

การวิเคราะห์พฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางวัสดุของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก

นายันทวัฒน์ โกสุมภ์สุวรรณค์

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 FOR MATERIAL NONLINEAR BEHAVIOR OF
REINFORCED CONCRETE FRAMES

MR. NANTAWAT GOSOOMSAWAN

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	การวิเคราะห์พฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางวัสดุของโครงข้อแข็ง คอนกรีตเสริมเหล็ก
โดย	นายณัฏวัฒน์ โกสุมภ์สุวรรณค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญะภิญโญ)

นันทวัฒน์ โกสุมภ์สุวรรณค์ : การวิเคราะห์พฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางวัสดุของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก. (ANALYSIS FOR MATERIAL NONLINEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วัฒน์ชัย สมิตถากร, 70 หน้า.

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบอ่อนตัวลง จึงอาจเป็นสาเหตุให้หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและลักษณะการวิบัติของโครงสร้าง งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยสมมติฐานไร้เชิงเส้นทางวัสดุและทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ร่วมกับการพิจารณาแบบจำลองทางวัสดุในการจำลองหน้าตัด สติฟเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์สร้างขึ้นด้วยวิธีการโดยตรง การวิเคราะห์ทำโดยวิธีการควบคุมการกระจัดที่คำนึงถึงพฤติกรรมทั้งก่อนและหลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด กรณีศึกษาประกอบด้วยโครงสร้างคานและโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นแบบสถิตในทิศทางเดียว

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับผลจากงานวิจัยในอดีตมากกว่าร้อยละ 99.4 สำหรับโครงสร้างที่เสริมเหล็กแบบน้อยกว่าอัตราส่วนสมดุลง และเฉลี่ยร้อยละ 92.14 สำหรับโครงสร้างที่เสริมเหล็กแบบมากกว่าอัตราส่วนสมดุลง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงกลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ (Strain Localization) อีกทั้งยังแสดงผลของการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีต่อการทำนายพฤติกรรมในช่วงอ่อนตัวลง (Mesh Sensitivity) ความสมเหตุสมผลในการสร้างแบบจำลองทางโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงผลของความไม่สมบูรณ์ตั้งต้น(Non-uniformities) และแนวโน้มของการอ่อนตัวลงที่มากขึ้นของเอลิเมนต์คาน-เสาที่รับแรงอัดแนวแกนสูง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5270613821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : REINFORCED CONCRETE FRAMES / NONLINEAR ANALYSIS /
MATERIAL NONLINEARITY / FIBER MODEL / DISPLACEMENT / CONTROL

NANTAWAT GOSOOMSAWAN: ANALYSIS FOR MATERIAL NONLINEAR
BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMES.

ADVISOR: ASST. PROF. WATANACHAI SMITTAKORN, Ph.D., 70 pp.

By reason of softening in constitutive relation of concrete, reinforced concrete structures can exhibit softening post-peak behavior which effect stability and the characteristic failure. Therefore, this research presents an analysis method for material nonlinear behavior of reinforced concrete frames and develop computer program using fiber model that be governed by material constitutive models directly. Beam-column element is derived by direct method. Load and displacement relation, from displacement control method, in both pre-peak and post-peak regions is considered. Case studies are composed of RC beams and Frames. Load acting on these structures are static monotonic type.

Results obtained from case studies yield the accuracy which compared to existing research about 99.4 % for under reinforced cases, and yield about 92.14 % for over reinforcement structures. Besides that, the results show the softening mechanism which is strain localization phenomena. Mesh sensitivity problem, the structural modeling technique accounted for non-uniformities and tendency of sectional behavior to be softened due to high compression are presented.

Department : Civil Engineering Student's Signature

Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิตถากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยความเมตตาตราบกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติรี ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณา ให้คำปรึกษา แนวคิด และ แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Miran Saje แห่งมหาวิทยาลัย Ljubljana ประเทศ Slovenia เป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาตอบข้อสงสัย และอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับปรากฏการณ์การอ่อนตัวลงของโครงสร้าง วิทยานิพนธ์นี้ไม่อาจสำเร็จโดยสมบูรณ์ หากปราศจากข้อแนะนำดังกล่าว

ท้ายที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะ และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าโดยตลอดมา ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความนำ.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.2.1 การวิเคราะห์โครงข้อแข็งด้วยวิธีไร้เชิงเส้น.....	3
1.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการอ่อนตัวลง.....	6
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	12
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	12
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 เอลิเมนต์คาน-เสาด้วยวิธีการโดยตรง.....	14
2.2 แบบจำลองไฟเบอร์.....	17
2.3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาไร้เชิงเส้นด้วยวิธีการทำซ้ำ.....	18
2.3.1 วิธีการควบคุมการกระจัด (Displacement Control).....	19
2.4 แบบจำลองทางวัสดุ.....	20
2.4.1 แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีต.....	20
2.4.2 แบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริม.....	22
บทที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการวิจัย.....	23
3.1 ความนำ.....	23
3.2 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม.....	23
3.2.1 ขั้นตอนของรอบการคำนวณ (Incremental Steps).....	23

3.2.2 ขั้นตอนของรอบการทำซ้ำ (Iteration Steps).....	26
3.3 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	30
3.3.1 การตรวจสอบโปรแกรม ตัวอย่างที่ 1.....	30
3.3.2 การตรวจสอบโปรแกรม ตัวอย่างที่ 2.....	32
บทที่ 4 กรณีศึกษา.....	35
4.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างง่าย (Simply Supported Beam).....	36
4.1.1 ผลของขนาดเอลิเมนต์.....	36
4.1.2 การพิจารณาผลของคอนกรีตรับแรงดึง.....	37
4.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมากกว่าอัตราส่วนสมดุล (Over Reinforcement)...	41
4.3 โครงข้อแข็งแบบพอร์ทัล (Reinforced Concrete Portal Frame).....	45
4.3.1 ผลของขนาดเอลิเมนต์.....	46
4.3.2 ผลของความไม่สมบรูณ์ตั้งต้น.....	51
4.3.3 ผลของแบบจำลองเหล็กเสริม.....	53
4.3.4 ผลของขนาดเอลิเมนต์ที่มีผลการอ่อนตัวลง (Mesh Sensitivity).....	55
4.4 โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น.....	56
4.4.1 ผลของขนาดเอลิเมนต์.....	57
4.4.2 ผลของแรงแนวแกนที่มีต่อการอ่อนตัวลงของหน้าตัด.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของโครงสร้าง และของวัสดุ ตัวอย่างที่ 1.....	30
ตารางที่ 3.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 1 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และ โปรแกรมในงานวิจัยนี้.....	31
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติของโครงสร้าง และของวัสดุ ตัวอย่างที่ 2.....	32
ตารางที่ 3.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 2 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และ โปรแกรมในงานวิจัยนี้.....	33
ตารางที่ 4.1	รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.1.....	36
ตารางที่ 4.2	น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริม ณ กึ่งกลางคานเริ่มคราก กรณีการแบ่งเอลิเมนต์ จำนวนต่างๆ เทียบกับผลการทดสอบ.....	37
ตารางที่ 4.3	รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.2.....	41
ตารางที่ 4.4	รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.3.1.....	46
ตารางที่ 4.5	การแบ่งเอลิเมนต์กรณีต่างๆ กรณีศึกษาที่ 4.3.1 (D คือ ค่าความลึกของหน้า ตัด).....	47
ตารางที่ 4.6	รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.4.....	57

สารบัญภาพ

	หน้า	
ภาพที่ 1.1	การเกิดจุดหมุนพลาสติกของโครงข้อแข็ง (ซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด เมื่อเกิดจุดหมุนพลาสติกก่อนตัว (ขวา) (Jirasek และ Bazant, 2002).....	2
ภาพที่ 1.2	ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์บนข้อสมมติฐานต่างๆ เทียบกับผลการทดสอบในอดีต (Metwally และ Chen, 1989).....	4
ภาพที่ 1.3	การแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ (Cuong Ngo-Huu และคณะ, 2006).....	5
ภาพที่ 1.4	เสาสพานภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวิถุจักรและแรงอัดตามแนวแกน (ซ้าย) การแบ่งไฟเบอร์เอลิเมนต์ (ขวา) (Sawaroj และคณะ, 2010).....	5
ภาพที่ 1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งแบบสามช่วง (Davall และ Mendis, 1985).....	6
ภาพที่ 1.6	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งแบบอ่อนตัวลง (ผลจากการคำนวณและผลจากการทดสอบ) (ซ้าย) ผลของการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ที่มีผลต่อคำตอบในช่วงอ่อนตัวลง(ขวา) (Bazant และคณะ, 1987a).....	7
ภาพที่ 1.7	โครงข้อแข็งแบบ 1 ชั้นหลายช่วง (บน) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งกรณีเหนียวมากหรือ Plastic Limit กับกรณีเหนียวน้อยหรือ Elastic Limit (ขวาล่าง) และการเปรียบเทียบผลการคำนวณโครงข้อแข็งแบบหลายช่วงที่มีค่าความเหนียวต่างๆ กับสมมติฐานพลาสติกและอีลาสติก (ขวาล่าง) (Jirasek, 1997).....	9
ภาพที่ 1.8	แผนผังโมเมนต์ (BMD) (ซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งที่แสดงให้เห็นจุดหมุนพลาสติกแบบแข็งตัวขึ้น และอ่อนตัวลง(ขวา) (Supaviriyakit และ Pimantas, 2004).....	10
ภาพที่ 2.1	ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งต่างๆของสมาชิกของเวคเตอร์ $\{u\}$	14
ภาพที่ 2.2	ลักษณะทางจลศาสตร์ที่หน้าตัดต่างๆของเอลิเมนต์คานตามสมมติฐานของ Timoshenko.....	15
ภาพที่ 2.3	การแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อยๆ.....	17
ภาพที่ 2.4	รูปแบบการคำนวณด้วยวิธีควบคุมน้ำหนักบรรทุก.....	18
ภาพที่ 2.5	การวิเคราะห์ด้วยวิธีควบคุมการกระจัด.....	20

ภาพที่ 2.6	แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีต.....	21
ภาพที่ 2.7	แบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริม.....	22
ภาพที่ 3.1	แผนผังการคำนวณในระดับรอบการคำนวณ (ค่าที่แสดงด้วยตัวเอียงคือตัวแปร).....	25
ภาพที่ 3.2	แผนผังการคำนวณในระดับรอบการทำซ้ำ.....	29
ภาพที่ 3.3	รายละเอียดโครงสร้าง การแบ่งเอลิเมนต์ และวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1.....	30
ภาพที่ 3.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 1 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และโปรแกรม ในงานวิจัยนี้.....	31
ภาพที่ 3.5	รายละเอียดโครงสร้าง การแบ่งเอลิเมนต์ และวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างที่ 2	32
ภาพที่ 3.6	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 2 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และโปรแกรม ในงานวิจัยนี้.....	34
ภาพที่ 4.1	รายละเอียดโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุก และการจำลองโครงสร้าง กรณีศึกษาที่ 4.1.....	36
ภาพที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.1.1 โดยไม่พิจารณาผลของคอนกรีตด้านรับแรงดึง และใช้จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ เทียบกับผลในอดีต.....	37
ภาพที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์กรณีไม่พิจารณาและพิจารณาผลของคอนกรีตด้านรับแรงดึง เทียบกับผลในอดีต กรณีศึกษาที่ 4.1.2.....	38
ภาพที่ 4.4	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้งที่เอลิเมนต์กึ่งกลางคาน กรณีศึกษาที่ 4.1.2.....	38
ภาพที่ 4.5	การกระจายความเครียดของหน้าตัด ที่เอลิเมนต์กึ่งกลางคาน กรณีศึกษาที่ 4.1.2.....	39
ภาพที่ 4.6	การกระจายความเค้นของหน้าตัด ที่เอลิเมนต์กึ่งกลางคาน กรณีศึกษาที่ 4.1.2.	39
ภาพที่ 4.7	รายละเอียดโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุก และการจำลองโครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์ กรณีศึกษาที่ 4.2.....	41
ภาพที่ 4.8	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.2 เทียบกับผลในอดีต.....	42
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งที่เอลิเมนต์ C1 และ B1.....	42
ภาพที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าการเสียรูปที่กึ่งกลางคานที่เอลิเมนต์ C1 และ B1.....	43

ภาพที่ 4.11	รายละเอียดโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุก กรณีศึกษาที่ 4.3.....	45
ภาพที่ 4.12	แบบจำลองโครงสร้าง กรณีศึกษาที่ 4.3.....	46
ภาพที่ 4.13	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.3.1 โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ เทียบกับผลในอดีต.....	47
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการเสียภาพที่ V^* ของเอลิเมนต์ B1 (ที่หัวเสา) จากการวิเคราะห์ (การแบ่งเอลิเมนต์กรณีที่ 3) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ.....	48
ภาพที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการเสียภาพที่ V^* ของเอลิเมนต์ C3 (กึ่งกลางคาน) จากการวิเคราะห์ (การแบ่งเอลิเมนต์กรณีที่ 3) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ.....	48
ภาพที่ 4.16	และกลไกการพังทลายกรณีศึกษาที่ 4.3.1.....	49
ภาพที่ 4.17	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ C1 C2 C3 และ B12) กรณีศึกษาที่ 4.3.1.....	49
ภาพที่ 4.18	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ B1 และ B2) กรณีศึกษาที่ 4.3.1.....	50
ภาพที่ 4.19	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.3.2 เมื่อพิจารณาความไม่สมมาตรที่กึ่งกลางคาน.....	51
ภาพที่ 4.20	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ C2 C3) กรณีศึกษาที่ 4.3.2.....	52
ภาพที่ 4.21	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ B1 B2) กรณีศึกษาที่ 4.3.2.....	52
ภาพที่ 4.22	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.3.3 เมื่อใช้แบบจำลองเหล็กเสริมแบบอีลาสติก-พลาสติก.....	53
ภาพที่ 4.23	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ C1 C2 C3 และ B12) กรณีศึกษาที่ 4.3.3.....	54
ภาพที่ 4.24	ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ B1 และ B2) กรณีศึกษาที่ 4.3.3.....	54
ภาพที่ 4.25	ผลการวิเคราะห์กรณีการแบ่งเอลิเมนต์ในช่วง BC จำนวนต่างๆ.....	55
ภาพที่ 4.26	รายละเอียดโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุก กรณีศึกษาที่ 4.4.....	56
ภาพที่ 4.27	ผลการวิเคราะห์ด้วยจำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ กรณีศึกษาที่ 4.4.1.....	57
ภาพที่ 4.28	กลไกการพังทลายของโครงสร้าง กรณีศึกษาที่ 4.4.1.....	58

ภาพที่ 4.29	รูปร่างภายหลังการเสียรูป กรณีศึกษาที่ 4.4.1.....	59
ภาพที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกนกับค่าโมเมนต์ที่เอลิเมนต์เสาต้นขวา ล่างสุด...	60
ภาพที่ 4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกนกับค่าโมเมนต์ที่เอลิเมนต์เสาต้นซ้าย ล่างสุด...	60
ภาพที่ 4.32	ผลการวิเคราะห์ กรณีศึกษาที่ 4.4.2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 71,380 107,070 และ 142,760 กก.....	62
ภาพที่ 4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างดิเทอริมิเนนต์ของสติฟเนสเมตริกซ์ของหน้าตัดกับค่าการเสีย รูป กรณีศึกษาที่ 4.4.2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 71,380 107,070 และ 142,760 กก.ของหน้าตัดที่จุด D ตามภาพที่ 4.25.....	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\{N\}$	เวกเตอร์ฟังก์ชันรูปร่าง
$[B]$	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดที่จุดต่อและความเครียด
$[S]$	เมตริกซ์สติฟเนสของหน้าตัด
$[k]$	เมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์
$[K]$	เมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้าง
$\{D\}$	เวกเตอร์ของแรงในระดับหน้าตัด
ξ	ค่าโคออร์ดิเนตธรรมชาติ บนเอลิเมนต์
E	โมดูลัสยืดหยุ่น
G	โมดูลัสยืดหยุ่นของแรงเฉือน
I	โมเมนต์ความเฉื่อย
A	พื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์
ϕ	อัตราส่วนระหว่างสติฟเนสแรงดัดกับสติฟเนสแรงเฉือน มีค่าเท่ากับ $\frac{12EI}{GAL^2}$
$u(x)$	การเสียรูปแนวแกน
$v(x)$	การเสียรูปแนวตั้งฉากแนวแกน
$\theta(x)$	การเสียมุมหมุนของหน้าตัด
$\{u\}$	เวกเตอร์การกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์
$\{P\}$	เวกเตอร์แรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์
$\varepsilon_n(x)$	ความเครียดแนวแกน (Axial Strain)
$\chi(x)$	ความโค้ง (Curvature)
$\gamma(x)$	ความเครียดเฉือน (Shear Strain)
$\{\Delta_i\}$	เวกเตอร์การกระจัดของโครงสร้าง เมื่อถึงรอบการคำนวณที่ i
$\{d\Delta_i^j\}$	เวกเตอร์การกระจัดของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นในรอบการคำนวณที่ i รอบการทำซ้ำที่ j
$d\lambda_i^j$	พารามิเตอร์น้ำหนักบรรทุก ในรอบการคำนวณที่ i รอบการทำซ้ำที่ j
$\{dP_i^j\}$	เวกเตอร์แรงกระทำต่อโครงสร้างในรอบการคำนวณที่ i รอบการทำซ้ำที่ j
$\{Q_i^j\}$	เวกเตอร์แรงต้านทานของโครงสร้างเมื่อถึงรอบการคำนวณที่ i รอบการทำซ้ำที่ j

$\{R_i^j\}$ เวกเตอร์แรงต้านทานของเอลิเมนต์เมื่อถึงรอบการคำนวณที่ i รอบการทำซ้ำที่ j
 $\{UBF_i^j\}$ เวกเตอร์แรงคงค้างของโครงสร้างเมื่อถึงรอบการคำนวณที่ i รอบการทำซ้ำที่ j

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความนำ

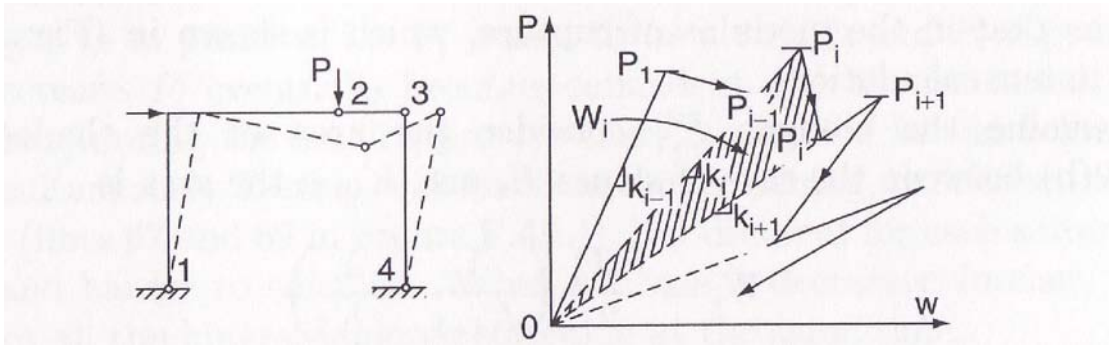
คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างประเภทต่าง ๆ ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น บ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน สะพาน หรือแม้กระทั่งโครงสร้างรางของรถไฟลอยฟ้า ที่เป็นเช่นนั้นเพราะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ดี ก่อสร้างได้ง่าย สามารถก่อสร้างเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้มากมายโดยไม่ต้องใช้กระบวนการพิเศษมากนัก อีกทั้งยังสามารถหาวัตถุดิบสำหรับก่อสร้างได้ง่าย นอกจากนี้ คอนกรีตเสริมเหล็กยังสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมและด้านทานอัคคีภัยได้ดี โดยมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาน้อย

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีข้อจำกัดบางประการ นั่นคือ เมื่อต้องแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่ามาก โครงสร้างอาจแสดงพฤติกรรมไร้เชิงเส้นแบบมีความเหนียวน้อย ซึ่งเป็นผลมาจาก การที่คอนกรีตมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบอ่อนตัวลงหลังจุดวิกฤติ (Softening Post-Peak) และแสดงพฤติกรรมแบบกึ่งเปราะ (Quasi-Brittle) แม้เหล็กเสริมจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดใกล้เคียงกับแบบอีลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์ (Elastic-Perfectly Plastic) และแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวหลังการครากก็ตาม แต่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่วิบัติด้านรับแรงอัดเป็นหลัก เช่น เสา หรือชิ้นส่วนคาน-เสาที่รับแรงอัดสูงๆอาจแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลงเมื่อความเครียดของคอนกรีตเกินกว่าความเครียดวิกฤติ ซึ่งพฤติกรรมการอ่อนตัวลงนี้อาจส่งผลต่อเสถียรภาพและพฤติกรรมการวิบัติของโครงสร้าง

ด้วยเหตุนี้ การคำนวณน้ำหนักบรรทุกวิกฤติด้วยวิธีพลาสติก (Plastic Analysis) จึงไม่ถูกต้องนักสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากพฤติกรรมการอ่อนตัวลงของจุดหมุนพลาสติกก่อนที่โครงสร้างจะขาดเสถียรภาพจะแตกต่างจากพฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกแบบสมบูรณ์ (yield Plateau) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ดังนั้น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไร้เชิงเส้นที่คำนึงถึงพฤติกรรมของวัสดุเมื่อเกิดความเสียหาย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกวิกฤติและพฤติกรรมการพังทลายของโครงสร้าง เพื่อให้วิศวกรสามารถออกแบบโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย และอยู่บนสมมติฐานที่ใกล้เคียงพฤติกรรมแท้จริงมากขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งนำเสนอ 1. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางวัสดุและแบบจำลองทางโครงสร้างที่เหมาะสม และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายผลการตอบสนองของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต 2. การใช้แบบจำลองดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของโครงข้อแข็ง

คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพฤติกรรมที่สนใจได้แก่ การทำนายน้ำหนักวิบัติ (Ultimate Load) และพฤติกรรมหลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Post-Peak Behavior)



รูปที่ 1.1 การเกิดจุดหมุนพลาสติกของโครงข้อแข็ง (ซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด เมื่อเกิดจุดหมุนพลาสติกก่อนตัว (ขวา) (Jirasek และ Bazant, 2002)

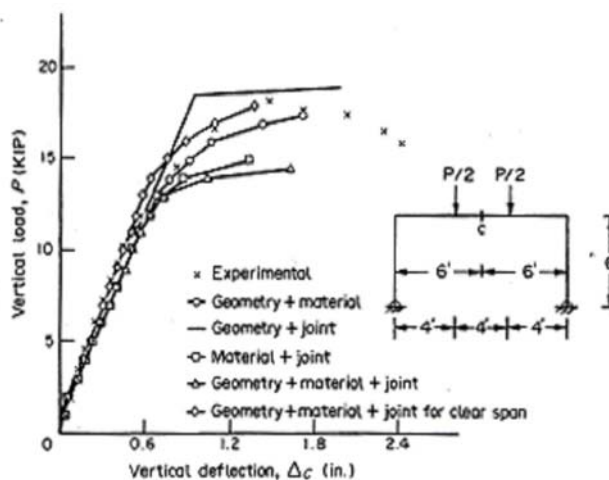
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในที่นี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้เชิงเส้น โดยแบ่งหัวข้อเป็นการวิเคราะห์โครงข้อแข็งด้วยวิธีไร้เชิงเส้นที่ไม่คำนึงถึงพฤติกรรมหลังรับน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ และการวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นที่คำนึงถึงการอ่อนตัวของโครงสร้าง

1.2.1 การวิเคราะห์โครงข้อแข็งด้วยวิธีไร้เชิงเส้น

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงข้อแข็งด้วยวิธีไร้เชิงเส้นในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาแนวทางการวิเคราะห์ และพฤติกรรมของโครงสร้างที่คำนึงถึงผลของความไร้เชิงเส้นจากสมมติฐานต่างๆ โดยไม่พิจารณาพฤติกรรมหลังการรับน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ ดังนี้

Metwally และ Chen (1989) เสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมไร้เชิงเส้นของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาผลของความไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิต ความไร้เชิงเส้นทางวัสดุ และความยืดหยุ่นของข้อต่อ (Joint Flexibility) มีรายละเอียดดังนี้ ความไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิต พิจารณา P- δ Effects ด้วยการปรับปรุงสติเฟนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ที่ขึ้นอยู่กับการตามแนวแกน และพิจารณาเสถียรภาพของโครงสร้าง P- Δ Effects ด้วยการปรับปรุงตำแหน่งของจุดต่อเมื่อจบรอบการคำนวณ ความไร้เชิงเส้นทางวัสดุใช้วิธีการวิเคราะห์หน้าตัดเพื่อหาค่าความแข็งเกร็งเชิงตัด (EI) และค่าความแข็งเกร็งแนวแกน (EA) ที่เปลี่ยนแปลง ความยืดหยุ่นของข้อต่อใช้การจำลองสปริงต้านทานการหมุน (Rotational Spring) ที่ตำแหน่งข้อต่อ งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองคอนกรีตของ Yu และ Soliman (1967) ที่พิจารณาผลของการโอบรัดของเหล็กปลอกแบบสี่เหลี่ยมแบบจำลองเหล็กเสริมใช้แบบจำลองอีลาสติก-พลาสติก กรณีศึกษาที่ใช้คือ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้นแบบเหนียว (Ductile Frame) และแบบเปราะ (Brittle Frame) ผลการวิเคราะห์ด้วยข้อสมมติฐานต่างๆถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.2 จากการศึกษาได้ผลสรุปว่า ความไร้เชิงเส้นทางวัสดุมีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้างที่ชะลูดมากหรือได้รับแรงด้านข้าง ความไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิตจะมีผลต่อพฤติกรรมมากยิ่งขึ้น

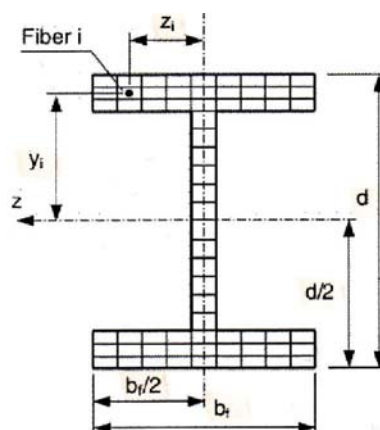


รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์บนข้อสมมติฐานต่างๆ เทียบกับผลการทดสอบในอดีต (Metwally และ Chen, 1989)

Kochan (1999) เสนอการวิเคราะห์โครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิตและทางวัสดุโดยคำนึงถึงผลของการโอบรัดคอนกรีตด้วยเหล็กปลอก โครงสร้างรับแรงกระทำแบบสถิต ผู้วิจัยพิจารณาผลของความไร้เชิงเส้นทางวัสดุด้วยการวิเคราะห์หน้าตัดโดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Central Difference) เพื่อหาค่าสติฟเนสแนวแกน (EA) และสติฟเนสการดัด (EI) ที่แปรเปลี่ยนไป แล้วจึงนำค่าดังกล่าวไปปรับปรุงเมตริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ พิจารณาผลของความไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิตแบบอันดับที่ 2 ร่วมกับการปรับปรุงตำแหน่งของจุดต่อในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแต่ละรอบ งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองวัสดุคอนกรีตของ Saactcioglu และคณะ (1992) และใช้แบบจำลองอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Perfectly Plastic) สำหรับเหล็กเสริม การหาน้ำหนักวิกฤติทำโดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Load Control) จนโครงสร้างไร้เสถียรภาพ ซึ่งตรวจสอบจากค่าตีเทอริมีเนตของสติฟเนสเมตริกซ์ของโครงสร้าง กรณีศึกษาคือ เสาเดี่ยวและโครงสร้างข้อแข็งชั้นเดียว ผลการวิเคราะห์สรุปว่า การพิจารณาผลการโอบรัดของเหล็กปลอกให้ผลน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่ใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่ากรณีที่ไม่พิจารณาผลการโอบรัด โดยได้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดประมาณร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบในอดีต

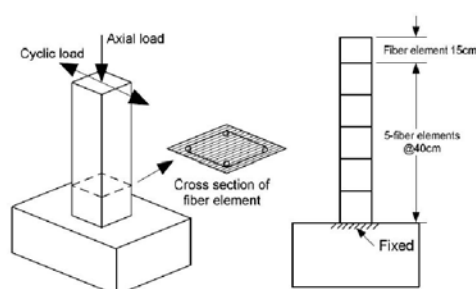
Cuong Ngo-Huu และคณะ (2006) เสนอการวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติประเภทโครงสร้างเหล็ก โดยจำลองจุดหมุนพลาสติกด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ (Fiber Plastic Hinge) ดังรูปที่ 1.3 การจำลองจุดหมุนพลาสติกเช่นนี้ทำให้สามารถแสดงพฤติกรรมการครากแบบค่อยเป็นค่อยไป (Plastification) ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง การวิเคราะห์พิจารณาความไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิตอันดับที่ 2 ส่วนความไร้เชิงเส้นทางวัสดุของแบบจำลองไฟเบอร์ดังกล่าวใช้แบบเส้นตรงสองเส้น (Bilinear Model) และพิจารณาผลจากความเครียดคงค้างของหน้าตัด การวิเคราะห์ใช้หนึ่งเอลิเมนต์ต่อหนึ่งชิ้นส่วนโครงสร้าง และเปรียบเทียบผลกับการวิเคราะห์ด้วย

โปรแกรม ABAQUS ที่ใช้เอลิเมนต์แบบแผ่นโค้ง (Shell Element) ผลการวิจัยสรุปว่าการจำลองจุดหมุนพลาสติกด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลจากโปรแกรม ABAQUS แต่ใช้จำนวนเอลิเมนต์น้อยกว่ามาก



รูปที่ 1.3 การแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ (Cuong Ngo-Huu และคณะ, 2006)

Sawaroj และคณะ (2010) ทำการวิเคราะห์เสาะสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ดังรูปที่ 1.4 โดยวิเคราะห์เสาะภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดด้านข้างแบบวัฏจักรด้วยวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของความยาวของไฟเบอร์เอลิเมนต์ และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อรูปทรงของแบบจำลองเหล็กเสริม ที่เสนอโดย Menegotto และ Pinto (1973) และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดด้านข้างกับการเคลื่อนที่ของปลายเสา และความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับค่าความโค้ง ผลการวิจัยสรุปว่าการวิเคราะห์ให้ผลใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบมากที่สุดเมื่อความยาวของไฟเบอร์เอลิเมนต์เท่ากับ $\frac{1}{4}$ เท่าของความกว้างหน้าตัด และพารามิเตอร์ของแบบจำลองเหล็กเสริมมีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับค่าการกระจัดที่คำนวณได้



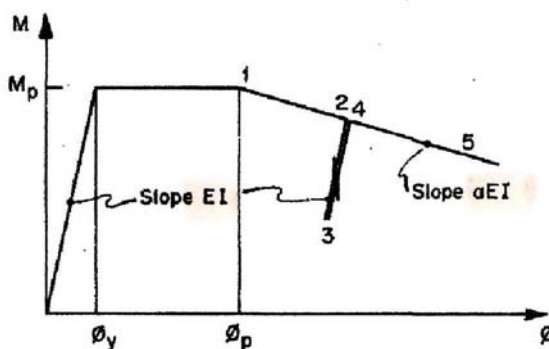
รูปที่ 1.4 เสาะสะพานภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรและแรงอัดตามแนวแกน (ซ้าย)

การแบ่งไฟเบอร์เอลิเมนต์ (ขวา) (Sawaroj และคณะ, 2010)

1.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการอ่อนตัวลง

งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างที่คำนึงถึงพฤติกรรมการอ่อนตัวลงกล่าวถึง หลักการวิเคราะห์และพฤติกรรมการอ่อนตัวลงทั้งในระดับหน้าตัด (Softening Hinge) และในระดับโครงสร้าง (Softening Frames) ดังนี้

Davall และ Mendis (1985) เสนอการวิเคราะห์โครงสร้างคานกรีตเสริมเหล็กสองมิติที่คำนึงถึงการอ่อนตัวลงในระดับหน้าตัด ผู้วิจัยได้ทำการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งแบบสามช่วง ได้แก่ ช่วงอีลาสติก ช่วงพลาสติก และช่วงอ่อนตัวลง (Elastic-Plastic-Softening) ดังแสดงในรูปที่ 1.5 และได้พัฒนาสถิติพหุเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ที่คำนึงถึงการอ่อนตัวลง โดยกำหนดให้การอ่อนตัวลงเกิดขึ้นในช่วงปลายของเอลิเมนต์ซึ่งเกิดโมเมนต์มาก และใช้ความยาวตามความสัมพันธ์ความยาวจุดหมุน (Hinge Length, L_p) ของ Corley และ Sawyer (1966) กรณีศึกษาได้แก่ โครงสร้างคานกรีตเสริมเหล็กชั้นเดียวและสองชั้น ผลการวิเคราะห์สรุปว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการอ่อนตัวลง (พารามิเตอร์ a ตามรูปที่ 1.5) ทำให้ลดจำนวนการเกิดจุดหมุนพลาสติกและลดค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติก่อนเกิดการพังทลาย ในขณะที่การเพิ่มค่าความเหนียว (Ductility or Rotational Capacity before Softening ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(\phi_p - \phi_y) \cdot L_p$ ตามรูปที่ 1.5) จะเพิ่มจำนวนการเกิดจุดหมุนพลาสติก และน้ำหนักบรรทุกวิกฤติก่อนเกิดการพังทลาย

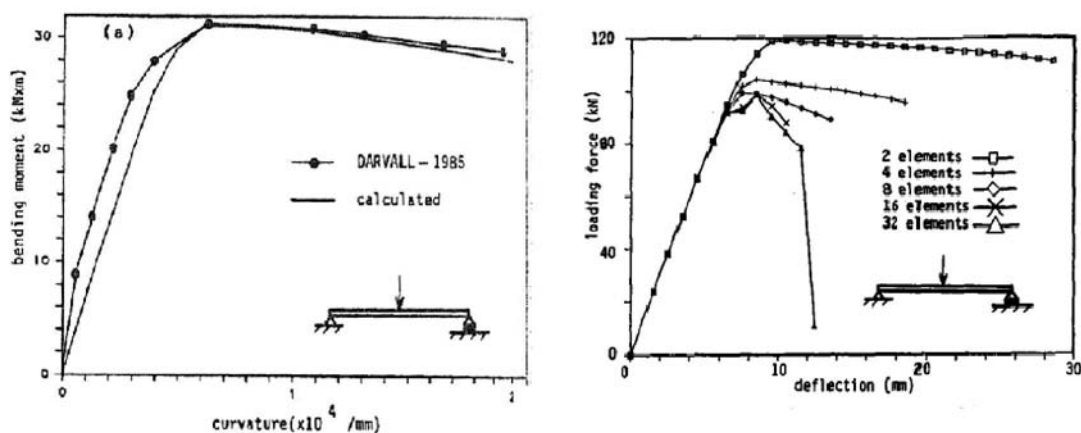


รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งแบบสามช่วง

(Davall และ Mendis, 1985)

Bazant และคณะ (1987a) เสนอการวิเคราะห์การอ่อนตัวลงของคานและโครงสร้างคานกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ Hermitian Cubic และใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการจำลองหน้าตัด ผู้วิจัยชี้ให้เห็นถึงปรากฏการณ์การอ่อนตัวลงของโครงสร้างคานกรีตเสริมเหล็กว่าส่งผลให้การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลาสติก (Plastic Limit Analysis) ไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากการอ่อนตัวลงของจุดหมุน (Softening Plastic Hinge) ก่อให้เกิดการวิบัติ การวิเคราะห์ที่ใช้ระเบียบวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ (Displacement Control) ด้วยวิธีทำซ้ำโดยตรงแบบซีแคนท์ แบบจำลองวัสดุ

ของคอนกรีต พิจารณาการอ่อนตัวลงทั้งทางด้านรับแรงอัดและด้านรับแรงดึง แบบจำลองเหล็กเสริมใช้แบบจำลองอีลาสติก-พลาสติก โดยไม่คำนึงผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต กรณีศึกษาได้แก่ คานเดี่ยวอย่างง่าย (Simply Supported Beam) และโครงข้อแข็ง 1 ช่วง 1 ชั้น วิธีการที่นำเสนอให้ผลการคำนวณที่มีเสถียรภาพ และผลการวิเคราะห์แสดงถึงความสามารถในการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างเทียบกับผลการทดสอบได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (ซ้าย) นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังแสดงให้เห็นปัญหาการแบ่งขนาดของเอลิเมนต์ (Mesh Sensitivity) ที่มีผลต่อความถูกต้องของคำตอบ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (ขวา) โดยผู้วิจัยเสนอว่า สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง ขนาดต่ำสุดของเอลิเมนต์ควรเท่ากับความลึกของคานเป็นอย่างน้อย



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งแบบอ่อนตัวลง (ผลจากการคำนวณและผลจากการทดสอบ) (ซ้าย) ผลของการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ที่มีผลต่อคำตอบในช่วงอ่อนตัวลง(ขวา)

(Bazant และคณะ, 1987a)

Bazant และคณะ (1987b) ศึกษาผลของความเหนียว เสถียรภาพ (Snapback Instability) ขนาดโครงสร้าง (Size Effect) และขนาดเอลิเมนต์ (Element size) ของคานและโครงข้อแข็ง โดยใช้แนวทางวิเคราะห์จากงานวิจัยก่อนหน้า(Bazant และคณะ,1987a) สืบเนื่องมาจากการอ่อนตัวลงของเอลิเมนต์ที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของโครงสร้างและพฤติกรรมในการกระจายโมเมนต์ใหม่ (Moment Redistribution) ผู้วิจัยจึงเสนอพารามิเตอร์ ได้แก่ Ductile Strengthening Factor ที่แสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในกรณีที่เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงเทียบกับกรณีที่เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมแบบพลาสติกสมบูรณ์ และ Redistribution Ratio ที่แสดงถึงปริมาณการกระจายโมเมนต์ใหม่ในกรณีที่เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงเทียบกับกรณีที่เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมแบบพลาสติกสมบูรณ์

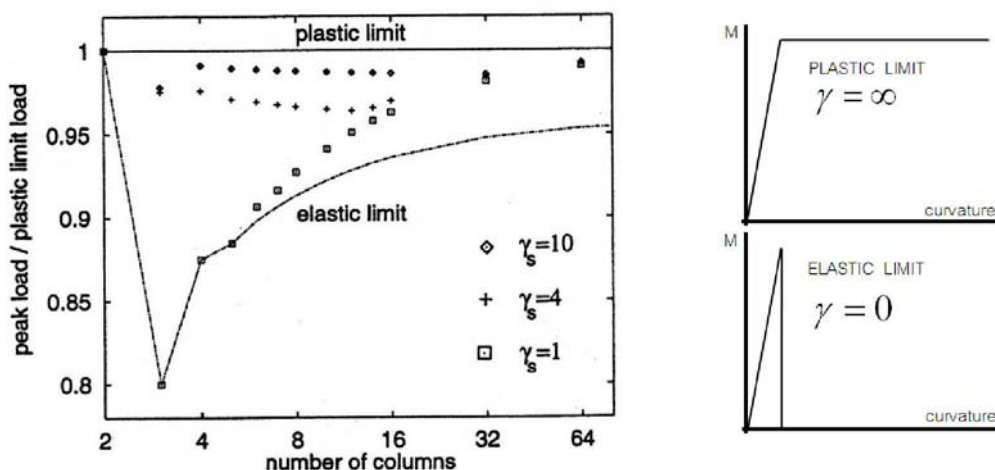
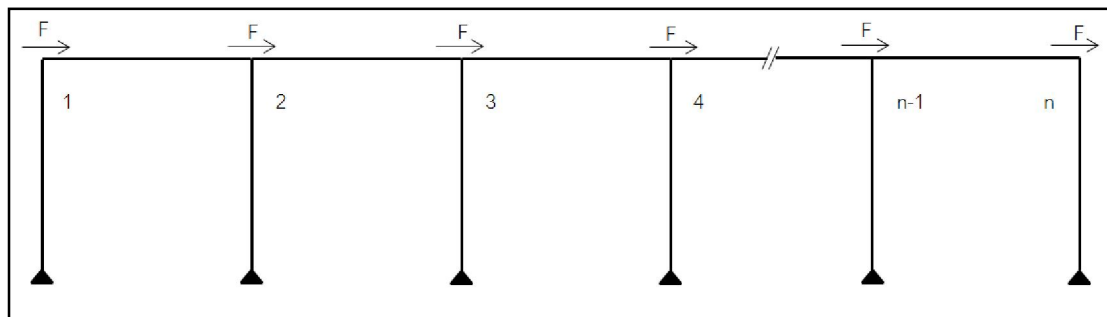
นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างที่มีแรงส่วนเกิน (Redundant Force) จำนวน n แรง เมื่อโครงสร้างแสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงอาจเกิดการไร้เสถียรภาพแบบ Snap Back ได้มากที่สุด $n+1$ ครั้ง

สำหรับการศึกษาผลของความเหนียว ขนาดโครงสร้าง (Size Effect) และขนาดเอลิเมนต์ (Element size) ผู้วิจัยใช้กรณีศึกษา ได้แก่ คานเดี่ยวอย่างง่าย โดยทำการเพิ่มความยาวของคาน ในขณะที่ใช้เอลิเมนต์ขนาดคงที่ (ความยาวของคานจึงเป็นส่วนโดยตรงกับจำนวนเอลิเมนต์) เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยการเพิ่มความยาวคาน 2, 4, 8, 16 และ 32 เท่าของความยาวเริ่มต้นพบว่า คานที่มีความยาวมากกว่า (ในกรณีนี้คือขนาดของโครงสร้างที่ใหญ่กว่า หรือเทียบเท่ากับกรณีที่ใช้เอลิเมนต์มีขนาดเล็กกว่า) พฤติกรรมของโครงสร้างที่ทำนายได้มีแนวโน้มที่จะแสดงความเหนียวน้อยลง ซึ่งหากพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับการกระจัดหรือค่าพลังงานในการพังทลายของโครงสร้าง (The energy dissipated at failure) เมื่อเอลิเมนต์มีขนาดเล็กค่าพลังงานดังกล่าวจะลดน้อยลงด้วย (เนื่องจากความความเหนียวที่ปรากฏหลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าน้อยลง ดังรูปที่ 1.6 ขวา) ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ที่ไม่สมเหตุสมผล ผู้วิจัยจึงสรุปว่าการแบ่งเอลิเมนต์ขนาดเล็กอาจให้ผลการคำนวณที่ไม่ถูกต้องนัก สำหรับโครงสร้างที่แสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง (Mesh Sensitivity)

Jirasek (1997) เสนอการวิเคราะห์โครงข้อแข็งโดยคำนึงถึงผลของการอ่อนตัวลงของจุดหมุนพลาสติก งานวิจัยนี้นำเสนอเอลิเมนต์คานที่ประกอบด้วยปลายสองข้างที่สามารถแสดงพฤติกรรมไร้เชิงเส้นแบบอ่อนตัวลง ซึ่งมีสลิปเนสเมตริกซ์ของเอลิเมนต์ที่มีพจน์ของ γ ที่แสดงถึงความเหนียวของเอลิเมนต์ ดังแสดงในสมการที่ 1.1 และ 1.2 กรณีศึกษา ได้แก่ เสาเดี่ยว โครงข้อแข็งแบบช่วงเดียวและโครงข้อแข็งแบบหลายช่วง ในกรณีของโครงข้อแข็งแบบหลายช่วง(รูปที่ 1.7 บน) พฤติกรรมการพังทลายถูกเปรียบเทียบกับสมมติฐานที่โครงสร้างมีความเหนียวแบบไม่จำกัด (Infinite Ductility) ที่กำหนดให้จุดหมุนพลาสติกมีค่าโมเมนต์คงที่หลังการคราก (Plastic Limit) (รูปที่ 1.7 ล่างขวา)และเทียบกับกรณีที่โครงสร้างมีความเหนียวน้อย ที่โมเมนต์มีค่าเป็นศูนย์ภายหลังการคราก (Elastic Limit ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ล่างขวา) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อพิจารณาการอ่อนตัวลงของจุดหมุน (γ อยู่ระหว่าง 0 ถึง ∞) ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติจะอยู่ระหว่างช่วงทั้งสอง ขึ้นกับทั้งค่าความเหนียวและจำนวนช่วง (Number of Bay) ดังรูปที่ 1.7 (ขวาล่าง) โดยโครงข้อแข็งแบบหลายช่วงที่ความเหนียวมากหรือจำนวนช่วงมาก ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีแนวโน้มเข้าใกล้ขอบเขตพลาสติก นอกจากนี้ จากผลของการอ่อนตัวลง ลักษณะของการวิบัติที่ปรากฏมีความแตกต่างกัน ทั้งแบบกระจายตัว (Distributed Mode) และแบบรวมตัวอย่างมาก (Highly Localized Mode)

$$k = k' \begin{bmatrix} 2-\gamma_2 & 1 \\ 1 & 2-\gamma_1 \end{bmatrix} \tag{1.1}$$

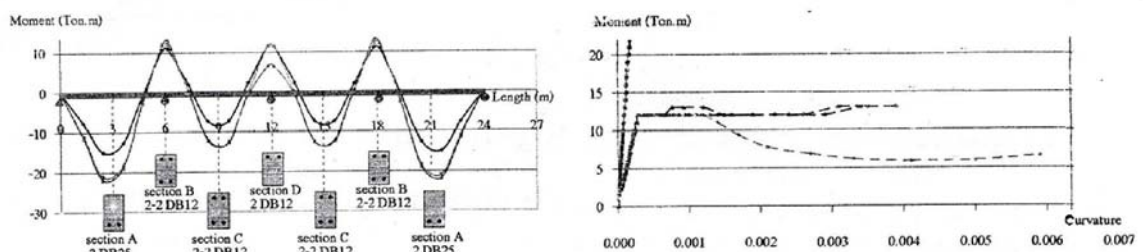
$$k' = \frac{6EI}{L} \frac{1}{3-2\gamma_1-2\gamma_2+\gamma_1\gamma_2} \tag{1.2}$$



รูปที่ 1.7 โครงข้อแข็งแบบ 1 ชั้นหลายช่วง (บน) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งกรณีเหนียวมากหรือ Plastic Limit กับกรณีเหนียวน้อยหรือ Elastic Limit (ขวาล่าง) และการเปรียบเทียบผลการคำนวณโครงสร้างแบบหลายช่วงที่มีค่าความเหนียวต่างๆ กับสมมติฐานพลาสติกและอีลาสติก (ซ้ายล่าง) (Jirasek, 1997)

Supaviriyakit และ Pimanpas (2004) เสนอการวิเคราะห์คานต่อเนื่องคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ การวิเคราะห์คำนึงถึงผลของการกระจายโมเมนต์ใหม่ (Moment Redistribution) ผู้วิจัยจำลองคานต่อเนื่องด้วยเอลิเมนต์เฟรมสามมิติแบบไอโซพารามेटริกซ์ แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีตส่วนรับแรงดึง พิจารณาผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมในการยับยั้งการแตกร้าวโดยแบ่งเป็น บริเวณที่มีเหล็กเสริม (RC Zone) ที่หน่วยแรงดึงจะค่อยๆ ลดลงหลังการแตกร้าว และบริเวณคอนกรีตล้วน (PL Zone) ที่หน่วยแรงดึงจะลดลงอย่างรวดเร็วหลังการแตกร้าว แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีต

ส่วนรับแรงอัด แสดงพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองการแตกร้าวอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic Fracture) โดยคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงอัดมีพฤติกรรมแบบพลาสติกและมีสมมติฐานที่รอยร้าวขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีตกระจายไปทั่ว ส่งผลให้สติฟเนสของคอนกรีตลดลง แบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริมพิจารณาผลของการครากภายใต้แรงดึงและผลของการโก่งเดาะภายใต้แรงอัด กรณีศึกษาคือ คานต่อเนื่อง 2 ช่วง และคานต่อเนื่อง 4 ช่วง วิเคราะห์โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ผลการวิเคราะห์ แบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายการกระจายโมเมนต์ใหม่เมื่อหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทางวัสดุ ดังรูปที่ 1.8 (ซ้าย) และสามารถทำนายลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติก พฤติกรรมจุดหมุนพลาสติกแบบแข็งตัว (Hardening Hinge) หรือจุดหมุนพลาสติกแบบอ่อนตัว (Softening Hinge) ได้ ดังรูปที่ 1.8 (ขวา) นอกจากนี้ยังสามารถทำนายกำลังสำรอง (Reserved Strength) ของคานต่อเนื่อง จากผลต่างของน้ำหนักบรรทุก ณ ขณะที่หน้าตัดแรกเริ่มคราก กับน้ำหนักบรรทุก ณ ขณะที่โครงสร้างเกิดการวิบัติ การวิเคราะห์ก็ยังแสดงให้เห็นความสามารถที่มากขึ้นในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของโครงสร้างจากการเพิ่มความเหนียวของหน้าตัดโดยการเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงอัด



รูปที่ 1.8 แผนผังโมเมนต์ (BMD) (ซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้งที่แสดงให้เห็นจุดหมุนพลาสติกแบบแข็งตัวขึ้น และอ่อนตัวลง (ขวา) (Supaviriyakit และ Pimanpas, 2004)

Saje และคณะ (2004) วิเคราะห์โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาผลของทั้งความไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิตและความไร้เชิงเส้นทางวัสดุ การวิเคราะห์ครอบคลุมทั้งก่อนและหลังน้ำหนักบรรทุกวิกฤติด้วยวิธีการควบคุมความยาวส่วนโค้ง (Arc Length Control) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเสนอการใช้เอลิเมนต์สั้นที่มีการกระจายตัวของความเครียดแบบคงที่ (Short Constant Strain Element) ในบริเวณที่มีการอ่อนตัวลง เพื่อแก้ปัญหาการเกิดความเครียดเฉพาะที่ (Strain Localization) โดยประมาณความยาวของเอลิเมนต์ด้วยพลังงานการแตกร้าว (Fracture Energy) ในบริเวณที่ไม่มีการอ่อนตัวลงใช้เอลิเมนต์ที่มีการกระจายความเครียดแบบโพลีโนเมียลลำดับสูง กรณีศึกษา ได้แก่ เสาเดี่ยว และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการวิเคราะห์พบว่า การจำลองโครงสร้างตามแนวทางดังกล่าวสามารถแสดงพฤติกรรมได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในอดีต

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตข้างต้น ผู้วิจัยนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยสมมติฐานไร้เชิงเส้นทั้งในช่วงก่อนการรับและหลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างได้ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด อย่างไรก็ตามสำหรับการวิเคราะห์ในช่วงหลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Softening Post-Peak) ยังมีปัจจัยอีกหลายประการที่อาจส่งผลต่อการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้าง เช่น เสถียรภาพของการคำนวณหรือความสมเหตุสมผลในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างที่ต้องคำนึงถึงผลจากการอ่อนตัวลง งานวิจัยนี้จึงมุ่งนำเสนอ แนวทางการวิเคราะห์ที่มีเสถียรภาพและสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงทั้งช่วงก่อนและหลังการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด อีกทั้งยังทำการศึกษปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงอ่อนตัวลง

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาพฤติกรรมมไร้เชิงเส้นของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพิจารณาทั้งช่วงก่อนและหลังการรับน้ำหนักบรรทุกทุกวิกฤติ ภายใต้แรงกระทำแบบสถิต (Monotonic Load)
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับจำลองพฤติกรรมมไร้เชิงเส้นของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการจำลองหน้าตัด และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าว
3. ศึกษาขนาดที่เหมาะสมของชิ้นส่วน และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต
4. ทำนายพฤติกรรมของโครงสร้าง และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมมไร้เชิงเส้นอันรวมไปถึงพฤติกรรมในช่วงอ่อนตัวลงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ

1. ศึกษาพฤติกรรมชิ้นส่วนรับโมเมนต์ดัด โดยไม่พิจารณาผลจากการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน
2. ศึกษาเฉพาะหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่านั้น
3. พิจารณาเฉพาะความมไร้เชิงเส้นทางวัสดุ โดยไม่คำนึงถึงผลของความมไร้เชิงเส้นทางเรขาคณิต
4. พิจารณาโครงสร้างในสองมิติ และกำหนดแรงกระทำเฉพาะที่ข้อต่อ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

รวบรวมและศึกษาผลการวิจัยในอดีต ได้แก่

- การวิเคราะห์โครงข้อแข็งด้วยวิธีไร้เชิงเส้น
 - การวิเคราะห์พฤติกรรมการอ่อนตัวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่
 - การวิเคราะห์โครงสร้างโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
 - การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไร้เชิงเส้นและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
 - พฤติกรรมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบจำลองทางวัสดุ
 3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์
 4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต
 5. ประยุกต์ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ปัญหาตัวอย่างโดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง
 6. สรุปผลการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

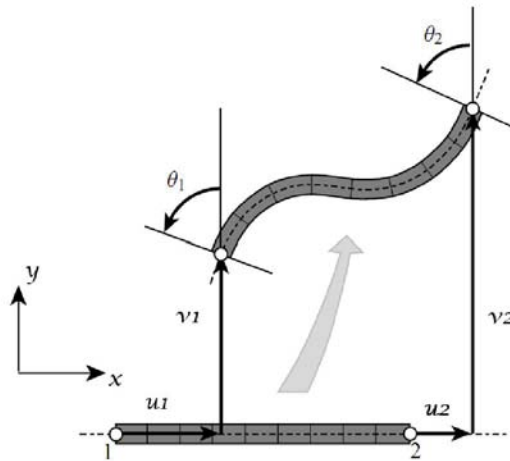
2.1 เอลิเมนต์คาน-เสาด้วยวิธีการโดยตรง

การสร้างเอลิเมนต์คาน-เสาด้วยวิธีการโดยตรงตามสมมติฐานของ Timoshenko จะใช้ 1 หน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเอลิเมนต์เป็นตัวแทนสำหรับทั้งเอลิและทำการสร้างสติฟเนสเมตริกซ์ ด้วยสมการสมดุล สมการจลศาสตร์ของหน้าตัด และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุโดยตรง อันมีรายละเอียดดังนี้ (ตามแนวทางของโปรแกรม TDAP, 2008)

เมื่อกำหนดให้เวกเตอร์ $\{u\}$ และ $\{P\}$ คือค่าการกระจัดและแรงกระทำในตำแหน่งที่สอดคล้องกันของจุดต่อดังแสดงในรูปที่ 2.1

$$\{u\} = \{u_1 \quad v_1 \quad \theta_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad \theta_2\}^T \quad (2.1)$$

$$\{P\} = \{N_1 \quad V_1 \quad M_1 \quad N_2 \quad V_2 \quad M_2\}^T \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งต่างๆของสมาชิกของเวกเตอร์ $\{u\}$

แรงภายในที่หน้าตัด (ในที่นี้ใช้หน้าตัดที่กึ่งกลางเอลิเมนต์เป็นตัวแทน) หาได้จากสมการที่

2.3, 2.4 และ 2.5

$$N_{mid} = \int \sigma(y) dA \quad (2.3)$$

$$M_{mid} = - \int \sigma(y) y dA \quad (2.4)$$

$$V_{mid} = GA\gamma \quad (2.5)$$

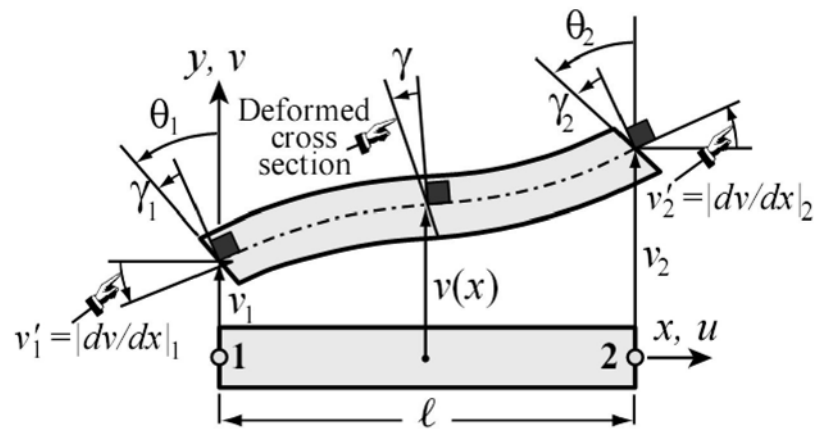
เมื่อค่าความเค้นที่ตำแหน่ง y ใดๆบนหน้าตัดมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.6 (กำหนดให้รูปร่างของหน้าตัด ค่าความเค้นและค่าความเครียดสมมาตรในแนวแกน y)

$$\sigma(y) = \varepsilon(y)E(y) = \{\varepsilon_n - \chi y\}E(y) \quad (2.6)$$

ค่าความเครียดแนวแกน ε_n ค่าความโค้ง χ ของหน้าตัดหาได้จากสมการ 2.7 และ 2.8

$$\varepsilon_n = \frac{du(x)}{dx} = \frac{(u_2 - u_1)}{L} \quad (2.7)$$

$$\chi = \frac{d\theta(x)}{dx} = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{L} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางจลศาสตร์ที่หน้าตัดต่างๆของเอลิเมนต์คานตามสมมติฐานของ Timoshenko

ค่าความเครียดเฉือน γ หาได้จากสมการที่ 2.9 และแสดงลักษณะทางจลศาสตร์ในรูปที่

2.2

$$\gamma = \frac{dv(x)}{dx} - \theta(x) \quad (2.9)$$

เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบแม่นยำ (ดูจากภาคผนวก ก) และจากสมการที่ 2.9 ค่าความเค้นเฉือนในพจน์ของการกระทำที่จุดต่อหาได้จาก

$$\gamma = \left(\frac{d\{N_v\}}{dx} - \{N_\theta\} \right) \{v_1 \quad \theta_1 \quad v_2 \quad \theta_2\}^T \quad (2.10)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\gamma = \frac{\phi}{1+\phi} \left[\frac{(v_2 - v_1)}{L} - \frac{(\theta_2 + \theta_1)}{2} \right] \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.5 ได้ว่าแรงเฉือนของหน้าตัดกึ่งกลางคานมีค่าเท่ากับ

$$V_{mid} = GAY = \frac{12EI}{L^2(1+\phi)} \left\{ \frac{(v_2 - v_1)}{L} - \frac{(\theta_2 + \theta_1)}{2} \right\} \quad (2.12)$$

$$\text{เมื่อ } \phi = \frac{12EI}{GAL^2}$$

จากหลักการสมดุล ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนหน้าตัดที่กึ่งกลางคานและแรงที่จุดต่อ
เป็นไปตามสมการที่ 2.13-2.16

$$N_1 = -N_2 = -N_{mid} \quad (2.13)$$

$$V_1 = -V_2 = -V_{mid} \quad (2.14)$$

$$M_1 = \frac{-V_{mid}L}{2} - M_{mid} \quad (2.15)$$

$$M_2 = \frac{-V_{mid}L}{2} + M_{mid} \quad (2.16)$$

สมการ 2.1-2.16 เมื่อจัดพจน์ให้อยู่ในรูป $\{u\} = [k]^{-1}\{P\}$ จะได้สมการสติฟเนสเมตริกซ์
ดังสมการที่ 2.17

$$[k]^{Timoshenko} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EAy}{L} & -\frac{EA}{L} & 0 & \frac{EAy}{L} \\ 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} \\ -\frac{EAy}{L} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} & \frac{EAy}{L} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & \frac{EAy}{L} & \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EAy}{L} \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} \\ \frac{EAy}{L} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} & -\frac{EAy}{L} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$EA = \int E(y)dA \quad (2.18)$$

$$EAy = \int E(y)y dA \quad (2.19)$$

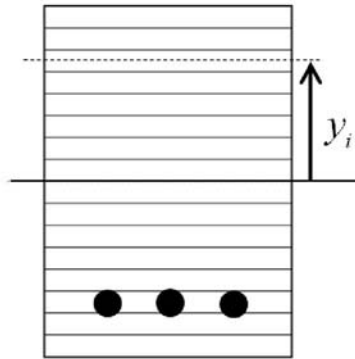
$$EI = \int E(y)y^2 dA \quad (2.20)$$

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้เอลิเมนต์ตามแนวทางที่นำเสนอมา และกำหนดให้การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนมีค่าน้อยมาก หรือ $\phi = 0$

2.2 แบบจำลองไฟเบอร์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างบนสมมติฐานแบบไร้เชิงเส้น เมื่อวัสดุมีคุณสมบัติผันไปจากช่วงอีลาสติกเชิงเส้น หรือเมื่อหน้าตัดของโครงสร้างไม่ได้เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน เช่น หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก การหาค่าสติเฟนสหรือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยโดยการอินทิเกรตทำได้ไม่ง่ายนัก การแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ช่วยให้เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้ง่ายขึ้น

จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 เมื่อทำการแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อยๆ จะสามารถคำนวณค่าแรงแนวแกนและค่าโมเมนต์ตัดได้จากการรวมค่าพารามิเตอร์ของแต่ละไฟเบอร์ ซึ่งได้แก่ ค่าโมดูลัส พื้นที่ และระยะห่างจากแนวอ้างอิง ตามสมการ 2.21 และ 2.22 และสามารถคำนวณสมการที่ 2.18-2.20 ได้ดังสมการที่ 2.23-2.25



รูปที่ 2.3 การแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อยๆ

$$N_{mid} = \int \sigma(y) dA = \sum \sigma_i A_i = \sum \{\varepsilon_n - \chi y_i\} E_i A_i = \varepsilon_n \sum E_i A_i - \chi \sum y_i E_i A_i \quad (2.21)$$

$$M_{mid} = - \int \sigma(y) y dA = \sum \sigma_i A_i y_i = \sum \{\varepsilon_n - \chi y_i\} E_i A_i y_i = \varepsilon_n \sum E_i A_i y_i - \chi \sum E_i A_i y_i^2 \quad (2.22)$$

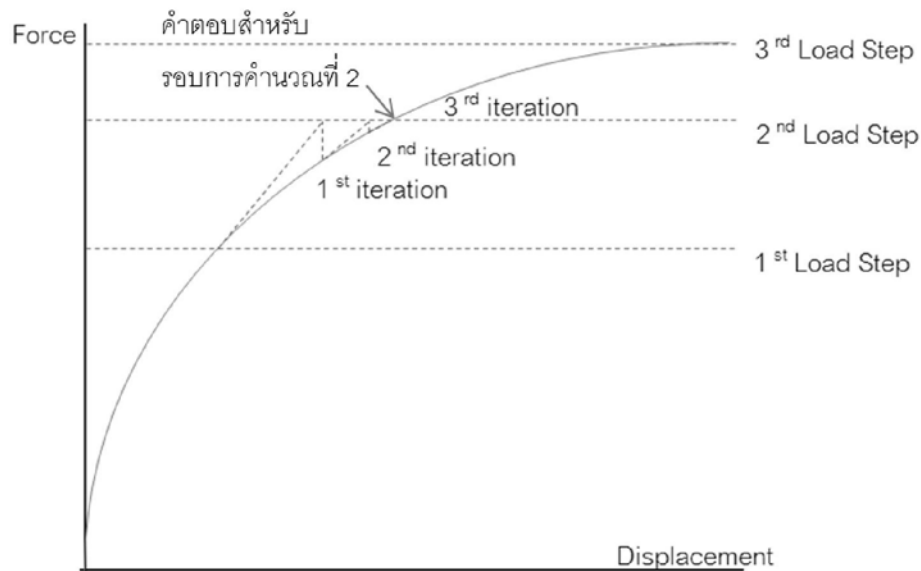
$$EA = \int E(y) dA = \sum E_i A_i \quad (2.23)$$

$$EAy = \int E(y) y dA = \sum E_i A_i y_i \quad (2.24)$$

$$EI = \int E(y) y^2 dA = \sum E_i A_i y_i^2 \quad (2.25)$$

2.3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาไร้เชิงเส้นด้วยวิธีการทำซ้ำ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ จะแบ่งการคำนวณออกเป็นรอบการคำนวณ โดยที่แต่ละรอบการคำนวณจะประกอบด้วยรอบการทำซ้ำเพื่อกำจัดค่าไม่สมดุลระหว่างแรงภายนอกและแรงภายใน โดยค่าไม่สมดุลที่ยอมรับได้ ขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การพิจารณาเงื่อนไขในการลู่เข้าของคำตอบ รูปแบบการคำนวณด้วยวิธีควบคุมน้ำหนักบรรทุกซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการอธิบายสำหรับวิธีการอื่นๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 (McGuire, 2000)



รูปที่ 2.4 รูปแบบการคำนวณด้วยวิธีควบคุมน้ำหนักบรรทุก

รายละเอียดการคำนวณ มีดังนี้

ค่าการเคลื่อนตัวในแต่ละรอบการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ 2.26

$$\{\Delta_i\} = \{\Delta_{i-1}\} + \sum_{j=1}^{m_i} \{d\Delta_i^j\} \quad (2.26)$$

เมื่อ $\{\Delta_i\}$ คือ การเคลื่อนที่ในรอบการคำนวณที่ i

$\{d\Delta_i^j\}$ คือ การเคลื่อนที่ในรอบการทำซ้ำที่ j ของรอบการคำนวณที่ i

m_i คือ จำนวนรอบการทำซ้ำ ของรอบการคำนวณที่ i

การเคลื่อนที่ในรอบการทำซ้ำที่ j รอบการคำนวณที่ i หากจากสมการที่ 2.27

$$\{K_i^{j-1}\} \{d\Delta_i^j\} = \{dP_i^j\} + \{R_i^{j-1}\} \quad (2.27)$$

เมื่อ $\{R_i^{j-1}\} = \{P_i^{j-1}\} - \{Q_i^{j-1}\} \quad (2.28)$

$$\{dP_i^j\} = d\lambda_i^j \{P_{ref}\} \quad (2.29)$$

และ $\{dP_i^j\}$ คือ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำในแต่ละรอบการทำซ้ำ

$\{d\lambda_i^j\}$	คือ พารามิเตอร์น้ำหนักบรรทุกในแต่ละรอบการทำซ้ำ
$\{UBF_i^j\}$	คือ แรงไม่สมดุลในแต่ละรอบการทำซ้ำ (Unbalanced Force)
$\{R_i^j\}$	คือ แรงภายใน หากจากผลรวมของแรงที่ปลายเอलिเมนต์ทั้งหมดจนถึงรอบทำซ้ำปัจจุบัน
$\{P_i^j\}$	คือ แรงภายนอกรวมทั้งหมดจนถึงรอบทำซ้ำปัจจุบัน

เพื่อความสะดวก สมการที่ 2.27 อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$[K_i^{j-1}]\{\overline{d\Delta_i^j}\} = \{dP_{ref}\} \quad (2.30)$$

$$[K_i^{j-1}]\{\overline{\overline{d\Delta_i^j}}\} = \{UBF_i^{j-1}\} \quad (2.31)$$

$$\{d\Delta_i^j\} = \{\overline{\overline{d\Delta_i^j}}\} + d\lambda_i^j \{\overline{d\Delta_i^j}\} \quad (2.32)$$

ขั้นตอนการคำนวณดังกล่าวมา สามารถจำแนกออกได้เป็นหลายประเภท เช่น วิธีการควบคุมน้ำหนักบรรทุก วิธีการควบคุมการกระจัด หรือวิธีการควบคุมความยาวส่วนโค้ง เป็นต้น ในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดวิธีการควบคุมการกระจัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.3.1 วิธีการควบคุมการกระจัด (Displacement Control)

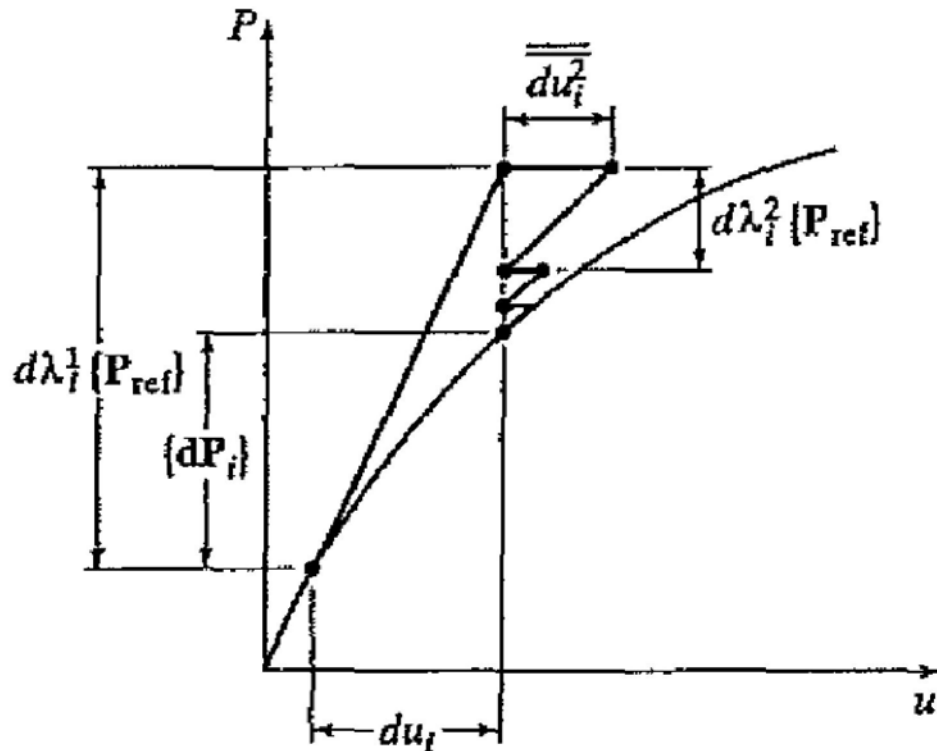
วิธีการนี้จะควบคุมการกระจัดที่ดักวีความ เป็นอิสระเพียง 1 จุด มีรายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยค่าพารามิเตอร์น้ำหนักบรรทุกในรอบการทำซ้ำแรกหาจากสมการที่ 2.33

$$d\lambda_1 = \frac{\delta u}{[K_i^{j-1}]^{-1}\{dP_{ref}\}_k} \quad (2.33)$$

เมื่อ δu คือการกระจัดที่ต้องการ ณ ดักวี k ที่ควบคุม และสำหรับรอบการทำซ้ำที่ 2 เป็นต้นไปคำนวณค่าพารามิเตอร์น้ำหนักบรรทุกจากสมการที่ 2.34

$$d\lambda = -\frac{\{\overline{\overline{d\Delta_i^j}}\}_k}{\{\overline{d\Delta_i^j}\}_k} \quad (2.34)$$

สมการที่ 2.34 เป็นการกำหนดให้การกระจัดที่ดักวี k มีค่าคงที่ตลอดการทำซ้ำ วิธีการควบคุมการกระจัดนี้สามารถคำนวณพฤติกรรมของโครงสร้างผ่านจุดวิกฤติได้ดี อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถคำนวณได้หากโครงสร้างมีพฤติกรรมแบบ Snap Back



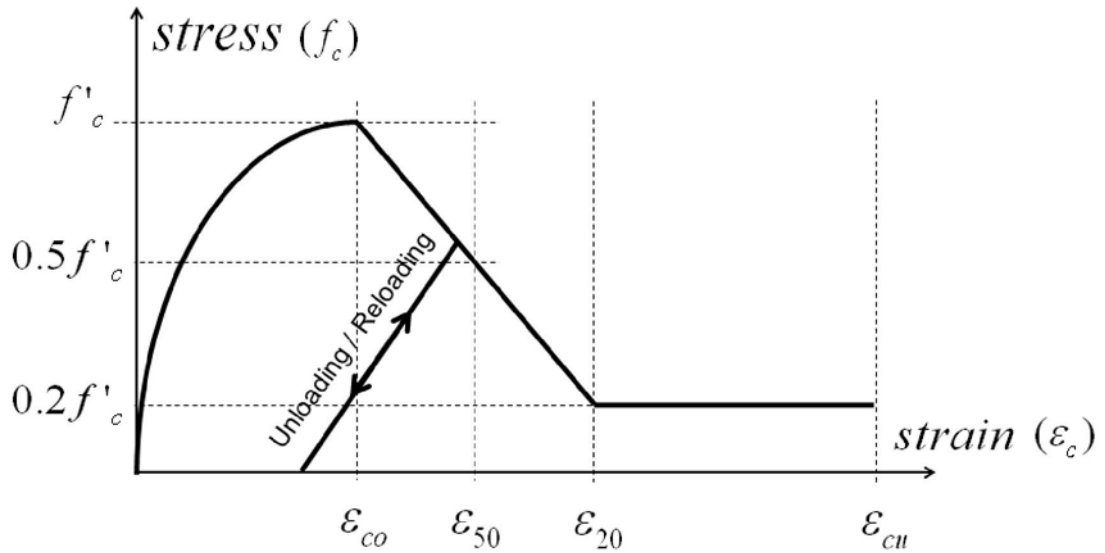
รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีควบคุมการกระจัด (McGuire, 2000)

2.4 แบบจำลองทางวัสดุ

แบบจำลองทางวัสดุที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้จากการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปประกอบด้วย แบบจำลองของเหล็กเสริม แบบจำลองของคอนกรีตที่พิจารณาผลของการไอบรัด และไม่พิจารณาผลของการไอบรัดของเหล็กปลอก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีต

แบบจำลองทางวัสดุโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นกรณีที่ไม่พิจารณาผลการไอบรัดของเหล็กปลอกเช่น แบบจำลองของ Kent และ Park (1971) แบบจำลองของ Popovics (1973) เป็นต้น และกรณีพิจารณาผลการไอบรัดของเหล็กปลอกเช่น แบบจำลองของ Desayi (1978) หรือแบบจำลองของ Scott (1982) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองตามแนวทางของ Scott (1982) ที่ไม่คำนึงถึงผลของเหล็กปลอกเป็นหลัก (ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6) ในขณะที่ผลของการไอบรัดของเหล็กปลอก ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงค่าความชันเฉพาะช่วงอ่อนตัวลงตามแนวทางของงานวิจัยเดียวกัน (Scott, 1982) อันมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 2.6 แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีต

เมื่อ $\varepsilon_c < \varepsilon_{co}$ และ $\varepsilon_{co} = 0.002$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (2.35)$$

เมื่อ $\varepsilon_{co} < \varepsilon_c < \varepsilon_{20}$ และ ε_{20} คือค่าความเครียดที่ความเค้นเท่ากับ 0.2 เท่าของความเค้นสูงสุด

$$f_c = f'_c - \left(\frac{f'_c - 0.5f'_c}{\varepsilon_{50u} - 0.002} \right) (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \quad (2.36)$$

และ

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 2.9f'_c}{1450f'_c - 1000} \quad (2.37)$$

เมื่อ $\varepsilon_{20} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$

$$f_c = 0.2f'_c \quad (2.38)$$

เมื่อ $\varepsilon_c > \varepsilon_{cu}$

$$f_c = 0 \quad (2.39)$$

สำหรับการพิจารณากรณีที่พิจารณาผลของเหล็กปลอก ทำการปรับปรุงสมการ 2.36 เป็น

ดังสมการ 2.40

$$f_c = f'_c - \left(\frac{f'_c - 0.5f'_c}{\varepsilon_{50u} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{w_c}{S_h}} - 0.002} \right) (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \quad (2.40)$$

เมื่อ $\rho_s = \frac{\pi(w_c + h_c)d_s^2}{2w_c h_c S_h}$

w_c คือ ความกว้างของคอนกรีตที่ถูกล้อมรอบด้วยเหล็กปลอก

h_c คือ ความสูงของคอนกรีตที่ถูกล้อมรอบด้วยเหล็กปลอก

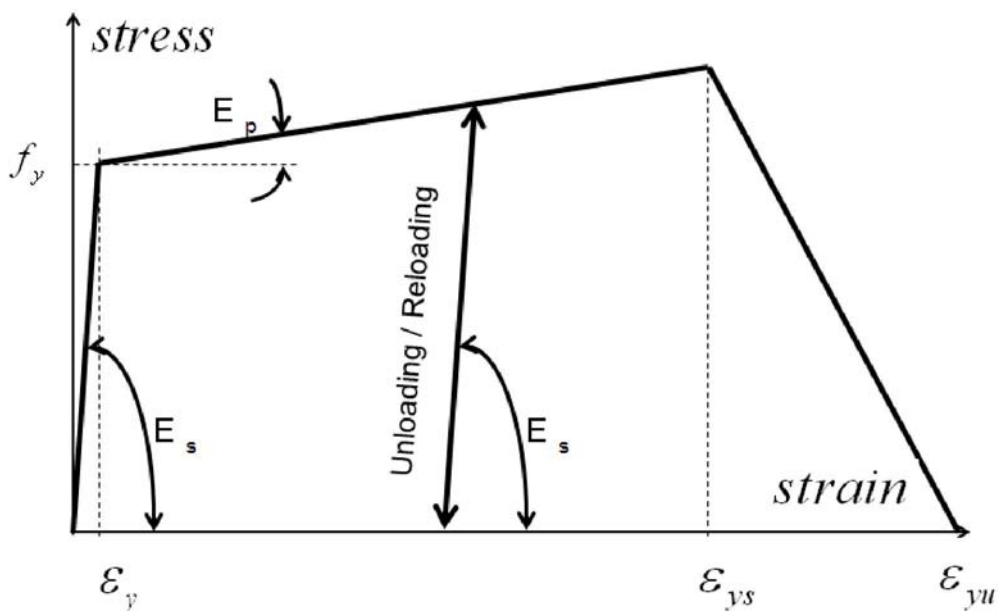
d_s คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเหล็กปลอก

S_h คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

สำหรับกรณี Unloading ที่เกิดขึ้นเมื่อความเครียดของคอนกรีตเข้าสู่ช่วงพลาสติก (มากกว่า 0.002) และความเครียดของวัสดุลดลงจากค่าสูงสุดที่เคยเกิดขึ้น กำหนดให้ค่าโมดูลัสบนเส้นทาง Unloading และ Reloading มีค่าเท่ากับ $\frac{f'_c}{0.002}$

2.4.2 แบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริม

แบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริมแสดงตามรูปที่ 2.7 โดยมีพฤติกรรมเหมือนกันทั้งด้านรับแรงอัดและด้านรับแรงดึง จากภาพ E_s คือ ค่าโมดูลัสในช่วงอีลาสติก E_p คือ ค่าโมดูลัสในช่วงพลาสติก สำหรับกรณี unloading และ reloading กำหนดให้มีค่าโมดูลัสเท่ากับ E_s



รูปที่ 2.7 แบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริม

บทที่ 3

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการวิจัย

3.1 ความนำ

จากวิธีการวิเคราะห์ แบบจำลองเอลิเมนต์ และแบบจำลองทางวัสดุที่ได้อธิบายในบทที่แล้ว งานวิจัยนี้ได้นำแนวทางดังกล่าวมาพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาจาวา เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางวัสดุของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับเนื้อหาในบทนี้ นำเสนอขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม และการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมในเบื้องต้น

3.2 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม

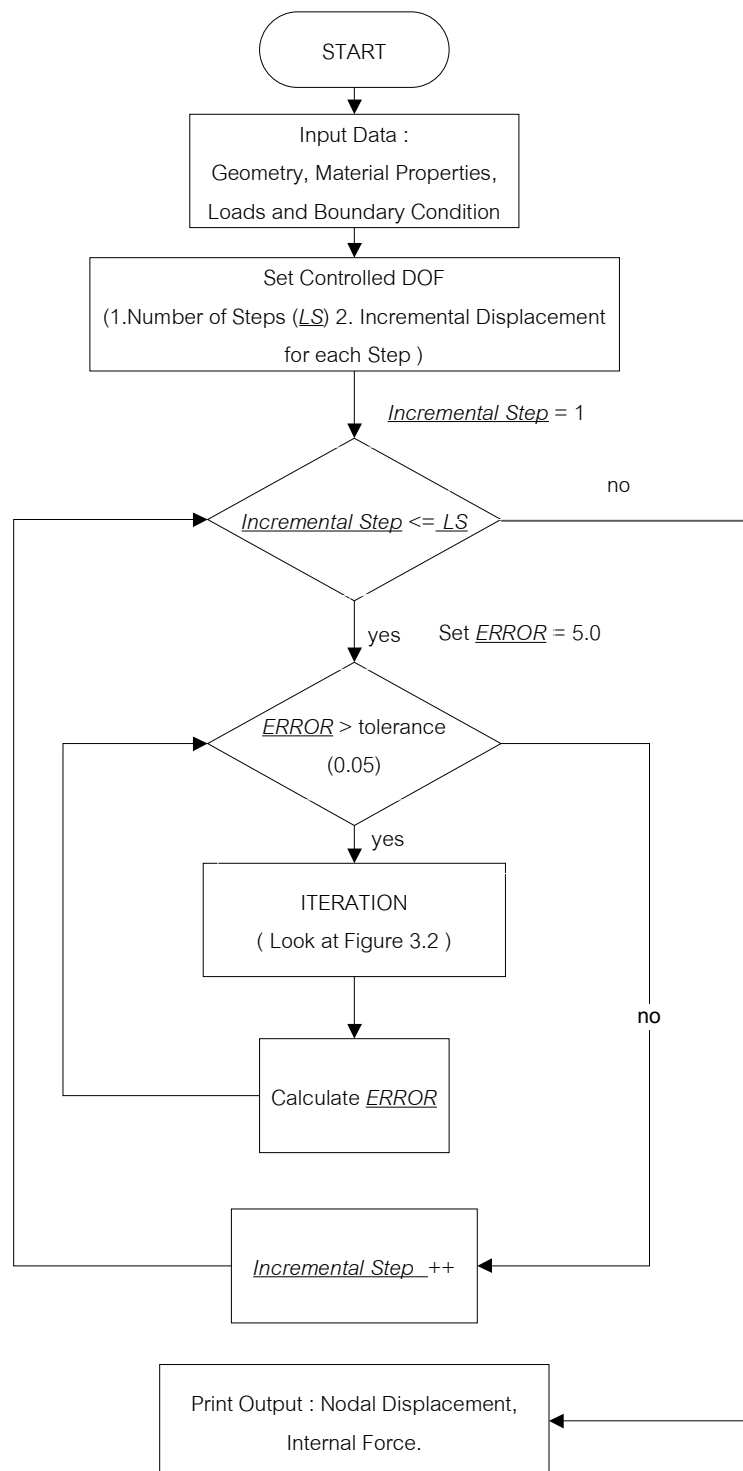
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาต่อจากโปรแกรม JSM (Smittakorn, 2008) ซึ่งสร้างด้วยภาษาจาวา บนหลักการเชิงวัตถุ ในที่นี้จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณโดยแบ่งออกเป็น 1. ขั้นตอนในระดับรอบการคำนวณ (Incremental Steps) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 2. ขั้นตอนในระดับรอบการทำซ้ำภายในรอบการคำนวณ (Iteration Steps) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ เนื้อหาที่อธิบายเป็นขั้นตอนของการคำนวณด้วยวิธีควบคุมการเคลื่อนที่อันเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนของรอบการคำนวณ (Incremental Steps)

ขั้นตอนในระดับรอบการคำนวณจะให้คำตอบเป็นคู่อันดับของเวกเตอร์การกระจัดกับเวกเตอร์น้ำหนักบรรทุก ที่ทำให้เงื่อนไขการตรวจสอบสมดุลเป็นจริง ดังนั้น หากผู้คำนวณต้องการสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการกระจัด จึงต้องทำการแบ่งการคำนวณออกเป็นหลายรอบ ทั้งนี้การแบ่งรอบการคำนวณออกเป็นรอบเล็กๆนั้นจะช่วยให้แต่ละรอบประกอบด้วยรอบการทำซ้ำที่น้อยลง และช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการคำนวณ รายละเอียดของรอบการคำนวณสำหรับโปรแกรมในงานวิจัย มีดังนี้

1. การรับข้อมูลของโครงสร้างได้แก่ รูปร่างทางเรขาคณิต คุณสมบัติทางวัสดุ น้ำหนักบรรทุก และ เงื่อนไขขอบเขต (สำหรับรอบการคำนวณแรก)
2. การรับข้อมูลการคำนวณ ได้แก่ จำนวนรอบการทำซ้ำที่ต้องการ ดัชนีความอิสระที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ และการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการคำนวณ (สำหรับรอบการคำนวณแรก)

3. โปรแกรมกำหนดค่า ตัวแปร ERROR ให้มากกว่าค่าอย่างต่ำ และเข้าสู่รอบการทำซ้ำ เพื่อกำจัดแรงไม่สมดุลระหว่างจุดต่อ
4. เมื่อเสร็จสิ้นรอบการทำซ้ำ ตรวจสอบจำนวนรอบการคำนวณ หากครบรอบการคำนวณตามที่กำหนดไว้ ให้ทำการแสดงผลการคำนวณ หากยังไม่เสร็จสิ้นรอบการคำนวณให้ไปที่ข้อ 3 เพื่อคำนวณรอบการคำนวณถัดไป



รูปที่ 3.1 แผนผังการคำนวณในระดับรอบการคำนวณ (ค่าที่แสดงด้วยตัวเอียงคือตัวแปร)

3.2.2 ขั้นตอนของรอบการทำซ้ำ (Iteration Steps)

ขั้นตอนของรอบการทำซ้ำ เป็นส่วนหนึ่งของรอบการคำนวณ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดแรงไม่สมดุลระหว่างแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ และแรงต้านทานอันเกิดจากการเสียรูปของโครงสร้าง อันมีรายละเอียด ดังนี้

1. จาก $ERROR > tolerance$ เข้าสู่รอบการทำซ้ำที่ 1 ($iteration = 1$)

1.1 เมื่อ $iteration = 1$

$$\text{แรงไม่สมดุล } UBF = 0.0$$

1.2 เมื่อ $iteration > 1$

$$\text{แรงไม่สมดุล } UBF = \lambda P - Q$$

2. คำนวณ $\overline{\{d\Delta_i^j\}} = [K_i^{j-1}]^{-1} \{dP_{ref}\}$ และ $\overline{\overline{\{d\Delta_i^j\}}} = [K_i^{j-1}]^{-1} \{UBF_i^{j-1}\}$

3. คำนวณพารามิเตอร์น้ำหนักบรรทุก $d\lambda$

3.1 เมื่อ $iteration = 1$

$$d\lambda_1 = \frac{\delta u}{[K_i^{j-1}]^{-1} \{dP_{ref}\}_k}$$

3.2 เมื่อ $iteration > 1$

$$d\lambda = -\frac{\overline{\overline{\{d\Delta_i^j\}}}_k}{\overline{\{d\Delta_i^j\}}_k}$$

3.3 คำนวณ $\overline{\{d\Delta_i^j\}} = \overline{\{d\Delta_i^j\}} + d\lambda_1^j \overline{\overline{\{d\Delta_i^j\}}}$ และ $\{\Delta_i\} = \{\Delta_{i-1}\} + \sum_{j=1}^{m_i} \{d\Delta_i^j\}$

4. จาก $\overline{\{d\Delta_i^j\}}$ ที่ได้ นำไปทำในขั้นตอน State Determination ดังนี้

- จากค่าการกระจัดนำไปคำนวณหาค่าความเครียดของหน้าตัดที่กึ่งกลางเอลิเมนต์

$$\varepsilon_n = \frac{du(x)}{dx} = \frac{(u_2 - u_1)}{L}$$

$$\chi = \frac{d\theta(x)}{dx} = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{L}$$

- จากความเครียดของหน้าตัดนำไปคำนวณหาค่าความเครียดของไฟเบอร์

$$\varepsilon_i = \{\varepsilon_n - \chi y\}$$

- คำนวณค่าความเค้นและโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละไฟเบอร์จากความเครียด

$$\sigma = \sigma(\varepsilon)$$

$$E_i = E_i(\varepsilon)$$

- จากค่าโมดูลัส E_i ที่ได้ นำไปหาค่าแรงต้านทานระดับหน้าตัด

$$D = \begin{Bmatrix} N_{mid} \\ M_{mid} \\ V_{mid} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \sum E_i A_i - \chi \sum y_i E_i A_i = \sum \sigma_i A_i \\ \varepsilon_n \sum E_i A_i y_i - \chi \sum E_i A_i y_i^2 = \sum \sigma_i A_i y_i \\ \frac{12EI_{OLD}}{L^2(1+\phi)} \left\{ \frac{(v_2 - v_1)}{L} - \frac{(\theta_2 + \theta_1)}{2} \right\} \end{Bmatrix}$$

- คำนวณแรงต้านทานระดับเอลิเมนต์จาก $Q_{element}$

$$N_1 = -N_2 = -N_{mid}$$

$$V_1 = -V_2 = -V_{mid}$$

$$M_1 = \frac{-V_{mid}L}{2} - M_{mid}$$

$$M_2 = \frac{-V_{mid}L}{2} + M_{mid}$$

- ปรับปรุงค่าแรงภายใน $Q_{new}^{element} = Q_{old}^{element} + dQ^{element}$ เมื่อ

$$dQ = \{N_1 \quad V_1 \quad M_1 \quad N_2 \quad V_2 \quad M_2\}^T$$

- จากแรงต้านทานระดับเอลิเมนต์ทำการรวมเป็นแรงต้านทานของโครงสร้าง

$$Q \text{ และทำการหาแรงไม่สมดุลจาก } UBF = \lambda P - Q$$

- จากแรงไม่สมดุลคำนวณค่า ERROR ด้วย Modified Euclidean Norm

$$ERROR = \sqrt{\frac{1}{n} \sum UBF_i^2}$$

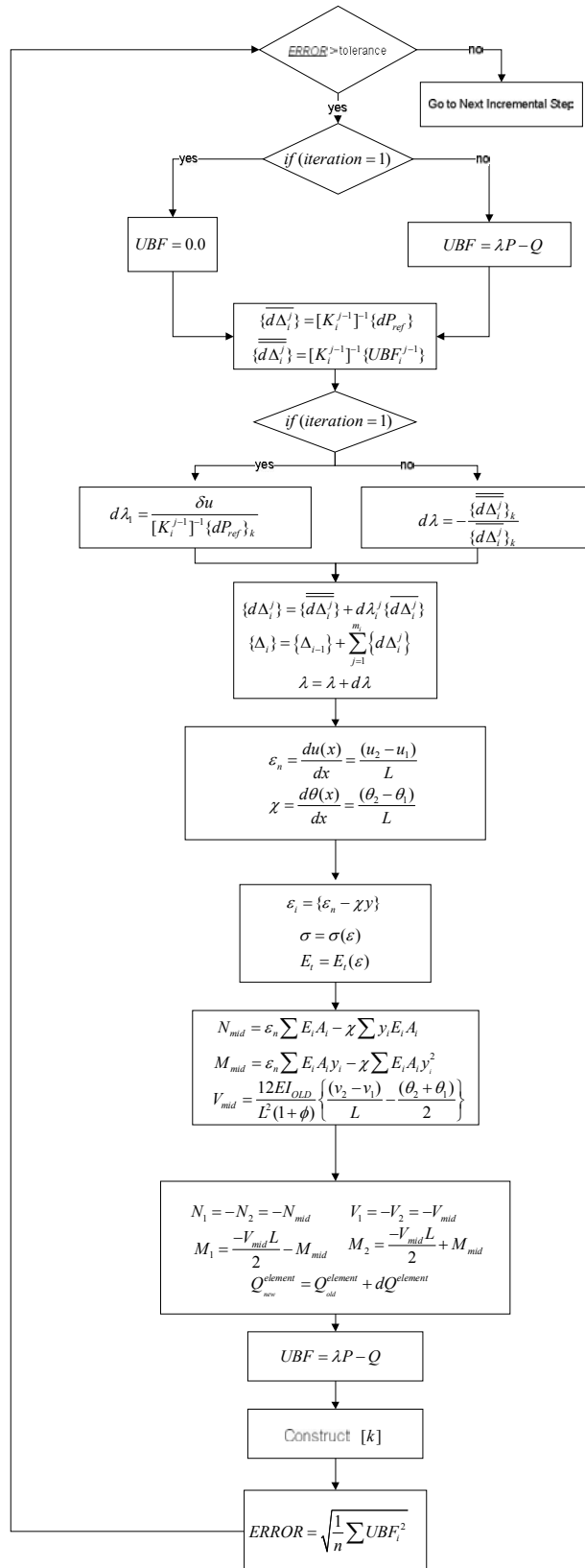
- จากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้ ($E_i = E_i(\varepsilon)$) นำไปหาสตีเฟนระดับหน้าตัด และสตีเฟน ระดับเอลิเมนต์

$$[k]^{Timoshenko} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EAy}{L} & -\frac{EA}{L} & 0 & \frac{EAy}{L} \\ 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} \\ -\frac{EAy}{L} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} & \frac{EAy}{L} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & \frac{EAy}{L} & \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EAy}{L} \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} \\ \frac{EAy}{L} & \frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} & -\frac{EAy}{L} & -\frac{6EI}{L^2(1+\phi)} & \frac{EI(4+\phi)}{L(1+\phi)} \end{bmatrix}$$

5. ตรวจสอบค่า *ERROR*

5.1 เมื่อ $ERROR > tolerance$ กลับไปที่ข้อ 2 และทำการคำนวณในรอบการทำซ้ำถัดไป

5.2 เมื่อ $ERROR \leq tolerance$ ไปที่รอบการคำนวณถัดไป



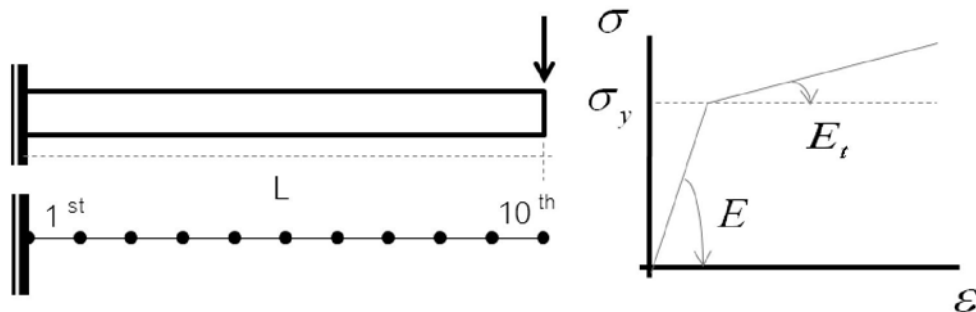
รูปที่ 3.2 แผนผังการคำนวณในระดับรอบการทำซ้ำ

3.3 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะตรวจสอบความถูกต้องกับโปรแกรม ALADDIN 2.0 (พัฒนาขึ้นที่ Institute for Systems Research, University of Maryland, College Park, USA) โดยโครงสร้างที่ใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ โครงสร้างคานยื่นที่วัสดุมีคุณสมบัติแบบเส้นตรงสองเส้น (Bilinear Hardening) และโครงสร้างชิ้นส่วนรับแรงดึงที่วัสดุมีคุณสมบัติแบบอ่อนตัวลง (Softening)

3.3.1 การตรวจสอบโปรแกรม ตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1 ได้แก่ โครงสร้างคานยื่น (Cantilever Beam) มีรูปร่าง การแบ่งเอลิเมนต์ และความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดดังแสดงในรูปที่ 3.3 และมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นและผลจากโปรแกรม ALADDIN แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.4



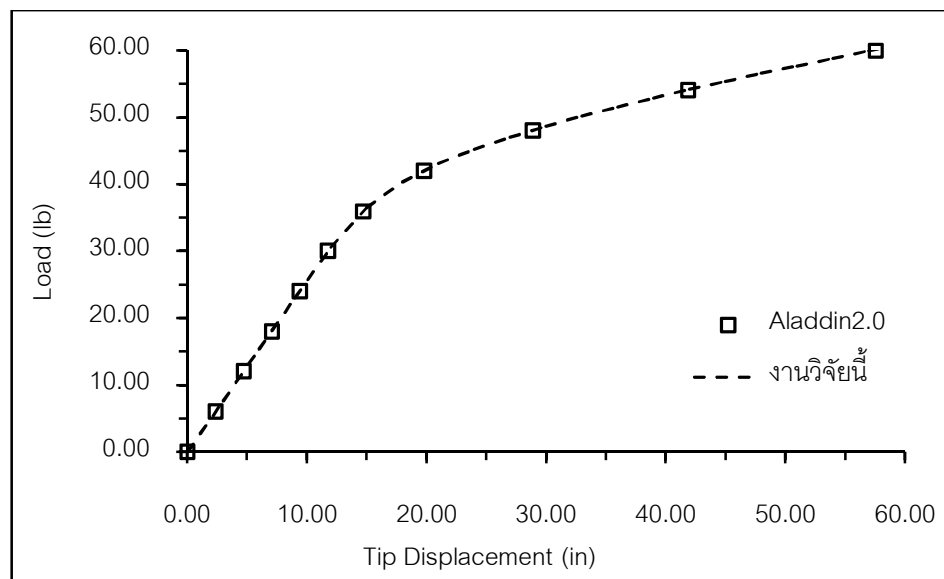
รูปที่ 3.3 รายละเอียดโครงสร้าง การแบ่งเอลิเมนต์ และวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของโครงสร้าง และของวัสดุ ตัวอย่างที่ 1

Structural Properties		
B	1.0	in
H	4.0	in
L	50.0	in
Material Properties		
E	20000.0	psi
Et	2000.0	psi
σ_y	500.0	psi

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 1 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และโปรแกรมในงานวิจัยนี้

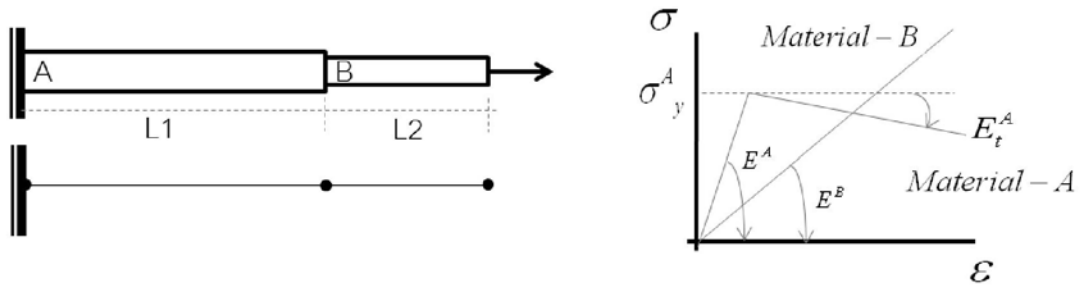
Load (lb)	Tip displacement (in)	Load (lb)	Tip displacement (in)
โปรแกรม Aladdin		งานวิจัยนี้	
0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	2.36	6.04	2.36
12.00	4.71	12.05	4.71
18.00	7.07	18.09	7.07
24.00	9.46	24.20	9.46
30.00	11.80	30.13	11.80
36.00	14.74	36.10	14.74
42.00	19.82	42.11	19.82
48.00	28.92	48.12	28.92
54.00	41.86	54.12	41.86
60.00	57.54	60.12	57.54



รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 1 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และโปรแกรมในงานวิจัยนี้

3.3.2 การตรวจสอบโปรแกรม ตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2 ได้แก่ ชิ้นส่วนรับแรงแนวแกน มีรูปร่าง การแบ่งเอลิเมนต์ และความสัมพันธ์ ความเค้นความเครียด แสดงในรูปที่ 3.5 และมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.6



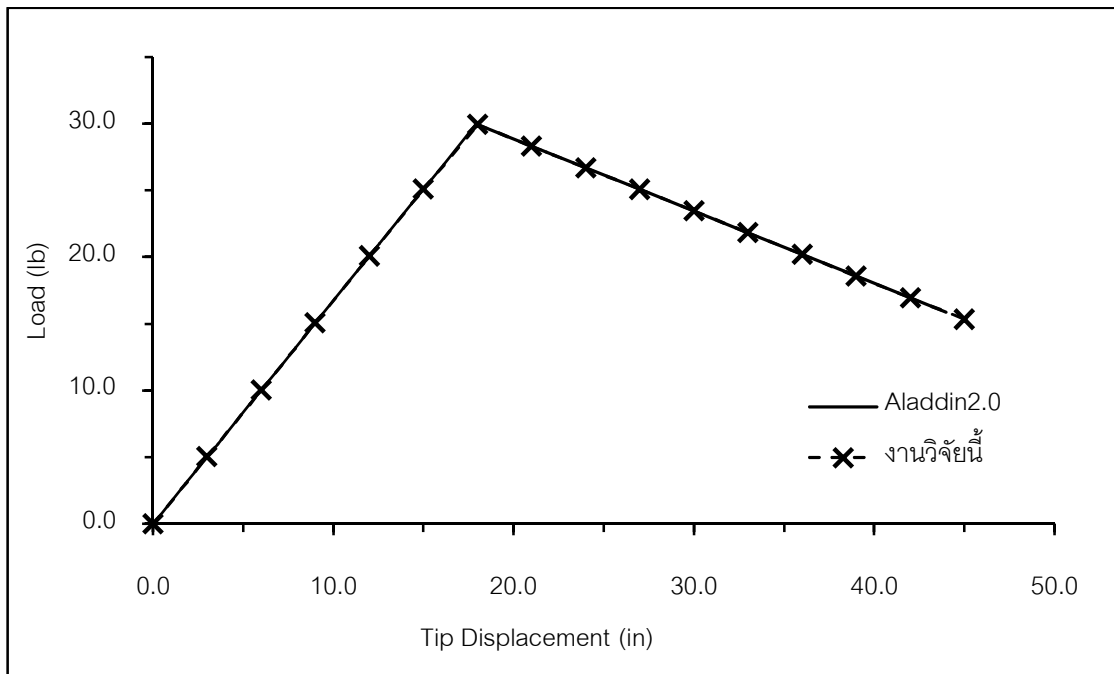
รูปที่ 3.5 รายละเอียดโครงสร้าง การแบ่งเอลิเมนต์ และวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของโครงสร้าง และของวัสดุ ตัวอย่างที่ 2

Structural Properties A			Structural Properties B		
B	0.1	m	B	0.1	m
H	0.3	m	H	0.2	m
L	2	m	L	1.5	m
Material Properties A			Material Properties B		
E	30000	N/m ²	E	20000	N/m ²
E _t	-3000	N/m ²	E _t	-	N/m ²
σ_y	1000	N/m ²	σ_y	-	N/m ²

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 2 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และโปรแกรมในงานวิจัยนี้

Force (N)	Displacement (cm)	Force (N)	Displacement (cm)
Aladdin		งานวิจัยนี้	
0.00	0.000	0.00	0.000
3.00	1.792	3.00	1.792
6.00	3.583	6.00	3.583
9.00	5.375	9.00	5.375
12.00	7.167	12.00	7.167
15.00	8.958	15.00	8.958
18.00	10.75	18.00	10.75
21.00	12.542	21.00	12.542
24.00	14.333	24.00	14.333
27.00	16.125	27	16.125
30.00	17.917	30.00	17.917
27.90	21.796	27.93	21.796
24.90	27.338	24.93	27.338
21.90	32.879	21.93	32.879
18.90	38.421	18.93	38.421
15.90	43.963	15.93	43.963



รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ 2 ด้วยโปรแกรม ALADDIN และโปรแกรมในงานวิจัยนี้

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในเบื้องต้นพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความใกล้เคียงกับโปรแกรม ALADDIN มากกว่าร้อยละ 99.1 ซึ่งถือว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี และสามารถนำไปใช้ในการวิจัยต่อไปได้

บทที่ 4 กรณีศึกษา

รายงานกรณีศึกษาและผลการวิเคราะห์ที่จะนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วยตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ตัวอย่าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1.ประเมินความสามารถของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในอดีต 2.เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมไร้เชิงเส้นทางวัสดุอันรวมไปถึงพฤติกรรมการอ่อนตัวลง (Softening Post-Peak) ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

กรณีศึกษาที่ 4.1 ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างง่าย (Simply Supported Beam) เสริมเหล็กแบบน้อยกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมส่วนสมดุลง (Under-Reinforcement) รับน้ำหนักบรรทุกแบบจุดที่กึ่งกลางคาน กรณีศึกษานำเสนอผลของแบ่งเอลิเมนต์เพื่อหาการลู่เข้าของค่าตอบโดยเทียบกับงานวิจัยในอดีต และเปรียบเทียบผลจากการพิจารณาแบบจำลองคอนกรีตส่วนรับแรงดึงต่อพฤติกรรมที่ทำนายได้ นอกจากนี้ พฤติกรรมในระดับหน้าตัดจะถูกนำเสนอเพื่อแสดงความถูกต้องของค่าตอบในระดับนั้นๆ อีกด้วย

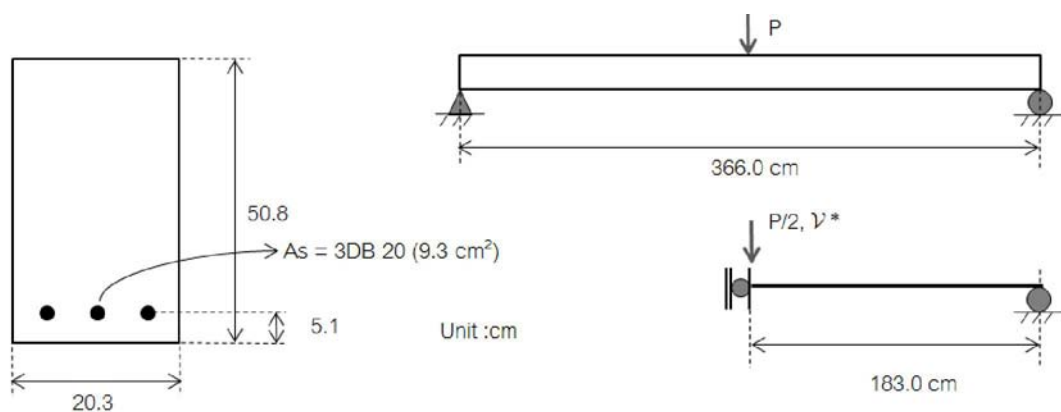
กรณีศึกษาที่ 4.2 ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุด 4 จุด (Four-Point Bending Test) เสริมเหล็กแบบมากกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมส่วนสมดุลง (Over-Reinforcement) ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลการทดสอบและผลการคำนวณในอดีต อีกทั้งพฤติกรรมในระดับหน้าตัดจะถูกแสดงเพื่อศึกษากลไกของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง

กรณีศึกษาที่ 4.3 ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ 1 ช่วง 1 ชั้นรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุด 2 จุด กรณีศึกษานี้แบ่งเป็น 4 กรณีย่อย ได้แก่ กรณีที่ 4.3.1 แสดงผลของแบ่งเอลิเมนต์เพื่อหาการลู่เข้าของค่าตอบโดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต และแสดงกลไกการอ่อนตัวลงของโครงสร้าง กรณีที่ 4.3.2 เปรียบเทียบกลไกการอ่อนตัวลงของโครงสร้างเมื่อเพิ่มเติมข้อสมมติฐานความไม่สมบูรณ์ตั้งต้น (Non-uniformities) กรณีที่ 4.3.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างโดยใช้แบบจำลองทางวัสดุที่เปลี่ยนไป และกรณีที่ 4.3.4 แสดงผลของการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ที่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วงอ่อนตัวลง

กรณีศึกษาที่ 4.4 ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ช่วง 2 ชั้น รับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งและรับแรงดัดแบบทิศทางเดียว การวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 กรณีศึกษาย่อย ได้แก่ กรณีที่ 4.4.1 แสดงผลของแบ่งเอลิเมนต์เพื่อหาการลู่เข้าของค่าตอบโดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต และกรณีที่ 4.4.2 แสดงผลการอ่อนตัวลงของหน้าตัดจากการรับแรงอัดแนวแกน

4.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างง่าย (Simply Supported Beam)

กรณีศึกษาที่ 4.1 ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างง่าย (Simply Supported Beam) เสริมเหล็กแบบน้อยกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมส่วนสมมูล (Under-Reinforcement) รับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดที่กึ่งกลางคานดังแสดงในรูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการทดสอบของ Burns และ Siess (1962), ผลการวิเคราะห์ของ Cervenka (2005) ด้วยโปรแกรม ATENA โดยการแบ่งเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม และผลการวิเคราะห์ของ Valipour และ Foster (2007) ด้วยวิธีการเฟลกซิบิลิตี้ รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 การจำลองโครงสร้างเป็นไปตามตามรูปที่ 4.1ล่างขวา (การจำลองโครงสร้างทำเพียงครั้งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้าง)



รูปที่ 4.1 รายละเอียดโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุกทุก และการจำลองโครงสร้าง กรณีศึกษาที่ 4.1

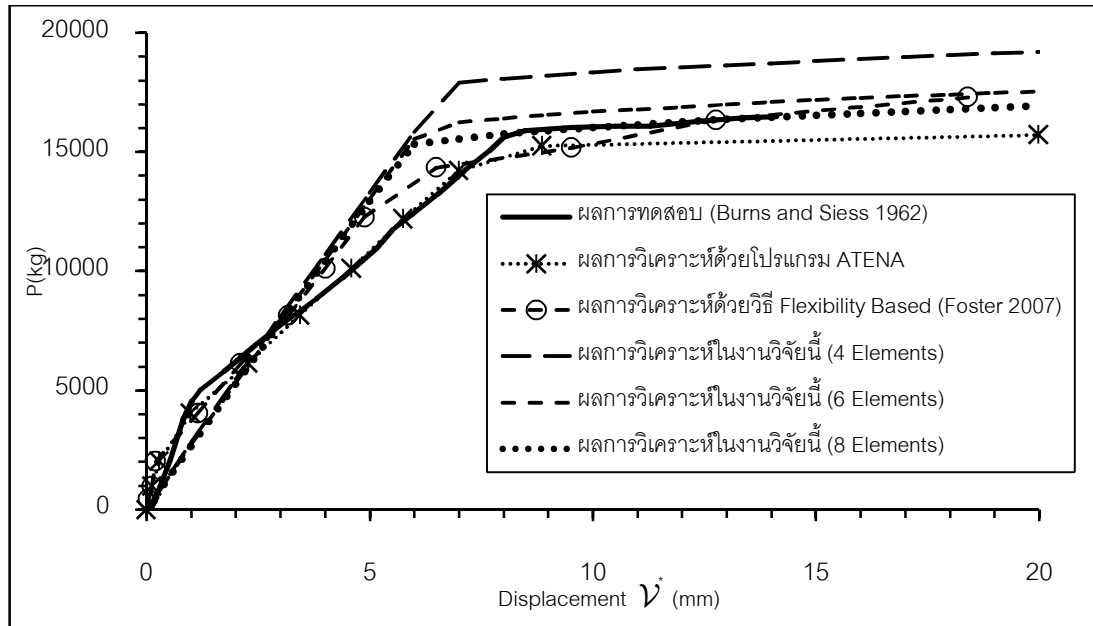
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.1

คุณสมบัติของวัสดุ		หน่วย
f'_c	336.50	กก./ซม. ²
ϵ_{co}	0.002	-
$\epsilon_{20} = \epsilon_{cu}$	0.004	-
f_y	3,161.12	กก./ซม. ²
E_s	2.00E6	กก./ซม. ²
E_p	2.00E4	กก./ซม. ²

4.1.1 ผลของขนาดเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ทำโดยแบ่งชิ้นส่วนย่อยจำนวน 4, 6 และ 8 เอลิเมนต์ เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยในอดีต ทั้งนี้แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีตไม่คำนึงถึงความสามารถของ

คอนกรีตในการรับแรงดึง ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.2 และแสดงน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เหล็กเสริมที่กึ่งกลางคานเริ่มครากสำหรับกรณีต่างๆ ในตารางที่ 4.2



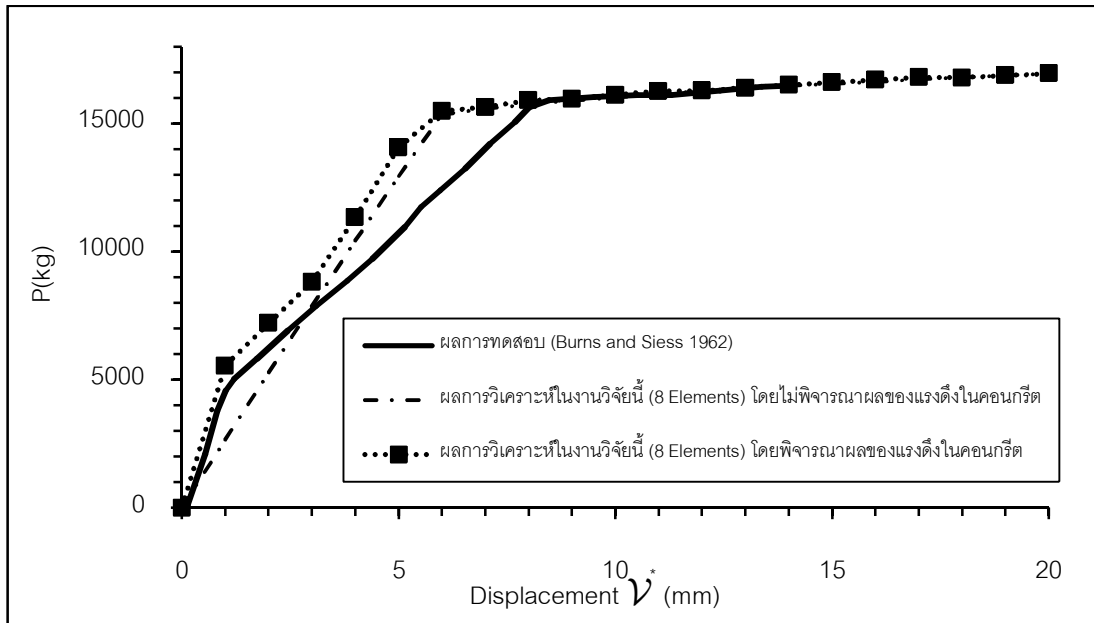
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.1.1 โดยไม่พิจารณาผลของคอนกรีตด้านรับแรงดึง และใช้จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ เทียบกับผลในอดีต

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริม ณ กึ่งกลางคานเริ่มคราก กรณีการแบ่งเอลิเมนต์จำนวนต่างๆ เทียบกับผลการทดสอบ

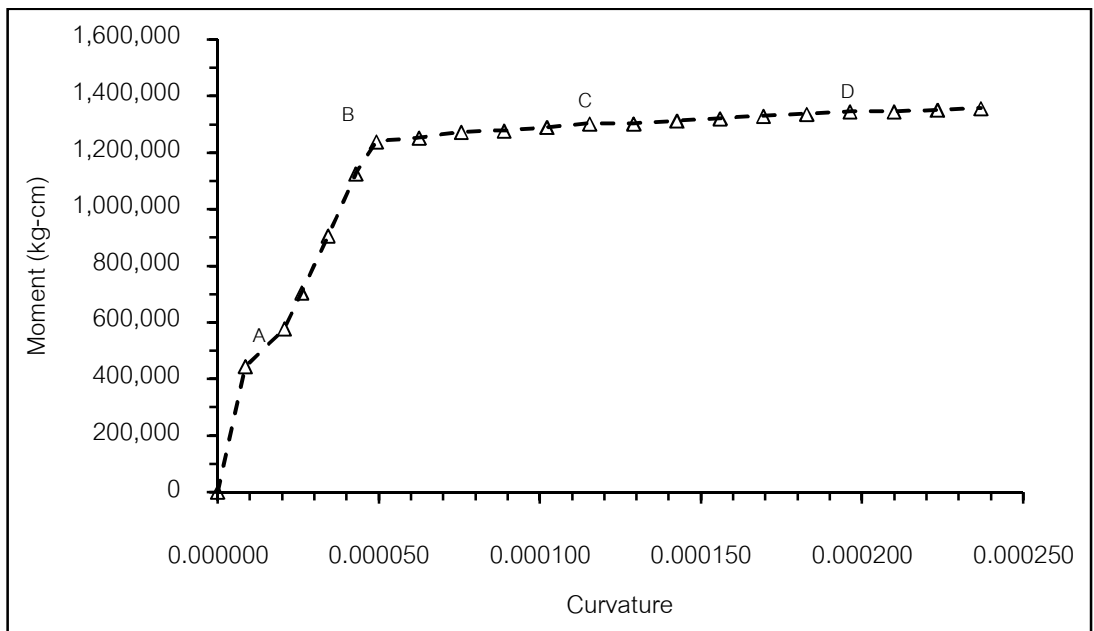
	4 เอลิเมนต์	6 เอลิเมนต์	8 เอลิเมนต์	ผลการทดสอบ
น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเริ่มคราก (กก.)	17,917	16,246	15,538	15,637

4.1.2 การพิจารณาผลของคอนกรีตรับแรงดึง

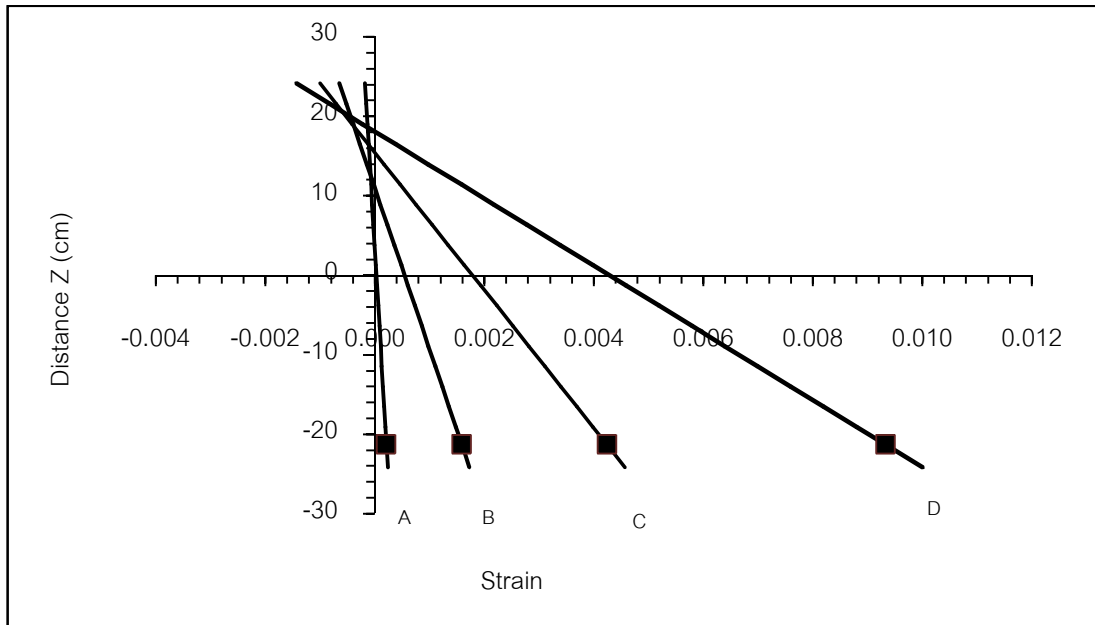
การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาความสามารถของคอนกรีตด้านรับแรงดึง ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.3 นอกจากนี้การคำนวณพฤติกรรมในระดับหน้าตัดสำหรับกรณีที่คิดผลของคอนกรีตรับแรงดึง อันได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้ง การกระจายความเค้นและการกระจายความเครียด แสดงในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6



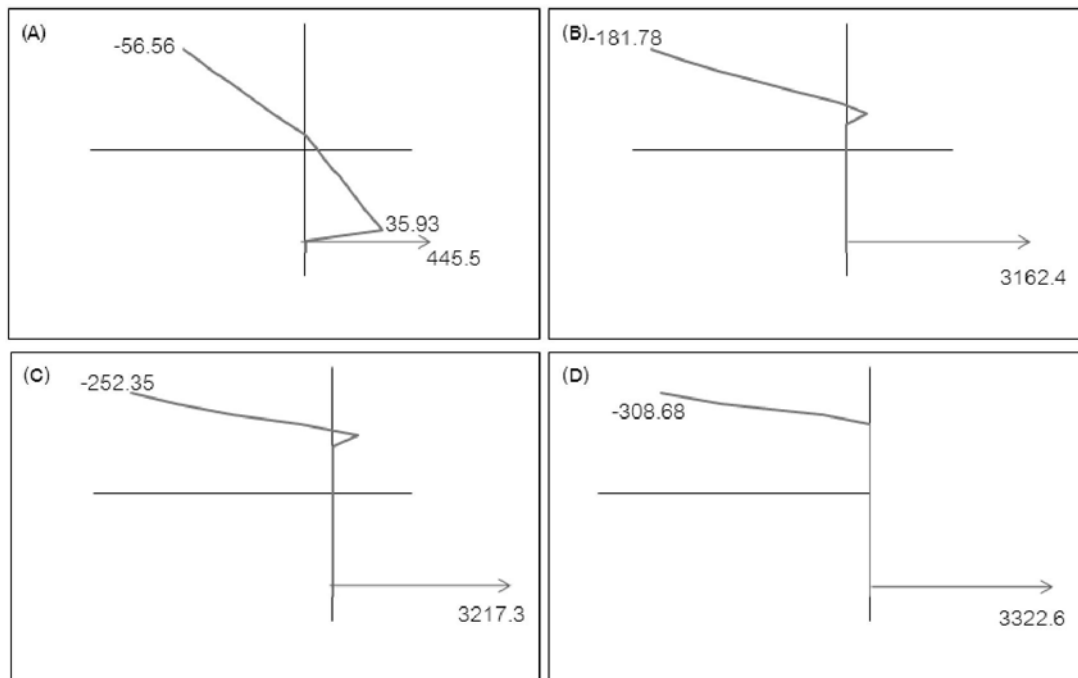
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์กรณีไม่พิจารณาและพิจารณาผลของคอนกรีตด้านรับแรงดึง เทียบกับ
ผลในอดีต กรณีศึกษาที่ 4.1.2



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้งที่เอลิเมนต์กึ่งกลางคาน กรณีศึกษาที่ 4.1.2



รูปที่ 4.5 การกระจายความเครียดของหน้าตัด ที่เอลิเมนต์กึ่งกลางคาน กรณีศึกษาที่ 4.1.2



รูปที่ 4.6 การกระจายความเค้นของหน้าตัด ที่เอลิเมนต์กึ่งกลางคาน กรณีศึกษาที่ 4.1.2

จากผลการวิเคราะห์ กรณีศึกษาที่ 4.1 พบว่า

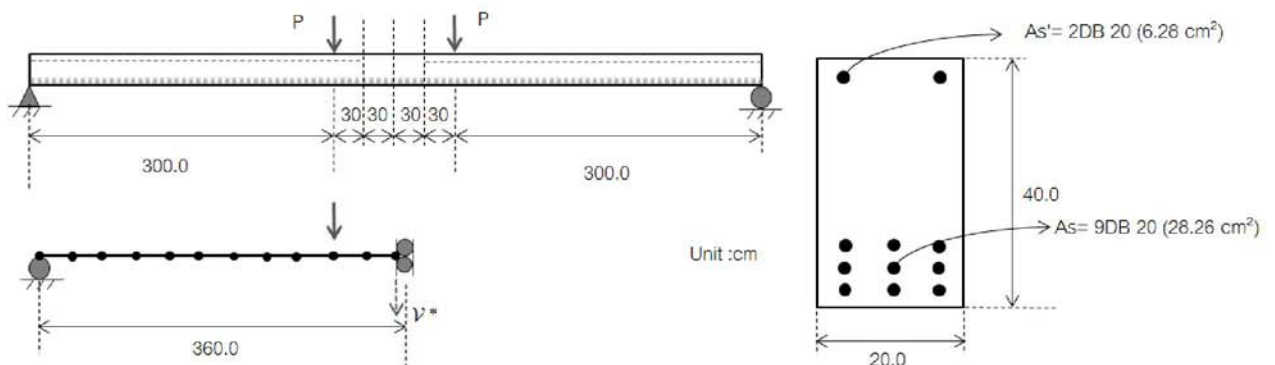
- จากการทดสอบแบ่งชิ้นส่วนย่อยจำนวน 4, 6 และ 8 เอลิเมนต์ (รูปที่ 4.2) พบว่าให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุก ณ จุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากเท่ากับ 17,917 16,246 และ 15,537 กก.

ตามลำดับ ซึ่งกรณีที่สามารถให้ค่าน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุดร้อยละ 99.4 รองลงมาได้แก่ กรณีที่ 2 ร้อยละ 96.1 และ กรณีที่ 1 ร้อยละ 85.4 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างที่ดีขึ้นเมื่อแบ่งขนาดของเอลิเมนต์เล็กลง

- จากผลการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกรณีพิจารณาความสามารถของคอนกรีตด้านรับแรงดึงและไม่พิจารณา (รูปที่ 4.3) พบว่า การพิจารณาผลของคอนกรีตด้านรับแรงดึง(ที่กำหนดให้โมดูลัสของการแตกร้าว $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$) จะแสดงพฤติกรรมในช่วงต้นได้ใกล้เคียงผลการทดสอบมากกว่า ซึ่งเห็นได้ชัดจากค่าสติเฟนสในช่วงก่อนที่ค่าความเค้นของคอนกรีตรับแรงดึงจะมากกว่าค่าโมดูลัสของการแตกร้าว (ตำแหน่ง A รูปที่ 4.4) อย่างไรก็ตามค่าน้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเริ่มครากครากมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทั้ง 2 กรณี
- จากผลการวิเคราะห์ในระดับหน้าตัด (รูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5) พบว่าพฤติกรรมในระดับหน้าตัดมีความสอดคล้องกับการประมาณทางทฤษฎี กล่าวคือ จากโครงสร้างตัวอย่าง อัตราส่วนเหล็กเสริมเท่ากับ $\frac{A_s}{bd} = 0.01$ ซึ่งน้อยกว่าอัตราเหล็กเสริมสมดุล (มีค่าเท่ากับ 0.051) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตด้านรับแรงอัดจะถึงค่าความเค้นสูงสุดที่(ตำแหน่ง B ตามภาพที่ 4.3) นอกจากนี้ หลังจากทีเหล็กเสริมเริ่มคราก ค่าโมเมนต์ที่หน้าตัดรับได้มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ขณะที่ค่าความโค้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ตำแหน่ง C และ D) โดยในช่วงนี้ ตำแหน่งแกนสะเทิน (Neutral Axis) ยกตัวขึ้นสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6

4.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมากกว่าอัตราส่วนสมดุล (Over Reinforcement)

กรณีศึกษาที่ 4.2 ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุด 4 จุด (Four-Point Bending Test) เสริมเหล็กแบบมากกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมส่วนสมดุล (Over-Reinforcement) ผลการวิเคราะห์ถูกเปรียบเทียบกับผลทดสอบของ Ulfkjaer (2000) ซึ่งมี 3 ตัวอย่างการทดสอบ (a, b, c) และผลการวิเคราะห์ของ Coleman และ Spacone (2001) รายละเอียดของโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกแสดงในรูปที่ 4.7 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 4.3

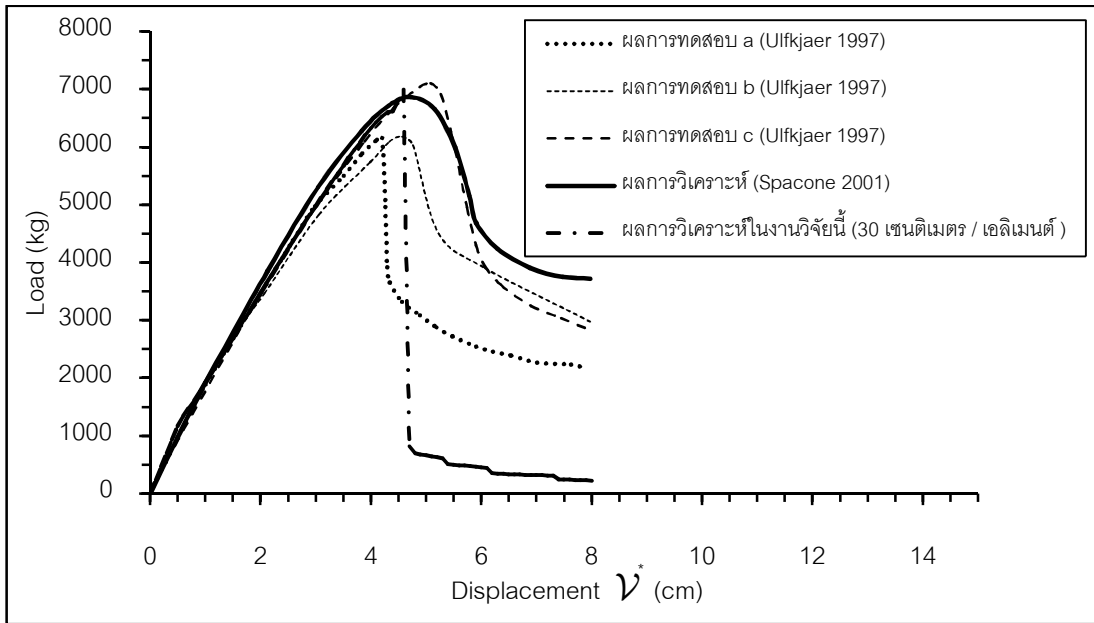


รูปที่ 4.7 รายละเอียดโครงสร้าง น้ำหนักบรรทุก และการจำลองโครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 4.2

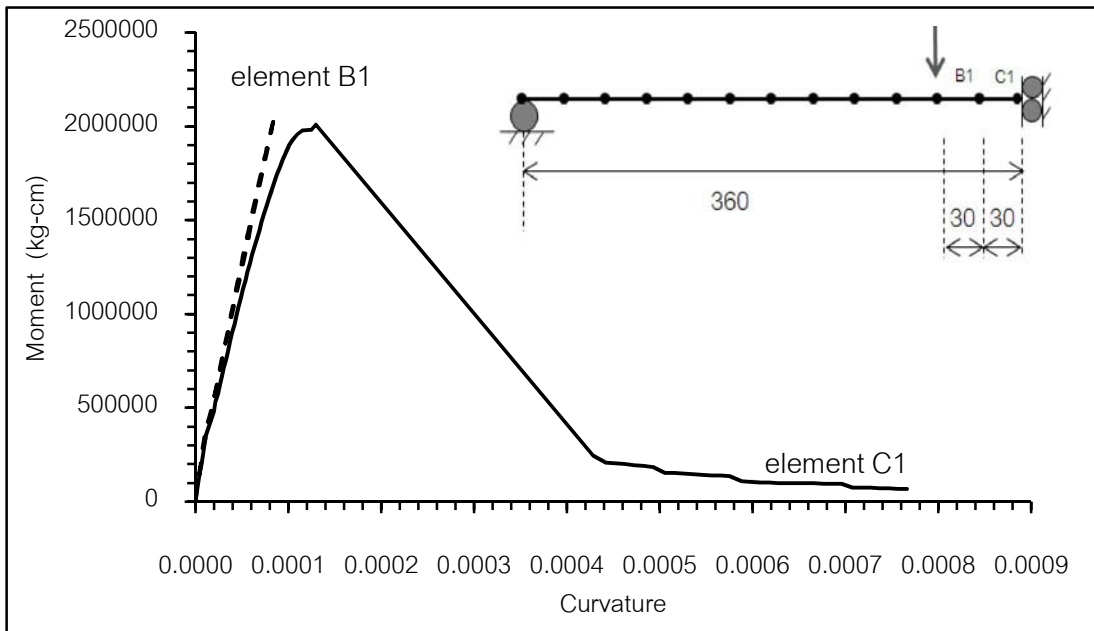
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.2

คุณสมบัติของวัสดุ		หน่วย
f'_c	247.80	กก./ชม. ²
ϵ_{co}	0.002	-
$\epsilon_{20} = \epsilon_{cu}$	0.004	-
f_y	6628.16	กก./ชม. ²
Es	2.00E6	กก./ชม. ²
Ep	2.00E4	กก./ชม. ²

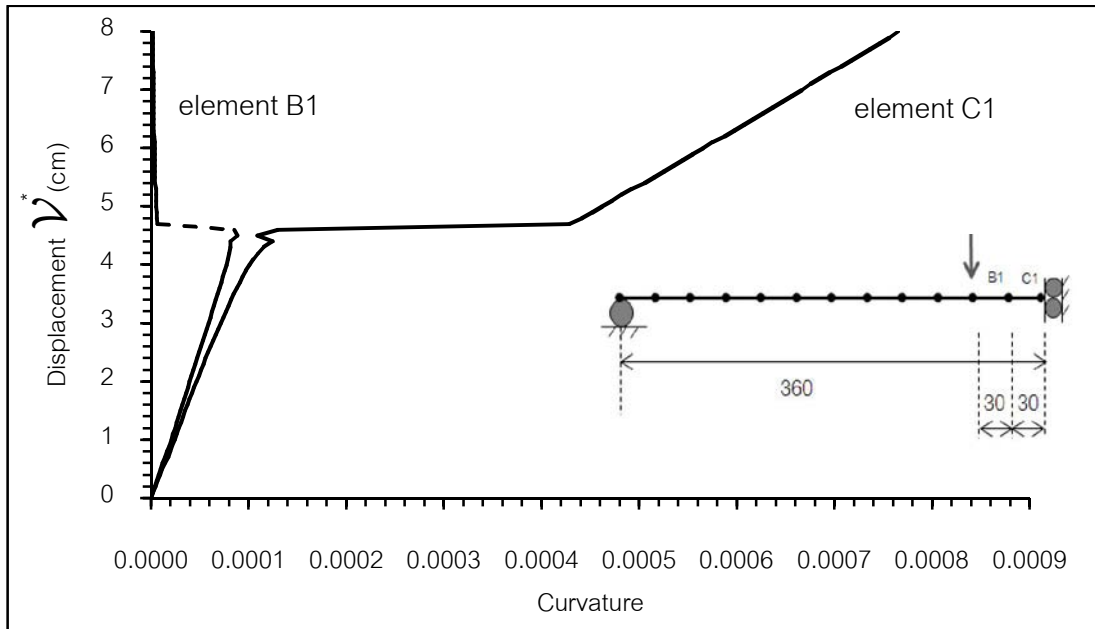
การวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 4.2 ใช้เอลิเมนต์ขนาดเท่ากับ 30 ซม.เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลจากงานวิจัยในอดีต (รูปที่ 4.8) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าความโค้ง ณ เอลิเมนต์ที่รับน้ำหนักวิฤติและเอลิเมนต์ข้างเคียง (เอลิเมนต์ C1 และ B1) ตามรูปที่ 4.9 และแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความโค้งกับค่าการเสียรูปตามแนวตั้ง (V^*) ที่กึ่งกลางคานในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.2 เทียบกับผลในอดีต



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งที่เอลิเมนต์ C1 และ B1



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าการเสียรูปที่กึ่งกลางคานที่เอลิเมนต์ C1 และ B1

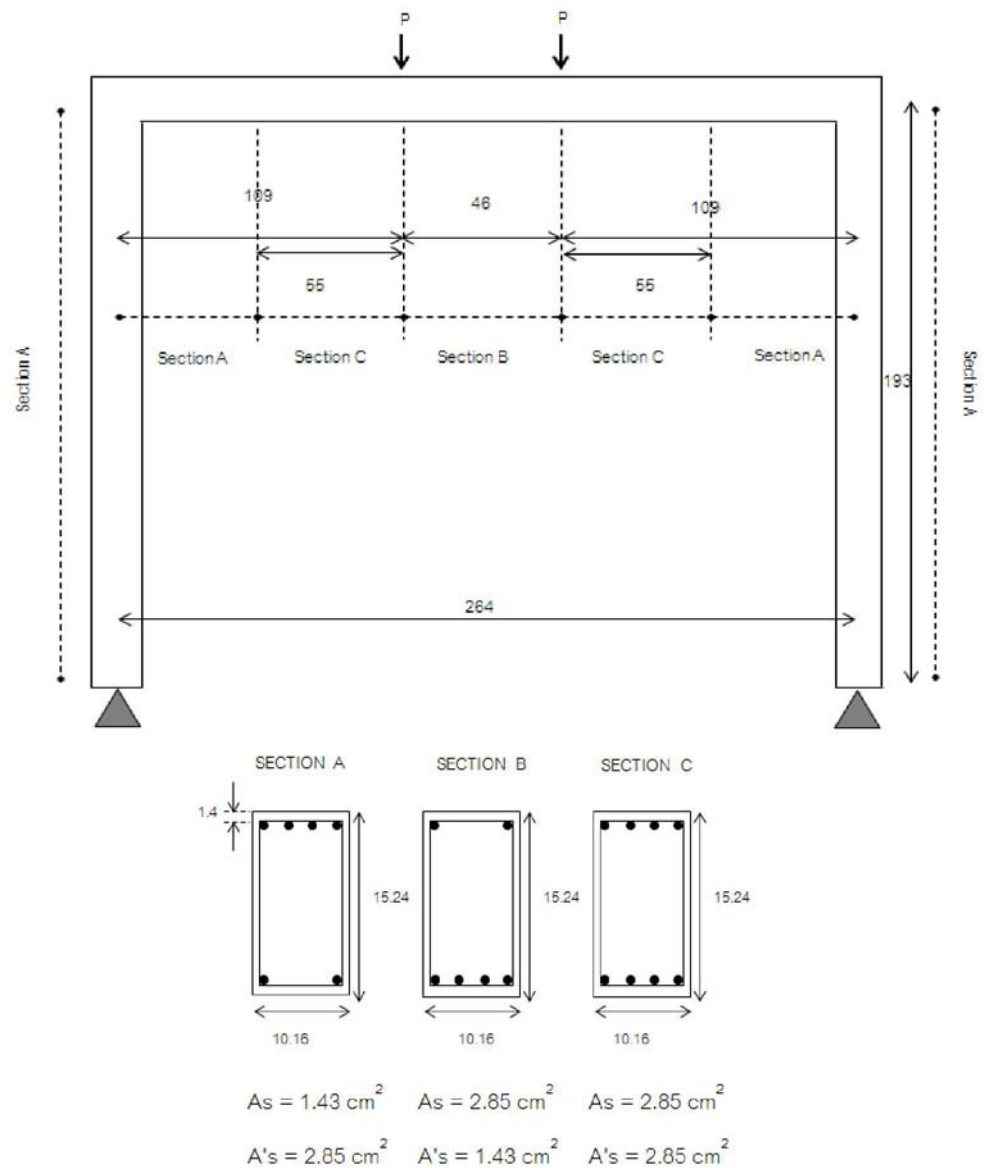
จากผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 4.2 พบว่า

- ผลการวิเคราะห์โดยใช้เอลิเมนต์ขนาด 30 ซม. เทียบกับผลการทดสอบในอดีต (รูปที่ 4.8) เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่วิเคราะห์ได้ กับผลจากการทดสอบของ Ulfkjaer (2000) ตัวอย่าง a,b,c และผลการวิเคราะห์ของ Spacone (2001) ซึ่งมีค่าดังนี้ 6,991 กก. (งานวิจัยนี้) 6,157 กก. (ตัวอย่าง a) 6,184 กก. (ตัวอย่าง b) 7,103 กก. (ตัวอย่าง c) และ 6,867 กก. (Spacone 2001) ผลการวิเคราะห์มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ(ตัวอย่าง a,b และ c) เท่ากับร้อยละ 7.86 และมีค่าความแตกต่างกับผลการวิเคราะห์ของ Spacone เท่ากับร้อยละ 1.81 แม้ว่าผลจากพฤติกรรมของหน้าตัดที่เสริมเหล็กแบบน้อยกว่าอัตราสมดุลง ($\frac{A_s}{bd} = 0.04$ ในขณะที่ อัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุลง เท่ากับ 0.013) ทำให้โครงสร้างมีการวิบัติแบบฉับพลัน ดังนั้น ผลจากการทดสอบจึงมีความไม่แน่นอนสูง(ดังแสดงในรูปที่ 4.8) แต่อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ให้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ในอดีตอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

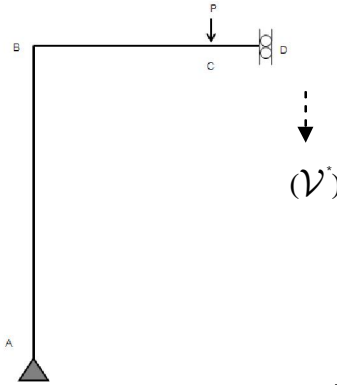
- ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างแสดงถึงความขยับพลันอย่างมากจากผลการคำนวณ กล่าวคือ น้ำหนักบรรทุกที่โครงสร้างสามารถรับได้ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมของหน้าตัดแบบ Over-Reinforcement
- จากพฤติกรรมระดับหน้าตัด (รูปที่ 4.9 และ 4.10) เอลิเมนต์ C1 ซึ่งรับโมเมนต์ดัดสูงสุด แสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง ในขณะที่เอลิเมนต์ B1 แสดงพฤติกรรมแบบ Unloading โดยไม่มีการเสียรูปแบบพลาสติก ทั้งนี้ จากพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กลไกการพังทลายของโครงสร้างที่แสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง จะประกอบด้วยเอลิเมนต์ที่รับน้ำหนักจนถึงจุดวิกฤติและแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง และการ Unloading ของเอลิเมนต์ข้างเคียงเพื่อรักษาสมดุลของแรงระหว่างเอลิเมนต์เสมอ
- จากพฤติกรรมระดับหน้าตัด (รูปที่ 4.9 และ 4.10) พบว่าเมื่อเอลิเมนต์ C1 เกิดการอ่อนตัวลงค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว(ในขณะที่ค่าการเสียรูป ν^* มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก) พร้อมกับที่ค่าความเค้นของเอลิเมนต์ B1 ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์อ่อนตัวลงเป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่ (Strain Localization ในที่นี้หมายถึงปรากฏการณ์ที่ค่าความเครียด ณ จุดใดจุดหนึ่งมีค่ามากกว่าจุดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ)

4.3 โครงข้อแข็งแบบพอร์ทัล (Reinforced Concrete Portal Frame)

กรณีศึกษาที่ 4.3 ได้แก่ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กหนึ่งชั้นหนึ่งช่วง ใช้น้ำหนักบรรทุกแบบจุด 2 จุด มีฐานรองรับแบบหมอน (Pinned Support) ทั้ง 2 ข้าง รายละเอียดของโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกแสดงในรูปที่ 4.11 และรายละเอียดการจำลองโครงสร้างแสดงในรูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Cranston (1965) และผลการวิเคราะห์ของ Bazant (1987) กับ Saje (2004)



รูปที่ 4.11 รายละเอียดโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุก กรณีศึกษาที่ 4.3



รูปที่ 4.12 แบบจำลองโครงสร้าง กรณีศึกษาที่ 4.3

สำหรับโครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.3 ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างโดยแบ่งออกเป็นกรณีศึกษาย่อย 4 กรณี อันมีรายละเอียด ดังนี้

4.3.1 ผลของขนาดเอลิเมนต์

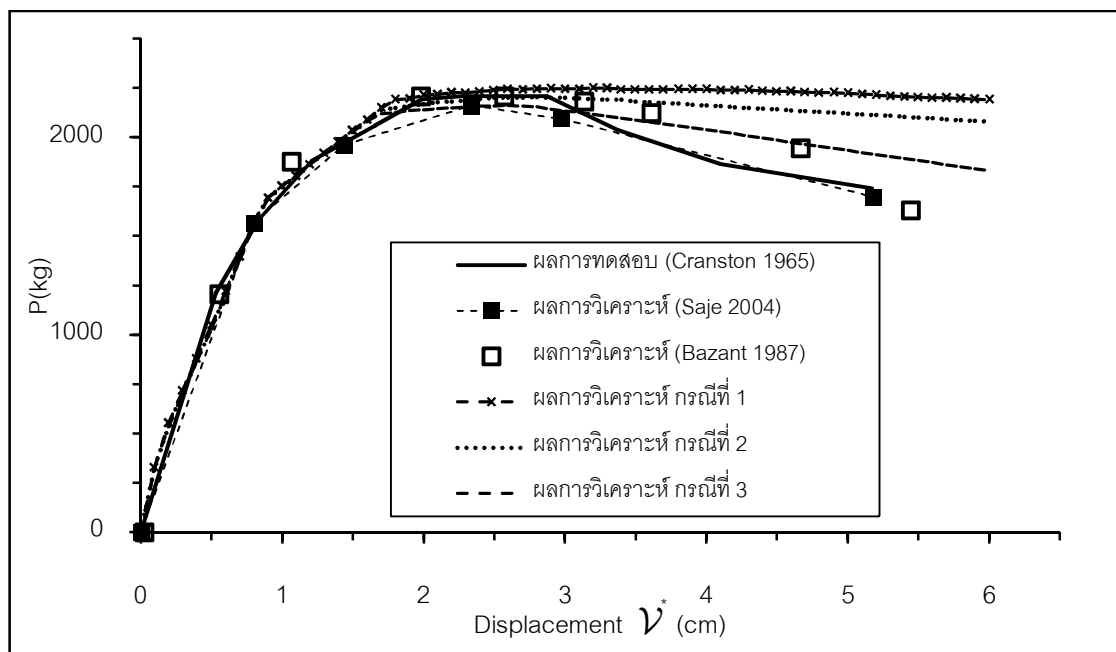
โครงสร้างถูกวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางวัสดุซึ่งมีค่าพารามิเตอร์เป็นไปตามแนวทางของ Saje (2004) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยแบบจำลองเหล็กเสริมพิจารณาส่วนของการอ่อนตัวลงเมื่อความเครียดมากกว่า ϵ_{ys} และมีค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ ϵ_{yu} ผลการวิเคราะห์ในระดับโครงสร้างแสดงในรูปที่ 4.13 (ซึ่งทำการแปรเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์ตามตารางที่ 4.5) ผลการวิเคราะห์แรงภายใน (โมเมนต์ที่จุด B และจุด D) แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 รายละเอียดดกลไกการพังทลายแสดงในรูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งของหน้าตัดที่มีพฤติกรรมแบบจุดหมุนพลาสติก แสดงในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.3.1

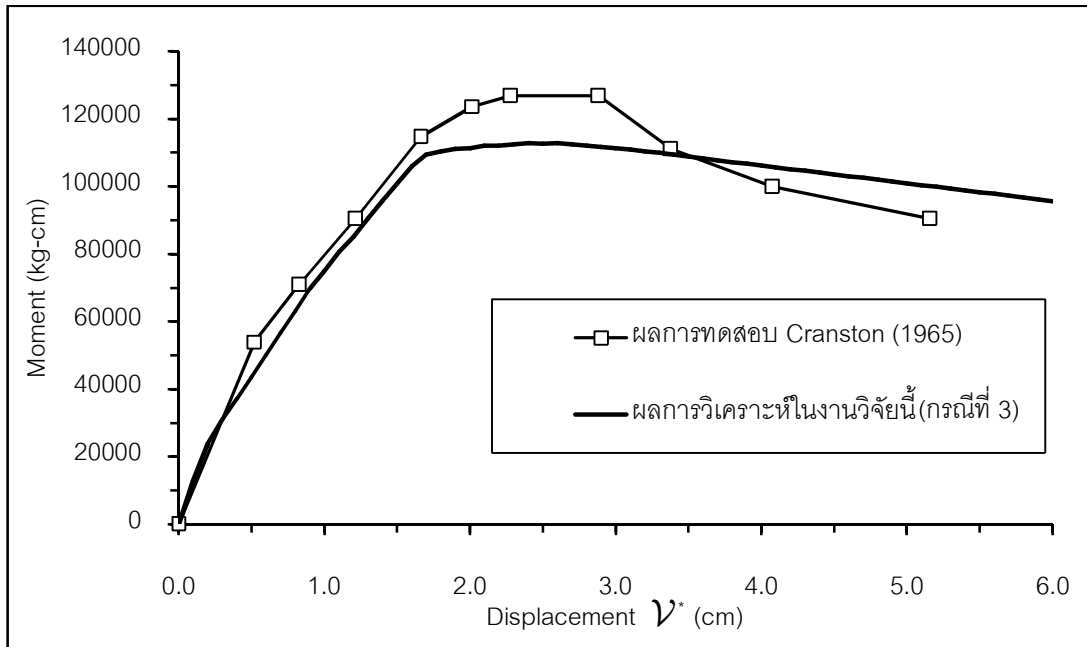
วัสดุ	คุณสมบัติ		หน่วย
คอนกรีต	f'_c	372.0	กก./ซม. ²
	ϵ_{co}	0.002	-
	$\epsilon_{20} = \epsilon_{cu}$	0.050	-
เหล็กเสริม	f_y	2988.0	กก./ซม. ²
	E_s	2.00E6	กก./ซม. ²
	E_p	0.00	กก./ซม. ²
	ϵ_{ys}	0.01	-
	ϵ_{yu}	0.30	-

ตารางที่ 4.5 การแบ่งเอลิเมนต์กรณีต่างๆ กรณีศึกษาที่ 4.3.1 (D คือ ค่าความลึกของหน้าตัด)

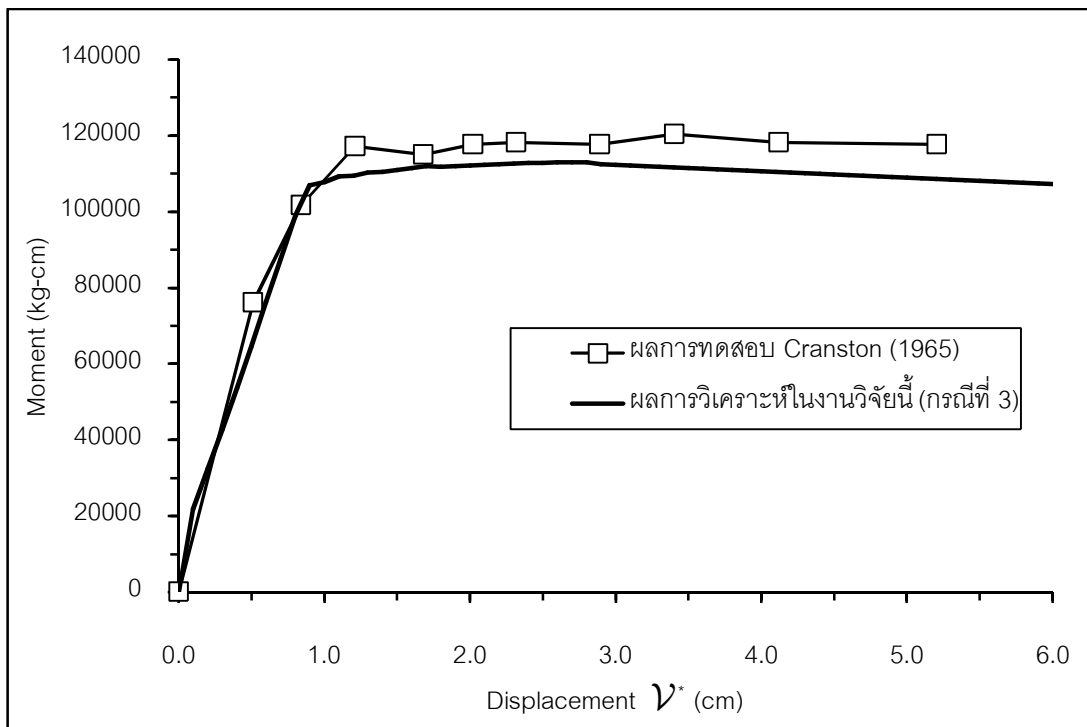
ช่วง (ขนาด (ซม.))	CASE 1($\approx 2D$)	CASE 2($\approx 1D$)	CASE 3($\approx 0.5D$)
	จำนวนเอลิเมนต์ (ขนาด (ซม.))	จำนวนเอลิเมนต์ (ขนาด (ซม.))	จำนวนเอลิเมนต์ (ขนาด (ซม.))
AB(193.00)	6 (32.17)	12 (16.08)	24 (8.04)
BC(109.00)	3 (36.33)	6 (18.17)	12 (9.08)
CD(23.00)	1 (23.00)	2 (11.50)	3 (7.67)



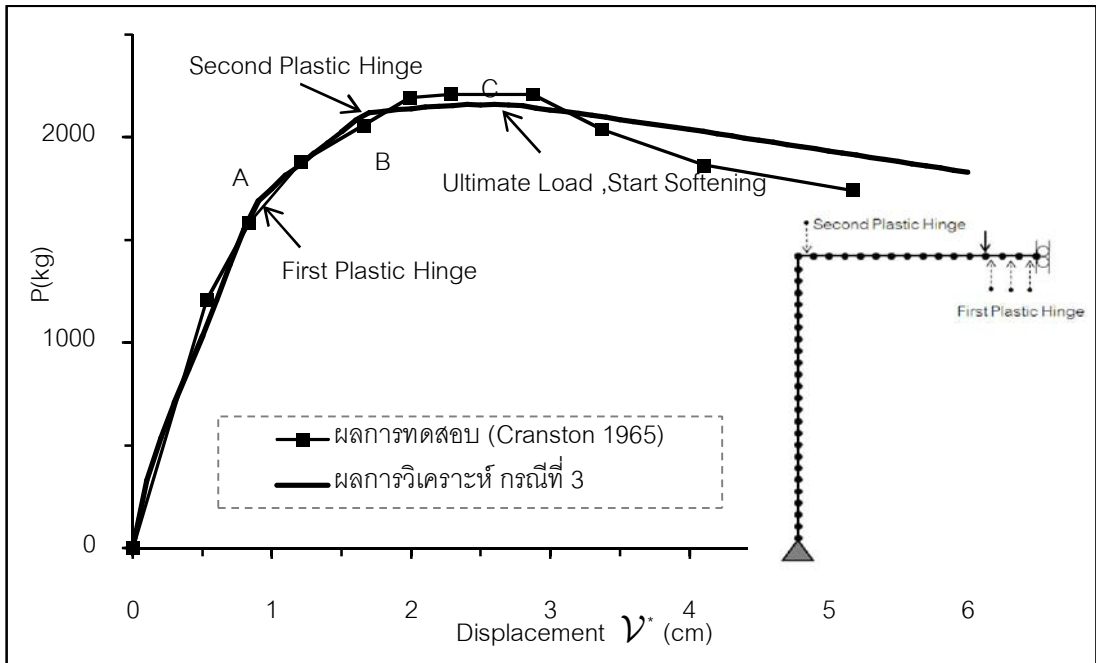
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.3.1 โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ เทียบกับผลในอดีต



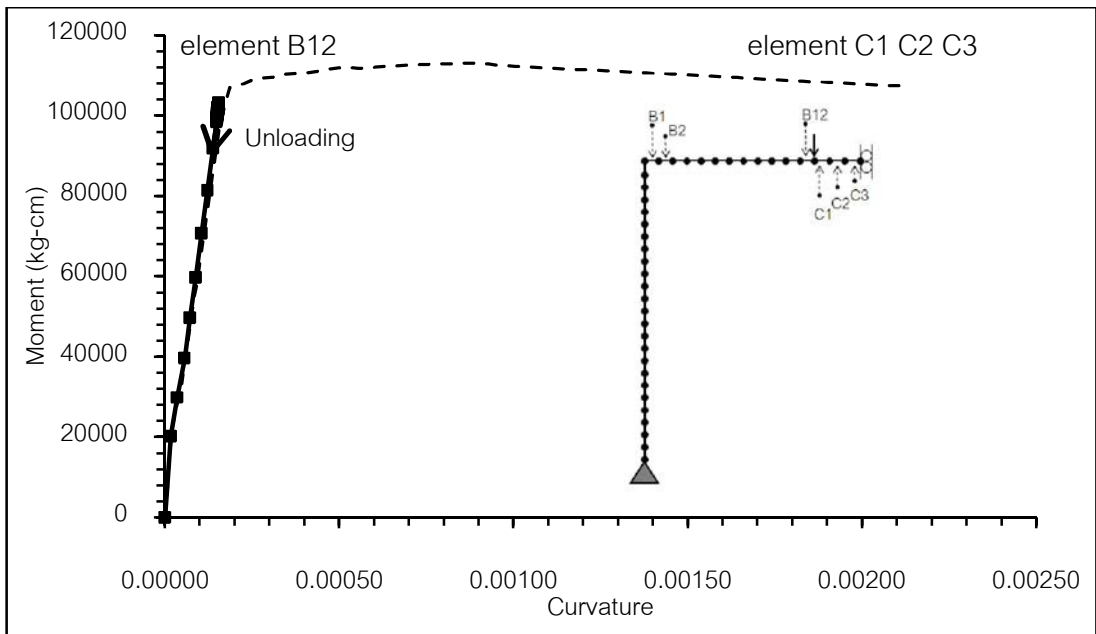
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการเสียรูปที่ v^* ของเอลิเมนต์ B1 (ที่หัวเสา) จากการวิเคราะห์ (การแบ่งเอลิเมนต์กรณีที่ 3) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับค่าการเสียรูปที่ v^* ของเอลิเมนต์ C3 (กึ่งกลางคาน) จากการวิเคราะห์ (การแบ่งเอลิเมนต์กรณีที่ 3) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

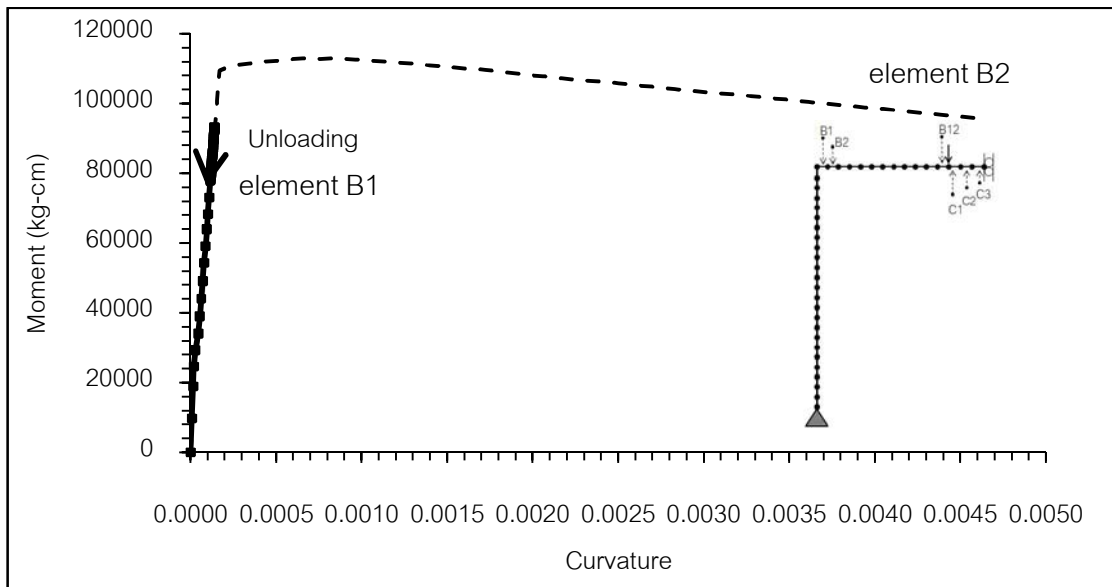


รูปที่ 4.16 และกลไกการพังทลายกรณีศึกษาที่ 4.3.1



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอलिเมนต์ C1 C2 C3 และ B12) กรณีศึกษาที่

4.3.1



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ B1 และ B2) กรณีศึกษาที่ 4.3.1

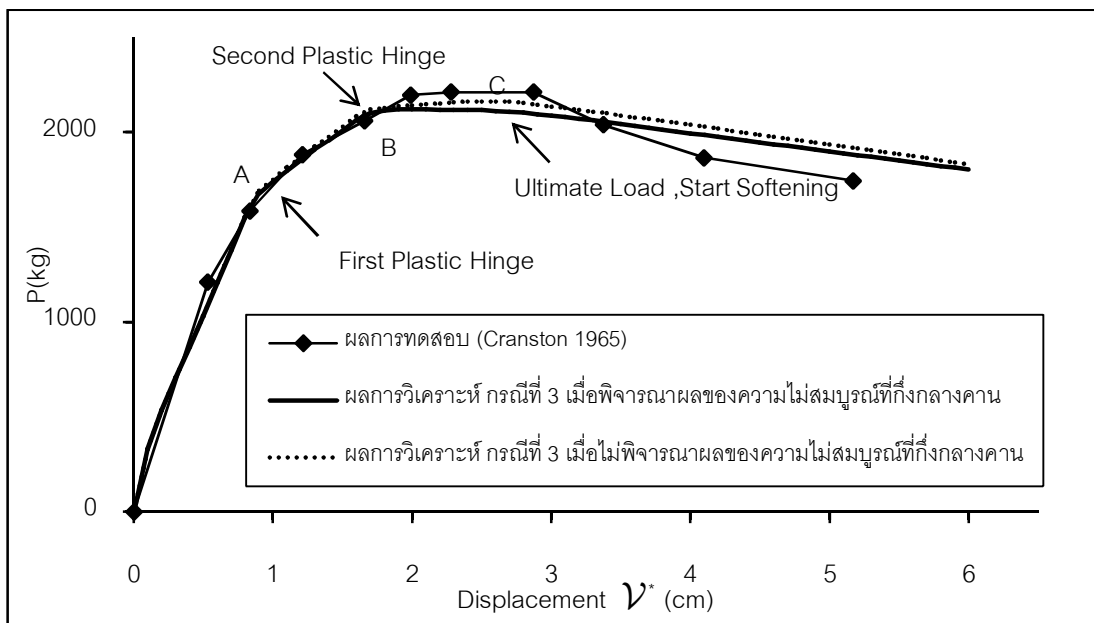
จากผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 4.3.1 พบว่า

- การวิเคราะห์ด้วยการแบ่งชิ้นส่วนย่อยแบบต่างๆพบว่า ทั้ง 3 กรณี ให้ผลการทำนายน้ำหนักบรรทุกวิกฤติใกล้เคียงผลการทดสอบดังนี้ ร้อยละ 97.8 (กรณีที่ 1) 99.9 (กรณีที่ 2) และ 98.2 (กรณีที่ 3) (โดยมีน้ำหนักบรรทุกวิกฤติคือ 2,250 2,204 2,162 กก. สำหรับกรณีที่ 1 2 และ 3 และ 2,201 กก.สำหรับผลการทดสอบ) อย่างไรก็ตาม การแบ่งชิ้นส่วนย่อยกรณีที่ 3 ให้ผลในช่วงการอ่อนตัวลงได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด รองลงมาได้แก่กรณีที่ 2 และกรณีที่ 1 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ภายในที่เอลิเมนต์ B1 และ C3 (รูปที่ 4.14 และ 4.15) เทียบกับผลการทดสอบ พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน
- ผลการแสดงกลไกการพังทลาย โครงสร้างเกิดจุดหมุนพลาสติกจากการครากของเหล็กเสริม 2 จุด ก่อนที่โครงสร้างจะเริ่มอ่อนตัวลง โดยเกิดในเอลิเมนต์ C1 C2 C3 เป็นลำดับที่ 1 เมื่อการเสียรูป \mathcal{V}^* มีค่าเท่ากับ 0.9 ซม. และ เกิดในเอลิเมนต์ B1เป็นลำดับที่ 2 เมื่อการเสียรูป \mathcal{V}^* มีค่าเท่ากับ 1.7 ซม.นอกจากนี้ โครงสร้างเริ่มอ่อนตัวลงเมื่อจุดหมุนพลาสติก B1 เริ่มอ่อนตัวลง เมื่อ \mathcal{V}^* มีค่าเท่ากับ 2.7 ซม.
- พฤติกรรมระดับหน้าตัดแสดงให้เห็นการอ่อนตัวลงของหน้าตัดที่รับโมเมนต์วิกฤติ และการ Unloading ของเอลิเมนต์ข้างเคียง โดยเอลิเมนต์ C1 C2 C3 (จากโครงสร้างดังกล่าว เอลิ

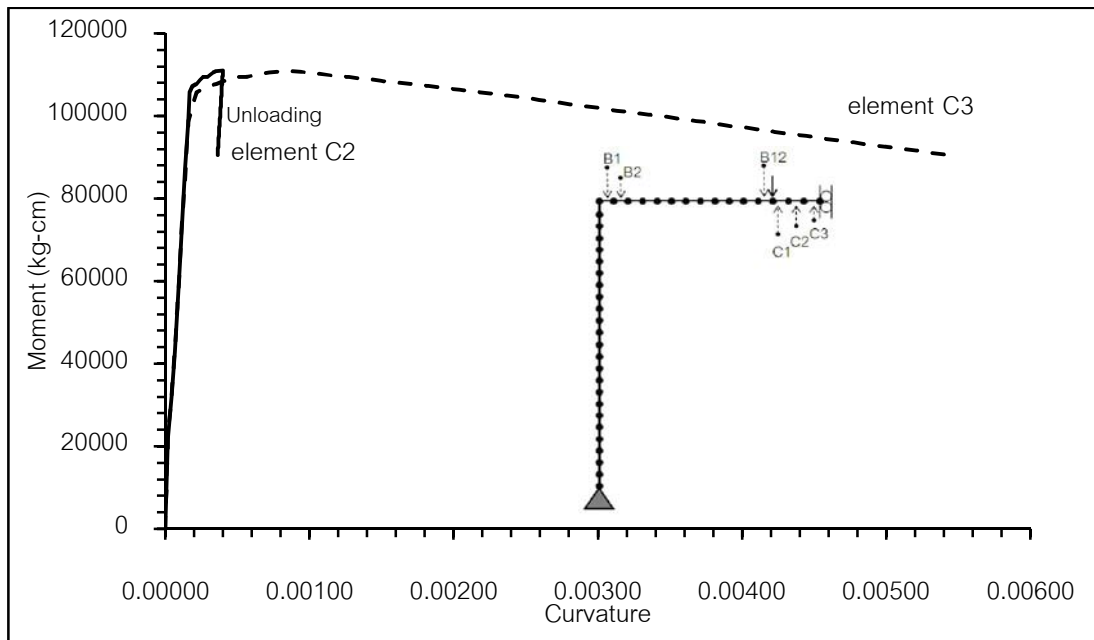
เมนต์ทั้ง 3 มีแรงภายในเท่ากัน) อ่อนตัวลงขณะที่เอลิเมนต์ B11 มีการ Unloading โดยไม่มีการเสียรูปแบบพลาสติก และเกิดเหตุการณ์ในทำนองเดียวกันกับเอลิเมนต์ B1 กับ B2

4.3.2 ผลของความไม่สมบูรณ์ตั้งต้น

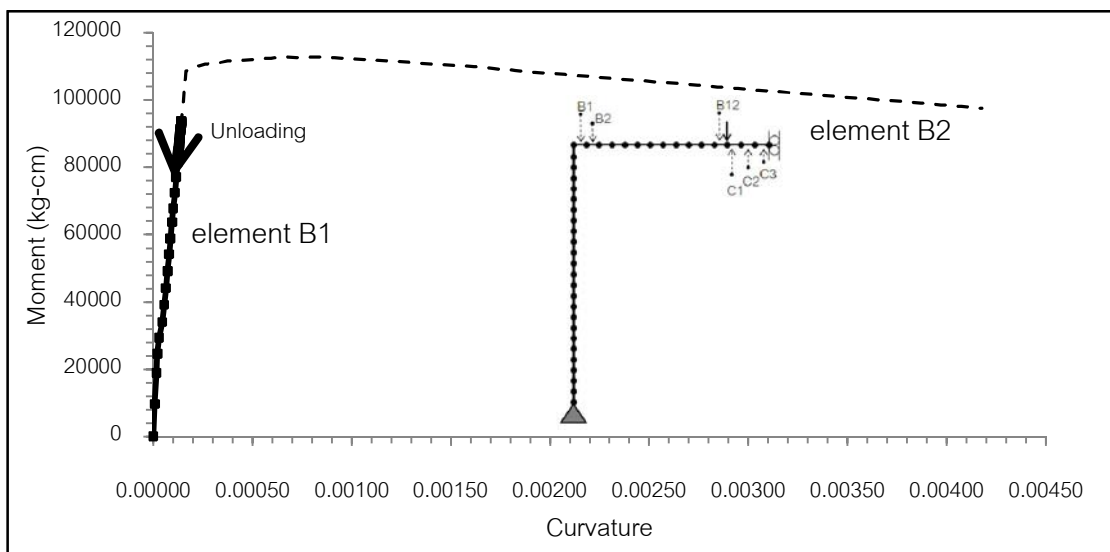
จากผลการศึกษากรรณศึกษาที่ 4.3.1 ไฟเบอร์บนสุดของเอลิเมนต์ C1 C2 C3 มีความเค้นที่เท่ากันเนื่องจากแรงภายในที่เท่ากันทั้ง 3 เอลิเมนต์ และจะอ่อนตัวลงพร้อมเพรียงกันหลังรับโมเมนต์สูงสุด อย่างไรก็ตามพฤติกรรมดังกล่าวยังคงไม่สมจริงนัก เนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบและความไม่สม่ำเสมอ (Imperfections and Non-uniformities) ทำให้การอ่อนตัวลง (หรือความเสียหาย) จะเกิดขึ้นในขอบเขตที่จำกัด (Spacone, 2001) กรรณศึกษาที่ 4.3.2 จึงเป็นการสมมติความไม่สมบูรณ์ที่กึ่งกลางคาน เพื่อเปรียบเทียบกลไกของกรรณศึกษานี้กับกรรณศึกษาก่อนหน้า



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรรณศึกษาที่ 4.3.2 เมื่อพิจารณาความไม่สมบูรณ์ที่กึ่งกลางคาน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ C2 C3) กรณีศึกษาที่ 4.3.2



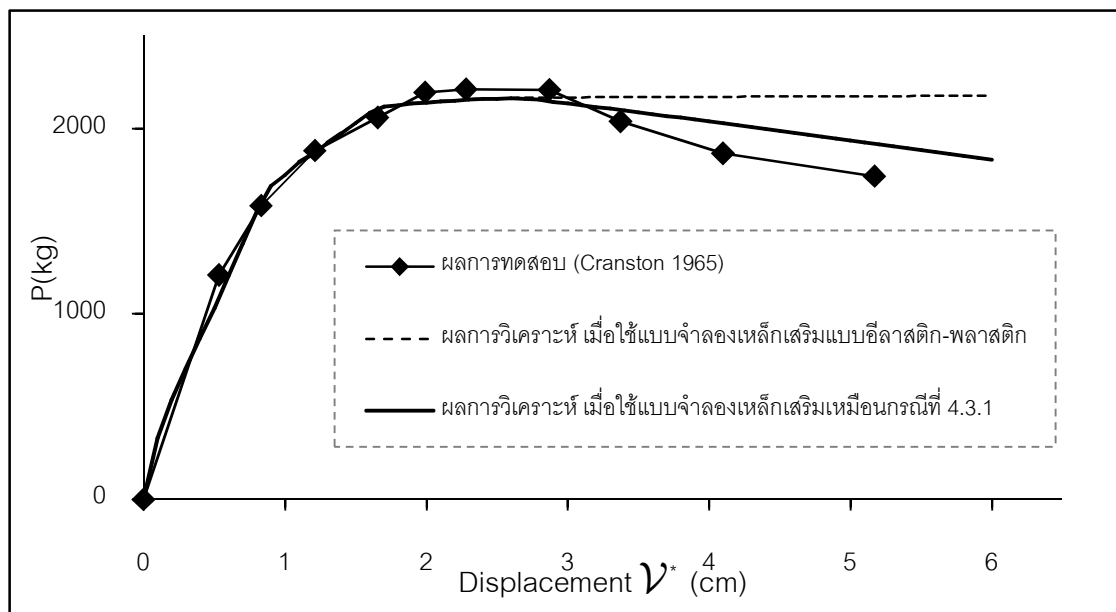
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ B1 B2) กรณีศึกษาที่ 4.3.2

จากผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 4.3.2 พบว่าการเพิ่มสมมติฐานความไม่สมบูรณ์แบบที่ เอลิเมนต์ C3 ทำให้พฤติกรรมของระบบ(ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัว V^* และน้ำหนักบรรทุก) ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก แต่ส่งผลต่อพฤติกรรมระดับหน้าตัด กล่าวคือ จากเดิม เอลิเมนต์ C1 C2 C3 มีพฤติกรรมอ่อนตัวลงทั้งหมด โดยมีค่าความเครียดสุดเท่ากับ 0.00213 และ มีการ Unloading ที่เอลิเมนต์ B12 มาเป็นเอลิเมนต์ C3 อ่อนตัวลงโดยมีค่าความเครียดสุดเท่ากับ 0.00543 ในขณะที่เอลิเมนต์ C2 แสดงการ Unloading แบบมีการเสียรูปพลาสติก (Plastic Deformation) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสมมติฐานความไม่สมบูรณ์เพียงเล็กน้อยส่งผล

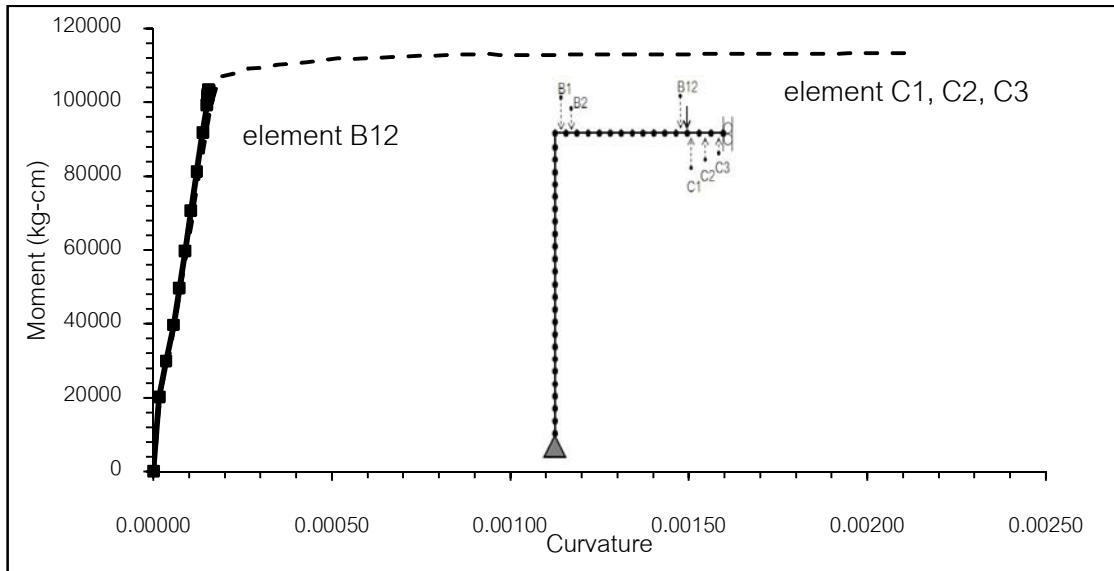
ต่อกลไกการอ่อนตัวลงของโครงสร้าง กล่าวคือเกิดความเสียหายที่เอลิเมนต์ C3 มากยิ่งขึ้น (Localization of Damage) ร่วมกับการเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกที่เอลิเมนต์ข้างเคียง

4.3.3 ผลของแบบจำลองเหล็กเสริม

จากกรณีศึกษาย่อยที่ 4.3.1 และ 4.3.2 พารามิเตอร์ของวัสดุเป็นไปตามแนวทางของ Saje (2004) ซึ่งกำหนดให้เหล็กเสริมแสดงการอ่อนตัวลงที่ความเครียดเท่ากับ 0.01 และมีความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.3 ซึ่งไม่สมจริงเท่าใดนัก เนื่องจากเหล็กเสริมควรมีความเหนียวกว่านั้นมากและอาจแสดงพฤติกรรมแบบ Hardening ภายหลังจากการยืดตัวแบบพลาสติก กรณีศึกษาที่ 4.3.3 จึงเป็นการทดสอบใช้พารามิเตอร์เหล็กเสริมที่เป็นแบบ อีลาสติก-พลาสติก ที่ไม่คำนึงถึงการอ่อนตัวลง

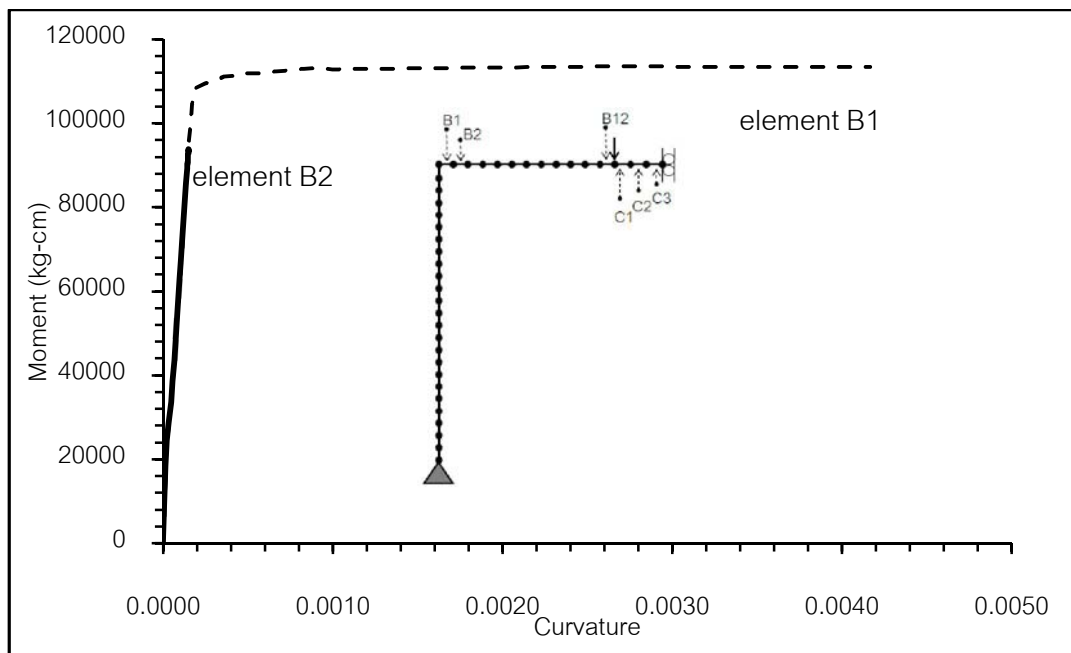


รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างกรณีศึกษาที่ 4.3.3 เมื่อใช้แบบจำลองเหล็กเสริมแบบ อีลาสติก-พลาสติก



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ C1 C2 C3 และ B12) กรณีศึกษาที่

4.3.3

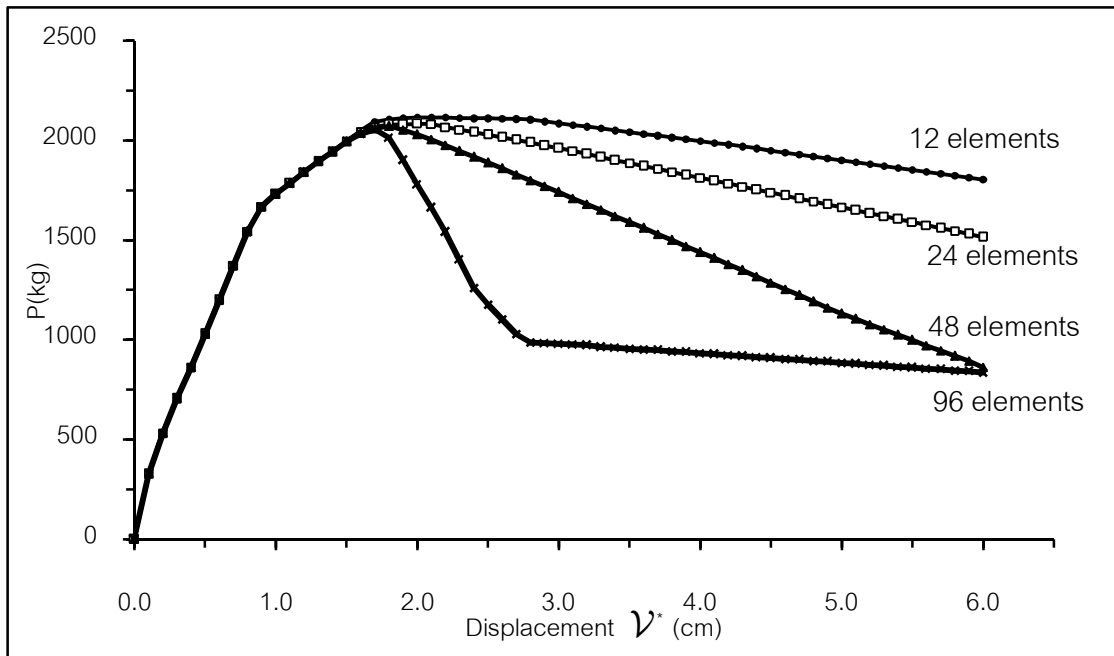


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์โมเมนต์และค่าความโค้ง (เอลิเมนต์ B1 และ B2) กรณีศึกษาที่ 4.3.3

จากผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาที่ 4.3.3 พบว่า จากการใช้แบบจำลองเหล็กเสริมแบบอัสติคพลาสติก ทำให้ทั้งหน้าตัดและโครงสร้างแสดงพฤติกรรมแบบอัสติคพลาสติกที่มีความเหนียว และไม่ปรากฏพฤติกรรมแบบเฉพาะที่เช่นกรณีก่อนๆ อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบโดย Cranston(1965) โครงสร้างแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจมีสาเหตุจากปัจจัยแวดล้อมอย่างอื่นเช่นผลจากการเคลื่อนตัวด้านข้างเนื่องมาจากความไม่สมมาตรของโครงสร้างอย่างแท้จริงอย่างแท้จริง เป็นต้น

4.3.4 ผลของขนาดเอลิเมนต์ที่มีผลการอ่อนตัวลง (Mesh Sensitivity)

จากกรณีศึกษาที่ 4.3.1 และ 4.3.2 พบว่ากลไกการอ่อนตัวลงของโครงสร้างประกอบด้วย เอลิเมนต์ที่อ่อนตัวลง และเอลิเมนต์ที่เกิดการ Unloading อันทำให้การแบ่งขนาดของเอลิเมนต์มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างที่อ่อนตัวลง กรณีศึกษาที่ 4.3.4 ผู้วิจัยทำการแบ่งเอลิเมนต์ในบริเวณ BC เป็น 4 กรณี คือ 12, 24, 48 และ 96 เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.25

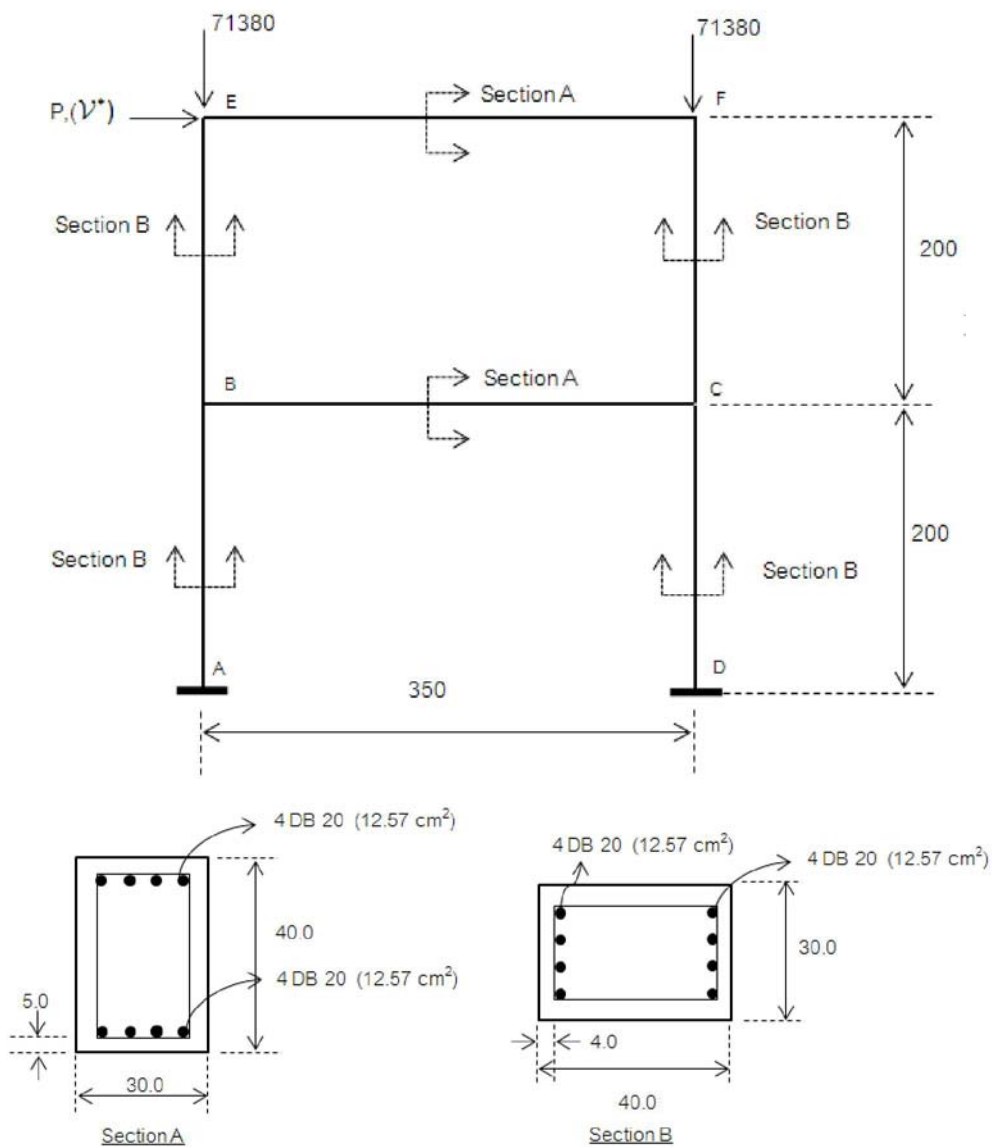


รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์กรณีการแบ่งเอลิเมนต์ในช่วง BC จำนวนต่างๆ

จากการผลการวิเคราะห์พบว่า การแบ่งเอลิเมนต์ให้ละเอียดยิ่งขึ้นทำให้ได้คำตอบที่ลู่เข้า เฉพาะกรณีที่โครงสร้างมีพฤติกรรมแบบ Hardening แต่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง การแบ่งเอลิเมนต์ที่ละเอียดก่อให้เกิดพฤติกรรมอ่อนตัวลงเกินกว่าความเป็นจริง (เนื่องจากการรวมตัวของความเสียหาย) ดังแสดงในรูปที่ 4.25

4.4 โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น

กรณีศึกษาที่ 4.4 ได้แก่ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น 1 ช่วงรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งคงที่เท่ากับ 71,380 กก. ที่จุด E และ F ตามรูปที่ 4.26 และรับแรงดัดข้างที่จุด E รายละเอียดทางเรขาคณิตและคุณสมบัติทางวัสดุแสดงไว้ในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบกับผลทดสอบในอดีตของ Vecchico และ Emara (1992) และผลการวิเคราะห์ของ Foster (2004) ทั้งนี้ การวิเคราะห์ในตัวอย่างนี้จะแบ่งเป็น 2 กรณีย่อย ได้แก่ กรณีที่ 4.4.1 พิจารณาการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยเพื่อหาการลู่เข้าของค่าตอบและแสดงกลไกการพังทลายของโครงสร้าง (แสดงในรูปที่ 4.28) และกรณีที่ 4.4.2 แสดงผลการอ่อนตัวลงของหน้าตัดจากการรับแรงอัดแนวแกน



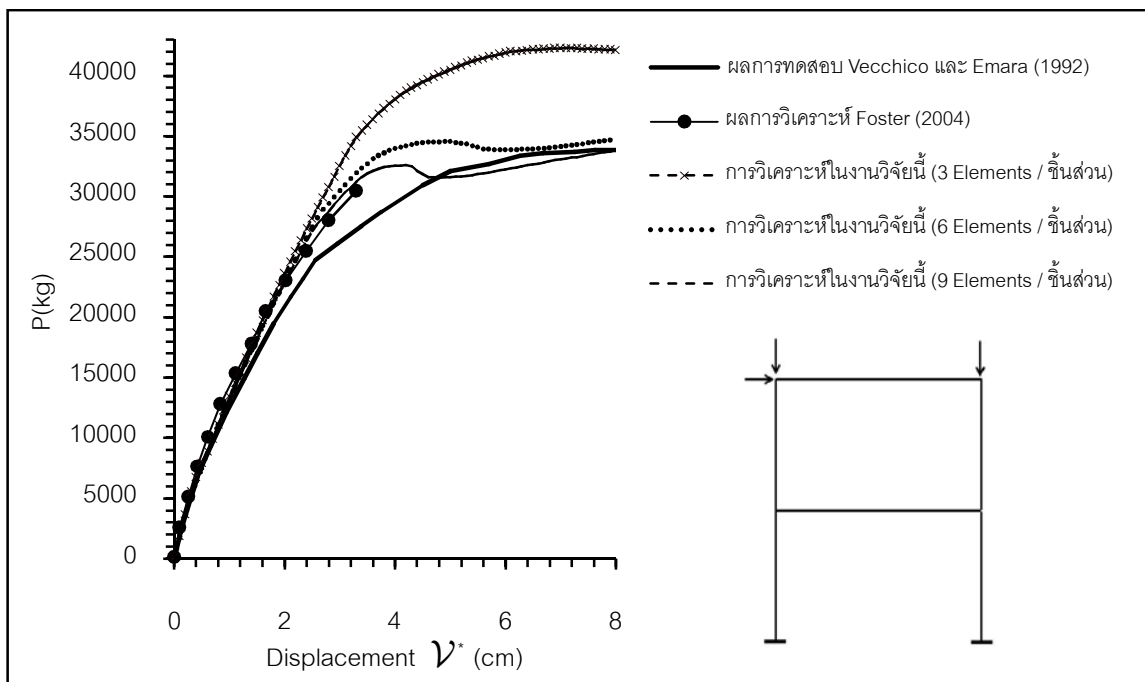
รูปที่ 4.26 รายละเอียดโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุก กรณีศึกษาที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ กรณีศึกษาที่ 4.4

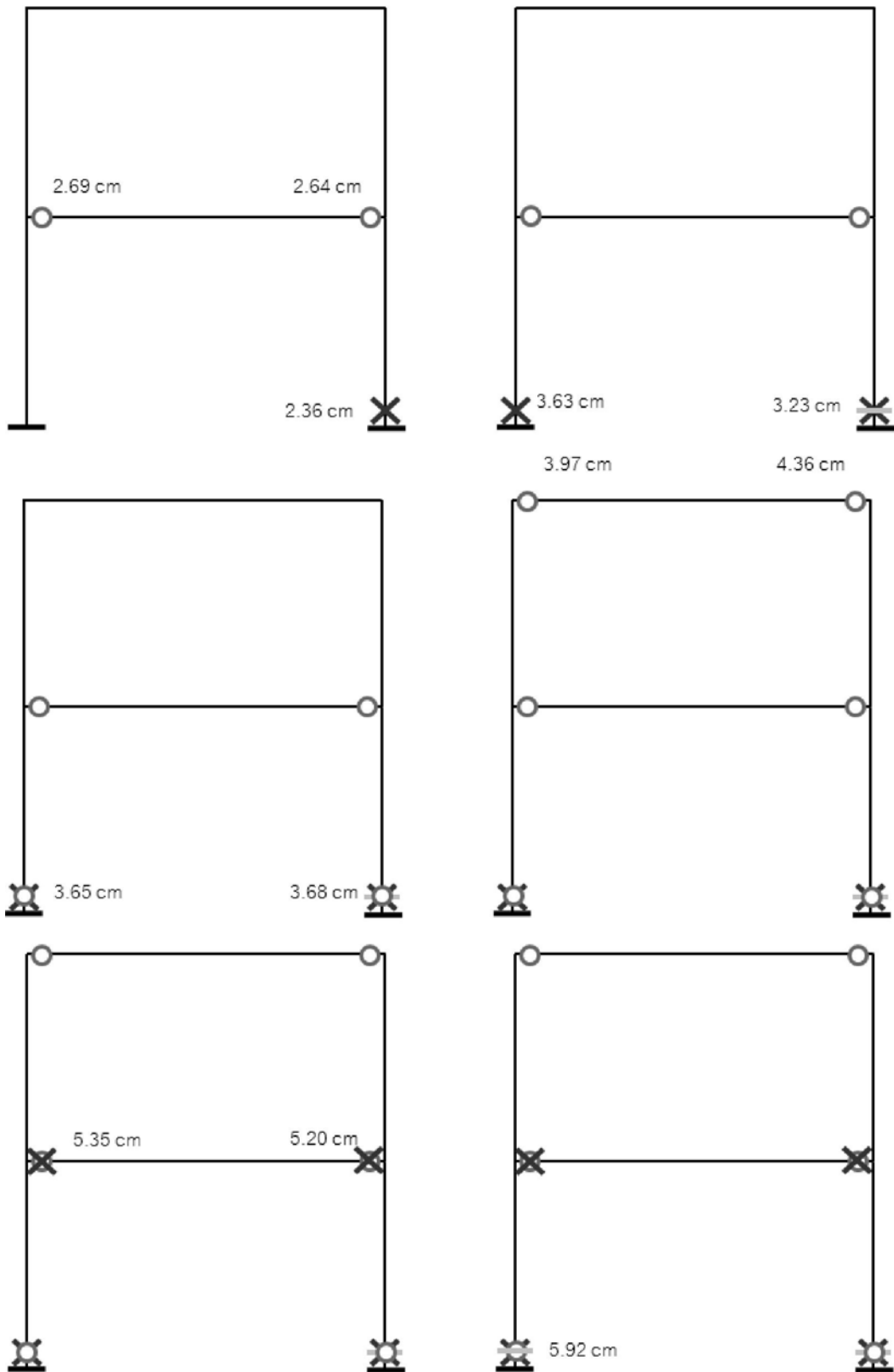
คุณสมบัติของวัสดุ		หน่วย
f'_c	275.0	กก./ซม. ²
ϵ_{co}	0.002	-
ϵ_{20}	0.010	-
ϵ_{cu}	0.050	-
f_y	4262.0	กก./ซม. ²
Es	2.00E6	กก./ซม. ²
Ep	2.00E4	กก./ซม. ²

4.4.1 ผลของขนาดเอลิเมนต์

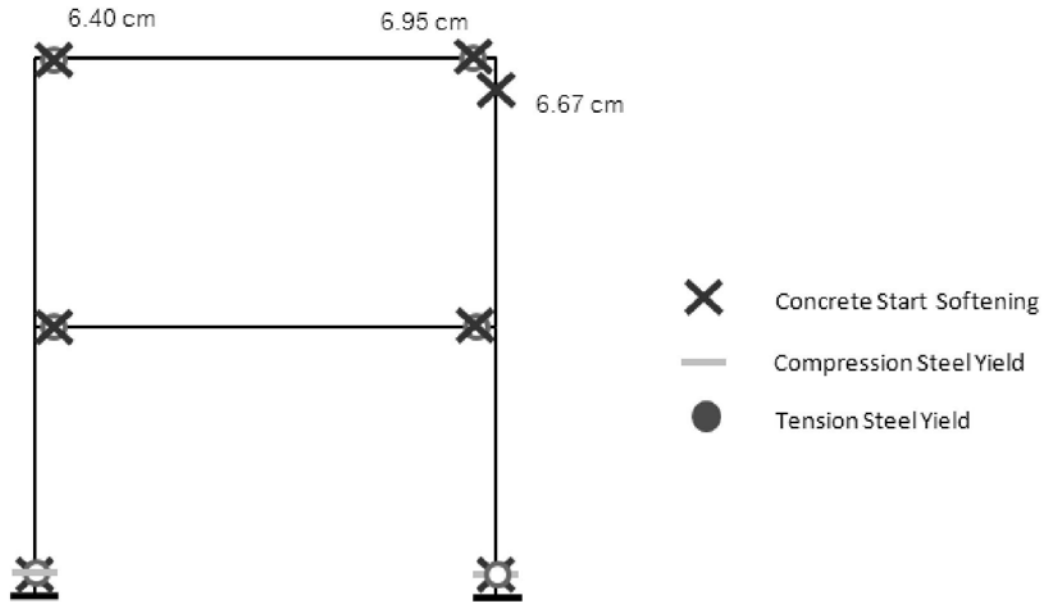
การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์ทำการแบ่งเอลิเมนต์ 3, 6 และ 9 เอลิเมนต์/ชั้นส่วน ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.27 กลไกการพังทลายแสดงในรูปที่ 4.28 และรูปร่างของโครงสร้างหลังการเสียรูป (ขยาย 20 เท่า) แสดงในรูปที่ 4.29



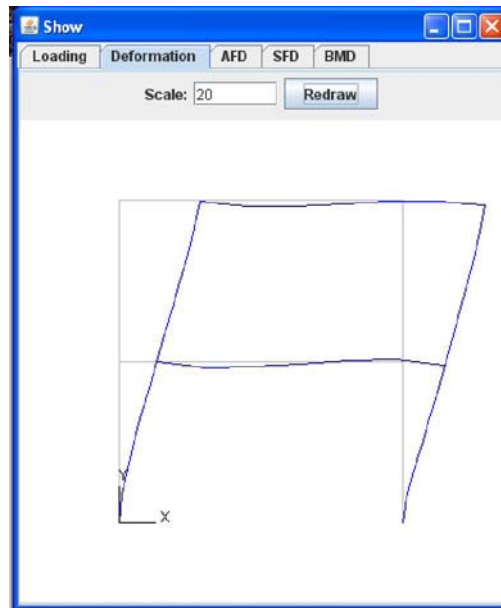
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ด้วยจำนวนเอลิเมนต์ต่างๆ กรณีศึกษาที่ 4.4.1



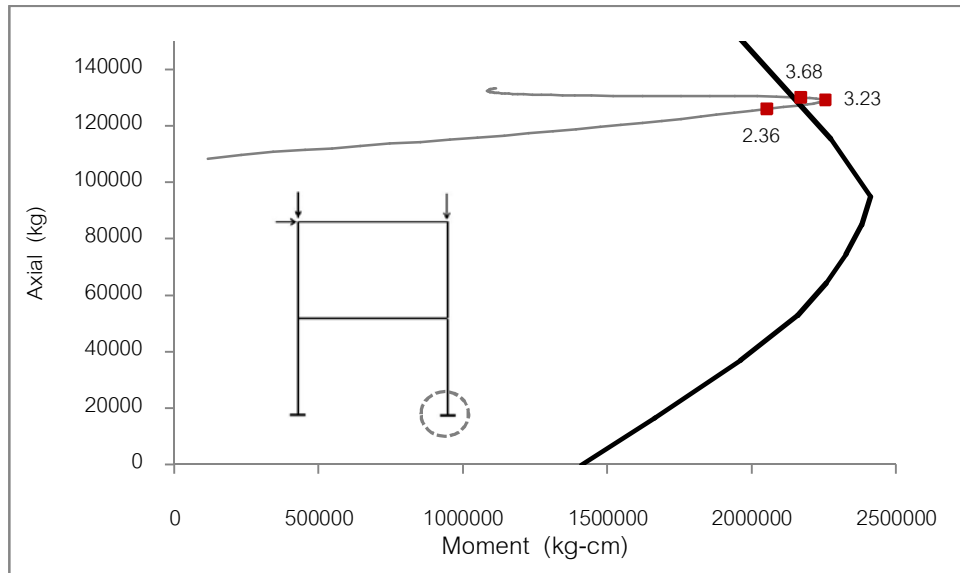
รูปที่ 4.28 กลไกการพังทลายของโครงสร้าง กรณีศึกษาที่ 4.4.1 (มีต่อในหน้าถัดไป)



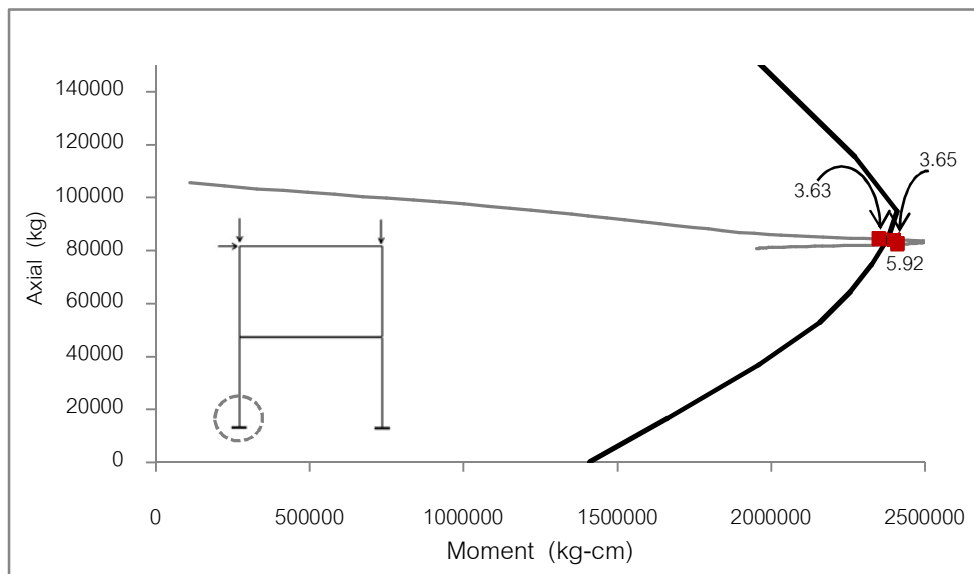
รูปที่ 4.28 (ต่อ) กลไกการพังทลายของ กรณีศึกษาที่ 4.4.1



รูปที่ 4.29 รูปร่างภายหลังการเสียรูป กรณีศึกษาที่ 4.4.1



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกนกับค่าโมเมนต์ที่โหนดที่เสาต้นขวา ล่างสุด



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกนกับค่าโมเมนต์ที่โหนดที่เสาต้นซ้าย ล่างสุด

จากการผลการวิเคราะห์พบว่า

- การวิเคราะห์โดยการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ 3,6 และ 9 เอลิเมนต์ต่อชิ้นส่วนพบว่า การใช้จำนวนเอลิเมนต์มากยิ่งขึ้นจะได้ผลการทำนายพฤติกรรมที่มีค่าสตีเฟนส์น้อยลง มีแนวโน้มสู่ค่า และมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากยิ่งขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุก P ที่การเคลื่อนตัว V^* เท่ากับ 8 ซม. กับผลการทดสอบ กรณีที่ 1 มีความถูกต้องร้อยละ 75.5 (42,125 กก.) กรณีที่ 2 มีความถูกต้องร้อยละ 97.3 (34,740 กก.) กรณีที่ 3

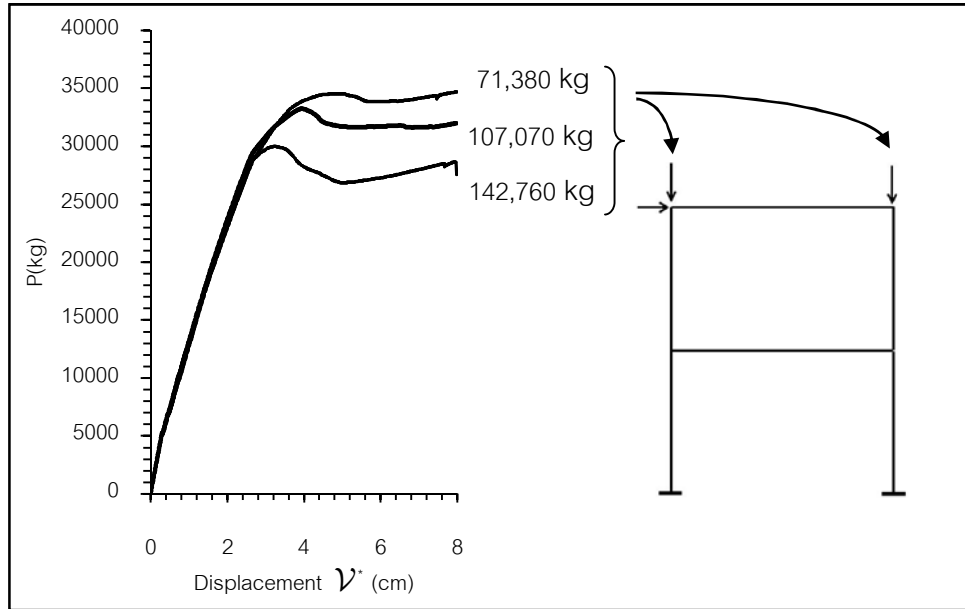
มีความถูกต้องร้อยละ 99.9 (33,855 กก.) เมื่อน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบมีค่า 33,823 กก. ดังแสดงในรูปที่ 4.26

- จากผลการวิเคราะห์ (โดยใช้ 9 เอลิเมนต์/ชิ้นส่วน) ที่การกระจัดเท่ากับ 4.3 ซม.พบว่า โครงสร้างมีแนวโน้มในการรับน้ำหนักน้อยลงแล้วจึงมีแนวโน้มจะรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายโมเมนต์ใหม่ของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมดังกล่าวมิได้ปรากฏในผลการทดสอบแต่กลับแสดงค่าสติฟเนสที่ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งอาจเป็นผลจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆหลายประการ เช่น ผลจากการเสียรูปทางเรขาคณิตของโครงสร้าง เป็นต้น
- จากการวิเคราะห์กลไกการพังทลายของโครงสร้างพบว่า
 - ความเสียหายของวัสดุมีลักษณะแบบรวมตัว กล่าวคือ จากผลการวิเคราะห์ เฉพาะที่ปลายของชิ้นส่วนที่แสดงพฤติกรรมไร้เชิงเส้นของวัสดุ อย่างไรก็ตามจากการจำลองหน้าตัดด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ทำให้สามารถติดตามพฤติกรรมการอ่อนตัวลงแบบค่อยเป็นค่อยไปในระดับหน้าตัดได้
 - หากพิจารณาเปรียบเทียบกับสมมติฐานของวิธีการพลาสติก โครงสร้างในตัวอย่างนี้จะพังทลายเมื่อเกิดจุดหมุนพลาสติกทั้งหมด 7 จุด ซึ่งเท่ากับจำนวนจุดที่เกิดความเสียหายที่แสดงในรูปที่ 4.27 อย่างไรก็ตามจุดที่เกิดความเสียหายมีระดับความเสียหายและรูปแบบการเสียหายต่างกัน และอาจไม่แสดงพฤติกรรมคล้ายแบบจุดหมุนพลาสติก (Elastic-Plastic) ทั้งหมด โดยอาจสรุปได้ว่า ชิ้นส่วนคานที่ชั้นที่ 1 และ 2 จะเกิดการครากของเหล็กเสริมก่อนแล้วจึงตามด้วยการอ่อนตัวลงของคานกริต ซึ่งเป็นกลไกทั่วไปของเอลิเมนต์คานที่รับแรงแนวแกนน้อย และแสดงพฤติกรรมแบบเหนียว ในขณะที่เสาจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการอ่อนตัวลงของคานกริตก่อน เนื่องจากต้องรับแรงอัดมาก และอาจแสดงพฤติกรรมแบบไม่เหนียว นอกจากนี้ กลไกการพังทลายยังแสดงให้เห็นการพังทลายที่มีลักษณะแบบเสาแข็ง คานอ่อน (Strong Column-Weak Beam) ซึ่ง จะเกิดความเสียหายในคานมากกว่าในเสาที่จุดต่อเดียวกัน
- จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับแรงแนวแกนที่เอลิเมนต์ล่างสุดของเสาดันซ้ายมือ และขวามือ โดยพบว่าที่ต้นซ้ายมือการวิบัติของเสา(เมื่อเทียบ

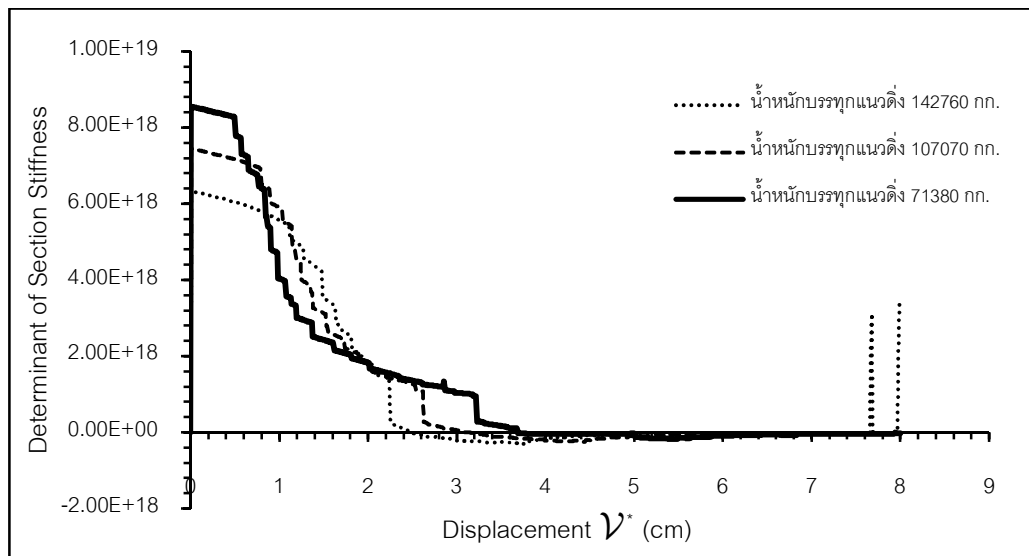
กับ P-M diagram) เป็นลักษณะแบบวิบัติด้านรับแรงดึง ในขณะที่ต้นขาเป็นแบบด้านรับแรงอัด

4.4.2 ผลของแรงแนวแกนที่มีต่อการอ่อนตัวลงของหน้าตัด

การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการเพิ่มแรงแนวตั้งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ 71,380 107,070 และ 142,760 กก. โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ 6 เอลิเมนต์ / ชั้น ส่วน ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปแบบที่ 4.30 และค่าดีเทอร์มิแนนต์ของสติฟเนสเมตริกซ์ของหน้าตัดที่จุด D แสดงในรูปแบบที่ 4.31



รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ กรณีศึกษาที่ 4.4.2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 71,380 107,070 และ 142,760 กก.



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างดีเทอร์มิแนนต์ของสติฟเนสเมตริกซ์ของหน้าตัดกับค่าการเสียรูป กรณีศึกษาที่ 4.4.2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 71,380 107,070 และ 142,760 กก. ของหน้าตัดที่จุด D ตามรูปที่ 4.25

จากการผลการวิเคราะห์พบว่า

- จากรูปที่ 4.32 เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่หัวเสาจาก 71,380 กก.เป็น 107,070 และ 142,760 กก. (โดยใช้ 6 เอลิเมนต์/ชิ้นส่วน)พบว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดด้านข้างที่โครงสร้างรับได้มีค่าลดน้อยลง เมื่อโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งเพิ่มมากขึ้น
- จากรูปที่ 4.33 ค่าดีเทอร์มิแนนต์ของสติเฟเนสเมตริกซ์ของหน้าตัดกรณีที่โครงสร้างรับน้ำหนักแนวตั้งมากมีแนวโน้มจะลดลงและติดลบเร็วกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างคาน-เสาที่รับแรงแนวแกนจำนวนมากมีแนวโน้มจะแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลงได้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. จากแนวทางการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาผลของความไร้เชิงเส้นทางวัสดุที่นำเสนอ และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนายพฤติกรรมโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ทั้งในระดับหน้าตัดและระดับโครงสร้าง เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ กรณีศึกษาที่ 4.1, 4.3 และ 4.4 (Under-reinforcement) ให้ค่าการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าร้อยละ 99.4 (สำหรับกรณีการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ที่ดีที่สุด) และกรณีศึกษาที่ 4.2 (Over-reinforcement) ให้ค่าการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดสอบเฉลี่ยร้อยละ 92.14
2. สำหรับโครงสร้างที่แสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง(Softening Post-Peak)จากแรงกระทำแบบทิศทางเดียว กลไกการอ่อนตัวจะประกอบด้วยเอลิเมนต์ที่อ่อนตัวลงและเอลิเมนต์ข้างเคียงที่มีพฤติกรรม Unloading เพื่อการรักษาสมดุลที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า แม้โครงสร้างจะรับแรงกระทำแบบทิศทางเดียว การพิจารณาแบบจำลองทางวัสดุจำเป็นต้องคำนึงถึงส่วนของการ Unloading (และการเสียรูปแบบพลาสติก) หากโครงสร้างหรือหน้าตัดมีพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง
3. จากการวิเคราะห์พบว่า ปรากฏการณ์อ่อนตัวลงเป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่ (Localization) ที่เกิดในขอบเขตจำกัด ดังนั้นการจำลองโครงสร้างจึงต้องพิจารณาขอบเขตที่อาจเกิดการอ่อนตัวลง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการอ่อนตัวลงในขอบเขตที่เล็กกลางจะก่อให้เกิดความเครียดที่สูงขึ้นในบริเวณนั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอ่อนตัวลงในขอบเขตที่กว้างกว่า
4. จากการวิเคราะห์กลไกการพังทลายพบว่า สำหรับตัวอย่างโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีจำนวนจุดที่เกิดความเสียหายเท่ากับกรณีที่พิจารณาด้วยจุดหมุนพลาสติกก่อนการพังทลาย อย่างไรก็ตามระดับความเสียหายของแต่ละจุดมีความแตกต่างกันไป และมีแนวโน้มจะเกิดในบริเวณที่จำกัด (เฉพาะที่ปลายเอลิเมนต์)
5. การแบ่งเอลิเมนต์ที่ละเอียดยิ่งขึ้น จะให้ผลการทำนายพฤติกรรมที่ดียิ่งขึ้น สำหรับโครงสร้างที่แสดงพฤติกรรมแบบ Hardening แต่สำหรับโครงสร้างที่แสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง (Softening) การแบ่งเอลิเมนต์ที่ละเอียดยิ่งขึ้นส่งผลให้โครงสร้างแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลงมากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจเกินกว่าความเป็นจริง (Mesh Sensitivity)

6. สำหรับเอลิเมนต์คาน-เสา ที่เสริมเหล็กแบบมากกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุค หน้าตัดมีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง ในขณะที่เอลิเมนต์คาน-เสา ที่เสริมเหล็กแบบน้อยกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุค และรับแรงอัดแนวแกนไม่มากนักหน้าตัดมีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมแบบเหนียว อย่างไรก็ตาม หน้าตัดของเอลิเมนต์คาน-เสาที่เสริมเหล็กแบบน้อยกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมสมดุค มีแนวโน้มจะอ่อนตัวลงเมื่อรับแรงอัดแนวแกนมากยิ่งขึ้น เช่น กรณีของเสาที่รับแรงดันด้านข้าง เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอาจแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง อย่างไรก็ตามความเข้าใจในกลไกการอ่อนตัวลงยังมีจำกัด (เช่นขอบเขตของการอ่อนตัวลง) ดังนั้น การทดสอบเพื่อศึกษากลไกดังกล่าวทั้งในระดับหน้าตัด เอลิเมนต์ และ ระดับโครงสร้าง รวมถึงการพิจารณาความสมเหตุสมผลของแบบจำลองทางวัสดุ มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์การพังทลายของโครงสร้างมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น
2. เมื่อโครงสร้างเริ่มมีความเสียหายจะเกิดการถ่ายเทแรงภายใน (Redistribution of Internal Forces) ซึ่งกลไกดังกล่าวอาจมีความซับซ้อนมากในโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อหน้าตัดแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวลง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทแรงภายใน รวมถึงกลไกการพังทลายจะช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบอาคารที่มีความปลอดภัยและประหยัดได้มากยิ่งขึ้นในภาวะที่โครงสร้างมีความเสี่ยงในภาวะการรับแรงวิกฤติ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ กอจันทร์. การวิเคราะห์หอนี้อีลาสติคอันดับที่สองของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคำนึงถึงผลของการไอบรอด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ธีระพจน์ ศุภะวิริยะกิจ, อมร พิมารมาศ, The Moment Redistribution of Continuous RC Beam by Nonlinear Finite Element Method Based on Fiber Model. ใน การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ, 2004.

อาชวิน สวโรจน์, วรากร สิงห์สุด, อาณัติ เรืองรัศมี. การวิเคราะห์เสถียรภาพคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวิวิจกรด้วยแบบจำลองไฟเบอร์. ใน การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 2010.

ภาษาอังกฤษ

Ark Information System, Inc. TDAP 3 Theoretical Manual, 2008

Bazant, P., Jiaying Pan, and Gilles Pijaudier-Cabot, Softening in Reinforced Concrete Beams and Frames. Journals of Structural Engineering, ASCE 113 ,12 (December 1987) : 2333-2347. (a)

Bazant, P., Jiaying Pan, Gilles Pijaudier-Cabot, Ductility, Snapback, Size Effect, and Redistribution in Softening Beams or Frames. Journals of Structural Engineering, ASCE 113, 12 (December 1987) : 2348-2365. (b)

Coleman, J., Spacone, E. LOCALIZATION ISSUES IN FORCE-BASED FRAME ELEMENTS. Journal of Structural Engineering 127 (2001), 11 : 1257–1265.

Cuong Ngo-Huu, Seung-Eock Kim, Jung-Ryul Oh. Nonlinear Analysis of Space Steel Frame using Fiber Plastic Hinge Concept. Journal of Engineering Structures 29 (2007) : 649-657.

Davall, P.L., Mendis, P.A. Elastic-Plastic-Softening Analysis of Plane Frames. Journal of Structural Engineering, ASCE 111,4 (April 1985) : 871-888.

Friedman, Z., Kosmatka, J.B., 1993. An improved two-node Timoshenko Beam Finite Element. Computers & Structures, 47, 3 : 473-481.

- Jirasek, M., and Bazant, Zdenek P. Inelastic analysis of structures. New York, NY : Wiley, 2002.
- Jirasek, M. Analytical and Numerical Solutions for Frames with Softening Hinges. Journal of Engineering Mechanics, ASCE 123,1(January 1997):8-13.
- McGuire, W., Gallagher, H., and Ziemian R. Matrix Structural Analysis. John-willy and Sons, 2000.
- Menegoto, M., and Pinto, P.E., Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending. Proc. Of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads 13, (1973):15-22.
- Metwally, S.E., and Chen, W.F. Nonlinear Behavior of R/C Frames. Journal of Computers and Structures 32, 6 (1989):1203-1209.
- Saatcioglu, M. and Razvi, S.R. Strength and Ductility of Confined Concrete. Journal of Structure Engineering, ASCE 118,6 (June 1992): 1590-1607.
- Saje, M., Bratina, S., Planinc, I., 2004. On materially and geometrically non-linear analysis of reinforced concrete planar frames. International Journal of Solids and Structures 41 : 7181–7207.
- Smittakorn, W. JSM as a Toolbox for Structural Analysis and Design Applications. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. 2008.
- Soliman, M. T. M. and Yu, C. W. The flexural Stress-Strain Relationships of Concrete confined by Rectangular transverse Reinforcement. Mag. Concrete Res 19(1967):223-238.
- Valipour, H.R., Foster, S.J., 2007. A Novel Flexibility Based Beam-Column Element for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames. Uniciv Report No.R-447 The university of New South Wales.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ฟังก์ชันรูปร่างแบบแม่นยำสำหรับเอลิเมนต์คาน-เสาด้อยสมมติฐานของ Timoshenko

สมการ (ก.2) แสดงฟังก์ชันรูปร่างแบบแม่นยำสำหรับเอลิเมนต์คาน-เสาด้อยสมมติฐานของ Timoshenko (Friedman, 1993) เมื่อกำหนดให้การประมาณค่าการเสี้ยวรูปที่ตำแหน่งใดๆ เป็นไปตามสมการที่ (ก.1)

$$\begin{Bmatrix} u(x) \\ v(x) \\ \theta(x) \end{Bmatrix} = [N] \{u_1 \quad v_1 \quad \theta_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad \theta_2\}^T \quad (\text{ก.1})$$

$$[N]^T = \begin{bmatrix} 1-\xi & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1+\phi)} \{2\xi^3 - 3\xi^2 - \phi\xi + (1+\phi)\} & \frac{6}{(1+\phi)} \{\xi^2 - \xi\} \\ 0 & \frac{L}{(1+\phi)} \left\{ \xi^3 - \left(2 + \frac{\phi}{2}\right)\xi^2 + \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)\xi \right\} & \frac{1}{(1+\phi)} \{3\xi^2 - (4+\phi)\xi + (1+\phi)\} \\ \xi & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{(1+\phi)} \{2\xi^3 - 3\xi^2 - \phi\xi + (1+\phi)\} & -\frac{6}{(1+\phi)} \{\xi^2 - \xi\} \\ 0 & \frac{L}{(1+\phi)} \left\{ \xi^3 - \left(1 - \frac{\phi}{2}\right)\xi^2 - \frac{\phi}{2}\xi \right\} & \frac{1}{(1+\phi)} \{3\xi^2 - (2-\phi)\xi\} \end{bmatrix} \quad (\text{ก.2})$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายันทวัฒน์ โกสุมภ์สุวรรณค์ เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2529 เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนจารึกล้อมวิทยา จังหวัดลพบุรี จากนั้นเข้าศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียน ภปร.ราชวิทยาลัยฯ จังหวัดนครปฐม และเข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา กรุงเทพฯ ปี 2547 เข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในสาขาวิศวกรรมโยธา ในปี 2551 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทในปีการศึกษา 2554