

การวิเคราะห์พฤติกรรมการบิดของสะพานเหล็กข้ามแยกในกรุงเทพมหานคร

นายสรายุทธ เกิดพิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ANALYSIS OF DISTORTIONAL BEHAVIORS OF FLYOVER STEEL BRIDGES
IN BANGKOK

Mr. Sarayuth Girdpituks

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์พฤติกรรมการบิดขของสะพานเหล็กข้ามแยกใน กรุงเทพมหานคร
โดย	นายสรายุทธ เกิดพิทักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉิมไชย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรรณ)

สรายุทธ เกิดพิทักษ์ : การวิเคราะห์พฤติกรรมการบิดของสะพานเหล็กข้ามแยกใน
กรุงเทพมหานคร. (ANALYSIS OF DISTORTIONAL BEHAVIORS OF FLYOVER
STEEL BRIDGES IN BANGKOK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.อัศววัชร
เล่นวารี, 219 หน้า.

การวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการบิดของสะพานเหล็กข้ามแยกใน
กรุงเทพมหานครด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์สะพาน 2 รูปแบบ ได้แก่
โครงสร้างส่วนบนคานเหล็กรูปไอเชิงประกอบ คือสะพานข้ามแยกประชานุกูล ที่มีความยาว
ช่วงเท่ากับ 25 เมตร และ 2 ช่องทางจราจร และสะพานที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบ
และระบบแผ่นพื้นอออร์ทอโทรปิค คือสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 35
เมตร และ 2 ช่องทางจราจร โดยศึกษาถึงผลกระทบของรถบรรทุกในประเทศไทย 10 ประเภท
และรถบรรทุกของ AASHTO ที่มีต่อพฤติกรรมการบิดของสะพาน อันประกอบไปด้วย การ
กระจายน้ำหนักทางขวาง การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียง และหน่วยแรงในแผ่นเอว
เนื่องจากการบิดนอกระนาบ จากการศึกษาพบว่า 1. ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางไม่
ขึ้นอยู่กับประเภทของรถบรรทุก 2. ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางโดยสมการของ
AASHTO LRFD 2007 มีความเหมาะสมในการออกแบบสะพานข้ามแยกในกรุงเทพมหานคร
3. การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียงกัน กรณีรถบรรทุก 1 คัน สูงกว่ากรณีรถบรรทุก 2
คัน และ 4. หน่วยแรงดึงในแผ่นเอวของคานเหล็กเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดภายใต้
รถบรรทุกในทุกประเภทมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดความล้าสำหรับรอยเชื่อมประเภท C ทั้ง 2
รูปแบบสะพาน โดยคานวิกฤติและรถบรรทุกวิกฤติ คือ คานตัวริมนอก และรถบรรทุกประเภท
ที่ 10 (รถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ) ตามลำดับ สำหรับแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล และ
สำหรับแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง คานวิกฤติและรถบรรทุกวิกฤติ คือ คานตัวริมใน
และรถบรรทุกประเภทที่ 8 (รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ) ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2554.....

5270641321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : FINITE ELEMENT / LATERAL LOAD DISTRIBUTION/ DISTORTION-INDUCED FATIGUE/ STEEL BRIDGE / HEAVY TRUCK

SARAYUTH GIRDPITUKS : ANALYSIS OF DISTORTIONAL BEHAVIORS OF FLYOVER STEEL BRIDGES IN BANGKOK. ADVISOR : ASSOC. PROF.

AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., 219 pp.

This research performs a finite element analysis of distortional behaviors of flyover steel bridges in Bangkok. Two types of superstructures are chosen. The first type is the composite steel I-girder superstructure of Prachanukul bridge having a span length of 25 m and two lanes. The second type is the orthotropic steel plate – girder superstructure of Wongsawang bridge having a span length of 35 m and two lanes. The effect of ten Thai truck types and AASHTO truck on the distortion behaviors including the lateral load distribution, relative deflection between adjacent girders and out-of-plane distortion-induced stress are studied. The results show that 1. the lateral load distribution factor is not dependent on the truck type. 2. the lateral load distribution factor by AASHTO LRFD 2007 equation seems to be appropriate for the design. 3. The relative deflection between adjacent girders is larger in case of one truck loading than two truck loading and 4. the out-of-plane distortion - induced tensile stress in the web gap due to all truck types is lower than fatigue threshold of category C for both superstructure types. For Prachanukul bridge, the critical girder is the exterior girder and the critical truck is truck type no. 10 (22 - wheel trailer), respectively. For Wongsawang bridge, the critical girder is the interior girder and the critical truck is truck type no. 8 (10 – wheel semi-trailer).

Department : CIVIL ENGINEERING..... Student's Signature

Field of Study : CIVIL ENGINEERING..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณแม่เพียว เกิดพิทักษ์ และคุณพ่ออ้วน เกิดพิทักษ์ ที่ให้กำเนิดข้าพเจ้าและเลี้ยงดูข้าพเจ้าเป็นอย่างดีถึงแม้ว่าคุณพ่อและคุณแม่จะมีรายได้น้อยรับราชการอยู่ในกองทัพอากาศ ตำแหน่งลูกจ้างประจำ จบการศึกษาแค่ ป.4 และ ป.7 เนื่องจากเกิดอยู่ในครอบครัวที่ยากจน แต่สิ่งนั้นเป็นแรงจูงใจอันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้ เพื่อให้สำเร็จลุล่วงไปได้เพื่อเป็นเกียรติประวัติแก่วงศ์ตระกูลที่มีข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและระดับปริญญาโทเป็นคนแรกในวงศ์ตระกูล ความสำเร็จนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้เลยถ้าไม่มีรองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวาริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ประสิทธิประสาทความรู้ ให้คำปรึกษาและเสียสละเวลาอันมีค่าให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าในการทำงานวิจัยนี้สำเร็จได้, ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติ ที่ได้ให้ความกรุณาว่าเป็นประธานของคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉมิไชย ที่ได้ให้ความกรุณาว่าเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิจพัฒน์ ภูววรรณ ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ท่านเหล่านี้ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆ ด้วยดีตลอดมาทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์และถูกต้องยิ่งขึ้น

นอกจากบุคคลที่ได้กล่าวในข้างต้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายไพโรจน์ วัชมานันท์ เป็นบุคคลสำคัญที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้าในการปรึกษาวิชาเรียนและให้คำแนะนำในงานวิจัยอย่างดีเสมอมา, คุณชัชวาลย์ สวณะเกษม, คุณวศิพล บุญเกียรติ และคุณสมชาย วิกิจไพศาล ที่ได้โอกาสให้ข้าพเจ้าเป็นส่วนหนึ่งของทีมสอนของโรงเรียนกวดวิชาสุวิชัย (etc) ทำให้ข้าพเจ้าได้มีทุนในการศึกษาปริญญาโท, ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน่วยงานกรมทางหลวง, ดร.ชาติ เลิศสิมา, คุณปิยะลักษณ์ วันทนาศิริ, คุณอนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ, คุณกานต์ คัลยาณี, คุณทศพล แก้วนุชดาสร, คุณปทุมรัตน์ ทักษะเศรณี, คุณเอกวิทย์ ชันแก้ว, คุณณัฐภรณ์ นิมิตฤทธิ, คุณสิรินันท์ อยู่อยู่, คุณเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง, คุณพัฒนพงศ์ วงศ์เสียงดัง, คุณทศพร ประเสริฐศรี และคุณชัชณพพงศ์ สุธรรมมะ ที่ได้ช่วยเหลือข้าพเจ้าในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและตลอดการศึกษาปริญญาโทของข้าพเจ้า ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยและประเทศชาติในต่อไปไม่มากก็น้อยและขอผลบุญนี้จงส่งผลให้แก่บุคคลที่ข้าพเจ้าได้กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นรวมทั้งบุคคลที่ช่วยเหลือข้าพเจ้าแต่ไม่ได้กล่าวถึง และญาติทั้งหลายของข้าพเจ้าที่ล่วงลับไปแล้วและยังมีชีวิตอยู่ จงได้รับส่วนบุญจากผลบุญอันนี้ให้ท่านทั้งหลายมีความสุขกาย สุขใจ และความเจริญตลอดกาลเทอญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	6
1.5 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย	7
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ความล้มเหลวเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็ก	8
2.2 การกระจายน้ำหนักทางขวาง	19
2.3 แบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	27
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	35
3.1 ความล้ม	35
3.2 ความล้มเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็ก	36
3.3 การประเมินอายุความล้มเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็กตามข้อกำหนด AASHTO	38
3.4 ชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	42
3.4.1 ชิ้นส่วนคาน	42

3.4.2	ชิ้นส่วนแผ่นโค้ง	43
3.4.2.1	ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยม	44
3.4.2.2	ชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยม	44
3.5	การแสดงผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SAP 2000	45
3.5.1	การแสดงผลของชิ้นส่วนคาน	45
3.5.2	การแสดงผลของชิ้นส่วนแผ่นโค้ง	46
3.6	การคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ...	48
3.6.1	ความกว้างประสิทธิผล	49
3.6.2	ค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบ	50
3.6.2.1	ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนคาน	50
3.6.2.2	ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนแผ่นพื้น	51
3.6.2.3	ค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกน	51
3.6.3	ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ	52
3.7	การคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการของ AASHTO	54
3.8	การคำนวณหน่วยแรงบริเวณ web gap	56
บทที่ 4	แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	58
4.1	แนวทางการสร้างแบบจำลองโครงสร้างส่วนบนของสะพาน	58
4.2	รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	59
4.2.1	แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล ช่วง typical span	59
4.2.2	แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ช่วง main span	60
4.2.3	แนวทางและการปรับเทียบแบบจำลอง	61
4.2.4	การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลจากการทดสอบของ สะพานข้ามแยกประชาชนกุล	62
4.2.5	การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลจากการทดสอบของ สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	63
4.3	การสำรวจข้อมูลรถบรรทุกในประเทศไทย	63

4.4	การกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในการวิเคราะห์	64
4.5	การกำหนดตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวางในแบบจำลองสะพาน	65
4.6	การกำหนดตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลองสะพาน	69
4.6.1	การกำหนดตำแหน่งในการอ่านค่าผลโมเมนต์และแรงในแนวแกน ด้วยวิธี section cut	70
4.6.1.1	เมื่อรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งตามแนวยาวตามตำแหน่งที่ทำให้ ให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 เมตร	71
4.6.1.2	เมื่อรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งตามแนวยาวตามทุก 50 เซนติเมตร ตลอดช่วงคาน	74
4.6.2	ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลอง 3 มิติ ที่ให้ค่า โมเมนต์สูงสุด	75
4.7	การสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมในการหาค่าหน่วยแรงบริเวณ web gap	71
4.7.1	การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประจักษ์นุกูล ...	79
4.7.2	การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	81
4.8	ผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยบริเวณ web gap ในแบบจำลอง สะพาน	82
4.8.1	ผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยสำหรับแบบจำลองสะพาน ข้ามแยกประจักษ์นุกูล	83
4.8.2	ผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยสำหรับแบบจำลองสะพาน ข้ามแยกวงศ์สว่าง	88
บทที่ 5	การวิเคราะห์และอภิปรายผลตัวคุณการกระจายน้ำหนักทางขวางของสะพาน .	94
5.1	แบบจำลองสะพานข้ามแยกประจักษ์นุกูล	94
5.1.1	ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ในคาน 1 เมตร	94
5.1.2	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง	95
5.1.3	ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นคอนกรีต	99
5.1.4	ค่าโมเมนต์สูงสุดในหน้าตัดคานวัสดุผสม	103
5.1.5	ตัวคุณกระจายน้ำหนักทางขวาง	117

5.2	แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	111
5.2.1	ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ	111
5.2.2	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง	112
5.2.5	ตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง	121
5.2.3	ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นเหล็ก	116
5.2.4	ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ	119
5.2.5	ตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง	121
บทที่ 6	การวิเคราะห์และอภิปรายผลการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียงของ สะพาน	127
6.1	แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	127
6.1.1	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว	127
6.1.2	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง	131
6.1.3	การโก่งตัวสูงสุดของคาน	133
6.1.4	การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ใกล้เคียง	136
6.2	แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	137
6.2.1	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว	137
6.2.2	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง	137
6.2.3	การโก่งตัวสูงสุดของคาน	141
6.2.4	การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ใกล้เคียง	144
บทที่ 7	การวิเคราะห์และอภิปรายผลหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบในบริเวณ web gap และอายุความล้าของสะพาน	147
7.1	แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	147
7.1.1	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว	148
7.1.2	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง	151
7.1.3	หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน	153
7.1.4	หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap	153

7.1.5 อายุความล่าช้าของสะพาน	155
7.2 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	158
7.2.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว	159
7.2.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง	159
7.2.3 หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน	162
7.2.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap	162
7.2.5 อายุความล่าช้าของสะพาน	164
8.1 สรุปผลการวิจัย	167
8.1.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	167
8.1.1.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และ รถบรรทุกวิกฤติ	167
8.1.1.2 ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง	168
8.1.1.3 การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียง	169
8.1.1.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบและอายุความล่า ช้าของสะพาน	169
8.1.2 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	170
8.1.2.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และ รถบรรทุกวิกฤติ	170
8.1.2.2 ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง	171
8.1.2.3 การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียง	172
8.1.2.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบและอายุความล่า ช้าของสะพาน	172
8.2 ข้อเสนอแนะ	173

รายการอ้างอิง	174
ภาคผนวก	179
ภาคผนวก ก	180
ภาคผนวก ข	183
ภาคผนวก ค	195
ภาคผนวก ง	200
ภาคผนวก จ	205
ภาคผนวก ฉ	208
ภาคผนวก ช	213
ภาคผนวก ซ	216
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	219

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap และค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานาที่ติดกันของเทคนิคเชื่อมแซมต่างๆ (Hassel และคณะ 2010)	18
2.2	ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆ ของสมการ LDF ของ Sotelino และคณะ (2004)	25
3.1	แสดงค่าคงที่ของประเภทรอยเชื่อม (A) และค่าช่วงความเค้นสำหรับแอมพลิจูดของหน่วยแรงคงที่ที่ขีดจำกัดความล้า	40
3.2	แสดงค่า Fraction of truck Traffic ในหนึ่งช่องทางจราจร	41
3.3	แสดงค่าจำนวนรอบของค่าช่วงความเค้นต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุก	42
3.4	แสดงชื่อของหน่วยแรงต่างๆของชิ้นส่วนแบบคานาในโปรแกรม SAP 2000	46
4.1	แสดงข้อมูลน้ำหนักรถบรรทุกและระยะระหว่างเพลตามแนวขวางสูงสุดและต่ำสุดประเภทต่างๆ	64
4.2	แสดงผลของค่าโมเมนต์สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์ในคานาของแบบจำลองสะพานจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. ...	75
4.3	แสดงรายละเอียดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ทั้ง 8 รูปแบบของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	79
4.4	แสดงรายละเอียดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ทั้ง 6 รูปแบบของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	81
5.1	ค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดวัดจากปลายด้านซ้ายของคานาของรถบรรทุกประเภทต่างๆ สำหรับสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	95
5.2	แสดงความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลของแรงในแนวแกนสำหรับสะพานแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	102
5.3	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลทั้ง 3 รูปแบบสำหรับสะพานแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	103
5.4	ค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดวัดจากปลายด้านซ้ายของคานาของรถบรรทุกประเภทต่างๆ สำหรับสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	112

ตารางที่	หน้า
5.5	แสดงความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลของแรงในแนวแกน สำหรับสะพานแบบจำลองข้ามแยกวงศ์สว่าง 119
7.1	แสดงอายุความล้าของสะพานเนื่องจากหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณ ขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน และจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ สูงสุดบริเวณ web gap ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล 157
7.2	แสดงอายุความล้าของสะพานเนื่องจากหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณ ขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน และจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ สูงสุดบริเวณ web gap ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 166
8.1	แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติใน กรณีศึกษาถาวรทุก 1 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล 167
8.2	แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติใน กรณีศึกษาถาวรทุก 2 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล 168
8.3	แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติใน กรณีศึกษาถาวรทุก 1 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 170
8.4	แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติใน กรณีศึกษาถาวรทุก 2 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 171
ผ-1	ข้อมูลรถบรรทุก 6 ล้อ 184
ผ-2	ข้อมูลรถบรรทุก 10 ล้อ 186
ผ-3	ข้อมูลรถบรรทุก 12 ล้อ 187
ผ-4	ข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ 188
ผ-5	ข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ 188
ผ-6	ข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 18 ล้อ 189
ผ-7	ข้อมูลรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 3 เพลา 12 ล้อ .. 191
ผ-8	ข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 20 ล้อ 191
ผ-9	ข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ 192
ผ-10	ข้อมูลรถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ 194
ผ-11	แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G1 ใน กรณีศึกษาถาวรทุก 1 คัน 209

ตารางที่	หน้า
ผ-12	แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G2 ใน กรณีศึกษาบรรทุกทุก 1 คัน 210
ผ-13	แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G3 ใน กรณีศึกษาบรรทุกทุก 1 คัน 210
ผ-14	แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G1 ใน กรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน 211
ผ-15	แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G2 ใน กรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน 211
ผ-16	แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G3 ใน กรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน 212
ผ-17	ค่า LDF จากสมการตามข้อกำหนด (AASHTO LRFD 2007) ของสะพานข้าม แยกวงสี่ส่วางในแต่ละคาน 215

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคานที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวาง (a)บริเวณที่มีการเชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกของคาน (b)บริเวณไร้การเชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกของคาน	2
1.2	แสดงส่วนประกอบสะพานคานเหล็กรูปตัวไอเชิงประกอบ	3
1.3	แสดงบริเวณช่องว่างของแผ่นเอวที่เกิดการบิดในนอกระนาบของสะพาน รูปแบบที่ 1 (a) ที่ตำแหน่งชิ้นส่วนไดอะแฟรม (b) ที่ตำแหน่งชิ้นส่วนโครงเฟรม ทางขวาง	3
1.4	Orthotropic Steel Plate – Girder	4
1.5	แสดงบริเวณ web – gab ของสะพานรูปแบบที่ 2	4
2.1	ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียดในบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านบน (Khalil และคณะ, 1998)	9
2.2	รอยร้าวที่เกิดจากความล้าเนื่องจากการบิดในนอกระนาบ (Roddis และ Zhao, 2003)	10
2.3	ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการหน่วยแรงในบริเวณ web gap (Fisher, 1978)	10
2.4	(a) ระบบโครงสร้างในบริเวณ web-gap (b) การหมุนของไดอะแฟรม (Jajich และ Schultz, 2003)	11
2.5	การเปลี่ยนรูปของบริเวณ web gap จากการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม SAP 2000 (Severtson และคณะ, 2004)	14
2.6	เกจวัดความเครียดในบริเวณ web gap ตำแหน่งใกล้ปีกบนและปีกล่าง (Zhou, 2006) (a)ตำแหน่งใกล้ปีกบน (b) ตำแหน่งใกล้ปีกล่าง	16
2.7	บริเวณ web gap (a) จากชิ้นส่วนไดอะแฟรม (b) จากชิ้นส่วนโครงเฟรมทาง ขวาง	16

ภาพที่	หน้า
2.8	เทคนิคการซ่อมแซม (a) No- retrofit stiffener. (b) Positively attached stiffener. (c) Back-up transverse stiffener. (d). Slotted connection stiffener. (Hassel และคณะ 2010) 17
2.9	รูปภาพเปรียบเทียบค่าLDFจากสมการที่เสนอใหม่ของ Nesvold (2002) กับสมการของ AASHTO 1998 24
2.10	Trend line สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kg กับ ค่า L (Sotelino และคณะ, 2004) 25
2.11	Trend line สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Kg กับ ค่า L (Phuvoravan, 2006) 26
2.12	แบบจำลองของ Hays Jr. (1986) และคณะ และMabsout และคณะ (1997) . 28
2.13	แสดงแบบจำลองของ Tarhini , Frederick , Mabsout และคณะ, Eom , Nowak , Baskar และคณะ , Queiroz และคณะ 28
2.14	แบบจำลองของ Tabsh,Tabatabai (2001), Issa และคณะ(2000), Bishara และคณะ(1993), Machadoและคณะ(2008) 29
2.15	แสดงแบบจำลองของ Brockenbrough (1986) 30
2.16	แสดง Eccentric Beam Model ของ Kitjapat (2006) 31
2.17	แสดงแบบจำลองของ Yuan Zhao และ W. M. Kim Roddis (2003) (a) การกำหนดชิ้นส่วนแบบจำลอง (b) แบบจำลองแบบหยาบ (c) แบบจำลองแบบละเอียด 32
2.18	แสดงแบบจำลองของ Berglund and Schultz 33
2.19	แบบจำลองของ Hidayat (2010) 33
2.20	แบบจำลองหลัก (global model) 34
2.21	แบบจำลองย่อย (sub model) 34
2.22	ความหนาแน่นในการทำให้เป็นตะแกรงของบริเวณ web gap (Hassel และคณะ, 2010) 34
3.1	แสดงการโค้งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคานที่ใกล้เคียง 36
3.2	แสดงการบิดในนอกระนาบของบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านบน 37
3.3	แสดงการบิดในนอกระนาบของบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านล่าง 37

ภาพที่	หน้า
3.4	กราฟ S – N ตามมาตรฐาน AASHTO (AASHTO 2007) 39
3.5	แสดง 3D – 2 Node Beam Element 43
3.6	แสดงชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งที่เกิดจากองค์ประกอบของสองชิ้นส่วน (a) Membrane element (b) Bending element 43
3.7	แสดง three – node triangular shell element 44
3.8	Four – node Quadrilateral Shell element 44
3.9	แสดงตัวแปรที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม SAP 2000 ของ Frame Element 45
3.10	แสดงการแสดงผลใน shell element ที่ถูกสร้างแบบจำลองในอยู่ในแนวนอน และแนวตั้ง 46
3.11	แสดงวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (section cut) ในโปรแกรม SAP 2000 (a) เส้นตัดผ่านชิ้นส่วนที่ต้องการอ่านค่าผลของโมเมนต์กับแรงในแนวแกน (b) การกำหนดโคออร์ดิเนตของเส้นตัดผ่านชิ้นส่วนและข้อมูลผลการวิเคราะห์ . 48
3.12	แสดงรายละเอียดต่างของส่วนหน้าตัดประสิทธิภาพ 49
3.13	การวิเคราะห์คานใน 1 มิติในการหาค่าโมเมนต์สูงสุดจากน้ำหนักบรรทุกจรจาก ยวดยาน 53
3.14	ตัวอย่างการหาค่า LDF โดยใช้กฎของคานงัด (Lever Rule) 55
3.15	ชิ้นส่วน web gap รับแรงดัดและแรงในแนวแกน 56
4.1	การกำหนดชิ้นส่วนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 59
4.2	แสดงหน้าตัดที่กึ่งกลางสะพานข้ามแยกประชาชนกุล (หน่วยมิลลิเมตร) 60
4.3	แสดงรูปขยายคานของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล (หน่วยมิลลิเมตร) 60
4.4	แสดงหน้าตัดที่กึ่งกลางสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง (หน่วยมิลลิเมตร) 61
4.5	แสดงแสดงรูปขยายคานของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง (หน่วยมิลลิเมตร) 61
4.6	การทดสอบใช้รถบรรทุก 25 ตัน ที่ตำแหน่งต่างๆตามขวางของสะพาน (a) การทดสอบรถบรรทุก 1 คันที่เลนนอกของสะพาน (b) การทดสอบ รถบรรทุก 1 คันที่เลนในของสะพาน (c) การทดสอบรถบรรทุก 2 คัน ทั้งเลนใน และเลนนอก 62
4.7	แสดงตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุก 6 ล้อ 65

ภาพที่	หน้า
4.8	แสดงการกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวางในแบบจำลองสะพานประชาชนุกูลช่วง typical span 66
4.9	แสดงการกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวางในแบบจำลองสะพานวงศ์สว่างช่วง main span 67
4.10	แสดงการกำหนดเส้นแกนของเลน (Define Bridge Layout Line) ในโปรแกรม SAP2000 68
4.11	แสดงกำหนดเส้นกึ่งกลางเลน (Define Lanes) ในโปรแกรม SAP2000 68
4.12	แสดงเส้นกึ่งกลางเลนของรถบรรทุกแต่ละประเภทในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนุกูล 69
4.13	แสดงการวางตำแหน่งรถบรรทุก 6 ล้อ ตามแนวยาว ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 มิติ ในแบบจำลอง 3 มิติ 70
4.14	แสดงการวางตำแหน่งรถบรรทุก 6 ล้อ ตามแนวยาว ทุก 50 เซนติเมตร ในแบบจำลอง 3 มิติ 70
4.15	รูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตัวแทน (fatigue truck) ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ของสะพานข้ามแยกประชาชนุกูล มีความยาวช่วง 25 เมตร 71
4.16	แสดงผลของค่าโมเมนต์สำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการ cut section (a) การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ของคาน G1 (b) การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ของคาน G2 (c) การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ของคาน G3 72
4.17	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งในการ cut section ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 73
4.18	แสดงตัวอย่าง cut section ที่ขึ้นส่วนแผ่นเอวของคาน (a) เส้นตัดผ่านจุดต่อของขึ้นส่วนย่อย (b) เส้นตัดผ่านจุดต่อของขึ้นส่วนย่อย 74
4.19	แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของรถบรรทุกตัวแทน (fatigue truck) ในการลองวางตำแหน่งทุกๆ 50 ซม. 74
4.20	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ 76
4.21	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งรถบรรทุกตัวแทนตามแนวยาว 76
4.22	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่ง cut section 76

ภาพที่	หน้า
4.23	แสดงการกำหนดแบ่งชิ้นย่อยส่วนในบริเวณ web gap ด้วยวิธี mesh transition 78
4.24	แสดงการกำหนดบริเวณในการแบ่งชิ้นย่อยในบริเวณ web gap (a) แบบจำลองสะพานประชาชนุกูล (b) แบบจำลองสะพานวงศ์สว่าง 78
4.25	แสดงการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap ของแบบจำลองสะพานข้ามแยก ประชาชนุกูล 80
4.26	แสดงการแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ทั้ง 6 รูปแบบ ของแบบจำลอง สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 81
4.27	แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรงในบริเวณ web gap ของแบบจำลอง สะพานข้ามแยกประชาชนุกูล 83
4.28	แสดงหน่วยแรงในบริเวณ web gap ในการแบ่งชิ้นย่อย ทั้ง 8 รูปแบบ ของ คาน G1, G2 และ G3 ที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และหมายเลข 2) 84
4.29	แสดงหน่วยแรงในบริเวณ web gap ในการแบ่งชิ้นย่อย ทั้ง 8 รูปแบบ ของ คาน G1, G2 และ G3 ที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 3 และหมายเลข 4) 84
4.30	แสดงการกระจายค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวตั้ง บริเวณ web gap ที่คาน G1, G2 และ G3 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยก ประชาชนุกูล 85
4.31	แสดงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวราบที่ ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ของคาน G1, G2 และ G3 ของ แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนุกูล 86
4.32	แสดงการกระจายหน่วยแรงอัดสูงสุดในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนุกูล ของคาน G2 ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานลงมาตามแนวตั้ง 1 มม. ในบริเวณ web gap ที่ผิวด้านซ้ายของชิ้นส่วนแผ่นเอว 86
4.33	แสดงการกระจายหน่วยแรงอัดสูงสุดในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนุกูล ของคาน G3 ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานมาตามแนวราบ ด้านขวา 2 มม. ในบริเวณ web gap ที่ผิวด้านขวาของชิ้นส่วนปีก 87

ภาพที่	หน้า
4.34	87
4.35	88
4.36	88
4.37	89
4.38	90
4.39	90
4.40	91
4.41	91
4.42	92
4.43	92

ภาพที่		หน้า
4.44	แสดงการเคลื่อนตัวตามแนวราบและแนวตั้งบริเวณ web gap ของคาน G1, G2, G3 และG4 ในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	93
5.1	แสดงรูปแบบการแสดงผลค่าโมเมนต์สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด	95
5.2	แสดงเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคาน G1 กับค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนแผ่นพื้น โดยใช้ fatigue truck 1 คัน ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์	96
5.3	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G1 ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	96
5.4	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G2 ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	97
5.5	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G3 ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	97
5.6	โมเมนต์สูงสุดในคาน G1, G2 และG3 ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน	98
5.7	แสดงจุดเริ่มต้นการลอมความกว้างทุก ๆ 50 มม. ของคาน G1, G2 และG3	100
5.8	แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	100
5.9	แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	101
5.10	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	104
5.11	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	104
5.12	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	105
5.13	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	105

ภาพที่		หน้า
5.14	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G2 สำหรับทุกประเภท รถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	106
5.15	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G3 สำหรับทุกประเภท รถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	106
5.16	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกใน กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	108
5.17	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกใน กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	108
5.18	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกใน กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	109
5.19	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกใน กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	109
5.20	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกใน กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	110
5.21	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกใน กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล	110
5.22	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G1 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	113
5.23	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G2 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	113
5.24	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G3 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	114
5.25	แสดงค่าโมเมนต์ในคาน G4 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง กรณีศึกษา รถบรรทุก 1 คัน	114
5.26	แสดงโมเมนต์สูงสุดในคาน G1,G2,G3 และG4 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน	116
5.27	แสดงจุดเริ่มต้นการลอมความกว้างทุกๆ 50 มม. ของคาน G1,G2,G3 และG4	117

ภาพที่	หน้า
5.28	แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 118
5.29	แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 118
5.30	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 , G2 ,G3 และG4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 120
5.31	แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 , G2 ,G3 และG4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 120
5.32	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 122
5.33	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 122
5.34	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 123
5.35	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 123
5.36	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 124
5.37	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 124
5.38	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 125
5.39	แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 125
6.1	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT 128

ภาพที่	หน้า
6.2	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT 128
6.3	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT 129
6.4	แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT 129
6.5	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งตามแนวยาวที่ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวาง L1-OUT และ L2-OUT 130
6.6	ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 131
6.7	ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 131
6.8	ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 132
6.9	ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 132
6.10	แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 134
6.11	แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 134
6.12	แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 ต่อความยาวของสะพาน (a) กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน (b) กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 135
6.13	ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน 136
6.14	ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันต่อความยาวสะพาน 136
6.15	ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 138

ภาพที่	หน้า
6.16	ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 138
6.17	ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G3 กับ G4 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 139
6.18	ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 140
6.19	ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 140
6.20	ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G3 กับ G4 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 141
6.21	แสดงการโค้งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 142
6.22	แสดงการโค้งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 142
6.23	แสดงการโค้งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 ต่อความยาวของสะพาน (a) กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน (b) กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน 143
6.24	ผลการวิเคราะห์การโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน 144
6.25	ผลการวิเคราะห์การโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันต่อความยาวสะพาน 144
7.1	แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรง ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล 148
7.2	การเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G1 149
7.3	การเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G2 149
7.4	การเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G3 150
7.5	หน่วยแรงในระนาบของคาน G1 บริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 151
7.6	หน่วยแรงในระนาบของคาน G2 บริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 152

ภาพที่	หน้า
7.7	หน่วยแรงในระนาบของคาน G3 บริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 152
7.8	หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 และG3 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 153
7.9	แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1, G2 และ G3 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT 154
7.10	แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1, G2 และ G3 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT 155
7.11	ผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงตั้งเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงตั้งในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน 156
7.12	แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรง ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกแยกวงศ์สว่าง 158
7.13	หน่วยแรงในระนาบของคาน G1 บริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 160
7.14	หน่วยแรงในระนาบของคาน G2 บริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 160
7.15	หน่วยแรงในระนาบของคาน G3 บริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 161
7.16	หน่วยแรงในระนาบของคาน G4 บริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 161
7.17	หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 G3 และ G4 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน 162
7.18	แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1 ,G2 ,G3 และ G4 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT 163

ภาพที่		หน้า
7.19	แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1 , G2, G3 และ G4 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT	164
7.20	ผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน	165
ผ-1	แบบจำลองโครงสร้างสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	181
ผ-2	แบบจำลองคานขวางประเภทต่างๆ ของโครงสร้างสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	181
ผ-3	แบบจำลองแผ่นพื้นของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล	181
ผ-4	แบบจำลองโครงสร้างสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	182
ผ-5	แบบจำลองคานขวางประเภทต่างๆ ของโครงสร้างสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ...	182
ผ-6	แบบจำลองแผ่นพื้นของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง	182
ผ-7	รถบรรทุก 6 ล้อ	184
ผ-8	รถบรรทุก 10 ล้อ	185
ผ-9	รถบรรทุก 12 ล้อ	187
ผ-10	รถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ	187
ผ-11	รถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ	188
ผ-12	รถบรรทุกพ่วง 18 ล้อ	189
ผ-13	รถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 3 เพลา 12 ล้อ	190
ผ-14	รถบรรทุกพ่วง 20 ล้อ	191
ผ-15	รถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ	192
ผ-16	รถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ	193
ผ-17	ข้อมูลของรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO (fatigue truck)	194
ผ-18	ตำแหน่งของรถบรรทุก 6 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด	196
ผ-19	ตำแหน่งของรถบรรทุก fatigue truck ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด	196
ผ-20	ตำแหน่งของรถบรรทุก 10 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด	197
ผ-21	ตำแหน่งของรถบรรทุก 12 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด	197

ภาพที่	หน้า
ผ-22	ตำแหน่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 197
ผ-23	ตำแหน่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 198
ผ-24	ตำแหน่งของรถบรรทุก 18 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 198
ผ-25	ตำแหน่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 3 เพลา 12 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 198
ผ-26	ตำแหน่งของรถบรรทุก 20 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 199
ผ-27	ตำแหน่งของรถบรรทุก 22 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 199
ผ-28	ตำแหน่งของรถบรรทุก 24 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด 199
ผ-29	แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 1 คันของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล 201
ผ-30	แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 2 คันของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล 202
ผ-31	แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 1 คันของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 203
ผ-32	แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 2 คันของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง 204
ผ-33	ค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีที่ 1 เปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามมาตรฐาน AASHTO 218
ผ-34	ค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีที่ 2 เปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามมาตรฐาน AASHTO 218

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วจึงมีผลทำให้การดำเนินชีวิตความเป็นอยู่มีคุณภาพมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณรถยนต์อย่างรวดเร็วในเขตกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลซึ่งเป็นผลโดยตรงในการทำให้เกิดปัญหาจราจรติดขัดอย่างมากในช่วงเวลาเร่งด่วน ดังนั้นการแก้ปัญหาจราจรติดขัดในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลวิธีหนึ่ง คือ การสร้างสะพานข้าม เพื่อให้รถยนต์ได้ข้ามผ่านโดยไม่ต้องติดสัญญาณจราจร ซึ่งในเขตกรุงเทพมหานครได้มีจำนวนสะพานข้ามแยก เป็นจำนวนมากซึ่งมักจะเป็นสะพานที่เป็นโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากสามารถทำการก่อสร้างได้รวดเร็วจึงลดผลกระทบเนื่องจากการดำเนินงานก่อสร้าง คุณสมบัติเฉพาะตัวของสะพานเหล็กคือน้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อเทียบกับสะพานประเภทคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งทำให้เกิดแนวความคิดในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมทางโครงสร้างของสะพานที่เป็นรูปแบบของโครงสร้างเหล็ก ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในสะพานเหล่านี้ เมื่อมีรถยนต์แล่นผ่าน สะพานจะได้รับหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำๆ ซึ่งทำให้เกิดผลทางด้านความล้าต่อโครงสร้างเหล็ก รวมถึงการกระจายน้ำหนักของรถยนต์ไปยังแต่ละคันความไม่สม่ำเสมอของน้ำหนักที่กระจายลงในแต่ละคันก็มีผลทำให้เกิดก่อให้เกิดการโก่งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคันที่ใกล้เคียงกันและจากสาเหตุนี้ก่อให้เกิดการบิดในบริเวณแผ่นเอว โดยเฉพาะบริเวณช่องว่างของการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนเอวกับแผ่นเหล็กเสริมข้างคันที่ตำแหน่งชิ้นส่วนทางขวางของสะพาน ได้แก่ ชิ้นส่วนไดอะแฟรม หรือชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวาง ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่าช่องว่างของแผ่นเอว (web gap) และในยานพาหนะที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุก ก็จะทำให้เกิดหน่วยแรงกระทำขึ้น - ลงแบบซ้ำๆ ก็จะทำให้เกิดความรุนแรงมากขึ้นของหน่วยแรงในบริเวณนี้ ดังนั้น อาจเป็นสาเหตุนำไปสู่รอยร้าวเนื่องจากความล้าที่เกิดขึ้นจนกระทั่งถึงการพังทลายได้

ในปัจจุบันได้มีการออกแบบสะพานโดยตระหนักถึงความล้าเนื่องจากน้ำหนักกระทำ(load induced fatigue) ซึ่งมีข้อกำหนดในการออกแบบกำหนดไว้แต่สำหรับปัญหาของความล้าเนื่องจากการบิดนอกระนาบ (out-of-plane distortion induced fatigue) ยังไม่มีรายละเอียดในการออกแบบและการวิเคราะห์ ซึ่งตามข้อกำหนด AASHTO ได้มีแต่การกำหนดให้ชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคันที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับชิ้นส่วนไดอะแฟรม หรือโครงเฟรมทางขวาง

ให้มีการเชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกด้านบนและด้านล่าง (positive attachment) เพื่อให้ปราศจากบริเวณ web gap ที่จะเกิดหน่วยแรงจากการบิดนอกระนาบในบริเวณนี้ดังภาพที่ 1.1(a) บริเวณนี้จะเกิดผลกระทบง่ายต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้น แต่ในสะพานจริงในปัจจุบันมักจะไม่มีการเชื่อมติดระหว่างชิ้นส่วนดังกล่าว ดังภาพที่ 1.1(b) ซึ่งการไร้การเชื่อมติดนี้ก็จะส่งผลให้สะพานเหล่านี้ก็จะเกิดหน่วยแรงจากการบิดนอกระนาบ



(a)บริเวณที่มีการเชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกของคาน (b)บริเวณไร้การเชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกของคาน
ภาพที่ 1.1 แสดงชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคานที่ตำแหน่งที่เชื่อมกับชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวาง

งานวิจัยนี้จึงศึกษาปัญหาการบิดนอกระนาบ โดยในการศึกษานี้ทำการศึกษาพฤติกรรม การบิดของสะพานที่มีรูปแบบเป็นโครงสร้างเหล็ก 2 รูปแบบที่เป็นรูปแบบของสะพานข้ามแยกใน เขตกรุงเทพมหานคร โดยที่มีระบบของคานเป็นคานเหล็ก และมีระบบของพื้นเป็นพื้นคอนกรีต หรือพื้นแบบออร์ทोटโรปิค (orthotropic steel deck) ซึ่งประกอบไปด้วยรูปแบบต่างๆ ดังนี้

สะพานรูปแบบที่ 1 สะพานคานเหล็กรูปตัวไอเชิงประกอบ (Composite Steel I-Girder Bridge) ซึ่งประกอบด้วย แผ่นพื้นคอนกรีตและคานเหล็กรูปตัวไอ ซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่าง คานเหล็กและ แผ่นพื้นคอนกรีต เพื่อให้เป็นระบบโครงสร้างเชิงประกอบ โดยใช้สลักรับแรงเฉือน (shear studs) และในส่วนของคานเหล็กมีจะชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (stiffeners) สำหรับชิ้นส่วนรองซึ่งเป็นชิ้นส่วนตามแนวขวาง ประกอบด้วยโครงเฟรมทางขวาง (cross bracings) ณ ตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ และ $\frac{3}{4}$ ของความยาวช่วงสะพาน และ ชิ้นส่วนไดอะแฟรม ณ ตำแหน่ง กึ่งกลางของความยาวช่วง สะพาน ซึ่งแสดงรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆดังรูปที่ 1.2 และบริเวณที่เกิดผลของการบิดนอกระนาบของสะพานนี้คือ บริเวณ web gap ที่ใกล้กับชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งการเชื่อม

ติดระหว่างแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับชิ้นส่วนไดอะแฟรม และการเชื่อมติดระหว่างแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวาง ดังภาพที่ 1.3(ก) และ 1.3(ข)



ภาพที่ 1.2 แสดงส่วนประกอบสะพานคานเหล็กรูปตัวไอเชิงประกอบ



(ก) ที่ตำแหน่งชิ้นส่วนไดอะแฟรม



(ข) ที่ตำแหน่งชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวาง

ภาพที่ 1.3 แสดงบริเวณช่องว่างของแผ่นเอวที่เกิดการบิดในนอกระนาบของสะพานรูปแบบที่ 1

สะพานรูปแบบที่ 2 สะพานที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบสองชิ้นส่วนประกอบ (steel plate - girder) ซึ่งประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนของเอวหนึ่งส่วน และชิ้นส่วนของปีกด้านล่างอีกหนึ่งส่วน ในส่วนของระบบแผ่นพื้นจะเป็นแผ่นพื้นแบบออร์โททรอปิก (orthotropic deck)

ประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนตามแนวยาวและตามแนวขวาง ซึ่งเรียกว่า RIBS เชื่อมติดกับแผ่นพื้นเหล็ก สำหรับชิ้นส่วนทางขวางของสะพาน คือ ชิ้นส่วนไดอะแฟรมยึดติดกับชิ้นส่วนเอวของคาน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1.4 และบริเวณที่ทำให้เกิดผลของการบิดในนอกระนาบของสะพานนี้คือ บริเวณ web gap ที่ใกล้กับชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับชิ้นส่วนไดอะแฟรม ดังภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.4 Orthotropic Steel Plate – Girder



ภาพที่ 1.5 แสดงบริเวณ web - gab ของสะพานรูปแบบที่ 2

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1.2.1 ศึกษาผลกระทบของรถบรรทุกในประเทศไทย ประเภทต่างๆ และรถบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO ที่มีผลต่อพฤติกรรมการบิดของสะพาน ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อันประกอบไปด้วย

- การกระจายน้ำหนักทางขวาง (Lateral load distribution)
- การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันของสะพาน (Relative deflection between adjacent girders)
- หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ (Out-of-plane distortion induced stress)

1.2.2 ศึกษาความเหมาะสมของการใช้สมการตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางตามข้อกำหนดของ AASHTO ในการออกแบบสะพานข้ามทางแยกในประเทศไทย

1.2.3 ศึกษาผลกระทบของรถบรรทุกในประเทศไทย ประเภทต่างๆ และรถบรรทุกของ AASHTO ที่มีต่ออายุความล้าเนื่องจากการบิดบริเวณ web gap ของสะพานเหล็กข้ามแยก รูปแบบต่างๆ

1.2.4 ศึกษาเปรียบเทียบหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap กับหน่วยแรงในระนาบบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานที่มีต่ออายุความล้าของสะพานเหล็กข้ามแยก รูปแบบต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษารูปแบบสะพานข้ามแยกในกรุงเทพมหานคร 2 รูปแบบ ประกอบด้วย

1. สะพานคานเหล็กรูปไอเชิงประกอบ (Composite Steel I-Girder Bridge) จำนวน 1 สะพาน คือ สะพานข้ามแยกประสานภููล พิจารณาศึกษาช่วงคานของสะพานในช่วง typical span มีความยาวช่วง เท่ากับ 25 เมตร

2. สะพานที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบและระบบแผ่นพื้นเป็นแบบออร์โทโทรปิค (Orthotropic Steel Plate – Girder Bridge) จำนวน 1 สะพาน คือ สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง พิจารณาศึกษาช่วงคานของสะพานในช่วงคานหลัก (main span) ซึ่งเป็นช่วงที่มีความยาวช่วงมากที่สุดของสะพาน มีความยาวช่วง เท่ากับ 35 เมตร

1.3.2 พิจารณาชนิดรถบรรทุกหนักในไทย และรถบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO ดังนี้

1. รถบรรทุกหนักในไทย จำนวน 10 ประเภท ประกอบด้วย รถบรรทุก 6 ล้อ, รถบรรทุก 10 ล้อ, รถบรรทุก 12 ล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 6 ล้อ ชนิดลากจูง 2 เพลา 8 ล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ชนิดลากจูง 2 เพลา 8 ล้อ, รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ชนิดลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ, รถบรรทุกพ่วง 18 ล้อ, รถบรรทุกพ่วง 20 ล้อ, รถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ และรถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ จากการสำรวจข้อมูลรถบรรทุกจากกรมทางหลวงและรถบรรทุกในท้องตลาด ทั้งหมด 4 ยี่ห้อ ประกอบไปด้วยรถบรรทุกยี่ห้อ ฮีโน่ อีซูซุ มิทซูบิชิ และนิสสันดีเซล

2. ชนิดตามข้อกำหนดของ AASHTO คือ รถบรรทุกข้อกำหนดสำหรับความล้า (fatigue truck)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 การทบทวนศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่มีจุดประสงค์เพื่อทบทวนผลงานที่เกี่ยวข้องและสามารถนำมาเป็นข้อมูลอ้างอิงกับงานวิจัยนี้ซึ่งจะแบ่งได้ ดังนี้

1.4.1.1 ทบทวนงานวิจัยความล้าเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็กและการประเมินอายุความล้าเนื่องจากการบิดบริเวณ web gap ของสะพานเหล็ก

1.4.1.2 ทบทวนงานวิจัยการกระจายน้ำหนักทางขวาง

1.4.1.3 ทบทวนงานวิจัยการจำลองรูปแบบสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2 เขียนหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อที่จะคัดเลือกข้อมูลทฤษฎีต่างๆที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะได้อธิบายหลักการและทฤษฎี ดังนี้

1.4.2.1 ความล้า

1.4.2.2 ความล้าเนื่องจากการบิด

1.4.2.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการประเมินอายุความล้าเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็ก

1.4.2.4 ทฤษฎีที่ใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.2.5 การคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4.3 ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลแบบจำลองของสะพานทั้ง 2 รูปแบบ

1.4.4 ทำการวิเคราะห์หาค่าค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางข้างจากรถบรรทุกในไทย และรถบรรทุกของ AASHTO จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP 2000

1.4.5 เปรียบเทียบค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางข้างที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม SAP 2000 กับสมการค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางข้างตามข้อกำหนด AASHTO

1.4.6 วิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันของสะพานจากรถบรรทุกในไทย ประเภทต่างๆ และรถบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO

1.4.7 สร้างแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หน่วยแรงนอกระนาบในบริเวณ web gap โดยกำหนดความหนาแน่นในแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้ซึ่งค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap ที่ถูกต้องและแม่นยำเหมือนพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด

1.4.8 วิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบจากรถบรรทุกในไทย ประเภทต่างๆ และรถบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO

1.4.9 วิเคราะห์ความเหมาะสมของการใช้สมการตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางตามข้อกำหนด AASHTO ในการออกแบบสะพานข้ามทางแยกในประเทศไทย

1.4.10 ประเมินค่าอายุความล้าเนื่องจากการบิดของสะพานทั้ง 2 รูปแบบสะพาน จากกราฟ S-N ตามข้อกำหนด AASHTO

1.4.11 เปรียบเทียบอายุความล้าจากหน่วยแรงในระนาบบริเวณชิ้นส่วนปีกล่างของคานสะพานหลักกับอายุความล้าจากหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ

1.4.12 สรุปผลงานวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ทราบถึงผลกระทบของรถบรรทุกในประเทศไทยประเภทต่างๆที่มีต่อพฤติกรรมการบิดนอกระนาบของสะพาน ประกอบไปด้วย ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียงของสะพาน และหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ

1.5.2 ทราบถึงความเหมาะสมในการใช้ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางตามข้อกำหนด ASSHTO กับสะพานข้ามทางแยกในประเทศไทย ในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานข้ามทางแยกในประเทศไทย

1.5.3 ทราบถึงอายุความล้าจากหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของสะพานทั้ง 2 รูปแบบและเปรียบเทียบกับอายุความล้าจากหน่วยแรงในระนาบบริเวณชิ้นส่วนปีกล่างของคานสะพานหลัก

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความล้าเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็ก

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในการประเมินอายุความล้าของสะพานเหล็กเนื่องจากผลจากความล้า (fatigue) เป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้สะพานเสียหายได้จากผลของน้ำหนักขบวนรถที่แล่นผ่านและเมื่อมีการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกที่มากขึ้นย่อมทำให้ผลของความล้าเกิดมากขึ้นและเร็วกว่าปกติ ดังนั้น อายุการใช้งานของสะพานย่อมลดลงเนื่องจากผลของความล้า ความล้าที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของสะพานมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อแบบเชื่อม การวิบัติที่เกิดขึ้นจากผลของความล้าเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็กก็เป็นสิ่งที่ควรตระหนักอย่างยิ่ง

Fisher (1978) ได้ทำการสำรวจรอยร้าวที่เกิดจากความล้าเนื่องจากการบิดในบริเวณที่เป็นช่องว่างของแผ่นเอวที่ไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับชิ้นส่วนปีกของคาน ซึ่งเรียกว่า บริเวณนี้ว่า web gap ซึ่งรอยร้าวมีสาเหตุเกิดเนื่องมาจากการหมุนที่ปลายของชิ้นส่วนค้ำยันตามขวางที่ยึดติดกับแผ่นเหล็กเสริมข้างคานรอยร้าวจะเกิดขึ้นในบริเวณโมเมนต์ค่าบวกในชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานที่เกิดหน่วยแรงดึง และรอยร้าวจะเกิดขึ้นในบริเวณโมเมนต์ค่าลบติดกับปีกด้านบน ซึ่งผลจากการตรวจวัดค่าความเครียดในบริเวณ web gap แสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดมีค่าสูงกว่าในบริเวณโมเมนต์ค่าลบ ที่มีแผ่นพื้นคอนกรีตรั้งยึดกับชิ้นส่วนปีกด้านบน แต่ในส่วนของบริเวณของ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านล่างที่ไม่มีการยึดรั้ง ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Y. Edward Zhou (2006) โดยใช้เกจวัดความเครียดในการวัดค่าของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในบริเวณ web gap ที่ตำแหน่งใกล้ปีกด้านบน และ ตำแหน่งใกล้ปีกด้านล่าง ซึ่งค่าของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดจะเกิดขึ้นที่บริเวณ web gap ที่ตำแหน่งใกล้ปีกด้านบน จะมีค่าสูงกว่า ตำแหน่งที่ใกล้ปีกด้านล่าง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณใกล้ปีกบนมีการยึดรั้งทางข้างมากกว่าบริเวณใกล้ปีกล่าง

Khalil และคณะ (1998) ได้ศึกษาถึงการเกิดและเติบโตของรอยร้าวที่รอยเชื่อมที่บริเวณ web gap ที่อยู่บริเวณที่มีค่าโมเมนต์ค่าลบ ซึ่งรอยร้าวนี้เกิดเนื่องมาจากการบิดนอกระนาบของบริเวณชิ้นส่วนเอวที่ใกล้กับปีกด้านบนของคานเหล็ก วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษาการ

ป้องกันการรอยร้าวที่รอยเชื่อมในบริเวณ web gap เนื่องมาจากการบิดในนอกระนาบของสะพานที่มีชิ้นส่วนไดอะแฟรมเป็นโครงเฟรมรูปตัว X (X-Type Diaphragm) 3 สะพาน และโครงเฟรมรูปตัว K (K-Type Diaphragm) 2 สะพาน ได้เสนอเทคนิคซ่อมแซมเพื่อลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบิดนอกระนาบที่บริเวณ web gap เทคนิคซ่อมแซม (retrofit technique) โดยการคลายสลักเกลียว ของชิ้นส่วนไดอะแฟรม ซึ่งได้ตรวจวัดค่าของหน่วยแรง ก่อนและหลังการดำเนินการใช้เทคนิคซ่อมแซมในการศึกษานี้โดยใช้ เกจวัดความเครียด (strain gages) และ displacement transducers ที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณ web gap ดังภาพที่ 2.1 โดยนำรถบรรทุกทดสอบเคลื่อนที่ในแต่ละช่องทางด้วยความเร็ว ที่แตกต่างกัน ผลจากการตรวจวัดพบว่าผลจากการบิดนอกระนาบของคานด้านนอกในบริเวณ web gap จะมีมากกว่าคานด้านใน และผลจากการใช้เทคนิคซ่อมแซมในงานวิจัยนี้พบว่าพฤติกรรมของ web gap ในสะพานที่มีชิ้นส่วนไดอะแฟรมเป็นโครงเฟรมรูปตัว X (X-Type Diaphragm) สามารถลดผลจากการบิดนอกระนาบได้อย่างน้อย 42 % ที่คานด้านนอก และ สำหรับสะพานที่มีชิ้นส่วนไดอะแฟรมเป็นโครงเฟรมรูปตัว K (K-Type Diaphragm) ก็มีแนวโน้มคล้ายกัน อย่างไรก็ตามจากเทคนิคที่นำเสนอนี้พบว่ามีความเสี่ยงที่ความเค้นของ web gap จะเพิ่มขึ้น

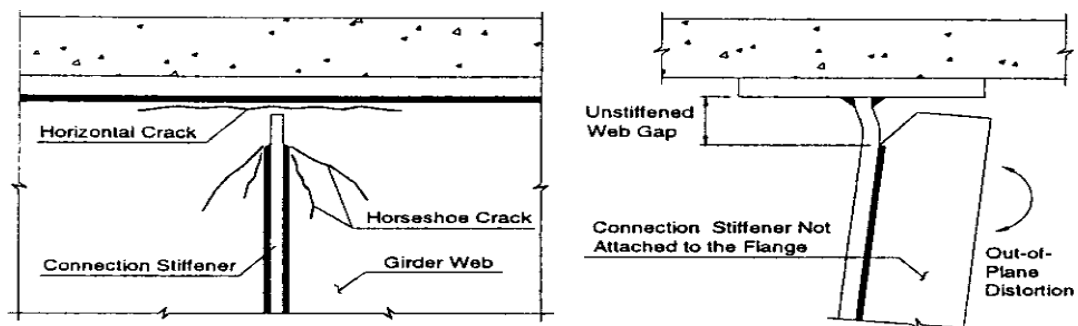


ภาพที่ 2.1 ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความเครียดในบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านบน

(Khalil และคณะ, 1998)

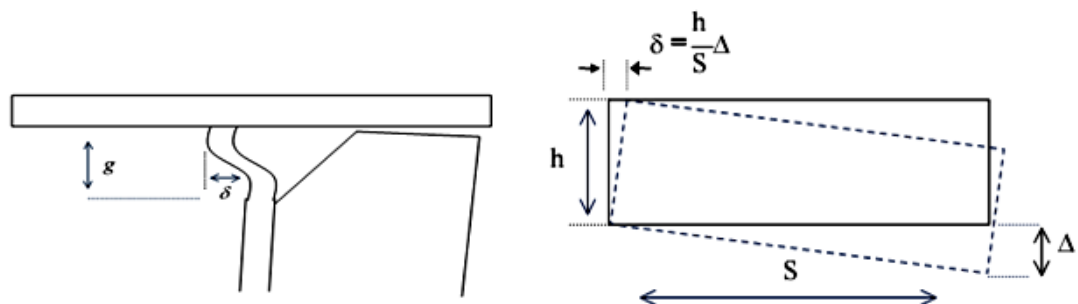
Roddis และ Zhao (2003) ได้ทำการศึกษารอยแตกบริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างคานกับ แผ่นเหล็กเสริมข้างคาน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะตรวจสอบรอยร้าวที่เกิดจากความล้าเนื่องจากการบิดนอกระนาบโดยที่ศึกษาในสะพานที่ไม่มีมุมเอียง (skewed bridge) และมีช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน และปีกของคาน ซึ่งช่องว่างดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีความอ่อนจึงมีการกระจายหน่วยไปยังบริเวณนี้สูง รอยแตกแนวขนอนมีการก่อตัวและขยายรอยแตกตามปีก

ด้านบนไปถึงรอยต่อส่วนนอกของคานนอกจากนี้ยังมีรอยแตกที่เริ่มต้นบริเวณจุดปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานไปตามส่วนเวรดังภาพที่ 2.2 ปัญหาที่ได้ทำการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยสร้างแบบจำลองหลักเพื่อคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจาก รถบรรทุกมาตรฐาน (standard fatigue truck) จากนั้นก็จะทำการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นใน web gap ด้วยแบบจำลองย่อยโดยค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นใน web gap ถูกค้นพบว่ามีความสูงกว่าค่าขีดจำกัดความล้า ซึ่งทำให้ทราบว่าการแตกร้าวนี้มีแนวโน้มที่เกิดจากความล้าเนื่องจากการบิดในนอกระนาบ



ภาพที่ 2.2 รอยร้าวที่เกิดจากความล้าเนื่องจากการบิดในนอกระนาบ (Roddis และ Zhao, 2003)

Fisher (1978) ได้เสนอสมการในการคำนวณหาหน่วยแรงในบริเวณ web gap โดยที่บริเวณส่วนของ web gap ถูกจำลองให้เป็นชิ้นส่วนของคานซึ่งมีฐานรองรับเป็นแบบฐานยึดแน่น (fixed) ที่ถูกเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ δ และที่ปลายทั้งสองข้างไม่มีการหมุน ใช้หลักการวิธีมุมลาด - การโก่ง (slope deflection method) ในการเสนอสมการซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ด้านข้างกับ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณ web gap และทำการสมมติให้ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างถูกสร้างขึ้นโดยการหมุนลักษณะแบบแข็งเกร็ง (rigid body rotation) ของชิ้นส่วนไดอะแฟรมรอบฐานรองรับซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ของระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (δ) การโก่งตัวในแนวตั้ง (Δ) ความกว้างของชิ้นส่วนไดอะแฟรม (h) และระยะระหว่างคาน (S) ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งจะได้สมการของหน่วยแรงบริเวณ web gap ดังสมการที่ 2.1



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการหน่วยแรงในบริเวณ web gap (Fisher, 1978)

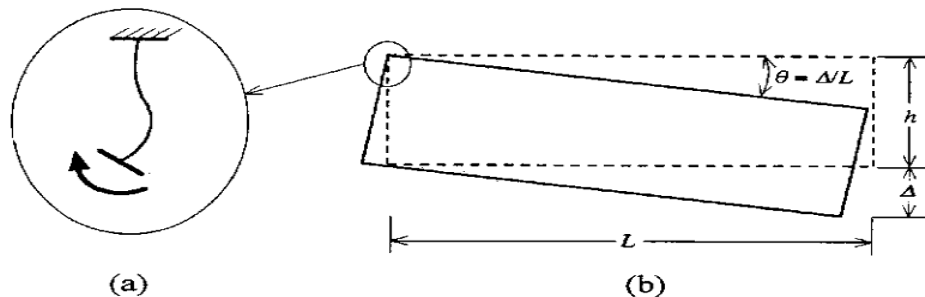
$$\sigma_{wg} \approx \left(\frac{3 E t_w}{g^2} \right) \delta = \left(\frac{3 E t_w}{g^2} \right) \left(\frac{h \Delta}{S} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่ σ_{wg} = หน่วยแรงในบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านบน

g = ความยาวของ web gap

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

Jajich และ Schultz (2003) ได้เสนอสมการอย่างง่ายในการคำนวณค่าหน่วยแรงสูงสุดในบริเวณ web gap ซึ่งคล้ายกับสมการของ Fisher (1978) จากการสร้างแบบจำลองสะพานรูปตัวไอแล้วทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้ข้อสังเกตวิธีอย่างง่ายในการทำนายค่าหน่วยแรงสูงสุดในบริเวณ web gap จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าที่บริเวณ web gap ทำให้เกิดหน่วยแรงจำนวนมาก การหมุนของ web gap ถูกประมาณให้เหมือนกับการหมุนของชิ้นส่วนไดอะแฟรม เนื่องจากชิ้นส่วนไดอะแฟรมเกิดการหมุนที่ฐานของ web gap ดังภาพที่ 2.4 (a) การโก่งตัวที่ต่างกัน Δ และ มุมหมุน θ ใช้หลักการพื้นฐานสำหรับระบบยึดหยุ่นเชิงเส้น ซึ่งจะได้ว่า $\theta = \Delta/L$ กำหนดให้ บริเวณ web gap เปรียบเหมือนเป็นคานที่มีฐานรองรับเป็นแบบฐานยึดแน่น (fixed) ทั้งสองข้าง และเกิดการหมุนที่ปลายด้านหนึ่งดังภาพที่ 2.4 (b)



ภาพที่ 2.4 (a) ระบบโครงสร้างในบริเวณ web-gap (b) การหมุนของไดอะแฟรม

(Jajich และ Schultz, 2003)

ซึ่งจะได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ฐานรองรับของ web gap ดังสมการที่ 2.2 ดังนั้นค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ปลาย ปลายของแผ่นเหล็กเสริมข้างคานของบริเวณ web gap จะได้เป็นสมการที่ 2.3 จากนั้นแทนค่าของโมเมนต์ดัดสูงสุดกับมุมหมุนลงในสมการที่ 2.3 ดังนั้นค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณ web gap จะได้ดังสมการที่ 2.4

$$M_{wg,m} = \frac{4EI_{wg}\theta}{g} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{wg,m} = \left(\frac{0.5 M_{wg,m} t_w}{I_{wg}} \right) \quad (2.3)$$

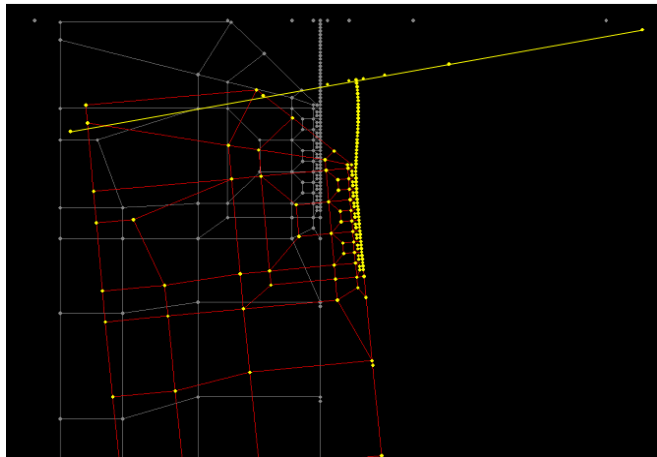
$$\sigma_{wg,m} = \left(\frac{2 E t_w}{g} \right) \left(\frac{\Delta}{L} \right) \quad (2.4)$$

- โดยที่
- $\sigma_{wg,m}$ = หน่วยแรงในบริเวณ web gap
 - $M_{wg,m}$ = โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ฐานรองรับของ web-gap
 - E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
 - I_{wg} = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของ web-gap
 - g = ความยาวของ web-gap
 - L = ระยะห่างระหว่างคาน (girder spacing)
 - t_w = ความหนาชิ้นส่วนเอว (web thickness)

สมการที่ถูกลำเสนอนี้สามารถใช้ประมาณค่าของ web gap stress ได้รวดเร็ว ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ web gap ถูกกระทำโดยการหมุนในนอกระนาบแทนที่การเคลื่อนตัว อย่างเช่นกรณีที่ยื่นส่วน เมื่อปีกด้านล่างของคานไม่มีการยึดรั้งทางด้านข้างจากผลในการคำนวณของสมการอย่างง่ายที่เสนอ มีค่าของความเค้นของบริเวณ web gap สูงสุด คลาดเคลื่อนจากผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 เท่ากับ 0.11 % และจากผลการศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณ web gap มีค่ามากกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปีกของคานกว่า 20 เท่า ในตำแหน่งของค่าโมเมนต์ดัดค่าลบและจากงานวิจัยนี้ได้ประเมินอายุความล้าเนื่องจากการบิดในบริเวณ web gap จากข้อมูลที่ได้การตรวจวัด 1 สัปดาห์ จากการติดตั้งเกจวัด แต่ละที่ตำแหน่งของเกจวัด และตรวจสอบโดย Mn/DOT Bridge #27734 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จำเป็นเพื่อที่จะหาถึงอายุความล้าของบริเวณ web gap โดยใช้กราฟช่วงความเค้นกับจำนวนรอบของ AASHTO อย่างไรก็ตามกราฟ S-N ของ AASHTO ใช้ได้สำหรับแรงกระทำเป็นรอบที่มีแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude loading) ซึ่งได้ใช้การประเมินอายุความล้าตามหลักของ Palmgren - Miner ในการประเมินความเสียหายที่เกิดจากการสะสมความล้าจากน้ำหนักกระทำที่มีลักษณะ

แบบไม่คงที่ (variable loading)กระทำโดยพิจารณาค่าช่วงความเค้นที่ i และมีจำนวนรอบของช่วงความเค้นที่ดังกล่าวเท่ากับ n_i แล้วใช้ความสัมพันธ์ของ กราฟ S – N ของ AASHTO สำหรับรอยต่อที่มีกำลังความล้าประเภท C (category C) ก็จะสามารถหาค่า N_i ซึ่งเป็นจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ ได้ ซึ่งจะหมายความว่าในขณะที่ได้ทำการหาช่วงความเค้นนั้นได้เกิดความเสียหายไปแล้วเป็นสัดส่วน $\sum n_i / N_i = 1$ ซึ่งกราฟ S-N ซึ่งดูเหมือนว่าจะใช้ได้เฉพาะในการประเมินอายุความล้าได้เพียงที่รอยเชื่อมบริเวณปีกที่เกิดหน่วยแรงดึง แต่ในการศึกษาของ Fisher และคณะ (1990) ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอายุความล้าของรอยเชื่อมบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวางกับเอวของคานได้เริ่มต้นเกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณ web gap เกิดขึ้นพร้อมกับกราฟ S-N ของ AASHTO สำหรับ Category C โดยที่สมการที่ใช้คำนวณหาจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ ตามกราฟ S-N ของ AASHTO เท่ากับ $N_i = A \times 10^9 / \Delta\sigma_i^m$ โดยที่ $m = 3$, $A = 1.442 \times 10^{12}$ ในการศึกษานี้ได้ประเมินอายุความล้าจากหน่วยแรงบริเวณ Web gap จำนวน 3 รูปแบบที่แตกต่างกันในการตรวจวัด ซึ่งผลที่ได้อายุความล้าที่ได้ของการประเมินทั้ง 3 รูปแบบ มีช่วงของอายุที่แตกต่างกันมากซึ่งอยู่ในช่วง 38 ปี ถึง 329 ปี โดยช่วงที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดคืออายุความล้าจะอยู่ในช่วง 45 ถึง 76 ปี

Severtson และคณะ (2004) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณ web gap และการเสียรูปของ web gap โดยที่จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณ web gap เท่ากับ 6.25 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลในภาคสนามโดยวัดจากการติดตั้งเกจวัดความเครียดโดยที่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเพราะว่าการติดตั้งเกจวัดความเครียด ไม่สามารถติดตั้งได้ในตำแหน่งที่ตรงกับค่าหน่วยแรงที่ได้ จากผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม SAP 2000 พบว่า ในชิ้นส่วนเอวมี่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างน้อยมาก ดังนั้น จึงสามารถบอกได้ว่าหน่วยแรงบริเวณ web gap ถูกสร้างขึ้นโดยการเปลี่ยนรูปโดยการหมุนของปีกด้านบน และชิ้นส่วนค้ำยันด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนรูปของบริเวณ web gap จากการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม SAP 2000

(Severtson และคณะ, 2004)

แล้วได้เสนอสมการอย่างง่ายในการคำนวณหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณ Web gap ซึ่งพื้นฐานของสมการที่ได้เสนอนี้คล้ายกับสมการของ Fisher (1978) และ Jajich (2003) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 2.5 แต่ในสมการของ Jajich (2003) ได้สมมติว่าการหมุนของบริเวณ web gap ที่รอยต่อกับปีกด้านบน และระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีค่าประมาณศูนย์ ($\theta_t \approx \delta \approx 0$) และ

$$\theta_b = \Delta/S$$

$$\sigma_{wg} = \frac{E t_w}{g} \left(2\theta_b + \theta_t + 3 \frac{\delta}{g} \right) \quad (2.5)$$

แต่สมการที่เสนอนี้ได้นำข้อมูลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณค่าโดยเฉลี่ยจากการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ซึ่งได้ค่าของ $\theta_t \approx 1.7 \Delta/S$, $\theta_b \approx 0.9 \Delta/S$ และระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมีค่าประมาณศูนย์ ($\delta \approx 0$) ดังนั้นสมการของหน่วยแรงในบริเวณ web gap จะได้ดังสมการที่ 2.6

$$\sigma_{wg} = 3.5 E \left(\frac{t_w}{g} \right) \left(\frac{\Delta}{S} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ σ_{wg} = หน่วยแรงในบริเวณ web gap

E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

Δ = ระยะโก่งตัวสัมพัทธ์

g = ความยาวของ web gap

S = ระยะห่างระหว่างคาน (girder spacing)

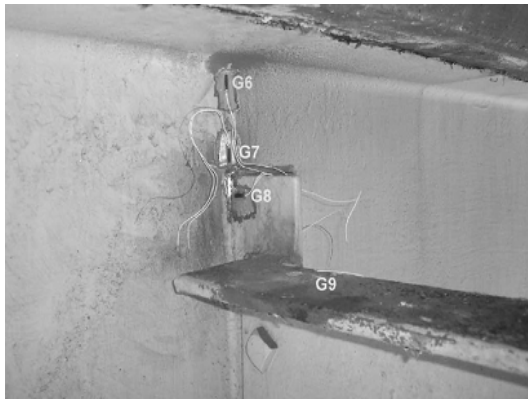
t_w = ความหนาชิ้นส่วนเอว (web thickness)

Berglund และ Schultz (2006) ได้กล่าวว่า การล้าเนื่องจากการบิดเป็นปัญหาที่ซับซ้อน ได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่มาจากรูปทรงทางเรขาคณิตของสะพานเช่น มุมเอียง ความยาวช่วง ระยะห่างระหว่างคาน และความหนาแผ่นพื้น รวมทั้งอิทธิพลการโค้งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคานที่อยู่ติดกัน ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อ การบิดเนื่องจากการล้า ทั้งการลดระยะระหว่างช่วงสะพาน และการเพิ่มระยะห่างระหว่างคานจะทำให้เกิดการขยายการโค้งตัวที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ความกว้างระหว่างล้อและความยาวเพลลาของรถบรรทุกยังมีผลด้วยเช่นกัน การเพิ่มระยะระหว่างช่วงสะพาน ก็จะทำให้เกิดความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น การค้ำยันทางด้านข้างจะกระจายน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพระหว่างคานและทำให้การโค้งตัวมีความแตกต่างกันน้อยลง และจากการที่ฐานรองรับของสะพานมักจะเอียงเพื่อรองรับเส้นทางจราจร ดังนั้นในแต่ละคานจะมีค่าโมเมนต์ดัดและการแอ่นตัว ที่แตกต่างกันซึ่งการล้าเนื่องจากการบิดก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มตามมุมที่เอียง

Connor และ Fisher (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับรอยร้าวที่เกิดในสะพานที่เป็นอันเนื่องมาจากผลของความล้า และจากผลการศึกษาได้พบว่า รอยร้าวที่เกิดมาจากความล้าเนื่องจากการบิดเกิดขึ้นประมาณ 90% ของรอยแตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความล้าทั้งหมดในสะพาน เป็นผลมาจากการบิดนอกระนาบ

Zhou (2006) ได้ทำการประเมินอายุการใช้งานที่เหลือของสะพานเหล็กที่เกิดจากความล้าเนื่องจากการบิด โดยตรวจวัดค่าความเครียดโดยการติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่เกิดการบิดนอกระนาบ บริเวณ web gap ที่ใกล้ปีกด้านบนและปีกด้านล่าง ดังภาพที่ 2.6 (a) และ 2.6 (b) ซึ่งผลการตรวจวัดจะแสดงค่าในรูปของช่วงความเค้นและแปลงสัญญาณที่มีลักษณะไม่คงที่ ให้เป็นสัญญาณที่มีลักษณะคงที่โดยใช้สมการของไมเนอร์แล้วใช้กราฟ S-N ของ AASHTO ในการประเมินอายุความล้าของสะพานเหล็กที่มีแผ่นพื้นเป็นคอนกรีต คานตามยาวเป็นคานเหล็กรูปตัวไอ และคานตามขวางเป็นไดอะแฟรมเชื่อมต่อกับแผ่นเหล็กเสริมข้างคานระหว่างคานที่ติดกัน ซึ่งผลจากการวัดค่าของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในบริเวณ web gap ได้ใช้การคาดการณ์เชิงเส้น (linear extrapolation) ในการทำนายค่าหน่วยแรงสูงสุดของบริเวณ web gap ทั้งบริเวณที่ใกล้กับปีกด้านบนและปีกด้านล่าง ผลที่ได้ค่าช่วงความเค้นที่ตำแหน่งใกล้ปีกด้านบน (G6) และ ตำแหน่งใกล้ ขึ้นส่วนคานตามขวาง (G7) ของบริเวณ web gap ใกล้ปีกด้านบน เท่ากับ 81.2 MPa และ 11.77 ksi ซึ่งที่ตำแหน่งใกล้ปีกด้านบน (G6) พิจารณาเป็นรอยต่อที่มีกำลังความล้าในประเภท B ตำแหน่งใกล้ ขึ้นส่วนคานตามขวาง (G7) พิจารณาเป็นรอยต่อที่มีกำลังความล้าในประเภท C ซึ่ง

ค่าช่วงความเค้นของทั้งสองตำแหน่งนี้มีค่าน้อยกว่าค่าขีดจำกัดความล้าสำหรับหน่วยแรงคงที่ (CAFL) ของรอยต่อที่มีกำลังความล้าในประเภท B อยู่ 16 ksi และค่า CAFL ของรอยต่อที่มีกำลังความล้าในประเภท B อยู่ 10 ksi ซึ่งมีโอกาสน้อยมากที่จะเกิดรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่จะเกิดขึ้น



(a) ตำแหน่งใกล้ปีกบน



(b) ตำแหน่งใกล้ปีกล่าง

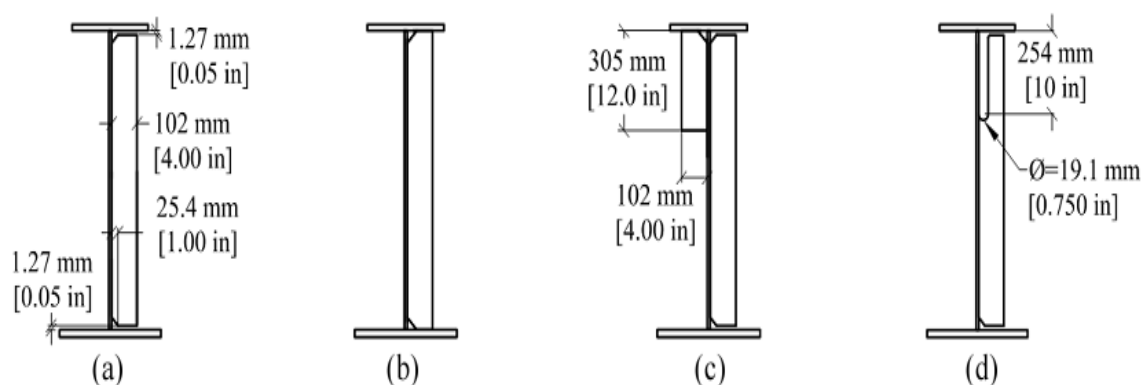
ภาพที่ 2.6 เกจวัดความเครียดในบริเวณ web gap ตำแหน่งใกล้ปีกบนและปีกล่าง (Zhou, 2006)

Hidayat (2008) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆของสะพานรูปไอเชิงประกอบต่อการโก่งตัวสัมพัทธ์ของคาน และ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างคานหลักกับชิ้นส่วนนอกระนาบ โดยที่ชิ้นส่วนนอกระนาบนี้ประกอบไปด้วย 2 ประเภท คือ ส่วนไดอะแฟรม และโครงเฟรมขวาง ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า web gap ดังภาพที่ 2.7 เนื่องจากเกิดหน่วยแรงสูงในบริเวณดังกล่าว ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำข้ามบนสะพานซึ่งสามารถนำไปสู่การเกิดรอยร้าวภายใต้ความล้าเนื่องจากการบิดอันมีสาเหตุหลักมาจากระยะการแอนตัวระหว่างคานข้าง เคียงที่ทำให้เกิดการบิดในนอกระนาบเกิดขึ้นจากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในแผ่นเอวของคานมากที่สุด คือความยาวของสะพานและคุณสมบัติของแผ่นเอว



ภาพที่ 2.7 บริเวณ web gap (a) จากชิ้นส่วนไดอะแฟรม (b) จากชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวาง

Hassel และคณะ (2010) ได้เสนองานวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคการซ่อมแซม (retrofit techniques) ด้วยวิธีต่างๆโดยวิเคราะห์จากแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อลดค่าหน่วยแรงที่เกิดจากการบิดนอกระนาบของบริเวณ web gap และการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้ เคียงของสะพานเหล็กโดยที่เทคนิคการซ่อมแซม 4 วิธีประกอบไปด้วย positive attachment, back-up stiffeners, slotted connection stiffeners และ interior cross frame removal โดยวิธี positive attachment คือการกำหนดให้ชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคานให้เชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกด้านบนและชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานเพื่อให้ปราศจากบริเวณ wab gap แต่สำหรับวิธี back-up stiffeners และวิธี slotted connection stiffeners จะไม่มีการเชื่อมติดกับชิ้นส่วนปีกด้านบนและล่างเหมือนในวิธีแรกแต่จะมีการเสริมชิ้นส่วนเพิ่มเติมที่ด้านหลังของแผ่นเหล็กเสริมข้างคานสำหรับวิธี back-up stiffeners และวิธี slotted connection จะลดการเชื่อมติดของแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับชิ้นส่วนเอวของคาน และวิธีสุดท้ายคือการปลดชิ้นส่วนคานขวางระหว่างคานใกล้เคียงกันออก ซึ่งเทคนิคเหล่านี้แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เทคนิคการซ่อมแซม (a) No- retrofit stiffener. (b) Positively attached stiffener. (c) Back-up transverse stiffener. (d). Slotted connection stiffener. (Hassel และคณะ)

ผลจากการวิเคราะห์จากแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของเทคนิคการซ่อมแซมทั้ง 4 วิธีแสดงให้เห็นว่าสามารถลดหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดจากการบิดนอกระนาบของบริเวณ web gap และการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ใกล้ เคียงของสะพานเหล็กโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีการซ่อมแซมดังตารางที่ 2.1 ซึ่งวิธี positive attachment สามารถลดหน่วยแรงที่เกิดจากการบิดนอกระนาบของบริเวณ web gap และการโก่งตัวสัมพัทธ์ได้มากที่สุดเกือบ 50% และ 32% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงนอกระนาบสูงสุดในบริเวณ web gap และค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน ของเทคนิคซ่อมแซมต่างๆ

Retrofit Description	Locally Applied Retrofit			
	Stress (MPa)	% ความแตกต่างเมื่อเทียบกับ no-retrofit	Δ (mm)	% ความแตกต่างเมื่อเทียบกับ no-retrofit
No Retrofit	103	-	0.249	-
Positive Attachment	80.7	-21%	0.222	-11%
Back-Up Stiffener	86	-1%	0.408	-5%
Slotted Stiffener	102	-16%	0.233	64%
Cross Frame Removal	98.5	-4%	0.532	114%
Retrofit Description	Globally Applied Retrofit			
	Stress (MPa)	% ความแตกต่างเมื่อเทียบกับ no-retrofit	Δ (mm)	% ความแตกต่างเมื่อเทียบกับ no-retrofit
No Retrofit	103	-	0.249	-
Positive Attachment	52.5	-49%	0.169	-32%
Back-Up Stiffener	69.2	-3%	0.570	-18%
Slotted Stiffener	99.4	-33%	0.205	129%
Cross Frame Removal	45.4	-56%	0.773	210%

2.2 การกระจายน้ำหนักทางขวาง (Lateral Load Distribution)

การกระจายน้ำหนักทางขวาง มีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบสะพาน ซึ่งน้ำหนักบรรทุกทุกจุดที่กระทำบนแผ่นพื้นของสะพานจะถูกกระจายไปยังคานที่รองรับแผ่นพื้น ตามรูปแบบต่างๆ ของสะพาน ซึ่งผลของการกระจายน้ำหนักจะไปยังแต่ละคาน ในแต่ละรูปแบบของสะพานก็จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าน้ำหนักบรรทุกทุกจุดที่เท่ากัน ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอสมการ การกระจายน้ำหนักทางด้านข้าง ในแต่ละรูปแบบของสะพานที่ทำการศึกษา ซึ่งในการคำนวณหาค่า ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง (LDF) ซึ่งเป็นสมการสำหรับค่าโมเมนต์ และแรงเฉือน ในแต่ละคาน ประกอบไปด้วยคานตัวใน และคานตัวนอก โดยที่สมการในการคำนวณหาค่า LDF ได้มีงานวิจัยที่เสนอสมการเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบสะพานรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะทบทวนงานวิจัยจากอดีตถึงปัจจุบัน ซึ่งในส่วนนี้ผู้วิจัยจะเสนอเฉพาะสมการ LDF ของคานตัวใน สำหรับค่าโมเมนต์ที่มีจำนวนช่องทางอย่างน้อยสองช่องทางจากราวเท่านั้น ดังต่อไปนี้

ข้อกำหนดมาตรฐาน AASHTO (1930) ได้เริ่มต้นเสนอสมการอย่างง่ายในการคำนวณตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง (LDF) สำหรับโมเมนต์ เพื่อใช้ในการออกแบบคานของสะพาน ซึ่งเป็นสมการที่ง่ายและสะดวกในการใช้ ดังสมการที่

$$LDF = \frac{S}{D} \quad (2.7)$$

โดยที่

S = ระยะห่างระหว่างคาน

D = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการรูปแบบของสะพาน และจำนวนของช่องทางจราจรที่รับน้ำหนัก

(lane loaded) ซึ่งได้กำหนดค่านี้ไว้ในข้อกำหนดมาตรฐานของ AASHTO (AASHTO 1996) โดยที่สมการ LDF สำหรับโมเมนต์สะพานที่เป็นรูปแบบแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็ก (concrete slab on steel girder bridges) และมีจำนวนช่องทางอย่างน้อยสองช่องทาง คือ

$$LDF = \frac{S}{5.5} \quad (\text{หน่วย US customary}) \quad (2.8)$$

$$LDF = \frac{S}{1.676} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.9)$$

ในส่วนของการ LDF ของโมเมนต์ สำหรับสะพานที่มีรูปแบบแผ่นพื้นเหล็กที่มีลักษณะเป็นตาราง วางบนคานเหล็ก (steel grids on steel beams) ของคานด้านในและมีจำนวนช่องทางอย่างน้อยสองช่องทาง คือ

- สำหรับความหนาของแผ่นพื้น ที่น้อยกว่า 0.10 เมตร

$$LDF = \frac{S}{1219} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.10)$$

- สำหรับความหนาของแผ่นพื้น ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 เมตร

$$LDF = \frac{S}{1524} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.11)$$

Zokaie (1991) ได้เสนอว่า สมการข้างต้น จะแสดงผลที่ถูกต้องเท่านั้นสำหรับเรขาคณิตทั่วไป เมื่อพารามิเตอร์ของสะพานมีความหลากหลาย เช่น สะพานที่มีการเอียงตามแนวขวาง (bridge skewness) ซึ่งสมการข้างต้นจะไม่ถูกต้องและปลอดภัยเพียงพอ

ข้อกำหนดมาตรฐาน AASHTO (AASHTO 1994) ได้มีการปรับปรุง สูตร S / D โดย the national cooperative highway research program (NHRCP) 12-26 มีโครงการพัฒนาสมการ LDF ซึ่งจะมีพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่รวมอยู่ในสูตรใหม่ด้วยซึ่งจะประกอบไปด้วย คือ ช่วงความยาวของสะพาน (L) , ความหนาพื้น (t_s) ระยะห่างระหว่างคาน (S) และค่าสติฟเนสตามแนวยาวของคาน (K_g) แต่ควรจะตระหนักว่าสูตรที่ได้รับการปรับปรุงนี้ จะต้องอยู่บนพื้นฐานที่มีระยะห่างระหว่างคานสม่ำเสมอ , โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน และ มุมเอียง รูปแบบจะต้องมีความต่อเนื่องของช่วงความยาวที่เท่ากันและผลกระทบไดอะแฟรมไม่รวมอยู่ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งสมการ LDF ที่เสนอจะเป็นสำหรับ โมเมนต์ดัด สำหรับคานภายใน โดยที่สะพานมีรูปแบบเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตวางอยู่บน คานเหล็ก (concrete slab on steel girder bridges) ในสะพานที่มีจำนวนช่องทางไม่น้อยกว่า 2 ช่องทางจราจร

$$LDF = 0.15 + \left(\frac{S}{3}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12 L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (\text{หน่วย US customary}) \quad (2.12)$$

$$LDF = 0.15 + \left(\frac{S}{914}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.13)$$

กำหนดให้ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆดังนี้ (Range of applicability)

$3.5f < S < 16f$, $20f \leq L \leq 200f$ และ $4.5 \leq t_s \leq 12$ โดยที่ค่า f กำหนดให้เท่ากับ 304.8 มม. (1 ฟุต)

โดยที่ S = ระยะห่างระหว่างคาน (ฟุต, มม.)

L = ความยาวช่วงสะพาน (ฟุต, มม.)

$K_g = n(I + Ae^2)$ = ค่าสติเฟเนสตามแนวยาวของคาน (นิ้ว⁴, มม.⁴)

t_s = ความหนาแผ่นพื้น (นิ้ว, มม.)

n = อัตราส่วนมอดุลัสระหว่าง เหล็ก และ คอนกรีต (E_s / E_c)

I = ค่าสติเฟเนสของคาน (นิ้ว⁴, มม.⁴)

A = พื้นที่หน้าตัดของคาน (นิ้ว², มม.²)

Mabsout และคณะ (1997) ได้คำนวณหาตัวคูณการกระจายน้ำหนักด้านข้าง ซึ่งได้สร้างแบบจำลองของสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาค่าโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หาดด้วยค่าโมเมนต์สูงสุด ที่ได้จากการวิเคราะห์คานช่วงเดียวแบบรองรับรับธรรมดา (simple beam)

AASHTO-LRFD (1998) เสนอสมการ LFD ที่ถูกต้องมากขึ้น ที่ใช้ได้สำหรับทุก ๆ รูปแบบสะพานซึ่งสมการที่ได้เสนอนี้ได้มาจากผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับสมการ LFD ใช้สำหรับสะพานในรูปแบบเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตวางอยู่บนคานเหล็ก ในสะพานที่มีจำนวนช่องทางไม่น้อยกว่า 2 เลน สำหรับคานภายใน

$$LDF = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12 L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (\text{หน่วย US customary}) \quad (2.14)$$

$$LDF = 0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.15)$$

กำหนดให้ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆดังนี้ (Range of applicability)

$1.1 < S < 4.9$ (m) , $6 < L < 73$ (m) และ $110 < t_s < 300$ (มม.)

ในส่วนของสมการ LDF ของโมเมนต์ สำหรับสะพานที่มีรูปแบบแผ่นพื้นเหล็กที่มีลักษณะเป็นตาราง วางบนคานเหล็ก (steel grids on steel beams) ของคานภายในและมีจำนวนช่องทางอย่างน้อย 2 ช่องทางจราจร คือ

- สำหรับความหนาของแผ่นพื้น ที่น้อยกว่า 0.10 เมตร

$$LDF = \frac{S}{2400} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.16)$$

- สำหรับความหนาของแผ่นพื้น ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 เมตร

$$LDF = \frac{S}{3050} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.17)$$

โดยกำหนด ระยะห่างระหว่างคาน (S) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3200 มม.

Zokaie (2000) ได้คำนวณสมการ LDF จากการศึกษาวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปที่จะวิเคราะห์ที่ถูกต้องโดยที่รูปแบบของพื้นสะพานที่สร้างขึ้นในโปรแกรม จะต้องมีความละเอียดเพื่อให้ได้มาซึ่งพฤติกรรมที่แท้จริงของพื้นสะพาน ซึ่งเขาได้ใช้โปรแกรม GENDEK5A โดยมีการกำหนดรูปแบบของแผ่นพื้นสะพานให้เป็นชิ้นส่วนแบบแผ่น (plate elements) และได้เลือกข้อมูลตัวแปรต่างๆจากหลายร้อยสะพานโดยการสุ่มเลือกจากข้อมูลของ National Bridge Inventory File (NBIF) หลังจากได้ทำการวิเคราะห์ก็ได้มีการตรวจสอบผลที่ได้โดยการเปรียบเทียบจากผลของตัวแปรต่างๆ เขาจึงได้สมการซึ่งมีรูปแบบคล้ายกับสมการของ (AASHTO 1998) โดยที่สมการที่แสดงจะเป็นสมการของการกระจายโมเมนต์สำหรับคานภายใน (interior girders) ใน สะพานที่มีจำนวนช่องทางไม่น้อยกว่า 2 ช่องทาง

$$LDF = 0.15 + \left(\frac{S}{9.5f} \right)^{0.6} \left(\frac{S}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{Lt_s^3} \right)^{0.1} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.18)$$

กำหนดให้ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆดังนี้ (Range of applicability)

$$3.5f < S < 16f \quad \text{และ} \quad 20f \leq L \leq 240f \quad \text{โดยที่ค่า } f \text{ กำหนดให้เท่ากับ } 304.8 \text{ มม. (1 ฟุต)}$$

Chaisomphob และ Lertsima (2000) ได้ศึกษาคำนวณค่า LDF ของสะพานเหล็กข้ามแยกในกรุงเทพฯ 3 รูปแบบ โดยใช้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วย สะพานรูปแบบที่ 1 มีระบบแผ่นพื้นเป็นแผ่นเหล็กแบบออร์โทโทรปิก และระบบ

คานเป็นแบบแผ่นเหล็กประกอบ (plate girder) , สะพานรูปแบบที่ 2 เป็นสะพานคานเหล็กรูปไอเชิงประกอบซึ่งมีแผ่นพื้นคอนกรีตและคานเหล็กรูปตัวไอ และสะพานรูปแบบที่ 3 มีระบบแผ่นพื้นเป็นแผ่นเหล็กแบบออร์โทโทรพิก และระบบคานเป็นองค์ประกอบแผ่นเหล็กที่ขึ้นส่วนประกอบซึ่งถูกจัดให้เป็นรูปแบบกล่องปิด ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้รถบรรทุกสิบล้อในไทยถูกจัดวางที่ตำแหน่งต่างๆของช่วงความยาวสะพานเฉพาะช่องทาง ด้านนอก ซึ่งมี 3 รูปแบบในการจัดวางรถบรรทุก 1 , 2 และ 3 คัน ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงความยาวสะพานของแต่ละรูปแบบสะพาน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่า LDF เมื่อเปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการ ตามมาตรฐาน AASHTO 1996 ซึ่งในสะพานรูปแบบที่ 1 ที่คานด้านนอกพบว่ามีค่า LDF สูงกว่าสมการของ AASHTO ประมาณ 8% แต่สำหรับคานภายในมีค่า LDF ต่ำกว่าสมการของ AASHTO ประมาณ 47% , ในสะพานรูปแบบที่ 2 พบว่าที่คานด้านนอกและคานด้านในมีค่า LDF ต่ำกว่าสมการของ AASHTO 16 % และ 57% ตามลำดับ และในสะพานรูปแบบที่ 3 พบว่ามีค่า LDF ต่ำกว่าสมการของ AASHTO ประมาณ 52% ซึ่งจากการผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าค่า LDF ตามมาตรฐาน AASHTO ให้ค่าที่ปลอดภัยกว่าผลจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับสะพานรูปแบบที่ 2 และ 3 ยกเว้นที่คานด้านนอกของสะพานรูปแบบที่ 1

Nesvold (2002) ได้เสนอสมการขึ้นมาใหม่โดยนำสมการ LDF ของ AASHTO 1998 มาใช้ โดยพิจารณาที่พจน์สุดท้ายของ AASHTO 1998 นั่นคือ $(K_g / 12.L.t_s)^{0.1}$ ซึ่งเขาได้เปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ $(y.E.t_s / S^3)^x$ โดยที่ y และ x คือ ค่าคงที่ ซึ่งรูปของสมการที่ได้เสนอมานี้ได้พิสูจน์มาจากสมการระยะแอนตัวที่ปลายคานยื่น แล้วจัดรูปให้คล้ายกับสมการของ AASHTO 1998 ซึ่งเขาได้ใช้รูปแบบสะพาน 49 แบบสะพานใช้ในการวิเคราะห์หาค่า y และ x ซึ่งเท่ากับ -0.11 และ 5.568×10^{-7}

$$LDF = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{5.568 \cdot 10^{-7} E t_s^3}{S^3}\right)^{-0.11} \quad (\text{US customary unit}) \quad (2.19)$$

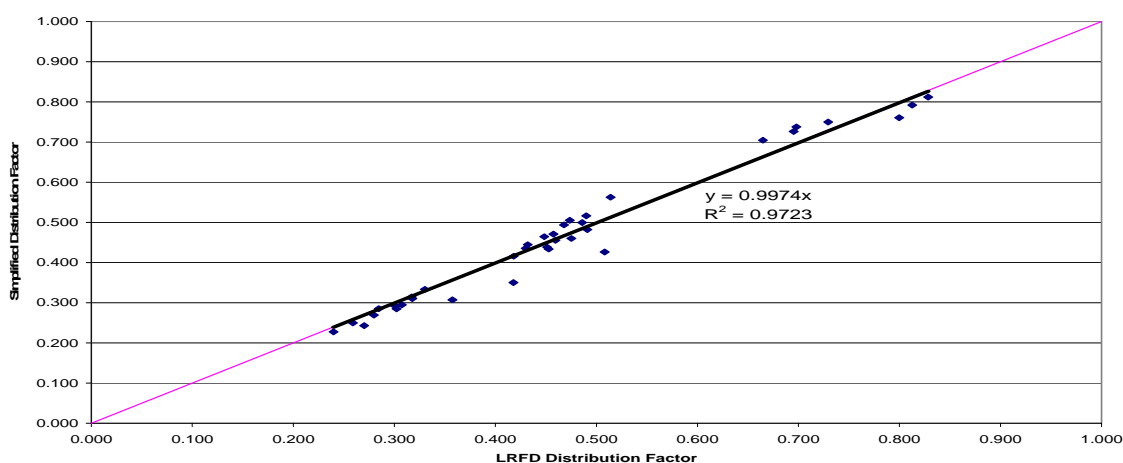
โดยที่ S = ระยะห่างระหว่างคาน (ฟุต)

L = ความยาวช่วงสะพาน (ฟุต),

t_s = ความหนาแผ่นพื้น (นิ้ว) และ

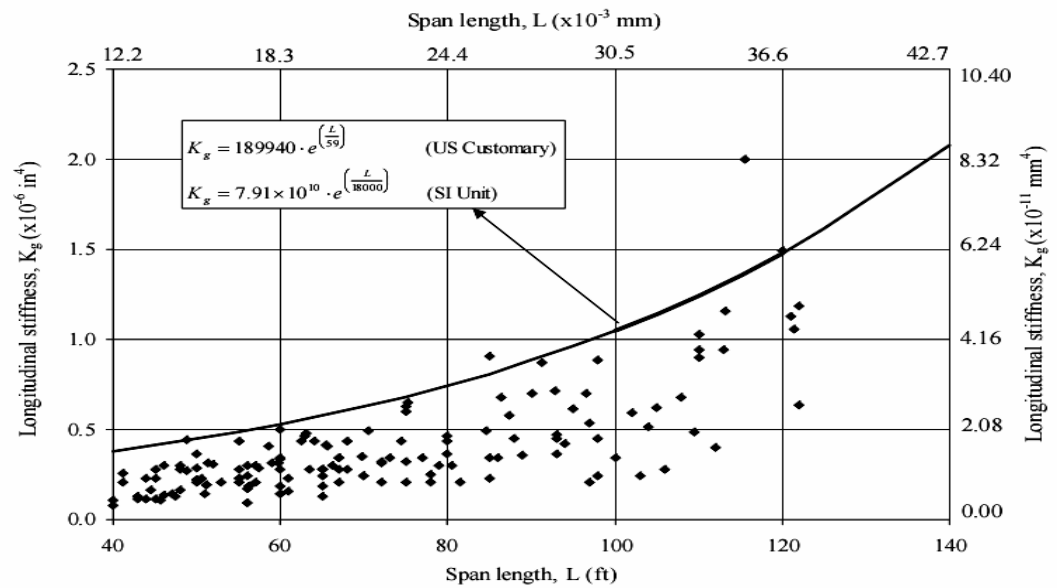
E = ค่าอีลาสติกโมดูลัสของเหล็ก (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, psi)

จากนั้นได้ทำการตรวจสอบสมการ LDF เสนอขึ้นมาใหม่ กับ สมการ LDF ของ AASHTO 1998 มาพล็อตดังภาพที่ 2.9 โดยใช้ค่ายังมอดูลัสของคอนกรีต และ ค่ายังมอดูลัสของเหล็ก เท่ากับ 3.6×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 29×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วได้ลากเส้นตรงที่ดีที่สุดผ่านจุดข้อมูลเป็นเส้นตรงแล้วหาค่าความชันได้เท่ากับ 0.9974 ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากสมการของ AASHTO 1998 เท่ากับ 3 %



ภาพที่ 2.9 รูปกราฟเปรียบเทียบค่าLDFจากสมการที่เสนอใหม่ของ Nesvold (2002) กับสมการของ AASHTO 1998

Sotelino และคณะ (2004) ได้เสนอสมการ LDF ง่ายขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีพื้นฐานตามสมการ LDF ของ AASHTO LRFD 1994 ซึ่งได้มีการลดรูปสมการให้ง่ายขึ้นโดยทำให้อยู่ในรูปของความยาวช่วงสะพาน (L) โดยใช้รูปแบบสะพานทั้งหมด 43 สะพานที่เป็นรูปแบบคานเหล็ก กำหนดค่าของความหนาพื้นเท่ากับ 8 นิ้ว ซึ่งสมการที่ถูกสร้างขึ้นมานี้ ค่าของสตีเฟนตามแนวยาวของสะพาน สามารถแทนด้วยเส้นที่ครอบคลุมค่าความยาวช่วงสะพานต่างๆด้วยสมการในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งสามารถครอบคลุมได้ทุกสะพาน ซึ่งจะมีความถูกต้องและปลอดภัยมากกว่าเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.10 และกำหนดให้ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.10 Trend line สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า Kg กับ ค่า L (Sotelino และคณะ, 2004)

$$LDF = 0.15 + 0.042 \left(\frac{S^{0.8}}{L^{0.3}} \right) \exp \left(\frac{L}{180000} \right) \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.20)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆ ของสมการ LDF ของ Sotelino และคณะ (2004)

Parameters	Girder Spacing: S,ft (mm)	Span Length: L,ft (mm)	Slab Thickness: t_s , in (mm)	Skew Angle (θ , degree)
Applicable Range	4 – 10 (1220 – 3050)	44 – 122 (13400 – 37200)	8 (200)	0 - 45

โดยที่ S = ระยะห่างระหว่างคาน (มม.)

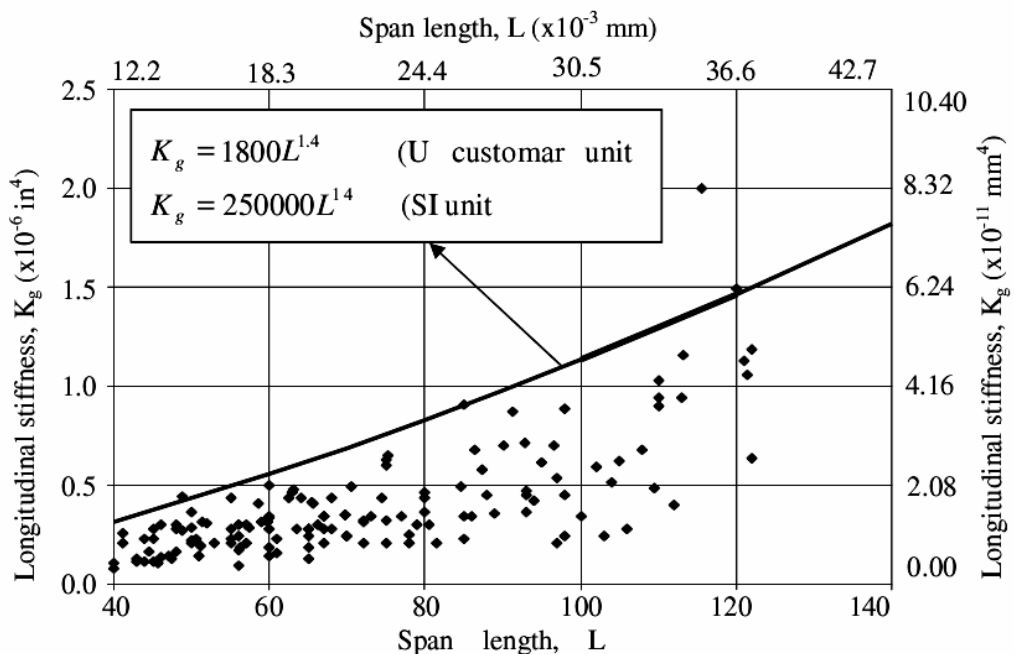
L = ความยาวช่วงสะพาน (มม.)

Cai (2005) ได้นำเสนอสมการใหม่ขึ้นมาที่มีเหตุผลมากขึ้น เพื่อให้เรียบง่ายและซับซ้อนน้อยลง ซึ่งการศึกษาขึ้นอยู่กับโครงการ NCHRP 12-62 ที่ต้องการพัฒนาสูตรการออกแบบมีเหตุผลมากขึ้นสำหรับสะพานทั่วไป โดยนำสมการที่ได้เสนอมี พารามิเตอร์เช่นเดียวกับ สมการของ

AASHTO 1998 แต่จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันเลขชี้กำลัง ตามสมการดังนี้ซึ่งจะนำเสนอสมการ LDF ของโมเมนต์ สำหรับคานภายใน และสะพานที่มีจำนวนช่องทางไม่น้อยกว่า 2 เลน

$$LDF = 0.15 + \left(\frac{S}{22}\right)^{0.6} \cdot 0.77 \left(\frac{S}{L}\right)^{0.75} \left(\frac{K_g}{12Lt_s^3}\right)^{0.25} \quad (\text{หน่วย US customary}) \quad (2.21)$$

Phuvoravan (2006) ได้เสนอว่า จากสมการของ AASHTO LRFD 1994 ที่ได้นำเสนอสมการ LDF ขึ้นมาใหม่ที่มาจากผลของโครงการ NCHRP 12-26 ซึ่งสมการของ AASHTO LRFD 1994 จะเกี่ยวเนื่องกับ ค่าสติเฟนตามแนวยาวของคาน (longitudinal stiffness, K_g) ซึ่งจะไม่ทราบค่านี้ในขั้นแรกในการออกแบบ ดังนั้น ต้องมีขั้นตอนการทำซ้ำที่กำหนดค่า LDF ได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้เกิดการยอมรับอย่างกว้างขวาง ซึ่งได้ทำการศึกษสมการที่ง่ายขึ้นใหม่บนพื้นฐานของสมการของ AASHTO LRFD ซึ่งได้พัฒนาโดยที่ไม่ต้องใช้ขั้นตอนในการทำซ้ำ (iterative) การศึกษานี้ได้เลือก 43 แบบสะพานและวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีความซับซ้อน ในการศึกษานี้ได้คำนวณหาค่า longitudinal stiffness (K_g) ให้อยู่ในรูปของ ความยาวช่วงสะพาน (L) ซึ่งทำการพล็อตค่าระหว่าง K_g กับ L ดังภาพที่ 2.11 โดยมีฐานข้อมูลมาจาก NCHRP project 12-26 โดยที่ค่า ความหนาของแผ่นพื้นจะถูกสมมติให้เท่ากับ 8 นิ้ว (200 มม.)



ภาพที่ 2.11 Trend line สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Kg กับ ค่า L (Phuvoravan, 2006)

สมการที่ให้นำเสนอใหม่นี้ได้มีพื้นฐานโดยใช้สมการของ AASHTO 1994 โดยการแทนค่าของ K_g ลงในสมการของ AASHTO 1994 โดยที่มีข้อกำหนดเหมือนกับสมการเดิมซึ่งเป็น สมการ LDF สำหรับโมเมนต์ของคานภายในในรูปแบบของสะพานที่เป็นพื้นคอนกรีตวางอยู่บนคานเหล็ก และ สะพานที่มีจำนวนช่องทางไม่น้อยกว่า 2 เลน

$$LDF = 0.15 + \left(\frac{S^{0.8}}{2.19L^{0.16}} \right) \quad (\text{หน่วย US customary}) \quad (2.22)$$

$$LDF = 0.15 + \left(\frac{S^{0.8}}{85L^{0.16}} \right) \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (2.23)$$

โดยที่

S = ระยะห่างระหว่างคาน (มม.)

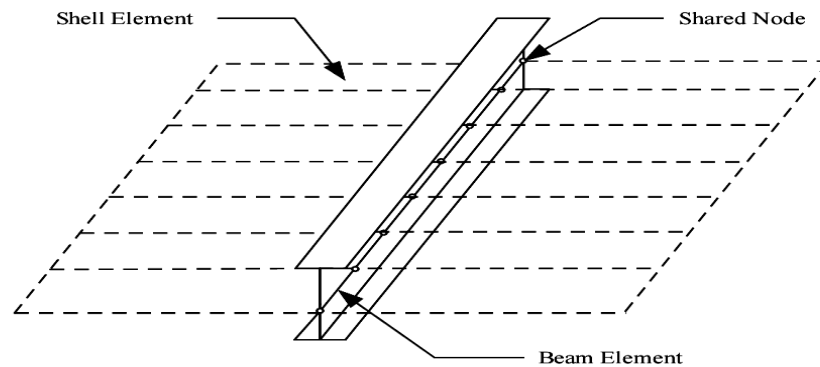
L = ความยาวช่วงสะพาน (มม.)

2.3 แบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับใช้หาผลลัพธ์โดยประมาณของ ปัญหาต่างๆ โดยจะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) เอลิเมนต์ ที่ถูกแบ่งเหล่านี้จะเชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาตัวแปรตาม (dependent variables) ในส่วนของปัญหาทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้หาค่าของหน่วยแรงต่างๆ และ ระยะการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนในโครงสร้าง เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และได้ถูกนำมาใช้ในงานออกแบบทางวิศวกรรมโยธา เช่น โปรแกรม SAP2000 โปรแกรม ANSYS และ โปรแกรม ABAQUS เป็นต้น ข้อดีของการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ปัญหา คือ สามารถลดค่าใช้จ่ายและลดระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในภาคสนาม ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น การกำหนดชิ้นส่วนต่างๆ

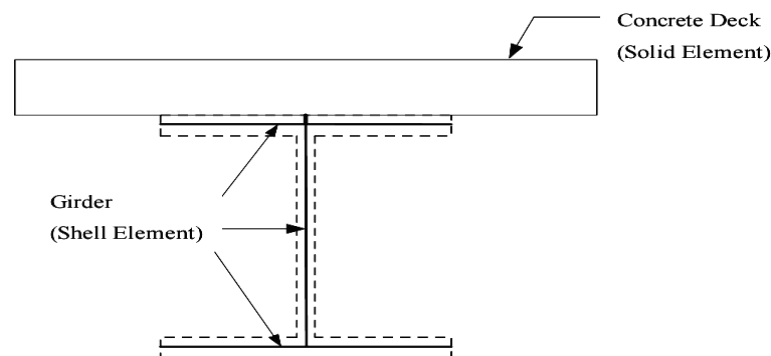
Hays Jr. และคณะ (1986) กับ Mabsout และคณะ (1997) สร้างแบบจำลองของ สะพานรูปตัวไอโดยจำลองแผ่นพื้นโดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีดิกิริอิสระต่อจุดต่อเท่ากับ 5 ดิกิริอิสระ และจำลองคานรูปตัวไอเป็นชิ้นส่วนคาน 3 มิติ ซึ่งมีดิกิริอิสระต่อจุดต่อเท่ากับ

5 ดีกรีอิสระ ที่แสดงดังภาพที่ 2.12 แผ่นพื้นของสะพานและคานเหล็กมีจุดต่อร่วมกัน วิธีการนี้เป็นหลักของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ ซึ่งจะไม่สามารถยึดกันไว้ระหว่างศูนย์กลางของคานเหล็กและศูนย์กลางของแผ่นพื้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถเข้าได้ถึงเงื่อนไขขอบเขตของระบบที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งฐานรองรับของแผ่นพื้นในระบบจริงจะถูกวางไว้ที่ตำแหน่งด้านล่างของคานเหล็กมากกว่าที่จะถูกวางอยู่ที่ระดับศูนย์กลางของแผ่นพื้น



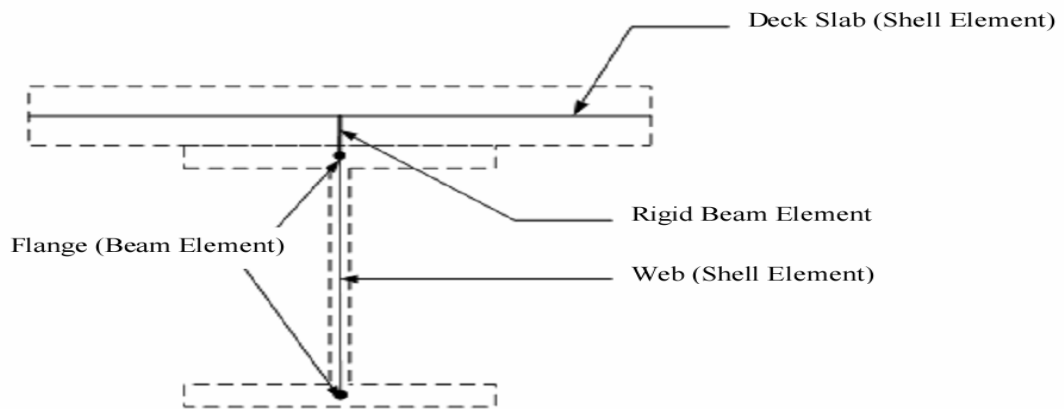
ภาพที่ 2.12 แบบจำลองของ Hays Jr. (1986) และคณะ และ Mabsout และคณะ (1997)

Tarhini และ Frederick (1992), Mabsout และคณะ (1997), Eom และ Nowak (2001), Baskar และคณะ (2002) กับ Queiroz และคณะ (2007) แบบจำลองของสะพานรูปตัวไอโดยใช้ linear solid brick elements 8 จุดต่อ ในการจำลองแผ่นพื้นคอนกรีต ประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ได้อิสระ 3 ดีกรีอิสระในแต่ละจุดต่อในส่วนของคานจำลองให้เป็น ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งรูปสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งไม่ได้กำหนดจำนวนจุดต่อในส่วนของคาน สำหรับโครงเฟรมทางขวางถูกจำลองให้เป็นชิ้นส่วนโครงข้อหมุน 3 มิติ ซึ่งมี 2 จุดต่อ



ภาพที่ 2.13 แสดงแบบจำลองของ Tarhini, Frederick, Mabsout และคณะ, Eom, Nowak, Baskar และคณะ, Queiroz และคณะ

Tabsh และ Tabatabai (2001) กับ Issa และคณะ(2000) จำลองแผ่นพื้นโดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง 4 จุดต่อรูปสี่เหลี่ยม ประกอบไปด้วย ดีกรีอิสระจำนวน 6 ดีกรีอิสระต่อหนึ่งจุดต่อและในแต่ละส่วน ประกอบของคานเหล็ก เช่น ปีกบน,ปีกล่าง และเอว ได้สร้างแบบจำลองแยกกันโดยที่ชิ้นส่วนปีกบน และปีกล่างจำลองให้เป็นชิ้นส่วนแบบคาน 2 จุดต่อ ประกอบไปด้วย ดีกรีอิสระจำนวน 6 ดีกรีอิสระ ต่อหนึ่งจุดต่อ และ ชิ้นส่วนเอว จำลองให้ใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง 4 จุดต่อรูปสี่เหลี่ยม สำหรับในส่วนของโครงเฟรมทางขวางถูกจำลองให้ใช้ชิ้นส่วนแบบคาน 2 จุดต่อ ถูกนำมาใช้ให้การประกอบกันระหว่างแผ่นพื้นและคาน มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ (full composite action) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 เช่นเดียวกับกับ Bishara และคณะ (1993) ได้ใช้เทคนิคในการสร้างแบบจำลองของคานเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่การสร้างแบบจำลองของแผ่นพื้นโดย Bishara และคณะ (1993) ได้ใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่น (plate elements) 3 จุดต่อรูปสามเหลี่ยม ซึ่งแตกต่างกับการจำลองของ Machado และคณะ(2008) ได้ใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง 4 จุดต่อรูปสี่เหลี่ยมจำลองแผ่นพื้นเหมือนกับ Tabsh และ Tabatabai (2001) และ Issa และคณะ (2000) แต่ในส่วนของ ปีกบน,ปีกล่าง และเอว ได้สร้างแบบจำลองเหมือนกันโดยจำลองให้เป็นชิ้นส่วนแบบคานของออยเลอร์ (Euler beam element) 2 จุดต่อ 3 มิติ

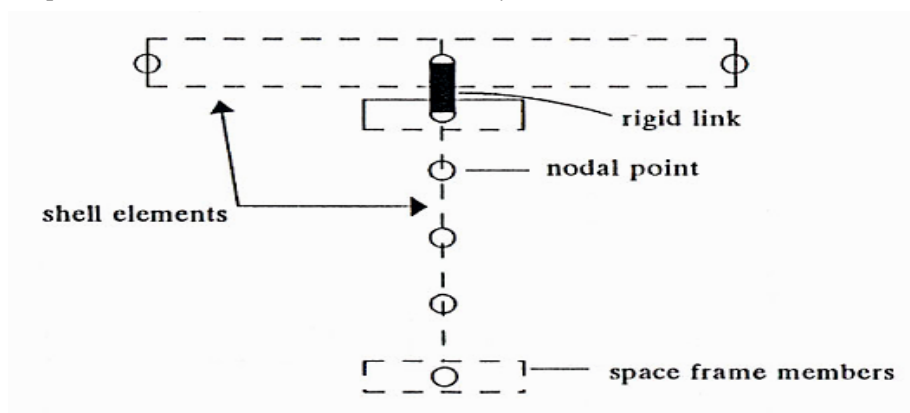


ภาพที่ 2.14 แบบจำลองของ Tabsh,Tabatabai (2001), Issa และคณะ(2000), Bishara และคณะ(1993), Machado และคณะ(2008)

Marx (1985) และ Sadek และ Tawfik (2000) ได้ใช้ 9 จุดต่อ Lagrangian elements ตาม ทฤษฎีแผ่น Mindlin ในการกำหนดจุดต่อของชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (shell element) และ กำหนด 3 จุดต่อของ Timoshenko ในชิ้นส่วนแบบคาน (beam elements) ที่รวมถึงการเปลี่ยนรูปจากแรงเฉือน เนื่องจากทุก ฟังก์ชันรูปร่างกำลังสอง (quadratic shape functions) ซึ่งสามารถ

มั่นใจได้ว่ามีความเข้ากันของการเคลื่อนที่ตามแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (shell element) และชิ้นส่วนแบบคาน (beam elements)

Brockenbrough (1986) ได้สร้างแบบจำลองของแผ่นพื้น โดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง 4 จุดต่อ ที่ได้รวมผลขององค์ประกอบเมมเบรน (membrane) และองค์ประกอบการดัด (bending) สำหรับในแบบจำลองของคานเหล็กรูปตัวไอ (steel I-girder) ที่แบ่งออกเป็นสองส่วนประกอบ คือ ชิ้นส่วนปีก และเอว โดยที่ ชิ้นส่วนปีกถูกไฮดริลไลซ์ โดยใช้ ชิ้นส่วนแบบคานของฮอยเลอร์ และ ชิ้นส่วนเอวถูกจำลองโดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง 4 จุดต่อ ที่แสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงแบบจำลองของ Brockenbrough (1986)

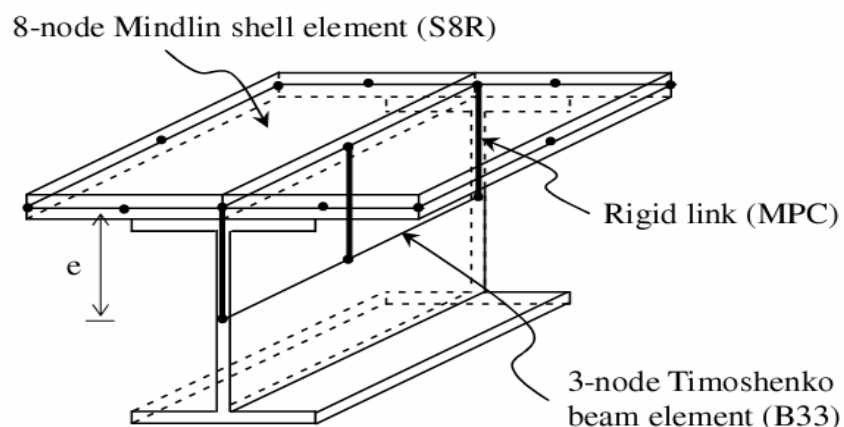
Chan and Chan (1999) สร้าง eccentric beam model ขึ้นโดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้กล่าวว่าการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยให้การตรวจสอบการกระจายน้ำหนัก ล้อของขบวนเป็นไปได้อย่างแม่นยำมากขึ้นกว่าการใช้สูตร หลังจากที่ได้ศึกษาตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการสรุปได้ว่า eccentric beam model ที่ได้ถูกจำลอง ขึ้นโดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่เหมือนจริงของพฤติกรรมสะพานแต่ต้องตระหนักถึงการรักษา ความเรียบง่ายซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์รายละเอียดของระบบเหล่านี้

Chaisomphob, T และ Lertsima, C (2000) ได้สร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของสะพาน 3 รูปแบบ โดยใช้โปรแกรม MARC ในการคำนวณหา LDF ประกอบไปด้วย สะพานรูปแบบที่ 1 มีระบบแผ่นพื้นเป็นแผ่นเหล็กแบบออร์โทโทโรปิก และระบบคานเป็นแบบแผ่นเหล็กประกอบ, สะพานรูปแบบที่ 2 เป็นสะพานคานเหล็กรูปตัวไอเชิงประกอบซึ่งมีแผ่นพื้นคอนกรีต และคานเหล็กรูปตัวไอเชื่อมต่อกันโดย rigid link ระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตและคานเหล็ก และ

สะพานรูปแบบที่ 3 มีระบบแผ่นพื้นเป็นแผ่นเหล็กแบบออร์โทโทโรปิคและระบบคานเป็นองค์ประกอบแผ่นเหล็กที่ขึ้นส่วนประกอบซึ่งถูกจัดให้เป็นรูป แบบกล่องปิด (steel box girder) โดยไอตีลไลซ์ ขึ้นส่วนแผ่นพื้น และคานเหล็กทั้งหมดโดยใช้ขึ้นส่วนแบบแผ่น 4 จุดต่อรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งกำหนดฐานรองรับของสะพานให้เป็นเงื่อนไขของคานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดา

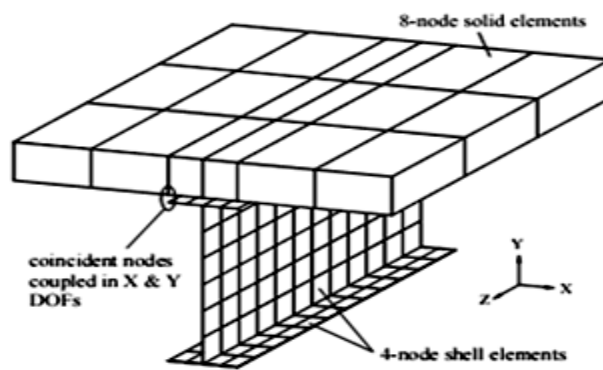
Lu Fu (2003) ได้ไอตีลไลซ์ ขึ้นส่วนปีกในคานเหล็ก ด้วยขึ้นส่วนแบบแผ่น (plate elements) และขึ้นส่วนเอว ด้วยขึ้นส่วนความเค้นในระนาบ (plane stress elements) ระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างพื้นคอนกรีต และขึ้นส่วนปีกของคานเหล็ก ได้สร้างแบบจำลองโดยการเชื่อมโดย rigid link แต่ไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับการได้รับผลกระทบที่มีความขัดแย้งกันในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนระหว่างคานและแผ่นพื้น

Phuvoravan (2006) สร้างแบบจำลองสะพานรูปไอเชิงประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS โดยที่แผ่นพื้นคอนกรีตถูกแบบจำลองโดยใช้ ขึ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง มี 8 จุดต่อ ซึ่งรวมระหว่างขึ้นส่วนแผ่นดัด (plate bending elements) และองค์ประกอบเมมเบรน (membrane) ในขณะที่ คานเหล็กรูปไอ สร้างแบบจำลองเป็นขึ้นส่วนแบบคาน (beam elements) ให้มี 3 จุดต่อ แบบจำลองนี้รวมสององค์ประกอบของ ขึ้นส่วนของแผ่นพื้นคอนกรีต และคานเหล็กรูปไอ ต้องแน่ใจว่ามีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ ระหว่างแผ่นพื้นและคานแบบจำลองนี้ใช้ไม่ได้กับ พฤติกรรมไม่เชิงประกอบ โดยที่การจะทำให้เป็นพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณได้ การเชื่อมต่อโดยใช้ rigid links ระหว่างจุดเซ็นทรอยด์ของขึ้นส่วนคานและเซ็นทรอยด์ของแผ่นพื้น ดังแสดงในภาพที่ 2.16

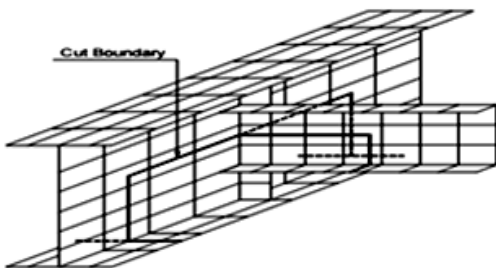


ภาพที่ 2.16 แสดง Eccentric Beam Model ของ Kitjapat (2006)

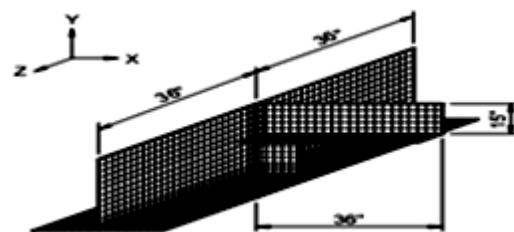
Zhao และ Roddis (2003) สร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยจำลอง 2 แบบจำลอง ประกอบไปด้วย แบบจำลองแบบหยาบ (coarse model) และแบบจำลองย่อย (sub model) ในแบบจำลองแบบหยาบมีจุดประสงค์หลักในวิเคราะห์ถึงการกระจายน้ำหนักของยวดยาน แผ่นพื้นคอนกรีตกำหนด ให้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic material properties) และ แผ่นพื้นคอนกรีตจำลองโดยใช้ brick elements 8 จุดต่อแผ่นพื้นที่ติดกับชิ้นส่วนปีกด้านบนของคานถูกกำหนดให้เกิดพฤติกรรมร่วมกันในการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ แนว แกน y แต่แตกต่างกันในพฤติกรรมตามยาวในแนวแกน z สำหรับในส่วนของคาน, ไดอะแฟรม, และแผ่นเหล็กเสริมข้างคานจำลองให้เป็นชิ้นส่วน shell elements ดังแสดงในภาพที่ 2.17 (a) สำหรับแบบจำลองย่อยซึ่งจำลองชิ้นส่วนต่างๆ เหมือนกับแบบจำลองแบบหยาบ แต่ทำการตัดขอบ เขตแบบจำลองแบบหยาบ ดังแสดงในภาพที่ 2.17 (b) กำหนดให้เป็นแบบจำลองย่อยโดยมีความละเอียดในการแบ่งชิ้นส่วนมากกว่า ดังภาพที่ 2.17 (c) โดยนำการประมาณค่าของผลการเคลื่อนที่จากแบบจำลองหยาบมาและนำไปใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองย่อย



(a) การกำหนดชิ้นส่วนแบบจำลอง



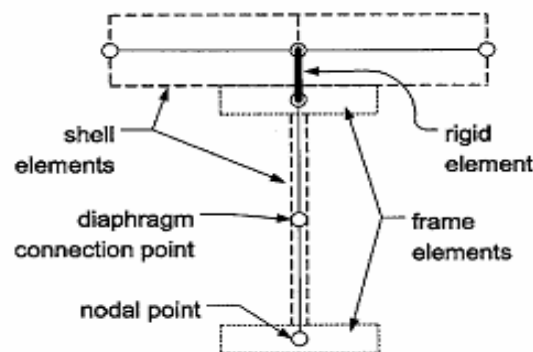
(b) แบบจำลองหยาบ



(c) แบบจำลองละเอียด

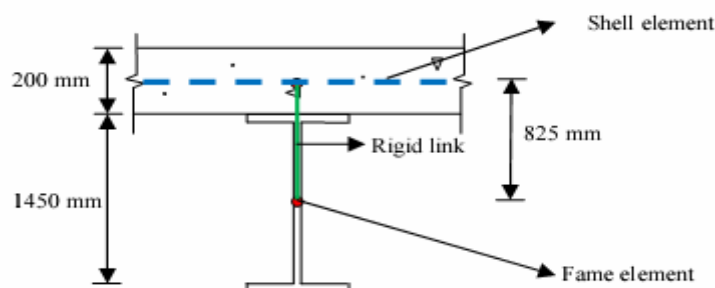
ภาพที่ 2.17 แสดงแบบจำลองของ Yuan Zhao และ W. M. Kim Roddis (2003)

Berglund and Schultz (2006) ใช้โปรแกรม SAP2000 Nonlinear เพื่อสร้างแบบจำลอง ชั้นส่วนของสะพานเป็น 3 มิติ โดยจำลองให้ชั้นส่วนแผ่นพื้นและชั้นส่วนเอวของคานเป็นชั้นส่วนแบบแผ่นโค้งและในส่วนของ ชั้นส่วนปีกของคานจำลองให้เป็นชั้นส่วนโครงข้อแข็ง (frame elements) แล้วเชื่อมต่อระหว่างชั้นส่วนของแผ่นพื้นกับคานเหล็กด้วย Rigid links เพื่อให้ได้ถึงพฤติกรรมการประกบกันของสองชั้นส่วนนี้ดังภาพที่ 2.18 ชั้นส่วนเอวของคานถูกจำลองให้เป็นชั้นส่วนแบบแผ่นโค้ง 2 ชั้นส่วน เพื่อให้ชั้นส่วนของไดอะแฟรม สามารถเชื่อมต่อที่จุดต่อเดียวกันได้



ภาพที่ 2.18 แสดงแบบจำลองของ Berglund and Schultz

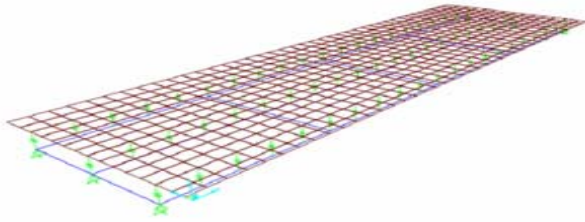
Syidik Hidayat (2008) ได้ทำสร้างแบบจำลองสะพานรูปไอเชิงประกอบด้วยแบบจำลอง finite element 3 มิติ โดยใช้ โปรแกรม SAP 2000 ในการสร้างแบบจำลองโดยที่กำหนดให้ส่วนของแผ่นพื้นคอนกรีตเป็นชั้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (Shell element) และส่วนของคานรูปตัวไอจำลองให้เป็นชั้นส่วนแบบคาน 3 มิติ (3D-Beam element) ซึ่งรูปแบบของสะพานนี้เป็นสะพานที่มีชั้นส่วนตามขวาง 2 ส่วน คือ ส่วนโครงเฟรมทางขวาง และ ส่วนของไดอะแฟรม และมีการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพื้นกับส่วนของคานโดย rigid link ดังภาพที่ 2.19



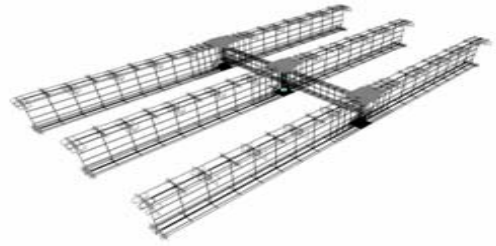
ภาพที่ 2.19 แบบจำลองของ Hidayat (2010)

โดยทำการสร้างแบบจำลองโดยแบ่งเป็น 2 แบบจำลอง ประกอบไปด้วยแบบจำลองหลัก (Global model) ดังรูปที่ 2.20 หลักเพื่อใช้ทำการศึกษาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง และการโก่งตัว

สัมพันธ์ โดยที่แบบจำลองหลักนี้ได้ทำการปรับแก้แบบจำลองให้ให้มีพฤติกรรมของหน่วยแรงต่างๆ ตรงกับข้อมูลที่ได้ตรวจวัดในภาคสนามซึ่งทำการปรับแก้โดยปรับระยะความหนาของแผ่นพื้น ส่วนในแบบจำลองที่สอง คือ แบบจำลองย่อย (Sub model) ซึ่งมีความละเอียดของการแบ่งชิ้นส่วนมากขึ้นในบริเวณ web gap เพื่อใช้ทำการศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณนั้น ดังภาพที่ 2.21

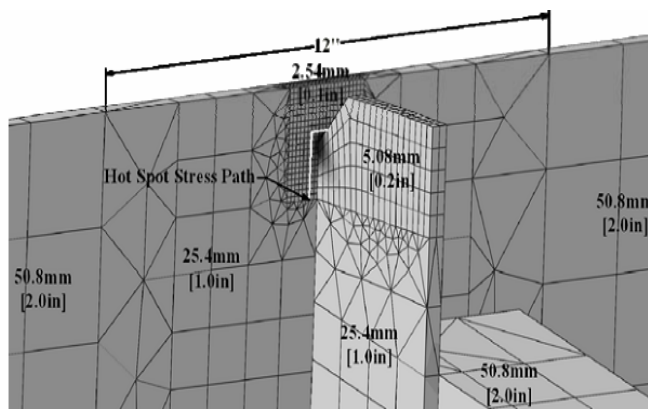


รูปที่ 2.20 แบบจำลองหลัก (global model)



รูปที่ 2.21 แบบจำลองย่อย (sub model)

Hassel และคณะ (2010) ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคในการลดผลของหน่วยแรง เนื่องจากการบิดในสะพานเหล็กรูปตัวไอมีระบบแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ระบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (3-D linear-elastic finite element) ในการวิเคราะห์ผล โดยใช้โปรแกรม ABAQUS v.6.8-2 โดยที่ คาน, โครงเฟรมทางขวาง และแผ่นพื้นคอนกรีต ถูกจำลองให้เป็น brick elements 8 จุดต่อ ซึ่งความหนาแน่นในการทำให้เป็นตะแกรงจำลองจะมีความหยาบและละเอียดแตกต่างกันในแต่ละบริเวณ การกำหนดความหนาแน่นในการทำให้เป็นตะแกรงจะมีการ กำหนดความหนาแน่นในการแบ่งชิ้นส่วนย่อย (mesh) มากที่สุดบริเวณรอยต่อด้านบนระหว่างแผ่นเอวของคานกับแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ดังภาพที่ 2.22 ซึ่งบริเวณนี้คือบริเวณ web gap ซึ่งจำนวนชิ้นส่วนทั้งหมดในแบบจำลองมีประมาณ 750,000 ชิ้นส่วน



ภาพที่ 2.22 ความหนาแน่นในการทำให้เป็นตะแกรงของบริเวณ web gap

(Hassel และคณะ, 2010)

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1 ความล้า (Fatigue)

ความล้าเป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำไปมากระทำอยู่นานจนกระทั่งเกิดการวิบัติเมื่อหน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงคราก การวิบัติโดยปกติจะเริ่มจากรอยแตกหรือรอยร้าวเพียงจุดเล็กๆ แล้วขยายใหญ่ขึ้นเป็นรอยแตกขนาดใหญ่จนถึงขั้นวิบัติในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งการวิบัติสามารถเกิดขึ้นโดยไม่มีสัญญาณใดๆ เตือนล่วงหน้าก่อน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้เห็นชัดเจนซึ่งการวิบัติจะเกิดคล้ายกับการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) ซึ่งจุดที่มักเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าว คือ บริเวณที่มีหน่วยแรงคอนเซนเทรชันสูง เช่น บริเวณรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากในบริเวณรอยเชื่อมจะมีรอยตำหนิขนาดเล็กอยู่ซึ่งเกิดจากกระบวนการเชื่อม และรอยตำหนิขนาดเล็กนี้จะทำให้เกิดผลของความหนาแน่นของความเค้นเพิ่มมากขึ้นจากลักษณะของรอยเชื่อม

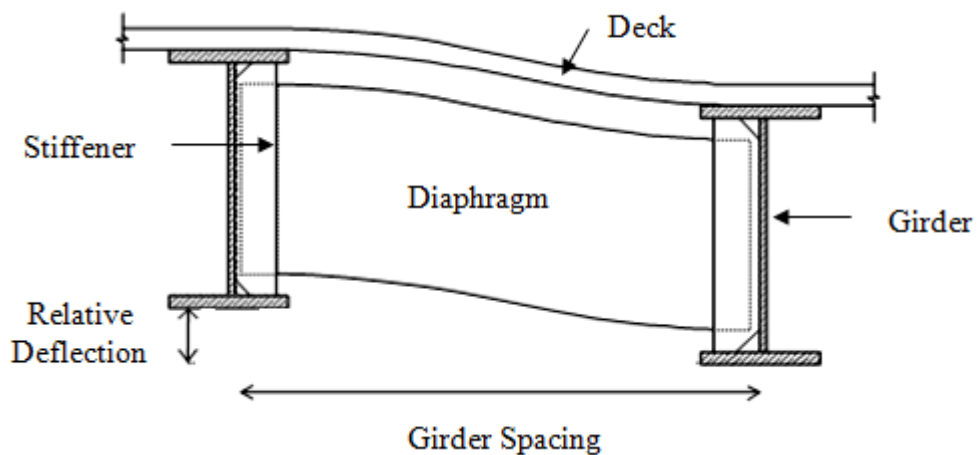
การวิบัติเนื่องจากความล้าสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

- การเปลี่ยนรูป แบบพลาสติกก่อนเกิดรอยแตกจากความล้า (fatigue crack)
- การเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (micro crack)
- การขยายและการรวมกันของรอยแตกเล็กๆจนกลายเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ (macro crack)
- การขยายของรอยแตกขนาดใหญ่
- การวิบัติ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความล้า คือ ลักษณะของน้ำหนักกระทำ, ความเค้นสูงสุด, ความเค้นต่ำสุด, แอมพลิจูดของความเค้น (stress amplitude) และจำนวนรอบของน้ำหนักที่มากกว่า นอกจากนี้ อุณหภูมิ การสึกกร่อน และความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างของวัสดุ ก็เป็นปัจจัยที่สนับสนุนให้เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าทั้งสิ้น ซึ่งกำลังของวัสดุจะมีค่าต่ำสุดเมื่อมีน้ำหนักกระทำในลักษณะที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุด และหน่วยแรงอัดต่ำสุดสลับกันในหนึ่งรอบ ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดความล้ามากหรือน้อยนั้นแบ่งเป็น 2 ปัจจัย คือ ค่าช่วงความเค้น (stress range) และ จำนวนรอบสำหรับค่าช่วงความเค้นนั้นๆ (no. of cycles) โดยทั่วไปวิธีพื้นฐานที่ใช้แสดงข้อมูลความล้า คือ การใช้กราฟ S – N (S – N diagram)

3.2 ความล้มเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็ก (Distortion-Induced Fatigue in Steel Bridges)

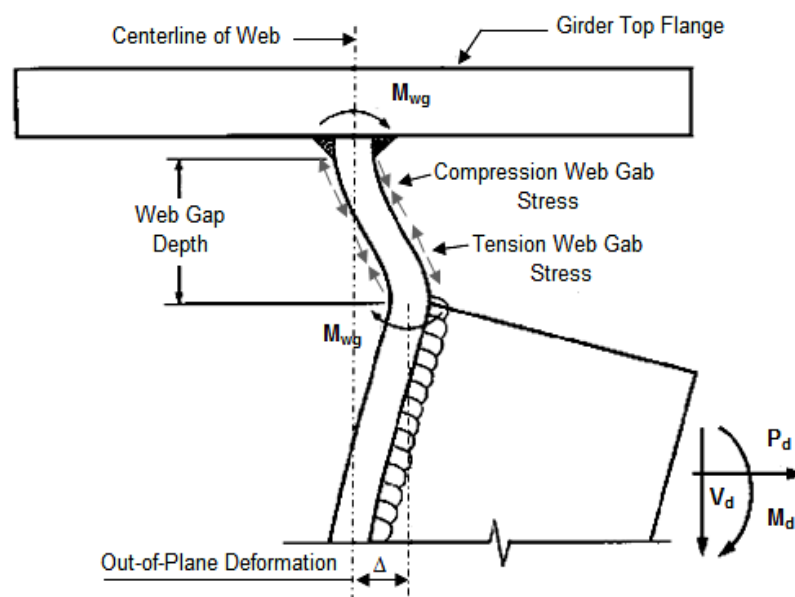
ความล้มเนื่องจากการบิดเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในสะพานเหล็ก ซึ่งในรูปแบบของโครงสร้างเหล็กจะมีโครงสร้างในส่วนที่นอกเหนือจากระบบแผ่นพื้น และระบบคานก็คือชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้าง ระหว่างคานของสะพานเหล็ก ซึ่ง ชิ้นส่วนค้ำยันทางด้านข้าง มีความต้านทานต่อน้ำหนักตามขวาง และช่วยกระจายน้ำหนักไปยังคานด้านข้าง การบิดเนื่องรอยร้าวที่เกิดขึ้นในสะพานเหล็กมักจะเกิดขึ้นจากรอยเชื่อมบริเวณที่มีการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนทางขวางของสะพาน (ชิ้นส่วนไดอะแฟรม หรือ โครงเฟรมทางขวาง) ที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับส่วนเอวของคานมักจะไม่มีการเชื่อมต่อในบริเวณที่ใกล้กับปีกด้านบน หรือปีกด้านล่างซึ่งกล่าวคือ มีช่องว่างระหว่างเอวของคาน กับในการค้ำยันทางด้านข้าง ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่า web gap และเนื่องจากที่บริเวณนี้ปราศจากการค้ำยันด้านข้างก็จะทำให้บริเวณนี้จะมีความอ่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ง่าย รวมทั้งความบกพร่องของการเชื่อมต่อก็จะสร้างความอ่อนของบริเวณ web gap มากยิ่งขึ้น และเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของน้ำหนักที่กระทำต่อคานก่อให้เกิดการโก่งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคานที่ติดกัน ดังภาพที่ 3.1



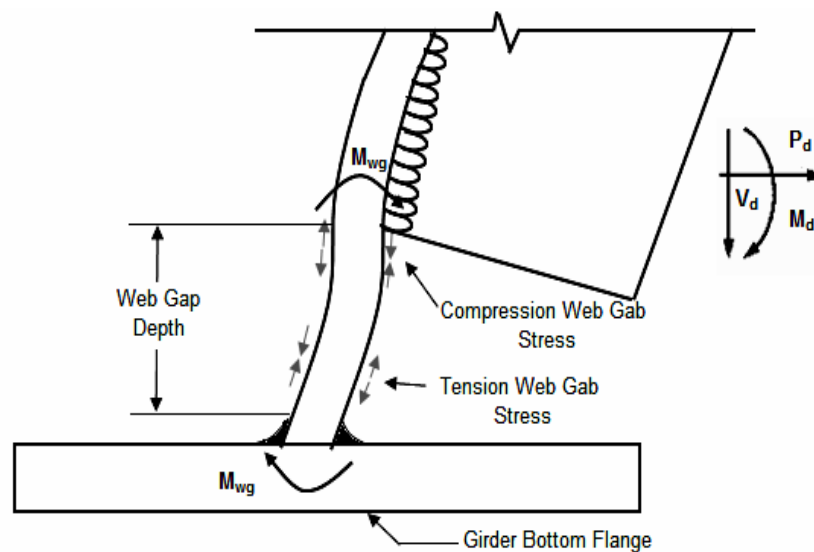
ภาพที่ 3.1 แสดงการโก่งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคานที่ใกล้เคียง

ผลของการโก่งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคานที่ติดกันจะก่อให้เกิดการหมุน (rotation) ของชิ้นส่วนทางขวางของสะพานที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ซึ่งจะทำให้เกิดหน่วยแรงขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณ web gap ในทิศทางนอกระนาบ ดังนั้น บริเวณ web gap ก็จะมีการบิดเกิดขึ้นในทิศทางนอกระนาบ ดังภาพที่ 3.2 และเนื่องจากน้ำหนักของรถบรรทุกหนักที่วิ่งผ่านบนสะพาน ก็จะทำให้เกิดการบิดที่มีความรุนแรงมากขึ้น รวมทั้งภายใต้ น้ำหนักกระทำซ้ำไปซ้ำมาก็จะทำให้เกิด

ความล้าซึ่งที่บริเวณนี้ ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นก็จะทำให้เกิดรอยร้าวที่เกิดจากความล้าเนื่องการบิด บริเวณ web gap นี้จะมีตำแหน่งอยู่ที่บริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานที่เชื่อมติดกับชิ้นส่วน เหวของคานที่ใกล้กับปีกด้านบน หรือใกล้กับปีกด้านล่างก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของสะพานที่ได้ ออกแบบโดยที่ขนาดของหน่วยแรงในแต่ละตำแหน่งของบริเวณ web gap ก็จะไม่แตกต่างกัน ซึ่งจะ แสดงพฤติกรรมการบิดของบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านบน และใกล้กับปีกด้านล่าง ดัง ภาพที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



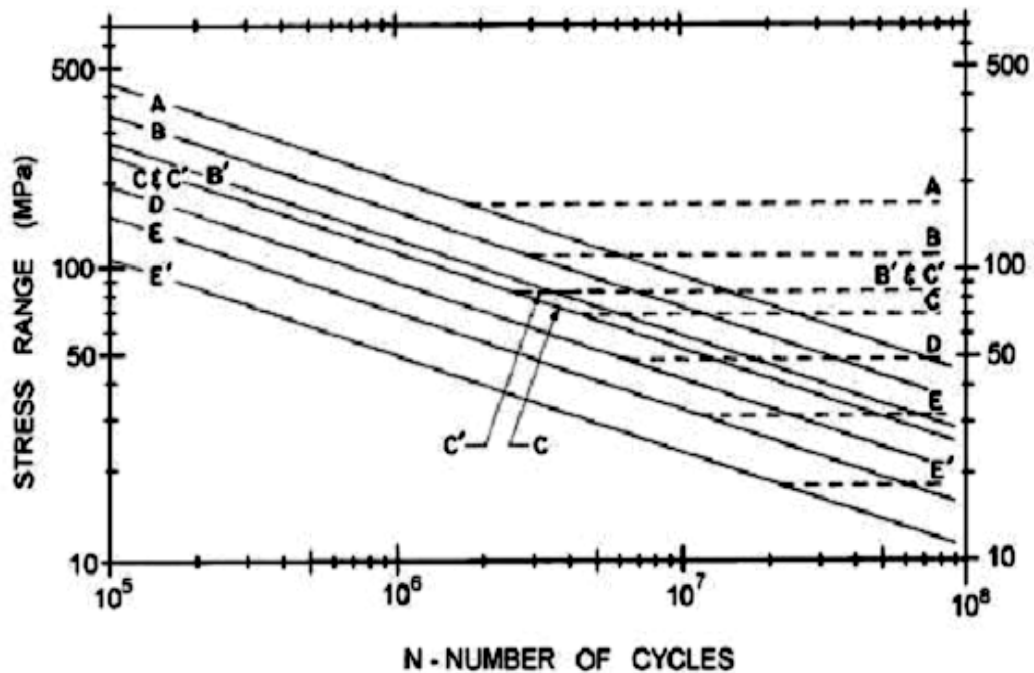
ภาพที่ 3.2 แสดงการบิดในนอกระนาบของบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านบน



ภาพที่ 3.3 แสดงการบิดในนอกระนาบของบริเวณ web gap ที่ใกล้กับปีกด้านล่าง

3.3 การประเมินอายุความล้าเนื่องจากการบิดในสะพานเหล็กตามข้อกำหนด AASHTO

กราฟ S - N เป็นกราฟแสดงข้อมูลความล้าของวัสดุในห้องปฏิบัติการและใช้หน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำๆที่มีลักษณะคงที่ (constant amplitude stressing) กระทำจนกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า ก็ทราบจำนวนรอบที่วิบัติ โดยที่ค่าช่วงความเค้นคือ ค่าความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงสูงสุด และ หน่วยแรงต่ำสุด ครึ่งหนึ่งของค่าช่วงความเค้น คือ แอมพลิจูดของความเค้น (stress amplitude) และค่าเฉลี่ยระหว่างหน่วยแรงสูงสุด และหน่วยแรงต่ำสุด คือ ค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress) แต่ความเป็นจริงในทางปฏิบัติแล้วค่าช่วงความเค้นที่ได้มาจากการตรวจวัดภาคสนามนั้นมีความเป็นไปได้ที่ค่าช่วงความเค้นจะมีลักษณะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าช่วงความเค้นที่ได้จากการตรวจวัดเกิดขึ้นจากปัจจัยที่แตกต่างกัน เช่น น้ำหนักของยานพาหนะที่แล่นผ่านสะพาน ระยะระหว่างเพลลา และปริมาณการจราจร เป็นต้น สำหรับกรณีสัญญาณที่มีลักษณะไม่คงที่ (variable amplitude stressing) ที่มีลักษณะเป็นแบบแถบแคบแต่ละรอบที่เกิดขึ้นมานั้นสามารถหาได้ง่าย ซึ่งสามารถที่จะหาจำนวนรอบโดยการนับรอบของค่าช่วงความเค้นที่มีค่าเท่ากัน แต่ถ้าสัญญาณที่มีลักษณะไม่คงที่จะไม่สามารถสังเกตได้เด่นชัด ก็จะเป็นการยากสำหรับการหาจำนวนรอบในแต่ละช่วงความเค้น ซึ่งอาจจะมีรอบเล็กๆเกิดขึ้นอยู่ในรอบใหญ่ๆ ที่เกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องแยกที่ได้มาจากการตรวจวัดออกเป็นค่าช่วงความเค้นต่างๆ ตัวอย่างของกราฟ S - N ในงานวิจัยนี้จะใช้กราฟ S - N ที่อ้างอิงมาจากข้อกำหนดกรมทางหลวงของประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO LRFD 2007) ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งกราฟ S - N จะแสดงขีดจำกัดความล้าเป็นเส้นประ ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดของหน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุแล้วเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า แต่ถ้ากรณีที่หน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุต่ำกว่าค่าดังกล่าวแล้ววัสดุจะไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าแม้ว่าจำนวนรอบของหน่วยแรงจะมีจำนวนมากก็ตาม โดยที่ค่าขีดจำกัดความล้าจากกราฟ S - N ของ AASHTO เป็นขีดจำกัดความล้าสำหรับหน่วยแรงคงที่ (constant amplitude fatigue limit, CAFL) ซึ่งจะใช้กับเงื่อนไขที่หน่วยแรงกระทำคงที่



ภาพที่ 3.4 กราฟ S - N ตามข้อกำหนด AASHTO (AASHTO 2007)

เส้นกราฟแต่ละเส้นจะสร้างขึ้นสำหรับแต่ละประเภทของรอยเชื่อม แบ่งออกเป็น 8 ประเภท คือ A, B, B', C, C', D, E และ E' ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ คุณภาพของรอยเชื่อม ความเข้มของความเค้น หน่วยแรงคงค้าง และผลกระทบอื่นๆ ซึ่งสมการของกราฟ S - N สามารถเขียนได้ดังนี้

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \geq \frac{1}{2} (\Delta F)_{TH} \quad (3.1)$$

โดยที่ $(\Delta F)_n$ = ค่าช่วงความเค้น (nominal stress resistance)

N = จำนวนรอบที่วิบัติเนื่องจากความล้า

$(\Delta F)_{TH}$ = ค่าช่วงความเค้นที่ขีดจำกัดความล้า (CAFL)

A = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยเชื่อม

กราฟ S - N ตามข้อกำหนด AASHTO ซึ่งเป็นกราฟสำหรับช่วงความเค้นสำหรับแอมพลิจูดของหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำๆ ที่มีลักษณะคงที่ ดังนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าช่วงความเค้นให้เทียบเท่ากับ หน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำๆ ที่มีลักษณะไม่คงที่ แต่ในงานวิจัยนี้ค่าช่วงความเค้นซึ่งจะได้จากน้ำหนักของรถบรรทุกต่างๆที่ใช้ในการศึกษานี้จะมีแอมพลิจูดของหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำๆ ที่มีลักษณะคงที่ สะพานทั้ง 3 รูปแบบ ที่พิจารณาในการศึกษานี้เป็นสะพานที่มี

ลักษณะของคานเกิดจากการประกอบกันของแผ่นเหล็กทั้งหมดซึ่งมีรอยต่อเป็นรอยต่อแบบเชื่อม โดยรอยต่อแบบเชื่อมมักจะเป็นรอยต่อที่ประกอบขึ้นจากโรงงาน ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในรอยเชื่อมนั้นจะมีความสลับซับซ้อนเนื่องจากความไม่สมบูรณ์และตำหนิของรอยต่อ ดังนั้นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันคือ การพิจารณาพฤติกรรมความล้าของรอยต่อในลักษณะเฉลี่ย โดยมาตรฐานการออกแบบต่างๆ ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมความล้าของรอยต่อในลักษณะต่างๆ เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำแบบซ้ำๆ และจากผลการทดสอบที่ได้จึงจำแนกรอยต่อตามกำลังความล้าของรอยต่อแต่ละประเภท โดยรอยต่อที่มีหมวดหมู่ของรอยเชื่อม (strengce category) เดียวกันจะมีกำลังความล้าเหมือนกันและ ใช้กราฟ S - N เดียวกัน ซึ่งค่าคงที่ของประเภทรอยเชื่อม (A) และค่าช่วงความเค้นสำหรับแอมพลิจูดของหน่วยแรงคงที่ที่ขีดจำกัดความล้า constant amplitude fatigue threshold) ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 จะแสดงตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าคงที่ของประเภทรอยเชื่อม (A) และค่าช่วงความเค้นสำหรับแอมพลิจูดของหน่วยแรงคงที่ที่ขีดจำกัดความล้า (constant amplitude fatigue threshold)

ประเภทรอยเชื่อม (DETAIL CATEGORY)	ค่าคงที่ของประเภทรอยเชื่อม (CONSTANT , A) TIME 10^{11} (MPa ³)	ขีดจำกัดความล้า Threshold (MPa)
A	82.0	165.0
B	39.3	110.0
B'	20.0	82.7
C	14.4	69.0
C'	14.4	82.7
D	7.21	48.3
F	3.61	31.0
E'	1.28	17.9

การคำนวณหาอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้า ตามข้อกำหนด AASHTO 2007 ได้เสนอสมการในการคำนวณหาจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ (N) สำหรับ 75 ปี ของ $ADTT_{SL}$ เทียบเท่าอายุอนันต์ ดังสมการที่ 3.2

$$N = (365) \times (75) \times n \times (ADTT)_{SL} \quad (3.2)$$

ซึ่ง $ADTT_{SL}$ คือ ปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยในช่องจราจรหลักที่รถบรรทุกแล่นผ่านสะพานต่อวัน (the number of truck per day in a single lane average) ซึ่งมาตรฐาน AASHTO 2007 ได้กำหนดดังสมการที่ 3.3

$$(ADTT)_{SL} = p \times ADTT \quad (3.3)$$

โดยที่ $ADTT$ คือ ปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยที่แล่นผ่านสะพานต่อวันในหนึ่งทิศทาง (the number of truck per day in one direction average)

p คือ Fraction of truck Traffic ในหนึ่งช่องทางจราจรซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนช่องทางจราจร Available of trucks ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า Fraction of truck Traffic ในหนึ่งช่องทางจราจร

Number of Lanes Available to Trucks	p
1	1.00
2	0.85
3 or more	0.80

ซึ่งในภายหลังนี้จะคำนวณหาอายุการใช้งานของสะพานจากข้อมูลตรวจวัดค่าปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยที่แล่นผ่านสะพานต่อวันในหนึ่งทิศทาง ($ADTT$) ดังนั้นสามารถกำหนดสมการใหม่ตามข้อกำหนด AASHTO 2007 สมการที่ 3.2 ในการหาอายุการใช้งานของสะพาน ซึ่งจะกำหนดตัวแปรของอายุการใช้งานเป็น Y มีหน่วยเป็น ปี ได้ดังสมการที่ 3.4

$$N = (365) \times (Y) \times n \times (ADTT)_{SL} \quad (3.4)$$

แทนค่าสมการที่ 3.4 ลงใน สมการที่ 3.1 แล้วจัดรูปให้อยู่ในรูปค่าอายุการใช้งานของสะพาน (Y)

$$Y = \frac{A}{(ADTT)_{SL} \times n \times 365 \times \Delta F_n^3} \quad (3.5)$$

โดยที่ Y = ค่าอายุการใช้งานของสะพาน (ปี)

n = จำนวนรอบของค่าช่วงความเค้นต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรองรับและความยาวช่วงของคาน ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าจำนวนรอบของค่าช่วงความเค้นต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุก

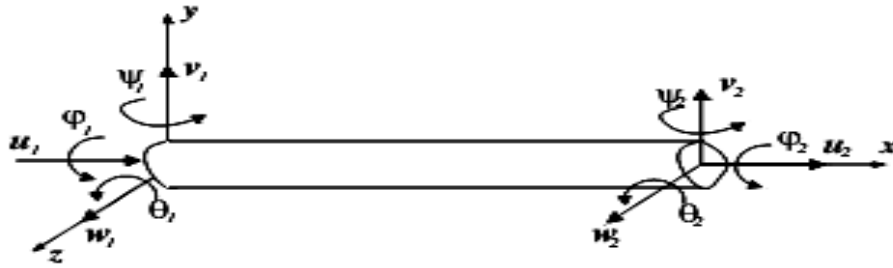
ชิ้นส่วนตามแนวยาว (Longitudinal Members)	ความยาวช่วงของคาน (Span Length)	
	>12000 มม.	≤12000 มม.
คานช่วงเดี่ยวแบบรองรับธรรมดา	1.0	2.0
คานต่อเนื่องใกล้ฐานรองรับด้านใน	1.5	2.0
คานต่อเนื่องที่ตำแหน่งอื่นๆ	1.0	2.0
คานยื่น	5.0	
โครงข้อหมุน	1.0	
คานขวาง	ความยาวคานขวาง(Spacing)	
	>6000 มม.	≤6000 มม.
	1.0	2.0

3.4 ชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ โปรแกรม SAP 2000 ในการสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานทั้ง 3 รูปแบบ โดยที่แบบจำลองของชิ้นส่วนของคานถูกจำลองให้เป็นทั้งชิ้นส่วนแบบคาน (Beam Element) และชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (Shell Element) แตกต่างกันตามรูปแบบของสะพาน สำหรับชิ้นส่วนของแผ่นพื้นจะถูกจำลองให้เป็นชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งในทุกแบบของสะพาน ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรูปแบบชิ้นส่วนที่ใช้สร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้

3.4.1 ชิ้นส่วนคาน (Beam Element)

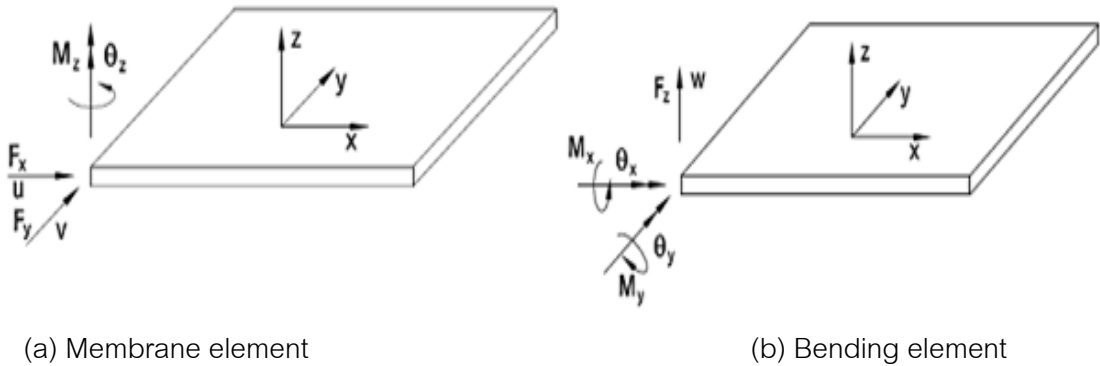
ชิ้นส่วนแบบคานใน 3 มิติ มีจำนวนดีกรีอิสระเท่ากับ 6 ดีกรีอิสระในแต่ละหนึ่งจุดต่อ ซึ่งในชิ้นส่วนแบบคานประกอบด้วย การเชื่อมต่อกันของ 2 จุดต่อ โดยในแต่ละจุดต่อ ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ได้อิสระ 3 ทิศทางในทิศทางของแกน x , y และ z และการหมุนได้อิสระ 3 ทิศทางคือ หมุนรอบ แกน x , y และ z โดยที่ u_i คือ การเคลื่อนที่ในทิศทางของแกน x , v_i คือการเคลื่อนที่ในทิศทางของแกน y , w_i คือ การเคลื่อนที่ในทิศทางของแกน z , θ_i คือ การหมุน รอบแกน x , ψ_i คือ การหมุนรอบแกน y และ ϕ_i คือ การหมุนรอบแกน z ของ จุดต่อที่ i ดังภาพที่ 3.5 ชิ้นส่วนแบบคานถูกจำลองการทำงานให้เป็น โครงสร้างที่ชะลูด ซึ่งมีหน้าตัดที่สม่ำเสมอ ชิ้น ส่วนแบบคานไม่เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน หรือเป็นหลุม



ภาพที่ 3.5 แสดง 3D – 2 Node Beam Element

3.4.2 ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (Shell Element)

ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง คือการรวมกันของ membrane element และ bending element ซึ่ง membrane element จะยอมให้เกิดการเคลื่อนที่และการหมุนในระนาบ ดังภาพที่ 3.6 (a) ในส่วนของ bending element (plate elements) จะยอมให้เกิดการเคลื่อนที่และการหมุนนอกระนาบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.6 (b) โดยที่ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งจะถูกกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะแบน ซึ่งปกติชิ้น ส่วนที่มีลักษณะแบนนี้จะถูกกำหนดให้อยู่ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว แล้วจะถูกรวมเปลี่ยนให้อยู่ในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอลของโครงสร้างรวม



(a) Membrane element

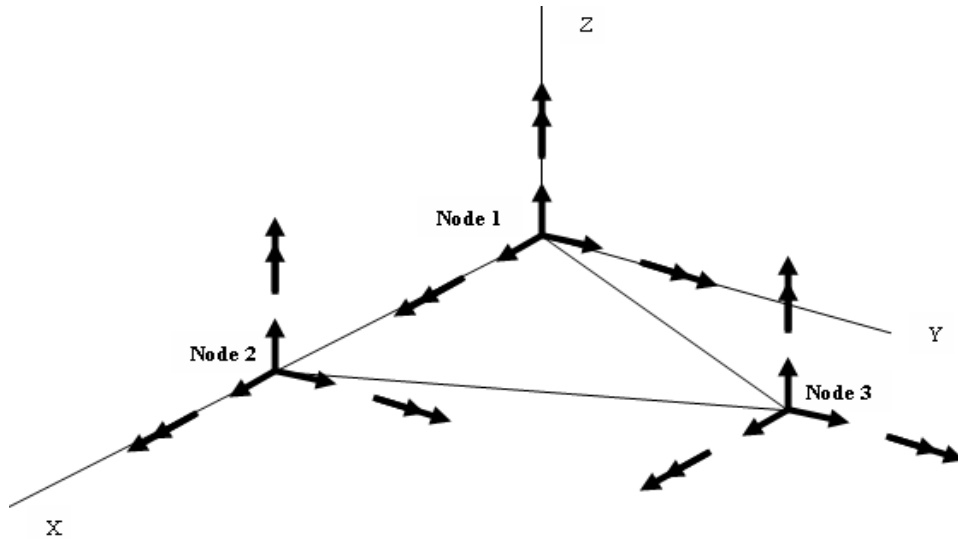
(b) Bending element

ภาพที่ 3.6 แสดงชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งที่เกิดจากองค์ประกอบของสองชิ้นส่วน

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง ในโปรแกรม SAP 2000 โดยที่ในโปรแกรมจะกำหนดชิ้นส่วนนี้ให้มี 3 จุดต่อรูปสามเหลี่ยม (three-node triangular element) หรือ 4 จุดต่อรูปสี่เหลี่ยม (four-node quadrilateral element) ในหนึ่งชิ้นส่วน โดยที่แต่ละชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งสามารถกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนที่มีรูปเป็นสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม

3.4.2.1 ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยม (triangular element)

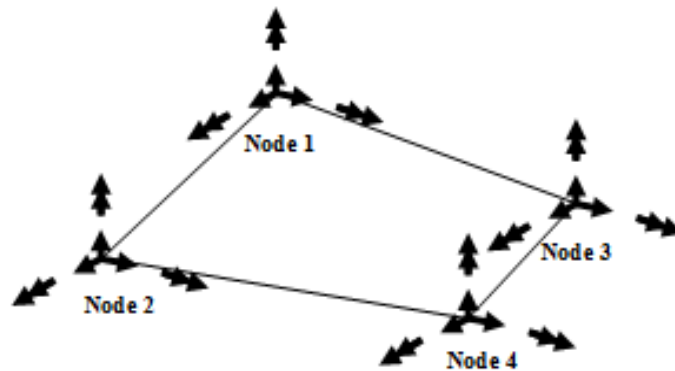
ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมโดยทั่วไปจะเป็นชิ้นส่วนที่ถูกจำลองให้เป็นชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง โดยมีสามจุดต่อเชื่อมต่อกันเป็นรูปสามเหลี่ยม ประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่ได้อิสระ 3 ทิศทางใน และ การหมุนได้อิสระ 3 ทิศทาง ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (local coordinate system) มีจำนวนดีกรีอิสระ 6 ดีกรีอิสระต่อหนึ่งจุดต่อ ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดง three – node triangular shell element

3.4.2.2 ชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยม (Quadrilateral element)

ชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งเหมือนกับชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากการรวมกันของชิ้นส่วน membrane and plate-bending ซึ่งในแต่ละโหนดจะมี 6 ดีกรีอิสระ แต่ในชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมจะมี 4 จุดต่อในหนึ่งชิ้นส่วน ดังภาพที่ 3.8 ดังนั้นจำนวนดีกรีอิสระทั้งหมดของชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมเท่ากับ 24 ดีกรีอิสระ



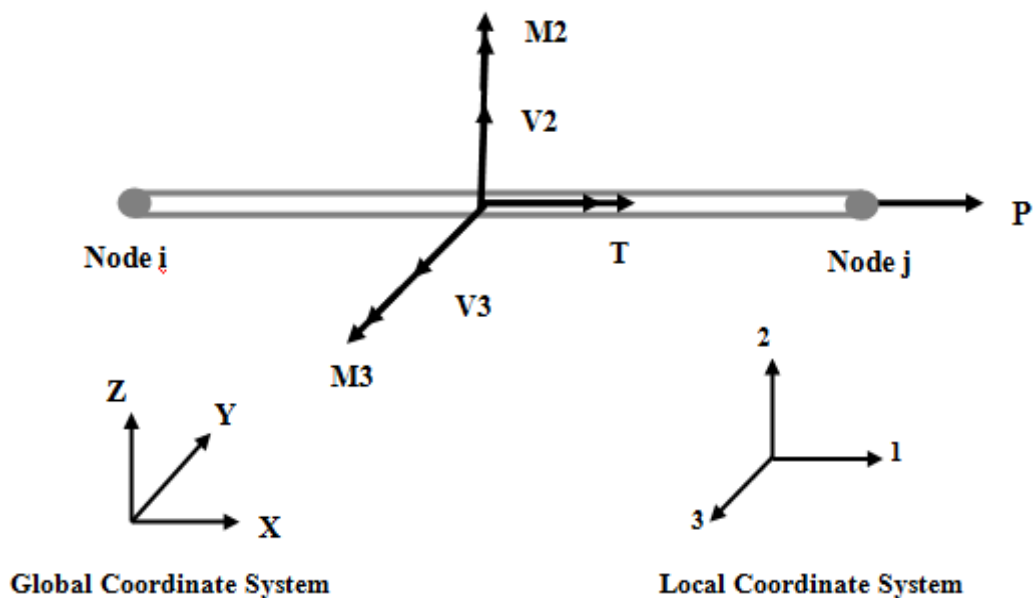
ภาพที่ 3.8 Four – node Quadrilateral Shell element

3.5 การแสดงผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SAP 2000

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม SAP 2000 ในการวิเคราะห์ผลของค่าต่างๆ ซึ่งการแสดงผลจากโปรแกรมเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องอธิบายให้เข้าใจถึงระบบต่างๆที่แสดงผลในโปรแกรมได้อย่างถูกต้อง เช่น ระบบโคออร์ดิเนตต่างๆของชิ้นส่วน ระบบการแสดงผลหน่วยแรง และระบบการแสดงผลระยะการเคลื่อนตัว เป็นต้น

3.5.1 การแสดงผลของชิ้นส่วนคาน

โปรแกรม SAP 2000 จะแสดง ชิ้นส่วนแบบคาน ชื่อของ Frame Element ซึ่งใช้ในทั่วไปในการสร้าง เสา คาน ใน 3 มิติ โดยที่ Frame Element ถูกจำลองให้แสดงรูปในโปรแกรมเป็นเส้นตรงเชื่อมต่อ ระหว่าง 2 จุดต่อ ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนที่ถูกสร้างขึ้น การกำหนดขนาดและรายละเอียดของหน้าตัดชิ้นส่วนจะแสดงผลอยู่ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วนนั้นๆและผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากการประมวลผลของโปรแกรม SAP 2000 จะแสดงค่าของ แรงในแนวแกน (axial loading), แรงเฉือน (shear loading), แรงดัด (bending loading) และแรงบิด (torsion loading)อยู่ในระบบของโคออร์ดิเนตประจำตัว ดังภาพที่ 3.9 การแสดงผลค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากการประมวลผลของโปรแกรม SAP 2000 ดังตารางที่ 3.4



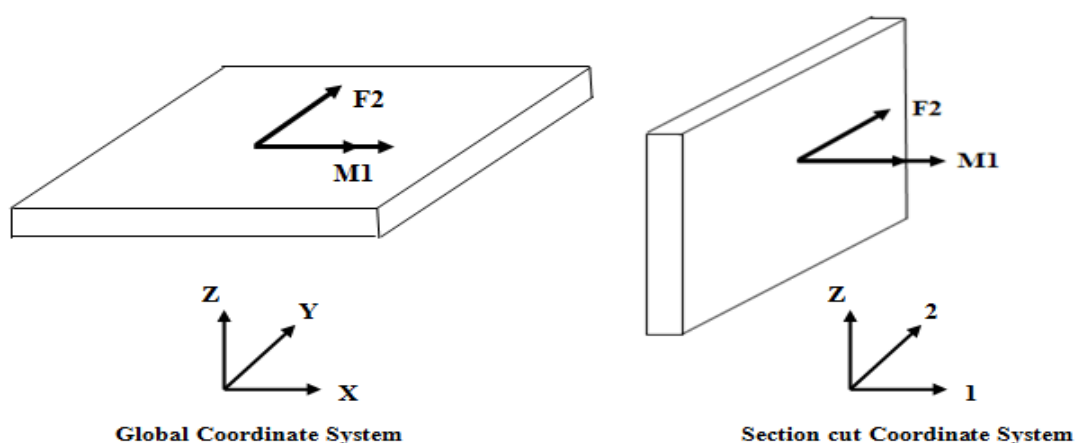
ภาพที่ 3.9 แสดงตัวแปรที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรม SAP 2000 ของ Frame Element

ตารางที่ 3.4 แสดงชื่อของหน่วยแรงต่างๆของชิ้นส่วนแบบคานในโปรแกรม SAP 2000

Type of Force	Parameter in SAP2000
Axial Forces	P
Shear Force in direction axes 2	V2
Shear Force in direction axes 3	V3
Bending Moments about the local axes 2	M2
Bending Moments about the local axes 3	M3
Torsion	T

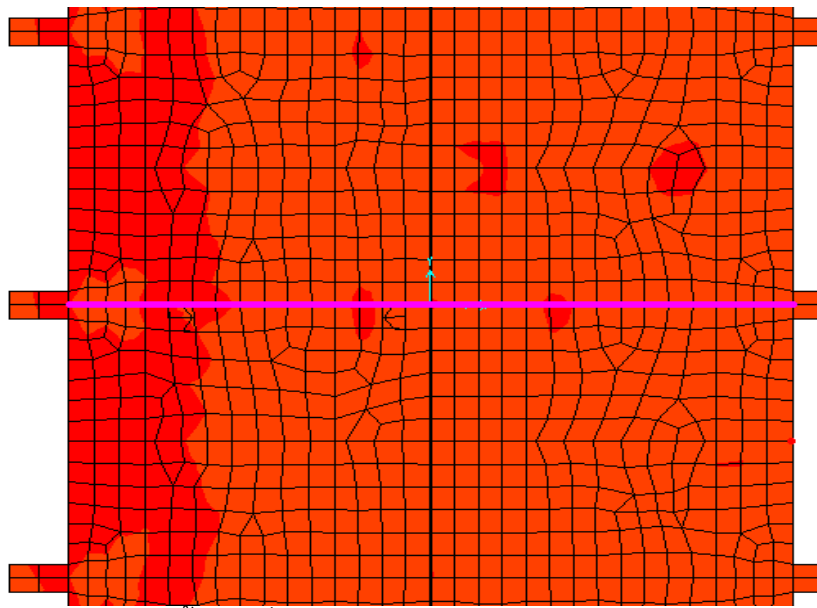
3.5.2 การแสดงผลของชิ้นส่วนแผ่นโค้ง

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากการประมวลผลของโปรแกรม SAP 2000 จะได้จากวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (section cut) การแสดงผลในวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด จะแสดงค่าของหน่วยแรงต่างๆของชิ้นส่วนแผ่นโค้งที่สร้างอยู่ในแนวนอนและแนวตั้งจะมีการแสดงอยู่ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของแต่ชิ้นส่วนดังนั้นชื่อหน่วยแรงต่างๆก็จะแตกต่างกัน ก็จะทำให้ยุ่งยากในการอ่านค่าหน่วยแรงดังนั้นวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัดจะใช้เพื่อที่จะหาค่าหน่วยแรงจะแสดงผลอยู่ระบบโคออร์ดิเนตของวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (section cut) ดังภาพที่ 3.10 ซึ่งค่าของหน่วยแรงที่แสดงนี้จะแสดงเฉพาะแรงในแนวแกนและโมเมนต์ตามแนวยาวของสะพานเท่านั้นซึ่งถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางข้าง (LDF)

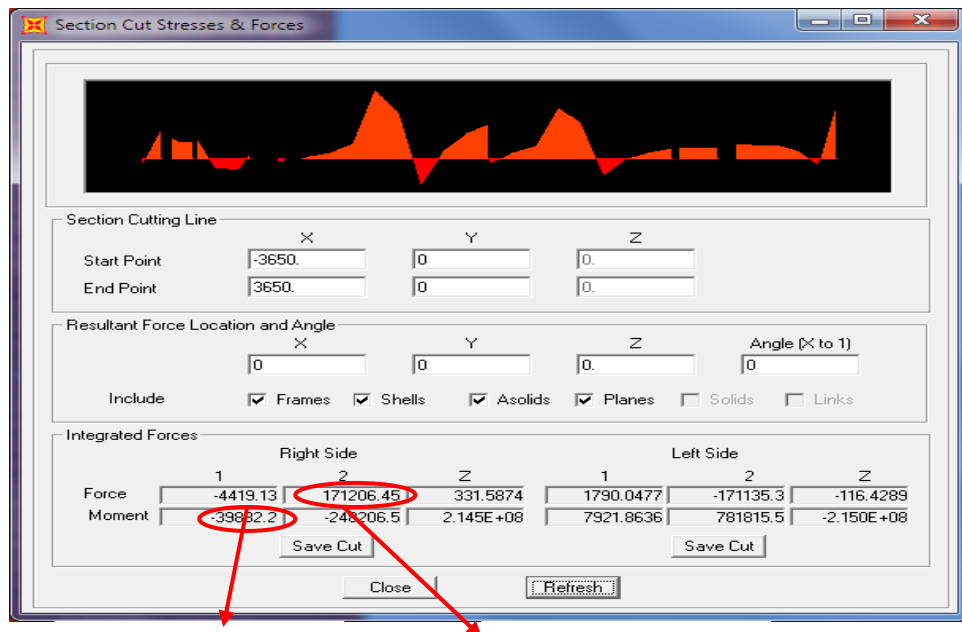


ภาพที่ 3.10 แสดงการแสดงผลใน shell element ที่ถูกสร้างแบบจำลองในอยู่ในแนวนอนและตั้ง

วิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (section cut) ในโปรแกรม SAP 2000 จะกระทำโดยการสร้างเส้นตัดผ่าน (section cut line) ชิ้นส่วนที่ต้องการจะดูค่าของหน่วยแรงทำการกำหนดถึงจุดเริ่มต้นกับจุดสุดท้ายของเส้นตัดผ่าน โดยระบบโคออร์ดิเนตของวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (section cut) แกนที่ 1 คือแกนที่ขนานกับเส้นที่สร้างขึ้น, แกนที่ 2 คือแกนที่ตั้งฉากในระนาบเดียวกันกับแกนที่ 1 ในทิศทางตามกฎมือขวาและในส่วนของแกน Z ก็คือแกน Z ในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล จากนั้นก็ทำการใส่ตำแหน่ง (x, y, z) ที่ต้องการหาค่าหน่วยในเส้นที่สร้างขึ้น และกำหนดมุมระหว่าง แกน X กับ แกน 1 ซึ่งหลังจากที่ลากเส้นตัดผ่านแล้ว ค่าต่างๆในตารางจะแสดงขึ้นมาโดยที่ค่าที่แสดงขึ้นมาั้นอาจยังไม่ถูกต้องกับตำแหน่งที่ต้องการลากเส้นขึ้นมาดังนั้นจะต้องทำการใส่ค่าตำแหน่งให้ถูกต้องลงไปอีกครั้ง ดังภาพที่ 3.11(a) ข้อมูลของหน่วยแรงที่ได้จะแสดงผลค่าโมเมนต์และแรงในแนวแกนทั้งด้านขวาและด้านซ้ายของเส้นที่ตัดผ่านดังภาพที่ 3.11(b)



(a) เส้นตัดผ่านชิ้นส่วนที่ต้องการอ่านค่าผลของโมเมนต์กับแรงในแนวแกน



ช่องแสดงผลค่า M1

ช่องแสดงผลค่า F2

(b) การกำหนดโคออร์ดิเนตของเส้นตัดผ่านชิ้นส่วนและข้อมูลผลการวิเคราะห์
ภาพที่ 3.11 แสดงวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (section cut) ในโปรแกรม SAP 2000

3.6 การคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง (LDF) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางที่ถูกต้องอย่างแม่นยำมากขึ้นกว่าการใช้สมการของข้อ กำหนดของ AASHTO เนื่องจากว่าในการสร้างสมการในการหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางนี้เป็นการสร้างมาจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการใช้รถบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO และค่าตัวแปรต่างๆของแบบสะพานตามงานวิจัยที่ตามข้อกำหนดของ AASHTO ได้เสนอขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงรถบรรทุกที่ใช้ในประเทศไทยจะแตกต่างกับรถบรรทุกตามข้อกำหนดของ AASHTO ดังนั้นการคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางโดยใช้รถบรรทุกที่ใช้งานในประเทศไทยก็จะให้ข้อมูลที่ถูกต้องอย่างแม่นยำมากกว่าซึ่งในการคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเท่ากับค่าโมเมนต์ในหน้าตัดประกอบของคาน (moment in girder section) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หารด้วยค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 เมตร (moment from beam analysis) ที่ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกจากรถบรรทุกหนักต่างๆกระทำ ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดนั้น

$$\text{LDF} = \frac{\text{ค่าโมเมนต์ในหน้าตัดของคานจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์}}{\text{ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ}} \quad (3.2)$$

3.6.1 ความกว้างประสิทธิผล (Effective Width)

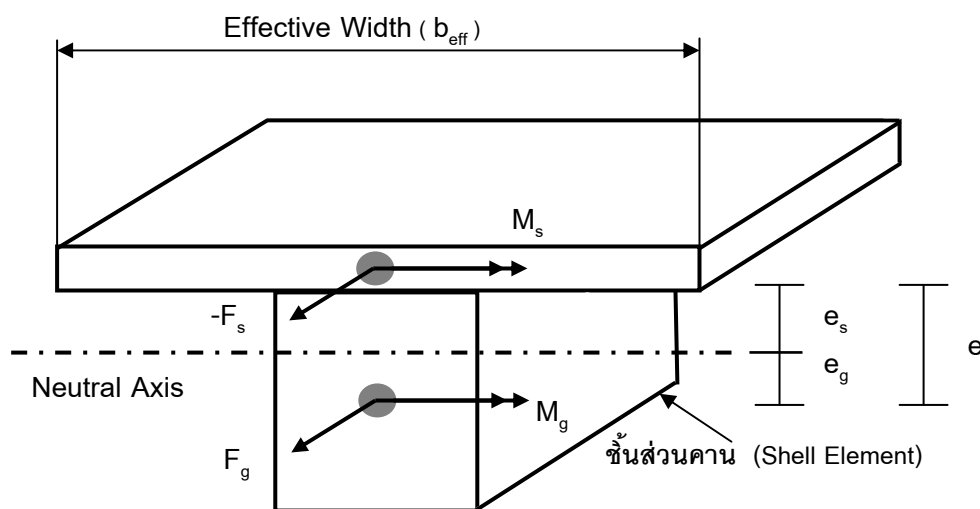
ค่าความกว้างประสิทธิผล เป็นขอบเขตที่ใช้กำหนดค่าความกว้างของชั้นส่วนแผ่นพื้นของแต่ละคานที่จะได้ซึ่งหน่วยแรงต่างๆเฉพาะขอบเขตความกว้างประสิทธิผลนี้ ภาพที่ 3.12 ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าความกว้างประสิทธิผลตามข้อกำหนดตามข้อกำหนดของ AASHTO LRFD 2007

สำหรับคานภายใน (interior girders) โดยกำหนดค่าความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุด ดังต่อไปนี้

- 1 / 4 เท่า ของความยาวช่วงสะพาน
- ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างคานที่กัน
- 12 เท่าของความหนาพื้น บวกด้วยความหนาที่มากกว่าในชั้นส่วนเอวของแต่ละคาน หรือ 1/2 เท่าของชั้นส่วนปีกด้านบนของคาน

สำหรับคานภายนอก (exterior girders) ค่าความกว้างประสิทธิผลมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความกว้างประสิทธิผล width ที่อยู่ติดกับคานภายใน บวกด้วยค่าที่น้อยที่สุดดังต่อไปนี้

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน
- ความกว้างของส่วนยื่น (Overhang width)
- 6 เท่าของความหนาพื้นบวกด้วย ครึ่งหนึ่งของความหนาที่มากกว่าในชั้นส่วนเอวของแต่ละคาน หรือ 1/4 เท่าของชั้นส่วนปีกด้านบนของคาน



ภาพที่ 3.12 แสดงรายละเอียดต่างของส่วนหน้าตัดประสิทธิผล

3.6.2 ค่าโมเมนต์ในหน้าตัดประกอบ (Moment in the Girder Section)

ในการคำนวณหาค่า LDF จากการวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับค่าโมเมนต์ในหน้าตัด ของคาน ทั้งหมดจะเกิดจากผลลัพธ์ของทั้งสามองค์ประกอบของหน่วยแรงในชิ้นส่วนต่างๆที่สร้างจากแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพานในแต่ละรูปแบบจะถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนที่แตกต่างกัน และค่าของหน่วยแรงในแต่ละชิ้นส่วนที่ถูกจำลองก็จะมีค่าแตกต่างกันในการที่จะได้ซึ่งหน่วยแรงที่เกิดในแบบจำลองชิ้นส่วนนั้นๆ ซึ่งวิธีในการแสดงผลของหน่วยแรงจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.5 สามองค์ประกอบในการหาค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบ ประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

3.6.2.1 ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนคาน (Girder Moment)

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนคานเป็นชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง ดังนั้นการแสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม SAP 2000 จะอธิบายถึงการแสดงผลของชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งและชิ้นส่วนแบบคานจะมีวิธีหาดังนี้

3.6.2.1.1 สำหรับชิ้นส่วนคานเป็นแบบจำลอง Beam Element หรือ Frame Element ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนนี้จะแสดงผลจากโปรแกรม SAP 2000 คือ ค่า M_3 ซึ่งคือชื่อเรียกของค่าโมเมนต์ตามแนวยาวที่แสดงผลโดยโปรแกรม SAP 2000

$$M_g = M_3 \quad (3.3)$$

เมื่อ M_g คือ ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนคาน (Girder Moment)

M_3 คือ ค่าโมเมนต์ที่แสดงผลโดยโปรแกรม SAP 2000

3.6.2.1.2 สำหรับชิ้นส่วนคานเป็นแบบจำลอง Shell Element ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนนี้จะให้ผลจากการวิเคราะห์วิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (Section Cut) ในโปรแกรม SAP 2000 คือค่าโมเมนต์ที่ได้อธิบายไว้จากแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม SAP 2000 แต่การสร้างแบบจำลองใน Shell Element จะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนเพื่อให้ได้เป็นคานประกอบตามรูปแบบของสะพานดังนั้นค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนคานจะเท่ากับผลรวมของค่าโมเมนต์ในแต่ละชิ้นส่วน

$$M_g = \sum M_{i} \quad (3.4)$$

เมื่อ M_g คือ ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนคาน (Girder Moment)

M_{1i} คือ ค่าโมเมนต์ที่แสดงผลจากวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (Section Cut) โดยโปรแกรม SAP 2000 ในชิ้นส่วนที่ i

3.6.2.2 ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนแผ่นพื้น (Deck Moment)

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนแผ่นพื้นทั้งหมดในทุกๆรูปแบบของสะพานให้เป็น Shell Element ดังนั้นค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนแผ่นพื้นก็คือค่าโมเมนต์ของ Shell Element ที่ได้จากการวิเคราะห์วิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (Section Cut) ในโปรแกรม SAP 2000

$$M_s = M_1 \quad (3.5)$$

เมื่อ M_s = ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนแผ่นพื้น (Deck Moment)

M_1 = ค่าโมเมนต์ที่แสดงผลจากวิธีตัดชิ้นส่วนหน้าตัด (Section Cut)

3.6.2.3 ค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกน (Moment Produced by Axial Forces)

การคำนวณหาค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกนที่เกิดจากแรงในแนวแกนของชิ้นส่วนแผ่นพื้นและชิ้นส่วนคานในงานวิจัยนี้จะคำนวณโดยใช้หลักการแกนสะเทินของคาน (Neutral Axis of the Girder) หลักการของวิธีนี้คือการหาค่าระยะแกนของแรงในแนวแกนในคาน (e_g) และ แรงในแนว แกนในแผ่นพื้น (e_s) จากที่รู้ว่าที่แกนสะเทิน (Neutral Axis) มีค่าของความเค้นในคานเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงดังรายละเอียดดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะมีวิธีในการคำนวณดังต่อไปนี้

ค่าความเค้นที่แกนจากแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัด ของชิ้นส่วนคานที่แกนสะเทินได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M \cdot y}{I} = \frac{F_g}{A_g} + \left(\frac{-M_g \cdot e_g}{I_g} \right) = 0 \quad (3.6)$$

ดังนั้นจะได้ค่า (e_g) และ (e_s)

$$e_g = \left(\frac{F_g \cdot I_g}{A_g \cdot M_g} \right) \quad (3.7)$$

$$\text{และ } e_s = e - e_g \quad (3.8)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกนได้เท่ากับ

$$M_{axial} = F_g \cdot e_g + F_s \cdot e_s \quad (3.9)$$

โดยที่ M_{axial} = ค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกน

F_g = ค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคาน (ค่า P จากแบบจำลองคานเป็น Frame element หรือ ค่า F2 จากแบบจำลองคานเป็น Shell element ด้วยวิธี Section cut)

F_s = ค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้น (ค่า F2 จาก Section cut)

e_g = ระยะแขนของแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคานถึงแกนสะเทิน

e_s = ระยะแขนของแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้นถึงแกนสะเทิน

3.6.3 ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ (Moment from Beam Analysis)

ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ ซึ่งเป็นน้ำหนักกระทำลงบนคานเป็นจุดตามตำแหน่งบนช่วงเลนของสะพานและขนาดของน้ำหนักที่ลงของล้อหน้าและล้อหลัง ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดบนคานช่วงเดี่ยวแบบรองรับธรรมดา (Simple Beam) โดยทั่วไปค่าโมเมนต์สูงสุดที่กึ่งกลางคานจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักที่ลงล้อของยานพาหนะสูงสุดอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน โดยใช้วิธีเส้นอินฟลูเอนซ์ (influence line) ในการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์สูงสุดที่กึ่งกลางคาน แต่หลักการนี้ไม่สามารถยืนยันได้ว่าการวางตำแหน่งของน้ำหนักที่ลงล้อในลักษณะนี้จะเป็นตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าค่าโมเมนต์สูงสุดจะเกิดที่ตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่กึ่งกลางสะพานและการวางตำแหน่งรถบรรทุกทุกอาจจะเป็นรูปแบบอื่นก็ได้ ดังนั้น จึงใช้วิธี Absolute Maximum Moment ซึ่งวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์หาตำแหน่งการวางน้ำหนักลงล้อหน้าและล้อหลัง ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด โดยมีหลักการคือ เมื่อพิจารณา คานช่วงเดี่ยวแบบรองรับธรรมดาที่มีรถบรรทุกวางอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆ บนคาน ซึ่งมีน้ำหนักลงล้อคือ P_1, P_2, P_3 และ P_4 โดยมีน้ำหนักรวม Q อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของน้ำหนักเท่ากับ ระยะ x จากปลายด้านซ้าย และให้ระยะ s คือระยะระหว่างตำแหน่งศูนย์กลางของน้ำหนักกับตำแหน่งน้ำหนักลงล้อที่ใกล้ที่สุด ดังรูปที่ 3.13 โดยที่ระยะ s สามารถคำนวณได้โดยนำระยะระหว่างตำแหน่ง P_1 กับล้อที่ใกล้ตำแหน่งศูนย์กลางน้ำหนักรวม Q ลบกับระยะระหว่างตำแหน่ง P_1 กับตำแหน่ง Q ซึ่งคือ \bar{x} โดยหาได้จากดังสมการที่ 3.10

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.10)$$

และสามารถคำนวณหาระยะ x ได้โดย พิจารณาคำนวณหาแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ A ให้อยู่ในรูปของน้ำหนักรวม Q ดังสมการที่ 3.11

$$\sum M_B = 0; R_A = \frac{Q(L-x)}{L} \quad (3.11)$$

ซึ่งสามารถค่าโมเมนต์สูงสุดจะเกิดที่ตำแหน่งน้ำหนักล้อที่ใกล้ตำแหน่งศูนย์ถ่วงของน้ำหนัก คือที่ตำแหน่ง P_3 ดังนั้นค่าโมเมนต์สูงสุดดังสมการที่ 3.12

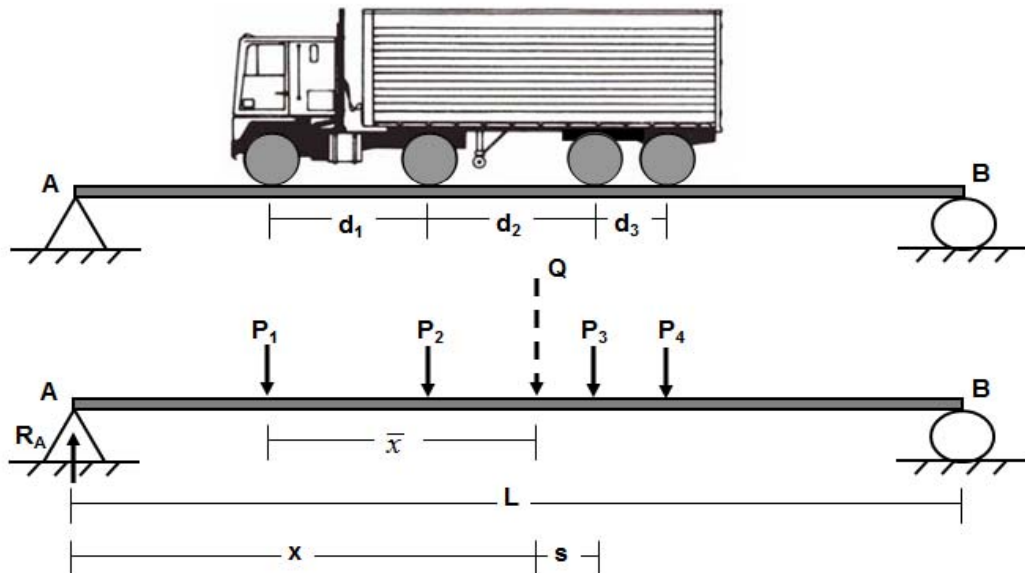
$$M_{\max} = \left[\frac{Q(L-x)}{L} \right] \cdot (x+s) - P_1(d_1+d_2) - P_2(d_2) \quad (3.12)$$

โดยที่จากค่าโมเมนต์สูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ค่าของแรงเฉือนเท่ากับศูนย์ จะได้ดังสมการที่ 3.13

$$\frac{dM_{\max}}{dx} = V = 0 = Q \frac{(L-2x-s)}{L} \quad (3.13)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะ x โดยจัดรูปสมการที่ 3.13 ได้ใหม่ ดังสมการที่ 3.14

$$x = \frac{L}{2} - \frac{s}{2} \quad (3.14)$$



ภาพที่ 3.13 การวิเคราะห์คานใน 1 มิติในการหาค่าโมเมนต์สูงสุดจากน้ำหนักบรรทุกทุกจ

จากยวดยาน

3.7 การคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการตามข้อกำหนด AASHTO

ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางตามข้อกำหนดตามข้อกำหนดของ AASHTO LRFD 2007 เป็นสมการหลักในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อที่จะวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของการใช้ สมการของ AASHTO ในการออกแบบสะพานข้ามทางแยกในประเทศไทย ซึ่งในแต่ละรูปแบบของสะพานในงานวิจัยนี้ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สมการLDF สำหรับโมเมนต์และพิจารณาจำนวนช่องทางไม่น้อยกว่า 2 เลนจะใช้สมการตามสมการของ AASHTO ดังต่อไปนี้

3.7.1 ค่า LDF สำหรับค่าโมเมนต์ของสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตและคานเป็นโครงสร้างเหล็ก - สำหรับคานภายในของสะพาน

$$LDF_{\text{interior}} = 0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{L t_s^3}\right)^{0.1} \quad (3.15)$$

กำหนดให้ค่าช่วงของตัวแปรต่างๆดังนี้ (Range of applicability)

$$1100 \leq S \leq 4900, \quad 110 \leq t_s \leq 300, \quad 6000 \leq L \leq 73000 \quad \text{และ} \quad 4 \times 10^9 \leq K_g \leq 3 \times 10^{12}$$

โดยที่ S = ระยะห่างระหว่างคาน (มม.)

L = ความยาวช่วงสะพาน (มม.)

$K_g = n(I + Ae^2) =$ ค่าสติเฟเนสตามแนวยาว (มม.⁴)

t_s = ความหนาแผ่นพื้น (มม.)

n = อัตราส่วนค่ามอดุลัสระหว่างเหล็ก และคอนกรีต (E_s / E_c)

I = ค่าสติเฟเนสของคาน (นิ้ว⁴ , มม.⁴)

A = พื้นที่หน้าตัดของคาน (นิ้ว² , มม.²)

- สำหรับคานภายนอกของสะพาน

$$LDF_{\text{exterior}} = e(LDF_{\text{interior}}) \quad (3.16)$$

โดยที่ $e = 0.77 + \frac{d_e}{2800} =$ ตัวคูณปรับแก้ (correction factor)

$d_e =$ ระยะจากชั้นส่วนเอวคานภายนอกถึงขอบด้านในของขอบถนน (มม.) ($-300 \leq d_e \leq 1700$)

3.7.2 ค่า LDF สำหรับสะพานที่มีรูปแบบแผ่นพื้นเหล็กที่มีลักษณะเป็นตาราง วางบนคานเหล็ก (steel grids on steel beams) และมีจำนวนช่องทางอย่างน้อยสองช่องทาง

- สำหรับคานภายในของสะพาน

สำหรับความหนาของแผ่นพื้น ที่น้อยกว่า 0.10 เมตร

$$LDF = \frac{S}{2400} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (3.17)$$

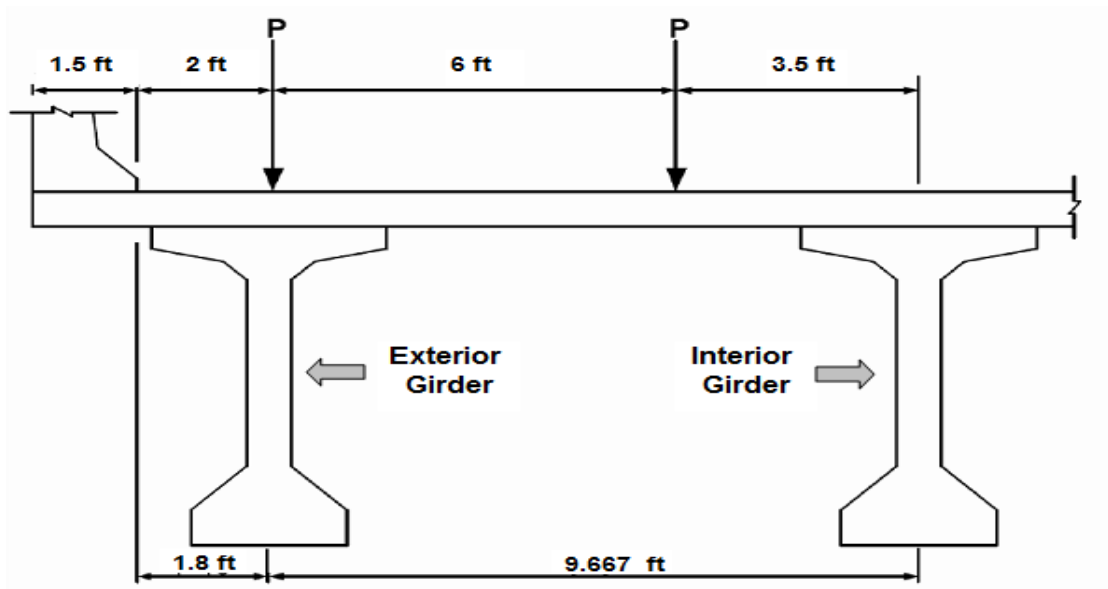
สำหรับความหนาของแผ่นพื้น ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 เมตร

$$LDF = \frac{S}{3050} \quad (\text{หน่วย SI}) \quad (3.18)$$

โดยกำหนด ระยะห่างระหว่างคาน (S) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3200 มม.

- สำหรับคานภายในของสะพาน

ตามข้อกำหนดของ AASHTO LRFD 2007 ค่า LDF กำหนดให้ใช้กฎของคานงัด (lever rule) ดังตัวอย่างดังภาพที่ 3.14 และตัวอย่างการคำนวณดังสมการที่ 3.19



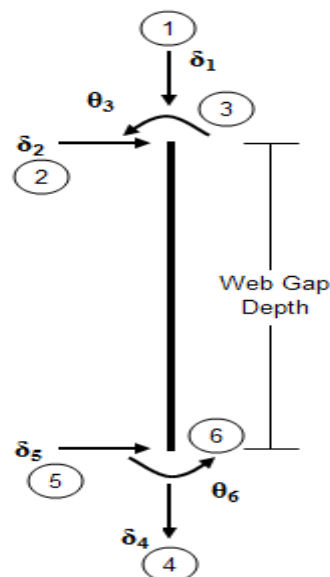
ภาพที่ 3.14 ตัวอย่างการหาค่า LDF โดยใช้กฎของคานงัด (Lever Rule)

(ข้อมูลจากคู่มือ SAP2000/Bridge™ version 14 ; Bridge Superstructure Design)

$$LDF_{Exterior} = [P(3.5 + 6) + P(3.5)] / [2P(9.667)] = 0.672 \quad (3.19)$$

3.8 การคำนวณหน่วยแรงบริเวณ web gap

บริเวณ web gap เปรียบเสมือนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งของโครงสร้างซึ่งมีการเปลี่ยนตำแหน่งจากการเคลื่อนที่และการหมุนที่เกิดจากการบิดในนอกระนาบอันเนื่องมาจากการโก่งตัวที่แตกต่างกันระหว่างคานที่ติดกันตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งงานวิจัยนี้จะคำนวณค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap จากแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานทั้ง 3 รูปแบบ ในการหาค่าช่วงความเค้นในการประเมินอายุความล้าเนื่องจากการบิดในนอกระนาบ บริเวณ web gap เปรียบเสมือนเป็นชิ้นส่วนคานของโครงสร้าง การวิเคราะห์ผลระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP 2000 จะให้ข้อมูลผลของระยะการเปลี่ยนตำแหน่งและการหมุนอยู่ในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล (global coordinate system) ซึ่งในการคำนวณหน่วยแรงในบริเวณ web gap จะใช้วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (direct stiffness method) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างใหญ่ๆหรือโครงสร้างที่ยู่ยากโดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีนี้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งด้านบน และตำแหน่งด้านล่างของบริเวณ web gap ที่เกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งจากการเคลื่อนที่และการหมุนที่เกิดจากการบิดในนอกระนาบ โดยเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่งในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ 3.20 และ 3.21 ซึ่งจะพิจารณากำหนดโคออร์ดิเนตของการเปลี่ยนตำแหน่งอิสระตามภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ชิ้นส่วน Web Gap รับแรงดัดและแรงในแนวแกน

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (3.20)$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ V_2 \\ M_3 \\ P_4 \\ V_5 \\ M_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \theta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

การคำนวณหาค่าของหน่วยแรงในบริเวณ Web Gap ด้านบนและด้านล่าง สามารถคำนวณได้จากสมการหน่วยแรงที่เกิดจากการตัดในชิ้นส่วนร่วมกับหน่วยแรงที่เกิดจากแรงในแนวแกนดังสมการที่ 3.22 และ 3.23

$$\sigma_{T,wg} = \frac{P_1}{A} + \frac{M_3 \cdot y}{I} \quad (3.22)$$

$$\sigma_{B,wg} = \frac{P_4}{A} + \frac{M_6 \cdot y}{I} \quad (3.23)$$

โดยที่ $\{F\}$ = เมทริกซ์ของหน่วยแรงต่างๆของบริเวณ web gap ตามโคออร์ดิเนต

$[K]$ = ค่าสติฟเนสเมทริกซ์ของแรงต่างๆตามโคออร์ดิเนต

$\{U\}$ = เมทริกซ์การเปลี่ยนตำแหน่งของแรงต่างๆ ตามโคออร์ดิเนต

E = ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของ web gap

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของ web gap

L = ความยาวของ web gap

A = พื้นที่หน้าตัดของ web gap

$\sigma_{T,wg}$ = หน่วยแรงที่ตำแหน่งด้านบนของ web gap

$\sigma_{B,wg}$ = หน่วยแรงที่ตำแหน่งด้านล่างของ web gap

บทที่ 4

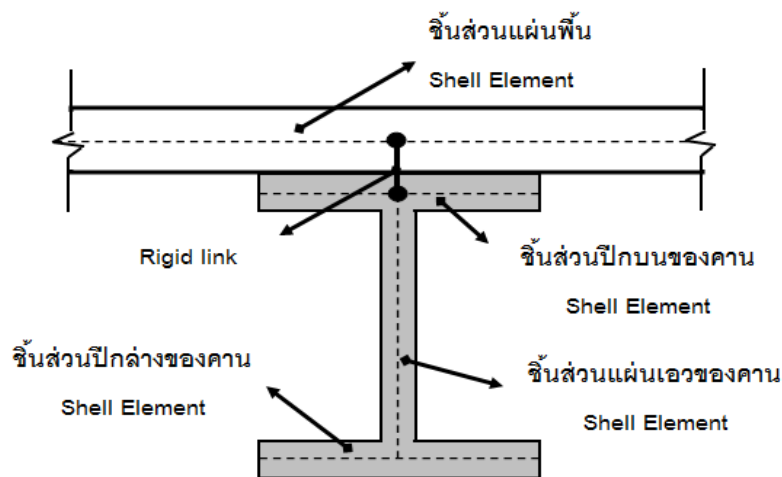
แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานทั้ง 2 รูปแบบ จากโครงการตรวจสอบและประเมินสะพานโครงสร้างเหล็ก ซึ่งเป็นโครงการของสำนักงานเขตกรุงเทพมหานคร โดยที่ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นผู้จัดทำขึ้น ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในสร้างและการวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SAP 2000 แบบจำลองโครงสร้างสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จะเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์หาแรงภายในชิ้นส่วนต่างๆ และระยะการแอ่นตัวของโครงสร้างสะพาน ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องมีการปรับเทียบพฤติกรรมของแบบจำลองสะพานให้สอดคล้องกับผลตอบสนองที่ตรวจวัดได้ในภาคสนามก่อนที่จะนำแบบจำลองสะพานไปใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลองที่ผู้วิจัยได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับเทียบแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบไว้เรียบร้อยแล้ว สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการปรับแก้แบบจำลองให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นในบริเวณ web gap เพื่อให้ได้ซึ่งพฤติกรรมที่แท้จริงของบริเวณ web gap และกำหนดน้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุกประเภทต่างๆ จากการสำรวจข้อมูลรถบรรทุกหนักในประเทศไทย

4.1 แนวทางการสร้างแบบจำลองโครงสร้างส่วนบนของสะพาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสะพาน 2 รูปแบบ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 1 ซึ่งสะพานทั้ง 2 รูปแบบนี้เป็นสะพานขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองเพื่อให้ถูกต้องสอดคล้องกับสะพานจริงจำเป็นต้องเลือกชนิดของชิ้นส่วนให้มีความเหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างจริง เพื่อให้ได้พฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานทั้ง 2 รูปแบบนี้ได้กำหนดใช้ชิ้นส่วนต่างๆ ของสะพานเป็นชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งสามารถแบ่งโครงสร้างให้เป็นชิ้นส่วนย่อยได้ดีกว่าชิ้นส่วนแบบคาน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองโดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้งนี้จะให้แบบจำลองมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานได้แม่นยำมากขึ้น โดยชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง ที่ใช้กำหนดในแบบจำลองเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแผ่นรูปสี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ และกำหนดชิ้นส่วนเป็นแผ่นรูปสามเหลี่ยม 3 จุดต่อในบริเวณ web gap ที่จะเปลี่ยนขนาดชิ้นส่วนให้เล็กลงโดยกำหนด rigid links ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนของแผ่นพื้นกับคานเหล็ก ดังภาพที่ 4.1 เพื่อให้ได้ถึงพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ และกำหนดขนาด

และคุณสมบัติต่างๆของแบบจำลอง โดยอ้างอิงจากแบบก่อสร้างสะพาน เพื่อให้แบบจำลองใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด



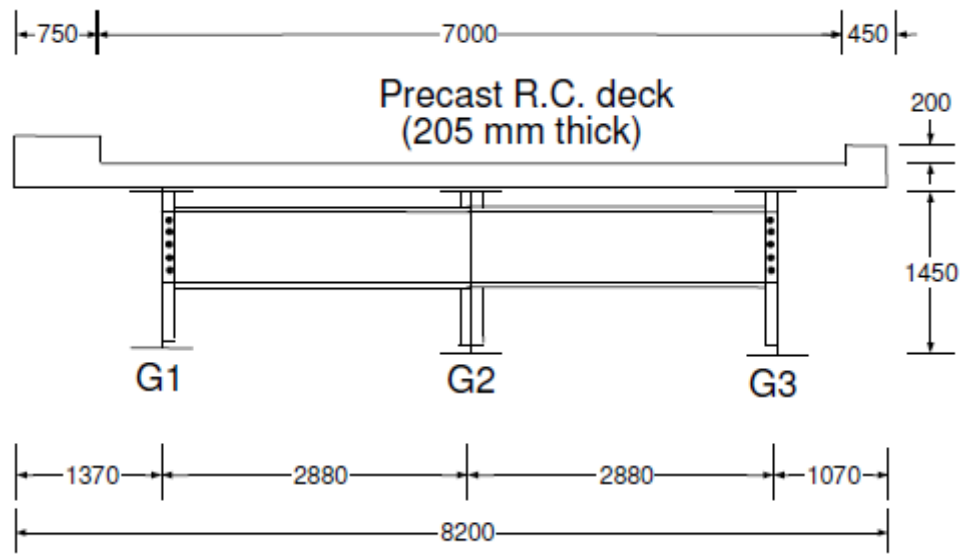
ภาพที่ 4.1 การกำหนดชั้นส่วนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

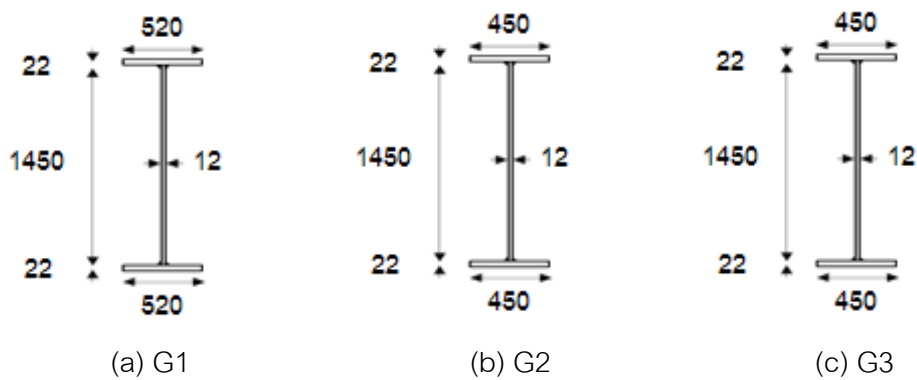
ในส่วนนี้จะอธิบายถึงขนาดของสะพานและจำนวนชั้นส่วนแบบจำลองของสะพานทั้ง 2 รูปแบบ ตามข้อมูลของโครงการตรวจสอบและประเมินสะพานโครงสร้างเหล็ก โดยที่ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นผู้จัดทำขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองสะพานข้ามแยกประสานภูผช่วง typical span ซึ่งมีรูปแบบสะพานเป็นสะพานคานเหล็กรูปไอเชิงประกอบ และสะพานข้ามแยกวงศ์ว่างช่วง main span ซึ่งมีรูปแบบสะพานที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบและระบบแผ่นพื้นเป็นแบบออร์โทโทโรปิคมีเกณฑ์การกำหนดใช้แบบจำลองโดยพิจารณาผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดมากที่สุด

4.2.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกประสานภูผ ช่วง typical span

ประกอบไปด้วยคานตามแนวยาวเป็นคานประกอบ (girder) จำนวน 3 คาน ได้แก่ G1, G2 และ G3 ,คานขวาง (cross frame) ทั้งหมด 5 คานขวาง แบ่งเป็น 3 ประเภทที่มีหน้าตัดและชั้นส่วนแตกต่างกัน ได้แก่ ประเภท SW (ชั้นส่วนไดอะแฟรม), ED (ชั้นส่วนไดอะแฟรม) และ MD (โครงเฟรมทางขวาง) และชั้นส่วนของแผ่นพื้นเป็นแผ่นพื้นคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ ผ1-ผ3 และแสดงหน้าตัดโครงสร้างส่วนบนที่กึ่งกลางสะพานในภาพที่ 4.2 และรูปขยายคานในภาพที่ 4.3 ซึ่งโครงสร้างในช่วง typical span เป็นช่วงสะพานที่มีความยาว เท่ากับ 25 เมตร มีชั้นส่วนทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 12694 ชั้นส่วน



ภาพที่ 4.2 แสดงหน้าตัดที่กึ่งกลางสะพานข้ามแยกประชานุกูล (หน่วยมิลลิเมตร)



(a) G1

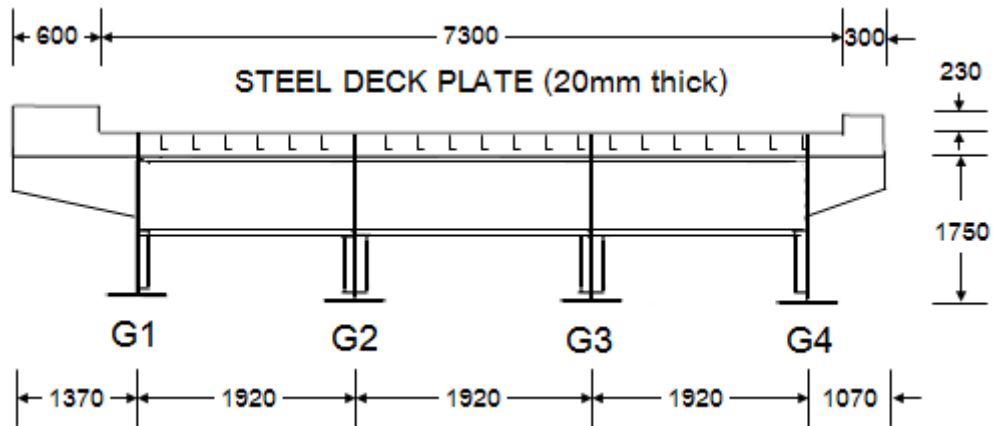
(b) G2

(c) G3

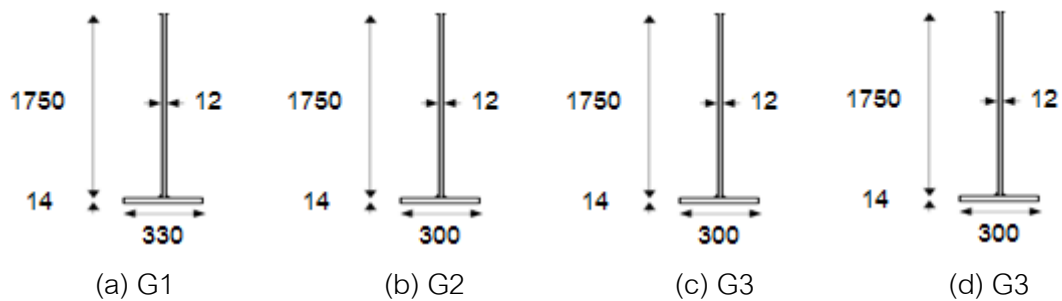
ภาพที่ 4.3 แสดงรูปขยายคานของสะพานข้ามแยกประชานุกูล (หน่วยมิลลิเมตร)

4.2.2 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง ช่วง main span

ประกอบไปด้วยคานตามแนวยาวเป็นคานประกอบ จำนวน 4 คาน ได้แก่ G1,G2,G3 และ G4 คานขวาง (cross frame) ทั้งหมด 11 คานขวาง แบ่งเป็น 3 ประเภท คือชิ้นส่วนไดอะแฟรม ที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน ได้แก่ ประเภท ED, C1 และ C2 และชิ้นส่วนของแผ่นพื้นเป็นระบบออร์โทโทโรปิค ดังแสดงในภาพที่ ๔4-๔6 และแสดงหน้าตัดโครงสร้างส่วนบนที่กึ่งกลางสะพานในภาพที่ 4.4 และรูปขยายคานในภาพที่ 4.5 ซึ่งโครงสร้างในช่วง main span เป็นช่วงสะพานที่มีความยาวมากที่สุด เท่ากับ 35 เมตร กว้าง 8.20 เมตร มีชิ้นส่วนทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 15797 ชิ้นส่วน



ภาพที่ 4.4 แสดงหน้าตัดที่กึ่งกลางสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง (หน่วยมิลลิเมตร)

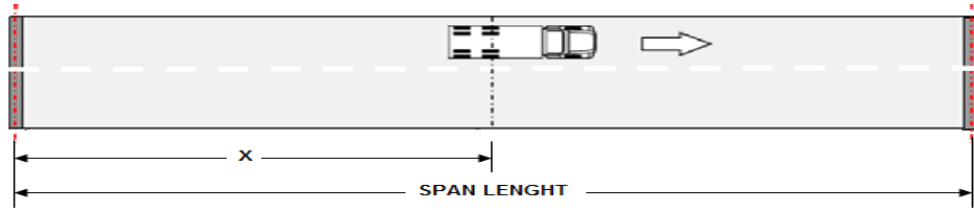


ภาพที่ 4.5 แสดงแสดงรูปขยายคานของสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง (หน่วยมิลลิเมตร)

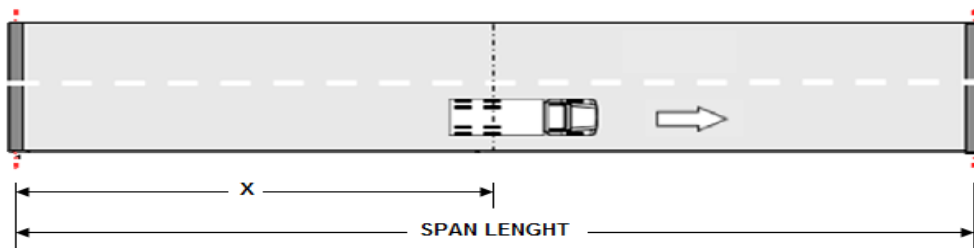
4.2.3 แนวทางการปรับเทียบแบบจำลอง

แนวทางในการปรับเทียบแบบจำลองจากแบบจำลองของโครงการตรวจสอบและประเมินสะพาน โครงสร้างเหล็กได้มีแนวทางในการปรับเทียบให้แบบจำลองสะพานให้มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยที่การปรับเทียบแบบจำลองช่วง main span ของสะพานวงค์สว่างนั้นได้ทำการปรับความหนาของแผ่นพื้น (deck plate) เพื่อลดเซยความหนาของชิ้นส่วนของแผ่นพื้น เนื่องจากแผ่นพื้นแบบออร์โทโทรปิก มีชิ้นส่วน RIBS ช่วยเสริมกำลังและต้านการโก่งตัวให้กับระบบแผ่นพื้น ดังนั้นความหนาจากแบบจำลองแผ่นจำเป็น ต้องให้สอดคล้องกับแผ่นพื้นของสะพานจริง สำหรับแบบจำลองช่วง typical span ของสะพานข้ามแยกประจักษ์นุกูล ได้ทำการปรับเทียบแบบจำลองโดยการปรับจำนวนชิ้นส่วนของ rigid link ที่เป็นตัวเชื่อม ต่อระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตกับคานรูปตัวไอให้ได้ซึ่งพฤติกรรมโครงสร้างเชิงประกอบที่สมบูรณ์ผลจากการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ตำแหน่งต่างๆของแบบจำลองสะพานเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามของโครงสร้างช่วง main span และ typical span ของสะพานทั้ง 2 รูปแบบการทดสอบ โดยที่การตรวจวัดจากภาคสนามได้ทำการทดสอบใช้รถบรรทุก 25 ตัน แล่น

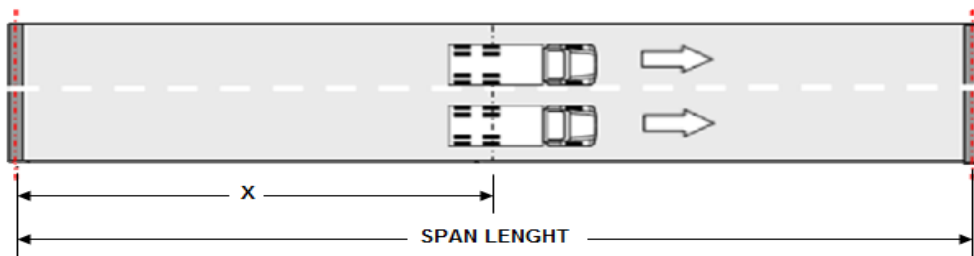
ข้ามสะพานที่เลนนอกเลนใน และรถบรรทุกสองคันแล่นคู่ขนานทั้งสองเลนดังภาพที่ 4.6 ซึ่งแนวทางการเปรียบเทียบค่าความเครียดพิจารณา 2 แนวทางการเปรียบเทียบ ได้แก่ ค่าความเครียดที่ปีกกลางของคานประกอบแต่ละคานที่ได้จากแบบจำลองของสะพานเปรียบ เทียบกับความเครียดที่วัดได้ที่ตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่ง $L/2$ และค่าความเครียดที่วัดได้ที่ตำแหน่ง $L/2$ ของคานประกอบแต่ละคานเมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆตามยาวของสะพาน



(a) การทดสอบรถบรรทุก 1 คันที่เลนนอกของสะพาน



(b) การทดสอบรถบรรทุก 1 คันที่เลนในของสะพาน



(c) การทดสอบรถบรรทุก 2 คัน ทั้งเลนในและเลนนอก

ภาพที่ 4.6 การทดสอบใช้รถบรรทุก 25 ตัน ที่ตำแหน่งต่างๆตามขวางของสะพาน

4.2.4 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลจากการทดสอบของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของแบบจำลองสะพานเปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามในแต่ละแนวทางการปรับเทียบของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าความคลาดเคลื่อนเมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งปลายของช่วงสะพานจะมีค่าสูงมาก แต่โดยรวมในบริเวณกึ่งกลางสะพานซึ่งเป็นตำแหน่งที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยถือว่าไม่มากซึ่งโดยเฉลี่ยไม่เกิน 10 %

4.2.5 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลจากการทดสอบของสะพานข้ามแยก วงศ์สว่าง

ผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของแบบจำลองสะพานเปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามในแต่ละแนวทางการปรับเทียบของสะพานข้ามแยก สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าความคลาดเคลื่อนเมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งปลายของช่วงสะพานจะมีค่าสูงมาก แต่โดยรวมในบริเวณกึ่งกลางสะพานซึ่งเป็นตำแหน่งที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์หามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยถือว่าไม่มากซึ่งโดยเฉลี่ยไม่เกิน 15 %

4.3 การสำรวจข้อมูลรถบรรทุกในประเทศไทย

รถบรรทุกที่วิ่งตามท้องถนนในปัจจุบันนี้มีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้มีโรงงานอุตสาหกรรมมากขึ้นในเขตจังหวัดที่ติดต่อกับกรุงเทพมหานคร ดังนั้นการขนส่งสินค้าก็จำเป็นต้องใช้รถบรรทุกในการขนส่งสินค้ารวมทั้งขนส่งวัสดุหนักต่างๆ ซึ่งมีผลอย่างยิ่งเมื่อรถบรรทุกเหล่านี้ได้วิ่งผ่านสะพานข้ามแยกในเขตกรุงเทพมหานครจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพที่เร็วขึ้นและความเสียหายต่อสะพาน จึงจำเป็นต้องสำรวจข้อมูลของรถบรรทุกหนักในไทยประเภทต่างๆรถบรรทุกที่มีขายในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด เช่น รถบรรทุกหกล้อ รถบรรทุกสิบล้อ รถบรรทุกสิบล้อสองล้อ รถบรรทุกกึ่งพ่วง และรถบรรทุกพ่วง เป็นต้น รถบรรทุกเหล่านี้ล้วนเป็นรถบรรทุกหนักทั้งสิ้น ซึ่งกรมทางหลวงได้มีข้อกำหนดในการห้ามใช้พาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลามากกว่าที่ได้กำหนดสำหรับรถบรรทุกประเภทต่างๆรวมทั้งได้กำหนดระยะ king pin สำหรับรถบรรทุกกึ่งพ่วงที่มีรถลากจูงประเภทต่างๆ แต่กรมทางหลวงไม่มีข้อกำหนดของระยะระหว่างล้อและความกว้างล้อไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สำรวจข้อมูลของระยะระหว่างล้อและความกว้างระหว่างล้อตามรถบรรทุกที่ผลิตตามท้องตลาดประกอบไปด้วยรถบรรทุกยี่ห้อ ฮีตซุ นิสสันดีเซล มิสซูบิชิ และอีโน ซึ่งรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ในแต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่นจะมีระยะระหว่างเพลตามแนวยาวและระยะระหว่างเพลตามแนวขวางที่แตกต่างกัน ดังนั้นตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่ลงในแต่ละล้อก็จะแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงตัวแปรเหล่านี้เพื่อหาข้อดีและข้อเสียของรถบรรทุกประเภทต่างๆที่มีผลกระทบมากที่สุด เพื่อที่กำหนดเป็นน้ำหนักบรรทุกจริงที่ใช้วิเคราะห์ในแบบจำลองสะพานโดยที่กำหนดน้ำหนักบรรทุกประเภทต่างๆ ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง และซึ่งจะแสดงข้อมูลของน้ำหนัก ระยะระหว่างเพลตามแนวยาว และระยะระหว่างเพลตามแนวขวาง ในแต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่น อย่างละเอียดในภาคผนวก ข ซึ่งจะคัดเลือกระยะระหว่างเพลตามแนวยาวที่ต่ำสุดในการวิเคราะห์ซึ่งจะแสดงระยะและรูปรถบรรทุกดังภาพที่ ผ-7 ถึง ผ-17

4.4 การกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในการวิเคราะห์

การกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุก เช่น น้ำหนักที่ล้อต่างๆของรถบรรทุก ระยะระหว่างล้อตามแนวยาว และระยะระหว่างล้อตามแนวขวาง จะถูกกำหนดเป็นน้ำหนักบรรทุกจรในแบบจำลองสะพาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดประเภทของรถบรรทุกประเภทต่างๆทั้งหมด 11 ประเภท ประกอบไปด้วย รถบรรทุกหนักในไทย 10 ประเภท และรถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO (fatigue truck) อีก 1 ประเภท ซึ่งในแต่ละประเภทจะทำการกำหนดรูปแบบของรถบรรทุกในแต่ละประเภท ประเภทละ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่มีระยะระหว่างล้อตามแนวขวางต่ำสุด และสูงสุด รวมรูปแบบการกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุกทั้งหมด 17 รูปแบบรถบรรทุกทั้งหมดนี้มีรถบรรทุก 5 ประเภทที่มีระยะระหว่างล้อตามแนวขวางค่าเดียว ซึ่งจะแสดงข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลน้ำหนักบรรทุกและระยะระหว่างเพลตามแนวขวางสูงสุดและต่ำสุด

ประเภท	รายละเอียด ชื่อเรียกรถบรรทุก	น้ำหนักรวม (ตัน)	ระยะระหว่างเพลหน้าตามแนวขวาง (มม.)	
			ค่าน้อย	ค่ามาก
1	6 ล้อ	15	1915	1970
2	Fatigue truck	24.5	1800	1800
3	10 ล้อ	25	1930	2056
4	รถบรรทุก 12 ล้อ	30	1935	1935
5	กึ่งพวงหัวลาก 6 ล้อ ลากจูง 2 เพล 8 ล้อ	35	1915	1915
6	กึ่งพวงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 2 เพล 8 ล้อ	45	1935	2050
7	พวง 18 ล้อ	47	1930	2020
8	กึ่งพวงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพล 12 ล้อ	50.5	1935	2050
9	พวง 20 ล้อ	52	1935	1935
10	พวง 22 ล้อ	53	1930	2020
11	พวง 24 ล้อ	58	1935	1935

การกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุกในแบบจำลองสะพานโปรแกรม SAP 2000 ทำโดยเลือกไปที่เมนู Define > Bridge Loads > Vehicles และเลือกไปที่ Add General Vehicle จากนั้นก็ป้อนข้อมูลในแต่ละล้อ ประกอบไปด้วย น้ำหนักในแต่ละเพลลา(Axle Load) ระยะระหว่างล้อตามแนวยาว (Minimum Distance) และระยะระหว่างล้อตามแนวขวาง (Axle Width) ดังตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุก 6 ล้อ ดังภาพที่ 4.7

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3048.	4000.	Two Points	1970.
Leading Load Fixed Length	3650.		0.	Fixed Width	3048.	11000.	Two Points	1850.

ภาพที่ 4.7 แสดงตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุก 6 ล้อ

4.5 การกำหนดตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวางในแบบจำลองสะพาน

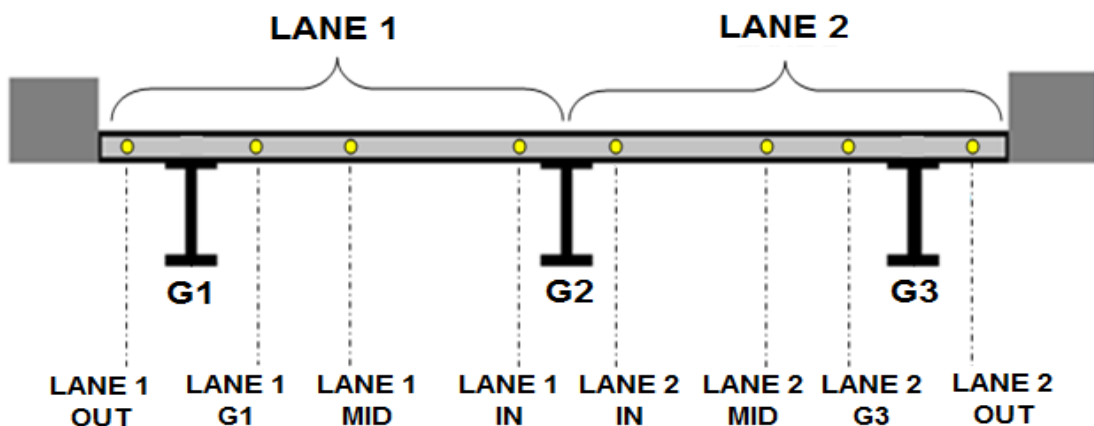
การกำหนดรูปแบบการวางตำแหน่งต่างๆของรถบรรทุกตามแนวขวางบนแบบจำลองสะพานในแต่ละช่องเลนมีผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานภายในและคานภายนอกแตกต่างกันไป ดังนั้น การกำหนดรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกประเภทต่างๆตามแนวขวางของสะพานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งตามแนวขวางที่ทำให้เกิดหน่วยแรงวิกฤติในคานต่างๆ ในงานวิจัยนี้สะพานที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสะพานที่มีสองช่องเลน ทั้ง 2 รูปแบบสะพาน โดยที่รูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง จะมี 2 กรณีศึกษา คือ กรณีรถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน

สำหรับสะพานข้ามแยกประชานุกูล ช่วง typical span มีความยาวช่วงสะพาน 25 เมตร

กำหนดตำแหน่งตามแนวขวางให้มีแนวเส้นการวิ่ง(เส้นกึ่งกลางเลน) เพื่อให้ได้ซึ่งตำแหน่งตามแนวขวางที่วิกฤติที่สุด โดยที่รถบรรทุกประเภทต่างๆทั้งหมด 11 ประเภท และใช้ระยะห่างระหว่างล้อหน้าตามแนวขวางสูงสุด และต่ำสุดของรถบรรทุกในแต่ละประเภทรวมมีรูปแบบของรถบรรทุกทั้งหมด 17 รูปแบบรถบรรทุก วิ่งคร่อมเส้นดังกล่าวนี้ ดังนั้นจำนวน line lane ในแบบจำลองสะพานประชานุกูล ช่วง typical span มีทั้งหมด 134 line lane ซึ่งในแต่ละรูปแบบของรถบรรทุกจะมีเส้นการวิ่ง 8 เส้น แตกต่างกันตามระยะห่างระหว่างล้อหน้าตามแนวขวางสูงสุด และต่ำสุดของรถบรรทุกในแต่ละประเภท ดังนี้

- LANE 1- OUT คือ เลนที่ 1 ที่ตำแหน่งนอก (ใกล้เคียงกับทางด้านซ้าย)
- LANE 1- G1 คือ เลนที่ 1 ที่ใกล้ตำแหน่ง G1 โดยที่ให้ล้อด้านซ้ายจะอยู่ที่ตำแหน่ง G1พอดี
- LANE 1- MID คือ เลนที่ 1 ที่ตำแหน่งกลาง
- LANE 1- IN คือ เลนที่ 1 ที่ตำแหน่งใน
- LANE 2- IN คือ เลนที่ 2 ที่ตำแหน่งใน
- LANE 2- MID mid คือ เลนที่ 2 ที่ตำแหน่งกลาง
- LANE 2- G3 คือ เลนที่ 2 ที่ใกล้ตำแหน่ง G3 โดยที่ให้ล้อด้านขวาจะอยู่ที่ตำแหน่ง G3พอดี
- LANE 2- OUT คือ เลนที่ 2 ที่ตำแหน่งนอก (ใกล้เคียงกับทางด้านซ้าย)

ซึ่งแสดงดัง ภาพที่ 4.8 โดยที่รถบรรทุกต่างๆจะวิ่งคร่อมเส้นดังกล่าวนี้ซึ่งเป็นวิธีการกำหนดเส้นการวิ่งของรถบรรทุก (define lane) ตามโปรแกรม SAP 2000 และรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวางในกรณีรถบรรทุก 1 คัน มีทั้งหมด 8 รูปแบบ ดังภาพที่ ผ-29 และในกรณีรถบรรทุก 2 คัน มีทั้งหมด 16 รูปแบบ ดังภาพที่ ผ-30 แสดงในภาคผนวก ง



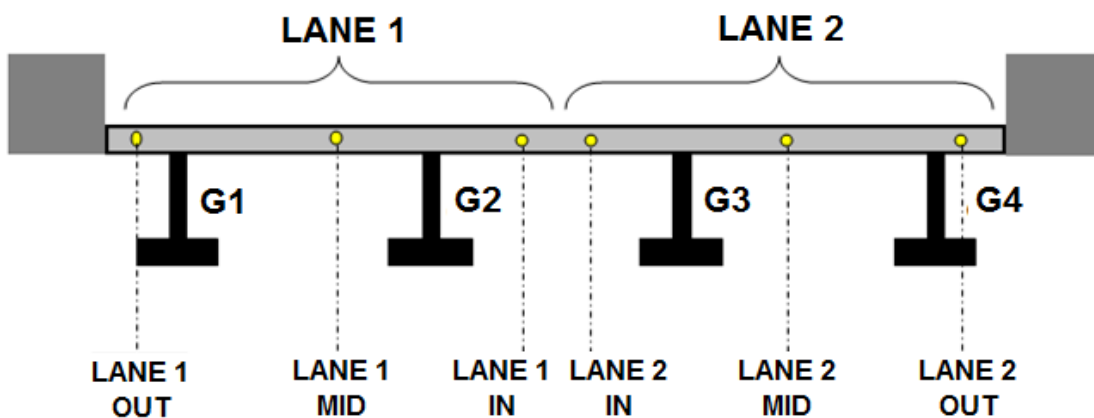
ภาพที่ 4.8 แสดงการกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวางในแบบจำลอง สะพานประชานุกูลช่วง typical span

สำหรับสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง ช่วง main span มีความยาวช่วงสะพาน 35 เมตร

กำหนดตำแหน่งตามแนวขวางให้มีแนวเส้นการวิ่ง(เส้นกึ่งกลางเลน) เพื่อให้ได้ซึ่งตำแหน่งตามแนวขวางที่วิกฤติที่สุด โดยที่รถบรรทุกประเภทต่างๆทั้งหมด 11 ประเภท และใช้ระยะห่างระหว่างล้อหน้าตามแนวขวางสูงสุด และต่ำสุดของรถบรรทุกในแต่ละประเภทรวมมีรูปแบบของรถบรรทุกทั้งหมด 17 รูปแบบรถบรรทุก วิ่งคร่อมเส้นดังกล่าวนี้ ดังนั้นจำนวน line lane ในแบบจำลองสะพานประชาชนกุล ช่วง typical span มีทั้งหมด 90 line lane ซึ่งในแต่ละรูปแบบของรถบรรทุกจะมีเส้นการวิ่ง 6 เส้น แตกต่างกันตามระยะห่างระหว่างล้อหน้าตามแนวขวางสูงสุด และต่ำสุดของรถบรรทุกในแต่ละประเภท ดังนี้

- LANE 1- OUT คือ เลนที่ 1 ที่ตำแหน่งนอก (ใกล้เคียงกับทางด้านซ้าย)
- LANE 1- MID คือ เลนที่ 1 ที่ตำแหน่งกลางเลน
- LANE 1- IN คือ เลนที่ 1 ที่ตำแหน่งใน
- LANE 2- IN คือ เลนที่ 2 ที่ตำแหน่งใน
- LANE 2- MID คือ เลนที่ 2 ที่ตำแหน่งกลาง
- LANE 2- OUT คือ เลนที่ 2 ที่ตำแหน่งนอก (ใกล้เคียงกับทางด้านซ้าย)

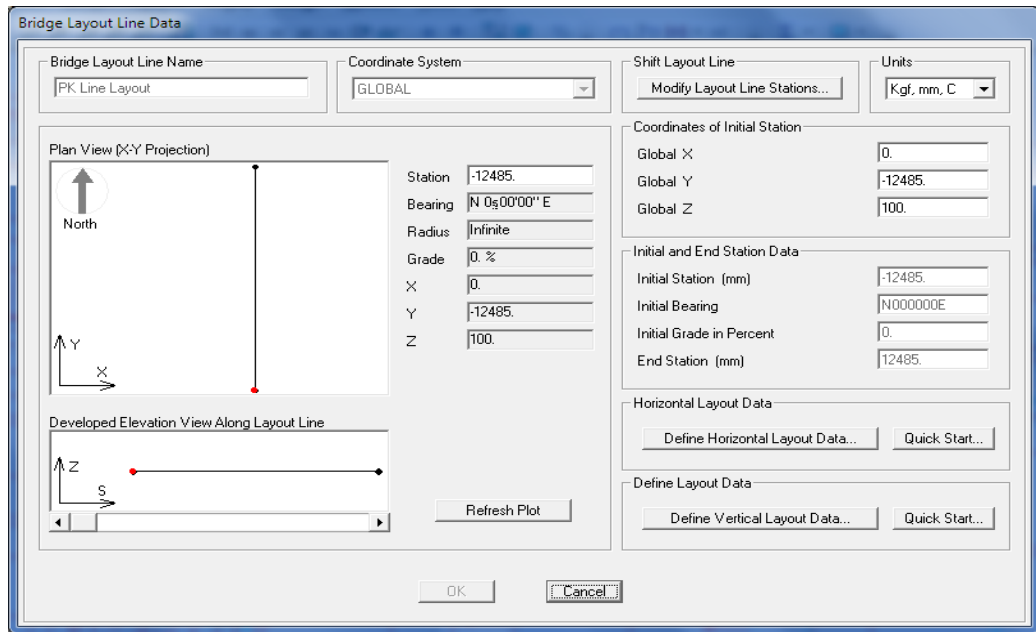
ซึ่งแสดงดัง ภาพที่ 4.9 และรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 1 คัน มีทั้งหมด 6 รูปแบบ ดังภาพที่ ผ-31 และในกรณีที่รถบรรทุก 2 คัน มีทั้งหมด 9 รูปแบบ ดังภาพที่ ผ-32 แสดงในภาคผนวก ค



ภาพที่ 4.9 แสดงการกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวางในแบบจำลองสะพานวงค์สว่างช่วง main span

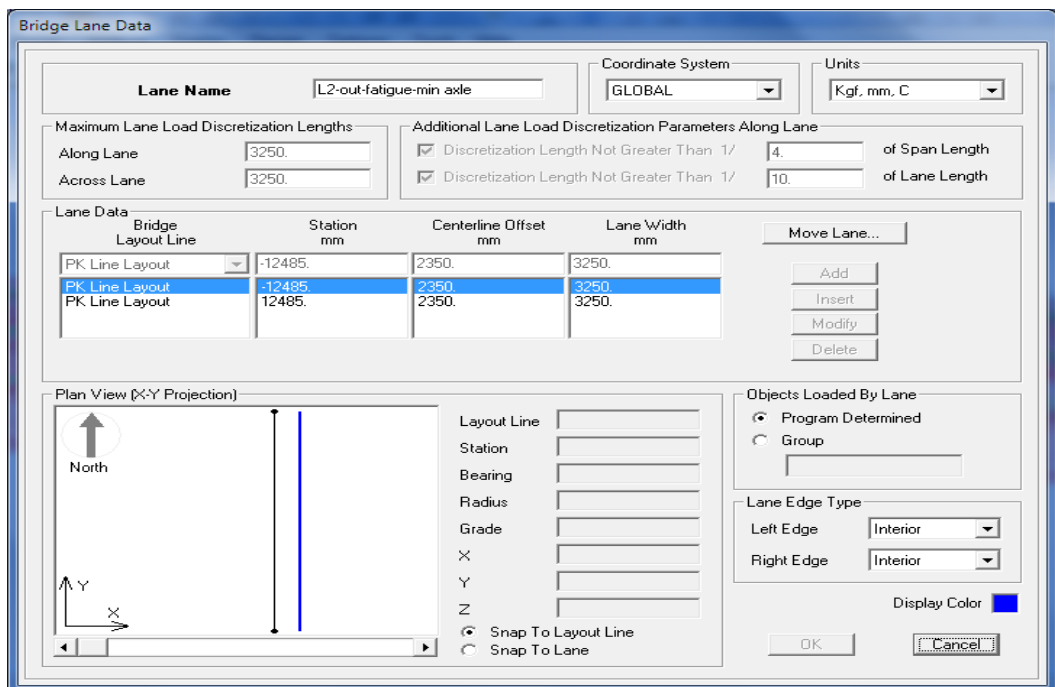
วิธีในการกำหนดเส้นการวิ่งของรถบรรทุก (define lane) ในแบบจำลองตามโปรแกรม SAP 2000 เริ่มต้นโดยการกำหนดเส้นแกนของเลน (Define Bridge Layout Line) ดังภาพที่ 4.10

ที่เพื่อเป็นเส้นแกนอ้างอิงสำหรับการกำหนดเส้นกึ่งกลางเลนที่ใช้ในการวิ่งของรถบรรทุก จากนั้นทำการกำหนดเส้นกึ่งกลางเลนโดยป้อนข้อมูลพิกัดระยะห่างของเส้นการวิ่งกับเส้นแกนของเลนและกำหนดความกว้างของเลนดังภาพที่ 4.11 และแสดงผลตัวอย่างการกำหนดเส้นกึ่งกลางเลนของรถบรรทุกในแต่ละประเภทของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนภูดั่งภาพที่ 4.12

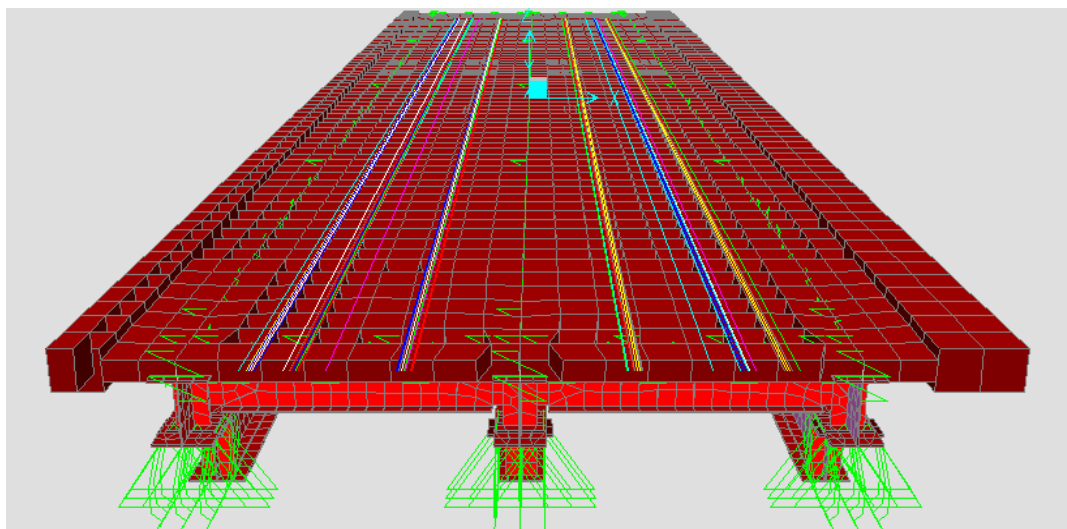


ภาพที่ 4.10 แสดงการกำหนดเส้นแกนของเลน (Define Bridge Layout Line)

ในโปรแกรม SAP2000



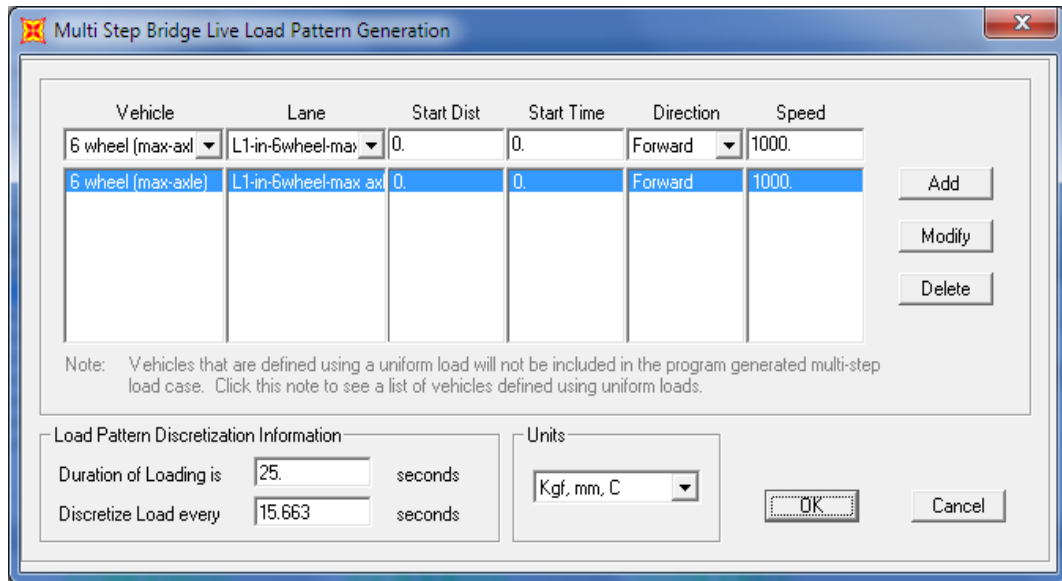
ภาพที่ 4.11 แสดงกำหนดเส้นกึ่งกลางเลน (Define Lanes) ในโปรแกรม SAP2000



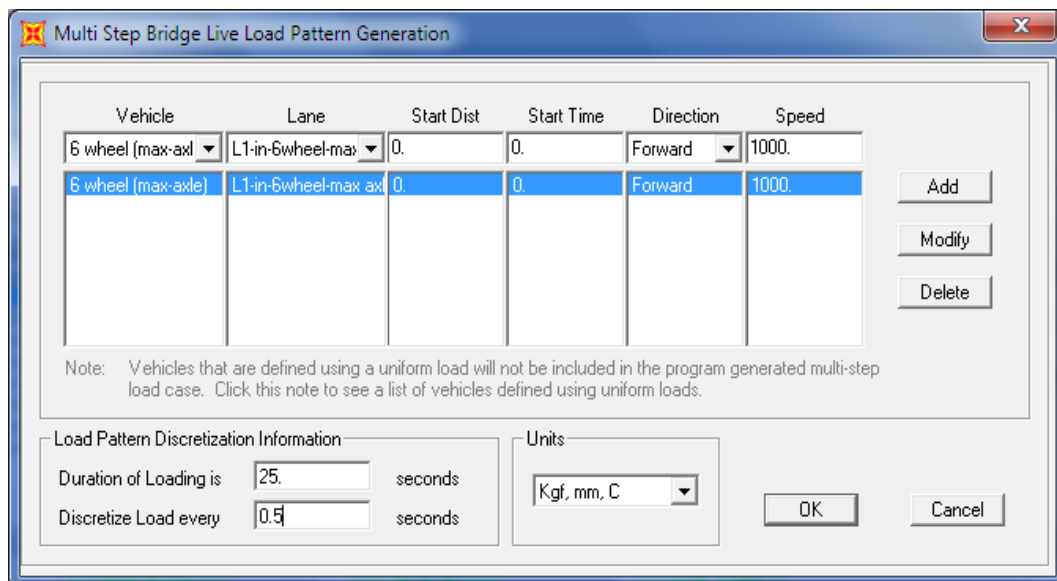
ภาพที่ 4.12 แสดงเส้นกึ่งกลางเลนของรถบรรทุกแต่ละประเภทในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

4.6 การกำหนดตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลองสะพาน

ในการกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลองสะพานจะพิจารณาโดยการตั้งสมมติฐานว่าตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 เมตร ด้วยวิธี Absolute Maximum Moment ดังที่แสดงไว้ใน ภาคผนวก ค เป็นตำแหน่งวิกฤติในแบบจำลองสะพานใน 3 เมตร ที่ให้ผลของค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบสูงสุด การโก่งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงสุด และหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap สูงสุด ซึ่งในการกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลองจะเปรียบเทียบกันระหว่าง การวางตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาว ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 เมตร ในแบบจำลอง 3 เมตรและการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุก 50 เซนติเมตร ในแบบจำลอง 3 เมตร ซึ่งการวางตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวต้องกำหนดคุณสมบัติของรถบรรทุก เช่น ความเร็วของรถบรรทุก ช่วงเวลาที่รถบรรทุกวิ่งตลอดช่วงความยาว และช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ดูผลทุกอย่างวินาทีตลอดช่วงความยาวสะพาน ซึ่งวิธีนี้ในโปรแกรมจะเรียกว่า Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดความเร็ว 1000 ม.ม./วินาที ในทุกรูปแบบรถบรรทุกและทุกรูปแบบสะพาน และกำหนดระยะเวลาที่รถบรรทุกวิ่งตลอดช่วงความยาว (Duration of Loading) ในส่วนของการกำหนดช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ดูผล กำหนดตามตำแหน่งล้อหน้าเป็นหลักโดยให้ระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับตำแหน่งเริ่มต้นการวิ่งของรถบรรทุกเป็นเวลาที่ต้องการดูผลเมื่อรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งนั้น ดังแสดงในภาพที่ 4.13-4.14



ภาพที่ 4.13 แสดงการวางตำแหน่งรถบรรทุก 6 ล้อ ตามแนวยาว ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 มิติ ในแบบจำลอง 3 มิติ



ภาพที่ 4.14 แสดงการวางตำแหน่งรถบรรทุก 6 ล้อ ตามแนวยาว ทุก 50 เซนติเมตร

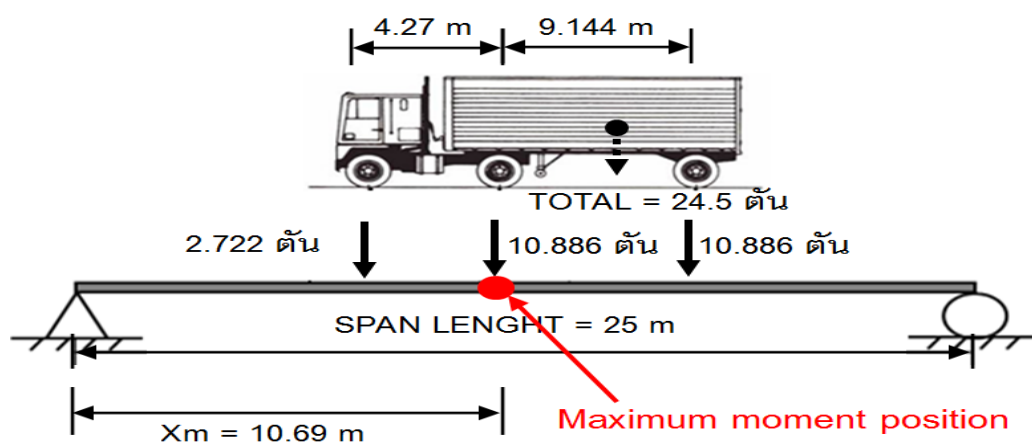
4.6.1 การกำหนดตำแหน่งการอ่านค่าผลโมเมนต์และแรงในแนวแกนด้วยวิธี section cut

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองชิ้นส่วนต่างๆด้วย shell element ซึ่งการแสดงผลวิเคราะห์จะใช้วิธี section cut ในการอ่านผลค่าโมเมนต์รอบแกน และค่าแรงในแนวแกน ซึ่งได้อธิบายวิธีการในหัวข้อที่ 3.6.2 แล้วในการค่าโมเมนต์จาก shell element จะต้องแยกอ่านค่าในแต่ละชิ้นส่วนของแบบจำลอง จึงมีความจำเป็นในการหาตำแหน่งในการ cut section เพื่อที่จะหาค่าโมเมนต์และแรงในแนวแกนถูกต้องที่สุด ในการคำนวณหาตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางการค่าโมเมนต์

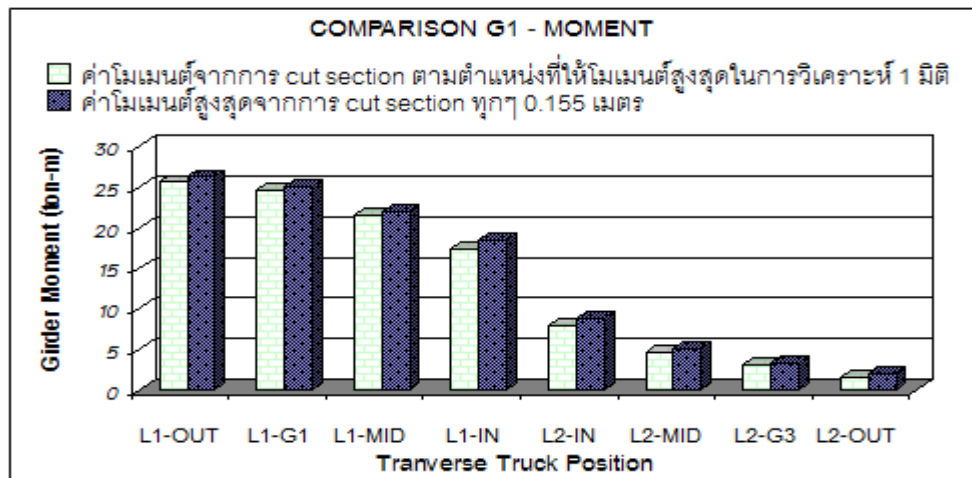
จาก shell element จะต้องแยกอ่านค่าในแต่ละชั้นส่วนของแบบจำลอง จึงมีความจำเป็นในการหาตำแหน่งในการ cut section เพื่อที่จะหาค่าโมเมนต์และแรงในแนวแกนถูกต้องที่สุด ในการคำนวณหาตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ โดยการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการ cut section จะพิจารณาใช้แบบจำลองสะพานประชาชนกุลเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์และพิจารณารถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO (fatigue truck) เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ซึ่งจะพิจารณาดำเนินการของรถบรรทุกตามแนวยาวของสะพานใน 2 ตำแหน่ง ดังนี้

4.6.1.1 เมื่อรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งตามแนวยาวตามตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ

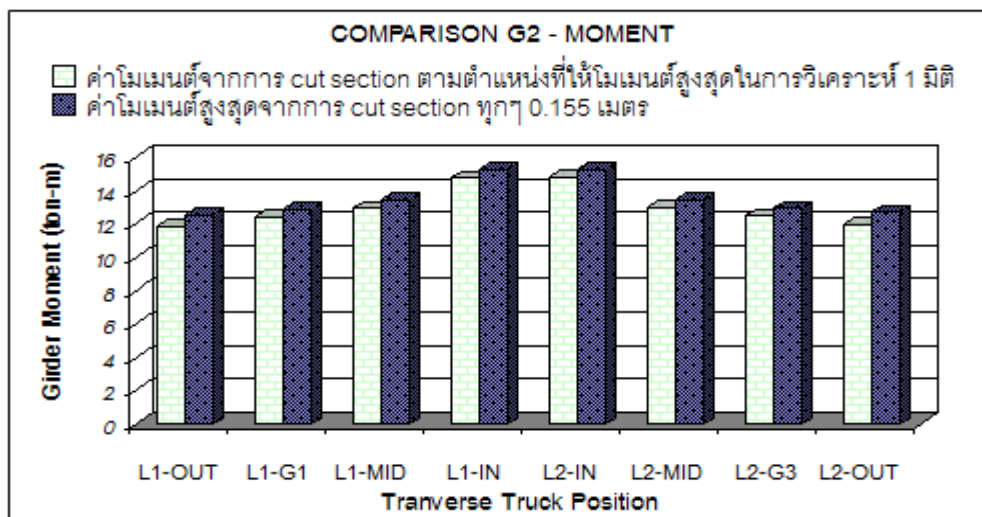
ซึ่งจะพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งที่เหมาะสมในการ cut section ระหว่างตำแหน่ง cut section ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ที่ระยะห่างจากปลายด้านซ้ายของคานเท่ากับ 10.69 เมตร ดังภาพที่ 4.15 กับตำแหน่งในการลอง cut section ทุก ๆ 155 มม. ตลอดความยาวช่วงคาน ถูกกำหนดตามระยะห่างระหว่างการแบ่งชิ้นส่วนคานตามแบบจำลอง โดยพิจารณาดำเนินการตามแนวขวางทั้ง 8 ตำแหน่ง ของแบบจำลองสะพานประชาชนกุล ผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในคาน G1, G2 และ G3 ที่ตำแหน่งในการ cut section ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ กับในการลอง cut section ทุก ๆ 155 มม. ตลอดความยาวช่วงคาน ดังภาพที่ 4.16 และผลการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ กับในการลอง cut section ทุก ๆ 155 มม. ตลอดความยาวช่วงคาน ดังภาพที่ 4.17



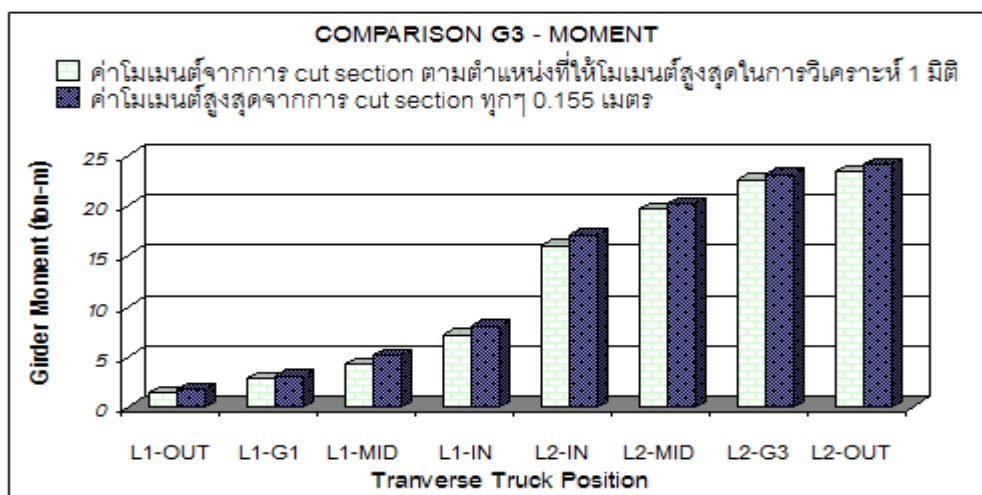
ภาพที่ 4.15 รูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกทุกตัวแทน (fatigue truck) ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล มีความยาวช่วง 25 เมตร



(a) การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ของคาน G1

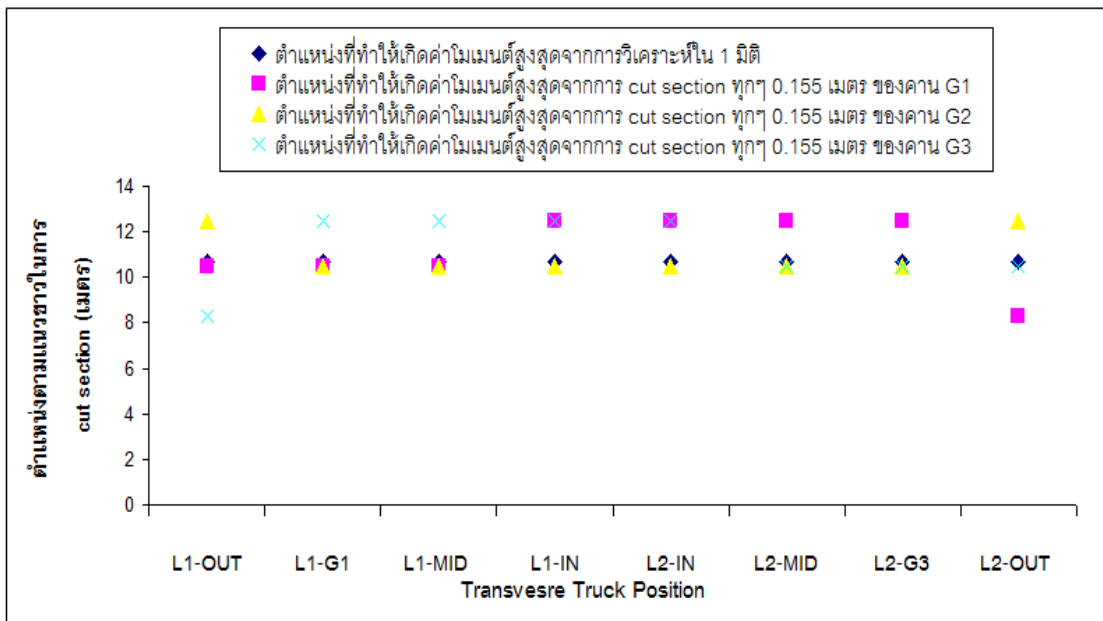


(b) การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ของคาน G2



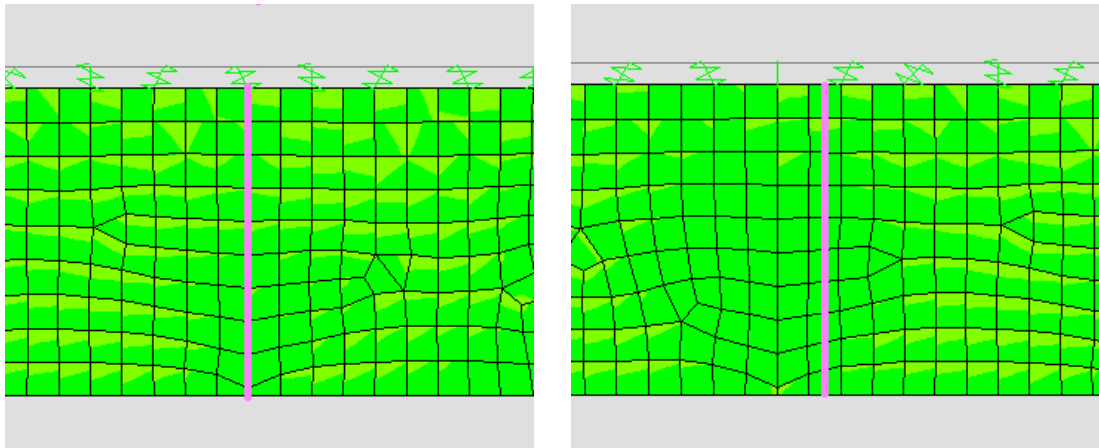
(c) การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ของคาน G3

ภาพที่ 4.16 แสดงผลของค่าโมเมนต์สำหรับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการ cut section



ภาพที่ 4.17 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งในการ cut section ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด

จากผลที่ได้สรุปได้ว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการ cut section เพื่ออ่านค่าโมเมนต์และแรงในแนวแกน เมื่อรถบรรทุกตัวแทนอยู่ตำแหน่งตามแนวขวางตามตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ คือ ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ โดยที่ค่าโมเมนต์มีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับตำแหน่งในการลอง cut section ทุก ๆ 155 มม. ตลอดความยาวช่วงคาน ประมาณ 2.8 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ มีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ให้ค่าโมเมนต์สูงในการลอง cut section ทุก ๆ 155 มม. ประมาณ 2.1 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ ความคลาดเคลื่อนของค่าโมเมนต์สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงน่าจะเกิดจากความหนาแน่นในการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของชิ้นส่วนคานซึ่งจะมีผลเมื่อใช้วิธี cut section ในการอ่านผล เพราะเส้นตัดผ่านที่กำหนดจากวิธีนี้อาจจะไม่ตรงกับจุดต่อของชิ้นส่วนในการแบ่งย่อย แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 4.18



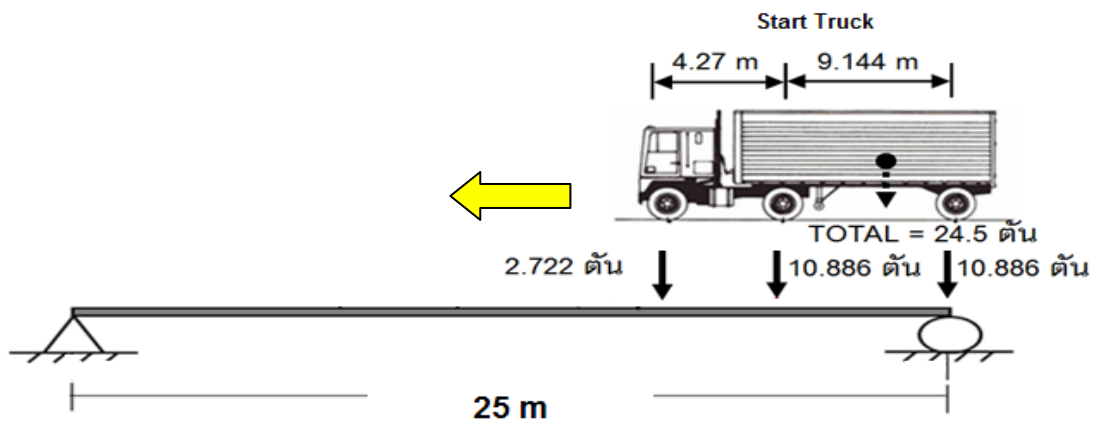
(a) เส้นตัดผ่านจุดต่อของชิ้นส่วนย่อย

(b) เส้นตัดผ่านจุดต่อของชิ้นส่วนย่อย

ภาพที่ 4.18 แสดงตัวอย่าง cut section ที่ชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน

4.6.1.2 เมื่อรถบรรทุกอยู่ตำแหน่งตามแนวยาวทุก 50 เซนติเมตร ตลอดช่วงคาน

การทดลองวางตำแหน่งรถบรรทุกทุกตามแนวยาวของสะพานที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในแบบจำลอง ซึ่งจะกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของรถบรรทุกทุกตามตัวแทนความยาวของรถบรรทุกทุกไปจนตำแหน่งล้อหน้าถึงปลายสะพานอีกด้าน ดังภาพที่ 4.19 โดยทำการลองวางตำแหน่งทุก ๆ 50 ซม. รวมทั้งหมด 24 step และจะพิจารณาตำแหน่งตามแนวขวางตามผลของค่าโมเมนต์ในคานในหัวข้อที่ 4.6.1.1 กล่าวคือ คาน G1 จะเกิดค่าโมเมนต์สูงสุดที่ตำแหน่งตามแนวขวาง คือ L1 – OUT คาน G2 จะเกิดค่าโมเมนต์สูงสุดที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2 – IN และคาน G3 จะเกิดค่าโมเมนต์สูงสุดที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2 – OUT เหตุผลในการกำหนดตำแหน่งตามแนวขวางดังกล่าวเพื่อลดความยุ่งยากในการลอง cut section ในทุกตำแหน่งตามแนวขวาง



ภาพที่ 4.19 ตำแหน่งเริ่มต้นของรถบรรทุกตัวแทน (fatigue truck) ในการลองวาง

ตำแหน่งทุก ๆ 50 ซม.

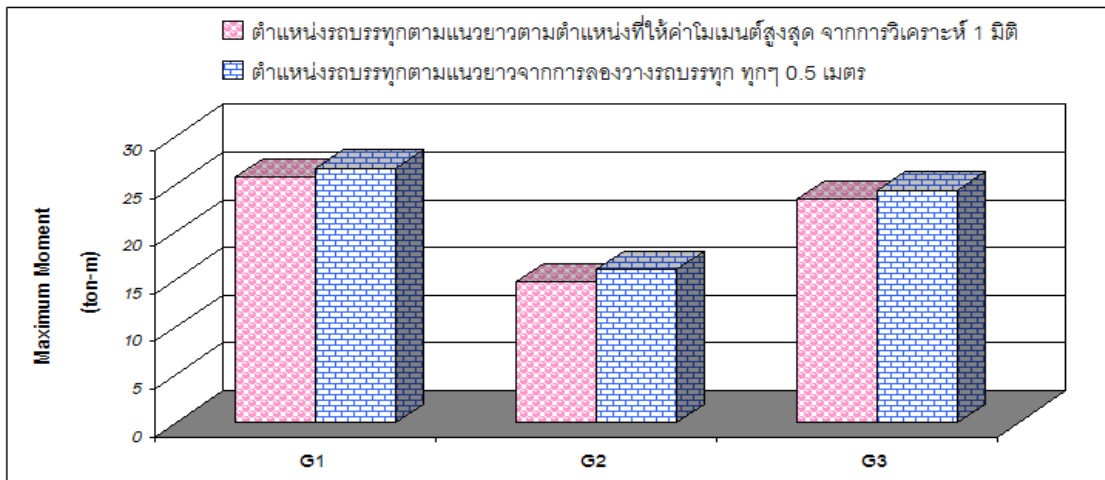
การลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุก ๆ 50 ซม. มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งรถบรรทุกตัวแทนตามแนวยาวที่วิกฤติที่สุดจากแบบจำลองสะพานใน 3 มิติ ในการหาค่าที่ให้ผลของค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบสูงสุด การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงสุด และหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap สูงสุด รวมทั้งการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการ cut section เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์สูงสุด และเปรียบเทียบตำแหน่งที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดกับตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 มิติ ว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.6 หรือไม่ ซึ่งผลของค่าโมเมนต์สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์ในคานของแบบจำลองจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุก ๆ 50 ซม. แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของค่าโมเมนต์สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์ในคานของแบบจำลองสะพานจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุก ๆ 50 ซม.

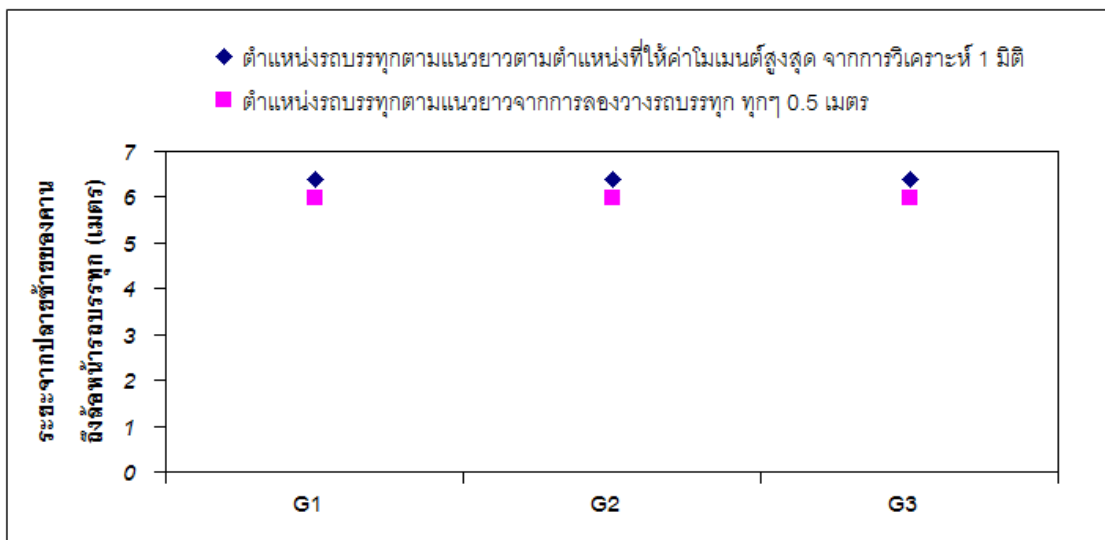
ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวาง	คาน	ค่าโมเมนต์สูงสุด (ตัน-ม.)	ตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดเทียบจากปลายด้านซ้ายของคาน (ม.)	ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวเทียบจากปลายด้านซ้ายของคานถึงล้อหน้า (ม.)
L1 – OUT	G1	26.72	10.47	5.965
L2 – IN	G2	16.1	10.32	5.965
L2 – OUT	G3	24.4	10.47	5.965

4.6.2 ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลอง 3 มิติ ที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุด

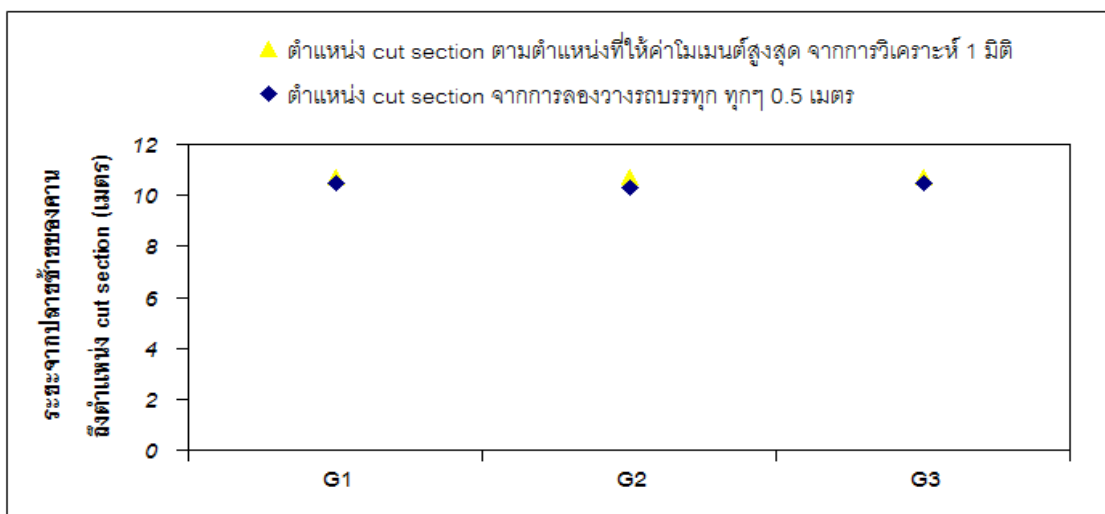
จากการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์จากการวางตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาว ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 มิติ ในแบบจำลอง 3 มิติและหาค่าโมเมนต์สูงสุดจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุก 50 เซนติเมตร ในแบบจำลอง 3 มิติ โดยพิจารณาใช้แบบจำลองสะพานประชานุกูลเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์และพิจารณารถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO (fatigue truck) เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ แสดงผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดังรูปที่ 4.20 และแสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งรถบรรทุกตัวแทนตามแนวยาวและตำแหน่ง cut section ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.20 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์



ภาพที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งรถบรรทุกตัวแทนตามแนวยาว



ภาพที่ 4.22 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่ง cut section

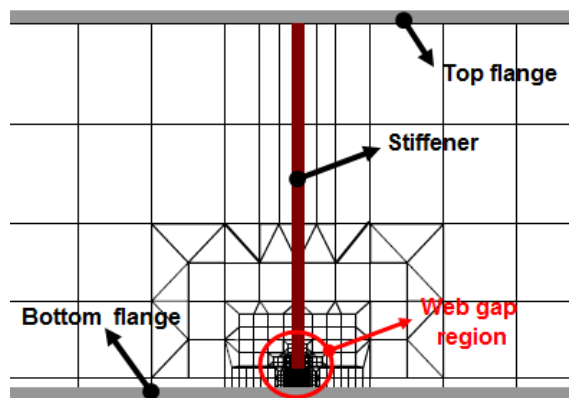
จากผลที่ได้พบว่าค่าโมเมนต์ในคาน G1, G2 และ G3 ในกรณีที่ตั้งตำแหน่งรถบรรทุกตัวแทน (fatigue truck) ตามแนวยาว ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ 1 มิติ เปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์สูงสุดในคานจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตัวแทน ตามแนวยาวทุก 50 เซนติเมตร ในแบบจำลองสะพานข้ามประชานุกูล ให้ค่าโมเมนต์ที่ใกล้เคียงกันมาก รวมทั้งตำแหน่งการวางรถบรรทุกตัวแทนที่ให้ค่าโมเมนต์สูงและตำแหน่ง cut section เปรียบเทียบกัน ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากเช่นกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งการวางรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ เป็นตำแหน่งแห่งเดียวกับตำแหน่งการวางรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ในแบบจำลอง 3 มิติ และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ จากการพิจารณาเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ในแบบจำลอง 3 มิติ จากการพิจารณารถบรรทุกตัวแทน (fatigue truck) และใช้แบบจำลองสะพานข้ามประชานุกูล ในการวิเคราะห์ ทั้งนี้จากผลสรุปที่ได้ผู้วิจัยจะพิจารณาตำแหน่งการวางรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ในการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์สูงสุดในแบบจำลองสะพานใน 3 มิติ ทั้ง 2 แบบจำลองสะพาน และในทุกประเภทรถบรรทุกที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.7 การสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมในการหาค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap

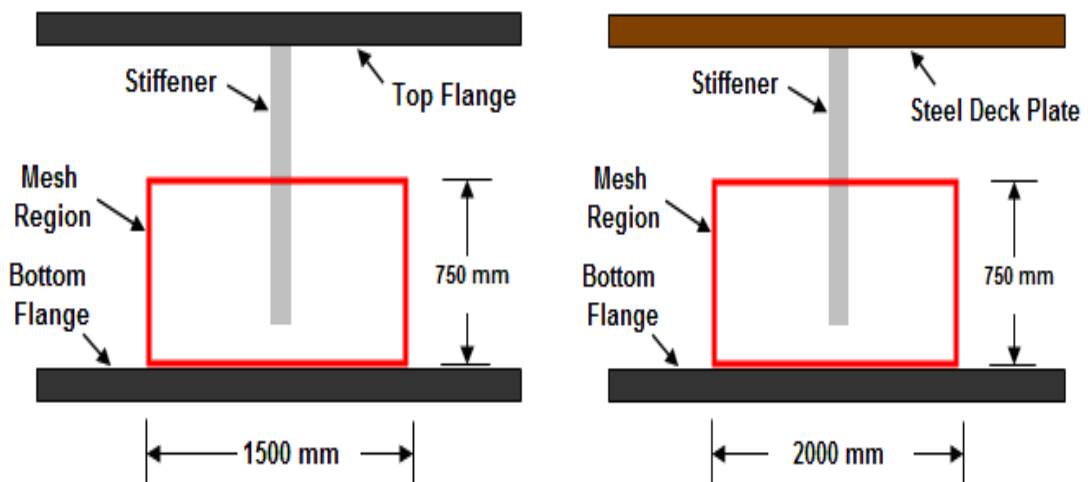
แบบจำลองสะพานจากโครงการตรวจสอบและประเมินสะพานโครงสร้างเหล็ก ซึ่งเป็นโครงการของสำนักงานเขตกรุงเทพมหานคร โดยที่ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นผู้จัดทำขึ้น ไม่ได้กำหนด ในการแบ่งชิ้นส่วนย่อยบริเวณ web gap ซึ่งเป็นบริเวณช่วงว่างที่ไร้การเชื่อมติดระหว่างแผ่นเหล็กเสริมข้างคานกับชิ้นส่วนปีกด้านล่าง บริเวณนี้จะมีความอ่อนต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นได้ง่าย จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งในการแบ่งชิ้นส่วนย่อย (mesh) ในบริเวณนี้ เพื่อให้ได้ซึ่งหน่วยแรงที่ถูกต้องจากแบบจำลองสะพานให้เหมือนกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด โดยกำหนดใช้รถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ และกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวยาว และตามแนวขวางคือ ตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 มิติ และตำแหน่ง L2-OUT ตามลำดับ

การแบ่งชิ้นส่วนย่อยบริเวณ web gap จะใช้วิธี mesh transition ซึ่งเป็นวิธีแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณที่จะทำการวิเคราะห์โดยละเอียดในบริเวณนั้น โดยที่กำหนดรูปแบบชิ้นส่วนแผ่นโค้งรูปสามเหลี่ยม ในบริเวณที่จะเปลี่ยนขนาดชิ้นส่วนให้เล็กลงแต่สำหรับบริเวณอื่นๆ จะกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนแผ่นโค้งรูปสี่เหลี่ยม โดยให้จุดต่อของชิ้นส่วนมีการเชื่อมต่อกันทั้งหมด ดังภาพที่ 4.23 ทั้งนี้

เพื่อให้ได้การกระจายหน่วยแรงใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด โดยพิจารณารูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap ให้มีขนาดเล็กที่สุดจนกว่าจะได้ค่าหน่วยแรงคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการตรวจวัดในภาคสนามไม่ได้กำหนดติดตั้งเกจวัดความเครียดในบริเวณ web gap ดังนั้นจึงพิจารณาการแบ่งชิ้นส่วนจนกว่าจะได้ค่าหน่วยแรงคงที่โดยพิจารณาบริเวณที่จะพิจารณาการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap มีความกว้างตามแนวราบและแนวตั้ง ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.23 แสดงการกำหนดแบ่งชิ้นย่อยส่วนในบริเวณ web gap ด้วยวิธี mesh transition



(a) แบบจำลองสะพานประชาชนกุล

(b) แบบจำลองสะพานวงศ์สว่าง

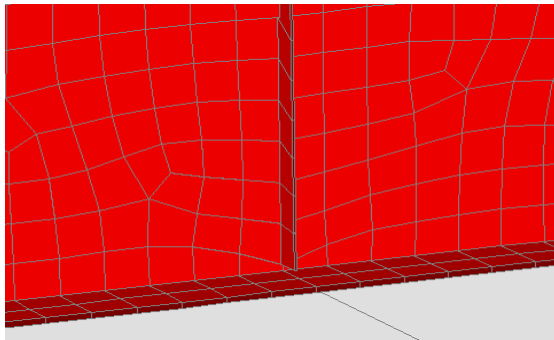
ภาพที่ 4.24 แสดงการกำหนดบริเวณในการแบ่งชิ้นย่อยส่วนในบริเวณ web gap

4.7.1 การแบ่งชิ้นส่วนย่อยสำหรับแบบจำลองสะพานข้ามแยกประจักษ์ศิลปาคม

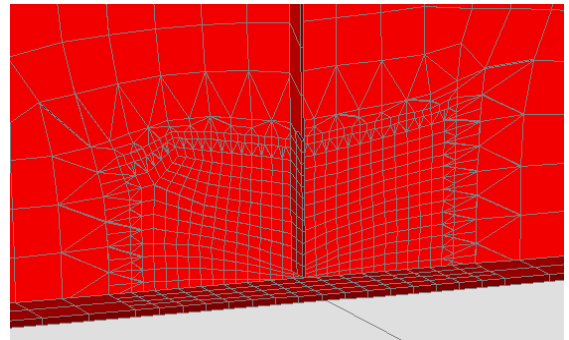
กำหนดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap ให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ที่สุดจนกว่าจะได้ค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap คงที่ โดยที่จะแบ่งชิ้นส่วนย่อยในบริเวณ web gap ประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนแผ่นเอว ชิ้นส่วนปีกกลาง และชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ซึ่งจะพิจารณาจำนวนรูปแบบทั้งหมด 8 รูปแบบ ดังภาพที่ 4.25 และแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ทั้ง 8 รูปแบบ ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประจักษ์ศิลปาคม

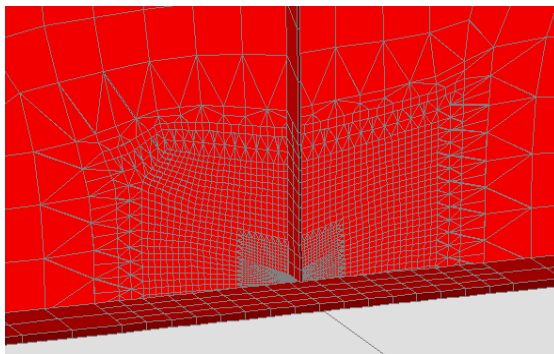
รูปแบบ	รายละเอียด	จำนวนชิ้นส่วน		ขนาดชิ้นส่วน เล็กที่สุด (ตร.มม.)
		บริเวณ web gap	รวม	
No Mesh	แบบจำลองเดิมที่ไม่มีการแบ่งชิ้นส่วน เพิ่มในบริเวณ web gap	351	12694	35×156
Mesh Type A	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจากแบบจำลองเดิม	2748	15442	9×38
Mesh Type B	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type A	7923	20617	2×10
Mesh Type C	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type B	18787	31481	2×5
Mesh Type D	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type C	24499	37193	1×2
Mesh Type E	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type D	33715	46409	1×2
Mesh Type F	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type E	38323	51017	1×2
Mesh Type G	แบ่งชิ้นส่วนจนมีขนาดเล็กที่สุด	118827	131521	1×1



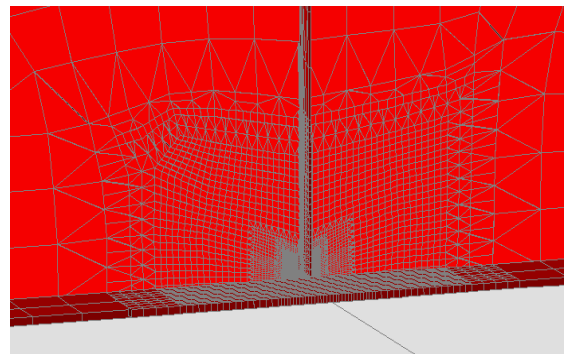
(a) แบบที่ 1 No Mesh



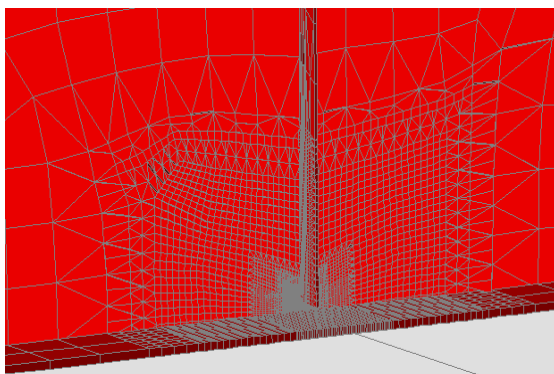
(b) แบบที่ 2 Mesh Type A



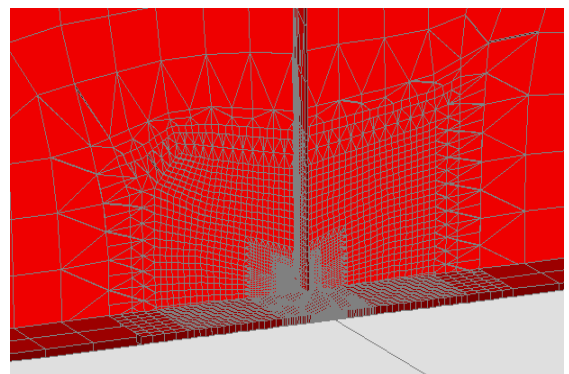
(c) แบบที่ 3 Mesh Type B



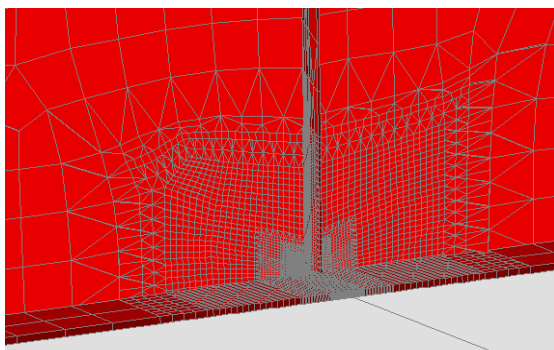
(d) แบบที่ 4 Mesh Type C



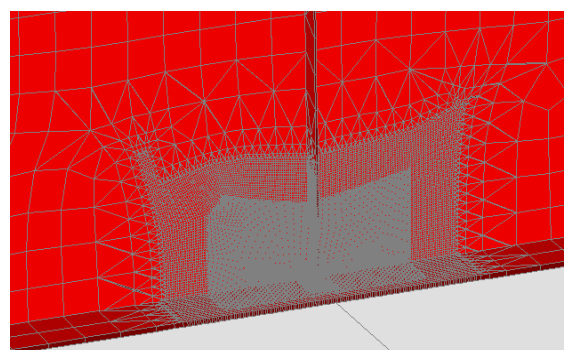
(e) แบบที่ 3 Mesh Type D



(f) แบบที่ 4 Mesh Type E



(g) แบบที่ 3 Mesh Type F



(h) แบบที่ 4 Mesh Type G

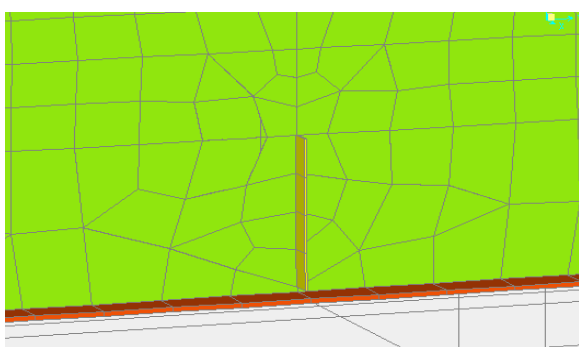
ภาพที่ 4.25 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

4.7.2 การแบ่งชิ้นส่วนย่อยสำหรับแบบจำลองสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง

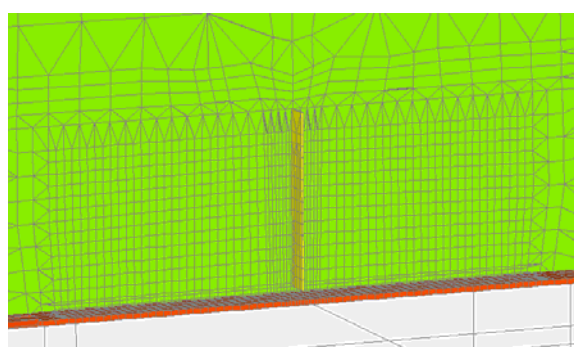
กำหนดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap ให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ที่สุดจนกว่าจะได้ค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap คงที่ โดยที่จะแบ่งชิ้นส่วนย่อยในบริเวณ web gap ประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนแผ่นเอว ชิ้นส่วนปีกกลาง และชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ซึ่งจะพิจารณาจำนวนรูปแบบทั้งหมด 6 รูปแบบ ดังภาพ 4.26 และแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ทั้ง 6 รูปแบบ ของแบบจำลองสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง

รูปแบบ	รายละเอียด	จำนวนชิ้นส่วน		ขนาดชิ้นส่วนเล็กที่สุด (ตร.มม.)
		บริเวณ web gap	รวม	
No Mesh	แบบจำลองเดิมที่ไม่มีการแบ่งชิ้นส่วนเพิ่มในบริเวณ web gap	256	15815	100 × 135
Mesh Type A	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจากแบบจำลองเดิม	12117	27932	14 × 18
Mesh Type B	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type A	32259	48074	7 × 18
Mesh Type C	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type B	67610	83425	4 × 9
Mesh Type D	แบ่งชิ้นส่วนเพิ่มจาก Mesh Type C	104818	120633	1 × 2
Mesh Type E	แบ่งชิ้นส่วนให้มีขนาดเล็กลงจาก Mesh Type D จนมีขนาดเล็กที่สุด	132007	147822	1 × 1

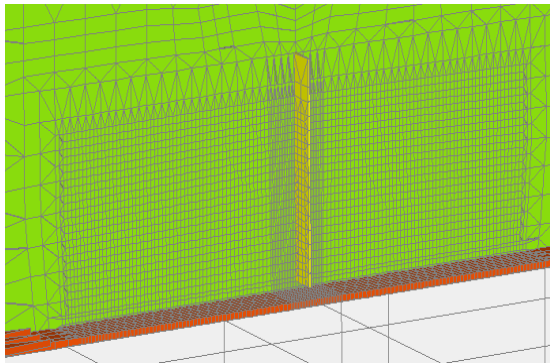


(a) แบบที่ 1 No Mesh

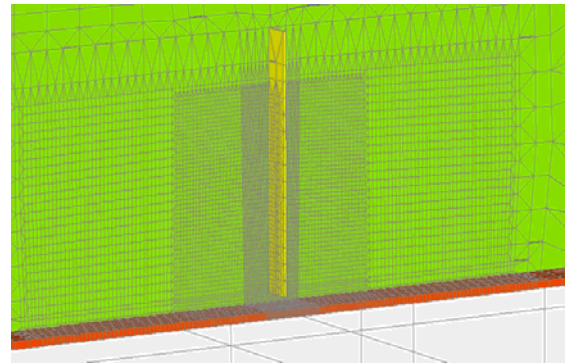


(b) แบบที่ 2 Mesh Type A

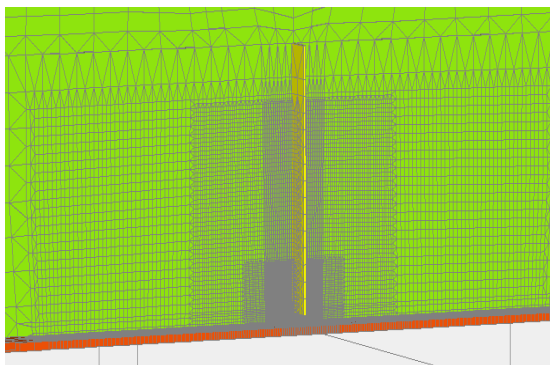
ภาพที่ 4.26 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนในบริเวณ web gap ทั้ง 6 รูปแบบ ของแบบจำลองสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง



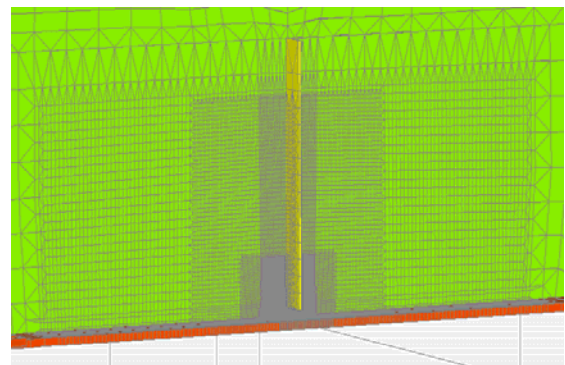
(c) แบบที่ 3 Mesh Type B



(d) แบบที่ 4 Mesh Type C



(e) แบบที่ 3 Mesh Type D



(f) แบบที่ 4 Mesh Type E

ภาพที่ 4.26 (ต่อ) แสดงการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณ web gap ของแบบจำลอง สะพานข้ามแยกวงค์สว่าง

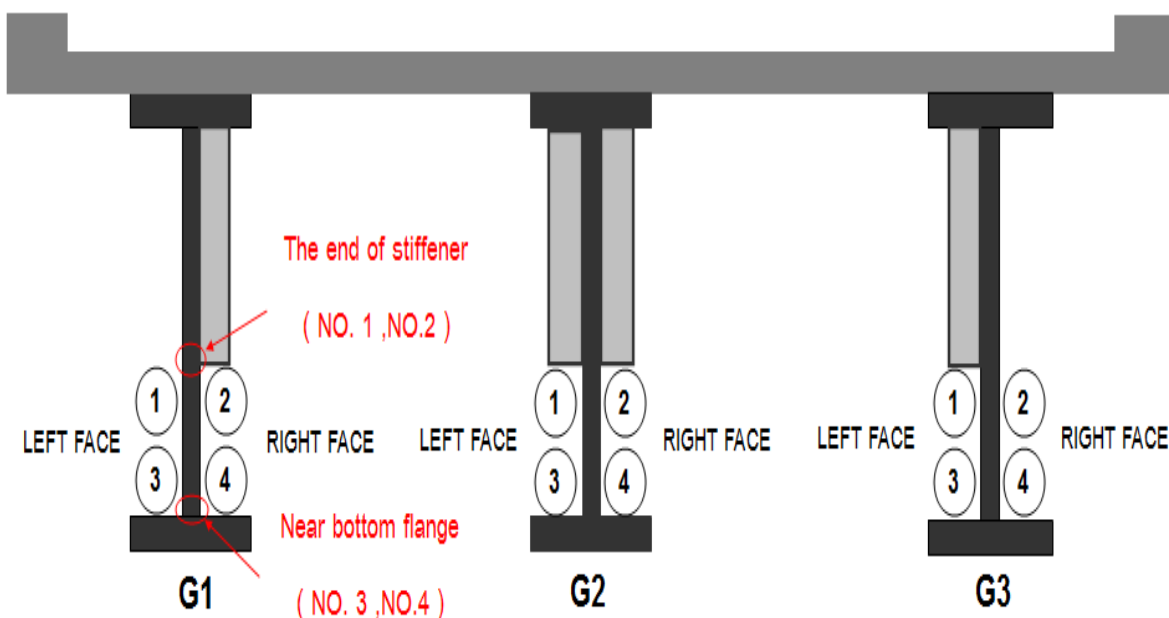
4.8 ผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยบริเวณ web gap ในแบบจำลองสะพาน

จากการกำหนดรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนย่อยบริเวณ web gap ในแบบจำลองสะพานเพื่อวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบของบริเวณ web gap ให้ถูกต้องที่สุด โดยการวิเคราะห์กำหนดใช้รถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ และกำหนดตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวยาว และตามแนวขวางคือ ตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์ใน 1 เมตร และตำแหน่ง L2-OUT ตามลำดับ ทั้ง 2 รูปแบบสะพาน ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์หน่วยแรงจากแบบจำลองสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม sap 2000 ในบริเวณ web gap ณ ตำแหน่งที่สำคัญทั้งสองตำแหน่ง คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน และตำแหน่งใกล้ชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน ทั้งสองด้านของแผ่นเอว การแสดงผลหน่วยแรงจากโปรแกรม sap 2000 ในชิ้นส่วนแบบแผ่นโค้ง (shell element) จะกำหนดการแสดงผลอยู่ในรูปของ stress diagram ในทิศทางแนวตั้งของชิ้นส่วนบริเวณ web gap ตามระบบ

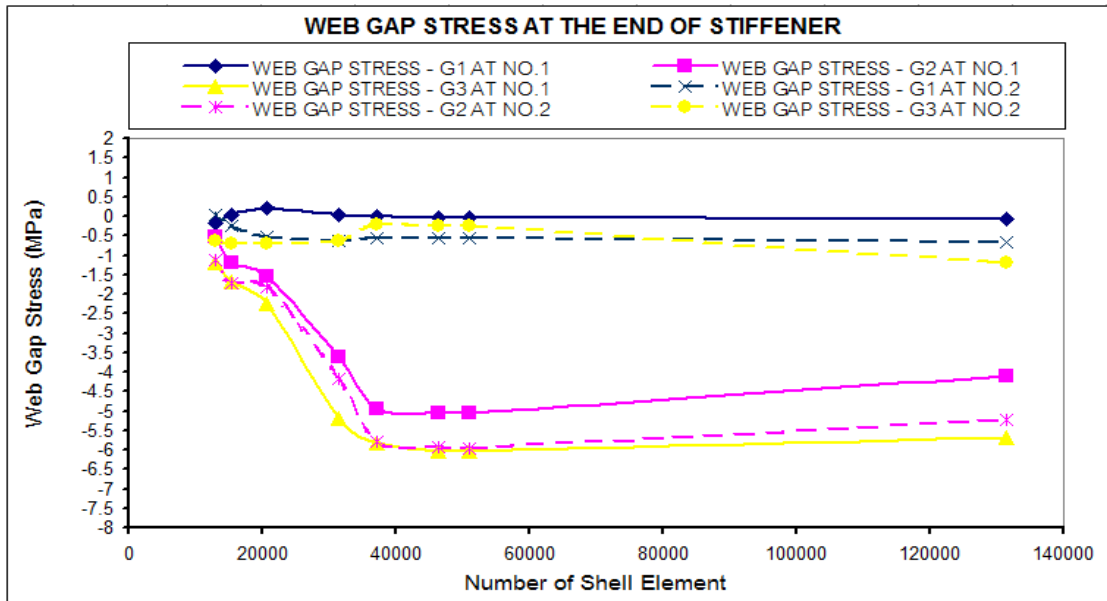
โคออร์ดิเนตประจำตัว (local coordinate) โดยกำหนดอ่านค่าหน่วยแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วน ณ ตำแหน่งที่สำคัญทั้งสองตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบของบริเวณ web gap ทั้ง 2 รูปแบบสะพาน จะแสดงดังนี้

4.8.1 ผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

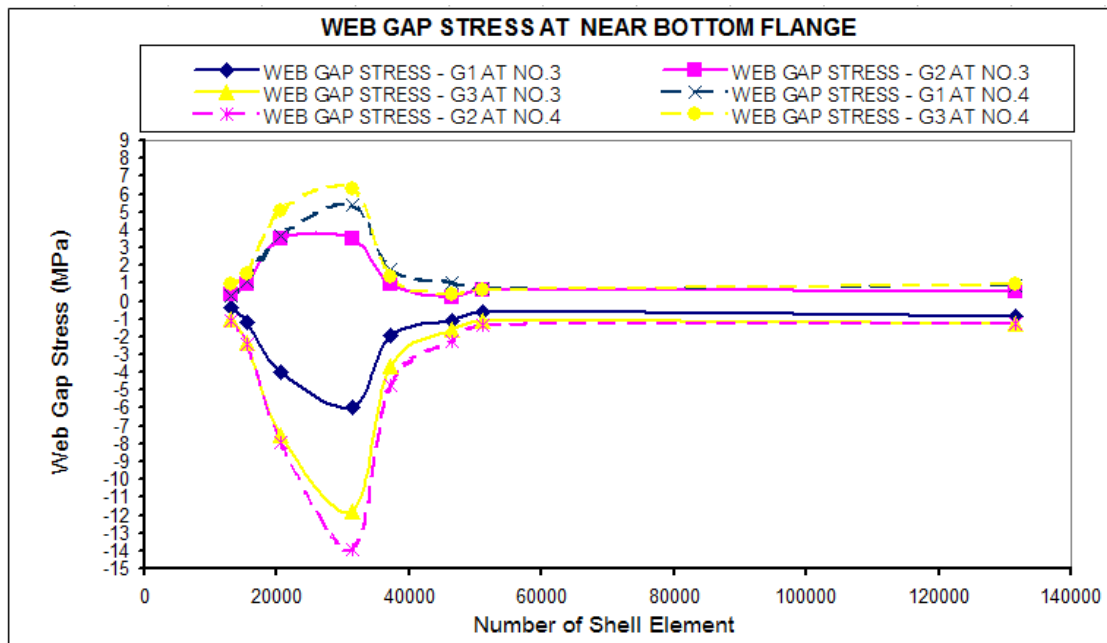
กำหนดตำแหน่งในการแสดงผลค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap ของคาน G1 ,G2 และ G3 ทั้งสองตำแหน่ง คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และหมายเลข 2) และตำแหน่งใกล้ชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน (หมายเลข 3 และหมายเลข 4) ทั้งสองด้านของแผ่นเอว ซึ่งแสดงตำแหน่งในการอ่านผลดังภาพที่ 4.27 และแสดงผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในบริเวณ web gap ในแต่ละรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ดังภาพที่ 4.28 - 4.29



ภาพที่ 4.27 แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรงในบริเวณ web gap ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล



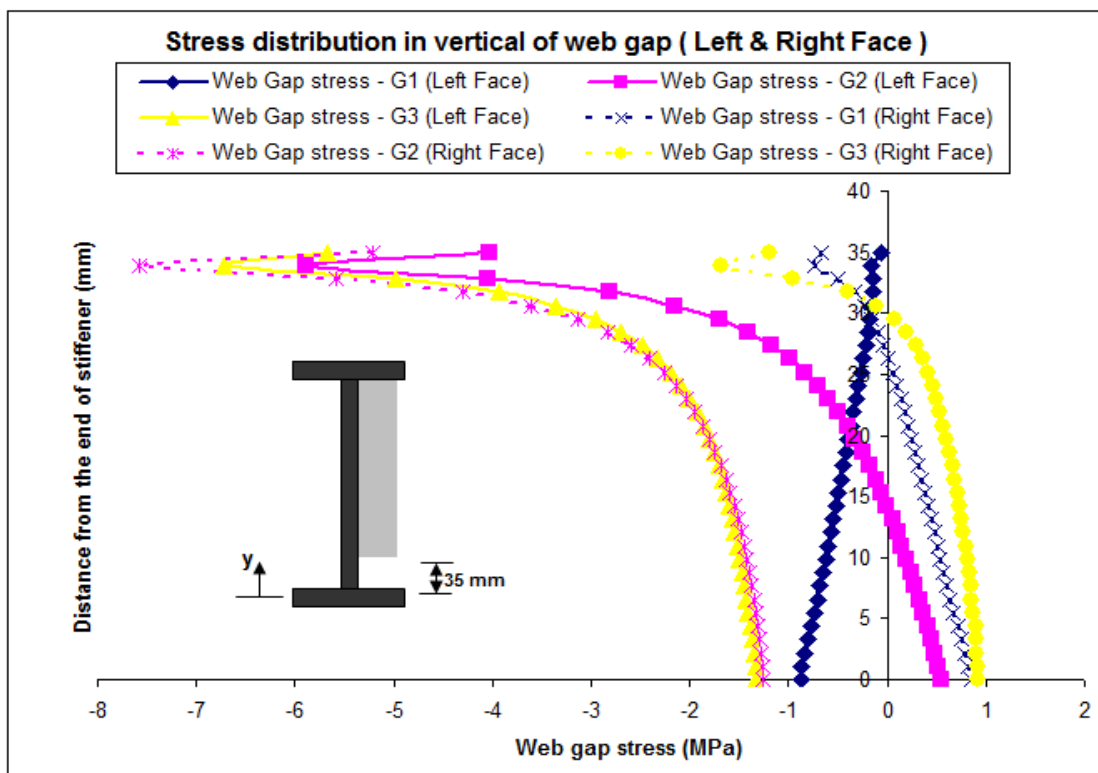
ภาพที่ 4.28 แสดงหน่วยแรงในบริเวณ web gap ในการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ทั้ง 8 รูปแบบ ของคาน G1, G2 และ G3 ที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และหมายเลข 2)



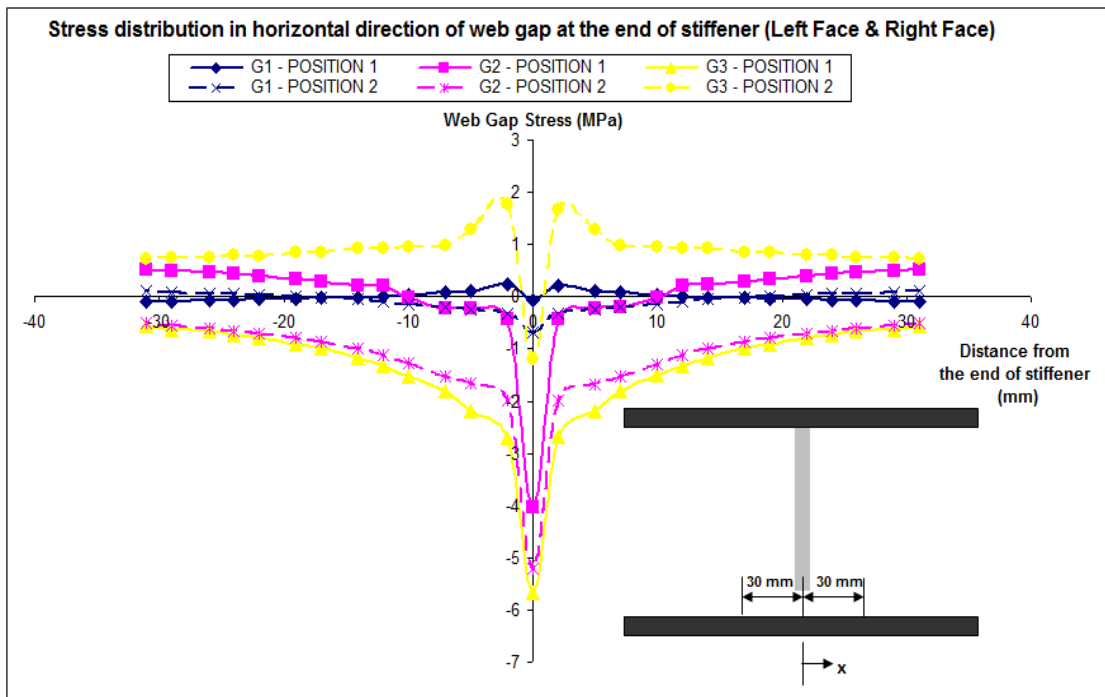
ภาพที่ 4.29 แสดงหน่วยแรงในบริเวณ web gap ในการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ทั้ง 8 รูปแบบ ของคาน G1, G2 และ G3 ที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 3 และหมายเลข 4)

จากผลที่ได้พบว่าในแบบจำลองแบบที่ 1 No Mesh ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ต่ำมากกว่าในแบบจำลองแบบที่ 7 และ 8 อยู่พอสมควร สำหรับตำแหน่งที่ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และหมายเลข 2) ในทุกคาน และสำหรับตำแหน่งใกล้ชิ้นส่วนปีก

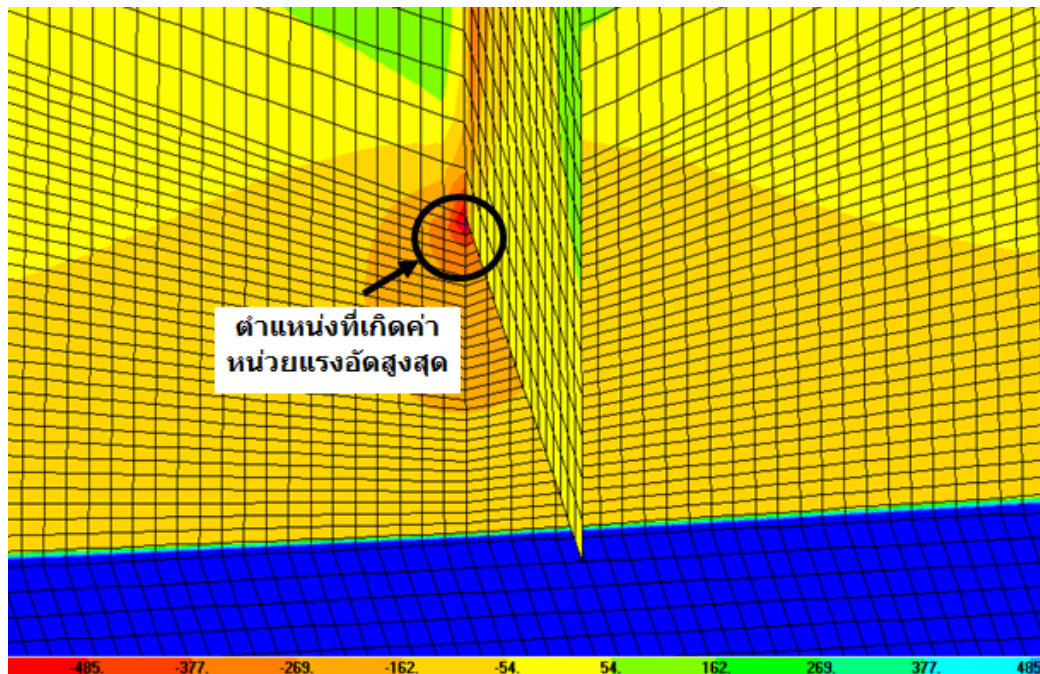
ด้านล่างของคาน (หมายเลข 3 และหมายเลข 4) ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองแบบที่ 7 Mesh Type F และ แบบที่ 8 Mesh Type G ค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบทั้งหน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึง ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างจะคงที่แล้ว ถึงแม้จำนวนชิ้นส่วนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ดังนั้นจึงพิจารณาแบบจำลองแบบที่ 7 Mesh Type F ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบ สำหรับรบบรทุกในทุกประเภท ซึ่งการกระจายของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบในบริเวณ web gap ตามแนวราบ และตามแนวตั้ง ทั้งสองด้านของชิ้นส่วนแผ่นเอว ซึ่งจะแสดงผลโดยที่ในแนวตั้งมีความยาวจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานไปยังชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน 35 มม. ซึ่งจะแสดงผลของค่าหน่วยแรงทุกๆ 1 มม. และสำหรับในแนวราบจะแสดงผลของค่าหน่วยแรงช่วงระยะห่างไปทางซ้ายและขวา ประมาณ 30 มม. จากปลายชิ้นส่วนเหล็กเสริมข้างคาน ทั้งสองด้านของชิ้นส่วนแผ่นเอวดังภาพที่ 4.30-4.31 ตามลำดับ แสดงผลการกระจายหน่วยแรงรอบๆบริเวณ web gap ดังภาพที่ 4.32-4.33 และผลจากการเคลื่อนตัวของ บริเวณ web gap ในแนวราบและแนวตั้งสำหรับคาน G1, G2 และ G3 ดังภาพที่ 4.34



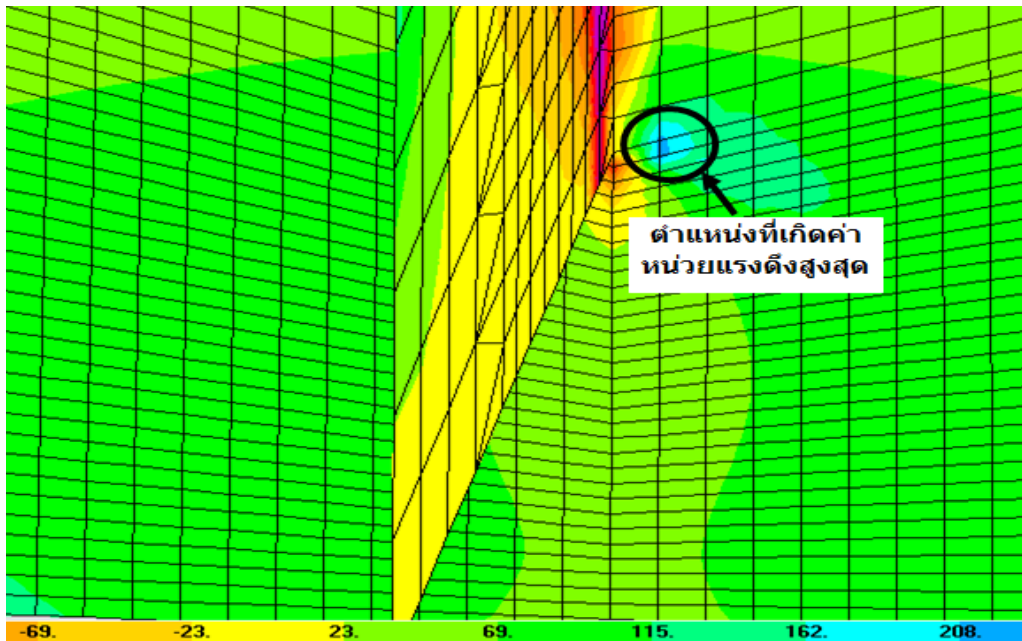
ภาพที่ 4.30 แสดงการกระจายค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวตั้งบริเวณ web gap ที่คาน G1, G2 และ G3 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล



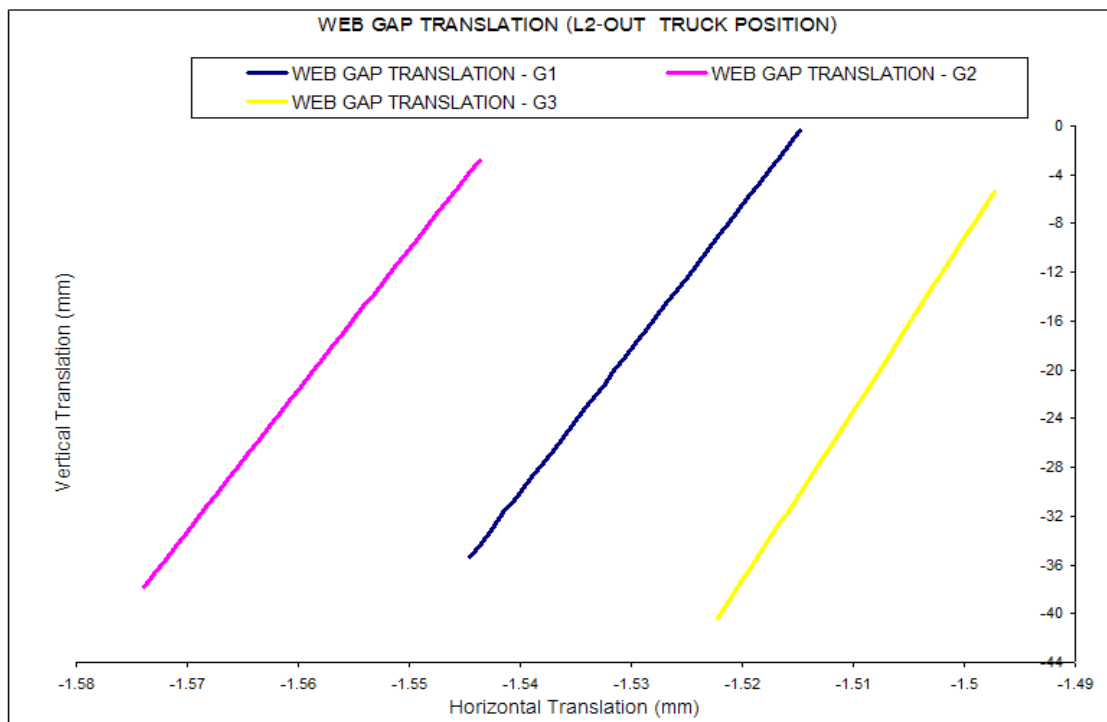
ภาพที่ 4.31 แสดงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในอกระนาบตามแนวราบที่ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ของคาน G1,G2 และ G3 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล



ภาพที่ 4.32 แสดงการกระจายหน่วยแรงอัดสูงสุดในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุลของคาน G2 ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานลงมาตามแนวตั้ง 1 มม. ในบริเวณ web gap ที่ผิวด้านซ้ายของชิ้นส่วนแผ่นเอว



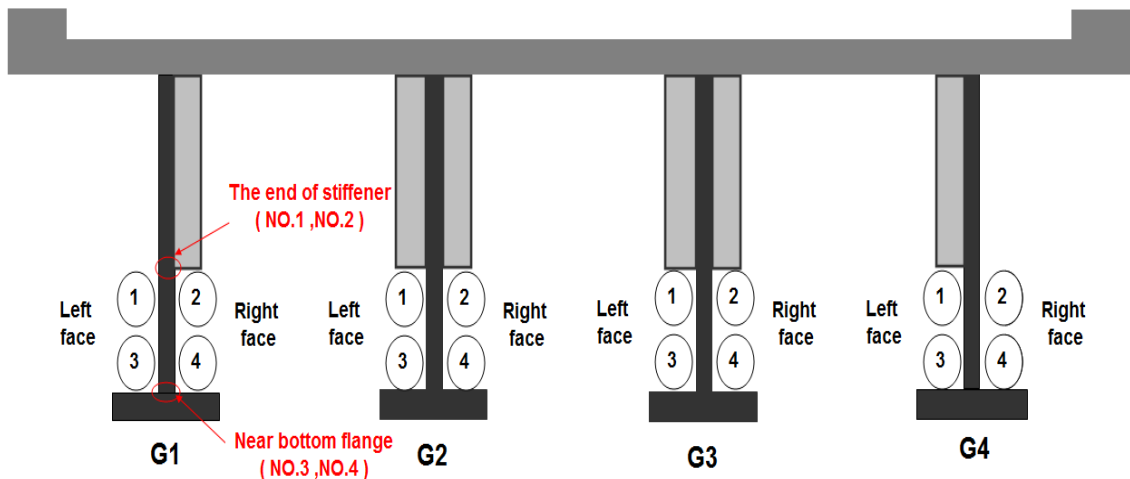
ภาพที่ 4.33 แสดงการกระจายหน่วยแรงอัดสูงสุดในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประจําอนุภูมของคาน G3 ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานมาตามแนวราบด้านขวา 2 มม. ในบริเวณ web gap ที่ผิวด้านขวาของชิ้นส่วนปีก



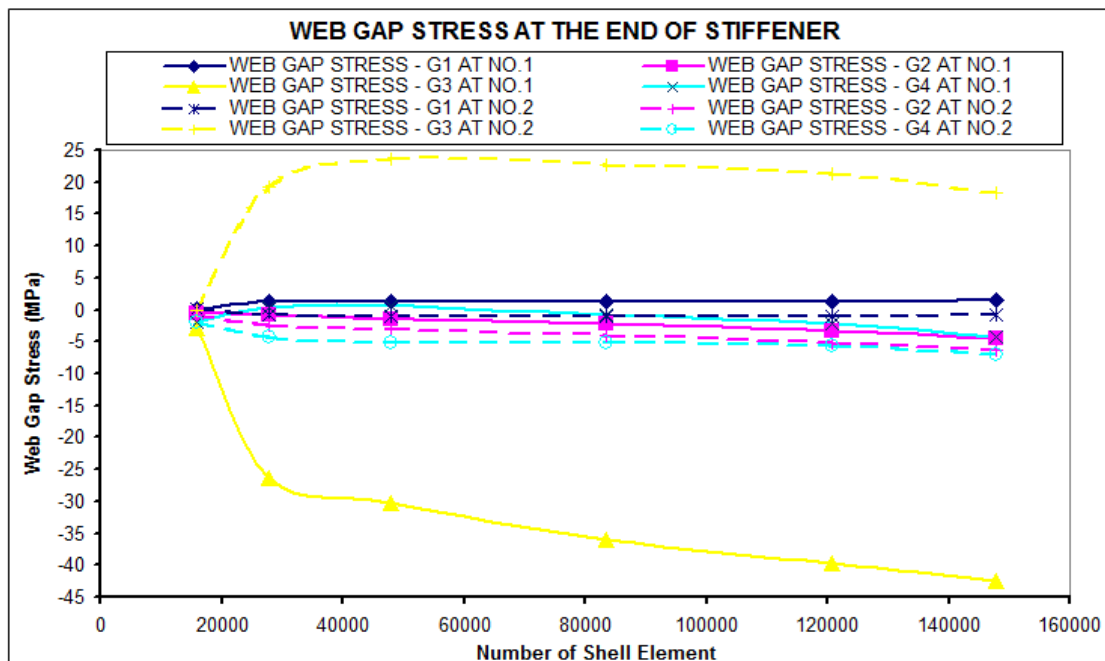
ภาพที่ 4.34 แสดงการเคลื่อนตัวตามแนวราบและแนวตั้งบริเวณ web gap ของคาน G1, G2 และ G3 ในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประจําอนุภูม

4.8.2 ผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยสำหรับแบบจำลองสะพานข้ามแกว่งค้ำส้วาง

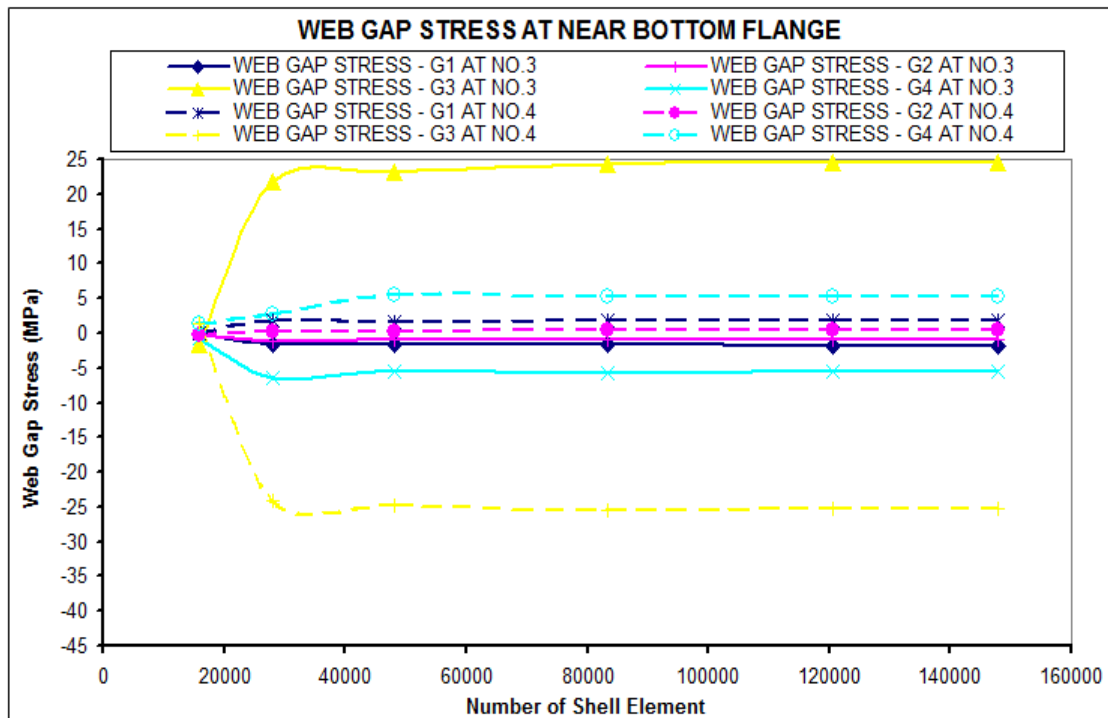
กำหนดตำแหน่งในการแสดงผลค่าหน่วยแรงในบริเวณ web gap ของคาน G1 ,G2,G3 และ G4 ทั้งสองตำแหน่ง คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และ หมายเลข 2) และตำแหน่งใกล้ชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน (หมายเลข 3 และหมายเลข 4) ทั้งสองด้านของแผ่นเอว ซึ่งแสดงตำแหน่งในการอ่านผลดังรูปที่ 4.35 และแสดงผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในบริเวณ web gap ในแต่ละรูปแบบการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ดังภาพที่ 4.36-4.37



ภาพที่ 4.35 แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรงในบริเวณ web gp ของแบบจำลอง สะพานข้ามแกว่งค้ำส้วาง

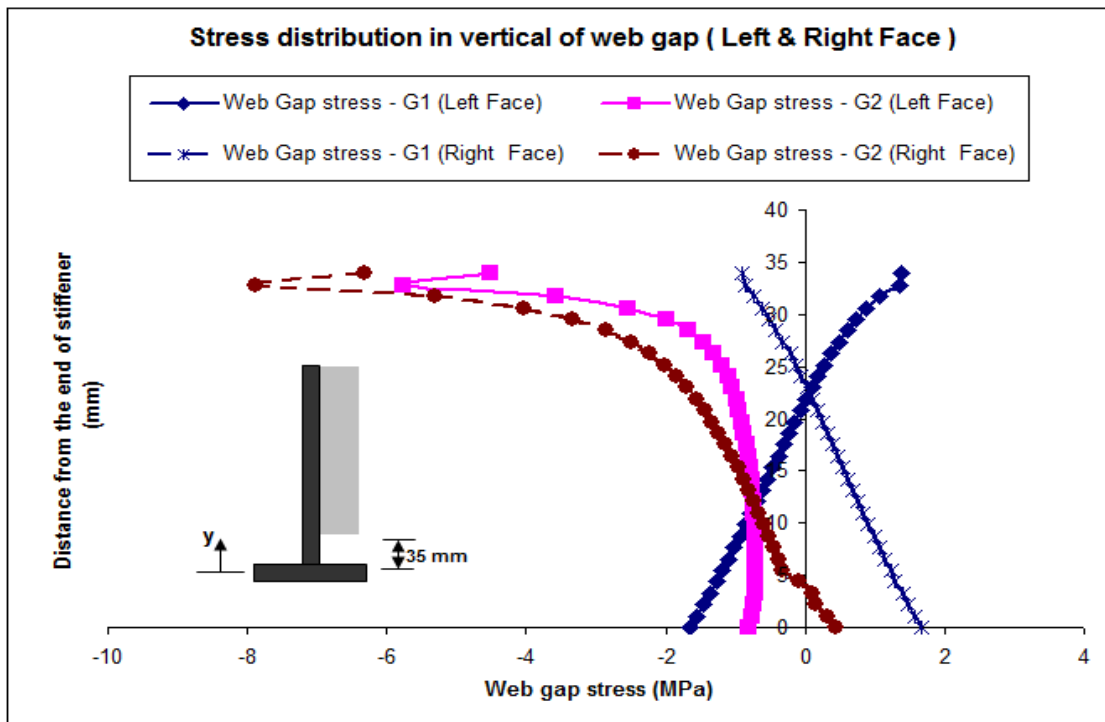


ภาพที่ 4.36 แสดงหน่วยแรงในบริเวณ web gap ในการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ทั้ง 6 รูปแบบ ของคาน G1, G2, G3 และ G4 ที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และ 2)

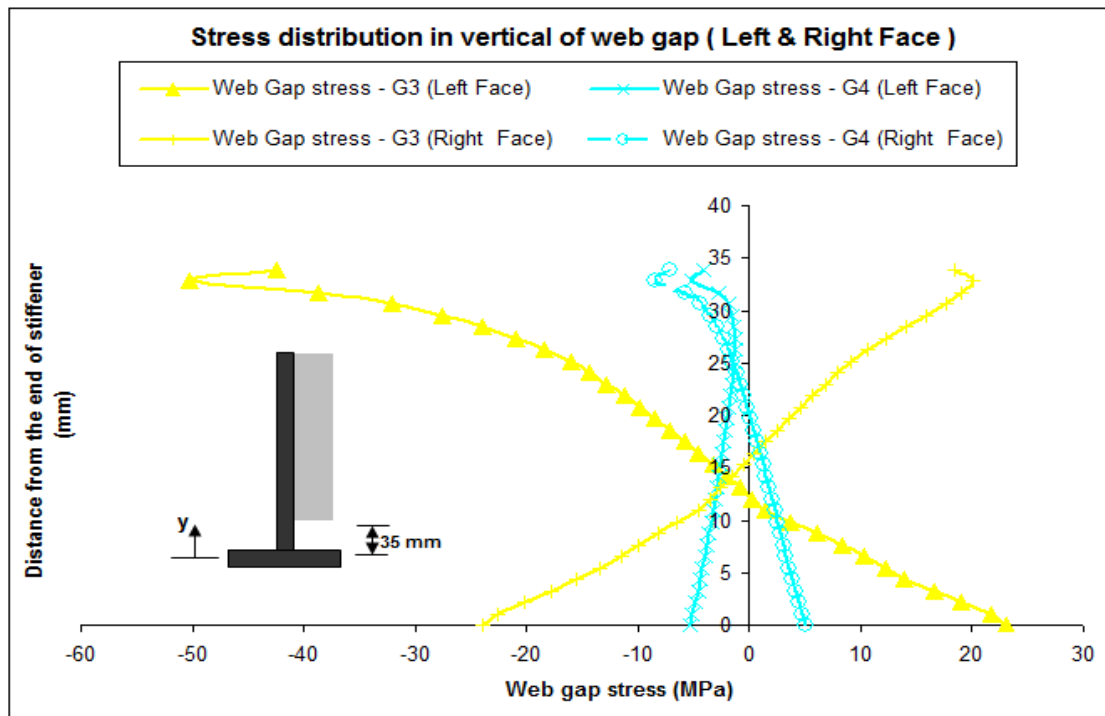


ภาพที่ 4.37 แสดงหน่วยแรงในบริเวณ web gap ในการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ทั้ง 6 รูปแบบ ของคาน G1, G2, G3 และ G4 ที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 3 และ 4)

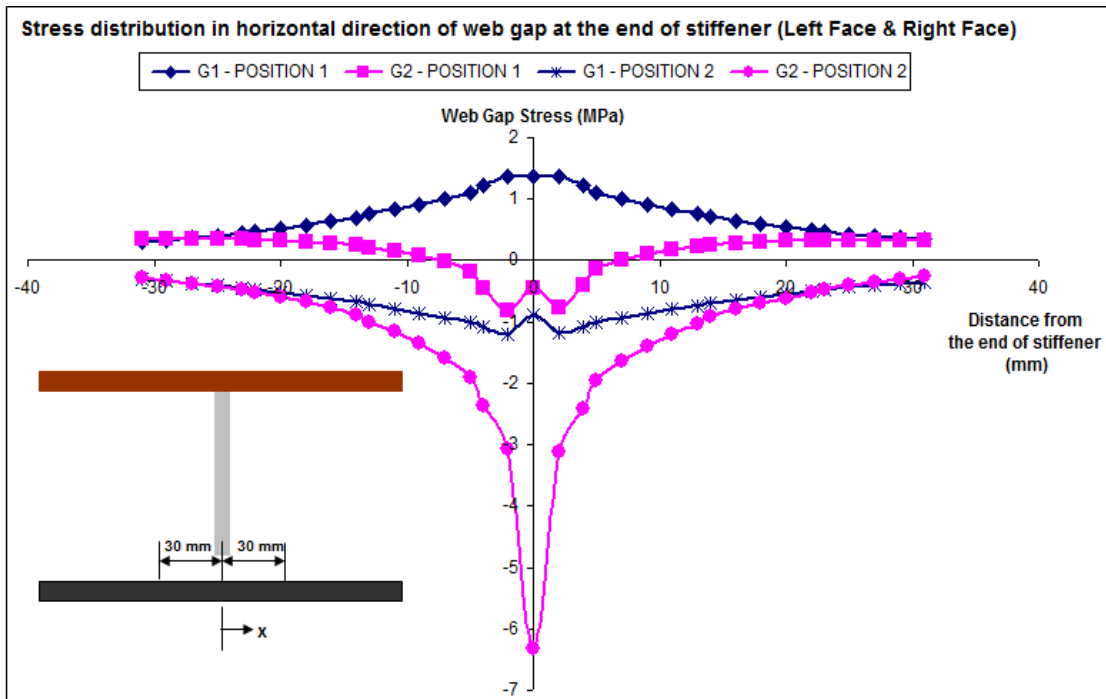
จากผลที่ได้พบว่าในแบบจำลองแบบที่ 1 No Mesh ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ต่ำมากกว่าในแบบจำลองแบบที่ 6 อยู่มากพอสมควร สำหรับตำแหน่งที่ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน (หมายเลข 1 และหมายเลข 2) ในทุกคาน และสำหรับตำแหน่งใกล้ชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน (หมายเลข 3 และหมายเลข 4) ค่าหน่วยแรงจากแบบจำลองแบบที่ 6 Mesh Type E ค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในอกระนาบทั้งหน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึง ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างจะคงที่แล้วถึงแม้จำนวนชิ้นส่วนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ดังนั้นจึงพิจารณาแบบจำลองแบบที่ 6 Mesh Type E ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในอกระนาบ สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท ซึ่งการกระจายของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในอกระนาบในบริเวณ web gap ตามแนวราบ และตามแนวตั้ง ทั้งสองด้านของชิ้นส่วนแผ่นเอว ซึ่งจะแสดงผลโดยที่ในแนวตั้งมีความยาวจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานไปยังชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน 35 มม. ซึ่งจะแสดงผลของค่าหน่วยแรงทุกๆ 1 มม. และสำหรับในแนวราบจะแสดงผลของค่าหน่วยแรงช่วงระยะห่างไปทางซ้ายและขวาประมาณ 30 มม. จากปลายชิ้นส่วนเหล็กเสริมข้างคาน ทั้งสองด้านของชิ้นส่วนแผ่นเอวดังภาพ 4.38-4.41 แสดงผลการกระจายหน่วยแรงรอบๆบริเวณ web gap ดังภาพที่ 4.42 -4.43 และผลจากการเคลื่อนตัวของ บริเวณ web gap ในแนวราบและแนวตั้งสำหรับคาน G1, G2, G3 และ G4 ดังภาพที่ 4.4



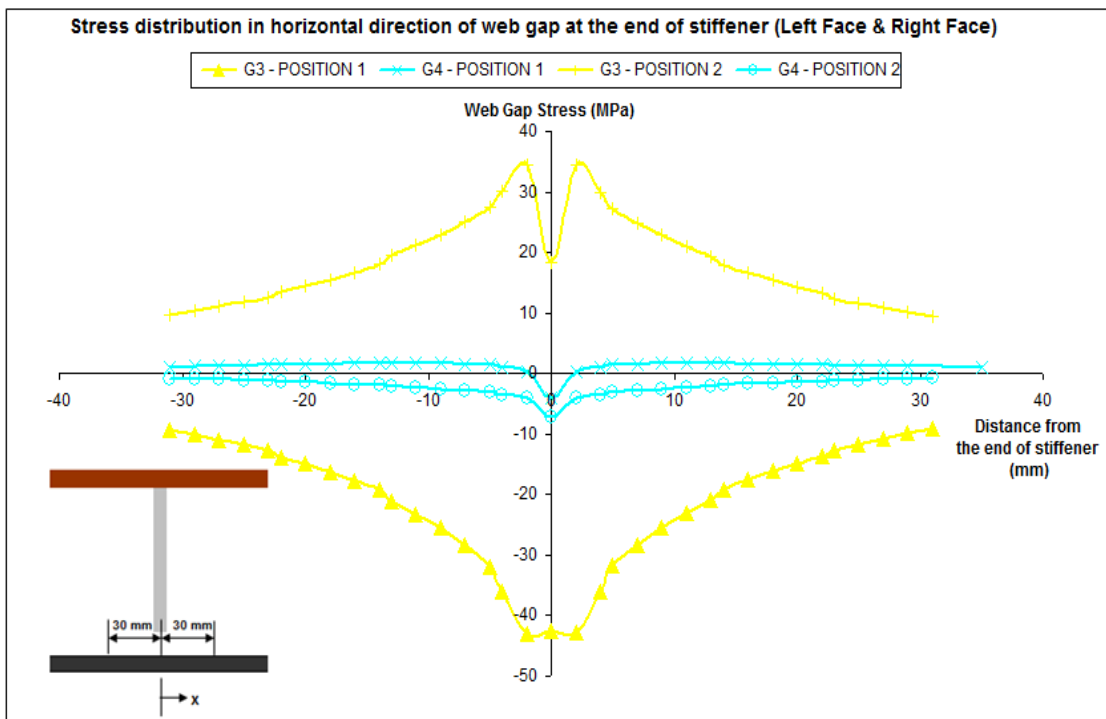
ภาพที่ 4.38 แสดงการกระจายค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวตั้งบริเวณ web gap ที่คาน G1 และ G2 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



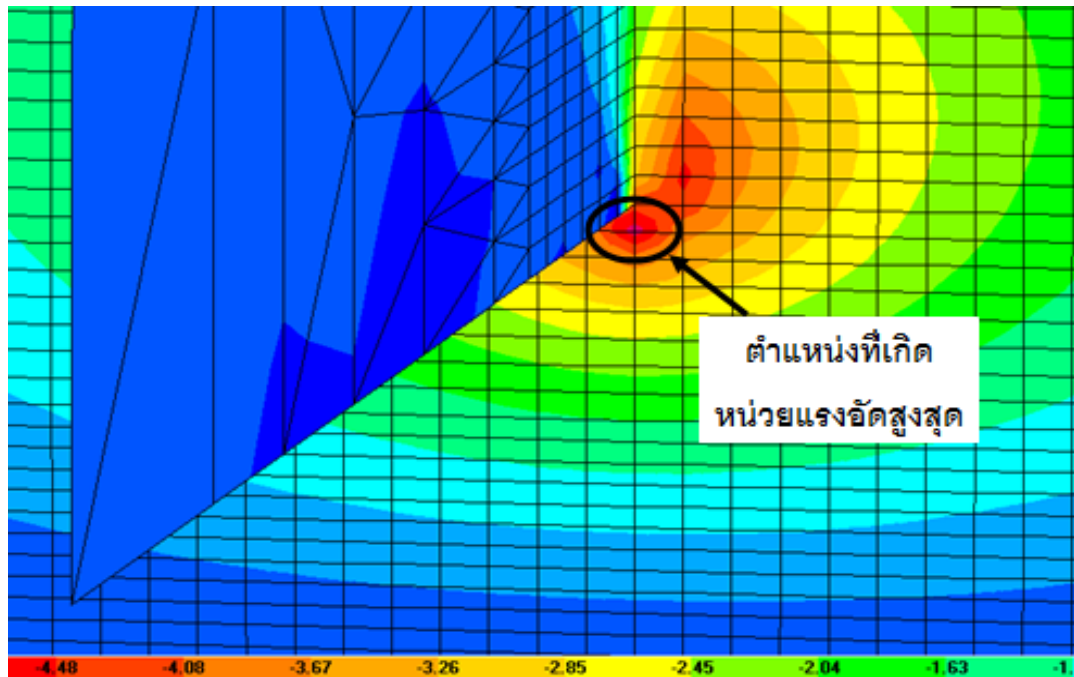
ภาพที่ 4.39 แสดงการกระจายค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวตั้งบริเวณ web gap ที่คาน G3 และ G4 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



ภาพที่ 4.40 แสดงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวราบที่ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ของคาน G1 และ G2 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สี่วง

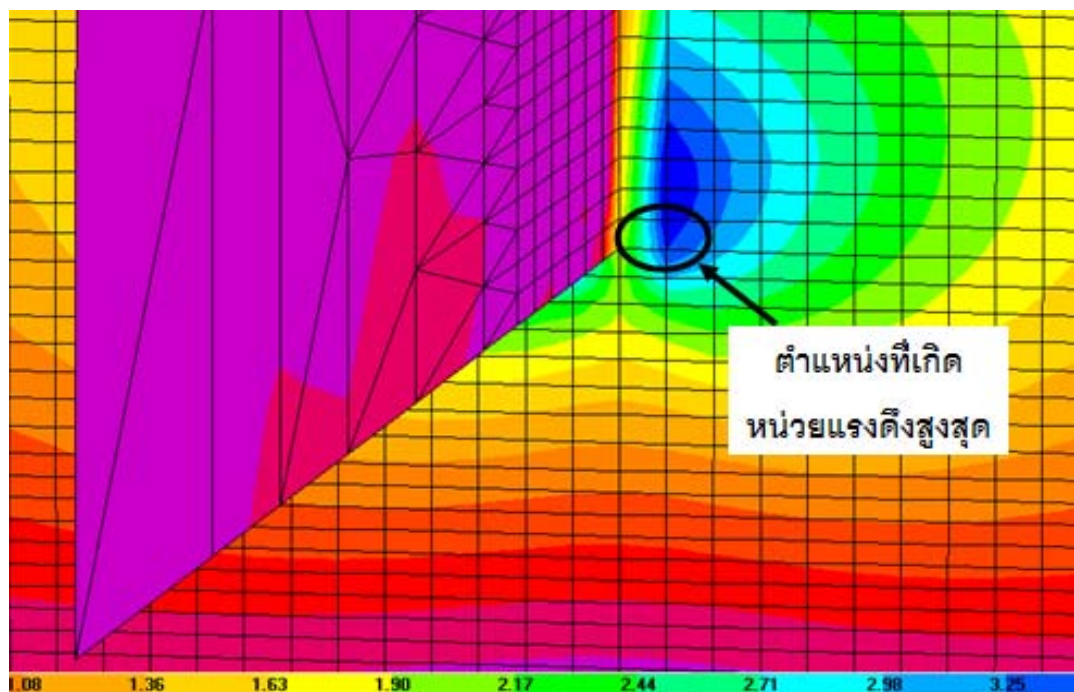


ภาพที่ 4.41 แสดงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบตามแนวราบที่ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ของคาน G3 และ G4 ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สี่วง



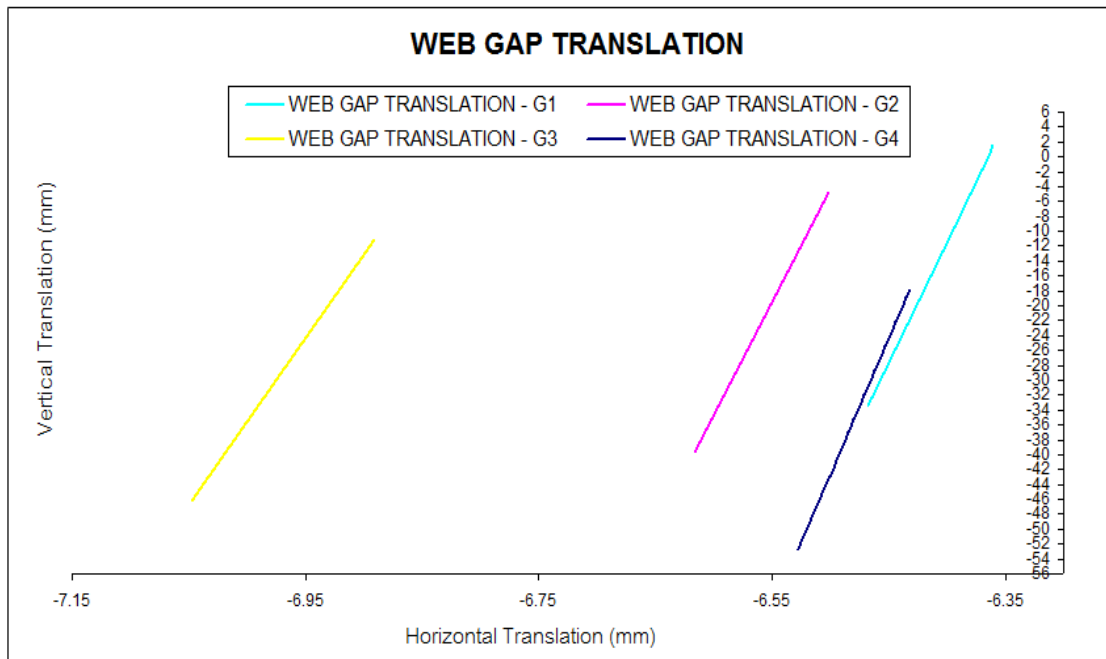
ภาพที่ 4.42 แสดงการกระจายหน่วยแรงอัดสูงสุดในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่างของคาน G3 ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานลงมาตามแนวตั้ง 1 มม.

ในบริเวณ web gap ที่ผิวด้านซ้ายของชิ้นส่วนแผ่นเอว



ภาพที่ 4.43 แสดงการกระจายหน่วยแรงดึงสูงสุดในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่างของคาน G3 ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแผ่นเหล็กเสริมข้างคานตามแนวราบ 1 มม.

ในบริเวณ web gap ที่ผิวด้านขวาของชิ้นส่วนแผ่นเอว



ภาพที่ 4.44 แสดงการเคลื่อนตัวตามแนวราบและแนวตั้งบริเวณ web gap ของคาน G1, G2, G3 และ G4 ในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

บทที่ 5

การวิเคราะห์และอภิปรายผล

ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางของสะพาน

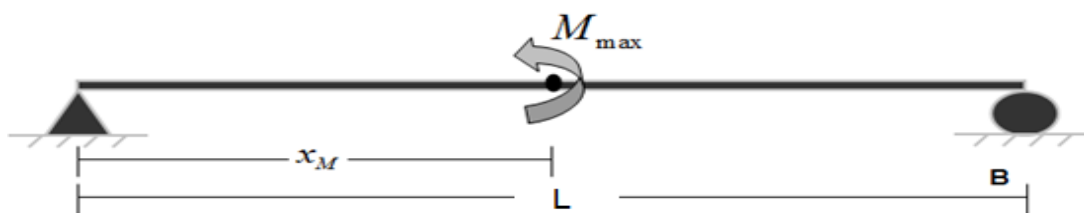
ค่าตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางเท่ากับค่าโมเมนต์สูงสุดของคานหน้าตัดประกอบในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์หารด้วยค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ในการหาค่าโมเมนต์สูงสุดของคานหน้าตัดประกอบในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องหาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวและแนวขวางเพื่อหาค่าโมเมนต์สูงสุด ซึ่งตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวจะพิจารณาใช้ตำแหน่งรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ และตำแหน่งที่ cut section ในการอ่านผลค่าโมเมนต์ของคานหน้าตัดประกอบพิจารณาใช้ตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ จากผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดในคานจกแบบจำลอง 3 มิติ กับค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ โดยใช้รถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ดังหัวข้อที่ 4.6 แต่สำหรับตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางจะพิจารณารูปแบบการวางรถบรรทุกซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางของสะพานในแต่ละแบบจำลองจะแสดงดังนี้

5.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล มีความยาวช่วง 25 เมตร เป็นสะพานคานเหล็กรูปตัวไอเชิงประกอบ ซึ่งมีคานเหล็ก G1 ,G2 และG3 ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนปีกด้านบน ชิ้นส่วนปีกด้านล่าง และชิ้นส่วนแผ่นเดือ และแผ่นพื้นคอนกรีต ถูกจำลองด้วย shell element ในทุกชิ้นส่วน การแสดงผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

5.1.1 ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ

การหาค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ วิเคราะห์โดยใช้วิธี Absolute Maximum Moment ในการหาค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด ในคานช่วงเดี่ยวแบบฐานรองรับธรรมดา ยาว 25 เมตร ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งใช้น้ำหนักบรรทุกเต็มคัน (two-line of wheel load) ในการวิเคราะห์กรณีศึกษาบรรทุก 1 คัน และใช้น้ำหนักบรรทุกเต็มสองคันในการวิเคราะห์กรณีศึกษาบรรทุก 2 คัน ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดวัดจากปลายด้านซ้ายของคานของรถบรรทุกประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงรูปแบบการแสดงผลค่าโมเมนต์สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด

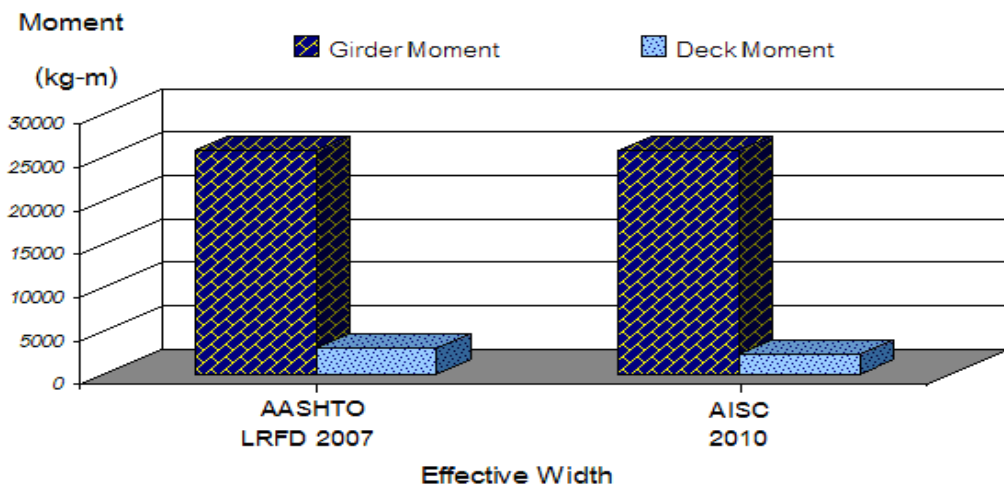
ตารางที่ 5.1 ค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดวัดจากปลายด้านซ้ายของคานของรถบรรทุกประเภทต่างๆ สำหรับสะพานข้ามแยกประชาชนอุบล

ประเภทรถบรรทุก	น้ำหนัก (ตัน)	สะพานข้ามแยกประชาชนอุบล ความยาวช่วงสะพาน 25 เมตร	
		ค่าโมเมนต์สูงสุด M_{max} (กิโลกรัม – เมตร) จากน้ำหนักรถบรรทุกเต็มคัน	ตำแหน่งค่าโมเมนต์สูงสุด x_M (เมตร)
1	15	86592	12.987
2	24.5	100665	10.705
3	25	141306	12.578
4	30	159296	13.018
5	35	155468	14.03
6	45	190455	11.187
7	47	209981	11.448
8	50.5	239474	13.383
9	52	223144	11.8726
10	53	217525	12.921
11	58	228659	11.347

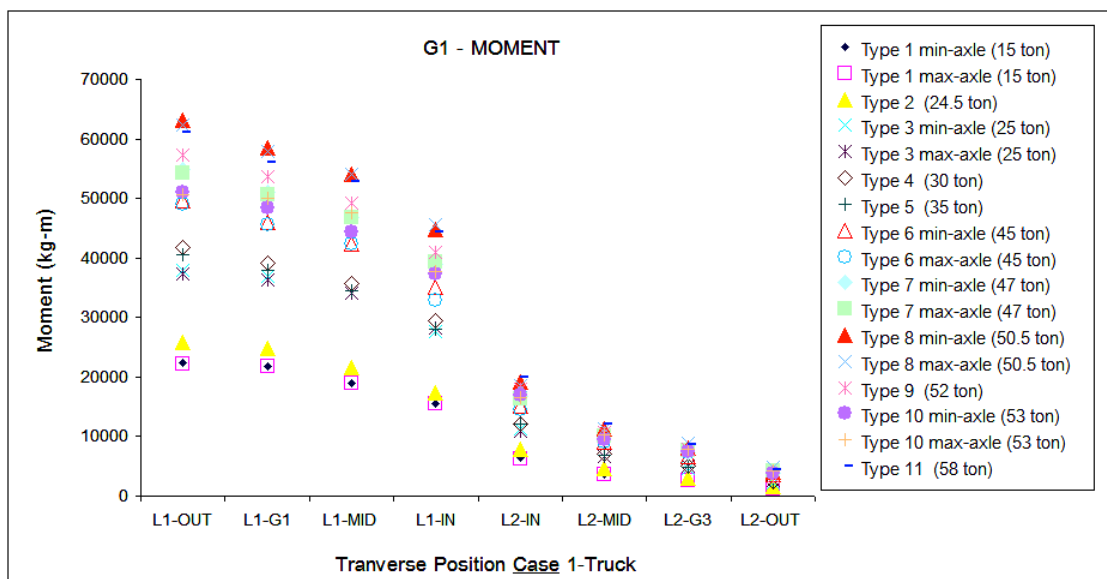
5.1.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง

การหาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ ทั้งนี้เพื่อความไม่ยุ่งยากในการคำนวณจะพิจารณาเฉพาะค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนคาน ประกอบไปด้วย ค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนปีกด้านบน ชิ้นส่วนปีกด้านล่าง และชิ้นส่วนแผ่นเอว รอบแกนสะเทินของหน้าตัดคาน ไม่รวมค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนแผ่นพื้น เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคาน G1 กับค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนแผ่นพื้น โดยใช้ fatigue truck 1 คัน ที่ตำแหน่งตามแนว

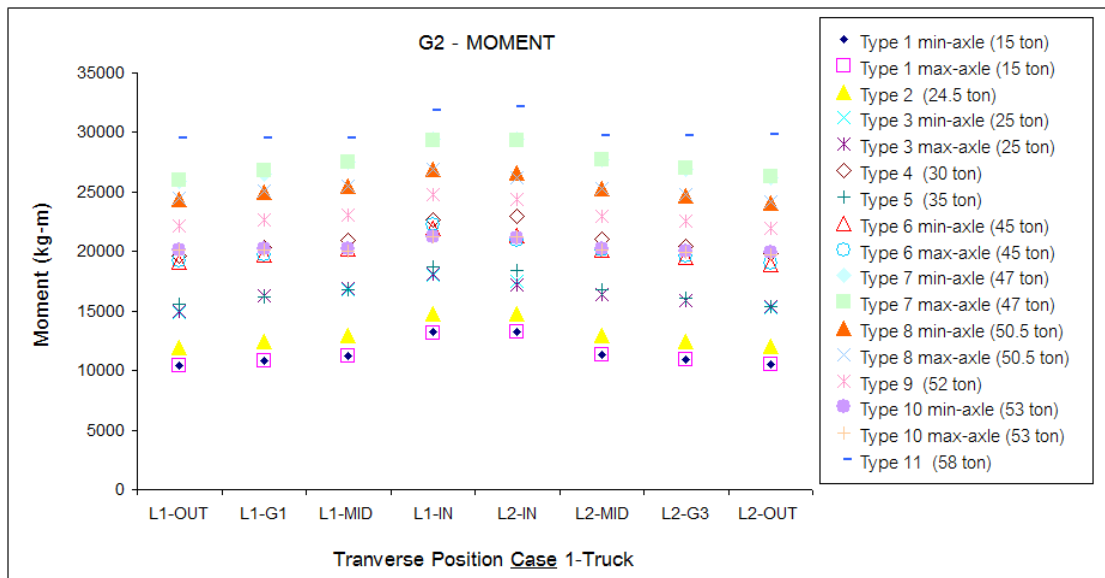
ขวาง L1-OUT เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์พบว่าค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคาน G1 ให้ค่าสูงกว่าค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนแผ่นพื้นที่ใช้ค่าความกว้างประสิทธิภาพตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 และค่าความกว้างประสิทธิภาพตามมาตรฐาน AISC 2010 โดยเฉลี่ยประมาณ 10 เท่า แสดงดังภาพที่ 5.2 จากผลเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคานกับค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนแผ่นพื้นสรุปได้ว่าสามารถใช้ค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนคานในการหาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางได้ และผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในคาน G1 ,G2 และG3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คันแสดงดังภาพที่ 5.3 – 5.5



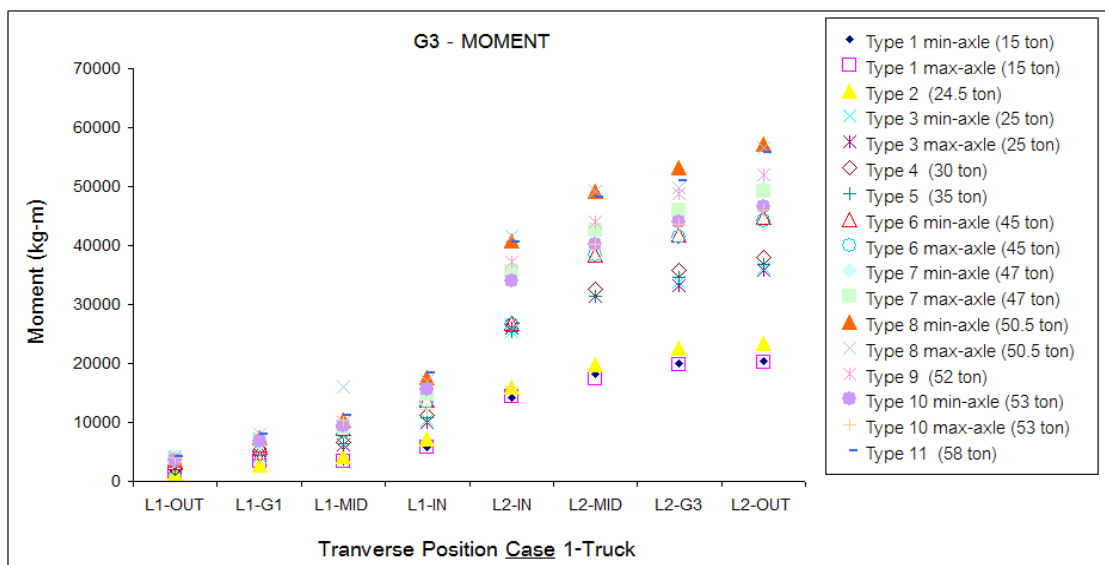
ภาพที่ 5.2 แสดงเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคาน G1 กับค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนแผ่นพื้น โดยใช้ fatigue truck 1 คัน ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์



ภาพที่ 5.3 ค่าโมเมนต์ในคาน G1 ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 5.4 ค่าโมเมนต์ในคาน G2 ของสะพานข้ามแยกประชาชนกุด กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 5.5 ค่าโมเมนต์ในคาน G3 ของสะพานข้ามแยกประชาชนกุด กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

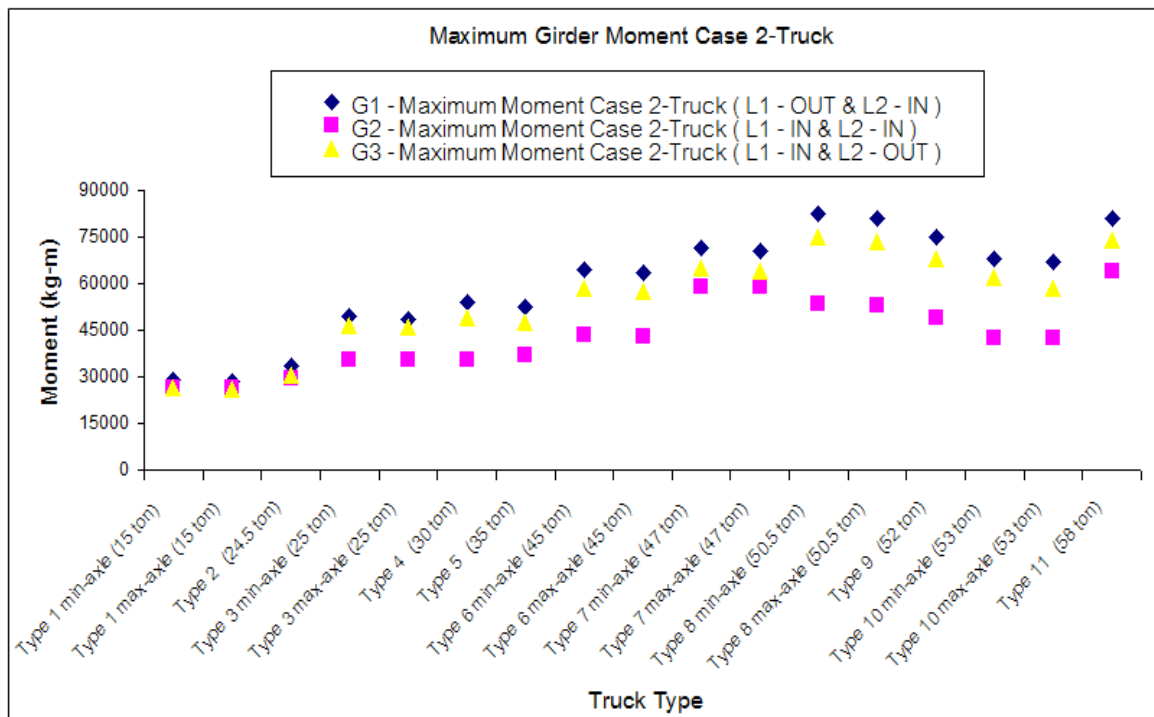
ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในคาน G1, G2 และ G3 ของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน สามารถสรุปได้ดังนี้

- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G1 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L1-OUT ทั้งหมดและลดลงเรื่อยๆตามตำแหน่งตามแนวขวางที่ไกลห่างคาน G1 ออกไป
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G2 สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L2-IN ซึ่งตำแหน่งนี้ให้ค่าโมเมนต์ใกล้เคียงกับตำแหน่ง L1-IN

- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G3 สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L2-OUT ทั้งหมดและลดลงเรื่อยๆตามตำแหน่งตามแนวขวางที่ไกลห่างคาน G3
- รถบรรทุกในทุกประเภทที่มีค่าความกว้างของล้อตามแนวขวางค่าน้อย (min Axle) จะให้ค่าโมเมนต์ของคาน G1,G2 และ G3 มากกว่า ค่าความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางค่ามาก (max Axle) เฉลี่ยประมาณ 0.9 % ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลจากความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวาง ยิ่งมีความกว้างน้อยจะยิ่งทำให้เกิดค่าโมเมนต์ในคานมากยิ่งขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน จะใช้เป็นตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน โดยการรวมผลค่าโมเมนต์สูงสุดในแต่ละคาน เมื่อรถบรรทุกทั้ง 2 คัน อยู่บนเลนทั้งสองเลน แสดงผลดังรูปที่ 5.6 และสามารถสรุปได้ดังนี้

- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ผลรวมค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G1 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-OUT กับ L2-IN
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ผลรวมค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G2 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-IN กับ L2-IN
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ผลรวมค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G3 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-IN กับ L2-OUT



ภาพที่ 5.6 โมเมนต์สูงสุดในคาน G1, G2 และ G3 ของสะพานข้ามแยกประชาชนภูถศกรกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

5.1.3 ความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้นคอนกรีต

ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนแผ่นพื้นของคาน G1,G2 และG3 จากแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล เป็นสะพานคานเหล็กรูปตัวไอเชิงประกอบ ซึ่งมีมาตรฐานกำหนดความกว้างประสิทธิผล (effective width) ของแผ่นพื้นสำหรับคานด้านในและคานด้านนอก ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความกว้างประสิทธิผล 3 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 กำหนดใช้ค่าความกว้างประสิทธิผล ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007

รูปแบบที่ 2 กำหนดใช้ค่าความกว้างประสิทธิผล ตามมาตรฐาน AISC 2010

รูปแบบที่ 3 กำหนดใช้ค่าความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลแรงในแนวแกนโดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้นที่ให้ค่าผลรวมของแรงในแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนคานกับชิ้นส่วนแผ่นพื้นมีค่าเป็นศูนย์ ทำโดยใช้การแสดงผลค่าแรงในแนวแกนด้วยวิธี section cut การกำหนดระยะในการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้นของแต่ละคานจะกำหนดดังนี้

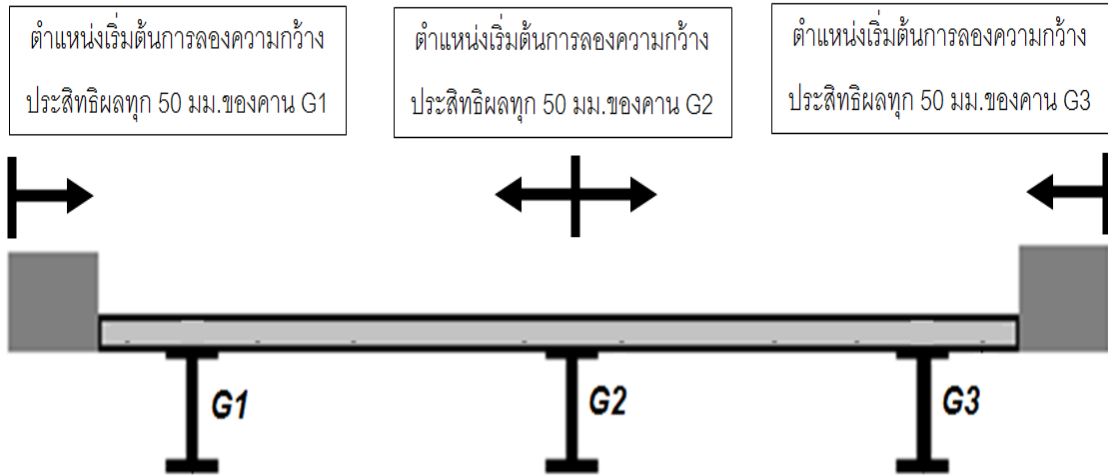
- สำหรับคาน G1 เริ่มต้นการลองความกว้างที่ปลายด้านซ้ายของแผ่นพื้นและกำหนดค่าความกว้างของแผ่นพื้น โดยการป้อนพิกัดของความยาวเส้นจากวิธี section cut ทุก ๆ 50 มม.

- สำหรับคาน G2 เริ่มต้นการลองความกว้างที่กึ่งกลางคาน G2 และกำหนดค่าความกว้างของแผ่นพื้นไปทั้งด้านซ้ายและด้านขวาเท่ากัน โดยการป้อนพิกัดของความยาวเส้นจากวิธี section cut ทุก ๆ 50 มม.

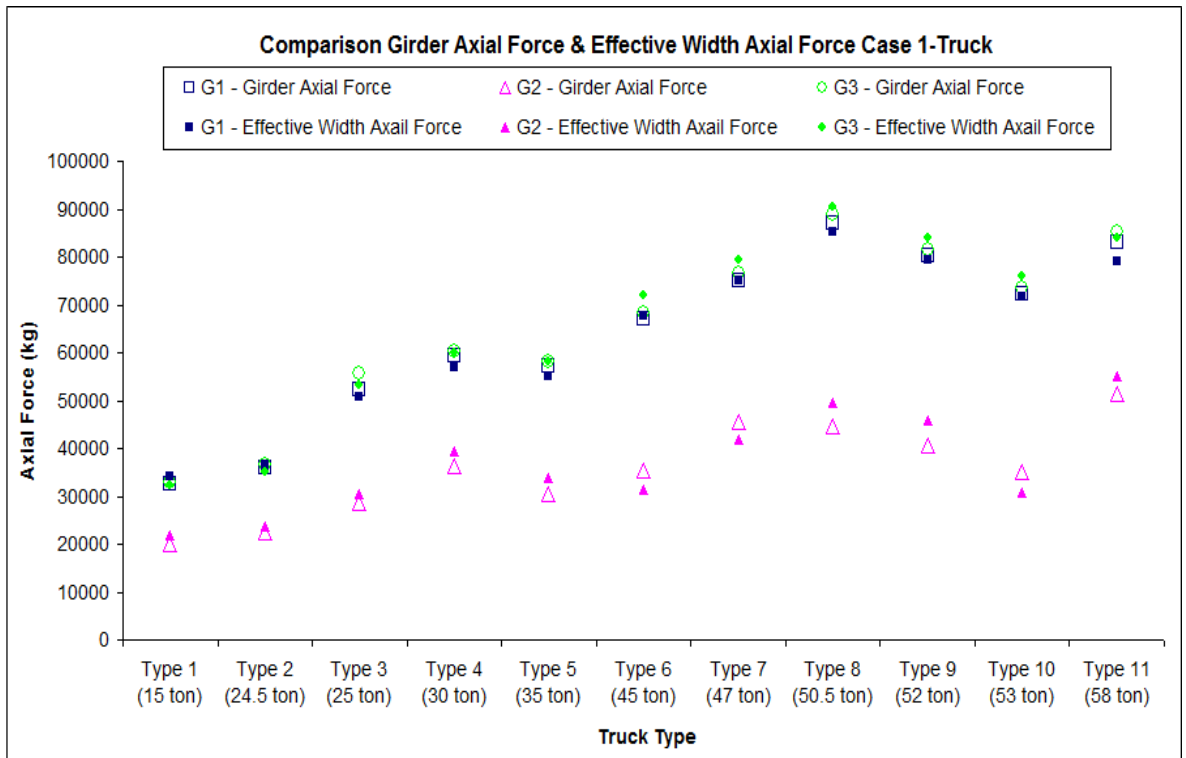
- สำหรับคาน G3 เริ่มต้นการลองความกว้างที่ปลายด้านขวาของแผ่นพื้นและกำหนดค่าความกว้างของแผ่นพื้น โดยการป้อนพิกัดของความยาวเส้นจากวิธี section cut ทุก ๆ 50 มม. แสดงรูปจุดเริ่มต้นการลองความกว้างของคาน G1,G2 และG3 ดังรูปที่ 5.7 และในการกำหนดการลองความกว้างทุก ๆ 50 มม. ถูกกำหนดโดยระยะห่างการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของชิ้นส่วนแผ่นพื้นในแบบจำลองสะพาน ทั้งนี้ผลรวมแรงในแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนคานกับชิ้นส่วนแผ่นพื้นอาจมีค่าไม่เป็นศูนย์พอดี เนื่องจากชิ้นอยู่กับความละเอียดในการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของชิ้นส่วนแผ่นพื้น

การคำนวณหาความกว้างประสิทธิผลของคาน G1,G2 และG3 ใน รูปแบบที่ 1 ค่าความกว้างประสิทธิผล ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 และรูปแบบที่ 2 ความกว้างประสิทธิผล ตามมาตรฐาน AISC 2010 จะแสดงผลโดยละเอียดในภาคผนวก แต่สำหรับการคำนวณหาความกว้างประสิทธิผลในรูปแบบที่ 3 โดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้นที่ให้ค่าผลรวมของแรงในแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนคานกับชิ้นส่วนแผ่นพื้นมีค่าเป็นศูนย์ ผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคาน และค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้นตามเงื่อนไขสมดุลแรงใน

แนวแกนโดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้น ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ดังภาพที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ



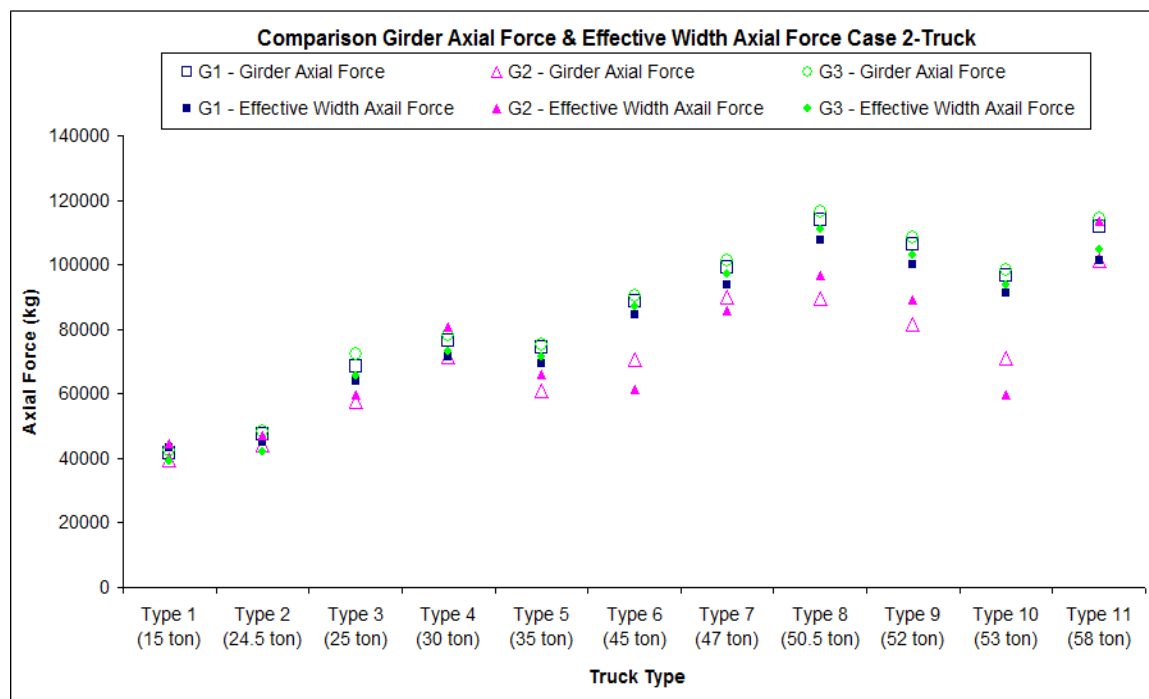
ภาพที่ 5.7 แสดงจุดเริ่มต้นการลองความกว้างทุก ๆ 50 มม. ของคาน G1, G2 และ G3



ภาพที่ 5.8 แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

จากผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคาน และค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้นตามเงื่อนไขสมมติค่าแรงในแนวแกนโดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้น ใน

กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยในคาน G1 ,G2 และG3 เท่ากับ 2.4 ,9.4 และ2.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 5.9 แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน
ของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

จากผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคาน และค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้นตามเงื่อนไขสมมูลแรงในแนวแกนโดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้น ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยในคาน G1 ,G2 และG3 เท่ากับ 6.1 ,9.7 และ6.5เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากผลที่ได้ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ในแต่ละคานค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถจะสรุปได้ว่าผลจากการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของแผ่นพื้นมีผลโดยตรงต่อค่าความละเอียดของการลองความกว้างด้วยวิธี section cut และค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ซึ่งมีค่าเท่ากันเนื่องจากการวิเคราะห์ห้ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน เกิดจากการรวมผลค่าแรงในแนวแกนจากกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ที่ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุขของแรงในแนวแกน

ประเภท	รายละเอียด ชื่อเรียกรถบรรทุก	ความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไข สมดุขของแรงในแนวแกนของคาน (มม.)		
		G1	G2	G3
1	6 ล้อ	2150	3600	2150
2	Fatigue truck	1950	3600	2050
3	10 ล้อ	1950	3400	2150
4	รถบรรทุก 12 ล้อ	1950	3600	2150
5	กึ่งพ่วงหัวลาก 6 ล้อ ลากจูง 2 เพลา 8 ล้อ	1950	3400	2150
6	กึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 2 เพลา 8 ล้อ	1950	2800	2150
7	พ่วง 18 ล้อ	1950	3400	2150
8	กึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลาก จูง 3 เพลา 12 ล้อ	1950	3400	2150
9	พ่วง 20 ล้อ	1950	3400	2150
10	พ่วง 22 ล้อ	1950	2800	2150
11	พ่วง 24 ล้อ	1950	3600	2150

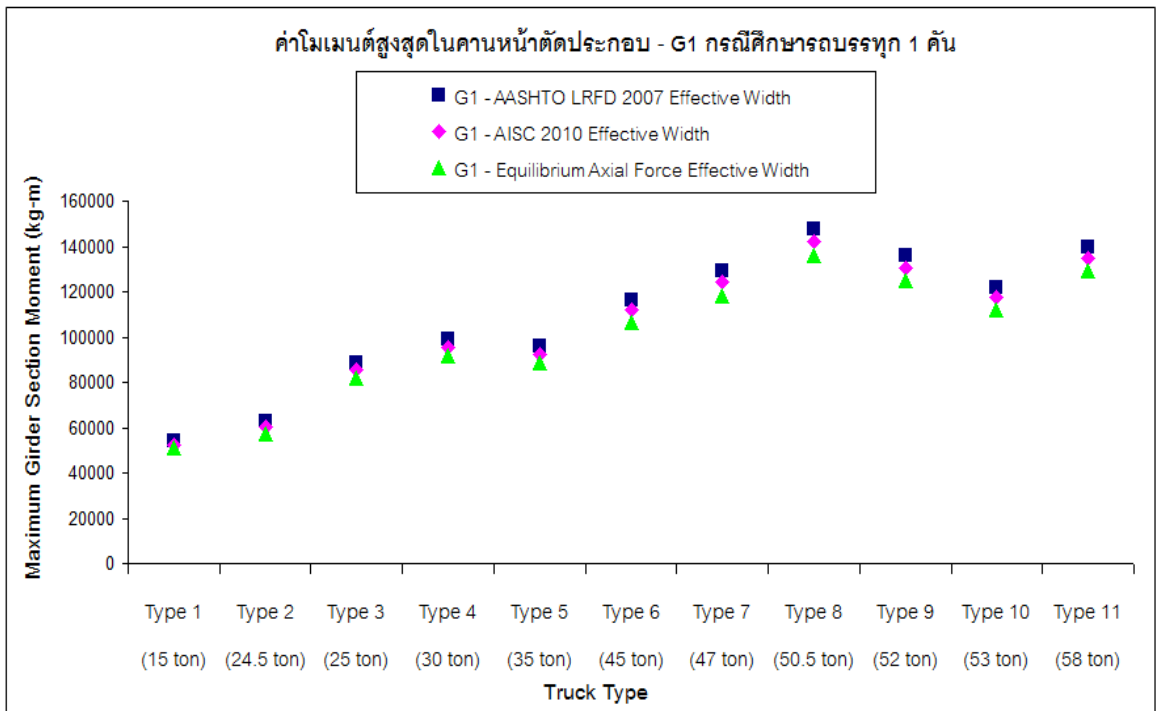
จากผลที่ได้พบว่าความกว้างประสิทธิผลที่ได้ของรถบรรทุกในแต่ละประเภทให้ค่าที่เท่ากันสำหรับคาน G1 และ G3 ยกเว้นรถบรรทุกในบางประเภท แต่สำหรับคาน G2 จะให้ค่าความกว้างประสิทธิผล ที่ต่างกันสำหรับรถบรรทุกในแต่ละประเภท โดยอยู่ในช่วงความกว้าง 2800 มม. ถึง 3600 มม. และผลการเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิผลทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพทั้ง 3 รูปแบบ

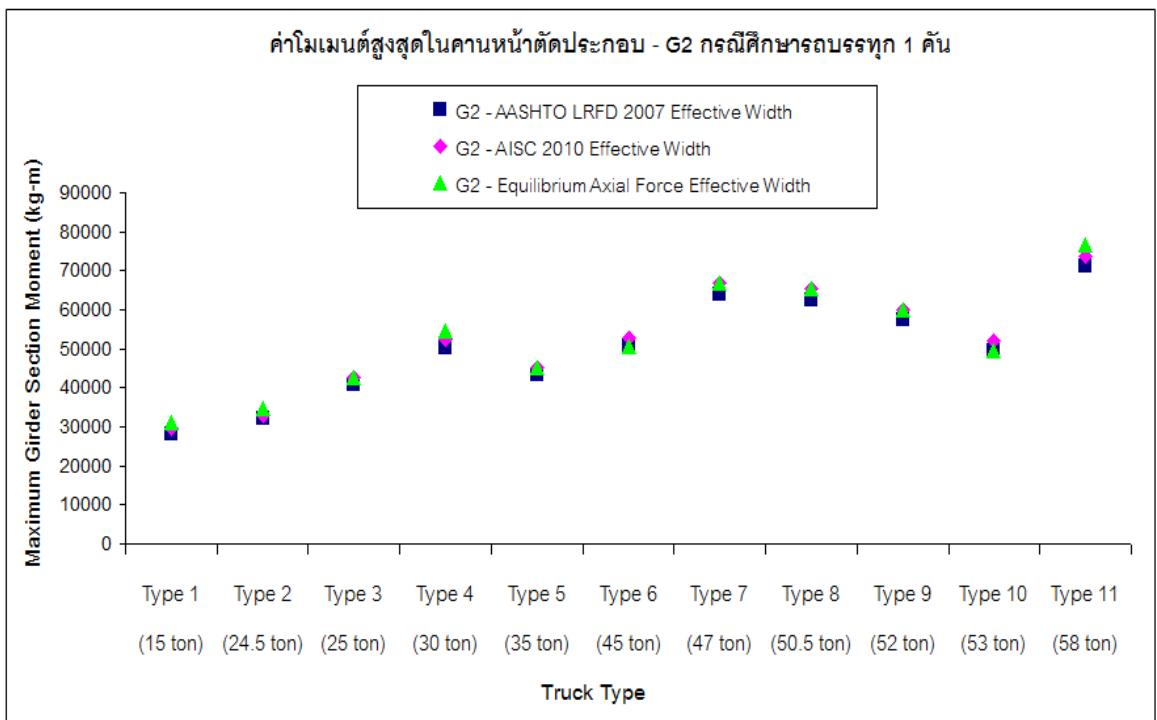
รูปแบบความกว้าง ประสิทธิภาพตาม	ความกว้างประสิทธิภาพของคาน (มม.)		
	G1	G2	G3
AASHTO LRFD 2007	3542	2472	3714
AISC 2010	2510	2880	2810
เงื่อนไขสมดุลงแรงในแนวแกน	1950 ถึง 2150	2800 ถึง 3600	2050 ถึง 2150

5.1.4 ค่าโมเมนต์สูงสุดในหน้าตัดคานวัสดุผสม

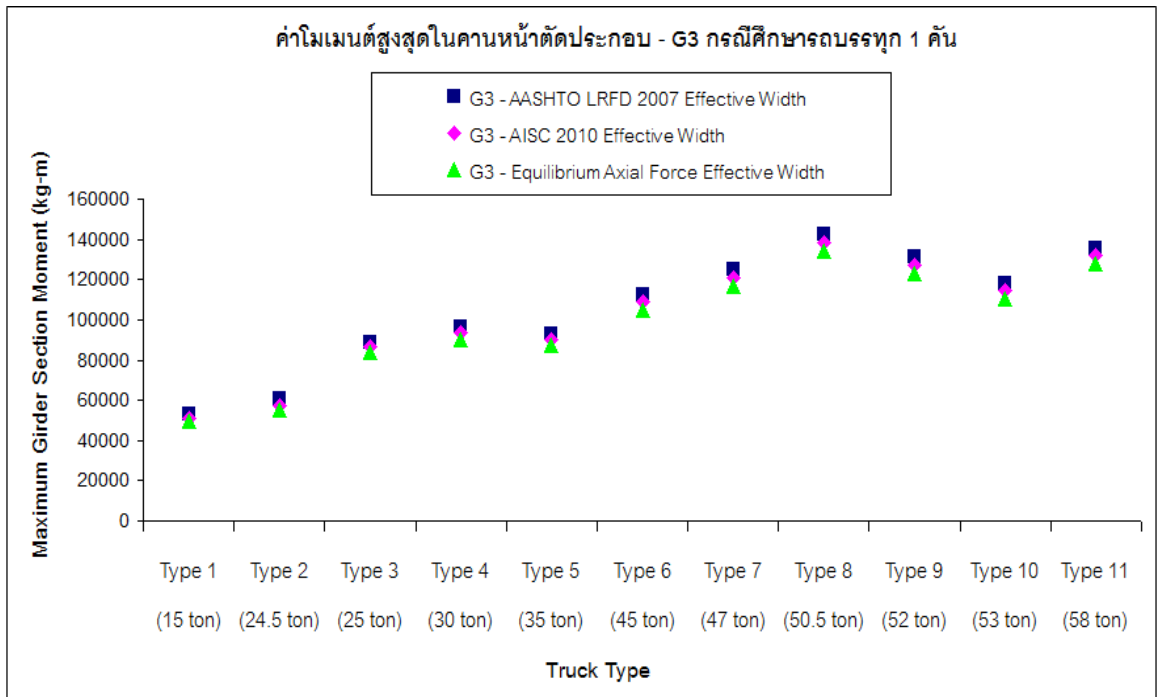
ค่าโมเมนต์สูงสุดในหน้าตัดคานวัสดุผสม (moment in girder section) เท่ากับผลรวมของค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคาน (girder moment) รอบแกนสะเทินของหน้าตัดคาน ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนแผ่นพื้น (deck moment) รอบแกนสะเทินของหน้าตัดแผ่นพื้นที่มีความกว้างประสิทธิภาพทั้ง 3 รูปแบบ และค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกน (moment produced by axial forces) ในการแสดงผลค่าโมเมนต์และแรงในแนวแกนด้วยวิธี section cut สำหรับแบบจำลองคานด้วย shell element จะแสดงผลแยกในแต่ละชิ้นส่วนและต้องป้อนค่าพิกัดที่จุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดคานและแผ่นพื้นถูกจำลองด้วย shell element การแสดงผลค่าโมเมนต์และแรงในแนวแกนด้วยวิธี section cut ต้องป้อนค่าพิกัดที่จุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดแผ่นพื้น ซึ่งจะแสดงตัวอย่างผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบโดยละเอียด ดังภาคผนวก ๑ ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภทดังภาพที่ 5.10 ถึง 5.12 และ 5.13 ถึง 5.15 ตามลำดับ ทั้ง 3 รูปแบบความกว้างประสิทธิภาพที่แสดงดังหัวข้อที่ 5.1.1.3



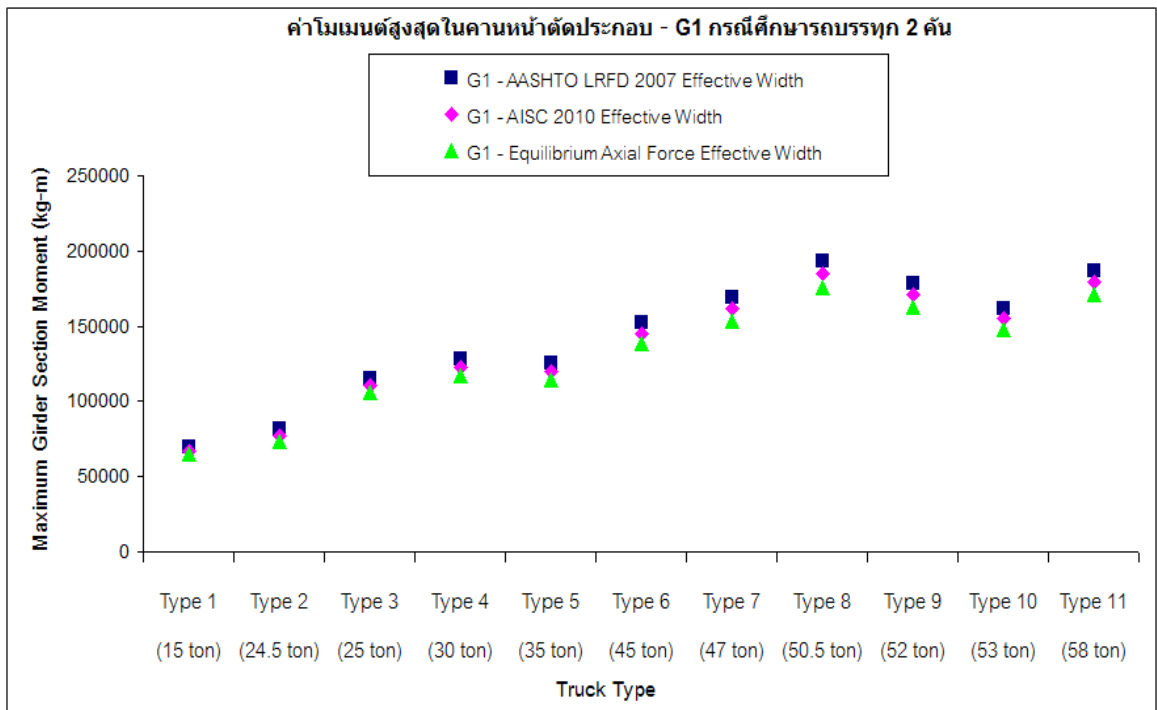
ภาพที่ 5.10 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล



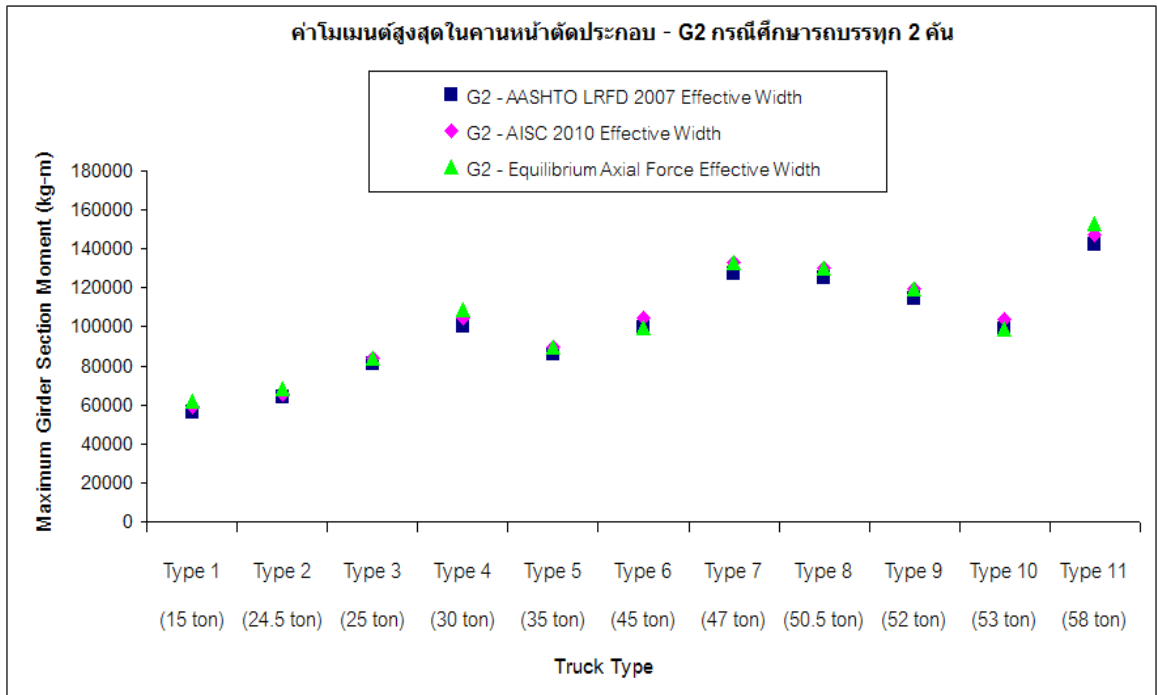
ภาพที่ 5.11 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล



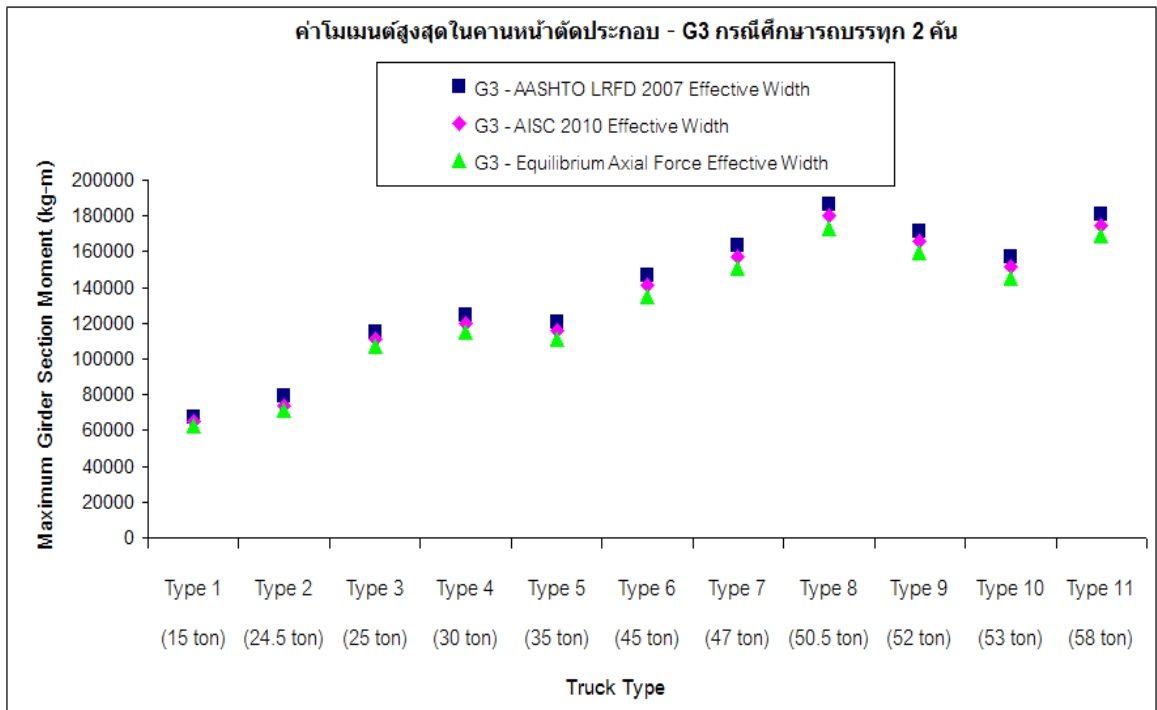
ภาพที่ 5.12 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล



ภาพที่ 5.13 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล



ภาพที่ 5.14 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนกูด

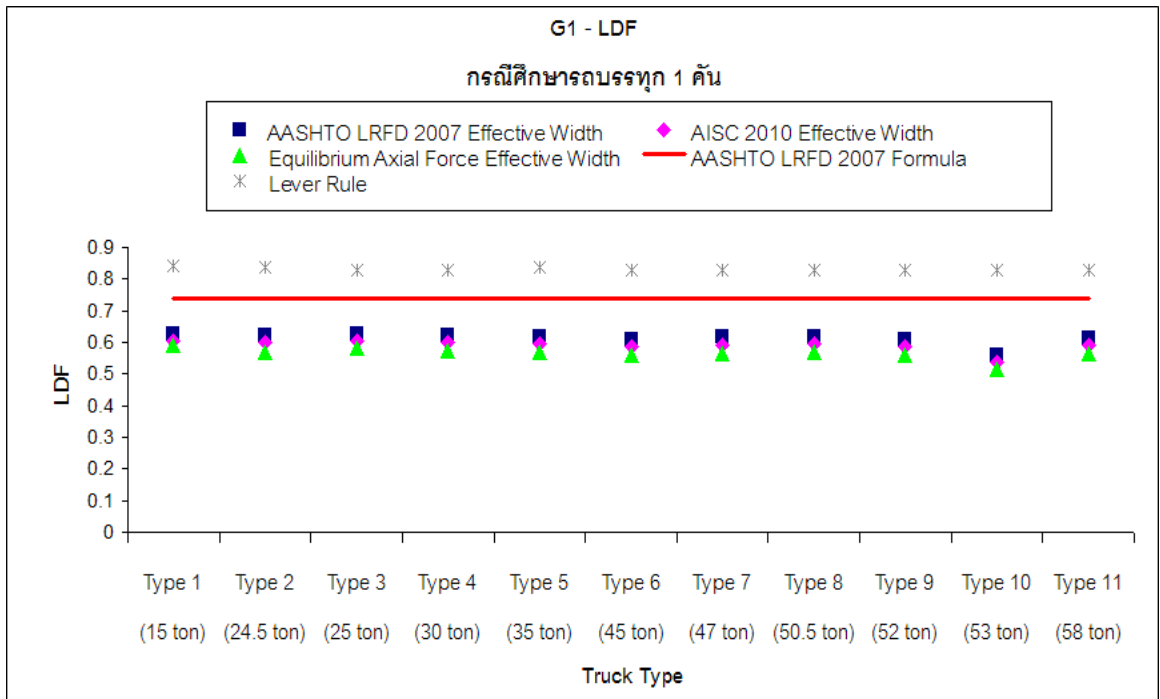


ภาพที่ 5.15 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนกูด

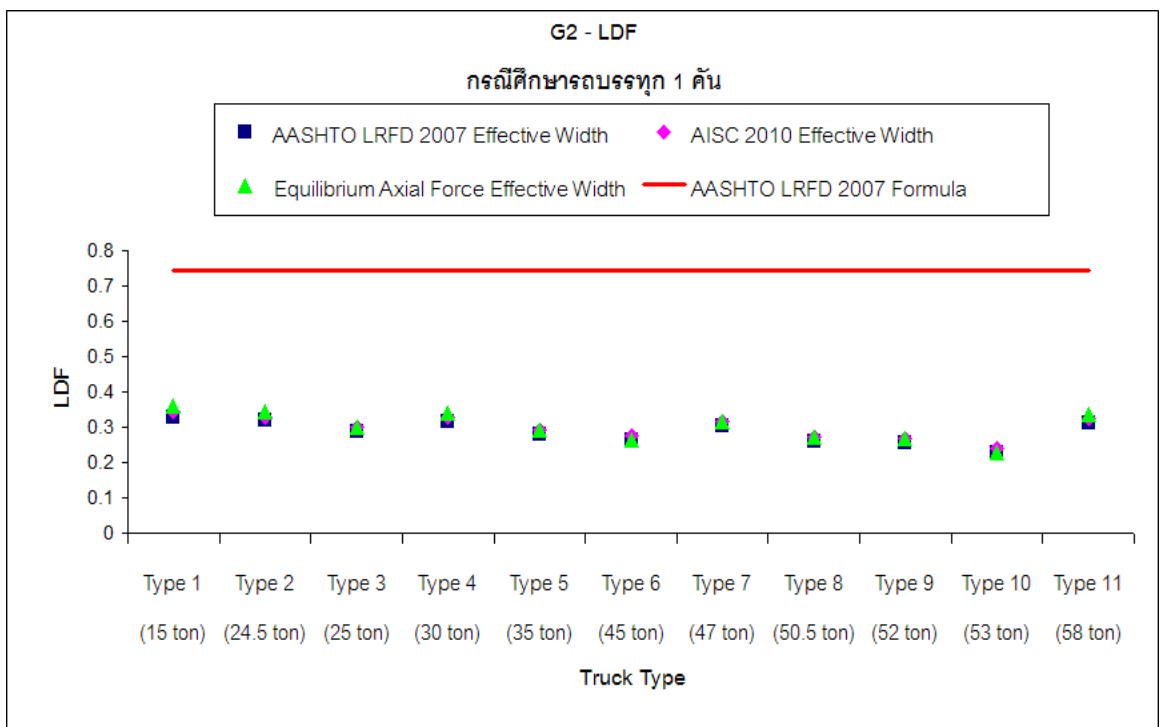
จากผลที่ได้ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่าคานวิกฤตที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบเกิดที่คาน G1 ในรถบรรทุกประเภทที่ 8 คือรถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ ที่ค่าความกว้างประสิทธิผลตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 ให้ค่าโมเมนต์สูงสุด และที่ความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลงแรงในแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนคานกับชิ้นส่วนแผ่นพื้นให้ค่าโมเมนต์ต่ำสุดในทุกประเภทรถบรรทุก ทั้งสองกรณีศึกษา และจากการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบระหว่างรถบรรทุกประเภทที่ 2 คือ fatigue truck กับ รถบรรทุกประเภทที่ 8 ที่คานวิกฤต พบว่ารถบรรทุกประเภทที่ 8 ให้ค่าค่าโมเมนต์สูงสุดมากกว่ารถบรรทุกประเภทที่ 2 ในทุกรูปแบบความกว้างประสิทธิผล สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน โดยเฉลี่ยประมาณ 2.36 เท่า และ 2.38 เท่า ตามลำดับ

5.1.5 ตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง

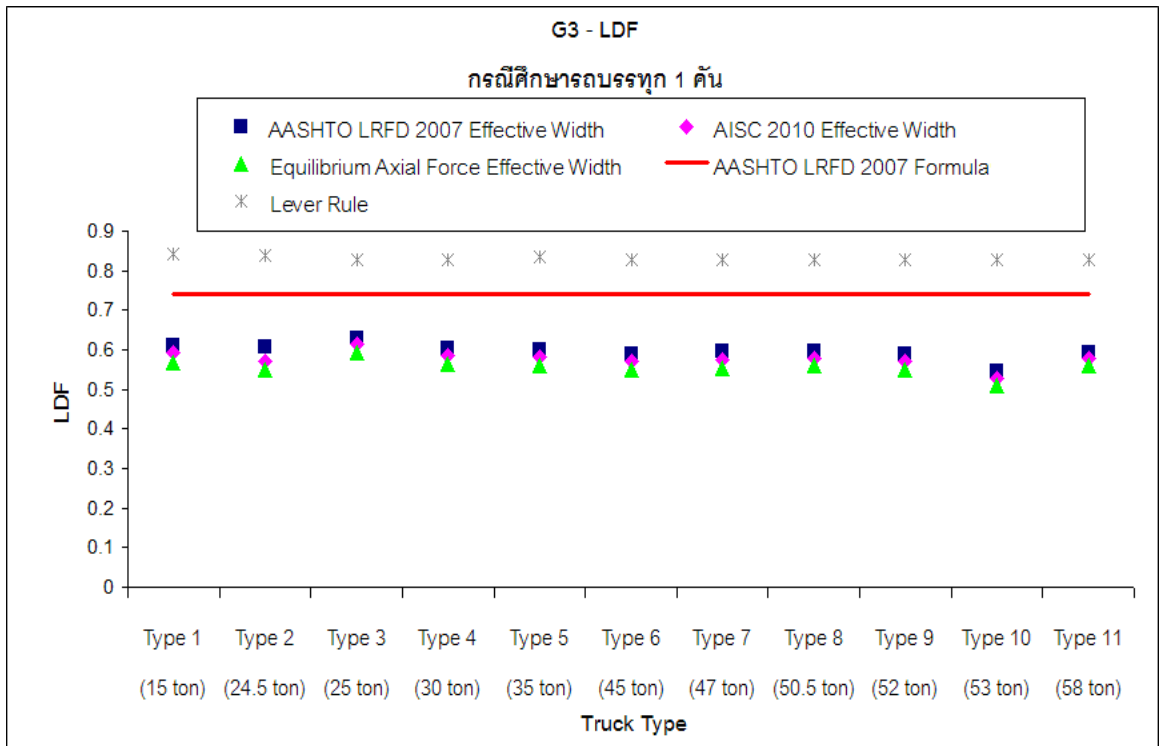
การคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง (LDF) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในคาน G1, G2 และ G3 ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน จะพิจารณาทั้ง 3 รูปแบบ ความกว้างประสิทธิผลที่แสดงดังหัวข้อที่ 5.1.1.3 และเปรียบเทียบค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางสำหรับคานด้านนอก (G1 และ G3) กับสมการตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 ดังสมการที่ 3.15 รวมทั้งเปรียบเทียบกับค่าค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางตามหลักการ lever rule ซึ่งเป็นข้อแนะนำของข้อกำหนด AASHTO และสำหรับคานด้านใน (G2) เปรียบเทียบกับสมการตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 ดังสมการที่ 3.16 ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 และจากหลักการ lever rule จะแสดงโดยละเอียดในภาคผนวก ข และผลการวิเคราะห์ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และจากสมการตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 ในแต่ละคานสำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คันและกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังภาพที่ 5.16 ถึง 5.18 และ 5.19 ถึง 5.21 ตามลำดับ ทั้งนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานวิกฤตเปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามมาตรฐานของ AASHTO standard 1996, AASHTO LRFD 1994 และ AASHTO LRFD 2007 เพื่อเป็นประโยชน์ในความเข้าใจถึงนิยามที่แท้จริงของค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังภาคผนวก ข



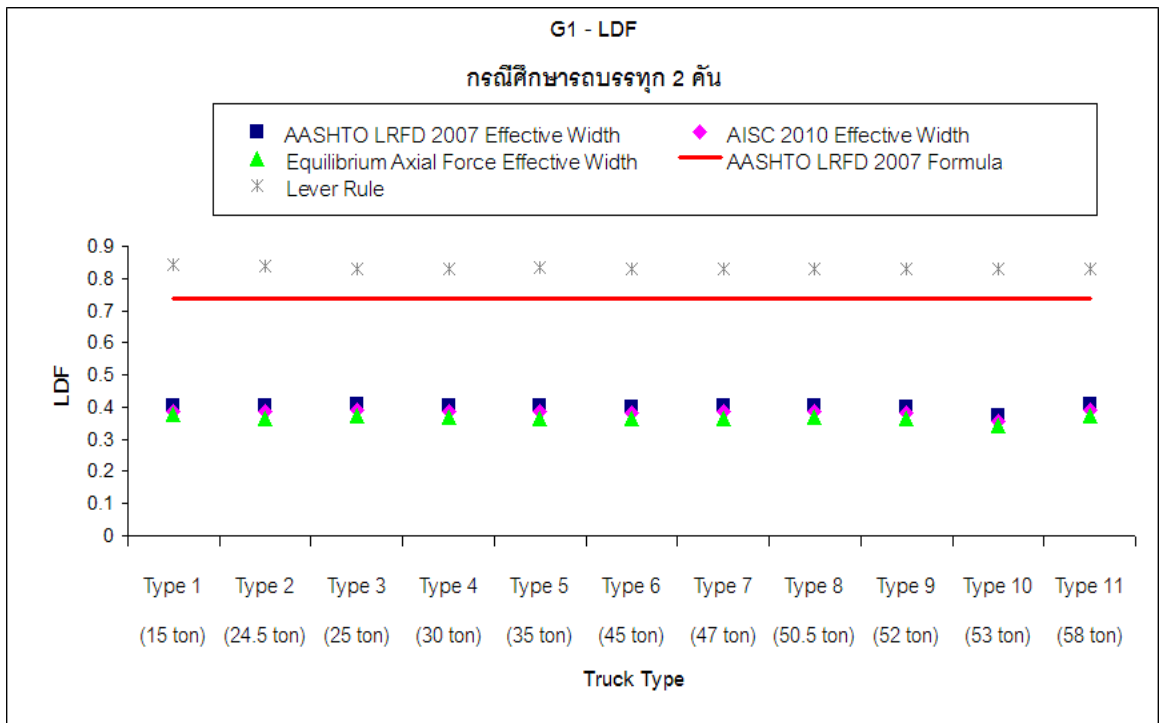
ภาพที่ 5.16 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนภูด



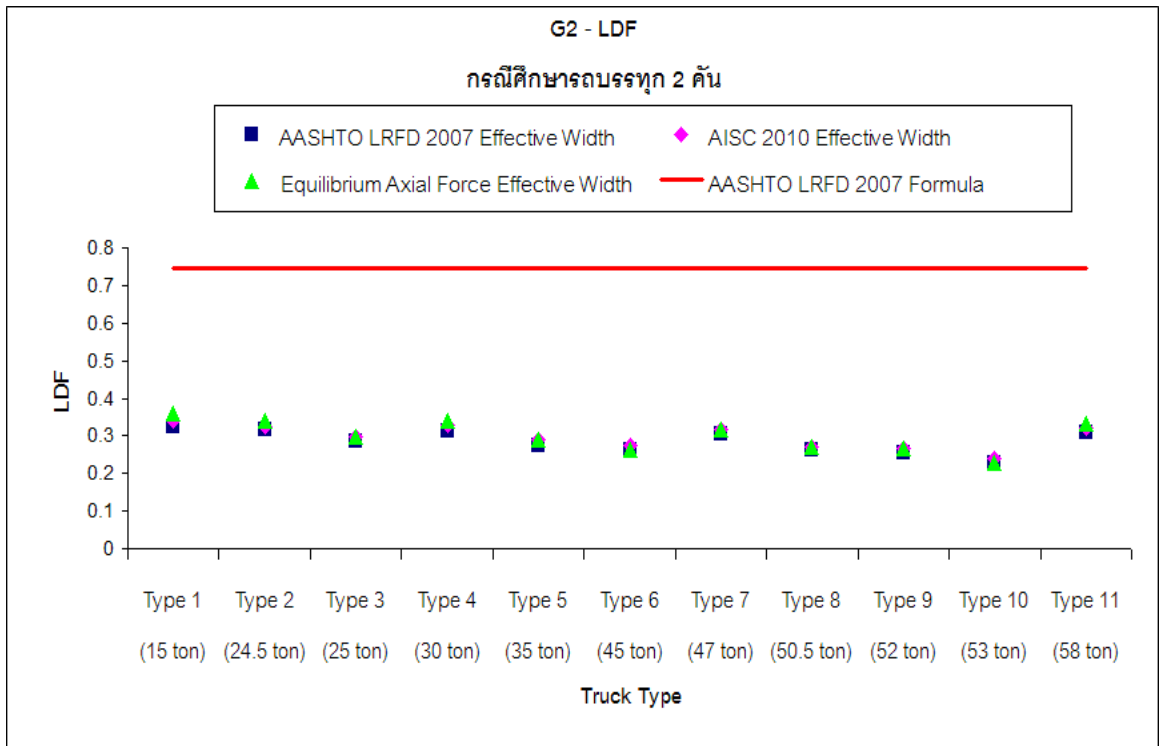
ภาพที่ 5.17 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนภูด



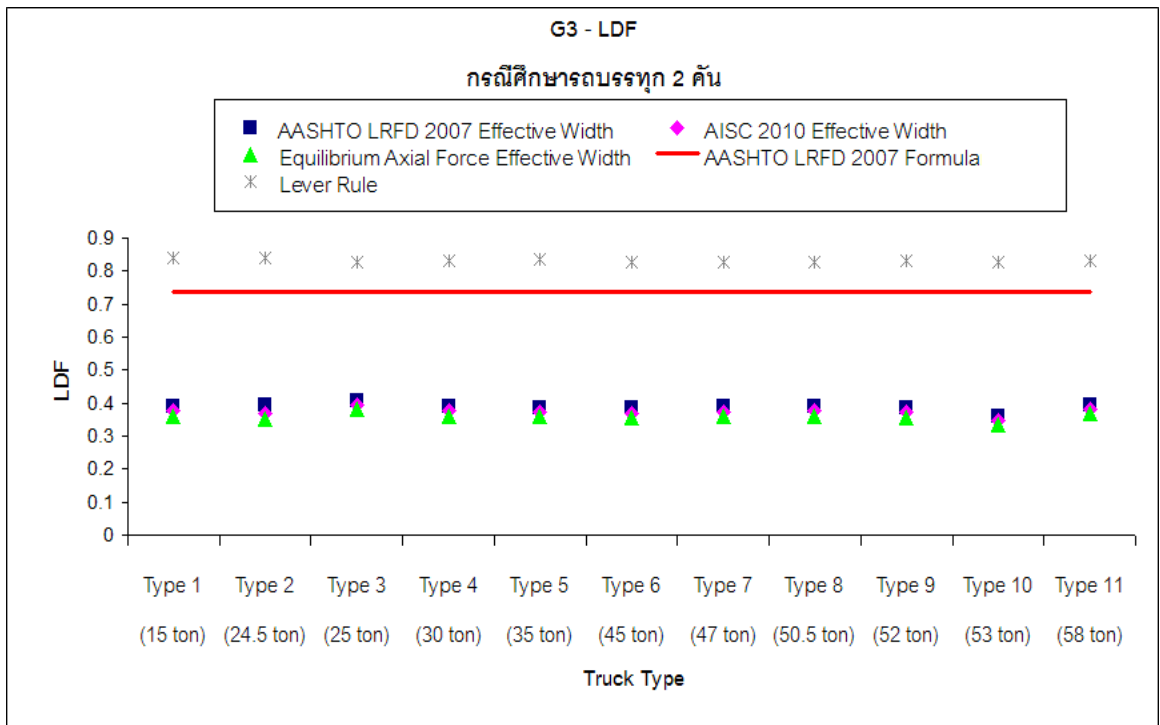
ภาพที่ 5.18 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล



ภาพที่ 5.19 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล



ภาพที่ 5.20 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนกูด



ภาพที่ 5.21 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกประชาชนกูด

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน พบว่าความวิกฤตที่ให้ค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เกิดที่คาน G1 ในทุกรูปแบบค่าความกว้างประสิทธิผล ทั้งสองกรณีศึกษา ซึ่งค่า LDF ของรถบรรทุกในแต่ละประเภทให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก มีค่า LDF อยู่ในช่วง 0.61 ถึง 0.63 สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน และมีค่า LDF อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.41 สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน ยกเว้นรถบรรทุกประเภทที่ 10 คือรถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ ที่ให้ค่า LDF ต่ำสุดที่คานวิกฤติ เท่ากับ 0.56 สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน และเท่ากับ 0.373 สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน โดยที่ความกว้างประสิทธิผลตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ให้ค่า LDF สูงสุดในทุกประเภทรถบรรทุกทั้งสองกรณีศึกษา ผลการเปรียบเทียบค่า LDF จากสมการของ AASHTO LRFD 2007 กับค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความกว้างประสิทธิผลตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 พบว่าค่า LDF จากสมการของ AASHTO LRFD 2007 ให้ค่าที่สูงกว่าค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานวิกฤติ โดยเฉลี่ยในทุกประเภทรถบรรทุกประมาณ 20.7 % สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน และ 84.5 % สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน และเมื่อเปรียบเทียบค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน กับในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน พบว่า ค่า LDF ในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าที่สูงกว่า เฉลี่ยในทุกประเภทรถบรรทุกที่คานวิกฤติประมาณ 1.53 เท่า ของในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน

5.2 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง

แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง มีความยาวช่วง 35 เมตร สะพานที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบและระบบแผ่นพื้นเป็นแบบออร์โทโทรปิค ซึ่งมีคาน G1 ,G2,G3 และG4 ประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนปีกด้านล่าง และชิ้นส่วนแผ่นเอว และแผ่นพื้นเป็นเหล็ก ถูกจำลองด้วย shell element ในทุกชิ้นส่วน การแสดงผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

5.2.1 ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ

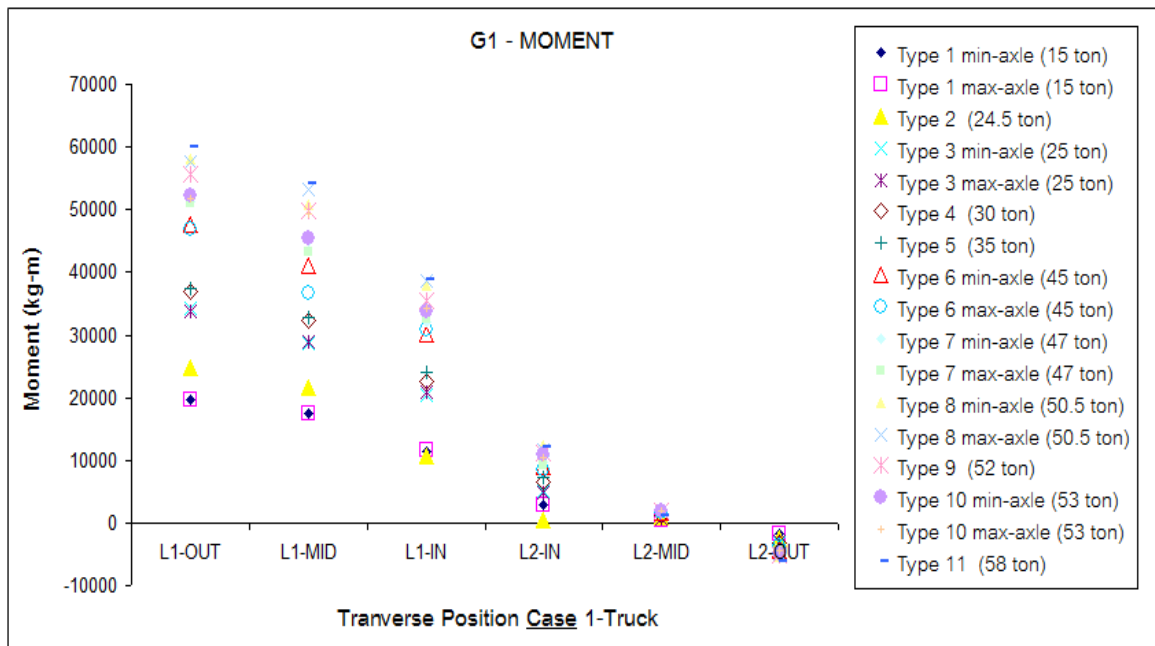
การหาค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ วิเคราะห์โดยใช้วิธี Absolute Maximum Moment ในการหาค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด ในคานช่วงเดี่ยวแบบฐานรองรับธรรมดา ยาว 35 เมตร ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งใช้น้ำหนักบรรทุกเต็มคัน (two-line of wheel load) ในการวิเคราะห์กรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน และใช้น้ำหนักบรรทุกเต็มสองคันในการวิเคราะห์กรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดวัดจากปลายด้านซ้ายของคานของรถบรรทุกประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.

ตารางที่ 5.4 ค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดวัดจากปลายด้านซ้ายของคานของรถบรรทุกประเภทต่างๆ สำหรับสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

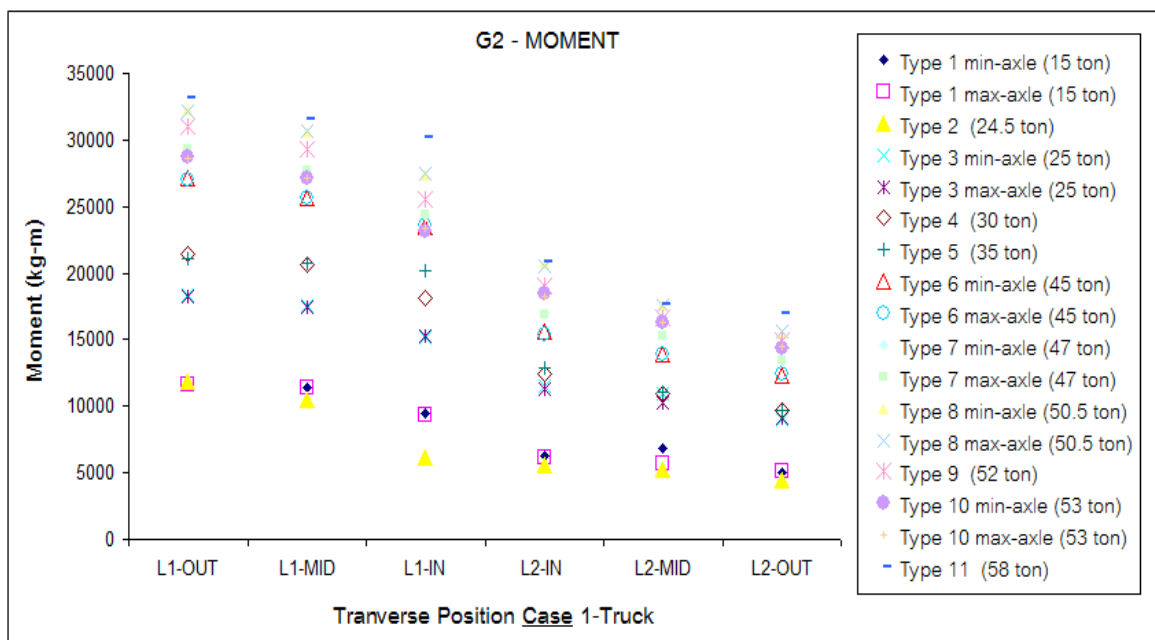
ประเภทรถบรรทุก	น้ำหนัก (ตัน)	สะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ความยาวช่วงสะพาน 35 เมตร	
		ค่าโมเมนต์สูงสุด M_{max} (กิโลกรัม – เมตร) จากน้ำหนักรถบรรทุกเต็มคัน	ตำแหน่งค่าโมเมนต์สูงสุด x_M (เมตร)
1	15	124052	17.987
2	24.5	161023	15.696
3	25	203804	17.578
4	30	234345	17.987
5	35	242032	19.03
6	45	302068	16.187
7	47	326886	16.448
8	50.5	365274	18.383
9	52	352910	16.873
10	53	349918	17.921
11	58	372778	16.347

5.2.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง

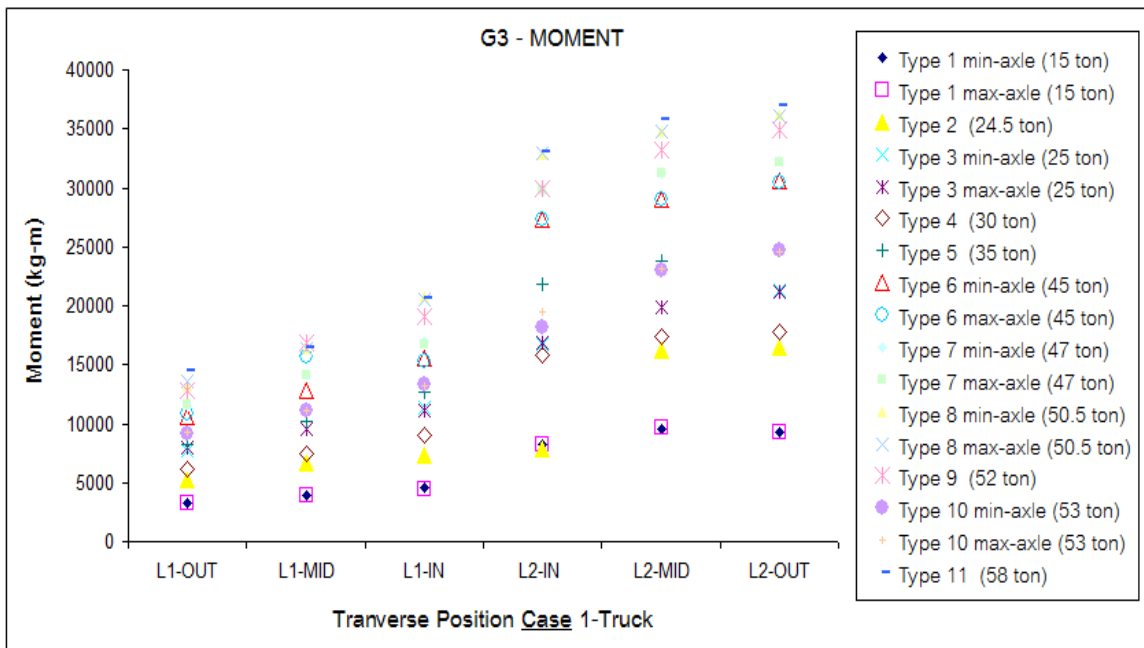
การหาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ ทั้งนี้เพื่อความไม่ยุ่งยากในการคำนวณจะพิจารณาเฉพาะค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนคาน เช่นเดียวกับแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนภูดง ดังหัวข้อ 5.1.2 ในการหาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวาง ค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนคานในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ประกอบไปด้วย ค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนปีกด้านล่าง และชิ้นส่วนแผ่นเอวรอบแกนสะเทินของหน้าตัดคาน ไม่รวมค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนแผ่นพื้น ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในแต่ละคาน ในกรณีศึกษากรรถบรรทุก 1 คันแสดงดังภาพที่ 5.22 – 5.25



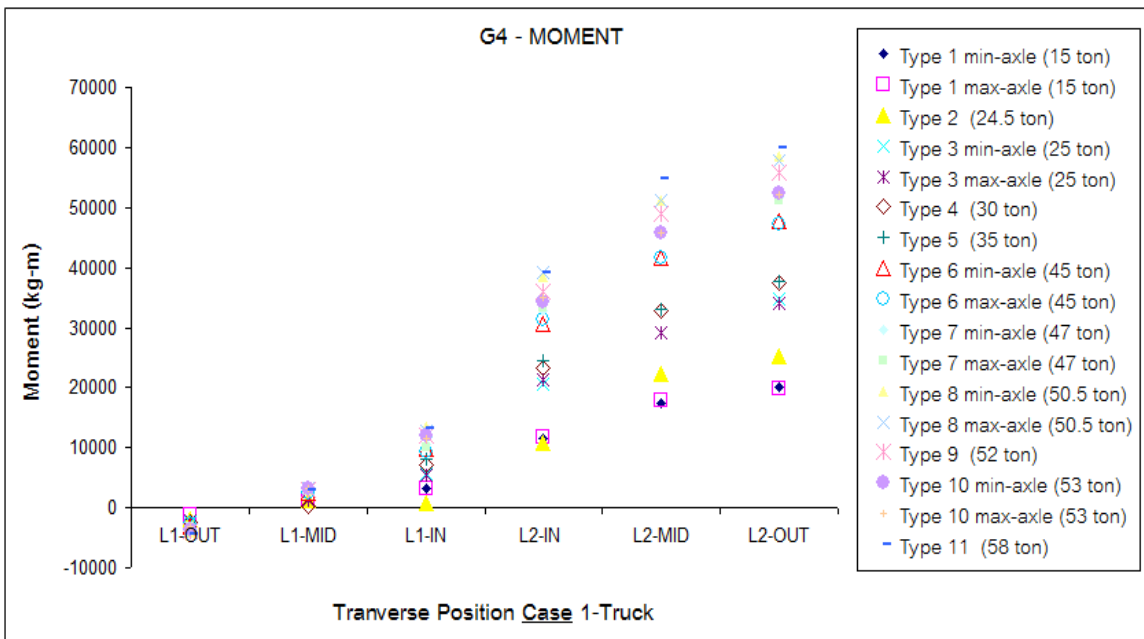
ภาพที่ 5.22 ค่าโมเมนต์ในคาน G1 ของสะพานข้ามแยกวงสี่ส่วง กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 5.23 ค่าโมเมนต์ในคาน G2 ของสะพานข้ามแยกวงสี่ส่วง กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 5.24 ค่าโมเมนต์ในคาน G3 ของสะพานข้ามแยกวงสี่เหลี่ยม กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



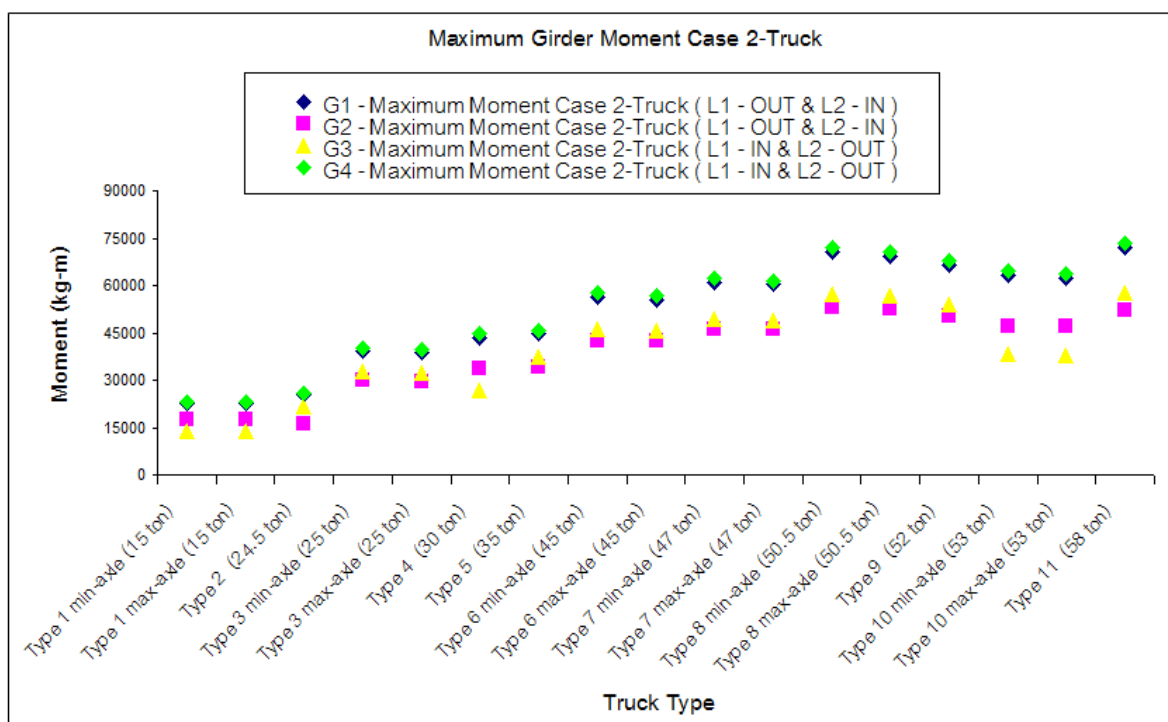
ภาพที่ 5.25 ค่าโมเมนต์ในคาน G4 ของสะพานข้ามแยกวงสี่เหลี่ยม กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในคาน G1, G2, G3 และG4 ของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน สามารถสรุปได้ดังนี้

- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G1 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L1-OUT ทั้งหมดและลดลงตามตำแหน่งตามแนวขวางที่ไกลห่างคาน G1 ออกไป
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G2 สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L1-OUT ซึ่งตำแหน่งนี้ให้ค่าโมเมนต์ใกล้เคียงกับตำแหน่ง L1-MID
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G3 สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L2-OUT ซึ่งตำแหน่งนี้ให้ค่าโมเมนต์ใกล้เคียงกับตำแหน่ง L2-MID
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G4 สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท เกิดที่ตำแหน่ง L2-OUT ทั้งหมดและลดลงตามตำแหน่งตามแนวขวางที่ไกลห่างคาน G4 ออกไป
- รถบรรทุกในทุกประเภทที่มีค่าความกว้างของล้อตามแนวขวางค่าน้อย (min Axle) จะให้ค่าโมเมนต์ของคาน G1,G2 ,G3 และG4 มากกว่า ค่าความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางค่ามาก (max axle) เฉลี่ยประมาณ 0.68 % ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลจากความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางยังมีค่าความกว้างน้อยจะยิ่งทำให้เกิดค่าโมเมนต์ในคานมากยิ่งขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน จะใช้เป็นตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน โดยการรวมผลค่าโมเมนต์สูงสุดในแต่ละคาน เมื่อรถบรรทุกทั้ง 2 คัน อยู่บนเลนทั้งสองเลน แสดงผลดังภาพที่ 5.26 สรุปได้ดังนี้

- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ผลรวมค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G1 และG2 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-OUT กับ L2-IN
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกที่ให้ผลรวมค่าโมเมนต์สูงสุดของคาน G3 หรือรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-IN กับ L2-OUT



ภาพที่ 5.26 โมเมนต์สูงสุดในคาน G1, G2, G3 และ G4 ของสะพานข้ามแยกแยกวงค์สว่าง
กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

5.2.3 ความกว้างประสิทธิผลของคาน

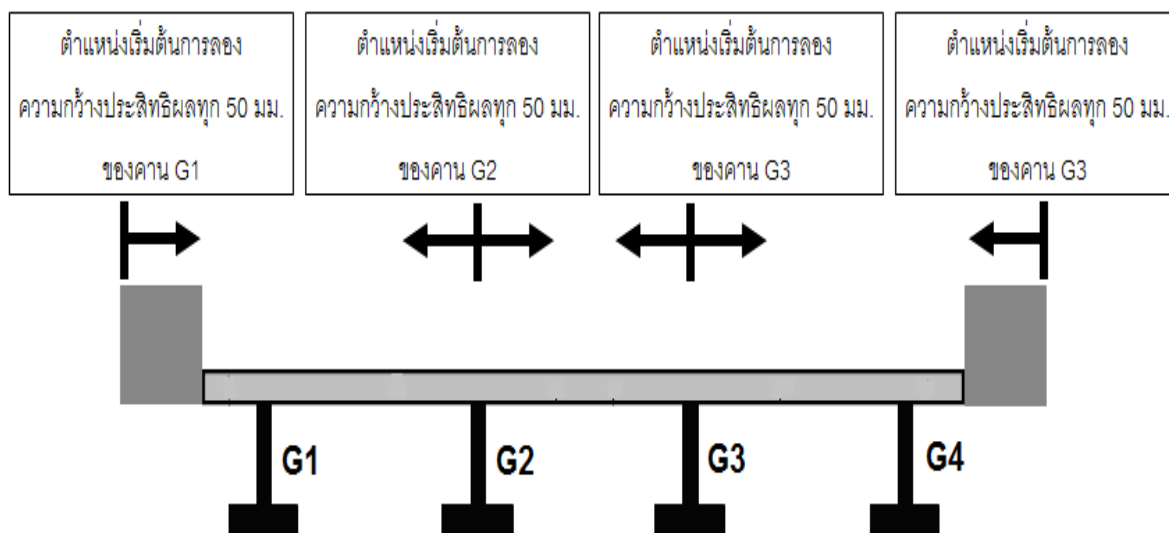
ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์จากชิ้นส่วนแผ่นพื้นของคาน G1, G2 และ G3 จากแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง เป็นสะพานที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบและระบบแผ่นพื้นเป็นแบบออร์โทโทรปิก ซึ่งข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 และ AISC 2010 ไม่ได้กำหนดความกว้างประสิทธิผล (effective width) สำหรับสะพานรูปแบบนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลแรงในแนวแกนเพียงรูปแบบเดียว โดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้นที่ให้ค่าผลรวมของแรงในแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนคานกับชิ้นส่วนแผ่นพื้นมีค่าเป็นศูนย์ ทำโดยใช้การแสดงผลค่าแรงในแนวแกนด้วยวิธี section cut การกำหนดระยะในการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้นของแต่ละคานจะกำหนดดังนี้

- สำหรับคาน G1 เริ่มต้นการลองความกว้างที่ปลายด้านซ้ายของแผ่นพื้นและกำหนดค่าความกว้างของแผ่นพื้น โดยการป้อนพิกัดของความยาวเส้นจากวิธี section cut ทุก ๆ 50 มม.

- สำหรับคาน G2 และ G3 เริ่มต้นการลองความกว้างที่กึ่งกลางคาน G2 และกำหนดค่าความกว้างของแผ่นพื้นไปทั้งด้านซ้ายและด้านขวาเท่ากัน โดยการป้อนพิกัดของความยาวเส้นจากวิธี section cut ทุก ๆ 50 มม.

- สำหรับคาน G4 เริ่มต้นการลองความกว้างที่ปลายด้านขวาของแผ่นพื้นและกำหนดค่าความกว้างของแผ่นพื้น โดยการป้อนพิกัดของความยาวเส้นจากวิธี section cut ทุก ๆ 50 มม. แสดงรูปจุดเริ่มต้นการลองความกว้างของคาน G1,G2 ,G3 และG4 ดังรูปที่ 5.27 และในการกำหนดการลองความกว้างทุก ๆ 50 มม. ถูกกำหนดโดยระยะห่างการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของชิ้นส่วนแผ่นพื้นในแบบลองสะพาน ทั้งนี้ผลรวมแรงในแนวแกนระหว่างชิ้นส่วนคานกับชิ้นส่วนแผ่นพื้นอาจมีค่าไม่เป็นศูนย์พอดี เนื่องจากขึ้นอยู่กับความละเอียดในการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของชิ้นส่วนแผ่นพื้น

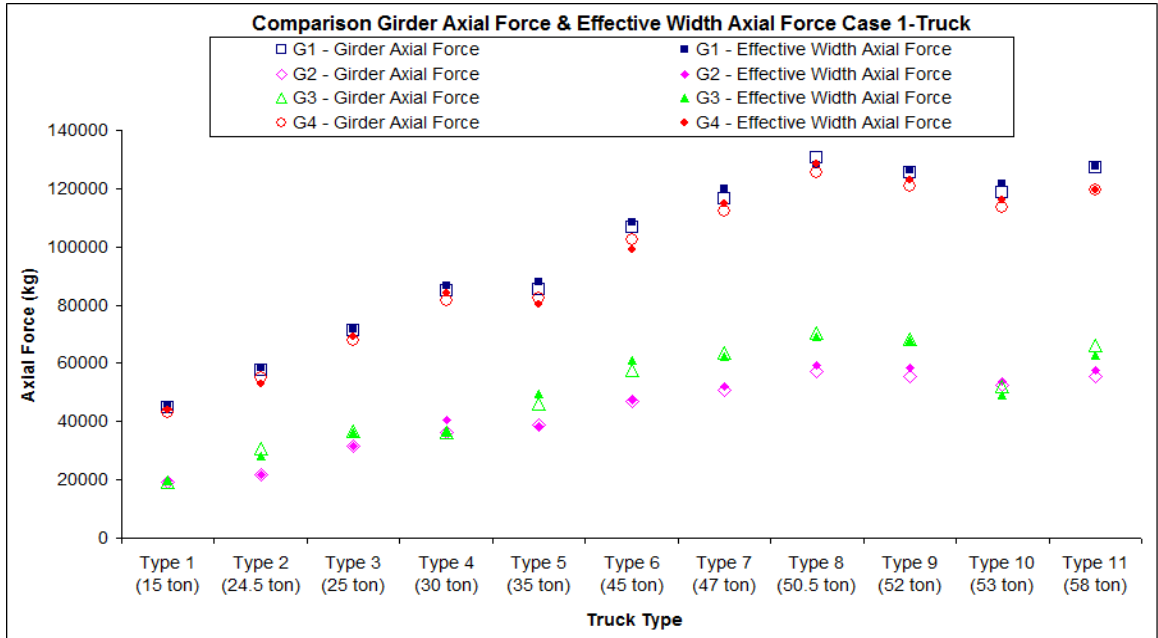
ผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคาน และค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้นตามเงื่อนไขสมมูลแรงในแนวแกนโดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้น ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ดังภาพที่ 5.28 และ5.29 ตามลำดับ



ภาพที่ 5.27 แสดงจุดเริ่มต้นการลองความกว้างทุก ๆ 50 มม. ของคาน G1,G2,G3 และG4

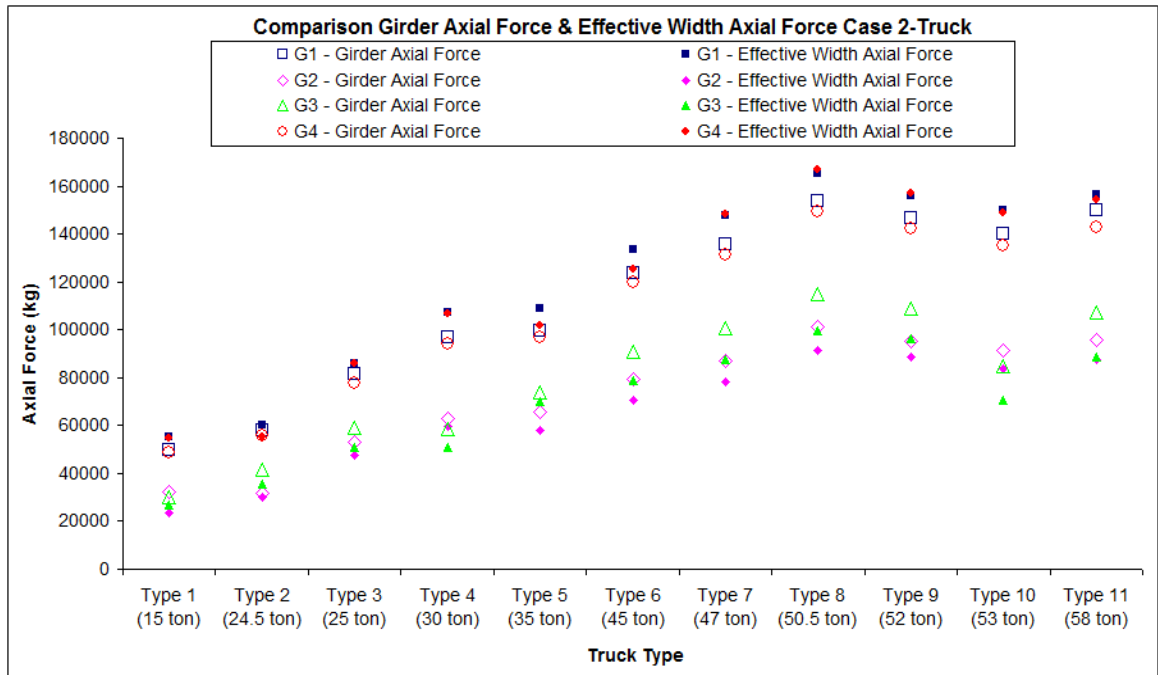
จากผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนคาน และค่าแรงในแนวแกนจากชิ้นส่วนแผ่นพื้นตามเงื่อนไขสมมูลแรงในแนวแกนโดยการลองความกว้างชิ้นส่วนแผ่นพื้น ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยในคาน G1, G2, G3 และG4 เท่ากับ 1.7 ,3.2 ,3.1 และ 2.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยในคาน G1, G2, G3 และG4 เท่ากับ 7.4, 10.3, 13.2 และ8.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากผลที่ได้ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ในแต่ละคานค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยไม่เกิน 14 เปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถจะสรุปได้ว่าผลจากการแบ่งชิ้นส่วนย่อย

ของแผ่นพื้นมีผลโดยตรงต่อค่าความละเอียดของการลองความกว้างด้วยวิธี section cut และค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับรถบรรทุกแต่ละประเภท ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ดังตารางที่ 5.5



ภาพที่ 5.28 แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



ภาพที่ 5.29 แสดงผลเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

ตารางที่ 5.5 แสดงความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุขของแรงในแนวแกน

ประเภท	รายละเอียด ชื่อเรียกรถบรรทุก	ความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไข สมดุขของแรงในแนวแกนของคาน (มม.)			
		G1	G2	G3	G4
1	6 ล้อ	2650	1600	1700	2250
2	Fatigue truck	2550	1600	1900	2050
3	10 ล้อ	2350	1900	1900	2050
4	รถบรรทุก 12 ล้อ	2650	1900	1600	2250
5	กึ่งพ่วงหัวลาก 6 ล้อ ลากจูง 2 เพลา 8 ล้อ	2550	1900	2100	2050
6	กึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 2 เพลา 8 ล้อ	2550	1900	1700	2250
7	พ่วง 18 ล้อ	2550	1900	2000	2550
8	กึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ	2750	1900	2100	2100
9	พ่วง 20 ล้อ	2450	1900	1900	2050
10	พ่วง 22 ล้อ	2450	1900	1700	2050
11	พ่วง 24 ล้อ	2450	1900	1900	2350

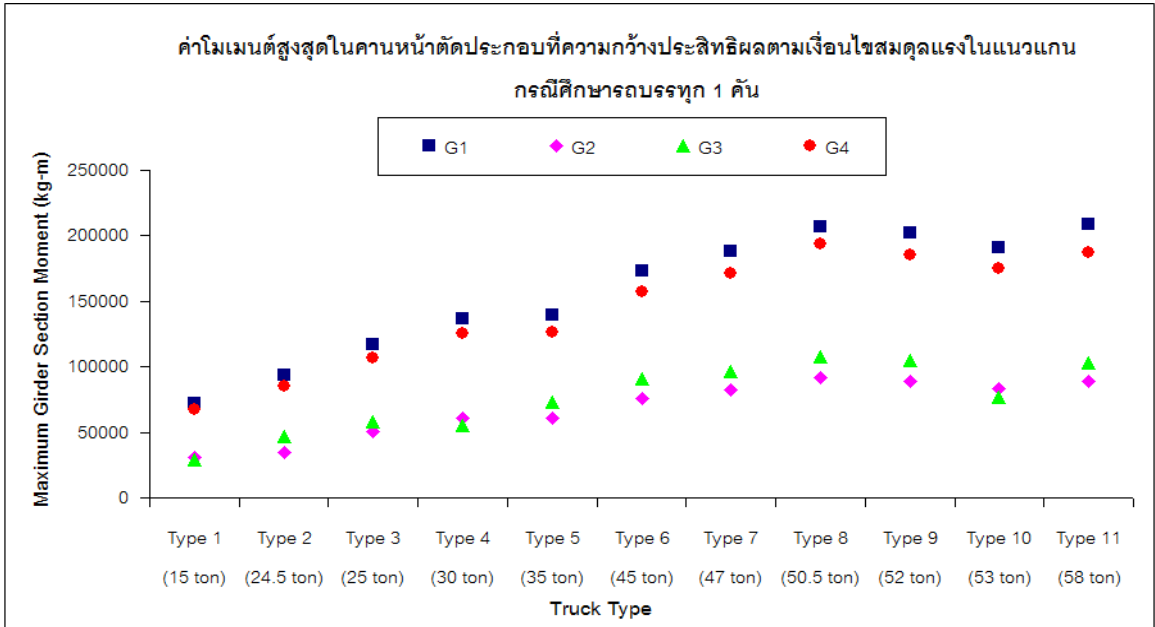
จากผลที่ได้พบว่าความกว้างประสิทธิผลที่ได้ของรถบรรทุกในแต่ละประเภทให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ในแต่ละคาน สรุปค่าช่วงความกว้างประสิทธิผลในแต่ละคาน ดังนี้

- คาน G1 ค่าความกว้างประสิทธิผลจะอยู่ในช่วงความกว้าง 2350 มม. ถึง 2750 มม.
- คาน G2 ค่าความกว้างประสิทธิผลจะอยู่ในช่วงความกว้าง 1600 มม. ถึง 1900 มม.
- คาน G3 ค่าความกว้างประสิทธิผลจะอยู่ในช่วงความกว้าง 1700 มม. ถึง 2100 มม.
- คาน G4 ค่าความกว้างประสิทธิผลจะอยู่ในช่วงความกว้าง 2050 มม. ถึง 2550 มม.

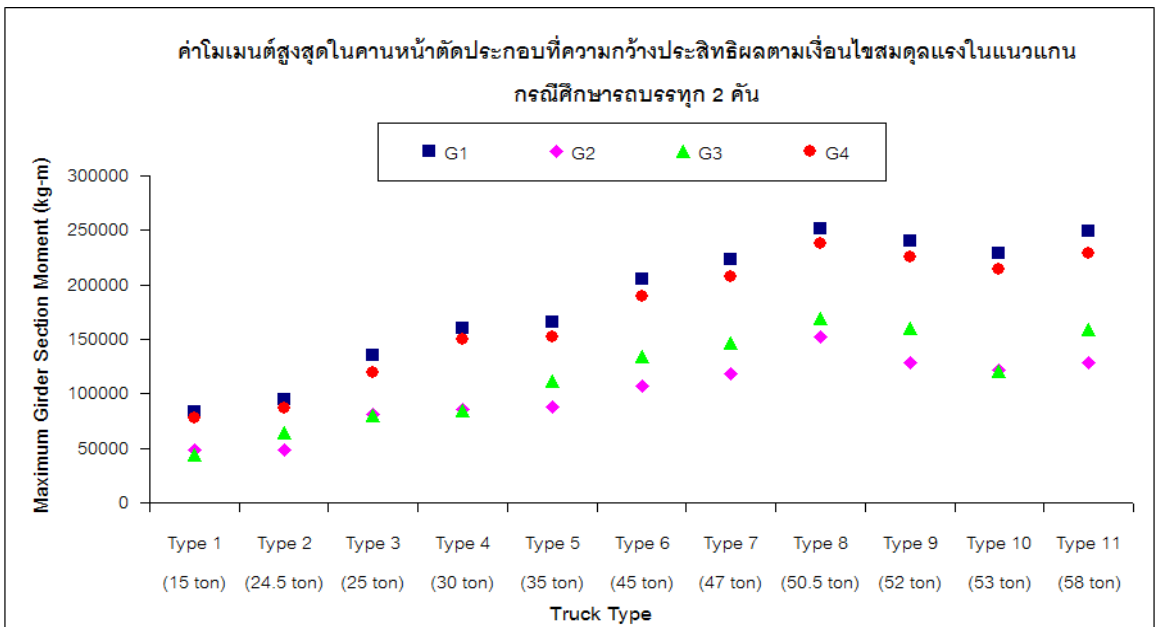
5.2.4 ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ

ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ (moment in girder section) เท่ากับผลรวมของค่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนคาน (girder moment) รอบแกนสะเทินของหน้าตัดคาน ค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนแผ่นพื้น (deck moment) รอบแกนสะเทินของหน้าตัดแผ่นพื้นที่มีความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุขแรงในแนวแกน และค่าโมเมนต์จากแรงในแนวแกน (moment produced by

axial forces) ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 , G2,G3 และG4 ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภทดังภาพที่ 5.30 และ 5.31ตามลำดับ



ภาพที่ 5.30 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 , G2 ,G3 และG4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง

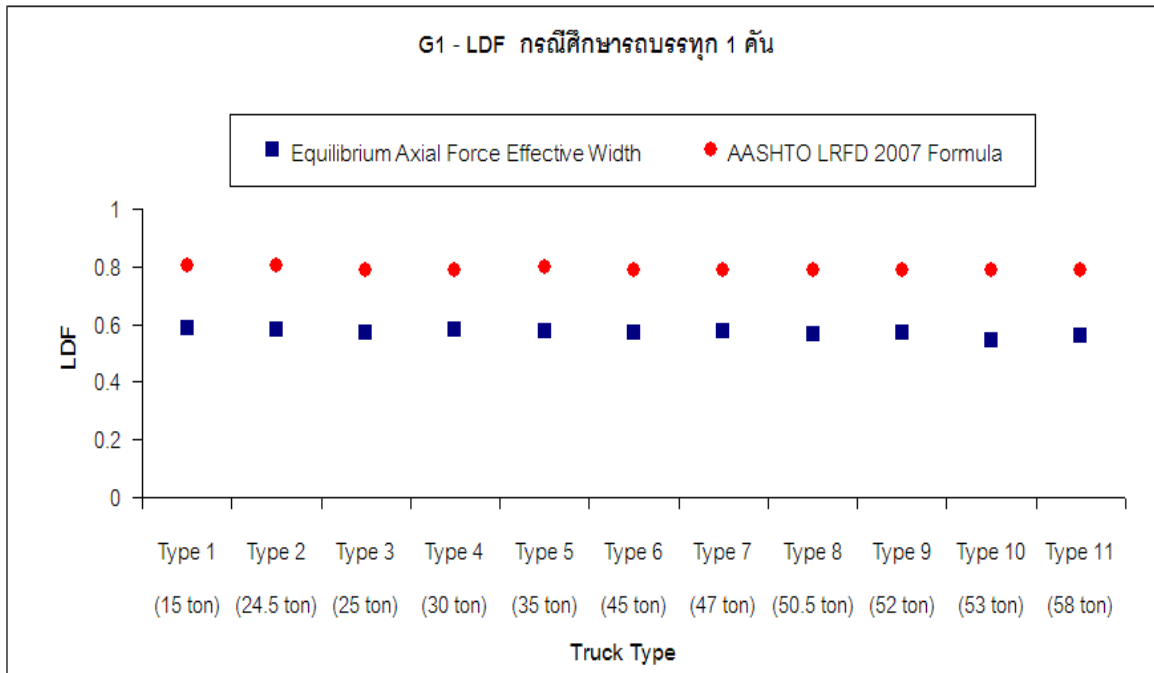


ภาพที่ 5.32 แสดงค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 , G2 ,G3 และG4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง

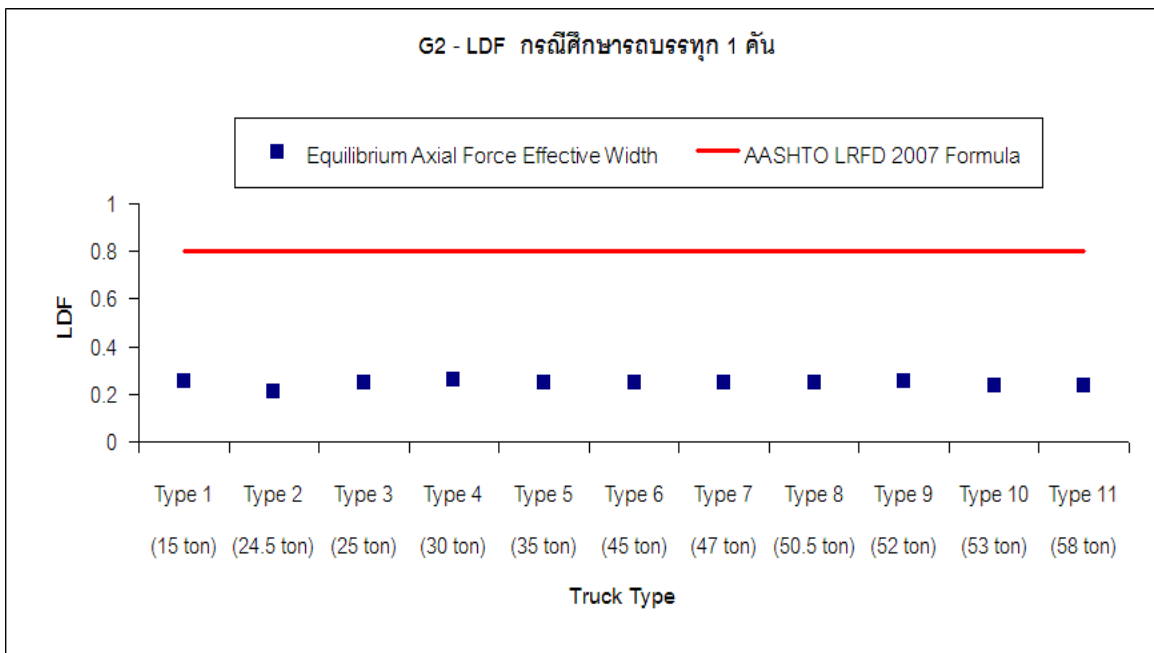
จากผลที่ได้พบว่าคานวิกฤติที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบเกิดที่คาน G1 ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน และรถบรรทุกในรถบรรทุกประเภทที่ 11 คือ รถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แต่ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน รถบรรทุกประเภทที่ 8 คือรถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบที่คานวิกฤติ และจากการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบระหว่างรถบรรทุกประเภทที่ 2 คือ fatigue truck กับรถบรรทุกวิกฤติ ให้ค่าค่าโมเมนต์สูงสุดมากกว่า fatigue truck สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน โดยเฉลี่ยประมาณ 2.23 เท่า และ 2.65 เท่า ตามลำดับ

5.2.5 ตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง

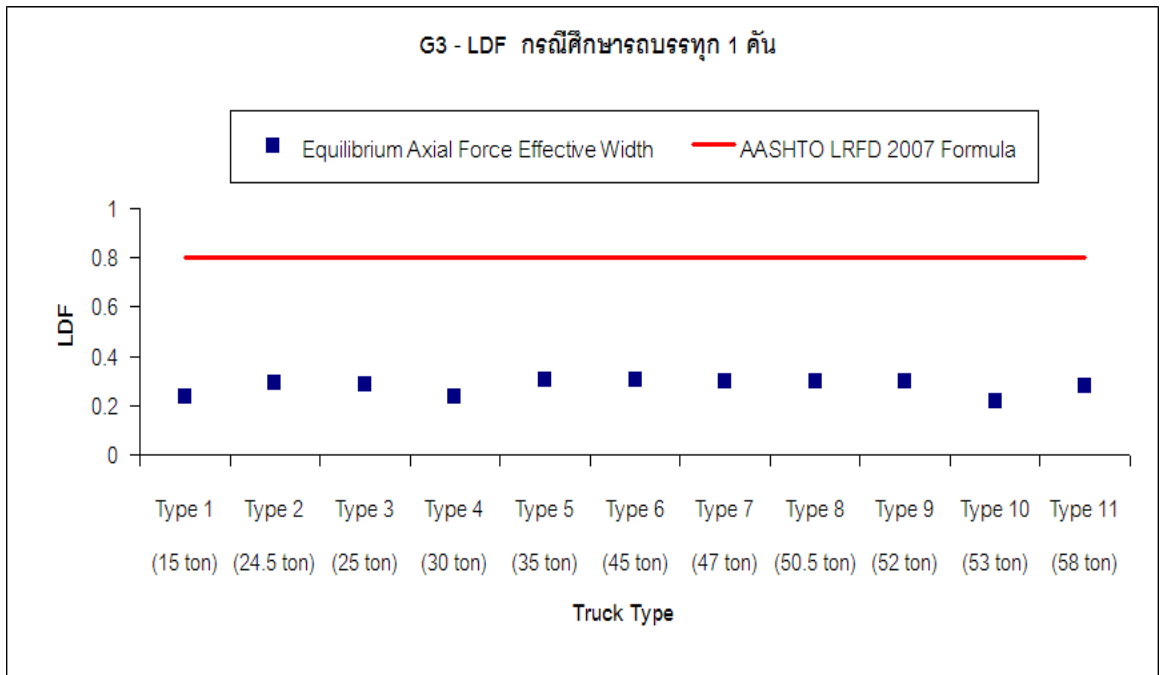
การคำนวณหาค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง (LDF) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในคาน G1, G2, G3 และG4 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ที่ความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลงแรงในแนวแกน และเปรียบเทียบกับค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ของคานด้านนอก (G1และG4) และคานด้านใน (G2และG3) ดังสมการที่ 3.19 และ 3.17 ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 จะแสดงโดยละเอียดในภาคผนวก ข และผลการวิเคราะห์ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และจากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ในแต่ละคาน สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คันและกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังภาพที่ 5.38 ถึง 5.41 และ 5.42 ถึง 5.45 ตามลำดับ



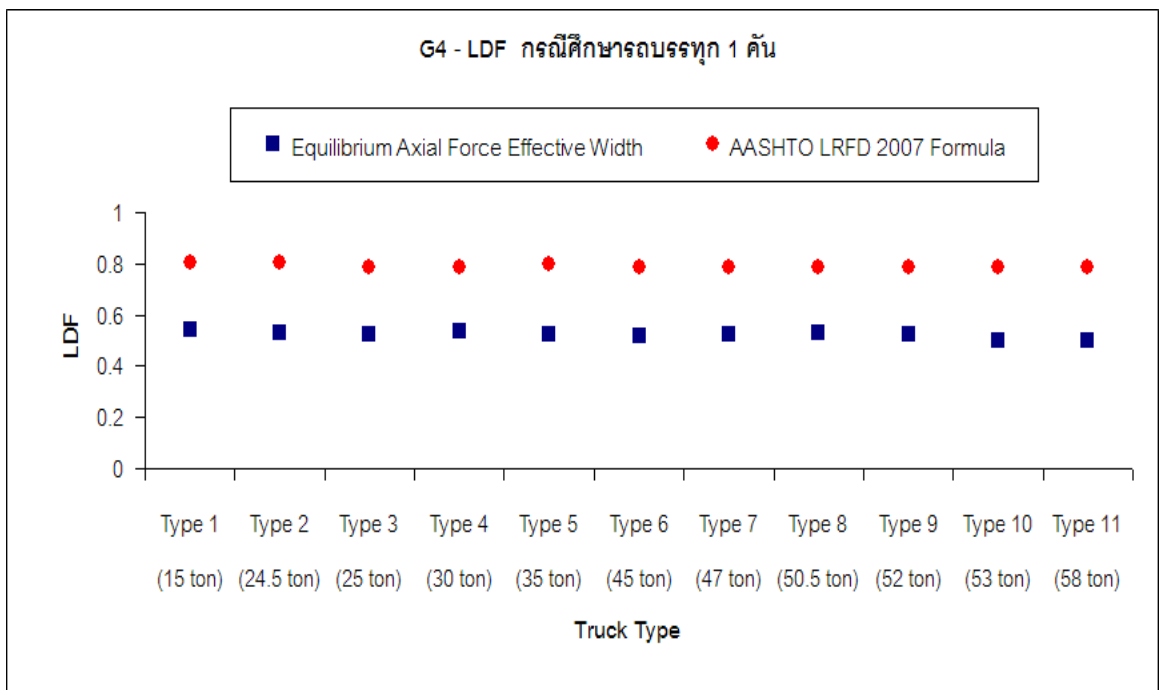
ภาพที่ 5.38 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



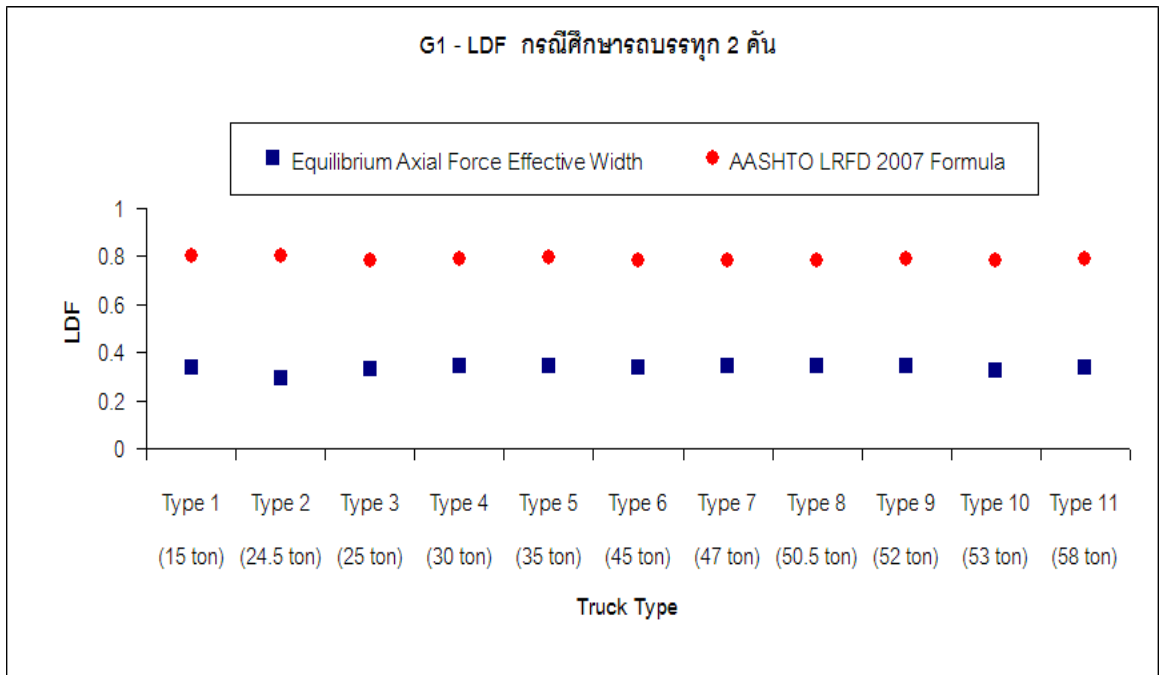
ภาพที่ 5.39 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



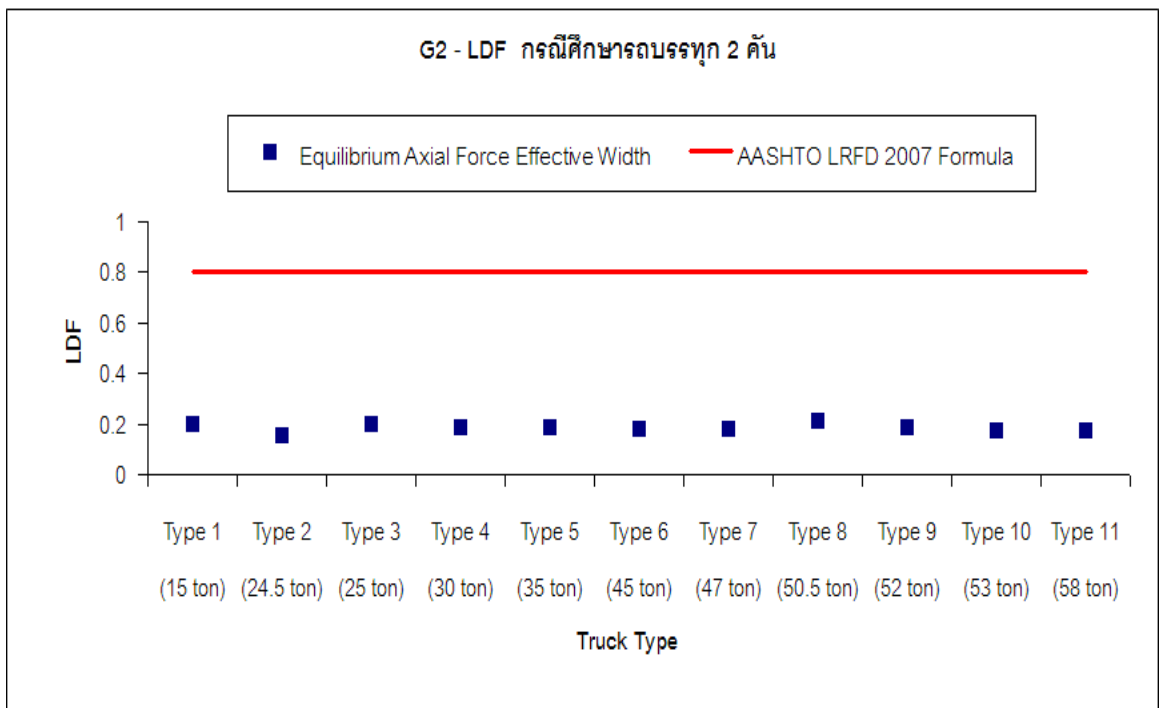
ภาพที่ 5.40 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



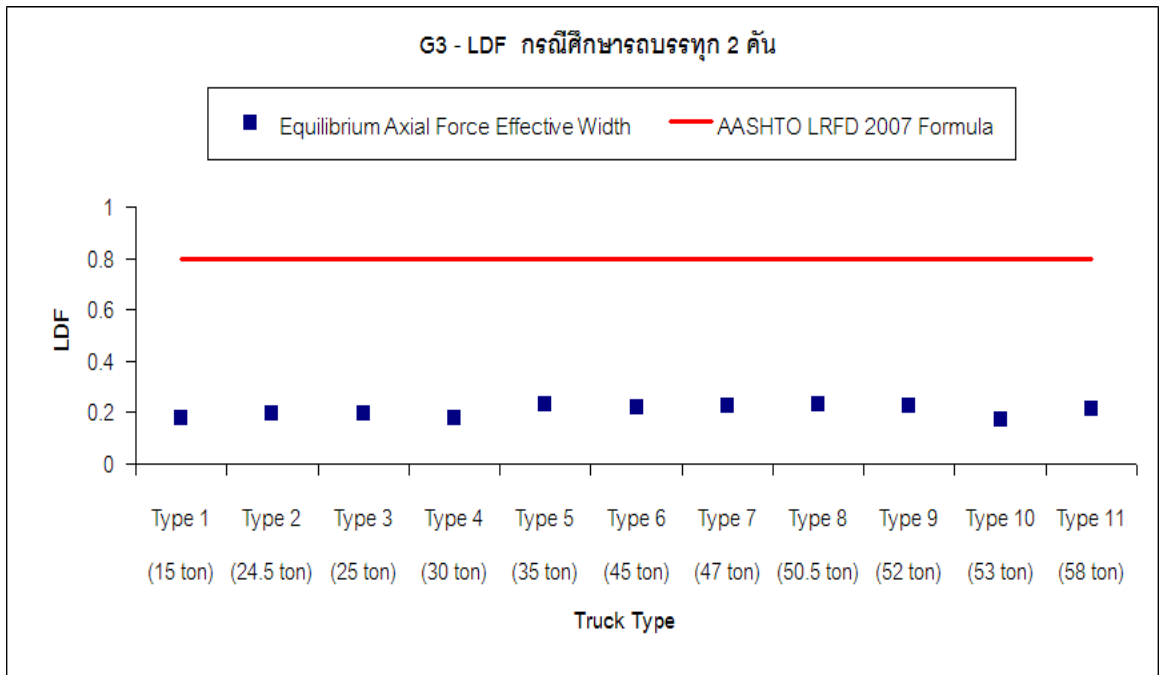
ภาพที่ 5.41 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



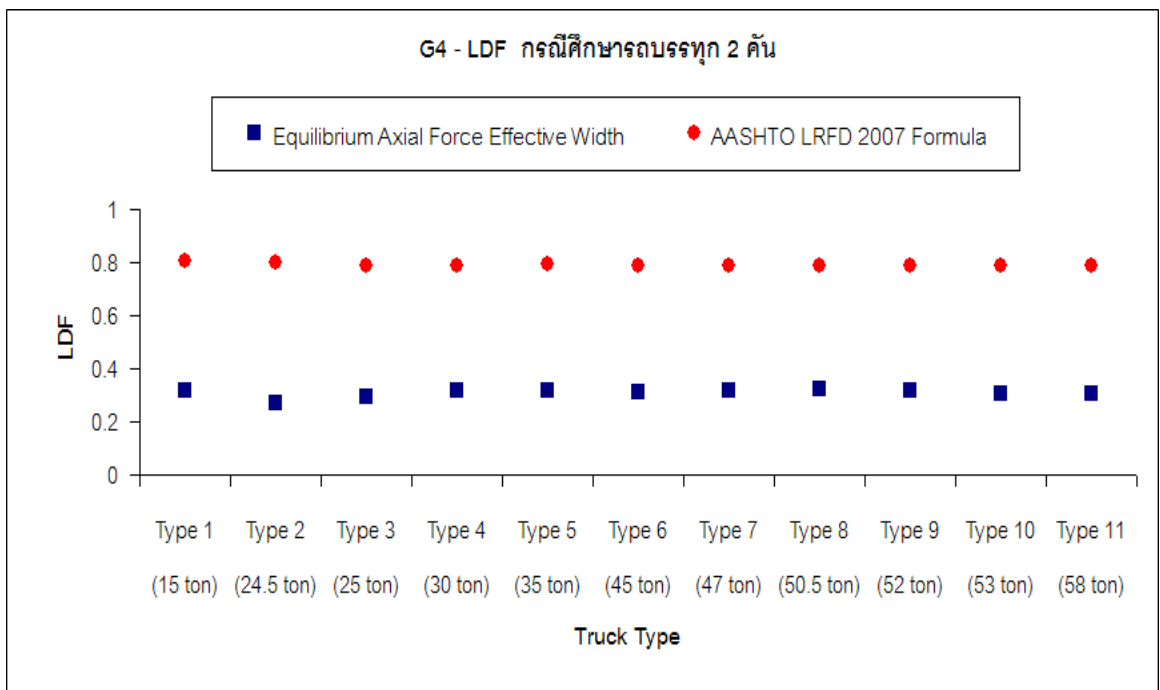
ภาพที่ 5.42 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G1 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



ภาพที่ 5.43 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G2 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



ภาพที่ 5.44 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G3 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



ภาพที่ 5.45 แสดงค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวาง G4 สำหรับทุกประเภทรถบรรทุกในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

จากผลการวิเคราะห์ค่า LDF ในกรณีศึกษาธาตบรทุก 1 คับ พบว่าคานววกฤตทให้ค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เกิดที่คาน G1 ซึ่งค่า LDF ของธาตบรทุกในแต่ละประเภทให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก มีค่า LDF อยู่ในช่วง 0.547 ถึง 0.585 ผลการเปรียบเทียบค่า LDF จากสมการของ AASHTO LRFD 2007 กับค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานววกฤตท พบว่าค่า LDF จากสมการของ AASHTO LRFD 2007 ให้ค่าที่สูงกว่าค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานววกฤตท โดยเฉลี่ยในทุกประเภทธาตบรทุกประมาณ 38.3 % และในกรณีศึกษาธาตบรทุก 2 คับ พบว่าคานววกฤตทให้ค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เกิดที่คาน G1 ซึ่งค่า LDF ของธาตบรทุกในแต่ละประเภทให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก มีค่า LDF อยู่ในช่วง 0.295 ถึง 0.345 ผลการเปรียบเทียบค่า LDF จากสมการของ AASHTO LRFD 2007 กับค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานววกฤตท พบว่าค่า LDF จากสมการของ AASHTO LRFD 2007 ให้ค่าที่สูงกว่าค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานววกฤตท โดยเฉลี่ยในทุกประเภทธาตบรทุกประมาณ 137.3 % และเมื่อเปรียบเทียบค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีศึกษาธาตบรทุก 1 คับ กับในกรณีศึกษาธาตบรทุก 2 คับ พบว่า ค่า LDF ในกรณีศึกษาธาตบรทุก 1 คับ ให้ค่าที่สูงกว่าเฉลี่ยในทุกประเภทธาตบรทุกที่คานววกฤตทประมาณ 1.72 เท่า ของในกรณีศึกษาธาตบรทุก 2 คับ

บทที่ 6

การวิเคราะห์และอภิปรายผล

การโค้งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียงของสะพาน

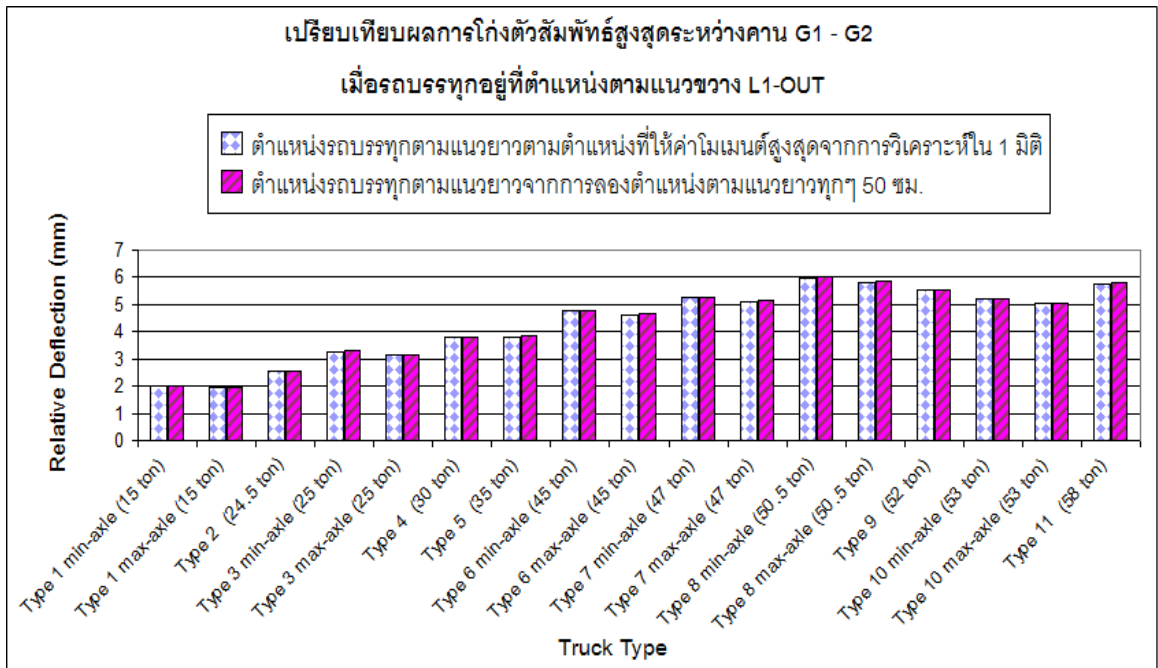
ในการหาค่าการโค้งตัวของคานในแบบจำลองสะพานทั้ง 2 รูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาหาค่าการโค้งตัวของคานที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีชั้นส่วนทางขวาง คือ ชั้นส่วนไดอะแฟรมเชื่อมต่อระหว่างคานที่ติดกันของสะพาน การวิเคราะห์หาการโค้งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่ติดกันของสะพานเป็นตัวแปรสำคัญในการหาหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของบริเวณ web gap จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อสะพานเกิดการการโค้งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงก็จะมีผลให้เกิดหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของบริเวณ web gap สูงเช่นกัน ในการหาค่าการโค้งตัวสัมพันธ์สูงสุดต้องหาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวและแนวขวาง ผลการวิเคราะห์การโค้งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่ติดกัน แต่ละแบบจำลองแสดงดังนี้

6.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

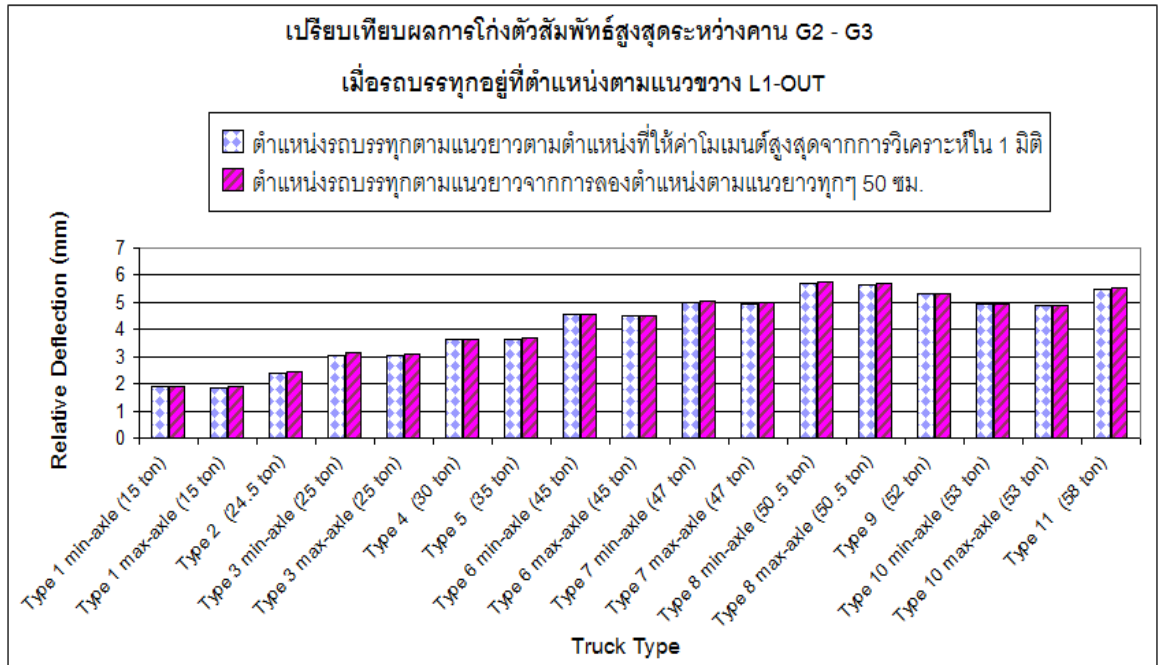
ในการหาค่าการโค้งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่ติดกัน ในแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล ประกอบด้วย 3 คาน คือ คาน G1 ,G2 และG3 ซึ่งจะพิจารณาหาค่าการโค้งตัวสูงสุดในแต่ละคาน และการโค้งตัวสัมพันธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และคาน G2 กับ G3 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

6.1.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว

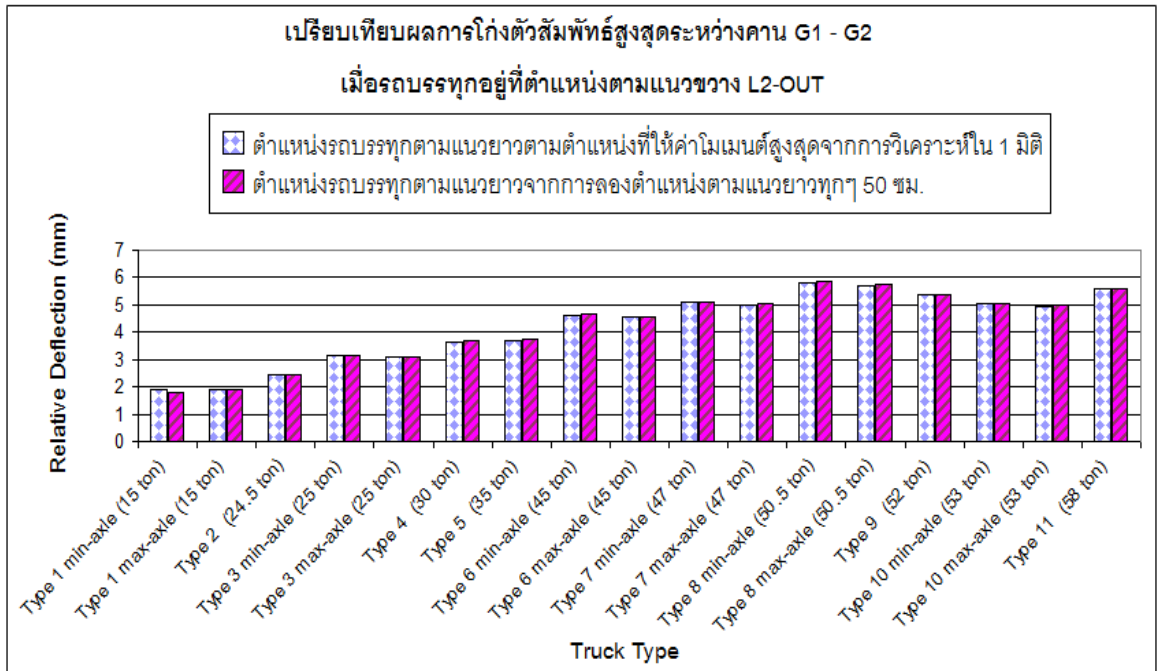
การหาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกทั้งหมดตามแนวยาวที่ให้ค่าการโค้งตัวสัมพันธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และ G2 กับ G3 ที่กึ่งกลางสะพานโดยตั้งสมมติฐานว่าตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ เป็นตำแหน่งที่ให้ค่าการโค้งตัวสัมพันธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และ G2 กับ G3 ซึ่งจะทดลองพิจารณาการวางตำแหน่งตามแนวขวาง 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่ง L1 – OUT และตำแหน่ง L2 – OUT และกำหนดการลองตำแหน่งรถบรรทุกในทุกประเภทตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. ตลอดความยาวสะพาน ในการวิเคราะห์ที่ได้อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.6 เฉพาะกรณีศึกษากรรถบรรทุก 1 คัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าการโค้งตัวสัมพันธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และ G2 กับ G3 ระหว่างตำแหน่งตามแนวยาวของรถบรรทุกจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม.กับ ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ดังภาพที่ 6.1 – 6.4



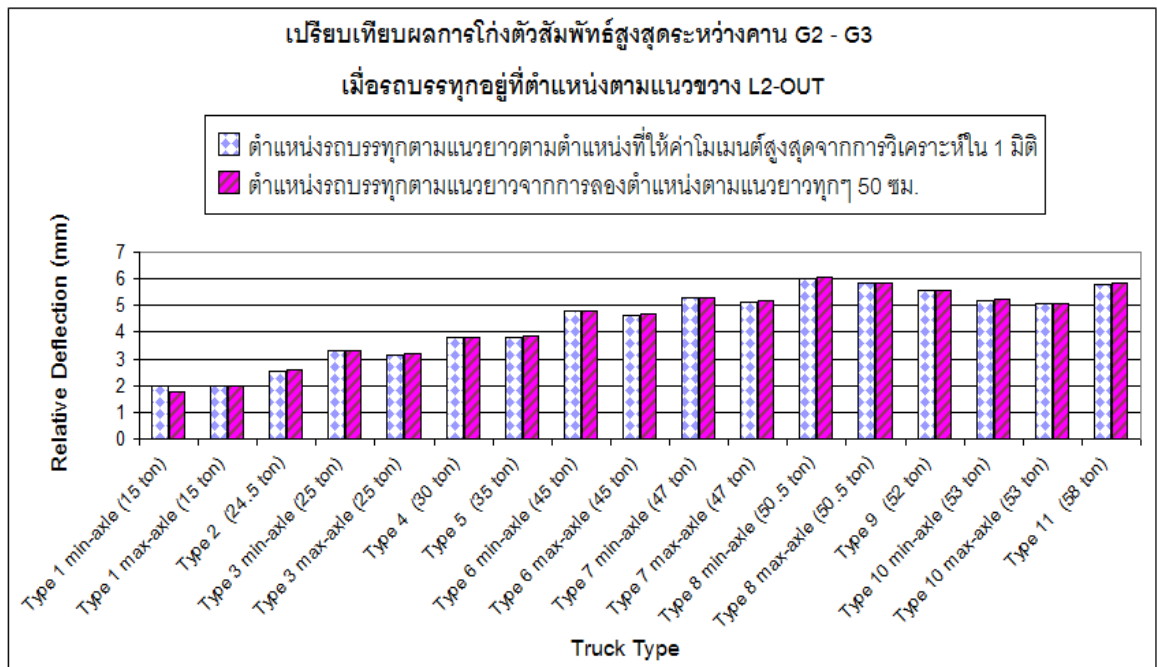
ภาพที่ 6.1 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT



ภาพที่ 6.2 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT

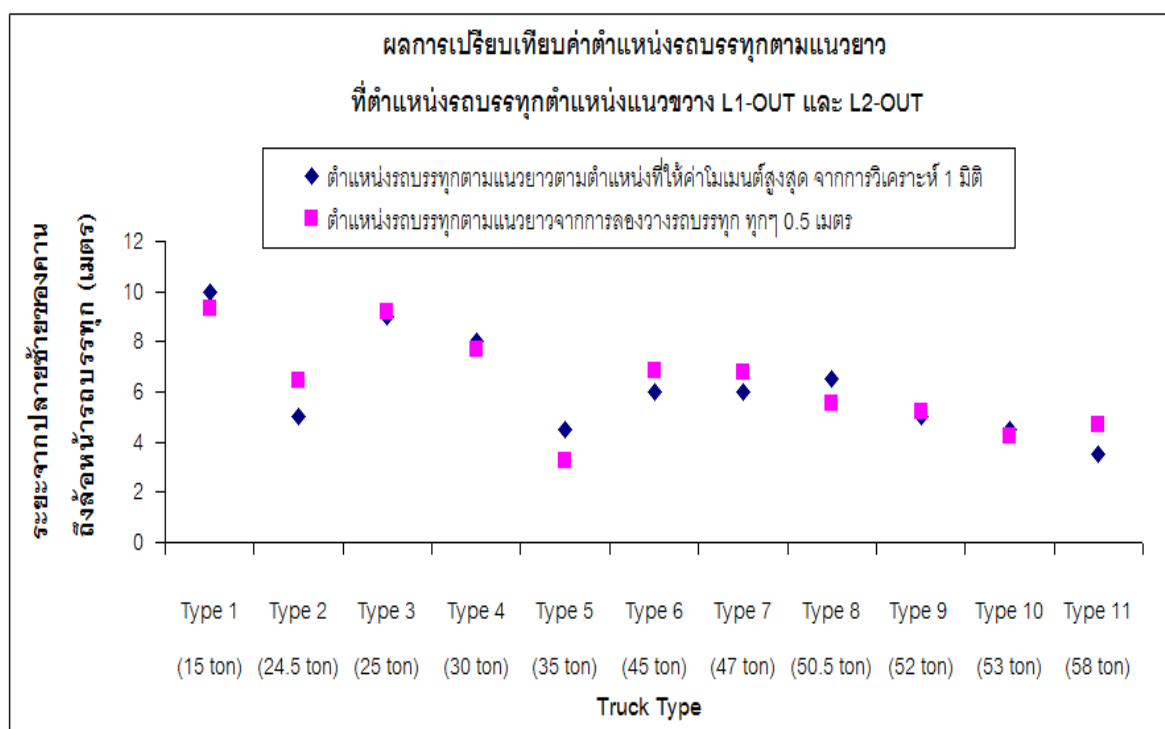


ภาพที่ 6.3 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT



ภาพที่ 6.4 แสดงผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT

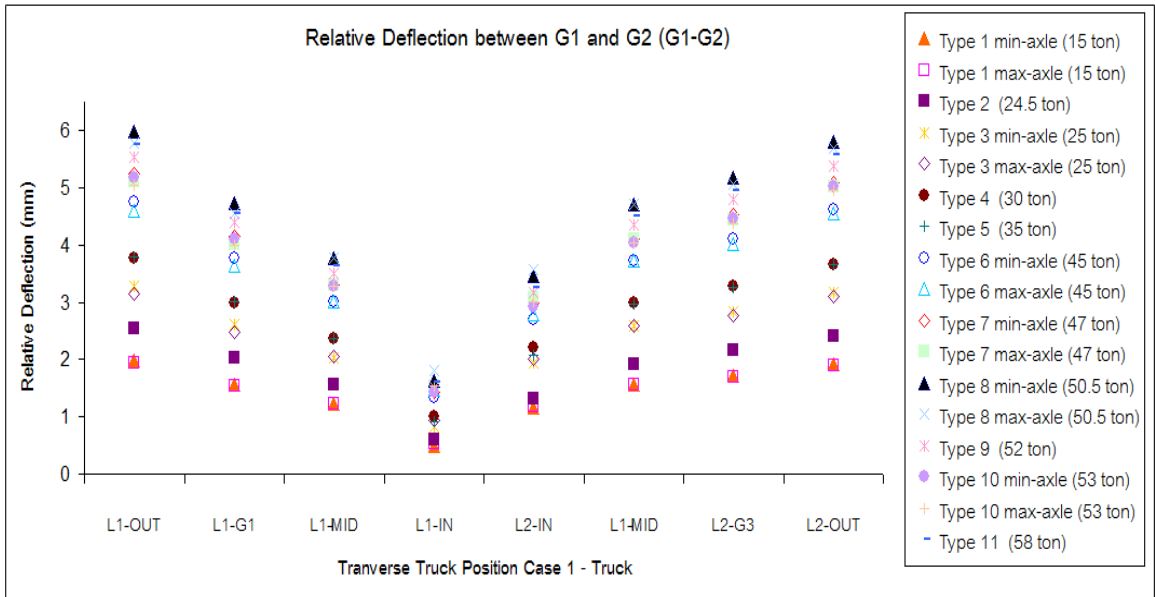
จากผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตามแนวยาวของรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ กับการลองตำแหน่งรถบรรทุกในทุกประเภทตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. ตลอดความยาวสะพาน ที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และ G2 กับ G3 ที่กึ่งกลางสะพาน สำหรับตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT และ L2-OUT พบว่าค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และ G2 กับ G3 มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเมื่อเทียบกับตำแหน่งจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกในทุกประเภทตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. ประมาณ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสรุปได้ว่าตำแหน่งวิกฤตของรถบรรทุกตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน คือตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติและผลการเปรียบเทียบตำแหน่งรถบรรทุกที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุด จากปลายด้านซ้ายของสะพานไปยังล้อหน้าของรถบรรทุก ที่ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวาง L1-OUT และ L2-OUT ดังภาพที่ 6.5 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งตามแนวยาวโดยเฉลี่ย 3.7 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากความละเอียดในการลองตำแหน่งรถบรรทุก



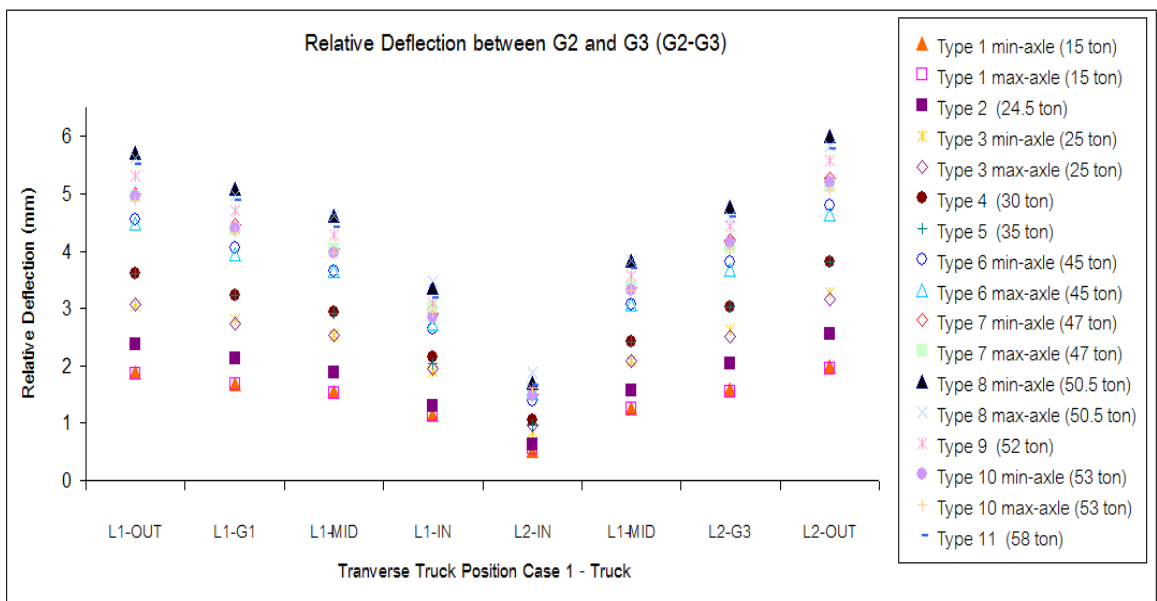
ภาพที่ 6.5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งตามแนวยาวที่ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวาง L1-OUT และ L2-OUT

6.1.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง

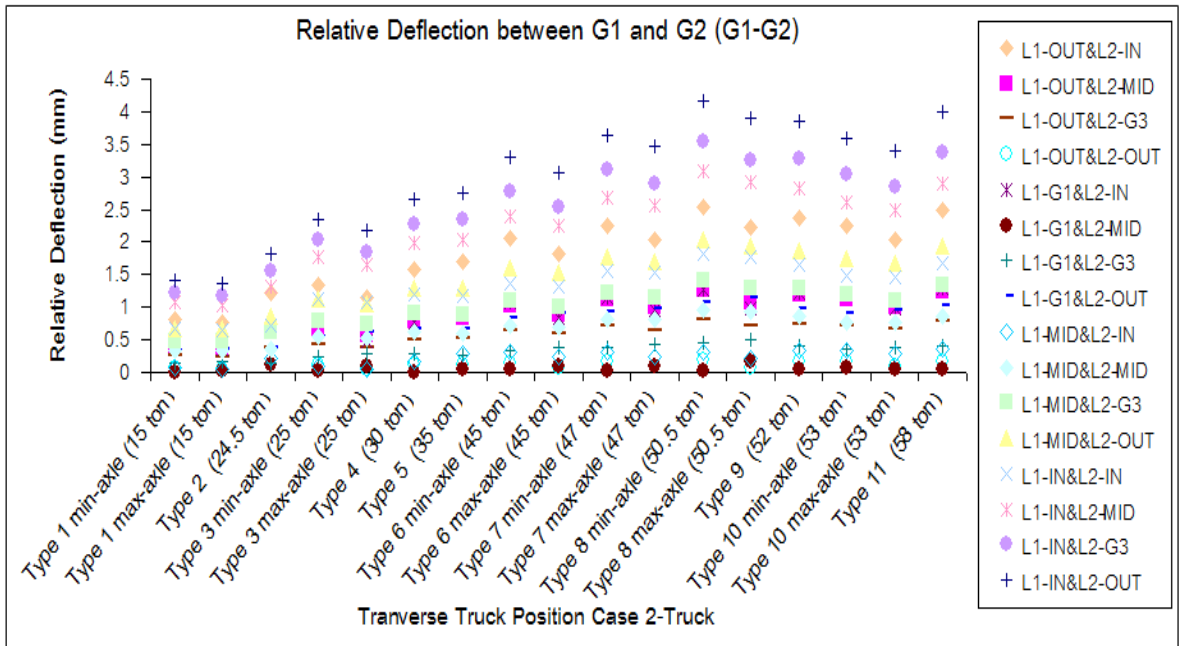
ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 และการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงดังภาพที่ 6.6 – 6.7 และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังภาพที่ 6.8 – 6.9



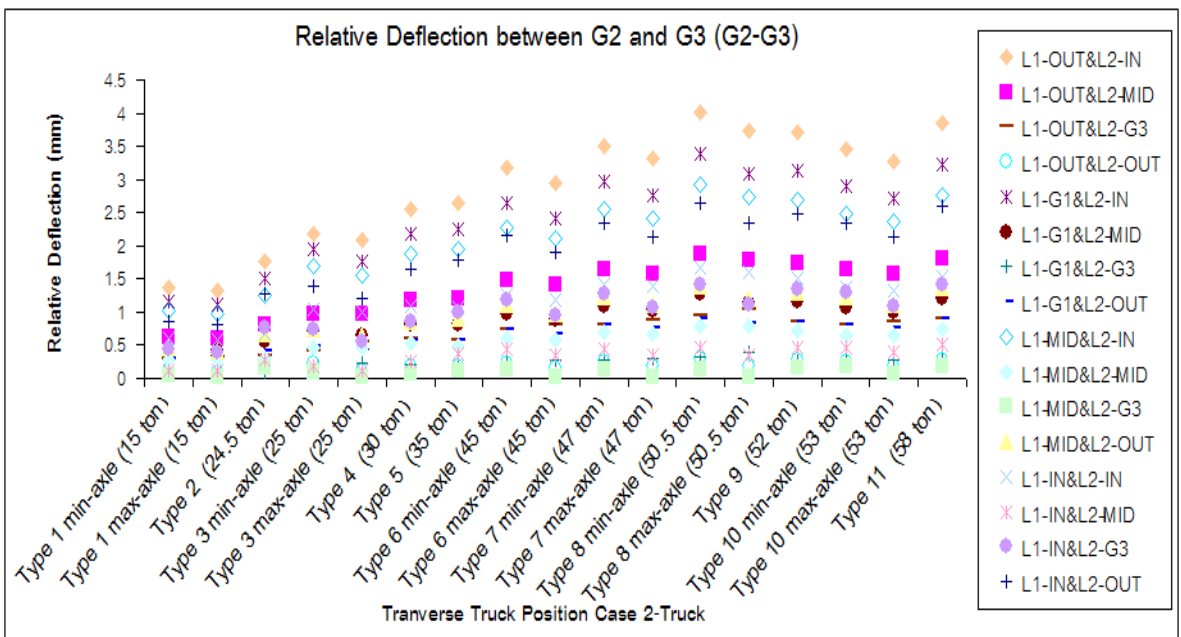
ภาพที่ 6.6 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 6.7 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 6.8 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน



ภาพที่ 6.9 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

จากผลการผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 และการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน สามารถสรุปได้ดังนี้

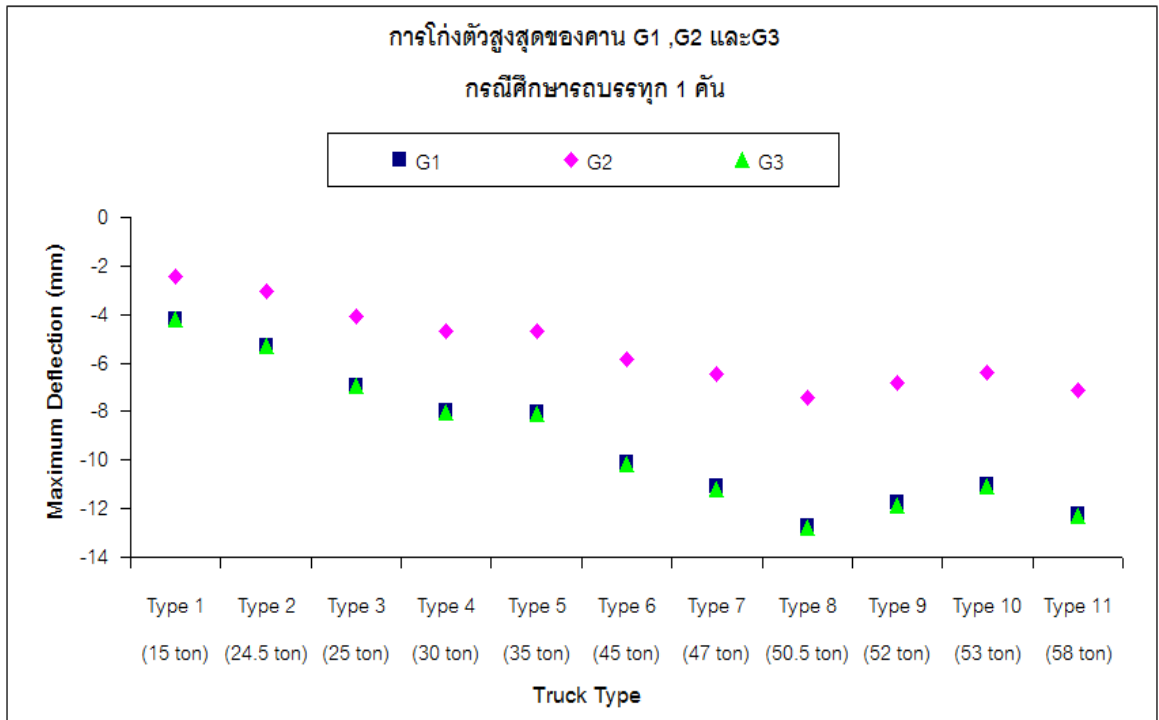
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 เกิดที่ตำแหน่ง L1-OUT ในทุกประเภทรถบรรทุก
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 เกิดที่ตำแหน่ง L2-OUT ในทุกประเภทรถบรรทุก
- รถบรรทุกในทุกประเภทที่มีค่าความกว้างของล้อตามแนวขวางค่าน้อย (min Axle) จะให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน มากกว่า ค่าความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางค่ามาก (max Axle) เฉลี่ยประมาณ 2.72 % ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลจากความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางยังมีความกว้างน้อยจะยิ่งทำให้การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันมากยิ่งขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน จะใช้เป็นตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน โดยการรวมผลค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน เมื่อรถบรรทุกทั้ง 2 คัน อยู่บนเลนทั้งสองเลน และสามารถสรุปได้ดังนี้

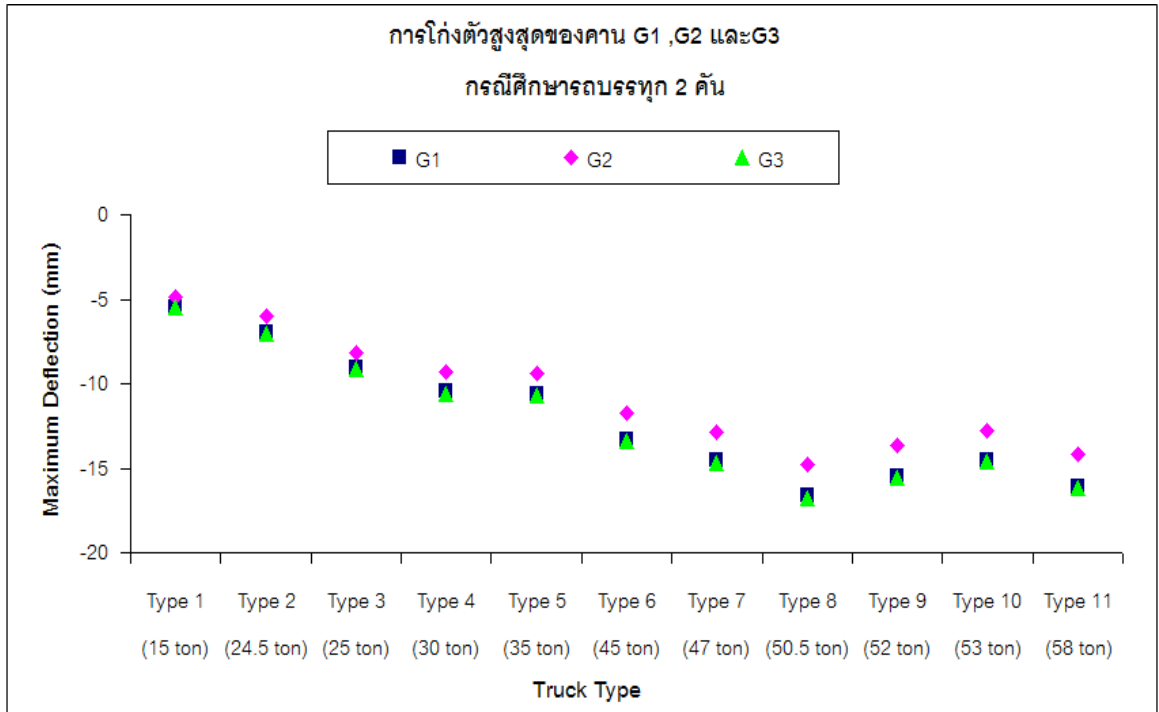
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-IN กับ L2-OUT
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 สำหรับรถบรรทุกทุกประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน คือ ตำแหน่ง L1-OUT กับ L2-IN

6.1.3 การโก่งตัวสูงสุดของคาน

ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 ที่ตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวยาวและตามแนวขวาง จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงดังภาพที่ 6.10 โดยตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 คือ L1-OUT ,L2-IN และ L2-OUT และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังรูปที่ 6.11 โดยตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 คือ L1-OUT & L2-IN ,L1-IN & L2-IN และ L1-IN & L2-OUT ซึ่งตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน คือตำแหน่งเดียวกับกับตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1 ,G2 และ G3

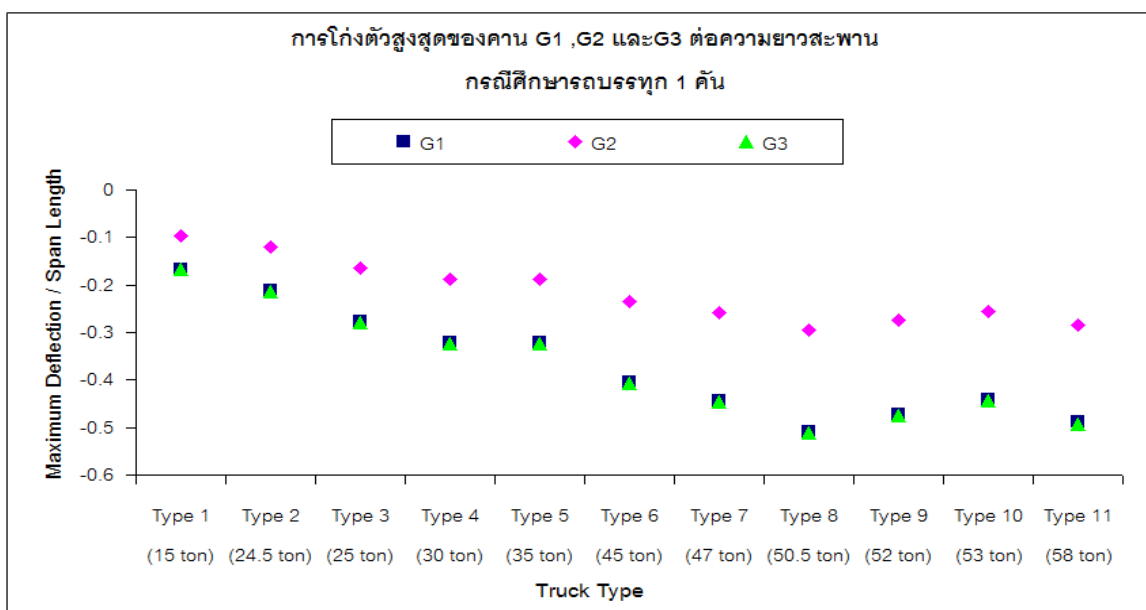


ภาพที่ 6.10 แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ
ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

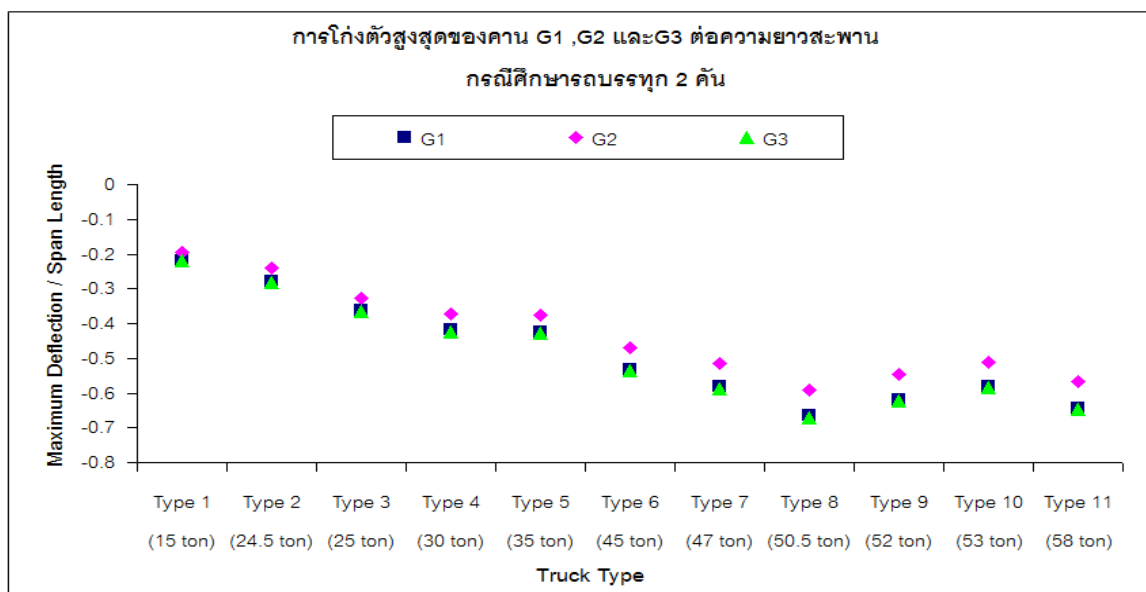


ภาพที่ 6.11 แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ
ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

จากผลการผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และG3 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่าคานวิกฤติที่ให้ค่าการโก่งตัวสูงสุด คือ คาน G3 ซึ่งรถบรรทุกประเภทที่ 8 คือ รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ เป็นรถบรรทุกวิกฤติที่ให้ค่าการโก่งตัวสูงสุด และผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 ต่อความยาวของสะพาน ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังภาพที่ 6.12(a) และ 6.12(b) ตามลำดับ



(a) กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

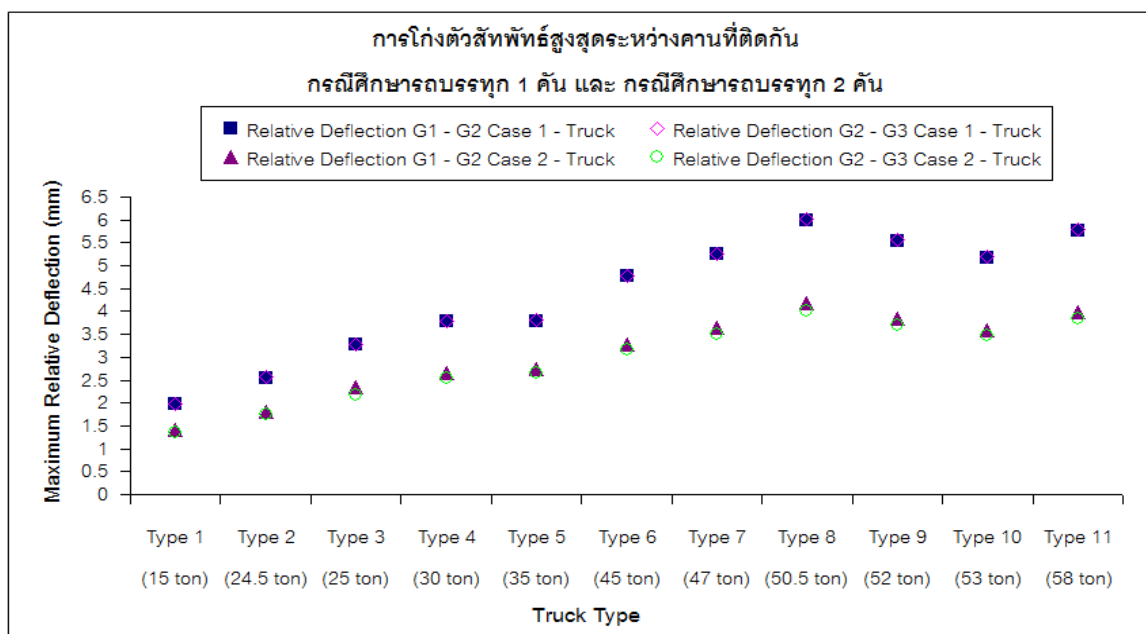


(b) กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

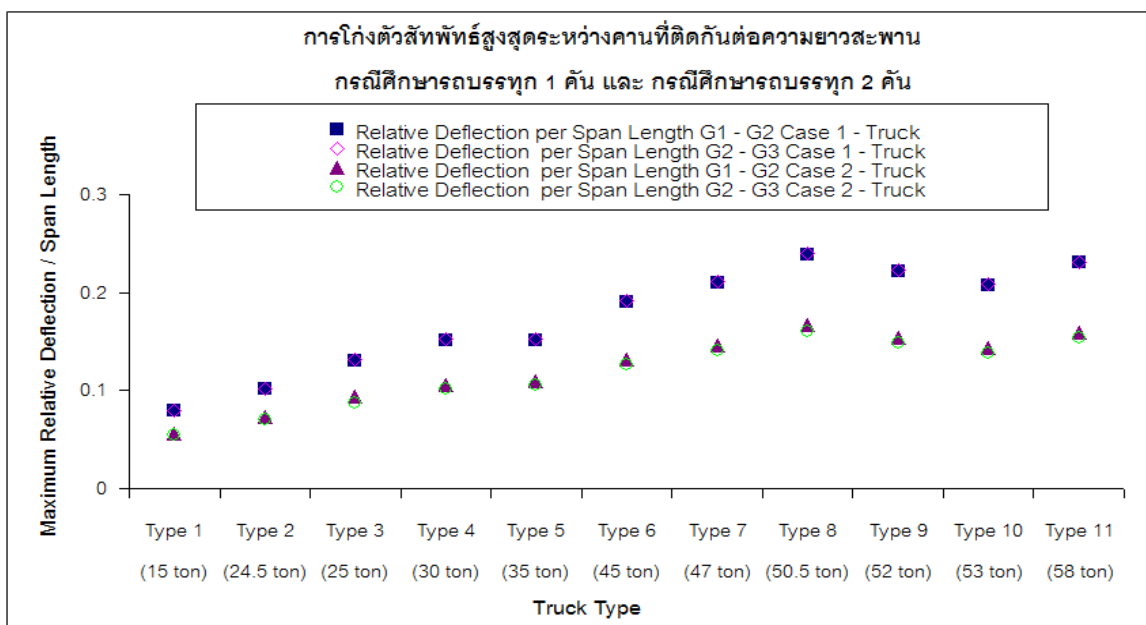
ภาพที่ 6.12 แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1 ,G2 และ G3 ต่อความยาวของสะพาน

6.1.4 การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ใกล้เคียง

ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวและแนวขวาง ของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน แสดงดังภาพที่ 6.13 และการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 ต่อหน่วยความยาว แสดงดังภาพที่ 6.14



ภาพที่ 6.13 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน



ภาพที่ 6.14 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันต่อความยาวสะพาน

จากผลการวิเคราะห์การโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันที่ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวและแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน พบว่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 สูงกว่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 เล็กน้อย โดยที่รถบรรทุกวิกฤติที่ให้ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุด คือ รถบรรทุกประเภทที่ 8 คือ รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน กับ กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่ากรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันสูงกว่าในทุกประเภทรถบรรทุกโดยเฉลี่ยประมาณ 31.25 %

6.2 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง

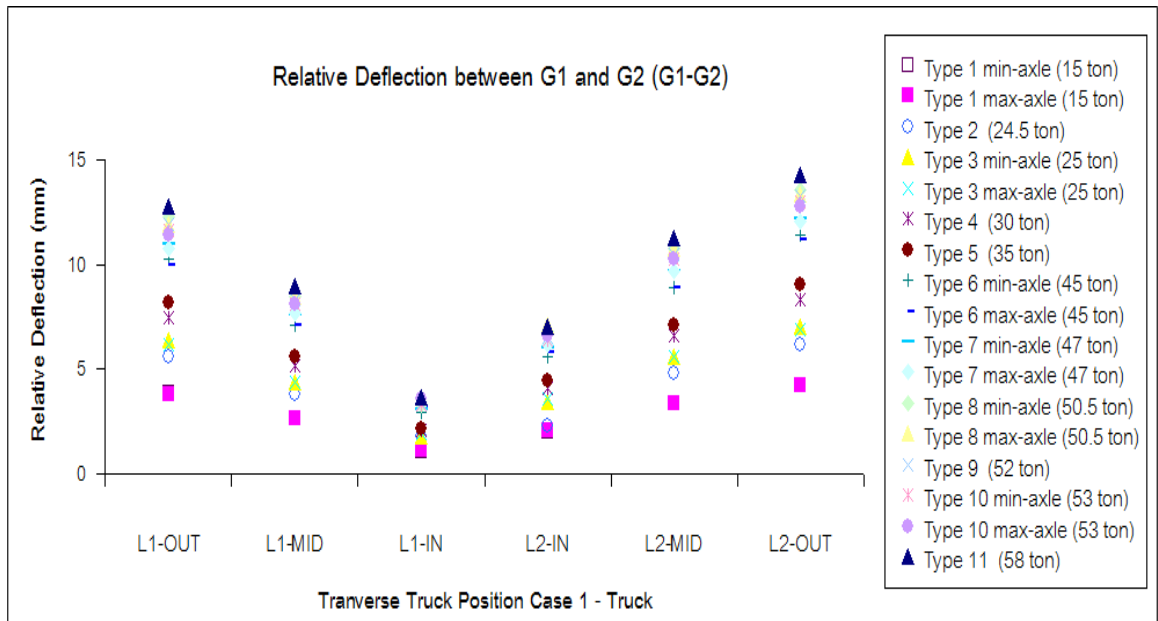
ในการหาค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน ในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง ที่ประกอบด้วย 4 คาน คือ คาน G1 ,G2 ,G3 และG4 ซึ่งจะพิจารณาค่าการโค้งตัวสูงสุดในแต่ละคาน และการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 ,G2 กับ G3 และG3 กับ G4 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์จะแสดงเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

6.2.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว

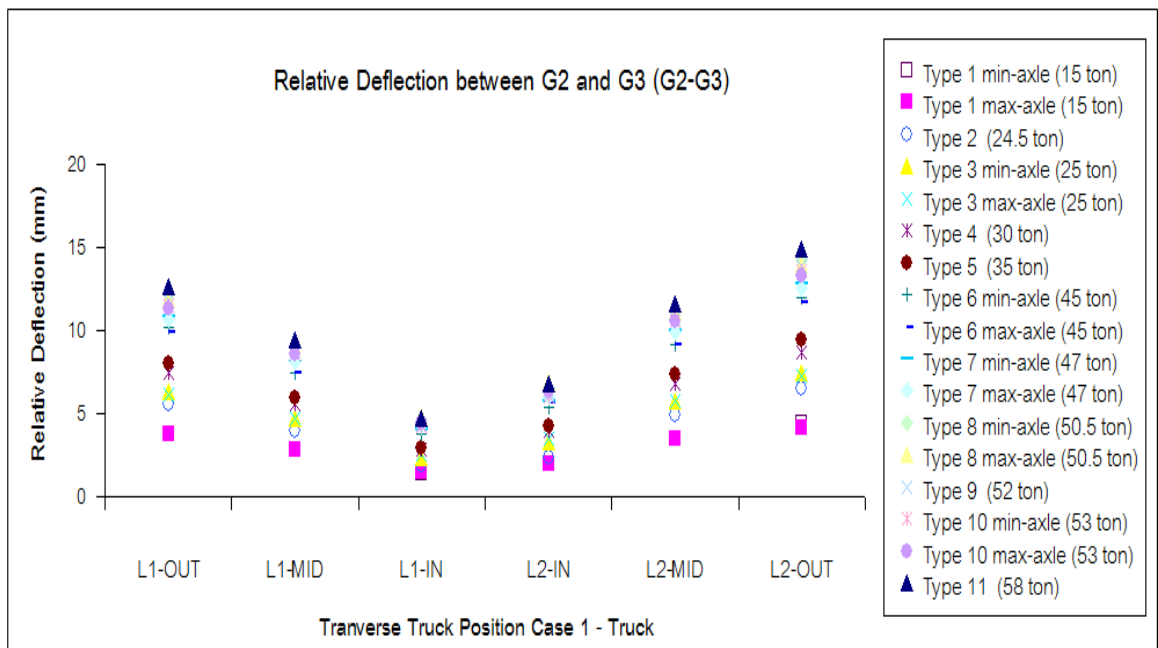
ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง จะพิจารณาตามผลการวิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวจากแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุลในหัวข้อที่ 6.1.1 ซึ่งพบว่าตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวที่ให้ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน คือตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ดังนั้นในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงค์สว่างจะพิจารณาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวเช่นเดียวกับแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

6.2.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง

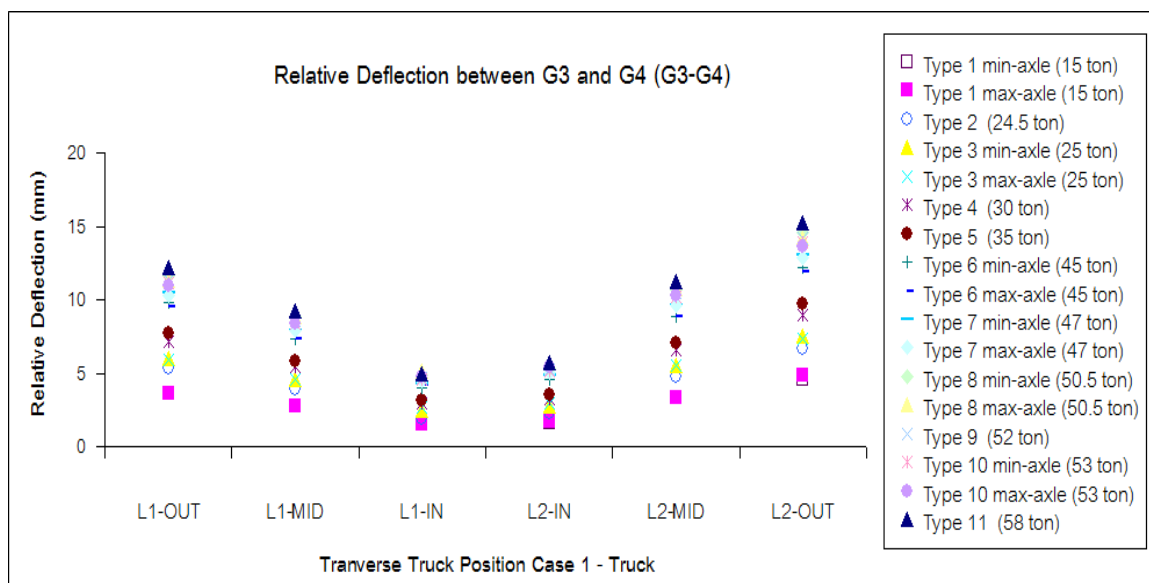
ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และG3 กับ G4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงดังภาพที่ 6.15–6.17



ภาพที่ 6.15 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



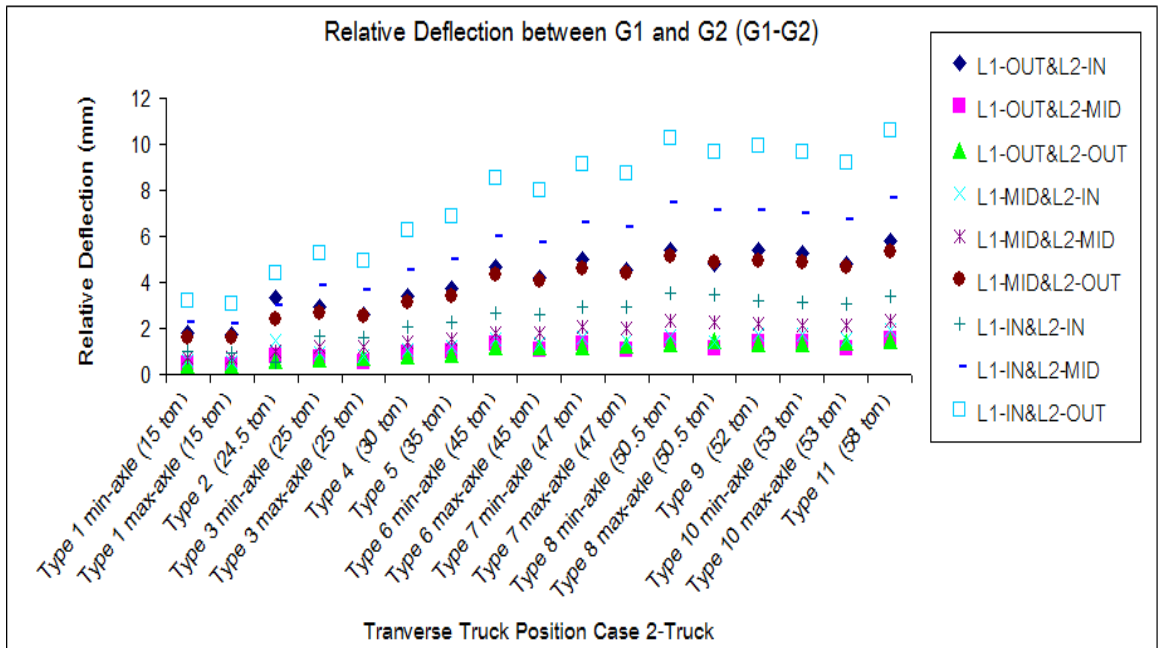
ภาพที่ 6.16 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



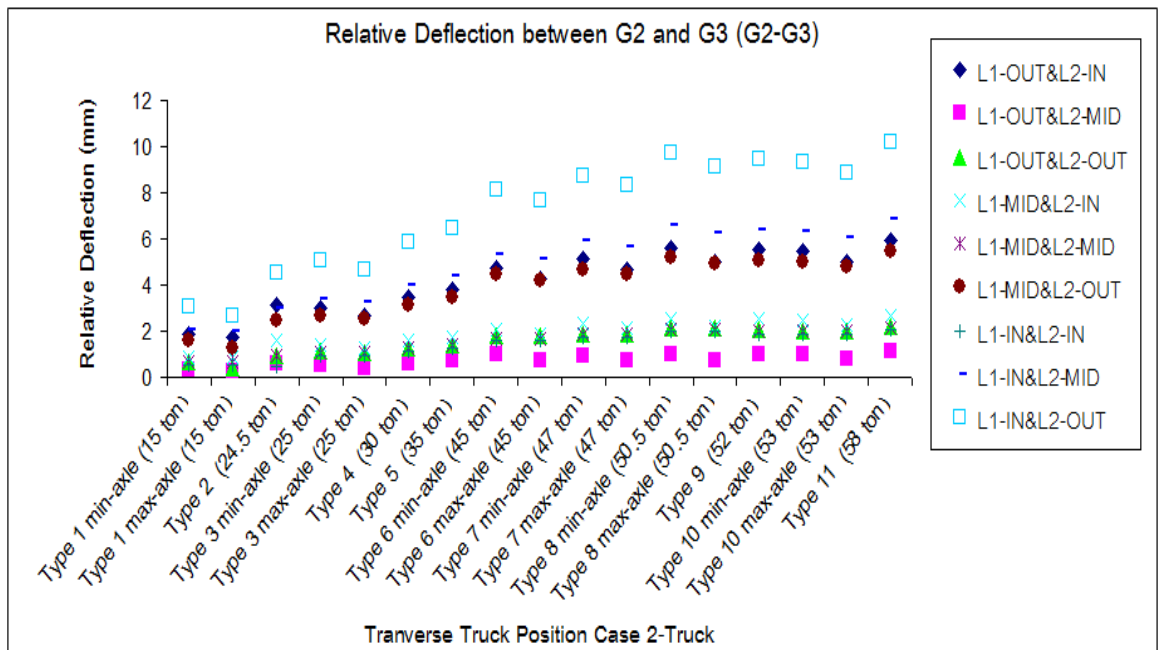
ภาพที่ 6.17 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G3 กับ G4 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

จากผลการผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และ G3 กับ G4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน สามารถสรุปได้ดังนี้

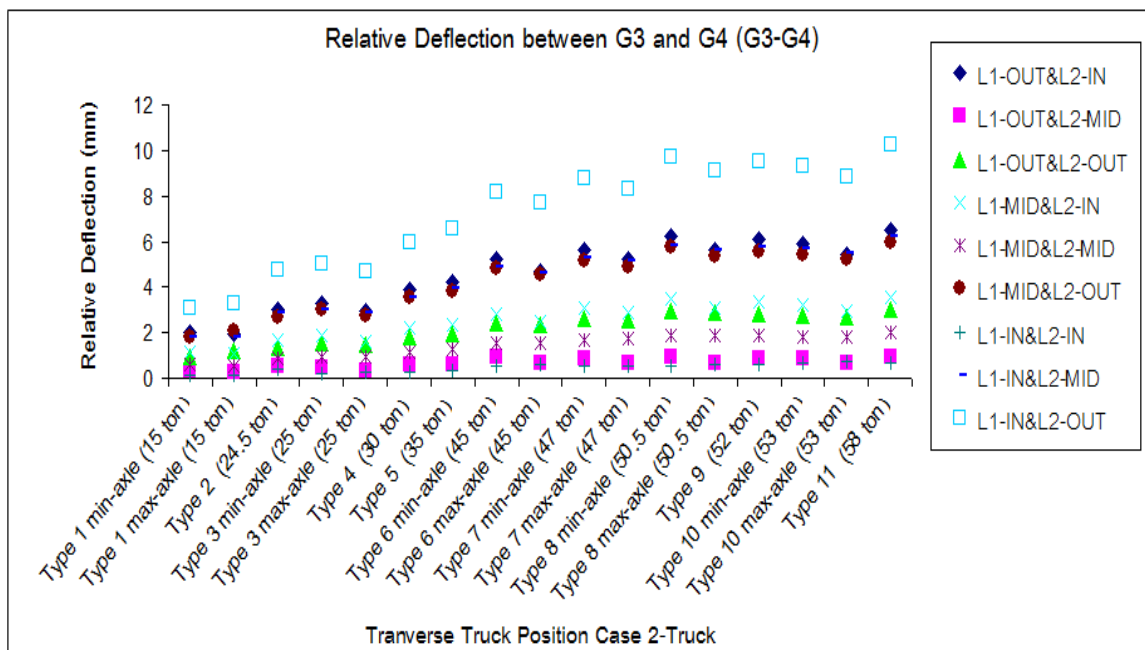
- ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และ G3 กับ G4 เกิดที่ตำแหน่ง L2-OUT ทั้งหมด ในทุกประเภทรถบรรทุก
- รถบรรทุกในทุกประเภทที่มีค่าความกว้างของล้อตามแนวขวางค่าน้อย (min axle) จะให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน มากกว่า ค่าความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางค่ามาก (max axle) เฉลี่ยประมาณ 2.14 % ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลจากความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางยังมีความกว้างน้อยจะยิ่งทำให้การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันมากยิ่งขึ้น จากผลการวิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน จะใช้เป็นตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน โดยการรวมผลค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันเมื่อรถบรรทุกทั้ง 2 คัน อยู่บนเลนทั้งสองเลน แสดงดังภาพที่ 6.18- 6.20



ภาพที่ 6.18 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคน G1 กับ G2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน



ภาพที่ 6.19 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคน G2 กับ G3 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน



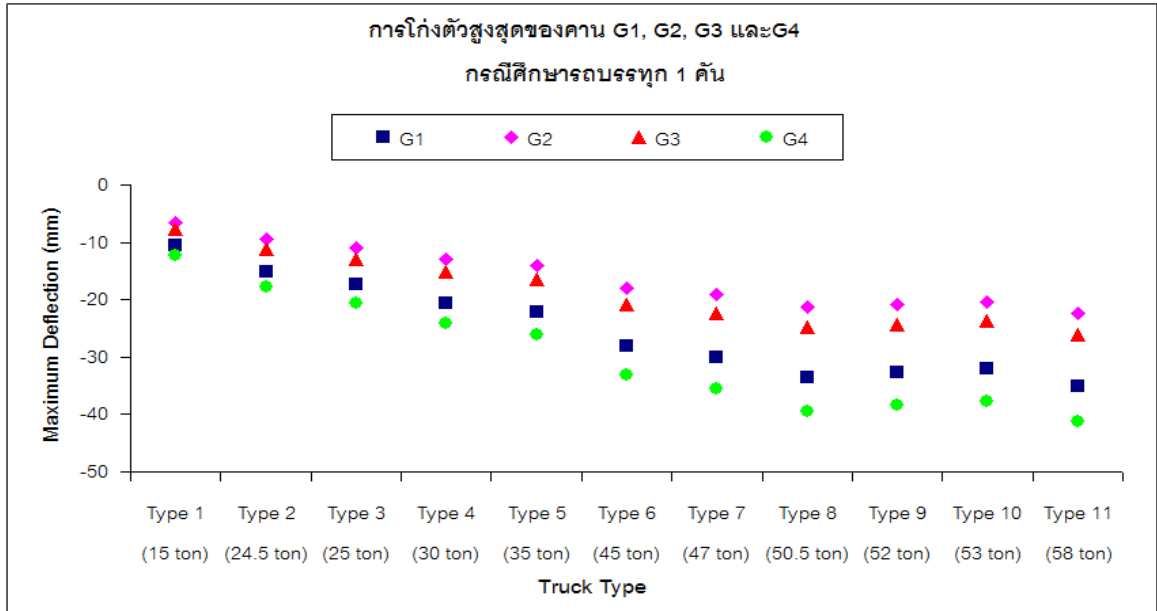
ภาพที่ 6.20 ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G3 กับ G4 ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

ผลค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่าตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และ G3 กับ G4 ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน เกิดที่ตำแหน่ง L1-IN กับ L2-OUT ทั้งหมด ในทุกประเภทรถบรรทุก

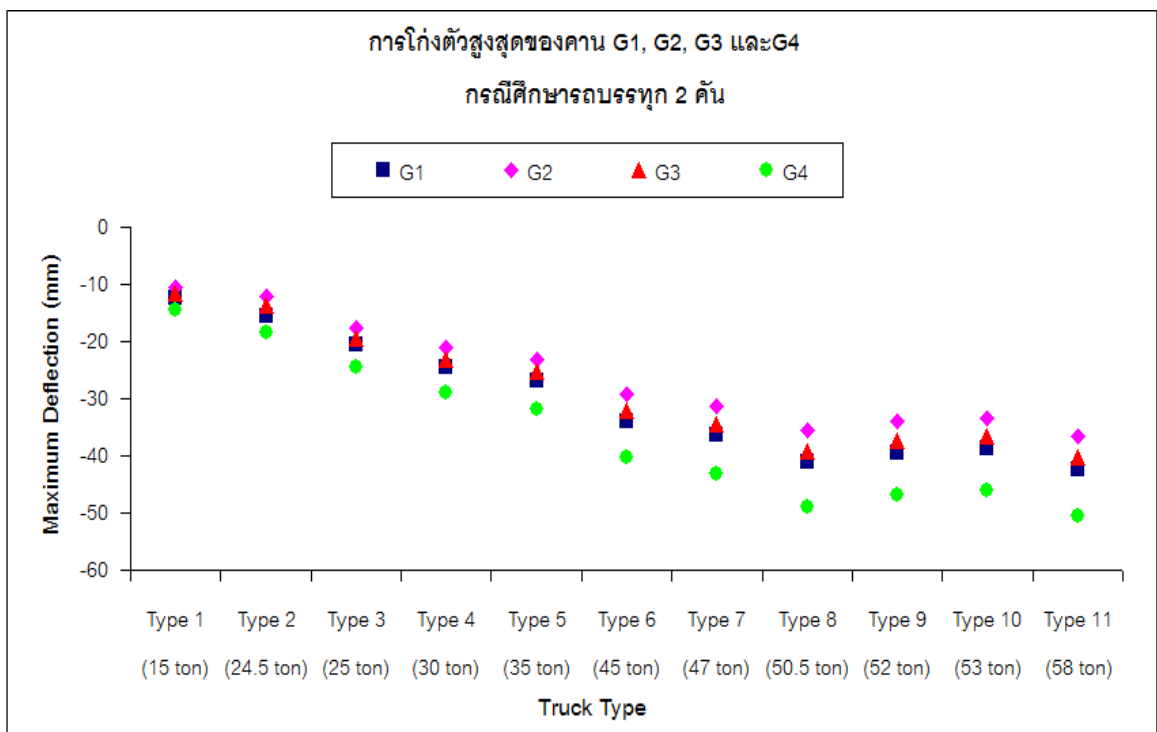
6.2.3 การโก่งตัวสูงสุดของคาน

ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 ที่ตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวยาวและตามแนวขวาง จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงดังรูปที่ 6.21 โดยตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 คือ L1-OUT, L1-OUT, L2-OUT และ L2-OUT ตามลำดับ และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังรูปที่ 6.22 โดยตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 คือ L1-OUT & L2-IN, L1-OUT & L2-IN, L1-IN & L2-OUT และ L1-IN & L2-OUT ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2 และ G3 ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน คือตำแหน่งเดียวกับกับตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1, G2 และ

G3 ดังนั้นสรุปได้ว่าตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ สอดคล้องกับตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุด

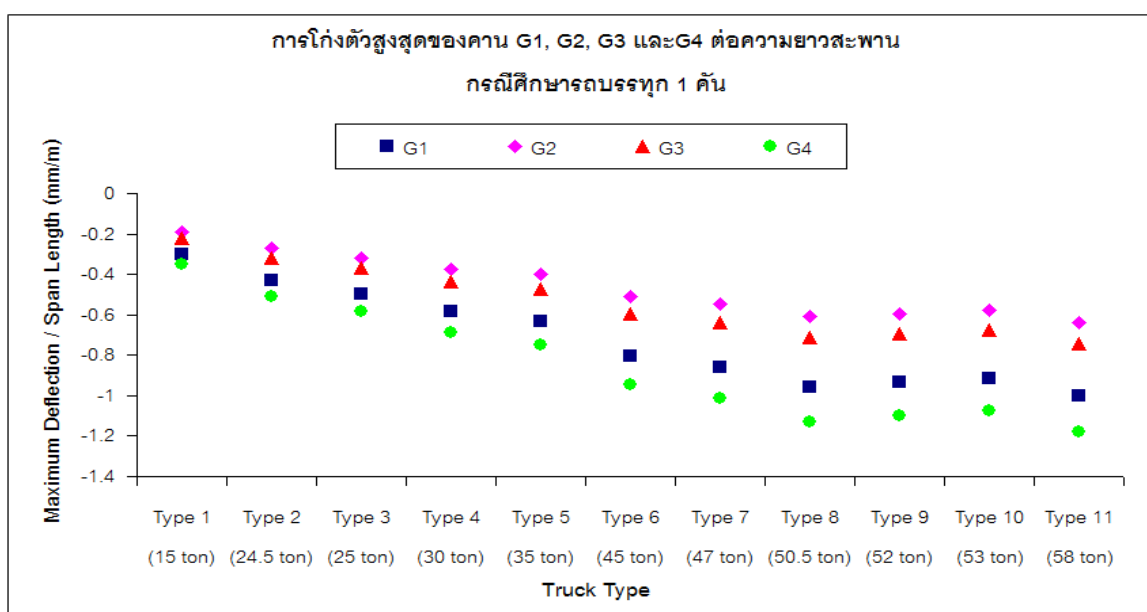


ภาพที่ 6.21 แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

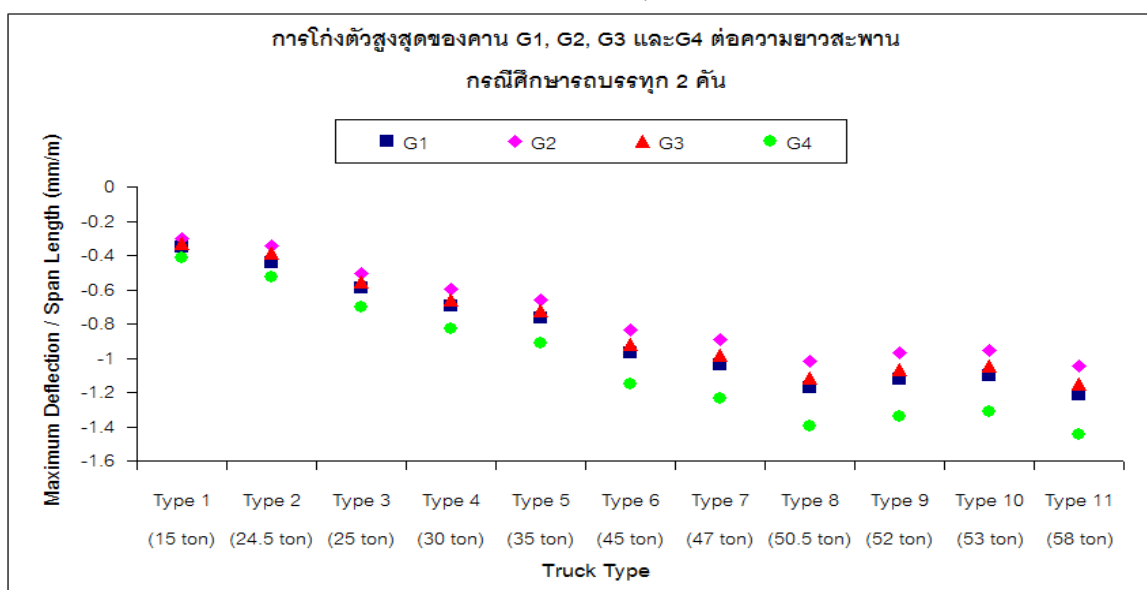


ภาพที่ 6.22 แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

จากผลการผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และG4 จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่าคานวิกฤติที่ให้ค่าการโก่งตัวสูงสุด คือ คาน G4 ซึ่งรถบรรทุกประเภทที่ 11 คือ รถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ เป็นรถบรรทุกวิกฤติที่ให้ค่าการโก่งตัวสูงสุด และผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และG4 ต่อความยาวของสะพาน ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน แสดงดังภาพที่ 6.23 (a) และ 6.23 (b) ตามลำดับ



(a) กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

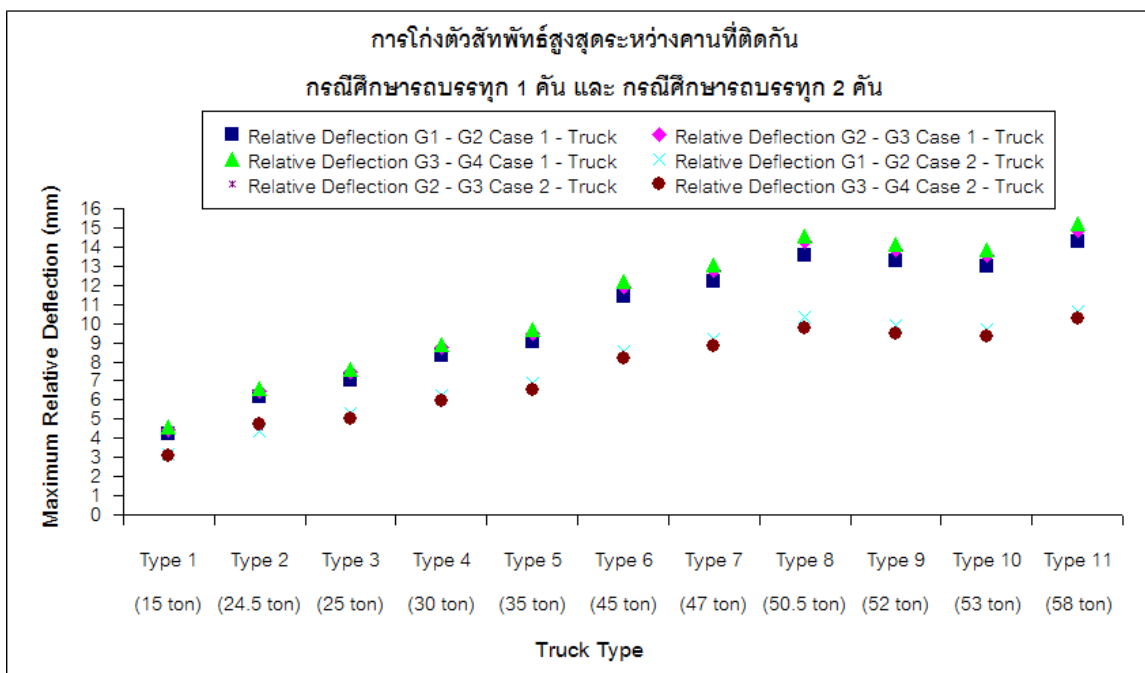


(b) กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

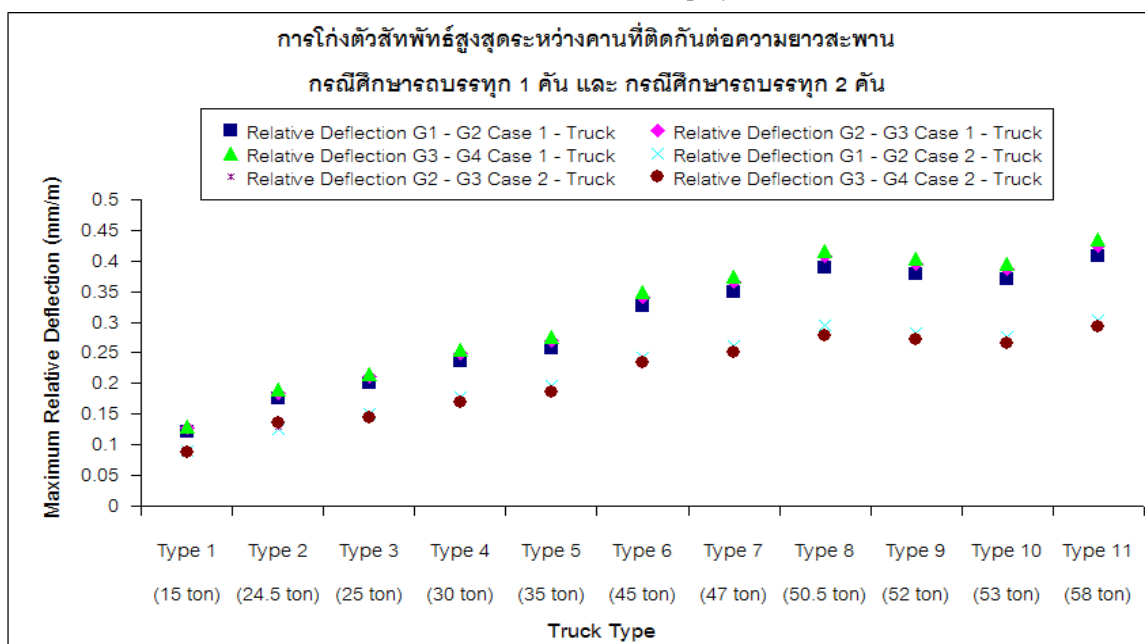
ภาพที่ 6.23 แสดงการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และG4 ต่อความยาวของสะพาน

6.2.4 การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ใกล้เคียง

ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และ G3 กับ G4 ที่ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวและแนวขวาง ของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน แสดงดังรูปที่ 6.24 และการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และ G3 กับ G4 ต่อหน่วยความยาว แสดงดังภาพที่ 6.25



ภาพที่ 6.24 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน



ภาพที่ 6.25 ผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันต่อความยาวสะพาน

จากผลการวิเคราะห์การโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันที่ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวและแนวขวางในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน พบว่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G3 กับ G4 สูงกว่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และ G2 กับ G3 เล็กน้อย โดยที่รถบรรทุกวิกฤติที่ให้ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุด คือ รถบรรทุกประเภทที่ 11 คือรถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ และเมื่อเปรียบเทียบกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน กับ กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่ากรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าการโค้งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันสูงกว่าในทุกประเภทรถบรรทุกโดยเฉลี่ยประมาณ 29.8 %

บทที่ 7

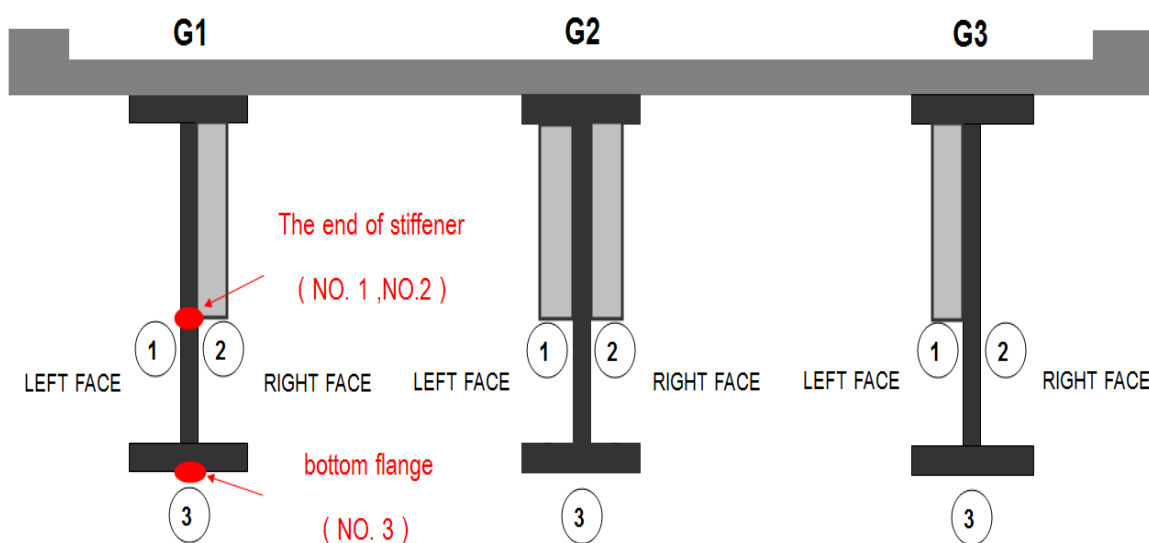
การวิเคราะห์และอภิปรายผล หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบในบริเวณ web gap และอายุความล้าของสะพาน

การวิเคราะห์หน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap จะพิจารณาใช้แบบจำลองสะพานที่ได้มีการแบ่งชิ้นส่วนย่อยในบริเวณ web gap ซึ่งแสดงรายละเอียดในการหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ในหัวข้อที่ 4.3 ในการกำหนดตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางของรถบรรทุกจะใช้ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวางที่ทำให้เกิดค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันในการวิเคราะห์เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมา Fisher และคณะ (1990) พบว่าเมื่อสะพานเกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงก็จะมีผลให้เกิดหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของบริเวณ web gap สูงเช่นกัน โดยที่พิจารณาเฉพาะกรณีศึกษาบรรทุกทุก 1 คันเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากผลการวิเคราะห์การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันในกรณีศึกษาบรรทุกทุก 1 คัน ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันมากกว่าในกรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน ทั้ง 2 รูปแบบสะพาน ดังหัวข้อที่ 6.1.4 และ 6.2.4 และในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap จะกำหนดตำแหน่งของบริเวณ web gap ที่ปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน เนื่องจากผลการกระจายหน่วยแรงบริเวณ web gap โดยใช้รถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ในหัวข้อที่ 4.4 พบว่าหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap เกิดที่ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ซึ่งตรงกับผลการศึกษาของ Fisher (1978) และ Y. Edward Zhou (2006) ผลการวิเคราะห์ตัวคูณการหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบในบริเวณ web gap และอายุความล้าของสะพานของสะพานในแต่ละแบบจำลองสะพานจะแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

7.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

จากการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยในบริเวณ web gap ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล ในหัวข้อที่ 4.4.1 เพื่อนำแบบจำลองที่เหมาะสมในการการวิเคราะห์หน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap พบว่าในแบบจำลองแบบที่ 7 Mesh Type F

ให้ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบทั้งหน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึง ค่อนข้างจะคงที่ แล้วเมื่อเทียบกับแบบที่ 8 Mesh Type G ถึงแม้จำนวนชิ้นส่วนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ดังนั้นจึงพิจารณาแบบจำลองแบบที่ 7 Mesh Type F ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบ สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท การกำหนดตำแหน่งในการแสดงผลวิเคราะห์หน่วยแรงของคาน G1 ,G2 และ G3 พิจารณากำหนด 3 ตำแหน่งสำคัญ คือ ตำแหน่งที่ 1 (No.1) คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ที่ผิวด้านซ้ายของแผ่นเอว ตำแหน่งที่ 2 (No.2) คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ที่ผิวด้านขวาของแผ่นเอว และตำแหน่งที่ 3 (No.3) คือ ตำแหน่งด้านล่างของชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน โดยที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นตำแหน่งในการอ่านผลของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบในทิศทางแนวตั้ง (vertical stress) ตามระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วน ณ ตำแหน่งนั้น และตำแหน่งที่ 3 เป็นตำแหน่งในการอ่านผลของหน่วยแรงในระนาบในทิศทางแนวราบ (horizontal stress) ตามระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วน ณ ตำแหน่งนั้น แสดงการกำหนดตำแหน่งในการแสดงผลวิเคราะห์หน่วยแรง ดังภาพที่ 7.1

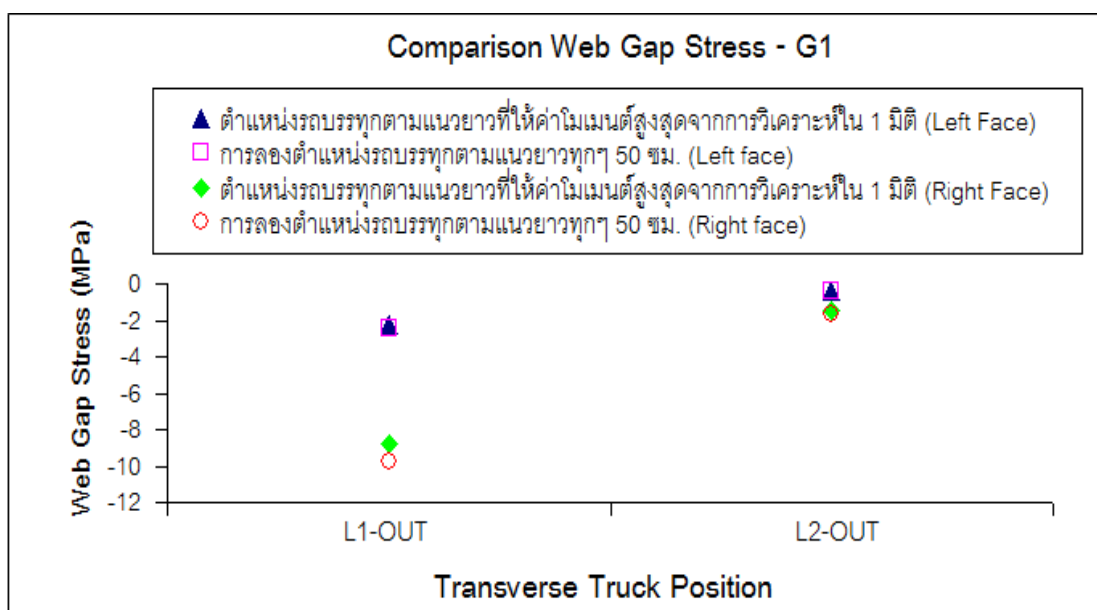


ภาพที่ 7.1 แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรง ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล

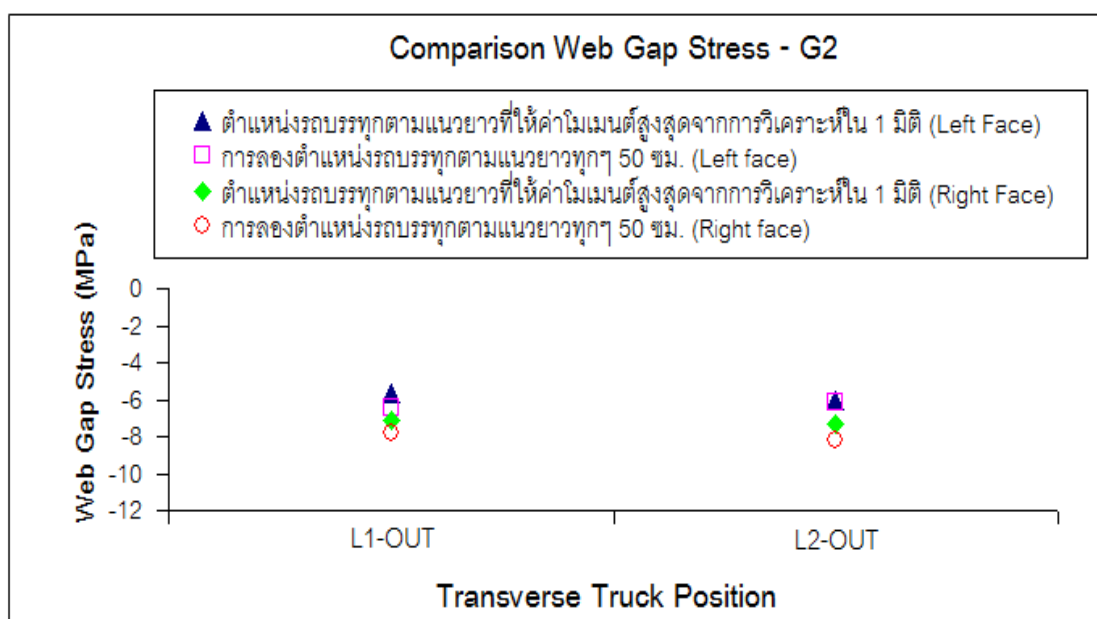
7.1.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว

การหาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวที่ให้ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1 ,G2 และ G3 ที่กึ่งกลางสะพานโดยตั้งสมมติฐานว่า ตำแหน่งตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติเป็นตำแหน่งที่ให้ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G1, G2 และ G3 สูงสุด ซึ่งจะทดลองพิจารณาการวางรถบรรทุก 1 คัน ณ ตำแหน่งตามแนวขวาง 2 ตำแหน่ง ที่ให้ผลการโก่งตัวสัมพันธ์ระหว่างคานที่

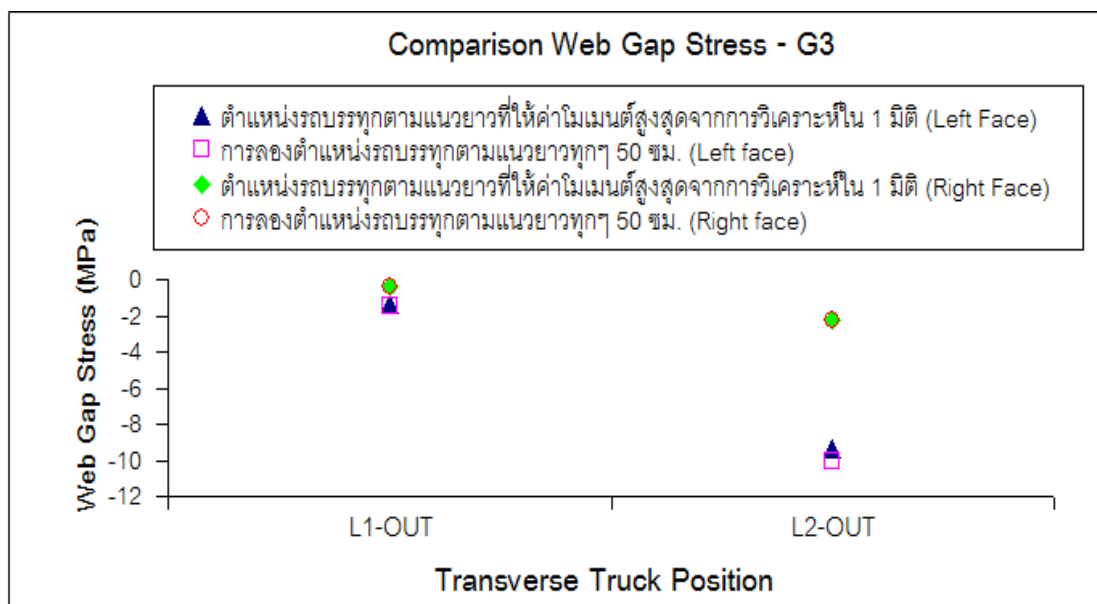
ติดกันสูงสุด โดยกำหนดให้รถบรรทุกทุกตามมาตรฐาน AASHTO เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ และ กำหนดการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. ตลอดจนความยาวสะพาน ซึ่งจะ แสดงผลการเปรียบเทียบผลค่าน้อยแรงจากจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. กับ ตำแหน่งรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 เมตร ที่ตำแหน่งปลายแผ่น เหล็กเสริมข้างคานในบริเวณ web gap (ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2) ดังภาพที่ 7.2 – 7.4



ภาพที่ 7.2 การเปรียบเทียบค่าน้อยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G1



ภาพที่ 7.3 การเปรียบเทียบค่าน้อยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G2



ภาพที่ 7.4 การเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบของคาน G3

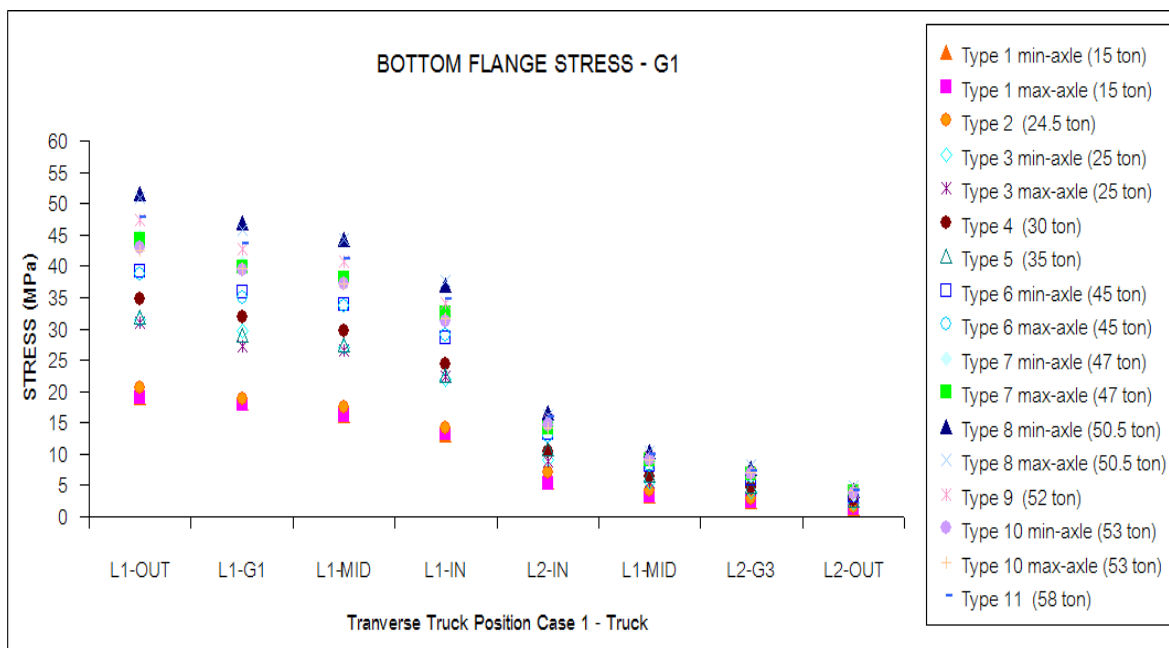
จากผลที่ได้พบว่าค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ web gap ของคาน G1 ,G2 และ G3 โดยเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 เมตร และตำแหน่งตามแนวยาวจากการวางรถบรรทุกตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. พบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากโดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้

- ที่ผิวด้านซ้ายของชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน G1 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 7.89 %
- ที่ผิวด้านขวาของชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน G1 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 9.69 %
- ที่ผิวด้านซ้ายของชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน G2 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.86 %
- ที่ผิวด้านขวาของชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน G2 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 9.97 %
- ที่ผิวด้านซ้ายของชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน G3 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.6 %
- ที่ผิวด้านขวาของชิ้นส่วนแผ่นเอวของคาน G3 มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.22 %

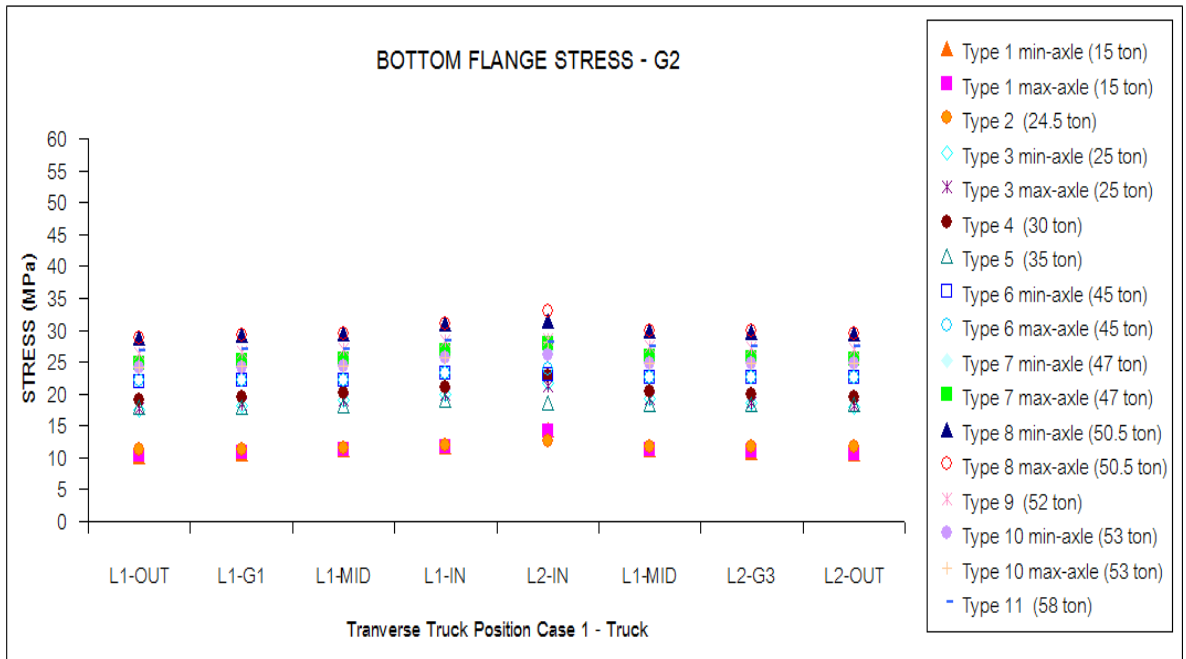
จากผลที่ได้พบว่าค่าหน่วยแรงจากการลองตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวทุกๆ 50 ซม. กับ ตำแหน่งรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 เมตร ในแต่ละคานโดยเฉลี่ยไม่เกิน 10 % ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งวิกฤติตามแนวยาวของรถบรรทุกจะพิจารณาตำแหน่งรถบรรทุกที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 เมตร ในการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap

7.1.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง

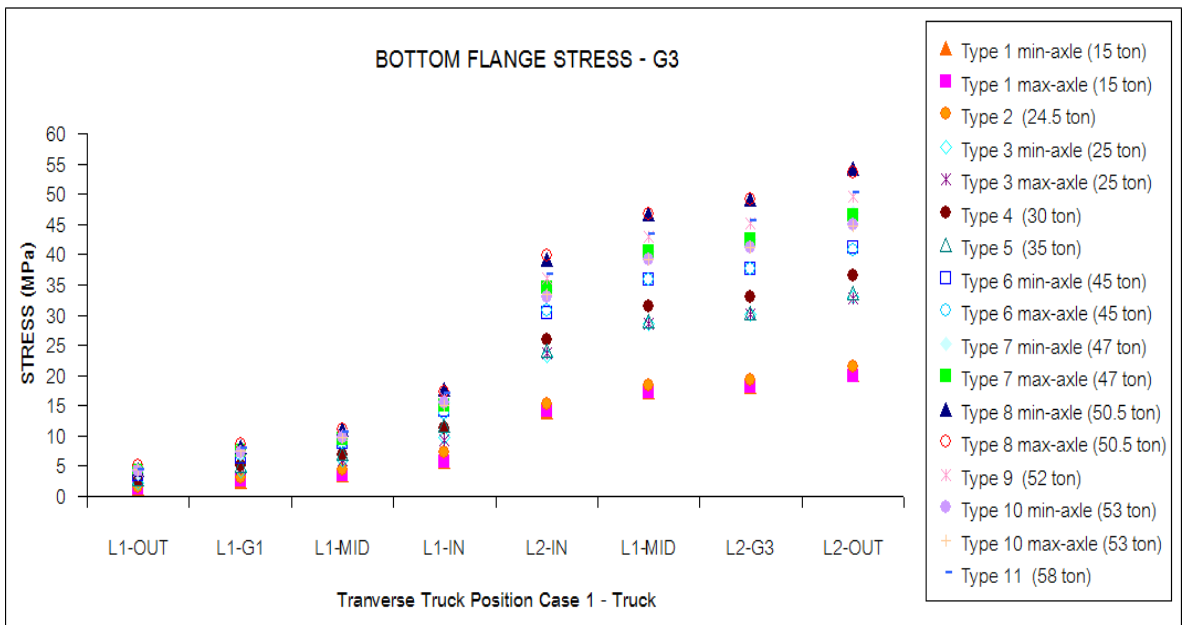
การกำหนดตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางในการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap สูงสุด ถูกกำหนดตามตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงสุด คือ ตำแหน่ง L1-OUT สำหรับการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G1 กับ G2 และตำแหน่ง L2-OUT สำหรับการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคาน G2 กับ G3 โดยพิจารณาเฉพาะกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คันเท่านั้น และในการหาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางในการวิเคราะห์หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 และ G3 ที่กึ่งกลางสะพาน จากรถบรรทุกในทุกประเภท เฉพาะกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 7.5 - 7.7 ซึ่งพบว่าตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ให้ค่าหน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 และ G3 คือ ตำแหน่ง L1-OUT, L2-IN และ L2-OUT ตามลำดับ และรถบรรทุกในทุกประเภทที่มีค่าความกว้างของล้อตามแนวขวางค่าน้อย (min axle) จะให้ค่า มากกว่า ค่าความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางค่ามาก (max axle) เฉลี่ยประมาณ 1.2 %



ภาพที่ 7.5 หน่วยแรงในระนาบของคาน G1 บริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



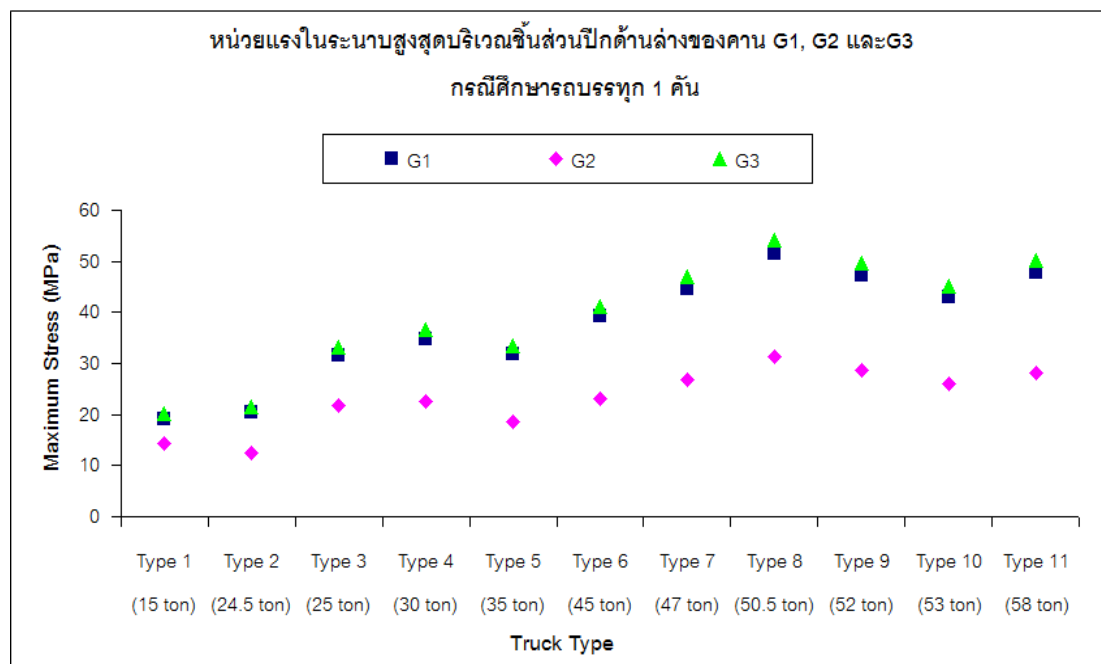
ภาพที่ 7.6 หน่วยแรงในระนาบของคาน G2 บริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 7.7 หน่วยแรงในระนาบของคาน G3 บริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

7.1.3 หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน

ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 และ G3 ที่ตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวยาวและตามแนวขวาง จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงดังภาพที่ 7.8



ภาพที่ 7.8 หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 และ G3

ของรถบรรทุกแต่ละประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

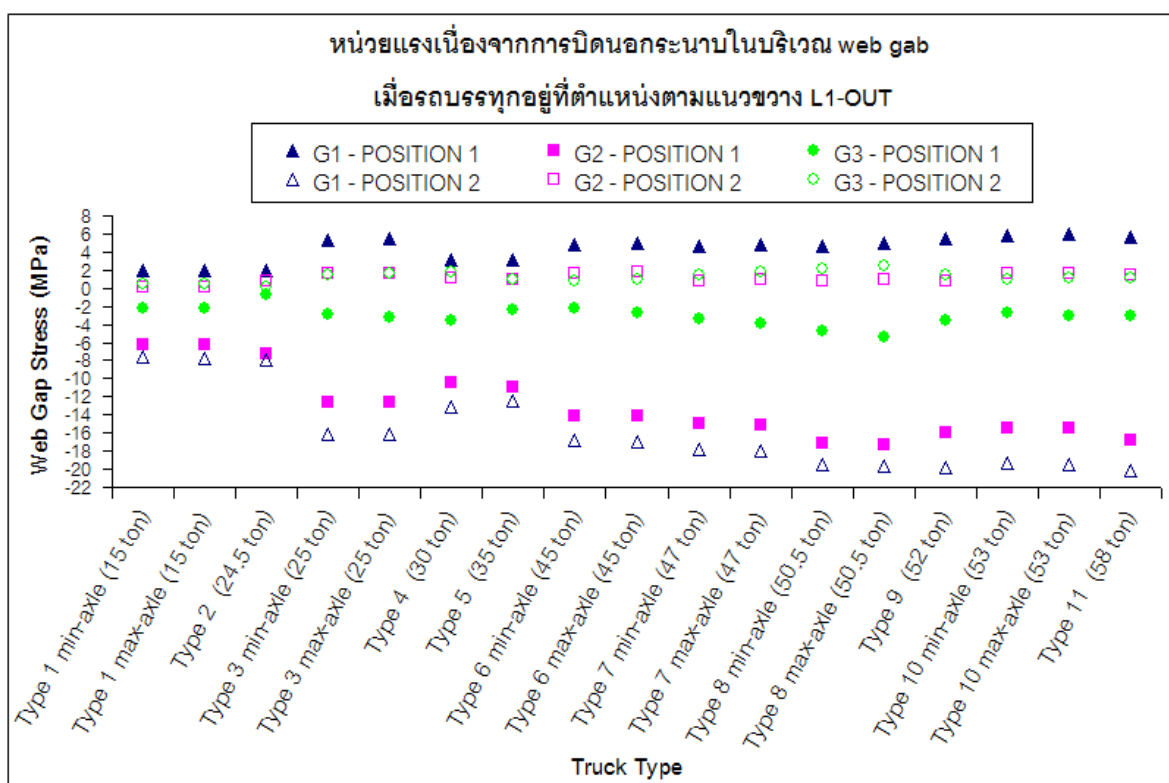
จากผลการวิเคราะห์พบว่า พบว่าคานวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงในระนาบสูงสุดซึ่งเป็นหน่วยแรงดึง (tensile stress) คือ คาน G3 ซึ่งรถบรรทุกประเภทที่ 8 คือ รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ เป็นรถบรรทุกวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่กึ่งกลางสะพาน ซึ่งตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดหน่วยแรงในระนาบสูงสุดของคาน G1, G2 และ G3 ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน คือตำแหน่งเดียวกับกับตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1, G2 และ G3 และตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G1, G2 และ G3

7.1.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap

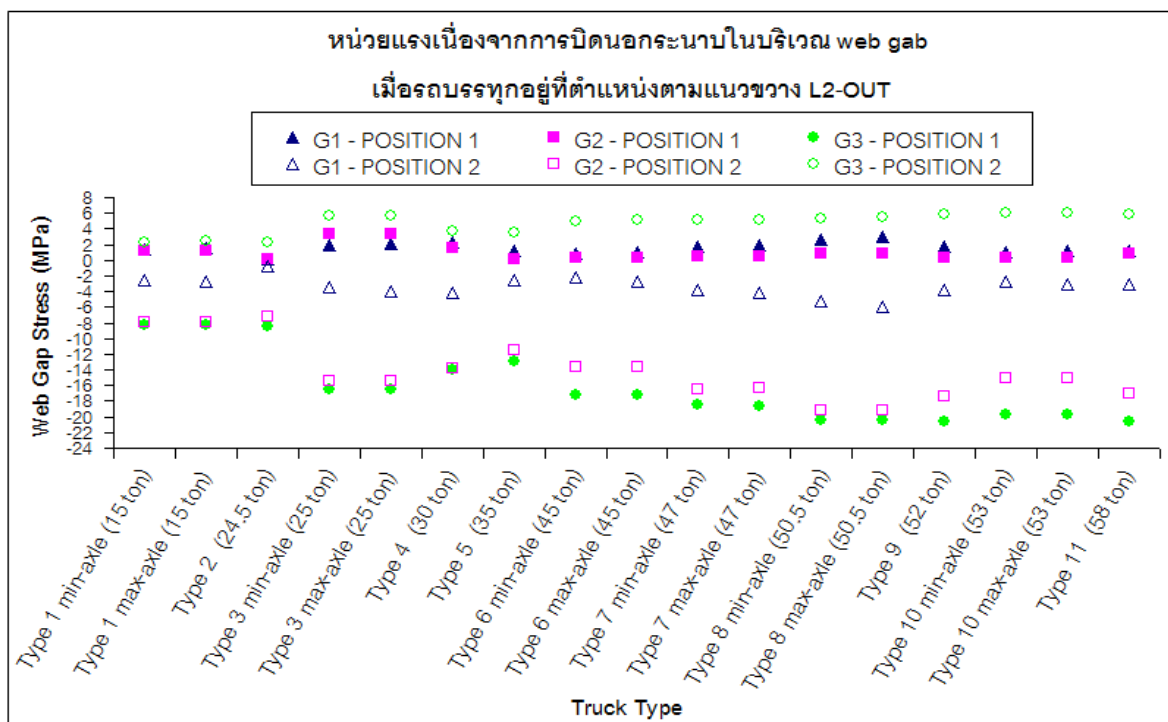
ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1, G2 และ G3 สำหรับรถบรรทุกประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน โดยพิจารณาตำแหน่งตามแนวขวาง 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง L2-OUT และตำแหน่ง L1-OUT ซึ่งทั้งสองตำแหน่งนี้เป็น

ตำแหน่งที่มีผลทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงสุดดังนั้นในการพิจารณาค่าหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap จึงใช้ 2 ตำแหน่งนี้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ตำแหน่งผิวด้านซ้ายของแผ่นเอว (ตำแหน่งที่1) และตำแหน่งผิวด้านขวาแผ่นเอว (ตำแหน่งที่2) แสดงดังภาพที่ 7.9 และ 7.10

จากผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap พบว่าที่ได้พบว่าตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวาง L2-OUT เป็นตำแหน่งวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุด โดยที่คานวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดคือ คาน G3 โดยที่หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่ผิวด้านซ้ายของแผ่นเอว (ตำแหน่งที่1) และหน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่ผิวด้านขวาของแผ่นเอว (ตำแหน่งที่2) โดยรถบรรทุกที่ให้ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุด คือ รถบรรทุกประเภทที่ 11 คือ รถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ เท่ากับ 20.67 MPa สำหรับหน่วยแรงดึงสูงสุดในแต่ละประเภทรถบรรทุกให้ค่าหน่วยแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งรถบรรทุกที่ให้ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด คือ รถบรรทุกประเภทที่ 10 คือ รถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ เท่ากับ 6.08 MPa โดยที่รถบรรทุกที่มีความกว้างตามแนวขวางค่ามาก (max-axle) ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงกว่ารถบรรทุกที่มีความกว้างตามแนวขวางค่าน้อย (min-axle) โดยเฉลี่ยประมาณ 1.1 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7.9 แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1, G2 และ G3 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT

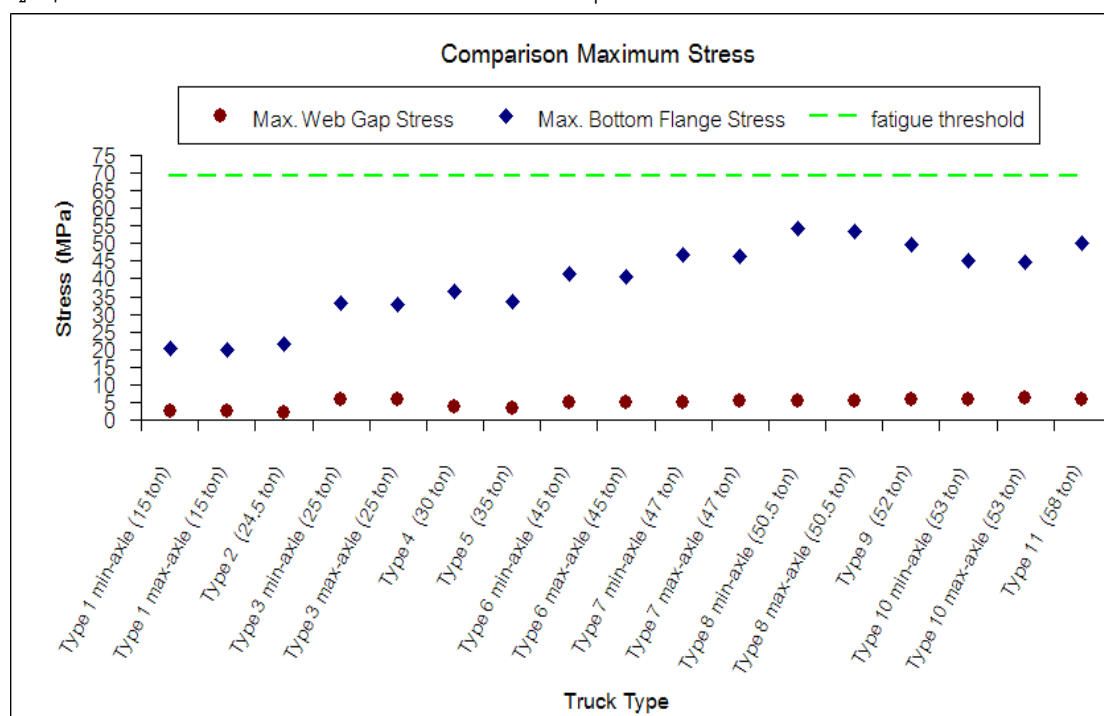


ภาพที่ 7.10 แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1, G2 และ G3 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT

7.1.5 อายุความล้าของสะพาน

การวิเคราะห์อายุความล้าของสะพานจะเปรียบเทียบผลของหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานที่ตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางและตามแนวยาวของรถบรรทุกประเภทต่างๆ เฉพาะในการศึกษากรณีรถบรรทุก 1 คัน ที่มีต่ออายุความล้าของสะพานเหล็ก ในการประเมินอายุความล้าของสะพานข้ามแยกประชานุกุลในงานวิจัยประเมินโดยใช้สมการของกราฟ S - N ที่อ้างอิงมาจากข้อกำหนดกรมทางหลวงของประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO LRFD 2007) ดังสมการที่ 3.1 และหาอายุความล้าจากสมการที่ 3.5 โดยพิจารณาประเภทรอยต่อของชิ้นส่วนประเภท C (category C) ในการประเมินอายุความล้า ประเภทรอยต่อประเภท C มีความหมายว่าเกิดการพังที่ตำแหน่งแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ซึ่งมีค่าคงที่ของประเภทรอยต่อเชื่อม (A) เท่ากับ $14.4 \times 10^{11} \text{ MPa}^3$ และค่าช่วงความเค้นสำหรับแอมพลิจูดของหน่วยแรงคงที่ที่ขีดจำกัดความล้า (constant amplitude fatigue threshold) เท่ากับ 69 MPa การประเมินอายุความล้าของสะพานเนื่องจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap โดยใช้ กราฟ S - N อ้างอิงจากการศึกษาของ Fisher และคณะ (1990) ที่พบว่าอายุความล้าของรอยต่อเชื่อมบริเวณ

รอยต่อของชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวางกับเอวของคานได้เริ่มต้นเกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณ web gap เกิดขึ้นพร้อมกับ กราฟ S-N ของ AASHTO สำหรับ Category C จากผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน ที่คานวิกฤติ ดังภาพที่ 7.11



ภาพที่ 7.11 ผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน

จากผลการวิเคราะห์พบว่าหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap โดยเฉลี่ยประมาณ 8.5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ขีดจำกัดความล้าพบว่าทั้งหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุด และหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุด มีค่าต่ำกว่าความหน่วยแรงที่ขีดจำกัดความล้า ผลการประเมินอายุความล้าโดยพิจารณาปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยที่แล่นผ่านสะพานเฉลี่ยต่อวันในหนึ่งทิศทาง (ADTT) จากข้อมูลตรวจนับปริมาณจราจรมีค่าเท่ากับ 440 คัน/วัน ซึ่งเป็นข้อมูลจากศูนย์บริการวิชาการจุฬาลงกรณ์สำหรับการตรวจนับปริมาณจราจรของสะพานข้ามแยกประชาชนกุล แสดงดังตารางที่ 7.1

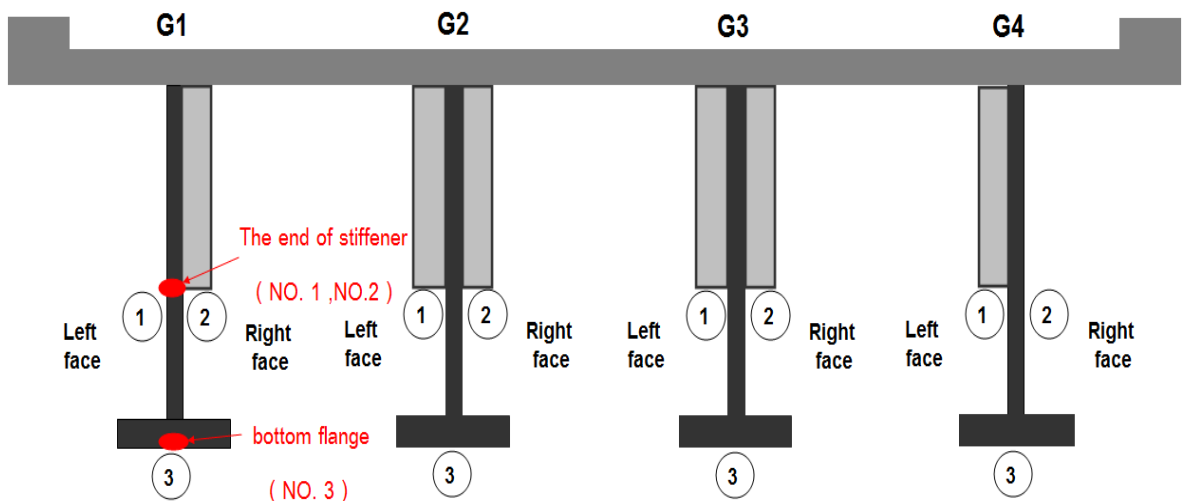
ตารางที่ 7.1 แสดงอายุความล้าของสะพานเนื่องจากหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน และจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap ของสะพานข้ามแยกประชานุกูล

ประเภท รถบรรทุก	อายุความล้าของสะพานเนื่องจาก (ปี)	
	Web Gap Stress	Bottom Flange Stress
Type 1 min-axle (15 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 1 max-axle (15 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 2 (24.5 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 3 min-axle (25 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 3 max-axle (25 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 4 (30 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 5 (35 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 6 min-axle (45 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 6 max-axle (45 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 7 min-axle (47 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 7 max-axle (47 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 8 min-axle (50.5 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 8 max-axle (50.5 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 9 (52 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 10 min-axle (53 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 10 max-axle (53 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 11 (58 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์

จากผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงพบว่าหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน มีค่าหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap และค่าหน่วยแรงมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดความล้าทั้งสองบริเวณดังนั้นสรุปได้ว่าการวิบัติของสะพานเนื่องจากความล้ามีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากโดยที่อายุความล้าจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุด บริเวณ web gap และอายุความล้าจากหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคานของรถบรรทุกในทุกประเภท คือ อายุอนันต์

7.2 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

จากการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนย่อยในบริเวณ web gap ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ในหัวข้อที่ 4.4.2 เพื่อนำแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หน่วยแรงสูงสุด เนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap พบว่าในแบบที่ 6 Mesh Type E ให้ค่าหน่วยแรง เนื่องจากการบิดนอกระนาบทั้งหน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึง ค่อนข้างจะคงที่แล้วเมื่อเทียบกับ แบบที่ 5 Mesh Type D และแบบที่ 4 Mesh Type C ถึงแม้จำนวนชิ้นส่วนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ดังนั้นจึงพิจารณาแบบจำลองแบบที่ 6 Mesh Type E ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการ บิดนอกระนาบ สำหรับบรรจบรถทุกในทุกประเภท การกำหนดตำแหน่งในการแสดงผลวิเคราะห์ หน่วยแรงของคาน G1 ,G2 ,G3 และ G4 พิจารณากำหนด 3 ตำแหน่งสำคัญ คือ ตำแหน่งที่ 1 (No.1) คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ที่ผิวด้านซ้ายของแผ่นเอว ตำแหน่งที่ 2 (No.2) คือ ตำแหน่งปลายชิ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ที่ผิวด้านขวาของแผ่นเอว และตำแหน่ง ที่ 3 (No.3) คือ ตำแหน่งด้านล่างของชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน โดยที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็น ตำแหน่งในการอ่านผลของหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบในทิศทางแนวตั้ง (vertical stress) ตามระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วน ณ ตำแหน่งนั้น และตำแหน่งที่ 3 เป็น ตำแหน่งในการอ่านผลของหน่วยแรงในระนาบในทิศทางแนวราบ (horizontal stress) ตามระบบ โคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วน ณ ตำแหน่งนั้น แสดงการกำหนดตำแหน่งในการแสดงผล วิเคราะห์หน่วยแรง ดังภาพที่ 7.12



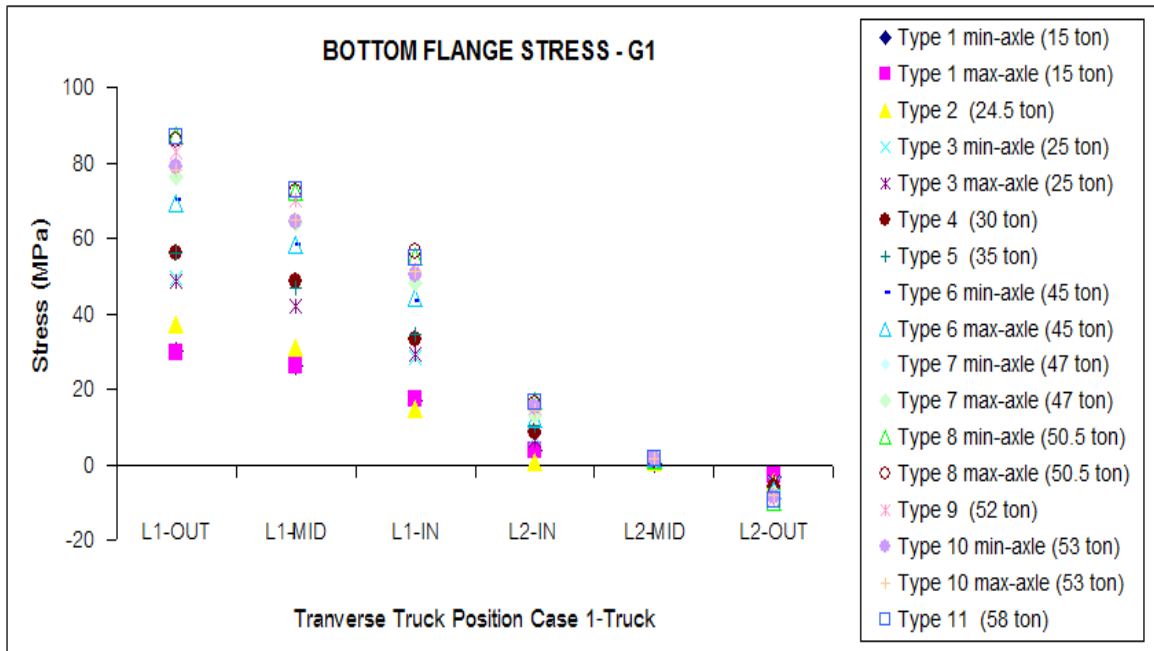
ภาพที่ 7.12 แสดงตำแหน่งในการอ่านผลหน่วยแรงของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

7.2.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาว

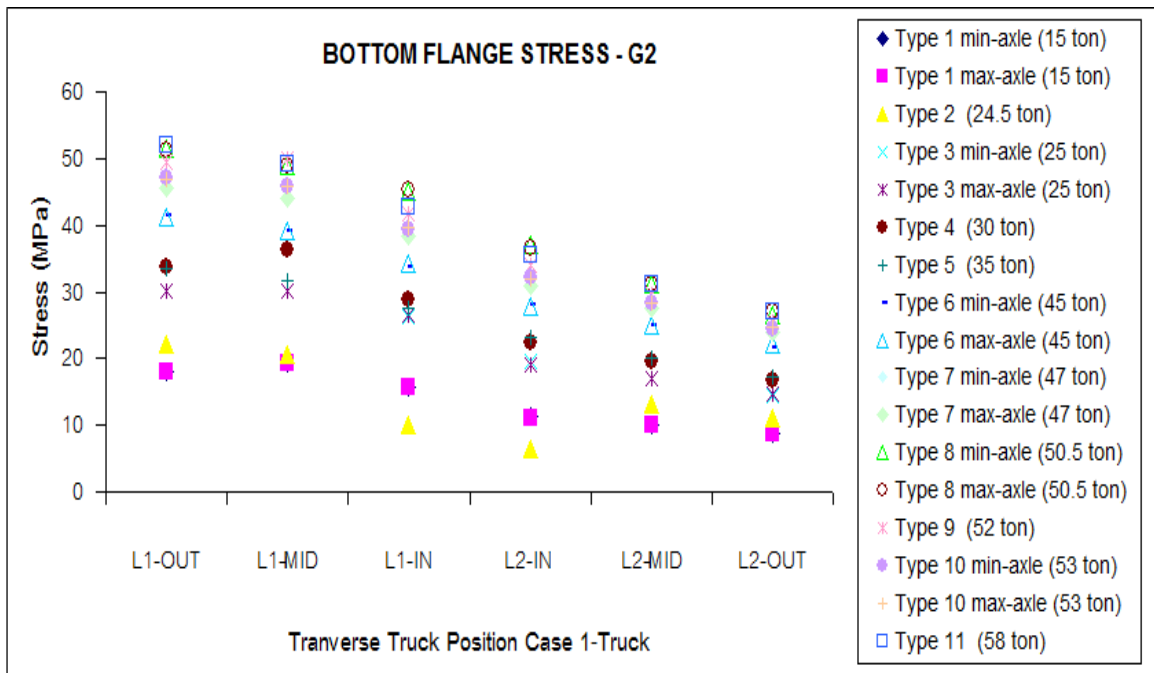
ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่างในการหาค่าหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap สูงสุดของคาน G1 ,G2 ,G3 และ G4 ที่กึ่งกลางสะพาน จะพิจารณาตามผลการวิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวจากแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุลในหัวข้อที่ 7.1.1 ซึ่งพบว่าตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกัน คือตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวตามแนวยาวที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ดังนั้นในแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่างจะพิจารณาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวยาวเช่นเดียวกับแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

7.2.2 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวาง

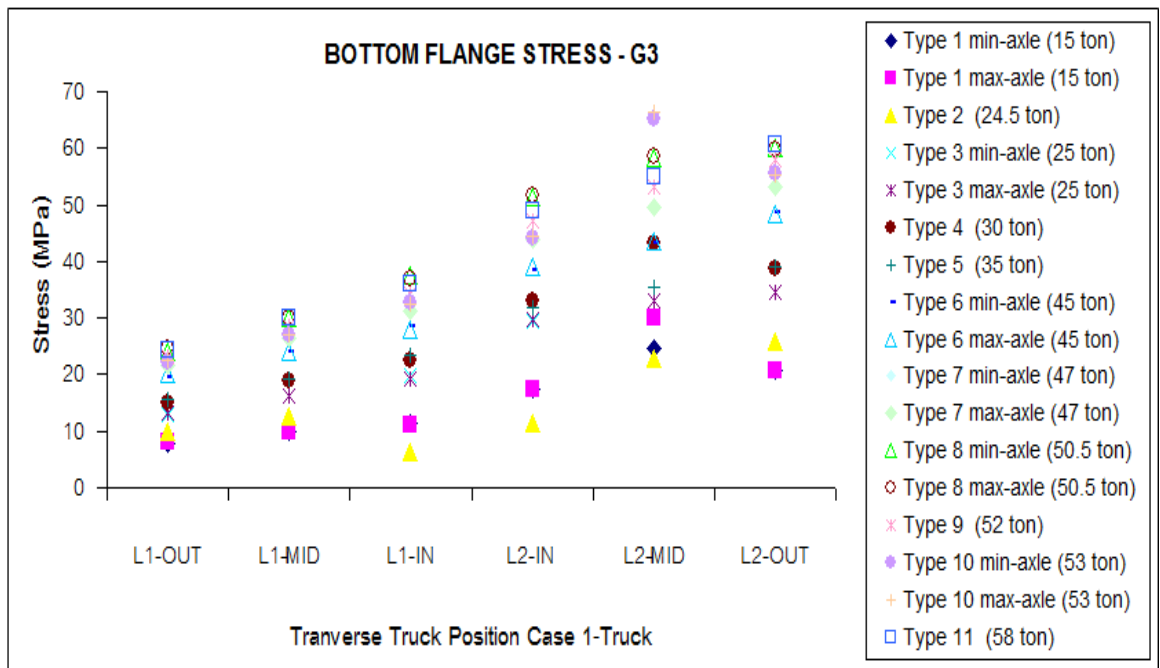
การกำหนดตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางในการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap สูงสุด ถูกกำหนดตามตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ ระหว่างคาน G1 กับ G2, G2 กับ G3 และ G3 กับ G4 เกิดที่ตำแหน่ง L2-OUT ทั้งหมด และที่ตำแหน่ง L1-OUT ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์จะพิจารณาตำแหน่งวิกฤติตามแนวขวาง คือ ตำแหน่ง L1-OUT และ L2-OUT โดยพิจารณาเฉพาะกรณีศึกษาบรรทุก 1 คันเท่านั้น และในการหาตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางในการวิเคราะห์หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2, G3 และ G4 ที่กึ่งกลางสะพาน จากรถบรรทุกในทุกประเภท เฉพาะกรณีศึกษาบรรทุก 1 คัน แสดงผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 7.13 - 7.16 ซึ่งพบว่าตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตามแนวขวางที่ให้ค่าหน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2, G3 และ G4 คือ ตำแหน่ง L1-OUT, L1-OUT, L2-OUT และ L2-OUT ตามลำดับ และรถบรรทุกในทุกประเภทที่มีค่าความกว้างของล้อตามแนวขวางค่าน้อย (min axle) จะให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน มากกว่า ค่าความกว้างระหว่างล้อตามแนวขวางค่ามาก (max axle) เฉลี่ยประมาณ 1 %



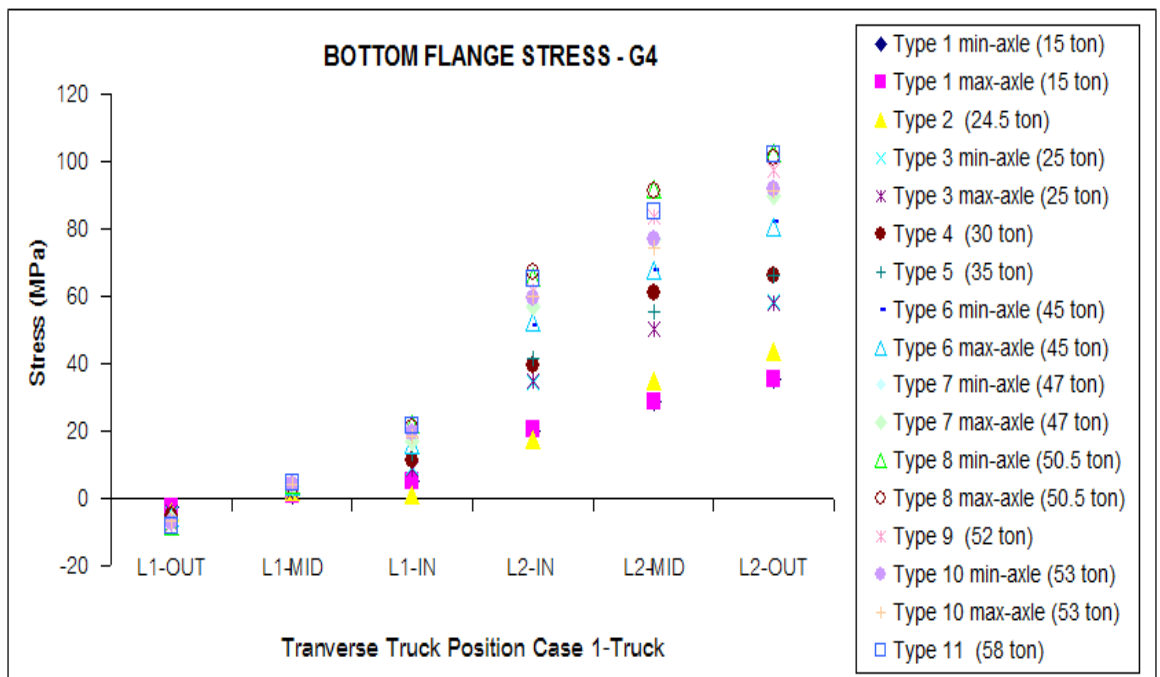
ภาพที่ 7.13 หน่วยแรงในระนาบของคาน G1 บริเวณชั้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 7.14 หน่วยแรงในระนาบของคาน G2 บริเวณชั้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



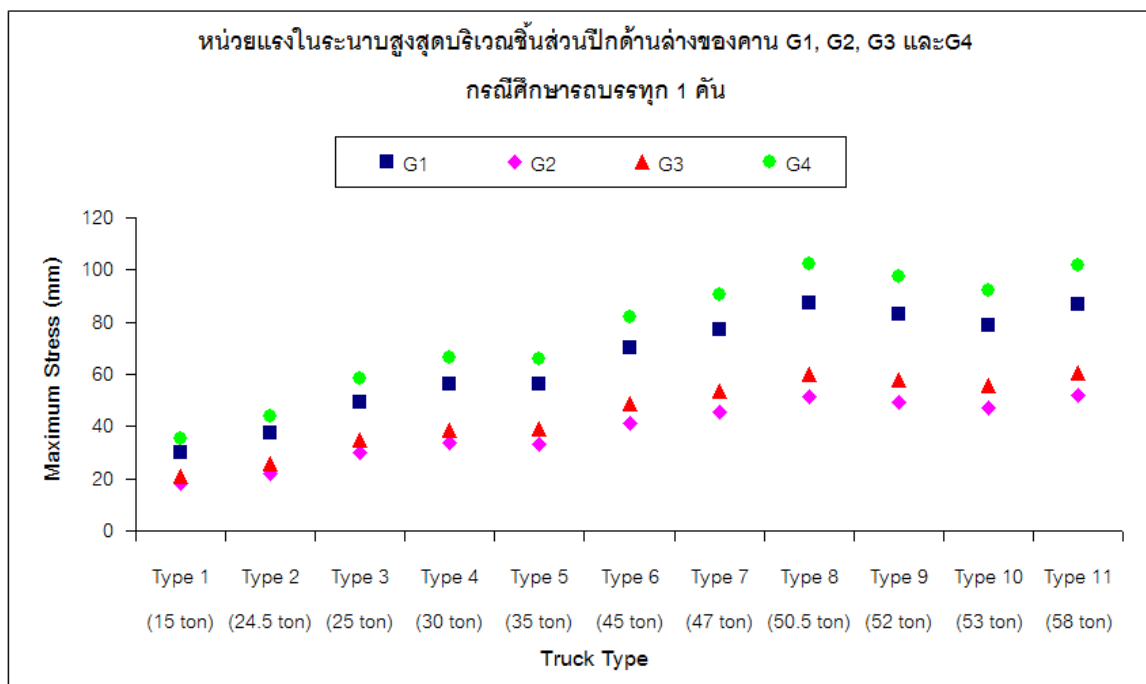
ภาพที่ 7.15 หน่วยแรงในระนาบของคาน G3 บริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน



ภาพที่ 7.16 หน่วยแรงในระนาบของคาน G4 บริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวขวางของรถบรรทุกแต่ละประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

7.2.3 หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน

ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2, G3 และ G4 ที่ตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวยาวและตามแนวขวาง จากรถบรรทุกประเภทต่างๆ ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แสดงดังภาพที่ 7.17



ภาพที่ 7.17 หน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน G1, G2 G3 และ G4 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

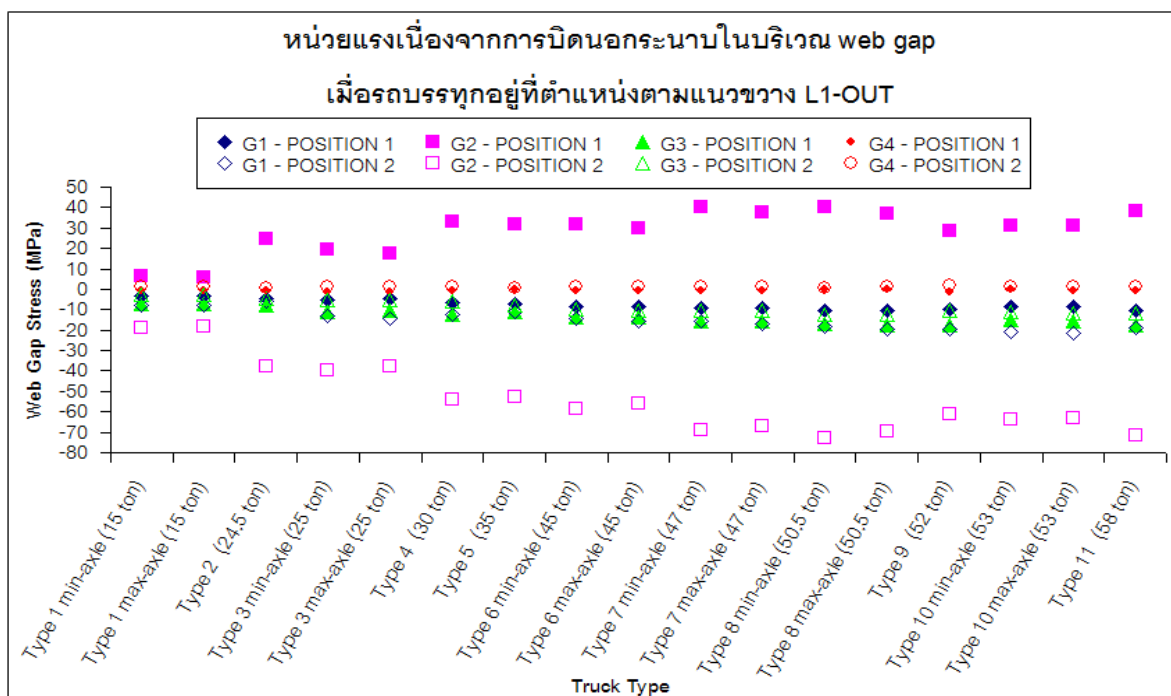
จากผลการผลการวิเคราะห์พบว่า พบว่าคานวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงในระนาบสูงสุดซึ่งเป็นหน่วยแรงดึง (tensile stress) คือ คาน G4 ซึ่งรถบรรทุกประเภทที่ 11 คือ รถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ เป็นรถบรรทุกวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างที่กึ่งกลางสะพาน ซึ่งตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดหน่วยแรงในระนาบสูงสุดของคาน G1, G2, G3 และ G4 ทั้งในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน คือตำแหน่งเดียวกับกับตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่ให้ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบ G1, G2, G3 และ G4 และตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดของคาน G3 และ G4

7.2.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap

ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1, G2, G3 และ G4 สำหรับรถบรรทุกประเภทในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน โดยพิจารณาตำแหน่งตาม

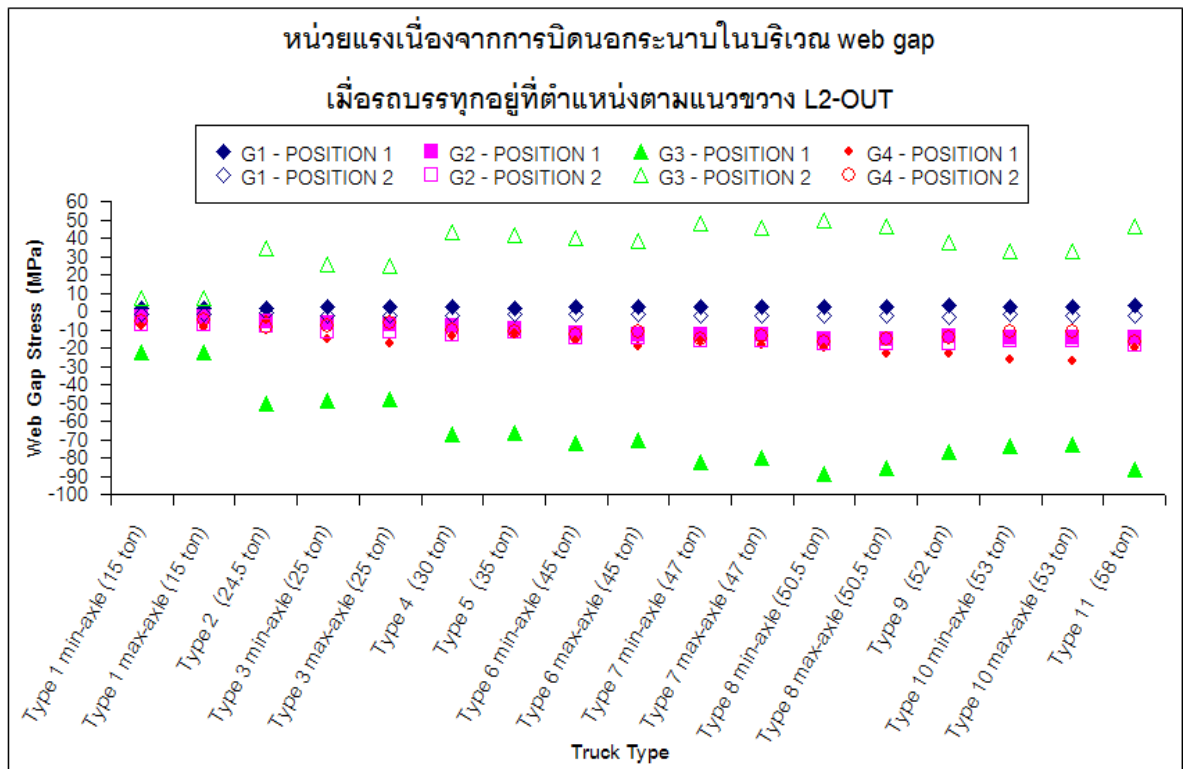
แนวขวาง 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง L2-OUT และตำแหน่ง L1-OUT ซึ่งทั้งสองตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่มีผลทำให้เกิดการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงสุดดังนั้นในการพิจารณาค่าหน่วยแรงสูงสุดเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap จึงใช้ 2 ตำแหน่งนี้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ตำแหน่งผิวด้านซ้ายของแผ่นเอว (ตำแหน่งที่1) และตำแหน่งผิวด้านขวาแผ่นเอว (ตำแหน่งที่2) แสดงดังภาพที่ 7.18 และ 7.19

จากผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap พบว่าที่ได้พบว่าตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวขวาง L2-OUT เป็นตำแหน่งวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุด โดยที่คานวิกฤติที่ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดคือ คาน G3 โดยที่หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดที่ผิวด้านซ้ายของแผ่นเอว (ตำแหน่งที่1) และหน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดที่ผิวด้านขวาของแผ่นเอว (ตำแหน่งที่2) โดยรถบรรทุกที่ให้ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุด คือ รถบรรทุกประเภทที่ 8 คือ รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ เท่ากับ 88.9 MPa สำหรับหน่วยแรงดึงสูงสุดรถบรรทุกที่ให้ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด คือ รถบรรทุกกึ่งพ่วงหัวลาก 10 ล้อ ลากจูง 3 เพลา 12 ล้อ เท่ากับ 49.5 MPa โดยที่รถบรรทุกที่มีความกว้างตามแนวขวางค่าน้อย (min-axle) ให้ค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงกว่ารถบรรทุกที่มีความกว้างตามแนวขวางค่ามาก (max-axle) โดยเฉลี่ยประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7.18 แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1 ,G2 ,G3

และ G4 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L1-OUT



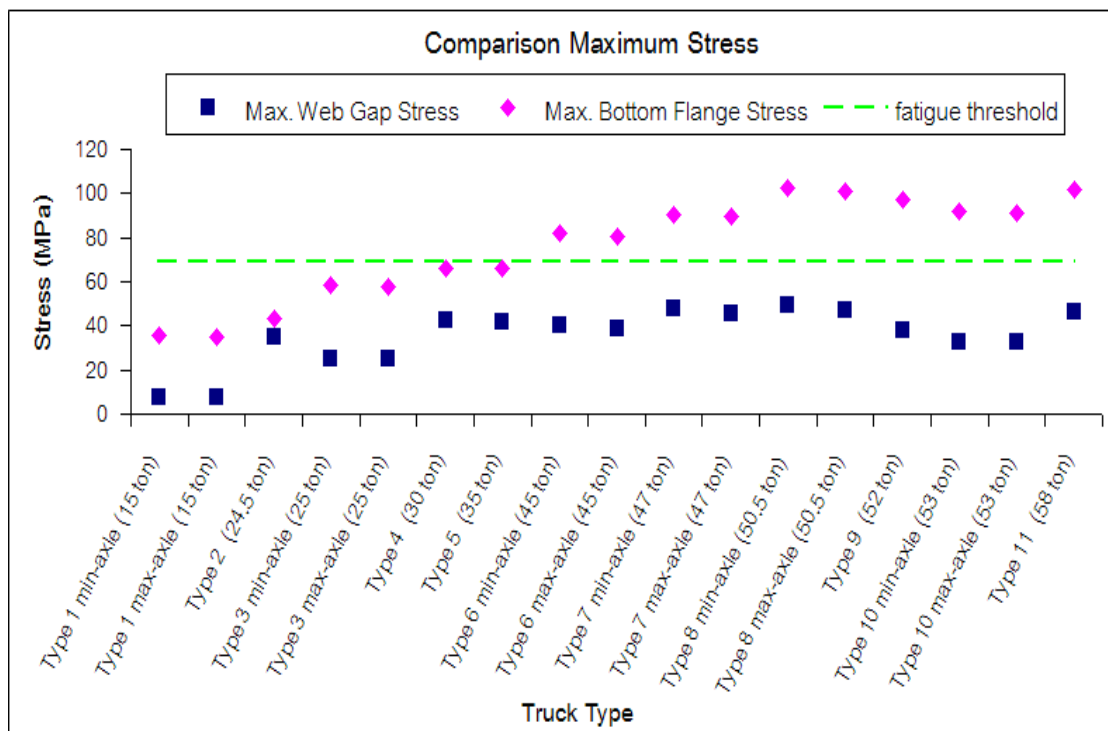
ภาพที่ 7.19 แสดงหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของคาน G1 ,G2 ,G3 และ G4 ของรถบรรทุกแต่ละประเภท เมื่อรถบรรทุกอยู่ที่ตำแหน่งตามแนวขวาง L2-OUT

7.2.5 อายุความล้าของสะพาน

การวิเคราะห์อายุความล้าของสะพานจะเปรียบเทียบผลของหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานที่ตำแหน่งรถบรรทุกวิกฤติตามแนวขวางและตามแนวยาวของรถบรรทุกประเภทต่างๆ เฉพาะในการศึกษากรณีรถบรรทุก 1 คัน ที่มีต่ออายุความล้าของสะพานเหล็ก ในการประเมินอายุความล้าของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ประเมินโดยใช้สมการของกราฟ S – N ที่อ้างอิงมาจากข้อกำหนดทางหลวงของประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO LRFD 2007) ดังสมการที่ 3.1 และหาอายุความล้าจากสมการที่ 3.5 โดยพิจารณาประเภทรอยต่อของชิ้นส่วน ประเภท C (category C) ในการประเมินอายุความล้า ประเภทรอยต่อประเภท C มีความหมายว่าเกิดการพังที่ตำแหน่งแผ่นเหล็กเสริมข้างคาน ซึ่งมีค่าคงที่ของประเภทรอยต่อเชื่อม (A) เท่ากับ $14.4 \times 10^{11} \text{ MPa}^3$ และค่าช่วงความเค้นสำหรับแอมพลิจูดของหน่วยแรงคงที่ที่ขีดจำกัดความล้า (constant amplitude fatigue threshold) เท่ากับ 69 MPa การประเมินอายุความล้าของสะพานเนื่องจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap โดยใช้กราฟ S – N อ้างอิงจากการศึกษาของ Fisher และคณะ (1990) ที่พบว่าอายุความล้าของรอย

เชื่อมบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนโครงเฟรมทางขวางกับเอวของคานได้เริ่มต้นเกิดรอยร้าวขึ้นที่บริเวณ web gap เกิดขึ้นพร้อมๆกับ กราฟ S-N ของ AASHTO สำหรับ Category C จากผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน ที่คานวิกฤติ ดังภาพที่ 7.19

จากผลการวิเคราะห์พบว่าหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap โดยเฉลี่ยประมาณ 6.2 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ขีดจำกัดความล้าพบว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุด มีค่าต่ำกว่าความเค้นที่ขีดจำกัดความล้า สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท แต่สำหรับหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดพบว่ามีค่าต่ำกว่าความเค้นที่ขีดจำกัดความล้าเฉพาะรถบรรทุกประเภทที่ 1 - 5 และในประเภทอื่นๆให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่าขีดจำกัดความล้า และผลการประเมินอายุความล้าโดยพิจารณาปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยที่แล่นผ่านสะพานต่อวันในหนึ่งทิศทาง (ADTT) จากข้อมูลตรวจนับปริมาณจราจรมีค่าเท่ากับ 448 คัน/วัน ซึ่งเป็นข้อมูลจากศูนย์บริการวิชาการจุฬาลงกรณ์สำหรับการตรวจนับปริมาณจราจรของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง แสดงดังตารางที่ 7.2



ภาพที่ 7.19 ผลการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน

ตารางที่ 7.2 แสดงอายุความล้าของสะพานเนื่องจากหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน และจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap ของสะพานข้ามแยกวงค์สว่าง

ประเภท รถบรรทุก	อายุความล้าของสะพานเนื่องจาก (ปี)	
	Web Gap Stress	Bottom Flange Stress
Type 1 min-axle (15 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 1 max-axle (15 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 2 (24.5 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 3 min-axle (25 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 3 max-axle (25 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 4 (30 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 5 (35 ton)	อายุอนันต์	อายุอนันต์
Type 6 min-axle (45 ton)	อายุอนันต์	18
Type 6 max-axle (45 ton)	อายุอนันต์	20
Type 7 min-axle (47 ton)	อายุอนันต์	14
Type 7 max-axle (47 ton)	อายุอนันต์	14
Type 8 min min axle (50.5 ton)	อายุอนันต์	10
Type 8 min -axle (50.5 ton)	อายุอนันต์	10
Type 9 (52 ton)	อายุอนันต์	12
Type 10 min-axle (53 ton)	อายุอนันต์	14
Type 10 max-axle (53 ton)	อายุอนันต์	14
Type 11 (58 ton)	อายุอนันต์	10

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน มีหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap และหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดความล้าทั้งสองบริเวณดังนั้นสรุปได้ว่าการวิบัติของสะพานเนื่องจากความล้ามีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก โดยที่อายุความล้าจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดในนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap ของรถบรรทุกทุกประเภทคือ อายุอนันต์ และอายุความล้าจากหน่วยแรงดึงในระนาบของรถบรรทุกในประเภทที่ 1-5 และ 6 – 11 คือ อายุอนันต์ และอยู่ในช่วง 10 ปี ถึง 20 ปี ตามลำดับ

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์พฤติกรรมการบิดของสะพานเหล็กข้ามแยก ประกอบด้วย ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน และหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบ อันเนื่องมาจากผลของรถบรรทุกประเภทต่างๆในไทย และรถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO ซึ่งสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละแบบจำลอง ได้ดังนี้

8.1.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

8.1.1.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติ ทั้งในกรณีศึกษา

รถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน ตามหัวข้อศึกษาดังตารางที่ 8.1 และ 8.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.1 แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติ

ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

รายละเอียดหัวข้อวิเคราะห์	ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุกตาม		คานวิกฤติ	รถบรรทุกวิกฤติ	ความกว้างรถบรรทุกตามแนวขวางวิกฤติ
	แนวยาว	แนวขวาง			
โมเมนต์ในหน้าตัดคานวัสดุผสมสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT	G1	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT	G1	ประเภทที่ 1	ค่าน้อย
การโก่งตัวของคานสูงสุด	1-D M_{max}	L2-OUT	G3	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกันสูงสุด	1-D M_{max}	L2-OUT	G2 กับ G3	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap	1-D M_{max}	L2-OUT	G3	ประเภทที่ 10	ค่าน้อย
หน่วยแรงในระนาบบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน	1-D M_{max}	L2-OUT	G3	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย

ตารางที่ 8.2 แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติ ในกรณีศึกษา
รถบรรทุก 2 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูล

รายละเอียด หัวข้อวิเคราะห์	ตำแหน่งวิกฤติของ รถบรรทุกตาม		คาน วิกฤติ	รถบรรทุก วิกฤติ	ความกว้าง รถบรรทุกตาม แนวขวาง วิกฤติ
	แนว ยาว	แนว ขวาง			
โมเมนต์ในหน้าตัดคานวัสดุ ผสมสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT กับ L2-IN	G1	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก ทางขวางสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT กับ L2-IN	G1	ประเภทที่ 3	ค่าน้อย
การโก่งตัวของคานสูงสุด	1-D M_{max}	L1-IN กับ L2-OUT	G3	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่าง คานที่ติดกันสูงสุด	1-D M_{max}	L1-IN กับ L2-OUT	G1 กับ G2	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย

หมายเหตุ; 1-D M_{max} หมายความว่า ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจาก
การวิเคราะห์สะพานใน 1 มิติ

8.1.1.2 ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง

1. ความกว้างประสิทธิผลตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 มีความเหมาะสมในการหาค่าตัว
คูณกระจายน้ำหนักทางขวาง เนื่องจากให้ค่าเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบสูงกว่าความกว้าง
ประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมดุลแรงในแนวแกนซึ่งมีช่วงความกว้างประสิทธิผลสำหรับรถบรรทุกใน
ทุกประเภทของแต่ละคานประกอบ คือ คานประกอบ G1 มีค่าอยู่ในช่วง 1950 ถึง 2150 มม.,
คานประกอบ G2 มีค่าอยู่ในช่วง 2800 ถึง 3600 มม. และคานประกอบ G3 มีค่าอยู่ในช่วง 2050
ถึง 2150 มม.

2. ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของรถบรรทุก ทั้งในกรณีศึกษา
รถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน

3. ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความกว้างประสิทธิผล
ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007 ของคานวิกฤติ ให้ค่าต่ำกว่า ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทาง
ขวางจากสมการของ AASHTO LRFD 2007 โดยเฉลี่ยในทุกประเภทรถบรรทุกประมาณ 20.7
เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และ 84.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก

2 คัน ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการของ AASHTO LRFD 2007 มีความเหมาะสมในการออกแบบสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

4. ค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าที่มากกว่า เฉลี่ยในทุกประเภทรถบรรทุกที่คานวิฤทธิประมาณ 1.53 เท่า ของในกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน

8.1.1.3 การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียง

1. เมื่อเปรียบเทียบการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน จากรถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO กับรถบรรทุกวิฤทธิในไทยเทียบเท่าน้ำหนักบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO ที่คานวิฤทธิ พบว่ารถบรรทุกวิฤทธิในไทย ให้การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน ต่ำกว่ารถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO ประมาณ 11.2 % สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน และ 13.8 % สำหรับกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน

2. เมื่อเปรียบเทียบกรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน กับ กรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 2 คัน ที่คานวิฤทธิ พบว่ากรณีศึกษาถนนรถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันสูงกว่าในทุกประเภทรถบรรทุกโดยเฉลี่ยประมาณ 31.25 %

8.1.1.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบและอายุความล้าของสะพาน

1. หน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap โดยเฉลี่ยประมาณ 8.5 เท่า สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท

2. ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงพบว่าหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน มีค่าหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap และค่าหน่วยแรงมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดความล้าทั้งสองบริเวณดังนั้นสรุปได้ว่าการวิบัติของสะพานเนื่องจากความล้าไม่มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากโดยที่อายุความล้าจากหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุด บริเวณ web gap ของรถบรรทุกในทุกประเภท เท่ากับ อายุอนันต์ และอายุความล้าจากหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคานของรถบรรทุกในทุกประเภท เท่ากับ อายุอนันต์

8.2.1 แบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

8.2.1.1 ตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติ ทั้งในกรณีศึกษา

รถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน ตามหัวข้อดังตารางที่ 8.3 และ 8.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.3 แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติ ในกรณีศึกษา

รถบรรทุก 1 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกข้ามแยกวงศ์สว่าง

รายละเอียด หัวข้อวิเคราะห์	ตำแหน่งวิกฤติของ รถบรรทุกตาม		คาน วิกฤติ	รถบรรทุก วิกฤติ	ความกว้าง รถบรรทุกตาม แนวขวาง วิกฤติ
	แนว ยาว	แนว ขวาง			
โมเมนต์ในคานหน้าตัด ประกอบสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT	G1	ประเภทที่ 11	ค่าน้อย
ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก ทางขวางสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT	G1	ประเภทที่ 1	ค่าน้อย
การโก่งตัวของคานสูงสุด	1-D M_{max}	L2-OUT	G4	ประเภทที่ 11	ค่าน้อย
การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่าง คานที่ติดกันสูงสุด	1-D M_{max}	L2-OUT	G3 กับ G4	ประเภทที่ 11	ค่าน้อย
หน่วยแรงเนื่องจากการบิด นอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap	1-D M_{max}	L2-OUT	G3	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
หน่วยแรงในระนาบบริเวณ ชิ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน	1-D M_{max}	L2-OUT	G4	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย

ตารางที่ 8.4 แสดงตำแหน่งวิกฤติของรถบรรทุก คานวิกฤติ และรถบรรทุกวิกฤติ
ในกรณีศึกษาสะพาน 2 คัน ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกข้ามแยกวงศ์สว่าง

รายละเอียด หัวข้อวิเคราะห์	ตำแหน่งวิกฤติของ รถบรรทุกตาม		คาน วิกฤติ	รถบรรทุก วิกฤติ	ความกว้าง รถบรรทุก ตามแนว ขวางวิกฤติ
	แนว ยาว	แนว ขวาง			
โมเมนต์ในคานหน้าตัด ประกอบสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT กับ L2-IN	G1	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
ตัวคูณการกระจายน้ำหนัก ทางขวางสูงสุด	1-D M_{max}	L1-OUT กับ L2-IN	G1	ประเภทที่ 8	ค่าน้อย
การโค้งตัวของคานสูงสุด	1-D M_{max}	L1-IN กับ L2-OUT	G4	ประเภทที่ 11	ค่าน้อย
การโค้งตัวสัมพัทธ์ระหว่าง คานที่ติดกันสูงสุด	1-D M_{max}	L1-IN กับ L2-OUT	G1 กับ G2	ประเภทที่ 11	ค่าน้อย

หมายเหตุ; 1-D M_{max} หมายความว่า ตำแหน่งรถบรรทุกตามแนวยาวที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจาก
การวิเคราะห์สะพานใน 1 มิติ

8.2.1.2 ตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง

1. สะพานข้ามแยกวงศ์สว่างเป็นสะพานรูปแบบที่มีระบบคานเป็นแผ่นเหล็กประกอบและระบบ
แผ่นพื้นเป็นแบบออร์โทโทรปิค (Orthotropic Steel Plate – Girder Bridge) ซึ่งไม่มีข้อกำหนดใน
การกำหนดค่าความกว้างประสิทธิภาพ ดังนั้นในการหาค่าตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางจาก
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ควรใช้ความกว้างประสิทธิภาพตามเงื่อนไขสมมูลแรงในแนวแกน จาก
การศึกษาพบว่าช่วงความกว้างประสิทธิภาพตามเงื่อนไขสมมูลแรงในแนวแกนสำหรับรถบรรทุกใน
ทุกประเภทของแต่ละคานประกอบ คือ คาน G1 มีค่าอยู่ในช่วง 2350 ถึง 2750 มม., คานประกอบ
G2 มีค่าอยู่ในช่วง 1600 ถึง 1900 มม., คานประกอบ G3 มีค่าอยู่ในช่วง 1700 ถึง 2100 มม. และ
คานประกอบ G4 มีค่าอยู่ในช่วง 2050 ถึง 2550 มม.

2. ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของรถบรรทุก ทั้งในกรณีศึกษา
รถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน

3. ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คานวิกฤติ ให้ค่าต่ำกว่า
ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการของ AASHTO LRFD 2007 โดยเฉลี่ยในทุก

ประเภทรถบรรทุกประมาณ 38.3 % สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน และในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ให้ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากจากสมการของ AASHTO LRFD 2007 ให้ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางต่ำกว่าค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเฉลี่ยในทุกประเภทรถบรรทุก 137 % ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการของ AASHTO LRFD 2007 มีเหมาะสมในการออกแบบสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

4. ค่า LDF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าที่มากกว่า เฉลี่ยในทุกประเภทรถบรรทุกที่คานวิกฤติประมาณ 1.72 เท่า ของในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

8.2.1.3 การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียง

1. เมื่อเปรียบเทียบการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน จากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO กับรถบรรทุกวิกฤติในไทยเทียบเท่าน้ำหนักตามรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO ที่คานวิกฤติพบว่า รถบรรทุกวิกฤติในไทย ให้การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ติดกัน ต่ำกว่ารถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO ประมาณ 2.5 % สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน แต่สำหรับกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน พบว่า รถบรรทุกวิกฤติในไทย ให้ค่าการโก่งตัวสูงสุดของคาน สูงกว่ารถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO ประมาณ 2 %

2. เมื่อเปรียบเทียบกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน กับ กรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน ที่คานวิกฤติ พบว่า กรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน ให้ค่าการโก่งตัวสัมพัทธ์สูงสุดระหว่างคานที่ติดกันสูงกว่าในทุกประเภทรถบรรทุกโดยเฉลี่ยประมาณ 29.8 %

8.2.1.4 หน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบและอายุความล้าของสะพาน

1. หน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคานให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดที่บริเวณ web gap โดยเฉลี่ยประมาณ 6.2 เท่า สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท

2. เมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรงพบว่าหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน มีและหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap กับความเค้นที่ขีดจำกัดความล้าพบว่าหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุด มีค่าต่ำกว่าความเค้นที่ขีดจำกัดความล้า สำหรับรถบรรทุกในทุกประเภท แต่สำหรับหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน พบว่ามีค่าต่ำกว่าความเค้นที่ขีดจำกัดความล้าเฉพาะรถบรรทุกประเภทที่ 1 - 5 และในประเภทอื่นๆให้ค่าหน่วยแรงสูงกว่าขีดจำกัดความล้า ดังนั้นสรุปได้ว่าการ

วิบัติของสะพานเนื่องจากความล้าของหน่วยแรงดึงเนื่องจากการบิดนอกระนาบสูงสุดบริเวณ web gap และเนื่องจากหน่วยแรงดึงในระนาบเนื่องบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคาน มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก โดยมีอายุความล้าเท่ากับอายุอนันต์ แต่การวิบัติของสะพานเนื่องจากความล้าของหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคานสำหรับรถบรรทุกประเภทที่ 6 – 11 จะเกิดการวิบัติของสะพานเนื่องจากความล้า โดยที่อายุความล้าอยู่ในช่วง 10 ปี ถึง 20 ปี ทั้งนี้อายุความล้าของสะพานเนื่องหน่วยแรงดึงในระนาบสูงสุดบริเวณขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคานที่มีค่าน้อยเป็นผลมาจากการกำหนดประเภทรอยเชื่อมในการวิเคราะห์

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีกฎหมายในการกำหนดระยะห่างตามแนวขวางและระยะห่างตามแนวยาวระหว่างเพลลาของรถบรรทุกหนักที่ผลิตตามท้องตลาดเนื่องจากผลการศึกษาพบว่ายิ่งระยะระหว่างเพลลาตามแนวขวางและตามแนวยาวยิ่งน้อยยิ่งมีผลทำให้เกิดการกระจายน้ำหนักทางขวางไปยังแต่ละคาน การโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่ใกล้เคียง และหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap สูงยิ่งขึ้น
2. ในการวิเคราะห์ค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางควรมีการแบ่งขึ้นส่วนย่อยของขึ้นส่วนแผ่นพื้นในแบบจำลองสะพานให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ได้ซึ่งค่าความกว้างประสิทธิผลตามเงื่อนไขสมมูลของแรงในแนวแกนของคานหน้าตัดประกอบที่ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด
3. การลดหน่วยแรงเนื่องจากการบิดนอกระนาบบริเวณ web gap ของสะพานเหล็กข้ามแยกในไทย ควรออกแบบให้ขึ้นส่วนแผ่นเหล็กเสริมข้างคานเชื่อมติดกับขึ้นส่วนปีกด้านล่างของคานตามข้อแนะนำตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กุ่มท บุญวรรณ. การประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากความล้าของสะพานเหล็กข้ามแยก.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ชัยชาญ ยวนะศิริ. ผลกระทบของรถบรรทุกหนักต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความล้าของสะพาน
เหล็ก. , สาขาวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- ทักษิณ เทพชาติรี และอัศววัชร เล่นวารีย์. พฤติกรรมและออกแบบโครงสร้างเหล็ก. แก้ไขปรับปรุง
ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- บริษัท ตรีเพชรรีซูเชลส์ จำกัด. แคตตาล็อกของรถบรรทุกประเภทต่างๆ, 2554.
- บริษัท นิสสันดีเซล (ประเทศไทย) จำกัด. แคตตาล็อกของรถบรรทุกประเภทต่างๆ, 2554
- บริษัท พูโซ่ ทวีค (ประเทศไทย) จำกัด. แคตตาล็อกของรถบรรทุกประเภทต่างๆ, 2552
- บริษัท ฮีโนมอเตอร์สเซลส์ (ประเทศไทย) จำกัด. ข้อมูลทางเทคนิคของรถบรรทุกประเภทต่างๆ,
2552
- ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์. การวิเคราะห์โครงสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : จัดพิมพ์โดย
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2538.
- ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวง
สัมปทาน เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 150 ง. ราชกิจจานุเบกษา (28 ธันวาคม พ.ศ. 2548).
- ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวง
สัมปทาน เล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 92 ง. ราชกิจจานุเบกษา (30 มิถุนายน พ.ศ. 2552).
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร :
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. โครงการตรวจสอบและประเมินการเสื่อมสภาพ
ของโครงสร้างสะพานเหล็ก. 2551.

ภาษาอังกฤษ

- Aljutaili , D.S. Distortion-Induced Fatigue Cracking of Girder-to-Crossbeam Connection. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Oregon State University, 2007.
- American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO 1996). Standard specifications for highway bridges. 16th Edition, Washington, D.C., 1996.
- American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO 1998). LRFD Bridge Specifications. 2nd Edition, Washington, D.C., 1998.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 2007). LRFD Bridge Specifications. 4th Edition, Washington, D.C., 2007.
- Bapat , A.V. Influence Of Bridge Parameters On Finite Element Modeling Of Slab On Girder Bridges. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- Berglund, E. and Schultz, A., E. Analysis of Tools and Rapid Screening Data for Assessing Distortional Fatigue in Steel Bridges. Technical Report. Department of Civil Engineering. University of Minnesota, 2001.
- Berglund, E., M. and Schultz, A., E. Girder Differential Deflection and Distortion-Induced Fatigue in Skewed Steel Bridges. Journal of Bridge Engineering, 11, 2 (2006) : 169 – 177.
- Cai, C. S. Discussion on AASHTO LRFD Load Distribution Factors for Slab-on-Girder Bridges . Practice Periodical on Structural Design and Construction, 10, 3(2005) : 171-176 .
- Chaisomphob, T. and Lertsima, C. Effect of BMA Flyover Bridge Type on Wheel Load Distribution Factors Based on AASHTO Specification. Thammasat International Journal Science Technology, (2000) : 8 – 15.
- Chan, T. H. T., and Chan, J. H. F. Use of eccentric beam elements in the analysis of slab-on-girder bridges. Structural Engineering and Mechanics, 8, 1(1999) : 85-102.

- Eom, J., and Nowak, A. S. Live load distribution for steel girder bridges. Journal of Bridge Engineering, 6, 6(2001) : 489-497.
- Fisher , J. W. Fatigue Cracking in Bridges from Out-of-Plane Displacements. The Canadian Journal of Civil Engineering, 5, 4(1978).
- Fisher , J. W., Jin, Jian, Wagner, David, and Yen, Ben. David, and Yen, Ben. Distortion Induced Fatigue Cracking in Steel Bridges, NCHRP Report 336 Transportation Research Board, National Research Council, (1990).
- Fu, K.C., and Lu, F. Nonlinear finite-element analysis for highway bridge superstructures. Journal of Bridge Engineering, 8, 3(2003) : 173-179.
- Hassel , H. L., Hartman , A. S. ,Bennett , C. R. ,Matamoros , A. B. and Rolfe, S. T. Distortion-Induced Fatigue in Steel Bridges: Causes, Parameters, and Fixes. Structures Congress, ,(2010) : 471-483.
- Hays Jr., C., Sessions, L. M., and Berry, A. J. Further studies on lateral load distribution using a finite element method. Transportation Research Record, (1986) : 6-14.
- Hidayat, M.S. Distortion-Induced Stresses In Composite Steel I-Girder Bridges. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- Issa, M. A., Yousif, A. A., and Issa, M. A. Effect of construction loads and vibrations on new concrete bridge decks. Journal of Bridge Engineering, 5, 3(2000) : 249-258.
- Jajich, D. and Schultz., A., E. Measurement and Analysis of Distortion-Induced Fatigue in Multigirder Steel Bridges. Journal of Bridge Engineering, 8, 2(2003) : 84-91.
- Khalil , A . , Wipf, T . J . , Greimann , L . , Wood, D . L . and Brakke, B . Retrofit Solution for Out-of-Plane Distortion of X-Type Diaphragm Bridges. Transportation Conference Proceedings, (1998) : 99-102 .
- K. M. Tarhini and G. R. Frederick, Wheel load distribution in I-girder highway bridges. ASCE J. Struct. Engng. 118, (1992) : 1285-1294.

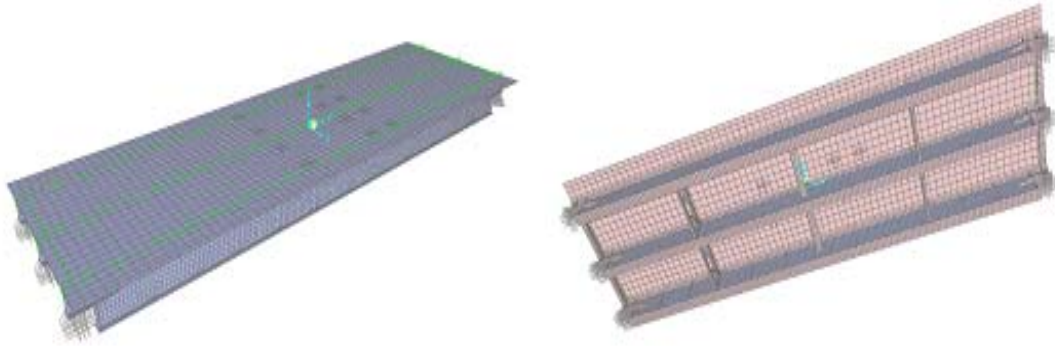
- Lertsima, C. Improvement On Current Design Practice Of Multi-Girder Bridges In Thailand. Master's Thesis, Sirindhorn International of Technology and Faculty of Engineering , Thammasat University, 2008.
- Mabsout, M. E., Tarhini, K. M., Fredrick, G. R., and Kobrosly, M. Finite Element Analysis of Steel Girder Highway Bridges. Journal of Bridge Engineering, 10 (1997) : 83 – 87.
- Nesvold , S . Live load distribution Factors For Girder Bridges. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Delaware , 2002.
- Phuvoravan, K. Load Distribution Factor Equation For Steel Girder Bridges In LRFD Design. Symposium on Infrastructure Development and the Environment, (2006).
- R. L. Brockenbrough, Distribution factors for curved I-girder bridges. ASCE J. Struct. Engng, 112(1986) : 2200-2215.
- Robert J. Connor,R .B and Fisher , J. W. Identifying Effective and Ineffective Retrofits for Distortion Fatigue Cracking in Steel Bridges Using Field Instrumentation. Journal of Bridge Engineering, 11, 6(2006) : 745-752.
- Roddis,W. M. K., and Zhao,Y. Finite-Element Analysis of Steel Bridge Distortion-Induced Fatigue. Journal of Bridge Engineering, 8, 5(2003) : 259-266.
- Roddis,W. M. K., and Zhao,Y. Out-of-plane fatigue cracking in welded steel bridges : Why it happened and how it can be repaired. Welding Innovation. (2001) : 2-7.
- Severtson, B. Beukema, F. and Schultz, A., E. Rapid Assessment of Distortional Stress in Multi-Girder Steel Bridges. Technical Report. Department of Civil Engineering. University of Minnesota, 2004.
- Sotelino, E.D. , Liu, J. , Chung, W. and Phuvoravan, K. Simplified Load Distribution Factor for Use in LRFD Design. Joint Transportation Research Program 1284. Civil Engineering Building , Purdue University, 2004.
- Tabsh, S. W., and Tabatabai, M. Live load distribution in girder bridges subject to oversized trucks. Journal of Bridge Engineering, 6, 1(2001) : 9-16.

- Zhao, Y. E. .Assessment of Bridge Remaining Fatigue Life through Field Strain Measurement. Journal of Bridge Engineering, 11, 6(2006) : 737 -744.
- Zokaie, T. AASHTO-LRFD Live Load Distribution Specifications. Journal of Bridge Engineering, 5, 2(2000) : 131 – 138.
- Zokaie, T. Distribution of Wheel Load on Highway Bridges , National Cooperative Highway Research Program Report 12-26/1, Washington, D.C : Transportation Research Board, (1991) .

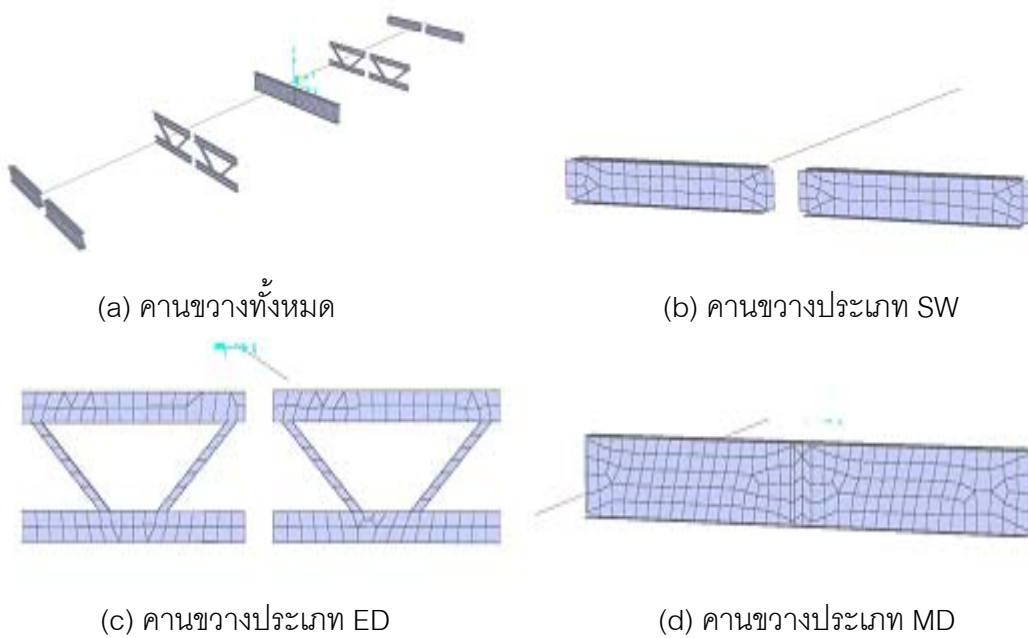
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

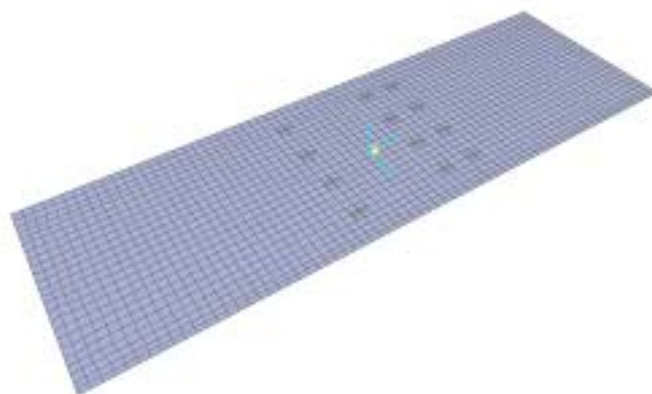
แบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานกุล 3 มิติ



ภาพที่ ผ-1 แบบจำลองโครงสร้างสะพานข้ามแยกประชานกุล

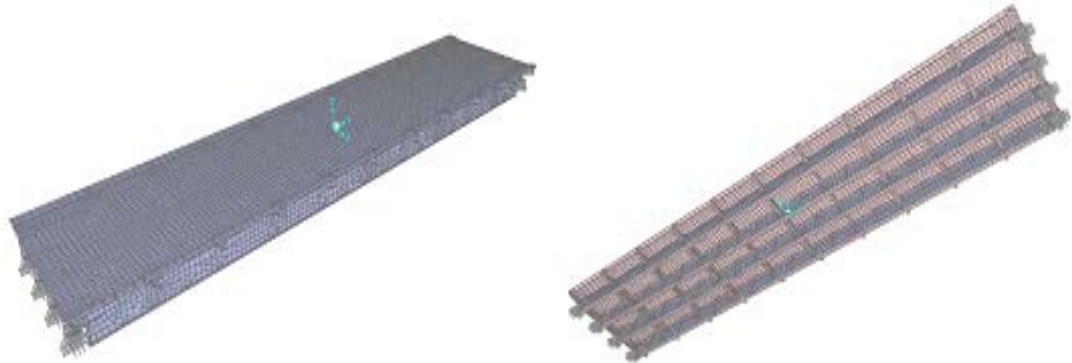


ภาพที่ ผ-2 แบบจำลองคานขวางประเภทต่างๆ ของโครงสร้างสะพานข้ามแยกประชานกุล



ภาพที่ ผ-3 แบบจำลองแผ่นพื้นของสะพานข้ามแยกประชานกุล

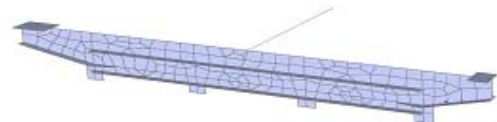
แบบจำลองสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง 3 มิติ



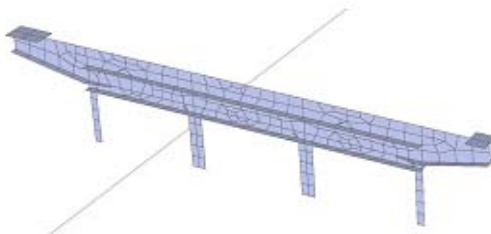
รูปที่ ๘-4 แบบจำลองโครงสร้างสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง



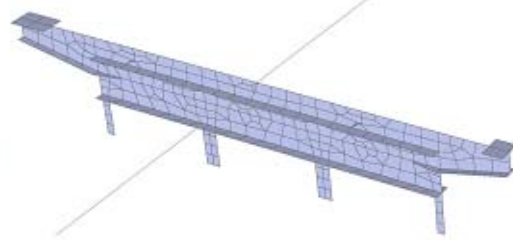
(a) คานขวางทั้งหมด



(b) คานขวางประเภท ED



(c) คานขวางประเภท C1



(d) คานขวางประเภท C2

ภาพที่ ๘-5 แบบจำลองคานขวางประเภทต่างๆ ของโครงสร้างสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง



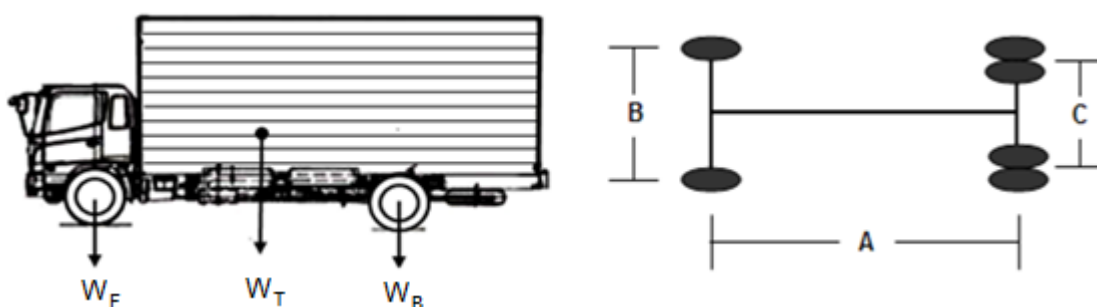
ภาพที่ ๘-6 แบบจำลองแผ่นพื้นของสะพานข้ามแคววงศ์สว่าง

ภาคผนวก ข

**ข้อมูลรถบรรทุกหนักในประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัยตามสำนักงานควบคุมน้ำหนัก
ยานพาหนะ กรมทางหลวง และ ตามรถบรรทุกที่ผลิตในท้องตลาด**

ข้อมูลรถบรรทุกหนักในประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ข้อกำหนดน้ำหนักบรรทุกรวม น้ำหนักรถบรรทุก (W_T), น้ำหนักบรรทุกลงแต่ละเพลลา (W_F , W_B) และระยะห่างระหว่างสลักพ่วง ตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 150 ง ราชกิจจานุเบกษา 28 ธันวาคม 2548 และเล่มที่ 126 ตอนพิเศษ 92 ง ราชกิจจานุเบกษา 30 มิถุนายน 2552 สำหรับในส่วนของระยะระหว่างล้อตามแนวยาว และระยะระหว่างล้อตามแนวกว้าง ซึ่งไม่ได้ถูกกำหนดไว้ตามกรมทางหลวงและกรมขนส่ง ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลตามรถบรรทุกต่างๆที่ผลิตตามท้องตลาด ประกอบไปด้วยรถบรรทุกยี่ห้อ ฮีโน่ ,อีซูซุ,มิตซูบิชิ และนิสสันดีเซล ในประเภทรถบรรทุกต่างๆ สำหรับงานวิจัย ซึ่งจะแสดงข้อมูลรถบรรทุกดังนี้

ประเภทที่ 1 รถบรรทุก 6 ล้อ



รูปที่ ๘-7 รถบรรทุก 6 ล้อ

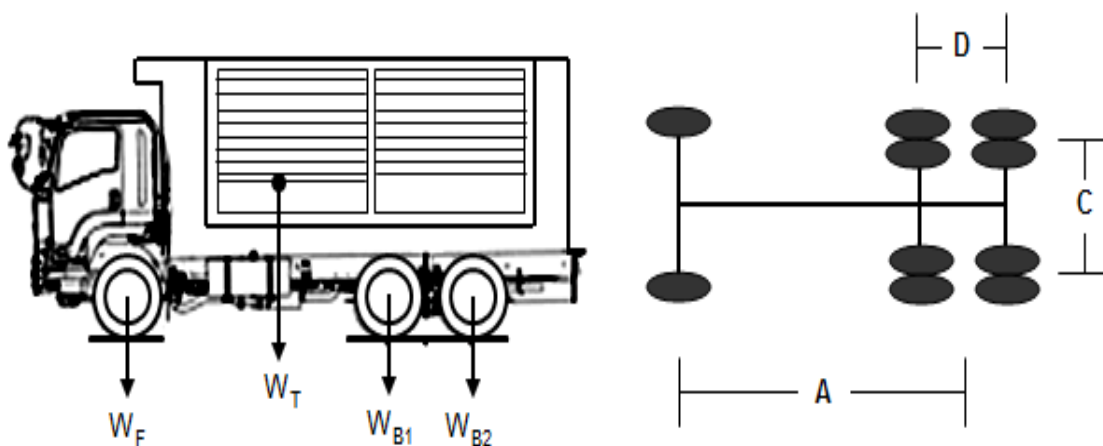
ตารางที่ ๘-1 ข้อมูลของรถบรรทุก 6 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_F (ตัน)	W_B (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง		4	11	-	-	-	15
2. ยี่ห้อ HINO	- รุ่น FG8JPLG	4	11	5,530	1,920	1,825	15
	- รุ่น FG8JRLA	4	11	5,800	1,920	1,840	15
	- รุ่น FG8JGLD	4	11	3,780	1,915	1,840	15
	- รุ่น FG8JJLA	4	11	4,280	1,915	1,835	15
	- รุ่น FG8JMLA	4	11	5,050	1,920	1,840	15
	- รุ่น FG8JPLA	4	11	5,530	1,920	1,840	15
	- รุ่น FG8JGLE	4	11	3,780	1,915	1,820	15

ตารางที่ ผ-1 (ต่อ) ข้อมูลของรถบรรทุก 6 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_F (ตัน)	W_B (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	W_T (ตัน)
2. ยี่ห้อ HINO	- รุ่น FG8JLB	4	11	4,280	1,915	1,835	15
	- รุ่น FG1JPKA	4	11	5,530	1,920	1,840	15
3. ยี่ห้อ Mitsubishi	- รุ่น FM65FF1RDH1	4	11	3680	1930	1850	15
	- รุ่น FM65FH1RDH1	4	11	4280	1930	1850	15
	- รุ่น FM65FJ1RDH1	4	11	4620	1930	1850	15
	- รุ่น FM65FM1RDH1	4	11	5550	1930	1850	15
4. ยี่ห้อ Isuzu	- รุ่น FTR34JZL	4	11	3650	1970	1790	15
	- รุ่น FTR34LZL	4	11	4250	1970	1790	15
	- รุ่น FTR34PZL	4	11	5050	1970	1790	15
	- รุ่น FTR34QZ	4	11	5550	1970	1790	15
5. ยี่ห้อ Nissan Diesel	- รุ่น PKB214E	4	11	3750	1960	1800	14.2
	- รุ่น PKB214G	4	11	4400	1960	1800	14.2
	- รุ่น PKB214N	4	11	5550	1960	1800	14.2

ประเภทที่ 3 รถบรรทุก 10 ล้อ

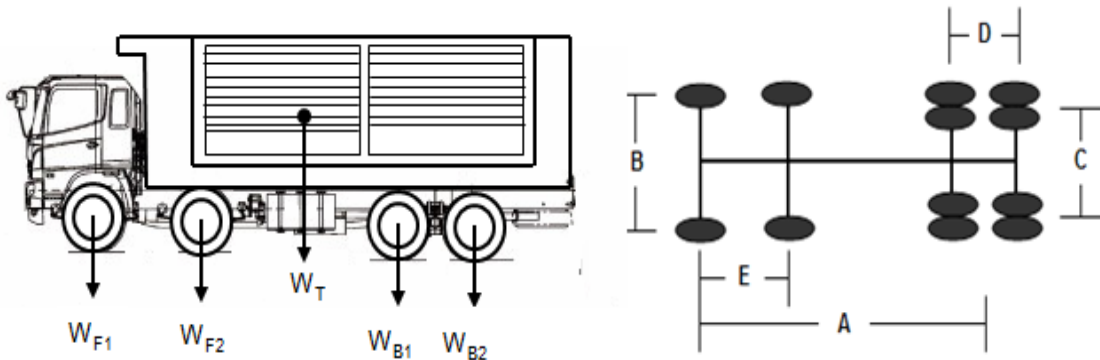


รูปที่ ผ-8 รถบรรทุก 10 ล้อ

ตารางที่ ผ-2 ข้อมูลของรถบรรทุก 10 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_F (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง		5	10	10	-	-	-	-	25
2. ยี่ห้อ HINO	- รุ่น FL8JNKA	5	10	10	4780	1930	1855	1300	25
	- รุ่น FL8JTKA	5	10	10	5630	1930	1855	1300	25
	- รุ่น FL8JNLA	5	10	10	4780	1930	1855	1300	25
	- รุ่น FM8JNKD	5	10	10	4780	1930	1855	1300	25
	- รุ่น FM8JNLD	5	10	10	4780	1930	1855	1300	25
	- รุ่น FM1AKKM	5	10	10	4030	1930	1855	1300	25
	- รุ่น FM1ANKD	5	10	10	4780	1935	1855	1300	25
	- รุ่น FM1ANLD	5	10	10	4780	1935	1855	1300	25
	- รุ่น FM2PNLD	5	10	10	4780	1935	1855	1300	25
3. ยี่ห้อ Mitsubishi	- รุ่น FN61FR2RDH1	5	10	10	5650	1930	1850	1300	25
	- รุ่น FN62FM1RDH1	5	10	10	4800	1930	1850	1300	25
	- รุ่น FN62FM2RDH1	5	10	10	4800	1930	1850	1300	25
4. ยี่ห้อ Isuzu	- รุ่น FVZ34PNDH	5	10	10	4650	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVZ34PSDFH	5	10	10	4650	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVZ34PSDTH	5	10	10	4650	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FXZ77QDFH	5	10	10	4700	2056	1850	1300	25
	- รุ่น FXZ77QDTH	5	10	10	4700	2056	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34QNH	5	10	10	4850	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34QNAK	5	10	10	4850	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34QSH	5	10	10	4850	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34RNH	5	10	10	5200	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34RNAK	5	10	10	5200	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34TNH	5	10	10	5700	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34TNAK	5	10	10	5700	1970	1850	1300	25
	- รุ่น FVM34TSH	5	10	10	5700	1970	1850	1300	25
4. ยี่ห้อ Nissan Diesel	- รุ่น CWM454M/6	5	10	10	4800	2020	1860	1300	25
	- รุ่น CWM454M/12	5	10	10	4800	2020	1860	1300	25
	- รุ่น CWM454M	5	10	10	4050	2020	1860	1300	25
	- รุ่น CWM454HM	5	10	10	4050	2020	1860	1300	25

ประเภทที่ 4 รถบรรทุก 12 ล้อ

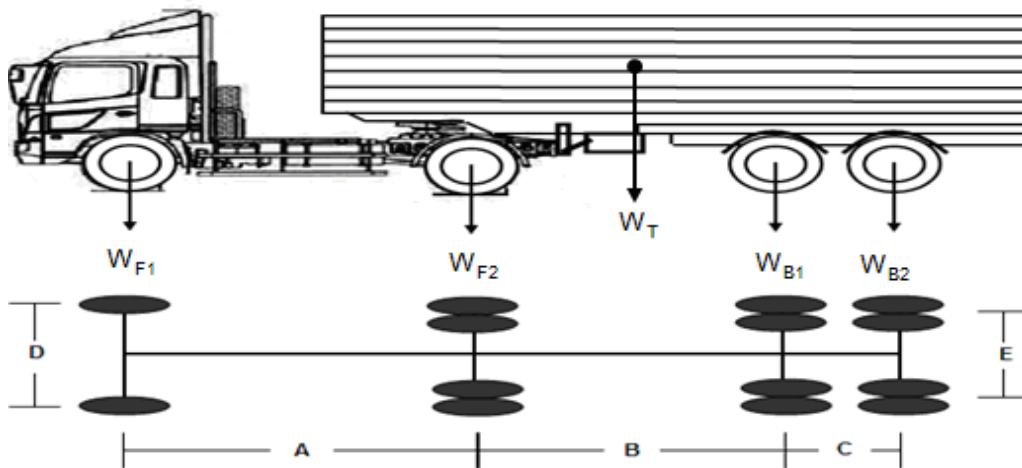


รูปที่ ๘-9 รถบรรทุก 12 ล้อ

ตารางที่ ๘-3 ข้อมูลของรถบรรทุก 12 ล้อ

ที่มาของ แหล่งข้อมูล	W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง	5	5	10	10	-	-	-	-	-	30
2. ยี่ห้อ HINO รุ่น GY2PSLA	5	5	10	10	6000	1935	1855	1300	1890	30

ประเภทที่ 5 รถกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ

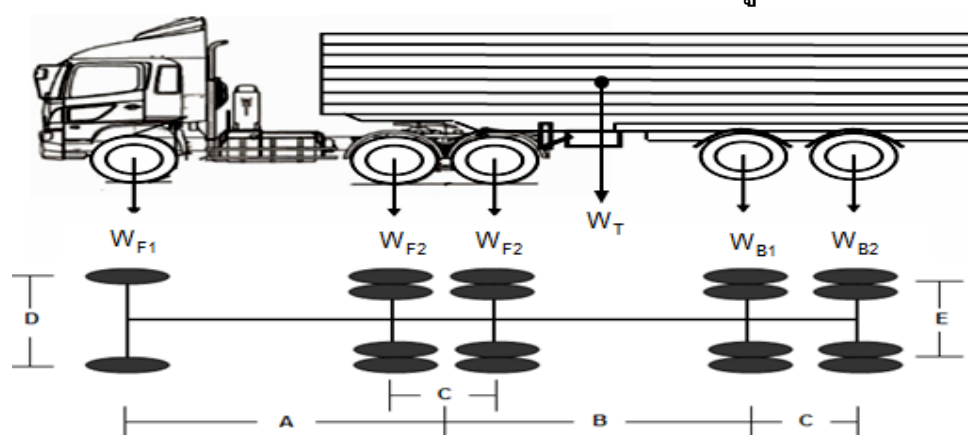


รูปที่ ๘-10 รถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ

ตารางที่ ๘-4 ข้อมูลของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ

ที่มาของ แหล่งข้อมูล	W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง	4	11	10	10	-	-	-	-	-	35
2. ยี่ห้อ HINO - รุ่น FG8JGLT	4	11	10	10	3780	7000	1300	1915	1820	35

ประเภทที่ 6 รถกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ

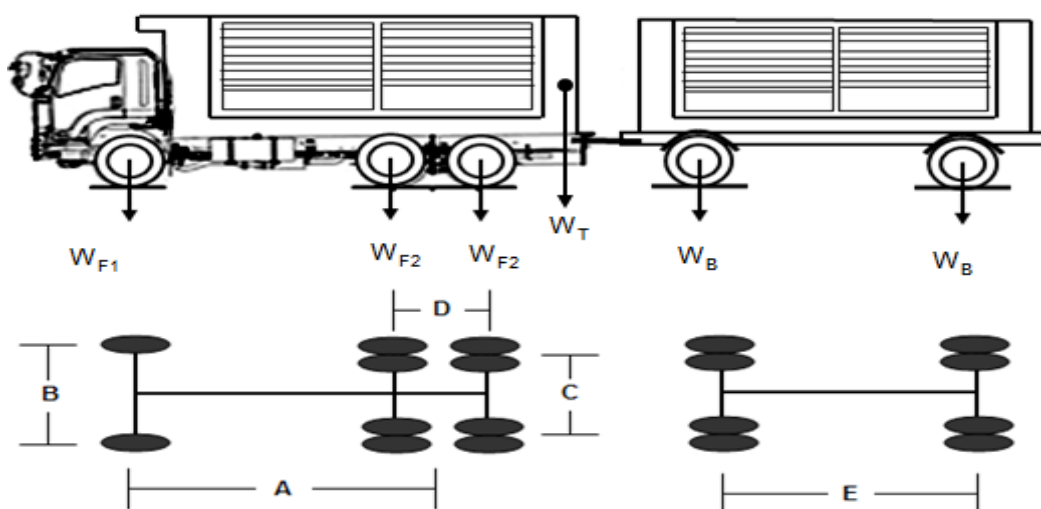


รูปที่ ๘-11 รถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ

ตารางที่ ๘-5 ข้อมูลของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล	W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)	
1. กรมทางหลวง	5	10	10	10	-	-	-	-	-	45	
2. ยี่ห้อ HINO	- รุ่น FM1AKKA	5	10	10	10	3780	7650	1300	1935	1855	45
	- รุ่น FM1AKLA	5	10	10	10	4030	7650	1300	1935	1855	45
	- รุ่น FM1JKKA	5	10	10	10	4030	7650	1300	1935	1855	45
	- รุ่น FM2PKLA	5	10	10	10	4030	7650	1300	1935	1855	45
3. ยี่ห้อ Mitsubishi - รุ่น FV51JHR3RDHA	5	10	10	10	3710	7650	1300	2050	1850	45	
4. ยี่ห้อ Nissan Diesel รุ่น CWM454/320 และ CWM454/350	5	10	10	10	4050	7650	1300	2050	1860	45	

ประเภทที่ 7 รถพ่วง 18 ล้อ



รูปที่ ๘-12 รถบรรทุกพ่วง 18 ล้อ

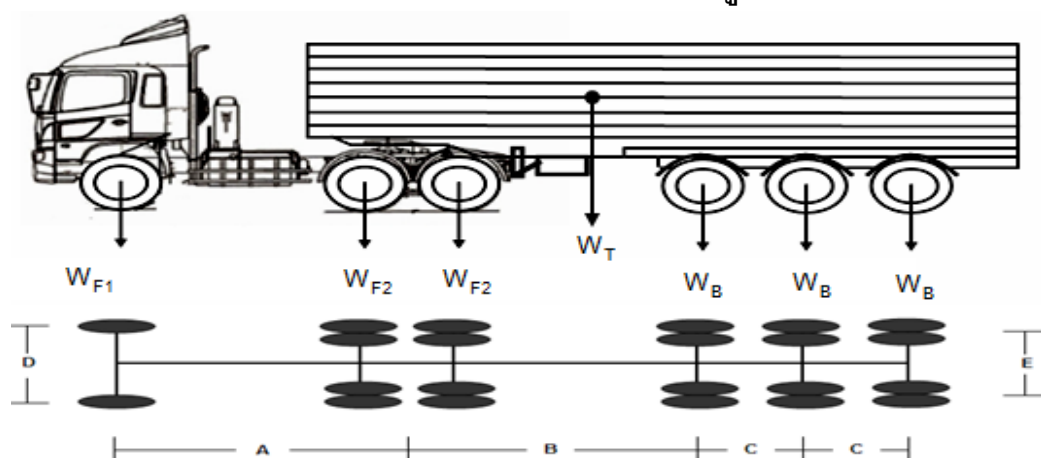
ตารางที่ ๘-6 ข้อมูลของรถบรรทุกพ่วง 18 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_B (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง		5	10	11	-	-	-	-	-	47
2. ยี่ห้อ HINO	- รุ่น FL8JNKA	5	10	11	4,780	1,930	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FL8JTCA	5	10	11	5,630	1,930	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FL8JNLA	5	10	11	4,780	1,930	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FM8JNKD	5	10	11	4,780	1,930	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FM8JNLD	5	10	11	4,780	1,930	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FM1AKKM	5	10	11	4,030	1,930	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FM1ANKD	5	10	11	4,780	1,935	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FM1ANLD	5	10	11	4,780	1,935	1,855	1,300	4,300	47
	- รุ่น FM2PNLD	5	10	11	4,780	1,935	1,855	1,300	4,300	47
3. ยี่ห้อ Mitsubishi	- รุ่น FN61FR2RDH1	5	10	11	5,650	1,930	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FN62FM1RDH1	5	10	11	4,800	1,930	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FN62FM2RDH	5	10	11	4,800	1,930	1,850	1,300	4,300	47

ตารางที่ ฌ-6 (ต่อ) ข้อมูลของรถบรรทุกพ่วง 18 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_B (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
4. ยี่ห้อ Isuzu	- รุ่น FVZ34PNDH	5	10	11	4,650	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVZ34PSDFH	5	10	11	4,650	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVZ34PSDTH	5	10	11	4,650	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FXZ77QDFH	5	10	11	4,700	2,056	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FXZ77QDTH	5	10	11	4,700	2,056	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34QNH	5	10	11	4,850	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34QNAK	5	10	11	4,850	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34QSH	5	10	11	4,850	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34RNH	5	10	11	5,200	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34RNAK	5	10	11	5,200	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34TNH	5	10	11	5,700	1,970	1,850	1,300	4,300	47
	- รุ่น FVM34TNAK	5	10	11	5,700	1,970	1,850	1,300	4,300	47
- รุ่น FVM34TSH	5	10	11	5,700	1,970	1,850	1,300	4,300	47	
5. ยี่ห้อ Nissan Diesel	- รุ่น CWM454M/6	5	10	11	4,800	2,020	1,860	1,300	4,300	47
	- รุ่น CWM454M/12	5	10	11	4,800	2,020	1,860	1,300	4,300	47
	- รุ่น CWM454M	5	10	11	4,050	2,020	1,860	1,300	4,300	47
	- รุ่น CWM454HM	5	10	11	4,050	2,020	1,860	1,300	4,300	47

ประเภทที่ 8 รถกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 3 เพลา 12 ล้อ

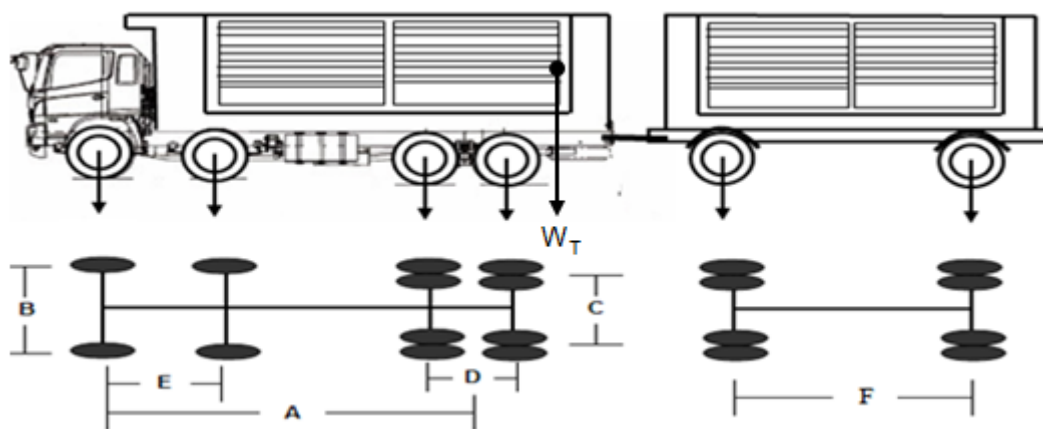


รูปที่ ฌ-13 รถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 3 เพลา 12 ล้อ

ตารางที่ ผ-7 ข้อมูลของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก10 ล้อ และรถลากจูงชนิด3 เพลา 12 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_B (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง		5	10	8.5	-	-	-	-	-	50.5
2. ยี่ห้อ HINO	รุ่น FM1AKKA	5	10	8.5	3780	4150	1300	1935	1855	50.5
	รุ่น FM1AKLA	5	10	8.5	4030	4150	1300	1935	1855	50.5
	รุ่น FM1JKKA	5	10	8.5	4030	4260	1300	1935	1855	50.5
	รุ่น FM2PKLA	5	10	8.5	4030	4150	1300	1935	1855	50.5
3. ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FV51JHR3RDHA		5	10	8.5	3710	4200	1300	2050	1850	50.5
4. ยี่ห้อ Nissan Diesel รุ่น CWM454/320 และ รุ่น CWM454/350		5	10	8.5	4050	-	1300	2050	1860	50.5

ประเภทที่ 9 รถพ่วง 20 ล้อ

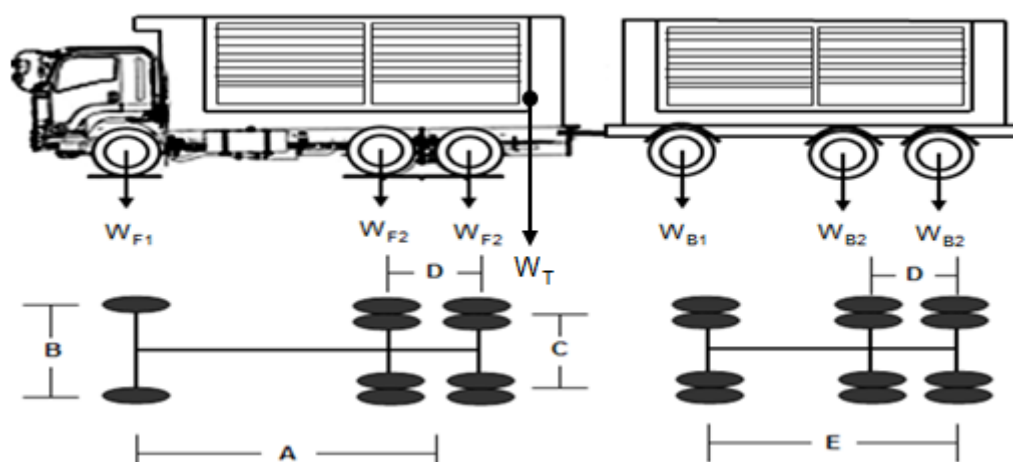


รูปที่ ผ-14 รถบรรทุกพ่วง 20 ล้อ

ตารางที่ ผ-8 ข้อมูลของรถบรรทุกพ่วง 20 ล้อ

ที่มาของ แหล่งข้อมูล	W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{F3} (ตัน)	W_B (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	F (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง	5	5	10	11	-	-	-	-	-	-	52
2. ยี่ห้อ HINO รุ่น GY2PSLA	5	5	10	11	6,000	1,935	1,855	1,300	1,890	4,300	52

ประเภทที่ 10 รถพ่วง 22 ล้อ



รูปที่ ผ-15 รถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ

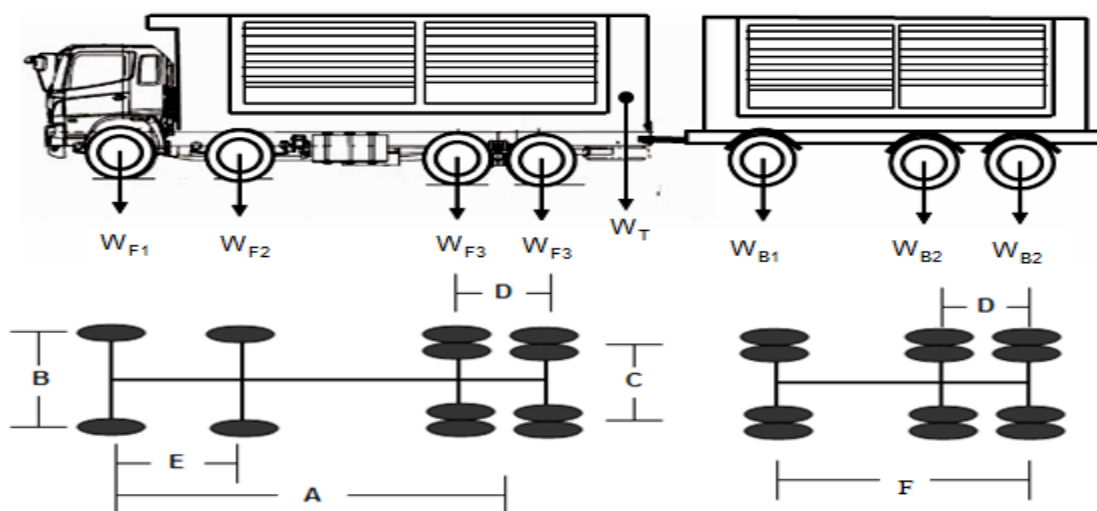
ตารางที่ ผ-9 ข้อมูลของรถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทางหลวง		5	10	10	9	-	-	-	-	-	53
2. ยี่ห้อ HINO	- รุ่น FL8JNKA	5	10	10	9	4,780	1,930	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FL8JTKA	5	10	10	9	5,630	1,930	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FL8JNLA	5	10	10	9	4,780	1,930	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FM8JNKD	5	10	10	9	4,780	1,930	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FM8JNLD	5	10	10	9	4,780	1,930	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FM1AKKM	5	10	10	9	4,030	1,930	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FM1ANKD	5	10	10	9	4,780	1,935	1,855	1,300	5,750	53
	- รุ่น FM1ANLD	5	10	10	9	4,780	1,935	1,855	1,300	5,750	53
- รุ่น FM2PNLD	5	10	10	9	4,780	1,935	1,855	1,300	5,750	53	
3. ยี่ห้อ Mitsu bishi	- รุ่น FN61FR2RDH1	5	10	10	9	5,650	1,930	1,850	1,300	5,750	53
	- รุ่น FN62FM1RDH1	5	10	10	9	4,800	1,930	1,850	1,300	5,750	53
	- รุ่น FN62FM2RDH	5	10	10	9	4,800	1,930	1,850	1,300	5,750	53

ตารางที่ ผ-9 (ต่อ) ข้อมูลของรถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ

ที่มาของแหล่งข้อมูล		W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	W_T (ตัน)
4. ยี่ห้อ Isuzu	รุ่น FVZ34PNDH	5	10	10	9	4,650	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVZ34PSDFH	5	10	10	9	4,650	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVZ34PSDTH	5	10	10	9	4,650	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FXZ77QDFH	5	10	10	9	4,700	2,056	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FXZ77QDTH	5	10	10	9	4,700	2,056	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34QNH	5	10	10	9	4,850	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34QNAK	5	10	10	9	4,850	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34QSH	5	10	10	9	4,850	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34RNH	5	10	10	9	5,200	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34RNAK	5	10	10	9	5,200	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34TNH	5	10	10	9	5,700	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34TNAK	5	10	10	9	5,700	1,970	1,850	1,300	5,750	53
	รุ่น FVM34TSH	5	10	10	9	5,700	1,970	1,850	1,300	5,750	53
5. ยี่ห้อ Nissan Diesel	รุ่น CWM454M/6	5	10	10	9	4,800	2,020	1,860	1,300	5,750	53
	รุ่น CWM454M/12	5	10	10	9	4,800	2,020	1,860	1,300	5,750	53
	รุ่น CWM454M	5	10	10	9	4,050	2,020	1,860	1,300	5,750	53
	รุ่น CWM454HM	5	10	10	9	4,050	2,020	1,860	1,300	5,750	53

ประเภทที่ 11 รถพ่วง 24 ล้อ



รูปที่ ผ-16 รถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ

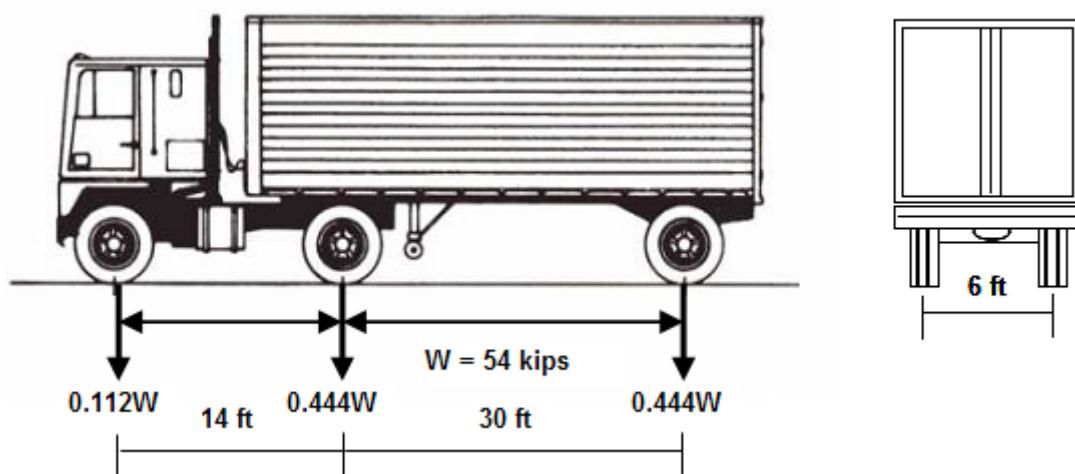
ตารางที่ ฌ-10 แสดงข้อมูลของรถบรรทุกพ่วง 24 ล้อ

ที่มาของ แหล่งข้อมูล	W_{F1} (ตัน)	W_{F2} (ตัน)	W_{F3} (ตัน)	W_{B1} (ตัน)	W_{B2} (ตัน)	A (มม.)	B (มม.)	C (มม.)	D (มม.)	E (มม.)	F (มม.)	W_T (ตัน)
1. กรมทาง หลวง	5	5	10	10	9	-	-	-	-	-	-	58
2. ยี่ห้อ HINO รุ่น GY2PSLA	5	5	10	10	9	6,000	1,935	1,855	1,300	1,890	5,750	58

ข้อมูลรถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO (fatigue truck)

การประเมินอายุการใช้งานตามข้อกำหนด AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ได้เสนอให้ใช้แบบจำลองรถบรรทุกในการประเมินความล้า โดยที่รถบรรทุกมาตรฐานนี้จะเป็นตัวแทนของรถบรรทุกที่มีความหลากหลายและแตกต่างกันในเรื่องของ ชนิดรถและน้ำหนักที่แล่นอยู่ในจราจรจริง ซึ่งระยะระหว่างเพลาและน้ำหนักที่กระจายลงในแต่ละเพลาของรถบรรทุกมาตรฐานนั้นจะแทนสำหรับรถบรรทุกทั่วไปที่ใช้ในอเมริกา ดังรูปที่ ฌ-17 ในงานวิจัยนี้จะพิจารณา fatigue truck ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรถบรรทุกหนักในไทย

ประเภทที่ 2 รถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO (fatigue truck)

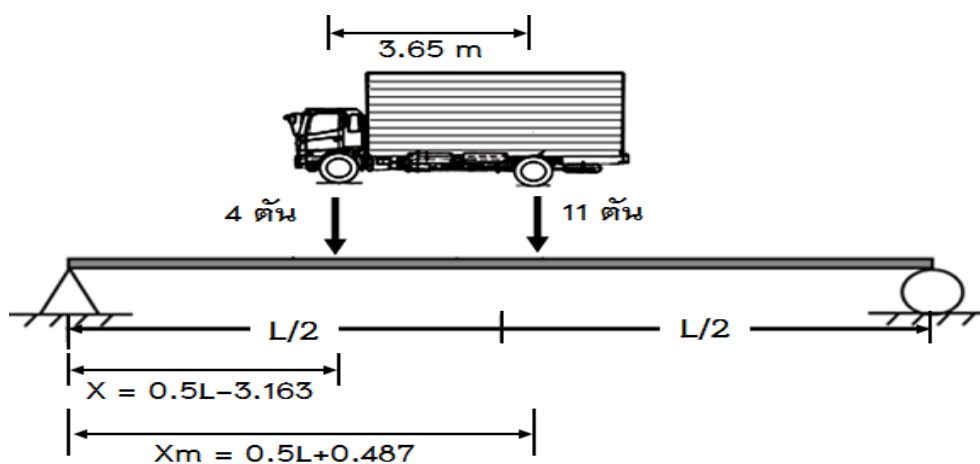


รูปที่ ฌ-17 ข้อมูลของรถบรรทุกตามข้อกำหนด AASHTO (fatigue truck)

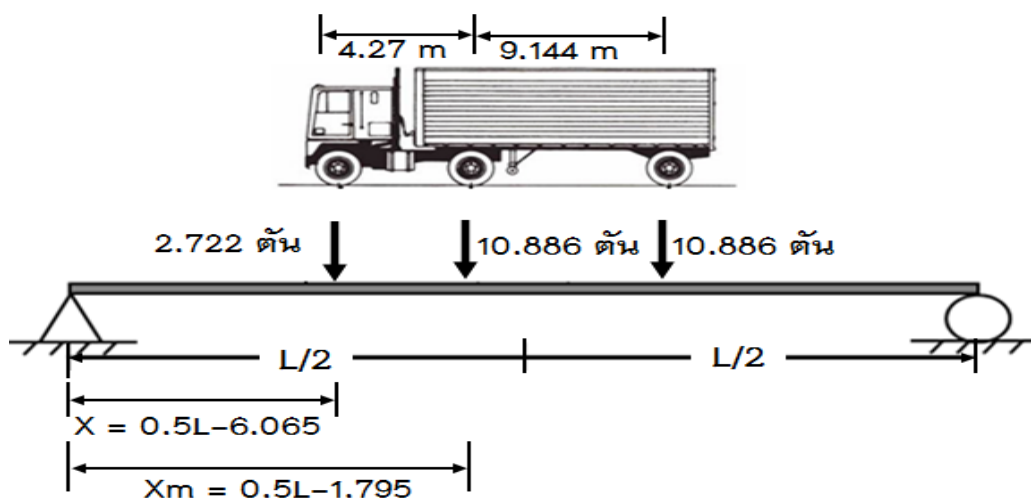
ภาคผนวก ค

**ตำแหน่งของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดในการวิเคราะห์
ใน 1 มิติ และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดบนสะพาน**

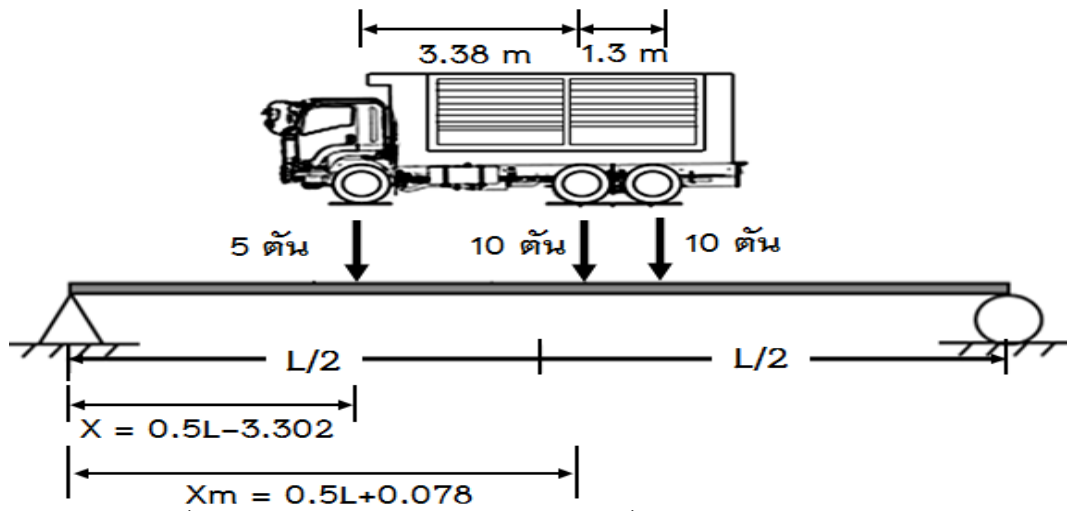
จากข้อมูลน้ำหนักและระยะต่างๆของรถบรรทุกแต่ละประเภทแต่ละยี่ห้อที่มีขายตามท้องตลาดจะเห็นได้ว่าจะมีความแตกต่างกันตามประเภทรถบรรทุก ยี่ห้อ และรุ่น ดังนั้นค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์หนึ่งมิติในคานช่วงเดียวแบบรองรับธรรมดา (Simple Beam) ด้วยวิธี Absolute Maximum Moment ของรถบรรทุกประเภท, ยี่ห้อ และรุ่นต่างๆ ก็จะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งผลของระยะระหว่างล้อที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดจะต้องมีระยะห่างระหว่างล้อน้อยที่สุด ซึ่งจะแสดงตำแหน่งของรถบรรทุกประเภทต่างๆ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดเรียงตามน้ำหนักรวมของรถบรรทุก ดังรูปที่ ฎ-18 ถึง ฎ-28 โดยที่ L คือ ความยาวช่วงสะพาน (เมตร), X คือ ระยะจากปลายสะพานด้านซ้ายไปยังล้อหน้าของรถบรรทุก (เมตร) และ X_m คือ ระยะจากปลายสะพานด้านซ้ายไปยังตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด (เมตร)



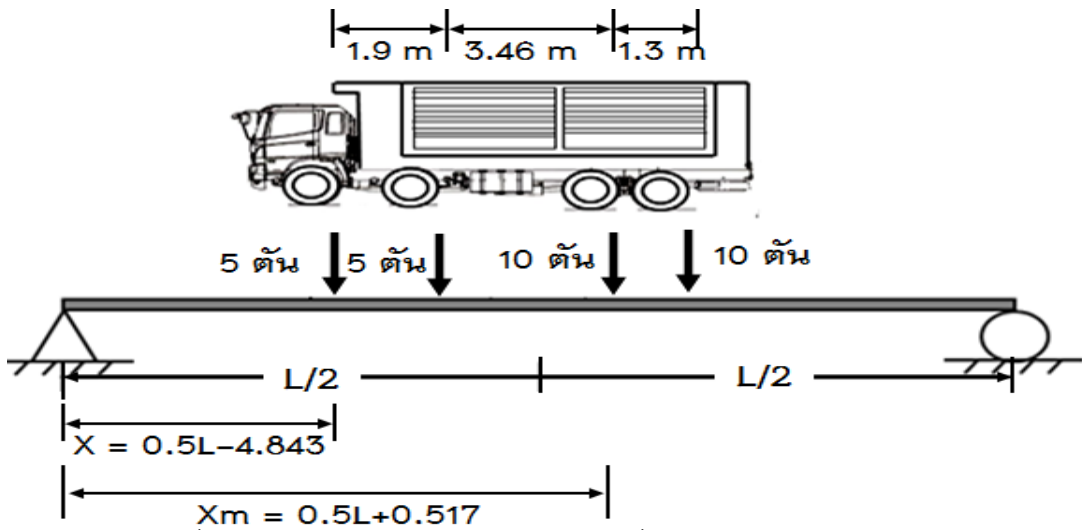
รูปที่ ฎ-18 ตำแหน่งของรถบรรทุก 6 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



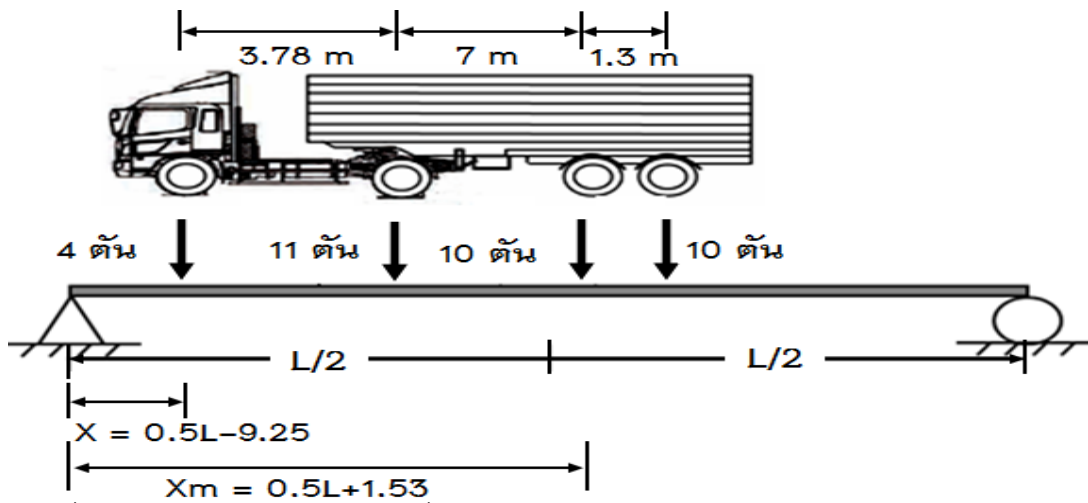
รูปที่ ฎ-19 ตำแหน่งของรถบรรทุก fatigue truck ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



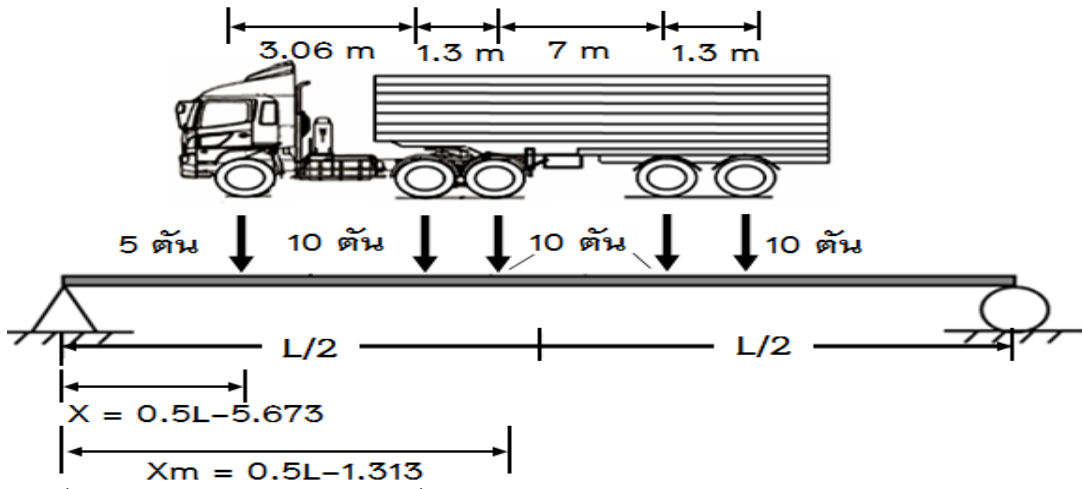
รูปที่ ผ-20 ตำแหน่งของรถบรรทุก 10 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



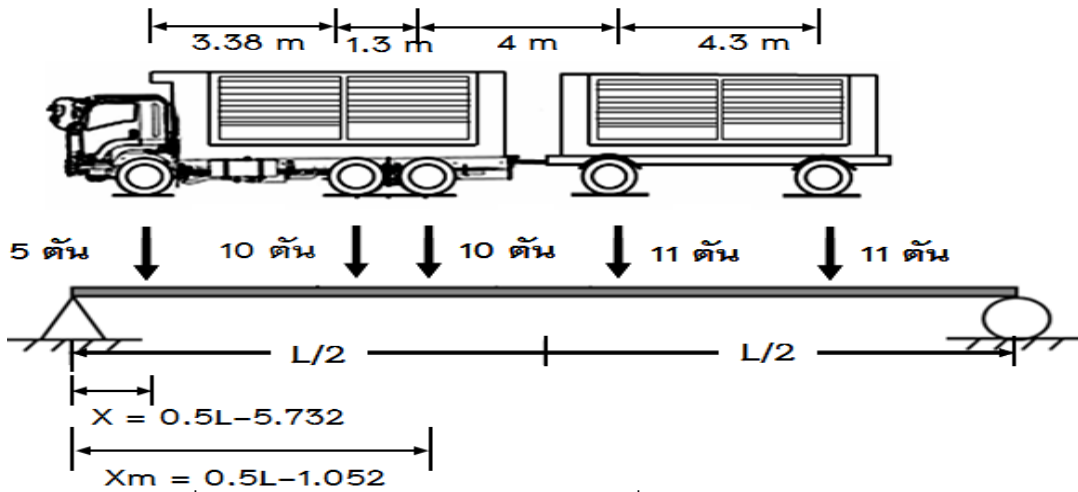
รูปที่ ผ-21 ตำแหน่งของรถบรรทุก 12 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



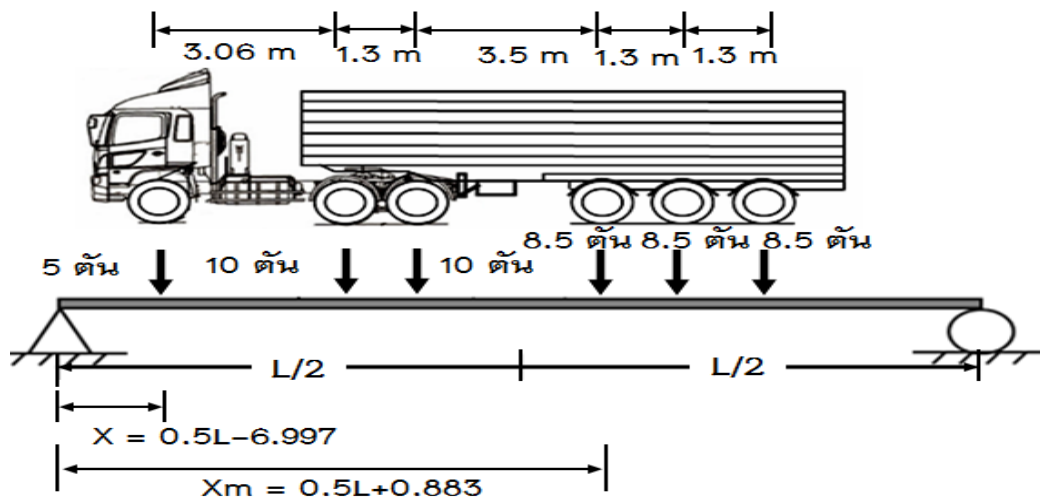
รูปที่ ผ-22 ตำแหน่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 6 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



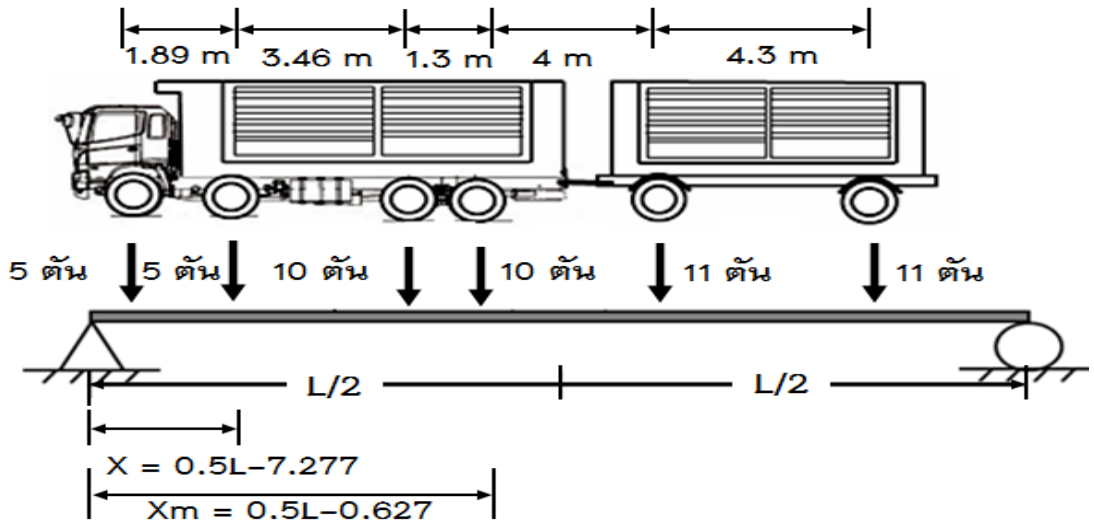
รูปที่ ๘-23 ตำแหน่งของรถบรรทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 2 เพลา 8 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



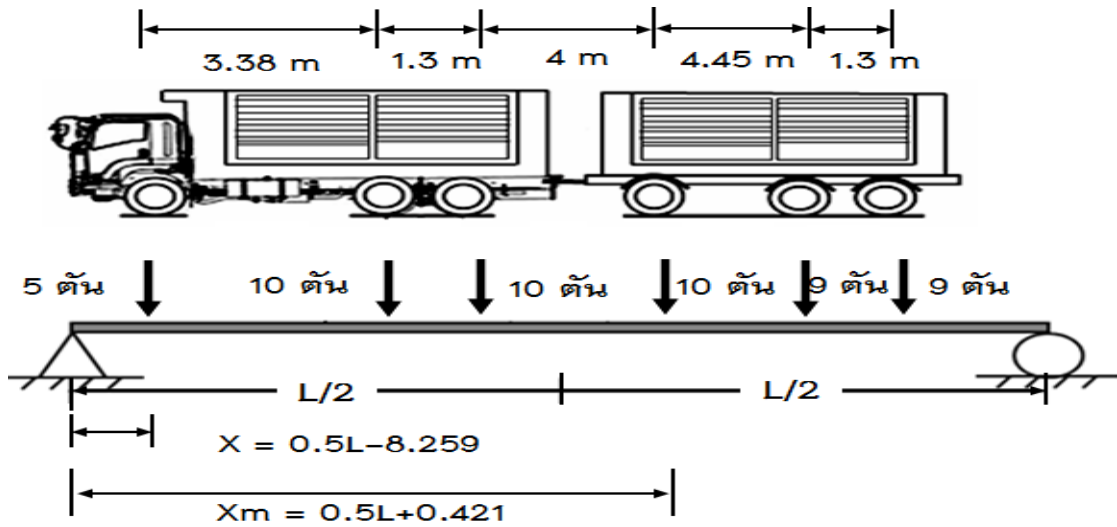
รูปที่ ๘-24 ตำแหน่งของรถบรรทุกทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 18 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



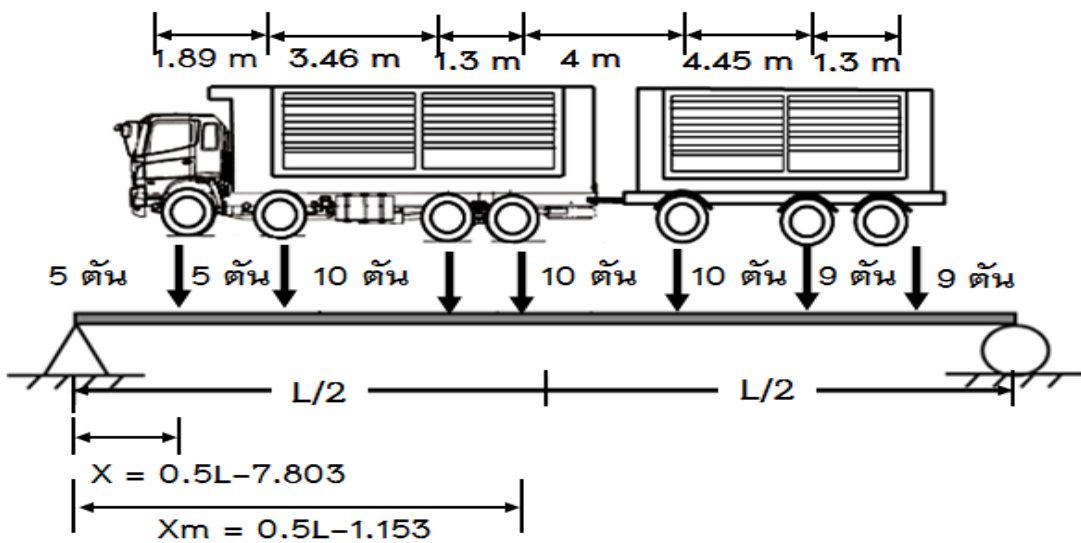
รูปที่ ๘-25 ตำแหน่งของรถบรรทุกทุกกึ่งพ่วงชนิดหัวลาก 10 ล้อ และรถลากจูงชนิด 3 เพลา 12 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



รูปที่ ๘-26 ตำแหน่งของรถบรรทุก 20 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



รูปที่ ๘-27 ตำแหน่งของรถบรรทุก 22 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด



ที่ ๘-28 ตำแหน่งของรถบรรทุก 24 ล้อ ที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด

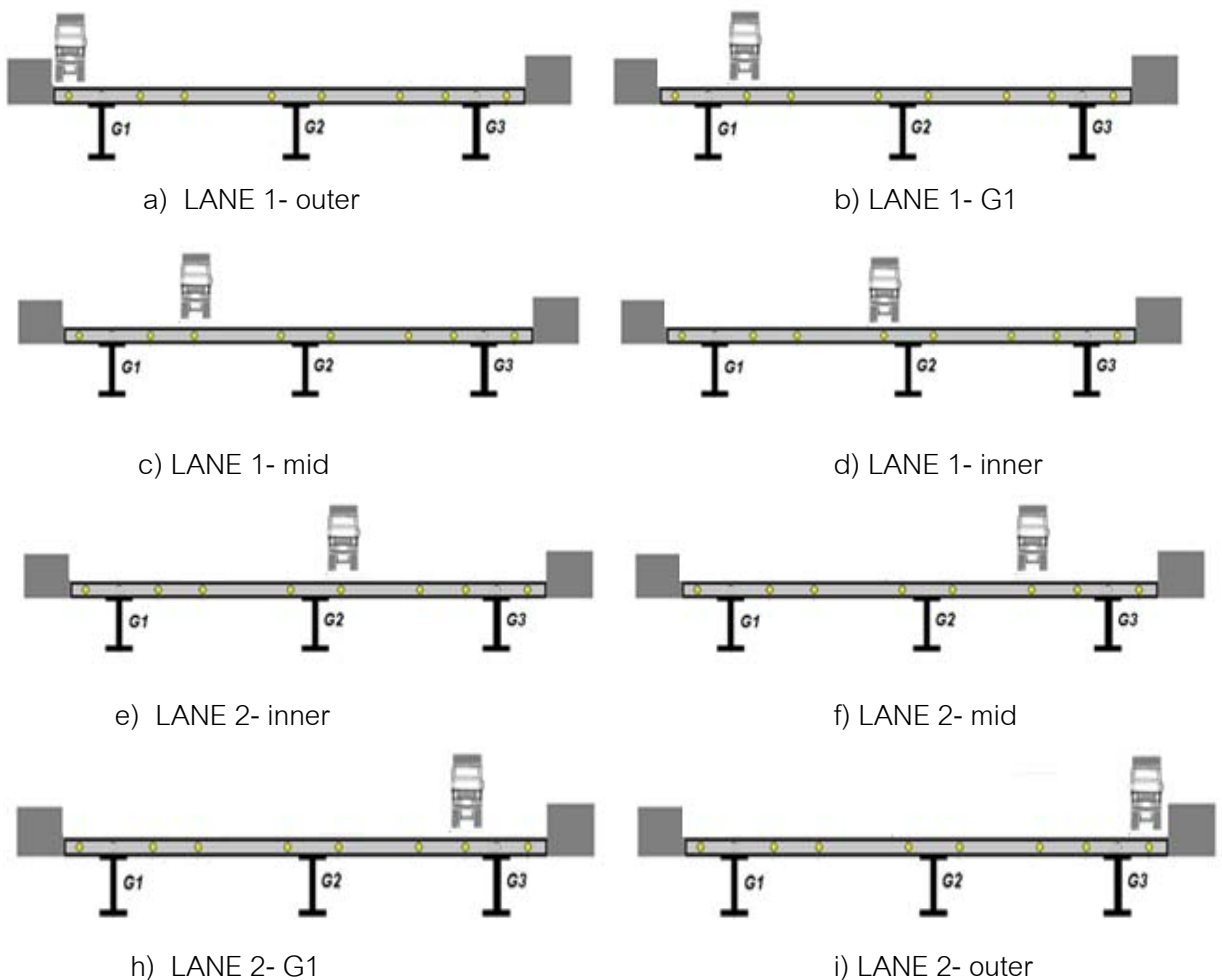
ภาคผนวก ง

การกำหนดรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกในแบบจำลองสะพาน

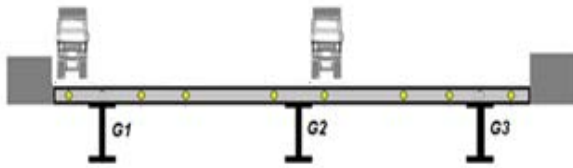
เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งตามแนวขวางที่ทำให้เกิดหน่วยแรงวิกฤติในคานต่างๆ ในงานวิจัยนี้เป็นสะพานที่มีสองช่องเลน ทั้ง 2 รูปแบบสะพาน โดยที่รูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง จะมี 2 กรณี คือ กรณีรถบรรทุก 1 คัน และ 2 คัน ดังนี้

สำหรับสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

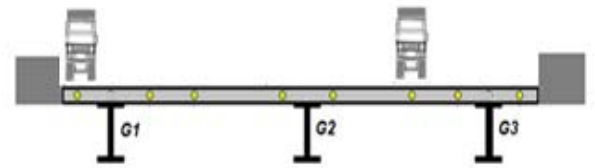
ในกรณีรถบรรทุก 1 คัน มีทั้งหมด 8 รูปแบบ ดังรูปที่ ผ-29 และในกรณีที่รถบรรทุก 2 คัน มีทั้งหมด 16 รูปแบบ ดังรูปที่ ผ-30



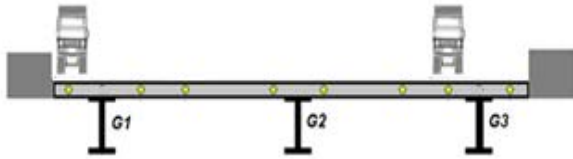
รูปที่ ผ-29 แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 1 คัน
ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล



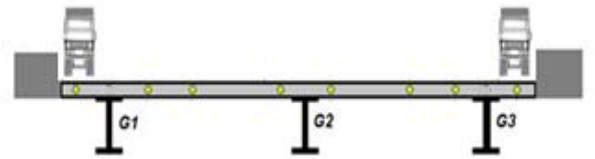
a) LANE 1- outer & LANE 2- inner



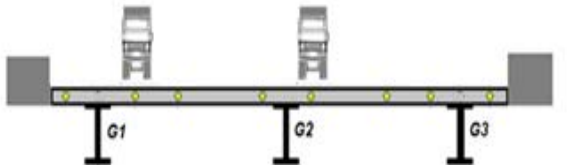
b) LANE 1- outer & LANE 2- mid



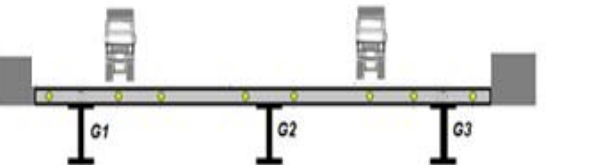
c) LANE 1- outer & LANE 2- G3



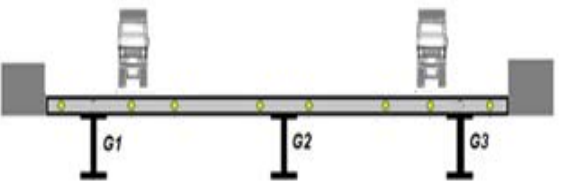
d) LANE 1- outer & LANE 2- outer



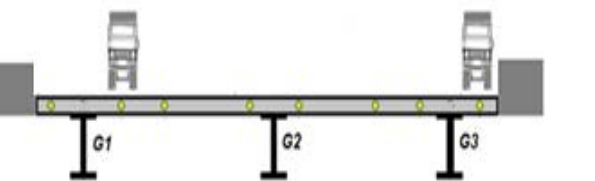
e) LANE 1- G2 & LANE 2- inner



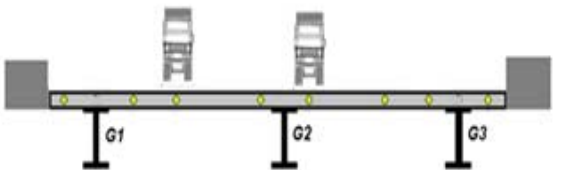
f) LANE 1- G2 & LANE 2- mid



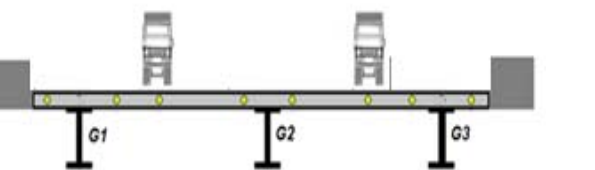
g) LANE 1- G2 & LANE 2- G3



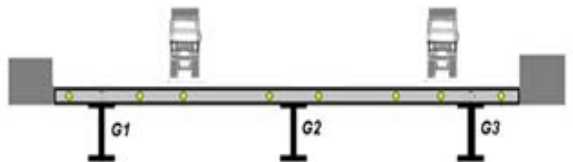
h) LANE 1- G2 & LANE 2- outer



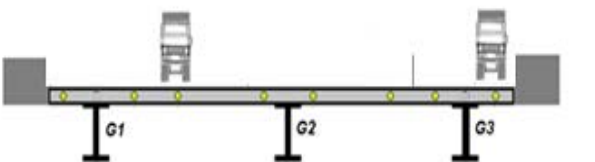
i) LANE 1- mid & LANE 2- inner



j) LANE 1- mid & LANE 2- mid



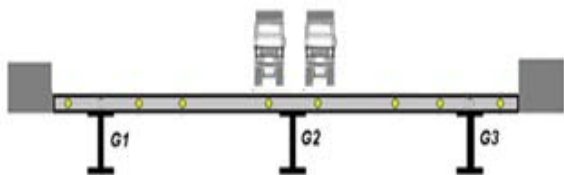
k) LANE 1- mid & LANE 2- G3



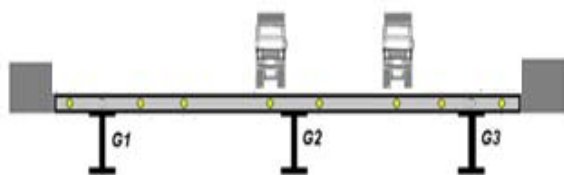
l) LANE 1- mid & LANE 2- outer

รูปที่ ผ-30 แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 2 คัน

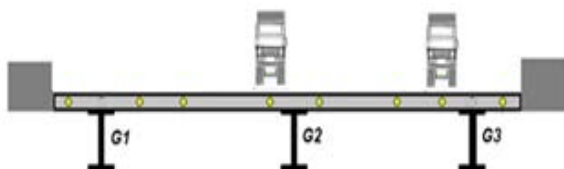
ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนุกูล



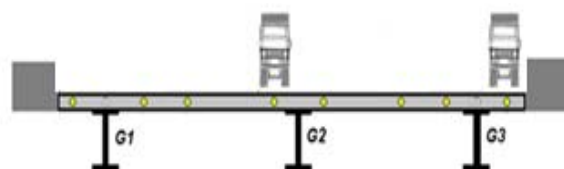
m) LANE 1- inner & LANE 2- inner



n) LANE 1- inner & LANE 2- mid



o) LANE 1- inner & LANE 2- G3

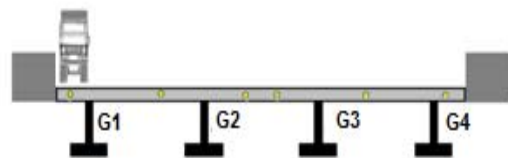


p) LANE 1- inner & LANE 2- outer

รูปที่ ผ-30 (ต่อ) แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 2 คันของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

สำหรับสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

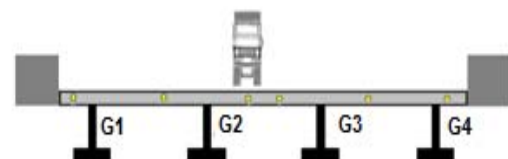
ในกรณีรถบรรทุก 1 คัน มีทั้งหมด 6 รูปแบบ ดังรูปที่ ผ-31 และในกรณีที่รถบรรทุก 2 คัน มีทั้งหมด 9 รูปแบบ ดังรูปที่ ผ-32



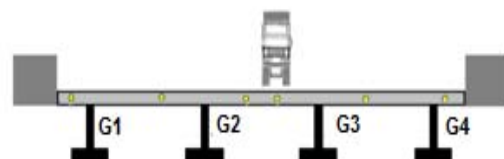
a) LANE 1- outer



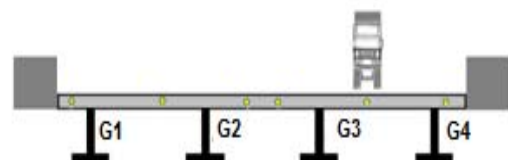
b) LANE 1- mid



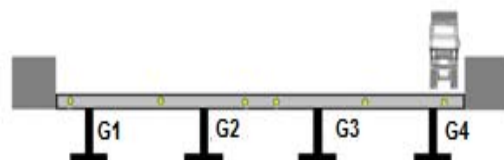
c) LANE 1- inner



d) LANE 2- inner

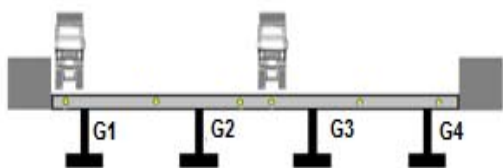


e) LANE 2- mid

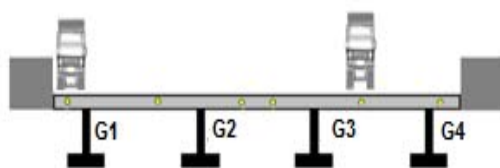


f) LANE 2- outer

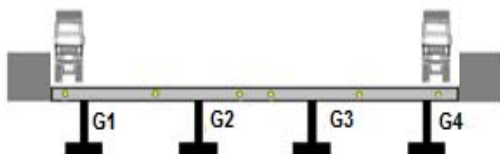
รูปที่ ผ-31 แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 1 คันของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง



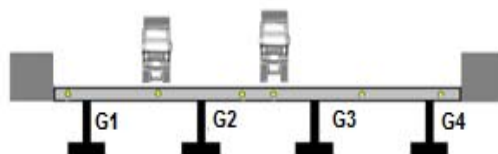
a) LANE 1- outer & LANE 2- inner



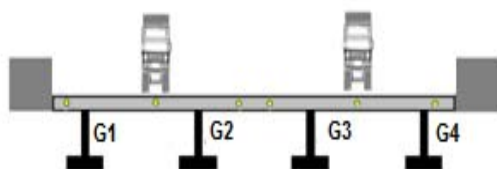
b) LANE 1- outer & LANE 2- mid



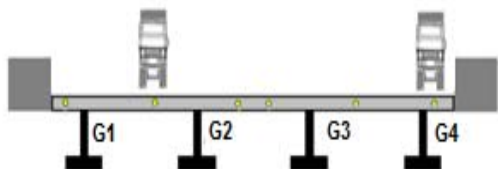
c) LANE 1- outer & LANE 2- outer



d) LANE 1- mid & LANE 2- inner



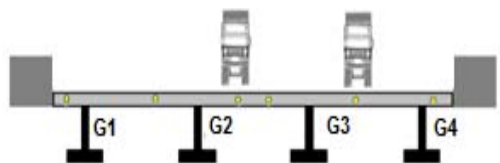
e) LANE 1- mid & LANE 2- mid



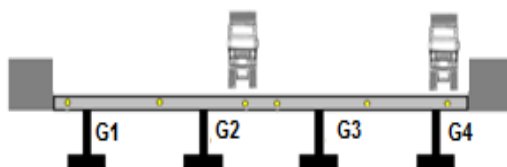
f) LANE 1- mid & LANE 2- outer



g) LANE 1- inner & LANE 2- inner



h) LANE 1- inner & LANE 2- mid



i) LANE 1- inner & LANE 2- outer

รูปที่ ผ-32 แสดงรูปแบบการวางตำแหน่งของรถบรรทุกตามแนวขวาง ในกรณีรถบรรทุก 2 คัน
ของแบบจำลองสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

ภาคผนวก จ

การคำนวณความกว้างประสิทธิผลของคานในสะพานเหล็ก

สำหรับสะพานข้ามแยกประธานภูกุล

รูปแบบที่ 1 ค่าความกว้างประสิทธิผล ตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007

Exterior Girders (G1) ค่าความกว้างประสิทธิผลมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความกว้างประสิทธิผลของคานภายในที่อยู่ติดกัน บวกด้วยค่าที่น้อยที่สุดดังต่อไปนี้

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ความกว้างของส่วนยื่น (Overhang width) คือ 1070 มม.
- 6 เท่าของความหนาพื้นบวกด้วย ครึ่งหนึ่งของความหนาที่มากกว่าในชั้นส่วนเอวของแต่ละคาน หรือ 1/4 เท่าของความกว้างชั้นส่วนปีกด้านบนของคาน คือ $6 * (205) + 12$ หรือ $1/4 * (520) = 1242$ มม.

ดังนั้นใช้ G1 - Effective Width คือ $2472 + 1070 = 3542$ มม.

Interior Girders (G2) โดยกำหนดค่าความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุด ดังต่อไปนี้

- 1 / 4 เท่า ของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/4 * (12485 * 2) = 6242.5$ มม.
- ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างคานที่กัน คือ 2880 มม.
- 12 เท่าของความหนาพื้น บวกด้วยความหนาที่มากกว่าในชั้นส่วนเอวของแต่ละคาน หรือ 1/2 เท่าของความกว้างชั้นส่วนปีกด้านบนของคาน คือ $12 * (205) + 12$ หรือ $1/2 * (450) = 2472$ มม.

ดังนั้นใช้ G2 - Effective Width คือ 2472 มม.

Exterior Girders (G3) ค่าความกว้างประสิทธิผลมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความกว้างประสิทธิผลของคานภายในที่อยู่ติดกัน บวกด้วยค่าที่น้อยที่สุดดังต่อไปนี้

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ความกว้างของส่วนยื่น (Overhang width) คือ 1370 มม.
- 6 เท่าของความหนาพื้นบวกด้วย ครึ่งหนึ่งของความหนาที่มากกว่าในชั้นส่วนเอวของแต่ละคาน หรือ 1/4 เท่าของความกว้างชั้นส่วนปีกด้านบนของคาน คือ $6 * (205) + 12$ หรือ $1/4 * (450) = 1242$ มม.

ดังนั้นใช้ G3 - Effective Width คือ $2472 + 1242 = 3714$ มม.

รูปแบบที่ 2 กำหนดใช้ค่าความกว้างประสิทธิภาพ ตามมาตรฐาน AISC 2010

Exterior Girders (G1) พิจารณาค่าความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด ด้านซ้ายและด้านขวาของ
แล้วนำมาบวกกัน

ด้านซ้ายของคาน G1

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ความกว้างของส่วนที่ยื่น คือ 1070 มม.

ด้านขวาของคาน G1

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างคานที่ติดกัน คือ 1440 มม.

ดังนั้นใช้ G1 - Effective Width คือ $1070 + 1440 = 2510$ มม.

Interior Girders (G2) พิจารณาค่าความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด ด้านซ้ายและด้านขวาของ
แล้วนำมาบวกกัน

ด้านซ้ายของคาน G2 และด้านขวาของคาน G2

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างคานที่ติดกัน คือ 1440 มม.

ดังนั้นใช้ G2 - Effective Width คือ $1440 + 1440 = 2880$ มม.

Exterior Girders (G3) พิจารณาค่าความกว้างประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด ด้านซ้ายและด้านขวาของ
แล้วนำมาบวกกัน

ด้านซ้ายของคาน G3

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างคานที่ติดกัน คือ 1440 มม.
- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ความกว้างของส่วนที่ยื่น คือ 1070 มม.

ด้านขวาของคาน G3

- 1/8 เท่าของความยาวช่วงสะพาน คือ $1/8 * (12485 * 2) = 1560.63$ มม.
- ความกว้างของส่วนที่ยื่น คือ 1370 มม.

ดังนั้นใช้ G3 - Effective Width คือ $1440 + 1370 = 2810$ มม.

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบ

ผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบ จะแสดงตัวอย่างการคำนวณเฉพาะรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO (fatigue truck) เพียงเท่านั้น ทั้งในกรณีศึกษาบรรทุก 1 คัน และทั้งในกรณีศึกษาบรรทุก 2 คัน โดยที่ค่าอธิบายตัวแปรและสมการในการหาค่าตัวแปรต่างๆในการคำนวณคานหน้าตัดประกอบแสดงดังหัวข้อที่ 3.6.2

สำหรับสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

กรณีศึกษาบรรทุก 1 คัน ; Fatigue Truck

ตารางที่ ผ-11 แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G1 ในกรณีศึกษาบรรทุก 1 คัน

Effective Width Case	G1 – Result									
	Girder		Deck		A_g (mm ²)	I_g (mm ⁴)	e_g (mm)	e_s (mm)	Moment produced by Axial Force (kg - m)	Total Moment (kg - m)
	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)						
AASHTO LRFD 2007	-25735	-36141.2	-2916.2	50547.9	0.0403	0.015	525.62	299.38	-34129.59	-62780.79
AISC 2010	-25735	-36141.2	-2295.7	44031.6	0.0403	0.015	525.62	299.38	-32178.73	-60209.43
Equilibrium Axial Force	-25735	-36141.2	-1561.7	36300.8	0.0403	0.015	525.62	299.38	-29864.27	-57160.97

ตารางที่ ผ-12 แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G2 ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

Effective Width Case	G2 – Result									
	Girder		Deck		A_g (mm ²)	I_g (mm ⁴)	e_g (mm)	e_s (mm)	Moment produced by Axial Force (kg - m)	Total Moment (kg - m)
	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)						
AASHTO LRFD 2007	-14800	-22371	-310.1	16910.1	0.037	0.0135	546.79	278.208	-16936.81	-32046.91
AISC 2010	-14800	-22371	-562.8	19436.9	0.037	0.0135	546.79	278.208	-17639.77	-33002.59
Equilibrium Axial Force	-14800	-22371	-1045.6	23545.1	0.037	0.0135	546.79	278.208	-18782.72	-34628.32

ตารางที่ ผ-13 แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G3 ในกรณีศึกษารถบรรทุก 1 คัน

Effective Width Case	G3 – Result									
	Girder		Deck		A_g (mm ²)	I_g (mm ⁴)	e_g (mm)	e_s (mm)	Moment produced by Axial Force (kg - m)	Total Moment (kg - m)
	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)						
AASHTO LRFD 2007	-23430	-36518.8	-3613.1	51520.3	0.0372	0.0135	563.82	261.18	-34046.05	-61089.15
AISC 2010	-23430	-36518.8	-2435.2	42046.9	0.0372	0.0135	563.82	261.18	-31571.82	-57437.02
Equilibrium Axial Force	-23430	-36518.8	-2060.1	35101.2	0.0372	0.0135	563.82	261.18	-29757.77	-55247.87

กรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน ; Fatigue Truck

ตารางที่ ผ-14 แสดงผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G1 ในกรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน

Effective Width Case	G1 – Result									
	Girder		Deck		A _g (mm ²)	I _g (mm ⁴)	e _g (mm)	e _s (mm)	Moment produced by Axial Force (kg - m)	Total Moment (kg - m)
	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)						
AASHTO LRFD 2007	-33632	-47674.9	-3086.8	66416.7	0.0403	0.015	530.55	294.45	-44850.25	-81569.05
AISC 2010	-33632	-47674.9	-2183.5	55995.4	0.0403	0.015	530.55	294.45	-41781.73	-77597.23
Equilibrium Axial Force	-33632	-47674.9	-1632.84	44909.7	0.0403	0.015	530.55	294.45	-38517.59	-73782.43

ตารางที่ ผ-15 แสดงผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G2 ในกรณีศึกษาบรรทุกทุก 2 คัน

Effective Width Case	G2 – Result									
	Girder		Deck		A _g (mm ²)	I _g (mm ⁴)	e _g (mm)	e _s (mm)	Moment produced by Axial Force (kg - m)	Total Moment (kg - m)
	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)						
AASHTO LRFD 2007	-29574	-44295	-629.5	34754.94	0.0372	0.013	541.81	283.19	-33841.68	-64045.18
AISC 2010	-29574	-44295	-908.6	39135.1	0.0372	0.013	541.81	283.19	-35082.12	-65564.72
Equilibrium Axial Force	-29574	-44295	-1645.7	47143.5	0.0372	0.013	541.81	283.19	-37350.05	-68569.75

ตารางที่ ผ-16 แสดงผลผลการคำนวณค่าโมเมนต์ในคานหน้าตัดประกอบของคาน G3 ในกรณีศึกษารถบรรทุก 2 คัน

Effective Width Case	G3 – Result									
	Girder		Deck		A _g (mm ²)	I _g (mm ⁴)	e _g (mm)	e _s (mm)	Moment produced by Axial Force (kg - m)	Total Moment (kg - m)
	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)	Moment (kg - m)	Axial Force (kg)						
AASHTO LRFD 2007	-30647	-48155.64	-3913.6	67262.54	0.0372	0.013	568.41	256.595	-44631.14	-79191.74
AISC 2010	-30647	-48155.64	-2651.6	51642.85	0.0372	0.013	568.41	256.595	-40623.20	-73921.80
Equilibrium Axial Force	-30647	-48155.64	-2244.9	42032.9	0.0372	0.013	568.41	256.595	-38157.34	-71049.24

ภาคผนวก ช

การคำนวณค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการตามมาตรฐาน
AASHTO LRFD 2007

สำหรับสะพานข้ามแยกประชาชนกุล

ค่า LDF สำหรับค่าโมเมนต์ของสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตและคานเป็นโครงสร้างเหล็ก และมีจำนวนช่องทางอย่างน้อยสองช่องทาง ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 สำหรับคานภายในของสะพานและคานภายนอกของสะพาน แสดงดังสมการที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ ซึ่งค่า LDF จากสมการจะไม่ขึ้นอยู่ประเภทของรถบรรทุก

- สำหรับคานภายในของสะพาน (G2)

S = ระยะห่างระหว่างคาน = 2880 มม.

L = ความยาวช่วงสะพาน = 24970 มม.

n = อัตราส่วนค่ามอดุลัสระหว่างเหล็ก และคอนกรีต (E_s / E_c) = 8

I = ค่าสติเฟเนสของคาน = $13.46 \cdot 10^9$ มม.⁴

A = พื้นที่หน้าตัดของคาน = $3.72 \cdot 10^9$ มม.²

$K_g = n(I + A e^2)$ = ค่าสติเฟเนสตามแนวยาว = $8(13.46 \cdot 10^9 + 37200 (825)^2)$ = $3.1 \cdot 10^{11}$ มม.⁴

t_s = ความหนาแผ่นพื้น = 205 มม.

ดังนั้น LDF ของคาน G2 เท่ากับ 0.745639

- สำหรับคานภายนอกของสะพาน (G1 และ G3)

ค่า d_e ของคาน G1 = d_e ของคาน G3 = 620 มม. จะได้ค่า $e = 0.99$

ดังนั้น LDF ของคาน G1 และ G3 เท่ากับ 0.739248

สำหรับสะพานข้ามแยกวงศ์สว่าง

ค่า LDF สำหรับสะพานที่มีรูปแบบแผ่นพื้นเหล็กที่มีลักษณะเป็นตาราง วางบนคานเหล็ก (steel grids on steel beams) และมีจำนวนช่องทางอย่างน้อยสองช่องทาง ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 สำหรับคานภายในของสะพานที่มีความหนาของแผ่นพื้น ที่น้อยกว่า 0.10 เมตร แสดงดังสมการที่ 3.17 ซึ่งค่า LDF จากสมการจะไม่ขึ้นอยู่ประเภทของรถบรรทุก และสำหรับคานภายนอกของสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ค่า LDF กำหนดให้ใช้กฎของคานงัด (Lever Rule) จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถบรรทุกประเภทต่างๆ โดยที่ค่า LDF จากรถบรรทุกในแต่ละประเภทของคาน G1, G2, G3 และ G4 แสดงดังตารางที่ ผ-17

ตารางที่ ผ-17 ค่า LDF จากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่างของแต่ละคาน

ประเภทรถบรรทุก	ตัวค่าตัวคูณกระจายน้ำหนักทางขวางจากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ของสะพานข้ามแยกวงศ์สว่างของคาน			
	G1	G2	G3	G4
1	0.805	0.8	0.8	0.805
2	0.802	0.8	0.8	0.802
3	0.786	0.8	0.8	0.786
4	0.788	0.8	0.8	0.788
5	0.797	0.8	0.8	0.797
6	0.786	0.8	0.8	0.786
7	0.786	0.8	0.8	0.786
8	0.786	0.8	0.8	0.786
9	0.788	0.8	0.8	0.788
10	0.786	0.8	0.8	0.786
11	0.788	0.8	0.8	0.788

ภาคผนวก ซ

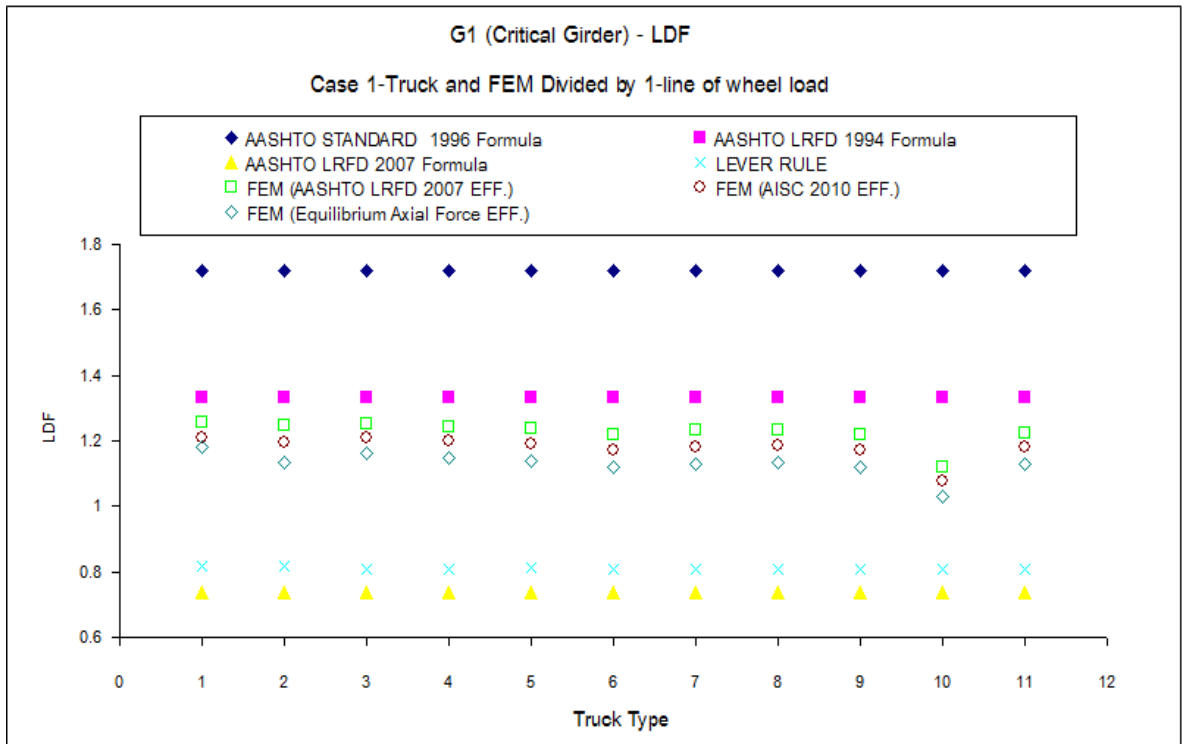
**เปรียบเทียบค่าตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวางของ
สะพานเหล็กข้ามแยกประชานุกูล**

ในการคำนวณค่าตัวคูณการกระจายน้ำหนักทางขวาง(LDF) จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องศึกษาถึงนิยามของการคำนวณโดยละเอียดซึ่งจากการศึกษาของ Sotelino และคณะ (2004) ได้คำนวณหาค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 1994 โดยให้นิยามของค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เท่ากับ ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบจากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หารด้วยค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกข้างเดียว (one-line of wheel load) แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 2007 ดังนั้นจึงพิจารณาการเปรียบเทียบกับค่า LDF กับสมการตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดตาม AASHTO ได้แก่ AASHTO standard 1996, AASHTO LRFD 1994 และ AASHTO LRFD 2007 เพื่อให้ทราบถึงนิยามของค่า LDF แบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แท้จริง โดยพิจารณาแสดงผลการเปรียบเทียบเฉพาะที่คานวิกฤติของแบบจำลองสะพานข้ามแยกประชานุกูลในกรณีศึกษาถาวรทุก 1 คัน ได้กำหนดนิยามของค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 วิธี ดังนี้

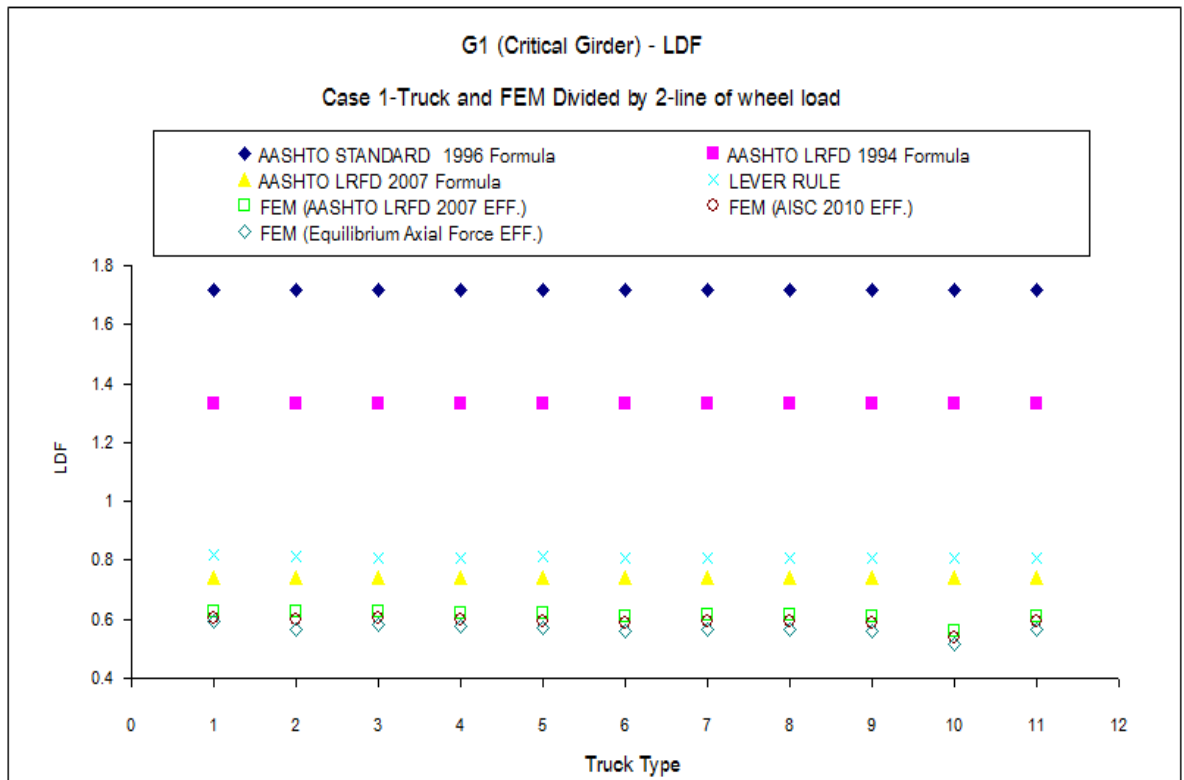
วิธีที่ 1 ค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เท่ากับ ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบจากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หารด้วยค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกข้างเดียว (one-line of wheel load) ซึ่งจะแสดงผลการเปรียบเทียบค่า LDF ดังภาพที่ ผ-33

วิธีที่ 2 ค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เท่ากับ ค่าโมเมนต์สูงสุดในคานหน้าตัดประกอบจากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หารด้วยค่าโมเมนต์สูงสุดจากการวิเคราะห์คานใน 1 มิติ เนื่องจากน้ำหนักรถบรรทุกสองข้าง (two-line of wheel load) ซึ่งจะแสดงผลการเปรียบเทียบค่า LDF ดังภาพที่ ผ-34

ผลที่ได้พบว่าการหาค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในวิธีที่ 1 จะใช้เปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามมาตรฐาน AASHTO standard 1996, AASHTO LRFD 1994 และค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในวิธีที่ 2 จะใช้เปรียบเทียบกับค่า LDF จากสมการตามข้อกำหนด AASHTO LRFD 2007



ภาพที่ ผ-33 ค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีที่ 1 เปรียบเทียบกับ
ค่า LDF จากสมการตามมาตรฐานหรือข้อกำหนด AASHTO



ภาพที่ ผ-34 ค่า LDF จากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามวิธีที่ 2 เปรียบเทียบกับ
ค่า LDF จากสมการตามมาตรฐานหรือข้อกำหนด AASHTO

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสรายุทธ เกิดพิทักษ์ เกิดวันศุกร์ที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2529 ที่โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 611/10 ม.6 ถ.พหลโยธิน ซอยพหลโยธิน 58 (ชุมชนหมู่บ้านซอยแอนเนกซ์) แขวงสายไหม เขตสายไหม จังหวัดกรุงเทพมหานคร เบอร์โทรติดต่อเพื่อปรึกษาเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ 02-9935429 และ 087-0516131 บิดาชื่อ นายอ้วน เกิดพิทักษ์ มารดาชื่อ นางเพยวี่ เกิดพิทักษ์ มีน้อง 3 คน และมีบุตรชาย 1 คน ชื่อเด็กชายโยธิน เกิดพิทักษ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2551 มีความสามารถพิเศษ คือ เล่นดนตรีกีตาร์เบส รางวัลที่ได้รับ คือ ชนะเลิศการประกวดวงดนตรีภายในมหาวิทยาลัย KMITNB MUSIC AWARD และรองชนะเลิศอันดับ 2 การประกวดดนตรีประเพณี 3 พระจอม 3-K MUSIC AWARD และเป็นติวเตอร์สอนพิเศษประจำสถาบันกวดวิชาสุวิทย์ (ETC) ตั้งแต่ปริญญาตรีปีที่ 2 จนถึงปัจจุบัน วิชาที่สอน คือ ฟิสิกส์ระดับมัธยมปลาย ฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี สถิตยศาสตร์ (static) และกลศาสตร์ของแข็ง (mechanics of solid)