

การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟแบบโครงถักที่มีรอยต่อแบบหมุดย้ำ



นายธีระชัย ดีสมสุข

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9769-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMAINING FATIGUE LIFE EVALUATION OF RAILWAY RIVETED TRUSS BRIDGES

Mr. Teerachai Deesomsuk

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9769-9

ธีระชัย ดีสมสุข : การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟแบบโครงถักที่มีรอยต่อแบบหมุดยึด. (REMAINING FATIGUE LIFE EVALUATION OF RAILWAY RIVETED TRUSS BRIDGES) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 270 หน้า. ISBN 974-17-9769-9.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าและความปลอดภัยในการใช้งานของสะพานรถไฟจำนวน 3 สะพาน ที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 40 ปี ในงานวิจัยได้ทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพานมากกว่า 10 ชิ้นส่วนในแต่ละสะพาน โดยทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานปกติของรถไฟและเนื่องจากหัวรถจักร นำข้อมูลค่าความเครียดที่ได้จากการตรวจวัดไปทำการปรับแก้แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วนำแบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักบรรทุกทุกแบบต่างๆ และทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทางด้านกำลังรับแรงดึงและกำลังด้านความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน นำผลที่ได้ไปทำการประเมินความปลอดภัยในการใช้งานของสะพานและประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน AREMA 1999 และทำการเปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานรถไฟชนิดต่างๆ

ผลการศึกษาพบว่า ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุทางด้านความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานมีค่าสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน AREMA 1999 กำหนดไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าตามมาตรฐาน AREMA 1999 ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ ผลการประเมินความปลอดภัยในการใช้งานปกติพบว่าสะพานทั้งสามยังมีความปลอดภัยในการใช้งาน และอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างหลักในสะพานจักรี สะพานกม.03 และสะพานกม.19 มีมากกว่า 80 ปี แต่ในสะพานกม.19 พบว่าเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าในชิ้นส่วน Stringer สำหรับการใช้งานเนื่องจากรถไฟแบบ U20 ซึ่งเป็นมาตรฐานขบวนรถไฟแบบใหม่ พบว่าสะพานทั้งสามมีความปลอดภัยในการใช้งานไม่เพียงพอหรือเกิดการวิบัติในการใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังให้โครงสร้างสะพานมีความปลอดภัยเพียงพอ ก่อนที่จะนำรถไฟแบบ U20 เข้ามาใช้งานจริง

อนึ่ง ผลจากการตรวจวัดสะพานพบว่า อัตราความเสียหายที่เกิดบนโครงสร้างสะพานเนื่องจากขบวนรถไฟบรรทุกมีค่ามากกว่าขบวนรถไฟโดยสารประมาณ 1.23 ถึง 3.05 เท่า

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมโครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.
 ปีการศึกษา 2545

4370341921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: FATIGUE / RIVETED CONNECTION / STEEL TRUSS BRIDGES

MR. TEERACHAI DEESOMSUK : REMAINING FATIGUE LIFE EVALUATION OF RAILWAY RIVETED TRUSS BRIDGES. THESIS ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR TOSPOL PINKAEW Ph.D., 270 pp. ISBN 974-17-9769-9.

This research studies on the remaining fatigue life and operating safety of three railway bridges with more than 40 years. In the research, the actual strain data under normal operating situation and a test locomotive was collected from more than 10 members of each bridges. The acquired data was used to calibrate the finite element models in computer program. Then the models were employed to analyze the stress of bridges under various types of loads. Moreover, this research also tested tensile strength and fatigue strength of selected bridge members. The analysis and test results were used in evaluating the remaining fatigue life and operating safety according to the AREMA 1999 specification and in comparing the damages from different types of trains.

Based on the obtained results, it was found that the fatigue strengths of the tested members were higher than those specified in AREMA 1999. Hence, the fatigue strengths given by AREMA 1999 were adopted. The safety evaluation for normal operating situation showed that all of three bridges, namely Chakri Bridge, KM03 Bridge and KM19 Bridge, had adequate safety and the remaining fatigue life in main structures were higher than 80 years. However, there were some fatigue damages found in a stringer of KM19 Bridge. While the safety evaluation for U20 train load, which is a new load standard, revealed that all these three bridges had inadequate safety. Therefore, it is necessary to strengthen them before adopting U20 in real operation.

Furthermore, the bridge test results showed that the damage rate induced from goods-carrying trains is approximately 1.23 to 3.05 times higher than that from passenger trains.

Department CIVIL ENGINEERING Student's signature.....

Field of study CIVIL ENGINEERING Advisor's signature.....

Academic year 2002.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีรพงศ์ เสนอจันทร์มิไชย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทาน และให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ หน่วยงานและบุคคลต่างๆที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆขั้นตอนการทำวิจัย และการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ ดังมีรายนามต่อไปนี้

การรถไฟแห่งประเทศไทย และ บริษัท นนทรี จำกัด ที่ได้ให้การทดสอบสะพานมาใช้ในงานวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ที่ได้ให้การทดสอบคุณสมบัติวัสดุมาประกอบผลงานวิจัย

พี่อัครวัชร เล่นวารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการทดสอบวัสดุ และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบ

พี่อาทิตย์ พี่ธานินทร์ พี่จตุพล และพี่ๆในบริษัท นนทรี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องข้อมูลและการทดสอบสะพาน ตลอดจนคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการทำงานวิจัย

พี่มันัส และพี่ศิโรจน์ และพี่ๆทุกท่านในห้องทดสอบวัสดุ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมือการทดสอบวัสดุ

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอก เพื่อนๆและรุ่นน้องทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆตลอดงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่ได้กรุณาส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสทางการศึกษา และอบรมสั่งสอนตลอดจนเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งพระคุณของครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มต้นการศึกษาจนถึงปัจจุบัน สิ่งต่างๆเหล่านี้ข้าพเจ้าจะจดจำในจิตใจตลอดไป และข้าพเจ้าขออุทิศคุณประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ให้กับผู้ด้อยโอกาสทางสังคมทุกๆคน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษาในงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ความล้า.....	7
2.3 กราฟ S-N.....	7
2.4 กฎของพาลเกรน-ไมเนอร์.....	8
2.5 ช่วงความเค้นเทียบเท่า.....	9
2.6 ช่วงความเค้นประสิทธิผล.....	10
2.7 วิธีการเรนโพล์วเคาน์ติ้ง.....	11
2.8 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	12
2.9 การวิเคราะห์หาช่วงความเค้นจากไฟไนท์เอลิเมนต์.....	14
2.10 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้า.....	14
2.11 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้าตามมาตรฐานของ AREMA 1999.....	17

สารบัญ (ต่อ)

๗

	หน้า
บทที่ 3 ข้อมูลการตรวจวัดและการวิเคราะห์ผล.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 ลักษณะทั่วไปของสะพานที่ใช้ในการศึกษา.....	18
3.3 การตรวจวัดข้อมูลภาคสนาม.....	20
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัด.....	25
บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน.....	27
4.1 บทนำ.....	27
4.2 การเลือกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานสำหรับการทดสอบ.....	27
4.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนในห้องปฏิบัติการ.....	28
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างสะพาน.....	29
บทที่ 5 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	31
5.1 บทนำ.....	31
5.2 การจำลองโครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	31
5.3 การเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดกับผลจากการวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	33
บทที่ 6 การวิเคราะห์ทางด้านความล้าของสะพานรถไฟ.....	42
6.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานรถไฟโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	42
6.2 การประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพาน.....	43
6.3 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟ.....	46
6.4 การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภท.....	49
บทที่ 7 การอภิปรายและวิเคราะห์ผลการศึกษา.....	50
7.1 บทนำ.....	50
7.2 การตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างสะพานรถไฟ.....	50
7.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน.....	51

สารบัญ (ต่อ)

ณ

หน้า

7.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	52
7.5 ผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน.....	53
7.6 การประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพาน.....	54
7.7 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟ.....	55
7.8 ผลการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภท.....	56
บทที่ 8 สรุปผลการศึกษา.....	58
8.1 สรุปผลการศึกษา.....	58
รายการอ้างอิง.....	145
ภาคผนวก	147
ภาคผนวก ก (ตาราง).....	148
ภาคผนวก ก (รูป).....	172
ภาคผนวก ข.....	188
ภาคผนวก ค.....	207
ภาคผนวก ง.....	241
ภาคผนวก จ.....	251
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	270

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง (ต่อ)

ญ

		หน้า
ตารางที่ 2-1	ค่าคงที่ A ตามมาตรฐานของ AREMA 1999.....	60
ตารางที่ 3-1	แสดงตัวอย่างข้อมูลการเดินรถไฟที่บันทึกได้ในสะพาน กม.03.....	61
ตารางที่ 3-2	แสดงคุณสมบัติของสเตรนเกจ (strain gage) ที่ใช้ในการศึกษา.....	62
ตารางที่ 4-1	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงของทั้ง 3 สะพาน.....	63
ตารางที่ 4-2	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของทั้ง 3 สะพาน.....	64
ตารางที่ 5-1	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความแตกต่างสูงสุด..	65
ตารางที่ 6-1	แสดงผลการประเมินดัชนีความปลอดภัยในชั้นส่วนหลักของสะพานจักรี.....	66
ตารางที่ 6-2	แสดงผลการประเมินดัชนีความปลอดภัยในชั้นส่วนหลักของสะพานกม.03... ..	66
ตารางที่ 6-3	แสดงผลการประเมินดัชนีความปลอดภัยในชั้นส่วนหลักของสะพานกม.19... ..	66
ตารางที่ 6-4	ตารางแสดงค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชั้นส่วนที่ทำการตรวจวัด ของทั้ง 3 สะพาน.....	67
ตารางที่ 6-5	ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลจากการ ตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของสะพานจักรี.....	67
ตารางที่ 6-6	ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลจากการ ตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของสะพานกม.03.....	68
ตารางที่ 6-7	ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลจากการ ตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของสะพานกม.19.....	68
ตารางที่ 6-8	ตารางสรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ ในสะพานจักรี.....	69
ตารางที่ 6-9	ตารางสรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ ในสะพานกม.03.....	69
ตารางที่ 6-10	ตารางสรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ ในสะพานกม.19.....	69
ตารางที่ 6-11	ตารางสรุปค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ ในสะพานจักรี.....	70
ตารางที่ 6-12	ตารางสรุปค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ ในสะพานกม.03.....	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

หน้า

ตารางที่ 6-13	ตารางสรุปค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ ในสะพานกม.19.....	70
ตารางที่ 7-1	แสดงค่าความเค้นสูงสุดในส่วนหลักของสะพานจากการตรวจวัด การใช้งานปกติ.....	71
ตารางที่ 7-2	สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง.....	71
ตารางที่ 7-3	แสดงค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในชั้นส่วนแต่ละชนิด เนื่องจากการใช้งานปกติ.....	72
ตารางที่ 7-4	แสดงค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในชั้นส่วนแต่ละชนิด เนื่องจากน้ำหนักแบบ U20.....	72
ตารางที่ 7-5	ตารางสรุปอายุการใช้งานที่เหลืออยู่น้อยที่สุดในชั้นส่วนโครงสร้างสะพาน เนื่องจากขบวนรถไฟปกติ.....	73
ตารางที่ ก-1	แสดงคุณสมบัติต่างๆของชั้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี.....	149
ตารางที่ ก-2	แสดงคุณสมบัติต่างๆของชั้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03.....	156
ตารางที่ ก-3	แสดงคุณสมบัติต่างๆของชั้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19.....	163
ตารางที่ ข-1	แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟ ภายใต้การใช้งานปกติของสะพานจักรี.....	189
ตารางที่ ข-2	แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟ ภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.03.....	192
ตารางที่ ข-3	แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟ ภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19.....	197
ตารางที่ ค-1	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักร ของสะพานจักรี.....	208
ตารางที่ ค-2	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักร ของสะพานกม.03.....	211
ตารางที่ ค-3	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักร ของสะพานกม.19.....	214
ตารางที่ ค-4	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ของสะพานจักรี.....	219

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

หน้า

ตารางที่ ค-5	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ของสะพานกม.03.....	222
ตารางที่ ค-6	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ของสะพานกม.19.....	225
ตารางที่ ค-7	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ของสะพานจักรี.....	230
ตารางที่ ค-8	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ของสะพานกม.03.....	233
ตารางที่ ค-9	ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ของสะพานกม.19.....	236
ตารางที่ ง-1	แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้า ของสะพานจักรี.....	242
ตารางที่ ง-2	แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้า ของสะพานกม.03.....	244
ตารางที่ ง-3	แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้า ของสะพานกม.19.....	246

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ฐ
ฎ

	หน้า
รูปที่ 1-1 สะพานจักรี อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา.....	74
รูปที่ 1-2 สะพานกม.03 เขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร.....	75
รูปที่ 1-3 สะพานกม.19 เขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร.....	76
รูปที่ 2-1 ตัวอย่างกราฟ S-N.....	77
รูปที่ 2-2 แอมพลิจูดคงที่ของหน่วยแรง.....	77
รูปที่ 2-3 แอมพลิจูดไม่คงที่ของหน่วยแรง.....	78
รูปที่ 2-4 ลักษณะของสัญญาณความเครียด.....	78
รูปที่ 2-5 สัญญาณความเค้นที่ผ่านวิธีการเรนโพล์วเคาน์ติ้ง.....	79
รูปที่ 2-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดและวิธีการเรนโพล์วเคาน์ติ้ง.....	79
รูปที่ 2-7 แสดงดีกรีความอิสระของเอลิเมนต์แบบเส้นในระบบแกนประจำตัว และระบบแกนทั้งโครงสร้าง.....	80
รูปที่ 2-8 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนขบวงจรไฟที่วิ่งผ่านต่อวัน.....	80
รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะน้ำหนักบรรทุกรถไฟแบบ U20.....	81
รูปที่ 3-1 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานจักรี.....	82
รูปที่ 3-2 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานกม.03.....	83
รูปที่ 3-3 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานกม.19.....	84
รูปที่ 3-4 แสดงตำแหน่งการติดสเตรนเกจในการตรวจวัดสะพานจักรี.....	85
รูปที่ 3-5 แสดงตำแหน่งการติดสเตรนเกจในการตรวจวัดสะพานกม.03.....	86
รูปที่ 3-6 แสดงตำแหน่งการติดสเตรนเกจในการตรวจวัดสะพานกม.19.....	87
รูปที่ 3-7 แสดงการเตรียมผิวของชิ้นส่วนก่อนติดตั้งสเตรนเกจ.....	88
รูปที่ 3-8 สเตรนเกจที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว.....	88
รูปที่ 3-9 แสดงลักษณะของดาต้าลอกเกอร์.....	89
รูปที่ 3-10 รูปแสดงตัวทริกเกอร์.....	90
รูปที่ 3-11 แสดงระบบการทำงานของ การตรวจวัดค่าความเครียดในสนาม.....	90
รูปที่ 3-12 แสดงแผนผังการทำงานของอุปกรณ์การตรวจวัดความเครียด.....	91
รูปที่ 3-13 แสดงการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักแบบห้วรถจักร.....	92
รูปที่ 3-14 แสดงลักษณะของห้วรถจักรที่ใช้ในการทดสอบ.....	93

รูปที่ 3-15 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรในชั้นส่วนโครงสร้าง สะพานจักรี.....	94
รูปที่ 3-16 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรในชั้นส่วนโครงสร้าง สะพานกม.03.....	96
รูปที่ 3-17 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรในชั้นส่วนโครงสร้าง สะพานกม.19.....	99
รูปที่ 4-1 ชี้นงานทดสอบแรงดึง.....	102
รูปที่ 4-2 ชี้นงานทดสอบความล้า.....	103
รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะชี้นงานรับแรงดึงก่อนการทดสอบ.....	104
รูปที่ 4-4 แสดงรูประหว่างการทดสอบแรงดึง.....	104
รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียด ของชี้นส่วนทดสอบแรงดึง กม.03 T3.....	105
รูปที่ 4-6 แสดงการวิบัติของชี้นส่วนรับแรงดึง กม.03 T3.....	105
รูปที่ 4-7 แสดงการติดตั้งชี้นงานทดสอบความล้า.....	106
รูปที่ 4-8 แสดงรูประหว่างการทดสอบความล้า.....	106
รูปที่ 4-9 แสดงลักษณะการวิบัติของชี้นงานทดสอบความล้า.....	107
รูปที่ 4-10 แสดงผลการทดสอบความล้าเปรียบเทียบกับกราฟ S-N ที่เสนอโดย AREMA 1999.....	107
รูปที่ 5-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของห้วงจักร เข้ามาในสะพานของชี้นส่วน 2205 ในสะพานจักรี.....	108
รูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของห้วงจักร เข้ามาในสะพานของชี้นส่วน 2216 ในสะพานจักรี.....	109
รูปที่ 5-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของห้วงจักร เข้ามาในสะพานของชี้นส่วน 2233 ในสะพานจักรี.....	110
รูปที่ 5-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของห้วงจักร เข้ามาในสะพานของชี้นส่วน 2241 ในสะพานจักรี.....	111
รูปที่ 5-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของห้วงจักร เข้ามาในสะพานของชี้นส่วน 2304 ในสะพานจักรี.....	112

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ณ

หน้า

รูปที่ 5-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักร เข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22209 ในสะพานกม.19.....	127
รูปที่ 5-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักร เข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22153 ในสะพานกม.19.....	128
รูปที่ 5-22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักร เข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22127 ในสะพานกม.19.....	129
รูปที่ 5-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักร เข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22141 ในสะพานกม.19.....	130
รูปที่ 5-24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักร เข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22309 ในสะพานกม.19.....	131
รูปที่ 5-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักร เข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22548 ในสะพานกม.19.....	132
รูปที่ 5-26 แสดงความหมายของค่าความแตกต่างสูงสุด.....	133
รูปที่ 5-27 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นใน Lower Chord ที่มีการปรับสภาพที่รองรับ....	133
รูปที่ 5-28 แสดง FBD ของแรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากที่รองรับแบบ Roller และแบบ Spring.....	134
รูปที่ 5-29 แสดง FBD ของแรงภายในที่เกิดในแบบจำลองแบบโครงข้อหมุน และโครงข้อแข็ง.....	134
รูปที่ 5-30 แสดงความแตกต่างของผลการตรวจวัดในชิ้นส่วน Lower Chord ทั้ง 2 ข้างของสะพานกม.19.....	135
รูปที่ 5-31 แสดงความแตกต่างของผลการตรวจวัดในชิ้นส่วน 22209 ของสะพานกม.19 ขาไปและขากลับที่ความเร็ว 5 กม.ต่อชั่วโมง.....	135
รูปที่ 6-1 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากหัวรถจักรวิ่งผ่าน บนสะพานจักรี.....	136
รูปที่ 6-2 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักแบบ U20 วิ่งผ่าน บนสะพานจักรี.....	136
รูปที่ 6-3 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากหัวรถจักรวิ่งผ่าน บนสะพานกม.03.....	137

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ด

หน้า

รูปที่ 6-4	รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักแบบ U20 วิ่งผ่าน บนสะพานกม.03.....	137
รูปที่ 6-5	รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากหัวรถจักรวิ่งผ่าน บนสะพานกม.19.....	138
รูปที่ 6-6	รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักแบบ U20 วิ่งผ่าน บนสะพานกม.19.....	138
รูปที่ 6-7	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานจักรี (Growth Rate = 0%).....	139
รูปที่ 6-8	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานจักรี (Growth Rate = 1%).....	139
รูปที่ 6-9	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานจักรี (Growth Rate = 2%).....	140
รูปที่ 6-10	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานกม.03 (Growth Rate = 0%).....	141
รูปที่ 6-11	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานกม.03 (Growth Rate = 1%).....	141
รูปที่ 6-12	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานกม.03 (Growth Rate = 2%).....	142
รูปที่ 6-13	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานกม.19 (Growth Rate = 0%).....	143
รูปที่ 6-14	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานกม.19 (Growth Rate = 1%).....	143
รูปที่ 6-15	แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่าน สะพานกม.19 (Growth Rate = 2%).....	144
รูปที่ ก-1	แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโครงสร้างสะพานจักรี.....	173
รูปที่ ก-2	แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโครงสร้างสะพานกม.03.....	179
รูปที่ ก-3	แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโครงสร้างสะพานกม.19.....	183

รูปที่ ๑-29 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสาร ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22141.....	266
รูปที่ ๑-30 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุก ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22141.....	266
รูปที่ ๑-31 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสาร ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22153.....	267
รูปที่ ๑-32 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุก ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22153.....	267
รูปที่ ๑-33 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสาร ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22309.....	268
รูปที่ ๑-34 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุก ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22309.....	268
รูปที่ ๑-35 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสาร ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22548.....	269
รูปที่ ๑-36 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุก ผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22548.....	269

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

สะพานรถไฟในประเทศไทยที่ใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นสะพานเหล็กแบบโครงถัก (Steel truss bridge) และมีอายุการใช้งานมานานกว่า 40 ปี ซึ่งในสมัยนั้น การออกแบบโครงสร้างสะพานจะออกแบบเพื่อให้รับน้ำหนักบรรทุกจากรถไฟที่ใช้งานในตอนนั้น แต่น้ำหนักบรรทุกจากรถไฟได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดมา ทำให้สะพานได้รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำที่สูงขึ้นกว่าที่ออกแบบในตอนแรก มีผลทำให้โครงสร้างสะพานได้รับความเสียหายหรืออาจจะพังทลายได้เนื่องจากความล้าโดยน้ำหนักกระทำแบบซ้ำจากรถไฟ ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้มีผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของสะพาน จึงจำเป็นที่จะต้องประเมินความเสียหายเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานต่อไป

ในการประเมินความเสียหายของสะพานเนื่องจากความล้า จะทำการประเมินเป็นอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพาน โดยมีวิธีการประเมินหลายวิธี เช่น วิธีการตามมาตรฐานของ AREMA 1999 (American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association 1999) ที่เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงความเค้นกับจำนวนรอบที่กระทำจนเกิดการวิบัติของเหล็กโครงสร้างที่มีรายละเอียดแบบต่างๆ และใช้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาค่าช่วงความเค้นมาทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพาน ซึ่งวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก เนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างจริง และการวิเคราะห์โครงสร้างอาจมีความแตกต่างกับพฤติกรรมของโครงสร้างจริง อย่างไรก็ตาม อีกวิธีการหนึ่งที่มีความถูกต้องมากกว่าคือวิธีการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่จากสภาพการใช้งานจริง โดยทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการใช้งานของสะพาน และนำชิ้นส่วนโครงสร้างของสะพานไปทำการทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูง แต่จะมีความถูกต้อง และเหมาะสมสำหรับสะพานที่มีอายุการใช้งานมานาน อย่างไรก็ตามในประเทศไทย

ในการศึกษานี้ จะทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่จากสภาพการใช้งานจริง โดยการตรวจวัดค่าความเครียดประกอบกับการทดสอบกำลังด้านความล้าของวัสดุในห้องปฏิบัติการ และจะทำการประเมินอัตราความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรถไฟแต่ละประเภท และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทใหม่ที่จะนำมาใช้ในอนาคต ผลจากการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานจะใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการใช้งาน การปรับปรุงหรือซ่อมแซม เพื่อให้สะพานสามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กซึ่งต่อด้วยหมุดย้ำ (riveted bridge) ได้มีผู้ศึกษาหลายท่าน โดยเริ่มจาก F. Moses , C.G. Schilling และ K.S. Raju (1987) ได้ศึกษาวิธีการประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กเนื่องจากความล้า โดยวิธีการประเมินนี้ใช้กับโครงสร้างสะพานเหล็กที่มีข้อกำหนดคือ เป็นโครงสร้างที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่เกิดการวิบัติทางกล และไม่เคยผ่านการซ่อมแซมมาก่อน โดยค่าความเค้นที่ใช้ไม่พิจารณาถึงค่าความเค้นลำดับที่สองในการคำนวณ อายุการใช้งานที่เหลือจริง (actual remaining life) มีความเป็นไปได้ 50 % ที่มากกว่าค่ากลางของอายุการใช้งานที่เหลือ (remaining mean life) และอายุการใช้งานที่เหลือจริงมีความเป็นไปได้ 97.7 และ 99.9 % ที่มากกว่าค่าอายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัย (remaining safe life) สำหรับโครงสร้างที่เป็นแบบเสถียรภาพเกิน (redundant) และเป็นแบบเสถียรภาพ (non-redundant) และจากผลการศึกษานี้ ทาง AASHTO Manual for Maintenance Inspection of Bridge ได้ทำการออกมาตรฐานในการประเมินอายุการใช้งานและการออกแบบสะพานโครงสร้างเหล็ก

หลังจากนั้น E. Bruhwiler, F.C. Smith และ M.A. Hirt (1990) ได้ทำการทดสอบคานสะพานที่มีอายุการใช้งานมานานกว่า 100 ปีซึ่งทำจากเหล็กหล่อ (wrought-iron) และคานที่ใช้ในงานสะพานรถไฟในโรงเก็บไม้ได้นำมาใช้งาน ซึ่งทำจากเหล็กกล้า (mild steel) และอยู่ในสภาพดี โดยทั้งหมดเป็นคานที่ประกอบขึ้นโดยใช้หมุดย้ำเป็นตัวยึด นำมาทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านความล้า พบว่าชิ้นส่วนที่นำมาทดสอบส่วนใหญ่จะเกิดความเสียหายโดยมีรอยแตกเกิดขึ้นที่บริเวณรูเจาะ และผลการทดสอบกำลังด้านความล้านี้ได้ผลใกล้เคียงกับกำลังด้านความล้าตามมาตรฐานของ ECCS (European Convention for Construction Steelwork) แบบ ECCS 71 และมาตรฐานของ AASHTO แบบ AASHTO D ซึ่งให้ผลการประเมินกำลังด้านความล้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ค่าช่วงความเค้นที่คำนวณจากเนื้อที่หน้าตัดสุทธิ และกำลังทางด้านความล้าของชิ้นส่วนที่ประกอบจากหมุดย้ำของเหล็กหล่อและเหล็กกล้าจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อค่าช่วงความเค้นที่กระทำสูงกว่าค่าขีดจำกัดความล้าแบบแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude fatigue limit) และขีดจำกัดความล้าแบบแอมพลิจูดคงที่ของชิ้นส่วนประกอบจากหมุดย้ำในเหล็กหล่อมีค่าประมาณ 10 ksi (70 MPa) และในส่วนของกำลังด้านความล้าในตัวยึดหมุดย้ำพบว่าขีดจำกัดความล้าแอมพลิจูดคงที่ประมาณ 14 ksi (100 MPa)

ในปีเดียวกัน John W. Fisher, Ben T. Yen และ Dayi Wang (1990) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของชิ้นส่วนประกอบจากหมุดย้ำประมาณ 1200 ชิ้นส่วน จากในสหรัฐอเมริกาและยุโรป ตั้งแต่ปี 1934 ถึง 1987 ซึ่งพบว่าในส่วนของรอยต่อแบบหมุดย้ำ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกำลังด้านความล้าคือแรงที่ใช้ในการขันหมุดย้ำ (rivet clamping force) และอัตราส่วนแรงกดของหมุดย้ำ (rivet bearing ratio) และสำหรับชิ้นส่วนประกอบจากหมุดย้ำพบว่า ชนิดของชิ้นส่วนและรายละเอียดของรอยต่อแบบต่างๆไม่ได้ทำให้กำลังการรับความล้าแตกต่างกัน และพบว่าขีดจำกัดล่างของกำลังด้านความล้าในชิ้นส่วนประกอบจากหมุดย้ำจะแทนได้โดยกำลังด้านความล้าตามมาตรฐาน AASHTO แบบ D แต่กำลังด้านความล้าที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดสอบจะตรงกับกำลังด้านความล้าตามมาตรฐานของ AASHTO แบบ C

ต่อมา J.D. DiBattista , D.E.J. Adamson และ G.L. Kulak (1998) ได้ทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพาน Miette River Bridge ซึ่งเป็นสะพานรถไฟแบบโครงถัก โดยทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติและจากรถไฟที่รู้จักขณะที่แน่นอน แล้วนำผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้าง พบว่าค่าความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างจริง ซึ่งสามารถใช้การวิเคราะห์แบบจำลองแทนการตรวจวัดจริงได้ จากนั้นทำการประเมินอายุการใช้งานโดยนำชิ้นส่วนโครงสร้างในสะพานมาทำการทดสอบกำลังทางด้านความล้า แล้วทำการเปรียบเทียบกับวิธีการประเมินตามมาตรฐาน AREA 1996 (American Railway Engineering Association) และวิธีที่เสนอโดย Kunz (1992) โดยเป็นวิธีตาม LEFM (Linear elastic fracture mechanic) พบว่าผลการวิเคราะห์จากสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ผลการทดสอบวัสดุจะได้อายุการใช้งานที่เหลืออยู่มากกว่าที่ประเมินได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าในทางที่ปลอดภัย และผลการประเมินอายุการใช้งานของสะพาน Miette River Bridge ในชิ้นส่วนทแยง (diagonal member) มีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เกิน 300 ปี และในชิ้นส่วนคานรับราง (stringer) มีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เกิน 50 ปี

กฤษ ญูวรรณ (1998) ได้ทำการประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากความล้าของสะพานเหล็กข้ามทางแยก โดยทำการตรวจวัดค่าความเครียดในสะพานข้ามทางแยกจำนวน 6 สะพานในกรุงเทพมหานครและเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 72 ชั่วโมง ทำการประเมินอายุการใช้งานโดยวิธีมาตรฐานของ AASHTO และวิธีการประเมินของ Palmgren-Miner ซึ่งพบว่าการประเมินอายุการใช้งานตามมาตรฐานของ AASHTO โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดจริง มีอายุการใช้งานที่เหลือต่ำกว่าการประเมินตามวิธีของ Palmgren-Miner มาก เพราะทาง AASHTO ได้คำนึงถึงผลของความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้นำมาทำการประเมิน

Mohammadi J., Guralnick S. และ Polepeddi R. (1998) ได้ทำการศึกษาถึงการประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากความล้า โดยการเก็บข้อมูลการตรวจวัดสะพานทางด่วนจำนวน 15 สะพาน ซึ่งเป็นแบบคานเหล็กที่มีพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำการเก็บข้อมูลประมาณ 2-3 วัน และนำข้อมูลที่ได้ไปทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่โดยใช้หลักการของ Miner และกราฟ S-N และได้ทำการคิดถึงผลจากการเพิ่มขึ้นของการใช้งานด้วย จากผลการศึกษาพบว่าการเก็บข้อมูลประมาณ 2-3 วัน ก็ได้ตัวแทนของน้ำหนักรถยนต์เพียงพอต่อการนำไปประเมิน และจากข้อมูลค่าความเครียดที่ตรวจวัดมาก็สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานได้โดยง่าย และสามารถประเมินอายุการใช้งานเมื่อมีผลจากการเพิ่มขึ้นของการใช้งานได้

Kiss K. และ Dunai L. (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาความเค้นในโครงสร้างสะพานรถไฟเหล็กแบบโครงถัก โดยทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างแบบโครงข้อแข็ง 3 มิติ (3-D Frame) ในชิ้นส่วนโครงสร้างหลัก แต่ที่รอยต่อของชิ้นส่วนจะทำการจำลองโครงสร้างแบบคาน (beam) และโครงสร้างแบบแผ่นและเปลือก (plate/shell) และทำการวิเคราะห์โครงสร้างหาความเค้นเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดค่าความเค้นจากการทดสอบสะพาน ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่ใช้รอยต่อโครงสร้างแบบแผ่นและเปลือก ให้ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลองรอยต่อแบบคาน เพราะ

ว่ารอยต่อโครงสร้างแบบแผ่นและเปลือกสามารถแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างได้ละเอียดใกล้เคียงความเป็นจริงมาก

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานเหล็กเนื่องจากความล้า นั้น วิธีการประเมินอายุการใช้งานโดยการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริง จะให้ผลการประเมินที่เหมาะสมที่สุด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถตรวจวัดได้ในทุกชิ้นส่วนโครงสร้างเพราะจะเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ผลจากการตรวจวัดจริงในชิ้นส่วนบางชิ้นของโครงสร้างสะพานร่วมกับวิธีการจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานอย่างเหมาะสม โดยวิธีของ Palmgren-Miner และวิธีตามมาตรฐาน AREMA 1999

1.3 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นส่วนโครงสร้างของสะพานรถไฟ ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติและภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า
- 1.3.2 เพื่อหาคุณสมบัติทางด้านกำลังและความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ใช้งานมานาน
- 1.3.3 ศึกษาถึงความถูกต้องของแบบจำลองสะพานรถไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับพฤติกรรมของสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า
- 1.3.4 ทำการประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพาน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ และภายใต้การใช้น้ำหนักบรรทุกแบบ U20
- 1.3.5 ทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของโครงสร้างสะพาน ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ และภายใต้การใช้น้ำหนักบรรทุกแบบ U20
- 1.3.5 ศึกษาประเภทของรถไฟที่มีผลต่อความเสียหายของสะพานเนื่องจากความล้า ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ

1.4 ขอบเขตของการศึกษาในงานวิจัย

- 1.4.1 ทำการศึกษาเฉพาะสะพานรถไฟที่มีลักษณะเป็นสะพานเหล็กแบบโครงถักจำนวน 3 ช่วง สะพาน และมีอายุการใช้งานมานานกว่า 40 ปี ได้แก่ สะพานจักรี สะพานกม.03 และ สะพานกม.19 ซึ่งแสดงในรูปที่ 1-1, 1-2 และ 1-3 ตามลำดับ
- 1.4.2 ทำการศึกษาเฉพาะในชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพาน ไม่รวมรางรถไฟ รอยต่อ และระบบฐานรองรับของตัวสะพาน
- 1.4.3 ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้าง ทั้งทางด้านกำลังรับแรงดึงและกำลังด้านความล้า ในลักษณะของการรับแรงตามแนวแกนเท่านั้น
- 1.4.4 ทำการตรวจวัดข้อมูลความเครียดของชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพานรถไฟภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ และภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า เฉพาะในชิ้นส่วนหลักที่สำคัญประมาณ 10 ชิ้นส่วนต่อสะพาน

- 1.4.5 ไม่คำนึงถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการใช้งานในชั้นส่วนโครงสร้างของสะพาน
- 1.4.6 ไม่คำนึงถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนโครงสร้างภายใต้สภาวะการใช้งานปกติ และภายใต้การใช้งานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 ซึ่งจะนำไปประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานของโครงสร้างสะพานได้
- 1.5.2 ทราบถึงคุณสมบัติทางด้านกำลังและความล้าของชั้นส่วนโครงสร้างสะพาน ซึ่งมีอายุการใช้งานมานานพอสมควร
- 1.5.3 ทราบถึงความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เปรียบเทียบกับพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน
- 1.5.4 ทราบถึงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานภายใต้การใช้งานปกติ และน้ำหนักบรรทุก U20
- 1.5.5 ทราบถึงอัตราความเสียหายของสะพานเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภท
- 1.5.6 ผลการศึกษาที่ได้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการวางแผน ปรับปรุงหรือทำการซ่อมแซมเพื่อให้สะพานสามารถรองรับการใช้งานในอนาคต

1.6 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ทบทวนข้อมูลและผลงานวิจัยที่ผ่านมา

เป็นการศึกษาค้นคว้าและหาข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยที่ผ่านมา มีจุดประสงค์เพื่อทบทวนผลงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดสะพานเหล็กเพื่อทำการหาค่าความเค้นและค่าความเครียด รวมทั้งหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการนำเอาผลการตรวจวัดที่ได้ดังกล่าวไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งานอย่างปลอดภัยของสะพาน

1.6.2 การตรวจวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนาม

การตรวจวัดข้อมูลในสนามจะเป็นการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริง ภายใต้สภาวะการใช้งานปกติของสะพาน ซึ่งจะทำการตรวจวัดชั้นส่วนโครงสร้างที่มีความสำคัญประมาณ 10 ชั้นส่วน โดยเก็บข้อมูลต่อเนื่องกันไม่น้อยกว่า 3 วัน ข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนโครงสร้างที่ทำการตรวจวัดได้ ค่าความเค้นที่ได้นี้จะนำไปวิเคราะห์ผ่านวิธีการเรนฟลิวเคาน์ติง (rainflow counting method) เพื่อหาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล และนำไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งานอย่างปลอดภัยของสะพานต่อไป

1.6.3 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์

จากแบบโครงสร้างของสะพาน จะทำการจำลองโครงสร้างสะพานด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อ

ทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นในทุกชิ้นส่วนโครงสร้าง ความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้างจะตรวจสอบได้โดยเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยใช้น้ำหนักห้วงจักรทำการทดสอบสะพาน และเมื่อแบบจำลองได้ถูกปรับปรุงจนมีความถูกต้องใกล้เคียงกับพฤติกรรมสะพานจริง ก็จะใช้แบบจำลองทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นของทุกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานได้

1.6.4 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้าง

เพื่อความถูกต้องในการประเมินอายุการใช้งานของสะพาน จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างจริง ซึ่งในการศึกษานี้ จะนำชิ้นส่วนจากโครงสร้างสะพานมาทดสอบคุณสมบัติวัสดุในส่วนของการรับแรงดึงและคุณสมบัติด้านความล้าของวัสดุ

1.6.5 การประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของสะพานรถไฟ

จากข้อมูลค่าความเค้นที่ทำการตรวจวัดได้ และค่าความเค้นจากน้ำหนักบรรทุก U20 จะนำไปประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานของโครงสร้างสะพาน โดยจะใช้กำลังวัสดุจากผลการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้าง และใช้มาตรฐาน AREMA 1999 ในการประเมินความปลอดภัย

1.6.6 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานรถไฟ

จากข้อมูลค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่ได้จากการตรวจวัด จะนำไปปรับแก้ค่าช่วงความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของทุกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพาน และจากคุณสมบัติด้านความล้าของวัสดุ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดการวิบัติได้ จากข้อมูลทั้งหมดนี้สามารถนำมาประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานได้

1.6.6 การประเมินอัตราการเสียหายเนื่องจากรถไฟแต่ละชนิด

ทำการประเมินอัตราการเสียหายของสะพานจากการใช้งานของรถไฟแต่ละชนิดที่มีการเก็บข้อมูลจากสภาพการใช้งานจริง เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานต่อไป

1.6.7 การวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และสรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของแต่ละสะพาน จะนำมาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานจริงและนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม ตลอดจนจะนำเสนอถึงความปลอดภัยทางด้านกำลัง และอายุการใช้งานที่เหลืออยู่อย่างปลอดภัยของสะพานรถไฟที่ทำการศึกษาและพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการใช้งานของรถไฟแต่ละชนิด

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในวัสดุที่เป็นโลหะ การจัดเรียงตัวของอะตอมจะมีการจัดตามรูปแบบทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันตามชนิดของโลหะ และเมื่อวัสดุได้รับน้ำหนักกระทำซ้ำ (repeating load) ความไม่สมบูรณ์ (dislocation) ของโลหะที่มีอยู่แล้วและที่เกิดขึ้นใหม่จากน้ำหนักกระทำซ้ำ จะเกิดเป็นรอยแตกขนาดเล็ก (microscopic crack) และเมื่อได้รับน้ำหนักกระทำซ้ำต่อไปรอยแตกจะขยายยาวมากขึ้นเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ (macroscopic crack) จนกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ ซึ่งลักษณะการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักกระทำซ้ำนี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากความล้า (fatigue failure)

สำหรับสะพานที่ทำการศึกษาซึ่งเป็นสะพานเหล็กแบบโครงถัก เมื่อมีรถไฟแล่นผ่านบนสะพานจะรับน้ำหนักกระทำซ้ำ โดยเฉพาะห้วงจรซึ่งมีน้ำหนักมากจะก่อให้เกิดหน่วยแรงกระทำซ้ำที่มีค่าสูง จะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้มาก ทำให้มีผลต่ออายุการใช้งานของสะพานโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีความหนาแน่นของความเค้น (stress concentration) ที่สูงด้วยแล้ว จะทำให้สะพานอาจได้รับความเสียหายหรือเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าได้

2.2 ความล้า

ความล้า (fatigue) เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในโครงสร้างของวัสดุที่เกิดเป็นจุด ๆ โดยเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักกระทำซ้ำ ทำให้เกิดรอยแตกขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ที่มีอยู่แล้วในโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งเรียกว่า รอยแตกขนาดเล็ก และเมื่อได้รับน้ำหนักกระทำซ้ำนี้ต่อไปอีก รอยแตกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะขยายยาวมากขึ้นและรวมกันเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่รับแรงในวัสดุลดลง จนกระทั่งไม่เพียงพอต่อการต้านทานหน่วยแรงดึงที่มากกระทำ ส่งผลให้เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า โดยที่หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยกว่ากำลังดึงประลัย (ultimate tensile strength) ของวัสดุ

ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการวิบัติเนื่องจากความล้าคือ ค่าช่วงความเค้น (stress range) จำนวนรอบ (number of cycle) ที่เกิดขึ้นสำหรับแต่ละค่าช่วงความเค้นนั้น ๆ กำลังของวัสดุด้านความล้า รวมทั้งลักษณะของรอยต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นๆ

2.3 กราฟ S-N (S-N Diagram)

ข้อมูลความล้าของวัสดุสามารถแสดงโดยกราฟ S-N (S-N diagram) ซึ่งประกอบด้วยค่าช่วงความเค้นต่างๆ (S) และจำนวนรอบที่เกิดการวิบัติของค่าช่วงความเค้นนั้น ๆ (N) กราฟ S-N จะได้จากการทดสอบวัสดุใน

ห้องปฏิบัติการ โดยใช้หน่วยแรงกระทำซ้ำที่มีลักษณะคงที่ (constant amplitude stressing) กระทำจนกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า ก็จะทราบจำนวนรอบที่วิบัติ และสามารถนำมาสร้างกราฟ S-N ได้บนกราฟอัตราส่วนลอการิทึม (log scale) ซึ่งจะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2-1 โดยที่ค่าช่วงความเค้น (stress range) คือค่าความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงสูงสุดและหน่วยแรงต่ำสุด แอมพลิจูดของความเค้น (stress amplitude) เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าช่วงความเค้น และค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress) คือค่าเฉลี่ยระหว่างหน่วยแรงสูงสุดและหน่วยแรงต่ำสุด ดังรูปที่ 2-2

ในกราฟ S-N มีส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือขีดจำกัดความล้า (fatigue limit) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดของหน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุแล้วเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า และถ้าหน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุต่ำกว่าค่าดังกล่าวแล้ววัสดุจะไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าแม้ว่าจำนวนรอบของการเกิดหน่วยแรงจะมีจำนวนมากก็ตาม

จากกราฟ S-N จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบสูงสุดที่เกิดการวิบัติกับค่าช่วงความเค้นได้ดังนี้

$$N \cdot S^B = A \quad (2-1)$$

โดยที่	N	=	จำนวนรอบสูงสุดที่เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า
	S	=	ช่วงความเค้น
	B	=	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ
	A	=	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยต่อหรือชิ้นส่วน (จุดตัดบนแกน X ในกราฟ S-N)

จากผลการศึกษาของ Miner พบว่าค่า B สำหรับเหล็ก มีค่าประมาณ 3.0 ดังนั้นสมการที่ (2-1) จะเป็น

$$N \cdot S^3 = A \quad (2-2)$$

2.4 กฎของพาลเกรน-ไมเนอร์ (Palgren - Miner Rule)

Miner ได้เสนอหลักการประเมินอัตราความเสียหาย (damage ratio) ของวัสดุเนื่องจากความล้าในค่าช่วงความเค้นที่แตกต่างกันหรือค่าช่วงความเค้นที่มีค่าเท่ากัน โดยอธิบายผ่านเส้นความเสียหาย (damage line) ที่ค่าช่วงความเค้นต่าง ๆ ซึ่งแทนด้วยกราฟ S-N ดังนั้นจะสามารถหาจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ (N_i) ที่ค่าช่วงความเค้น (S_i) นั้นๆได้ และอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้าของค่าช่วงความเค้นนั้นๆ ก็คือ อัตราส่วนจำนวนรอบที่หน่วยแรงนั้นเกิดขึ้น (n_i) ต่อจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติที่ค่าช่วงความเค้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2-3)$$

โดยที่ D_i คืออัตราความเสียหายที่เกิดขึ้น และโครงสร้างจะเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าก็ต่อเมื่อผลรวมของอัตราความเสียหายเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นถ้าให้ ค่าช่วงความเค้น S_1, S_2, \dots, S_i มีจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติที่ได้จากกราฟ S-N เป็น N_1, N_2, \dots, N_i กระทำเป็นจำนวน n_1, n_2, \dots, n_i รอบ ดังรูปที่ 2-3 โครงสร้างจะเกิดการวิบัติเมื่อ

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_t}{N_t} = 1 \quad (2-4)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^t \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2-5)$$

2.5 ช่วงความเค้นเทียบเท่า (Equivalent Stress Range)

จากสัญญาณในการตรวจวัด เมื่อรถไฟขบวนที่ i วิ่งผ่านช่วงสะพานที่ทำการตรวจวัด จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการตรวจวัดความเครียด สัญญาณความเครียดที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2-4 และจากกฎของฮุก (Hook's law) สามารถแปลงเป็นความเค้นได้จาก

$$\sigma_i = E \cdot \epsilon_i \quad (2-6)$$

โดยที่	σ_i	=	ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากรถไฟขบวนที่ i ตลอดช่วงเวลาที่รถไฟวิ่งผ่านช่วงสะพาน
	ϵ_i	=	ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากรถไฟขบวนที่ i ตลอดช่วงเวลาที่รถไฟวิ่งผ่านช่วงสะพาน
	E	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

และจากลักษณะสัญญาณของค่าความเค้น สัญญาณที่ได้มีลักษณะที่ซับซ้อน และเมื่อผ่านวิธีการของเรนโพล์แคาน์ติงจะได้ค่าช่วงความเค้นทั้งหมด n รอบ โดยมีความเค้นเป็น $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ ตามลำดับดังรูปที่ 2-5 และจากอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้าที่เกิดจากช่วงความเค้น S_{i1} จะได้เท่ากับ

$$D_{i1} = \frac{1}{N_{i1}} = \frac{S_{i1}^3}{A} \quad (2-7)$$

ดังนั้นอัตราความเสียหายรวมทั้งหมดที่เกิดจากรถไฟขบวนที่ i วิ่งผ่าน ทำให้เกิดช่วงความเค้น $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ จำนวน j ช่วงความเค้น จะได้เป็น

$$D_i = D_{i1} + D_{i2} + \dots + D_{in} \quad (2-8)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij}^3}{A} \quad (2-9)$$

เมื่อต้องการแทนด้วยค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าเพียง 1 รอบ ที่มีขนาด S_i อัตราความเสียหายเนื่องจากค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า S_i เท่ากับ

$$D_i = \frac{1}{N_i} = \frac{S_i^3}{A} \quad (2-10)$$

ค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า 1 ลูกที่เป็นค่าช่วงความเค้นที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเท่ากับความเสียหายที่เกิดเนื่องจากความล้าของค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากรถไฟขบวนที่ i วิ่งบนสะพาน ซึ่งเมื่อรถไฟขบวนที่ i วิ่งผ่านจะทำให้เกิดความเค้น $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ จำนวน n ลูก โดยให้อัตราความเสียหายที่เกิดขึ้นเท่ากัน นั่นคือสมการที่ (2-9) เท่ากับสมการที่ (2-10) จะได้

$$\frac{S_i^3}{A} = \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij}^3}{A} \quad (2-11)$$

$$S_i = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n S_{ij}^3} \quad (2-12)$$

นั่นคือค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า S_i เพียง 1 ลูกจะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเทียบเท่ากับความเสียหายเนื่องจากความล้าของรถไฟขบวนที่ i วิ่งผ่านสะพาน

2.6 ช่วงความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress Range)

เมื่อมีจำนวนรถไฟวิ่งผ่าน T ขบวน อัตราความเสียหายทั้งหมดที่เกิดจากรถไฟ T ขบวนวิ่งผ่าน โดยที่รถไฟแต่ละขบวนมีค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าเป็น S_i ดังนั้นอัตราความเสียหายรวมทั้งจากรถไฟ T ขบวนเท่ากับ

$$\sum_{i=1}^T D_i = \sum_{i=1}^T \frac{1}{N_i} = \sum_{i=1}^T \frac{S_i^3}{A} \quad (2-13)$$

ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล (S_e) เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราความเสียหายของค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า S_1, S_2, \dots, S_T จำนวน T ลูก นั่นคือความเสียหายเนื่องจากความล้าที่เกิดจากค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล จำนวน T ลูก ทำให้เกิดความเสียหายเท่ากับความเค้นเทียบเท่า S_1, S_2, \dots, S_T ทั้งหมดรวมกัน ดังนั้นอัตราความเสียหายที่เกิดจากค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล (D_e) จำนวน T ลูกเป็น

$$T \cdot D_e = \frac{T \cdot S_e^3}{A} \quad (2-14)$$

จากสมการข้างต้นเมื่ออัตราความเสียหายเท่ากัน จะได้

$$\frac{T \cdot S_e^3}{A} = \sum_{i=1}^T \frac{S_i^3}{A} \quad (2-15)$$

$$S_e = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^T f_i \cdot S_i^3} \quad (2-16)$$

โดยที่ S_i = ค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดจากรถไฟขบวนที่ i
 S_e = ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล
 f_i = ความถี่ของค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่ i (จำนวนค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่ i หารด้วยจำนวนค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าทั้งหมด)

2.7 วิธีการเรนฟอล์วเคาน์ติ้ง (Rainflow Counting Method)

ในการตรวจวัดสัญญาณของหน่วยแรงที่เกิดจากรถไฟที่แล่นผ่านสะพานนั้น สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีลักษณะที่ซับซ้อนและไม่คงที่ คือค่าช่วงความเค้นและค่าความเค้นเฉลี่ยจะไม่คงที่ และโดยทั่วไปแล้ว ค่าช่วงความเค้นจะมีผลต่อความล้ามากกว่าค่าความเค้นเฉลี่ยมาก (Moses F., Schilling C.G. and Raju K.S. 1987) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าความเค้นเฉลี่ย และในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบจำนวนรอบของแต่ละช่วงความเค้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกจำนวนรอบของแต่ละช่วงความเค้นออกจากความเค้นที่ซับซ้อนและไม่คงที่โดยวิธีการเรนฟอล์วเคาน์ติ้ง

หลักการของวิธีเรนฟอล์วเคาน์ติ้ง เป็นการเปลี่ยนสัญญาณของหน่วยแรงที่มีลักษณะที่ซับซ้อนให้เป็นสัญญาณที่มีลักษณะคงที่หลาย ๆ ค่า คิดค้นโดยชาวญี่ปุ่น (Anzai H. and Endo T. 1979) ซึ่งชื่อเรนฟอล์วนั้น

สื่อความหมายมาจากแนวความคิดของการหยุดของน้ำฝน ณ ตำแหน่งที่ขอบหลังคาของพระเจดีย์ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งวิธีการที่จะอธิบายได้ดีโดยการหมุนแกนของกราฟหน่วยแรงและเวลา 90 องศา ดังรูปที่ 2-6 เปรียบจุดยอดของสัญญาณเป็นขอบของหลังคา และจินตนาการว่าหยุดฝนจะเริ่มไหลจากจุดยอดของสัญญาณ (A) และจากด้านในของทุก ๆ จุดยอด การไหลจะเปลี่ยนทิศทางเมื่อไหลถึงจุดยอดและจะหยุดลงที่สัญญาณที่ต่ำกว่า (C-C') การไหลจะหยุดเมื่อพบกับการไหลจากชั้นที่สูงกว่า (F) และมีขนาดทางคณิตศาสตร์ที่ใหญ่กว่า หรือจุดที่หยุดมีขนาดทางคณิตศาสตร์ที่เล็กกว่าสัญญาณด้านล่าง (C') การแยกการไหลแต่ละค่าจะถูกนับเป็นครั้งรอบ ดังนั้นสัญญาณที่มีลักษณะที่ซับซ้อนจะถูกลดเป็นจำนวนครั้งรอบของหน่วยแรงที่คงที่แต่ละค่า และจะเห็นได้ว่าจำนวนครั้งรอบของสัญญาณที่ได้จะสามารถจับคู่กันได้เป็นหนึ่งรอบยกเว้นสัญญาณที่จำกัดซึ่งอาจจะไม่สามารถจับคู่ได้บริเวณปลายของสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ได้สามารถแสดงลักษณะของหน่วยแรงและจำนวนรอบได้ด้วยวงรอบของฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ดังรูปที่ 2-6

2.8 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับอายุการใช้งานของสะพานนั้น จะมีปัจจัยจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำเป็นหลัก ซึ่งวิธีหนึ่งในการหาค่าความเค้นสามารถหาได้จากการตรวจวัดค่าความเครียดโดยตรงจากโครงสร้างจริง แต่เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้น โครงสร้างสะพานที่ทำการศึกษาคือเป็นโครงสร้างแบบโครงถักซึ่งมีชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าความเครียดได้ในทุกชิ้นส่วนโครงสร้าง ดังนั้นอีกวิธีที่เหมาะสมในการหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคือการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในทุกชิ้นส่วนโครงสร้างได้ โดยหลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้หลักการของการรวมสติฟเนสโดยตรง (direct stiffness method) ซึ่งสำหรับโครงสร้างแบบโครงถัก เอลิเมนต์ที่ใช้จะเป็นแบบเอลิเมนต์เส้น (line element) โดยมีดีกรีความอิสระ (degree of freedom) และสติฟเนสประจำตัว (local stiffness) ในระบบแกนประจำตัว (local coordinate system) ดังรูปที่ 2-7 และจะทำการรวมสติฟเนสของแต่ละเอลิเมนต์ได้โดยตรงเมื่อทำการเปลี่ยนระบบแกนประจำตัวให้อยู่ในระบบแกนของทั้งโครงสร้าง (global coordinate system) โดยความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของทั้งโครงสร้างกับระบบแกนประจำตัวเขียนได้เป็น

$$\{u\} = [a]\{U\} \quad (2-17)$$

$$[a]^T [k] [a] = [K] \quad (2-18)$$

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos \theta_y & \cos \theta_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_x & \cos \theta_y & \cos \theta_z \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

$$[k] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

โดยที่	{u}	=	เวกเตอร์ของการกระจัดในระบบแกนประจำตัว
	{U}	=	เวกเตอร์ของการกระจัดในระบบแกนของทั้งโครงสร้าง
	[k]	=	เมตริกซ์สติฟเนสในระบบแกนประจำตัว
	[K]	=	เมตริกซ์สติฟเนสในระบบแกนของทั้งโครงสร้าง
	[a]	=	เมตริกซ์การแปลง (transformation matrix)
	L	=	ความยาวของชิ้นส่วนโครงสร้าง
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง
	E	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
	$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	=	มุมที่วัดเทียบกับแกน x,y,z ของระบบตามลำดับ

และสมการสมดุลในระบบแกนของทั้งโครงสร้างเขียนได้เป็น

$$[K]\{U\} = \{F_{ext}\} \quad (2-21)$$

โดยที่ $\{F_{ext}\}$ = เวกเตอร์ของแรงภายนอก

สมการที่ (2-21) สามารถแก้ได้โดยวิธีระบบสมการแบบเชิงเส้น เมื่อแก้สมการออกมาแล้วจะได้เวกเตอร์ของการกระจัดที่จุดต่อได้ และจะหาแรงภายในที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ (2-17) และสมการสมดุลของระบบแกนประจำตัว

$$[k]\{u\} = \{F_{int}\} \quad (2-22)$$

โดยที่ $\{F_{int}\}$ = เวกเตอร์ของแรงภายในชิ้นส่วน

และค่าความเค้นในแนวแกนที่เกิดขึ้นคือ

$$\sigma_i = \frac{F_{int,i}}{A_i} \quad (2-23)$$

โดยที่	σ_i	=	ค่าความเค้นของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ i
	$F_{int,i}$	=	แรงภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ i
	A_i	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ i

2.9 การวิเคราะห์หาช่วงความเค้นจากไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์หาค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของสะพานจากรถไฟที่วิ่งผ่าน เนื่องจากชิ้นส่วนของสะพานมีมาก จึงไม่สามารถติดตั้งสเตรนเกจเพื่อทำการตรวจหาค่าความเครียดเพื่อนำไปหาค่าความเค้นของทุกชิ้นส่วนได้ จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นของชิ้นส่วนทั้งหมดของสะพานได้ โดยจะทำการสร้างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ของสะพาน ซึ่งจะอ้างอิงจากแบบก่อสร้างจริง คุณสมบัติของวัสดุ และการเปลี่ยนแปลงระหว่างการใช้งานเช่นการซ่อมแซม การเปลี่ยนชิ้นส่วนหรือการเสริมกำลัง ซึ่งอาจจะต้องทำการตรวจวัดกับตัวโครงสร้างสะพานจริง เมื่อได้แบบจำลองของสะพานที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดแล้ว จะทำการวิเคราะห์โดยการสร้างแบบจำลองของน้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่าซึ่งก็คือห้วงจักรรถไฟที่วิ่งผ่านสะพาน โดยข้อมูลรูปแบบของห้วงจักรรถไฟทั้งจำนวนล้อและน้ำหนักของตัวรถ จะสมมติให้มีลักษณะที่เหมือนกันในการวิ่งผ่านแต่ละครั้ง เมื่อสร้างแบบจำลองของห้วงจักรรถไฟได้แล้ว จะทำการวิเคราะห์โดยให้แบบจำลองของห้วงจักรรถไฟ 1 ขบวน วิ่งผ่านบนแบบจำลองของสะพาน ดังนั้น จะหาความสัมพันธ์ของช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นกับเวลาเมื่อรถไฟวิ่งผ่านในชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ของสะพานได้ จากนั้นก็จะทำการปรับแบบจำลองของสะพาน จนทำให้ค่าความเค้นที่วิเคราะห์จากไฟไนท์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดภายใต้การวิ่งผ่านของห้วงจักรรถไฟ และผลจากการวิเคราะห์ที่กล่าวมา จะนำมาใช้ประกอบกับผลการตรวจวัดสะพานซึ่งกระทำเพียงในบางชิ้นส่วนโครงสร้าง เพื่อให้สามารถทำนายหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนอื่นที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด นั่นคือผลที่ได้จากการตรวจวัดสะพานจะนำมาทำการแยกข้อมูลจำนวนรอบของแต่ละช่วงความเค้นออกมาโดยวิธีเรนโพล์สวาคานี้ตั้ง จากนั้นก็จะนำมาหาค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า และค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล โดยวิธีที่กล่าวในตอนต้น และค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่ได้นี้ จะนำมาเปรียบเทียบและปรับค่าแบบสัดส่วนกับผลจากการวิเคราะห์โดยไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของทุกชิ้นส่วนในสะพานที่จะนำไปใช้ในการประเมินอายุของสะพานต่อไป

2.10 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้า

ในการประเมินผลของอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้า กราฟ S-N ที่นำมาใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานเป็นแบบช่วงความเค้นคงที่ แต่เนื่องจากสัญญาณที่ทำการตรวจวัดมีลักษณะเป็นสัญญาณที่ซับซ้อนไม่คงที่ ซึ่งขีดจำกัดความล้าสำหรับช่วงความเค้นไม่คงที่จะต่ำกว่าขีดจำกัดสำหรับช่วงความเค้นความเค้นคงที่ ดังนั้นจะพิจารณาว่าวัสดุไม่มีขีดจำกัดความล้า เพื่อค่าที่ได้ในการประเมินอายุการใช้งานจะอยู่ในด้านปลอดภัย รวมทั้งมีความสะดวกในการประเมินอายุการใช้งาน

พิจารณาสมการที่ (2-2) เมื่อให้ค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นแทนด้วยค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่ได้จากการตรวจวัดสัญญาณความเครียด จะได้จำนวนรอบทั้งหมดที่ทำให้โครงสร้างสะพานเกิดการวิบัติเนื่องจากค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลเป็น

$$N = \frac{A}{S_e^3} \quad (2-24)$$

หากกำหนดให้ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันในอดีตเท่ากับปัจจุบัน ดังนั้นจำนวนรอบที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในอดีต

$$N_p = T_{ai} \cdot 365 \cdot Y_p \quad (2-25)$$

โดยที่ N_p = จำนวนรอบที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในอดีต
 T_{ai} = ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันในปัจจุบัน
 Y_p = อายุการใช้งานของสะพานเป็นปี

ดังนั้นจะสามารถหาอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ (Y_R) ได้จาก

$$T_{ai} \cdot 365 \cdot Y_R = N - N_p$$

จะได้
$$Y_R = \frac{N - N_p}{T_{ai} \cdot 365} \quad (2-26)$$

สำหรับการประเมินอายุการใช้งานของสะพานนี้ จะมีการคิดถึงการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวัน (growth rate) เพราะในการใช้งานของสะพานรถไฟจะมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและจำนวนรถไฟที่วิ่งผ่านในแต่ละวัน ซึ่งในการประเมินอายุการใช้งานนี้จะใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงการใช้งานในอนาคต โดยจะคิดอัตราการเพิ่มที่ 1 % และ 2 % ต่อปี และความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันจะมีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันสามารถเป็นไปได้ และในงานวิจัยนี้จะสมมติให้ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันในอดีตมีค่าเท่ากับในปัจจุบัน รูปที่ 2-8 แสดงความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันตั้งแต่อดีตจนถึงอนาคต การคำนวณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่จะมีวิธีดังนี้

ให้ T_{ai} = ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันในปัจจุบัน
 $T_{a,max}$ = ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันมากที่สุดที่เป็นไปได้ในอนาคต
 r = อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟต่อปี
 Y_F = จำนวนปีที่ความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันเพิ่มขึ้นจากปัจจุบันจนถึงค่าที่เป็นไปได้ในอนาคต
 Y_p = ระยะเวลาการใช้งานของสะพานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน
 Y_R = อายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพาน
 N_p = จำนวนรอบที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในอดีต

อายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานที่ทำการประเมิน (Y_R) หาได้โดย

จากอนุกรมเรขาคณิตจะได้

$$\left(1 + \frac{r}{100}\right)^{Y_F - 1} T_{ai} = T_{a,max} \quad (2-27)$$

ดังนั้น

$$Y_F = \frac{\ln\left(\frac{T_{a,max}}{T_{ai}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{r}{100}\right)} + 1 \quad (2-28)$$

จะได้

$$N_F = \frac{1 - \left(1 + \frac{r}{100}\right)^{Y_F}}{-r} \cdot T_{ai} \cdot 365 \cdot 100 \quad (2-29)$$

โดยที่ N_F = จำนวนรอบที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราการเพิ่มขึ้น r และ
จำนวนปี Y_F

อายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานที่ทำการประเมิน (Y_R) จะหาได้จาก

- ถ้า $N_F > (N - N_p)$ จะหมายความว่าโครงสร้างเกิดการวิบัติก่อนที่จำนวนการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันเท่ากับจำนวนการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันที่เป็นไปได้ ซึ่งจะหาอายุการใช้งานของสะพานได้จาก

$$Y_R = \frac{\ln\left(1 + \frac{(N - N_p) \cdot r}{36500 \cdot T_{ai}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{r}{100}\right)} \quad (2-30)$$

- ถ้า $N_F < (N - N_p)$ จะหมายความว่าโครงสร้างยังไม่เกิดการวิบัติในขณะที่จำนวนการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันเท่ากับจำนวนการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันที่เป็นไปได้ ซึ่งจะหาอายุการใช้งานของสะพานได้จาก

$$Y_R = Y_F + \frac{[(N - N_p) - N_F]}{365 \cdot T_{a,max}} \quad (2-31)$$

สำหรับการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 (รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะน้ำหนักรถไฟแบบ U20) จะสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน แต่จะต้องใช้ค่าจำนวนรอบที่เกิดขึ้นในอดีตจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในปัจจุบัน โดยจะต้องปรับค่าดังนี้

$$N_p = \frac{S_e^3}{S_{U20}^3} (T_{ai} \cdot 365 \cdot Y_p) \quad (2-32)$$

โดยที่ S_{U20} จะเป็นค่าความเค้นประสิทธิผลจากน้ำหนักแบบ U20 เมื่อคำนวณหาค่า N_p ได้แล้วนำไปแทนค่าในสมการข้างต้น ก็จะสามารถหาอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ได้

2.11 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้าตามมาตรฐานของ AREMA 1999

ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟนั้น ปัจจัยที่มีความสำคัญคือค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างสะพานและลักษณะรอยต่อของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพาน ซึ่งจากสมการ (2-1) เมื่อวัสดุที่ใช้ในการสร้างสะพานเป็นหลัก จะได้ค่าคงที่ B เท่ากับ 3 ดังนั้นจะเขียนสมการ (2-1) ได้เป็น

$$NS^3 = A \quad (2-33)$$

จากสมการ (2-33) ก็จะพบว่าค่าคงที่อีกตัวหนึ่งคือค่า A เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับลักษณะของรอยต่อในชิ้นส่วนของสะพาน ซึ่งค่านี้จะสามารถหาได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของวัสดุที่มีรอยต่อชนิดเดียวกัน แต่ในบางครั้งการทดสอบวัสดุไม่สามารถทำได้โดยสะดวกเนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านต่างๆ ดังนั้นอาจใช้ค่าคงที่ A จากมาตรฐานที่เป็นสากลแนะนำให้ใช้ได้ โดยในงานวิจัยจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของวัสดุ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าคงที่อ้างอิงตามมาตรฐาน AREMA 1999 ซึ่งได้กำหนดค่าคงที่ของลักษณะรอยต่อแสดงไว้ในตารางที่ 2-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ข้อมูลการตรวจวัดและการวิเคราะห์ผล

3.1 บทนำ

ในการประเมินผลของพฤติกรรมทางโครงสร้างจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งโดยทั่วไป การวิเคราะห์โครงสร้างจะเป็นการสร้างแบบจำลองลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจำลองรูปร่างลักษณะของโครงสร้าง คุณสมบัติของวัสดุ ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ และระบบของโครงสร้าง แต่สำหรับพฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำจริงๆแล้ว อาจจะไม่ตรงกับที่จำลองไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากพฤติกรรมการถ่ายแรงของโครงสร้าง หรือความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ รวมทั้งความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อและลักษณะของที่รองรับ เป็นต้น ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง จำเป็นต้องมีข้อมูลจากการตรวจวัดโครงสร้างจริง และนำมาปรับแก้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำให้มีความน่าเชื่อถือในแบบจำลองมากขึ้น และข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะต้องเป็นตัวแทนของพฤติกรรมโครงสร้างจริงที่เกิดขึ้น

ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างสะพานรถไฟ เพื่อใช้ในการประเมินอายุการใช้งานนั้น จะต้องทำการเก็บข้อมูลจากการตรวจวัดสะพานภายใต้สภาพการใช้งานจริง และภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า โดยทำการตรวจวัดข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน และทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน เพื่อความน่าเชื่อถือและความถูกต้องในผลการประเมินอายุของสะพานรถไฟ

ในการศึกษาวิจัยนี้ การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ได้ทำการแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการตรวจวัดภาคสนาม ซึ่งจะกล่าวถึงตั้งแต่การสำรวจเบื้องต้น การติดตั้งและการตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นจากการใช้งานของสะพาน การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ขั้นตอนที่สอง เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม จะกล่าวถึงตั้งแต่การดึงข้อมูลจากหน่วยความจำหลักเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพการใช้งานจริง เพื่อใช้ปรับแก้แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และนำไปหาค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล และวิเคราะห์ผลจากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อทำการประเมินอายุการใช้งานของสะพานจากการตรวจวัดสภาพการใช้งานจริงและการประเมินอายุการใช้งานจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20

3.2 ลักษณะทั่วไปของสะพานที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 สะพานจักรี

สะพานจักรี เป็นสะพาน 3 ช่วงความยาว ตั้งอยู่ระหว่างสถานีท่าเรือและหนองวิวัฒน์ ที่กม. 102+288 ในทางสายเหนือ ทอดผ่านแม่น้ำป่าสักโดยมีความยาวทั้งสะพานประมาณ 103 เมตร โครงสร้างสะพานช่วงแรก

จากกรุงเทพฯ จะเป็นโครงสร้างแบบ Through Plate มีความยาวโดยประมาณ 24.5 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2517 ส่วนช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนโครงสร้างที่จะทำการศึกษาคือจะเป็นโครงสร้างแบบ Through Truss มีความยาวโดยประมาณ 54 เมตร สูงประมาณ 8 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2491 และช่วงสุดท้ายเป็นโครงสร้างแบบ Through Truss มีความยาวโดยประมาณ 24.5 เมตร สูงประมาณ 4 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2491 ปลายทั้งสองของสะพานจะวางอยู่บนแท่นคอนกรีต ตัวโครงสร้างของสะพานเป็นโครงสร้างเหล็กทั้งหมด ลักษณะทั่วไปของสะพานจักรีแสดงในรูปที่ 1-1

3.2.2 สะพานกม.03+870

สะพานกม.03+870 หรือสะพานกม.03 เป็นสะพาน 2 ช่วงความยาว ตั้งอยู่ระหว่างสถานีธนบุรีและตลิ่งชัน ในทางสายใต้ มีความยาวโดยประมาณ 56 เมตร โครงสร้างสะพานกม.03 ช่วงแรกจากกรุงเทพฯ จะเป็นโครงสร้างแบบ Deck Plate มีความยาวโดยประมาณ 6 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2505 ส่วนช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงสะพานที่ทำการศึกษาคือเป็นโครงสร้างแบบ Through Truss มีความยาวโดยประมาณ 50 เมตร และสูงประมาณ 8 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2509 ปลายทั้งสองของสะพานวางอยู่บนฐานรองรับซึ่งสร้างอยู่บนแท่นคอนกรีต ตัวโครงสร้างทั้งหมดของสะพานเป็นโครงสร้างเหล็กทั้งหมด ลักษณะทั่วไปของสะพานกม.03 แสดงในรูปที่ 1-2

3.2.3 สะพานกม.19+223

สะพานกม.19+223 หรือสะพานกม.19 เป็นสะพาน 2 ช่วงความยาว ตั้งอยู่ระหว่างสถานีบางบำหรุและตลิ่งชันในทางสายใต้ มีความยาวโดยประมาณ 80 เมตร โครงสร้างสะพานกม.19 ช่วงแรกจากกรุงเทพฯ จะเป็นโครงสร้างแบบ Through Plate มีความยาวโดยประมาณ 10 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2466 ส่วนช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงสะพานที่ทำการศึกษาคือเป็นโครงสร้างแบบ Through Truss มีความยาวโดยประมาณ 70 เมตร และสูงประมาณ 8 เมตร ข้อมูลที่ตัวสะพานระบุว่าสร้างในปี พ.ศ. 2466 ปลายทั้งสองของสะพานวางอยู่บนฐานรองรับซึ่งสร้างอยู่บนแท่นคอนกรีต ตัวโครงสร้างทั้งหมดของสะพานเป็นโครงสร้างเหล็กทั้งหมด ลักษณะทั่วไปของสะพาน กม.19 แสดงในรูปที่ 1-3

จากการศึกษาแบบโครงสร้างสะพานจะสามารถแบ่งประเภทของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานได้ดังนี้

- ก) Stringer เป็นชิ้นส่วนที่วางตามแนวสะพาน รับน้ำหนักที่ถ่ายมาจากรถไฟโดยตรง โดยน้ำหนักรถไฟจะถ่ายลงที่รางรถไฟ ผ่านไม้หมอนรถไฟ และถ่ายลง Stringer ตามลำดับ
- ข) Floor Beam เป็นชิ้นส่วนที่วางตามแนวขวางของสะพาน จะรับแรงจาก Stringer แล้วจะถ่ายแรงเข้าสู่ตัวโครงถักหลัก
- ค) Upper Chord เป็นส่วนประกอบด้านบนของโครงถักซึ่งรับแรงมาจาก Floor Beam และส่งถ่ายแรงที่เกิดขึ้นบนสะพานสู่ที่รองรับโดยผ่านทาง End Post

- ง) Lower Chord เป็นส่วนประกอบด้านล่างของโครงถักซึ่งรับแรงมาจาก Floor Beam และส่งถ่ายแรงที่เกิดขึ้นบนสะพานสู่ที่รองรับ
- จ) End Post เป็นส่วนประกอบวางตามแนวทแยงในโครงถักต่อมาจาก Upper Chord ทำหน้าที่ถ่ายแรงจาก Upper Chord สู่ที่รองรับ
- ฉ) Vertical Member หรือ Post เป็นส่วนประกอบตามแนวตั้งของโครงถัก ทำหน้าที่ช่วยให้โครงถักมีเสถียรภาพและบางส่วนยังช่วยส่งถ่ายแรงจาก Floor Beam สู่ Upper และ Lower Chord
- ช) Diagonal Member เป็นส่วนประกอบตามแนวทแยงของโครงถัก ทำหน้าที่รับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนโครงถัก
- ซ) Lateral Bracing เป็นชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้างของโครงสร้างสะพานรถไฟ อาจมีทั้งด้านบนและด้านล่างของสะพาน
- ฅ) Portal Bracing เป็นชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้างของ End Post
- ญ) Sway Bracing เป็นชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้างอีกชิ้นส่วนหนึ่งของโครงสร้างสะพาน

ชิ้นส่วนต่างๆที่กล่าวมาเกือบทั้งหมดจะเป็นหน้าตัดประกอบ (built-up section) โดยชิ้นส่วน Portal Bracing และ Sway Bracing อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ถ้าโครงสร้างสะพานมีความยาวและความสูงน้อย ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลค่าคุณสมบัติของชิ้นส่วนสะพาน และแสดงแบบจำลองของโครงสร้างในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ทั้ง 3 สะพาน

3.3 การตรวจวัดข้อมูลภาคสนาม

สำหรับโครงสร้างสะพานที่ทำการประเมินอายุการใช้งานนั้น การใช้งานที่เกิดขึ้นจากรถไฟวิ่งผ่านสะพานนั้นมีลักษณะไม่คงที่ ทั้งขนาดน้ำหนักบรรทุกและรูปแบบของรถไฟ รวมทั้งพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่มีความซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการประเมินที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด จะต้องประเมินผลจากข้อมูลที่คาดว่าจะเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด โดยตัวแทนของข้อมูลจะได้จากการตรวจวัดภาคสนามภายใต้สภาพการใช้งานปกติ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

3.3.1 การสำรวจเบื้องต้น

การสำรวจเบื้องต้นเป็นการหาข้อมูลที่จำเป็นเบื้องต้น ในการวางแผนการกำหนดแนวทางในการเก็บข้อมูลและรายละเอียดของการตรวจวัดข้อมูลได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมตามหลักวิชาการ โดยจะทำการเก็บข้อมูลต่างๆของสะพาน ดังนี้

3.3.1.1 ลักษณะทั่วไปของสะพาน

ลักษณะและรูปแบบของโครงสร้างสะพานจะมีผลอย่างมากต่อการประเมินอายุการใช้งานของสะพาน กล่าวคือ ถ้าสะพานมีการสั่นสะเทือนมากระหว่างการใช้งาน จะทำให้เกิดหน่วยแรงกระทำซ้ำต่อ

โครงสร้างสะพานมาก เป็นต้น ดังนั้นในการสำรวจลักษณะโครงสร้างสะพานเบื้องต้นนี้ จะทำการเก็บข้อมูลรูปแบบโครงสร้างของสะพานทั้งหมด และเก็บข้อมูลโดยรวมของสภาพโครงสร้างสะพาน เช่น ชิ้นส่วนโครงสร้างมีการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนมากน้อยแค่ไหน ชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานเกิดการเสียหายจากการใช้งานมากน้อยแค่ไหนหรือลักษณะรอยต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างว่ายังสามารถรับแรงได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ รวมทั้งการสำรวจรายละเอียดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงนอกเหนือจากในแบบก่อสร้าง เช่น การปรับปรุงหรือเสริมกำลังในชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำไปพิจารณาในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อความถูกต้องมากขึ้นกว่าที่พิจารณาเฉพาะแบบก่อสร้างที่มีอยู่ในอดีตแต่เพียงอย่างเดียว ผลการสำรวจลักษณะโครงสร้างสะพานพบว่า โครงสร้างสะพานทั้ง 3 สะพาน ยังอยู่ในสภาพที่ค่อนข้างสมบูรณ์ มีการกัดกร่อนในชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยโดยจะเกิดสนิมมากที่ชิ้นส่วนโครงสร้างที่อยู่ใต้ระดับรางรถไฟลงไป และมีรอยร้าวเกิดขึ้นเล็กน้อยในชิ้นส่วนที่รับแรงโดยตรงคือ Stringer และ Floor Beam ยังไม่พบปัญหาใหญ่ต่อโครงสร้างสะพานมากนัก แต่ควรจะมีการตรวจสอบเป็นประจำ เพื่อทำการปรับปรุงซ่อมแซมต่อไป ส่วนรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างยังอยู่ในสภาพดี มีหมุดยึดหลวมบางตัว อาจจะต้องทำการซ่อมแซมในจุดต่อเหล่านี้เพื่อให้สามารถรับการใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ สภาพสภาพของสะพานโดยรวมพบว่ายังสมบูรณ์ ไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนและการหลวมตัวของรอยต่อ รูปที่ 3-1 ถึง 3-3 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานทั้ง 3 สะพาน

3.2.1.2 ข้อมูลการใช้งานของสะพานเบื้องต้น

สะพานรถไฟที่ทำการตรวจวัดแต่ละแห่งจะมีที่ตั้งแตกต่างกัน ทำให้ลักษณะการใช้งานของรถไฟแตกต่างกันซึ่งทำให้มีผลต่อการประเมินอายุการใช้งานของสะพาน และเพื่อการวางแผนการทำงานในการตรวจวัดข้อมูลภาคสนาม ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาข้อมูลการใช้สะพานเบื้องต้น ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากการรถไฟแห่งประเทศไทยในการให้ข้อมูลการเดินทางรถไฟเบื้องต้น แสดงตัวอย่างในตารางที่ 3-1 ทำให้การวางแผนการติดตั้งอุปกรณ์ การเตรียมพื้นที่ การตรวจวัดข้อมูล และการถอดเปลี่ยนชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุสามารถทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

3.3.2 การตรวจวัดความเครียด

การตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานรถไฟในสภาพการใช้งานปกติเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญหลักอย่างหนึ่งในการที่จะนำไปประเมินอัตราการเสื่อมสภาพของสะพานและการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการประเมินอายุการใช้งานของสะพาน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะได้จากอุปกรณ์การตรวจวัดที่จะต้องทำการติดตั้งกับโครงสร้างของสะพาน และขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดจะต้องไม่กระทบต่อการใช้งานปกติของรถไฟขณะทำการติดตั้ง ดังนั้นจากข้อมูลเบื้องต้นของสะพานและข้อมูลการใช้งานของสะพานเบื้องต้นก็จะสามารถกำหนดแผนการติดตั้งได้

3.3.2.1 ตำแหน่งของโครงสร้างสะพานที่ทำการตรวจวัด

ในการตรวจวัดค่าความเครียดของสะพาน เพื่อที่จะนำผลจากการตรวจวัดมาทำการเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจวัดชิ้นส่วนโครงสร้าง แต่ในทางปฏิบัติ สำหรับโครงสร้างสะพานรถไฟแบบโครงถัก การตรวจวัดข้อมูลความเครียดไม่สามารถตรวจวัดได้ทุกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพาน เพราะจะเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นจึงจะทำการตรวจวัดเฉพาะชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีความสำคัญ และเพียงพอที่จะเป็นตัวแทนชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมดในการนำไปใช้ในการประเมินอายุของสะพาน โดยจะพิจารณาเลือกจากชิ้นส่วนหลักที่รับแรงโดยจะมีทั้งชิ้นส่วนโครงสร้างในโครงถัก ซึ่งมี Upper Chord ,Lower Chord ,Vertical Member ,Diagonal Member และชิ้นส่วนหลักที่ถ่ายแรงจากรถไฟลงสู่โครงสร้าง ซึ่งมี Stringer ,Floor beam โดยจะทำการเลือกตำแหน่งชิ้นส่วนที่มีการรับแรงมากที่สุดก่อน ซึ่งจะอยู่ตรงกลางช่วงของสะพาน และกระจายไปยังตำแหน่งที่รับแรงรองลงมา ซึ่งอาจจะอยู่ตรงตำแหน่งหนึ่งในสามของช่วงสะพาน โดยชิ้นส่วนเหล่านี้จะเกิดความเสียหายมาก ทำให้มีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างโดยตรง รูปที่ 3-4 ถึง 3-6 แสดงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ทำการตรวจวัดความเครียดทั้ง 3 สะพาน

3.3.2.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด

ในการพิจารณาตำแหน่งที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดความเครียดในชิ้นส่วนโครงสร้าง จะต้องเป็นตำแหน่งที่แสดงพฤติกรรมของความล้าที่เกิดกับโครงสร้างสะพาน ดังนั้นตำแหน่งที่ติดตั้งจะต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟวิ่งผ่านได้ และเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเครียดสูงและจะต้องหลีกเลี่ยงตำแหน่งที่มีผลของความหนาแน่นจากความเค้นสูง ซึ่งในส่วนของโครงสร้างสะพานนี้จะพบว่าเนื่องจากโครงสร้างสะพานเป็นแบบโครงถัก ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นความเค้นตามแนวแกน ดังนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของชิ้นส่วนโครงสร้าง และเป็นการหลีกเลี่ยงตำแหน่งที่มีค่าความหนาแน่นจากความเค้นสูงที่รอยต่อด้วย ส่วนชิ้นส่วนที่รับแรงดัดเป็นหลักเช่น Stringer และ Floor Beam จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งปีกกลางของช่วงคานหลัก เนื่องจากความล้าที่เกิดขึ้นจะมีผลมาจากแรงดัดในช่วงคานหลัก และจะติดห่างจากรอยต่อหรือรอยเชื่อมเพื่อลดผลจากตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของความเค้นสูงด้วย

3.3.2.3 อุปกรณ์การตรวจวัดข้อมูล

อุปกรณ์หลักที่สำคัญที่ใช้ในขั้นตอนของการตรวจวัดข้อมูลในโครงสร้างสะพานมีดังนี้

ก) สเตรนเกจ (strain gage) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้น โดยที่สเตรนเกจที่ใช้เป็นสเตรนเกจแบบต้านทานไฟฟ้า นั่นคือเป็นเกจที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนค่าการยืดและหดตัวของสเตรนเกจให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสเตรนเกจที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นแบบเมททอลฟอยเกจ (metal foil gage) มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3-2 และรูปที่ 3-7 และ 3-8 แสดงสเตรนเกจที่ทำการติดตั้งแล้ว

ข) ชีลด์เคเบิล (shield cable) เป็นสายไฟที่มีความต้านทานต่ำประมาณ 0.05 โอห์มต่อเมตรและป้องกันสัญญาณรบกวน ซึ่งชีลด์เคเบิลจะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อตัวสเตรนเกจเข้ากับดาต้าลอคเกอร์ โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทำการสร้างวงจรไฟฟ้าแบบวีทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge) สำหรับสเตรนเกจแต่ละตัวในรูปแบบที่เรียกว่า ระบบควอเตอร์บริดจ์ทรีไวร์ (quarter bridge-3-wires system) ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถลดผลกระทบจากการใช้สายไฟยาวลงได้

ค) ดาต้าลอคเกอร์ (data logger) จะเป็นอุปกรณ์ที่เก็บข้อมูลจากสัญญาณที่ส่งมาจากสเตรนเกจโดยตรง โดยจะรวมอุปกรณ์ต่างๆไว้ในตัวดังนี้

- อุปกรณ์การสร้างวงจรไฟฟ้าแบบวีทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge completion) เป็นอุปกรณ์ในการสร้างวงจรไฟฟ้าแบบ วีทสโตนบริดจ์ โดยจะมีลักษณะเป็นวงจรตัวต้านทาน 3 ตัว และนำสายจากสเตรนเกจมาต่อทำให้เป็นวงจรบริดจ์ได้
- ไดนามิกสเตรนแอมพลิไฟเออร์ (dynamic strain amplifier) จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนสัญญาณความเครียดให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาลอก และทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าไปเลี้ยงที่สเตรนเกจ เพื่อให้สามารถทำงานได้
- อนาลอกโลว์พาสฟิวเตอร์ (analog lowpass filter) จะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนที่ตามมากับสัญญาณที่ได้รับจากสเตรนเกจ โดยจะปิดกั้นและไม่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ตัดออก (cut-off frequency) ผ่านไปได้
- อนาลอกทูดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์ (analog-to-digital converter) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าอนาลอกที่ผ่านการกรองจากอนาลอกโลว์พาสฟิวเตอร์ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล
- ดิจิตอลทูอนาลอกคอนเวอร์เตอร์ (digital-to-analog converter) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่จ่ายเข้ามาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาลอก เพื่อส่งไปให้สเตรนเกจทำงาน
- คอมพิวเตอร์ชิป (CPU) เป็นตัวทำการประมวลผลและควบคุมอุปกรณ์ทุกชิ้นในดาต้าลอคเกอร์
- หน่วยความจำหลัก (hard disk) เป็นอุปกรณ์ที่ทำการเก็บข้อมูลจากการตรวจวัดทั้งหมด รูปที่ 3-9 แสดงลักษณะของดาต้าลอคเกอร์

ง) ทริกเกอร์ (trigger) เป็นตัวควบคุมการจ่ายไฟจากแบตเตอรี่เข้าสู่อุปกรณ์การตรวจวัดทั้งหมดเนื่องจากในการเก็บข้อมูลความเครียดนั้น จะเก็บเฉพาะตอนที่มียืดไฟวิ่งผ่านเท่านั้น ซึ่งในแต่ละวันจำนวนรอบไฟที่วิ่งผ่านจะมีจำนวนไม่มากนัก ถ้าทำการเปิดเครื่องเก็บข้อมูลทิ้งไว้ตลอดเวลาจะทำให้สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ใช้ และข้อมูลที่เก็บได้จะมีมากเกินไปจะทำให้หน่วยความจำหลักที่ใช้เก็บข้อมูลไม่พอ ดังนั้นจะใช้ตัวทริกเกอร์นี้ในการควบคุมการเก็บข้อมูล เมื่อยืดไฟวิ่งผ่านมาจะทำการกดตัวทริกเกอร์นี้แล้ว อุปกรณ์จะทำการบันทึกข้อมูลเป็นเวลา 5 นาทีแล้วจะปิดตัวเองลง ข้อมูลที่ได้ก็จะเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผลได้ต่อไป รูปที่ 3-10 แสดงลักษณะของทริกเกอร์

จ) คอมพิวเตอร์ (computer) เป็นอุปกรณ์ในการจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดทั้งหมด โดยจะทำการถ่ายโอนข้อมูลจากดาต้าลอกเกอร์ ลงสู่หน่วยความจำหลักในคอมพิวเตอร์ และนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจัดการข้อมูลการตรวจวัดเป็นหลัก รูปที่ 3-11 และ 3-12 แสดงแผนผังการทำงานของอุปกรณ์ในการตรวจวัดความเครียด

3.3.3 การตรวจวัดการใช้งานของสะพาน

ในการพิจารณาถึงอัตราการเสื่อมสภาพเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภท หรือการประเมินอายุการใช้งานของสะพานนั้น รวมทั้งการปรับแก้แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมโครงสร้างจริงนั้น จะต้องทำการเก็บข้อมูลทั้งประเภทของรถไฟและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นไปพร้อม ๆ กันในสภาพการใช้งานปกติ และการตรวจวัดค่าความเครียดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่รู้ค่า รวมทั้งข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุในชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยมีรายละเอียดในการตรวจวัดการใช้งานของสะพานดังนี้

3.3.3.1 การตรวจวัดภายใต้สภาพการใช้งานปกติ

ภายใต้สภาพการใช้งานปกติของสะพานรถไฟนั้น รูปแบบและน้ำหนักบรรทุกของรถไฟที่วิ่งผ่านในแต่ละขบวนนั้นมีความแตกต่างกัน รถไฟที่มีน้ำหนักมากก็ทำให้เกิดความเสียหายมาก หรือรถไฟที่วิ่งผ่านด้วยความเร็วสูงก็จะทำให้เกิดผลจากแรงกระแทกสูงตาม ดังนั้นในการศึกษาผลของการใช้งานของรถไฟแต่ละประเภท จึงจำเป็นต้องมีการบันทึกข้อมูลของรถไฟที่วิ่งผ่านควบคู่กับการตรวจวัดค่าความเครียดด้วย โดยจะทำการบันทึกเวลาที่รถไฟวิ่งผ่าน ชนิดของรถไฟและทิศทางในการวิ่งผ่านสะพาน

3.3.3.2 การตรวจวัดการใช้งานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า

เพื่อผลการประเมินอายุการใช้งานของสะพานที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้แบบจำลองของโครงสร้างสะพานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ให้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับพฤติกรรมโครงสร้างจริง ดังนั้นจึงทำการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า เพื่อนำข้อมูลค่าความเครียดที่ได้ไปเปรียบเทียบและปรับแก้แบบจำลองของโครงสร้างสะพานในคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการทดสอบนี้จะใช้หัวรถจักรที่ทราบน้ำหนักและรูปแบบที่แน่นอนในการทดสอบ ทำการทดสอบโดยใช้หัวรถจักรวิ่งผ่านสะพานด้วยความเร็วต่างๆกันทั้งขาไปและขากลับ ทำการเก็บข้อมูลความเครียดที่เกิดขึ้น ค่าความเครียดที่ได้จากความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 5.3) ซึ่งจะเทียบเท่าได้กับผลจากการทดสอบแบบสถิตศาสตร์ได้ รูปที่ 3-13 แสดงการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักแบบหัวรถจักร รูปที่ 3-14 แสดงลักษณะของหัวรถจักรที่ใช้ในการทดสอบโครงสร้างสะพาน

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัด

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดนั้น เป็นขั้นตอนในการนำข้อมูลที่ทำการเก็บจากการตรวจวัดภาคสนามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นมาทำการวิเคราะห์ ตั้งแต่พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานขณะที่มีรถแล่นผ่าน ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล การประเมินอายุการใช้งานของสะพาน โดยมีวิธีการดังนี้

3.4.1 การเรียกข้อมูลจากการตรวจวัดความเครียดในภาคสนาม

ข้อมูลความเครียดจากการตรวจวัดภาคสนามที่เก็บไว้ในหน่วยความจำหลักในดาต้าล็อกเกอร์นั้น จะทำการถ่ายข้อมูลออกมาลงในคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ผล โดยรูปแบบของข้อมูลที่เก็บได้จะอยู่ในรูปแบบ text file (.txt) ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานได้ทันที โดยโปรแกรมที่จะใช้วิเคราะห์จะใช้โปรแกรม MATLAB และ Excel ในการเรียกข้อมูลการตรวจวัดความเครียด

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าความเค้นจากข้อมูลการตรวจวัด

การบันทึกสัญญาณความเครียดที่ได้จากสเตรนเกจนั้น สัญญาณที่ได้จะอยู่ในรูปของความต่างศักย์ซึ่งความสัมพันธ์ของความเครียดและความต่างศักย์นั้นจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์การตรวจวัด โดยอุปกรณ์การตรวจวัดจะมีความสามารถในการเก็บข้อมูลเป็น 17 บิต และจากสมการของสเตรนเกจจะได้

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \cdot 1 \frac{R_L}{R_G} \quad (3-1)$$

โดยที่	ε	=	ค่าความเครียด
	V_r	=	อัตราส่วนของความต่างศักย์ที่ออกมากับความต่างศักย์ที่จ่ายเข้าไป
	GF	=	เกจแฟคเตอร์ของสเตรนเกจ
	R_L	=	ความต้านทานในสายไฟ
	R_G	=	ความต้านทานในสเตรนเกจ

เมื่อทำการแทนค่าต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ตรวจวัดแล้ว จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับข้อมูลที่อ่านได้ (reading data) ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\text{reading data}}{2200} \quad \text{หน่วยไมโครสเตรน} \quad (3-2)$$

เมื่อได้ค่าความเครียดออกมาแล้วก็จะสามารถนำไปแปลงเป็นค่าความเค้นได้จากสมการ (2-6)

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (2-6)$$

แทนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก = 2000000 ksc และค่าความเครียดในสมการที่ (3-2) จะได้

$$\sigma = \frac{2 \times (\text{reading data})}{2200} \quad \text{ksc} \quad (3-3)$$

เมื่อทำการคำนวณค่าความเค้นได้แล้วก็จะสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าช่วงความเค้นเทียบเท่า ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลโดยผ่านวิธีการเรนโพล์วเคาท์ติ้ง และสามารถนำผลการวิเคราะห์ความเค้นจากการทดสอบห้วงจักรไปทำการปรับแก้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ และนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาประเมินอายุการใช้งานของสะพานได้โดยวิธีการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 รูปที่ 3-15 ถึง 3-17 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบห้วงจักรในชิ้นส่วนหลักของทั้ง 3 สะพาน ภาคผนวก ข แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดการใช้งานปกติและค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของทั้ง 3 สะพาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

4.1 บทนำ

สำหรับสะพานที่มีอายุการใช้งานมายาวนาน คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างสะพานในสมัยนั้นอาจ จะมีความแตกต่างจากคุณสมบัติของวัสดุในปัจจุบัน อีกทั้งคุณสมบัติของวัสดุอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก สภาพการใช้งานด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อประเมินหาอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของสะพานเนื่องจากผล ของความล้า จึงจำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างสะพาน แม้ว่าในมาตรฐานการประเมินอายุ การใช้งานที่ปลอดภัยของสะพานที่ใช้อ้างอิงคือ AREMA 1999 จะเสนอกราฟ S-N ที่แสดงถึงคุณสมบัติทาง ด้านความล้าตามลักษณะของรอยต่อแบบต่างๆ แต่เพื่อผลการประเมินอายุการใช้งานที่ปลอดภัยน่าเชื่อถือและ ถูกต้องมากยิ่งขึ้น จึงทำการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้เป็นชิ้น ส่วนโครงสร้างสะพานอย่างแท้จริง โดยในงานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนการทดสอบวัสดุดังนี้

4.2 การเลือกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานสำหรับการทดสอบ

โดยปกติการเลือกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานสำหรับนำมาทดสอบหาคุณสมบัติวัสดุนั้น จะไม่สามารถ นำชิ้นส่วนที่เกิดความเค้นสูงสุดออกมาทดสอบได้ เนื่องจากอาจจะทำให้โครงสร้างสะพานเกิดความไม่ปลอดภัย ในการใช้งานและไม่สะดวกในการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำชิ้นส่วนที่สะดวกต่อการนำออกมาทดสอบและ หารวัสดุใหม่ติดตั้งแทนได้ง่ายมาทำการทดสอบแทน และชิ้นส่วนนั้นต้องเป็นตัวแทนข้อมูลคุณสมบัติวัสดุของชิ้น ส่วนโครงสร้างสะพานด้วย ซึ่งจะต้องมีหลักการในการเลือกชิ้นส่วนโครงสร้างมาทดสอบดังนี้

- 1) เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่สามารถนำออกมาจากโครงสร้างสะพานได้และติดตั้งชิ้นส่วนใหม่ทดแทน ได้โดยง่าย เพราะมีข้อจำกัดทางด้านเวลาในการทำงาน ซึ่งจะต้องทำการถอดและติดตั้งชิ้นส่วน ทดแทนในช่วงเวลาที่ไม่มีการวิ่งผ่านเท่านั้น และเมื่อทำการถอดชิ้นส่วนออกจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อ พฤติกรรมในการรับแรงของโครงสร้างสะพาน
- 2) ชิ้นส่วนที่นำออกมาทดสอบ จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติและเป็นชนิดเดียวกันกับชิ้นส่วนที่เกิด ความเสียหายมากที่สุดในโครงสร้างสะพาน
- 3) ชิ้นส่วนที่นำออกมาทดสอบ จะต้องมียุการใช้งานเท่ากับกับชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายมากที่สุด ในโครงสร้างสะพาน ซึ่งไม่ใช่ชิ้นส่วนที่ได้รับการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังเข้าไปภายหลัง และอยู่ใน สภาพแวดล้อมที่เหมือนกัน เพื่อควบคุมปัญหาเรื่องการกัดกร่อนในโครงสร้างสะพาน
- 4) ชิ้นส่วนที่นำออกมาทดสอบ จะต้องมียุการใช้งานรับแรงคล้ายคลึงกับชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย มากที่สุดในโครงสร้างสะพาน

ในสภาพการทำงานจริง ชิ้นส่วนที่สามารถนำออกมาจากสะพานได้นั้นอาจจะมีคุณสมบัติตามที่ กำหนดไว้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาเลือกชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย

หายมากที่สุด ในโครงสร้างสะพาน ซึ่งจะทำได้ผลการทดสอบที่เป็นตัวแทนของข้อมูลคุณสมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานได้ในระดับหนึ่ง

4.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานในห้องปฏิบัติการจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง และการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของวัสดุ โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

4.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงจะมีการทดสอบ 2 แห่งคือที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) โดยการทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จะทำการทดสอบชิ้นงานรับแรงดึงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 4-1 (ก) และทำการทดสอบตรงกลางที่กึ่งกลางทั้ง 2 ด้านของชิ้นงาน จากนั้นจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง INSTRON ในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ทำการบันทึกค่าแรงดึง ค่าการยืดตัว และค่าความเครียดที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปหาค่าคุณสมบัติต่างๆ เช่นค่าความเค้นที่จุดคราก ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น ส่วนการทดสอบที่ วท. จะทำการทดสอบชิ้นงานรับแรงดึงอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS Z 2241 จะเตรียมชิ้นงานตามรูปที่ 4-1 (ข) ซึ่งทาง วท. ได้ทำการทดสอบ และได้ให้ผลการทดสอบมาประกอบงานวิจัยในครั้งนี้

4.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้า

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงจะมีการทดสอบ 2 แห่งคือที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) โดยการทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จะทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้า โดยจะพยายามจำลองลักษณะการรับแรงให้ได้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงในโครงสร้างสะพานเท่าที่จะสามารถเตรียมชิ้นงานได้ โดยลักษณะชิ้นงานจะเป็นรอยต่อแบบหมุดย้ำแสดงในรูปที่ 4-2 (ก) จะทำการทดสอบชิ้นงานแบบหน่วยแรงกระทำซ้ำโดยเครื่อง SURVOPULSER ในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ โดยให้น้ำหนักกระทำแบบแรงดึงที่มีแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude loading) และให้มีความเค้นค้างอยู่เล็กน้อยเพื่อแทนความเค้นที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของโครงสร้างสะพานเอง จะทำการทดสอบจนครบตามจำนวนรอบที่กำหนด จากนั้นก็จะเพิ่มน้ำหนักกระทำขึ้น ทดสอบจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการวิบัติ นำค่าที่บันทึกได้จากการทดสอบไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ (กราฟ S-N) ซึ่งจะนำไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งานต่อไป ส่วนที่ วท. จะทำการทดสอบชิ้นงานที่มีลักษณะแบบชิ้นส่วนเรียบ (plain member) ดังรูปที่ 4-2 (ข) และลักษณะการทดสอบก็คล้ายกันกับการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งทาง วท. ได้ทำการทดสอบ และได้ให้ผลการทดสอบมาประกอบงานวิจัยในครั้งนี้

4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างสะพาน

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างสะพาน ในงานวิจัยนี้ได้นำชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้าง (lateral bracing) จากโครงสร้างทั้ง 3 สะพานออกมาทดสอบ โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงทั้งหมด 9 ชิ้น และทำการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าทั้งหมด 5 ชิ้น ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงที่จู่ฟ้าฯ จะมีการเตรียมชิ้นงานดังรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4 แสดงรูประหว่างการทดสอบ จะทำการทดสอบชิ้นส่วนจากสะพานกม.03 จำนวน 2 ชิ้น และการทดสอบที่ วท. จะทดสอบชิ้นส่วนจากสะพานจักรีจำนวน 3 ชิ้น สะพานกม.03 จำนวน 2 ชิ้นและสะพานกม.19 จำนวน 2 ชิ้น ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดแสดงในรูปที่ 4-5 และลักษณะของชิ้นงานที่เกิดการวิบัติแสดงในรูปที่ 4-6 ผลการทดสอบชิ้นงานสามารถสรุปได้ดังนี้

- ชิ้นส่วนจากสะพานจักรี มีค่าความเค้นที่จุดครากประมาณ 2850 ksc และค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดประมาณ 4300 ksc
- ชิ้นส่วนจากสะพาน กม.03 มีค่าความเค้นที่จุดครากประมาณ 2850 ksc และค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดประมาณ 4400 ksc
- ชิ้นส่วนจากสะพาน กม.19 มีค่าความเค้นที่จุดครากประมาณ 2800 ksc และค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดประมาณ 4350 ksc

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุด้านการรับแรงดึงของชิ้นส่วนสะพานทั้งหมดพบว่า ค่าความเค้นที่จุดครากที่ได้จากการทดสอบของชิ้นงานทั้งหมด มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 2700-3000 ksc หรือเฉลี่ยที่ประมาณ 2850 ksc และค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ก็ไม่แตกต่างกันมากนัก มีค่าอยู่ที่ประมาณ 4100-4600 ksc หรือเฉลี่ยที่ประมาณ 4400 ksc ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ตรวจวัดได้จากชิ้นส่วน กม.03 ติดเสตรนเกจทดสอบที่จู่ฟ้าฯพบว่าได้ค่าประมาณ 2.02×10^6 ksc และจากค่าอัตราการยืดตัวที่มีค่าประมาณ 40 % และจากลักษณะการวิบัติสามารถบอกได้ว่าวัสดุที่นำมาทดสอบนี้เป็นเหล็กแบบเหนียว (ductile steel) และจากค่าคุณสมบัติการรับแรงดึงที่ทดสอบได้ก็จะบอกได้ว่าเหล็กที่ใช้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กแบบ A572 Gr.42 ซึ่งเป็นเหล็กกล้ากำลังสูงโลหะผสมต่ำ (ผสมโคลัมเบียหรือวนาเดียม) ตามมาตรฐาน ASTM มีค่าความเค้นครากประมาณ 2900 ksc และค่ากำลังรับแรงดึงประมาณ 4150 ksc เหล็กชนิดนี้นิยมใช้กับงานสะพานเหล็กทั่วไป

4.4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้า

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าที่จู่ฟ้าฯ จะมีการเตรียมชิ้นงานดังรูปที่ 4-7 และรูปที่ 4-8 แสดงรูประหว่างการทดสอบ จะทำการทดสอบชิ้นส่วนจากสะพานกม.03 จำนวน 2 ชิ้น และการทดสอบที่ วท. จะทำการทดสอบชิ้นส่วนจากสะพานกม.03 จำนวน 2 ชิ้น และชิ้นส่วนจากสะพานกม.19 จำนวน 1 ชิ้น ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4-2 และลักษณะการวิบัติของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4-9 พบ

ว่าลักษณะการวิบัติของชิ้นงานจะเป็นแบบการวิบัติแบบทันทีทันใด ซึ่งแตกต่างจะการวิบัติแบบการรับแรงดึงทั่วไปคือมีการยืดตัวของชิ้นงานที่รอยขาดน้อยมาก รอยขาดมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และการวิบัติจะขาดที่ชิ้นงานตรงที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดกลางตัวหมุดยัดรูป เป็นไปตามการออกแบบให้ขาดที่ชิ้นงาน ตามขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย

สำหรับผลการทดสอบนำไปสร้างกราฟ S-N เปรียบเทียบกับกราฟที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของ AREMA 1999 แสดงในรูปที่ 4-10 พบว่าการทดสอบที่จุฬาเป็นลักษณะการทดสอบแบบรอยต่อหมุดยัด ซึ่งตรงกับ Category D ตามมาตรฐาน AREMA 1999 ได้ผลการทดสอบสูงกว่ามาตรฐาน ส่วนการทดสอบที่ วท. เป็นลักษณะการทดสอบแบบชิ้นส่วนเรียบ (plain member) ซึ่งตรงกับ Category A ตามมาตรฐาน AREMA 1999 ได้ผลการทดสอบสูงกว่ามาตรฐานทุกชิ้นส่วน ซึ่งโดยสรุปแล้วจากผลการทดสอบนี้สามารถยืนยันได้ในระดับหนึ่งว่าสามารถใช้กราฟ S-N ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน AREMA 1999 แบบ Category D มาใช้ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ได้โดยปลอดภัยของสะพานรถไฟที่มีรอยต่อแบบหมุดยัดในงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 บทนำ

การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานเป็นการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานภายใต้ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานแบบต่างๆ โดยจะทำการจำลองโครงสร้างสะพานและทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ใกล้เคียงความเป็นจริง และเมื่อได้ค่าความเค้นในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักบรรทุกทุกที่ทราบค่าซึ่งก็คือห้วงจรแล้ว ก็จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นในชิ้นส่วนที่ได้ทำการตรวจวัดโดยให้ห้วงจรเคลื่อนผ่านสะพาน จากนั้นก็จะทำการปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างสะพานในบางจุดที่สามารถปรับแก้ได้ จนได้ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดเท่าที่ทำได้ แล้วแบบจำลองโครงสร้างสะพานที่ได้นี้ก็จะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในทุกชิ้นส่วนโครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบอื่นๆได้ต่อไป

5.2 การจำลองโครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นต้นจะต้องเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติได้ และเหมาะสมกับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบสะพานที่มีน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่วิ่งผ่าน (moving load) และต้องมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือในผลการวิเคราะห์หรือเป็นสากล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม STAAD III ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานทั้งหมด

เมื่อเลือกโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างสะพานทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานขึ้นในโปรแกรม โดยมีหลักการในการสร้างแบบจำลองดังนี้

- 1) การจำลองลักษณะทางเรขาคณิตของโครงสร้างสะพาน จะอ้างอิงข้อมูลจากแบบโครงสร้างเดิมของสะพานที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งจะสามารถหาค่ามิติต่างๆของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน และสามารถคำนวณค่าคุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานคือพื้นที่หน้าตัดและโมเมนต์ความเฉื่อยได้ ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ แต่สำหรับในสะพานบางแห่งที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการใช้งาน เช่น การซ่อมแซม การเปลี่ยนชิ้นส่วนหรือการเสริมกำลังในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ในบางครั้งอาจจะต้องทำการตรวจวัดเพิ่มเติมกับตัวโครงสร้างจริง ถ้ารายละเอียดไม่ชัดเจนดังที่กล่าวมา ซึ่งในการจำลองลักษณะทางเรขาคณิตนี้ไม่สามารถทำการปรับแก้ได้ เนื่องจากสามารถหาค่าที่แน่นอนได้

2) ลักษณะชนิดของแบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะแบบจำลองชิ้นส่วนโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ทั้งหมด 2 แบบคือ ชิ้นส่วนโครงสร้างแบบโครงข้อหมุน (truss element) ซึ่งรับแรงตามแนวแกนอย่างเดียว ไม่สามารถถ่ายโมเมนต์ระหว่างจุดต่อได้ และชิ้นส่วนโครงสร้างแบบโครงข้อแข็ง (frame element) ซึ่งรับแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และสามารถถ่ายโมเมนต์ระหว่างจุดต่อได้ การกำหนดลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างสะพานนี้ จะขึ้นกับชนิดและพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ถ่ายแรงจากห้รจรจักรเข้าสู่โครงถักหลักคือ Stringer และ Floor Beam ชิ้นส่วนทั้งสองชนิดนี้จะมีการถ่ายโมเมนต์ระหว่างจุดต่อได้ เนื่องจากลักษณะของรอยต่อออกแบบมาให้สามารถรับโมเมนต์ได้ ดังนั้นจึงกำหนดลักษณะแบบจำลองชิ้นส่วนเป็นแบบโครงข้อแข็ง

- ชิ้นส่วนในโครงถักหลัก (main truss) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับแรงทั้งหมดของโครงสร้าง ซึ่งประกอบด้วย Lower Chord ,Upper Chord ,Vertical ,Diagonal ,End Post และ Bracing ชนิดต่างๆ ซึ่งการกำหนดลักษณะแบบจำลองในชิ้นส่วนในงานวิจัยนี้ จะทำการจำลองลักษณะชิ้นส่วนโครงสร้างแบบโครงข้อหมุนทั้งหมดและแบบโครงข้อแข็งทั้งหมดเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นกับผลการตรวจวัดค่าความเค้นในภาคสนาม เพราะว่าในความเป็นจริง เรายังไม่ทราบแน่ชัดได้ว่าในจุดต่อของชิ้นส่วนโครงถักหลักนั้นมีพฤติกรรมเป็นแบบใดอย่างแน่ชัด ซึ่งอาจจะสามารถถ่ายโมเมนต์ได้บ้างหรือไม่สามารถรับโมเมนต์ได้เลย จึงจำเป็นที่จะต้องทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองแบบเพื่อให้เป็นแนวทางในการนำไปออกแบบต่อไปในอนาคต แต่สำหรับการให้รอยต่อเป็นแบบถ่ายโมเมนต์ได้บางส่วน ในงานวิจัยนี้จะไม่ทำการศึกษาเพราะว่าไม่สามารถรู้แน่ชัดได้และไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน

- สภาพที่รองรับของโครงสร้างสะพานทั้งหมดในงานวิจัยนี้ มีลักษณะแบบปลายข้างหนึ่งยึดติดกับที่ (pinned support) และปลายอีกข้างหนึ่งเป็นแบบล้อเลื่อน (roller support) แต่พฤติกรรมของโครงสร้างจริง ปลายที่เป็นแบบล้อเลื่อนอาจจะไม่ได้มีสภาพเลื่อนได้อย่างอิสระจริง เนื่องจากผลของปัจจัยต่างๆ เช่น ความฝืดของล้อเลื่อน ระยะห่างที่รองรับกับฐานของที่รองรับ และผลจากปัจจัยอื่นที่ซับซ้อน ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่สามารถทำการปรับแก้พฤติกรรมที่รองรับตามความเหมาะสมได้

- ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ในการสร้างแบบจำลองนี้จะใช้ห้รจรจักรในการวิเคราะห์ ซึ่งจะมีรูปแบบลักษณะแน่นอน แต่สำหรับน้ำหนักของห้รจรจักรนั้นค่าที่นำมาใช้วิเคราะห์ยังเป็นค่าที่อาจจะเปลี่ยนแปลงได้บ้างเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งบนห้รจรจักร และน้ำหนักที่มีอยู่ระหว่างการทดสอบ ซึ่งในจุดนี้สามารถทำการปรับแก้ค่าน้ำหนักบรรทุกได้เล็กน้อยตามความเหมาะสม

- ชิ้นส่วนที่นอกเหนือจากโครงถักหลัก เช่น ไม้หมอน รางรถไฟ แผ่นเหล็กประกบ เป็นต้น ชิ้นส่วนเหล่านี้จะไม่นำมาจำลองในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีความยุ่งยากในการจำลองและไม่ค่อยสะดวกในการใช้งานจริง ทั้งขนาด รูปร่าง และพฤติกรรมในการรับแรงและส่งถ่ายแรงเข้าสู่ชิ้นส่วนอื่นๆ ซึ่งผลจากชิ้นส่วนเหล่านี้จะเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์โครงสร้าง

เมื่อทำการจำลองโครงสร้างลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แล้ว ก็ทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้น แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดโครงสร้างสะพาน และทำการปรับแก้แบบจำลองจนได้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดต่อไป

5.3 การเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดกับผลจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดกับผลจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรจรรถไฟในการเปรียบเทียบและปรับแก้แบบจำลอง รูปที่ 5-1 ถึง 5-25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะทางที่เพลารอกของห้วงจักรจรเข้ามาในสะพานที่ได้จากการตรวจวัดโครงสร้างสะพาน เปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยแบบจำลองที่ได้ทำการปรับแก้อย่างเหมาะสม ทั้งแบบจำลองของโครงถักแบบโครงข้อหมุนและแบบโครงข้อแข็งดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่แล้ว จากผลการเปรียบเทียบสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.3.1 การเปรียบเทียบรูปร่างของกราฟและค่าความแตกต่างเทียบกับผลการตรวจวัด

การเปรียบเทียบรูปร่างและความแตกต่างของค่าความเค้นจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดโครงสร้างสะพาน จะใช้ค่าทางสถิติที่เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) และค่าความแตกต่างสูงสุด (maximum different) ในการอธิบายความเหมือนกันของรูปร่างกราฟ และความแตกต่างที่มีมากที่สุดระหว่างผลการวิเคราะห์เทียบกับผลการตรวจวัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.3.1.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient)

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 ชุดว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยขนาดไหน ในทางสถิติจะใช้ค่าที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เป็นตัวบอกระดับของความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้ง 2 ชุด โดยให้ข้อมูลทั้ง 2 ชุดแทนด้วย X และ Y การวัดความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้ง 2 ชุดนี้จะพิจารณาว่าค่าของ Y ขึ้นกับค่าของ X มากขนาดไหน ค่าความสัมพันธ์นี้จะแสดงออกมาในรูปของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ค่าของ r จะหาได้จากสมการดังนี้

$$r = \frac{SS_{xy}}{\sqrt{SS_{xx} SS_{yy}}} \quad (5-1)$$

โดยที่

$$SS_{xx} = \sum_{i=1}^n X^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X)^2}{n}$$

$$SS_{yy} = \sum_{i=1}^n Y^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y)^2}{n}$$

$$SS_{xy} = \sum_{i=1}^n XY - \frac{(\sum_{i=1}^n X)(\sum_{i=1}^n Y)}{n}$$

$$X = \text{คือข้อมูลชุดที่ 1}$$

$$Y = \text{คือข้อมูลชุดที่ 2}$$

$$n = \text{จำนวนข้อมูล}$$

ค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้จะมีความหมายดังนี้

- 1) ค่า r มีค่าเป็นบวก แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือถ้าค่า X เพิ่มขึ้น ค่า Y จะเพิ่ม
- 2) ค่า r มีค่าเป็นลบ แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงข้ามกัน คือถ้าค่า X เพิ่มขึ้น ค่า Y จะลด
- 3) ถ้าค่า r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากในทิศทางเดียวกัน
- 4) ถ้าค่า r มีค่าเข้าใกล้ -1 หมายถึง X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากในทิศทางตรงข้ามกัน
- 5) ถ้าค่า r = 0 หมายถึง X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
- 6) ถ้าค่า r เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความคล้ายกันของรูปร่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน จากผลการตรวจวัดในสนามกับผลการวิเคราะห์โดยไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถประยุกต์จากหลักการของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้ โดยถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าผลการตรวจวัดในสนามกับผลการวิเคราะห์โดยไฟไนท์เอลิเมนต์มีความสัมพันธ์กันมาก นั่นคือรูปร่างกราฟทั้ง 2 ข้อมูลมีความคล้ายกันมากนั่นเอง

5.3.1.2 ค่าความแตกต่างสูงสุด (Maximum Different)

ค่าความแตกต่างสูงสุดเป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความแตกต่างสูงสุดระหว่างข้อมูล 2 ชุดเทียบกับค่าช่วงความเค้นของข้อมูลชุดที่ใช้อ้างอิง กล่าวคือ ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลชุดที่อ้างอิงเป็นค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม และจะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยไฟไนท์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบ รูปที่ 5-26 แสดงความหมายของค่าความแตกต่างสูงสุด โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{MaxDiff}(\%) = \frac{\text{Max Diff Stress between Measurement and Analysis} \times 100}{\text{Stress Range from Measurement}} \quad (5-2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่างค่าความเค้นจากผลการตรวจวัดและผลการวิเคราะห์ จะเป็นตัวบอกถึงความคล้ายกันของรูปร่างกราฟและค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด

5.3.2 การปรับแก้แบบจำลองโครงสร้างสะพาน

การปรับแก้แบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานในงานวิจัยนี้ จะทำการปรับแก้แบบจำลองให้ได้ผลการวิเคราะห์เข้าหาผลจากการตรวจวัด โดยถือว่าผลจากการตรวจวัดในภาคสนามเป็นผลที่ได้จากพฤติกรรมของโครงสร้างจริงระหว่างการรับน้ำหนักบรรทุกทุกในโครงสร้างสะพาน ดังนั้นจะต้องทำการสร้างแบบจำลองที่มีพฤติกรรมให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักจริง ซึ่งอาจจะต้องทำการปรับแก้แบบจำลองในบางจุดเพื่อที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดเท่าที่สามารถทำได้ โดยการปรับแก้แบบจำลองจะพิจารณาทำการปรับแก้ได้ใน 3 ลักษณะดังนี้

5.3.2.1 การปรับแก้น้ำหนักบรรทุกของห้วงจักร

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานรถไฟนี้ น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีผลอย่างมากต่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน เพราะว่าค่าความเค้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ซึ่งในการทดสอบโครงสร้างสะพานนี้จะใช้ห้วงจักรรถไฟในการทดสอบ เพราะลักษณะของห้วงจักรทั้งในเรื่องของขนาดและระยะต่างๆมีค่าที่แน่นอน สามารถหาได้จากแบบที่กำหนดมาเฉพาะจากบริษัทผู้ผลิต แต่ในส่วนของน้ำหนักของห้วงจักรจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย เนื่องจากค่าที่ใช้เป็นค่าที่ประมาณจากแบบที่กำหนดซึ่งไม่ได้ทำการชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ ซึ่งน้ำหนักในส่วนที่ไม่แน่นอนนี้จะมาจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนห้วงจักรและปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในห้วงจักร ในแบบที่กำหนดให้จากบริษัทผู้ผลิตจะให้น้ำหนักมากที่สุด ซึ่งจะยังมีความคลาดเคลื่อนในส่วนของปริมาณน้ำมันในห้วงจักรและน้ำหนักของอุปกรณ์ในห้วงจักรนั่นเอง (รูปที่ 3-14 แสดงแบบลักษณะของห้วงจักรที่ใช้ในการทดสอบ) ดังนั้นจึงสามารถปรับแก้ค่าน้ำหนักบรรทุกของห้วงจักรในการวิเคราะห์หลังได้เล็กน้อยตามความเหมาะสม โดยพบว่ามีการวิเคราะห์สะพานกม.03 ที่ต้องปรับแก้ลดน้ำหนักบรรทุกลงเพลาละ 1 ตัน หรือลดลง 6.7 % จากน้ำหนักเพลาประมาณ 15 ตัน ทั้งนี้จะพิจารณาจากค่าความเค้นใน Stringer เป็นหลัก เพราะเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงโดยตรงจากห้วงจักรเป็นลำดับแรก ดังนั้นจึงต้องปรับแก้ให้ได้ค่าความเค้นที่ใกล้เคียงก่อน แล้วจึงไปทำการปรับแก้ในชิ้นส่วนอื่นต่อไป

5.3.2.2 การปรับแก้สภาพที่รองรับ

สำหรับการจำลองสภาพที่รองรับในแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์นั้น โดยปกติจะจำลองตามแบบโครงสร้างของสะพาน คือที่ปลายข้างหนึ่งเป็นแบบยึดติดกับที่ (pinned support) และปลายอีกข้างหนึ่งจะเป็นแบบล้อเลื่อน (roller support) แต่ในพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานจริง ปลายที่เป็นแบบล้อเลื่อนอาจจะไม่ได้มีสภาพเลื่อนได้อย่างอิสระจริง เนื่องจากจากล้อเลื่อนมีความฝืดเกิดขึ้น หรือล้อเลื่อนอาจจะไปชนกับฐานที่รองรับ โดยพฤติกรรมนี้จะสามารถสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบโครงสร้างสะพาน ดังเช่นในสะพานจักรี ในการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า ค่าความเค้นใน Upper Chord มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด

แต่ใน Lower Chord พบว่าค่าความเค้นยังสูงกว่าผลการตรวจวัดอยู่มาก ดังรูปที่ 5-27 ดังนั้นจึงลองใส่ค่าคงที่ของสปริง K (kg/m) ที่ปลายล้อเลื่อนให้มีลักษณะด้านการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5-28 พบว่าสปริงที่ใส่เข้าไปจะไปลดความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน Lower Chord อย่างเดียว ไม่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนอื่น ซึ่งจะสามารถปรับแก้จนได้ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นใน Lower Chord ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดได้ระดับหนึ่ง ดังรูปที่ 5-27 เปรียบเทียบค่าความเค้นใน Lower Chord แบบที่ใส่สปริงและไม่ใส่สปริงที่ปลายล้อเลื่อน โดยในการวิเคราะห์สะพานจักรี้จะใช้ค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ 45000 kg/cm สะพาน กม.03 ใช้ค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ 50000 kg/cm และสะพาน กม.19 ใช้ที่รองรับแบบล้อเลื่อนปกติ ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์เทียบกับผลการตรวจวัดมีความใกล้เคียงยิ่งขึ้นในระดับหนึ่ง

5.3.2.3 การจำลองโครงสร้างแบบโครงข้อหมุนและแบบโครงข้อแข็ง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแบบโครงถักนี้ พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานเป็นสิ่งที่สำคัญในการจำลองโครงสร้างสะพาน เพราะว่าถ้าให้พฤติกรรมโครงสร้างของชิ้นส่วนในโครงสร้างผิดพลาดไปอาจจะทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปได้ โดยปกติการออกแบบโครงสร้างสะพานแบบโครงถักจะให้พฤติกรรมของโครงสร้างเป็นแบบโครงข้อหมุน ซึ่งไม่สามารถถ่ายโมเมนต์ระหว่างจุดต่อได้ แต่สำหรับพฤติกรรมจริงนั้นที่จุดต่ออาจจะมีการถ่ายโมเมนต์ได้บ้างขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยต่อ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยการจำลองโครงสร้างสะพานเป็นแบบโครงข้อหมุน และเป็นแบบโครงข้อแข็งเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัด เพื่อที่จะได้ทราบถึงพฤติกรรมโครงสร้างสะพานจริง และจะได้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคต แต่จะไม่ศึกษาถึงพฤติกรรมที่อยู่ระหว่างการถ่ายโมเมนต์ได้และถ่ายโมเมนต์ไม่ได้หรือเรียกว่าถ่ายโมเมนต์ได้บางส่วน เนื่องจากพฤติกรรมนี้ไม่สามารถทราบได้อย่างแน่ชัดว่ามีค่าเป็นอย่างไร และข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดก็ไม่เพียงพอที่จะศึกษาในประเด็นนี้ด้วย รูปที่ 5-29 แสดงลักษณะแรงภายในที่เกิดขึ้นของโครงสร้างสะพานแบบโครงข้อหมุน และแบบโครงข้อแข็ง ยกตัวอย่างชิ้นส่วน Lower Chord ที่ติดสเตรนเกจที่ผิวล่างของชิ้นส่วน

ค่าความเค้น (σ) ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน Lower Chord แบบโครงข้อหมุนจะเท่ากับ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5-3)$$

ค่าความเค้น (σ) ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน Lower Chord แบบโครงข้อแข็งจะเท่ากับ

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (5-4)$$

โดยที่	P	=	แรงภายในตามแนวแกนของชิ้นส่วน
	M	=	โมเมนต์ภายในของชิ้นส่วน
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน
	c	=	ระยะทางจากแกนสะเทินถึงจุดที่ติดสเตรนเกจ

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดในแกนที่รับโมเมนต์

ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ จะมีค่าที่แตกต่างกันระหว่างแบบจำลองทั้งสอง ขึ้นอยู่กับแรงที่เข้าตามแนวแกน โมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้น และค่าคุณสมบัติของหน้าตัดในชิ้นส่วนที่ทำการวิเคราะห์

5.3.3 การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าความเค้นจากการตรวจวัดและการวิเคราะห์

เมื่อทำการปรับแก้แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นจากการตรวจวัด ถ้าผลการวิเคราะห์ยังไม่ใกล้เคียงกับการตรวจวัดก็จะทำการปรับแก้ต่อ จนผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับการตรวจวัดระดับหนึ่งเท่าที่สามารถจะปรับแก้ได้ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบค่าความเค้นนี้จะสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.3.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความแตกต่างสูงสุด

ในการเปรียบเทียบผลค่าความเค้นจากการวิเคราะห์กับผลจากการตรวจวัดนั้น รูปร่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลลาแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานจะมีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นตัวบอกถึงความถูกต้องของพฤติกรรมในแบบจำลองที่นำมาใช้วิเคราะห์โครงสร้างสะพาน ถ้าพฤติกรรมในแบบจำลองถูกต้องก็จะทำให้ได้รูปร่างของกราฟที่มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันกับผลจากการตรวจวัด แต่ในทางกลับกัน ถ้าผลการวิเคราะห์ได้รูปร่างของกราฟที่แตกต่างกับผลจากการตรวจวัดมาก ก็อาจจะบอกได้ว่าพฤติกรรมของโครงสร้างในการวิเคราะห์มีความผิดพลาดอยู่ และอีกค่าหนึ่งที่สำคัญรองลงมาก็คือค่าความแตกต่างของค่าความเค้นจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัด ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ว่ามีมากแค่ไหนเทียบกับผลจากการตรวจวัด ถ้าค่าความแตกต่างมีมากก็อาจจะบอกได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ อาจจะต้องทำการปรับแก้ต่อถ้าผลในชิ้นส่วนที่ทำการวิเคราะห์ยังแตกต่างกันมากอยู่ ในงานวิจัยนี้ ค่าที่ใช้เปรียบเทียบความเหมือนของรูปร่างกราฟก็คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และค่าที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างก็คือค่าความแตกต่างสูงสุด ซึ่งได้อธิบายความหมายค่าทั้งสองในหัวข้อที่ 5.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความแตกต่างสูงสุดของทั้ง 3 สะพานแสดงในตารางที่ 5-1 จากผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ในสะพานจักรีพบว่าผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก โดยมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.97 ซึ่งบอกได้ว่ารูปร่างของกราฟจากการวิเคราะห์มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันกับผลจากการตรวจวัด หรือก็คือว่าพฤติกรรมของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของการตรวจวัด ส่วนค่าความแตกต่างสูงสุดที่วิเคราะห์ได้พบว่าส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 20 % โดยจะมีชิ้นส่วน 2233 เป็นชิ้นส่วน Vertical ที่มีค่าความแตกต่างอยู่มาก ก็เป็นเพราะเครื่องมือที่ทำการตรวจวัดมีปัญหา ดูได้จากรูปที่ 5-3 ที่ตำแหน่งปลายของกราฟมีลักษณะที่ยุ่งเหยิง และค่าความเค้นไม่กลับไปศูนย์ เป็นสิ่งที่น่าจะเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือ ส่วนชิ้นส่วนอื่นที่มีค่าความแตกต่างสูงก็คือ Stringer และ Floor Beam น่าจะเกิดจาก

ความคลาดเคลื่อนอื่นๆ เช่นการไม่ได้รวมผลจากชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นที่นอกเหนือจากโครงสร้างหลัก หรือพฤติกรรมกรรมการถ่ายโมเมนต์ได้แค่บางส่วน ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความผิดพลาดอยู่ในระดับหนึ่ง

2) ในสะพานกม.03 พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก โดยมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.97 ซึ่งบอกได้ว่ารูปร่างของกราฟจากการวิเคราะห์มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันกับผลจากการตรวจวัด หรือก็คือว่าพฤติกรรมของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของการตรวจวัด ส่วนค่าความแตกต่างสูงสุดที่วิเคราะห์ได้พบว่าส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 20 % แต่จะมีชิ้นส่วน 12514 เป็นชิ้นส่วน Floor Beam ที่มีค่าความแตกต่างอยู่มาก น่าจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนอื่นๆ เช่นการไม่ได้รวมผลจากชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นที่นอกเหนือจากโครงสร้างหลัก หรือพฤติกรรมกรรมการถ่ายโมเมนต์ได้แค่บางส่วนทำให้ผลการวิเคราะห์มีความผิดพลาดอยู่บ้าง และในชิ้นส่วนหลักอื่นๆมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่มากนักก็อาจบอกได้ว่าแบบจำลองในการวิเคราะห์นี้ถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ

3) ในสะพานกม.19 พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก โดยมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.96 ซึ่งบอกได้ว่ารูปร่างของกราฟจากการวิเคราะห์มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันกับผลจากการตรวจวัด หรือก็คือว่าพฤติกรรมของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของการตรวจวัด ส่วนค่าความแตกต่างสูงสุดที่วิเคราะห์ได้พบว่าส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 20 % แต่จะมีชิ้นส่วน 22309 เป็นชิ้นส่วน Stringer ที่มีค่าความแตกต่างอยู่มาก น่าจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนอื่นๆ เช่นการไม่ได้รวมผลจากชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นที่นอกเหนือจากโครงสร้างหลัก หรือพฤติกรรมกรรมการถ่ายโมเมนต์ได้บางส่วนทำให้ผลการวิเคราะห์มีความผิดพลาดอยู่บ้าง และในชิ้นส่วนหลักอื่นๆมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่มากนักก็อาจบอกได้ว่าแบบจำลองในการวิเคราะห์นี้ถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ

โดยสรุปทั้ง 3 สะพานพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าที่เข้าใกล้ 1 มาก ในทุกสะพาน ซึ่งก็บอกได้ว่าแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง และค่าความแตกต่างสูงสุดส่วนใหญ่ก็ไม่เกิน 20 % จะมีชิ้นส่วนที่แตกต่างอยู่มากก็คือ Stringer และ Floor Beam ซึ่งทั้ง 2 ชิ้นส่วนนี้ในแบบจำลองไม่ได้รวมผลของชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นที่นอกเหนือจากโครงสร้างหลัก เช่นรางรถไฟ ไม้หมอน และพฤติกรรมกรรมการถ่ายโมเมนต์ได้แค่บางส่วน ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้

5.3.3.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองแบบโครงข้อหมุนและโครงข้อแข็ง

สำหรับผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข้อหมุนและแบบจำลองโครงข้อแข็ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองทั้งสอง เปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีค่าเข้าใกล้ 1 เช่นเดียวกัน และค่าความแตกต่างสูงสุดที่เกิดขึ้นก็มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักในชิ้นส่วนหลัก ยกเว้นแต่ชิ้นส่วน Stringer และ Floor Beam อาจแตกต่างกันได้ถึงกว่า 10 % เพราะว่ามีกรรมการถ่ายโมเมนต์เกิดขึ้น และถ้าโครงสร้างหลักเป็นแบบโครงข้อแข็งสามารถรับโมเมนต์ได้ ก็จะทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่เป็นแบบโครงข้อหมุนที่ไม่สามารถรับโมเมนต์ได้ สำหรับในชิ้นส่วนหลักพบว่าส่วนใหญ่มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก (ไม่เกิน 10 %) จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองนี้จะบอกได้ว่า ในสะพานทั้ง 3 สะพานที่ทำการศึกษานี้ การใช้แบบจำลองแบบโครงข้อหมุนและแบบโครงข้อแข็งในชิ้นส่วนโครงสร้างหลักให้ผลการวิเคราะห์โครง

สร้างไม่แตกต่างกันมากนัก เป็นเพราะว่าผลของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นส่วนโครงสร้างหลักนั้นมีค่าไม่มากนัก เป็นผลเนื่องจากลักษณะรูปแบบของสะพานที่ทำให้เกิดโมเมนต์ในชั้นส่วนน้อย หรือค่าคุณสมบัติของหน้าตัดคือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสูง ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดจากผลของโมเมนต์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความเค้นจากแรงตามแนวแกน และจากการติดสเตรนเกจในตำแหน่งที่ใกล้กับแกนสะเทินของหน้าตัดในหลายๆชั้นส่วน ทำให้ไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้พอจะสรุปได้ว่า ทั้ง 3 สะพานที่ทำการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทั้งสองแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในแบบจำลองแบบโครงข้อแข็ง Floor Beam และ Stringer จะมีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากกว่า เพราะพฤติกรรมของโครงสร้างจริงจะมีการถ่ายโมเมนต์ระหว่างจุดต่อได้บ้าง ทำให้ค่าความเค้นใน Floor Beam และ Stringer มีความใกล้เคียงผลการตรวจวัดมากกว่าแบบจำลองแบบโครงข้อหมุน ส่วนในแบบจำลองแบบโครงข้อหมุน ชั้นส่วนในโครงสร้างหลักส่วนใหญ่จะมีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากกว่า เพราะพฤติกรรมของโครงสร้างหลักอาจจะสามารถถ่ายโมเมนต์ระหว่างจุดต่อได้น้อย หรือลักษณะของสะพานทำให้โมเมนต์เข้ามาในชั้นส่วนน้อย ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถอธิบายได้อย่างละเอียดมากนัก เพราะข้อมูลที่มีอยู่ไม่เพียงพอ และพฤติกรรมโครงสร้างยังมีความซับซ้อนมาก แต่ที่พอสรุปได้ก็คือ แบบจำลองทั้งสองแบบไม่มีความแตกต่างกันมากในการใช้วิเคราะห์โครงสร้างสะพานทั้ง 3 สะพานในงานวิจัยนี้ และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทั้งสองแบบก็ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมาก

5.3.3.3 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดนั้น ก็ยังไม่สามารถทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่เหมือนกับผลจากการตรวจวัดจริงได้ทุกประการ เนื่องจากพฤติกรรมโครงสร้างสะพานจริงนั้น มีความซับซ้อนอยู่อย่างมาก และในบางจุดก็ไม่สามารถนำมาจำลองหรือใส่ค่าที่ถูกต้องลงในแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้มีผลต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่พบในงานวิจัยดังนี้

ก) พฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน

ในการจำลองพฤติกรรมโครงสร้างสะพานแบบโครงถักนั้น ยังไม่สามารถจำลองพฤติกรรมที่แน่นอนของโครงสร้างสะพานได้ เนื่องจากพฤติกรรมของชั้นส่วนโครงสร้างมีความซับซ้อนอยู่มากในเรื่องของการถ่ายแรงและโมเมนต์เข้าสู่ชั้นส่วนต่างๆ เพราะว่าพฤติกรรมการถ่ายแรงและโมเมนต์จะต้องผ่านรอยต่อ แต่โครงสร้างสะพานแบบโครงถักที่มีรอยต่อแบบหมุดย้านี้ ในการออกแบบจะให้พฤติกรรมของโครงถักเป็นแบบโครงข้อหมุน แต่ในความเป็นจริง พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานอาจจะถ่ายโมเมนต์ได้หรือถ่ายได้บางส่วนระหว่างจุดต่อ ซึ่งไม่สามารถรู้ได้อย่างชัดเจน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่างเช่น ลักษณะของรอยต่อ ความหยาบของตัวหมุดย้าเนื่องจากการใช้งานมายาวนาน สิ่งเหล่านี้ไม่สามารถจำลองได้อย่างถูกต้องในแบบจำลอง ทำให้มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์โครงสร้างได้

ข) ความไม่แน่นอนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในการวิเคราะห์

ในการจำลองรูปแบบน้ำหนักบรรทุกหรือห้วงจักรที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานนั้น อย่างที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้วว่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เพราะไม่ได้ทำการชั่งน้ำหนักจริง ก่อนทำการทดสอบสะพาน และส่วนที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกก็คือ การกระจายของน้ำหนักลงในแต่ละเพลลา ซึ่งในแต่ละเพลลาของรถไฟอาจจะไม่ได้รับน้ำหนักที่เท่ากันทุกเพลลา เนื่องมาจากน้ำหนักของอุปกรณ์และตัวห้วงจักร ซึ่งในส่วนนี้อาจจะเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้บ้าง และยากที่จะทราบค่าที่แน่นอนได้

ค) พฤติกรรมของที่รองรับสะพาน

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ สภาพที่รองรับสะพานมีผลต่อการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างมาก และไม่สามารถที่จะสร้างแบบจำลองที่ถูกต้องได้แน่นอน เพราะพฤติกรรมของที่รองรับมีความซับซ้อนอย่างมาก เช่น สภาพที่รองรับอาจจะไม่สามารถเลื่อนได้แบบอิสระตามที่ออกแบบไว้เนื่องจากมีเศษหิน เศษดิน หรือสนิมเหล็กเข้าไปขวางไว้ หรือระยะระหว่างที่รองรับกับฐานที่วางของที่รองรับมีน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในเวลากลางวันหรือห้วงจักรวิ่งผ่านอาจทำให้สะพานยึดตัวไปชนกับฐานที่รองรับได้ หรืออาจจะมีผลจากแรงเสียดทานในที่รองรับที่เกิดขึ้นจากการที่ห้วงจักรวิ่งผ่าน น้ำหนักของห้วงจักรที่หนักมากทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับมากจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากตาม ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นพฤติกรรมที่ซับซ้อนมาก ไม่สามารถนำมาสร้างแบบจำลองได้อย่างถูกต้อง แต่สามารถทำการปรับแก้ได้ระดับหนึ่ง จึงถือเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

ง) ความไม่สมบูรณ์ตามแบบของโครงสร้างสะพาน

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน การจำลองโครงสร้างสะพานจะนำข้อมูลมาจากแบบก่อสร้างของสะพาน ซึ่งมีความถูกต้องอยู่ระดับหนึ่ง แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างสะพานจริงนั้นอาจจะไม่ได้มีมิติที่ตรงตามแบบอย่างสมบูรณ์ อาจจะมีการผิดพลาดในเรื่องขนาดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบเป็นโครงสร้าง หรือการไม่ได้ระดับของโครงสร้างสะพานเช่นมีความเอียงไปด้านใดด้านหนึ่งเล็กน้อย หรือการโก่งตัวที่เกิดขึ้นอย่างถาวรเนื่องจากการใช้งานมายาวนานของโครงสร้าง สิ่งเหล่านี้เป็นผลทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในการวิเคราะห์โครงสร้าง ยกตัวอย่างได้จากชิ้นส่วนสะพาน กม.19 ชิ้นส่วน Lower Chord 22109 และ 22209 ชิ้นส่วนทั้ง 2 นี้จะมีคุณสมบัติและวางไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันแต่คนละด้านของโครงสร้าง ซึ่งในผลการวิเคราะห์โครงสร้างจะได้ค่าความเค้นที่เท่ากัน แต่จากผลการตรวจวัดพบว่า ค่าความเค้นที่ได้มีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 5-30 มีค่าแตกต่างกันมากที่สุดประมาณ 3 % ซึ่งข้อมูลนี้เป็นสิ่งที่ยืนยันได้ว่ามีความไม่สมบูรณ์ตามแบบของโครงสร้างอยู่ และอาจจะเป็นผลเนื่องจากการบิดในโครงสร้างสะพานรวมอยู่ด้วย สิ่งนี้ก็คือเป็นความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่มีอยู่ตามปกติของการวิเคราะห์โครงสร้างเปรียบเทียบกับพฤติกรรมจริง

จ) ชิ้นส่วนที่นอกเหนือจากชิ้นส่วนหลักของโครงสร้าง

ในโครงสร้างสะพานรถไฟที่ทำการศึกษานี้ มีชิ้นส่วนอีกมากที่ไม่ได้จำลองลงในโครงสร้างสะพานเช่น รางรถไฟ ไม้หมอนรับรางรถไฟ เหล็กยึดระหว่างชิ้นส่วนแบบประกอบ (built-up member) แผ่นเหล็กประกบรอยต่อ เหล็กเสริมข้างคาน (stiffener) และอื่นๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่สามารถสร้างลงในแบบจำลองได้ เนื่องจากเป็นจุดย่อยที่ละเอียด และไม่ทราบพฤติกรรมที่กระทำต่อโครงสร้างได้อย่างแน่นอน ทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าในชิ้นส่วนโครงสร้างหลักนั้น พวกเหล็กประกบหรือเหล็กยึดระหว่างชิ้นส่วนประกอบไม่ค่อยมีผลมากนัก แต่ในส่วนของรางรถไฟและไม้หมอนใน Stringer กับ Floor Beam อาจจะมีผลอยู่บ้าง เพราะในชิ้นส่วนรางรถไฟและไม้หมอนอาจจะช่วยรับแรงที่ถ่ายเข้ามาในชิ้นส่วนเหล่านี้ได้บ้าง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ก็แสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นจากการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งเป็นเพราะในการวิเคราะห์ไม่ได้คิดผลของชิ้นส่วนเหล่านี้ ทำให้ชิ้นส่วนมีสติเฟนสน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ผลค่าความเค้นที่ได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงได้

ฉ) ความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์การตรวจวัด

การตรวจวัดผลการทดสอบภาคสนามนั้น จะทำการตรวจวัดค่าความเครียดโดยใช้สเตรนเกจติดที่ชิ้นส่วน และจากค่าความเครียดก็จะแปลงมาเป็นค่าความเค้นมาใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป จากขั้นตอนเหล่านี้ พบว่าผลจากการคลาดเคลื่อนในอุปกรณ์ อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่นการติดสเตรนเกจ ในบางจุดสเตรนเกจอาจมีปัญหาได้ดังเช่นชิ้นส่วน 2233 ในสะพานจักรี หรือตำแหน่งการติดอาจจะไม่ตรงตามที่กำหนดเช่นติดไม่ตรงกลางชิ้นส่วนหรือติดเอียง ทำให้มีผลจากแรงในแนวอื่นเข้ามาในการตรวจวัดชิ้นส่วนนั้นได้ และส่วนของผลจากความต้านทานและการสูญเสียในสายไฟจากสเตรนเกจทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าผิดพลาด และสัญญาณรบกวน (noise) ที่เกิดขึ้น แม้จะทำการกรองในขั้นตอนแปลผลข้อมูลแล้วก็ยังมีส่วนให้คลาดเคลื่อนอยู่บ้าง สิ่งเหล่านี้มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัด ทำให้ค่าที่ตรวจวัดได้มีค่าแตกต่างจากค่าที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสิ่งเหล่านี้ถ้าควบคุมให้ดีจะลดค่าความคลาดเคลื่อนลงได้ระดับหนึ่ง

ช) ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดสอบสะพาน

ในการทดสอบโครงสร้างสะพานจากห้วยจรจักร จะใช้ค่าความเค้นที่ได้จากห้วยจรจักรที่วิ่งด้วยความเร็วเข้าประมาณ 5 กม.ต่อชั่วโมงมาใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลอง ซึ่งขณะที่รถไฟวิ่งผ่านอาจจะมีผลกระทบเกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานได้ และบางครั้งอาจจะวิ่งด้วยความเร็วที่แตกต่างกันทำให้เกิดผลแรกกระทบที่แตกต่างกัน ทำให้ผลการตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ยกตัวอย่างเช่นรูปที่ 5-31 เป็นผลการตรวจวัดของชิ้นส่วน Lower Chord 22209 ในโครงสร้างสะพานกม.19 ที่วิ่งด้วยความเร็วเท่ากัน 2 เทียวไปกลับ พบว่ายังมีความแตกต่างกันอยู่บ้างประมาณ 3 % ซึ่งก็เป็นผลมาจากที่กล่าวมาข้างต้น เป็นความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่เกิดขึ้นปกติจากการตรวจวัด

บทที่ 6

การวิเคราะห์ทางด้านความล้าของสะพานรถไฟ

6.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานรถไฟโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทที่ 5 ได้กล่าวถึงวิธีการจำลองโครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างละเอียด เมื่อทำการจำลองโครงสร้างสะพานรถไฟจนได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างแล้ว ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นโดยใช้น้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำหนักบรรทุกแบบห้วงจักร น้ำหนักบรรทุกแบบ U20 และน้ำหนักบรรทุกคงที่มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน ซึ่งจะหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในส่วนโครงสร้างสะพานได้ และจะทำการประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานของสะพาน และทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟเนื่องจากการใช้งานแบบปกติ และน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 การวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากน้ำหนักรถไฟจะอ้างอิงตามมาตรฐาน AREMA 1999 ในข้อกำหนดเรื่องแรงกระแทก (impact load) ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างสะพาน ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยน้ำหนักแบบห้วงจักรไม่คิดแรงกระแทกเพิ่ม แต่จะนำไปปรับค่ากับผลการตรวจวัดการใช้งานของสะพานซึ่งรวมผลจากแรงกระแทกที่เกิดขึ้นแล้ว แต่สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยน้ำหนักแบบ U20 จะต้องคิดถึงผลจากแรงกระแทกมารวมในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งจากมาตรฐาน AREMA 1999 ได้กำหนดวิธีการคิดผลจากแรงกระแทกจากน้ำหนักบรรทุกจรของขบวนรถไฟที่มีห้วงจักรแบบดีเซลดังนี้

$$IL = RE + 40 - \frac{3L^2}{1600} \quad \text{เมื่อ } L \text{ น้อยกว่า } 80 \text{ ฟุต} \quad (6-1)$$

$$IL = RE + 16 + \frac{600}{L - 30} \quad \text{เมื่อ } L \text{ มากกว่า } 80 \text{ ฟุต} \quad (6-2)$$

โดยที่

$$IL = \text{แรงกระแทกที่คิดเพิ่มค่าขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกจร (\%)}$$

$$RE = \text{ผลกระทบจากการสะเทือน (Rocking Effect) คิด 10\% สำหรับน้ำหนักเพลา หรือ 20\% สำหรับน้ำหนักล้อ ซึ่งจะกระทำลงในรางด้านหนึ่ง และกระทำขึ้นในรางอีกด้านหนึ่ง}$$

$$L = \text{ความยาวช่วงของสะพาน หน่วย ฟุต}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า IL ของสะพานจักรซึ่งยาว 54 เมตร

$$L = 54 \times 100 / 30 = 180 \text{ ฟุต}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (6-2)} \quad \text{IL} &= \text{RE} + 16 + \frac{600}{\text{L} - 30} \\
 &= 20 + 16 + \frac{600}{180 - 30} \\
 &= 40 \quad \% \quad \text{ที่รางด้านหนึ่ง} \\
 \text{และ} \quad \text{IL} &= \text{RE} + 16 + \frac{600}{\text{L} - 30} \\
 &= -20 + 16 + \frac{600}{180 - 30} \\
 &= 0 \quad \% \quad \text{ที่รางอีกด้านหนึ่ง}
 \end{aligned}$$

ค่า IL ของสะพานจักรี สะพานกม.03 และสะพานกม.19 มีค่า (40%,0%) (40.4%,0.4%) และ (39%,-1%) ตามลำดับ เมื่อหาค่า IL ได้แล้วก็จะนำไปเพิ่มค่าให้กับน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 เมื่อได้ค่าน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ที่ทำการเพิ่มค่าแรงกระทำแล้ว จะนำไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จากแบบจำลองที่ใกล้เคียงพฤติกรรมจริงของโครงสร้างสะพานก็จะสามารถหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้

ผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบห้วงจักรและน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 และค่าความเค้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ในชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของทั้ง 3 สะพาน แสดงในตารางภาคผนวก ค และนำมาสรุปในรูปที่ 6-1 ถึง 6-6

6.2 การประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพาน

ในการประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานของสะพานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ ทั้งการใช้งานปกติ และแบบ U20 จะทำการหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ มารวมกับค่าความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่จากการวิเคราะห์โครงสร้าง แล้วนำค่าความเค้นที่ได้มาหาอัตราส่วนกับหน่วยแรงที่ยอมให้ (allowable stress) ซึ่งจะเรียกอัตราส่วนที่คำนวณได้นี้ว่า ดัชนีความปลอดภัย (safety index) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{SI} = \frac{\text{Stress from Service Load}}{\text{Allowable Stress}} \quad (6-3)$$

ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติจะสามารถหาได้จากผลการตรวจวัดค่าความเครียดในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ส่วนค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 จะต้องคิดถึงผลจากแรงกระทำตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1

สำหรับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานจะคำนวณตามข้อกำหนดมาตรฐาน AREMA 1999 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) หน่วยแรงดึงตามแนวแกนที่ยอมให้

$$F_a = 0.55F_y \quad (6-4)$$

โดยใช้พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (net cross sectional area) ในการคำนวณ

- 2) หน่วยแรงอัดตามแนวแกน ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ดังนี้

$$\begin{aligned} &\text{เมื่อ} \quad \frac{kL}{r} \leq \frac{898}{\sqrt{F_y}} \\ &\text{จะได้} \quad F_a = 0.55F_y \quad (6-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{เมื่อ} \quad \frac{898}{\sqrt{F_y}} \leq \frac{kL}{r} \leq \frac{7189}{\sqrt{F_y}} \\ &\text{จะได้} \quad F_a = 0.6F_y - \left(\frac{F_y}{686} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{kL}{r} \quad (6-6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{เมื่อ} \quad \frac{7189}{\sqrt{F_y}} \geq \frac{kL}{r} \\ &\text{จะได้} \quad F_a = \frac{10338042}{(kL/r)^2} \quad (6-7) \end{aligned}$$

โดยใช้พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (gross cross sectional area) ในการคำนวณ

3) หน่วยแรงอัดเนื่องจากแรงดัด ขึ้นอยู่กับชิ้นส่วนที่ใช้ ดังนี้

- เมื่อเป็น Welded Built-up หรือ Rolled Beam และ Channel ให้ใช้ค่ามากที่สุดของ

$$F_a = 0.55F_y - \frac{0.55F_y^2}{126588275} \left(\frac{L}{r_y} \right)^2 \quad (6-8)$$

และ

$$F_a = \frac{738431}{Ld/A_f} \quad (6-9)$$

- เมื่อเป็น Riveted หรือ Bolted Built-up ให้ใช้

$$F_a = 0.55F_y - \frac{0.55F_y^2}{126588275} \left(\frac{L}{r_y} \right)^2 \quad (6-10)$$

โดยที่ กำหนดให้

F_y	=	หน่วยแรงคราก (yield stress) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
L	=	ความยาวของชิ้นส่วนระหว่างที่รองรับด้านข้างของปีกรับแรงอัด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
r	=	เป็นรัศมีไจเรชั่น (radius of gyration) ที่น้อยสุด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
r_y	=	เป็นรัศมีไจเรชั่น (radius of gyration) ที่น้อยที่สุดของปีกรับแรงอัดและส่วนของแผ่นเอวที่รับแรงอัดรอบแนวแกนของแผ่นเอวมี่หน่วยเป็นเซนติเมตร
k	=	0.75 สำหรับชิ้นส่วนซึ่งใช้การต่อยึดด้วยหมุดย้ำ (rivets), สลักเกลียว (bolts) หรือการเชื่อม โดยที่ kL/r ไม่ควรเกิน 200 สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดตามแนวแกน
A_f	=	พื้นที่หน้าตัดของปีกคานรับแรงอัด มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
d	=	ความสูงของแผ่นเอว มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

สำหรับหน่วยแรงครากนั้นจะได้มาจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 และในการคำนวณหาดัชนีความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานเหล็ก ได้มีข้อกำหนดคือจะต้องไม่เกิน 1.0 ถ้าเกิน 1.0 จะถือว่าโครงสร้างไม่มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน ผลการคำนวณค่าดัชนีความปลอดภัยในชิ้นส่วนหลักของทั้ง 3 สะพาน แสดงไว้ในตารางที่ 6-1 ถึง 6-3 พบว่าในสภาพการใช้งานปกติ โครงสร้างสะพานทั้งสามยังมีความปลอดภัยในการใช้งาน แต่สำหรับการใช้งานโดยน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 พบว่าโครงสร้างสะพานทั้งสามไม่มีความปลอดภัยในการใช้งาน

6.3 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟ

การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟ จะทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่จากการใช้งานปกติและจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 ซึ่งจะใช้ค่าช่วงความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดและจากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน และผลจากการทดสอบวัสดุทางด้านความล้า ซึ่งจากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในบทที่ 4 พบว่า กำลังทางด้านความล้าของวัสดุที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่ากำลังทางด้านความล้าที่กำหนดในมาตรฐาน AREMA 1999 ลักษณะรอยต่อแบบหมุดย้ำ (Category D) ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้เป็นข้อมูลที่ยืนยันได้ว่าสามารถใช้ค่าที่กำหนดให้ตามมาตรฐาน AREMA 1999 Category D มาทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานได้อย่างปลอดภัยในงานวิจัยนี้

6.3.1 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟจากข้อมูลการตรวจวัด

ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟจากการใช้งานปกตินั้น จะต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดโครงสร้างสะพานในการใช้งานจริง โดยทั่วไปจะทำการตรวจวัดหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานปกติในชิ้นส่วนหลักของโครงสร้างสะพานอย่างน้อย 10 ชิ้นส่วน เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน เพื่อให้ได้ข้อมูลค่าความเครียดที่เป็นตัวแทนของขบวนรถไฟปกติที่วิ่งผ่านโครงสร้างสะพาน จากนั้นจะทำการประมวลผลข้อมูลการตรวจวัดค่าความเครียดให้เป็นค่าความเค้นในแต่ละชิ้นส่วนที่ทำการตรวจวัดนั้น แล้วนำไปหาค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟแต่ละขบวนในชิ้นส่วนที่ทำการตรวจวัดโดยวิธีการเรนโพล์วเคาน์ติง จากนั้นจะสามารถหาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของชิ้นส่วนที่ทำการตรวจวัดเนื่องจากขบวนรถไฟปกติที่วิ่งผ่านสะพานในช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัดได้ ผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชิ้นส่วนที่ทำการตรวจวัดของทั้ง 3 สะพานแสดงในตารางที่ 6-4

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชิ้นส่วนหลักที่ทำการตรวจวัดของสะพานรถไฟแล้ว ก็จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานเนื่องจากห้วงจักร จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปปรับแก้เทียบกับค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่ได้ทำการตรวจวัด โดยในการศึกษานี้ เนื่องจากไม่ทราบลักษณะที่แน่นอนของขบวนรถไฟปกติที่วิ่งผ่านสะพานทุกขบวน ดังนั้นจึงสมมติให้ค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากขบวนรถไฟปกติ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าช่วงความเค้นที่เกิดจากห้วงจักร ผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลกับค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแสดงในตารางที่ 6-5 ถึง 6-7 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นจะได้ว่า ค่าที่นำมาใช้ปรับแก้ค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน จะใช้ค่าจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานที่มีสัดส่วนระหว่างค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลต่อค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างจากห้วงจักรที่สูงที่สุดในสะพานนั้น และก็จะนำค่านี้ไปทำการปรับแก้ค่าช่วงความเค้นของทุกชิ้นส่วนจากการวิเคราะห์โครงสร้าง ก็จะได้ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของทุกชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานได้

เมื่อได้ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของทุกชิ้นส่วนในโครงสร้างแล้ว ก็จะทำให้การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานได้ โดยวิธีการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 2 แล้ว ใน

การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่นี้จะใช้ค่าความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟในปัจจุบันเท่ากับ 38 ขบวนต่อวัน ซึ่งค่านี้ได้มาจากการตรวจวัดข้อมูลในหลายๆสะพาน และค่าความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟมากที่สุดที่เป็นไปได้ ในอนาคตเท่ากับ 120 ขบวนต่อวัน ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ประมาณเพื่อใช้ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ ค่าคงที่ลักษณะของรอยต่อเป็นแบบหมุดย้ำ (Category D) ซึ่งค่านี้อ้างอิงมาจากผลการทดสอบที่ยืนยันผลว่าสูงกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน AREMA 1999 และในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่นี้จะพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนการวิ่งผ่านของรถไฟต่อปีเป็น 0% ,1% และ 2% ซึ่งได้ผลการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ในชั้นส่วนหลักของทั้ง 3 สะพาน แสดงในตารางภาคผนวก ง และนำมาสรุปในรูปแบบที่ 6-7 ถึง 6-15

ตัวอย่างการคำนวณหาอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกปกติ

จากชั้นส่วน 2101 สะพานจักรี จะได้ค่าตัวแปรต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} S_e &= 212.5 \text{ ksc} \\ T_{ai} &= 38 \text{ ขบวนต่อวัน} \\ Y_p &= 54 \text{ ปี} \\ A &= 7.546 \times 10^{14} \text{ (ksc)}^3 \times \text{รอบ} \end{aligned}$$

จำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติที่ค่าความเค้น S_e หาได้จากสมการ (2-24)

$$\begin{aligned} N &= \frac{A}{S_e^3} = \frac{7.546 \times 10^{14}}{212.5^3} \\ &= 78,639,365 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

จำนวนรอบที่เกิดขึ้นจากการใช้งานในอดีต N_p หาได้จากสมการ (2-25)

$$\begin{aligned} N_p &= T_{ai} \cdot 365 \cdot Y_p = 38 \cdot 365 \cdot 54 \\ &= 748,980 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{อายุการใช้งานที่เหลืออยู่} \quad Y_R &= \frac{N - N_p}{T_{ai} \cdot 365} = \frac{78,639,365 - 748,980}{38 \cdot 365} \\ &= 5,616 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ถ้าให้อัตราการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟต่อปีเท่ากับ 1 %

$$r = 1 \%$$

$$T_{a,max} = 120 \text{ ขบวนต่อวัน}$$

จากสมการ (2-28)

$$Y_F = \frac{\ln\left(\frac{T_{a,max}}{T_{ai}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{r}{100}\right)} + 1 = \frac{\ln\left(\frac{120}{38}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1}{100}\right)} + 1$$

$$= 116.6 \text{ ปี}$$

จากสมการ (2-29)

$$N_F = \frac{1 - \left(1 + \frac{r}{100}\right)^{Y_F}}{-r} T_{ai} \cdot 365 \cdot 100$$

$$= \frac{1 - \left(1 + \frac{1}{100}\right)^{116.6}}{-1} \cdot 38 \cdot 365 \cdot 100$$

$$= 3,038,360 \text{ รอบ}$$

จะพบว่า $N_F < N - N_p$ จากสมการ (2-31) จะได้อายุการใช้งานที่เหลืออยู่

$$Y_R = Y_F + \frac{[(N - N_p) - N_F]}{365 \cdot T_{a,max}}$$

$$= 116.6 + \frac{[(78,639,365 - 748,980) - 3,038,360]}{365 \cdot 120}$$

$$= 1,826 \text{ ปี}$$

6.3.2 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานรถไฟจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20

ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟแบบ U20 จะทำได้โดยทำการหาค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ดังที่กล่าวมาในบทที่แล้ว และจะใช้ข้อกำหนดจากมาตรฐาน AREMA 1999 ในการประเมิน โดยจะต้องคิดผลจากการกระทำรวมในการวิเคราะห์ด้วย แต่เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพานทั้งสาม พบว่าสะพานทั้งสามไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานทางด้านกำลังเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสะพานเนื่องจากความล้า เพราะถือว่าสะพานไม่สามารถใช้งานได้เมื่อใช้งานน้ำหนักบรรทุกแบบ U20

6.4 การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภท

ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภทนั้น จะทำการวิเคราะห์หาค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นของรถไฟแต่ละขบวน เพราะค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นของโครงสร้างสะพานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานเนื่องจากรถไฟวิ่งผ่าน ดังสมการ

$$D_i = \frac{1}{N_i} = \frac{S_i^3}{A} \quad (6-11)$$

เมื่อ	D_i	=	ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟขบวนที่ i
	N_i	=	จำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ
	S_i	=	ค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟขบวนที่ i
	A	=	ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของรอยต่อ

ค่าความเสียหายนี้เป็นค่าที่ชี้ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟวิ่งผ่านโครงสร้างสะพาน และสะพานจะเกิดการวิบัติเมื่อผลรวมของค่าความเสียหายมีค่าเท่ากับ 1 จากสมการข้างต้นพบว่าค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟวิ่งผ่านสะพานขึ้นกับค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟขบวนนั้นๆ ดังนั้นจะสามารถทำการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟแต่ละประเภทแทนได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแบ่งประเภทเป็นรถไฟโดยสารและรถไฟบรรทุก โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ได้จากการบันทึกค่าในระหว่างการเก็บข้อมูลค่าความเครียดในสนาม และนำเอาข้อมูลที่ได้มาทำการแยกประเภทรถ คำนวณหาค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟแต่ละขบวนโดยวิธีเรนโพลด์เคาน์ติ่ง จากนั้นก็ทำการสร้างฮิสโทแกรมของค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟในชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของสะพานที่ตรวจวัด เพื่อทำการศึกษาถึงการกระจายค่าช่วงความเค้นในรถไฟแต่ละประเภท ตารางที่ 6-8 ถึง 6-10 สรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภทในชิ้นส่วนสะพานทั้งสาม ตารางที่ 6-11 ถึง 6-13 สรุปค่าความเสียหายเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆ และภาคผนวก ๑ แสดงฮิสโทแกรมค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟแต่ละประเภทในชิ้นส่วนหลักที่ทำการตรวจวัดทั้ง 3 สะพาน

บทที่ 7

การอภิปรายและวิเคราะห์ผลการศึกษา

7.1 บทนำ

ในการศึกษาวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟที่มีอายุการใช้งานมายาวนาน ซึ่งจะต้องทำการศึกษาในเรื่องของพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน การเก็บข้อมูลความเครียดจากสะพานเนื่องจากการใช้งานจริง การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานเพื่อหาค่าความเค้น แล้วนำผลที่ได้ไปทำการประเมินความปลอดภัยในการใช้งานทางด้านกำลังของสะพานรถไฟ และทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้า ในบทที่ผ่านมาทั้งหมดได้อธิบายถึงวิธีการและขั้นตอนในการศึกษาวิจัย ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งหมดสามารถนำมาอภิปรายและวิเคราะห์ผลการศึกษาดังหัวข้อต่อไปนี้

7.2 การตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างสะพานรถไฟ

การตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างสะพานรถไฟ ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) สะพานจักรี ทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรจำนวน 6 จุด และทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานปกติจำนวน 14 จุด และทำการบันทึกข้อมูลการตรวจวัดความเครียดจากการใช้งานปกติได้ 52 ขบวนการ
- 2) สะพานกม.03 ทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรจำนวน 9 จุด และทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานปกติจำนวน 13 จุด และทำการบันทึกข้อมูลการตรวจวัดความเครียดจากการใช้งานปกติได้ 84 ขบวนการ
- 3) สะพานกม.19 ทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรจำนวน 10 จุด และทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานปกติจำนวน 14 จุด และทำการบันทึกข้อมูลการตรวจวัดความเครียดจากการใช้งานปกติได้ 189 ขบวนการ

ตำแหน่งชิ้นส่วนที่ทำการตรวจวัดค่าความเครียดแสดงในรูปที่ 3-1 ถึง 3-3 จากผลการตรวจวัดค่าความเครียดเนื่องจากการใช้งานปกติพบว่า ค่าความเครียดที่ทำการตรวจวัดได้มีสัญญาณรบกวน (noise) เข้าแทรกอยู่ทุกข้อมูล สัญญาณรบกวนนี้อาจเกิดจากสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสะพานเช่น การมีสายไฟฟ้าแรงสูงอยู่ใกล้สะพานเป็นต้น ทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณในการตรวจวัดได้ ดังนั้นจะต้องทำการกำจัดสัญญาณรบกวนใน

ส่วนนี้ออกไปก่อน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ทำการกรองสัญญาณที่มีความถี่สูงที่มารบกวนออกไป โดยการใช้ฟิลเตอร์ (low-pass filter) ซึ่งจะต้องกำหนดความถี่ที่เหมาะสมในการกรองสัญญาณรบกวนออกไปได้และไม่กระทบต่อสัญญาณความถี่ที่ต้องการตรวจวัด ค่าความถี่นี้เรียกว่า cut-off frequency จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน และลักษณะการปนเปื้อนของสัญญาณจากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าค่าความถี่ที่เหมาะสมในการกรองออกคือ 20 Hz ทั้ง 3 สะพาน

สำหรับค่าความเค้นที่วัดได้จากการใช้งานปกติในชิ้นส่วนหลัก แสดงในภาคผนวก ข นำมาสรุปได้ในตารางที่ 7-1 พบว่าค่าความเค้นสูงสุดที่วัดได้ในสะพานจักรี้เท่ากับ 298.0 ksc ที่ชิ้นส่วน Stringer ในสะพานกม.03 เท่ากับ -409.4 ksc ที่ Upper Chord และในสะพานกม.19 เท่ากับ 497.8 ksc ที่ Stringer และอธิบายได้ว่า ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจะมีค่าสูงในชิ้นส่วน Stringer และ Upper Chord ดังนั้นชิ้นส่วนเหล่านี้จะเป็นตัวควบคุมระดับความปลอดภัยในโครงสร้าง ซึ่งค่าความเค้นที่วัดได้นี้จะนำไปประเมินค่าดัชนีความปลอดภัยของโครงสร้างสะพานต่อไป

7.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานรถไฟ ได้กล่าวถึงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุดังนี้

7.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทางด้านการรับแรงดึง

ในการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานรถไฟ ได้ใช้ชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้าง (lateral bracing) จากโครงสร้างทั้ง 3 สะพานมาทำการทดสอบ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ 2 แบบคือ ASTM E8 จำนวน 2 ชิ้นงาน (ชิ้นส่วนสะพานกม.03) และ JIS Z 2241 จำนวน 7 ชิ้นงาน (ชิ้นส่วนทั้ง 3 สะพาน) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแสดงในตารางที่ 4-1 จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 3 สะพานพบว่า ค่าความเค้นที่จุดครากมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2850 ksc และกำลังทางด้านการรับแรงดึงสูงสุดมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4400 ksc ใกล้เคียงกันทั้ง 3 สะพาน ตารางที่ 7-2 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง ซึ่งจากผลการทดสอบจะสามารถบอกได้ว่า เหล็กที่ใช้ในโครงสร้างสะพานเป็นเหล็กเหนียว (ductile steel) และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กแบบ A572 Gr.42 ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งเป็นเหล็กที่ใช้ในงานสะพานทั่วไป และพบว่าการทดสอบกำลังทางด้านการรับแรงดึงตามมาตรฐานทั้ง 2 แบบได้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน สำหรับค่าความเค้นที่จุดคราก F_y ที่นำไปใช้ในการประเมินอัตราส่วนความปลอดภัย จะใช้ค่าที่ต่ำที่สุดของแต่ละสะพาน

7.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้า

ในการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ได้ใช้ชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้าง (lateral bracing) เช่นเดียวกับการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง โดยลักษณะการทดสอบแบ่งเป็นการทดสอบแบบชิ้นงานที่มีรอยต่อแบบหมุดย้าจำนวน 2 ชิ้น (ชิ้นส่วนสะพานกม.03) และชิ้นงานแบบชิ้น

ส่วนเรียบจำนวน 3 ชั้น (ชั้นส่วนสะพานกม.03 และ กม.19) จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 3 สะพานพบว่าผลการทดสอบที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน AREMA 1999 โดยชิ้นงานที่มีรอยต่อแบบหมุดย้ำได้ผลการทดสอบสูงกว่าแบบ Category D และชิ้นงานแบบชิ้นส่วนเรียบได้ผลการทดสอบสูงกว่าแบบ Category A ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน AREMA 1999 แสดงในรูปที่ 4-10 และจากผลการทดสอบอธิบายได้อีกว่า แม้ชิ้นส่วนเหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงไม่สูงนัก แต่ก็มีอายุการใช้งานมานานและอยู่ในสภาพแวดล้อมใช้งานที่อาจจะเกิดการกัดกร่อนได้ ซึ่งจากผลการทดสอบชิ้นงานพบว่าได้ค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน AREMA 1999 ได้เสนอไว้ เพราะว่าค่าที่กำหนดให้ตามมาตรฐาน AREMA 1999 เป็นค่าที่คิดถึงความน่าเชื่อถือ (reliability) จากผลการทดสอบชิ้นงานจำนวนมาก ซึ่งจะเป็นค่าที่มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าใช้ค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน AREMA 1999 ซึ่งจะทำให้ผลการประเมินอายุการใช้งานของสะพานอยู่ในด้านความปลอดภัย

7.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จะต้องทำการจำลองโครงสร้างสะพานลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม STAAD III แล้วทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นออกมา การสร้างแบบจำลองจะมีหลักการคือต้องสร้างแบบจำลองให้มีพฤติกรรมของโครงสร้างใกล้เคียงกับพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานจริงมากที่สุด โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นจากแบบจำลองที่สร้างเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดค่าความเค้นจากหัวรถจักรที่ได้ทำการทดสอบ แล้วมาทำการปรับแก้แบบจำลองตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความเค้นที่ใกล้เคียงพฤติกรรมจริงจากผลการทดสอบมากที่สุด ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ซึ่งสามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้

1) การจำลองโครงสร้างจะอ้างอิงจากแบบโครงสร้างเป็นหลัก ทั้งลักษณะทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของหน้าตัดในชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถทำการปรับแก้ได้ เนื่องจากสามารถหาค่าที่แน่นอนได้จากแบบโครงสร้างสะพานที่มีอยู่

2) ลักษณะชนิดของแบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยแบบจำลองแบบโครงข้อหมุน (truss element) และแบบโครงข้อแข็ง (frame element) ซึ่งพบว่า ค่าความเค้นในตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดที่วิเคราะห์ออกมาได้จากแบบจำลองทั้งสอง มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยการเปรียบเทียบรูปร่างของกราฟค่าความเค้นในตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองแบบจำลอง มีค่าใกล้เคียง 1.0 มาก (ดูตารางที่ 5-1 ได้ค่าต่ำสุด 0.96) และค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากที่สุด มีค่าสูงสุดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกันระหว่าง 2 แบบจำลองในจุดที่ทำการตรวจวัด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พอจะบอกได้ว่า การจำลองโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแบบโครงถัก สามารถวิเคราะห์โดยแบบจำลองแบบโครงข้อหมุนหรือแบบโครงข้อแข็งก็ได้ โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากพฤติกรรมของชิ้นส่วนสะพานแบบโครงถักขึ้นกับแรงตามแนวแกนเป็นหลัก ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองแบบโครงข้อแข็งมีค่าน้อย ทำให้ไม่ค่อยมีผลต่อค่าความเค้นของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานมากนัก

3) การปรับแก้แบบจำลองเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับพฤติกรรมโครงสร้างจริงนั้น จะสามารถปรับแก้ได้บางจุดที่เหมาะสม ซึ่งจุดที่ปรับแก้กันนั้นไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอนได้ และมีเหตุผลที่เหมาะสมต่อการปรับแก้ โดยโครงสร้างสะพานในงานวิจัยนี้พบว่า สามารถปรับแก้น้ำหนักบรรทุกของห้วงจรที่นำมาวิเคราะห์ได้ เพราะว่าน้ำหนักที่แท้จริงของห้วงจรจะมีความแตกต่างจากแบบลักษณะของห้วงจรซึ่งเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นจึงทำการปรับได้เล็กน้อย (ในงานวิจัยนี้ปรับแก้สูงสุด 6.7 %) และจุดที่ปรับแก้ได้อีกจุดคือสภาพที่รองรับ เนื่องจากสภาพที่รองรับเป็นพฤติกรรมที่ซับซ้อน ไม่ได้เป็นแบบลื่นโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงสามารถปรับแก้โดยใส่สปริงเข้าไปดำเนินการเคลื่อนที่ตรงจุดรองรับได้ ซึ่งในสะพานจักรีใช้ค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ 45000 kg/m สะพานกม.03 ใช้ค่าคงที่สปริงเท่ากับ 50000 kg/m และสะพานกม.19 ใช้ที่รองรับแบบลื่นโดยปกติ ซึ่งผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดภายใต้ห้วงจร ได้แสดงโดยละเอียดไว้ในบทที่ 5

7.5 ผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

การวิเคราะห์หาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ต่อไปได้ โดยในงานวิจัยนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานเนื่องจากการใช้งานปกติและน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ขั้นตอนการวิเคราะห์ได้กล่าวโดยละเอียดในบทที่ผ่านมา ซึ่งจะกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

7.5.1 ผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากการใช้งานปกติ

การวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากการใช้งานปกติ จะสามารถหาได้โดยการนำเอาค่าความเค้นที่ทำการตรวจวัดจากการใช้งานปกติมาผ่านวิธีการเรนโพล์วเคาน์ติง จะได้ค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าของรถไฟแต่ละขบวน แล้วก็จะนำไปหาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของขบวนรถไฟทั้งหมดที่ทำการตรวจวัดได้ แต่ในการตรวจวัดจริง ไม่ได้ทำการตรวจวัดในทุกชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ดังนั้นจะมีการปรับแก้โดยใช้ค่าช่วงความเค้นจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างเนื่องจากห้วงจร ซึ่งจะสมมติว่าค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าช่วงความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจากห้วงจร (แสดงในรูปที่ 6-1 , 6-3 และ 6-5) ซึ่งจะสามารถหาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่ทำการปรับแก้ได้ ผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ง นำมาสรุปในชิ้นส่วนที่สำคัญในตารางที่ 7-3 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ในสะพานจักรี ชิ้นส่วนที่มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงที่สุดคือ ชิ้นส่วน Diagonal 2142 ซึ่งมีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ 579.9 ksc
- ในสะพานกม.03 ชิ้นส่วนที่มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงที่สุดคือ ชิ้นส่วน Stringer 12302 ซึ่งมีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ 731.7 ksc
- ในสะพานกม.19 ชิ้นส่วนที่มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงที่สุดคือ ชิ้นส่วน Stringer 22308 ซึ่งมีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ 930.0 ksc

จากผลการวิเคราะห์จะพบว่า ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่ทำการวิเคราะห์จากการใช้งานปกติของทั้ง 3 สะพาน มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดเป็น 579.9 , 731.7 และ 930.0 ksc ในสะพานจักรี สะพานกม.03 และสะพานกม.19 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าที่แตกต่างกันพอสมควรในแต่ละสะพาน ซึ่งที่เปรียบเทียบได้อย่างชัดเจนคือ สะพานจักรี กับสะพานกม.03 ซึ่งมีลักษณะของโครงสร้างสะพานใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่ทำการวัดได้มีความแตกต่างกัน จะสามารถอธิบายได้ว่า เป็นผลมาจากค่าคุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วน Stringer ในสะพานจักรี มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแกนที่รับแรงดัดเท่ากับ 398448 cm^4 แต่ชิ้นส่วน Stringer ในสะพานกม.03 มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในแกนที่รับแรงดัดเท่ากับ 172239 cm^4 ซึ่งต่างกันมาก ทำให้ค่าช่วงความเค้นที่เกิดในชิ้นส่วน Stringer ของสะพานกม.03 มีค่าสูงกว่าสะพานจักรี

7.5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20

การวิเคราะห์หาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 นี้ จะทำได้โดยการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานโดยน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ที่คิดแรงกระทำแล้ว คำนวณหาค่าช่วงความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นก็คือค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่นำไปใช้ประเมินอายุการใช้งาน ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 6-2 , 6-4 และ 6-6 และภาคผนวก ง นำมาสรุปในชิ้นส่วนที่สำคัญในตารางที่ 7-4 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ในสะพานจักรี ชิ้นส่วนที่มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดคือ ชิ้นส่วน Upper Chord 2116 ซึ่งมีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ 1682.0 ksc
- ในสะพานกม.03 ชิ้นส่วนที่มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดคือ ชิ้นส่วน Floor Beam 12508 ซึ่งมีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ 2225.8 ksc
- ในสะพานกม.19 ชิ้นส่วนที่มีค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดคือ ชิ้นส่วน Diagonal 22146 ซึ่งมีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ 2214.6 ksc

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ทั้ง 3 สะพาน มีค่า 1682.0 , 2225.8 และ 2214.6 ksc ในสะพานจักรี สะพานกม.03 และสะพานกม.19 ตามลำดับ และชิ้นส่วนที่เกิดค่าช่วงความเค้นสูงสุดก็ไม่ใช่ว่าชิ้นส่วนชนิดเดียวกัน ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะของโครงสร้างสะพาน ลักษณะน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ และค่าคุณสมบัติของหน้าตัดในชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นส่วนที่เกิดค่าช่วงความเค้นสูงเป็นชิ้นส่วนที่ต่างกัน

7.6 การประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพาน

การประเมินความปลอดภัยในการใช้งานของโครงสร้างสะพาน เป็นการประเมินความปลอดภัยด้านกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ โดยจะใช้ค่าดัชนีความปลอดภัยซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเทียบกับค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (allowable stress) ตามข้อ

กำหนดมาตรฐาน ซึ่งใช้มาตรฐาน AREMA 1999 ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา ผลการประเมินค่าดัชนีความปลอดภัยจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ ค่าดัชนีความปลอดภัยภายใต้การใช้งานปกติรวมกับน้ำหนักคงที่ของสะพาน และค่าดัชนีความปลอดภัยภายใต้น้ำหนักบรรทุก U20 รวมกับน้ำหนักคงที่ของสะพาน ซึ่งได้ผลแสดงในตารางที่ 6-1 ถึง 6-3 ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

- ในสะพานจักรี ค่าดัชนีความปลอดภัยของการใช้งานปกติมีค่าสูงสุดในชั้นส่วน Upper Chord เท่ากับ 0.34 และสำหรับน้ำหนักบรรทุก U20 มีค่าสูงสุดในชั้นส่วน Upper Chord เท่ากับ 1.34
- ในสะพานกม.03 ค่าดัชนีความปลอดภัยของการใช้งานปกติมีค่าสูงสุดในชั้นส่วน Upper Chord เท่ากับ 0.43 และสำหรับน้ำหนักบรรทุก U20 มีค่าสูงสุดในชั้นส่วน Upper Chord เท่ากับ 1.74
- ในสะพานกม.19 ค่าดัชนีความปลอดภัยของการใช้งานปกติมีค่าสูงสุดในชั้นส่วน Stringer เท่ากับ 0.96 และสำหรับน้ำหนักบรรทุก U20 มีค่าสูงสุดในชั้นส่วน Stringer เท่ากับ 2.61

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าดัชนีความปลอดภัยสำหรับการใช้งานปกติของทั้ง 3 สะพาน มีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งบอกได้ว่าทั้งสามสะพานยังมีความปลอดภัยในการใช้งานปกติอยู่ ส่วนค่าดัชนีความปลอดภัยสำหรับน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ของทั้ง 3 สะพาน มีค่ามากกว่า 1.0 ซึ่งบอกได้ว่าทั้งสามสะพานไม่มีความปลอดภัยในการใช้งาน ทั้งนี้เพราะไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รับน้ำหนักบรรทุกขนาดดังกล่าว ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำหนักแบบ U20 มาใช้งานจะต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างให้สามารถรับน้ำหนักได้ปลอดภัยก่อน และจากการประเมินความปลอดภัยในชั้นส่วนโครงสร้างสะพานจะอธิบายได้อีกว่า ชั้นส่วนที่รับแรงอัดจะมีค่าน้อยแรงที่ยอมให้ต่ำกว่าชั้นส่วนที่รับแรงดึง เนื่องจากผลจากการโก่งเดาะของชั้นส่วนที่รับแรงอัด (buckling) เห็นได้จากชั้นส่วน Upper Chord และสำหรับชั้นส่วนที่รับแรงอัดจากการตัดก็จะมีค่าน้อยแรงที่ยอมให้ต่ำลงไปอีก เนื่องจากผลของการโก่งเดาะด้านข้าง (lateral torsional buckling) ซึ่งสังเกตได้จากชั้นส่วน Stringer โดยเฉพาะชั้นส่วนในสะพานกม.19 มีค่าดัชนีความปลอดภัย 0.96 ซึ่งใกล้เคียง 1.0 มาก เป็นผลมาจากการต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างน้อย ซึ่งชั้นส่วนนี้อาจจะต้องทำการปรับปรุงเสริมกำลังให้รับน้ำหนักได้ดีขึ้นต่อไป

7.7 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานรถไฟ

จากผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพานรถไฟ จะสามารถหาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นได้ และจะนำไปทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของโครงสร้างสะพาน โดยจะใช้กำลังทางด้านความล้าที่กำหนดตามมาตรฐาน AREMA 1999 Category D ขั้นตอนการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ผ่านมา จากผลการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ที่แสดงในรูปที่ 6-7 ถึง 6-15 และในตารางที่ ง-1 ถึง ง-3 นำมาเรียงลำดับอายุการใช้งานที่เหลืออยู่น้อยสุดในแต่ละชนิดของชั้นส่วนโครงสร้างได้ในตารางที่ 7-5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

7.7.1 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนการรถไฟปกติ

ผลการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนการรถไฟปกติของทั้ง 3 สะพาน พบว่าในสะพานจักรีและสะพานกม.03 มีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มากกว่า 100 ปีที่อัตราการเพิ่มของขบวนการรถไฟ 0% ต่อปี และมีอายุการใช้งานมากกว่า 80 ปีที่อัตราการเพิ่มของขบวนการรถไฟ 2% ต่อปี แต่ในสะพานกม.19 พบว่า ในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่พบว่า อายุการใช้งานของสะพานกม.19 เท่ากับ 0 ปี โดยขึ้นส่วนที่กำหนดอายุของโครงสร้างเป็น Stringer แต่ในโครงสร้างหลักของสะพานพบว่ายังมีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มากกว่า 80 ปี โดยตัวกำหนดอายุของสะพานคือชิ้นส่วน Vertical ซึ่งจากผลที่ได้มาสามารถอธิบายได้ว่าน่าจะเกิดความเสียหายในชิ้นส่วน Stringer แต่ในความเป็นจริงยังไม่เสียหาย เนื่องจากว่าในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่นั้น สำหรับการใช้งานในอดีตได้ใช้ค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นและจำนวนการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวันในปัจจุบัน ทำให้อายุการใช้งานที่ประเมินได้น้อยกว่าปกติ ซึ่งในการที่ได้ผลออกมาเช่นนี้ แม้สะพานยังไม่เกิดความเสียหาย แต่ก็ถือเป็นข้อมูลสำคัญที่ชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มการเกิดความเสียหาย ซึ่งควรจะมีการตรวจสอบสะพานอย่างละเอียดอีกครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นส่วน Stringer

7.7.2 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20

การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ของทั้งสามสะพาน เนื่องจากผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพานทั้งสามนั้น พบว่าไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานโดยน้ำหนักบรรทุกแบบ U20 ดังนั้นจึงไม่ทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานทั้งสาม

7.8 ผลการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภท

การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟแต่ละประเภทได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6-8 ถึง 6-13 และภาคผนวก จ จากผลการวิเคราะห์ความเสียหายสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) สะพานจักรี ทำการแยกประเภทรถเป็นขบวนรถโดยสาร 25 ขบวน และขบวนรถบรรทุก 12 ขบวน พบว่าค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของขบวนรถบรรทุก มีค่าสูงกว่าค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของขบวนรถโดยสารอยู่ในช่วงประมาณ 1.07 ถึง 1.45 เท่า โดยขึ้นส่วนที่เกิดค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดคือชิ้นส่วน Stringer โดยมีค่าเท่ากับ 347.0 ksc สำหรับขบวนรถโดยสาร และ 502.2 ksc สำหรับขบวนรถบรรทุก และค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าสูงสุดเท่ากับ 450.7 ksc สำหรับขบวนรถโดยสาร และ 667.2 ksc สำหรับขบวนรถบรรทุก
- 2) สะพานกม.03 พบว่าในการใช้งานของสะพานนี้ มีขบวนรถบรรทุกน้อยมาก ซึ่งเก็บข้อมูลมาได้ไม่เกิน 3 ขบวน จึงไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ส่วนขบวนรถโดยสารสามารถเก็บข้อมูลได้มากกว่า 70 ขบวน พบว่า ชิ้นส่วนที่เกิดค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดคือชิ้นส่วน Stringer มีค่าเท่ากับ 455.2 ksc และค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าสูงสุดเท่ากับ 525.9 ksc

3) สะพานกม.19 ได้ทำการเก็บข้อมูลประเภทรถได้เป็นขบวนรถโดยสารมากกว่า 90 ขบวน และขบวนรถบรรทุกมากกว่า 30 ขบวน พบค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของขบวนรถบรรทุก มีค่าสูงกว่าค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลของขบวนรถโดยสารอยู่ในช่วงประมาณ 1.13 ถึง 1.26 เท่า โดยขึ้นส่วนที่เกิดค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดคือขึ้นส่วน Stringer โดยมีค่าเท่ากับ 663.9 ksc สำหรับขบวนรถโดยสาร และ 803.1 สำหรับขบวนรถบรรทุก และค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าสูงสุดเท่ากับ 905.0 ksc สำหรับขบวนรถโดยสาร และ 1057.7 ksc สำหรับขบวนรถบรรทุก

จากผลการวิเคราะห์ค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากขบวนรถไฟทั้ง 2 ประเภท พบว่าขบวนรถไฟบรรทุกจะทำให้เกิดค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าสูงกว่าขบวนรถไฟโดยสารประมาณ 1.07 ถึง 1.45 เท่า และเมื่อวิเคราะห์ค่าความเสียหายซึ่งแปรผันกับกำลังสามของค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าพบว่า ขบวนรถไฟบรรทุกจะทำให้เกิดค่าความเสียหายสูงกว่าขบวนรถไฟโดยสารประมาณ 1.23 ถึง 3.05 เท่า และจากฮิสโทแกรมการกระจายของค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าในภาคผนวก จ พบว่าการกระจายของข้อมูลยังไม่เป็นแบบเส้นโค้งปกติมากนัก เนื่องจากข้อมูลที่เก็บมานั้นน้อยเกินไปในบางสะพาน ทำให้การสร้างฮิสโทแกรมแสดงการกระจายของข้อมูลยังทำได้ไม่ดีนัก และจากค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นสูงสุดพบว่าค่าความเค้นเทียบเท่าสูงสุดเท่ากับ 667.2 ksc , 525.9 ksc และ 1057.7 ksc ในสะพานจักรี สะพานกม.03 และสะพานกม.19 ตามลำดับ และจะเกิดค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่สูงในขึ้นส่วน Stringer ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างสะพานรถไฟจำเป็นต้องคำนึงถึงผลจากน้ำหนักกระทำซ้ำที่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าในสะพานรถไฟด้วย

บทที่ 8

สรุปผลการศึกษา

8.1 สรุปผลการศึกษา

8.1.1 ค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดเนื่องจากการใช้งานปกติ พบว่าค่าสูงสุดในสะพานจักรี สะพานกม.03 และ กม.19 เท่ากับ 298.0 ksc 409.4 ksc และ 497.8 ksc ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของเหล็กโครงสร้างสะพาน

8.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทางด้านกำลังรับแรงดึงทั้งสามสะพาน พบว่ามีค่าความเค้นที่จุดครากประมาณ 2850 ksc และค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดประมาณ 4400 ksc ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถบอกได้ว่าเหล็กโครงสร้างสะพานเป็นเหล็กแบบเหนียว (ductile steel) และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กแบบ A572 Gr.42 ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งนิยมใช้ในงานสะพานเหล็กทั่วไป

8.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุทางด้านความล้า พบว่าผลการทดสอบได้กำลังรับความล้าสูงกว่าที่มาตรฐาน AREMA 1999 กำหนด แม้ว่าชิ้นส่วนที่นำมาทดสอบได้ถูกใช้งานมานาน และอาจจะถูกกัดกร่อนโดยสภาพแวดล้อมก็ตาม ดังนั้นการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ในงานวิจัยนี้ จะใช้ค่ากำลังทางด้านความล้าที่กำหนดตามมาตรฐาน AREMA 1999 Category D (สำหรับรอยต่อแบบหมุดยึด) ซึ่งจะทำได้ผลการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่นั้นอยู่ในด้านที่ปลอดภัย

8.1.4 พฤติกรรมของโครงสร้างสะพานจากผลการตรวจวัด เมื่อนำมาจำลองลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์พบว่า การจำลองโครงสร้างแบบโครงข้อหมุน (truss element) และการจำลองโครงสร้างแบบโครงข้อแข็ง (frame element) ให้ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่ไม่แตกต่างกันนัก เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานแบบโครงถักขึ้นกับแรงในแนวแกนเป็นหลัก พฤติกรรมที่จุดต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างหลักพบว่าสามารถถ่ายโมเมนต์ได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของแบบจำลองโครงข้อแข็งมีค่าน้อย ทำให้ค่าความเค้นที่ได้จากทั้งสองแบบจำลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองโครงข้อหมุนในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นของโครงสร้างสะพานทั้งหมด

8.1.5 การสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อให้ได้พฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงเทียบกับผลการตรวจวัดพบว่า สำหรับสะพานโครงถักที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนดังเช่นสะพานในงานวิจัยนี้ การสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงจากแบบก่อสร้างที่มีอยู่ทั้งขนาด และหน้าตัดของชิ้นส่วน และใช้การจำลองโครงสร้างแบบโครงข้อหมุนก็สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดระดับหนึ่ง และเพื่อให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้นจะสามารถทำการปรับแก้ในส่วนที่ไม่ทราบค่าแน่นอนและสามารถปรับแก้ได้อย่างมีเหตุผล เช่นทำการปรับแก้ค่าน้ำหนักบรรทุกของหีวรถจักรได้เล็กน้อย เนื่องจากไม่ได้ทำการชั่งน้ำหนักจริงและอาศัยการประมาณจากแบบที่กำหนดจากผู้ผลิตเท่านั้น และส่วนสภาพที่รองรับแบบล้อเลื่อนสามารถทำการปรับแก้ได้ เพราะว่าใน

สภาพการใช้งานจริงไม่ได้มีสภาพเป็นล้อยื่นอิสระ เนื่องจากมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนหลายอย่างเช่น มีแรงเสียดทานด้านการเคลื่อนที่เป็นต้น จึงสามารถทำการปรับแก้ให้มีการต้านการเคลื่อนที่ของที่รองรับได้ตามความเหมาะสม โดยในการศึกษานี้ได้แทนสภาพที่รองรับให้มีค่าสติเฟนตามแนวราบด้านการเคลื่อนที่ของที่รองรับในบางสะพาน ซึ่งพบว่าได้ผลการวิเคราะห์ที่ดีขึ้นพอสมควร

8.1.6 จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะสามารถอธิบายได้ว่า ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน จะเป็นชิ้นส่วนประเภท Stringer และ Upper Chord ซึ่งค่าความเค้นสูงสุดในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานจะขึ้นกับ ลักษณะของโครงสร้างสะพาน ความยาวของช่วงสะพาน ค่าคุณสมบัติของหน้าตัดในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน และลักษณะของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ

8.1.7 การประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังของโครงสร้างสะพานพบว่า ในสภาวะการใช้งานปกติ สะพานจักรี สะพานกม.03 และสะพานกม.19 มีค่าดัชนีความปลอดภัยในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานสูงสุดเท่ากับ 0.34 0.43 และ 0.96 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 1.0 ดังนั้นจึงบอกได้ว่าโครงสร้างสะพานมีความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานปกติ ส่วนค่าดัชนีความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานสำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 มีค่าสูงสุดมากกว่า 1.0 ทั้งสามสะพาน ซึ่งบอกได้ว่าไม่มีความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานหรือเกิดการวิบัติได้ถ้าน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 มาใช้งาน ดังนั้นจำเป็นต้องทำการปรับปรุงหรือเสริมกำลังให้ชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานมีความกำลังต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกเพียงพอก่อนที่จะนำน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 มาใช้งานจริง

8.1.8 อายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าจากการประเมินในสภาพการใช้งานปกติ พบว่า สะพานจักรีและสะพานกม.03 มีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มากกว่า 80 ปี สะพานกม.19 ในโครงสร้างหลักของสะพานกม.19 มีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มากกว่า 80 ปี แต่ในชิ้นส่วน Stringer พบว่ามีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เท่ากับ 0 ปี ซึ่งเป็นเพราะว่าในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ในงานวิจัยนี้ได้คิดถึงความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากรถไฟ 1 ขบวนในอดีตมีค่าเท่ากับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ค่าอายุการใช้งานที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม จากผลที่ได้จะเป็นข้อมูลที่แสดงให้เห็นว่าควรจะทำการศึกษาตรวจสอบสภาพชิ้นส่วน Stringer อย่างละเอียดในสนาม เพื่อทำการปรับปรุงหรือซ่อมแซมให้สามารถใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย

8.1.9 การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 เนื่องจากผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านกำลังในการใช้งานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ U20 ของทั้งสามสะพานพบว่าสะพานทั้งสามไม่ปลอดภัยหรือเกิดการวิบัติได้ ดังนั้นจึงไม่มีอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้า

8.1.10 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยที่เกิดขึ้นเนื่องจากขบวนรถไฟแต่ละประเภท พบว่าขบวนรถไฟบรรทุกทำให้เกิดค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานสูงกว่าขบวนรถไฟโดยสารประมาณ 1.07 ถึง 1.45 เท่า ซึ่งจะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสะพานสูงกว่าขบวนรถไฟโดยสารเป็น 1.23 ถึง 3.05 เท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน โดยชิ้นส่วนที่เกิดค่าความเสียหายสูงสุดคือชิ้นส่วน Stringer

ตารางที่ 2-1 ค่าคงที่ A ตามมาตรฐานของ AREMA 1999

Detail Category	Constant A	Fatigue Limit (ksi)
A	2.5×10^{10}	24
B	1.2×10^{10}	16
B'	6.1×10^{10}	12
C	4.4×10^9	10
D	2.2×10^9	7
E	1.1×10^9	4.5
E'	3.9×10^8	2.6



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-1 แสดงตัวอย่างข้อมูลการเดินทางรถไฟที่บันทึกได้ในสะพาน กม.03

22/10/44 ตารางรถไฟผ่านสะพาน กม.03

เวลา	หมายเลข หัวจักร	ขาขึ้น	เวลา	หมายเลข หัวจักร	ขาล่อง
16.30	4204	รถโดยสาร	13.45	3016	รถโดยสาร
18.15	4223	รถโดยสาร	14.58	4039	รถโดยสาร
			17.12	4131	รถโดยสาร
			17.55	4224	รถโดยสาร
			19.18	4419	รถโดยสาร
			03.20	850	หัวรถจักร
รวม		8	ขบวน		

23/10/44 ตารางรถไฟผ่านสะพาน กม.03

เวลา	หมายเลข หัวจักร	ขาขึ้น	เวลา	หมายเลข หัวจักร	ขาล่อง
6.31	4131	รถโดยสาร	7.5	4223	รถโดยสาร
7.00	4202	รถโดยสาร	8.30	4131	รถโดยสาร
7.36	4203	รถโดยสาร	13.40	4202	รถโดยสาร
10.07	4050	รถโดยสาร	13.47	4050	รถโดยสาร
11.21	3106	รถโดยสาร	17.13	3016	รถโดยสาร
12.10	4005	รถน้ำมัน	17.56	4203	รถโดยสาร
16.30	4419	รถโดยสาร			
18.58	4131	รถโดยสาร			
21.55	824	หัวรถจักร			
รวม		15	ขบวน		

ตารางที่ 3-2 แสดงคุณสมบัติของสเตรนเกจ (strain gage) ที่ใช้ในการศึกษา

Type	Cu-Ni Foil Gage with Epoxy Backing
Gage Pattern	Single Element
Gage Resistant	120 Ohm.
Gage Factor	2.13
Gage Length	5 mm.
Gage Width	1.5 mm.
Self-temperature Compensated for Mild Steel (10 – 80 °C)	



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึงของทั้ง 3 สะพาน

สะพาน	จักรี			กม.19+223	
	TP-A	TT-B	TT-C	TP-A	TT-B
ตัวอย่างที่	TP-A	TT-B	TT-C	TP-A	TT-B
ความหนา (cm)	1.00	0.95	0.99	0.94	0.79
ความกว้าง (cm)	2.50	2.47	2.51	2.51	2.51
พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	2.500	2.356	2.475	2.359	1.983
แรงดึงที่จุดคราก (kg)	7220	6470	7280	6460	5700
แรงดึงสูงสุด (kg)	11380	10100	10440	10890	8080
ความเค้นที่จุดคราก (ksc)	2888	2746	2941	2738	2874
กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ksc)	4552	4287	4218	4616	4075
อัตราการยืดตัว (%)	38	39	39	39	40
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด
ตำแหน่งการขาด	ในช่วง	ในช่วง	ในช่วง	ในช่วง	ในช่วง
ห้องทดสอบ	วท.	วท.	วท.	วท.	วท.

สะพาน	กม.03+870			
	T2	T3	TP-A	TT-B
ตัวอย่างที่	T2	T3	TP-A	TT-B
ความหนา (cm)	0.95	0.95	0.99	0.98
ความกว้าง (cm)	3.74	3.74	2.51	2.51
พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	3.553	3.553	2.485	2.460
แรงดึงที่จุดคราก (kg)	9640	9530	7390	7480
แรงดึงสูงสุด (kg)	15570	15610	11040	11160
ความเค้นที่จุดคราก (ksc)	2713	2682	2974	3041
กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ksc)	4382	4393	4443	4537
อัตราการยืดตัว (%)	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด	37	40
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)	2.00x10 ⁶	2.04x10 ⁶	ไม่ได้ตรวจวัด	ไม่ได้ตรวจวัด
ตำแหน่งการขาด	ในช่วง	ในช่วง	ในช่วง	ในช่วง
ห้องทดสอบ	จุฬาฯ	จุฬาฯ	วท.	วท.

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้าของทั้ง 3 สะพาน

ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	ความเค้นที่ใช้ (ksc)	ช่วงความเค้น (ksc)	จำนวนรอบ	ความเค้นเทียบเท่า 1000000 รอบ (ksc)	ห้องทดสอบ	หมายเหตุ
KM03 F1	2.00	200-700	500	1000000	2363	จุฬาฯ	**ทดสอบจน สิ้นงานขาด
		200-1200	1000	1000000			
		200-2200	2000	1000000			
		200-2400	2200	381620			
KM03 F2	2.00	200-700	500	1000000	2684	จุฬาฯ	**ทดสอบจน สิ้นงานขาด
		200-1200	1000	1000000			
		200-2200	2000	1000000			
		200-2400	2200	958170			
KM03 TP-A	2.02	200-700	500	2000000	2624	วท.	**สิ้นงาน ไม่ขาด
		200-1200	1000	2000000			
		200-2200	2000	1977763			
KM03 TT-B	1.84	200-700	500	2000000	2633	วท.	**สิ้นงาน ไม่ขาด
		200-1200	1000	2000000			
		200-2200	2000	2000000			
KM19 TP-A	1.58	200-700	500	2000000	2831	วท.	**ทดสอบจน สิ้นงานขาด
		200-1200	1000	2000000			
		200-2200	2000	2555000			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความแตกต่างสูงสุด

สะพานจักรี	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เทียบกับผลการตรวจวัด		% ความแตกต่างมากที่สุดเทียบกับผลการตรวจวัด	
	Truss Model	Frame Model	Truss Model	Frame Model
member				
2205	0.997	0.998	-0.16	6.85
2216	0.994	0.996	-8.06	-14.78
2233	0.991	0.990	19.35	27.48
2241	0.999	0.998	1.33	1.69
2304	0.973	0.979	-16.22	-13.65
2514	0.999	0.999	19.00	15.67

สะพานกม.03	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เทียบกับผลการตรวจวัด		% ความแตกต่างมากที่สุดเทียบกับผลการตรวจวัด	
	Truss Model	Frame Model	Truss Model	Frame Model
member				
12123	0.990	0.990	-2.51	-11.83
12140	0.995	0.995	-2.50	-1.39
12113	0.993	0.991	-14.06	-14.23
12105	0.990	0.994	3.32	6.96
12142	0.995	0.995	-5.69	-3.15
12116	0.996	0.995	1.76	-3.01
12205	0.992	0.995	3.87	7.69
12404	0.972	0.981	-19.68	-13.92
12514	0.990	0.990	36.51	25.33

สะพานกม.19	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เทียบกับผลการตรวจวัด		% ความแตกต่างมากที่สุดเทียบกับผลการตรวจวัด	
	Truss Model	Frame Model	Truss Model	Frame Model
member				
22101	0.990	0.990	0.15	-2.76
22109	0.999	0.999	-11.95	-12.94
22119	0.972	0.960	-9.02	-13.77
22127	0.998	0.999	16.40	7.03
22141	0.998	0.998	2.21	10.69
22146	0.994	0.979	-3.78	4.52
22153	0.990	0.998	-19.56	-14.04
22209	0.998	0.999	-8.98	-9.99
22309	0.959	0.971	-23.55	-11.95
22548	0.997	0.998	0.28	-4.89

ตารางที่ 6-1 แสดงผลการประเมินดัชนีความปลอดภัยในชิ้นส่วนหลักของสะพานจ๊กกรี

ชิ้นส่วน	ชนิด	Max Stress (ksc)		Allowable Stress (ksc)	Safety Index	
		DL+Normal Tr.	DL+U20		DL+Normal Tr.	DL+U20
2105	L กลาง	421.5	1423.4	1510	0.28	0.94
2116	U กลาง	-481.0	-1872.1	1398	0.34	1.34
2133	V กลาง	264.2	1337.2	1510	0.17	0.89
2143	D กลาง	265.5	1025.2	1510	0.18	0.68
2403	ST กลาง	314.6	906.6	923	0.34	0.98
2514	FB กลาง	297.0	1487.3	1492	0.20	1.00

ตารางที่ 6-2 แสดงผลการประเมินดัชนีความปลอดภัยในชิ้นส่วนหลักของสะพานกม.03

ชิ้นส่วน	ชนิด	Max Stress (ksc)		Allowable Stress (ksc)	Safety Index	
		DL+Normal Tr.	DL+U20		DL+Normal Tr.	DL+U20
12105	L กลาง	395.8	1495.3	1475	0.27	1.01
12116	U กลาง	-587.3	-2356.4	1356	0.43	1.74
12123	V ริม	359.1	1942.4	1475	0.24	1.32
12142	D กลาง	297.6	1041.5	1475	0.20	0.71
12404	ST กลาง	402.0	1377.5	1211	0.33	1.14
12514	FB กลาง	413.8	2204.3	1463	0.28	1.51

ตารางที่ 6-3 แสดงผลการประเมินดัชนีความปลอดภัยในชิ้นส่วนหลักของสะพานกม.19

ชิ้นส่วน	ชนิด	Max Stress (ksc)		Allowable Stress (ksc)	Safety Index	
		DL+Normal Tr.	DL+U20		DL+Normal Tr.	DL+U20
22109	L กลาง	573.8	2037.9	1510	0.38	1.35
22127	U กลาง	-708.3	-2430.2	1510	0.47	1.61
22141	V กลาง	335.8	1445.4	1510	0.22	0.96
22153	D กลาง	-269.1	-766.5	1204	0.22	0.64
22309	ST กลาง	509.7	1387.5	532	0.96	2.61
22548	FB กลาง	397.6	1323.9	1495	0.27	0.89

ตารางที่ 6-4 ตารางแสดงค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลในชิ้นส่วนที่ทำการตรวจวัดของทั้ง 3 สะพาน

สะพานจักรี			สะพาน กม.03			สะพาน กม.19		
ชิ้นส่วน	จำนวนขบวนรถไฟ (ขบวน)	Effective Stress(ksc)	ชิ้นส่วน	จำนวนขบวนรถไฟ (ขบวน)	Effective Stress(ksc)	ชิ้นส่วน	จำนวนขบวนรถไฟ (ขบวน)	Effective Stress(ksc)
2105	52	179.9	12123	52	313.5	22101	189	127.4
2404	52	415.5	12140	84	261	22119	189	234.2
2304	52	420.2	12113	84	226.1	22146	162	301.2
2514	52	283.7	12105	84	180.3	22109	189	240.6
2405	52	355.9	12142	84	259.7	22153	189	334.1
2205	52	173.7	12116	84	267.4	22127	189	311
2133	52	221	12130	81	67.5	22141	183	359.3
2116	52	212.6	12106	50	169.7	22110	189	236.3
2142	52	208.6	12205	50	174.7	22209	65	235
2242	52	227.8	12216	55	285.4	22253	66	335.5
2104	49	176.4	12304	49	433.8	22227	66	321.2
2130	52	58.5	12404	50	453.7	22309	67	711.6
2143	52	232.5	12514	50	360.8	22409	65	538.3
2141	52	183.5				22548	65	484.9

ตารางที่ 6-5 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลจากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของสะพานจักรี

ชิ้นส่วน	ชนิด	ค่าความเค้นจากเรนโพล์เคาน์ดิง				ค่าความเค้นจากการวิเคราะห์			ratio
		Min Eq Stress (ksc)	Max Eq Stress (ksc)	Eff Stress (ksc)	No. of train (ขบวน)	min (ksc)	max (ksc)	stress range (ksc)	
2105	L กลาง	100.4	253.6	179.9	52	0	139.6	139.6	1.29
2404	ST กลาง	220.3	629	415.5	52	-42.8	234.5	277.3	1.50
2304	ST กลาง	220.4	675.8	420.2	52	-42.8	234.5	277.3	1.52
2514	FB กลาง	182.5	402.4	283.7	52	-12.4	265	277.4	1.02
2405	ST กลาง	188.3	555.1	355.9	52	-42.8	234.5	277.3	1.28
2205	L กลาง	100.3	239.6	173.7	52	0	139.6	139.6	1.24
2133	V ริม	138.4	306.8	221	52	-20.6	199.1	219.7	1.01
2116	U กลาง	117.9	302.5	212.6	52	-169.6	0	169.6	1.25
2142	D กลาง	104.3	273.6	208.6	52	-101.6	172.5	274.1	0.76
2242	D กลาง	115.4	294.1	227.8	52	-101.6	172.5	274.1	0.83
2104	L กลาง	93.8	250.9	176.4	49	0	139	139	1.27
2130	V กลาง	33.3	77.2	58.5	52	0	0	0	-
2143	D กลาง	116.2	307	232.5	52	-101.6	172.5	274.1	0.85
2141	D ริม	102.2	228.2	183.5	52	-150.4	38.5	188.9	0.97

ตารางที่ 6-6 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิภาพผลจากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของสะพานกม.03

ชิ้นส่วน	ชนิด	ค่าความเค้นจากเรนโพล์เคาน์ติง				ค่าความเค้นจากการวิเคราะห์			ratio
		Min Eq Stress (ksc)	Max Eq Stress (ksc)	Eff Stress (ksc)	No. of train (ขบวน)	min (ksc)	max (ksc)	stress range (ksc)	
12123	V ริม	269.2	338.1	313.5	52	-17.1	245.8	262.9	1.19
12140	D ริม	175.6	385.2	261	84	-19.1	217.7	236.8	1.10
12113	U ริม	132.3	356.1	226.1	84	-201.8	0	201.8	1.12
12105	L กลาง	131.3	255.3	180.3	84	0	142.4	142.4	1.27
12142	D กลาง	212.2	359.1	259.7	84	-111.9	183.3	295.2	0.88
12116	U กลาง	170.7	410.7	267.4	84	-213.7	0	213.7	1.25
12130	V กลาง	26.2	109	67.5	81	0	0	0	-
12106	L กลาง	115.9	337.4	169.7	50	0	142.4	142.4	1.19
12205	L กลาง	121.2	339	174.7	50	0	142.4	142.4	1.23
12216	U กลาง	182.4	435.6	285.4	55	-213.7	0	213.7	1.34
12304	ST กลาง	248.2	494.5	433.8	49	-102	361	463	0.94
12404	ST กลาง	267.2	525.9	453.7	50	-102	361	463	0.98
12514	FB กลาง	310.4	404.2	360.8	50	-23	404	427	0.84

ตารางที่ 6-7 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าช่วงความเค้นประสิทธิภาพผลจากการตรวจวัดกับการวิเคราะห์ของสะพานกม.19

ชิ้นส่วน	ชนิด	ค่าความเค้นจากเรนโพล์เคาน์ติง				ค่าความเค้นจากการวิเคราะห์			ratio
		Min Eq Stress (ksc)	Max Eq Stress (ksc)	Eff Stress (ksc)	No. of train (ขบวน)	min (ksc)	max (ksc)	stress range (ksc)	
22101	L ริม	58.1	193.8	127.4	189	0	97.6	97.6	1.31
22119	EP	113.8	340	234.2	189	-173.2	0	173.2	1.35
22146	D ริม	150.5	443.9	301.2	162	-7.7	172.9	180.6	1.67
22109	L กลาง	123.8	369.7	240.6	189	0	157.1	157.1	1.53
22153	D กลาง	180.4	445.5	334.1	189	-126.9	112.8	239.7	1.39
22127	U กลาง	164.8	461.1	311	189	-187.1	0	187.1	1.66
22141	V กลาง	183.5	646.9	359.3	183	-13.2	238.2	251.4	1.43
22110	L กลาง	121.4	367.3	236.3	189	0	157.1	157.1	1.50
22209	L กลาง	129.8	330.3	235	65	0	157.1	157.1	1.50
22253	D กลาง	188.0	453.6	335.5	66	-126.9	112.8	239.7	1.40
22227	U กลาง	177.8	448.9	321.2	66	-187.1	0	187.1	1.72
22309	ST กลาง	372.7	1057.7	711.6	67	-118	388	506	1.41
22409	ST กลาง	257.1	840.3	538.3	65	-118	388	506	1.06
22548	FB กลาง	245.6	820	484.9	65	-22	329	351	1.38

ตารางที่ 6-8 ตารางสรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆในสะพานจักรี

ชิ้นส่วน	ชนิด	ประเภทรถโดยสาร				ประเภทรถบรรทุก			
		Min Eq. Stress (ksc)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	No. of Train	Min Eq. Stress (ksc)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	No. of Train
2105	L กลาง	100.4	192.6	156.8	25	121.9	253.6	204.9	12
2116	U กลาง	117.9	220.5	183.6	25	136.1	301.1	242.5	12
2133	V กลาง	138.4	306.8	209.4	25	181.0	282.6	232.3	12
2143	D กลาง	116.2	257.1	213.3	25	139.9	273.9	243.3	12
2403	ST กลาง	220.4	450.7	347.0	25	272.6	667.2	502.2	12
2514	FB กลาง	182.5	402.4	273.6	25	231.3	335.8	291.4	12

ตารางที่ 6-9 ตารางสรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆในสะพานกม.03

ชิ้นส่วน	ชนิด	ประเภทรถโดยสาร				ประเภทรถบรรทุก			
		Min Eq. Stress (ksc)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	No. of Train	Min Eq. Stress (ksc)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	No. of Train
12105	L กลาง	131.3	255.3	180.6	79	166.7	191.5	177.6	3
12116	U กลาง	170.8	410.7	267.5	79	245.5	311.1	271.2	3
12123	V ริม	269.2	338.1	312.4	55	269.3	296.4	283.5	2
12142	D กลาง	175.7	359.1	259.8	79	236.2	268.1	256.8	3
12404	ST กลาง	267.2	525.9	455.2	49	361.7	361.7	361.7	1
12514	FB กลาง	321.0	404.2	361.7	49	310.4	310.4	310.4	1

ตารางที่ 6-10 ตารางสรุปค่าช่วงความเค้นเทียบเท่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถไฟประเภทต่างๆในสะพานกม.19

ชิ้นส่วน	ชนิด	ประเภทรถโดยสาร				ประเภทรถบรรทุก			
		Min Eq. Stress (ksc)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	No. of Train	Min Eq. Stress (ksc)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	No. of Train
22109	L กลาง	124.2	333.7	223.1	94	211.7	358.0	280.5	35
22127	U กลาง	167.3	422.1	287.1	94	270.9	458.9	361.9	35
22141	V กลาง	184.4	436.7	341.5	92	221.2	646.9	403.3	33
22153	D กลาง	180.4	444.4	323.2	94	305.7	445.5	364.2	35
22309	ST กลาง	372.7	905.0	663.9	45	447.0	1057.7	803.1	20
22548	FB กลาง	245.6	558.4	445.7	43	302.0	820.0	552.0	20

ตารางที่ 6-11 ตารางสรุปค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกรรไฟประเภทต่างๆในสะพานจ๊กกรี

ชิ้นส่วน	ชนิด	ประเภททรคโดยสว			ประเภททรคบรรทุก			Ratio
		Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	Damage ($\times 10^{-9}$)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	Damage ($\times 10^{-9}$)	
2105	L กลาง	192.6	156.8	5.1	253.6	204.9	11.4	2.23
2116	U กลาง	220.5	183.6	8.2	301.1	242.5	18.9	2.30
2133	V กลาง	306.8	209.4	12.2	282.6	232.3	16.6	1.36
2143	D กลาง	257.1	213.3	12.9	273.9	243.3	19.1	1.48
2403	ST กลาง	450.7	347.0	55.4	667.2	502.2	167.8	3.03
2514	FB กลาง	402.4	273.6	27.1	335.8	291.4	32.8	1.21

ตารางที่ 6-12 ตารางสรุปค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกรรไฟประเภทต่างๆในสะพานกม.03

ชิ้นส่วน	ชนิด	ประเภททรคโดยสว			ประเภททรคบรรทุก			Ratio
		Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	Damage ($\times 10^{-9}$)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	Damage ($\times 10^{-9}$)	
12105	L กลาง	255.3	180.6	7.8	*	*	*	-
12116	U กลาง	410.7	267.5	25.4	*	*	*	-
12123	V ริม	338.1	312.4	40.4	*	ข้อมูลน้อย	*	-
12142	D กลาง	359.1	259.8	23.2	*	ไม่นำมา	*	-
12404	ST กลาง	525.9	455.2	125.0	*	ประเเมน	*	-
12514	FB กลาง	404.2	361.7	62.7	*	*	*	-

ตารางที่ 6-13 ตารางสรุปค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกรรไฟประเภทต่างๆในสะพานกม.19

ชิ้นส่วน	ชนิด	ประเภททรคโดยสว			ประเภททรคบรรทุก			Ratio
		Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	Damage ($\times 10^{-9}$)	Max Eq. Stress (ksc)	EFF Stress (ksc)	Damage ($\times 10^{-9}$)	
22109	L กลาง	333.7	223.1	14.7	358.0	280.5	29.2	1.99
22127	U กลาง	422.1	287.1	31.4	458.9	361.9	62.8	2.00
22141	V กลาง	436.7	341.5	52.8	646.9	403.3	86.9	1.65
22153	D กลาง	444.4	323.2	44.7	445.5	364.2	64.0	1.43
22309	ST กลาง	905.0	663.9	387.8	1057.7	803.1	686.4	1.77
22548	FB กลาง	558.4	445.7	117.3	820.0	552.0	222.9	1.90

ตารางที่ 7-1 แสดงค่าความเค้นสูงสุดในชั้นส่วนหลักของสะพานจากการตรวจวัดการใช้งานปกติ

ชนิด	สะพานจักรี		สะพานกม.03		สะพานกม.19	
	ชั้นส่วน	Max Stress (ksc)	ชั้นส่วน	Max Stress (ksc)	ชั้นส่วน	Max Stress (ksc)
L	2105	245.2	12105	252.2	22109	328.4
U	2116	-290.9	12116	-409.4	22127	-418.7
V	2133	199.0	12123	308.5	22141	264.8
D	2143	202.4	12142	249.1	22153	-230.1
ST	2403	298.0	12404	387.8	22309	497.8
FB	2514	266.7	12514	385.4	22548	380.4

ตารางที่ 7-2 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง

สะพาน	ค่าหน่วยแรงคราก เฉลี่ย (ksc)	ค่าหน่วยแรงครากที่ ใช้ประเมิน F_y (ksc)	ค่ากำลังรับแรงดึง เฉลี่ย (ksc)
จักรี	2858	2746	4352
กม.03	2853	2682	4439
กม.19	2806	2738	4346
เหล็กชนิด A572 Gr.42	2900	2900	4150

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7-3 แสดงค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในชิ้นส่วนแต่ละชนิดเนื่องจากการใช้งานปกติ

สะพานจักรี			สะพานกม.03			สะพานกม.19		
ชิ้นส่วน	ชนิด	Max EFF Stress (ksc)	ชิ้นส่วน	ชนิด	Max EFF Stress (ksc)	ชิ้นส่วน	ชนิด	Max EFF Stress (ksc)
2142	D	579.9	12302	ST	731.7	22308	ST	930.0
2502	FB	456.3	12505	FB	690.1	22513	FB	690.4
2303	ST	435.9	12142	D	632.3	22140	V	577.2
2123	V	416.9	12123	V	588.5	22149	D	550.3
2114	U	349.4	12116	U	450.1	22123	U	429.1
2105	L	268.0	12104	L	298.3	22109	L	360.3

ตารางที่ 7-4 แสดงค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในชิ้นส่วนแต่ละชนิดเนื่องจากน้ำหนักแบบ U20

สะพานจักรี			สะพานกม.03			สะพานกม.19		
ชิ้นส่วน	ชนิด	Max EFF Stress (ksc)	ชิ้นส่วน	ชนิด	Max EFF Stress (ksc)	ชิ้นส่วน	ชนิด	Max EFF Stress (ksc)
2116	U	1682.0	12508	FB	2225.8	22146	D	2214.6
2140	D	1592.5	12116	U	2178.5	22127	U	2140.6
2508	FB	1498.5	12123	V	1930.4	22109	L	1792.5
2123	V	1354.5	12140	D	1832.1	22543	FB	1656.0
2104	L	1250.2	12301	ST	1776.2	22301	ST	1605.1
2304	ST	1027.1	12104	L	1365.1	22140	V	1376.2

ตารางที่ 7-5 ตารางสรุปอายุการใช้งานที่เหลืออยู่น้อยที่สุดในชั้นส่วนโครงสร้างสะพานเนื่องจากขบวนรถไฟปกติ

สะพานจักรี					สะพานกม.03					สะพานกม.19				
ชั้นส่วน	ชนิด	อายุที่เหลือ (ปี)			ชั้นส่วน	ชนิด	อายุที่เหลือ (ปี)			ชั้นส่วน	ชนิด	อายุที่เหลือ (ปี)		
		0%	1%	2%			0%	1%	2%			0%	1%	2%
2142	D	>100	>100	95	12302	ST	>100	>100	80	22308	ST	0	0	0
2123	V	>500	>100	>100	12505	FB	>100	>100	98	22513	FB	86	63	51
2303	ST	>500	>100	>100	12142	D	>100	>100	>100	22140	V	>100	>100	88
2502	FB	>500	>100	>100	12123	V	>100	>100	>100	22149	D	>100	>100	>100
2105	L	>2000	>500	>500	12104	L	>2000	>500	>500	22109	L	>500	>100	>100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 1-1 สะพานจักรี อ. ท่าเรือ จ. พระนครศรีอยุธยา



(ก)



(ข)

รูปที่ 1-2 สะพานกม.03 เขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร

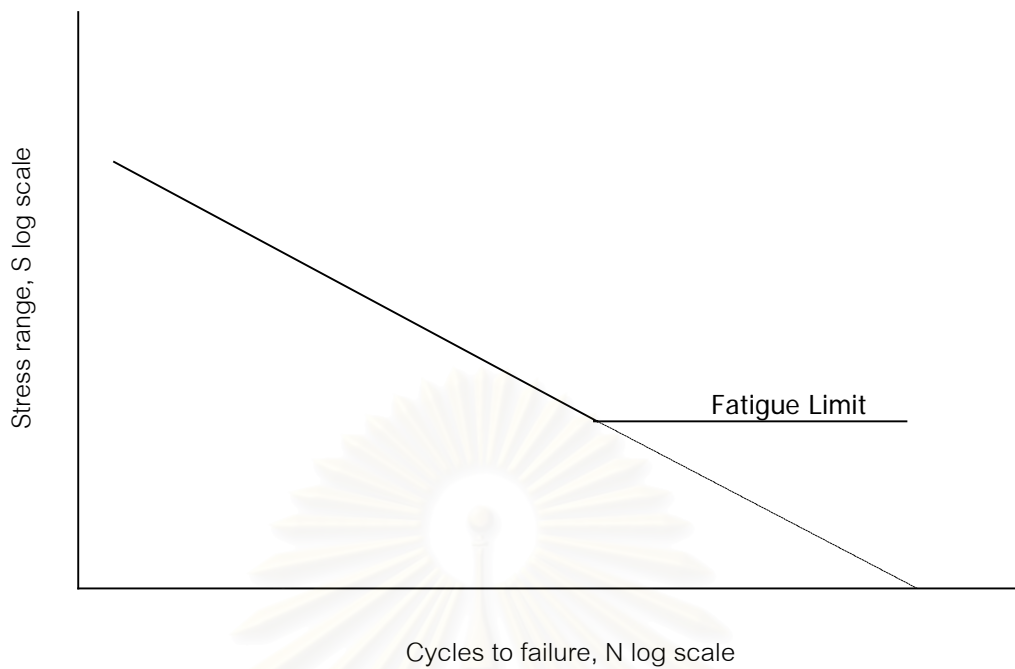


(ก)

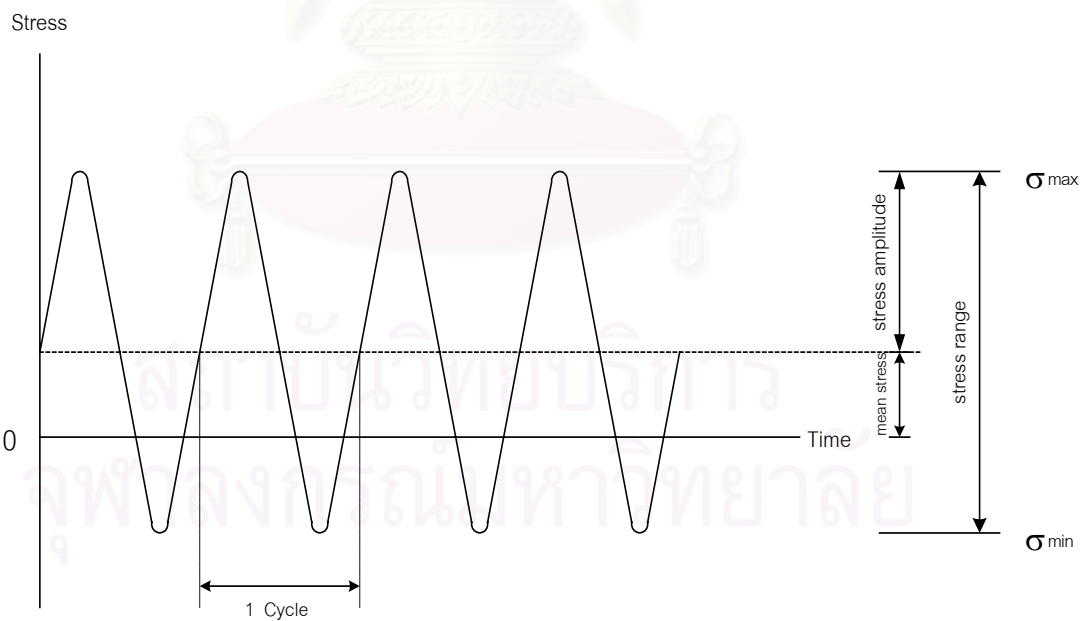


(ข)

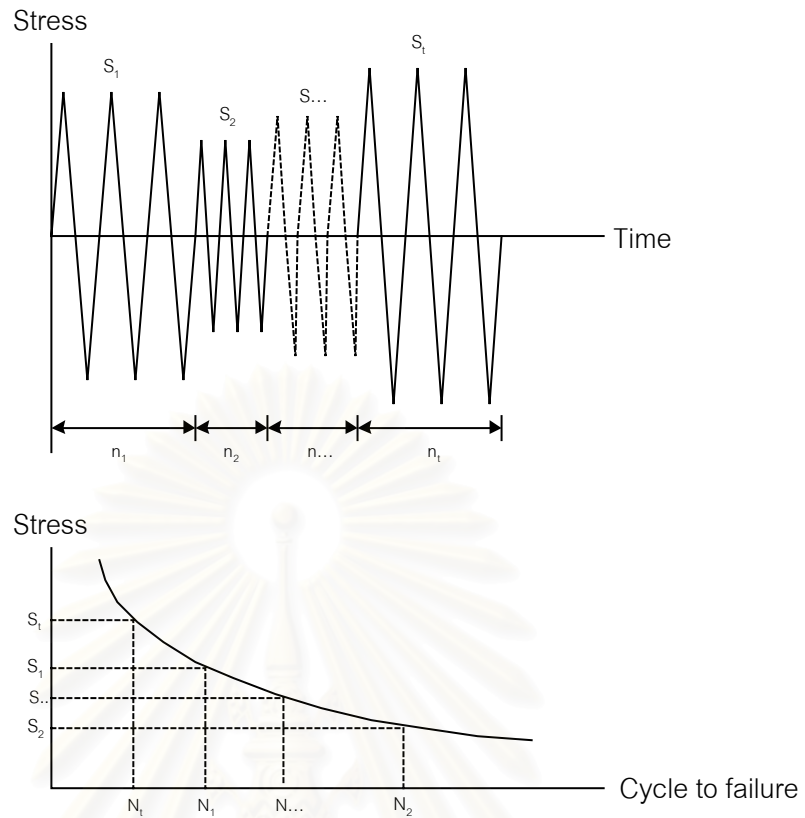
รูปที่ 1-3 สะพานกม.19 เขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร



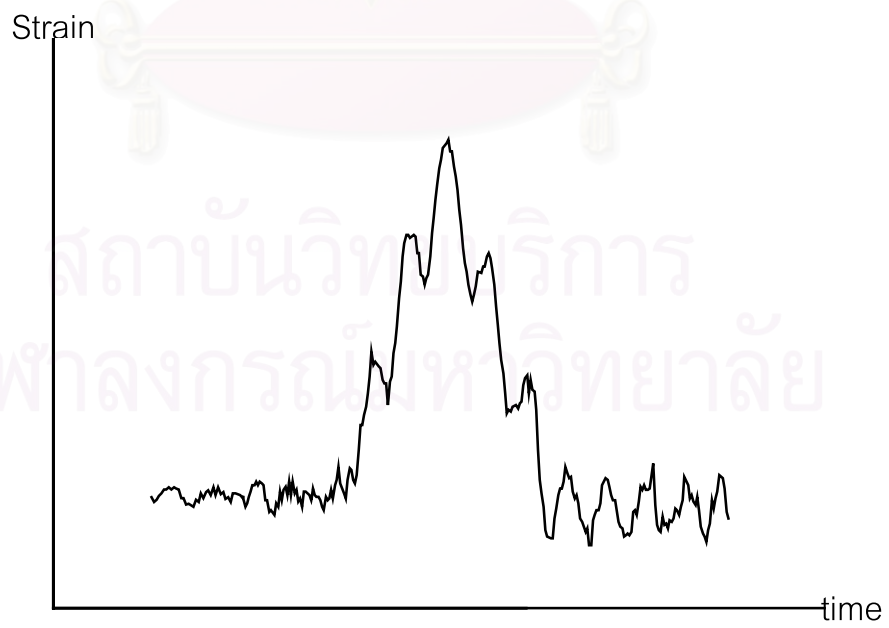
รูปที่ 2-1 ตัวอย่างกราฟ S-N



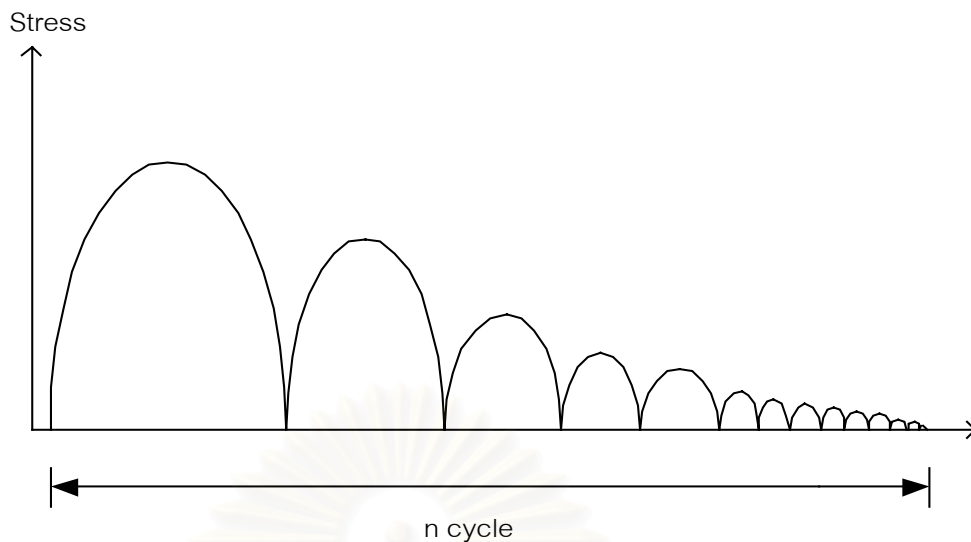
รูปที่ 2-2 แอมพลิจูดคงที่ของหน่วยแรง



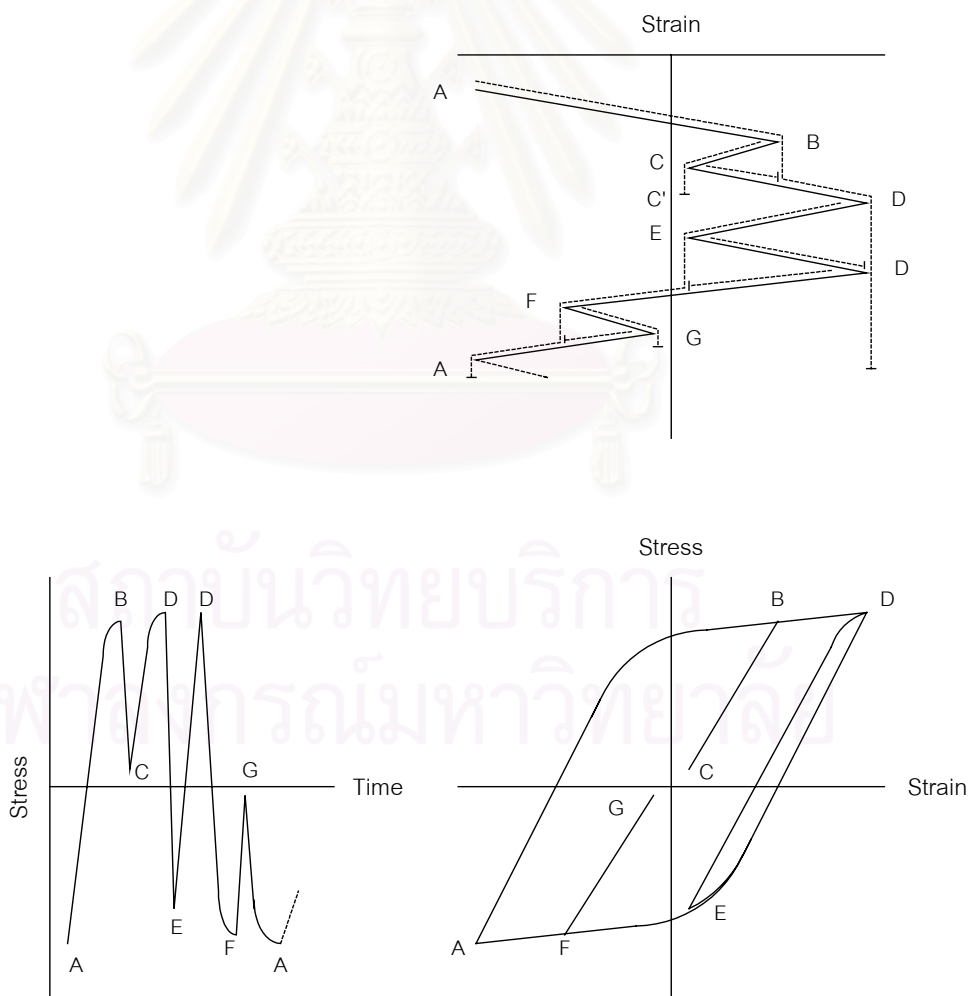
รูปที่ 2-3 แอมพลิจูดไม่คงที่ของหน่วยแรง



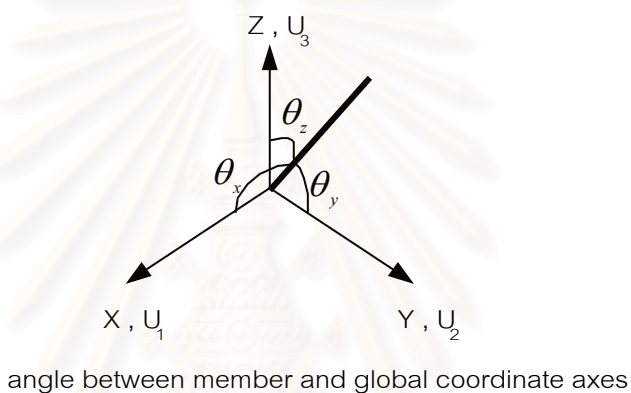
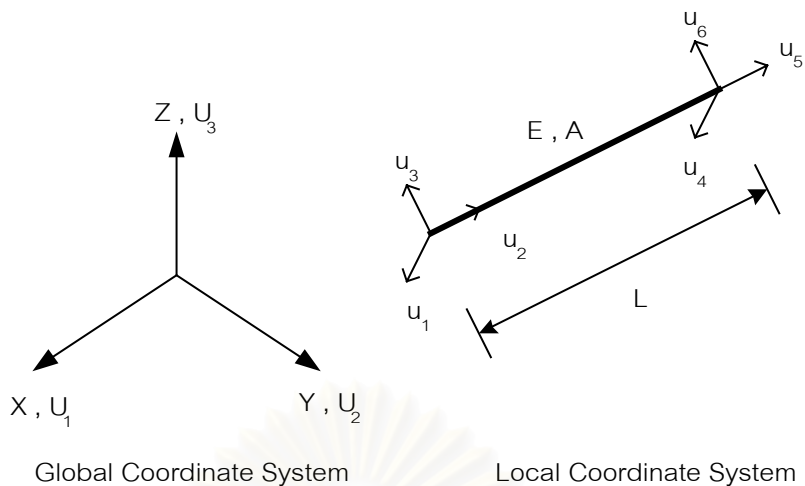
รูปที่ 2-4 ลักษณะของสัญญาณความเครียด



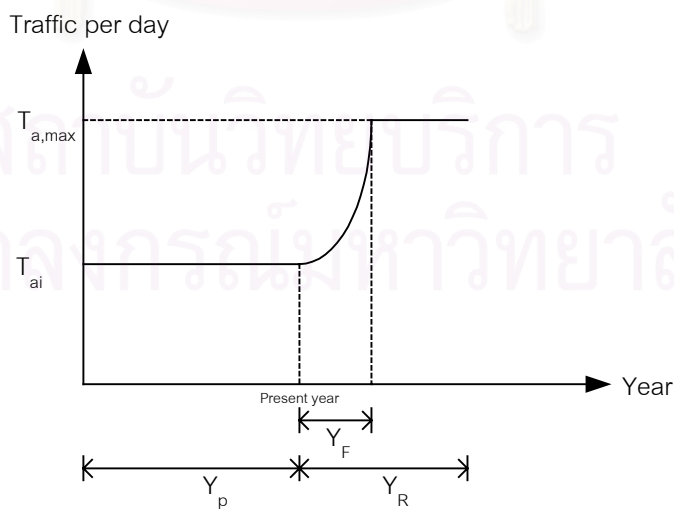
รูปที่ 2-5 สัญลักษณ์ความเค้นที่ผ่านวิธีเรนโพล์วเคาน์ติง



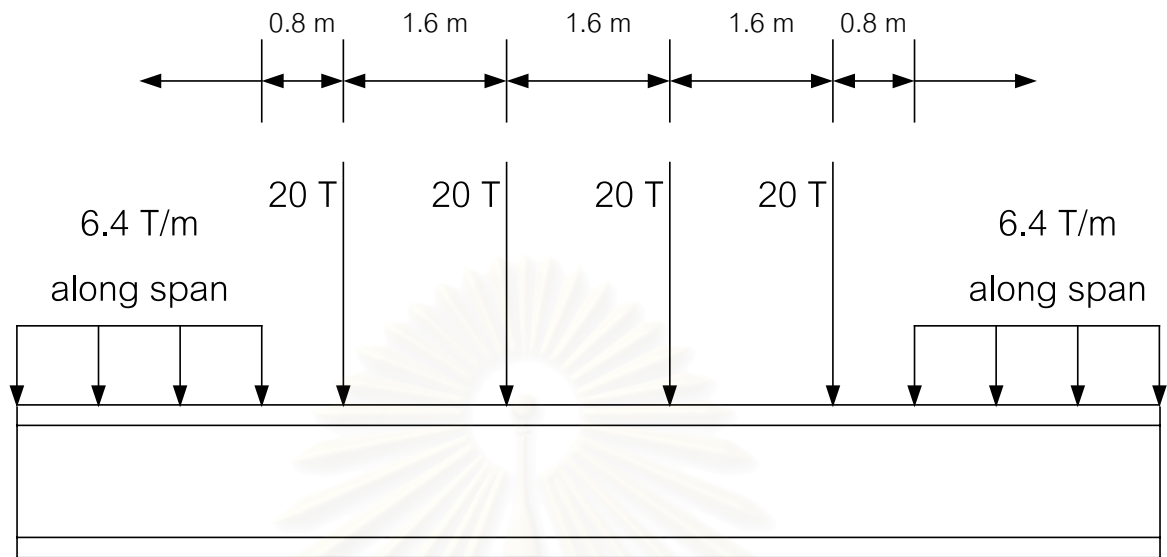
รูปที่ 2-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดและวิธีการเรนโพล์วเคาน์ติง



รูปที่ 2-7 แสดงดีกรีความอิสระของเอลิเมนต์แบบเส้นในระบบแกนประจำตัวและระบบแกนทั้งโครงสร้าง



รูปที่ 2-8 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการวิ่งผ่านของรถไฟต่อวัน

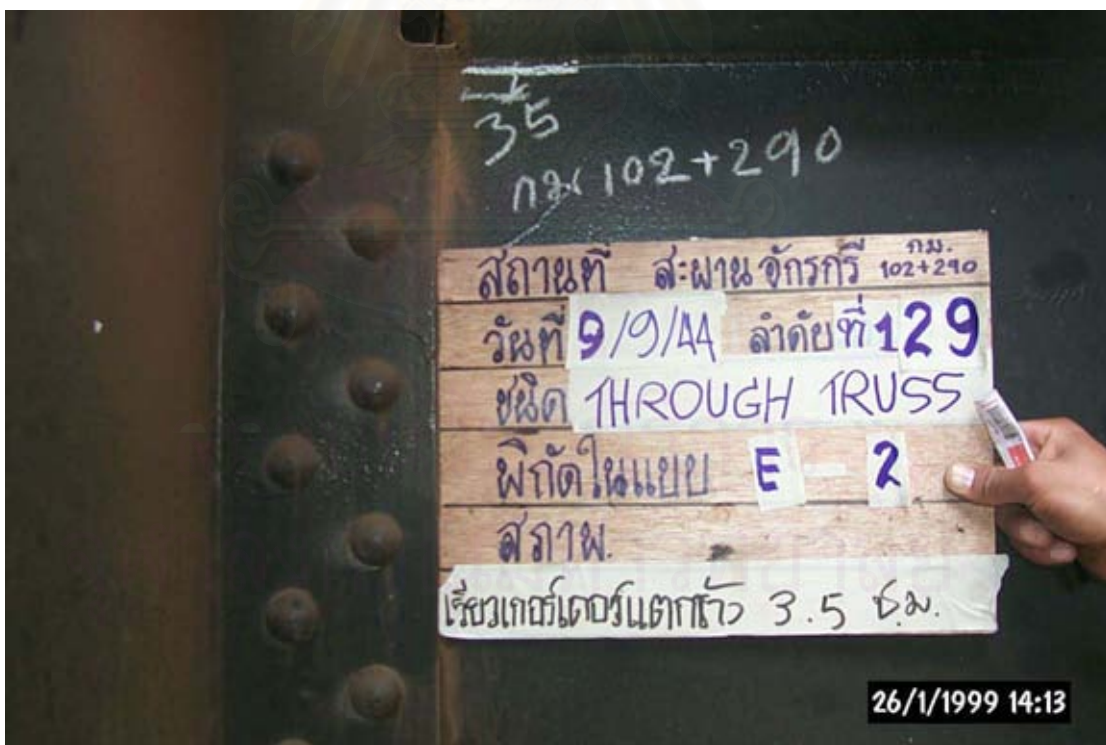


รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะน้ำหนักบรรทุกรถไฟแบบ U20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

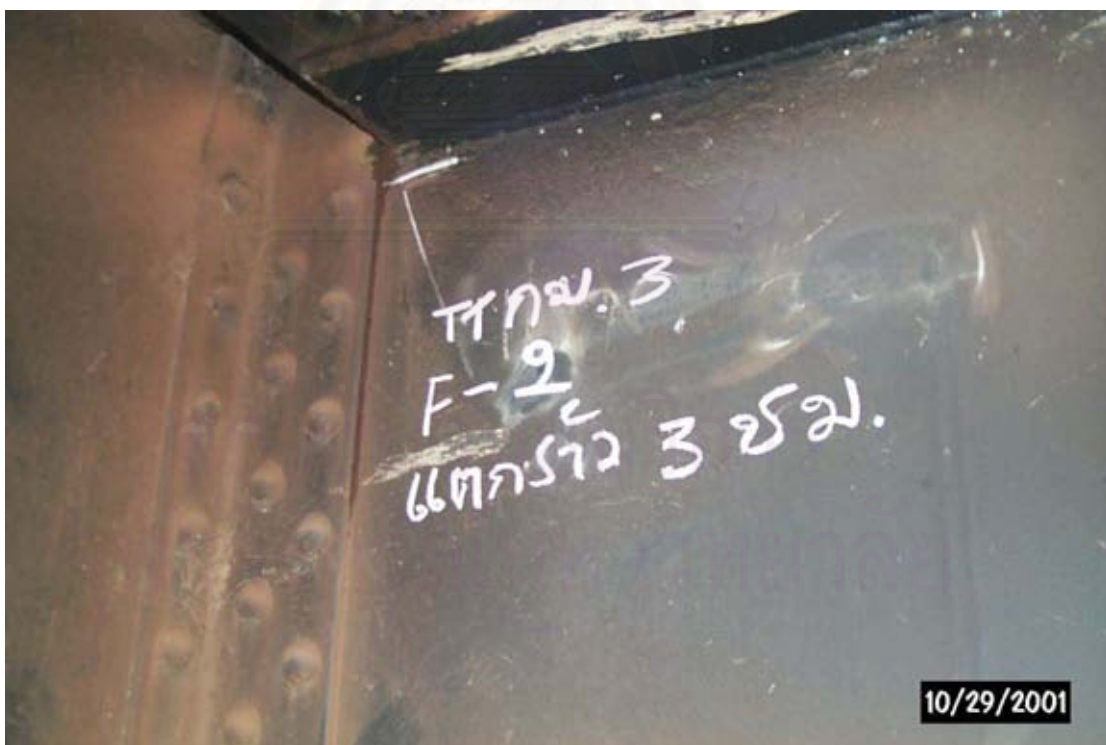


(ข)

รูปที่ 3-1 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานจักรกรี



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-2 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานกม.03

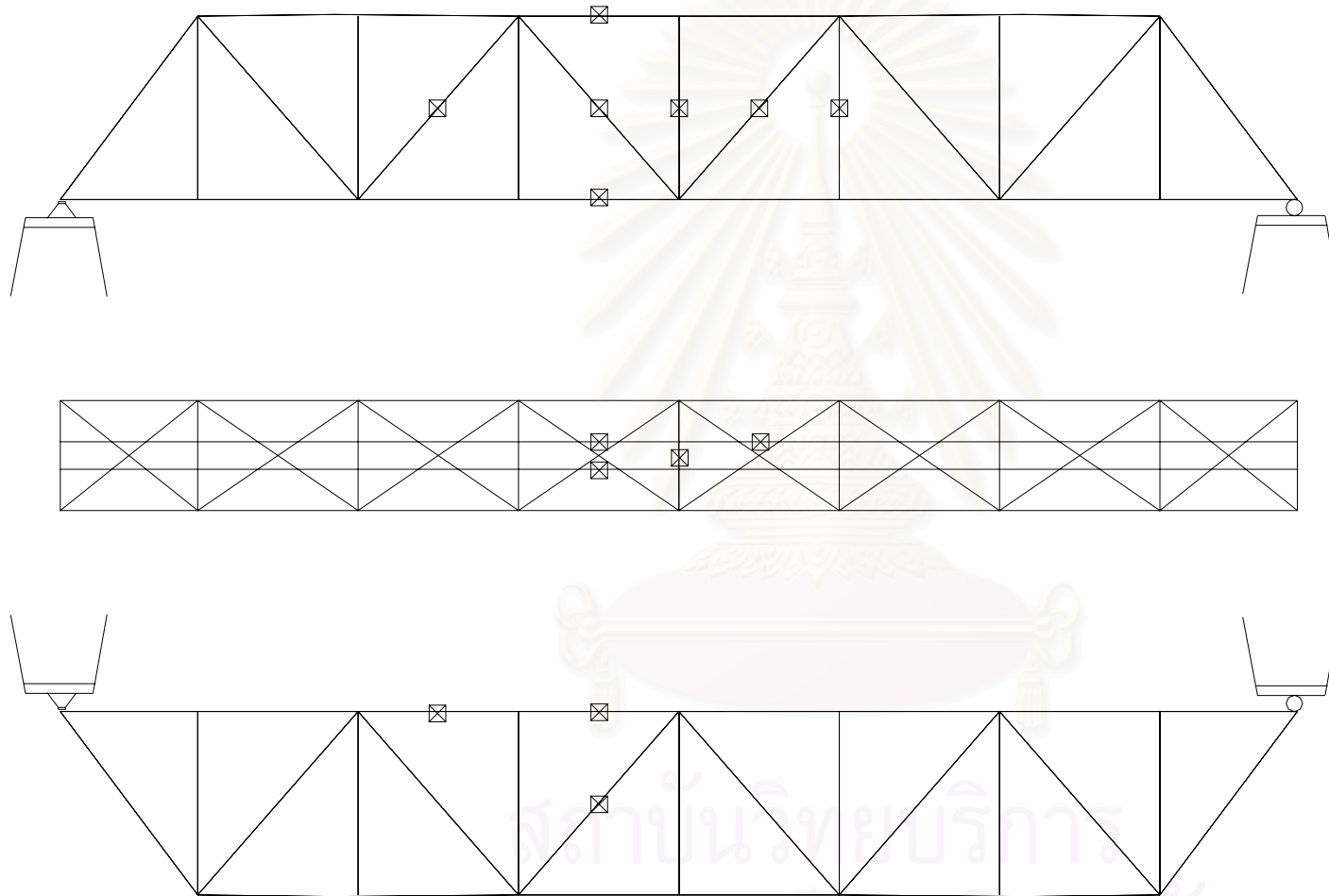


(ก)



(ข)

รูปที่ 3-3 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในโครงสร้างสะพานกม.19



ชั้นส่วนที่ติดเสตรนเกจ

2205*

2304*

2404

2514*

2305

2105

2233*

2216*

2242

2142

2204

2230

2243

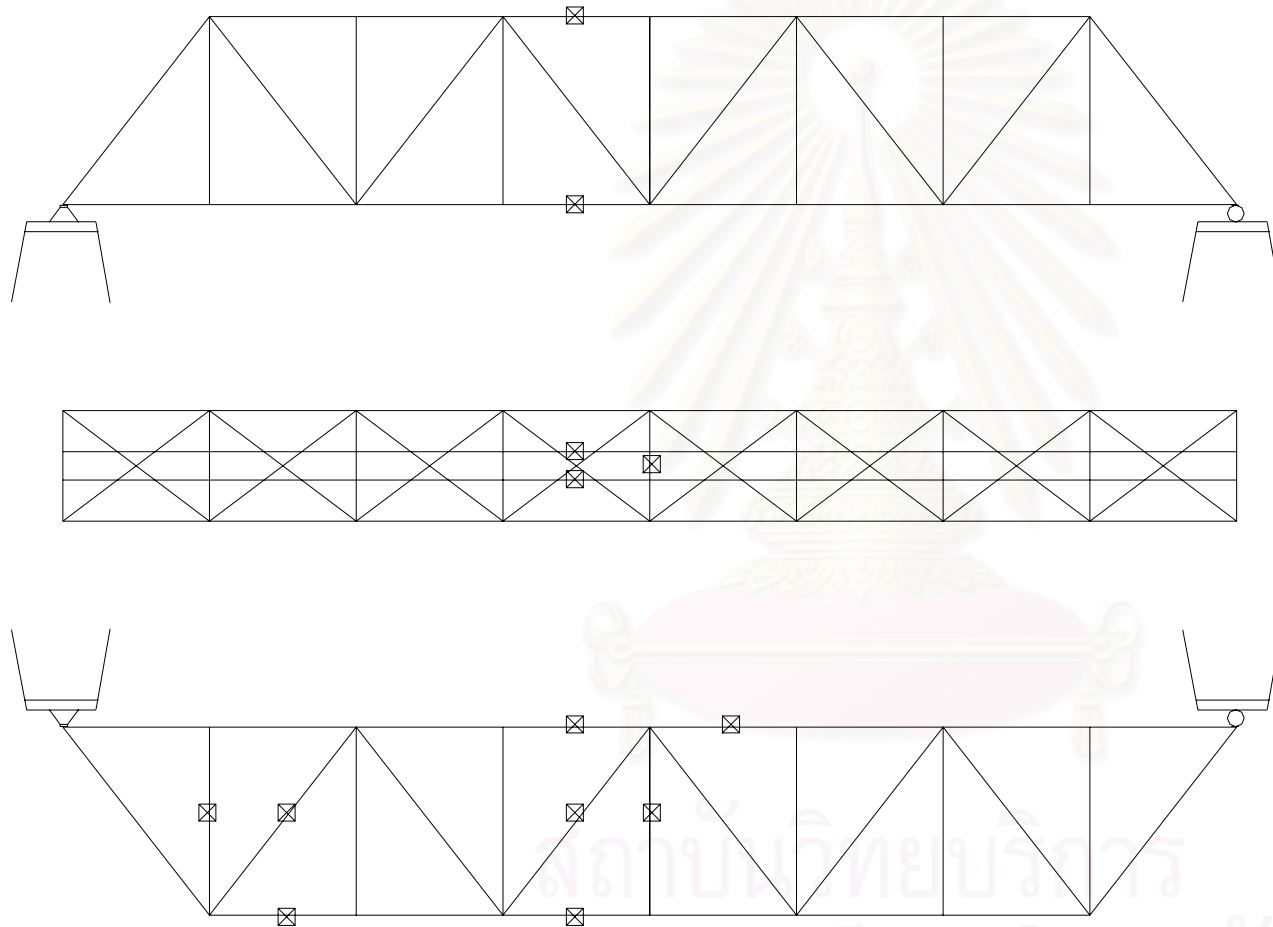
2241*

ชั้นส่วนที่มี * เป็นชั้น

ส่วนที่วัดความเครียด

ตอนทดสอบหัวรถจักร

รูปที่ 3-4 แสดงตำแหน่งการติดเสตรนเกจในการตรวจวัดสะพานจักรี



ชั้นส่วนที่ติดเสตรนเกจ

12123*

12140*

12113*

12105*

12142*

12116*

12130

12106

12205*

12216

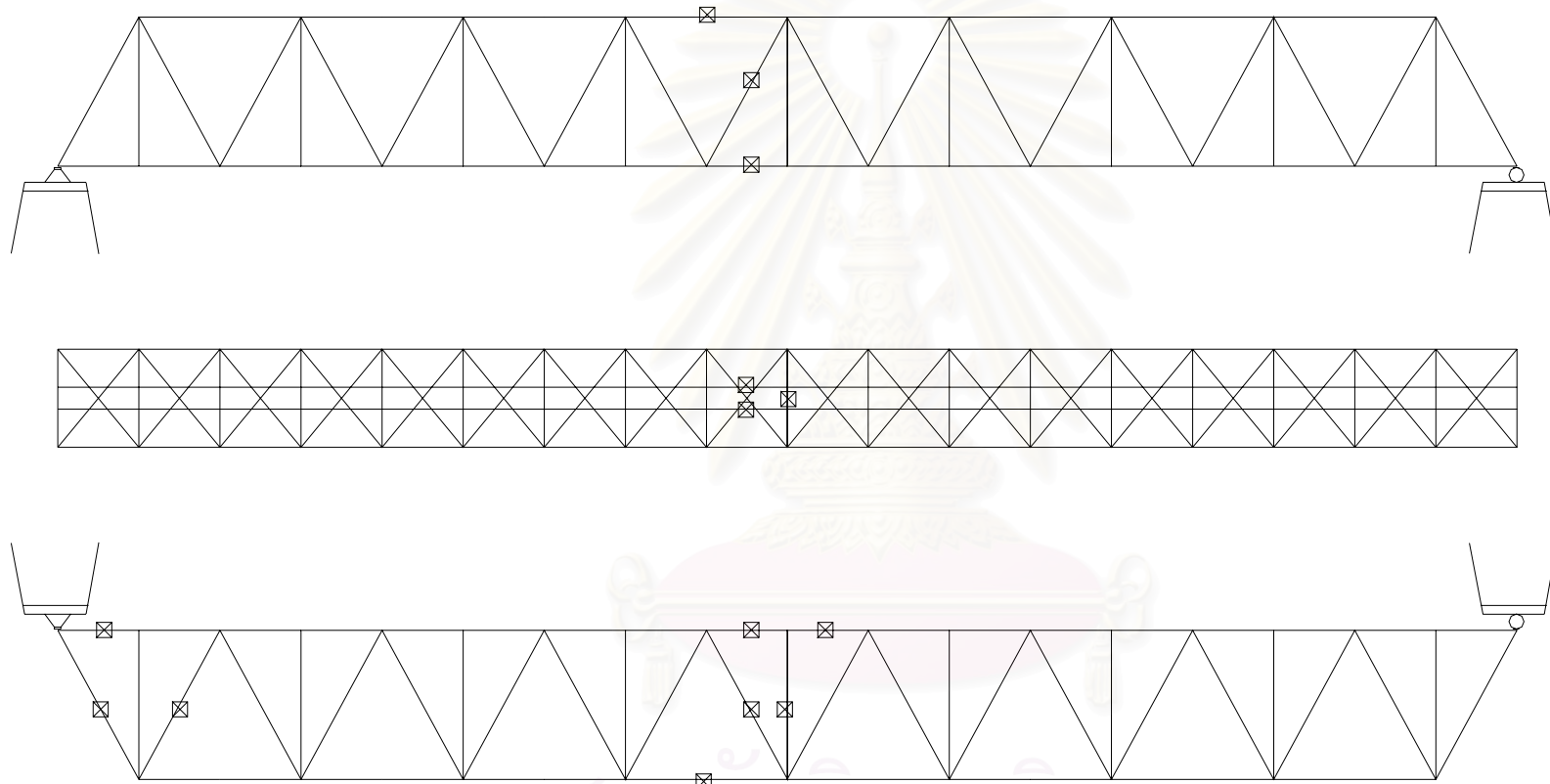
12304

12404*

12514*

ชั้นส่วนที่มี * เป็นชั้น
ส่วนที่วัดความเครียด
ตอนทดสอบหัวรถจักร

รูปที่ 3-5 แสดงตำแหน่งการติดเสตรนเกจในการตรวจวัดสะพานกม.03



ชั้นส่วนที่ติดเสตรนเกจ

22101*

22119*

22146*

22109*

22153*

22127*

22141*

22110

22209*

22253

22227

22309*

22409

22548*

ชั้นส่วนที่มี * เป็นชั้น

ส่วนที่วัดความเครียด

ทดสอบห้วงจักร

รูปที่ 3-6 แสดงตำแหน่งการติดเสตรนเกจในการตรวจวัดสะพานถ.19



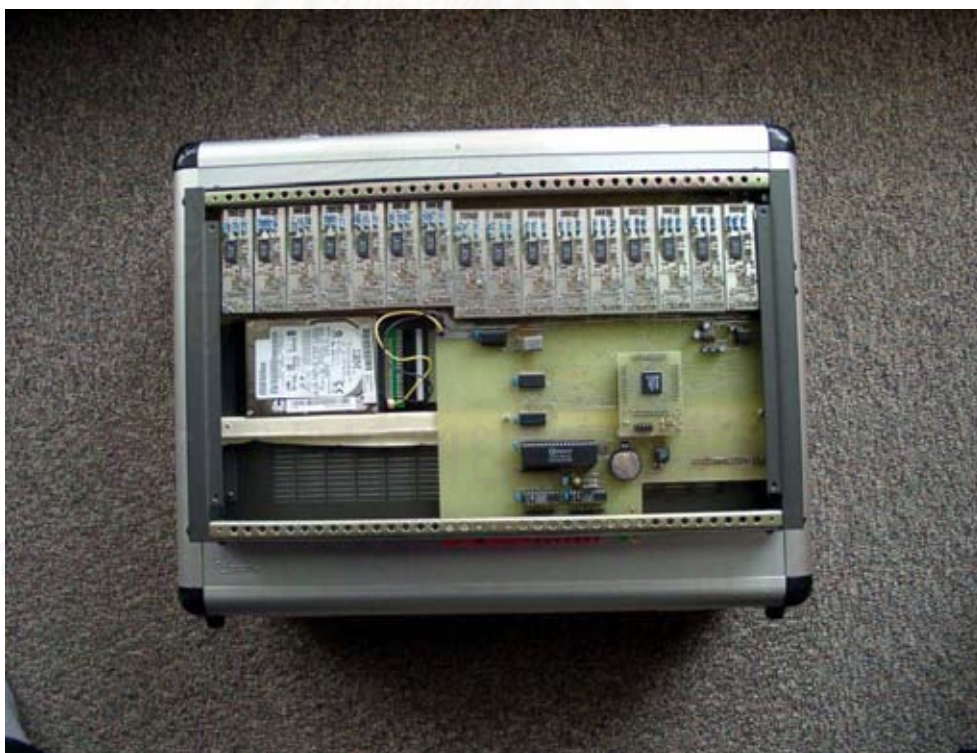
รูปที่ 3-7 แสดงการเตรียมผิวของชิ้นส่วนก่อนติดตั้งสเตรนเกจ



รูปที่ 3-8 สเตรนเกจที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว



(ก) แสดงลักษณะภายนอกของดาต้าล็อกเกอร์

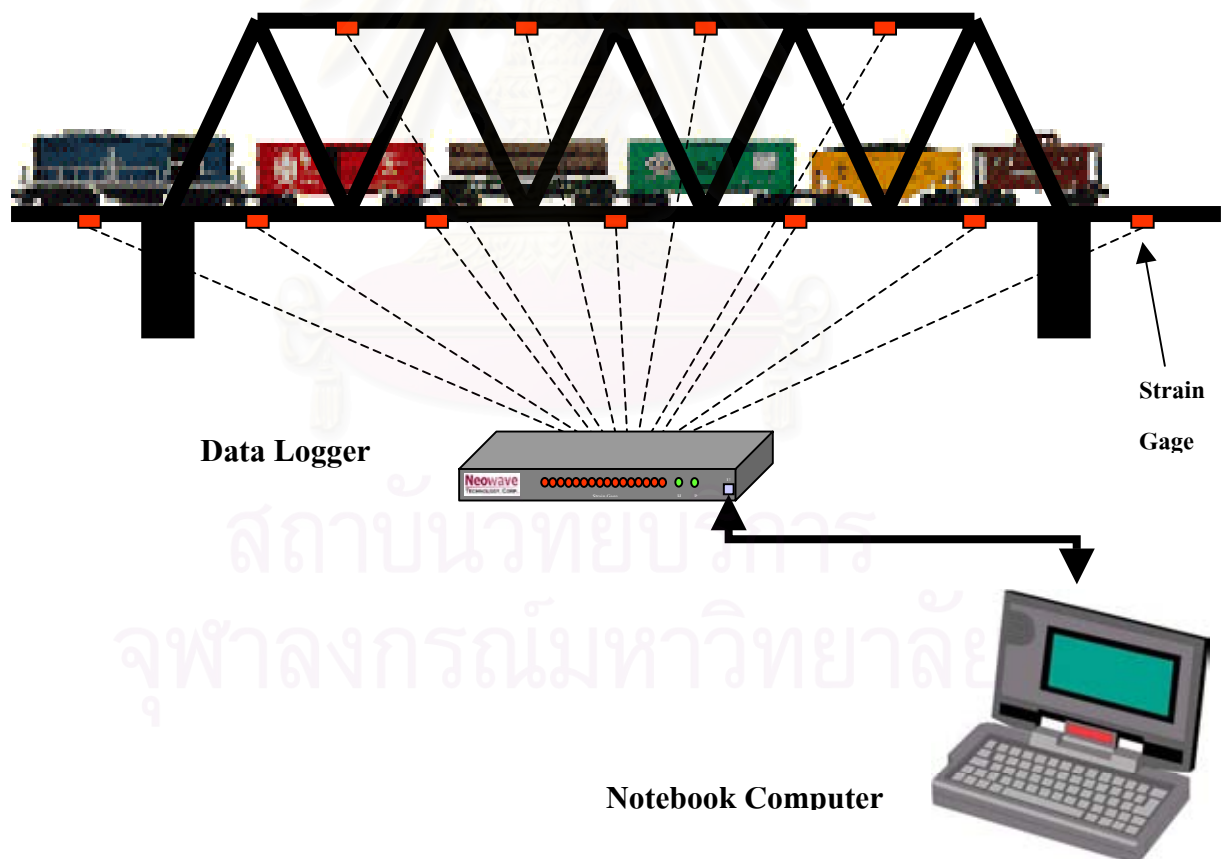


(ข) แสดงลักษณะภายในของดาต้าล็อกเกอร์

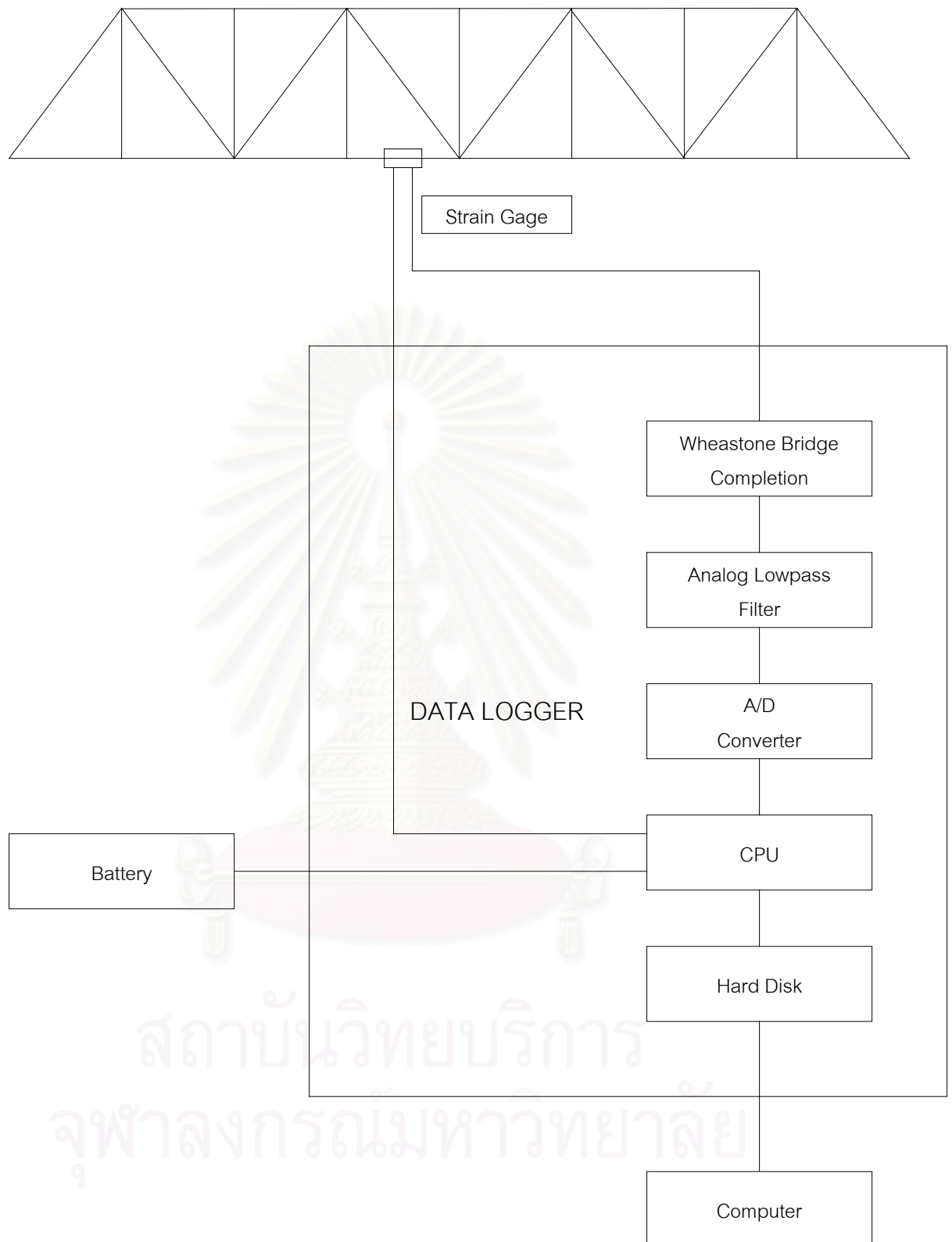
รูปที่ 3-9 แสดงลักษณะของดาต้าล็อกเกอร์



รูปที่ 3-10 รูปแสดงตัวทริกเกอร์



รูปที่ 3-11 แสดงระบบการทำงานของ การตรวจวัดค่าความเครียดในสนาม



รูปที่ 3-12 แสดงแผนผังการทำงานของอุปกรณ์การตรวจวัดความเค้น

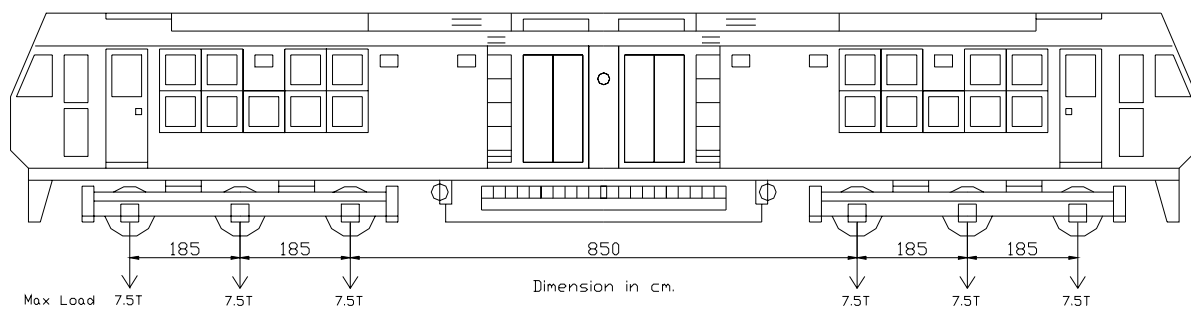


(ก)

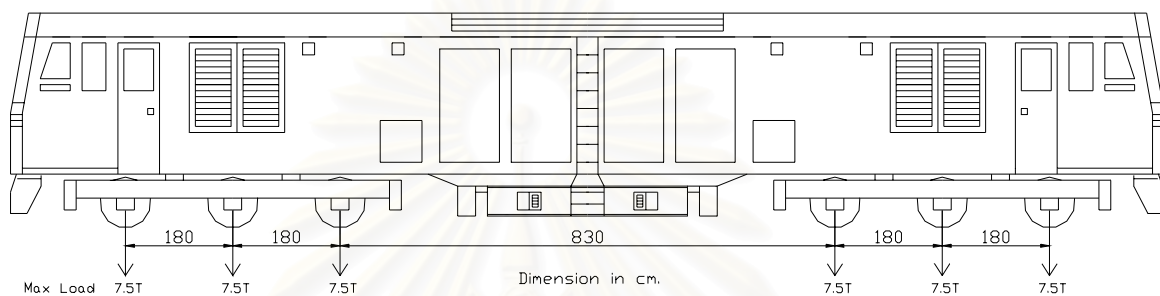


(ข)

รูปที่ 3-13 แสดงการทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักแบบห้วงจักร



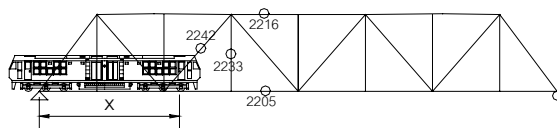
Locomotive for Chakri & KM19+223 Bridge



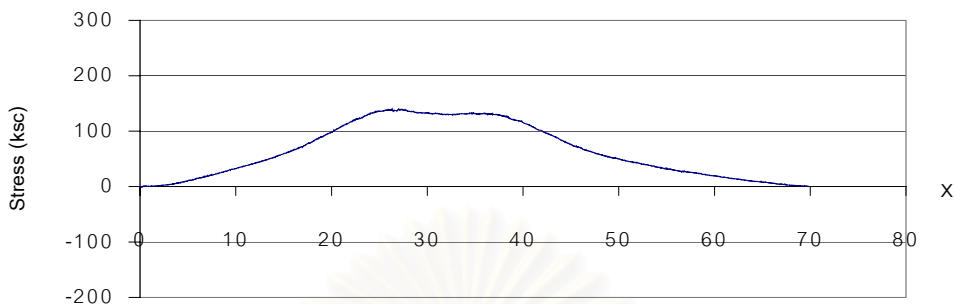
Locomotive for KM03+870 Bridge

รูปที่ 3-14 แสดงลักษณะของหัวรถจักรที่ใช้ในการทดสอบ

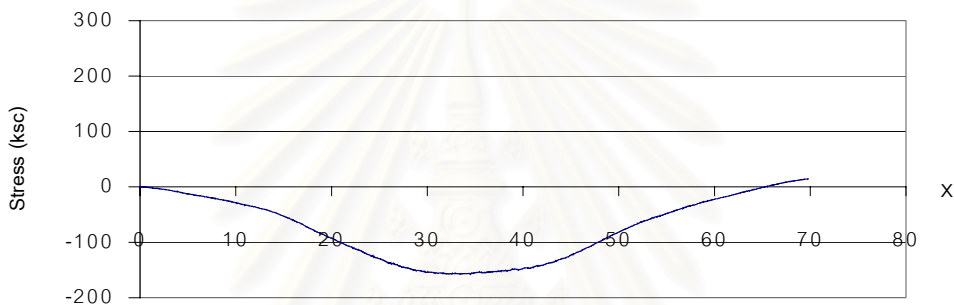
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



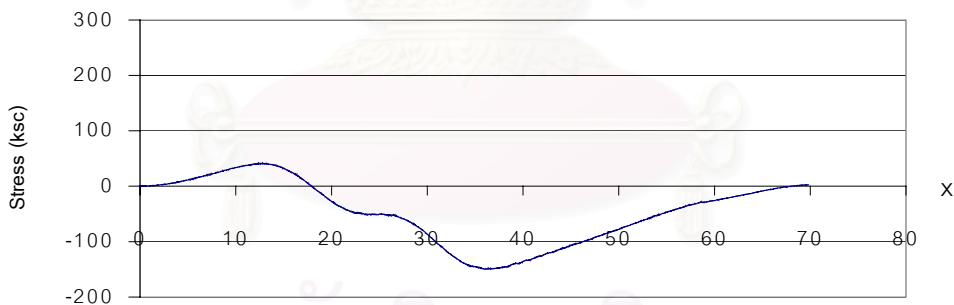
Member 2205 Lower Chord



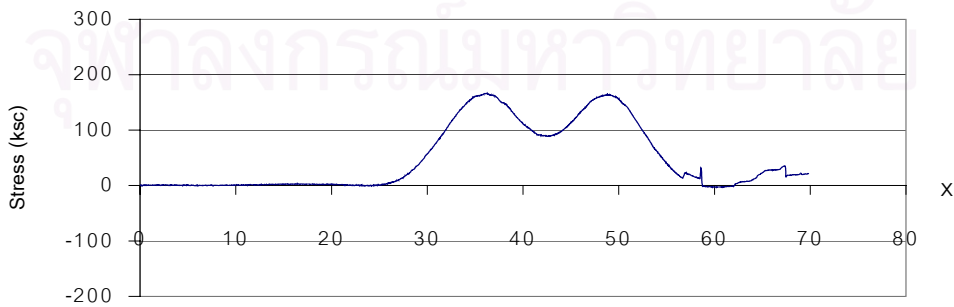
Member 2216 Upper Chord



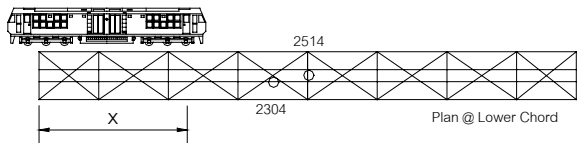
Member 2241 Diagonal



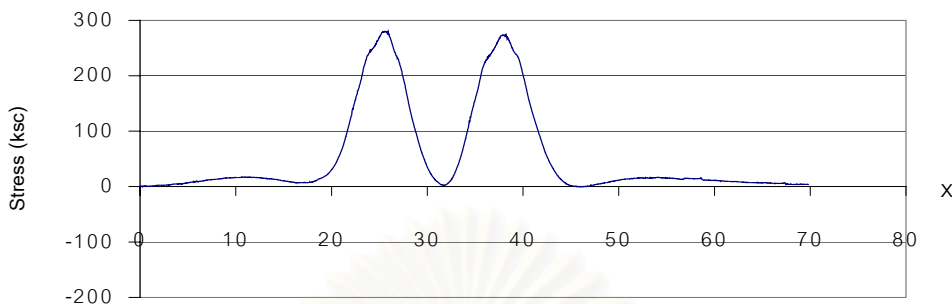
Member 2233 Vertical



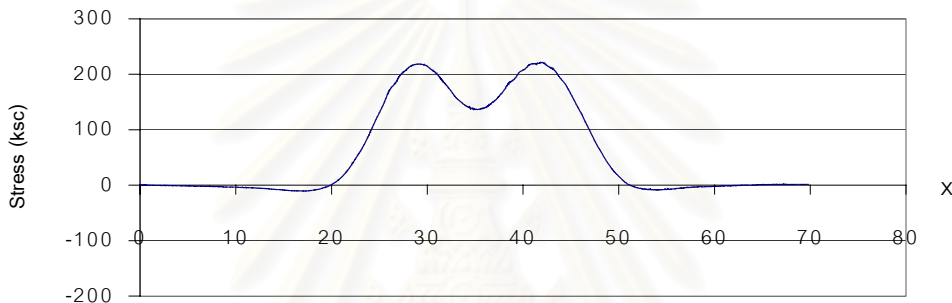
รูปที่ 3-15 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรโนชั้นส่วนโครงสร้างสะพานจ๊กรี



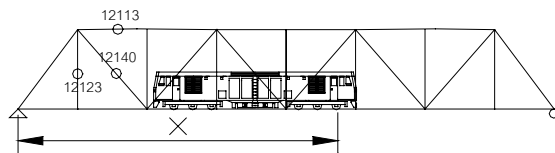
Member 2304 Stringer



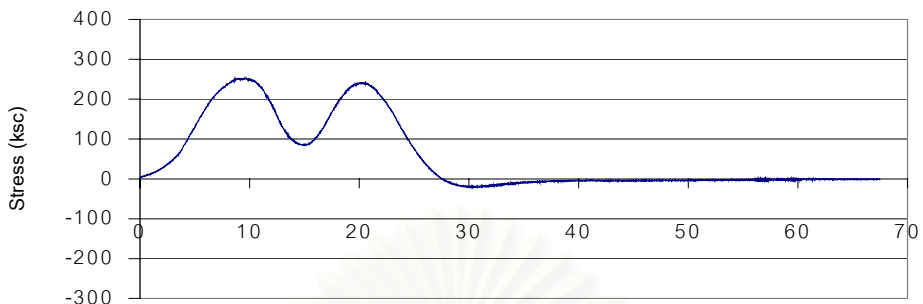
2514 Floor Beam



รูปที่ 3-15 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงรถจักรในชั้นส่วนโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

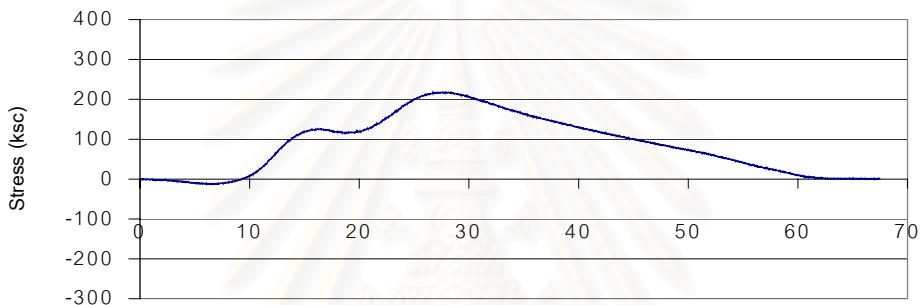


Member 12123 Vertical



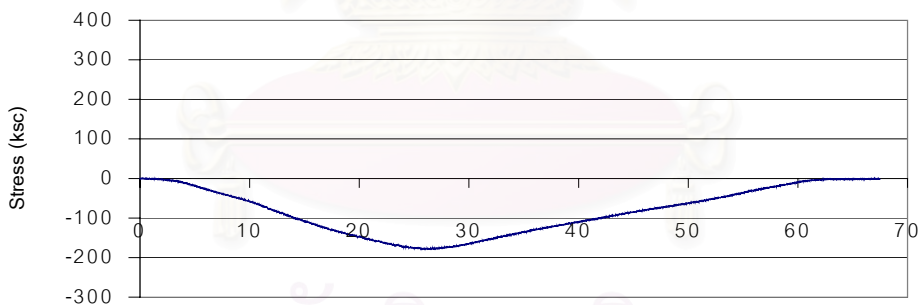
X

Member 12140 Diagonal



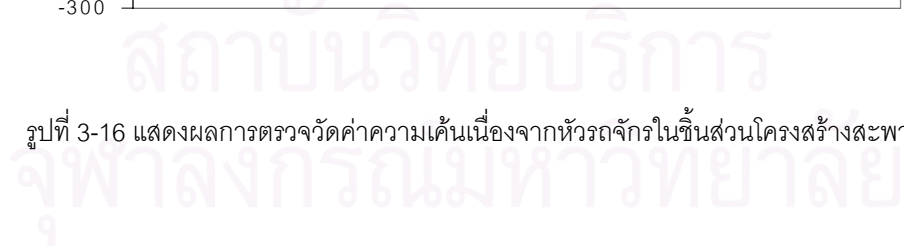
X

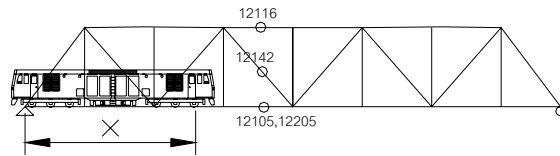
Member 12113 Upper Chord



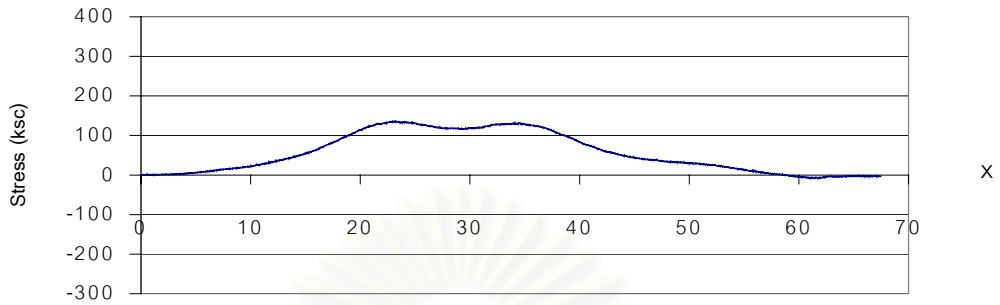
X

รูปที่ 3-16 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงรถจักรในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานกม.03

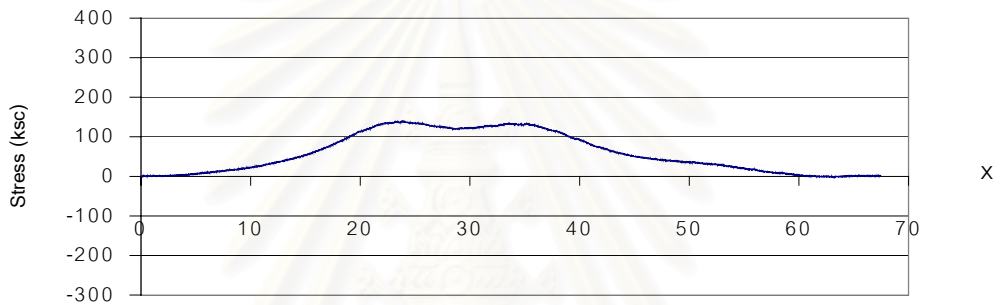




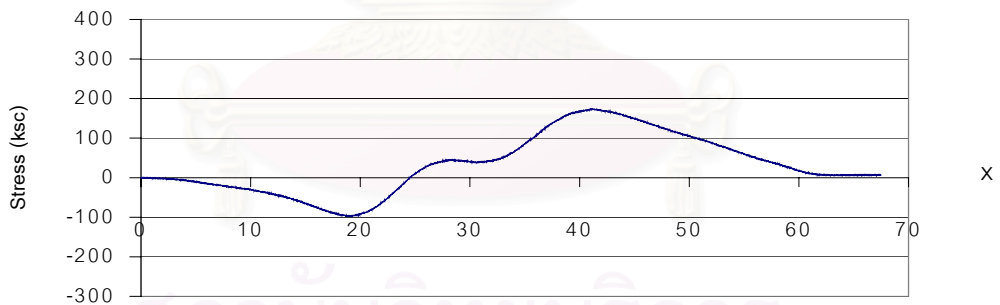
Member 12105 Lower Chord



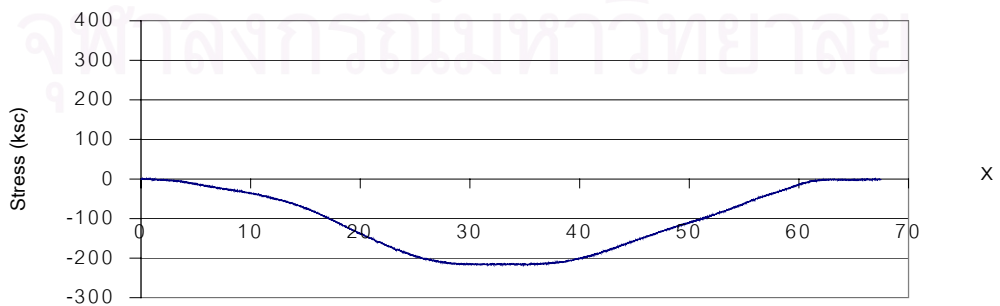
Member 12205 Lower Chord



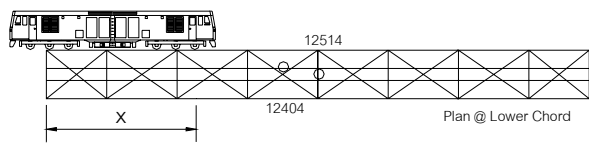
Member 12142 Diagonal



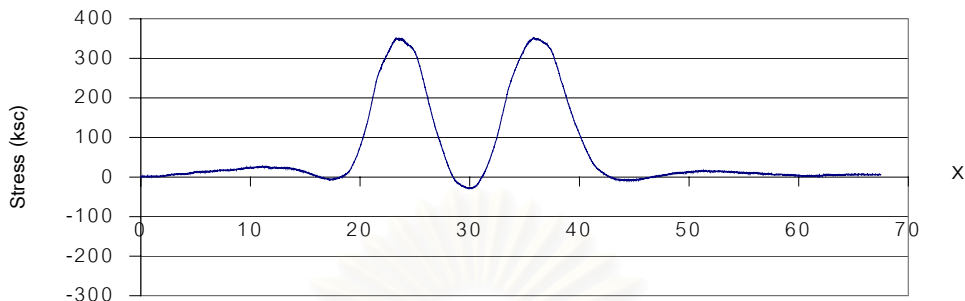
Member 12116 Upper Chord



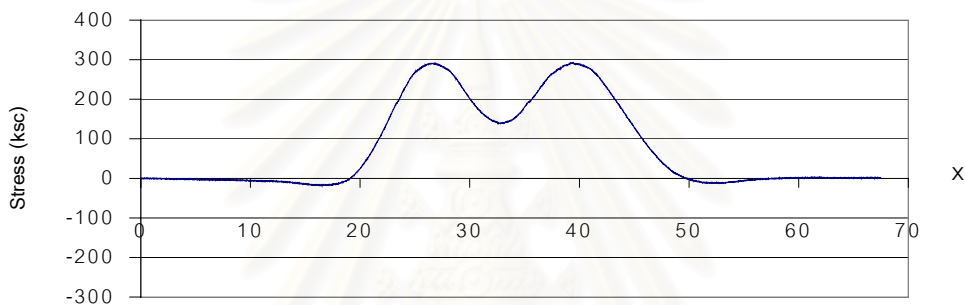
รูปที่ 3-16 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)



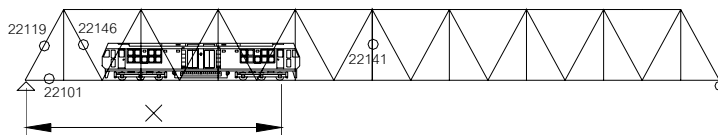
Member 12404 Stringer



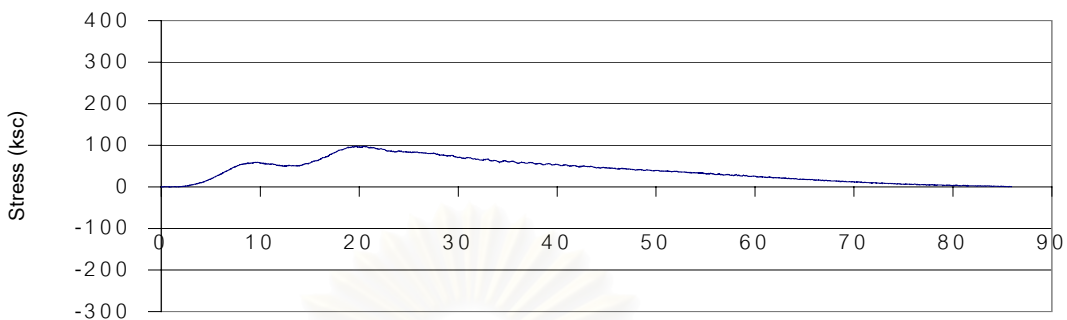
Member 12514 Floor Beam



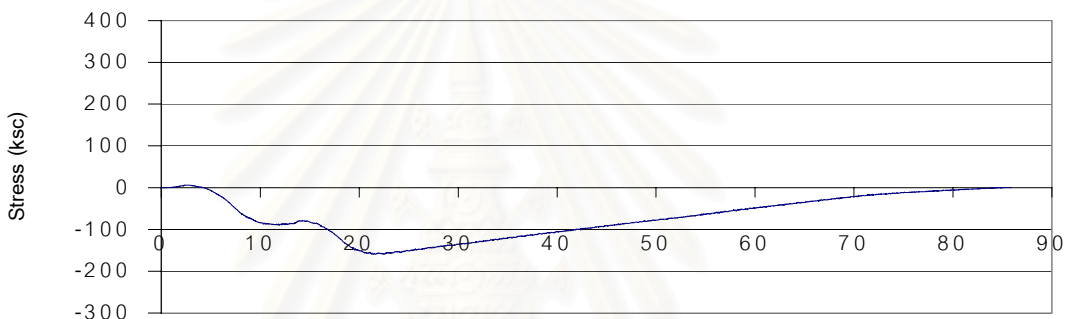
รูปที่ 3-16 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)



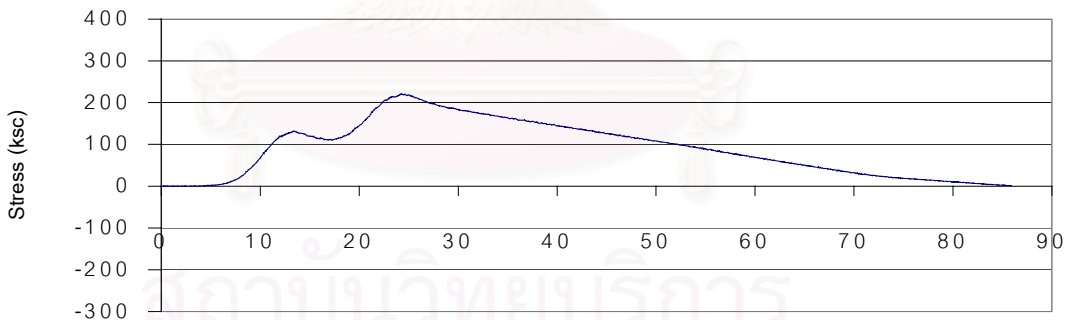
Member 22101 Lower Chord



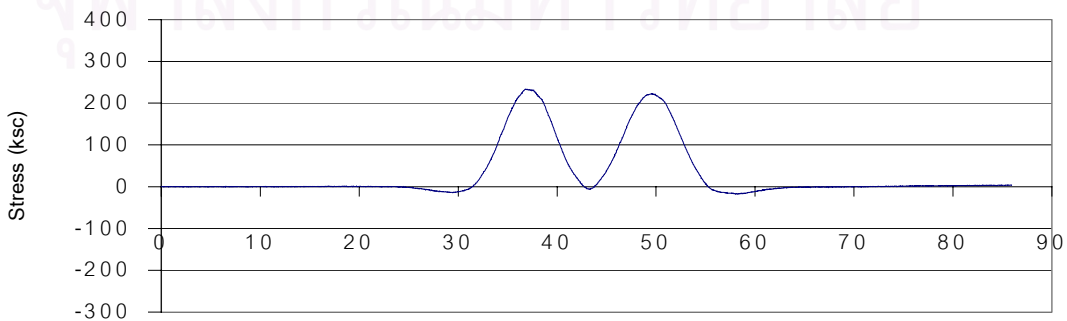
Member 22119 End Post



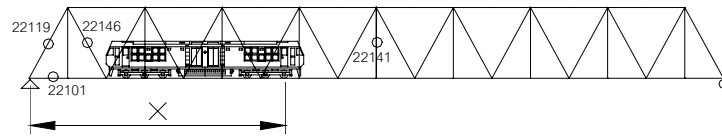
Member 22146 Diagonal



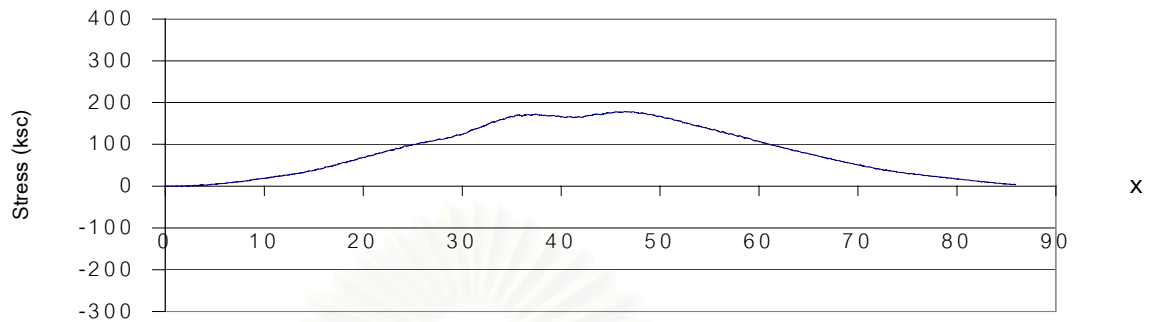
Member 22141 Vertical



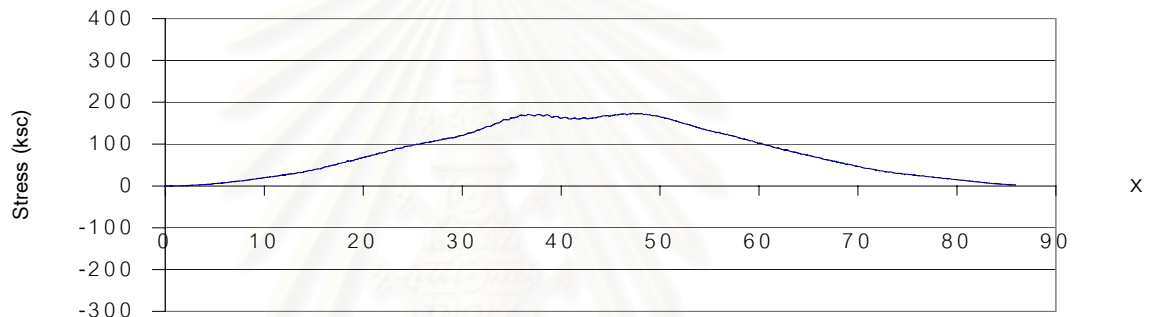
รูปที่ 3-17 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงรถจักรในชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานกม.19



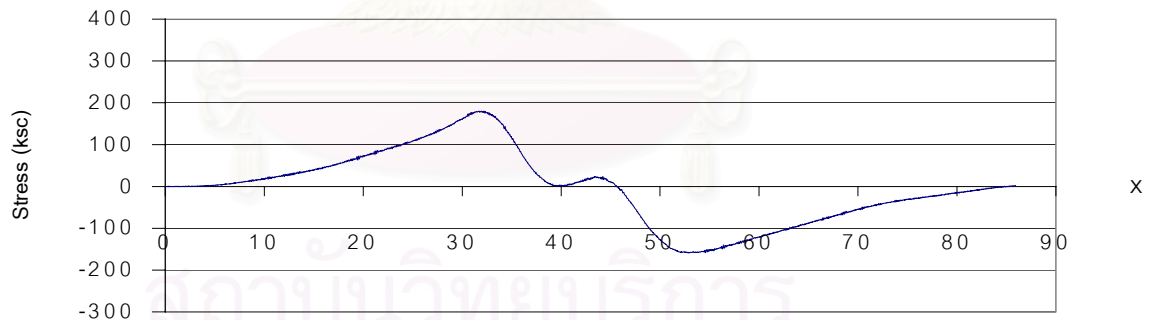
Member 22109 Lower Chord



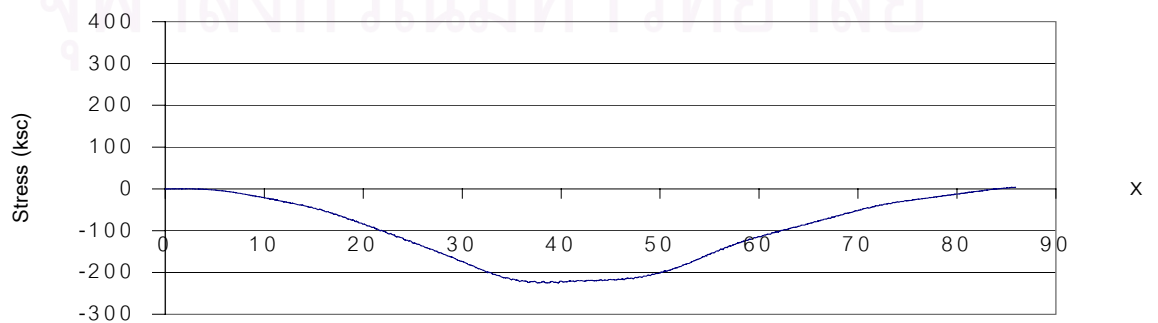
Member 22209 Lower Chord



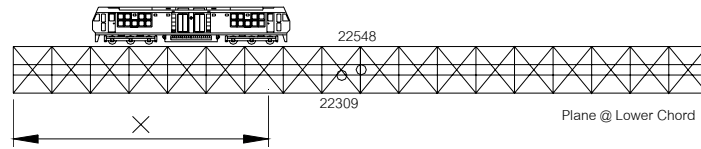
Member 22153 Diagonal



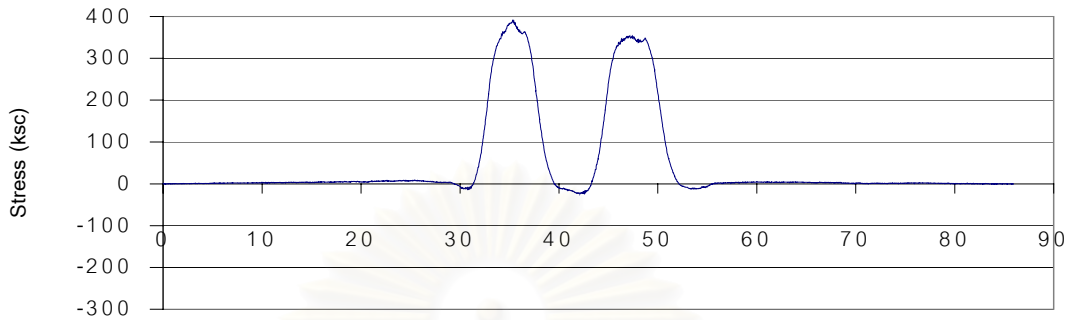
Member 22127 Upper Chord



รูปที่ 3-17 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงรถจักรในชั้นส่วนโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

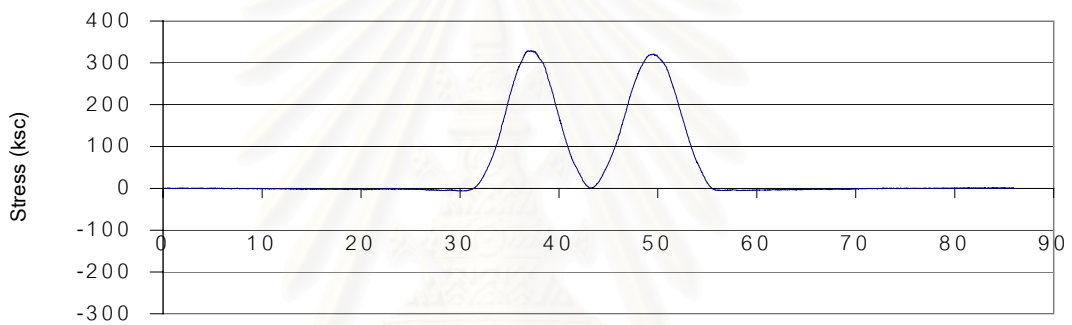


Member 22309 Stringer



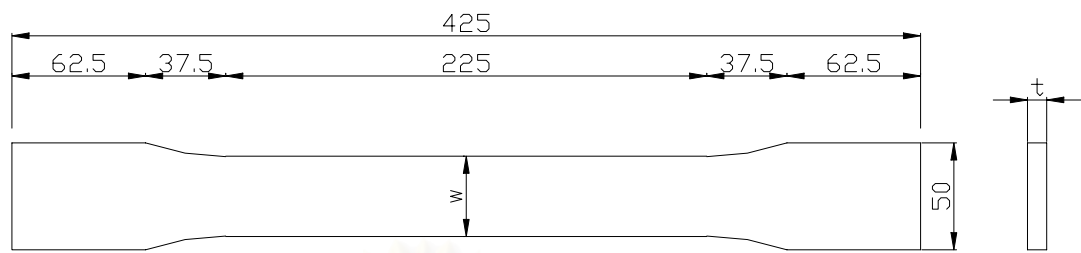
x

Member 22548 Floor Beam



x

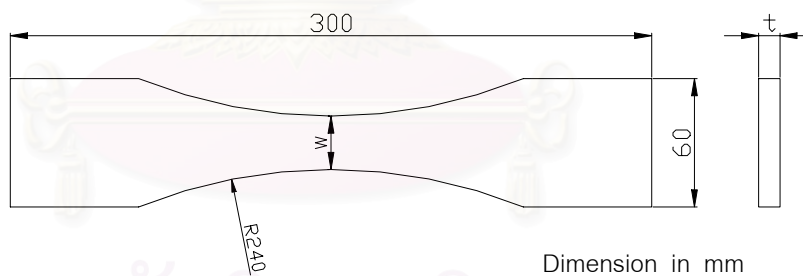
รูปที่ 3-17 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเค้นเนื่องจากห้วงจักรในชั้นส่วนโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)



Dimension in mm

w	=	ความกว้าง (Width)
t	=	ความหนา (Thickness)

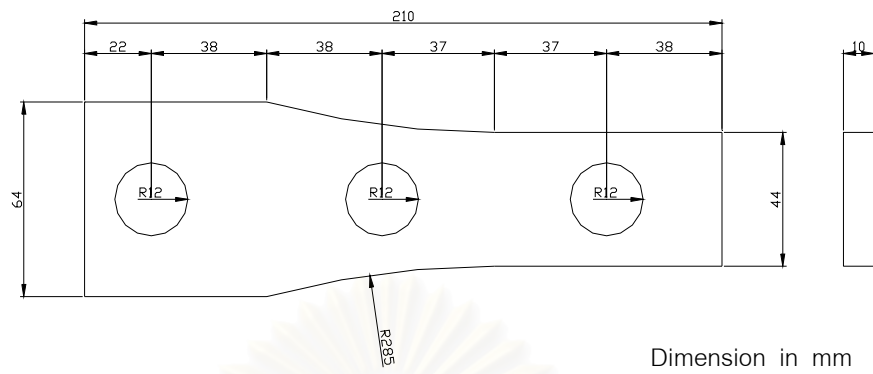
รูปที่ 4-1 (ก) ชิ้นงานทดสอบแรงดึงทดสอบที่जूฟฟ้า (ASTM E8)



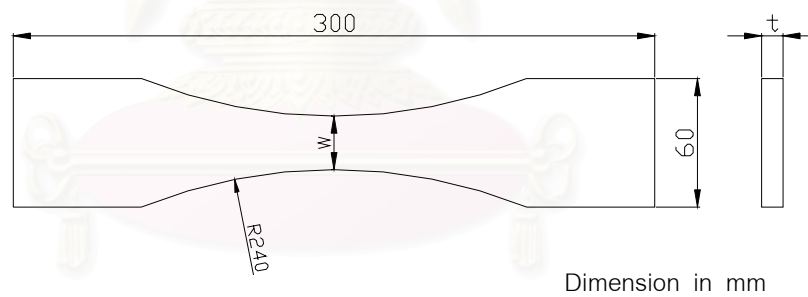
Dimension in mm

w	=	ความกว้าง (Width)
t	=	ความหนา (Thickness)

รูปที่ 4-1 (ข) ชิ้นงานทดสอบแรงดึงทดสอบที่ วท. (JIS Z 2241)



รูปที่ 4-2 (ก) ชิ้นงานทดสอบความล้าทดสอบที่จุฬาราชมนตรี

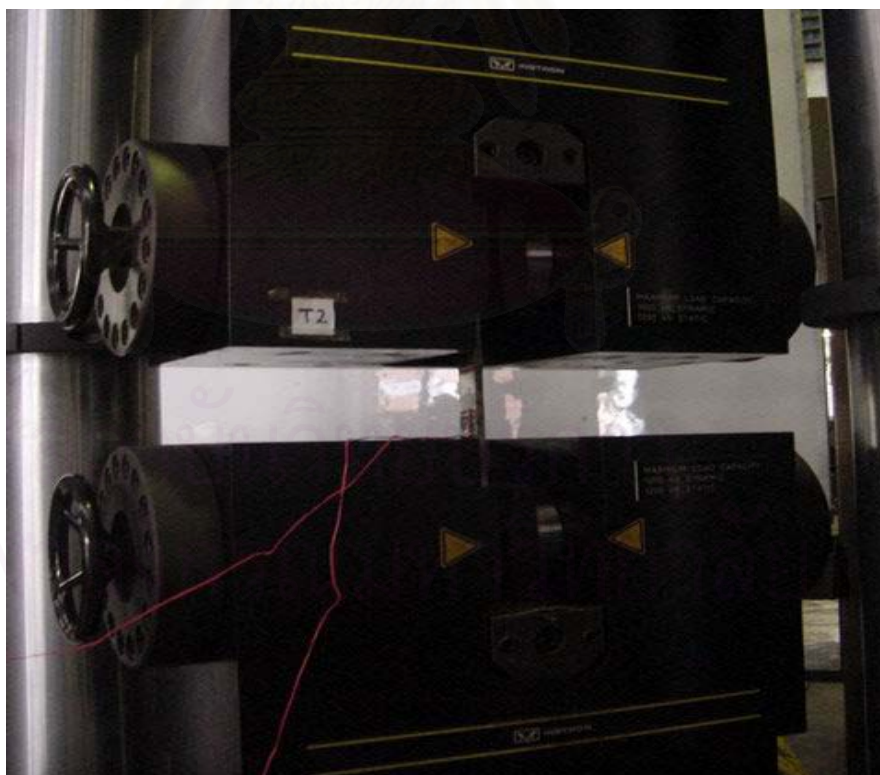


w	=	ความกว้าง (Width)
t	=	ความหนา (Thickness)

รูปที่ 4-2 (ข) ชิ้นงานทดสอบความล้าทดสอบที่ วท.

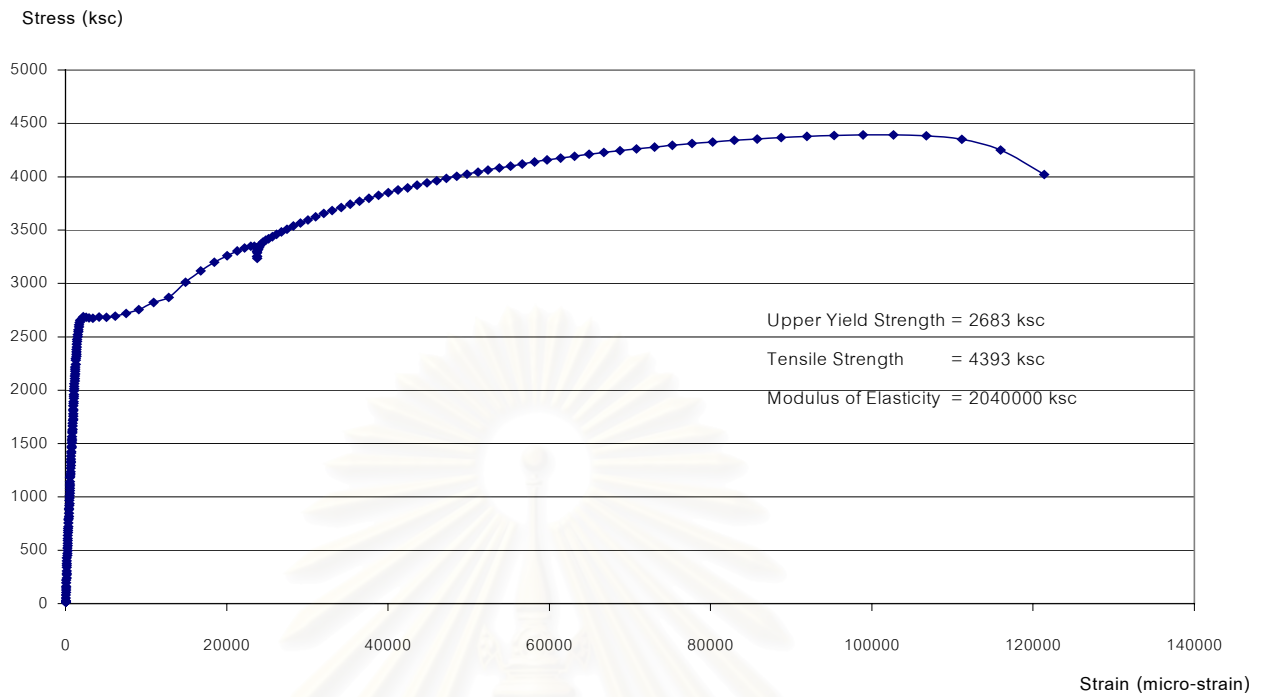


รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะชิ้นงานรับแรงดึงก่อนการทดสอบ



รูปที่ 4-4 แสดงรูประหว่างการทดสอบแรงดึง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วน กม.03 T3



รูปที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดของชิ้นส่วนทดสอบแรงดึง กม.03 T3



รูปที่ 4-6 แสดงการวิบัติของชิ้นส่วนรับแรงดึง กม.03 T3



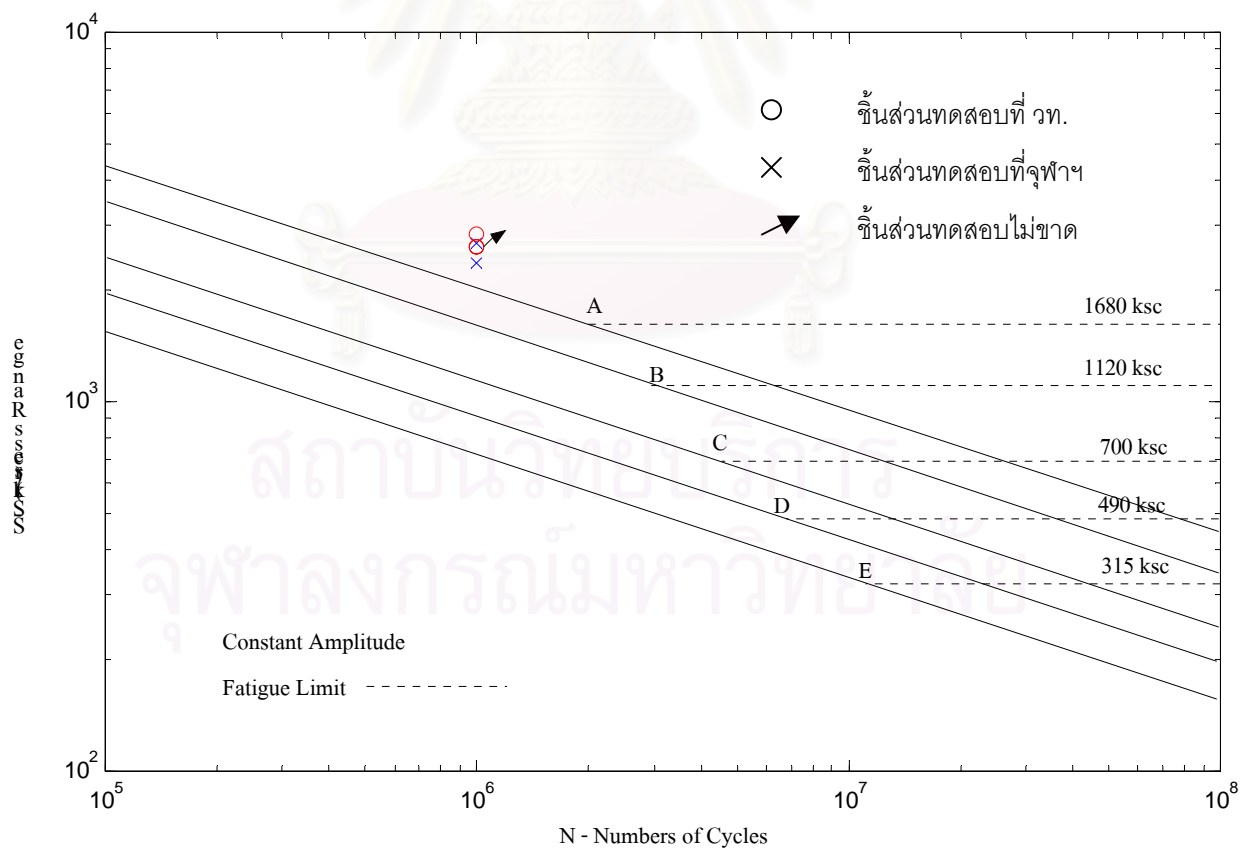
รูปที่ 4-7 แสดงการติดตั้งชิ้นงานทดสอบความล้า



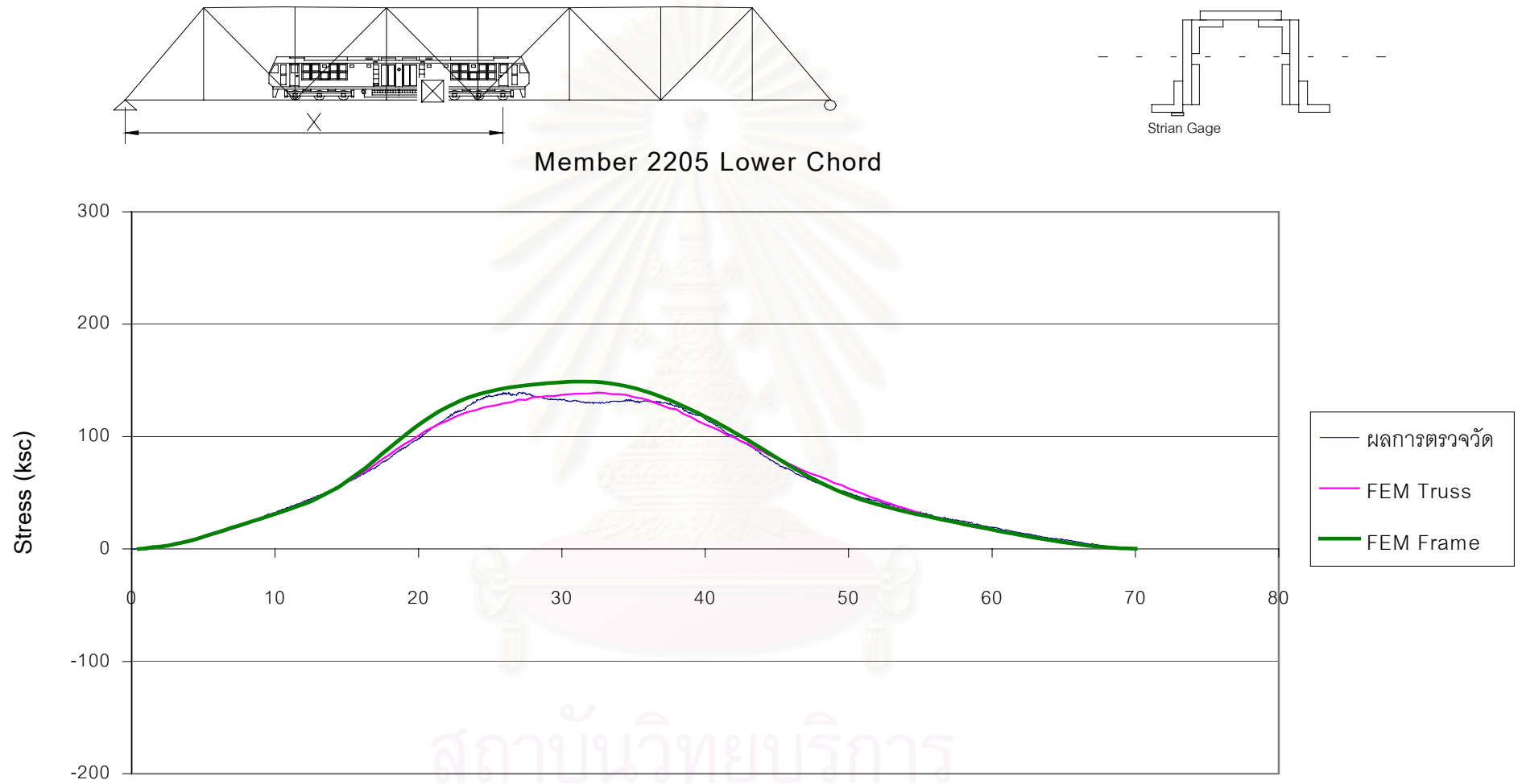
รูปที่ 4-8 แสดงรูประหว่างการทดสอบความล้า



รูปที่ 4-9 แสดงลักษณะการวิบัติของชิ้นงานทดสอบความล้า

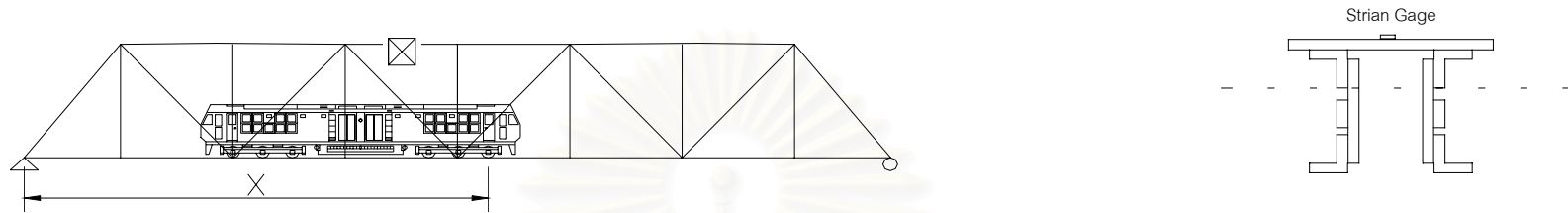


รูปที่ 4-10 แสดงผลการทดสอบความล้าเปรียบเทียบกับกราฟ S-N ที่เสนอโดย AREMA 1999

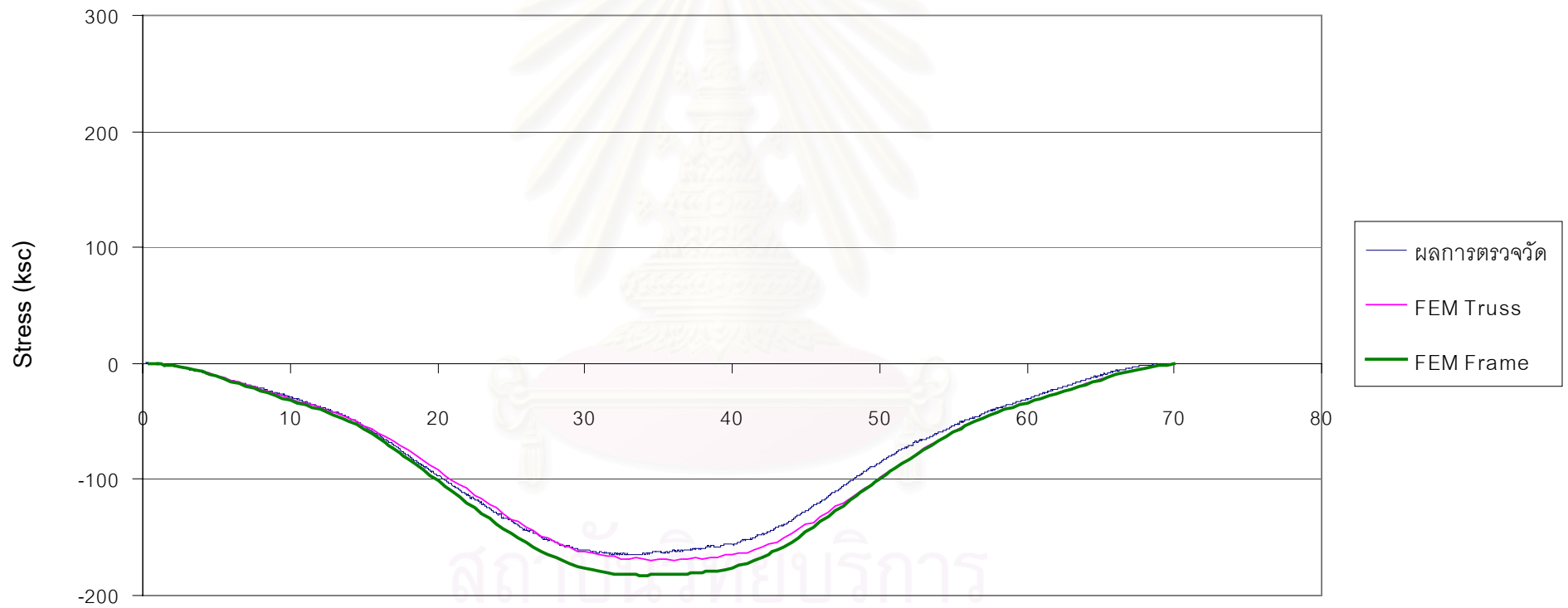


ระยะทางที่เพลารอกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารอกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 2205 ในสะพานจักรี

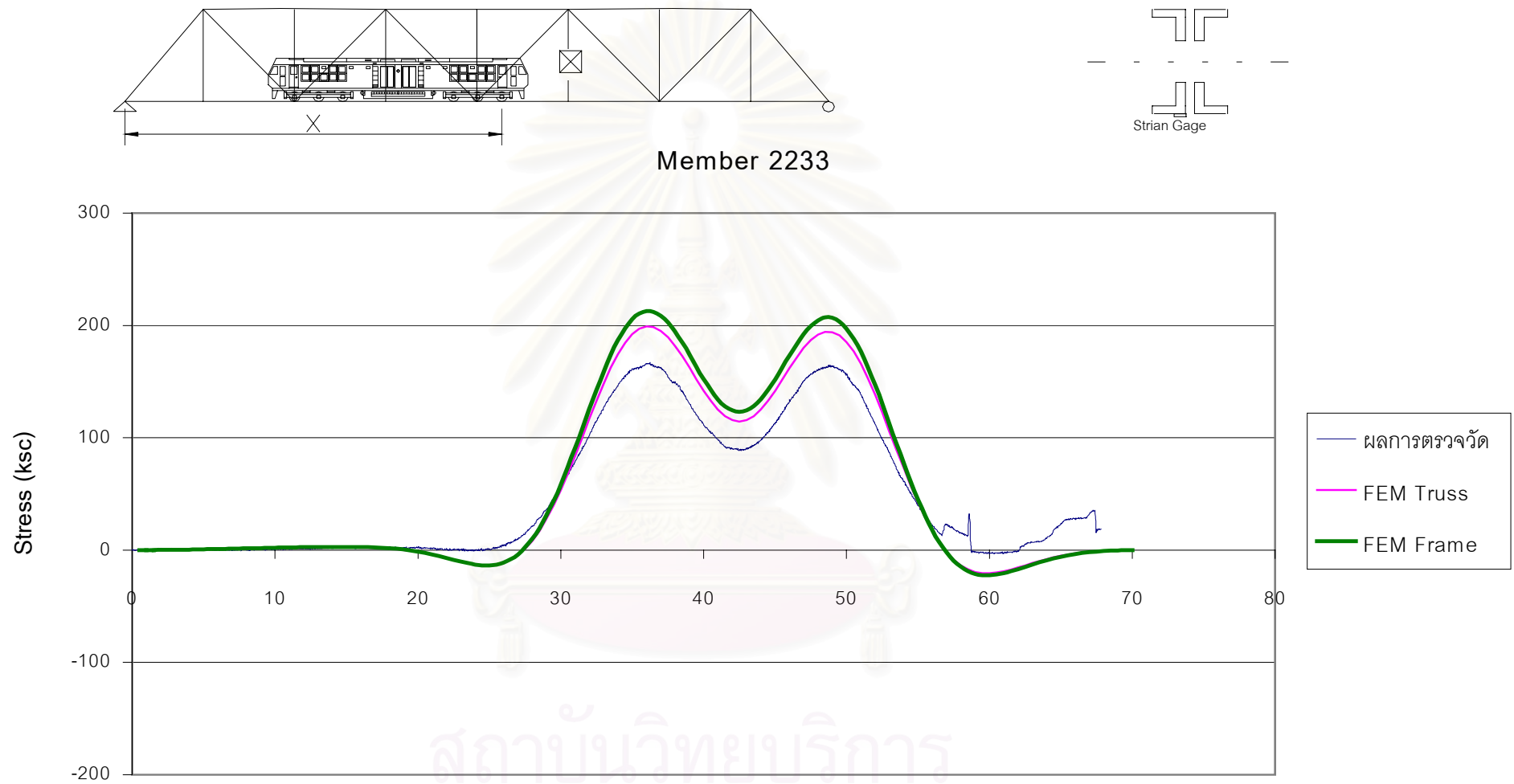


Member 2216 Upper Chord



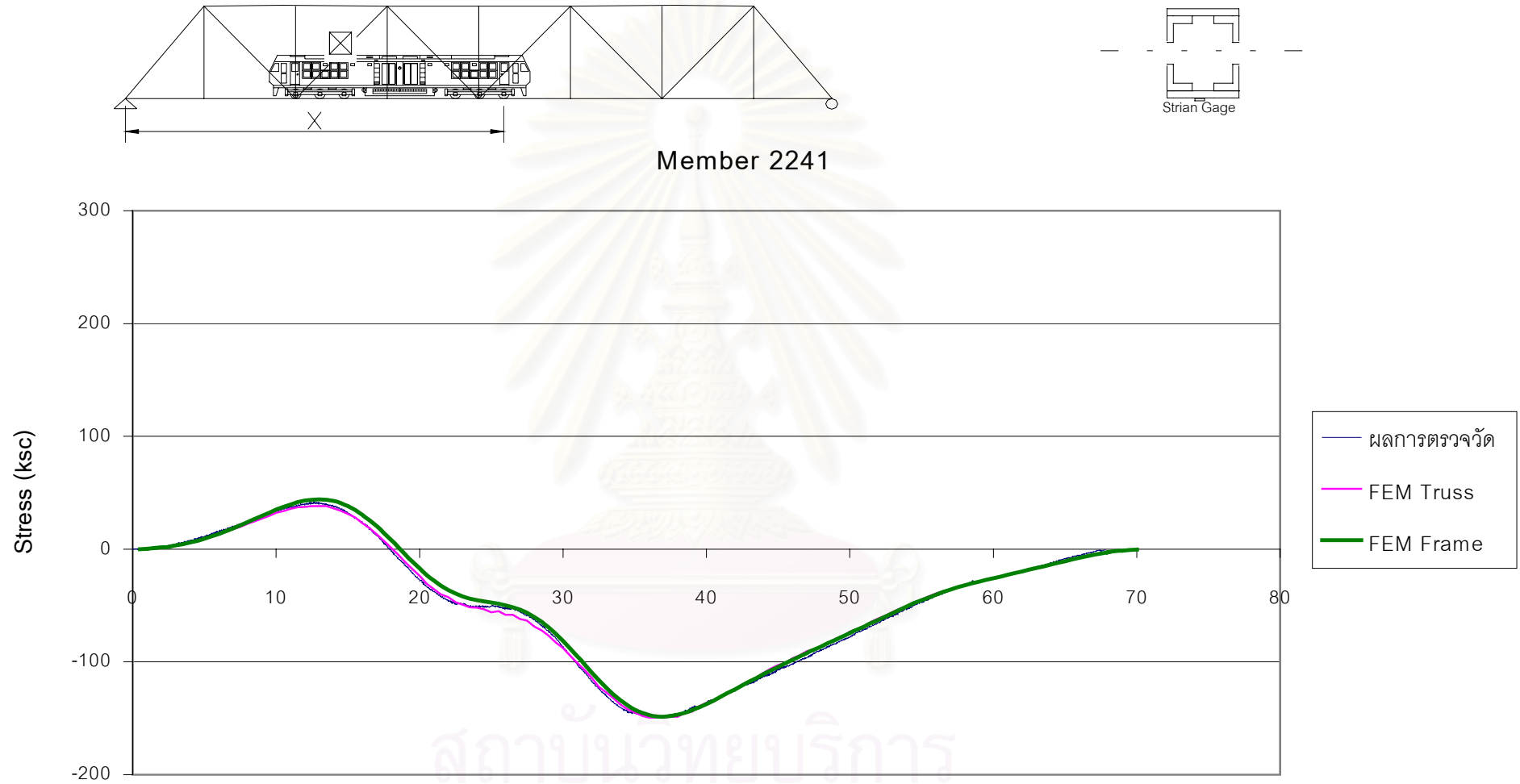
ระยะทางที่เพลแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 2216 ในสะพานจักรี



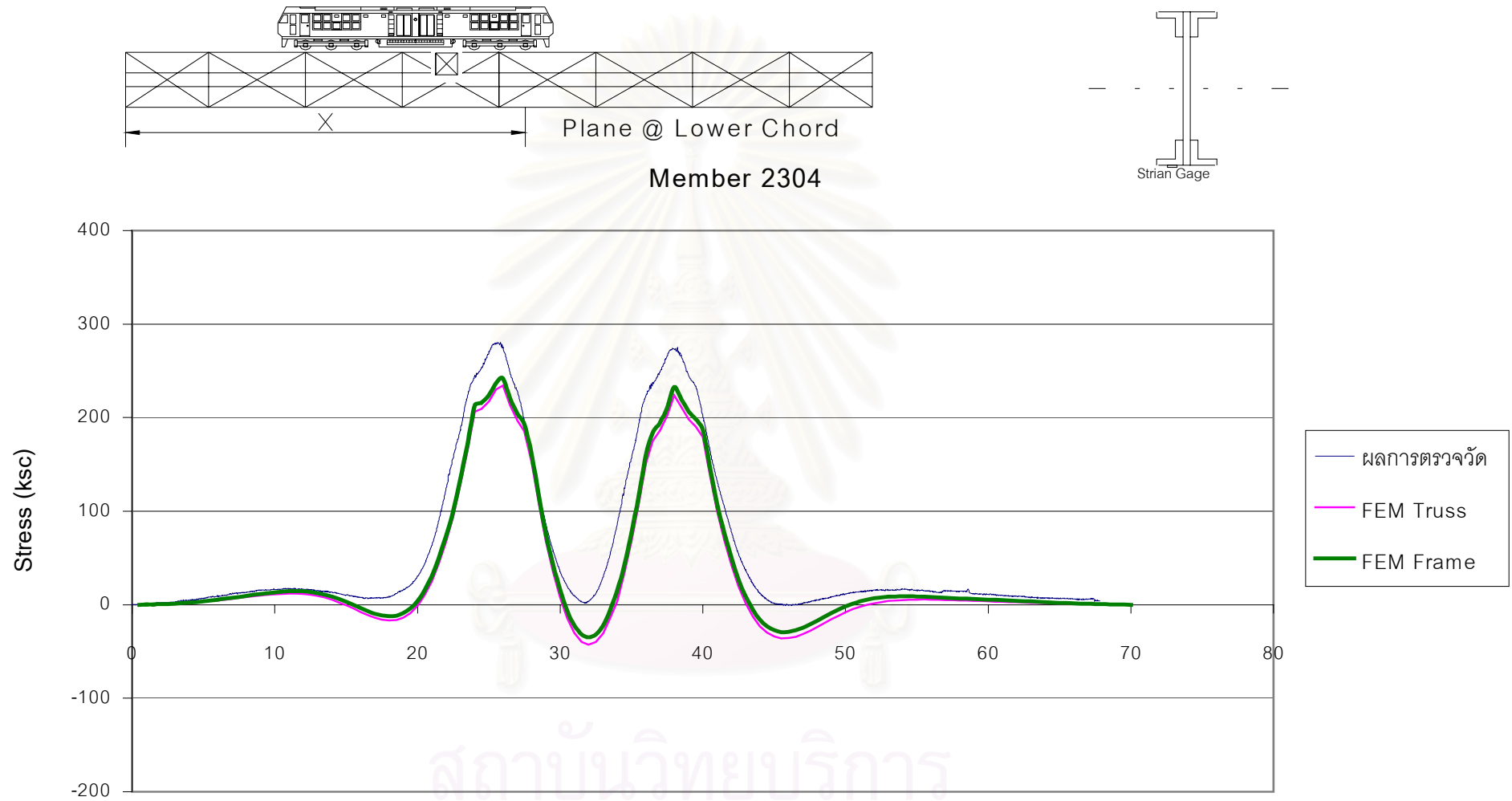
ระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 2233 ในสะพานจักรี



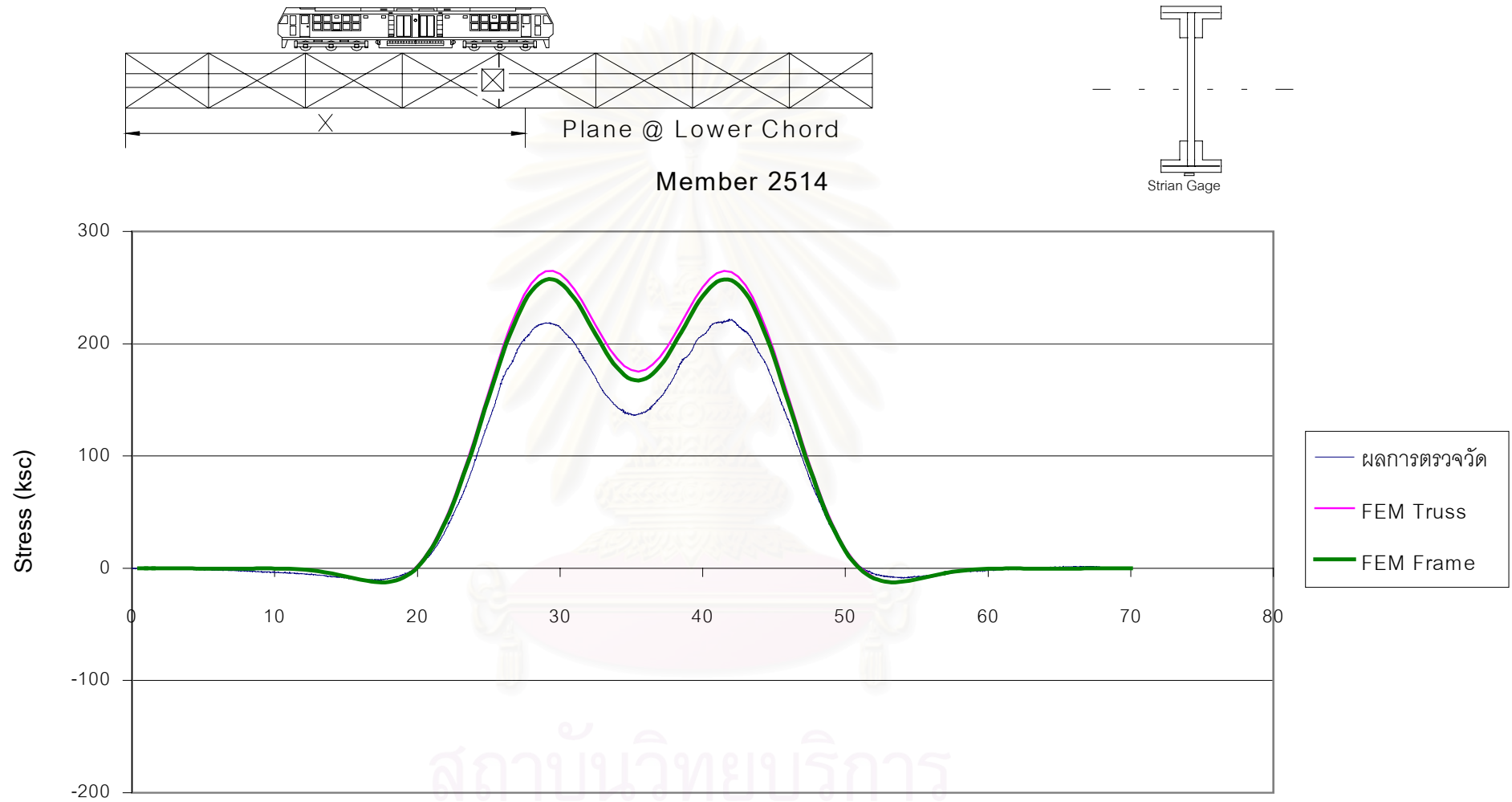
ระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 2241 ในสะพานจักรี



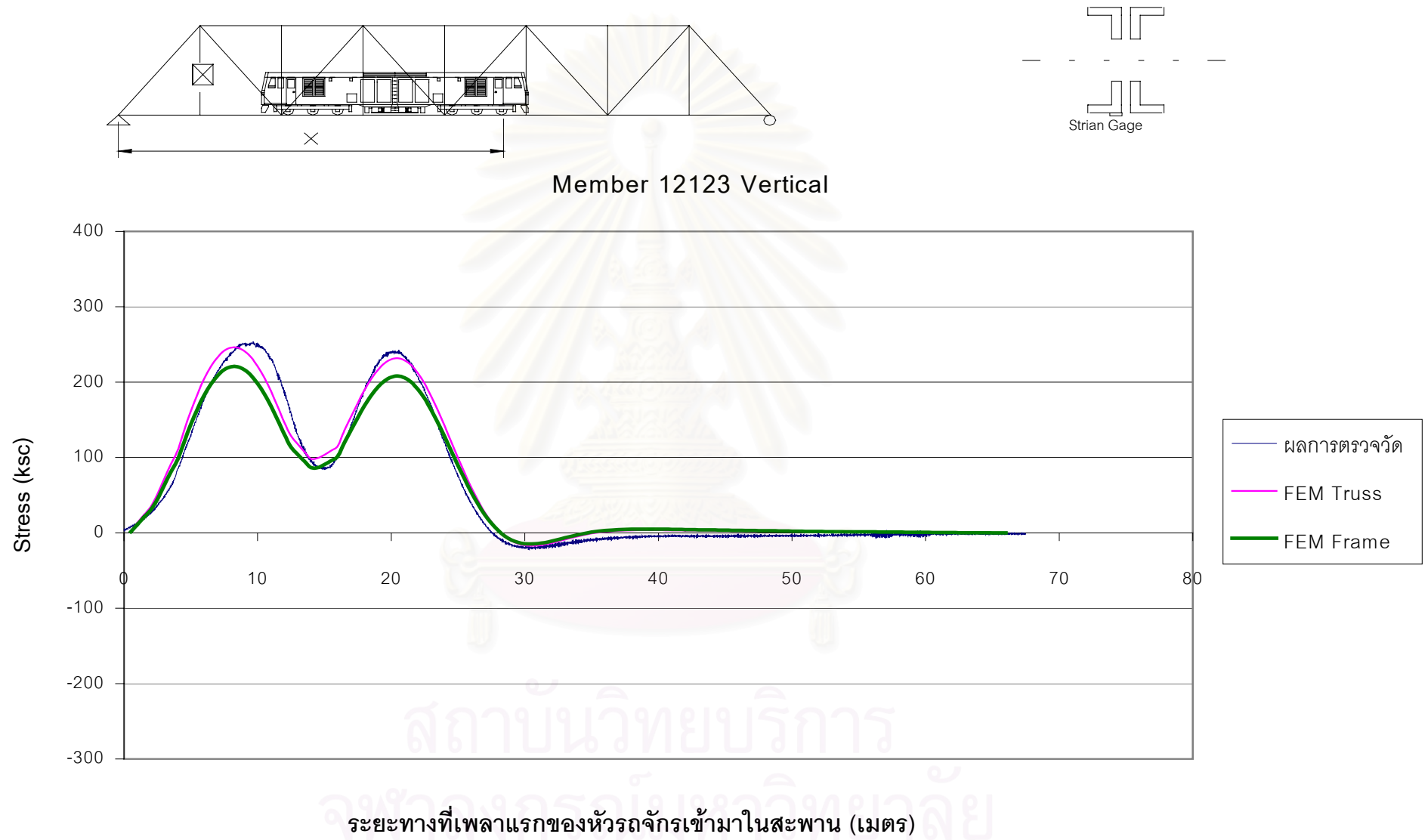
ระยะทางที่เพลารแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 2304 ในสะพานจกรี

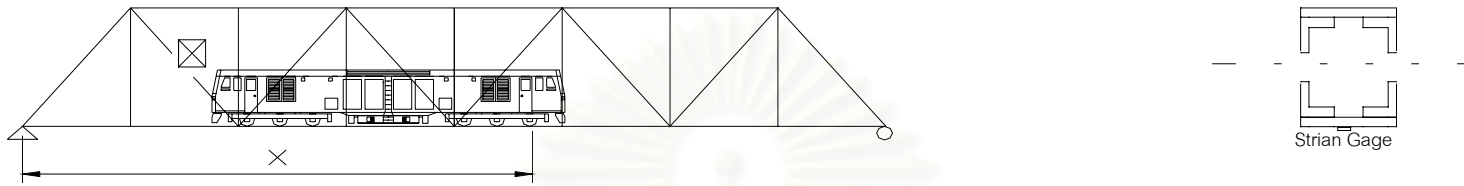


ระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

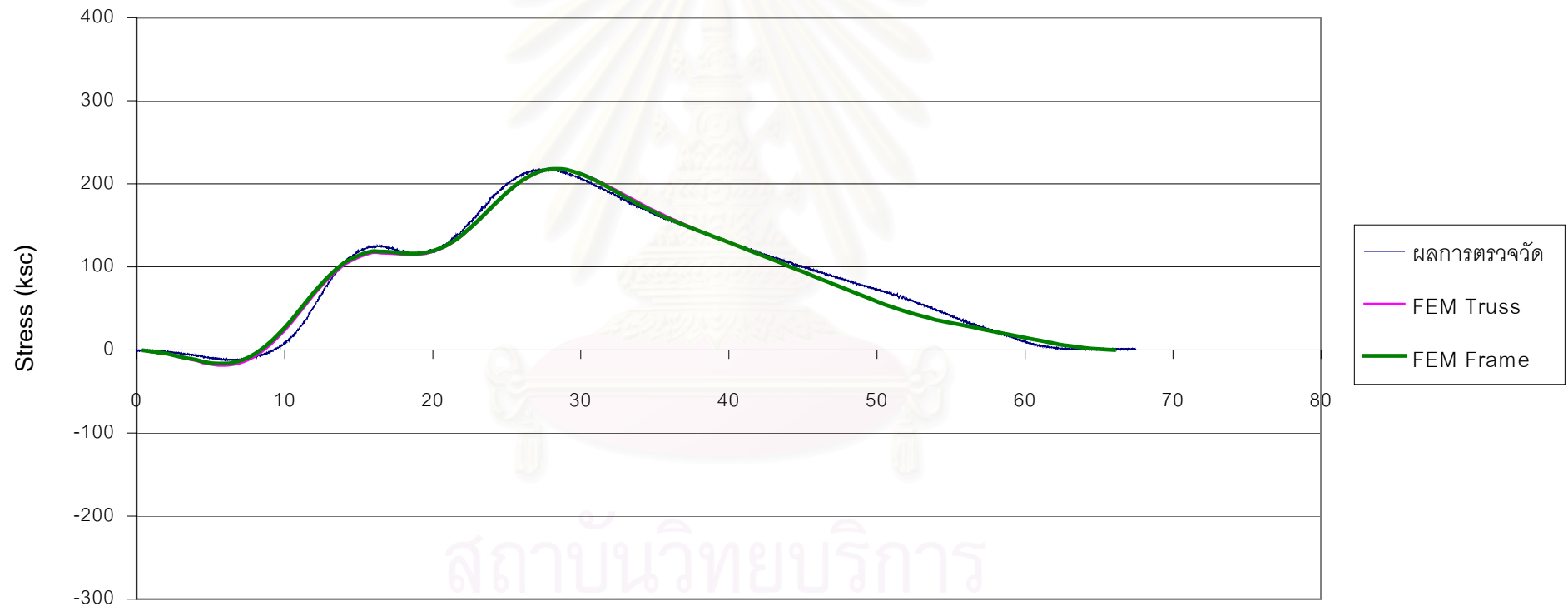
รูปที่ 5-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 2514 ในสะพานจักรี



รูปที่ 5-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12123 ในสะพานกม.03

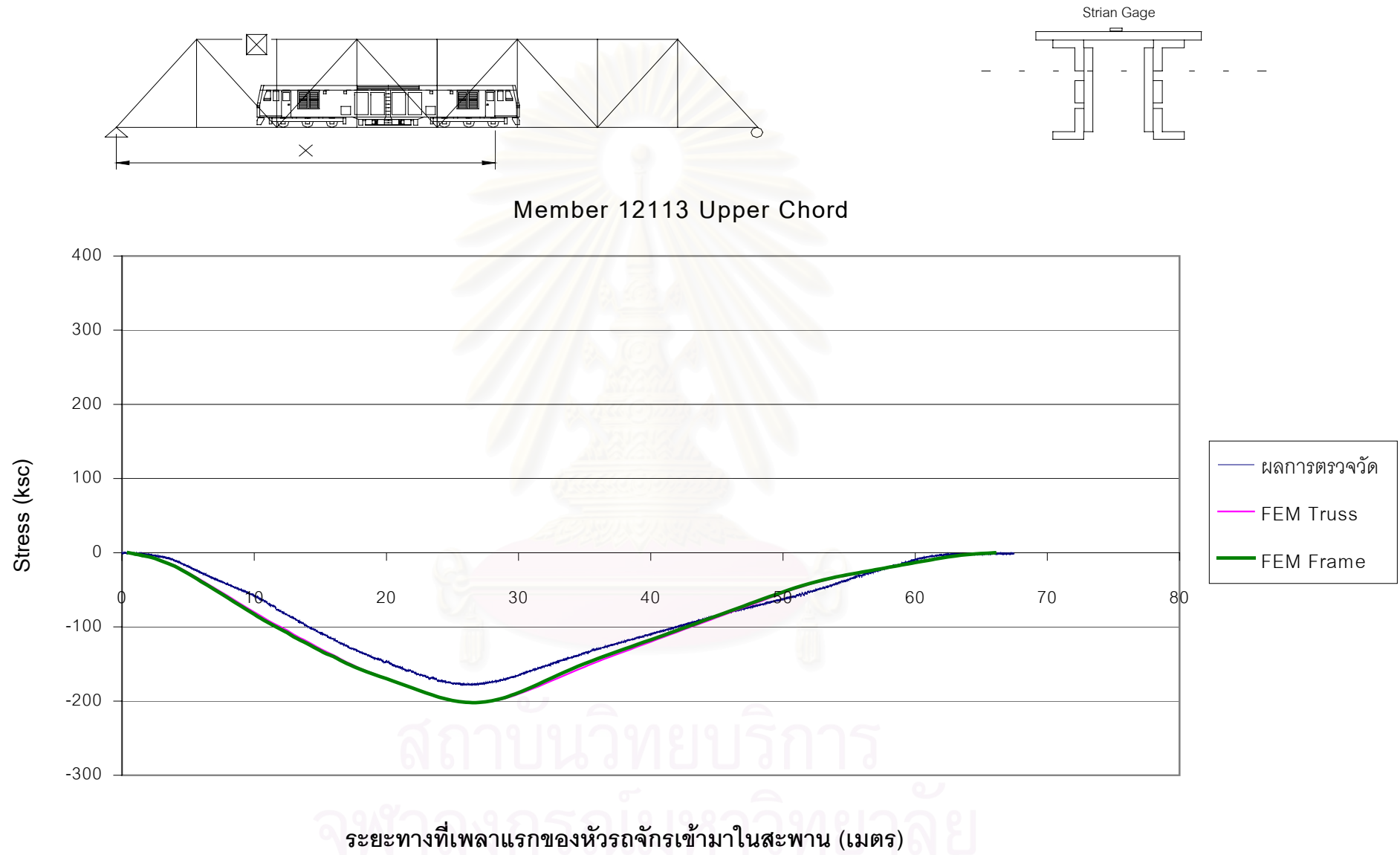


Member 12140 Diagonal

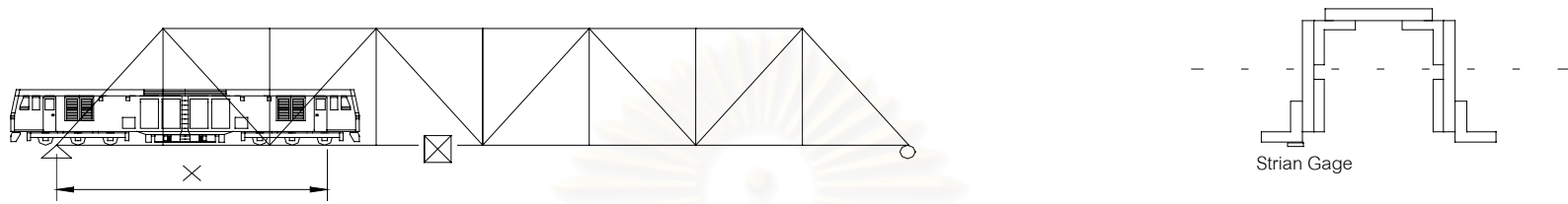


ระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

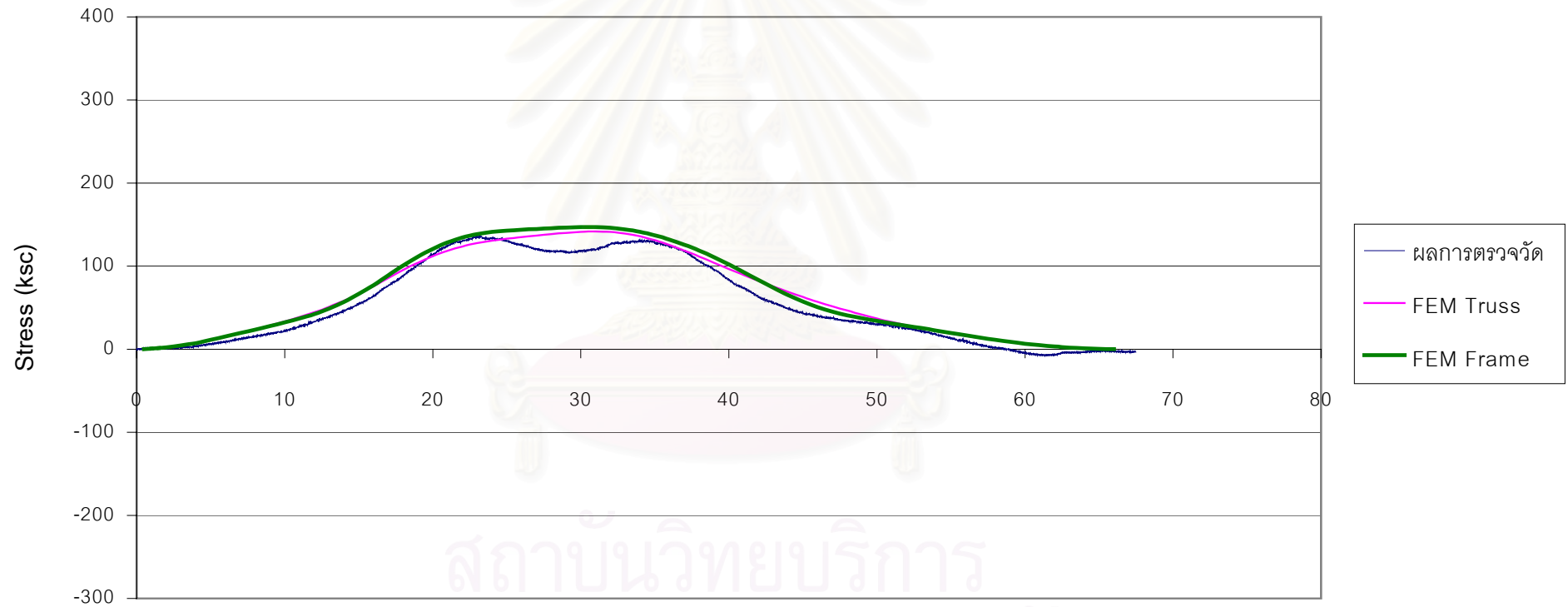
รูปที่ 5-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12140 ในสะพานกม.03



รูปที่ 5-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาแรกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12113 ในสะพานกม.03

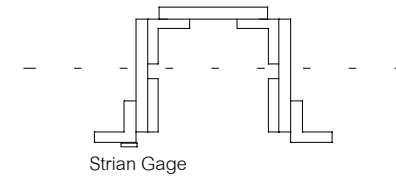
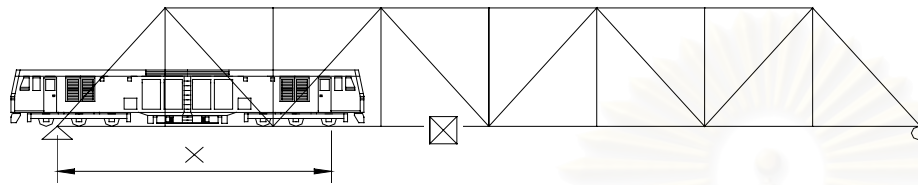


Member 12105 Lower Chord

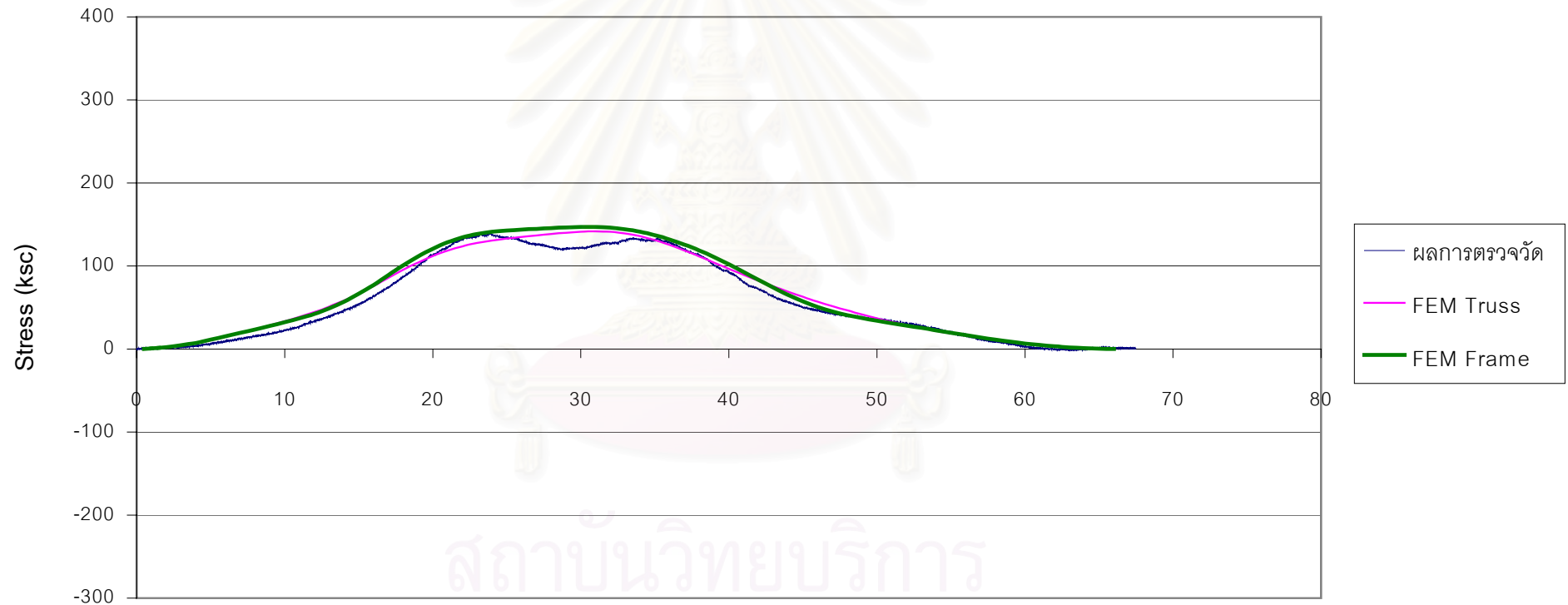


ระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12105 ในสะพานกม.03

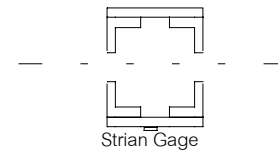
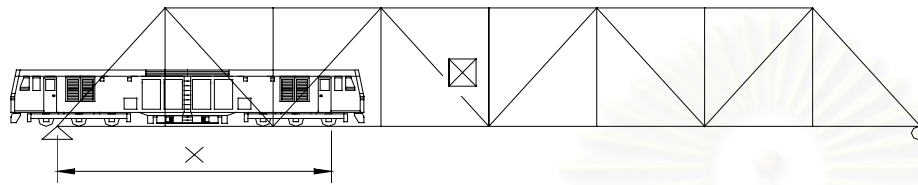


Member 12205 Lower Chord

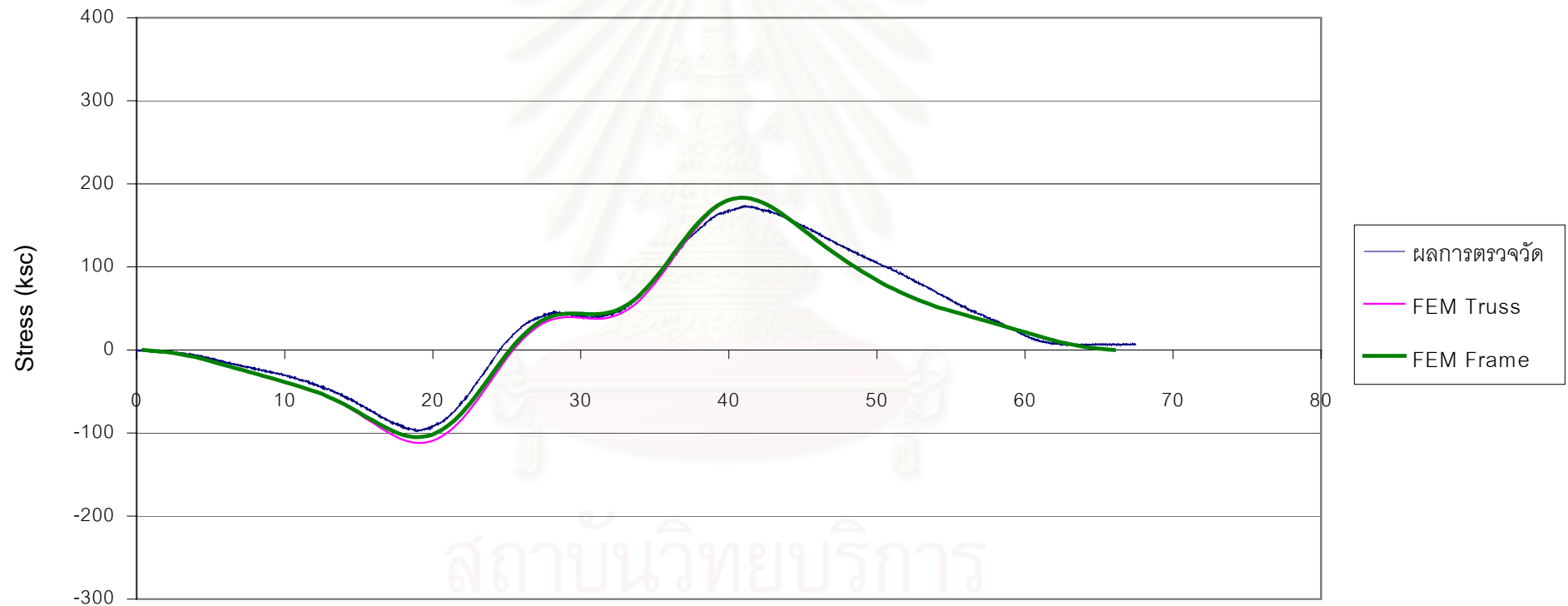


ระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12205 ในสะพานกม.03

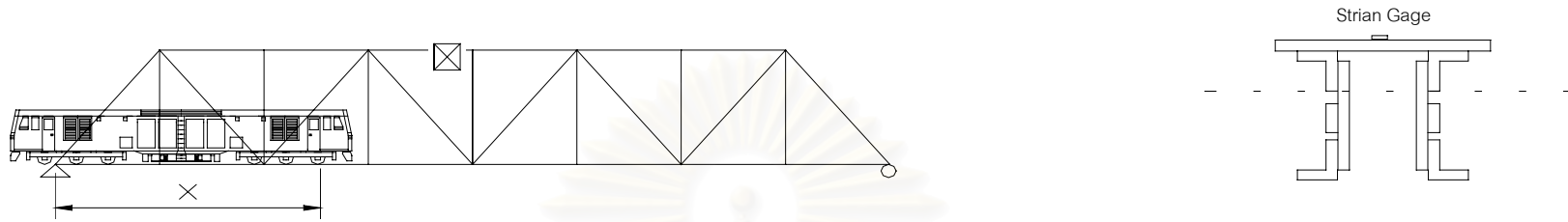


Member 12142 Diagonal

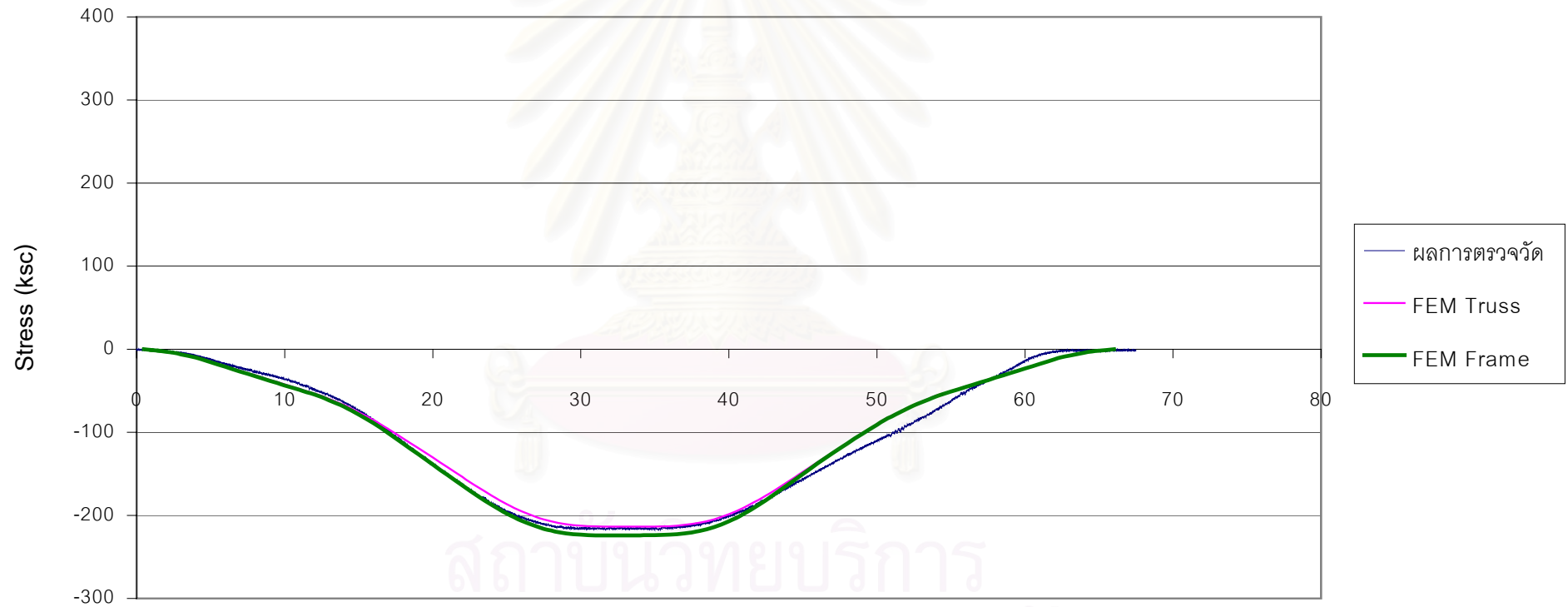


ระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

รูปที่ 5-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12142 ในสะพานกม.03

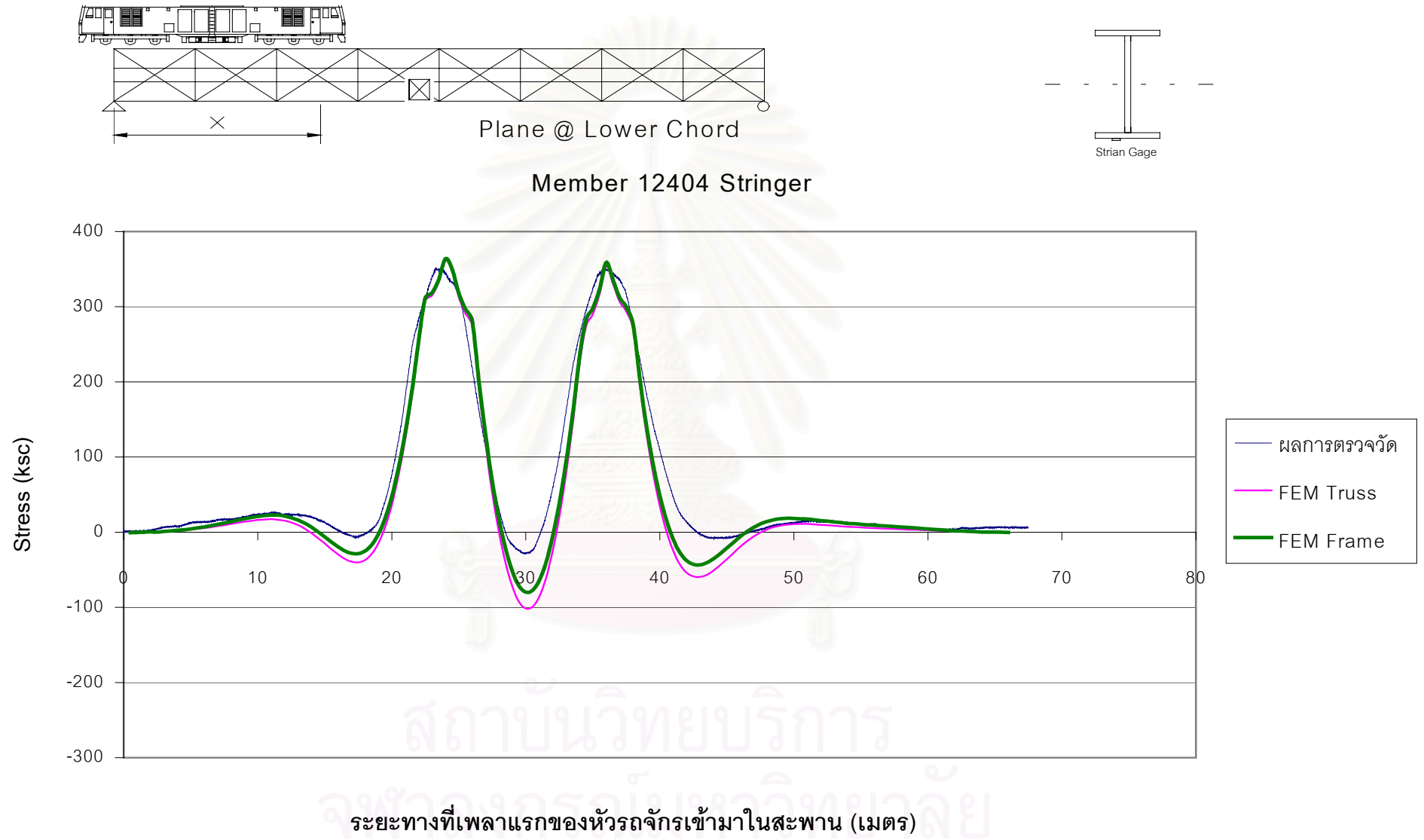


Member 12116 Upper Chord

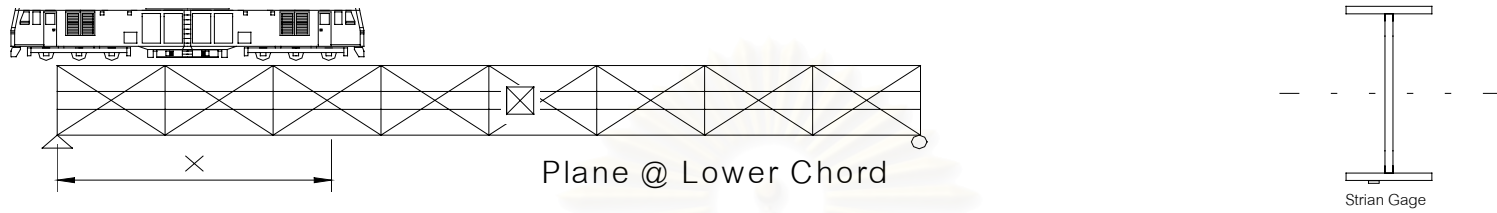


ระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

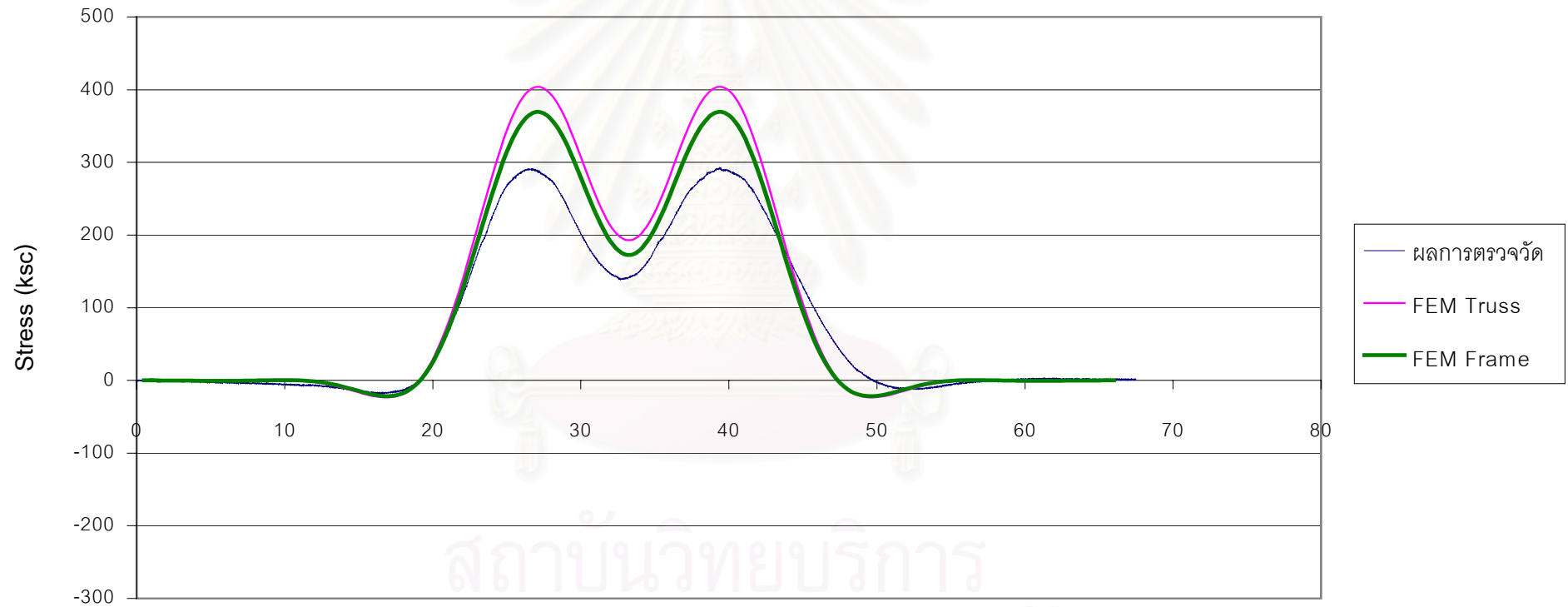
รูปที่ 5-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12116 ในสะพานกม.03



รูปที่ 5-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12404 ในสะพานกม.03

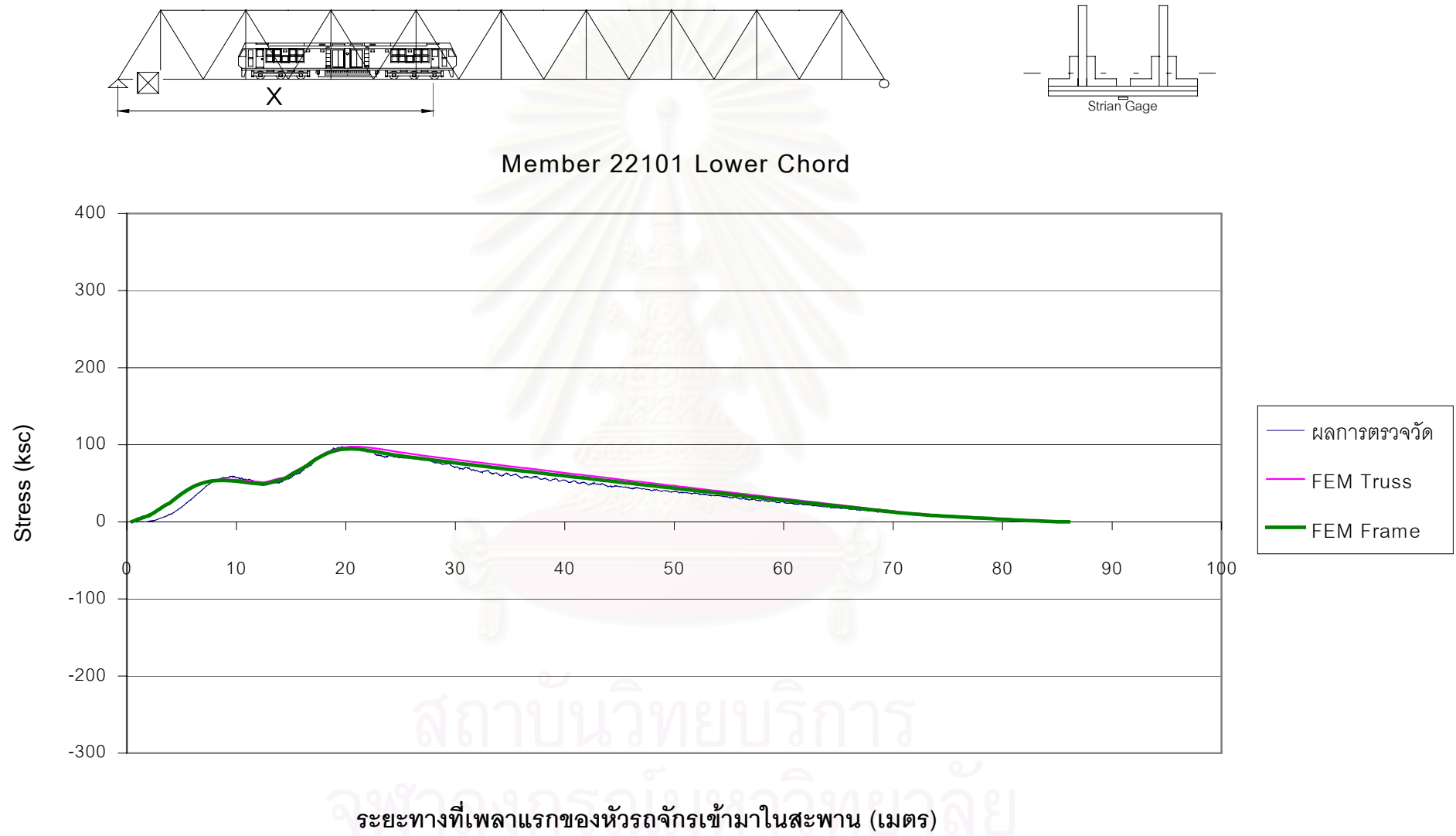


Member 12514 Floor Beam

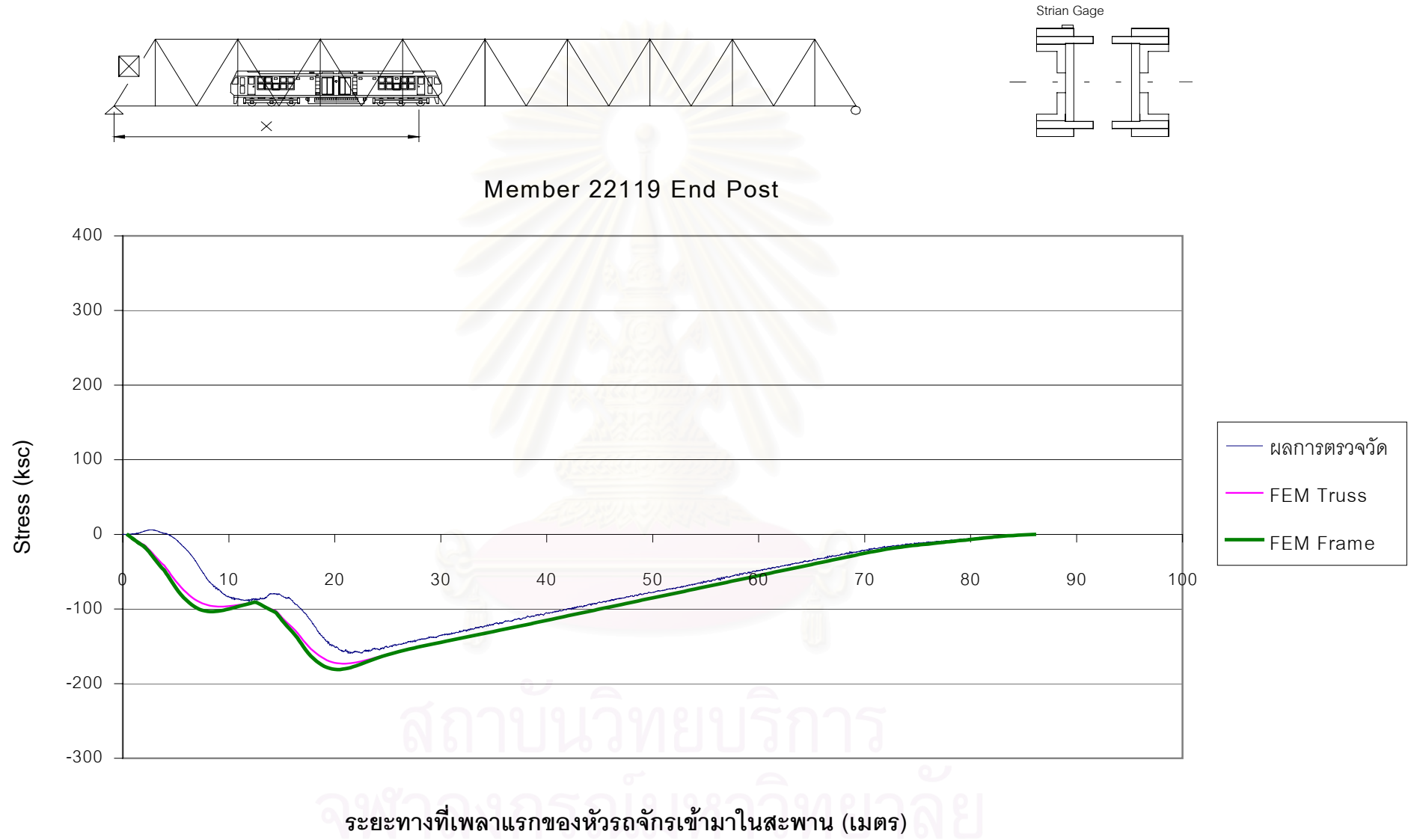


ระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพาน (เมตร)

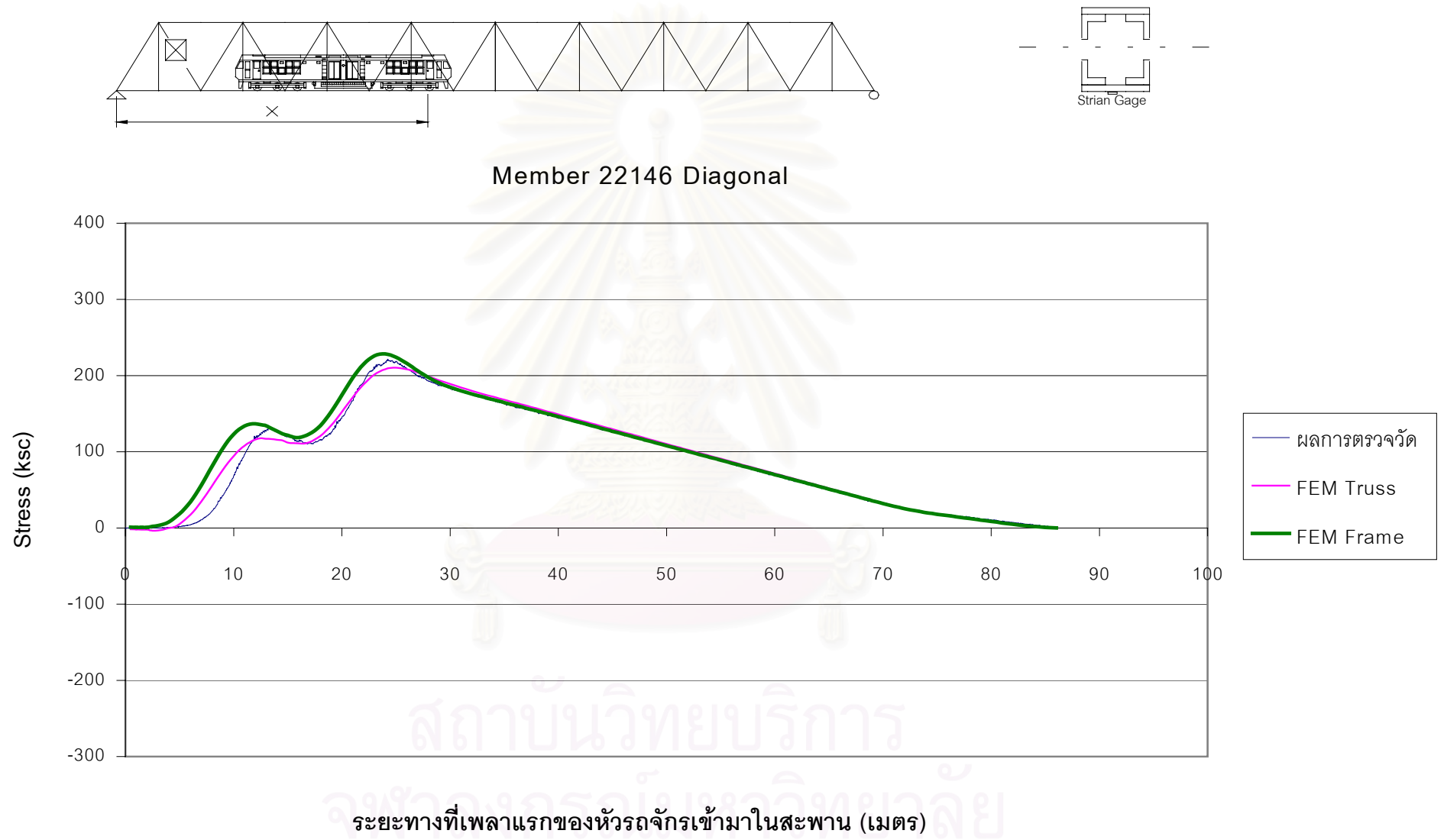
รูปที่ 5-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 12514 ในสะพานกม.03



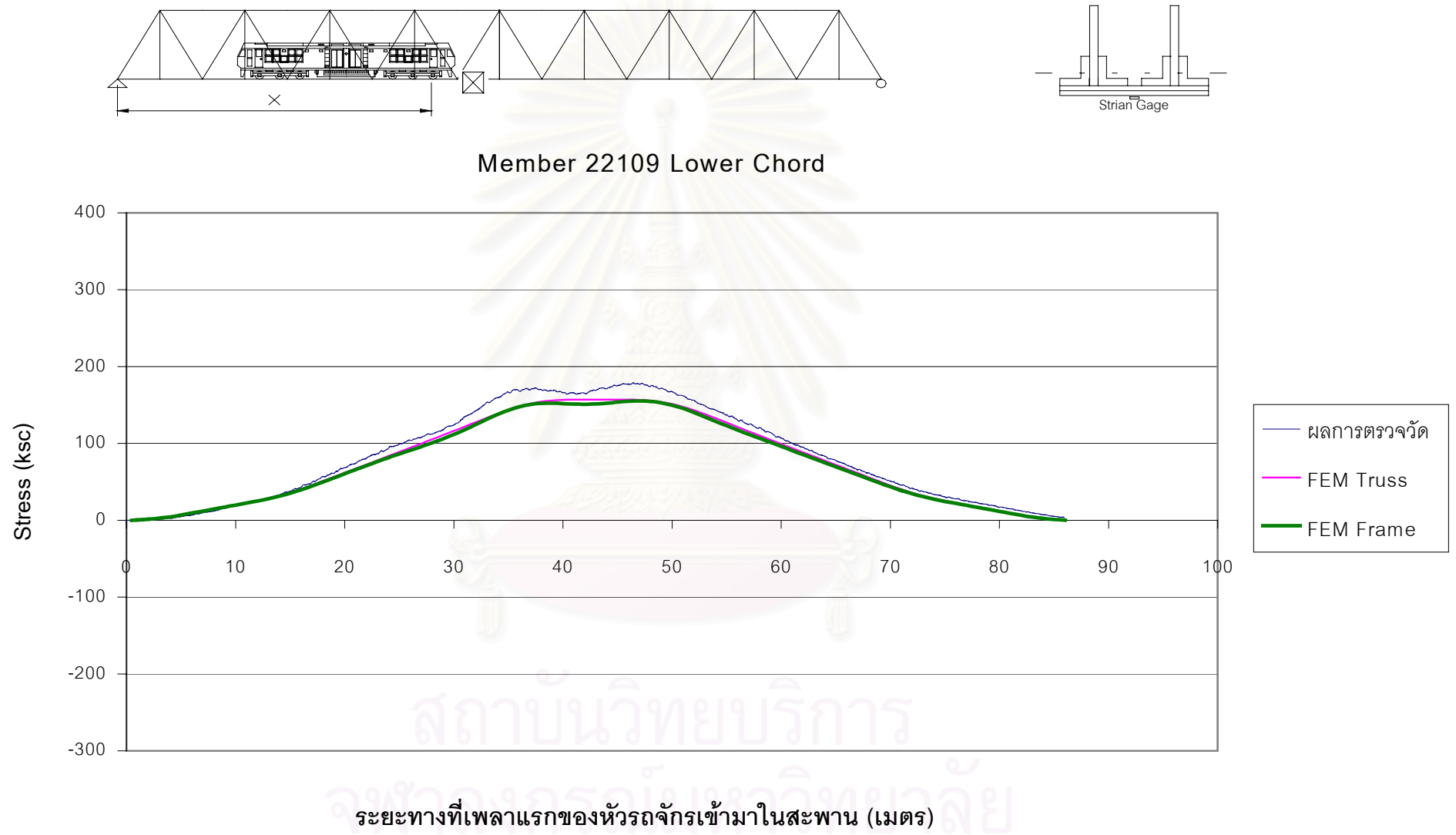
รูปที่ 5-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22101 ในสะพานกม.19



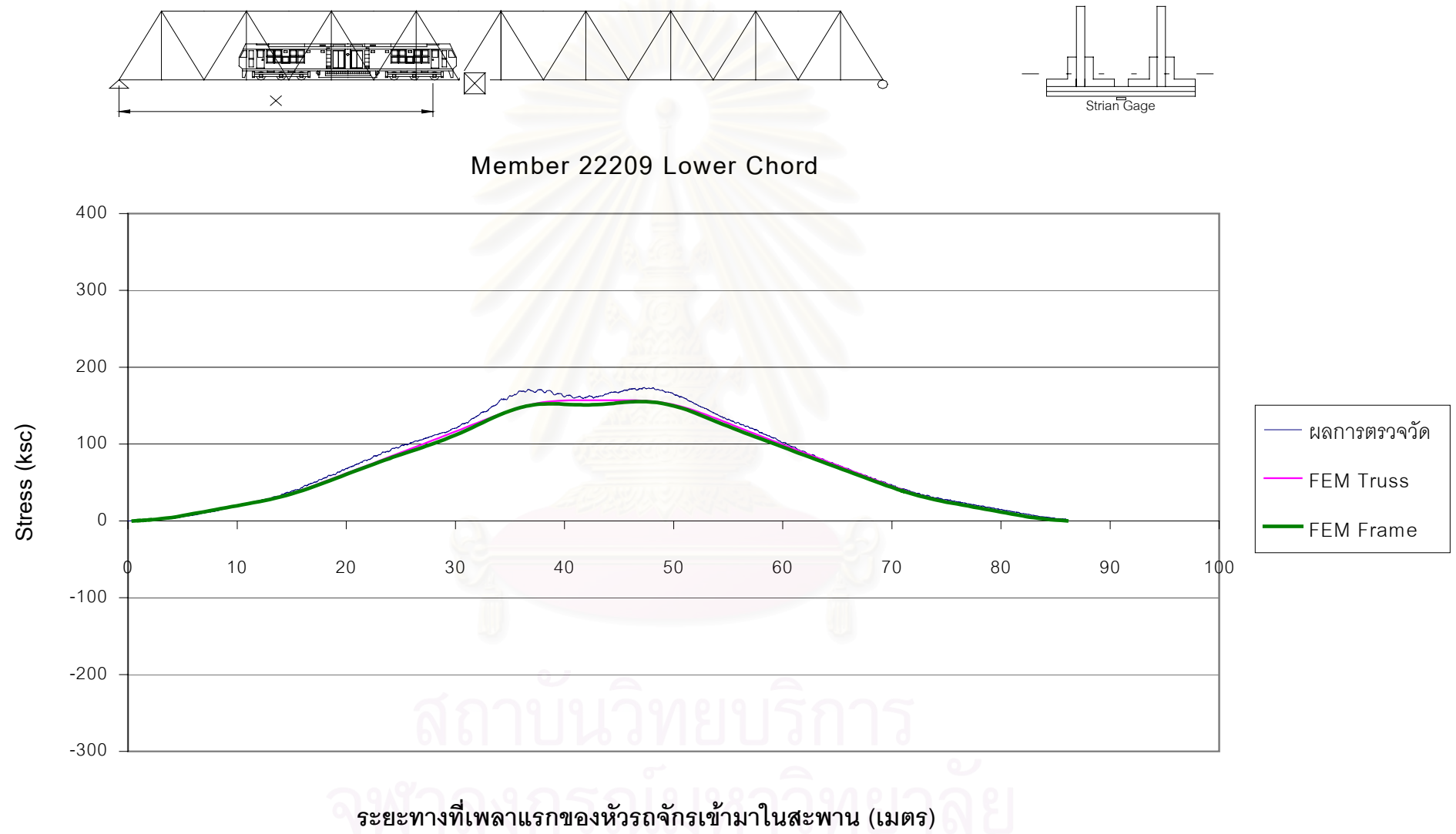
รูปที่ 5-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22119 ในสะพานกม.19



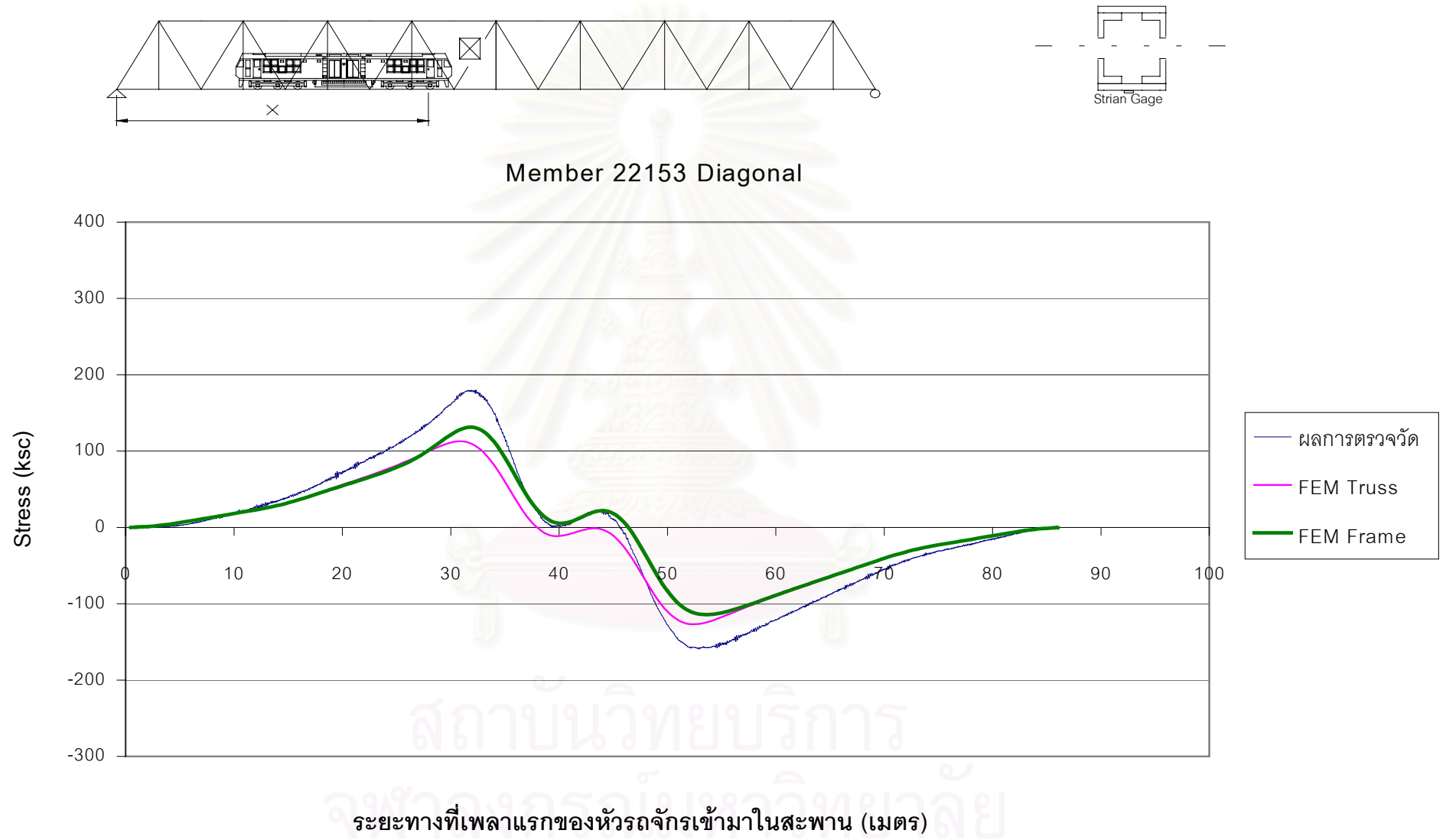
รูปที่ 5-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22146 ในสะพานกม.19



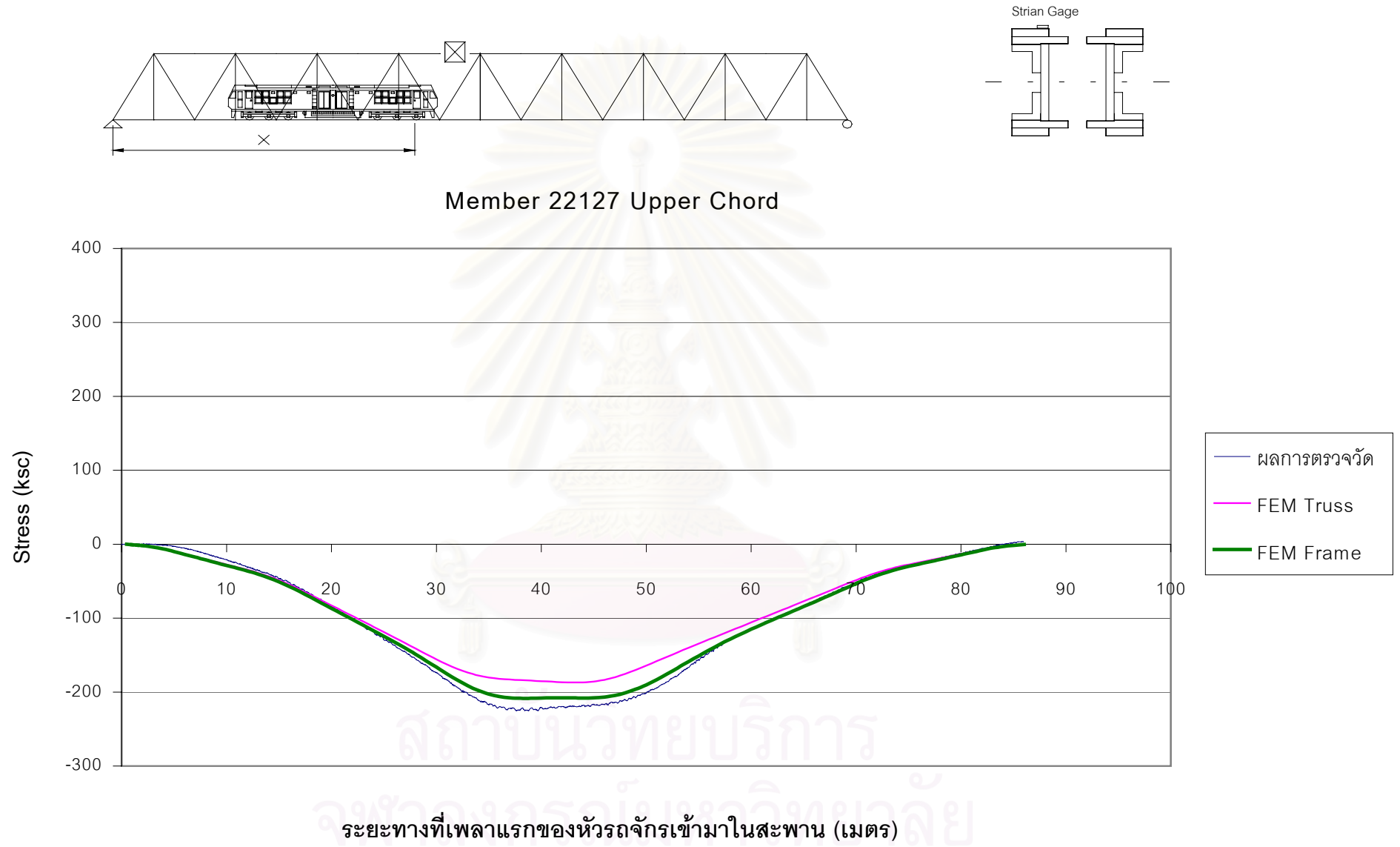
รูปที่ 5-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22109 ในสะพานกม.19



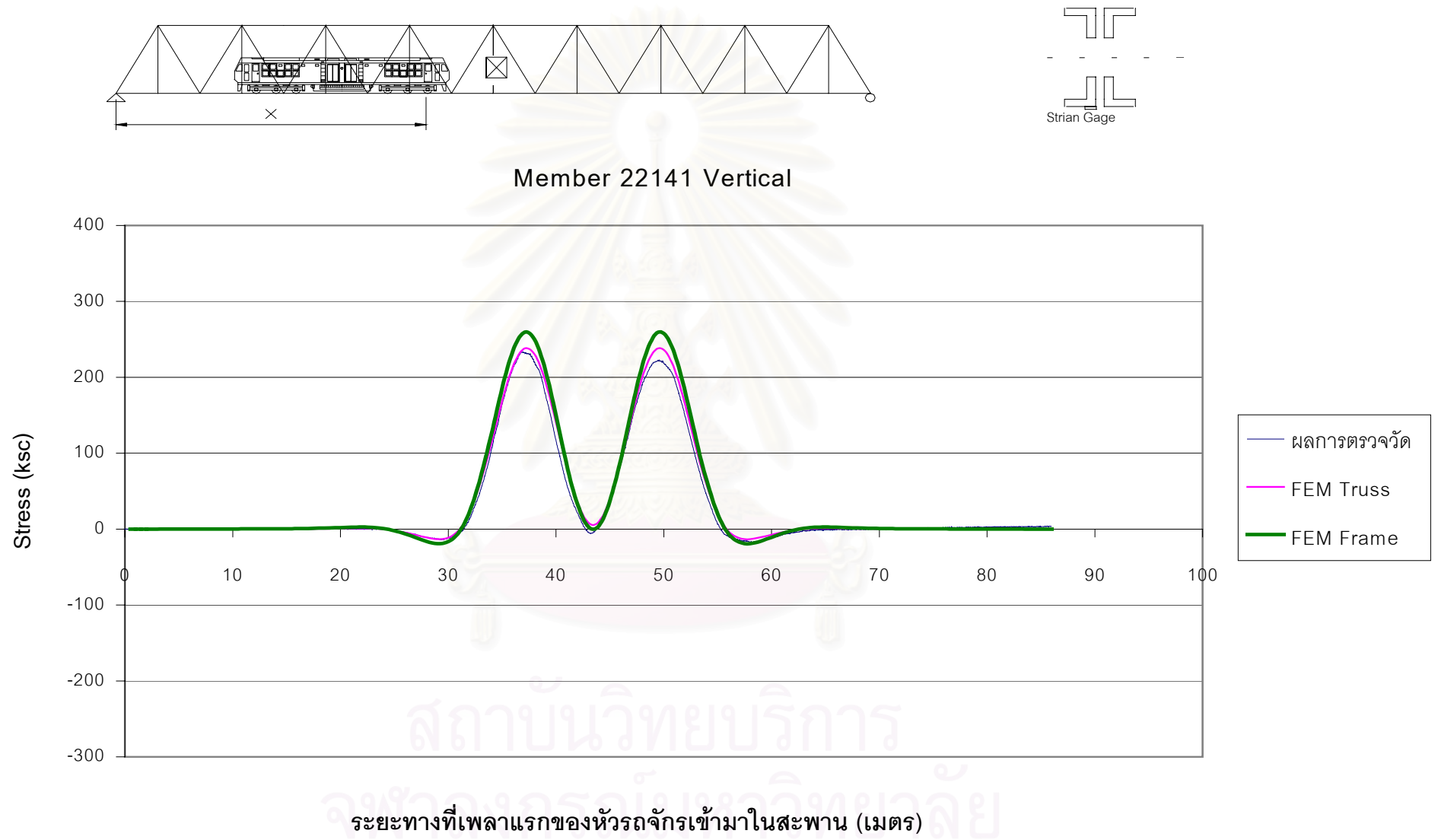
รูปที่ 5-20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารวมของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22209 ในสะพานกม.19



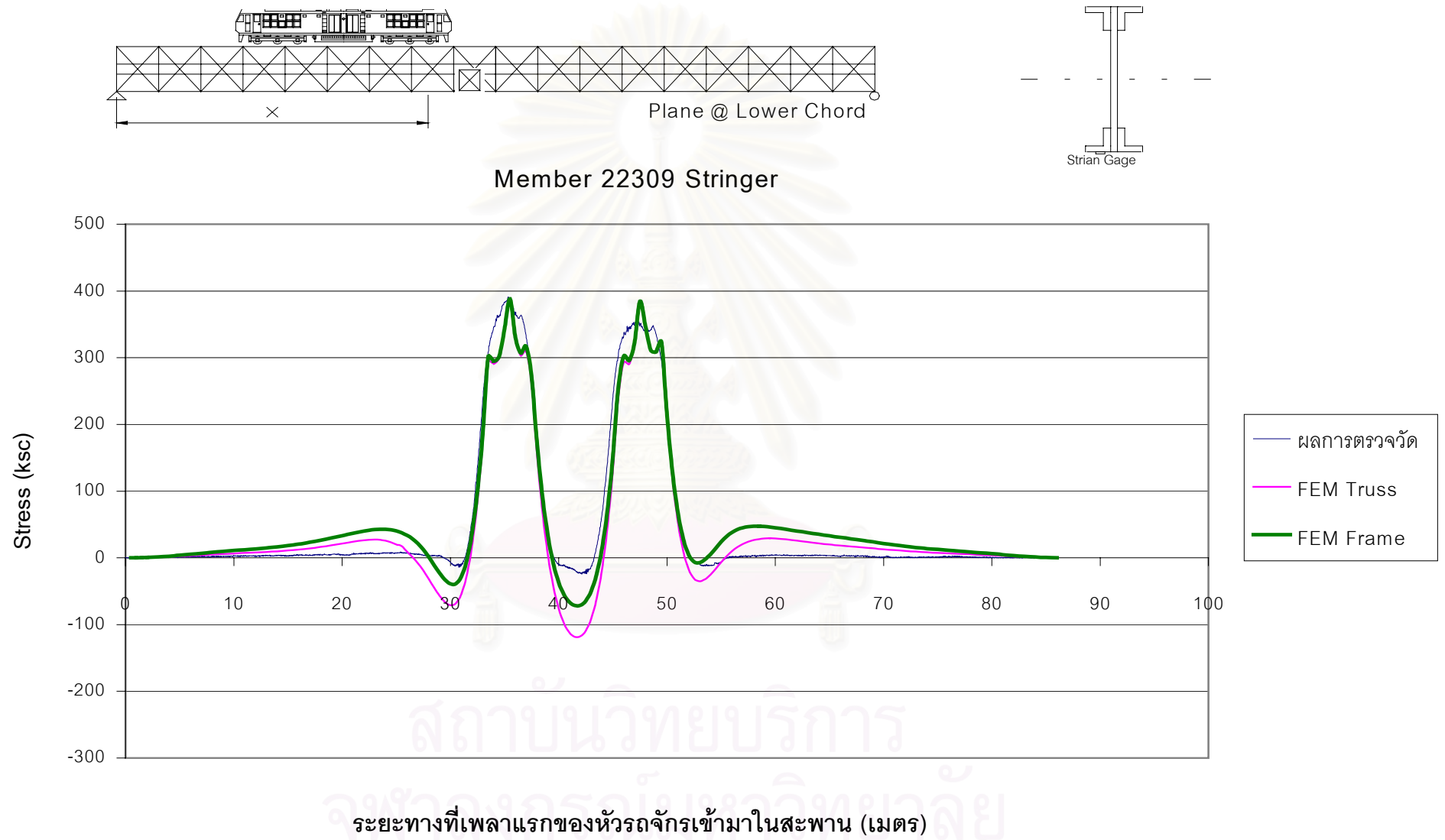
รูปที่ 5-21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารอกของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22153 ในสะพานกม.19



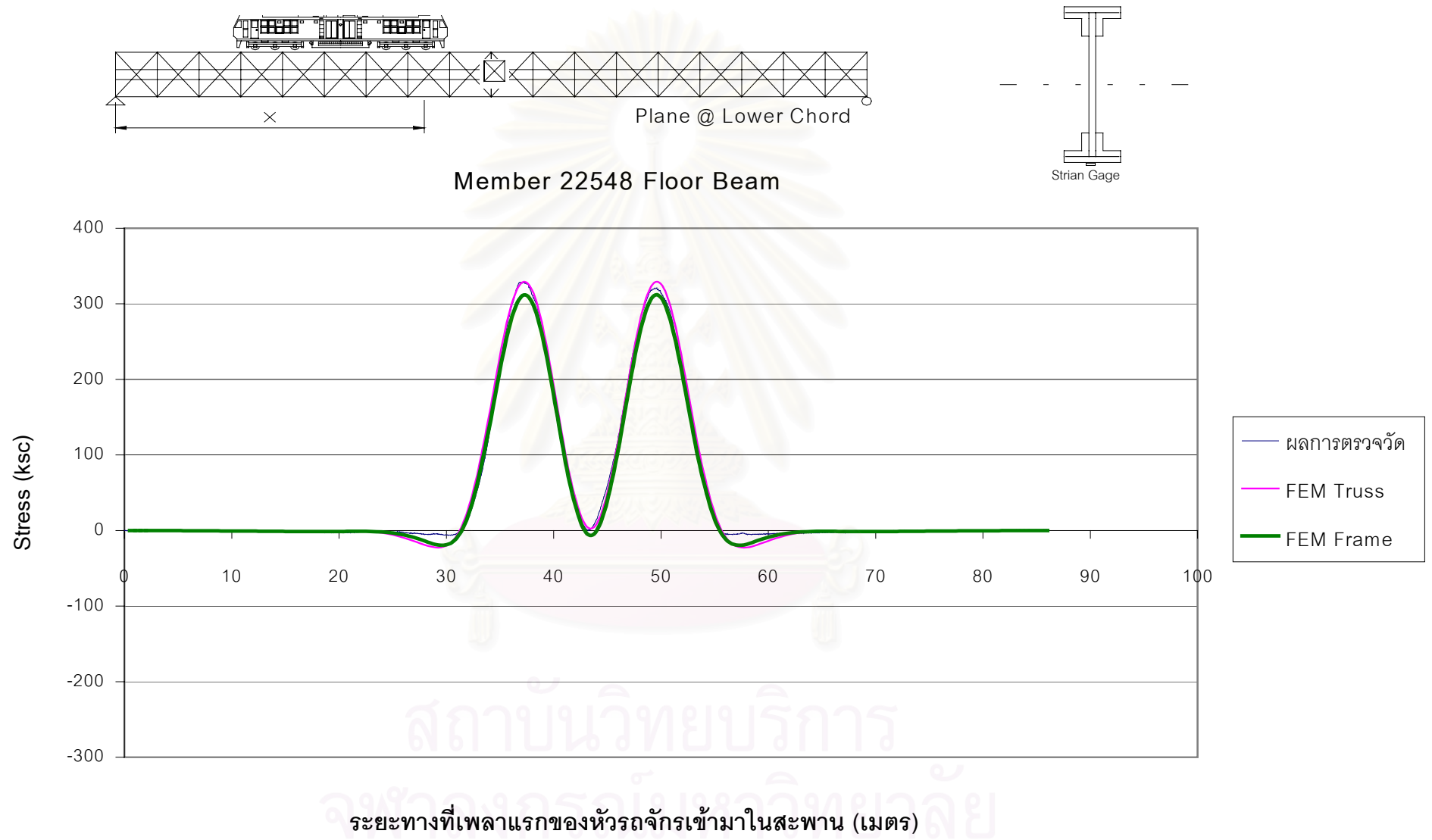
รูปที่ 5-22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลาร่างของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22127 ในสะพานกม.19



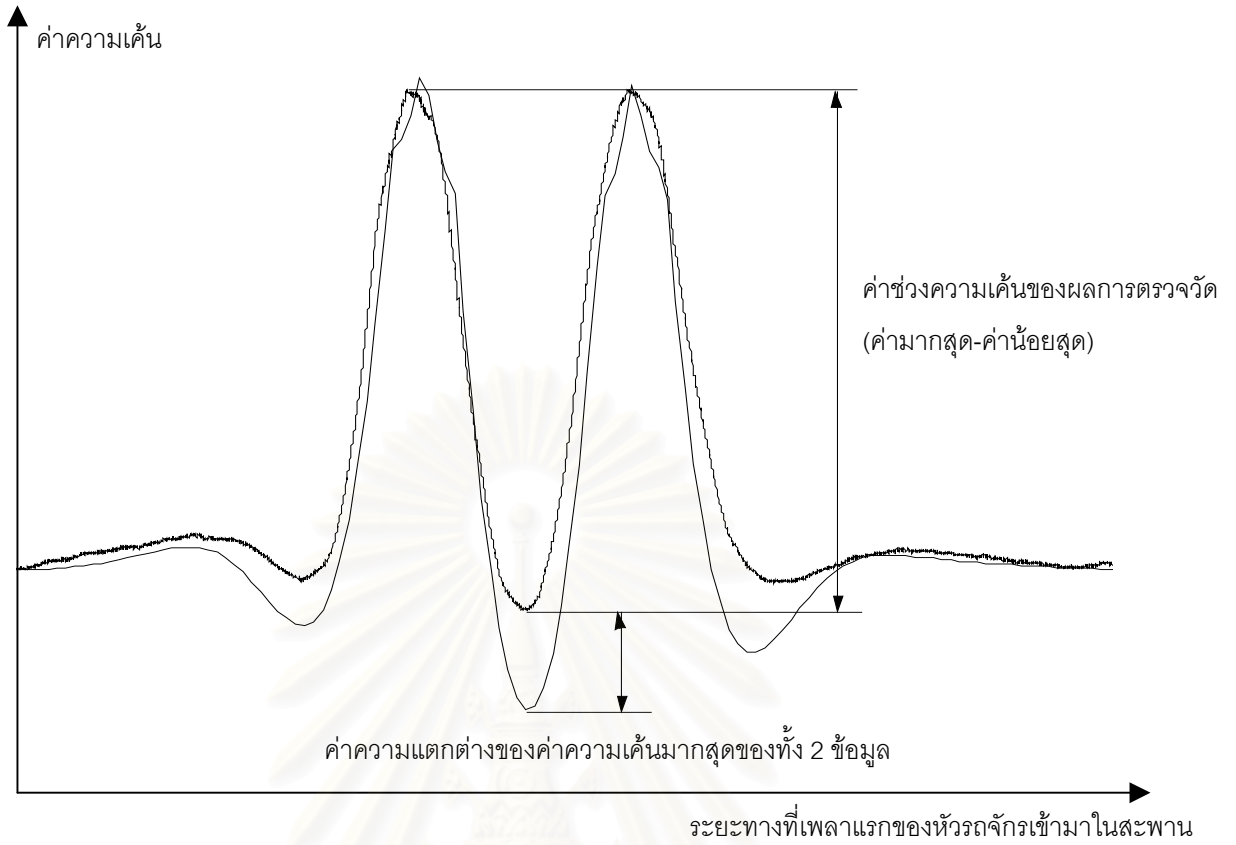
รูปที่ 5-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22141 ในสะพานกม.19



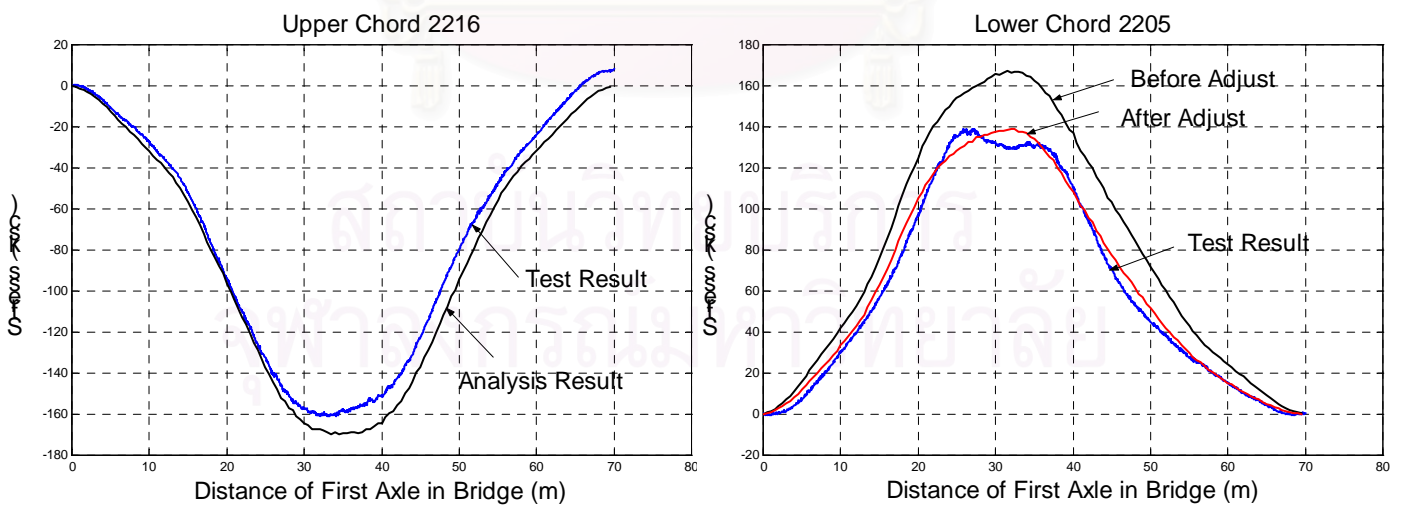
รูปที่ 5-24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22309 ในสะพานกม.19



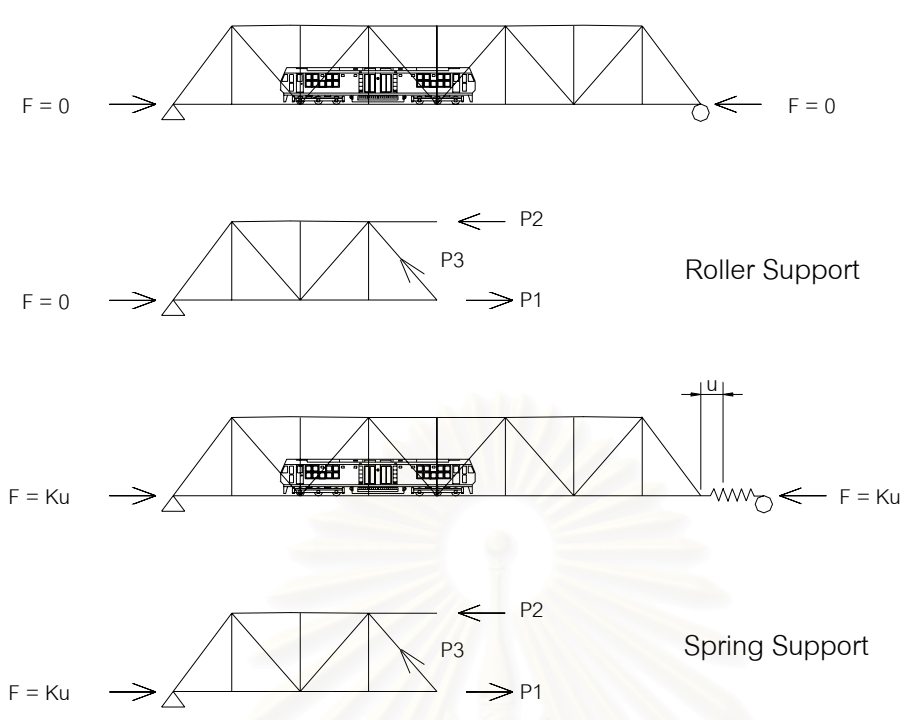
รูปที่ 5-25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับระยะทางที่เพลารากของหัวรถจักรเข้ามาในสะพานของชิ้นส่วน 22548 ในสะพานกม.19



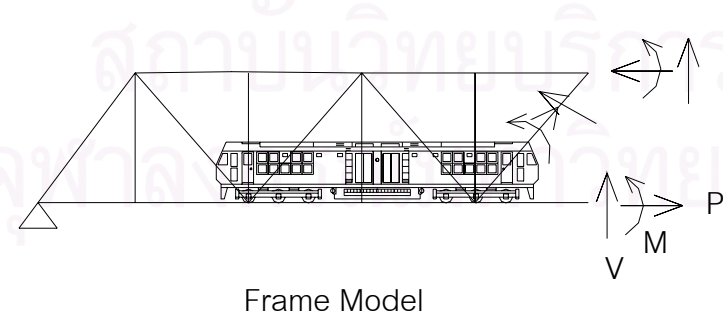
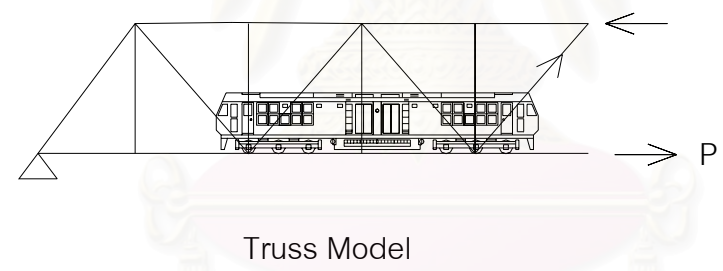
รูปที่ 5-26 แสดงความหมายของค่าความแตกต่างสูงสุด



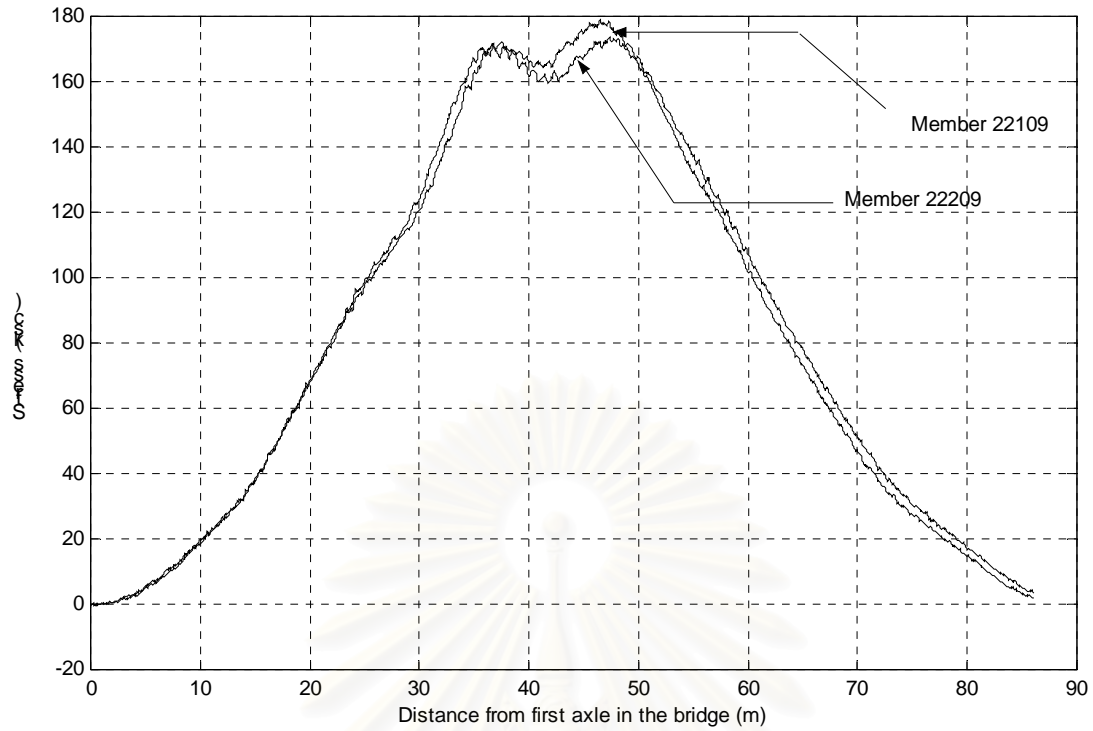
รูปที่ 5-27 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นใน Lower Chord ที่มีการปรับสภาพที่รองรับ



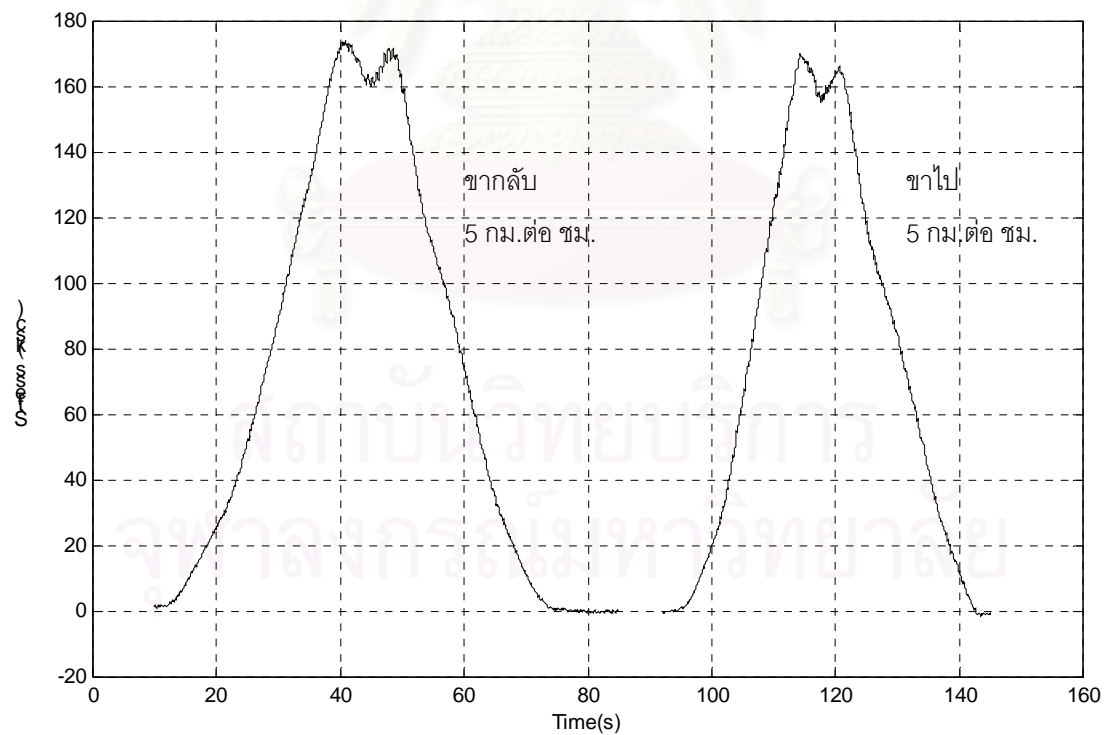
รูปที่ 5-28 แสดง FBD ของแรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากที่รองรับแบบ Roller และ แบบ Spring



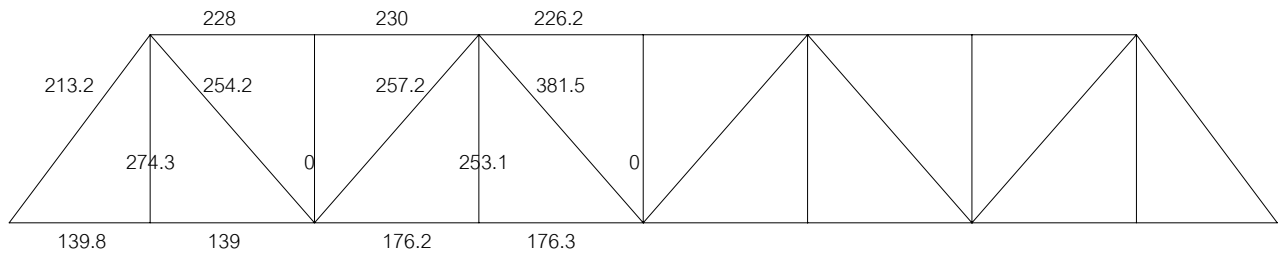
รูปที่ 5-29 แสดง FBD ของแรงภายในที่เกิดในแบบจำลองแบบโครงข้อหมุนและโครงข้อแข็ง



รูปที่ 5-30 แสดงความแตกต่างของผลการตรวจวัดในชิ้นส่วน Lower Chord ทั้ง 2 ข้างของสะพานกม.19



รูปที่ 5-31 แสดงความแตกต่างของผลการตรวจวัดในชิ้นส่วน 22209 ของสะพานกม.19 ขาไปและขากลับที่
ความเร็ว 5 กม.ต่อชั่วโมง



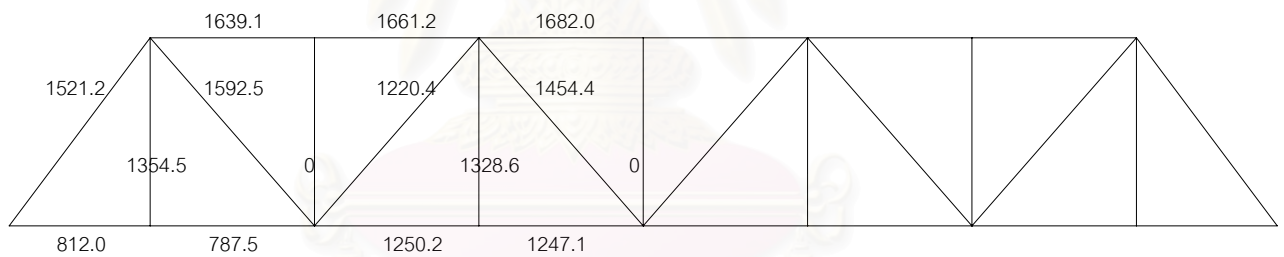
Front View

300.2	265.3	285.8	245.9	263.9			
	246.3	278.3	286.8	283.9			

Top View @ Lower Chord Plane

ค่าช่วงความเค้น หน่วย ksc

รูปที่ 6-1 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากหีวรถจักรวิ่งผ่านบนสะพานจักรี



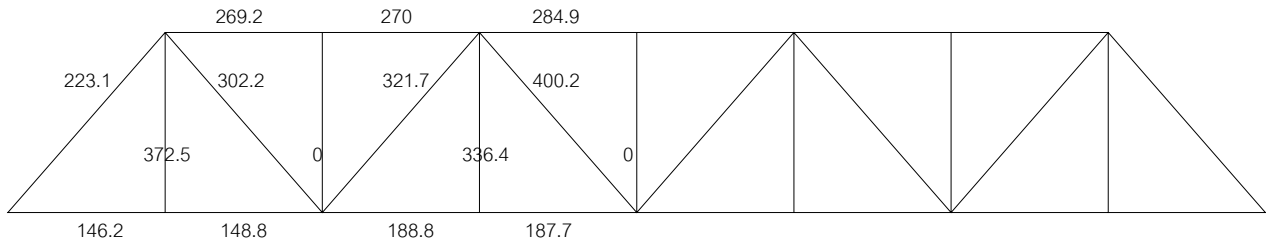
Front View

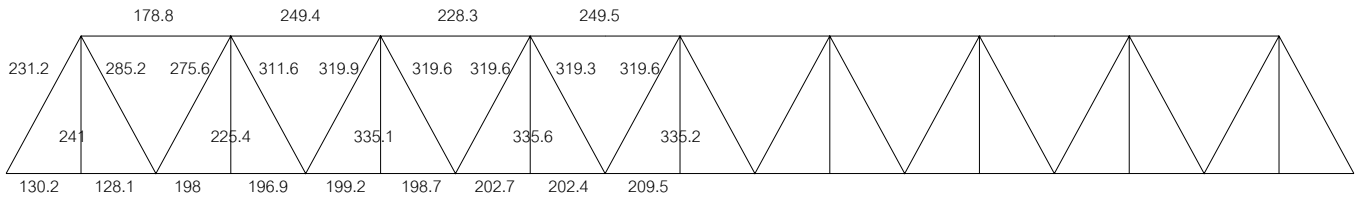
1016.8	1244.5	1498.5	1214.4	1474.2			
	940.7	929.3	1000.7	1027.1			

Top View @ Lower Chord Plane

ค่าช่วงความเค้น หน่วย ksc

รูปที่ 6-2 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักแบบ U20 วิ่งผ่านบนสะพานจักรี





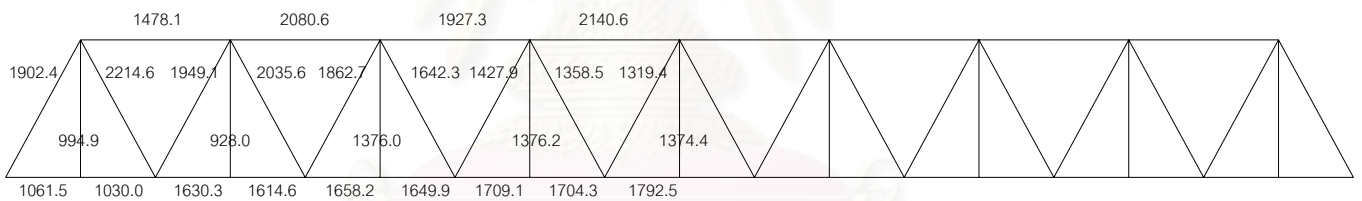
Front View

324	390.1	401.4	363	395.9	347.6	397.8	348.1	397.3	347.6								
	437.8	478.3	506.1	522.1	523.4	532.9	521.7	540.7	530.3								

Top View @ Lower Chord Plane

ค่าช่วงความเค้น หน่วย ksc

รูปที่ 6-5 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากหัวรถจักรวิ่งผ่านบนสะพานกม.19



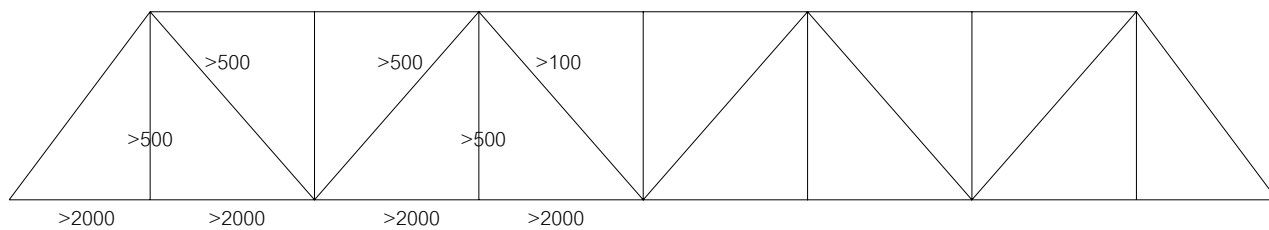
Front View

1109.0	1529.0	1638.9	1410.8	1632.8	1343.9	1662.7	1342.8	1656.0	1388.9								
	1605.1	1255.7	1306.1	1389.6	1512.0	1466.0	1469.6	1492.7	1521.7								

Top View @ Lower Chord Plane

ค่าช่วงความเค้น หน่วย ksc

รูปที่ 6-6 รูปแสดงค่าช่วงความเค้นจากการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักแบบ U20 วิ่งผ่านบนสะพานกม.19



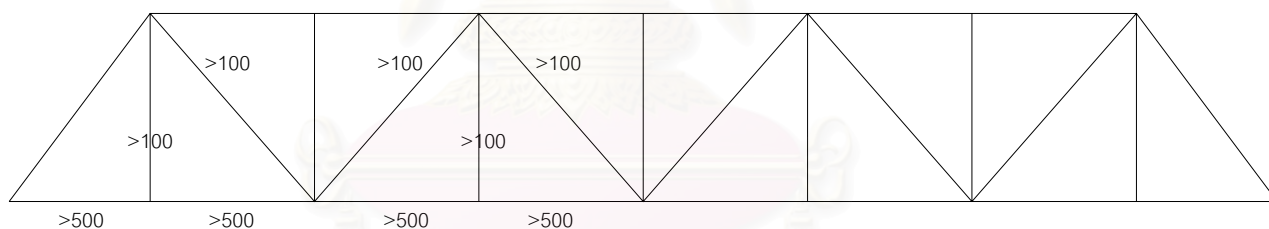
Front View

>500	>500	>500	>500	>500			
>500	>500	>500	>500	>500			

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

รูปที่ 6-7 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานจักรี (Growth Rate = 0%)



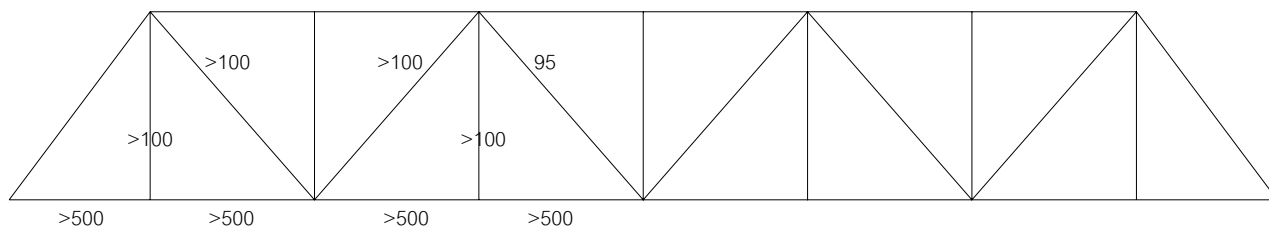
Front View

>100	>100	>100	>100	>100			
>100	>100	>100	>100	>100			

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

รูปที่ 6-8 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานจักรี (Growth Rate = 1%)



Front View

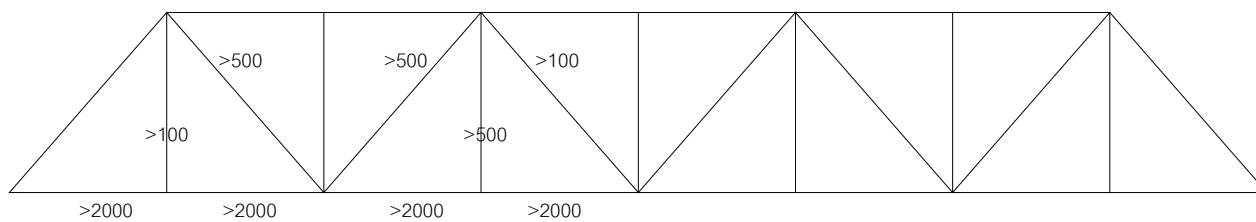
>100	>100	>100	>100	>100			
>100	>100	>100	>100				

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

รูปที่ 6-9 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานจักรี (Growth Rate = 2%)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



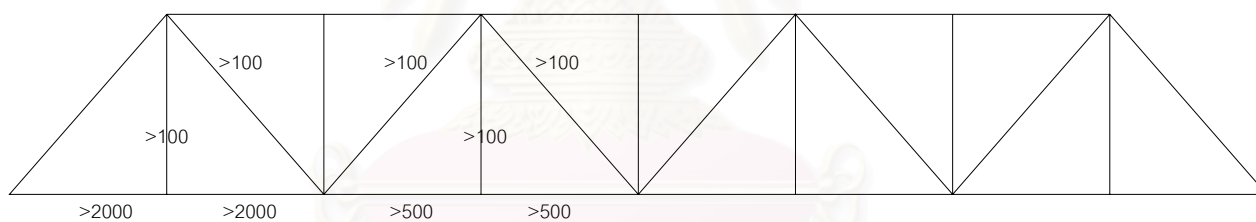
Front View

>500	>100	>100	>100	>100	>100		
>100	>100	>100	>100	>100			

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

รูปที่ 6-10 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานกม.03 (Growth Rate = 0%)



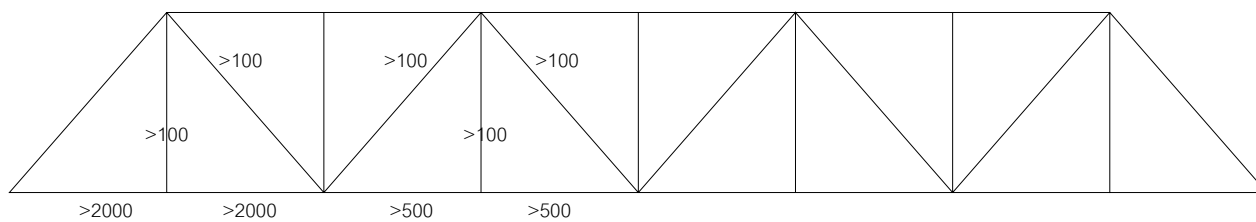
Front View

>100	>100	>100	>100	>100		
>100	>100	>100	>100			

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

ที่ 6-11 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานกม.03 (Growth Rate = 1%)



Front View

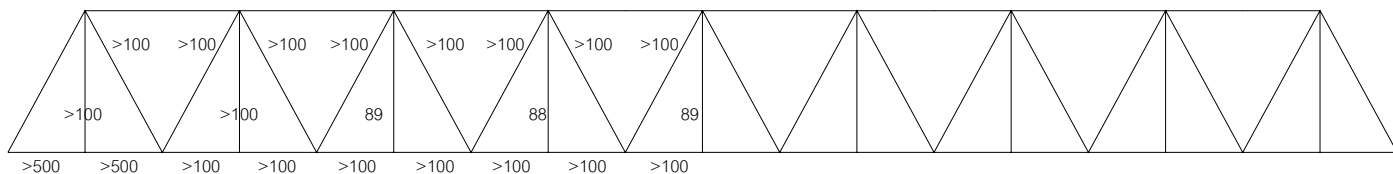
>100	98	>100	>100	>100			
82	80	81	81				

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

รูปที่ 6-12 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานกม.03 (Growth Rate = 2%)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Front View

98	56	51	70	53	80	52	79	53	79									
	34	16	3	0	0	0	0	0	0									

Top View @ Lower Chord Plane

อายุ หน่วย ปี

รูปที่ 6-15 แสดงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากขบวนรถไฟปกติวิ่งผ่านสะพานกม.19 (Growth Rate = 2%)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กุ่มพ บุญวรรณ. การประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากความล้าของสะพานเหล็กข้ามทางแยก. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541.
- ชัยชาญ ยุวนะศิริ. ผลกระทบของรถบรรทุกหนักต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้าของสะพานเหล็ก. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542.

ภาษาอังกฤษ

- Anzai H. and Endo T. On-site Indication of Fatigue Damage under Complex Loading. *International Journal of Fatigue* (1979) : 40-57.
- AREMA . *Manual for Railway Engineering*. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association 1999.
- Bannantine J.A. ,Comer J.J. and Handrock J.L. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey : Prentice-Hall , 1990.
- Barsom J.M. and Rolfe S.T. *Fracture and Fatigue Control in Structures* : Applications of Fracture Mechanics. ASTM 1999.
- Bruhwieler E. ,Smith I.F.C. and Hirt M.A. Fatigue and Fracture of Riveted Bridge Members. *Journal of Structural Engineering* 116, 1 (1990) : 198-214.
- DiBattista J.D. ,Adamson D.E.J. and Kulak G.L. Fatigue Strength of Riveted Connections. *Journal of Structural Engineering* 124, 7 (1998) : 792-797.
- DiBattista J.D. ,Adamson D.E.J.and Kulak G.L. Evaluation of Remaining Fatigue Life for Riveted Truss Bridges. *Canadian Journal of Civil Engineering* 25 (1998) : 678-691.
- Downing S.D. and Socie D.F. Simple Rainflow Counting Algorithms. *International Journal of Fatigue* (1982) : 31-40.
- Dvorak I.J. and Zimmer D.C. Fatigue Evaluation of Existing Steel Highway Bridges. *IABSE* (1982) : 503-509.
- Fisher J.W. *Fatigue and Fracture in Steel Bridge*. New York : John Wiley & Sons, 1984.
- Fisher J.W. ,Yen B.T.and Wang D. Fatigue Strength of Riveted Bridge Members. *Journal of Structural Engineering* 116, 11 (1990) : 2968-2981.
- Ghosh U.K. *Repair and Rehabilitation of Steel Bridges*. A.A. Balkema Publishers, Old Post Road, Brookfield. 2000.

- Kiss K. , Dunai L. Stress History Generation for Truss Bridges using Multi-Level Models. **Computer & Structures** 78 (2000) : 329-339.
- Kulak G.L. Fatigue Strength of Riveted Shear Splices. **Progressive in Structural Engineering Material**. 2 (2000) : 110-119.
- Mohammadi J. , Polepeddi, R. Bridge Rating with Consideration for Fatigue Damage from Overloads. **Journal of Bridge Engineering** 5, 3 (2000) : 259-265.
- Marek P. Prediction of Fatigue Life in Steel Bridge. **IABSE**. (1982) : 511-515.
- Moses F. , Schilling C.G. and Raju K.S. Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges. **NCHRP**. Report 299 (1987) :1-94.
- Roeder C.W. ,MacRae G. ,Crocker P. ,Arima, K. and Wong, S. Dynamic Response and Fatigue of Steel Tied-Arch Bridge. **Journal of Bridge Engineering** 5, 1 (2000) : 14-21
- Standard Specifications for Highway Bridge. **AASHTO , American Association of State Highway and Transportation Officials**. 1996.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

(ตาราง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี้

(X = 2 Y = 1,2)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y01	L	152.00	112.00	6.00	32,209	35,789	14.56	15.34
2Y02	L	152.00	112.00	4.50	32,209	35,789	14.56	15.34
2Y03	L	312.84	247.80	2.50	68,413	62,718	14.79	14.16
2Y04	L	312.84	247.80	7.00	68,413	62,718	14.79	14.16
2Y05	L	312.84	247.80	7.00	68,413	62,718	14.79	14.16
2Y06	L	312.84	247.80	7.00	68,413	62,718	14.79	14.16
2Y07	L	312.84	247.80	7.00	68,413	62,718	14.79	14.16
2Y08	L	312.84	247.80	2.50	68,413	62,718	14.79	14.16
2Y09	L	152.00	112.00	4.50	32,209	35,789	14.56	15.34
2Y10	L	152.00	112.00	6.00	32,209	35,789	14.56	15.34
2Y11	EP	260.80	195.60	6.40	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y12	EP	260.80	195.60	3.60	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y13	U	260.80	195.60	7.00	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y14	U	260.80	195.60	0.66	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y15	U	348.80	261.60	6.34	99,054	119,342	16.85	18.50
2Y16	U	348.80	261.60	7.00	99,054	119,342	16.85	18.50
2Y17	U	348.80	261.60	7.00	99,054	119,342	16.85	18.50
2Y18	U	348.80	261.60	6.34	99,054	119,342	16.85	18.50
2Y19	U	260.80	195.60	0.66	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y20	U	260.80	195.60	7.00	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y21	EP	260.80	195.60	3.60	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y22	EP	260.80	195.60	6.40	90,556	88,220	18.63	18.39
2Y23	P	76.00	66.00	8.00	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y24	P	76.00	66.00	5.60	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y25	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y26	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y27	P	76.00	66.00	5.60	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y28	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y29	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y30	P	76.00	66.00	5.60	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y31	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y32	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y33	P	76.00	66.00	5.60	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y34	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y35	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y36	P	76.00	66.00	5.60	12,846	1,582	13.00	4.56

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 1,2)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y37	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y38	P	76.00	66.00	1.20	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y39	P	76.00	66.00	8.00	12,846	1,582	13.00	4.56
2Y40	D	197.60	153.60	10.63	35,130	36,271	13.33	13.55
2Y41	D	188.44	138.40	10.63	36,839	33,625	13.98	13.36
2Y42	D	124.00	89.00	10.63	12,985	22,722	10.23	13.54
2Y43	D	124.00	89.00	10.63	12,985	22,722	10.23	13.54
2Y44	D	188.44	138.40	10.63	35,130	36,271	13.33	13.55
2Y45	D	197.60	153.60	10.63	36,839	33,625	13.98	13.36

โดยที่ L = Lower Cord
 U = Upper Cord
 P = Post
 D = Diagonal Member
 EP = End Post

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 3,4)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y01	ST	283.80	212.85	6.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y02	ST	283.80	212.85	7.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y03	ST	283.80	212.85	7.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y04	ST	283.80	212.85	7.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y05	ST	283.80	212.85	7.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y06	ST	283.80	212.85	7.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y07	ST	283.80	212.85	7.00	398,448	7,769	37.47	5.23
2Y08	ST	283.80	212.85	6.00	398,448	7,769	37.47	5.23

โดยที่ ST = Stringer
 ทุก member มี depth เท่ากับ 94.0 cm.
 ทุก member มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 47.0 cm.

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y01	FB	255.24	191.43	1.80	469,717	5,740	42.90	4.74
2Y02	FB	255.24	191.43	1.20	469,717	5,740	42.90	4.74
2Y03	FB	255.24	191.43	1.80	469,717	5,740	42.90	4.74
2Y04	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y05	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y06	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y07	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y08	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y09	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y10	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y11	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y12	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y13	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y14	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y15	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y16	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y17	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y18	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y19	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y20	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y21	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y22	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y23	FB	292.04	219.03	1.20	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y24	FB	292.04	219.03	1.80	697,776	7,680	48.88	5.13
2Y25	FB	255.24	191.43	1.80	469,717	5,740	42.90	4.74
2Y26	FB	255.24	191.43	1.20	469,717	5,740	42.90	4.74
2Y27	FB	255.24	191.43	1.80	469,717	5,740	42.90	4.74
2Y28	LB	38.00	33.00	7.68	360	791	3.08	4.56
2Y29	LLB	38.00	33.00	7.68	360	791	3.08	4.56
2Y30	LLB	34.00	29.00	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y31	LLB	34.00	29.00	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y32	LLB	24.31	21.10	8.49	224	224	3.04	3.04
2Y33	LLB	24.31	21.10	8.49	224	224	3.04	3.04
2Y34	LLB	21.71	15.20	5.31	160	160	2.72	2.72
2Y35	LLB	21.71	15.20	5.31	160	160	2.72	2.72
2Y36	LLB	21.71	30.92	3.18	160	160	2.72	2.72

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y37	LLB	21.71	30.92	3.18	160	160	2.72	2.72
2Y38	LLB	21.71	30.92	3.18	160	160	2.72	2.72
2Y39	LLB	21.71	30.92	3.18	160	160	2.72	2.72
2Y40	LLB	21.71	15.20	5.31	160	160	2.72	2.72
2Y41	LLB	21.71	15.20	5.31	160	160	2.72	2.72
2Y42	LLB	24.31	21.10	8.49	224	224	3.04	3.04
2Y43	LLB	24.31	21.10	8.49	224	224	3.04	3.04
2Y44	LLB	34.00	29.00	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y45	LLB	34.00	29.00	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y46	LLB	38.00	33.00	7.68	360	791	3.08	4.56
2Y47	LLB	38.00	33.00	7.68	360	791	3.08	4.56
2Y48	LLB	17.00	14.50	1.20	129	129	2.76	2.76
2Y49	LLB	17.00	14.50	1.20	129	129	2.76	2.76

โดยที่ FB = Floor Beam

LLB = Lower Lateral Bracing

member 2Y01 ถึง 2Y03 และ 2Y25 ถึง 2Y27 มี depth เท่ากับ 105.0 cm.

member 2Y01 ถึง 2Y03 และ 2Y25 ถึง 2Y27 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 52.5 cm.

member 2Y04 ถึง 2Y24 มี depth เท่ากับ 120.0 cm.

member 2Y04 ถึง 2Y24 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 60.0 cm.

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 6)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y01	SB	34.00	24.00	2.40	129	129	2.76	2.76
2Y02	SB	34.00	24.00	2.40	129	129	2.76	2.76
2Y03	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y04	SB	34.00	24.00	1.20	129	129	2.76	2.76
2Y05	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y06	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y07	SB	34.00	24.00	1.20	129	129	2.76	2.76
2Y08	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y09	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y10	SB	34.00	24.00	1.20	129	129	2.76	2.76

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 6)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y11	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y12	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y13	SB	34.00	24.00	1.20	129	129	2.76	2.76
2Y14	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y15	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y16	SB	34.00	24.00	1.20	129	129	2.76	2.76
2Y17	SB	34.00	24.00	1.80	129	129	2.76	2.76
2Y18	SB	34.00	24.00	2.40	129	129	2.76	2.76
2Y19	SB	34.00	24.00	2.40	129	129	2.76	2.76
2Y20	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y21	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y22	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y23	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y24	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y25	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y26	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y27	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y28	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y29	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y30	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16
2Y31	ULB	17.00	14.50	8.49	258	589	2.76	4.16

โดยที่ SB = Sway Bracing

ULB = Upper Lateral Bracing

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 7)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y01	PB	34.00	24.00	4.33	16,539	258	22.06	2.76
2Y02	PB	34.00	24.00	4.33	16,539	258	22.06	2.76
2Y03	PB	34.00	24.00	2.16	16,539	258	22.06	2.76
2Y04	PB	34.00	24.00	2.16	16,539	258	22.06	2.76
2Y05	PB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y06	SB	34.00	24.00	4.80	258	589	2.76	4.16

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 7)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y07	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y08	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y09	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y10	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y11	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y12	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y13	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y14	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y15	SB	34.00	24.00	4.80	258	589	2.76	4.16
2Y16	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y17	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y18	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y19	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y20	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y21	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y22	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y23	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y24	SB	34.00	24.00	4.80	258	589	2.76	4.16
2Y25	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y26	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y27	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y28	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y29	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y30	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y31	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y32	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y33	SB	34.00	24.00	4.80	258	589	2.76	4.16
2Y34	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y35	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y36	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y37	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y38	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y39	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y40	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y41	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y42	SB	34.00	24.00	4.80	258	589	2.76	4.16

ตารางที่ ก-1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานจักรี (ต่อ)

(X = 2 Y = 7)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
2Y43	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y44	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y45	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y46	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y47	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y48	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y49	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y50	SB	17.00	14.50	1.70	129	129	2.76	2.76
2Y51	PB	34.00	24.00	4.33	16,539	258	22.06	2.76
2Y52	PB	34.00	24.00	4.33	16,539	258	22.06	2.76
2Y53	PB	34.00	24.00	2.16	16,539	258	22.06	2.76
2Y54	PB	34.00	24.00	2.16	16,539	258	22.06	2.76
2Y55	PB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y56	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y57	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y58	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y59	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y60	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y61	SB	34.00	24.00	4.33	16,539	258	22.06	2.76
2Y62	SB	34.00	24.00	2.16	16,539	258	22.06	2.76
2Y63	SB	34.00	24.00	2.16	16,539	258	22.06	2.76
2Y64	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y65	SB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y66	PB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y67	PB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y68	PB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76
2Y69	PB	34.00	24.00	2.40	16,539	258	22.06	2.76

โดยที่ SB = Sway Bracing
PB = Portal Bracing

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03

(X = 1 Y = 2 Z = 1,2)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z01	L	125.60	92.10	6.25	18,545	27,750	12.15	14.86
12Z02	L	125.60	92.10	2.25	18,545	27,750	12.15	14.86
12Z03	L	125.60	92.10	4.00	18,545	27,750	12.15	14.86
12Z04	L	244.60	185.60	6.25	34,207	44,180	11.83	13.44
12Z05	L	244.60	185.60	6.25	34,207	44,180	11.83	13.44
12Z06	L	244.60	185.60	6.25	34,207	44,180	11.83	13.44
12Z07	L	244.60	185.60	6.25	34,207	44,180	11.83	13.44
12Z08	L	125.60	92.10	4.00	18,545	27,750	12.15	14.86
12Z09	L	125.60	92.10	2.25	18,545	27,750	12.15	14.86
12Z10	L	125.60	92.10	6.25	18,545	27,750	12.15	14.86
12Z11	EP	231.00	173.25	6.13	47,332	78,429	14.31	18.43
12Z12	EP	231.00	173.25	4.00	47,332	78,429	14.31	18.43
12Z13	U	190.40	142.80	5.41	31,044	59,597	12.77	17.69
12Z14	U	190.40	142.80	0.84	31,044	59,597	12.77	17.69
12Z15	U	190.40	142.80	6.25	31,044	59,597	12.77	17.69
12Z16	U	231.00	173.25	6.25	47,332	78,429	14.31	18.43
12Z17	U	231.00	173.25	6.25	47,332	78,429	14.31	18.43
12Z18	U	190.40	142.80	6.25	31,044	59,597	12.77	17.69
12Z19	U	190.40	142.80	0.84	31,044	59,597	12.77	17.69
12Z20	U	190.40	142.80	5.41	31,044	59,597	12.77	17.69
12Z21	EP	231.00	173.25	4.00	47,332	78,429	14.31	18.43
12Z22	EP	231.00	173.25	6.13	47,332	78,429	14.31	18.43
12Z23	P	68.00	48.00	8.00	10,943	1,178	12.69	4.16
12Z24	P	83.16	62.37	5.60	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z25	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z26	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z27	P	83.16	62.37	5.60	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z28	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z29	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z30	P	83.16	62.37	5.60	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z31	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z32	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z33	P	83.16	62.37	5.60	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z34	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z35	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z36	P	83.16	62.37	5.60	10,225	1,178	11.09	3.60

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)
(X = 1 Y = 2 Z = 1,2)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z37	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z38	P	83.16	62.37	1.20	10,225	1,178	11.09	3.60
12Z39	P	68.00	48.00	8.00	10,943	1,178	12.69	4.16
12Z40	D	148.00	116.00	10.15	17,305	24,741	10.81	12.93
12Z41	D	128.00	98.00	10.15	15,443	21,947	10.98	13.09
12Z42	D	102.96	75.96	10.15	11,597	18,502	10.61	13.41
12Z43	D	102.96	75.96	10.15	11,597	18,502	10.61	13.41
12Z44	D	128.00	98.00	10.15	15,443	21,947	10.98	13.09
12Z45	D	148.00	116.00	10.15	17,305	24,741	10.81	12.93

โดยที่ L = Lower Cord
EP = End Post
U = Upper Cord
P = Post
D = Diagonal

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)
(X = 1 Y = 2 Z = 3,4)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z01	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z02	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z03	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z04	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z05	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z06	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z07	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80
12Z08	ST	161.40	121.05	6.25	172,239	7,452	32.67	6.80

โดยที่ ST = Stringer
ทุกmember มี depth เท่ากับ 79.0 cm.
ทุกmember มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 40.92 cm.

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)

(X = 1 Y = 2 Z = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z01	FB	218.67	164.00	1.75	324,588	10,580	38.53	6.96
12Z02	FB	218.67	164.00	1.20	324,588	10,580	38.53	6.96
12Z03	FB	218.67	164.00	1.75	324,588	10,580	38.53	6.96
12Z04	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z05	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z06	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z07	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z08	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z09	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z10	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z11	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z12	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z13	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z14	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z15	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z16	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z17	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z18	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z19	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z20	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z21	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z22	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z23	FB	205.61	154.21	1.20	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z24	FB	205.61	154.21	1.75	380,387	7,506	43.01	6.04
12Z25	FB	218.67	164.00	1.75	324,588	10,580	38.53	6.96
12Z26	FB	218.67	164.00	1.20	324,588	10,580	38.53	6.96
12Z27	FB	218.67	164.00	1.75	324,588	10,580	38.53	6.96
12Z28	LLB	38.00	23.00	7.82	360	791	3.08	4.56
12Z29	LLB	38.00	23.00	7.82	360	791	3.08	4.56
12Z30	LLB	27.36	18.96	7.82	632	174	4.81	2.52
12Z31	LLB	27.36	18.96	7.82	632	174	4.81	2.52
12Z32	LLB	20.50	13.50	7.82	325	143	3.98	2.64
12Z33	LLB	20.50	13.50	7.82	325	143	3.98	2.64
12Z34	LLB	17.00	10.00	4.67	129	129	2.76	2.76
12Z35	LLB	17.00	10.00	4.67	129	129	2.76	2.76
12Z36	LLB	34.00	25.50	3.15	258	589	2.76	4.16

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)
(X = 1 Y = 2 Z = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z37	LLB	34.00	25.50	3.15	258	589	2.76	4.16
12Z38	LLB	34.00	25.50	3.15	258	589	2.76	4.16
12Z39	LLB	34.00	25.50	3.15	258	589	2.76	4.16
12Z40	LLB	17.00	10.00	4.67	129	129	2.76	2.76
12Z41	LLB	17.00	10.00	4.67	129	129	2.76	2.76
12Z42	LLB	20.50	13.50	7.82	325	143	3.98	2.64
12Z43	LLB	20.50	13.50	7.82	325	143	3.98	2.64
12Z44	LLB	27.36	18.96	7.82	632	174	4.81	2.52
12Z45	LLB	27.36	18.96	7.82	632	174	4.81	2.52
12Z46	LLB	38.00	23.00	7.82	360	791	3.08	4.56
12Z47	LLB	38.00	23.00	7.82	360	791	3.08	4.56
12Z48	LLB	17.00	12.75	1.20	129	129	2.76	2.76
12Z49	LLB	17.00	12.75	1.20	129	129	2.76	2.76

โดยที่ FB = Floor Beam

LLB = Lower Lateral Bracing

member 12Z01 ถึง 12Z03 และ 12Z25 ถึง 12Z27 มี depth เท่ากับ 91.0 cm.

member 12Z01 ถึง 12Z03 & 12Z25 ถึง 12Z27 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 47.22 cm

member 12Z04 ถึง 12Z24 มี depth เท่ากับ 105.0 cm.

member 12Z04 ถึง 12Z24 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 54.49 cm.

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)
(X = 1 Y = 2 Z = 6)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z01	PB	25.38	14.14	2.35	5,319	133	14.48	2.29
12Z02	PB	25.38	14.14	2.35	5,319	133	14.48	2.29
12Z03	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z04	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z05	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z06	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z07	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z08	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z09	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z10	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)
(X = 1 Y = 2 Z = 6)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z11	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z12	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z13	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z14	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z15	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z16	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z17	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z18	PB	25.38	14.14	2.35	5,319	133	14.48	2.29
12Z19	PB	25.38	14.14	2.35	5,319	133	14.48	2.29
12Z20	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z21	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z22	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z23	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z24	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z25	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z26	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z27	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z28	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z29	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z30	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56
12Z31	ULB	20.79	11.79	7.82	489	137	4.85	2.56

โดยที่ PB = Portal Bracing
SB = Sway Bracing
ULB = Upper Lateral Bracing

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)
(X = 1 Y = 2 Z = 7)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z01	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z02	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z03	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z04	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z05	PB	25.38	14.14	2.35	5,319	133	14.48	2.29

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)

$$(X = 1 \quad Y = 2 \quad Z = 7)$$

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z06	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z07	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z08	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z09	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z10	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z11	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z12	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z13	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z14	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z15	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z16	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z17	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z18	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z19	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z20	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z21	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z22	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z23	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z24	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z25	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z26	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z27	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z28	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z29	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z30	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z31	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z32	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z33	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z34	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z35	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z36	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z37	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z38	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z39	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z40	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z41	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)

$$(X = 1 \quad Y = 2 \quad Z = 7)$$

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z42	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z43	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z44	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z45	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z46	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z47	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z48	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z49	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z50	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z51	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29

ตารางที่ ก-2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.03 (ต่อ)

$$(X = 1 \quad Y = 2 \quad Z = 7)$$

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
12Z52	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z53	SB	25.38	14.14	2.35	133	319	2.29	3.54
12Z54	SB	25.38	14.14	1.18	133	319	2.29	3.54
12Z55	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z56	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z57	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z58	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z59	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z60	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z61	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z62	SB	12.69	9.52	1.68	66	66	2.29	2.29
12Z63	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z64	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z65	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z66	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z67	PB	25.38	14.14	2.35	5,319	133	14.48	2.29
12Z68	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29
12Z69	PB	25.38	14.14	2.32	5,319	133	14.48	2.29

โดยที่ PB = Portal Bracing
SB = Sway Bracing

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19

(X = 2 Y = 2 Z = 1,2)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z01	L	200.64	150.48	3.89	72,574	85,750	19.02	20.67
22Z02	L	200.64	150.48	3.89	72,574	85,750	19.02	20.67
22Z03	L	344.64	258.48	3.89	106,234	161,818	17.56	21.67
22Z04	L	344.64	258.48	3.89	106,234	161,818	17.56	21.67
22Z05	L	488.64	366.48	3.89	125,226	237,886	16.01	22.06
22Z06	L	488.64	366.48	3.89	125,226	237,886	16.01	22.06
22Z07	L	560.64	420.48	3.89	133,009	275,920	15.40	22.18
22Z08	L	560.64	420.48	3.89	133,009	275,920	15.40	22.18
22Z09	L	560.64	420.48	3.89	133,009	275,920	15.40	22.18
22Z10	L	560.64	420.48	3.89	133,009	275,920	15.40	22.18
22Z11	L	560.64	420.48	3.89	133,009	275,920	15.40	22.18
22Z12	L	560.64	420.48	3.89	133,009	275,920	15.40	22.18
22Z13	L	488.64	366.48	3.89	125,226	237,886	16.01	22.06
22Z14	L	488.64	366.48	3.89	125,226	237,886	16.01	22.06
22Z15	L	344.64	258.48	3.89	106,234	161,818	17.56	21.67
22Z16	L	344.64	258.48	3.89	106,234	161,818	17.56	21.67
22Z17	L	200.64	150.48	3.89	72,574	85,750	19.02	20.67
22Z18	L	200.64	150.48	3.89	72,574	85,750	19.02	20.67
22Z19	EP	245.00	183.75	8.14	140,787	106,967	23.97	20.90
22Z20	U	280.64	210.48	3.89	126,608	158,122	21.24	23.74
22Z21	U	280.64	210.48	3.89	126,608	158,122	21.24	23.74
22Z22	U	348.64	261.48	3.89	174,367	218,936	22.36	25.06
22Z23	U	348.64	261.48	3.89	174,367	218,936	22.36	25.06
22Z24	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z25	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z26	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z27	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z28	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z29	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z30	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z31	U	484.64	363.48	3.89	281,036	340,566	24.08	26.51
22Z32	U	348.64	261.48	3.89	174,367	218,936	22.36	25.06
22Z33	U	348.64	261.48	3.89	174,367	218,936	22.36	25.06
22Z34	U	280.64	210.48	3.89	126,608	158,122	21.24	23.74
22Z35	U	280.64	210.48	3.89	126,608	158,122	21.24	23.74
22Z36	EP	245.00	183.75	8.14	140,787	106,967	23.97	20.90

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 1,2)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z37	P	80.64	60.48	7.15	24,766	1,421	17.52	4.20
22Z38	P	80.64	60.48	7.15	24,766	1,421	17.52	4.20
22Z39	P	52.00	39.00	7.15	17,657	840	18.43	4.02
22Z40	P	52.00	39.00	7.15	17,657	840	18.43	4.02
22Z41	P	52.00	39.00	7.15	17,657	840	18.43	4.02
22Z42	P	52.00	39.00	7.15	17,657	840	18.43	4.02
22Z43	P	52.00	39.00	7.15	17,657	840	18.43	4.02
22Z44	P	80.64	60.48	7.15	24,766	1,421	17.52	4.20
22Z45	P	80.64	60.48	7.15	24,766	1,421	17.52	4.20
22Z46	D	188.16	141.12	8.14	58,541	31,392	17.64	12.92
22Z47	D	188.16	141.12	8.14	58,541	31,392	17.64	12.92
22Z48	D	160.24	120.18	8.14	50,737	27,115	17.79	13.01
22Z49	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z50	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z51	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z52	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z53	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z54	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z55	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z56	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z57	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z58	D	150.24	112.68	8.14	46,934	18,464	17.67	11.09
22Z59	D	160.24	120.18	8.14	50,737	27,115	17.79	13.01
22Z60	D	188.16	141.12	8.14	58,541	31,392	17.64	12.92
22Z61	D	188.16	141.12	8.14	58,541	31,392	17.64	12.92

โดยที่
 L = Lower Cord
 EP = End Post
 U = Upper Cord
 P = Post
 D = Diagonal

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 3,4)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z01	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z02	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z03	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z04	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z05	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z06	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z07	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z08	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z09	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z10	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z11	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z12	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z13	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z14	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z15	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z16	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z17	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25
22Z18	ST	117.00	87.75	3.89	71,126	594	24.66	2.25

โดยที่ ST = Stringer

ทุกmember มี depth เท่ากับ 65.0 cm.

ทุกmember มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 32.5 cm.

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z01	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z02	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z03	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z04	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z05	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z06	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z07	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z08	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z09	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z10	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z11	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z12	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z13	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z14	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z15	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z16	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z17	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z18	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z19	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z20	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z21	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z22	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z23	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z24	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z25	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z26	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z27	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z28	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z29	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z30	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z31	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z32	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z33	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z34	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z35	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z36	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z37	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z38	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z39	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z40	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z41	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z42	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z43	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z44	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z45	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z46	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z47	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z48	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z49	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z50	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z51	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z52	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z53	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z54	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z55	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z56	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z57	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z58	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z59	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z60	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z61	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z62	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z63	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z64	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z65	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z66	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z67	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z68	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z69	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z70	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z71	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z72	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z73	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z74	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z75	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z76	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z77	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z78	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z79	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z80	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 5)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z81	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z82	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z83	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z84	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z85	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z86	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z87	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z88	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z89	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z90	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z91	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39
22Z92	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z93	FB	218.00	163.50	1.05	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z94	FB	218.00	163.50	0.95	310,945	7,407	37.77	5.83
22Z95	FB	150.00	112.50	0.88	170,162	857	33.68	2.39

โดยที่ FB = Floor Beam

member 22Z01,22Z05,22Z06,22Z10,22Z11,22Z15 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z01,22Z05,22Z06,22Z10,22Z11,22Z15 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member 22Z16,22Z20,22Z21,22Z25,22Z26,22Z30 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z16,22Z20,22Z21,22Z25,22Z26,22Z30 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member 22Z31,22Z35,22Z36,22Z40,22Z41,22Z45 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z31,22Z35,22Z36,22Z40,22Z41,22Z45 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member 22Z46,22Z50,22Z51,22Z55,22Z56,22Z60 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z46,22Z50,22Z51,22Z55,22Z56,22Z60 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member 22Z61,22Z65,22Z66,22Z70,22Z71,22Z75 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z61,22Z65,22Z66,22Z70,22Z71,22Z75 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member 22Z76,22Z80,22Z81,22Z85,22Z86,22Z90 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z76,22Z80,22Z81,22Z85,22Z86,22Z90 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member 22Z91,22Z95 มี depth เท่ากับ 90.0 cm.

member 22Z91,22Z95 มีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 45.0 cm.

member ที่เหลือทั้งหมด มี depth เท่ากับ 92.0 cm. และมีระยะ N.A. ถึง bottom เท่ากับ 46.0 cm.

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 6)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z01	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z02	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z03	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z04	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z05	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z06	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z07	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z08	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z09	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z10	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z11	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z12	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z13	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z14	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z15	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z16	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z17	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z18	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z19	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z20	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z21	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z22	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z23	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z24	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z25	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z26	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z27	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z28	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z29	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z30	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z31	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z32	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z33	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z34	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z35	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z36	LLB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)

(X = 2 Y = 2 Z = 7)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z01	SB	60.00	45.00	4.70	31,092	849	22.76	3.76
22Z02	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z03	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z04	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z05	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z06	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z07	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z08	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z09	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z10	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z11	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z12	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z13	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z14	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z15	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z16	SB	52.00	39.00	4.70	27,465	588	22.98	3.36
22Z17	SB	60.00	45.00	4.70	31,092	849	22.76	3.76
22Z18	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z19	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z20	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z21	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z22	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z23	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z24	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z25	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z26	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z27	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z28	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z29	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z30	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z31	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z32	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z33	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z34	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z35	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z36	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12

ตารางที่ ก-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานกม.19 (ต่อ)
(X = 2 Y = 2 Z = 7)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia (cm ⁴)		Radius of Gyration (cm)	
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	r _x	r _y
22Z37	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z38	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z39	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z40	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z41	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z42	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z43	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z44	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z45	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z46	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z47	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12
22Z48	ULB	13.00	9.75	6.10	58	58	2.12	2.12

โดยที่ LLB = Lower Lateral Bracing
SB = Sway Bracing
ULB = Upper Lateral Bracing

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

(รูป)

(ไม่มีในเล่มและเพิ่มข้อมูล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานจักรี

member		2105 (L)			2403 (ST)			2514 (FB)			2133 (V)			2116 (U)			2143 (D)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
1		-11.2	146.9	159.0	-7.7	269.4	390.3	-10.2	241.0	280.6	-15.2	171.1	213.4	-233.9	3.0	237.3	-48.7	173.5	230.0
3	รถโดยสาร	-2.3	97.6	100.4	-8.5	135.4	221.5	-6.7	137.3	185.6	-9.5	99.1	142.4	-115.1	8.2	123.4	-38.2	75.3	122.8
5	สปริงเตอร์	-4.0	103.0	109.6	-10.3	167.3	304.4	-9.7	155.6	249.6	-12.2	109.4	192.4	-170.3	2.7	173.3	-48.4	78.5	147.0
6		-5.2	154.0	160.3	-3.3	285.8	388.7	-10.6	244.0	276.9	-6.9	170.4	201.2	-191.7	24.7	216.5	-35.4	180.9	224.8
7	รถปูน	-2.7	203.9	211.0	-1.6	259.5	559.9	-14.1	255.7	319.0	-7.1	183.0	238.7	-264.1	35.5	301.1	-109.4	154.8	272.9
8	รถโดยสาร	-3.3	163.3	167.3	-7.2	238.7	338.3	-11.5	216.5	256.6	-11.1	158.8	194.2	-214.7	5.7	220.5	-108.6	145.1	257.1
9	รถโดยสาร	-4.4	154.1	159.6	-2.6	265.8	357.9	-12.0	227.0	265.7	-4.8	168.8	197.7	-202.1	17.1	219.4	-42.3	185.6	237.0
10	รถน้ำมัน	-0.7	238.8	246.1	-0.8	289.1	653.0	-9.6	255.6	335.8	-8.4	195.6	281.5	-286.9	1.0	291.4	-91.3	157.9	273.2
11	รถโดยสาร	-4.0	168.9	175.0	-3.1	274.0	419.0	-12.4	237.5	298.0	-4.5	175.7	224.9	-201.9	2.1	205.0	-35.7	179.4	228.5
12	สปริงเตอร์	-4.3	110.6	115.2	-5.6	160.0	235.9	-12.0	145.7	193.4	-3.0	103.3	143.0	-118.9	2.8	121.8	-31.0	76.4	116.2
13	รถโดยสาร	-2.9	188.8	192.6	-0.9	283.8	388.9	-11.2	233.1	266.5	-9.9	184.8	218.0	-206.0	1.4	208.0	-95.5	149.1	247.8
14	รถน้ำมัน	-1.3	198.4	201.8	-0.9	279.9	468.8	-9.4	252.2	272.4	-5.8	190.6	211.8	-247.3	0.9	249.1	-53.1	182.4	241.0
15	รถโดยสาร	-1.4	181.5	184.0	-0.8	246.7	353.7	-11.8	221.5	270.8	-9.0	172.2	217.0	-202.5	0.9	203.9	-104.2	146.5	255.9
16	รถน้ำมัน	-1.8	169.4	175.1	-0.8	267.7	387.5	-9.6	235.0	255.1	-4.9	177.3	197.4	-196.8	0.9	199.5	-27.2	175.8	212.1
17	รถโดยสาร	-0.9	163.0	164.8	-0.9	268.0	364.3	-5.7	231.4	281.6	-5.8	170.7	212.7	-189.3	3.1	192.6	-45.8	177.3	232.8
18	รถโดยสาร	-2.6	170.9	177.0	-2.0	270.1	450.7	-3.7	233.7	381.0	-2.7	171.9	289.8	-196.9	0.7	198.1	-24.7	176.8	237.6
19	ดีเซลราง	-3.6	128.7	134.1	-6.7	175.8	323.0	-4.3	170.2	257.0	-5.8	123.9	198.7	-147.9	1.1	149.8	-36.8	91.3	152.5
21	สปริงเตอร์	-0.4	130.4	131.4	-4.1	198.1	294.4	-0.3	190.9	256.2	-6.8	135.6	198.9	-139.3	1.5	141.0	-42.0	97.6	159.3
22	รถโดยสาร	-2.0	177.7	183.8	-2.1	281.2	450.5	-6.7	234.3	402.4	-7.5	180.4	306.8	-208.4	1.1	210.1	-28.9	183.6	257.0
23	รถโดยสาร	-2.7	164.4	168.2	-2.8	266.7	401.3	-9.0	227.7	283.4	-6.6	170.6	217.7	-196.3	0.8	197.6	-35.4	174.3	223.4

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานจักรี (ต่อ)

member		2105 (L)			2403 (ST)			2514 (FB)			2133 (V)			2116 (U)			2143 (D)		
file	ประเภทรถ	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress
24	รถน้ำมัน	-2.1	179.1	182.3	-2.4	252.4	308.5	-11.0	223.3	235.5	-10.7	171.0	183.7	-196.8	1.0	198.3	-100.6	146.5	248.2
25		-1.1	171.1	173.4	-1.7	271.1	380.9	-9.9	232.0	281.5	-7.1	174.2	214.7	-198.1	0.7	199.5	-46.9	187.5	244.8
26		-1.1	177.1	181.1	-2.4	226.9	315.1	-4.5	232.6	252.7	-7.5	162.3	189.5	-191.1	1.1	194.1	-95.5	138.4	237.5
27	รถน้ำมัน	-1.8	233.7	243.5	-0.8	298.0	629.7	-6.5	266.7	322.6	-8.6	199.0	268.5	-270.2	1.0	278.1	-90.7	156.1	266.4
28		-2.2	170.5	174.5	-1.3	266.8	404.0	-7.1	232.4	301.6	-4.7	172.9	228.4	-198.2	1.0	200.0	-38.4	183.3	236.6
29	รถปูน	-1.1	230.9	235.1	-0.9	272.9	576.5	-9.8	262.2	323.9	-7.9	194.7	260.4	-272.6	0.6	274.8	-90.8	148.7	252.1
30	สปริงเตอร์	-1.0	106.9	108.3	-4.8	161.1	241.5	-3.4	138.2	186.1	-5.8	103.5	145.3	-116.9	0.9	117.9	-33.2	77.4	119.9
31		-2.3	189.0	193.5	-1.1	295.8	415.2	-4.5	238.9	279.0	-7.9	183.2	226.6	-199.4	2.1	202.5	-95.1	154.1	255.1
32	รถโดยสาร	-0.5	105.9	106.8	-2.3	143.3	220.4	-0.3	143.4	183.5	-3.9	103.0	139.9	-117.2	1.2	118.5	-35.1	78.4	122.8
33		-0.3	166.3	170.0	-1.3	278.5	372.0	-0.2	227.4	233.5	-6.6	166.1	181.9	-187.4	0.7	190.5	-30.9	169.8	207.2
34		-0.5	193.5	196.0	-0.6	290.3	429.2	-3.1	241.4	300.3	-8.5	182.3	240.8	-205.0	1.2	206.9	-94.2	159.8	261.7
35	รถโดยสาร	-1.4	175.6	180.3	-2.5	269.8	428.9	-7.8	219.3	358.1	-7.6	175.0	276.8	-188.5	0.8	189.9	-88.6	142.4	254.8
36		-3.0	194.2	225.9	-2.4	237.0	363.4	-8.8	236.7	295.5	-8.2	174.5	219.4	-231.1	1.4	256.2	-90.2	199.7	307.0
37		-0.6	190.7	193.8	-0.4	264.3	388.3	-8.1	234.9	299.2	-9.4	177.0	237.3	-198.3	2.2	201.9	-101.1	158.3	267.8
38		-2.9	223.9	232.7	-2.5	261.4	563.9	-7.2	263.6	365.3	-4.4	195.2	283.1	-257.2	1.4	262.8	-34.8	202.4	262.7
42	รถก๊าซ	-1.4	180.2	182.7	-1.2	261.0	350.8	-9.5	223.6	273.0	-8.2	166.3	207.0	-195.1	1.4	197.0	-100.8	156.3	262.4
43	รถน้ำมัน	-2.1	245.2	253.6	-1.6	290.9	667.2	-7.5	248.0	325.7	-7.4	194.1	282.6	-283.4	1.8	290.5	-89.9	163.1	273.9
44	รถโดยสาร	-1.1	108.1	109.4	-0.8	148.5	223.2	-0.2	150.2	182.5	-4.6	104.9	138.4	-118.8	1.4	120.3	-35.2	76.9	118.2
46	ดีเซลราง	-0.8	180.3	186.7	-0.7	250.2	363.1	-6.1	220.1	245.0	-8.2	159.4	189.7	-186.6	1.7	190.4	-97.0	141.0	243.4
47	รถน้ำมัน	-0.6	119.6	121.9	-2.4	157.3	272.6	-0.9	163.1	231.3	-5.0	117.1	181.0	-133.1	2.5	136.1	-36.5	88.2	139.9

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานจักรี (ต่อ)

member		2105 (L)			2403 (ST)			2514 (FB)			2133 (V)			2116 (U)			2143 (D)		
file	ประเภทรถ	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress	min	max	Eq stress
48	รถน้ำมัน	-0.9	170.9	172.8	-1.5	260.6	371.3	-1.3	248.5	289.3	-5.5	163.3	203.8	-198.1	1.6	200.2	-38.7	184.5	234.1
49	ดีเซลราง	-1.0	121.0	122.7	-4.0	161.6	246.1	-1.2	163.1	199.9	-7.6	117.5	155.2	-136.9	0.5	137.5	-42.2	81.5	131.6
50	รถโดยสาร	-0.5	158.3	159.7	-0.7	259.1	363.7	-3.8	231.2	272.5	-14.1	161.8	204.2	-198.6	0.6	199.7	-41.9	181.0	233.6
51	ดีเซลราง	-1.2	177.3	179.5	-1.3	263.2	346.1	-7.1	229.5	263.0	-9.6	165.9	201.0	-208.7	5.9	214.9	-99.4	142.2	245.3
52	รถโดยสาร	-0.6	130.0	131.3	-7.8	202.4	313.2	-2.2	200.2	274.0	-8.3	139.2	200.7	-153.2	1.2	154.5	-44.0	102.0	165.5
53	รถโดยสาร	-2.7	164.5	167.7	-5.3	240.0	328.5	-11.5	220.7	256.6	-8.1	164.8	195.0	-202.2	5.0	207.4	-103.7	149.6	256.0
54	สปริงเตอร์	-1.9	162.7	165.5	-2.3	248.5	349.5	-5.9	231.3	269.1	-13.9	160.2	202.0	-193.0	9.7	203.3	-39.3	185.2	234.8
56		-5.8	185.3	193.9	-5.6	265.9	494.0	-6.0	254.4	308.7	-12.3	179.4	246.5	-237.8	11.1	250.1	-54.7	194.3	260.5
57		-2.4	162.4	166.0	-4.6	244.1	340.7	-12.0	224.8	263.2	-12.9	155.5	197.5	-207.0	2.4	209.8	-100.9	149.0	253.5
58		-4.1	211.2	227.9	-3.7	277.8	675.8	-9.7	247.3	327.4	-12.3	187.6	286.4	-290.9	2.7	302.5	-91.8	151.5	265.4
59		-2.4	153.8	157.5	-3.7	267.6	407.3	-9.5	229.8	285.7	-9.6	164.8	217.7	-190.4	1.1	192.1	-34.3	172.9	220.8
60	รถน้ำมัน	-5.0	130.4	136.0	-3.1	200.7	280.8	-8.1	184.4	260.5	-9.9	133.6	201.6	-140.3	2.4	142.8	-43.2	98.7	161.5

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.03

Set1	member	12123 (V)			12105 (L)			12142 (D)			12116 (U)			12404 (ST)			12514 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
1	รถโดยสาร	-34.0	229.0	301.6	-7.2	152.5	163.1	-39.2	161.1	216.3	-222.9	2.5	226.8	-23.2	244.8	374.8	-14.3	301.4	347.2
2	รถโดยสาร	-23.7	242.5	297.1	-7.6	168.9	177.9	-45.3	193.0	249.3	-245.2	12.9	259.2	-15.4	290.3	386.1	-13.2	295.5	329.5
3	รถโดยสาร	-21.8	243.4	314.7	-5.5	159.0	166.3	-101.7	158.1	265.5	-258.6	0.4	259.6	-19.2	348.3	484.5	-16.6	304.1	367.9
4	รถโดยสาร	-29.5	244.7	303.6	-2.9	173.7	178.0	-48.7	203.0	259.5	-266.6	0.6	267.5	-17.9	320.2	432.9	-16.9	303.2	348.6
5	รถโดยสาร	-31.0	264.4	327.1	-4.2	186.8	192.1	-43.3	202.9	257.8	-280.3	2.0	284.1	-19.9	323.4	453.6	-16.8	316.2	358.1
6	รถโดยสาร	-11.5	253.3	318.7	-3.2	161.6	167.3	-101.0	162.0	268.9	-258.4	3.8	262.9	-19.2	341.6	484.6	-18.6	310.7	375.9
7	รถโดยสาร	-22.3	245.2	317.3	-3.1	186.3	191.9	-49.2	209.1	271.1	-282.8	3.1	288.2	-19.6	356.1	504.1	-19.3	324.3	392.3
8	หัวรถจักร	-19.4	308.5	330.4	-2.9	252.2	255.3	-109.7	249.1	359.1	-409.4	1.1	410.7	-5.1	327.9	340.2	-17.3	385.4	404.2
9	รถโดยสาร	-4.0	249.6	292.3	-0.7	164.8	166.4	-91.2	171.2	266.7	-251.7	3.4	255.4	-21.8	358.5	470.1	-18.8	295.8	349.9
10	รถโดยสาร	-6.9	264.0	306.0	-1.4	166.2	169.2	-102.2	164.9	271.7	-259.5	7.6	267.8	-21.0	357.4	476.8	-19.8	291.1	341.1
11	รถโดยสาร	-1.0	270.8	328.8	-3.0	169.5	177.0	-101.9	166.9	275.4	-255.2	8.4	265.2	-16.7	367.5	522.4	-17.3	310.1	372.1
12	รถโดยสาร	-26.8	264.5	335.8	-1.0	191.4	194.0	-40.0	213.2	266.3	-273.4	3.6	277.7	-16.1	332.9	480.5	-17.4	318.6	379.5
13	รถโดยสาร	-24.7	268.4	338.1	-2.7	187.1	191.6	-42.4	200.3	253.7	-264.0	5.0	269.9	-12.3	323.1	464.4	-17.3	306.8	369.3
14	รถโดยสาร	-6.6	236.3	277.8	-2.5	162.8	166.8	-107.1	149.2	259.4	-248.0	5.7	254.1	-12.6	316.3	396.2	-19.7	294.0	339.1
15	รถโดยสาร	-14.9	244.6	300.2	-1.1	141.6	145.7	-93.1	129.2	229.0	-209.5	4.2	216.2	-20.2	244.3	358.7	-17.2	296.1	345.5
16	รถน้ำมัน	-25.9	237.9	269.3	-9.6	181.0	191.5	-108.9	157.8	268.1	-303.1	7.3	311.1	-5.4	320.4	361.7	-16.5	292.0	310.4
17	รถโดยสาร	-32.3	264.7	323.0	-1.6	180.3	183.7	-45.3	198.1	253.3	-264.7	6.8	272.6	-13.0	339.9	451.3	-16.5	308.9	351.9
18	รถโดยสาร	-25.5	251.3	303.0	-1.3	176.9	179.2	-45.7	183.2	237.0	-244.6	2.0	246.9	-14.6	299.2	380.7	-16.3	302.0	338.1
19	รถโดยสาร	-4.9	246.7	312.4	-2.7	166.2	171.0	-97.1	165.7	268.7	-255.1	4.7	260.4	-22.9	355.5	489.2	-24.1	292.0	359.9
20	รถโดยสาร	-24.9	235.7	296.1	-1.8	150.0	154.8	-37.3	161.7	212.2	-205.8	3.8	213.5	-18.3	248.2	371.9	-16.9	294.9	343.0

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.03 (ต่อ)

Set1	member	12123 (V)			12105 (L)			12142 (D)			12116 (U)			12404 (ST)			12514 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
21	รถโดยสาร	-25.9	257.6	322.9	-2.0	193.2	197.3	-53.0	211.1	275.0	-277.3	3.5	283.7	-17.6	331.8	461.8	-28.5	332.6	391.5
22	รถโดยสาร	-1.5	243.1	304.8	-1.2	162.0	165.8	-99.4	154.9	260.6	-255.0	3.8	259.4	-13.9	349.9	488.5	-14.4	295.3	364.8
23	หัวรถจักร	-19.6	281.9	307.7	-1.4	235.5	237.5	-96.4	218.8	315.8	-371.0	2.8	374.2	-3.6	320.1	360.0	-15.9	344.9	363.9
25	รถโดยสาร	-5.4	245.4	309.4	-6.9	166.1	175.9	-96.2	166.6	268.8	-261.2	4.5	266.7	-17.9	355.4	494.5	-19.2	301.8	373.3
26	รถโดยสาร	-25.7	251.4	324.0	-0.4	194.0	196.2	-40.3	221.9	272.2	-278.1	4.3	283.3	-18.2	352.9	491.9	-20.7	319.2	381.2
27	รถโดยสาร	-20.4	248.3	318.2	-1.0	195.4	198.1	-40.7	216.4	270.2	-272.5	5.4	280.2	-15.5	384.7	525.9	-21.9	328.6	397.7
28	รถโดยสาร	-32.0	241.2	274.7	-3.0	143.1	146.4	-89.9	148.8	238.9	-171.1	8.1	179.7	-11.5	249.9	267.2	-19.6	301.4	321.0
30	รถโดยสาร	-10.4	267.7	315.7	-2.9	170.1	175.1	-104.9	163.9	273.4	-259.4	7.5	267.9	-9.3	217.5	264.6	-	-	-
62	รถโดยสาร	-34.7	264.1	327.7	-6.8	184.6	192.7	-40.0	199.4	250.0	-271.9	1.3	273.8	-8.0	234.0	291.6	-	-	-
63	รถโดยสาร	-28.3	242.2	295.6	-5.8	173.2	180.0	-48.5	175.8	234.5	-244.1	2.3	246.7	-13.6	290.2	379.1	-16.6	291.6	331.9
64	รถโดยสาร	-10.2	245.5	314.4	-2.4	162.2	166.8	-98.1	159.7	263.8	-256.2	2.3	259.2	-19.9	349.7	480.5	-18.7	302.9	364.1
65	รถโดยสาร	-25.5	246.4	315.1	-2.8	184.5	189.7	-49.4	206.5	268.9	-271.0	2.1	275.0	-17.2	327.9	471.4	-17.3	311.5	367.8
66	รถโดยสาร	-30.5	255.0	322.3	-3.2	179.2	183.7	-47.5	193.1	250.6	-268.9	1.6	271.9	-14.2	341.7	461.7	-17.8	304.8	359.2
67	รถโดยสาร	-8.0	246.3	312.4	-1.7	163.5	167.5	-101.4	158.1	265.4	-256.3	4.5	261.3	-13.1	352.2	480.5	-18.6	302.0	367.7
68	รถโดยสาร	-32.0	255.1	330.8	-2.5	180.2	184.3	-44.5	193.9	249.8	-258.3	2.4	261.8	-16.2	329.2	474.1	-16.5	293.5	356.8
70	รถโดยสาร	-4.1	267.2	320.5	-0.4	180.0	181.8	-93.9	177.9	276.4	-263.4	1.1	265.1	-21.4	350.8	488.1	-18.1	292.0	347.7
71	รถโดยสาร	-1.3	258.8	318.8	-0.8	169.8	173.6	-87.9	179.8	274.6	-262.0	5.5	268.8	-13.8	345.8	484.3	-18.0	312.4	378.0
72	รถโดยสาร	-18.6	275.0	333.0	-0.8	188.6	191.0	-35.5	201.1	247.5	-269.6	3.8	274.4	-15.9	346.3	484.2	-16.6	308.2	367.0
73	รถโดยสาร	-28.9	257.0	335.5	-0.7	186.3	189.6	-43.1	213.3	267.3	-273.6	7.8	282.5	-16.4	317.7	471.3	-18.9	335.9	395.4
74	รถโดยสาร	-17.4	243.6	312.5	-4.6	166.5	172.7	-106.6	151.5	261.5	-251.6	2.5	254.3	-13.2	321.1	405.5	-18.0	296.2	338.2

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.03 (ต่อ)

Set1	member	12123 (V)			12105 (L)			12142 (D)			12116 (U)			12404 (ST)			12514 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
76	รถโดยสาร	-21.3	261.9	309.1	-8.1	174.0	182.6	-44.7	192.5	245.2	-266.4	0.5	267.0	-12.5	355.7	453.6	-14.5	305.9	344.8
77	รถโดยสาร	-24.7	253.5	309.0	-9.0	175.7	186.3	-53.7	185.2	250.7	-260.9	1.4	264.2	-18.6	306.6	400.2	-16.2	297.4	337.7
78	รถโดยสาร	-4.4	243.1	301.9	-5.3	162.8	169.5	-96.7	158.6	261.0	-253.2	1.9	255.8	-22.5	343.2	476.0	-18.5	302.0	367.0
79	รถโดยสาร	-24.2	260.5	316.9	-2.5	189.6	193.5	-44.1	198.9	253.7	-269.4	3.2	273.3	-18.4	328.0	445.5	-18.2	309.0	359.2
81	รถโดยสาร	-3.5	254.1	315.1	-0.6	166.0	168.7	-99.9	163.3	269.2	-256.4	6.7	263.7	-15.1	346.7	477.8	-20.5	306.6	373.6
82	รถโดยสาร	-26.7	255.0	323.3	-2.2	185.9	189.7	-45.1	203.6	258.2	-268.8	2.2	272.0	-16.1	323.4	470.1	-17.1	301.5	362.5
84	รถโดยสาร	-0.8	245.9	291.2	-0.5	166.3	168.0	-88.7	174.2	269.3	-249.5	6.6	256.5	-18.4	357.5	473.6	-18.1	292.1	348.5
85	รถโดยสาร	-1.7	256.0	322.7	-0.8	176.1	179.4	-95.2	175.2	276.6	-268.4	7.8	277.4	-19.0	359.8	495.4	-18.7	298.7	368.0
86	รถโดยสาร	-20.5	269.5	328.5	-1.5	184.7	187.7	-34.6	208.5	253.4	-265.6	9.3	275.5	-19.0	326.5	461.2	-17.1	304.2	360.4
87	รถโดยสาร	-25.5	264.4	334.9	-1.3	186.3	189.7	-41.2	212.3	262.0	-266.1	5.8	272.8	-14.3	352.1	480.8	-17.2	325.3	383.6
88	รถโดยสาร	-2.2	240.4	275.9	-1.2	162.7	165.0	-76.3	180.0	259.9	-244.4	10.5	255.5	-6.5	303.9	392.7	-17.9	285.4	331.1
89	รถโดยสาร	-10.2	276.4	319.8	-0.7	180.9	183.5	-97.9	166.2	268.9	-263.7	8.7	273.3	-15.5	387.8	495.8	-19.3	311.7	355.9
91	รถน้ำมัน	-27.6	243.9	296.4	-11.7	158.0	172.7	-96.5	155.4	263.7	-241.9	2.5	245.5	-11.4	195.7	244.8	-7.9	205.0	242.1
92	หัวรถจักร	-25.6	243.1	269.2	-6.6	124.5	131.3	-86.9	134.3	221.2	-170.3	0.4	170.7	-17.5	162.8	183.3	-26.1	164.6	195.1
93	รถโดยสาร	-27.5	261.6	321.9	-6.7	178.3	187.2	-47.2	203.0	260.5	-280.1	1.1	282.0	-22.1	201.1	287.9	-29.9	225.1	323.6
94	รถโดยสาร	-16.0	233.9	274.2	-6.0	163.4	170.3	-33.9	180.3	222.5	-242.4	1.7	244.2	-27.4	177.2	237.3	-32.7	201.8	285.6
95	รถโดยสาร	-26.0	237.3	279.2	-9.1	161.2	170.7	-43.6	186.2	235.5	-247.3	1.3	248.8	-25.8	170.3	222.6	-31.2	203.3	268.1

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.03 (ต่อ)

Set2	member	12123 (V)			12105 (L)			12142 (D)			12116 (U)			12404 (ST)			12514 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
5	รถโดยสาร	-	-	-	-10.6	147.9	161.6	-45.3	159.1	219.0	-226.5	0.5	228.1	-	-	-	-	-	-
6	รถโดยสาร	-	-	-	-9.9	166.4	178.0	-63.1	186.9	259.4	-254.3	3.0	258.2	-	-	-	-	-	-
7	รถโดยสาร	-	-	-	-2.4	165.2	169.5	-99.1	162.3	267.6	-260.4	2.7	263.7	-	-	-	-	-	-
8	หัวรถจักร	-	-	-	-6.2	163.6	170.1	-107.1	177.7	284.9	-229.9	3.3	233.3	-	-	-	-	-	-
10	รถโดยสาร	-	-	-	-3.4	167.1	173.2	-99.0	161.9	267.5	-260.8	2.1	263.8	-	-	-	-	-	-
11	รถโดยสาร	-	-	-	-2.8	189.9	195.9	-38.9	165.2	222.7	-268.1	1.8	272.3	-	-	-	-	-	-
12	รถโดยสาร	-	-	-	-3.6	182.0	189.4	-33.3	171.4	225.3	-258.9	1.8	263.5	-	-	-	-	-	-
14	รถโดยสาร	-	-	-	-0.4	171.8	174.9	-84.8	164.7	256.7	-255.7	13.6	270.6	-	-	-	-	-	-
16	รถโดยสาร	-	-	-	-0.9	181.4	184.8	-41.4	201.8	253.8	-255.3	8.8	265.3	-	-	-	-	-	-
17	หัวรถจักร	-	-	-	-2.6	150.1	153.5	-97.8	186.4	285.0	-223.7	5.1	228.9	-	-	-	-	-	-
18	รถโดยสาร	-	-	-	-10.5	154.3	166.3	-109.1	148.9	261.6	-264.6	0.8	266.0	-	-	-	-	-	-
19		-	-	-	-3.5	167.4	172.9	-102.2	143.4	249.7	-253.3	7.4	261.8	-	-	-	-	-	-
20	รถโดยสาร	-	-	-	-9.4	192.7	204.2	-57.7	189.0	260.5	-263.4	3.1	269.8	-	-	-	-	-	-
21	รถโดยสาร	-	-	-	-4.9	169.2	174.7	-39.8	193.5	240.9	-250.4	1.8	252.4	-	-	-	-	-	-
22	รถโดยสาร	-	-	-	-6.0	160.3	168.1	-93.2	153.9	254.8	-254.9	0.6	256.3	-	-	-	-	-	-
24	รถโดยสาร	-	-	-	-2.4	179.5	182.8	-49.0	189.5	248.0	-260.2	1.6	262.1	-	-	-	-	-	-
25	รถโดยสาร	-	-	-	-1.7	163.8	168.0	-99.8	162.2	268.0	-258.8	4.9	264.3	-	-	-	-	-	-
26	รถโดยสาร	-	-	-	-3.0	180.5	185.4	-57.2	183.5	249.9	-253.8	2.0	257.2	-	-	-	-	-	-
27	รถโดยสาร	-	-	-	-2.9	192.3	198.0	-34.7	171.2	221.4	-272.8	1.8	276.4	-	-	-	-	-	-
28	รถโดยสาร	-	-	-	-1.1	166.9	169.8	-97.1	169.0	271.1	-259.6	7.1	267.2	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.03 (ต่อ)

Set2	member	12123 (V)			12105 (L)			12142 (D)			12116 (U)			12404 (ST)			12514 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
29	รถโดยสาร	-	-	-	-0.5	170.3	173.6	-94.7	172.9	276.4	-255.4	7.2	264.0	-	-	-	-	-	-
30	รถโดยสาร	-	-	-	-0.6	166.6	169.9	-94.1	163.0	264.3	-253.7	5.3	260.3	-	-	-	-	-	-
31	รถโดยสาร	-	-	-	-1.3	181.8	185.6	-45.8	214.6	271.0	-276.4	5.7	284.0	-	-	-	-	-	-
32		-	-	-	-5.1	161.7	167.9	-98.1	146.7	247.3	-250.0	2.3	252.6	-	-	-	-	-	-
34	รถโดยสาร	-	-	-	-16.5	164.3	182.1	-97.7	148.4	251.0	-250.3	9.0	259.7	-	-	-	-	-	-
35	รถโดยสาร	-	-	-	-5.3	169.1	177.3	-100.7	127.9	230.8	-275.3	7.6	283.4	-	-	-	-	-	-
36	รถบรรทุก	-	-	-	-6.8	159.5	166.7	-52.9	182.6	236.2	-242.9	2.7	246.2	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
1		-3.7	224.8	233.1	-111.8	200.1	364.1	-295.1	24.5	324.1	-32.6	231.6	418.5	-47.9	367.0	773.0	-10.5	326.0	543.5
2		-2.6	183.8	186.6	-152.4	183.7	337.3	-234.1	10.2	244.5	-26.1	241.9	323.5	-28.4	405.0	536.0	-8.2	336.9	427.4
5	รถสินค้า	-2.7	260.5	264.8	-203.8	115.4	339.5	-348.8	15.4	366.7	-25.3	216.1	358.9	-29.8	381.6	762.8	-8.7	311.2	485.1
6	รถน้ำมัน	-8.5	206.5	215.7	-174.4	137.2	315.0	-284.1	9.9	294.4	-21.3	185.4	221.2	-13.2	316.2	447.0	-5.2	274.4	302.0
7	รถโดยสาร	-1.3	207.6	209.3	-111.2	184.4	296.2	-257.8	9.5	267.7	-23.5	183.8	214.7	-7.0	356.7	450.8	-13.1	306.9	352.2
8	รถโดยสาร	-1.3	224.3	227.6	-187.4	118.3	349.9	-314.7	1.3	317.1	-22.2	242.7	397.2	-30.7	403.0	749.5	-9.9	327.7	522.0
9	รถสินค้า	-2.2	246.5	250.2	-99.4	203.5	318.9	-316.0	6.6	324.8	-14.0	213.8	356.6	-24.6	358.5	755.2	-5.7	310.5	487.0
10	รถนอน	-1.9	225.4	229.9	-176.4	112.4	352.7	-300.9	9.2	314.3	-25.4	227.5	420.7	-17.6	389.9	749.1	-10.8	320.9	545.4
11	รถนอน	-1.6	216.5	220.2	-177.2	112.5	345.4	-280.4	27.5	309.6	-22.9	230.9	410.6	-14.7	411.0	758.6	-12.5	312.7	534.6
12	รถสินค้า	-2.0	305.1	327.8	-116.2	205.6	422.3	-393.4	16.2	436.1	-	-	-	-	-	-	-12.6	345.6	742.4
13	หัวรถจักร	-2.4	205.7	208.2	-149.4	192.3	342.1	-277.1	1.4	278.6	-17.7	201.9	240.4	-19.1	380.5	504.7	-6.6	301.3	346.6
14	รถโดยสาร	-3.4	213.3	218.8	-184.4	112.5	333.5	-288.2	0.9	290.3	-23.7	212.4	357.4	-17.5	398.5	712.8	-11.6	307.1	479.6
15	หัวรถจักร	-11.3	176.4	188.2	-178.9	190.1	370.9	-228.3	1.6	230.0	-24.4	240.0	325.2	-14.4	411.3	532.2	-10.5	332.2	424.7
16	สปริงเตอร์	-3.8	132.5	136.3	-88.9	102.3	196.1	-171.6	3.1	174.7	-20.6	120.4	194.3	-16.6	252.8	372.7	-10.0	166.7	250.4
17	รถโดยสาร	-0.6	213.8	216.0	-185.6	115.2	339.4	-285.6	1.3	288.4	-23.3	210.4	349.6	-14.2	389.6	706.1	-9.0	306.3	467.2
18	ดีเซลราง	-3.4	158.3	161.7	-74.3	95.1	184.8	-200.2	2.2	202.4	-14.9	120.0	219.6	-16.6	237.9	430.8	-7.7	164.9	286.3
19	รถโดยสาร	-4.6	215.2	221.3	-186.6	119.1	341.5	-286.3	1.8	289.3	-21.2	213.7	361.4	-17.1	386.5	727.4	-11.9	309.7	485.7
20	รถโดยสาร	-1.8	213.6	216.4	-187.3	111.2	331.2	-277.3	2.5	280.9	-22.1	209.3	336.0	-20.1	383.2	682.4	-11.5	300.5	455.8
21	สปริงเตอร์	-1.5	173.6	175.2	-95.6	106.4	222.6	-218.5	4.1	223.0	-21.2	149.8	256.8	-15.1	334.8	528.0	-9.5	209.0	336.9
22	รถนอน	-1.9	235.2	238.1	-180.2	115.8	348.8	-302.7	2.0	306.2	-24.9	238.4	421.1	-17.5	402.6	796.5	-13.4	328.3	554.3

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
23	รถสินค้า	-5.2	275.7	283.3	-195.5	110.2	328.6	-357.1	11.6	375.0	-19.7	184.7	262.3	-14.8	341.4	675.1	-9.5	267.6	353.7
24	สปริงเตอร์	-0.6	195.7	197.8	-101.8	128.1	288.9	-243.3	4.5	250.7	-26.2	156.1	335.9	-16.4	341.9	677.7	-12.9	219.7	432.3
25	รถขนปูนที่พี	-0.8	217.0	218.4	-111.8	190.7	312.4	-269.2	1.2	270.9	-13.6	209.7	276.1	-33.4	389.1	567.5	-6.5	307.8	385.6
26	รถรวม	-2.0	293.6	301.9	-145.9	214.2	445.5	-370.4	1.4	380.2	-34.2	259.9	634.2	-21.6	412.0	1009.9	-15.5	356.2	820.0
27	รถบรรทุกทราย	-8.4	204.7	245.1	-169.1	98.1	305.7	-270.0	9.4	321.6	-21.4	183.8	336.6	-15.5	351.0	744.7	-6.9	269.5	455.2
28	รถรวม	-5.2	285.9	311.5	-215.7	134.2	432.0	-356.6	7.7	390.5	-27.9	241.9	617.3	-17.7	403.2	933.9	-16.3	321.8	780.4
29	รถขนปูนที่พี	-0.4	322.8	328.4	-216.8	151.9	408.2	-407.5	5.8	416.8	-23.5	208.7	479.6	-19.6	398.7	1057.7	-9.0	300.4	640.5
30	รถสินค้า	-1.1	318.4	336.8	-172.3	169.9	406.0	-393.4	13.6	436.5	-20.5	209.4	393.7	-21.2	373.7	891.9	-9.5	300.7	535.4
31	สปริงเตอร์	-3.3	184.5	188.0	-101.5	116.1	241.0	-230.3	3.4	234.0	-26.5	150.8	265.2	-23.6	326.2	554.8	-9.0	213.0	342.2
32	รถโดยสาร	-1.3	224.4	226.2	-105.4	203.6	334.7	-280.2	5.6	286.6	-19.0	227.5	377.9	-26.8	395.9	728.5	-8.8	319.6	510.4
33	รถโดยสาร	-0.5	256.0	273.4	-127.0	201.5	363.6	-321.8	6.1	347.6	-16.5	210.9	308.4	-21.5	380.4	735.6	-4.2	309.0	432.0
34	รถโดยสาร	-0.6	222.0	223.1	-116.3	195.1	337.8	-276.1	6.3	283.2	-20.4	198.3	314.4	-15.1	385.0	698.2	-9.2	294.9	439.4
35	ดีเซลราง	-0.4	134.5	134.9	-86.7	104.3	195.4	-167.3	5.1	172.4	-19.9	126.2	197.0	-10.0	277.1	373.6	-7.4	175.3	254.3
36	รถสินค้า	-0.7	277.5	290.0	-89.6	196.1	332.7	-338.7	10.4	364.7	-15.1	182.0	385.1	-19.3	387.3	859.7	-3.4	267.0	525.0
37	รถโดยสาร	-0.4	217.0	218.1	-117.3	189.3	340.7	-270.1	4.6	275.8	-20.5	193.8	330.9	-21.3	387.2	745.6	-8.0	289.2	458.5
38	รถโดยสาร	-0.6	234.4	235.9	-117.7	195.5	346.9	-284.1	3.1	289.0	-27.4	198.0	342.7	-20.3	373.0	717.7	-10.9	304.3	464.2
39	รถโดยสาร	-0.7	230.6	231.8	-119.0	197.2	345.1	-277.2	2.2	280.2	-23.2	202.7	329.2	-21.8	384.2	703.0	-8.5	307.1	454.8
40	รถโดยสาร	-0.4	224.8	226.6	-114.9	195.0	350.2	-289.7	1.3	292.5	-30.2	214.5	385.9	-33.1	398.5	771.0	-6.8	311.6	515.8
41	รถโดยสาร	-0.8	224.6	227.5	-117.6	197.8	355.8	-280.2	10.4	293.1	-17.3	227.2	395.4	-24.0	386.6	737.9	-10.0	319.6	522.2
42	ดีเซลราง	-0.6	164.6	165.2	-95.5	110.1	223.4	-215.6	4.4	220.0	-25.0	125.7	231.6	-20.2	293.0	473.1	-11.4	171.6	296.9

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
44	รถโดยสาร	-0.7	225.7	228.9	-175.2	109.2	347.5	-297.3	23.8	324.1	-22.0	237.0	428.2	-225.0	393.6	905.0	-11.5	329.0	555.1
46	รถสินค้า	-0.7	302.7	311.3	-206.6	113.2	394.5	-395.3	8.9	416.7	-32.1	249.8	547.4	-12.7	378.0	810.6	-15.3	332.4	695.0
47	รถลากวาง	-16.5	205.8	233.3	-110.0	191.6	306.7	-263.3	29.7	309.6	-15.2	204.9	247.6	-23.6	355.9	502.9	-6.2	300.3	351.4
48	รถสินค้า	-1.2	212.4	215.0	-189.1	116.5	344.0	-288.7	9.4	299.2	-22.6	213.7	358.1	-14.4	388.7	715.8	-10.9	308.4	475.1
49	ดีเซลวาง	-2.4	128.9	131.4	-93.3	107.1	205.1	-172.4	1.9	174.4	-20.3	119.8	190.6	-12.9	268.3	376.3	-10.2	167.5	248.1
50	รถโดยสาร	-0.8	215.4	217.2	-191.0	117.9	347.7	-291.8	1.0	294.6	-21.1	212.3	359.0	-19.9	385.3	726.2	-10.7	301.9	482.1
51	ดีเซลวาง	-0.7	165.9	166.7	-79.0	96.4	193.5	-212.1	1.3	213.4	-17.7	127.0	230.1	-14.0	280.2	456.2	-9.6	172.3	297.5
52	รถโดยสาร	-0.8	211.3	212.8	-183.1	109.6	327.7	-282.2	1.9	284.9	-22.2	213.1	351.0	-16.7	396.9	744.6	-10.3	305.2	479.7
53	รถโดยสาร	-1.4	242.2	246.1	-183.4	114.8	338.2	-305.9	8.1	315.7	-23.6	231.4	359.3	-17.4	426.8	720.1	-14.8	331.0	480.9
54	ดีเซลวาง	-1.1	177.3	178.5	-103.1	107.0	229.8	-223.6	0.6	224.3	-24.8	147.1	257.0	-14.6	331.2	532.2	-7.0	212.3	342.4
55	รถโดยสาร	-0.6	226.6	228.5	-174.4	116.3	344.6	-293.7	0.4	295.9	-23.6	233.0	410.6	-50.1	454.8	838.0	-12.2	328.1	545.3
56	ดีเซลวาง	-1.9	194.6	198.1	-102.9	112.4	280.7	-242.2	2.0	247.4	-27.9	154.0	332.3	-20.4	361.2	684.0	-12.2	223.7	435.7
57	รถสินค้า	-2.8	317.4	324.9	-133.2	184.8	422.4	-401.9	1.9	409.1	-34.0	252.0	646.9	-22.5	392.7	998.3	-	-	-
58	รถสินค้า	-5.1	293.8	310.9	-207.1	148.4	385.0	-366.3	4.8	380.9	-22.0	209.0	352.6	-28.8	379.9	849.0	-8.5	305.2	491.4
59	รถสินค้า	-3.0	203.4	224.0	-173.6	125.0	316.1	-268.4	7.3	298.3	-19.9	216.7	289.0	-16.9	375.3	546.6	-8.8	305.8	389.3
60	ดีเซลวาง	-1.9	184.5	186.6	-99.0	112.0	230.1	-230.1	6.8	237.2	-25.5	145.1	262.1	-19.6	321.2	522.3	-8.3	211.1	337.7
61	รถสินค้า	-1.0	280.9	283.9	-90.7	201.3	311.8	-350.4	5.5	359.0	-11.7	182.5	290.5	-15.3	358.0	700.3	-6.6	263.8	393.9
62	รถสินค้า	-8.3	247.8	269.6	-112.6	205.2	340.6	-301.7	16.2	333.3	-21.4	218.1	280.5	-24.0	365.5	666.2	-3.0	318.9	381.5
63	รถโดยสาร	-0.6	220.6	221.9	-123.7	194.4	352.1	-280.5	4.9	286.6	-24.5	194.2	344.1	-16.7	382.3	747.8	-10.1	285.5	558.4
64	รถโดยสาร	-0.7	229.7	231.1	-120.9	190.8	337.5	-270.4	4.5	275.7	-21.2	199.0	323.5	-21.9	377.2	685.7	-9.3	306.0	449.9

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
145		-4.4	259.5	274.8	-204.2	115.5	372.3	-359.2	4.4	377.0	-28.9	210.4	484.5	-	-	-	-	-	-
146		-0.7	190.9	191.7	-111.1	176.8	289.5	-235.4	2.7	238.3	-11.4	183.2	203.2	-	-	-	-	-	-
147	รถโดยสาร	-1.3	211.4	214.6	-173.6	121.9	336.1	-284.5	1.6	288.0	-23.4	232.3	395.1	-	-	-	-	-	-
148	รถโดยสาร	-0.9	252.8	254.4	-122.6	203.5	371.4	-317.6	1.2	319.4	-24.1	202.2	382.0	-	-	-	-	-	-
149	รถโดยสาร	-4.6	235.3	242.0	-176.5	108.8	349.3	-296.6	1.5	302.2	-26.1	241.1	436.7	-	-	-	-	-	-
150	รถโดยสาร	-0.5	214.1	216.0	-173.0	115.2	338.9	-284.5	1.6	287.8	-23.1	234.0	409.3	-	-	-	-	-	-
151	รถโดยสาร	-0.7	214.8	216.2	-188.1	120.6	339.6	-288.6	5.4	294.9	-21.0	210.8	351.0	-	-	-	-	-	-
152	ดีเซลราง	-1.4	131.8	133.3	-89.8	111.3	205.9	-171.5	4.2	175.7	-21.0	123.7	198.5	-	-	-	-	-	-
153	สปริงเตอร์	-0.7	212.2	214.7	-187.4	119.2	349.4	-290.8	3.8	296.5	-20.6	219.8	368.1	-	-	-	-	-	-
154	ดีเซลราง	-1.0	163.3	164.4	-82.9	100.9	205.0	-208.4	3.4	211.8	-19.9	121.8	228.5	-	-	-	-	-	-
156	รถโดยสาร	-0.6	212.6	213.7	-185.6	114.7	331.4	-282.0	0.5	283.0	-20.9	211.9	333.9	-	-	-	-	-	-
157	รถโดยสาร	-3.4	183.1	186.7	-102.0	106.8	229.2	-239.3	0.4	240.1	-24.0	147.8	259.2	-	-	-	-	-	-
158	รถโดยสาร	-0.4	229.4	232.0	-179.7	114.7	354.9	-294.0	3.3	299.3	-23.5	239.9	427.2	-	-	-	-	-	-
159	รถสินค้า	-1.4	272.2	295.7	-161.2	127.9	345.3	-348.4	0.6	381.0	-19.0	192.0	284.1	-	-	-	-	-	-
160		-0.7	193.8	195.7	-100.7	141.6	295.3	-250.4	0.6	253.3	-26.6	163.2	340.7	-	-	-	-	-	-
161		-3.6	303.3	341.8	-203.3	178.5	413.5	-403.6	0.5	442.9	-20.9	219.2	418.3	-	-	-	-	-	-
162		-8.9	183.3	192.4	-149.1	193.8	343.6	-233.6	0.8	234.6	-22.0	226.9	273.0	-	-	-	-	-	-
163		-4.9	193.9	233.1	-106.4	184.4	312.6	-256.5	0.4	304.6	-10.9	181.8	259.5	-	-	-	-	-	-
164		-0.7	176.9	177.7	-89.4	112.9	225.2	-236.5	0.7	237.4	-24.6	148.6	259.9	-	-	-	-	-	-
165		-0.7	219.0	221.4	-108.4	192.0	350.3	-285.7	0.5	288.4	-21.2	219.8	400.4	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนการไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
167	รถสินค้า	-1.7	217.1	219.5	-110.1	200.8	345.4	-287.0	0.7	288.6	-19.6	199.5	344.6	-	-	-	-	-	-
169		-0.4	159.9	160.3	-83.2	113.3	220.7	-207.1	5.4	212.6	-19.6	121.6	243.7	-	-	-	-	-	-
170		-0.5	229.0	230.0	-118.3	192.1	338.2	-277.5	16.3	294.4	-19.0	196.5	327.4	-	-	-	-	-	-
171	สปริงเตอร์	-1.3	122.9	124.2	-81.5	94.9	180.4	-153.1	19.9	173.0	-20.7	112.4	184.4	-	-	-	-	-	-
172	รถโดยสาร	-0.6	216.2	217.6	-110.3	191.0	338.9	-277.0	17.6	295.9	-23.8	216.0	377.0	-	-	-	-	-	-
173		-0.4	233.6	234.8	-119.7	200.9	354.7	-289.9	6.2	297.5	-22.3	229.5	378.8	-	-	-	-	-	-
174	รถนอน	-1.4	324.3	328.3	-215.7	114.2	407.0	-412.2	1.7	416.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
175		-0.5	169.1	169.7	-86.7	111.1	216.5	-207.0	13.5	220.5	-31.7	121.6	241.2	-	-	-	-	-	-
176		-0.4	222.8	224.1	-114.0	184.8	329.0	-284.1	18.5	303.2	-18.8	208.9	354.5	-	-	-	-	-	-
177	รถสินค้า	-0.6	219.9	221.6	-113.1	185.1	341.2	-268.8	15.2	285.6	-25.6	215.6	386.7	-	-	-	-	-	-
178		-0.6	224.4	227.5	-114.2	192.4	353.1	-283.3	0.8	286.9	-20.2	226.5	395.1	-	-	-	-	-	-
179	รถนอน	-0.5	284.5	291.4	-115.7	191.3	363.6	-341.4	26.6	378.5	-18.1	206.6	358.4	-	-	-	-	-	-
180		-0.5	222.0	223.3	-180.5	121.1	341.5	-288.7	3.5	293.1	-20.7	237.4	390.9	-	-	-	-	-	-
181		-1.4	242.0	245.3	-177.3	120.2	366.1	-305.2	3.6	312.8	-25.3	231.2	426.7	-	-	-	-	-	-
182		-1.4	303.5	339.5	-133.4	220.7	434.9	-393.2	2.9	439.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
183		-0.4	233.4	235.4	-182.0	125.1	356.6	-303.5	1.1	306.1	-24.0	230.3	410.0	-	-	-	-	-	-
184		-1.7	210.5	214.2	-183.4	111.0	333.8	-286.7	7.6	295.6	-20.1	215.5	357.2	-	-	-	-	-	-
185		-1.8	121.9	123.8	-84.3	100.9	190.5	-164.1	1.0	165.1	-21.3	112.5	184.7	-	-	-	-	-	-
187		-0.5	220.3	222.0	-195.9	121.3	361.7	-290.9	3.2	295.8	-27.4	224.7	376.2	-	-	-	-	-	-
188		-0.9	161.3	162.3	-78.8	95.3	192.0	-204.5	0.6	205.1	-18.1	118.6	222.6	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
189		-4.6	214.3	220.6	-185.5	109.1	334.7	-288.8	2.7	292.7	-28.7	207.7	368.9	-	-	-	-	-	-
190		-1.0	159.7	160.7	-83.0	91.5	195.3	-197.0	5.9	203.0	-18.0	115.7	233.3	-	-	-	-	-	-
191		-3.6	215.8	219.9	-180.5	107.4	315.6	-280.0	1.6	282.5	-20.6	207.6	329.6	-	-	-	-	-	-
192		-3.3	164.5	168.2	-91.1	96.9	228.5	-210.1	5.7	216.2	-18.7	126.1	258.1	-	-	-	-	-	-
193	ดีเซลราง	-2.6	219.0	222.6	-170.3	106.4	332.4	-289.4	3.4	294.3	-22.7	224.9	408.9	-	-	-	-	-	-
194	รถโดยสาร	-2.9	298.1	308.8	-185.6	119.8	325.7	-384.1	4.8	392.2	-19.5	184.0	304.6	-	-	-	-	-	-
195		-5.9	184.9	191.3	-95.2	106.7	228.0	-227.9	11.7	240.5	-22.4	158.6	260.6	-	-	-	-	-	-
196		-2.1	194.5	197.6	-101.8	121.3	274.7	-247.3	8.6	258.5	-24.4	152.9	327.5	-	-	-	-	-	-
197		-3.5	328.4	342.0	-178.1	153.5	418.6	-418.7	11.1	450.5	-20.6	210.2	428.4	-	-	-	-	-	-
198		-3.7	324.3	332.4	-216.8	141.3	402.8	-411.7	9.6	424.1	-18.7	215.5	470.2	-	-	-	-	-	-
199	รถสินค้า	-19.8	232.3	259.7	-115.1	187.1	350.1	-275.3	26.0	314.3	-29.0	215.2	416.9	-	-	-	-	-	-
201	รถขนเหล็ก	-18.0	282.2	327.0	-108.7	184.6	343.2	-353.1	26.2	414.6	-14.4	186.6	325.4	-	-	-	-	-	-
202		-4.0	180.6	184.8	-101.9	117.0	243.3	-229.2	6.5	236.0	-26.8	151.7	272.0	-	-	-	-	-	-
203	สปริงเตอร์	-0.7	313.2	333.7	-194.0	126.3	444.4	-384.4	11.3	422.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
204		-3.0	227.1	230.9	-113.7	197.8	339.9	-278.2	6.7	285.9	-18.4	228.2	371.6	-	-	-	-	-	-
205		-0.4	164.5	165.2	-90.2	110.7	234.8	-206.9	5.7	213.1	-26.4	122.0	280.9	-	-	-	-	-	-
206	รถโดยสาร	-0.7	224.0	225.0	-106.0	195.9	323.8	-264.5	7.5	272.5	-12.9	225.2	353.9	-	-	-	-	-	-
207		-0.7	220.4	222.1	-110.2	184.4	326.0	-272.7	2.3	276.0	-19.8	213.5	359.5	-	-	-	-	-	-
208		-2.0	221.1	224.6	-94.9	196.3	323.3	-252.5	27.9	282.7	-10.1	203.1	328.5	-	-	-	-	-	-
210	รถโดยสาร	-1.6	216.3	219.0	-113.8	187.3	340.0	-263.8	3.3	268.7	-16.1	215.0	376.3	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
211	ดีเซลราง	-1.3	223.0	226.4	-117.7	193.9	358.9	-299.1	4.6	306.4	-20.0	223.9	401.0	-	-	-	-	-	-
212		-0.7	247.4	248.9	-205.3	99.9	362.0	-348.0	0.4	349.2	-30.1	209.9	403.7	-	-	-	-	-	-
213	รถโดยสาร	-0.5	224.8	226.3	-119.5	187.2	345.6	-293.0	0.8	295.4	-25.3	194.5	341.8	-	-	-	-	-	-
214		-1.9	230.2	234.6	-179.8	117.2	342.5	-299.8	8.5	310.9	-25.2	234.8	400.6	-	-	-	-	-	-
215		-1.1	292.4	324.2	-98.5	201.5	349.8	-382.8	5.1	435.2	-17.0	189.6	391.1	-	-	-	-	-	-
216		-1.5	227.8	231.4	-179.1	113.8	351.3	-298.1	11.3	313.6	-25.8	238.0	419.4	-	-	-	-	-	-
217		-2.6	176.5	180.2	-116.3	173.1	296.2	-227.4	3.3	232.0	-14.2	182.2	215.6	-	-	-	-	-	-
218		-2.9	223.7	227.9	-183.7	117.1	352.1	-283.9	18.2	303.4	-23.6	234.5	413.7	-	-	-	-	-	-
219	รถสินค้า	-2.8	293.1	306.2	-218.5	103.7	398.7	-388.7	9.8	410.8	-28.8	224.8	544.2	-	-	-	-	-	-
220		-1.7	212.9	216.5	-188.6	114.8	345.4	-290.7	1.6	293.5	-27.4	205.6	355.9	-	-	-	-	-	-
221		-2.9	121.4	124.3	-83.3	103.9	193.2	-160.0	4.8	164.8	-19.6	112.1	183.5	-	-	-	-	-	-
222		-1.5	292.6	297.5	-150.7	201.9	414.8	-361.0	3.7	368.7	-27.9	253.5	550.0	-	-	-	-	-	-
223		-0.4	216.5	218.9	-192.1	115.9	351.3	-290.0	0.8	292.6	-23.1	214.9	366.8	-	-	-	-	-	-
224		-2.1	167.4	169.5	-73.4	97.7	190.6	-212.8	0.9	213.7	-18.3	128.5	231.4	-	-	-	-	-	-
225	รถโดยสาร	-0.7	232.6	233.9	-175.2	126.5	335.3	-296.2	2.5	299.3	-23.1	235.7	388.5	-	-	-	-	-	-
226		-2.4	161.5	163.9	-78.4	94.2	197.5	-203.6	6.5	210.2	-17.7	125.3	241.2	-	-	-	-	-	-
227	รถสินค้า	-1.0	306.3	308.5	-230.1	181.6	433.7	-408.2	3.8	412.6	-22.7	217.0	359.7	-	-	-	-	-	-
228		-1.8	165.2	167.2	-67.3	94.6	204.4	-204.2	5.7	210.2	-15.5	128.4	265.3	-	-	-	-	-	-
229	ดีเซลราง	-0.8	182.3	183.3	-94.0	109.7	223.0	-229.6	2.1	232.0	-25.7	140.9	255.1	-	-	-	-	-	-
230	รถโดยสาร	-1.3	222.6	226.1	-177.2	114.4	348.7	-285.6	2.8	290.4	-24.7	226.6	409.5	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดขบวนรถไฟภายใต้การใช้งานปกติของสะพานกม.19 (ต่อ)

member		22109 (L)			22153 (D)			22127 (U)			22141 (V)			22309 (ST)			22548 (FB)		
file	ประเภทรถ	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress	min(ksc)	max(ksc)	Eq stress
231	สปริงเตอร์	-0.8	282.0	284.0	-108.6	202.9	334.1	-354.8	3.1	359.1	-18.4	205.8	366.0	-	-	-	-	-	-
232	รถโดยสาร	-3.6	310.8	326.0	-170.5	111.3	341.4	-393.3	9.8	418.9	-20.6	192.8	394.6	-	-	-	-	-	-
234		-13.6	306.6	328.3	-114.0	200.1	365.5	-399.0	18.2	429.6	-12.3	215.4	462.8	-	-	-	-	-	-
235		-4.7	309.8	369.7	-198.6	172.3	397.1	-391.8	8.6	461.1	-21.4	209.3	400.1	-	-	-	-	-	-
236		-1.0	227.0	230.0	-104.8	192.6	345.5	-277.7	4.4	285.0	-20.0	210.3	392.7	-	-	-	-	-	-
237		-1.3	216.9	219.3	-110.8	191.7	332.1	-268.3	4.1	273.8	-20.4	198.1	336.9	-	-	-	-	-	-
238	รถโดยสาร	-1.1	219.6	221.4	-119.8	187.2	326.6	-269.6	3.7	274.0	-20.0	196.4	306.0	-	-	-	-	-	-
239	รถโดยสาร	-0.6	226.0	227.4	-113.6	192.0	340.6	-263.5	10.2	274.8	-21.1	199.7	338.8	-	-	-	-	-	-
240	สปริงเตอร์	-0.5	227.3	228.8	-124.2	196.8	353.6	-283.1	0.6	285.1	-23.1	204.8	339.7	-	-	-	-	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานจักรี

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range(ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
2101	L	152.0	112.0	6.00	32,209	35,789	-561	15097	15658	139.8
2102	L	152.0	112.0	4.50	32,209	35,789	-697	14873	15571	139.0
2103	L	312.8	247.8	2.50	68,413	62,718	-697	14873	15571	62.8
2104	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	43647	43647	176.1
2105	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	43685	43685	176.3
2106	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	43685	43685	176.3
2107	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	43647	43647	176.1
2108	L	312.8	247.8	2.50	68,413	62,718	-697	14873	15571	62.8
2109	L	152.0	112.0	4.50	32,209	35,789	-697	14873	15571	139.0
2110	L	152.0	112.0	6.00	32,209	35,789	-561	15097	15658	139.8
2111	EP	260.8	195.6	6.40	90,556	88,220	-41570	0	41570	212.5
2112	EP	260.8	195.6	3.60	90,556	88,220	-41704	0	41704	213.2
2113	U	260.8	195.6	7.00	90,556	88,220	-44591	0	44591	228.0
2114	U	260.8	195.6	0.66	90,556	88,220	-44971	0	44971	229.9
2115	U	348.8	261.6	6.34	99,054	119,342	-44986	0	44986	172.0
2116	U	348.8	261.6	7.00	99,054	119,342	-59169	0	59169	226.2
2117	U	348.8	261.6	7.00	99,054	119,342	-59169	0	59169	226.2
2118	U	348.8	261.6	6.34	99,054	119,342	-44986	0	44986	172.0
2119	U	260.8	195.6	0.66	90,556	88,220	-44971	0	44971	229.9
2120	U	260.8	195.6	7.00	90,556	88,220	-44591	0	44591	228.0
2121	EP	260.8	195.6	3.60	90,556	88,220	-41704	0	41704	213.2
2122	EP	260.8	195.6	6.40	90,556	88,220	-41570	0	41570	212.5
2123	P	76.0	66.0	8.00	12,846	1,582	-1421	16680	18101	274.3
2124	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2125	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2126	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2127	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-1569	15133	16702	253.1
2128	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-1569	15133	16702	253.1
2129	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-1569	15133	16702	253.1
2130	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2131	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2132	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2133	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-1569	15133	16702	253.1
2134	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-1569	15133	16702	253.1
2135	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-1569	15133	16702	253.1
2136	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2137	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานจ๊กรี (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
2138	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2139	P	76.0	66.0	8.00	12,846	1,582	-1421	16680	18101	274.3
2140	D	197.6	153.6	10.63	35,130	36,271	-1886	37155	39040	254.2
2141	D	188.4	138.4	10.63	36,839	33,625	-28347	7252	35599	257.2
2142	D	124.0	89.0	10.63	12,985	22,722	-12597	21359	33955	381.5
2143	D	124.0	89.0	10.63	12,985	22,722	-12597	21359	33955	381.5
2144	D	188.4	138.4	10.63	35,130	36,271	-28347	7252	35599	257.2
2145	D	197.6	153.6	10.63	36,839	33,625	-1886	37155	39040	254.2

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg)	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
2301	ST	283.8	212.9	6.00	398,448	7,769	-2540	18220	400	246.3
2302	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-5010	18330	850	278.3
2303	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-4500	19430	1280	286.8
2304	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-4080	19540	1490	283.9
2305	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-4080	19540	1490	283.9
2306	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-4500	19430	1280	286.8
2307	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-5010	18330	850	278.3
2308	ST	283.8	212.9	6.00	398,448	7,769	-2540	18220	400	246.3
2501	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-1530	25850	0	300.2
2502	FB	255.2	191.4	1.20	469,717	5,740	-1530	25850	0	300.2
2503	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-1530	25850	0	300.2
2504	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2250	30050	-2290	265.3
2505	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-2250	30050	-2290	265.3
2506	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2250	30050	-2290	265.3
2507	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-1670	32960	-2050	285.8
2508	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-1670	32960	-2050	285.8
2509	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-1670	32960	-2050	285.8
2510	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2830	27220	-2390	245.9
2511	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-2830	27220	-2390	245.9
2512	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2830	27220	-2390	245.9
2513	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-1130	30960	-2180	263.9
2514	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-1130	30960	-2180	263.9
2515	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-1130	30960	-2180	263.9
2516	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2830	27220	-2390	245.9
2517	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-2830	27220	-2390	245.9
2518	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2830	27220	-2390	245.9

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานจักรี (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
2519	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-1670	32960	-2050	285.8
2520	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-1670	32960	-2050	285.8
2521	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-1670	32960	-2050	285.8
2522	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2250	30050	-2290	265.3
2523	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-2250	30050	-2290	265.3
2524	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2250	30050	-2290	265.3
2525	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-1530	25850	0	300.2
2526	FB	255.2	191.4	1.20	469,717	5,740	-1530	25850	0	300.2
2527	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-1530	25850	0	300.2

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 2201 ถึง 2245 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 2101 ถึง 2145
: ชิ้นส่วน 2401 ถึง 2408 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 2301 ถึง 2308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.03

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
12101	L	125.6	92.1	6.25	18,545	27,750	-885	12580	13465	146.2
12102	L	125.6	92.1	2.25	18,545	27,750	-1000	12708	13709	148.8
12103	L	125.6	92.1	4.00	18,545	27,750	-1000	12708	13709	148.8
12104	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	35039	35039	188.8
12105	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	34837	34837	187.7
12106	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	34837	34837	187.7
12107	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	35039	35039	188.8
12108	L	125.6	92.1	4.00	18,545	27,750	-1000	12708	13709	148.8
12109	L	125.6	92.1	2.25	18,545	27,750	-1000	12708	13709	148.8
12110	L	125.6	92.1	6.25	18,545	27,750	-885	12580	13465	146.2
12111	EP	231.0	173.3	6.13	47,332	78,429	-38652	0	38652	223.1
12112	EP	231.0	173.3	4.00	47,332	78,429	-38652	0	38652	223.1
12113	U	190.4	142.8	5.41	31,044	59,597	-38431	0	38431	269.1
12114	U	190.4	142.8	0.84	31,044	59,597	-38431	0	38431	269.1
12115	U	190.4	142.8	6.25	31,044	59,597	-38552	0	38552	270.0
12116	U	231.0	173.3	6.25	47,332	78,429	-49361	0	49361	284.9
12117	U	231.0	173.3	6.25	47,332	78,429	-49361	0	49361	284.9
12118	U	190.4	142.8	6.25	31,044	59,597	-38552	0	38552	270.0
12119	U	190.4	142.8	0.84	31,044	59,597	-38431	0	38431	269.1
12120	U	190.4	142.8	5.41	31,044	59,597	-38431	0	38431	269.1
12121	EP	231.0	173.3	4.00	47,332	78,429	-38652	0	38652	223.1
12122	EP	231.0	173.3	6.13	47,332	78,429	-38652	0	38652	223.1
12123	P	68.0	48.0	8.00	10,943	1,178	-1164	16714	17878	372.5
12124	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12125	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12126	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12127	P	68.0	48.0	5.60	10,943	1,178	-1362	14788	16150	336.4
12128	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-1362	14783	16145	336.4
12129	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-1362	14784	16145	336.4
12130	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12131	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12132	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12133	P	68.0	48.0	5.60	10,943	1,178	-1362	14788	16150	336.4
12134	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-1362	14783	16145	336.4
12135	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-1362	14784	16145	336.4
12136	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12137	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
12138	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12139	P	68.0	48.0	8.00	10,943	1,178	-1164	16714	17878	372.5
12140	D	148.0	116.0	10.15	17,305	24,741	-2829	32227	35055	302.2
12141	D	128.0	98.0	10.15	15,443	21,947	-24909	6613	31522	321.7
12142	D	103.0	76.0	10.15	11,597	18,502	-11520	18877	30397	400.2
12143	D	103.0	76.0	10.15	11,597	18,502	-11520	18877	30397	400.2
12144	D	128.0	98.0	10.15	15,443	21,947	-24909	6613	31522	321.7
12145	D	148.0	116.0	10.15	17,305	24,741	-2829	32227	35055	302.2

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
12301	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-2530	17090	717	454.6
12302	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-6000	13860	1194	463.1
12303	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-4930	14610	1628	458.4
12304	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-4740	14800	1846	459.8
12305	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-4740	14800	1846	459.8
12306	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-4930	14610	1628	458.4
12307	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-6000	13860	1194	463.1
12308	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-2530	17090	717	454.6
12501	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-1415	22190	0	343.4
12502	FB	218.7	164.0	1.20	324,588	10,580	-1415	22190	0	343.4
12503	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-1415	22190	0	343.4
12504	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2040	29250	-2374	436.8
12505	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-2040	29250	-2374	436.8
12506	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2040	29250	-2374	436.8
12507	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-1650	29000	-1898	429.9
12508	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-1650	29000	-1898	429.9
12509	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-1650	29000	-1898	429.9
12510	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2380	25880	-2217	394.1
12511	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-2380	25880	-2217	394.1
12512	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2380	25880	-2217	394.1
12513	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-1350	28750	-2105	421.0
12514	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-1350	28750	-2105	421.0
12515	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-1350	28750	-2105	421.0
12516	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2380	25880	-2217	394.1
12517	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-2380	25880	-2217	394.1
12518	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2380	25880	-2217	394.1

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
12519	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-1650	29000	-1898	429.9
12520	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-1650	29000	-1898	429.9
12521	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-1650	29000	-1898	429.9
12522	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2040	29250	-2374	436.8
12523	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-2040	29250	-2374	436.8
12524	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2040	29250	-2374	436.8
12525	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-1415	22190	0	343.4
12526	FB	218.7	164.0	1.20	324,588	10,580	-1415	22190	0	343.4
12527	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-1415	22190	0	343.4

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 12201 ถึง 12245 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 12101 ถึง 12145

: ชิ้นส่วน 12401 ถึง 12408 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 12301 ถึง 12308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓-3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.19

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
22101	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	0	19585	19585	130.2
22102	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	0	19277	19277	128.1
22103	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	0	51188	51188	198.0
22104	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	0	50893	50893	196.9
22105	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	0	73019	73019	199.2
22106	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	0	72802	72802	198.7
22107	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	0	85243	85243	202.7
22108	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	0	85121	85122	202.4
22109	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	0	88088	88088	209.5
22110	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	0	88088	88088	209.5
22111	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	0	85121	85122	202.4
22112	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	0	85243	85243	202.7
22113	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	0	72802	72802	198.7
22114	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	0	73019	73019	199.2
22115	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	0	50893	50893	196.9
22116	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	0	51188	51188	198.0
22117	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	0	19277	19277	128.1
22118	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	0	19585	19585	130.2
22119	EP	245.0	183.8	8.14	140,787	106,967	-42450	0	42450	231.0
22120	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-37631	0	37631	178.8
22121	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-37661	0	37661	178.9
22122	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-65226	0	65226	249.4
22123	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-65232	0	65232	249.5
22124	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-82980	0	82980	228.3
22125	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-82983	0	82983	228.3
22126	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-90654	0	90654	249.4
22127	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-90660	0	90660	249.4
22128	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-90660	0	90660	249.4
22129	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-90654	0	90654	249.4
22130	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-82983	0	82983	228.3
22131	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-82980	0	82980	228.3
22132	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-65232	0	65232	249.5
22133	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-65226	0	65226	249.4
22134	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-37661	0	37661	178.9
22135	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-37631	0	37631	178.8
22136	EP	245.0	183.8	8.14	140,787	106,967	-42450	0	42450	231.0
22137	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	-629	13945	14574	241.0

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
22138	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	-729	12934	13663	225.9
22139	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	-697	12373	13070	335.1
22140	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	-697	12395	13092	335.7
22141	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	-688	12386	13074	335.2
22142	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	-697	12395	13092	335.7
22143	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	-697	12373	13070	335.1
22144	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	-729	12934	13663	225.9
22145	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	-629	13945	14574	241.0
22146	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	-670	39589	40259	285.3
22147	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	-36345	2546	38891	275.6
22148	D	160.2	120.2	8.14	50,737	27,115	-3470	33981	37451	311.6
22149	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-30429	5620	36049	319.9
22150	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-7672	28337	36009	319.6
22151	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-24750	11261	36011	319.6
22152	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-13365	22626	35991	319.4
22153	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-19067	16948	36015	319.6
22154	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-19067	16948	36015	319.6
22155	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-13365	22626	35991	319.4
22156	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-24750	11261	36011	319.6
22157	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-7672	28337	36009	319.6
22158	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-30429	5620	36049	319.9
22159	D	160.2	120.2	8.14	50,737	27,115	-3470	33981	37451	311.6
22160	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	-36345	2546	38891	275.6
22161	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	-670	39589	40259	285.3

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22301	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-1260	8230	487	437.8
22302	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-2860	7430	947	478.3
22303	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3210	7610	1374	506.1
22304	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3250	7850	1742	522.1
22305	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-2980	8090	2056	523.4
22306	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3140	8090	2307	532.9
22307	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3140	7810	2503	521.7
22308	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3110	8230	2633	540.7
22309	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3090	8010	2699	530.3
22310	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3090	8010	2699	530.3

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22311	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3110	8230	2633	540.7
22312	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3140	7810	2503	521.7
22313	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3140	8090	2307	532.9
22314	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-2980	8090	2056	523.4
22315	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3250	7850	1742	522.1
22316	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-3210	7610	1374	506.1
22317	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-2860	7430	947	478.3
22318	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	-1260	8230	487	437.8
22501	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-570	9930	0	277.7
22502	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1190	20710	0	324.0
22503	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1190	20710	0	324.0
22504	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1190	20710	0	324.0
22505	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-570	9930	0	277.7
22506	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-550	12200	-751	332.2
22507	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1150	25450	-751	390.1
22508	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1150	25450	-751	390.1
22509	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1150	25450	-751	390.1
22510	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-550	12200	-751	332.2
22511	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-490	12650	-894	341.5
22512	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1020	26390	-894	401.4
22513	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1020	26390	-894	401.4
22514	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1020	26390	-894	401.4
22515	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-490	12650	-894	341.5
22516	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-640	11290	-1138	307.9
22517	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1330	23560	-1138	363.0
22518	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1330	23560	-1138	363.0
22519	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1330	23560	-1138	363.0
22520	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-640	11290	-1138	307.9
22521	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-400	12590	-1094	336.2
22522	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-840	26260	-1094	395.9
22523	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-840	26260	-1094	395.9
22524	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-840	26260	-1094	395.9
22525	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-400	12590	-1094	336.2
22526	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10830	-1143	294.9
22527	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22580	-1143	347.6
22528	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1270	22580	-1143	347.6
22529	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22580	-1143	347.6

ตารางที่ ๗-3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22530	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10830	-1143	294.9
22531	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-370	12690	-1129	337.9
22532	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-770	26470	-1129	397.8
22533	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-770	26470	-1129	397.8
22534	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-770	26470	-1129	397.8
22535	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-370	12690	-1129	337.9
22536	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10840	-1164	295.0
22537	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22620	-1164	348.1
22538	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1270	22620	-1164	348.1
22539	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22620	-1164	348.1
22540	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10840	-1164	295.0
22541	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-380	12670	-1181	337.2
22542	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-790	26430	-1181	397.3
22543	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-790	26430	-1181	397.3
22544	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-790	26430	-1181	397.3
22545	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-380	12670	-1181	337.2
22546	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-600	10840	-1204	294.5
22547	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1260	22610	-1204	347.6
22548	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1260	22610	-1204	347.6
22549	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1260	22610	-1204	347.6
22550	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-600	10840	-1204	294.5
22551	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-380	12670	-1181	337.2
22552	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-790	26430	-1181	397.3
22553	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-790	26430	-1181	397.3
22554	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-790	26430	-1181	397.3
22555	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-380	12670	-1181	337.2
22556	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10840	-1164	295.0
22557	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22620	-1164	348.1
22558	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1270	22620	-1164	348.1
22559	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22620	-1164	348.1
22560	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10840	-1164	295.0
22561	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-370	12690	-1129	337.9
22562	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-770	26470	-1129	397.8
22563	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-770	26470	-1129	397.8
22564	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-770	26470	-1129	397.8
22565	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-370	12690	-1129	337.9
22566	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10830	-1143	294.9

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากห้วงจักรของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22567	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22580	-1143	347.6
22568	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1270	22580	-1143	347.6
22569	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1270	22580	-1143	347.6
22570	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-610	10830	-1143	294.9
22571	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-400	12590	-1094	336.2
22572	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-840	26260	-1094	395.9
22573	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-840	26260	-1094	395.9
22574	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-840	26260	-1094	395.9
22575	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-400	12590	-1094	336.2
22576	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-640	11290	-1138	307.9
22577	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1330	23560	-1138	363.0
22578	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1330	23560	-1138	363.0
22579	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1330	23560	-1138	363.0
22580	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-640	11290	-1138	307.9
22581	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-490	12650	-894	341.5
22582	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1020	26390	-894	401.4
22583	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1020	26390	-894	401.4
22584	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1020	26390	-894	401.4
22585	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-490	12650	-894	341.5
22586	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-550	12200	-751	332.2
22587	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1150	25450	-751	390.1
22588	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1150	25450	-751	390.1
22589	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1150	25450	-751	390.1
22590	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-550	12200	-751	332.2
22591	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-570	9930	0	277.7
22592	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1190	20710	0	324.0
22593	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	-1190	20710	0	324.0
22594	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	-1190	20710	0	324.0
22595	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	-570	9930	0	277.7

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 22201 ถึง 22261 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 22101 ถึง 22161

: ชิ้นส่วน 22401 ถึง 22418 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 22301 ถึง 22318

ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ของสะพานจักรี้

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
2101	L	152.0	112.0	6.00	32,209	35,789	-1460	89480	90940	812.0
2102	L	152.0	112.0	4.50	32,209	35,789	-2100	86100	88200	787.5
2103	L	312.8	247.8	2.50	68,413	62,718	-2100	86100	88200	355.9
2104	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	309810	309810	1250.2
2105	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	309020	309020	1247.1
2106	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	309020	309020	1247.1
2107	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	0	309810	309810	1250.2
2108	L	312.8	247.8	2.50	68,413	62,718	-2100	86100	88200	355.9
2109	L	152.0	112.0	4.50	32,209	35,789	-2100	86100	88200	787.5
2110	L	152.0	112.0	6.00	32,209	35,789	-1460	89480	90940	812.0
2111	EP	260.8	195.6	6.40	90,556	88,220	-297540	0	297540	1521.2
2112	EP	260.8	195.6	3.60	90,556	88,220	-296630	0	296630	1516.5
2113	U	260.8	195.6	7.00	90,556	88,220	-320610	0	320610	1639.1
2114	U	260.8	195.6	0.66	90,556	88,220	-324940	0	324940	1661.2
2115	U	348.8	261.6	6.34	99,054	119,342	-324940	0	324940	1242.1
2116	U	348.8	261.6	7.00	99,054	119,342	-440010	0	440010	1682.0
2117	U	348.8	261.6	7.00	99,054	119,342	-440010	0	440010	1682.0
2118	U	348.8	261.6	6.34	99,054	119,342	-324940	0	324940	1242.1
2119	U	260.8	195.6	0.66	90,556	88,220	-324940	0	324940	1661.2
2120	U	260.8	195.6	7.00	90,556	88,220	-320610	0	320610	1639.1
2121	EP	260.8	195.6	3.60	90,556	88,220	-296630	0	296630	1516.5
2122	EP	260.8	195.6	6.40	90,556	88,220	-297540	0	297540	1521.2
2123	P	76.0	66.0	8.00	12,846	1,582	-2840	86560	89400	1354.5
2124	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2125	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2126	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2127	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-3760	83930	87690	1328.6
2128	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-3760	83930	87690	1328.6
2129	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-3760	83930	87690	1328.6
2130	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2131	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2132	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2133	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-3760	83930	87690	1328.6
2134	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-3760	83930	87690	1328.6
2135	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-3760	83930	87690	1328.6
2136	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2137	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0

ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ของสะพานจักรี (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
2138	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	0	0	0	0.0
2139	P	76.0	66.0	8.00	12,846	1,582	-2840	86560	89400	1354.5
2140	D	197.6	153.6	10.63	35,130	36,271	-3740	240870	244610	1592.5
2141	D	188.4	138.4	10.63	36,839	33,625	-145740	23160	168900	1220.4
2142	D	124.0	89.0	10.63	12,985	22,722	-43810	85630	129440	1454.4
2143	D	124.0	89.0	10.63	12,985	22,722	-43810	85630	129440	1454.4
2144	D	188.4	138.4	10.63	35,130	36,271	-145740	23160	168900	1220.4
2145	D	197.6	153.6	10.63	36,839	33,625	-3740	240870	244610	1592.5

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg)	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
2301	ST	283.8	212.9	6.00	398,448	7,769	-6350	72560	2800	940.7
2302	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-8560	68000	7450	929.3
2303	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-9500	72340	10040	1000.7
2304	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-8040	75430	12070	1027.1
2305	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-8040	75430	12070	1027.1
2306	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-9500	72340	10040	1000.7
2307	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	-8560	68000	7450	929.3
2308	ST	283.8	212.9	6.00	398,448	7,769	-6350	72560	2800	940.7
2501	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-3060	89930	-530	1016.8
2502	FB	255.2	191.4	1.20	469,717	5,740	-3060	89930	-530	1016.8
2503	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-3060	89930	-530	1016.8
2504	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-3390	148900	-12600	1244.5
2505	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-3390	148900	-12600	1244.5
2506	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-3390	148900	-12600	1244.5
2507	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-4640	177920	-13180	1498.5
2508	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-4640	177920	-13180	1498.5
2509	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-4640	177920	-13180	1498.5
2510	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-6520	143620	-16080	1214.4
2511	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-6520	143620	-16080	1214.4
2512	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-6520	143620	-16080	1214.4
2513	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2010	178280	-14670	1474.2
2514	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-2010	178280	-14670	1474.2
2515	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-2010	178280	-14670	1474.2
2516	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-5430	143620	-16080	1214.4
2517	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-5430	143620	-16080	1214.4
2518	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-5430	143620	-16080	1214.4

ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก U20 ของสะพานจักรี (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
2519	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-4640	177920	-13180	1498.5
2520	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-4640	177920	-13180	1498.5
2521	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-4640	177920	-13180	1498.5
2522	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-3390	148900	-12600	1244.5
2523	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	-3390	148900	-12600	1244.5
2524	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	-3390	148900	-12600	1244.5
2525	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-3060	89930	-530	1016.8
2526	FB	255.2	191.4	1.20	469,717	5,740	-3060	89930	-530	1016.8
2527	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	-3060	89930	-530	1016.8

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 2201 ถึง 2245 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 2101 ถึง 2145

: ชิ้นส่วน 2401 ถึง 2408 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 2301 ถึง 2308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.03

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
12101	L	125.6	92.1	6.25	18,545	27,750	-2758	74861	77619	842.8
12102	L	125.6	92.1	2.25	18,545	27,750	-3719	73443	77162	837.8
12103	L	125.6	92.1	4.00	18,545	27,750	-3719	73443	77162	837.8
12104	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	253368	253368	1365.1
12105	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	250871	250871	1351.7
12106	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	250871	250871	1351.7
12107	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	0	253368	253368	1365.1
12108	L	125.6	92.1	4.00	18,545	27,750	-3719	73443	77162	837.8
12109	L	125.6	92.1	2.25	18,545	27,750	-3719	73443	77162	837.8
12110	L	125.6	92.1	6.25	18,545	27,750	-2758	74861	77619	842.8
12111	EP	231.0	173.3	6.13	47,332	78,429	-279932	0	279932	1615.8
12112	EP	231.0	173.3	4.00	47,332	78,429	-279932	0	279932	1615.8
12113	U	190.4	142.8	5.41	31,044	59,597	-282106	0	282106	1975.5
12114	U	190.4	142.8	0.84	31,044	59,597	-282106	0	282106	1975.5
12115	U	190.4	142.8	6.25	31,044	59,597	-282952	0	282952	1981.5
12116	U	231.0	173.3	6.25	47,332	78,429	-377426	0	377426	2178.5
12117	U	231.0	173.3	6.25	47,332	78,429	-377426	0	377426	2178.5
12118	U	190.4	142.8	6.25	31,044	59,597	-282952	0	282952	1981.5
12119	U	190.4	142.8	0.84	31,044	59,597	-282106	0	282106	1975.5
12120	U	190.4	142.8	5.41	31,044	59,597	-282106	0	282106	1975.5
12121	EP	231.0	173.3	4.00	47,332	78,429	-279932	0	279932	1615.8
12122	EP	231.0	173.3	6.13	47,332	78,429	-279932	0	279932	1615.8
12123	P	68.0	48.0	8.00	10,943	1,178	-1852	90807	92658	1930.4
12124	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12125	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12126	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12127	P	68.0	48.0	5.60	10,943	1,178	-2969	81356	84325	1756.8
12128	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-2969	81332	84301	1756.3
12129	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-2972	81310	84283	1755.9
12130	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12131	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12132	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12133	P	68.0	48.0	5.60	10,943	1,178	-2969	81356	84325	1756.8
12134	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-2969	81332	84301	1756.3
12135	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	-2972	81310	84283	1755.9
12136	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12137	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
12138	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	0	0	0	0.0
12139	P	68.0	48.0	8.00	10,943	1,178	-1852	90807	92658	1930.4
12140	D	148.0	116.0	10.15	17,305	24,741	-6142	206379	212521	1832.1
12141	D	128.0	98.0	10.15	15,443	21,947	-129032	21409	150441	1535.1
12142	D	103.0	76.0	10.15	11,597	18,502	-41067	75470	116537	1534.2
12143	D	103.0	76.0	10.15	11,597	18,502	-41067	75470	116537	1534.2
12144	D	128.0	98.0	10.15	15,443	21,947	-129032	21409	150441	1535.1
12145	D	148.0	116.0	10.15	17,305	24,741	-6142	206379	212521	1832.1

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
12301	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-6120	69860	5300	1776.2
12302	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-7330	48460	10020	1342.2
12303	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-7010	54120	12730	1481.5
12304	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-6400	55330	14640	1507.1
12305	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-6400	55330	14640	1507.1
12306	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-7010	54120	12730	1481.5
12307	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-7330	48460	10020	1342.2
12308	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	-6120	69860	5300	1776.2
12501	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-2920	87070	-540	1306.7
12502	FB	218.7	164.0	1.20	324,588	10,580	-2920	87070	-540	1306.7
12503	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-2920	87070	-540	1306.7
12504	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3040	151780	-13150	2154.2
12505	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-3040	151780	-13150	2154.2
12506	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3040	151780	-13150	2154.2
12507	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3870	155560	-12010	2225.8
12508	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-3870	155560	-12010	2225.8
12509	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3870	155560	-12010	2225.8
12510	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-4990	135810	-15390	1942.5
12511	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-4990	135810	-15390	1942.5
12512	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-4990	135810	-15390	1942.5
12513	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2470	156170	-12600	2211.6
12514	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-2470	156170	-12600	2211.6
12515	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-2470	156170	-12600	2211.6
12516	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-4990	135810	-15390	1942.5
12517	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-4990	135810	-15390	1942.5
12518	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-4990	135810	-15390	1942.5

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
12519	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3870	155560	-12010	2225.8
12520	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-3870	155560	-12010	2225.8
12521	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3870	155560	-12010	2225.8
12522	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3040	151780	-13150	2154.2
12523	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	-3040	151780	-13150	2154.2
12524	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	-3040	151780	-13150	2154.2
12525	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-2920	87070	-540	1306.7
12526	FB	218.7	164.0	1.20	324,588	10,580	-2920	87070	-540	1306.7
12527	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	-2920	87070	-540	1306.7

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 12201 ถึง 12245 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 12101 ถึง 12145

: ชิ้นส่วน 12401 ถึง 12408 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 12301 ถึง 12308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.19

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
22101	L	200.6	150.5	3.89	72574	85750	0	159731	159731	1061.5
22102	L	200.6	150.5	3.89	72574	85750	0	154998	154998	1030.0
22103	L	344.6	258.5	3.89	106234	161818	0	421388	421388	1630.3
22104	L	344.6	258.5	3.89	106234	161818	0	417349	417349	1614.6
22105	L	488.6	366.5	3.89	125226	237886	0	607699	607699	1658.2
22106	L	488.6	366.5	3.89	125226	237886	0	604647	604647	1649.9
22107	L	560.6	420.5	3.89	133009	275920	0	718636	718636	1709.1
22108	L	560.6	420.5	3.89	133009	275920	0	716623	716623	1704.3
22109	L	560.6	420.5	3.89	133009	275920	0	753719	753719	1792.5
22110	L	560.6	420.5	3.89	133009	275920	0	753719	753719	1792.5
22111	L	560.6	420.5	3.89	133009	275920	0	716623	716623	1704.3
22112	L	560.6	420.5	3.89	133009	275920	0	718636	718636	1709.1
22113	L	488.6	366.5	3.89	125226	237886	0	604647	604647	1649.9
22114	L	488.6	366.5	3.89	125226	237886	0	607699	607699	1658.2
22115	L	344.6	258.5	3.89	106234	161818	0	417349	417349	1614.6
22116	L	344.6	258.5	3.89	106234	161818	0	421388	421388	1630.3
22117	L	200.6	150.5	3.89	72574	85750	0	154998	154998	1030.0
22118	L	200.6	150.5	3.89	72574	85750	0	159731	159731	1061.5
22119	EP	245.0	183.8	8.14	140787	106967	-349574	0	349574	1902.4
22120	U	280.6	210.5	3.89	126608	158122	-311103	0	311103	1478.1
22121	U	280.6	210.5	3.89	126608	158122	-311342	0	311342	1479.2
22122	U	348.6	261.5	3.89	174367	218936	-544000	0	544000	2080.5
22123	U	348.6	261.5	3.89	174367	218936	-544048	0	544048	2080.6
22124	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-700529	0	700529	1927.3
22125	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-700531	0	700531	1927.3
22126	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-778048	0	778048	2140.6
22127	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-778072	0	778072	2140.6
22128	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-778072	0	778072	2140.6
22129	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-778048	0	778048	2140.6
22130	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-700531	0	700531	1927.3
22131	U	484.6	363.5	3.89	281036	340566	-700529	0	700529	1927.3
22132	U	348.6	261.5	3.89	174367	218936	-544048	0	544048	2080.6
22133	U	348.6	261.5	3.89	174367	218936	-544000	0	544000	2080.5
22134	U	280.6	210.5	3.89	126608	158122	-311342	0	311342	1479.2
22135	U	280.6	210.5	3.89	126608	158122	-311103	0	311103	1478.1
22136	EP	245.0	183.8	8.14	140787	106967	-349574	0	349574	1902.4
22137	P	80.6	60.5	7.15	24766	1421	-729	59443	60172	994.9

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		load (kg)			net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	min	max	range	
22138	P	80.6	60.5	7.15	24766	1421	-1353	54771	56124	928.0
22139	P	52.0	39.0	7.15	17657	840	-1242	52421	53663	1376.0
22140	P	52.0	39.0	7.15	17657	840	-1262	52408	53670	1376.2
22141	P	52.0	39.0	7.15	17657	840	-1219	52383	53602	1374.4
22142	P	52.0	39.0	7.15	17657	840	-1262	52408	53670	1376.2
22143	P	52.0	39.0	7.15	17657	840	-1242	52421	53663	1376.0
22144	P	80.6	60.5	7.15	24766	1421	-1353	54771	56124	928.0
22145	P	80.6	60.5	7.15	24766	1421	-729	59443	60172	994.9
22146	D	188.2	141.1	8.14	58541	31392	-1062	311469	312531	2214.6
22147	D	188.2	141.1	8.14	58541	31392	-269802	5251	275053	1949.1
22148	D	160.2	120.2	8.14	50737	27115	-9072	235568	244640	2035.6
22149	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-192801	17084	209885	1862.7
22150	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-24687	160364	185051	1642.3
22151	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-123087	37805	160892	1427.9
22152	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-49205	103873	153077	1358.5
22153	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-81992	66679	148671	1319.4
22154	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-81992	66679	148671	1319.4
22155	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-49205	103873	153077	1358.5
22156	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-123087	37805	160892	1427.9
22157	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-24687	160364	185051	1642.3
22158	D	150.2	112.7	8.14	46934	18464	-192801	17084	209885	1862.7
22159	D	160.2	120.2	8.14	50737	27115	-9072	235568	244640	2035.6
22160	D	188.2	141.1	8.14	58541	31392	-269802	5251	275053	1949.1
22161	D	188.2	141.1	8.14	58541	31392	-1062	311469	312531	2214.6

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22301	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-2640	31600	4750	1605.1
22302	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3350	22420	9150	1255.7
22303	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-4170	22050	12640	1306.1
22304	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3230	24170	16100	1389.6
22305	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3580	25950	19030	1512.0
22306	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-2960	25060	21720	1466.0
22307	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3750	24030	23430	1469.6
22308	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3160	24940	24420	1492.7
22309	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3380	25230	25080	1521.7
22310	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3380	25230	25080	1521.7

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22311	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3160	24940	24420	1492.7
22312	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3750	24030	23430	1469.6
22313	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-2960	25060	21720	1466.0
22314	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3580	25950	19030	1512.0
22315	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3230	24170	16100	1389.6
22316	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-4170	22050	12640	1306.1
22317	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-3350	22420	9150	1255.7
22318	ST	117.0	87.8	3.89	71126	594	-2640	31600	4750	1605.1
22501	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1115	36400	-200	990.8
22502	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2230	72800	-200	1109.0
22503	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2230	72800	-200	1109.0
22504	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2230	72800	-200	1109.0
22505	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1115	36400	-200	990.8
22506	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-635	51950	-5850	1351.6
22507	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1270	103900	-5850	1529.0
22508	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1270	103900	-5850	1529.0
22509	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1270	103900	-5850	1529.0
22510	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-635	51950	-5850	1351.6
22511	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1310	55215	-7310	1446.1
22512	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2620	110430	-7310	1638.9
22513	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2620	110430	-7310	1638.9
22514	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2620	110430	-7310	1638.9
22515	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1310	55215	-7310	1446.1
22516	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1200	47880	-9020	1237.8
22517	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2400	95760	-9020	1410.8
22518	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2400	95760	-9020	1410.8
22519	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2400	95760	-9020	1410.8
22520	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1200	47880	-9020	1237.8
22521	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-855	55725	-9000	1436.3
22522	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1710	111450	-9000	1632.8
22523	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1710	111450	-9000	1632.8
22524	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1710	111450	-9000	1632.8
22525	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-855	55725	-9000	1436.3
22526	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1090	45755	-9180	1177.6
22527	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2180	91510	-9180	1343.9
22528	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2180	91510	-9180	1343.9
22529	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2180	91510	-9180	1343.9

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกU20ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22530	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1090	45755	-9180	1177.6
22531	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-755	56875	-9250	1462.4
22532	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1510	113750	-9250	1662.7
22533	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1510	113750	-9250	1662.7
22534	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1510	113750	-9250	1662.7
22535	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-755	56875	-9250	1462.4
22536	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1110	45745	-9490	1175.8
22537	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2220	91490	-9490	1342.8
22538	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2220	91490	-9490	1342.8
22539	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2220	91490	-9490	1342.8
22540	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1110	45745	-9490	1175.8
22541	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-775	56690	-9650	1455.4
22542	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1550	113380	-9650	1656.0
22543	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1550	113380	-9650	1656.0
22544	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1550	113380	-9650	1656.0
22545	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-775	56690	-9650	1455.4
22546	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1075	45725	-9990	1171.0
22547	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2150	91450	-9990	1338.9
22548	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2150	91450	-9990	1338.9
22549	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2150	91450	-9990	1338.9
22550	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1075	45725	-9990	1171.0
22551	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-775	56690	-9650	1455.4
22552	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1550	113380	-9650	1656.0
22553	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1550	113380	-9650	1656.0
22554	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1550	113380	-9650	1656.0
22555	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-775	56690	-9650	1455.4
22556	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1110	45745	-9490	1175.8
22557	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2220	91490	-9490	1342.8
22558	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2220	91490	-9490	1342.8
22559	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2220	91490	-9490	1342.8
22560	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1110	45745	-9490	1175.8
22561	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-755	56875	-9250	1462.4
22562	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1510	113750	-9250	1662.7
22563	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1510	113750	-9250	1662.7
22564	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1510	113750	-9250	1662.7
22565	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-755	56875	-9250	1462.4
22566	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1090	45755	-9180	1177.6

ตารางที่ ค-6 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกU20ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment (kg-m)		Load (kg) Axial	net stress range (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}	negative	positive		
22567	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2180	91510	-9180	1343.9
22568	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2180	91510	-9180	1343.9
22569	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2180	91510	-9180	1343.9
22570	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1090	45755	-9180	1177.6
22571	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-855	55725	-9000	1436.3
22572	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1710	111450	-9000	1632.8
22573	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1710	111450	-9000	1632.8
22574	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1710	111450	-9000	1632.8
22575	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-855	55725	-9000	1436.3
22576	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1200	47880	-9020	1237.8
22577	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2400	95760	-9020	1410.8
22578	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2400	95760	-9020	1410.8
22579	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2400	95760	-9020	1410.8
22580	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1200	47880	-9020	1237.8
22581	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1310	55215	-7310	1446.1
22582	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2620	110430	-7310	1638.9
22583	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2620	110430	-7310	1638.9
22584	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2620	110430	-7310	1638.9
22585	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1310	55215	-7310	1446.1
22586	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-635	51950	-5850	1351.6
22587	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1270	103900	-5850	1529.0
22588	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-1270	103900	-5850	1529.0
22589	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-1270	103900	-5850	1529.0
22590	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-635	51950	-5850	1351.6
22591	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1115	36400	-200	990.8
22592	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2230	72800	-200	1109.0
22593	FB	218.0	163.5	1.05	310945	7407	-2230	72800	-200	1109.0
22594	FB	218.0	163.5	0.95	310945	7407	-2230	72800	-200	1109.0
22595	FB	150.0	112.5	0.88	170162	857	-1115	36400	-200	990.8

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 22201 ถึง 22261 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 22101 ถึง 22161

: ชิ้นส่วน 22401 ถึง 22418 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 22301 ถึง 22318

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานจ๊กวี

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Load (kg) Max	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
2101	L	152.0	112.0	6.00	32,209	35,789	16570	147.9
2102	L	152.0	112.0	4.50	32,209	35,789	16370	146.2
2103	L	312.8	247.8	2.50	68,413	62,718	16370	66.1
2104	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	43660	176.2
2105	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	43680	176.3
2106	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	43680	176.3
2107	L	312.8	247.8	7.00	68,413	62,718	43660	176.2
2108	L	312.8	247.8	2.50	68,413	62,718	16370	66.1
2109	L	152.0	112.0	4.50	32,209	35,789	16370	146.2
2110	L	152.0	112.0	6.00	32,209	35,789	16570	147.9
2111	EP	260.8	195.6	6.40	90,556	88,220	-32700	-167.2
2112	EP	260.8	195.6	3.60	90,556	88,220	-32700	-167.2
2113	U	260.8	195.6	7.00	90,556	88,220	-35820	-183.1
2114	U	260.8	195.6	0.66	90,556	88,220	-36430	-186.2
2115	U	348.8	261.6	6.34	99,054	119,342	-36430	-139.3
2116	U	348.8	261.6	7.00	99,054	119,342	-49720	-190.1
2117	U	348.8	261.6	7.00	99,054	119,342	-49720	-190.1
2118	U	348.8	261.6	6.34	99,054	119,342	-36430	-139.3
2119	U	260.8	195.6	0.66	90,556	88,220	-36430	-186.2
2120	U	260.8	195.6	7.00	90,556	88,220	-35820	-183.1
2121	EP	260.8	195.6	3.60	90,556	88,220	-32700	-167.2
2122	EP	260.8	195.6	6.40	90,556	88,220	-32700	-167.2
2123	P	76.0	66.0	8.00	12,846	1,582	3535	53.6
2124	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-2435	-36.9
2125	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-2435	-36.9
2126	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-2435	-36.9
2127	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	4300	65.2
2128	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	4300	65.2
2129	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	4300	65.2
2130	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-2380	-36.1
2131	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-2380	-36.1
2132	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-2380	-36.1
2133	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	4300	65.2
2134	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	4300	65.2
2135	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	4300	65.2
2136	P	76.0	66.0	5.60	12,846	1,582	-2435	-36.9
2137	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-2435	-36.9

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานจ๊กกรี (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Load (kg) Max	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
2138	P	76.0	66.0	1.20	12,846	1,582	-2435	-36.9
2139	P	76.0	66.0	8.00	12,846	1,582	3535	53.6
2140	D	197.6	153.6	10.63	35,130	36,271	26940	175.4
2141	D	188.4	138.4	10.63	36,839	33,625	-16440	-118.8
2142	D	124.0	89.0	10.63	12,985	22,722	5620	63.1
2143	D	124.0	89.0	10.63	12,985	22,722	5620	63.1
2144	D	188.4	138.4	10.63	35,130	36,271	-16440	-118.8
2145	D	197.6	153.6	10.63	36,839	33,625	26940	175.4

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
2301	ST	283.8	212.9	6.00	398,448	7,769	1010	11.9
2302	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	1410	16.6
2303	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	1410	16.6
2304	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	1410	16.6
2305	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	1410	16.6
2306	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	1410	16.6
2307	ST	283.8	212.9	7.00	398,448	7,769	1410	16.6
2308	ST	283.8	212.9	6.00	398,448	7,769	1010	11.9
2501	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	3130	34.3
2502	FB	255.2	191.4	1.20	469,717	5,740	3130	34.3
2503	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	3130	34.3
2504	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3460	29.3
2505	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3460	29.3
2506	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3460	29.3
2507	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3620	30.6
2508	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3620	30.6
2509	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3620	30.6
2510	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3570	30.2
2511	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3570	30.2
2512	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3570	30.2
2513	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3585	30.3
2514	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3585	30.3
2515	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3585	30.3
2516	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3570	30.2
2517	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3570	30.2
2518	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3570	30.2

ตารางที่ ค-7 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานจ๊กวี (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
2519	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3620	30.6
2520	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3620	30.6
2521	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3620	30.6
2522	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3460	29.3
2523	FB	292.0	219.0	1.20	697,776	7,680	3460	29.3
2524	FB	292.0	219.0	1.80	697,776	7,680	3460	29.3
2525	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	3130	34.3
2526	FB	255.2	191.4	1.20	469,717	5,740	3130	34.3
2527	FB	255.2	191.4	1.80	469,717	5,740	3130	34.3

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 2201 ถึง 2245 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 2101 ถึง 2145

: ชิ้นส่วน 2401 ถึง 2408 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 2301 ถึง 2308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-8 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานม.03

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Load (kg) Max	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
12101	L	125.6	92.1	6.25	18,545	27,750	10750	116.7
12102	L	125.6	92.1	2.25	18,545	27,750	10876	118.1
12103	L	125.6	92.1	4.00	18,545	27,750	10876	118.1
12104	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	26786	144.3
12105	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	26647	143.6
12106	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	26647	143.6
12107	L	244.6	185.6	6.25	34,207	44,180	26786	144.3
12108	L	125.6	92.1	4.00	18,545	27,750	10876	118.1
12109	L	125.6	92.1	2.25	18,545	27,750	10876	118.1
12110	L	125.6	92.1	6.25	18,545	27,750	10750	116.7
12111	EP	231.0	173.3	6.13	47,332	78,429	-22970	-132.6
12112	EP	231.0	173.3	4.00	47,332	78,429	-22970	-132.6
12113	U	190.4	142.8	5.41	31,044	59,597	-22711	-159.0
12114	U	190.4	142.8	0.84	31,044	59,597	-22711	-159.0
12115	U	190.4	142.8	6.25	31,044	59,597	-22793	-159.6
12116	U	231.0	173.3	6.25	47,332	78,429	-30820	-177.9
12117	U	231.0	173.3	6.25	47,332	78,429	-30820	-177.9
12118	U	190.4	142.8	6.25	31,044	59,597	-22793	-159.6
12119	U	190.4	142.8	0.84	31,044	59,597	-22711	-159.0
12120	U	190.4	142.8	5.41	31,044	59,597	-22711	-159.0
12121	EP	231.0	173.3	4.00	47,332	78,429	-22970	-132.6
12122	EP	231.0	173.3	6.13	47,332	78,429	-22970	-132.6
12123	P	68.0	48.0	8.00	10,943	1,178	2430	50.6
12124	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	-1740	-27.9
12125	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	-1740	-27.9
12126	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	-1740	-27.9
12127	P	68.0	48.0	5.60	10,943	1,178	2780	57.9
12128	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	2780	57.9
12129	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	2780	57.9
12130	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	-1940	-31.1
12131	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	-1940	-31.1
12132	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	-1940	-31.1
12133	P	68.0	48.0	5.60	10,943	1,178	2780	57.9
12134	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	2780	57.9
12135	P	68.0	48.0	1.20	10,943	1,178	2780	57.9
12136	P	83.2	62.4	5.60	10,225	1,178	-1740	-27.9
12137	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	-1740	-27.9

ตารางที่ ค-8 ผลการวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Load (kg) Max	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
12138	P	83.2	62.4	1.20	10,225	1,178	-1740	-27.9
12139	P	68.0	48.0	8.00	10,943	1,178	2430	50.6
12140	D	148.0	116.0	10.15	17,305	24,741	16774	144.6
12141	D	128.0	98.0	10.15	15,443	21,947	-10295	-105.1
12142	D	103.0	76.0	10.15	11,597	18,502	3686	48.5
12143	D	103.0	76.0	10.15	11,597	18,502	3686	48.5
12144	D	128.0	98.0	10.15	15,443	21,947	-10295	-105.1
12145	D	148.0	116.0	10.15	17,305	24,741	16774	144.6

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
12301	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	510	11.7
12302	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	620	14.2
12303	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	620	14.2
12304	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	620	14.2
12305	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	620	14.2
12306	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	620	14.2
12307	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	620	14.2
12308	ST	161.4	121.1	6.25	172,239	7,452	510	11.7
12501	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	2360	34.3
12502	FB	218.7	164.0	1.20	324,588	10,580	2360	34.3
12503	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	2360	34.3
12504	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1960	28.1
12505	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1960	28.1
12506	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1960	28.1
12507	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1940	27.8
12508	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1940	27.8
12509	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1940	27.8
12510	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1920	27.5
12511	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1920	27.5
12512	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1920	27.5
12513	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1980	28.4
12514	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1980	28.4
12515	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1980	28.4
12516	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1920	27.5
12517	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1920	27.5
12518	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1920	27.5

ตารางที่ ค-8 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
12519	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1940	27.8
12520	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1940	27.8
12521	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1940	27.8
12522	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1960	28.1
12523	FB	205.6	154.2	1.20	380,387	7,506	1960	28.1
12524	FB	205.6	154.2	1.75	380,387	7,506	1960	28.1
12525	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	2360	34.3
12526	FB	218.7	164.0	1.20	324,588	10,580	2360	34.3
12527	FB	218.7	164.0	1.75	324,588	10,580	2360	34.3

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 12201 ถึง 12245 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 12101 ถึง 12145

: ชิ้นส่วน 12401 ถึง 12408 สม่มาตรงกับชิ้นส่วน 12301 ถึง 12308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.19

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Load (kg) Max	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
22101	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	19700	130.9
22102	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	19160	127.3
22103	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	54880	212.3
22104	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	54440	210.6
22105	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	81380	222.1
22106	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	81080	221.2
22107	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	97790	232.6
22108	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	97640	232.2
22109	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	103200	245.4
22110	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	103200	245.4
22111	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	97640	232.2
22112	L	560.6	420.5	3.89	133,009	275,920	97790	232.6
22113	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	81080	221.2
22114	L	488.6	366.5	3.89	125,226	237,886	81380	222.1
22115	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	54440	210.6
22116	L	344.6	258.5	3.89	106,234	161,818	54880	212.3
22117	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	19160	127.3
22118	L	200.6	150.5	3.89	72,574	85,750	19700	130.9
22119	EP	245.0	183.8	8.14	140,787	106,967	-45310	-246.6
22120	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-39910	-189.6
22121	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-39910	-189.6
22122	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-71700	-274.2
22123	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-71700	-274.2
22124	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-93980	-258.6
22125	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-93980	-258.6
22126	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-105260	-289.6
22127	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-105260	-289.6
22128	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-105260	-289.6
22129	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-105260	-289.6
22130	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-93980	-258.6
22131	U	484.6	363.5	3.89	281,036	340,566	-93980	-258.6
22132	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-71700	-274.2
22133	U	348.6	261.5	3.89	174,367	218,936	-71700	-274.2
22134	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-39910	-189.6
22135	U	280.6	210.5	3.89	126,608	158,122	-39910	-189.6
22136	EP	245.0	183.8	8.14	140,787	106,967	-45310	-246.6
22137	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	1840	30.4

ตารางที่ ค-9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Load (kg) Max	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
22138	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	2110	34.9
22139	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	2550	65.4
22140	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	2770	71.0
22141	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	2770	71.0
22142	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	2770	71.0
22143	P	52.0	39.0	7.15	17,657	840	2550	65.4
22144	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	2110	34.9
22145	P	80.6	60.5	7.15	24,766	1,421	1840	30.4
22146	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	40270	285.4
22147	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	-37080	-262.8
22148	D	160.2	120.2	8.14	50,737	27,115	30790	256.2
22149	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-27310	-242.4
22150	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	20070	178.1
22151	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-16280	-144.5
22152	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	8320	73.8
22153	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-4400	-39.0
22154	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-4400	-39.0
22155	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	8320	73.8
22156	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-16280	-144.5
22157	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	20070	178.1
22158	D	150.2	112.7	8.14	46,934	18,464	-27310	-242.4
22159	D	160.2	120.2	8.14	50,737	27,115	30790	256.2
22160	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	-37080	-262.8
22161	D	188.2	141.1	8.14	58,541	31,392	40270	285.4

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
22301	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	200	9.1
22302	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22303	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22304	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22305	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22306	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22307	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22308	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22309	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22310	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9

ตารางที่ ค-9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
22311	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22312	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22313	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22314	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22315	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22316	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22317	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	260	11.9
22318	ST	117.0	87.8	3.89	71,126	594	200	9.1
22501	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	1300	35.1
22502	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	2200	32.5
22503	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	2200	32.5
22504	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	2200	32.5
22505	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	1300	35.1
22506	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22507	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22508	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22509	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22510	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22511	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22512	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22513	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22514	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22515	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22516	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22517	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22518	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22519	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22520	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22521	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22522	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22523	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22524	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22525	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22526	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22527	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22528	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22529	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2

ตารางที่ ค-9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
22530	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22531	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22532	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22533	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22534	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22535	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22536	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22537	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22538	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22539	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22540	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22541	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22542	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22543	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22544	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22545	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22546	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22547	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22548	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22549	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22550	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22551	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22552	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22553	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22554	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22555	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22556	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22557	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22558	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22559	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22560	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22561	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22562	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22563	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22564	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22565	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22566	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9

ตารางที่ ค-9 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Type of Member	Area (cm ²)		Length (m)	Moment of Inertia(cm ⁴)		Moment Max(kg.m)	Max stress (ksc)
		Gross	Net		I _{xx}	I _{yy}		
22567	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22568	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22569	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22570	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22571	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22572	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22573	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22574	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22575	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22576	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22577	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22578	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22579	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22580	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22581	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22582	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22583	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22584	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22585	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22586	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22587	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22588	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	1160	17.2
22589	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	1160	17.2
22590	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	700	18.9
22591	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	1300	35.1
22592	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	2200	32.5
22593	FB	218.0	163.5	1.05	310,945	7,407	2200	32.5
22594	FB	218.0	163.5	0.95	310,945	7,407	2200	32.5
22595	FB	150.0	112.5	0.88	170,162	857	1300	35.1

**หมายเหตุ : ชิ้นส่วน 22201 ถึง 22261 สม่มาตรกับชิ้นส่วน 22101 ถึง 22161

: ชิ้นส่วน 22401 ถึง 22418 สม่มาตรกับชิ้นส่วน 22301 ถึง 22318



ภาคผนวก ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-1 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานจรัล

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
2101	212.5	812.0	>2000	-	>500	-	>500	-
2102	211.3	787.5	>2000	-	>500	-	>500	-
2103	95.5	355.9	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2104	267.8	1250.2	>2000	-	>500	-	>500	-
2105	268.0	1247.1	>2000	-	>500	-	>500	-
2106	268.0	1247.1	>2000	-	>500	-	>500	-
2107	267.8	1250.2	>2000	-	>500	-	>500	-
2108	95.5	355.9	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2109	211.3	787.5	>2000	-	>500	-	>500	-
2110	212.5	812.0	>2000	-	>500	-	>500	-
2111	Comp	Comp						
2112	Comp	Comp						
2113	Comp	Comp						
2114	Comp	Comp						
2115	Comp	Comp						
2116	Comp	Comp						
2117	Comp	Comp						
2118	Comp	Comp						
2119	Comp	Comp						
2120	Comp	Comp						
2121	Comp	Comp						
2122	Comp	Comp						
2123	416.9	1354.5	>500	-	>100	-	>100	-
2124	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2125	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2126	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2127	384.7	1328.6	>500	-	>100	-	>100	-
2128	384.7	1328.6	>500	-	>100	-	>100	-
2129	384.7	1328.6	>500	-	>100	-	>100	-
2130	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2131	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2132	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2133	384.7	1328.6	>500	-	>100	-	>100	-
2134	384.7	1328.6	>500	-	>100	-	>100	-
2135	384.7	1328.6	>500	-	>100	-	>100	-
2136	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2137	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2138	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
2139	416.9	1354.5	>500	-	>100	-	>100	-
2140	386.3	1592.5	>500	-	>100	-	>100	-

ตารางที่ ง-1 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานจักรี (ต่อ)

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
2141	391.0	1220.4	>500	-	>100	-	>100	-
2142	579.9	1454.4	>100	-	>100	-	95	-
2143	579.9	1454.4	>100	-	>100	-	95	-
2144	391.0	1220.4	>500	-	>100	-	>100	-
2145	386.3	1592.5	>500	-	>100	-	>100	-
2301	374.4	940.7	>500	-	>100	-	>100	-
2302	423.0	929.3	>500	-	>100	-	>100	-
2303	435.9	1000.7	>500	-	>100	-	>100	-
2304	431.5	1027.1	>500	-	>100	-	>100	-
2305	431.5	1027.1	>500	-	>100	-	>100	-
2306	435.9	1000.7	>500	-	>100	-	>100	-
2307	423.0	929.3	>500	-	>100	-	>100	-
2308	374.4	940.7	>500	-	>100	-	>100	-
2501	456.3	1016.8	>500	-	>100	-	>100	-
2502	456.3	1016.8	>500	-	>100	-	>100	-
2503	456.3	1016.8	>500	-	>100	-	>100	-
2504	403.2	1244.5	>500	-	>100	-	>100	-
2505	403.2	1244.5	>500	-	>100	-	>100	-
2506	403.2	1244.5	>500	-	>100	-	>100	-
2507	434.4	1498.5	>500	-	>100	-	>100	-
2508	434.4	1498.5	>500	-	>100	-	>100	-
2509	434.4	1498.5	>500	-	>100	-	>100	-
2510	373.8	1214.4	>500	-	>100	-	>100	-
2511	373.8	1214.4	>500	-	>100	-	>100	-
2512	373.8	1214.4	>500	-	>100	-	>100	-
2513	401.1	1474.2	>500	-	>100	-	>100	-
2514	401.1	1474.2	>500	-	>100	-	>100	-
2515	401.1	1474.2	>500	-	>100	-	>100	-
2516	373.8	1214.4	>500	-	>100	-	>100	-
2517	373.8	1214.4	>500	-	>100	-	>100	-
2518	373.8	1214.4	>500	-	>100	-	>100	-
2519	434.4	1498.5	>500	-	>100	-	>100	-
2520	434.4	1498.5	>500	-	>100	-	>100	-
2521	434.4	1498.5	>500	-	>100	-	>100	-
2522	403.2	1244.5	>500	-	>100	-	>100	-
2523	403.2	1244.5	>500	-	>100	-	>100	-
2524	403.2	1244.5	>500	-	>100	-	>100	-
2525	456.3	1016.8	>500	-	>100	-	>100	-
2526	456.3	1016.8	>500	-	>100	-	>100	-
2527	456.3	1016.8	>500	-	>100	-	>100	-

ตารางที่ ง-2 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.03

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
12101	231.0	842.8	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12102	235.2	837.8	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12103	235.2	837.8	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12104	298.3	1365.1	>2000	-	>500	-	>500	-
12105	296.6	1351.7	>2000	-	>500	-	>500	-
12106	296.6	1351.7	>2000	-	>500	-	>500	-
12107	298.3	1365.1	>2000	-	>500	-	>500	-
12108	235.2	837.8	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12109	235.2	837.8	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12110	231.0	842.8	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12111	Comp	Comp						
12112	Comp	Comp						
12113	Comp	Comp						
12114	Comp	Comp						
12115	Comp	Comp						
12116	Comp	Comp						
12117	Comp	Comp						
12118	Comp	Comp						
12119	Comp	Comp						
12120	Comp	Comp						
12121	Comp	Comp						
12122	Comp	Comp						
12123	588.5	1930.4	>100	-	>100	-	>100	-
12124	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12125	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12126	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12127	531.6	1756.8	>500	-	>100	-	>100	-
12128	531.4	1756.3	>500	-	>100	-	>100	-
12129	531.5	1755.9	>500	-	>100	-	>100	-
12130	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12131	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12132	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12133	531.6	1756.8	>500	-	>100	-	>100	-
12134	531.4	1756.3	>500	-	>100	-	>100	-
12135	531.5	1755.9	>500	-	>100	-	>100	-
12136	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12137	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12138	0.0	0.0	>2000	-	>2000	-	>2000	-
12139	588.5	1930.4	>100	-	>100	-	>100	-
12140	477.5	1832.1	>500	-	>100	-	>100	-

ตารางที่ ง-2 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.03 (ต่อ)

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
12141	508.2	1535.1	>500	-	>100	-	>100	-
12142	632.3	1534.2	>100	-	>100	-	>100	-
12143	632.3	1534.2	>100	-	>100	-	>100	-
12144	508.2	1535.1	>500	-	>100	-	>100	-
12145	477.5	1832.1	>500	-	>100	-	>100	-
12301	718.3	1776.2	>100	-	>100	-	82	-
12302	731.7	1342.2	>100	-	>100	-	80	-
12303	724.3	1481.5	>100	-	>100	-	81	-
12304	726.5	1507.1	>100	-	>100	-	81	-
12305	726.5	1507.1	>100	-	>100	-	81	-
12306	724.3	1481.5	>100	-	>100	-	81	-
12307	731.7	1342.2	>100	-	>100	-	80	-
12308	718.3	1776.2	>100	-	>100	-	82	-
12501	542.6	1306.7	>500	-	>100	-	>100	-
12502	542.6	1306.7	>500	-	>100	-	>100	-
12503	542.6	1306.7	>500	-	>100	-	>100	-
12504	690.1	2154.2	>100	-	>100	-	98	-
12505	690.1	2154.2	>100	-	>100	-	98	-
12506	690.1	2154.2	>100	-	>100	-	98	-
12507	679.3	2225.8	>100	-	>100	-	>100	-
12508	679.3	2225.8	>100	-	>100	-	>100	-
12509	679.3	2225.8	>100	-	>100	-	>100	-
12510	622.7	1942.5	>100	-	>100	-	>100	-
12511	622.7	1942.5	>100	-	>100	-	>100	-
12512	622.7	1942.5	>100	-	>100	-	>100	-
12513	665.2	2211.6	>100	-	>100	-	>100	-
12514	665.2	2211.6	>100	-	>100	-	>100	-
12515	665.2	2211.6	>100	-	>100	-	>100	-
12516	622.7	1942.5	>100	-	>100	-	>100	-
12517	622.7	1942.5	>100	-	>100	-	>100	-
12518	622.7	1942.5	>100	-	>100	-	>100	-
12519	679.3	2225.8	>100	-	>100	-	>100	-
12520	679.3	2225.8	>100	-	>100	-	>100	-
12521	679.3	2225.8	>100	-	>100	-	>100	-
12522	690.1	2154.2	>100	-	>100	-	98	-
12523	690.1	2154.2	>100	-	>100	-	98	-
12524	690.1	2154.2	>100	-	>100	-	98	-
12525	542.6	1306.7	>500	-	>100	-	>100	-
12526	542.6	1306.7	>500	-	>100	-	>100	-
12527	542.6	1306.7	>500	-	>100	-	>100	-

ตารางที่ ง-3 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.19

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
22101	223.9	1061.5	>2000	-	>500	-	>500	-
22102	220.3	1030.0	>2000	-	>500	-	>500	-
22103	340.6	1630.3	>500	-	>100	-	>100	-
22104	338.7	1614.6	>500	-	>100	-	>100	-
22105	342.7	1658.2	>500	-	>100	-	>100	-
22106	341.7	1649.9	>500	-	>100	-	>100	-
22107	348.7	1709.1	>500	-	>100	-	>100	-
22108	348.2	1704.3	>500	-	>100	-	>100	-
22109	360.3	1792.5	>500	-	>100	-	>100	-
22110	360.3	1792.5	>500	-	>100	-	>100	-
22111	348.2	1704.3	>500	-	>100	-	>100	-
22112	348.7	1709.1	>500	-	>100	-	>100	-
22113	341.6	1649.9	>500	-	>100	-	>100	-
22114	342.7	1658.2	>500	-	>100	-	>100	-
22115	338.6	1614.6	>500	-	>100	-	>100	-
22116	340.6	1630.3	>500	-	>100	-	>100	-
22117	220.3	1030.0	>2000	-	>500	-	>500	-
22118	223.9	1061.5	>2000	-	>500	-	>500	-
22119	Comp	Comp						
22120	Comp	Comp						
22121	Comp	Comp						
22122	Comp	Comp						
22123	Comp	Comp						
22124	Comp	Comp						
22125	Comp	Comp						
22126	Comp	Comp						
22127	Comp	Comp						
22128	Comp	Comp						
22129	Comp	Comp						
22130	Comp	Comp						
22131	Comp	Comp						
22132	Comp	Comp						
22133	Comp	Comp						
22134	Comp	Comp						
22135	Comp	Comp						
22136	Comp	Comp						
22137	414.5	994.9	>500	-	>100	-	>100	-
22138	387.7	928.0	>500	-	>100	-	>100	-
22139	576.4	1376.0	>100	-	>100	-	89	-

ตารางที่ ง-3 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
22140	577.2	1376.2	>100	-	>100	-	88	-
22141	576.6	1374.4	>100	-	>100	-	89	-
22142	577.4	1376.2	>100	-	>100	-	88	-
22143	576.4	1376.0	>100	-	>100	-	89	-
22144	388.6	928.0	>500	-	>100	-	>100	-
22145	414.3	994.9	>500	-	>100	-	>100	-
22146	490.6	2214.6	>100	-	>100	-	>100	-
22147	474.0	1949.1	>100	-	>100	-	>100	-
22148	536.0	2035.6	>100	-	>100	-	>100	-
22149	550.3	1862.7	>100	-	>100	-	>100	-
22150	549.7	1642.3	>100	-	>100	-	>100	-
22151	549.7	1427.9	>100	-	>100	-	>100	-
22152	549.1	1358.5	>100	-	>100	-	>100	-
22153	549.6	1319.4	>100	-	>100	-	>100	-
22154	549.7	1319.4	>100	-	>100	-	>100	-
22155	549.4	1358.5	>100	-	>100	-	>100	-
22156	549.3	1427.9	>100	-	>100	-	>100	-
22157	549.7	1642.3	>100	-	>100	-	>100	-
22158	550.3	1862.7	>100	-	>100	-	>100	-
22159	535.9	2035.6	>100	-	>100	-	>100	-
22160	473.9	1949.1	>100	-	>100	-	>100	-
22161	490.7	2214.6	>100	-	>100	-	>100	-
22301	753.0	1605.1	48	-	40	-	34	-
22302	822.6	1255.7	19	-	17	-	16	-
22303	870.6	1306.1	3	-	3	-	3	-
22304	898.0	1389.6	0	-	0	-	0	-
22305	900.2	1512.0	0	-	0	-	0	-
22306	916.5	1466.0	0	-	0	-	0	-
22307	897.4	1469.6	0	-	0	-	0	-
22308	930.0	1492.7	0	-	0	-	0	-
22309	912.1	1521.7	0	-	0	-	0	-
22310	912.1	1521.7	0	-	0	-	0	-
22311	930.0	1492.7	0	-	0	-	0	-
22312	897.4	1469.6	0	-	0	-	0	-
22313	916.5	1466.0	0	-	0	-	0	-
22314	900.2	1512.0	0	-	0	-	0	-
22315	898.0	1389.6	0	-	0	-	0	-
22316	870.6	1306.1	3	-	3	-	3	-
22317	822.6	1255.7	19	-	17	-	16	-
22318	753.0	1605.1	48	-	40	-	34	-

ตารางที่ ง-3 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
22501	477.6	990.8	>100	-	>100	-	>100	-
22502	557.2	1109.0	>100	-	>100	-	98	-
22503	557.2	1109.0	>100	-	>100	-	98	-
22504	557.2	1109.0	>100	-	>100	-	98	-
22505	477.6	990.8	>100	-	>100	-	>100	-
22506	571.3	1351.6	>100	-	>100	-	91	-
22507	670.9	1529.0	>100	-	70	-	56	-
22508	670.9	1529.0	>100	-	70	-	56	-
22509	670.9	1529.0	>100	-	70	-	56	-
22510	571.3	1351.6	>100	-	>100	-	91	-
22511	587.4	1446.1	>100	-	>100	-	84	-
22512	690.4	1638.9	86	-	63	-	51	-
22513	690.4	1638.9	86	-	63	-	51	-
22514	690.4	1638.9	86	-	63	-	51	-
22515	587.4	1446.1	>100	-	>100	-	84	-
22516	529.6	1237.8	>100	-	>100	-	>100	-
22517	624.3	1410.8	>100	-	90	-	70	-
22518	624.3	1410.8	>100	-	90	-	70	-
22519	624.3	1410.8	>100	-	90	-	70	-
22520	529.6	1237.8	>100	-	>100	-	>100	-
22521	578.3	1436.3	>100	-	>100	-	88	-
22522	680.9	1632.8	93	-	66	-	53	-
22523	680.9	1632.8	93	-	66	-	53	-
22524	680.9	1632.8	93	-	66	-	53	-
22525	578.3	1436.3	>100	-	>100	-	88	-
22526	507.3	1177.6	>100	-	>100	-	>100	-
22527	597.8	1343.9	>100	-	>100	-	80	-
22528	597.8	1343.9	>100	-	>100	-	80	-
22529	597.8	1343.9	>100	-	>100	-	80	-
22530	507.3	1177.6	>100	-	>100	-	>100	-
22531	581.1	1462.4	>100	-	>100	-	87	-
22532	684.2	1662.7	91	-	65	-	52	-
22533	684.2	1662.7	91	-	65	-	52	-
22534	684.2	1662.7	91	-	65	-	52	-
22535	581.1	1462.4	>100	-	>100	-	87	-
22536	507.5	1175.8	>100	-	>100	-	>100	-
22537	598.7	1342.8	>100	-	>100	-	79	-
22538	598.7	1342.8	>100	-	>100	-	79	-
22539	598.7	1342.8	>100	-	>100	-	79	-
22540	507.5	1175.8	>100	-	>100	-	>100	-

ตารางที่ ง-3 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.19 (ต่อ)

Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
22541	580.1	1455.4	>100	-	>100	-	87	-
22542	683.3	1656.0	92	-	65	-	53	-
22543	683.3	1656.0	92	-	65	-	53	-
22544	683.3	1656.0	92	-	65	-	53	-
22545	580.1	1455.4	>100	-	>100	-	87	-
22546	506.6	1171.0	>100	-	>100	-	>100	-
22547	597.9	1338.9	>100	-	>100	-	79	-
22548	597.9	1338.9	>100	-	>100	-	79	-
22549	597.9	1338.9	>100	-	>100	-	79	-
22550	506.6	1171.0	>100	-	>100	-	>100	-
22551	580.1	1455.4	>100	-	>100	-	87	-
22552	683.3	1656.0	92	-	65	-	53	-
22553	683.3	1656.0	92	-	65	-	53	-
22554	683.3	1656.0	92	-	65	-	53	-
22555	580.1	1455.4	>100	-	>100	-	87	-
22556	507.5	1175.8	>100	-	>100	-	>100	-
22557	598.7	1342.8	>100	-	>100	-	79	-
22558	598.7	1342.8	>100	-	>100	-	79	-
22559	598.7	1342.8	>100	-	>100	-	79	-
22560	507.5	1175.8	>100	-	>100	-	>100	-
22561	581.1	1462.4	>100	-	>100	-	87	-
22562	684.2	1662.7	91	-	65	-	52	-
22563	684.2	1662.7	91	-	65	-	52	-
22564	684.2	1662.7	91	-	65	-	52	-
22565	581.1	1462.4	>100	-	>100	-	87	-
22566	507.3	1177.6	>100	-	>100	-	>100	-
22567	597.8	1343.9	>100	-	>100	-	80	-
22568	597.8	1343.9	>100	-	>100	-	80	-
22569	597.8	1343.9	>100	-	>100	-	80	-
22570	507.3	1177.6	>100	-	>100	-	>100	-
22571	578.3	1436.3	>100	-	>100	-	88	-
22572	680.9	1632.8	93	-	66	-	53	-
22573	680.9	1632.8	93	-	66	-	53	-
22574	680.9	1632.8	93	-	66	-	53	-
22575	578.3	1436.3	>100	-	>100	-	88	-
22576	529.6	1237.8	>100	-	>100	-	>100	-
22577	624.3	1410.8	>100	-	90	-	70	-
22578	624.3	1410.8	>100	-	90	-	70	-
22579	624.3	1410.8	>100	-	90	-	70	-
22580	529.6	1237.8	>100	-	>100	-	>100	-

ตารางที่ ง-3 แสดงการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่เนื่องจากความล้าของสะพานกม.19 (ต่อ)

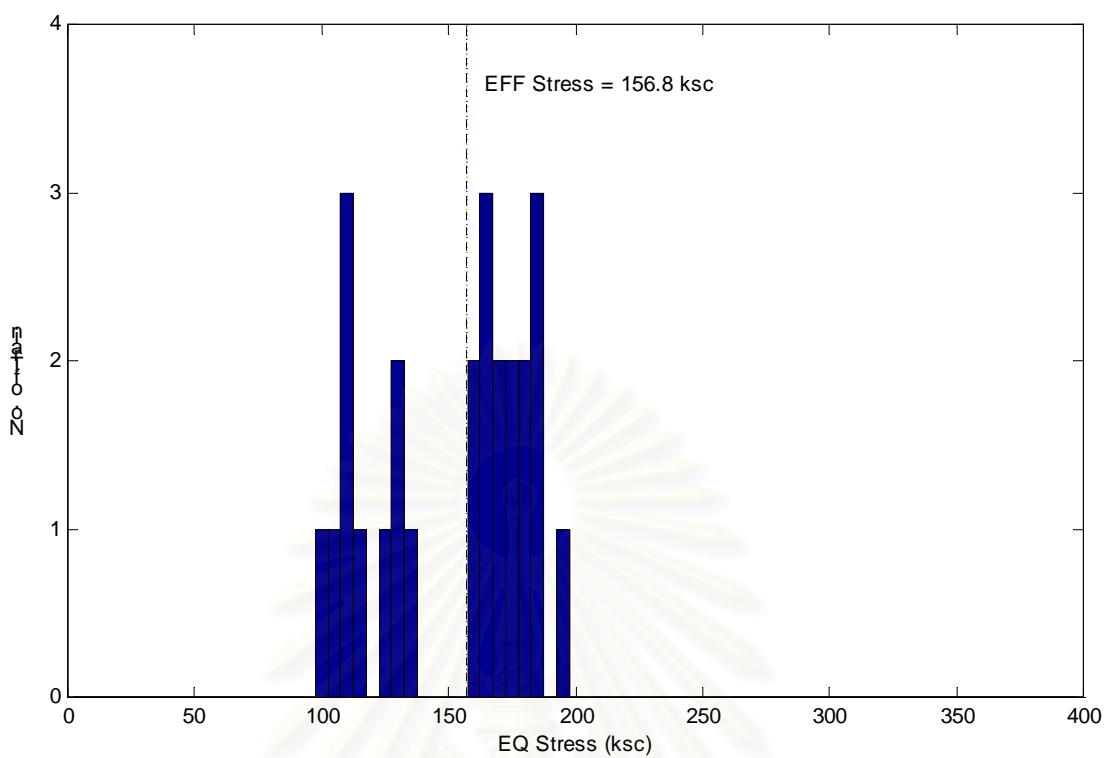
Member	Effective Stress (ksc)	Stress Range U20 (ksc)	Remaining Life (years)					
			Growth Rate = 0%		Growth Rate = 1%		Growth Rate = 2%	
			normal train	U20	normal train	U20	normal train	U20
22581	587.4	1446.1	>100	-	>100	-	84	-
22582	690.4	1638.9	86	-	63	-	51	-
22583	690.4	1638.9	86	-	63	-	51	-
22584	690.4	1638.9	86	-	63	-	51	-
22585	587.4	1446.1	>100	-	>100	-	84	-
22586	571.3	1351.6	>100	-	>100	-	91	-
22587	670.9	1529.0	>100	-	70	-	56	-
22588	670.9	1529.0	>100	-	70	-	56	-
22589	670.9	1529.0	>100	-	70	-	56	-
22590	571.3	1351.6	>100	-	>100	-	91	-
22591	477.6	990.8	>100	-	>100	-	>100	-
22592	557.2	1109.0	>100	-	>100	-	98	-
22593	557.2	1109.0	>100	-	>100	-	98	-
22594	557.2	1109.0	>100	-	>100	-	98	-
22595	477.6	990.8	>100	-	>100	-	>100	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

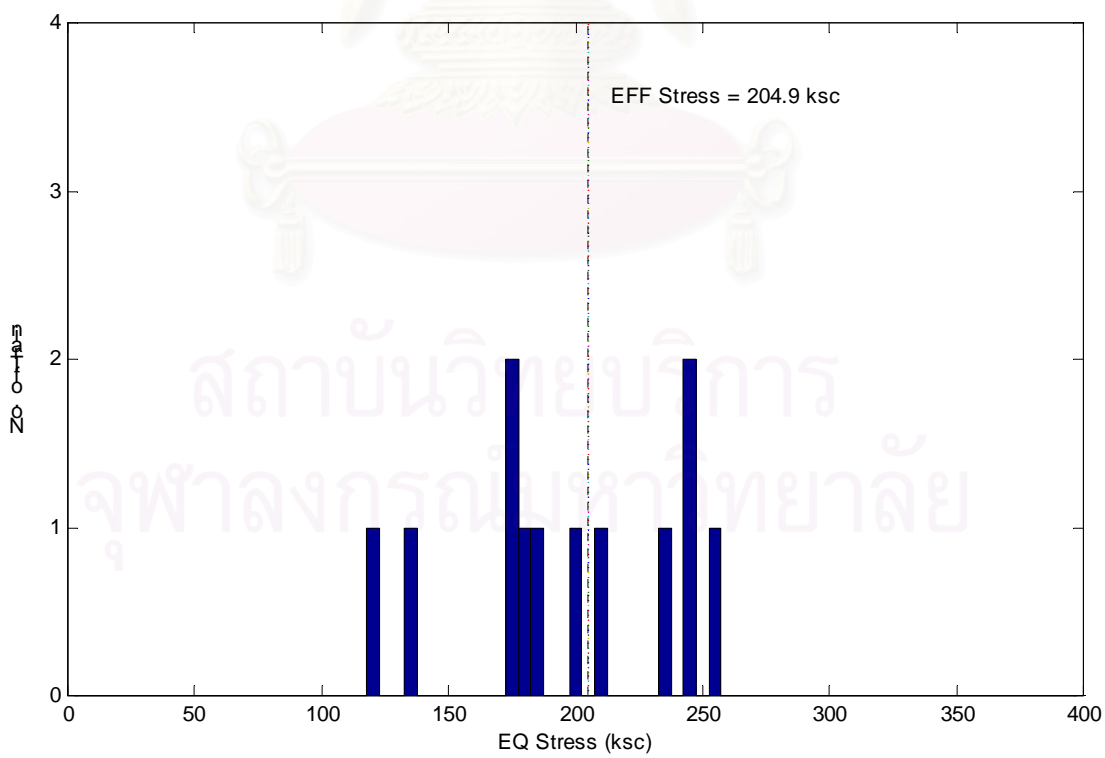


ภาคผนวก จ

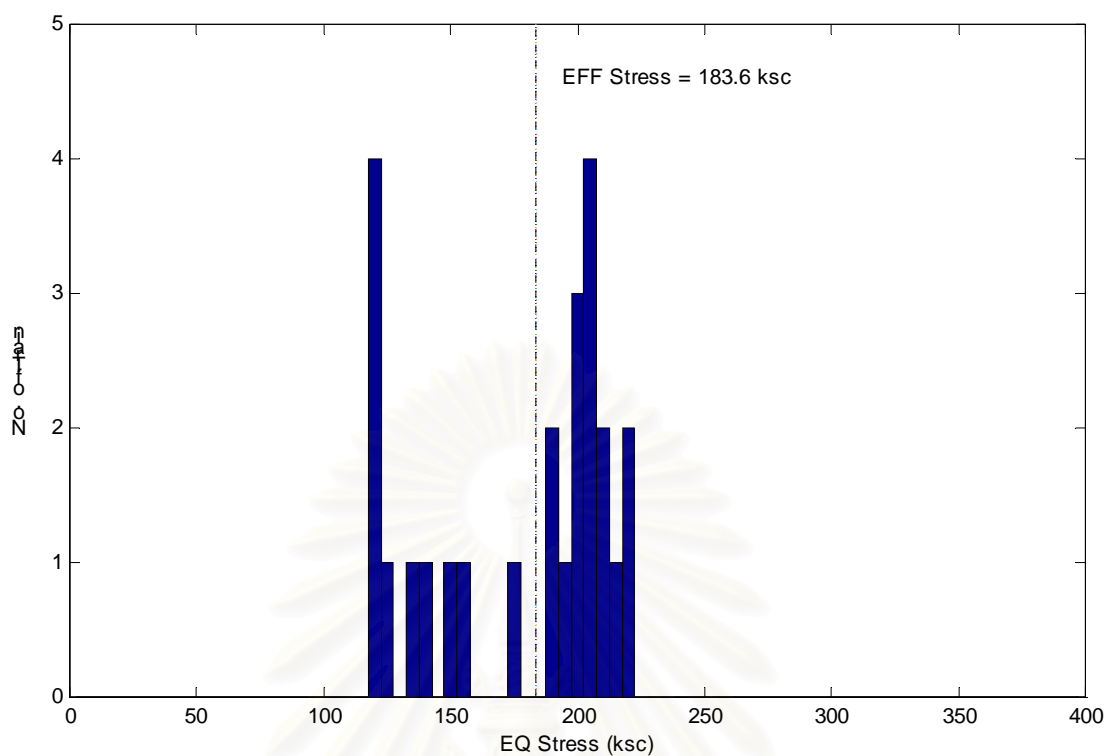
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



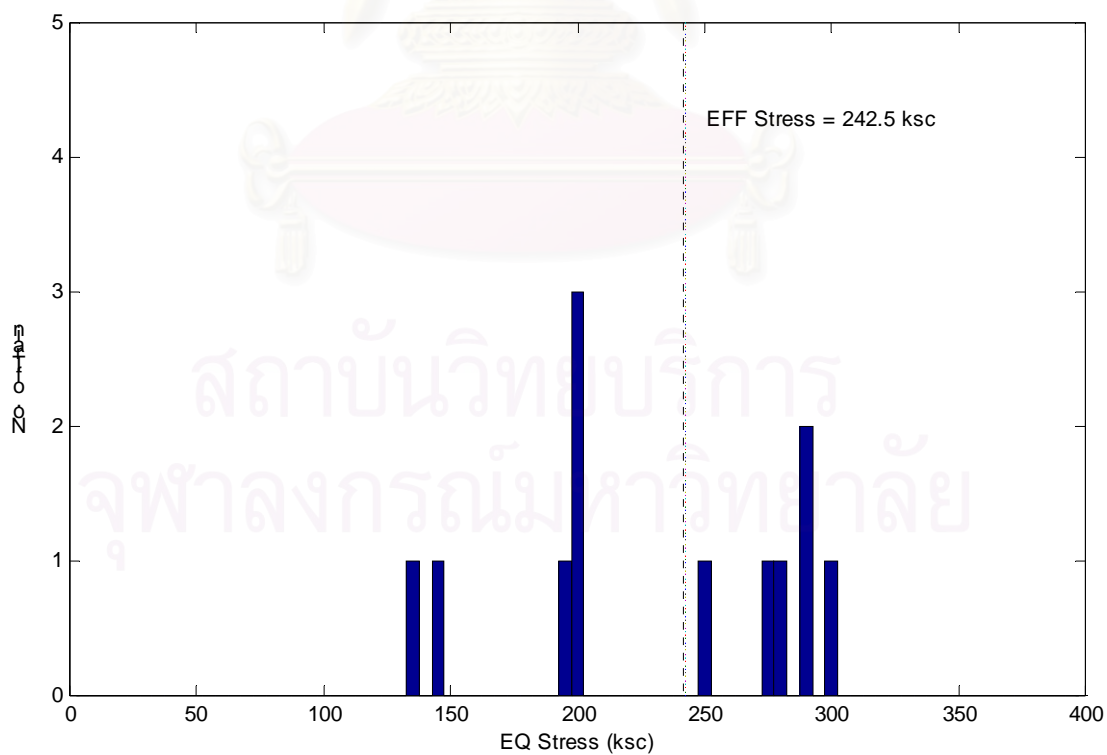
รูปที่ จ-1 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2105



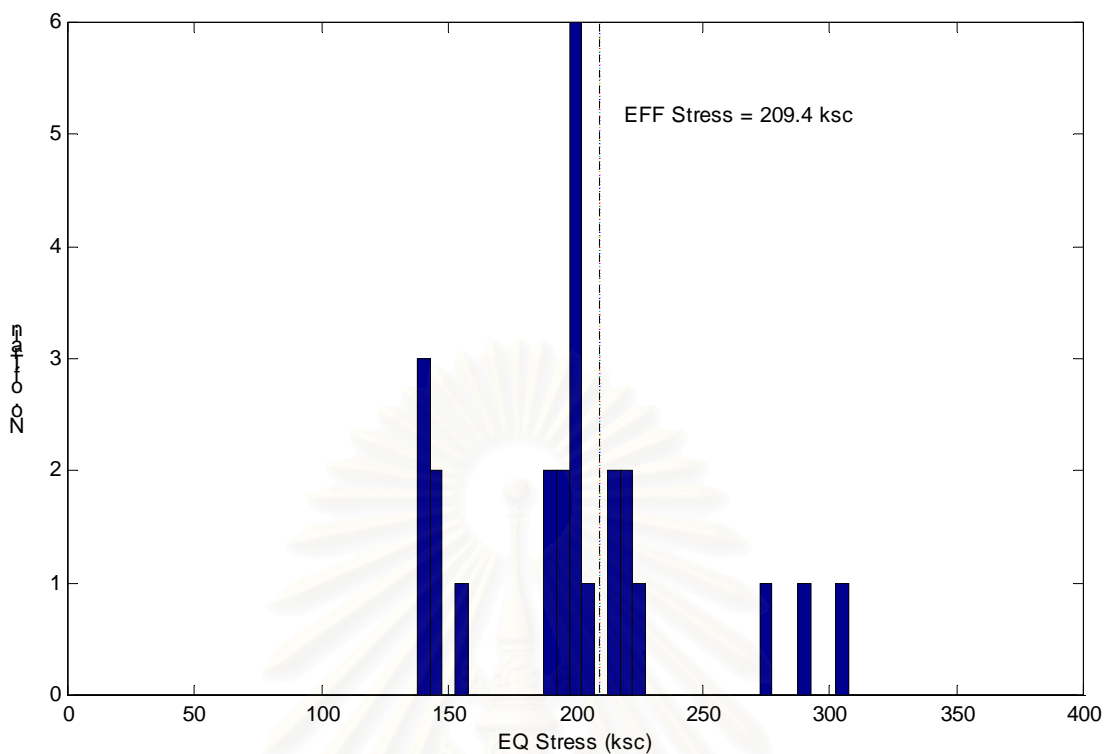
รูปที่ จ-2 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2105



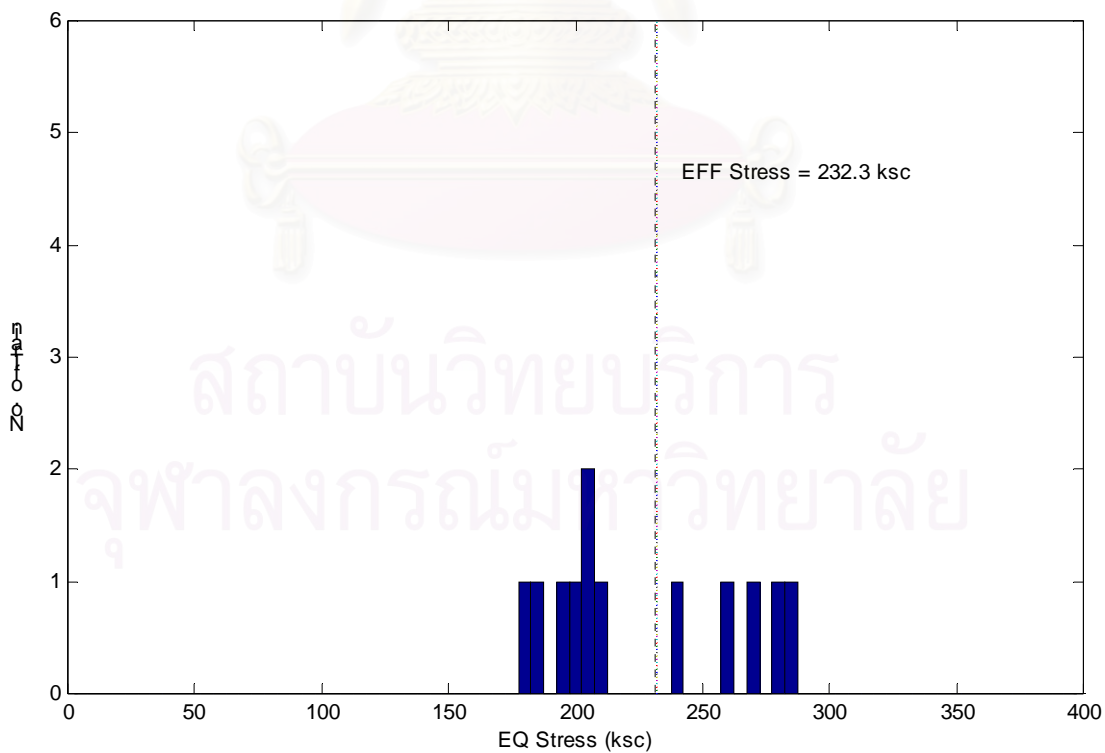
รูปที่ ๑-3 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2116



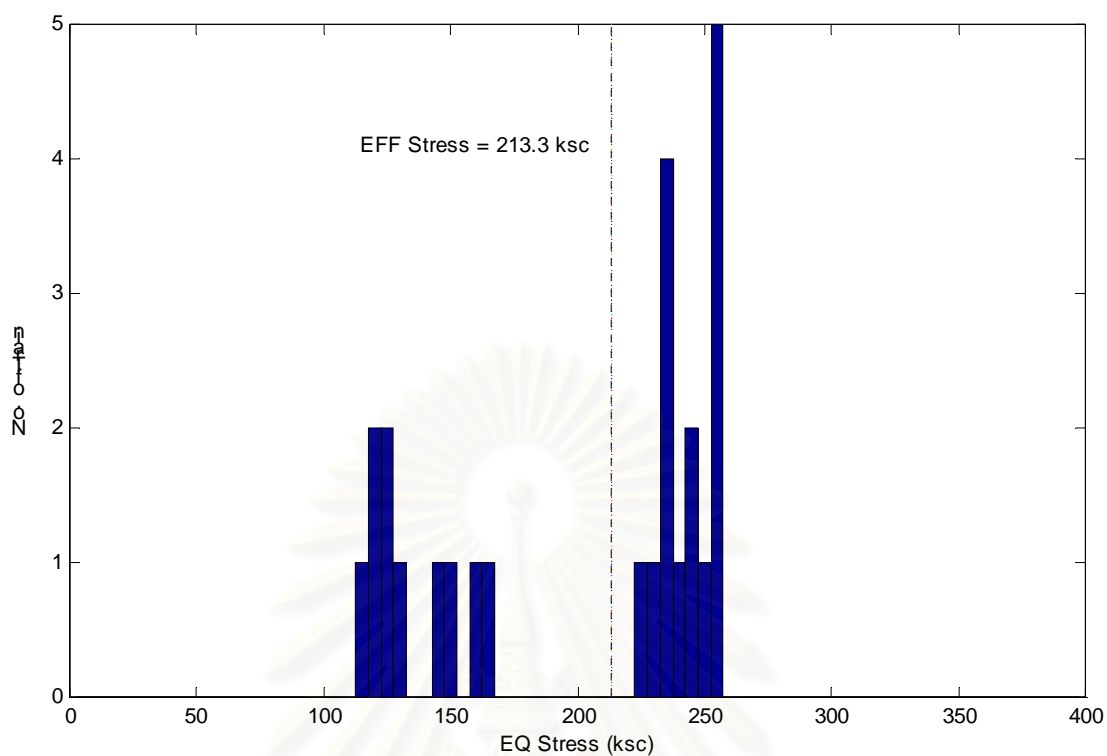
รูปที่ ๑-4 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2116



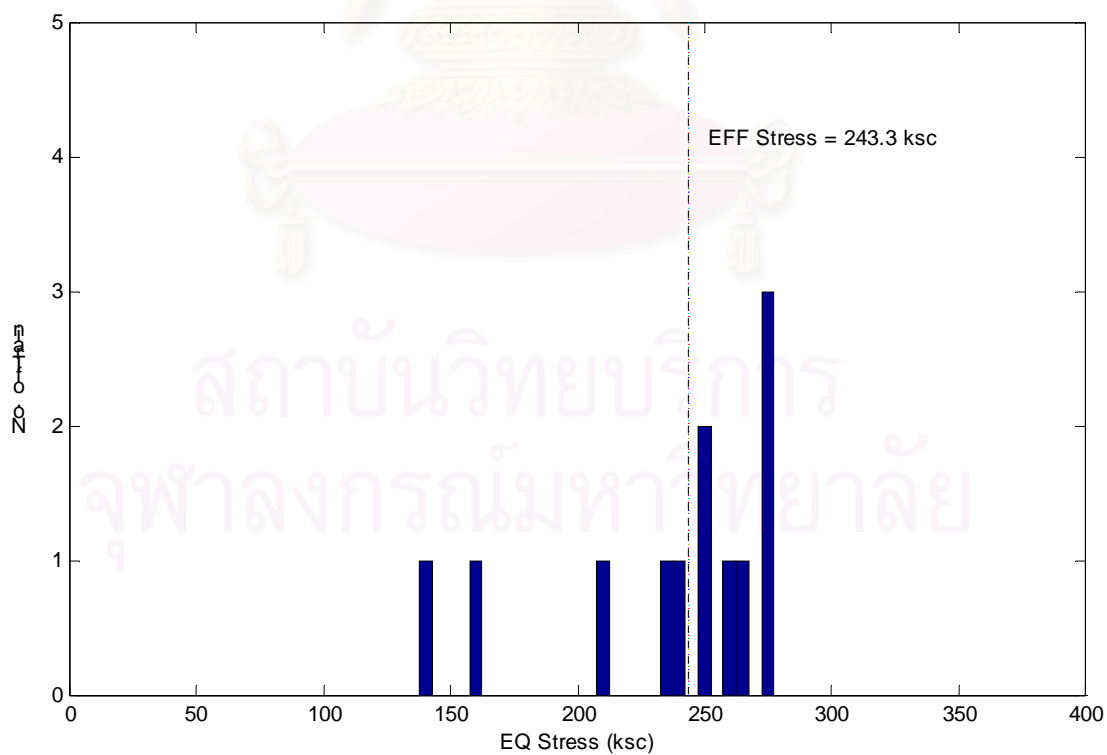
รูปที่ ๙-5 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2133



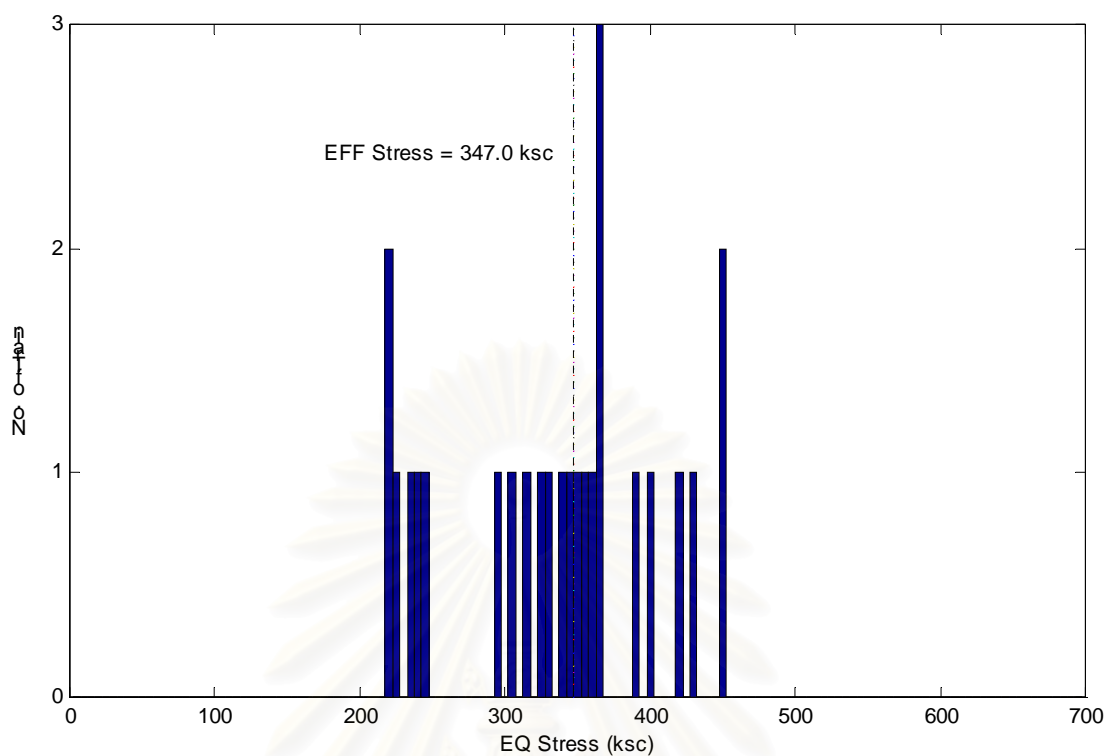
รูปที่ ๙-6 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2133



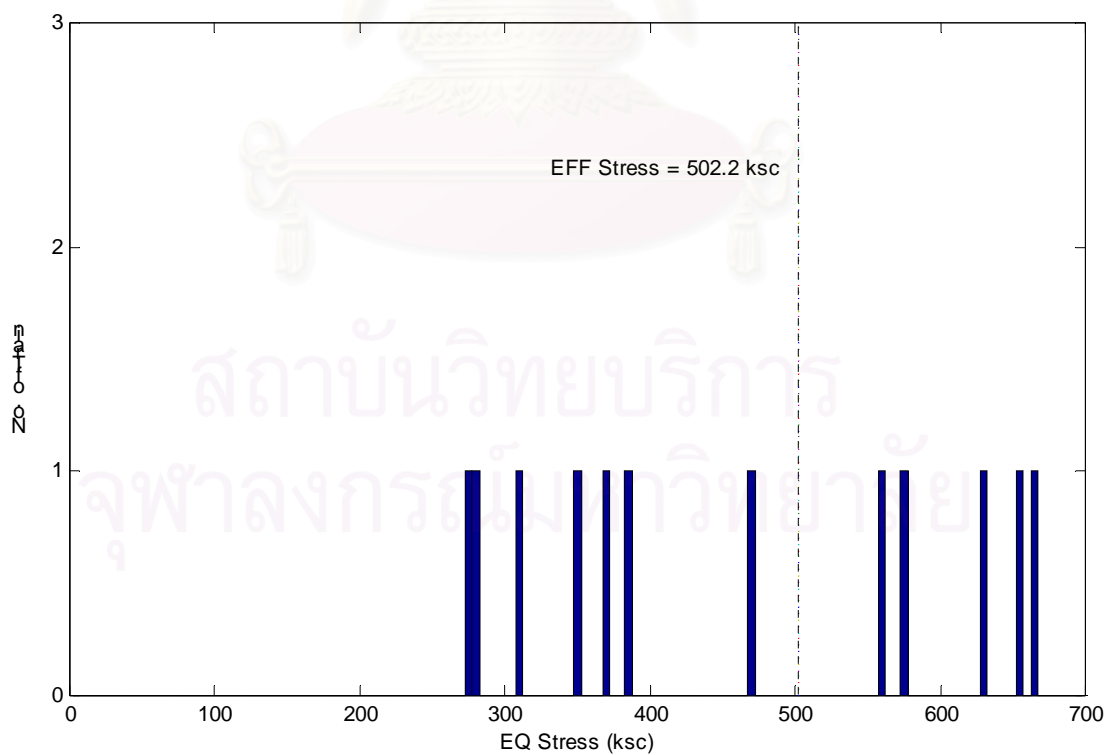
รูปที่ ๑-๗ แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2143



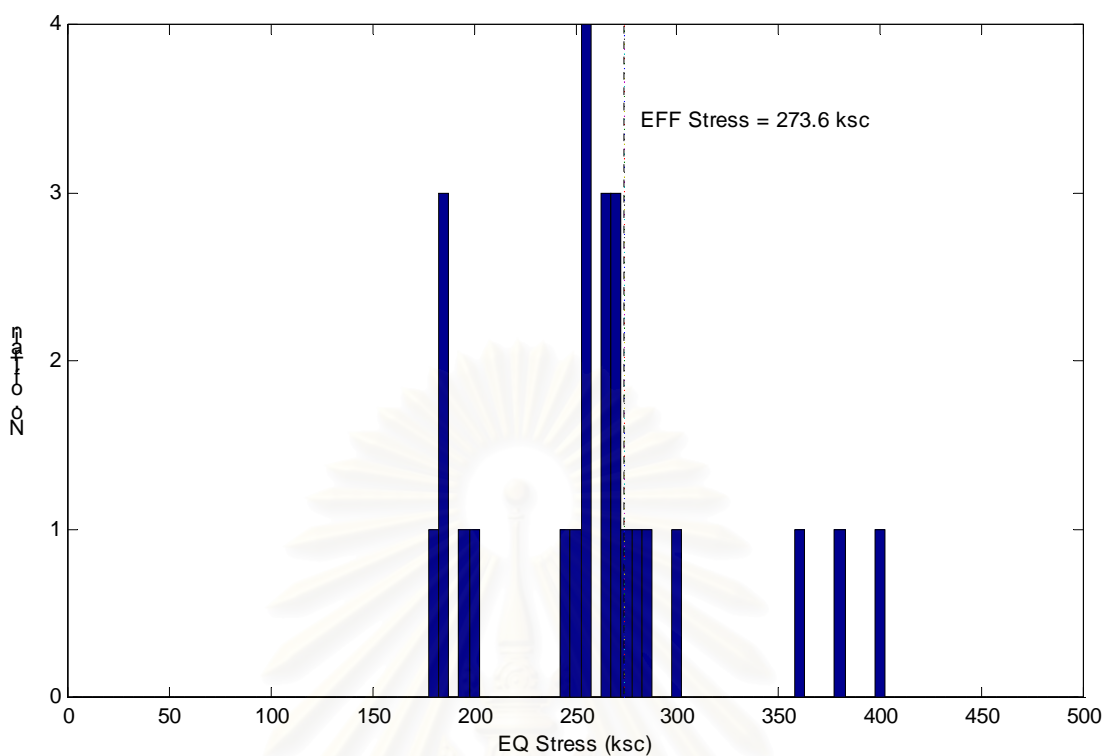
รูปที่ ๑-๘ แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2143



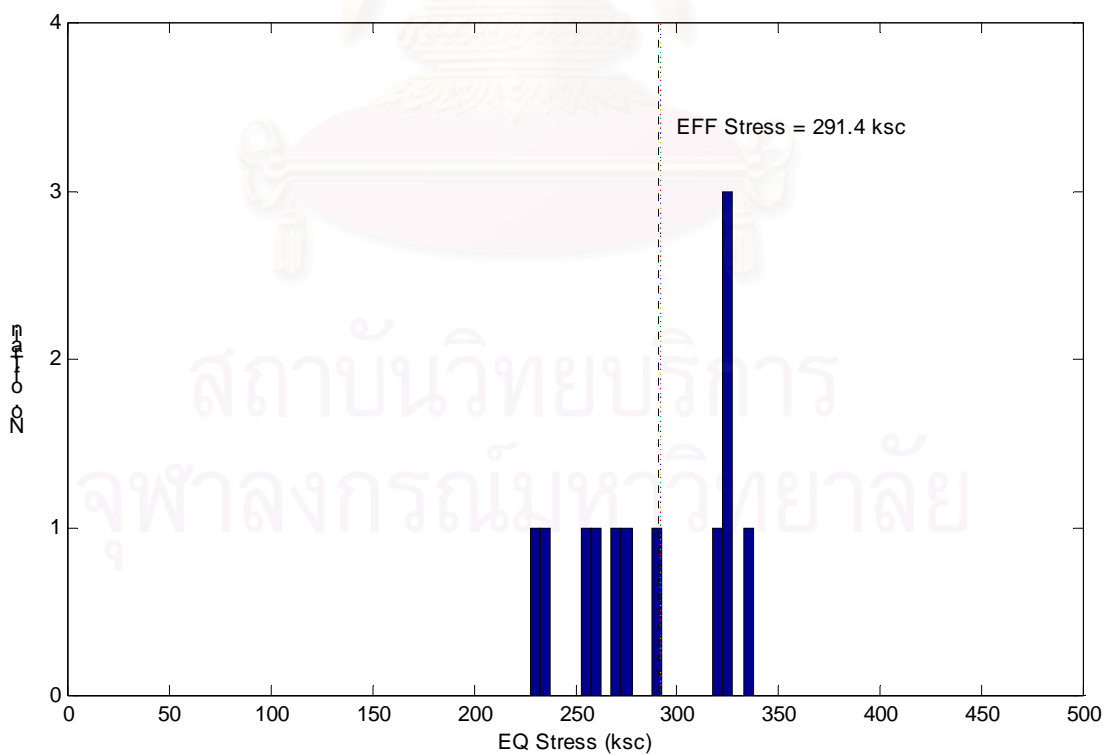
รูปที่ ๙-๙ แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2403



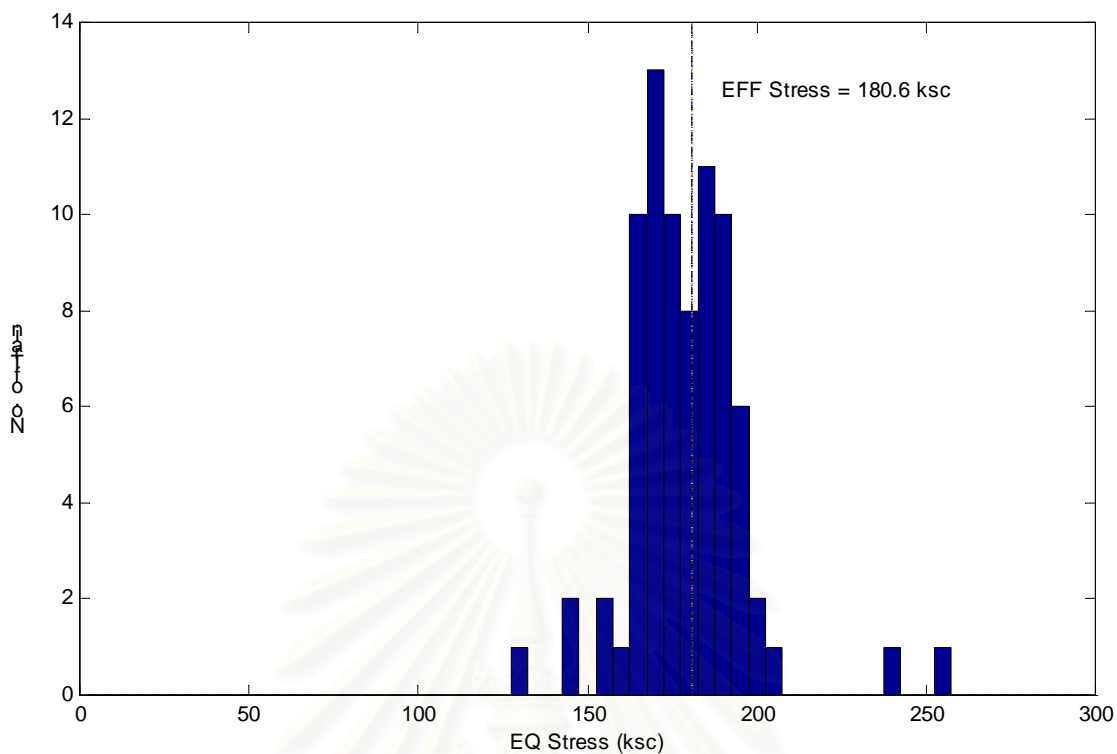
รูปที่ ๙-๑๐ แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2403



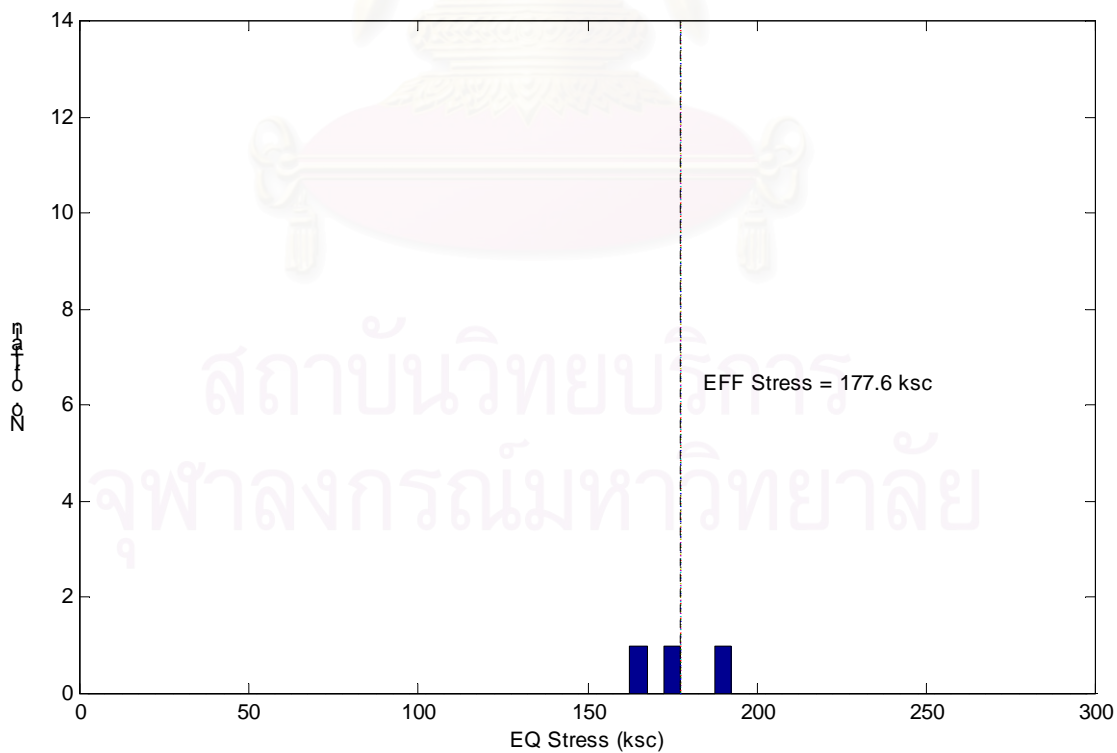
รูปที่ ๑-11 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2514



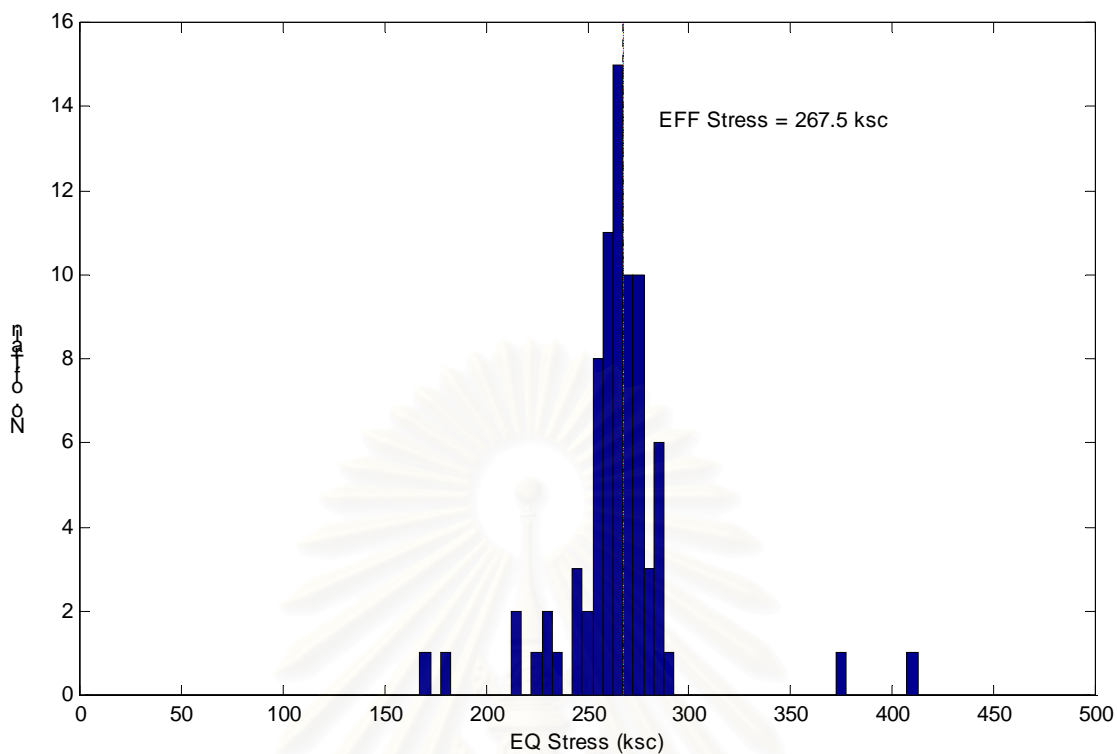
รูปที่ ๑-12 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานจักรีในชั้นส่วน 2514



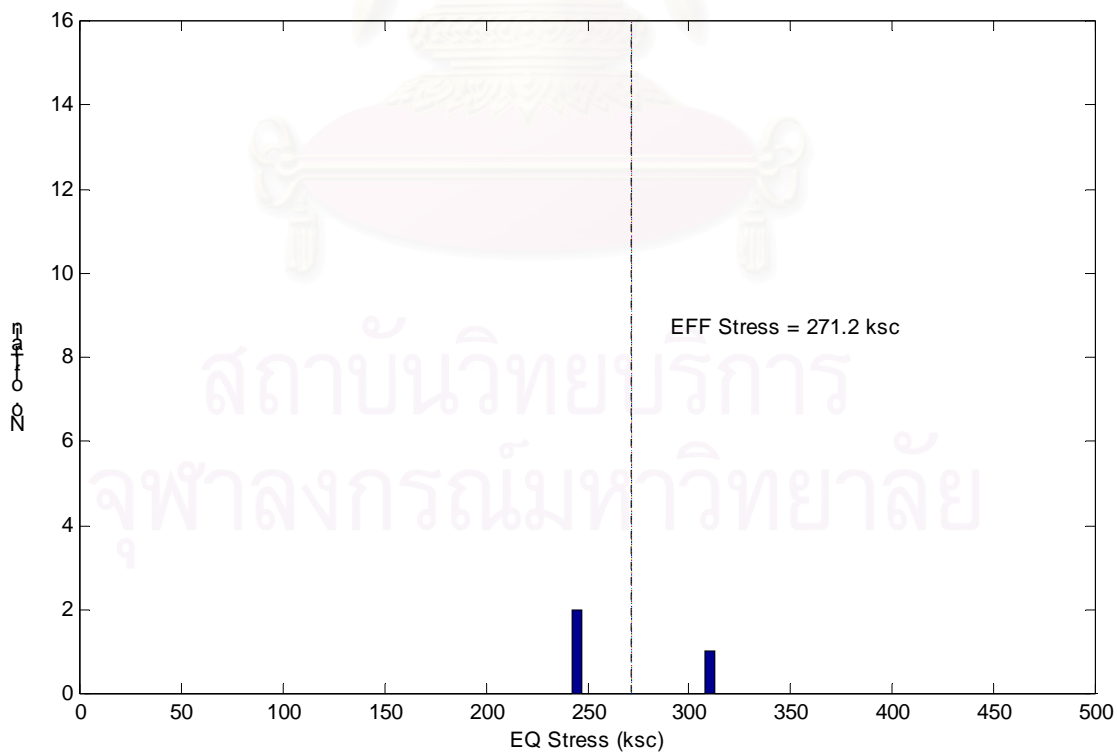
รูปที่ ๑-13 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12105



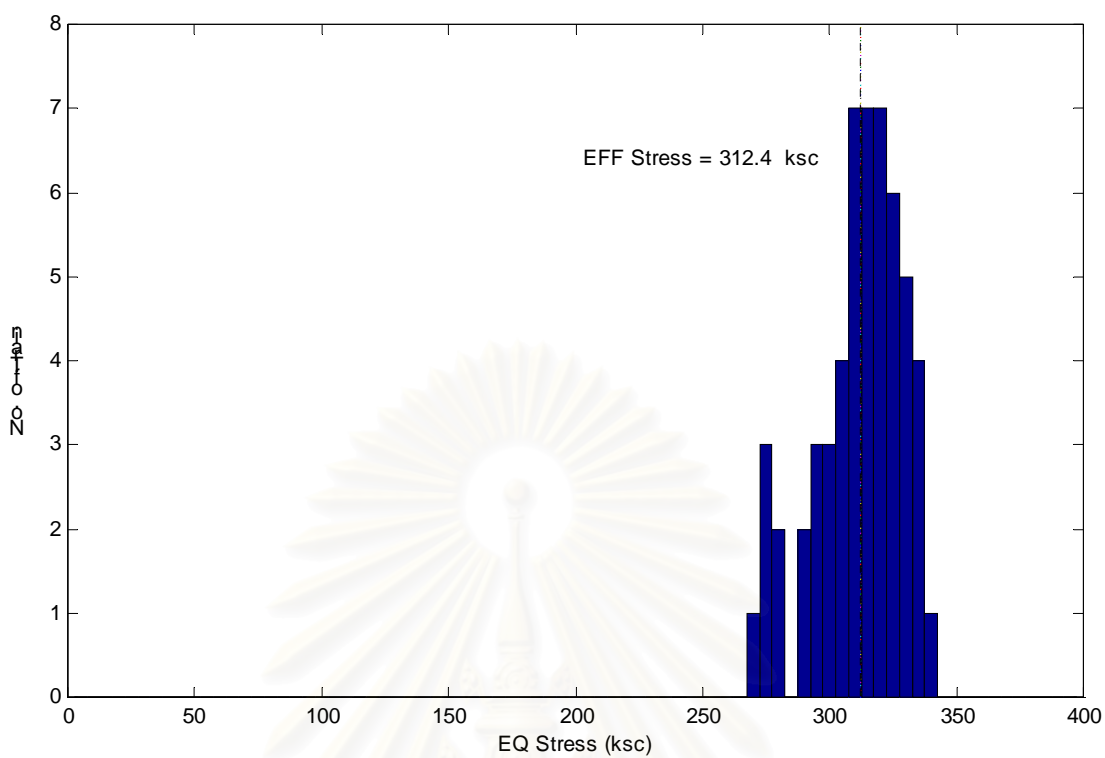
รูปที่ ๑-14 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12105



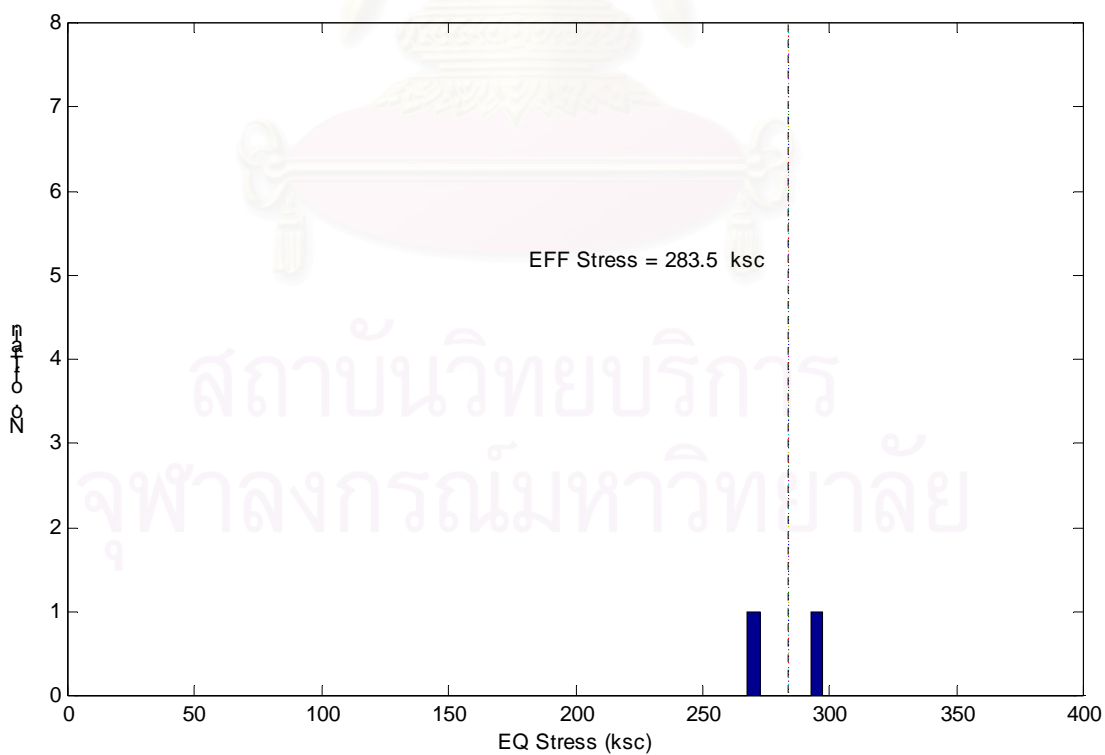
รูปที่ ๑-15 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12116



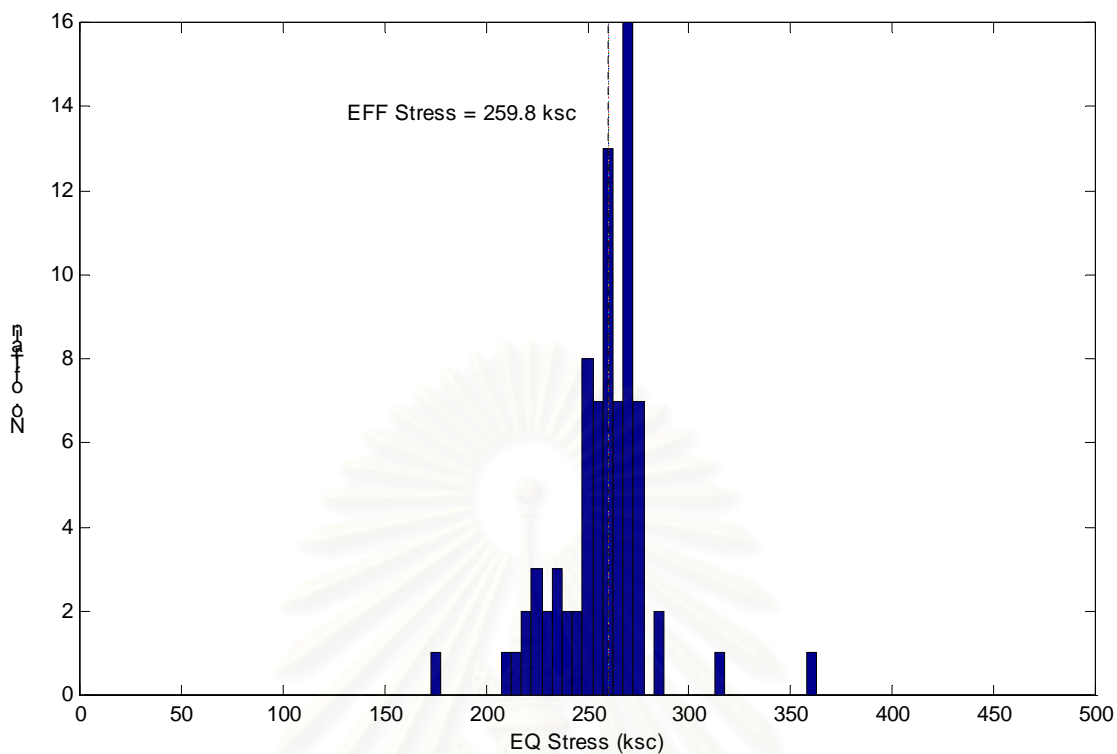
รูปที่ ๑-16 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12116



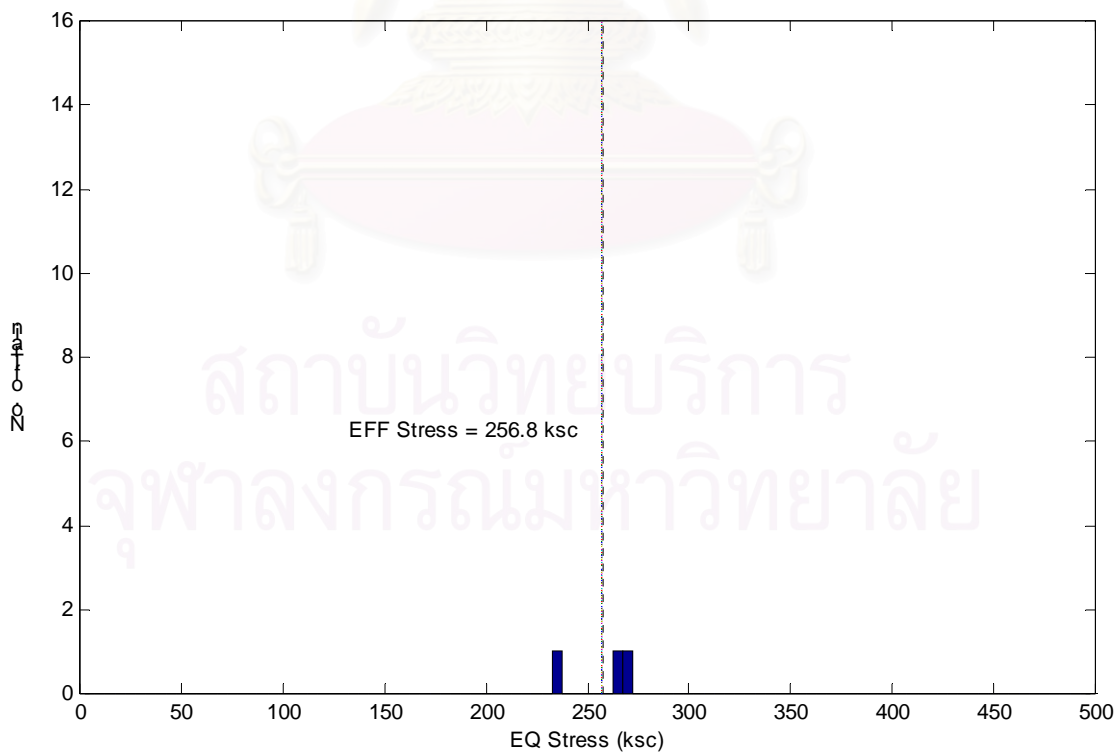
รูปที่ จ-17 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12123



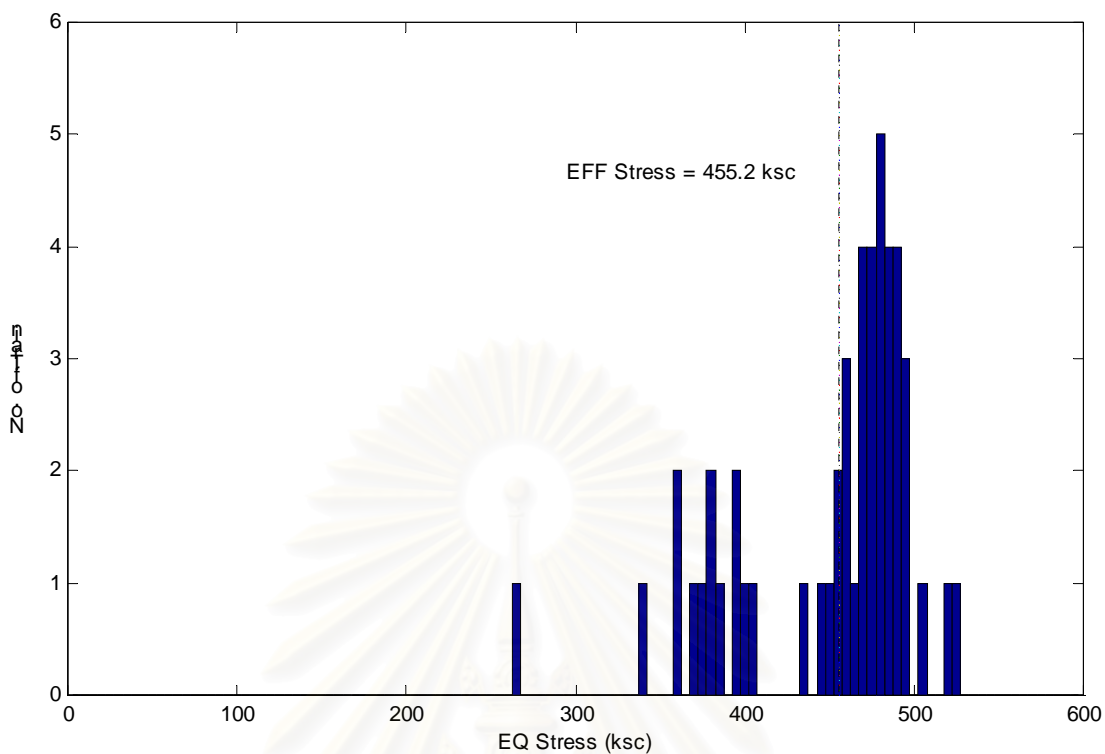
รูปที่ จ-18 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12123



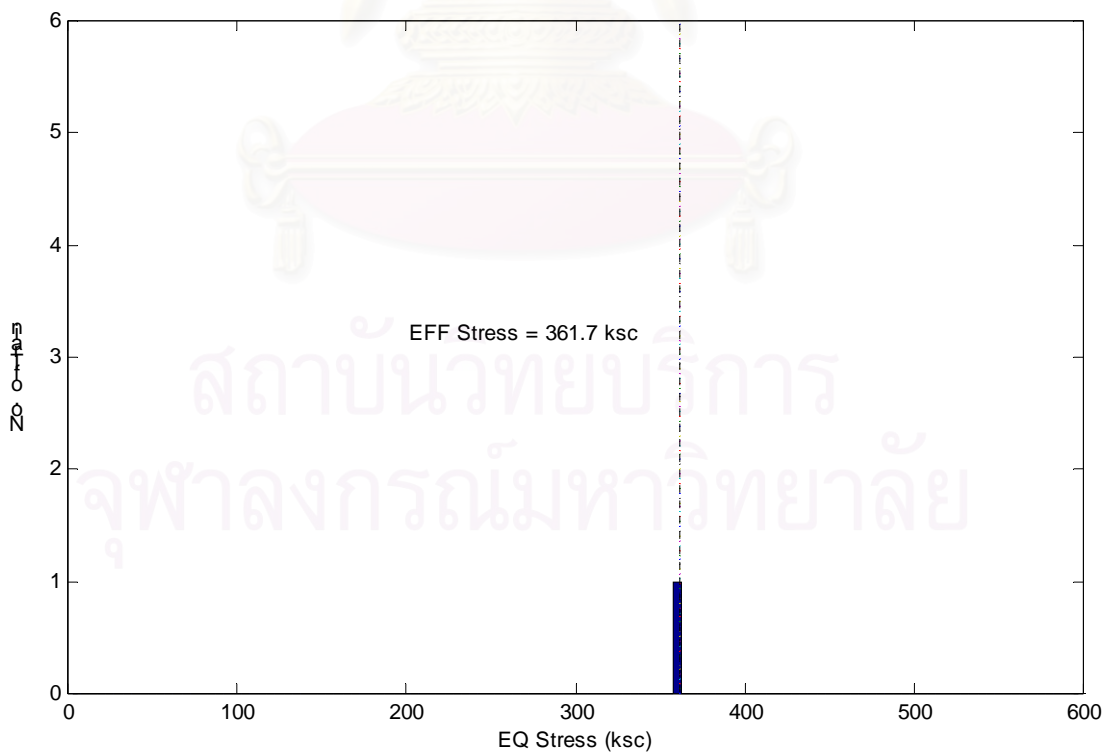
รูปที่ ๑-19 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12142



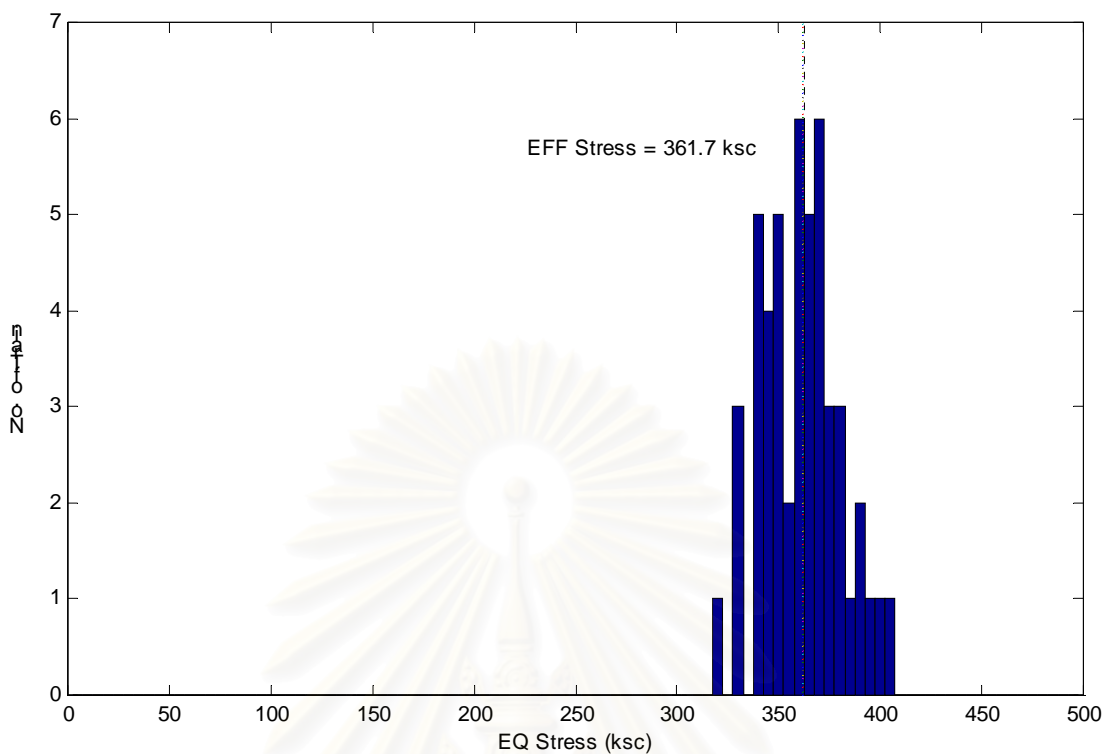
รูปที่ ๑-20 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12142



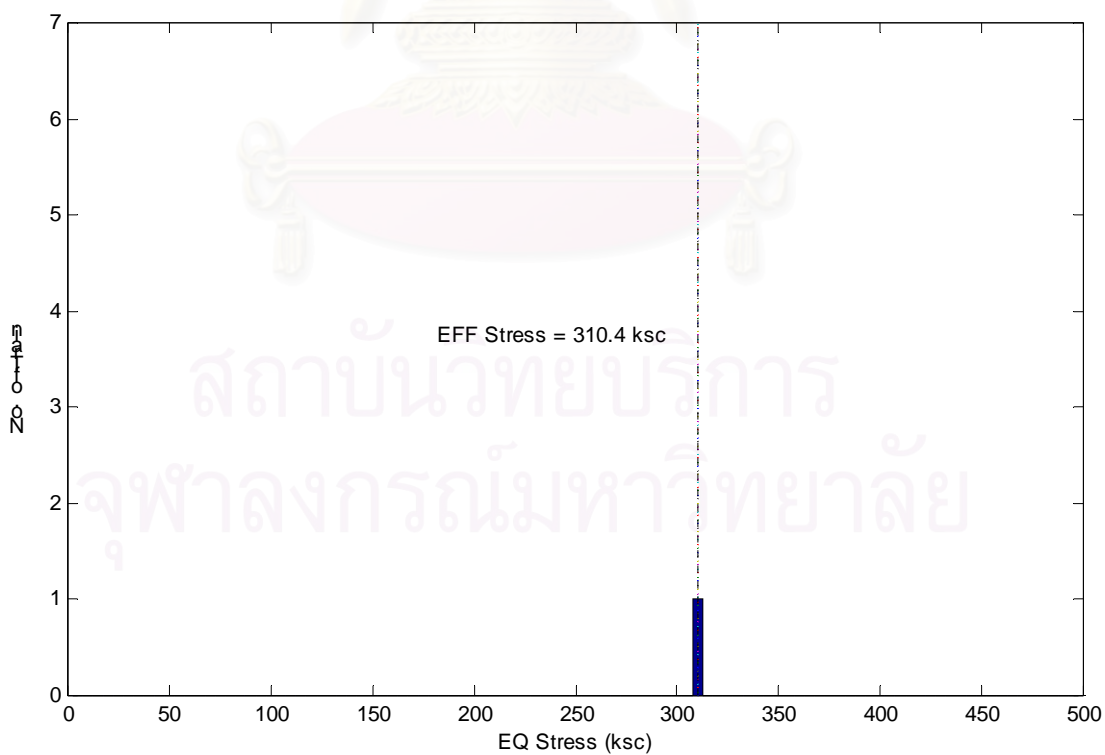
รูปที่ ๑-21 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12404



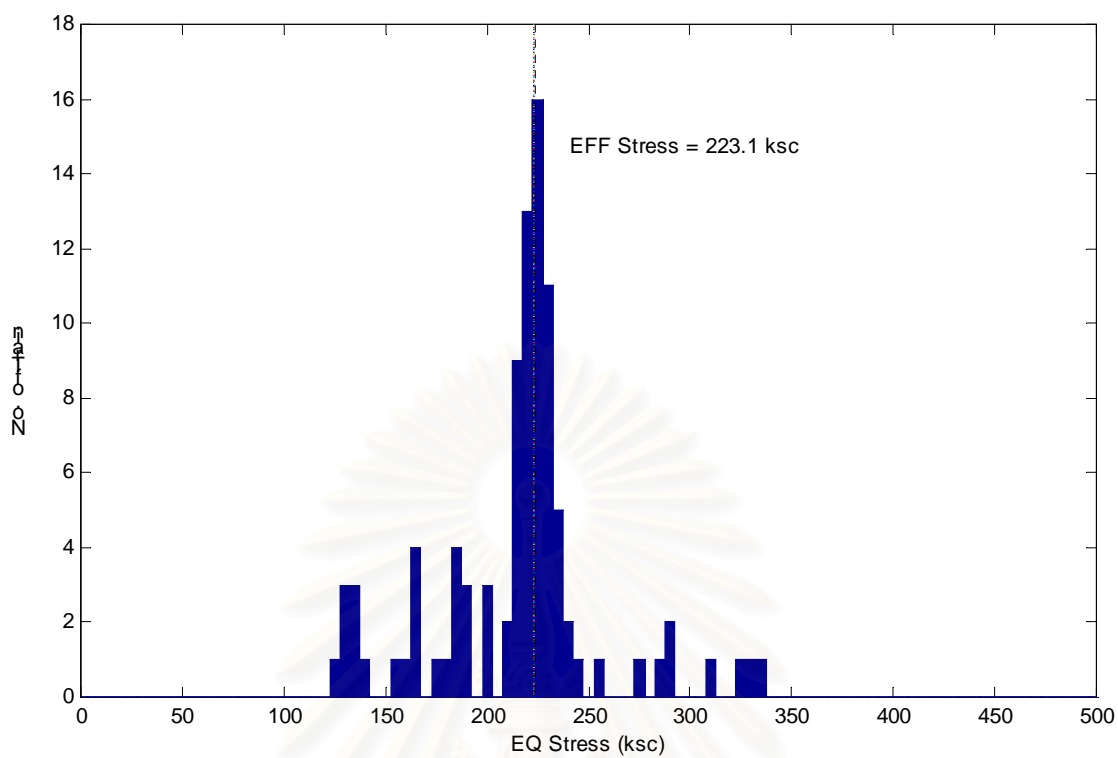
รูปที่ ๑-22 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12404



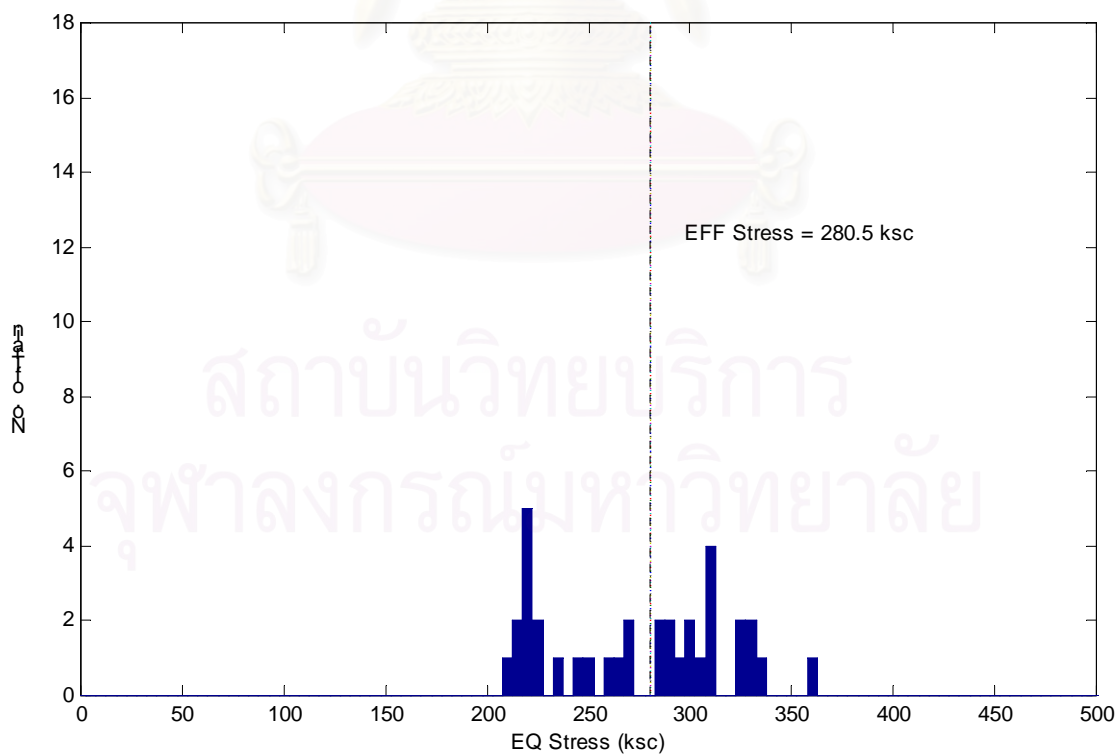
รูปที่ ๙-23 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12514



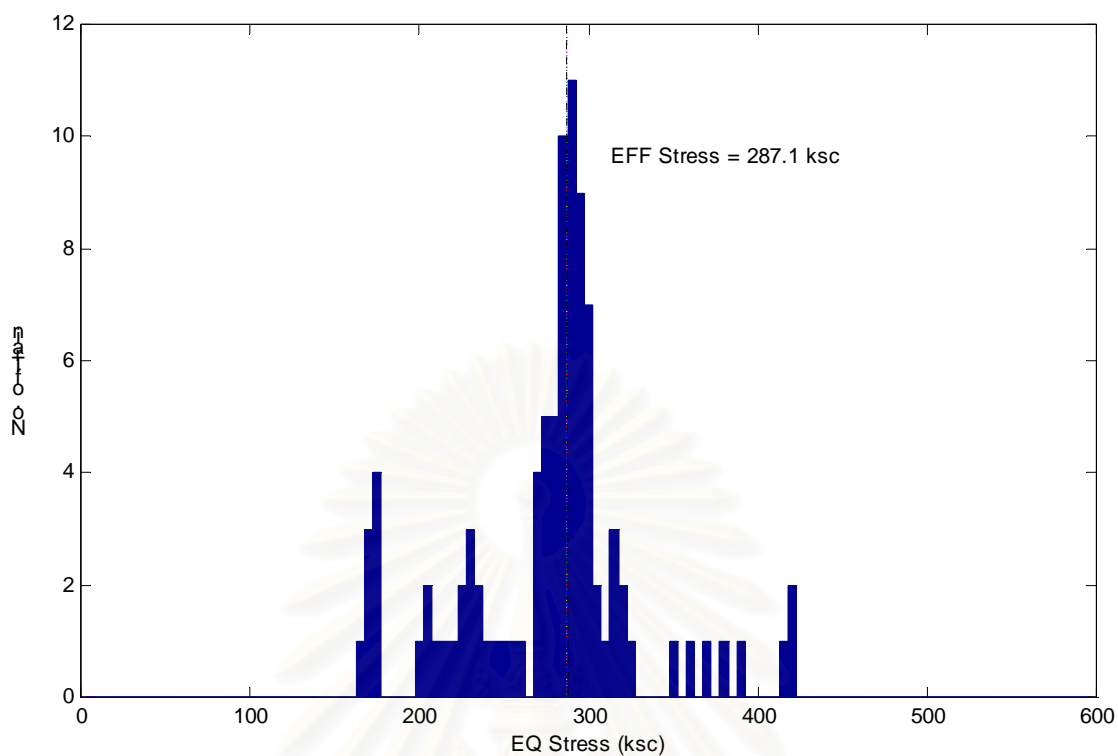
รูปที่ ๙-24 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.03 ในชิ้นส่วน 12514



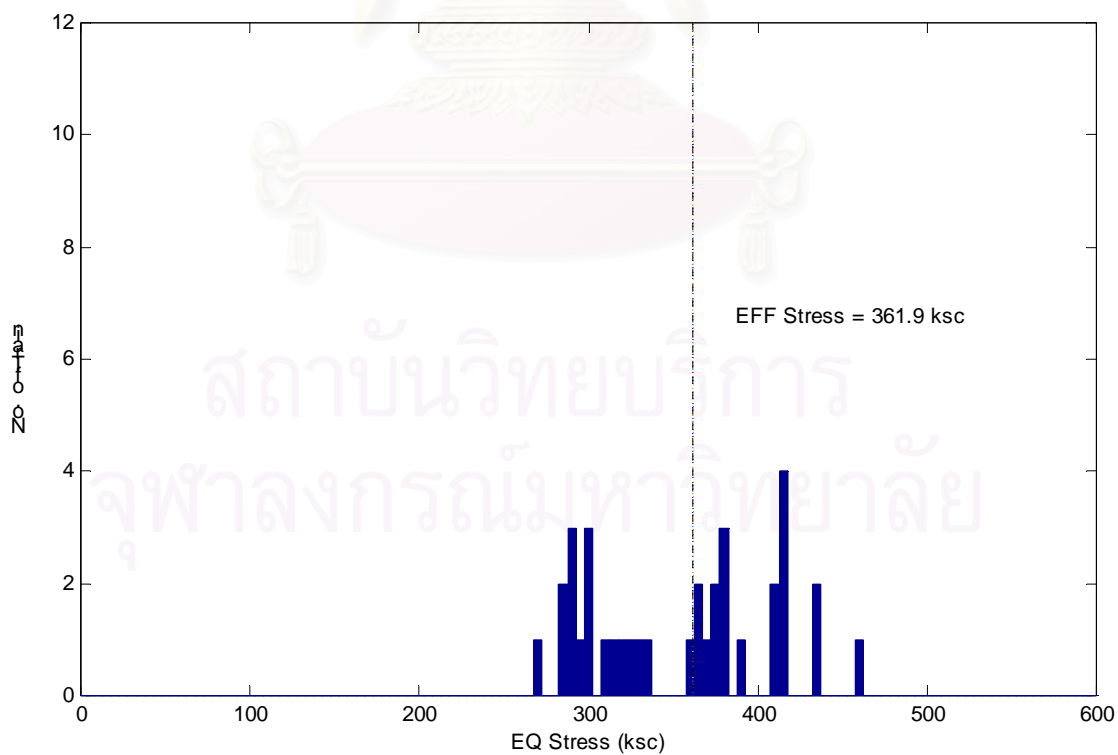
รูปที่ ๑-25 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22109



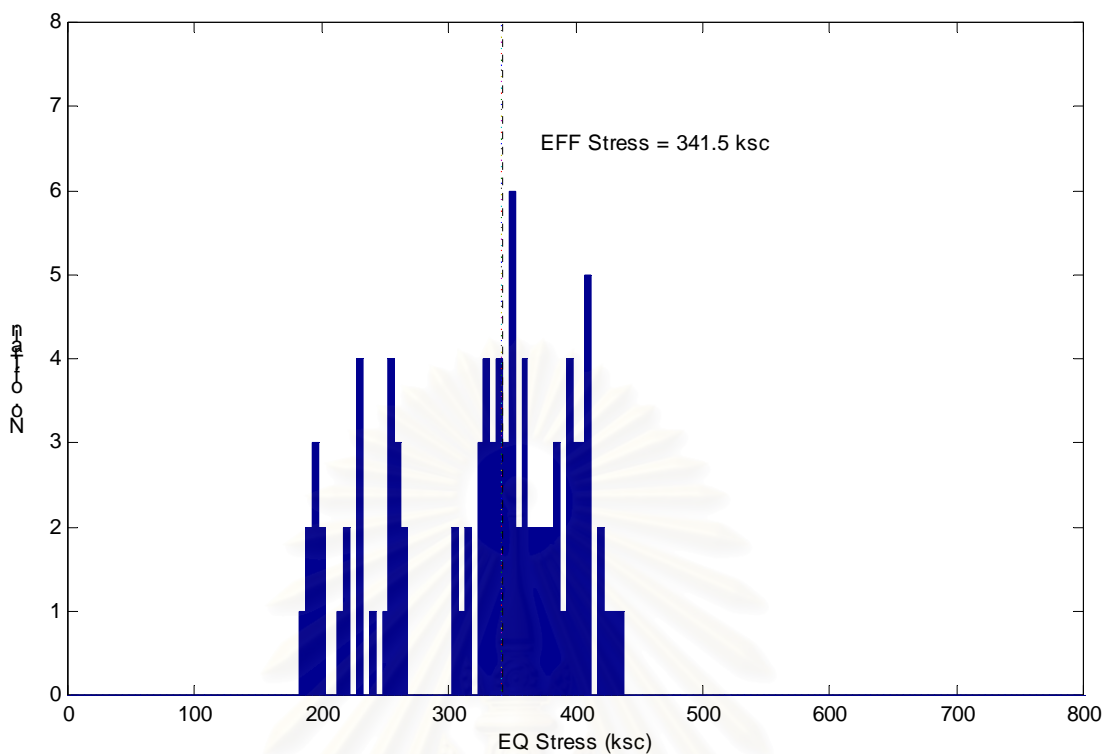
รูปที่ ๑-26 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22109



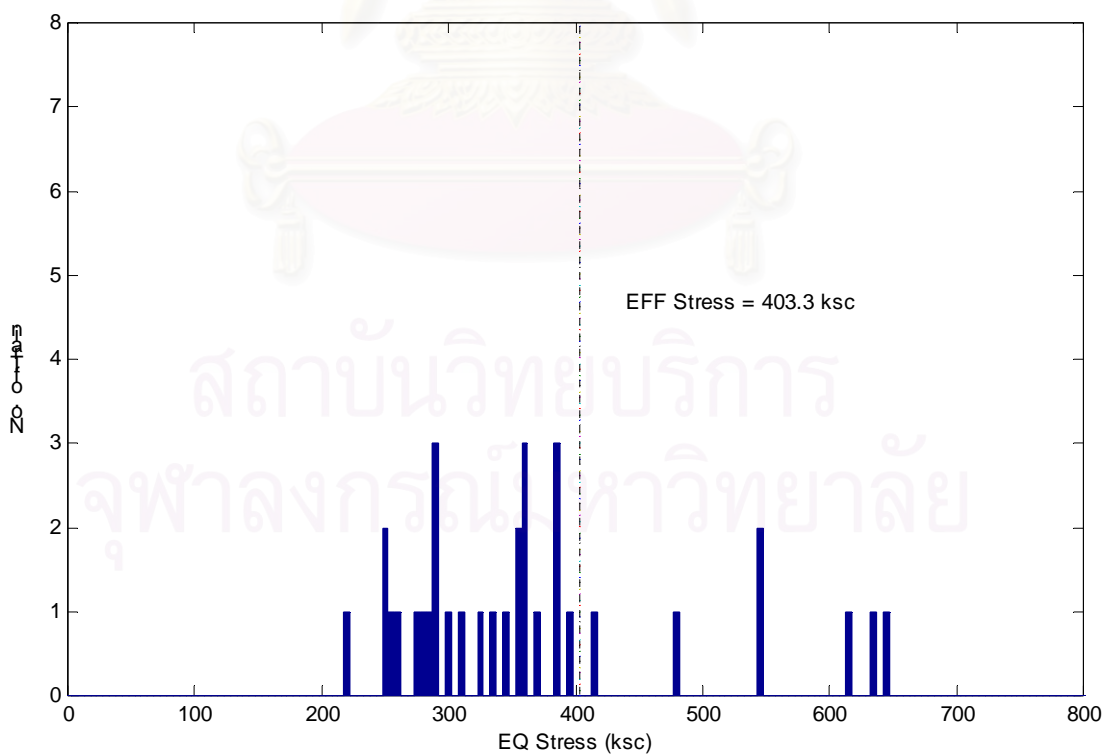
รูปที่ ๙-๒๗ แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22127



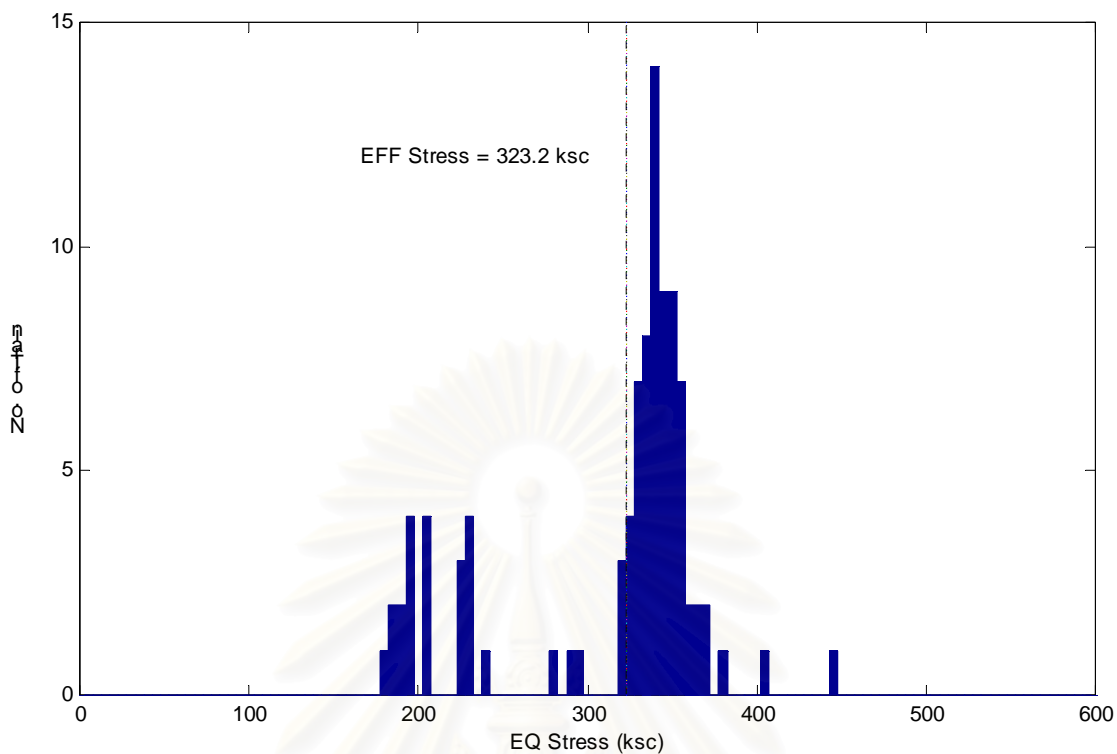
รูปที่ ๙-๒๘ แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22127



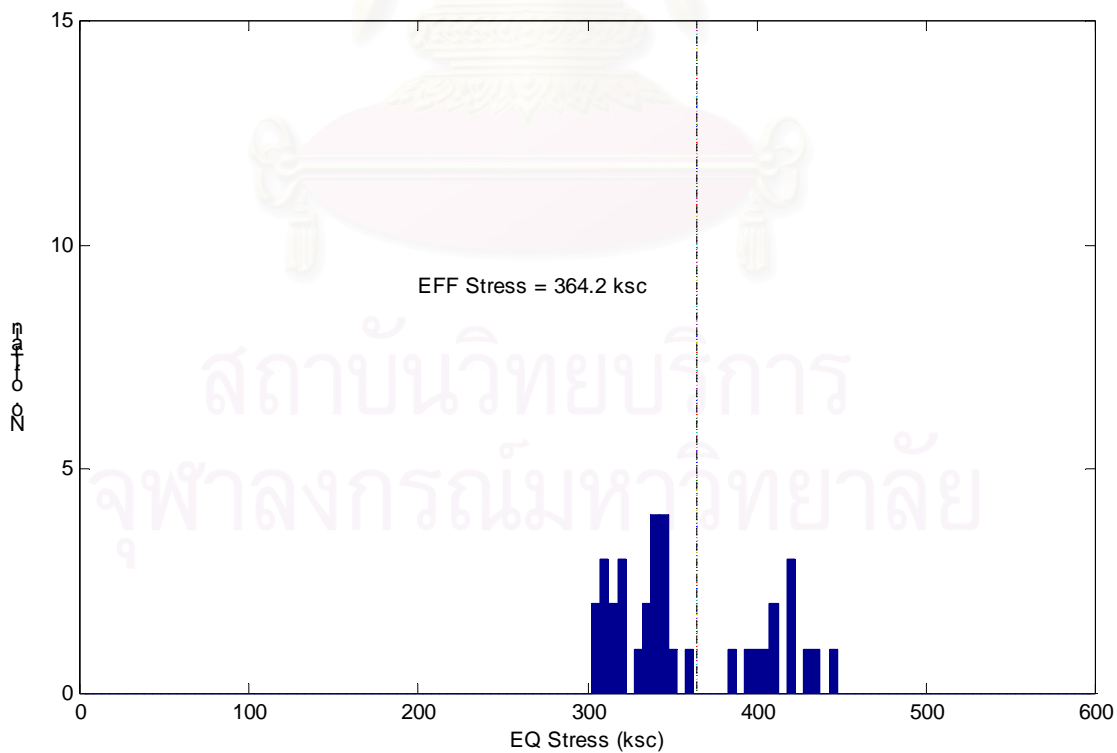
รูปที่ จ-29 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22141



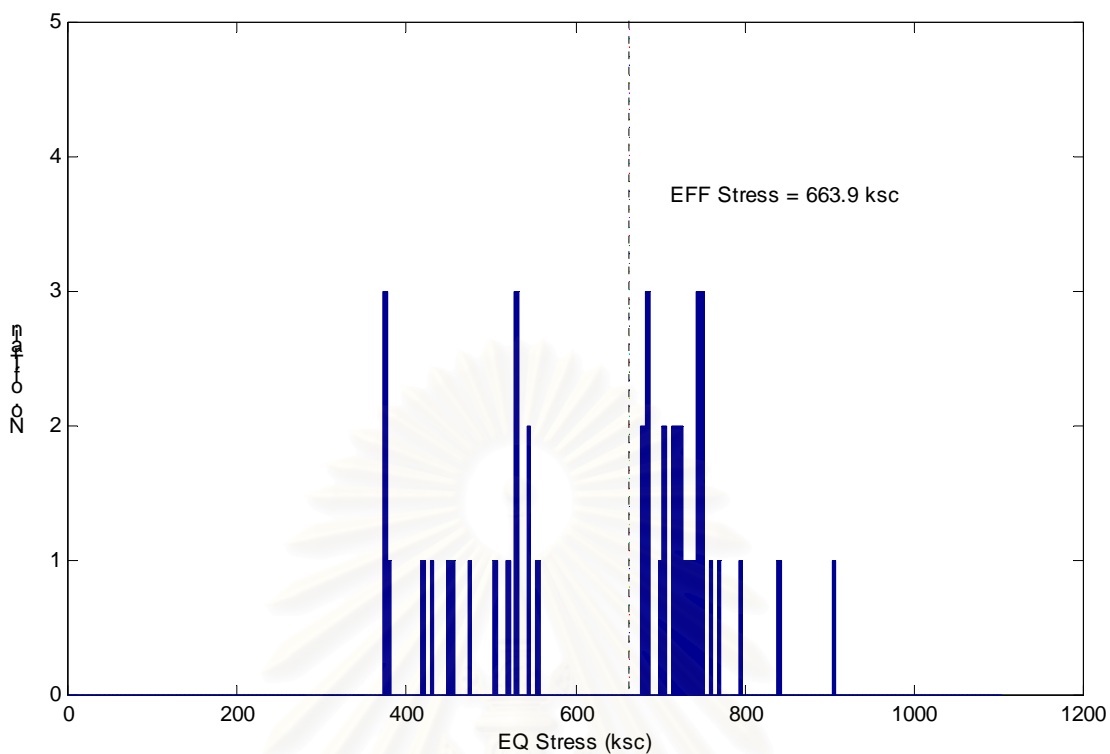
รูปที่ จ-30 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.19 ในชิ้นส่วน 22141



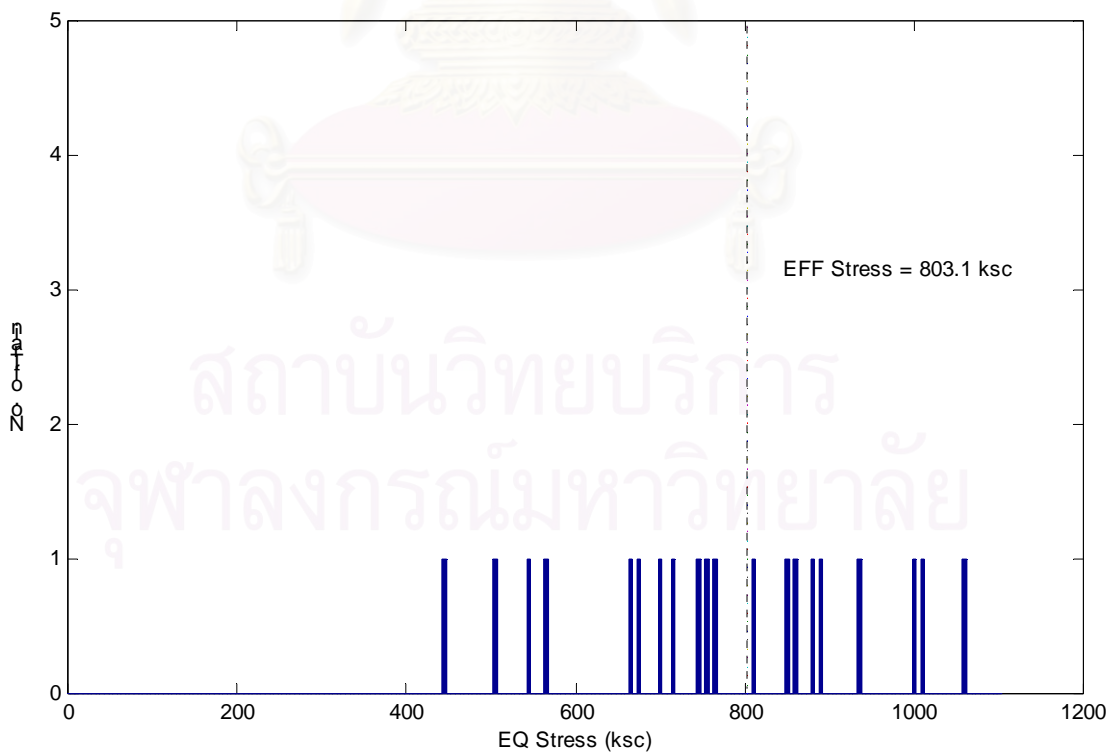
รูปที่ ๑-31 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.19 ในชั้นส่วน 22153



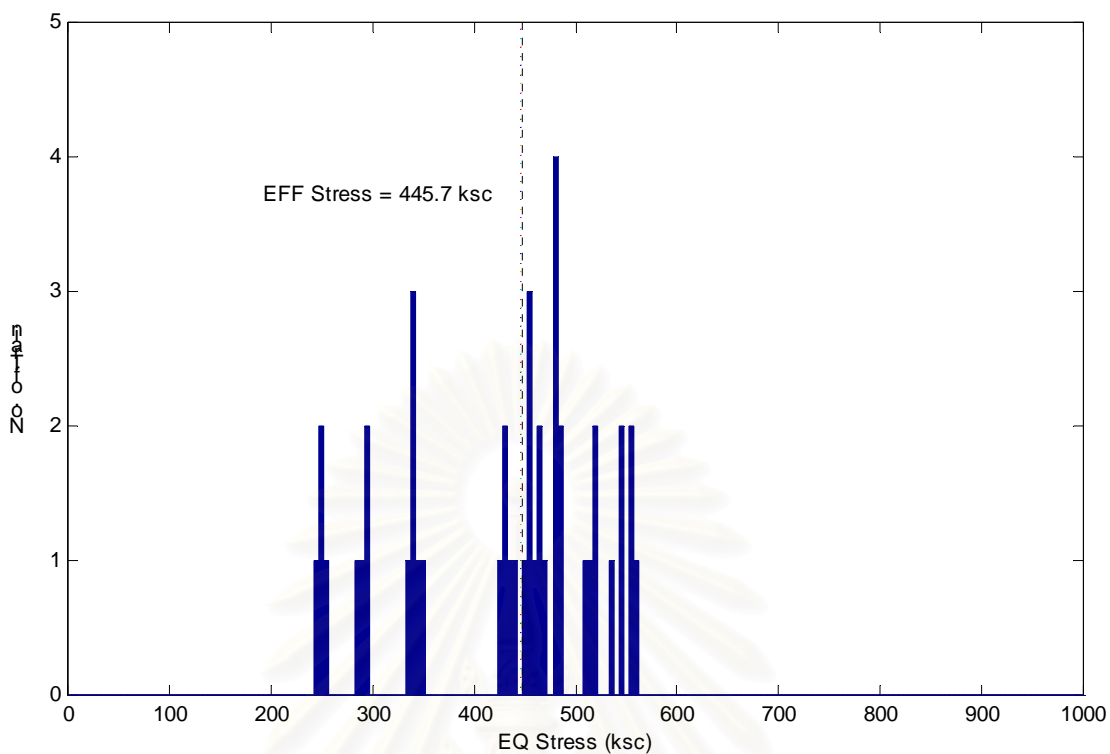
รูปที่ ๑-32 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.19 ในชั้นส่วน 22153



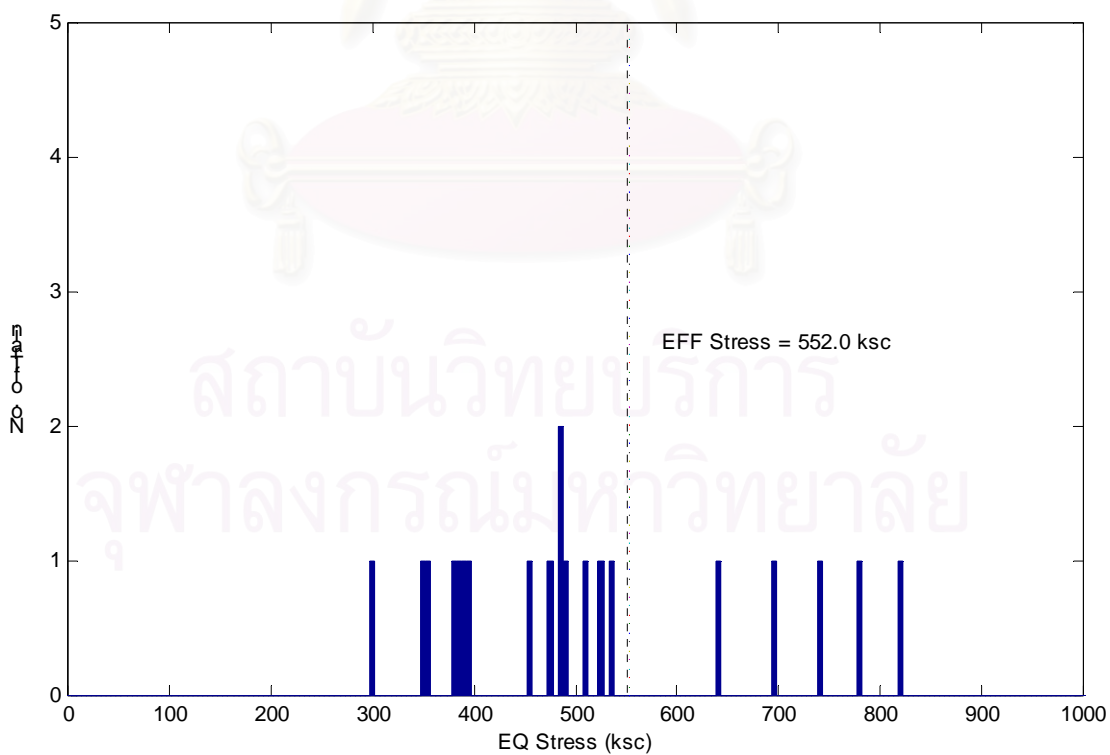
รูปที่ จ-33 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.19 ในชั้นส่วน 22309



รูปที่ จ-34 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.19 ในชั้นส่วน 22309



รูปที่ ๙-35 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟโดยสารผ่านสะพานกม.19 ในชั้นส่วน 22548



รูปที่ ๙-36 แสดงฮิสโทแกรมค่าความเค้นเทียบเท่าของรถไฟบรรทุกผ่านสะพานกม.19 ในชั้นส่วน 22548

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วีระชัย ดีสมสุข เกิดเมื่อวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้ารับการศึกษา ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนจินตมณี จากนั้นได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเทพศิรินทร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย