พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีการค้ำยันทางด้านข้างแบบไม่เชิงเส้น

นายชิษณุพงศ์ สุธัมมะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

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.

BUCKLING BEHAVIOR OF STEEL REBARS WITH NONLINEAR LATERAL BRACING

Mr. Chisanuphong Suthumma

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีการค้ำยันทางด้านข้างแบบไม่เชิงเส้น
โดย	นายชิษณุพงศ์ สุธัมมะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย)

………………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี)

…………………………………………… กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

…………………………………………… กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. หทัยรัตน์ มณีเทศ)

ชิษณุพงศ์ สุธัมมะ : พฤติกรรมหลังโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีการค้ำยันทางด้านข้างแบบไม่เชิงเส้น. (BUCKLING BEHAVIOR OF STEEL REBARS WITH NON-LINEAR LATERAL BRACING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อาณัติ เรืองรัศมี.197 หน้า.

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเหล็กเสริมตามยาวโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OpenSees ในการวิเคราะห์ได้แบ่งการวิเคราะห์เป็นสองส่วนคือ การวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันและไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง ในการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้าง ใช้ขนาดหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 16 การเยื้องศูนย์เริ่มต้นเท่ากับ 0.001 ที่กึ่งกลางของแบบจำลอง กำลังที่จุดครากเท่ากับ 400 เมกกะปาสคาล และอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b) เท่ากับ 0.01 โดยพิจารณาพฤติกรรมของค้ำยันแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆได้แก่ สติฟเนสของค้ำยัน และ กำลังที่จุดครากของค้ำยัน แบบจำลองที่มีค้ำยันแบบเป็นเชิงเส้นที่ L/D เท่ากับ 16 เมื่อเพิ่มสติฟเนสของค้ำยันมากขึ้นจนกระทั่งประมาณ 9-12% ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว พบว่ากำลังหลังจุดครากใกล้เคียงแบบจำลองที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้างที่มีอัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 การเสียรูปด้านข้างเกิดมากที่สุดที่กึ่งกลางของแบบจำลอง เมื่อสติฟเนสของค้ำยันเกิน 20 % การเสียรูปด้านข้างที่เกิดมากที่สุดที่ L/4 จากปลายทั้งสองของแบบจำลองโดยประมาณ แบบจำลองที่มีค้ำยันแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเมื่อค้ำยันถึงจุดครากกำลังหลังจุครากของเหล็กเสริมตามยาวจะลดลงอย่างกะทันหัน การเสียรูปทางด้านข้างของแบบจำลองมีค้ำยันแบบไม่เป็นเชิงเส้นเกิดมากที่สุดที่กึ่งกลางของแบบจำลองเมื่อค้ำยันถึงจุดคราก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต..

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์..........................

ปีการศึกษา 2555

5270602921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEYWORDS : BUCKLING/ REBAR/ AXIAL COMPRESSION / FIBER MODEL / LATERAL BRACING

CHISANUPHONG SUTHUMMA : BUCKLING BEHAVIOR OF STEEL REBARS WITH NON-LINEAR LATERAL BRACING . ADVISOR: ASST.PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, 197 pp.

. The objective of this research is to study the behavior of longitudinal reinforcing bars with bracing and without bracing by using fiber models. Analytical models are conducted using the OpenSees program. Analysis is done for longitudinal reinforcement under compression loads with bracing and without bracing. Bracing is considered at the mid length. In this study bracing is considered for both linear and non-linear behaviors. The bar diameter for the braced longitudinal bar is equal to 25 mm, length-to-diameters (L/D) equal to 16, initial imperfection (e/D) equal to 0.001, yield stress (Fy) equal to 400 MPa and strain hardening ratio (b) equal to 0.01. Various bracing stiffnesses and yield stresses of the bracing are considered. From the analytical result, the model with bracing stiffness equal to 9-12% of the lateral stiffness of the longitudinal bar has the post yield stress close to the unbraced model with L / D equal to 8. The lateral deformation is maximum at the mid-length (L/2) when the bracing stiffness is less than 20% of the lateral stiffness of the longitudinal bar. When bracing stiffness is more than 20% of lateral stiffness of longitudinal bar, the maximum lateral deformation occurs at about L/4 from both ends. In the model with non-linear bracing, when the bracing yields the post yield stress decreases suddenly. The braced longitudinal bar has maximum lateral deformation at the mid length (L/2) after yields of the bracing.

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

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

Academic Year : 2012............................

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ช่วยเหลือในด้านต่างๆ เช่นให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาระดับปริญญาโทและในการทำวิจัย รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี และ ดร. หทัยรัตน์ มณีเทศ ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ หน่วยงานและบุคคลต่างๆที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ดังรายนามต่อไปนี้

คุณไพโรจน์ อนันตะเศรษฐกูล เจ้าหน้าที่บริการการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ช่วยในการทำอุปกณณ์ที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยทั้งหมด

คุณศิโรจน์ ถนอมพันพันธุ์ เจ้าหน้าที่หน่วยทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องทดสอบตลอดจนการทดสอบเสร็จสิ้น

นางสาวพรพรรณ วงศ์เมืองแก่น รุ่นพี่ที่ช่วยเหลือในการศึกษาโปรแกรม OpenSees .ในขั้นเริ่มต้นตลอดจนให้คำปรึกษาจนงานวิจัยลุล่วง

รุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทดสอบตัวอย่างและการศึกษาโปรแกรม การดำเนินงาน และจัดข้อมูลเอกสาร รวมถึงคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและที่สำคัญที่สุดข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคือ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ

กิตติกรรมประกาศ..ฉ

สารบัญ..ช

สารบัญตาราง..ฌ

สารบัญภาพ..ญ

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย..2

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย..2

1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..3

บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว และแบบวัฏจักร..4

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองต่างๆที่รวมผลของการโก่งเดาะ..12

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่พิจารณาผลกระทบจาก การเสริมเหล็กปลอก..28

บทที่ 3 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง..36

3.1 การแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลอง..39

3.2 การเยื้องศูนย์เริ่มต้น (initial imperfection , e/D)..62

3.3 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลาง..77

3.4 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy) ที่มีผลต่อการโก่งเดาะของเสริม..93

3.5 ผลของอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b)..97

3.6 ผลของตัวแปรต่างๆที่กระทำร่วม..101

3.7 สอบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยที่ผ่านมา..104

หน้า

บทที่ 4 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณาผล
ของค้ำยันทางด้านข้าง……………………………………………………….………105
4.1 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณา
ผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น…………………..…….………..107
4.2 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณา
ผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น………………..…..……………126
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและเสนอแนะ……………………………………………….....157
5.1 สรุปผลงานวิจัย………………………………………………………………….....157
5.2 ข้อเสนอะแนะ……………………………..……………………………….…...160
รายการอ้างอิง...…161
ภาคผนวก...162
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..197

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลต่อ
อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D)..........................38
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลต่อ
การเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)..43
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลของ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)..49
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลของ
กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy)...52
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามขวางหรือตามหน้าตัดและผลการ
วิเคราะห์...57
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามขวาง
หรือตามหน้าตัด...57
ตารางที่ 3.7 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)
ต่ออัตราส่วนความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D)......................................62
ตารางที่ 3.8 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)
ต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆของเหล็กเสริม..................................66
ตารางที่ 3.9 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)
ต่อกำลังที่จุดคราก (Fy) ของเหล็กเสริม..70
ตารางที่ 3.10 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วน
การพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b)...................................76
ตารางที่ 3.11 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังที่จุด
คราก (Fy)...... 85
ตารางที่ 3.12 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของกำลังที่จุดคราก
ของเหล็กเสริม (F_y) ที่มีผลต่อการโก่งเดาะของเหล็กเสริม..............................89
ตารางที่ 3.13 รายละเอียดในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆที่กระทำร่วม......................97
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดในการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีการค้ำยันทางด้านข้างมี
พฤติกรรมเป็นเชิงเส้น...104

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบวัฏจักร
(cyclic test)(Monti และ Nuti ,1992)……………………………………………………5
ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม
ภายใต้แรงกระทำทิศทางเดียวที่อัตราส่วนต่างๆ (Monti และ Nuti ,1992)…………………5
ภาพที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม
ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Monti และ Nuti ,1992)……………………………………5
ภาพที่ 2.4 แสดงขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (Rodriguez และคณะ,1999)……………6
ภาพที่ 2.5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Rodriguez และคณะ,199)………………….7
ภาพที่ 2.6 แสดงผลการทดสอบ (Rodriguez และคณะ,1999)…………………………………..7
ภาพที่ 2.7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bayrak และ Sheikh 2001)…………………8
ภาพที่ 2.8 ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
(Bayrak และ Sheikh 2001)……………………………………………………………….9
ภาพที่ 2.9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bae และคณะ, 2005)…………………..…10
ภาพที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอัตราส่วน
ความชะลูดต่างๆของเหล็ก No.8 และ No.10 (Bae และคณะ, 2005)……….... ……..…11
ภาพที่ 2.11 แสดงการความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ด้านข้างกับความเค้น
(Bae และคณะ, 2005) ……………………………………………………………………11
ภาพที่ 2.12 แสดงการเสริมเหล็กที่ใช้วิเคราะห์โดยมีแนวคิดว่าให้เหล็กเป็นเป็นจุดรองรับ
(Mau และ El-Mabsout,1989)……………………………………………………………12
ภาพที่ 2.13 แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Mau และ El-Mabsout,1989)…..12
ภาพที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบโดย Mander และคณะ
กับผลการวิเคราะห์(Mau และ El-Mabsout,1989)……………………………………..13
ภาพที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง
ความเค้นและความเครียด (Gomes and Appleton,1996)……………………………...14
ภาพที่ 2.16 แสดงสมดุลของการโก่งเดาะ ของเหล็กเสริมยืน
(Gomes and Appleton,1996)…………………………………………………………...15

หน้า

ภาพที่ 2.17 แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ของ Menegotto และ Pinto,1973(Gomes and Appleton,1996) ……………………………………………………………………..…15
ภาพที่ 2.18 แบบจำลองของการโก่งเดาะพิจารณาหลังคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการหลุดล่อน (Gomes และ Appleton,1996)………………………………………...15
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมที่พิจารณาผลการโด่งเดาะขอเหล็กเสริมตามยาว (Gomes และ Appleton,1996)…………………..18
ภาพที่ 2.20 แสดงชิ้นส่วนแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์โดยไฟเบอร์เทคนิคนำมาใช้ร่วมกับวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Dhakal และ Maekawa, 2002)………………………………………18
ภาพที่ 2.21 แสดงการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Manderและคณะ (1984) (Dhakal และ Maekawa, 2002)…………………………………………………………..19
ภาพที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992) (Dhakal และ Maekawa ,2002)…………………………………………………………19
ภาพที่ 2.23 แสดงผลกระทบจากของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง (Dhakal และ Maekawa ,2002)…………………………………………………………..20
ภาพที่ 2.24 ผลกระทบของกำลังจุดครากของเหล็กเสริม (Dhakal และ Maekawa ,2002)…………………………………………………………..20
ภาพที่ 2.25 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับแบบจำลองที่นำเสนอ (Dhakal และ Maekawa ,2002)…………………………………………………………..21
ภาพที่ 2.26 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Bae และคณะ, 2005)…………………………………………………………………….22
ภาพที่ 2.27 การเปรียบเทียบความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างโดยการทดสอบและแบบจำลอง (Bae และคณะ, 2005)……………………………………………………….23
ภาพที่ 2.28 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกน (Bae และคณะ, 2005)………………………………………………………….24

หน้า

ภาพที่ 2.29 การเปรียบเทียบระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกนโดยการทดสอบและแบบจำลอง (Bae และคณะ, 2005) ……………….…25
ภาพที่ 2.30 แสดงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีผลเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์หรือการเสียรูปตั้งแต่เริ่มต้น (Initial imperfection) (Massone และ Moroder ,2009)………..26
ภาพที่ 2.31 แสดงหน้าตัดของเหล็กเสริมในช่วงจุดหมุนพลาสติก ของแบบจำลองไฟเบอร์ (Massone และ Moroder ,2009)………………………………………………………26
ภาพที่ 2.32 แสดงแผนภูมิกระบวนการเชิงตัวเลขในการกำหนดการเสียรูปเริ่มต้นและกระบวนการวิเคราะห์การโก่งเดาะของแบบจำลองจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge model) (Massone และ Moroder ,2009)………………………………27
ภาพที่ 2.33 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลอง (Massone และ Moroder ,2009)………………………………………………………28
ภาพที่ 2.34 แบบจำลองในการวิเคราะห์ Papia และคณะ (1988)…………………………..29
ภาพที่ 2.35 แสดงผลการทดวิเคราะห์กับผลการทดสอบ Papia และคณะ (1988)…………….29
ภาพที่ 2.36 แสดงแบบจำลองในการหาความยาวของการโก่งเดาะ (Dhakal และ Maekawa, 2000) ……………………………………………………….30
ภาพที่ 2.37 แสดงกระบวนการคำนวณหาความยาวของการโก่งเดาะ (Dhakal และ Maekawa, 2000)………………………………………………………..31
ภาพที่ 2.38 แสดงตัวอย่าง ค่าของ n_l และ n_b สำหรับรูปแบบการเสริมเหล็กทั่วไป (Dhakal และ Maekawa, 2000)……………………………………………………..…33
ภาพที่ 2.39 แสดงสติฟเนสของเหล็กปลอกที่ต้านการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว………..…34
ภาพที่ 2.40 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าต่างๆ ของการเสริมเหล็กรูปแบบต่างๆ(Dhakal 2005)……………………………………………………………...35
ภาพที่ 3.1 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง…………………………………………………..…37
ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงลักษณะการหาค่าหน่วยแรงและความเครียด……………………………..37
ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8………………………………………………….….41

หน้า

ภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8……………………………………………………………………….41
ภาพที่ 3.5 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8……………………………………………...42
ภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=5……………………………………………………………42
ภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 5……………………………………………………………………..43
ภาพที่ 3.8 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 5…………………………………………..…43
ภาพที่ 3.9 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ e/D= 0.01…………………………………………………………46
ภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.01…………………………………………………...……46
ภาพที่ 3.11 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.01……………………………47
ภาพที่ 3.12 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ e/D= 0.001………………………………………………..……..47
ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.001……………………………………………..………48
ภาพที่ 3.14 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.001…………………..………48
ภาพที่ 3.15 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ e/D= 0.0001…………………………………………..…………49
ภาพที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.0001……………………………………………………...49
ภาพที่ 3.17 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.0001……………………………50

หน้า

ภาพที่ 3.18 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ D=20 mm……………………………………………………..……52
ภาพที่ 3.19 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ D=25 mm………………………………………………………….52
ภาพที่ 3.20 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ D=32 mm………………………………………………………….53
ภาพที่ 3.21 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=300 MPa……………………………………………………….54
ภาพที่ 3.22 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=400 MPa……………………………………………………….55
ภาพที่ 3.23 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=500 MPa……………………………………………………….56
ภาพที่ 3.24 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=600 MPa……………………………………………………….56
ภาพที่ 3.25 ลักษณะการแบ่งชิ้นส่วนตามหน้าตัดของแบบจำลอง……………………………….58
ภาพที่ 3.26 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากจำนวนไฟเบอร์ L/D =5…...60
ภาพที่ 3.27 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากจำนวนไฟเบอร์ L/D =8…...60
ภาพที่ 3.28 ความสัมพันธ์ของจำนวนไฟเบอร์ค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D =5……………………………………………………………………...61
ภาพที่ 3.29 ความสัมพันธ์ของจำนวนไฟเบอร์ค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D =8…………………………………………………………………..….61
ภาพที่ 3.30 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้างพิจารณาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น……………………………...63
ภาพที่ 3.31 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=4…………………………………………………………………...65
ภาพที่ 3.32 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=4……………………………………………………………65

หน้า

ภาพที่ 3.33 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้น
ของเหล็กเสริม L/D=8…………………………………………………………………..….66
ภาพที่ 3.34 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียด
เท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=8…………………………………………………………….66
ภาพที่ 3.35 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้น
ของเหล็กเสริม L/D=12…………………………………………………………………….67
ภาพที่ 3.36 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียด
เท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=12…………………………………………………………...67
ภาพที่ 3.37 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของ
เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.00001……..69
ภาพที่ 3.38 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของ
เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.0001………69
ภาพที่ 3.39 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของ
เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.001……….70
ภาพที่ 3.40 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของ
เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.01…………70
ภาพที่ 3.41 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของ
เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.1…………..71
ภาพที่ 3.42 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของ
เหล็กเสริม L/D=8 Fy=400MPa…………………………………………………...……73
ภาพที่ 3.43 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียด
เท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=8 400MPa…………………………………………………73
ภาพที่ 3.44 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้น
ของเหล็กเสริม L/D=8 Fy=500 MPa……………………………………………………74
ภาพที่ 3.45 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียด
เท่ากับ 0.1 ที่ Fy=500 MPa……………………………………………………………..74
ภาพที่ 3.46 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้น
ของเหล็กเสริม L/D=8 Fy=600 MPa……………………………………………………75

หน้า

ภาพที่ 3.47 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียด เท่ากับ 0.1 ที่ Fy=600 MPa……………………………………………………………..75
ภาพที่ 3.48 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยไม่คิดผล ของค้ำยันทางด้านข้างพิจารณาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่น……………...76
ภาพที่ 3.49 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้น ของเหล็กเสริม L/D=8 โดยพิจารณาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่น…………77
ภาพที่ 3.50 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่ออัตราส่วน strain hardening (b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.0001 …………………82
ภาพที่ 3.51 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่ออัตราส่วน strain hardening (b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.005……………………83
ภาพที่ 3.52 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่ออัตราส่วน strain hardening (b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.01……………………..84
ภาพที่ 3.53 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่ออัตราส่วน strain hardening (b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.015……………………85
ภาพที่ 3.54 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่ออัตราส่วน strain hardening (b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.02……………………86
ภาพที่ 3.55 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่อกำลังที่จุคราก ที่ L/D ต่างๆ Fy=400 MPa…………………………………90
ภาพที่ 3.56 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่อกำลังที่จุคราก ที่ L/D ต่างๆ Fy=500 MPa…………………………………91
ภาพที่ 3.57 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริมต่อกำลังที่จุคราก ที่ L/D ต่างๆ Fy=600 MPa…………………………………92
ภาพที่ 3.58 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/D = 4 ที่ F_y ต่างๆ…………94
ภาพที่ 3.59 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และ อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ L/D=4………………………………94
ภาพที่ 3.60 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ F_y ต่างๆ…………95

หน้า

ภาพที่ 3.61 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และ
อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ L/D=8……………………………….95
ภาพที่ 3.62 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/D = 16 ที่ F_y ต่างๆ………..96
ภาพที่ 3.63ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และ
อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ L/D=16……………………………..96
ภาพที่ 3.64 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=4
ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=400 MPa………………………………………………………………98
ภาพที่ 3.65 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=8
ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=400 MPa………………………………………………………………98
ภาพที่ 3.66 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=16
ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=400 MPa………………………………………………………………99
ภาพที่ 3.67 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=4
ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=500 MPa………………………………………………………………99
ภาพที่ 3.68 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=8
ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=500 MPa……………………………………………………….…….100
ภาพที่ 3.69 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=4
ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=500 MPa……………………………………………………………100
ภาพที่ 3.70 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และ
อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ FLD=5……………………………102
ภาพที่ 3.71 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และ
อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่
FLD=10…………………………...…102
ภาพที่ 3.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และ
อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่
FLD=15……………………...……103
ภาพที่ 3.73 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากผลการทดสอบ
และแบบจำลองของ Bae และคณะ…………………………………………………..….104
ภาพที่ 4.1 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยพิจารณาผลของค้ำยันทาง….105

ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =3%................108
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =6%................108
หน้า
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =9%................109
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =12.58%..........109
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =15%..............110
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =20%..............110
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =25%..............111
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =40%..............111
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =60%............112
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =80%............112
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =100%...........113
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =120%...........113
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =200%...........114
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =655%...........114
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k ต่างๆ…………115
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k ต่างๆ…………...116
ภาพที่ 4.18 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=12.58%...117
ภาพที่ 4.19 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=12.58%...117
ภาพที่ 4.20 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=15%...118
ภาพที่ 4.21 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=15%...118
ภาพที่ 4.22 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=20%...119
ภาพที่ 4.23 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=20%...119

ภาพที่ 4.24 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=25%..120

หน้า

ภาพที่ 4.25 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=25%..120

ภาพที่ 4.26 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=100%..121

ภาพที่ 4.27 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=100%..121

ภาพที่ 4.28 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=655%..122

ภาพที่ 4.29 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=655%..122

ภาพที่ 4.30แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีลักษณะการเยื้องศูนย์เริ่มต้นที่ตำแหน่งอื่น…………………………………..123

ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่มีลักษณะการเยื้องศูนย์เริ่มต้นที่ตำแหน่งอื่น………………………………………...124

ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k ต่างๆและที่ R ต่างๆกัน………………………………………………………………………………..126

ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =6%..127

ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =9%..127

ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =12.58%..128

ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=15%...128

ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=20%...129

ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=25%...129

หน้า

ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=40%...130

ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=60%...130

ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=100%...131

ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=150%...131

ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16

ที่ R ต่างๆ N_k

=200%...132

ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k

=1…………133

ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =2…………133

ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =3…………134

ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =5…………134

ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =10………..135
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =15………..135
ภาพที่ 4.50 (a)-(f)การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% ที่ R ต่างๆ ณ ความเครียดต่างๆ……………………………………………………….137
ภาพที่ 4.51 (a)-(f)การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% ที่ R ต่างๆ ณ ความเครียดเท่ากับ 0.015……………………………………………..139
ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =12.58% ที่พิจารณาผลของพฤติกรรมการรับแรงของค้ำยันทางด้านข้าง ที่จุด A-G……………………………………………………………………………141
ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=1………………………………………………………………142
ภาพที่ 4.54การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=1 ณจุด A-G……142
ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=2………………………………………………………………143

หน้า

ภาพที่ 4.56 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=2 ณจุด A-G…...143
ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=3………………………………………………………………144
ภาพที่ 4.58 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=3 ณจุด A-G…...144
ภาพที่ 4.59 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=5………………………………………………………………145
ภาพที่ 4.60 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=5 ณจุด A-G…...145
ภาพที่ 4.61 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=10…………………………………………………………...…146
ภาพที่ 4.62 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=10 ณจุด A-G….146
ภาพที่ 4.63 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง

ที่ N_k=12.58%

R=15……………………………………………………………………..147

ภาพที่ 4.64 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=15 ณจุด A-G….147

ภาพที่ 4.65 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =100%
ที่พิจารณาผลของพฤติกรรมการรับแรงของค้ำยันทางด้านข้างที่จุด A-G………………...148

ภาพที่ 4.66 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=1……149

ภาพที่ 4.67 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=1 ณจุด A-G……..149

ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=2……150

ภาพที่ 4.69 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=2 ณจุด A-G……..150

ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=3……151

ภาพที่ 4.71 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=3 ณจุด A-G……..151

ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=5……152

ภาพที่ 4.73 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=5 ณจุด A-G……..152

ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=10…..153

ภาพที่ 4.75 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=10 ณจุด A-G……153

ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=15…..154

ภาพที่ 4.77 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=15 ณจุด A-G……154

บทที่ 1
บทนำ

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้างจะพบว่าจะเกิดการแตกร้าว บริเวณรอยต่อ (joints) ระหว่างองค์อาคาร คือ ระหว่างเสาและคาน โดยเฉพาะเสาที่มีการเสริมเหล็กปลอกไม่เพียงพอบริเวณจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge length) คอนกรีตบริเวณดังกล่าวเกิดการแตกร้าวส่งผลให้เกิดการโก่งเดาะ (buckling) ส่งผลให้เสาเกิดการสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักและเกิดการวิบัติโดยสิ้นเชิง งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งศึกษา พฤติกรรมรับแรงในแนวแกนของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวาง เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สำคัญที่เกี่ยวข้องจนเป็นสาเหตุให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ

ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปเสาจะรับน้ำหนักในแนวแกนและแรงดัดเป็นหลัก คอนกรีตมีหน้าที่รับแรงอัด และเหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงดึงและแรงอัด ในสภาวะเหล็กเสริมรับแรงอัดจะส่งผลให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะได้ ฉะนั้นจึงต้องมีการเสริมเหล็กตามขวางในเสาเพื่อป้องกันและยึดรั้งการโก่งเดาะของเหล็กตามยาว หน้าที่ของเหล็กตามขวางในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าที่หลักคือ ป้องกันและยึดรั้งเหล็กเสริมตามยาวไม่ให้เกิดการโก่งเดาะก่อนเวลา เพิ่มการโอบรัด(confinement)ของเสาคอนกรีต และช่วยในการรับแรงเฉือนในเสาอีกด้วย เมื่อพิจารณาพฤติกรรมและหน้าที่ของเหล็กเสริมตามขวางจะพบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการการโก่งเดาะของเหล็กตามยาว

งานวิจัยนี้จะศึกษาให้เห็นพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่รับแรงในแนวแกนในช่วงอีลาสติกตลอดจนช่วงอินอีลาสติก ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ด้วยโปรแกรม OpenSees โดยพิจารณาผลของการเสริมเหล็กตามขวางที่ทำหน้าที่ค้ำยัน โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนความยาวในช่วงที่ไม่มีการค้ำยันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาว สติฟเนสของเหล็กเสริมตามขวาง

1.1 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

งานวิจัยที่ศึกษามีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันทางด้านข้าง ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ สติฟเนสของค้ำยัน กำลังที่จุดครากของค้ำยัน

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยที่การศึกษามีขอบเขตดังต่อไปนี้

1. ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม โดยใช้โปรแกรม OpenSees

2 การวิเคราะห์แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาว ที่รับแรงอัดตามแนวแกน โดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด รับแรงอัดกระทำแบบทิศทางเดียวของ Menegotto และ Pinto (1973)

3. ค้ำยันทางด้านข้างพิจารณาพฤติกรรมแบบเป็นเชินเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ค้ำยัน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางเพียงตำแหน่งเดียว

1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวิธีดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาต่างๆ ในอดีต เพื่อเป็นแนวทางศึกษาในการทำวิจัย เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็เสริมภายใต้แรงอัดกระทำทิศทางเดียวและแบบวัฏจักร พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมทั้งจากการทดสอบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมและการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตและแนวทางการวิจัย

2.ศึกษาการใช้งานของโปรแกรม OpenSees เช่น การสร้างแบบจำลอง การวิเคราะห์และการเก็บข้อมูล

3.สร้างแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกระทำตามแนวแกน พร้อมทั้งสอบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองกับผลงานวิจัยในอดีต

4.ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเหล็กเสริมที่ส่งผลต่อการโก่งเดาะของเหล็กเสริม เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องเหมาะสม และเพียงพอในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

5.ทำการวิเคราะห์แบบจำลองที่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง โดยพฤติกรรมของค้ำยันเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

6.สรุปผลงานวิจัย

7.จัดทำวิทยานิพนธ์

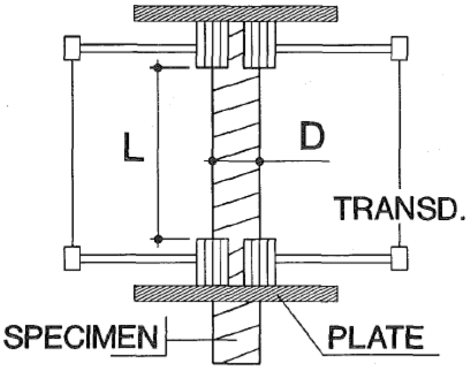
บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

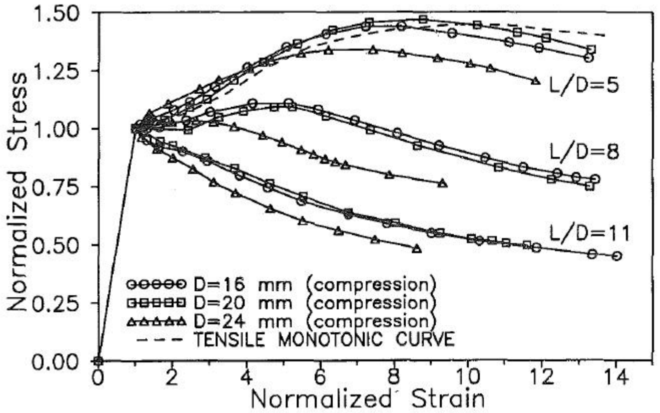
วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา เนื่องมาจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการทำวิจัยพัฒนาองค์ความรู้ต่างๆ เพื่อที่จะได้มีแนวทางและแนวคิดในเรื่องที่จะศึกษาค้นคว้า อีกทั้งยังได้ความรู้ความเข้าใจจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กตามยาวภายในเสา แบบจำลองความสันพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเสา ภายได้แรงกระทำทิศทางเดียวและวัฏจักร งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียวและแบบวัฏจักร

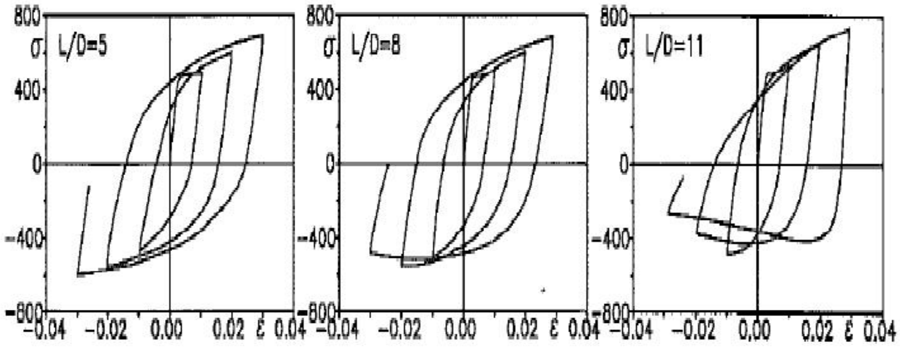
MontiและNuti (1992) ได้ดำเนินการทดสอบชุดตัวอย่างของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว (monotonic loading) และแบบวัฏจักร (cyclic loading) โดยใช้เหล็กที่มีกำลังที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 440 MPa และเปลี่ยนอัตราส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม(L/D) โดยการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 2.1 จากการทดสอบในเรื่องสัดส่วนระหว่างการลดลงของความเค้นอัดหลังเหล็กเสริมรับน้ำหนักถึงจุดครากกับของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม จะพบว่าเมื่อของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นความเค้นหลังจากเลยจุดครากจะลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะได้เร็วขึ้น แต่เมื่อลดอัตราส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เท่ากับ หรือน้อยกว่า 5 จะพบว่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัด จะใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังแสดงในภาที่ 2.2



ภาพที่ 2.1การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแบบวัฏจักร (cyclic test)(Monti และ Nuti ,1992)

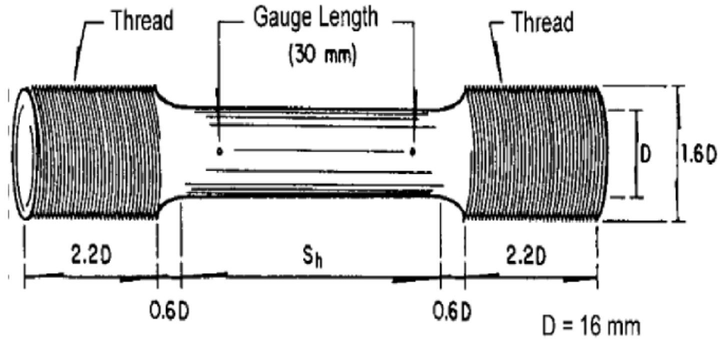


ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำทิศทางเดียวที่อัตราส่วนต่างๆ (Monti และ Nuti ,1992)

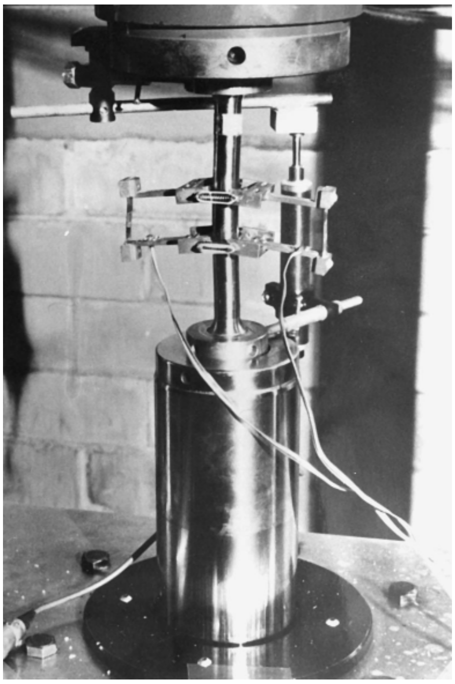


ภาพที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Monti และ Nuti ,1992)

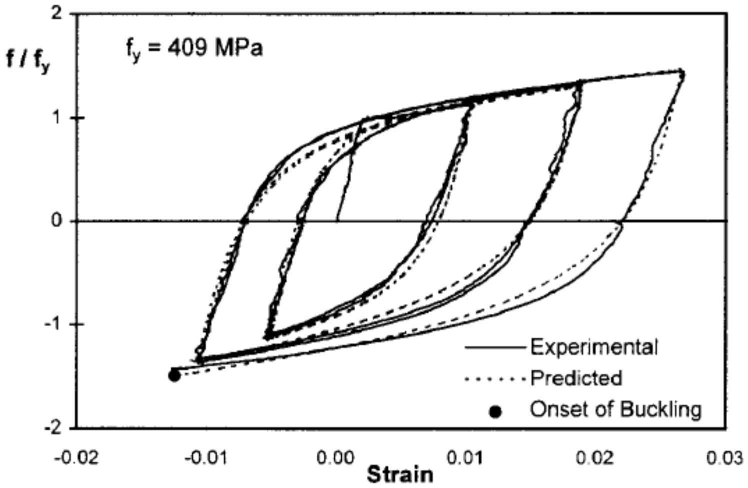
Rodriguez และคณะ(1999) ได้ดำเนินการทดสอบชุดตัวอย่างของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด โดยใช้เหล็กที่มีกำลังที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 415 MPa และเปลี่ยนอัตราส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม(L/D) และทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จึงสรุปได้ว่า จุดเริ่มต้นของการโก่งเดาะขึ้นอยู่กับความเครียดที่เกินความเครียดดึงสูงสุดในภายใต้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร และบนพื้นฐานที่เสนอโดยDodd และ Restrepo-Posada (1995) ได้หาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่เกิดจากพฤติกรรมของเหล็กเมื่อรับแรงดึง ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าพฤติกรรมการดึงและการอัดของแท่งเหล็กมีคุณสมบัติเหมือนกันแต่ทิศทางตรงกันข้าม และสมการความสัมพันธ์จะไม่คำนึงถึงคุณสมบัติทางเรขาคณิตเบื้องต้นของเหล็กเสริม ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมในการรับแรงอัดของเหล็กเสริมผลการทดสอบจะอ้างอิงผลการทดสอบและแบบจำลองในอดีตที่ผ่านมา อาทิ Mander และคณะ (1988) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 2.4-2.5



ภาพที่ 2.4 แสดงขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (Rodriguez และคณะ,1999)

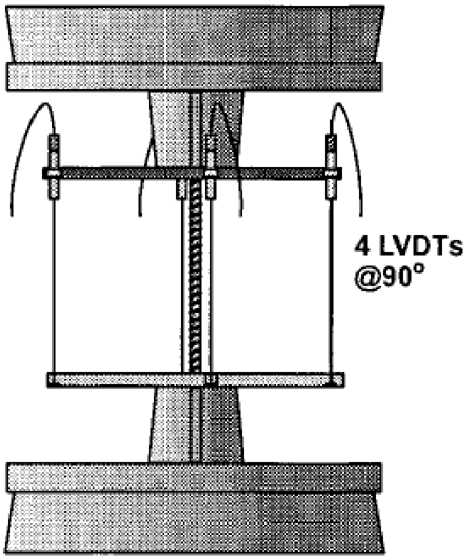


ภาพที่ 2.5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Rodriguez และคณะ,1999)

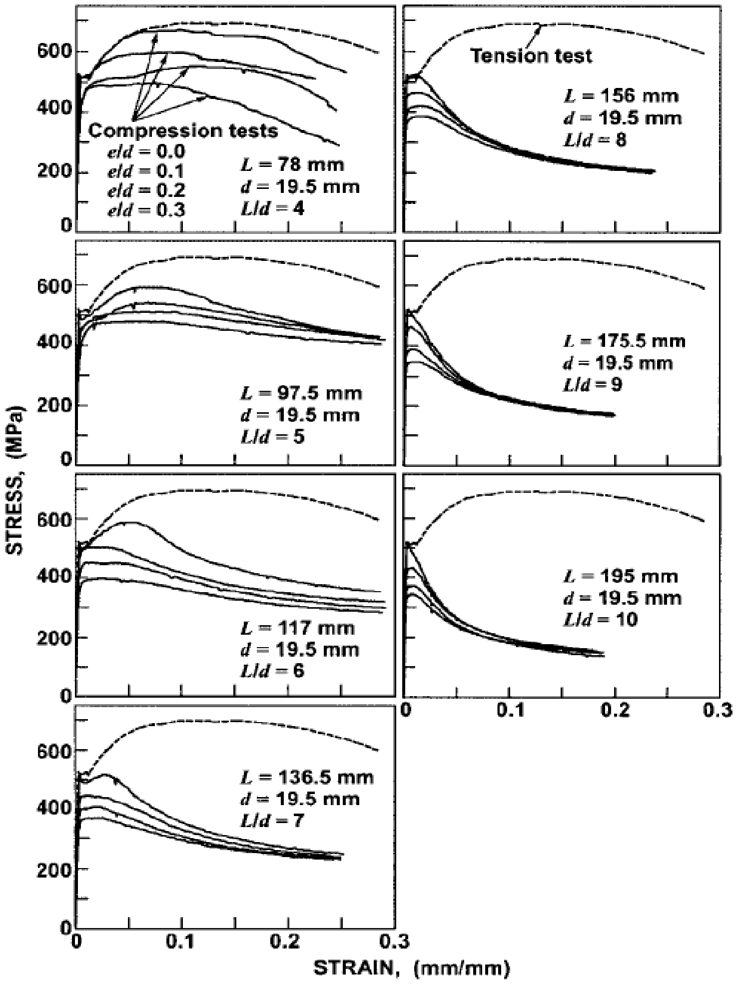


ภาพที่ 2.6 แสดงผลการทดสอบ (Rodriguez และคณะ,1999)

Bayrak และ Sheikh (2001) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมทั้งหมด 56 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดทิศทางเดียว (monotonic compression) โดยใช้เหล็ก Grade 400 20M (d=19.5 mm) โดยทดสอบในอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio, L/d) ตั้งแต่ 4 ถึง 10 และการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (initial imperfection, e/d) ตั้งแต่ 0.0 ถึง 0.3 การติดตั้งอุปกรณ์จะใช้เครื่องวัดการเคลื่อนแบบไฟฟ้า (LVDT) จำนวน 4 ตัว การติดตั้งอุปกรณ์และตัวอย่างในการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.7 ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงโดยรูปที่ 2.8 เมื่อให้อัตราส่วนความชะลูด(L/d) คงที่โดยเพิ่มการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/d) ผลที่ได้คือกำลังและความเหนียวลดลง ในทำนองเดียวกัน เมื่อให้การเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/d) คงที่และเพิ่มอัตราส่วนความชะลูด (L/d) ผลที่ได้คือกำลังและความเหนียวลดลงเช่นเดียวกัน จากการทดสอบได้สรุปว่าอัตราส่วนชะลูดวิกฤตของการโก่งเดาะ (critical L/d ratio) มีค่าเท่ากับ 7



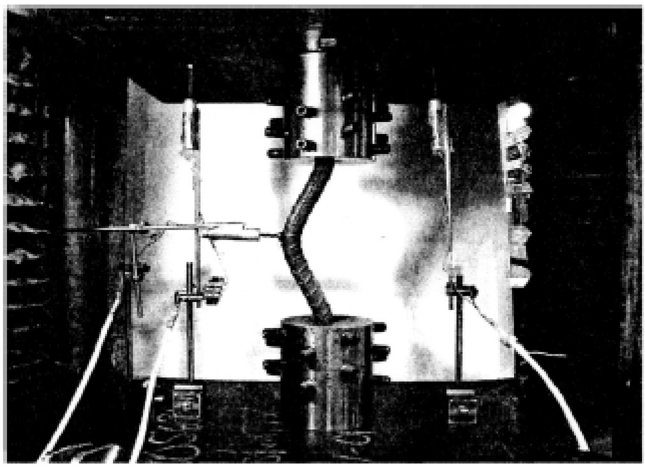
ภาพที่ 2.7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bayrak และ Sheikh 2001)



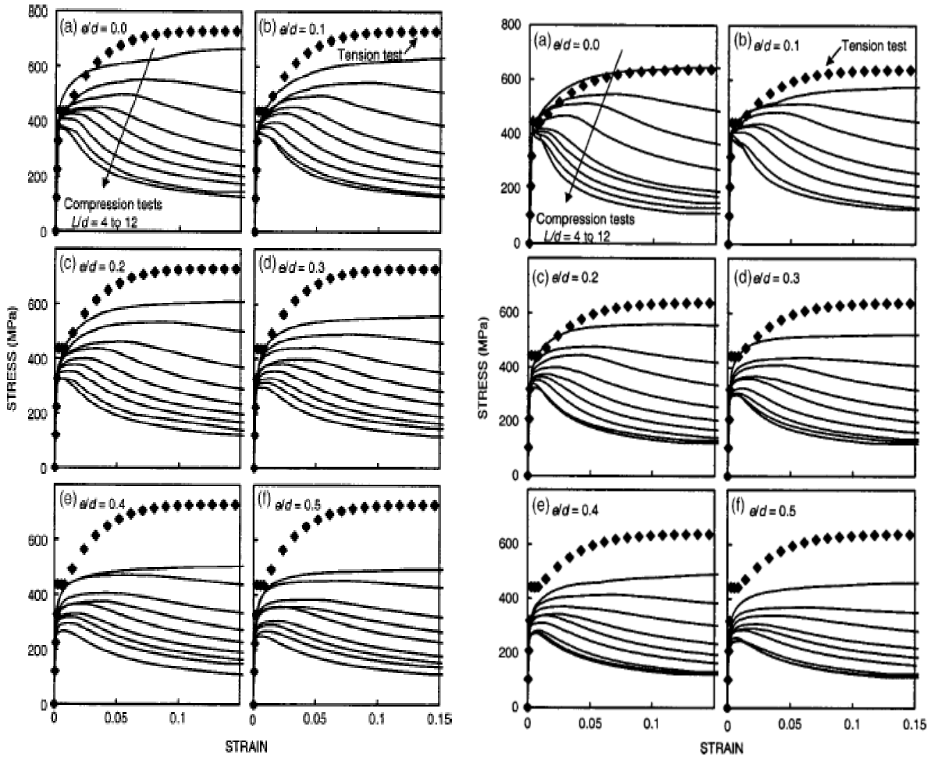
ภาพที่ 2.8 ผลการทดสอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

(Bayrak และ Sheikh 2001)

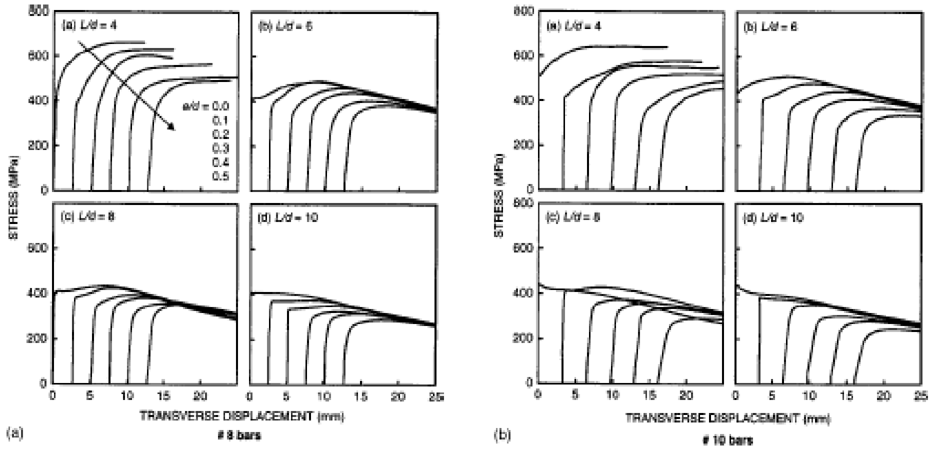
Bae และคณะ (2005) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริม Grade 60 No.8 (d=25.4 mm, As=510 mm^2) และ No.10 (d=32.3 mm, As=819 mm^2) กำลังที่จุกครากเท่ากับ 440 MPa โดยต้องการสังเกตพฤติกรรมของเหล็กเสริมโดยคำนึงผลของความยาวที่ไม่มีการยึดรั้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดเหล็กเสริม หรืออัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio, L/d) และผลของความไม่สมบูรณ์ตั้งแต่ต้นหรือการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (initial imperfection, e/d) ของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด(compressive loads) โดยช่วงของอัตราส่วนความชะลูด(L/d) ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 4 ถึง 12 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 และการเยื้องศูนย์เริ่มต้น(e/d) 0.0 ถึง 0.5 12 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 การติดตั้งอุปกรณ์จะใช้เครื่องวัดการเคลื่อนแบบไฟฟ้า (Displacement transducer) จำนวน 2 ตัว วัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน และใช้เครื่องวัดการเคลื่อนแบบไฟฟ้า จำนวน 1 ตัว ใช้วัดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่าง ในการทดสอบนี้ไม่ใช้เกจวัดความเครียดในการทดสอบเนื่องจากไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมโดยรวมทั้งหมดของชิ้นตัวอย่างได้ และในการติดตั้งเกจวัดความเครียดจะรบกวนรูปร่างของตัวอย่างคือเป็นการลดพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างลง การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.9 ผลการทดสอบได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความชะลูด(L/d)และการเยื้องศูนย์เริ่มต้น(e/d)การรับน้ำหนักของตัวอย่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออัตราส่วนความชะลูด(L/d) มากกว่าหรือเท่ากับ 6 ดังแสดงดังภาพที่ 2.10 และเมื่อการเยื้องศูนย์เริ่มต้น(e/d)เพิ่มมากขึ้นกำลังรับน้ำหนักจะน้อยกว่ากำลังที่จุดคราก เนื่องจากเกิดการโก่งเดาะก่อนที่กำลังจะพัฒนาไปถึงกำลังที่จุดครากดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ (Bae และคณะ, 2005)



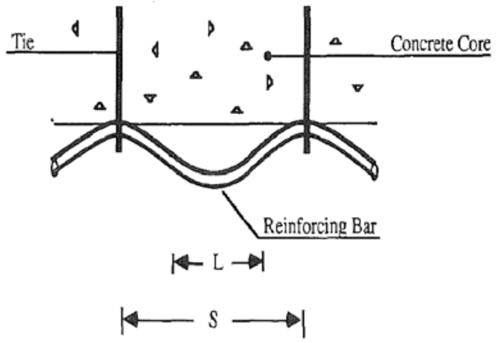
ภาพที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอัตราส่วนความชะลูดต่างๆ ของเหล็ก No.8 และ No.10 (Bae และคณะ, 2005)



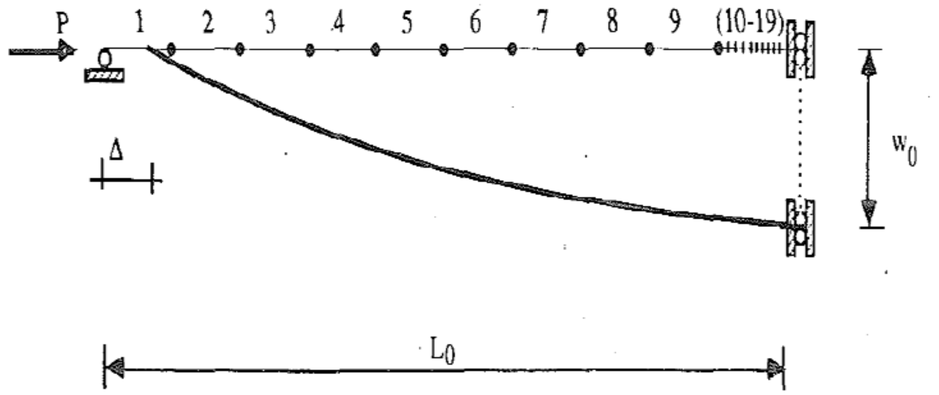
ภาพที่ 2.11 แสดงการความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ด้านข้างกับความเค้น (Bae และคณะ, 2005)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองต่าง ๆที่รวมผลของการโก่งเดาะ

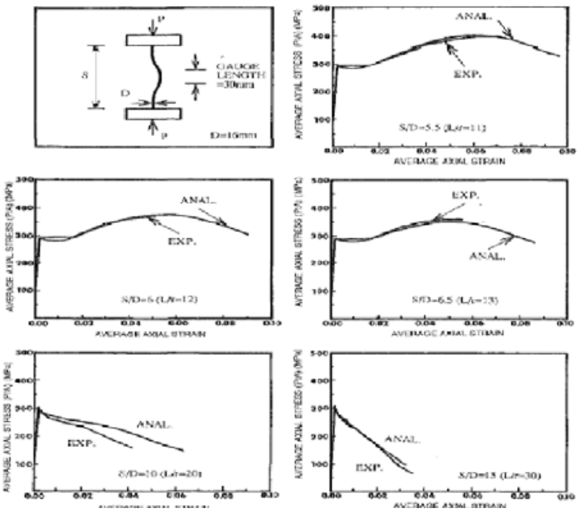
Mau และ El-Mabsout(1989) ได้วิเคราะห์คานและเสาโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์โดยสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดที่อยู่ภายใต้แรงอัดของเหล็กเสริมซึ่งรวมพฤติกรรมการโก่งเดาะไว้ด้วย ผลของอัตราส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมได้มีการศึกษาวิจัย จากการศึกษาพบว่าการโก่งเดาะตามปกติจะเกิดขึ้นหลังเหล็กเสริมที่ได้รับแรงจนถึงถึงจุดคราก ซึ่งการโก่งเดาะจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูด(slenderness ratio ,L/d) และ พฤติกรรมแต่ละจุดของเหล็กเสริม ผลของการโก่งเดาะจะถูกลดทอนลงไปเมื่ออัตราส่วนความชะลูด น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5



ภาพที่ 2.12 แสดงการเสริมเหล็กที่ใช้วิเคราะห์โดยมีแนวคิดว่าให้เหล็กเป็นเป็นจุดรองรับ (Mau และ El-Mabsout,1989)



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Mau และ El-Mabsout,1989)

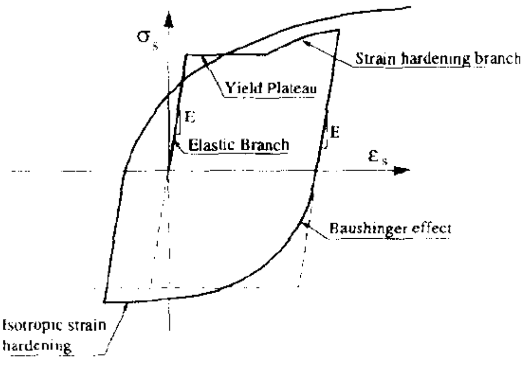


ภาพที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบโดย Mander และคณะ กับผลการวิเคราะห์(Mau และ El-Mabsout,1989)

Gomes และ Appleton(1996) ได้ทำการเสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมโดยพิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม แบบจำลองนี้ได้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ Menegotto-Pinto(1973)โดย Gomes และ Appleton(1996) ได้เสนอลักษณะของแบบจำลองที่ถูกต้องไว้ดัง

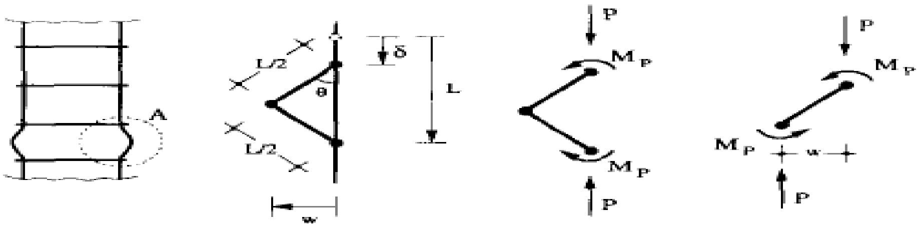
1. ช่วงที่ 1 ช่วงอิลาสติกลักษณะของของกราฟเป็นเส้นตรง และกำลังจะคงที่เมื่อกำลังถึงจุดคราก จนกระทั่งเกิด การแข็งตัวเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น
2. ช่วงที่ 2 คือช่วงที่ความเค้นและความเค้นลดลงเนื่องจากแรงกระทำเปลี่ยนเป็นทิศตรงข้าม จนกระทั่งถึงกำลังที่จุดครากในทิศตรงข้ามโดยกำลังลังที่จุดครากนี้จะน้อยกว่าเพราะผลของเส้นแบชชิงเจอร์(Baushinger effect) โดยของปรากฏการณ์นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดพลาสติกของวัสดุมากขึ้น
3. ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่กำลังของวัสดุมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง (Isotropic strain hardening)

โดยลักษณะของแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 2.14

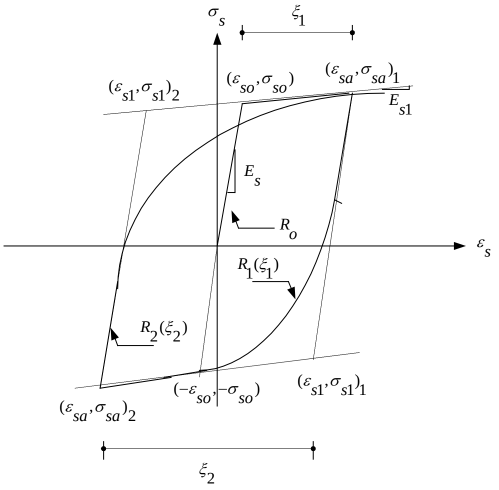


ภาพที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบของแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Gomes and Appleton,1996)

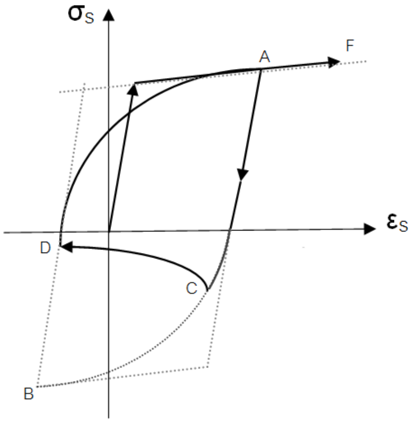
แบบจำลองของ Menegotto-Pinto(1973)ดังแสดงภาพที่ 2.16 ซึ่งเดิมที่ไม่ได้พิจารณาผลของการโก่งเดาะของเหล็ก ผู้วิจัยได้ทำการเสนอแบบจำลองโดยพิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริมโดยกำหนดให้พฤติกรรมช่วงที่เกิดการโก่งเดาะมีลักษณะเป็นจุดหมุนพลาสติก 3 จุด ซึ่งอาศัยหลักการความสมดุลของจุดหมุนพลาสติก (equilibrium of a plastic mechanism)ดังแสดงในภาพที่ 2.15 เมื่อเหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะ แบบจำลองของการโก่งเดาะนั้นจะพิจารณาหลังคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการหลุดล่อน ดังแสดงภาพที่ 2.17 โดยที่มีช่วง CD คือพิจารณาผลของการโก่งเดาะอยู่ระหว่างช่วงลดแรงลง AB โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเสาตัวอย่างเปรียบเทียบกับ แบบจำลองไฟเบอร์(fiber model) และได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์พบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองให้ความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดสอบ ภาพที่ 2.18 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมที่เสนอโดย Gomes และ Appleton (1996)



ภาพที่ 2.16 แสดงสมดุลของการโก่งเดาะ ของเหล็กเสริมยืน (Gomes and Appleton,1996)



ภาพที่ 2.17 แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ของ Menegotto และ Pinto,1973(Gomes and Appleton,1996)



ภาพที่ 2.18แบบจำลองของการโก่งเดาะพิจารณาหลังคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการหลุดล่อน (Gomes และ Appleton,1996)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Menegotto และ Pinto, 1973) ในช่วงของการให้แรงเพิ่มขึ้น (reloading) และให้แรงลดลง (unloading) แสดงได้ดังสมการ (1)

$$\sigma_s^* = b\varepsilon_s^* + \frac{(1-b)\varepsilon_s^*}{\left(1+\left(\varepsilon_s^*\right)^R\right)^{\frac{1}{R}}} \tag{1}$$

โดยที่ $\varepsilon_s^* = \dfrac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sa}}{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{sa}}$, $\sigma_s^* = \dfrac{\sigma_s - \sigma_{sa}}{\sigma_{s1} - \sigma_{sa}}$

$\sigma_{s1}, \varepsilon_{s1}$ คือ ความเค้นและความเครียดที่จุดตัดของเส้นล้อมรอบ (envelope line) ในช่วงอิลาสติก

$\sigma_{sa}, \varepsilon_{sa}$ คือ ความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งเมื่อให้แรงกระทำกลับข้าง

$b = \dfrac{E_{s1}}{E_s}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสติฟเนสในช่วงของการแข็งตัวเพิ่มขึ้นต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสัมผัสในช่วงอิลาสติก

R คือ ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อส่วนโค้งของเส้นกราฟ (bauschinger effect)

มีค่าเท่ากับ $R_0 - \dfrac{a_1\xi}{a_2 + \xi}$

ξ คือ ค่า plastic strain

R_0, a_1, a_2 คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด Gomes and Appleton(1996) ในช่วงของการให้แรงเพิ่มขึ้น(reloading) และให้แรงลดลง (unloading) แสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\sigma_s = \frac{2\sqrt{2}}{A_s L}\frac{4}{3} r^3 \sin^3\theta \sigma_{sa} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_s}} \tag{2}$$

โดยที่

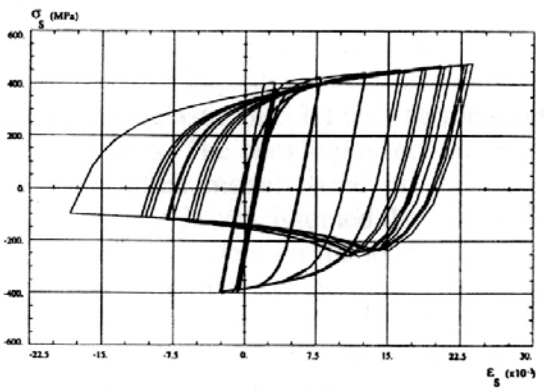
L คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดขวางของเหล็กเสริมตามยาว

r คือ ความยาวเส้นรัศมีของเหล็กเสริมตามยาว

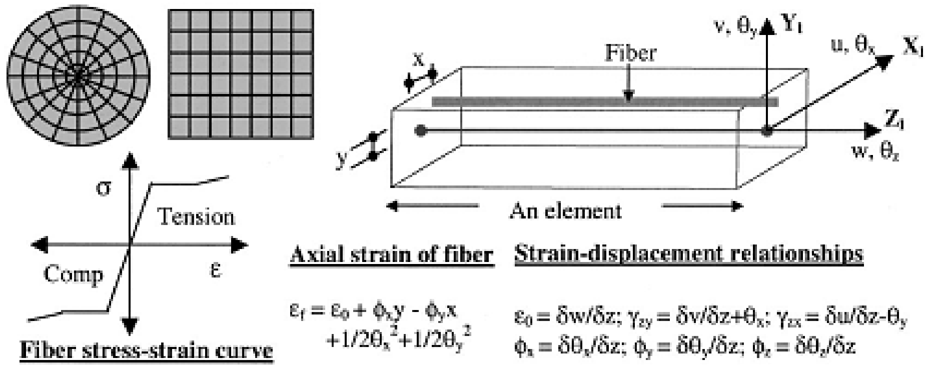
σ_{sa} คือ ความเค้นของเหล็กเสริมที่ตำแหน่งเมื่อให้แรงกระทำกลับข้าง

ε_s คือ ความเครียดของเหล็กเสริม

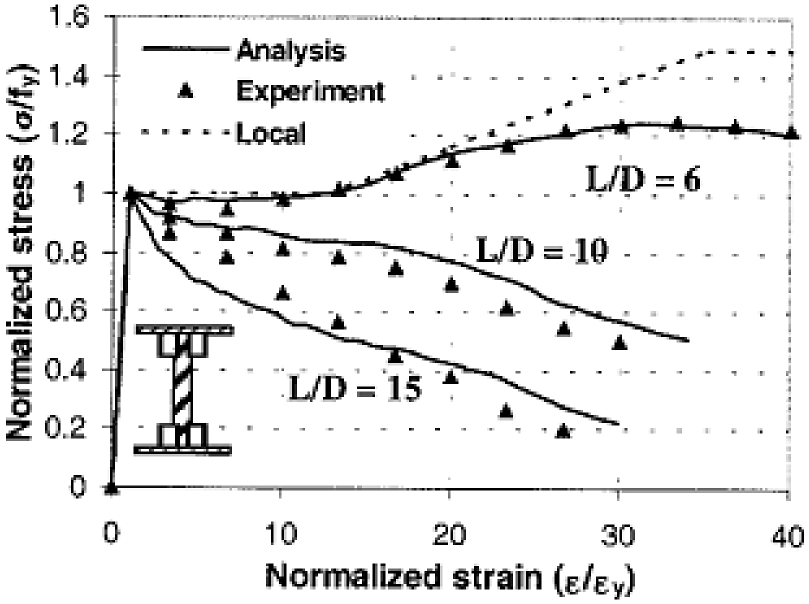


รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมที่พิจารณาผลการโด่งเดาะขอเหล็กเสริมตามยาว (Gomes และ Appleton,1996)

Dhakal และ Maekawa (2002) ได้นำเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สำหรับการโก่งเดาะหลังเลยจุดครากของเหล็กเสริม โดยแบบจำลองไฟเบอร์นำมาใช้ร่วมกับวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ชิ้นส่วนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังภาพที่ 2.19 โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการโก่งเดาะ แสดงในเทอมของตัวแปรในรูปของรากที่สองของกำลังครากและอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบของ Manderและคณะ(1984)ดังภาพที่ 2.20 โดยใช้อัตราส่วนความชะลูด (*L/ D*) ที่เท่ากันคือ 6, 10 และ 15 ของ Monti และ Nuti(1992) กับแบบจำลองที่นำเสนอดังภาพที่ 2.21 โดยใช้อัตราส่วนความชะลูด(*L/ D*) คือ 5, 8 และ 11 ผลที่ได้จะสังเกตเห็นว่าใกล้เคียงกันโดยเฉพาะที่อัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 5

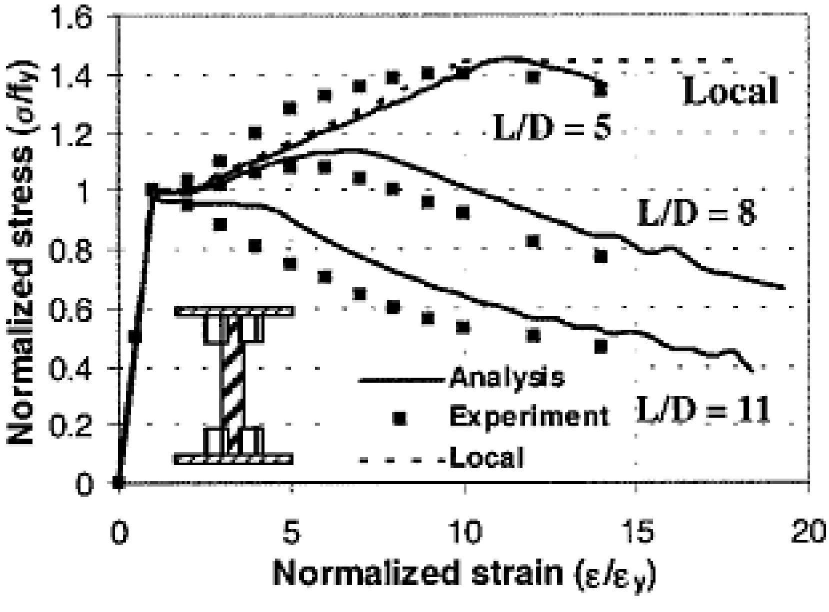


ภาพที่ 2.20 แสดงชิ้นส่วนแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์โดยไฟเบอร์เทคนิคนำมาใช้ร่วมกับวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Dhakal และ Maekawa, 2002)



ภาพที่ 2.21 แสดงการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Manderและคณะ (1984)

(Dhakal และ Maekawa, 2002)

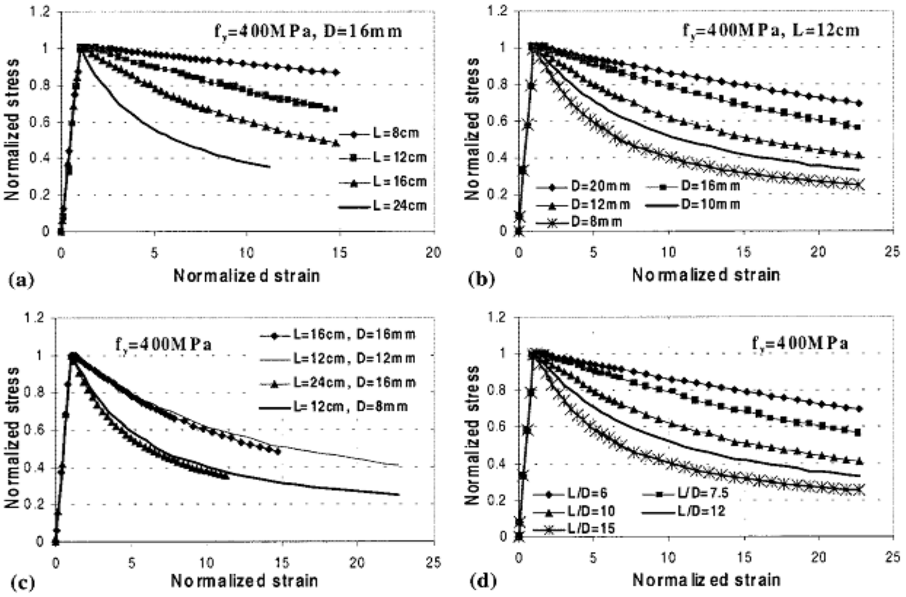


ภาพที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Monti และ Nuti(1992)

(Dhakal และ Maekawa ,2002)

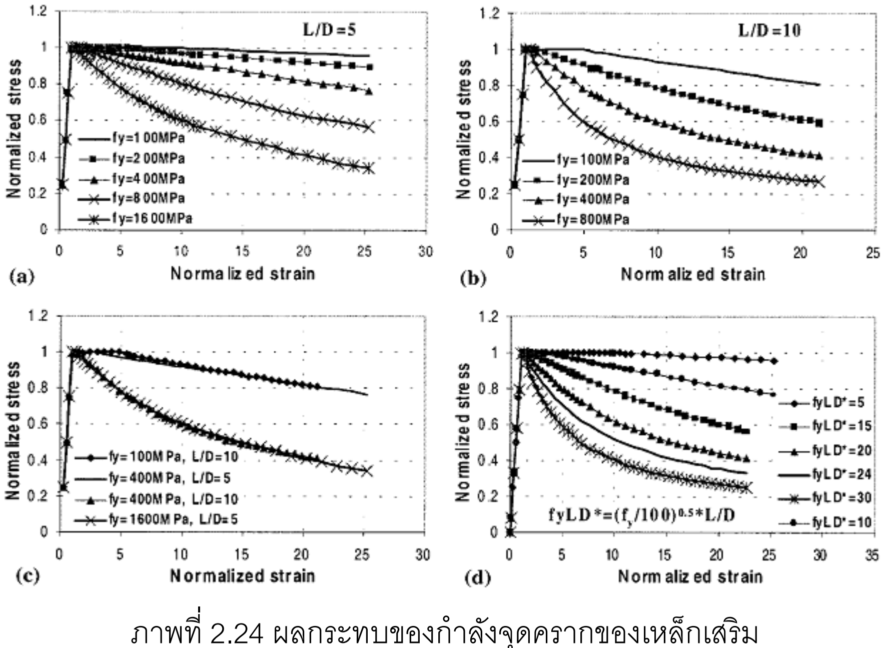
จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟเบอร์ร่วมกับวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จึงใช้ในการตรวจสอบและศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการโก่งเดาะในช่วงเลยจุดคราก (Postyield Buckling) โดย

ศึกษาผลกระทบจากของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 2.23 ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบในอดีตที่ผ่านคือ เมื่ออัตราส่วนความชะลูดเพิ่มค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วงหลังจุดครากจะลดลงอย่างรวดเร็ว และผลกระทบของกำลังจุดครากของเหล็กเสริม ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 2.24 ผลที่แสดงชี้ให้เห็นว่าเมื่อกำลังครากของวัสดุเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉลี่ยในช่วงหลังจุดครากจะลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2.23 แสดงผลกระทบจากของความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง

(Dhakal และ Maekawa ,2002)



ภาพที่ 2.24 ผลกระทบของกำลังจุดครากของเหล็กเสริม

(Dhakal และ Maekawa ,2002)

แบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สำหรับการโก่งเดาะหลังเลยจุดครากของเหล็กเสริม ที่สร้างโดยใช้การวิเคราะห์โดยใช้ไฟเบอร์เทคนิคนำมาใช้ร่วมกับวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ดังรูปที่ อธิบายโดยสมการที่ 3-4

สำหรับ $\varepsilon_y < \varepsilon \le \varepsilon^*$

$$\frac{\sigma}{\sigma_l} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma^*}{\sigma_l^*}\right)\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon^* - \varepsilon_y}\right) \qquad (3)$$

สำหรับ $\varepsilon > \varepsilon^*$

$$\sigma \ge 0.2 f_y \;;\; \sigma = \sigma^* - 0.02 E_s \left(\varepsilon - \varepsilon^*\right) \qquad (4)$$

จากความความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สามารถคำนวณหาจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน (Intermediate point , $(\varepsilon^*, \sigma^*)$) ได้จากสมการที่ 5-6

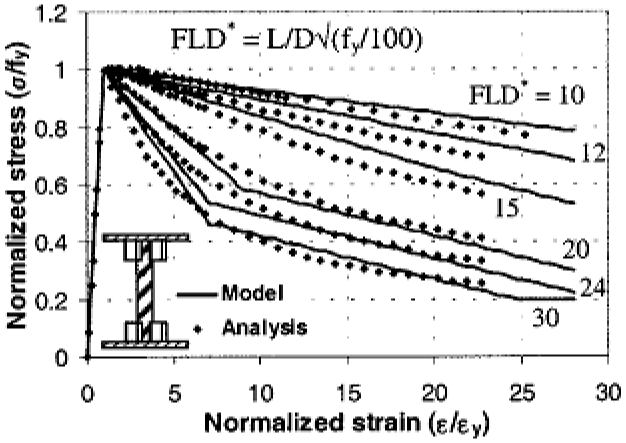
$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_y} = 55 - 2.3\sqrt{\frac{f_y}{100}}\frac{L}{D} \qquad (5)$$

เมื่อ $\varepsilon^*/\varepsilon_y \ge 7$

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_l^*} = \alpha\left(1.1 - 0.016\sqrt{\frac{f_y}{100}}\frac{L}{D}\right) \qquad (6)$$

เมื่อ $\sigma^* \ge 0.2 f_y$

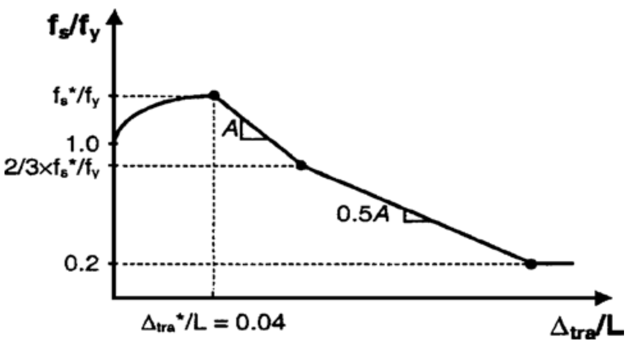
ผลที่ได้แสดงการเปรียบเทียบดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับแบบจำลองที่นำเสนอ

(Dhakal และ Maekawa ,2002)

Bae และคณะ (2005) ได้ทำการเสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง และความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกน เนื่องจากผลของการโก่งเดาะ โดยแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ได้เสนอนั้นมีสมมุติฐานในการสร้างคือ (1) เหล็กเสริมเริ่มเกิดการโก่งเดาะเมื่อรับกำลังไปถึงกำลังที่จุดคราก (2) ความเค้นเริ่มลดลงหลังจากการเสียรูปด้านข้างเกิน 0.04เท่าของความยาวที่ไม่มีการค้ำยัน (3)ความเค้นเฉลี่ยหลังจากการโก่งเดาะมีค่าคงที่หลังจากความเค้นลดลงเหลือ 20% ของกำลังที่จุดคราก โดยสมมุติฐานนี้สร้างโดยขึ้นอยู่กับการทดสอบที่ผ่านมา ดังแสดงภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง

(Bae และคณะ, 2005)

สมการแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง ดังสมการที่ 7-11

ช่วงแรก $\left(\frac{\Delta_{tra}}{L} \le 0.04\right)$

$$\frac{f_s}{f_y} = 1 + \left(\frac{f_s^*}{f_y}\right) \times \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_{tra}}{\Delta_{tra}^*} - 1\right)^2} \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{f_s^*}{f_y} \le 1 \qquad (7)$$

$$\frac{f_s}{f_y} = \left(\frac{f_s^*}{f_y} - 1\right)\frac{\Delta_{tra}}{\Delta_{tra}^*} + 1 \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{f_s^*}{f_y} \ge 1 \qquad (8)$$

ช่วงที่ 2 $\left(\frac{\Delta_{tra}}{L} \geq 0.04\right)$

$$\frac{f_s - f_s^*}{f_y} = A\left(\frac{\Delta_{tra} - \Delta_{tra}^*}{L}\right) \qquad \text{เมื่อ} \qquad \frac{f_s}{f_y} \geq \frac{2}{3}\frac{f_s^*}{f_y} \qquad (9)$$

$$\frac{f_s - 2/3 f_s^*}{f_y} = \frac{A}{2}\left(\frac{\Delta_{tra}}{L} - x_1\right) > 0.2 \qquad \text{เมื่อ} \qquad \frac{f_s}{f_y} < \frac{2}{3}\frac{f_s^*}{f_y} \qquad (10)$$

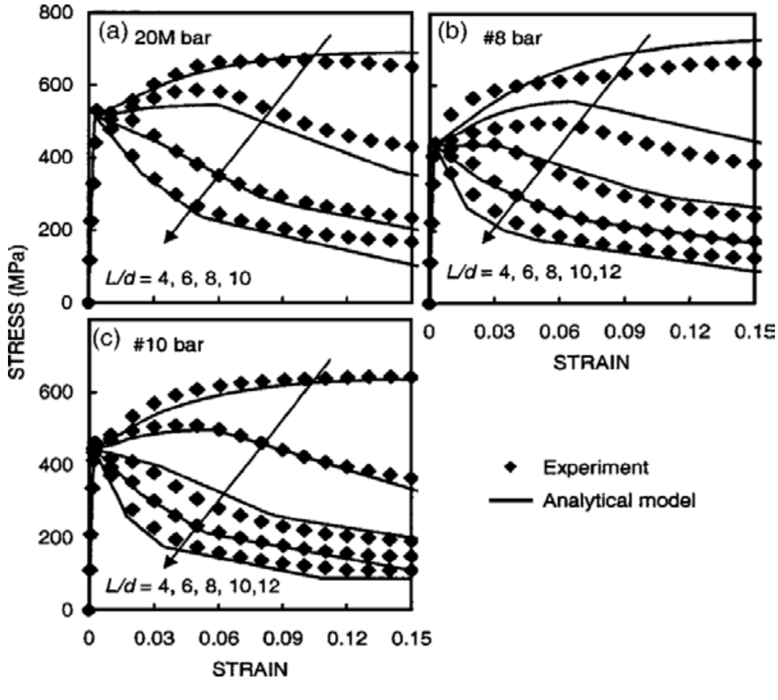
$$\frac{\Delta_{tra}^*}{L} = 0.04; \frac{f_s^*}{f_y} = -0.45\zeta^{1.5}\left[\ln\left(\frac{L/d}{4}\right)\right] + \zeta \leq \zeta \qquad (11)$$

โดยที่ ζ คือ f_u / f_y

Δ_{tra} คือ ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของตัวอย่าง

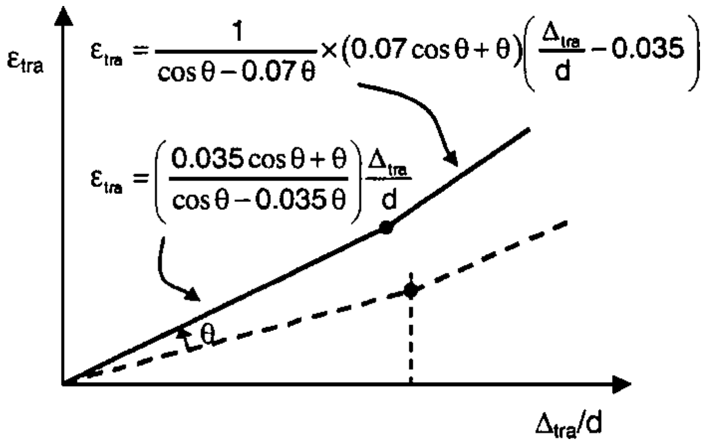
L คือ ความยาวของตัวอย่างระหว่างหัวจับของเครื่องทดสอบ

f_y คือ ความเค้นที่จุดคราก



ภาพที่ 2.27 การเปรียบเทียบความเค้นและระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างโดยการทดสอบและแบบจำลอง (Bae และคณะ, 2005)

และได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกน ดังแสดงภาพที่ 2.28



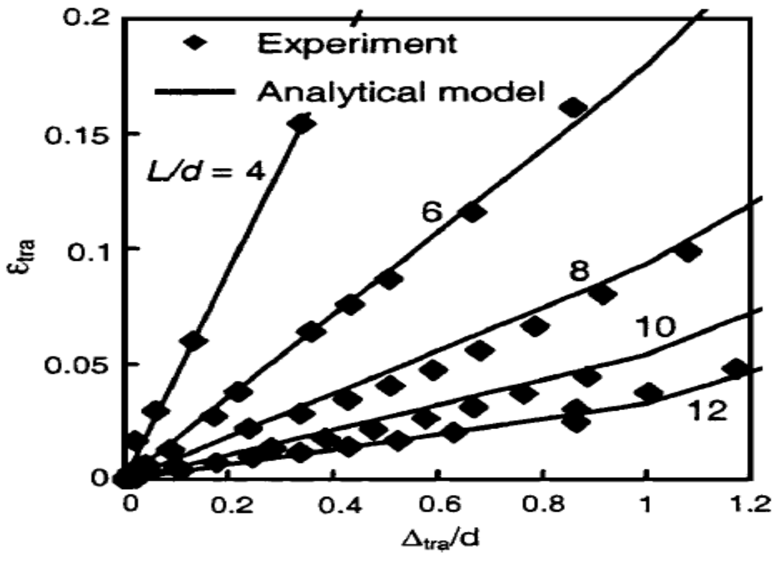
รูปที่ 2.28 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกน (Bae และคณะ, 2005)

สมการแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกน ดังสมการที่ 12

$$\varepsilon_{tra} = \max\begin{cases} \left(\dfrac{0.035\cos\theta+\theta}{\cos\theta-0.035\theta}\right)\dfrac{\Delta_{tra}}{d} \\ \dfrac{1}{\cos\theta-0.07\theta}\times\left(0.07\cos\theta+\theta\right)\left(\dfrac{\Delta_{tra}}{d}-0.035\right) \end{cases} \qquad (12)$$

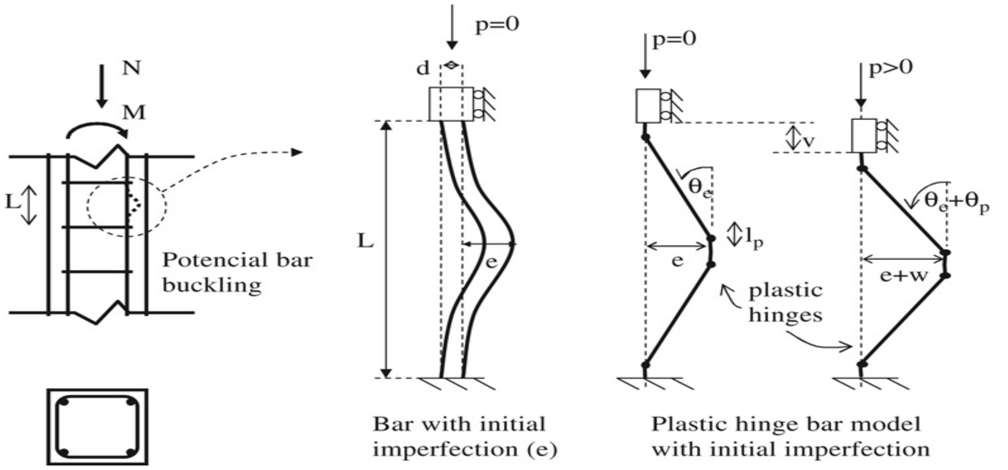
โดยที่ ε_{tra} คือ ความเครียดจากการเคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกน

θ คือ $6.9/\left(L/d\right)^2 - 0.05$

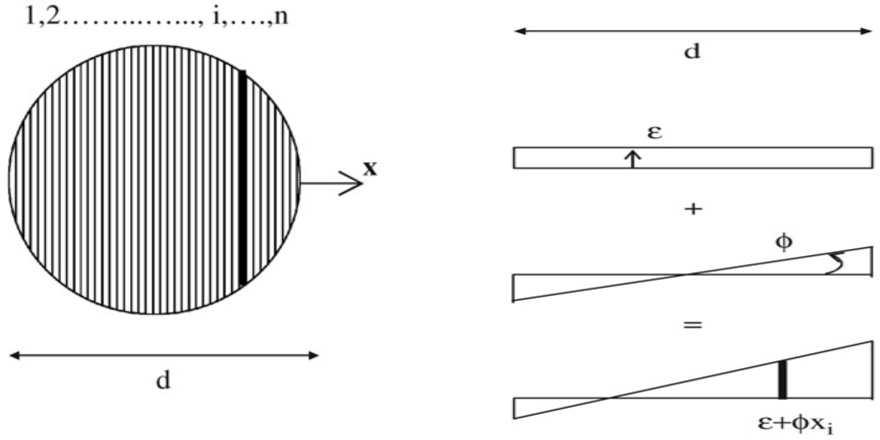


ภาพที่ 2.29 การเปรียบเทียบระหว่างระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างและความเครียดตามแนวแกนโดยการทดสอบและแบบจำลอง (Bae และคณะ, 2005)

Massone และ Moroder (2009) ได้นำเสนอแบบจำลองการโก่งเดาะ(buckling modeling) ของเหล็กเสริมที่มีผลเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ (initial imperfection) โดยการเสียรูป ในการทดสอบการโก่งเดาะของเหล็กเส้นรับแรงในแนวแกนขั้นตอนการให้เกิดการเสียรูปด้านข้างเริ่มต้นจะทำการใส่แรงกระทำด้านข้างชั่วคราว ทำการทดสอบโดยใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวางยาว (L) มีการยึดแน่นปลายทั้งสองข้าง 2 ข้าง และแบบจำลองที่นำเสนอจะแบ่งเป็นจุดหมุนพลาสติก (plastic hinges) เป็น 4 จุด ในช่วงที่เกิดการโก่งเดาะโดยแต่ละตำแหน่งแสดง ดังภาพที่ 2.30ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะเปรียบโดยอ้างอิงผลการทดสอบ ของ Bayrak และ Sheikh (2001)

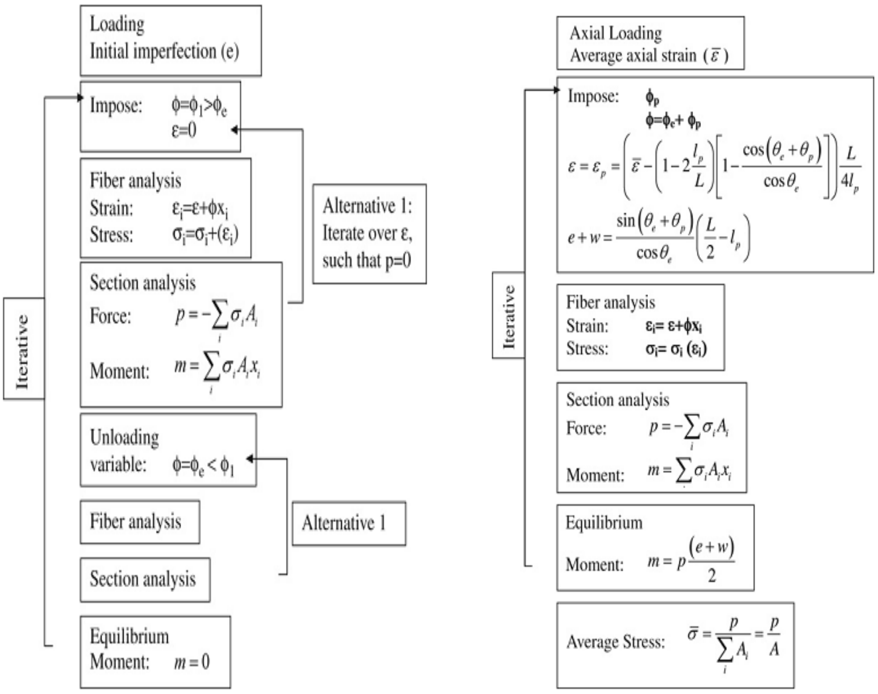


ภาพที่ 2.30 แสดงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่มีผลเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์หรือการเสียรูปตั้งแต่เริ่มต้น (Initial imperfection) (Massone และ Moroder ,2009)

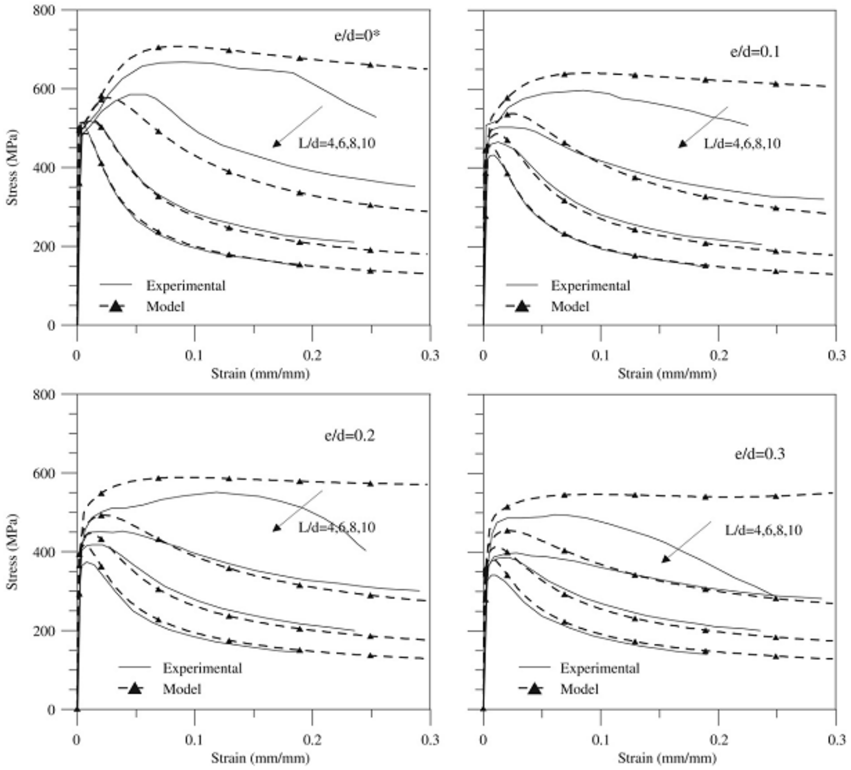


ภาพที่ 2.31 แสดงหน้าตัดของเหล็กเสริมในช่วงจุดหมุนพลาสติก ของแบบจำลองไฟเบอร์

(Massone และ Moroder ,2009)



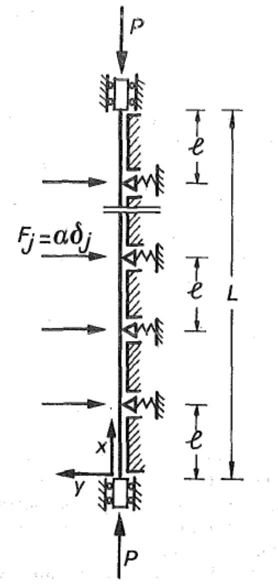
ภาพที่ 2.32 แสดงแผนภูมิกระบวนการเชิงตัวเลขในการกำหนดการเสียรูปเริ่มต้น และกระบวนการวิเคราะห์การโก่งเดาะของแบบจำลองจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge model) (Massone และ Moroder ,2009)



ภาพที่ 2.33 แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลอง(Massone และ Moroder ,2009)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่พิจารณาผลกระทบจากการเสริมเหล็กปลอก

Papia และคณะ (1988) แบบจำลองในการวิเคราะห์การโก่งเดาะโดยพิจารณาผลจากเหล็กปลอก โดยแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 2.33 โดยปกติโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะอยู่ในช่วงระหว่างระยะของเหล็กปลอก แบบจำลองที่เสนอใช้ในการหาความยาวของเหล็กเสริมตามยาวที่เกี่ยวข้องกับการโก่งเดาะ แบบจำลองสร้างขึ้นเพื่อพิจารณาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้แรงอัด โดยพิจารณาตั้งแต่คอนกรีตหุ้มหลุดร่อนเป็นต้นไป โดยมีสมมุติฐานว่าความเครียดด้านข้างของแกนคคอนกรีตมีค่าคงที่ ผลจากแรงดันด้านข้างที่เกิดขึ้นกับเหล็กตามยาวจากการโอบรัดของคอนกรีตจะไม่นำมาพิจารณา เหล็กปลอกจะพิจารณาเป็นจุดรองรับด้านข้างเพียงอย่างเดียว(unilateral elastic supports) ผลที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ แสดงให้ทราบว่าการพังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดได้รับผลจากความไม่มีเสถียรภาพของเหล็กเสริมตามยาว



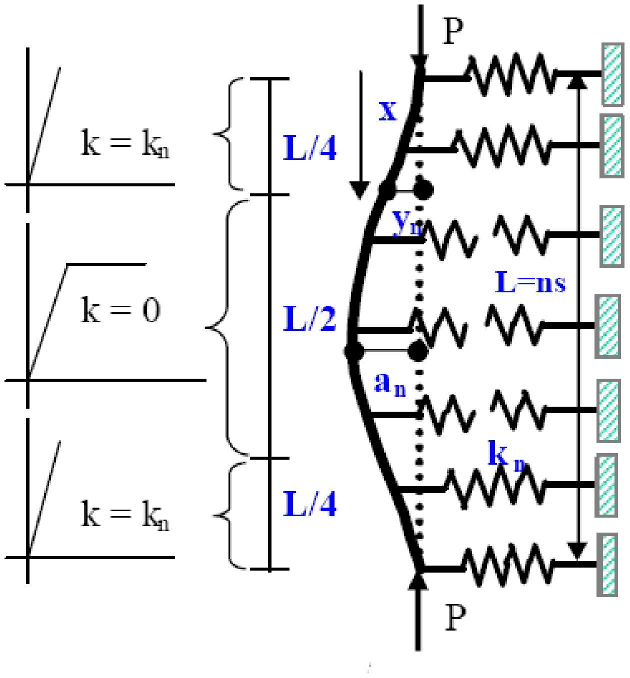
ภาพที่ 2.34 แบบจำลองในการวิเคราะห์ Papia และคณะ (1988)

	GEOMETRICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS							RESULTS						
	Longitudinal Reinforcement				Transverse Reinforcement			Experimental		Theoretical				
Specimen (1)	d (mm) (2)	f_y (MPa) (3)	E_h (MPa) (4)	E_r (MPa) (5)	d (mm) (6)	l (mm) (7)	E_h (MPa) (8)	ε_u (9)	P_s (kN) (10)	γ (11)	c_c (12)	L/l (13)	P_c (kN) (14)	$(\Delta P/P) \times 100$ (15)
(*a*) Confined Core: 267 mm × 267 mm (Sheikh and Uzumeri 1980)														
4C6-5	15.87	372	9,240	26,500	4.76	38.1	5,000	0.0183	94	0.44	0.22[a]	6	123	31
4A1-13	22.22	438	9,670	27,400	4.76	57.1	5,000	0.0130	187	0.38	0.20[a]	7	195	4
2A5-14	15.87	404	8,100	23,900	9.52	76.2	5,000	0.0210	106	15.8	1.16	2.6	147	38
2A6-15	15.87	404	8,100	23,900	6.35	35.0	5,000	0.0273	120	0.67	0.26[a]	6	157	31
2C6-18	12.70	414	8,970	25,900	4.76	38.1	5,000	0.0253	70	1.1	0.34	5	76	9
4B4-20	19.05	392	6,250	19,300	4.76	38.1	5,000	0.0250	143	0.29	0.18[a]	7	153	7
4B6-21	19.05	392	6,250	19,300	6.35	47.7	5,000	0.0223	141	1.0	0.33	5	176	25
4D6-24	19.05	392	6,250	19,300	6.35	38.1	5,000	0.0265	145	0.37	0.20[a]	7	169	17
(*b*) Confined Core: 400 mm × 400 mm (Scott et al. 1982)														
12	20	434	8,500	24,700	10	98	4,500	0.0167	157	6.1	0.82	3	163	4
13	20	434	8,500	24,700	10	72	4,500	0.0203	167	2.4	0.52	4	192	15
14	20	434	8,500	24,700	12	88	4,000	0.0289	180	5.6	0.80	3	197	10
15	20	434	8,500	24,700	12	64	4,000	0.0304	190	2.2	0.50	4	233	23
17	24	394	6,000	18,800	10	98	4,500	0.0214	220	5.4	0.79	3	248	13
18	24	394	6,000	18,800	10	72	4,500	0.0287	240	2.1	0.49	4	284	19
19	24	394	6,000	18,800	12	88	4,000	0.0359	250	5.0	0.76	3	296	18
20	24	394	6,000	18,800	12	64	4,000	0.0382	255	1.9	0.46	4	338	33

[a]Determined by analytical procedure.

ภาพที่ 2.35 แสดงผลการทดวิเคราะห์กับผลการทดสอบ Papia และคณะ (1988)

Dhakal และ Maekawa (2000) ได้เสนอกระบวนการคำนวณหาความยาวของการโก่งเดาะในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของโครงสร้าง เนื่องจากค่าความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวในการโก่งเดาะมาก งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เพื่อทำนายความยาวของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการยึดรั้งโดยเหล็กปลอกภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นจะพิจารณาคุณสมบัติทั้งสองอย่างคือ คุณสมบัติทางเรขาคณิตและคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอก สติฟเนสของเหล็กปลอกที่ต้องการจะคำนวณจากหลักการพลังงานและนำไปเปรียบเทียบกับสติฟเนสของเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นจริงเพื่อใช้หารูปแบบเสถียรภาพการโก่งเดาะ ในการวิเคราะห์แบบจำลองมีสมมุติฐานดังนี้ เหล็กเสริมตามยาวถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนรับแรงดัด โดยแบบจำลองเหล็กปลอกรัดรอบมีลักษณะเป็นสปริงเชิงเส้น โดยสปริงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกความเค้นจะถึงจุดคราก และเมื่อเลยจุดครากสติฟเนสของสปริงจะเข้าใกล้ศูนย์ ดังแสดงแบบจำลองโดยภาพที่ 2.36 โดยแบบจำลองนี้พิจารณาหลังจากการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้ม



รูปที่ 2.36 แสดงแบบจำลองในการหาความยาวของการโก่งเดาะ (Dhakal และ Maekawa, 2000)

รูปร่างการเสียรูปของเหล็กเสริมตามยาวถูกแทนที่โดยฟังก์ชันโคไซน์ ดังสมการที่ 13

$$y = \frac{a}{2}\left(1 - \cos\frac{2\pi x}{ns}\right) \qquad (13)$$

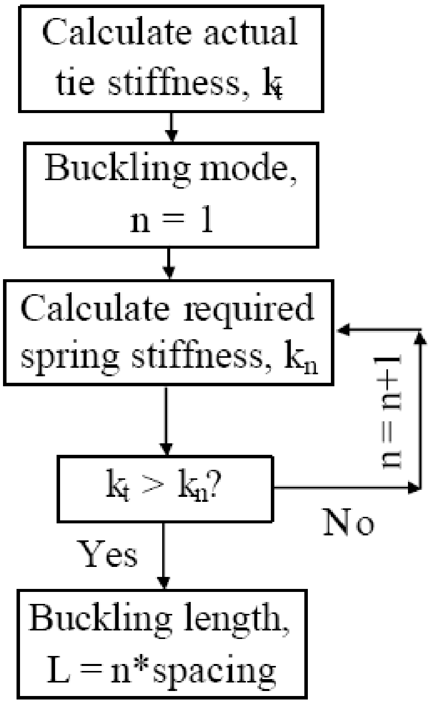
โดยที่

y คือ ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระยะ x

a คือ การเสียรูปทางด้านข้างสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกลางของระยะที่เกิดการโก่งเดาะ

ns=L คือ ความยาวของการโก่งเดาะ

โดยขอบเขตเงื่อนไขของสมการที่สอดคล้องกับแบบจำลองคือ ที่ปลายทั้งสองข้างการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและความชันเท่ากับ 0 (ที่ระยะ X=0 และ X=L) การเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดและความชันเท่ากับ 0 (ที่ระยะ X=L/2)



ภาพที่ 2.37 แสดงกระบวนการคำนวณหาความยาวของการโก่งเดาะ(Dhakal และ Maekawa, 2000)

กระบวนการการคำนวณระยะการโงเดาะแสดงโดยรูป 2.35 โดยขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาสติฟเนสที่เกิดขึ้นจริงของเหล็กปลอก ของแต่ช่วงของการเสริมเหล็กปลอก
2. หาค่าต่ำสุดของสติฟเนสของสปริงที่ต้องการเพื่อคงรูปของเหล็กเสริมตามยาวที่เกิดการโก่งเดาะในรูปแบบต่างๆโดยใช้หลักการพลังงาน โดยเริ่มจากการโก่งเดาะรูปแบบที่ 1 (n = 1)
3. ทำการเปรียบเทียบสติฟเนสที่เกิดขึ้นจริงของเหล็กปลอกกับสติฟเนสของสปริง
4. เพื่อจะตรวจสอบความเสถียรภาพของเหล็กเสริมที่รูปแบบการโก่งเดาะนั้นๆ รูปแบบการโก่งเดาะที่เสถียรที่สุดคือรูปแบบที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (n น้อยที่สุด) ที่ซึ่งค่าสติฟเนสของสปริง ที่ต้องการน้อยกว่าสติฟเนสที่เกิดขึ้นจริงของเหล็กปลอกผลที่ได้
5. ระยะของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่ได้เป็นผลจากจำนวนรูปแบบของการโก่งเดาะคูณกับระยะห่างของเหล็กปลอก

วิธีการดังกล่าวนี้ไม่สามารถใช้ในการคำนวณระยะของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก ในกรณีนี้ระยะของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวขึ้นอยู่กับความต้านทานของคอนกรีตหุ้มเท่านั้น และเป็นการยากในการคำนวณช่วงยาวของการโก่ง การเปลี่ยนช่วงความยาวของการโก่งเดาะไม่มีผลกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของเหล็กเสริมรับแรงอัดมาก ถ้าอัตราของส่วนช่วงยาวของการโก่งเดาะต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวมีค่ามาก(L/d มีค่ามาก)

ในการคำนวณหาสติฟเนสประสิทธิผลของเหล็กปลอกนั้นต้องประเมินกำลังและการจัดเรียงของเหล็กปลอก เพื่อให้สอดคล้องกับสติฟเนสของสปริงที่ต้องการ โดยการโก่งเดาะของเหล็กเสริมความยาวจะทำให้เกิดแรงดึงในแนวแกนภายในของขาเหล็กปลอก ดังนั้นความต้านทานการขยายออกด้านข้างจะถูกควบคุมโดยสติสเนสทางแนวแกนของเหล็กปลอกเป็นหลัก โดยสติสเนสของเหล็กปลอกแสดงโดยสมการที่ 14

$$k_t = \frac{E_t A_t}{b}\frac{n_l}{n_b} \qquad (14)$$

โดยที่ E_t คือ อิลาสติกโมดูลัสของเหล็กปลอก

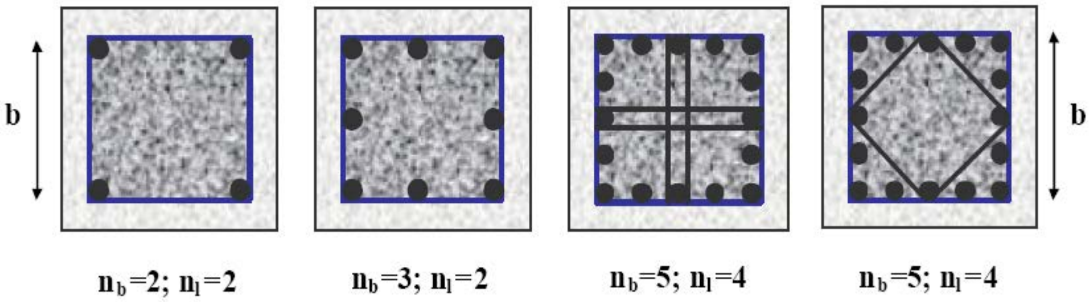
A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก

b คือ ความยาวของเหล็กปลอก

n_l คือ จำนวนขาของเหล็กปลอก

n_b คือ จำนวนเหล็กเสริมตามยาว

ค่าของ n_l และ n_b สามารถหาค่าหาได้ แสดงดังรูป 2.33



ภาพที่ 2.38 แสดงตัวอย่าง ค่าของ n_l และ n_b สำหรับรูปแบบการเสริมเหล็กทั่วไป

(Dhakal และ Maekawa, 2000)

Dhakal(2005) ได้เสนอวิธีการออกแบบเหล็กปลอกเพื่อป้องกันการการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยอ้างอิงงานวิจัยในอดีต Bresler และ Gilbert 1961, Dhakal และ Maekawa 2000 ในการวิเคราะห์หาสติฟเนสของเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นจริง โดยอ้างอิงสมการที่ 15 ปรับปรุงเป็นสมการที่ 17

$$k_t \geq 0.75\frac{\pi^4 EI}{s^3} \qquad (15)$$

โดย $$EI = \frac{E_s I}{4}\sqrt{\frac{f_y}{100}} \qquad (16)$$

แทนค่า EI ในสมการ(15) แทนในสมการ(16) จะได้

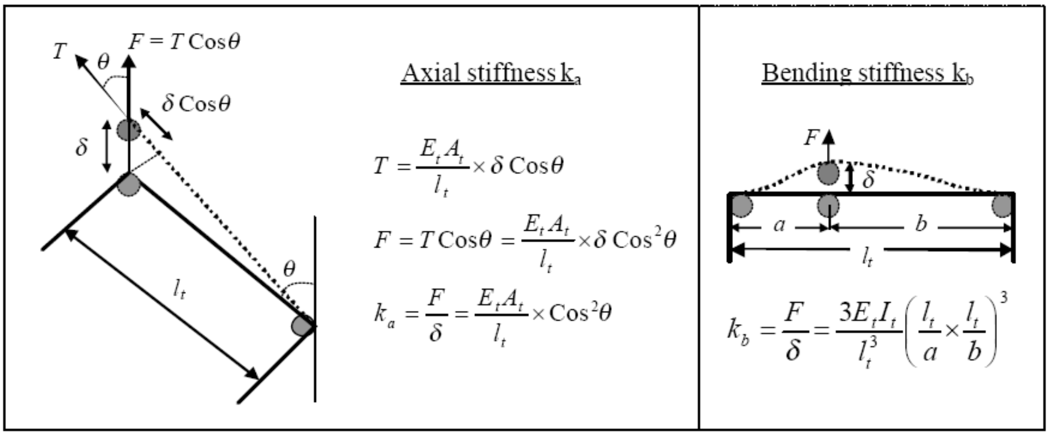
$$k_t = 0.18\frac{E_s I}{s^3}\sqrt{\frac{f_y}{100}} \qquad (17)$$

โดยที่ E_s คือ อิลาสติกโมดูลัส

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเสริมตามขวาง

s คือ ระยะระหว่างเหล็กปลอก

โดยสติฟเนสของเหล็กปลอกนั้นแบ่งการพิจารณาเป็นสติฟเนสในแนวแกนและสติฟเนสในการดัด ของเหล็กปลอก เนื่องจากตำแหน่งในการเสริมเหล็กตามยาว เมื่อเกิดการโก่งเดาะจะเกิดแรงกระทำต่อเหล็กปลอกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง แสดงโดยภาพที่ 2.38



ภาพที่ 2.39 แสดงสติฟเนสของเหล็กปลอกที่ต้านการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

แบ่งเป็นสติฟเนสในแนวแกนและสติฟเนสในการดัด (Dhakal 2005)

สติฟเนสการดัดของเหล็กปลอก สามารถคำนวณจากสมการที่ 18

$$k_b = \frac{3E_t I_t}{l_t^3}\left(\frac{l_t}{a} \times \frac{l_t}{b}\right)^3 \qquad (18)$$

โดยที่ E_t คือ อิลาสติกโมดูลัสของเหล็กปลอก

I_t คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กปลอก

l_t คือ ความยาวของเหล็กปลอก

a, b คือ ระยะภายในระหว่างเสริมตามยาว

สติฟเนสในแนวแกนของเหล็กปลอก สามารถคำนวณจากสมการที่19

$$k_a = \frac{E_t A_t}{l_t} \cos^2 \theta \times \frac{n_l}{n_b} \qquad (19)$$

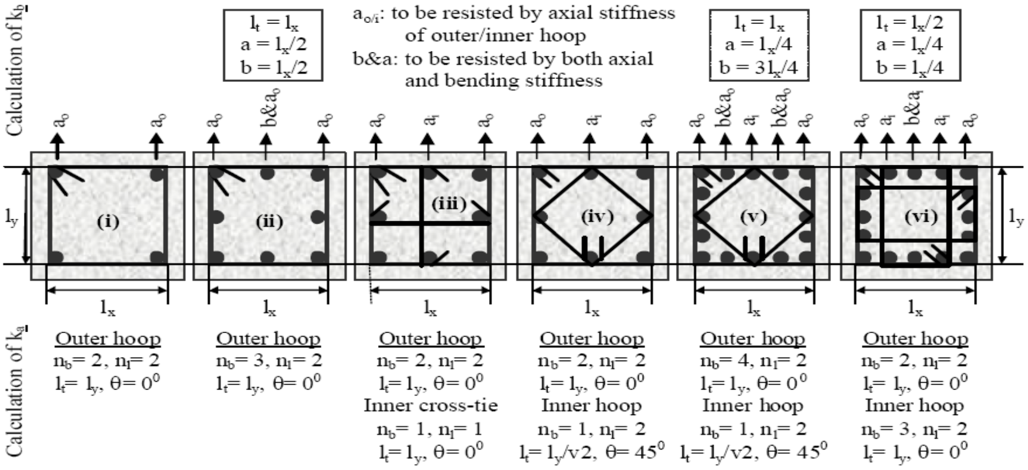
โดยที่ E_t คือ อิลาสติกโมดูลัสของเหล็กปลอก

l_t คือ ความยาวของเหล็กปลอก

A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก

n_l คือ จำนวนขาของเหล็กปลอก

n_b คือ จำนวนเหล็กเสริมตามยาว



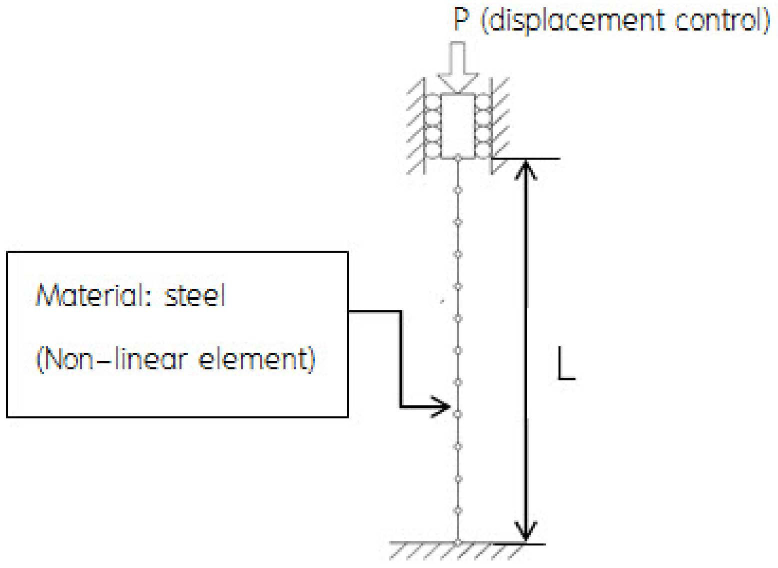
ภาพที่ 2.40 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าต่างๆ ของการเสริมเหล็กรูปแบบต่างๆ(Dhakal 2005)

บทที่ 3
แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกน
โดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง

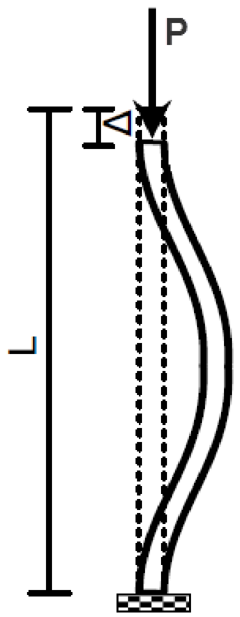
ในอดีตที่ผ่านมาการวิเคราะห์โดยแบบจำลองนั้น จะพิจารณาพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด ภายใต้สมมุติฐานว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัดมีพฤติกรรมเหมือนเหล็กเสริมรับแรงดึงแต่มีทิศทางตรงกันข้าม โดยไม่พิจารณาผลอันเนื่องมาจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ซึ่งในความเป็นจริงนั้นผลจากการโก่งเดาะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำนายพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดให้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น ในบทนี้จะศึกษาการสร้างแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์โดยใช้โปรแกรม OpenSees ซึ่งมีการคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ และความไม่เป็นเชิงเส้นทางเรขาคณิตด้วยวิธีโคโรเทชั่น (Co-rotation)

แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน

การหาโครงสร้างของแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต้องสอดคล้องกับปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองที่เหมาะสมนี้จะต้องไม่ก่อให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแบบจำลอง หรือมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่สามารถยอมได้แต่เพียงพอที่จะสามารถใช้แก้ปัญหาที่ต้องการได้ ดังนั้นก่อนที่จะได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมีความแม่นยำจะต้องมีการทดสอบผลของพารามิเตอร์ต่างๆก่อนเพื่อให้ได้แบบจำลองที่สอดคล้องและเหมาะสม



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง



ภาพที่ 3.2 ภาพแสดงลักษณะการหาค่าหน่วยแรงและความเครียด

หน่วยแรงและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์หาได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (20)$$

โดยที่

σ คือหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่างๆ

P คือแรงที่กระทำต่อแบบจำลอง ณ ช่วงเวลาต่างๆ

A คือผลรวมของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นไฟเบอร์ทั้งหมดในหน้าตัดนั้นๆ

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L} \qquad (21)$$

โดยที่

ε คือความเครียดที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่างๆ

Δ คือการเสียรูปทงแนวแกนของแบบจำลอง ณ ช่วงเวลาต่างๆ

L คือความยาวก่อนการเสียรูปของแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดโดยเส้นกราฟแทนจำนวนขอมูลทั้งหมด สัญลักษณ์บนเส้นกราฟแทนข้อมูลบางจุดเท่านั้น

3.1 การแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลอง

การแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการวิเคราะห์อย่างมาก นั่นคือการกำหนดรูปร่างของแบบจำลองและลักษณะชิ้นส่วนของแบบจำลอง โดยการแบ่งชิ้นส่วนนั้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของแบบจำลองและการแบ่งชิ้นส่วนตามขวางหรือตามหน้าตัดของแบบจำลอง

3.1.1 การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของแบบจำลอง

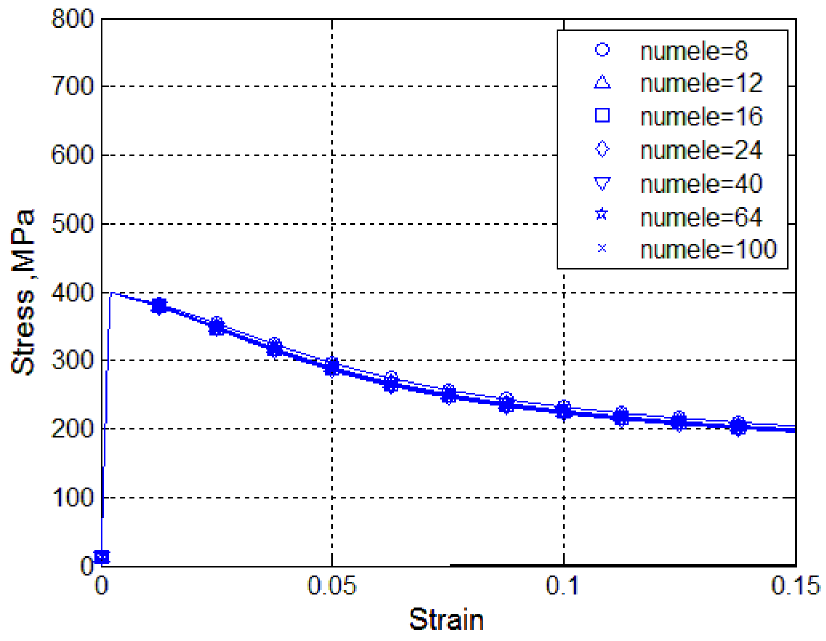
การแบ่งชิ้นส่วนตามยาวของแบบจำลอง คือ การแบ่งชิ้นส่วน (element) จากการสร้างชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างจุดต่อ (node) 2 จุด การศึกษาในหัวข้อนี้จะหาจำนวนชิ้นที่เหมาะสมเพียงพอที่จะสามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่ต้องการได้ โดยใช้พิจารณาผลของตัวแปรต่างๆ ค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) การเยื้องศูนย์เริ่มต้น(e/D) ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(D) และผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy)

3.1.1.1 ผลของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D)

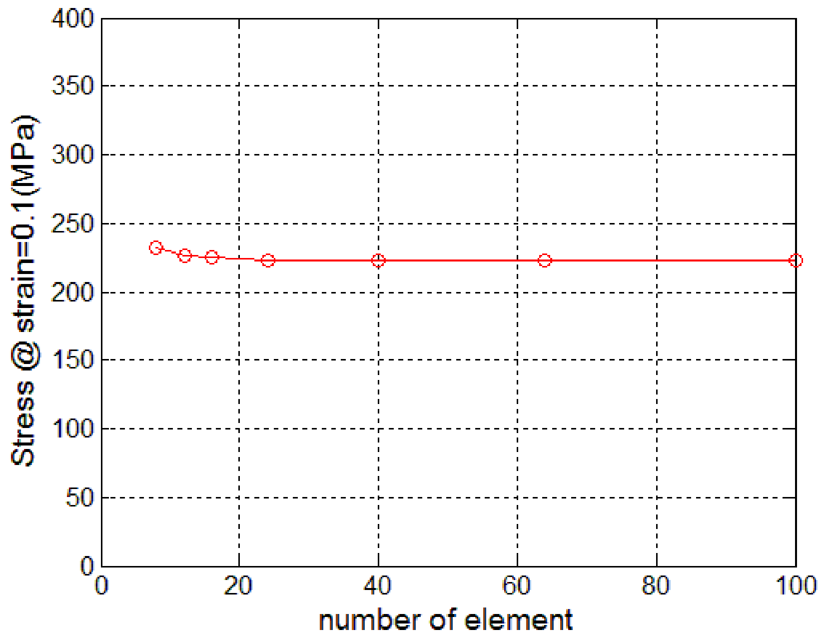
ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลต่ออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) โดยแสดงรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลต่ออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D)

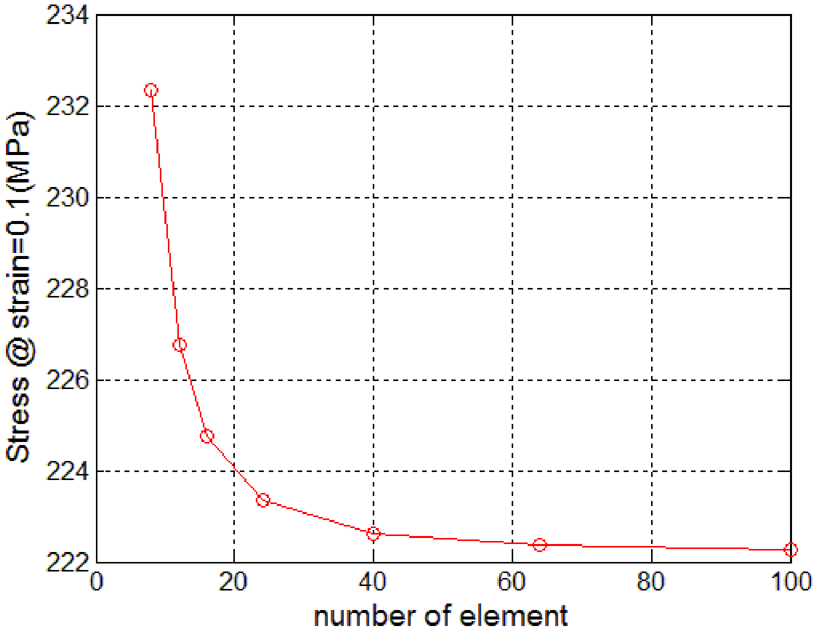
No.	Fy	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	e/D	L/D	จำนวนอิลิเมนต์
1	400	20	0.001	8	8
2					12
3					16
4					24
5					40
6					64
7					100
8				5	8
9					12
10					16
11					24
12					40
13					64
14					100



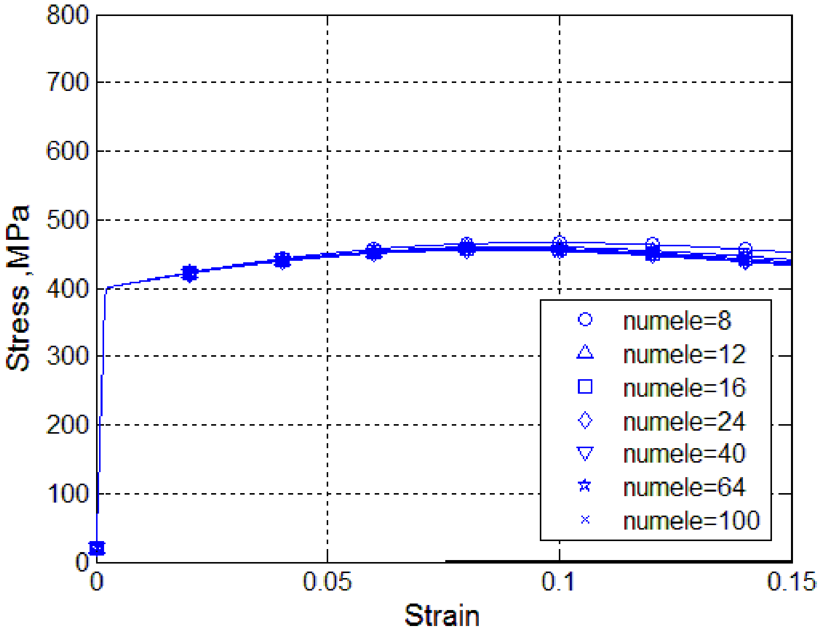
ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8



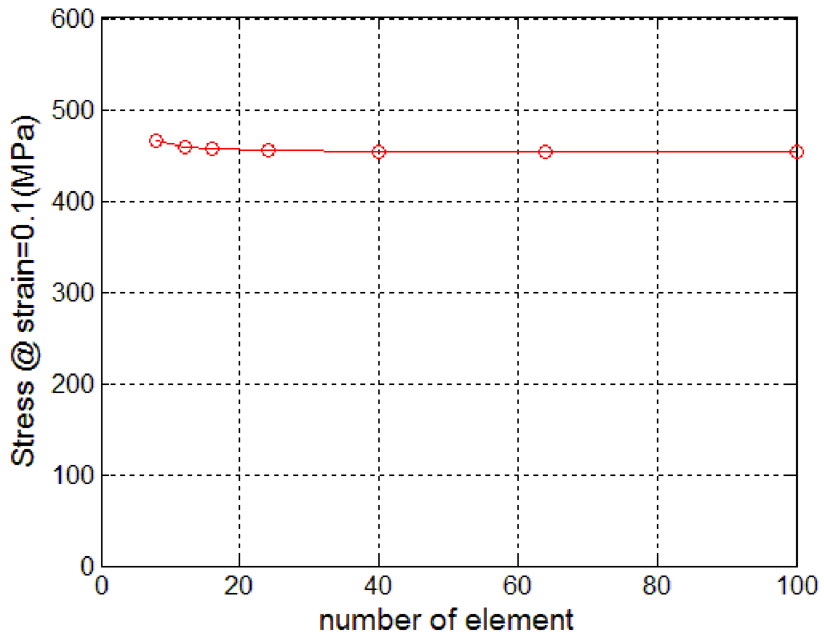
ภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8



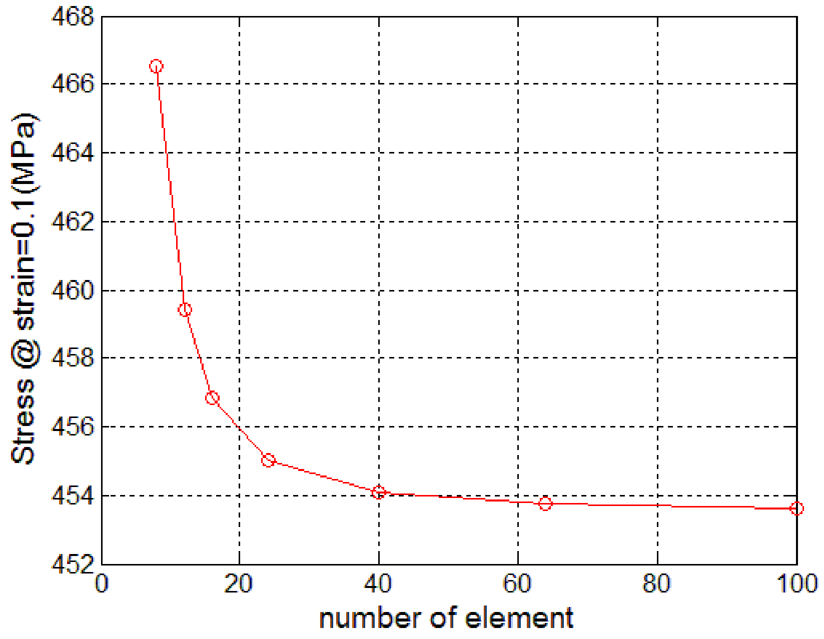
ภาพที่ 3.5 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8



ภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=5



ภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 5



ภาพที่ 3.8 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 5

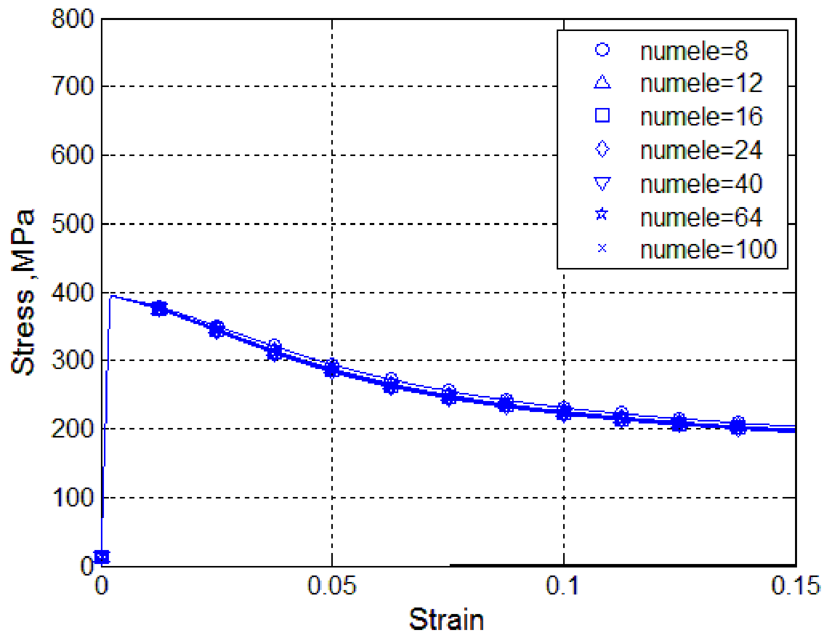
ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้างโดยใช้จำนวนอิลิเมนต์ต่างๆกันที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 5 และ 8 เพื่อหาจำนวนอิลิเมนต์ที่เหมาะสมได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.3 ถึง 3.8 จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของแต่ละจำนวนชิ้นอิลิเมนต์นั้น ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งที่อัตราส่วนความยาวเหล็กเสริมยืนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม เท่ากับ 5 และ 8 ดังนั้นจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงเลือกใช้จำนวนอิลิเมนต์อยู่ในช่วง 48-60 อิลิเมนต์ซึ่งเพียงพอที่ใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นต่อไปและเพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนาแบบจำลองเป็นที่มีค้ำยันทางด้านข้างมากกว่า 1 ช่วง

3.1.1.2 ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)

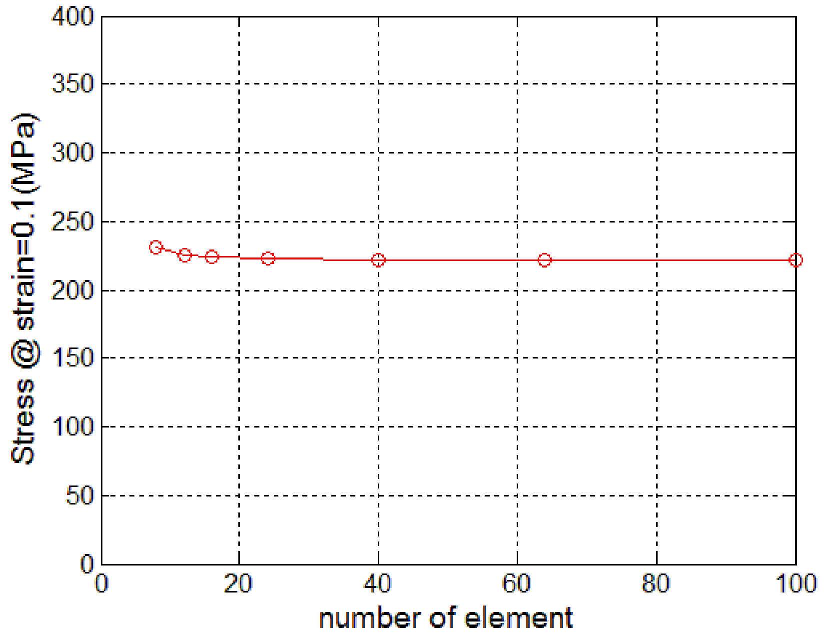
ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลต่อการเยื้องศูนย์เริ่มต้น(e/D) โดยแสดงรายละเอียดในนการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลต่อการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)

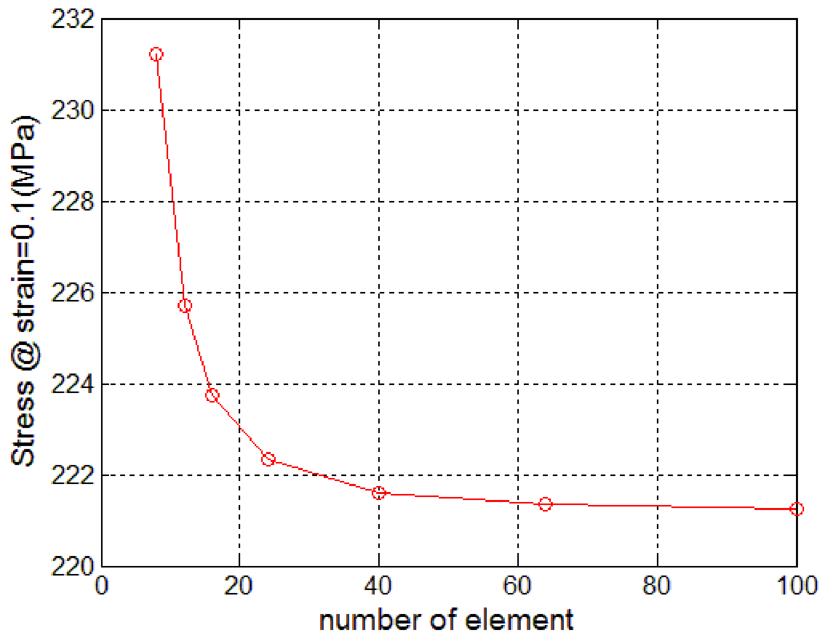
No.	Fy	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	L/D	e/D	จำนวนอิลิเมนต์
1	400	20	8	0.01	8
2					12
3					16
4					24
5					40
6					64
7					100
8				0.001	8
9					12
10					16
11					24
12					40
13					64
14					100
15				0.0001	8
16					12
17					16
18					24
19					40
20					64
21					100



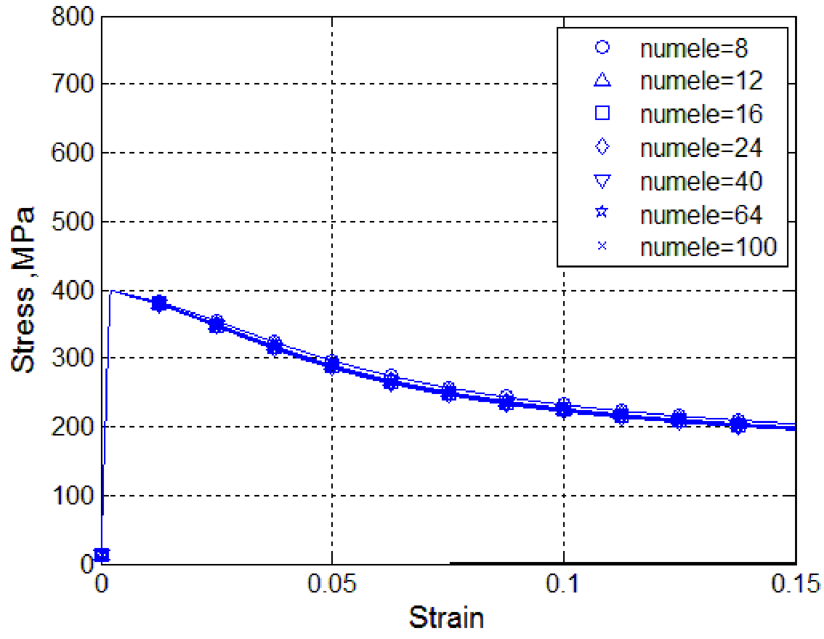
ภาพที่ 3.9 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ e/D= 0.01



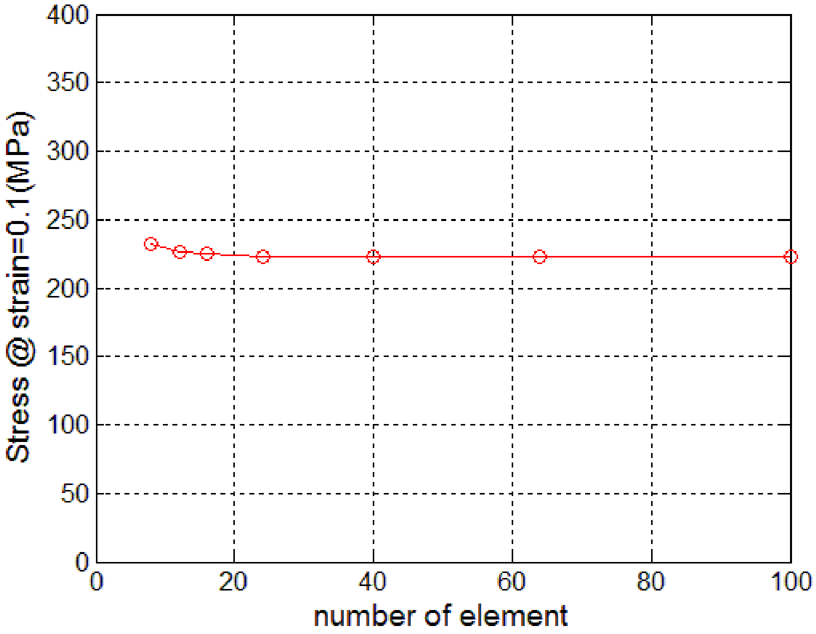
ภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.01



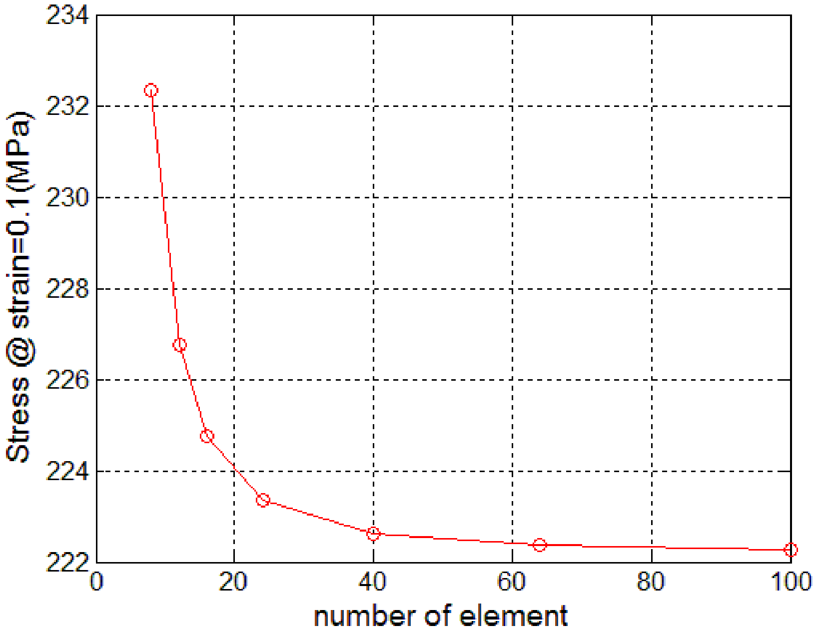
ภาพที่ 3.11 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.01



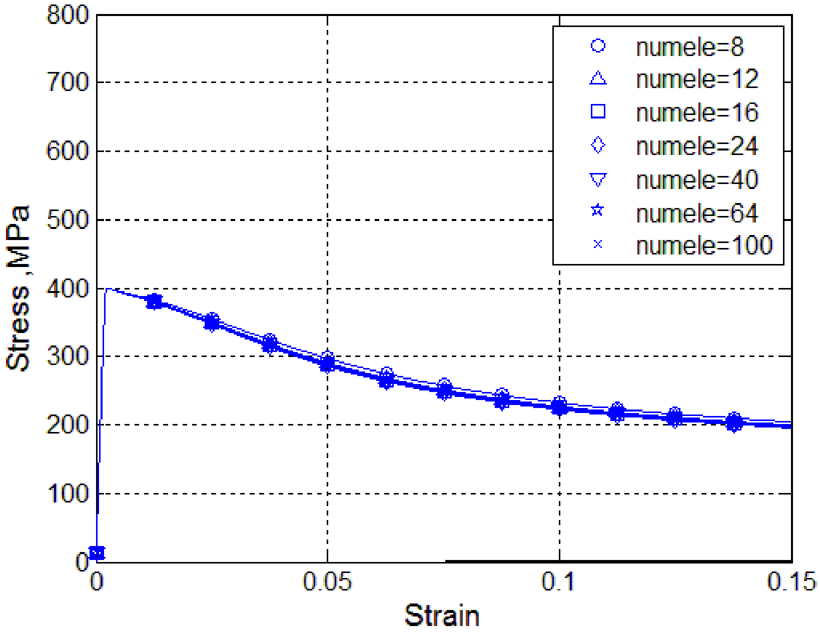
ภาพที่ 3.12 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ e/D= 0.001



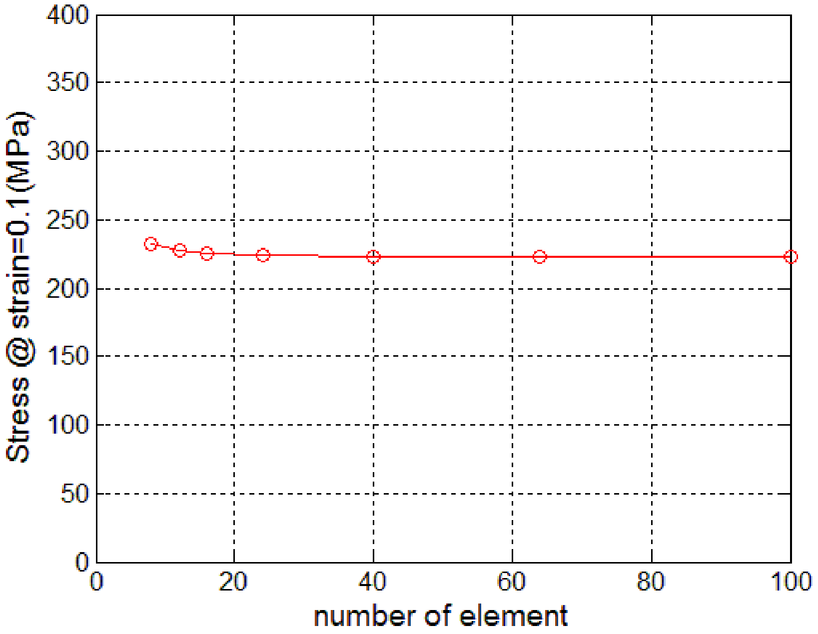
ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.001



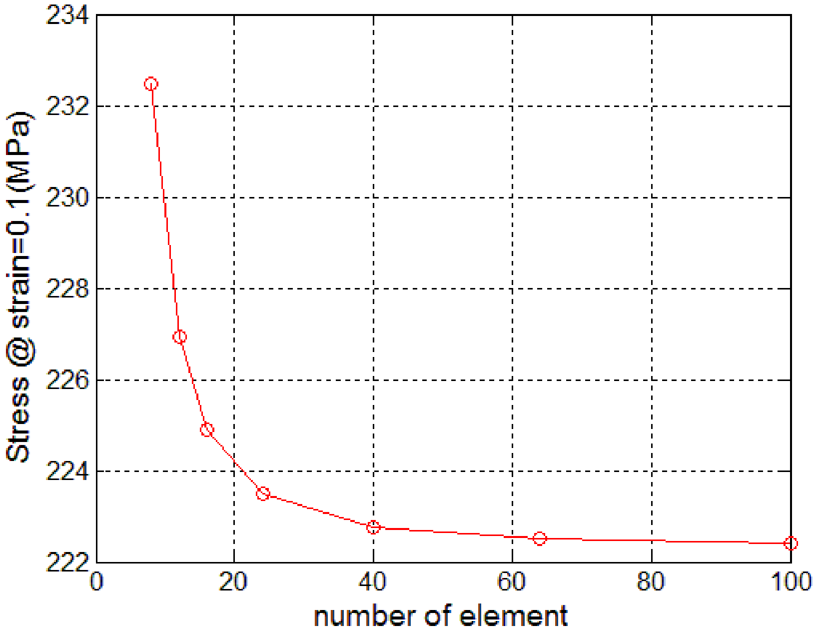
ภาพที่ 3.14 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.001



ภาพที่ 3.15 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ e/D= 0.0001



ภาพที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.0001



ภาพที่ 3.17 ภาพขยายช่วงความสัมพันธ์ของจำนวนอิลิเมนต์ต่อค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ e/D= 0.0001

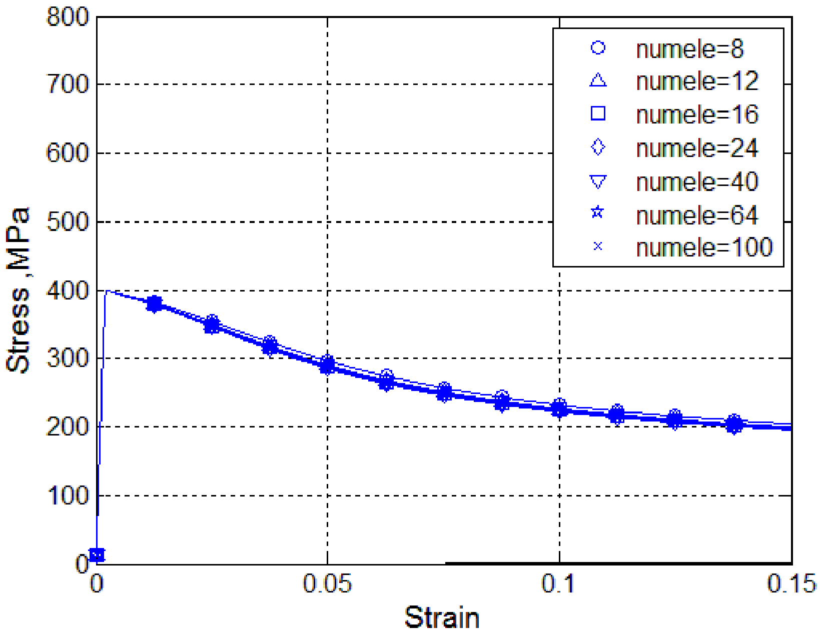
ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้างโดยใช้จำนวนอิลิเมนต์ต่างๆกันที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D) เท่ากับ 8 ที่อัตราส่วนการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)เท่ากับ 0.01 0.001 และ 0.0001 เพื่อหาจำนวนอิลิเมนต์ที่เหมาะสมได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.9 ถึง 3.17 จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของแต่ละจำนวนชิ้นอิลิเมนต์ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ต่อจำนวนอิลิเมนต์ต่างๆกันนั้นไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจน

3.1.1.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)

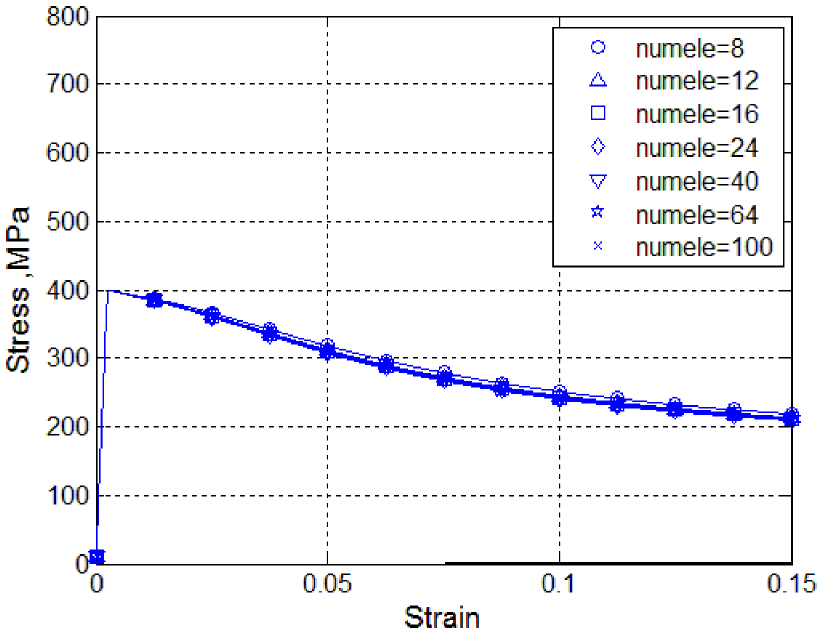
ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) โดยแสดงรายละเอียดในนการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)

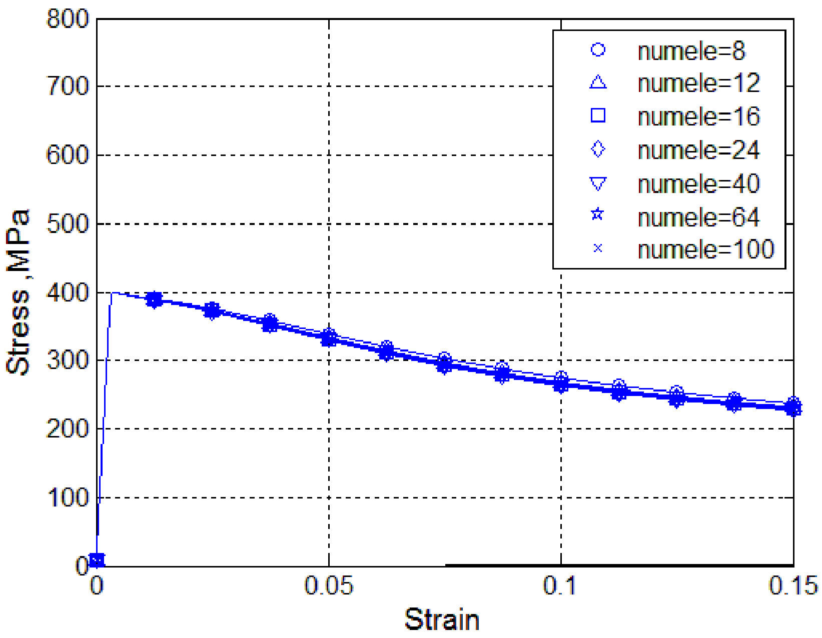
No.	Fy	L/D	e/D	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	จำนวนอิลิเมนต์
1	400	8	0.001	20	8
2					12
3					16
4					24
5					40
6					64
7					100
8				25	8
9					12
10					16
11					24
12					40
13					64
14					100
15				32	8
16					12
17					16
18					24
19					40
20					64
21					100



ภาพที่ 3.18 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ D=20 mm



ภาพที่ 3.19 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ D=25 mm



ภาพที่ 3.20 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ D=32 mm

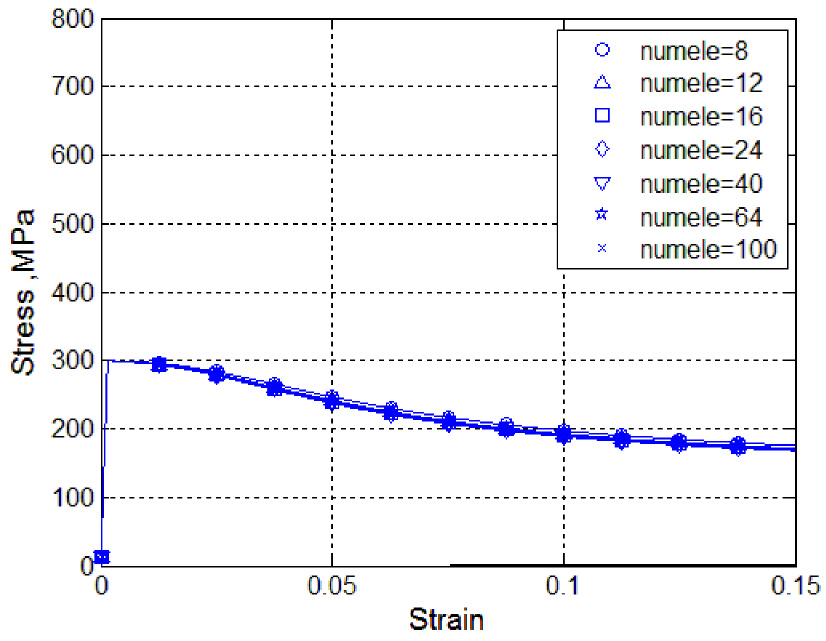
จากภาพที่ 3.18-3.20 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของเหล็กเสริมในแบบจำลองนั้นไม่แสดงผลต่อจำนวนอิลิเมนต์อย่างชัดเจน

3.1.1.4 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy)

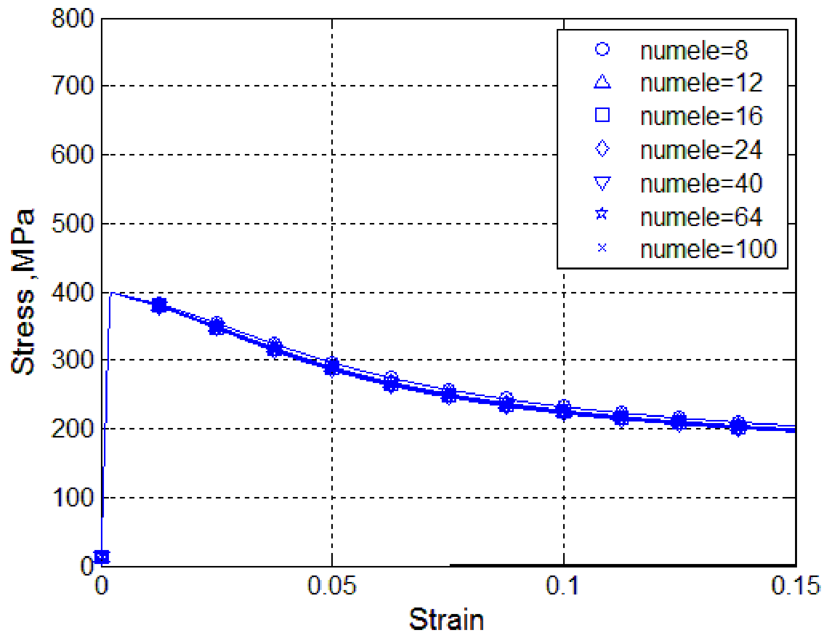
ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy) โดยแสดงรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของจำนวนอิลิเมนต์ที่มีผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy)

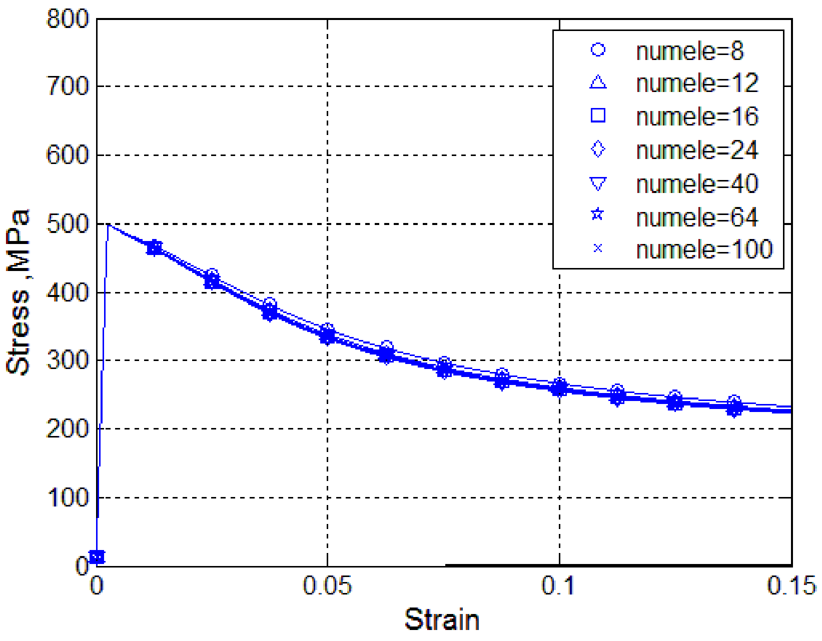
No.	เส้นผ่านศูนย์กลาง(มม.)	L/D	e/D	Fy	จำนวนอิลิเมนต์
1					8
2					12
3					16
4				300	24
5					40
6					64
7					100
8					8
9					12
10					16
11				400	24
12					40
13					64
14	20	8	0.001		100
15					8
16					12
17					16
18				500	24
19					40
20					64
21					100
22					8
23					12
24					16
25				600	24
26					40
27					64
28					100



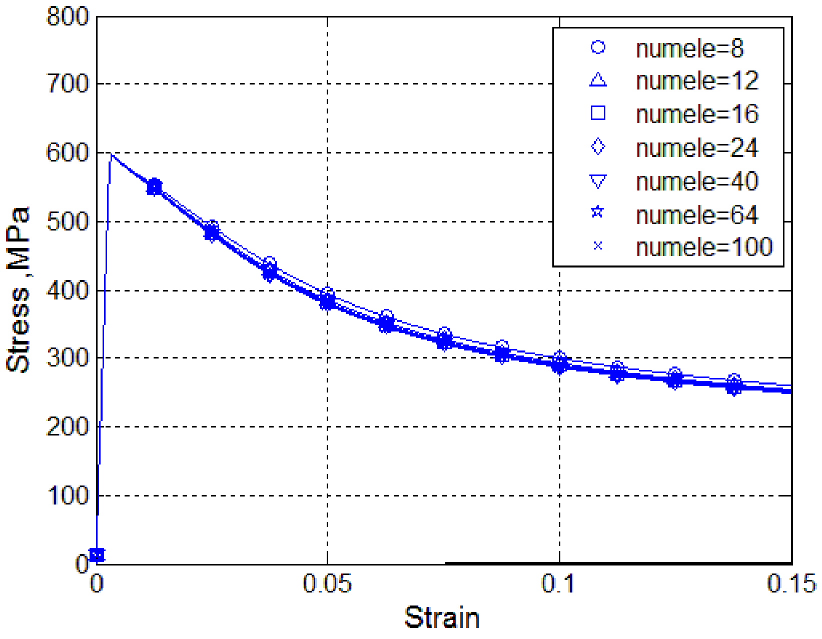
ภาพที่ 3.21 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=300 MPa



ภาพที่ 3.22 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=400 MPa



ภาพที่ 3.23 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=500 MPa



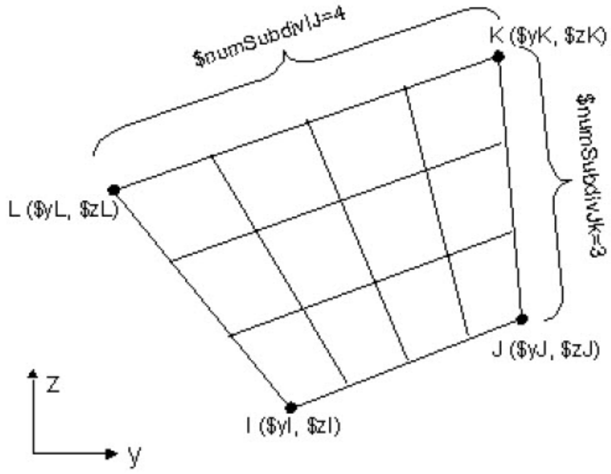
ภาพที่ 3.24 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการแบ่งอิลิเมนต์ที่อัตราส่วน L/D=8 ที่ Fy=600 MPa

จากภาพที่ 3.21-3.24 ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy)ของเหล็กเสริมในแบบจำลองนั้นไม่แสดงผลต่อจำนวนอิลิเมนต์อย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้างโดยใช้จำนวนอิลิเมนต์ต่างๆกัน เพื่อหาจำนวนอิลิเมนต์ที่เหมาะสมนั้น จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง-ความเครียดของแต่ละจำนวนชิ้นอิลิเมนต์ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันโดยผลที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนอิลิเมนต์ยิ่งมีการแบ่งจำนวนอิลิเมนต์มาก ค่าที่ได้จะลู่เข้ามากกว่าดังนั้นจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงเลือกใช้จำนวนอิลิเมนต์อยู่ในช่วง 60 อิลิเมนต์ เนื่องจากเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดและเพียงพอต่อการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปและเพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนาแบบจำลองเป็นที่มีค้ำยันทางด้านข้างมากกว่า 1 ช่วง

3.1.2 การแบ่งชิ้นส่วนตามขวางหรือตามหน้าตัดของแบบจำลอง

การแบ่งหน้าตัดชิ้นส่วนเป็นการแบ่งแบบชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม(Quadrilateral Patch) โดยหน้าตัดแบบชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม ต้องกำหนดค่าพิกัดที่จุดมุมทั้งสี่ของสี่เหลี่ยม(i,j,k,l) โดยให้ลำดับของพิกัดทวนเข็มนาฬิกา และกำหนดจำนวนชิ้นส่วนย่อยตามแนวi,j (number of subdivisions(fibers) in the IJ direction) และแนว j,k (number of subdivisions(fibers) in the JK direction) ดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ลักษณะการแบ่งชิ้นส่วนตามหน้าตัดของแบบจำลอง

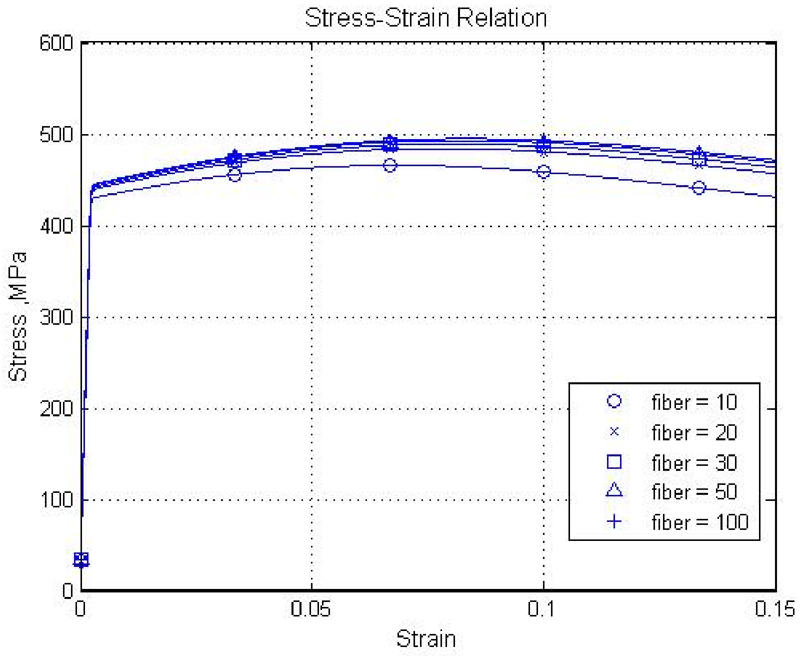
ศึกษาการแบ่งจำนวนชิ้นส่วนที่เหมาะสม โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาจากค่าความถูกต้องของคุณสมบัติหน้าตัด ซึ่งได้แก่พื้นที่หน้าตัดและโมเมนต์เฉื่อย(Moment of inertia)ของหน้าตัด และส่วนที่ 2 ศึกษาผลการแบ่งหน้าตัดที่มีผลต่อค่าหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน โดยใช้คุณสมต่างๆของแบบจำลองดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามขวางหรือตามหน้าตัดและผลการวิเคราะห์

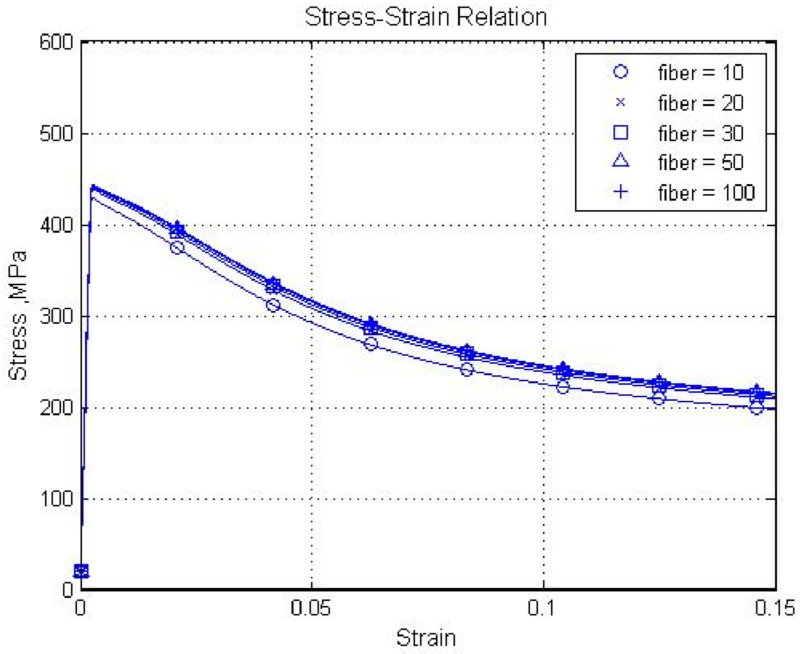
No.	Number of Fiber	Calculate Area (mm^2)	Calculate Moment of inertia (mm^4)	Area from OpenSees (mm^2)	Moment of inertia from OpenSees (mm^4)	Error of area %	Error of inertia %
1	10	490.8738	19174.76	474.5388	17248.8866	3.3277	10.0437
2	20	490.8738	19174.76	485.0809	18418.7628	1.1801	3.9426
3	30	490.8738	19174.76	488.8226	18890.0662	0.4178	1.4847
4	50	490.8738	19174.76	489.7567	19015.8226	0.2275	0.8288
5	100	490.8738	19174.76	490.3544	19099.1120	0.1058	0.3945

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการแบ่งชิ้นส่วนตามขวางหรือตามหน้าตัด

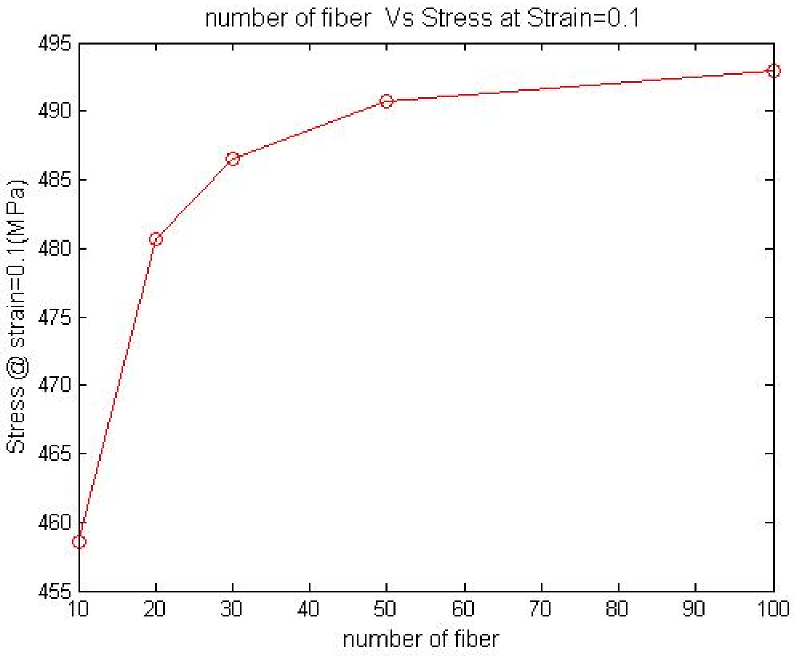
No.	number of elements ,Numele	Number of fiber	unsupported length-to-bar diameter, L/d
1	60	10	5
2	60	20	5
3	60	30	5
4	60	50	5
5	60	100	5
6	60	10	8
7	60	20	8
8	60	30	8
9	60	50	8
10	60	100	8



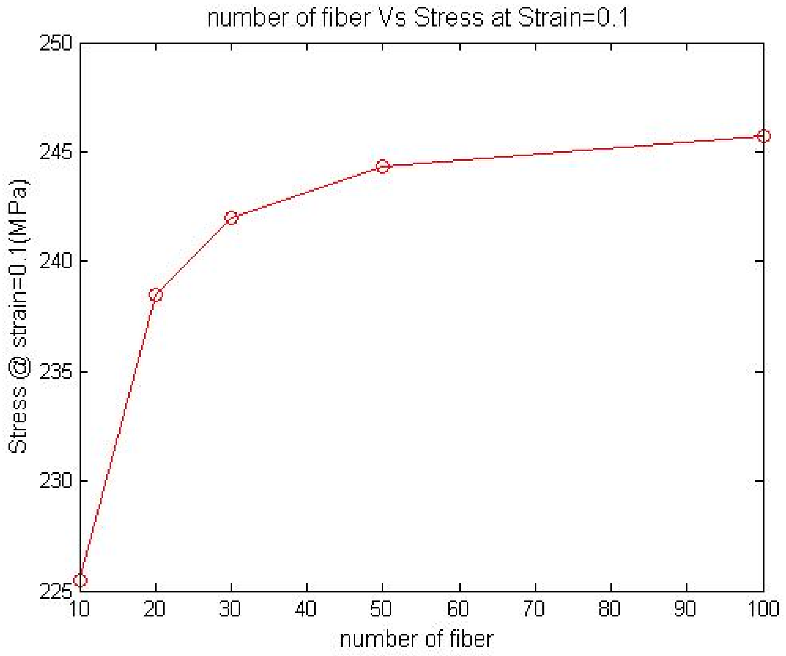
ภาพที่ 3.26 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากจำนวนไฟเบอร์ L/D =5



ภาพที่ 3.27 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากจำนวนไฟเบอร์ L/D =8



ภาพที่ 3.28 ความสัมพันธ์ของจำนวนไฟเบอร์ค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D =5

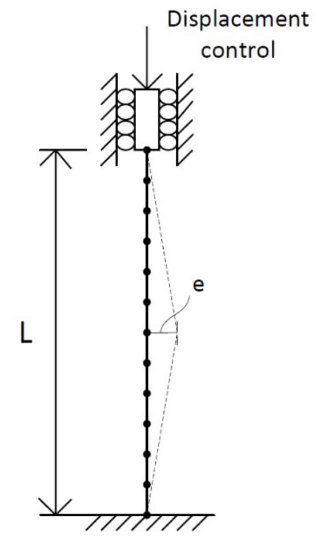


ภาพที่ 3.29 ความสัมพันธ์ของจำนวนไฟเบอร์ค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D =8

จากภาพที่ 3.26 และ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงละความเครียดมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับแบบจำลองที่มีการแบ่งจำนวนหน้าตัดตั้งแต่ 20 ขึ้นไป ภาพที่ 3.28 และ 3.29 แสดงค่าหน่วยแรงเมื่อความเครียดเท่ากับ 0.1 ในกรณีที่มีการแบ่งหน้าตัดจำนวนแตกต่างกัน สังเกตเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของหน่วยแรงในแต่ละกรณีมีค่าน้อยลงเมื่อมีการแบ่งหน้าตัดที่มากขึ้น และควรเลือกใช้การแบ่งหน้าตัดจำนวน 40 ชิ้นขึ้นไป สำหรับการทำแบบจำลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าจำนวนไฟเบอร์ 40 ชิ้นในการวิเคราะห์เป็นหลัก เนื่องจากให้ความคลาดเคลื่อนน้อยและเพียงพอในการแก้ปัญหา

3.2 การเยื้องศูนย์เริ่มต้น (initial imperfection , e/D)

การเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม (initial imperfection , e/D) คือ ค่าการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้นของเหล็กเสริมเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (e/D ratio) โดยมีผลโดยตรงกับความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเหล็กเสริม เนื่องจากค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้นส่งผลให้แบบจำลองเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ และเพื่อให้แบบจำลองแสดงผลของการโก่งเดาะ Massone และ Moroder (2009) ได้แนะนำให้ใส่การเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม (initial imperfection , e/D)ประมาณ e/D=0.01 โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองเหล็กรับแรงอัดที่ใช้การแบ่งชิ้นส่วนไฟเบอร์แบบสี่เหลี่ยมจำนวน 40 ชิ้น และจำนวนชิ้นส่วนตามยาว 60 ชิ้นโดยศึกษาค่า e/D ที่มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001และ 0.00001 โดยทดสอบที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ต่างๆ ลักษณะการเยื้องศูนย์เริ่มต้นจะกำหนดมีการเสียรูปที่กึ่งกลางของแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.30 ในการวิเคราะห์ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมจะพิจารผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม เช่น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง กำลังที่จุดคราก



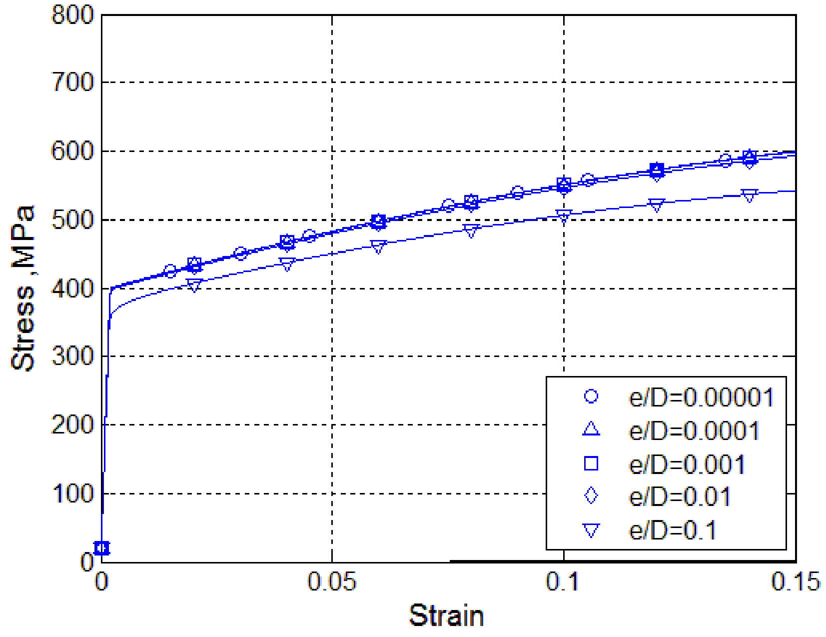
ภาพที่ 3.30 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้าง พิจารณาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น

3.2.1 ผลของอัตราส่วนความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ต่างๆ

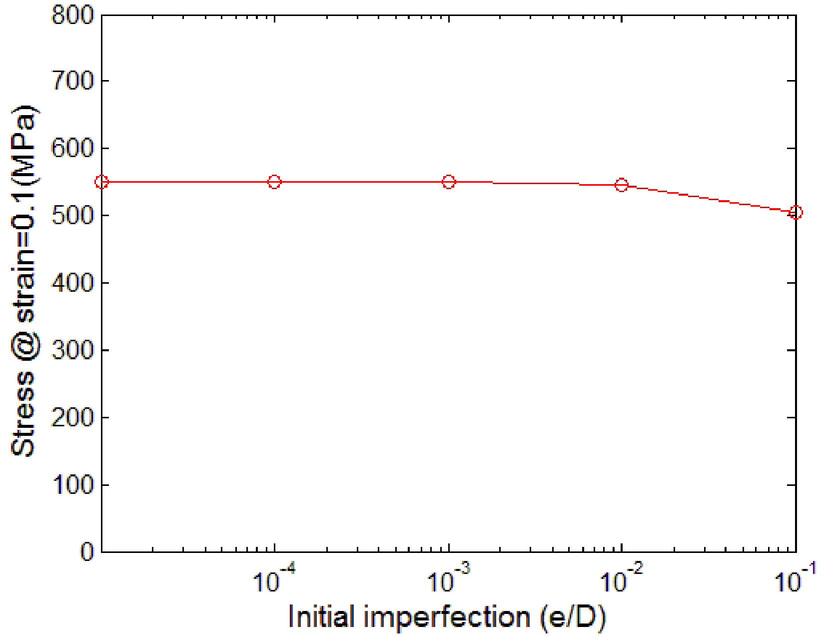
โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาค่าความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริมที่มีผลของอัตราส่วนความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) รายละเอียดดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ต่ออัตราส่วนความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D)

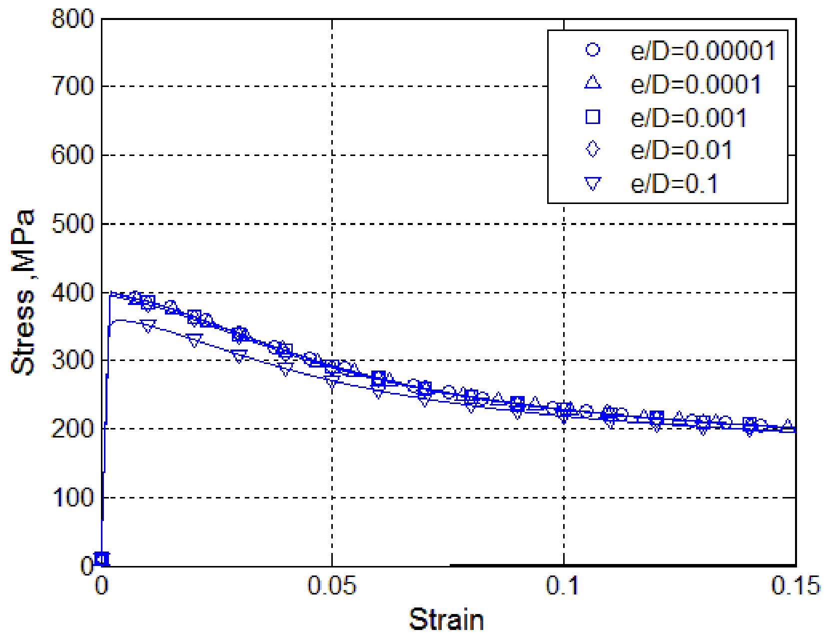
No	Fy (MPa)	b	diameter (mm.)	L/d	e/d
1	400	0.01	25	4	0.00001
2					0.0001
3					0.001
4					0.01
5					0.1
6				8	0.00001
7					0.0001
8					0.001
9					0.01
10					0.1
11				12	0.00001
12					0.0001
13					0.001
14					0.01
15					0.1



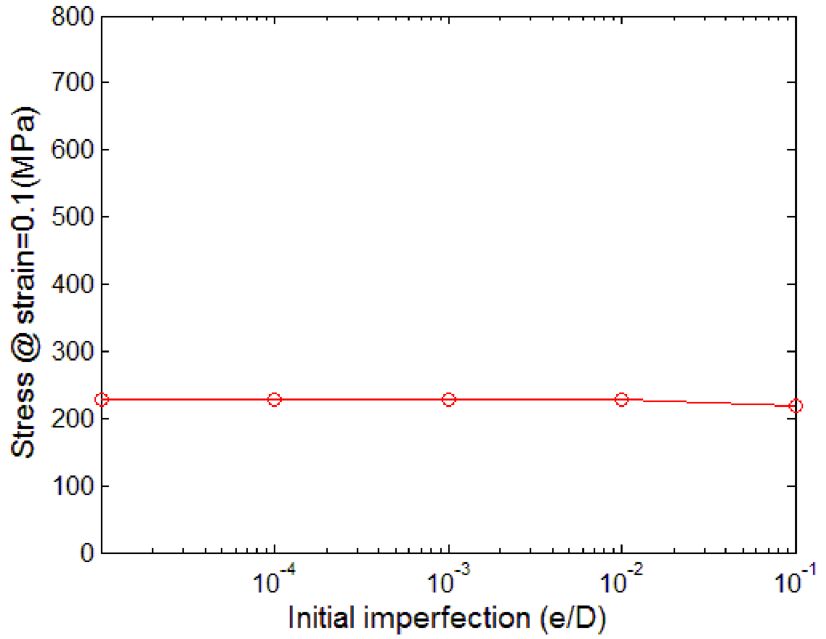
ภาพที่ 3.31 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=4



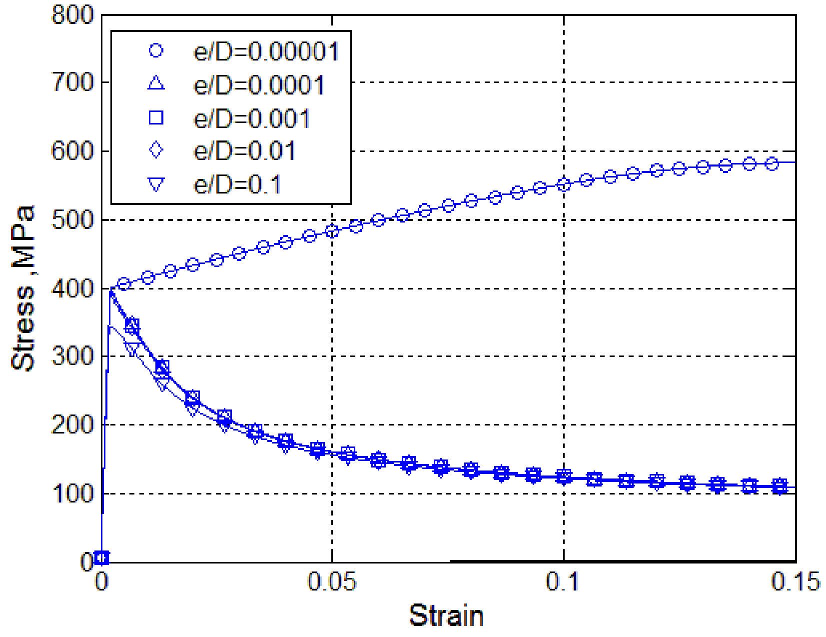
ภาพที่ 3.32 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=4



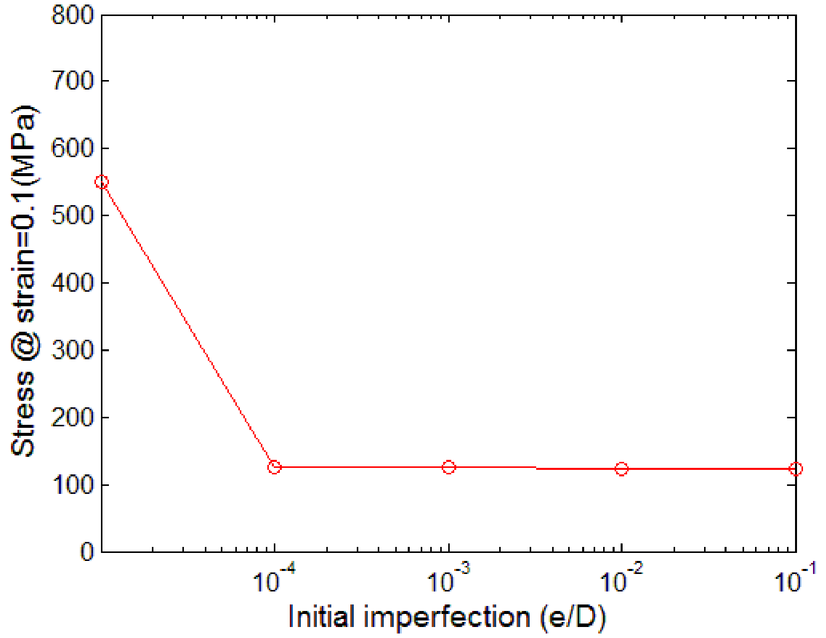
ภาพที่ 3.33 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=8



ภาพที่ 3.34 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=8



ภาพที่ 3.35 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=12



ภาพที่ 3.36 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=12

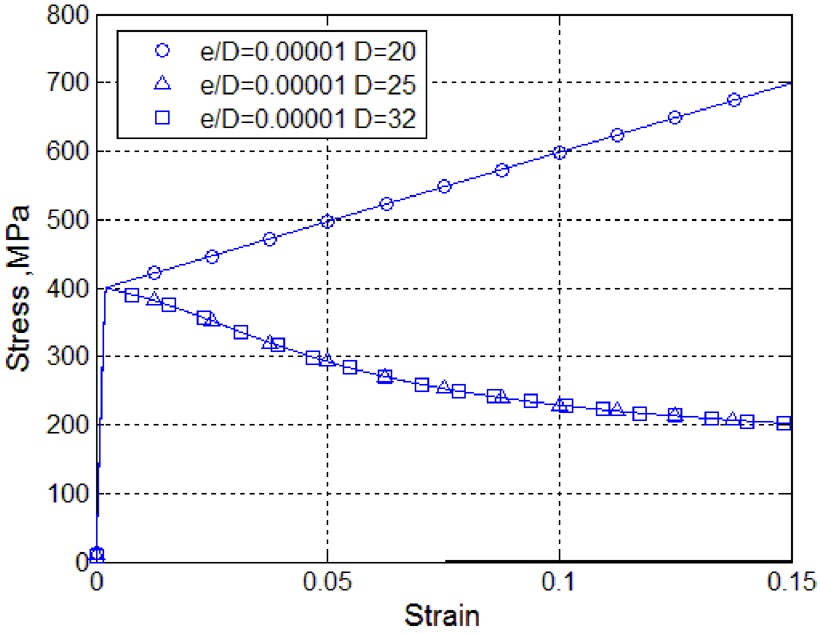
จากภาพที่ 3.31 3.33 และ 3.35 ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 และ 12 แบบจำลองที่มีค่า e/D=0.00001 นั้นไม่เกิดการลดลงของหน่วยแรงหลังจุดคราก ที่ค่า e/D=0.1 นั้นเกิดการโก่งเดาะก่อนที่ค่าหน่วยแรงจะพัฒนากำลังถึงจุดคราก จากภาพที่ 3.32 3.34 และ 3.36 ค่า e/D เท่ากับ 0.01 0.001และ 0.0001 ให้ค่าหน่วยแรงที่ใกล้เคียงกันมากที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆ

3.2.2 ผลของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆของเหล็กเสริม

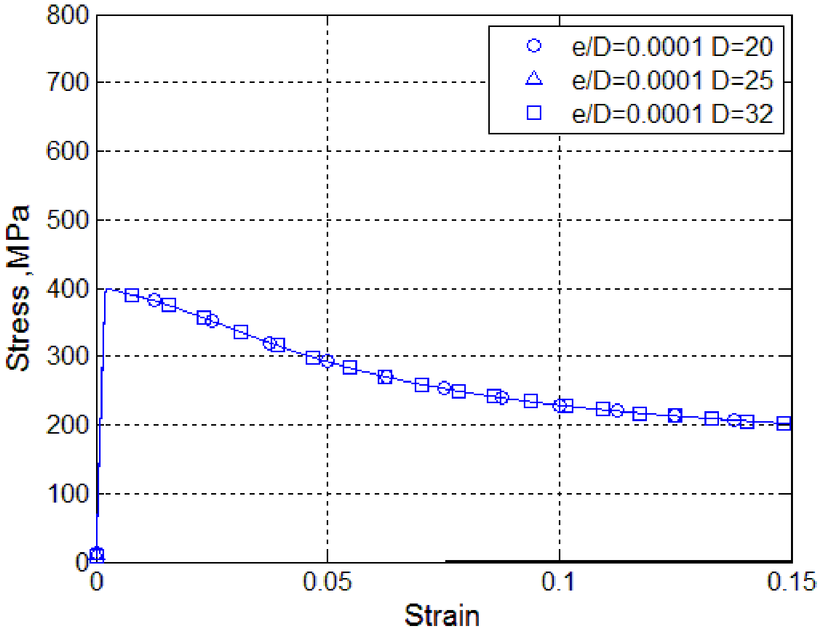
โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)ของเหล็กเสริมที่มีต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆของเหล็กเสริม รายละเอียดดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆของเหล็กเสริม

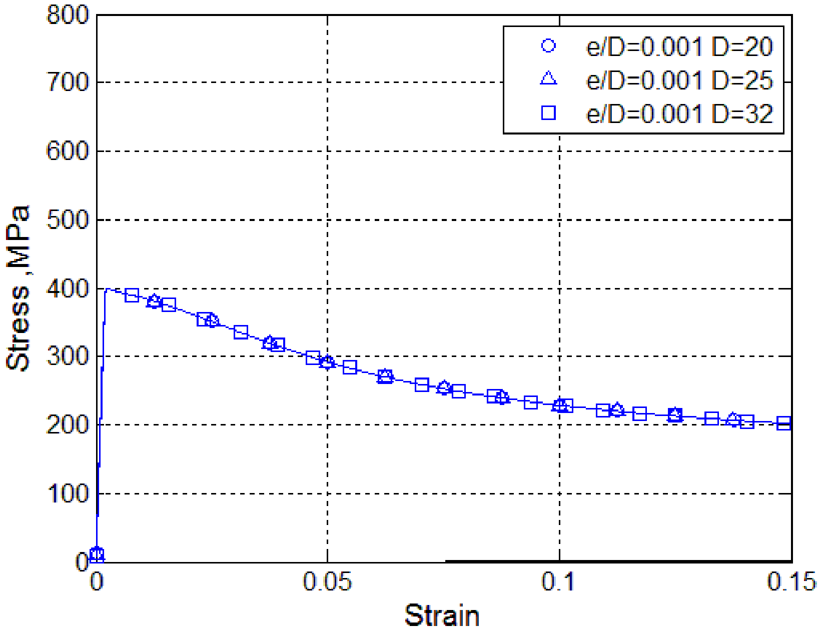
No	Fy (MPa)	b	L/D	diameter (mm.)	e/D
1	400	0.01	8	20	0.00001
2					0.0001
3					0.001
4					0.01
5					0.1
6				25	0.00001
7					0.0001
8					0.001
9					0.01
10					0.1
11				32	0.00001
12					0.0001
13					0.001
14					0.01
15					0.1



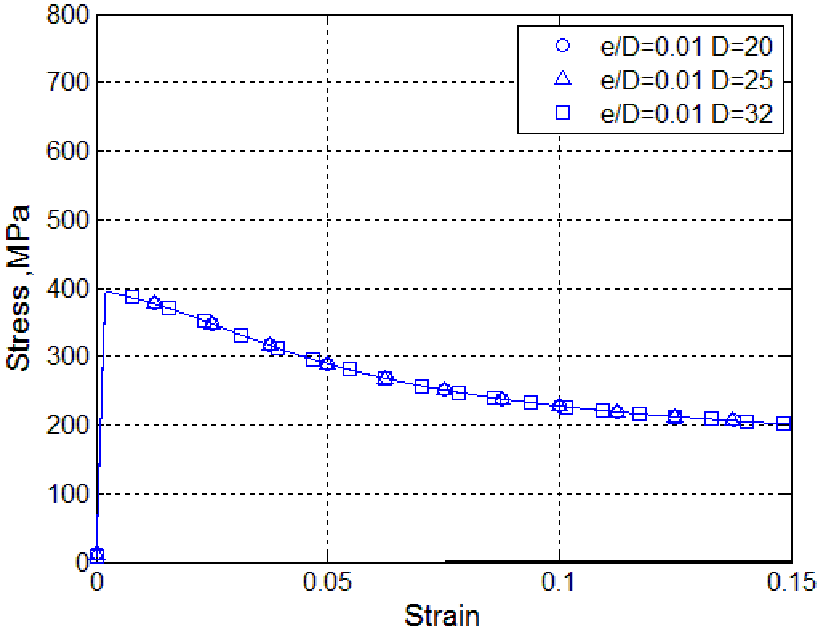
ภาพที่ 3.37 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.00001



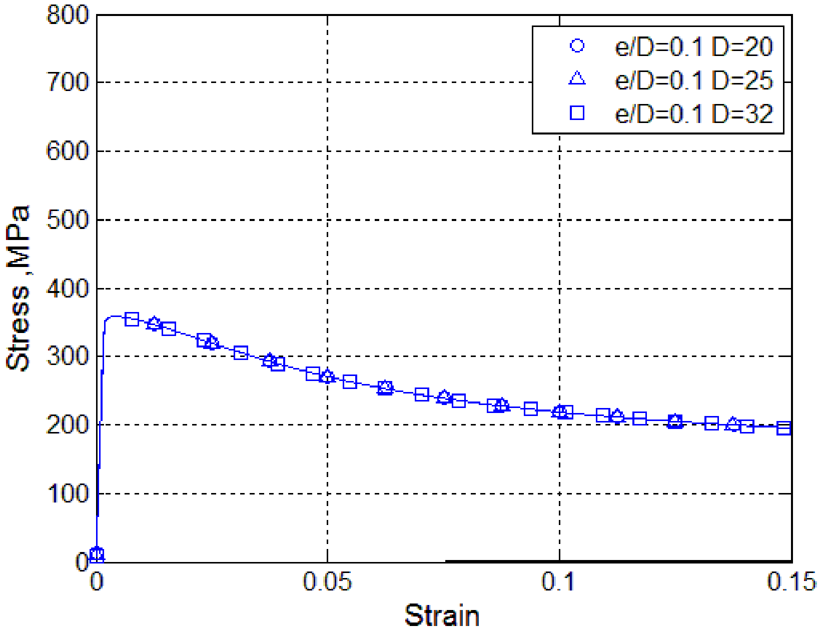
ภาพที่ 3.38 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.0001



ภาพที่ 3.39 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.001



ภาพที่ 3.40 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.01



ภาพที่ 3.41 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูย์กลางต่าง 20 25 และ 32 mm ที่ L/D=8 e/D=0.1

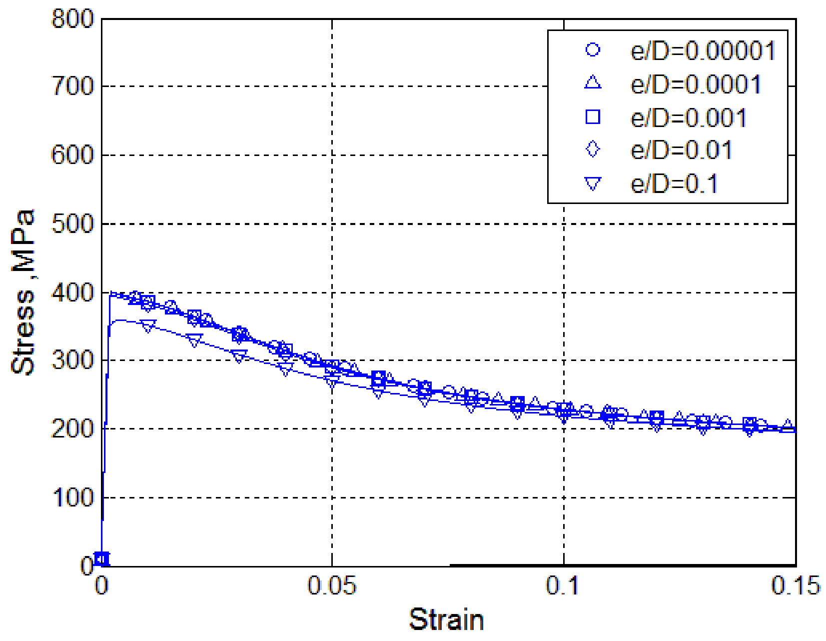
จากผลการวิเคราะห์ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆของเหล็กเสริม จากภาพที่ 3.37-3.41 จะเห็นได้ว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมไม่มีผลต่อการเยื้องศูนย์เริ่มต้น

3.2.3 ผลของกำลังที่จุดคราก (Fy) ของเหล็กเสริม

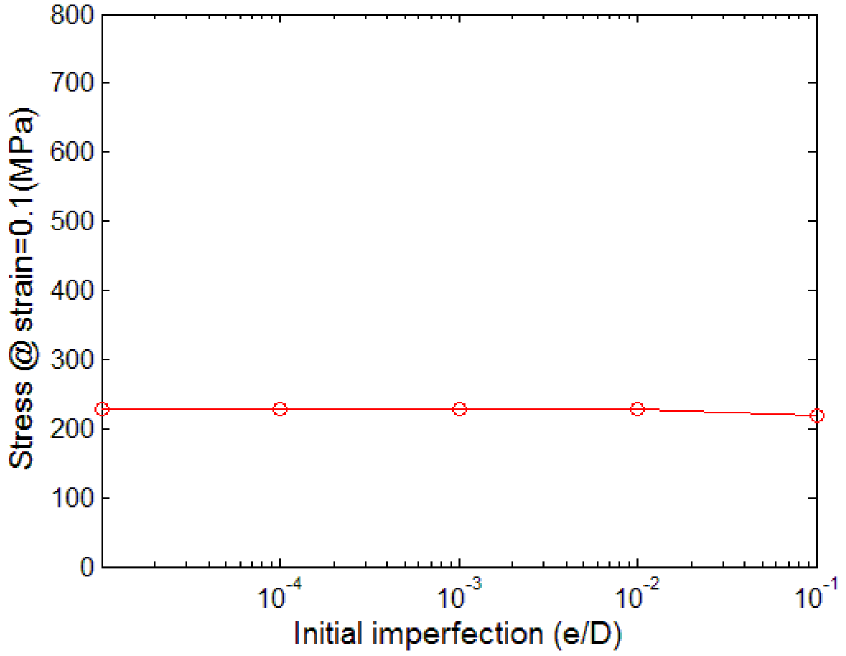
โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาค่าการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ของเหล็กเสริมที่มีต่อกำลังที่จุดคราก (Fy) ของเหล็กเสริม รายละเอียดดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ต่อกำลังที่จุดคราก (Fy) ของเหล็กเสริม

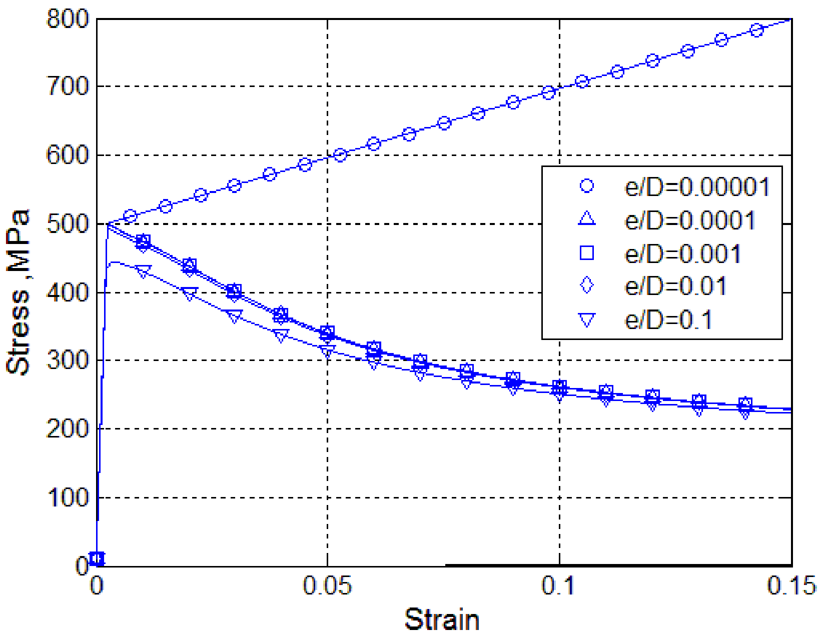
No	diameter (mm.)	b	L/D	Fy (MPa)	e/d
1	25	0.01	8	400	0.00001
2					0.0001
3					0.001
4					0.01
5					0.1
6				500	0.00001
7					0.0001
8					0.001
9					0.01
10					0.1
11				600	0.00001
12					0.0001
13					0.001
14					0.01
15					0.1



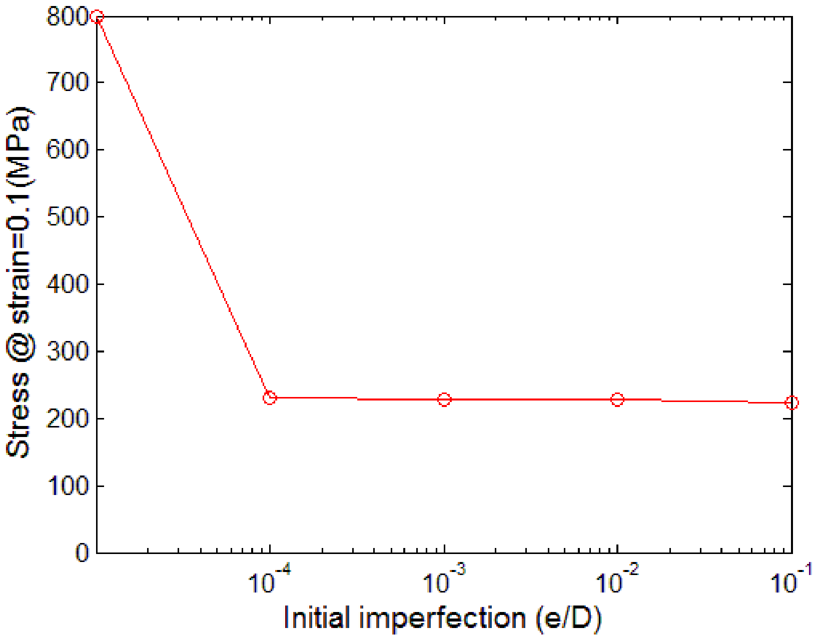
ภาพที่ 3.42 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=8 Fy=400MPa



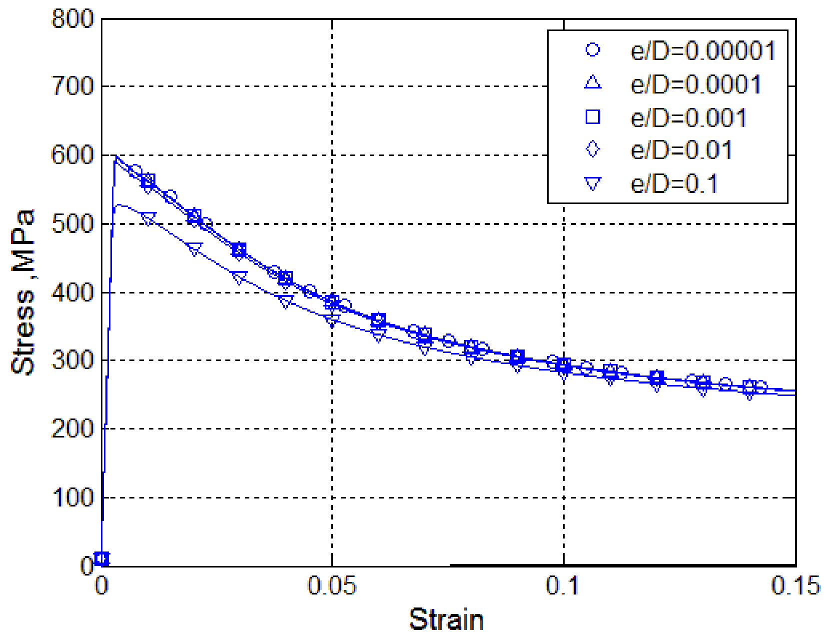
ภาพที่ 3.43 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่อัตราส่วน L/D=8 400MPa



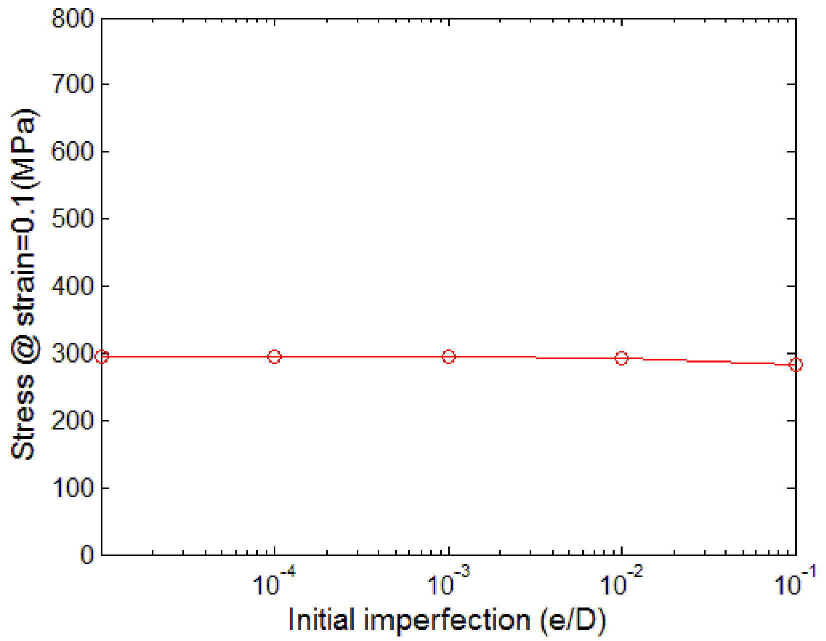
ภาพที่ 3.44 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=8 Fy=500 MPa



ภาพที่ 3.45 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.15 ที่ Fy=500 MPa



ภาพที่ 3.46 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=8 Fy=600 MPa

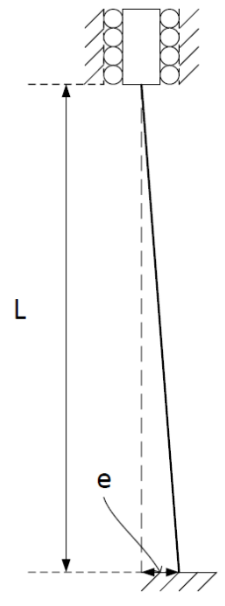


ภาพที่ 3.47 ความสัมพันธ์ของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริมค่าหน่วยแรงที่ความเครียดเท่ากับ 0.1 ที่ Fy=600 MPa

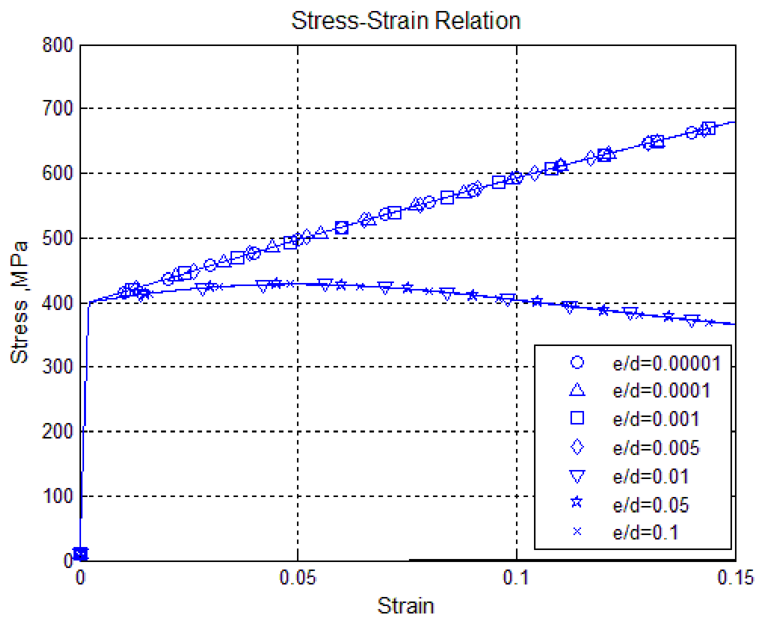
จากผลการวิเคราะห์ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D)ต่อกำลังที่จุดคราก (Fy)ของเหล็กเสริม จากภาพที่ 3.42-3.47 จะเห็นได้ว่าผลของกำลังที่จุดคราก (Fy)ของเหล็กเสริมไม่มีผลต่อการเยื้องศูนย์เริ่มต้น ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะการเยื้องศูนย์ (e) ยิ่งมีค่าน้อยจะยิ่งรบกวนโครงสร้างแบบจำลองน้อยแต่โครงแบบจำลองนั้นจะไม่เกิดการลดลงของหน่วยแรงก่อนถึงจุดคราก ค่าที่แนะของอัตราส่วน e/D อยู่ระหว่าง 0.0001-0.01 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าอัตราส่วน e/D เท่ากับ 0.001 เป็นหลักในการวิเคราะห์

3.2.4 ผลของการการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่นๆ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของการการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่น โดยปกติแบบจำลองจะกำหนดมีการเสียรูปที่กึ่งกลางของแบบจำลอง ซึ่งผลของการการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่นนั้นจะให้ผลที่แตกต่างกันอย่างไร โดยลักษณของการการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่นของแบบจำลองนั้นแสดงดังภาพที่ 3.48 โดยในการวิเคราะห์นั้นจะใช้อัตราส่วน L/D=8 โดยใช้การเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) ต่างๆกัน ได้แก่ 0.00001 0.0001 0.001 0.005 0.01 0.05 และ0.1



ภาพที่ 3.48 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยไม่คิดผลของค้ำยันทางด้านข้างพิจารณาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 3.49 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลจากการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม L/D=8 โดยพิจารณาผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตำแหน่งอื่น

จากภาพที่ 3.49 ผลของความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้นั้นแตกต่างจากผลของความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของแบบจำลองที่กำหนดมีการเสียรูปที่กึ่งกลางของแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่กำหนดการเยื้องศูนย์ที่ปลายนั้นให้ค่าหน่วยแรงที่สูงกว่าแบบจำลองที่กำหนดมีการเสียรูปที่กึ่งกลางของแบบจำลอง

3.3 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมการเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม (e/D)เท่ากับ 0.001 ใช้อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 6 8 10 12 และ 16 โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b) กำลังที่จุดคราก (Fy)

3.3.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b)

โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วนอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b) รายละเอียดดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b)

No.	Fy (MPa)	e/d	b	diameter (mm.)	L/d
1	400	0.001	0.0001	20	4
2					6
3					8
4					10
5					12
6					16
7				25	4
8					6
9					8
10					10
11					12
12					16
13				32	4
14					6
15					8
16					10
17					12
18					16
19			0.005	20	4
20					6
21					8
22					10
23					12
24					16

ตารางที่ 3.10 (ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b)

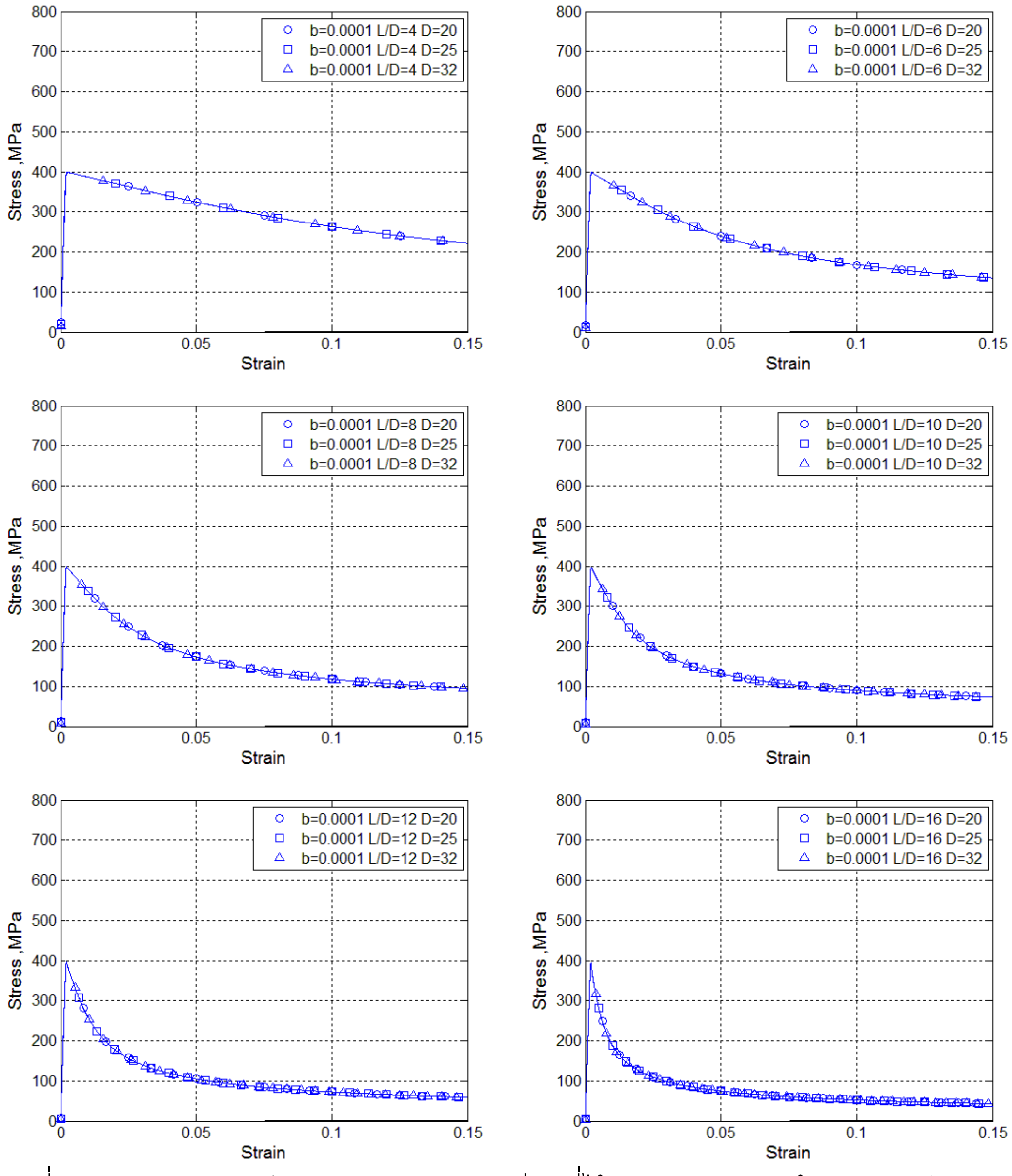
No.	Fy (MPa)	e/d	b	diameter (mm.)	L/d
25	400	0.001	0.005	25	4
26					6
27					8
28					10
29					12
30					16
31				32	4
32					6
33					8
34					10
35					12
36					16
37			0.01	20	4
38					6
39					8
40					10
41					12
42					16
43				25	4
44					6
45					8
46					10
47					12
48					16

ตารางที่ 3.10 (ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b)

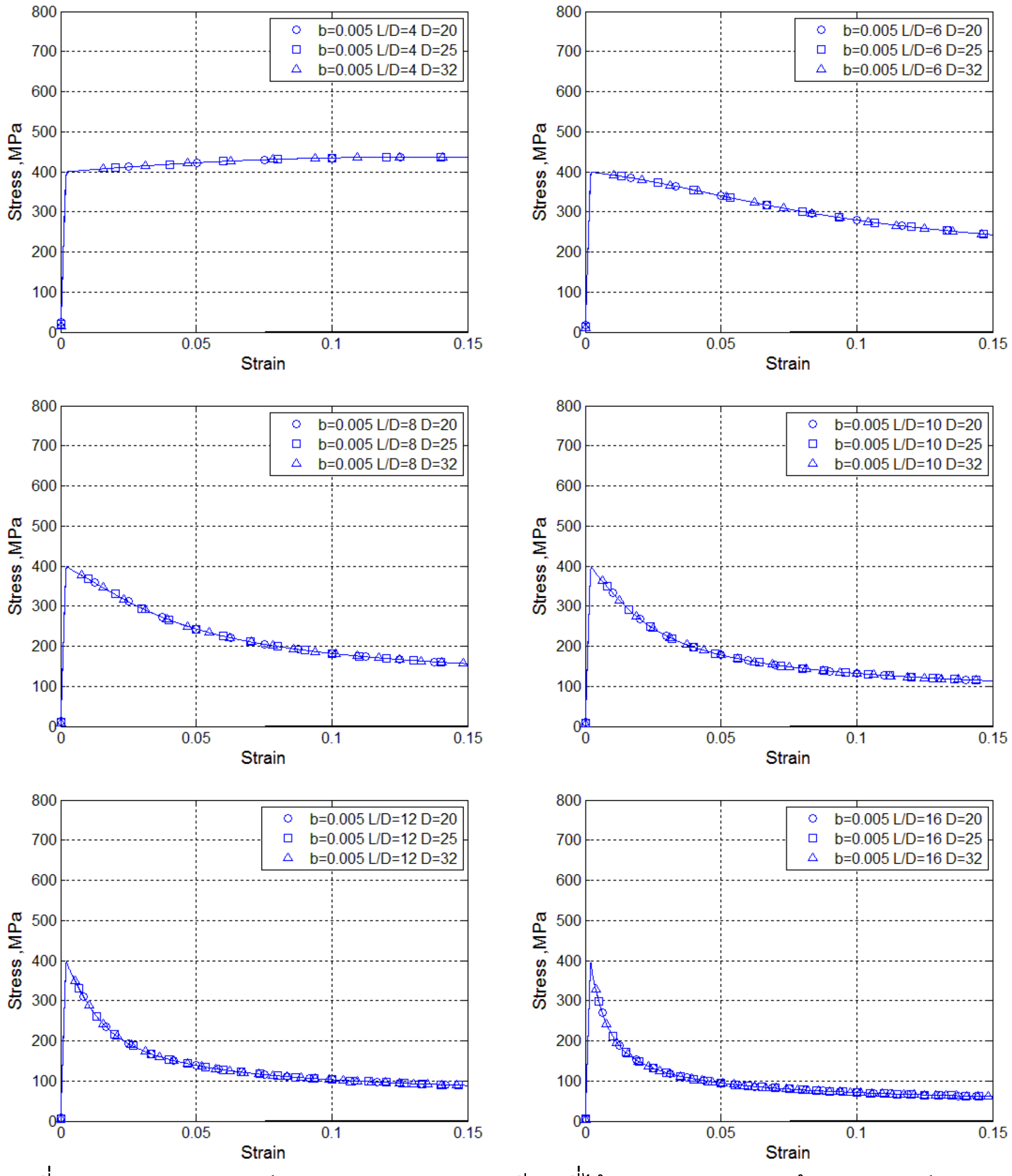
No.	Fy (MPa)	e/d	b	diameter (mm.)	L/d
49	400	0.001	0.01	32	4
50					6
51					8
52					10
53					12
54					16
55			0.015	20	4
56					6
57					8
58					10
59					12
60					16
61				25	4
62					6
63					8
64					10
65					12
66					16
67				32	4
68					6
69					8
70					10
71					12
72					16

ตารางที่ 3.10 (ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b)

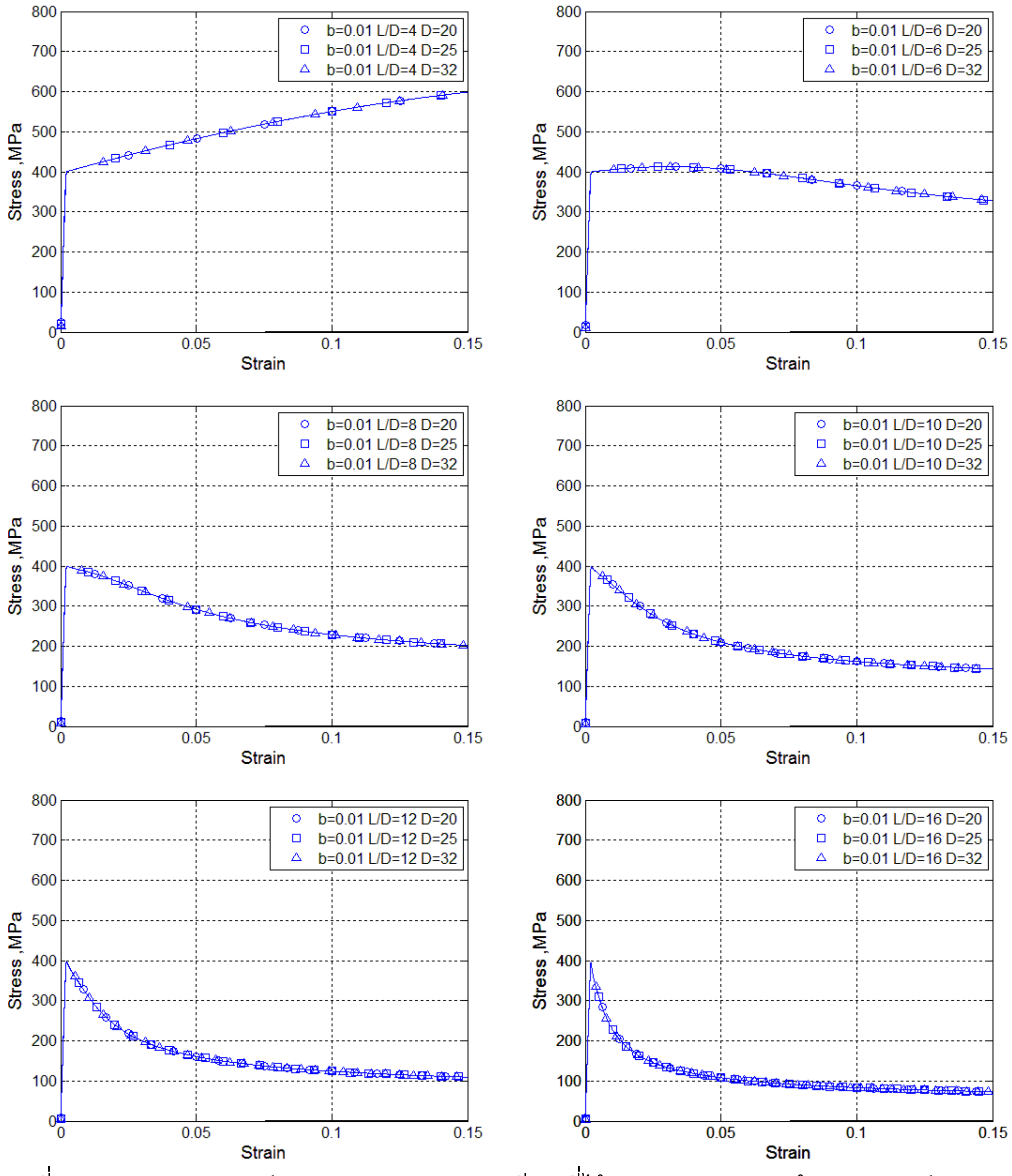
No.	Fy (MPa)	e/d	b	diameter (mm.)	L/d
73	400	0.001	0.02	20	4
74					6
75					8
76					10
77					12
78					16
79				25	4
80					6
81					8
82					10
83					12
84					16
85				32	4
86					6
87					8
88					10
89					12
90					16



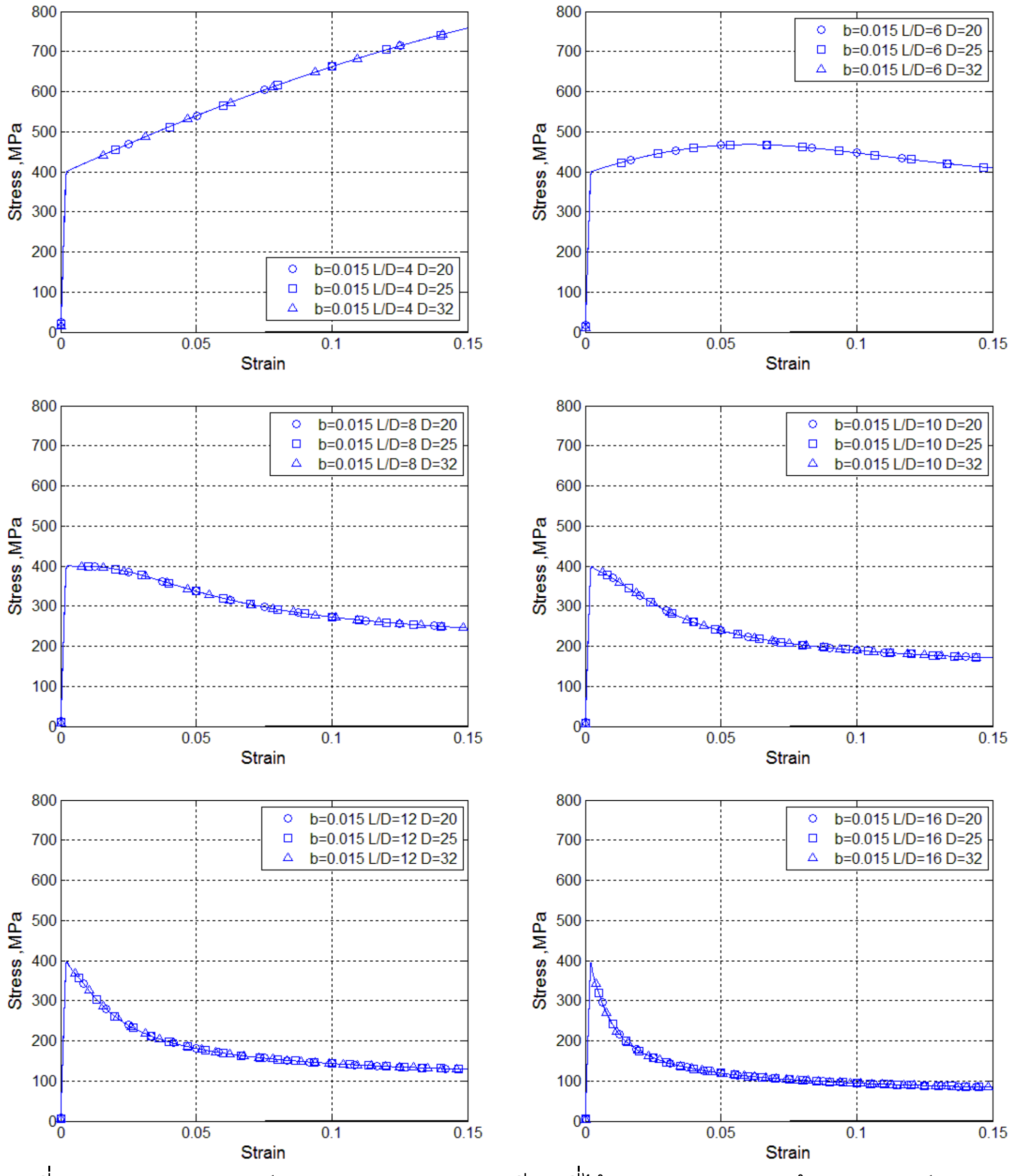
ภาพที่ 3.50 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.0001



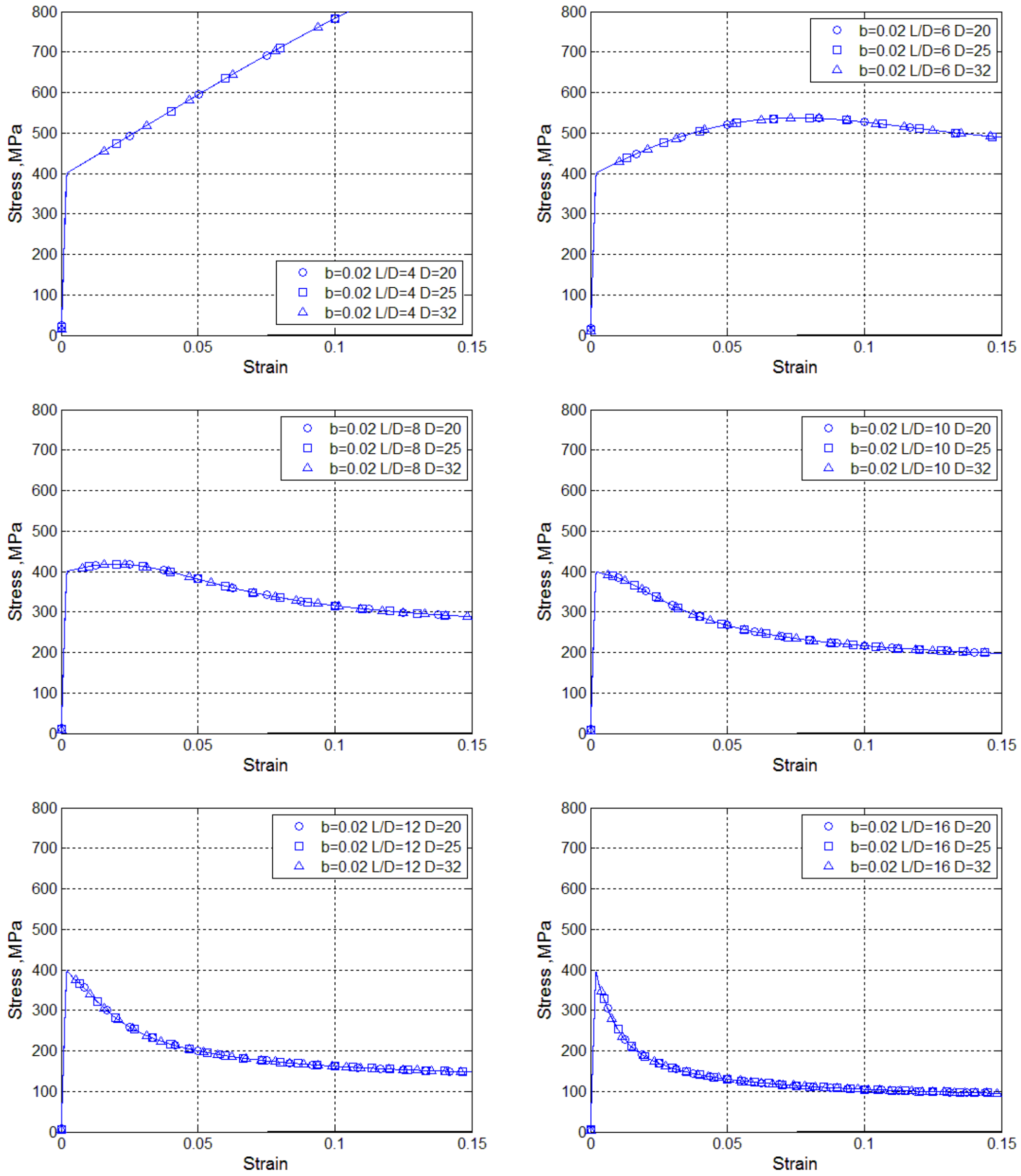
ภาพที่ 3.51 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) ที่ L/D ต่างๆ b=0.005



ภาพที่ 3.52 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b)ที่ L/D ต่างๆ b=0.01



ภาพที่ 3.53 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) ที่ L/D ต่างๆ b=0.015



ภาพที่ 3.54 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่ออัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) ที่ L/D ต่างๆ b=0.02

จากภาพที่ 3.50-3.54 จะเห็นได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์ไม่มีผลกระทบต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์ (L/D) เดียวกัน

3.3.2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังที่จุดคราก (Fy)

โดยในหัวข้อนี้ทำการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังที่จุดคราก (Fy) รายละเอียดดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังที่จุดคราก (Fy)

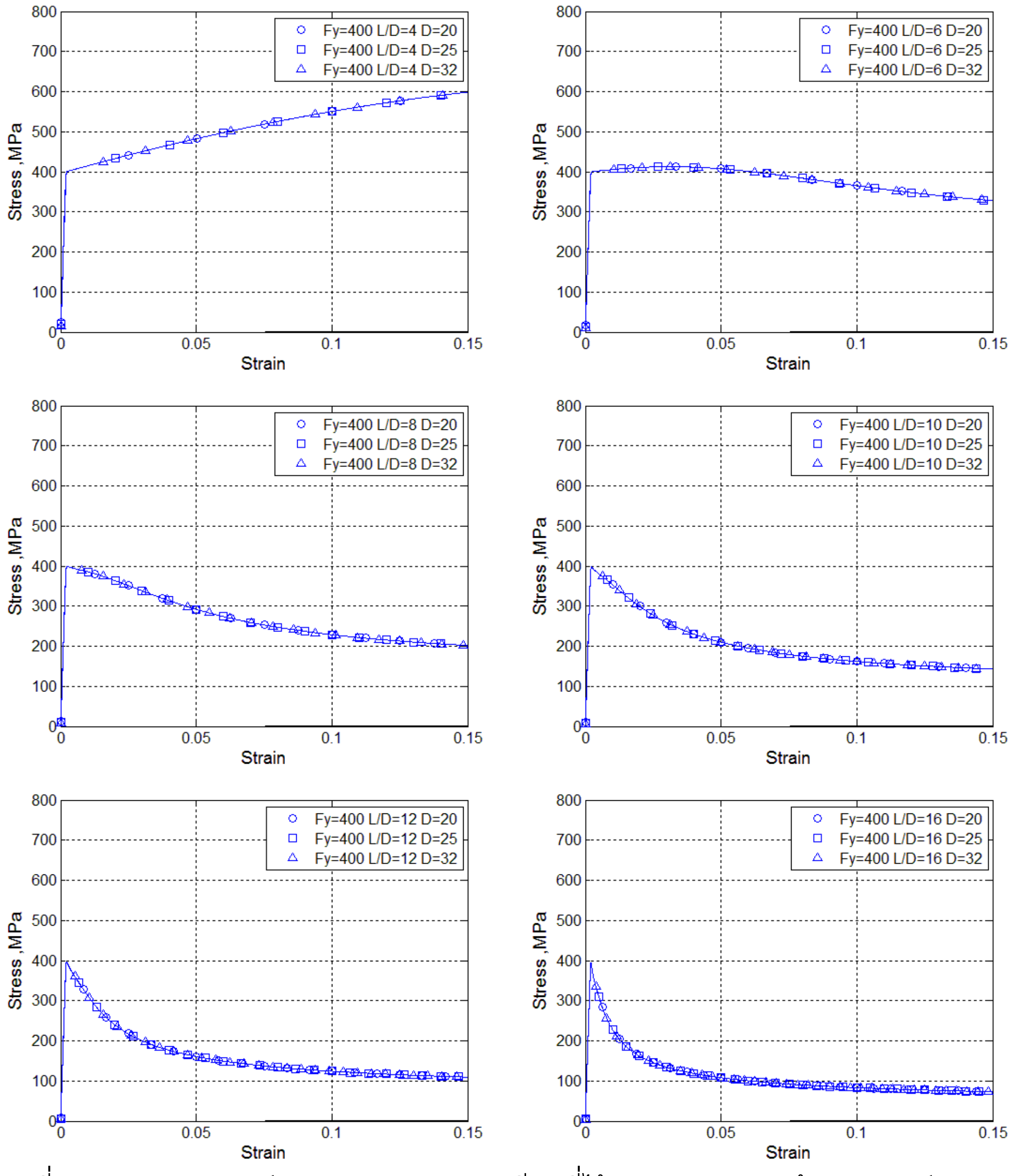
No.	e/d	b	diameter (mm.)	Fy (MPa) diameter (mm.)	L/d
1	0.001	0.01	400	20	4
2					6
3					8
4					10
5					12
6					16
7				25	4
8					6
9					8
10					10
11					12
12					16
13				32	4
14					6
15					8
16					10
17					12
18					16

ตารางที่ 3.11 (ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังที่จุดคราก (Fy)

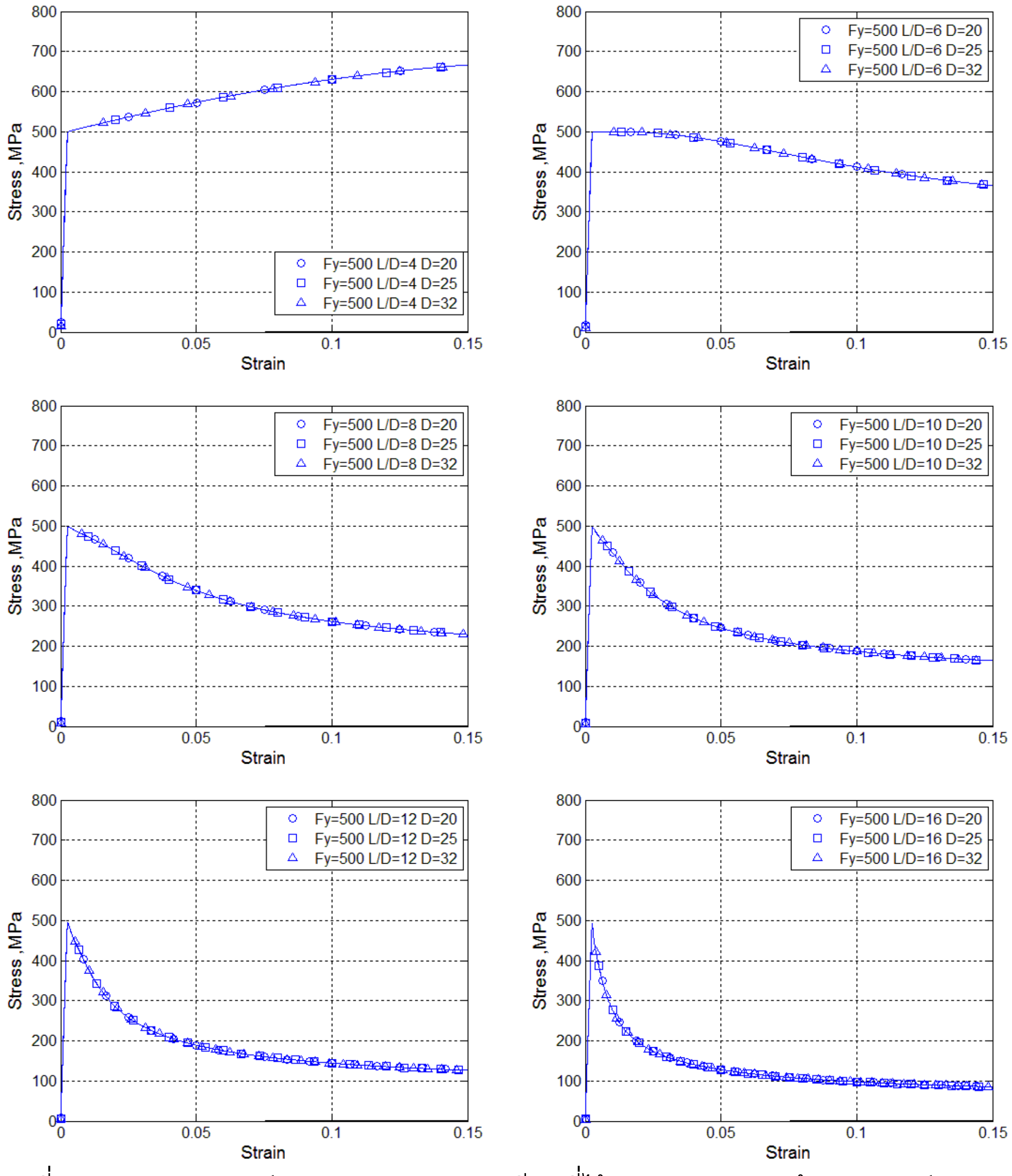
No.	e/d	b	diameter (mm.)	Fy (MPa) diameter (mm.)	L/d
19	0.001	0.01	500	20	4
20					6
21					8
22					10
23					12
24					16
25				25	4
26					6
27					8
28					10
29					12
30					16
31				32	4
32					6
33					8
34					10
35					12
36					16

ตารางที่ 3.11 (ต่อ) รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกำลังที่จุดคราก (Fy)

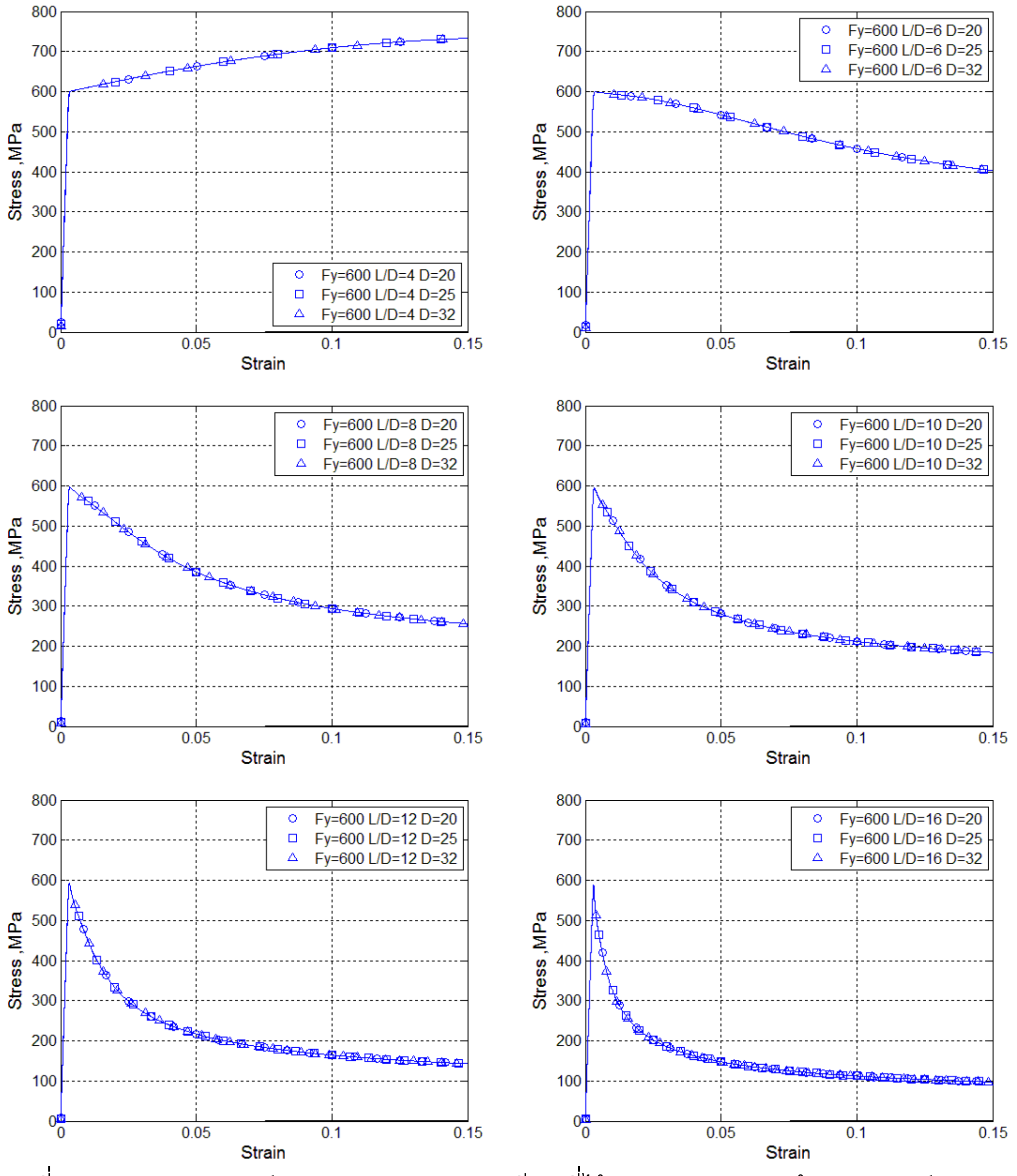
No.	e/d	b	diameter (mm.)	Fy (MPa) diameter (mm.)	L/d
37	0.001	0.01	600	20	4
38					6
39					8
40					10
41					12
42					16
43				25	4
44					6
45					8
46					10
47					12
48					16
49				32	4
50					6
51					8
52					10
53					12
54					16



ภาพที่ 3.55 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่อกำลังที่จุดคราก ที่ L/D ต่างๆ Fy=400 MPa



ภาพที่ 3.56 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่อกำลังที่จุคราก ที่ L/D ต่างๆ Fy=500 MPa



ภาพที่ 3.57 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่ได้รับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่อกำลังที่จุดคราก ที่ L/D ต่างๆ Fy=600 MPa

จากภาพที่ 3.55- 3.57 พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกนที่มีค่าอัตราส่วน L/D เท่ากันจะมีพฤติกรรมภายหลังเลยจุดครากที่เหมือนกัน โดยที่ไม่ขึ้นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) กำลังที่จุดคราก (F_y) โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm เป็นตัวแทนเหล็กเสริมขนาดอื่นในการวิเคราะห์

3.4 ผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (Fy) ที่มีผลต่อการโก่งเดาะของเสริม

ศึกษาผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (F_y) โดยใช้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมเท่ากับ 25 mm ซึ่งความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นของเหล็กเสริม(e/D) เท่ากับ 0.001 อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) เท่ากับ 0.01 ใช้กำลังที่จุดครากเท่ากับ 400 500 และ 600 ใช้อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 8 และ 16 ในการวิเคราะห์รายละเอียดดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (F_y) ที่มีผลต่อการโก่งเดาะของเหล็เสริม

No.	diameter (mm.)	e/d	b	Fy (MPa)	L/d
1	25	0.001	0.01	400	4
2					8
3					16
7				500	4
8					8
9					16
13				600	4
14					8
15					16

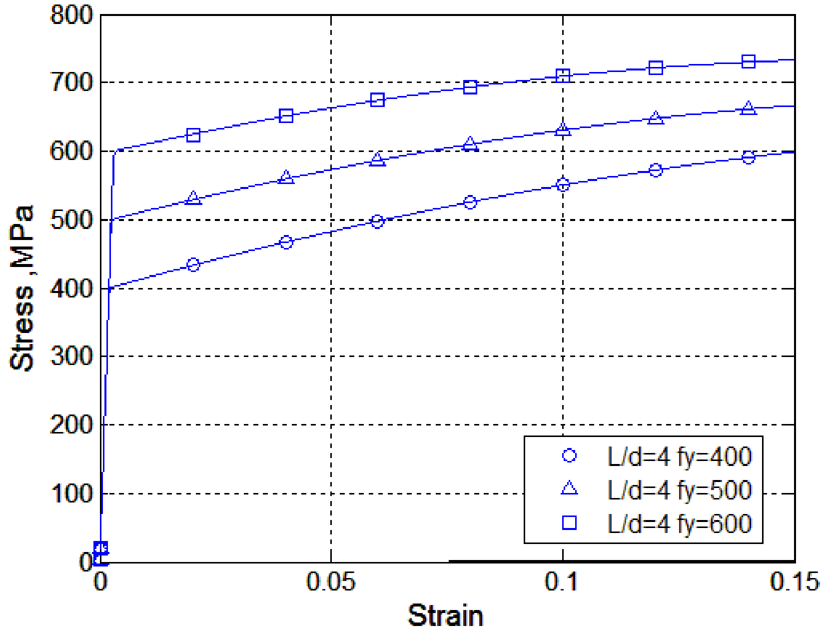
การแสดงผลจะแสดงในรูปอัตราส่วนความเค้นต่อความเค้นคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) โดยคำนวณจากสมการ 20 และ 21

Normalized stress $$N_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{y,T}} \quad (22)$$

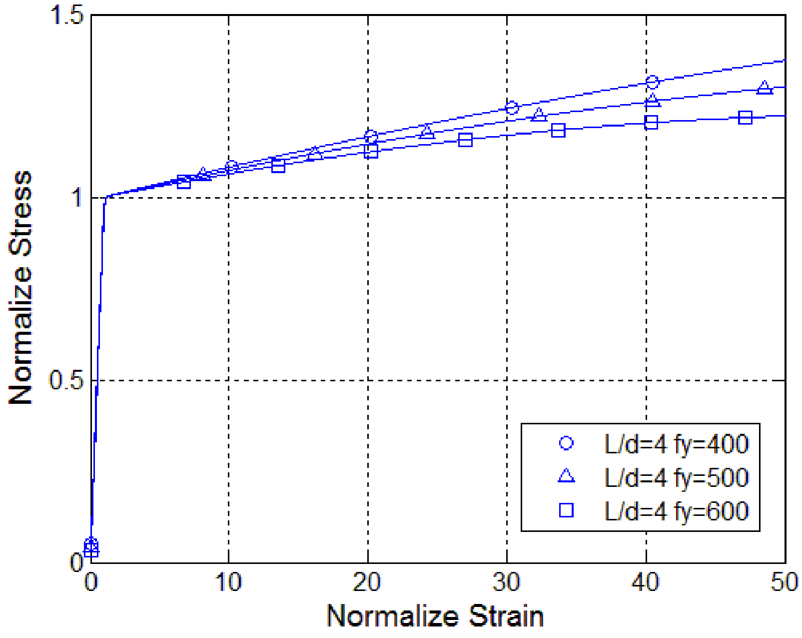
Normalized strain $$N_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{y,T}} \quad (23)$$

$\sigma_{y,T}, \varepsilon_{y,T}$ คือค่าความเค้นและความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง

σ, ε คือค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดใดๆ

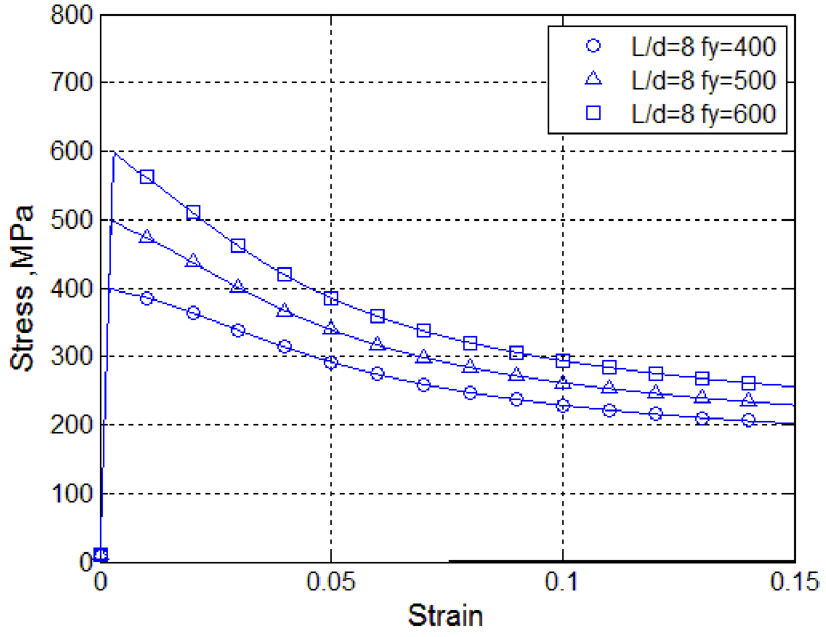


ภาพที่ 3.58 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/D = 4 ที่ F_y ต่างๆ

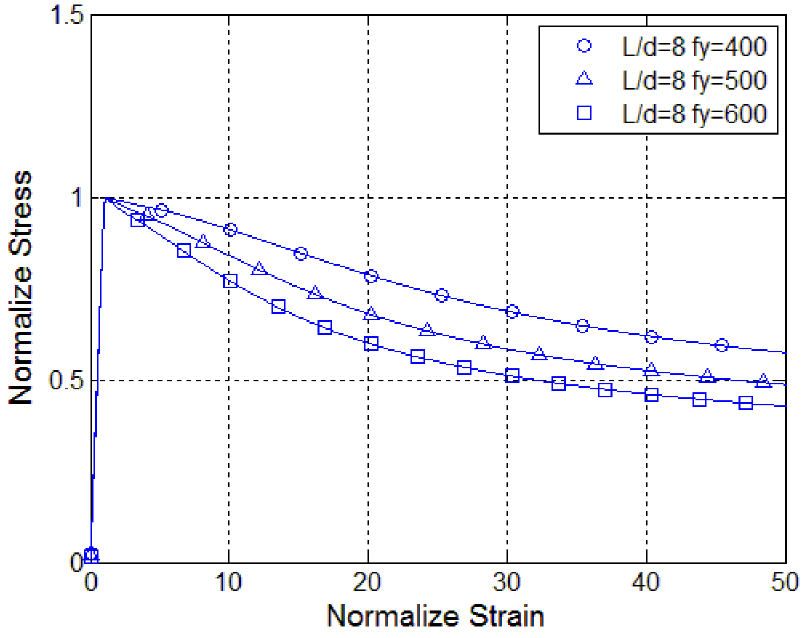


ภาพที่ 3.59 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ)

และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ L/D=4

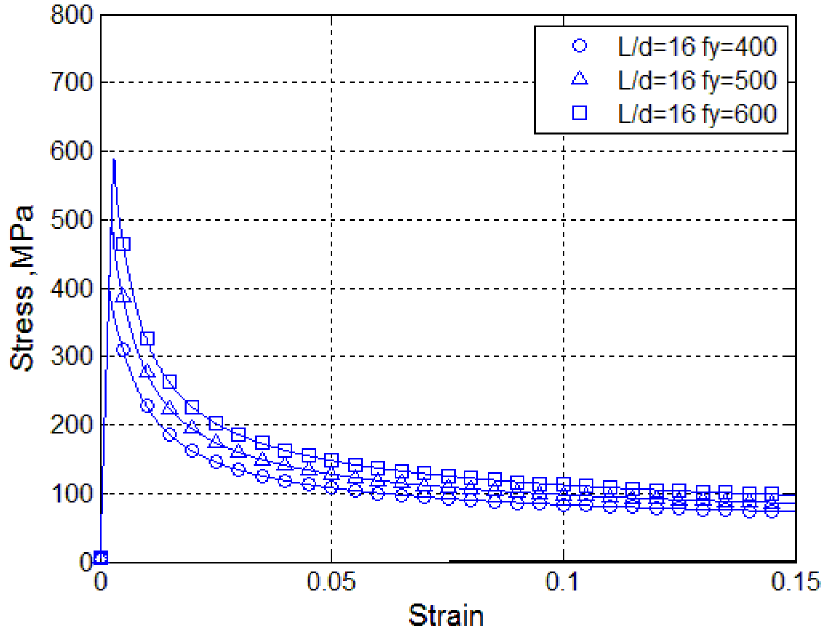


ภาพที่ 3.60 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/D = 8 ที่ F_y ต่างๆ

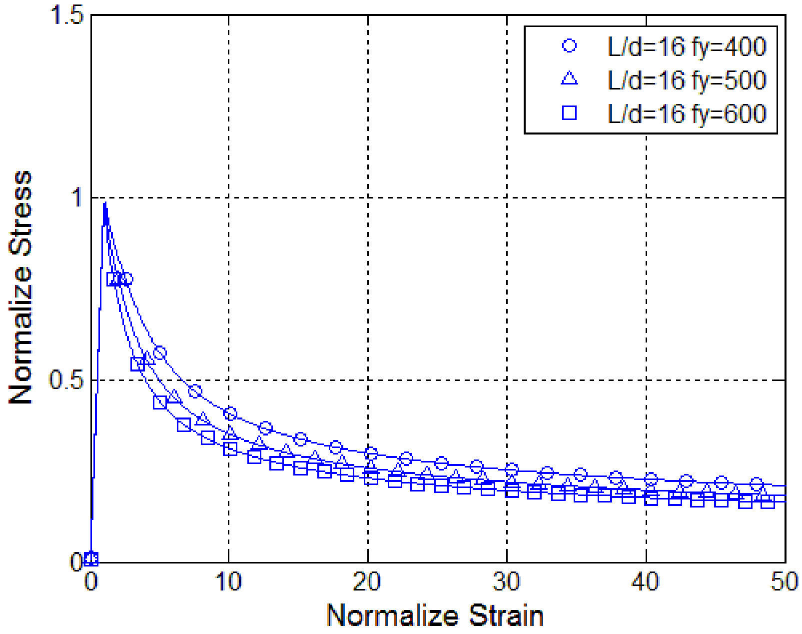


ภาพที่ 3.61 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ)

และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ L/D=8



ภาพที่ 3.62 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/D = 16 ที่ F_y ต่างๆ



ภาพที่ 3.63 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_{σ})

และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_{ε}) ที่ L/D=16

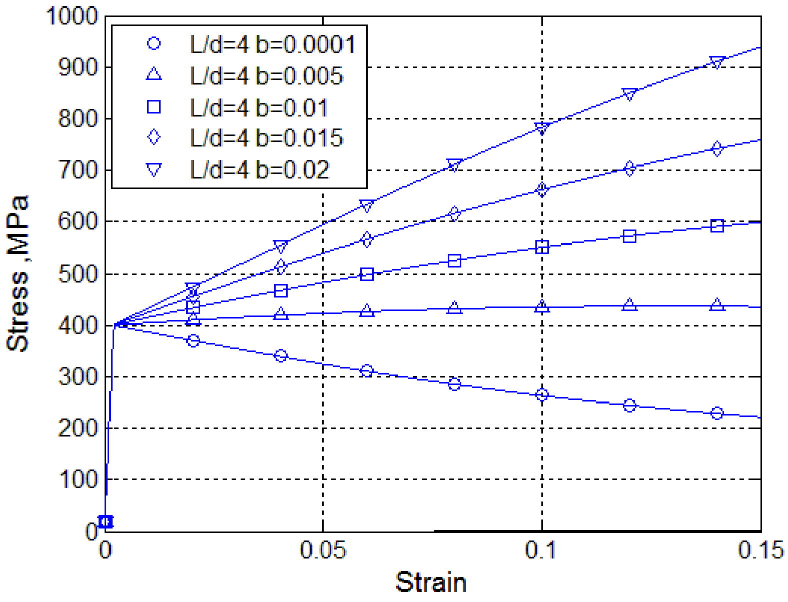
จากภาพที่ 3.61 และ 3.63 ค่าหน่วยแรงครากของเหล็กเสริมที่มากกว่า กำลังของเหล็กเสริมตามยาวจะลดลงหลังเลยจุดครากมากกว่าที่ค่าความเค้นครากต่ำกว่าซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε)

3.5 **ผลของอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก** (strain hardening , b)

ในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดของแบบจำลอง ที่สำคัญคือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ โดยในการศึกษานี้ได้เลือกศึกษาพฤติกรรมของคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริม คือSteel02(Giuffre-Menegotto-Pinto)

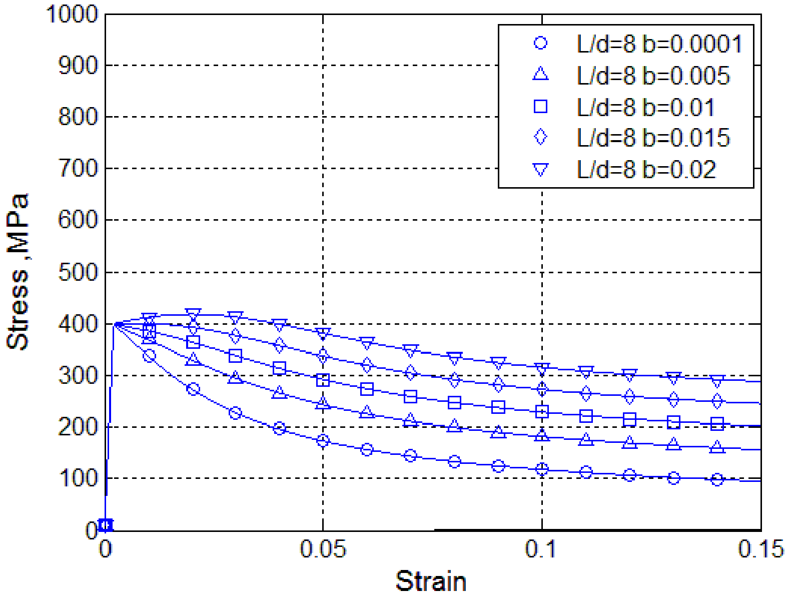
แบบจำลองที่ใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 กำหนดค่าคุณสมบัติโดยใช้การกำหนดโมดูลัสช่วงยืดหยุ่น และกำหนดค่าโมดูลัสหลังจุดครากที่ทำให้ค่าการสลายพลังงานมีค่าเทียบเท่ากับผลการทดสอบเหล็กรับแรงดึง เนื่องจากแบบจำลอง Steel02 เป็นการจำลองลักษณะ bilinear ซึ่งไม่สามารถจำลองให้เหมือนกันเหล็กรับแรงดึง และพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเสริมขึ้นกับค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุแบบ Reinforcing Steel มีความซับซ้อนในการประมวลผลมากกว่าแบบจำลองแบบ Steel02 ต้องคำนึงถึตัวแปรค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมหลายค่า ซึ่งในจุดนี้แบบจำลองแบบ Steel02 ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบได้ดีอีกทั้งยังใช้ทรัพยากรในการประมวลผลที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลอง Steel02 สำหรับงานวิจัยนี้

แบบจำลองคุณสมบัติวัสดุแบบ Steel02 นั้นยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่มีผลต่อการโก่งเดาะนั่นคือ b RO CR1 CR2 a1 a2 a3 และa4 เนื่องจากการศึกษาในประเด็นของเหล็กรับแรงอัดจึงใช้ค่าพารามิเตอร์R0,CR1,CR2, a1,a2,a3 และa4 ตามค่าปกติของโปรแกรม โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะใช่ค่าที่โปรแกรมแนะนำ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) โดยใช้ค่าเท่ากับ 0.00001 0.005 0.01 0.015 และ 0.02 ทำการวิเคราะห์ในอัตราส่วน L/D=4 8 และ16 ที่กำลังที่จุดครากเท่ากับ 400 และ 500



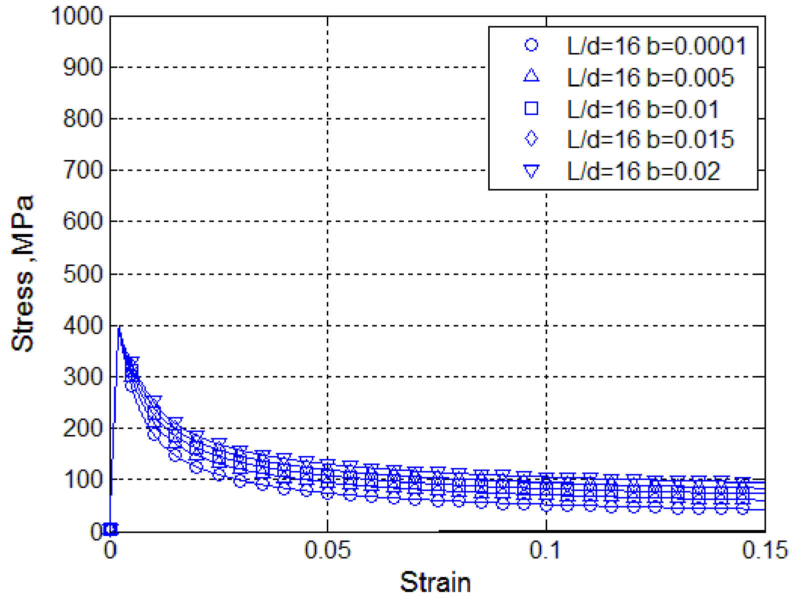
ภาพที่ 3.64 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=4

ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=400 MPa



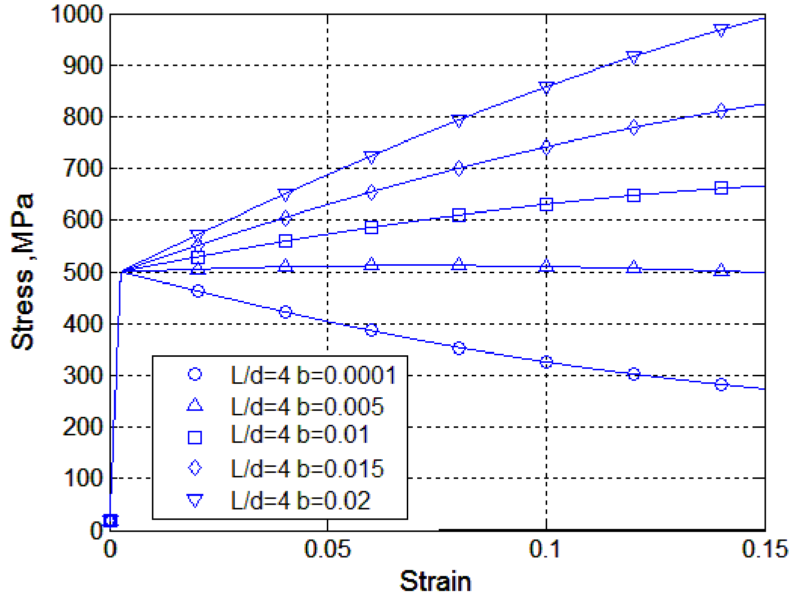
ภาพที่ 3.65 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=8

ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=400 MPa



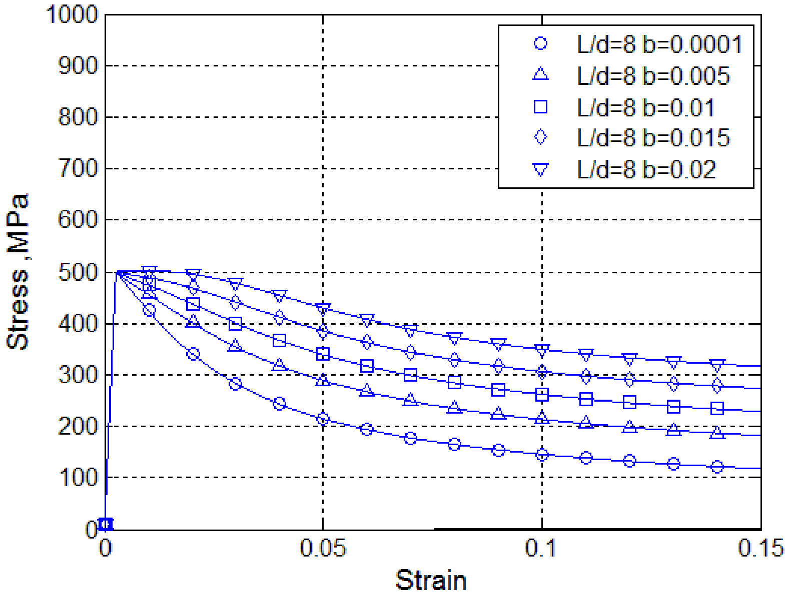
ภาพที่ 3.66 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=16

ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=400 MPa



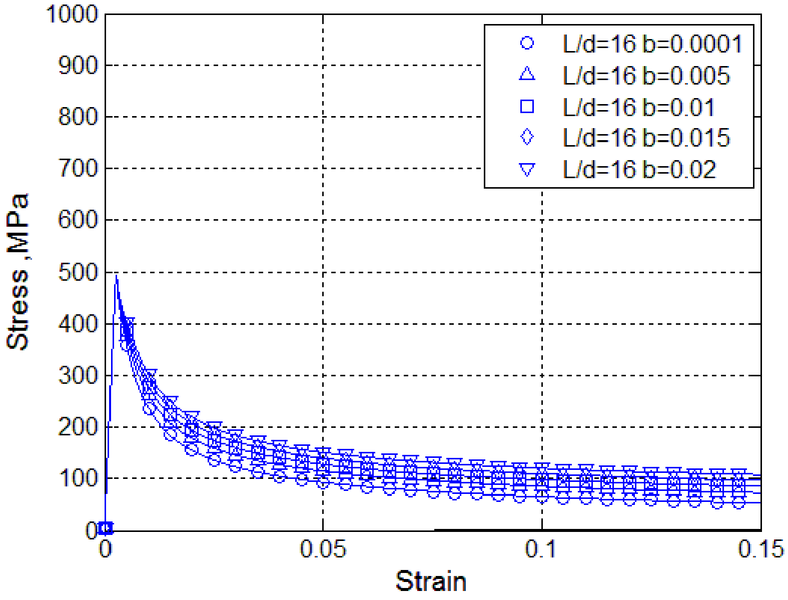
ภาพที่ 3.67 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=4

ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=500 MPa



ภาพที่ 3.68 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=8

ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=500 MPa



ภาพที่ 3.69 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดที่อัตราส่วน L/d=4

ที่ b ต่างๆ ที่ Fy=500 MPa

จากภาพที่ 3.64-3.69 ค่า b หรือ อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b) นั้นจะเห็นได้ชัดว่ามีผลมากต่อการพัฒนากำลังของเหล็กเสริมรับแรงในแนวแกนหลังจุดคราก แต่ไม่มีผลต่อกำลังที่จุดครากเนื่องจากผลที่ได้ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อค่า b หรือ strain hardening ratio เพิ่มขึ้นค่าความชันหลังจุดครากสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของค่าอัตราส่วน การพัฒนากำลังหลังจุดคราก ที่เราเลือกใช้นั้น ควรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็กเสริม ซึ่งในการกำหนดอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening , b)ที่เหมาะสมนั้นคำนวนจากความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรับดึง โดยเป็นค่าที่ทำให้ค่าการสลายพลังงานมีค่าเทียบเท่ากับผลการทดสอบเหล็กรับแรงดึง

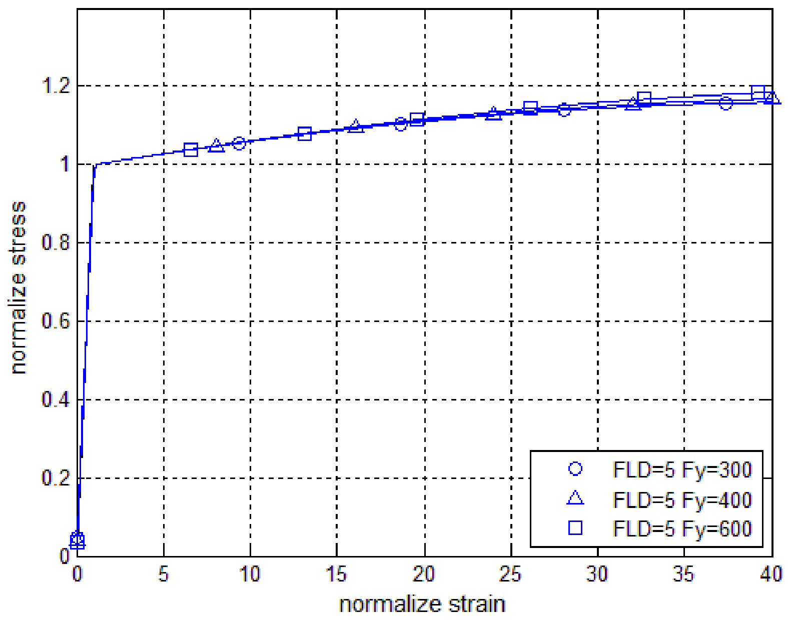
3.6 ผลของตัวแปรต่าง ๆที่กระทำร่วม

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของตัวแปรต่างๆได้แก่ กำลังที่จุดคราก (Fy) ความยาวของแบบจำลอง (L) และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (D) ที่กระทำร่วมกันโดยอ้างอิงจากสมการที่ 24 รายละเอียดตัวแปรต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.13

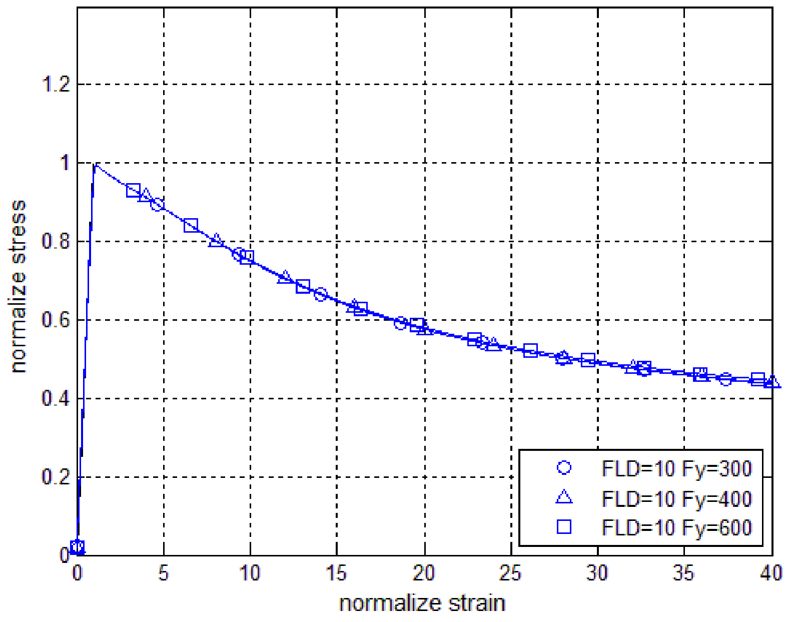
$$FLD = \sqrt{F_y / 400} * (L / D) \qquad (24)$$

ตารางที่ 3.13 รายละเอียดในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆที่กระทำร่วม

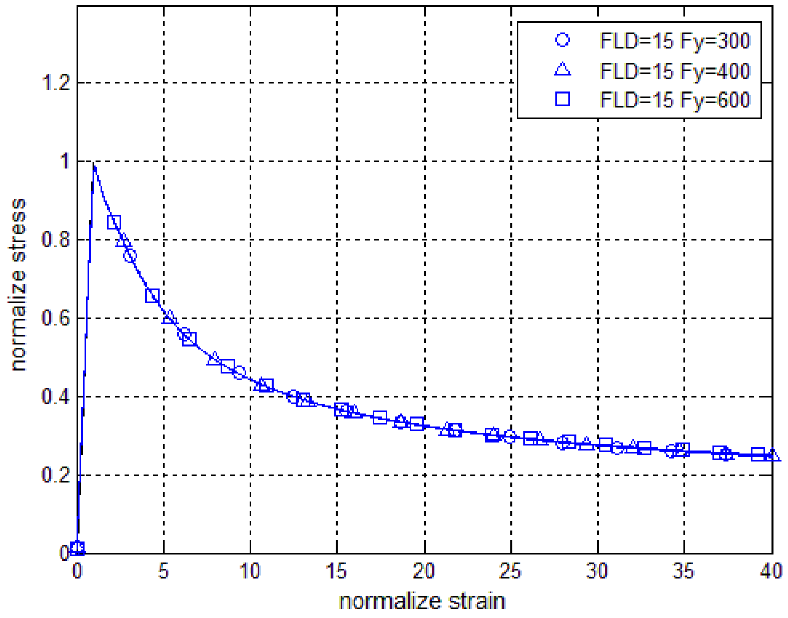
No	FLd	fy	L/D	D	L
1	5	300	5.773503	25	144.3376
2	5	400	5	25	125
3	5	600	4.082483	25	102.0621
4	10	300	11.54701	25	288.6751
5	10	400	10	25	250
6	10	600	8.164966	25	204.1241
7	15	300	17.32051	25	433.0127
8	15	400	15	25	375
9	15	600	12.24745	25	306.1862



ภาพที่ 3.70 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_{σ}) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_{ε}) ที่ FLD=5



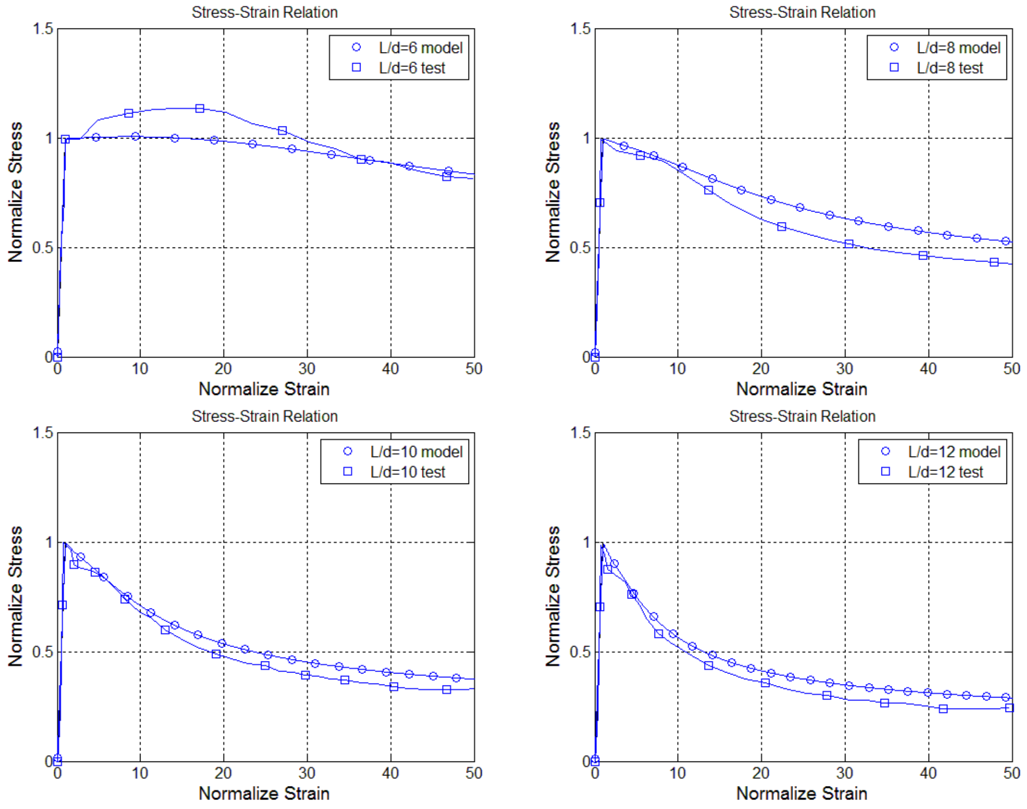
ภาพที่ 3.71 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_{σ}) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_{ε}) ที่ FLD=10



ภาพที่ 3.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ที่ FLD=15

จากภาพที่ 3.70-3.72 แสดงเห็นว่าเมื่ออัตราส่วน FLD เท่ากัน ในกรณีที่กำลังที่จุดคราก (Fy) ความยาวของแบบจำลอง (L) และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (D) ต่างๆกัน ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) แสดงให้เห็นพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน

3.7 สอบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยที่ผ่านมา



ภาพที่ 3.73 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่ได้จากผลการทดสอบ และแบบจำลองของ Bae และคณะ

จากภาพที่ 3.73 ผลการวิเคราะห์จะให้ค่าแตกต่างกับผลการทดสอบ ที่อัตราส่วน L/D สูง 8, 10, 12 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง จะให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาว ที่นำมาวิเคราะห์ผลของการโก่งเดาะ สามารถแสดงให้เห็นพฤติหลังการโก่งเดาะได้เป็นอย่างดี

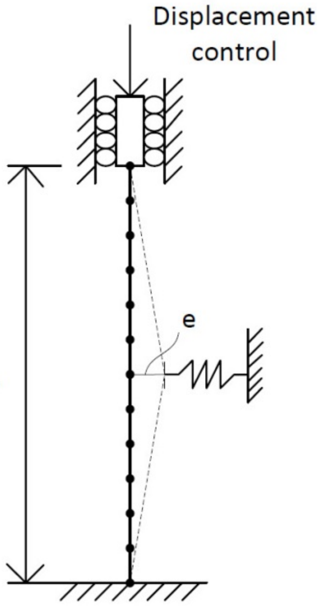
บทที่ 4

แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกน

โดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้าง

จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ไม่มีค้ำยันทางด้านที่แสดงผลในบทที่ 3 ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาว โดยไม่ได้พิจารณาผลอันเนื่องมาจากค้ำยันทางด้านข้าง ในบทนี้ได้เพิ่มการพิจารณาผลการต้านทานการเสียรูปทางด้านข้าง อันเนื่องมาจากการค้ำยันทางด้านข้าง โดยพิจารณาการค้ำยันช่วงเดียวที่กึ่งกลาง พฤติกรรมของค้ำยันพิจารณาพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยผลการทดสอบที่ได้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเหล็กเสริมตามยาว ลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริม

แบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้าง จะมีจุดรองรับแบบยึดแน่นด้านล่าง และที่ปลายด้านบนจะต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างและการหมุน ยอมให้มีการเสียรูปในแนวแกน โดยเลือกใช้วิธีให้แรงในแนวแกนแบบให้แรงทิศทางเดียว ด้วยวิธีควบคุมด้วยการเคลื่อนที่เหมือนแบบจำลองแบบที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้างแต่จะเพิ่มผลของค่าสติฟเนสของค้ำยัน ที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงความยาว ภายใต้สมมติฐานว่าค่าสติฟเนสของค้ำยันคือ ค่าตัวแปรแสดงความต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กปลอกดังภาพที่ 4.1 โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 หัวข้อหลัก คือ พฤติกรรมของค้ำยันทางด้านข้างเป็นเชิงเส้น และพฤติกรรมของค้ำยันทางด้านข้างไม่เป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 4.1 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้าง

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองมีค้ำยันทางด้านข้างโดยการเปรียบเทียบผลที่ได้กับ อัตราส่วน L/D โดยทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองไม่มีค้ำยันทางด้านข้างที่มีความยาว เท่ากับ L/2ของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้าง โดยการเพิ่มค่าสติฟเนสของสปริง โดยให้ค่าสติฟเนสของสปริงเริ่มต้นตั้งแต่ K_s เท่ากับ 0 จนเพิ่มเรื่อยๆ จนกระทั่งมีพฤติกรรมเทียบเท่าแบบจำลองที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง โดยค่าสติฟเนสของสปริงจะถูกนำเสนอ ในรูปของค่าตัวแปร N_k โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 25 และ 26

$$N_k = \frac{K_S}{K_L} \quad (25)$$

$$K_L = \frac{192EI}{8L^3} \quad (26)$$

โดยที่ K_S คือ ค่าสติฟเนสเชิงเส้นของค้ำยันที่ใช้ในแบบจำลองมีค้ำยันทางด้านข้าง

K_L คือ ค่าสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว

E คือ ค่าโมดูลัสเชิงเส้นของเหล็กเสริม

I คือ ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยในหน้าตัด

L คือ ความยาวช่วงของแบบจำลองมีค้ำยันทางด้านข้าง

ในการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างเพื่อศึกษาค่า K_S ที่เหมาะสม จนสามารถทำให้แบบจำลองที่เดิมไม่มีผลของการค้ำยันทางด้านข้าง มีพฤติกรรมที่ดีขึ้น จนกระทั่งมีค่าความสัมพันธ์ของหน่วยแรง-ความเครียด มีพฤติกรรมดีขึ้นและมีความต้านทานการเสียรูปด้านข้างได้มากขึ้นเทียบเท่ากับ แบบจำลองที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง ที่มีค่าอัตราส่วน L/D เท่ากับครึ่งของแบบจำลองมีค้ำยันทางด้านข้างได้

4.1 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

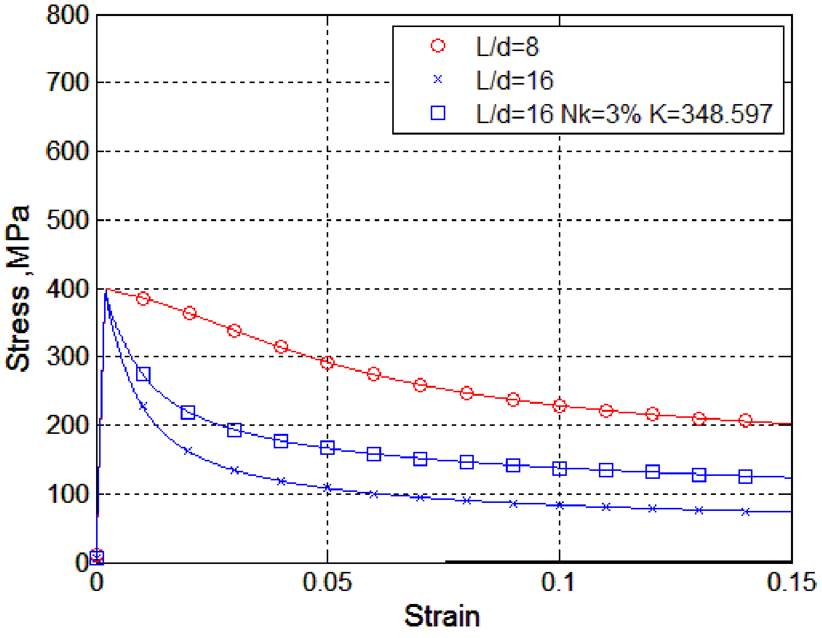
ในการวิเคราะห์แบบจำลองจะใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ค่าความเค้นที่จุดคราก 400 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 202000 MPa และอัตราส่วนความชัน(b)เท่ากับ 0.01 โดยทดสอบที่ L/D =16 โดยอ้างอิงระยะห่างของเหล็กปลอกจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทปี 2553 (สะพานภูมิภาคในเขตชุมชนขนาดเล็กช่วง 10 เมตร) ค่าการเสียรูปเริ่มต้น (e/D) เท่ากับ 0.001 ที่กึ่งกลางของแบบจำลอง โดยทำการปรับค่า K_S ในแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างแล้วนำค่าที่ได้จากเหล็กเสริมรับแรงอัด ของแบบจำลองมาวิเคราะห์ผล ในรูปของอัตราส่วน ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้น แล้วเปรียบเทียบอยู่ในรูปของค่า $\%N_k$ ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.1

4.1.1 พฤติกรรมการรับแรงของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

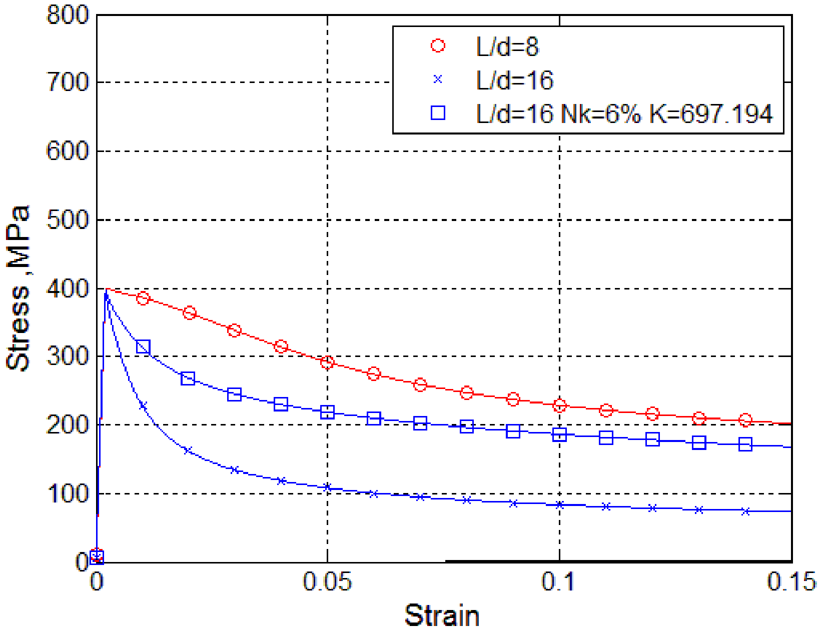
ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นพฤติกรรมการรับแรงที่เกิดขึ้นของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น โดยแสดงผลในรูปความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดทุกๆ การเปลี่ยนแปลงสติฟเนสของค้ำยันทางด้านข้าง

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดในการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

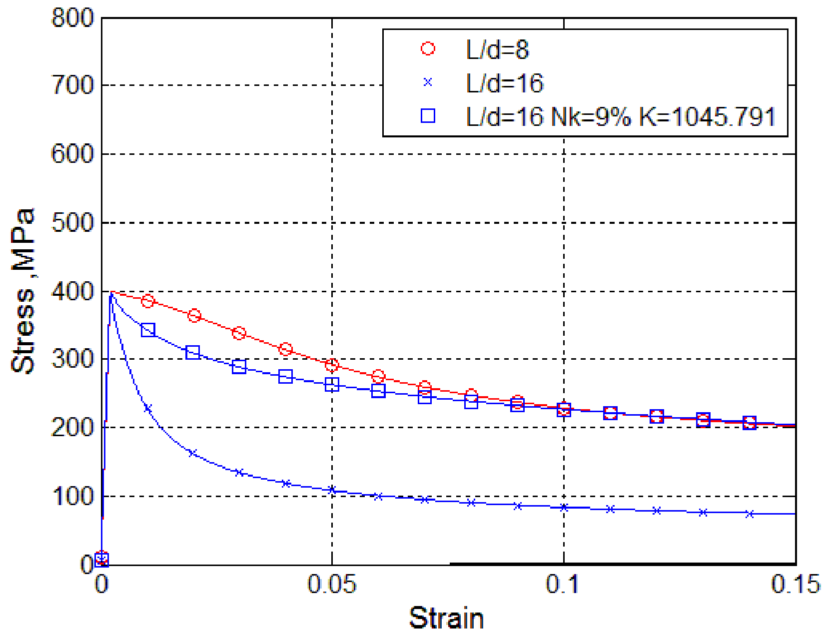
Diameter (mm)	L/D	K_L(N/mm)	%N_K	K_S(N/mm)	Remark
25	16	11619.9	0	0	L/D=16
			3	348.5971	
			6	697.1943	
			9	1045.791	
			12.58	1461.988	$K_{bending}$
			15	1742.986	
			20	2323.981	
			25	2904.976	
			40	4647.96	
			60	6971.94	
			80	9295.92	
			100	11619.9	
			120	13943.8854	
			200	23239.809	
			655	76200	K_{axial}



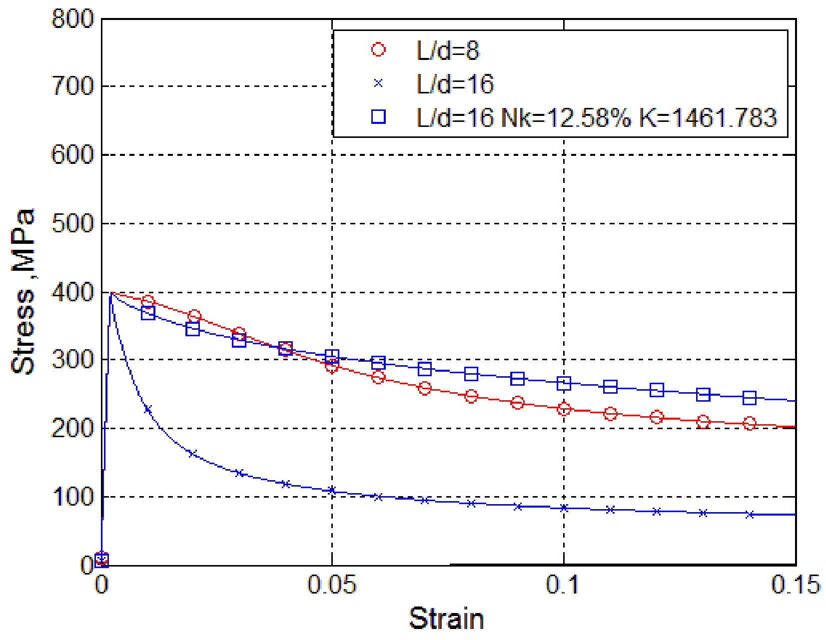
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =3%



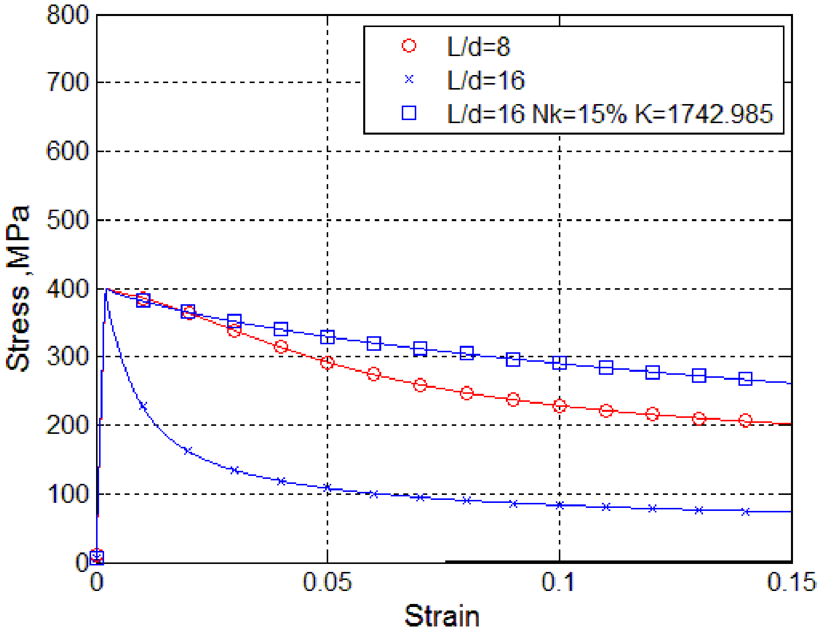
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =6%



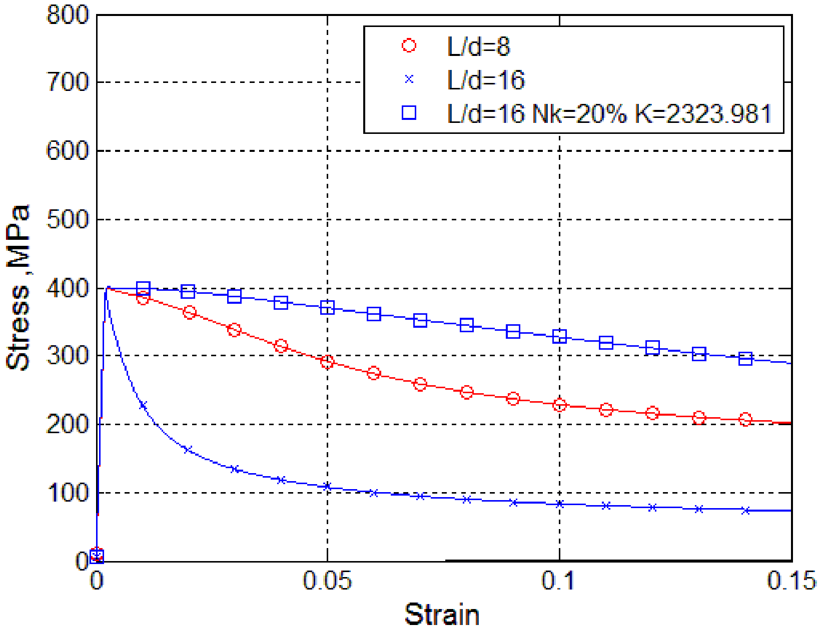
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =9%



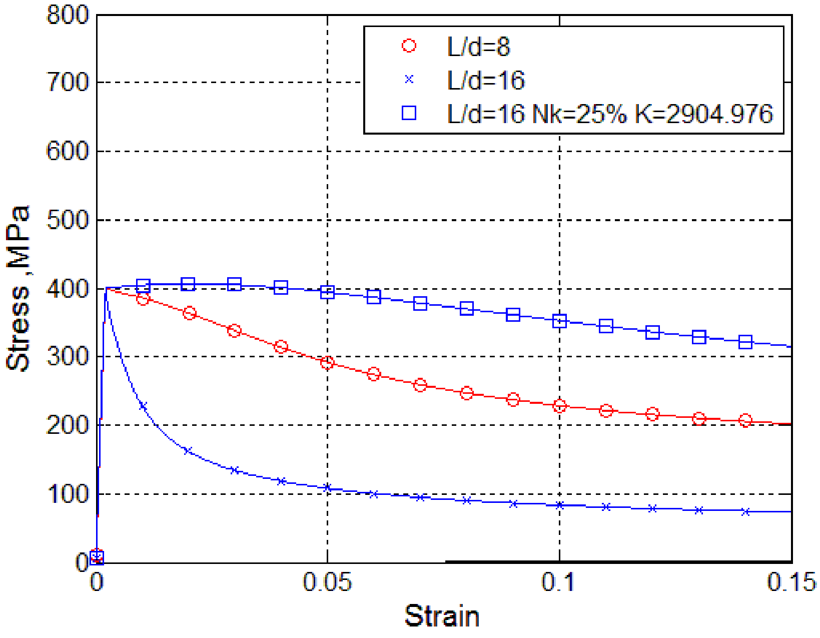
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =12.58%



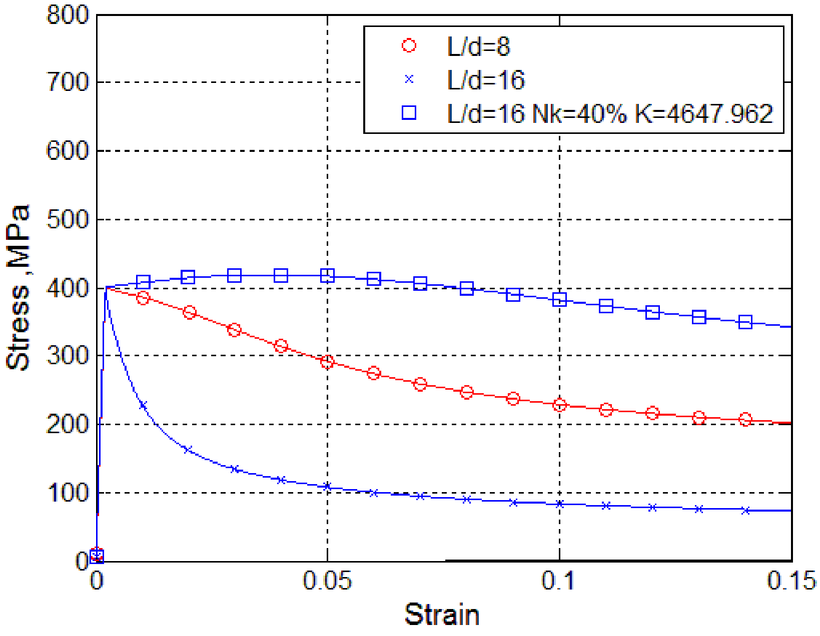
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =15%



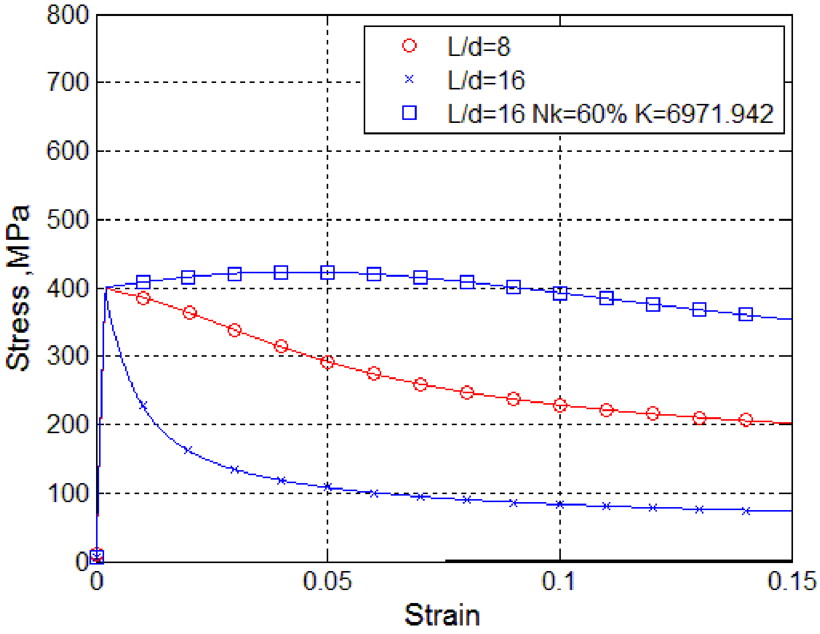
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =20%



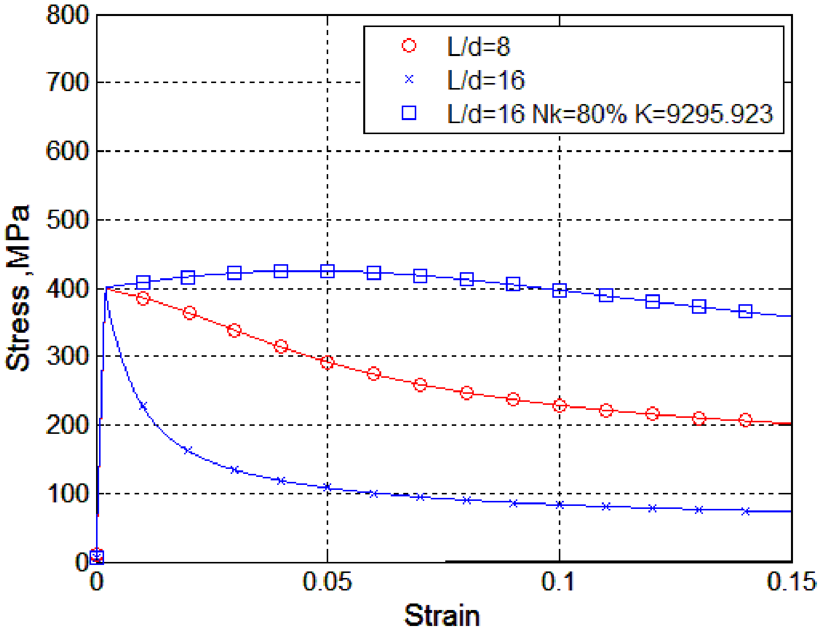
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =25%



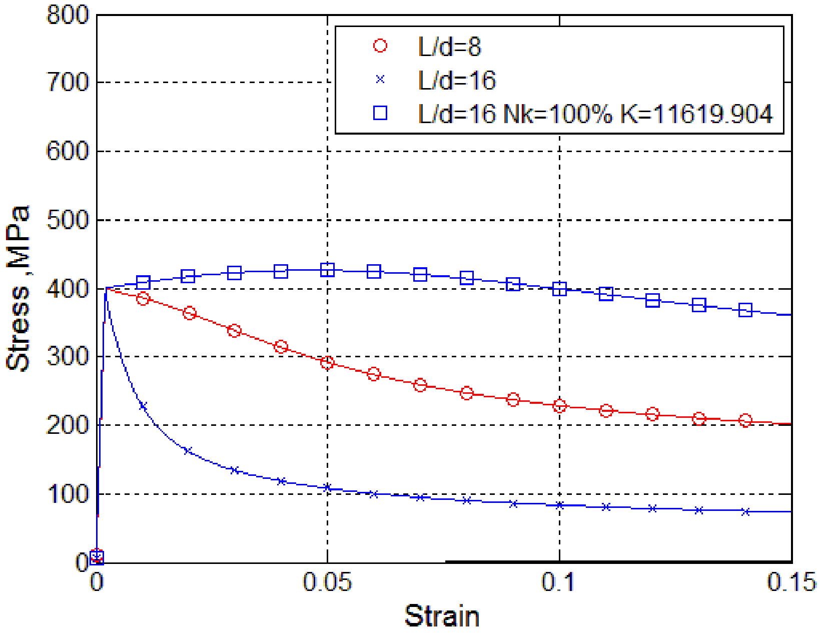
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =40%



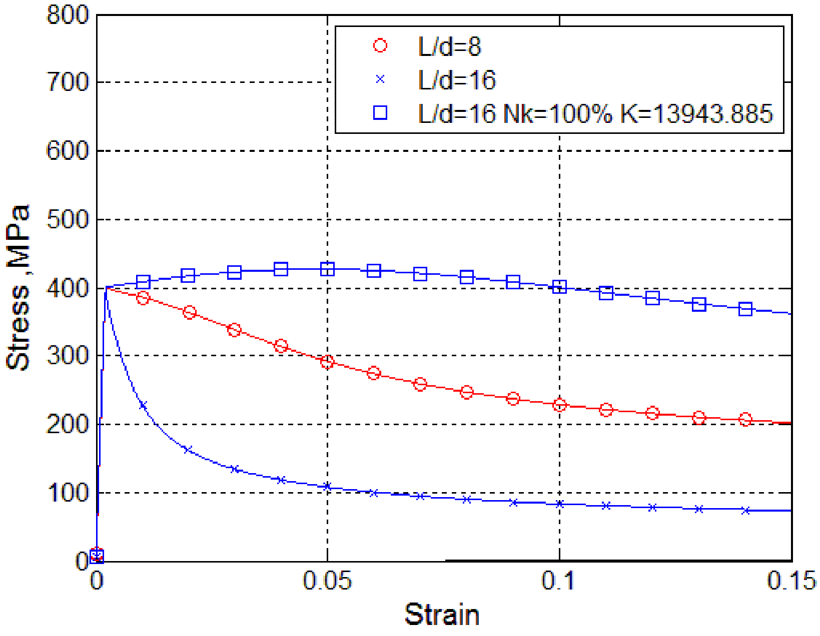
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =60%



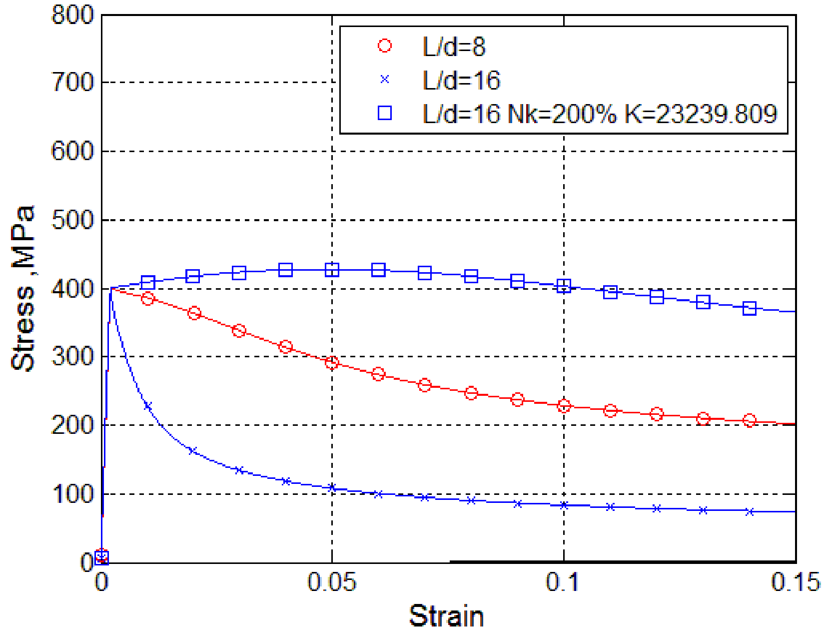
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =80%



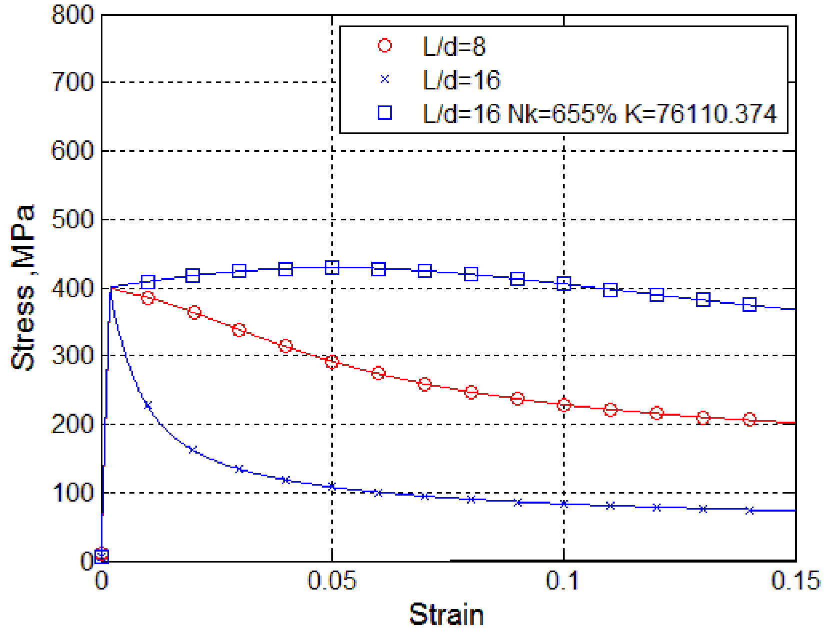
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =100%



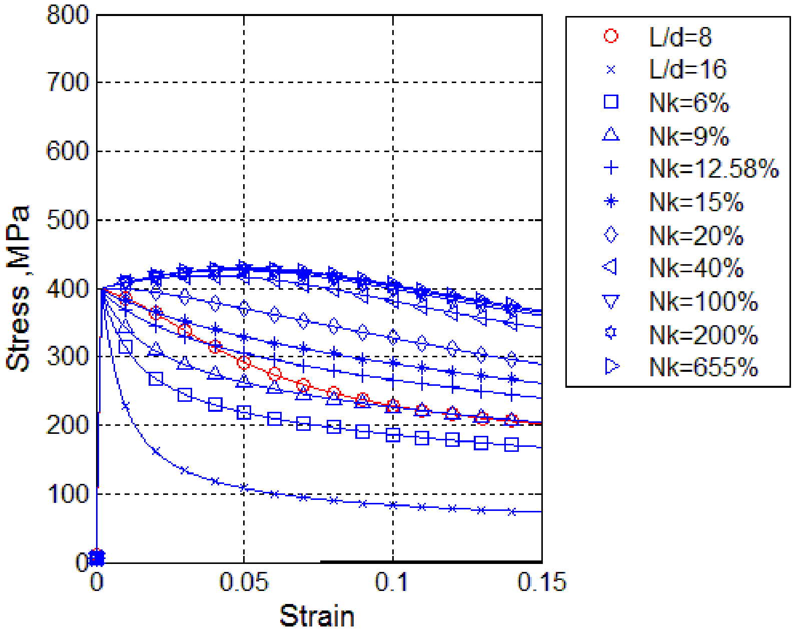
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =120%



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =200%

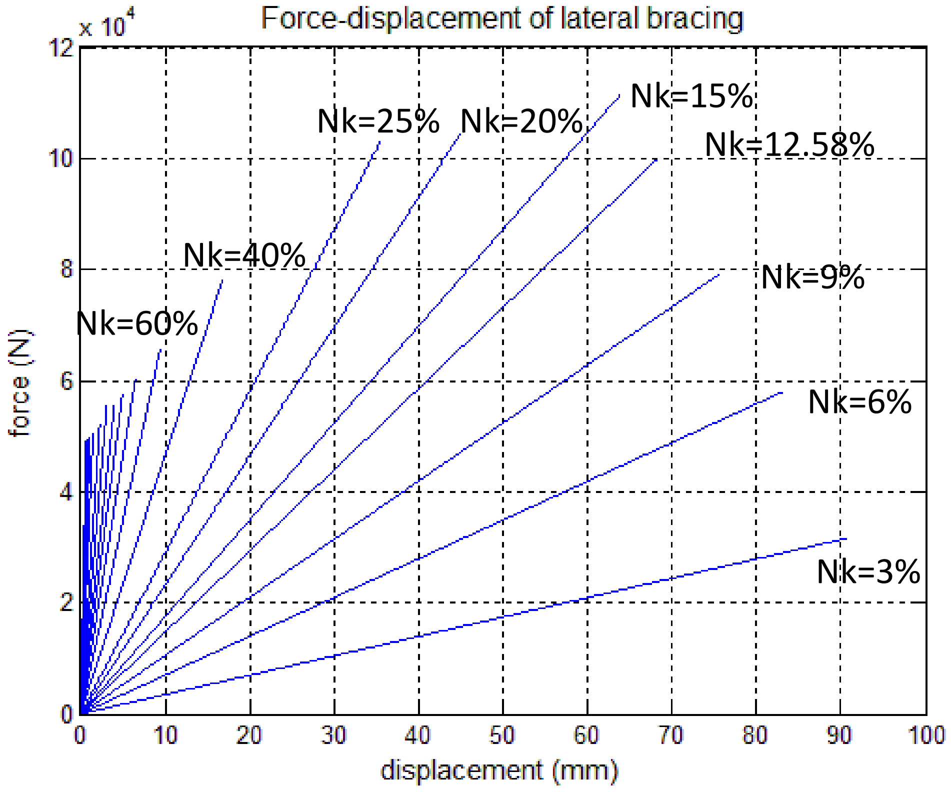


ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k =655%



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ N_k ต่างๆ

จากภาพที่ 4.2-4.15 แสดงให้เห็นการพัฒนาพฤติกรรมการรับแรงของแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัดในแนวแกนที่มีพฤติกรรมของค้ำยันทางด้านข้างเป็นเชิงเส้น เมื่อเพิ่มสติฟเนสของค้ำยันมากขึ้นหน่วยแรงที่รับได้ของแบบจำลองมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเพิ่มค่าของสติฟเนสของค้ำยันจนถึง 9%ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว พฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะใกล้เคียงแบบจำลองเหล็กเสริมที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้างที่อัตราส่วน L/D=8 จากภาพที่ 4.16 เมื่อเพิ่มสติฟเนสของค้ำยันจนถึงประมาณ 60% ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว กำลังจะพัฒนาขึ้นเพียงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าสติฟเนสของค้ำยันจะมากขึ้น

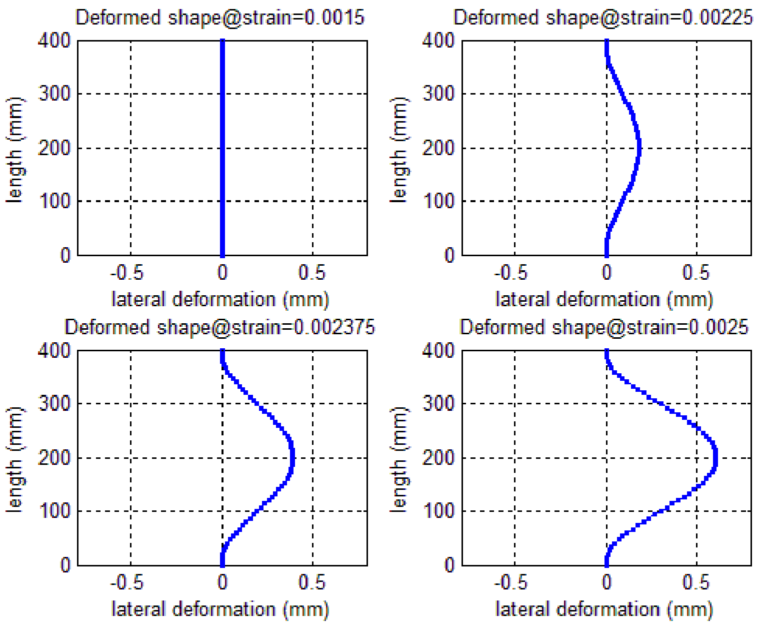


ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k ต่างๆ

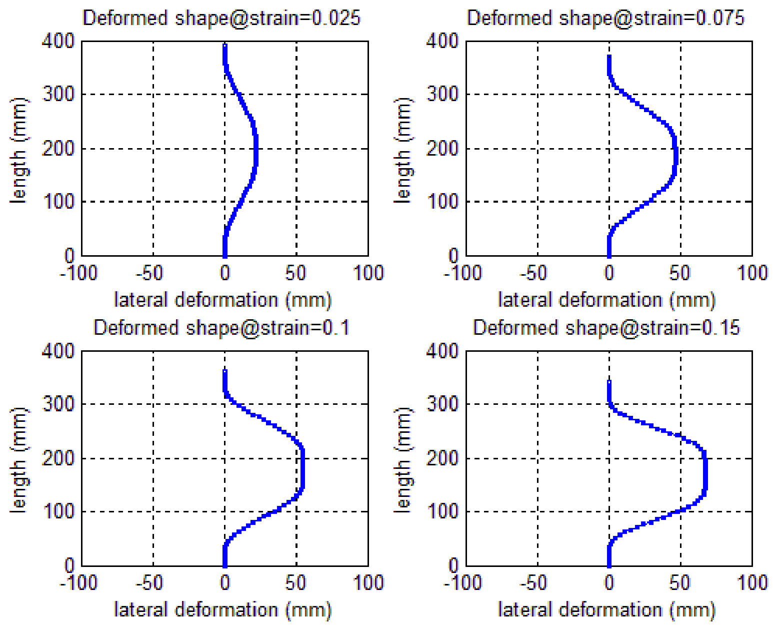
พฤติกรรมของค้ำยันแสดงโดยภาพที่ 4.17 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสติฟเนสของค้ำยันมากขึ้น ความชันของกราฟชันมากขึ้นแรงที่เกิดขึ้นภายในค้ำยันสูงขึ้น จนกระทั่งเพิ่มสติฟเนสเกิน 15%ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว แรงภายในที่เกิดขึ้นลดลง จนกระทั่งเพิ่มค่าของสติฟเนสจนกระทั่งถึง 150%ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้าง แรงภายในที่เกิดลดลงเพียงเล็กน้อยถึงแม้ว่าสติฟเนสของค้ำยันจะมากขึ้น

4.1.2 พฤติกรรมการเสียรูปทางด้านข้างของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

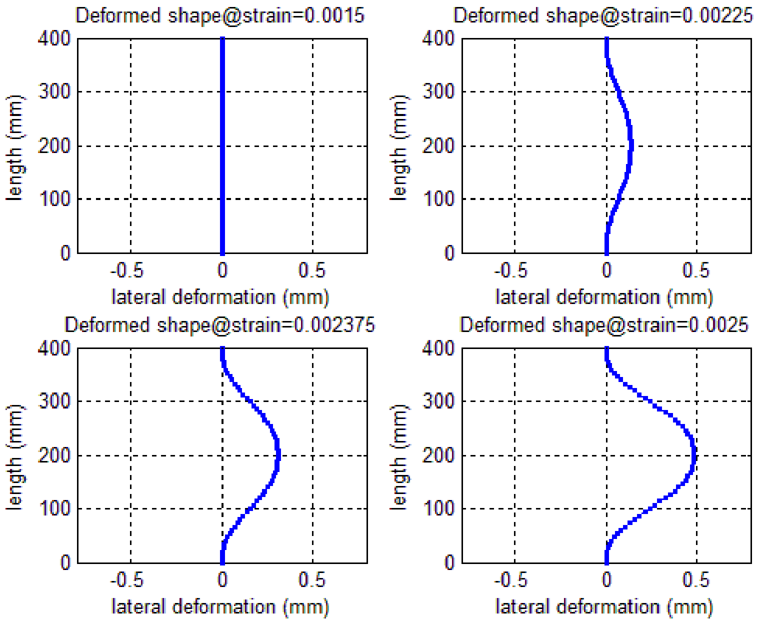
ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นพฤติกรรมการเสียรูปทางด้านข้างของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างจุดครากและหลังจุดครากที่ตำแหน่งความเครียดต่างๆเพื่อพิจารณาลักษณะการเสียรูปประกอบกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง



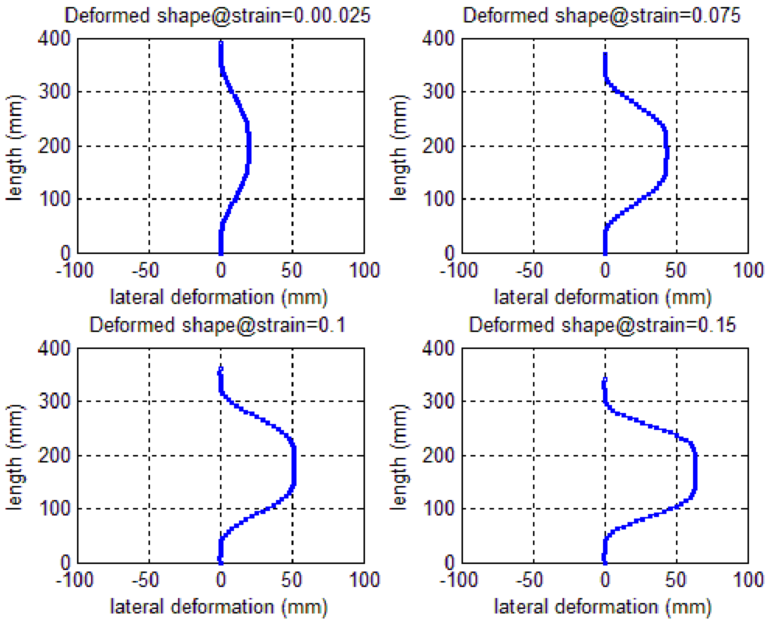
ภาพที่ 4.18 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=12.58%



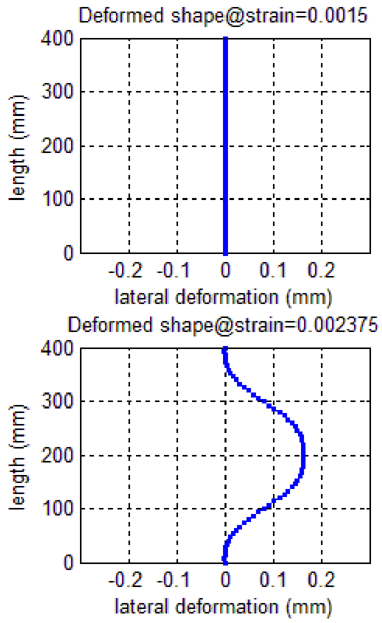
ภาพที่ 4.19 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=12.58%



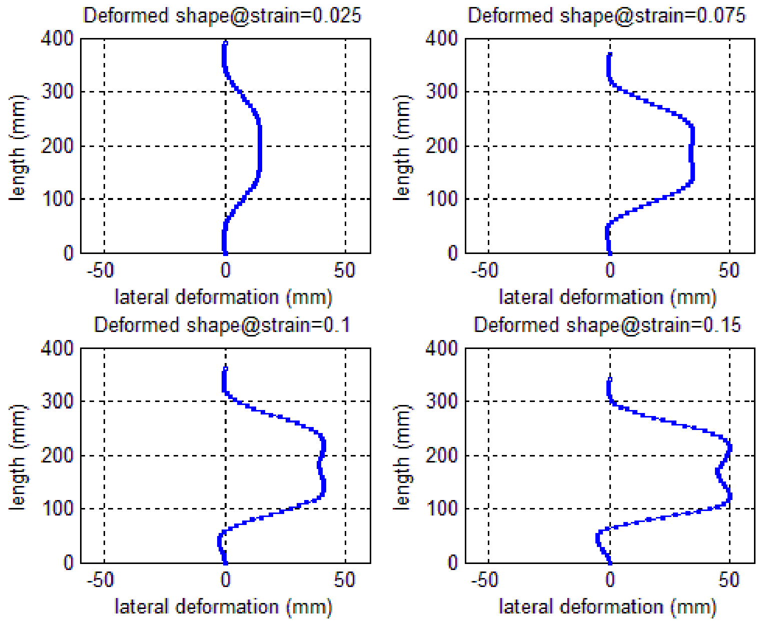
ภาพที่ 4.20 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=15%



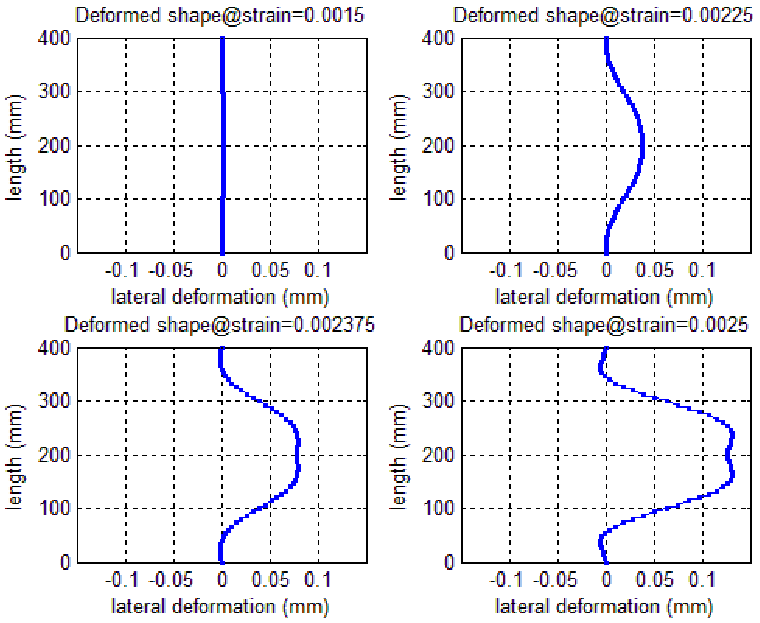
ภาพที่ 4.21 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=15%



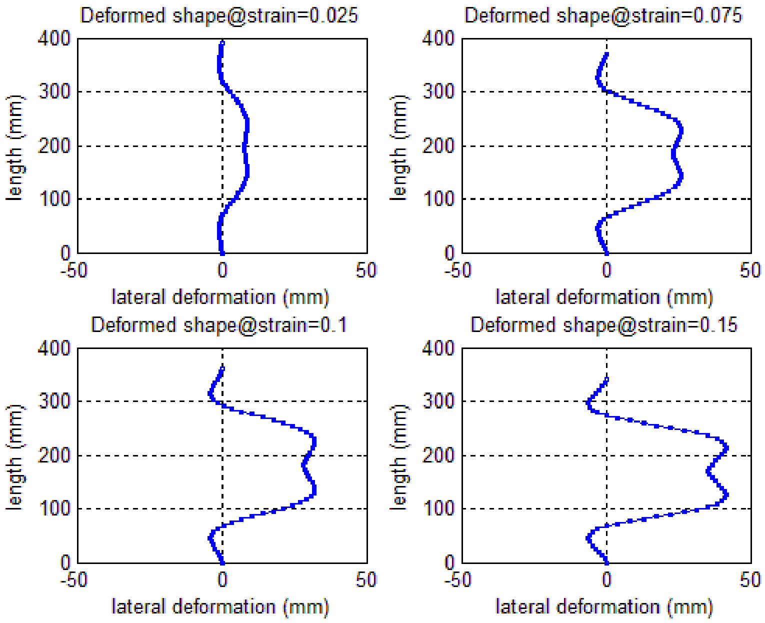
ภาพที่ 4.22 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=20%



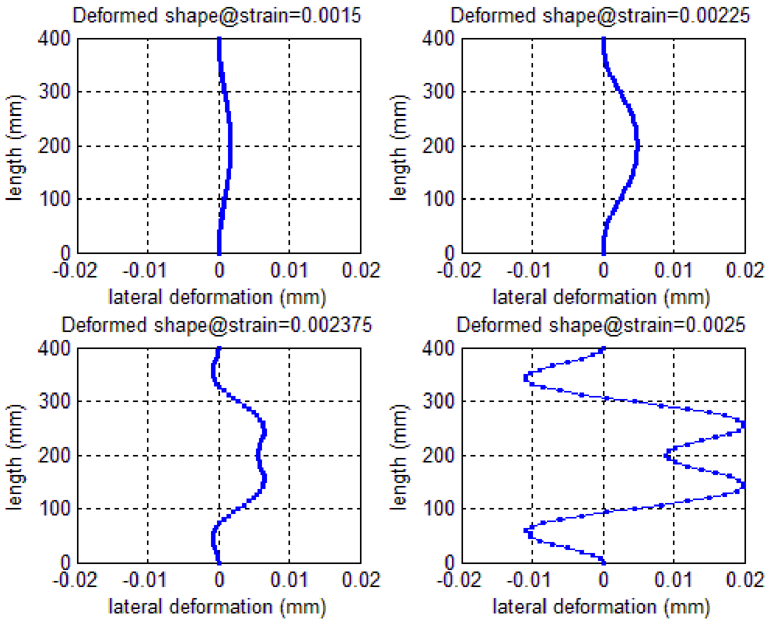
ภาพที่ 4.23 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=20%



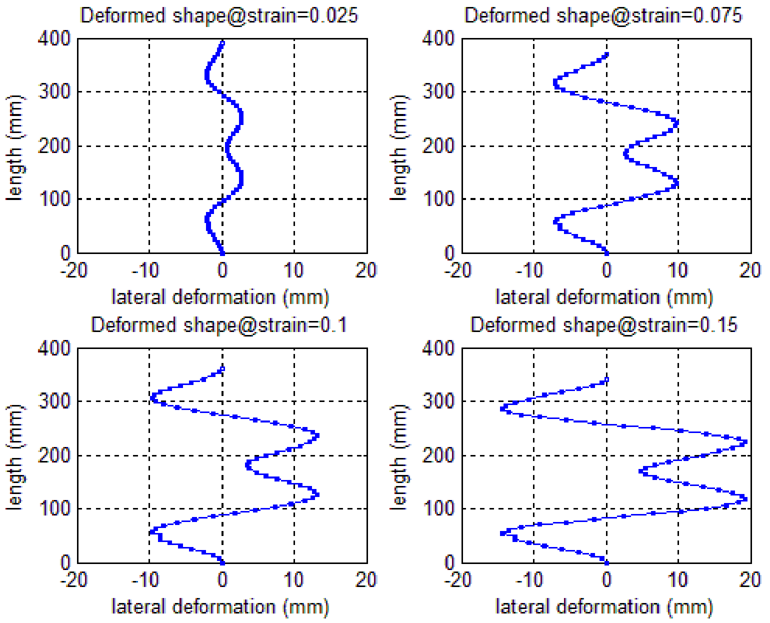
ภาพที่ 4.24 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=25%



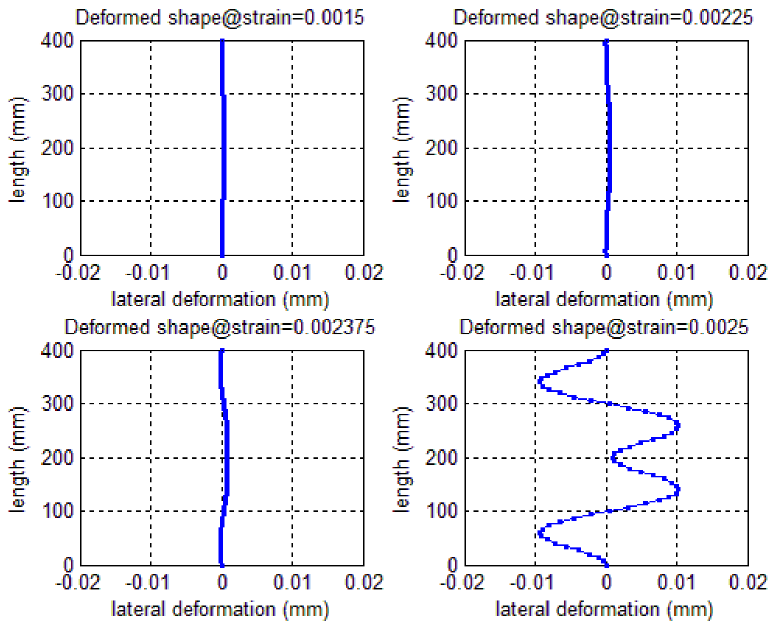
ภาพที่ 4.25 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=25%



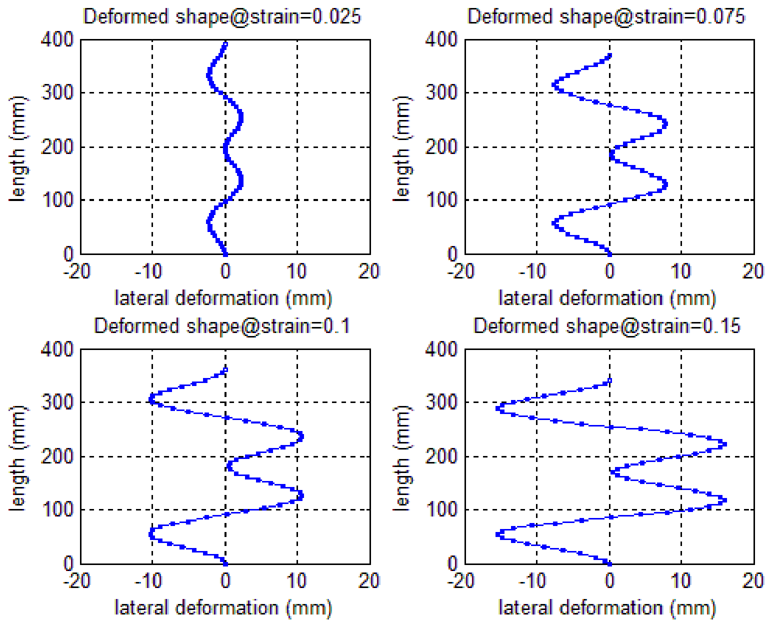
ภาพที่ 4.26 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=100%



ภาพที่ 4.27 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=100%



ภาพที่ 4.28 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงระหว่างเหล็กเสริมถึงจุดคราก ที่ Nk=655%

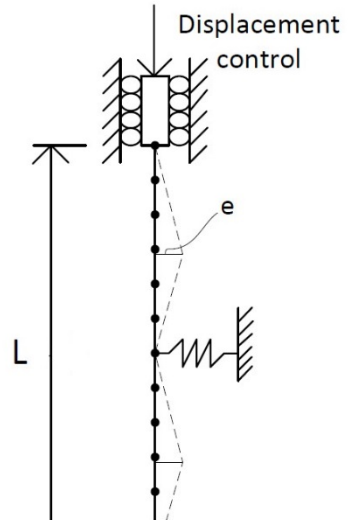


ภาพที่ 4.29 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาวช่วงหลังจุดครากของเหล็กเสริม ที่ Nk=655%

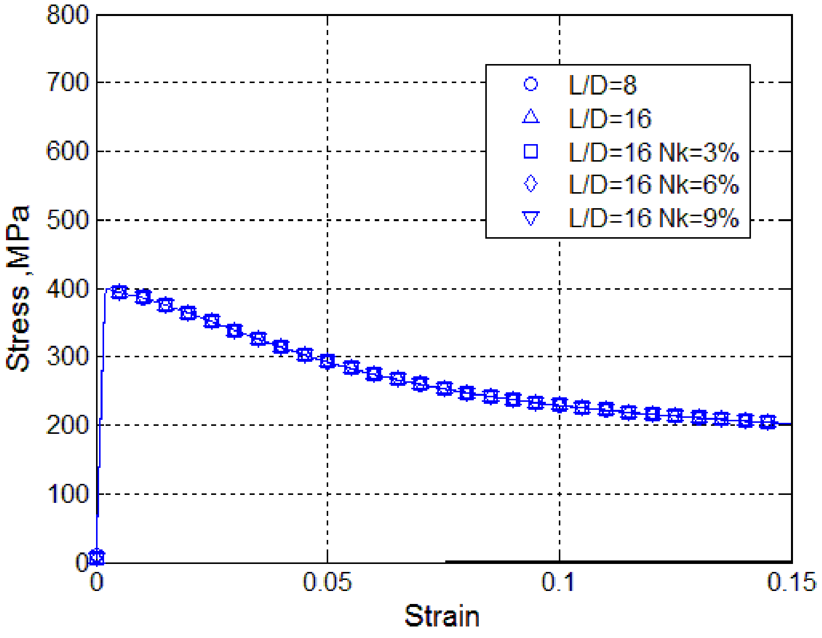
จากภาพที่ 4.18-4.21 แสดงให้เห็นลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมที่รับแรงอัดในแนวแกนที่มีผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างจุดครากและหลังจุดครากของเหล็กเสริม เห็นได้ว่าค้ำยันทางด้านข้างทำหน้าที่ต้านทานการเสียรูปได้มากกว่าขึ้นเมื่อสติฟเนสมากขึ้นสังเกตได้จากระยะการเคลื่อนทางด้านข้างของเหล็กเสริม ณ ตำแหน่งกึ่งกลางลดลงเมื่อสติฟของค้ำยันสูงขึ้น จากภาพที่ 4.22 -4.29 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสติฟเนสของค้ำยันมีค่ามากขึ้นเกิน 15%ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างลักษณะการเสียรูปจะเปลี่ยนรูปแบบเป็นอีกmode ที่ความเครียดตั้งแต่ 0.0025 ซึ่งเป็นความเครียดที่จุดคราก การเสียรูปจะเปลี่ยนรูปแบบเป็นอีกmode เมื่อความเครียดเลยความเครียดครากไปแล้ว

4.1.3 ผลของการเยื้องศูนย์เริ่มต้นที่ตำแหน่งอื่น

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของแบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีลักษณะการเยื้องศูนย์เริ่มต้นที่ตำแหน่งอื่น แสดงดังภาพที่ 4.29



ภาพที่ 4.30 แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีลักษณะการเยื้องศูนย์เริ่มต้นที่ตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่มีลักษณะการเยื้องศูนย์เริ่มต้นที่ตำแหน่งอื่น

จากภาพที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในรูปแบบนี้ไม่สามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมของค้ำยัน และความความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดนั้นเทียบเท่ากับแบบจำลองที่ไม่มีค้ำยันทางด้ารข้างที่อัตราส่วน L/D=8 ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลของอัตราส่วน L/D=16 ที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง

4.2 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น

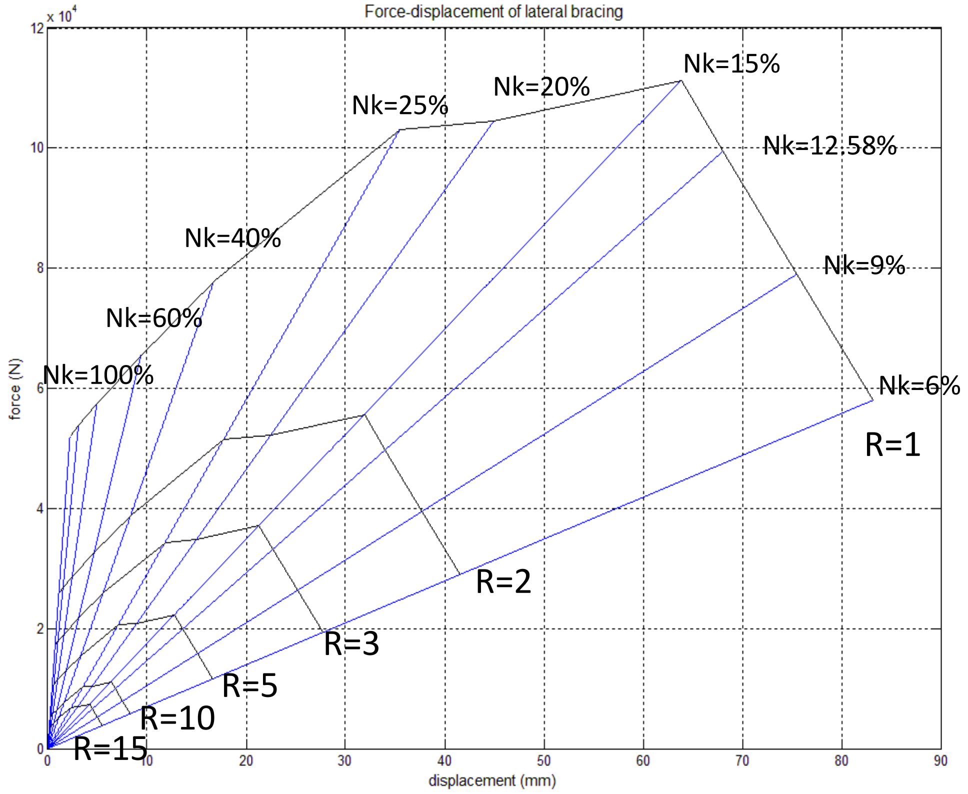
ทำการศึกษาผลของแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น โดยอ้างอิงจากแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่มีค้ำยันทางด้านข้างพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น โดยกำหนดพฤติกรรมของค้ำยันเป็นเชิงเส้นในช่วงต้นในการรับแรงจนกระทั่งแรงภายในของค้ำยันพัฒนาถึงจุดที่มีการเปลี่ยนพฤติกรรมจากเชิงเส้นเป็นไม่เป็นเชิงเส้นโดยจุดดังจะถูกกำหนดโดย ค่าตัวประกอบลดค่า R (reduction factor)โดยพิจารณาจากสมการที่ 27

$$R = \frac{F_{elastic}}{F_{inelastic}} \qquad (27)$$

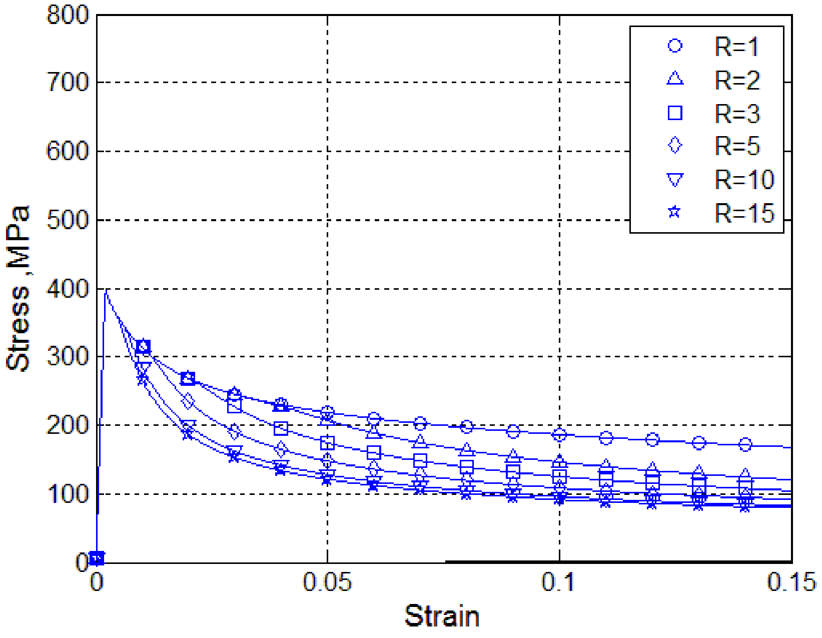
โดยที่ $F_{elastic}$ คือแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นในค้ำยันของแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่มีค้ำยันทางด้านข้างพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

$F_{inelastic}$ คือแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นในค้ำยันที่เปลี่ยนพฤติกรรมจากเชิงเส้นไปเป็นไม่เชิงเส้นของแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่มีค้ำยันทางด้านข้างพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น

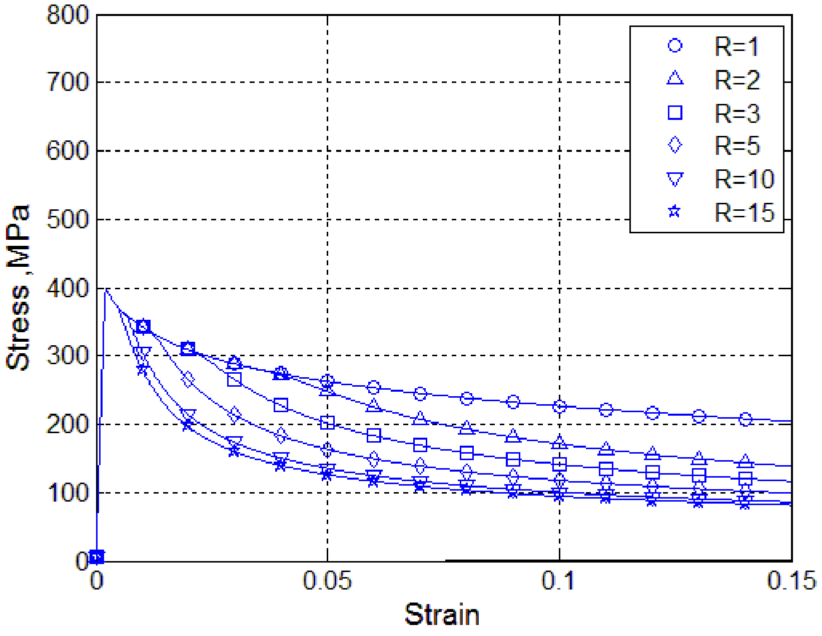
โดยหนดค่า R ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ 1 ,2,3,5,10 และ 15 แบบจำลองคุณสมบัติของค้ำยันที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นไบลิเนีย (Bilinear) โดยความชันที่เปลี่ยนแปลงหลังจุดที่กำหนดให้มีความชันมีค่าน้อยมากเทียบเท่าศูนย์ จุดที่มีการเปลี่ยนความชันที่สติฟของค้ำยันต่างๆที่ R ต่างๆกันแสดงดังภาพที่ 4.31



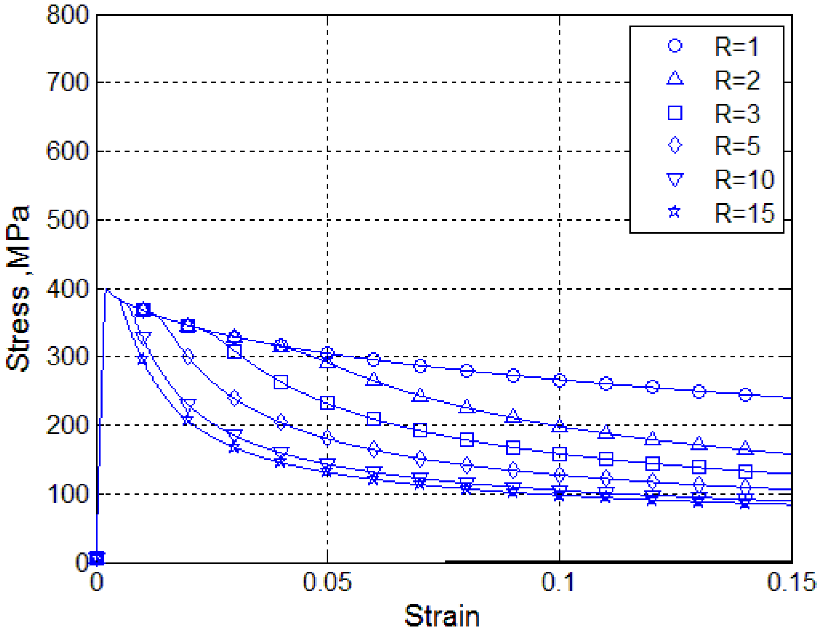
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k ต่างๆและที่ R ต่างๆกัน



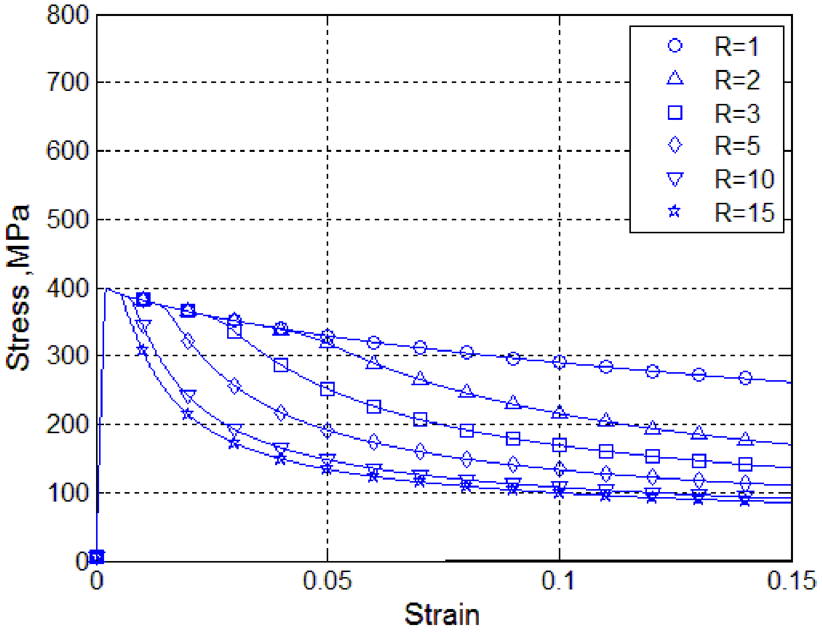
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =6%



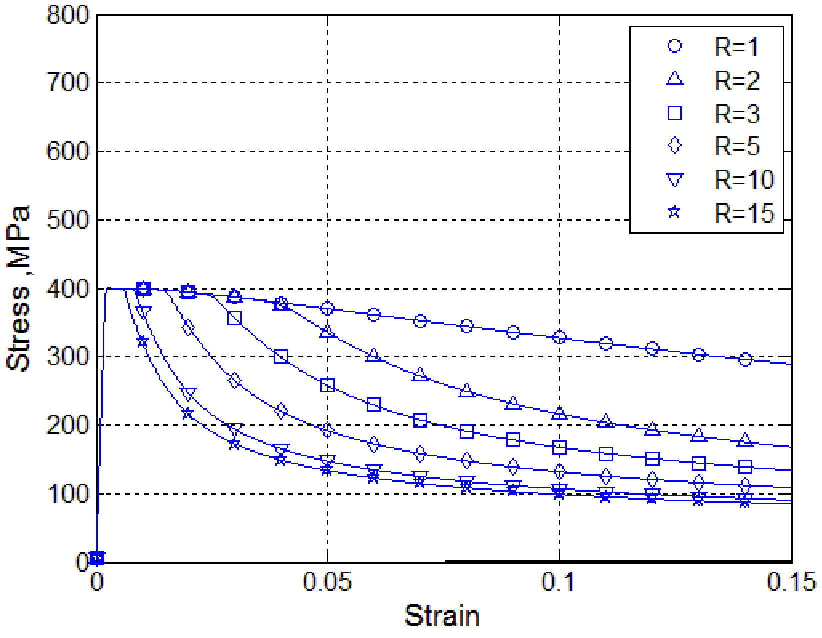
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =9%



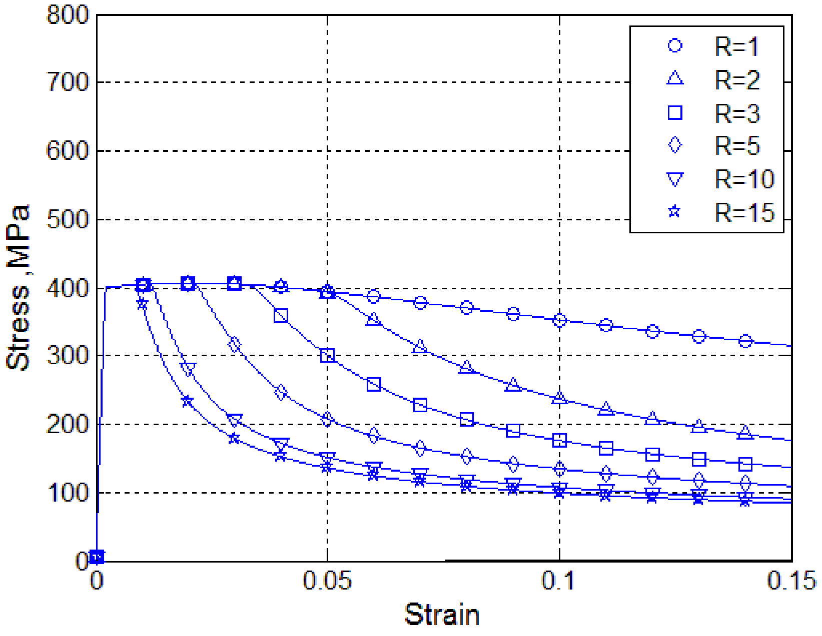
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =12.58%



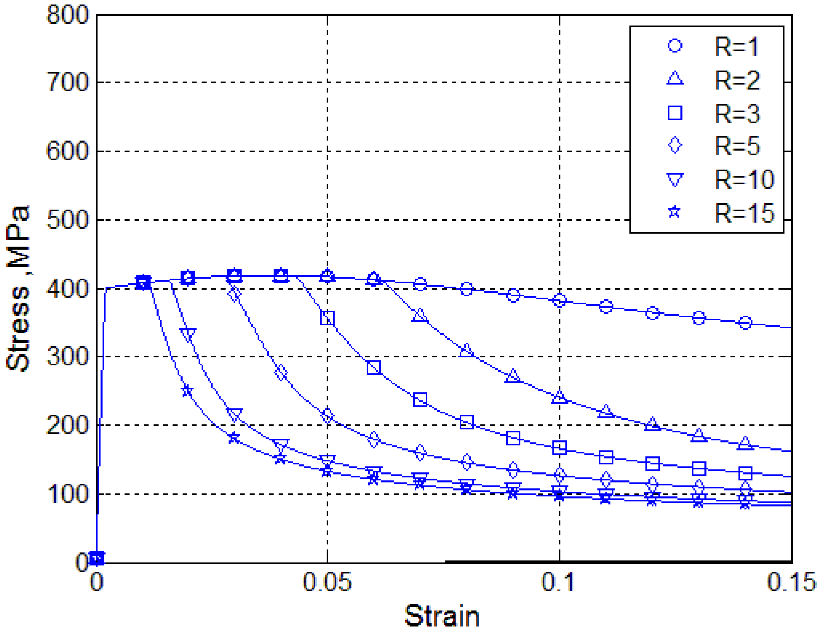
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =15%



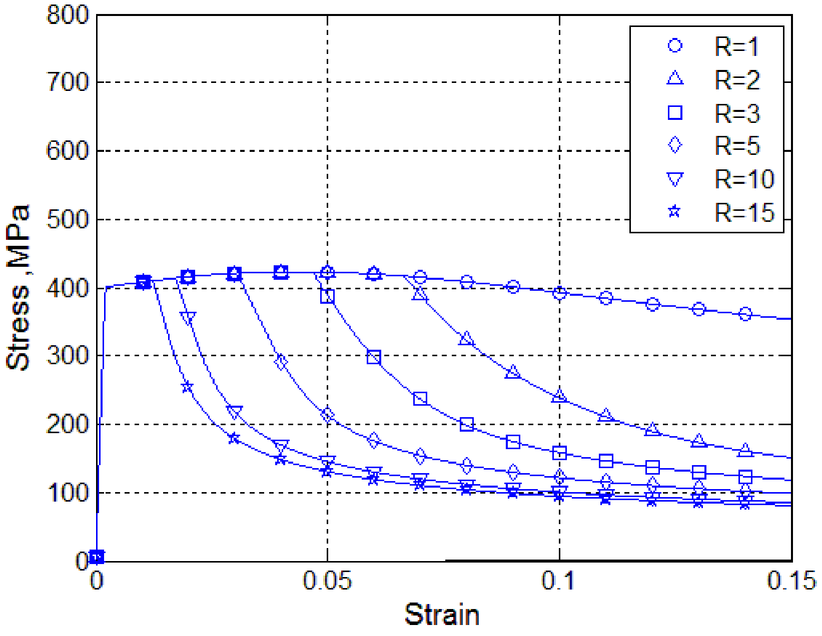
ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =20%



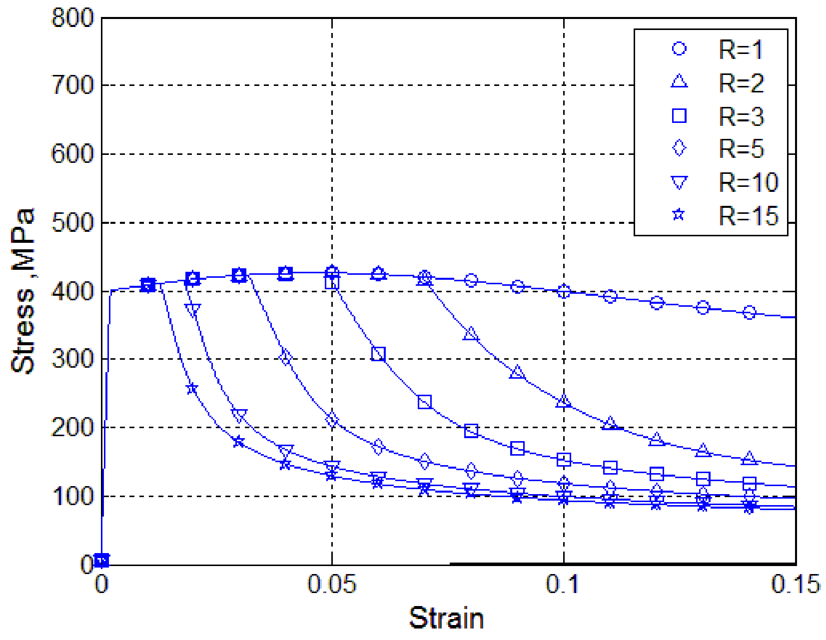
ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =25%



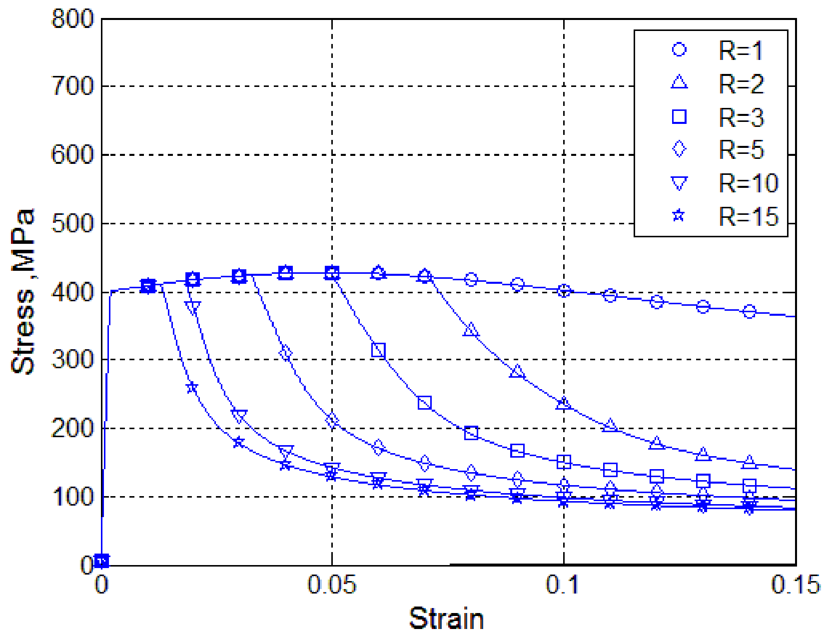
ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =40%



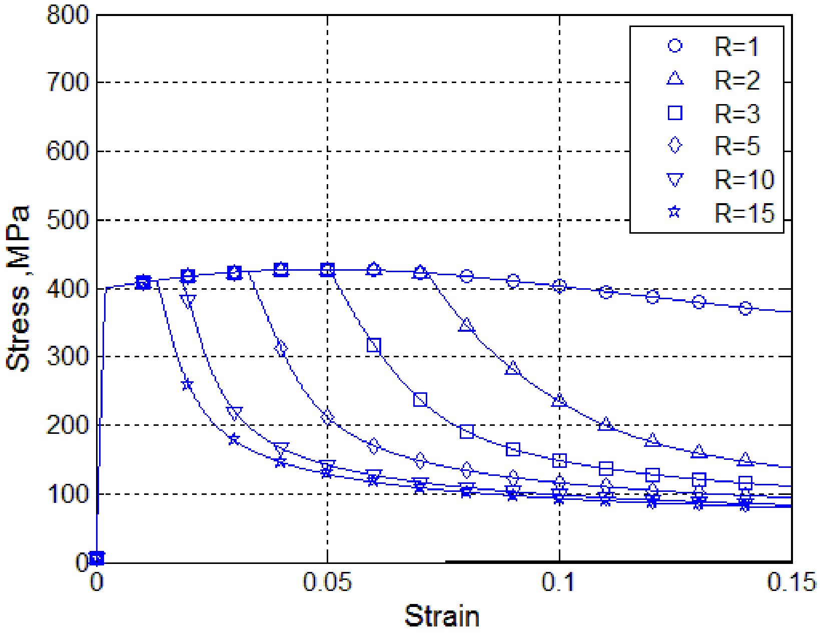
ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =60%



ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =100%

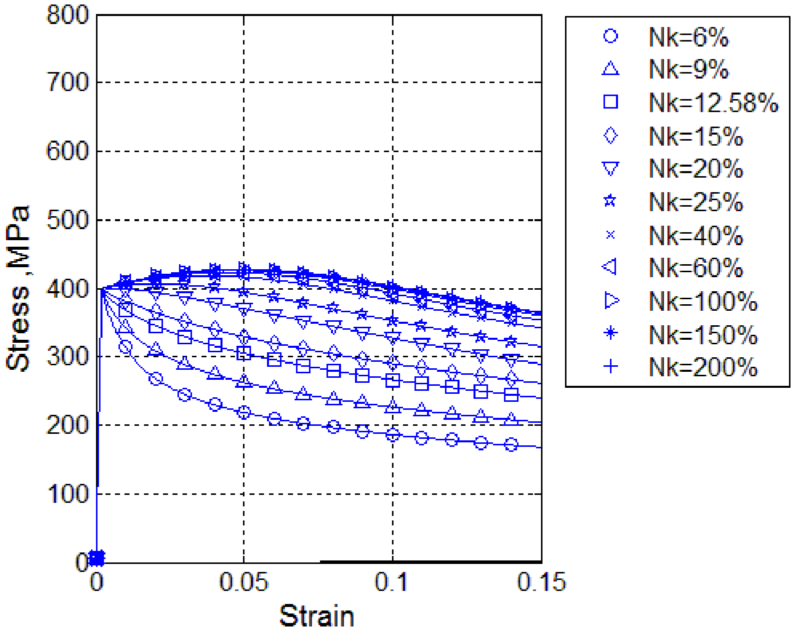


ภาพที่ 4.42 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =150%

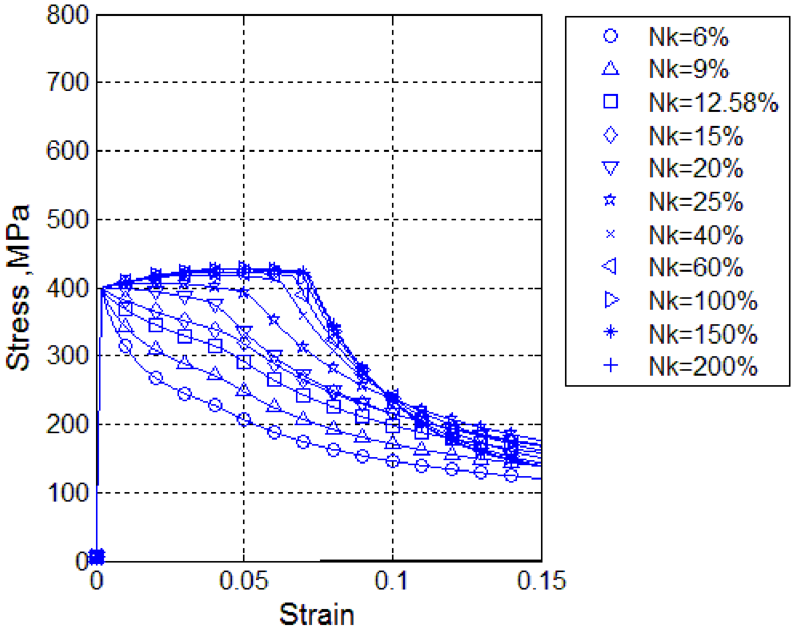


ภาพที่ 4.43 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =200%

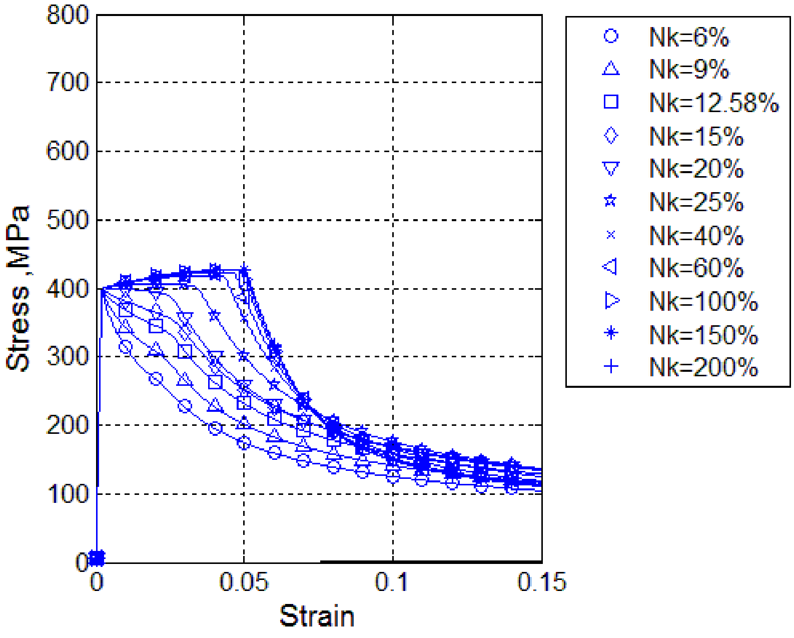
จากภาพที่ 4.33-4.43 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นที่ R ต่างๆกัน เมื่อพิจารณาค่า R แล้วพบว่าเมื่อค่า R เพิ่มขึ้นความเครียดจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงที่ลดลงกะทันหันมีค่าน้องลงยิ่งเพิ่มค่า R มากขึ้นแนวโน้มพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นจะใกล้เคียงแบบจำลองที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้างที่อัตราส่วน L/D เดียวกัน



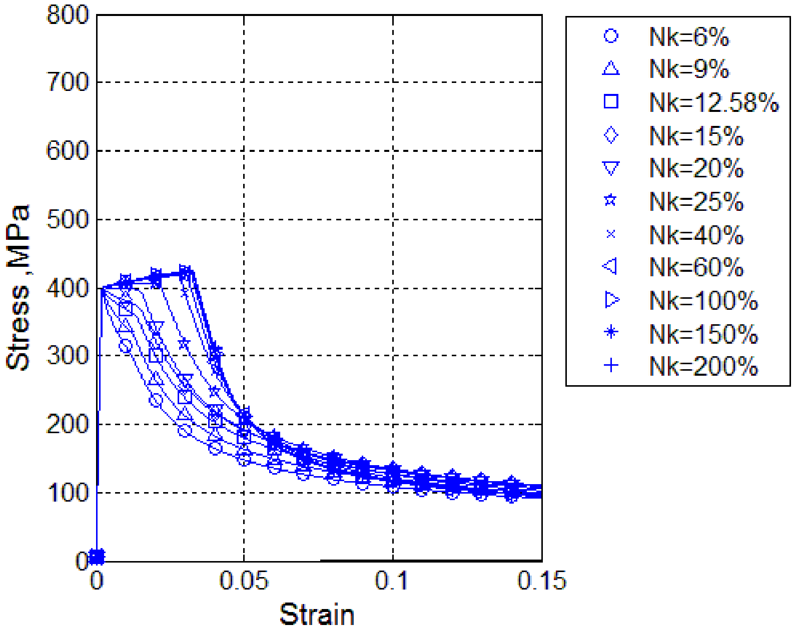
ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ $\%N_k$ ต่างๆ R_k =1



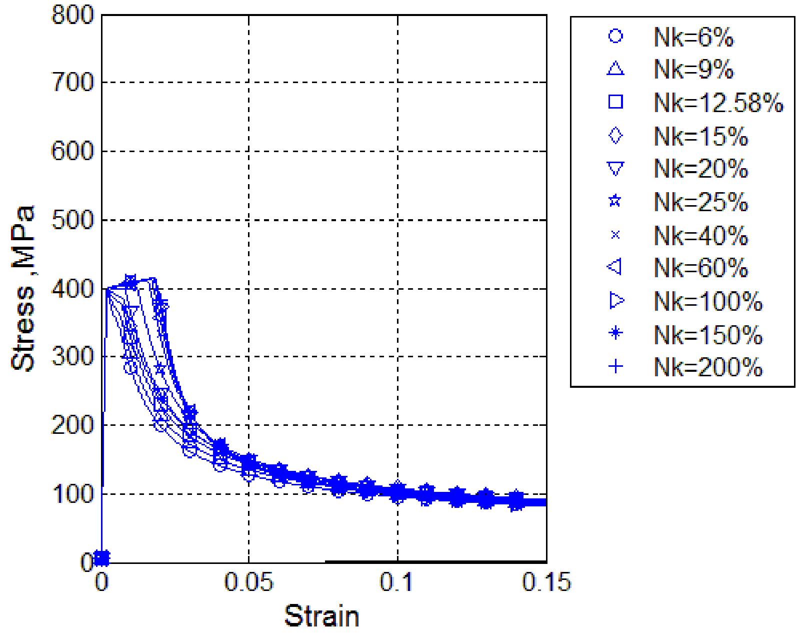
ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ $\%N_k$ ต่างๆ R_k =2



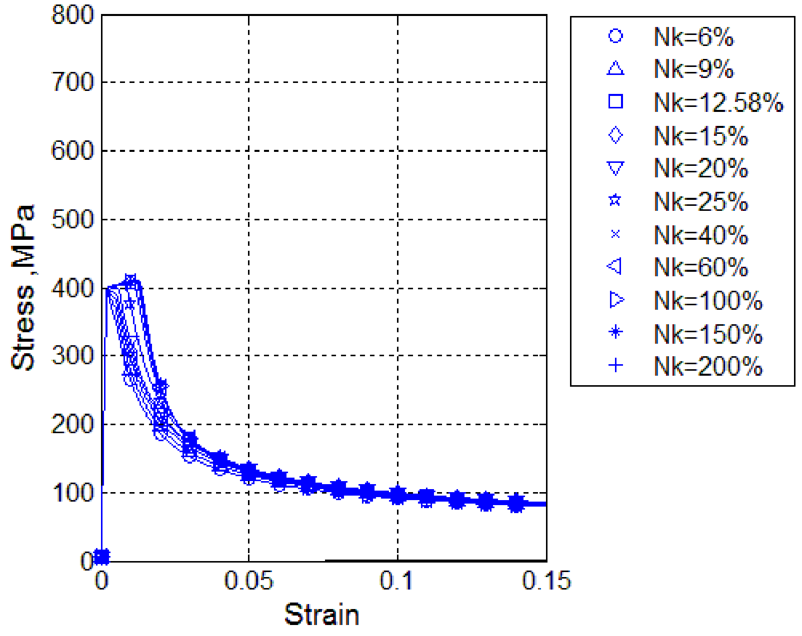
ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ $\%N_k$ ต่างๆ R_k =3



ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ $\%N_k$ ต่างๆ R_k =5



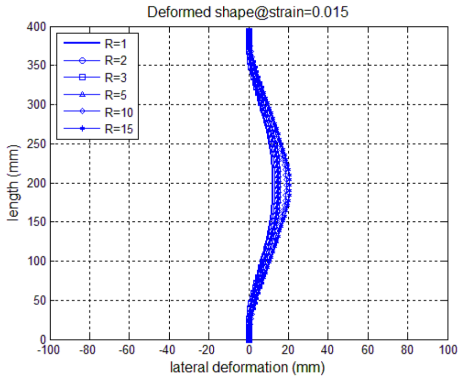
ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =10



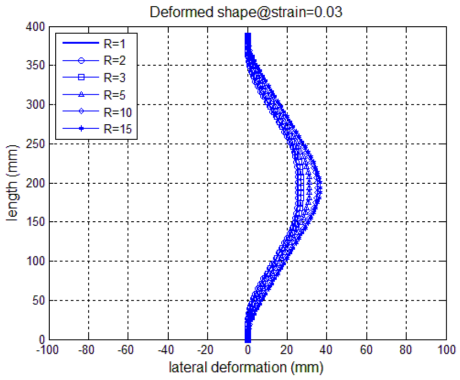
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ %N_k ต่างๆ R_k =15

จากภาพที่ 4.43-4.48 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วนที่ N_k ต่างๆ ที่ R เดียวกันมีพฤติกรรมต่างกันอย่างไร จะพบว่าที่ตั้งแต่ R=2 ยิ่งมีค่าN_kมากจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงอย่างชัดเจน และหน่วยแรงจะลดลงอย่างรวดเร็วหน่วยแรงที่ปลายคงเหลือต่ำกว่าค่าN_kน้อย เนื่องจากค้ำยันทางด้านข้างเมื่อถึงจุดที่แปลงจากพฤติกรรมจากเชิงเป็นพฤกรรมไม่เป็นเชิงเส้นแรงที่ค้างอยู่นั้นในกรณีที่ N_k มากนั้นแรงที่ค้างอยู่นั้นน้อยกว่าแรงที่คงค้างกรณที่ N_k น้อยดังแสดงในภาพที่ 4.32

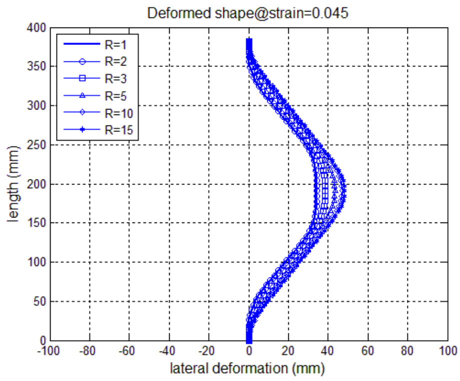
4.2.2 พฤติกรรมการเสียรูปทางด้านข้างของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น



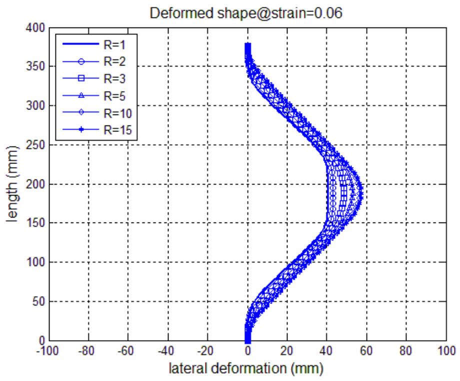
(a)



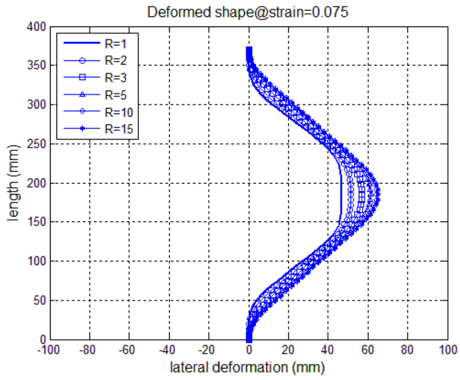
(b)



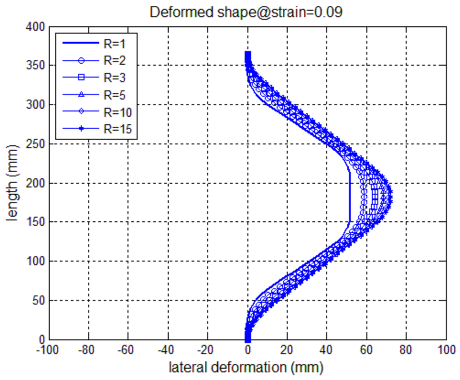
(c)



(d)

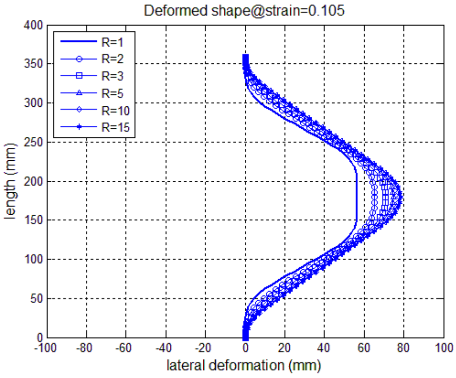


(e)

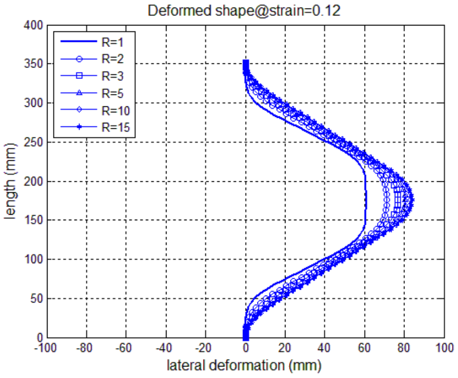


(f)

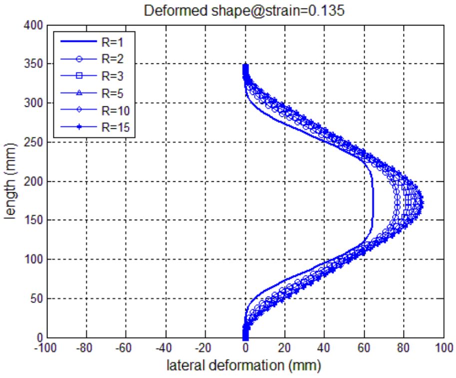
ภาพที่ 4.50 (a)-(f)การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% ที่ R ต่างๆ ณ ความเครียดต่างๆ



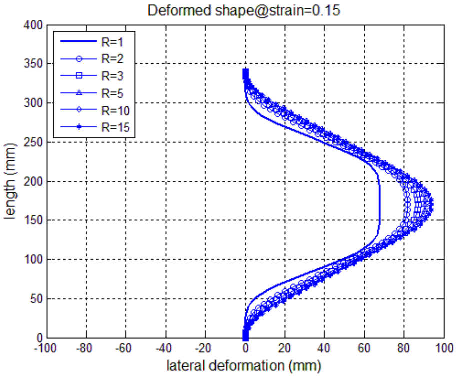
(g)



(h)



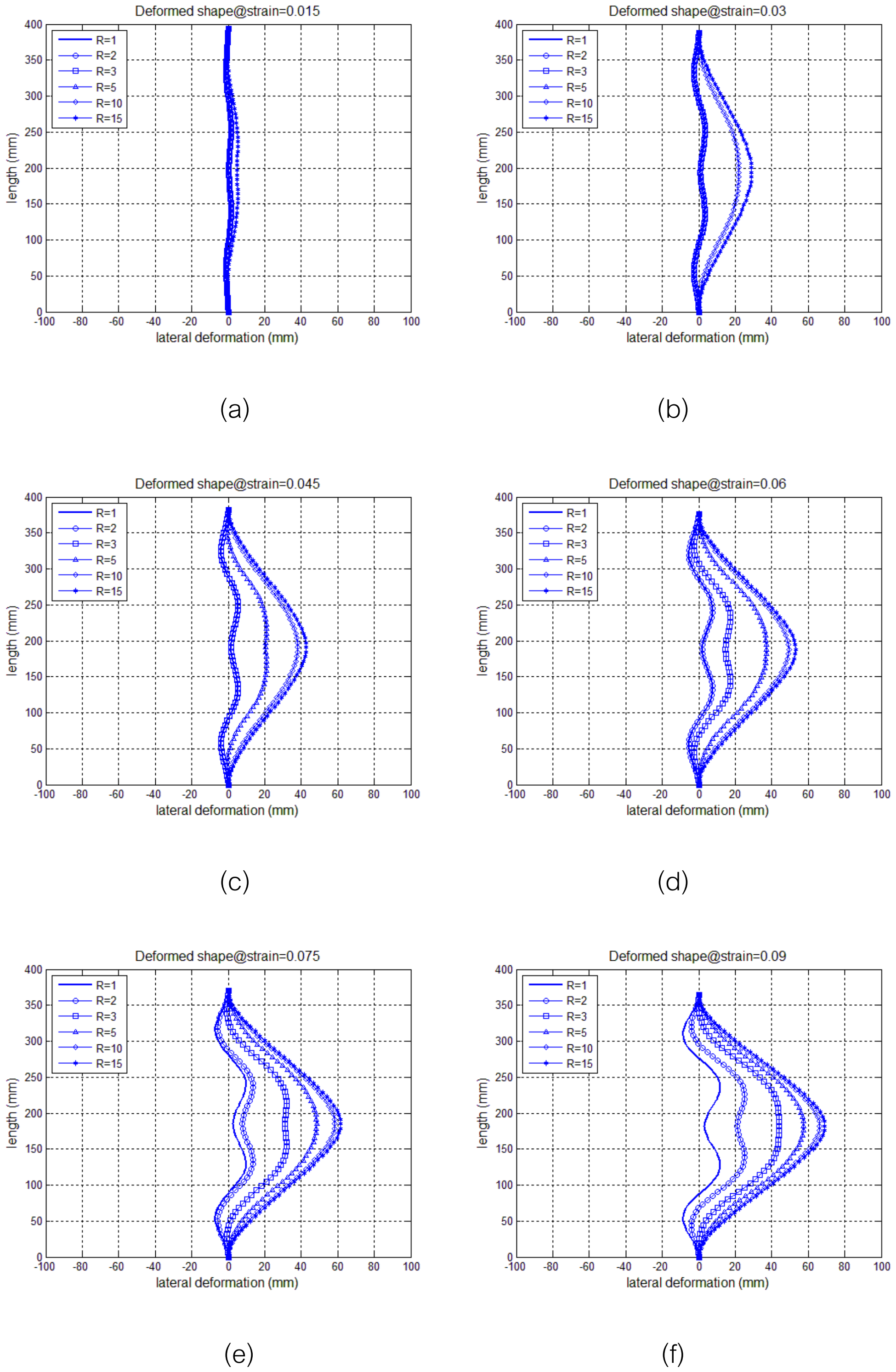
(i)



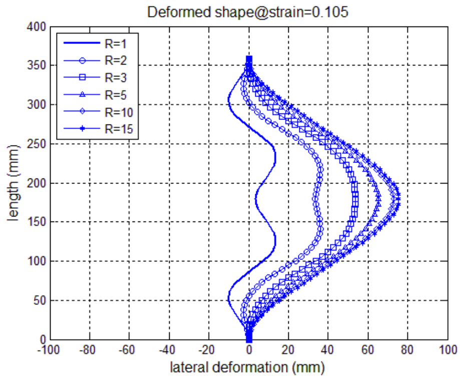
(j)

ภาพที่ 4.50(ต่อ) (g)-(j)การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% ที่ R ต่างๆ ณ ความเครียดต่างๆ

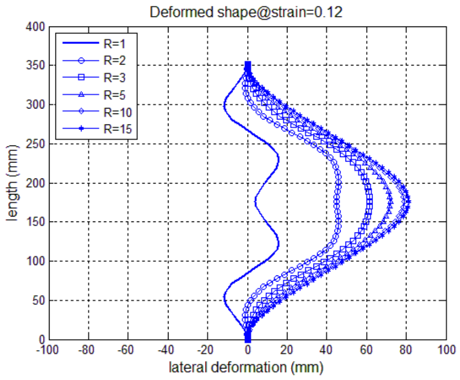
จากภาพที่ 4.50แสดงให้เห็นว่าการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% ที่ R มากขึ้น ค้ำยันทางด้านข้างจะมีความสามารถในการต้านการเสียรูปทางด้านข้างลดลงอย่างเห็นได้อย่างชัดแจน สังเกตได้จากระยะการเสียรูปที่กึ่งกลาง ณ จุดที่ค้ำยันเพิ่มขึ้นเมื่อ R เพิ่มมาก



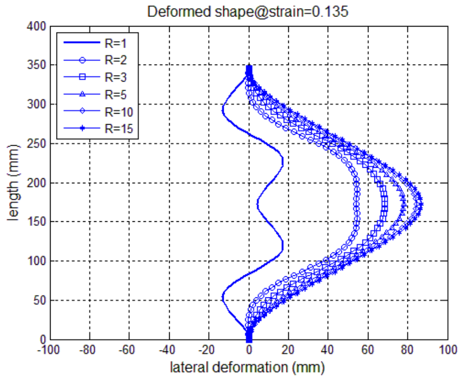
ภาพที่ 4.51 (a)-(f)การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% ที่ R ต่างๆ ณ ความเครียดเท่ากับ 0.015



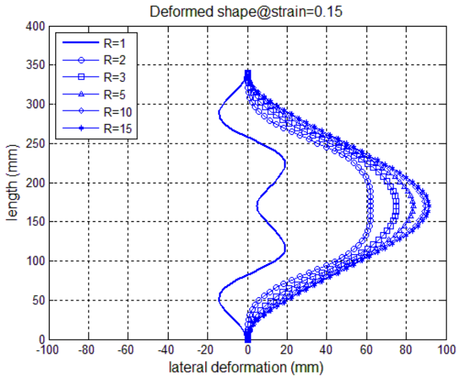
(g)



(h)



(i)



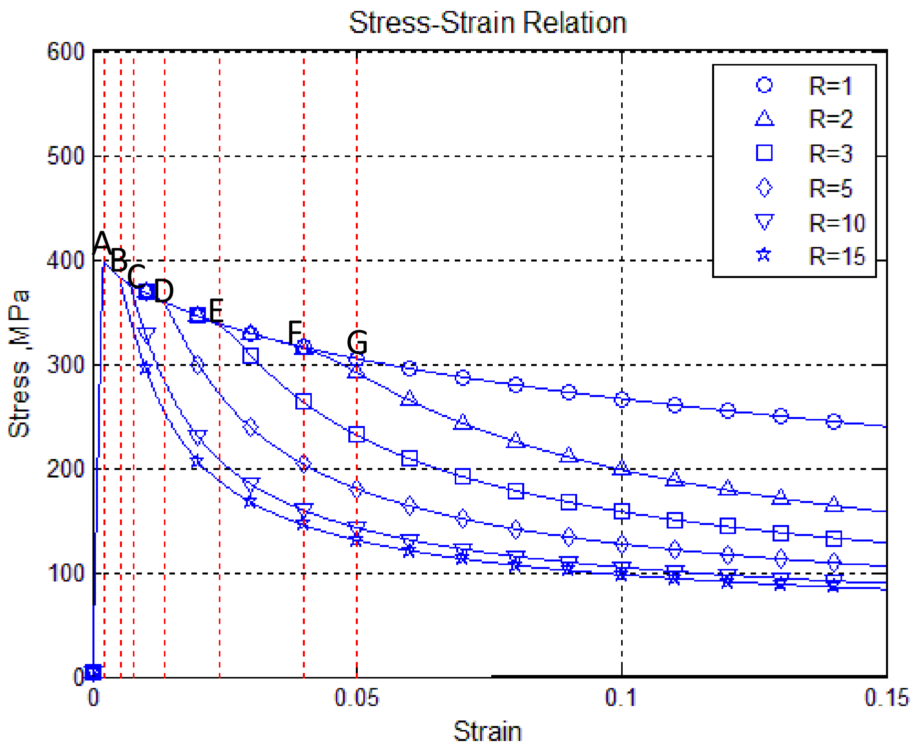
(j)

ภาพที่ 4.51(ต่อ) (g)-(j) การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% ที่ R ต่างๆ ณ ความเครียดเท่ากับ 0.015

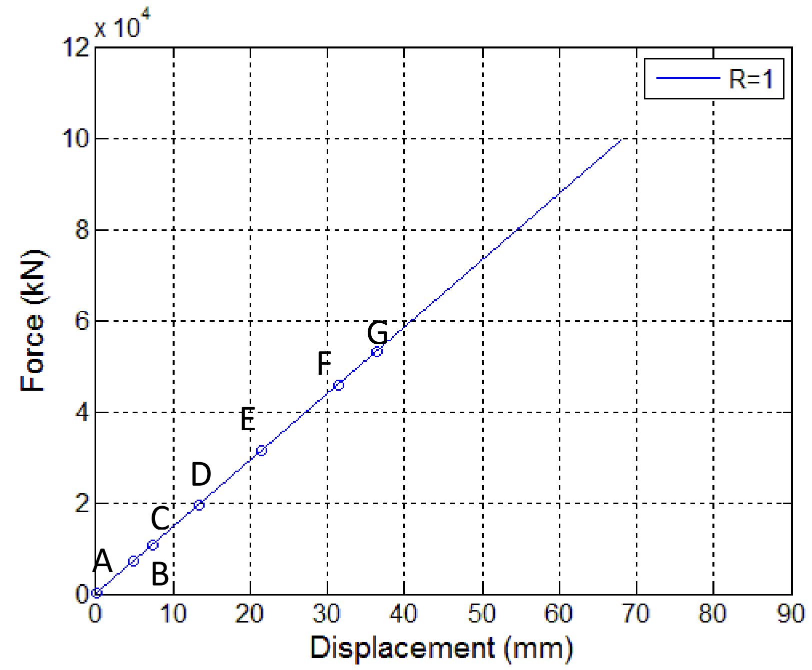
จากภาพที่ 4.51 แสดงให้เห็นว่าการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% ที่ R มากขึ้น ค้ำยันทางด้านข้างจะมีความสามารถในการต้านการเสียรูปทางด้านข้างลดลงอย่างเห็นได้อย่างชัดแจน สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการเสียรูปจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ค้ำยันมีพฤติกรรมที่เป็นเชิงเส้น

4.2.3 พฤติกรรมการรับแรงของค้ำยันทางด้านข้างที่มีผลต่อความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดและการเสียรูปทางด้านข้างของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมไร้เชิงเส้น

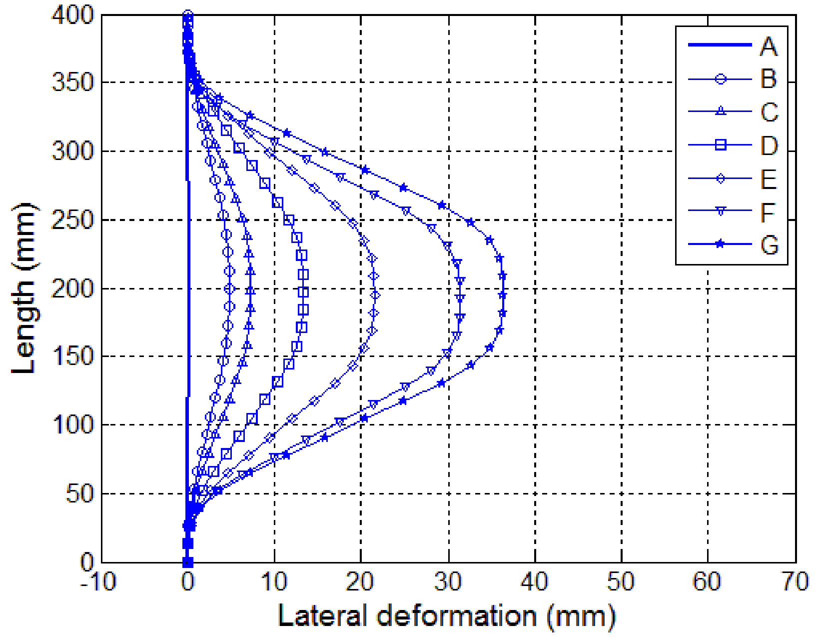
ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดและการเสียรูปทางด้านข้างของแบบจำลองที่มีค้ำยันทางด้านข้างที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้น ณ ช่วงต่างๆ โดยแสดงให้เห็นผลที่เกิดจากพฤติกรรมการรับแรงของค้ำยันทางด้านข้าง



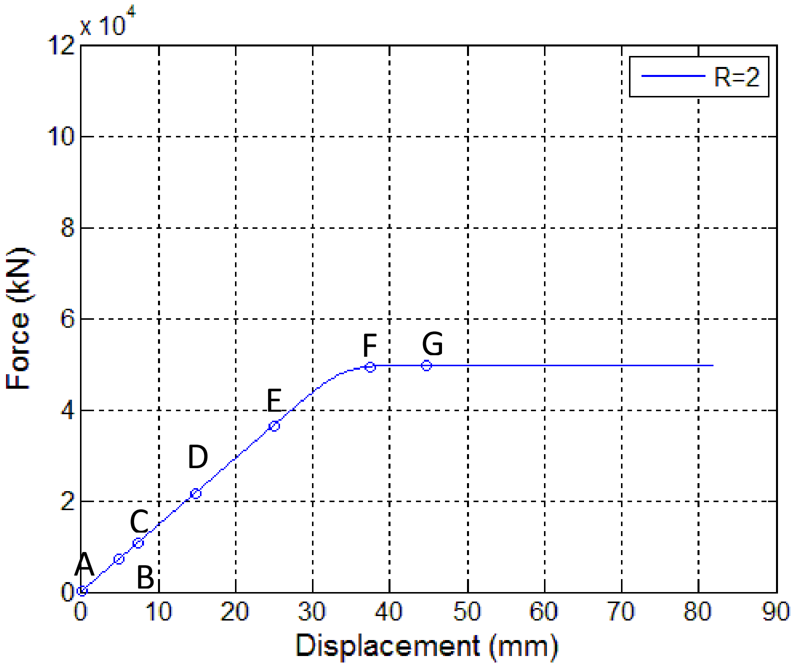
ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =12.58% ที่พิจารณาผลของพฤติกรรมการรับแรงของค้ำยันทางด้านข้างที่จุด A-G



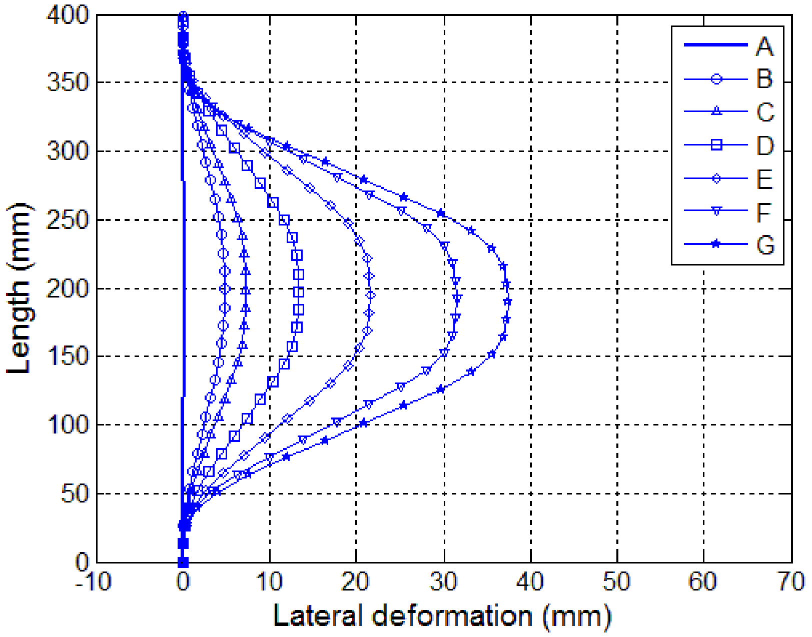
ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=1



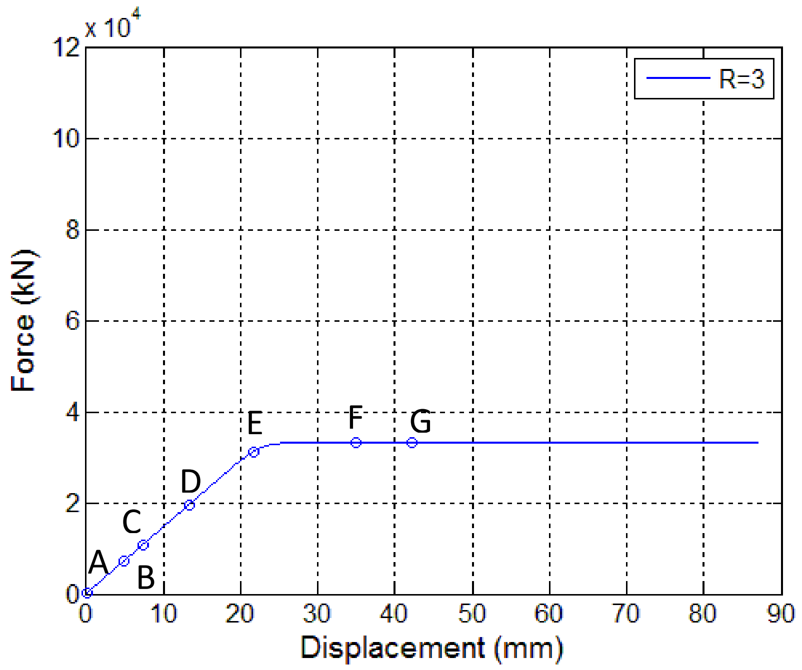
ภาพที่ 4.54 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=1 ณ จุด A-G



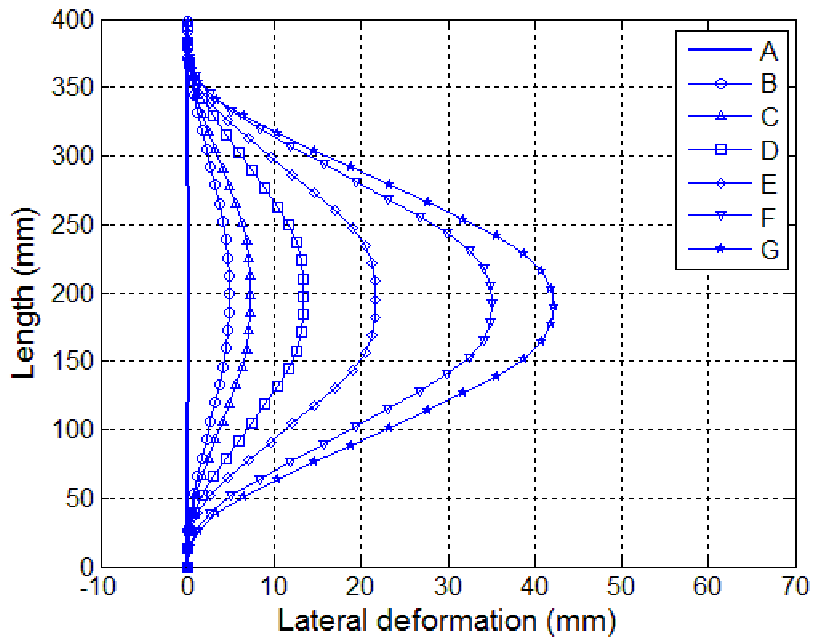
ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=2



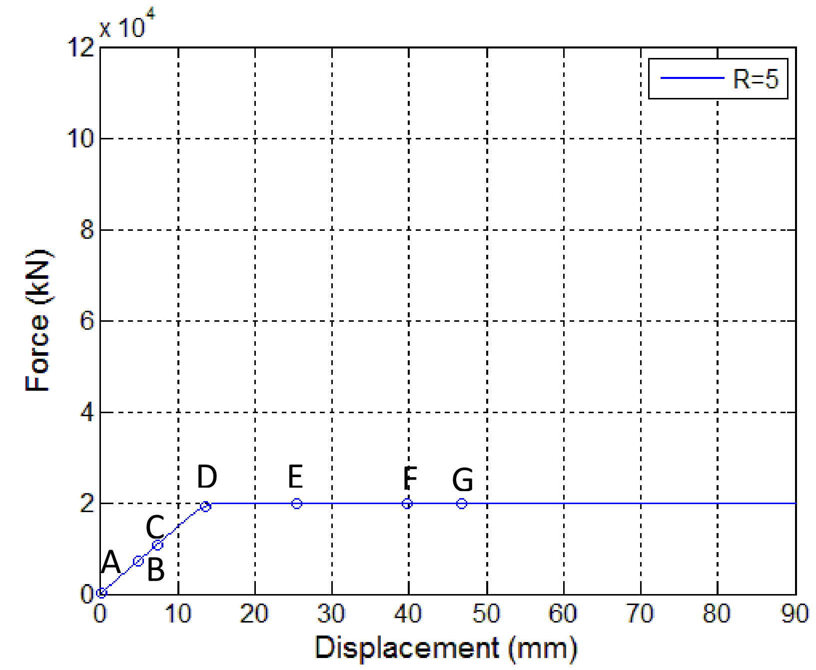
ภาพที่ 4.56 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=2 ณ จุด A-G



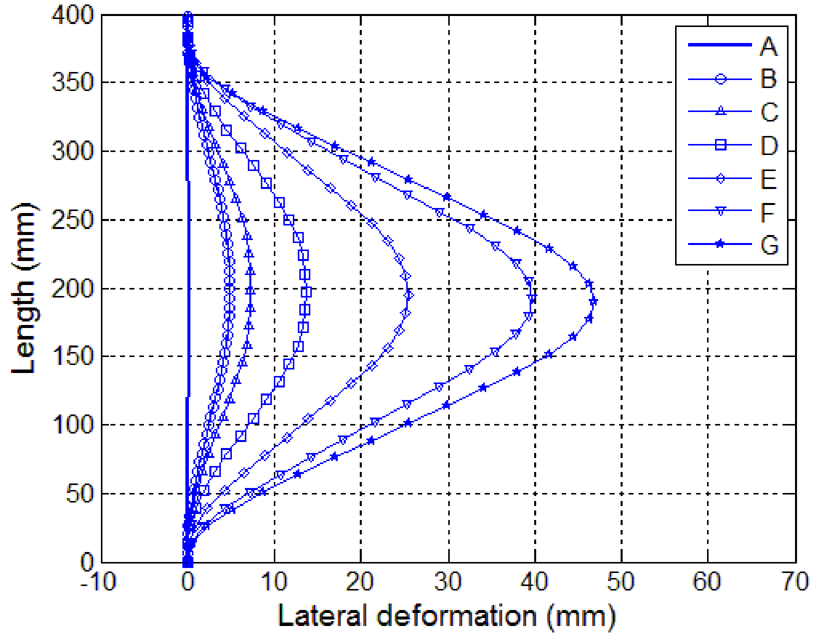
ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=3



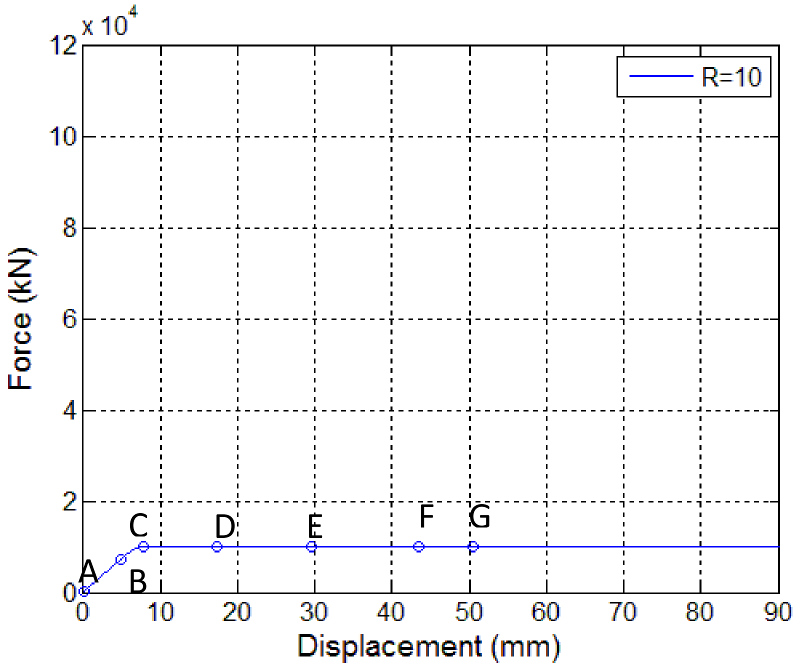
ภาพที่ 4.58 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=3 ณ จุด A-G



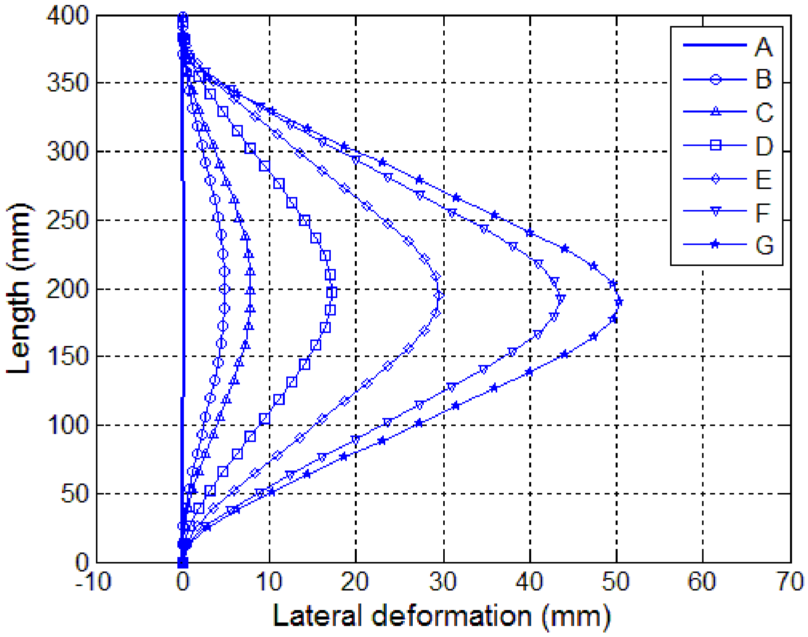
ภาพที่ 4.59 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=5



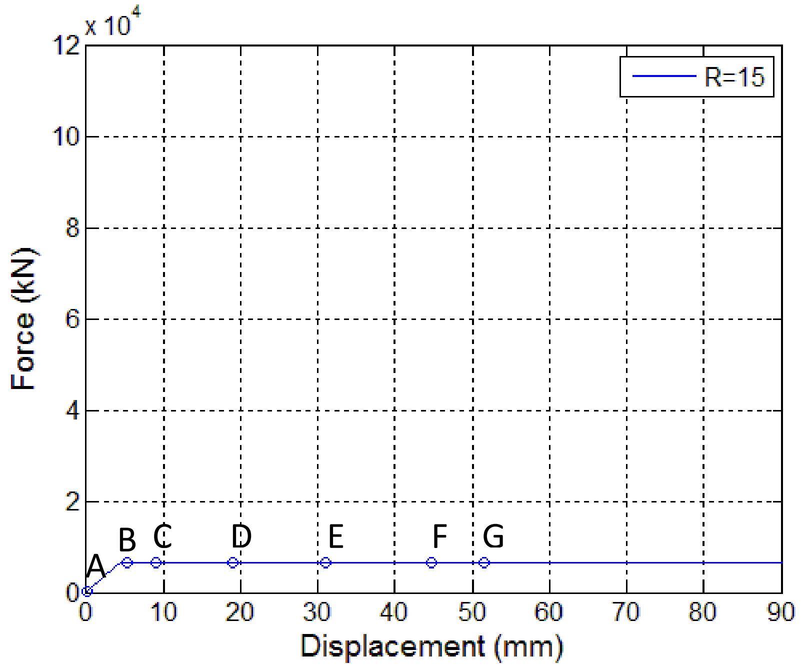
ภาพที่ 4.60 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=5 ณ จุด A-G



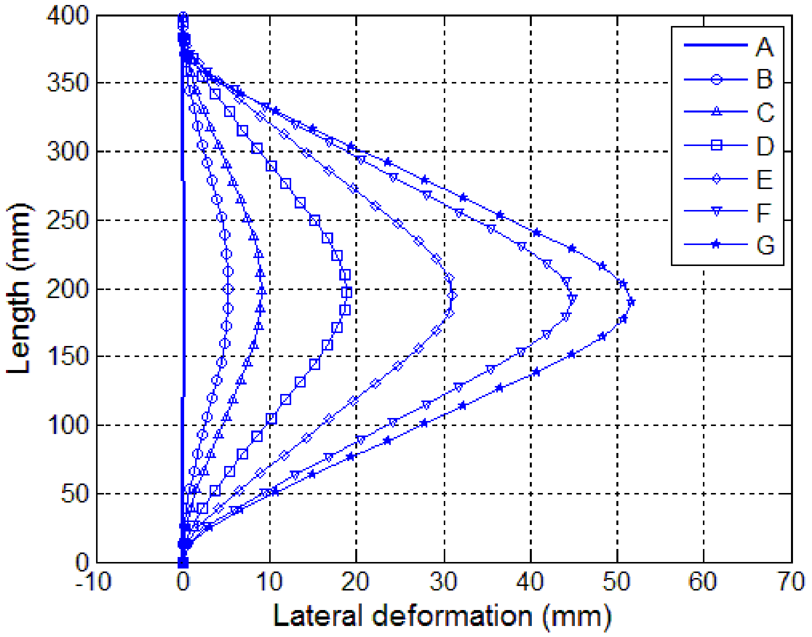
ภาพที่ 4.61 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=10



ภาพที่ 4.62 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=10 ณ จุด A-G

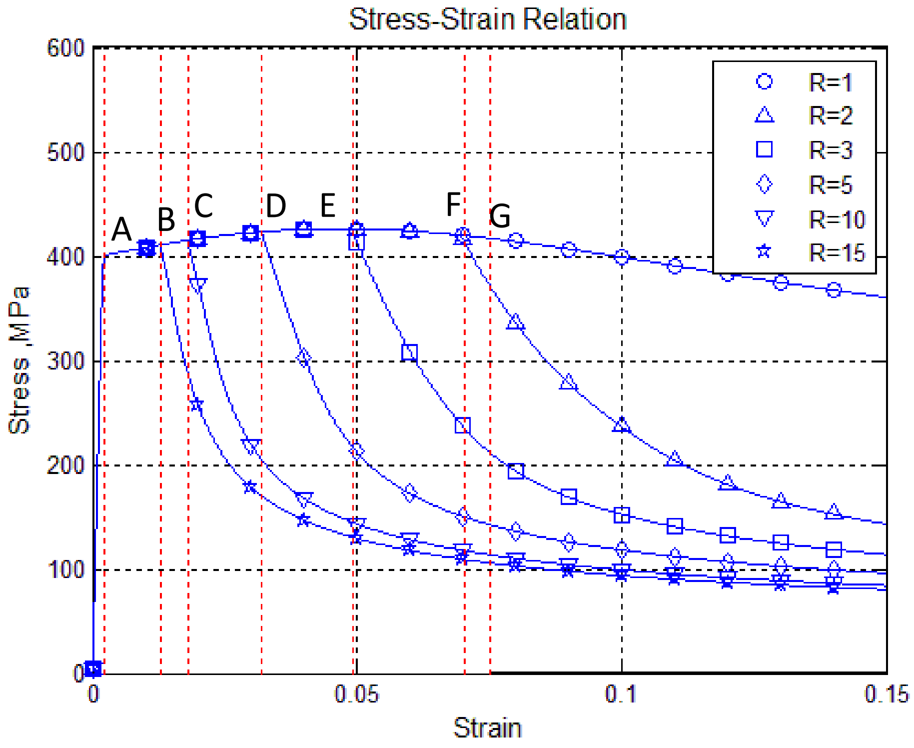


ภาพที่ 4.63 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=12.58% R=15

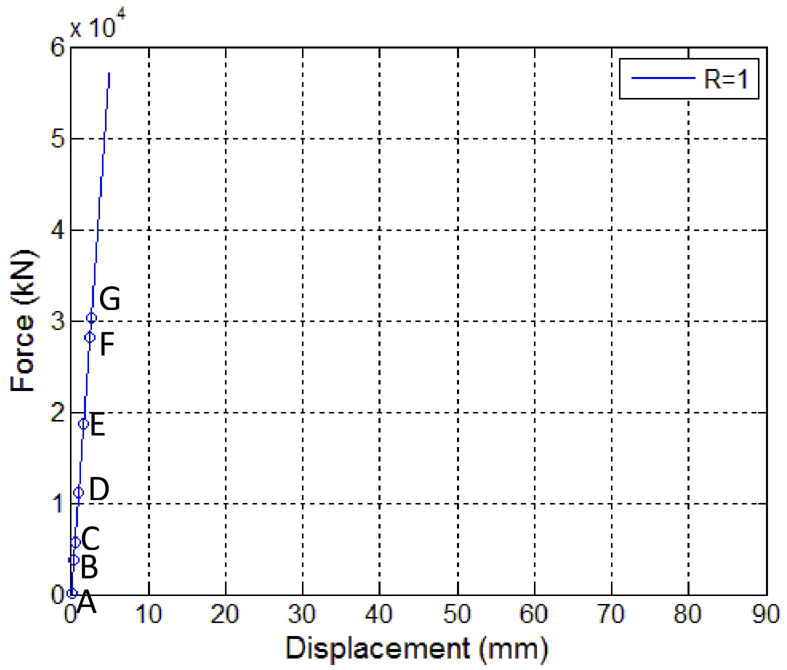


ภาพที่ 4.64 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=12.58% R=15 ณ จุด A-G

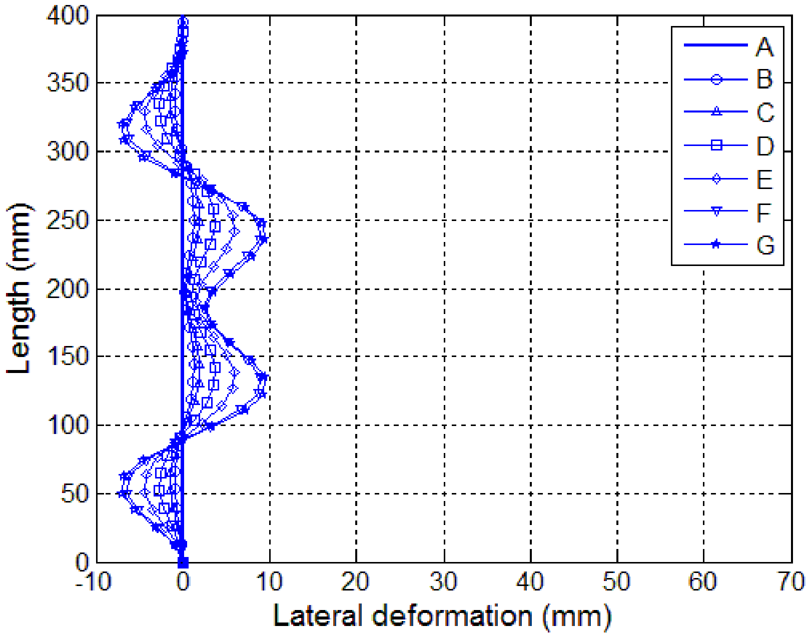
จากภาพที่ 4.52-4.64 แสดงให้เห็นพฤติกรรมในช่วงต่างๆระหว่าง A-G ของเหล็กเสริมตามยาวที่มีสติฟเนสของค้ำยันทางด้านข้างเท่ากับ12.58% ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปของเหล็กตามยาวที่ L/D=16 จากภาพที่ 4.52 จะเห็นว่าเมื่อค่า R มีการเปลี่ยนแปลงโดยท่เมื่อ R เพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงที่เกิดคือหน่วยแรงมีค่าน้อยลงซึ่งสาเหตุดังกล่าวมาจากความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้างที่เปลี่ยนไปคือเมื่อค้ำยันทางด้านข้างรับแรงจนกระทั่งถึงจุดที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเชิงเส้นเป็นพฤกรรมไม่เป็นเชิงเส้น ค้ำยันสูญเสียความสามารถในการต้านทานการเสียรูปของเหล็กเสริมตามยาวทำให้มีการเสียรูป ณ กึ่งกลางของเหล็กเสริมตามยาวมากขึ้นตามไปด้วย เช่น จากภาพที่ 4.55 เมื่อแรงกระทำต่อค้ำยันถึงจุด F ซึ่งเป็นจุดที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเชิงเส้นเป็นพฤกรรมไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าหน่วยแรงในภาพที่ 4.52 จะลดลง ระยะการเสียรูปทางด้านข้างเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากภาพที่ 4.56



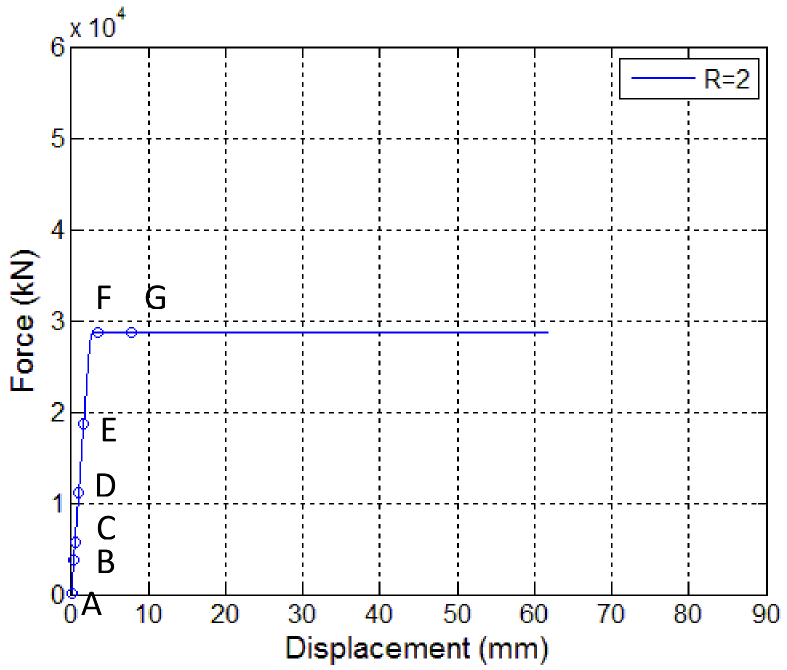
ภาพที่ 4.65 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและความเครียดอัตราส่วน L/D=16 ที่ R ต่างๆ N_k =100% ที่พิจารณาผลของพฤติกรรมการรับแรงของค้ำยันทางด้านข้างที่จุด A-G



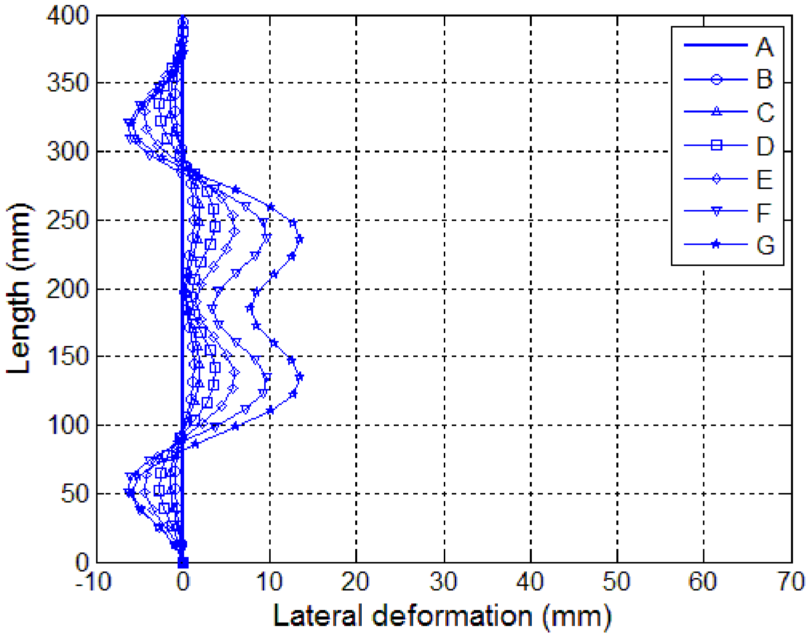
ภาพที่ 4.66 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=1



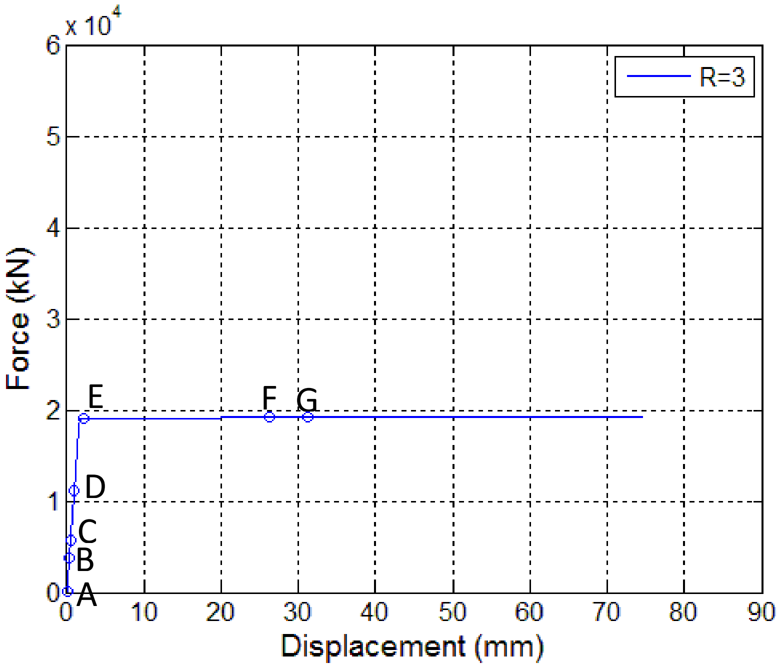
ภาพที่ 4.67 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=1 ณ จุด A-G



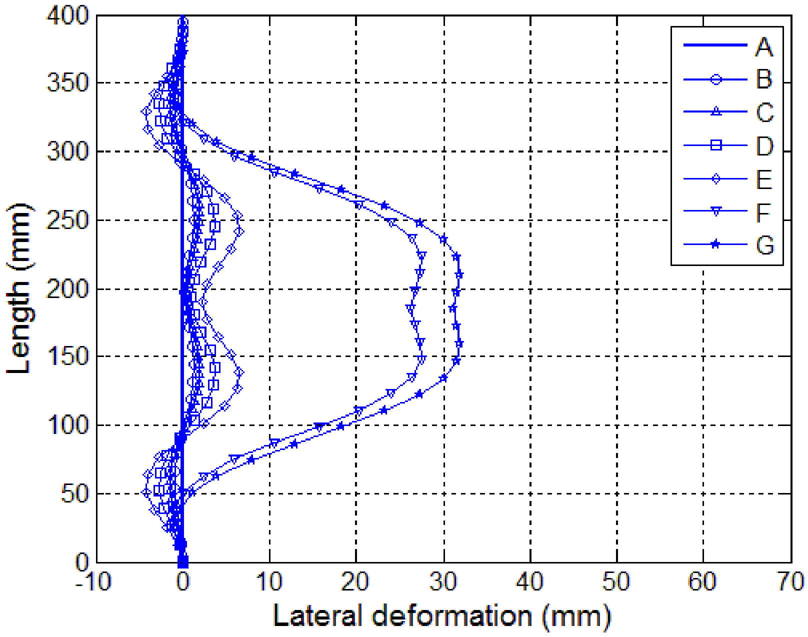
ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=2



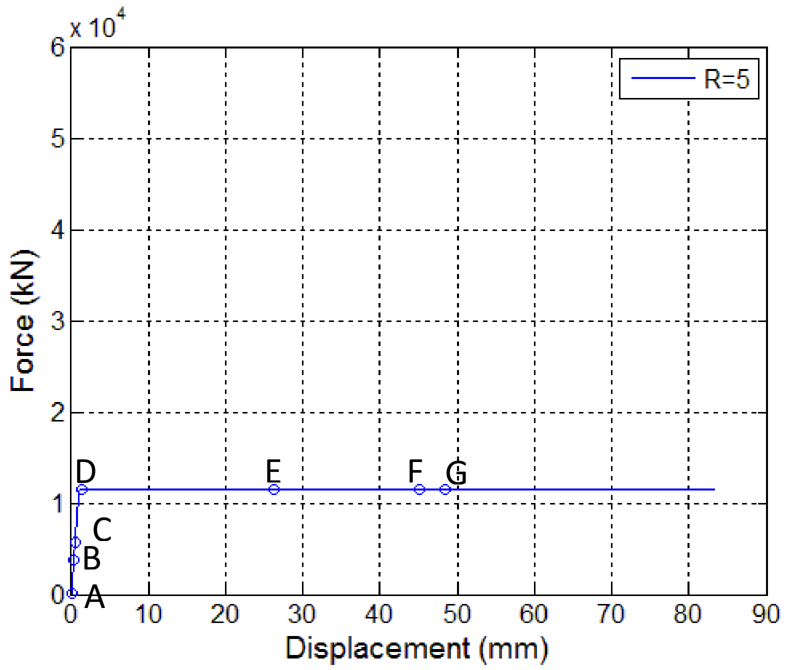
ภาพที่ 4.69 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=2 ณ จุด A-G



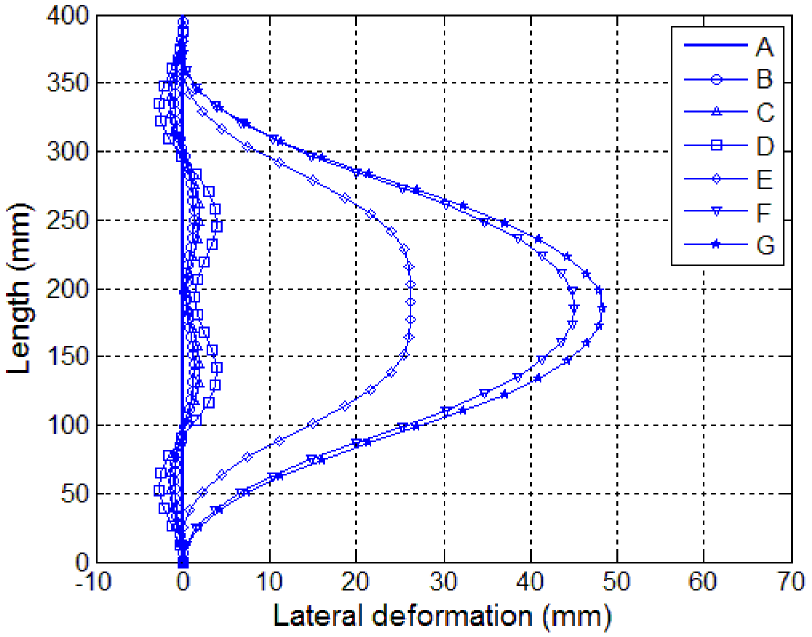
ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=3



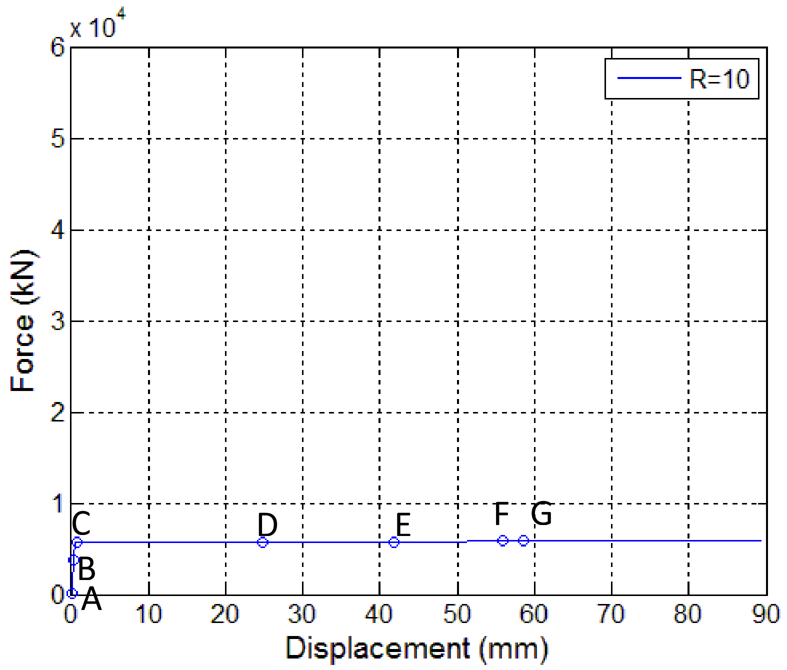
ภาพที่ 4.71 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=3 ณ จุด A-G



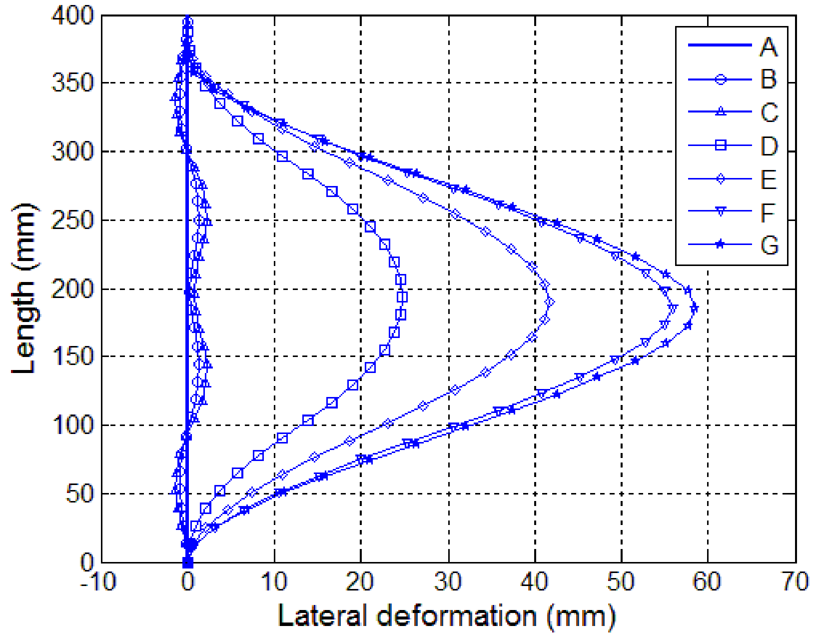
ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=5



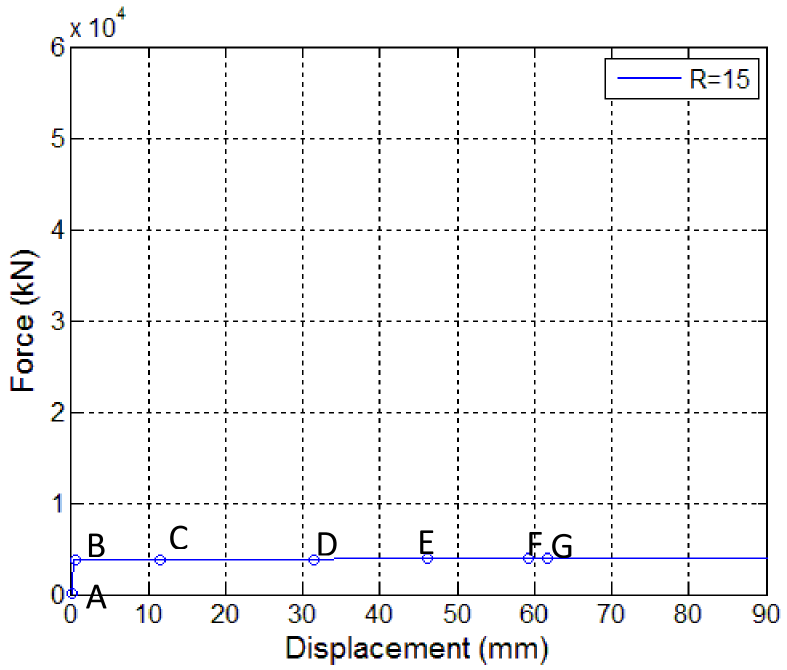
ภาพที่ 4.73 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=5 ณ จุด A-G



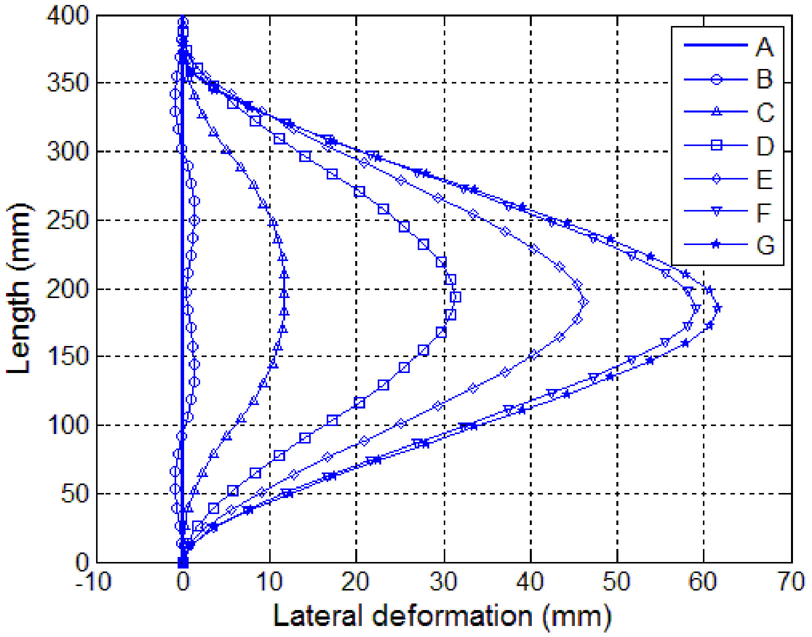
ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=10



ภาพที่ 4.75 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=10 ณ จุด A-G



ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้าง ที่ N_k=100% R=15



ภาพที่ 4.77 การเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว Nk=100% R=15 ณ จุด A-G

จากภาพที่ 4.65-4.77 แสดงให้เห็นพฤติกรรมในช่วงต่างๆระหว่าง A-G ของเหล็กเสริมตามยาวที่มีสติฟเนสของค้ำยันทางด้านข้างเท่ากับ100% ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปของเหล็กตามยาวที่ L/D=16 จากภาพที่ 4.65 จะเห็นว่าเมื่อค่า R มีการเปลี่ยนแปลงโดยท่เมื่อ R เพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงที่เกิดคือหน่วยแรงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสาเหตุดังกล่าวมาจากความสัมพันธ์แรงและการเคลื่อนที่ของค้ำยันทางด้านข้างที่เปลี่ยนไปคือเมื่อค้ำยันทางด้านข้างรับแรงจนกระทั่งถึงจุดที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเชิงเส้นเป็นพฤกรรมไม่เป็นเชิงเส้นค้ำยันสูญเสียความสามารถในการต้านทานการเสียรูปของเหล็กเสริมตามยาวทำให้มีการเสียรูป ณ กึ่งกลางของเหล็กเสริมตามยาวมากขึ้นตามไปด้วย เช่น จากภาพที่ 4.68 เมื่อแรงกระทำต่อค้ำยันถึงจุด F ซึ่งเป็นจุดที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเชิงเส้นเป็นพฤกรรมไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าหน่วยแรงในภาพที่ 4.65 จะลดลง ระยะการเสียรูปทางด้านข้างเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากภาพที่ 4.69 และเมื่อR เพิ่มขึ้น จากภาพที่ 4.71 จะเห็นว่ารูปร่างของการเสียรูปเปลี่ยนแปลงรูปแบบหนึ่งไปเป็นรูปแบบหนึ่ง

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัยและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่รับแรงอัดในแนวแกน โดยทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ในกรณีที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้างและในกรณีที่มีค้ำยันทางด้านข้าง โดยพิจารณาคุณสมบัติของค้ำยันให้มีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว (D) อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม(L/D) กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว(Fy) อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b) และสติฟเนสของการค้ำยันทางด้านข้าง จากการทำการศึกษาทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

1.ผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์นั้นแสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบโดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบในอัตราส่วน L/D มากกว่า 10 ขึ้นไป โดยผลการวิเคราะห์อัตราส่วน L/D มากกว่า 10 ขึ้นไปนั้นจะให้หน่วยแรงหลังจุดครากที่สูงกว่าผลการทดสอบ และมีแนวโน้มว่าเมื่ออัตราส่วน L/D มากกว่า 10 ขึ้นไปผลต่างของหน่วยแรงหลังจุดครากระหว่างผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์จะลดลง

2. จากผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ในแบบจำลองที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้างนั้น การเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) เป็นปัจจัยหลักที่มีให้โครงสร้างของแบบจำลองมีการเสียรูปทางด้านข้าง ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการรับกำลังของเหล็กเสริม ถ้าการเยื้องศูนย์เริ่มต้น (e/D) มีค่ามากเกินไปจะทำให้เกิดการลดลงของหน่วยแรงก่อนที่กำลังจะพัฒนาไปถึงจุดครากและถ้าน้อยเกินไปแบบจำลองจะไม่แสดงผลของการโก่งเดาะ โดยความเป็นจริงนั้นเหล็กที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะมีการเยื้องศูนย์เริ่มต้นในตัวเองอยู่ และเพื่อให้แบบจำลองแสดงผลของการโก่งเดาะ Massone และ Moroder (2009) ได้แนะนำให้ใส่การเยื้องศูนย์เริ่มต้นของเหล็กเสริม (initial imperfection , e/D)ประมาณ e/D=0.01

3.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว (D) ที่ได้ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ขนาด 20 mm. 25mm. และ 32 mm. ผลการการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม โดยยังคงอัตราส่วนต่างๆ เท่ากันนั้นผลคือพฤติกรรมการรับกำลัง

แตกต่างน้อยกว่า1% สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม โดยยังคงอัตราส่วนต่างๆ เท่ากันนั้นไม่ส่งต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน ที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง จะเห็นว่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (L/D)นั้น มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะของโครงสร้างอย่างมากจะเห็นว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม(L/D) เท่ากับ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด หลังจุดครากจะเกิดช่วง Strain hardening กำลังของเหล็กเสริมจะสูงขึ้นมากกว่าค่าความเค้นคราก และลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะลดลง อันเนื่องมาจากผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมของเหล็กเสริมรับแรงอัดตามแนวแกน จะเห็นว่าที่ยิ่งอัตราส่วน L/D เพิ่มขึ้นมาก กำลังของเหล็กเสริมก็ยิ่งลดลงในช่วงหลังจุดคราก

5 .จากการวิเคราะห์แบบจำลองการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง ที่กำลังที่จุดครากต่างๆกัน โดย ใช้ค่า Fy เท่ากับ400 500 และ 600 MPa ผลที่ได้นั้นแสดงให้เห็นพฤติกรรมที่แตกต่างกันโดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) เห็นได้ว่าอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ)ของ Fy=400 MPa นั้นให้ค่าที่สูงกว่า Fy = 500 และ 600 MPa โดยที่ Fy=500 MPa อัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) ที่อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) เท่ากับ 50 นั้นให้ค่าแตกต่างกันประมาณ 16% เทียบกับ Fy=400 MPa และ Fy=600 MPa อัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) ที่อัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) เท่ากับ 50 นั้นให้ค่าแตกต่างกันประมาณ 25% เทียบกับ Fy=400 MPa ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8

6.ผลของอัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดคราก (strain hardening, b) เห็นได้ชัดว่ามีผลมากต่อการพัฒนากำลังของเหล็กเสริมรับแรงในแนวแกนหลังจุดคราก แต่ไม่มีผลต่อกำลังที่จุดครากเนื่องจากผลที่ได้ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อค่า b หรือ strain hardening ratio เพิ่มขึ้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นหลังจุดครากนั้นที่อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดครากมากกว่าจะทำให้หน่วยแรงหลังจุดครากนั้นมีค่าสูงกว่า ในกรณีอัตรารส่วน L/D เท่ากับ 4 นั้นที่อัตราส่วนการพัฒนากำลังหลังจุดครากเท่ากับ 0.02 นั้นหน่วยแรงที่เกิดหลังจุดครากมีพฤติกรรมเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราส่วนความชันหลังจุดครากต่อความชันก่อนจุดครากเกือบเท่ากันกับ 0.02

7.แบบจำลองเหล็กเสริมแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกระทำตามแนวแกนโดยพิจารณาผลของค้ำยันทางด้านข้างจะพิจารณาตัวแปรต่างๆของค้ำยัน ได้แก่ สติฟเนสของค้ำยันทางด้านข้าง ลักษณะการเสียรูปด้านข้าง จุดครากของค้ำยันในกรณีที่พิจารณาผลของค้ำยันให้มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยศึกษาที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 16 ผลที่ได้คือ ในกรณีที่ค้ำยันมีพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มสติฟเนสของค้ำยันมากขึ้นจนกระทั่งประมาณ 9-12%ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว พฤติกรรมการรับแรงของเหล็กตามยาวจะมีกำลังหลังจุดครากใกล้เคียงแบบจำลองการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง ที่มีอัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 และเมื่อเพิ่มสติฟเนสของค้ำยันกำลังลังหลังจุดครากเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

8.จากการศึกษาลักษณะการเสียรูปด้านข้างกรณีที่ค้ำยันมีพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้นจะมีการเสียรูปที่เกิดขึ้น 2 รูปแบบคือ เมื่อสติฟเนสของค้ำยันไม่เกิน 20% ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว การเสียรูปทางด้านข้างที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดมากที่สุดกึ่งกลางของแบบจำลอง (L/2) เมื่อสติฟเนสของค้ำยันเกิน 20 % ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว การเสียรูปด้านข้างที่เกิดจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่มีการเสียรูปทางด้านมากที่สุดเป็นที่หนึ่งในสี่ของความยาว (L/4)จากปลายทั้งสองด้านโดยประมาณ

9.เมื่อพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของค้ำยันพบว่า เมื่อค้ำยันถึงจุดครากหน่วยแรงของเหล็กเสริมตามยาวจะลดลงอย่างกะทันหัน การเสียรูปท้างด้านข้างของแบบจำลองเหล็กเสริมแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่มีค้ำยันพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบกับการเสียรูปของแบบจำลองที่มีค้ำยันพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้นพบว่าเมื่อ ค้ำยันถึงจุดครากลักษณะการเสียรูปทางด้านข้างที่เกิดขึ้นคือการเสียรูปในแบบแรกที่ค้ำยันมีสติฟเนสของค้ำยันไม่เกิน 20% ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว การเสียรูปทางด้านข้างที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดมากที่สุดกึ่งกลางของแบบจำลอง (L/2) โดยรูปร่างการเสียรูปนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่เกิดการเสียรูปมากขึ้นกว่าแบบค้ำยันมีพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้น การเสียรูปในแบบที่สองที่ค้ำยันมีสติฟเนสของค้ำยันเกิน 20 % ของสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว การเสียรูปทางด้านข้างที่เกิดขึ้นเปลี่ยนลักษณะการเสียจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นรูปแบบหนึ่งคือจากตำแหน่งที่มีการเสียรูปด้านข้างมากที่สุดที่หนึ่งในสี่ของความยาว (L/4)จากปลายทั้งสองด้าน เมื่อค้ำยันครากจะค่อยเปลี่ยนตำแหน่งเป็นที่กึ่งกลางของแบบจำลอง (L/2) สาเหตุที่พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงนั้นมาจากที่ค้ำยันรับแรงจนกระทั่งถึงจุดครากของค้ำยันที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากเชิงเส้นเป็นพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น ค้ำยันนั้นจะสูญเสียความสามารถในการ

ต้านทานการเสียรูปของเหล็กเสริมตามยาว ทำให้เกิดการเสียรูปทางด้านข้างมากขึ้นหรือเปลี่ยนลักษณะการเสียจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นรูปแบบหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอะแนะ

จากการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางปฏิบัติในอนาคตได้ดังต่อไปนี้

1.จากงานวิจัยนี้ควรทดสอบเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัด โดยมีค้ำยันด้านข้าง เนื่องยังขาดข้อมูลที่ใช้อ้างอิงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง เพื่อใช้ในการเปรียบกับผลการวิเคราะห์ต่อไป

2.จากการวิเคราะห์แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันด้านข้างด้วยเหล็กเสริมตามขวาง ควรเพิ่มจำนวนตำแหน่งค้ำยันทางด้านข้างให้มากกว่า 1ช่วงเพื่อให้ใกล้เคียงกับพฤติของเหล็กเสริมภายในเสามากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

Bae S., Mieses A.M. and Bayrak O. Inelasic buckling of reinforcing bar. ASCE Journal of Structural Engineering. 131(2005): 314-321

Bayrak O, Sheikh SA. Plastic hinge analysis. ASCE Journal of Structural Engineering. 127(2001):1092-1100.

Dhakal R.P. Enchanced fiber model in highly inelastic range and seismic performance assessment of reinforced concrete. Department of civil engineering, The university of Tokyo, Japan (2000)

Dhakal R.P. and Meakawa K. Determination of buckling length of reinforcing bars based on stability analysis . Jaoan Concrete Institute JCI Annual Conference, 2000. 73-78.

Dhakal R.P. and Meakawa K. Modeling for postyield buckling of reinforcement. ASCE Journal of Structural Engineering. 128(2002) : 1139-47

Gomes A. and Appleton J. Nonlinear cyclic stress-strain relation of reinforcing bars including buckling. Elsevier Engineering Structural Division. 19(1997) : 822-826

Mau ST, El-Mabsout M. Inelastic buckling of reinforcing bars. ASCE Journal of Engineering Mechanics.115(1989):1-17.

Massone L. M. and Moroder D. Buckling modeling of reinforcing bars with Imperfection. Elsevier Engineering Structural Division. 31(2009) : 758-767

Monti G. and Nuti C. Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling. ASCE Journal of Structural Engineering. 118 (1992) : 3268-3284

Papia, M., Russo, G., and Zingone, G. Instability of longitudinal bars in RC columns. . ASCE Journal of Structural Engineering. 114(1988): 445-461.

Rodriguez M., and Botero J. C. Cyclic stress-strain behavior of reinforcing steel including effect of buckling. ASCE Journal of Structural Engineering. 125(1999) : 605-612

ภาคผนวก

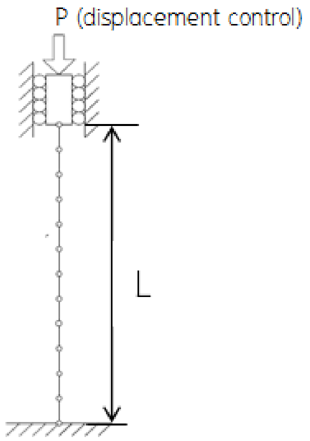
ทดสอบเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัด โดยไม่มีค้ำยันด้านข้าง

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

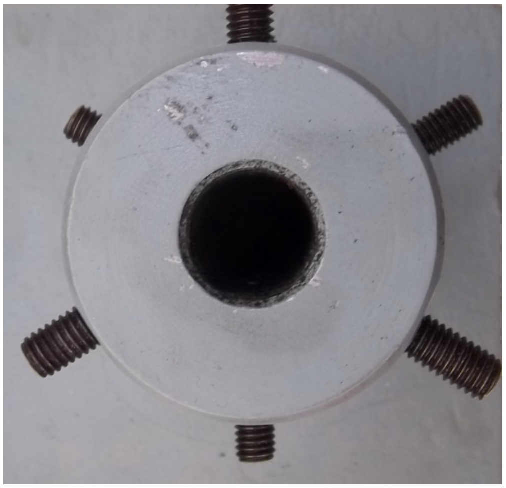
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงลักษณะของตัวอย่างทดสอบ วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ อันได้แก่ เหล็กเสริม อุปกรณ์ในการจับยึดตัวอย่าง นอกจากนั้นจะได้ทำการอธิบายถึงขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งเครื่องมือวัดการรเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าและวิธีการเก็บข้อมูลในการทดสอบรวมถึงรูปแบบการทดสอบ และแสดงผลการทดสอบ และทำการเปรียบผลกังานวิจัยที่ผ่านมา

ก.1 ทดสอบเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัด โดยไม่มีค้ำยันด้านข้าง

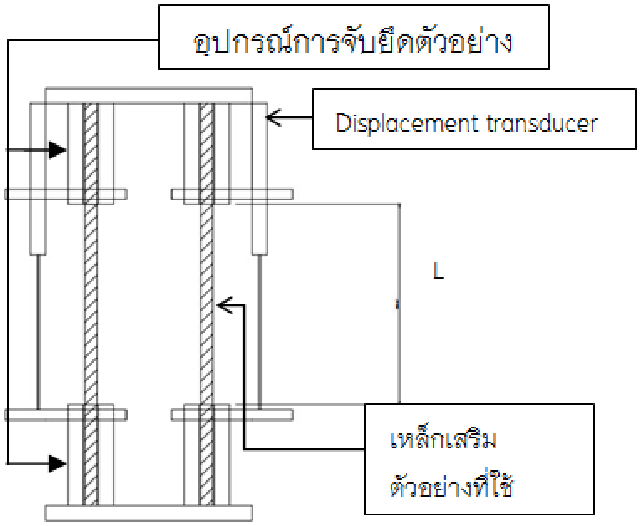
การทดสอบเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัด โดยไม่มีค้ำยันด้านข้างจะออกแบบการทดสอบโดยอ้างอิงจากแบบจำลองดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะการการยึดแน่นที่ปลายทั้งสองข้างอ้างอิงจาก Bae และคณะ (2005) โดยการยึดแน่นในการทดสอบจริงจะทำการยึดเหล็กเสริมตามยาวที่จุดรองรับโดยสลักเกลียว 3ตัว เพื่อไม่ให้เหล็กมีการเคลื่อนที่และทำการยึดทั้งหมด 3 ชั้น เพื่อป้องกันหมุนของเหล็กเสริมตามยาว ลักษณะดังรูป 3.2 โดยลักษณะการติดตั้งตัวอย่างในรูปแบบนี้มีแนวคิดคือจำลองลักษณะของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยความยาว (L) คือระยะภายในระหว่างเหล็กปลอก ซึ่งการติดตั้งในรูปแบบนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการรับแรงของเหล็กเสริมตามยาวในเสาในระยะระหว่างเหล็กปลอกต่างๆ



ภาพที่ ก.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ออกแบบการทดสอบ



ภาพที่ ก.2 แสดงลักษณะการจับยึดเหล็กเสริมตามยาวที่จุดรองรับ



ภาพที่ ก.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบ

ก.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงอัดในแนวแกนมีคุณสมบัติดังตารางที่3.1

ตารางที่ ก.1. แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมตามยาว

Bar diameter (mm)	Area (mm^2)	Yield point (MPa)	Elastic modulus (MPa)
12 mm	113.1	440	202000

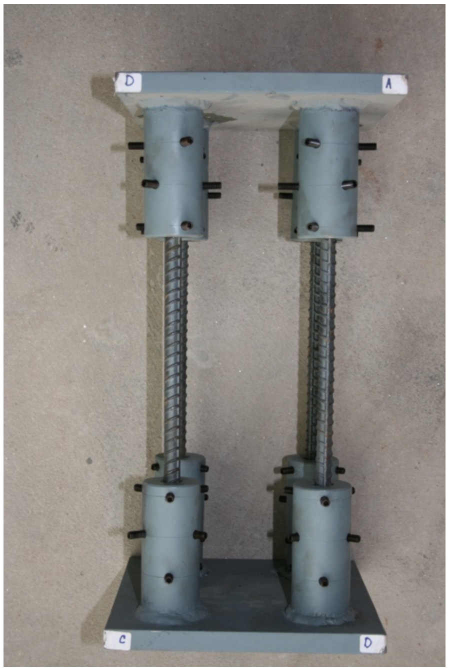
โดยการทดสอบจะทดสอบเหล็กเสริมตามยาวในแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะทดสอบในอัตราส่วนความยาว (L) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ดังแสดงในตารางที่ ก.2

ตารางที่ก.2 แสดงรายการทดสอบตัวอย่างและวิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองในงานวิจัย

Bar diameter (mm)	Area (mm^2)	L/d	L (mm)

12 mm	113.1	5	60
		6	72
		8	96
		10	120
		12	144
		16	192

การติดตั้งตัวอย่างเหล็กแต่ละขนาดความยาวจะถูกจับยึดตัวอย่างด้วยอุปกรณ์การทดสอบดังแสดงในภาพที่ ก.4 โดยที่จุดรองรับแต่ละมุมจะยึดโดยสลักเกลียว 3ตัว เพื่อไม่ให้เหล็กเสริมมีการเคลื่อนที่และทำการยึดทั้งหมด 3 ชั้น เพื่อป้องกันหมุนของเหล็กเสริมตามยาว การวัดระยะ L จะวัดจากสลักเกลียวตัวนอกสุดของตัวอุปกรณ์การทดสอบตัวล่างถึงสลักเกลียวตัวนอกสุดของตัวอุปกรณ์การทดสอบตัวบน



ภาพที่ ก.4 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

ก.3 เครื่องมือในการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ

ก.3.1 การทดสอบตัวอย่างโดยจะทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) โดยทดสอบแบบควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) โดยกำหนดให้การเคลื่อนที่ เท่า 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที

ก.3.2 เครื่องมือในการในการอ่านค่าต่างๆจะใช้เครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า (displacement transducer) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระยะการเคลื่อนที่ เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ต่างๆ ซึ่งได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้าจำนวน 4 ตัว โดยที่เครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า ใช้วัดการเคลื่อนที่ทางแนวแกนของตัวอย่าง ตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.3 และการบันทึกน้ำหนักบรรทุกจะทำโดยดึงค่าจาก Load cell ภายในเครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) โดยค่าการเคลื่อนที่และน้ำหนักบบรรทุกนั้นจะถูกบันทึกรวมกันผ่านโปรแกรมของ data logger ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ ก.5 (a)-(b)

(a)

(b)

ภาพที่ ก.5 (a)-(b) แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลในการทดสอบ

ก.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนในการทดสอบนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

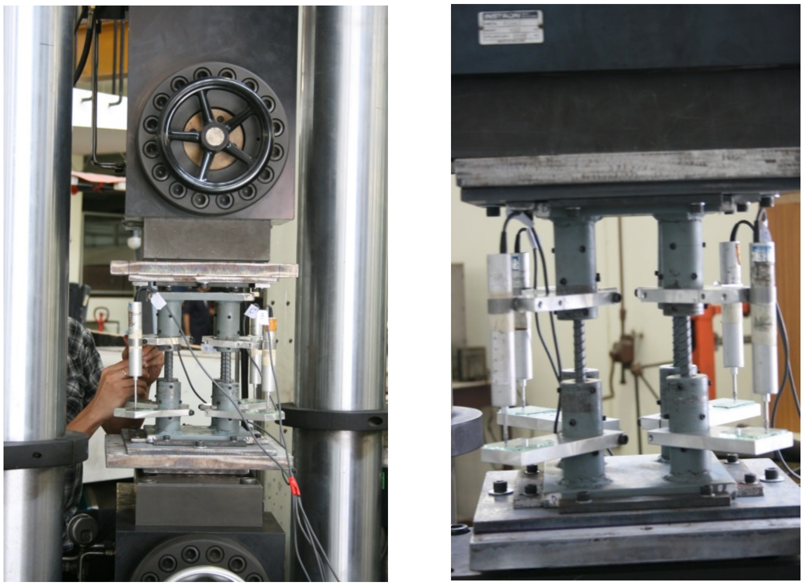
ก.4.1 การติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องเครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ในการติดตั้งนั้นจะมีการทำเครื่องหมายบอกตำแหน่งต่างๆ ที่หัวกดและบนแท่งเครื่องทดสอบเพื่อให้ตัวอย่างอยู่ตรงกึ่งกลางแนวแรงที่กระทำต่อตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ ก.6 (a)-(d) เมื่อตัวอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำการยึดที่ป้องกันการเคลื่อนที่ เพื่อป้องกันการไถลออกของตัวอย่างในการทดสอบ

(a) (b)

(c) (d)

ภาพที่ ก.6 (a)-(d) การแสดงติดตั้งตัวอย่างบนแท่นเครื่องทดสอบ

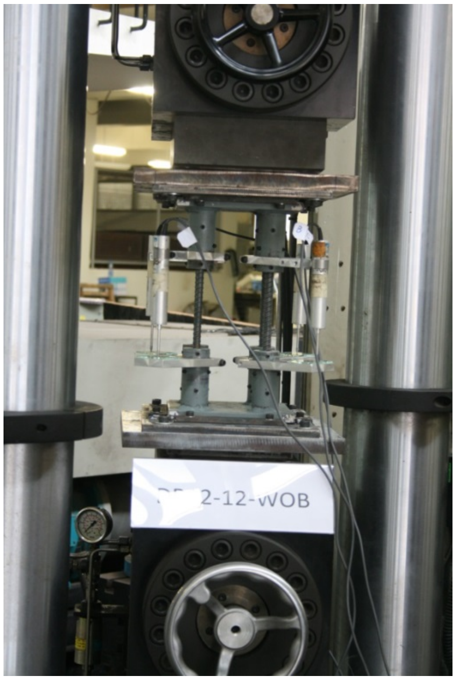
ก.4.2 การติดตั้งอุกปรณ์ในการเก็บและบันทึกผล ทำการติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า (displacement transducer) ที่มุมทั้ง 4 ของตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง โดยตรวจลักษณะการติดตั้งในได้แนวตรงตามแนวการเคลื่อนที่ในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ ก.7 (a) เมื่อติดตั้งเสร็จสิ้นต้องทำการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์โดยนำกระจกที่ทราบความหนาไปวางบนแท่นสัมผัสและอ่านค่าที่แสดงออกมาเพื่อให้ทราบว่าอุปกรณ์นั้นพร้อมอยู่ในสภาพใช้งานได้



(a) (b)

ภาพที่ ก.7 (a)แสดงการติดตั้ง (b)แสดงตรวจสอบการทำงานของเครื่องวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า (displacement transducer) ที่มุมต่างๆ

ก.4.3 ตรวจเช็คความพร้อมก่อนทำการทดสอบเช่นการบันทึกผลการทดสอบการบันทึกภาพระหว่างทำการทดสอบเมื่อทุกอย่างเรียบร้อยจึงเริ่มทำการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3.8 แสดงให้ความพร้อมก่อนทำการทดสอบและภาพที่ ก.9 แสดงให้เห็นการเสร็จสิ้นกระบวนการทดสอบ

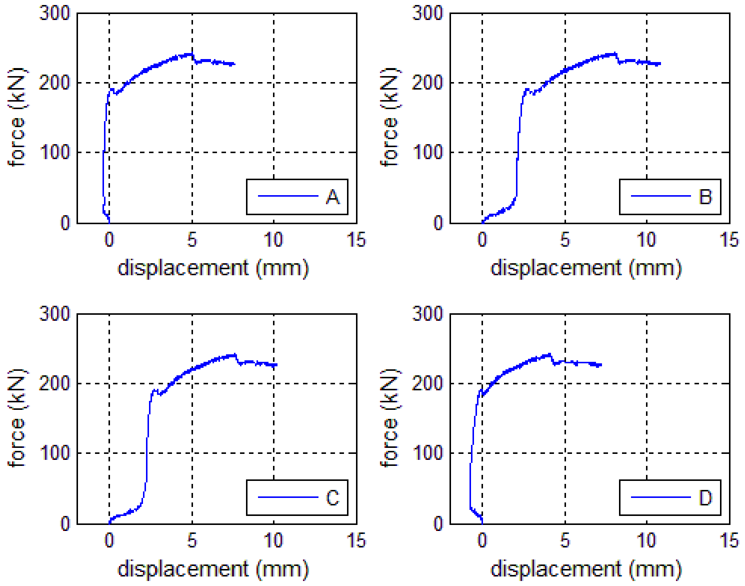


ภาพที่ ก.8 แสดงการเริ่มทำการทดสอบตัวอย่าง

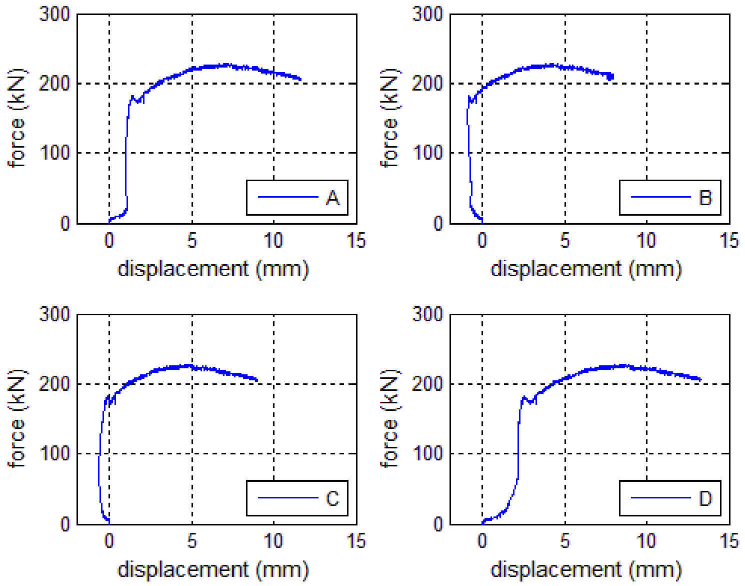
ภาพที่ ก.9 แสดงการสิ้นสุดในการทดสอบตัวอย่าง

ก.5 ผลการทดสอบ

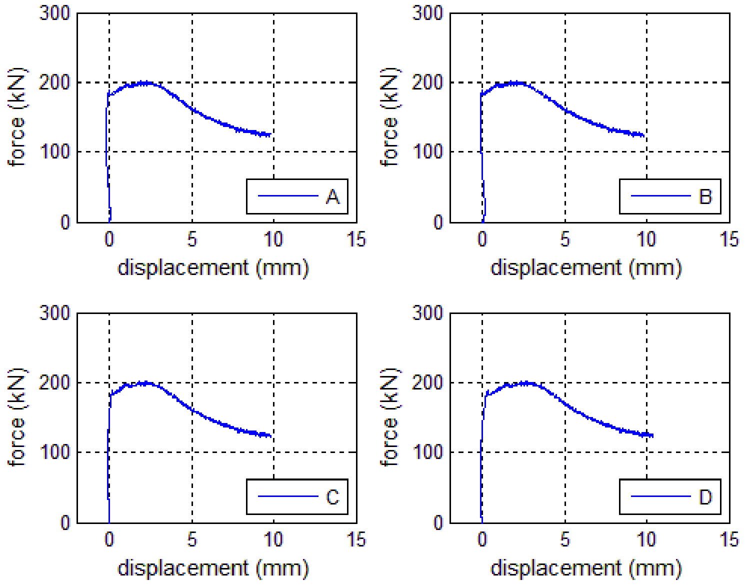
ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบนั้นจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement) ของเหล็กเสริมในแต่ละมุมแสดงดังภาพที่ ก.10-ก.15



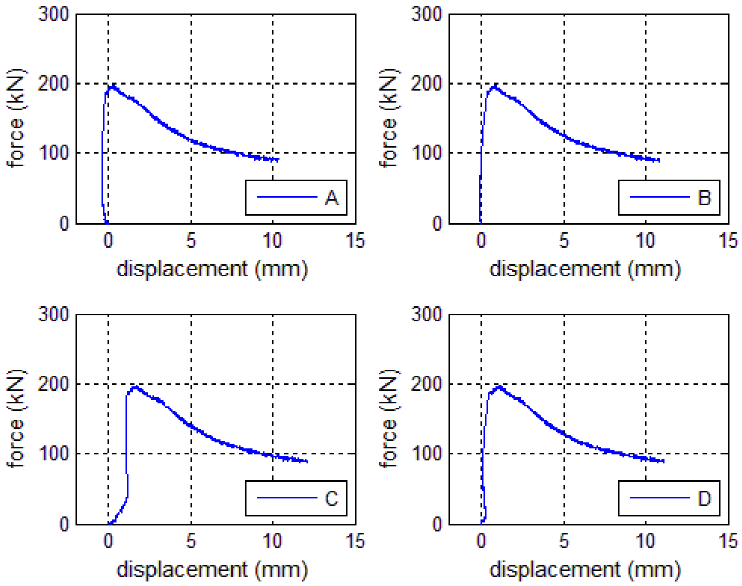
ภาพที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement)ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=5 ที่มุมต่างๆ



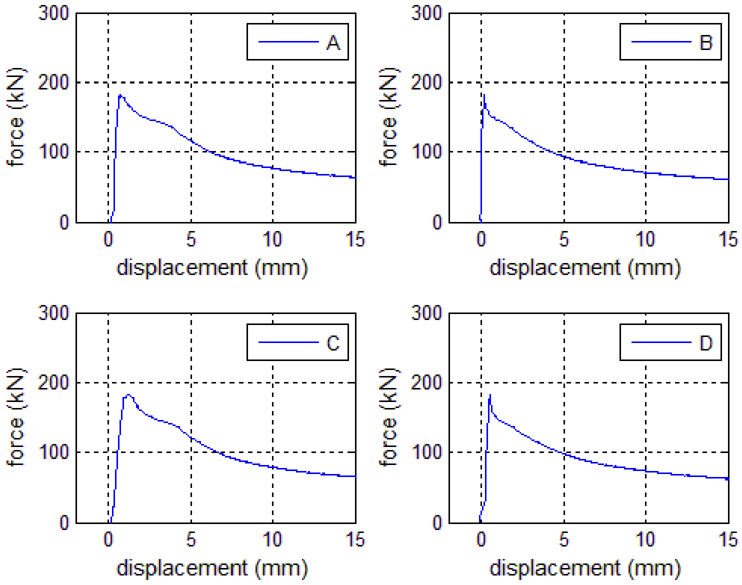
ภาพที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement)ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=6 ที่มุมต่างๆ



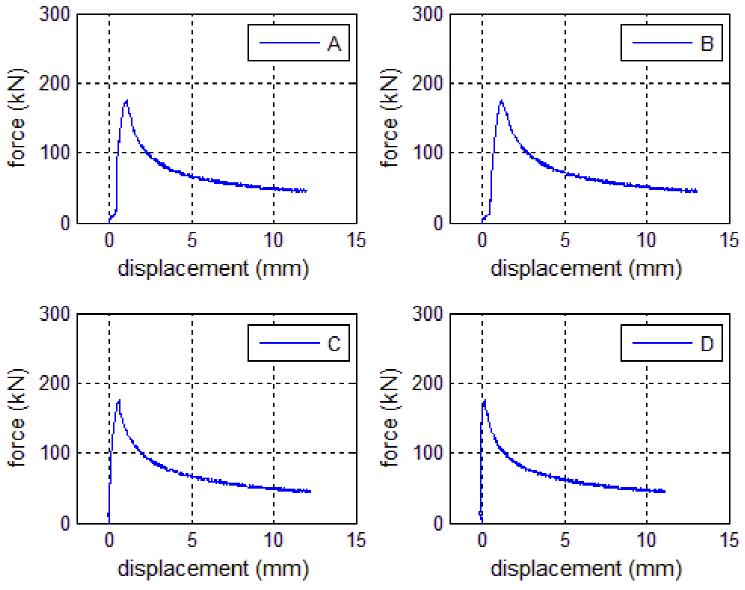
ภาพที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement)ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=8 ที่มุมต่างๆ



ภาพที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement)ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=10 ที่มุมต่างๆ



ภาพที่ ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement)ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=12 ที่มุมต่างๆ



ภาพที่ ก.15ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement)ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=16 ที่มุมต่างๆ

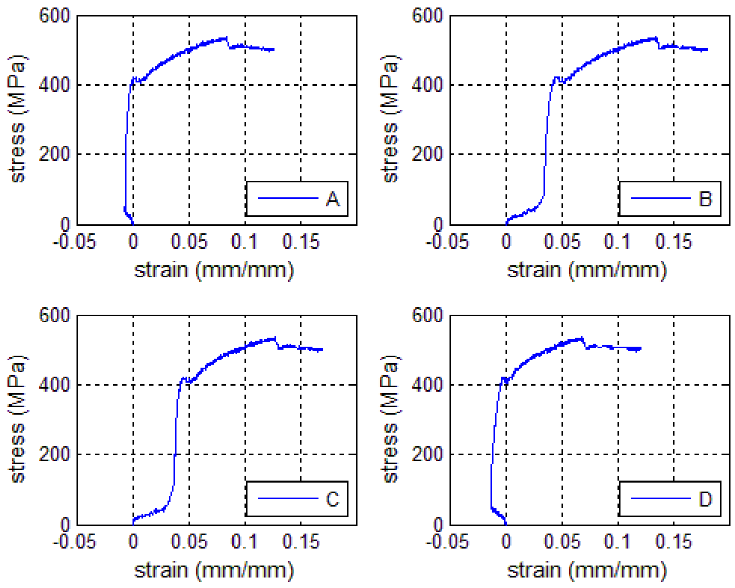
ผลการทดสอบเกิดขึ้นที่มุมต่างๆ ที่มีการติดตั้งตัววัดการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเกิดการโก่งเดาะที่ความเค้นที่เท่ากัน ลักษณะของกราฟมีรูปแบบไปในทิศทางเดียวกัน ความเครียดแต่ละเส้นกราฟไม่เท่ากันนั้น ผลอาจเกิดจากการยึดตัวอย่างกับอุปกรณ์จับยึดซึ่งอาจทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นทำให้ระยะเคลื่อนที่เริ่มต้นต่างกัน

ก.6 การประมวลผลการทดสอบ

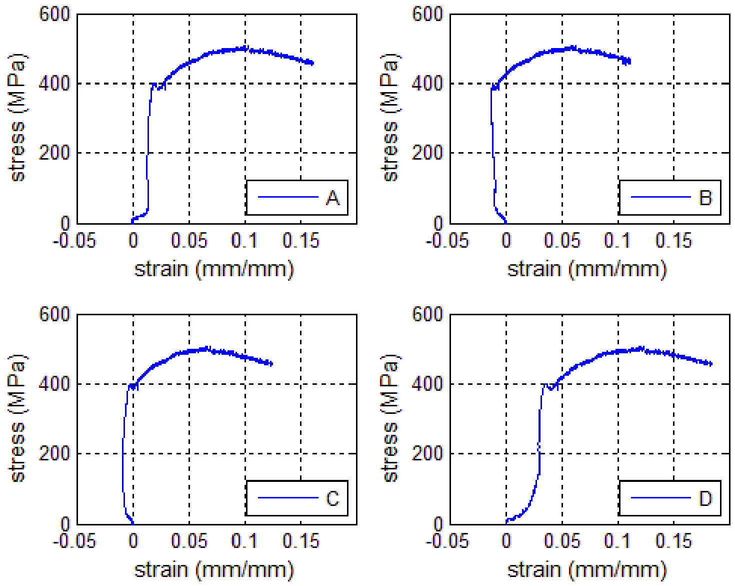
จากผลการทดสอบที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ (load-displacement) จะทำการประมวลผลให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเหล็กเสริมตามยาวในแต่ละมุม และทำการหาผลเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมทั้ง 4 เส้น ทำการปรับแก้ข้อมูล โดยทำการคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) ของข้อมูลเพื่อลดการแกว่งของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

ก.6.1ทำการประมวลผลให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

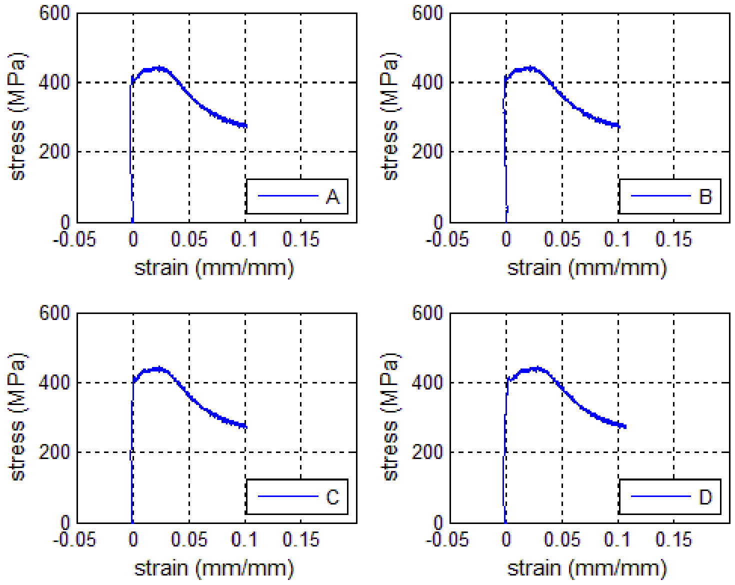
ทำการประมวลผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ของเหล็กเสริมแต่ละเส้น ดังแสดงในภาพที่ ก.16-ก.21



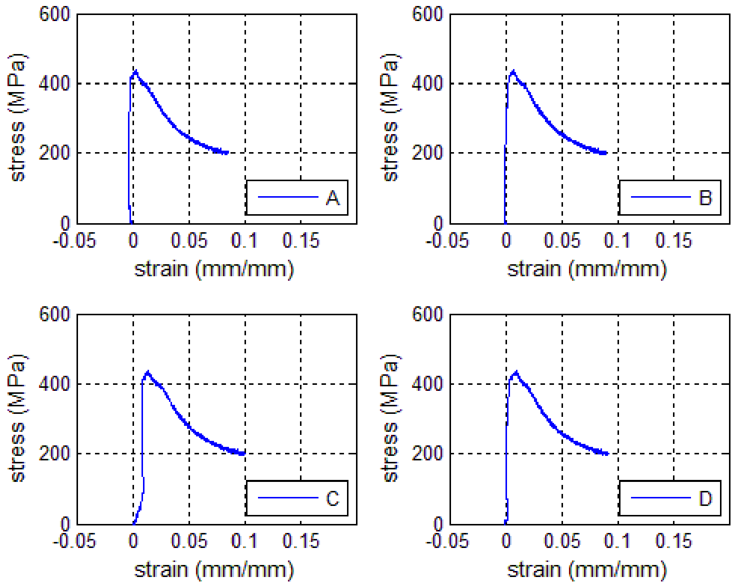
ภาพที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma-\varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=5 ที่มุมต่างๆ



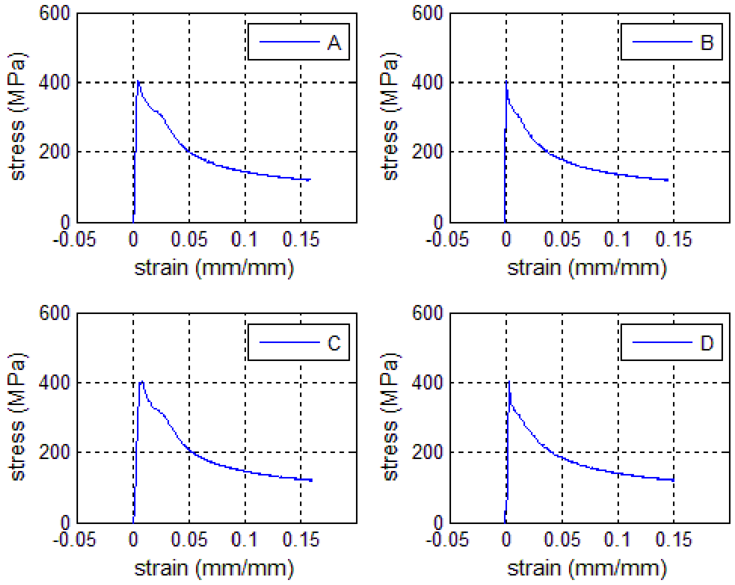
ภาพที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=6 ที่มุมต่างๆ



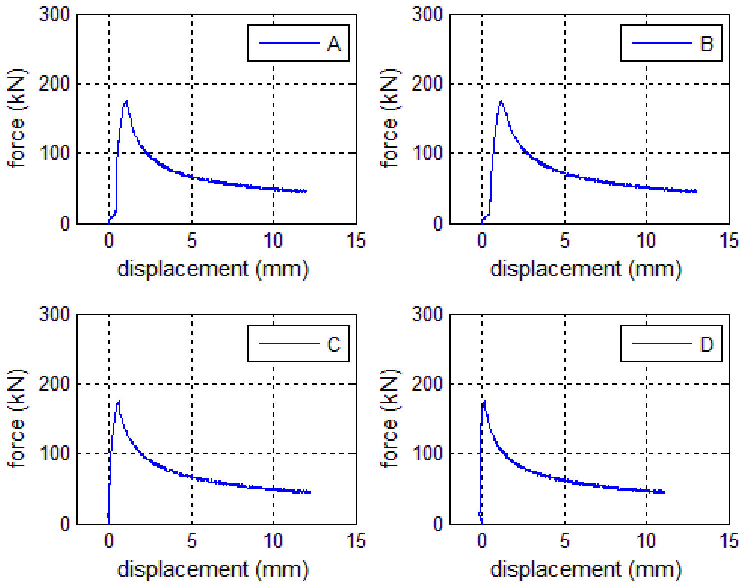
ภาพที่ ก.18 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=8 ที่มุมต่างๆ



ภาพที่ ก.19 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma-\varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=10 ที่มุมต่างๆ



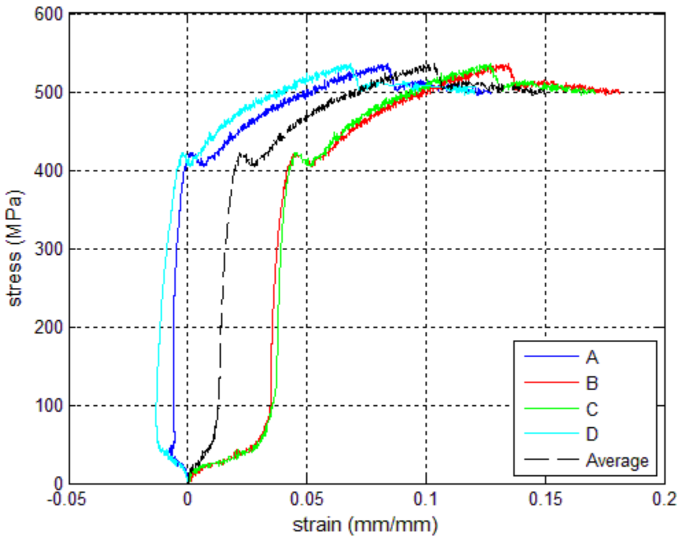
ภาพที่ ก.20 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma-\varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=12 ที่มุมต่างๆ



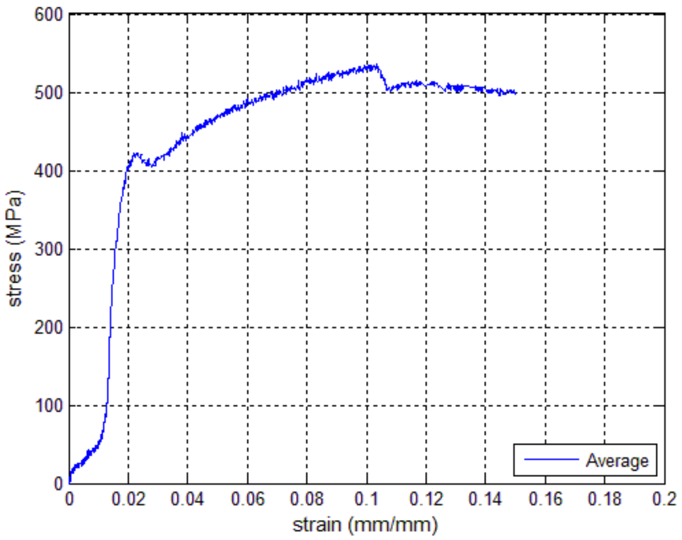
ภาพที่ ก.21 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=16 ที่มุมต่างๆ

ก.6.2 ทำการหาผลเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม

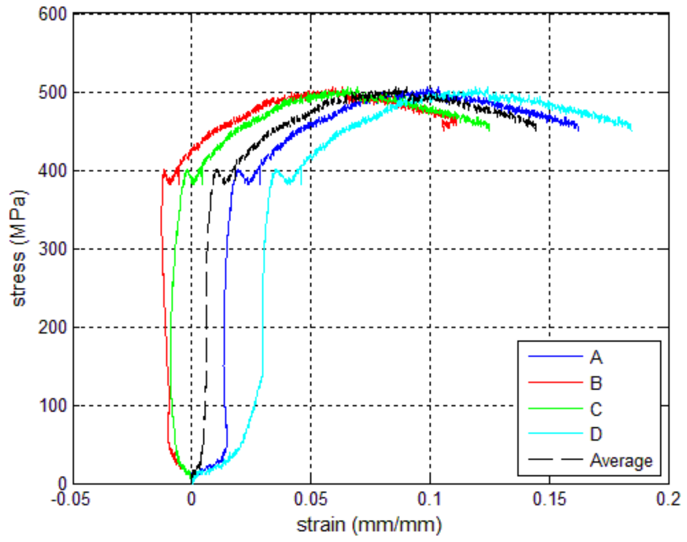
ทำการหาผลเฉลี่ยของหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมทั้ง 4 เส้น ดังแสดงในภาพที่ ก.22-ก.34



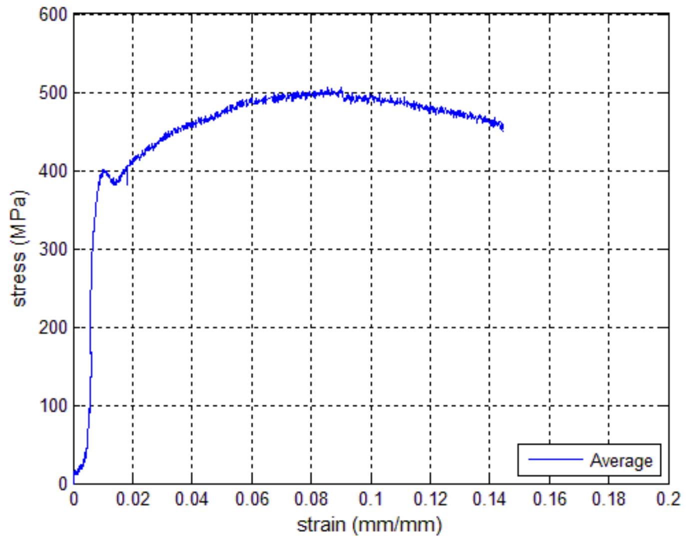
ภาพที่ ก.22 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มุมต่างๆและหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=5



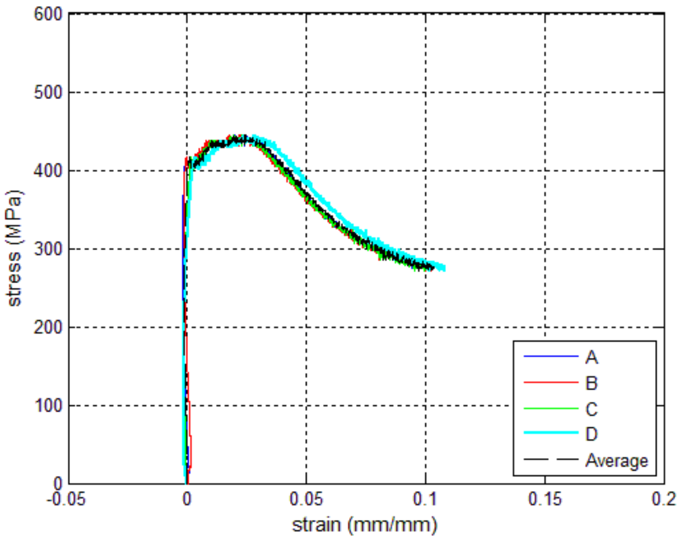
ภาพที่ ก.23 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=5



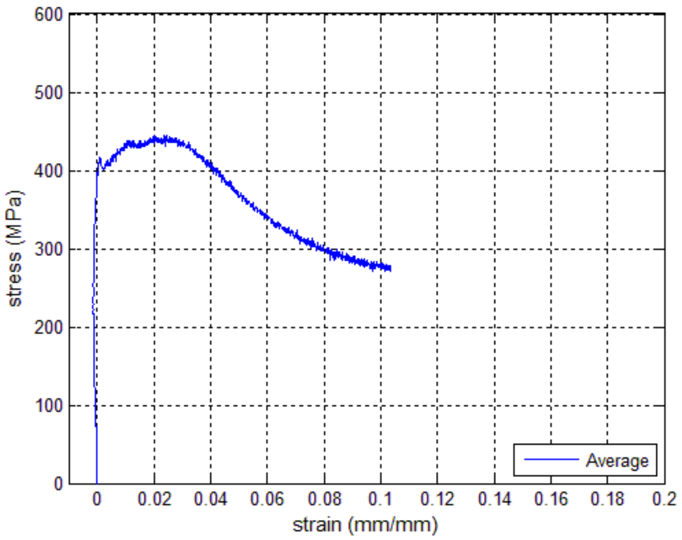
ภาพที่ ก.24 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มุมต่างๆและหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=6



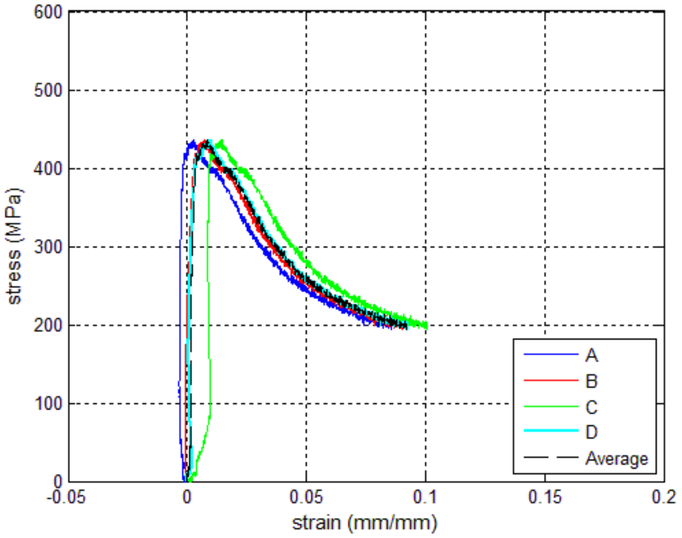
ภาพที่ ก.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=6



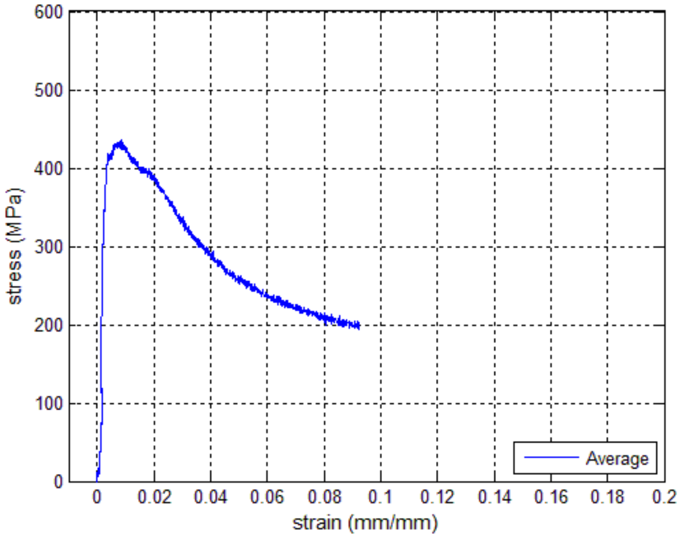
ภาพที่ ก.27 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มุมต่างๆและหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=8



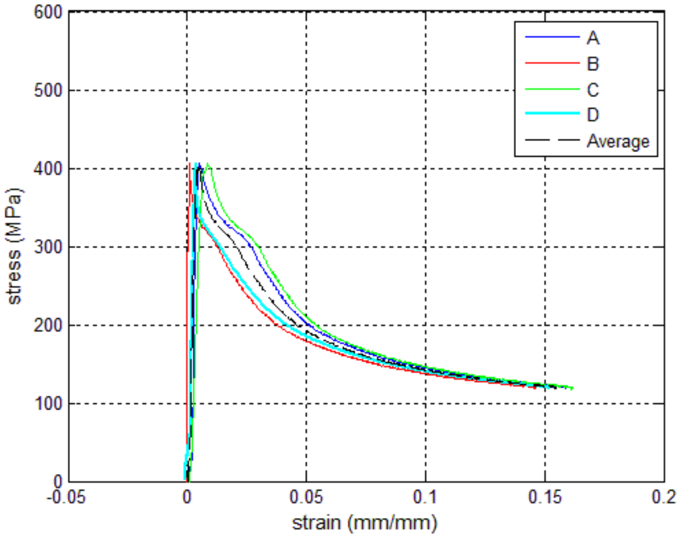
ภาพที่ ก.28 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=8



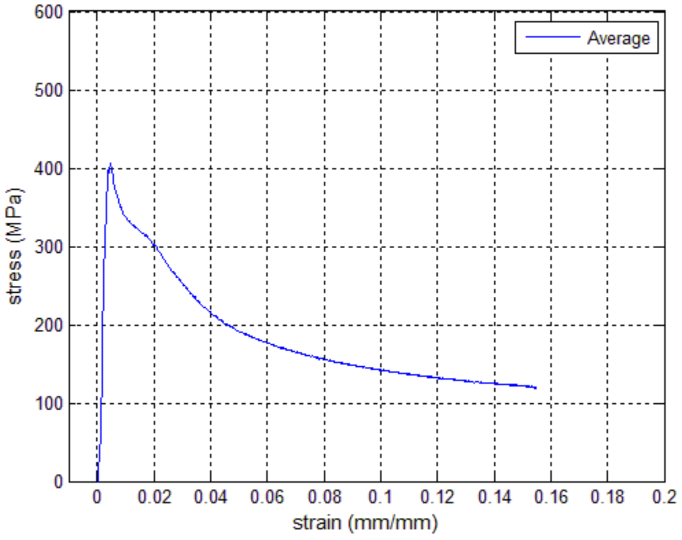
ภาพที่ ก.29 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มุมต่างๆและหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=10



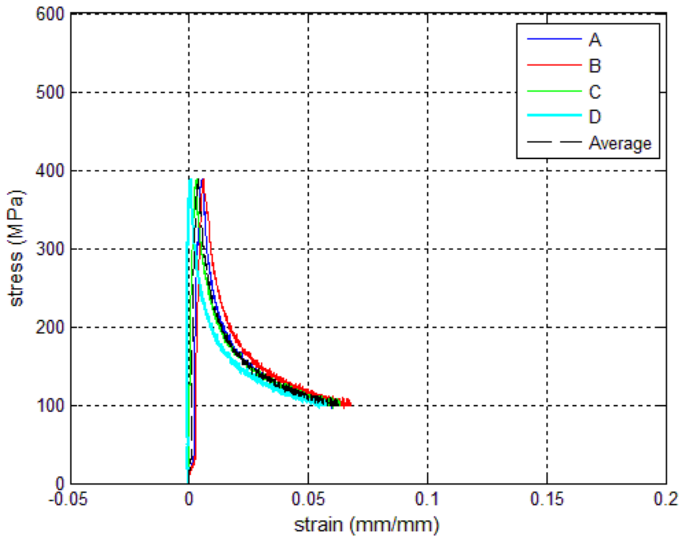
ภาพที่ ก.30 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=10



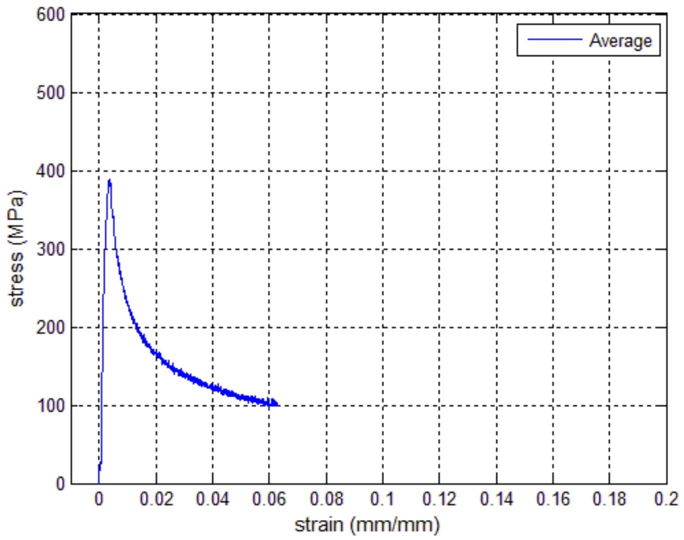
ภาพที่ ก.31 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มุมต่างๆและหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=12



ภาพที่ ก.32 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=12



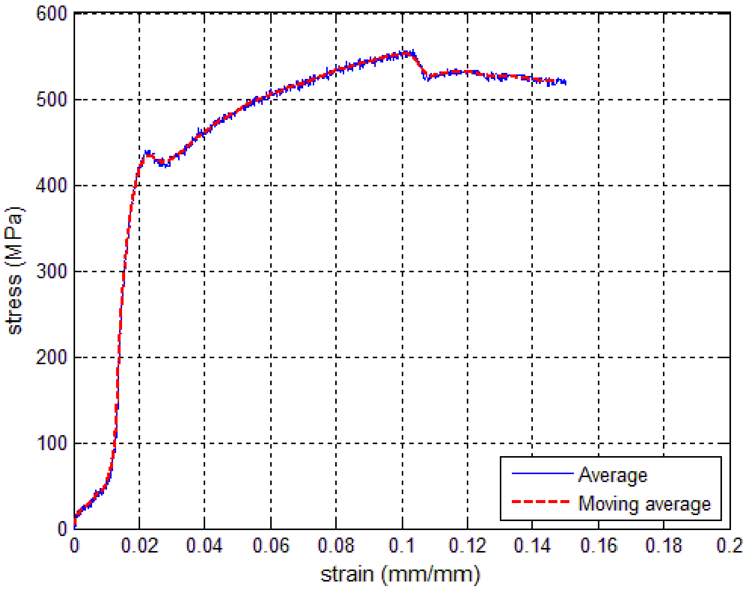
ภาพที่ ก.33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มุมต่างๆและหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=16



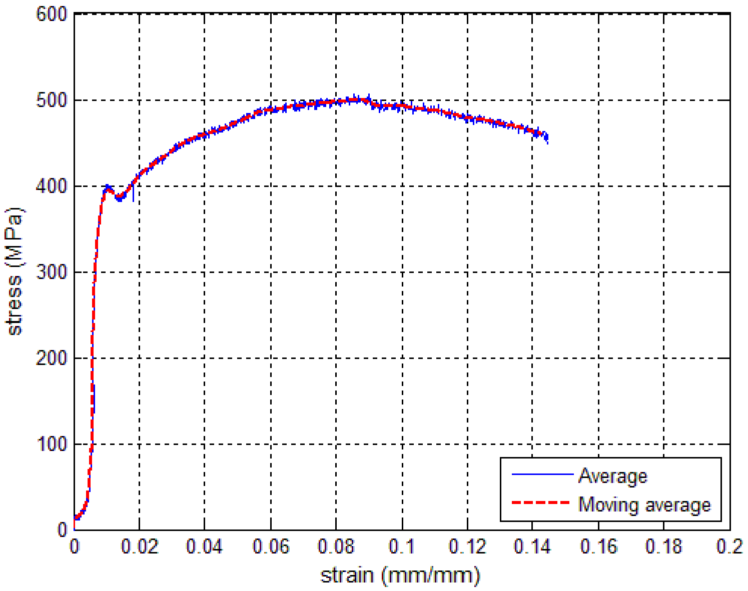
ภาพที่ ก.34 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=16

ก.6.3 ทำการปรับแก้ข้อมูล โดยทำการคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average)

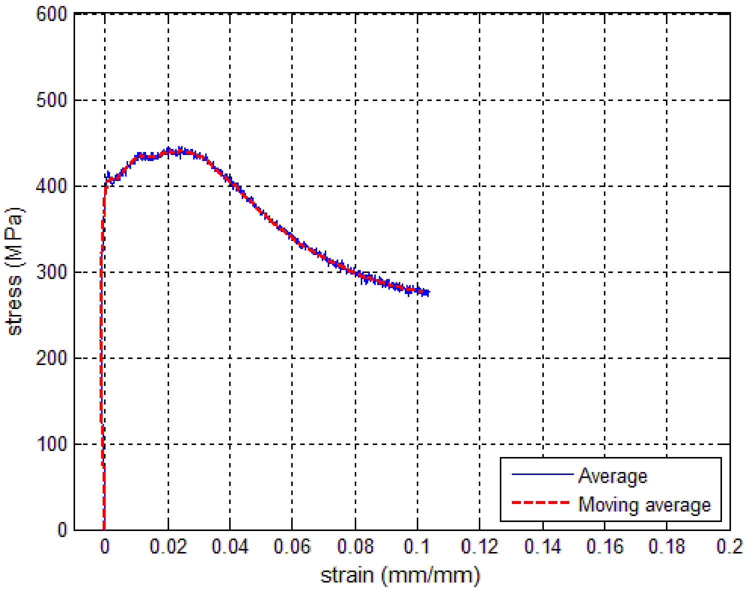
จากผลการทดสอบจะเห็นว่าผลการทดสอบนั้นมีการแกว่งของข้อมูลจะมีการทำการคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) เพื่อคำนวณแนวโน้มของค่าทำโดยการเฉลี่ยค่าในช่วงนั้นๆ ผลการคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) แสดงดังภาพที่ ก.35-ก.40



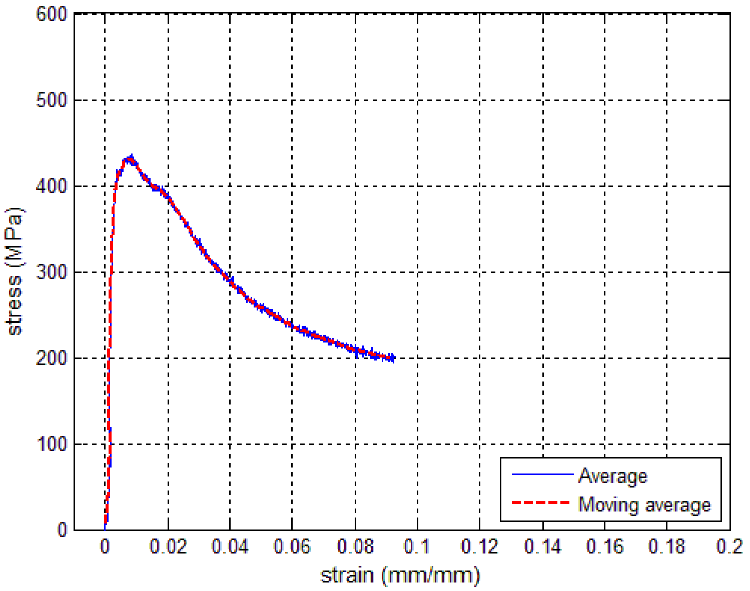
ภาพที่ ก.35 การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=5



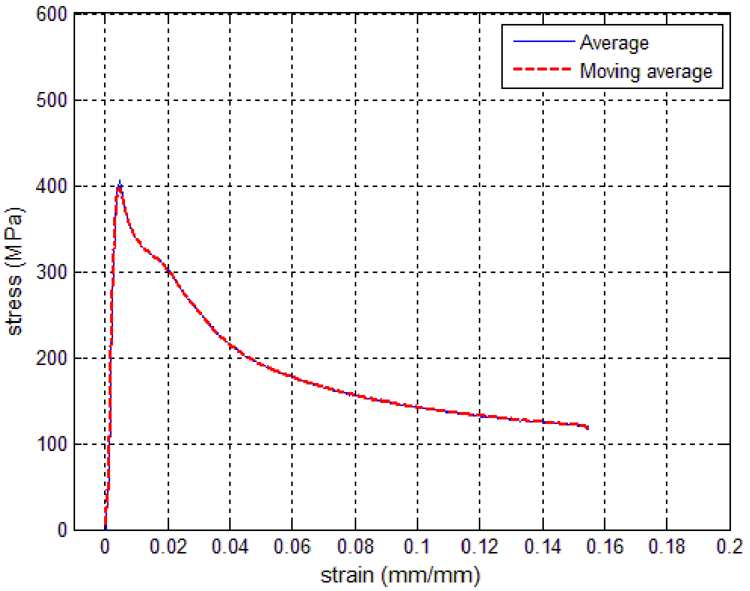
ภาพที่ ก.36 การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=6



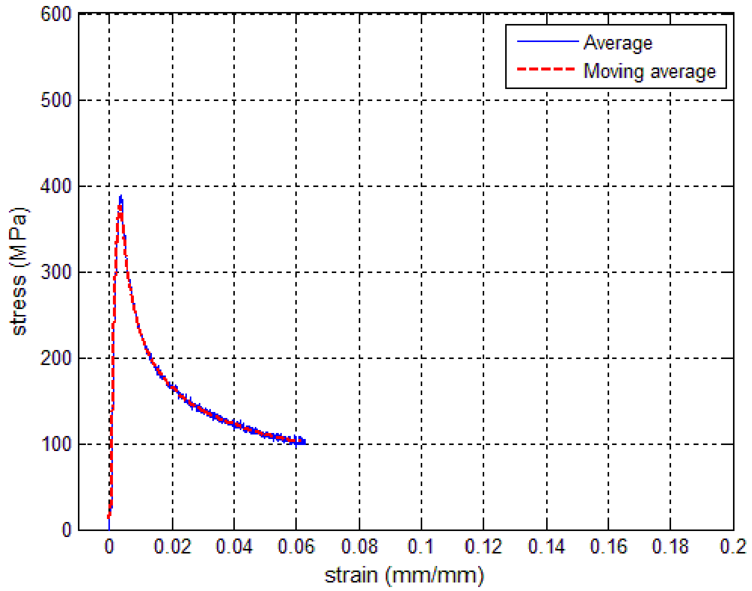
ภาพที่ ก.37 การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=8



ภาพที่ ก.38 การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=10

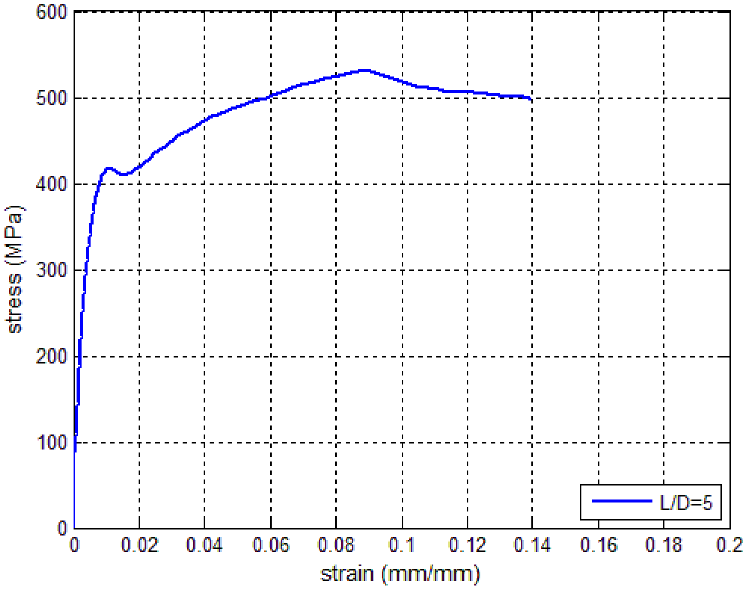


ภาพที่ ก.39 การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=12

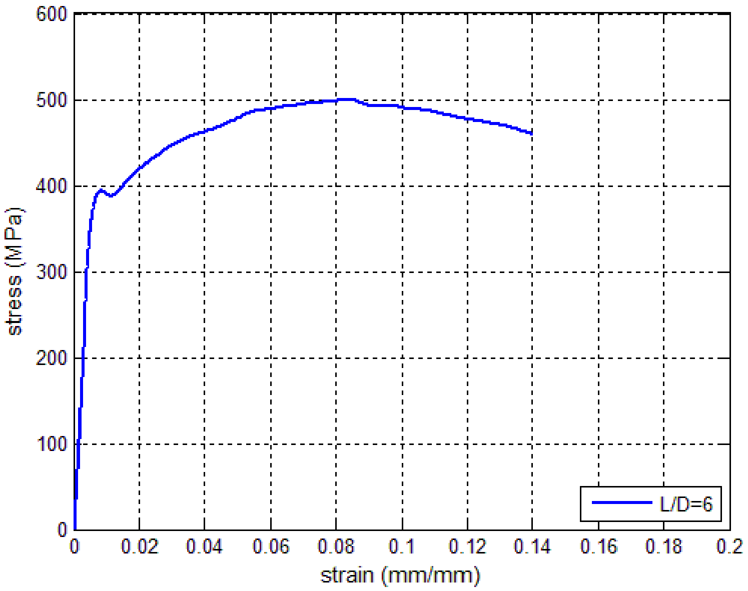


ภาพที่ ก.40 การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉลี่ยและความเครียดเฉลี่ยของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=16

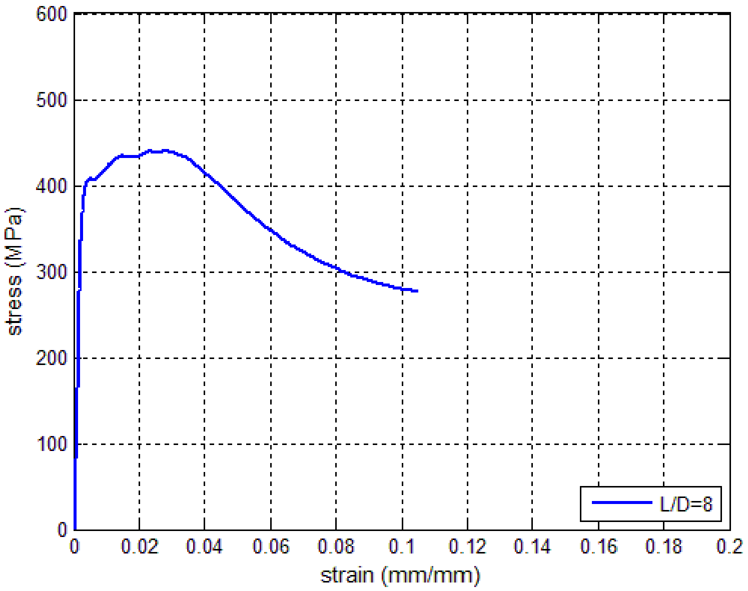
ผลการทดสอบที่ทำการประมวลผลและการปรับค่าแล้วที่อัตราส่วน L/D ต่างๆแสดงดังภาพที่ 3.41-ก.46



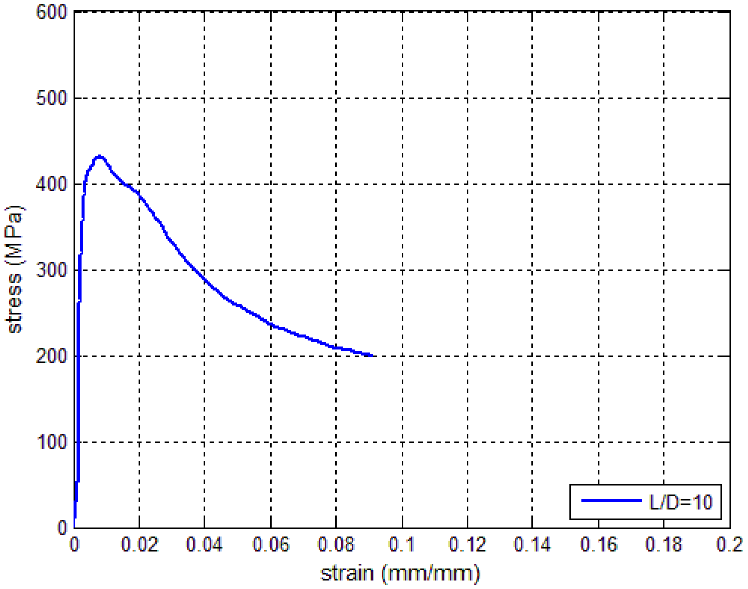
ภาพที่ ก.41 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=5



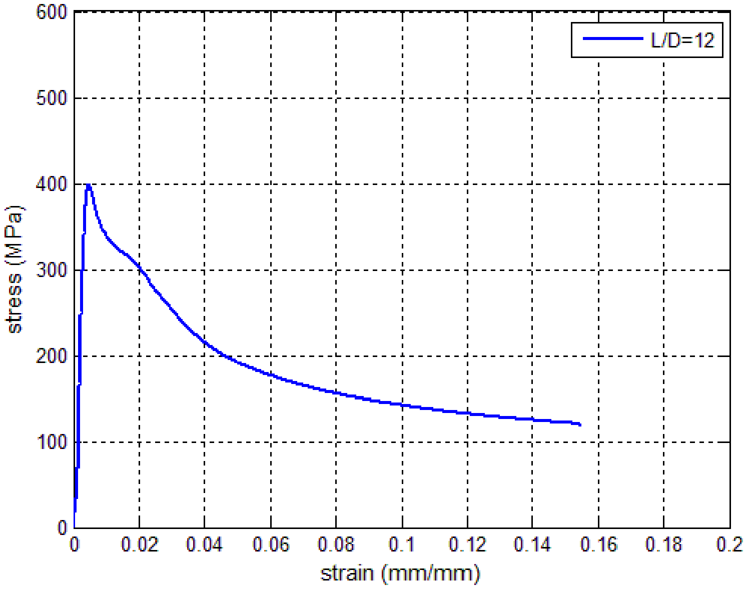
ภาพที่ ก.42 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=6



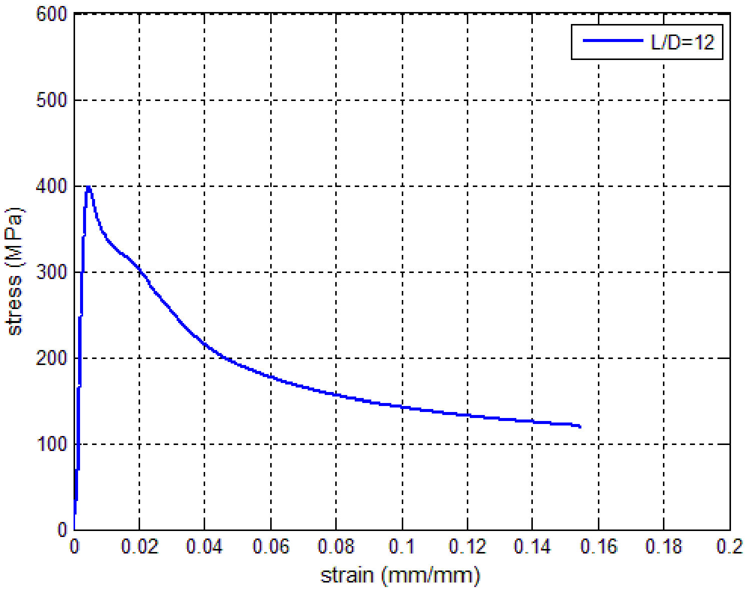
ภาพที่ ก.43 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=8



ภาพที่ ก.44 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=10



ภาพที่ ก.45 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=12



ภาพที่ ก.46 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ($\sigma - \varepsilon$) ของเหล็กเสริมตามยาวภายใต้แรงอัดที่ L/d=16

ก.7 ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

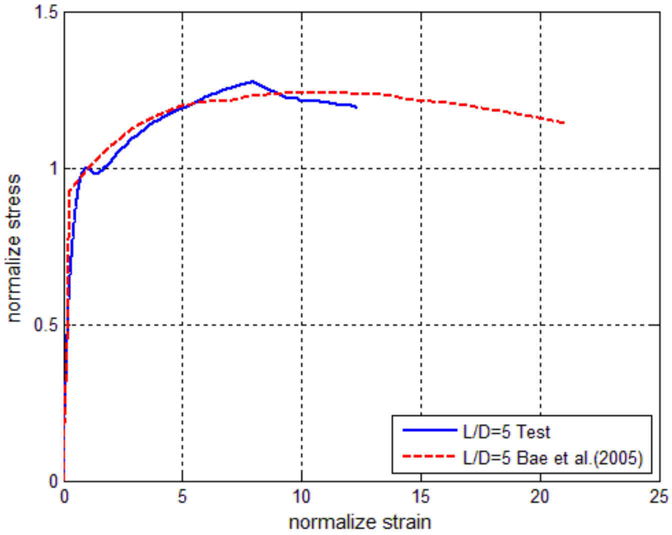
ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการทดสอบของงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงจะเปรียบเทียบผลในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความเค้นต่อความเค้นคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ดังแสดงในภาพที่ ก.47-ก.50

Normalized stress $$N_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{y,T}}$$

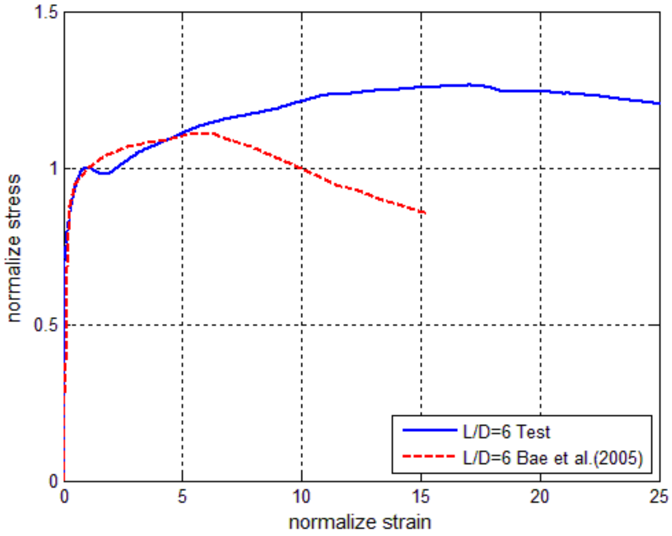
Normalized strain $$N_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{y,T}}$$

$\sigma_{y,T}, \varepsilon_{y,T}$ คือค่าความเค้นและความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง

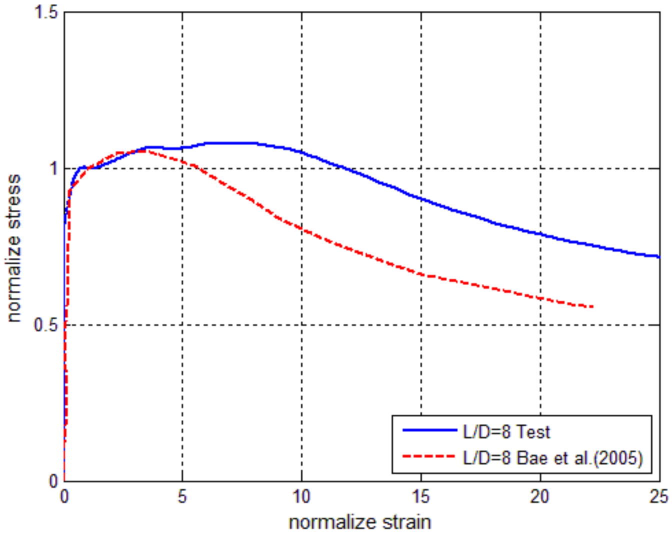
σ, ε คือค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดใดๆ



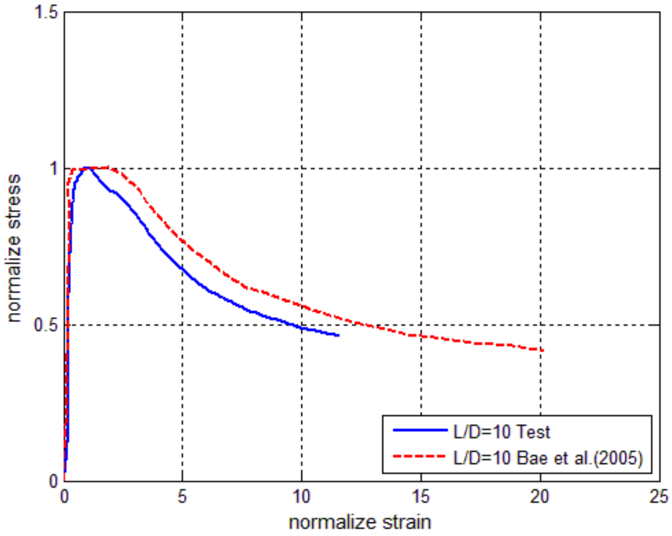
ภาพที่ ก.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ระหว่างการทดสอบเทียบผลงานวิจัยในอดีต ที่ L/D=5



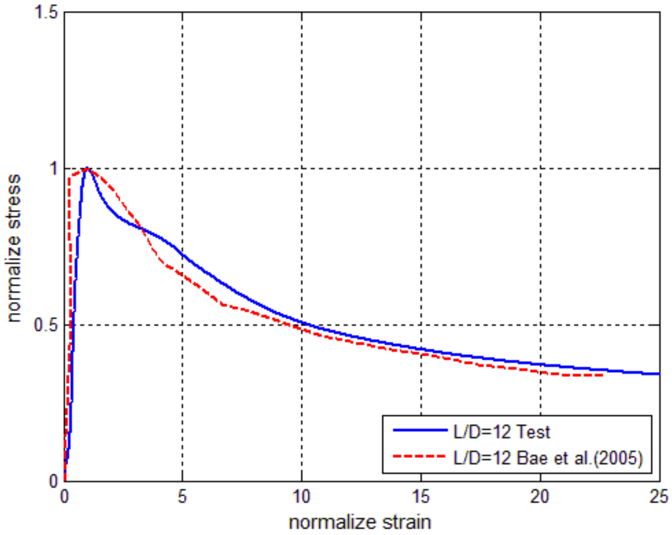
ภาพที่ ก.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_σ) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_ε) ระหว่างการทดสอบเทียบผลงานวิจัยในอดีต ที่ L/D=6



ภาพที่ ก.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_{σ}) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_{ε}) ระหว่างการทดสอบเทียบผลงานวิจัยในอดีต ที่ L/D=8



ภาพที่ ก.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_{σ}) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_{ε}) ระหว่างการทดสอบเทียบผลงานวิจัยในอดีต ที่ L/D=10



ภาพที่ ก.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหน่วยแรงต่อหน่วยแรงคราก (N_{σ}) และอัตราส่วนความเครียดต่อความเครียดคราก (N_{ε}) ระหว่างการทดสอบเทียบผลงานวิจัยในอดีต ที่ L/D=12

ผลการทดสอบที่ได้นั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Bae และคณะ (2005)ที่อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) เท่ากับ 6 และ 8 ผลที่ได้นั้นต่างกันแต่ลักษณะของกราฟนั้นไปในทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ ก.48และก.49 เมื่อ L/d มีค่ามากขึ้นผลการทดสอบนั้นจะใกล้เคียงกับผลของงานวิจัยของ Bae และคณะ (2005)มากขึ้น

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชิษณุพงศ์ สุธัมมะ เกิดวันอาทิตย์ที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดชัยนาท สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2551และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552