

การศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



นายพงษ์สุร อังคนานูชาติ


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1232-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO
CYCLIC LATERAL LOADINGS BY THE FINITE ELEMENT METHOD



Mr.Pongsura Angkananuchat

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1232-4

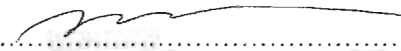
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้าง
แบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย นายพงษ์สุร อังคนานูชาติ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์

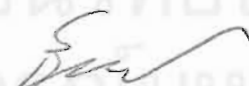
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับ
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ชัย)

พงษ์สุร อังคนานุชาติ: การศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (A STUDY ON BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO CYCLIC LATERAL LOADINGS BY THE FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ 173 หน้า. ISBN: 974-17-1232-4

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงในแนวแกน และแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อมูลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมเหล็กแปลก และระดับแรงในแนวแกนต่างๆกันจะถูกใช้ในการตรวจสอบยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะมีขนาดหน้าตัด 400x400 มม. ความสูง 1500 มม. ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว 3.14%

สำหรับแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และเหล็กเสริมที่เสนอในงานวิจัยนี้จะรวมพฤติกรรมทั้งหมดที่มีความสำคัญต่อการตอบสนองของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร พฤติกรรมที่สำคัญเมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมากๆเมื่อใกล้จุดวิบัติคือ การหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก และการดุ้งของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นผลของพฤติกรรมเหล่านี้ได้รวมไว้ในแบบจำลองวัสดุที่เสนอนี้แล้ว

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้วพบว่า การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง การลดลงของแรงกระทำทางด้านข้าง ความสามารถในการสลายพลังงาน และ ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำให้ทราบถึงข้อมูลที่ได้ไม่สมบูรณ์จากการทดสอบ เช่น หน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมตลอดประวัติการรับแรง เป็นต้น ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้ร่วมกับผลการทดสอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรในรูปแบบต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา 2545.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4170422921: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: FINITE ELEMENT / REINFORCED CONCRETE COLUMN / BUCKLING / COVER CONCRETE SPALLING / CYCLIC LOADINGS

PONGSURA ANGKANANUCHAT : A STUDY ON BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO CYCLIC LATERAL LOADINGS BY THE FINITE ELEMENT METHOD, THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHADCHART SITTIPUNT, Ph.D. 173 pp. ISBN: 974-17-1232-4

The major objective of this research is to use the finite element method to investigate the cyclic responses of reinforced concrete cantilever columns subjected to axial loading and to cyclic lateral loadings. Experimental results of four columns with different details of confinement and axial load level were used as reference to verify the results from the finite element analyses. Each column specimen was 400 mm by 400 mm in cross section, 1500 mm in height, and reinforced with 3.14% of longitudinal steel ratio.

The material models for concrete and reinforcing steel proposed in this research include all behaviors that have significant effects on the cyclic responses of reinforced concrete columns. Important behaviors observed when columns experienced large inelastic deformation prior to their failures include spalling of cover concrete and buckling of reinforcing steel. These two behaviors significantly effect the inelastic softening responses of the reinforced concrete columns and hence, are included in the proposed material models.

The analytical results from the finite element method agree well with the experimental results. These results include lateral loads, degradation of lateral loads due to effects of cyclic loadings, energy dissipation capacities, and failure modes of the columns. The finite element analyses also provide valuable information that cannot be obtained from experimental results such as stress-strain in reinforcing steel during the whole loading histories. The finite element analysis is found to be a powerful tool that can be used successfully with an experimental program to expand the investigation on the cyclic behavior of reinforced concrete columns subjected to lateral cyclic loadings.

Department Civil Engineering
Field of study Civil Engineering
Academic year 2002

Student's signature.....
Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณท่าน ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉิมิไชย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อรุ่นพี่ เพื่อนๆ รุ่นน้อง ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงานและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจ สนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดีตลอดมา ครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่เคยสั่งสอน อบรม ให้ความรู้ในสาขาวิชาต่าง ๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

พงษ์สุร อังคนานุชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การจำลองแบบรอยแตกร้าว (crack modeling)	8
2.2 การจำลองแบบเหล็กเสริม.....	10
2.3 แบบจำลองวัสดุที่นำเสนอ (propose material models)	11
2.4 แบบจำลองวัสดุของคอนกรีต (material model for concrete)	12
2.5 แบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริม (material model for reinforcing steel)	26
2.6 ข้อกำหนดสำหรับการหาค่าดัดของคอนกรีตผิวนอก และการดัดของเหล็กเสริม ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	32
บทที่3 วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	34
3.1 สูตรที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	34
3.2 โปรแกรม FINITE.....	38
3.3 ข้อกำหนดที่ใช้ในแบบจำลองวัสดุ.....	39
3.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43
3.5 กระบวนการหาค่าตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ (incremental-iterative algorithms)	46

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ.....	49
4.1 ตัวอย่างทดสอบ (test specimen)	49
4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	50
4.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	51
4.4 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์.....	52
บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	173



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต.....66
2.2	สรุปค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริม.....66
3.1	การแยกประเภทการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น.....67
4.1	รายละเอียดการเสริมเหล็กของอและระดับแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ.....68
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้สำหรับตัวอย่างทดสอบ.....69
4.3	ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริมที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ.....69
4.4	สรุปค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทุกตัว.....70



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ขนาดและรูปร่างของเสาที่ใช้ในการทดสอบ.....71
1.2	แบบจำลองของเสาที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....72
2.1	แบบจำลองรอยแตกร้าวเป็นแนว.....73
2.2	แบบจำลองรอยแตกร้าวทั่วๆ.....73
2.3	การแยกความเครียดเฉือน.....74
2.4	แบบจำลองการแข็งขึ้นทางด้านแรงดึง (tension stiffening).....75
2.5	ข้อกำหนดสำหรับการปิดของรอยแตกร้าว (crack closing , $\Delta\varepsilon < 0$).....76
2.6	ข้อกำหนดสำหรับการเปิดของรอยแตกร้าว (crack opening , $\Delta\varepsilon > 0$).....77
2.7	แบบจำลองการอ่อนลงทางด้านแรงอัด.....78
2.8	แบบจำลองสำหรับคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่เสนอโดย Shiekh และ Uzumeri78
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัดกระทำ แบบเป็นวัฏจักร.....79
2.10	ข้อกำหนดสำหรับการลดแรงกระทำและการเพิ่มแรงกระทำใหม่สำหรับคอนกรีตที่ไม่ได้ โอบรัดด้วยเหล็กปลอก.....79
2.11	ข้อกำหนดสำหรับการลดแรงกระทำและการเพิ่มแรงกระทำใหม่สำหรับคอนกรีตที่ โอบรัดด้วยเหล็กปลอก.....80
2.12	การถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัส.....80
2.13	สติฟเนสแรงเฉือนเนื่องจาก Dowel action81
2.14	แบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดเฉือนของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำ แบบเป็นวัฏจักร.....82
2.15	รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม เมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร.....83
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำทาง เดียว.....84
2.17	เส้นโค้ง Envelope84
2.18	รูปแสดงตำแหน่ง Common Points และ Ultimate Points.....85
2.19	รูปแบบทั่วไปของผลการทดสอบการให้แรงกระทำย้อนกลับจากช่วง Yield Plateau ของเหล็กเสริม.....86
2.20	แสดงการลดแรงกระทำจากช่วง Yield Plateau87
2.21	รูปประกอบการอธิบายข้อกำหนดสำหรับการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก.....88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	89
<p>แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้สมการของ Ramberg-Osgood ซึ่งได้พิจารณาผลของการดัดกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่เสนอโดย Monti และ Nuti.....</p>	
3.1	90
<p>วิธีการคำนวณในแต่ละชั้นของแรงกระทำ.....</p>	
3.2	91
<p>เส้นทางของผลเฉลยในวิธี Incremental-iterative</p>	
3.3	91
<p>ปัญหาเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นในวิธีการ Newton-Raphson Iteration</p>	
3.4	92
<p>วิธีการ Newton-Raphson Iterative</p>	
4.1	93
<p>ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ.....</p>	
4.2	94
<p>รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบแต่ละตัว.....</p>	
4.3	96
<p>รายละเอียดของตำแหน่งของเหล็กปลอกในแต่ละชั้น.....</p>	
4.4	97
<p>วิธีหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดคราก (yield displacement: Δ_y) ตามวิธีของ Watson และ Park.....</p>	
4.5	98
<p>รูปแบบประวัติการรับน้ำหนัก (loading history) ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด.....</p>	
4.6	99
<p>หมายเลขของชิ้นส่วนคอนกรีตและเหล็กเสริมทั้งหมด.....</p>	
4.7	100
<p>ประวัติการรับน้ำหนักของแต่ละตัวอย่างทดสอบ.....</p>	
4.8	102
<p>กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37.....</p>	
4.9	103
<p>แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37.....</p>	
4.10	104
<p>กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30.....</p>	
4.11	105
<p>แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30.....</p>	
4.12	106
<p>กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37.....</p>	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอก ชั้นที่ 4 ที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30.....	132
4.37	วิธีการคำนวณหาค่าการสลายพลังงาน.....	133
4.38	แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CFL90/120/0.37 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	134
4.39	แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CFL90/120/0.30 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	135
4.40	แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CF135/120/0.37 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	136
4.41	แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CF135/120/0.30 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	137
4.42	แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของทุกตัวอย่างเสาที่ได้จากผลการทดสอบ.....	138
4.43	แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของทุกตัวอย่างเสาที่ได้จาก ผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	139
4.44	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่1 และชั้นที่2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37.....	140
4.45	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่2 และชั้นที่3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37.....	141
4.46	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่1 และชั้นที่2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30.....	142
4.47	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่2 และชั้นที่3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30.....	143
4.48	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว ที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่1 และชั้นที่2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37.....	144

บทที่ 1

บทนำ

การทดสอบเพื่อให้ข้อมูลของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบต่างๆ โดยทั่วไปจะเสียค่าใช้จ่ายมากและใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่ยาวนาน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะถูกจำกัดโดยรูปแบบของตัวอย่างทดสอบและลักษณะของแรงกระทำ ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจึงมีความจำเป็นที่จะนำมาใช้เพื่อขยายผลการศึกษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรูปแบบและลักษณะของแรงกระทำต่างๆกันซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายและเวลาน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการทดสอบ อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขว่าเชื่อถือได้หรือไม่ ดังนั้นการทดสอบและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจึงมีความจำเป็นในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เลือกใช้ คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆซึ่งสามารถจำลองโครงสร้างที่เป็นการรวมกันระหว่างชิ้นส่วนย่อยๆหลายชิ้น หลักการนี้สามารถทำโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ง่ายขึ้นและสามารถทำปัญหาให้ เขียนอยู่ในรูปเมตริกซึ่งสามารถรวมกันให้อยู่ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งเมื่อรวมกับแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เหมาะสมจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรูปแบบและรับแรงกระทำต่างๆกัน นอกจากนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังให้ข้อมูลที่สำคัญสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริม, สภาพการเปลี่ยนรูปร่าง และรูปแบบของรอยแตกร้าว เป็นต้น ซึ่งบางข้อมูลไม่สามารถได้มาจากวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขวิธีอื่น หรือแม้กระทั่งจากการทดสอบ

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงในแนวแกน และ แรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร โดยจะใช้ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากงานวิจัยของ จตุพล เทพมังกร[1] จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ CFL90/120/0.37, CFL90/120/0.30, CF135/120/0.37 และCF135/120/0.30 ในการตรวจสอบแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะปรับปรุงจากแบบจำลองวัสดุที่เสนอโดย C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] โดยจะรวมพฤติกรรมสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการตอบสนองของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างสูงๆ คือ เกิดการหลุดล่อน (spalling) ของคอนกรีตผิวนอก และ การดุ้ง (buckling) ของเหล็กเสริมตามยาว ดังนั้นในแบบจำลองวัสดุที่เสนอมัจะรวมพฤติกรรมเหล่านี้ไว้ด้วย

ภายหลังจากการตรวจสอบแบบจำลองวัสดุโดยการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการทดสอบแล้วจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาข้อมูลสำคัญของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำด้าน

ข้างแบบเป็นวัฏจักรที่ขาดไปจากผลการทดสอบ หรือไม่สามารถให้ได้จากผลการทดสอบ เช่น หน่วยแรง และความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม และคอนกรีต เป็นต้น

1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในขั้นต้นของงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร รวมถึงการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยงานแรกของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1967 Ngo และ Scordelis [3] ได้ทำการศึกษาและทำการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีฐานรองรับแบบธรรมดา (simply support) และกำหนดรอยแตกไว้ก่อนโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากนั้นงานวิจัยจำนวนมาก ซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย แต่ส่วนมากจะเป็นการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กประเภท คาน, พื้น และแผ่นผิวบาง ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจากกล่าวได้ว่าอุปสรรคที่สำคัญ 2 ประการในการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรของคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ 1. การขาดความเข้าใจในพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร (cyclic loading) และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของแบบจำลองวัสดุ และ 2. ปัญหาในเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นเมื่อแรงกระทำกลับไปกลับมา

เพื่อที่จะได้รับความเข้าใจในรายละเอียดของพฤติกรรมของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร และเพื่อที่จะรวบรวมข้อมูลในการทดลองที่จำเป็นซึ่งต้องการเพื่อที่จะวางกฎเกณฑ์ของพฤติกรรมเหล่านี้ ในปี ค.ศ. 1987 Steven, Uzumeri และ Collins [4] ได้ทำการศึกษาโดยการทดสอบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชิ้นที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร โดยในจำนวนนี้ 2 ชิ้นส่วนมีจำนวนเหล็กเสริมต่างกัน และรับแรงกระทำกลับไปกลับมาในรูปแบบของแรงเฉือนอย่างเดียว (pure shear) ในขณะที่อีกชิ้นหนึ่งรับแรงเฉือนแบบเป็นวัฏจักรบวกกับแรงอัดแบบสองแกน (biaxial) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของชิ้นส่วนเหล่านี้ถูกใช้เป็นพื้นฐานเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต

ในปี ค.ศ. 1993 งานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางวัสดุ (material model) สำหรับคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งได้รวมพฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กเสริมเมื่อได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการพัฒนาแบบจำลองนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบกำแพงจำนวน 19 ตัวอย่างจาก PCA และ อีก 2 ตัวอย่างจาก University of Illinois ในการปรับแก้และตรวจสอบแบบจำลองทางวัสดุ ผลปรากฏว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ

ในปี พ.ศ. 2542 เสกสรรค์ ธรรมอำนวยสุข [5] ได้นำแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ในงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กของ พิชัย ภัทรรัตน์กุล [6] ซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ แบบที่มีการเสริมเหล็กในกำแพงตามมาตรฐาน ACI และ แบบที่มีการเสริมเหล็กทแยงในกำแพง ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรได้ในระดับหนึ่งก่อนที่จะกำแพงจะเกิดการพังทลายซึ่งจะมีผลของการดุ้งของเหล็กเสริม แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ยังสามารถให้ข้อมูลที่ไม่สามารถทราบได้โดยสมบูรณ์จากการทดสอบ เช่น หน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริม และ ผลของการเสริมเหล็กทแยงในปริมาณที่ต่างกัน

1.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

ในปี ค.ศ. 1994 Watson และ Park [7] ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 11 ตัวอย่าง ซึ่งมีการเสริมเหล็กปลอกปริมาณต่างๆกัน โดยรับแรงอัดในแนวแกนขนาด ต่ำ ปานกลาง สูง และ แรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรกึ่งสถิต (quasi-static) ผลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเหนียว (ductility) และ กำลังรับแรงดัดของเสาที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงในแนวแกนมีค่าน้อยปริมาณของเหล็กปลอกที่ต้องการเพื่อให้ได้ค่าความเหนียวตามระดับที่กำหนดจะน้อยกว่าที่ระบุโดยมาตรฐานที่ใช้อยู่ในขณะนั้น และ ต้องการปริมาณเหล็กปลอกมากกว่าที่ระบุโดยมาตรฐานเมื่อแรงในแนวแกนมีค่าสูง นอกจากนั้นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้รวมผลของการโอบรัดด้วยเหล็กปลอก และความเครียดเมื่อเริ่มเกิดช่วงการแข็งตัวเพิ่ม (strain hardening) ของเหล็กเสริม ซึ่งในมาตรฐานไม่ได้รวมผลเนื่องจากพฤติกรรมทั้งสองนี้ไว้ โดยผลการทดสอบพบว่าสมการที่ใช้หาปริมาณของเหล็กปลอกสามารถใช้ในการออกแบบได้เหมาะสมกว่าที่ระบุโดยมาตรฐานที่ใช้อยู่ในขณะนั้น และยังได้เสนอสมการที่ใช้หาความยาวของช่วงที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกในสวน potential plastic-hinge ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 1999 Wehbe และ คณะ [8] ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับและแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรกึ่งสถิต เพื่อตรวจสอบค่าความเหนียว และพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเสริมเหล็กปลอกปริมาณ 46 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเหล็กปลอกที่กำหนดโดย AASHTO เพื่อเป็นแนวทางในการเสริมเหล็กของเสาและกำแพงในพื้นที่ที่มีระดับแผ่นดินไหวต่ำถึงปานกลาง โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ตัวอย่าง ซึ่งได้เปลี่ยนค่าตัวแปร 2 ชนิดคือ ปริมาณของเหล็กปลอก และ แรงในแนวแกน ผลการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กปลอกเท่ากันค่าความเหนียวของเสาจะลดลงเมื่อแรงในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อแรงในแนวแกนมีค่าเท่ากันค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก นอกจากนั้นยังได้เสนอสมการที่ใช้หาปริมาณเหล็กปลอกตามค่าความเหนียวที่ต้องการ

ในปี พ.ศ. 2543 จตุพล เทพมังกร [1] ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยศึกษาถึงผลของระดับแรงอัดในแนวแกนและ รูปแบบของเหล็กปลอกที่มีผลต่อความเหนียว และการสลายพลังงาน โดยจะมีรายละเอียดบริเวณของต่างกัน 3 แบบ คือ เหล็กปลอกกรวดรอบของ 90 องศา, 135 องศา และ 90 องศาพร้อมคลิปปียัดของ

1.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

ในปี ค.ศ. 1965 Singh และ คณะ [9] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่รับแรงกระทำในแนวแกนแบบเป็นวัฏจักร โดยทำการทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมให้รับแรงในแนวแกนสลับทิศทางทั้งแรงดึงและแรงอัด และจัดเก็บข้อมูลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเหล็กเสริมได้รับแรงแบบย้อนกลับตำแหน่งที่เกิดการครากจะหายไป และพบว่าปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ได้แก่ ความเครียดที่เหล็กเสริมได้รับก่อนเกิดการให้แรงกระทำย้อนกลับ, จำนวนรอบของการรับแรง และเวลาในการให้แรงกระทำ พร้อมทั้งได้เสนอสมการที่ใช้นิยามความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม

ในปี ค.ศ. 1972 Kent และ Park [10] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมรับแรงในแนวแกนแบบสลับทิศทางทั้งแรงดึงและแรงอัด โดยใช้เหล็กเสริมจากหลายชุดตัวอย่าง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดขึ้นอยู่กับความเครียดที่เหล็กเสริมได้รับมาก่อน, จำนวนรอบของการรับแรง และคุณสมบัติแรกเริ่มของเหล็กเสริม พร้อมทั้งได้ทดลองใช้สมการแบบต่างๆ รวมทั้งสมการที่เสนอโดย Singh [9] เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม จากนั้นจึงได้เสนอให้ใช้สมการ Ramberg-Osgood เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่รับแรงในแนวแกนแบบเป็นวัฏจักร

ในปี ค.ศ. 1973 Aktan และ คณะ [11] ได้ทำการทดสอบโดยจะเน้นไปที่พฤติกรรมของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรที่มีค่าความเครียดสูงๆ (ความเครียดอัดไม่เกิน 0.06) ซึ่งในการทดสอบของ Singh [9] และ Kent [10] ได้จำกัดความเครียดไว้ต่ำกว่าความเครียดเมื่อเริ่มเกิดช่วงการแข็งตัวเพิ่ม นอกจากนั้นได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเหล็กเสริม 2 แบบคือ แบบจำลอง Ramberg-Osgood และ แบบจำลองเชิงเส้น โดยความถูกต้องของแบบจำลอง Ramberg-Osgood จะขึ้นกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองนั้น ซึ่งสามารถหาได้จากข้อมูลของตัวอย่างทดสอบโดยวิธีทางสถิติ

ในปี ค.ศ. 1992 Monti และ Nuti [12] ได้เสนอแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรซึ่งได้รวมผลของการดุ้งของเหล็กเสริม โดยเสนอความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อเริ่มเกิดช่วงการแข็งตัวเพิ่ม ซึ่งสามารถจำลองได้ทั้งกรณีที่เกิดการดุ้งเมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) มีค่ามากกว่า 5 และกรณีที่เหล็กเสริมไม่เกิดการดุ้งเมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการสำหรับแบบจำลองคือ คุณสมบัติของเหล็กเสริม ระยะห่างของเหล็กปลอก และ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ซึ่งผลการวิเคราะห์จากแบบ

จำลองให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบเป็นอย่างดี นอกจากนี้แบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เป็นอย่างดี

ต่อมาในงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางวัสดุของเหล็กเสริม เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ แบบจำลองวัสดุสำหรับเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังคงใช้สมการของ Ramberg-Osgood เป็นต้นแบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดีโดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นชุดเดียวกันสำหรับเหล็กเสริมชนิดต่างๆ ซึ่งมีเพียงบางค่าที่ต้องหามาจากการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงดึงทางเดียวซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายทำให้แบบจำลองนี้สามารถใช้ในทางปฏิบัติ

ในปี พ.ศ. 2541 วรพงศ์ จินข้าง [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงกระทำในแนวแกนแบบเป็นวัฏจักร โดยทำการทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD30 และ ชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน มอก. 20-2527. ซึ่งให้รับแรงในแนวแกนแบบเป็นวัฏจักรในหลายๆรูปแบบ และจำกัดไม่ให้เกิดการดัดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ได้เสนอพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริมที่เสนอโดย C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] สำหรับเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มอก. 20-2527. ซึ่งแบบจำลองที่ได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เสนอนี้ให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อนำเสนอแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และเหล็กเสริมที่เหมาะสมในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองวัสดุที่เสนอนี้จะรวมปรากฏการณ์ทั้งหมดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร
2. เพื่อตรวจสอบแบบจำลองวัสดุที่เสนอ โดยทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร โดยพิจารณาจากวงรอบฮิสเทรีซิส (hysteresis loop) ทั้งหมด, สภาพการเปลี่ยนรูปร่าง, ความสามารถในการสลายพลังงาน และความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาว
3. เพื่อใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรอย่างละเอียดโดยจะพิจารณาข้อมูลที่ขาดไปจากผลการทดสอบ หรือไม่สามารถให้ได้จากการทดสอบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเน้นการอยู่ภายในขอบเขตดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยนำมาจากงานวิจัยของ จตุพล เทพมังกร [1] จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ CFL90/120/0.37, CFL90/120/0.30, CF135/120/0.37 และ CF135/120/0.30 มีลักษณะดังรูปที่ 1.1 โดยเสามีขนาดหน้าตัด 400×400 มม. ความสูง 1500 มม. ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว 3.14 %
2. ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการวิจัยได้รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวิถุจักรกึ่งสถิต (quasi-static) ที่ตำแหน่ง 1500 มม. จากฐาน และรับแรงอัดในแนวแกนคงที่ตลอดการทดสอบ
3. ในงานวิจัยนี้จะปรับปรุงแบบจำลองวัสดุสำหรับคอนกรีต และ เหล็กเสริมที่เสนอโดย C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] โดยได้รวมการหลุดล่อนของคอนกรีตผิววนอก (spalling) และ การดุ้ง (buckling) ของเหล็กเสริมตามยาว

1.4 สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการวิจัยได้มีการค้ำยันทางด้านข้างเพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่ออกนอกระนาบ ดังนั้นแบบจำลองของเสาที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพิจารณาให้เป็น 2 มิติ ซึ่งสามารถแบ่งชิ้นส่วนที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ประกอบด้วยชิ้นส่วนสองชนิด คือ ชิ้นส่วนแบบไอโซพารามेटริก 4 โหนด (4-node isoparametric elements) ใช้จำลองชิ้นส่วนของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกและ ชิ้นส่วนของคอนกรีตผิววนอก และชิ้นส่วนแบบแท่ง 2 โหนด (2-node bar elements) ใช้จำลองชิ้นส่วนเหล็กยื่น และ ชิ้นส่วนเหล็กปลอก โดยชิ้นส่วนทั้งสองแบบจะพิจารณาถึงความไม่เชิงเส้นทางรูปร่าง และความไม่เชิงเส้นทางวัสดุ
2. ในงานวิจัยนี้จะสมมติให้ไม่เกิดการแอ่อกของของอในเหล็กปลอกรัตรอบตลอดการวิเคราะห์
3. ชิ้นส่วนเหล็กเสริมสามารถเกิดการดุ้งได้หลายชิ้นส่วน โดยแต่ละชิ้นส่วนจะกำหนดให้มีความยาวในการเกิดการดุ้ง (buckling length) เท่ากับระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวิธีการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎี, สมมติฐาน, ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง, และ งานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจที่ถูกต้อง
2. ศึกษาโปรแกรม FINITE , แบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมเพื่อสามารถทำการพัฒนาได้อย่างถูกต้อง
3. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และ เหล็กเสริมให้สามารถจำลองพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ใกล้เคียงมากที่สุด
4. เมื่อปรับปรุงแบบจำลองวัสดุได้ผลเป็นที่น่าพอใจแล้ว วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกใช้ในการตรวจสอบผลของการทดลอง ข้อมูลที่ไม่สามารถวัดได้โดยง่ายจากการทดลอง เช่น หน่วยแรง และ ความเครียดในเหล็กเสริมที่ตำแหน่งต่างๆ , หน่วยแรง และความเครียดในคอนกรีต และ ความสามารถในการกระจายพลังงาน ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการเพิ่มความเข้าใจพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และทำรายงานการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรและแรงอัดในแนวแกน
2. สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาข้อมูลที่ไม่สามารถวัดได้จากการทดสอบ เช่น หน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีต , หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการเข้าใจพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรูปแบบและรับแรงกระทำด้านข้างต่างๆกัน ซึ่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องทำการทดสอบ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึงการจำลองแบบรอยแตกร้าว การจำลองแบบเหล็กเสริม และ แบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมซึ่งจะรวมพฤติกรรมต่างๆของคอนกรีตและเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร นอกจากนี้จะอธิบายถึงข้อกำหนดสำหรับการดุ้ง (buckling) ของเหล็กเสริม และ การหลุดล่อน (spalling) ของคอนกรีตผิวนอก

2.1 การจำลองแบบรอยแตกร้าว (Crack modeling)

ในการพิจารณาความไม่เชิงเส้น (nonlinearity) สิ่งหนึ่งที่สำคัญสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การแตกร้าวด้วยแรงดึง (tension cracking) โดยที่将有ผลกระทบต่อพฤติกรรมของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างมาก และเนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้มากนัก ดังนั้นการเลือกแบบจำลองการแตกร้าวที่เหมาะสมจะทำให้เราสามารถหาแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองของคอนกรีตโดยส่วนประกอบพื้นฐานของแบบจำลองการแตกร้าวมีดังนี้

2.1.1 ตัวแทนของการแตกร้าว

ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หน่วยแรง และความเครียดถูกสมมติให้ต่อเนื่องในหนึ่งชิ้นส่วน แต่หลังจากคอนกรีตแตกร้าวจะเกิดความไม่ต่อเนื่องในหน่วยแรงและความเครียด ซึ่งตัวแทนของการแตกร้าวจะรวมความไม่ต่อเนื่องนี้ในแบบจำลองของคอนกรีตด้วย โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น

1. แบบจำลองการแตกร้าวเป็นแนว (discrete crack model)
2. แบบจำลองการแตกร้าวทั่วๆ (smeared crack model)

ในแบบจำลองการแตกร้าวเป็นแนวการแตกร้าว จะแทนด้วยการแตกแยกของโนด (node) ตามขอบเขตของชิ้นส่วน ดังแสดงดังรูปที่ 2.1 พฤติกรรมหลังการแตกร้าว เช่น การทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง (tension stiffening) และ การส่งถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัส (aggregate interlock) ถูกรวมอยู่ในแบบจำลองด้วยการให้การต่อชิ้นส่วนที่ต่อกับโนดที่แยกกัน แบบจำลองนี้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Ngo และ Scordelis [3] ในปี ค.ศ. 1968 โดยแบบจำลองนี้มีข้อเสียอยู่ 3 ประการ

1. การแตกร้าวจะสามารถเกิดขึ้นตามขอบของชิ้นส่วนเท่านั้น
2. รอยแตกร้าวต้องถูกกำหนดเอาไว้ก่อน ไม่เช่นนั้นจะต้องทำการกำหนดโนดใหม่ซึ่งทำให้โครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element mesh) เปลี่ยนแปลง

3. เมื่อเกิดการแตกแยกของโนด ทำให้การปิด และ เปิดของรอยแตกร้าวจะต้องพิจารณา

เมื่อมีการบรรจบกันของโหนด ซึ่งทำให้ขั้นตอนของไฟไนต์เอลิเมนต์มีความซับซ้อนอย่างมากโดยเฉพาะปัญหาเกี่ยวกับการรับแรงแบบเป็นวัฏจักร

ในแบบจำลองการแตกร้าวต่างๆ จะสมมุติคอนกรีตให้ยังคงต่อเนื่องหลังการแตกร้าวโดยความไม่ต่อเนื่องของหน่วยแรงและความเครียดที่ผ่านรอยแตกร้าวถูกเฉลี่ยบนชิ้นส่วนในรอยแตกร้าวที่ใกล้ๆ กัน ดังนั้นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่แตกร้าวจะสามารถอธิบายในลักษณะที่ต่อเนื่องได้ในหนึ่งชิ้นส่วนของคอนกรีตนั้น รอยแตกร้าวจะพิจารณาให้ขนานกันและห่างกันน้อยๆ และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเฉลี่ยของคอนกรีตที่แตกร้าวแทนด้วยเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (constitutive matrix) ดังรูปที่ 2.2 แบบจำลองนี้ถูกเสนอครั้งแรกโดย Rashid [14] ในปี ค.ศ. 1968 โดยแบบจำลองนี้มีข้อได้เปรียบคือ 1. การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกทิศทาง และเกิดได้หลายอันในแต่ละจุดการอินทิเกรต (integration point) 2. ในแต่ละรอยแตกร้าวสามารถแทนได้โดยเพียงแค่ปรับค่าเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (constitutive matrix) ในตำแหน่งจุดการอินทิเกรต (integration point) ที่รอยแตกร้าวเกิดขึ้นซึ่งทำให้รูปร่างของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element mesh) ยังคงเหมือนเดิมตลอดการวิเคราะห์ และ 3. เนื่องจากรอยแตกร้าวในแต่ละจุดการอินทิเกรต (integration point) จะถูกพิจารณาแยกจากกันทำให้ทิศทางของแต่ละรอยแตกร้าวแตกต่างกันได้ และยังสามารถเกิดการแตกร้าวเพียงบางส่วนได้อีก

2.1.2 การเริ่มต้นการแตกร้าวและการแพร่กระจาย

แบบจำลองคอนกรีตส่วนมาก จะใช้กฎเกณฑ์ของความแข็งแรง (strength criterion) ในการพิจารณาการเริ่มต้นการแตกร้าว รอยแตกร้าวที่จุดๆ หนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงหลัก (principle stress) ที่จุดนั้นมีค่าเกินหน่วยแรงแตกร้าว (cracking stress) หลังจากการแตกร้าวเริ่มเกิดและขยายไปยังชิ้นส่วนคอนกรีตที่ติดกัน มีกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการตรวจสอบการแพร่กระจายของรอยแตกร้าวดังนี้

1. กฎเกณฑ์ด้านความแข็งแรง (strength criterion)
2. กฎเกณฑ์ด้านกลศาสตร์ของรอยแตก (fracture mechanics criterion)

กฎเกณฑ์ด้านความแข็งแรงจะเหมือนกับการเริ่มต้นการแตกร้าว คือ การแพร่กระจายของรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ยอดของรอยแตกร้าวเกินหน่วยแรงแตกร้าว แต่ในช่วงปี ค.ศ. 1979-1980 Bazant และ Cedolin [15] ได้ทำการศึกษาแล้วแย้งว่า กฎเกณฑ์ด้านความแข็งแรงเป็นกฎเกณฑ์ที่ไม่สมบูรณ์นักเนื่องจากพบว่า เมื่อแบ่งชิ้นส่วนให้มีขนาดเล็กลง หรือ ที่ปลายของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแหลมมากขึ้นจะเกิดการรวมกันของหน่วยแรง (stress concentration) สูงที่ปลายของรอยแตกร้าวแม้จะมีแรงกระทำน้อย

กฎเกณฑ์ด้านกลศาสตร์ของรอยแตกร้าวของแบบจำลองรอยแตกร้าวต่างๆ ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย Bazant และ Cedolin [15] ในช่วงปี ค.ศ. 1979-1980 โดยไม่ได้มีจุดมุ่งหมายในกฎเกณฑ์ด้านความแข็งแรง แต่ละรอยแตกร้าวถูกจำลองเป็นแถบชิ้นส่วนคอนกรีตกว้างและไม่แหลม และใช้สมมุติฐานที่ว่างงานที่ใช้เพื่อให้แถบของรอยแตกขยายไปหนึ่งหน่วยมีค่าคงที่ กล่าวคือการแพร่กระจายของรอยแตกไปที่ชิ้นส่วนถัดไปที่ปลายของรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการลดลงของพลังงานที่คำนวณได้ของแถบของรอยแตกร้าวเกินค่าวิกฤตซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานการแตกร้าวของคอนกรีต

2.1.3 การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (constitutive) ของคอนกรีตที่แตกร้าว

การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (constitutive) ของคอนกรีตที่แตกร้าวประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด และแบบจำลองรอยแตกร้าว ในส่วนแรกนั้นจะแทนความสัมพันธ์เฉลี่ยของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่แตกร้าวในทิศทางของการแตกร้าว สำหรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด ต้องรวมหลักเกณฑ์ที่สำคัญของพฤติกรรมของคอนกรีตที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร เช่น การปิดของรอยแตกร้าวและการเปิดใหม่ พร้อมด้วยผลกระทบของหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงเฉือนที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ในส่วนที่สอง แบบจำลองการแตกร้าวมี 3 แบบที่ใช้ได้อย่างประสบความสำเร็จคือ

1. แบบจำลองรอยแตกร้าวคงที่ (fixed crack model) แบบจำลองนี้ การแตกร้าวจะเกิดขึ้นบนเส้นตั้งฉากกับทิศทางของหน่วยแรงหลักที่มากที่สุดเมื่อหน่วยแรงหลักที่มากที่สุดมีค่าถึงหน่วยแรงแตกร้าว ทิศทางของการแตกร้าวจะยังคงที่ตลอดการวิเคราะห์
2. แบบจำลองรอยแตกร้าวหมุน (rotating crack model) แบบจำลองนี้จะคล้ายกับแบบจำลองแรก เพียงแต่ทิศทางของการแตกร้าวจะอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางของความเครียดหลัก
3. แบบจำลองรอยแตกร้าวแบบไม่ตั้งฉากและมีหลายรอย (non-orthogonal multi-crack model) ในปี ค.ศ. 1985 De Borst และ Nauta [16] ได้เสนอแบบจำลองนี้ ซึ่งมีหลักการคือ แยกการเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมดเป็นการเพิ่มขึ้นของความเครียดของคอนกรีต และการเพิ่มขึ้นของความเครียดของรอยแตกร้าว โดยที่ในความเครียดของรอยแตกร้าวนั้นเป็นการรวมการแตกร้าวทุกๆอันที่จุดๆหนึ่งซึ่งรอยแตกร้าวแต่ละอันจะเป็นอิสระต่อกันและรอยแตกร้าวที่ไม่ตั้งฉากกันจำนวนมากสามารถเกิดขึ้นที่จุดเดียวกัน

2.2 การจำลองแบบเหล็กเสริม

การจำลองแบบเหล็กเสริมมีหลักสำคัญ 2 ประการคือ

2.2.1 การแทนเหล็กเสริม

แบบจำลองหลักที่ใช้กันอย่างประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีอยู่ 3 แบบคือ

1. แบบจำลองเหล็กเสริมเป็นส่วนๆ (discrete steel model) ในปี ค.ศ. 1968 Ngo และ Scoredelis [3] ได้ศึกษาและใช้แบบจำลองนี้ โดยที่คิดให้เหล็กเสริมเป็นชิ้นส่วน 1 มิติของชิ้นส่วนแท่ง (bar element) ข้อดีของแบบจำลองนี้คือ ง่าย และสามารถรวมความสัมพันธ์ ยึด-ไถล (bond-slip) ระหว่างคอนกรีตและเหล็กด้วยการต่อชิ้นส่วนทั้งสองที่โนดของเหล็กเสริมและโนดของคอนกรีต สติฟเนสแรงดัดและสติฟเนสแรงเฉือนของเหล็กเสริมสามารถจำลองโดยชิ้นส่วนคานแทนชิ้นส่วนแท่ง ส่วนข้อเสียคือทิศทางและตำแหน่งของชิ้นส่วนแท่งจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2. แบบจำลองเหล็กที่ฝังอยู่ (embedded steel model) เหล็กเสริมจะคิดเป็นชิ้นส่วนรับแรงกระทำแกนเดียว (uniaxial member) แต่จะแทนด้วย 2 มิติ หรือ 3 มิติ ของชิ้นส่วนแบบไอโซพารามेटริก (isoparametric element)

3. แบบจำลองทั่วๆ (smeared steel model) เหล็กเสริมจะถูกสมมุติให้กระจายอยู่ทั่วชิ้นส่วนคอนกรีตในทิศทางเฉพาะ

2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมประกอบด้วย ช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น (initial elastic region), ช่วงที่เกิดการคราก (yield plateau) และ ช่วงการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (strain hardening region)

2.3 แบบจำลองวัสดุที่นำเสนอ (Propose material models)

แบบจำลองวัสดุที่นำเสนอควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความง่าย แบบจำลองจะต้องง่ายและประกอบด้วยเพียงหลักเกณฑ์ของพฤติกรรมซึ่งมีผลกระทบที่สำคัญบนพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

2. ความมีเสถียรภาพ แบบจำลองจะต้องมีเสถียรภาพและมีอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี ระหว่างการทำการเวียนซ้ำในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น

3. ความเชื่อถือได้ แบบจำลองจะต้องเชื่อถือได้โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรได้อย่างถูกต้อง

แบบจำลองของคอนกรีต และเหล็กเสริมที่เสนอมีดังนี้

2.3.1 แบบจำลองคอนกรีตที่นำเสนอ (Propose concrete model)

จากงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ได้แนะนำให้ใช้แบบจำลองคอนกรีตที่มีลักษณะดังนี้ คือ แบบจำลองรอยแตกทั่วๆ (smeared crack model) โดยมีรอยแตกทั่วๆ ตั้งฉากและคงที่ (fixed orthogonal cracks) และใช้กฎเกณฑ์ด้านความแข็งแรง (strength criterion) ในการพิจารณาการเริ่มต้นการแตกร้าวและการแพร่กระจาย (crack initiation and propagation) แต่เนื่องจากแบบจำลองรอยแตกทั่วๆ คงที่ไม่สามารถให้แทนการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือนมากๆ ได้ จึงจำลองการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือนในเป็นการแยกความเครียดเฉือนจากองค์ประกอบความเครียดอื่นๆ ในระบบพิกัดโกลบอลดังแสดงในรูปที่ 2.3

จะเห็นว่า การแยกความเครียดเฉือนจากความเครียดตามยาวและตามขวาง ทำให้เกิดการแยกของสตีฟเนสพแรงเฉือนในระบบพิกัดโกลบอลออกจากสตีฟเนสในทิศตั้งฉากกับรอยแตกทั่วๆ (normal stiffness) ในระบบพิกัดแตกร้าว ดังนั้นฟังก์ชันที่จะต้องพิจารณาของแบบจำลองคอนกรีตคือ ฟังก์ชันหน่วยแรงตั้งฉากกับรอยแตกทั่วๆ (normal stress function) และ ฟังก์ชันหน่วยแรงเฉือน (shear stress function)

2.3.2 แบบจำลองเหล็กเสริมที่นำเสนอ (Proposed steel model)

ในงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองเป็นส่วนๆ (discrete steel model) เนื่องจาก

1. การจัดชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำให้เหมือนกับแบบจำลองของเหล็กเสริมในเสาได้
2. สามารถใช้ผลของการยึดเกาะ (bond-slip) ระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมได้ด้วย
 1. จากการจัดเหล็กเสริมเสาในการทดสอบ และ จากการวางชิ้นส่วนในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองเป็นส่วนๆ ไม่ต้องขึ้นกับช่องของชิ้นส่วนที่แบ่งนั้น อีกทั้งแต่ละกลุ่มเหล็กเสริมจำลองได้ด้วยชิ้นส่วนแท่ง (bar element) ได้โดยง่าย

ดังนั้นฟังก์ชันที่จะต้องพิจารณาแบบจำลองของเหล็กเสริมมีเพียงหนึ่งฟังก์ชันคือ ฟังก์ชันหน่วยแรงและความเครียดแกนเดียว (uniaxial stress-strain relationship)

2.4 แบบจำลองวัสดุของคอนกรีต (Material model for concrete)

ฟังก์ชันที่ใช้พิจารณาแบบจำลองนี้มี 2 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันหน่วยแรงตั้งฉากกับรอยแตกร้าว (normal stress function) และ ฟังก์ชันหน่วยแรงเฉือน (shear stress function) ลักษณะที่พิเศษที่สำคัญ 2 ประการของฟังก์ชันทั้งสองคือ การไม่เชิงเส้นของวัสดุ (material nonlinearity) และ การขึ้นอยู่กับประวัติการรับแรง (history dependency) พฤติกรรมการไม่เชิงเส้นของคอนกรีตเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวหรือได้รับหน่วยแรงอัดสูงๆ หรือได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ส่วนประวัติการรับแรงนั้นจะทำให้เกิดหน่วยแรงและความเครียดในอดีตที่มีผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งจะขึ้นกับความเครียดในขณะนั้น

2.4.1 ฟังก์ชันของหน่วยแรงตั้งฉากกับรอยแตกร้าว (Normal stress function)

ฟังก์ชันของหน่วยแรงตั้งฉากแทนด้วยความสัมพันธ์เฉลี่ยของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตในทิศทางตั้งฉากกับรอยแตกร้าว และเนื่องจากคอนกรีตถูกสมมติให้ยังคงต่อเนื่องหลังการแตกร้าว ดังนั้นความไม่ต่อเนื่องของหน่วยแรงและความเครียดข้ามรอยแตกร้าวจะกระจายไปทั่วชิ้นส่วนคอนกรีต และทำให้ฟังก์ชันของหน่วยแรงตั้งฉากไม่เพียงแต่แทนความสัมพันธ์เฉลี่ยของหน่วยแรงและความเครียด ของคอนกรีตที่ยังไม่แตกสลายเท่านั้นแต่ยังแทนความไม่ต่อเนื่องจากรอยแตกร้าวด้วย ฟังก์ชันของหน่วยแรงตั้งฉากที่ใช้ในแบบจำลองคอนกรีตนี้ มีสมมุติฐานหลัก 2 ประการคือ 1. อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของคอนกรีตที่แตกร้าวมีค่าเป็นศูนย์ และ 2. พฤติกรรมของคอนกรีตที่แตกร้าวเป็นพฤติกรรมรับแรงกระทำแกนเดียว (uniaxial) ในทิศทางของการแตกร้าว

ในสมมุติฐานแรก อัตราส่วนปัวซองของของคอนกรีตที่แตกร้าวถูกสมมติให้มีค่าเป็นศูนย์ เพราะการมีผลกระทบต่อกันระหว่างแกน 2 แกนที่ตั้งฉากกันลดลงอย่างมากหลังการแตกร้าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสมมุติอัตราส่วนปัวซองของของคอนกรีตที่แตกร้าวมีค่าเป็นศูนย์ ในสมมุติฐานที่สอง คอนกรีตถูกสมมติให้

ความสามารถในการรับแรงแกนเดียวในทิศทางของรอยแตกร้าว และสมมุติให้หน่วยแรงในทิศทางที่แตกร้าวขึ้น กับเพียงความเครียดในทิศทางนั้นเท่านั้น

หน่วยแรงที่จุดหนึ่งในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน สามารถเปลี่ยนได้เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของแรงที่ มากระทำหรือการกระจายแรงใหม่ของหน่วยแรงเนื่องจากการตอบสนองไม่เชิงเส้นทุกๆแห่งในโครงสร้าง ดังนั้นทุกๆชิ้นส่วนจะได้รับแรงกระทำ (loading), คลายแรงกระทำ (unloading) และ รับแรงกระทำอีก (reloading) ในระหว่างการวิเคราะห์ และ ฟังก์ชันของหน่วยแรงตั้งฉากต้องสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของลำดับการรับแรงกระทำได้ จากงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ฟังก์ชันนี้จะสามารถแทนด้วยหลักเกณฑ์ที่สำคัญดังนี้

2.4.1.1 การทำให้แข็งขึ้นด้านแรงดึง (tension stiffening)

2.4.1.2 การเปิดและการปิดใหม่ของรอยแตกร้าว (crack closing and crack reopening)

2.4.1.3 การทำให้อ่อนลงด้านแรงอัด (compression softening)

2.4.1.4 ผลของการโอบรัดด้วยเหล็กปลอก (effect of steel confinement)

2.4.1.5 การลดลงของคุณสมบัติคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (degradation of concrete properties with cyclic loading)

2.4.1.1 การทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง (Tension stiffening)

เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าวคอนกรีตที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าวยังสามารถรับหน่วยแรงดึงได้โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตที่อยู่รอบๆ ซึ่งทำให้ค่าสถิติเทนชันด้านแรงดึงของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมีค่าสูงกว่าเหล็กธรรมดา (plain bar) ซึ่งเรียกว่าการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง (tension stiffening) เนื่องจากการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึงเป็นผลมาจากบทบาทระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมดังนั้นพฤติกรรมของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็ก เช่น ขนาดของรอยแตกร้าว, อัตราส่วนเหล็กเสริม และ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัส

พฤติกรรมของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึงในการวิเคราะห์คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงได้ 2 วิธีคือ โดยวิธีแรกผลของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง จะถูกรวมอยู่ในพฤติกรรมของเหล็กเสริมโดยหลังจากการแตกร้าว จะสมมุติให้คอนกรีตไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับรอยแตกร้าวได้ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมจะถูกรวมผลของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึงเข้าไปด้วย ในวิธีที่สอง ผลของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง จะถูกรวมอยู่ในชิ้นส่วนของคอนกรีต หลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมยังคงเหมือนกับเหล็กธรรมดา ขณะที่หน่วยแรงดึงที่ตั้งฉากกับรอยแตกของคอนกรีตแทนที่จะลดลงเป็นศูนย์ในทันทีแต่จะค่อยๆลดลงซึ่งใช้แทนผลของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึง ซึ่งในงานวิจัยนี้พฤติกรรมการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึงจะรวมอยู่ในชิ้นส่วนของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตหลังจากการแตกร้าวแทนด้วยแบบจำลองเส้นตรงไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในแบบจำลองนี้หน่วยแรงดึงของคอนกรีตจะลดลงทันทีทันใด จากหน่วยแรงแตกร้าว (σ_c) จนถึงหน่วยแรงที่น้อยกว่า ($\alpha\sigma_c$)

หลังการแตกร้าว จากนั้นเมื่อความเครียดดึง (tensile strain) เพิ่มขึ้น หน่วยแรงดึงจะลดลงเป็นเส้นตรงจนถึง หน่วยแรงขบล่าง (σ_c) ที่ ความเครียดดึง ϵ_c และจะยังคงมีค่าคงที่เป็น σ_c ดังนั้นจะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ ที่กำหนดพฤติกรรมของการทำให้แข็งขึ้นทางด้านแรงดึงจะมีอยู่ 3 ตัว คือ α , ϵ_c และ σ_c

2.4.1.2 การปิดและการเปิดใหม่ของรอยแตกร้าว (Crack closing and crack reopening)

เมื่อชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร รอยแตกร้าวจะปิดและเปิดใหม่ตลอดการรับแรง โดยที่รอยแตกร้าวจะเปลี่ยนจากการเปิดเต็มที่ไปจนถึงการปิดเต็มที่ และสตีฟเนสของคอนกรีตที่แตกร้าวจะเพิ่มขึ้นจากค่าใกล้ศูนย์จนถึงค่าใกล้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด เนื่องจากการปิดและเปิดของรอยแตกร้าวสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. เส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก (envelope curve): ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดดึงในการรับแรงแบบเป็นวัฏจักร สามารถประมาณได้โดยเส้นโค้งเมื่อรับแรงกระทำทางเดียว (monotonic curve) ของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึงทางเดียว (uniaxial tension) และเส้นโค้งความสัมพันธ์หลักของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดอัดในการรับแรงแบบเป็นวัฏจักร สามารถประมาณได้โดยเส้นโค้งรับแรงกระทำทางเดียว ของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดทางเดียว (uniaxial compression)

2. เส้นโค้งคลายแรงกระทำ (unloading curve): ด้านแรงดึงเมื่อรอยแตกร้าวปิด ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ ส่วนเริ่มต้นแข็งตัว (the initially stiff region), ส่วนอ่อนตัวลง (the softened region) และ ส่วนแข็งตัว (the stiffened region) และจะรวมเข้ากับเส้นโค้งความสัมพันธ์หลักด้านแรงอัดที่จุดใดจุดหนึ่งในช่วงความเครียดอัด

3. เส้นโค้งการรับแรงกระทำใหม่ (reloading curve): ด้านแรงดึงเมื่อรอยแตกร้าวเปิดโดยเริ่มมีค่าสตีฟเนสเดียวกับค่าสตีฟเนสของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว จากนั้นเส้นโค้งจะอ่อนลงที่ละน้อยจนกระทั่งรวมเข้ากับเส้นโค้งความสัมพันธ์หลักด้านรับแรงดึงที่จุดใดจุดหนึ่งในช่วงความเครียดดึง

รูปแบบของกฎการปิดและเปิดของรอยแตกร้าวอธิบายได้ ดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 รอยแตกร้าวจะถูกพิจารณาว่าปิดเต็มที่เมื่อความเครียดอัดเกินกว่า ϵ_n และรอยแตกร้าวถูกพิจารณาว่าเปิดบางส่วนเมื่อความเครียดอยู่ระหว่าง ϵ_n และ ϵ_c และรอยแตกร้าวจะถูกพิจารณาว่าเปิดเต็มที่เมื่อความเครียดดึงเกินกว่า ϵ_c ในแต่ละขั้นตอนของแรงกระทำ (load step) คอนกรีตที่แตกร้าวจะถูกพิจารณาว่าเปิดถ้าหากความเครียดที่เพิ่มขึ้นเป็นการขยายและจะถูกพิจารณาว่าปิดถ้าหากความเครียดที่เพิ่มขึ้นเป็นการอัด แบบจำลองที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่นำมาใช้เสนอโดย Yankelevsky และ Reinhardt [17] ในแบบจำลองที่เสนอนี้จะเห็นว่ามีอยู่ 5 จุด คือ $(0, \sigma_c)$, (ϵ_c, σ_c) , (ϵ_c, σ_1) , (ϵ_3, σ_3) และ (ϵ_n, σ_n) ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของคอนกรีตด้านแรงดึงเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ทุกๆจุดจะมีค่าคงที่ตลอดการรับแรงยก

ห้จุด $(\varepsilon_n, \sigma_n)$ ซึ่งจะขึ้นกับประวัติการรับแรงแบบเป็นวัฏจักรทางด้านแรงอัด กฎที่ใช้อธิบายถึงรอยแตก
 ราวปิดและเปิดในทิศทาง $\Delta\varepsilon$ สามารถอธิบายได้ดังนี้

- โดยที่
- (ε, σ) คือ ความเครียดและหน่วยแรงที่ขั้นตอนของแรงท้ายสุด (last load step)
 - $(\varepsilon_n, \sigma_n)$ คือ ความเครียดและหน่วยแรงที่ขั้นตอนของแรงปัจจุบัน (current load step)
 - ε'_{max} คือ ความเครียดตึงมากที่สุดของครั้งก่อนในทิศทาง $\Delta\varepsilon$
 - $\Delta\varepsilon$ คือ ความเครียดที่เพิ่มขึ้น, $\varepsilon_c - \varepsilon$

- การปิดของรอยแตกราว (Crack closing, $\Delta\varepsilon < 0$)

เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.5 โดยมีส่วน
 สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนเริ่มต้นแข็งตัว (initially stiff region, เมื่อ $\sigma > \sigma_2$): เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์
 ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดคือเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่าง (ε, σ) และ $(0, \sigma_2)$ โดยจะแทนการตอบสนอง
 ของคอนกรีตเมื่อรอยแตกราวเริ่มปิด ซึ่งการแข็งตัวจะน้อยเมื่อรอยแตกราวเริ่มปิดที่หน่วยความเครียดสูงๆ
 ส่วนที่ 1 นี้จะสิ้นสุดเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าเกิน σ_2

2. ส่วนอ่อนตัวลง (softened region, เมื่อ $\sigma = \sigma_2$ และ $\varepsilon > \varepsilon_1$): เส้นโค้งแสดงความ
 สัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด คือเส้นในแนวราบที่เชื่อมต่อระหว่าง (ε, σ) และ $(\varepsilon_1, \sigma_2)$ โดยที่
 หน่วยแรงมีค่าคงที่ เท่ากับ σ_2 และสตีเฟนเนสสัมผัส (tangent stiffness) มีค่าเป็นศูนย์ เส้นนี้จะแทนการปิดของ
 รอยแตกราวที่ ปิดเต็มที่ เนื่องจากผิวของรอยแตกราวที่อยู่ตรงข้ามกันอยู่ห่างกันมากและจะไม่มีควมต้านทาน
 ต่อการปิดของรอยแตกราว จนกระทั่งความเครียดตึงมีค่าลดลงถึง ε_1 และเกิดการสัมผัสระหว่างผิวของรอยแตก
 ราวทั้งสอง

3. ส่วนแข็งตัว (stiffened region, เมื่อ $\sigma < \sigma_2$ และ $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_n$): เส้นโค้งแสดงความ
 สัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด คือเส้นโค้งที่เชื่อมต่อระหว่าง (ε, σ) และ (σ_n, σ_n) ซึ่งกำหนดด้วย
 สมการที่ (1)

$$\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_n}{\varepsilon_{os}} = \frac{\sigma_c - \sigma_n}{\sigma_{os}} + \left(\frac{\sigma_c - \sigma_n}{\sigma_{os}} \right)^s \quad (1)$$

โดยที่

$$s = \left(\frac{E_c}{E_t} - 1 \right) \left(\frac{k_2}{k_1 E_c - k_2} \right)$$

$$\sigma_{os} = \frac{|k_2|^{\frac{s}{s-1}}}{|k_1 E_c - k_2|^{\frac{1}{s-1}}}$$

$$\varepsilon_{os} = \frac{\sigma_{os}}{E_c}$$

$$K_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_n$$

$$K_2 = \sigma_c - \sigma_n$$

E_t = สติฟเนสสัมพัทธ์ที่จุดเริ่มต้นของเส้นโค้งคลายแรงกระทำ

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต

- การเปิดของรอยแตกกว้าง (Crack opening, $\Delta\varepsilon > 0$)

เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดอธิบายได้ดังรูปที่ 2.6 โดยมีส่วนสำคัญอยู่ 4 ส่วน คือ

1. ส่วนเริ่มต้นแข็งตัว (initially stiff region, เมื่อ $\sigma < \sigma_4$ และ $\varepsilon_n < \varepsilon < \varepsilon'_{max}$): เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด คือเส้นที่มีสติฟเนสสัมพัทธ์เท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (E_c) เส้นโค้งนี้แสดงถึงการแข็งตัวของคอนกรีตที่แตกกว้างเมื่อรอยแตกกว้างเริ่มเปิด

2. ส่วนอ่อนตัวลงเป็นเส้นตรง (linear softening region I, เมื่อ $\sigma_2 > \sigma > \sigma_4$ และ $\varepsilon_n < \varepsilon < \varepsilon'_{max}$): เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด คือ เส้นที่เชื่อมต่อระหว่าง (ε, σ) และ ($\varepsilon'_{max}/2, \sigma_2$)

3. ส่วนอ่อนตัวลงเป็นเส้นตรงช่วงที่สอง (linear softening region II, เมื่อ $\sigma > \sigma_2$ และ $\varepsilon_n < \varepsilon < \varepsilon'_{max}$): เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด คือ เส้นที่เชื่อมต่อระหว่าง ($\varepsilon'_{max}/2, \sigma_2$) และ ($\varepsilon'_{max}, \sigma$)

4. ส่วนอ่อนตัวลง (softening region, เมื่อ $\sigma = \sigma_1$ และ $\varepsilon'_{max} < \varepsilon$): เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด คือเส้นในแนวราบโดยที่หน่วยแรง σ มีค่าเท่ากับ σ_1 และสติฟเนสสัมพัทธ์มีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการปิดและเปิดใหม่ของรอยแตกกว้างจะมีอยู่ 5 ตัว คือ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ และ σ_n

2.4.1.3 การทำให้อ่อนตัวลงทางด้านแรงอัด (Compression softening)

เมื่อคอนกรีตได้รับหน่วยแรงอัดสูงๆ คอนกรีตจะมีพฤติกรรมอ่อนตัวลง ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดทางเดียว (uniaxial compression) จะเป็นเส้นตรงเมื่อคอนกรีตได้รับหน่วยแรงอัดน้อยๆ เมื่อได้รับหน่วยแรงอัดเพิ่มขึ้นเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตจะเริ่มมีแนวโน้มที่อ่อนตัวลงที่ละน้อยจนกระทั่งถึงจุดยอดของเส้นโค้งดังรูปที่ 2.7 จากนั้นหน่วยแรงอัดจะเริ่มลดลงเมื่อความเครียดอัดเพิ่มขึ้น การลดลงของกำลังเช่นนี้จะแทนการเสียหายสะสมในคอนกรีตเนื่องจากความเครียดอัดสูงๆ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เสนอในงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ซึ่งสามารถแทนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดทางเดียวได้อย่างถูกต้องทั้งในส่วนที่ขึ้นและส่วนที่ลดลงด้วยฟังก์ชันง่ายๆเพียงฟังก์ชันเดียว ซึ่งฟังก์ชันนี้จะต้องกำหนดเพียงกำลังของคอนกรีตและสตีฟเนสของคอนกรีตเริ่มต้นเท่านั้น เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของการทำให้อ่อนตัวลงทางด้านแรงอัดจะมีสตีฟเนสสัมผัส (tangent stiffness) เหมือนกับของพฤติกรรมการเปิดของรอยแตกกว้างซึ่งเท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (E_c) ที่จุดรอยต่อ (transition point) (ϵ_n, σ_n) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \epsilon > \epsilon_n & \quad \sigma = E_c \epsilon \\ \text{เมื่อ } \epsilon < \epsilon_n & \quad \frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma_{oc}} = \frac{\epsilon - \epsilon_n}{\epsilon_{oc}} e^{\left(\frac{1 - \frac{\epsilon - \epsilon_n}{\epsilon_{oc}}}{\epsilon_{oc}} \right)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad \sigma_{oc} &= f_{cult} - \sigma_n \\ f_{cult} &= \text{หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต} \\ E_c &= \text{โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมทำให้อ่อนลงทางด้านแรงอัดจะมีอยู่ 4 ตัว คือ $\epsilon_n, \sigma_n, E_c$ และ f_{cult} แต่ ϵ_n, σ_n ได้นิยามไว้ในพฤติกรรมการเปิดและปิดของรอยแตกกว้างแล้ว ดังนั้นจะต้องนิยามพารามิเตอร์ในพฤติกรรมนี้ 2 ตัว คือ E_c และ f_{cult}

2.4.1.4 ผลคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก (Effect of steel confinement)

จากผลการทดลองเห็นได้ชัดว่ากำลัง (strength) และ ความเหนียว (ductility) ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจะอย่างมากภายใต้สภาวะของแรงอัดสามแกน (triaxial compression) ในชั้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก สภาวะของแรงอัดสามแกนจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอก เมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าน้อยเหล็กปลอกจะถูกดันจากคอนกรีตเพียงเล็กน้อยซึ่งไม่สามารถให้ผลของการโอบรัดแก่คอนกรีตได้ ดังนั้นคอนกรีตที่อยู่

ภายในเหล็กปลอกจะไม่ได้รับผลของการโอบรัดเมื่อนวณแรงอัดมีค่าน้อยๆ แต่เมื่อนวณแรงอัดมีค่าเข้าใกล้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เหล็กปลอกจะเริ่มให้ผลของการโอบรัดเนื่องจากคอนกรีตที่แตกจะไปดันเหล็กปลอกซึ่งจะทำให้เกิดแรงอัดกลับไปยังคอนกรีตแบบจำลองของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก(confined concrete) ที่เป็นต้นแบบในงานวิจัยนี้นำเสนอโดย Shiekh และ Uzumeri [18] เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. ส่วนที่ยังไม่แตกหัก (the uncrushed section): ส่วนนี้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดคล้ายกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดด้านแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก (unconfined concrete) ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าว ความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีสลิปเนสสัมพันธ์เท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (E_c) จนกระทั่งถึงจุด (ϵ_n, σ_n) และจะเริ่มเป็นไปตามเส้นโค้งของพฤติกรรมการอ่อนลงด้านแรงอัดเมื่อ $\epsilon < \epsilon_n$ จนกระทั่งถึงหน่วยแรงอัดของคอนกรีต $f_{c,ult}$ ค่าของ $f_{c,ult}$ จะเท่ากับ $k_s f_c$ ซึ่งจะมากกว่าหน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก f_c เทอม k_s จะใช้แทนการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องมาจากการ โอบรัดด้วยเหล็กปลอก หลังจากนั้นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะเข้าสู่ส่วนที่ 2

2. ส่วนที่ถูกกดทำให้แตกร้าว (the crush plateau): ส่วนนี้จะมีหน่วยแรงอัดคงที่เท่ากับ $f_{c,ult}$ จนกระทั่งความเครียดอัดมีค่าถึง ϵ_2 หลังจากนั้นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะเข้าสู่ส่วนที่ 3

3. ส่วนที่ถูกกดทำให้แตกร้าวทั้งหมด (the totally crushed section): ส่วนนี้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะลดลงเป็นเส้นตรงจากจุด ($\epsilon_2, f_{c,ult}$) จนถึงจุด ($\epsilon_{85}, 0.85f_{c,ult}$) และจะยังคงลดลงเป็นเส้นตรงจนกระทั่งหน่วยแรงอัดเป็น $0.30f_{c,ult}$ สำหรับความเครียดอัดสูงๆ หน่วยแรงอัดก็จะมีค่าคงที่เท่ากับ $0.30f_{c,ult}$

ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกจะมีอยู่ 3 ตัว คือ k_s , ϵ_2 และ ϵ_{85} ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- อัตราส่วนต่อปริมาตรของเหล็กปลอก
- ระยะห่างของเหล็กปลอก
- คุณสมบัติของเหล็กปลอก
- การกระจายของเหล็กเสริมหลัก

2.4.1.5 การลดลงของคุณสมบัติคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร (Degradation of concrete properties under cyclic loadings)

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดแบบเป็นวัฏจักรของคอนกรีตซึ่งมีพื้นฐานจากการทดลองโดย Karsan, Jirsa [19] และ Sinha [20] โดยมีขั้นตอนที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งนำมาจากแบบจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรที่เสนอโดย Yankelevsky และ Reinhardt [21] ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะถูกกำหนดโดยเส้นโค้ง 2 เส้น คือ เส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก (envelope curve) และ เส้นโค้งของจุดร่วม (common point curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยเส้นโค้งความสัมพันธ์หลักใช้กำหนดขอบเขตตำแหน่งของหน่วยแรงและความเครียดที่ยอมได้ ซึ่งเส้นโค้งของหน่วยแรงและความเครียดจะต้องอยู่ภายในพื้นที่ที่ล้อมรอบโดยเส้นโค้งความสัมพันธ์หลักและแกนความเครียด เส้นโค้งความสัมพันธ์หลักจะแสดงโดยเส้นโค้งหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดกระทำทางเดียว สำหรับเส้นโค้งของจุดร่วมแต่ละจุดบนเส้นโค้งนี้ ($\epsilon_{cp}, \sigma_{cp}$) แสดงจุดรวม (focal point) ของเส้นโค้งรับแรงกระทำใหม่ด้านแรงอัด ซึ่งความเครียดอัดมากที่สุด ในครั้งก่อนที่จุดเริ่มต้นของเส้นโค้งรับแรงกระทำใหม่มีค่าเท่ากับ ϵ_{cp} เส้นโค้งของจุดร่วม กำหนดโดยสมการที่ (3)

$$\sigma_{cp} = \sigma_n + 0.85 \left(\sigma_{oc} \frac{\epsilon_{cp} - \epsilon_n}{\epsilon_{oc}} e^{\frac{1 - \epsilon_{cp} - \epsilon_n}{\epsilon_{oc}}} \right) \quad (3)$$

โดยที่

($\epsilon_{cp}, \sigma_{cp}$) คือ ความเครียดและหน่วยแรงบนเส้นโค้งของจุดร่วม (common point)

(ϵ_n, σ_n) คือ พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองคอนกรีต

($\epsilon_{oc}, \sigma_{oc}$) ได้นิยามไว้ในการทำให้อ่อนตัวลงด้านแรงอัด

ข้อกำหนดสำหรับการเพิ่มแรงกระทำและการลดแรงกระทำทางด้านแรงอัดแสดงในรูปที่ 2.10 เส้นโค้งลดแรงกระทำประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ

1. ส่วนลดแรงกระทำเริ่มต้น (the Initial unloading, D-E) : คือ เส้นที่มีความชันเท่ากับค่า โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต (E_c) โดยที่เส้นโค้งนี้สามารถเริ่มจากจุดใดที่อยู่บนหรือต่ำกว่าเส้นโค้งความสัมพันธ์หลักโดยจะสิ้นสุดเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าถึง $0.30f_{cut}$

2. ส่วนลดแรงกระทำที่อ่อนตัว (the softening unloading, E-F) : คือ เส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งลดแรงกระทำเริ่มต้นและจุด ($\epsilon_p, 0$) บนแกนความเครียด ความเครียด ϵ_p แสดงความเครียดอัดถาวรในรอบแรงกระทำปัจจุบัน ซึ่งค่า ϵ_p สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ สมการที่ (5) ที่เสนอโดย Yankelevsky และ Reinhardt [21]

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon_{ult} (1.0 - 0.425e^{(1-s)})}{1 - (se^{(1-s)})} \quad (4)$$

$$\text{ถ้า} \quad \varepsilon_p < 0.70 \cdot \varepsilon_{\max}^c \quad \varepsilon_p = 0.70 \cdot \varepsilon_{\max}^c \quad (5)$$

เมื่อ

$$S = \frac{\varepsilon_{\max}^c}{\varepsilon_{ult}}$$

ε_{ult} คือ ความเครียดอดที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต ($f_{c,ult}$)

ε_{\max}^c คือ ความเครียดอดมากที่สุดในครั้งก่อน

3. ส่วนลดแรงกระทำที่หน่วยแรงเท่ากับศูนย์ (the zero-stress unloading, F-G): คือเส้นโค้งที่เริ่มจากตำแหน่ง ($\varepsilon_p, 0$) และจะไปต่อตามแกนความเครียด กรณีที่เส้นนี้ไปถึงจุดเริ่มต้น (origin) ก็จะไปต่อตามเส้นโค้งลดแรงกระทำด้านแรงดึง

เส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่ทางด้านแรงอัดประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนเพิ่มแรงกระทำใหม่เริ่มต้น (the initial reloading, A-B และ G-H): คือเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่กับจุดที่อยู่บนเส้นโค้งของจุดร่วม ซึ่งมีความเครียดเท่ากับค่าความเครียดอดมากที่สุดในครั้งก่อน (ε_{\max}^c) ส่วนนี้จะสิ้นสุดเมื่อตัดกับเส้นโค้งของจุดร่วม

2. ส่วนเพิ่มแรงกระทำใหม่ที่อ่อนตัว (the softening reloading, B-C และ H-I): คือเส้นที่เริ่มจากจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่เริ่มต้น และจะมีความชันเท่ากับ $0.10E_c$ ส่วนนี้จะสิ้นสุดเมื่อไปถึงเส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก

3. เส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก (the envelope curve, C-D และ I-J): ส่วนนี้จะไปตามเส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก

เนื่องจากผลการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตด้านแรงอัดแบบเป็นวัฏจักร ทั้งหมดเป็นของคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก (unconfined concrete) ดังนั้นวิธีที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่รับแรงกระทำทางเดียวของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก (confined concrete) และ เส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำและลดแรงกระทำของคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก จะถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดแบบเป็นวัฏจักรสำหรับคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก พิจารณารูปที่ 2.11 เส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่ทางด้านแรงอัดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. ส่วนเพิ่มแรงกระทำใหม่เริ่มต้น (the initial reloading, E-F): ส่วนนี้จะเหมือนกับในคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก โดยจะเป็นเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่กับจุดที่อยู่บนเส้นโค้งของจุดร่วม ซึ่งมีความเครียดเท่ากับค่าความเครียดอดมากที่สุดในครั้งก่อน (ε_{\max}^c) ส่วนนี้จะสิ้นสุดเมื่อตัดกับเส้นโค้งของจุดร่วม

2. ส่วนเพิ่มแรงกระทำใหม่ที่อ่อนตัว (the softening ,reloading,F-G): ส่วนนี้จะเหมือนกับในคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก โดยจะเป็นเส้นที่เริ่มจากจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่เริ่มต้น และจะมีความชันเท่ากับ $0.10E_c$ ส่วนนี้จะสิ้นสุดเมื่อไปถึงเส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก

3. ส่วนที่ถูกกดทำให้แตกร้าว (the crush plateau, A-B และ G-H-I): ในส่วนนี้แทนที่จะไปตามเส้นโค้งความสัมพันธ์หลัก เหมือนกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอกแต่เส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่จะเป็นแนวอนจนกระทั่งเกิดการลดแรงกระทำ (จุด B) หรือ ความเครียดถึงค่า ϵ_2 (จุด H)

ถ้าความเครียดอัดมีค่าเกิน ϵ_2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดจะลดลงเป็นเส้นตรงจาก (ϵ_2, σ_c) จนถึง $(\epsilon_{85}, 0.85\sigma_c)$ (σ_c คือ หน่วยแรงอัดเมื่อความเครียดอัดมีค่าเท่ากับ ϵ_2) และจะยังคงอยู่บนเส้นนี้ไปจนหน่วยแรงอัดมีค่าถึง $0.30f_{cut}$ สำหรับความเครียดอัดสูงๆ หน่วยแรงอัดจะมีค่าคงที่เท่ากับ $0.30f_{cut}$ เส้นโค้งเพิ่มแรงกระทำใหม่ช่วงนี้ จะเหมือนกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อรับแรงกระทำทางเดียวของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกภายหลังจากคอนกรีตแตกหักแล้ว ดังรูปที่ 2.8

เส้นโค้งลดแรงกระทำสำหรับคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก จะเหมือนของคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. ส่วนลดแรงกระทำเริ่มต้น (the initial unloading , B-C และ I-J): ส่วนนี้จะเริ่มด้วยสตีเฟนสันส์มีค่าเท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต(E_c) และจะอยู่บนเส้นนี้จนกระทั่งหน่วยแรงอัดมีค่าถึง $0.30f_{cut}$

2. ส่วนลดแรงกระทำที่อ่อนตัว (the softening unloading, C-D และ J-K): ส่วนนี้จะเป็เส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งลดแรงกระทำเริ่มต้นและจุด $(\epsilon_p, 0)$ (จุด Dและ K)

3. ส่วนลดแรงกระทำที่หน่วยแรงเท่ากับศูนย์ (the zero-stress unloading, D-E): ส่วนนี้จะเริ่มจากจุด $(\epsilon_p, 0)$ และจะไปตามแกนความเครียด กรณีที่เส้นนี้ไปถึงจุดเริ่มต้น (origin) ก็จะไปต่อตามเส้นโค้งลดแรงกระทำด้านแรงดึง

จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก ซึ่งทำให้มีการสลายพลังงาน (energy dissipation) ที่ดีกว่า พฤติกรรมของกฎเกณฑ์เหล่านี้จะประกอบกันเป็นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดที่สมบูรณ์ในทิศทางตั้งฉากกับรอยแตกร้าว

2.4.2 ฟังก์ชันของหน่วยแรงเฉือน (Shear stress function)

ในงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ได้ศึกษาและแนะนำให้ใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวที่จะใช้ กำหนดฟังก์ชันของหน่วยแรงเฉือนของแบบจำลองรอยแตกร้าวทั่วๆ (smeared crack model) คือ ความเครียดของรอยแตกร้าว, ความเครียดเฉือน และอัตราส่วนเหล็กเสริม ในแบบจำลองรอยแตกร้าวทั่วๆ มีวิธีการอยู่ 2 วิธีที่ใช้แทนสติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่แตกร้าว คือ การลดสติฟเนสแรงเฉือน และการแปรผันของสติฟเนสแรงเฉือนตามฟังก์ชันอื่น

การลดสติฟเนสแรงเฉือน สติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าวจะลดลงด้วยแฟคเตอร์ค่าหนึ่งหลังคอนกรีตแตกร้าวลงไปจนถึงค่าความสามารถของคอนกรีตที่แตกร้าวที่สามารถรับแรงเฉือนด้วยการส่งถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัส (aggregate interlock) การแปรผันของสติฟเนสแรงเฉือนค่าสติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่แตกร้าวถูกสมมุติให้เป็นฟังก์ชันของความเครียดที่ตั้งฉากกับทิศทางของรอยแตกร้าว ในแบบจำลองที่นำเสนอนี้สติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่แตกร้าวถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. G_{ist} = สติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัส
2. G_{dow} = สติฟเนสแรงเฉือนเนื่องจากพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (dowel action)

โดยที่ สติฟเนสแรงเฉือนทั้งหมด (G) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$G = G_{ist} + G_{dow} \quad (6)$$

2.4.2.1 สติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัส (Shear stiffness due to interface shear transfer)

ผิวของคอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวจะมีลักษณะขรุขระ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงต้านทานเมื่อพื้นผิวเคลื่อนที่ผ่านกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่อกลไกของการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสของคอนกรีตที่แตกร้าว คือ ความกว้างของรอยแตกร้าวในตอนแรก ซึ่งสติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสของคอนกรีตที่แตกร้าว จะเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของรอยแตกร้าวลดลง สติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสของคอนกรีตที่แตกร้าวมี ค่าดังสมการที่ (7)

$$G_{ist} = 2.0 \left[\frac{1}{G_{ist}^1} + \frac{1}{G_{ist}^2} \right]^{-1} \quad (7)$$

โดยที่

G_{ist}^1 คือสติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสในทิศทางแตกร้าว 1

G_{ist}^2 คือสติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสในทิศทางแตกร้าว 2

และ

$$G_{ist}^i = \mu_1 \cdot G_{conc} \quad ; \quad \varepsilon_{nn}^i < \varepsilon_{cr}$$

$$G_{ist}^i = \frac{\mu_1 [\varepsilon_{min} - \varepsilon_{nn}^i]}{[\varepsilon_{min} - \varepsilon_{cr}]} G_{conc} \quad ; \quad \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_{nn}^i < \varepsilon_{min} \quad (8)$$

$$G_{ist}^i = G_{min} \quad ; \quad \varepsilon_{min} \leq \varepsilon_{nn}^i$$

โดยที่

μ_1 = พารามิเตอร์ที่ใช้สัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสกับสติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว

ε_{nn}^i = ความเครียดของรอยแตกร้าวตั้งฉากในทิศทาง i

ε_{cr} = ความเครียดด้านแรงดึงเมื่อคอนกรีตแตกร้าว

ε_{min} = ความเครียดของรอยแตกร้าวตั้งฉากเมื่อ $G_{ist}^i = G_{min}$

G_{min} = ค่าต่ำสุดของ G_{ist}^i

G_{conc} = สติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว $\left(\frac{E_c}{2[1+\nu]} \right)$

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของคอนกรีต

ν = อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว

ดังนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในพฤติกรรมนี้ 3 ตัว คือ μ_1 , ε_{min} และ G_{min} โดยค่า G_{min} จะใช้เพื่อจำกัดค่าน้อยที่สุดของ G_{ist}^i โดยจะไม่ให้ค่านี้เท่ากับศูนย์เพื่อป้องกันปัญหาในเชิงตัวเลข

2.4.2.2 สติฟเนสแรงเฉือนเนื่องจากพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (Shear stiffness due to dowel action)

พิจารณารูปที่ 2.13(ก) เหล็กเสริมที่ผ่านรอยแตกร้าวจะให้สติฟเนสผ่านทางพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (dowel action) จากผลรวมของกลไกทั้ง 3 อย่างคือ การโค้งงอ (flexure) , การเฉือน (shear) และการคดงอ (kinking) ดังแสดงในรูปที่ 2.13(ข) ซึ่งมีพฤติกรรมที่สำคัญ คือ สติฟเนสแรงเฉือนจากทางพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (dowel action) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการเปลี่ยนรูปเฉือน (shear deformation) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการเปลี่ยนรูปเฉือนมีค่าน้อยสติฟเนสแรงเฉือนจะขึ้นกับสติฟเนสแรงเฉือน และสติฟเนสแรงดัดของแท่งเหล็กเป็นอย่างมาก เนื่องจากส่วนของแท่งเหล็กที่ใกล้กับรอยแตกร้าวยังไม่ไปดันทับคอนกรีตที่อยู่รอบๆอย่างเต็มที่ แต่เมื่อการเปลี่ยนรูปเฉือนมีค่ามากขึ้นแท่งเหล็กก็จะเริ่มต้นคอนกรีตที่อยู่รอบๆและทำให้สติฟเนสแรงเฉือนจากทางพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (dowel action) มีค่าเพิ่มขึ้น แบบจำลองพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (dowel action) แสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$G_{dow} = 2.0 \left[\frac{1}{G_{dow}^1} + \frac{1}{G_{dow}^2} \right]^{-1} \quad (9)$$

โดยที่

G_{dow}^1 เป็นสติฟเนสแรงเฉือนจากพฤติกรรมแบบการใส่สลักในทิศทางแตกร้าว 1

G_{dow}^2 เป็นสติฟเนสแรงเฉือนจากพฤติกรรมแบบการใส่สลักในทิศทางแตกร้าว 2

แบบจำลองนี้ได้รวมลักษณะสำคัญ 2 ประการ คือ สติฟเนสแรงเฉือนจากพฤติกรรมแบบการไถสลัก (dowel action) เพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น และ ความสัมพันธ์ของพฤติกรรมแบบการไถสลัก (dowel action) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมเป็นเส้นตรง จากพฤติกรรมแบบการไถสลัก (dowel action) ในทิศทางรอยแตกร้าว l แสดงโดยสมการที่ (10)

$$G_{dow}^l = G_{\min} \quad : |\gamma| < |\gamma_i|$$

$$G_{dow}^l = f(\theta_i, \Omega, r_1, r_2) \left| \frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma_n} \right|^n \quad : |\gamma_i| \leq |\gamma| < |\gamma_n + \gamma_i| \quad (10)$$

$$G_{dow}^l = f(\theta_i, \Omega, r_1, r_2) \quad : |\gamma_n + \gamma_i| \leq |\gamma|$$

โดยที่

γ = ความเครียดเฉือน

γ_i = พารามิเตอร์ที่รวมผลของการย้อนกลับของแรงเฉือน ซึ่งจะนิยามในหัวข้อต่อไป (ผลกระทบของแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร)

γ_n, n = ค่าคงที่ที่กำหนด

$f(\theta_i, \Omega, r_1, r_2)$ = ฟังก์ชันที่ใช้แทนผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และทิศทางการเสริมเหล็ก

θ_i = มุมของรอยแตกร้าวในทิศทาง l

Ω = มุมของเหล็กเสริม

$r_1 = \frac{\rho_{s1}}{\phi_{s1}}$ = อัตราส่วนเหล็กเสริมในทิศทาง 1 ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (in.)

$r_2 = \frac{\rho_{s2}}{\phi_{s2}}$ = อัตราส่วนเหล็กเสริมในทิศทาง 2 ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (in.)

และ $f(\theta_i, \Omega, r_1, r_2)$ มีค่าดังสมการที่ (11)

$$f(\theta_i, \Omega, r_1, r_2) = (r_1 |\sin(\Omega - \theta_i)| + r_2 |\cos(\Omega - \theta_i)|) \mu_2 G_{conc} \quad (11)$$

โดยที่

μ_2 = พารามิเตอร์ที่ใช้สัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสของพฤติกรรมแบบการไถสลักกับ สติฟเนสแรงเฉือนของคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว

แทนค่าสมการที่ (11) ใน สมการที่ (9) และ สมการที่ (10) สำหรับทิศทางแตกร้าวทั้งสอง ($l=1,2$) จะได้

$$G_{dow} = G_{\min} \quad : |\gamma| < |\gamma_i| \quad (12)$$

$$G_{dow} = 2 \cdot \left(\frac{[r_1^2 + r_2^2]s_c + r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(s + c)} \right) \mu_2 G_{conc} \left| \frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma_n} \right|^n \quad : |\gamma_i| \leq |\gamma| < |\gamma_n + \gamma_i|$$

$$G_{dow} = 2 \cdot \left(\frac{[r_1^2 + r_2^2]sc + r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(s + c)} \right) \mu_2 G_{conc} \quad ; \quad |\gamma_n + \gamma_i| \leq |\gamma|$$

โดยที่

$$s = |\sin(\Omega - \theta_1)|$$

$$c = |\cos(\Omega - \theta_1)|$$

ดังนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในพฤติกรรมนี้ 3 ตัว คือ μ_2 , γ_n และ n

2.4.2.3 ผลของแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร (Effect of cyclic loading)

แบบจำลองการถ่ายเทแรงเฉือนภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร จะมีพื้นฐานมากจากการสังเกตจากผลการทดลองและจากแบบจำลองที่ได้เสนอโดยผู้วิจัยอื่นๆ พิจารณารูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือนประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. ส่วนเพิ่มแรงกระทำ (loading region, B-C และ E-F) : ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน และความเครียดเฉือนขึ้นอยู่กับสตีเฟนสแรงเฉือน (G) ณ ปัจจุบัน ซึ่งเป็นผลรวมของสตีเฟนสแรงเฉือนจากการถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัสและสตีเฟนสแรงเฉือนจากพฤติกรรมแบบการใส่สลัก (dowel action)

2. ส่วนลดแรงกระทำ (unloading region, C-D และ F-G) : ในส่วนนี้จะป็นเส้นที่เริ่มจากจุดที่ความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้นเริ่มที่จะกลับทิศ โดยจะมีค่าสตีเฟนสแรงเฉือนคงที่เท่ากับ G_{uni} ส่วนลดแรงกระทำจะสิ้นสุดเมื่อตัดกับแกนความเครียด (จุด A, D และ G)

3. ส่วนเลื่อนหลุด (slip region, D-E และ A-B) : ส่วนนี้จะป็นเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดที่ส่วนลดแรงกระทำตัดกับแกนความเครียด และจุด $(\beta \cdot \gamma_{max}^+, \tau_{slip})$ และ จุด $(\beta \cdot \gamma_{max}^-, -\tau_{slip})$ ซึ่งจะขึ้นกับทิศทางของแรงกระทำ

โดยที่ γ_{max}^+ คือ ความเครียดเฉือนมากที่สุดที่เป็นบวกในครั้งก่อนซึ่งเส้นโค้งลดแรงกระทำในครั้งก่อนตัด กับแกนความเครียด (จุด D)

γ_{max}^- คือ ความเครียดเฉือนมากที่สุดที่เป็นลบในครั้งก่อนซึ่งเส้นโค้งลดแรงกระทำในครั้งก่อนตัด กับแกนความเครียด (จุด A)

จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดผลของแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรมี 2 ตัว คือ β และ τ_{slip} ซึ่งใช้กำหนดจุด $(\beta \cdot \gamma_{max}^+, \tau_{slip})$ และ จุด $(\beta \cdot \gamma_{max}^-, -\tau_{slip})$

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต ทั้งฟังก์ชันหน่วยแรงตั้งฉากกับรอยแตกกว้าง (normal stress function) และ ฟังก์ชันหน่วยแรงเฉือน (shear stress function) แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

2.5 แบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริม (Material model for reinforcing steel)

แบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริมจะนิยามความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในแนวแกนของเหล็กเสริมซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำด้านเดียว (Monotonic loading Curve)

รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรมีลักษณะดังรูปที่ 2.15 ซึ่งพบวก่อนเกิดการให้แรงกระทำกลับข้าง (load reversal) ครั้งแรกความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด จะมีลักษณะเหมือนพฤติกรรมรับแรงกระทำทางเดียว (monotonic curve) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.16 คือ

1. ช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear region) มีลักษณะเป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) โดยเริ่มตั้งแต่ความเครียดเป็นศูนย์ จนกระทั่งถึงความเครียดเมื่อเริ่มมีการครากเกิดขึ้น (ϵ_y) อันเป็นจุดสิ้นสุดขีดจำกัดยืดหยุ่นของเหล็ก ตำแหน่งนี้หน่วยแรงจะเท่ากับหน่วยแรงคราก
2. ช่วงที่เกิดการคราก (yield plateau) มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความชันเท่ากับศูนย์ หน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงคราก โดยเริ่มตั้งแต่ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการคราก ไปจนถึงความเครียดเมื่อเริ่มเกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (ϵ_{sh}) ซึ่งปกติมีค่าประมาณ 10-12 เท่าของความเครียดที่จุดคราก
3. ช่วงการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (strain hardening) มีลักษณะเป็นส่วนของเส้นโค้ง หน่วยแรงจะเพิ่มขึ้นจากหน่วยแรงครากจนถึงตำแหน่งสูงสุดที่จุดกำลังประลัย (ultimate strength, ϵ_{uh}) ก่อนที่แรงดึงจะลดลงและเหล็กเสริมเกิดคอคอด (necking) และขาดออกจากกัน

2.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

จากรูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรภายหลังเกิดการให้แรงกระทำกลับข้าง พบว่าค่าสตีเฟนเนสของเหล็กเมื่อเริ่มให้แรงกระทำลดลง (unloading) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear region) ของเหล็กเสริมหลังจากนั้นพฤติกรรมไม่เชิงเส้น (nonlinearity) โดยที่หน่วยแรงครากจะไม่ปรากฏชัดเจนและมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งพฤติกรรมความไม่เชิงเส้นนี้เรียกว่าผลของเบาซิงเกอร์ (Bauschinger effects) พฤติกรรมการรับแรงแบบเป็นวัฏจักรของเหล็กเสริมในรอบของแรงกระทำต่อๆมามีลักษณะเดียวกันกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายหลังเกิดการให้แรงกระทำกลับข้างครั้งแรกโดยจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีค่าโมดูลัสเท่ากับโมดูลัสเริ่มต้นของเหล็กเสริม และส่วนที่เป็นผลของเบาซิงเกอร์ (Bauschinger effects) ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้จะขึ้นกับความเครียดที่เกิดขึ้นก่อนหน้าอีกด้วย

2.5.3 แบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

แบบจำลองของเหล็กเสริมที่ใช้จะต้องสามารถแทนลักษณะที่สำคัญ 2 ประการของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ได้แก่ พฤติกรรมเชิงเส้น ซึ่งมีความชันเท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม และ พฤติกรรมการอ่อนตัวลง (softening) ในช่วงที่ความเครียดเพิ่มขึ้น ซึ่งได้ใช้สมการของ Ramberg-Osgood มาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริม

2.5.3.1 แบบจำลอง Ramberg-Osgood

เดิมที่เดียวสมการ Ramberg-Osgood ไม่ได้มีจุดประสงค์เพื่อนำมาใช้กับพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรของเหล็กเสริม แต่ด้วยคุณสมบัติของ สมการ Ramberg-Osgood ซึ่งสามารถอธิบาย พฤติกรรมเชิงเส้น และผลของเบ้าชิงเกอร์ (Bauschinger effects) อันเป็นลักษณะสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรได้เป็นอย่างดี จึงได้มีการนำสมการนี้มาใช้เป็นแบบจำลองของวัสดุเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรอย่างแพร่หลาย รูปแบบของสมการ Ramberg-Osgood ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$\varepsilon - \varepsilon_i = \sigma - \sigma_i \left[1 + \left| \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_0 - \sigma_i} \right|^{\alpha-1} \right] \quad (13)$$

โดยที่

- ε_i, σ_i คือ ความเครียดและหน่วยแรง ณ ตำแหน่งเริ่มต้น
- σ_0, α คือ ตัวแปรซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของสมการ
- E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของเหล็กเสริม

จากสมการข้างต้นพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมการได้แก่คุณสมบัติเริ่มต้นของเหล็กเสริม (E_s, σ_0), σ_0 และ α ซึ่งยังไม่ได้มีการกำหนดค่า แต่เนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรนั้นมีผลอันเนื่องมาจากความเครียดที่เกิดขึ้นก่อนหน้า (previous strain history) รวมอยู่ด้วย ดังนั้นการกำหนดค่า σ_0 และ α เพื่อให้สมการ Ramberg-Osgood ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบ จึงต้องคำนึงถึงความเครียดที่เกิดขึ้นก่อนหน้าด้วย จากงานวิจัยของ C.Sittipunt และ S.L.Wood [2] ได้มีการเสนอแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริมโดยใช้สมการ Ramberg-Osgood เป็นพื้นฐานเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงเฉือน โดยแบ่งแบบจำลองออกเป็น ช่วงต่างๆ ซึ่งมีรูปแบบของแบบจำลองดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อรับแรงกระทำด้านเดียว

(Monotonic curve)

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อรับแรงกระทำด้านเดียว ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 คือ ช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น (เส้น A-B) ,ช่วงที่เกิดการคราก (เส้น B-C) สองส่วนแรกนี้มีพฤติกรรมแบบฮิสเทติก-พลาสติกของเหล็กเสริม สามารถแทนได้ด้วยสมการเส้นตรงโดยกำหนดให้ช่วงแรกมีความชันเท่ากับโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมจนกระทั่งค่าหน่วยแรงมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก และในช่วงที่สองกำหนดให้มีความชันเล็กน้อยเท่ากับ $0.0001E_s$ จนกระทั่งความเครียดมีค่าเท่ากับค่าความเครียดเมื่อเริ่มเกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (ϵ_{sh}) ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในช่วงที่สาม (strain hardening region) จะแสดงได้โดยสมการ Ramberg-Osgood ดังแสดง

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_{om}} = \frac{\sigma}{\sigma_{om}} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_{om}} \right)^m \quad (14)$$

โดยที่

$$\epsilon_{om} = \frac{\sigma_{om}}{E_s}$$

$\sigma_{om} \cdot m$ คือ ตัวแปรซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของสมการ

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

สำหรับค่า σ_{om} และ m สามารถหาได้จากผลการทดสอบ หรือจากค่าที่ Aktan และคณะ [11] ได้เสนอไว้ โดยให้ค่า m เท่ากับ 4.30 และค่า σ_{om} มีค่าเท่ากับ $0.70 \sigma_y$ (σ_y เป็นค่าหน่วยแรงครากของเหล็กเสริม) ซึ่งได้จากผลการทดสอบเหล็กเสริมซึ่งมีกำลังครากเท่ากับ 60 ksi มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 29,000 ksi

2. รอบความสัมพันธ์หลัก (Envelope curve)]

รอบของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดซึ่งใช้อธิบายรอบความสัมพันธ์หลัก (envelope curve) แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ซึ่งในรอบหนึ่งๆ (เส้น A-B-C) จะประกอบไปด้วย ครึ่งรอบจากแรงดึง (เส้น A-B) และ ครึ่งรอบจากแรงอัด (เส้น B-C) ในแต่ละครึ่งรอบของความสัมพันธ์จะเริ่มต้นที่ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนทิศทางของหน่วยแรงและความเครียด คือ ต่างมีจุดกำเนิดของตนเอง (ϵ, σ) ของในแต่ละครึ่งรอบความสัมพันธ์ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้วิธีการกำหนดค่า σ_0 และ α สามารถทำได้สองวิธี โดยพิจารณาจากคุณสมบัติเริ่มต้น (ϵ, σ) ของแต่ละครึ่งรอบความสัมพันธ์เป็นหลัก ดังนี้

- แบบที่ 1 เมื่อ $|\sigma_i| \geq |\sigma_{\max}|$

เมื่อจุดเริ่มต้นของครึ่งรอบความสั่นพ้องนั้น เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งซึ่งมีค่าหน่วยแรงเริ่มต้นมากกว่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เคยเกิดขึ้น หรือ เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งซึ่งมีค่าหน่วยแรงเริ่มต้นน้อยกว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดที่เคยเกิดขึ้น ทั้งนี้จะพิจารณาให้หน่วยแรงดึงมีค่าเป็นบวกและหน่วยแรงอัดมีค่าเป็นลบ ค่า σ_0 และ α หาได้จากสมการที่ (15)

$$\sigma_0 = A \cdot \sigma_y + B(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (15)$$

สำหรับครึ่งรอบความสั่นพ้องจากด้านรับแรงอัด

$$\text{กำหนดให้ } \alpha = 6 \quad A = 0.7938 \quad B = 0.55723$$

สำหรับครึ่งรอบความสั่นพ้องจากด้านรับแรงดึง

$$\text{กำหนดให้ } \alpha = 7 \quad A = 0.7735 \quad B = 0.47989$$

โดยที่

σ_{\max} คือ ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของครึ่งรอบนั้น

σ_{\min} คือ ค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของครึ่งรอบนั้น

σ_y คือ ค่าหน่วยแรงคราก

สมการและค่าคงที่ข้างต้น Aktan และคณะ [11] ได้เป็นผู้เสนอขึ้นโดยที่ค่าคงที่ A และ B เป็นค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์กำลังสองน้อยสุด (least square analysis) จากผลการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร วิธีการนี้ใช้สำหรับเหล็กเสริมที่ต้องรับแรงกระทำแบบสมมาตรในแต่ละรอบของความสั่นพ้อง (ความเครียดที่เกิดขึ้นในครึ่งรอบจากแรงดึงมีค่าเท่ากับความเครียดที่เกิดขึ้นในครึ่งรอบจากแรงอัด) ซึ่งพบว่าค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของความสั่นพ้องระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

- แบบที่ 2 เมื่อ $|\sigma_i| < |\sigma_{\max}|$

กรณีที่รอบของความสั่นพ้องระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเกิดขึ้นอย่างไม่สมมาตร หรือ ความเครียดที่ใช้ในการย่นแรงมีค่าน้อยกว่าครึ่งรอบก่อนหน้า การใช้ค่า ที่หาได้จากวิธีการแบบที่ 1 ให้ผลที่มีความผิดพลาดมากทำให้ต้องหาวิธีการอื่นในการกำหนดค่า σ_0 และ α สำหรับกรณีนี้ C.Sittipunt [2] ได้สังเกตจากผลการทดสอบของ Aktan และคณะ [11] จึงได้เสนอวิธีการขึ้นดังนี้

สำหรับครึ่งรอบความสั่นพ้องซึ่งมีค่าหน่วยแรงเริ่มต้นน้อยกว่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน เส้นความสั่นพ้องระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในครึ่งรอบนั้น จะรวมเข้าเป็นเส้นเดียวกันกับเส้นความสั่นพ้องระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของครึ่งรอบก่อนหน้าที่มีทิศทางเดียวกัน จากข้อสังเกตดังกล่าว ทำให้ได้แนวความคิดเรื่องตำแหน่งที่เป็นจุดร่วม (common point) ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 สำหรับครึ่งรอบของความสั่นพ้องระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจากแรงดึง (เส้น C-E) ตำแหน่งที่เป็นจุดร่วม

คือจุด D ซึ่งเป็นเป็นตำแหน่งที่เส้นความสัมพันธ์ของเครื่องรอบ C-E รวมเป็นเส้นเดียวกันกับเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดก่อนหน้า (เส้น A-B) โดยค่าความเครียดที่จุด D กำหนดให้เท่ากับ $\varepsilon_c - 0.01$ (เมื่อ ε_c เป็นความเครียดที่จุดจบของเครื่องรอบก่อนหน้า A-B) และในทำนองเดียวกันตำแหน่งตำแหน่งที่เป็นจุดร่วม สำหรับเครื่องรอบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจากแรงอัด (เส้น H-J) คือ จุด I ซึ่งมีค่าความเครียดเท่ากับ $\varepsilon_c + 0.01$ (เมื่อ ε_c เป็นความเครียดที่จุดจบของเครื่องรอบก่อนหน้า F-G) สำหรับความเครียดที่เพิ่มขึ้น (± 0.01) ซึ่งใช้ในการกำหนดตำแหน่งตำแหน่งที่เป็นจุดร่วมนั้น ได้จากผลการทดสอบและการทดลองปรับเปลี่ยนค่าความเครียดจนได้ค่าที่เสนอนี้

จากแนวคิดเรื่องตำแหน่งที่เป็นจุดร่วมค่า σ_0 และ α จำเป็นต้องถูกคำนวณขึ้นเพื่อที่ทำให้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเครื่องรอบที่มีหน่วยแรงเริ่มต้นน้อยกว่าหน่วยแรงสูงสุดที่เคยเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันที่ตำแหน่งที่เป็นจุดร่วม โดยกำหนดให้ตำแหน่งซึ่งเส้นความสัมพันธ์ทั้งสองมารวมกันนี้มีค่าหน่วยแรงและค่าสติฟเนสสัมผัส (tangent stiffness) เท่ากัน ดังนั้นค่า σ_0 และ α สำหรับเครื่องรอบความสัมพันธ์ที่มีหน่วยแรงเริ่มต้นน้อยกว่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน สามารถหาได้จากสมการที่ (16)

$$\alpha = \left(\frac{E_s}{E_t} - 1 \right) \left| \frac{k_2}{k_1 E_s - k_2} \right| \quad (16)$$

$$\sigma_0 = \frac{|k_2|^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}}{|k_1 E_s - k_2|^{\frac{1}{\alpha-1}}}$$

โดยที่

$$k_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_i \text{ และ } k_2 = \sigma_c - \sigma_i$$

ε_i, σ_i คือ ความเครียดและหน่วยแรงเริ่มต้นของเครื่องรอบความสัมพันธ์ใดๆ

ε_c, σ_c คือ ความเครียดและหน่วยแรงที่ตำแหน่งที่เป็นจุดร่วม

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มแรก (initial modulus of elasticity) ของเหล็กเสริม

E_t คือ ค่าสติฟเนสสัมผัส (tangent stiffness) ที่ตำแหน่งที่เป็นจุดร่วม

นอกจากวิธีการทั้งสองแบบ พบว่าบางครั้งค่า σ_0 และ α ที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้ให้ค่าหน่วยแรงมากกว่าค่าหน่วยแรงดิ่งประลัย หรือ หน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กเสริม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการเพื่อปรับลดค่าหน่วยแรงลงให้อยู่ในข้อจำกัดของวิธีทั้งสองแบบ และโดยวิธีการสังเกตและการนำแนวคิดเรื่องตำแหน่งที่เป็นจุดร่วมมาใช้ทำให้ได้แนวคิดเรื่องตำแหน่งอัลติเมต (ultimate point) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ในรูปที่ 2.18(ก) แสดงตำแหน่งอัลติเมตสำหรับเครื่องรอบความสัมพันธ์จากด้านรับแรงดิ่ง (เส้น C-E) จุด E เป็นตำแหน่งอัลติเมตซึ่งกำหนดให้มีความเครียดเท่ากับ $\varepsilon_c - 0.01$ (เมื่อ ε_c เป็นความเครียดเริ่มต้นของเครื่องรอบความสัมพันธ์ C-E) ส่วนตำแหน่งอัลติเมตของเครื่องรอบความสัมพันธ์จากแรงอัด (เส้น H-J) คือจุด J ในรูปที่ 2.18(ข) ซึ่งมี

ความเครียดเท่ากับ $\varepsilon_H + 0.09$ (เมื่อ ε_H เป็นความเครียดเริ่มต้นของครึ่งรอบความสั้มนพันธ์ H-J) ซึ่งค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น (± 0.09) ซึ่งใช้กำหนดตำแหน่งอัลติเมตนั้น ได้จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าความเครียดจนได้ค่าที่เสถียร

ดังนั้นเพื่อที่จะปรับค่าหน่วยแรงที่มากเกินไปกว่าค่าหน่วยแรงประลัยของเหล็กเสริม โดยนำสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า σ_0 และ α ในวิธีการแบบที่ 2 มาประยุกต์ใช้กับกรณีนี้จึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขที่ตำแหน่งอัลติเมตเพิ่มเติม ได้แก่ ค่าหน่วยแรงที่ตำแหน่งอัลติเมตกำหนดให้เท่ากับหน่วยแรงประลัย และค่าสตีฟเนสสัมผัสกำหนดให้เท่ากับ $0.0001E_s$ จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้สามารถหาค่า σ_0 และ α สำหรับกรณีที่หน่วยแรงมีค่าเกินหน่วยแรงประลัยที่ตำแหน่งอัลติเมตได้โดยสมการที่ (17)

$$\alpha = \left(\frac{E_s}{E_t} - 1 \right) \left| \frac{k_2}{k_1 E_s - k_2} \right| \quad (17)$$

$$\sigma_0 = \frac{|k_2|^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}}{|k_1 E_s - k_2|^{\frac{1}{\alpha-1}}}$$

โดยที่

$$k_1 = \varepsilon_{ult} - \varepsilon_i \text{ และ } k_2 = \sigma_{ult} - \sigma_i$$

ε_i, σ_i คือ ความเครียดและหน่วยแรงเริ่มต้นของครึ่งรอบความสั้มนพันธ์ใดๆ

$\varepsilon_{ult}, \sigma_{ult}$ คือ ความเครียด และหน่วยแรงที่จุดร่วม (common point)

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มแรก (initial modulus of elasticity) ของเหล็กเสริม

E_t คือ ค่าสตีฟเนสสัมผัส (tangent stiffness) ที่จุดร่วม (common point) เท่ากับ $0.0001 E_s$

3. รอบของความสั้มนพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงที่เกิดการคราก (Load reversals from yield plateau)

ในกรณีของครึ่งรอบความสั้มนพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดที่เกิดขึ้นต่อจากครึ่งรอบความสั้มนพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่เกิดการคราก Popov [22] และ Ma และคณะ [23] สังเกตพบในผลการทดสอบ จึงได้ทำการเสนอแบบจำลองวัสดุสำหรับกรณีเช่นนี้ไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 รอบของความสั้มนพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มีจุดเริ่มต้นในช่วงที่เกิดการคราก (yield plateau) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ รอบที่มีวงรอบเล็ก (เส้น A-B-C) และ รอบที่มีวงรอบใหญ่ (เส้น D-E-F) สำหรับครึ่งรอบของการย้อนแรงในวงรอบเล็ก (เส้น B-C) พบว่าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่าสตีฟเนสเท่ากับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นของเหล็กเสริม (E_s) และจะกลับไปรวมกับช่วงที่เกิดการคราก (yield plateau) และแสดงพฤติกรรมเหมือนเมื่อรับแรงทางเดียวได้ต่อไป สำหรับครึ่งรอบของการย้อนแรงในวงรอบใหญ่ (เส้น E-F) จะแสดงพฤติกรรม Bauschinger effect ขึ้น ช่วงที่เกิดการครากจะหายไป จากข้อสังเกตนี้ทำให้

มีการเสนอวิธีการสำหรับรอบของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่เกิดการคราก ดังนี้

$$\text{- กรณี } \Delta \varepsilon'_s < 0.50 \cdot |\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y|$$

ในรูปที่ 2.20(ก) สำหรับในรอบของความสัมพันธ์ที่มีวงรอบเล็ก (เส้น A-B-C-D) ความกว้างในวงรอบ ($\Delta \varepsilon'_s$) น้อยกว่า $0.50 \cdot |\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y|$ ครึ่งรอบของการย้อนแรง (เส้น B-C-D) จะแสดงพฤติกรรมแบบอิลาสติก-พลาสติกเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อรับแรงกระทำทางเดียว (monotonic curve) และเมื่อแรงกระทำยังคงดำเนินต่อไปเหล็กเสริมจะแสดงพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (strain hardening) เหมือนกับที่เกิดขึ้นเมื่อเหล็กเสริมรับแรงกระทำเพียงด้านเดียว

$$\text{- กรณี } \Delta \varepsilon'_s \geq 0.50 \cdot |\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y|$$

ในรูปที่ 2.20(ข) รอบความสัมพันธ์ที่มีวงรอบใหญ่ (เส้น E-F-G) ความกว้างในวงรอบ ($\Delta \varepsilon'_s$) มากกว่า $0.50 \cdot |\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y|$ (เส้น F-G) จะไม่แสดงพฤติกรรมอิลาสติก-พลาสติกเช่นในกรณีวงรอบเล็ก ค่าสถิติในเสของเหล็กเสริมจะลดลงก่อนที่หน่วยแรงจะถึงจุดคราก โดยที่ครึ่งรอบของการย้อนแรงนี้จะรวมเข้าเป็นเส้นเดียวกับเส้นความสัมพันธ์ในช่วงการแข็งตัวเพิ่มขึ้นใหม่ (เส้นประ E-G) ซึ่งเป็นเส้นแสดงความสัมพันธ์ช่วงการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมรับแรงดึงกระทำเพียงด้านเดียว (monotonic strain-hardening curve) ที่ย้ายจุดเริ่มต้นเดิม ε_{sh} มาอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มย้อนแรง (จุด E) บนช่วงที่เกิดการคราก สำหรับจุดที่ทั้งสองเส้นความสัมพันธ์จะรวมเป็นเส้นเดียวกันนั้น คือ จุด G ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เป็นจุดร่วมของรอบความสัมพันธ์ E-F-G และมีค่าความเครียดที่ตำแหน่ง G เท่ากับ $\varepsilon_F + 0.01$

ข้อดีของแบบจำลอง Ramberg-Osgood ที่เสนอโดย C.Sittipunt [2] คือสามารถใช้ได้กับเหล็กเสริมโดยทั่วไป เนื่องจากค่าคงที่ที่ใช้กับแบบจำลองนี้ (α, σ_0) สามารถหาได้จากการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ทำกันโดยทั่วไป สำหรับค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริมแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

2.6 ข้อกำหนดสำหรับการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก และการดุ้งของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมที่อยู่ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการดุ้ง (buckling) ภายหลังจากที่คอนกรีตผิวนอกได้หลุดล่อน (spalling) ซึ่งพฤติกรรมทั้งสองอย่างนี้จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน การหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอกจะเกิดขึ้นก่อน และหลังจากนั้นการดุ้ง (buckling) ของเหล็กเสริมสามารถเกิดได้ในรอบแรงกระทำต่อมา โดยการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอกจะเกิดเมื่อคอนกรีตสูญเสียความสามารถในการรับแรงอัดเนื่องจากแรงอัดในแนวแกน และ จากการดันของเหล็กเสริมที่อยู่ติดกันซึ่งเริ่มเกิดการดุ้ง (Dhakal [24]) นอกจากนี้ Park และ คณะ [25] สังเกตจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผิวนอกจะไม่หลุดล่อนทันทีภายหลังจากได้แตกหักแล้ว (หน่วยแรงอัดมีค่าถึง f'_c) แต่จะเริ่มหลุดร่อนภายหลังจากเกิดหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดสลับไปมา 2-3 รอบ

2.6.1 ข้อกำหนดสำหรับการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก

จากหลักการที่กล่าวมา C.Sittipunt [2] ได้เสนอข้อกำหนดซึ่งให้ผลที่น่าพอใจ โดยจะกำหนดให้คอนกรีตผิวนอกเกิดการหลุดล่อนเมื่อ

1. คอนกรีตผิวนอกต้องเกิดการแตกหัก โดยหน่วยแรงอัดมีค่าถึง f'_c

2. ภายหลังจากที่คอนกรีตผิวนอกเกิดการแตกหักแล้ว จะต้องหน่วยแรงดึง และ หน่วยแรงอัดสลับไปมาอย่างน้อย 3 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ตัวอย่างเช่น เมื่อความเครียดของคอนกรีตมีค่าเกินค่าความเครียดอัดที่กำหนด และเกิดการย่นแรงซึ่งทำให้ความเครียดอัดเปลี่ยนไปเป็นความเครียดดึงจนกระทั่งเกินค่าความเครียดดึงที่กำหนด หลังจากนั้นเกิดการย่นแรงขึ้นอีกครั้ง และความเครียดเปลี่ยนจากความเครียดดึงไปเป็นความเครียดอัดจนกระทั่งมีค่าถึงความเครียดอัดที่กำหนดอีกครั้ง จะกำหนดให้เป็น 1 รอบ

2.6.2 ข้อกำหนดสำหรับการดุ้งของเหล็กเสริม

ภายหลังจากที่คอนกรีตผิวนอกได้หลุดล่อนแล้ว เหล็กเสริมสามารถที่จะเกิดการดุ้งได้อย่างอิสระเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงวิกฤติ σ_{buck} ดังแสดงในสมการ (18)

$$\sigma_{buck} = \frac{\pi^2 E_t}{(4L_e / D)^2} \quad (18)$$

โดยที่

E_t คือ สติฟเนสสัมพัทธ์ของเหล็กเสริม

L_e คือ ความยาวประสิทธิผล

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กเสริม

หลังจากที่เหล็กเสริมได้เกิดการดุ้ง (buckling) แล้วจะกำหนดให้หน่วยแรงมีค่าคงที่เท่ากับ σ_{buck} จนกระทั่งเกิดการย่นแรง ในรูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้สมการของ Ramberg-Osgood ซึ่งได้พิจารณาผลของการดุ้ง (buckling) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น กับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่เสนอโดย Monti และ Nuti [12] ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี นอกจากนี้การเกิดการดุ้ง (buckling) ของเหล็กเสริมยังมีผลทำให้สูญเสียแรงโอบรัดที่ให้กับคอนกรีตภายในเหล็กปลอก (confined concrete) ดังนั้นคอนกรีตภายในเหล็กปลอกซึ่งอยู่ติดกับเหล็กเสริมที่เกิดการดุ้ง (buckling) จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตปกติที่ไม่มีผลของการโอบรัด (unconfined concrete)

วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

นอกจากแบบจำลองวัสดุแล้ว ลักษณะต่างๆของวิธีการวิเคราะห์จะมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ลักษณะดังกล่าวจะประกอบไปด้วยสูตรที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, อัลกอริทึมที่ใช้ในแบบจำลองวัสดุ, แบบจำลองโครงสร้างในไฟไนต์เอลิเมนต์ และอัลกอริทึมในการหาผลเฉลย ซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำ, เสถียรภาพ และการลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง การเลือกวิธีการที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา ดังนั้นความเข้าใจในลักษณะของวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และรูปแบบของปัญหาที่จะวิเคราะห์ จะช่วยให้สามารถเลือกวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างๆได้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับงานวิจัยนี้ โดยที่สูตรที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรม FINITE จะกล่าวถึงเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจะเป็นอัลกอริทึมที่สำคัญที่ใช้ในแบบจำลองวัสดุ และวิธีการในการสร้างแบบจำลองของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ในตอนสุดท้ายจะอธิบายถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาผลเฉลยซึ่งจะใช้กระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ (incremental-iterative algorithms) ในการแก้ปัญหาสมการสมดุลแบบไม่เชิงเส้น

3.1 สูตรที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการใช้สูตรทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิศวกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ขึ้นกับระยะเวลาเคลื่อนที่ สูตรนี้จะมีพื้นฐานเบื้องต้นจากหลักการงานสมมุติ (ระยะเวลาเคลื่อนที่สมมุติ) และเป็นพื้นฐานเบื้องต้นในการใช้ฟังก์ชันการประมาณของระยะเวลาเคลื่อนที่ กับระยะเวลาเคลื่อนที่ของจุดต่อ เพื่อที่จะประมาณระยะเวลาเคลื่อนที่ภายในแต่ละชิ้นส่วน หลักการของระยะเวลาเคลื่อนที่สมมุติ คือ เมื่อวัตถุมีระยะเวลาเคลื่อนที่สมมุติใดๆที่เล็กๆ งานสมมุติภายในทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับงานสมมุติภายนอกทั้งหมด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (19)

$$\int_V \bar{\epsilon}^T \sigma dV = \int_V \bar{U}_b^T f_b dV + \int_S \bar{U}_s^T f_s dS + \sum_i \bar{U}_i^T F_i \quad (19)$$

โดยที่

\bar{U} = ระยะเวลาเคลื่อนที่สมมุติ

$\bar{\epsilon}$ = ความเครียดสมมุติ

f_b, f_s, F_i = แรงวัตถุ, แรงที่ผิว และ แรงกระทำเป็นจุด

$\bar{U}_b, \bar{U}_s, \bar{U}_i$ = ระยะเวลาเคลื่อนที่สมมุติที่สัมพันธ์กับ f_b, f_s, F_i

σ = หน่วยแรงจริงที่เกิดขึ้นที่สัมพันธ์กับความเครียดจริง ϵ

ค่าการเคลื่อนที่ $u^{(m)}$ สำหรับชิ้นส่วน m จะถูกประมาณจากค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อ U โดยการใช้เมตริกซ์ประมาณค่าการเคลื่อนที่ $H^{(m)}$ ดังสมการที่ (20)

$$u^{(m)}(x, y, z) = H^{(m)}(x, y, z)U \quad (20)$$

โดยที่

$u^{(m)}$ = ค่าการเคลื่อนที่สำหรับชิ้นส่วน m

$H^{(m)}$ = เมตริกซ์ประมาณค่าการเคลื่อนที่สำหรับชิ้นส่วน m

U = เวกเตอร์ขององค์ประกอบของค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อทั้งหมด

ในระบบเชิงเส้น ความเครียดในชิ้นส่วน $\epsilon^{(m)}$ หาได้จากค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อโดยใช้เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่ $B^{(m)}$ ดังสมการที่ (21)

$$\epsilon^{(m)} = B^{(m)}U \quad (21)$$

ความเครียดในชิ้นส่วน $\epsilon^{(m)}$ จะสัมพันธ์กับหน่วยแรงในชิ้นส่วน $\sigma^{(m)}$ โดยอาศัยเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด C ดังสมการที่ (22)

$$\sigma^{(m)} = C^{(m)}\epsilon^{(m)} \quad (22)$$

แทนค่าสมการที่ (20), (21) และ (22) สำหรับทั้งค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อที่เกิดขึ้นจริง และค่าการเคลื่อนที่สมมุติ และค่าความเครียด ลงในสมการที่ (19) แล้วทำการจัดรูปจะได้ดังสมการที่ (23)

$$KU = R \quad (23)$$

โดยที่

$$R = R_B + R_S + R_I + R_C \quad (24)$$

เมตริกซ์ K เป็นสติเฟนสเมตริกซ์เมื่อรวมชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

$$K = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} C^{(m)} B^{(m)} dV^{(m)} \quad (25)$$

เวกเตอร์ของแรงกระทำ R_B คือ ค่าของแรงที่จุดต่อเทียบเท่าเนื่องจากแรงวัตถุ

$$R_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} f_B^{(m)} dV^{(m)} \quad (26)$$

เวกเตอร์ของแรงกระทำ R_S คือ ค่าของแรงที่จุดต่อเทียบเท่าเนื่องจากแรงที่ผิว

$$R_S = \sum_m \int_{S^{(m)}} H^{S(m)T} f_B^{S(m)} dS^{(m)} \quad (27)$$

เวกเตอร์ของแรงกระทำ R_I คือ ค่าของแรงที่จุดต่อเทียบเท่าเนื่องจากหน่วยแรงเริ่มต้น

$$R_I = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} \sigma^{(m)} dV^{(m)} \quad (28)$$

เวกเตอร์ของแรงกระทำ R_C คือ เวกเตอร์ของแรงกระทำเป็นจุด

$$R_C = F \quad (29)$$

แม้ว่าสมการที่ (19) จะเป็นจริงทั้งวัสดุแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น แต่สมการที่ (23) จะใช้ได้กับปัญหาของวัสดุเชิงเส้นเท่านั้น เนื่องจากสมการนี้สมมติให้เมตริกซ์ K ไม่ขึ้นกับค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อ เมื่อพิจารณาสมการที่ (25) เมตริกซ์ K จะสามารถหาได้จากเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด C และเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่ B ซึ่งมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อ U ซึ่งสอดคล้องกับเวกเตอร์แรงกระทำ R สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการที่ (23) อย่างไรก็ตามถ้าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้น หรือถ้าหากวัตถุเกิดการเคลื่อนที่หรือความเครียดสูงๆ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด C หรือ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่ B จะไม่คงที่อีกต่อไป และจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุในขณะนั้น ทำให้สตีเฟนสมเมตริกซ์ K และสมการสมดุลที่เกี่ยวข้องเป็นแบบไม่เชิงเส้น ทำให้ต้องใช้กระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ (incremental-iterative algorithms) ในการแก้สมการสมดุล

หลักการของการแก้ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น คือ การหาสถานะสมดุลของวัตถุที่ช่วงเวลา หรือ ช่วงของแรงกระทำ $t + \Delta t$ ที่สอดคล้องกับเวกเตอร์แรงกระทำ ${}^{t+\Delta t}R$ (โดยสมมติว่าทราบสถานะสมดุลที่ช่วงเวลา t แล้ว) สถานะสมดุลที่ช่วงเวลา $t + \Delta t$ จะหาได้เมื่อแรงกระทำที่จุดต่อ ${}^{t+\Delta t}R$ มีค่าเท่ากับแรงกระทำที่จุดต่อเทียบเท่าที่สอดคล้องกับหน่วยแรงของชิ้นส่วน ${}^{t+\Delta t}F$ ดังสมการที่ (30)

$${}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F = 0 \quad (30)$$

โดยที่

$${}^{t+\Delta t}F = {}^tF + \Delta F \quad (31)$$

$${}^tF = \sum_m \int_{V^{(m)}} {}^tB^{(m)T} \sigma^{(m)t} dV^{(m)} \quad (32)$$

ΔF คือ เวกเตอร์ของแรงกระทำที่จุดต่อที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงของชิ้นส่วน ΔF ยังขึ้นอยู่กับค่าการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้น ΔU ซึ่งจะไม่สามารถทราบค่าของ ΔF จนกระทั่งถึงสถานะสมดุลในช่วงเวลา $t + \Delta t$ ดังนั้นค่า ΔF จะถูกประมาณโดยการใช้สถิติเนสเมตริกซ์ที่เวลา t $'K$ ซึ่งทราบค่าแล้ว ดังนี้

$$\Delta F \approx 'KAU \quad (33)$$

แรงกระทำที่จุดต่อทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับหน่วยแรงในชิ้นส่วนที่เวลา $t + \Delta t$ คือ ${}^{++\Delta}F$ สามารถประมาณได้ดังนี้

$${}^{++\Delta}F \approx 'F + 'KAU \quad (34)$$

แทนค่าสมการที่ (34) ลงในสมการที่ (30) จะได้

$$'K \Delta U = {}^{++\Delta}R - 'F \quad (35)$$

จากที่แสดงมาทั้งหมด ค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อที่เวลา $t + \Delta t$ สามารถประมาณได้ดังสมการที่ (36)

$${}^{++\Delta}U \approx 'U + \Delta U \quad (36)$$

สมการที่ (35) เป็นพื้นฐานของสมการสมดุลในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากสมมุติฐานที่ใช้ในสมการที่ (33) ทำให้การประมาณค่าของค่าการเคลื่อนที่ที่จุดต่อในสมการที่ (36) อาจจะมีความคลาดเคลื่อนซึ่งขึ้นกับขนาดของช่วงเวลาที่ใช้ ดังนั้นการหาผลเฉลยของสมการที่ (35) จะถูกทำซ้ำจนกว่าสถานะสมดุลในสมการที่ (30) จะมีความถูกต้องเพียงพอ โดยกระบวนการนี้จะได้อธิบายในหัวข้อ 3.5

โดยทั่วไปการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นสามารถแยกได้เป็นสามแบบที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถรับการเปลี่ยนรูปสัมพัทธ์ที่มีค่ามาก ทำให้การวิเคราะห์ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่จะถูกพิจารณาเพียงความไม่เชิงเส้นทางด้านวัสดุ อย่างไรก็ตามความไม่เชิงเส้นทางด้านรูปร่างจะมีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางประเภท เช่น เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่รับแรงในแนวแกนถ้าหากเกิดค่าการเคลื่อนที่ที่สูงๆ จะเกิดผลของ $P - \Delta$ ซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมการอ่อนตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ถ้าเราไม่พิจารณาความไม่เชิงเส้นทางด้านรูปร่างจะทำให้ไม่สามารถแสดงผลของ $P - \Delta$ ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาทั้งความไม่เชิงเส้นทางด้านวัสดุ และความไม่เชิงเส้นทางด้านรูปร่าง

3.2 โปรแกรม FINITE

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FINITE ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งร่วมพัฒนาโดย The Civil Engineering departments at the University of Illinois at Urbana-Champaign, the University of Kansas, the University of Wyoming และ Carnegie-Mellon University ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งปัญหาไม่เชิงเส้นทางรูปร่าง และปัญหาความไม่เชิงเส้นทางวัสดุ (material nonlinearity) สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้นทางรูปร่างจะใช้วิธี total Lagrangian approach ซึ่งจะคิดหน่วยแรงจาก the second Piola-Kirchhoff stress และ ความเครียดจาก the Green engineering strain นอกจากนั้นในการแก้สมการสมดุลแบบไม่เชิงเส้นจะใช้วิธีการแทนค่าวนซ้ำแบบ นิวตัน-ราฟสัน (incremental-iterative Newton-Raphson)

คุณสมบัติสำคัญซึ่งทำให้โปรแกรม FINITE เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัยนี้คือสามารถที่จะใส่แบบจำลองชิ้นส่วน และ แบบจำลองวัสดุที่พัฒนาขึ้นใหม่ได้อย่างอิสระ ทั้งนี้เนื่องจาก FINITE จะแยกแบบจำลองวัสดุ และแบบจำลองชิ้นส่วนออกจากระบบหลักของโปรแกรม ซึ่งระบบหลักของโปรแกรมจะทำหน้าที่คำนวณสมการสมดุล, จัดการเกี่ยวกับหน่วยความจำและข้อมูล, คำนวณสติเฟนสเมตริกซ์ และแสดงผลลัพธ์ นอกจากนี้ยังจัดเตรียมข้อมูลที่จำเป็น และรับผลการคำนวณจากแบบจำลองชิ้นส่วน และแบบจำลองวัสดุผ่านทางกรังโปรแกรมย่อย (subroutine) ขั้นตอนในการคำนวณสำหรับแต่ละชั้นของแรงกระทำแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งขั้นตอนที่ทำได้ระบบหลักของโปรแกรมจะมีเส้นที่ล้อมรอบ ส่วนขั้นตอนที่เป็นของแบบจำลองชิ้นส่วน และแบบจำลองวัสดุจะล้อมรอบด้วยเส้นประ ดังนั้นผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถที่จะใส่แบบจำลองชิ้นส่วน และแบบจำลองวัสดุที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยไม่จำเป็นต้องแก้ไขระบบหลักซึ่งมีผลทำให้ผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถมุ่งพัฒนาแบบจำลองได้อย่างเต็มที่โดยไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับขั้นตอนต่างๆในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองวัสดุจะใช้ภาษาฟอร์แทรน (Fortran) ในการแก้ไขโดยจะเริ่มจากเขียนและเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบจำลองวัสดุในไฟล์แบบจำลองวัสดุของคอนกรีต (fmm05.for) และของเหล็กเสริม (fmm12.for) โดยก่อนที่จะเริ่มทำการคอมไพล์ (compile) จะต้องตั้งค่าใน Window Linking Switches และ Fortran Compiler Switches โดยค่าต่างๆได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก เมื่อตั้งค่าต่างๆเรียบร้อยแล้วจะทำการคอมไพล์จากไฟล์นามสกุล ".for" ให้เป็นไฟล์นามสกุล ".obj" โดยจะได้ไฟล์มาสองไฟล์คือ fmm05.obj และ fmm12.obj สำหรับคอนกรีต และเหล็กเสริมตามลำดับ หลังจากนั้นจะนำไฟล์ fmm05.obj และ fmm12.obj ไปรวมกับไฟล์นามสกุล ".obj" ของโปรแกรม FINITE ซึ่งมาจากส่วนของระบบหลักนั่นเอง เมื่อนำมารวมกันแล้วจะทำการคอมไพล์จากไฟล์นามสกุล ".obj" ทั้งหมดจะได้เป็นไฟล์ชื่อ "SYSTEM.exe" ซึ่งจะเป็นไฟล์ที่ใช้ในการรันโปรแกรม FINITE

3.3 ข้อกำหนดที่ใช้ในแบบจำลองวัสดุ

นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เหมาะสมแล้ว ลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งของแบบจำลองวัสดุที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องและเสถียรภาพของการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ ข้อกำหนดที่ใช้ในการปรับปรุงค่าของหน่วยแรง และสติฟเนสระหว่างกระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ (iterative procedure) ข้อกำหนดเหล่านี้จะใช้กำหนดเส้นทางของหน่วยแรงในแต่ละจุดอินทิเกรตที่สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความเครียด ข้อกำหนดที่ไม่เหมาะสมจะทำให้หน่วยแรงจะไปตามเส้นทางที่ไม่ถูกต้องซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ไม่ถูกต้องหรือไม่มีเสถียรภาพ ในการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรข้อกำหนดที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดปัญหา 3 รูปแบบ คือ เส้นทางของหน่วยแรงที่ไม่ถูกต้อง, การย้อนกลับของแรงกระทำที่ไม่ถูกต้อง หรือ การไม่ลู่เข้าหาผลเฉลยในกระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.3.1 เส้นทางของหน่วยแรงที่ไม่ถูกต้อง

กระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำเพื่อจะหาผลเฉลยที่อยู่ในสภาวะสมดุลย์สำหรับชั้นของแรงกระทำ A-B ในรูปที่ 3.2 โดยที่ผลเฉลยที่ได้จากกระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำคือเส้นทาง A-1-2-3-4-5-B ขณะที่ผลเฉลยที่แท้จริงคือเส้นทาง A-B ผลเฉลยในช่วงระหว่าง A-B ที่จุด 1,2,3,4,5 จะเป็นผลเฉลยที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากไม่สอดคล้องกับสมการสมดุลย์ทั้งหมดซึ่งจะมีผลต่อทั้งคอนกรีต และเหล็กเสริมเนื่องจากพฤติกรรมของวัสดุทั้งสองอย่างนี้จะขึ้นกับประวัติการรับแรง

ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจะมีอยู่สองวิธีสำหรับการคำนวณค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น และการค่าของหน่วยแรงในแต่ละครั้งของการแทนค่าวนซ้ำ คือ วิธีที่ขึ้นกับเส้นทาง (the path dependent method) และ วิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง (the path independent method) เมื่อจะหาผลเฉลยจากขั้นตอนที่ n ถึงขั้นตอนที่ $n+1$ จะสามารถเขียนความเครียดที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับปรุงค่าของหน่วยแรงสำหรับทั้งสองวิธีได้ดังนี้

$$\text{วิธีที่ขึ้นกับเส้นทาง} \quad \Delta \varepsilon_{PD}^i = \varepsilon_{n+1}^i - \varepsilon_{n+1}^{i-1} \quad (37)$$

$$\text{วิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง} \quad \Delta \varepsilon_{PI}^i = \varepsilon_{n+1}^i - \varepsilon_n \quad (38)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \varepsilon_n &= \text{ความเครียดที่ลู่เข้าจากชั้นของแรงกระทำสุดท้าย } n \\ \varepsilon_{n+1}^i &= \text{ความเครียดที่การแทนค่าวนซ้ำรอบที่ } i \text{ ของชั้นแรงกระทำ } n+1 \\ i &= \text{จำนวนรอบของการแทนค่าวนซ้ำ} \end{aligned}$$

ในวิธีที่ขึ้นกับเส้นทาง หน่วยแรงที่รอบของการแทนค่า i จะคำนวณจากความเครียดที่เพิ่มขึ้น

ที่รอบของการแทนค่า i และ ใช้หน่วยแรงและความเครียดที่ไม่ลู่เข้าที่รอบของการแทนค่า $i-1$ เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น โดยวิธีนี้จะสมมติให้เส้นทางของผลเฉลย (A-1-2-3-4-5-B ในรูปที่ 3.2) ถูกต้อง ดังนั้นพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น หรือความเสียหายที่เกิดขึ้นตามเส้นทางนี้จะมีผลกระทบต่อผลเฉลยของชั้นแรงกระทำนี้ ส่วนในวิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง หน่วยแรงที่รอบของการแทนค่า i จะคำนวณจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดและใช้หน่วยแรงและความเครียดที่ลู่เข้าจากชั้นแรงกระทำสุดท้ายเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น เนื่องจากหน่วยแรงของวิธีการนี้จะถูกคำนวณจากหน่วยแรงและความเครียดที่ลู่เข้าจากชั้นของแรงกระทำสุดท้าย ดังนั้นผลเฉลยที่ลู่เข้าของชั้นแรงกระทำปัจจุบันจะไม่ได้รับผลจากเส้นทางที่ไม่ถูกต้องของกระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ ในทางทฤษฎีวิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางควรจะถูกใช้ในแบบจำลองวัสดุที่เสถียรเนื่องจากจะไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดที่เกิดจากเส้นทางที่ไม่ถูกต้องของกระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ อย่างไรก็ตามในบางกรณี เช่น เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าว การใช้วิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางมักจะทำให้การลู่เข้าสู่ผลเฉลยช้ากว่าการใช้วิธีที่ขึ้นกับเส้นทาง

วิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางจะถูกใช้เป็นข้อกำหนดส่วนใหญ่ในการหาผลเฉลยสำหรับแบบจำลองของคอนกรีตและเหล็กเสริม หน่วยแรงที่ลู่เข้าและความเครียดจากชั้นของแรงกระทำสุดท้ายจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการปรับปรุงค่าของหน่วยแรงในทุกๆ การแทนค่าวนซ้ำของชั้นของแรงกระทำปัจจุบัน อย่างไรก็ตามในชั้นของแรงกระทำที่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตที่จุดอินทิเกรตใดๆ วิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางส่วนมากจะให้อัตราการลู่เข้าช้า หรือบางครั้งอาจให้ผลเฉลยที่ไม่ลู่เข้า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากขณะคอนกรีตที่จุดอินทิเกรตหนึ่งเกิดการแตกร้าวจะปล่อยพลังงานความเครียดออกมาจำนวนมากจะมีผลทำให้คอนกรีตที่จุดอินทิเกรตซึ่งอยู่ติดกันซึ่งได้เกิดการแตกร้าวระหว่างการแทนค่าวนซ้ำในรอบก่อนหน้าก็กลายเป็นคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว เพราะว่าหน่วยแรงดึงของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนสถานะของคอนกรีต ซึ่งการเปลี่ยนสถานะอีกครั้งของคอนกรีตจากแตกร้าวไปเป็นไม่แตกร้าวและในทางกลับกัน ปัญหานี้จะเกิดเมื่อใช้วิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้จะใช้วิธีที่ขึ้นกับเส้นทางสำหรับคอนกรีตโดยหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่การแทนค่าวนซ้ำซึ่งเกิดการแตกร้าวจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการปรับปรุงค่าของหน่วยแรงในการแทนค่าวนซ้ำรอบต่อๆ มา เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่ผิดพลาดซึ่งเป็นผลจากเส้นทางที่ไม่ถูกต้องของผลเฉลยที่ได้จากกระบวนการแทนค่าวนซ้ำ ชั้นของแรงกระทำในการวิเคราะห์จะต้องมีขนาดเล็กเพื่อทำให้เส้นทางของผลเฉลยที่ได้จากกระบวนการแทนค่าวนซ้ำใกล้เคียงกับเส้นทางของผลเฉลยที่แท้จริง

3.3.2 การย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด

ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร การย้อนกลับของแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมจะเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของการให้แรงกระทำ หรือจากการถ่ายแรงกระทำใหม่ (load redistribution) เนื่องจากความไม่เชิงเส้นทางวัสดุ ซึ่งจะมีผลทำให้การย้อนกลับของแรงกระทำสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดประวัติการรับแรงและมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของชิ้นส่วนเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการย้อนกลับของแรงกระทำออกเป็นสองประเภท คือ การย้อนกลับของแรงกระทำที่ถูกต้อง และการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด การย้อนกลับของแรงกระทำที่ถูกต้องคือการย้อนกลับของแรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดมีค่ามาก (เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของ

ความเครียดของชั้นของแรงกระทำก่อนหน้า) โดยจะดำเนินต่อไปในชั้นของแรงกระทำอื่นๆ ซึ่งการย้อนกลับของแรงกระทำที่ถูกต้องจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างมาก ส่วนการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด คือการย้อนกลับของแรงกระทำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดมีค่าน้อย และจะดำเนินต่อไปเพียงแค่นี้หรือสองชั้นของแรงกระทำก่อนที่แรงกระทำจะย้อนกลับมายังทิศทางเดิมอีกครั้ง การย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาดจะไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมากนัก นอกจากปัญหาเชิงตัวเลข เช่น อัตราการลู่เข้าสู่ผลเฉลยช้า หรือ อาจจะไม่ลู่เข้าเลย ดังนั้นข้อกำหนดสำหรับการหาผลเฉลยต้องมีความสามารถที่จะป้องกันการเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด ข้อกำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาดจะเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประสพผลในกรณีวิเคราะห์โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ถ้าหากข้อกำหนดที่ใช้ผ่อนผันมากเกินไปจะทำให้การย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาดเกิดขึ้นซ้ำๆ กันอีกซึ่งจะทำให้ผลเฉลยจะลู่เข้าช้ามากหรืออาจจะไม่ลู่เข้าซึ่งในทางตรงกันข้าม ถ้าหากข้อกำหนดที่ใช้เข้มงวดเกินไป อาจจะไปขัดขวางการย้อนกลับของแรงกระทำที่เกิดขึ้นจริง และทำให้ผลเฉลยเกิดขึ้นในเส้นทางที่ผิดได้

ในแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะมีข้อกำหนดที่ใช้เพื่อป้องกันการเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมด : การเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมดจะถูกใช้ในการประเมินหาการย้อนกลับของแรงกระทำในแต่ละองค์ประกอบของความเครียด ซึ่งได้อธิบายไว้ในวิธีที่ไม่ขึ้นกับเส้นทาง การย้อนกลับทิศทางของการเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมดจะชี้ให้เห็นว่าการย้อนกลับของแรงกระทำจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมดจะถูกคำนวณจากความเครียดที่ลู่เข้าหาผลเฉลยในชั้นของแรงกระทำสุดท้าย ในทางกลับกันการย้อนกลับทิศทางของการเพิ่มขึ้นของความเครียดจากการแทนค่าวนซ้ำ (iterative strain increment) จะไม่สามารถบ่งชี้การย้อนกลับของแรงกระทำได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดจากการแทนค่าวนซ้ำจะคำนวณมาจากความเครียดของการแทนค่าวนซ้ำรอบหลังสุดซึ่งจะไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขของการสมดุล ในแต่ละชั้นของแรงกระทำการเพิ่มขึ้นของความเครียดจากการแทนค่าวนซ้ำสามารถเปลี่ยนทิศทางได้หลายครั้งซึ่งจะขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความเครียดที่ใช้ในการแก้ไขในแต่ละการแทนค่าวนซ้ำ แม้ว่าเมื่อผลเฉลยจะอยู่บนเส้นทางแรงกระทำของเส้นโค้งหน่วยแรงและความเครียด และการเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมดไม่ได้เปลี่ยนทิศทางในการแทนค่าวนซ้ำใดๆก็ตาม

2. จำนวนรอบสูงสุดของการแทนค่าวนซ้ำ : ในแบบจำลองของคอนกรีตและเหล็กเสริม จะยอมให้เกิดการย้อนกลับของแรงกระทำเมื่อเกิดขึ้นภายใน 5 รอบแรกของการแทนค่าวนซ้ำของชั้นของแรงกระทำ ปัจจุบันเท่านั้น การย้อนกลับของแรงกระทำที่เริ่มเกิดภายหลัง 5 รอบแรกของการแทนค่าวนซ้ำจะไม่ยอมให้เกิดขึ้น และจะถูกทำให้เหมือนกับยังอยู่บนเส้นทางของแรงกระทำปัจจุบัน ข้อกำหนดที่ใช้นี้จะอยู่บนพื้นฐานของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำ และการเปลี่ยนแปลงค่าสถิติพลส่วนมากจะเกิดขึ้นขึ้นภายในจำนวนรอบของการแทนค่าวนซ้ำไม่มากนัก ส่วนการย้อนกลับของแรงกระทำที่เกิดขึ้นในรอบหลังๆ เหมือนจะเป็นการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาดดังนั้นจะต้องป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น ถ้า

หากการย้อนกลับของแรงกระทำที่ถูกต้องเกิดขึ้นภายหลัง 5 รอบแรกของการแทนค่าวนซ้ำ ข้อกำหนดที่ใช้นี้จะเลื่อนการเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำเหล่านี้ไปจนกระทั่งถึงขั้นของแรงกระทำถัดมา

3. ขนาดของความเครียดที่เกิดการย้อนกลับทิศทาง : ในแบบจำลองของเหล็กเสริมจะยอมให้เกิดการย้อนกลับของแรงกระทำเมื่อขนาดของการเพิ่มขึ้นของความเครียดที่เกิดการย้อนกลับขณะนั้นมีค่ามากกว่า 25% ของขนาดของการเพิ่มขึ้นของความเครียดทั้งหมดจากขั้นของแรงกระทำก่อนหน้านี้ จุดประสงค์ของข้อกำหนดนี้คือเพื่อถ่วงเวลาจนกระทั่งถึงขั้นของแรงกระทำถัดมาซึ่งเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำที่มีขนาดเล็ก และเหมือนจะเป็นการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด ซึ่งถ้าหากการย้อนกลับของแรงกระทำนี้ถูกต้องขนาดของการเพิ่มขึ้นของความเครียดจะมีค่ามากพอที่จะเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำ ถ้าหากเป็นการย้อนกลับของแรงกระทำที่ผิดพลาด ทิศทางของการเพิ่มขึ้นของความเครียดในขั้นของแรงกระทำถัดมาจะย้อนกลับไปยังทิศทางเดิม และผลเฉลยจะอยู่บนเส้นทางแรงกระทำนี้ต่อไป โดยข้อกำหนดนี้จะใช้สำหรับแบบจำลองของเหล็กเสริมเท่านั้นเพราะว่ารอบเล็กๆของการย้อนแรงกระทำที่ผิดพลาดมักจะทำให้เกิดปัญหาเชิงตัวเลขในการหาค่าตัวแปรสำหรับสมการ Ramberg-Osgood

ข้อกำหนดเหล่านี้มาจากการทดลองในหลายรูปแบบเพื่อปรับปรุงการลู่เข้า และความมีเสถียรภาพของผลเฉลย ซึ่งข้อกำหนดจะขึ้นกับรูปแบบของปัญหาที่ทำการศึกษาเป็นอย่างมากโดยอาจจะต้องการเปลี่ยนแปลงบ้างเมื่อนำไปใช้กับปัญหา หรือการให้แรงกระทำแบบอื่นๆ

3.3.3 ปัญหาในวิธี Newton-Raphson

ในการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาที่มักจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการไม่ลู่เข้าหาผลเฉลยในวิธีการ Newton-Raphson ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อผลเฉลยที่ได้จากการแทนค่าวนซ้ำสลับอยู่ระหว่างสองจุด คือ จุด A และ C ซึ่งอยู่บนเส้นทางของผลเฉลยโดยจะไม่ลู่เข้าสู่ตำแหน่งสมดุลที่จุด E ปัญหานี้จะเกิดขึ้นเมื่อเส้นโค้งของหน่วยแรงและความเครียดสำหรับแบบจำลองของวัสดุเกิดลักษณะอ่อนลงและแข็งขึ้นอีกครั้ง เช่น การเกิดการครากแล้วตามด้วยการแข็งขึ้นของความเครียด (strain hardening) ในเหล็กเสริม เนื่องจากทั้งจุด A หรือ จุด C ในรูปที่ 3.3 จะสอดคล้องกับกับตำแหน่งสมดุล ผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะไม่ลู่เข้าและจะมีค่าสลับไปมาระหว่างสองจุดนี้ต่อไป เพื่อที่จะปรับปรุงอัตราการลู่เข้าให้ดีขึ้นจะต้องใช้วิธีการทางตัวเลขเฉพาะสำหรับทั้งแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และเหล็กเสริม โดยถ้าหากว่าสามารถตรวจพบผลเฉลยที่มีค่าสลับไปมาระหว่างกระบวนการแทนค่าวนซ้ำจะยอมให้เส้นทางของผลเฉลยลู่เข้าที่จุด B และผลเฉลยจะถูกแก้ไขให้เป็นจุด C ในขั้นของแรงกระทำถัดมา แม้ว่าจุด B จะไม่อยู่บนเส้นทางของผลเฉลยที่ต้องการในการเลือกจุด B ระหว่างขั้นของแรงกระทำปัจจุบันจะไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อความถูกต้องของผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากนักเนื่องจากผลเฉลยจะถูกแก้ไขให้เป็นค่าที่ถูกต้องในขั้นของแรงกระทำถัดมา

3.4 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการเลือกแบบจำลองชิ้นส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องแทนลักษณะรูปร่าง, เงื่อนไขขอบเขต และประวัติการรับแรงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการศึกษาได้อย่างถูกต้อง ลักษณะต่างๆของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วย ชนิดของชิ้นส่วน, ขนาดของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element mesh), ขนาดขั้นของแรงกระทำ และ ข้อกำหนดสำหรับแรงกระทำ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.4.1 ชนิดของชิ้นส่วน

สำหรับการเลือกชนิดของชิ้นส่วนที่เหมาะสมจะมีวิธีการสองวิธีที่แตกต่างกัน โดยวิธีแรกจะเลือกใช้จำนวนของชิ้นส่วนไม่มากแต่มีฟังก์ชันการประมาณที่มีอันดับสูง ส่วนในวิธีที่สองจะเลือกใช้ชิ้นส่วนจำนวนมากแต่มีฟังก์ชันการประมาณที่มีอันดับต่ำ เมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรรอยแตกร้าวจะขยายกว้างขึ้นในส่วนล่างของเสา ดังนั้นการกระจายความเครียดในคอนกรีตจะมีความไม่ต่อเนื่องอย่างมาก ความเครียดของคอนกรีตที่แต่ละจุดจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของคอนกรีตที่อยู่บริเวณใกล้เคียงเท่านั้น และเหมือนจะไม่ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่ของคอนกรีตที่อยู่ห่างออกไป ดังนั้นการใช้ชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กหลายชิ้นส่วนซึ่งความเครียดจะคำนวณจากการเคลื่อนที่ของจุดต่อใกล้เคียง 4 จุด จะเหมาะสมสำหรับแทนความไม่ต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ของคอนกรีตที่แตกร้าวมากกว่าการใช้ชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่เพียงไม่กี่ชิ้นส่วนที่มีฟังก์ชันการประมาณที่มีอันดับสูงซึ่งความเครียดจะได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่ของจุดต่อที่อยู่ห่างออกไป

ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยนี้จะใช้ชิ้นส่วนแบบ 4 จุดต่อชนิดไอโซพาราเมตริกซ์เชิงเส้นที่มีกฎการอินทิเกรตแบบ 2×2 สำหรับคอนกรีต และใช้ชิ้นส่วนแบบแท่ง 2 จุดต่อ สำหรับเหล็กเสริม

ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของการใช้ชิ้นส่วนแบบไอโซพาราเมตริกซ์เชิงเส้นที่มีกฎการอินทิเกรตแบบ 2×2 คือ ชิ้นส่วนแบบเชิงเส้นมีลักษณะที่ดี และยังคงมีเสถียรภาพแม้ว่าเกิดการแตกร้าวที่จุดอินทิเกรตทั้ง 4 จุดในชิ้นส่วน สติเฟเนสของชิ้นส่วนเชิงเส้นเส้นที่มีกฎการอินทิเกรตแบบ 2×2 เมื่อแตกร้าวจะมีรูปแบบพลังงานเป็นศูนย์ (zero energy mode) อยู่สามรูปแบบ ซึ่งทั้งหมดจะแสดงถึงการเคลื่อนที่แบบแข็งเกร็ง (rigid body motion) ที่ต้องการของชิ้นส่วน สำหรับชิ้นส่วนชนิดอื่นมักจะมีรูปแบบพลังงานเป็นศูนย์อื่นอีกเมื่อเกิดการแตกร้าวซึ่งรูปแบบพลังงานเป็นศูนย์อื่นๆที่เพิ่มขึ้นมาจะไม่ได้แสดงถึงการเคลื่อนที่แบบแข็งเกร็งซึ่งจะยอมให้ชิ้นส่วนเปลี่ยนรูปโดยไม่เกิดความเครียด ดังนั้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างซึ่งไม่สามารถทำนายได้ของชิ้นส่วน ชิ้นส่วนชนิดอื่นที่มีเสถียรภาพพอกับชิ้นส่วนเชิงเส้นที่มีกฎการอินทิเกรตแบบ 2×2 คือชิ้นส่วนแบบควอดราติก (quadratic element) ที่มีกฎการอินทิเกรตแบบ 3×3 อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนชนิดนี้ต้องการความสามารถในการคำนวณมากกว่าชิ้นส่วนเชิงเส้นเป็นอย่างมาก และยังไม่ได้ให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำไปกว่าชิ้นส่วนแบบเชิงเส้น ดังนั้นชิ้นส่วนเชิงเส้นจะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

เมื่อเลือกชนิดของชิ้นส่วนสำหรับคอนกรีตได้แล้ว การเลือกชิ้นส่วนสำหรับเหล็กเสริมก็จะสามารถเลือกได้อย่างตรงไปตรงมา ซึ่งเลือกใช้ชิ้นส่วนแบบแท่ง 2 จุดต่อ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนชนิดนี้จะสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ตามขอบของชิ้นส่วนเชิงเส้นแบบ 4 จุดต่อที่ใช้สำหรับคอนกรีต และชิ้นส่วนแบบแท่ง 2 จุดต่อยังสามารถใช้การแบ่งโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element mesh) เหมือนกับชิ้นส่วนคอนกรีตโดยไม่ต้องสร้างจุดต่อเพิ่มเติม

3.4.2 ขนาดของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element mesh)

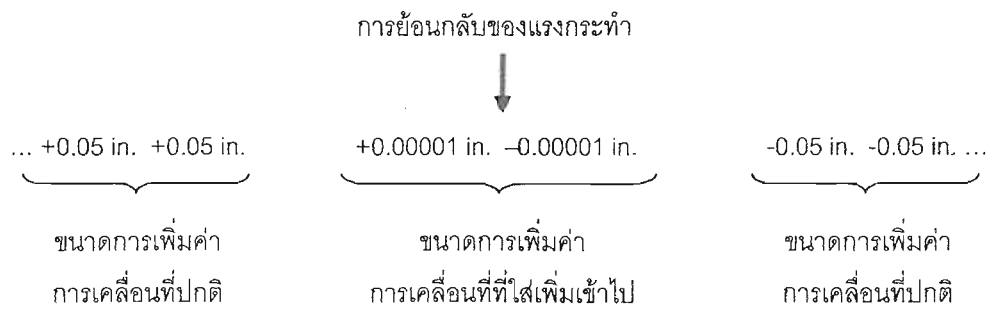
ขนาดของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างยิ่ง การแบ่งชิ้นส่วนที่ละเอียดโดยไม่จำเป็นจะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้น ในขณะที่การแบ่งชิ้นส่วนที่หยาบเกินไปก็จะไม่เพียงพอที่จะแทนพฤติกรรมของเสาได้อย่างถูกต้อง ขนาดที่เหมาะสมของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นกับลักษณะของปัญหาที่จะทำการศึกษาเป็นอย่างมาก เนื่องจากไม่มีข้อกำหนดตายตัวสำหรับการเลือกขนาดโครงข่ายที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก การทดลองสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขนาดโครงข่ายต่างๆกันเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับขนาดของโครงข่ายที่เหมาะสม และผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นกับขนาดของโครงข่ายมากน้อยเพียงไร ในงานวิจัยนี้การจัดวางโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์จะขึ้นกับตำแหน่งของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมจะถูกจำลองโดยชิ้นส่วนแท่งโดยโครงข่ายจะถูกออกแบบให้ตำแหน่งของชิ้นส่วนเหล็กเสริมใกล้เคียงกับตำแหน่งจริงของเหล็กเสริมในเสา รายละเอียดของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 1.2

3.4.3 วิธีการในการให้แรงกระทำ

ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีวิธีการในการให้แรงกระทำอยู่สองแบบ คือวิธีการควบคุมแรงกระทำ (load-control algorithm) และวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement-control algorithm) ในวิธีการควบคุมแรงกระทำ แรงกระทำจะถูกให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆในแต่ชั้นของแรงกระทำ ในขณะที่วิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ที่จุดต่อที่กำหนดจะถูกกำหนดให้เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นของแรงกระทำ Darwin และ Pecknold [26] ได้กล่าวว่าวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่จะให้ผลการวิเคราะห์สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรที่แม่นยำกว่าวิธีการควบคุมแรงกระทำ เนื่องจากในชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนมากจะเกิดพฤติกรรมการอ่อนตัวภายหลังจากที่เหล็กเสริมตามยาวได้เกิดการคราก เพราะเราไม่สามารถทราบถึงตำแหน่งที่พฤติกรรมการอ่อนตัวเริ่มเกิด และกำลังของชิ้นส่วนคอนกรีตได้ก่อนทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะเป็นการยากที่จะกำหนดการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำที่เหมาะสมตลอดประวัติการรับแรง ขนาดการเพิ่มแรงกระทำที่มากเกินไปก็จะเกินกำลังของชิ้นส่วน และทำให้ผลเฉลยไม่ลู่เข้า ขณะที่ขนาดการเพิ่มแรงกระทำน้อยเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการวิเคราะห์ โดยที่วิธีการควบคุมการเคลื่อนที่จะให้ผลเฉลยที่มีเสถียรภาพมากกว่าวิธีการควบคุมแรงกระทำเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่กำหนดจะไม่เกินความสามารถในการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ ยกเว้นเมื่อใกล้สิ้นสุดประวัติการรับแรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับการให้แรงกระทำกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ทำนองเดียวกันกับการเลือกขนาดของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการเลือกขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่จะขึ้นกับลักษณะของปัญหาที่จะทำการศึกษ สำหรับกรณีวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรในงานวิจัยนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่จุดต่อ ณ ตำแหน่งสูง 1.50 ม. เหนือฐานเสา โดยในตอนแรกจะกำหนดขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ 10 % ของขนาดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ทำให้แรงกระทำมีค่าเท่ากับ $0.75 H_u$ จนกระทั่งถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเท่ากับ $1\Delta y$ รอบที่สอง ซึ่งในตอนนี้อเหล็กเสริมตามยาวอันนอกสุดที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และ เหล็กปลอกชั้นที่ 2 ได้เกิดการครากไปแล้ว และชิ้นส่วนคอนกรีตส่วนใหญ่ที่ส่วนล่างของเสาได้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นในรอบต่อมาสามารถเพิ่มขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างให้เป็น 2-3 เท่าของค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ใช้ในตอนเริ่มแรกได้ จนกระทั่งเมื่อคอนกรีตรอบนอกเกิดการหลุดร่อน และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะเราจะต้องลดขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเนื่องจากพฤติกรรมทั้งสองอย่างนี้ทำให้กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงเป็นอย่างมากซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการลู่เข้าของผลกรวิเคราะห์ ที่ได้กล่าวไปแล้วเป็นวิธีการโดยรวมสำหรับการแบ่งขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ด้านข้าง นอกจากนี้เราสามารถใช้คุณสมบัติของโปรแกรม FINITE อีกประการหนึ่งคือ โปรแกรม FINITE สามารถเก็บฐานข้อมูล (database) เช่น สถิติในสมเมตริกซ์, หน่วยแรง และความเครียด, การเคลื่อนที่ของจุดต่อ เพื่อไว้ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับขั้นของแรงกระทำต่อไปได้ โดยคุณสมบัตินี้จะมีประโยชน์เป็นอย่างมากในการวิเคราะห์เพราะว่าในบางครั้งขนาดขั้นของการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ใช้อาจทำให้เกิดการไม่ลู่เข้าของผลลัพธ์ซึ่งโปรแกรมจะหยุดการทำงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในรอบของกรณีวิเคราะห์หลังๆ ซึ่งคอนกรีตรอบนอกเกิดการหลุดร่อน และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ ทำให้ไม่ต้องไปเสียเวลาเริ่มวิเคราะห์ใหม่ตั้งแต่เริ่มต้นโดยสามารถเริ่มทำการวิเคราะห์ใหม่จากขั้นของแรงกระทำที่ได้ทำการเก็บฐานข้อมูลเอาไว้

ลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งของข้อกำหนดในการให้แรงกระทำสำหรับการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรคือ วิธีการที่ใช้กำหนดขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเมื่อเกิดแรงกระทำย้อนกลับ แทนที่จะให้เกิดการย้อนกลับทิศทางในทันที จะใช้วิธีการค่อยๆเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ทีละน้อยเมื่อเกิดการเปลี่ยนทิศทางของแรงกระทำ โดยจะทำการใส่ขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ 2 ค่าระหว่างขั้นของแรงกระทำที่ทิศทางของแรงกระทำเกิดการย้อนกลับ ซึ่งขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ที่ใส่ไปทั้งสองค่านี้จะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ปกติ รูปแบบทั่วไปของขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่เมื่อเกิดการย้อนกลับของแรงกระทำสามารถแสดงได้ดังนี้



สำหรับขนาดการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ที่ใส่เข้าไปทั้งสองนี้จะยอมให้ใช้การแทนค่าวนซ้ำเพียงแค่นีกรอบและหลังจากนั้นจะทำการคำนวณในขั้นแรงกระทำต่อไป เนื่องจากการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ที่ใส่เข้าไปทั้งสองมีขนาดเล็กมาก การใช้เพียงแค่อการแทนค่าวนซ้ำหนึ่งรอบจะไม่ทำให้เกิดผลกระทบกับเงื่อนไขสมมูลย์ของแบบจำลอง และผลเฉลยที่ได้จากกระบวนการแทนค่าวนซ้ำสำหรับการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ ที่ใส่เข้าไปเหล่านี้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ถูกต้อง

3.5 กระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำ (Incremental-iterative algorithms)

ในการวิเคราะห์ความไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก จะใช้เวลาส่วนใหญ่ไปกับการแก้สมการสมมูลแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการหาวิธีการที่เหมาะสมในการแก้สมการโดยมีเสถียรภาพที่ดี และมีความแม่นยำที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กระบวนการหาคำตอบโดยการแทนค่าวนซ้ำที่ใช้ในการแก้สมการแบบไม่เชิงเส้นสำหรับงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ วิธีการนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) และข้อกำหนดสำหรับการลู่เข้า ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

3.5.1 วิธีการ Newton-Raphson

วิธีการแทนค่าวนซ้ำที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการหาผลเฉลยของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจะมีพื้นฐานมาจากวิธีการ Newton-Raphson ในวิธีการนี้เวกเตอร์การเคลื่อนที่ U ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขสมมูล ณ เวลา $t + \Delta t$ สามารถหาได้จากสมการที่ใช้ประมาณค่าดังนี้

$${}^{t+\Delta t} K^{i-1} \Delta U^i = {}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F^{i-1} \quad (39)$$

โดยที่ ${}^{t+\Delta t} K^{i-1}$ = เมตริกซ์ของสติฟเนสสัมผัสที่รอบของการแทนค่าวนซ้ำ $i-1$ ของชิ้นแรงกระทำ $t + \Delta t$

ΔU^i = เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นที่รอบของการแทนค่าวนซ้ำที่ i

${}^{t+\Delta t} R$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำภายนอกที่ชิ้นของแรงกระทำ $t + \Delta t$

${}^{t+\Delta t} F^{i-1}$ = เวกเตอร์ของแรงกระทำที่สอดคล้องกับหน่วยแรงของชิ้นส่วนที่รอบของการแทนค่าวนซ้ำที่ $i-1$ ของชิ้นแรงกระทำ $t + \Delta t$

ระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (40)

$${}^{t+\Delta t} U^i = {}^{t+\Delta t} U^{i-1} + \Delta U^i \quad (40)$$

โดยที่ ${}^{t+\Delta t}U^i$ คือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ทั้งหมดที่รอบของการแทนค่าวนซ้ำ $i-1$ ของขั้นแรงกระทำ $t + \Delta t$

เงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่ (39) และ สมการที่ (40) คือ

$${}^{t+\Delta t}U^0 = {}^tU \quad (41)$$

$${}^{t+\Delta t}F^0 = {}^tF \quad (42)$$

ในวิธีการนี้จะใช้แบบ full N-R iteration สถิติเนสมเมตริกซ์ของแบบจำลอง K จะถูกปรับค่าทุกๆรอบของการแทนค่าวนซ้ำดังสมการที่ (39) ในการปรับค่าของสถิติเนสมเมตริกซ์ทุกๆรอบจะทำให้ใช้เวลาการคำนวณมากซึ่งอาจจะไม่เหมาะสำหรับปัญหาบางชนิด ทำให้เกิดการพัฒนามาเป็นแบบ modified N-R iteration โดยแทนที่จะปรับค่าสถิติเนสมเมตริกซ์ทุกๆรอบของการแทนค่าวนซ้ำ สถิติเนสมเมตริกซ์จะถูกปรับค่าในรอบของการแทนค่าวนซ้ำที่แน่นอนซึ่งจะทำให้การคำนวณสถิติเนสมเมตริกซ์ในวิธีนี้จะน้อยกว่าแบบ full N-R iteration แม้ว่าวิธี modified N-R iteration โดยปกติจะต้องการจำนวนรอบในการแทนค่าวนซ้ำเพื่อให้ผลเฉลยลู่เข้ามากกว่าวิธี full N-R iteration แต่เวลาที่ใช้ทั้งหมดอาจจะน้อยกว่าเนื่องจากปรับค่าสถิติเนสมเมตริกซ์จำนวนครั้งน้อยกว่า โดยวิธีการทั้งสองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Darwin และ Pecold [26] ได้รายงานว่าการใช้วิธี full N-R iteration จะให้ผลที่ดีกว่าการใช้วิธี modified N-R iteration เนื่องจากทั้งพฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะขึ้นกับเส้นทางเป็นอย่างมาก และสถิติเนสของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่สภาวะต่างกันก็จะมีค่าแตกต่างกันมาก เช่น สถิติเนสเมื่อคอนกรีตแตกแล้วเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่แตกแล้ว , สถิติเนสของเหล็กเสริมเมื่อเกิดการครากเปรียบเทียบกับเมื่อเหล็กเสริมยังไม่เกิดการคราก เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้การแก้สมการสมมูลย์เมื่อใช้สถิติเนสสัมพัทธ์ที่ไม่สอดคล้องกับสถานะปัจจุบันของวัสดุอาจทำให้ผลเฉลยเบี่ยงเบนออกจากเส้นทางที่ถูกต้องอย่างมาก และมีผลทำให้อัตราการลู่เข้าของผลเฉลยช้า หรือไม่ลู่เข้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี full N-R iteration

3.5.2 ข้อกำหนดสำหรับการลู่เข้า

นอกจากการเลือกวิธีการเชิงตัวเลข และการเลือกวิธีการสำหรับการปรับค่าสถิติเนสที่เหมาะสมแล้ว ความแม่นยำของกระบวนการแทนค่าวนซ้ำยังขึ้นกับข้อกำหนดสำหรับการลู่เข้าเป็นอย่างมาก ซึ่งจะใช้กำหนดเงื่อนไขการสิ้นสุดของการแทนค่าวนซ้ำ ในจุดสิ้นสุดของแต่ละรอบของการแทนค่าวนซ้ำ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์บางค่าจะถูกนำมาตรวจสอบกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับสำหรับการลู่เข้า (convergence tolerance) เพื่อพิจารณาว่าสามารถทำการวิเคราะห์ในขั้นของแรงกระทำต่อไป หรือต้องเพิ่มจำนวนรอบสำหรับการแทนค่าวนซ้ำในขั้นของแรงกระทำปัจจุบัน ถ้าหากว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับสำหรับการลู่เข้าผ่อนผัน

เกินไปผลเฉลยที่ได้อาจจะคลาดเคลื่อนและไปตามเส้นทางผลเฉลยที่ผิดพลาดได้ ในทางตรงข้ามถ้าหากว่า ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับการลู่อเข้าเข้มงวดเกินไปทำให้ต้องเสียเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยซึ่งมีความแม่นยำที่ไม่จำเป็น โดยทั่วไปจะมีตัวแปรอยู่สามชนิดที่จะถูกใช้สำหรับข้อกำหนดสำหรับการลู่อเข้า คือ การเคลื่อนที่, แรงกระทำรีซิดวล (residual load) และพลังงานภายใน ในการเลือกชนิดของตัวแปรที่เหมาะสมจะขึ้นกับปัญหาที่กำลังศึกษาอยู่ เช่น ใช้วิธีพลังงานภายในจะเหมาะสมกับปัญหาที่หน่วยของเวกเตอร์แรงกระทำไม่เหมือนกัน อย่างเช่น เวกเตอร์แรงกระทำที่ประกอบไปด้วยแรง และโมเมนต์

ในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนของนอร์ม (norm) ของเวกเตอร์แรงกระทำรีซิดวล ต่อนอร์มของการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ ซึ่งจะใช้เป็นข้อกำหนดสำหรับการสิ้นสุดของกระบวนการแทนค่าวนซ้ำ ผลเฉลยที่ได้จากกระบวนการแทนค่าวนซ้ำของขั้นแรงกระทำปัจจุบันจะถือว่าเกิดการลู่อเข้าถ้าสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\|R\| \leq \|\Delta P\| * \frac{TOL}{100} \quad (43)$$

โดยที่

$$\|x_i\| = \text{ยูคลิเดียนนอร์ม (the Euclidean norm) ของเวกเตอร์ } x = \sqrt{\sum x_i^2}$$

$$R = \text{เวกเตอร์ของแรงกระทำรีซิดวลทั้งหมด}$$

$$\Delta P = \text{การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ}$$

$$TOL = \text{ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับการลู่อเข้า ในงานวิจัยนี้ใช้ 5\%}$$

แรงกระทำรีซิดวลถูกเลือกนำมาใช้ในข้อกำหนดสำหรับการลู่อเข้าเนื่องจากสามารถแสดงภาวะสมดุลล่าสุดของผลเฉลย นอกจากนั้นทุกๆค่าของเวกเตอร์ของแรงกระทำรีซิดวลจะมีหน่วยเหมือนกันซึ่งจะไม่เกิดปัญหาขึ้นเมื่อทำการคำนวณนอร์มของแรงกระทำรีซิดวล และเวกเตอร์ของแรงกระทำรีซิดวล R จะคำนวณมาจากเงื่อนไขสมดุลทั้งหมด ดังนั้นจะไม่ทำให้เกิดการสะสมของความผิดพลาดในการหาผลเฉลยระหว่างขั้นของแรงกระทำ เนื่องจากแรงกระทำรีซิดวลจะคำนวณมาจากเงื่อนไขสมดุลทั้งหมดขั้นของแรงกระทำที่ลู่อเข้าจะให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม้ว่าเมื่อขั้นของแรงกระทำก่อนหน้าจะไม่ลู่อเข้าก็ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

ในบทนี้จะทำการอธิบายและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อตรวจสอบและยืนยันแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และเหล็กเสริมที่ได้เสนอว่าสามารถแสดงพฤติกรรมที่สำคัญของเสาได้อย่างเหมาะสม สำหรับข้อมูลของเสาที่ได้จากการทดสอบจะนำมาจากงานวิจัยของ จตุพล เทพมังกร [1] จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ CFL 90/120/0.37, CFL 90/120/0.30, CF 135/120/0.37, และ CF 135/120/0.30 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง, กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กปลอก และ ความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

4.1 ตัวอย่างทดสอบ (Test specimen)

ตัวอย่างทดสอบจากงานวิจัยของ จตุพล เทพมังกร [1] เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดรูปร่างและรายละเอียดการเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.3 คุณสมบัติของวัสดุทั้งคอนกรีต และเหล็กเสริม และ แรงอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีขนาดหน้าตัด 400x400 มม. ความสูงถึงจุดให้แรงกระทำทางด้านข้าง 1500 มม. ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. (DB20) จำนวน 16 เส้น เป็นเหล็กเสริมตามยาว ส่วนเหล็กเสริมทางขวางใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. (RB9) ประกอบด้วยเหล็กปลอกกรัดรอบ (hoop ties) และเหล็กยึดทางขวาง (crossties) ซึ่งมีการสลับปลายของอ 90 องศาและ 135 องศาไปมาในแต่ละชั้นของเหล็กเสริมทางขวางตลอดแนวเสา ลักษณะการทำมุมของของจะแตกต่างกันไปในแต่ละตัวอย่างทดสอบ แต่รัศมีภายในของของอทุกตำแหน่งมีค่าเท่ากันเท่ากับ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางขวางที่ใช้ ส่วนระยะจากผิวสัมผัสเหล็กเสริมตามยาวถึงปลายของของอเหล็กเสริมทางขวาง (hook extensions) มีค่าเท่ากับ 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางขวางที่ใช้แต่ต้องไม่น้อยกว่า 60 มม. ในส่วนรายละเอียดที่แตกต่างกันของตัวอย่างทดสอบแต่ละตัวมีดังนี้

ตัวอย่าง CFL90/120/0.37 ใช้เหล็กปลอกกรัดรอบ (hoop ties) ที่มีของอ 90 องศา ร่วมกับคลิปยึดของอ (hook-clips) และปลายของเหล็กยึดทางขวาง (crossties) ด้านที่ใช้ของอ 90 องศาจะมีการใช้คลิปยึดของอเช่นกัน ส่วนระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวางใช้เท่ากับ 120 มม. และทดสอบที่ระดับแรงอัดตามแนวแกนเท่ากับ $0.37f'_c A_g$

ตัวอย่าง CFL90/120/0.30 ใช้เหล็กปลอกรัดรอบ (hoop ties) ที่มีของอ 90 องศา ร่วมกับคลิปปยึดของอ (hook-clips) และปลายของเหล็กยึดทางขวาง (crossties) ด้านที่ใช้ของอ 90 องศาที่มีการใช้คลิปปยึดของอ เช่นกัน ส่วนระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวางใช้เท่ากับ 120 มม. และทดสอบที่ระดับแรงอัดตามแนวแกน เท่ากับ $0.30f_c'A_g$

ตัวอย่าง CF135/120/0.37 ใช้เหล็กปลอกรัดรอบ (hoop ties) ที่มีของอ 135 องศา และ เหล็กยึดทางขวาง (crossties) ใช้ตามข้อกำหนดของ ACI ส่วนระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวางใช้เท่ากับ 120 มม. และทดสอบที่ระดับแรงอัดตามแนวแกน เท่ากับ $0.37f_c'A_g$

ตัวอย่าง CF135/120/0.30 ใช้เหล็กปลอกรัดรอบ (hoop ties) ที่มีของอ 135 องศา และ เหล็กยึดทางขวาง (crossties) ใช้ตามข้อกำหนดของ ACI ส่วนระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวางใช้เท่ากับ 120 มม. และทดสอบที่ระดับแรงอัดตามแนวแกน เท่ากับ $0.30f_c'A_g$

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะให้แรงอัดในแนวแกนคงที่แก่ตัวอย่างทดสอบ และให้แรงกระทำทางด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรกับตัวอย่างทดสอบที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เริ่มแรกจะทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ทั้งหมด และตรวจสอบความผิดพลาดในการติดตั้งเนื่องจากแรงอัดในแนวแกนไม่ตรงศูนย์กลางเสา โดยจะให้แรงอัดในแนวแกนแก่ตัวอย่างทดสอบประมาณ 50-75 % ของแรงอัดในแนวแกนสูงสุดที่จะให้ระหว่างการทดสอบและจะทำการผลึกและดึงเสาดตัวอย่างทดสอบด้วยแรงกระทำทางด้านข้างประมาณ 3 ถึง 5 ตัน นอกจากนี้จะทำการตรวจสอบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาว ตลอดจนค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีอีลาสติก

การทดสอบจริงจะทำตามวิธีที่เสนอโดย Watson และ Park [7] ซึ่งได้เสนอวิธีการหาค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ณ จุดคราก (yield displacement, Δ_y) โดยประมาณไว้ หลังจากให้แรงอัดตามแนวแกนกับตัวอย่างทดสอบตามค่าที่กำหนดไว้แล้วจะทำการให้แรงกระทำทางด้านข้างเท่ากับ $\pm 75\%$ ของค่าแรงกระทำทางด้านข้างประลัย (H_u) ที่คำนวณตามข้อกำหนด ACI 318-99 [27] โดยไม่คำนึงถึงการลดลงของกำลังต้านทานเนื่องจากค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่มากขึ้น (เครื่องหมาย + หมายถึง แรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักไฮดรอลิกซ์เกิดแรงดึง และ เครื่องหมาย - หมายถึง แรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบด้านที่อยู่ตรงข้ามกับเครื่องกดน้ำหนักไฮดรอลิกซ์เกิดแรงอัด) เมื่อได้ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ $\pm 0.75H_u$ ($\pm \Delta_{0.75H_u}$) แล้ว จึงทำการประมาณค่านอกช่วงหาค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ณ จุดคราก (yield displacement, Δ_y) จากค่าเฉลี่ยของค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ $\pm 0.75H_u$ ต่อไปดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในช่วงแรกนี้การทดสอบยังเป็นลักษณะควบคุมแรงกระทำ (load control) เนื่องจากอยู่ในช่วงอีลาสติกสามารถควบคุมแรงกระทำทางด้านข้างได้

เมื่อได้ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ณ จุดครากแล้ว จึงทำการทดสอบโดยการให้แรงกระทำจะเปลี่ยนเป็นแบบควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) ซึ่งเป็นการควบคุมค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาแทนการควบคุมแรงกระทำทางด้านข้าง โดยเริ่มจากการทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเท่ากับ $\pm \Delta_y$ และทำการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างขึ้นครั้งละ $\pm \Delta_y$ โดยในแต่ละระดับค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างจะทำการทดสอบ 2 รอบ (การทดสอบ 1 รอบ หมายถึง เริ่มที่แรงกระทำทางด้านข้างเท่ากับศูนย์และให้แรงกระทำทางด้านข้างไปทางด้าน + จนได้ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ต้องการ แล้วลดแรงกระทำทางด้านข้างจนเป็นศูนย์ จากนั้นให้แรงกระทำทางด้านข้างไปทางด้าน - จนได้ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ต้องการแล้วลดแรงกระทำทางด้านข้างจนเป็นศูนย์) ทำการทดสอบตามวิธีการนี้จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (failure) ประวัติการรับน้ำหนัก (loading history) ของตัวอย่างทดสอบที่อธิบายข้างต้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5

4.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับตัวอย่างทดสอบทุกตัวที่นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดังรูปที่ 1.2 โดยคอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กปลอก และคอนกรีตผิวนอกจะจำลองโดยชิ้นส่วนแบบไอโซพารามेटริกซ์ 4 โหนด (4-node isoparametric elements) ส่วนเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กปลอกจะจำลองโดยชิ้นส่วนแบบแท่ง 2 โหนด (2-node bar elements) จุดต่อทั้งหมดที่ฐานเสาจะถูกกำหนดไม่ให้เกิดเคลื่อนที่ในแนวราบและในแนวตั้ง แรงอัดในแนวแกนจะแทนโดยแรงกระทำที่จุดต่อในระดับหัวเสา และแรงกระทำทางด้านข้างจะแทนโดยแรงกระทำที่จุดต่อในตำแหน่งกึ่งกลางเสาที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา ซึ่งการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่จุดต่อนี้จะถูกกำหนดให้เหมือนกับประวัติการเคลื่อนที่ของเสาจากการทดสอบ ตำแหน่งหมายเลขของชิ้นส่วนคอนกรีตและเหล็กเสริมทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.6

วิธีการให้แรงกระทำที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้แบบควบคุมการเคลื่อนที่ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4.3 ในตอนแรกจะทำการวิเคราะห์โดยกำหนดค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างให้มีขนาดน้อย ๆ ประมาณ 2-3 รอบเพื่อให้ชิ้นส่วนคอนกรีตส่วนใหญ่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากในแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตจะกำหนดให้คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นหลังจากเกิดการแตกร้าวซึ่งในตอนนี้จะยังไม่ให้แรงกระทำในแนวแกน ดังนั้นถ้าหากเริ่มการวิเคราะห์ด้วยค่าการเคลื่อนที่หลายๆในทันทีจะทำให้ค่าแรงกระทำทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสูงเกินความจริงในช่วงรอบแรกๆ หลังจากนั้นจะให้แรงกระทำในแนวแกนเท่ากับค่าที่ใช้ในการทดสอบคงที่ตลอดการวิเคราะห์ โดยในช่วงนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของจุดต่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสาที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาให้เหมือนกับประวัติการเคลื่อนที่ของเสาจากการทดสอบ คือ $\pm 0.75H_u$, $\pm 1\Delta_y$ จำนวน 2 รอบ, $\pm 2\Delta_y$ จำนวน 2 รอบ, $\pm 3\Delta_y$ จำนวน 2 รอบ, จนสิ้นสุดประวัติการรับแรง ในการพิจารณาว่าจุดใดเป็นจุดสิ้นสุดการวิเคราะห์จะใช้วิธีที่เสนอโดย Wehbe และคณะ [8] คือเสาจะถูกพิจารณาว่าวิบัติเมื่อค่ากำลังต้านทางแรงทางด้านข้างมีค่าน้อยกว่า 75 % ของกำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างมากที่สุด สำหรับประวัติการรับแรงของแต่ละตัวอย่างทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นอกจากราคาการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของจุดต่อ และแรงกระทำทางด้านข้างแล้วยังสามารถกำหนดเป็นอย่างอื่นได้อีก คือ ค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่ออื่นๆ ทั้งในแนวราบ และแนวตั้ง , หน่วยแรง และความเครียด ของคอนกรีต และเหล็กเสริม ชั้นส่วนต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบต่อไป

4.4 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้าง และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของตัวอย่างเสาทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.15 สำหรับแรงกระทำทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบที่นำมาเขียนกราฟนั้นได้ทำการปรับแก้ผลเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนที่ไม่อยู่ในแนวตั้ง และคิดผลของแรงอัดตามแนวแกนที่ทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดลดลง ($P - \Delta$ effect) ซึ่งจะมีผลอย่างเห็นได้ชัดเมื่อค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมีค่าสูงๆ ส่วนค่าแรงกระทำด้านข้างที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้รวมผลของ $P - \Delta$ effect ไว้เรียบร้อยแล้วเนื่องจากชั้นส่วนของคอนกรีต และเหล็กเสริมที่ใช้จะพิจารณาถึงความไม่เชิงเส้นทางรูปร่าง (geometric nonlinearity)

4.4.1.1 ตัวอย่าง CFL90/120/0.37

ผลจากการทดสอบ

ตัวอย่าง CFL90/120/0.37 สามารถรับแรงกระทำด้านข้างจนถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ $3.5 \Delta_y$ รอบที่ $1 \frac{1}{2}$ โดยมีแรงกระทำด้านข้างมากที่สุด 31.1 ตัน จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 10-15 ตันในรอบทดสอบที่ให้แรงกระทำด้านข้างเท่ากับ $\pm 0.75 H_u$ เมื่อดำเนินการทดสอบต่อไปเหล็กเสริมตามยาวจะเริ่มเกิดการครากด้านแรงอัดที่ $-1 \Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ -13 มม. และ แรงกระทำด้านข้าง -25 ตัน หลังจากนั้นเมื่อทำการทดสอบจนถึงรอบการทดสอบที่ $2 \Delta_y$ รอบที่ 2 จะมีรอยแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงอัดเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยบริเวณเล็กๆใกล้โคนเสา และในระดับเหล็กปลอกชั้นที่ 3 เท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่รอบการทดสอบที่ $3 \Delta_y$ จะเริ่มเห็นการลดลงของกำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างเนื่องจากเริ่มมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นอย่างชัดเจนในระดับเหล็กปลอกชั้นที่ 3 โดยจะเริ่มสังเกตเห็นการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอกตามแนวเหล็กปลอกชั้นที่ 3 และเมื่อสิ้นสุดรอบการทดสอบที่ $3 \Delta_y$ รอบที่ 2 สภาพความเสียหายเพิ่มขึ้นมากจากเหตุผลนี้ทำให้ในการทดสอบรอบต่อไปจะทำการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ $0.5 \Delta_y$ เท่านั้น เมื่อทำการทดสอบต่อไปจนถึงรอบการทดสอบที่ $3.5 \Delta_y$ รอบที่ $1 \frac{1}{2}$ จะเกิดการดุ้งของเหล็กเสริมตามยาวระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 3 ทำให้กำลังต้านทานทางด้านข้างลดลงอย่างชัดเจนซึ่งนำไปสู่การวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยเป็นการวิบัติแบบการดัด ในรูปที่ 4.16 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CFL90/120/0.37

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี โดยเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงอัดที่ $-1 \Delta_y$ รอบที่ 1 ถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -10.54 มม. หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงอัดที่ $1 \Delta_y$ รอบที่ 1 ถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 10.55 มม. ส่วนในรอบต่อมาผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง และการลดลงของกำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีแรงกระทำด้านข้างมากที่สุด 31.2 ตัน เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อมาในรอบ $-3 \Delta_y$ รอบที่ 2 ถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -6.92 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 188 เกิดการหลุดล่อน และเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 เกิดการดุ้ง ส่งผลให้คอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 8 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก และเมื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปในรอบ $+3 \Delta_y$ รอบที่ 2 ถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -1.97 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 175 เกิดการหลุดล่อน หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเกิดการดุ้งที่รอบ $+3 \Delta_y$ รอบที่ 2 ถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 3.96 มม. และคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 5 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอกเช่นกัน

ผลของพฤติกรรมเหล่านี้ทำให้เสาเกิดพฤติกรรมอ่อนตัวลงอย่างชัดเจนในรอบการวิเคราะห์ต่อมาคือรอบ $\pm 3.5 \Delta_y$ รอบที่ 1 ซึ่งจะสังเกตเห็นการลดลงของกำลังต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้อย่างชัดเจน และเมื่อมาถึงรอบ $3.5 \Delta_y$ รอบที่ $1 \frac{1}{2}$ ซึ่งเป็นรอบสุดท้ายของการทดสอบ ผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าแรงกระทำทางด้านข้างที่สูงกว่าการทดสอบ อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบค่าแรงกระทำทางด้านข้างในรอบนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.74 ตัน จะมีค่าเป็น 66.5 % ของแรงกระทำทางด้านข้างที่มากที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 75 % ของแรงกระทำทางด้านข้างที่มากที่สุด และเมื่อสังเกตลักษณะของกราฟที่รอบนี้จะเห็นว่ามี ความชันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นที่ตำแหน่งนี้สามารถใช้งั้งชี้การวิบัติของเสาได้อย่างสมเหตุสมผล

4.4.1.2 ตัวอย่าง CFL90/120/0.30

ผลจากการทดสอบ

ตัวอย่าง CFL90/120/0.30 สามารถรับแรงกระทำด้านข้างจนถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ $\pm 4 \Delta_y$ รอบที่ 2 โดยมีแรงกระทำด้านข้างมากที่สุด 29.2 ตัน ตัวอย่าง CFL90/120/0.30 แสดงพฤติกรรมที่น่าสนใจมาก เมื่อทดสอบสิ้นสุดที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3 \Delta_y$ ทั้ง 2 รอบ สภาพโดยรวมของตัวอย่างทดสอบยังคงอยู่ในสภาพค่อนข้างดี มีการหลุดล่อน (spalling) เพียงเล็กน้อยของคอนกรีตผิวนอกบริเวณฐานเสาเนื่องจากผลของแรงอัด โดยสังเกตเห็นรอยแตกร้าวในแนวตั้งใกล้ๆขอบในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งกว้างประมาณ 2 มม. และมีการรวมของคอนกรีตผิวนอกในด้านรับแรงอัดใกล้ตำแหน่งปลายด้านของ 90 องศาของเหล็กยึดทางขวาง (cross ties)

ชั้นที่ 2 (ประมาณ 17 ซม. เหนือฐานเสา) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีการขยายตัวของเหล็กปลอกรัดรอบและเหล็กยึดทางขวางระหว่างทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $4\Delta_y$ ในรอบที่ 1 รอยแตกร้าวเกิดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและรอยแตกร้าวของคอนกรีตผิวนอกเนื่องจากผลของการอัดบริเวณมุมด้านล่างของตัวอย่างทดสอบขยายกว้างขึ้น วัดความกว้างได้ประมาณ 5 มม. แต่ไม่สามารถเห็นเหล็กเสริมภายใน ส่วนในบริเวณอื่น ๆ ไม่มีสภาพการแตกร้าวที่เป็นผลจากการอัดกว้างเท่ากับบริเวณฐานเสา จนกระทั่งทดสอบไปถึงช่วงครึ่งหลังของการทดสอบที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $4\Delta_y$ ในรอบที่ 1 เมื่อคอนกรีตผิวนอกเกิดการหลุดล่อนออกมา ทำให้สังเกตเห็นลักษณะรูปร่างการตัดของเหล็กเสริมตามยาวด้านในที่ไม่มีเหล็กยึดทางขวางยึดรั้งเกิดการดุ้งได้อย่างชัดเจน โดยที่การดุ้งเกิดขึ้นระหว่างเหล็กเสริมทางขวางชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 2 (ประมาณ 5 ถึง 17 ซม. เหนือฐานเสา) แม้ว่าค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเทียบกับความสูงของตัวอย่างทดสอบจะมีค่า เท่ากับ 4 % ก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า ภายหลังจากการดุ้ง เหล็กเสริมตามยาวยังคงรักษากำลังด้านทานได้พอสมควร และเหล็กปลอกรัดรอบกับคัลป์ยังคงทำหน้าที่โอบรัดคอนกรีตภายในไปได้อีก 1 รอบ ก่อนที่จะเกิดการวิบัติโดยการดุ้งของเหล็กเสริมตามยาวทั้งหมด การวิบัติของตัวอย่าง CFL90/120/0.30 เป็นการวิบัติแบบการดัด (flexural failure) และมีลักษณะค่อนข้างเหนียว คอนกรีตผิวนอกที่หุ้มบริเวณฐานเสาโดยรอบหลุดออกจนสามารถสังเกตเห็นเหล็กเสริมภายในอย่างชัดเจน ในรูปที่ 4.17 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CFL90/120/0.30

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี โดยเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงอัดที่ $+1\Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ 16.20 มม. หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงอัดที่ $-2\Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -21.0 มม. ส่วนในรอบต่อมาผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง และการลดลงของกำลังด้านทานแรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีแรงกระทำด้านข้างมากที่สุด 30.0 ตัน เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อมาในรอบ $-4\Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -9.05 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 188 เกิดการหลุดล่อน และ เหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 เกิดการดุ้ง ส่งผลให้คอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 8 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอกจะเห็นว่าในรอบนี้จะมีลักษณะการลดลงของแรงกระทำ

เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปในรอบ $+4\Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 4.7 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 175 เกิดการหลุดล่อน หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเกิดการดุ้งที่รอบนี้ ส่วนคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 5 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก และที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 20.6 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 176 เกิดการหลุดล่อน และเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 55 จะเกิดการดุ้ง

ส่วนคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 9 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอกเช่นกัน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าเกิดการดุ้งของเหล็กเสริมทางด้านซ้ายจำนวน 2 ชิ้นส่วน ซึ่งทำให้กำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างในช่วงก่อนเกิดการย่นแรงกระทำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณากราฟในช่วง $-4 \Delta_y$ รอบที่ 2 แรงกระทำด้านข้างก่อนเกิดการย่นแรงกระทำมีค่าเท่ากับ -20.7 ตัน และแรงกระทำด้านข้างก่อนเกิดการย่นแรงในช่อง $+4 \Delta_y$ รอบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 19.32 ตัน ในรอบนี้เริ่มเห็นได้ว่าความชันของกราฟเริ่มลดลง และเมื่อเกิดการย่นแรงกระทำอีกครั้งจากกราฟจะเห็นว่าความชันแทบจะไม่เพิ่มขึ้น และแรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเท่ากับ -18.1 ตัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60 % ของขนาดแรงกระทำสูงสุด ดังนั้นตำแหน่งนี้สามารถบ่งชี้ถึงการวิบัติของเสาได้เป็นอย่างดี

4.4.1.3 ตัวอย่าง CF135/120/0.37

ผลจากการทดสอบ

ตัวอย่าง CF135/120/0.37 สามารถรับแรงกระทำด้านข้างจนถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ $\pm 3.5 \Delta_y$ รอบที่ 1 มีแรงกระทำด้านข้างมากที่สุด 30.6 ตัน โดยจะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ค่าแรงกระทำทางด้านข้าง ประมาณ 13 ตัน ในรอบทดสอบที่ให้แรงกระทำทางด้านข้าง $\pm 0.75 H_u$ ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการตัด รอยแตกร้าวเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบสูงจากฐานเสาประมาณ 20 ซม. เมื่อทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $1 \Delta_y$ จบ 2 รอบ ตัวอย่างทดสอบมีรอยแตกร้าวเนื่องจากการตัดและการเฉือนตามปกติ เมื่อทดสอบตัวอย่าง CF135/120/0.37 ไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $2 \Delta_y$ เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากผลของการอัดอย่างมาใกล้ขอบในบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ และมีการรวมของคอนกรีตผิวนอกอย่างเห็นได้ชัดเจนตลอดแนวของเหล็กปลอกรัดรอบในชั้นที่ 2 และ ชั้นที่ 3 (ประมาณ 17 และ 29 ซม. เหนือฐานเสา) และระหว่างทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3 \Delta_y$ ในรอบแรก เกิดการหลุดล่อน (spalling) ของขอบคอนกรีตที่แตกร้าวเดิมบริเวณฐานเสา แต่ยังไม่สามารถสังเกตเห็นเหล็กเสริมตามยาว และในช่วงก่อนสิ้นสุดการทดสอบในรอบที่ 2 ที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3 \Delta_y$ มีการลดลงอย่างรวดเร็วของกำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้าง และตามด้วยการขยายกว้างออกอย่างรวดเร็วของรอยแตกร้าวเนื่องจากการเฉือนนำไปสู่การวิบัติในที่สุด ในรูปที่ 4.18 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CF135/120/0.37

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างนี้ให้ค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 31.45 ตัน โดยเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงอัดที่ $+2 \Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 24.1 มม. และเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงดึงที่ $+2 \Delta_y$ รอบที่ 1 เช่นเดียวกันที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 25.5

มม. ซึ่งในรอบนี้ค่าแรงกระทำทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์) ส่วนในรอบต่อมาผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง และการลดลงของกำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้าง เมื่อทำการวิเคราะห์ห้ต่อมาในรอบ $+3\Delta_y$ รอบที่ 2 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 12.78 มม. คอนกรีตผิวนอกชั้นส่วนที่ 175 เกิดการหลุดล่อน และ เหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 54 เกิดการดุ้ง ส่งผลให้คอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชั้นส่วนที่ 5 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอกเมื่อทำการวิเคราะห์ห้ต่อไปในรอบ $-3\Delta_y$ รอบที่ 2 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -2.80 มม. คอนกรีตผิวนอกชั้นส่วนที่ 188 เกิดการหลุดล่อน หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67 จะเกิดการดุ้งที่รอบนี้ ส่วนคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชั้นส่วนที่ 8 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก และจะทำการวิเคราะห์ห้ต่อไปจนถึงรอบ $+3.5\Delta_y$ รอบที่ 1 ซึ่งเป็นรอบสุดท้ายของการทดสอบ

ผลจากการทดสอบตัวอย่างเสา CF135/120/0.37 จะเกิดการวิบัติที่ตำแหน่งการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเท่ากับ $+3.5\Delta_y$ รอบที่ 1 โดยจะเกิดรอยแตกกว้างในแนวตั้งขนาดใหญ่มากยาวตั้งแต่หัวเสามาจนถึงฐานเสา ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตำแหน่งนี้ยังไม่แสดงให้เห็นว่าจะเกิดการวิบัติได้อย่างชัดเจนนักสังเกตได้จากความชันของกราฟที่ยังไม่ลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากแบบจำลองการแตกกว้างสำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบการแตกกว้างทั่วๆ ซึ่งทำให้ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของเสาเมื่อเกิดรอยแตกกว้างขนาดใหญ่ได้อย่างชัดเจนนัก แต่อย่างไรก็ตามค่าของแรงกระทำด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรอบนี้มีค่า 23.47 ตัน ซึ่งเท่ากับ 74.6 เปอร์เซ็นต์ ของค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่วิเคราะห์ห้ได้ ซึ่งน่าจะเป็นสัญญาณบอกได้ว่าเสาน่าจะใกล้เกิดการวิบัติ

4.4.1.4 ตัวอย่าง CF135/120/0.30

ผลจากการทดสอบ

ตัวอย่าง CF135/120/0.30 สามารถรับแรงกระทำด้านข้างจนถึงค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ $\pm 4\Delta_y$ รอบที่ 1 มีแรงกระทำด้านข้างมากที่สุด 32.2 ตัน เริ่มสังเกตเห็นรอยแตกกว้างที่ค่าแรงกระทำทางด้านข้าง ประมาณ 15 ตัน ในรอบทดสอบที่ให้แรงกระทำทางด้านข้าง $\pm 0.75H_u$ ซึ่งเป็นรอยแตกกว้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการตัดโดยเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบสูงจากฐานเสาประมาณ 15 ซม. เมื่อทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $1\Delta_y$ จบ 2 รอบ ตัวอย่างทดสอบมีรอยแตกกว้างเนื่องจากการตัดและการเขื่อนตามปกติ และเมื่อทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $2\Delta_y$ จบ 2 รอบ สังเกตเห็นรอยแตกกว้างเนื่องจากผลของการอัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อพยายามดันตัวอย่าง CF135/120/0.30 ไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3\Delta_y$ ในรอบแรก รอยแตกกว้างเนื่องจากผลของการอัดที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยบริเวณใกล้โคนเสาในช่วงที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $2\Delta_y$ ขยายกว้างและยาวขึ้นอย่างรวดเร็ว และสังเกตเห็นว่า เกิดการแตกกว้างและการรวมของคอนกรีตผิวนอกบริเวณเหล็กปลอกชั้นที่ 3 (ประมาณ 29 ซม. เหนือฐานเสา) อย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องมาจากการขยายตัวของเหล็กปลอกรัดรอบ และระหว่างการทดสอบที่

ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3\Delta_y$ ในรอบที่ 2 เกิดการหลุดล่อน (spalling) ของคอนกรีตอย่างมากบริเวณใกล้โคนเสา และเกิดการบวมของคอนกรีตผิวนอกอย่างเห็นได้ชัดเจน บริเวณใกล้กับปลายด้านขององศาของเหล็กยึดทางขวาง (cross ties) ในชั้นที่ 2 (ประมาณ 17 ซม. เหนือฐานเสา) และเมื่อพยายามทดสอบไปที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $4\Delta_y$ สังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของรอยแตกร้าว และการบวมของคอนกรีตผิวนอก ในช่วงระหว่างเหล็กปลอก ชั้นแรกถึงเหล็กปลอกชั้นที่ 3 (ประมาณ 5 ถึง 29 ซม. เหนือฐานเสา) เนื่องจากการอัดออกขององศาขององศาในเหล็กยึดทางขวาง (cross ties) และในที่สุดก็เกิดการดุ้งของเหล็กเสริมตามยาวตามมา ระยะการดุ้งของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่าง CF135/120/0.30 เกิดขึ้นที่ระดับเหล็กเสริมทางขวางชั้นที่ 2 ถึง ชั้นที่ 3 (ประมาณ 17 ถึง 29 ซม. เหนือฐานเสา) ในรูปที่ 4.19 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CF135/120/0.30

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างนี้ให้ค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 32.17 ตัน โดยเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงอัดที่ $-1\Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -14.37 มม. และเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเริ่มเกิดการครากทางด้านแรงดึงที่ $-2\Delta_y$ รอบที่ 1 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -22.60 มม. ส่วนในรอบต่อมาค่าแรงกระทำทางด้านข้างจากไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง และการลดลงของกำลังต้านทานแรงกระทำทางด้านข้าง เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อมาในรอบ $-3\Delta_y$ รอบที่ 2 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ -9.89 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 188 เกิดการหลุดล่อน และ เหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 67 เกิดการดุ้ง ส่งผลให้คอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 8 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอกเมื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปในรอบ $+3\Delta_y$ รอบที่ 2 ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสาเท่ากับ 9.92 มม. คอนกรีตผิวนอกชิ้นส่วนที่ 175 เกิดการหลุดล่อน หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 จะเกิดการดุ้งที่รอบนี้ ส่วนคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกชิ้นส่วนที่ 5 จะถูกพิจารณาเป็นคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก

เมื่อทำการวิเคราะห์ต่อมาที่รอบ $-4\Delta_y$ รอบที่ 1 เมื่อพิจารณาลักษณะความชันของกราฟในรอบนี้จะเห็นว่าค่อนข้างจะเรียบ และแรงกระทำด้านข้างมีค่าน้อยกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ ของแรงกระทำด้านข้างสูงสุด จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30 สามารถบ่งชี้ถึงการวิบัติของเสาได้เป็นอย่างดีชัดเจน

จากที่แสดงมาทั้งหมด กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงพฤติกรรมที่สำคัญต่างๆ ได้อย่างน่าพอใจ ทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง ลักษณะการลดลงของแรงกระทำทางด้านข้าง ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ แม้ว่าตัวอย่างเสา CF135/120/0.30 จะไม่สามารถแสดงตำแหน่งที่เกิดการวิบัติได้อย่างชัดเจนนักซึ่งเป็นผลมาจาก

เกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งขนาดใหญ่มากยาวตั้งแต่หัวเสามาจนถึงฐานเสาเมื่อเสาดันนี้เกิดการวิบัติ ทำให้แบบจำลองการแตกร้าวสำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นแบบการแตกร้าวทั่วๆไปไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของเสาเมื่อเกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ได้ดีพอ แต่สำหรับตัวอย่างเสาดันอื่น (CFL90/120/0.37, CFL90/120/0.30 และ CF135/120/0.30) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายตำแหน่งที่เกิดการวิบัติได้เป็นอย่างดี

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว

รูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบ และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบบางตัวอย่างความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการทดสอบขาดหายไป เนื่องจากเกจวัดความเครียดหลุดออกจากเหล็กเสริมก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากตัวอย่างทดสอบต้องรับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรซ้ำไปซ้ำมาหลายรอบจนทำให้แรงยึดเหนี่ยว (bond) ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมลดลงทำให้เกิดการเลื่อน (slip) ระหว่างผิววัสดุทั้งสอง ทำให้ไม่สามารถให้ข้อมูลที่สำคัญ ๆ เช่น ตำแหน่งที่เกิดการครากของเหล็กเสริม, ตำแหน่งที่เกิดการดุ้งของเหล็กเสริม เป็นต้น แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถให้ข้อมูลที่ขาดไปนี้ได้ซึ่งเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ

ลักษณะของกราฟกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่ได้จากการทดสอบ และได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด พบว่าภายหลังจากที่ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรจนกระทั่งเหล็กเสริมตามยาวที่รับแรงตัดเริ่มเกิดการคราก และเมื่อตัวอย่างทดสอบกลับมามีอยู่ในช่วงที่ไม่มีแรงกระทำทางด้านข้าง หรือแรงกระทำทางด้านข้างเป็นศูนย์ (unload) จะสังเกตเห็นว่าเหล็กเสริมตามยาวจะมีหน่วยการยืดตัว (tensile strain) เหลือค้างอยู่ ซึ่งหมายความว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหลังจากเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณด้านล่างของตัวอย่างทดสอบเริ่มครากไปแล้วยังปิดไม่สนิทในช่วงที่ไม่มีแรงกระทำทางด้านข้าง

ลักษณะที่สังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่ได้จากการทดสอบอีกอย่างหนึ่งคือ ณ ตำแหน่งที่เหล็กเสริมตามยาวเกิดการครากหลังจากนั้นเมื่อความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าแรงกระทำทางด้านข้างค่อนข้างจะคงที่ ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน และลักษณะอีกประการหนึ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือเมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการดุ้งหลังจากนั้นค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในขณะที่แรงกระทำด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งความชันของกราฟในช่วงหลังจากที่เหล็กเสริมตามยาวเกิดการดุ้งมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดสอบ และที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ค่อนข้างให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมทางขวาง

รูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมทางขวางของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดที่ได้จากผลการทดสอบ และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับผลจากการทดสอบที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะนำมาเพียงแค่ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกที่รอบในแนวที่ขนานกับแรงกระทำทางด้านข้าง ส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกที่รอบในแนวตั้งฉากกับแรงกระทำทางด้านข้างจะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากแบบจำลองของเสาที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งไม่สามารถให้ข้อมูลของเหล็กปลอกในแนวที่ตั้งฉากกับแรงกระทำทางด้านข้างได้

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกับความเครียดในเหล็กเสริมทางขวางที่ได้จากการทดสอบทุกตัวอย่างพบว่า ค่าความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นตามรอบทดสอบที่มากขึ้น และเมื่อตัวอย่างทดสอบกลับมาอยู่ในช่วงที่ไม่มีแรงกระทำทางด้านข้าง หรือแรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์ เหล็กเสริมทางขวางก็จะมีหน่วยการยืดตัว (tensile strain) เหลือค้างอยู่ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นตามรอบทดสอบที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งลักษณะเหล่านี้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน แม้ว่ารูปร่างของกราฟอาจจะไม่เหมือนกันซึ่งเนื่องมาจากชิ้นส่วนเหล็กเสริมที่นำมาใช้ในไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นคิดแต่ความเครียดในแนวแกนอย่างเดียว ไม่ได้คิดถึงผลจากการดัด ซึ่งในสภาพความเป็นจริงเหล็กปลอกจะถูกดันจากคอนกรีตภายในเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ดังนั้นผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเหล็กเสริมทางขวางนี้สามารถแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ในระดับหนึ่ง

4.4.4 ความสามารถในการสลายพลังงาน (Energy dissipation capacity)

สำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบนอกจากความเหนียว (ductility) ของโครงสร้างแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความสามารถในการสลายพลังงาน (energy dissipation capacity) เพื่อป้องกันการเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดไม่มีการเตือนภัยล่วงหน้าซึ่งจะมีการสลายพลังงานต่ำ กลไกในการสลายพลังงานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรนั้น เนื่องจากคอนกรีตจะเกิดการสูญเสียกำลัง และสติฟเนสเป็นอย่างมากเมื่อได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรที่มีค่ามาก ดังนั้นความสามารถในการสลายพลังงานที่ได้ส่วนใหญ่จะมาจากเหล็กเสริมภายหลังจากที่เหล็กเสริมมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น

วิธีการคำนวณค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบจะทำโดยการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา โดยแต่ละรอบจะเริ่มจากตำแหน่งที่แรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์ แล้วให้แรงกระทำด้านข้างไปทางบวกจนเกิดการย้อนแรงกระทำทางด้านข้างกลับมาในทิศทางตรงกันข้าม จนกระทั่งเกิดการย้อนแรงกระทำทางด้านข้างกลับมาในทิศทางเดิม จนค่าแรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเป็นศูนย์อีกครั้ง จะนับเป็น 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 เมื่อคำนวณค่าการสลายพลังงานตามวิธีการข้างต้นจะสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงค่าการสลาย

พลังงานสะสมที่ได้จากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดง ในรูปที่ 4.38 ถึงรูปที่ 4.43 และในตารางที่ 4.4 เป็นตารางสรุปค่าการสลายพลังงานในแต่ละรอบของทุกตัวอย่างทดสอบ

ค่าการสลายพลังงานสะสมสำหรับเสา CFL90/120/0.37, CFL90/120/0.30, CF135/120/0.37 และ CF135/120/0.30 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลในระดับที่น่าพอใจ โดยมีความแตกต่างจากค่าการสลายพลังงานที่ได้จากการทดสอบ 10.8, 5.9, 13.1 และ 15.34 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าการสลายพลังงานของทุกตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการทดสอบ และได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าระดับแรงอัดในแนวแกนมีผลต่อค่าการสลายพลังงานซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง CF135/120/0.30 กับ ตัวอย่าง CF135/120/0.37 ซึ่งมีระดับแรงอัดตามแนวแกน เท่ากับ $0.30f'_cA_g$ และ $0.37f'_cA_g$ ตามลำดับ พบว่า ที่จุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบ หรือที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3\Delta_y$ เท่ากัน ค่าการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่าง CF135/120/0.30 มีค่ามากกว่าค่าการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่าง CF135/120/0.37 และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่าง CFL90/120/0.30 กับ ตัวอย่าง CFL90/120/0.37 ซึ่งมีระดับแรงอัดตามแนวแกน เท่ากับ $0.30f'_cA_g$ และ $0.37f'_cA_g$ ตามลำดับ พบว่า ที่จุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบ หรือที่ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา เท่ากับ $3\Delta_y$ เท่ากัน ค่าการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่าง CFL90/120/0.30 มีค่ามากกว่าค่าการสลายพลังงานสะสมของตัวอย่าง CFL90/120/0.37 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน จากผลที่ได้นี้ สามารถสรุปได้ว่า ถ้าระดับแรงอัดตามแนวแกนมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าการสลายพลังงานสะสมมีค่าลดลง

4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว

รูปที่ 4.44 ถึงรูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากทุกตัวอย่างทดสอบพบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 (ชั้นส่วนที่ 54 และ 67) จะเกิดความเครียดมากกว่าเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 (ชั้นส่วนที่ 55 และ 68) ซึ่งเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะเกิดพฤติกรรม Bauschinger effects ตั้งแต่ช่วงแรกๆ ในการวิเคราะห์ ในขณะที่กว่าเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะเกิดการย้อนแรงในช่วงที่เกิดการครากเป็นส่วนมาก และยังมีขนาดของวงรอบที่เล็กซึ่งเมื่อย้อนแรงกระทำกลับมาในทิศทางที่เกิดการครากก็ยังสามารถแสดงลักษณะของพฤติกรรมแบบฮิสทีติกได้อีก ส่วนพฤติกรรม Bauschinger effects จะมาเกิดเมื่อในช่วงหลังของการวิเคราะห์ และเมื่อภายหลังจากเหล็กเสริมตามยาวเกิดการดึงซึ่งค่าหน่วยแรงจะไม่เพิ่มขึ้นในขณะที่ความเครียดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งสาเหตุนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาที่ได้จากการวิเคราะห์ลดลงภายหลังจากที่เหล็กเสริมตามยาวเกิดการดึง

4.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีต

รูปที่ 4.52 ถึงรูปที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิว นอก และคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อพิจารณา ลักษณะโดยรวมของกราฟก็จะให้ผลในทำนองเดียวกันกับเหล็กเสริมตามยาวคือ คอนกรีตที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะเกิดความเครียดมากกว่าคอนกรีตที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 เมื่อพิจารณาคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 (ชิ้นส่วนที่ 175 และ 188) ของทุกตัวอย่าง ทดสอบพบว่า จะเกิดค่าความเครียดอัดเป็นอย่างมาก ซึ่งตำแหน่งที่คอนกรีตผิวนอกเกิดการหลุดล่อนกำลังของคอนกรีตมีค่าน้อยมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่สามารถรับแรงกระทำได้จึงสามารถพิจารณาให้เกิดการหลุดล่อน

สำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 (ชิ้นส่วนที่ 5 และ 8) จะเกิดความเครียดมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 (ชิ้นส่วนที่ 9 และ 12) ซึ่งค่าหน่วยแรงยังไม่ถึงค่ากำลังของคอนกรีต และเมื่อเหล็กเสริมตำแหน่งที่อยู่ติดกันกับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกนั้นๆเกิดการดึง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะของกราฟจะเห็นว่ากำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดเป็นเหล็กปลอกจะลดลงเป็นอย่างมากเนื่องจากถูกพิจารณาให้เป็นคอนกรีตธรรมดา พฤติกรรมนี้ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาที่ได้จากการวิเคราะห์ลดลง

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นอย่างดีซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง, ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว และความสามารถในการสลายพลังงาน
2. การหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก ,การดุ้งของเหล็กเสริมตามยาว และ การเปลี่ยนสถานะของคอนกรีตภายในเหล็กปลอกซึ่งอยู่ติดกับเหล็กเสริมที่เกิดการดุ้งเป็นคอนกรีตปกติที่ไม่มีผลของการโอบรัด จะมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการลดกำลัง และสติฟเนส (strength and stiffness degradation) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมากๆใกล้จุดวิบัติ ซึ่งจะต้องรวมไว้ในแบบจำลองวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมไม่เช่นนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะไม่สามารถจำลองการลดกำลังและสติฟเนสของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างถูกต้อง
3. หลังจากที่ได้รวมผลของการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก และ การดุ้งของเหล็กเสริมตามยาวไว้ในแบบจำลองวัสดุ การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายตำแหน่งที่เกิดการวิบัติของเสาได้เป็นที่น่าพอใจสำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37, CFL90/120/0.30 และ CF135/120/0.30 แต่สำหรับ ตัวอย่างเสา CF135/120/0.37 ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่แสดงตำแหน่งที่เกิดการวิบัติได้ชัดเจน เนื่องจากเกิดรอยแตกกว้างในแนวตั้งขนาดใหญ่มากยาวตั้งแต่หัวเสามาจนถึงฐานเสาเมื่อเสาดันนี้เกิดการวิบัติทำให้แบบจำลองการแตกกว้างสำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นแบบการแตกกว้างทั่วๆไปไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของเสาเมื่อเกิดรอยแตกกว้างขนาดใหญ่ได้ดีพอ
4. การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาซึ่งบางข้อมูลได้ค่าจากการทดสอบไม่ครบถ้วน หรือบางข้อมูลไม่สามารถได้จากการทดสอบ เช่น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต และเหล็กเสริม ซึ่งทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และเหล็กเสริมในอนาคตมีดังนี้

1. ในงานวิจัยนี้จะสมมติให้ความยาวในการเกิดการดุ้ง (buckling length) ของเหล็กเสริมตามยาวมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก ซึ่งไม่ถูกต้องเสมอไป ยกเว้นในบางกรณี คือ 1. เมื่อเหล็กปลอกมีความแข็งแรงมาก, 2. เหล็กเสริมตามยาวมีความชะลูดมาก และ 3. ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกมีค่ามาก ดังนั้นเพื่อให้สามารถจำลองพฤติกรรมเมื่อเกิดการดุ้งได้อย่างเหมาะสม จึงควรที่จะพิจารณาค่าความยาวในการเกิดการดุ้งให้มีความแม่นยำ

2. ในงานวิจัยนี้ไม่ได้คิดคำนึงถึงผลของของอซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมโดยรวมของเสาเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมของของอ เช่น การเสริมคัลิป เป็นเรื่องที่ค่อนข้างลำบาก มีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องมาก แต่เราอาจสามารถใส่ผลของของออย่างง่ายไว้ในข้อกำหนดในการเกิดการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอกเป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. จตุพล เทพมังกร. ผลของระดับแรงอัดตามแนวแกนและรูปแบบเหล็กปลอกเดี่ยวที่มีต่อความเหนียวและการสลายพลังงานของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
2. Sittipunt, C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Shear Walls. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.
3. Ngo, D.; and Scordelis A.C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams. ACI Journal, Vol. 65 No.9 (September 1968): 152-163.
4. Stevens, N.J.; Uzumeri S.M.; and Collins M.P. Analytical Modeling of Reinforced concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loadings. Publication No. 87-1, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, January 1987.
5. เสกสรรค์ ธรรมอำนวยสุข. การศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
6. พิชัย ภัทรรัตนกุล. ผลของการจัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแบบต่างๆต่อพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
7. Watson, S.; and Park, R. Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.120 No.6 (June 1994): 1825-1849.
8. Wehbe, N.I.; Salid, M.S.; and Sander, D.H. Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement. ACI Structural Journal, Vol.96 No.2 (March-April 1999): 248-258.
9. Singh, A.; Gerstle, K.H.; and Tulin L.G. The Behavior of Reinforcing Steel Under Reversal Loading. Journal ASTM, Materials Research and Standards, Vol. 5 No.1 (January 1995): 12-17.
10. Kent, D.C.; and Park, R. Cyclic Load Behavior of Reinforcing Steel. Strain, Vol.9 No.3 (July 1973): 98-103.
11. Aktan, A.E.; Karson, B.I.; and Sozen, M.A. Stress-Strain Relationships of Reinforcing Bars Subjected to Large Strain Reversals. Civil Engineering Studies, Structural Research Series No.397, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, June 1993.
12. Monti, G.; and Nuti, C. Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling. Journal of Structural Engineering, Vol.118 No.12 (December 1992): 3268-3284.
13. วรพงษ์ จินข้าง. พฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

14. Rashid, Y.R. Analytical of Prestressed Concrete Vessels. Nuclear Engineering and Design, Vol.7 No.4 (April 1968): 334-344.
15. Bazant, Z.P.; and Cedolin, L. Blunt Crack Band Propagation in Finite Element Analysis. ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.105 No.EM2 (April 1979): 397-315.
16. De Borst, R.; and Nauta, P. Non-orthogonal Cracks in a Smeared Finite Element Method. Engineering coputations, Vol.2(March 1985): 35-46.
17. Yankelevsku, R.Z.; and Reinhardt, H.W. Uniaxial Behavior of Concrete in Cyclic Tension. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 115 No.1 (January 1989): 166-182.
18. Shkiekh, S.A. and Uzumeri, S.M. Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns. ASCE Journal of the Structural Division, Vol.108 No. ST12 (December 1982): 2703-2722.
19. Karson, I.D.; and Jirsa, J.O. Behavior of Concrete Under Compressive Loading. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.95 No.ST12 (December 1969): 2543-2563.
20. Sinha, B.P.; Gerstle, K.H.; and Tulin L.G. Stress-Strain Relations for Concrete Under Cyclic Loadings. Journal of American Concrete Inistitute, Vol.61 No.2 (February 1967): 195-211.
21. Yankelevsku, R.Z.; and Reinhardt, H.W. Model for Cyclic Compressive Behavior of Concrete. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 115 No.1 (January 1989): 166-182.
22. Popov, E.G. Mechanical Characteristics and Bond of Reinforcing Steel under Seismic Conditions. Proceeding, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction (ERCBC), University of California at Berkeley, Berkeley, California,(July 1977): 658-682.
23. Ma, S.Y.; Betero, V.V.; and Popov, E.G. Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-beams. Report No. EERC 76-2, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkley, May 1976.
24. Dhakal, R.P. Enhanced Fiber Model in Highly Inelastic Range and Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo Japan, 2000.
25. Park, R.; Kent, D.C.; and Richard, A.S. Reinforced Concrete Member with Cyclic Loadings. ASCE Journal of Structural Division, Vol.98 No.ST7 (July 1972): 1341-1360.
26. Darwin, D.; and Pecknold, D.A.W. Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete. Civil Engineering Studies, Structural Research Series No.409, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 1974.
27. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99). American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต

Normal Stress Function		Shear Stress Function	
Parameter	Value	Parameter	Value
ε_i	$50.0 \varepsilon_{cr}$	μ_1	0.14
σ_i	$0.2 \sigma_{cr}$	ε_{min}	$12.5 \varepsilon_{cr}$
α	0.3	μ_2	0.2
σ_1	$3 \sigma_{cr}$	γ_n	0.015
σ_2	$0.2 \sigma_{cr}$	n	3
σ_3	$0.8 \sigma_{cr}$	τ_{slip}	0.04 ksi
σ_4	$0.2 \sigma_{cr}$	G_{unt}	$0.10 G_{conc}$
σ_n	$3.0 \sigma_{cr}$	G_{min}	$0.0005 G_{conc}$

ตารางที่ 2.2 สรุปค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริม

Type of Curve	Parameter	Value
strain hardening curve	m	4.1
	σ_{om}	$0.7 \sigma_y$
$\frac{1}{2}$ cycle from compression	α	10
	A	0.3032
	B	0.7520
$\frac{1}{2}$ cyclic from tension	α	7.0
	A	0.7735
	B	0.47989

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 การแยกประเภทการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น

ชนิดของการวิเคราะห์	คำอธิบาย	ชนิดของสูตรที่ใช้
แบบไม่เชิงเส้นทางวัสดุเท่านั้น	<ul style="list-style-type: none"> - มีการเคลื่อนตัว และความเครียดเพียงเล็กน้อย - ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดแบบไม่เชิงเส้น 	แบบไม่เชิงเส้นทางวัสดุ
การเคลื่อนตัวมาก, การหมุนของจุดต่อมาก แต่ความเครียดน้อย	<ul style="list-style-type: none"> - การเคลื่อนตัว และการหมุนของจุดต่อมีค่ามาก แต่มีความเครียดน้อย - ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดอาจจะเป็นแบบเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้นก็ได้ 	แบบไม่เชิงเส้นทางด้านรูปร่างโดยจะพิจารณา หรือไม่พิจารณาความไม่เชิงเส้นทางด้านวัสดุ
การเคลื่อนตัวมาก, การหมุนของจุดต่อมาก และความเครียดมาก	<ul style="list-style-type: none"> - ความเครียดมีค่ามาก - การเคลื่อนตัว และการหมุนของจุดต่ออาจมีค่ามาก - ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดอาจจะเป็นแบบเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้นก็ได้ 	แบบไม่เชิงเส้นทางด้านรูปร่างโดยจะพิจารณา หรือไม่พิจารณาความไม่เชิงเส้นทางด้านวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กของและระดับแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	เหล็กเสริมตามยาว			เหล็กเสริมทางขวาง			ลักษณะของข้อที่ใช้	ระดับแรงอัดตามแนวแกน $P/(f'_c A_g)$
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม)	จำนวน (เส้น)	ρ_l (%)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม)	ระยะห่าง, s (มม)	$A_{sh}/(sh_c)$ (%)		
CFL90/120/0.37	20	16	3.14	9	120	0.453	90° + ACI crossties; with clips	0.37
CF135/120/0.30	20	16	3.14	9	120	0.453	135° + ACI crossties; no clips	0.30
CFL90/120/0.30	20	16	3.14	9	120	0.453	90° + ACI crossties; with clips	0.30
CFL90/120/0.30(9.1)	20	16	3.14	9	120	0.453	90° + ACI crossties; with clips	0.30

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้สำหรับตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	อายุ (วัน)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	f'_c (กก./ซม. ²)
CFL90/120/0.37	93	2325	330
CF135/120/0.30	35	2435	364
CFL90/120/0.30	211	-	323
CFL90/120/0.30	45	2423	355

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเหล็กเสริมที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ

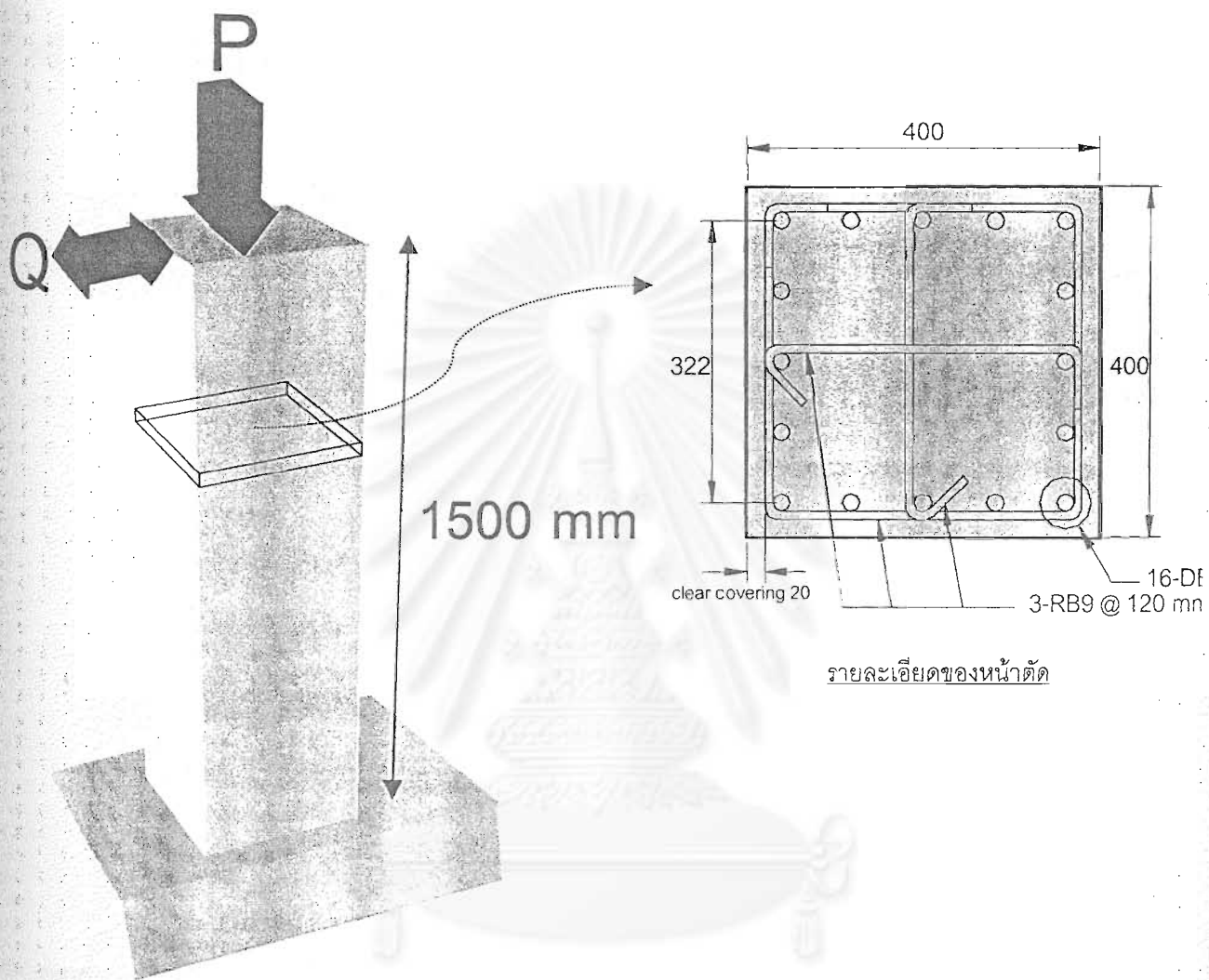
ตัวอย่างเหล็กเสริม	f_y, f_{yh} (กก./ซม. ²)	f_{su} (กก./ซม. ²)	E_s (กก./ซม. ²)
DB20ก	4786	6388	2170000
DB20ข	4837	6039	1960000
RB9ก	3120	4584	2060000
RB9ข	3098	4517	2160000
RB9ค	3112	4799	2170000
RB9ง	3240	4798	2160000

026061ตารางที่ 4.4 สรุปค่าการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบทุกตัว

รอบที่	รอบทดสอบ	ค่าการสลายพลังงาน(ตัน-มม.)															
		CFL90/120/0.37				CFL90/120/0.30				CF135/120/0.37				CF135/120/0.30			
		การทดสอบ		FINITE		การทดสอบ		FINITE		การทดสอบ		FINITE		การทดสอบ		FINITE	
		แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม	แต่ละรอบ	สะสม
1	$\pm 0.75H_u$	102	102	68.7	68.7	158	158	50.3	50.3	123	123	79	79	103	103	70	70
2	$\pm 1\Delta$, รอบที่ 1	122	224	195.3	264	197	355	257.7	308	142	265	197	276	129	232	184	254
3	$\pm 1\Delta$, รอบที่ 2	86	310	188	452	154	509	270	578	86	351	177	453	83	315	175	429
4	$\pm 2\Delta$, รอบที่ 1	675	985	725	1177	897	1406	1082	1660	652	1003	767	1220	752	1067	850	1279
5	$\pm 2\Delta$, รอบที่ 2	540	1525	697	1874	798	2204	937	2597	481	1484	750	1970	568	1635	735	2014
6	$\pm 3\Delta$, รอบที่ 1	1389	2914	1470	3344	1764	3968	1830	4427	1352	2836	1416	3386	1523	3158	1630	3644
7	$\pm 3\Delta$, รอบที่ 2	1311	4225	1380	4724	1660	5628	1810	6237	1396	4232	1399	4785	1410	4568	1625	5269
8	$\pm 4\Delta$, รอบที่ 1	1716	5941	1860	6584	2836	8464	2950	9187								
9	$\pm 4\Delta$, รอบที่ 2					2450	10914	2380	11567								

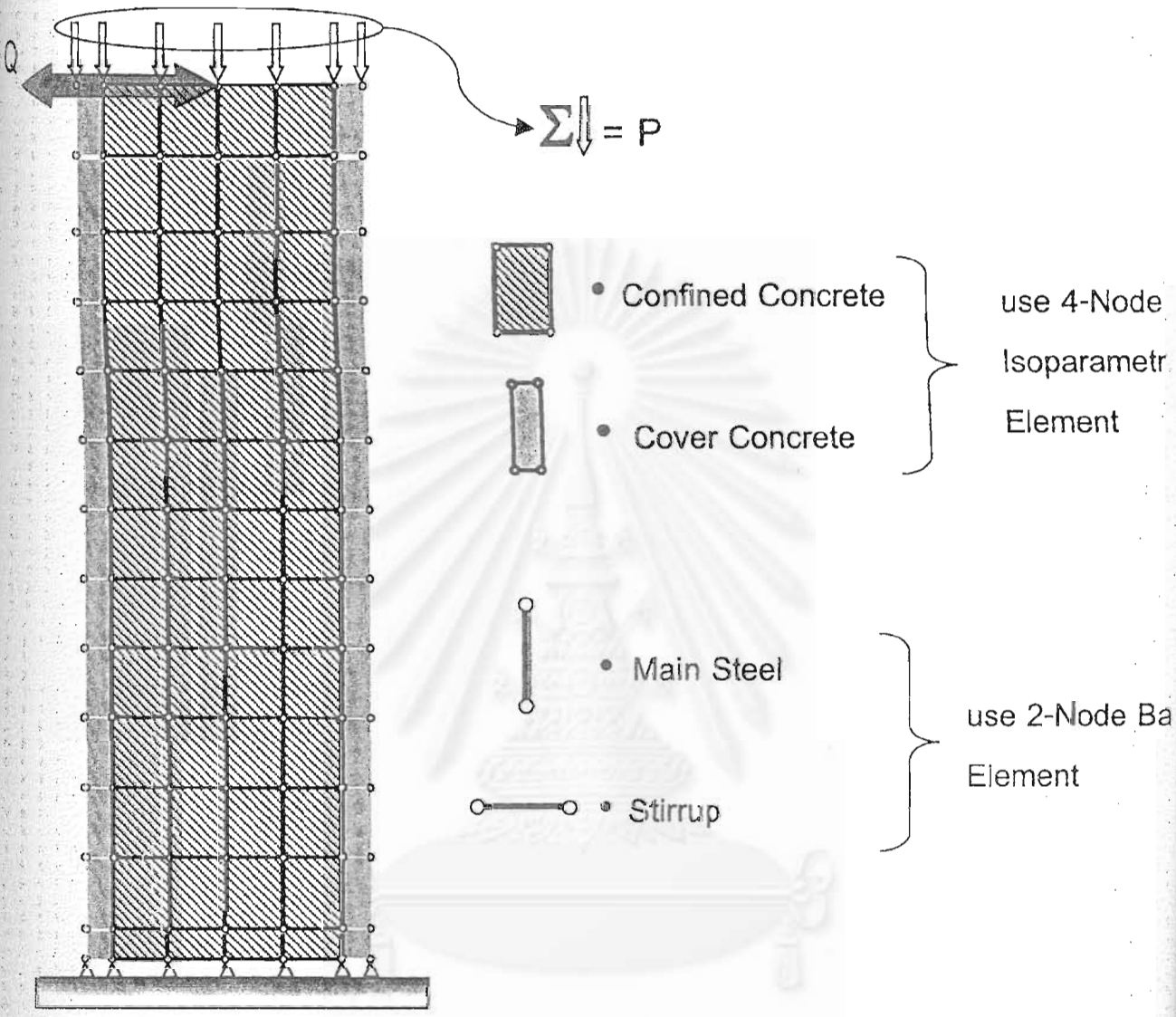
* รอบที่ 8 ของตัวอย่างทดสอบ CF135/120/0.37 ตรงกับรอบทดสอบ $\pm 3.5\Delta y$ รอบที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



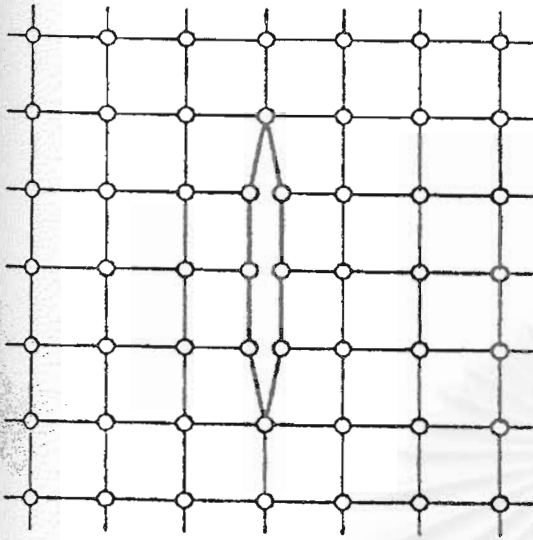
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1.1 ขนาดและรูปร่างของเสาที่ใช้ในการทดสอบ

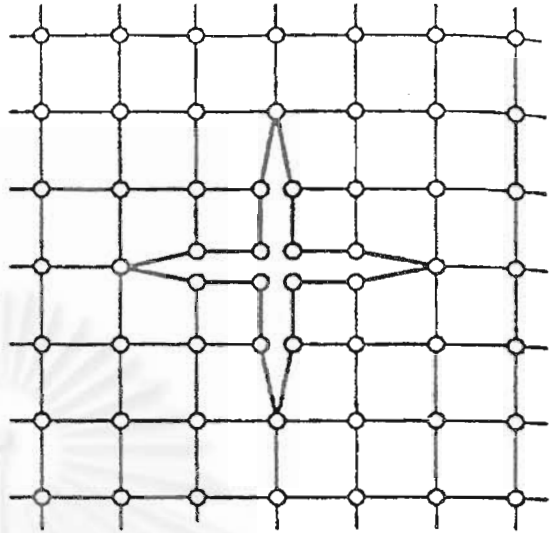


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1.2 แบบจำลองของเสาที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

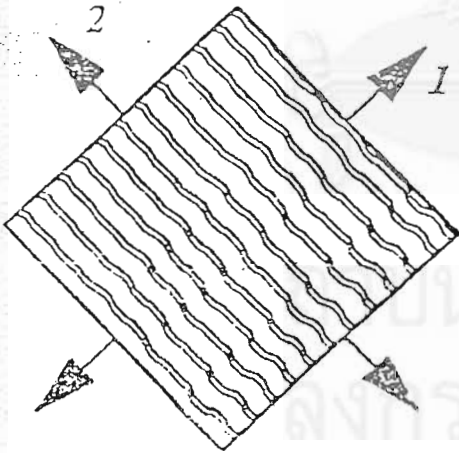


a) one-directional cracking



b) two-directional cracking

รูปที่ 2.1 แบบจำลองรอยแตกกว้างเป็นแนว

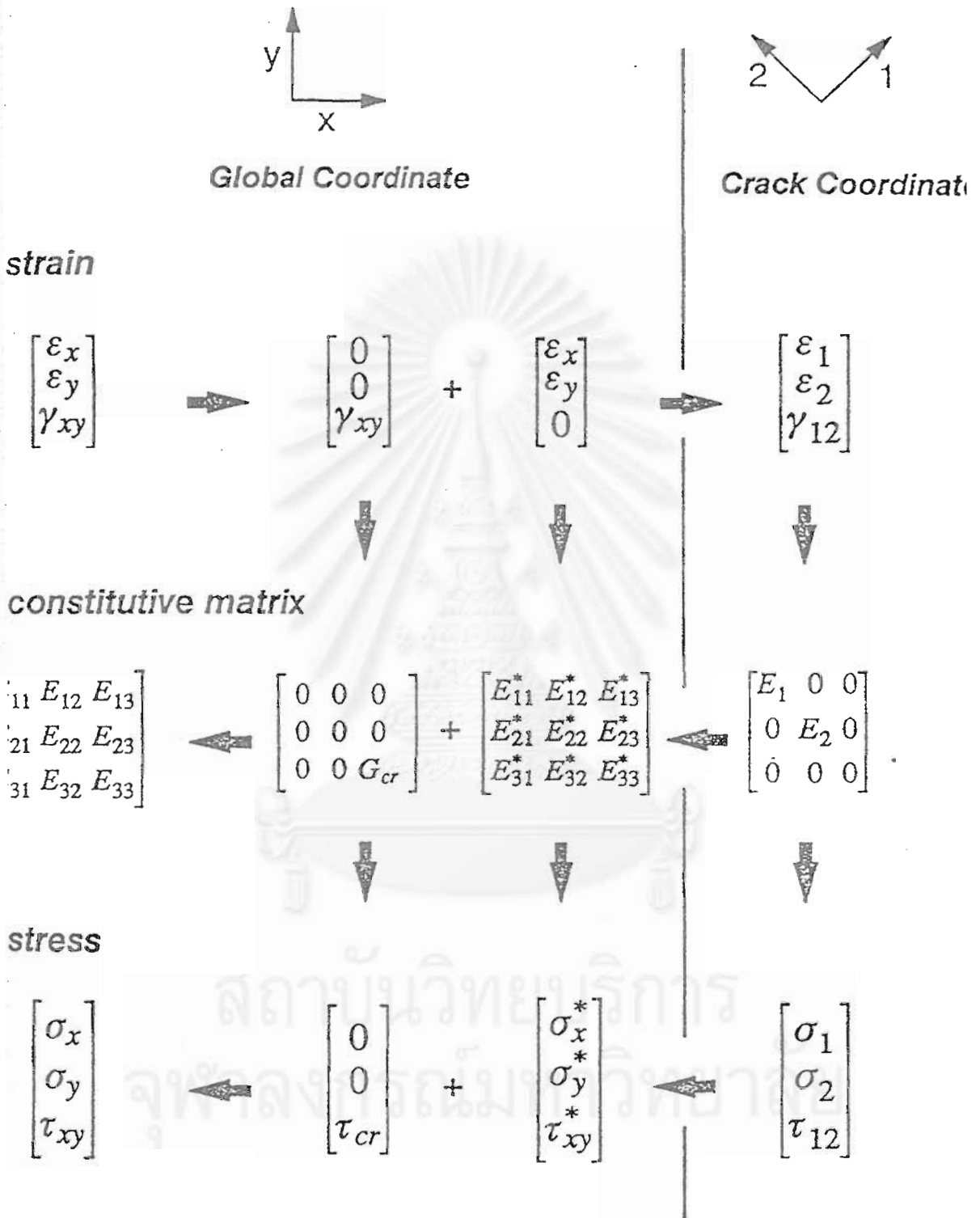


a) one-directional cracking

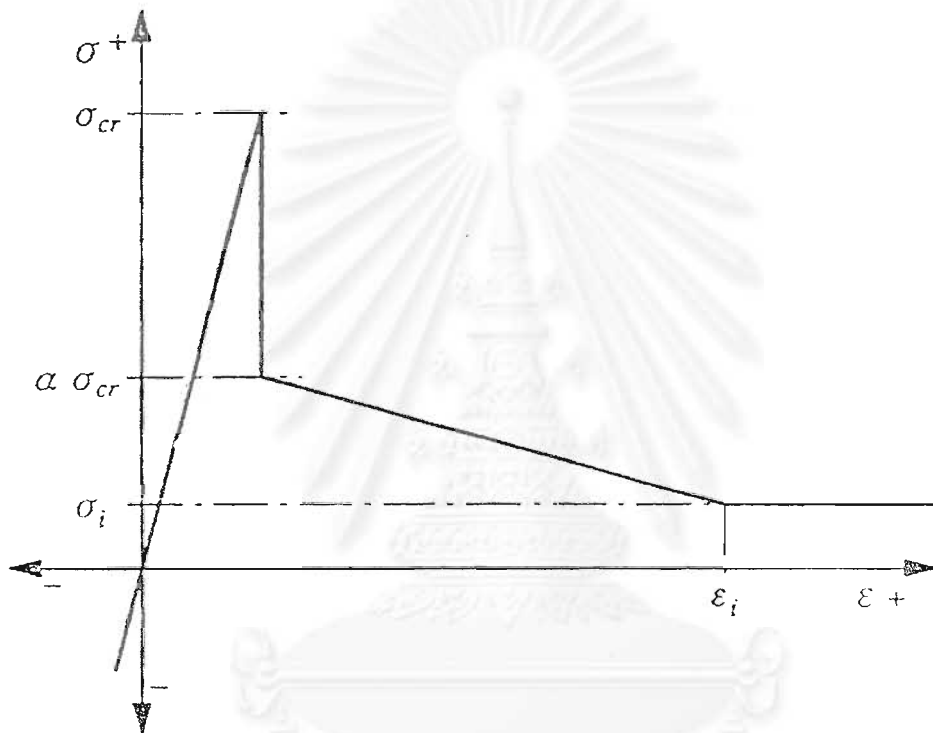
$$\begin{bmatrix} \partial\sigma_1 \\ \partial\sigma_2 \\ \partial\tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial\varepsilon_1 \\ \partial\varepsilon_2 \\ \partial\gamma_{12} \end{bmatrix}$$

b) constitutive matrix in crack direction

รูปที่ 2.2 แบบจำลองรอยแตกกว้างทั่วๆ

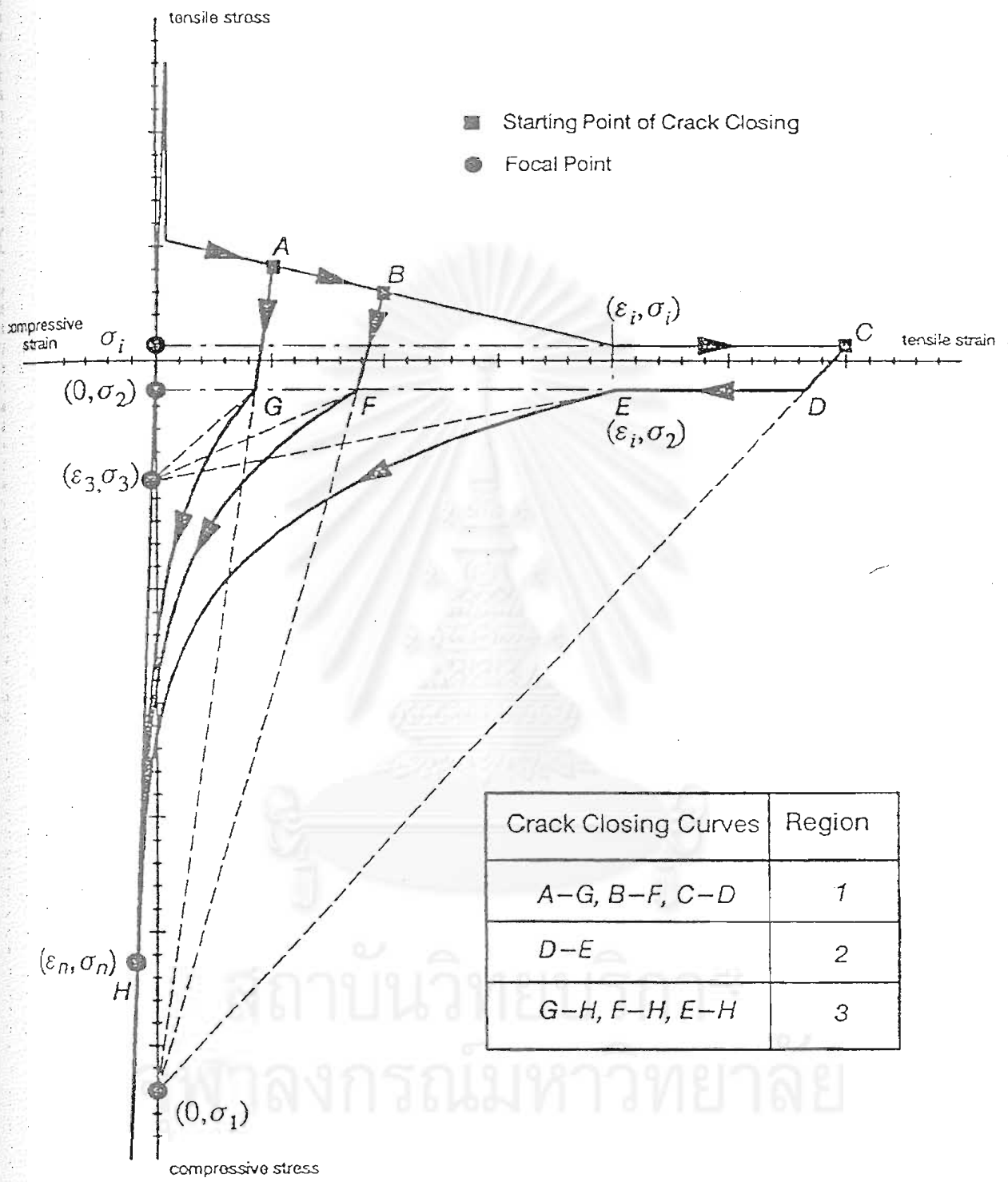


รูปที่ 2.3 การแยกความเค้น

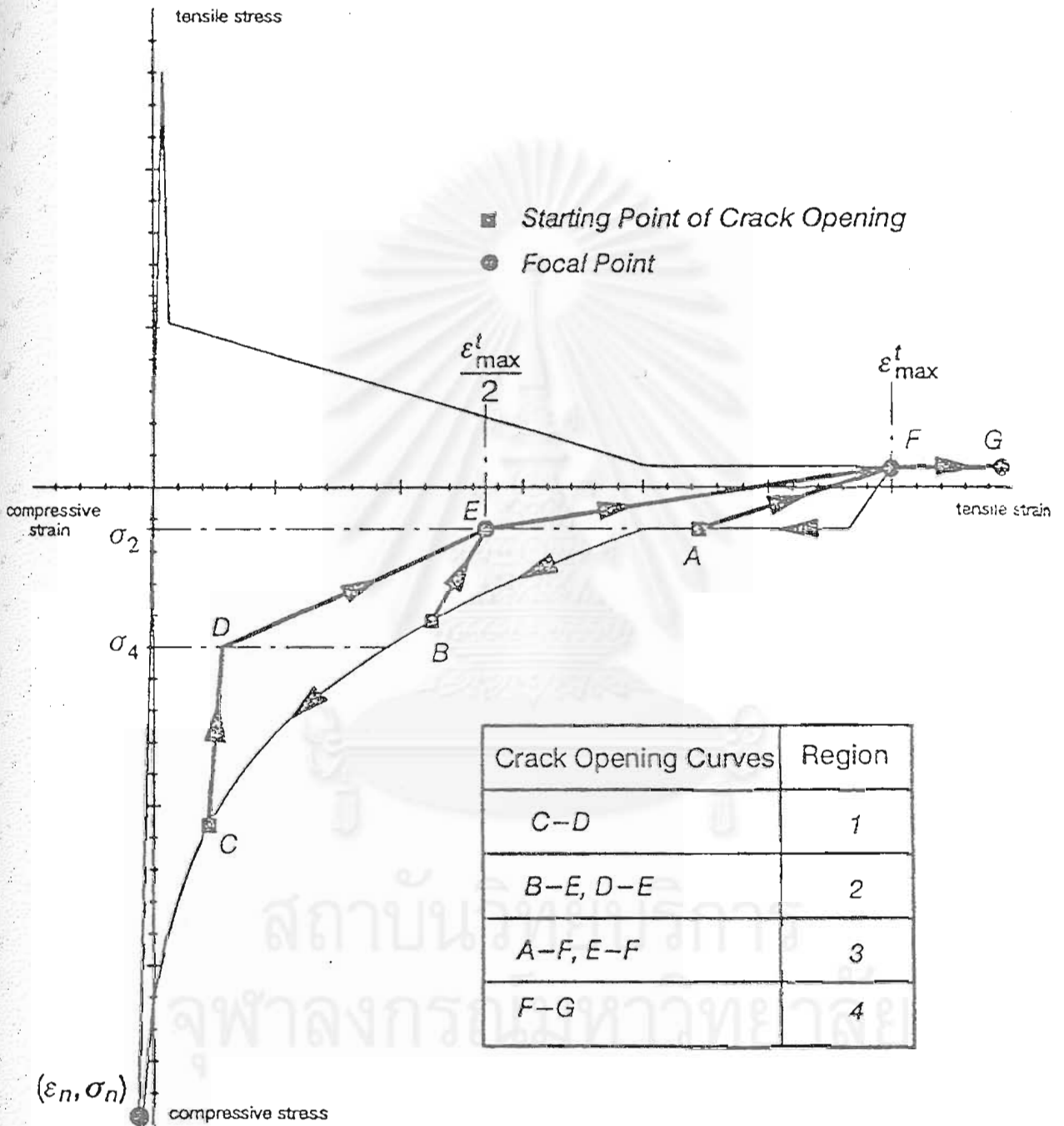


รูปที่ 2.4 แบบจำลองการแข็งขึ้นทางด้านแรงดึง (tension stiffening)

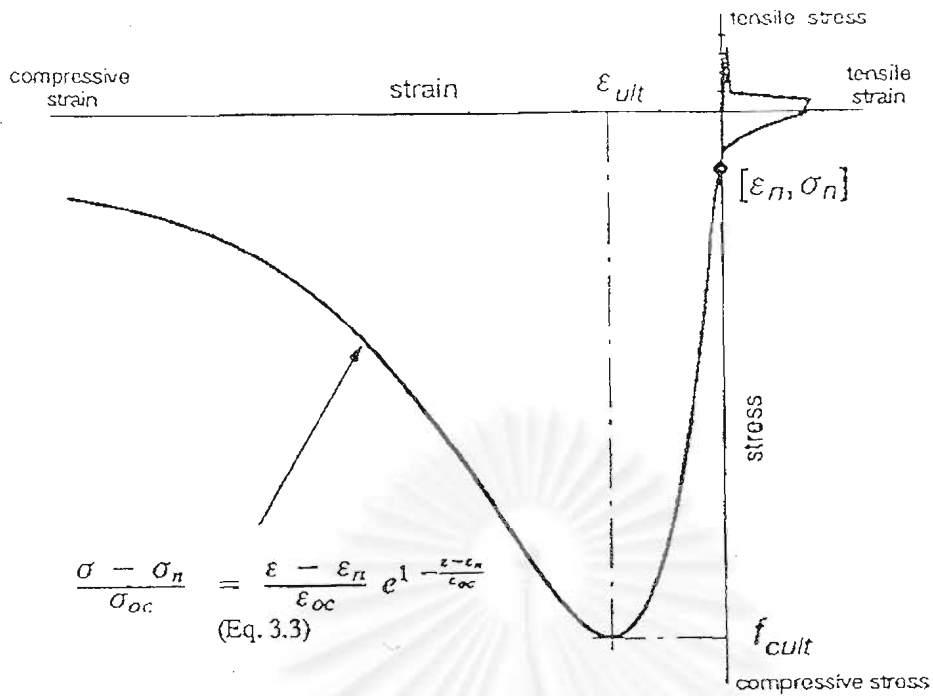
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



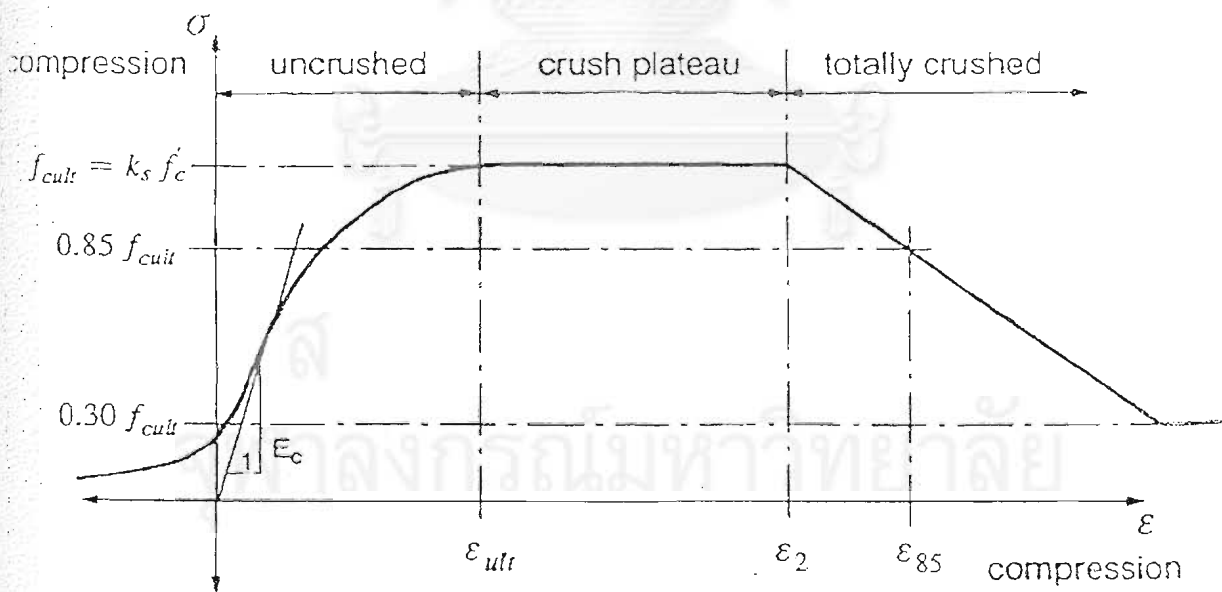
รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดสำหรับการปิดของรอยแตกร้าว (Crack closing . $\Delta\epsilon < 0$)



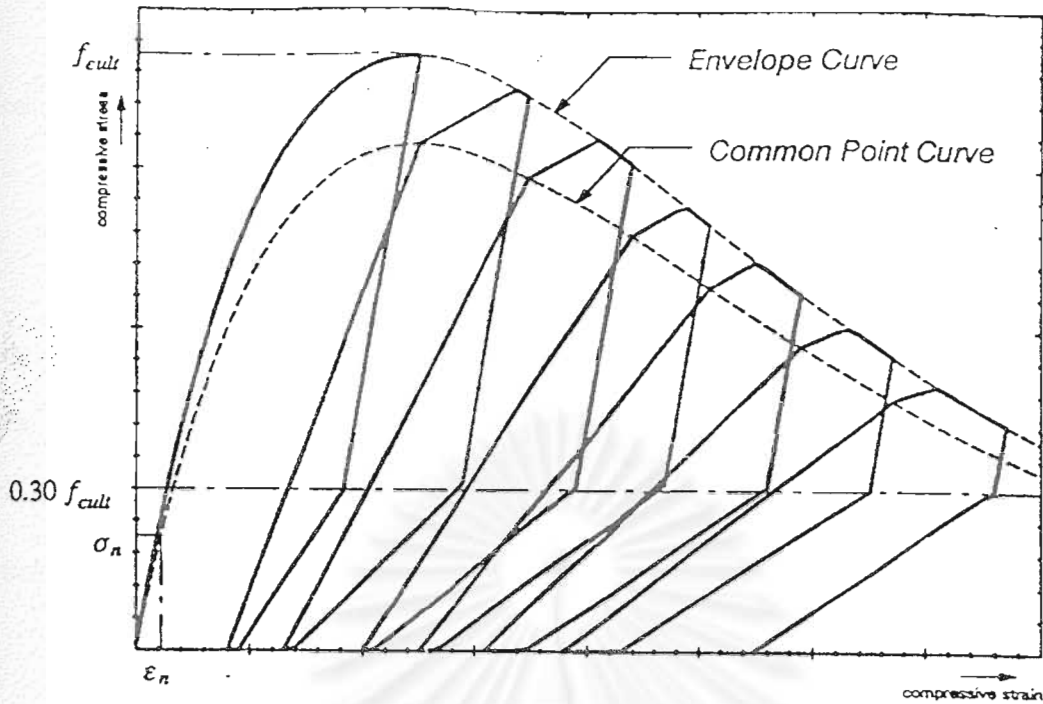
รูปที่ 2.6 ข้อกำหนดสำหรับการเปิดของรอยแตกร้าว (crack opening, $\Delta\epsilon > 0$)



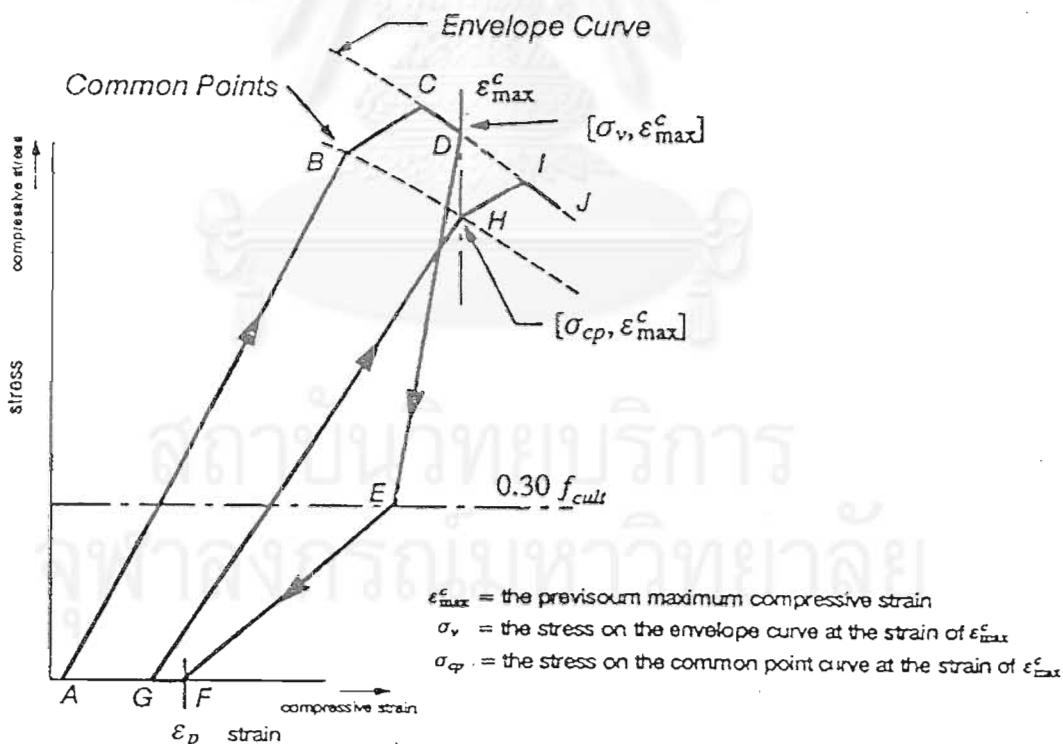
รูปที่ 2.7 แบบจำลองการอ่อนลงทางด้านแรงอัด



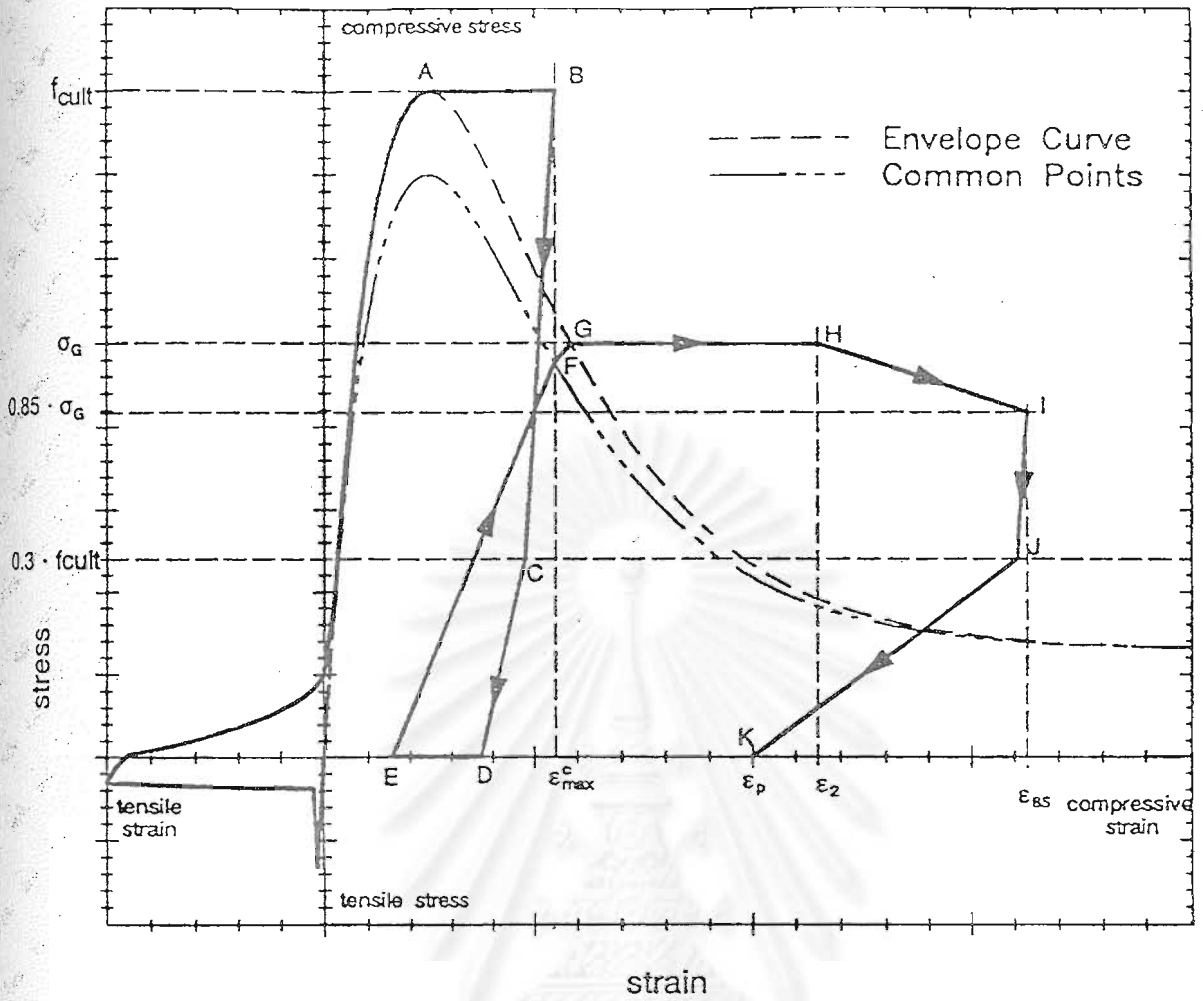
รูปที่ 2.8 แบบจำลองสำหรับคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่เสนอโดย Shiekh และ Uzumeri



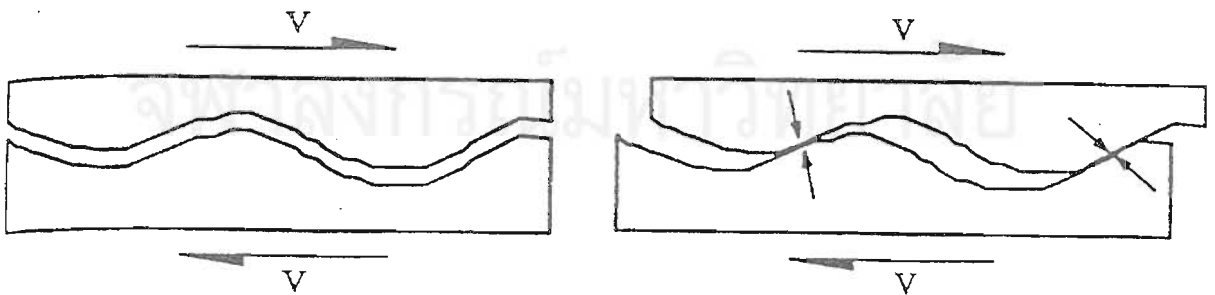
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัดกระทำแบบเป็นวัฏจักร



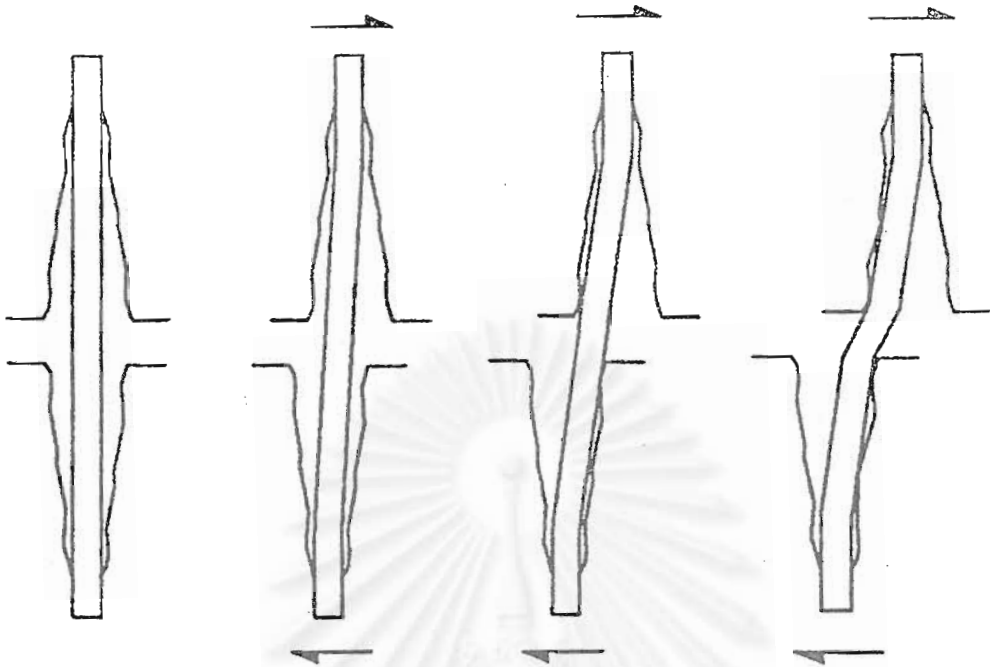
รูปที่ 2.10 ข้อกำหนดสำหรับการลดแรงกระทำและการเพิ่มแรงกระทำใหม่ สำหรับคอนกรีตที่ไม่ได้โอบรัดด้วยเหล็กปลอก



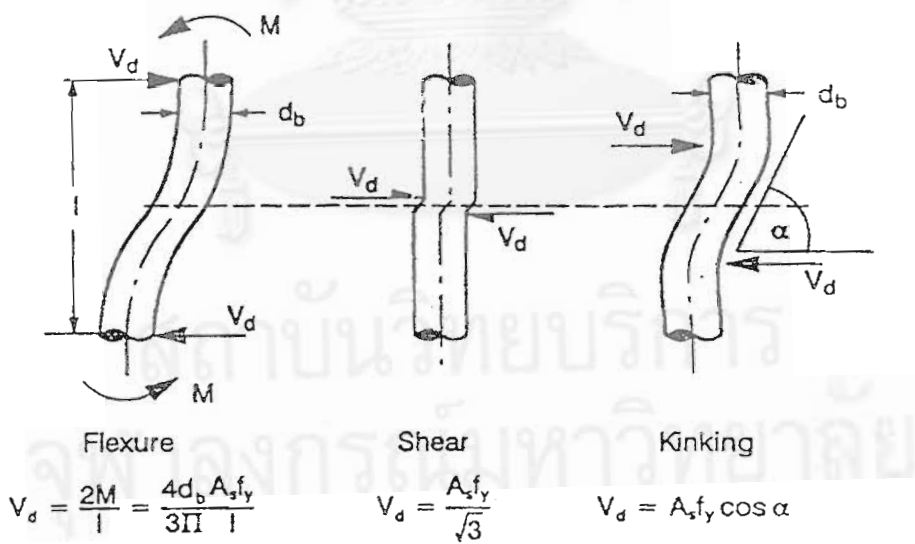
รูปที่ 2.11 ข้อกำหนดสำหรับการลดแรงกระทำและการเพิ่มแรงกระทำใหม่ สำหรับคอนกรีตที่โอบรัดด้วยเหล็กปลอก



รูปที่ 2.12 การถ่ายแรงเฉือนผ่านผิวสัมผัส

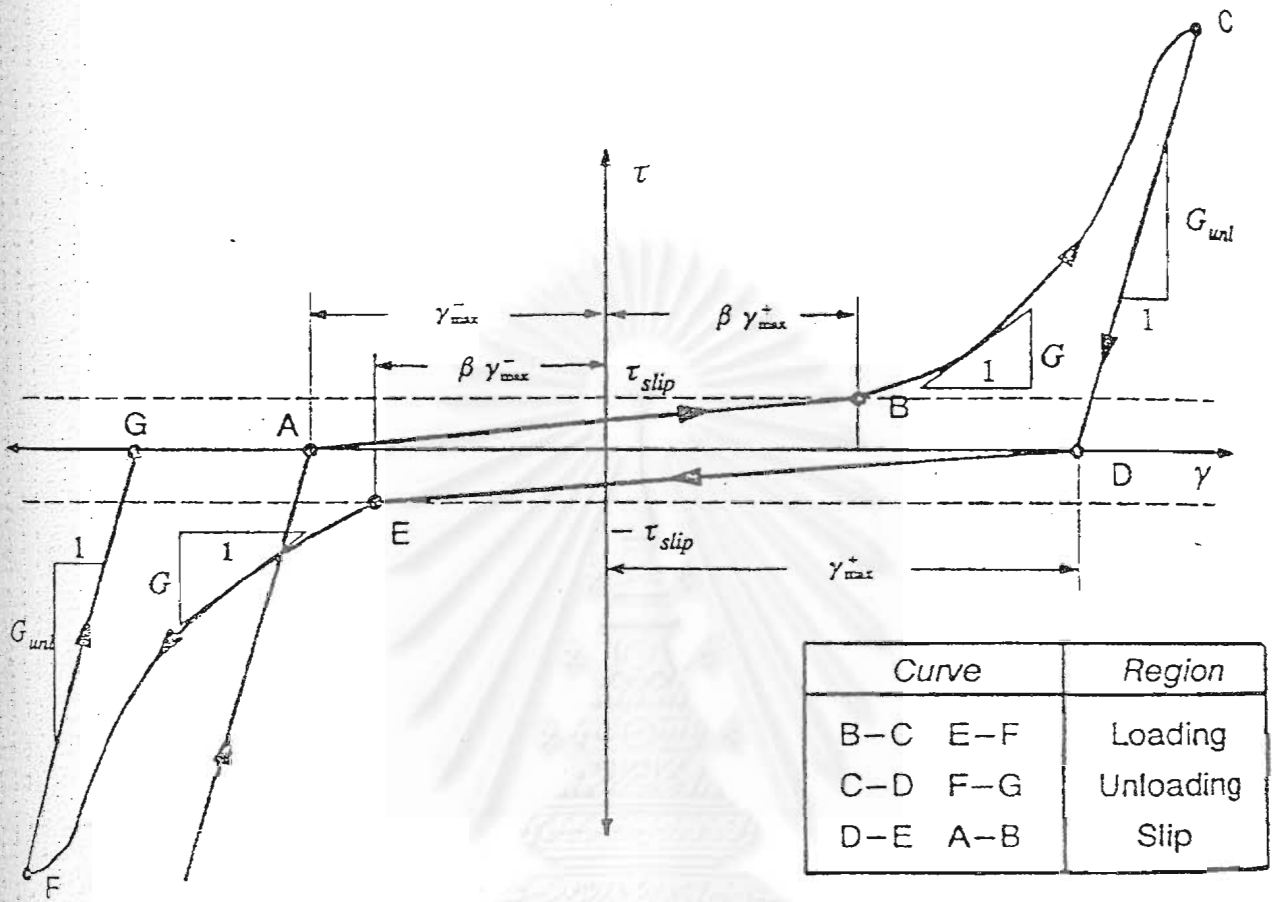


(ก) แสดงพฤติกรรมการเกิด Dowel Action



(ข) กลไกที่เกิดจาก Dowel Action

รูปที่ 2.13 สติฟเนสแรงเฉือนเนื่องจาก Dowel action

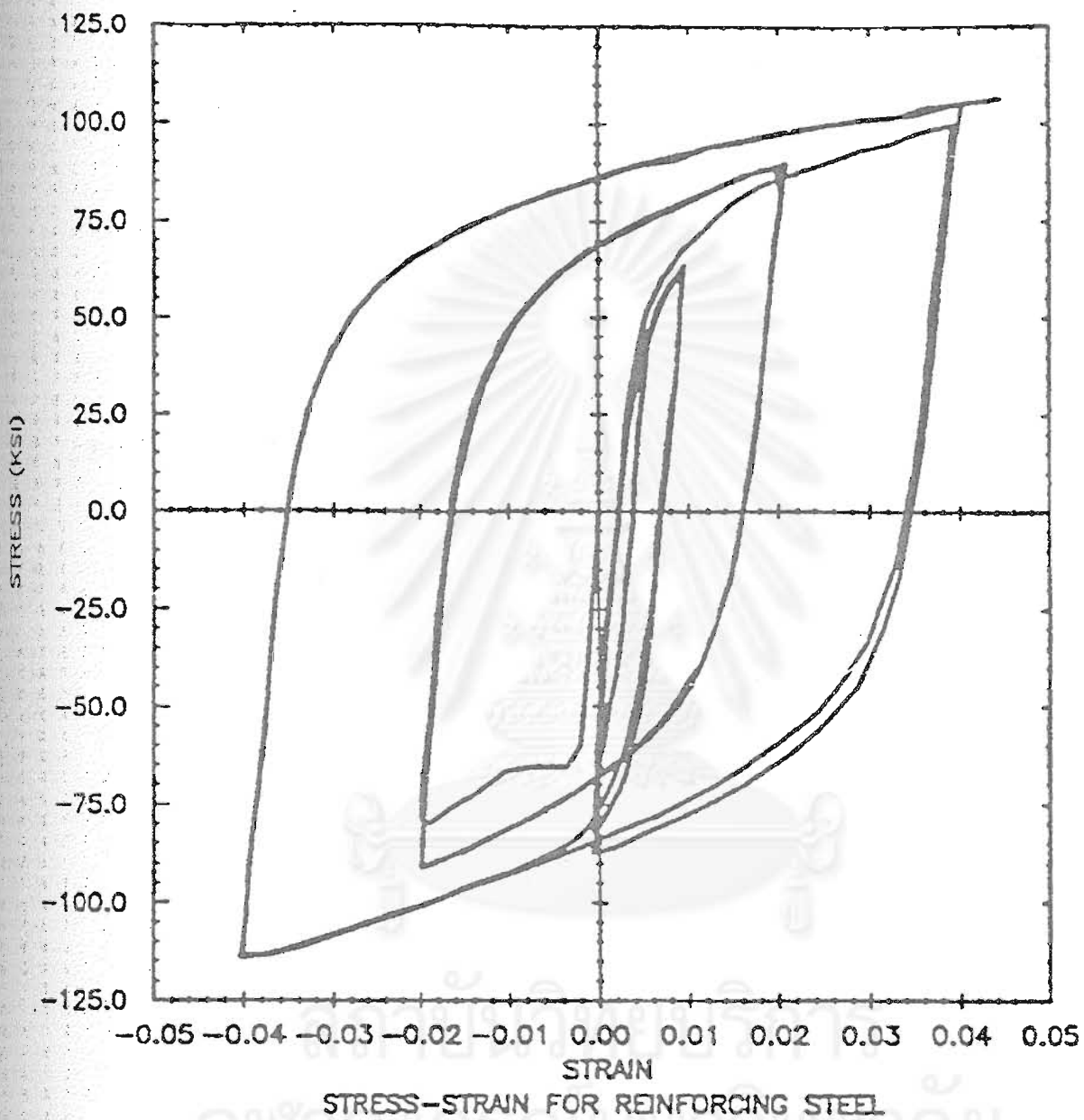


γ_{max}^- = max. negative shear strain intercept in the previous cycles

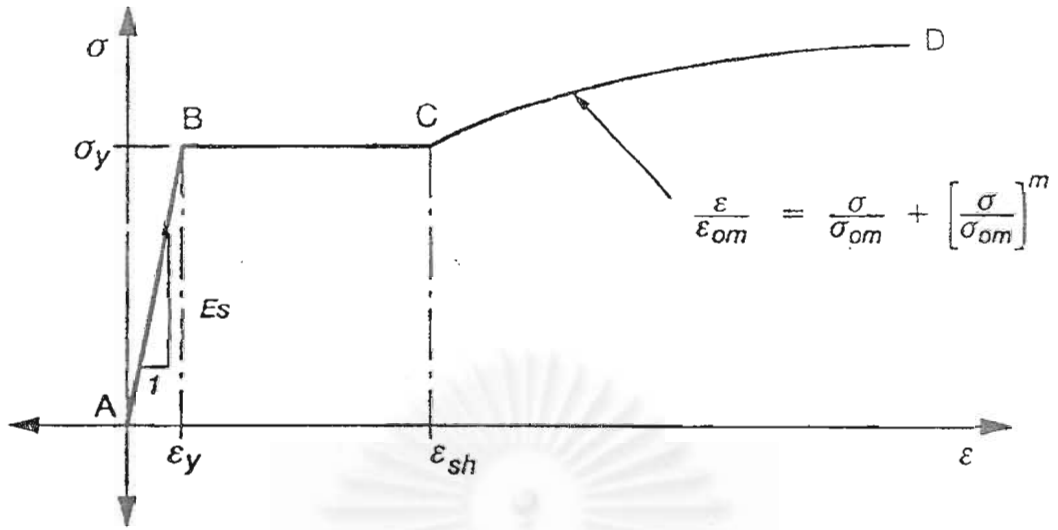
γ_{max}^+ = max. positive shear strain intercept in the previous cycles

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

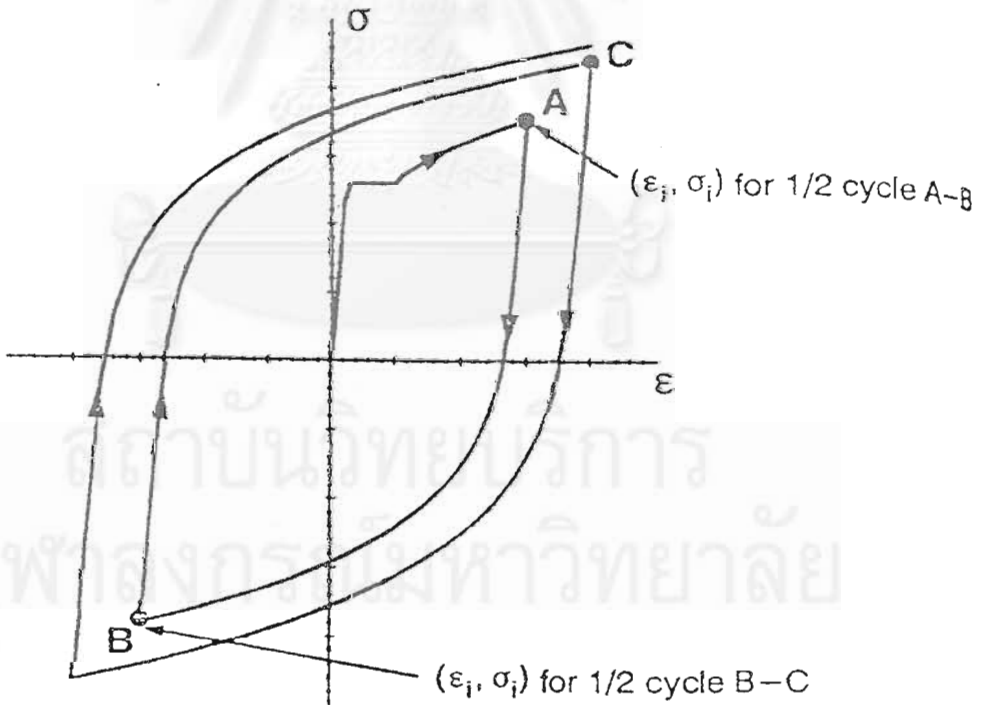
รูปที่ 2.14 แบบจำลองหน่วงแรงและความเครียดเฉือนของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร



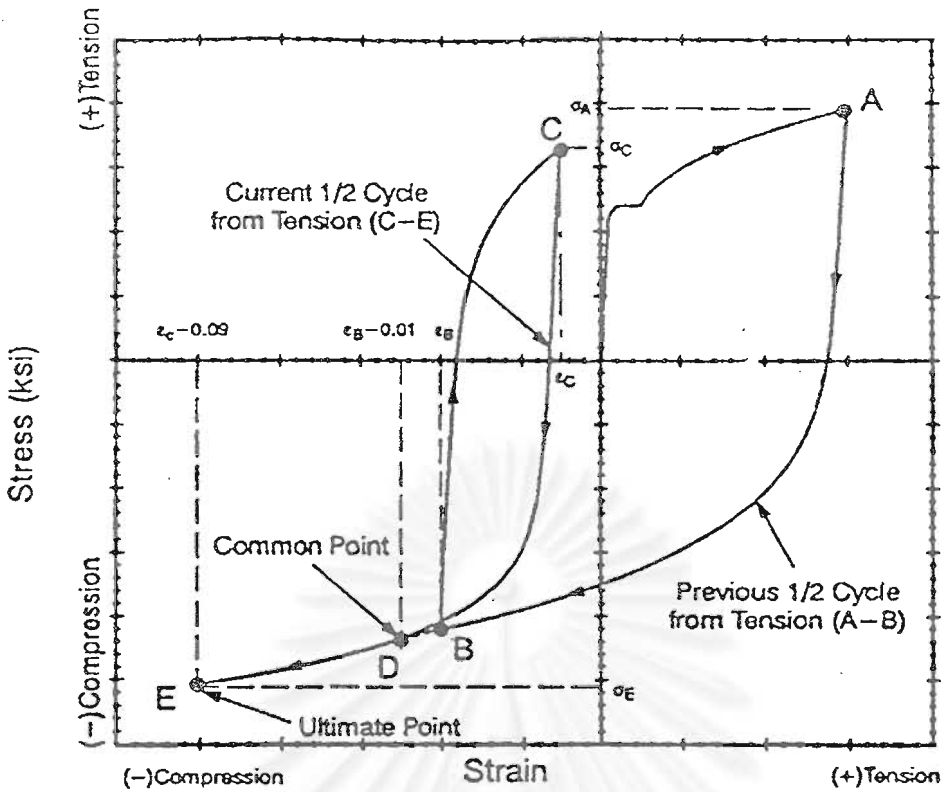
รูปที่ 2.15 รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม
เมื่อรับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร



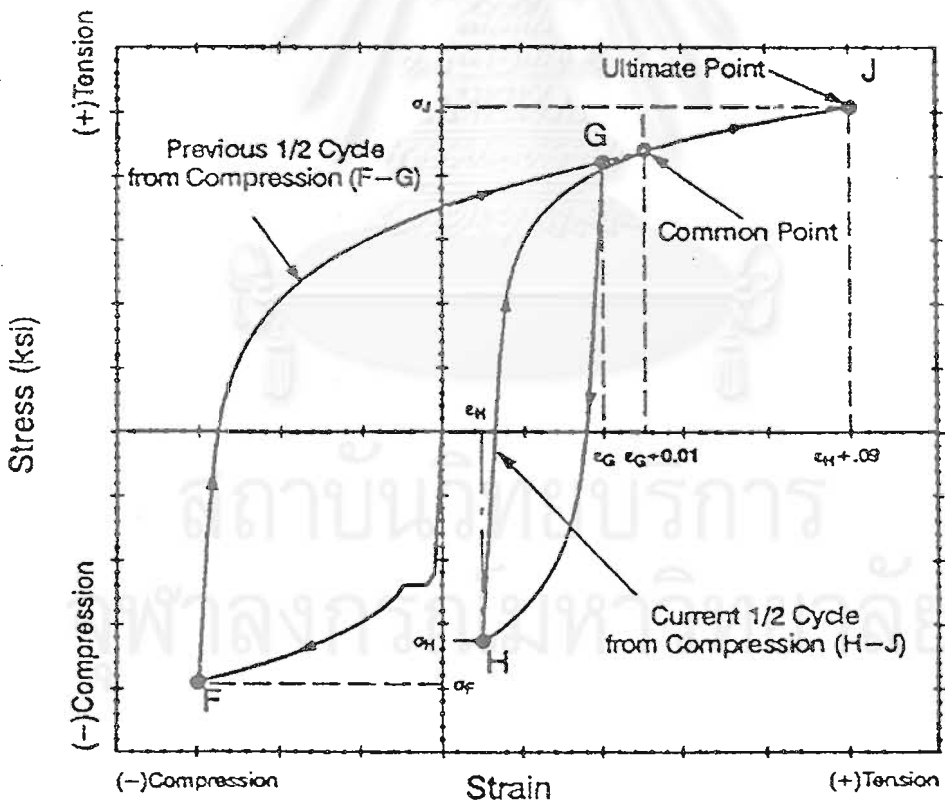
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำทางเดียว



รูปที่ 2.17 เส้นโค้ง Envelope

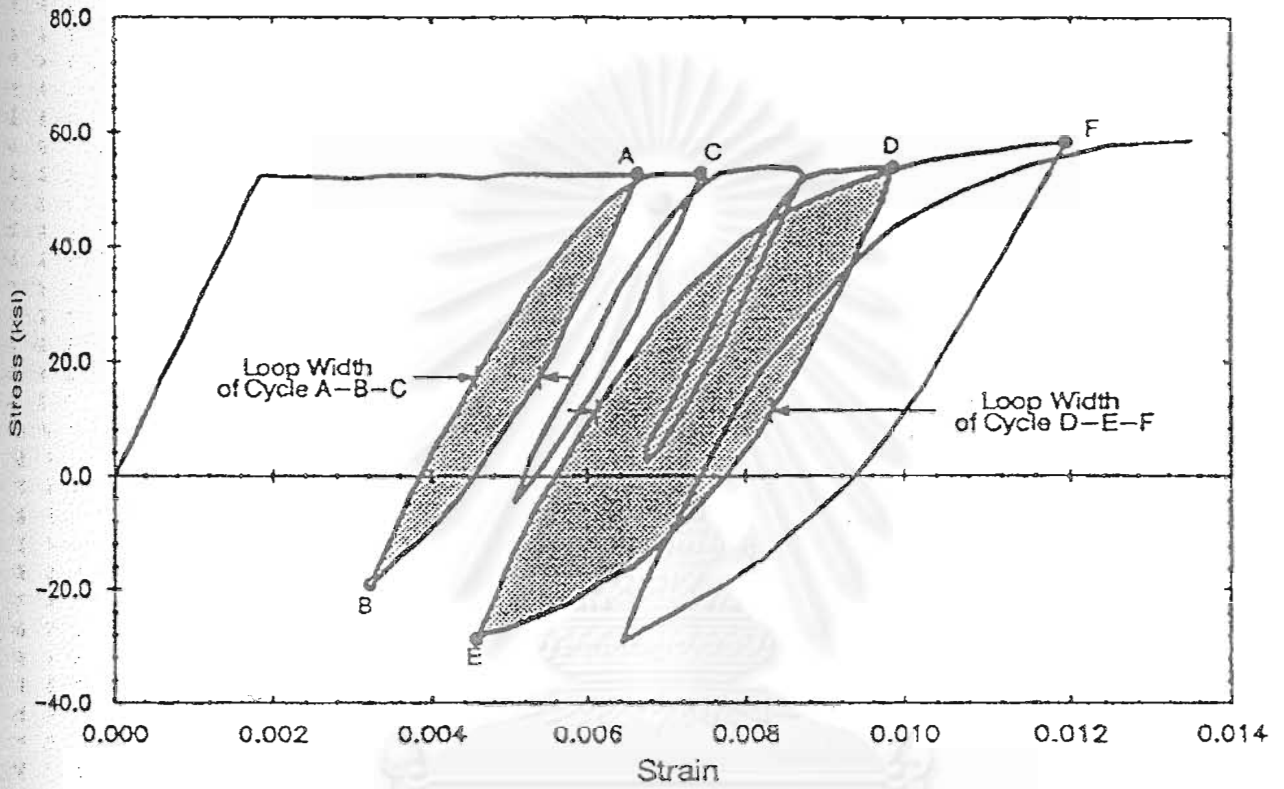


(n) 1/2 Cycle from Tension



(ข) 1/2 Cycle from Compression

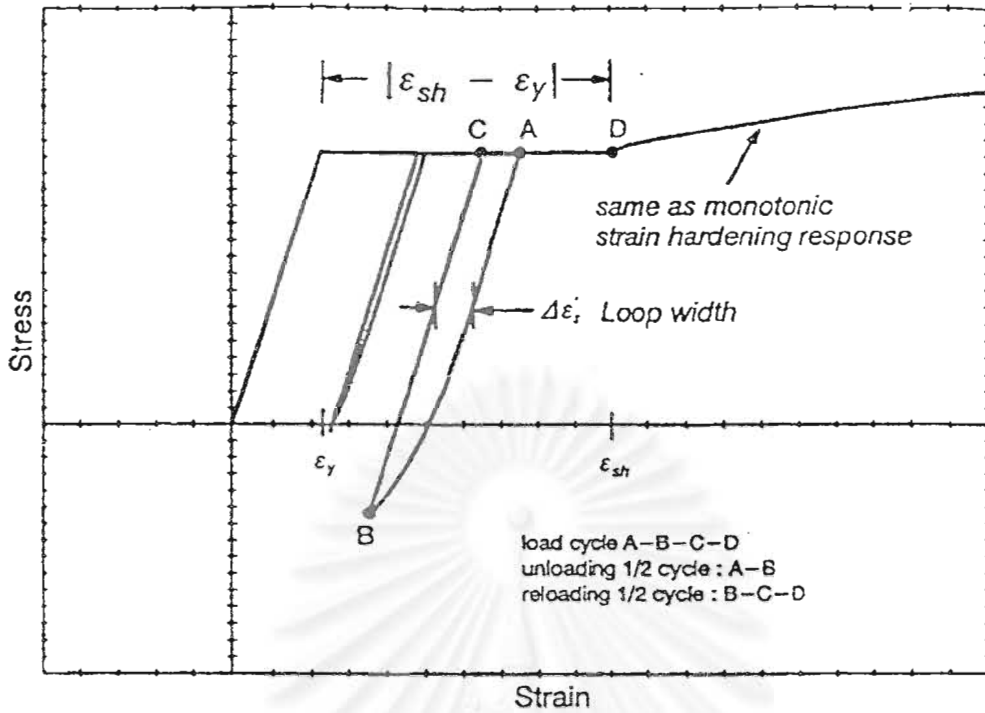
รูปที่ 2.18 รูปแสดงตำแหน่ง Common Points และ Ultimate Points



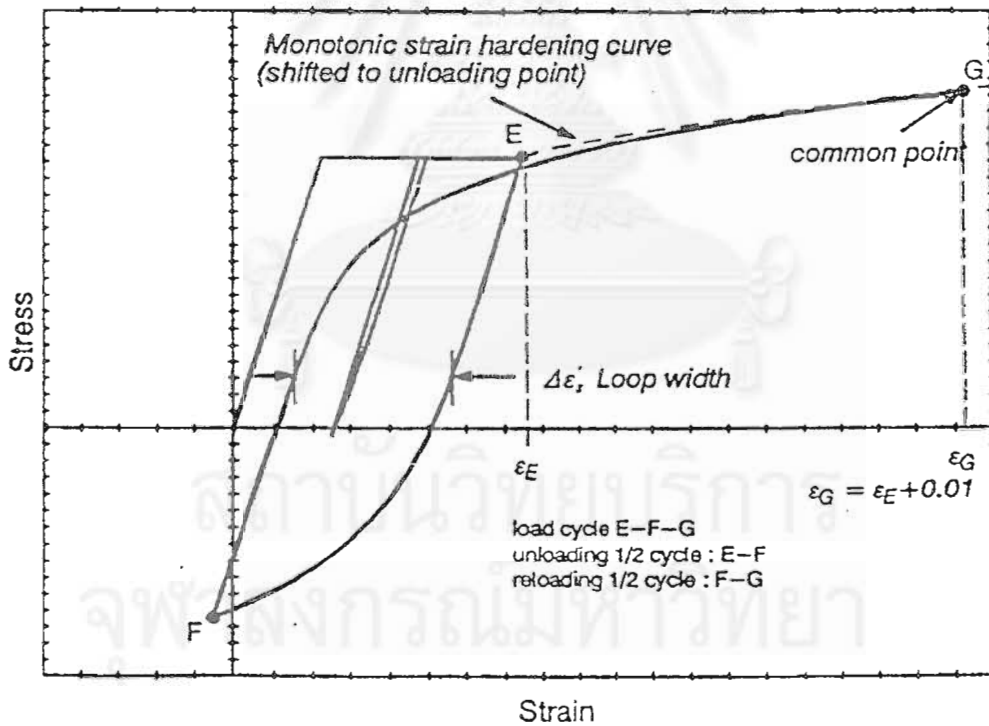
Experimental Result Test BR13 (from Seckin [124])

รูปที่ 2.19 รูปแบบทั่วไปของผลการทดสอบการให้แรงกระทำย้อนกลับจากช่วง Yield Plateau ของเหล็กเสริม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

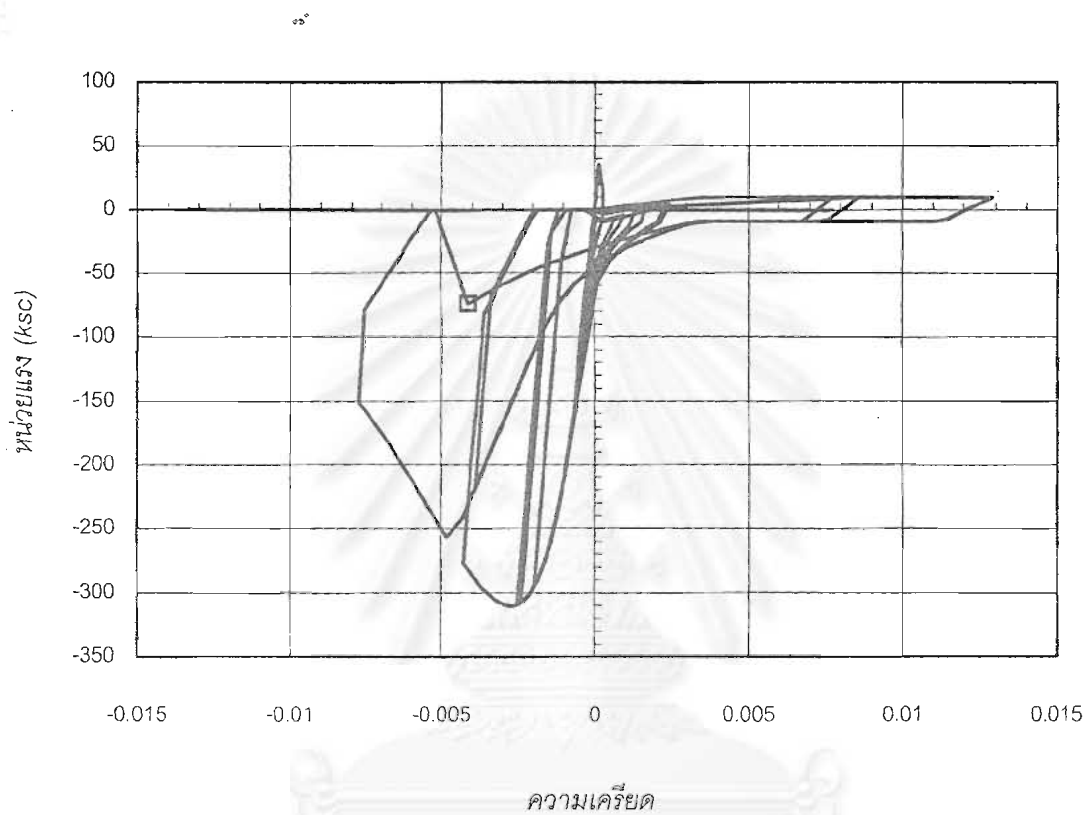


$$(n) \Delta\epsilon_s' < 1/2 |\epsilon_{sh} - \epsilon_y|$$



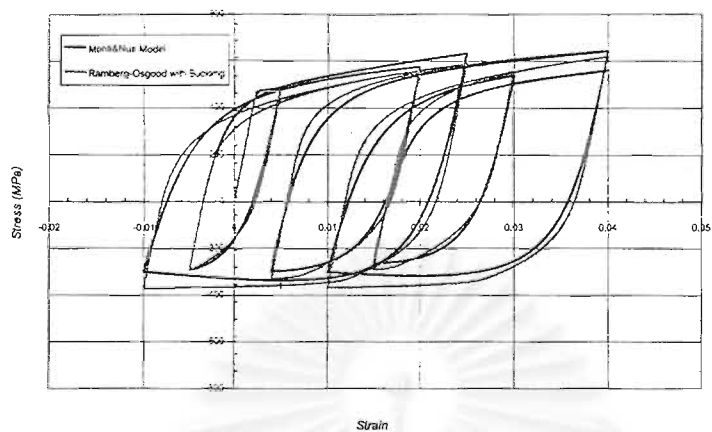
$$(n1) \Delta\epsilon_s' \geq 1/2 |\epsilon_{sh} - \epsilon_y|$$

รูปที่ 2.20 แสดงการลดแรงกระทำจากช่วง Yield Plateau

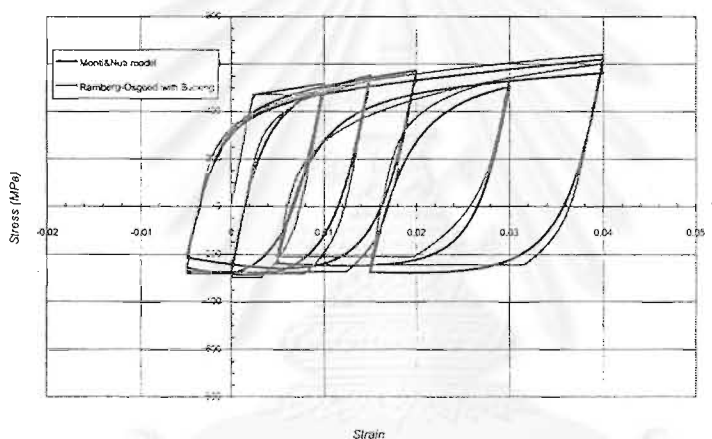


รูปที่ 2.21 รูปประกอบการอธิบายข้อกำหนดสำหรับการหลุดล่อนของคอนกรีตผิวนอก

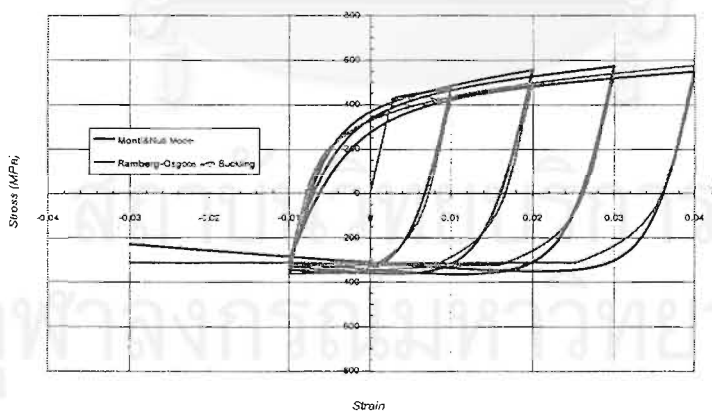
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Specimen C1

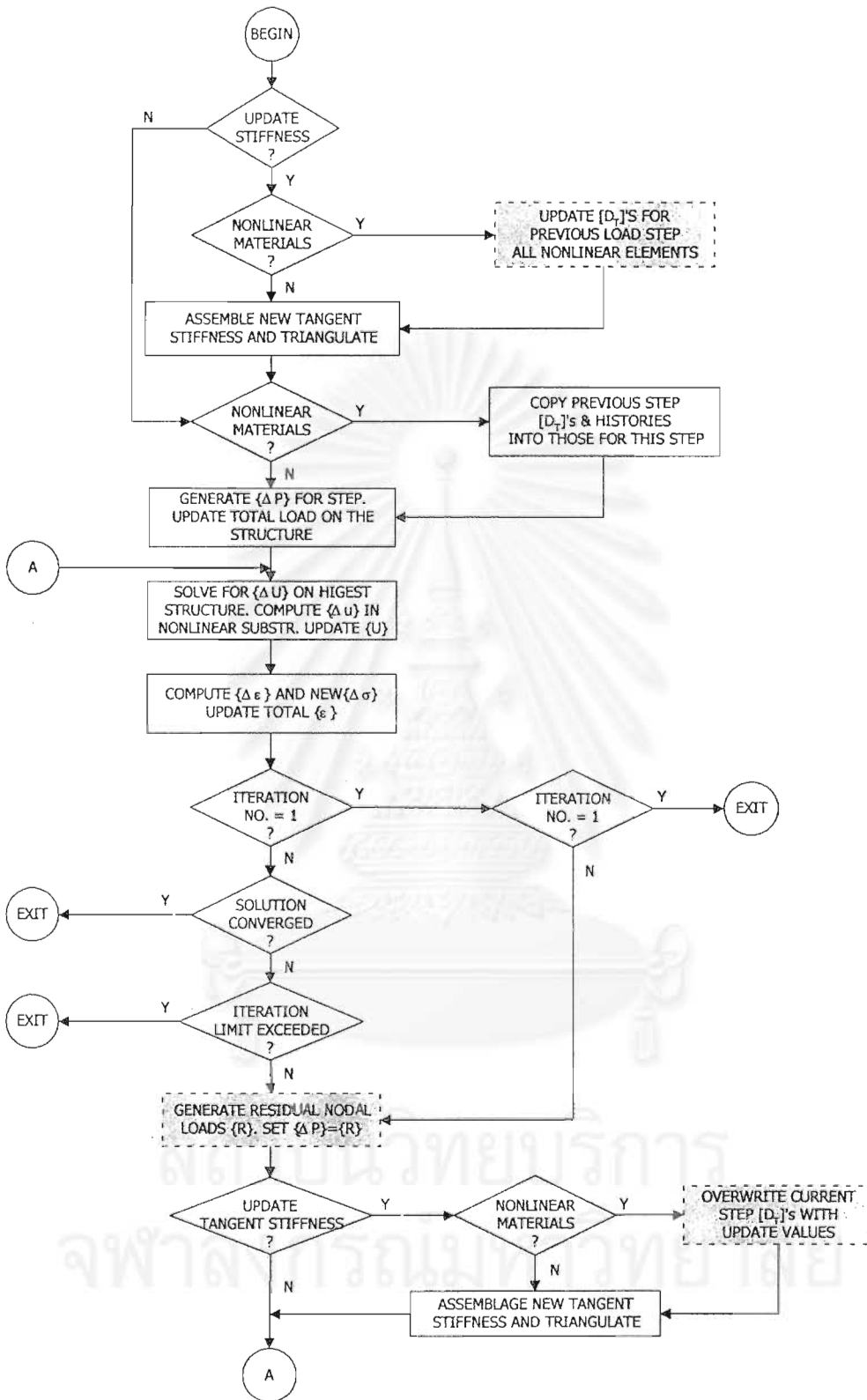


Specimen C2

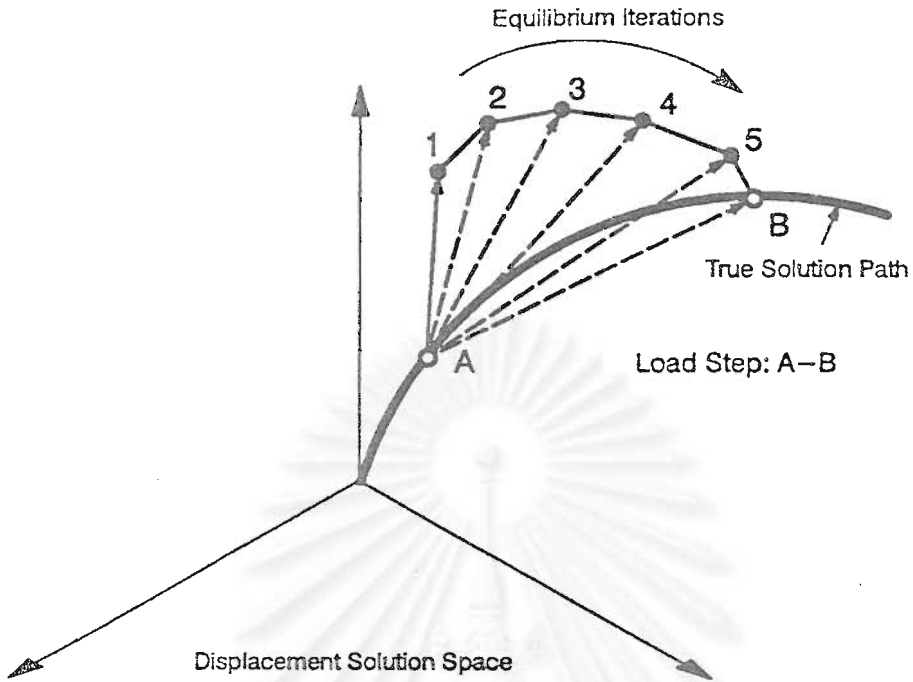


Specimen C5

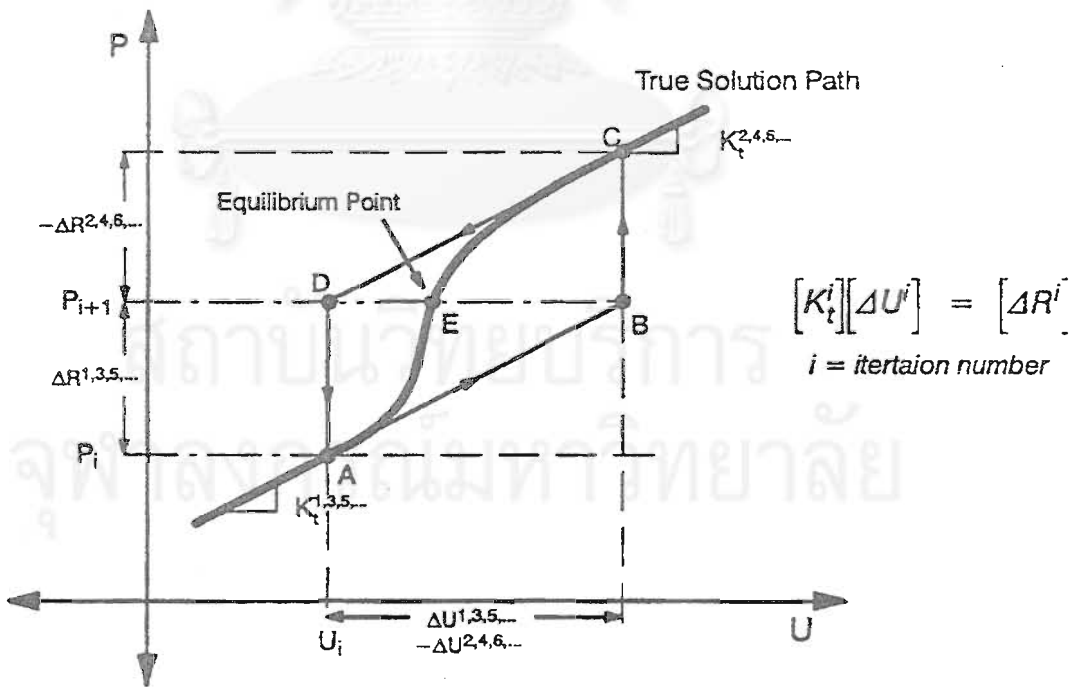
รูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบความล้มพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้สมการของ Ramberg-Osgood ซึ่งได้พิจารณาผลของการดุ้งกับความล้มพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่เสนอโดย Monti และ Nuti



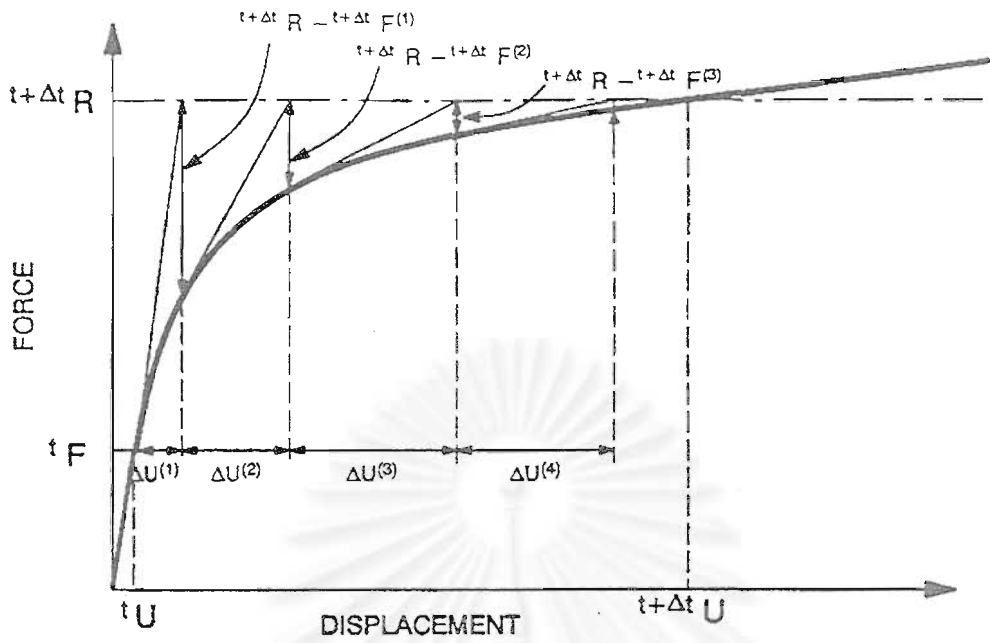
รูปที่ 3.1 วิธีการคำนวณในแต่ละขั้นของแรงกระทำ



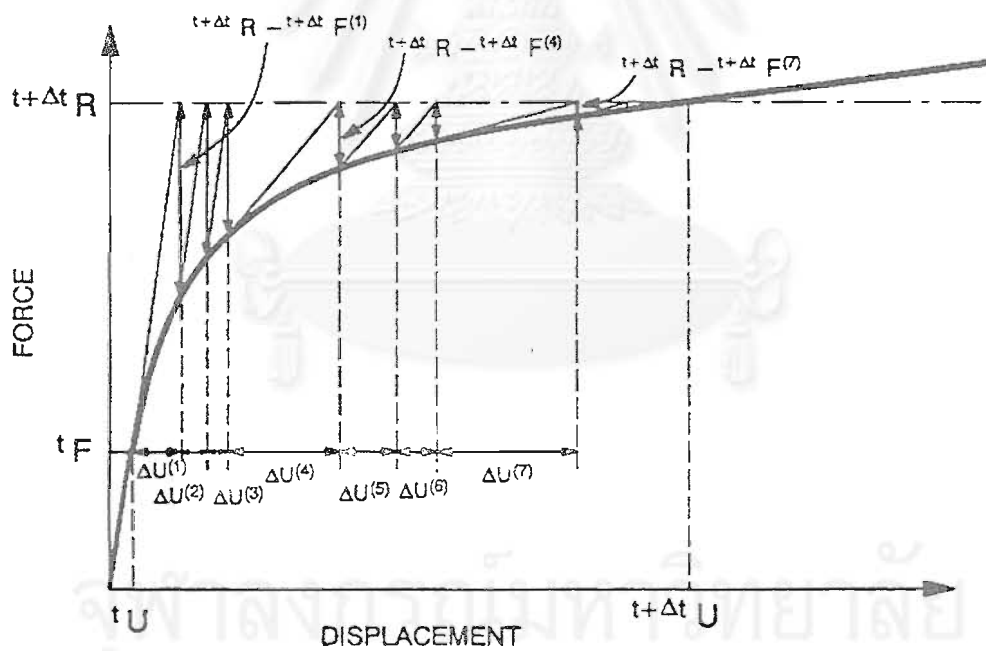
รูปที่ 3.2 เส้นทางของผลเฉลยในวิธี Incremental-iterative



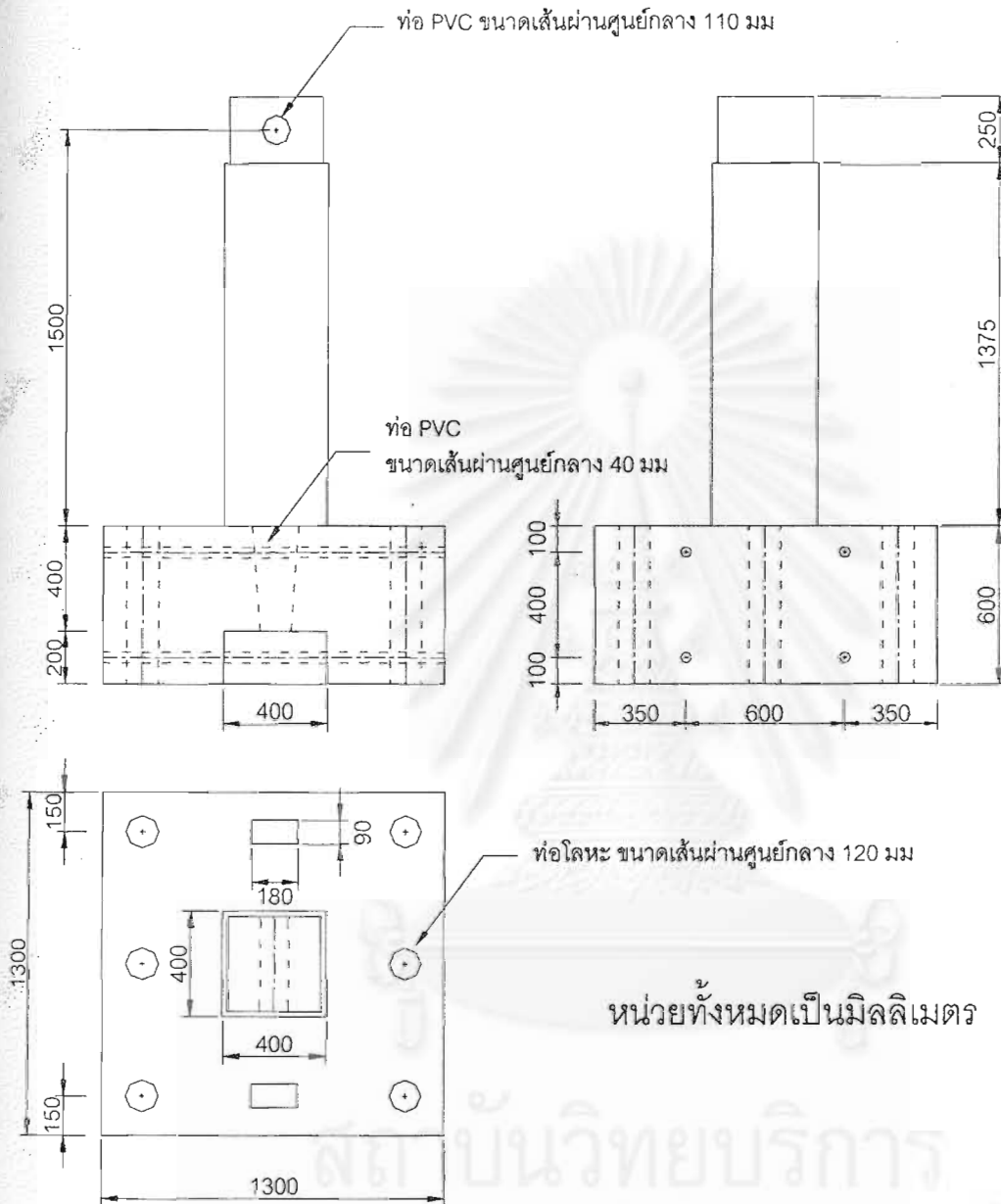
รูปที่ 3.3 ปัญหาเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นในวิธีการ Newton-Raphson Iteration



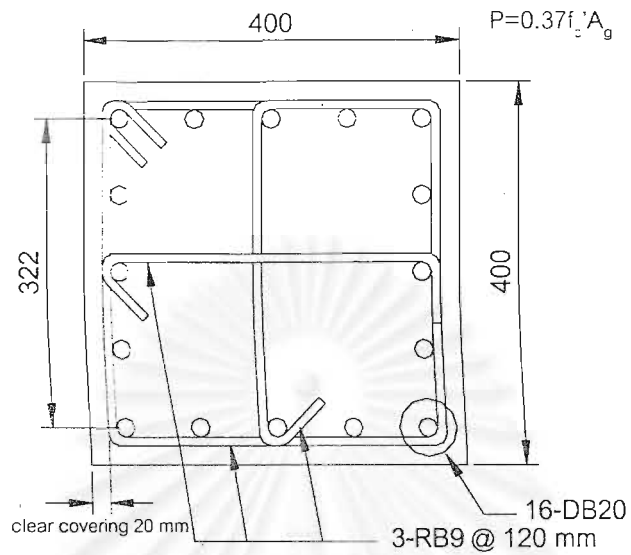
(n) Full Newton-Raphson Algorithm



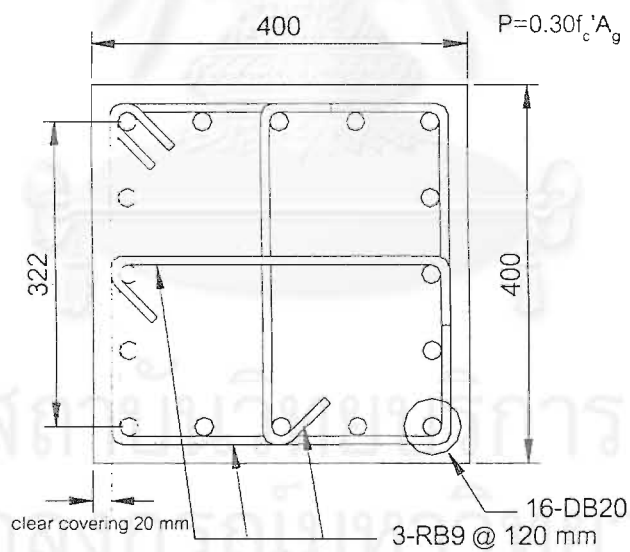
(n) Modified Newton-Raphson Algorithm



รูปที่ 4.1 ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ

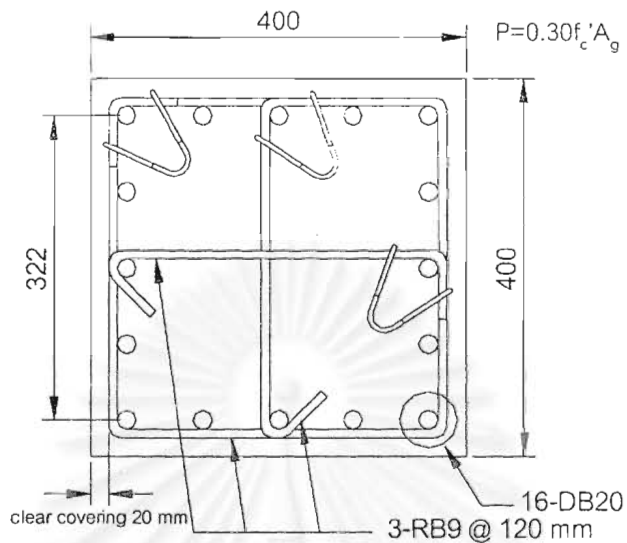


(n) ตัวอย่าง CFL90/120/0.37

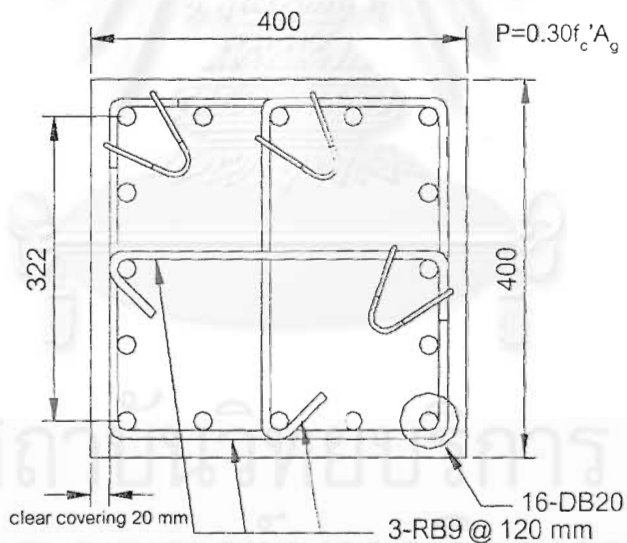


(ข) ตัวอย่าง CF 135/120/0.30

รูปที่ 4.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบแต่ละตัว



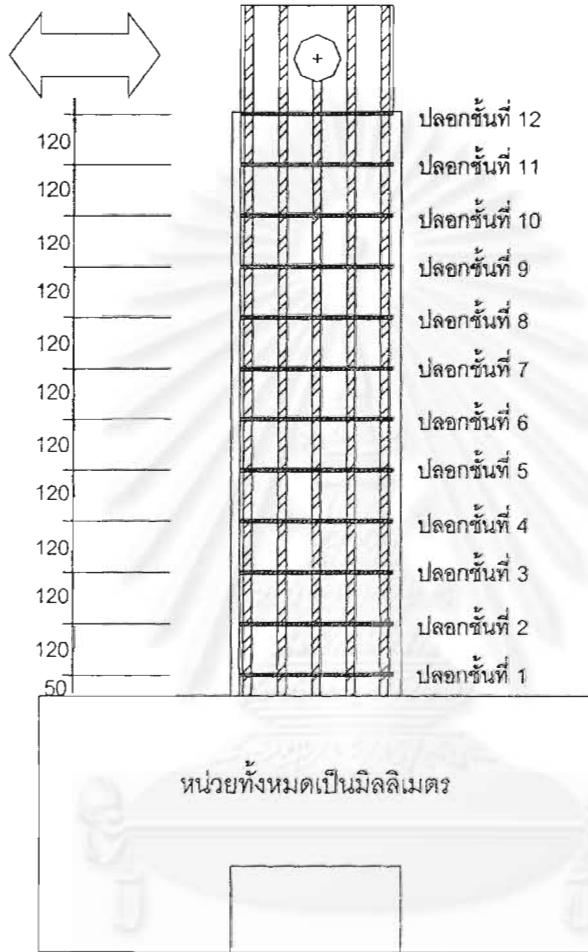
(ค) ตัวอย่าง CFL90/120/0.30



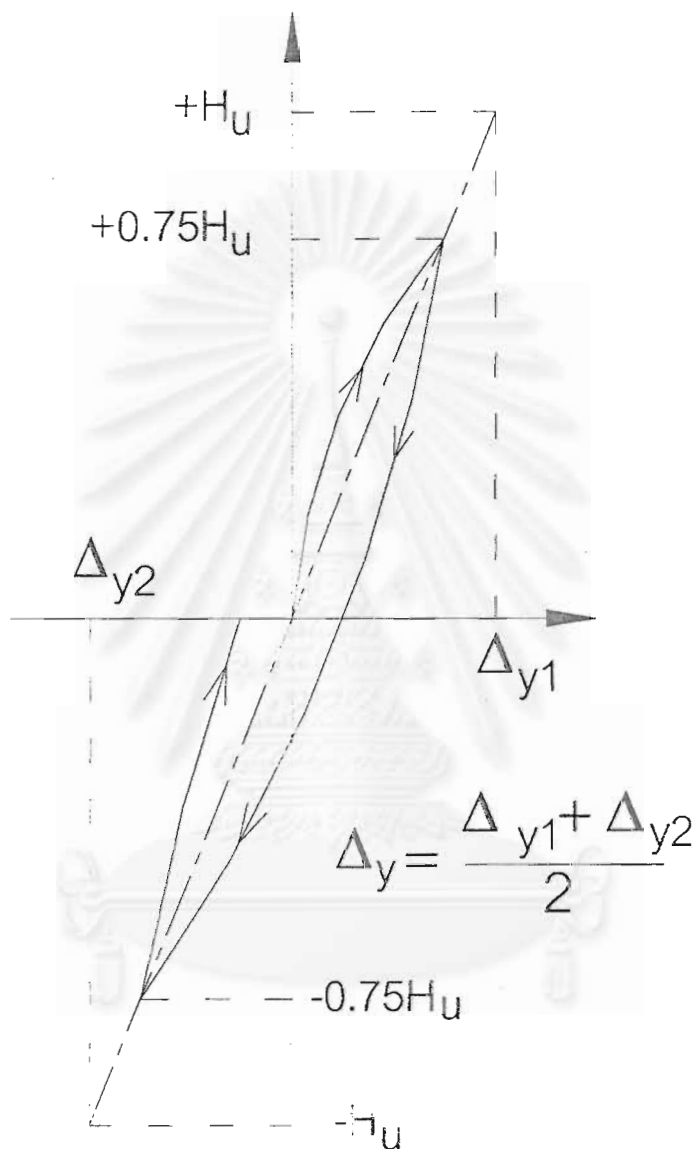
(ง) ตัวอย่าง CFL90/120/0.30 (9.1)

รูปที่ 4.2 (ต่อ) รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบแต่ละตัว

Jack



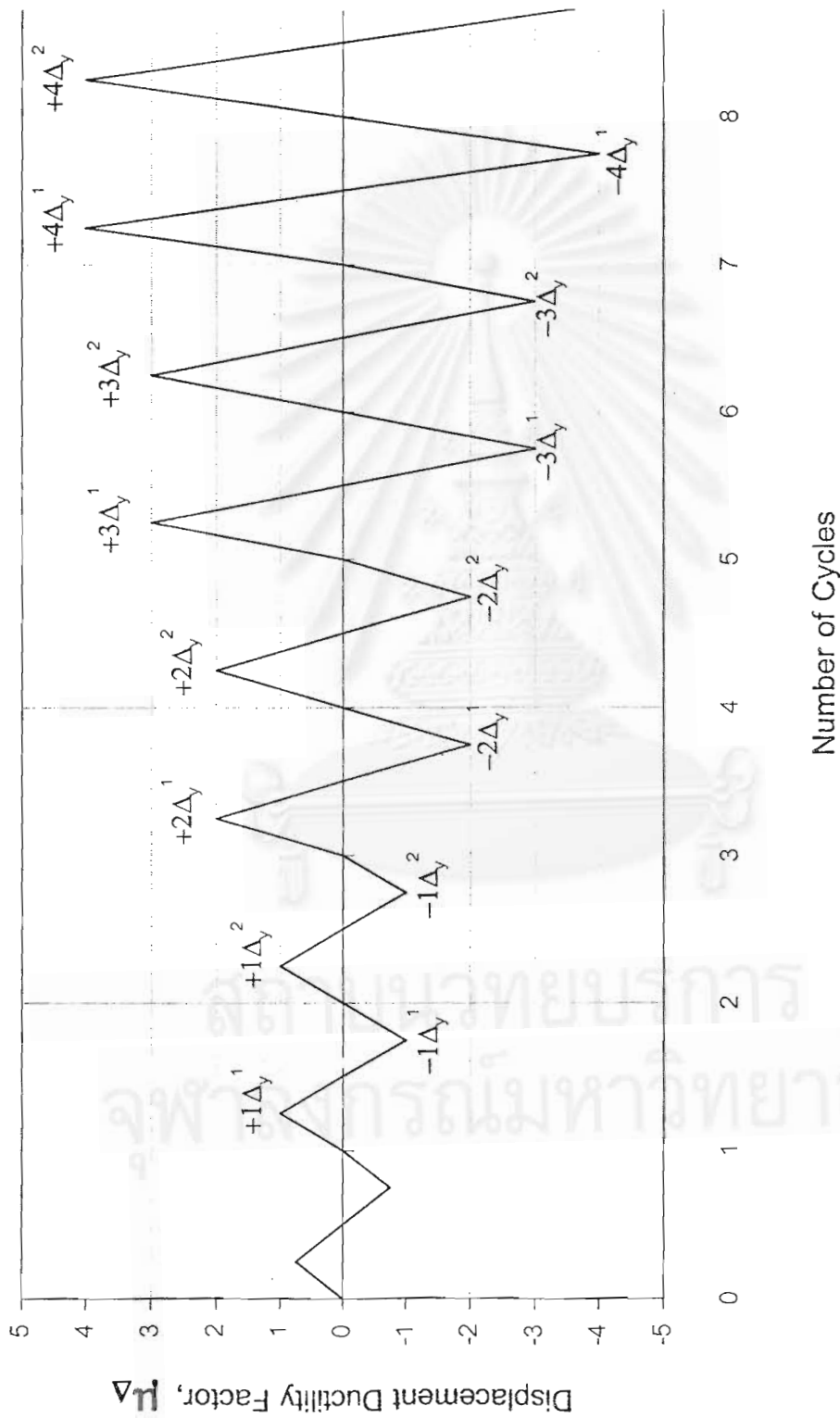
รูปที่ 4.3 รายละเอียดของตำแหน่งของเหล็กปลอกในแต่ละชั้น



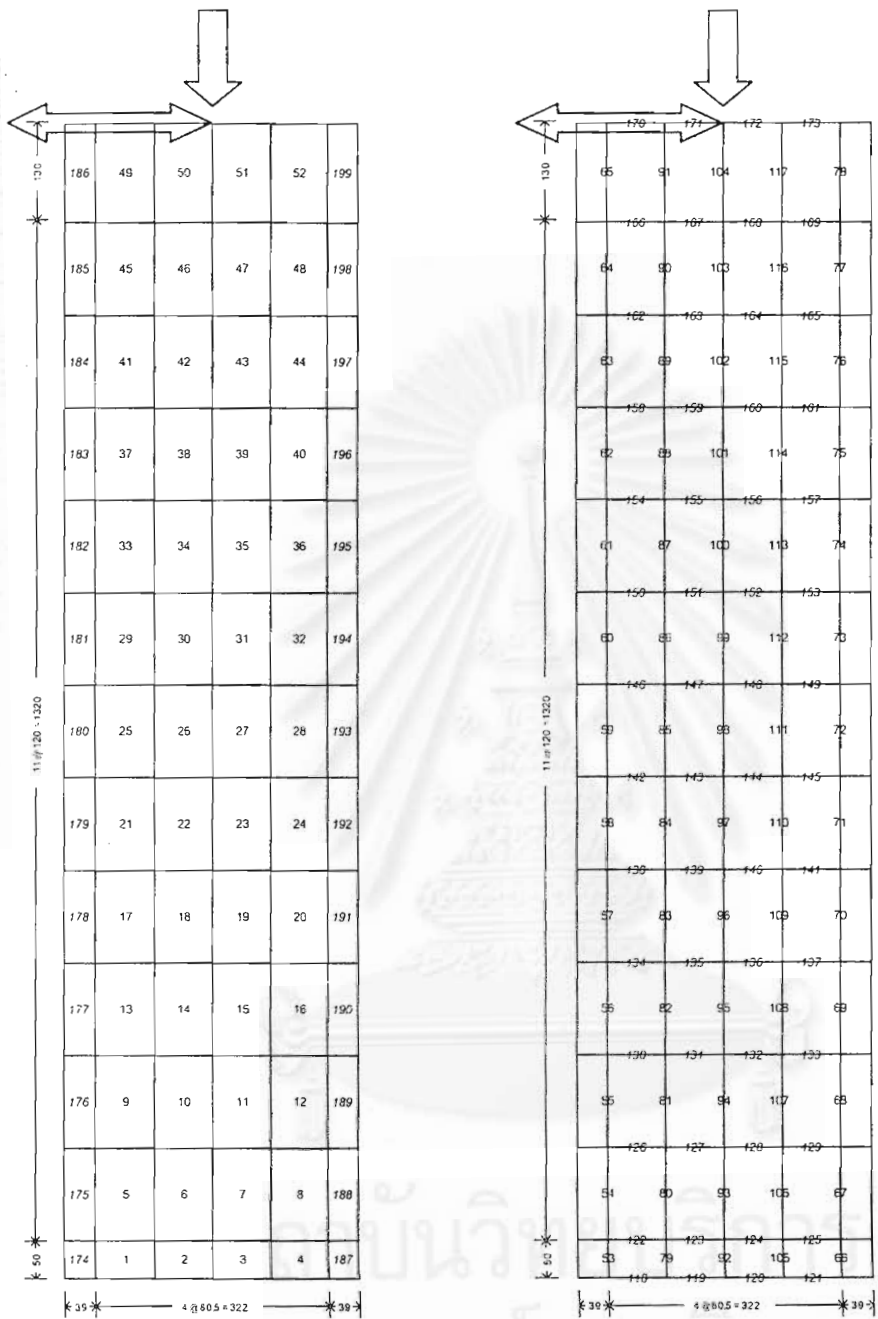
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.4 วิธีหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดคราก (yield displacement: Δ_y)

ตามวิธีของ Watson และ Park



รูปที่ 4.5 รูปแบบประวัติการรับน้ำหนัก (loading history) ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด

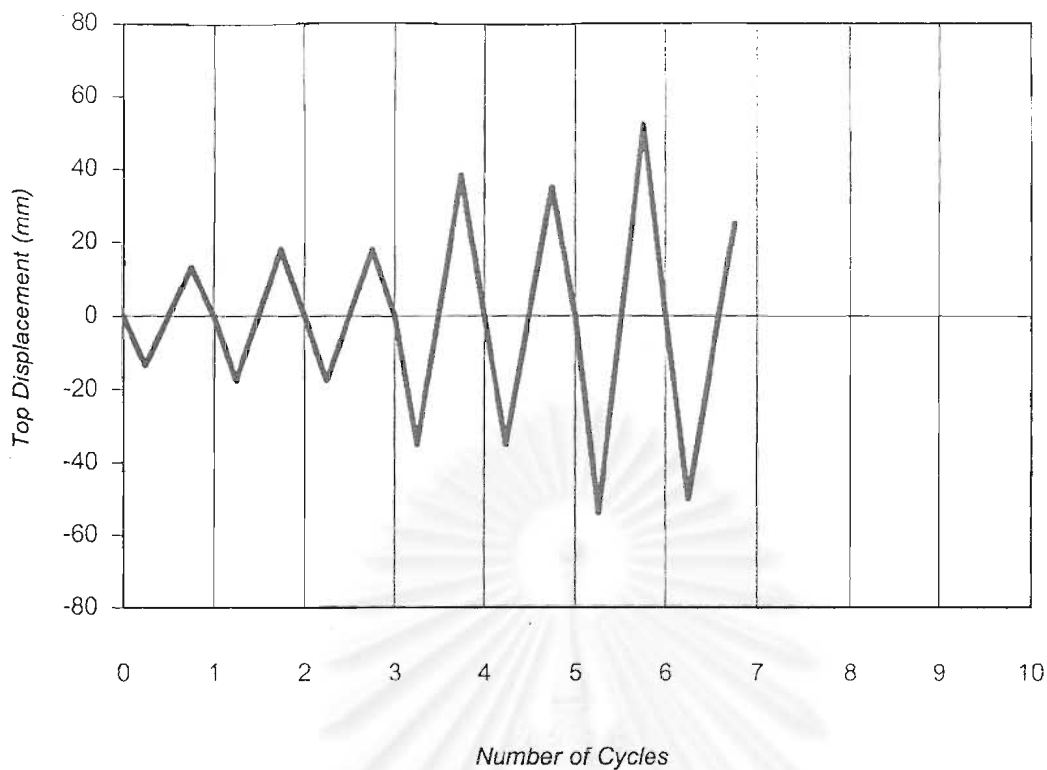


หน่วยทั้งหมดเป็นมิลลิเมตร

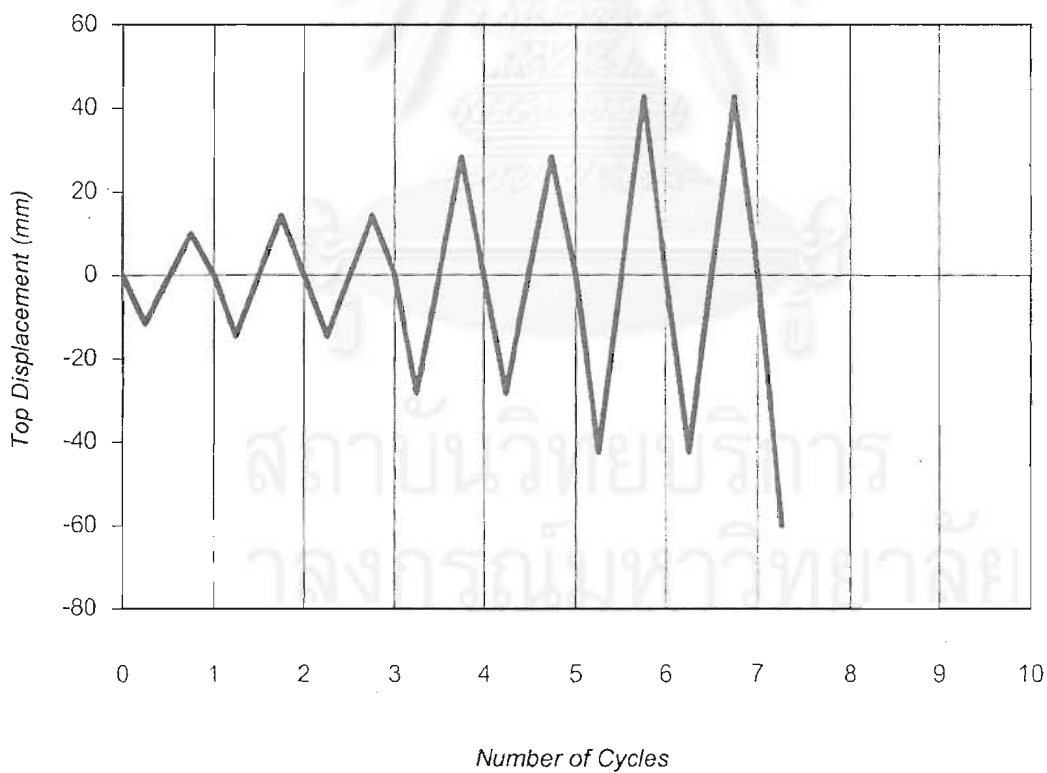
ชั้นส่วนคอนกรีต

ชั้นส่วนเหล็กเสริม

รูปที่ 4.6 หมายเลขของชั้นส่วนคอนกรีตและเหล็กเสริมทั้งหมด

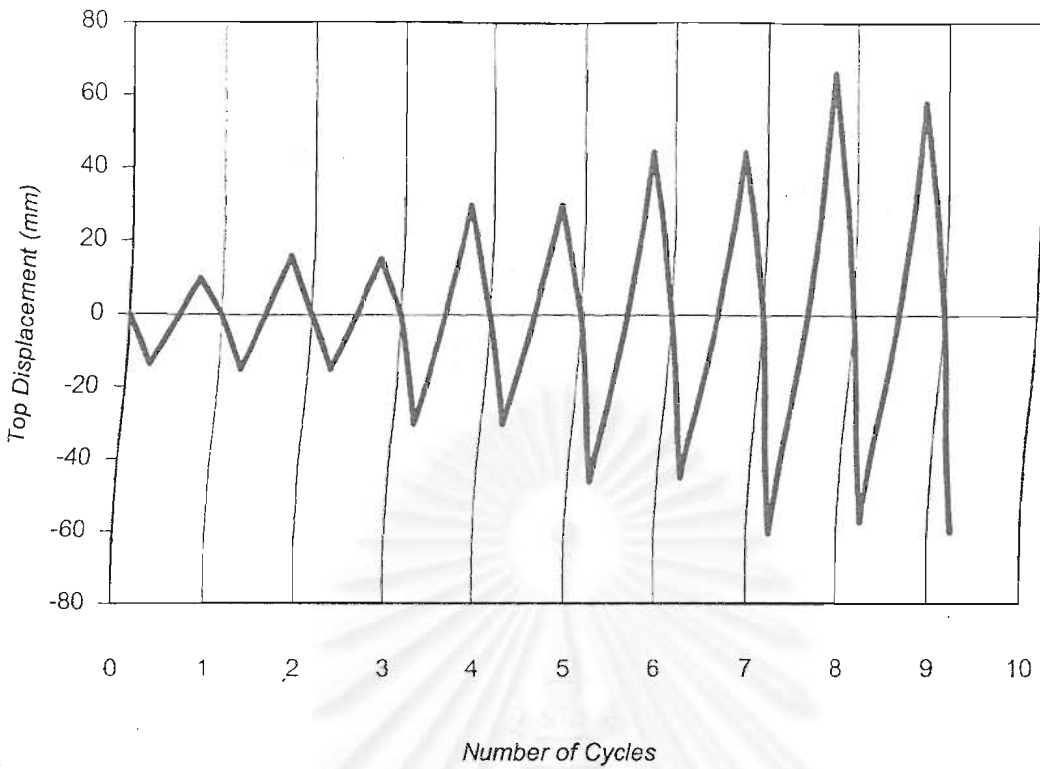


(ก) ตัวอย่างทดสอบ CFL90/120/0.37

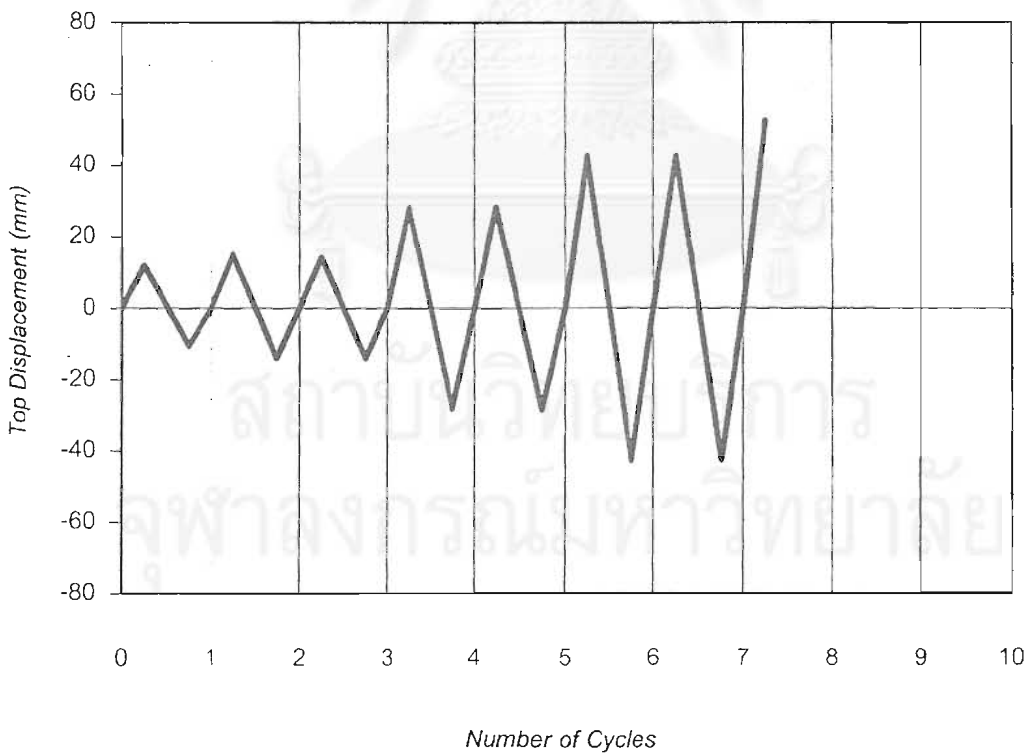


(ข) ตัวอย่างทดสอบ CF 135/120/0.30

รูปที่ 4.7 ประวัติการรับแรงของแต่ละตัวอย่างทดสอบ

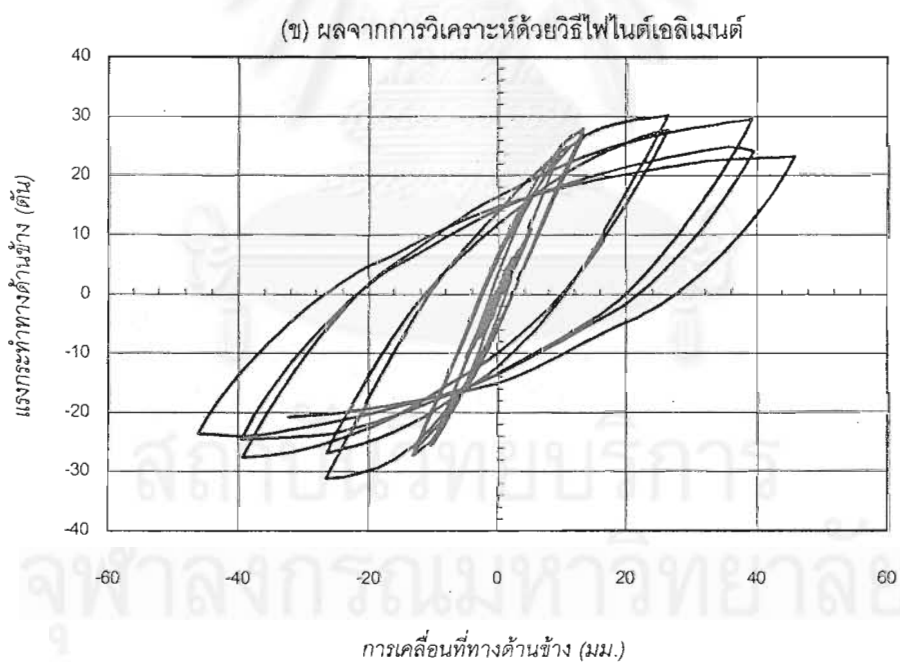
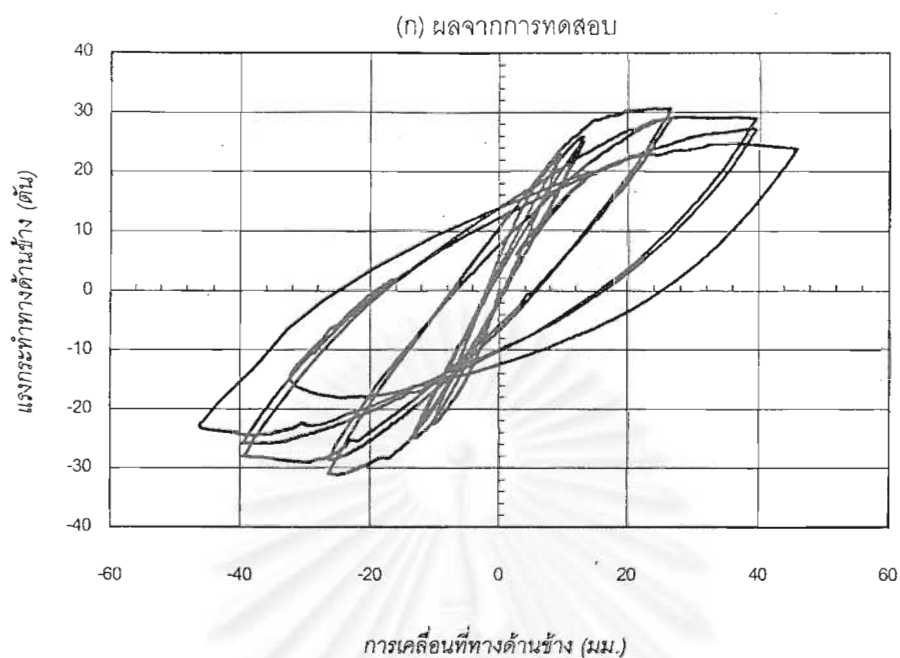


(ค) ตัวอย่างทดสอบ CFL 90/120/0.30

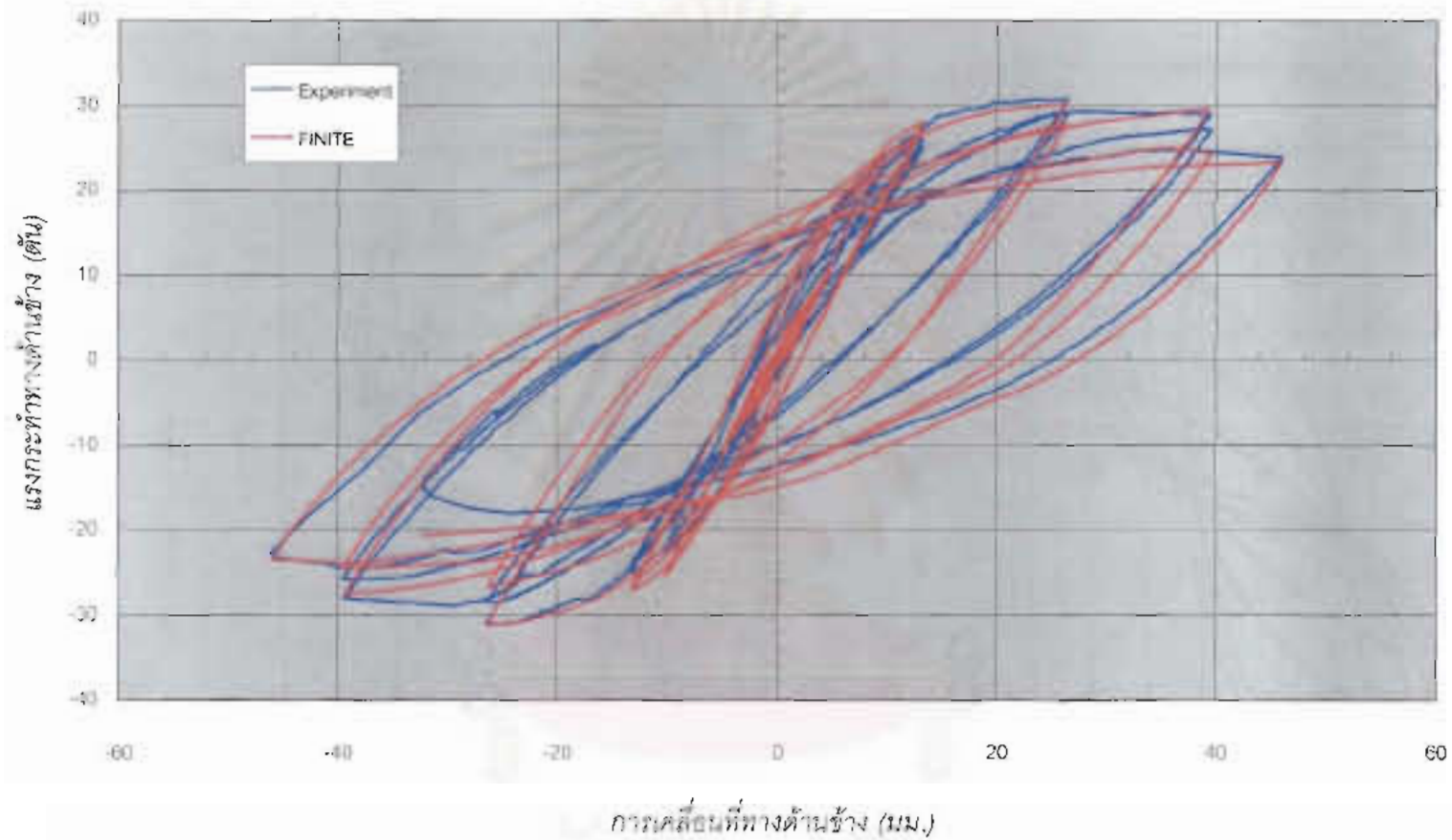


(ง) ตัวอย่างทดสอบ CF135/120/0.37

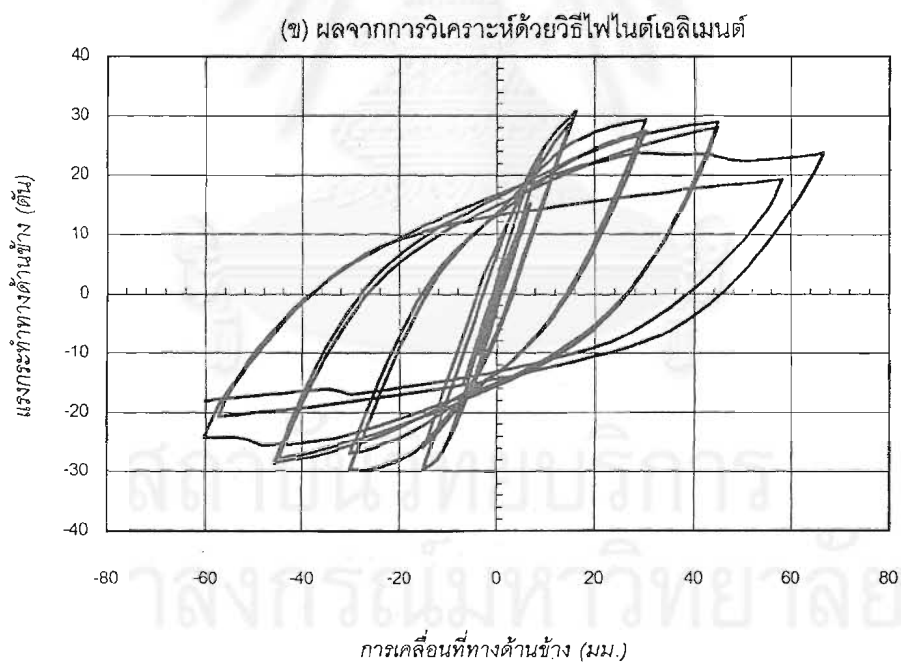
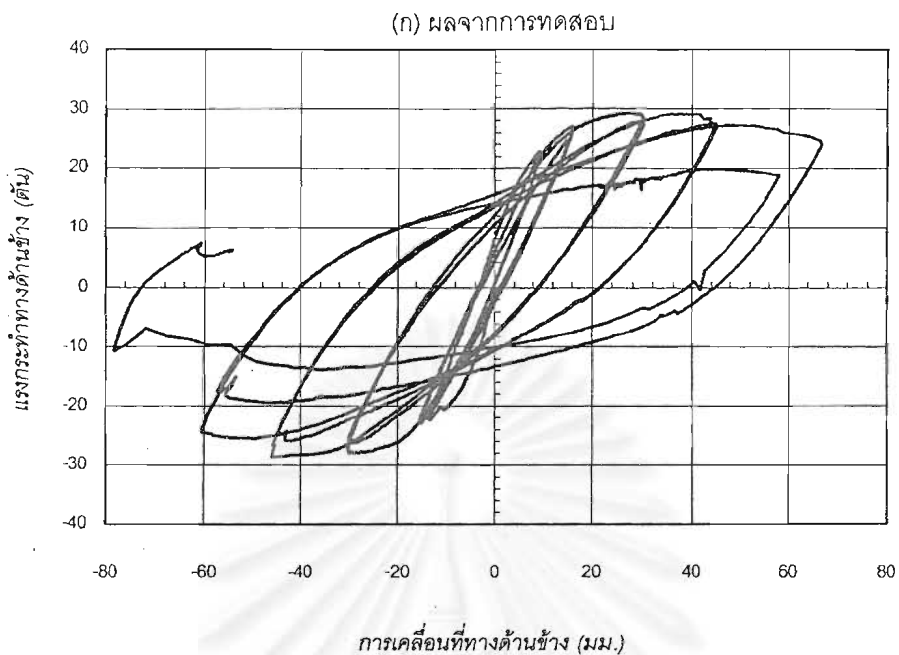
รูปที่ 4.7(ต่อ) ประวัติการรับแรงของแต่ละตัวอย่างทดสอบ



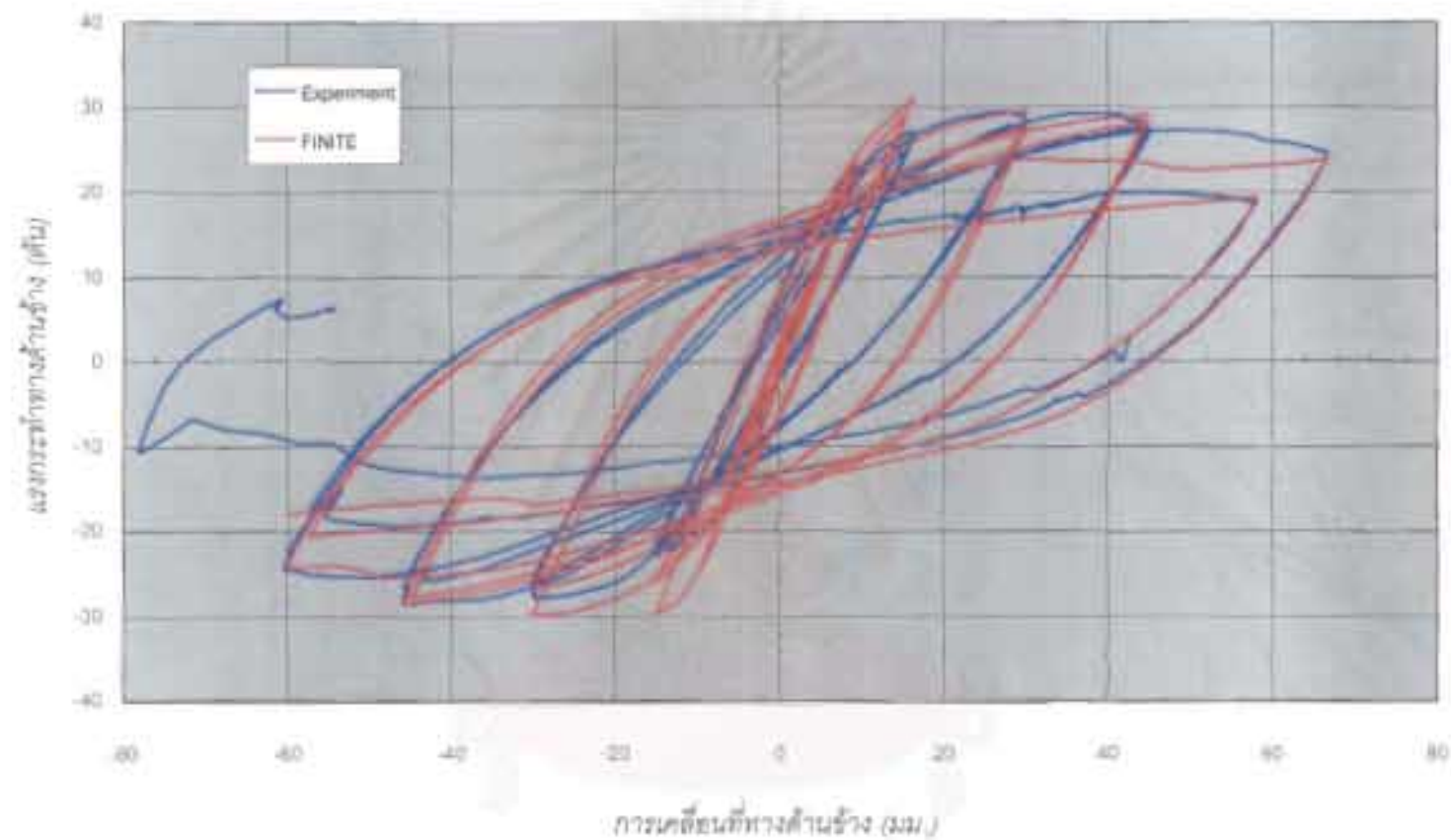
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



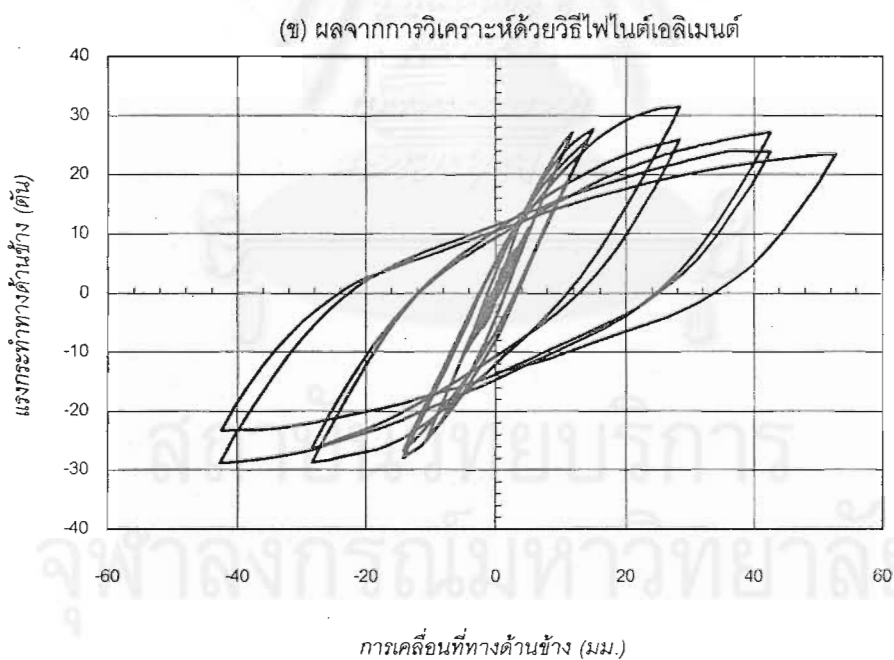
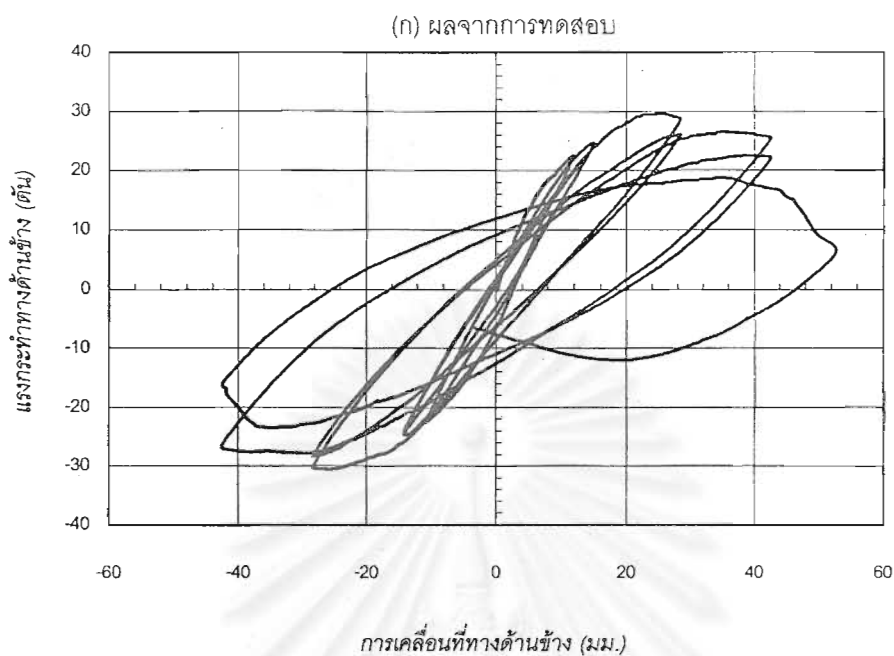
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/H 20/0.37



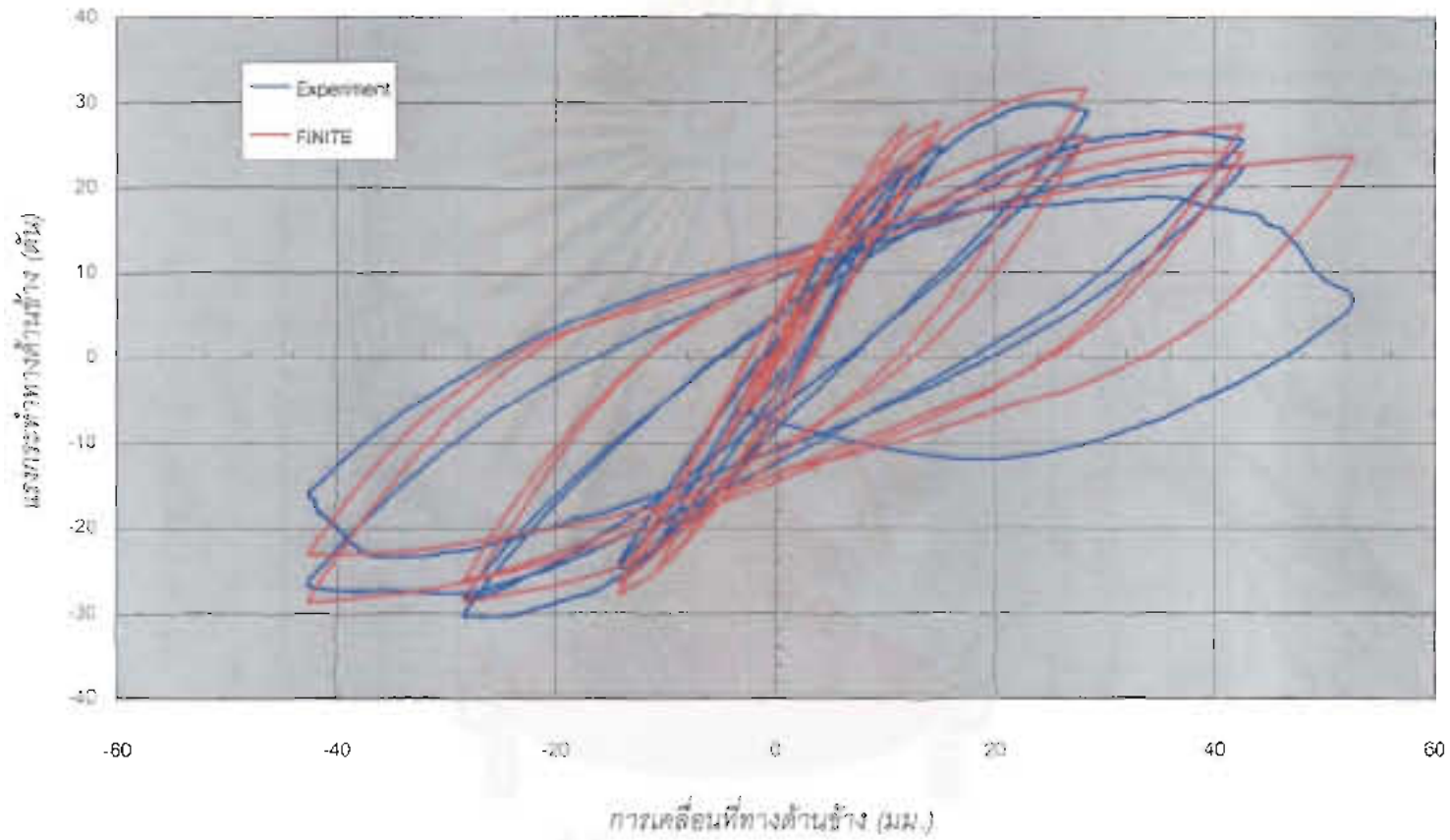
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30



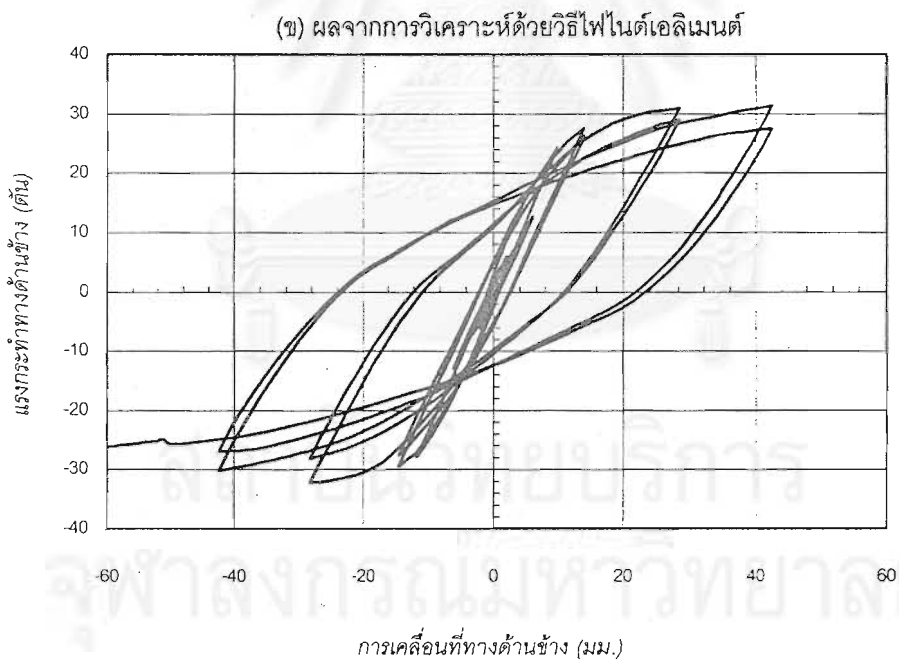
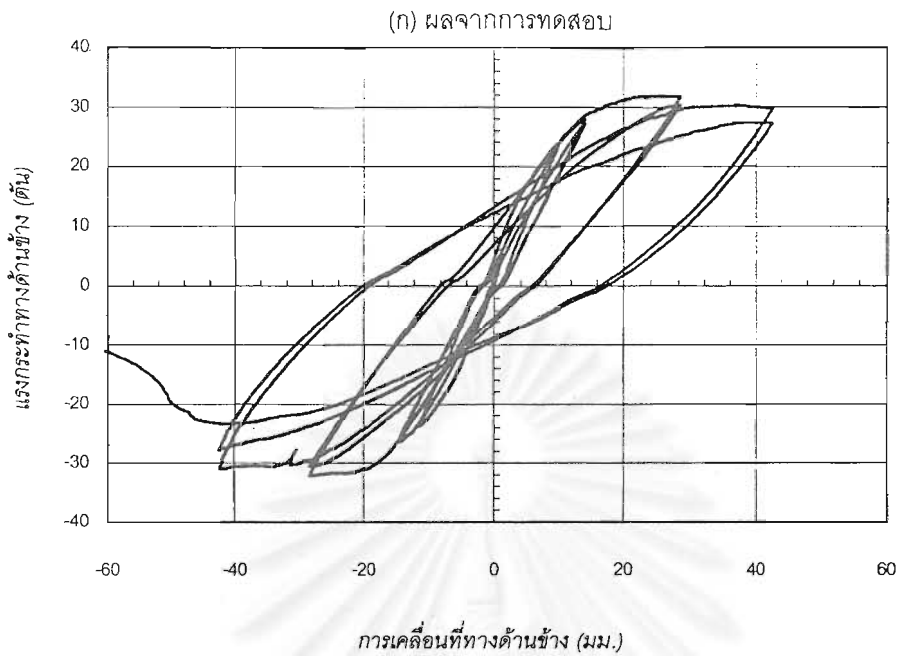
รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับตัวข่าเสา CFL90/120/0.30



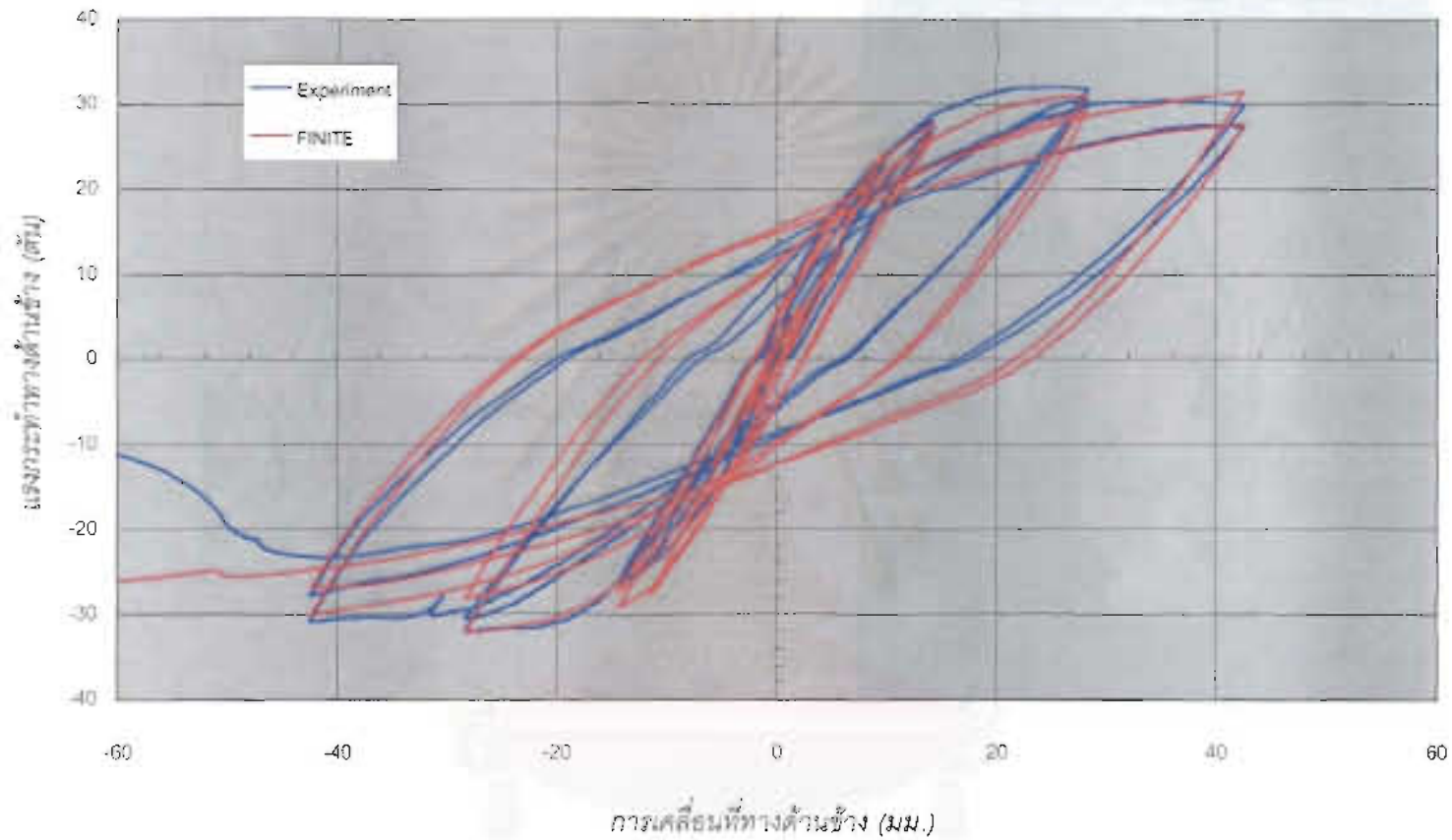
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37

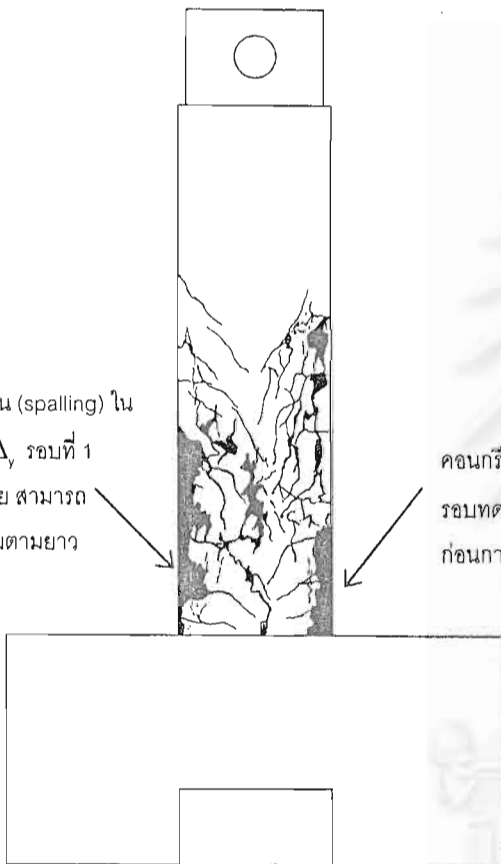


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30

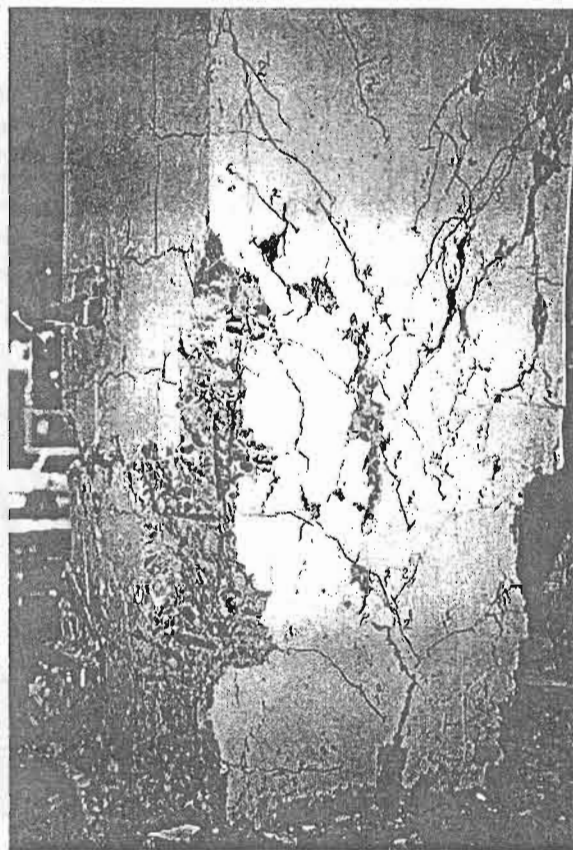


รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30

คอนกรีตเริ่มหลุดล่อน (spalling) ใน
รอบทดสอบ -3.5Δ , รอบที่ 1
ก่อนการวิบัติเล็กน้อย สามารถ
สังเกตเห็นเหล็กเสริมตามยาว



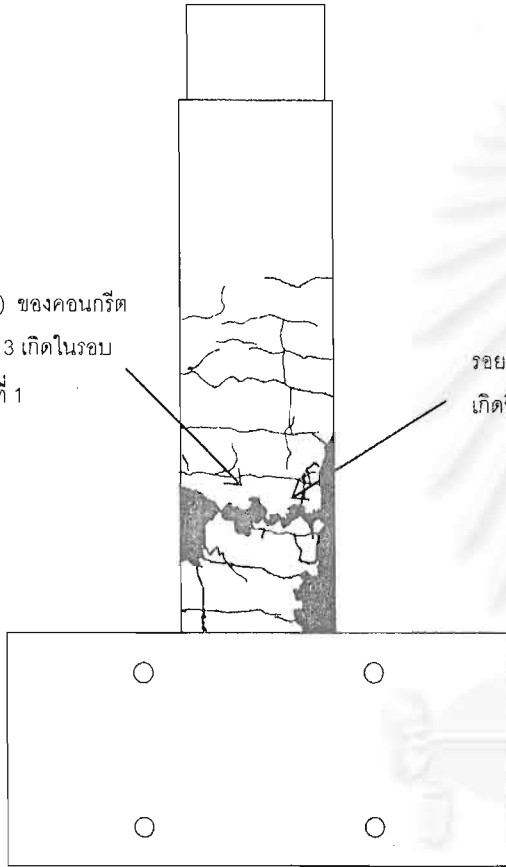
คอนกรีตเริ่มหลุดล่อน (spalling) ใน
รอบทดสอบ -3.5Δ , รอบที่ 1
ก่อนการวิบัติเล็กน้อย



ก. แสดงการแตกร้าวในด้านที่มีหน่วยแรงเฉือนสูง

รูปที่ 4.16 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CFL90/120/0.37

การหลุดล่อน (spalling) ของคอนกรีต
ในแนวเหล็กปลอกชั้นที่ 3 เกิดในรอบ
ทดสอบ $-3.5\Delta_y$ รอบที่ 1

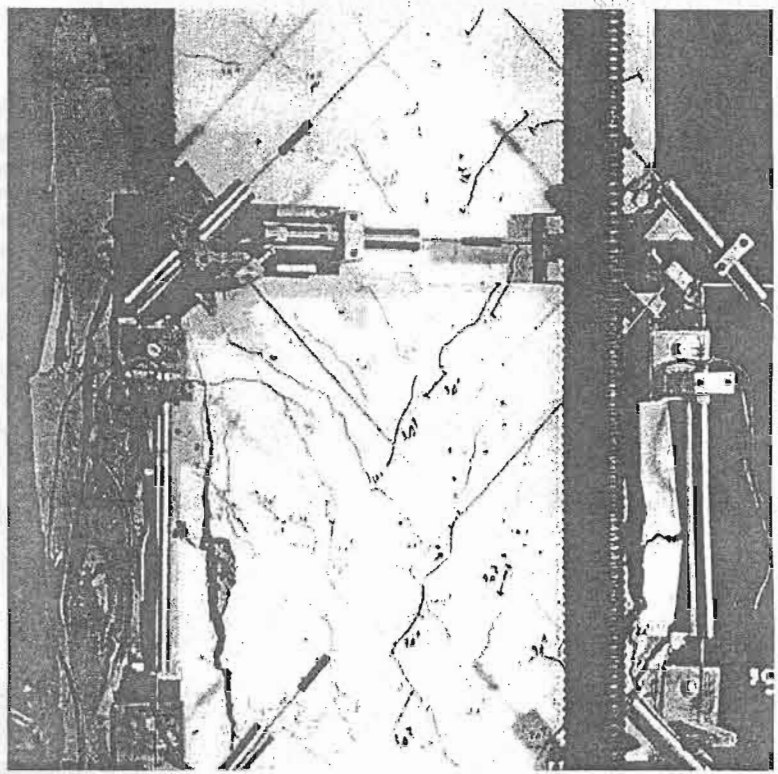


รอยแตกร้าวที่
เกิดขึ้นครั้งแรก



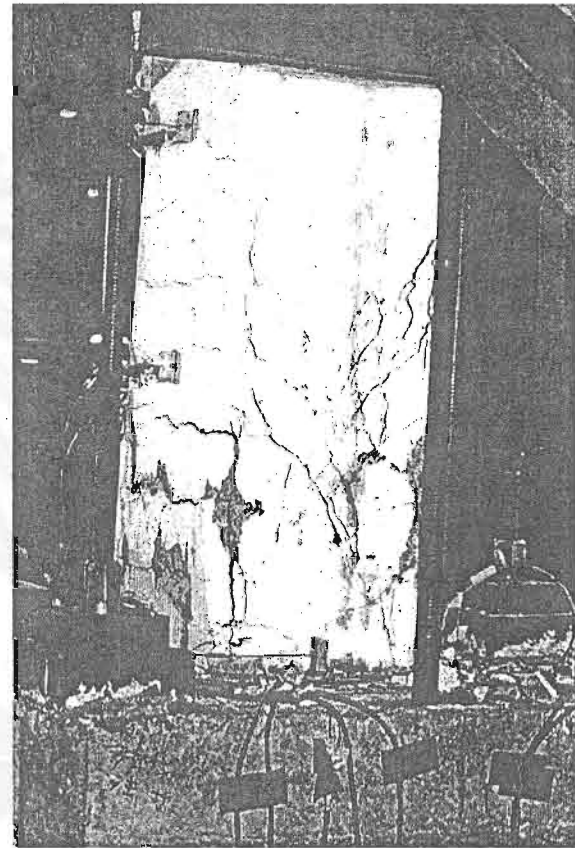
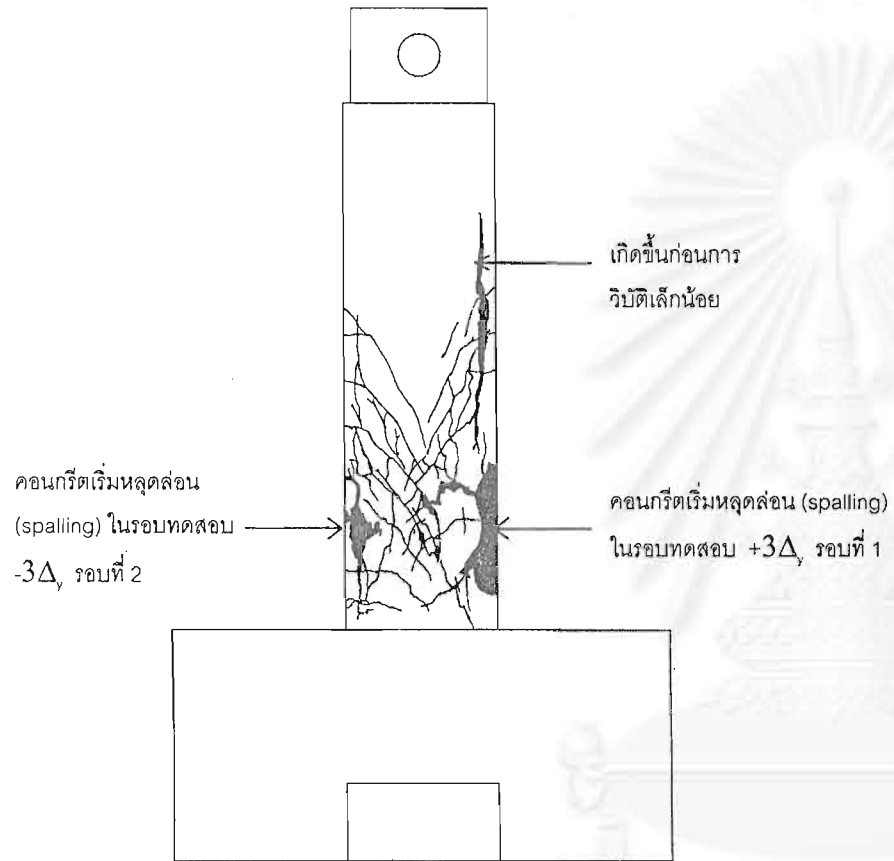
ข. แสดงการแตกร้าวในด้านที่มีหน่วยแรงอัดเนื่องจากโมเมนต์ดัดสูง

รูปที่ 4.16 (ต่อ) แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CFL90/120/0.37



รูปที่ 4.17 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CFL90/120/0.30

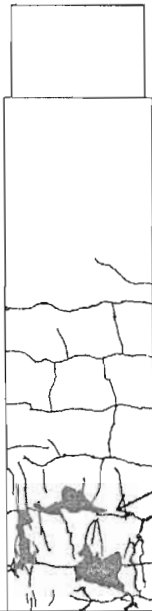
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



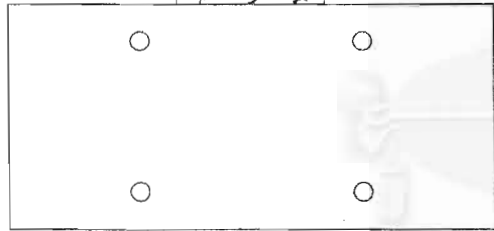
ก. แสดงการแตกร้าวในด้านที่มีหน่วยแรงเฉือนสูง

รูปที่ 4.18 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CF135/120/0.37

การหลุดล่อน (spalling) ของ
คอนกรีตทั้งหมดเกิดขึ้นในรอบ
ทดสอบ $-3\Delta_y$ รอบที่ 2

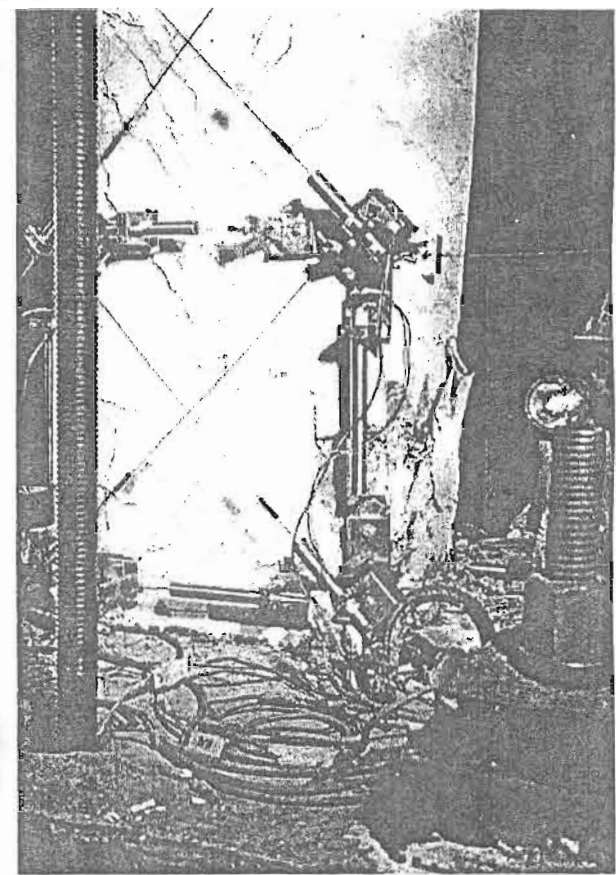
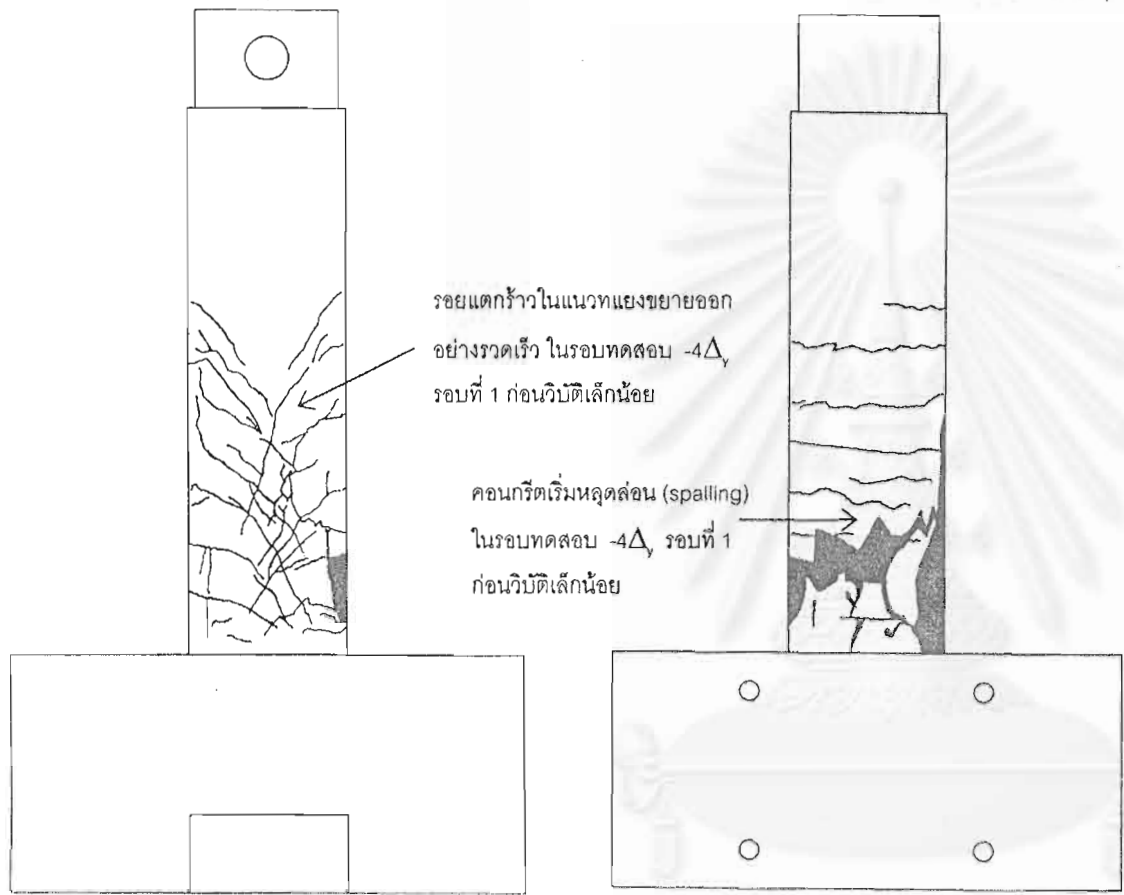


รอยแตกร้าวที่
เกิดขึ้นครั้งแรก



ข. แสดงการแตกร้าวในด้านที่มีหน่วยแรงอัดเนื่องจากโมเมนต์ดัดสูง

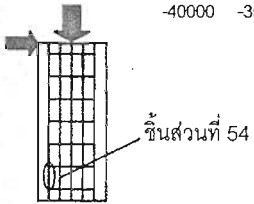
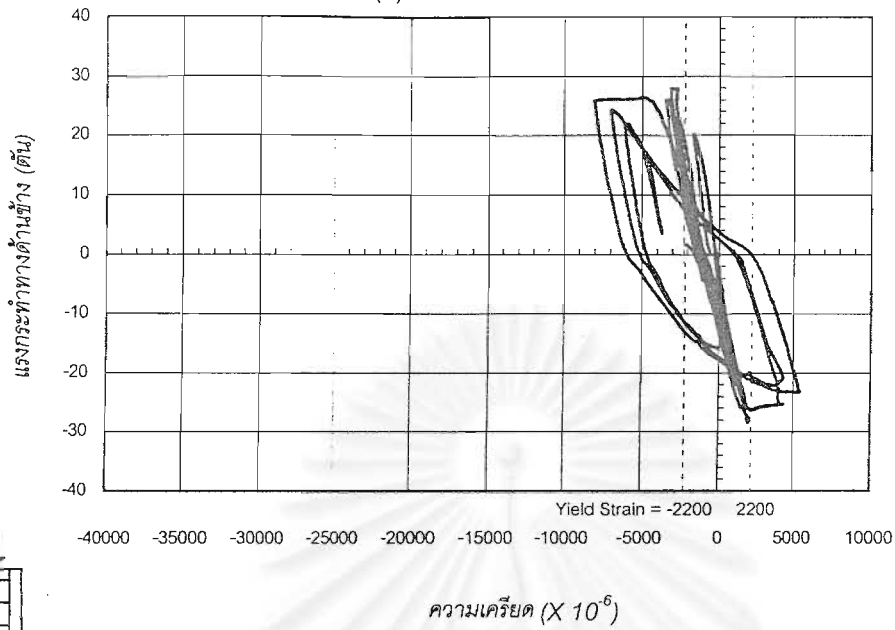
รูปที่ 4.18 (ต่อ) แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CF135/120/0.37



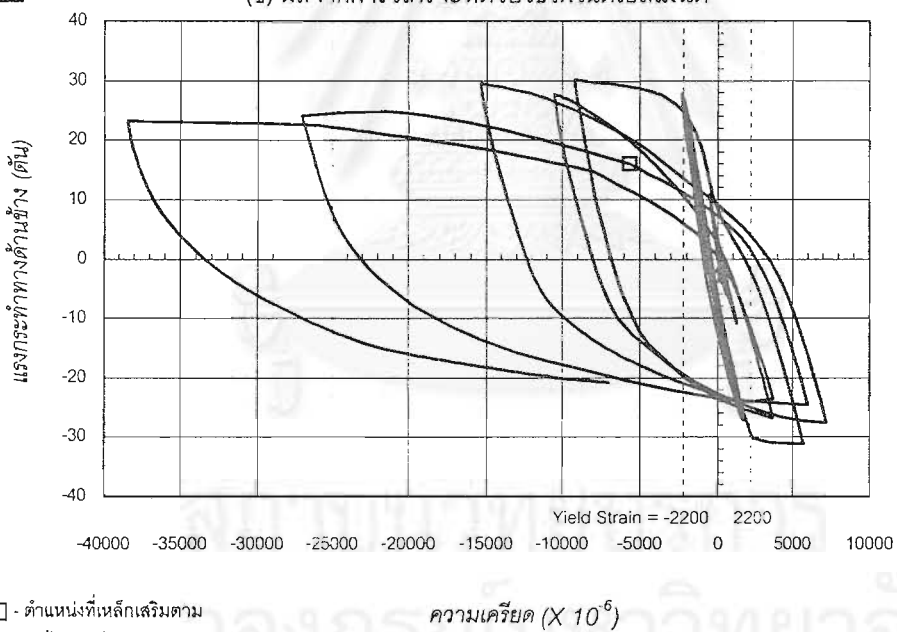
สถาบันวิทยบริการ
รูปที่ 4.19 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง CF135/120/0.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก) ผลจากการทดสอบ



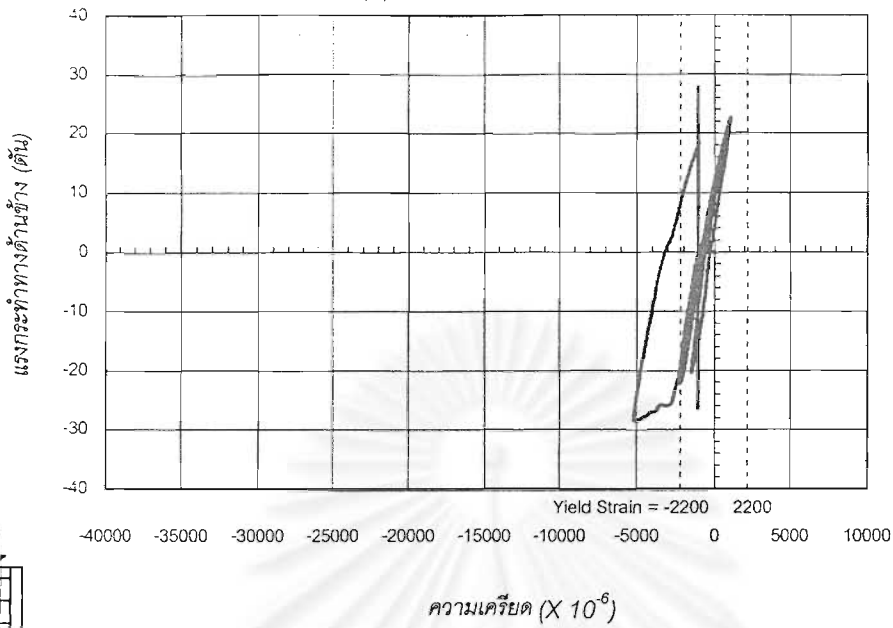
(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



□ - ตำแหน่งที่เหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 54 เกิดการดึง

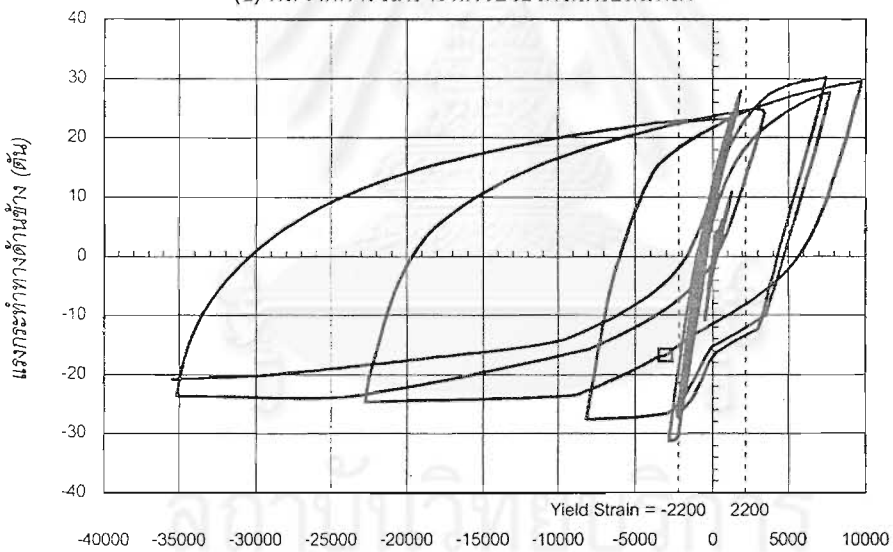
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 54 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37

(ก) ผลจากการทดสอบ



ชั้นส่วนที่ 67

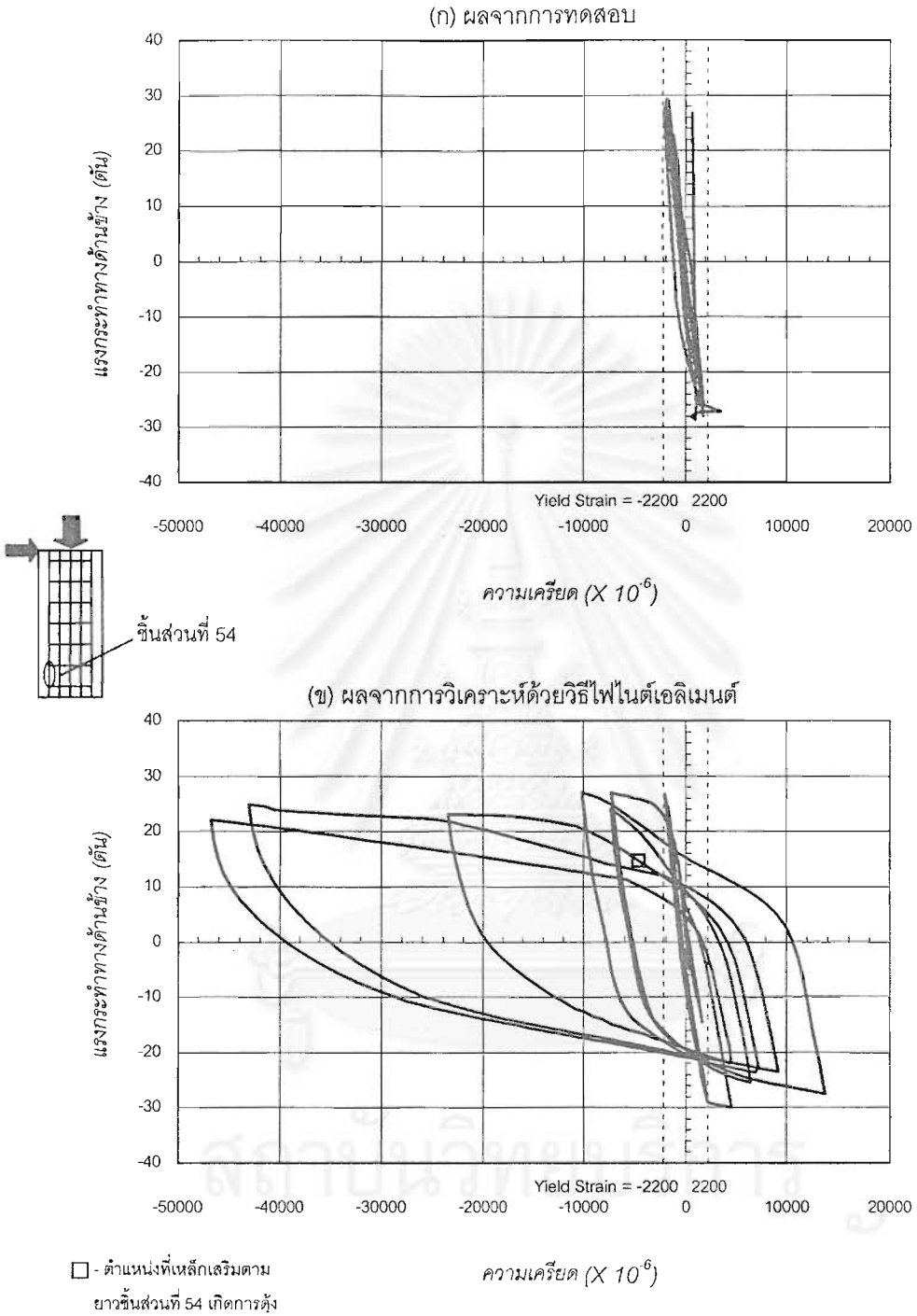
(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



□ - ตำแหน่งที่เหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67 เกิดการดึง

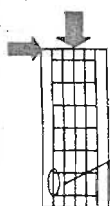
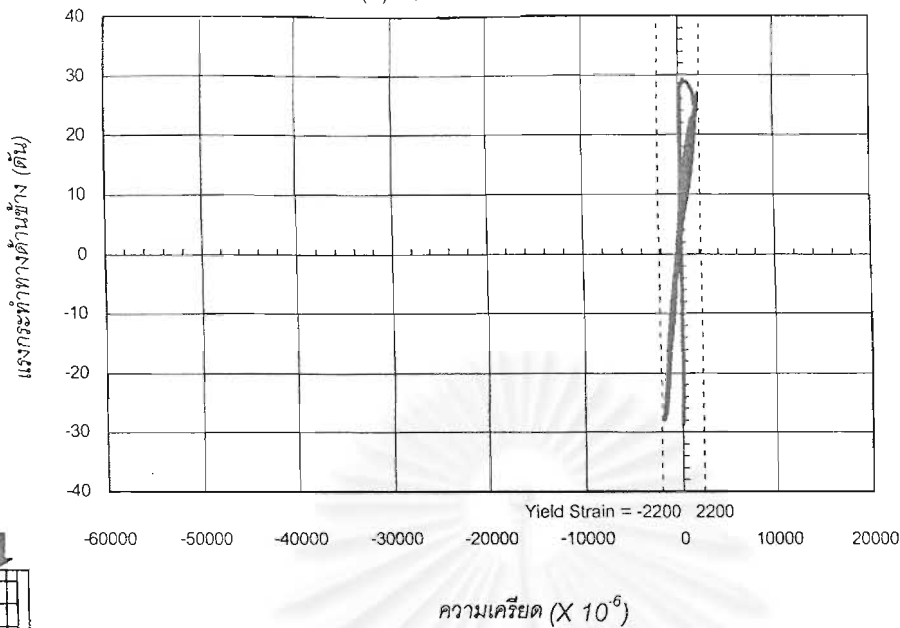
ความเครียด ($\times 10^{-6}$)

รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



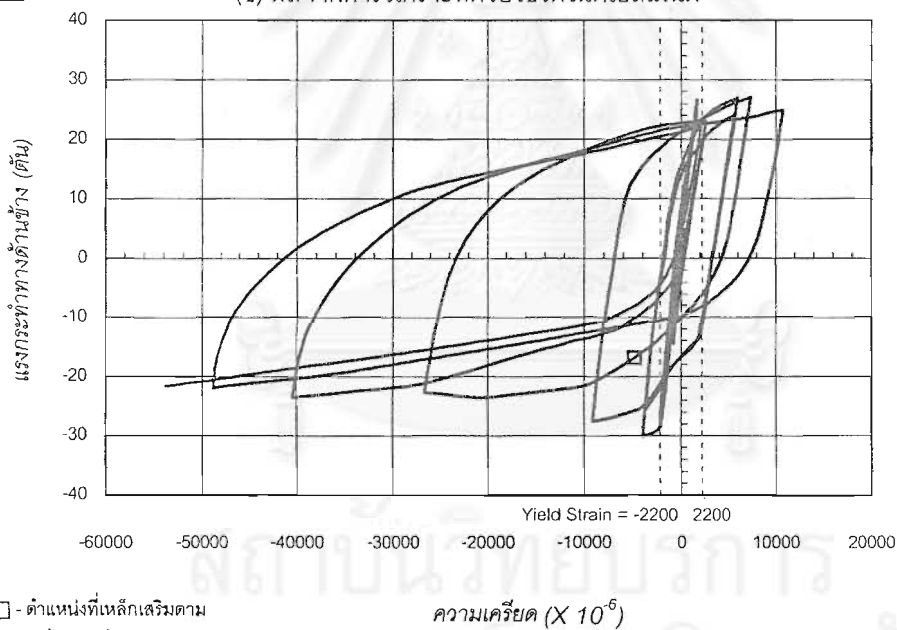
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30

(ก) ผลจากการทดสอบ



ชั้นส่วนที่ 67

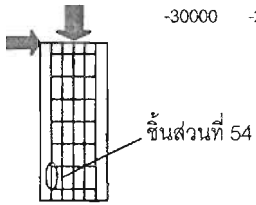
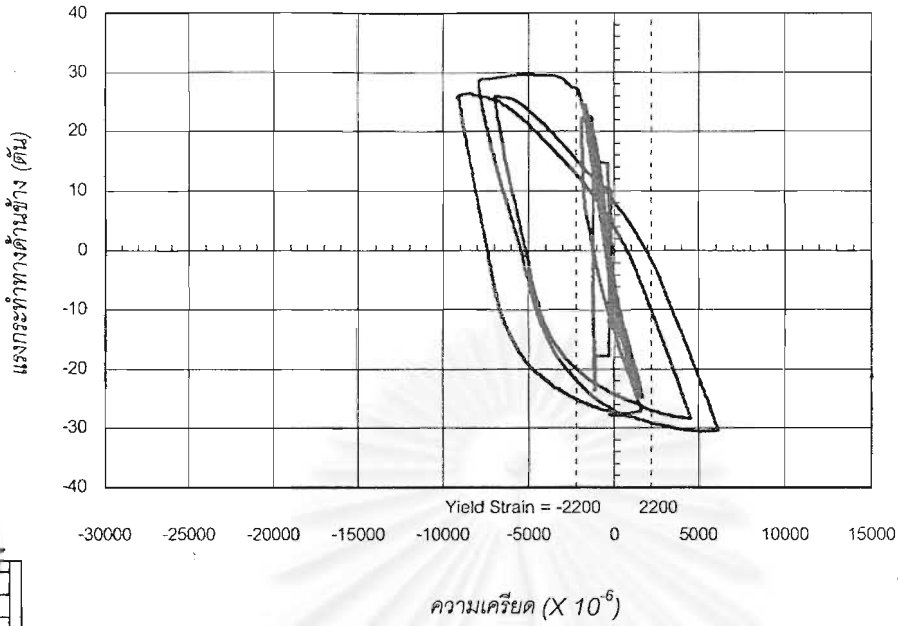
(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



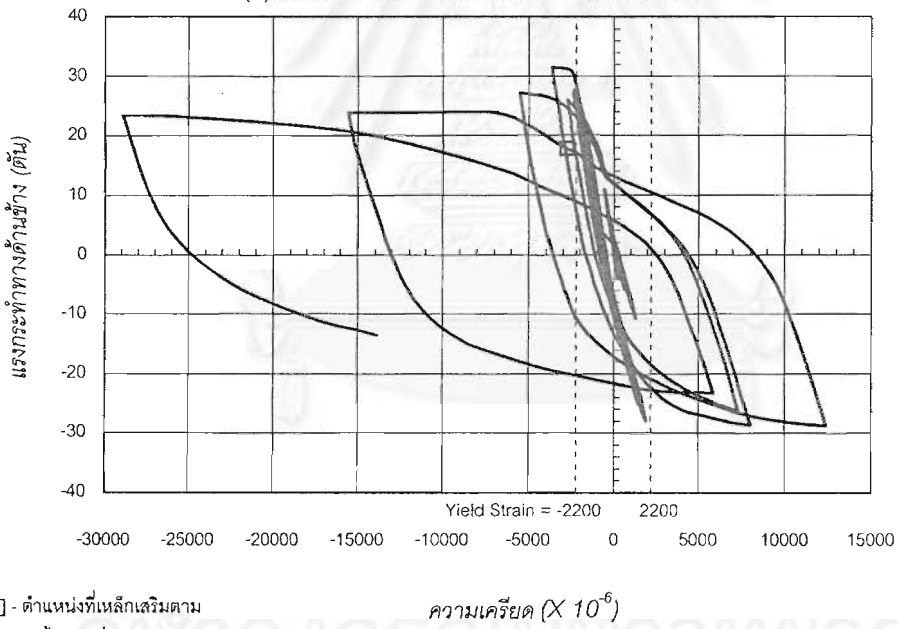
□ - ตำแหน่งที่เหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67 เกิดการดุ้ง

รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30

(ก) ผลจากการทดสอบ



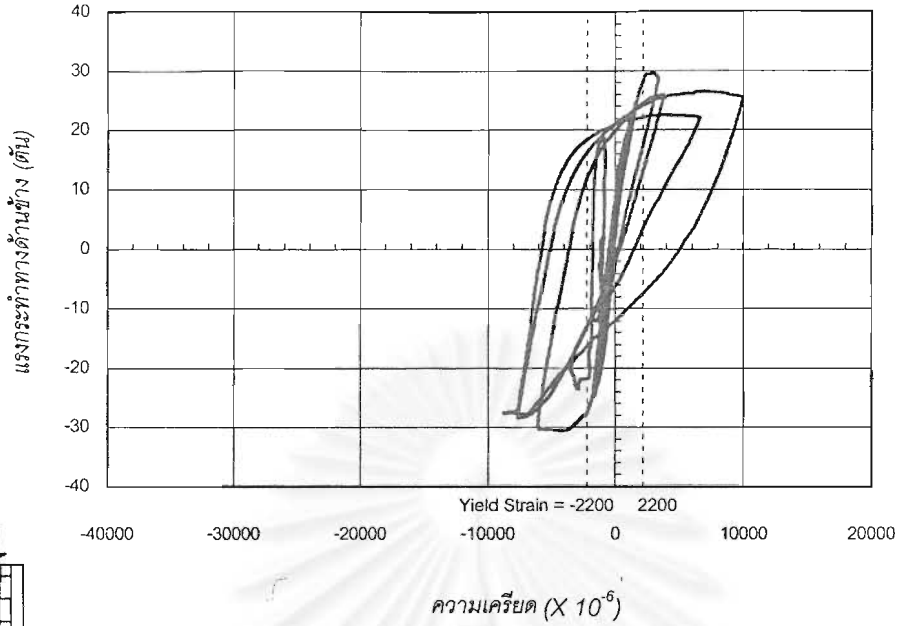
(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



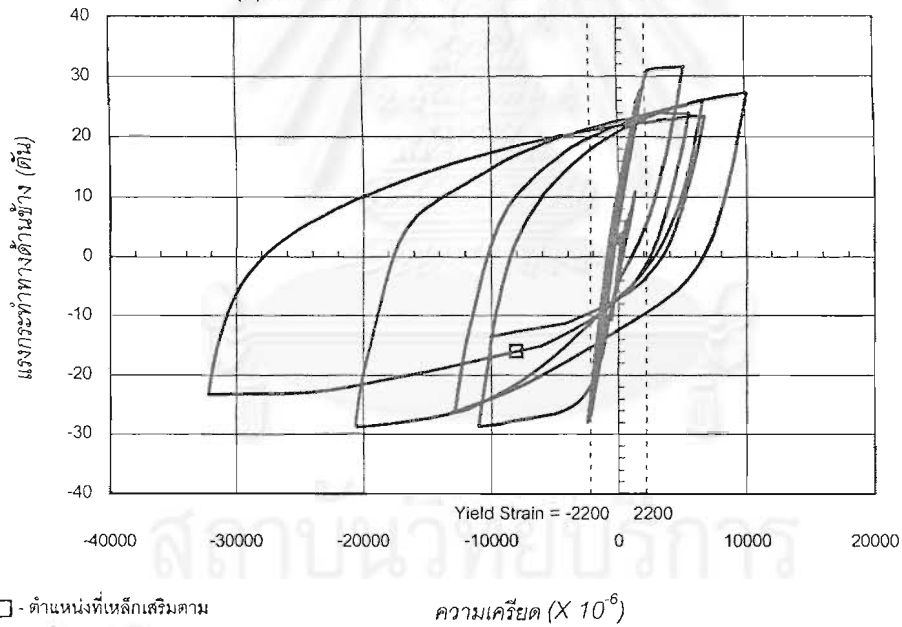
□ - ตำแหน่งที่เหล็กเสริมตาม
ยาวชิ้นส่วนที่ 54 เกิดการดึง

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37

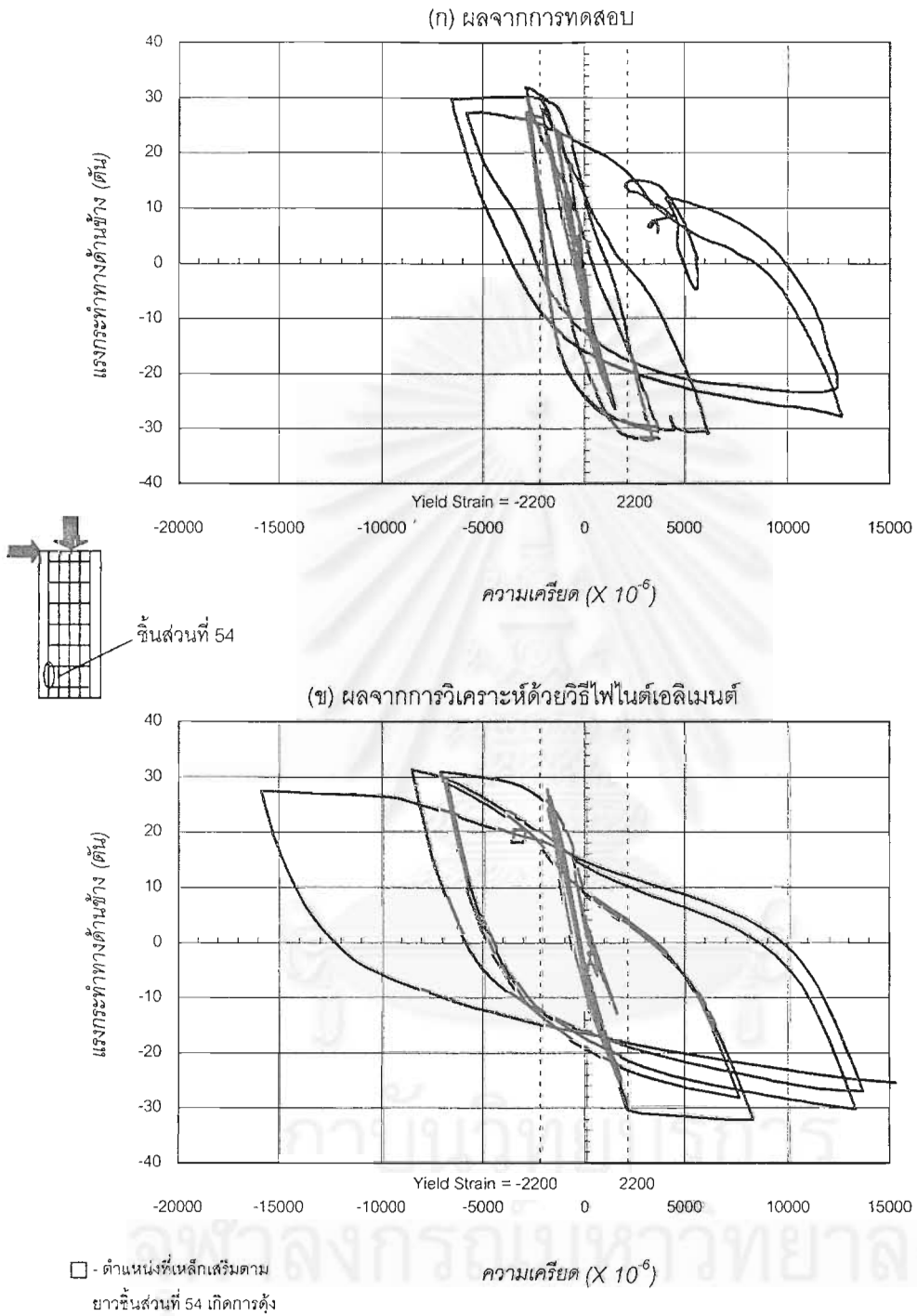
(ก) ผลจากการทดสอบ



(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

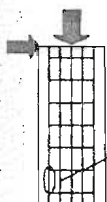
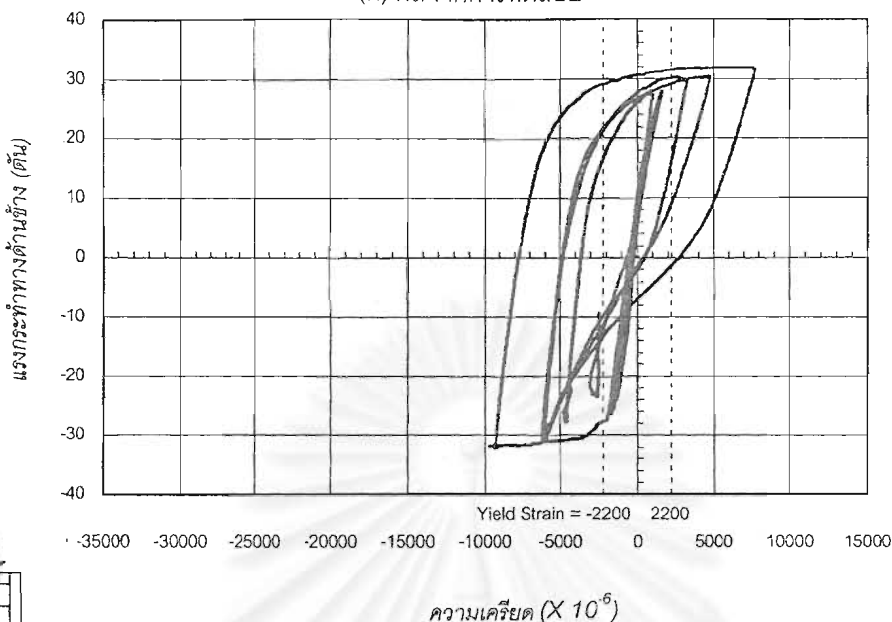


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



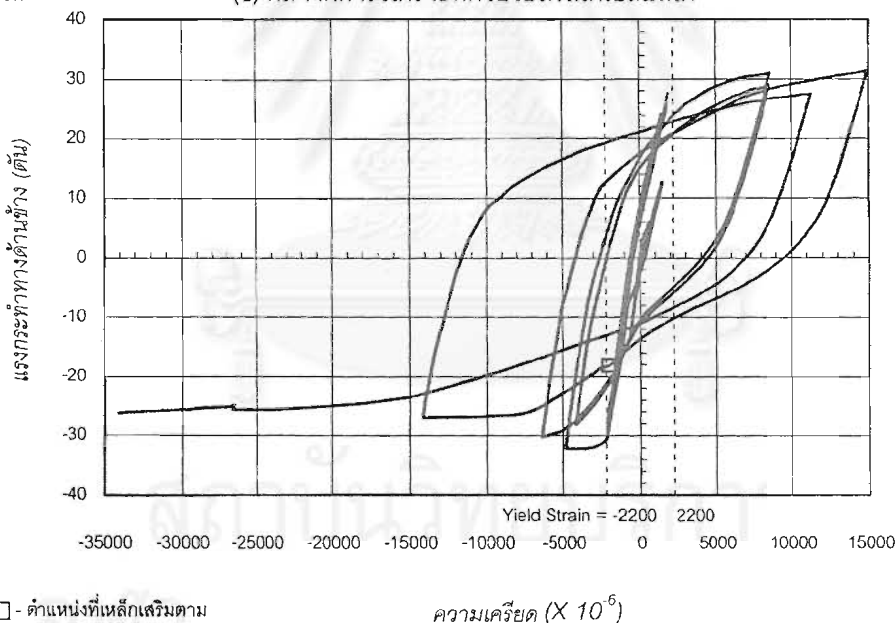
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชิ้นส่วนที่ 54 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30

(ก) ผลจากการทดสอบ



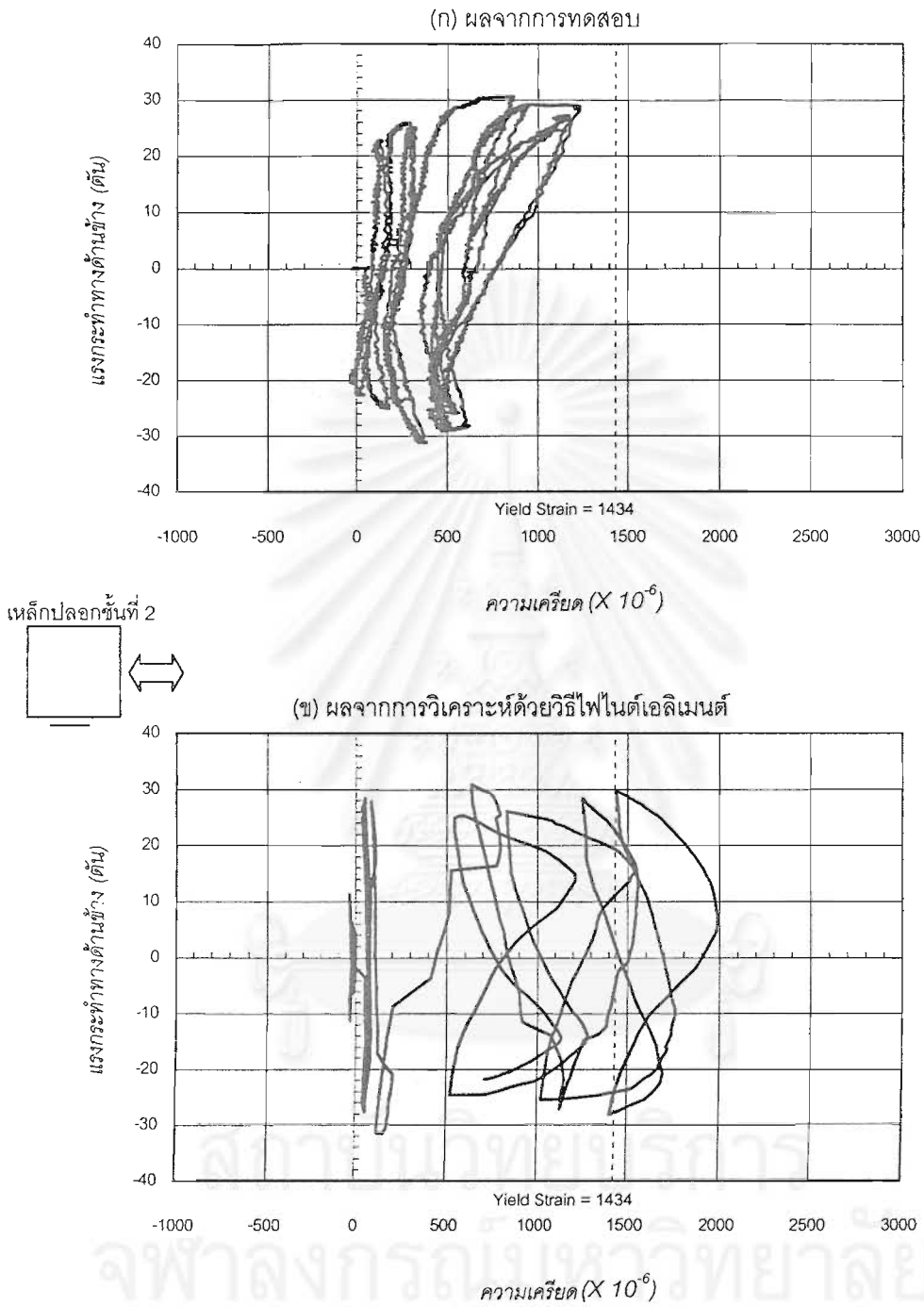
ชั้นส่วนที่ 67

(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

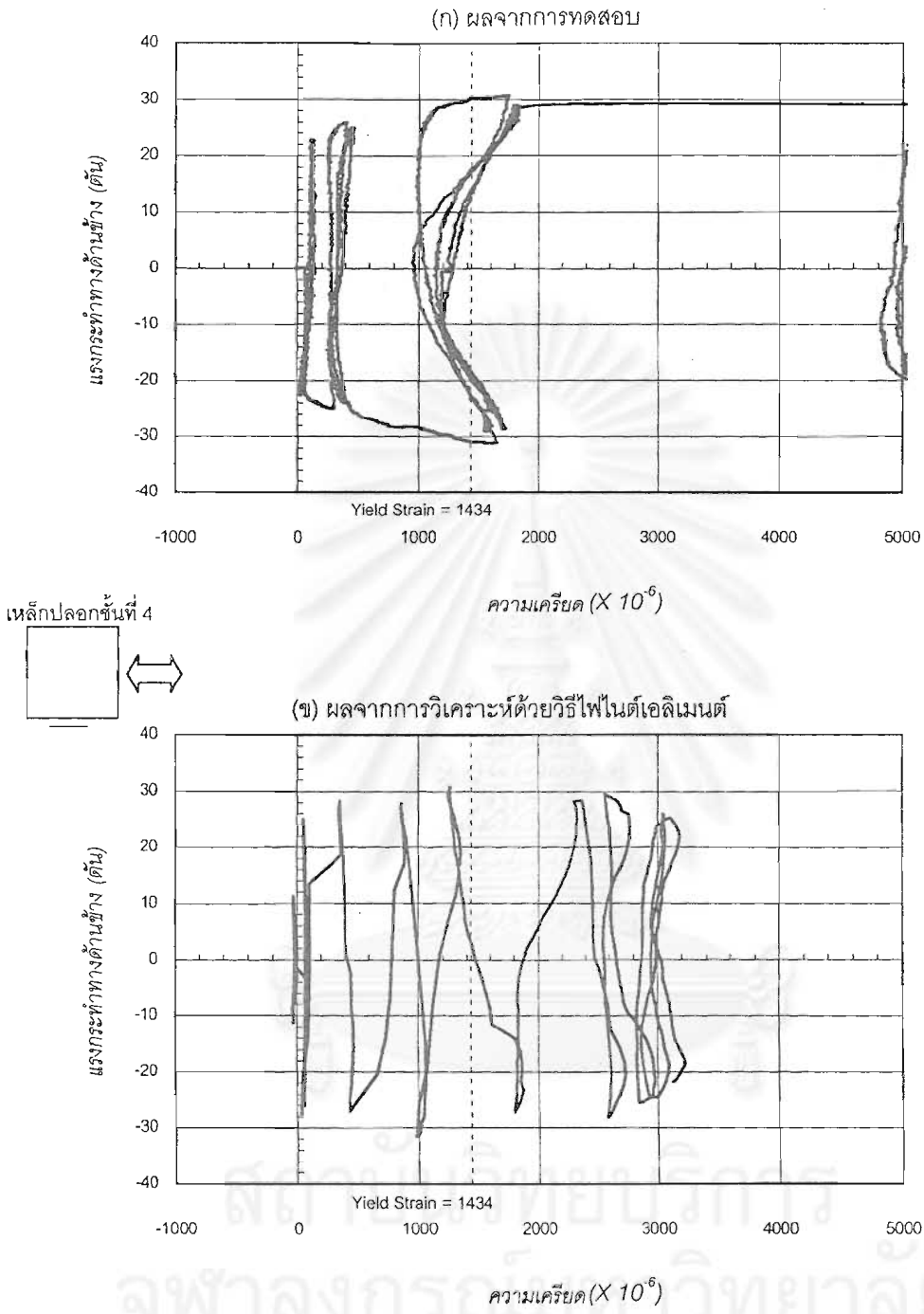


□ - ตำแหน่งที่เหล็กเสริมตาม
ยาวชั้นส่วนที่ 67 เกิดการดัดง

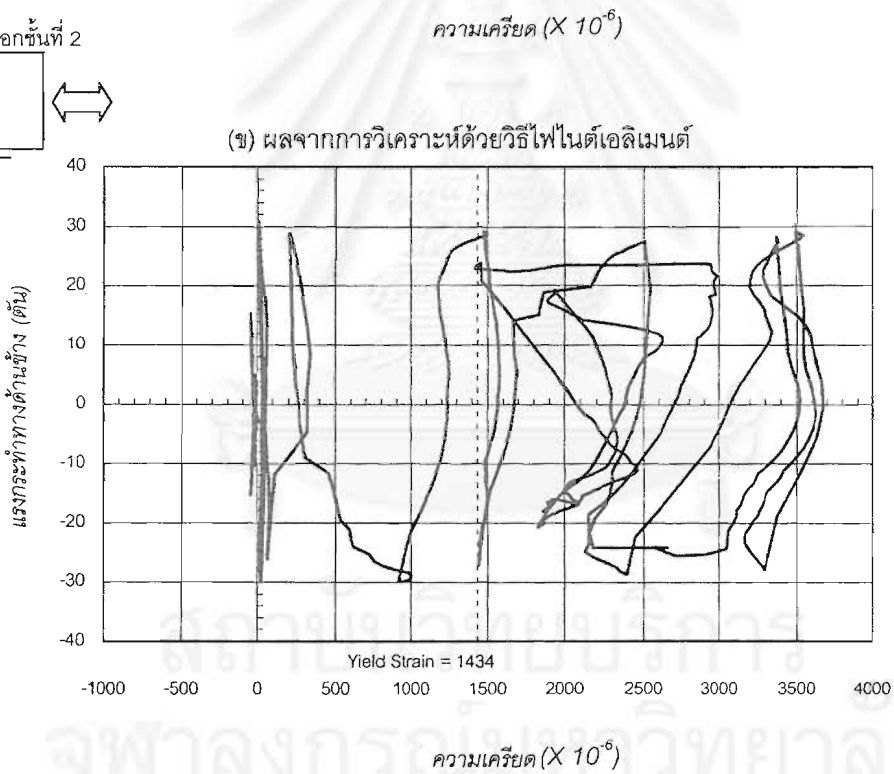
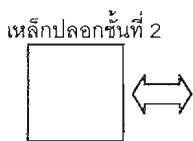
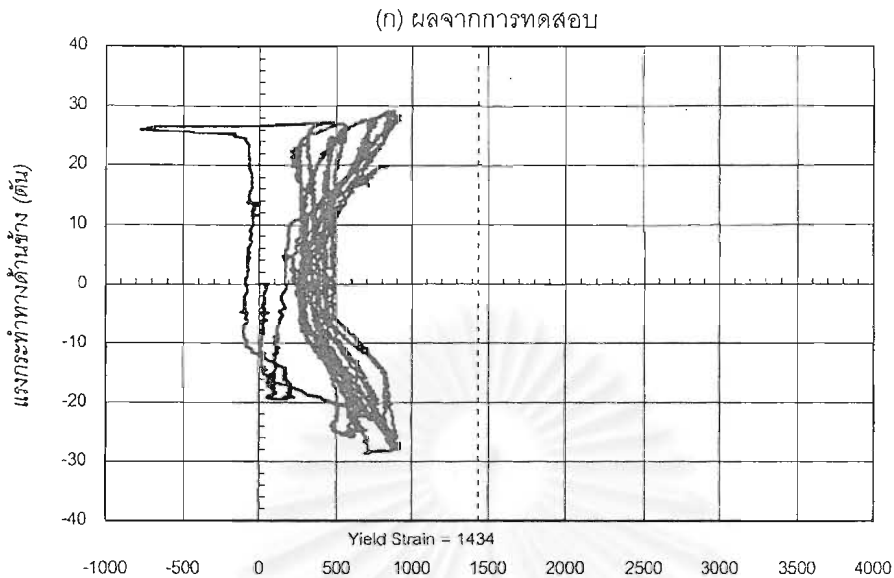
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวชั้นส่วนที่ 67
ที่ได้จากผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30



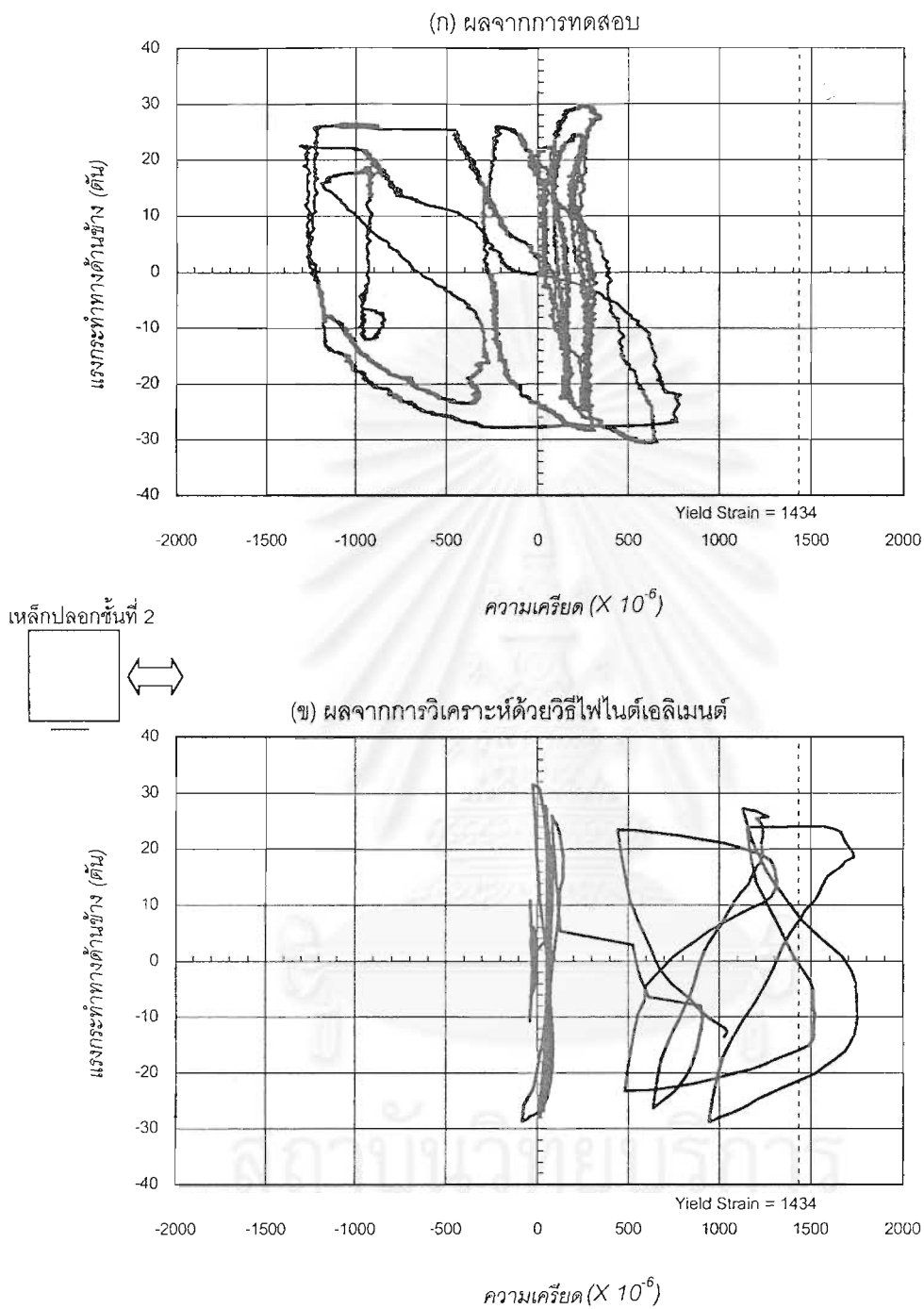
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 2 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



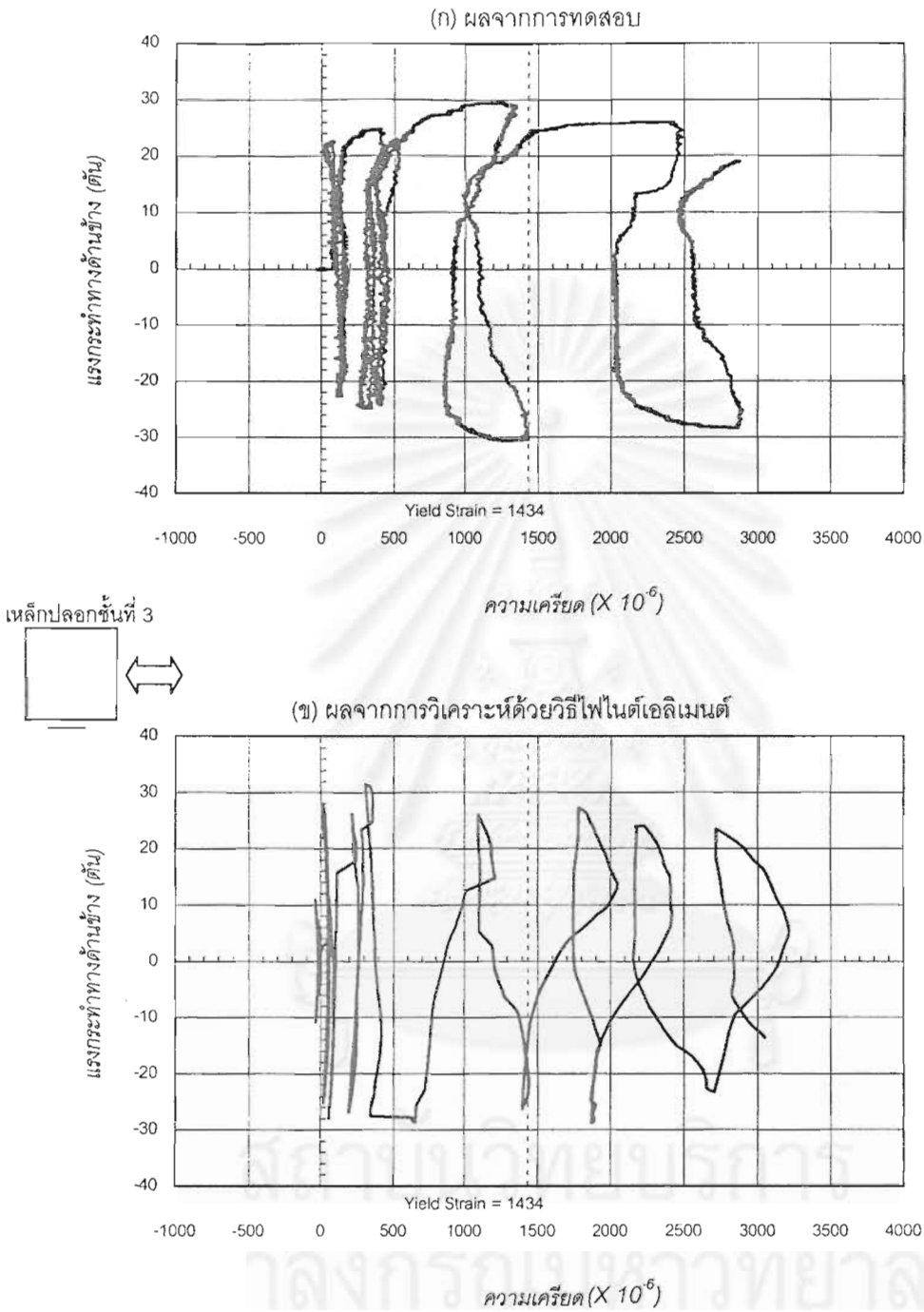
รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 4 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



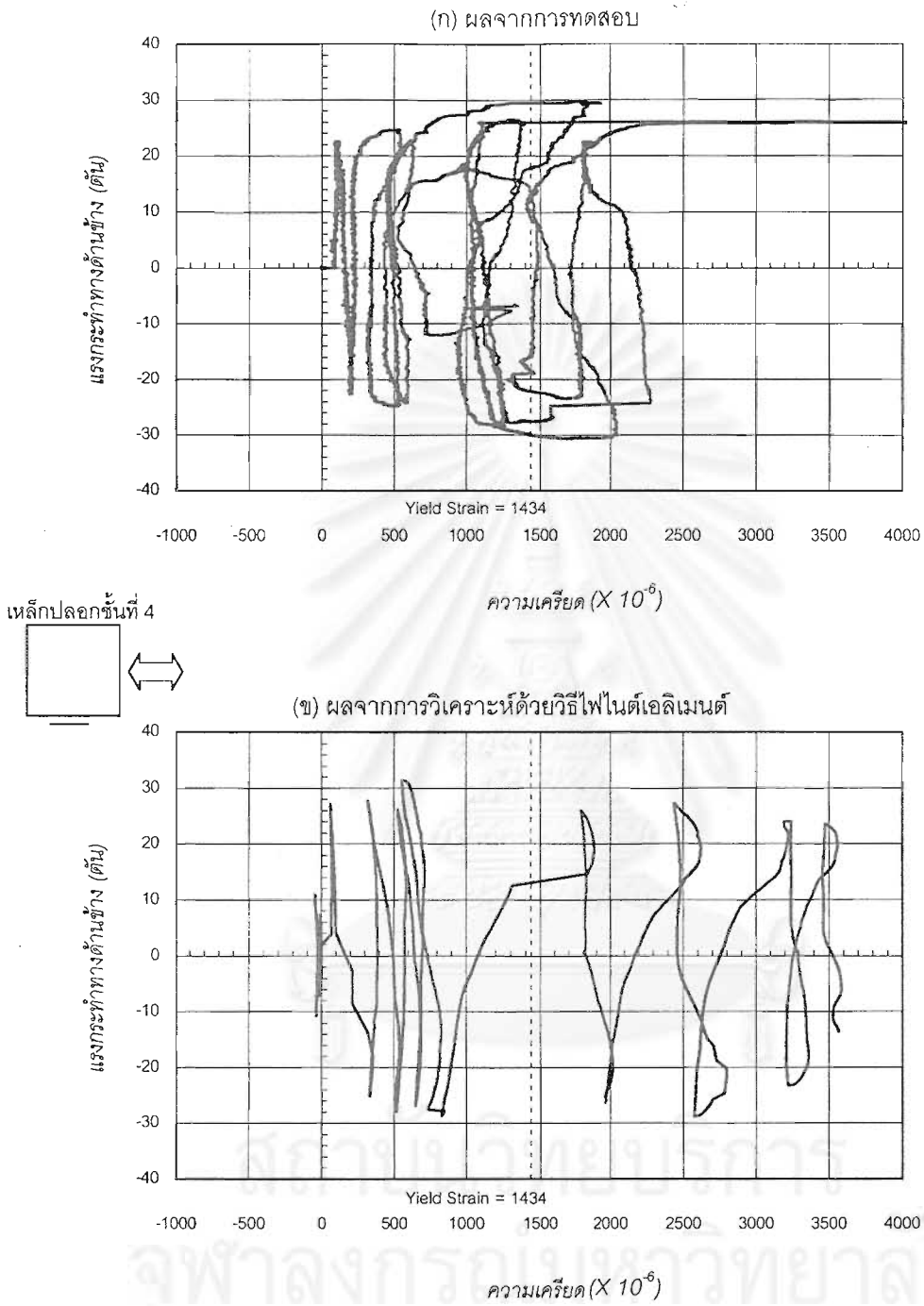
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 2 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30



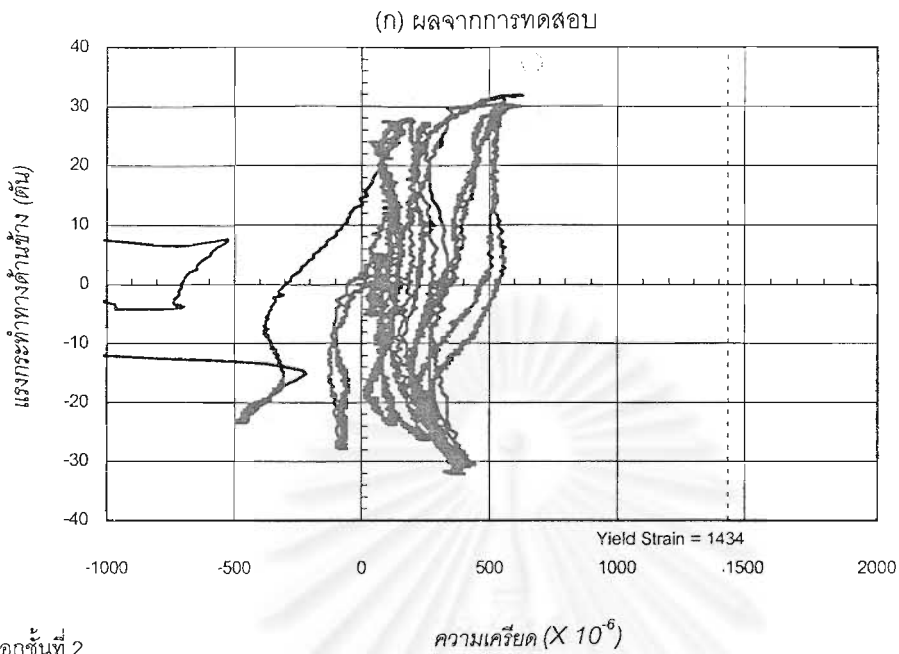
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 2 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 3 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



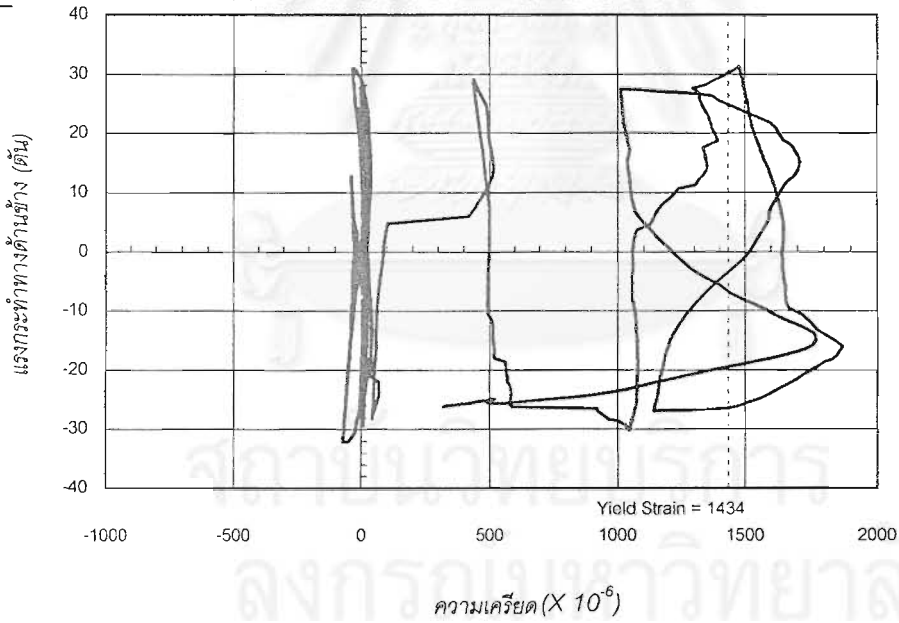
รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 4 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



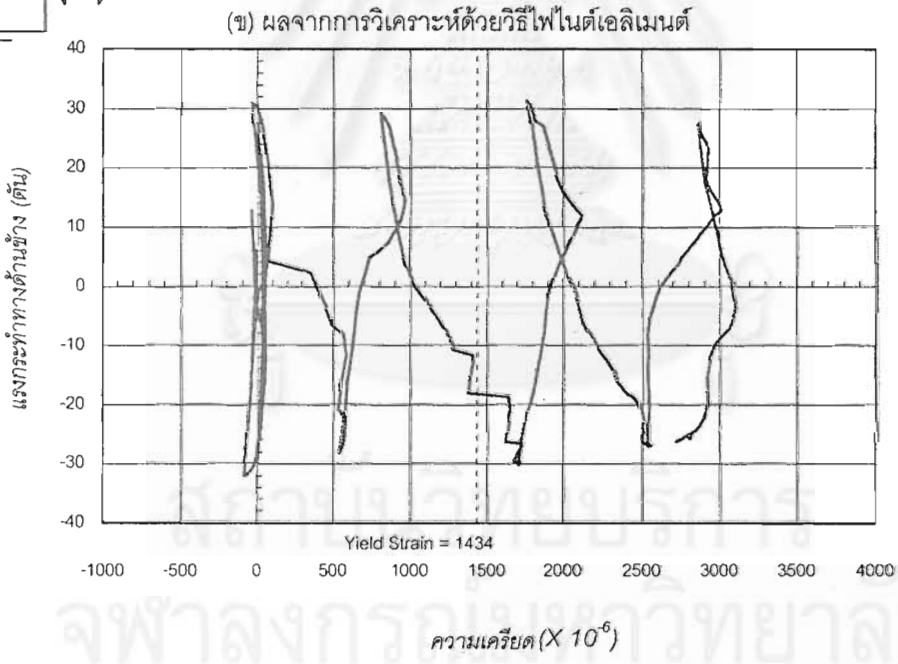
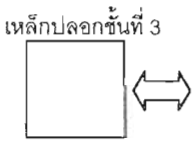
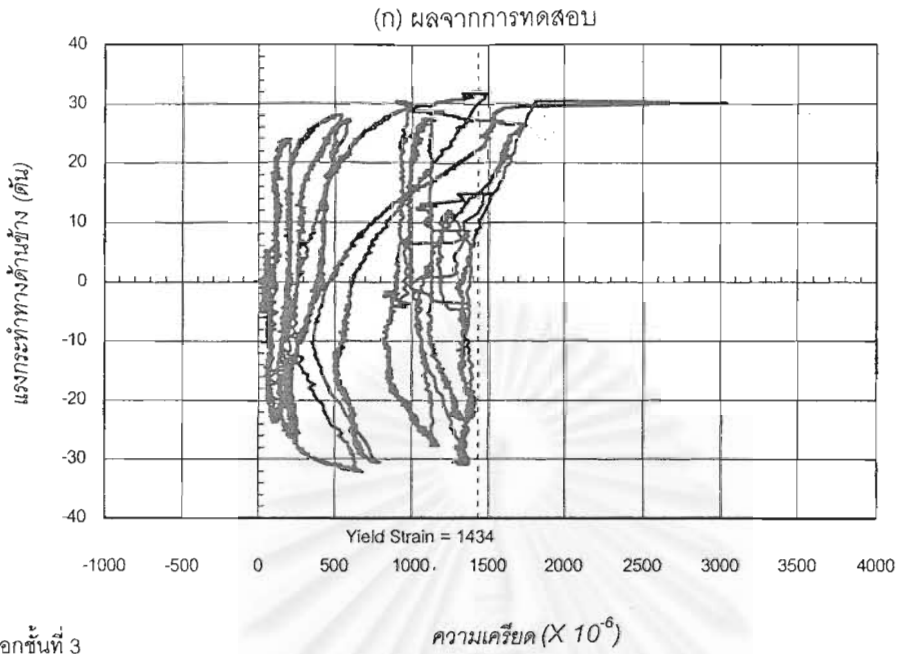
เหล็กปลอกชั้นที่ 2



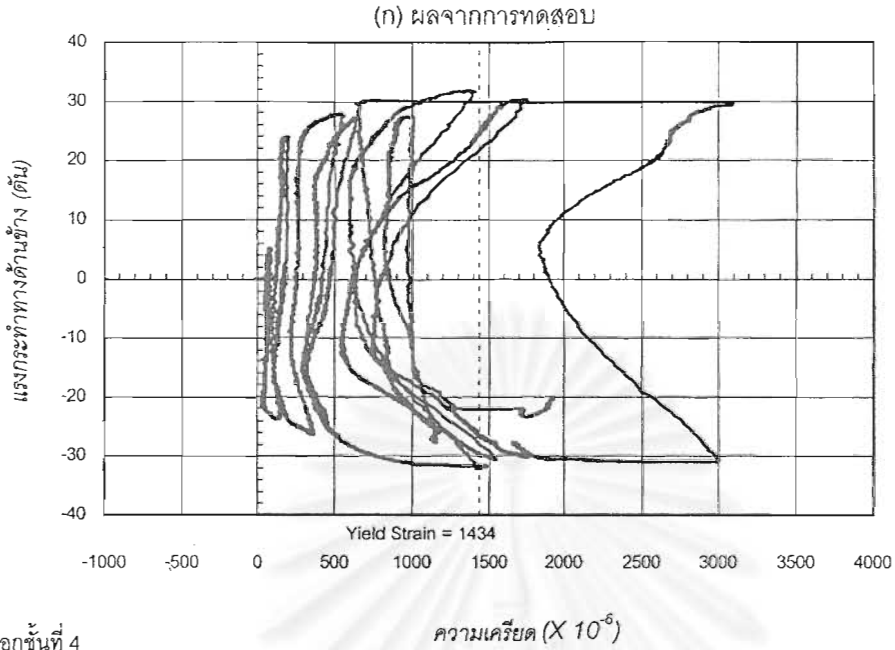
(ข) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



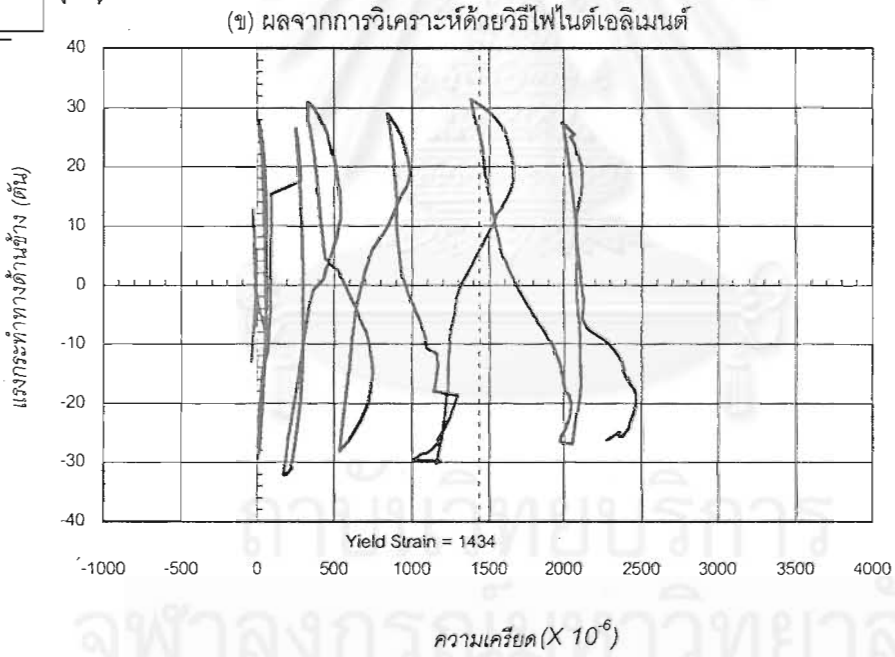
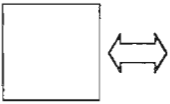
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 2 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30



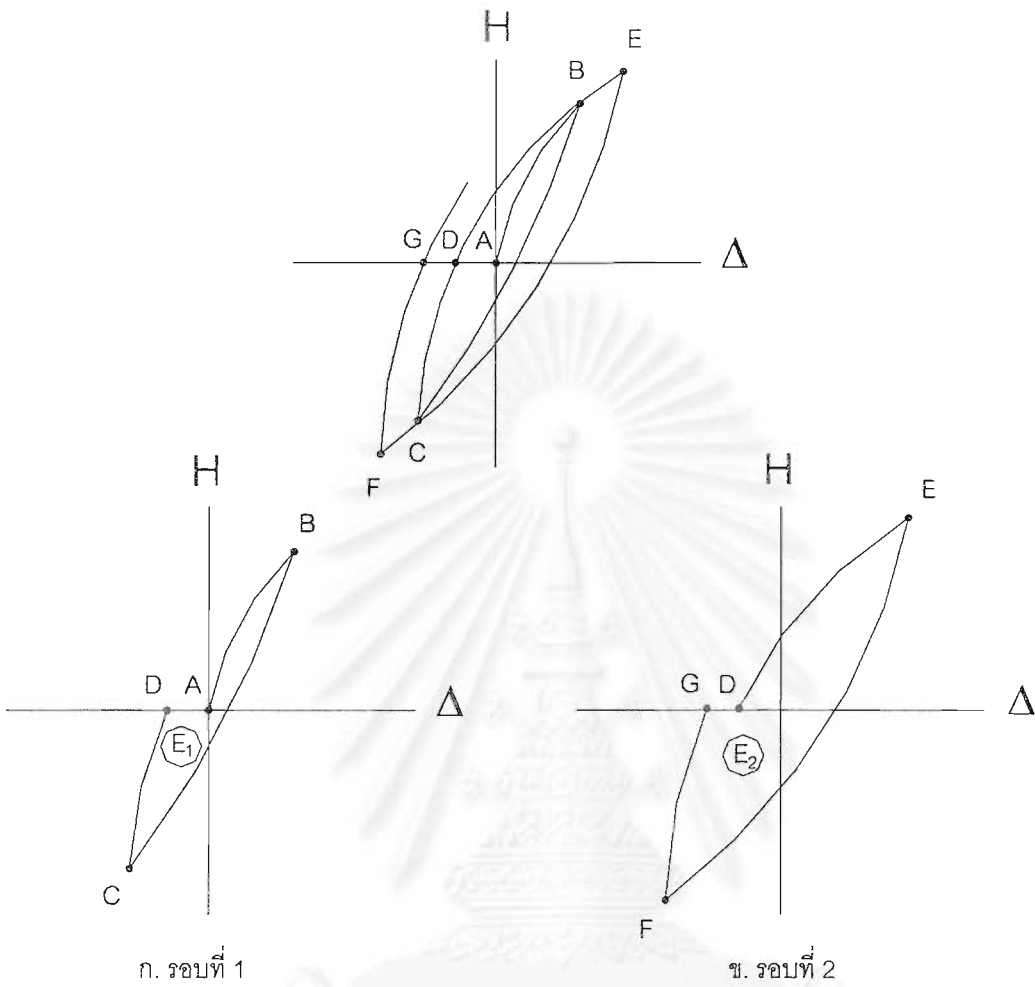
รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 3 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30



เหล็กปลอกชั้นที่ 4

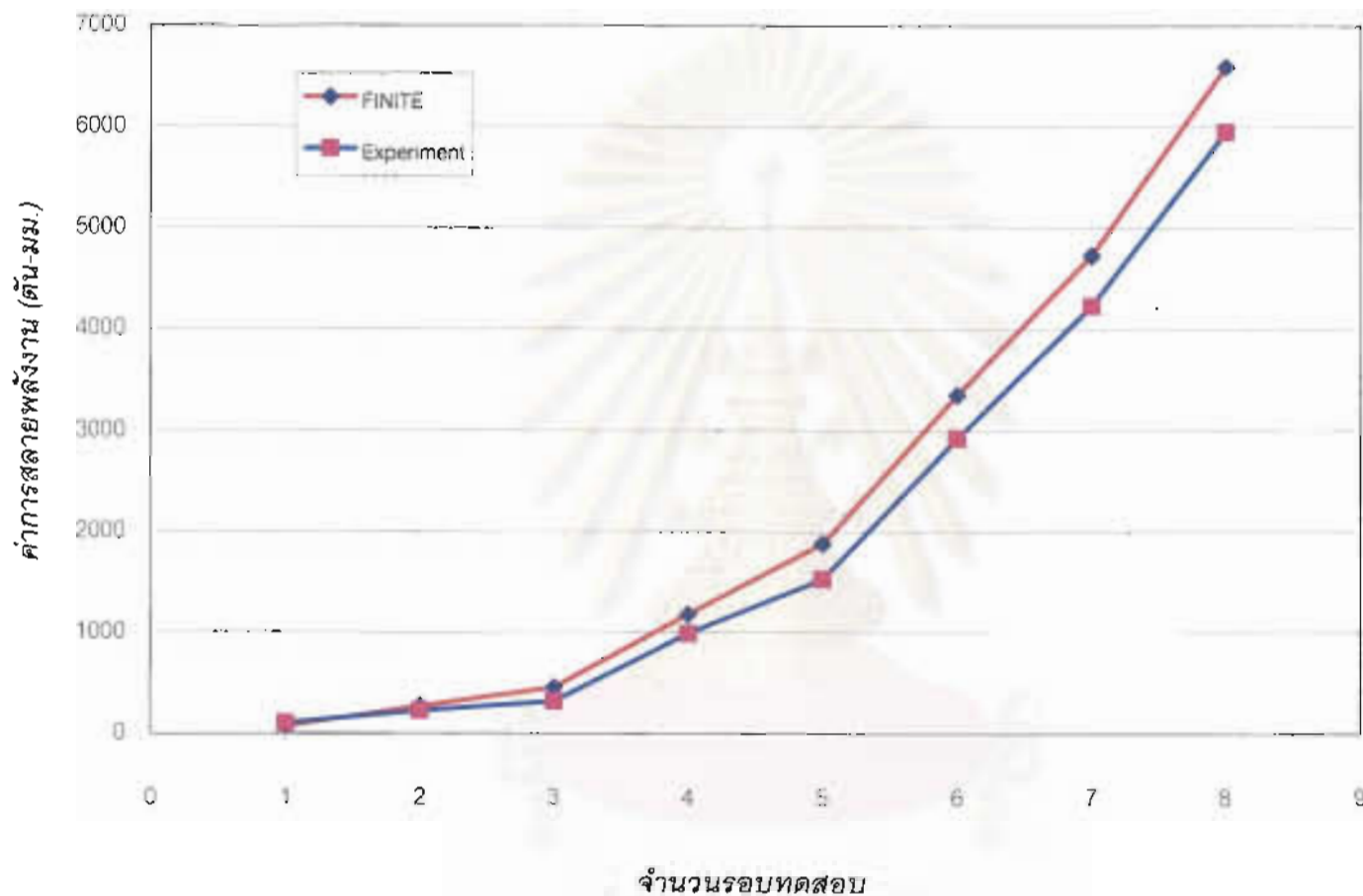


รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับความเครียดในเหล็กปลอกชั้นที่ 4 ที่ได้จากการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30



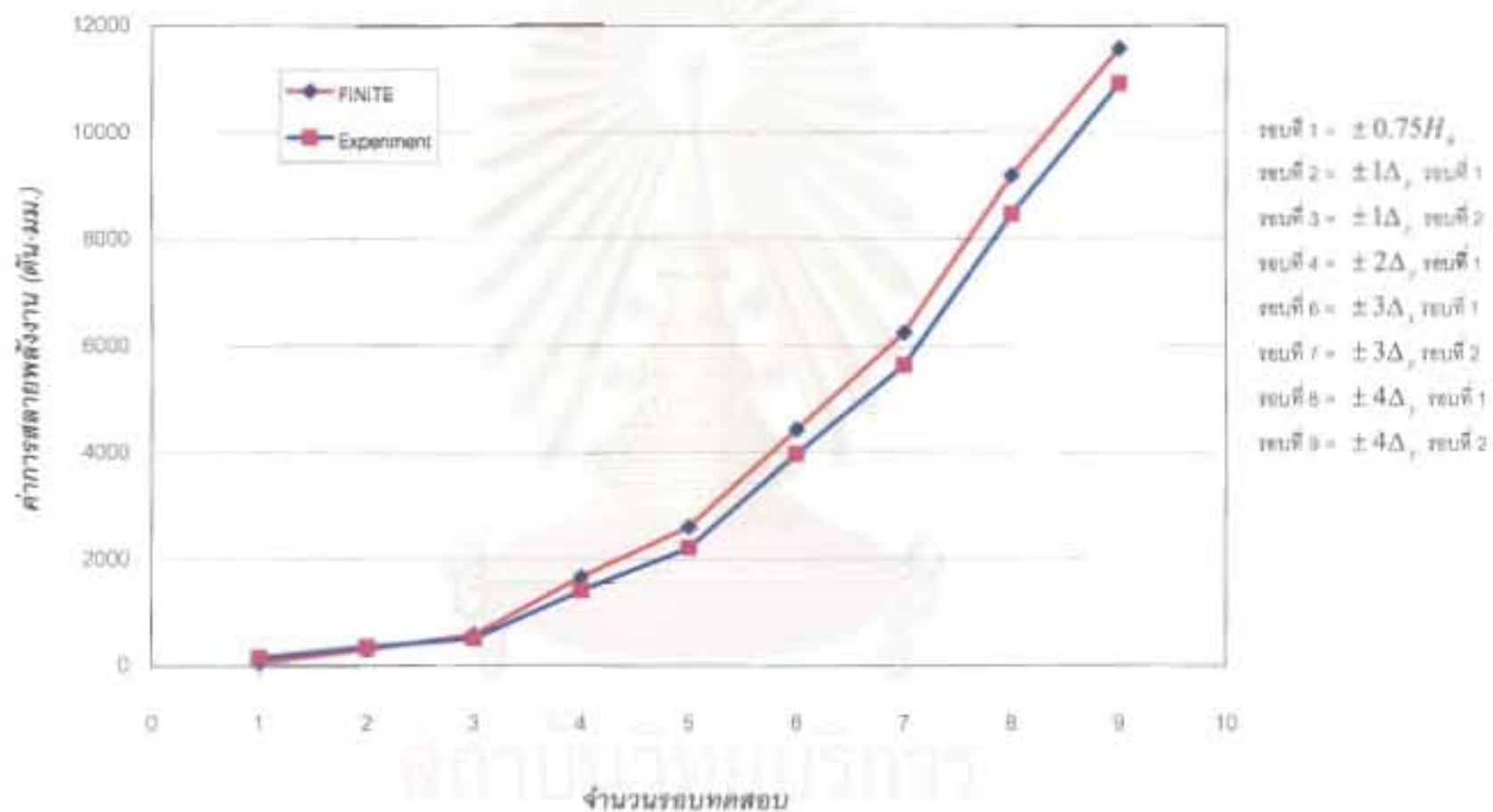
โดยที่ H หมายถึง แรงกระทำทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา
 Δ หมายถึง การเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระดับ 1.50 ม. เหนือฐานเสา
 E_i หมายถึง ความสามารถในการสลายพลังงานในแต่ละรอบทดสอบของ
 แรงกระทำทางด้านข้าง

รูปที่ 4.37 วิธีการคำนวณหาค่าการสลายพลังงาน

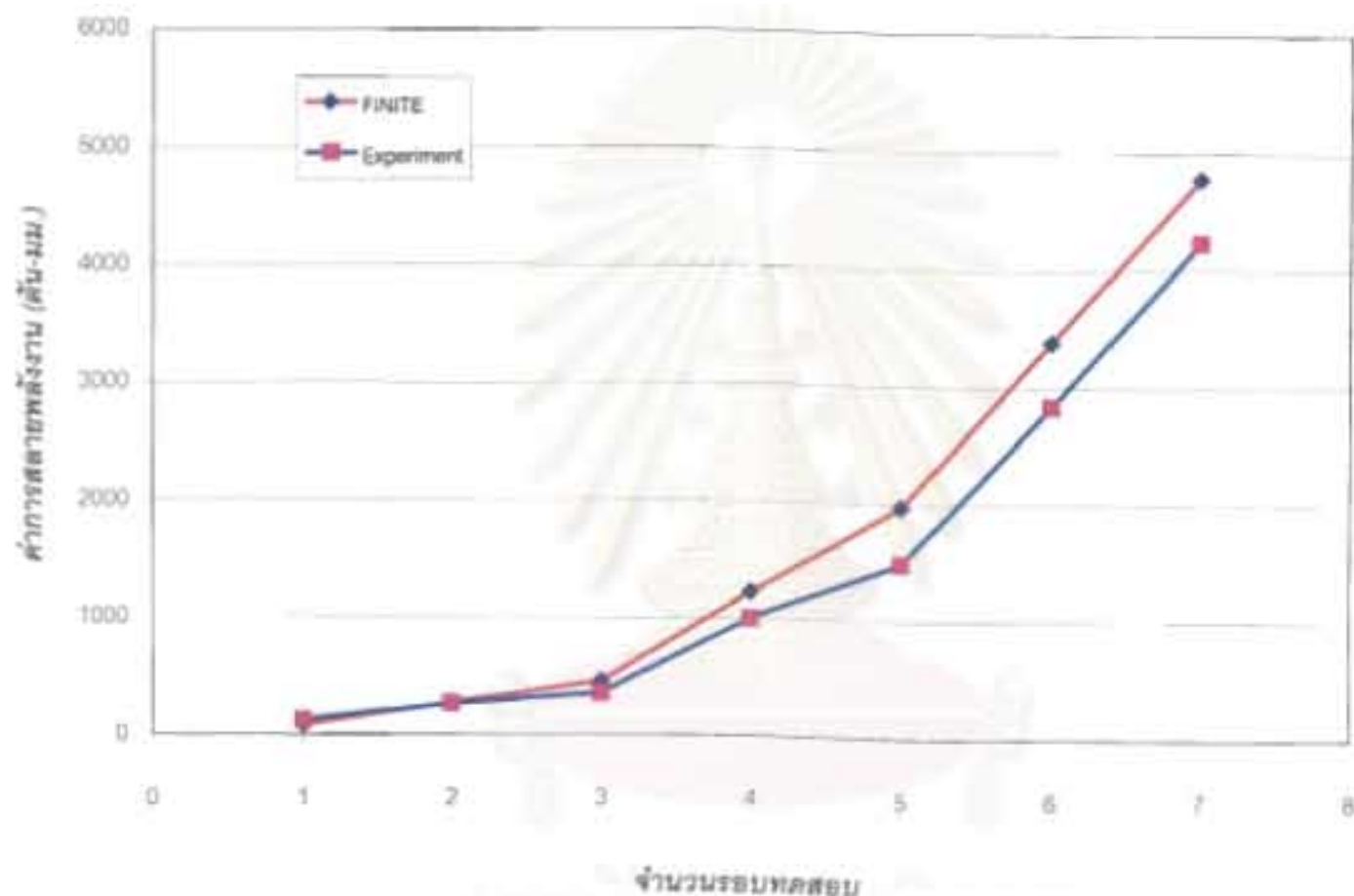


รอบที่ 1 = $\pm 0.75H_u$
 รอบที่ 2 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 3 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 2
 รอบที่ 4 = $\pm 2\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 6 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 7 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 2
 รอบที่ 8 = $\pm 3.5\Delta$, รอบที่ 1

รูปที่ 4.38 แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CFL90/120/0 37 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

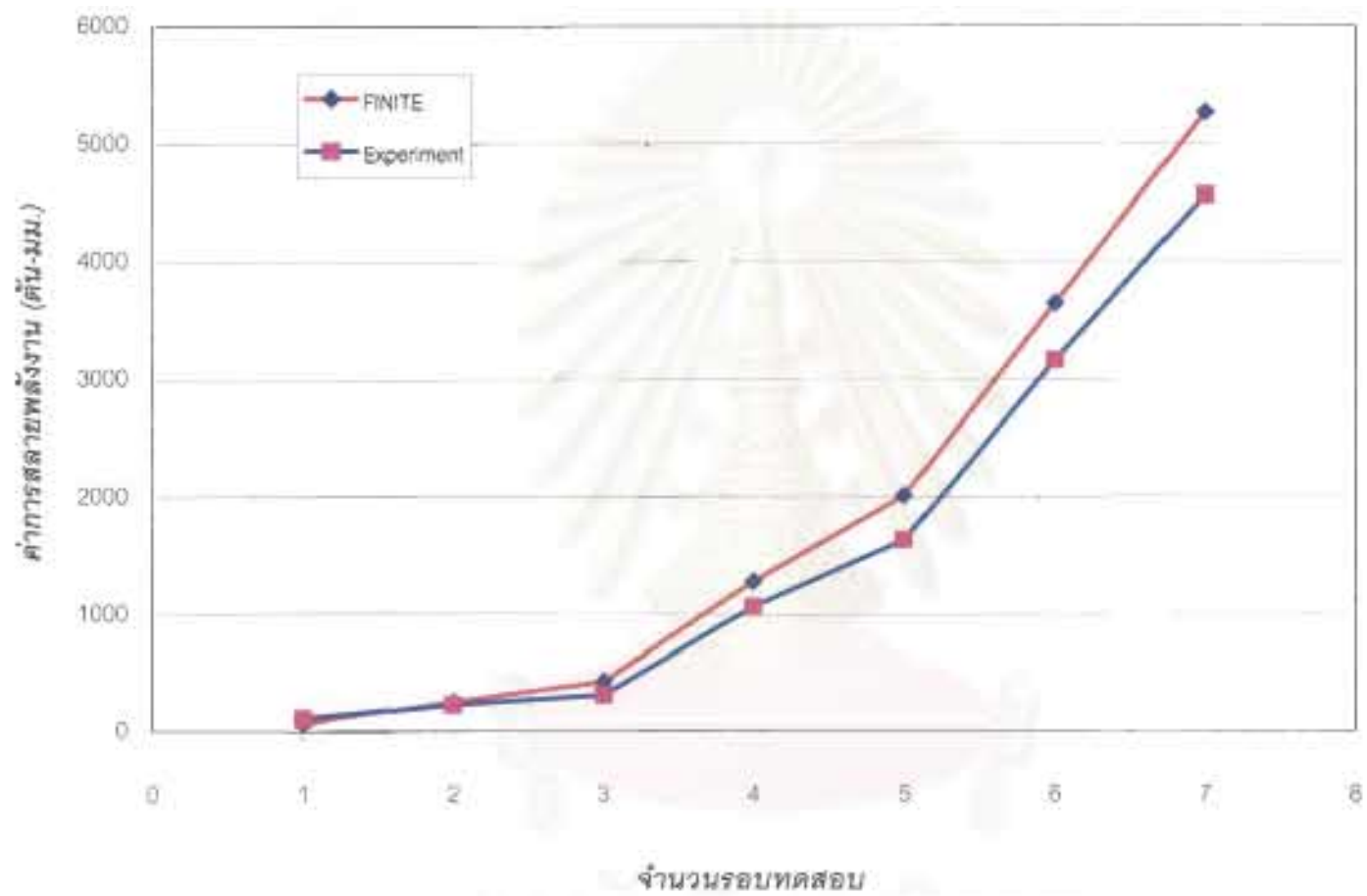


รูปที่ 4.39 แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของหัวรถจักรทดสอบ CFL90/120/0.30 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



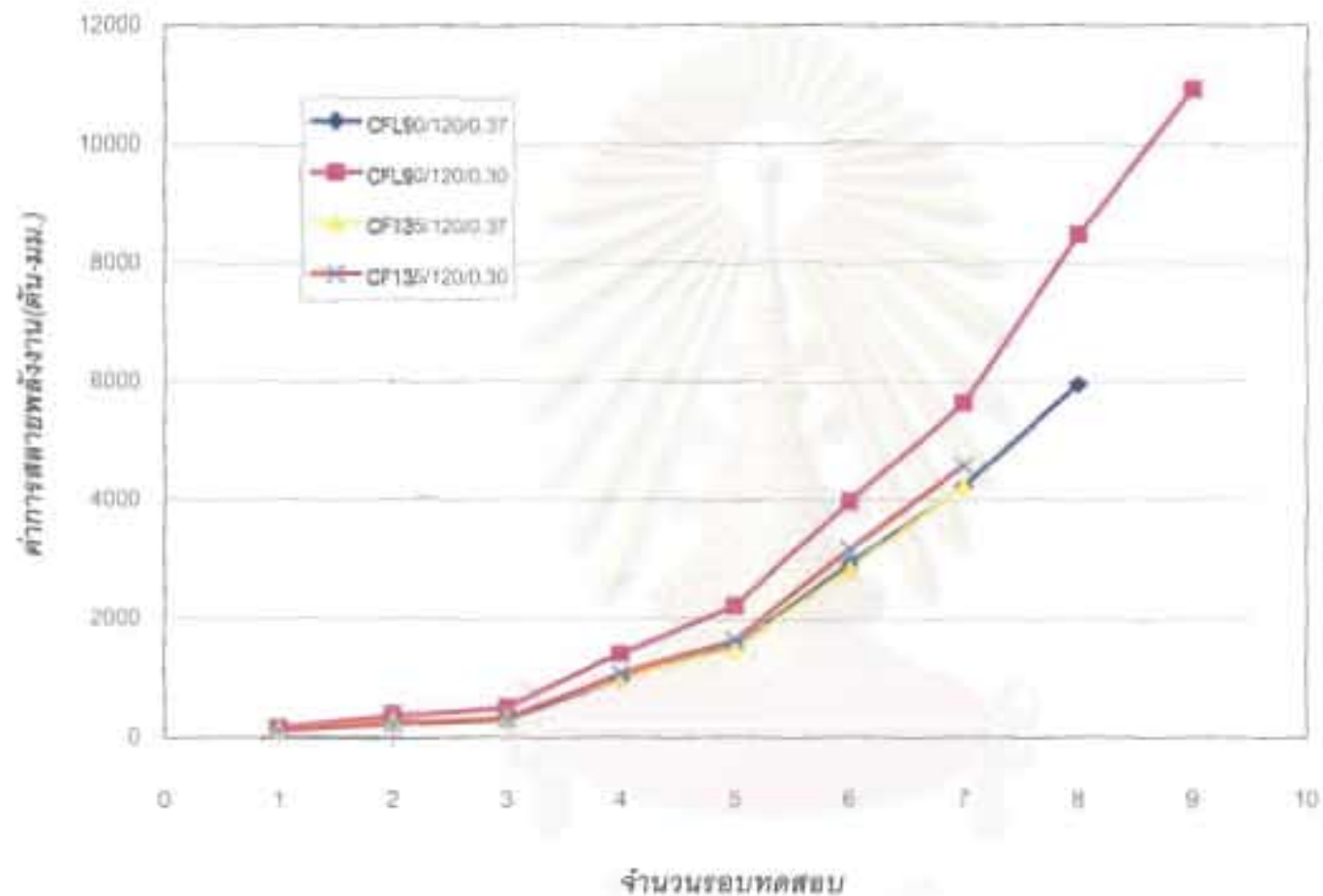
รอบที่ 1 = $\pm 0.75H_x$
 รอบที่ 2 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 3 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 2
 รอบที่ 4 = $\pm 2\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 6 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 7 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 2

รูปที่ 4.40 แสดงความสามารถในการคลายพลังงานของตัวรับทดสอบ CF 135/1200.37 ที่ได้จากกราฟทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รอบที่ 1 = $\pm 0.75H_u$
 รอบที่ 2 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 3 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 2
 รอบที่ 4 = $\pm 2\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 6 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 7 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 2

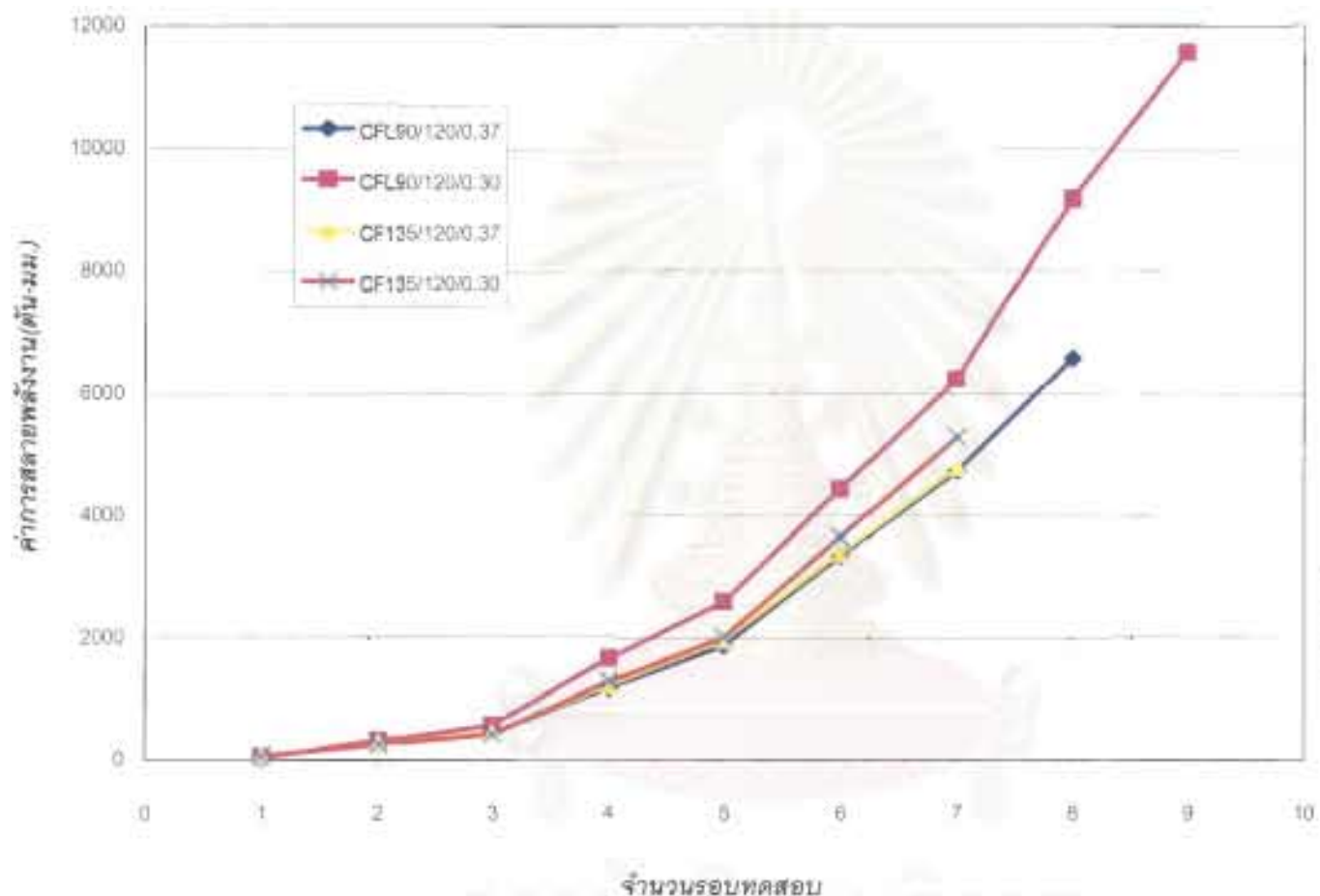
รูปที่ 4.41 แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CF 135/120/0.30 ที่ได้จากการทดสอบ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รอบที่ 1 = $\pm 0.75H_u$
 รอบที่ 2 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 3 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 2
 รอบที่ 4 = $\pm 2\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 6 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 7 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 2
 รอบที่ 8 = $\pm 4\Delta$, รอบที่ 1
 รอบที่ 9 = $\pm 4\Delta$, รอบที่ 2

ยกเว้น รอบที่ 8 ซึ่งใช้ค่า $\pm 3.5\Delta$
 CFL90/120/0.37 ใช้ร่วมกับรอบ
 ทดสอบ $\pm 3.5\Delta$, รอบที่ 1

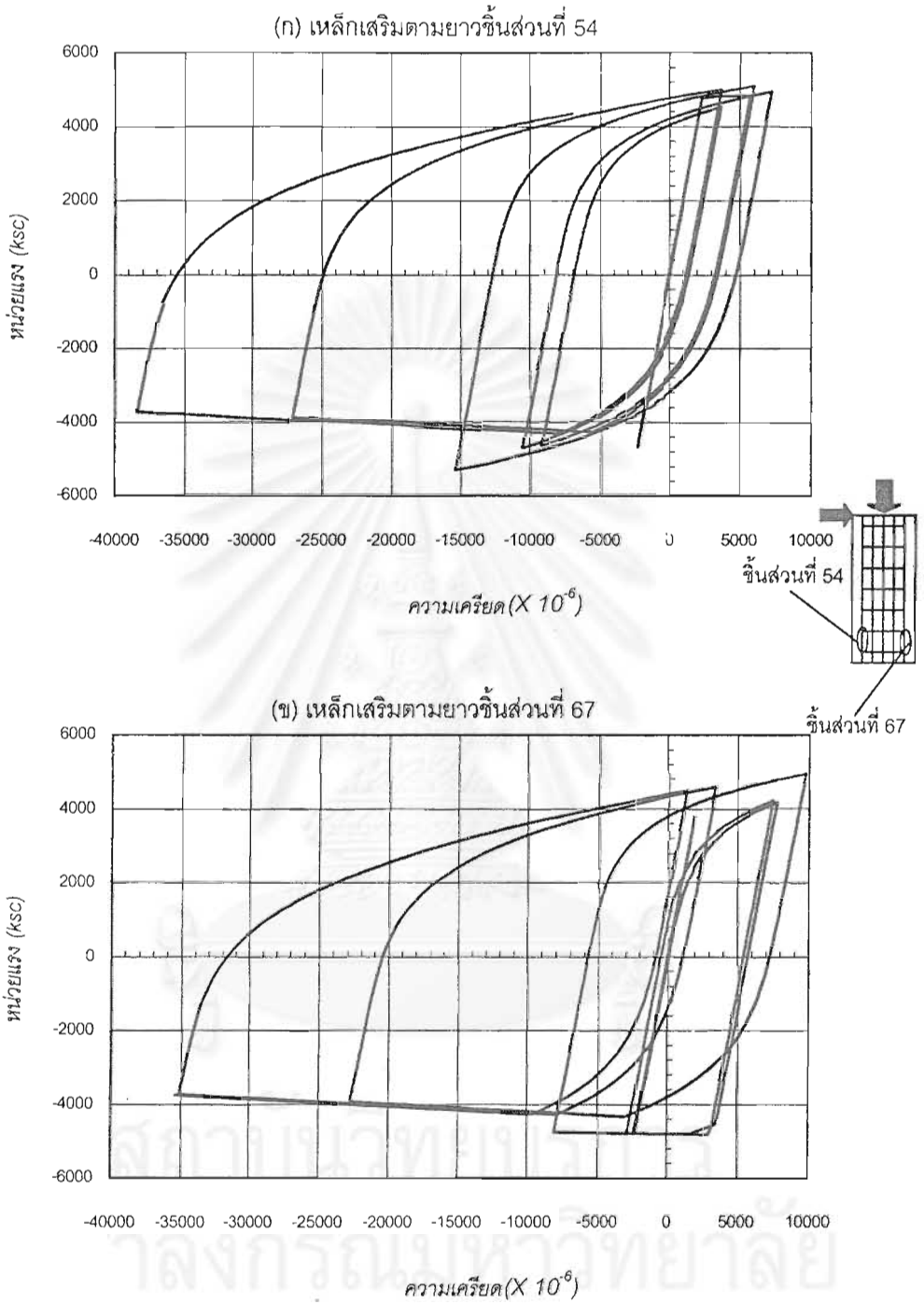
รูปที่ 4.42 แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของชุดตัวอย่างเสาที่ 1 ได้จากการทดสอบ



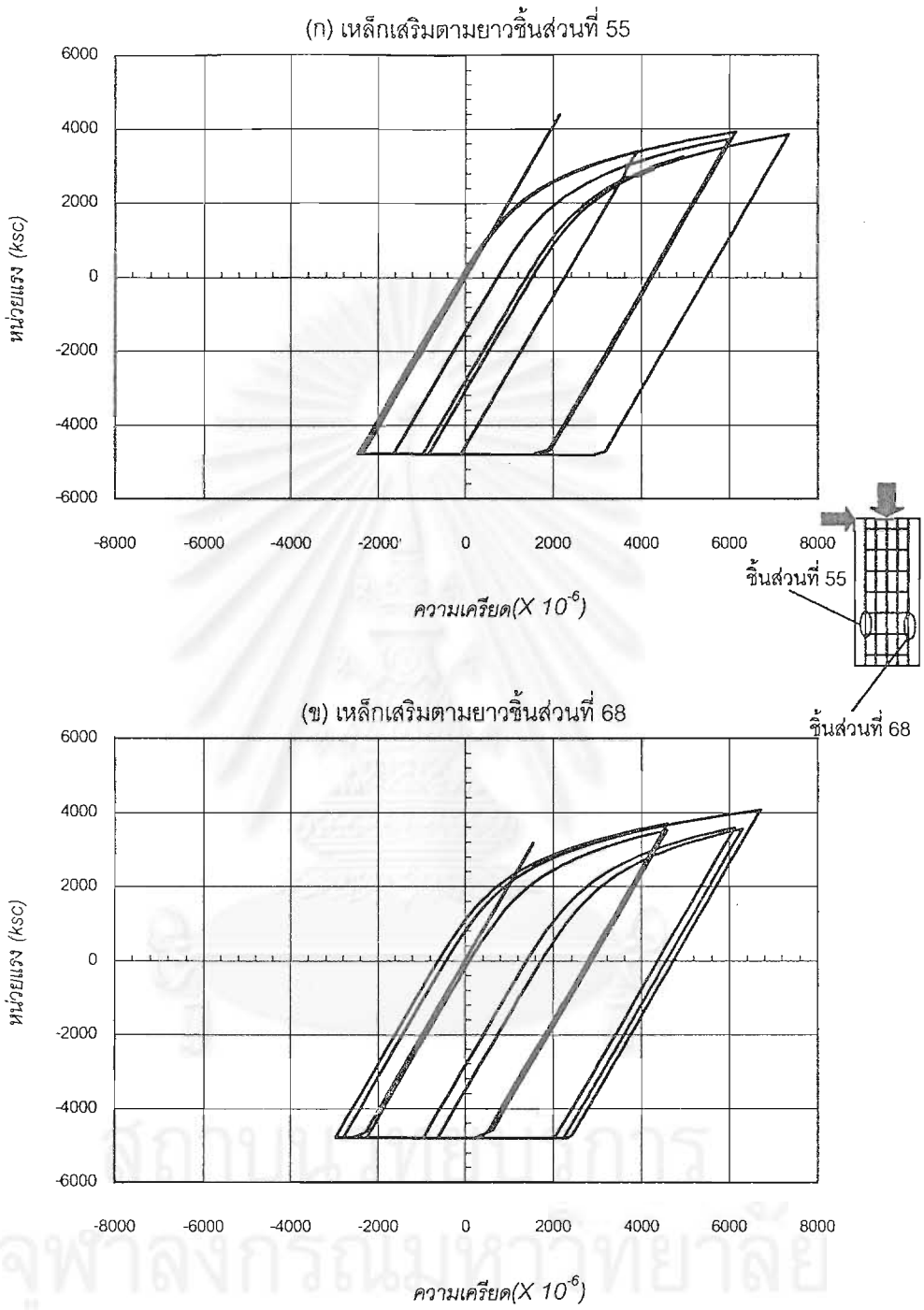
- รอบที่ 1 = $\pm 0.75H_u$
- รอบที่ 2 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 1
- รอบที่ 3 = $\pm 1\Delta$, รอบที่ 2
- รอบที่ 4 = $\pm 2\Delta$, รอบที่ 1
- รอบที่ 5 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 1
- รอบที่ 6 = $\pm 3\Delta$, รอบที่ 2
- รอบที่ 7 = $\pm 4\Delta$, รอบที่ 1
- รอบที่ 8 = $\pm 4\Delta$, รอบที่ 2

ยกเว้น รอบที่ 8 ของตัวอย่าง CFL90/120/0.37 ที่ตรงกับรอบทดสอบ $\pm 3.5\Delta$, รอบที่ 1

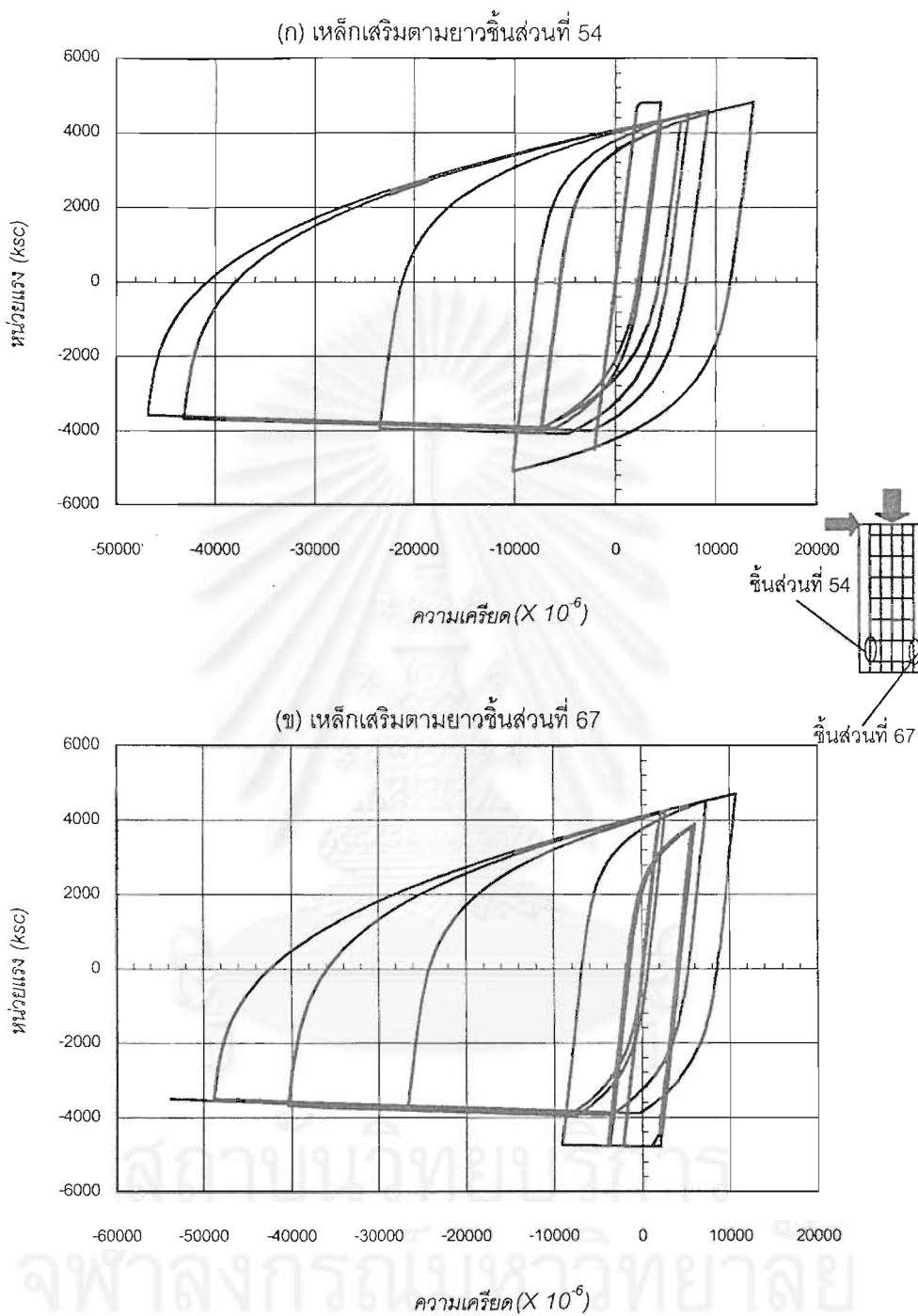
รูปที่ 4.43 แสดงความสามารถในการสลายพลังงานของทุกตัวอย่างเสาที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



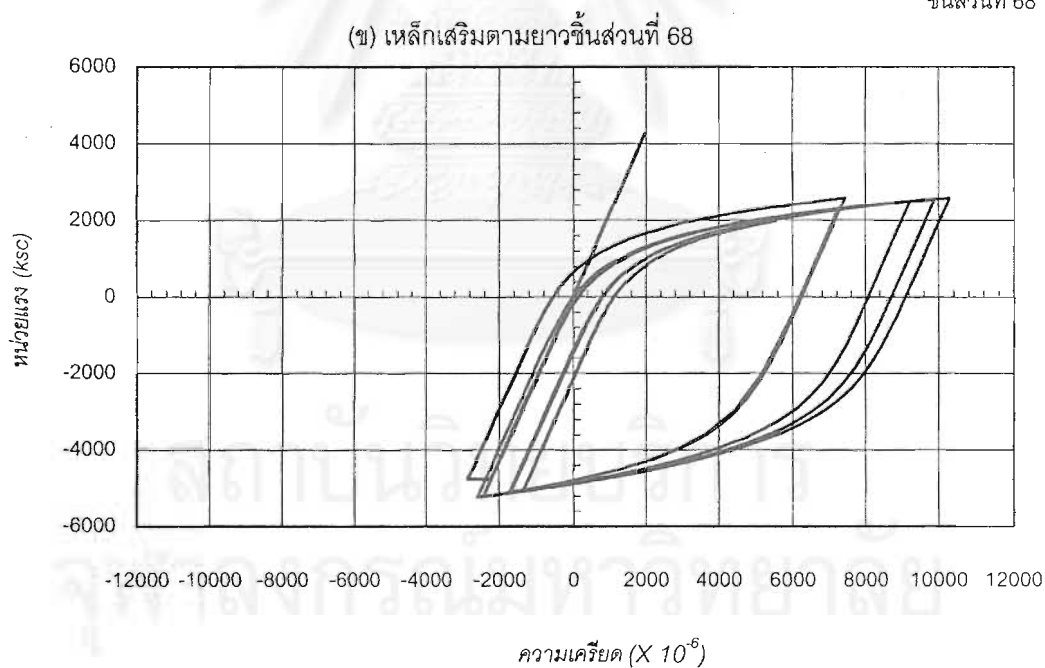
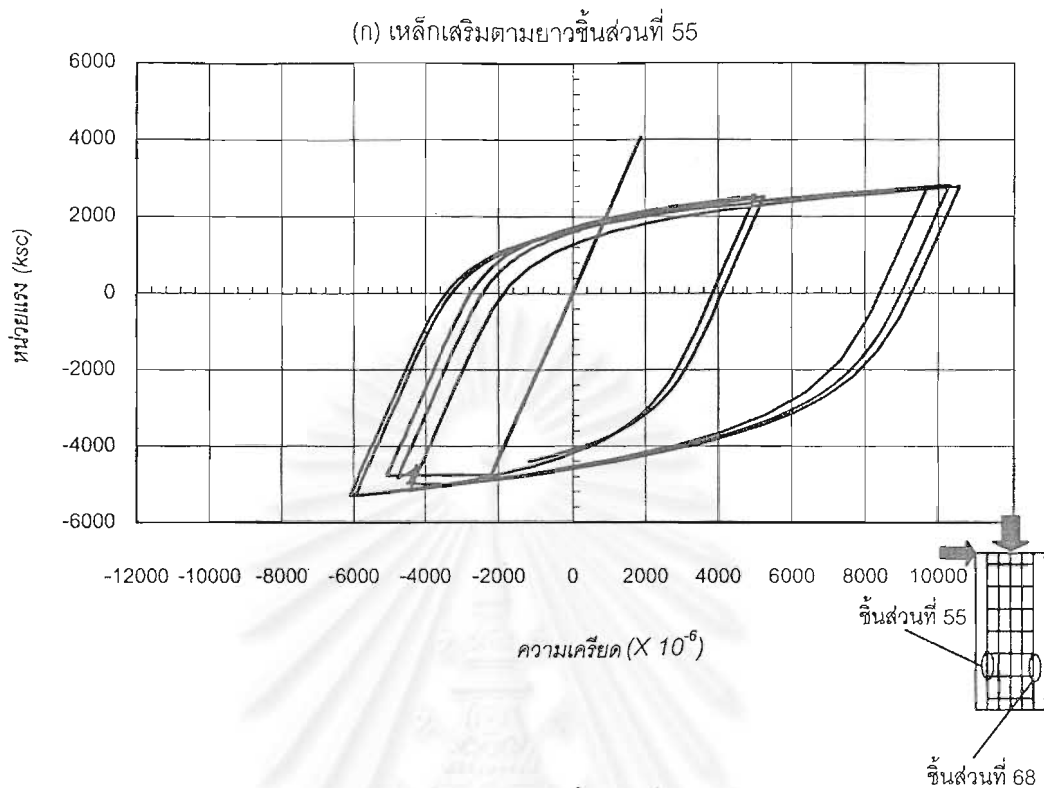
รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์หัตถ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



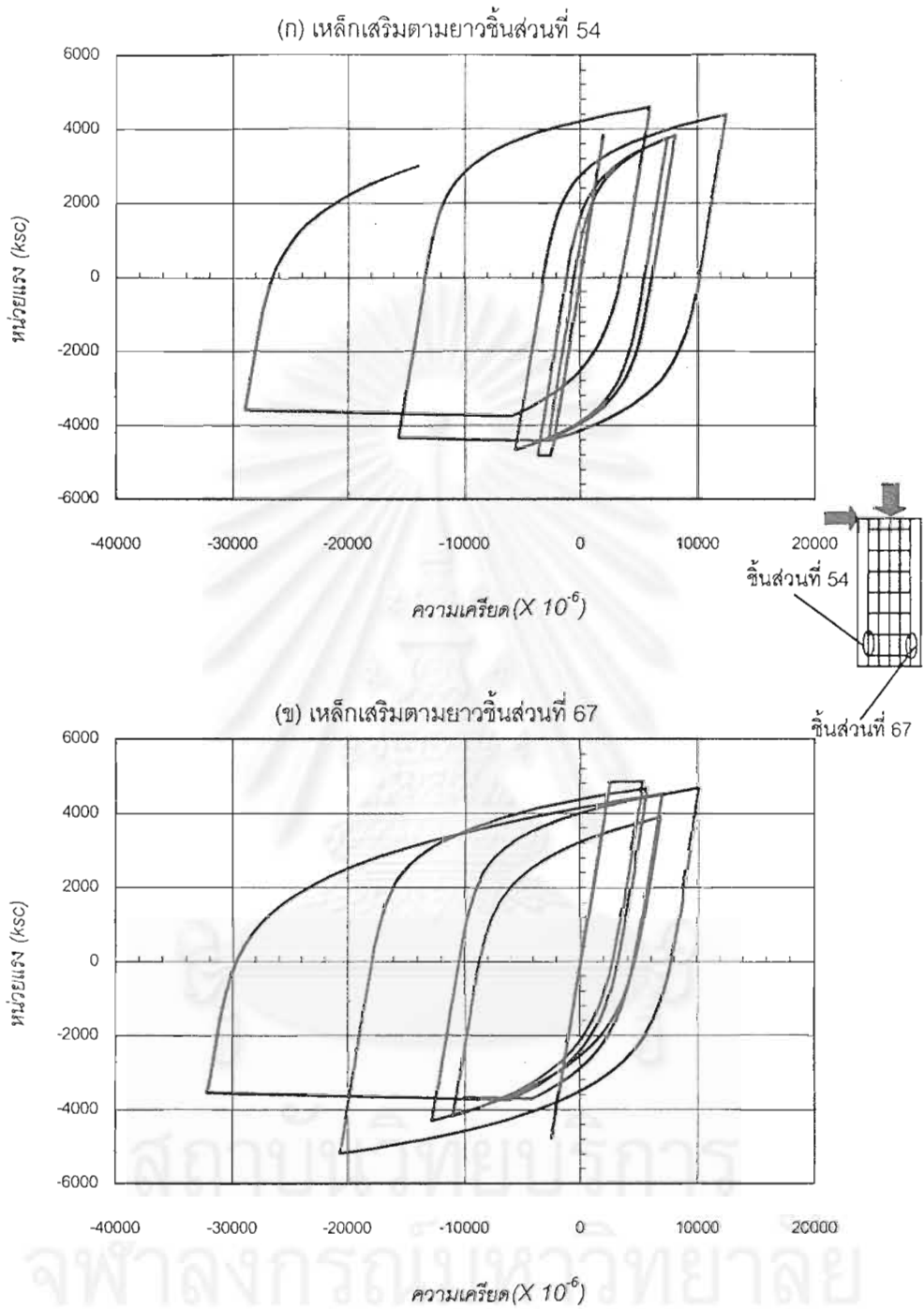
รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



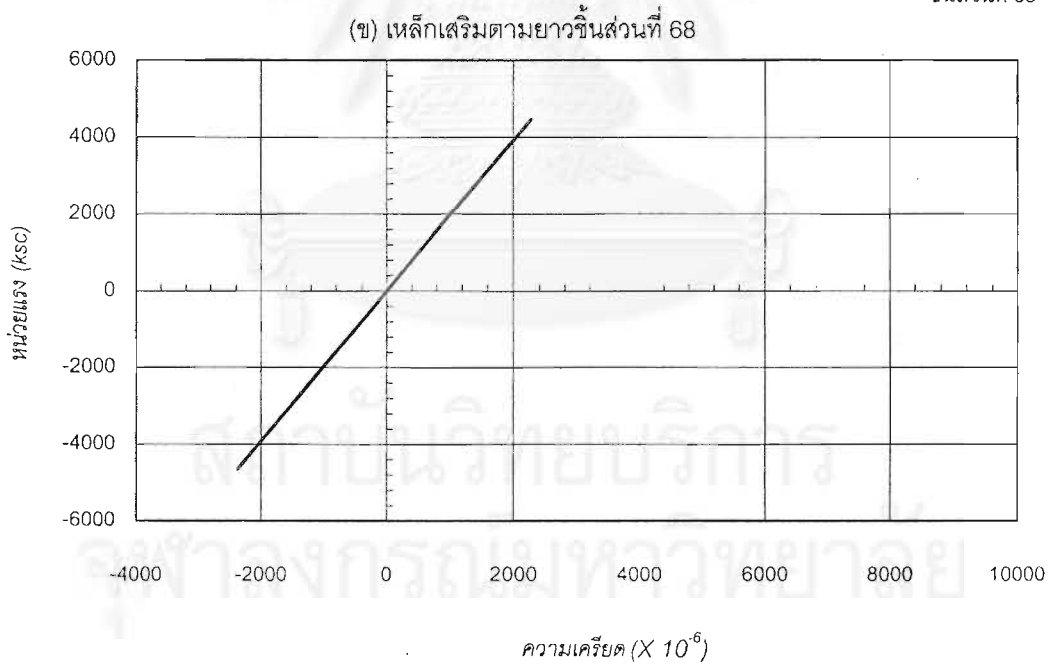
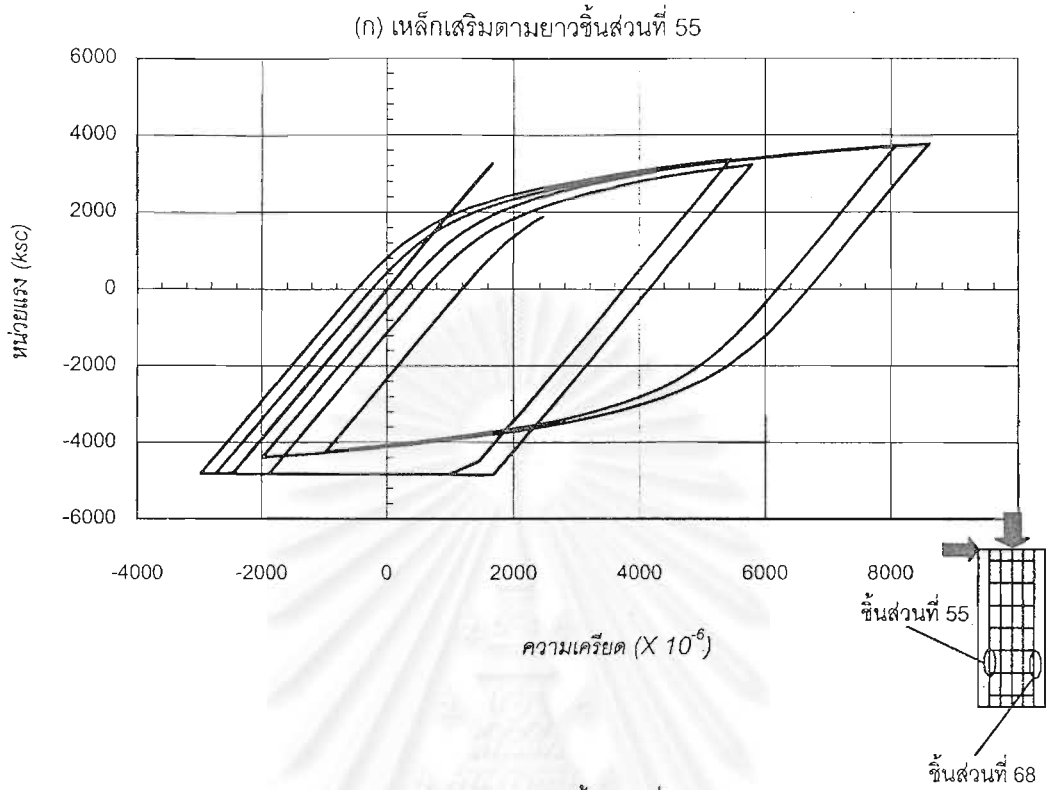
รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30



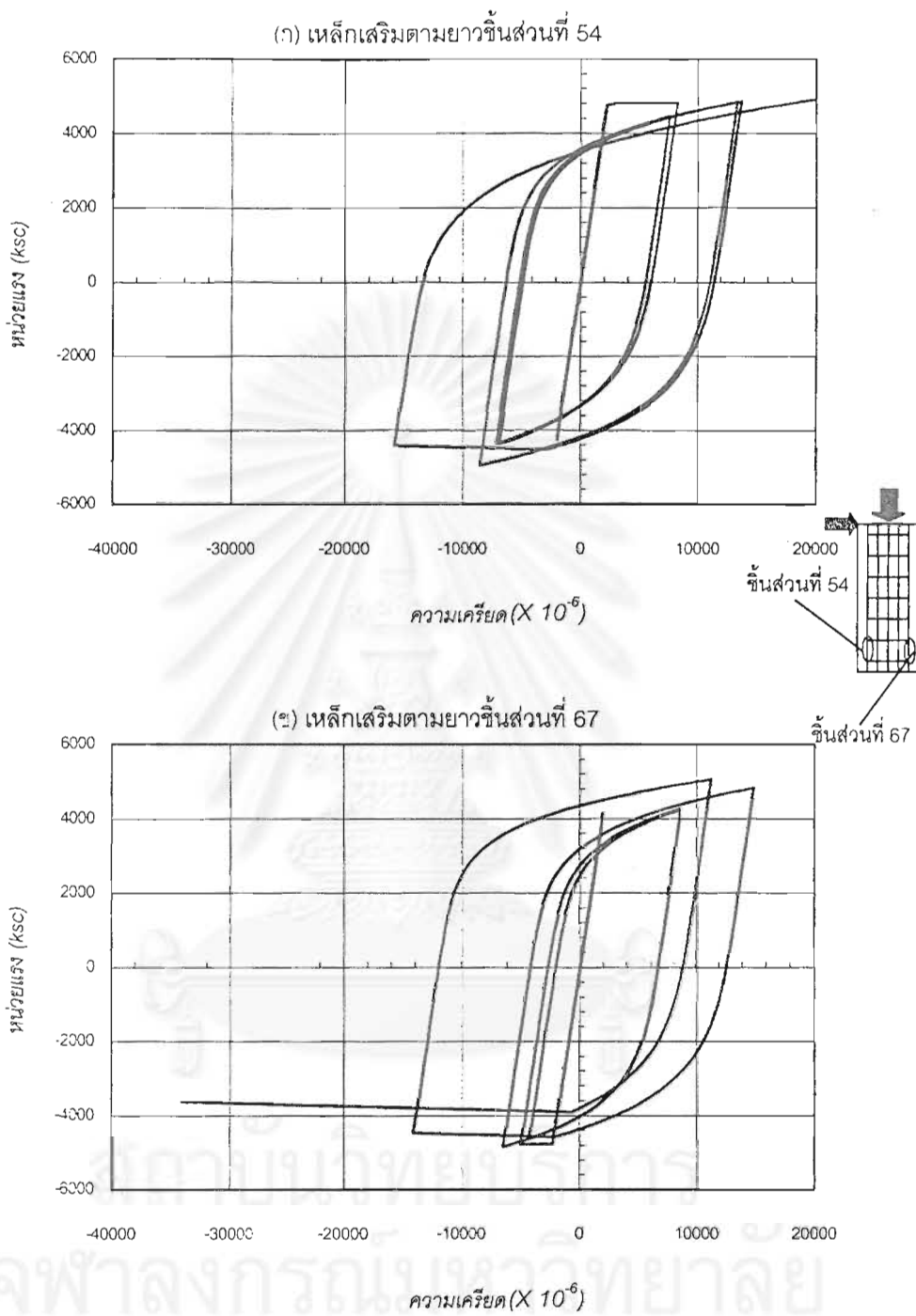
รูปที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30



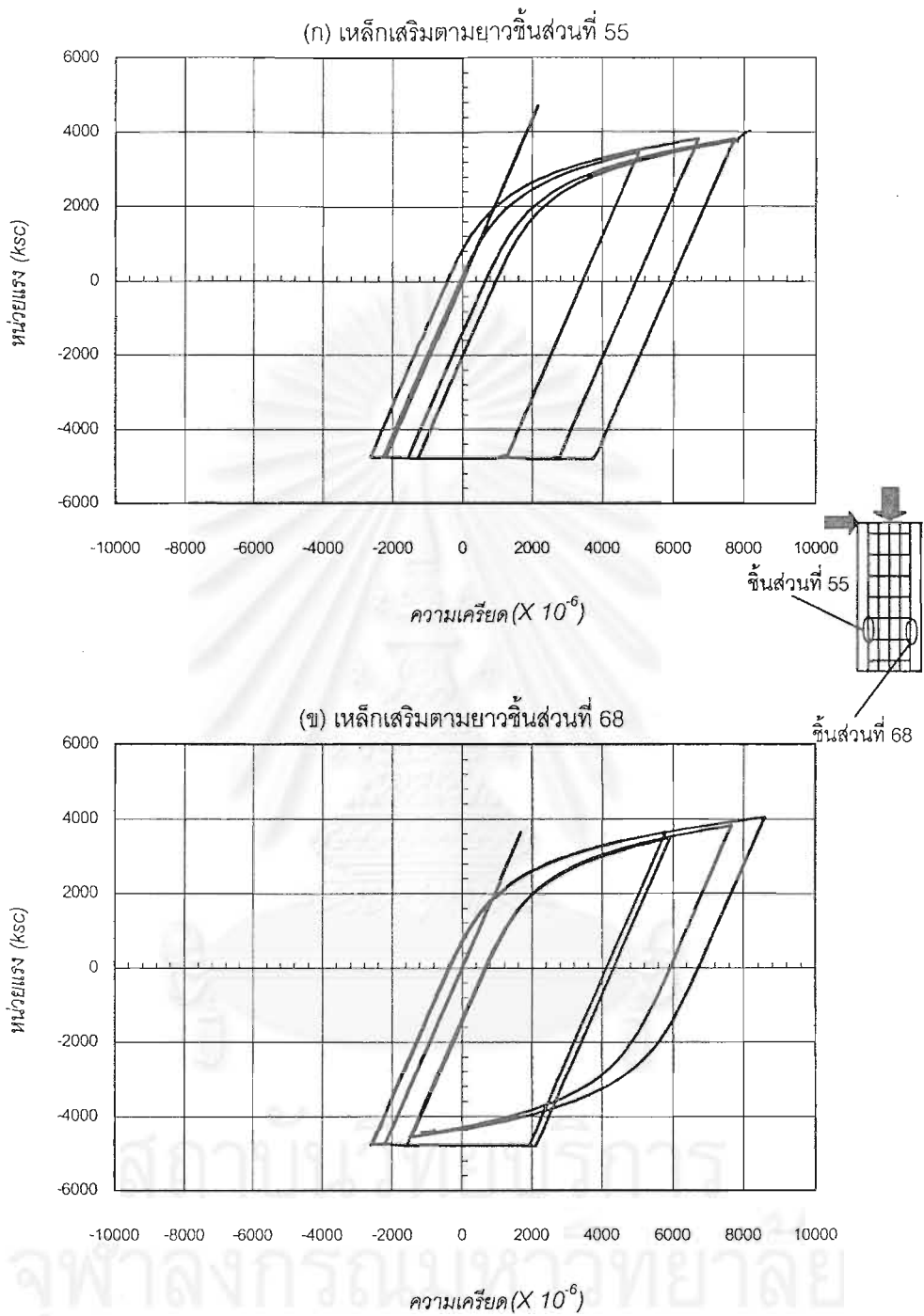
รูปที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



รูปที่ 4.49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37

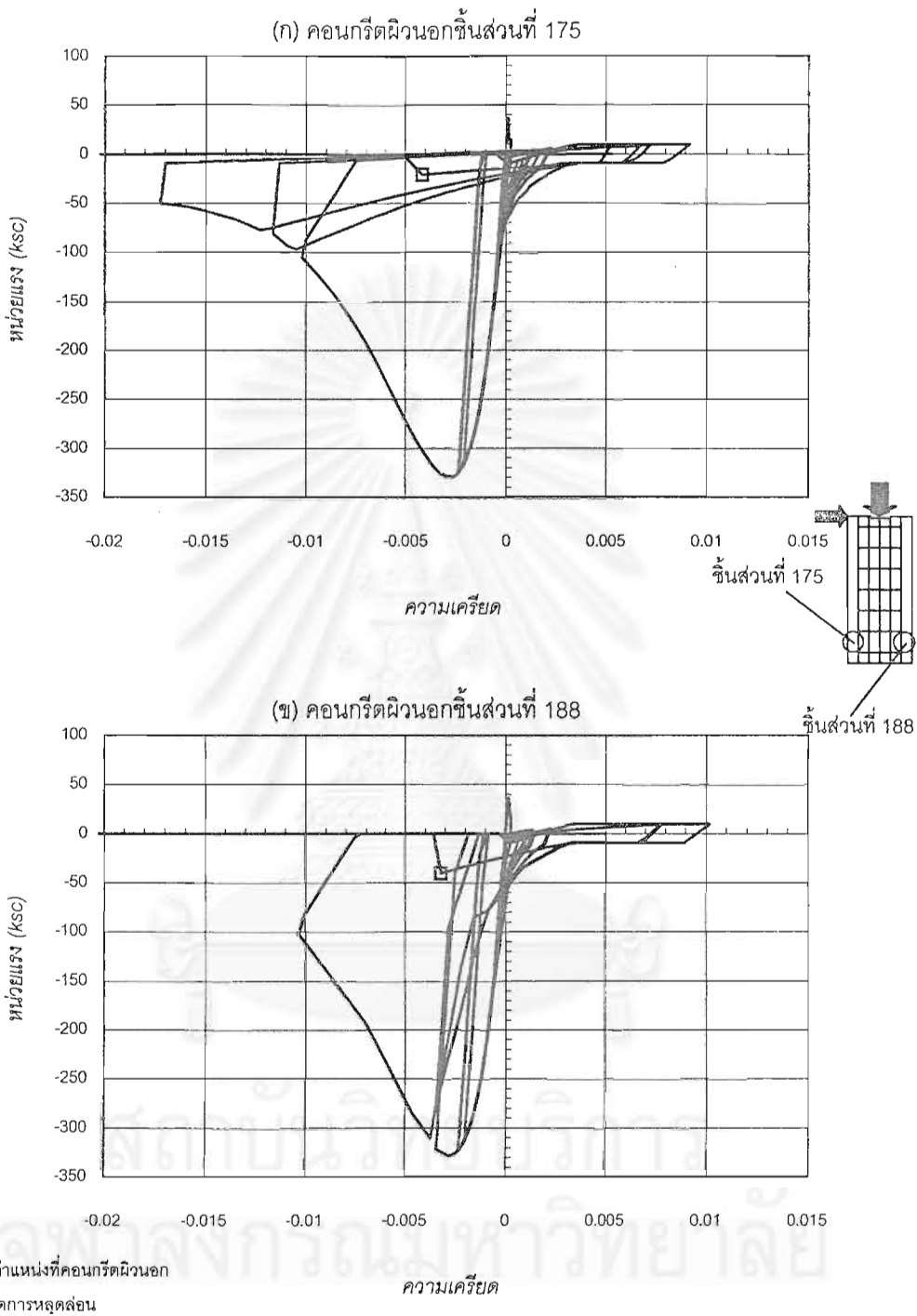


รูปที่ 4.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์หัตถ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30

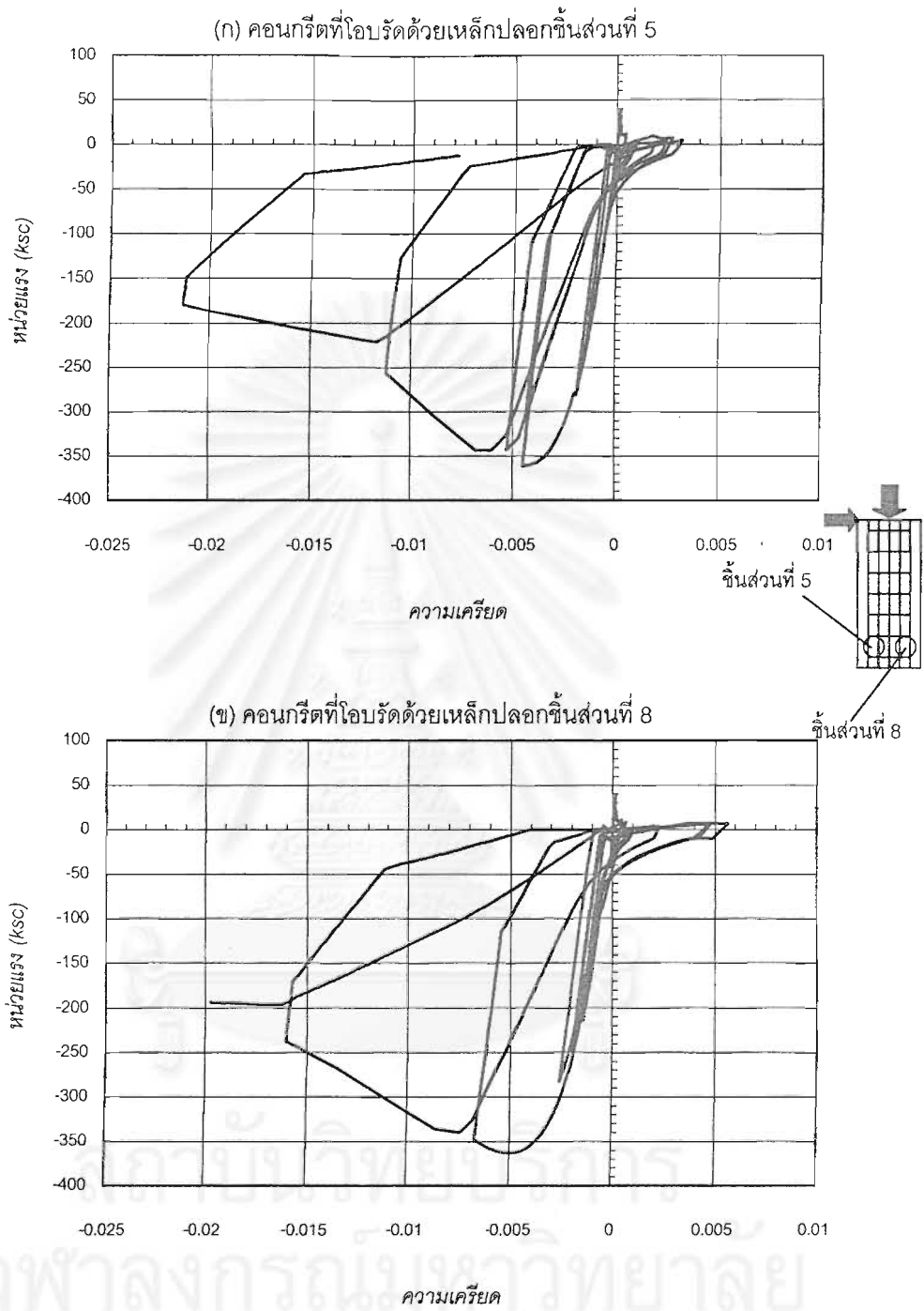


รูปที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30

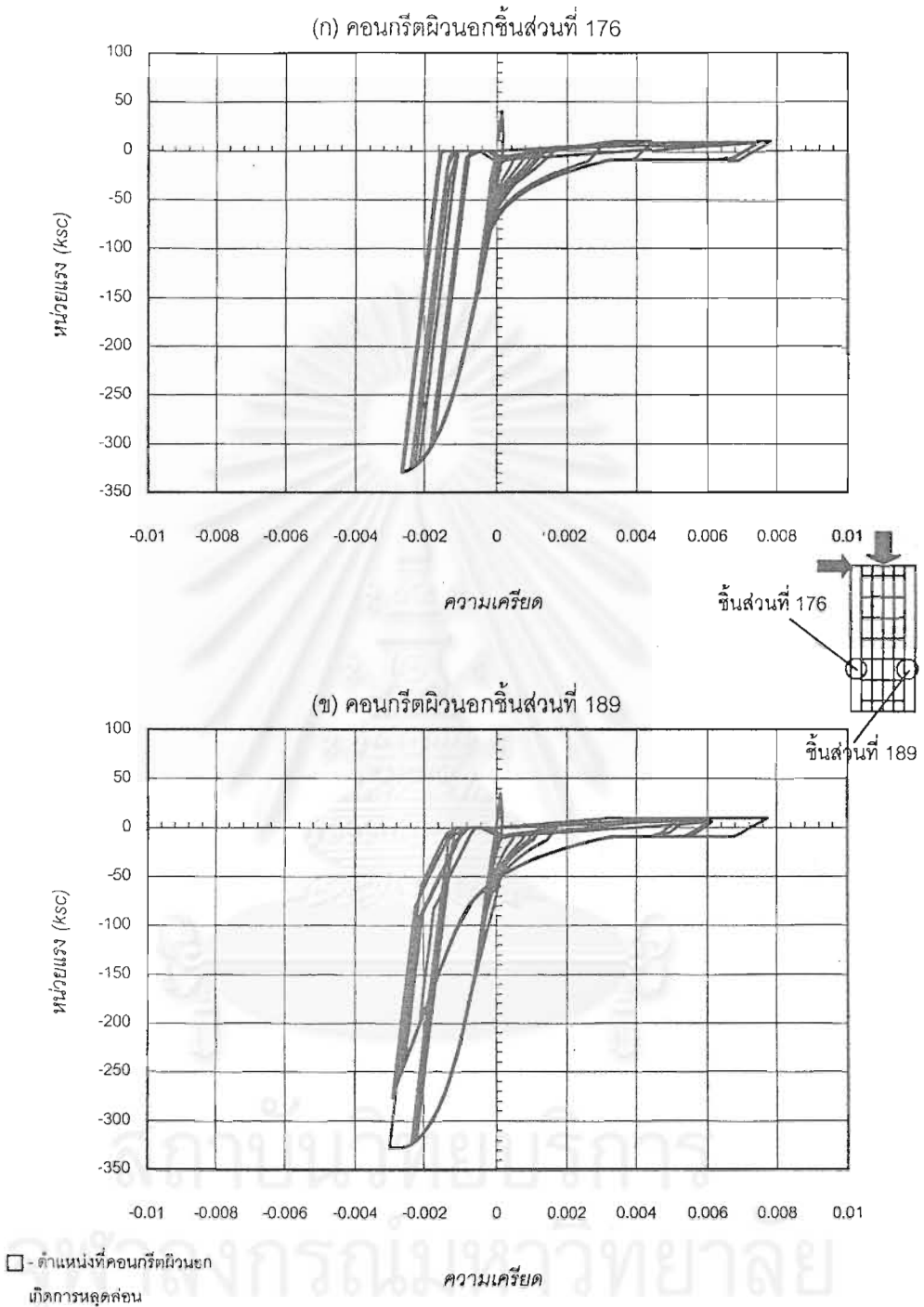
CFL90/120/0.37



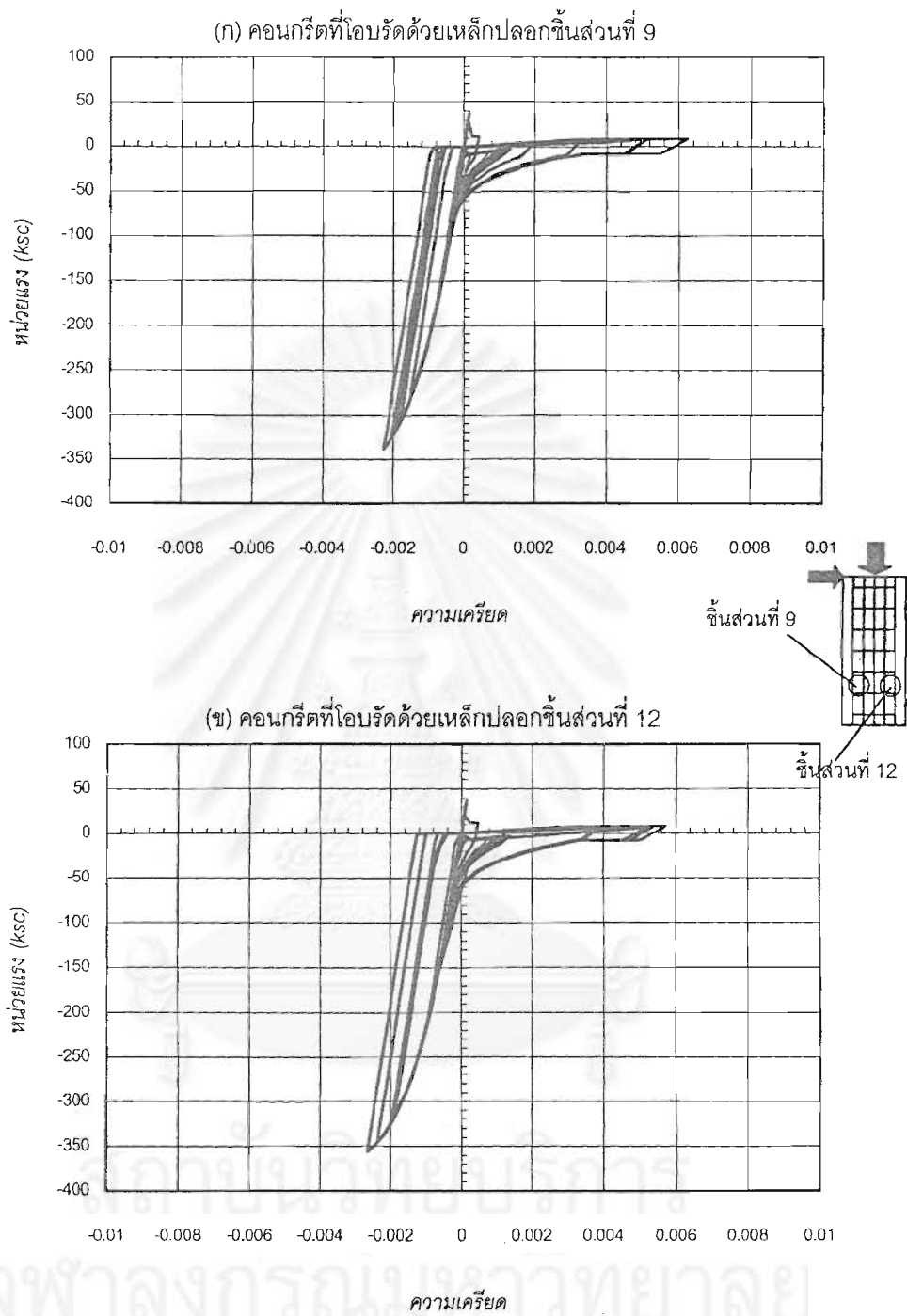
รูปที่ 4.52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิวบนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



รูปที่ 4.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเคียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา



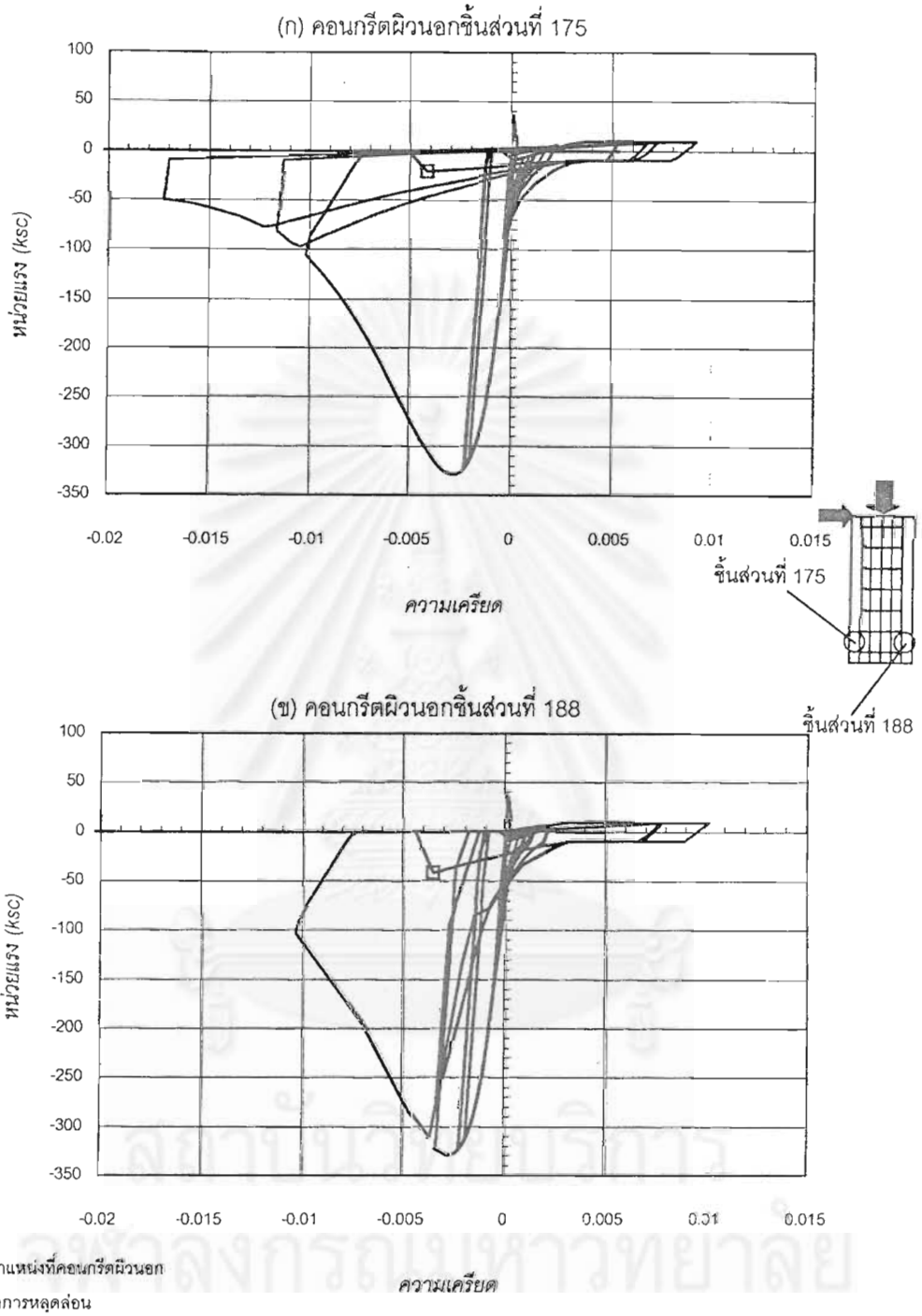
รูปที่ 4.54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.37



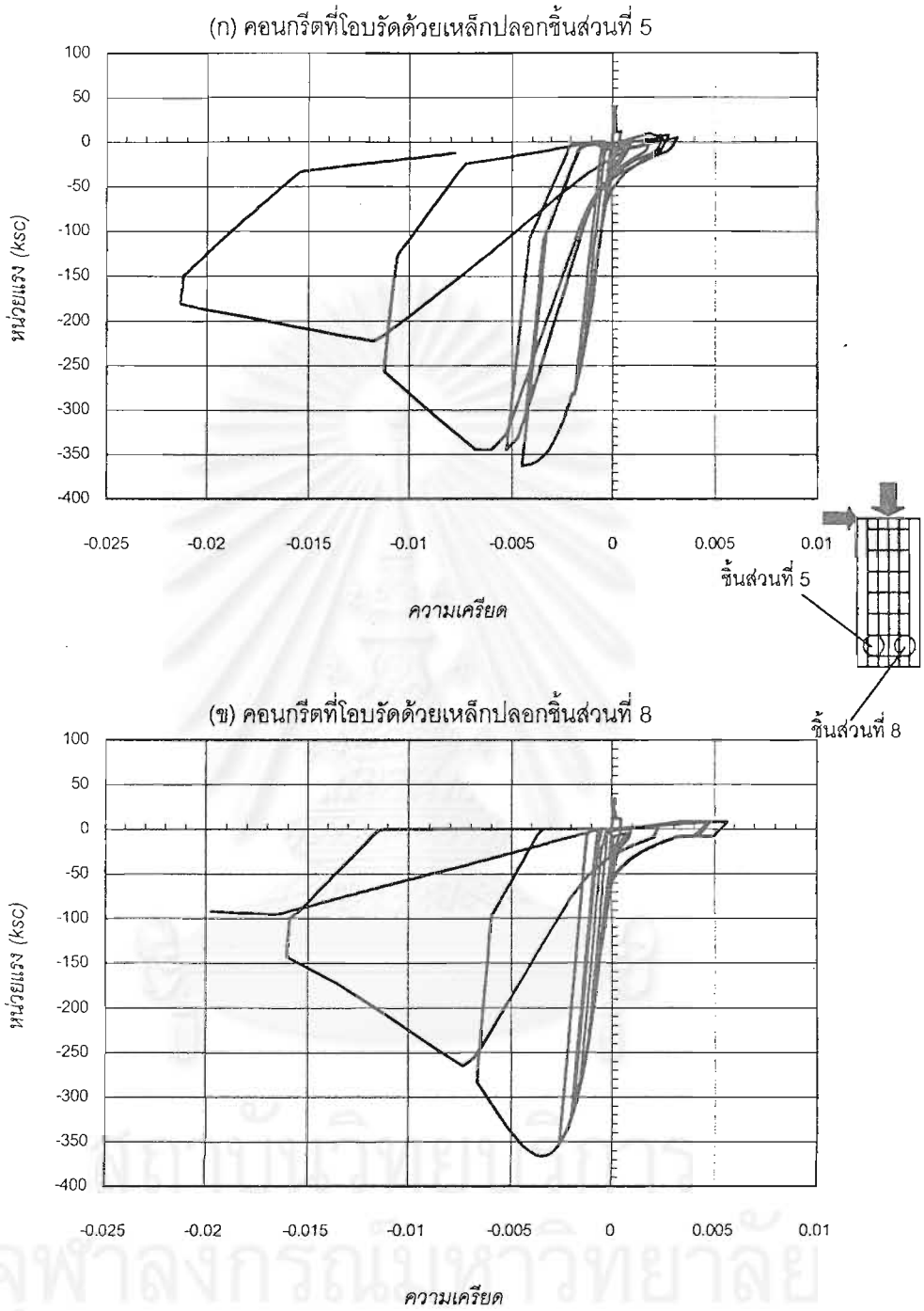
รูปที่ 4.55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเคียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา

CFL90/120/0.37

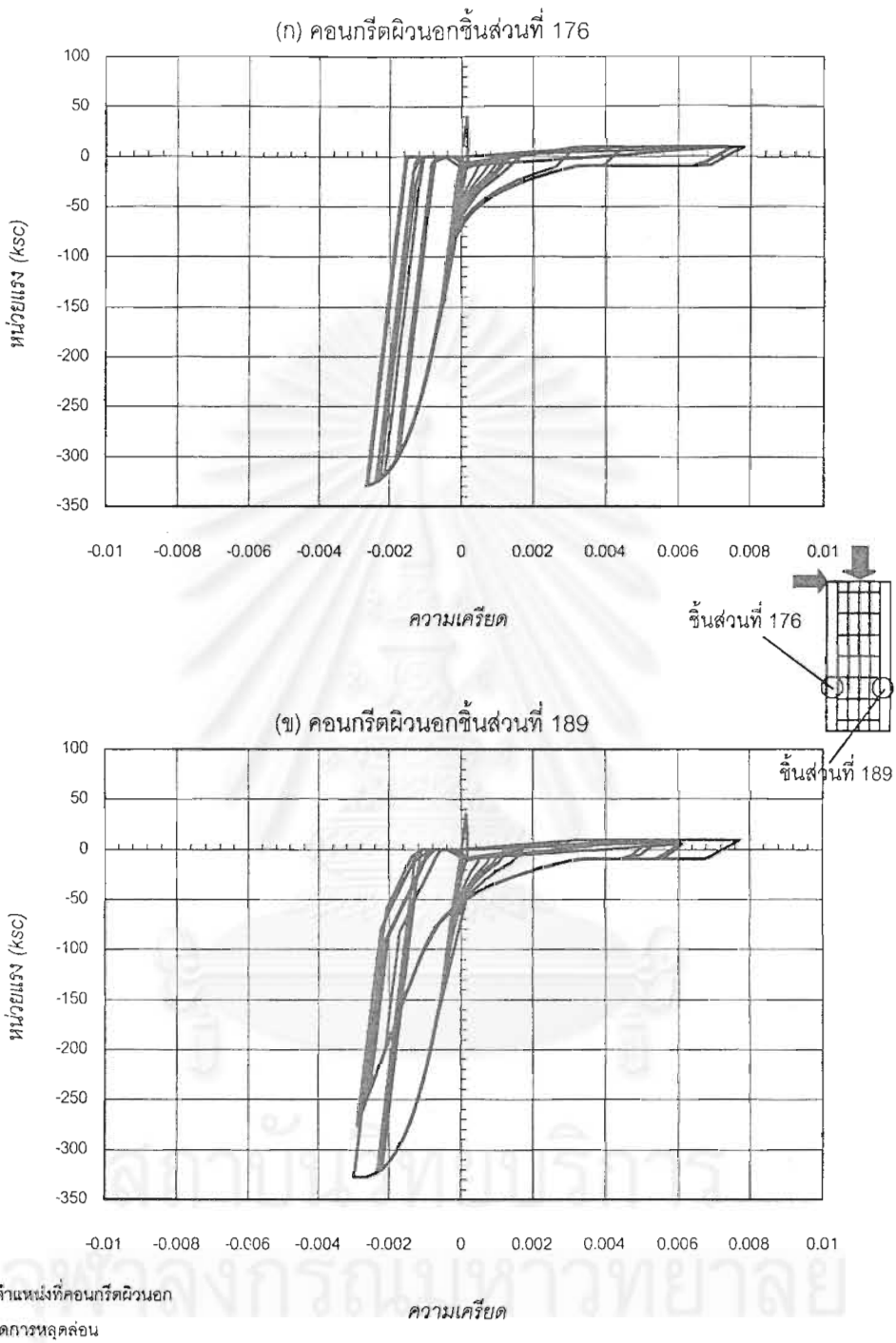
CFL90/120/0.30



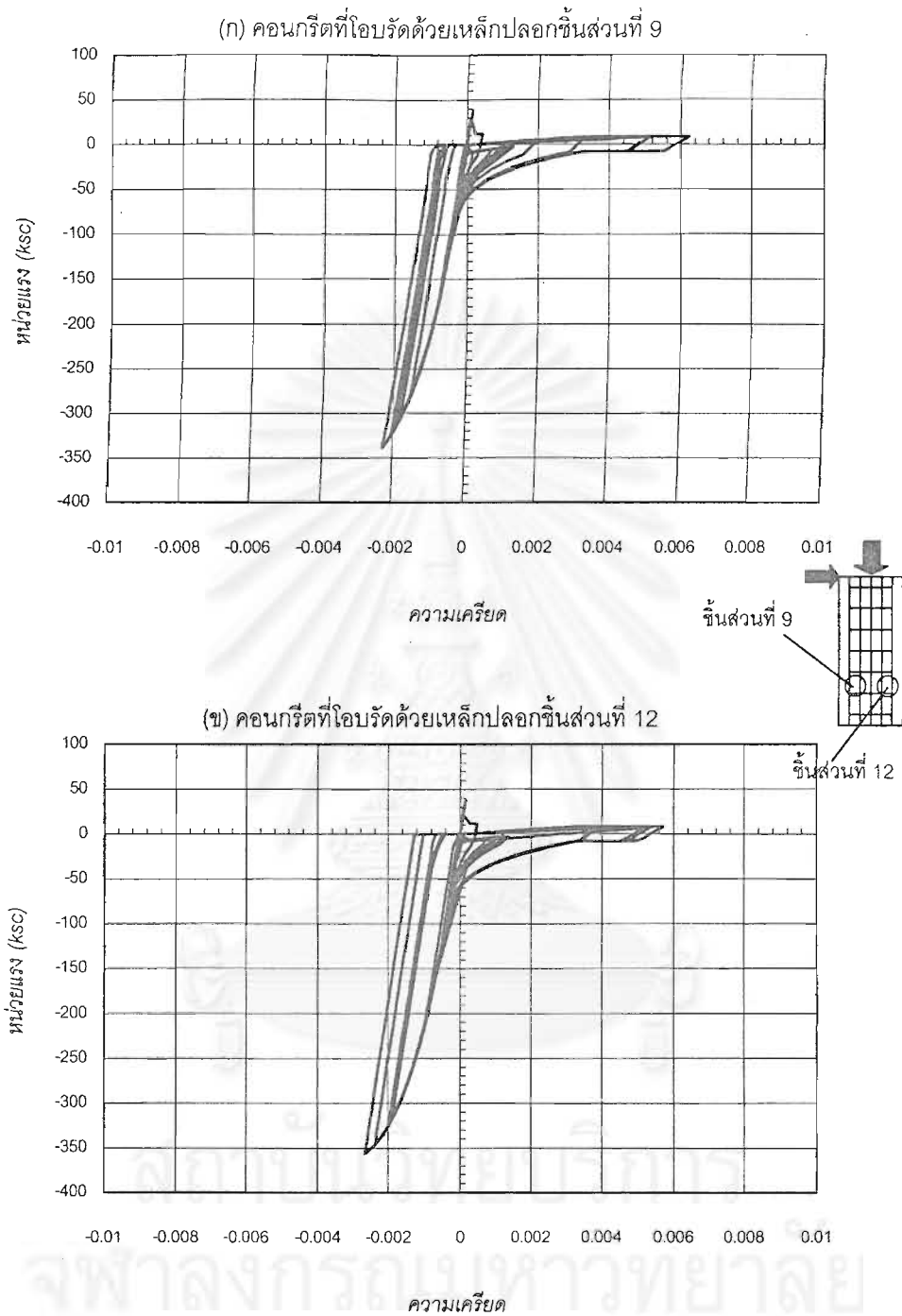
รูปที่ 4.56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30



รูปที่ 4.57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา

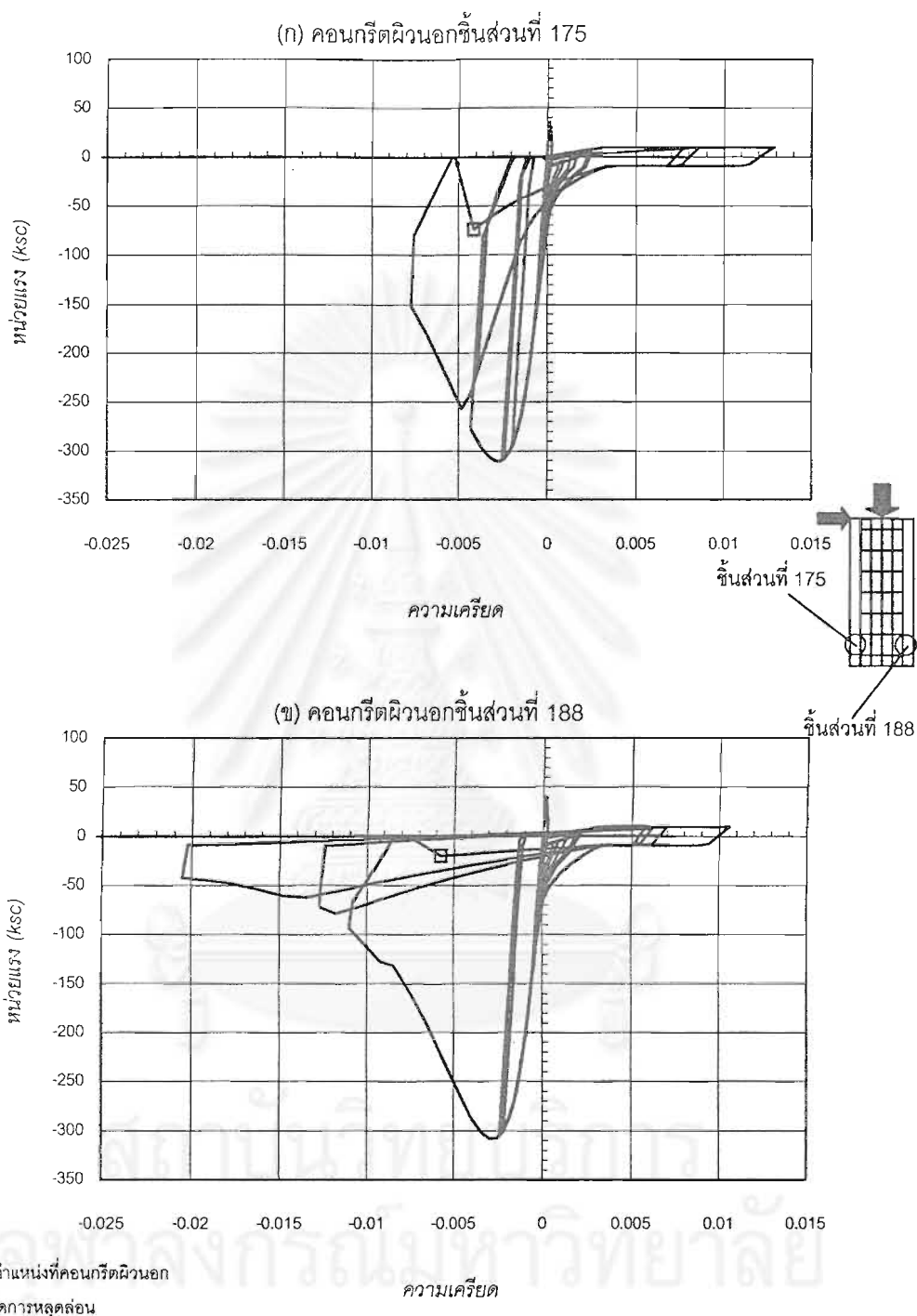


รูปที่ 4.58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิววนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CFL90/120/0.30

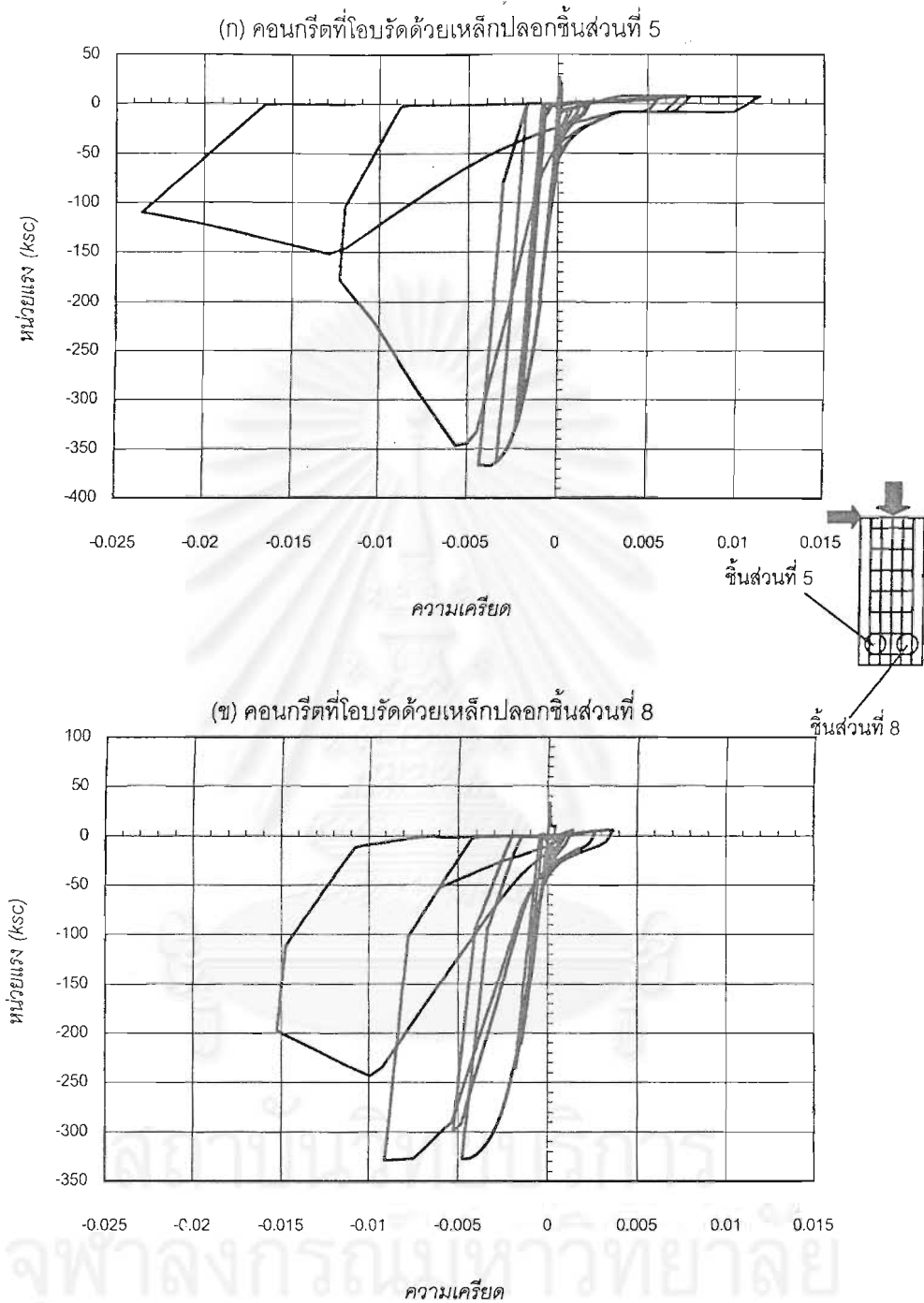


รูปที่ 4.59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา

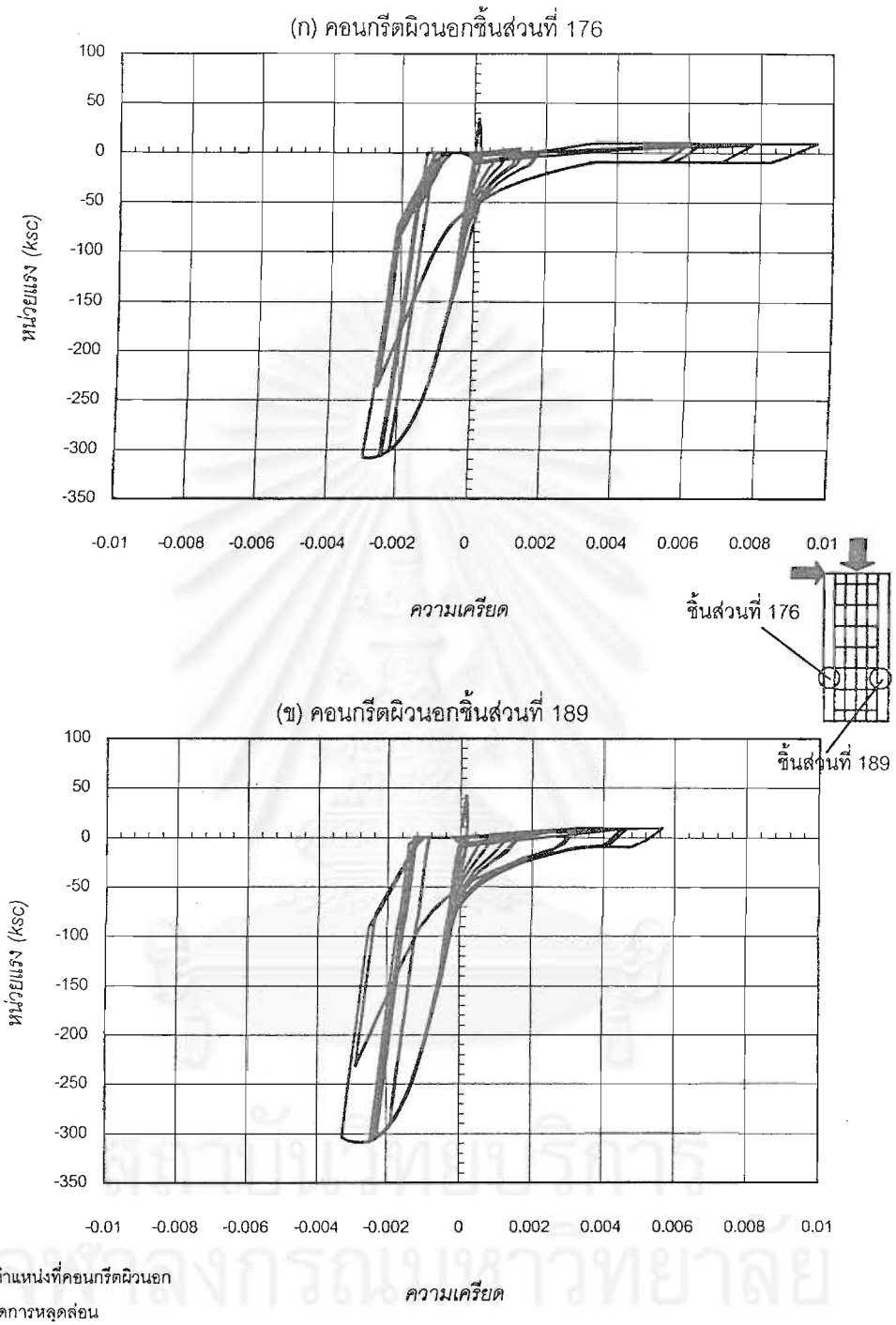
CF135/120/0.37



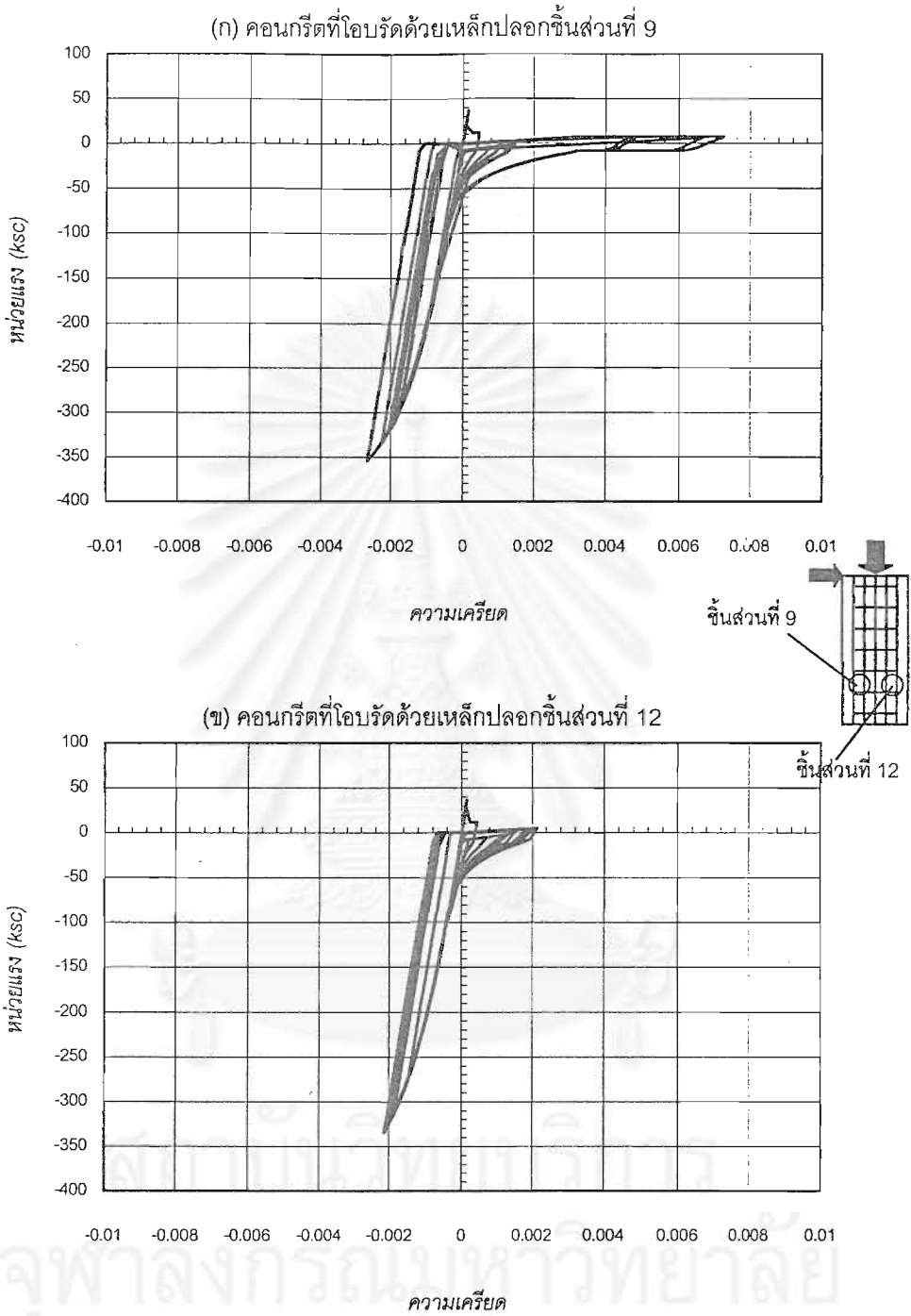
รูปที่ 4.60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเคียดในคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37



รูปที่ 4.61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา

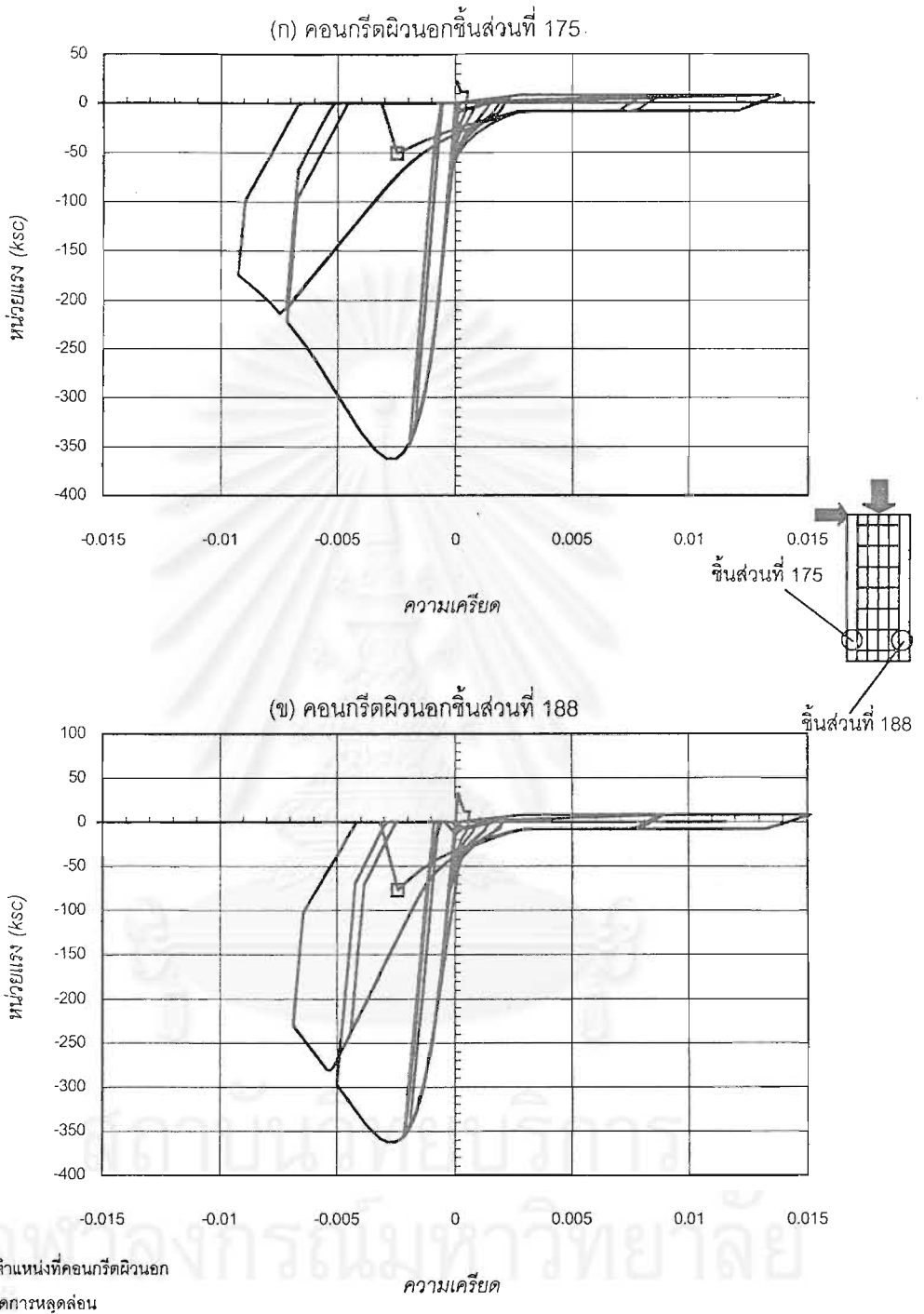


รูปที่ 4.62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.37

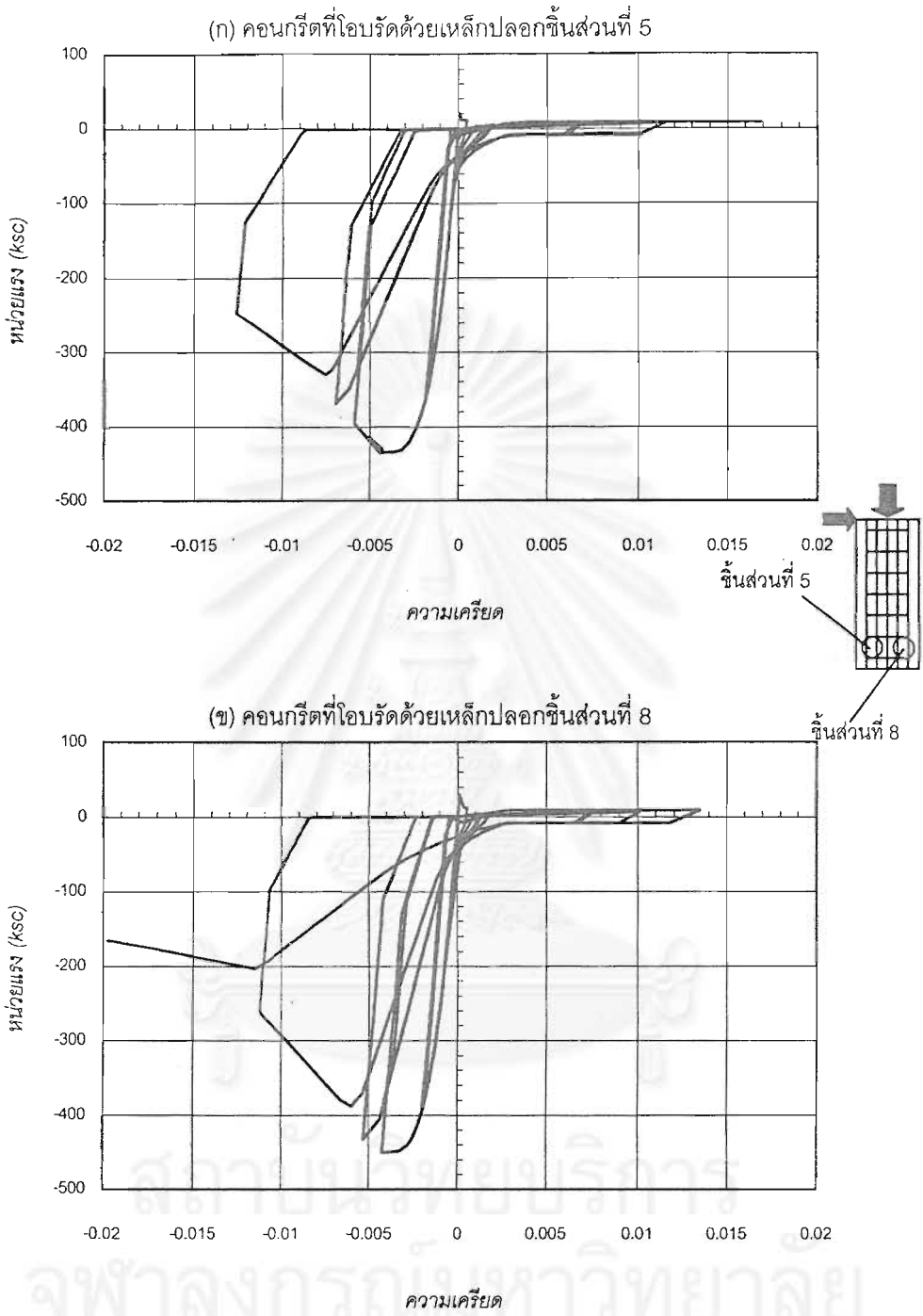


รูปที่ 4.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา

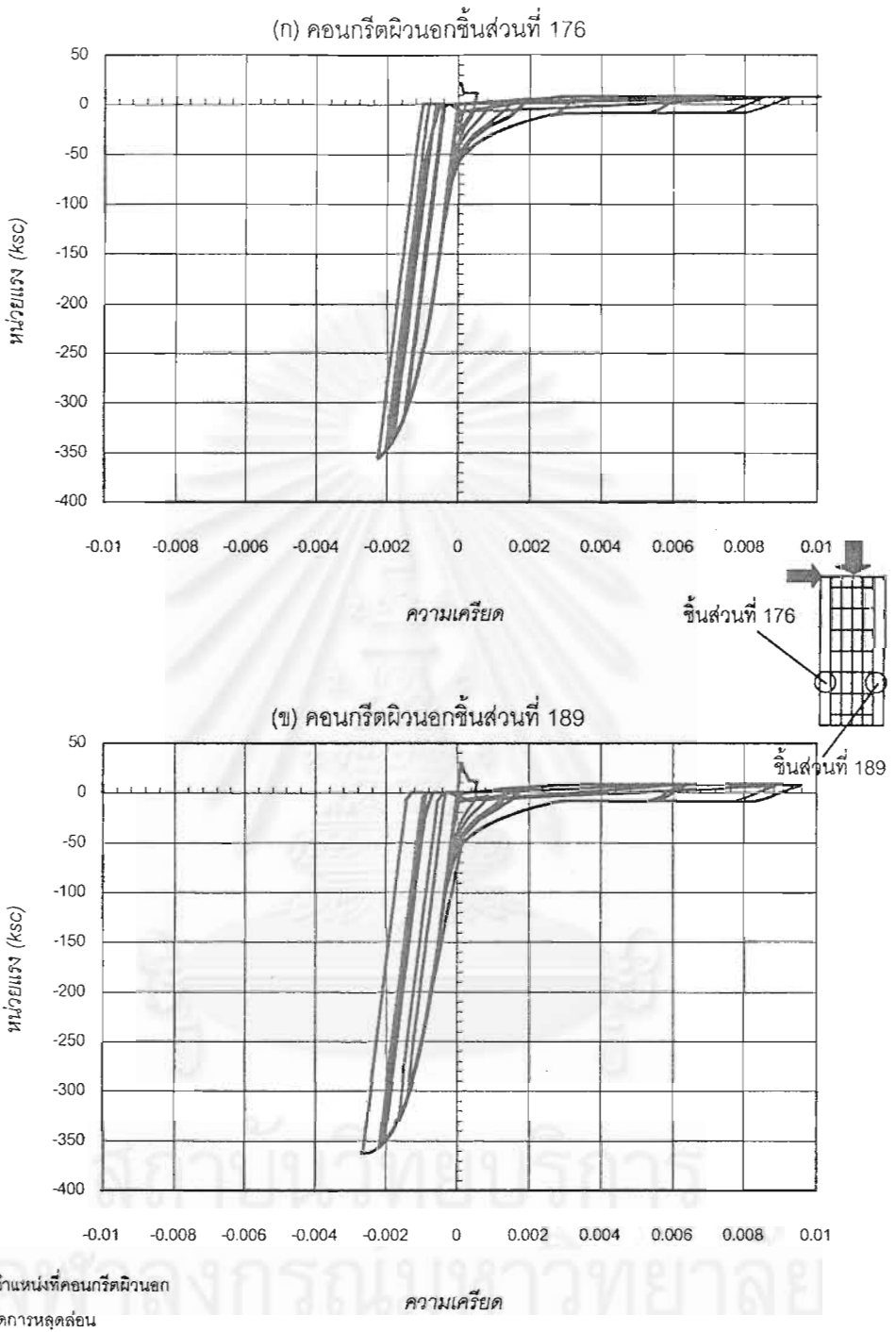
CF135/120/0.30



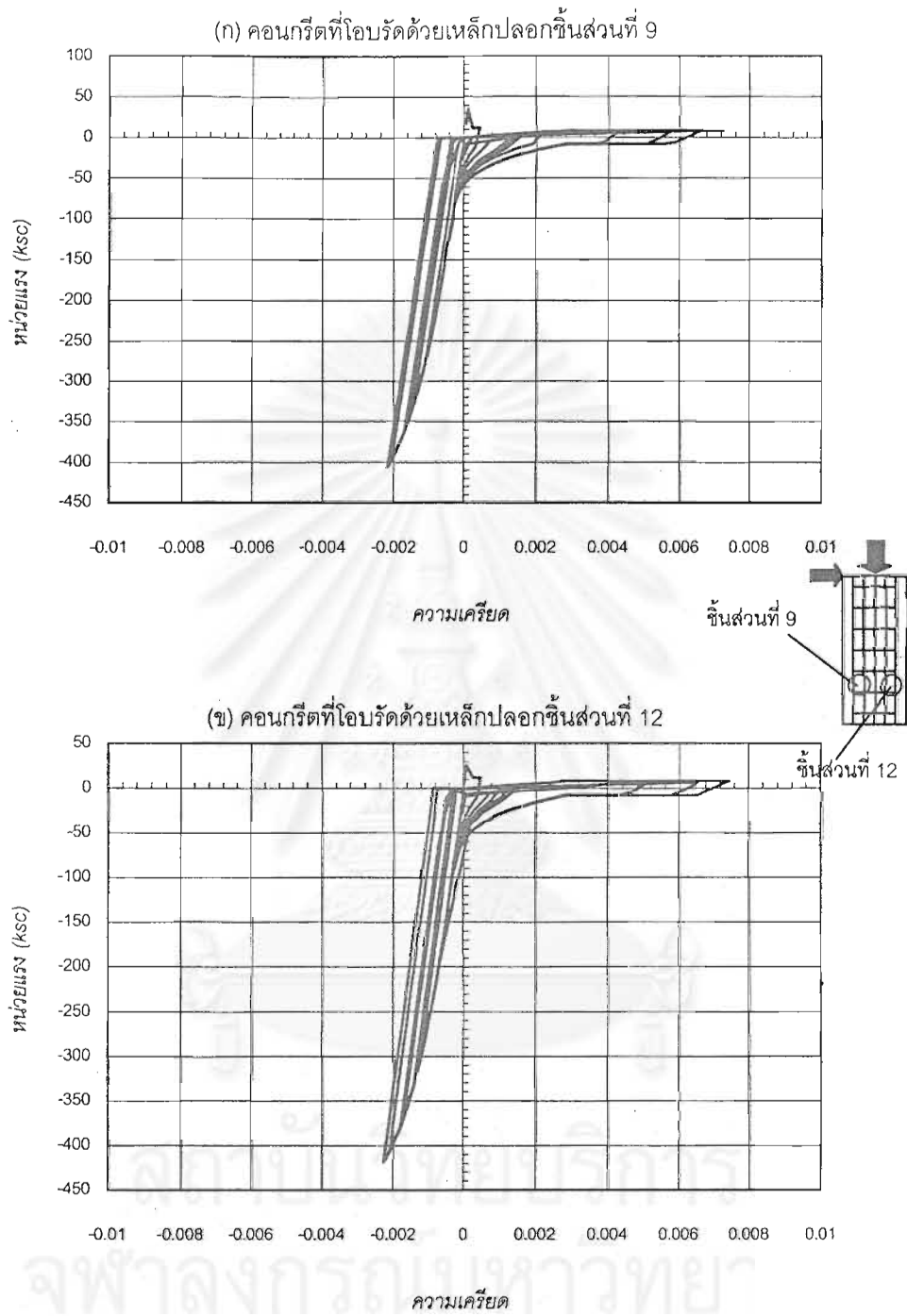
รูปที่ 4.64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30



รูปที่ 4.65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา



รูปที่ 4.66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตผิวนอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา CF135/120/0.30

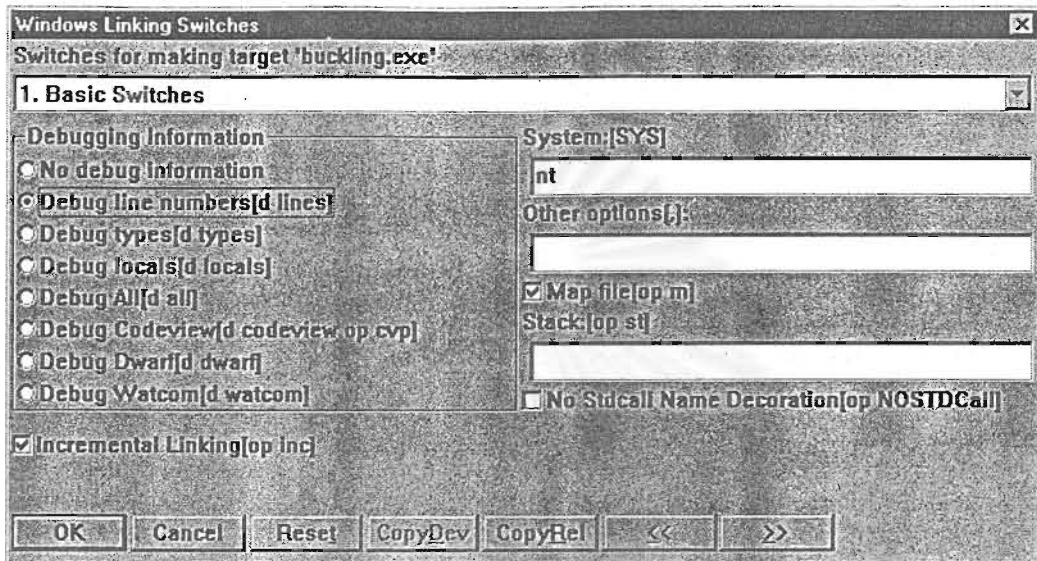


รูปที่ 4.67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับตัวอย่างเสา

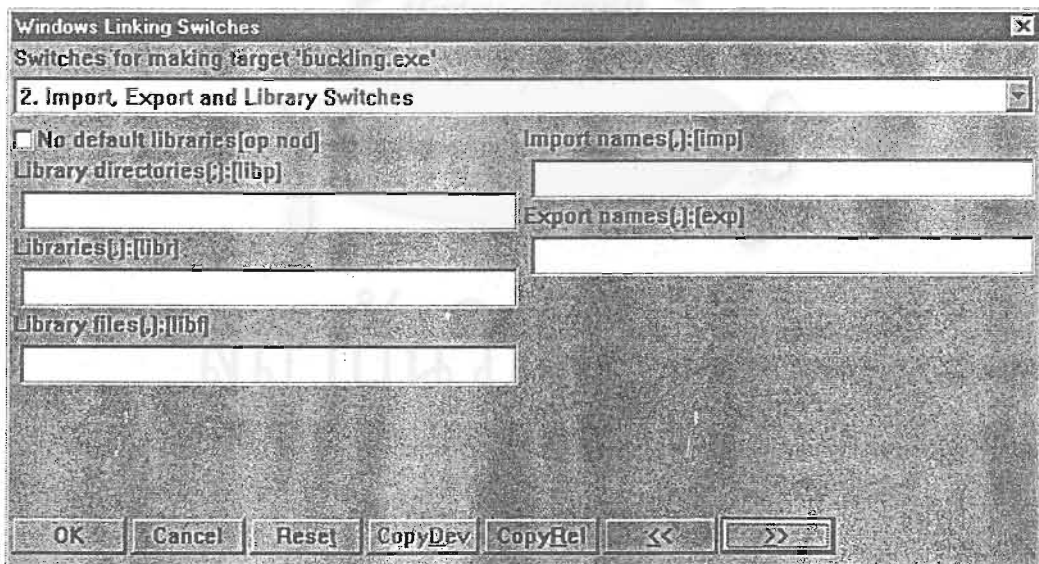
ภาคผนวก ก แสดงการตั้งค่าต่างๆใน Window Linking Switches และ Fortran Compiler Switches

1. Window Linking Switches

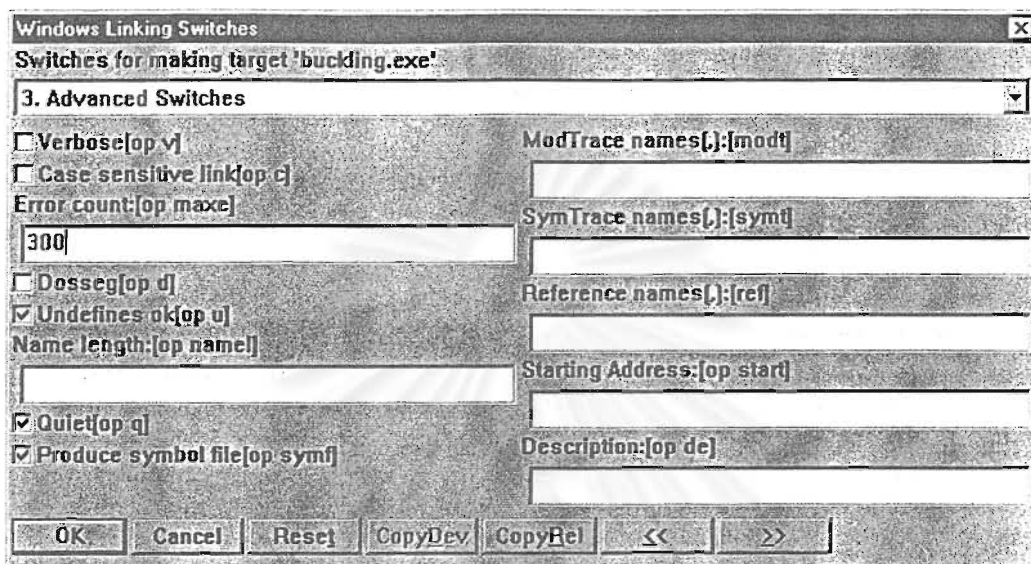
การตั้งค่าต่างๆใน Window Linking Switches จะสามารถตั้งค่าเป็นลำดับต่อเนื่องดังแสดงต่อไปนี้



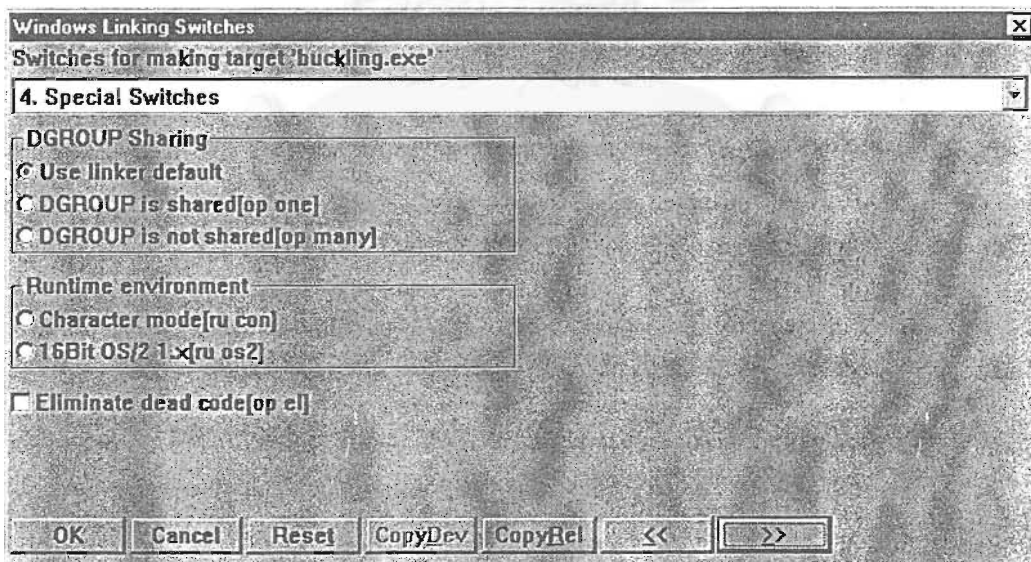
ขั้นตอนที่ 1



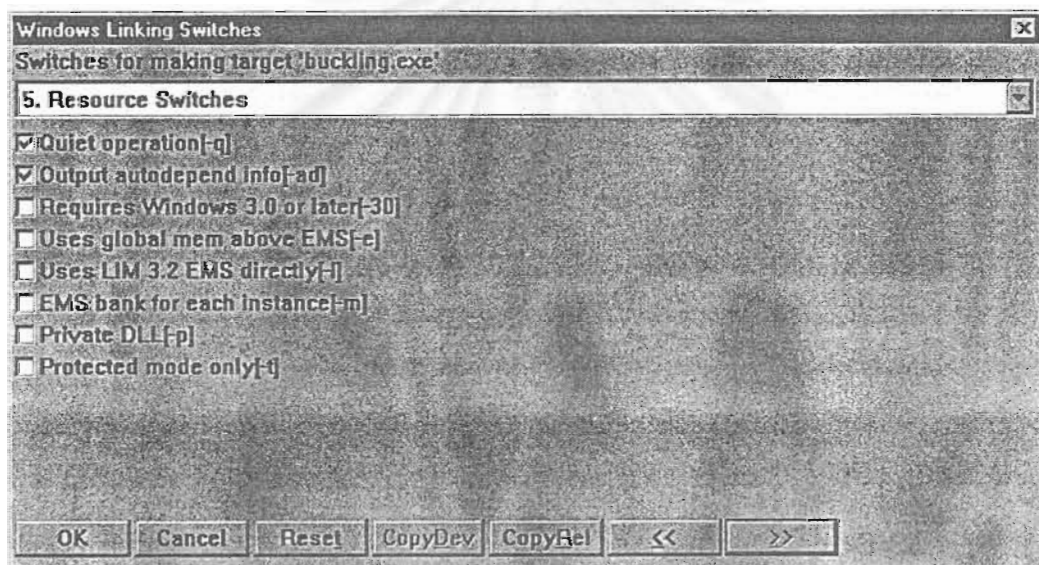
ขั้นตอนที่ 2



ขั้นตอนที่ 3



ขั้นตอนที่ 4

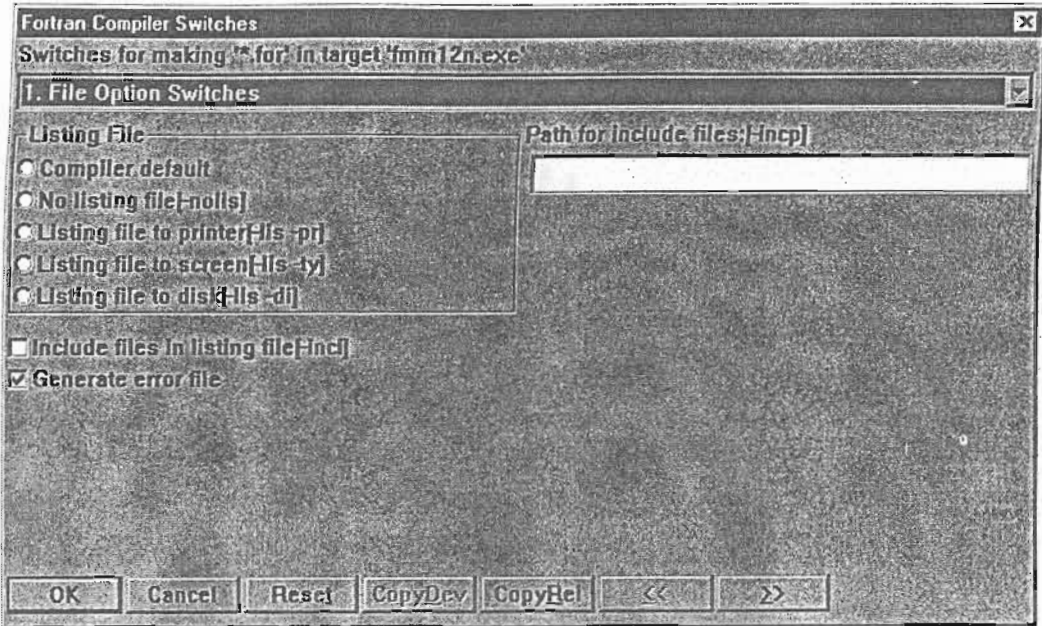


ขั้นตอนที่ 5

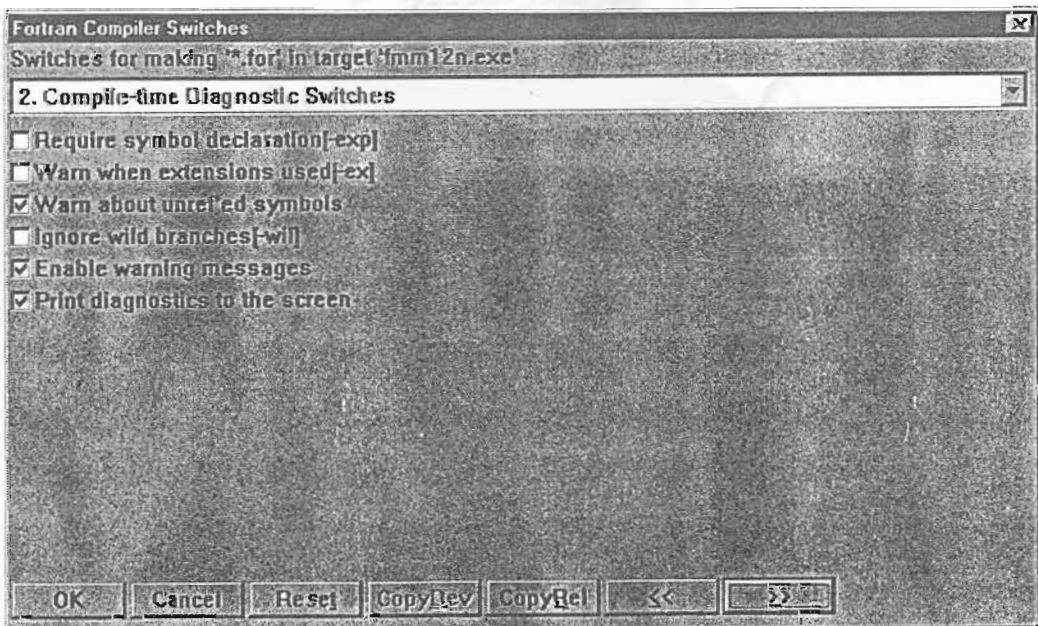
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. Fortran Compiler Switches

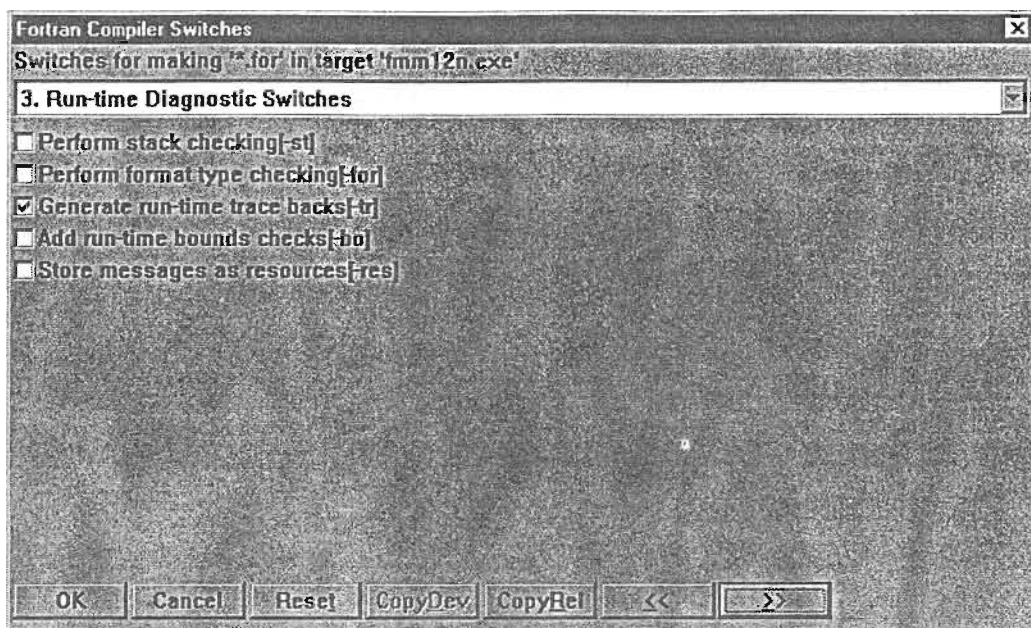
การตั้งค่าต่างๆใน Fortran Compiler Switches จะสามารถตั้งค่าเป็นลำดับต่อเนื่องดังแสดงต่อไปนี้



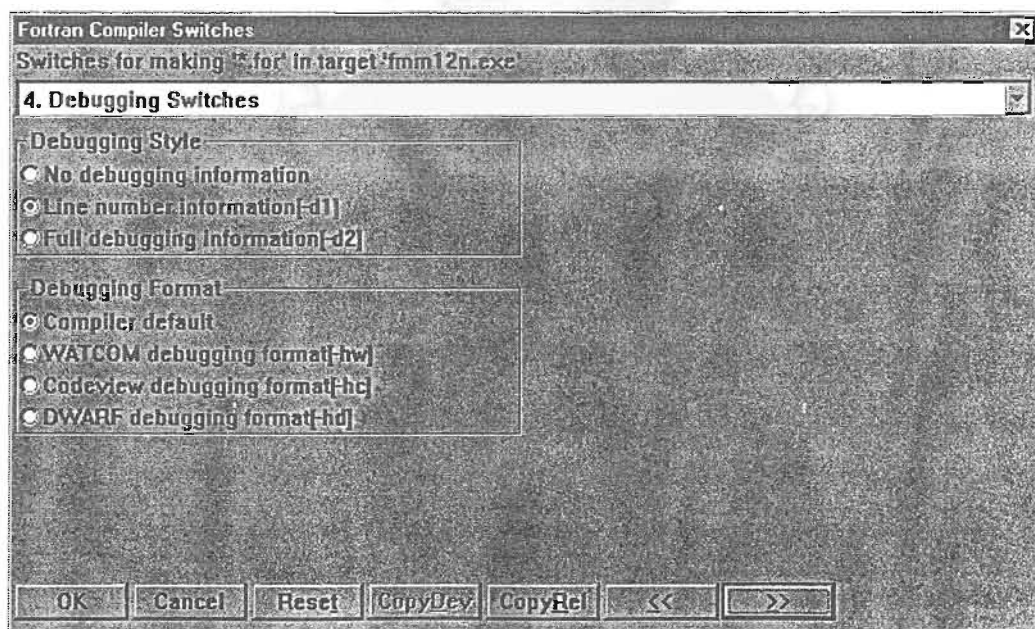
ขั้นตอนที่ 1



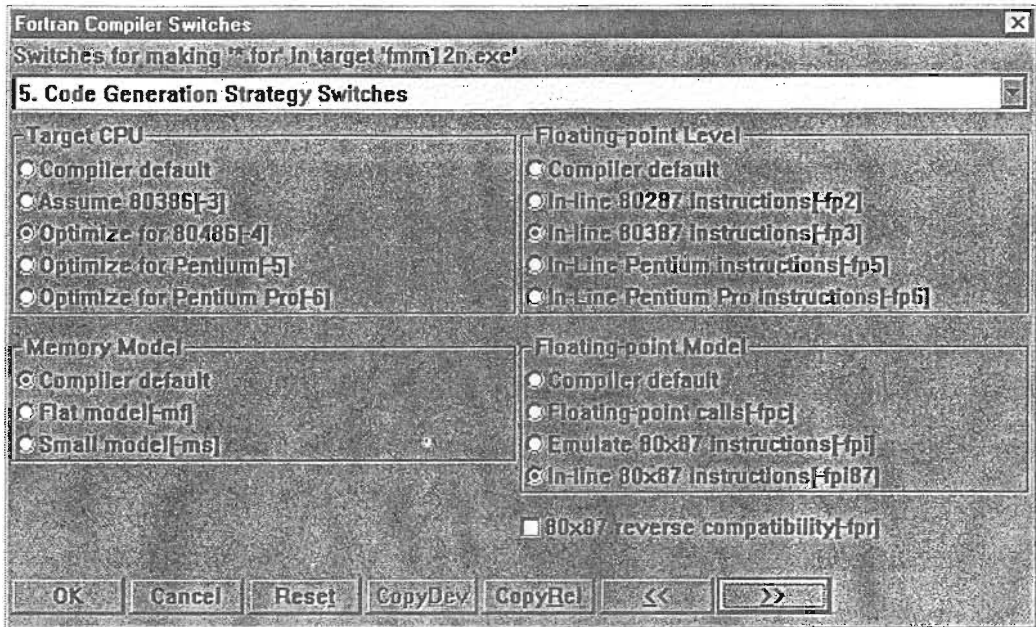
ขั้นตอนที่ 2



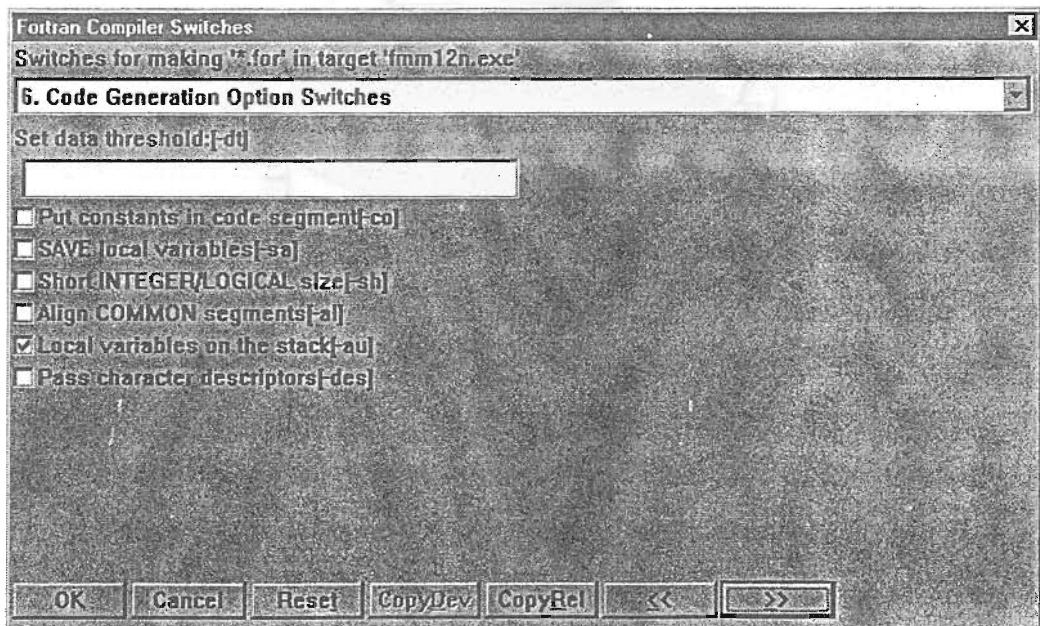
ขั้นตอนที่ 3



ขั้นตอนที่ 4



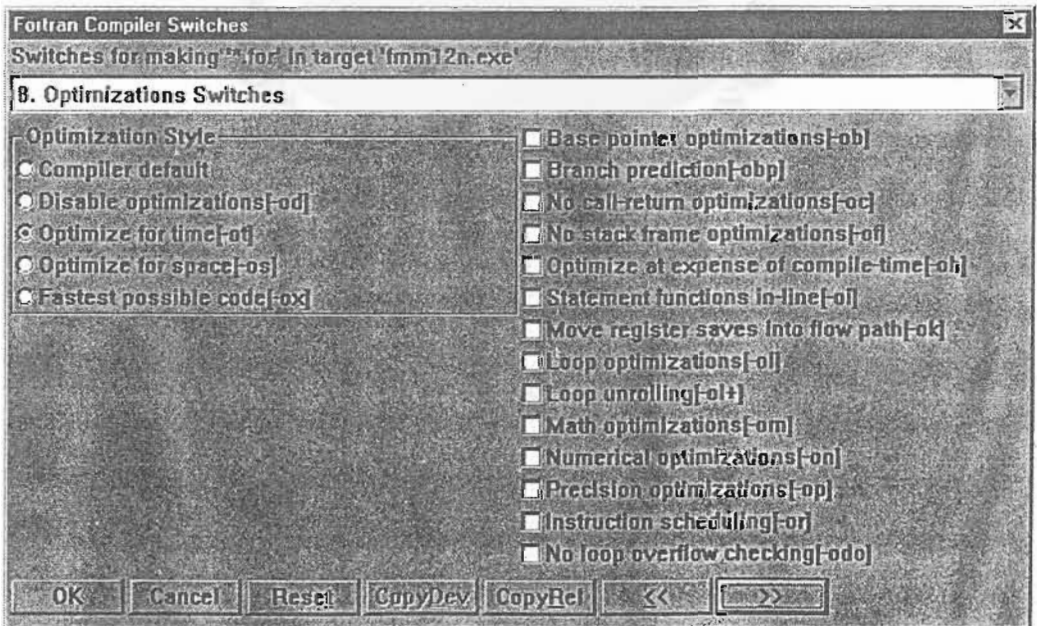
ขั้นตอนที่ 5



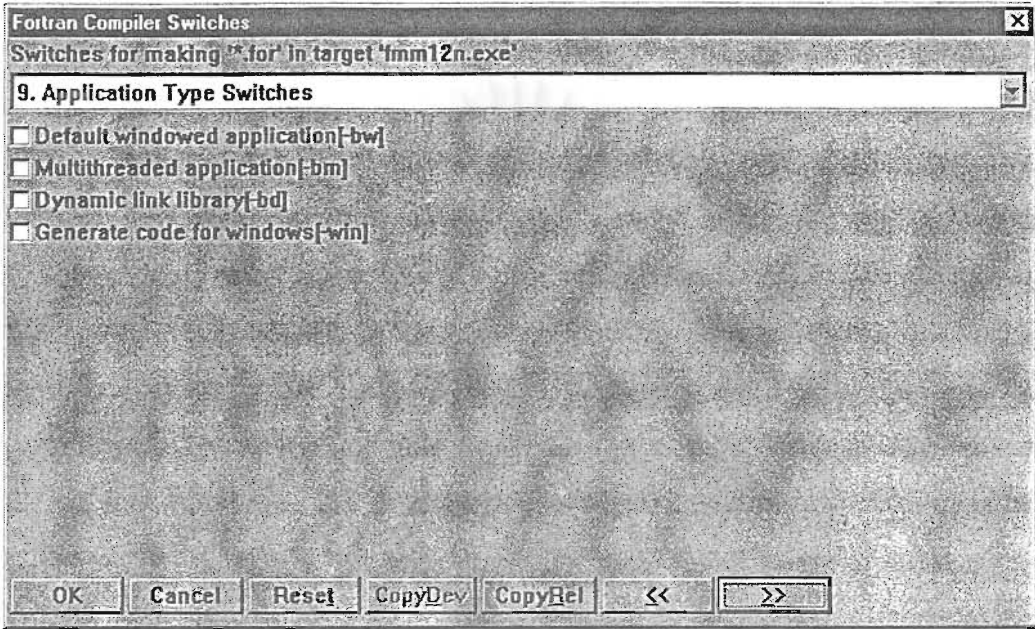
ขั้นตอนที่ 6



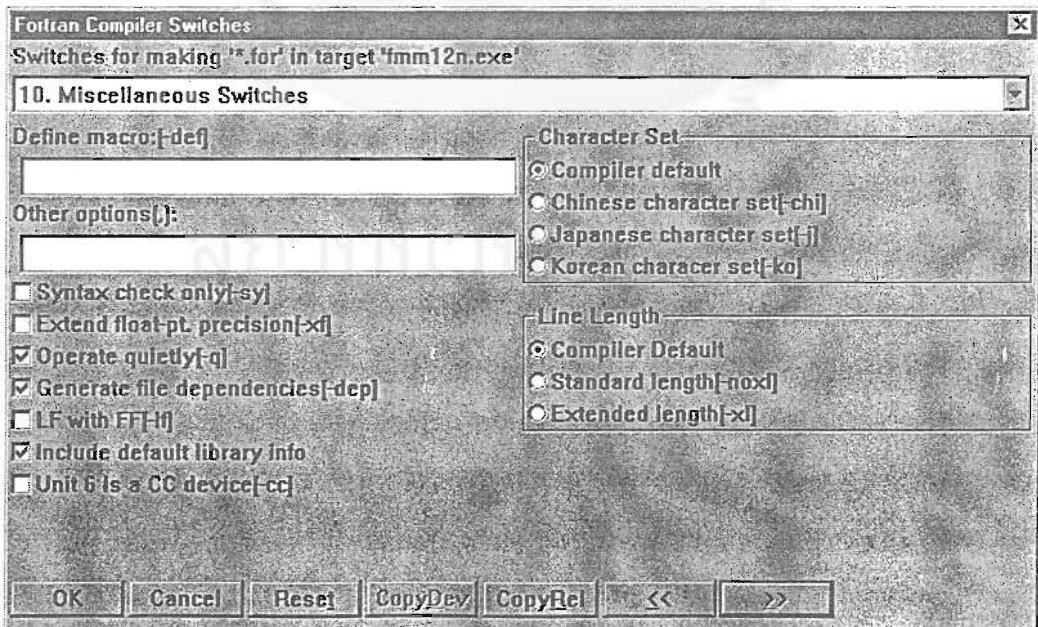
ขั้นตอนที่ 7



ขั้นตอนที่ 8



ขั้นตอนที่ 9



ขั้นตอนที่ 10

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงษ์สุร อังคนานุชาติ เกิดเมื่อวันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2520 ที่กรุงเทพมหานคร ได้รับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอุดมศึกษา และระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนีย์) สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2541 หลังจากนั้นได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโทที่สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย