

พฤติกรรมไม่เชิงเส้นแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

นายพงศกร จันทะราช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

NONLINEAR CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCEMENT WITH REBAR-RESTRAINING
COLLARS

MR. PONGSAKORN CHANTHARAJ

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมไม่เชิงเส้นแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่มีการเสริม
ปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม

โดย

นายพงศกร จันทะราช

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ชีรพงศ์ เสนจันทร์ไชย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัศววัชร เล่นาวารี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติภูมิ รอดสิน)

พงศกร จันทะราช : พฤติกรรมไม่เชิงเส้นแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึด
 รั้งเหล็กเสริม. (NONLINEAR CYCLIC BEHAVIOR OF REINFORCEMENT WITH
 REBAR-RESTRAINING COLLARS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. อาณัติ
 เรืองวัศมี, 173 หน้า.

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีต พบว่าเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการโก่งเดาะบริเวณจุดหมุนพลาสติก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถชะลอการโก่งเดาะของโครงสร้างเสาได้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกนที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม เพื่อชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ โดยพิจารณาเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16, 25, 32 และ 40 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนความชะลูด 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ซึ่งมีการแปรผันความยาว และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยพิจารณาเหล็กเกรด SD40 และ SD50 สำหรับเหล็กเสริม และเหล็กเกรด SS400 สำหรับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

จากผลการศึกษา อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาวเหล็กเสริมที่เหมาะสมที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 4 มีค่าเท่ากับ 35%, 50%, 60%, 65%, 70% และ 75% สำหรับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ตามลำดับ และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมในการยึดรั้งขึ้นกับประวัติการรับแรง, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, อัตราส่วนความชะลูด และคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม

ภาควิชา วิศวกรรมโยธาลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธาลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554

5370558021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: rebar / rebar-restraining collar / buckling / reinforced concrete

PONGSAKORN CHANTHARAJ :NONLINEAR CYCLIC BEHAVIOR OF
REINFORCEMENT WITH REBAR-RESTRAINING COLLARS. ADVISOR
:ASST.PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, Ph.D., 173 pp.

From observations of building damage caused by past earthquakes, buckling of longitudinal reinforcements was found in reinforced concrete columns at plastic hinge location. It was found in a previous experimental study that rebar-restraining collar (RRC) is effective in delaying buckling of reinforcements. In this research, the monotonic and cyclic behaviors of reinforcements with rebar-restraining collars are investigated using analytical fiber models. The analytical models use reinforcements with the SD40 and SD50 steel grade and RRCs with the SS400 steel grade. The behaviors of reinforcements with various lengths and thicknesses of rebar-restraining collars are studied. The reinforcements with diameters of 16, 25, 32 and 40 and length-to-diameter ratios of 4, 6, 8, 10, 12, 14 and 16 are considered.

From the study, it is found that it is possible for reinforcements with a length-to-diameter ratio greater than 4 to achieve equivalent energy dissipation as the reinforcement with a length-to-diameter ratio of 4 by installing rebar-restraining collars. The lengths of rebar-restraining collars required are 35%, 50%, 60%, 70% and 75% of total reinforcement length for reinforcements with length-to-diameter ratios equal to 6, 8, 10, 12, 14 and 16, respectively. The thickness required for rebar-restraining collars depends on the load history, reinforcement diameter, reinforcement length-to-diameter ratio and strength.

Department : CIVIL ENGINEERING Student's Signature

Field of Study : CIVIL ENGINEERING Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมทั้งกรุณาเสียสละเวลาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. อธิพงษ์ เสนอจันทร์ฉิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี กรรมการสอบภายในมหาวิทยาลัย, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข กรรมการสอบภายในมหาวิทยาลัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึงวิธีการแก้ไขปัญหาแก่ข้าพเจ้า

รุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย ขอขอบคุณสำหรับน้ำใจและกำลังใจที่มอบให้ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณน้องสาวที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลผู้ที่มีความสำคัญมาก คือ บิดา และมารดา ที่ช่วยอบรม สั่งสอน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มการศึกษาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริม.....	5
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเหล็กเสริม.....	5
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของเหล็กเสริม.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	22
2.3 โปรแกรมOpenSees.....	29
2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น.....	30
2.4.1 การวิเคราะห์โดยคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นทางเรขาคณิต ด้วยวิธี โคโรเทชันนอล (Co-rotational).....	30
2.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองโดยคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นทาง คุณสมบัติวัสดุ ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์.....	38
บทที่ 3 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกน.....	40
3.1 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัด.....	40
3.1.1 การแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัดเหล็กเสริม.....	40
3.1.2 การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของเหล็กเสริม.....	46
3.1.3 ความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริม.....	49

	หน้า
3.1.4 คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม.....	51
3.1.5 สอบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	57
3.1.6 ผลของคุณสมบัติวัสดุที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัด.....	58
3.1.7 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และอัตราส่วนความ ชะลูดที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม.....	61
3.2 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวิฎจักร.....	62
3.2.1 ผลของค่าพารามิเตอร์ $R_0, CR_1, CR_2, a_1, a_2, a_3$ และ a_4 ที่มีผลต่อ พฤติกรรมแบบวิฎจักรของเหล็กเสริม.....	62
3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมแบบวิฎจักรของ เหล็กเสริม.....	66
บทที่ 4 แบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงกระทำ ตามแนวแกน.....	74
4.1 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	74
4.1.1 การแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	74
4.1.2 การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	76
4.1.3 การเชื่อมต่อของเหล็กเสริมกับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	78
4.1.4 รูปแบบการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	85
4.1.5 ความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	89
4.1.6 สอบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลการทดสอบ เหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	90
4.2 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวิฎจักรที่มีการเสริม ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	92
บทที่ 5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	93
5.1 แรงปฏิกิริยาทางข้างบริเวณปลายของเหล็กเสริม.....	93
5.2 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริม.....	94
5.3 ค่าความเครียด และความโค้งภายในเหล็กเสริม.....	97
5.4 ค่าความเครียด และความโค้งภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	107
5.5 ค่าโมเมนต์ภายในเหล็กเสริม.....	114

	หน้า
5.6 ค่าโมเมนต์ภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	118
บทที่ 6 กรณีศึกษาของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตาม แนวแกน.....	122
6.1 กรณีศึกษาที่ 1 : ผลของความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อ พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด.....	122
6.2 กรณีศึกษาที่ 2 : ผลของความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อ พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด.....	123
6.3 กรณีศึกษาที่ 3 : อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาว เหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากัน	124
6.4 กรณีศึกษาที่ 4 : อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริม คงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก.....	125
6.5 กรณีศึกษาที่ 5 : ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีประสิทธิภาพใน การยึดรั้งเหล็กเสริม.....	131
6.6 กรณีศึกษาที่ 6 : คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของ เหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	143
6.6.1 ผลของคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่มีต่ออัตราส่วนความยาวของ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้ง.....	143
6.6.2 ผลของคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่มีต่อความหนาของปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้ง.....	146
6.7 กรณีศึกษาที่ 7 : คุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรม ของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	147
บทที่ 7 กรณีศึกษาเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงแบบวิฎจักร ตามแนวแกน.....	149
7.1 กรณีศึกษาที่ 1 ผลของค่าพารามิเตอร์ $R_0, CR_1, CR_2, a_1, a_2, a_3$ และ a_4 สำหรับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎจักร.....	149
7.2 กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อ พฤติกรรมแบบวิฎจักรของเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากัน.....	152
7.3 กรณีศึกษาที่ 3 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมมี พฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$	154

	หน้า
7.4 กรณีศึกษาที่ 4 ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวิถุจักร.....	155
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	168
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	168
8.2 การประยุกต์ใช้งาน.....	170
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	170
รายการอ้างอิง.....	171
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	173

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (Archawin Sawaroj ,2010).....	9
ตารางที่ 2.2 รูปแบบของการยึดเหนี่ยว (Pandey และMutsuyoshi ,2005).....	22
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเสา (Pandey และMutsuyoshi ,2005).....	23
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเสา (Archawin Sawaroj ,2010).....	26
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัดและผลการวิเคราะห์.....	42
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของ เหล็กเสริม.....	46
ตารางที่ 3.3 ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองเหล็กที่ใช้สำหรับ แบบจำลอง.....	52
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยในอดีต.....	66
ตารางที่ 3.5 ความแตกต่างของการสลายพลังงานจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง และผลการทดสอบที่มีการแปรผันค่า R_0, a_{12} และ a_{23}	73
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	77
ตารางที่ 5.1 แรงปฏิกิริยาทางข้างบริเวณปลายของเหล็กเสริม.....	94
ตารางที่ 6.1 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรง ในช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก.....	128
ตารางที่ 6.2 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว และงานวิจัยที่อ้างอิง.....	131
ตารางที่ 6.3 ความเครียดคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเกิดความเสียหาย และ งานวิจัยที่อ้างอิง.....	132
ตารางที่ 6.4 ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีประสิทธิภาพในการยึดรั้งเหล็กเสริม ในช่วงความเครียดเท่ากับ 0.06.....	134
ตารางที่ 6.5 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมที่มีต่ออัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$	145
ตารางที่ 6.6 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมที่มีต่อความหนาของปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้ง (กรณีที่ทำให้เหล็กเสริมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$).....	147

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริม.....	149
ตารางที่ 7.2 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$ สำหรับเหล็กเสริมรับแรงกระทำแบบวิฎัจกร และแรงอัดตามแนวแกน.....	154
ตารางที่ 7.3 ความหนาที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวิฎัจกรตามแนวแกน.....	159
ตารางที่ 8.1 ขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสม สำหรับการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวิฎัจกรหรือแรงแผ่นดินไหว.....	170

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 การโค้งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวบริเวณจุดหมุนพลาสติก (http://www.degenkolb.com).....	2
ภาพที่ 1.2 หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน.....	2
ภาพที่ 1.3 ความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติก ขณะสิ้นสุดการทดสอบ (Archawin Sawaroj, 2010).....	2
ภาพที่ 2.1 อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด (Monti และ Nuti, 1992).....	5
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้ แรงกระทำแบบวิฎัจกร (Monti และ Nuti, 1992).....	5
ภาพที่ 2.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bae และคณะ, 2005).....	6
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็ก No.8 และ No.10 (Bae และคณะ, 2005).....	7
ภาพที่ 2.5 ผลของอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงประลัยกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กที่ มีผลต่อพฤติกรรมหลังการโค้งเดาะของเหล็กเสริม (Bae และคณะ, 2005).....	7
ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้ (Bae และคณะ, 2005).....	8
ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัวทางข้าง (Bae และคณะ, 2005)	9
ภาพที่ 2.8 เปรียบเทียบแบบจำลอง กับผลการทดสอบ (Bae และคณะ, 2005).....	9
ภาพที่ 2.9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ และการทดสอบตัวอย่างปลอกยึดรั้งเหล็ก เสริม (Sawaroj, 2010).....	10
ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริม ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (Sawaroj, 2010).....	11
ภาพที่ 2.11 ความเสียหายของเหล็กเสริมที่ความเครียด 0.13 (Sawaroj, 2010).....	11
ภาพที่ 2.12 คุณลักษณะหลักของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ เหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวิฎัจกร (Gomes และ Appleton, 1997).....	12
ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้ แรงกระทำแบบวิฎัจกร (Menegotto และ Pinto, 1973).....	13

	หน้า
ภาพที่ 2.14 การโค้งเดาะของเหล็กเสริมภายใต้ช่วงถอนแรงกระทำ (Gomes และAppleton, 1997).....	14
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาที่ใช้จากแบบจำลองที่ เสนอ และผลการทดสอบ (Gomes และAppleton, 1997).....	15
ภาพที่ 2.16 แบบจำลองไฟเบอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Dhakal และMaekawa, 2002).....	16
ภาพที่ 2.17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับผลการทดสอบ (Dhakal และMaekawa, 2002).....	17
ภาพที่ 2.18 ผลของอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรง และความเครียด (Dhakal และMaekawa, 2002).....	17
ภาพที่ 2.19 ผลของกำลังที่จุดคราก ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (Dhakal และMaekawa, 2002).....	17
ภาพที่ 2.20 ผลของอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริมและกำลังที่จุดคราก ที่มีต่อ ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (Dhakal และMaekawa, 2002)....	18
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Dhakal และMaekawa, 2002).....	18
ภาพที่ 2.22 การโค้งเดาะของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากการเสียรูปเริ่มต้นของ เหล็กเสริม (Massone และMoroder, 2009).....	19
ภาพที่ 2.23 การจำลองหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ (Massone และMoroder, 2009).....	19
ภาพที่ 2.24 การวิเคราะห์แบบจำลองในช่วงความยาว 1/4 (Massone และMoroder, 2009).....	20
ภาพที่ 2.25 กระบวนการเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วย แรงและความเครียด (Massone และMoroder, 2009).....	21
ภาพที่ 2.26 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับผลการทดสอบของ Bayrak และSheikh (2001) (Massone และMoroder, 2009).....	21
ภาพที่ 2.27 รูปแบบของการยึดเหนี่ยวที่พิจารณา (Pandey และMutsuyoshi, 2005).....	22

	หน้า
ภาพที่ 2.28 รูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Pandey และMutsuyoshi, 2005).....	23
ภาพที่ 2.29 แสดงกรณีที่มีการยึดเหนี่ยวแบบต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสา (Pandey และMutsuyoshi, 2005).....	24
ภาพที่ 2.30 การยึดเหนี่ยวแบบ Perfect unbond และPoor Bond II ที่ทำให้เสามีความเหนียวมากกว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก (Pandey และMutsuyoshi ,2005).....	25
ภาพที่ 2.31 ความยาวของส่วนที่ปราศจากการยึดเหนี่ยวต่อพฤติกรรมของเสา (Pandey และMutsuyoshi, 2005).....	25
ภาพที่ 2.32 รูปแบบการแตกร้าวของเสาที่มีการยึดเหนี่ยวแบบต่างๆ (Pandey และMutsuyoshi, 2005).....	25
ภาพที่ 2.33 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Sawaroj, 2010).....	26
ภาพที่ 2.34 ความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติก ภายหลังจากทดสอบ (Sawaroj, 2010).....	27
ภาพที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Sawaroj, 2010).....	27
ภาพที่ 2.36 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากฐานของเสา C1 (Sawaroj, 2010).....	28
ภาพที่ 2.37 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางของเสา C1 (Sawaroj, 2010).....	28
ภาพที่ 2.38 ความเครียดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมของเสา C2 (Sawaroj, 2010).....	28
ภาพที่ 2.39 กระบวนการวิเคราะห์และแก้ปัญหาของโปรแกรม OpenSees (Mazzoni และคณะ, 2007).....	29
ภาพที่ 2.40 ลักษณะโครงสร้างช่วงเริ่มต้น และโครงสร้างปัจจุบัน ที่ไม่พิจารณาผลของการดัด (Yaw, 2009).....	31
ภาพที่ 2.41 ลักษณะโครงสร้างช่วงเริ่มต้น และโครงสร้างปัจจุบัน ที่พิจารณาผลของการดัด (Yaw, 2009).....	32
ภาพที่ 2.42 โครงสร้างที่มีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าโครงสร้างปัจจุบัน (Yaw, 2009).....	33
ภาพที่ 2.43 หน้าตัดไฟเบอร์ และการกระจายความเค้นบนหน้าตัด.....	38
ภาพที่ 3.1 รายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัด (Mazzoni และคณะ, 2007).....	41

	หน้า
ภาพที่ 3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชั้นส่วนที่มีต่อคุณสมบัติของ หน้าตัด.....	42
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชั้นส่วนของหน้าตัดที่มีต่อ ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	44
ภาพที่ 3.4 ผลของจำนวนชั้นส่วนของหน้าตัดที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและ ความเครียด.....	45
ภาพที่ 3.5 ผลของจำนวนชั้นส่วนของหน้าตัดต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ0.05....	45
ภาพที่ 3.6 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชั้นส่วนตามแนวยาวที่มีต่อ ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	46
ภาพที่ 3.7 ผลของจำนวนชั้นส่วนย่อยตามแนวยาวที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและ ความเครียด.....	47
ภาพที่ 3.8 ผลของจำนวนชั้นส่วนย่อยตามแนวยาวต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.10.....	47
ภาพที่ 3.9 ผลของจำนวนชั้นส่วนตามแนวยาวที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและ ความเครียด.....	48
ภาพที่ 3.10 ผลของจำนวนชั้นส่วนตามแนวยาวต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.10.....	48
ภาพที่ 3.11 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็ก เสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	49
ภาพที่ 3.12 ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและ ความเครียด.....	50
ภาพที่ 3.13 ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียด เท่ากับ 0.05.....	50
ภาพที่ 3.14 ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมที่เกิดจากการเสียรูปจากแรงทาง ด้านข้าง.....	51
ภาพที่ 3.15 แบบจำลองที่ใช้ในศึกษาแบบจำลองคุณสมบัติวัสดุเหล็กเสริม.....	52
ภาพที่ 3.16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จาก แบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ ReinforcingSteel และผลการทดสอบ..	53

ภาพที่ 3.17	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ Reinforcing Steel และผลการทดสอบ.....	53
ภาพที่ 3.18	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 และผลการทดสอบ.....	54
ภาพที่ 3.19	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 และผลการทดสอบ.....	54
ภาพที่ 3.20	ผลของค่า R0 ที่มีผลต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเหล็กเสริม.....	56
ภาพที่ 3.21	ผลของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของวัสดุที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเสริม.....	56
ภาพที่ 3.22	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Bayrak และ Sheikh(2001).....	57
ภาพที่ 3.23	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลอง และผลการทดสอบของ Bayrak และ Sheikh(2001).....	57
ภาพที่ 3.24	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองและแบบจำลองของ Wongmuangkaen(2011).....	58
ภาพที่ 3.25	ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก.....	59
ภาพที่ 3.26	ความสัมพันธ์อัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก.....	59
ภาพที่ 3.27	ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น.....	60
ภาพที่ 3.28	ความสัมพันธ์อัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น.....	60
ภาพที่ 3.29	ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนชะลูด.....	61
ภาพที่ 3.30	แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวิฎจักร และรูปแบบการให้แรงกระทำ (loading scheme).....	62
ภาพที่ 3.31	ผลของค่า R0 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎจักร.....	63
ภาพที่ 3.32	ผลของค่า CR1 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎจักร.....	63

	หน้า
ภาพที่ 3.33 ผลของค่า CR2 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎัจกร.....	64
ภาพที่ 3.34 ผลของค่า a1 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎัจกร.....	64
ภาพที่ 3.35 ผลของค่า a2 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎัจกร.....	65
ภาพที่ 3.36 ผลของค่า a3 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎัจกร.....	65
ภาพที่ 3.37 ผลของค่า a4 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฎัจกร.....	65
ภาพที่ 3.38 รหัสต้นฉบับของโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของค่าการแข็งตัว เพิ่มขึ้นสำหรับแบบจำลอง Steel02.....	66
ภาพที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a1/a2^{0.8} = 0.1$ (L/d=3).....	67
ภาพที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a1/a2^{0.8} = 0.05$ (L/d=3).....	67
ภาพที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a1/a2^{0.8} = 0.1$ (L/d=8).....	68
ภาพที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a3/a4^{0.8} = 0.1$ (L/d=8).....	68
ภาพที่ 3.43 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ R0,a12,a13 ที่อ้างอิงจากผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992).....	69
ภาพที่ 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) สำหรับ L/d =5.....	70
ภาพที่ 3.45 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) สำหรับ L/d =8.....	71
ภาพที่ 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) สำหรับ L/d =11.....	72
ภาพที่ 3.47 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ R0,a12 และ a34.....	73
ภาพที่ 4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชั้นส่วนของปลอกยึดรั้งเหล็ก เสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	75
ภาพที่ 4.2 ผลของจำนวนชั้นส่วนหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์ หน่วยแรงและความเครียด.....	75

ภาพที่ 4.3 ผลของจำนวนชิ้นส่วนหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อค่าหน่วยแรงที่ ความเครียดเท่ากับ 0.12.....	76
ภาพที่ 4.4 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามยาวปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	77
ภาพที่ 4.5 ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์ หน่วยแรงและความเครียด.....	78
ภาพที่ 4.6 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลประเภทการยึดรั้งระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็ก เสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	79
ภาพที่ 4.7 ผลของประเภทการยึดรั้งระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อ ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับแรงดึง.....	79
ภาพที่ 4.8 ผลของประเภทการยึดรั้งระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อ ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับแรงอัด.....	80
ภาพที่ 4.9 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและ ความเครียด.....	81
ภาพที่ 4.10 ผลของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	81
ภาพที่ 4.11 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อระหว่างปลอกยึด รั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด..	82
ภาพที่ 4.12 ผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อ ที่มีการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์ หน่วยแรงและความเครียด (L/d=8 L150-T6).....	83
ภาพที่ 4.13 ผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อ ที่มีการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์ หน่วยแรงและความเครียด (L/d=8 L100-T3).....	83
ภาพที่ 4.14 ผลของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (L/d=16 L340-T8).....	84
ภาพที่ 4.15 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง L/d=8 L100-T3 ที่มีจุดเชื่อมต่อ ระหว่างเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม จำนวน 3 จุด.....	84
ภาพที่ 4.16 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง L/d=8 L100-T3 ที่มีจุดเชื่อมต่อ ระหว่างเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม จำนวน 9 จุด.....	85

	หน้า
ภาพที่ 4.17 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลรูปแบบการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	86
ภาพที่ 4.18 ผลของการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (L150-T6,L100-T3).....	87
ภาพที่ 4.19 ผลของการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (L50-T6,L100-T3,L100-T9).....	87
ภาพที่ 4.20 ลักษณะการกระจายความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีการจำลองแบบ 1RRC.....	88
ภาพที่ 4.21 ลักษณะการกระจายความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีการจำลองแบบ 2RRC.....	88
ภาพที่ 4.22 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	89
ภาพที่ 4.23 ผลการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	90
ภาพที่ 4.24 แบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกับผลการทดสอบ.....	90
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความยาวที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010).....	91
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความหนาที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010).....	91
ภาพที่ 4.27 แบบจำลองเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวัฏจักร และรูปแบบการให้แรงกระทำ (loading scheme).....	92
ภาพที่ 5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	93
ภาพที่ 5.2 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม...	94

	หน้า
ภาพที่ 5.52 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L150-T6.....	119
ภาพที่ 5.53 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T3.....	119
ภาพที่ 5.54 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T9.....	120
ภาพที่ 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	121
ภาพที่ 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	121
ภาพที่ 5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	121
ภาพที่ 6.1 ผลของความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด.....	122
ภาพที่ 6.2 ผลของความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด.....	123
ภาพที่ 6.3 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาวเหล็กเสริมที่มี ต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	124
ภาพที่ 6.4 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วย แรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=6$	125
ภาพที่ 6.5 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วย แรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=8$	125
ภาพที่ 6.6 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วย แรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=10$	126
ภาพที่ 6.7 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วย แรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=12$	126
ภาพที่ 6.8 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วย แรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=14$	126
ภาพที่ 6.9 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วย แรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=16$	127
ภาพที่ 6.10 ค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด ของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม.....	127
ภาพที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้ เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดครากกับอัตราส่วนความชะลูด.....	128

ภาพที่ 6.12	ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วน ความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริม แบบ ก.....	129
ภาพที่ 6.13	ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วน ความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริม แบบ ข.....	130
ภาพที่ 6.14	ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วน ความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้ง เหล็กเสริม แบบ ค.....	130
ภาพที่ 6.15	ลักษณะของตัวอย่างทดสอบ และพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้การโอบรัด Scott และคณะ(1988).....	132
ภาพที่ 6.16	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีการ แปรผันความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และความแตกต่างของค่า การสลายพลังงาน.....	133
ภาพที่ 6.17	ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม ขนาด 16 มิลลิเมตร.....	136
ภาพที่ 6.18	ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม ขนาด 25 มิลลิเมตร.....	138
ภาพที่ 6.19	ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม ขนาด 32 มิลลิเมตร.....	140
ภาพที่ 6.20	ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม ขนาด 40 มิลลิเมตร.....	142
ภาพที่ 6.21	ผลของความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มี การแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก.....	144
ภาพที่ 6.22	ผลของความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มี การแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น.....	145
ภาพที่ 6.23	ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มี การแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก.....	146

	หน้า
ภาพที่ 6.24 ผลของความหนาปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น.....	146
ภาพที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดครากของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม.....	148
ภาพที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม.....	148
ภาพที่ 7.1 คุณสมบัติวัสดุของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรม.....	150
ภาพที่ 7.2 ค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม.....	151
ภาพที่ 7.3 ค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม.....	152
ภาพที่ 7.4 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด.....	153
ภาพที่ 7.5 ค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม.....	154
ภาพที่ 7.6 ค่าอัตราการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม.....	155
ภาพที่ 7.7 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน.....	156
ภาพที่ 7.8 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน.....	156
ภาพที่ 7.9 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม ขนาดL65%-T5 ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน.....	157
ภาพที่ 7.10 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม ขนาดL65%-T5 ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน.....	157
ภาพที่ 7.11 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมขนาดต่างๆ.....	158

ภาพที่ 7.12	พฤติกรรมกำรรับแรงแบบวิญจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่ไม่เสริม ปลอกยัดรั้งเหล็กเสริม	160
ภาพที่ 7.13	พฤติกรรมกำรรับแรงแบบวิญจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 16 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยัดรั้ง เหล็กเสริม.....	161
ภาพที่ 7.14	พฤติกรรมกำรรับแรงแบบวิญจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยัดรั้ง เหล็กเสริม.....	163
ภาพที่ 7.15	พฤติกรรมกำรรับแรงแบบวิญจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 32 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยัดรั้ง เหล็กเสริม.....	165
ภาพที่ 7.16	พฤติกรรมกำรรับแรงแบบวิญจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 40 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยัดรั้ง เหล็กเสริม.....	167

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวโครงสร้างจะรับแรงกระทำแบบวัฏจักร เหล็กเสริมตามยาวในโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะรับแรงดึงและอัดสลับไปมา ในสภาวะที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำจนกระทั่งเลยขีดจำกัดยืดหยุ่น เหล็กเสริมตามยาวอาจเกิดการโก่งเดาะในช่วงการรับแรงอัด ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างเสามีความสามารถในการต้านทานแรงลดลงจนนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง ดังเช่นในภาพที่ 1.1

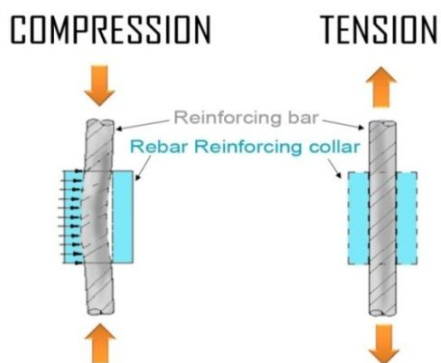
Archawin Sowaraj(2010) ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ติดตั้งโดยการสวมกับเหล็กเสริมตามยาวในบริเวณจุดหมุนพลาสติก เพื่อป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยที่ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีส่วนช่วยในการเสริมกำลังเฉพาะในภาวะที่เหล็กเสริมรับแรงอัดเท่านั้น โดยทำหน้าที่เพิ่มการยึดรั้งทางข้างของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 1.2 จากผลการทดสอบในภาพที่ 1.3 พบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสามารถป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ส่งผลให้เสามีความเหนียวเพิ่มขึ้นประมาณ 27% และมีความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติกลดลง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม, ความยาวและความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และค่าคุณสมบัติวัสดุ พร้อมทั้งเสนอขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมที่ใช้ในการยึดรั้งเหล็กเสริม

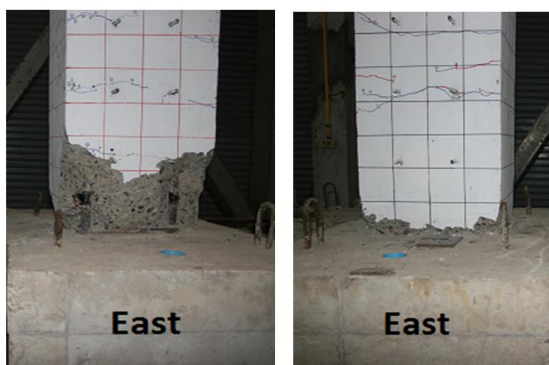


ภาพที่ 1.1 การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวบริเวณจุดหมุนพลาสติก

(<http://www.degenkolb.com>)



ภาพที่ 1.2 หลักการทำงานของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน



ภาพที่ 1.3 ความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติก ขณะสิ้นสุดการทดสอบ

ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม(ซ้าย) เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม(ขวา)

(Archawin Sawaraj, 2010)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน
- 2) ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม จากแบบจำลองไฟเบอร์
- 3) ศึกษาขนาดปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่เหมาะสมในการยี่ดั่งเหล็กเสริม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม OpenSees
- 2) พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นทางเรขาคณิตด้วยวิธีโคโรเทชันนอล (Co-rotational)
- 3) พิจารณาอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม(L/d) เท่ากับ 4, 6, 8,10, 12, 14 และ16

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ทบทวนงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เป็นความรู้พื้นฐาน และก่อให้เกิดแนวความคิดในการทำงานวิจัย โดยได้ทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม, พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร และแรงอัดตามแนวแกน, การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น พร้อมทั้งกำหนดขอบเขต และแนวทางการวิจัย
- 2) ศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OpenSees
- 3) สร้างแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกน พร้อมทั้งสอบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลงานวิจัยในอดีต
- 4) สร้างแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่รับแรงตามแนวแกน พร้อมทั้งสอบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลงานวิจัยในอดีต

- 5) ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม
- 6) ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบวิฎจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม
- 7) สรุปผลการวิจัย
- 8) จัดทำวิทยานิพนธ์

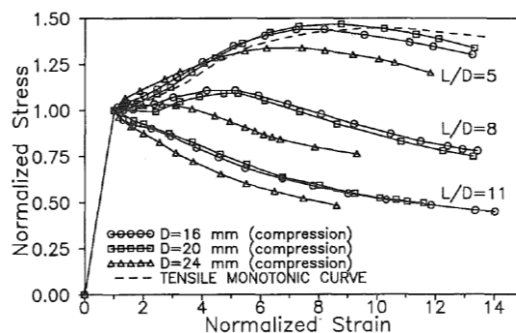
บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

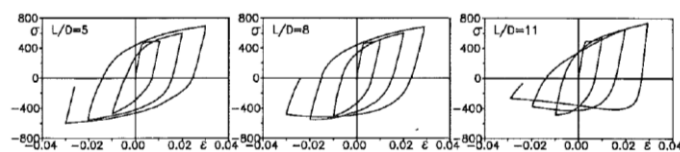
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริม

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเหล็กเสริม

Monti และ Nuti (1992) ได้ทดสอบเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว และแรงกระทำแบบวัฏจักร โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนความยาวที่ปราศจากการยึดรั้งต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/d) ซึ่งอัตราส่วนที่พิจารณามีค่า 5, 8 และ 11 ที่มีที่มาจากค่าของระยะห่างของเหล็กปลอกในการก่อสร้างทั่วไป โดยใช้เหล็กที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 440 เมกะปาสคาล และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16, 20 และ 24 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบภาพที่ 2.1 พฤติกรรมใกล้เคียงกับกับเหล็กเสริมรับแรงดึง เมื่ออัตราส่วนความชะลุดมีค่าเท่ากับ 5 และมีกำลังหลังจุดครากลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 5 เนื่องจากผลการโก่งเดาะ เช่นเดียวกับภาพที่ 2.2 เหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 5 มีกำลังลดลงในช่วงรับแรงอัด

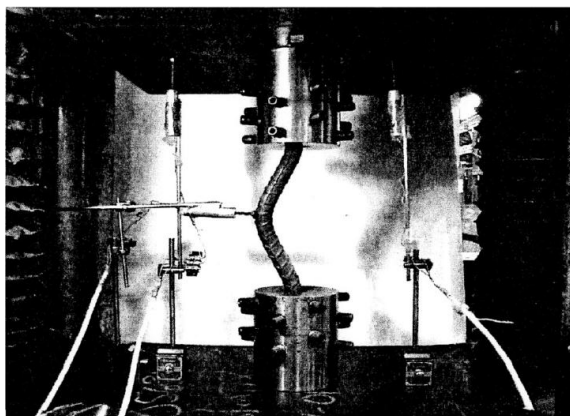


ภาพที่ 2.1 อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด (Monti และ Nuti, 1992)



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเคี้ยวของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Monti และ Nuti, 1992)

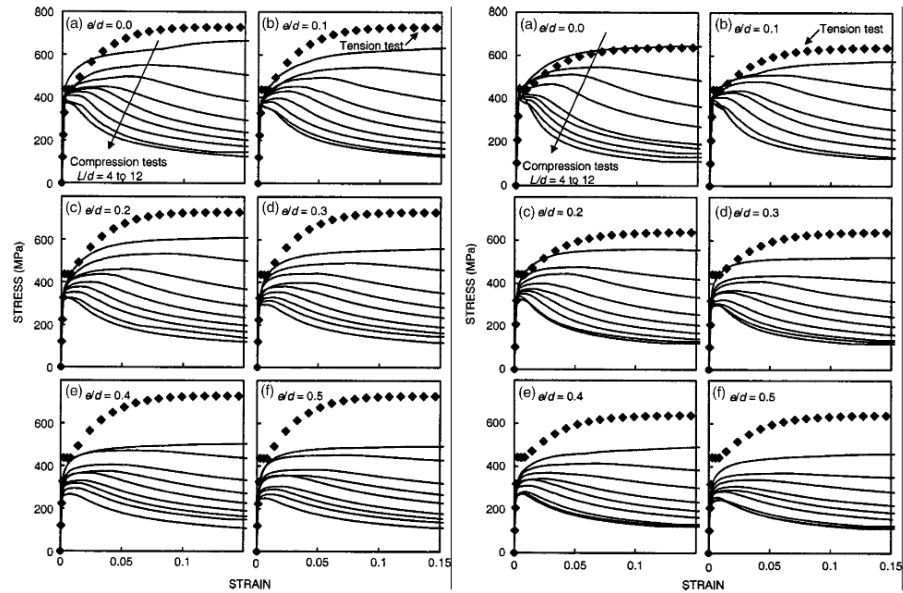
Bae และคณะ (2005) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมจำนวน 162 เส้น ภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนความยาวที่ปราศจากการยึดรั้งต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมหรืออัตราส่วนความชะลูด (L/d) ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นหรือการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/d) ซึ่งอัตราส่วนความชะลูดที่พิจารณามีค่า 4,5,6,7,8,9,10,11 และ 12 และค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้นมีค่า 0.0,0.1,0.2, 0.3,0.4,0.5 และ 0.6 โดยในการทดสอบได้ใช้เหล็ก Grade60 No.8 และ No.10 ที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 437 และ 444 เมกะปาสคาล และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25.4 และ 32.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบได้ติดตั้งอุปกรณ์การวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า จำนวน 3 ตัว โดยที่ 2 ตัวไว้สำหรับการวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และ อีก 1 ตัวไว้สำหรับการวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งในการทดสอบไม่ใช้การตรวจวัดด้วยเกจวัดความเครียดเนื่องจากว่าการติดเกจวัดความเครียดจะเป็นการรบกวนตัวอย่างทดสอบ โดยการลดพื้นที่หน้าตัด อีกทั้งไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมภาพรวมของเหล็กเสริมภายหลังการโก่งเดาะได้



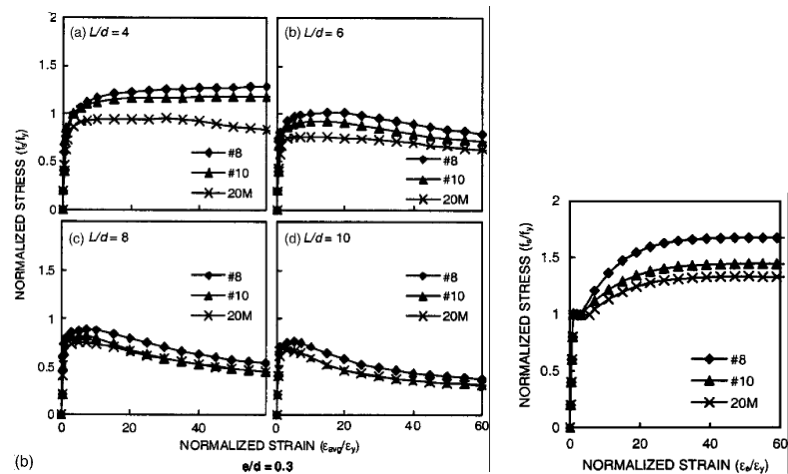
ภาพที่ 2.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bae และคณะ, 2005)

จากผลการทดสอบ ภาพที่ 2.4 ค่าอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 พฤติกรรมของเหล็กเสริมจะเป็นแบบเหนียวกล่าวคือ เหล็กเสริมยังคงสามารถรับแรงได้สูงกว่าค่าหน่วยแรงที่จุดครากเมื่อค่าความเครียดของ เมื่ออัตราส่วนความชะลูดและค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการรับแรงลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมไม่สามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดคราก เนื่องจากเกิดการโก่งเดาะก่อนถึงจุดคราก นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมภายหลังการโก่ง

เดาะย้งดีซึ้น เมื่อค่าอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงประลัยกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมมีค่าสูงซึ้น โดยอ้างอิงผลการทดสอบเพิ่มเติมจาก Bayrak และ Sheikh (2001) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



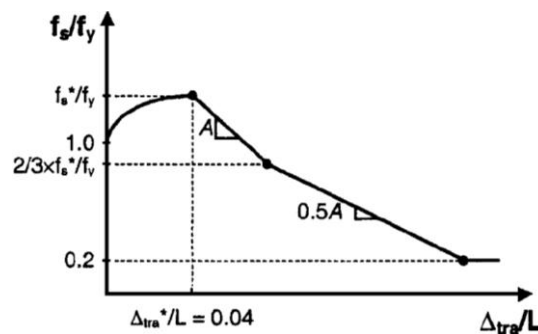
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็ก No.8 และ No.10 (Bae และคณะ, 2005)



ภาพที่ 2.5 ผลของอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงประลัยกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กที่มีผลต่อพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของเหล็กเสริม (Bae และคณะ, 2005)

นอกจากนี้ได้เสนอแบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และการเคลื่อนตัวทางข้างของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 2.6 และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด และการเคลื่อนตัวทางข้าง ดังภาพที่ 2.7 โดยแบบจำลองที่เสนอมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ ดังภาพที่ 2.8

โดยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวทางข้างเป็นดังสมการที่ 2.1 – 2.5



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวทางข้าง (Bae และคณะ, 2005)

$$\text{ช่วงที่ 1 } \frac{\Delta_{tra}}{L} \leq 0.04$$

$$\frac{f_s}{f_y} = 1 + \left(\frac{f_s^*}{f_y} - 1\right) \times \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_{tra}}{\Delta_{tra}^*} - 1\right)^2} \quad \text{เมื่อ } \frac{f_s^*}{f_y} > 1 \quad (2.1)$$

$$\frac{f_s}{f_y} = \left(\frac{f_s^*}{f_y} - 1\right) \frac{\Delta_{tra}}{\Delta_{tra}^*} + 1 \quad \text{เมื่อ } \frac{f_s^*}{f_y} \leq 1 \quad (2.2)$$

$$\text{ช่วงที่ 2 } \frac{\Delta_{tra}}{L} > 0.04$$

$$\frac{f_s - f_s^*}{f_y} = A \left(\frac{\Delta_{tra} - \Delta_{tra}^*}{L}\right) \quad \text{เมื่อ } \frac{f_s}{f_y} \geq \frac{2}{3} \frac{f_s^*}{f_y} \quad (2.3)$$

$$\frac{f_s - 2/3 f_s^*}{f_y} = \frac{A}{2} \left(\frac{\Delta_{tra} - x_1}{L}\right) > 0.2 \quad \text{เมื่อ } \frac{f_s}{f_y} < \frac{2}{3} \frac{f_s^*}{f_y} \quad (2.4)$$

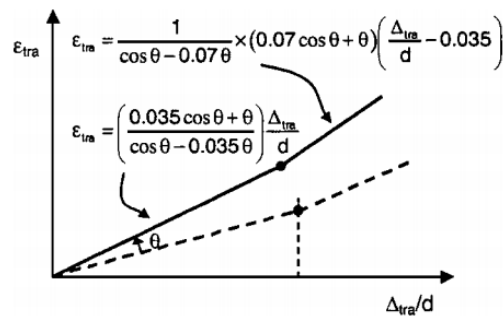
$$\frac{\Delta_{tra}^*}{L} = 0.04; \frac{f_s^*}{f_y} = -0.45 \zeta^{1.5} \left[\ln\left(\frac{L/d}{4}\right)\right] + \zeta \leq \zeta \quad (2.5)$$

โดยที่ Δ_{tra} คือ ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความยาวของเหล็กเสริม

A คือ $4(\zeta - 1)^2 - 5$

ζ คือ f_u / f_y

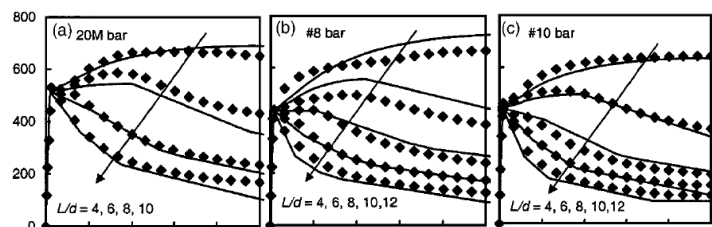
ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เป็นดังสมการที่ 2.6



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Bae และคณะ, 2005)

$$\varepsilon_{tra} = \max \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{0.035 \cos \theta + \theta}{\cos \theta - 0.035\theta} \right) \frac{\Delta_{tra}}{d} \\ \frac{1}{\cos \theta - 0.07\theta} \times (0.07 \cos \theta + \theta) \left(\frac{\Delta_{tra}}{d} - 0.035 \right) \end{array} \right. \quad (2.6)$$

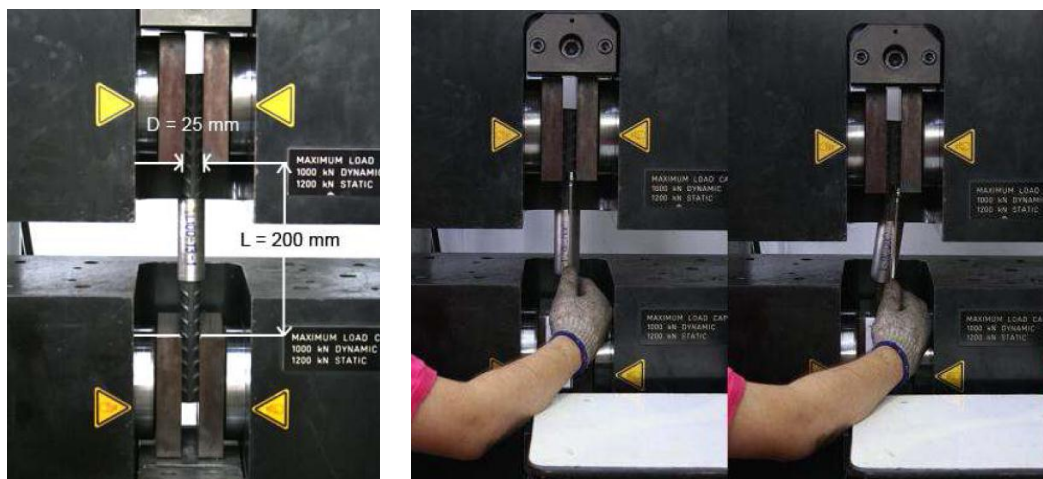
โดยที่ $\theta = 6.9 / (L/d)^2 - 0.05$



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดสอบ

(Bae และคณะ, 2005)

Archawin Sawaroj (2010) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำอัดตามแนวแกน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่สวมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม โดยในการทดสอบได้ใช้เหล็กที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 492 เมกะปาสคาล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลูด(L/d) เท่ากับ 8 และมีการสวมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมซึ่งทำจากเหล็ก เกรดSS400 ซึ่งเป็นเหล็กที่ไม่มีผลเนื่องจากการแข็งตัวเพิ่มขึ้น(Strain hardening) ที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 513 เมกะปาสคาล โดยทดสอบด้วยเครื่องให้แรงตามแนวแกนโดยการควบคุมการเคลื่อนที่(displacement control) โดยภาพที่ 2.9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์พร้อมทั้งการทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม และขนาดของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.1



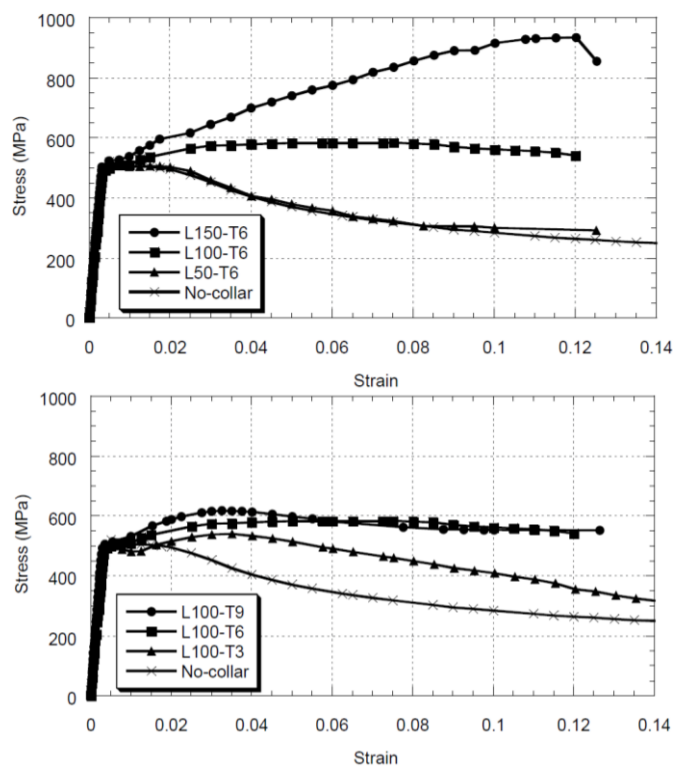
ภาพที่ 2.9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ(ซ้าย) การทดสอบตัวอย่างปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม(ขวา)

(Archawin Sawaroj, 2010)

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดขนาดปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม (Archawin Sawaroj, 2010)

Length (mm)	Thickness (mm)		
	9	6	3
150	-	L150-T6	-
100	L100-T9	L100-T6	L100-T3
50	-	L50-T6	-

จากผลการทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดที่จุดครากที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันภายหลังจากจุดคราก โดยที่ตัวอย่าง L150-T6 สามารถรับแรงอัดตามแนวแกนภายหลังจากครากได้สูงที่สุด ซึ่งสามารถรับแรงได้มากกว่ากำลังที่จุดคราก และตัวอย่าง L50-T6 มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และตัวอย่าง L100-T6 และ T100-T9 สามารถรับแรงได้ค่อนข้างคงที่ภายหลังจากจุดครากดังแสดงในภาพที่ 2.10 และภาพที่ 2.11 แสดงความเสียหายของเหล็กเสริมภายหลังจากการทดสอบ



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม แปรผันความยาว(บน) ,แปรผันความหนา(ล่าง) (Archawin Sawaraj, 2010)

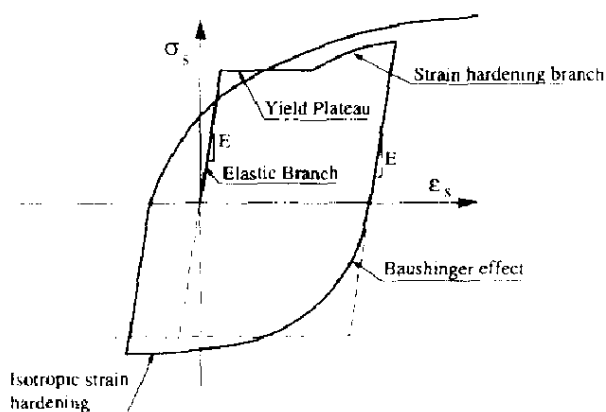


ภาพที่ 2.11 ความเสียหายของเหล็กเสริมที่ความเครียด 0.13 (Sawaraj, 2010)

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของเหล็กเสริม

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมที่ถูกต้องนั้น ต้องสามารถจำลองพฤติกรรมหลักทั้ง 5 พฤติกรรม ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.12

1. ความสัมพันธ์เชิงเส้น(elastic branch) ช่วงที่เหล็กเสริมมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโดยมีความชันเท่ากับค่าโมดูลัสของวัสดุ และมีจุดสิ้นสุดเมื่อเหล็กรับแรงถึงจุด
2. การคราก(yield plateau) ช่วงที่ความเครียดของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นแต่หน่วยแรงคงที่จนกระทั่งถึงจุดการแข็งตัวเพิ่มขึ้น
3. การแข็งตัวเพิ่มขึ้น(strain hardening) ช่วงที่เหล็กเสริมสามารถพัฒนากำลังได้มากกว่าหน่วยแรงที่จุดครากโดยมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง
4. ส่วนโค้งของกราฟในช่วงถดถอยแรงกระทำ(bauschinger effect) ภายหลังจากการถดถอยแรงกระทำ กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับค่าโมดูลัสของวัสดุแต่เหล็กเสริมไม่สามารถพัฒนากำลังถึงจุดครากได้ เนื่องจาก bauschinger effect ที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของความเครียด
5. การแข็งตัวเพิ่มขึ้นในช่วงถดถอยแรงกระทำ(isotropic strain hardening) ช่วงที่วัสดุช่วงที่สามารถพัฒนากำลังได้มากกว่าหน่วยแรงที่จุดครากในด้านรับแรงอัด



ภาพที่ 2.12 คุณลักษณะหลักของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม

ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร(Gomes และAppleton,1997)

Menegotto และ Pinto (1973) ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ที่ไม่พิจารณาผลการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ซึ่งลักษณะของแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 2.13

$$\sigma_s^* = \beta \varepsilon_s^* + (1 - \beta) \frac{\varepsilon_s^*}{(1 + (\varepsilon_s^*)^R)^{1/R}} \quad (2.7)$$

ซึ่ง $\varepsilon_s^*, \sigma_s^*$ คือค่าความเครียดหนึ่งหน่วย และหน่วยแรงหนึ่งหน่วยโดยมีค่าดังสมการที่ 2.8-2.9

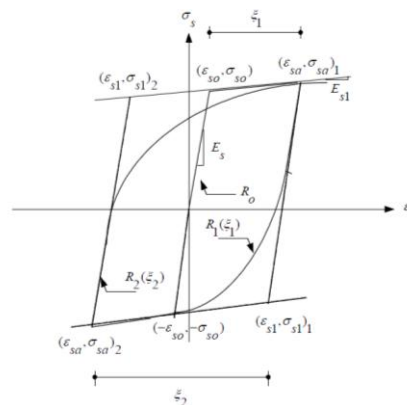
ช่วงแรงกระทำรอบแรก $\varepsilon_s^* = \varepsilon_s / \varepsilon_{so}, \sigma_s^* = \sigma_s / \sigma_{so} \quad (2.8)$

ช่วงหลังแรงกระทำรอบแรก $\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sa}}{2\varepsilon_{so}}, \sigma_s^* = \frac{\sigma_s - \sigma_{sa}}{2\sigma_{so}} \quad (2.9)$

- โดยที่ $\sigma_{so}, \varepsilon_{so}$ คือ ค่าหน่วยแรงและความเครียดที่จุดคราก
- $\sigma_{sa}, \varepsilon_{sa}$ คือ ค่าหน่วยแรงและความเครียดที่จุดเปลี่ยนทิศทางของแรงกระทำ
- $\beta = E_{s1} / E_s$ คือ ค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น
- R คือ ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการลดลงของกำลังที่จุดคราก

(Bauschinger effect) โดยมีค่าเท่ากับ $R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$

(ξ คือ ค่าความเครียดพลาสติก และ R_0, a_1, a_2 คือ ค่าคงที่ของวัสดุ)



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Menegotto และ Pinto, 1973)

ต่อมา Filippou et al (1987) ได้เสนอการแก้ไขแบบจำลอง 2 ส่วน เพื่อคำนึงถึงการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม (isotropic hardening)

$$\text{ส่วนที่ 1} \quad \varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sa}}{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{sa}}, \sigma_s^* = \frac{\sigma_s - \sigma_{sa}}{\sigma_{s1} - \sigma_{sa}} \quad (2.10)$$

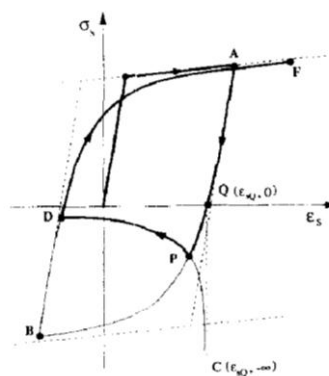
$$\text{ส่วนที่ 2} \quad \sigma_{so}^e = \sigma_{so} a_3 \left(\frac{\varepsilon_{s\max}}{\varepsilon_{so}} - a_4 \right) \quad (2.11)$$

โดยที่ $\sigma_{s1}, \varepsilon_{s1}$ คือ ค่าหน่วยแรงและความเครียดที่จุดตัดของเส้นโค้งขอบนอกกับเส้นตรง

ช่วงอีลาสติก

σ_{so}^e คือ ค่าความเค้นที่จุดครากใหม่ ($\varepsilon_{s\max}$ คือ ความเครียดสูงสุดก่อนกลับทิศของแรงกระทำ, a_3, a_4 คือ ค่าคงที่ของวัสดุ)

Gomes และAppleton (1997) ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ที่คำนึงถึงผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริม โดยได้ทำการปรับปรุงจากแบบจำลองของ Menegotto-Pinto (1973) โดยใช้หลักการสมมูลของการวิบัติของเหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะ ซึ่งก่อนหน้านี้นักวิจัยบางท่านได้ทำการสร้างแบบจำลองของเหล็กที่คำนึงถึงผลของการโก่งเดาะ เช่น Monti และNuti (1992) โดยงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยแบบจำลองมีลักษณะดังภาพที่ 2.14 และมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดดังสมการที่ 2.12 และ 2.13



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ที่คำนึงถึงผลของการโก่งเดาะ (Gomes และAppleton, 1997)

ช่วงการให้แรงกระทำในวัฏจักรที่หนึ่ง

$$\sigma_s = \begin{cases} \varepsilon_s E_s & ,if |\varepsilon_s| < \varepsilon_{s0} \\ \sigma_{s0} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{s0}) E_{s1} & ,if \varepsilon_s > \varepsilon_{s0} \\ -\sigma_{s0} - (\varepsilon_s - \varepsilon_{s0}) E_{s1} & ,if \varepsilon_s < -\varepsilon_{s0} \end{cases} \quad (2.12)$$

ช่วงการให้แรงกระทำภายหลังวัฏจักรที่หนึ่ง

$$\sigma_s = \frac{2\sqrt{s}}{A_s L} \frac{4}{3} r^3 \sin^3 \theta \sigma_{s0} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_s}} \quad (2.13)$$

โดยที่ $\sigma_{s0}, \varepsilon_{s0}$ คือ ค่าหน่วยแรงและความเครียดที่จุดคราก

E_s คือ ค่าโมดูลัสสัมผัสในช่วงอีลาสติก

E_{s1} คือ ค่าโมดูลัสหลังจุดคราก

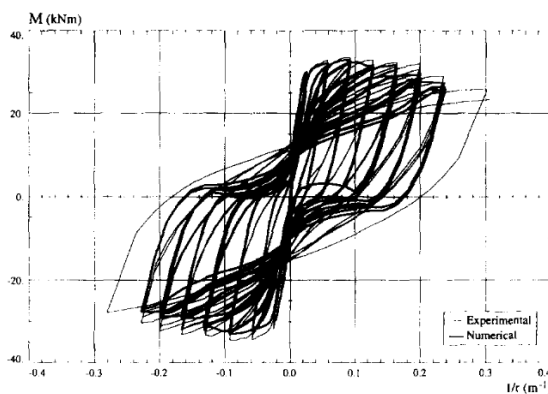
A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

L คือ ความยาวของเหล็กเสริม

r คือ ความยาวรัศมีของเหล็กเสริม

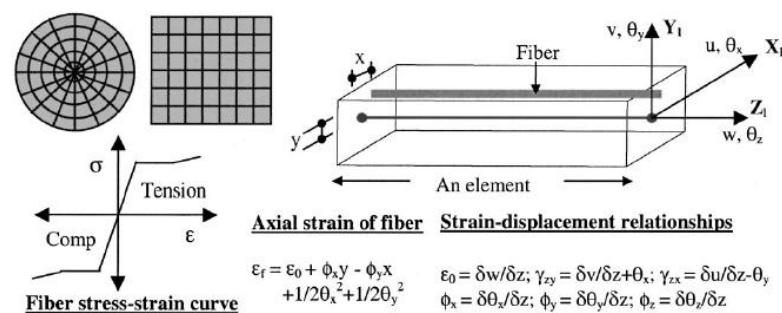
θ คือ มุมหมุนของเหล็กเสริม

จากนั้นนำแบบจำลองเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาที่ใช้จากแบบจำลองที่เสนอ และผลการทดสอบ (Gomes และ Appleton, 1997)

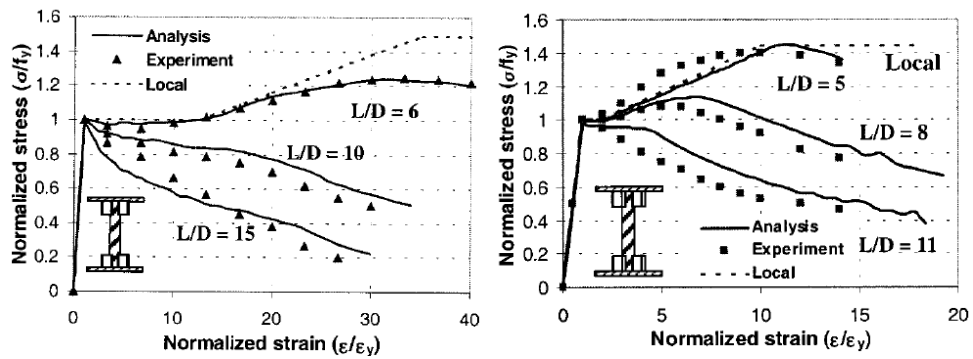
Dhakar และMaekawa (2002) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังภาพที่ 2.16 พร้อมทั้งเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม โดยพิจารณาผลของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม พร้อมทั้งศึกษาความเกี่ยวเนื่องกันของสองปัจจัยนี้ และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบของ Mander และคณะ. (1984) และMonti และNutti (1992)



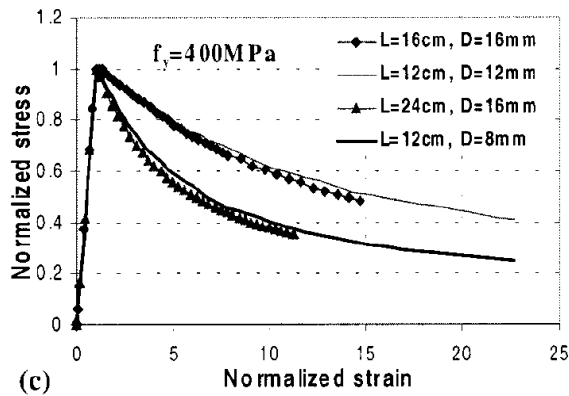
ภาพที่ 2.16 แบบจำลองไฟเบอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

(Dhakar และMaekawa, 2002)

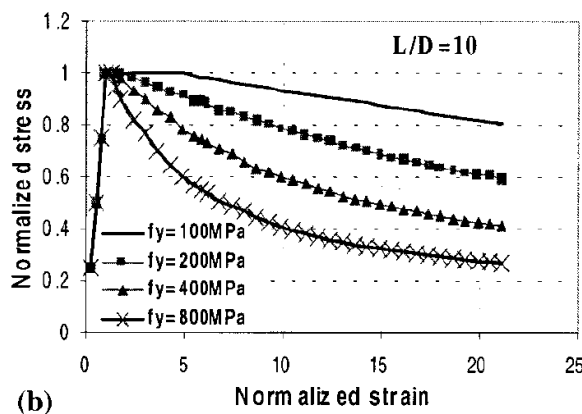
แบบจำลองที่สร้างขึ้นสอดคล้องตามผลการทดสอบของ Mander และคณะ. (1984) และ Monti และNutti (1992) ดังภาพที่ 2.17 และจากผลการศึกษาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะได้ว่า เหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดที่เท่ากันจะมีความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 2.18 และเหล็กเสริมที่มีกำลังที่จุดครากน้อยกว่าจะมีพฤติกรรมภายหลังจากการโค้งเดาะที่เหนียวกว่าดังภาพที่ 2.19 และจากการศึกษาความเกี่ยวเนื่องกันของตัวแปรทั้ง 2 ตัว คือ อัตราส่วนความชะลูด(L/d) และกำลังที่จุดคราก(f_y) พบว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับ $L/d(f_y)^{0.5}$ ดังภาพที่ 2.20 อีกทั้งได้สรุปว่าค่าอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริมเท่ากับ 5 หรือน้อยกว่าจะพฤติกรรมเหมือนเหล็กเสริมรับแรงดึงนั้นไม่เป็นจริงเสมอไป โดยขึ้นอยู่กับกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมด้วย



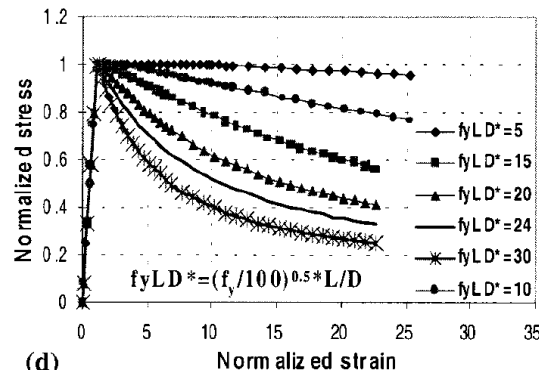
ภาพที่ 2.17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ห้ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับผลการทดสอบของ Mander และคณะ (1984) (ซ้าย) และ Monti และ Nuti (1992) (ขวา) (Dhakar และ Maekawa, 2002)



ภาพที่ 2.18 ผลของอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (Dhakar และ Maekawa, 2002)

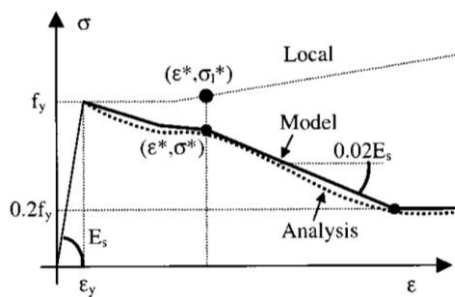


ภาพที่ 2.19 ผลของกำลังที่จุดคราก ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (Dhakar และ Maekawa, 2002)



ภาพที่ 2.20 ผลของอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริมและกำลังที่จุดคราก ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (Dhakar และMaekawa, 2002)

และเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดดังภาพที่ 2.21 และสมการที่ 2.14-2.17



ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Dhakar และMaekawa, 2002)

$$\frac{\sigma}{\sigma_l} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma^*}{\sigma_l}\right) \left(\frac{\epsilon - \epsilon_y}{\epsilon^* - \epsilon_y}\right) \quad ; \text{for } \epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon^* \quad (2.14)$$

$$\sigma \geq 0.2f_y; \sigma = \sigma^* - 0.02E_s(\epsilon - \epsilon^*) \quad ; \text{for } \epsilon > \epsilon^* \quad (2.15)$$

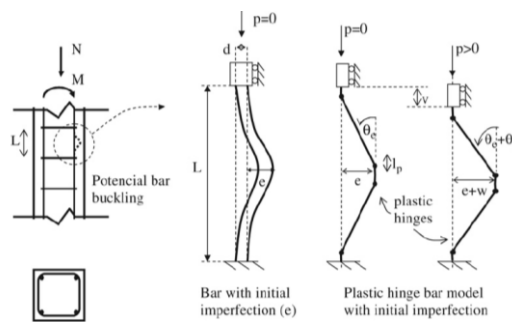
ซึ่งจุดเปลี่ยนความชัน (σ^*, ϵ^*) คำนวณได้จากสมการที่ 2.1.12 และ 2.1.13

$$\frac{\epsilon^*}{\epsilon_y} = 55 - 2.3\sqrt{\frac{f_y}{100} \frac{L}{D}} \quad ; \epsilon^* / \epsilon_y \geq 7 \quad (2.16)$$

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_l} = \alpha \left(1.1 - 0.016\sqrt{\frac{f_y}{100} \frac{L}{D}}\right) \quad ; \sigma^* \geq 0.2f_y \quad (2.17)$$

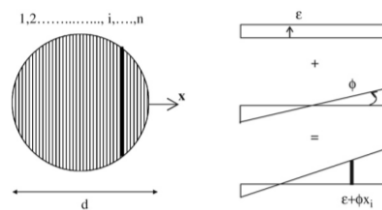
โดย $\alpha = 1.00$ เมื่อไม่พิจารณาของการโค้งเดาะ, $\alpha = 0.75$ ถ้าพิจารณาผลเนื่องจากการโค้งเดาะ

Massone และMoroder (2009) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดจากแบบจำลองไฟเบอร์ โดยพิจารณาผลของการเสียรูปเริ่มต้นของเหล็กเสริม ด้วยแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีจุดหมุนพลาสติกจำนวน 4 จุด ซึ่งมีการยึดปลายด้านล่าง ไม่ให้เคลื่อนที่ตามแนวราบและดึงรวมถึงการหมุน และปลายด้านบนด้านยอมให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะตามแนวแกน ซึ่งรับแรงกระทำตามแนวแกน โดยส่วนของการเสียรูปเริ่มต้นนั้น จำลองโดยการใส่แรงด้านข้างบริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริมดังภาพที่ 2.22 และมีลักษณะการแบ่งชิ้นส่วนย่อยตามแนวหน้าตัด ดังภาพที่ 2.23 โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลการทดสอบของ Bayrak และSheikh (2001)



ภาพที่ 2.22 การโก่งเดาะของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากผลของการเสียรูปเริ่มต้นของเหล็กเสริม

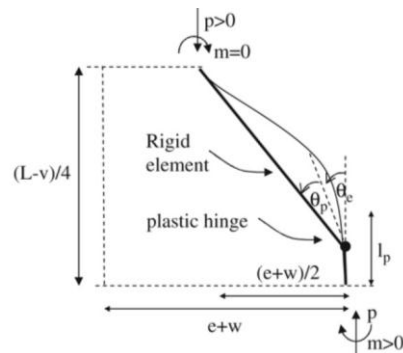
(Massone และMoroder, 2009)



ภาพที่ 2.23 การจำลองหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

(Massone และMoroder, 2009)

จากแบบจำลองของเหล็กเสริม ที่พิจารณาช่วงของการโก่งเดาะที่มีความยาว $\frac{1}{4}$ ของความยาวเหล็กเสริม ในภาพที่ 2.24 และจากหลักการสมดุลจะได้ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างกับการเสียรูปเชิงมุม และความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวตามแนวแกนกับการเสียรูปเชิงมุม ดังสมการที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงและความเครียดดังสมการที่ 2.23 โดยขั้นตอนการการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการเชิงตัวเลขแสดงดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.24 การวิเคราะห์แบบจำลองในช่วงความยาว 1/4 (Massone และ Moroder, 2009)

จากสมการสมดุล $\sum M = 0$ จะได้

$$m = p \frac{(e+w)}{2} \quad (2.18)$$

$$e+w = \frac{\sin(\theta_e + \theta_p)}{\cos \theta_e} \left(\frac{L}{2} - l_p \right) \quad (2.19)$$

$$\theta_e = \phi_e l_p = \tan^{-1} \left(\frac{e}{L/2 - l_p} \right) \quad (2.20)$$

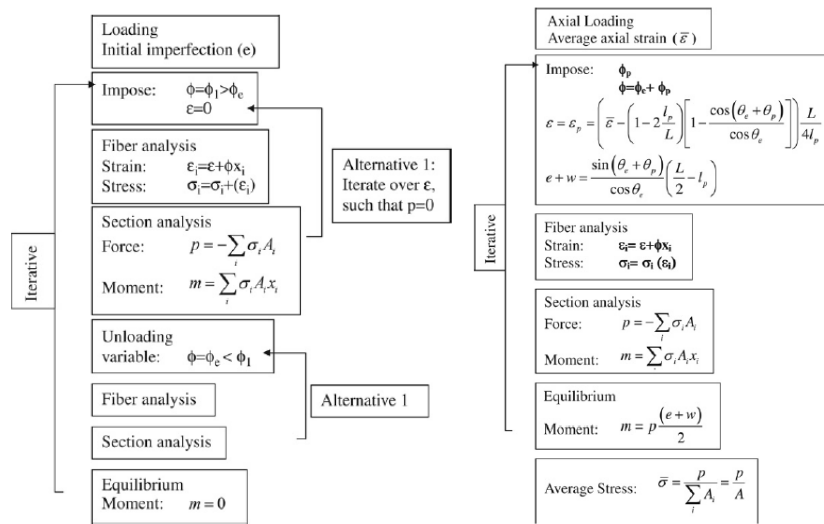
$$\theta_p = \phi_p l_p \quad (2.21)$$

$$v = v_\phi + v_\varepsilon = (L - 2l_p) \left[1 - \frac{\cos(\theta_e + \theta_p)}{\cos(\theta_e)} \right] + 4l_p \varepsilon_p \quad (2.22)$$

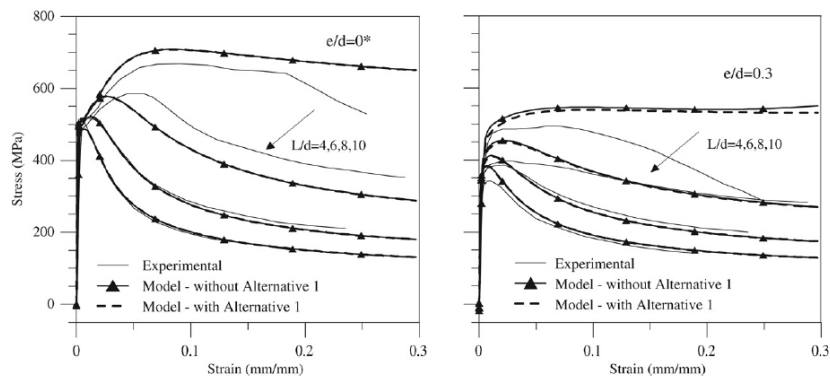
$$\bar{\sigma} = \frac{p}{\sum_i A_i} = \frac{p}{A}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{v}{L} \quad (2.23)$$

โดยที่	w	คือ การเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น บริเวณกึ่งกลางความยาวเหล็กเสริม
	θ_e	คือ มุมที่เกิดจากการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้นของเหล็กเสริม
	θ_p	คือ มุมที่เกิดจากการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำเพิ่มขึ้น
	ϕ_p	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมหรือความโค้งที่เกิดจากการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงกระทำเพิ่มขึ้น
	l_p	คือ ความยาวช่วงที่เกิดจุดหมุนพลาสติก

- v คือ ระยะเคลื่อนตัวตามแนวแกน
- ϵ_p คือ หน่วยแรงในช่วงที่เกิดจุดหมุนพลาสติก
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม



ภาพที่ 2.25 กระบวนการเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Massone และMoroder, 2009)



ภาพที่ 2.26 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ กับผลการทดสอบของ Bayrak และSheikh (2001) (Massone และMoroder, 2009)

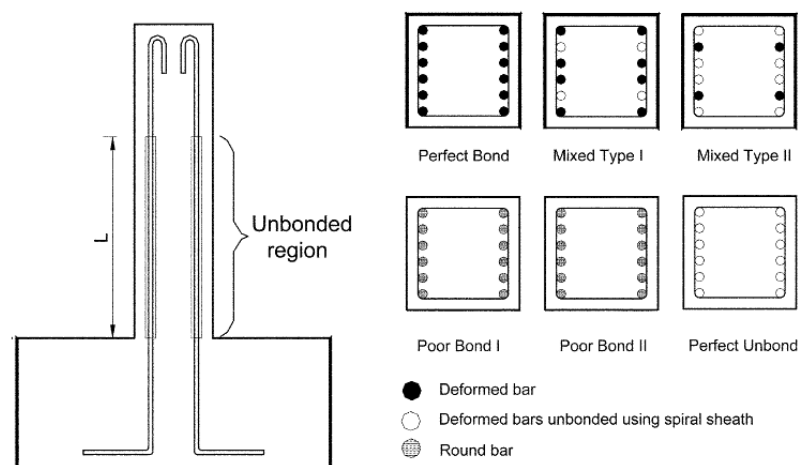
จากภาพที่ 2.26 เห็นได้ว่าความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมสอดคล้องกับผลการทดสอบในงานวิจัยในอดีต โดยมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนความขรุขระของเหล็กเสริมมากขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

Pandey และMutsuyoshi (2005) ได้ทำการทดสอบเสา ขนาด 0.3x0.3 เมตร ที่มีการแปรผันความยาวจำนวน 15 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวิภูจักร และแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ ซึ่งมีแรงกระทำตามแนวแกน 90 kN และตัวอย่างเสาทดสอบมีการออกแบบตามมาตรฐาน JSCE (2002) โดยพิจารณาผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมยาวกับคอนกรีต ซึ่งขึ้นกับประเภทของเหล็กเสริมตามยาว,ลักษณะการห่อหุ้มของเหล็กเสริม และความยาวของการห่อหุ้ม โดยรูปแบบของการยึดเหนี่ยวที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 2.2 และในภาพที่ 2.27 โดยรูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัดของเสาแสดงในภาพที่ 2.28 และคุณสมบัติของเสาแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 รูปแบบของการยึดเหนี่ยว (Pandey และMutsuyoshi,2005)

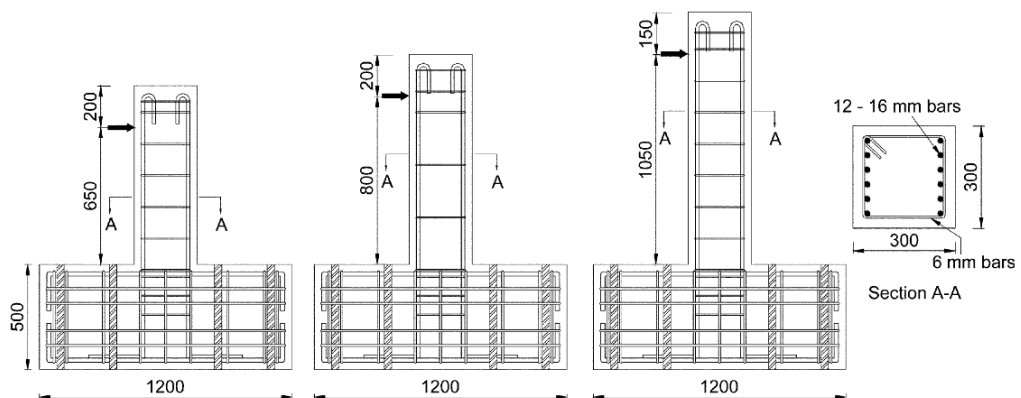
ประเภทของการยึดเหนี่ยว	ลักษณะของเหล็กเสริมตามยาว
Perfect bond	เหล็กข้ออ้อย
Mixed Type I	เหล็กข้ออ้อยที่มีการหุ้มด้วยปลอกพลาสติกจำนวน 4 เส้น
Mixed Type II	เหล็กข้ออ้อยที่มีการหุ้มด้วยปลอกพลาสติกจำนวน 8 เส้น
Poor Bond I	เหล็กกลม
Poor Bond II	เหล็กกลมที่มีการเคลือบด้วยจารบี
Perfect unbond	เหล็กข้ออ้อยที่มีการหุ้มด้วยปลอกพลาสติกทุกเส้น



ภาพที่ 2.27 รูปแบบของการยึดเหนี่ยวที่พิจารณา (Pandey และMutsuyoshi, 2005)

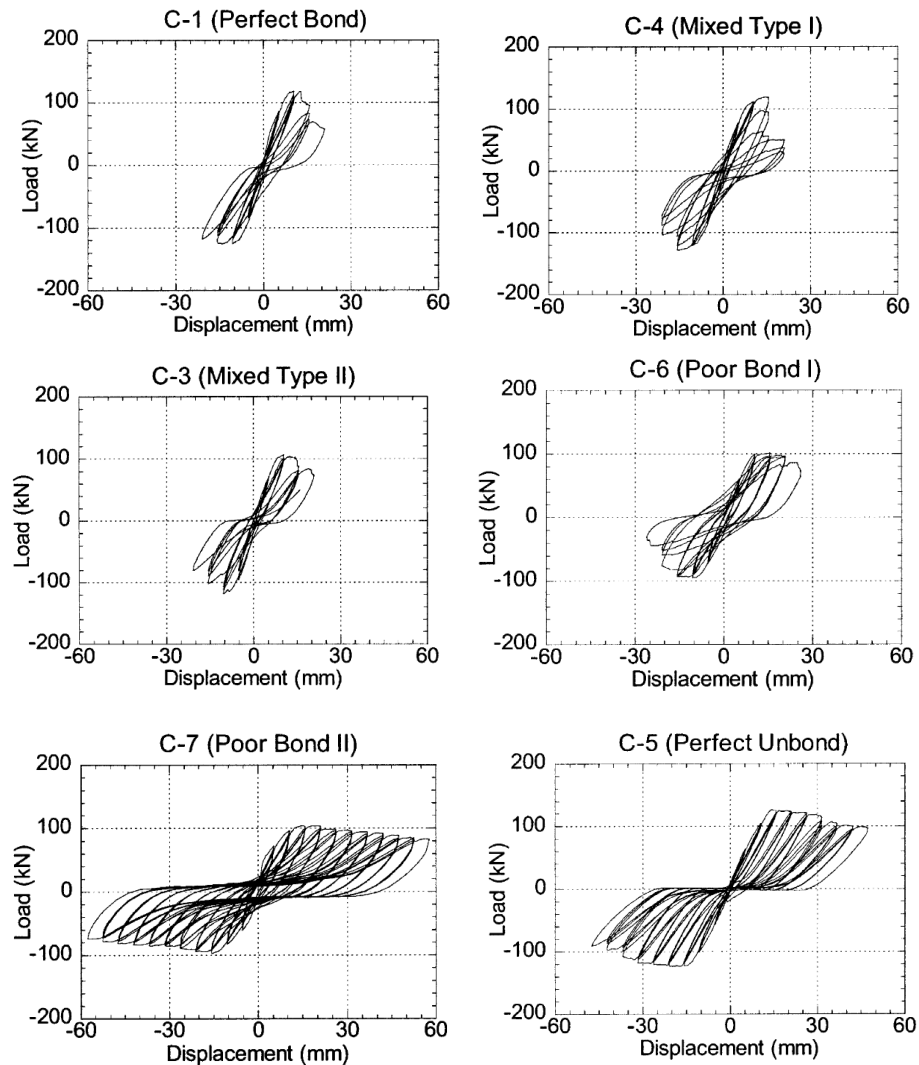
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเสา (Pandey และ Mutsuyoshi, 2005)

Specimen	a/d ratio	Bond condition	L (mm)	F _c ' (MPa)	Longitudinal bars			Lateral ties		
					As	f _{yl}	ρ _l	S (mm)	f _{yt}	ρ _t
A-1	2.5	Perfect bond	-	28.76	12-D16	380.1	0.22	D6@150	396.6	0.12
A-2		Perfect unbond	550	30.47	12-D16	380.1	0.22	D6@150	396.6	0.12
A-3		Poor Bond II	550	31.14	12-∅16	324.0	0.22	D6@150	396.6	0.12
A-4		Perfect bond	-	33.07	12-D16	380.1	0.22	D6@70	396.6	0.27
A-5		Perfect unbond	700	32.85	12-D16	380.1	0.22	D6@70	396.6	0.27
B-1	3.0	Perfect bond	-	32.54	12-D16	380.1	0.22	D6@250	396.6	0.08
B-2		Perfect unbond	700	33.69	12-D16	380.1	0.22	D6@250	396.6	0.08
B-3		Poor Bond II	700	34.12	12-∅16	324.0	0.22	D6@250	396.6	0.08
C-1	4.1	Perfect bond	-	36.40	12-D16	396.4	0.22	D6@150	426.7	0.12
C-2		Mixed Type I	400	39.70	12-D16	396.4	0.22	D6@150	426.7	0.12
C-3		Mixed Type II	400	43.40	12-D16	396.4	0.22	D6@150	426.7	0.12
C-4		Mixed Type I	800	42.59	12-D16	396.4	0.22	D6@150	426.7	0.12
C-5		Perfect unbond	800	41.38	12-D16	396.4	0.22	D6@150	426.7	0.12
C-6		Poor Bond I	-	39.21	12-∅16	298.6	0.22	D6@150	426.7	0.12
C-7		Poor Bond II	800	42.52	12-∅16	298.6	0.22	D6@150	426.7	0.12



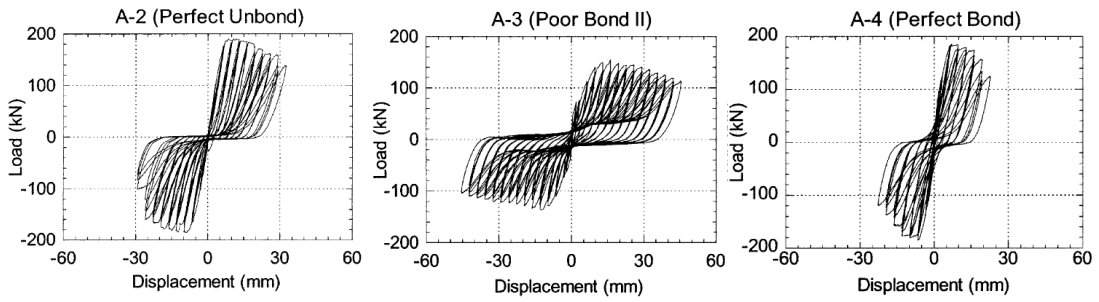
ภาพที่ 2.28 รูปแบบเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Pandey และ Mutsuyoshi, 2005)

ผลการทดสอบพบว่าเสาคอนกรีตในกรณีที่มีการยึดเหนี่ยวแบบ Perfect unbond และ Poor Bond II ทำให้ความเหนียวของเสามีค่ามากขึ้นกว่ากรณีที่เพิ่มเหล็กปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง และกรณีการยึดเหนี่ยวแบบอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 2.29 และ 2.30 อีกทั้งยังส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากเดิมซึ่งเป็นการวิบัติแบบเฉือนเป็นการวิบัติแบบดัด นอกจากนี้ความยาวของส่วนที่ปราศจากการยึดเหนี่ยวไม่มีผลต่อพฤติกรรมของเสา ดังภาพที่ 2.31 และในภาพที่ 2.32 แสดงรูปแบบการแตกร้าวของเสา พบว่าการแตกร้าวของเสาแบบ Perfect unbond และ Poor Bond II จำกัดอยู่ในช่วงรอยต่อระหว่างของฐานรากและเสาเท่านั้น

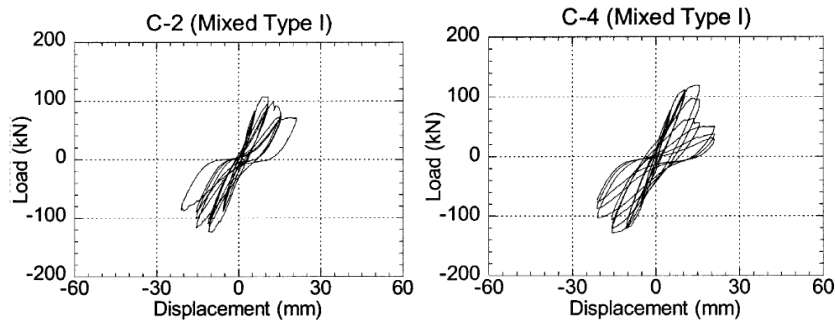


ภาพที่ 2.29 แสดงกรณีที่มีการยึดเหนี่ยวแบบต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสา

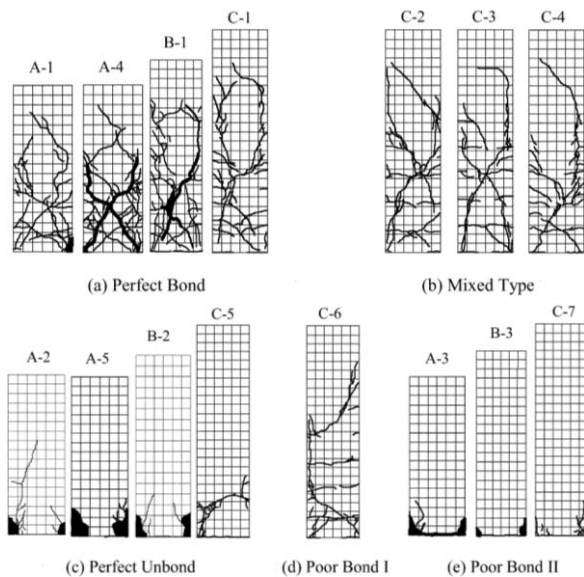
(Pandey และ Mutsuyoshi, 2005)



ภาพที่ 2.30 การยึดเหนี่ยวแบบ Perfect unbond และ Poor Bond II ที่ทำให้เสามีความเหนียวมากกว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก (Pandey และ Mutsuyoshi, 2005)

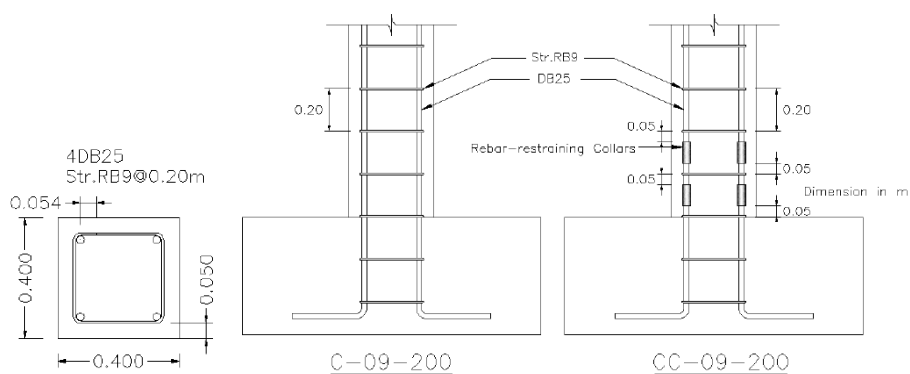


ภาพที่ 2.31 ความยาวของส่วนที่ปราศจากการยึดเหนี่ยวต่อพฤติกรรมของเสา (Pandey และ Mutsuyoshi, 2005)



ภาพที่ 2.32 รูปแบบการแตกร้าวของเสาที่มีการยึดเหนี่ยวแบบต่างๆ (Pandey และ Mutsuyoshi, 2005)

Archawin Sawaraj (2010) ได้ทำการทดสอบเสา ขนาด 0.4x0.4 เมตร สูง 2.15 เมตร จำนวน 2 ต้น ภายใต้แรงกระทำทางข้างแบบวัฏจักร และแรงกระทำตามแนวแกนคงที่ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมา เพื่อป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยพิจารณาผลของเสาที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งขนาดของเสาที่ใช้ในการทดสอบเป็นขนาดของเสาสะพานตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับสะพานชุมชนที่มีช่วงยาว 10 เมตร ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน โดยขนาดหน้าตัดและรูปแบบเสริมเหล็กแสดงในภาพที่ 2.33 และคุณสมบัติของเสาแสดงดังตารางที่ 2.4

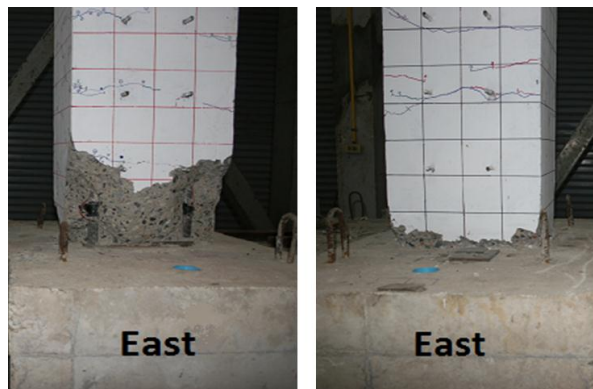


ภาพที่ 2.33 รูปแบบการเสริมเหล็กและขนาดหน้าตัด (Archawin Sawaraj, 2010)

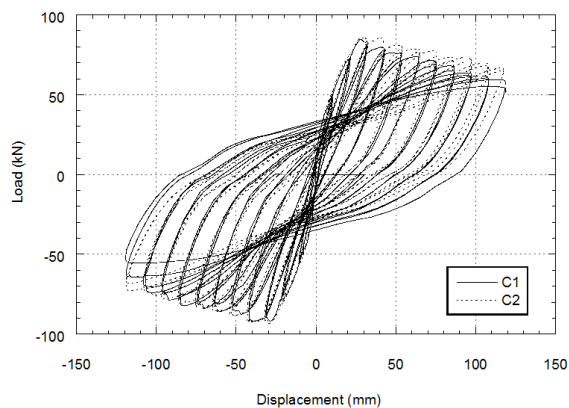
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเสา (Archawin Sawaraj, 2010)

Parameters of columns	C1	C2
Rebar-Restraining collars	No	Yes
Cross-section dimension (m)	0.40x0.40	
Effective height (m)	2.15	
Longitudinal reinforcement ratio	0.0123	
Volumetric ratio of transverse reinforcement	0.00424	
Cylinder compressive strength of concrete (MPa)	34.3	
Longitudinal reinforcement	4-DB 25 mm	
Transverse reinforcement	RB 9 mm @ 200 mm	
Axial force (kN)	314	
Axial force ratio, $P/f_c' A_g$ (%)	5.7	

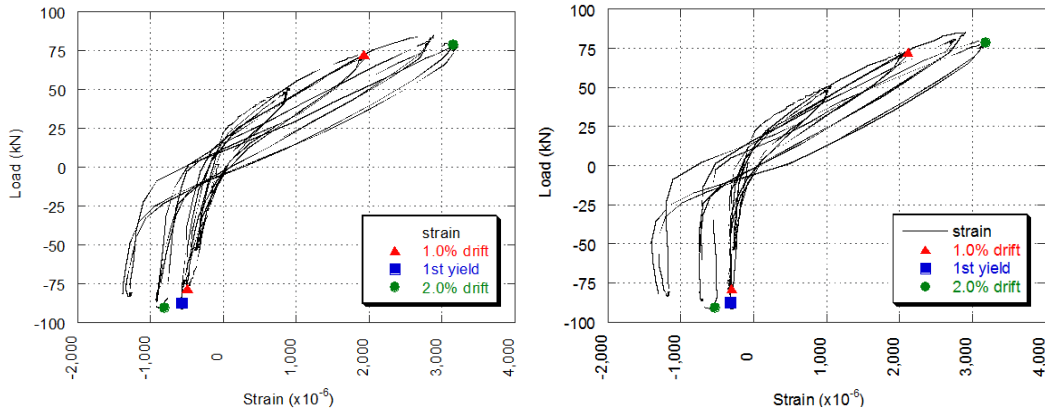
จากผลการทดสอบพบว่า เสาที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมมีการหลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณโคนเสาน้อยกว่าเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม และไม่พบการโก่งเดาะของเหล็กเสริมสำหรับเสาต้นที่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม ดังภาพที่ 2.34 และจากภาพที่ 2.35 ค่าความเหนียวของเสาที่มีค่าสูงขี้กว่าเสาที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม 27% อีกท้ังพบว่าเหล็กเสริมตามยาวมีค่าความเครียดในด้านการรับแรงดั่งที่สูงกว่าในด้านการรับแรงอัดเนื่องจากในด้านการรับแรงดั่ง มีเพียงเหล็กเสริมตามยาวเท่านั้นที่เป็นตัวรับแรง แต่ในด้านการรับแรงอัดมีคอนกรีตเป็นตัวช่วยในการรับแรง ดังแสดงในภาพที่ 2.36 นอกจากนี้จากภาพที่ 2.37 และ 2.38 แสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดของเหล็กตามขวางในด้านที่ขนานกับแรงกระทำมีค่าสูงขี้กว่าด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำ



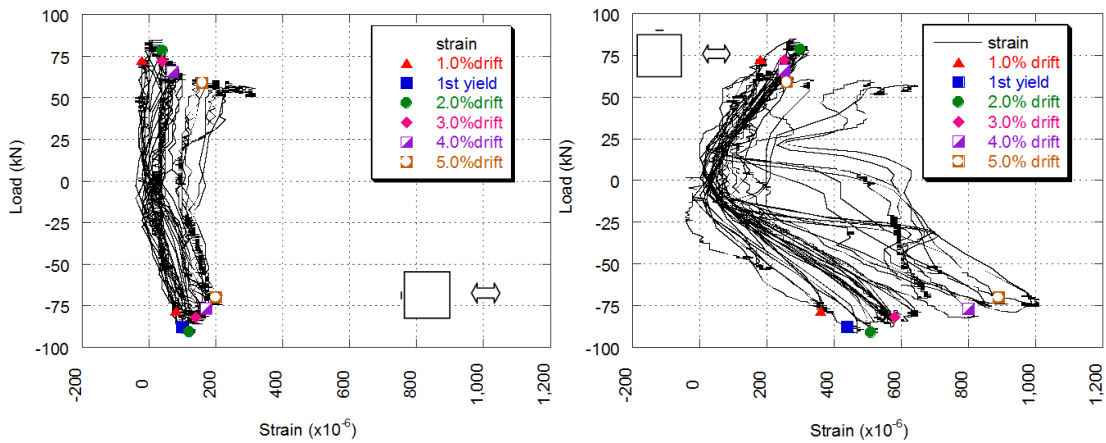
ภาพที่ 2.34 ความเสียหายบริเวณจุดหมุนพลาสติก ภายหลังกการทดสอบ C1(ซ้าย) ,C2(ขวา)
(Sawaroj, 2010)



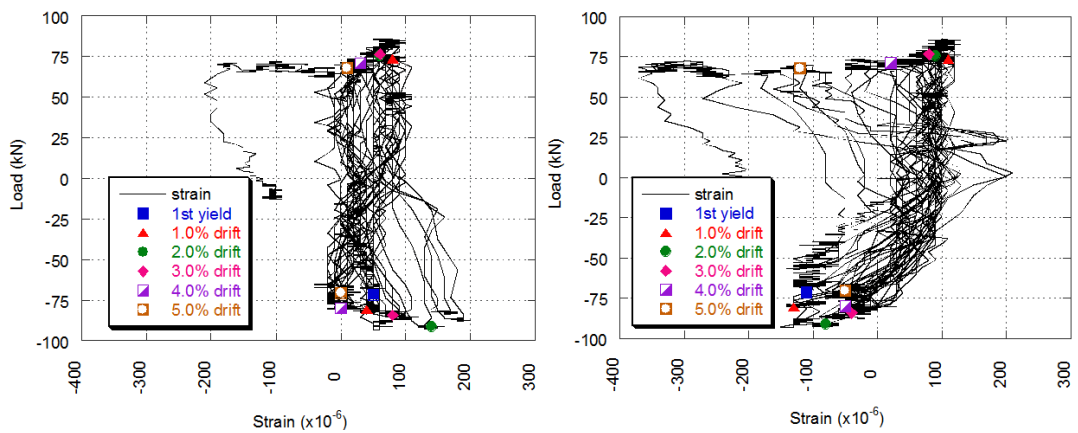
ภาพที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา
(Sawaroj, 2010)



ภาพที่ 2.36 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากฐาน ของเสา C1
ความเครียดที่ผิวนอก(ซ้าย) ความเครียดที่ผิวใน(ขวา) (Sawaraj, 2010)



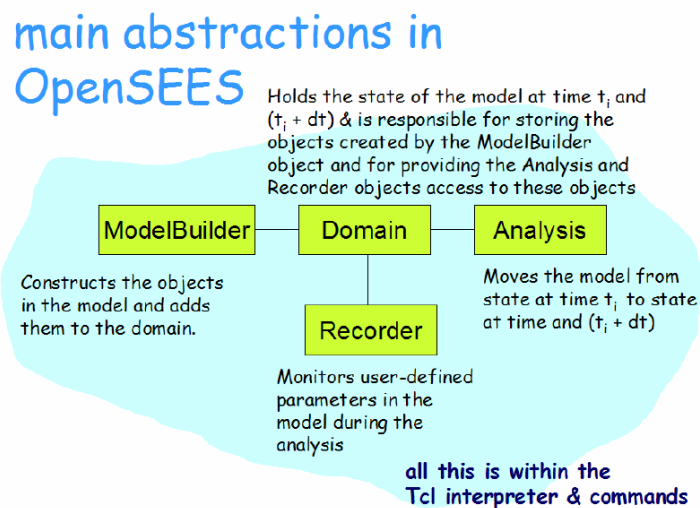
ภาพที่ 2.37 ความเครียดของเหล็กเสริมตามขวางของเสา C1 ด้านขนานกับแรงกระทำ(ซ้าย)
ด้านตั้งฉากกับแรงกระทำ(ขวา) (Sawaraj, 2010)



ภาพที่ 2.38 ความเครียดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมของเสา C2 ด้านขนานกับแรงกระทำ
ความเครียดที่ผิวนอก(ซ้าย) ความเครียดที่ผิวใน(ขวา) (Sawaraj, 2010)

2.3 โปรแกรมOpensees

Opensees(Open System for Earthquake Engineering Simulation) เป็นโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียเบิร์กลีย์ เพื่อใช้สำหรับงานวิจัย ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหว โดยสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้ดี ทั้งการวิเคราะห์ปัญหา 2 มิติและ 3 มิติ และสามารถเลือกใช้กระบวนการเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ปัญหาได้ โดยสามารถวิเคราะห์ปัญหาผ่านชุดคำสั่งของโปรแกรมที่มีพื้นฐานมาจากภาษา Tcl/Tk และแสดงผลการวิเคราะห์แบบไฟล์ข้อความ



ภาพที่ 2.39 กระบวนการวิเคราะห์และแก้ปัญหาของโปรแกรม OpenSees

(Mazzoni และคณะ, 2007)

กระบวนการภายในโปรแกรมแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ดังภาพที่ 2.39 ได้แก่ กลุ่มที่ 1 Model builder เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองรวมถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบ, กลุ่มที่ 2 Domain สถานะของแบบจำลองที่เวลาใดๆ, กลุ่มที่ 3 Recorder บันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ และ กลุ่มที่ 4 Analysis เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของโครงสร้างจากในช่วงเวลา t ถึง $t+dt$

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิงเส้น เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้สมมุติฐานที่ว่า คุณสมบัติวัสดุเป็นแบบเชิงเส้น และโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวน้อย โดยที่การเคลื่อนที่เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับแรงกระทำ ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นจะใช้ได้กับการวิเคราะห์โครงสร้างส่วนใหญ่ แต่การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นก็มีความสำคัญสำหรับโครงสร้างที่มีการเคลื่อนตัวมาก หรือมีหน่วยแรงมาก เช่น สายเคเบิลในสะพาน, โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น

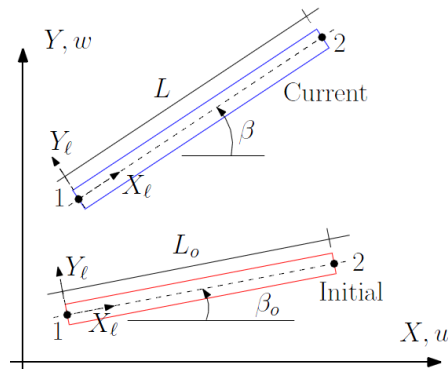
การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นแบ่งเป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ความไม่เชิงเส้นของคุณสมบัติวัสดุ เมื่อโครงสร้างรับแรงมากส่งผลให้ค่าหน่วยแรงอยู่ในความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดแบบไม่เชิงเส้น, ความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต เมื่อโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวมาก ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และความเครียดไม่เป็นเชิงเส้น และเงื่อนไขขอบเขตแบบไม่เชิงเส้น เช่นโครงสร้างที่สัมผัสกับพื้นดิน

ซึ่งในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น โดยคำนึงถึงความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตด้วยวิธีโคโรเทชันนอล (Co-rotational) และความไม่เชิงเส้นของวัสดุด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

2.4.1 การวิเคราะห์โดยคำนึงถึงความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต ด้วยวิธีโคโรเทชันนอล (Co-rotational)

Yaw, 2009 กล่าวถึงการพิสูจน์ค่าสติเฟนสของโครงสร้างคานเสา ด้วยวิธีโคโรเทชันนอล ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์หนึ่งที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่มีการเสียรูปมาก โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแกนการเสียรูปของชิ้นส่วนโครงสร้างรอง (local axis) กับ แกนของโครงสร้างหลัก (Global axis) โดยในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการหาค่าสติเฟนสของชิ้นส่วนโครงสร้างคาน-เสา ที่มีค่าสติเฟนสในระดับหน้าตัดคงที่

2.4.1.1 ความเครียดตามแนวแกน



ภาพที่ 2.40 ลักษณะโครงสร้างช่วงเริ่มต้น และโครงสร้างปัจจุบัน ที่ไม่พิจารณาผลของการดัด

(Yaw, 2009)

พิจารณาชิ้นส่วนคาน ดังภาพที่ 2.40 โดยค่าพิกัดเริ่มต้นที่จุด 1 และจุด 2 เท่ากับ (X_1, Y_1) และ (X_2, Y_2) ตามลำดับ ซึ่งค่าความยาวเริ่มต้น และความยาวปัจจุบัน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25

$$L_0 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (2.24)$$

$$L = \sqrt{((X_2 + u_2) - (X_1 + u_1))^2 + ((Y_2 + w_2) - (Y_1 + w_1))^2} \quad (2.25)$$

และค่าการเคลื่อนตัวตามแนวแกน และแรงตามแนวแกน ดังสมการที่ 2.26 และ 2.27

$$u_1 = L - L_0 = \frac{L^2 - L_0^2}{L + L_0} \quad (2.26)$$

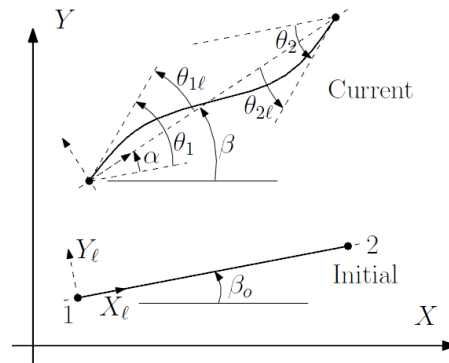
$$N = \frac{EAu_1}{L_0} \quad (2.27)$$

2.4.1.2 การเสียรูปจากการดัด

จากภาพที่ 2.40 มุมหมุนของชิ้นส่วนคานคำนวณตามสมการที่ 2.28

$$\cos \beta = \frac{(X_2 + u_2) - (X_1 + u_1)}{L}, \sin \beta = \frac{(Y_2 + w_2) - (Y_1 + w_1)}{L} \quad (2.28)$$

พิจารณาชิ้นส่วนคานที่พิจารณาผลของการดัด ดังภาพที่ 2.41



ภาพที่ 2.41 ลักษณะโครงสร้างช่วงเริ่มต้น และโครงสร้างปัจจุบัน ที่พิจารณาผลของการดัด

(Yaw, 2009)

จากภาพที่ 2.41 มุมหมุนที่จุดปลาย (θ_{1l}, θ_{2l}), มุมระหว่างแกน X และแกนของชิ้นส่วนเริ่มต้น (β_0) และ มุมระหว่างแกน X และแกนของชิ้นส่วนปัจจุบัน (β) คำนวณดังสมการที่ 2.29-2.31

$$\theta_{1l} = \theta_1 + \beta_0 - \beta, \theta_{2l} = \theta_2 + \beta_0 - \beta \quad (2.29)$$

$$\beta_0 = \arctan\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right) \quad (2.30)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{(Y_2 + w_2) - (Y_1 + w_1)}{(X_2 + u_2) - (X_1 + u_1)}\right) \quad (2.31)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.30 และ 2.31 สามารถใช้ได้เมื่อค่า $|\beta| < \pi/2$ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงข้อกำหนัดนี้จึงพิจารณาสมการที่ 2.32 – 2.35

$$\sin \theta_{1l} = \sin(\theta_1 + \beta_0 - \beta) = \sin(\beta_1 - \beta) = \sin \beta_1 \cos \beta - \cos \beta_1 \sin \beta \quad (2.32)$$

$$\cos \theta_{1l} = \cos(\theta_1 + \beta_0 - \beta) = \cos(\beta_1 - \beta) = \cos \beta_1 \cos \beta + \sin \beta_1 \sin \beta \quad (2.33)$$

โดยที่ $\beta_1 = \theta_1 + \beta_0$

และจากสมการที่ 2.32 และ 2.33 จะได้

$$\theta_{1l} = \arctan\left(\frac{\sin \beta_1 \cos \beta - \cos \beta_1 \sin \beta}{\cos \beta_1 \cos \beta + \sin \beta_1 \sin \beta}\right) \quad (2.34)$$

$$\theta_{2l} = \arctan\left(\frac{\sin \beta_2 \cos \beta - \cos \beta_2 \sin \beta}{\cos \beta_2 \cos \beta + \sin \beta_2 \sin \beta}\right) \quad (2.35)$$

โดยที่ $\beta_2 = \theta_2 + \beta_0$

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และการหมุนที่จุดปลาย
ดังสมการที่ 2.36

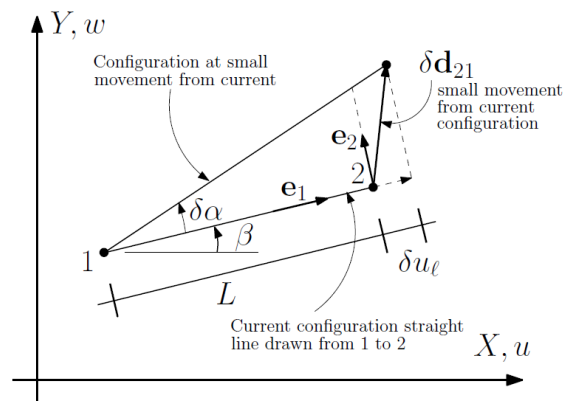
$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \frac{2EI}{L_0} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{1l} \\ \theta_{2l} \end{Bmatrix} \quad (2.36)$$

เนื่องจากไม่มีการเสียรูปทางข้างของตามแนวแกนโครงสร้าง ดังนั้นสามารถคำนวณแรง
เฉือนโดยใช้หลักสถิติอย่างง่าย ดังสมการที่ 2.37

$$V_1 = \frac{M_1 + M_2}{L} \quad (2.37)$$

$$V_2 = -V_1 \quad (2.38)$$

2.4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าในแกนอ้างอิงหลักและค่าในแกนอ้างอิงรอง



ภาพที่ 2.42 โครงสร้างที่มีการเคลื่อนตัวน้อยจากโครงสร้างปัจจุบัน (Yaw, 2009)

พิจารณาโครงสร้างที่มีการเคลื่อนตัวน้อย ดังภาพที่ 2.42 โดยใช้ผลคูณสเกลาร์ เพื่อคำนวณหาการเสียรูปตามแนวแกน และการหมุนตามแนวแกนรอง โดยสามารถคำนวณการเสียรูปตามแนวแกนได้ดังสมการที่ 2.39

$$\delta u_1 = e_1^T \delta d_{21} = \begin{Bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{Bmatrix}^T \delta d_{21} = \begin{Bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} \delta u_2 - \delta u_1 \\ \delta w_2 - \delta w_1 \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \delta u_1 &= \cos \beta \delta u_2 - \cos \beta \delta u_1 + \sin \beta \delta w_2 - \sin \beta \delta w_1 \\ &= -\cos \beta \delta u_1 - \sin \beta \delta w_1 + 0 \delta \theta_1 + \cos \beta \delta u_2 + \sin \beta \delta w_2 + 0 \delta \theta_2 \\ &= [-\cos \beta \quad -\sin \beta \quad 0 \quad \cos \beta \quad \sin \beta \quad 0] \delta p \\ &= r^T \delta p \end{aligned} \quad (2.40)$$

โดยที่ $p^T = [u_1 \quad w_1 \quad \theta_1 \quad u_2 \quad w_2 \quad \theta_2]$

โดยมุมระหว่างก่อนการเสียรูปกับหลังการเสียรูป ดังสมการที่ 2.41

$$\delta \alpha = \frac{1}{L} e_2^T \delta d_{21} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \delta \alpha &= \frac{1}{L} \begin{Bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} \delta u_2 - \delta u_1 \\ \delta w_2 - \delta w_1 \end{Bmatrix} \\ &= \frac{1}{L} (\sin \beta \delta u_1 - \sin \beta \delta u_2 - \cos \beta \delta w_1 + \cos \beta \delta w_2) \\ &= \frac{1}{L} [\sin \beta \quad -\cos \beta \quad 0 \quad -\sin \beta \quad \cos \beta \quad 0] \delta p \\ &= \frac{1}{L} Z^T \delta p \end{aligned} \quad (2.42)$$

จากสมการที่ 2.29 และ 2.42 โดยพิจารณา $\delta \beta_0 = 0$ และ $\delta \beta = \delta \alpha$ สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าการหมุนตามแนวแกนรอง ($\delta \theta_1$) ตามสมการที่ 2.43

$$\delta\theta_l = \delta \begin{Bmatrix} \theta_1 + \beta_0 - \beta \\ \theta_2 + \beta_0 - \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta\theta_1 + \delta\beta_0 - \delta\beta \\ \delta\theta_2 + \delta\beta_0 - \delta\beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta\theta_1 - \delta\alpha \\ \delta\theta_2 - \delta\alpha \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

แทนค่าสมการที่ 2.42 ในสมการที่ 2.43 จะได้

$$\delta\theta_l = \begin{Bmatrix} [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \delta p - \frac{1}{L} Z^T \delta p \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \delta p - \frac{1}{L} Z^T \delta p \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\delta\theta_l = \begin{bmatrix} [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} Z^T \\ Z^T \end{bmatrix} \delta p = A^T \delta p \quad (2.45)$$

และจากสมการที่ 2.40 และ 2.45 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าในแกนอ้างอิงหลักและค่าในแกนอ้างอิงรอง ดังสมการที่ 2.46

$$\delta p_l = \begin{Bmatrix} \delta u_l \\ \delta\theta_{1l} \\ \delta\theta_{2l} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r^T \\ A^T \end{bmatrix} \delta p = B \delta p \quad (2.46)$$

โดยที่

$$B = \begin{bmatrix} -\cos \beta & -\sin \beta & 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ \frac{-\sin \beta}{L} & \frac{\cos \beta}{L} & 1 & \frac{\sin \beta}{L} & \frac{-\cos \beta}{L} & 0 \\ \frac{-\sin \beta}{L} & \frac{\cos \beta}{L} & 0 & \frac{\sin \beta}{L} & \frac{-\cos \beta}{L} & 1 \end{bmatrix}$$

จากหลักการงานเสมือน (Virtual Work) พลังงานภายนอกเท่ากับพลังงานภายใน

$$\delta p_v^T q_i = N \delta u_{lv} + M_1 \delta\theta_{1lv} + M_2 \delta\theta_{2lv} = \delta p_h^T q_{li} \quad (2.47)$$

โดยที่ $q_{li}^T = [N \ M_1 \ M_2]$

$$\delta p_v^T q_i = (B \delta p_v)^T q_{li} = \delta p_v^T B^T q_{li} \quad (2.48)$$

$$q_i = B^T q_{li} \quad (2.49)$$

2.4.1.4 ค่าสติฟเนส

พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสมการที่ 2.49 จะได้

$$\begin{aligned}\delta q_i &= B^T \delta q_{ii} + \delta B^T \delta q_{ii} = B^T \delta q_{ii} + N\delta B_1 + M_1\delta B_2 + M_2\delta B_3 \\ &= k_{i1}\delta p + k_{i\sigma}\delta p\end{aligned}\quad (2.50)$$

โดยที่ B_1, B_2, B_3 เป็นค่าในเมตริกซ์ B^T หลัก 1,2,3 ตามลำดับ โดยพจน์ $B^T \delta q_{ii}$ เป็นพจน์สติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติวัสดุ และพจน์ที่ $N\delta B_1 + M_1\delta B_2 + M_2\delta B_3$ เป็นพจน์สติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปทางเรขาคณิต

สติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติวัสดุ ($k_{i1}\delta p$)

$$\delta q_{ii} = \begin{bmatrix} \delta N \\ \delta M_1 \\ \delta M_2 \end{bmatrix} = \frac{EA}{L_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 4r^2 & 2r^2 \\ 0 & 2r^2 & 4r^2 \end{bmatrix} \delta p_i = C_i \delta p_i \quad (2.51)$$

โดยที่ $r = \sqrt{I/A}$

จากสมการที่ 2.46, 2.50 และ 2.51 จะได้สติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติวัสดุ ดังสมการที่ 2.53

$$B^T \delta q_{ii} = B^T C_i \delta p_i = B^T C_i B \delta p = k_{i1} \delta p \quad (2.52)$$

$$k_{i1} = B^T C_i B \quad (2.53)$$

สติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปทางเรขาคณิต ($k_{i\sigma}\delta p$)

พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า B^T ในหลักที่ 1

$$\begin{aligned}\delta B_1 &= \delta r = \delta[-\cos \beta \quad -\sin \beta \quad 0 \quad \cos \beta \quad \sin \beta \quad 0]^T \\ &= [\sin \beta \quad -\cos \beta \quad 0 \quad \sin \beta \quad \cos \beta \quad 0]^T \delta \beta = z \delta \beta\end{aligned}\quad (2.54)$$

$$\delta B_1 = \frac{1}{L} z z^T \delta p \quad (2.55)$$

พิจารณาอัตราค่าการเปลี่ยนแปลงค่า B^T ในหลักที่ 2

$$\delta B_2 = \delta \left(-\frac{1}{L} z \right) = \delta \left(-\frac{1}{L} \right) z + \left(-\frac{1}{L} \right) \delta z \quad (2.56)$$

จากสมการที่ 2.42 และ 2.43 จะสามารถหาค่า δz ได้ดังสมการที่ 2.57

$$\delta z = \delta \begin{Bmatrix} \sin \beta \\ -\cos \beta \\ 0 \\ -\sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \\ -\cos \beta \\ -\sin \beta \\ 0 \end{Bmatrix} \delta \alpha = -r \delta \alpha = -\frac{1}{L^2} r z^T \delta p \quad (2.57)$$

จากสมการที่ 2.40 และ $L = L_0 + u_l$ จะได้ $\delta \left(-\frac{1}{L} \right)$ ดังสมการที่ 2.58

$$\delta \left(-\frac{1}{L} \right) = (-1) \delta (L^{-1}) = (-1) (-L^{-2}) \delta u_l = \frac{\delta u_l}{L^2} = \frac{1}{L^2} r^T \delta p \quad (2.58)$$

จากสมการที่ 2.56 - 2.58 จะได้

$$\delta B_2 = \frac{1}{L^2} z r^T \delta p + \frac{1}{L^2} r z^T \delta p = \frac{1}{L^2} (r z^T + z r^T) \delta p \quad (2.59)$$

หาค่า B_3 ด้วยหลักการเดียวกับการหาค่า δB_2 และจากสมการ 2.50, 2.55 และ 2.58 จะได้
สติฟเนสที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปทางเรขาคณิต ดังสมการที่ 2.60

$$k_{i\sigma} = \frac{N}{L} z z^T + \frac{M_1 + M_2}{L^2} (r z^T + z r^T) \quad (2.60)$$

จากสมการ 2.50, 2.53 และ 2.60 จะคำนวณค่าสติฟเนสได้ ดังสมการที่ 2.61

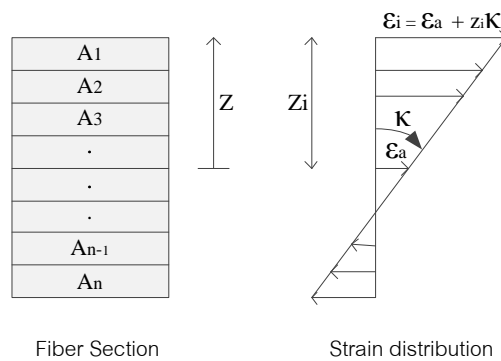
$$k_i = B^T C_i B + \frac{N}{L} z z^T + \frac{M_1 + M_2}{L^2} (r z^T + z r^T) \quad (2.61)$$

2.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองโดยคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นทางคุณสมบัติวัสดุ ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

เมื่อโครงสร้างรับแรงจนกระทั่งบางบริเวณของหน้าตัดมีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ส่งผลให้ค่าสติเฟนสของหน้าตัดไม่คงที่ การวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุอาจส่งผลให้ผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้องตามพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริง วิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

แบบจำลองไฟเบอร์ส่งผลต่อการหาค่าสติเฟนสในระดับหน้าตัด โดยการแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัดออกเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งมีความยาวเท่ากับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่พิจารณา ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนย่อย (fiber) สามารถกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ

จากการเปลี่ยนแปลงความยาวตามแนวแกน (ϵ_u) ,การเปลี่ยนแปลงมุมของชิ้นส่วน หรือค่าความโค้ง (κ) และระยะห่างจากเส้นแกนกลาง (z_i) ในภาพที่ 2.43 จะคำนวณค่าความเครียดของชิ้นส่วนย่อยได้ดังสมการที่ 2.62



ภาพที่ 2.43 หน้าตัดไฟเบอร์ และการกระจายความเครียดบนหน้าตัด

$$\epsilon_i = \epsilon_a + z_i K \tag{2.62}$$

โดยแรงตามแนวแกน และโมเมนต์ของหน้าตัดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.63 และ 2.64

$$N = \int \sigma dA \approx \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i \quad (2.63)$$

$$M = \int \sigma \cdot z dA \approx \sum_{i=1}^n \sigma_i z_i A_i \quad (2.64)$$

โดยที่ $\sigma_i = \sigma(\varepsilon_i) = \sigma(\varepsilon_a + z_i \kappa)$

และสามารถคำนวณค่าสตีเฟนของหน้าตัดได้จากสมการ 2.65

$$k = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial \varepsilon_a} & \frac{\partial N}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial M}{\partial \varepsilon_a} & \frac{\partial M}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\partial N}{\partial \varepsilon_a} = \int \frac{d\sigma}{d\varepsilon_a} dA \approx \sum_{i=1}^n \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \varepsilon_a} A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \kappa} = \int \frac{d\sigma}{d\kappa} dA \approx \sum_{i=1}^n \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \kappa} A_i = \sum_{i=1}^n E_i z_i A_i \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \varepsilon_a} = \int \frac{d\sigma}{d\varepsilon_a} z dA \approx \sum_{i=1}^n \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \varepsilon_a} z_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \kappa} = \int \frac{d\sigma}{d\kappa} z dA \approx \sum_{i=1}^n \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \kappa} z_i A_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2 \quad (2.69)$$

ประยุกต์ใช้หลักการของงานสมมุติ (principle of virtual displacements) และเทคนิคการอินทิเกรตแบบ Gauss Quadrature จะสามารถหาค่าสตีเฟนของชิ้นส่วนได้จากสมการที่ 2.70

$$K = \int B^T(x) k(x) B(x) dx \approx \sum_{i=1}^n B^T(x_i) k(x_i) B(x_i) w_i \quad (2.70)$$

โดย B คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันการประมาณค่าภายในเอลิเมนต์ (shape function)

บทที่ 3

แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกน

ศึกษาการสร้างแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัด และแรงกระทำแบบวิถัจกรตามแนวแกน ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม OpenSees ซึ่งมีการคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ และความไม่เป็นเชิงเส้นทางเรขาคณิตด้วยวิธี Co-rotational ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยอ้างอิงคุณสมบัติวัสดุตามการทดสอบเหล็ก No.10 ของ Bae และคณะ(2005) สำหรับเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน และคุณสมบัติวัสดุตามการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) สำหรับเหล็กเสริมรับแรงกระทำแบบวิถัจกรตามแนวแกน

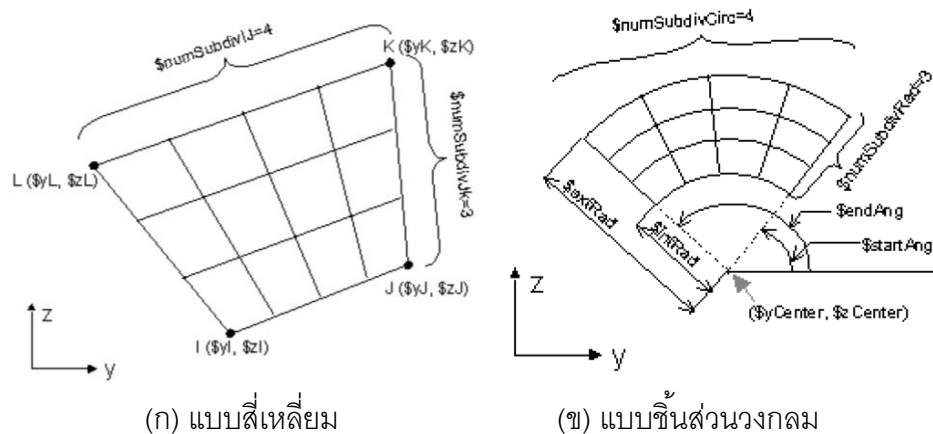
3.1 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัด

แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัด ได้อ้างอิงขนาดเหล็กเสริม, ความยาวเหล็กเสริม และค่าคุณสมบัติวัสดุ จากการทดสอบเหล็ก No.10(32.3 มิลลิเมตร) ของ Bae และคณะ(2005)

3.1.1 การแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัดเหล็กเสริม

การแบ่งหน้าตัดชิ้นส่วนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การแบ่งแบบชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม (quadrilateral patch) และชิ้นส่วนวงกลม (circular patch) โดยหน้าตัดแบบชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม ต้องกำหนดค่าพิกัดที่จุดมุมทั้งสี่ของสี่เหลี่ยม (i,j,k,l) โดยให้ลำดับของพิกัดทวนเข็มนาฬิกา และกำหนดจำนวนชิ้นส่วนย่อยตามแนว i,j (number of subdivisions (fibers) in the IJ direction) และแนว j,k (number of subdivisions (fibers) in the JK direction) ดังภาพที่ 3.1 และสำหรับหน้าตัดแบบชิ้นส่วนวงกลม ต้องกำหนดจำนวนชิ้นส่วนย่อยตามแนวเส้นรอบวง (number of subdivisions (fibers) in the circumferential direction) ,จำนวนชิ้นส่วนย่อยตามแนวรัศมี (number of subdivisions (fibers) in the radial direction) ,ค่าพิกัดจุดศูนย์กลางตามแนวแกน y

และ z ค่ารัศมีภายใน(internal radius) ,รัศมีภายนอก(external radius) ,มุมเริ่มต้น(starting angle) ,มุมสิ้นสุด (ending angle) ดังภาพที่ 3.1

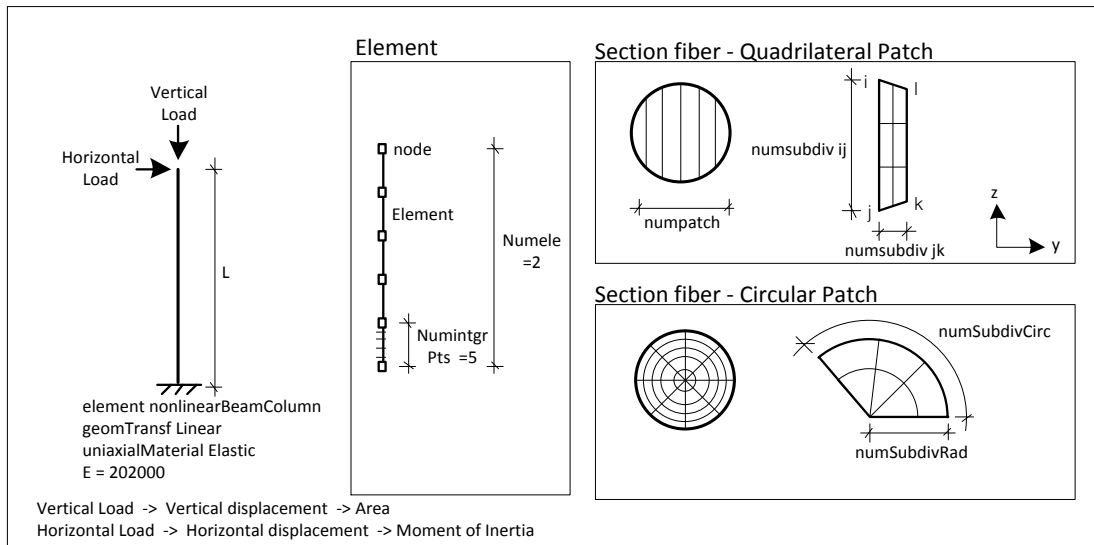


ภาพที่ 3.1 รายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัด (Mazzoni และคณะ, 2007)

ศึกษาการแบ่งจำนวนชิ้นส่วนที่เหมาะสม โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาจากค่าความถูกต้องของคุณสมบัติหน้าตัด ซึ่งได้แก่พื้นที่หน้าตัดและโมเมนต์เฉื่อย(Moment of inertia)ของหน้าตัด และส่วนที่ 2 ศึกษาผลการแบ่งหน้าตัดที่มีผลต่อค่าหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน

3.1.1.1 ผลของการแบ่งชิ้นส่วนที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติของหน้าตัด

วิเคราะห์แบบจำลองคานายื่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 203.2 มิลลิเมตร ที่รับแรงตามแนวแกนและแรงกระทำด้านข้าง 100 นิวตัน ดังภาพที่ 3.2 เพื่อหาค่าพื้นที่หน้าตัดและโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด จากการเคลื่อนตัวของแบบจำลองคานายื่นซึ่งมีแรงกระทำตามแนวตั้ง และแนวราบ โดยการแบ่งชิ้นส่วนและผลการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 3.1 พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับค่าคุณสมบัติหน้าตัดที่ได้จากการคำนวณจากค่าพิกัดของชิ้นส่วนย่อย สำหรับกรณีของการแบ่งชิ้นส่วนแบบสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิ้นส่วนที่มีต่อคุณสมบัติของหน้าตัด

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัด และผลการวิเคราะห์

Quadrilateral Patch							
No.	Number of patch	Number of subdivisions (ij direction)	Number of subdivisions (jk direction)	Calculate from OpenSees		Calculate from coordinate	
				Error of area	Error of inertia	Error of area	Error of inertia
1	10	1	1	3.33%	11.30%	3.33%	10.04%
2	10	10	1	3.33%	11.30%	-	-
3	10	1	10	3.33%	10.06%	-	-
4	10	10	10	3.33%	10.06%	-	-
5	20	1	1	1.18%	4.27%	1.18%	3.98%
6	30	1	1	0.64%	2.38%	0.64%	2.23%
7	40	1	1	0.42%	1.57%	0.42%	1.48%

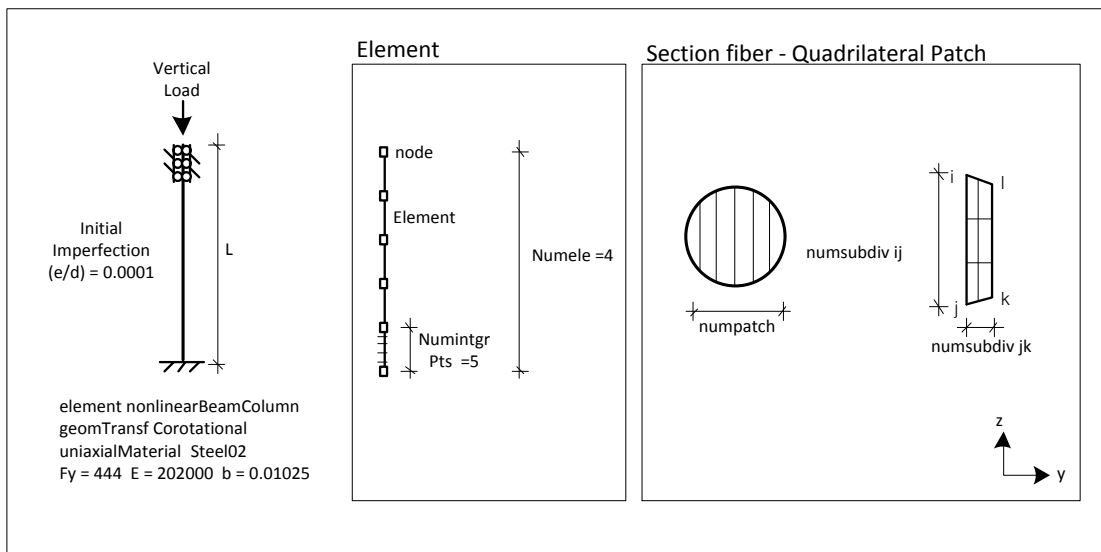
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัด และผลการวิเคราะห์ (ต่อ)

Circular Patch				
No.	Number of subdivisions (circumferential direction)	Number of subdivisions (radial direction)	Calculate from OpenSees	
			error of area	error of inertia
8	5	5	24.32%	50.79%
9	10	5	6.45%	15.93%
10	5	10	24.32%	50.55%
11	10	10	6.45%	15.52%
12	20	1	1.64%	14.71%
13	30	5	0.73%	2.45%
14	40	5	0.41%	1.67%

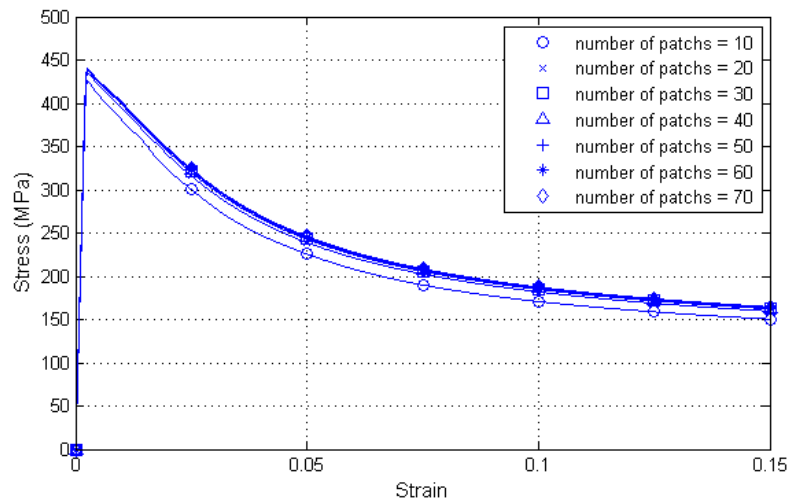
จากผลการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนแบบรูปสี่เหลี่ยม พบว่าการแบ่งชิ้นจำนวนชิ้นส่วนของหน้าตัด (number of patches) ที่ได้จากการใส่ค่าพิกัดของสี่เหลี่ยม มีผลต่อคุณสมบัติของหน้าตัดมากกว่าการแบ่งชิ้นส่วนย่อย (number of subdivisions ij , number of subdivisions jk) ซึ่งการแบ่งตามแนว ij ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติหน้าตัด แต่การแบ่งตามแนว jk มีผลให้ค่าโมเมนต์เฉื่อยตามแนวแกนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และค่าความถูกต้องของคุณสมบัติของหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ ใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติที่คำนวณจากพิกัดจุดของชิ้นส่วนย่อย และการวิเคราะห์การแบ่งชิ้นส่วนแบบรูปวงกลม การแบ่งตามเส้นรอบวง (circumferential) มีผลมากกว่าการแบ่งตามแนวรัศมี (radial) โดยจากการเปรียบเทียบการแบ่ง 2 ประเภทนี้เมื่อเทียบจำนวนของไฟเบอร์แล้ว การแบ่งแบบรูปสี่เหลี่ยมให้ค่าคุณสมบัติที่ดีกว่าการแบ่งแบบชิ้นส่วนวงกลม ดังนั้นการแบ่งชิ้นส่วนแบบสี่เหลี่ยม จึงมีความเหมาะสมมากกว่าอีกทั้งยังง่ายต่อการศึกษาค่าหน่วยแรงและความเครียดภายในหน้าตัดของชิ้นส่วนอีกด้วย

3.1.1.2 ผลของการแบ่งชิ้นส่วนที่มีผลต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

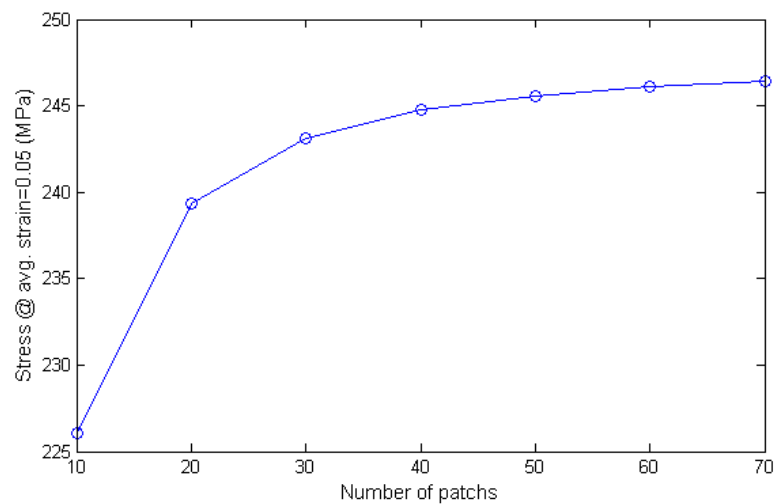
วิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัด ดังภาพที่ 3.3 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.3 มิลลิเมตร ยาว 258.4 มิลลิเมตร ($L/d=8$) โดยที่มีการแบ่งชิ้นส่วนแบบสี่เหลี่ยมซึ่งมีจำนวนชิ้นส่วนของหน้าตัดเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 และไม่มีการแบ่งชิ้นส่วนย่อยเพิ่มเติม (number of subdivisions $i_j = 1$, number of subdivisions $j_k = 1$) ซึ่งมีการเสียรูปเริ่มต้น (e/d) เท่ากับ 0.0001 โดยอ้างอิงค่าคุณสมบัติของวัสดุจากผลการทดสอบของ Bae และคณะ (2005) ซึ่งมีค่ากำลังที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 444 เมกกะปาสคาล และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (young modulus) เท่ากับ 202,222 เมกกะปาสคาล และค่าโมดูลัสหลังจุดครากคำนวณจากค่าความชันที่ทำให้พื้นที่ใต้กราฟหน่วยแรง และความเครียดมีค่าเท่ากับผลการทดสอบ และมีการแบ่งชิ้นส่วนตามแนวยาว 4 ชิ้นส่วน โดยที่แต่ละชิ้นส่วนมีการแบ่งย่อย เท่ากับ 5 โดยผลการวิเคราะห์เป็นดังภาพที่ 3.4 และ 3.5



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิ้นส่วนของหน้าตัดที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด



ภาพที่ 3.4 ผลของจำนวนชิ้นส่วนของหน้าตัดที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

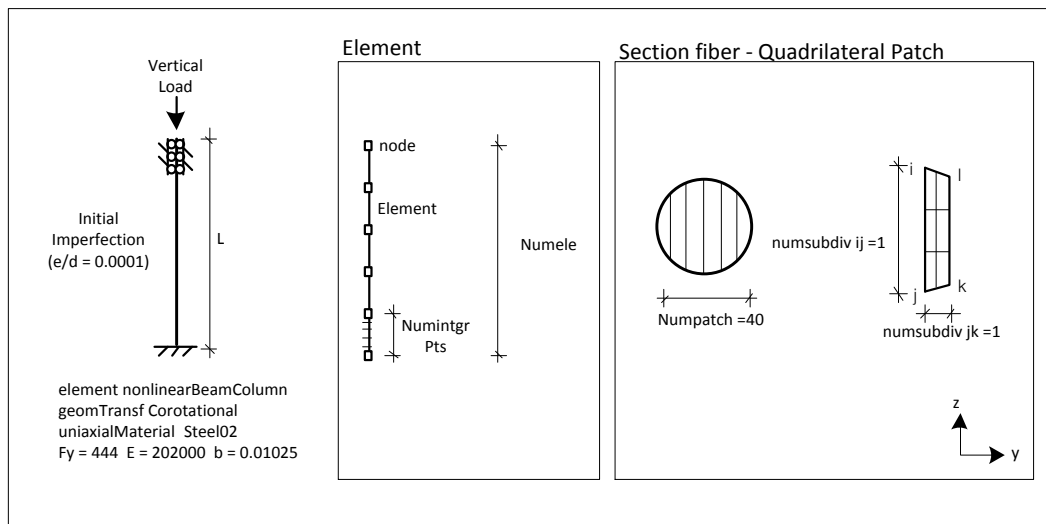


ภาพที่ 3.5 ผลของจำนวนชิ้นส่วนของหน้าตัดต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.05

จากภาพที่ 3.4 เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับแบบจำลองที่มีการแบ่งจำนวนหน้าตัดตั้งแต่ 20 ขึ้นไป และภาพที่ 3.5 แสดงค่าหน่วยแรง เมื่อความเครียดเท่ากับ 0.05 ในกรณีที่มีการแบ่งหน้าตัดจำนวนแตกต่างกัน สังเกตเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของหน่วยแรงในแต่ละกรณีมีค่าน้อยลงเมื่อมีการแบ่งหน้าตัดที่มากขึ้น และเลือกใช้การแบ่งหน้าตัดจำนวน 40 ชิ้นส่วน สำหรับการทำให้แบบจำลองเนื่องจากมีค่าความแตกต่างของหน่วยแรงที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรงในกรณีที่มีการแบ่งหน้าตัดที่มากกว่า

3.1.2 การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของเหล็กเสริม

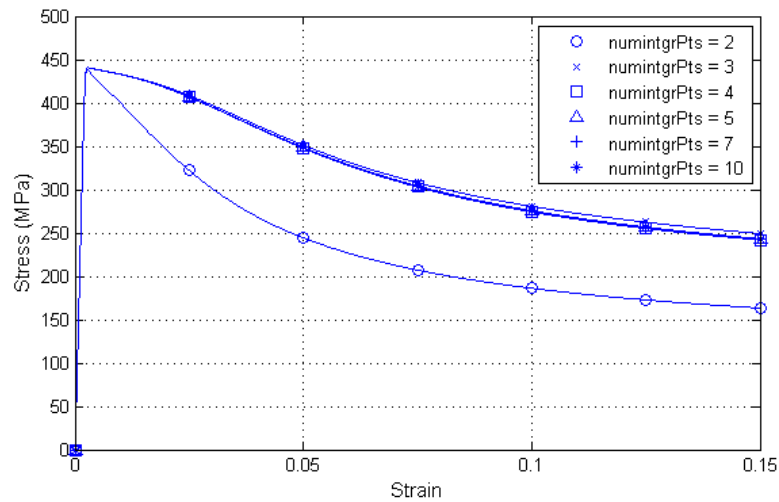
การแบ่งชิ้นส่วนตามแนวยาวสามารถแบ่งได้ 2 ระดับ คือ จำนวนชิ้นส่วนตามแนวยาว (number of elements) คือ การแบ่งชิ้นส่วนจากการสร้างชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างจุดพิกัด (node) 2 จุด และการแบ่งชิ้นส่วนย่อย (number of integration points along the element) คือ การแบ่งชิ้นส่วนย่อยภายในชิ้นส่วนที่สร้างจากจุดพิกัด โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามยาวที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับแรงอัด โดยใช้แบบจำลองเหล็กรับแรงอัด ดังภาพที่ 3.6 ที่มีเหล็กเสริมขนาด 32.3 มิลลิเมตร $L/d=8$ ที่ใช้การแบ่งชิ้นส่วนแบบสี่เหลี่ยมจำนวน 40 ชิ้น ซึ่งมีการแปรผันค่าจำนวนชิ้นส่วนตามแนวยาวดังตารางที่ 3.2



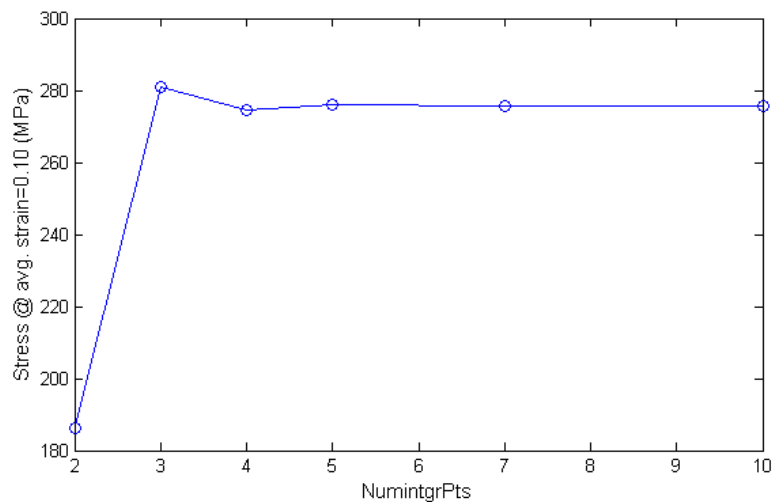
ภาพที่ 3.6 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามแนวยาวที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของเหล็กเสริม

No.	Number of elements	Number of integration points along the element	No.	Number of elements	Number of integration points along the element
1	4	2	7	8	5
2	4	3	8	12	5
3	4	4	9	16	5
4	4	5	10	20	5
5	4	7	11	24	5
6	4	10			

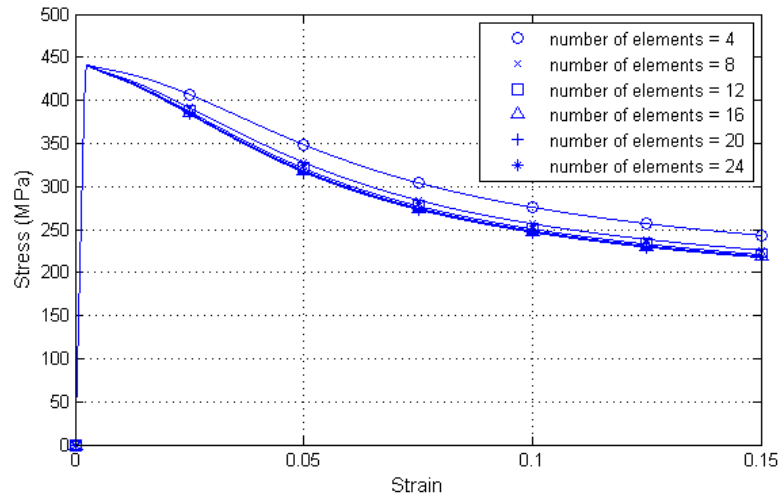


ภาพที่ 3.7 ผลของจำนวนชิ้นส่วนย่อยตามแนวยาวที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

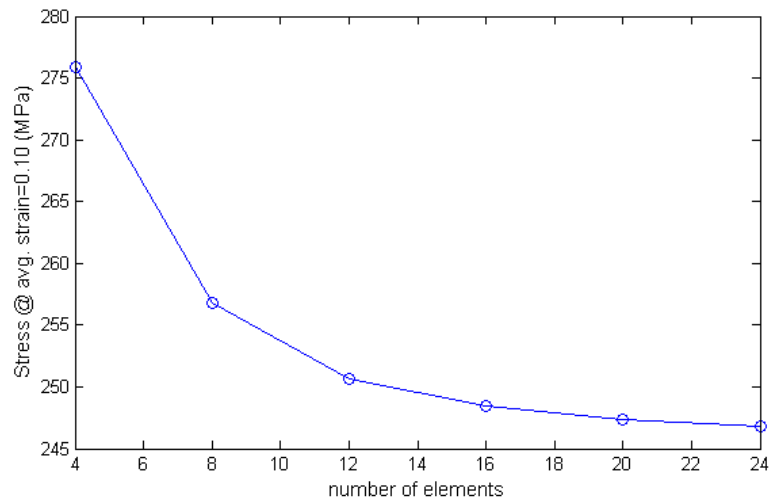


ภาพที่ 3.8 ผลของจำนวนชิ้นส่วนย่อยตามแนวยาวต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.10

จากการวิเคราะห์ในภาพที่ 3.7 และ 3.8 ค่าการแบ่งชิ้นส่วนย่อย เห็นได้ว่าการแบ่งชิ้นส่วนลำดับที่สองตั้งแต่ 5 เป็นต้นไปทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดใกล้เคียงกัน จึงใช้ค่าการแบ่งจำนวนชิ้นส่วนย่อยเท่ากับ 5



ภาพที่ 3.9 ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามแนวยาวที่มีต่อความเค้นหน่วยแรงและความเครียด

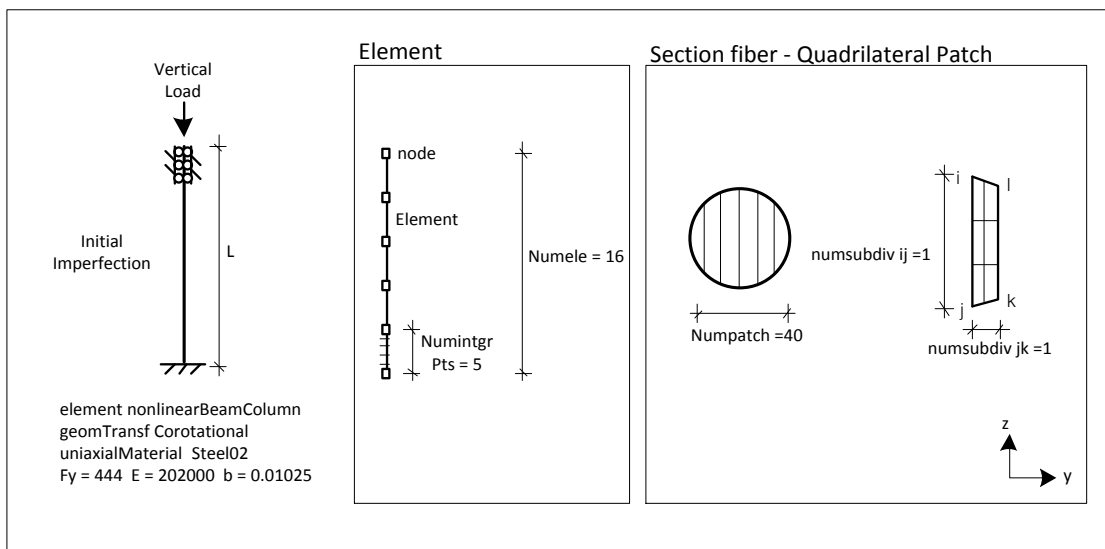


ภาพที่ 3.10 ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามแนวยาวต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.10

จากภาพที่ 3.9 และ 3.10 ค่าหน่วยแรงที่ค่าความเครียดเท่ากับ 0.10 มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับแบบจำลองที่มีการแบ่งชิ้นส่วนตามยาวจำนวน 16, 20 และ 24 ดังนั้นการแบ่งชิ้นส่วนตามแนวตั้งแต่ 16 ชิ้นส่วนขึ้นไปจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในแบบจำลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้จำนวนชิ้นส่วนตามแนวยาวเท่ากับ 16

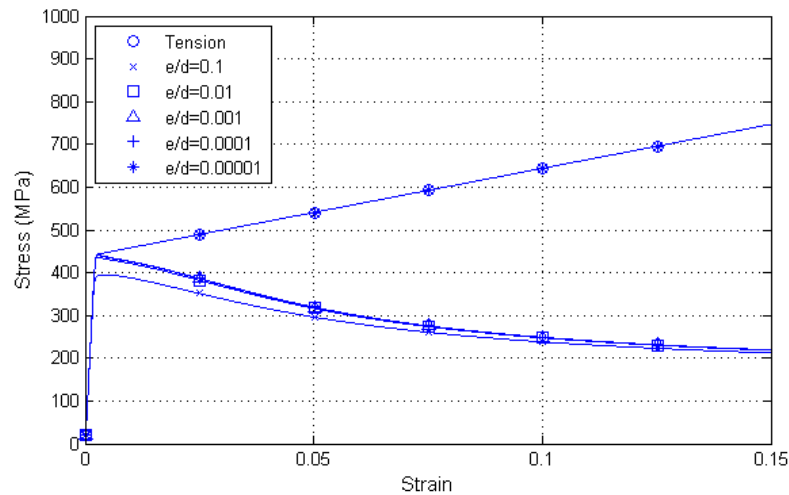
3.1.3 ความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริม

ความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริม คือ ค่าการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้นของเหล็กเสริมเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (e/d ratio) โดยที่มีผลโดยตรงกับความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมตามที่ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยของ Bae และคณะ (2005) อีกทั้งเกี่ยวข้องกับแบบจำลองเหล็กรับแรงอัด เนื่องจากค่าความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นส่งผลให้แบบจำลองเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาค่าความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมที่เหมาะสม โดยที่ในงานวิจัยของ Massone และ Moroder (2002) ได้ใช้ค่า $e/d = 0.01$ แทนกรณี $e/d = 0$ โดยการใช้แบบจำลองเหล็กรับแรงอัด ดังภาพที่ 3.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.3 มิลลิเมตร $L/d=8$ โดยใช้แบบจำลองเหล็กรับแรงอัดที่มีค่าคุณสมบัติวัสดุตามการทดสอบของ Bae และคณะ (2005) ที่ใช้การแบ่งชิ้นส่วนแบบสี่เหลี่ยมจำนวน 40 ชิ้น และจำนวนชิ้นส่วนตามยาว 16 ชิ้นส่วนโดยมีการแบ่งชิ้นส่วนย่อยเท่ากับ 5 โดยศึกษาค่า e/d ที่มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001 และ 0.00001 โดยผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3.12 และ 3.13

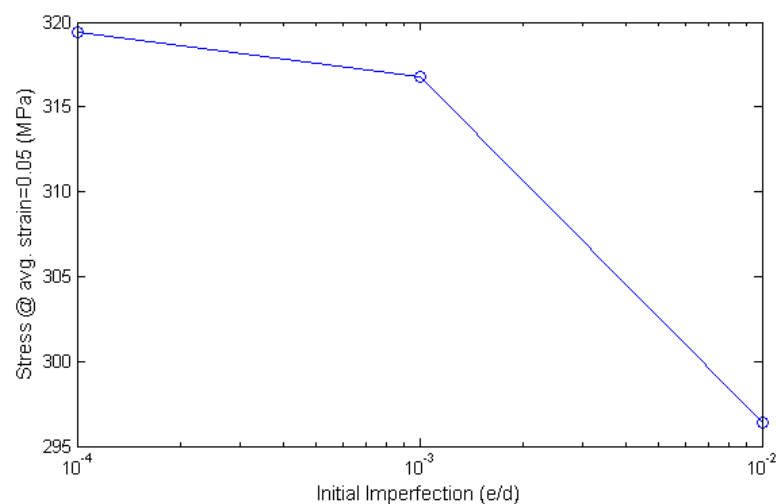


ภาพที่ 3.11 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมที่มีต่อ

ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด



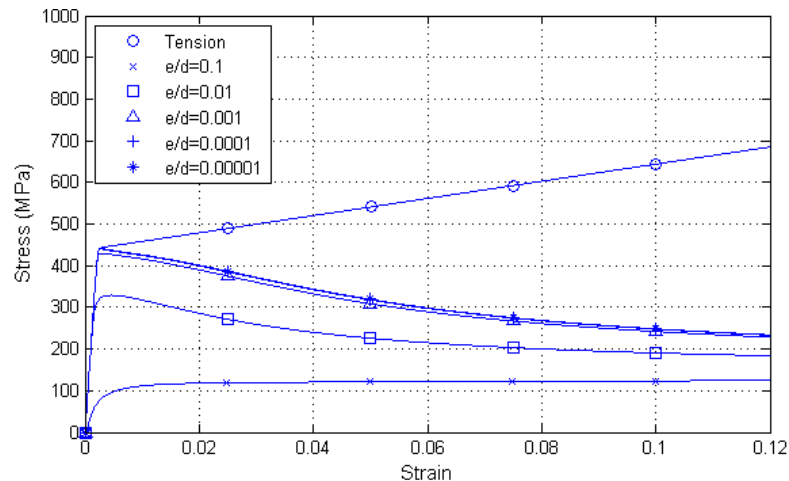
ภาพที่ 3.12 ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด



ภาพที่ 3.13 ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.05

จากภาพที่ 3.12 แบบจำลองที่มีค่า $e/d=0.00001$ นั้นไม่เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเหล็กรับแรงดึง โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่ไม่พิจารณาผลของความไม่สมบูรณ์เริ่มต้น หรือ ค่า $e/d=0$ และจากภาพที่ 3.13 ค่าความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นที่อยู่ในช่วง $e/d=0.0001-0.01$ ให้ค่าหน่วยแรงที่ใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาค่า $e/d=0.0001$ สำหรับกรณี $e/d=0$ สำหรับแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการโก่งเดาะ

นอกจากนี้ได้พิจารณาแบบจำลอง ที่มีแรงกระทำทางด้านข้างเพื่อให้เกิดการเสียรูปตามที่กำหนดโดยไม่ถอนแรงกระทำออก แต่ผลการวิเคราะห์นั้นไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.14

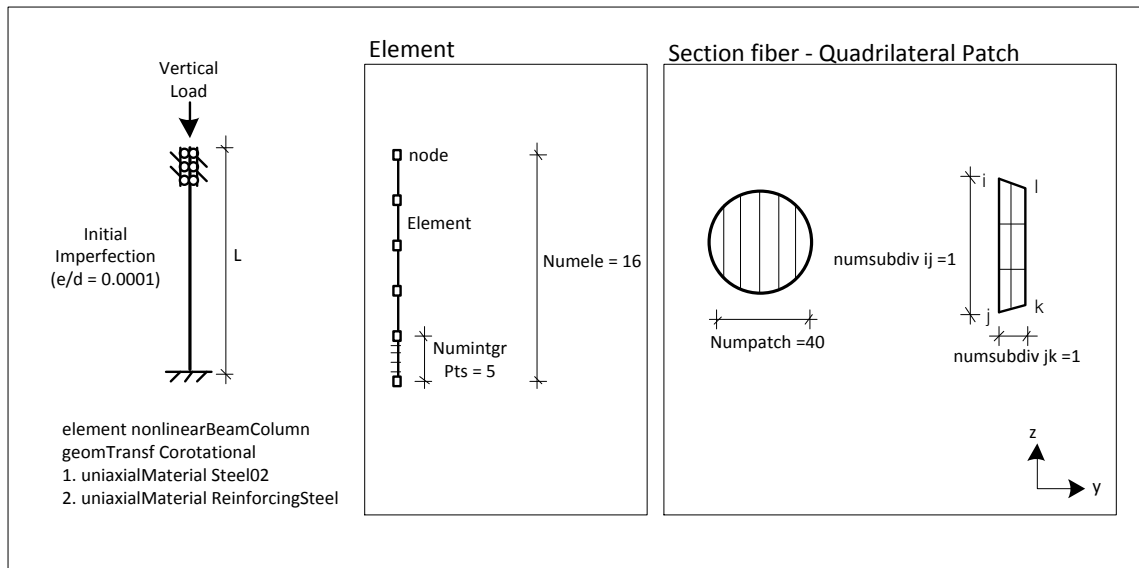


ภาพที่ 3.14 ผลความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมที่เกิดจากการเสียรูปจากแรงทางด้านข้าง

3.1.4 คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม

3.1.4.1 แบบจำลองคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม 2 แบบ คือ Reinforcing Steel (สร้างจากแบบจำลองของนักวิจัยหลายท่าน เช่น Chang and Mander(1994), Gomes and Appleton(1997), Dhakal and Maekawa(2002) เป็นต้น) และSteel02(Giuffre-Menegotto-Pinto(1987)) โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับแรงอัด ที่มีค่า $L/d=4,6,8,10,12$ ที่มีค่าคุณสมบัติวัสดุตามการทดสอบของ Bae และคณะ (2005) โดยกำหนดค่าคุณสมบัติดังตารางที่ 3.3 โดยได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ ดังภาพที่ 3.16-3.19 ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองคุณสมบัติวัสดุเหล็กเสริม

ตารางที่ 3.3 ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองเหล็กที่ใช้สำหรับแบบจำลอง

ReinforcingSteel	f_y	f_u	E_s	E_{sh}	ϵ_{sh}	ϵ_{ult}
	444	648	202000	5021	0.0091	0.15
Steel02	f_y	E	b			
	444	202000	0.01025			

หมายเหตุ ค่าคุณสมบัติวัสดุนอกเหนือจากที่ระบุไว้ในตาราง ใช้ตามค่าปกติของโปรแกรม

โดยที่ f_y = หน่วยแรงที่จุดคราก

f_u = กำลังอัดประลัยของเหล็กเสริม

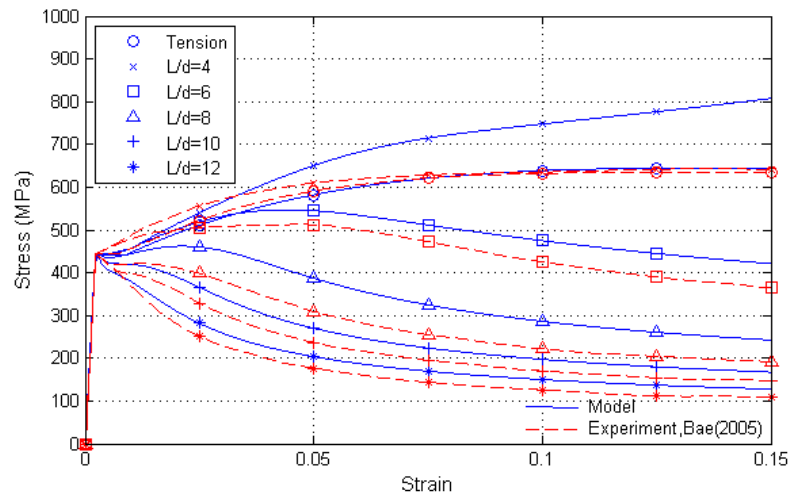
E_s, E = ค่าโมดูลัสเริ่มต้น

E_{sh} = ค่าโมดูลัสหลังจุดคราก

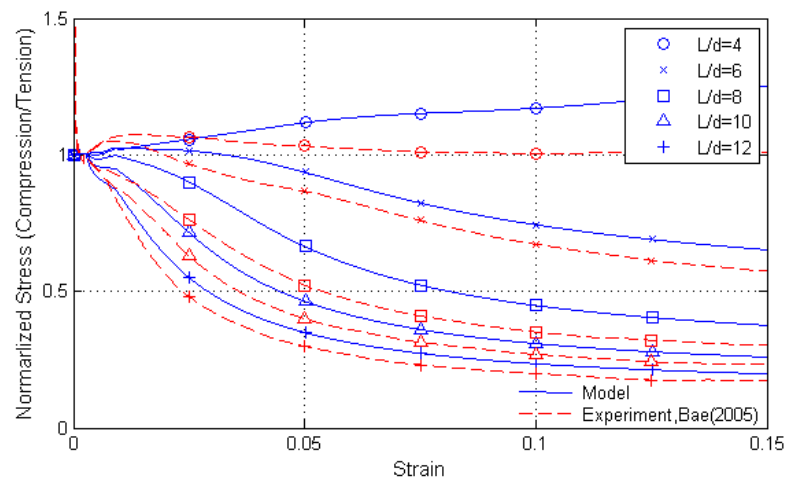
ϵ_{sh} = ค่าความเครียดเริ่มต้นที่เกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้น

ϵ_{ult} = ค่าความเครียดเมื่อหน่วยแรงมีค่าสูงสุด

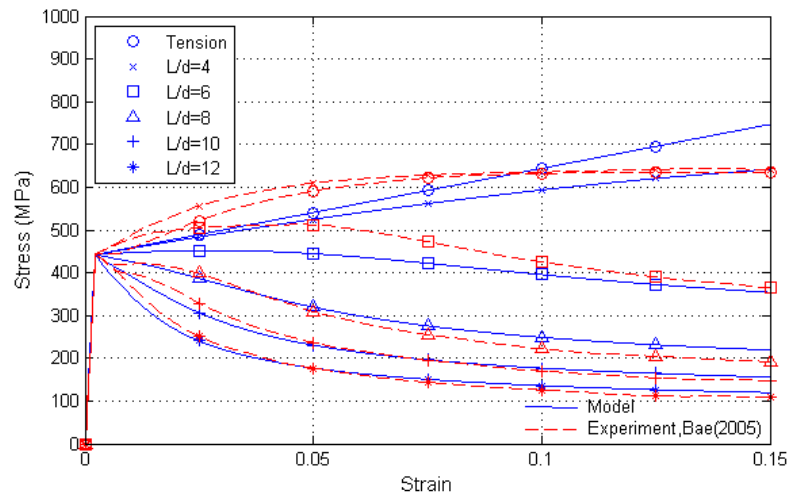
b = ค่าอัตราส่วนโมดูลัสเริ่มต้นต่อโมดูลัสหลังจุดคราก



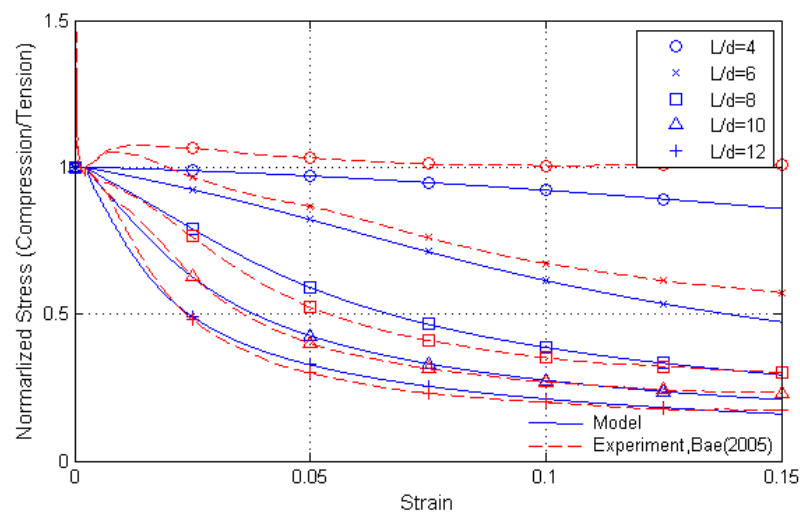
ภาพที่ 3.16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ ReinforcingSteel และผลการทดสอบ



ภาพที่ 3.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ ReinforcingSteel และผลการทดสอบ



ภาพที่ 3.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 และผลการทดสอบ



ภาพที่ 3.19 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้คุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 และผลการทดสอบ

ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้จากแบบจำลอง ReinforcingSteel และ Steel02 ในภาพที่ 3.16 และ 3.18 มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Bae และคณะ (2005) ในแบบจำลองแรกที่ใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุแบบ Reinforcing Steel แบบจำลองนี้สามารถ

จำลองพฤติกรรมเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และมีพฤติกรรมการอ่อนตัว ภายหลังการโค้งเดาะที่น้อยกว่าผลการทดสอบสำหรับทุกๆกรณี โดยที่สามารถรับแรงได้มากกว่า เหล็กรับแรงดึงเมื่อค่ามีค่าอัตราส่วนชะลูดเท่ากับ 4 แบบจำลองที่ใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 กำหนดค่าคุณสมบัติโดยใช้การกำหนดโมดูลัสช่วงยืดหยุ่น และกำหนดค่าโมดูลัสหลังจุดครากที่ทำให้ค่าการสลายพลังงานมีค่าเทียบเท่ากับผลการทดสอบเหล็กรับแรงดึง และเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์เหล็กเสริมรับแรงอัดจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียด เนื่องจากแบบจำลอง Steel02 เป็นการจำลองลักษณะ bilinear ซึ่งไม่สามารถจำลองให้เหมือนกันเหล็กรับแรงดึง และพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเสริมขึ้นกับค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม ตามงานวิจัย Dhakal และMaekawa (2002) และ bae และคณะ(2005) ซึ่งจากการเปรียบเทียบในภาพที่ 3.17 และ3.19 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองแบบ Steel02 ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบมากกว่า อีกทั้งยังใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลอง Steel02 สำหรับงานวิจัยนี้

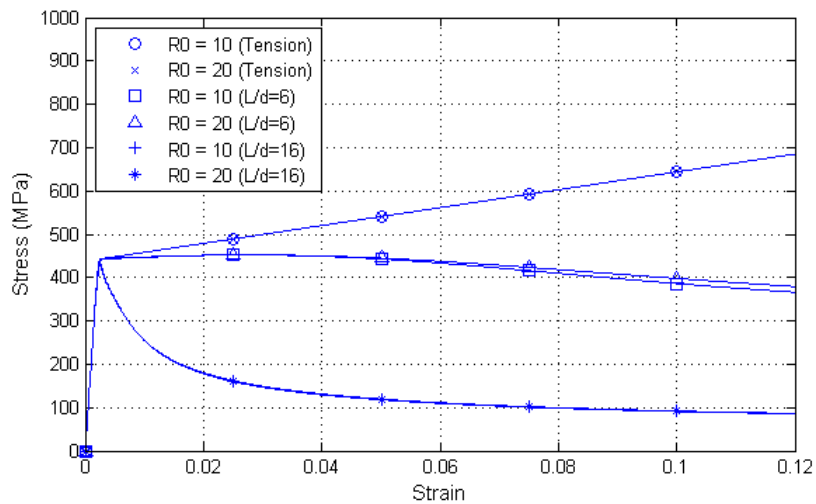
อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่ต้องระบุสำหรับคุณสมบัติวัสดุสำหรับแบบจำลอง Steel02 ไม่ได้มีเพียง 3 ค่าที่กล่าวไป แต่ยังคงมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเปลี่ยนจากช่วงยืดหยุ่นเป็นช่วงพลาสติก (R_0, CR_1, CR_2), ค่าการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (isotropic hardening) (a_1, a_2, a_3, a_4) รวมทั้งสิ้น 7 ค่า ซึ่งเป็นค่าที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิวิจกรรมของเหล็กเสริม โดยได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด ในหัวข้อที่ 3.1.4.2

3.1.4.2 ผลของค่าพารามิเตอร์ R_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด

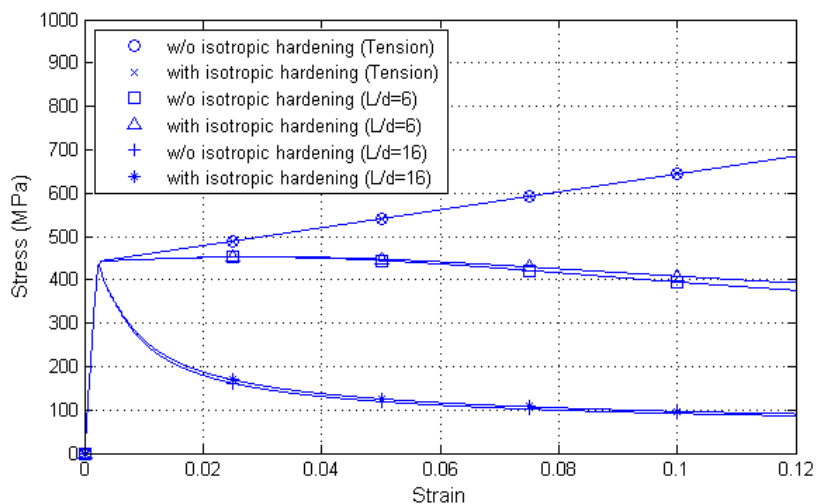
ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด ที่มีการแปรผันค่า R_0, a_1, a_2, a_3, a_4 (ไม่ได้ศึกษาค่า CR_1 และ CR_2 เนื่องจากเป็นค่าที่แนะนำจากโปรแกรม) ซึ่งผลการศึกษาดังภาพที่ 3.20 และ3.21 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดน้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาในประเด็นของเหล็กรับแรงอัดจึงใช้ค่าพารามิเตอร์

R0, CR1, CR2, a1, a2, a3 และ a4 ตามค่าปกติของโปรแกรม โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงกระทำแบบวิถัจกรอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งกล่าวถัดไปในหัวข้อที่

3.2.1



ภาพที่ 3.20 ผลของค่า R0 ที่มีผลต่อพฤติกรรมรับแรงอัดของเหล็กเสริม



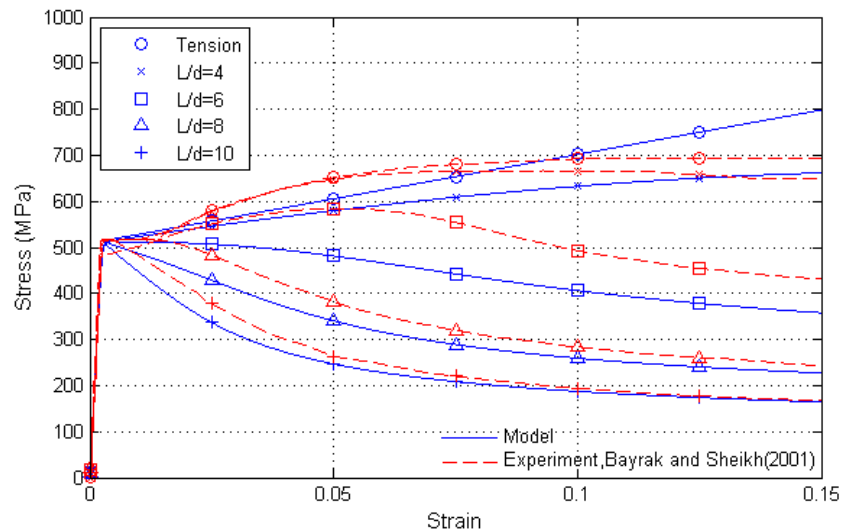
ภาพที่ 3.21 ผลของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของวัสดุที่มีผลต่อพฤติกรรม การรับแรงอัดของเหล็กเสริม

หมายเหตุ โดยที่ a1=0.1, a2=1, a3=0.13 และ a4=1 สำหรับกรณี w/o isotropic hardening

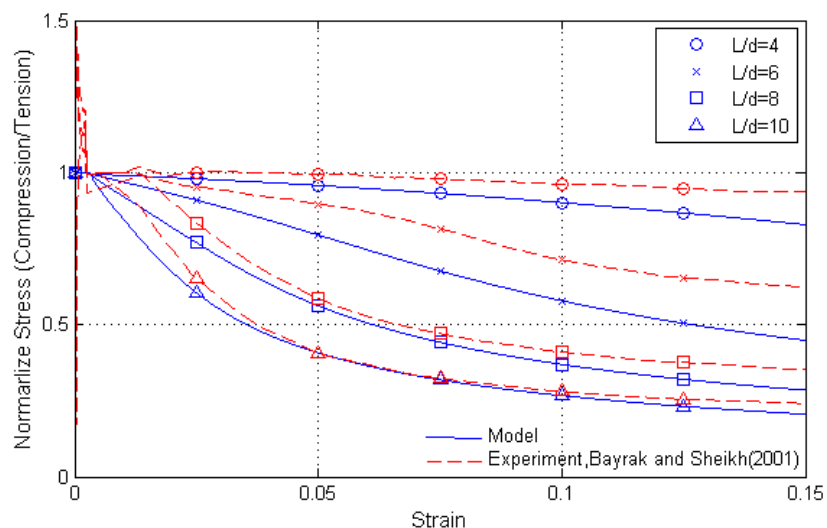
และ a1=0, a2=1, a3=0 และ a4=1 สำหรับกรณี with isotropic hardening

3.1.5 สอบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยที่ผ่านมา

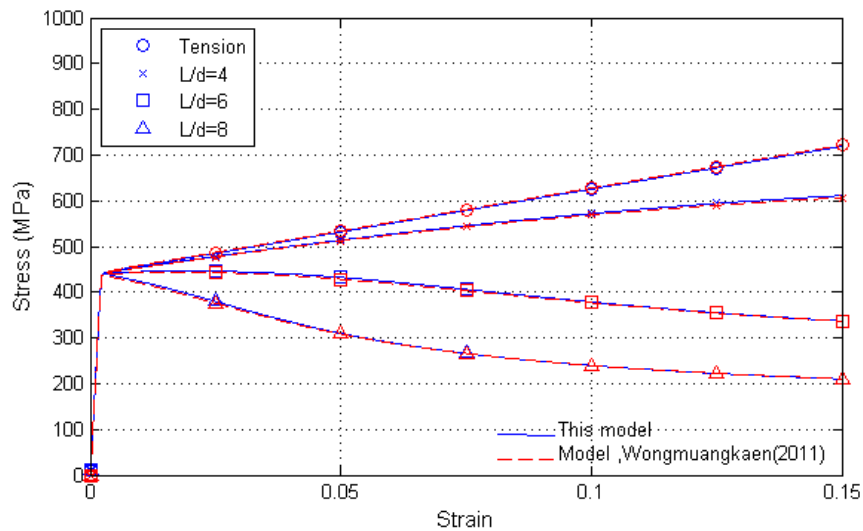
สอบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองเพิ่มเติม โดยเทียบผลกับผลการทดสอบเหล็กขนาด M20(20 มิลลิเมตร) ของ Bayrak และSheikh(2001) และผลการวิเคราะห์กับแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกดของ Wongmuangkaen(2011) ซึ่งผลการสอบเทียบแสดงภาพที่ 3.22-3.24



ภาพที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลอง และผลการทดสอบของ Bayrak และSheikh(2001)



ภาพที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากแบบจำลอง และผลการทดสอบของ Bayrak และSheikh(2001)

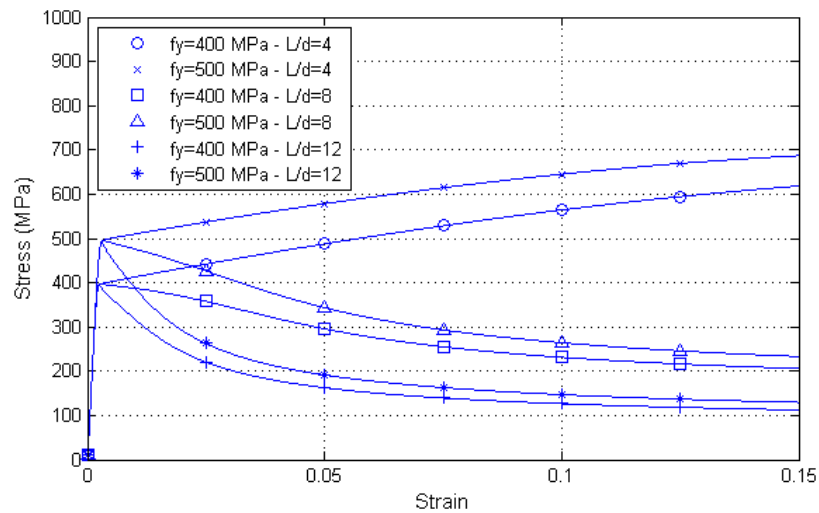


ภาพที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์
เทียบกับแบบจำลองของ Wongmuangkaen(2011)

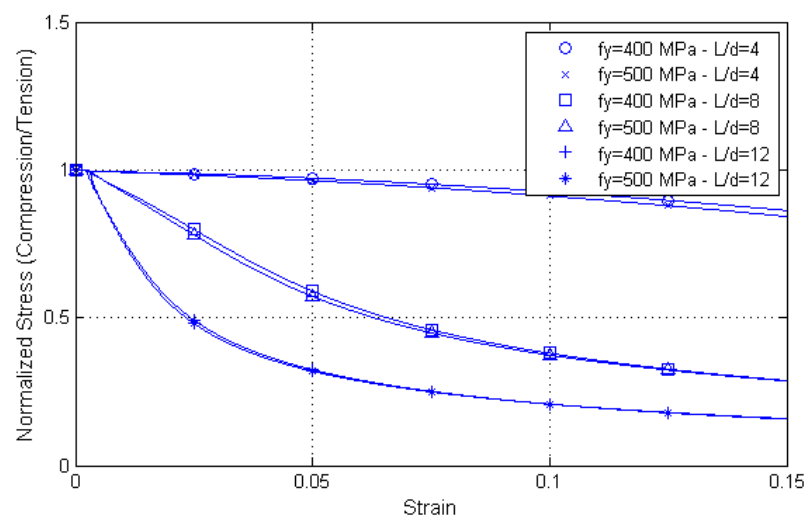
หมายเหตุ อ้างอิงคุณสมบัติเหล็กเสริมตามแบบจำลองของ Wongmuangkaen(2011)

3.1.6 ผลของคุณสมบัติวัสดุที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัด

ดังที่กล่าวไปข้างต้น พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมรับแรงอัดขึ้นกับค่ากำลังที่จุดคราก และอัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสหลังจุดครากเป็นสำคัญ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีค่าคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียด แทนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด โดยที่อัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียด หมายถึง อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงของเหล็กรับแรงอัดต่อหน่วยแรงของเหล็กรับแรงดึง

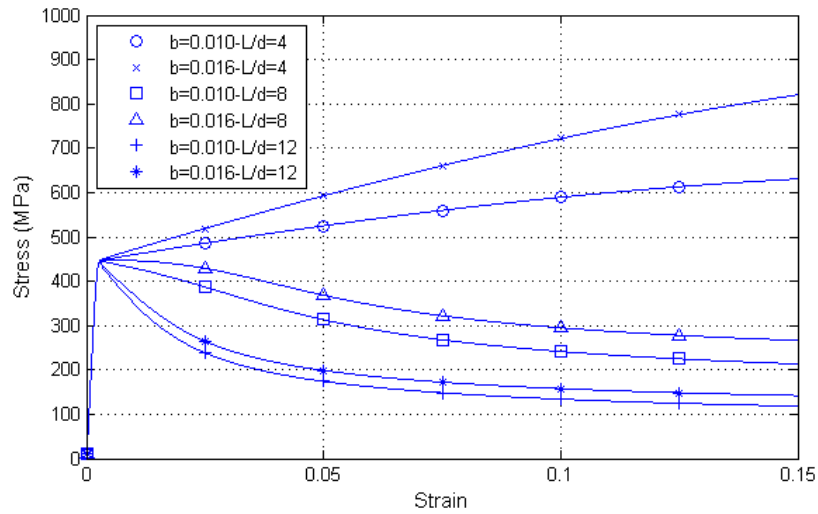


ภาพที่ 3.25 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก

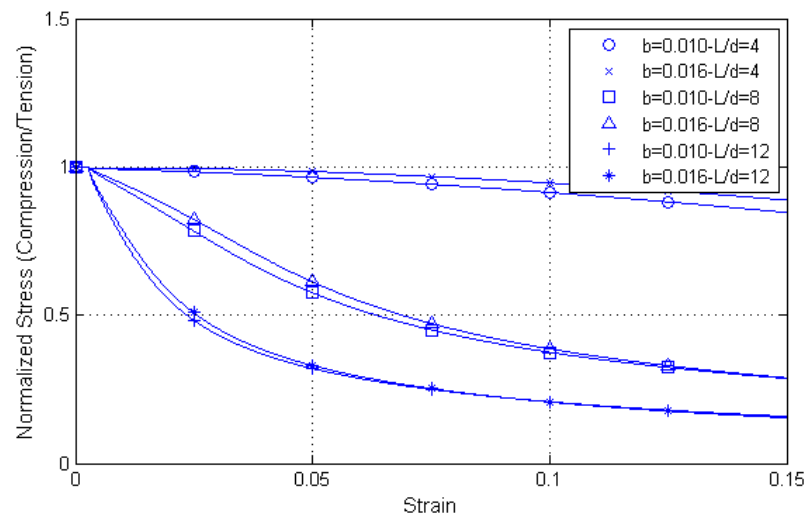


ภาพที่ 3.26 ความสัมพันธ์อัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก

ผลของค่า f_y หรือกำลังที่จุดคราก โดยที่มีการแปรผันค่าคุณสมบัติเหล็กเสริมเท่ากับ 400 และ 500 เมกกะปาสคาล แสดงดังภาพที่ 3.25 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดพบว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความแตกต่างมากที่สุดประมาณ 2% ดังแสดงในภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.27 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสเริ่มต้นต่อโมดูลัสหลังจุดคราก



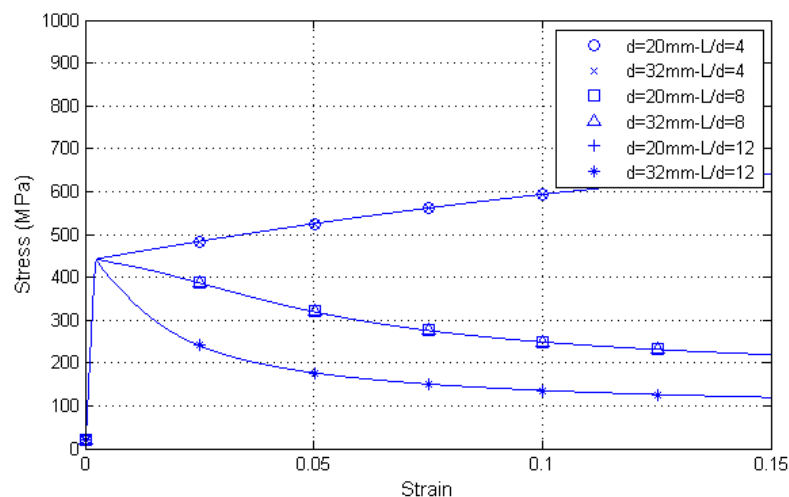
ภาพที่ 3.28 ความสัมพันธ์อัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กที่มีการแปรผันค่าอัตราส่วนโมดูลัสเริ่มต้นต่อโมดูลัสหลังจุดคราก

ผลของค่า b หรืออัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสหลังจุดคราก ที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดแสดงดังภาพที่ 3.27 โดยมีค่า b เท่ากับ 0.010 และ 0.016 ซึ่งได้จากการคำนวณจากความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กกับดึงของ

เหล็ก No.10 และ No.8 ของ Bae และคณะ(2005) ตามลำดับ พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงและความเครียดมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างมากที่สุดประมาณ 4% ดังแสดงในภาพที่ 3.28

3.1.7 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และอัตราส่วนความชะลูดที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

ศึกษาผลของค่าอัตราส่วนความชะลูด(L/d)สำหรับเหล็กเสริมที่มีขนาดต่างๆ โดยใช้คุณสมบัติเหล็กเสริมและแบบจำลองเช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมเท่ากับ 0.0001 ซึ่งผลการศึกษาดังภาพที่ 3.29

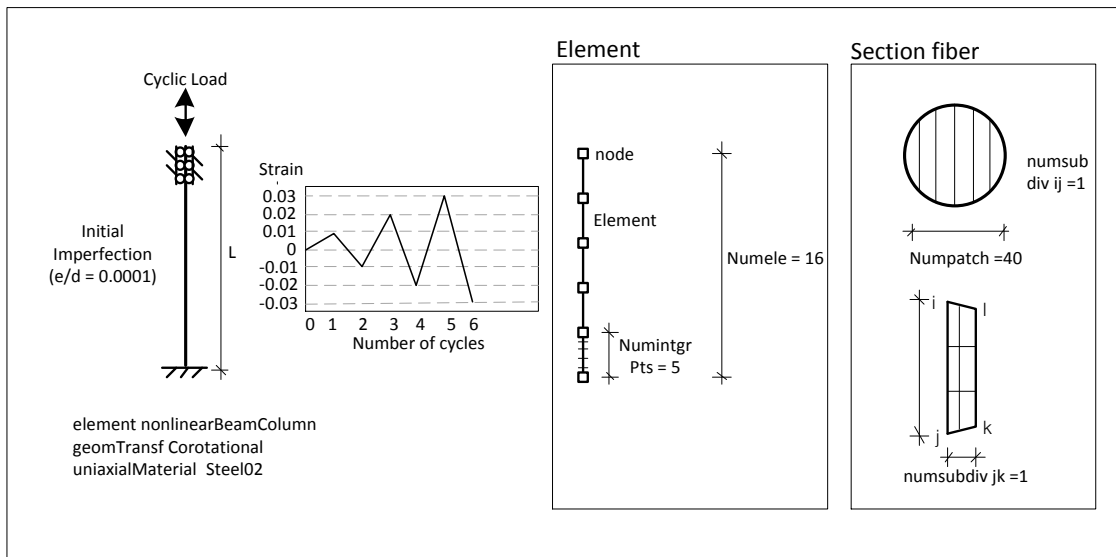


ภาพที่ 3.29 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนชะลูด

จากภาพที่ 3.29 สังเกตเห็นได้ว่าพฤติกรรมของเหล็กที่มีค่าอัตราส่วนชะลูด(L/d) เท่ากัน จะมีพฤติกรรมภายหลังการโก่งเดาะที่เหมือนกัน โดยที่ไม่ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม

3.2 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวิถัจกร

แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวิถัจกร พัฒนาจากแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัด โดยอ้างอิงตามผลการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) ดังภาพที่ 3.30

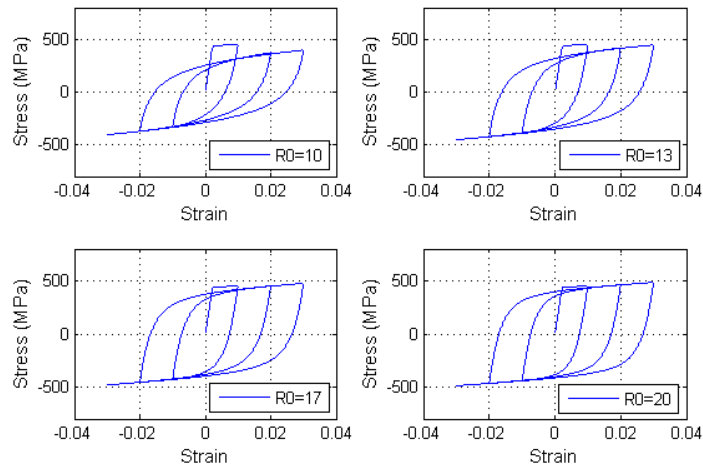


ภาพที่ 3.30 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวิถัจกร และรูปแบบการให้แรงกระทำ (loading scheme)

3.2.1 ผลของค่าพารามิเตอร์ $R_0, CR_1, CR_2, a_1, a_2, a_3$ และ a_4 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิถัจกรของเหล็กเสริม

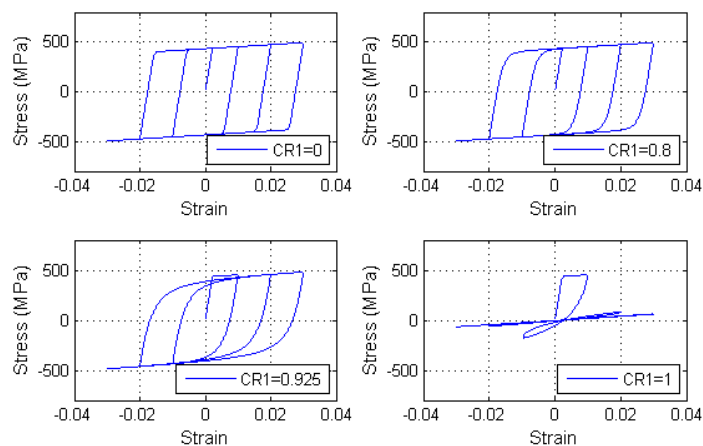
นอกเหนือจากค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน (f_y, E, b) แบบจำลอง Steel02 (Giuffre-Menegotto-Pinto) มีค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการสอบเทียบกับผลทดสอบเหล็กเสริมแบบวิถัจกร ดังนี้ คือ R_0, CR_1, CR_2 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมเปลี่ยนจากช่วงยืดหยุ่น (ก่อนจุดคราก) เป็นช่วงพลาสติก (หลังจุดคราก) โดยในโปรแกรมได้แนะนำค่า R_0 ให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 , $CR_1 = 0.925$, $CR_2 = 0.15$ และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของของเหล็กเสริม ได้แก่ a_1, a_2 (การแข็งตัวเพิ่มขึ้นช่วงเหล็กรับแรงอัด) และ a_3, a_4 (การแข็งตัวเพิ่มขึ้นช่วงเหล็กรับแรงดึง) โดยค่าปกติของ $a_1, a_2, a_3, a_4 = 0, 1, 0, 1$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่พิจารณาผลของการแข็งตัวเพิ่มขึ้น

R0 ส่งผลต่อการพัฒนากำลังในช่วงพลาสติกจากภาพที่ 3.31 จะเห็นได้ว่าค่า R0 น้อยส่งผลให้การพัฒนากำลังในช่วงพลาสติกได้น้อยลง ทั้งในช่วงรับแรงดึงและแรงอัด และเหล็กเสริมสามารถพัฒนากำลังได้ใกล้เคียงกับกำลังที่จุดคราก เมื่อค่า R0=20



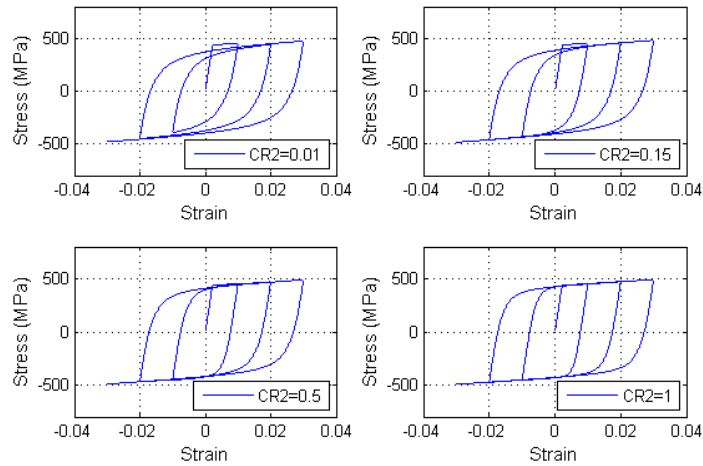
ภาพที่ 3.31 ผลของค่า R0 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร

CR1 ส่งผลต่อส่วนโค้งของกราฟในช่วงถอนแรงกระทำ(จากรับแรงดึงเป็นแรงอัดและจากรับแรงอัดเป็นแรงดึง) จากภาพที่ 3.32 ค่าความโค้งมากขึ้นเมื่อ CR1 เพิ่มขึ้น โดยไม่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังในช่วงพลาสติก และไม่สามารถจำลองพฤติกรรมแบบวัฏจักรได้เมื่อค่า CR1=1



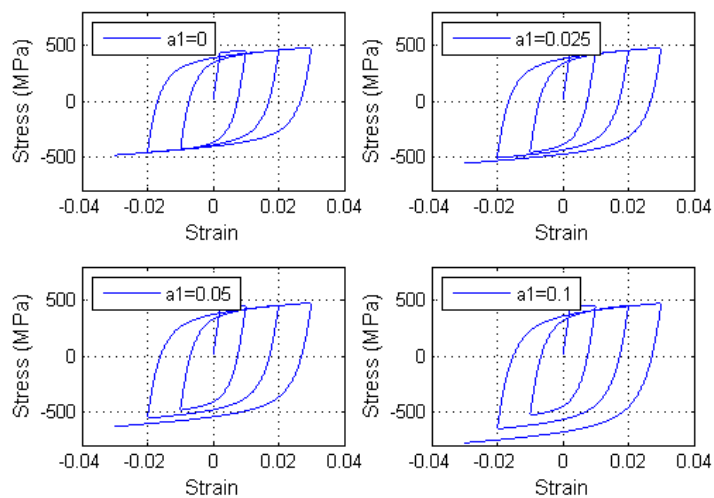
ภาพที่ 3.32 ผลของค่า CR1 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร

ค่า CR2 ส่งผลต่อส่วนโค้งของกราฟในช่วงถนนแรงกระทำ โดยค่าความโค้งน้อยลงเมื่อ CR2 เพิ่มขึ้น และไม่ส่งต่อการพัฒนากำลังในช่วงพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 3.33

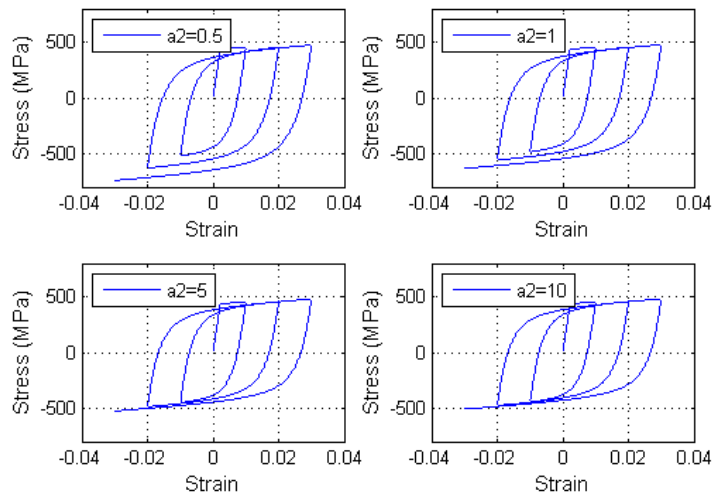


ภาพที่ 3.33 ผลของค่า CR2 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร

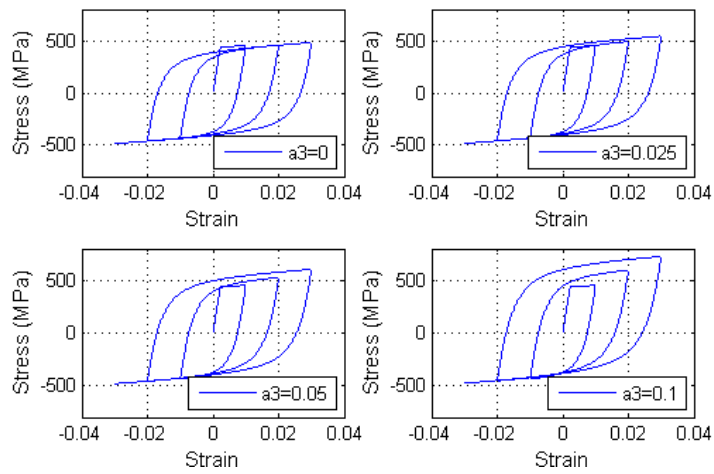
ตามที่กล่าวมาข้างต้นค่า a_1 และ a_2 เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวเพิ่มขึ้นช่วงเหล็กรับแรงอัด เมื่อค่า a_1 สูงขึ้นทำให้กำลังเหล็กด้านรับแรงอัดมีกำลังที่สูงขึ้น ดังภาพที่ 3.34 ซึ่งตรงข้ามกับค่า a_2 ซึ่งแสดงในภาพที่ 3.35 โดยเหล็กจะรับกำลังด้านแรงอัดสูงขึ้น เมื่อค่า a_2 มีค่าน้อย เช่นเดียวกับภาพที่ 3.36 และ 3.37 ที่กำลังของเหล็กด้านรับแรงดึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อ ค่า a_3 มากขึ้น และค่า a_4 น้อยลง



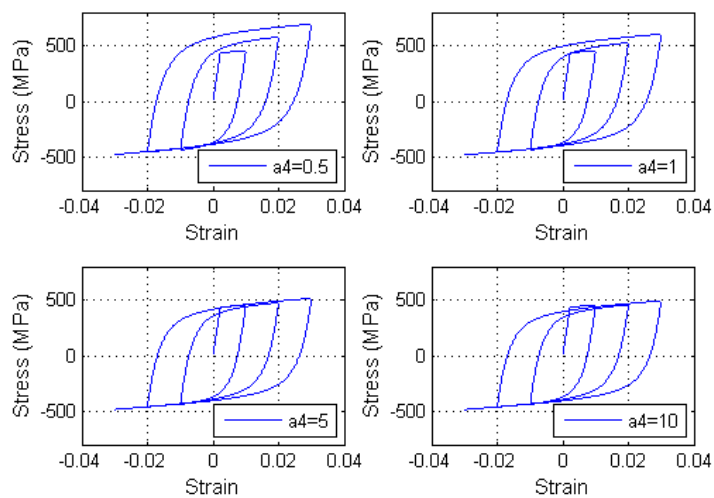
ภาพที่ 3.34 ผลของค่า a_1 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร



ภาพที่ 3.35 ผลของค่า a_2 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร



ภาพที่ 3.36 ผลของค่า a_3 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร



ภาพที่ 3.37 ผลของค่า a_4 ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักร

3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมแบบวิถัจกรของเหล็กเสริม

ค่าพารามิเตอร์ของเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยในอดีต แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยที่ค่า R0 ที่ใช้อยู่ในช่วง 15-20, ค่า CR1=0.925 และ CR2=0.15 ซึ่งเป็นค่าที่โปรแกรมแนะนำ โดยที่ในงานวิจัยไม่ได้ระบุถึงค่าที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม หรืออาจจะมีนัยยะที่ว่าไม่พิจารณาถึงการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาแนวทางการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยในอดีต

No.	R0	CR1	CR2	a1	a2	a3	a4
Bao และKunnath(2010)	-	-	-	-	-	-	-
Tang และZhang (2010) - #5 rebar #10 rebar	15	0.925	0.15	-	-	-	-
	18	0.925	0.15	-	-	-	-
Melo และคณะ (2010)	16.5	-	-	-	-	-	-
Terzic และStojadinovic (2010)	20	0.925	0.15	-	-	-	-
Gajan และSaravanathiiban (2011)	18	0.925	0.15	-	-	-	-

จากรหัสต้นฉบับ(source code)ของโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติแบบ Steel02 ได้ระบุความสัมพันธ์ของค่าการแข็งตัวเพิ่มขึ้นที่เกี่ยวข้องกับค่า a1, a2 และ a3, a4 ดังภาพที่ 3.38

```

00244     double d1 = (epsmax - epsmin) / (2.0*(a2 * epsy));
00245     double shft = 1.0 + a1 * pow(d1, 0.8);
00246     epss0 = (-Fy * shft + Esh * epsy * shft - sigr + E0 * epsr) / (E0 - Esh);
00247     sigs0 = -Fy * shft + Esh * (epss0 + epsy * shft);
00248     epspl = epsmin;

00220     double d1 = (epsmax - epsmin) / (2.0*(a4 * epsy));
00221     double shft = 1.0 + a3 * pow(d1, 0.8);
00222     epss0 = (Fy * shft - Esh * epsy * shft - sigr + E0 * epsr) / (E0 - Esh);
00223     sigs0 = Fy * shft + Esh * (epss0 - epsy * shft);
00224     epspl = epsmax;

```

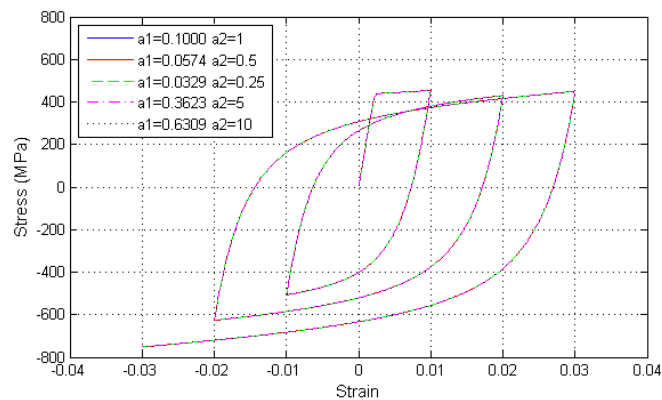
ภาพที่ 3.38 รหัสต้นฉบับของโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของค่าการแข็งตัวเพิ่มขึ้น
สำหรับแบบจำลอง Steel02

จากภาพที่ 3.38 จะได้ว่าค่าการแข็งตัวเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันของ $\frac{a1}{a2^{0.8}}$ และ $\frac{a3}{a4^{0.8}}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2

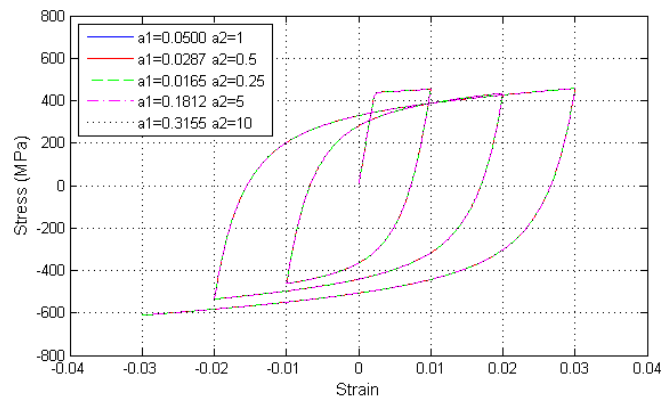
$$shft = 1.0 + \frac{a1}{a2^{0.8}} \times \left(\frac{eps\ max - eps\ min}{2\ epsy} \right)^{0.8} \quad (3.1)$$

$$shft = 1.0 + \frac{a3}{a4^{0.8}} \times \left(\frac{eps\ max - eps\ min}{2\ epsy} \right)^{0.8} \quad (3.2)$$

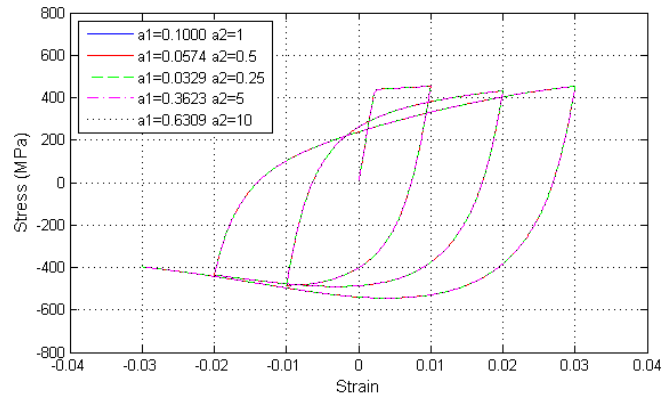
ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่มีการแปรผันค่า $a1, a2$ และ $a3, a4$ โดยกำหนดให้อัตราส่วนของ $\frac{a1}{a2^{0.8}}$ และ $\frac{a3}{a4^{0.8}}$ เท่ากัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.39-3.42



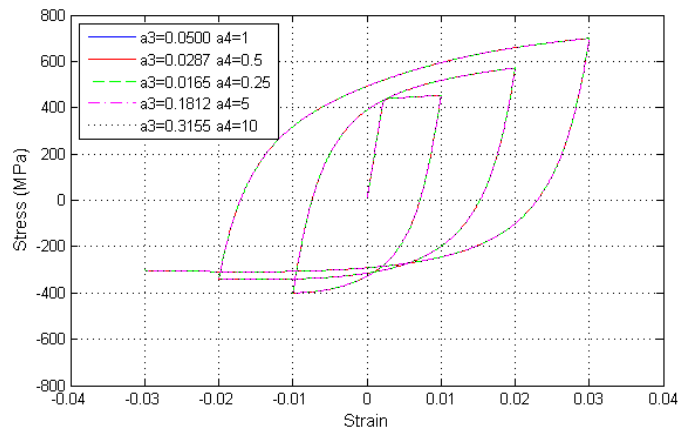
ภาพที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a1/a2^{0.8} = 0.1$ ($L/d=3$)



ภาพที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a1/a2^{0.8} = 0.05$ ($L/d=3$)

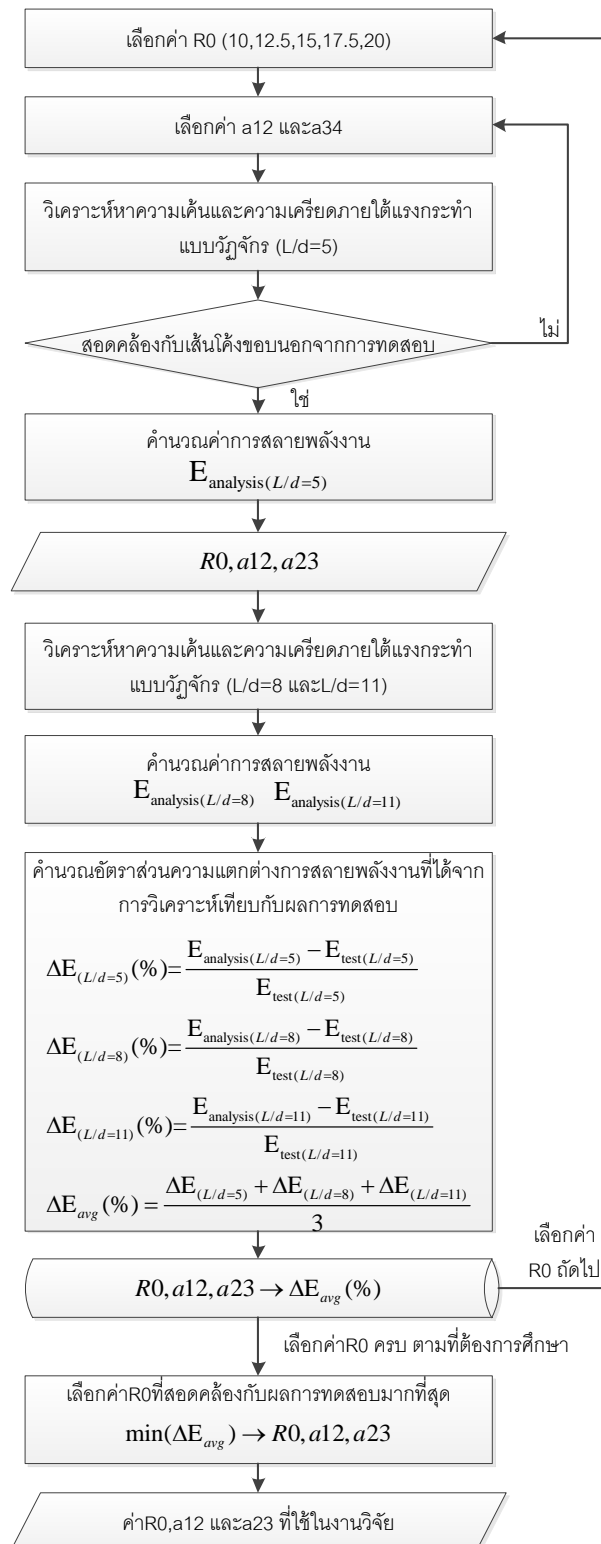


ภาพที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a1/a2^{0.8} = 0.1$ ($L/d=8$)



ภาพที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเมื่อค่า $a3/a4^{0.8} = 0.1$ ($L/d=8$)

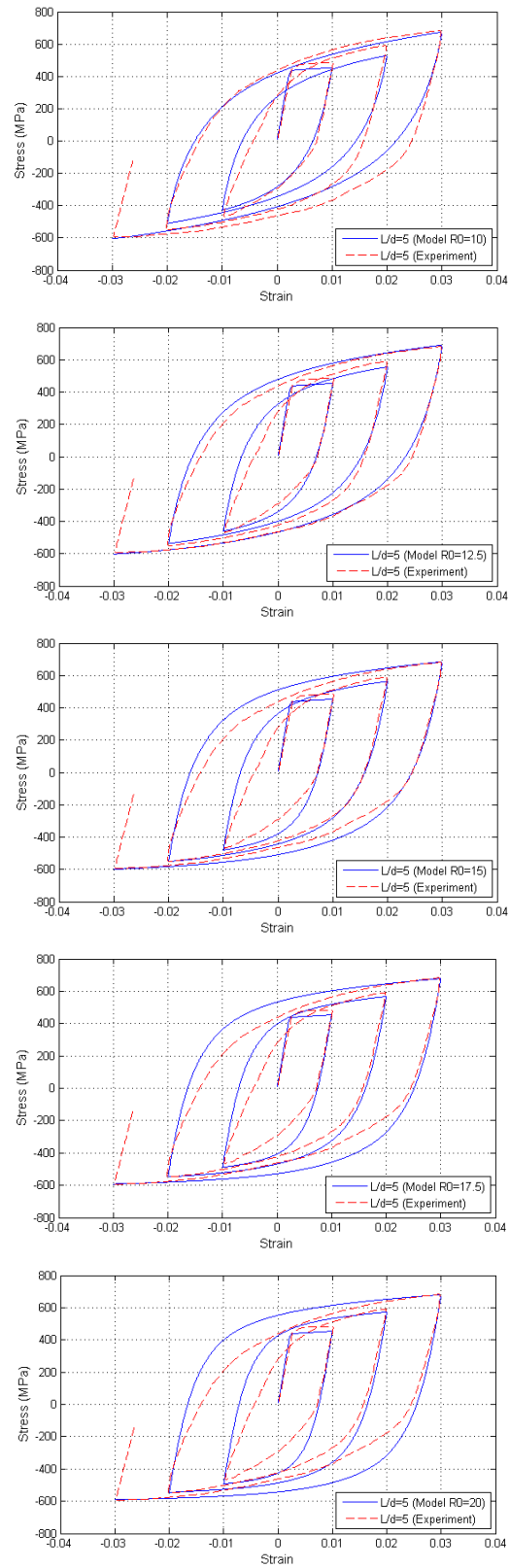
จากงานวิจัยในอดีตที่ใช้ค่า $CR1=0.925$ และ $CR2=0.15$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าแนะนำของโปรแกรม และความสัมพันธ์ของค่า $a1, a2$ และ $a3, a4$ ทำให้มีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาจำนวน 3 ตัว ซึ่งได้แก่ $R0, a12$ และ $a34$ โดยที่ $a12 = \frac{a1}{a2^{0.8}}$ และ $a34 = \frac{a3}{a4^{0.8}}$ ซึ่งขั้นตอนในการหาค่าพารามิเตอร์ แสดงในภาพที่ 3.43 โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับการทดสอบการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) ที่มีการแปรผันค่า $R0$ จำนวน 5 ค่า ได้แก่ 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 โดยเปรียบเทียบผลเบื้องต้นด้วยเส้นโค้งขอบนอก (envelope curve) โดยใช้กรณี $L/d=5$ เนื่องจากมีความซับซ้อนของพฤติกรรมที่น้อยกว่ากรณีที่เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.44-3.46 และตารางที่ 3.5



หมายเหตุ ใช้ค่า $f_y=440$ MPa, $E=202952$ MPa, $b=0.01$, $CR1=0.925$ และ $CR2=0.15$

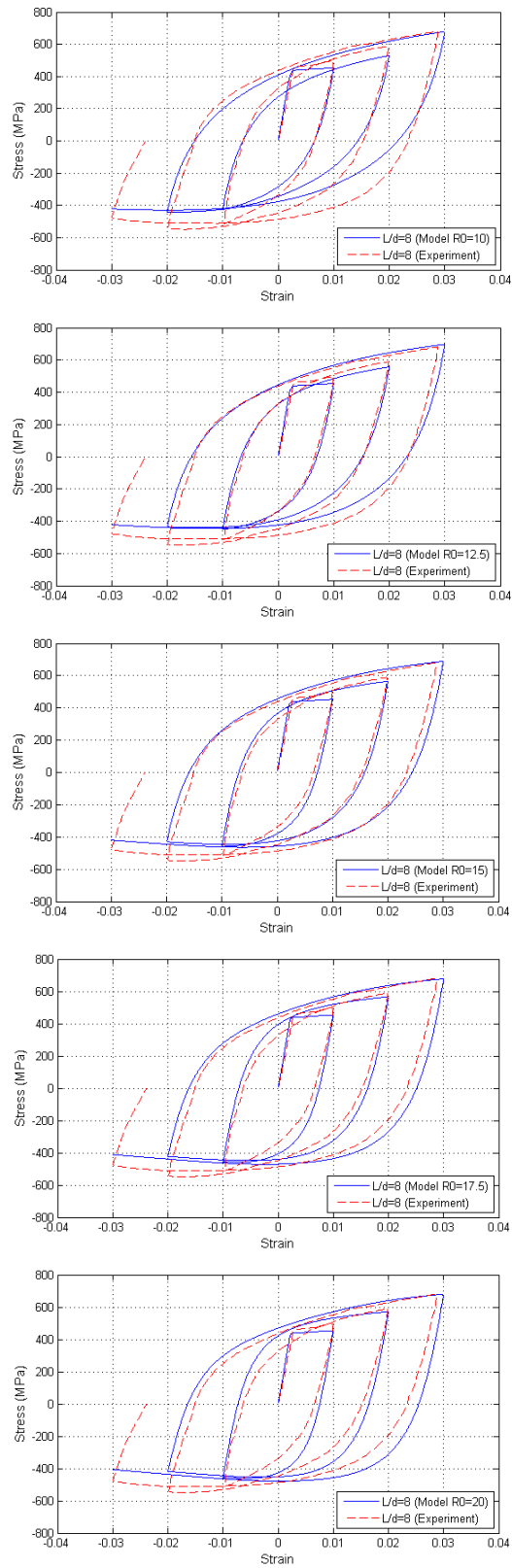
ภาพที่ 3.43 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ R_0, a_{12}, a_{13} ที่อ้างอิงจากผลการทดสอบของ

Monti และ Nuti(1992)



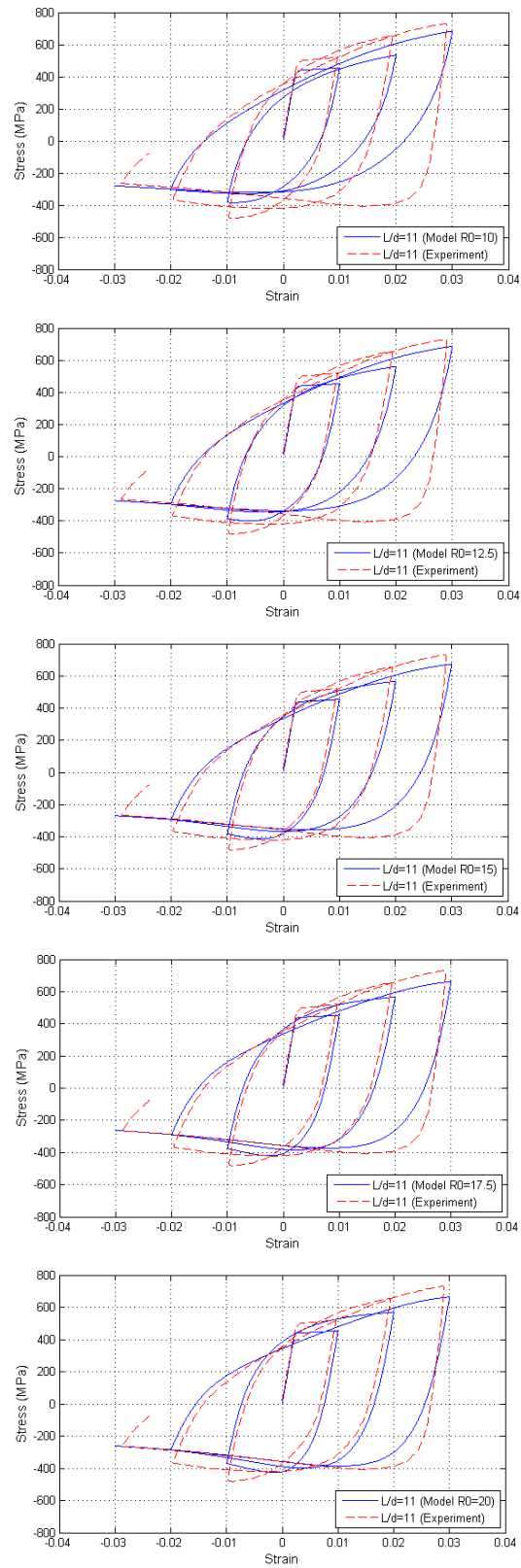
ภาพที่ 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์

และผลการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) สำหรับ $L/d = 5$



ภาพที่ 3.45 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์

และผลการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) สำหรับ $L/d = 8$



ภาพที่ 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์

และผลการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) สำหรับ $L/d = 11$

ตารางที่ 3.5 ความแตกต่างของการสลายพลังงานจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง กับผลการทดสอบที่มีการแปรผันค่า R_0, a_{12} และ a_{23}

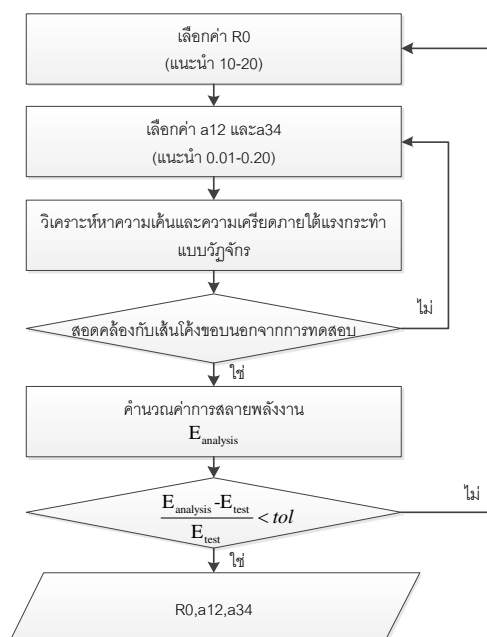
No.	Material Parameter			Δ Energy dissipation (%) (Analysis-Experiment)			
	R_0	a_{12}	a_{23}	L/d=5	L/d=8	L/d=11	Average
1	10	0.12	0.165	9.38(-)	14.65(-)	25.64(-)	16.56
2	12.5	0.085	0.125	2.41	4.75(-)	18.55(-)	8.57
3	15	0.07	0.1	10.69	1.80	13.82(-)	8.77
4	17.5	0.06	0.085	16.03	5.63	10.97(-)	10.87
5	20	0.055	0.08	20.47	8.91	8.52(-)	12.64

หมายเหตุ ค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมจากผลทดสอบ เท่ากับ 73.09, 72.95 และ 68.63

เมกะปาสคาล สำหรับกรณีที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 5, 8 และ 11 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์เหล็กเสริมที่มีค่าพารามิเตอร์ $R_0=12.5$, $a_{12}=0.085$ และ $a_{23}=0.125$ มีค่าสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) มากที่สุด โดยมีค่าความแตกต่างของการสลายพลังงานเฉลี่ยเทียบกับผลการทดสอบเท่ากับ 8.57%

นอกจากนี้ได้เสนอแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ R_0, a_{12} และ a_{34} โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.47



ภาพที่ 3.47 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ R_0, a_{12} และ a_{34}

บทที่ 4

แบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม รับแรงกระทำตามแนวแกน

ศึกษาการสร้างแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยการพัฒนาจากเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกน โดยอ้างอิงคุณสมบัติเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมตามการทดสอบของ Archawin Sawaraj(2010) และสำหรับแบบจำลองเหล็กเสริมรับกระทำแบบวงจักร และได้อ้างอิงคุณสมบัติเหล็กเสริมตามการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) และคุณสมบัติปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ตามการทดสอบของ และ Archawin Sawaraj(2010)

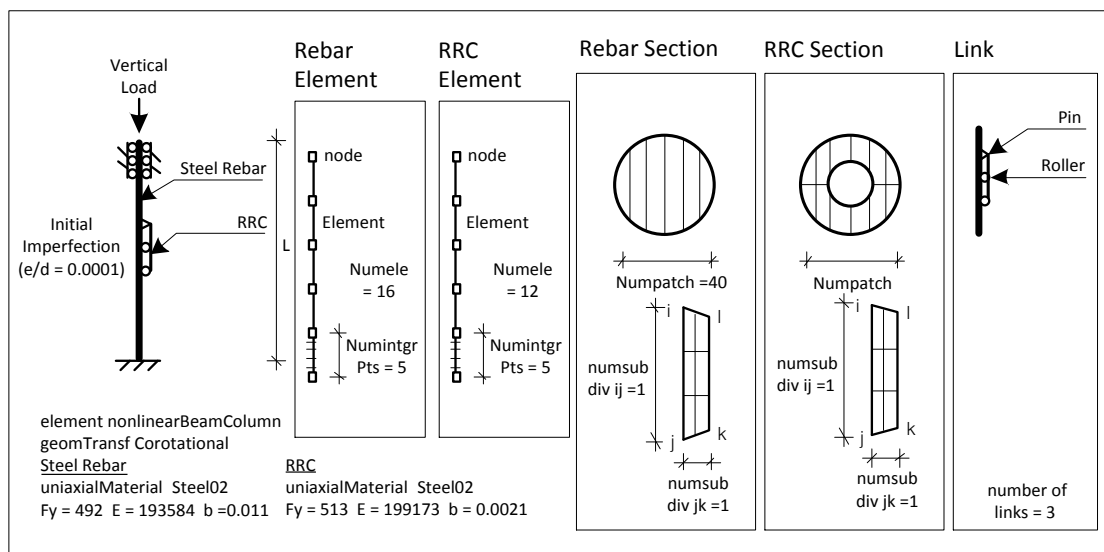
โดยกำหนดชื่อของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมตามความยาว และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมในรูปแบบ Lxxx-Tx โดย L (Length of Rebar-Restraining Collar) ตามด้วยความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ T (Thickness of Rebar-Restraining Collar) ตามด้วยความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหน่วยเป็นมิลลิเมตร โดยกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม 2 มิลลิเมตร เช่น L100-T3 (สำหรับเหล็กเสริม DB25) คือ ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมยาว 100 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 27 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33 มิลลิเมตร

4.1 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

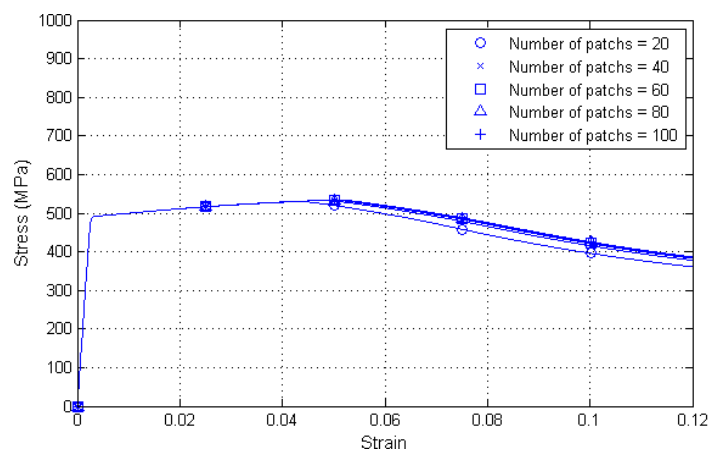
พัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริม ที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยการพัฒนาจากเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกน โดยใช้แบบจำลองที่มีการแบ่งหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจำนวน 40 ชิ้นส่วน แบ่งชิ้นส่วนตามแนวยาวของเหล็กเสริม 16 ชิ้นส่วนและแบ่งชิ้นส่วนย่อยตามยาว เท่ากับ 5 และมีค่าความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นเท่ากับ 0.0001 และใช้ค่าคุณสมบัติเหล็กเสริมและปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมตามการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010)

4.1.1 การแบ่งชิ้นส่วนหน้าตัดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

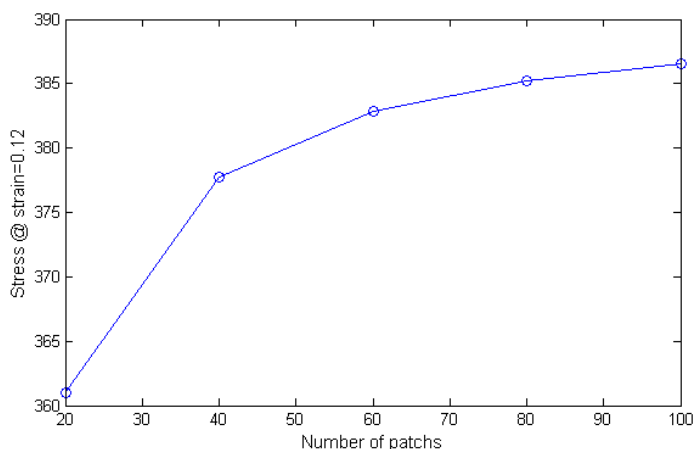
ศึกษาจำนวนหน้าตัดที่เหมาะสมของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยใช้เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ($L/d=8$) ที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27 มิลลิเมตร, ภายนอก 33 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยการใช้การแบ่งหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมที่มีชิ้นส่วนจำนวนเท่ากับ 20, 40, 60, 80 และ 100 ที่มีชิ้นส่วนตามยาว 12 ชิ้นส่วนที่มีการแบ่งย่อยเท่ากับ 5 และมีจุดต่อเชื่อมระหว่างเหล็กเสริม 3 จุด ซึ่งแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิ้นส่วนของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด



ภาพที่ 4.2 ผลของจำนวนชิ้นส่วนหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด



ภาพที่ 4.3 ผลของจำนวนชิ้นส่วนหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.12

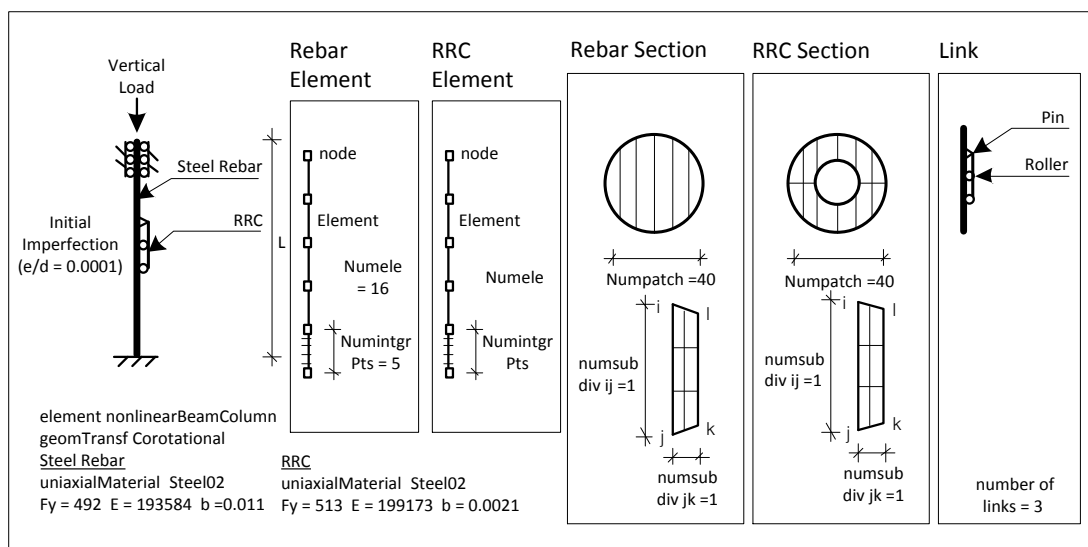
จากภาพที่ 4.2 จำนวนชิ้นส่วนหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ส่งผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมในช่วงที่เหล็กเสริมมีกำลังลดลง โดยมีการลดลงของกำลังที่ค่าความเครียดสูงขึ้น เมื่อมีการแบ่งหน้าตัดจำนวนมากขึ้น ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เหล็กเสริม ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีการแบ่งชิ้นส่วนตั้งแต่ 40 ชิ้นขึ้นไปมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน และจากภาพที่ 4.3 ค่าความแตกต่างของหน่วยแรงสำหรับ 40 ชิ้นส่วน และ 100 ชิ้นส่วน มีค่าประมาณ 8 เมกะปาสคาลซึ่งสามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้การแบ่งหน้าตัดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจำนวน 40 ชิ้น สำหรับงานวิจัยนี้

4.1.2 การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ศึกษาการแบ่งจำนวนชิ้นส่วนตามยาวที่เหมาะสม สำหรับชิ้นส่วนหน้าตัดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยใช้เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ($L/d=8$) ที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27 มิลลิเมตร, ภายนอก 33 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรโดยใช้การแบ่งหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมที่มีชิ้นส่วนจำนวนเท่ากับ 40 และมีจุดต่อเชื่อมระหว่างเหล็กเสริม 3 จุด ที่มีชิ้นส่วนตามยาว และการแบ่งชิ้นส่วนย่อย ดังตารางที่ 4.1 โดยแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 4.4

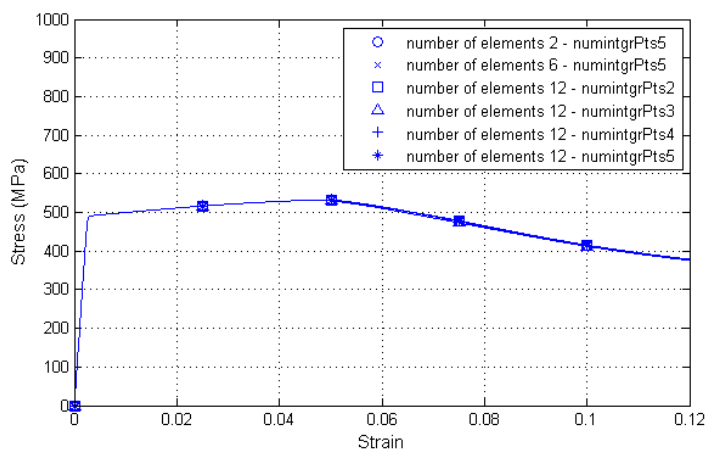
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

No.	Number of elements	Number of integration points along the element
1	2	5
2	6	5
3	12	5
4	12	2
5	12	3
6	12	4



ภาพที่ 4.4 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

จากผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 4.5 การแบ่งจำนวนชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมอย่างเด่นชัด อย่างไรก็ตามจำนวนชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม มีผลต่อจำนวนจุดยึดรั้งระหว่างเหล็กเสริมและปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ดังนั้นจำนวนชิ้นส่วนตามยาวที่เหมาะสม ยังขึ้นกับจำนวนจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมซึ่งศึกษาในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.5 ผลของจำนวนชิ้นส่วนตามยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

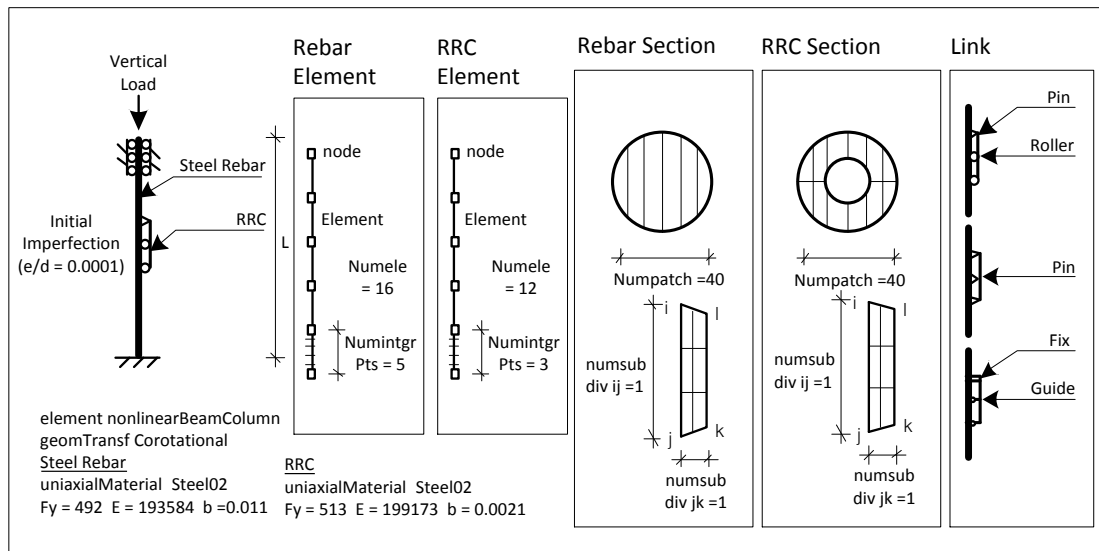
4.1.3 การเชื่อมต่อของเหล็กเสริมกับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

การจำลองจุดเชื่อมต่อระหว่างเหล็กเสริม กับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต้องคำนึงถึงรูปแบบของการยึดรั้ง และจำนวนจุดเชื่อมต่อ โดยใช้เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ($L/d=8$) โดยใช้การแบ่งหน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมแบบสี่เหลี่ยมจำนวน 40 ชิ้นส่วน โดยมีชิ้นส่วนตามยาว 12 และการแบ่งชิ้นส่วนย่อยตามยาวเท่ากับ 3 โดยการศึกษาในหัวข้อนี้แบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน

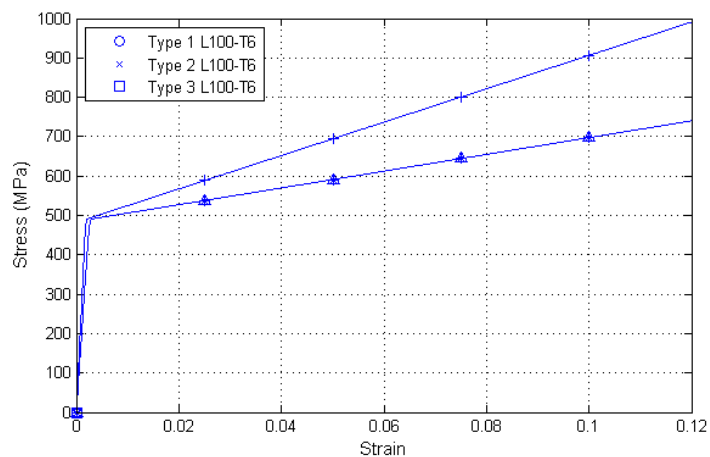
4.1.3.1 รูปแบบการยึดรั้งระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริม

พิจารณาการยึดรั้ง 3 รูปแบบ ประเภทที่ 1 Pin-Roller ซึ่งเป็นการยึดรั้งแบบที่ไม่ยินยอมให้มีการเคลื่อนที่ตามแนวความยาวเหล็กเสริม (y direction) และตามแนวตั้งฉากความยาวเหล็กเสริม (x direction) จำนวนหนึ่งจุดเชื่อมต่อ โดยที่จุดเชื่อมต่ออื่นๆไม่ยินยอมให้เคลื่อนที่ตามแนวตั้งฉากของเหล็กเสริม, การยึดรั้งประเภทที่ 2 Pin-Pin ซึ่งจุดเชื่อมต่อทั้งหมดเป็นการยึดรั้งแบบที่ไม่ยินยอมให้มีการเคลื่อนที่ตามแนวความยาวเหล็กเสริม และตามแนวตั้งฉากความยาวเหล็กเสริม, การยึดรั้งประเภทที่ 3 Fix-Guide ซึ่งเป็นการยึดรั้งแบบที่ไม่ยินยอมให้มีการเคลื่อนที่ตาม

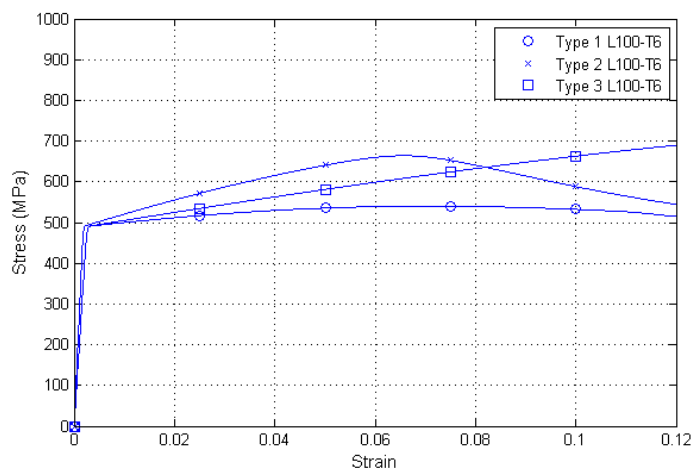
แนวความยาวเหล็กเสริม ตามแนวตั้งฉากความยาวเหล็กเสริม รวมถึงการหมุนในทิศทาง z จำนวนหนึ่งจุดเชื่อมต่อ โดยที่จุดเชื่อมต่ออื่นๆไม่ยินยอมให้เคลื่อนที่ตามแนวตั้งฉากของเหล็กเสริม และการหมุนในทิศทาง z ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลประเภทการยัดรีงระหว่างปลอกยัดรีงเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด



ภาพที่ 4.7 ผลของประเภทการยัดรีงระหว่างปลอกยัดรีงเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับแรงดึง

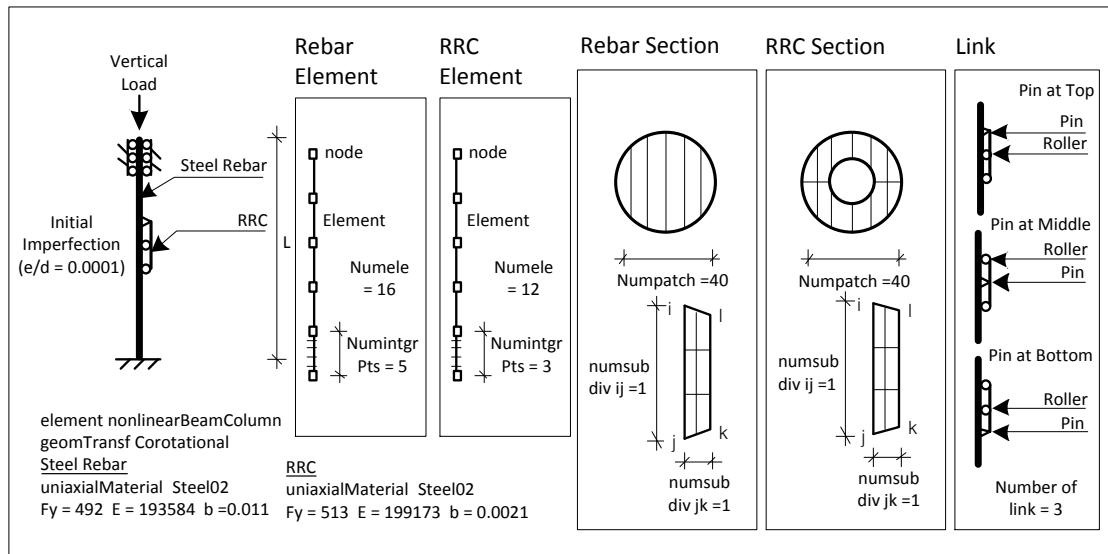


ภาพที่ 4.8 ผลของประเภทการยึดรั้งระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อ
ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับแรงอัด

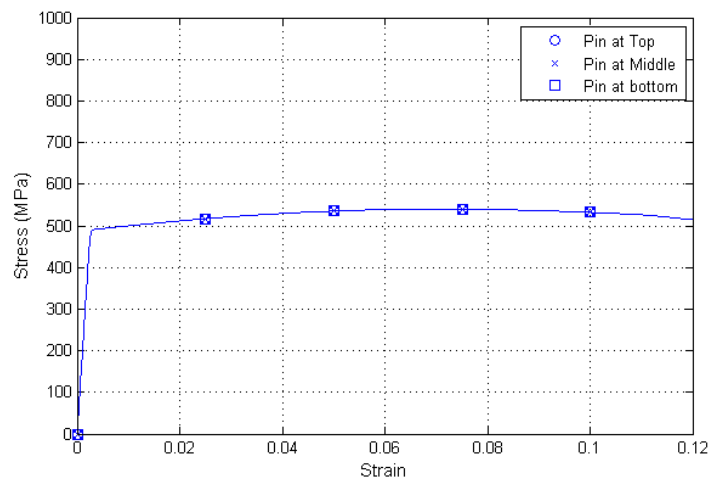
จากภาพที่ 4.7 การยึดรั้งประเภทที่ 2 Pin-Pin ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีผลต่อการรับแรงดึง ซึ่งขัดแย้งกับความเป็นจริงที่ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับดึงของเหล็กเสริม และการยึดรั้งประเภทที่ 1 Pin-Roller และการยึดรั้งประเภทที่ 3 Fix-Guide ไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรม การรับแรงดึงของเหล็กเสริม โดยที่การยึดรั้งประเภท Fix-Guide สามารถรับแรงในช่วงพลาสติกได้ มากกว่าการยึดรั้งประเภท Pin-Roller ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ การยึดรั้งประเภท Pin-Roller เนื่องจากเมื่อเทียบกับสภาวะความเป็นจริงจากลักษณะการ เชื่อมต่อระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริม ซึ่งไม่ได้มีการยึดรั้งตามการหมุนของเหล็ก เสริม

4.1.3.2 ตำแหน่งของล้อเลื่อน(Pin) สำหรับการยึดรั้งแบบข้อหมุนล้อเลื่อน(Pin-Roller)

ศึกษาผลของตำแหน่งของ Pin สำหรับการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีจำนวนจุดเชื่อมต่อ เท่ากับ 3 ซึ่งมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T6 โดยมีรายละเอียดแบบจำลองดัง ภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับการยัดรีงแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

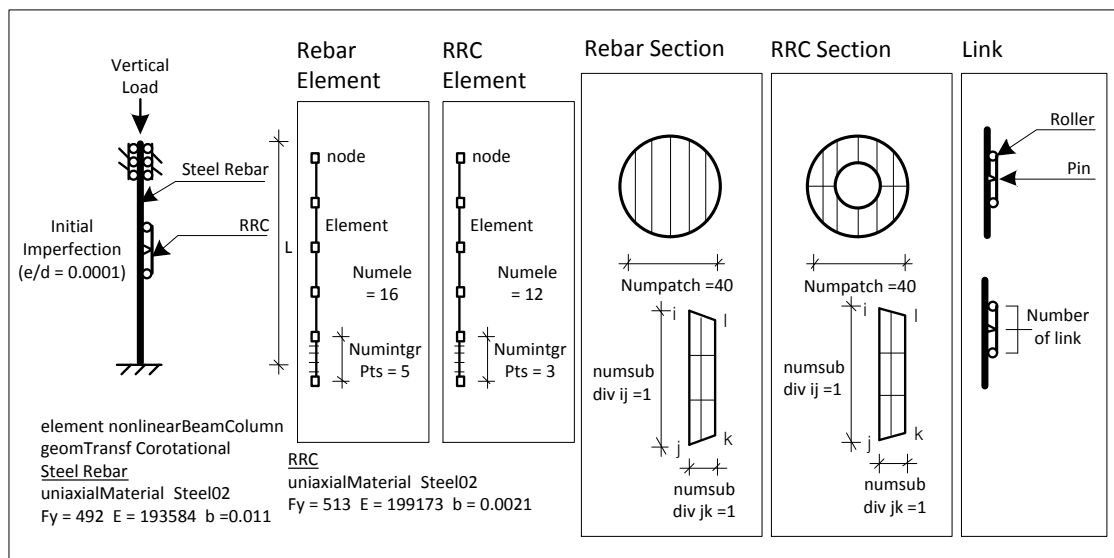


ภาพที่ 4.10 ผลของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับการยัดรีงแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

ตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับการยัดรีงแบบ Pin-Roller ไม่ส่งผลต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด ดังภาพที่ 4.10 โดยสำหรับแบบจำลองในหัวข้อถัดไปได้กำหนดให้ จุดเชื่อมต่อแบบ Pin อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของปลอกยัดรีงเหล็กเสริม

4.1.3.3 จำนวนจุดเชื่อมต่อระหว่างเหล็กเสริมและปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

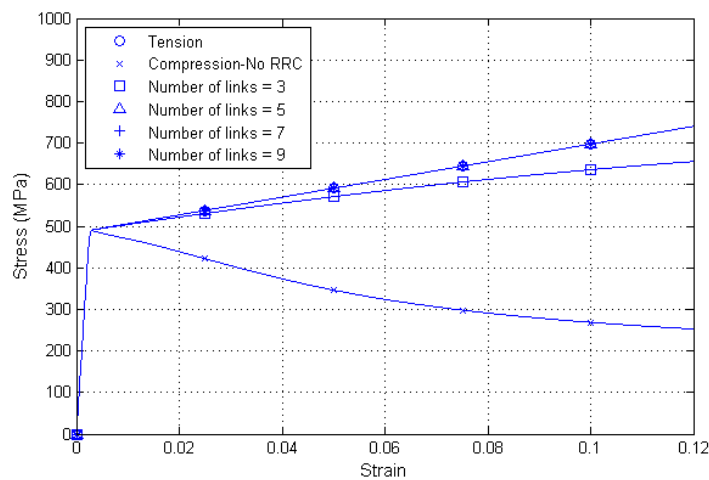
ศึกษาผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริม ที่ยึดรั้งแบบ Pin-Roller ซึ่งมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L150-T6 และ L100-T3 เพื่อเปรียบเทียบผลกับผลการทดสอบ โดยเหตุในการเลือกตัวอย่างนี้ เนื่องจากขนาด L150-T6 เป็นขนาดที่เหล็กเสริมไม่เกิดการโก่งเดาะ และสามารถรับแรงได้มากกว่าเหล็กรับแรงดึงตามการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010) และ ขนาด L100-T3 เนื่องจากเป็นขนาดที่ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไม่เพียงพอจึงทำให้รับแรงได้น้อยลง โดยศึกษาจำนวนจุดเชื่อมต่อที่มีค่าเท่ากับ 3, 5, 7 และ 9 โดยมี และศึกษาเพิ่มเติมสำหรับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 16 ที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L340-T8 เพื่อศึกษาผลการของจำนวนจุดเชื่อมต่อเมื่อปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความยาวเพิ่มขึ้น โดยรายละเอียดของแบบจำลองดังภาพที่ 4.11



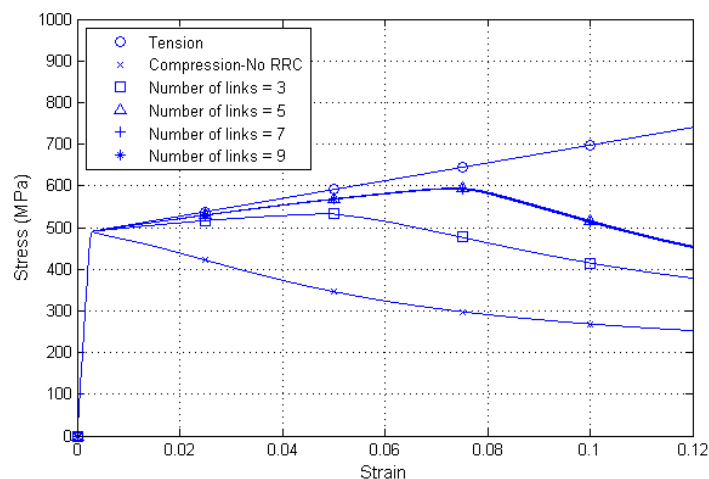
ภาพที่ 4.11 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อระหว่างปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมและเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

จากผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 4.12 จำนวนจุดเชื่อมต่อ ตั้งแต่ 5 จุดขึ้นไปมีพฤติกรรมที่เหมือนกันซึ่งสามารถรับแรงภายหลังช่วงยืดหยุ่นได้มากกว่าแบบจำลองที่มีการเชื่อมต่อจำนวน 3 จุด โดยมีความสามารถในการรับแรงเท่ากับเหล็กรับแรงดึง และในภาพที่ 4.13 ทุกแบบจำลองสามารถจำลองความไม่เพียงพอความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้ (มีการลดลงของกำลังการ

รับแรงของเหล็กเสริม) โดยที่แบบจำลองที่มีจุดเชื่อมต่อ ตั้งแต่ 5 จุดขึ้นไปมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันโดยกำลังมีการลดลงที่ค่าความเครียดประมาณ 0.075 และ ประมาณ 0.05 สำหรับแบบจำลองที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จำนวนจุด



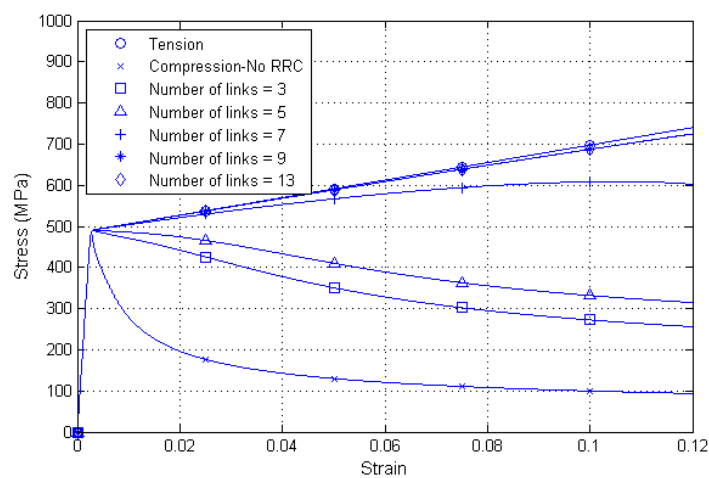
ภาพที่ 4.12 ผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อ ที่มีการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด ($L/d=8$ L150-T6)



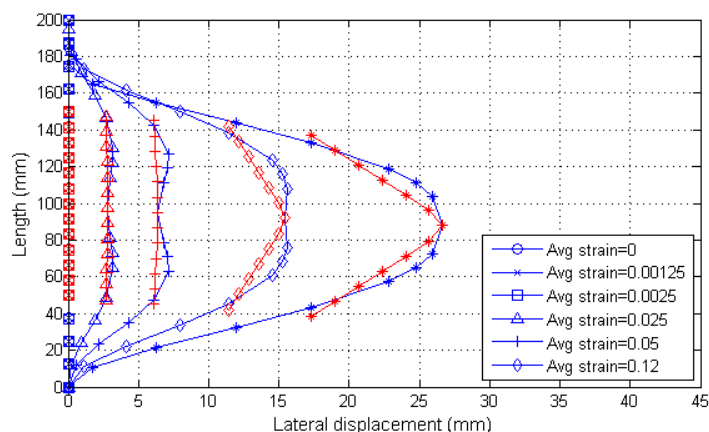
ภาพที่ 4.13 ผลของจำนวนจุดเชื่อมต่อ ที่มีการยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด ($L/d=8$ L100-T3)

อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีนี้ที่ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความยาวมาก แบบจำลองที่มีจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 5 ขึ้นไป พฤติกรรมของเหล็กเสริมมีความแตกต่างกัน ดังแสดงดังภาพที่ 4.14

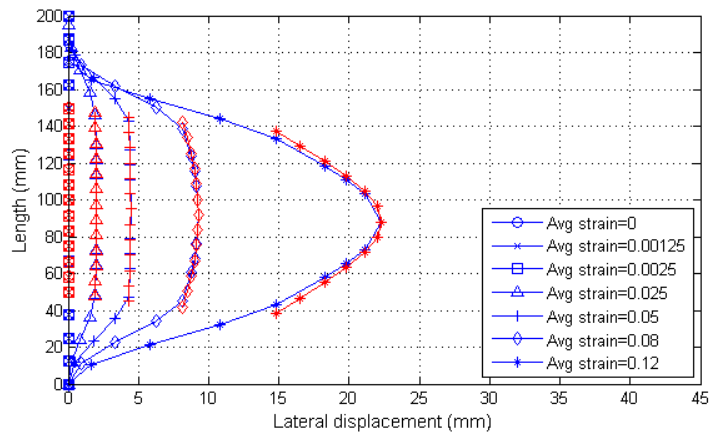
โดยแบบจำลองที่มีจุดเชื่อมต่อมากกว่าจะมีพฤติกรรมที่ดีกว่า และมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันเมื่อจำนวนจุดเชื่อมต่อเท่ากับ 9 และ 13 จากผลการศึกษาทั้ง 3 ตัวอย่าง เหล็กเสริมมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน สำหรับแบบจำลองที่มีการจำลองจุดยึดรั้งมากกว่าค่าค่าหนึ่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้กำหนดให้ทุกจุดของเหล็กเสริมที่อยู่ในช่วงปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม มีการเชื่อมต่อกับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยรูปแบบการเสีรูปด้านข้างของเหล็กเสริมที่มีจำนวนจุดยึดรั้งจำนวน 3 จุด 9 จุด สำหรับตัวอย่าง L100-T3 แสดงดังภาพที่ 4.15-4.16



ภาพที่ 4.14 ผลของตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อแบบ Pin สำหรับ การยึดรั้งแบบ Pin-Roller ที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด ($L/d=16$ L340-T8)



ภาพที่ 4.15 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง $L/d=8$ L100-T3 ที่มีจุดเชื่อมต่อระหว่างเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม จำนวน 3 จุด

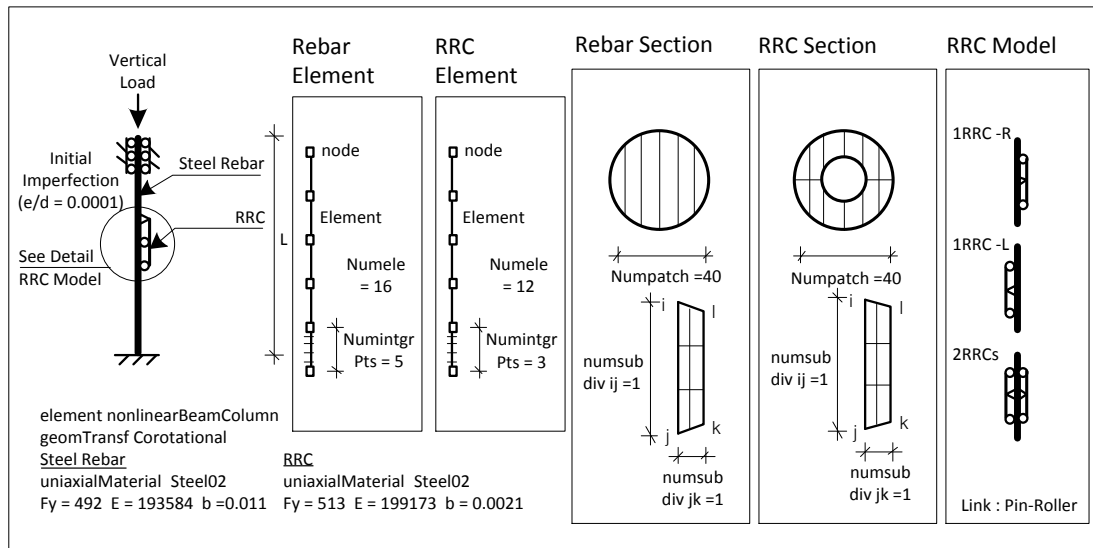


ภาพที่ 4.16 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง $L/d=8$ L100-T3 ที่มีจุดเชื่อมต่อระหว่างเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม จำนวน 9 จุด

ซึ่งจากภาพที่ 4.15 และ 4.16 เห็นได้ว่าแบบจำลองที่มีจำนวนจุดเชื่อมต่อมากกว่ามีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า

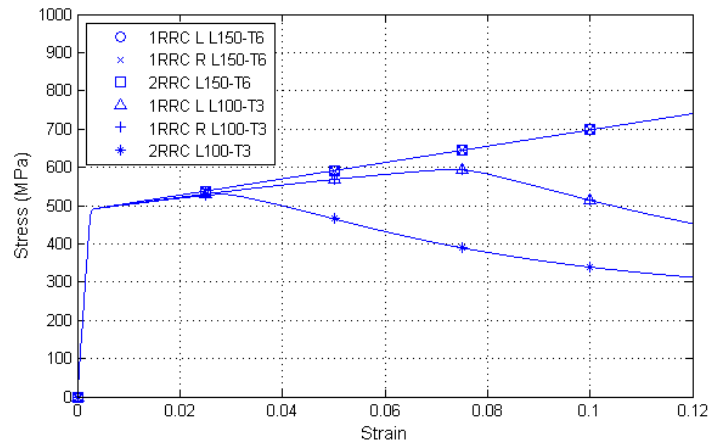
4.1.4 รูปแบบการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ทำการศึกษารูปแบบการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ที่มีการยึดรั้งแบบ Pin-Roller โดยศึกษาจำนวน 3 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 จำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจำนวน 1 ขึ้นส่วนอยู่ทางขวาของเหล็กเสริม รูปแบบที่ 2 จำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจำนวน 1 ขึ้นส่วนอยู่ทางซ้ายของเหล็กเสริม และรูปแบบที่ 3 จำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจำนวน 2 ขึ้นส่วนอยู่ทางขวา และซ้ายของเหล็กเสริม โดยที่มีพื้นที่หน้าตัดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเป็นครึ่งหนึ่งของรูปแบบที่ 1 และ 2 โดยใช้เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร $L/d = 8$ ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 4.17

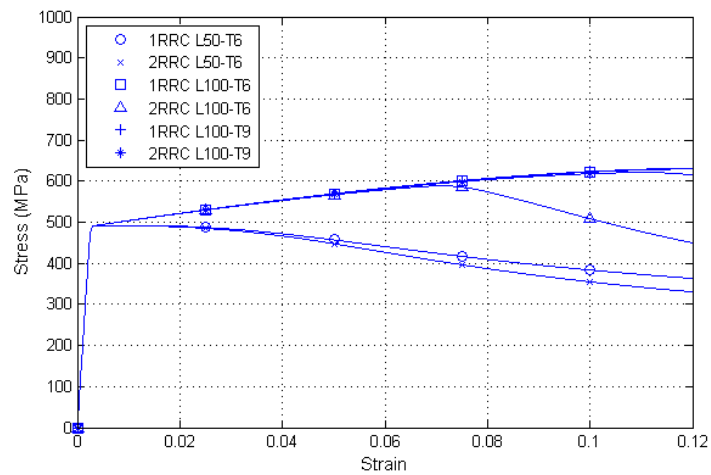


ภาพที่ 4.17 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลรูปแบบการจำลองปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

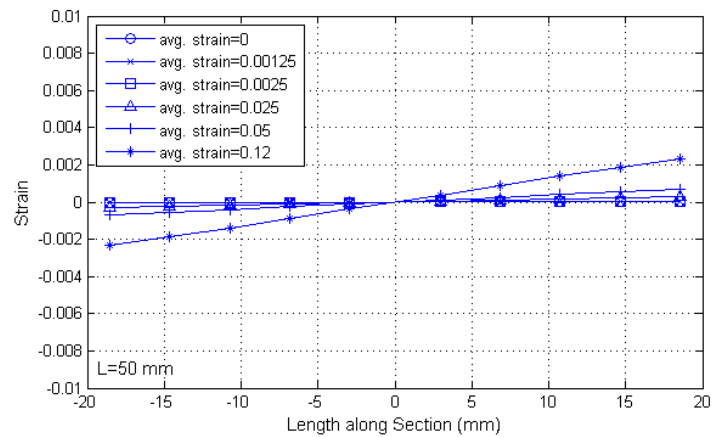
ผลการวิเคราะห์ ภาพที่ 4.18 กรณี L150-T6 ทุกแบบจำลองมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน โดยสามารถรับแรงได้เท่ากับเหล็กรับแรงดึง และสำหรับกรณี L100-T3 การจำลองชิ้นส่วนปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมจำนวนหนึ่งด้าน ให้ผลที่เหมือนกันโดยไม่ขึ้นอยู่กับด้านของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม และมีกำลังหลังช่วงยืดหยุ่นมากกว่าการจำลองปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมสองด้าน โดยทั้ง 3 แบบจำลองสามารถจำลองความไม่เพียงพอของความหนาของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมได้ โดยที่แบบจำลองที่มีปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม 1 ด้าน มีการลดลงของกำลังเมื่อความเครียดเท่ากับ 0.075 และ 0.03 สำหรับแบบจำลองที่มีเหล็กเสริม 2 ด้าน และภาพที่ 4.19 เป็นการเปรียบเทียบเพิ่มเติมระหว่างแบบจำลองที่มีปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม 1 ด้าน และ 2 ด้าน สำหรับปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L50-T6, L100-T6 และ L100-T9 ซึ่งกรณี L100-T6 เหล็กเสริมรับแรงได้ลดลงที่ความเครียดมากกว่า 0.075 เมื่อจำลองปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม 2 ด้าน แต่ไม่พบการรับแรงที่ลดลงเมื่อจำลองปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม 1 ด้าน โดยที่พฤติกรรมในภาพรวม การจำลองเหล็กเสริม 1 ด้านทำให้เหล็กเสริมสามารถรับแรงในช่วงพลาสติกได้มากกว่าการจำลองเหล็กเสริม 1 ด้าน



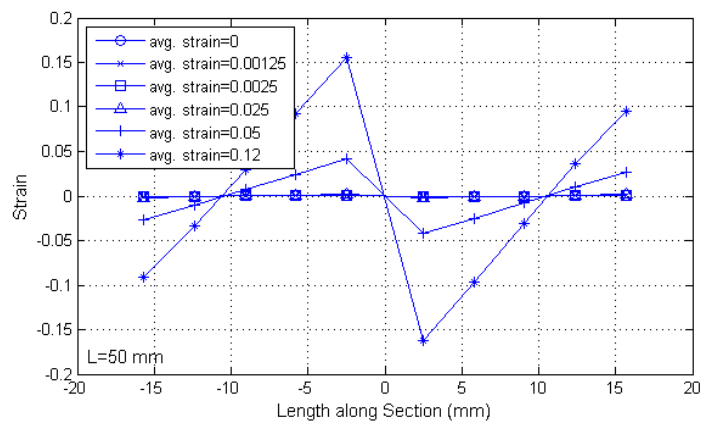
ภาพที่ 4.18 ผลของการจำลองปลอกยึดดึงเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (L150-T6,L100-T3)



ภาพที่ 4.19 ผลของการจำลองปลอกยึดดึงเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด (L50-T6,L100-T3,L100-T9)



ภาพที่ 4.20 ลักษณะการกระจายความเคียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม
ที่มีการจำลองแบบ 1RRC

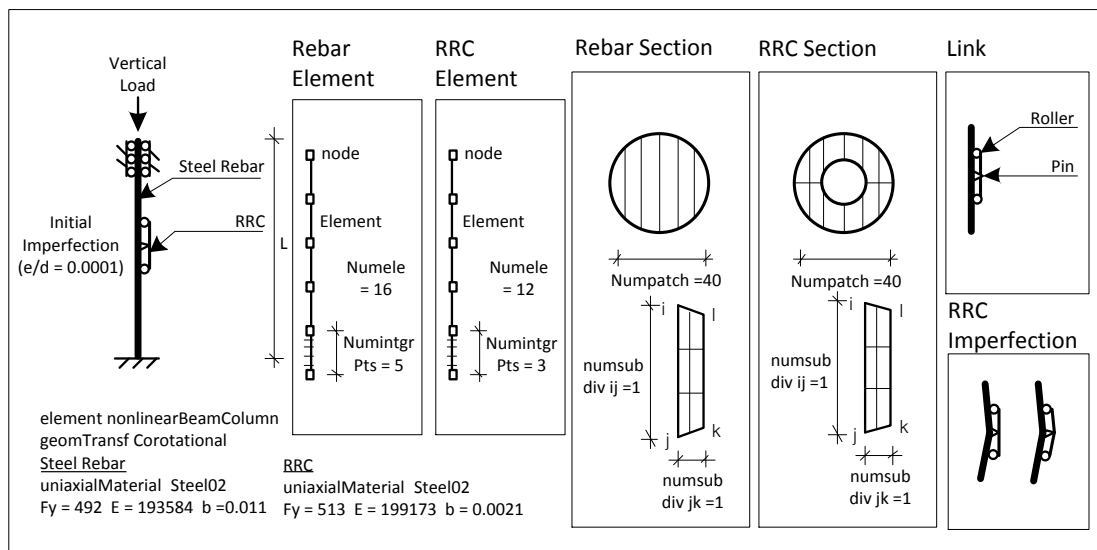


ภาพที่ 4.21 ลักษณะการกระจายความเคียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม
ที่มีการจำลองแบบ 2RRC

ภาพที่ 4.20 และ 4.21 แสดงถึงลักษณะการกระจายความเคียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่มีการจำลองแบบ 1RRC และ 2RRC ซึ่งแบบจำลองแบบ 1RRC มีความสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่าที่มีการรับแรงดัดรอบแกนกึ่งกลางของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่มีด้านหนึ่งรับแรงอัด และอีกด้านหนึ่งรับแรงดึง

4.1.5 ความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม

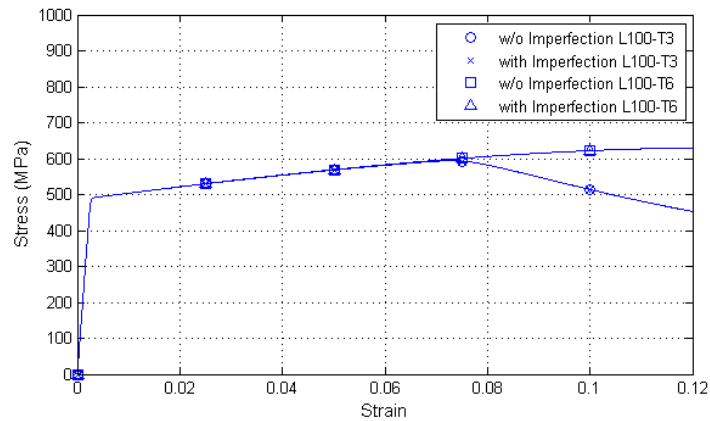
อันเนื่องมาจากแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการสมมุติให้มีความไม่สมบูรณ์เริ่มต้น ดังนั้นจึงส่งผลต่อการจำลองปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม โดยสามารถจำลองได้ 2 ลักษณะ คือให้ปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมเป็นแนวตรง และให้ปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมมีความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นสอดคล้องกับแบบจำลอง โดยศึกษาจากแบบจำลองที่ผ่านมา ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของปลอกยี่ดั่ง

เหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

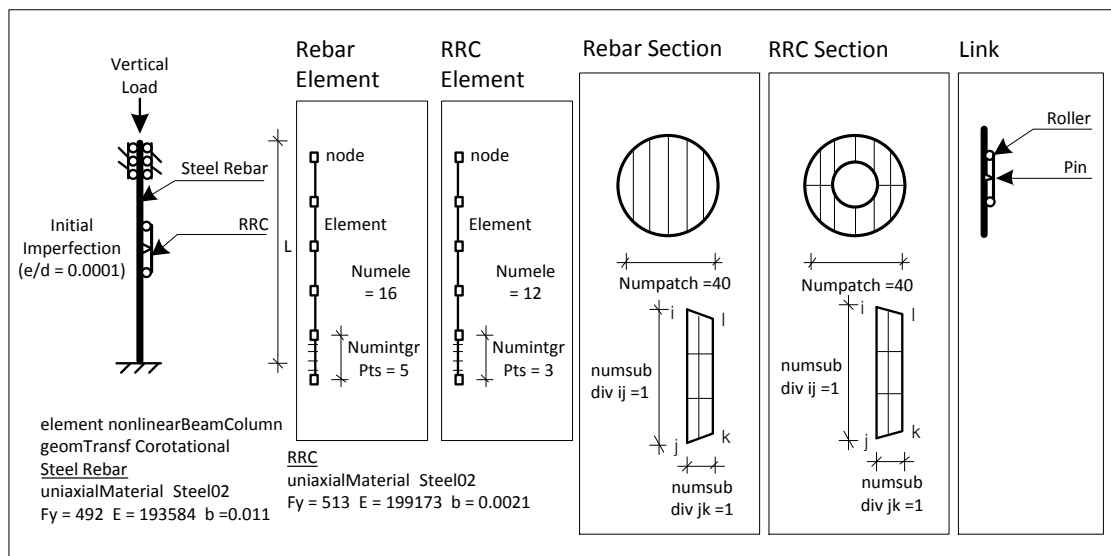
ผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม ส่งผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมการรับแรงของเหล็กเสริมน้อยมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงใช้การจำลอง ที่ไม่คำนึงถึงผลของความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม เพื่อให้สะดวกต่อการสร้างแบบจำลอง



ภาพที่ 4.23 ผลการจำลองปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

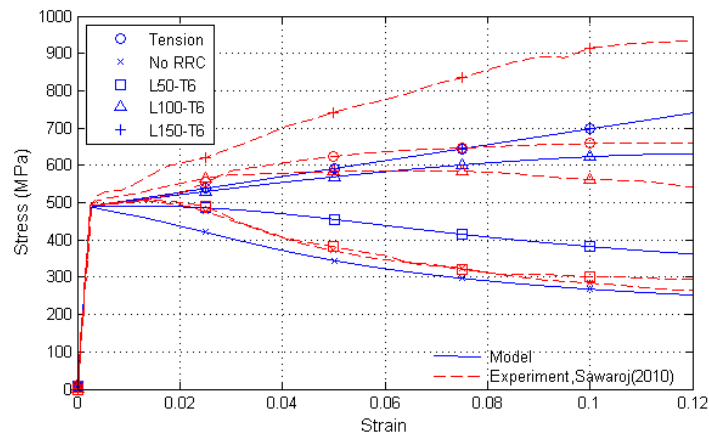
4.1.6 สอบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

เปรียบเทียบพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกับผลการทดสอบ ซึ่งได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010) ซึ่งวิเคราะห์โดยแบบจำลองดังภาพที่ 4.24

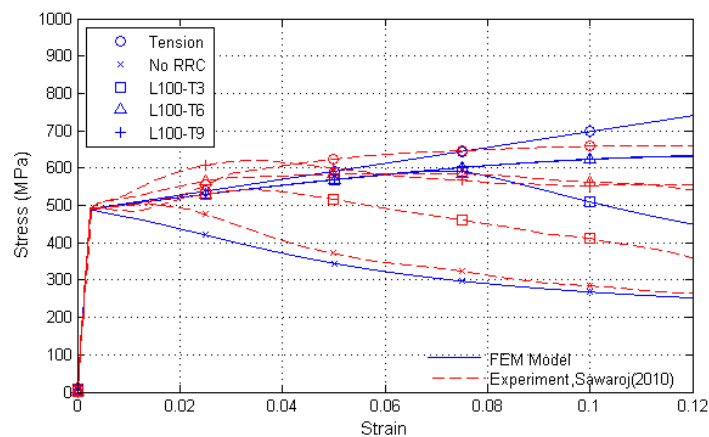


ภาพที่ 4.24 แบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้ง

เหล็กเสริมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกับผลการทดสอบ



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความยาวที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010)



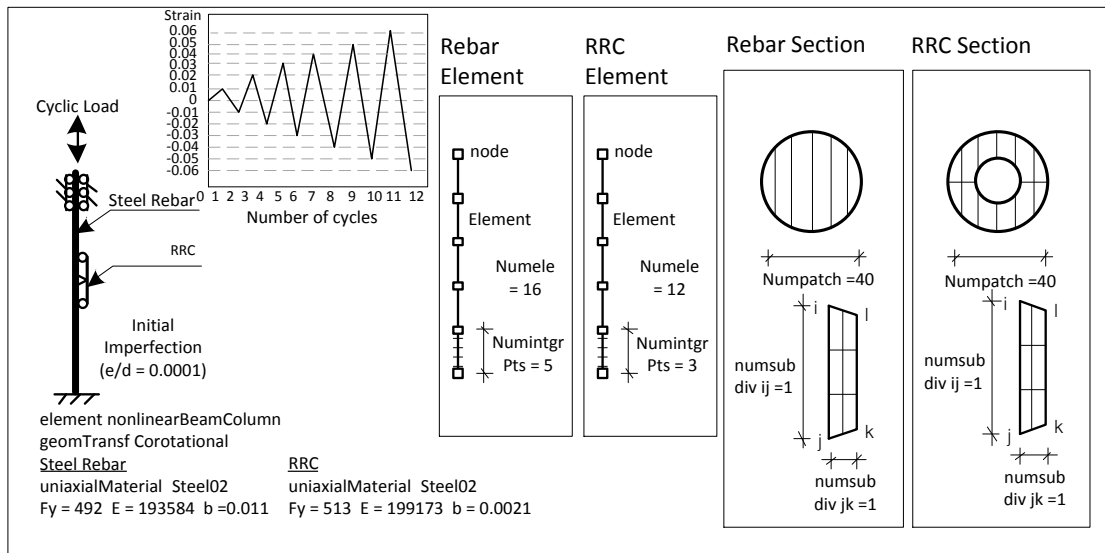
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่แปรผันความหนาที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010)

การทดสอบของ Archawin Sawaraj(2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่ขึ้นกับความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งจากภาพที่ 4.25 ผลจากแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับความยาว และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมได้ โดยที่เหล็กเสริมสามารถรับแรงได้มากขึ้นเมื่อปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความยาวมากขึ้น สำหรับตัวอย่าง L150-T6 จากการทดสอบเหล็กเสริมสามารถรับแรงได้มากกว่าเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยที่แบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงอัดที่ดีที่สุดเท่ากับเหล็กรับแรงดึง และในภาพที่ 4.26 ซึ่งเป็นพฤติกรรมของเหล็กเสริมเมื่อมีการแปรผันความหนาของปลอกยึดรั้ง

เหล็กเสริม จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความหนาที่พอเพียงของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมเพื่อให้สามารถคงสภาพการยี่ดิ่งไว้ได้ โดยที่เมื่อความหนาเพียงพอถึงค่าหนึ่งแล้วเหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมที่คงที่ ซึ่งสังเกตได้จากตัวอย่าง L100-T6 และ L100-T9 ซึ่งในแบบจำลอง สามารถจำลองพฤติกรรมการรับแรงที่ลดลงเพื่อแสดงให้เห็นถึงความไม่เพียงพอของความหนาปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ดังในตัวอย่าง L100-T3 ที่มีการลดลงของกำลังหลังช่วงยี่ดิ่งที่ความเครียดมีค่าประมาณ 0.075

4.2 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวงจักรที่มีการเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

แบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม รับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวงจักรแสดงดังภาพที่ 4.27 โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาจากแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมรับแรงอัด โดยค่าคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมสอดคล้องตามผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) และคุณสมบัติของวัสดุของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมสอดคล้องตามผลการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010)

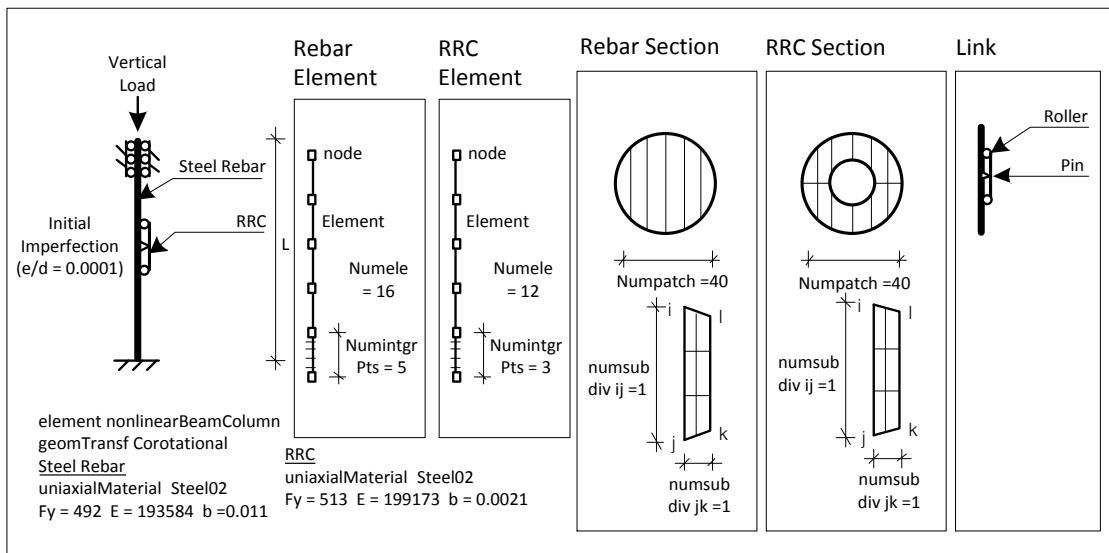


ภาพที่ 4.27 แบบจำลองเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวงจักร และรูปแบบการให้แรงกระทำ (loading scheme)

บทที่ 5

พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึง แรงปฏิกริยาทางข้างบริเวณปลายของเหล็กเสริม, การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริม, ค่าความเครียดและความโค้งภายในเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม, ค่าโมเมนต์ภายในเหล็กเสริม และปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยอ้างอิงตัวอย่างศึกษาจากการทดสอบของ Archawin Sawaraj (2010) และใช้แบบจำลองดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

5.1 แรงปฏิกริยาทางข้างบริเวณปลายของเหล็กเสริม

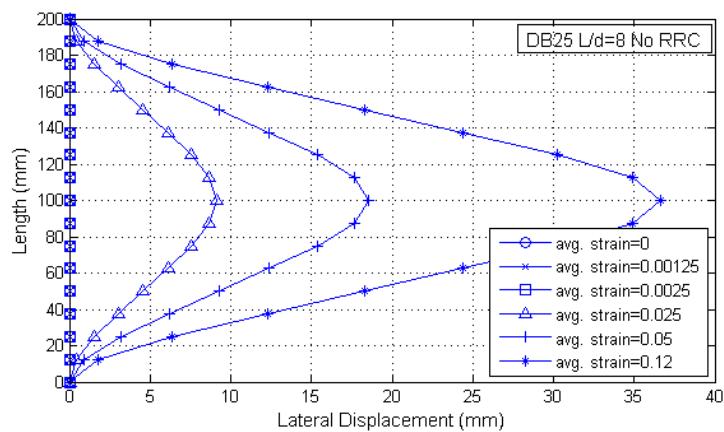
ตารางที่ 5.1 แรงปฏิกริยาทางข้างบริเวณปลายของเหล็กเสริม

แรงปฏิกริยาทางข้างบริเวณปลายเหล็กเสริม ที่ความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมเท่ากับ $0.12 (\times 10^{-10})$ นิวตัน					
No RRC	L50-T6	L100-T6	L150-T6	L100-T3	L100-T9
1.01	4517.97	150.84	0.31	6.82	128.03

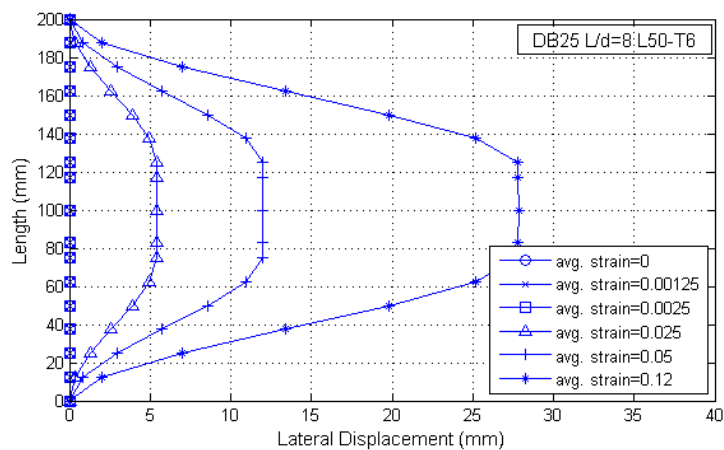
จากตารางที่ 5.1 แรงปฏิกริยาทางด้านข้างบริเวณจุดยึดรั้งของเหล็กเสริมที่ค่าใกล้เคียง

ศูนย์ทุกกรณี โดยมีค่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ยกเว้นตัวอย่าง L150-T6 ที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงเหล็กเสริมรับแรงดึง ที่มีแรงปฏิกริยาน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในส่วนนี้ไม่สามารถสรุปได้โดยตรงในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับผลของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อเหล็กทางขวางที่ใช้ในการยึดรั้งเหล็กเสริม เนื่องจากการจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมในช่วงของเหล็กทางขวาง ภายใต้อสมมุติฐานเหล็กทางขวางมีประสิทธิภาพเพียงพอในการยึดรั้งเหล็กเสริม แต่ในสภาพความเป็นจริงเมื่อเหล็กเสริมในช่วงของเหล็กทางขวางไม่เกิดการโก่งเดาะอันเนื่องมาจากการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม อาจส่งผลให้เหล็กเสริมมีรูปแบบการโก่งเดาะที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมบริเวณที่ยึดรั้งด้วยเหล็กเสริมทางขวาง

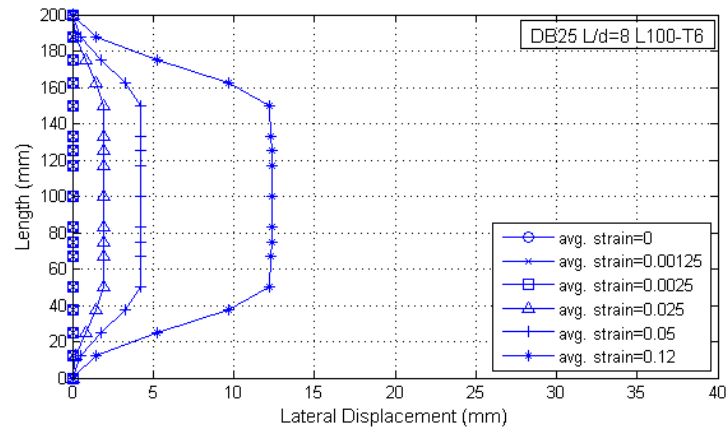
5.2 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริม



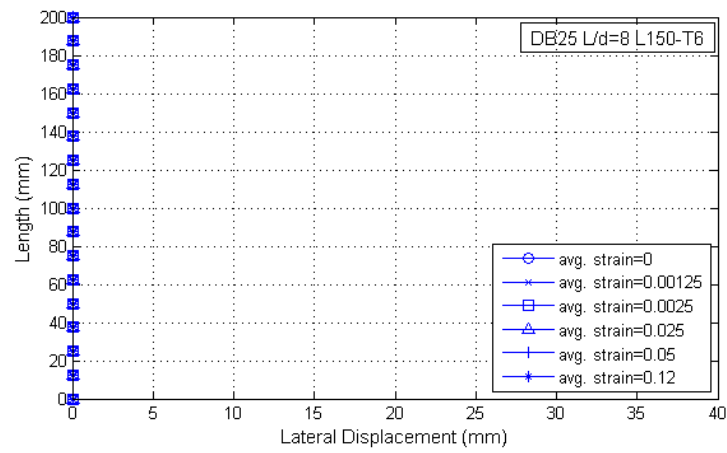
ภาพที่ 5.2 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



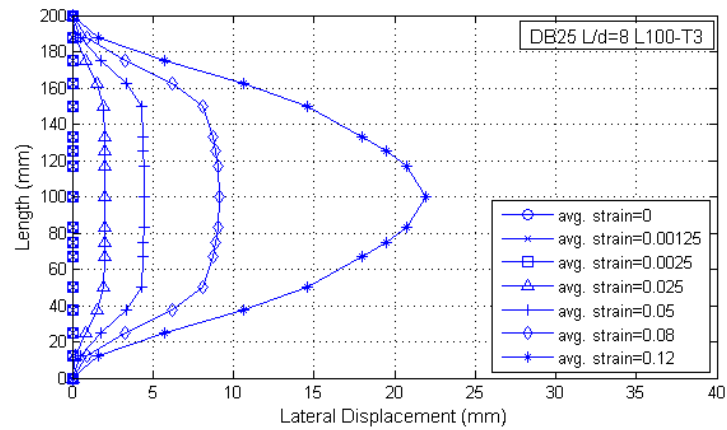
ภาพที่ 5.3 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่เสริมปลอกขนาด L50-T6



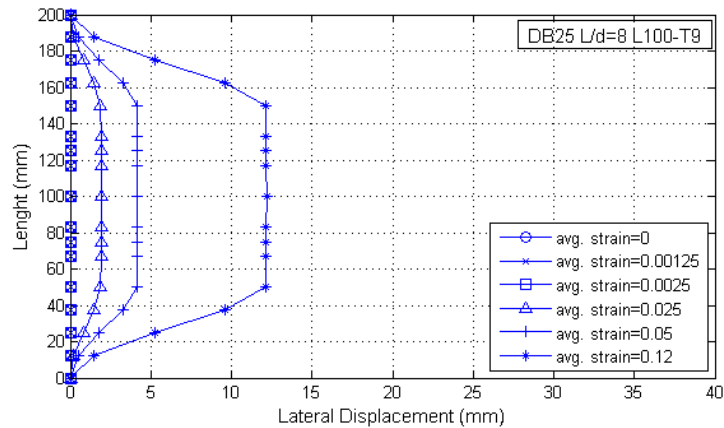
ภาพที่ 5.4 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่เสริมปลอกขนาด L100-T6



ภาพที่ 5.5 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่เสริมปลอกขนาด L150-T6



ภาพที่ 5.6 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่เสริมปลอกขนาด L100-T3



ภาพที่ 5.7 ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างที่เสริมปลอกขนาด L100-T9

ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมส่งผลให้การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมลดลง โดยขึ้นกับความยาวและความหนาของเหล็กเสริม ซึ่งลักษณะการเสียรูปของตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ภาพที่ 5.2 มีลักษณะการเสียรูปสอดคล้องกับการเสียรูปจากการทดสอบในงานวิจัยในอดีต ในตัวอย่าง L50-T6, L100-T6 และ L100-T9 ดังภาพที่ 5.3, 5.4 และ 5.7 ตามลำดับ การเสียรูปทางด้านข้างคงที่ตลอดช่วงความยาวที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยที่เหล็กเสริมมีการเสียรูปด้านข้างน้อยลงเมื่อเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความยาวมากขึ้น และตัวอย่าง L150-T6 ภาพที่ 5.5 เป็นตัวอย่างที่เหล็กเสริมมีความสามารถในการรับแรงเท่ากับเหล็กรับแรงดึง เหล็กเสริมมีการเสียรูปทางด้านข้างน้อยมาก สำหรับการเสียรูปทางด้านข้างของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาแตกต่างกัน อธิบายจากภาพที่ 5.4, 5.6 และ 5.7 ตัวอย่าง L100-T3 เป็นตัวอย่างที่ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมไม่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมได้เมื่อเหล็กเสริมมีการเสียรูปมาก อันเนื่องมาจากความหนาที่ไม่เพียงพอของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยเริ่มสังเกตการเสียภาพที่ไม่คงที่ ในช่วงที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเมื่อค่าความเครียดของเหล็กเสริมประมาณ 0.08 โดยมีลักษณะการเสียรูปคล้ายกับเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเมื่อความเครียดเท่ากับ 0.12 ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในภาพที่ 4.26 ที่เหล็กเสริมมีกำลังที่ลดลงในช่วงความเครียดมากกว่า 0.08 โดยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความหนาเพียงพอต่อการยึดรั้ง เหล็กเสริมจะมีการเสียรูปด้านข้างที่ใกล้เคียงกัน ดังเช่นตัวอย่าง L100-T6 และ L100-T9

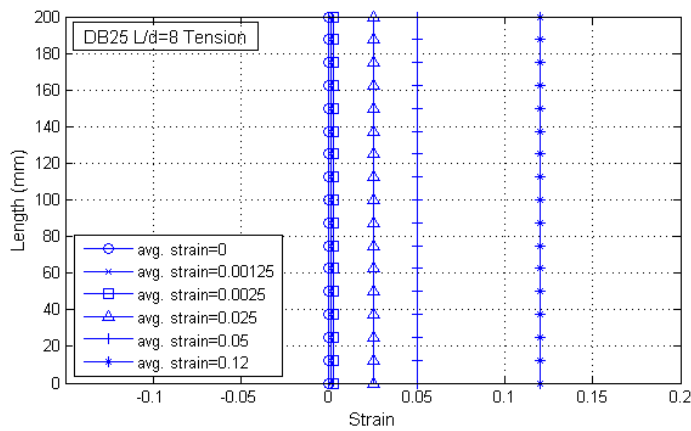
5.3 ค่าความเครียด และความโค้งภายในเหล็กเสริม

เนื่องจากเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ และบางบริเวณของเหล็กเสริมมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น จึงส่งผลให้ความเครียดไม่ได้มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวหน้าตัด ซึ่งสามารถอธิบายด้วยความโค้งในแต่ละบริเวณของเหล็กเสริม ในหัวข้อนี้จึงศึกษาการกระจายตัวของความเครียดบริเวณกึ่งกลางหน้าตัดตามแนวยาวของเหล็กเสริม, ค่าความเครียดบนหน้าตัดเหล็กเสริม และความโค้งภายในเหล็กเสริม

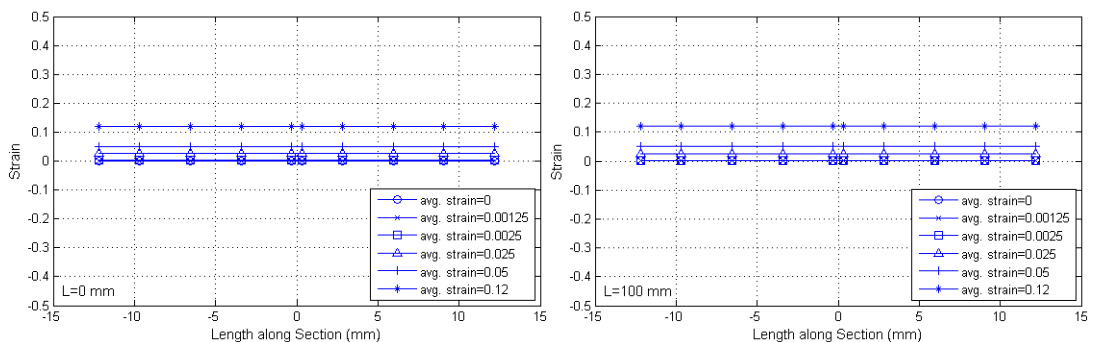
5.3.1 ค่าความเครียดตามแนวยาวและตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริม

(1) เหล็กเสริมรับแรงดึง

ความเครียดมีค่าสม่ำเสมอตลอดความยาว ดังแสดงในภาพที่ 5.8 และไม่มีการเสียรูปเนื่องจากแรงดัด ซึ่งสังเกตได้จากภาพที่ 5.9 ที่มีค่าความเครียดสม่ำเสมอตามแนวหน้าตัด



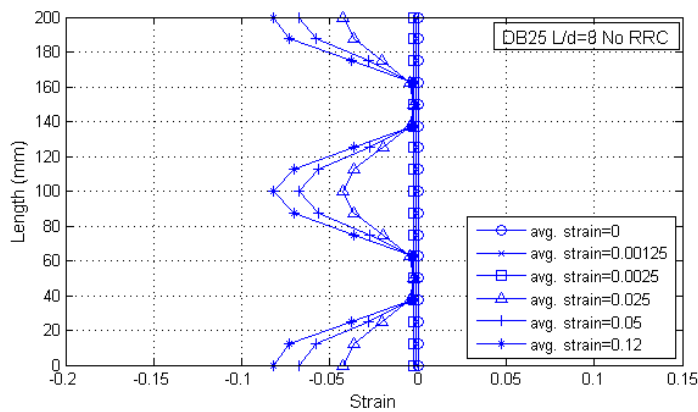
ภาพที่ 5.8 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริมรับแรงดึง



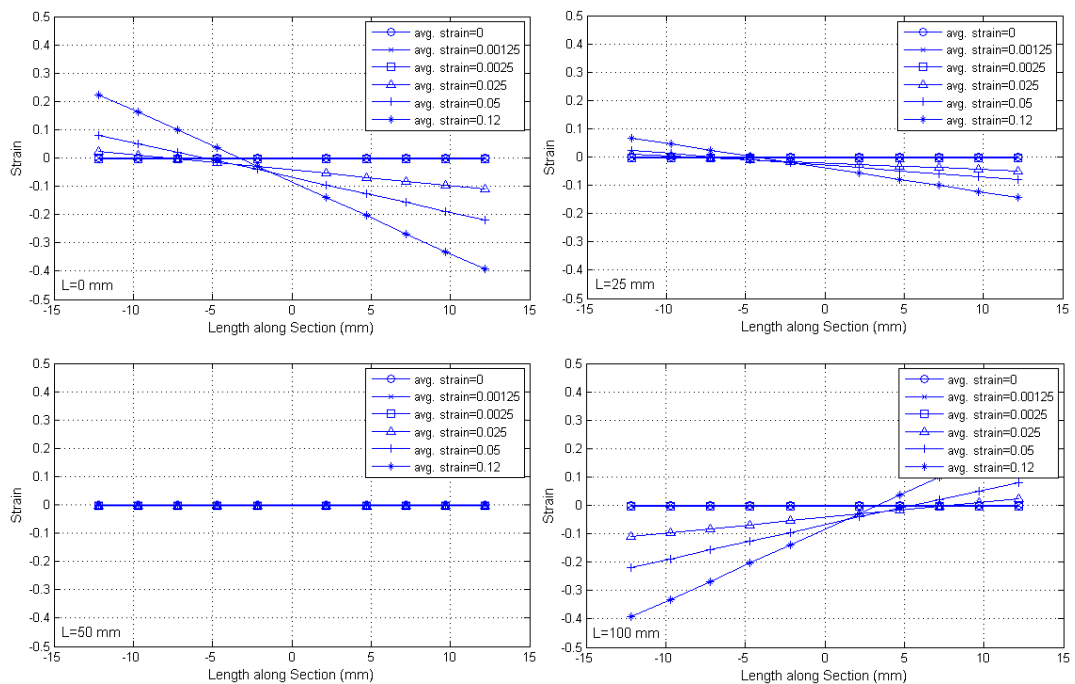
ภาพที่ 5.9 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

(2) เหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ค่าความเครียดมีค่าคงที่ตลอดทั้งหน้าตัดในช่วงก่อนที่เหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ และมีค่าไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดเมื่อเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ โดยที่มีค่ามากในช่วงปลายทั้งสองด้านของเหล็กเสริม หรือบริเวณที่มีการยึดรั้ง และบริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริม โดยนอกเหนือจากบริเวณที่กล่าวมานี้ ความเครียดมีค่าน้อยมากซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0024, 0.0020 และ 0.0132 เมื่อค่าความเครียดเฉลี่ยเท่ากับ 0.025, 0.05 และ 0.12 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5.10 และภาพที่ 5.11 แสดงความเครียดตามแนวหน้าตัดเหล็กเสริมสำหรับแต่ละช่วงความยาวเหล็กเสริม



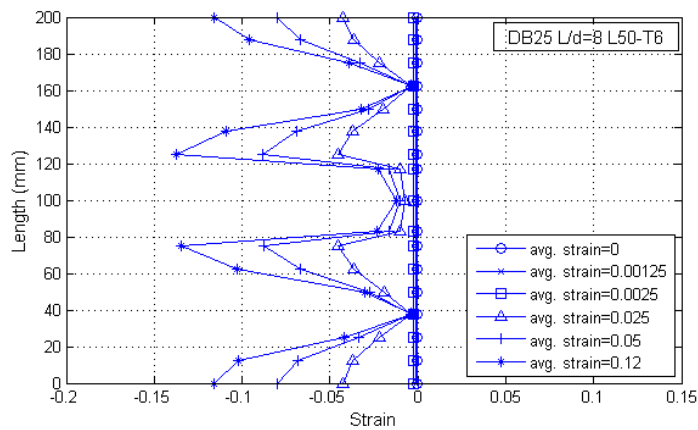
ภาพที่ 5.10 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริมที่ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



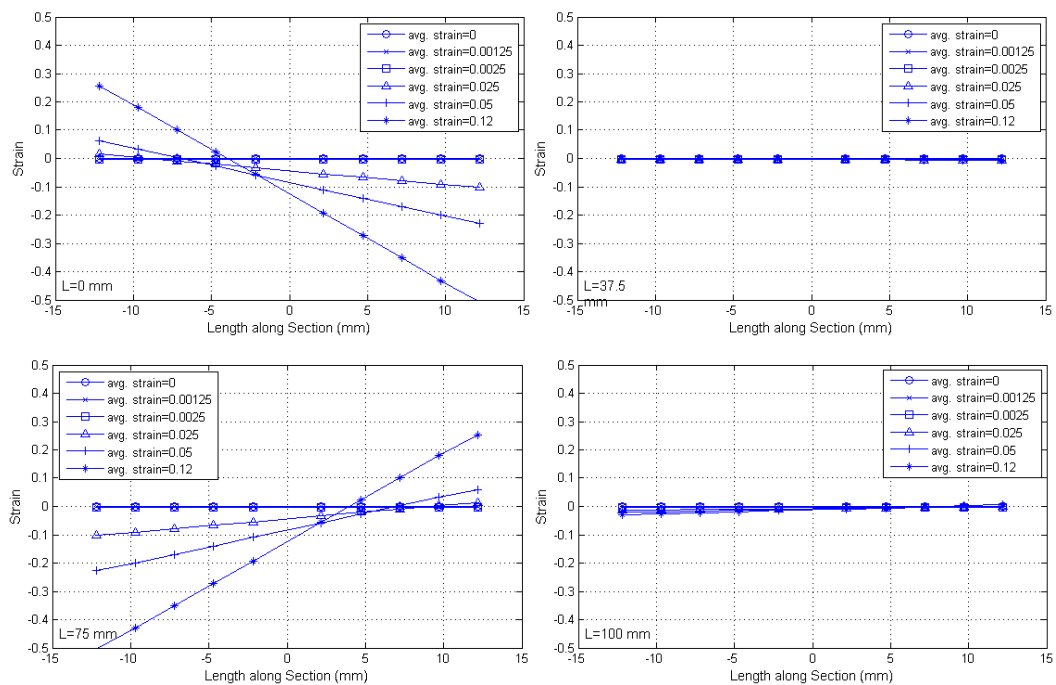
ภาพที่ 5.11 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริมที่ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

(3) เหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L50-T6

จากภาพที่ 5.12 และ 5.13 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมมีค่ามากบริเวณปลายของเหล็กเสริม และบริเวณจุดปลายของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม โดยมีค่าความเครียดน้อยลงบริเวณที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม



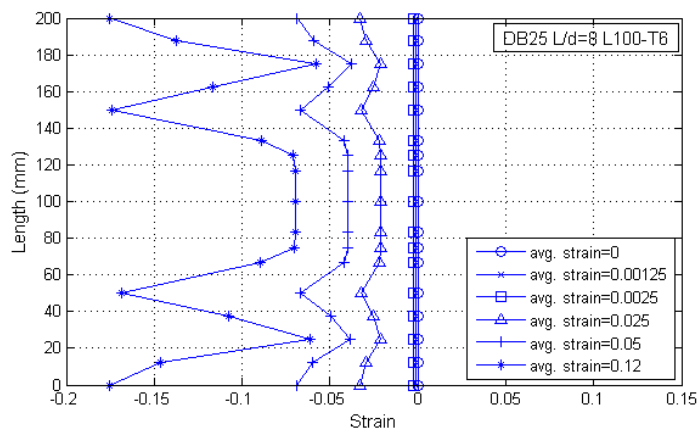
ภาพที่ 5.12 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L50-T6



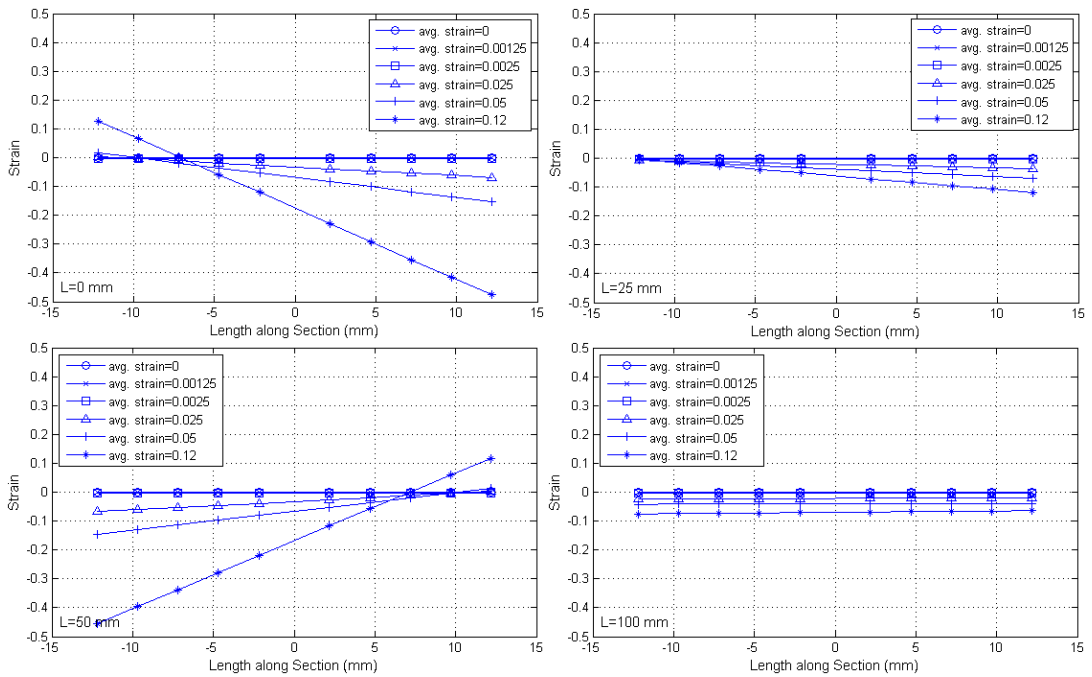
ภาพที่ 5.13 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L50-T6

(4) เหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T6

ค่าความเครียดในเหล็กเสริมมีค่ามากบริเวณปลายทั้งสองด้านของเหล็กเสริม และบริเวณจุดปลายของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม โดยมีค่าความเครียดน้อยลงบริเวณที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม และมีค่าความเครียดบนหน้าตัดที่สม่ำเสมอบริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 5.14 และ 5.15



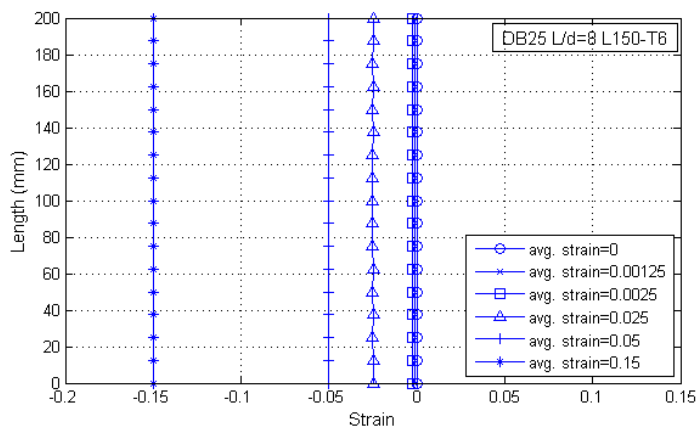
ภาพที่ 5.14 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T6



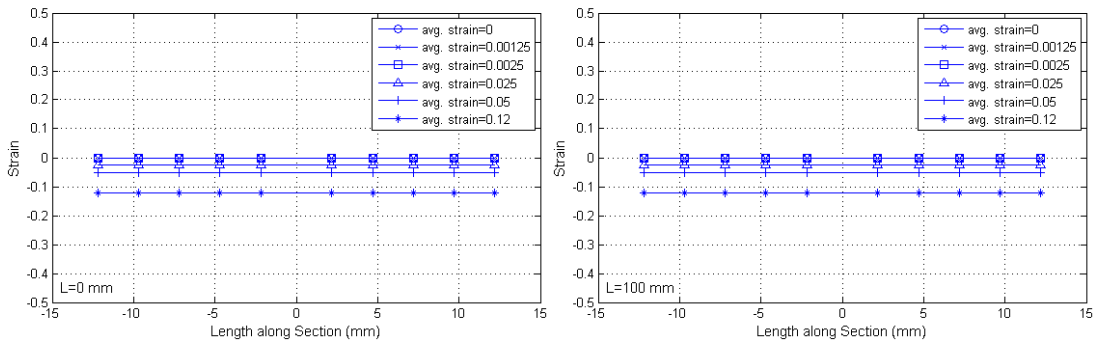
ภาพที่ 5.15 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T6

(5) เหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L150-T6

มีการกระจายตัวของความเครียดเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด เช่นเดียวกับเหล็กรับแรงดึงในภาพที่ 5.16 และจากภาพที่ 5.17 ค่าความเครียดมีค่าที่เท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีแรงดัดเกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมได้



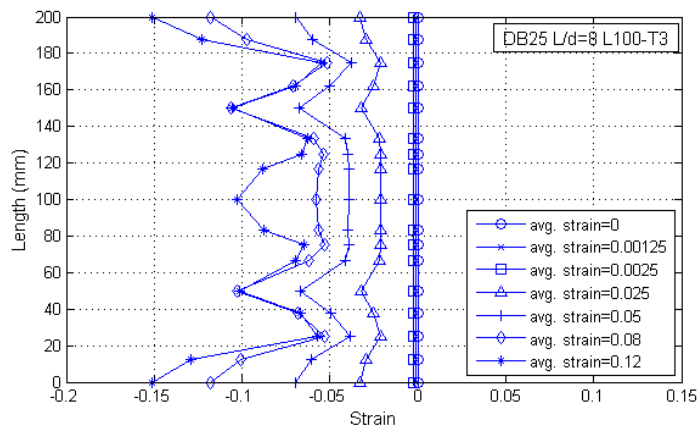
ภาพที่ 5.16 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L150-T6



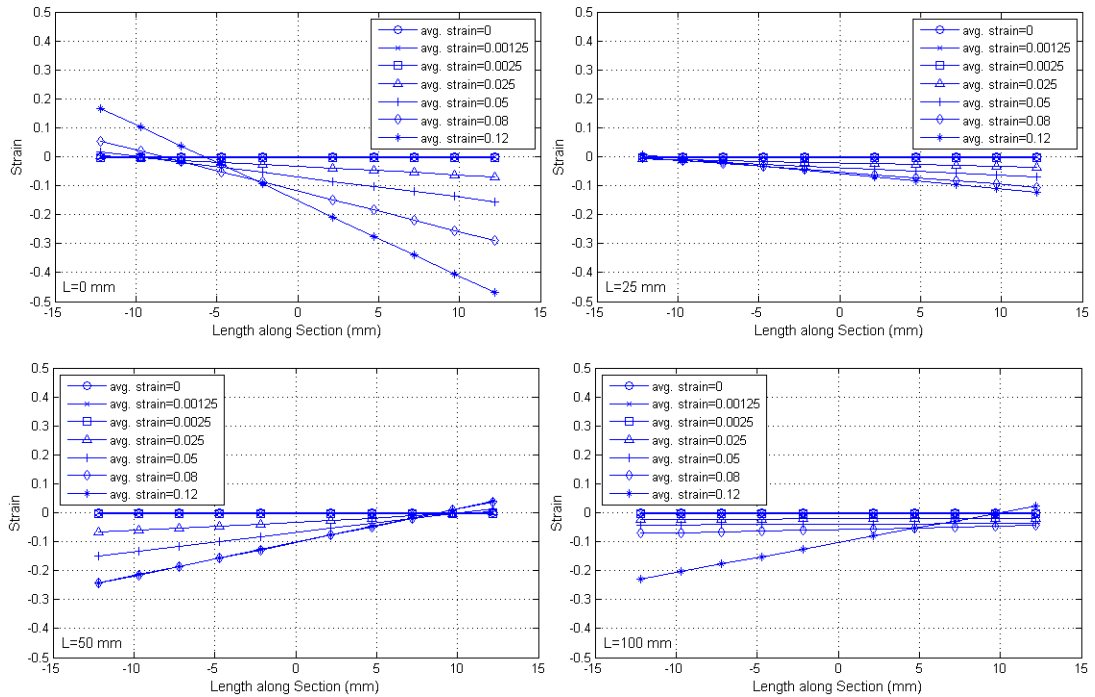
ภาพที่ 5.17 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L150-T6

(6) เหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T3

การกระจายของความเครียดในช่วงความเครียดเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 0.05 มีลักษณะเช่นเดียวกับ ตัวอย่างที่ L100-T6 แต่ภายหลังค่าความเครียดเท่ากับ 0.08 ซึ่งเหล็กเสริมสามารถรับกำลังได้ลดลง ค่าความเครียดในช่วงที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมนั้นมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.18 และ 5.19



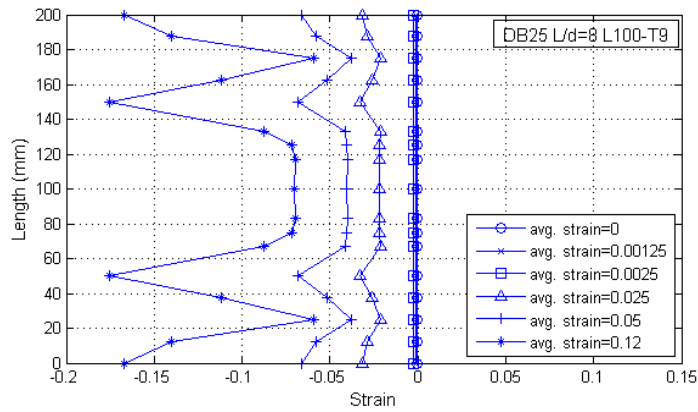
ภาพที่ 5.18 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T3



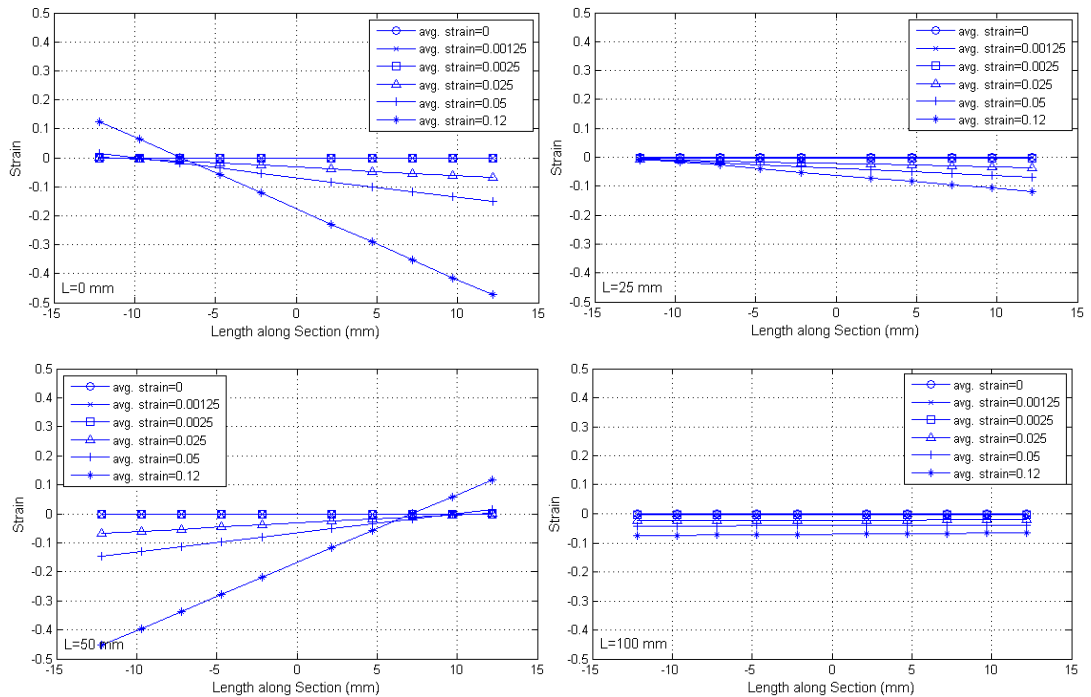
ภาพที่ 5.19 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T3

(7) เหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T9

ลักษณะการกระจายของความเครียดใกล้เคียงกับ ตัวอย่าง L100-T6 โดยมีค่าน้อยกว่า ตัวอย่าง L100-T6 บริเวณจุดปลายของเหล็กเสริม และมีค่ามากขึ้นบริเวณจุดปลายของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 5.20 และ 5.21

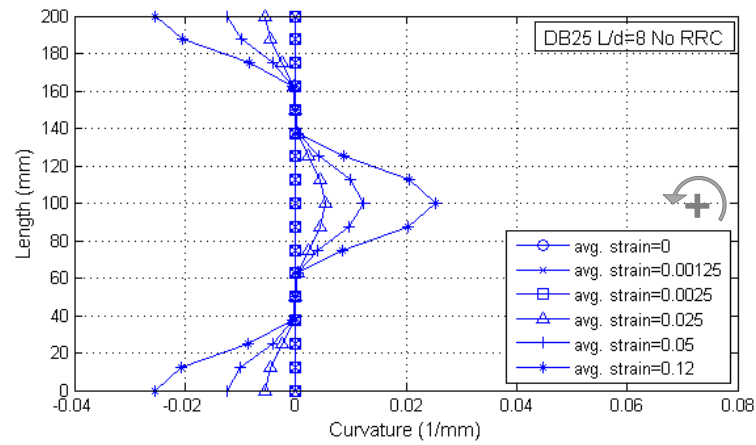


ภาพที่ 5.20 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T9

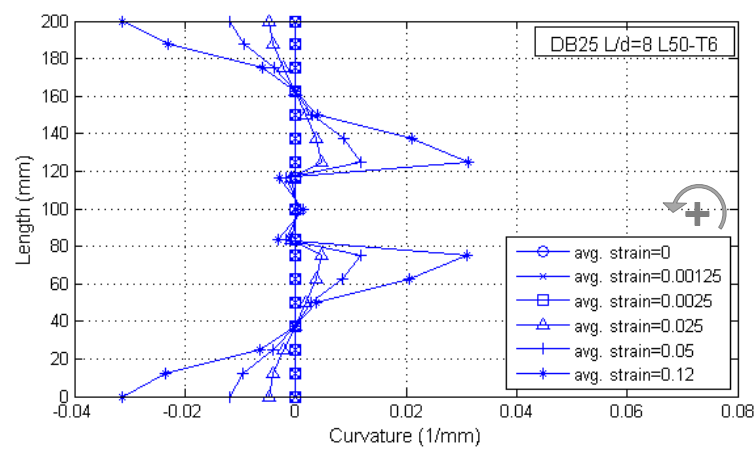


ภาพที่ 5.21 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T9

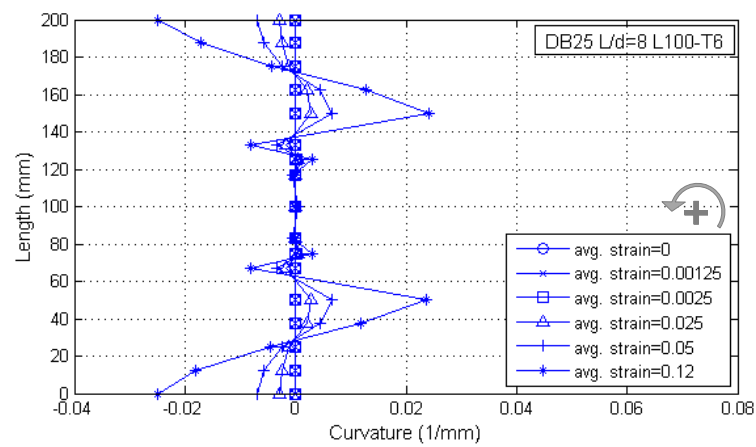
5.3.2 ค่าความโค้งภายในเหล็กเสริม



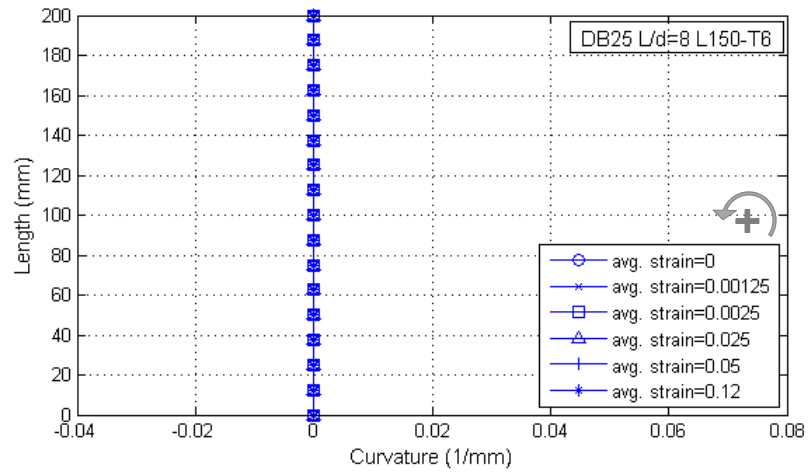
ภาพที่ 5.22 ค่าความโค้งของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดครั้งเหล็กเสริม



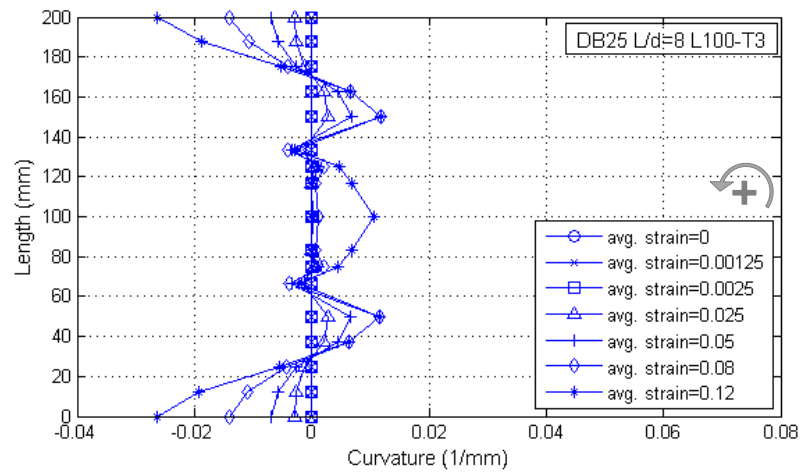
ภาพที่ 5.23 ค่าความโค้งของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L50-T6



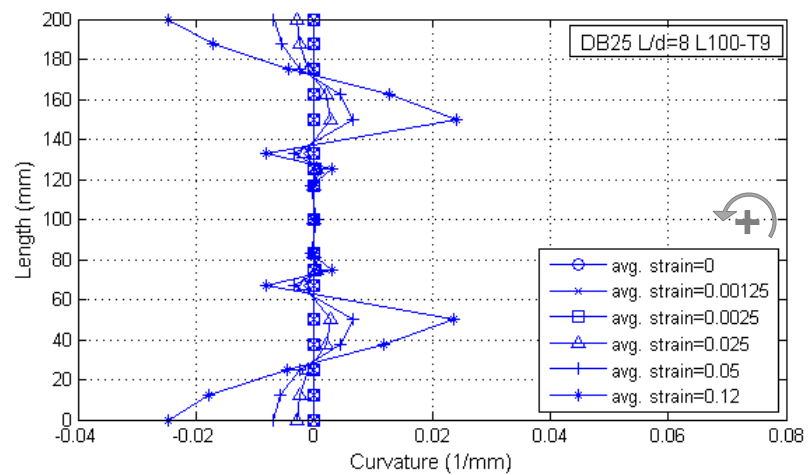
ภาพที่ 5.24 ค่าความโค้งของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T6



ภาพที่ 5.25 ค่าความโค้งของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L150-T6



ภาพที่ 5.26 ค่าความโค้งของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T3



ภาพที่ 5.27 ค่าความโค้งของเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T9

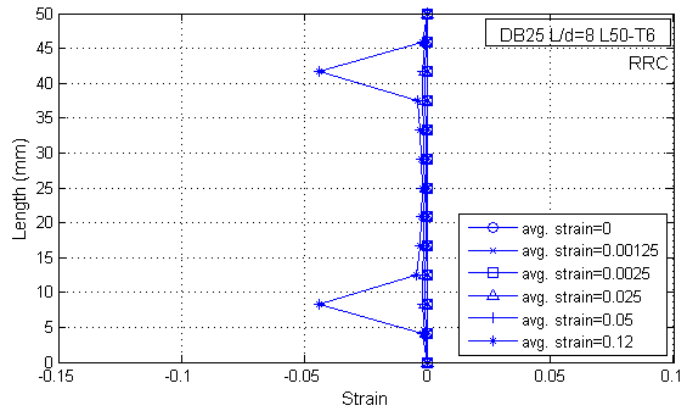
ภาพที่ 5.22-5.27 แสดงค่าความโค้งภายในเหล็กเสริม โดยกำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อความโค้งมีทิศทวนเข็มนาฬิกา และมีค่าเป็นลบในทิศตามเข็มนาฬิกา ซึ่งค่าความโค้งใช้สำหรับอธิบายลักษณะการกระจายความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอของหน้าตัด

เหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะมีลักษณะการกระจายความเครียดที่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวเหล็กเสริม เนื่องจากหน้าตัดเหล็กเสริมบางส่วนมีหน่วยแรงเกินจุดครากทำให้คุณสมบัติวัสดุบริเวณนั้นไม่เป็นเชิงเส้น ส่งผลให้ตำแหน่งของแกนสะเทิน(neutral axis) เลื่อนออกจากบริเวณที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นค่าความเครียดภายในเหล็กเสริมจึงขึ้นกับค่าความโค้ง(curvature) ในแต่ละช่วงความยาวของเหล็กเสริม โดยเหล็กเสริมมีค่าความเครียดสูง เมื่อความโค้งของเหล็กเสริมมีค่าสูง เหล็กเสริมที่ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าความเครียดสูง เนื่องจากเหล็กเสริมมีค่าความโค้งสูง ในบริเวณปลายทั้งสองด้านของเหล็กเสริม และบริเวณกึ่งกลางความยาวเหล็กเสริม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Dhakal และMaekawa(2002) โดยมีลักษณะการกระจายความเครียดแตกต่างจากตัวอย่างที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม เนื่องจากการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมทำให้ตำแหน่งที่มีค่าความโค้งสูงภายในเหล็กเสริมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่าบริเวณปลายทั้งสองด้านของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าความโค้งสูงขึ้น และมีค่าลดลงบริเวณกึ่งกลางความยาวเหล็กเสริม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในตัวอย่าง L100-T6, L100-T9 ที่พบค่าความเครียดสูงบริเวณปลายทั้งสองด้านของเหล็กเสริมและบริเวณปลายของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และมีค่าความเครียดน้อยลงและสม่ำเสมอในช่วงที่ค่าความโค้งน้อย ในตัวอย่าง L100-T3 ช่วงแรกเหล็กเสริมมีการกระจายความเครียดเช่นเดียวกับตัวอย่าง L100-T6 แต่เมื่อค่าความเครียดเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 0.075 เหล็กเสริมมีค่าความโค้งสูงบริเวณกึ่งกลางความยาวเหล็กเสริม ส่งผลให้ค่าความเครียดบริเวณนี้มีค่าสูงขึ้น และในตัวอย่าง L150-T6 ความเครียดภายในเหล็กเสริมมีค่าเท่ากันตลอดความยาว เช่นเดียวกับเหล็กรับแรงดึง เนื่องจากเหล็กเสริมไม่เกิดการโก่งเดาะ และมีค่าความโค้งใกล้เคียงศูนย์ตลอดความยาว

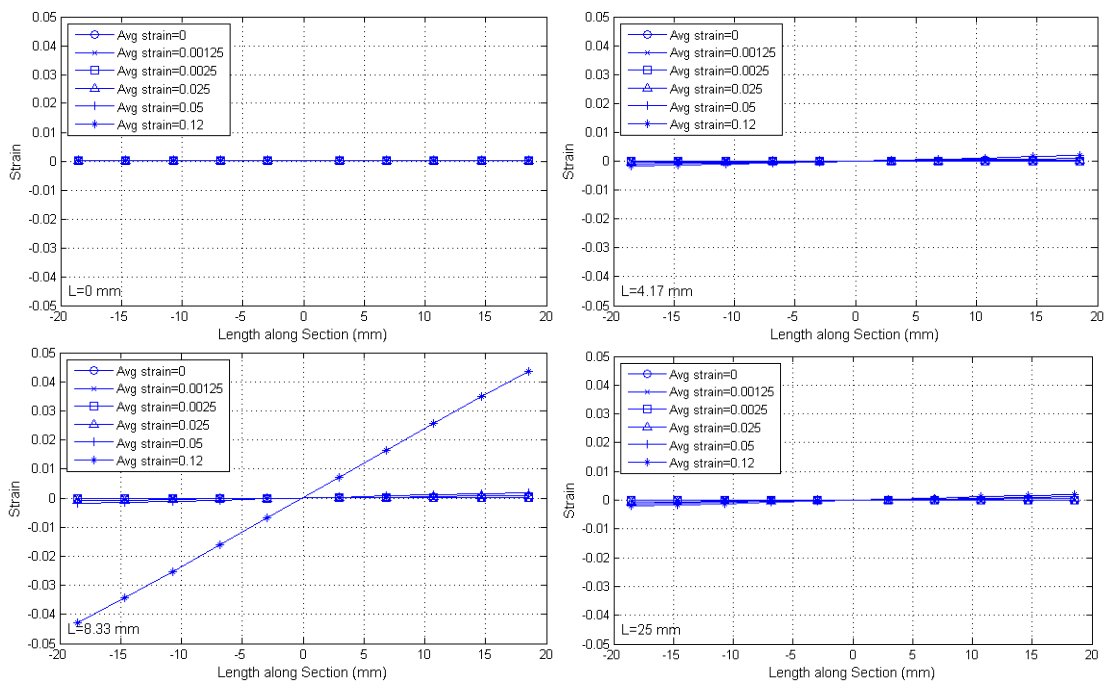
5.4 ค่าความเครียด และความโค้งภายในปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม

5.4.1 ค่าความเครียดตามแนวยาวและตามแนวหน้าตัดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม

(1) ปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ขนาด L50-T6



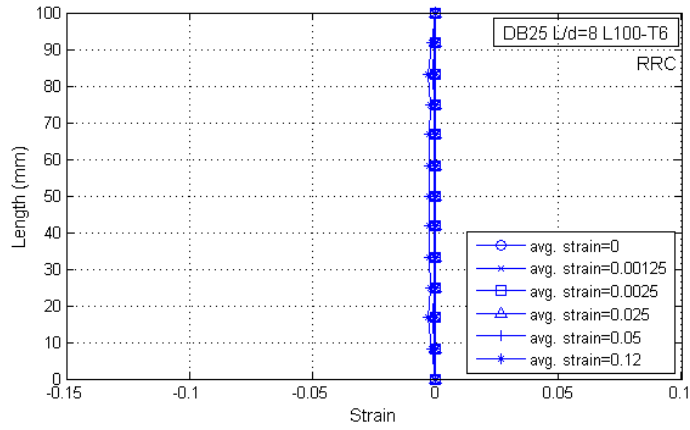
ภาพที่ 5.28 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ขนาด L50-T6



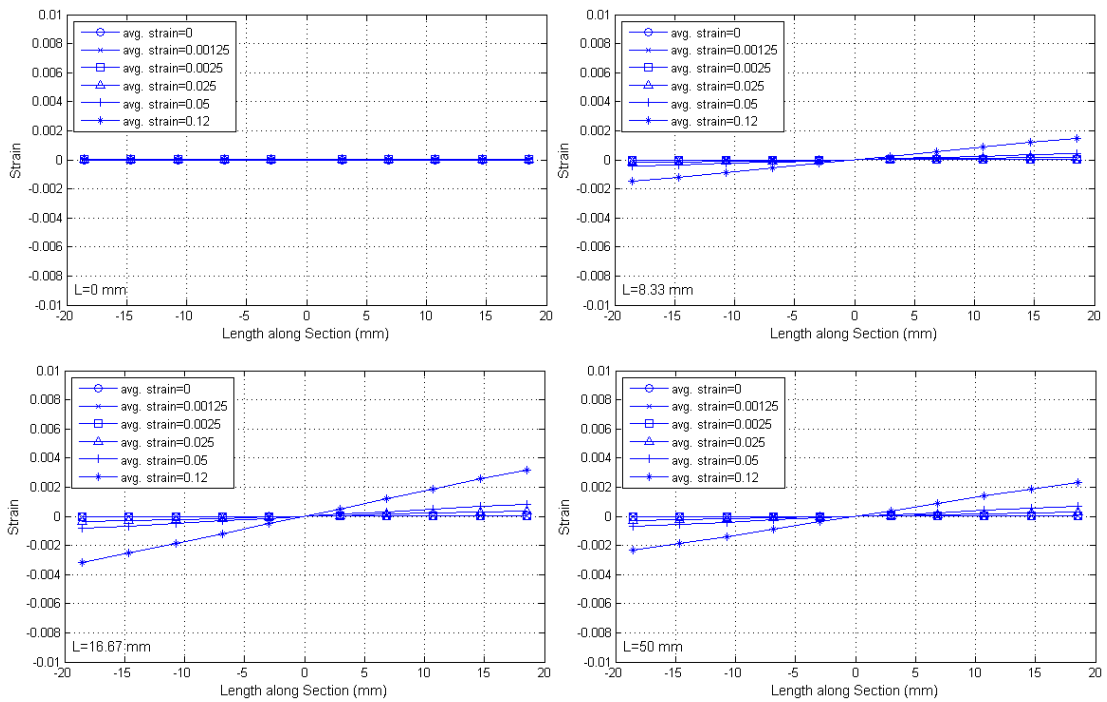
ภาพที่ 5.29 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ขนาด L50-T6

จากภาพที่ 5.28 และ 5.29 ค่าความเครียดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเครียดในเหล็กเสริม โดยมีค่าเทียบเท่าศูนย์บริเวณปลายทั้งสองข้างของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม และมีค่าความเครียดภายในปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมมากขึ้น เมื่อค่าความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่ามากบริเวณที่ห่างจากปลายทั้งสองด้านประมาณ 8 มิลลิเมตร

(2) ปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ขนาด L100-T6



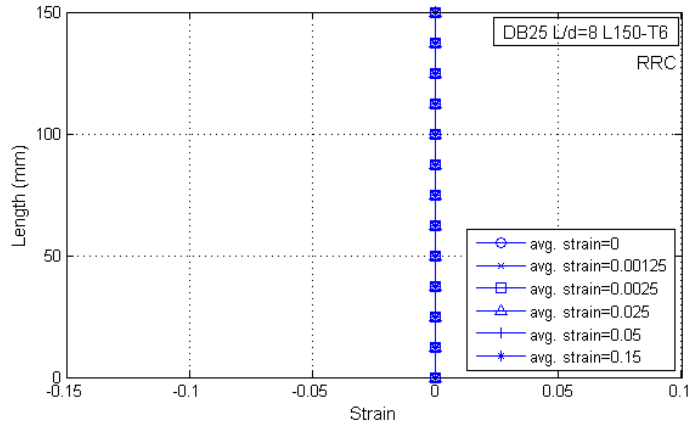
ภาพที่ 5.30 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ขนาด L100-T6



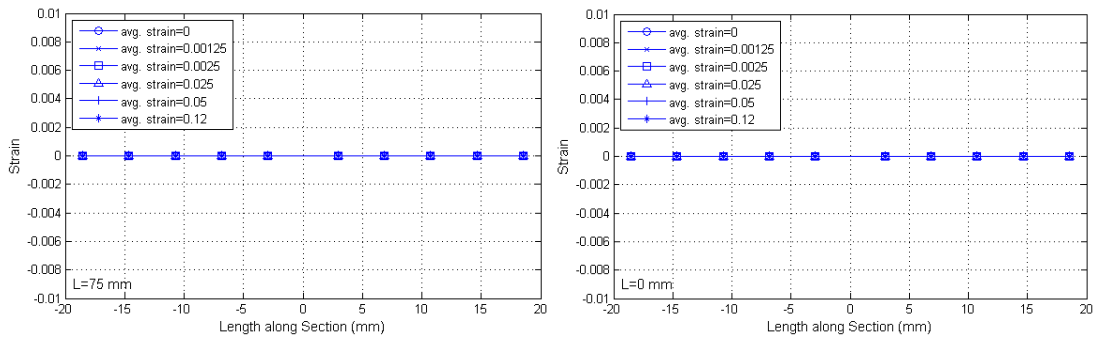
ภาพที่ 5.31 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L100-T6

ลักษณะการกระจายของความเครียดมีลักษณะเช่นเดียวกับตัวอย่าง L50-T6 โดยมีค่าความเครียดประมาณ 0.002-0.003 บริเวณที่ไม่ใช่ปลายทั้งสองข้างของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 5.30 และ 5.31

(3) ปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ขนาด L150-T6



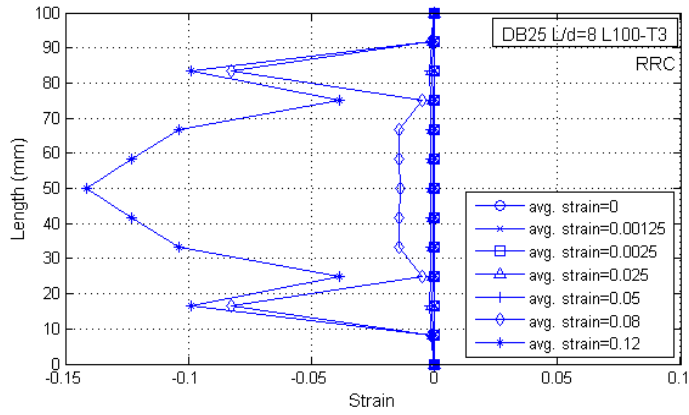
ภาพที่ 5.32 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L150-T6



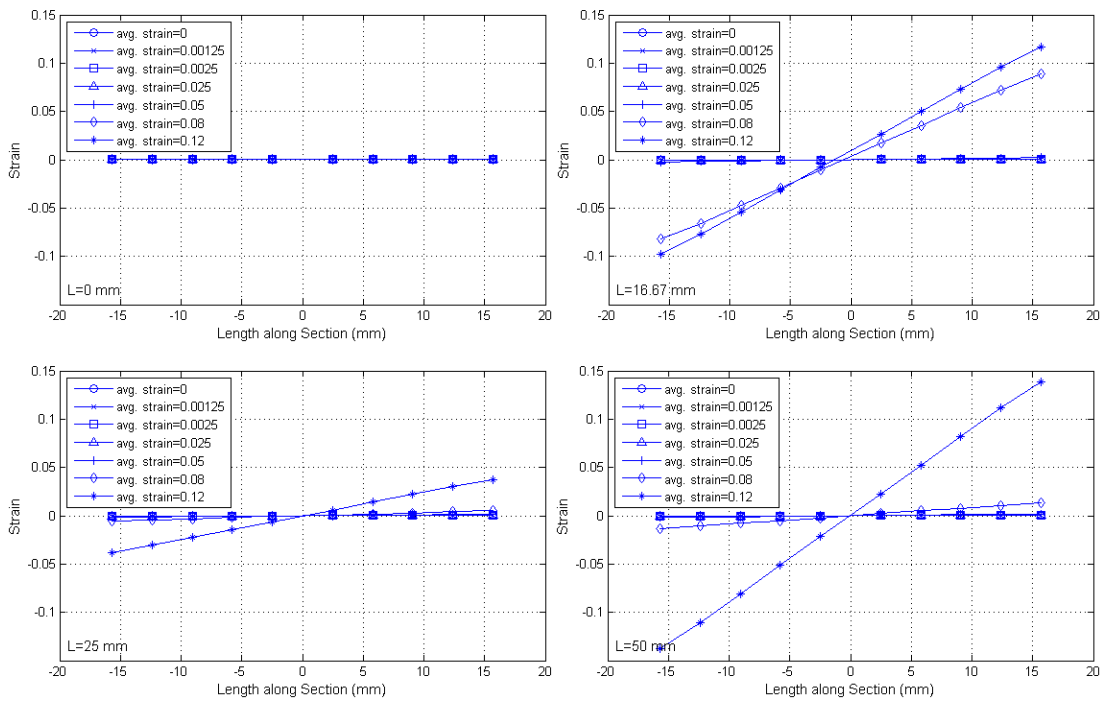
ภาพที่ 5.33 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L150-T6

ตัวอย่าง L150-T6 ค่าความเครียดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมมีค่าเทียบเท่าศูนย์ตลอดความยาวของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ซึ่งแสดงในภาพที่ 5.32 และ 5.33

(4) ปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ขนาด L100-T3



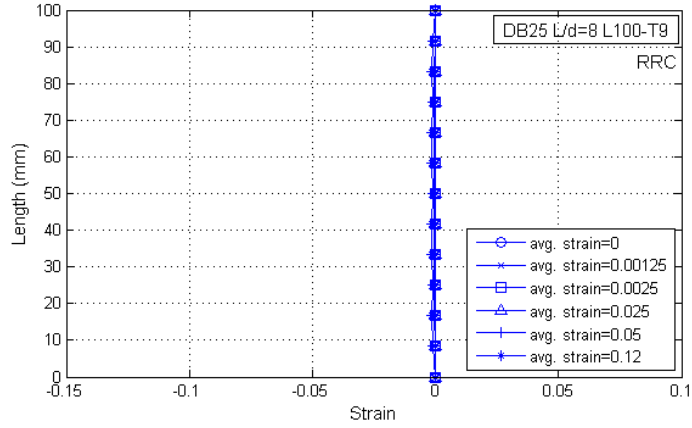
ภาพที่ 5.34 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L100-T3



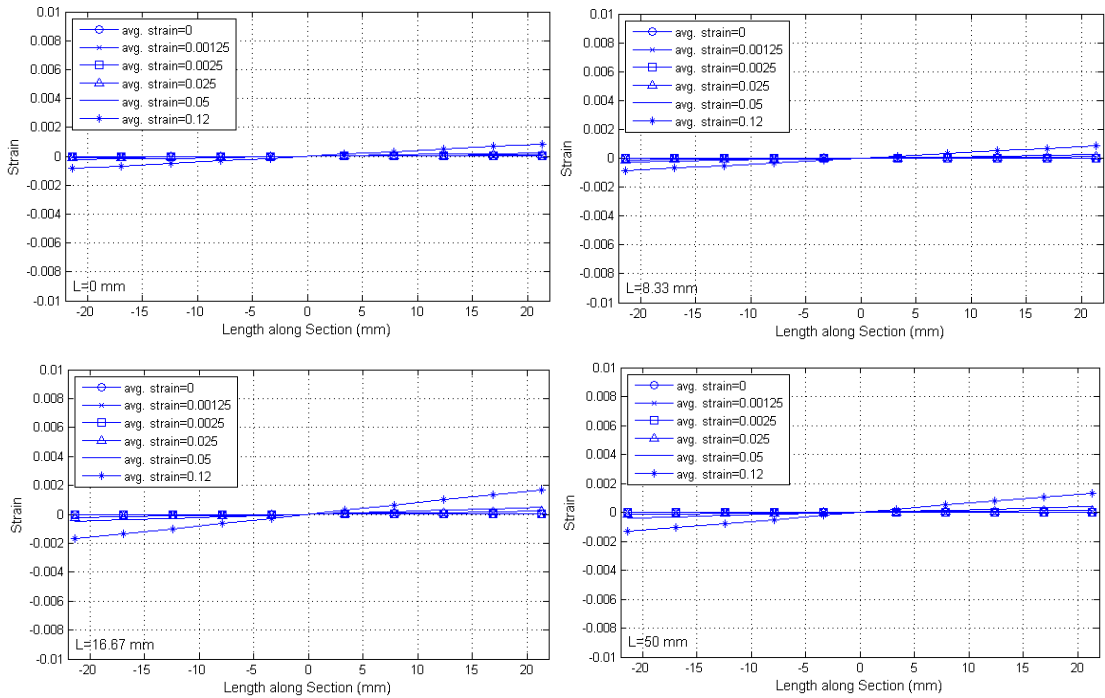
ภาพที่ 5.35 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L100-T3

จากภาพที่ 5.34 และ 5.35 ลักษณะการกระจายความเครียดมีลักษณะเช่นเดียวกับ ตัวอย่าง L100-T6 แต่เมื่อความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมแต่ภายหลังค่าความเครียดเท่ากับ 0.08 ซึ่งเป็นช่วงที่เหล็กเสริมสามารถรับกำลังได้ลดลง ค่าความเครียดบริเวณที่ห่างจากจุดปลายทั้งสอง 16.67 มิลลิเมตร และบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวเหล็กเสริม มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

(5) ปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม ขนาด L100-T9



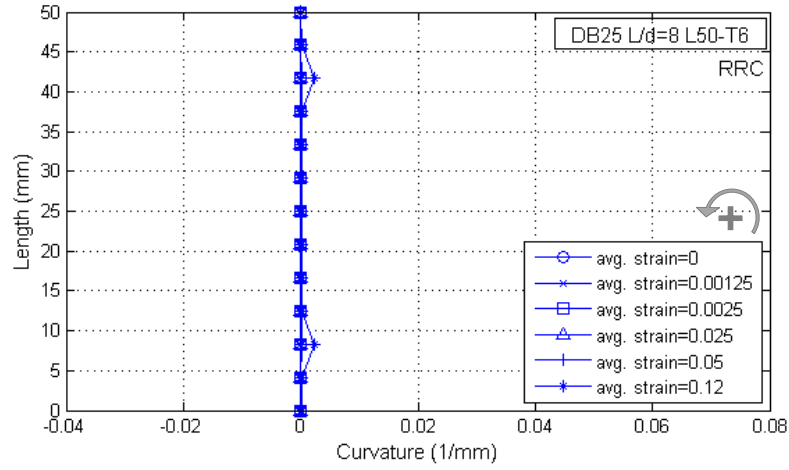
ภาพที่ 5.36 ค่าความเครียดตามแนวความยาวของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L100-T9



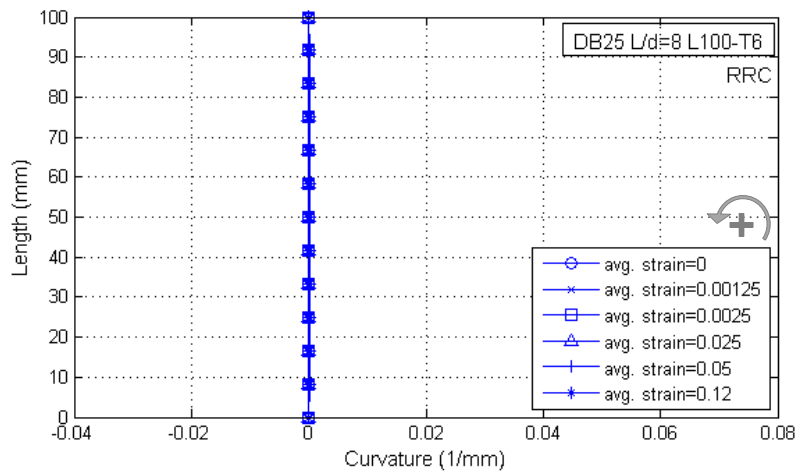
ภาพที่ 5.37 ค่าความเครียดตามแนวหน้าตัดของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L100-T9

ค่าความเครียดภายในปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมน้อยกว่า 0.002 ซึ่งน้อยกว่าค่าความเครียดที่จุดคราก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5.36 และ 5.37

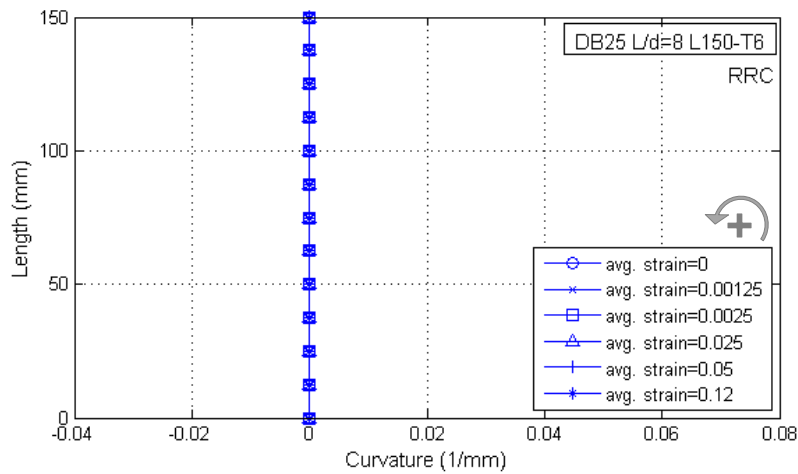
5.4.2 ค่าความโค้งภายในปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม



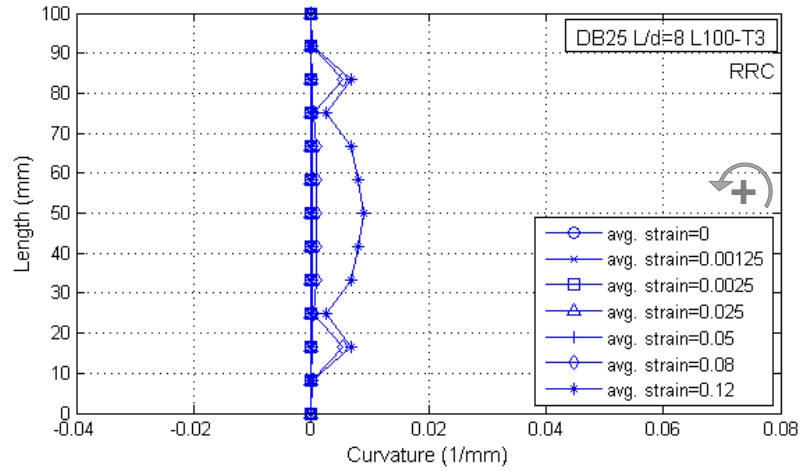
ภาพที่ 5.38 ค่าความโค้งของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ตัวอย่าง L50-T6



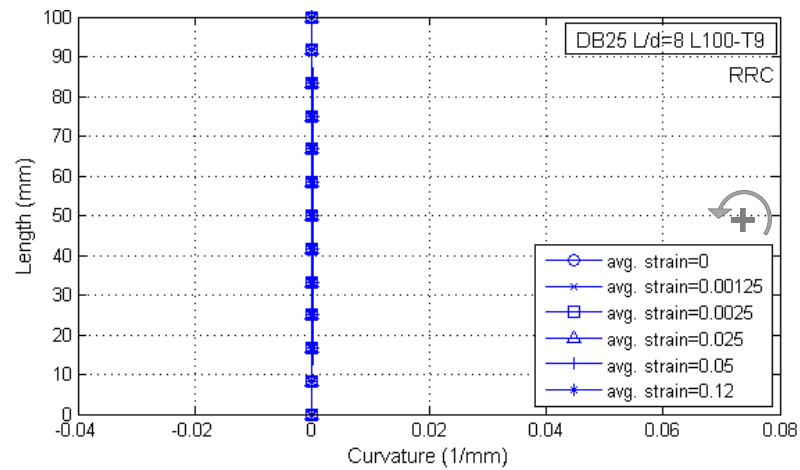
ภาพที่ 5.39 ค่าความโค้งของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T6



ภาพที่ 5.40 ค่าความโค้งของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ตัวอย่าง L150-T6



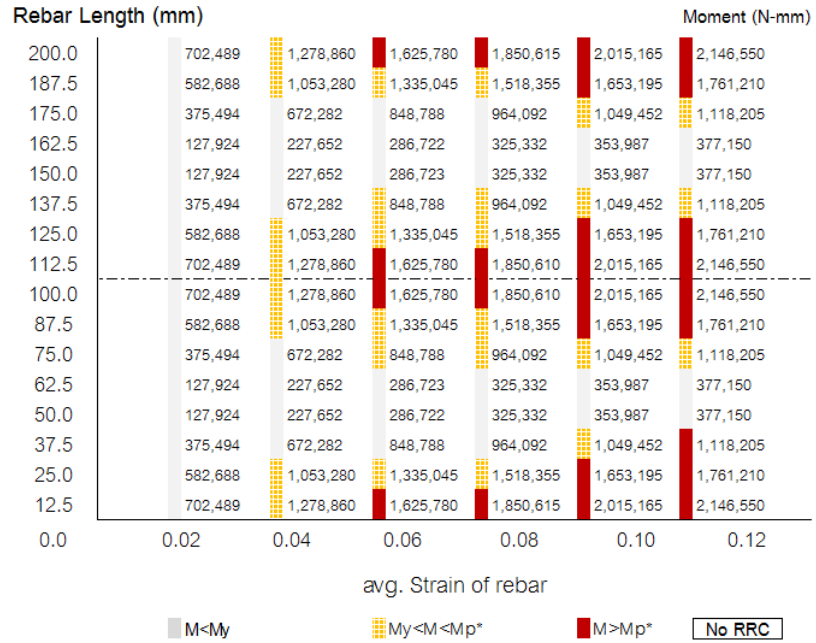
ภาพที่ 5.41 ค่าความโค้งของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T3



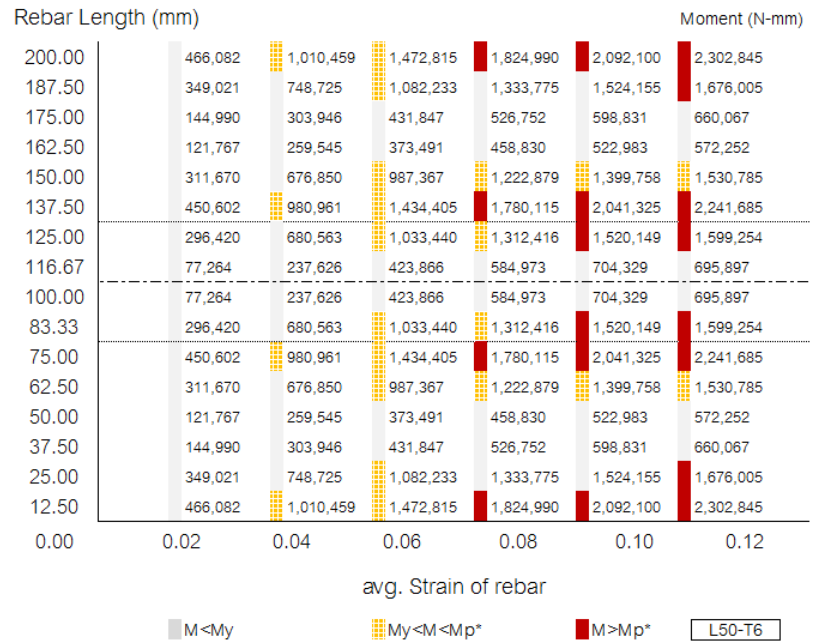
ภาพที่ 5.42 ค่าความโค้งของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม ตัวอย่าง L100-T9

ความเครียดภายในปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเครียดภายในเหล็กเสริม และมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ปลายทั้งสองข้างของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมเนื่องจากการยี่ดั่งแบบหมุนโดยที่ค่าความเครียดมีค่าสอดคล้องตามความโค้งของเหล็กเสริมดังแสดงในภาพที่ 5.38-5.42 โดยตัวอย่างที่มีความยาวของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมมากกว่าจะมีค่าความเครียด และความโค้งภายในปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่น้อยกว่าตัวอย่างที่มีความยาวปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ดังแสดงดังภาพที่ 5.38-5.40 และพบว่าเมื่อเหล็กเสริมเริ่มสูญเสียการยี่ดั่งทางด้านข้าง ค่าความเครียดและความโค้งของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริมมีค่าสูงขึ้นบริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดปลายของปลอกยี่ดั่งเหล็กเสริม และบริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 5.41

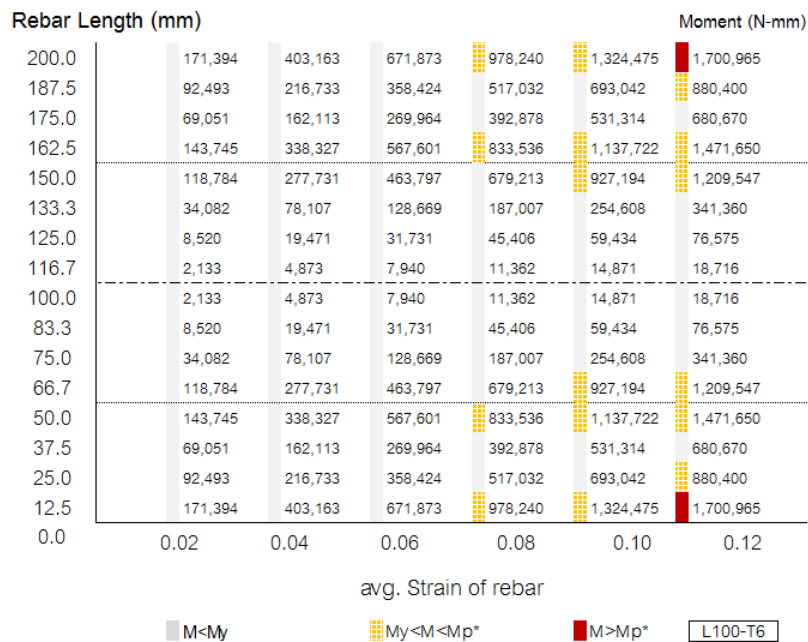
5.5 ค่าโมเมนต์ภายในเหล็กเสริม



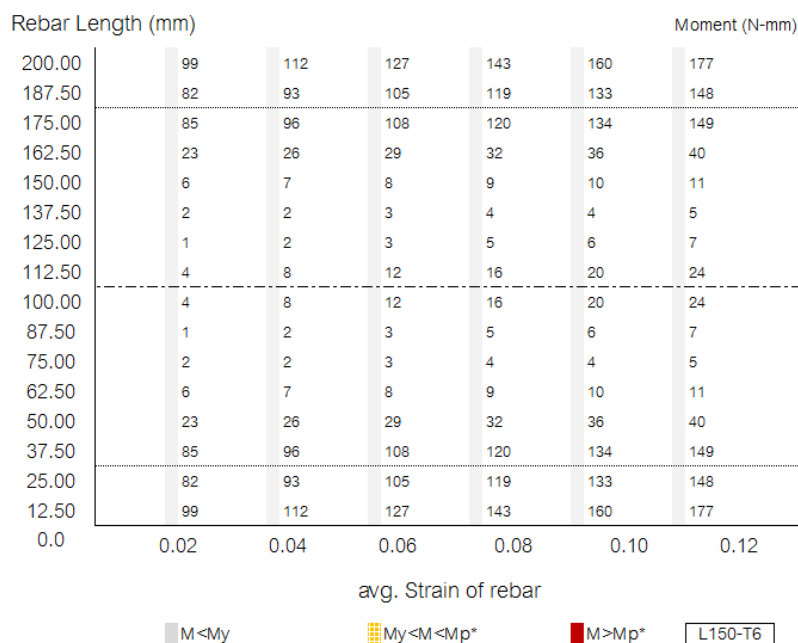
ภาพที่ 5.43 ค่าความโมเมนต์ภายในเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



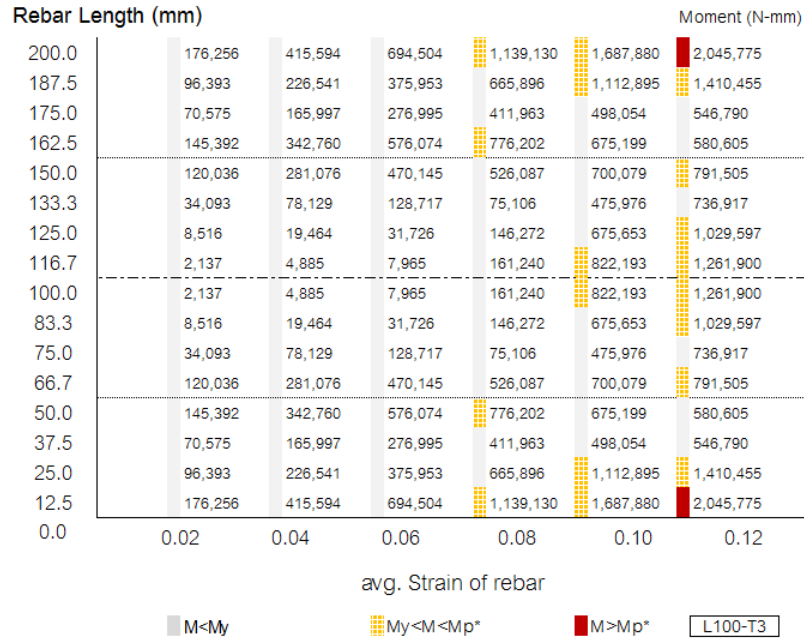
ภาพที่ 5.44 ค่าความโมเมนต์ภายในเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L50-T6



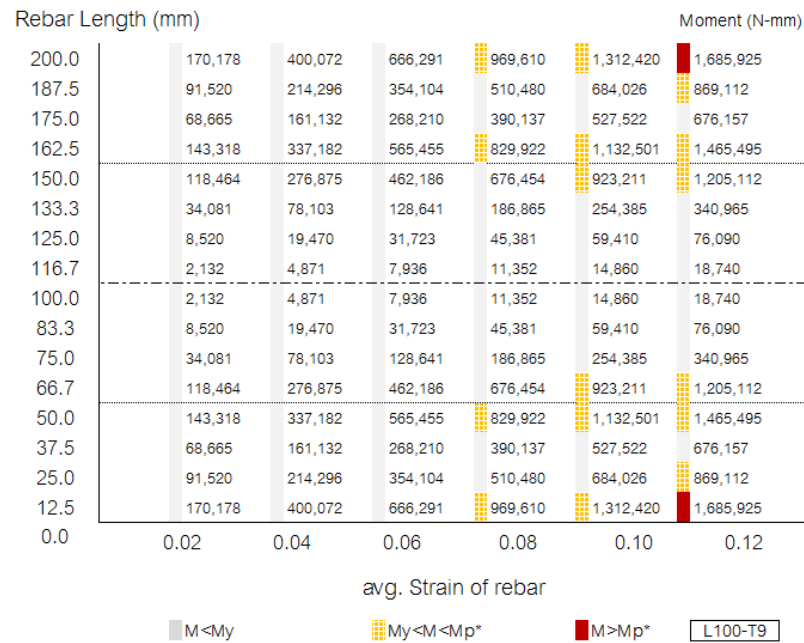
ภาพที่ 5.45 ค่าความโมเมนต์ภายในเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T6



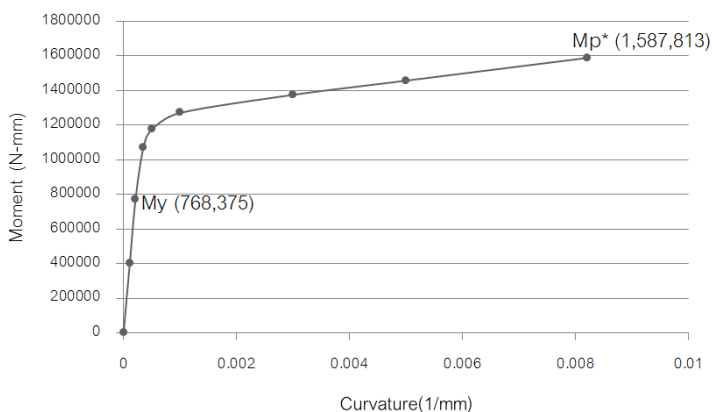
ภาพที่ 5.46 ค่าความโมเมนต์ภายในเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L150-T6



ภาพที่ 5.47 ค่าความโมเมนต์ภายในเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T3



ภาพที่ 5.48 ค่าความโมเมนต์ภายในเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T9

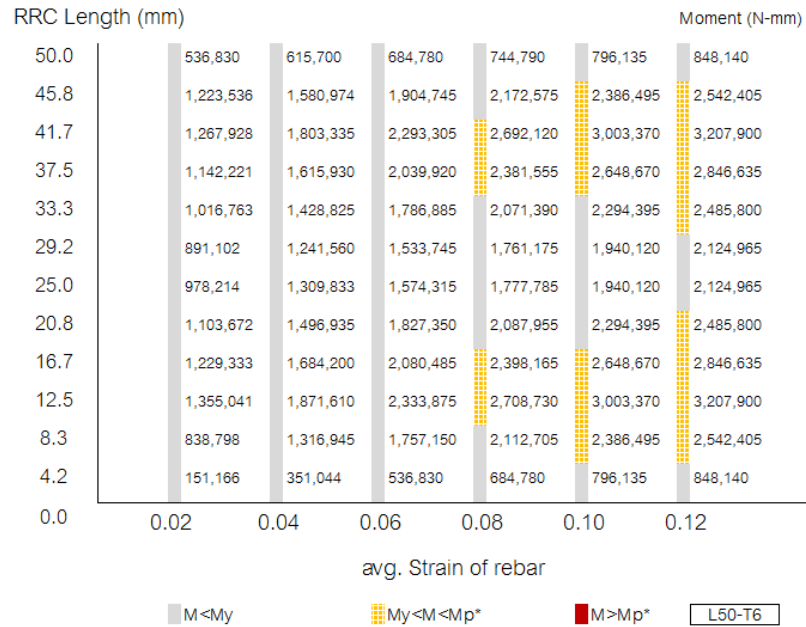


ภาพที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของเหล็กเสริม
(Diameter 25 mm - $f_y=492$ MPa)

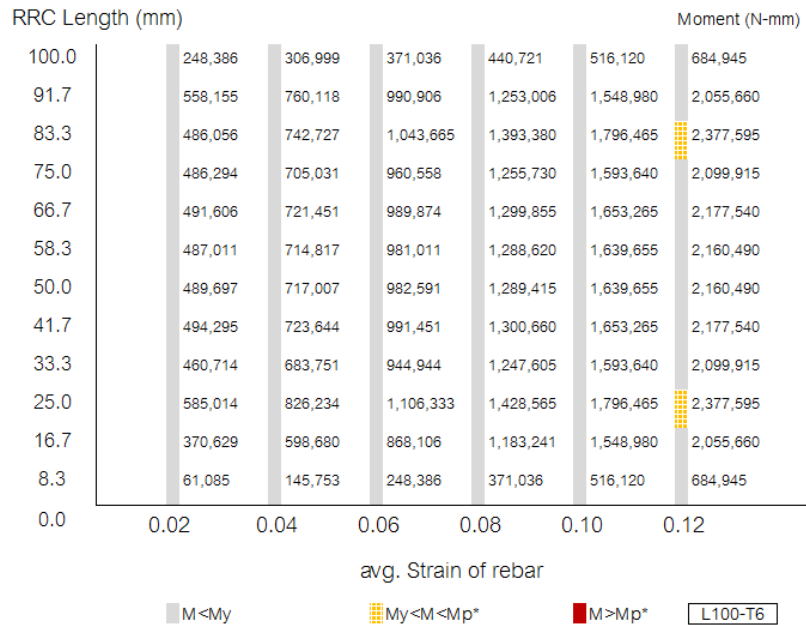
หมายเหตุ ค่า M_p^* คือ ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เฟเบอร์ทั้งหมดบนหน้าตัดมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น

เหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเมื่อเกิดการโก่งเดาะ จะเกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณกึ่งกลางของเหล็กเสริม และปลายทั้งสองข้างของเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 5.43 ซึ่งมีความแตกต่างจากตัวอย่างที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณปลายปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และบริเวณจุดปลายทั้ง 2 ข้างของเหล็กเสริม และส่งผลต่อการชะลอการเกิดจุดหมุนพลาสติกภายในเหล็กเสริม โดยพบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความยาวมากกว่า สามารถชะลอการเกิดจุดหมุนพลาสติกได้ดีกว่า ดังเช่นในตัวอย่าง L50-T6 (ภาพที่ 5.44) และ L100-T6 (ภาพที่ 45) ที่เกิดจุดหมุนพลาสติกเมื่อความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 0.04 และ 0.08 ตามลำดับ และ ไม่พบการเกิดจุดหมุนพลาสติกในเหล็กเสริมในช่วงที่ศึกษาสำหรับตัวอย่าง L150-T6 (ภาพที่ 46) และ สำหรับตัวอย่างที่มีการแปรผันความหนา (L100-T3, L100-T6 และ L100-T9) ช่วงแรกก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงได้น้อยลง ทุกตัวอย่างเกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณปลายปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยที่ตัวอย่าง L100-T6 (ภาพที่ 5.45) และ L100-T9 (ภาพที่ 5.45) มีค่าโมเมนต์ภายในชิ้นส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยตัวอย่าง L100-T6 มีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย แต่สำหรับตัวอย่าง L100-T3 (ภาพที่ 5.47) ภายหลังจากความเครียดเท่ากับ 0.08 ค่าโมเมนต์บริเวณปลายปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าลดลง และมีค่ามากขึ้นบริเวณกึ่งกลางความยาวเหล็กเสริม และเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งการจุดหมุนพลาสติก จากบริเวณปลายปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมเป็นบริเวณกึ่งกลางเหล็กเสริม

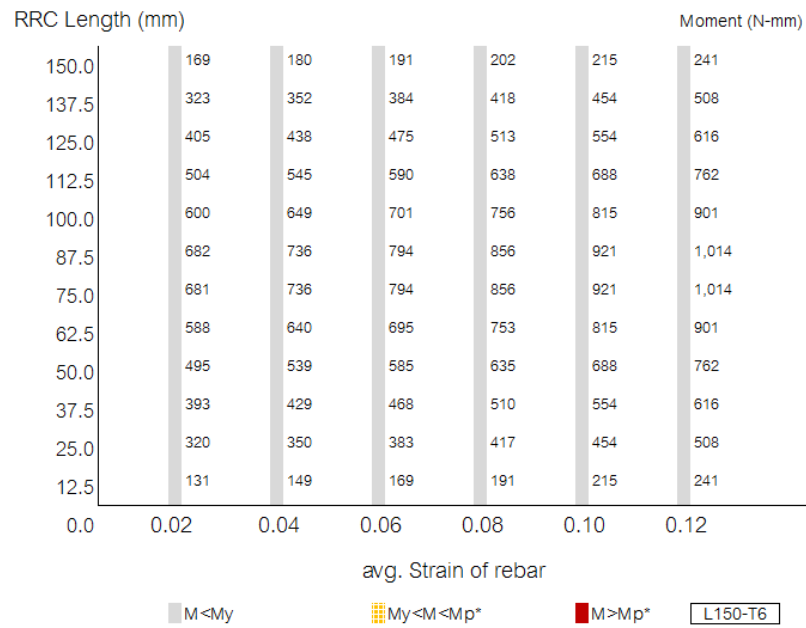
5.6 ค่าโมเมนต์ภายในปลอกยัดรีงเหล็กเสริม



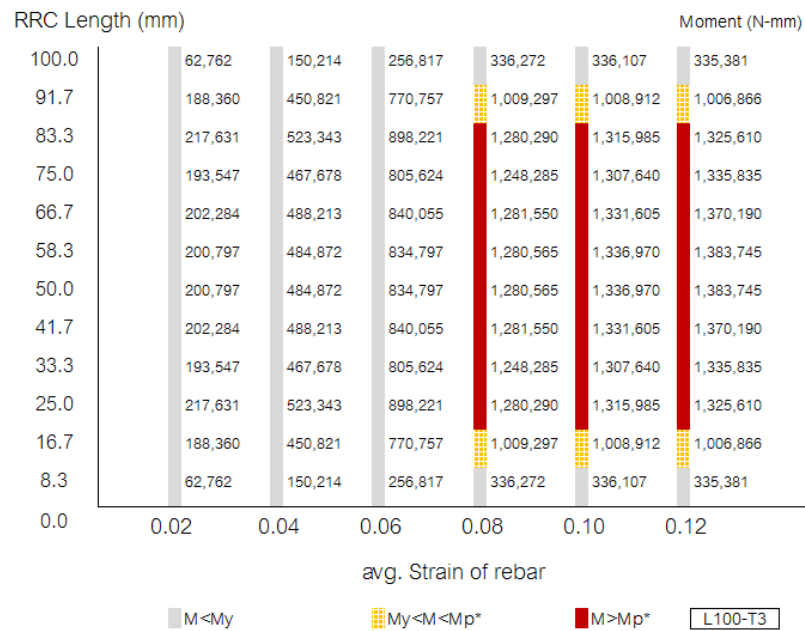
ภาพที่ 5.50 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยัดรีงเหล็กเสริมขนาด L50-T6



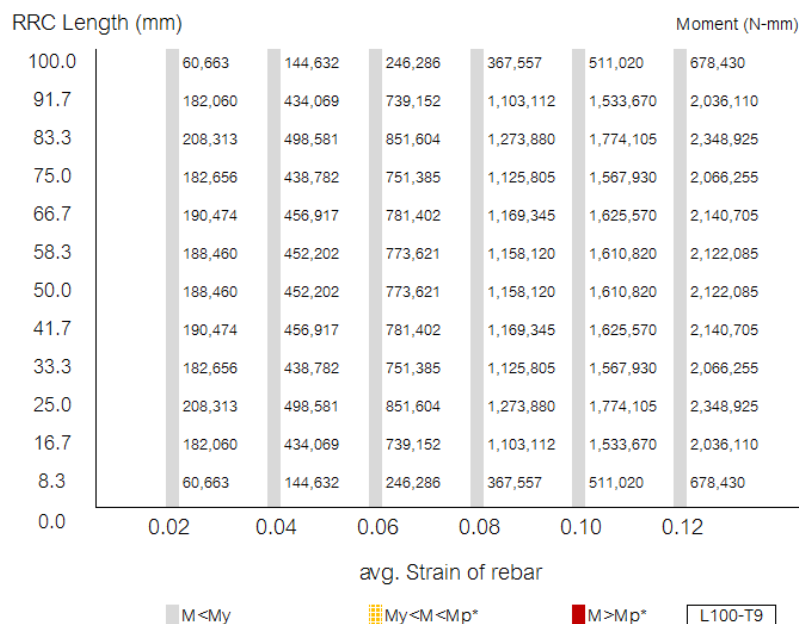
ภาพที่ 5.51 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยัดรีงเหล็กเสริมขนาด L100-T6



ภาพที่ 5.52 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยึดค้ำเหล็กเสริมขนาด L150-T6

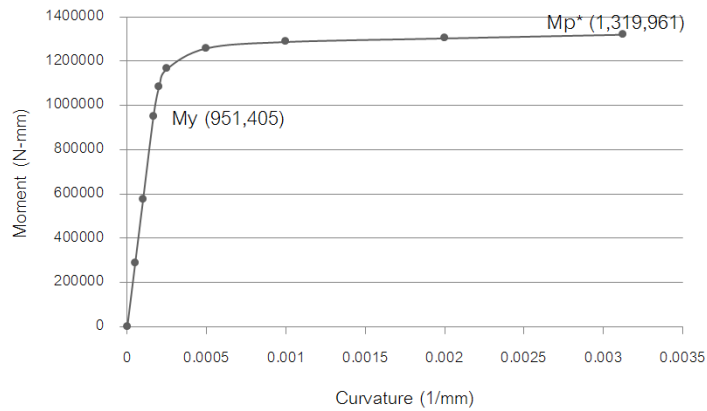


ภาพที่ 5.53 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยึดค้ำเหล็กเสริมขนาด L100-T3



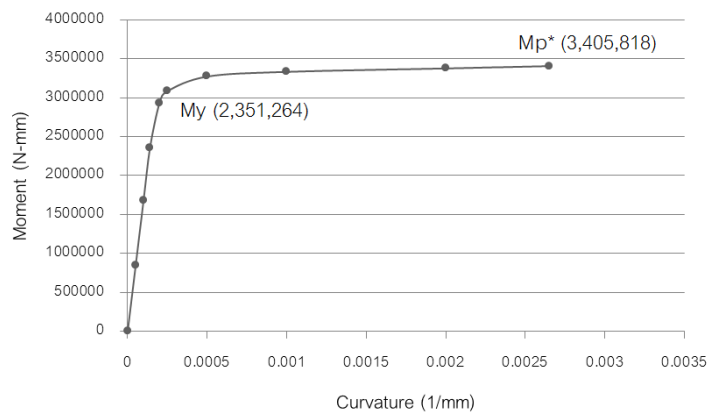
ภาพที่ 5.54 ค่าความโมเมนต์ภายในปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T9

จากตัวอย่างที่มีการแปรผันค่าความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ภาพที่ 5.50-5.52 ค่าโมเมนต์มีค่าน้อยลงเมื่อความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้น และพบการเกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณห่างจากปลายทั้งสองด้านของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมเล็กน้อย เมื่อความเครียดของเหล็กเสริมประมาณ 0.08 และ 0.12 สำหรับปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L50-T6 และ L100-T6 ตามลำดับ สำหรับปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีการแปรผันความหนา ภาพที่ 5.51, 5.53 และ 5.54 พบว่าเกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณกึ่งปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมเมื่อความเครียดประมาณ 0.08 สำหรับปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T3 และมีค่าโมเมนต์ใกล้เคียงกัน สำหรับปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาด L100-T6 และ L100-T9 ซึ่งตัวอย่าง L100-T6 มีค่าโมเมนต์มากกว่าเล็กน้อย โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมขนาดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5.55-5.57



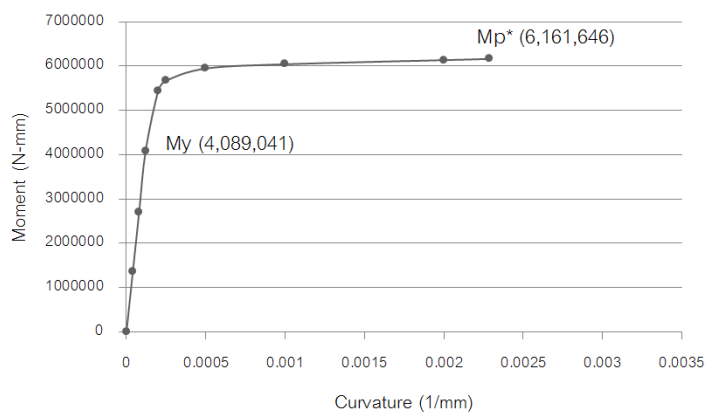
ภาพที่ 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

($d_{in} = 27$ mm, $d_{out} = 33$ mm - $f_y = 513$ MPa)



ภาพที่ 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

($d_{in} = 27$ mm, $d_{out} = 39$ mm - $f_y = 513$ MPa)



ภาพที่ 5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และความโค้งของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

($d_{in} = 27$ mm, $d_{out} = 45$ mm - $f_y = 513$ MPa)

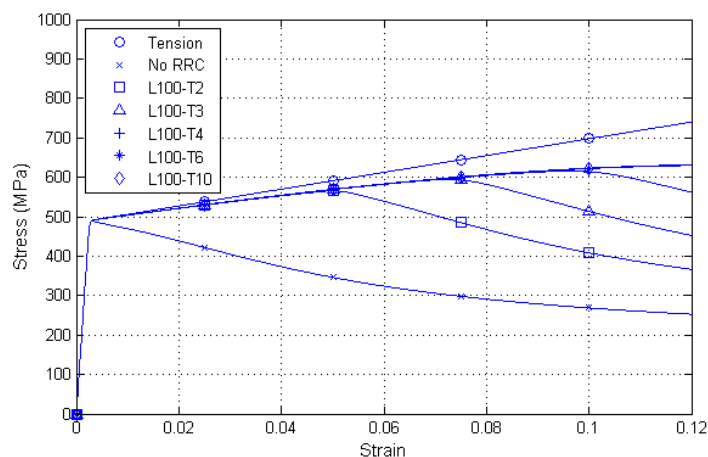
บทที่ 6

กรณีศึกษาของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (ความหนา, ความยาว และคุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเหล็กเสริม (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, อัตราส่วนความขรุขระ และคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม) รวมถึงศึกษาขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมต่อการยึดรั้งเหล็กเสริม

6.1 กรณีศึกษาที่ 1 : ผลของความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด

วิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ($L/d=8$) ที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมยาว 100 มิลลิเมตร ซึ่งมีการแปรผันความหนาเท่ากับ 2, 3, 4, 6 และ 10 มิลลิเมตร โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 6.1



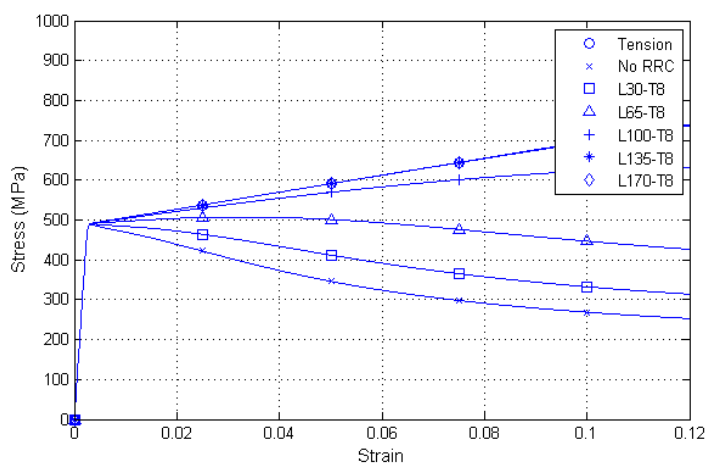
ภาพที่ 6.1 ผลของความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อความสัมพันธ์

ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

จากภาพที่ 6.1 ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจะไม่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมมีการเสีรูปร่างถึงระดับหนึ่ง หรือที่ความเครียดค่าหนึ่ง โดยเมื่อเหล็กเสริมเกิดการเสีรูปร่างมาก ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาน้อยกว่าจะเกิดการเสีรูปร่าง และไม่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียดที่น้อยกว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนามากกว่า ทำให้โมเมนต์ภายในปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าสูง และเกิดจุดหมุนพลาสติกบริเวณกึ่งกลางปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ดังการศึกษาในหัวข้อที่ 5.5 และในกรณีนี้ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาตั้งแต่ 6 มิลลิเมตรขึ้นไป มีพฤติกรรมรับแรงที่เหมือนกัน โดยสามารถคงสภาพการยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียด 0.12 ได้

6.2 กรณีศึกษาที่ 2 : ผลของความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด

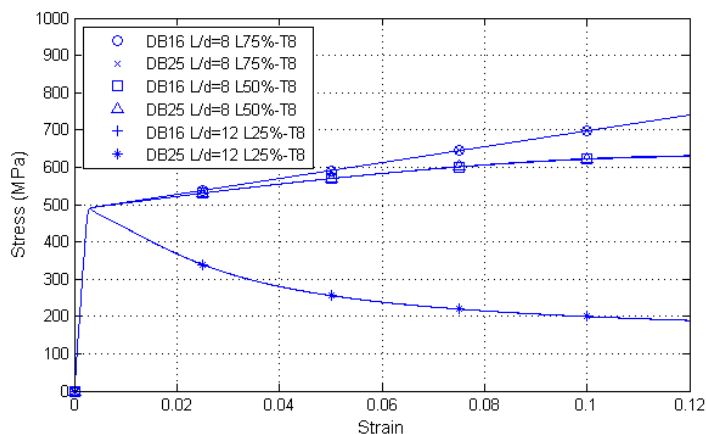
วิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ($L/d=8$) ที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหนา 6 มิลลิเมตร และแปรผันความยาวเท่ากับ 30, 65, 100, 135 และ 170 มิลลิเมตร จากผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 6.2 เหล็กเสริมมีค่าการสลายพลังงานมากขึ้น เมื่อความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่ามากขึ้น โดยมีค่าการสลายพลังงานสูงสุดเท่ากับเหล็กรับแรงดึงภายใต้เงื่อนไขความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เพียงพอในช่วงที่ศึกษา



ภาพที่ 6.2 ผลของความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

6.3 กรณีศึกษาที่ 3 : อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาวเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากัน

เหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนชะลูดเท่ากัน มีความยาวต่างกันเมื่อมีขนาดเหล็กเสริมไม่เท่ากัน ส่งผลต่อการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีต่อความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการกำหนดค่าความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจากเดิมที่เป็นค่าความยาวจริงเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาวของเหล็กเสริม โดยวิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 16 และ 25 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 8 และ 12 ซึ่งมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหนา 8 มิลลิเมตร และยาว 25% ของความยาวเหล็กเสริม สำหรับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 12 และ 50% และ 75% ของความยาวเหล็กเสริม สำหรับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 8 ผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนชะลูดเท่ากัน และมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความยาวเท่ากันจะมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน ภายใต้เงื่อนไขความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เพียงพอในช่วงที่ศึกษา

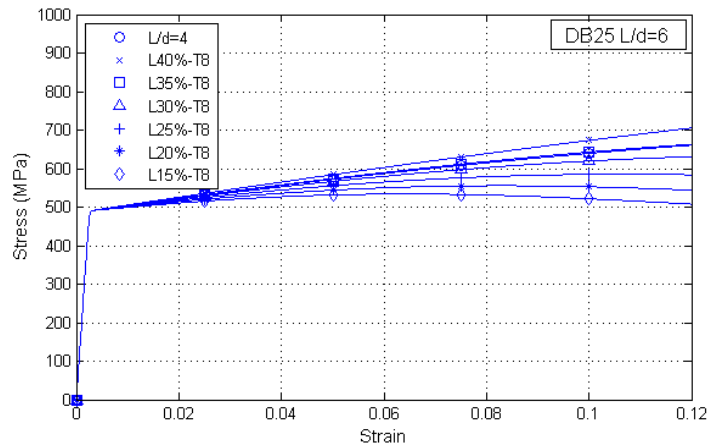


ภาพที่ 6.3 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาวเหล็กเสริมที่มีต่อ

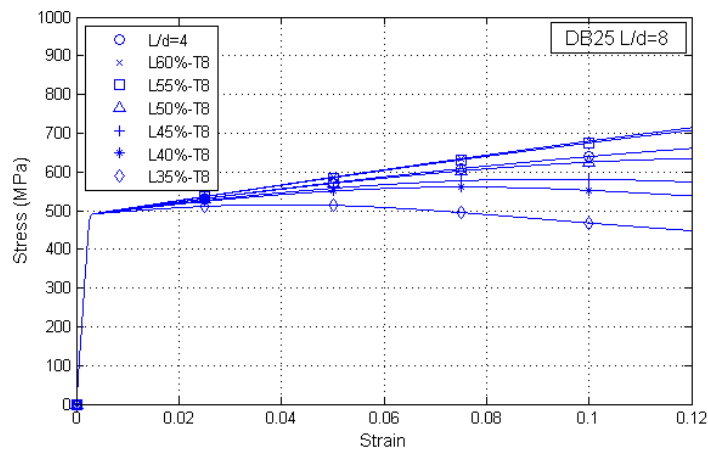
ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด

6.4 กรณีศึกษาที่ 4 : อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก

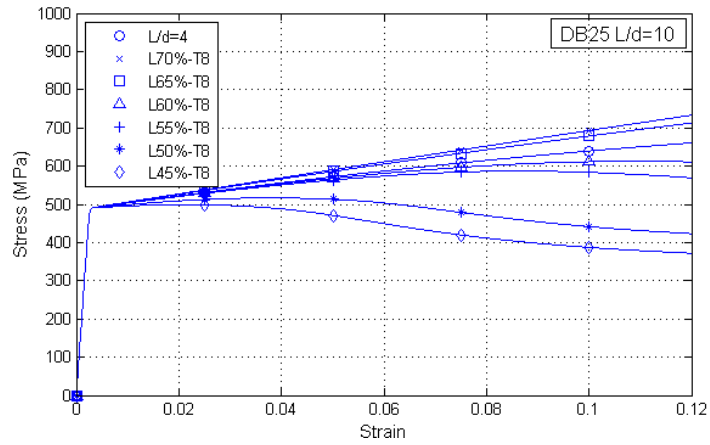
วิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ซึ่งมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาเพียงพอในช่วงความเครียดที่ศึกษา (8 มิลลิเมตร) และแปรผันอัตราส่วนความยาวในช่วง 10%-90% ของความยาวเหล็กเสริม โดยมีการแปรผันค่าทุกๆ 5% ของความยาวเหล็กเสริม โดยภาพที่ 6.4-6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่แปรผันอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมจำนวน 6 ค่า ที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับช่วงที่เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก



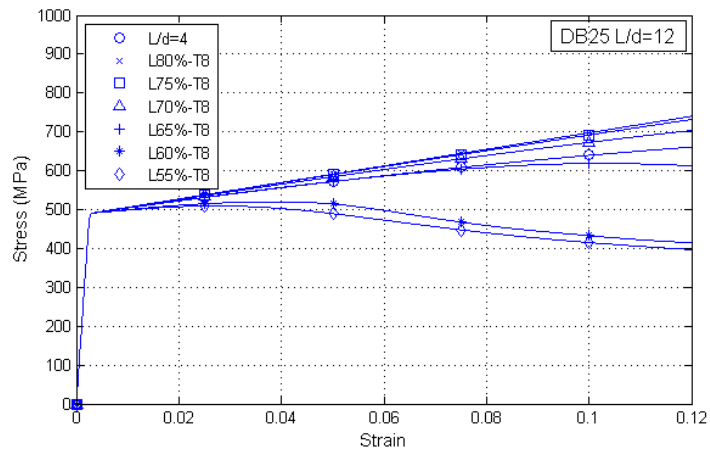
ภาพที่ 6.4 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี L/d=6



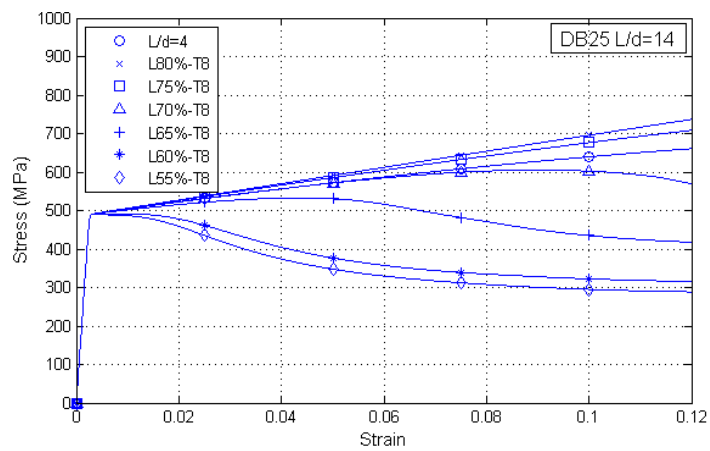
ภาพที่ 6.5 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี L/d=8



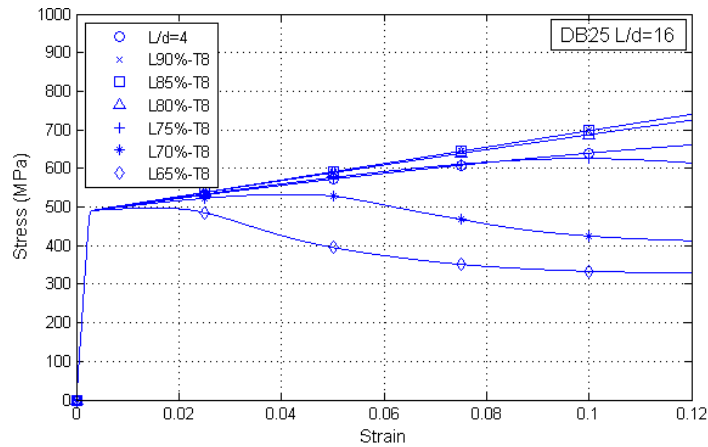
ภาพที่ 6.6 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=10$



ภาพที่ 6.7 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=12$

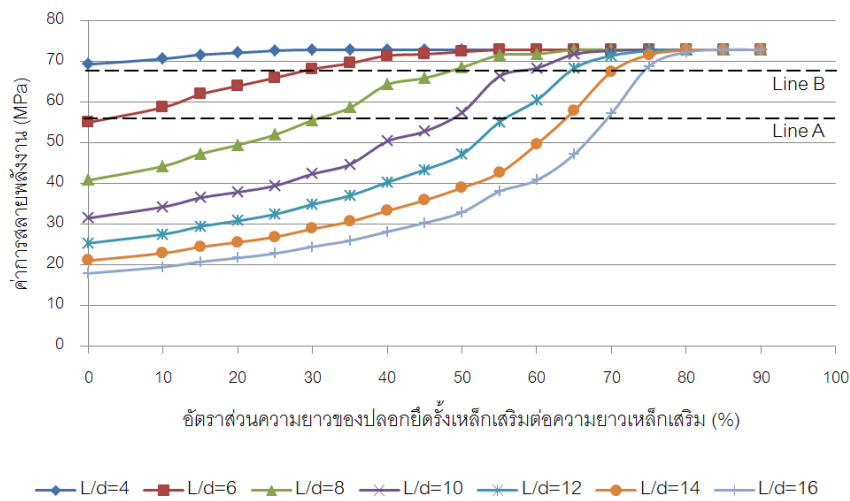


ภาพที่ 6.8 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี $L/d=14$



ภาพที่ 6.9 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริมที่มีต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียด สำหรับเหล็กเสริมที่มี L/d=16

ค่าการสลายพลังงานที่คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟหน่วยแรงและความเครียด ใช้เป็นค่าในการอ้างอิงเพื่อหาค่าอัตราส่วนความยาวปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก ซึ่งแสดงในภาพที่ 6.10 โดยแบ่งเป็นค่าการสลายพลังงานที่ทำให้เหล็กเสริมมีกำลังการรับแรงในช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก (Line A) และค่าการสลายพลังงานที่ทำให้มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 4 (Line B) และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก แสดงดังตารางที่ 6.1

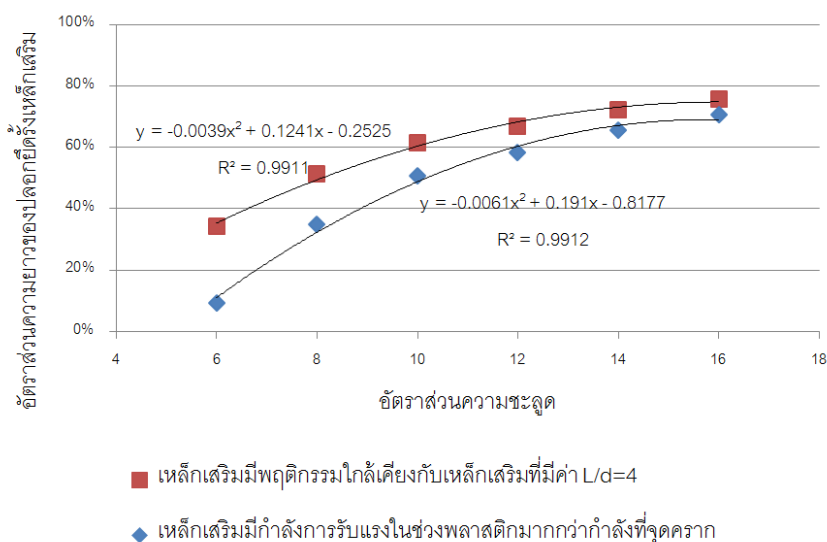


ภาพที่ 6.10 ค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดครั้งแรกเหล็กเสริม

ตารางที่ 6.1 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก

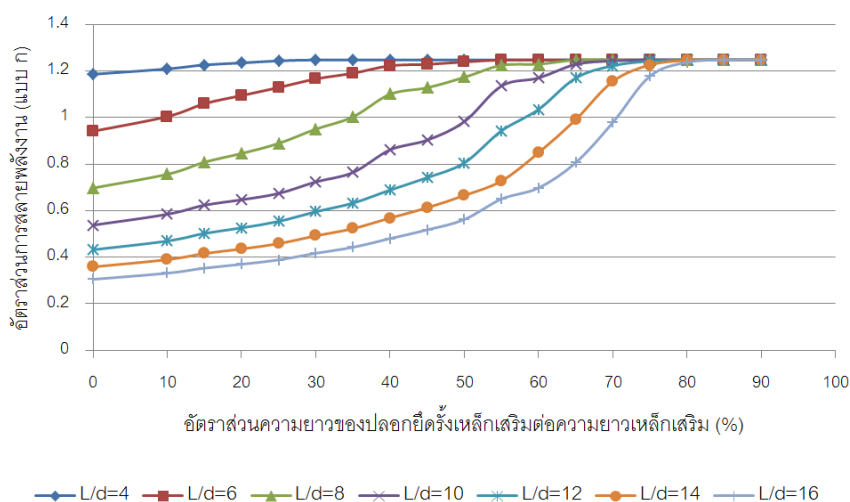
L/d	อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม(%)	
	เหล็กเสริมมีกำลังการรับแรงในช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก	เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่า L/d=4
6	10 (9.31)	35 (34.10)
8	35 (34.74)	50 (51.27)
10	50 (50.58)	60 (61.36)
12	60 (58.12)	65 (66.56)
14	65 (65.28)	70 (72.17)
16	70 (70.54)	75 (75.67)

จากตารางที่ 6.1 อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ที่ทำให้เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดครากมีค่ามากขึ้น เมื่ออัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริมมีค่าสูงขึ้น โดยค่าอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมและค่าอัตราส่วนความชะลูดมีความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง ดังภาพที่ 6.11

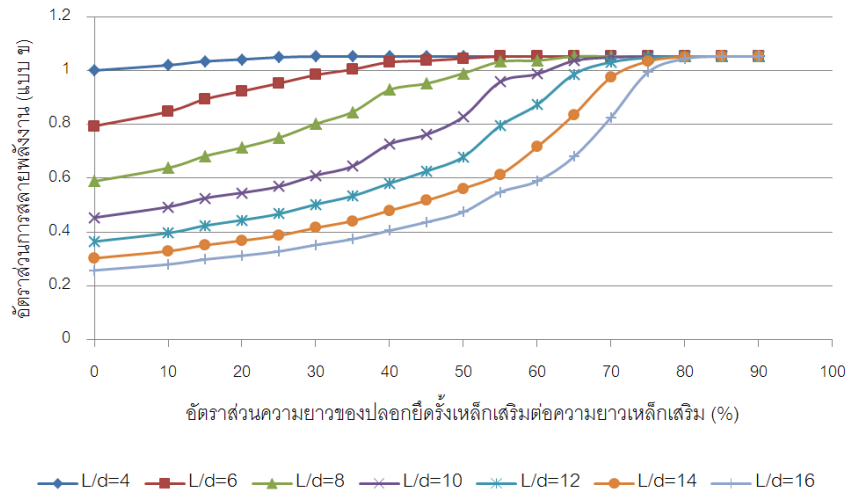


ภาพที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมคงสภาพการรับแรงหลังจุดครากกับอัตราส่วนความชะลูด

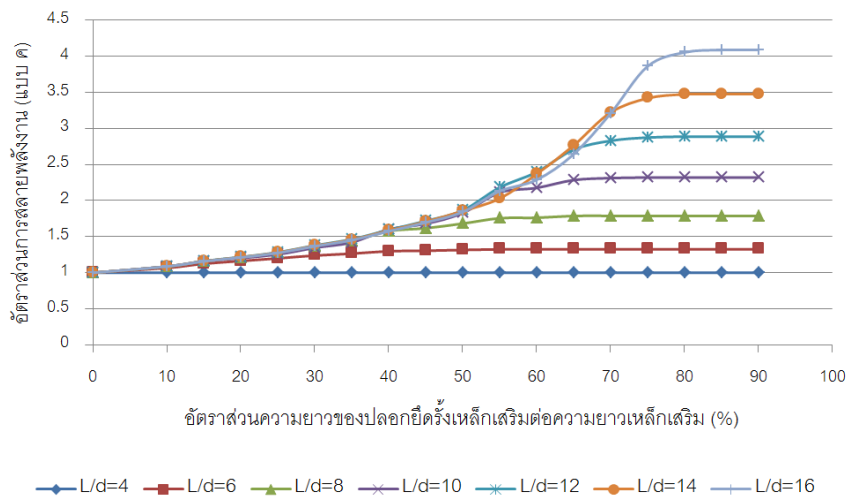
ภาพที่ 6.12–6.14 แสดงค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่แปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยมีการทำอัตราส่วนทั้งสิ้น 3 แบบ คือ แบบ ก การทำเป็นอัตราส่วนด้วยค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีพฤติกรรมการรับแรงในช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก แบบ ข การทำเป็นอัตราส่วนด้วยค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเหล็กเสริมที่มี $L/d=4$ และแบบ ค การทำเป็นอัตราส่วนด้วยค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมของแต่ละอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม



ภาพที่ 6.12 ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม แบบ ก



ภาพที่ 6.13 ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม แบบ ข



ภาพที่ 6.14 ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม แบบ ค

6.5 กรณีศึกษาที่ 5 : ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีประสิทธิภาพในการยึดรั้งเหล็กเสริม

ในกรณีศึกษาที่ 1 ที่ว่าด้วยการศึกษาเกี่ยวกับความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม เหล็กเสริมที่มีความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมน้อยกว่า จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการเสียดรูปที่ต่ำกว่าเหล็กเสริมที่มีความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมากกว่า ดังนั้นการศึกษาหัวข้อนี้จึงศึกษาความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เพียงพอ สำหรับยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียดที่เหมาะสม โดยอ้างอิงค่าความเครียดของเหล็กเสริมจากงานวิจัยการทดสอบเสาภายใต้แรงกระทำแบบวิถัจกร และแรงอัดตามแนวแกน ซึ่งคำนวณจากความโค้งบริเวณจุดหมุนพลาสติกของเสา โดยค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวแสดงในตารางที่ 6.2 และค่าความเครียดของคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเริ่มสูญเสียความสามารถในการโอบรัด เหตุที่ใช้ค่านี้ในการอ้างอิงเนื่องจากคอนกรีตเริ่มมีพฤติกรรมแบบเปราะเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดจนนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างเสา ซึ่งแสดงในตารางที่ 6.3 และภาพที่ 6.15

ตารางที่ 6.2 ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว และงานวิจัยที่อ้างอิง

ผู้วิจัย และตัวอย่างเสาที่อ้างอิง	ขนาดเสาทดสอบ (mm)	ความโค้งสูงสุดบริเวณจุดหมุนพลาสติก ($1/\text{mm} \times 10^{-6}$)	ค่าโมเมนต์ที่ค่าความโค้งสูงสุดเทียบกับโมเมนต์ที่จุดคราก	ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวคำนวณจากความโค้งเสาสูงสุด
Azizinamini และคณะ (1992) (NC-5) $\rho_s = 0.0219$	457×457 ×3200	349	75%	0.058
Bae และ Bayrak (2008) (S24-5UT) $\rho_s = 0.0130$	610×610 ×2630	175	76%	0.044
Singhasut (2008) (C-12-090) $\rho_s = 0.01675$	400×400 ×2150	287	73%	0.037
Sawaroj (2010) (CC-09-200) $\rho_s = 0.00424$	400×400 ×2150	218	78%	0.028

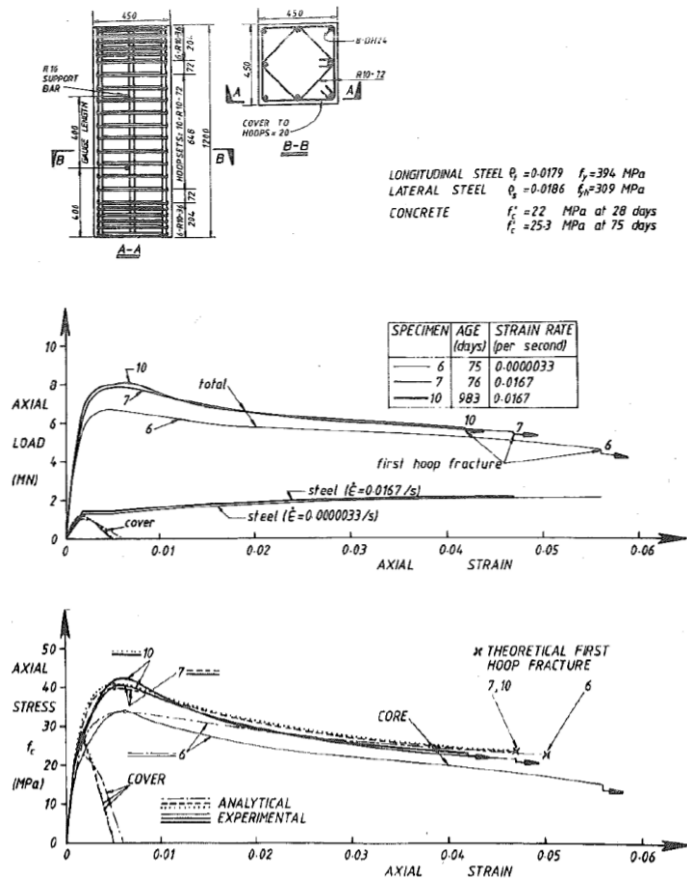
หมายเหตุ ρ_s = อัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กทางขวาง (volumetric ratio)

งานวิจัยในอดีตได้มีการศึกษาพฤติกรรมการโอบรัดคอนกรีตของเหล็กเสริมทางขวางอย่างแพร่หลาย ซึ่งได้แก่ Scott และคณะ(1988), Mander และคณะ(1988), Razvi และSaaticioglu (1989) โดยค่าความเครียดของคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเกิดความเสียหาย แสดงดังตารางที่ 6.3 และภาพที่ 6.15

ตารางที่ 6.3 ความเครียดคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเกิดความเสียหาย และงานวิจัยที่อ้างอิง

ผู้วิจัย	ลักษณะหน้าตัด	อัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กโอบรัด	ความเครียดคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเกิดความเสียหาย
Mander และคณะ(1988)	วงกลม	0.018	0.053
	สี่เหลี่ยม	0.046	0.038

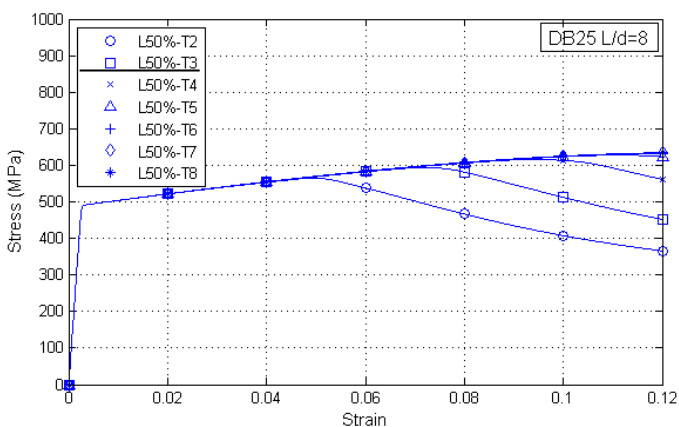
หมายเหตุ ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ



ภาพที่ 6.15 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบ และพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้การโอบรัด

Scott และคณะ(1988)

จากตารางที่ 6.2 ค่าเฉลี่ยความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 0.042 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.058 และจากตารางที่ 6.3 และภาพที่ 6.15 ความเครียดของคอนกรีตเมื่อเหล็กเสริมทางขวางเกิดความเสียหายอยู่ในช่วงความเครียดที่น้อยกว่า 0.06 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียดเท่ากับ 0.06 โดยวิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 16, 25, 32 และ 40 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 6, 8, 12, 16 และพิจารณาอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม 2 แบบ คือ อัตราส่วนความยาวที่ทำให้เหล็กเสริมมีกำลังการรับแรงในช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก และอัตราส่วนความยาวที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$ โดยแต่ละตัวอย่างมีการแปรผันค่าความหนาทุกๆ 1 มิลลิเมตร จำนวน 7 ค่า โดยความหนาที่เหมาะสม พิจารณาจากค่าการสลายพลังงานภายในช่วงความเครียดเท่ากับ 0.06 ที่มีค่าความแตกต่างของค่าการสลายพลังงานที่น้อยกว่า 0.5% เมื่อเทียบกับกรณีที่มีความหนาที่ยึดรั้งมากที่สุด(เหตุที่ใช้ความแตกต่างที่ 0.5% เพราะว่าค่าการสลายของเหล็กเสริมที่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงที่กำหนดมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.5% ดังแสดงในภาพที่ 6.16) โดยผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 6.17-6.20 และตารางที่ 6.4 แสดงความหนาที่เหมาะสมที่ใช้ในการยึดรั้ง



Thickness of RRC (mm)	2	3	4	5	6	7	8
Δ Energy dissipation (%)	0.89	0.13	0.07	0.04	0.02	0.01	-

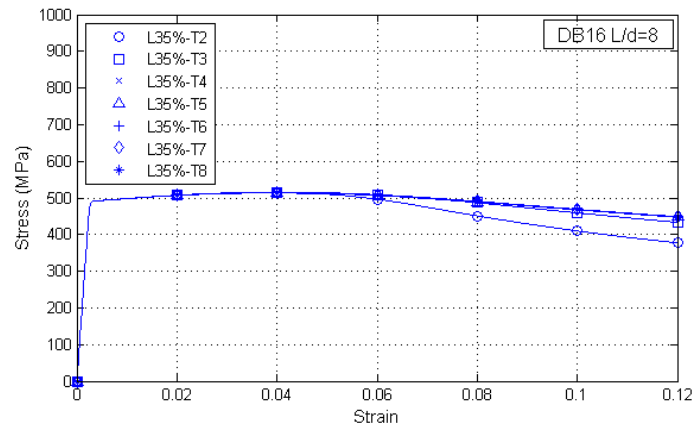
ภาพที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และความแตกต่างของค่าการสลายพลังงาน

ตารางที่ 6.4 ความหนาของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีประสิทธิภาพในการยึดตั้งเหล็กเสริม ในช่วงความเครียดเท่ากับ 0.06

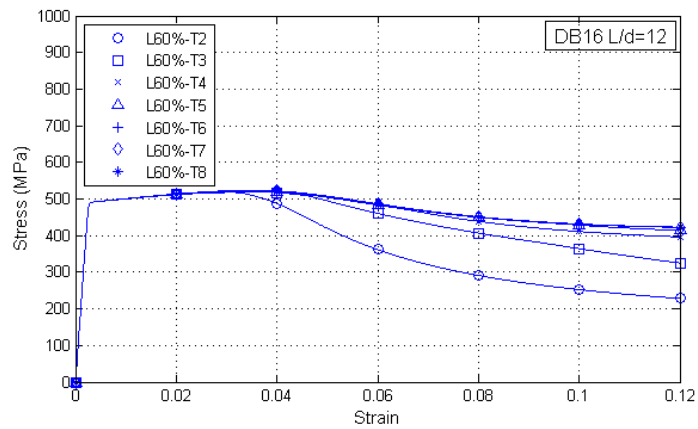
อัตราส่วนความ ชะลูดของ เหล็กเสริม	ความหนาของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม							
	เหล็กเสริมมีกำลังการรับแรงในช่วงพลาสติก มากกว่ากำลังที่จุดคราก				เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม ที่มีค่า $L/d=4$			
	DB16	DB25	DB32	DB40	DB16	DB25	DB32	DB40
6	2	2	3	4	2	2	2	4
8	2	4	5	6	2	3	3	4
12	4	5	6	8	3	4	5	6
16	4	6	8	10	3	5	6	7

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าขนาดของเหล็กเสริม และความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม มีผลต่อความหนาของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดตั้ง โดยเหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่า ต้องใช้ปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีความหนามากขึ้น และปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่สั้นกว่าต้องใช้ปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเกี่ยวกับความเครียด และโมเมนต์ภายในปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม โดยปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีขนาดสั้นกว่าจะมีค่าความเครียดและโมเมนต์ภายในปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มากกว่า ซึ่งหมายถึงการเสียรูปของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความหนาที่เหมาะสมของกรณีเหล็กเสริมมีกำลังการรับแรงในช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก อยู่ในช่วง 3-10 มิลลิเมตร และเหล็กเสริมที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่าอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 4 อยู่ในช่วง 2-7 มิลลิเมตร

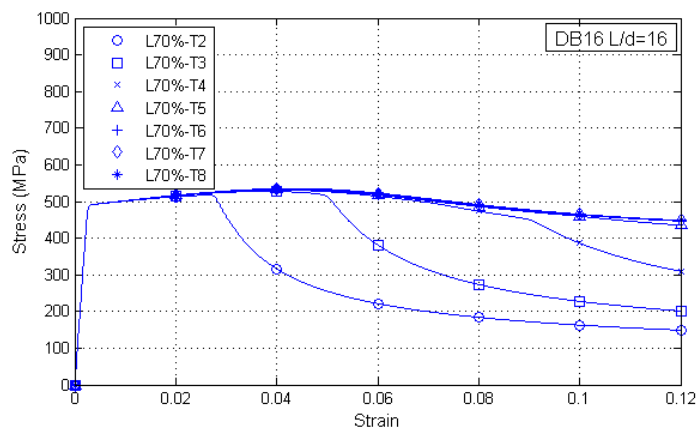
อย่างไรก็ตามค่าความหนาที่เหมาะสมที่แสดงดังตารางที่ 6.4 เป็นเพียงค่าความหนาที่มาจากการศึกษาจากเหล็กเสริมที่มีคุณสมบัติตามการทดสอบของ Sawaroj (2010) ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อค่าความหนาประสิทธิภาพผลของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม เช่น ค่าคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม ค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ซึ่งได้กล่าวไว้ในกรณีศึกษาที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



(ก) L/d=8 L35%



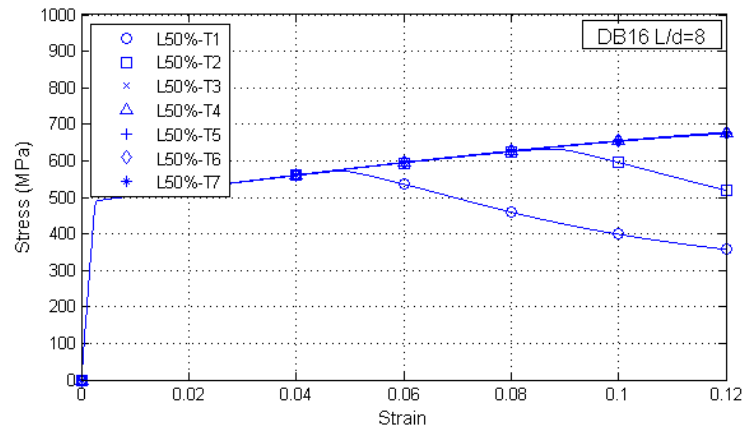
(ข) L/d=12 L60%



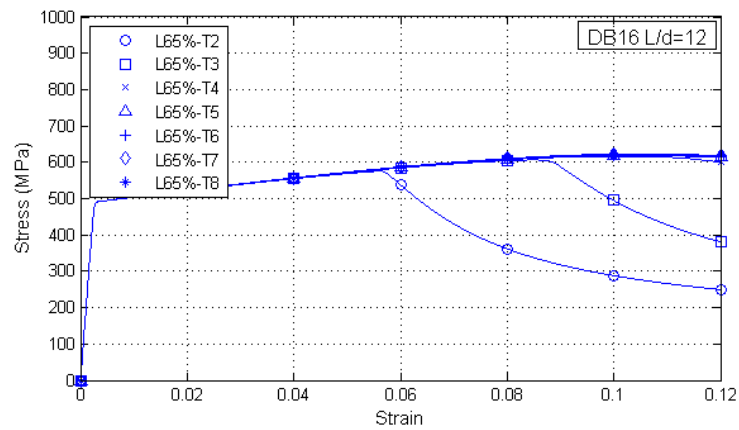
(ค) L/d=16 L70%

ภาพที่ 6.17 ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

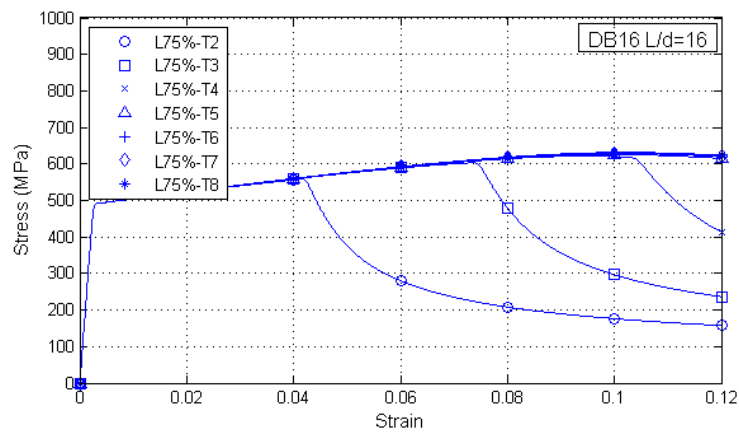
ขนาด 16 มิลลิเมตร



(ง) L/d=8 L50%



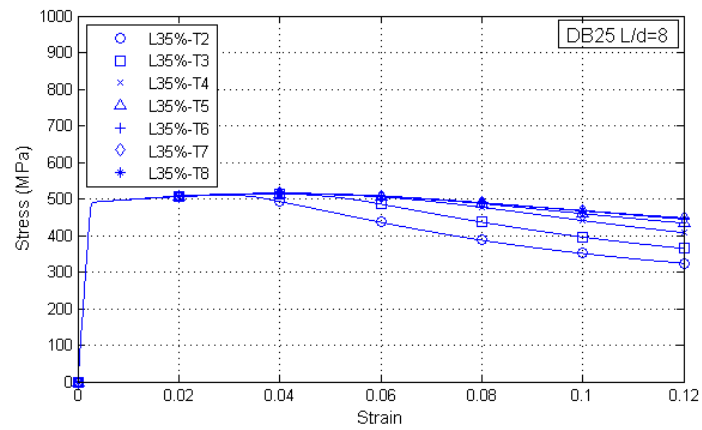
(จ) L/d=12 L65%



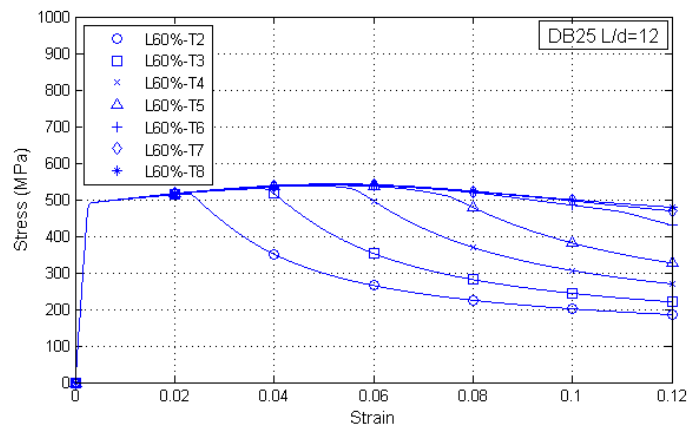
(ฉ) L/d=16 L75%

ภาพที่ 6.17(ต่อ) ผลของความหนาปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

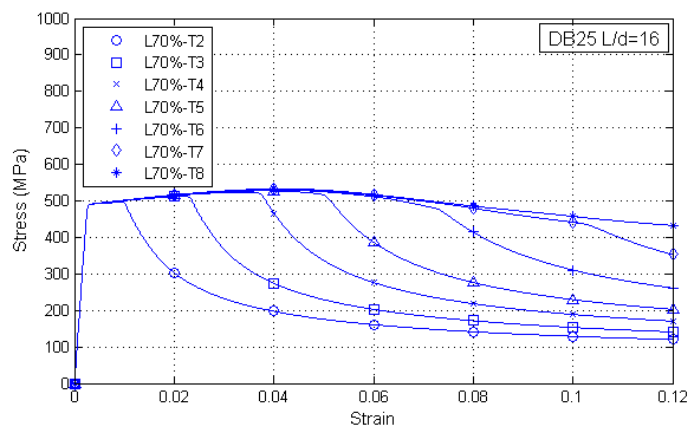
ขนาด 16 มิลลิเมตร



(ก) L/d=8 L35%



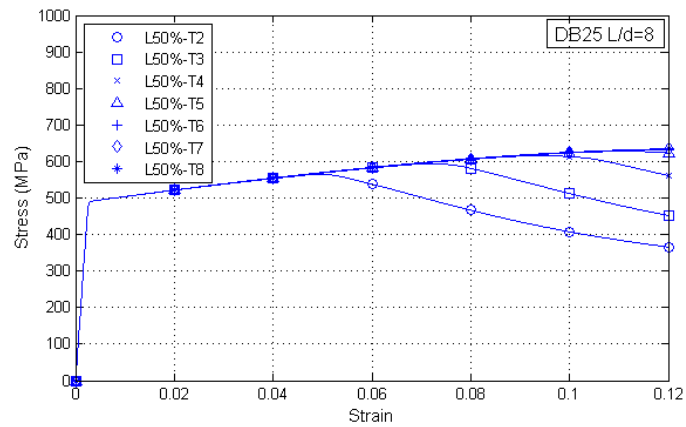
(ข) L/d=12 L60%



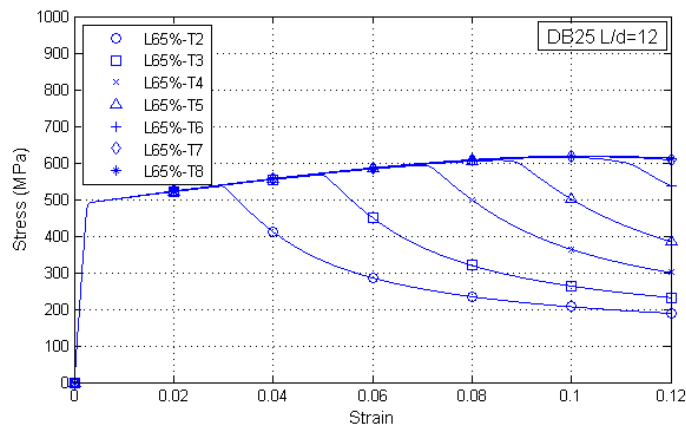
(ค) L/d=16 L70%

ภาพที่ 6.18 ผลของความหนาปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

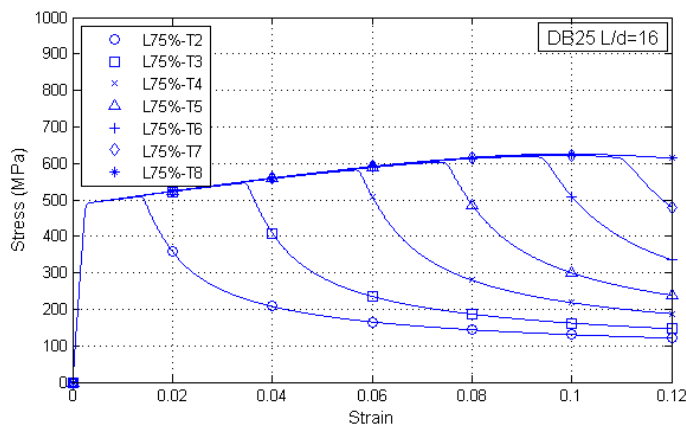
ขนาด 25 มิลลิเมตร



(ง) L/d=8 L50%



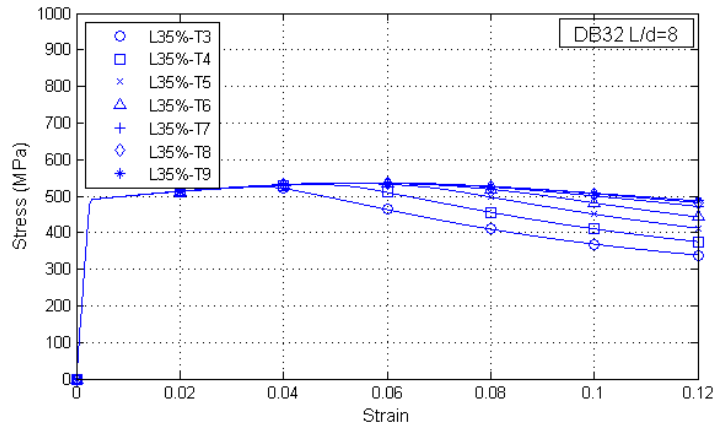
(จ) L/d=12 L65%



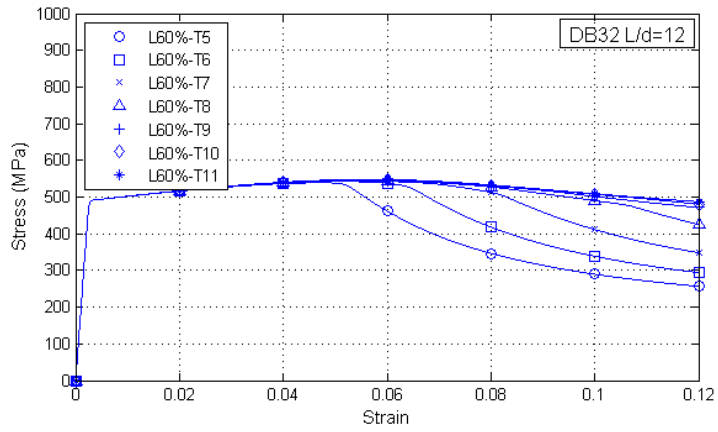
(ฉ) L/d=16 L75%

ภาพที่ 6.18(ต่อ) ผลของความหนาปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

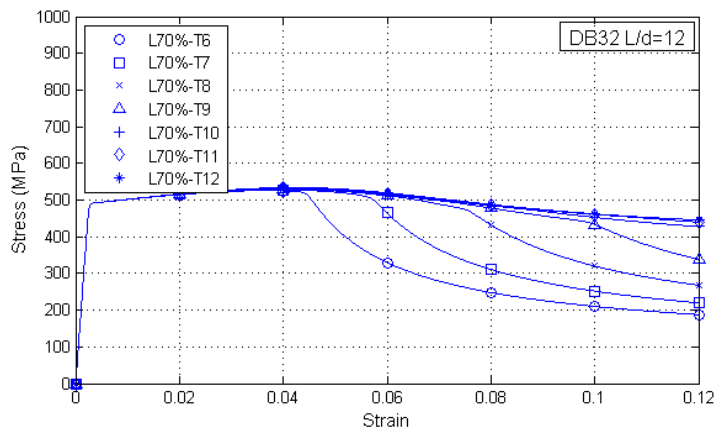
ขนาด 25 มิลลิเมตร



(ก) L/d=8 L35%



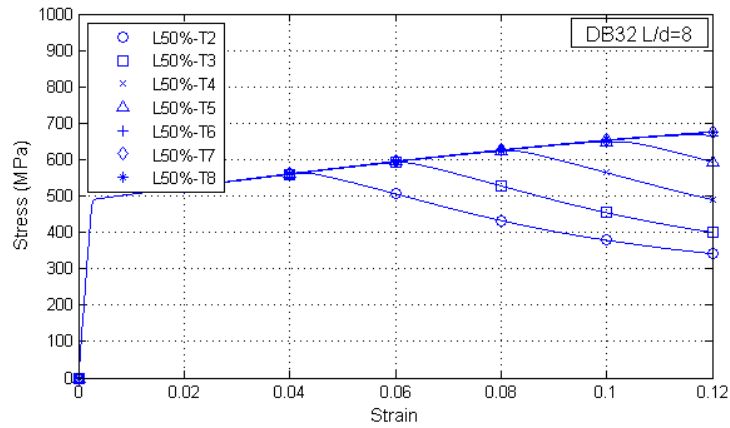
(ข) L/d=12 L60%



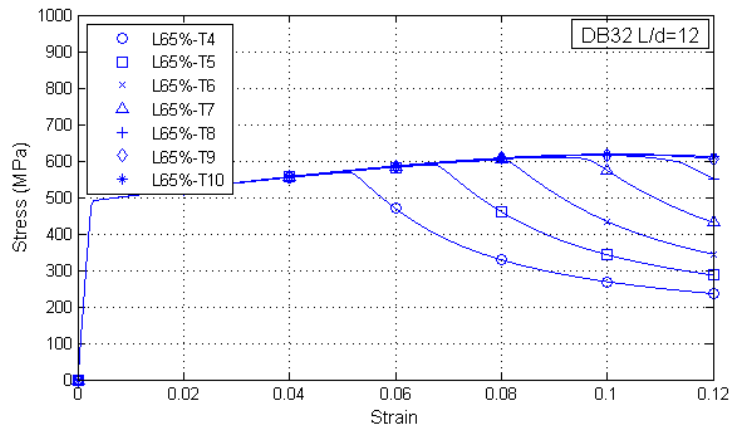
(ค) L/d=16 L70%

ภาพที่ 6.19 ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

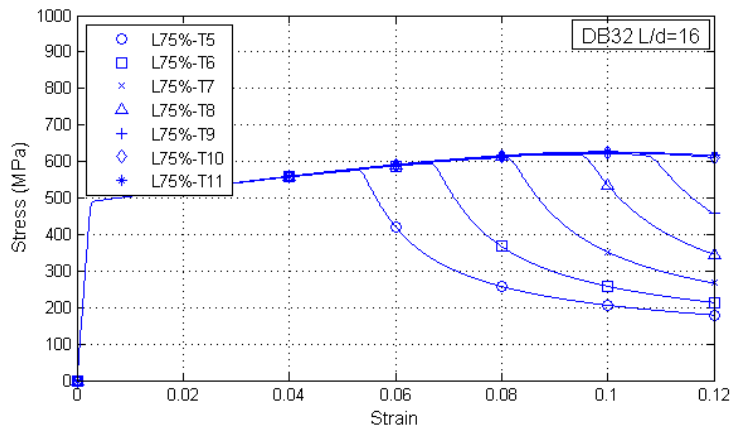
ขนาด 32 มิลลิเมตร



(ง) L/d=8 L50%



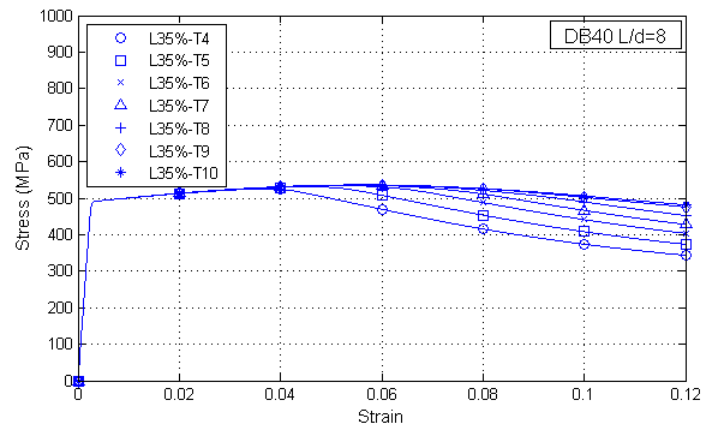
(จ) L/d=12 L65%



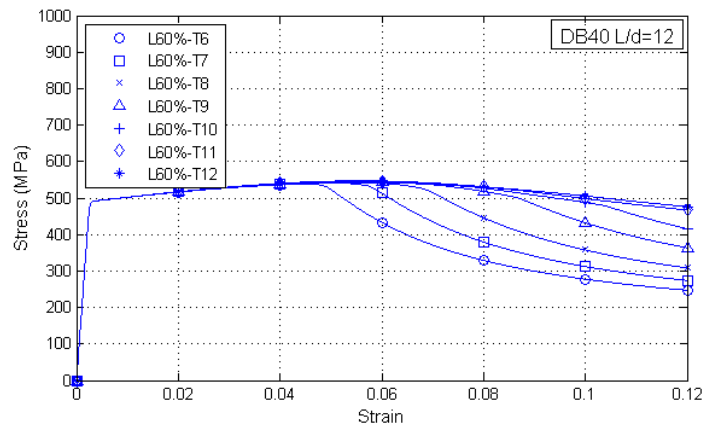
(ฉ) L/d=16 L75%

ภาพที่ 6.19(ต่อ) ผลของความหนาปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

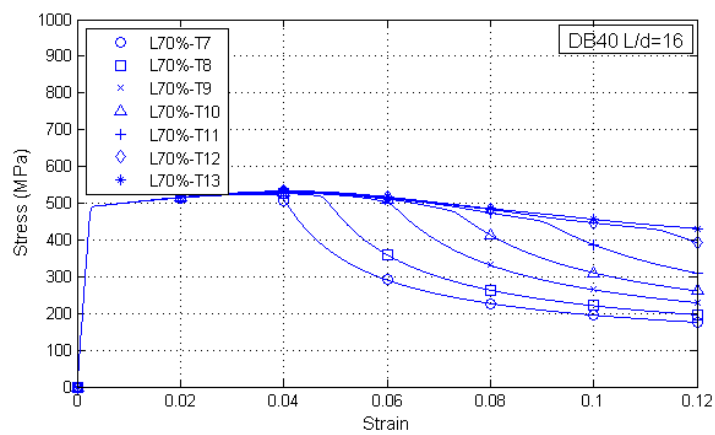
ขนาด 32 มิลลิเมตร



(ก) L/d=8 L35%



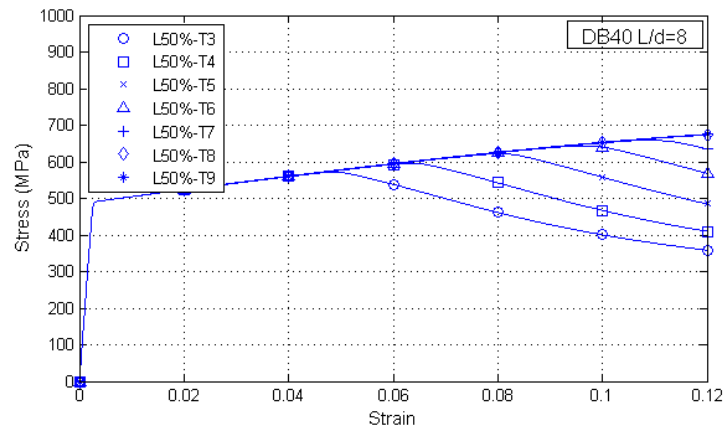
(ข) L/d=12 L60%



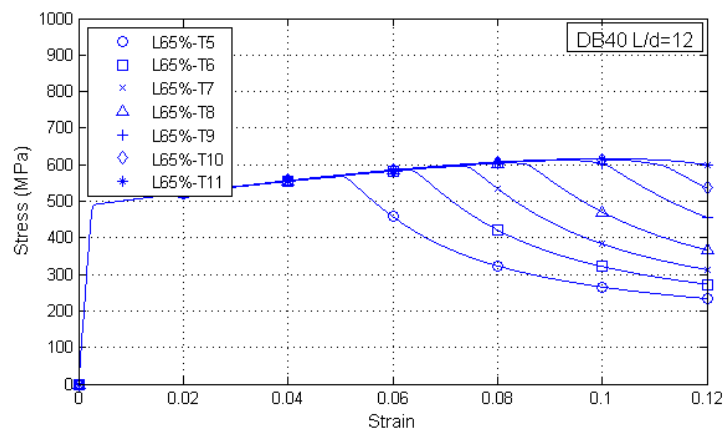
(ค) L/d=16 L70%

ภาพที่ 6.20 ผลของความหนาปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

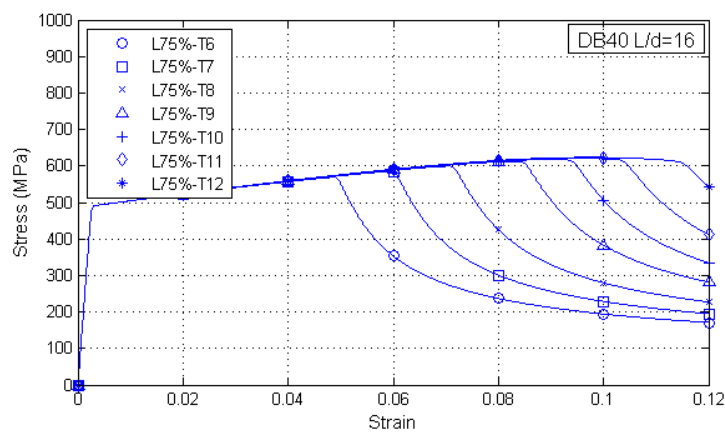
ขนาด 40 มิลลิเมตร



(ง) L/d=8 L50%



(จ) L/d=12 L65%



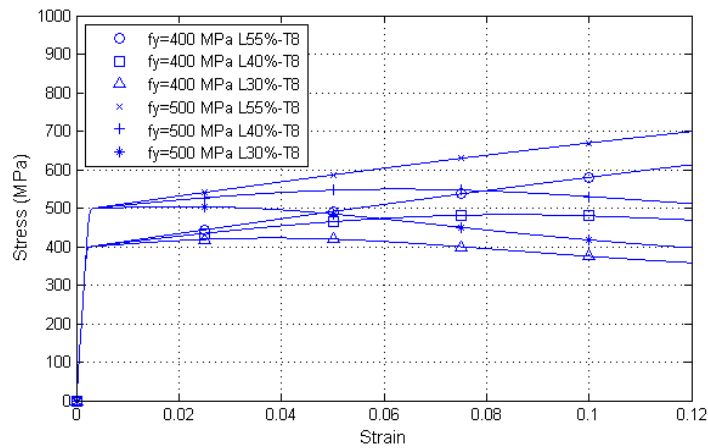
(ฉ) L/d=16 L75%

ภาพที่ 6.20(ต่อ) ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม
ขนาด 40 มิลลิเมตร

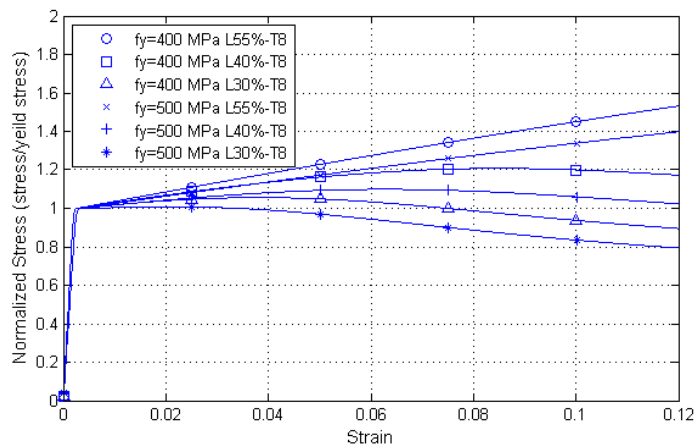
6.6 กรณีศึกษาที่ 6 : คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม

ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม ที่มีการแปรผันค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม โดยใช้เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร โดยพิจารณาเหล็กเสริมที่มีค่ากำลังที่จุดครากเท่ากับ 400 และ 500 เมกกะปาสคาล และ อัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นเท่ากับ 0.010 และ 0.016

6.6.1 ผลของคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่มีต่ออัตราส่วนความยาวของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดตั้ง

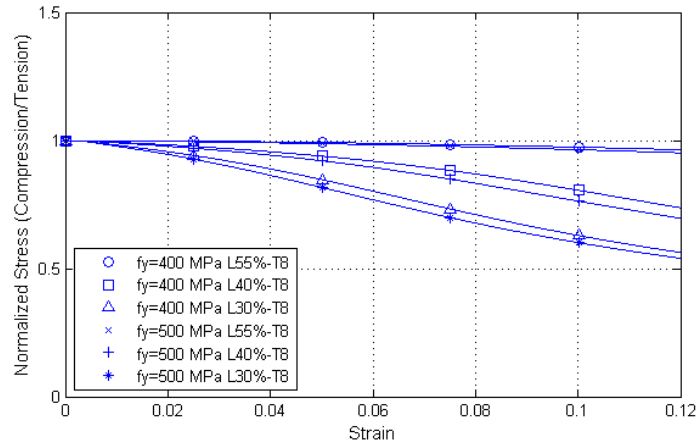


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงที่จุดครากและความเครียด

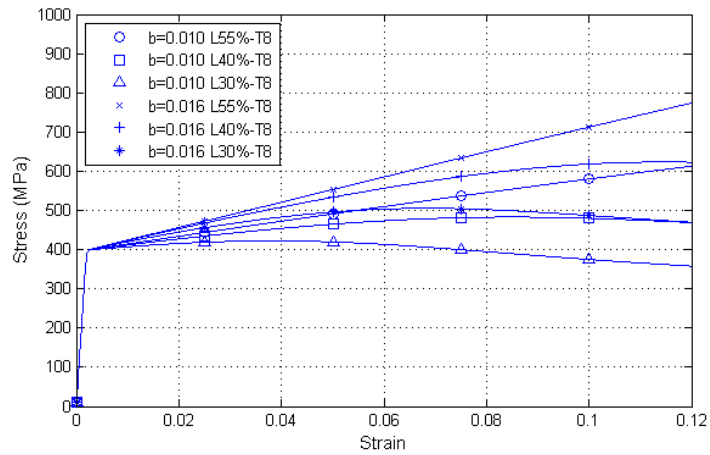
ภาพที่ 6.21 ผลของความยาวปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมเหล็กเสริมที่แปรผันกำลังที่จุดคราก



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงอัดต่อหน่วยแรงดึงและความเครียด

ภาพที่ 6.21(ต่อ) ผลของความยาวปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมเหล็กเสริมที่แปรผันกำลังที่จุด

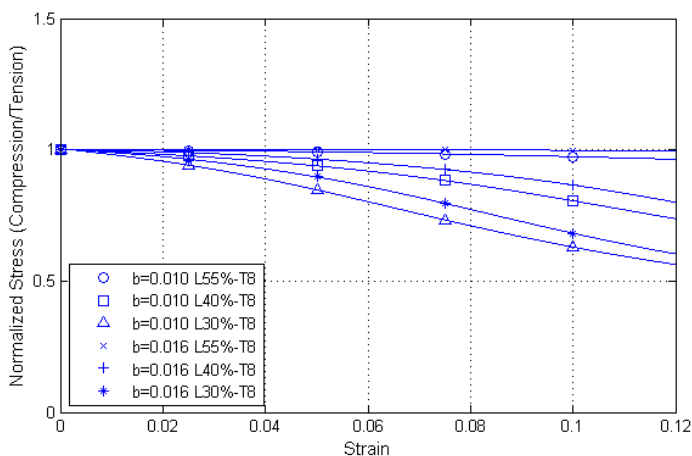
คราก



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงที่จุดครากและความเครียด

ภาพที่ 6.22 ผลของความยาวปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการแปรผัน

อัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น



(ข) อัตราส่วนหน่วยแรงอัดต่อหน่วยแรงดึงและความเครียด

ภาพที่ 6.22(ต่อ) ผลของความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น

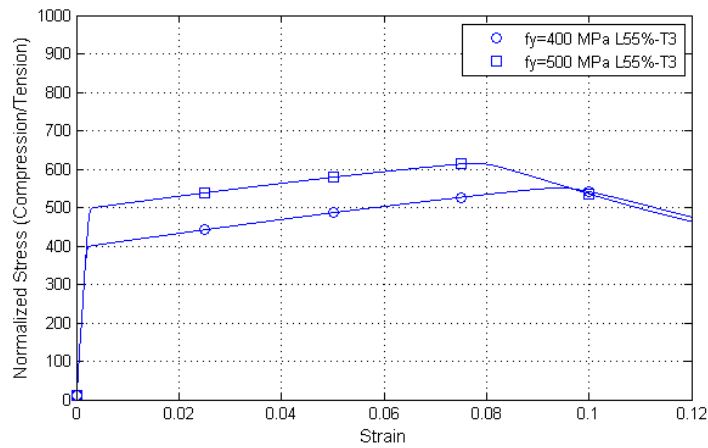
จากภาพที่ 6.21 และ 6.22 เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน เมื่อเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมความยาวเท่ากันแต่แปรผันค่าคุณสมบัติวัสดุ โดยพบว่าต้องใช้ความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ยาวขึ้นเล็กน้อย เมื่อเหล็กเสริมมีกำลังที่จุดครากสูง หรือมีอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นต่ำ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้งเมื่อกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมเท่ากับ 400, 500 และ 600 เมกะปาสคาล โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมที่มีต่ออัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$

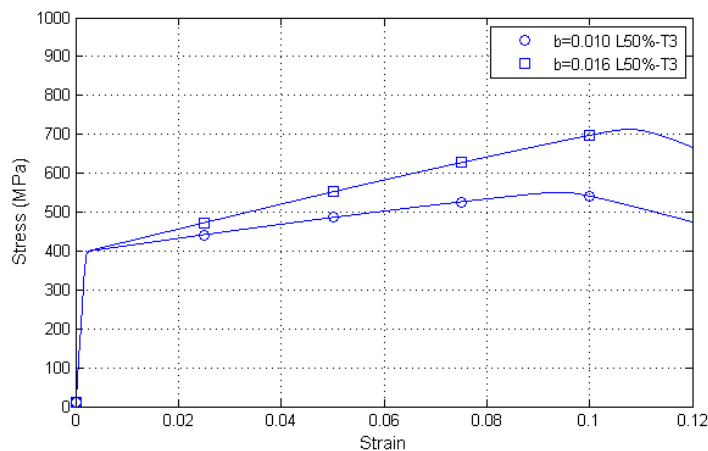
กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกะปาสคาล)	อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม(%) ที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$		
	$L/d=8$	$L/d=12$	$L/d=16$
400	51.14	66.12	75.00
500	51.39	66.85	76.12
600	51.74	67.57	77.31

จากตารางที่ 6.5 สรุปได้ว่าอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมสำหรับการยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดครากในช่วง 400–600 เมกะปาสคาลนั้นไม่แตกต่างกันมาก โดยมีความแตกต่างกันมากที่สุดเท่ากับ 2.31% สำหรับกรณี $L/d=16$

6.6.2 ผลของคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่มีต่อความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้ง



ภาพที่ 6.23 ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดคราก



ภาพที่ 6.24 ผลของความหนาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้น

จากภาพที่ 6.23 และ 6.24 เหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาเท่ากันสามารถยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียดที่น้อยกว่าเมื่อเหล็กเสริมมีกำลังที่จุดครากสูงกว่า หรือ มีค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ได้ศึกษาความหนาที่ใช้ในการยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียดเท่ากับ 0.06 ที่มีอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$ โดยผลการศึกษาดังตารางที่ 6.6

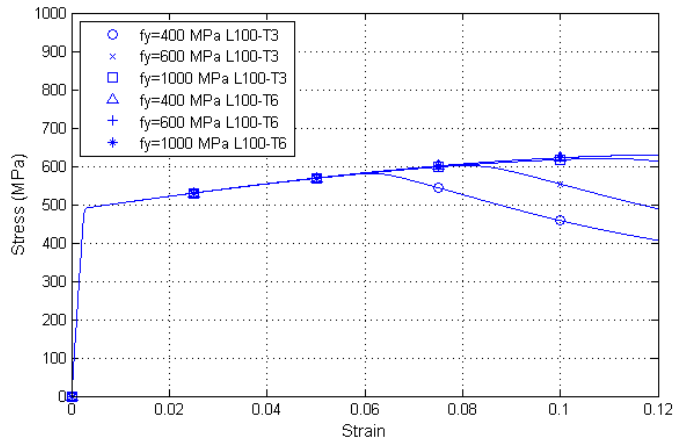
ตารางที่ 6.6 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมที่มีต่อความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้ง (กรณีที่ทำให้เหล็กเสริมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$)

อัตราส่วนความ ขะลุขของ เหล็กเสริม	ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)											
	DB16			DB25			DB32			DB40		
	400 MPa	500 MPa	600 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa
8	1	2	2	2	3	3	3	3	4	3	4	5
16	3	3	4	4	5	6	5	6	7	6	7	9

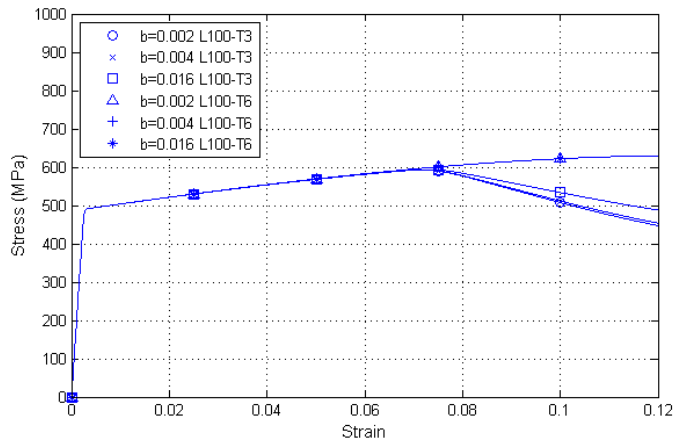
จากตารางที่ 6.6 ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้งเหล็กเสริมมีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 500 เมกกะปาสคาลมีขนาดเช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อที่ 6.5 ซึ่งมีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 492 เมกกะปาสคาล และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการยึดรั้งมีค่าแตกต่างกันประมาณ 1 มิลลิเมตร เมื่อกำลังที่จุดครากแตกต่างกันประมาณ 100 เมกกะปาสคาล

6.7 กรณีศึกษาที่ 7 : คุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเสริม ที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยใช้เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ($L/d=8$) โดยศึกษาปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 400, 600 และ 1,000 เมกกะปาสคาล และ อัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นเท่ากับ 0.002, 0.004 และ 0.016



ภาพที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันค่ากำลังที่จุดครากของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



ภาพที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

จากภาพที่ 6.25 ค่ากำลังรับแรงที่จุดครากของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีผลต่อประสิทธิภาพในการยึดรั้งเหล็กเสริม โดยปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีกำลังที่จุดครากสูงกว่าจะมีประสิทธิภาพในการยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงที่มีความเครียดสูงกว่า เนื่องจากมีผลในการเพิ่มโมเมนต์พลาสติกของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ทำให้ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้น และจากภาพที่ 6.26 ค่าอัตราส่วนโมดูลัสหลังจุดครากต่อโมดูลัสเริ่มต้นของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ส่งผลต่อพฤติกรรมภายหลังจากที่เหล็กเสริมมีกำลังลดลง โดยที่มีผลในการชะลอการลดลงของกำลังการรับแรงของเหล็กเสริม แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทั้งสองนี้ไม่มีผลต่อการพัฒนา กำลังสำหรับเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีความหนาเพียงพอในช่วงที่ศึกษา ซึ่งสังเกตได้ในตัวอย่าง L100-T6

บทที่ 7

กรณีศึกษาเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้ แรงแบบวิฤจักรตามแนวแกน

ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม โดยวิเคราะห์เหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสมต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวิฤจักรตามแนวแกน

7.1 กรณีศึกษาที่ 1 ผลของค่าพารามิเตอร์ $R_0, CR_1, CR_2, a_1, a_2, a_3$ และ a_4 สำหรับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวิฤจักร

ในการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด ไม่ได้พิจารณาค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับ พฤติกรรมการเปลี่ยนจากช่วงยืดหยุ่นเป็นช่วงพลาสติก (R_0, CR_1, CR_2) และค่าการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (a_1, a_2, a_3, a_4) โดยได้ใช้ตามค่าปกติของโปรแกรม ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของคุณสมบัติที่กล่าวไป ต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวิฤจักรและแรงอัดตามแนวแกน

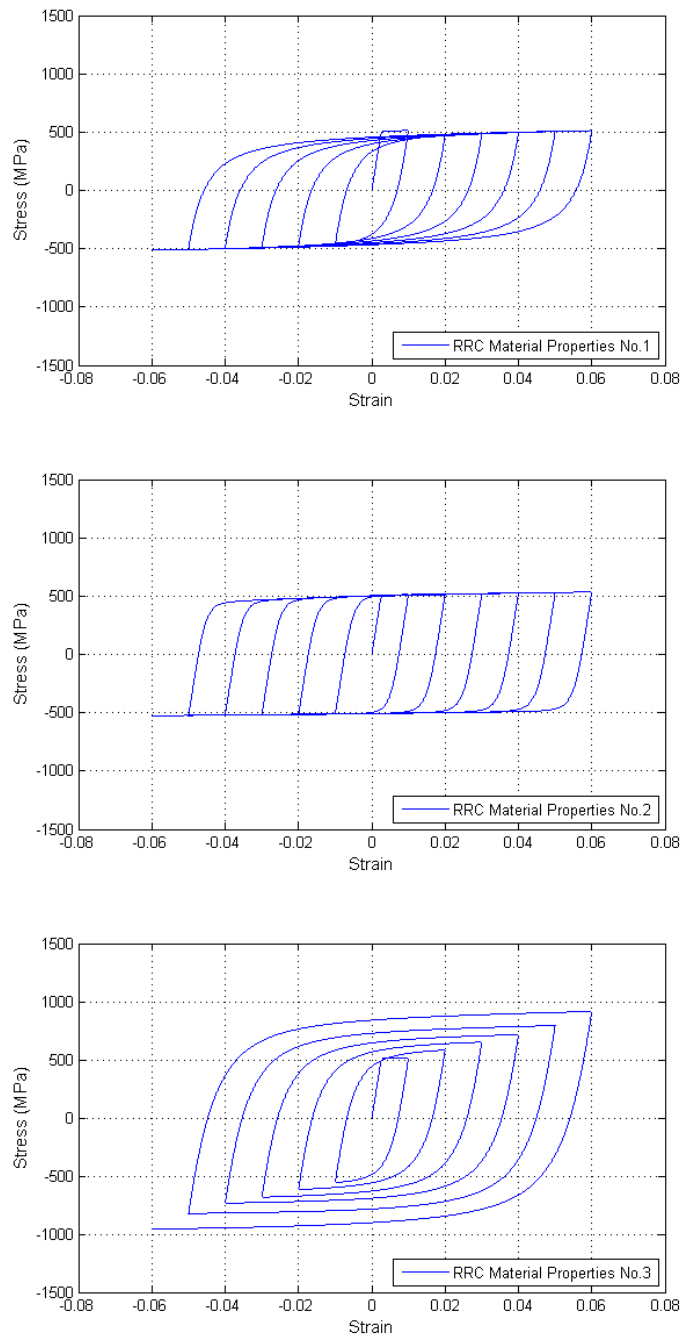
ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริม

No.	R_0	CR_1	CR_2	a_1	a_2	a_3	a_4
1	15	0.925	0.15	0	1	0	1
2	18	0.8	0.15	0	1	0	1
3	20	0.925	0.15	0.00001	0.00002	0.00001	0.00002

หมายเหตุ No.1 เป็นค่าปกติของโปรแกรม

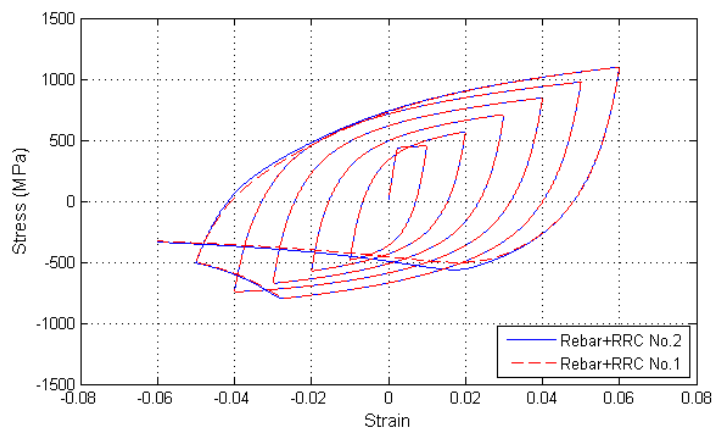
ค่าคุณสมบัติแบบที่ 1 และ 2 ไม่คิดผลของการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม (isotropic hardening) แตกต่างกันที่ค่าคุณสมบัติเกี่ยวกับพฤติกรรมการเปลี่ยนจากช่วงยืดหยุ่นเป็นช่วง

พลาสติก และแบบที่ 3 คุณสมบัติวัสดุที่คิดผลของการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของคุณสมบัติทั้ง 3 แบบ แสดงดังภาพที่ 7.1

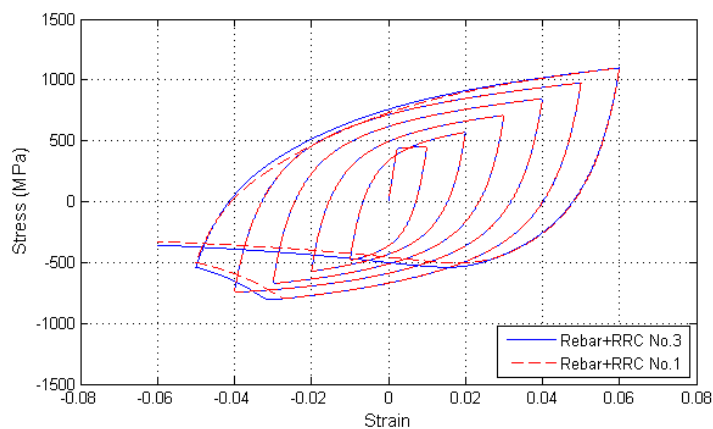


ภาพที่ 7.1 คุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดดิ่งเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรม

วิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 32 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 12 ซึ่งมีคุณสมบัติวัสดุตามผลการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) โดยเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมขนาด L65%-T5 ซึ่งมีการแปรผันค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมจำนวน 3 ค่า โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 7.2



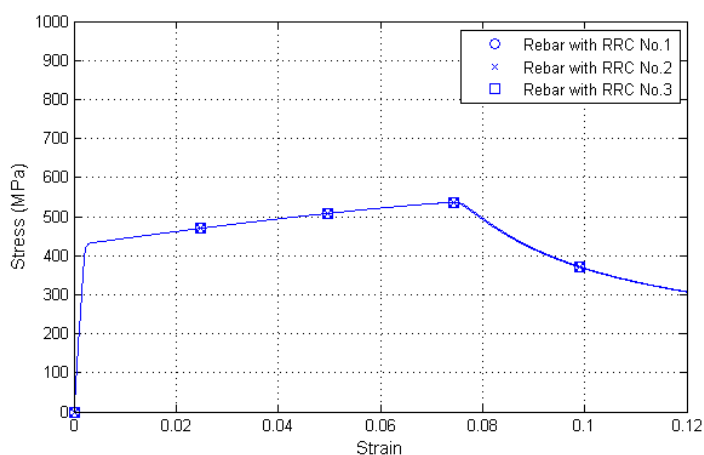
(ก) คุณสมบัติแบบที่ 2 และแบบที่ 1



(ข) คุณสมบัติแบบที่ 3 และแบบที่ 1

ภาพที่ 7.2 ค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

จากภาพที่ 7.2 เห็นได้ว่าค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ศึกษาซึ่งได้แก่ ค่า R_0 ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนจากช่วงยืดหยุ่นเป็นช่วงพลาสติก และค่า a_1, a_2, a_3, a_4 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแข็งตัวเพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการรับแรงของเหล็กเสริม โดยพบว่าปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีค่าการสลายพลังงานมากกว่าจะมีประสิทธิภาพการยึดรั้งเหล็กเสริม ดีกว่า อย่างไรก็ตามค่าคุณสมบัติเหล่านี้ มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 7.3 ซึ่งในการศึกษาพฤติกรรมแบบวัฏจักรเลือกใช้คุณสมบัติแบบที่ 1 เนื่องจากเหล็กเกรด SS400 ที่ใช้สำหรับปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีคุณสมบัติแบบอิลาสโตพลาสติกจึงไม่มีพิจารณาการแข็งตัวเพิ่มขึ้น (isotropic hardening) และเลือกใช้ค่า R_0 เท่ากับ 15 เนื่องจากเป็นค่ามาตรฐานของโปรแกรม

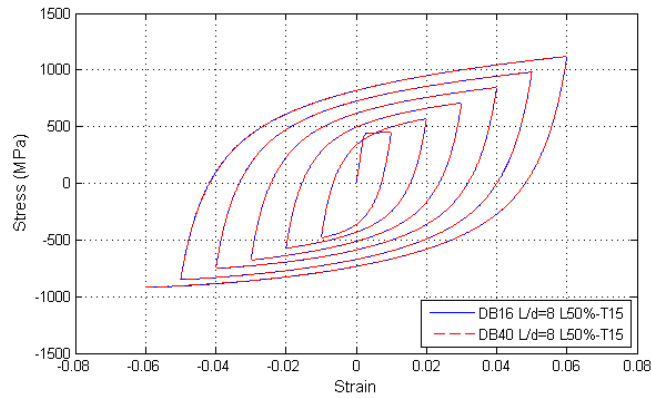


ภาพที่ 7.3 ค่าคุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

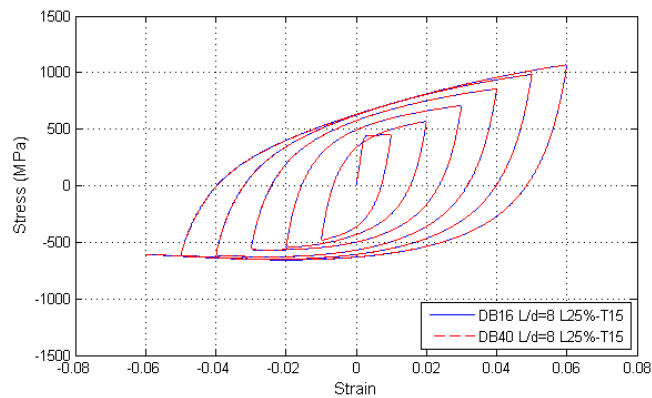
7.2 กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีผลต่อพฤติกรรมแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากัน

วิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 16 และ 40 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนชะลูดเท่ากับ 8 และ 12 ซึ่งมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหนา 15 มิลลิเมตร และยาว 50% และ 25% ของความยาวเหล็กเสริม ผลการวิเคราะห์เห็นภาพที่ 7.4 พบว่าเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนชะลูดเท่ากัน และมีการเสริม

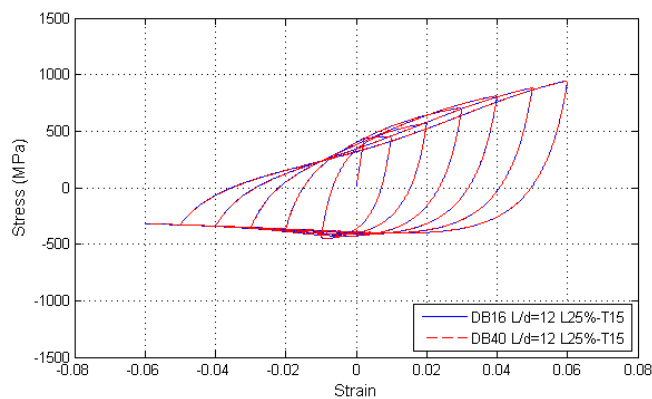
ปลอกยัดรีงเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความยาวเท่ากันจะมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน ภายใต้เงื่อนไข
ความหนาของปลอกยัดรีงเหล็กเสริมที่เพียงพอ



(ก) $L/d=8$ L50%-T15



(ข) $L/d=8$ L25%-T15



(ค) $L/d=12$ L25%-T15

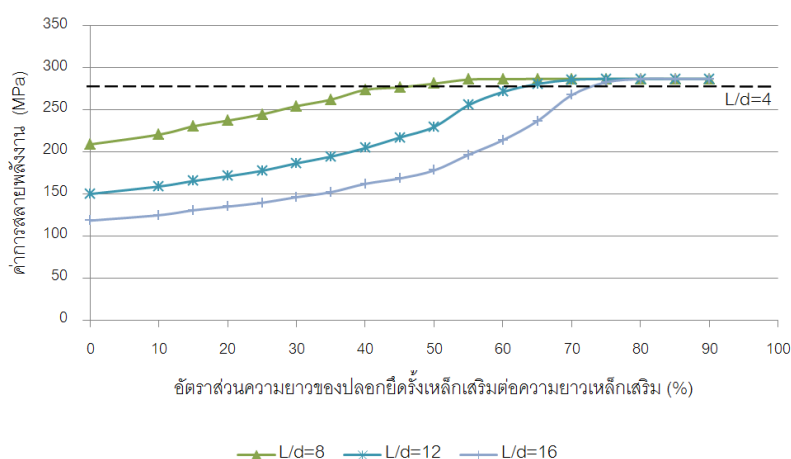
ภาพที่ 7.4 ผลของอัตราส่วนความยาวปลอกยัดรีงเหล็กเสริมต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและ
ความเคียว

7.3 กรณีศึกษาที่ 3 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริม $L/d=4$

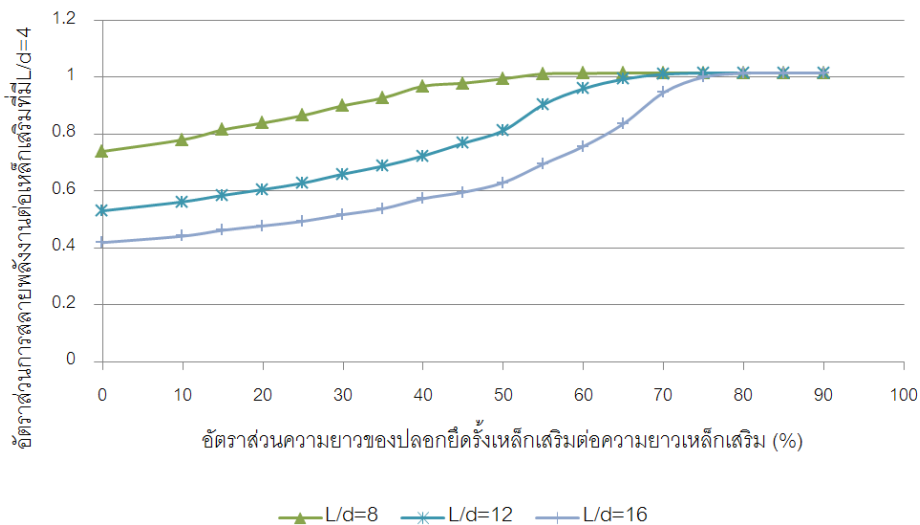
วิเคราะห์เหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 8, 12, 16 ซึ่งมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมหนา 15 มิลลิเมตร และแปรผันอัตราส่วนความยาวในช่วง 10%-90% ของความยาวเหล็กเสริม โดยมีการแปรผันค่าทุกๆ 5% ของความยาวเหล็กเสริม โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 7.5 และ 7.6 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนความยาวที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$ สำหรับแรงกระทำแบบวัฏจักรนั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความยาวสำหรับเหล็กเสริมที่รับแรงอัดตามแนวแกน แสดงดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 อัตราส่วนความยาวปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$ สำหรับเหล็กเสริมรับแรงกระทำแบบวัฏจักร และแรงอัดตามแนวแกน

อัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม	อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม(%)	
	เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$ (cyclic) ($f_y=444$ MPa)	เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีค่า $L/d=4$ (monotonic) ($f_y=444$ MPa)
8	50 (51.51)	50 (51.27)
12	65 (66.83)	65 (66.48)
16	75 (74.93)	75 (75.56)



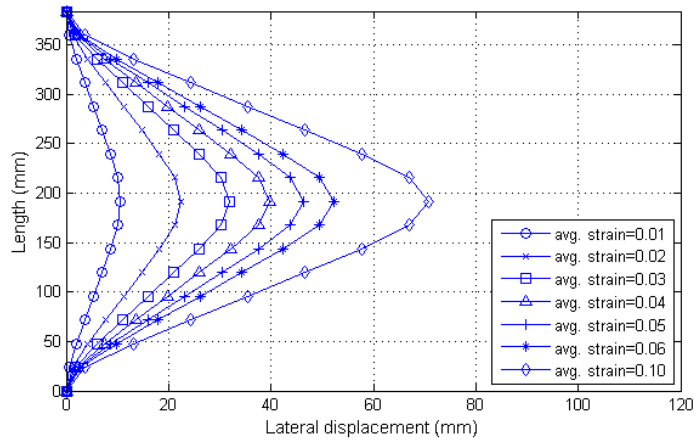
ภาพที่ 7.5 ค่าการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริมและอัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



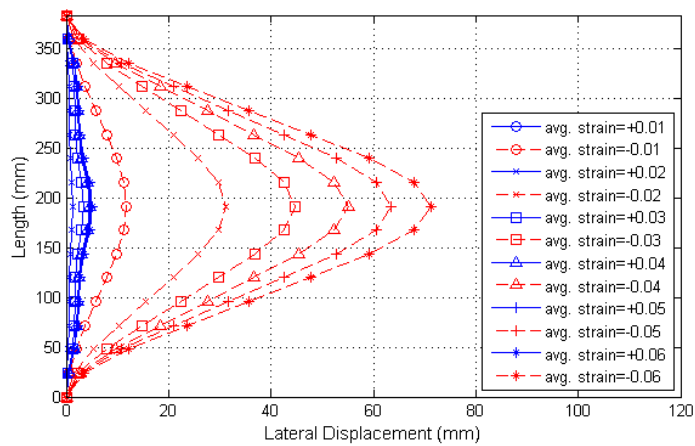
ภาพที่ 7.6 ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานของเหล็กเสริมที่มีการแปรผันอัตราส่วนความละเอียดของเหล็กเสริม และอัตราส่วนความยาวของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม

7.4 กรณีศึกษาที่ 4 ความหนาของปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร

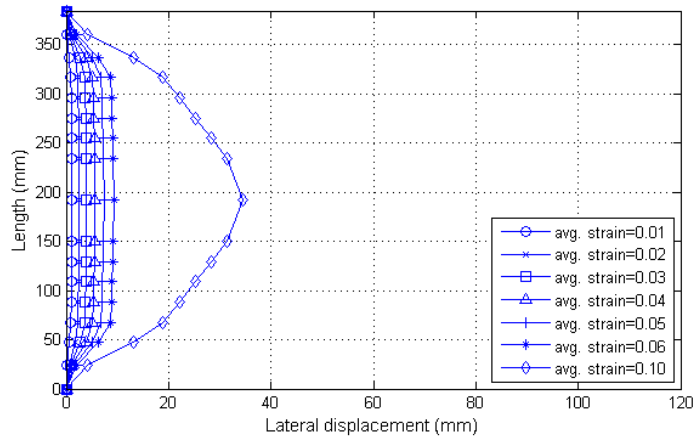
จากภาพที่ 7.2 และ 7.10 สังเกตเห็นได้ว่าปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมไม่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมที่ความเครียดเท่ากับ -0.05 ซึ่งแตกต่างจากเหล็กรับแรงอัดตามแนวแกน ตามภาพที่ 7.3 และ 7.9 ที่ปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริมไม่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมได้เมื่อความเครียดประมาณ 0.08 เนื่องจากเหล็กเสริมที่รับแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกนจะเสียรูปทางข้างมากกว่าเหล็กเสริมรับแรงกดตามแนวแกน เมื่อค่าความเครียดของเหล็กเสริมเท่ากัน ดังภาพที่ 7.7 และ 7.8



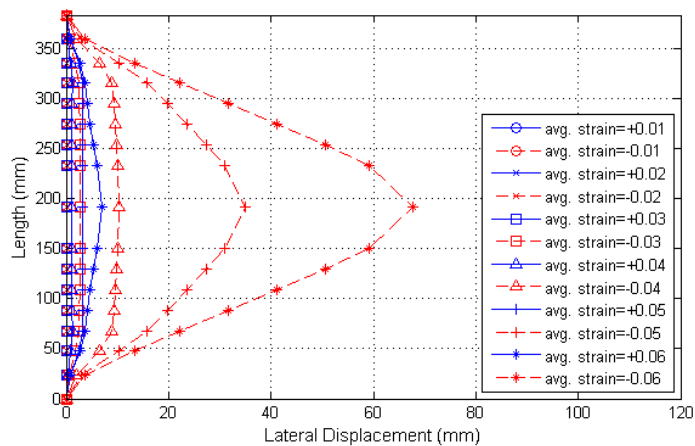
ภาพที่ 7.7 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็กเสริม
ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน



ภาพที่ 7.8 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่ไม่มีการเสริมปลอกยี่ดิ่งเหล็ก
เสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน

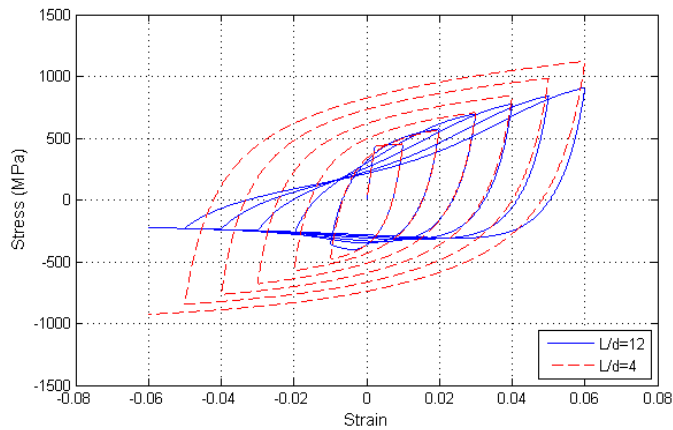


ภาพที่ 7.9 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
ขนาดL65%-T5 ภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

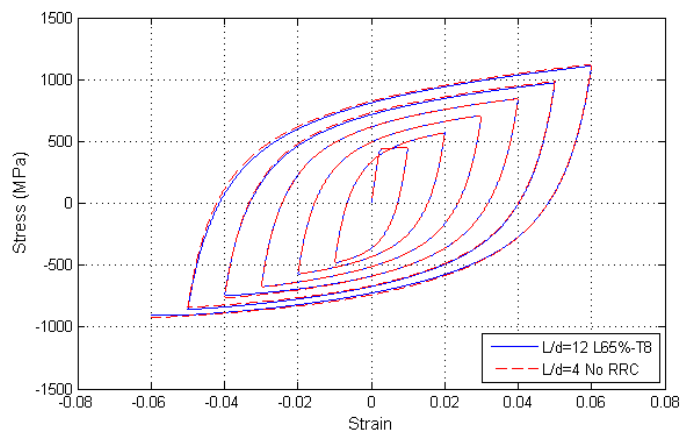


ภาพที่ 7.10 ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม
ขนาดL65%-T5 ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน

ดังนั้นจึงวิเคราะห์หาขนาดของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสม ด้วยแบบจำลองเดียวกัน โดยมีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความยาว L65%-T8 โดยที่มีค่าความหนาที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมในช่วงความเครียด -0.06 โดยผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 7.11



(ก) L/d=12 No RRC



(ข) L/d=12 L65%-T8

ภาพที่ 7.11 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมขนาดต่างๆ

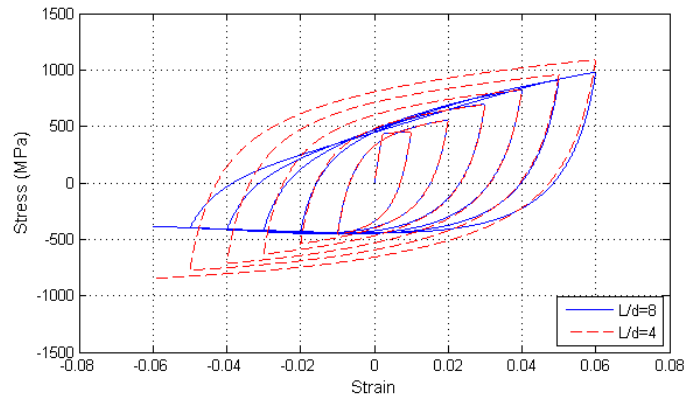
พบว่าต้องใช้ความหนาเพื่อยึดรั้งเหล็กเสริม ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรมากกว่าความหนาที่ใช้ในการยึดรั้งเหล็กรับแรงอัด ประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 7.11 และจากภาพที่ 7.7 และ 7.8 ที่แสดงการเสียรูปทางทางด้านข้าง พบว่าการเสียรูปทางด้านข้างที่ความเครียด -0.06 ของเหล็กเสริมที่รับแรงกระทำแบบวัฏจักร นั้นมีการเสียภาพที่ใกล้เคียงกับที่ความเครียด 0.10 ของเหล็กเสริมที่รับแรงอัด และได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อศึกษาหาขนาดความหนาที่เหมาะสมที่

ใช้ในการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร โดยพิจารณาเหล็กเสริมขนาด 16, 25, 32 และ 40 มิลลิเมตร ที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมยาว 50% และ 75% สำหรับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 8 และ 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์เหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกนแบบวัฏจักรแสดงในภาพที่ 7.12-7.16 และค่าความหนาที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมโดยพิจารณาจากค่าการสลายพลังงาน แสดงดังตารางที่ 7.3

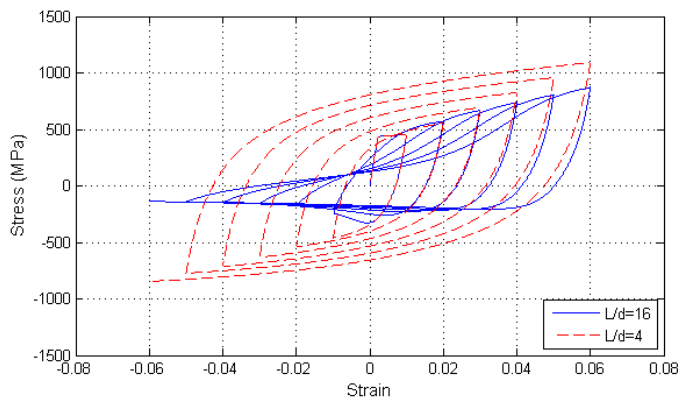
ตารางที่ 7.3 ความหนาที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	Monotonic (0.06) ($f_y=444$ MPa)		Cyclic (-0.06) ($f_y=444$ MPa)	
	L/d =8 L50%	L/d =16 L75%	L/d =8 L50%	L/d =16 L75%
16	2	3	3	4
25	2	4	4	6
32	3	5	5	8
40	3	6	6	10

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 7.3 สรุปได้ว่า ต้องใช้ความหนาเพิ่มขึ้นจากการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด ประมาณ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กเสริม ขนาด 16, 25, 32 และ 40 ตามลำดับ

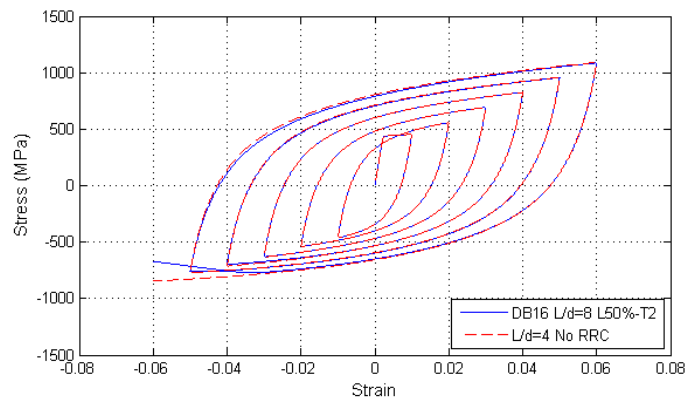


(ก) L/d=8



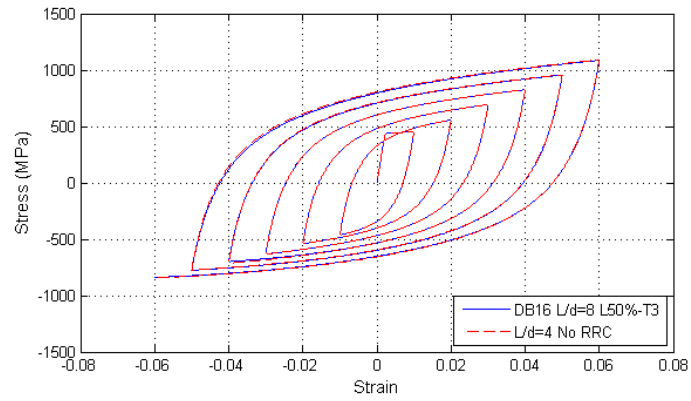
(ข) L/d=16

ภาพที่ 7.12 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่ไม่เสริม
ปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

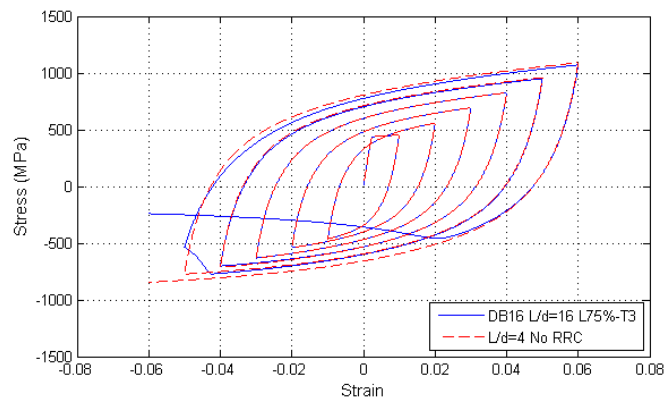


(ก) L/d=8 L50%-T2

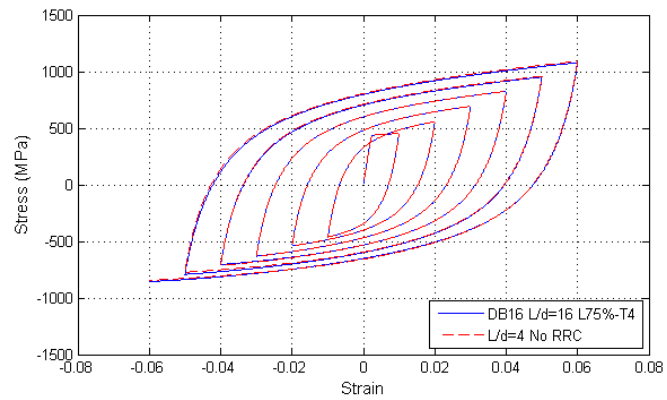
ภาพที่ 7.13 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 16 มิลลิเมตรที่มี
การแปรผันอัตราส่วนความแข็งแรง และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



(ข) L/d=8 L50%-T3

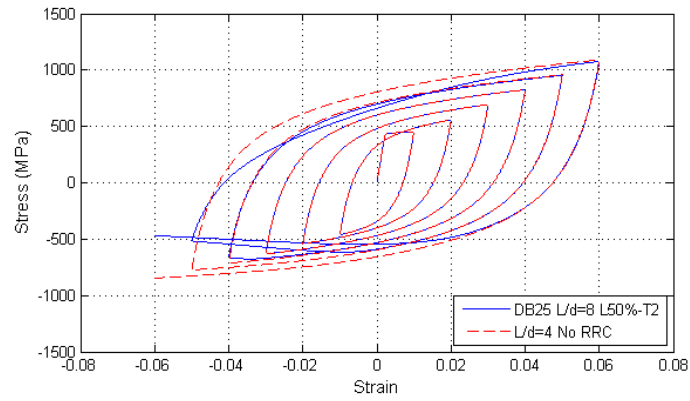


(ค) L/d=16 L75%-T3

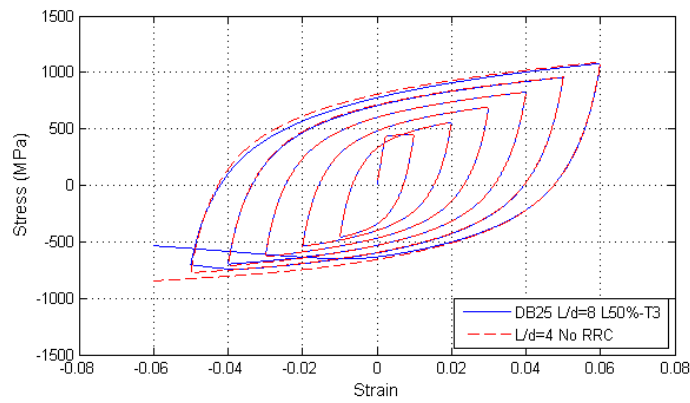


(ง) L/d=16 L75%-T4

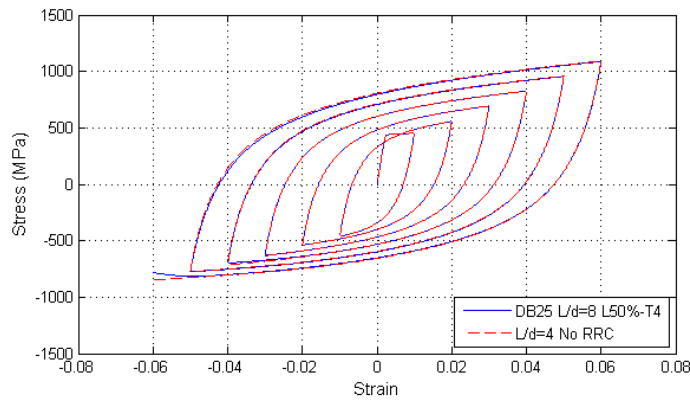
ภาพที่ 7.13(ต่อ) พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 16 มิลลิเมตร
ที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



(ก) L/d=8 L50%-T2

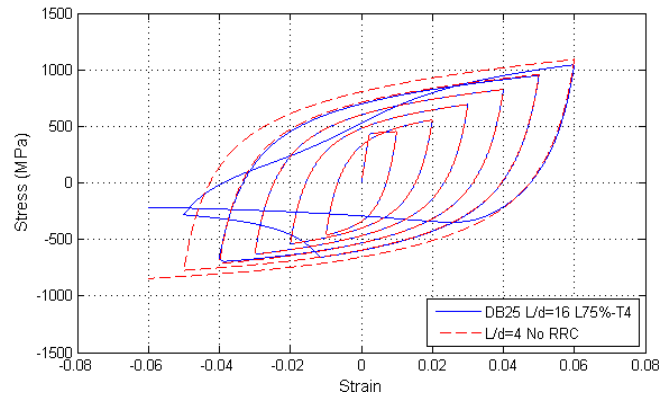


(ข) L/d=8 L50%-T3

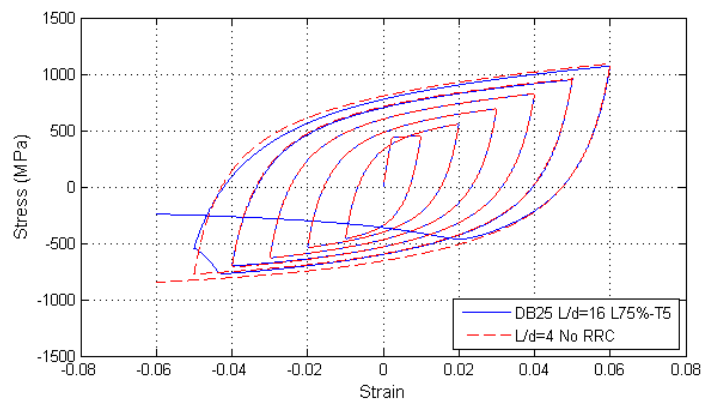


(ค) L/d=8 L50%-T4

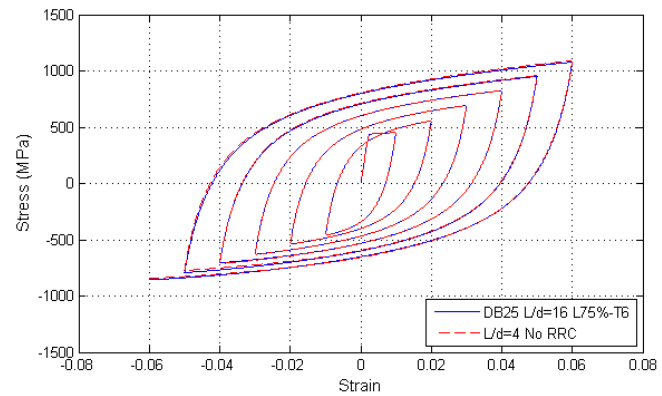
ภาพที่ 7.14 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม



(ง) L/d=8 L75%-T4

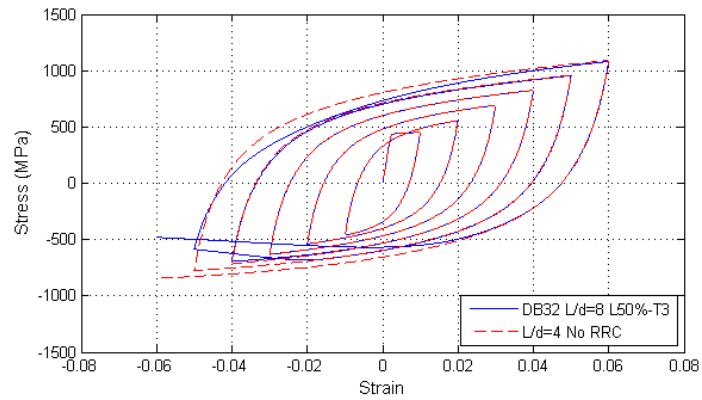


(จ) L/d=8 L75%-T5

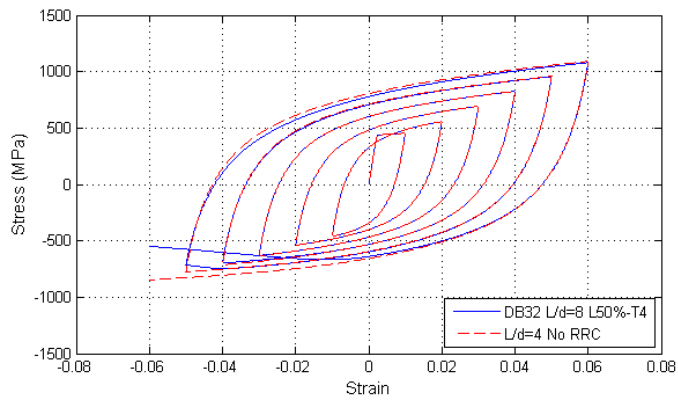


(ฉ) L/d=8 L75%-T6

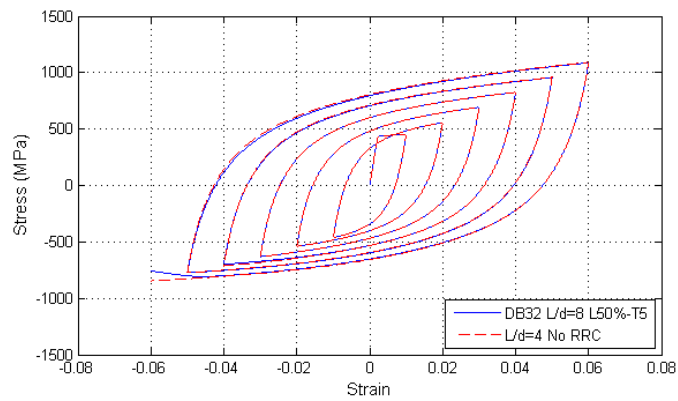
ภาพที่ 7.14(ต่อ) พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 25 มิลลิเมตร
ที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



(ก) L/d=8 L50%-T3

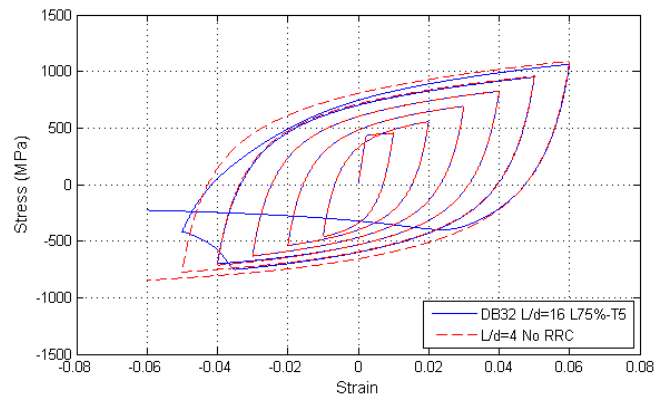


(ข) L/d=8 L50%-T4

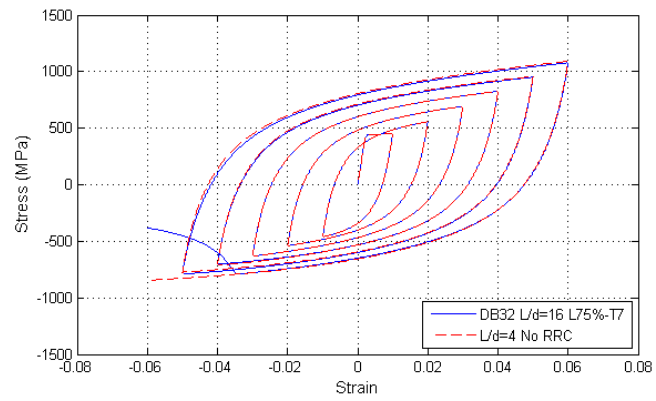


(ค) L/d=8 L50%-T5

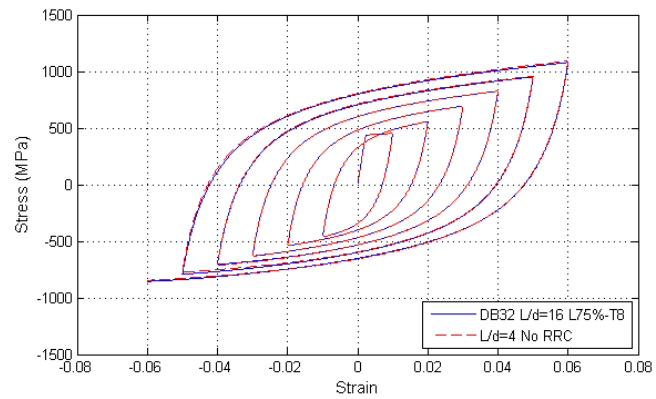
ภาพที่ 7.15 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 32 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



(ง) L/d=8 L75%-T5

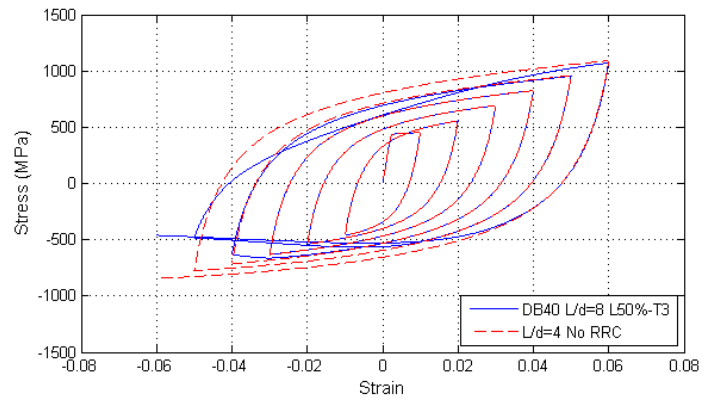


(จ) L/d=8 L75%-T7

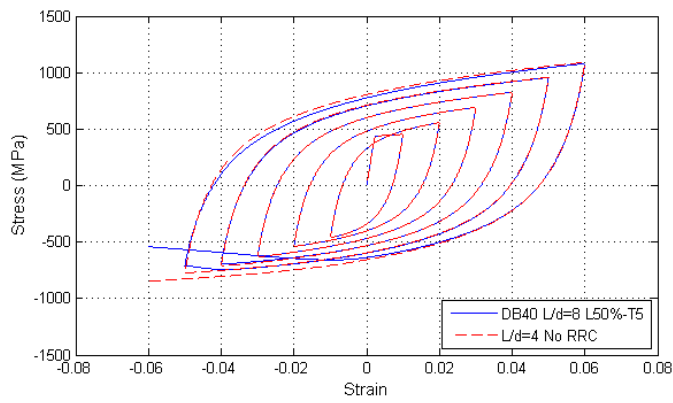


(ฉ) L/d=8 L75%-T8

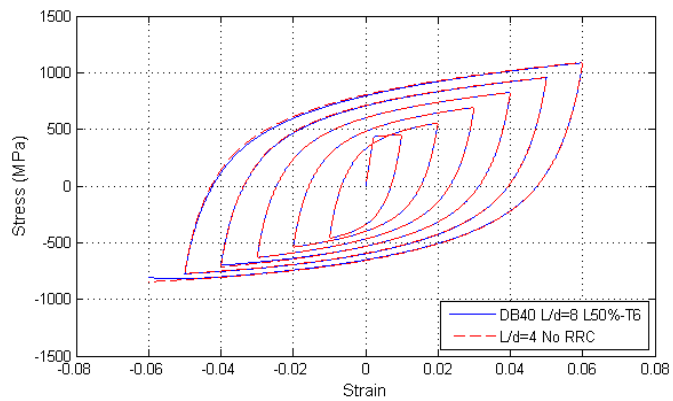
ภาพที่ 7.15(ต่อ) พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 32 มิลลิเมตร
ที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



(ก) L/d=8 L50%-T3

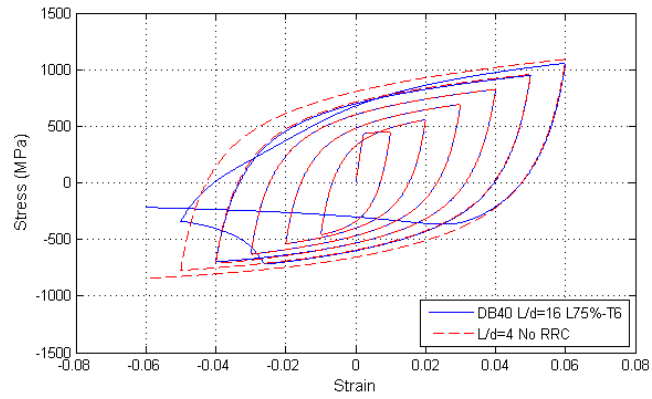


(ข) L/d=8 L50%-T5

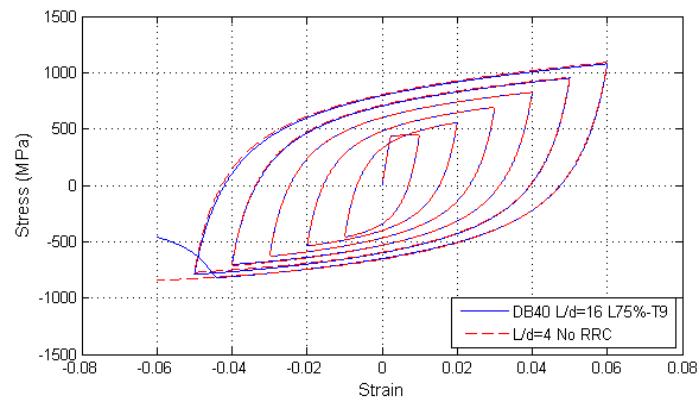


(ค) L/d=8 L50%-T6

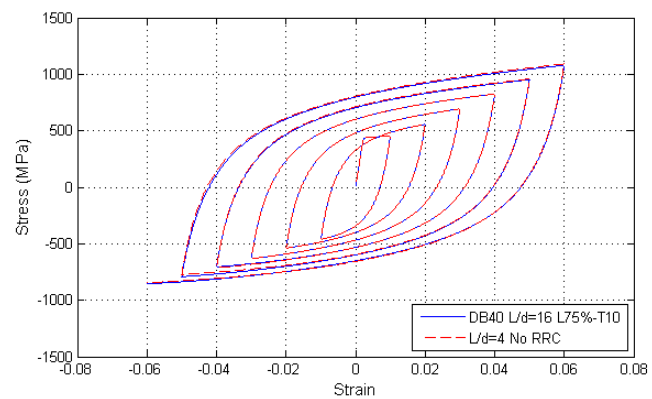
ภาพที่ 7.16 พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 40 มิลลิเมตรที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม



(ง) L/d=8 L75%-T6



(จ) L/d=8 L75%-T9



(ฉ) L/d=8 L75%-T10

ภาพที่ 7.16(ต่อ) พฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักรตามแนวแกนของเหล็กเสริมขนาด 40 มิลลิเมตร
ที่มีการแปรผันอัตราส่วนความชะลูด และขนาดปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายใต้รับแรงอัดตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวงจักรตามแนวแกนที่มีการเสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม เพื่อชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ด้วยโปรแกรมOpensees โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ที่พิจารณาความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตแบบCo-rotational และความไม่เชิงเส้นทางวัสดุด้วยแบบจำลองของGiuffre-Menegotto-Pintoที่คำนึงถึงผลการแข็งตัวเพิ่มขึ้น(Isotropic Hardening) โดยพิจารณาเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16, 25, 32 และ 40 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความชะลูด 4,6,8,10,12,14,16 ซึ่งมีการแปรผันความยาว และความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุอ้างอิงตามการทดสอบของ Archawin Sawaraj(2010) และ Monti และ Nuti(1992) ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมรับแรงอัดขึ้นกับค่ากำลังที่จุดคราก และค่าโมดูลัสหลังจุดคราก โดยพบว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงอัดต่อหน่วยแรงดึง และความเครียด
2. เสนอแนวทางการหาค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมแบบวงจักรของเหล็กเสริม ที่ใช้แบบจำลองSteel02 (Giuffre-Menegotto-Pinto)
3. ลักษณะการกระจายความเครียดของเหล็กเสริมของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม และไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความแตกต่างกัน โดยที่เหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความเครียดมากบริเวณปลายทั้ง 2 ด้านของเหล็กเสริม และบริเวณปลายของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม แต่เหล็กเสริมที่ไม่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความเครียดมาก บริเวณปลายทั้ง 2 ด้านของเหล็กเสริม และบริเวณกึ่งกลางความยาวของเหล็กเสริม โดยบริเวณที่มีความเครียดสูงเป็นบริเวณที่เหล็กเสริมมีค่าความโค้งสูง

4. เหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีกำลังหลังจุดครากสูงขึ้น เนื่องจากปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีผลในการชะลอการเกิดจุดหมุนพลาสติกในเหล็กเสริม โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการเกิดจุดหมุนพลาสติกจากบริเวณกึ่งกลางเหล็กเสริมเป็นบริเวณปลายทั้งสองด้านของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นยากกว่า

5. เหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมีความสามารถในการสลายพลังงานที่สูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมต่อความยาวเหล็กเสริมมากขึ้น และมีการสลายพลังงานที่เท่ากัน เมื่อความหนาหามีค่ามากกว่าความหนาค่าหนึ่ง (ความหนาที่เพียงพอต่อการยึดรั้ง)

6. อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ทำให้เหล็กเสริมรับแรงอัดคงสภาพการรับแรงหลังจุดคราก (มีพฤติกรรมการรับแรงช่วงพลาสติกมากกว่ากำลังที่จุดคราก และพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 4) ขึ้นกับอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม โดยต้องใช้อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมมากขึ้น เมื่อเหล็กเสริมมีอัตราส่วนความชะลูดมาก โดยมีความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง

7. ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริม ขึ้นกับอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม, คุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม และคุณสมบัติวัสดุของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริม โดยความหนาในการยึดรั้งมากขึ้น เมื่อเหล็กเสริมมีความชะลูด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาก เช่นเดียวกับค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมที่มีค่ามาก และกำลังที่จุดครากของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่มีค่าน้อยน้อย ที่ส่งผลต่อความหนาในการยึดรั้งเหล็กเสริมที่มากขึ้น

8. อัตราส่วนความยาวของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่ยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และแรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกน เพื่อที่ทำให้เหล็กเสริมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 4 มีขนาดใกล้เคียงกัน

9. ความหนาของปลอกยึดรั้งเหล็กเสริมที่เพียงพอต่อการยึดรั้งเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรตามแนวแกนมีขนาดมากกว่า เหล็กเสริมที่รับแรงอัดตามแนวแกน เนื่องจากเหล็กเสริมมีการเสียรูปทางด้านข้างที่มากกว่าที่ค่าความเครียดเท่ากัน

8.2 การประยุกต์ใช้งาน

ขนาดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสม สำหรับการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแผ่นดินไหว แสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ขนาดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่เหมาะสม สำหรับการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรหรือแรงแผ่นดินไหว

อัตราส่วนความชะลูด ของเหล็กเสริม (L/d)	ขนาดของปลอกยึดตั้งเหล็กเสริม (สำหรับเหล็กเสริมเกรด SD40)			
	DB16	DB25	DB32	DB40
6	L35%-T3	L35%-T4	L35%-T5	L35%-T8
8	L50%-T3	L50%-T5	L50%-T6	L50%-T8
10	L60%-T4	L60%-T6	L60%-T8	L60%-T10
12	L65%-T4	L65%-T6	L65%-T8	L65%-T10
14	L70%-T4	L70%-T7	L70%-T9	L70%-T11
16	L75%-T4	L75%-T7	L75%-T9	L75%-T11

หมายเหตุ สำหรับเหล็กเสริมเกรด SD50 ใช้ความหนาเพิ่มขึ้น 1 มิลลิเมตร

8.3 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่เสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมที่วิเคราะห์จากแบบจำลองไฟเบอร์ ที่เทียบผลกับการทดสอบเพียง 5 ตัวอย่าง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมจากการทดสอบเพื่อเทียบผลกับผลการวิเคราะห์

2. เสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรมีพฤติกรรมค่อนข้างซับซ้อนทั้งผลของการไอบอร์ดคอนกรีตของเหล็กเสริมทางข้าง, การโก่งเดาะของเหล็กเสริม, ผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม และปัจจัยอื่นๆ การเสริมปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมเป็นอีกแนวทางหนึ่งเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมรวมของเสาคอนกรีตที่มีการโก่งเดาะของเหล็กเสริม

3. ปลอกยึดตั้งเหล็กเสริมมีผลในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมด้านการรับแรงอัดของเหล็กเสริม และข้อต่อเชิงกล(Mechanical Splice) เป็นอุปกรณ์สำหรับต่อเหล็กเสริม ดังนั้นการวิจัยเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ใหม่โดยหลักการของอุปกรณ์ทั้งสองนี้ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

รายการอ้างอิง

- Archawin Sawaraj. 2010. Ductility Enhancement of Reinforced-Concrete Columns by Rebar-Restraining Collars. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
- Azizinamini, A., Corley, W.G., and Johal, L.S.P. 1992. Effects of Transverse Reinforcement on Seismic Performance of Columns. ACI Structural Journal. 89(4) : 442-450
- Bae, S., and Bayrak, O. 2008. Seismic Performance of Full-Scale Reinforced Concrete Columns. ACI Structural Journal. 105(2) : 123-133
- Bae, S., Miseses A.M. and Bayrak O. 2005. Inelastic Buckling of Reinforcing Bar. ASCE Journal of Structural Engineering. 131(2) : 314-321
- Bao, Y., and Kunnath, S.K. 2010. Simplified progressive collapse simulation of RC frame wall structures. Elsevier Engineering Structural Devision. 32(2010) : 3153-3162
- Bayrak, O., and Sheikh, S.A. 2001. Plastic hinge analysis. ASCE Journal of Structural Engineering. 127(9) : 1092-1100
- Dhakal, R.P., and Meakawa, K. 2002. Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement. ASCE Journal of Structural Engineering. 128(9) : 1139-1147
- Gajan, S., and Saravanathiiban, D. 2011. Modeling of energy dissipation instructural devices and foundation soil during seismic loading. Elsevier Engineering Structural Devision. 33(2011) : 1106-1122
- Gomes, A., and Appleton, J. 1997. Nonlinear Cyclic Stress-Strain Relation of Reinforcing Bars Including Buckling. Elsevier Engineering Structural Division. 19(10) : 822-826
- Japan Society of Civil Engineers. 2002. Standard Specification for Concrete Structures : Seismic Performance Verification. Tokyo : Yotsuya 1-chome
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park R. 1988. Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete. ASCE Journal of Structural Engineering. 144(8) : 1827-1849
- Massone, L.M., and Moroder, D. 2009. Buckling Modeling of Reinforcing Bars with Imperfections. Elsevier Engineering Structural Devision. 31(2009) : 758-767

- Mazzoni, S., et al. 2007. OpenSees Command Language Manual. California : The Regents of the University of California.
- Melo, J., Fernandes, C., Varuma, H., Rodrigues, H., Costa, A. and Arêde, A. Numerical modelling of the cyclic behaviour of RC elements built with plain reinforcing bars. Elsevier Engineering Structural Devison. 33(2011) : 273-286
- Menegotto, M., and Pinto, P.E. 1973. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plain Frame including Changes in Geometry and Non-elastic Behavior of Element under Combined Normal Force and Bending. Proceeding, IABSE symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. pp. 15-22. Lisbon, Portugal.
- Monti, G., and Nuti, C. 1992. Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including buckling. ASCE Journal of Structural Engineering. 118(12) : 3268-3284
- Pandey, G. R., and Mutsuyoshi, H. 2005. Seismic Performance of Reinforced Concrete Piers with Bond-Controlled Reinforcements. ACI Structural Journal. 102(2) : 295-304
- Scott, B.D., Park, P., and Priestley, M.J.N. 1982. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at high and low strain rates. ACI Journal Proceedings. 79(1) : 13-27
- Tang, Y. and Zhang, J. 2011. Probabilistic seismic demand analysis of a slender RC shear wall considering soil-structure interaction effects. Elsevier Engineering Structural Devison. 33(2011) : 218-229
- Warakorn Singhasut. 2008. Seismic Performance of Reinforced-Concrete Bridge Column in Thailand under Cyclic Loading. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkon University
- Yaw, L. L. 2D Corotational Beam Formulation. [Online]. 2009. Available from : <http://people.wallawalla.edu/~louie.yaw/publications.html> [2012, April 17]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศกร จันทะราช เกิดวันอังคารที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553