การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวาง

นางสาวพรพรรณ วงศ์เมืองแก่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

BUCKLING OF LONGITUDINAL REINFORCEMENTS LATERALLY BRACED BY TRANSVERSE REINFORCEMENTS

Miss Pornpun Wongmuangkaen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวาง
โดย	นางสาวพรพรรณ วงศ์เมืองแก่น
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
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.หทัยรัตน์ มณีเทศ)

พรพรรณ วงศ์เมืองแก่น : การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวาง. (BUCKLING OF LONGITUDINAL REINFORCEMENTS LATERALLY BRACED BY TRANSVERSE REINFORCEMENTS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. อาณัติ เรืองรัศมี,.131 หน้า.

องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อได้รับแผ่นดินไหวรุนแรง จะเกิดการแตกร้าวขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียกำลังในการรับแรง เหล็กเสริมจึงต้องเป็นโครงสร้างหลักในการทำหน้าที่รับแรงดึงและแรงอัด และเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมของเสาหลังการแตกร้าว ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวาง เมื่อรับแรงอัดแบบทิศทางเดียว และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางเมื่อเกิดการโก่งเดาะ โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ การจำลองเหล็กเสริมตามยาวได้กำหนดให้ปลายด้านล่างของแบบจำลองมีจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น ปลายด้านบนยอมให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกนเนื่องจากแรงอัด พิจารณาแบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมเป็น 2 กรณี คือแบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวแบบช่วงเดียว ที่ไม่พิจารณาผลของการค้ำยันทางด้านข้าง และแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาว ที่พิจารณาผลการค้ำยันทางด้านข้างด้วยเหล็กปลอก โดยจำลองพฤติกรรมการยึดรั้งของเหล็กปลอกเป็นจุดรองรับแบบสปริง โดยมีค่าสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้าง ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะ จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ เหล็กเสริมยืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 12 และ 20 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 5, 6, 8, 10 และ12 นำเสนอผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด, ค่าความสัมพันธ์ความเค้นอัดที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความเค้นดึง กับความเครียด และอัตราส่วนค่าสติฟเนสในแนวแกนของเหล็กเสริมยืนกับอัตราส่วนค่าสปริงสติฟเนสของสปริง ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมของแบบจำลองที่พิจารณาผลของการค้ำยันทางด้านข้าง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554

5270621821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : BUCKLING / LONGITUDINAL REINFORCEMENT / TRANSVERSE REINFORCEMENT / AXIAL / COMPRESSION FORCE

PORNPUN WONGMUANGKAEN : BUCKLING OF LONGITUDINAL REINFORCEMENTS LATERALLY BRACED BY TRANSVERSE REINFORCEMENTS. ADVISOR: ASST.PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, 131 pp.

Under extreme seismic actions, plastic hinges of reinforced concrete columns are subjected to axial compression forces and bending. The lateral deformation of the longitudinal bar is usually restrained by transverse reinforcing bars. The objective of the research is to investigate the behavior of longitudinal bars in monotonic loading with buckling effects and initial imperfection effects. The behavior of longitudinal reinforcements laterally braced by transverse reinforcements is studied by using fiber models. The analytical models study in 2 cases. The model 1 is the one spacing of longitudinal reinforcement without the lateral bracing. The model 2 considers the lateral bracing of transverse reinforcements idealized by a linear spring. The supports do not allow lateral and rotational movements. The upper support accepts moving vertically. The center node of the model has a slight eccentricity in order to initiate buckling of longitudinal reinforcements as the eccentricity-to-diameter ratios is 0.01. The length-to-diameter ratios of 4, 5, 6, 8, 10 and 12 are considered in this study. In the transverse reinforcement is simulated as spring supports. This research aims to determine the responses of longitudinal bars with buckling effects and to propose the stress-strain relations of longitudinal reinforcement bars with bucking effects, the normalized stress-strain of longitudinal reinforcements and the normalized stiffness.

Department : Civil Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Civil Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์ และ ดร. หทัยรัตน์ มณีเทศ ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ หน่วยงานและบุคคลต่างๆที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ดังรายนามต่อไปนี้

Prof. Keh-Chyuan Tsai คณะวิศวกรรมศาสตร์ แห่ง National Taiwan University และเพื่อนนักศึกษาทีม Prof. Keh-Chyuan Tsai เป็นที่ปรึกษาทุกคน

Yi-Jer Yu และหน่วยงาน National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) เมือง Taipei ประเทศ Taiwan.

รุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาโปรแกรม การดำเนินงานและจัดข้อมูลเอกสาร รวมถึงคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและที่สำคัญที่สุด ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคือ บิดา มารดา ที่เป็นแรงบันดาลใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
บทที่ 1. บทนำ..... 1
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3
1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 3
บทที่ 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียวและแบบวัฏจักร..... 5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม..... 11
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่พิจารณาผลของเหล็กปลอก..... 32
2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมอันเนื่องมาจากผลของเสาคอนกรีตที่มีการโอบรัด 40
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์..... 50
บทที่ 3. วิธีดำเนินการวิจัย..... 55
3.1 ทำการศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา..... 55
3.2 ศึกษาโปรแกรม OPENSEES..... 55
3.3 วิเคราะห์แบบจำลอง..... 59
3.4 สอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบ..... 59
3.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 60
3.6 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ..... 60
บทที่ 4. วิเคราะห์แบบจำลอง..... 61
4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้..... 62
4.2 จำนวนไฟเบอร์..... 65

หน้า

4.3 ความแปรผันของค่าความชันในรูปของอัตราส่วนค่า STRAIN HARDENING 68
บทที่ 5. สอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบ 75
5.1 การสอบเทียบแบบจำลองแบบที่ 1 75
5.2 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่พิจารณาผลการต้านทานการเสียรูปทางด้านข้าง
อันเนื่องมาจากเหล็กปลอก แบบจำลองแบบที่ 2 82
บทที่ 6. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 83
6.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 83
6.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 2 93
บทที่ 7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 116
7.1 สรุปผลการวิจัย 116
7.2 ข้อเสนอแนะ 119
รายการอ้างอิง 120
ภาคผนวก 122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 131

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม..... 36
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 เพื่อหาจำนวน ELEMENT 63
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองของเสาเพื่อหาจำนวน FIBER 66
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด และค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของเหล็กเสริม DB10 ที่จำนวนไฟเบอร์ต่างกัน กับค่า EXACT SOLUTION 67
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าอัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 70
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าตัวแปรจากผลการทดสอบของ BAE และคณะ, 2005 NO.10..... 76
ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 ที่นำมาสอบเทียบกับผลการทดสอบของ BAE และคณะ, 2005..... 76
ตารางที่ 5.3 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 เพื่อทำการเปรียบเทียบที่ได้จากการทดสอบของ BAYRAK และ SHEIKH 79
ตารางที่ 6.1 ตารางที่แสดงค่าตัวแปรและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ใน แบบจำลองแบบที่ 1 ที่ค่าอัตราส่วน L/D ต่างๆกัน 84
ตารางที่ 6.2 ค่าแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยืน ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกันที่ใช้ในการเปรียบเทียบ..... 86
ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ ในการวิเคราะห์ที่ค่าจุดคราก ต่างๆกัน..... 89
ตารางที่ 6.4 ตารางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล้กเสริม และอัตราส่วน L/D ที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 2 94
ตารางที่ 6.5 ตารางแสดงค่า K_S และอัตราส่วนสติฟเนส (N_K) ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลิเมตร ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 ของแบบจำลองแบบที่ 2..... 96
ตารางที่ 6.6 ตารางแสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 กับแบบจำลองแบบที่ 1 และผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น-ความเครียด..... 98
ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงพลังงานที่เกิดขึ้น ที่ค่าอัตราส่วนสติฟเนส (N_K) ต่างๆ ของแบบจำลองแบบที่ 2 เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1..... 107

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า
ภาพที่ 1.1 แสดงการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่เกิดขึ้นในเสา เมื่อคอนกรีตหุ้มเกิดการแตกร้าว (BERRY และ EBERHARD, 2005) 2
ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่รับแรงดึงเพียงอย่างเดียวของ เหล็กเสริมรับแรงดึง (ที่มา MASSONE และ MORODER, 2009)... 6
ภาพที่ 2.2 แสดงความเครียดเฉพาะจุด (STRAIN LOCALIZATION) รวมเฉลี่ยของเหล็กเสริมที่รับแรงดึง (ที่มา MASSONE และ MORODER, 2009)..... 7
ภาพที่ 2.3 ผลที่ได้จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดที่เกิดจากเหล็กเส้นรับแรงดึงและแรงอัด (ที่มา DODD และ RESTREPO-POSADA,1995)..... 8
ภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดในเหล็กเสริม..... 9
ภาพที่ 2.5 แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (ที่มา GOMES และ APPLETON, 1996) 10
ภาพที่ 2.6 รูปแสดงเครื่องมือที่นำมาทดสอบเหล็กเส้นที่รับแรงดึงและแรงอัด..... 12
ภาพที่ 2.7 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดแบบทิศทางเดียวที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 5, 8 และ 10 (ที่มา MONTI และ NUTI, 1992)... 13
ภาพที่ 2.8 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดแบบวัฏจักรที่อัตราส่วนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 5, 8 และ 10 (ที่มา MONTI และ NUTI, 1992)..... 13
ภาพที่ 2.9 แบบจำลองอย่างง่ายของเหล็กเสริมยืนในช่วงที่มีการโก่งเดาะเกิดขึ้น 14
ภาพที่ 2.10 ความเค้นพลาสติกที่กระจายตัวอยู่ในหน้าตัดของเหล็กเสริม..... 15
ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัด A.) แบบช่วงพลาสติก B.) คิดผลตามสมการที่ 10 C.) คิดผลตามสมการที่ 12 (ที่มา GOMES และ APPLETON, 1996) . 17
ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่มีแรงกระทำแบบวัฏจักรเมื่อพิจารณาผลของการโก่งเดาะของเหล็กเส้น (ที่มา GOMES และ APPLETON, 1996)..... 17
ภาพที่ 2.13 รูปแสดงแบบจำลองไฟเบอร์ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์..... 18
ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์กับชิ้นส่วนทดสอบของ MONTI และ NUTI (1992) (ที่มา DHAKAL และ MAEKAWA, 2002 19

หน้า

ภาพที่ 2.15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-อัตราส่วนความเครียดของเหล็กเส้น ที่ F_y=400Mpa อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 10 และ 15 ตามลำดับ (ที่มา DHAKAL และ MAEKAWA, 2002) 20
ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์เนื่องมาจากอัตราส่วน L/D ที่เท่ากันกับค่า F_y ที่ต่างกัน 21
ภาพที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-อัตราส่วนความเครียด ตามสมการที่ 14... 21
ภาพที่ 2.18 แสดงผลของความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-อัตราส่วนความเครียด ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นต่างๆกัน (ที่มา DHAKAL และ MAEKAWA, 2002)..... 22
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด ที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิเมนต์ .. 23
ภาพที่ 2.20 ภาพแสดงการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ (ที่มา BAE และคณะ, 2005)..... 24
ภาพที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้นอัดในแนวแกน-อัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างต่อความยาว (ที่มา BAE และคณะ, 2005)..... 25
ภาพที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเริ่มต้น-อัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างต่อความยาว (ที่มา BAE และคณะ, 2005) 26
ภาพที่ 2.23 แสดงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่พิจารณาผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเริ่มต้น (ที่มา MASSONE และ MORODER, 2009)..... 28
ภาพที่ 2.24 การวิเคราะห์แบบจำลองการโก่งเดาะที่ช่วงความยาว 1 ใน 4..... 28
ภาพที่ 2.25 แสดงหน้าตัดของด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ (ที่มา MASSONE และ MORODER, 2009)..... 29
ภาพที่ 2.26 รูปแบบกระบวนการเชิงตัวเลขที่นำไปวิเคราะห์การโก่งเดาะ..... 31
ภาพที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่คิดผลของการโก่งเดาะและการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น จากการวิเคราะห์กับผลที่ได้ จากการทดสอบ (ที่มา MASSONE และ MORODER, 2009)..... 31
ภาพที่ 2.28 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่คิดผลของการโก่งเดาะและการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น (ที่มา MASSONE และ MORODER, 2009)..... 32
ภาพที่ 2.29 ภาพจำลองของการวิเคราะห์สภาพที่เกิดขึ้นของการโก่งทางด้านข้างของเหล็กเสริมยืน (ที่มา DHAKAL, 2000) 33
ภาพที่ 2.30 เปรียบเทียบรูปแบบการเสียรูปโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (ที่มา DHAKAL, 2000)..... 33

หน้า

ภาพที่ 2.31 การคำนวณช่วงการเกิดโก่งเดาะ (ที่มา DHAKAL, 2000) 34
ภาพที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และไม่มีการโอบรัด (ที่มา KENT และ PARK, 1971) 40
ภาพที่ 2.33 แรงดันทางด้านข้างของเสาหน้าตัดวงกลม (A) แสดงแรงดันสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด (B) แรงเทียบเท่าของแรงดันทางด้านข้างกับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอก (ที่มา SAATCIOGLU และ RAZVI, 1992) 43
ภาพที่ 2.34 แรงดันทางด้านข้างของเสาหน้าตัดจัตุรัส (A) แสดงแรงดันสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดจัตุรัส (B) แรงดันด้านข้างที่กระจายตัวตามการจัดเรียงของเหล็กเสริม 45
ภาพที่ 2.35 การกระจายตัวแรงดันทางด้านข้างของเสาหน้าตัดจัตุรัส (A).แสดงแรงดันสม่ำเสมอตลอดความยาว (B).แสดงค่าเกิดขึ้นจริง, ค่าเฉลี่ย และค่าแรงดันเทียบเท่า..... 46
ภาพที่ 2.36 การกระจายตัวแรงต้านทานทางด้านข้างของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 47
ภาพที่ 2.37 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่นำมาอ้างอิง 48
ภาพที่ 2.38 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นต่อความเค้นสูงสุดที่ไม่มีผลการโอบรัดความเครียดที่นำมาอ้างอิง (ที่มา SAATCIOGLU และ RAZVI, 1992)..... 49
ภาพที่ 2.39 ดีกรีการเคลื่อนที่อิสระของชิ้นส่วน..... 50
ภาพที่ 2.40 การกระจายความเครียดในหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์..... 51
ภาพที่ 2.41 แสดงวิธี COROTAIONAL ที่ใช้การแก้ปัญหาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม 54
ภาพที่ 3.1 จำลองพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างภายหลังจากคอนกรีตสูญเสียกำลังการรับแรงอัด 56
ภาพที่ 3.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลองไฟเบอร์ที่โปรแกรม OPENSEES ใช้ในการวิเคราะห์..... 56
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาเริ่มต้น..... 58
ภาพที่ 4.1 แบบจำลองแบบที่ 1..... 61
ภาพที่ 4.2 คุณสมบัติความเค้น-ความเครียดที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 (MENEGOTTO และ PINTO, 1973)..... 62
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของแบบจำลองแบบที่ 1 เมื่อจำนวน ELEMENT ต่างๆกัน ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 64
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของแบบจำลองแบบที่ 1 เมื่อจำนวน ELEMENT ต่างๆกัน ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 64

หน้า

ภาพที่ 4.5 วิเคราะห์แบบจำลองของเสาโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ 65
ภาพที่ 4.6 รูปแสดงจำนวนชิ้นส่วนไฟเบอร์ต่างๆกันในเหล็กเสริม 65
ภาพที่ 4.7 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ใช้จำนวนไฟเบอร์ต่างๆกัน 67
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมขนาดอัตราส่วน L/D ต่างๆกัน.. 68
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน..... 69
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดึงที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน ของแบบจำลองแบบที่ 1 71
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=4..... 71
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดอัด ที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=4..... 72
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=6..... 72
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดอัด ที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=6..... 73
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=8..... 73
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดอัด ที่อัตราส่วน STRAIN HARDENING ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=8..... 74
ภาพที่ 5.1 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมรับแรงดึงของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.3 มม. 77
ภาพที่ 5.2 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของ BAE และคณะ,2005 กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม 32.3 มม. 78
ภาพที่ 5.3 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของ BAE และคณะ,2005 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหล็กเสริม ในรูปของความสัมพันธ์ในอัตราส่วนความเค้น-ความเครียด 78

หน้า

ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมรับแรงดึงของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.5 มม. 80
ภาพที่ 5.5 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ ผลการทดสอบของ BAYRAK และ SHEIKH, 2002 กับผลที่การวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเหล็กเสริม 19.5 มม. 80
ภาพที่ 5.6 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของ BAYRAK และ SHEIKH, 2002 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหล็กเสริม ในรูปของความสัมพันธ์ในอัตราส่วนความ เค้น-ความเครียด 81
ภาพที่ 5.7 แบบจำลองแบบที่ 2..... 82
ภาพที่ 6.1 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกดแบบช่วงเดียวที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง..... 83
ภาพที่ 6.2 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 85
ภาพที่ 6.3 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน ของ เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 85
ภาพที่ 6.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 10 มม. และ 12 มม. ที่อัตรส่วน L/D ต่างๆกัน..... 87
ภาพที่ 6.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 12 มม. ที่อัตรส่วน L/D ต่างๆกัน 87
ภาพที่ 6.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 12 มม. และ 20 มม. ที่อัตรส่วน L/D เท่ากับ 4 และ 8 88
ภาพที่ 6.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. และ 20 มม. ที่อัตรส่วน L/D D เท่ากับ 4 และ 8 ... 88
ภาพที่ 6.8 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 โดยที่ค่า F_Y ต่างๆกัน..... 90
ภาพที่ 6.9 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น (σ/σ_Y)-ความเครียด ($\varepsilon/\varepsilon_Y$) ของแบบจำลอง แบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 โดยที่ค่า F_Y ต่างๆกัน..... 91
ภาพที่ 6.10 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 8 โดยที่ค่า F_Y ต่างๆกัน..... 91

หน้า

ภาพที่ 6.11 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น (σ/σ_Y)-ความเครียด ($\varepsilon/\varepsilon_Y$) ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 8 โดยที่ค่า F_Y ต่างๆกัน 92
ภาพที่ 6.12 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกดที่มีการค้ำยันด้านข้างอันเนื่องมาจากเหล็กปลอกเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1 93
ภาพที่ 6.13 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 96
ภาพที่ 6.14 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 97
ภาพที่ 6.15 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 98
ภาพที่ 6.16 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 และ 10 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 99
ภาพที่ 6.17 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 100
ภาพที่ 6.18 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 101
ภาพที่ 6.19 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 และ 10 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 102
ภาพที่ 6.20 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 103
ภาพที่ 6.21 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. 104
ภาพที่ 6.22 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 และ 10 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. 105
ภาพที่ 6.23 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. 106
ภาพที่ 6.24 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 107

หน้า

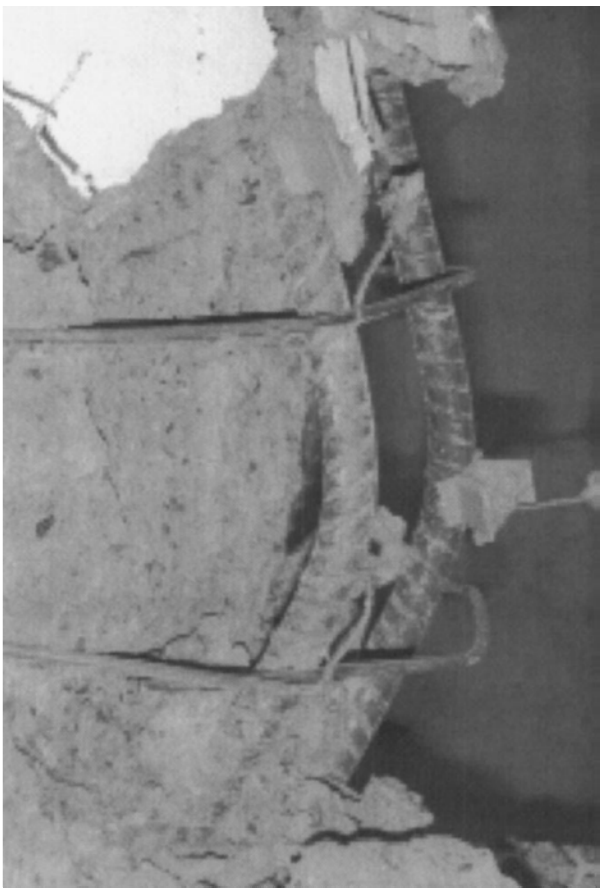
ภาพที่ 6.25 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 108
ภาพที่ 6.26 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 109
ภาพที่ 6.27 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 110
ภาพที่ 6.28 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 111
ภาพที่ 6.29 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 112
ภาพที่ 6.30 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. 113
ภาพที่ 6.31 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. 114
ภาพที่ 6.32 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. 115
ภาพที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนสติฟเนส (N_K) กับอัตราส่วน L/D..... 118

บทที่ 1

บทนำ

องค์อาคารในปัจจุบันได้มีการออกแบบทางวิศวกรรม ให้คำนึงถึงผลอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุก แรงกระทำต่างๆ แผ่นดินไหวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ต้องถูกพิจารณา แผ่นดินไหวถือว่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติยากที่จะทำนายพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้น ไม่สามารถคาดการณ์ ความรุนแรงและผลกระทบก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยอยู่ในบริเวณที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว มีบางส่วนอยู่บนแนวของรอยเลื่อนแผ่นดินไหวและเคยเป็นบริเวณได้รับผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว อีกทั้งในบางส่วนของประเทศยังเป็นดินอ่อนอีกด้วยซึ่งมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว ถึงแม้ว่าประเทศไทยไม่ได้เกิดแผ่นดินไหวรุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ แต่ก็นับได้ว่ามีความเสี่ยงเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในองค์อาคาร ดังนั้นโครงสร้างขององค์อาคารจะต้องคำนึงถึง ผลอันเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหวด้วยซึ่งจะได้รับผลกระทบมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ สถานที่ตั้งและประเภทขององค์อาคาร

องค์อาคารเมื่อได้รับแรงแผ่นดินไหวจะเกิดการแตกร้าวในโครงสร้างและองค์อาคารบางส่วน ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว โดยจากที่มีการทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการรับแรงแผ่นดินไหว แล้วเกิดการแตกออกของคอนกรีตหุ้ม เหล็กเสริมเป็นส่วนต้องทำหน้าที่หลักในการรับแรงดึงและแรงอัด หลังจากคอนกรีตได้สูญเสียกำลังในการช่วยรับแรง เหล็กเสริมตามยาวจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลถึงพฤติกรรมของเสาทั้งหมด เมื่อเหล็กเสริมตามยาวทำหน้าที่รับแรงอัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเกิดการโก่งเดาะ การเกิดการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว จะมีเหล็กปลอกที่มีส่วนช่วยชะลอการโก่งเดาะ ดังแสดงพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาดังภาพที่ 1.1 แสดงการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่มีเหล็กรัดรอบภายหลังจากคอนกรีตหุ้มเกิดการแตกร้าว การศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางนั้น ยังมีอยู่จำกัดมาก งานวิจัยนี้ได้มุ่งทำการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางในเสา และทำการวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์



ภาพที่ 1.1 แสดงการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่เกิดขึ้นในเสา เมื่อคอนกรีตหุ้มเกิดการแตกร้าว (Berry และ Eberhard, 2005)

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงอัดแบบทิศทางเดียว ที่มีผลของพฤติกรรมแบบเชิงเส้นไปจนถึงช่วง Inelastic อันเนื่องมาจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมรับแรงอัด และผลการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมขณะเกิดการโก่งเดาะต่อเหล็กปลอกที่ทำหน้าที่ค้ำยัน รวมถึงผลอันเนื่องมาจากเหล็กปลอกที่ระยะเรียงระหว่างเหล็กเสริมต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน, ขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมและกำลังของเหล็กเสริม แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมOpenSees ในการศึกษาแบบจำลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้สรุปและทำนายพฤติกรรมของค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวาง

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการยึดรั้งทางด้านข้างจากเหล็กปลอก

2. วิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการโก่งเดาะ เพื่อให้ทราบพารามิเตอร์ที่ส่งผลถึงพฤติกรรม

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม โดยใช้โปรแกรม OpenSees

2. ขอบเขตของค่าตัวแปรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

   ก. เหล็กข้ออ้อย SD40 กำลังความเค้นจุดครากที่ใช้ 400 เมกะพาสคาล โดยพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดเหล็กเส้นข้ออ้อย 10 มิลลิเมตร, 12 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

   ข. แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีที่ไม่พิจารณาการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น จะมีอัตราส่วนของการโก่งเดาะเริ่มต้นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด, e/D มีอัตราส่วนเท่ากับ 0.01

3. การวิเคราะห์แบบจำลองของเหล็กเสริมตามยาว ที่รับแรงอัดตามแนวแกน โดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด รับแรงอัดกระทำแบบทิศทางเดียว

1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวิธีดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีเหล็กเสริมรับแรงอัดในแนวแกน ทั้งแบบวัฏจักรและแบบทิศทางเดียว ในช่วงที่เลยจุดคราก ที่มีผลอันเนื่องมาจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมรับแรงอัดในแนวแกน ทั้งจากการทดสอบและวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองแสดงพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

2. ศึกษาการใช้โปรแกรม OPENSEES

3. สร้างแบบจำลองพฤติกรรมเหล็กเสริมรับแรงอัดในแนวแกนโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์

4. ทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีโครงสร้างที่ถูกต้อง เหมาะสม และเพียงพอในการจำลองพฤติกรรมแบบจำลองเหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะ เช่น จำนวนอิลิเมนต์ จำนวนชิ้นส่วนไฟเบอร์ และผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน ความชันหลังจุดครากต่อความชันเริ่มต้นของเหล็กเสริม

5. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดสอบ

6. ทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน

7. ทำการวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ของเหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งเดาะ ที่มีผลต่อเหล็กเสริมตามขวางในรูปของสติฟเนสค่าคงที่ของสปริง

8. สรุปผลการศึกษาวิจัย

9. เขียนวิทยานิพนธ์

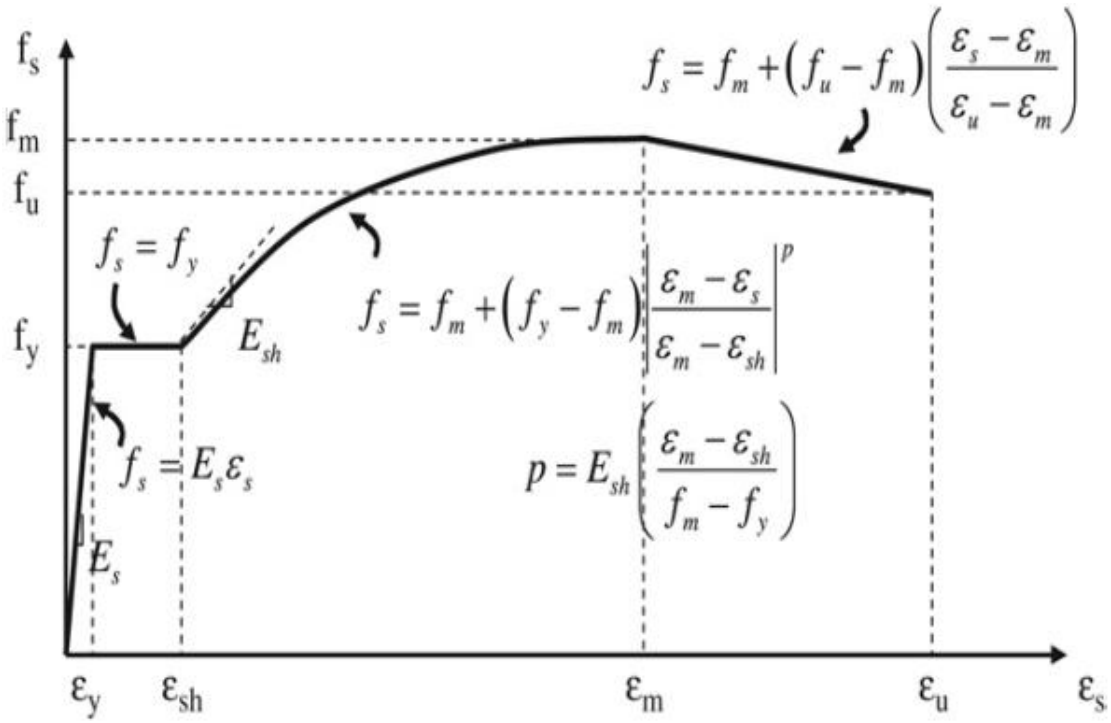
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัย ทำให้เข้าใจในพฤติกรรมของเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการโก่งเดาะเมื่อมีแรงมากระทำต่อโครงสร้าง อีกทั้งเพื่อหาแนวโน้มของพฤติกรรมการโก่งเดาะที่ทำการศึกษาวิจัย แล้วสามารถนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยที่ทำการศึกษามาก่อน โดยสามารถสรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

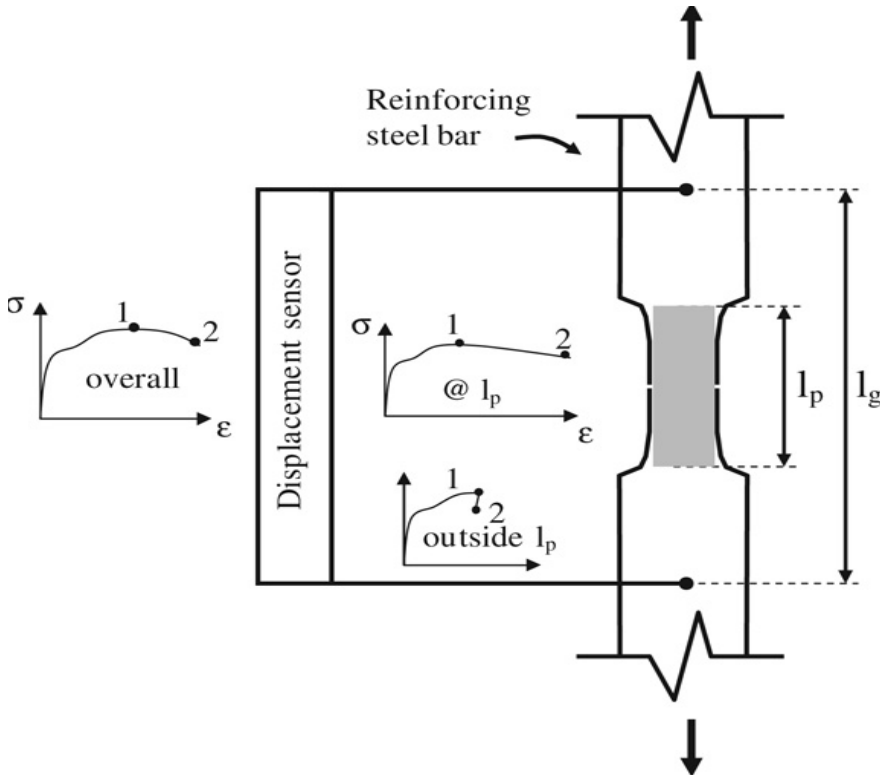
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียวและแบบวัฏจักร

Massone และ Moroder (2009) อ้างอิงการศึกษาของ Mander, Priestley และ Park (1984) ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงดึงแบบทิศทางเดียวเพื่อหาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเส้น ตั้งแต่ที่เหล็กเสริมเริ่มมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจนกระทั่งเหล็กเสริมถึงจุดคราก $\left(f_y,\varepsilon_y\right)$, แล้วเข้าสู่ช่วงที่มีกำลังความเครียดเพิ่มขึ้น (Strain hardening)$\left(f_y,\varepsilon_{sh}\right)$, ถึงจุดที่มีค่าความเค้นสูงสุด $\left(f_m,\varepsilon_m\right)$, แล้วยังมีความเครียดเพิ่มขึ้นอีกเข้าสู่ช่วงที่กำลังของวัสดุตกลง (Strain degradation) จนกระทั่งเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่ได้อีก $\left(f_u,\varepsilon_u\right)$, ดังภาพที่ 2.1แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดการรับแรงดึงของเหล็กเสริม



ภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่รับแรงดึงเพียงอย่างเดียวของ เหล็กเสริมรับแรงดึง (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)

จากแบบจำลองของ Mander และคณะ (1984) ได้ทำการศึกษาผลของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดึง โดยศึกษาพฤติกรรมหลังการเกิดค่าความเค้นสูงสุดที่กำลังประลัย ($\varepsilon_{u,p}$) โดยการพิจารณาความเครียดเฉพาะจุดด้วยเครื่องมือวัดการเสียรูปทางแนวแกนในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด (l_p) และช่วงระยะความยาวเกจทั้งหมด (l_g) ที่มีพฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดึงจากจุด 1 ไปสู่จุด 2 ที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.2 แล้วหาความสัมพันธ์ของความเครียดเฉลี่ยที่ลดลงหลังจุดสูงสุดจนถึงจุดแตกหักของเหล็กเส้นตามสมการที่ 1 และ 2



ภาพที่ 2.2 แสดงความเครียดเฉพาะจุด (Strain localization) รวมเฉลี่ย ของเหล็กเสริมที่รับแรงดึง (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)

$$\varepsilon_{u,p}=\varepsilon_m+\left[\left(\varepsilon_{u,g}-\varepsilon_m\right).l_g+\left(\frac{f_u-f_m}{E_s}\right).\left(l_g-l_p\right)\right]\Big/ l_p \qquad (1)$$

$$\varepsilon_{u,p}\approx\varepsilon_m+\left(\varepsilon_{u,g}-\varepsilon_m\right)\frac{l_g}{l_p} \qquad (2)$$

ผลที่ได้จากเหล็กเสริมรับแรงดึงนี้เองได้ถูกนำมาใช้ในการหาพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด โดยได้มีการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดอัด จากการประมาณค่าที่ได้จากความสัมพันธ์อันเนื่องมาจากแรงดึง

Dodd และ Restrepo-Posada (1995) ได้หาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่เกิดจากพฤติกรรมของเหล็กเมื่อรับแรงดึง ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าพฤติกรรมการดึงและการอัดของแท่งเหล็กมีคุณสมบัติเหมือนกันแต่ทิศทางตรงกันข้าม โดยไม่พิจารณาผลอันเนื่องมาจากการโก่ง

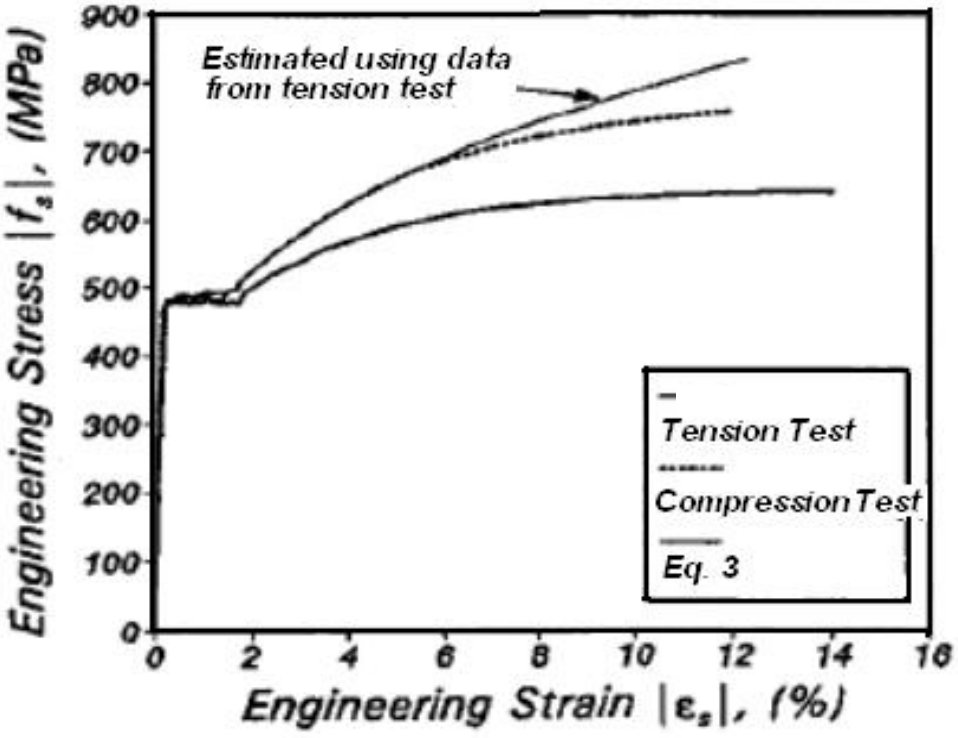
เดาะ แสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดึงกับความเค้น-ความเครียดอัดทางวิศวกรรม ตามสมการที่ 3 และสมการที่ 4

$$f_{s,c} = -f_{s,t}(1+\varepsilon_{s,t})^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{s,c} = -\frac{\varepsilon_{s,t}}{1+\varepsilon_{s,t}} \quad (4)$$

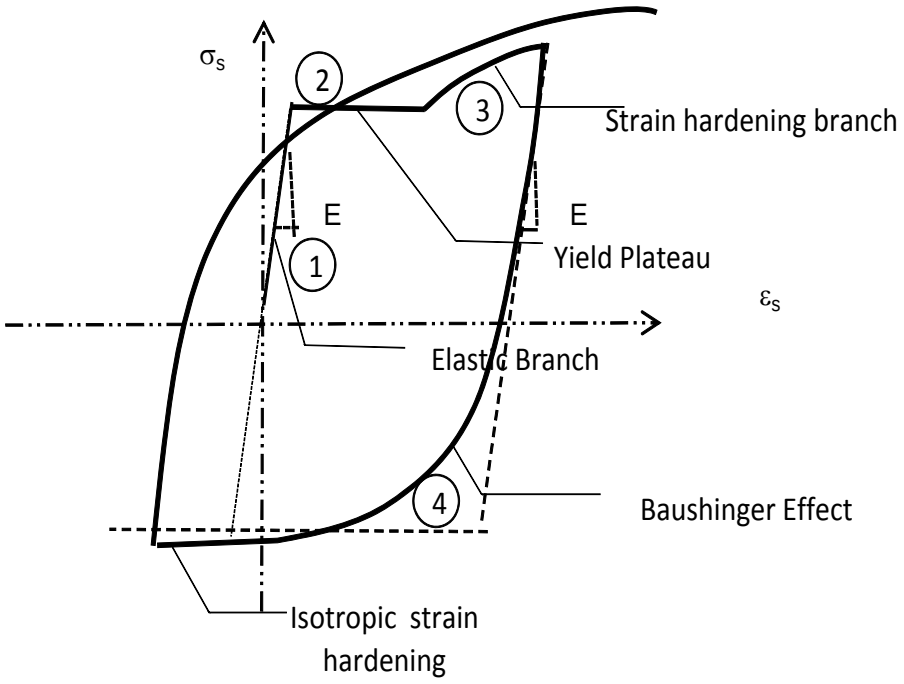
โดยที่ $f_{s,c}$ คือ ค่าความเค้นอัด

$\varepsilon_{s,c}$ คือ ค่าความเครียดอัด



ภาพที่ 2.3 ผลที่ได้จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดที่เกิดจากเหล็กเส้นรับแรงดึงและแรงอัด (ที่มา Dodd และ Restrepo-Posada,1995)

Gomes และ Appleton, (1996) ได้อธิบายความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเส้นที่มีพฤติกรรมแบบวัฏจักรอย่างง่ายๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดในเหล็กเสริม
(ที่มา Gomes และ Appleton, 1996)

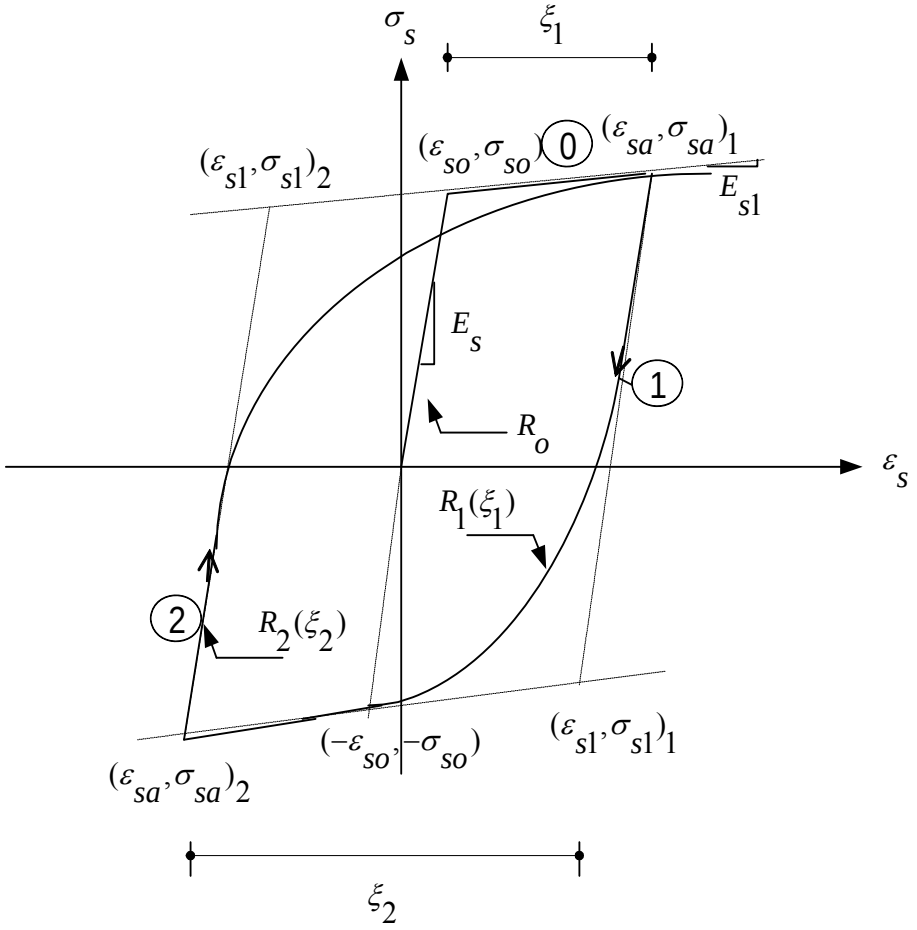
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด สามารถอธิบายได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดคราก คือจุดที่เกิดหน่วยแรงคงค้างช่วงที่ 2 ต่อเนื่องไปถึงเป็นช่วงที่ 3 ที่มีกำลังของวัสดุเพิ่มขึ้น (Hardening)

ช่วงที่ 4 แรงกระทำเปลี่ยนเป็นทิศตรงกันข้ามจะเกิดเส้นแบชชิงเจอร์ (Baushinger effect) ทำให้กำลังที่จุดครากในทิศตรงกันข้ามนี้มีค่าลดลง ผลของปรากฏการณ์นี้จะเพิ่มมากขึ้นตามความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นก่อนจะเกิดแรงกลับทิศ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นโค้งความสัมพันธ์ในช่วงระหว่างพฤติกรรมแบบอีลาสติกและพลาสติก (Transition zone) คุณสมบัติทางด้านกำลังของเหล็กลดลงจากพฤติกรรมตั้งต้น

ช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่กำลังของวัสดุมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง (Isotropic strain hardening) ซึ่งสัมพันธ์กับความเครียดพลาสติกที่เกิดขึ้นก่อนจะเกิดแรงกระทำในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางแรก

Gomes และ Appleton (1996) ได้อ้างอิงแบบจำลองของ Menegotto และ Pinto, (1973) อธิบายความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแบบวัฏจักร สามารถแสดงในรูปของสมการที่ 5 ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (ที่มา Gomes และ Appleton, 1996)

$$\sigma_s^* = \beta\varepsilon_S^* + \frac{(1-\beta)\varepsilon_s^*}{(1+(\varepsilon_s^*)^R)^{1/R}} \tag{5}$$

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s0}} \ , \ \sigma_s^* = \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} \tag{6}$$

ใช้กับช่วงที่มีความเค้น, ความเครียด ที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sa}}{2\varepsilon_{s0}} \ , \ \sigma_s^* = \frac{\sigma_s - \sigma_{sa}}{2\sigma_{s0}} \tag{7}$$

ใช้กับช่วงที่มีความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดลดลงในช่วงที่ 1 เมื่อเหล็กเริ่มมีพฤติกรรมแบบพลาสติก จนกระทั่งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากแรงในแนวแกนแต่ทิศทางตรงกันข้าม

$$\varepsilon_s^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sa}}{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{sa}} \ , \ \sigma_s^* = \frac{\sigma_s - \sigma_{sa}}{\sigma_{s1} - \sigma_{sa}} \qquad (8)$$

ใช้กับช่วงที่1 ที่มีความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากแรงในแนวแกนแต่ทิศทางตรงกันข้ามจากเดิม

โดยที่

$\sigma_{s0}, \varepsilon_{s0}$ คือ ความเค้นและความเครียดที่จุดตัดคราก

$\sigma_{s1}, \varepsilon_{s1}$ คือ ความเค้นและความเครียดที่จุดตัดของเส้นกรอบ (Envelope line) ในเชิงเส้น

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

$\beta = \frac{E_{s1}}{E_s}$ คือ อัตราส่วนความชันของช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบพลาสติก

R คือ ค่าตัวแปรที่ได้จากเส้นกราฟแบชชิงเจอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านความเหนียวของวัสดุ

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$$

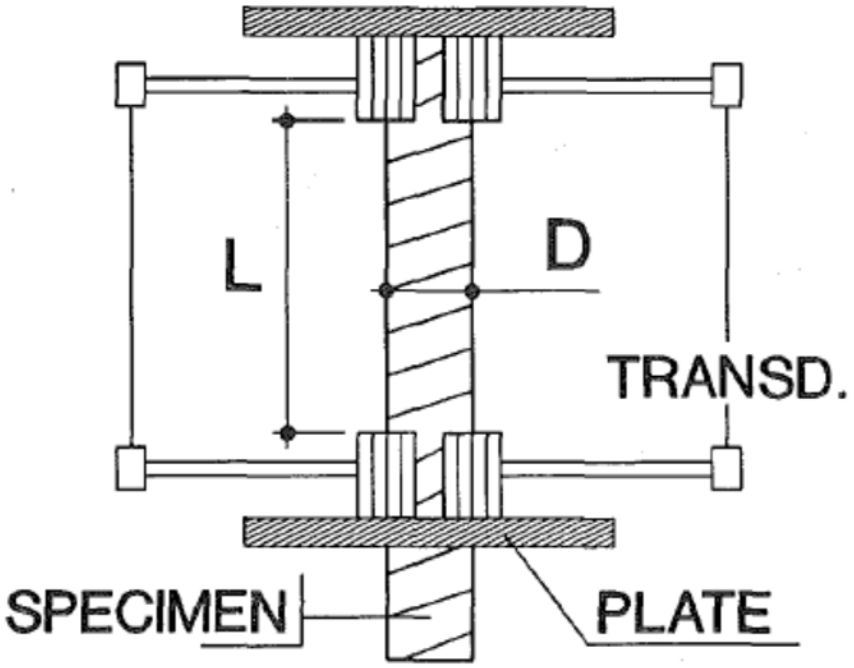
ξ คือ ผลต่างของความเครียดในช่วงพลาสติก จนกระทั่งไปถึงจุดที่มีความเค้นและความเครียดสูงสุด

R_0 , a_1 , a_2 คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ

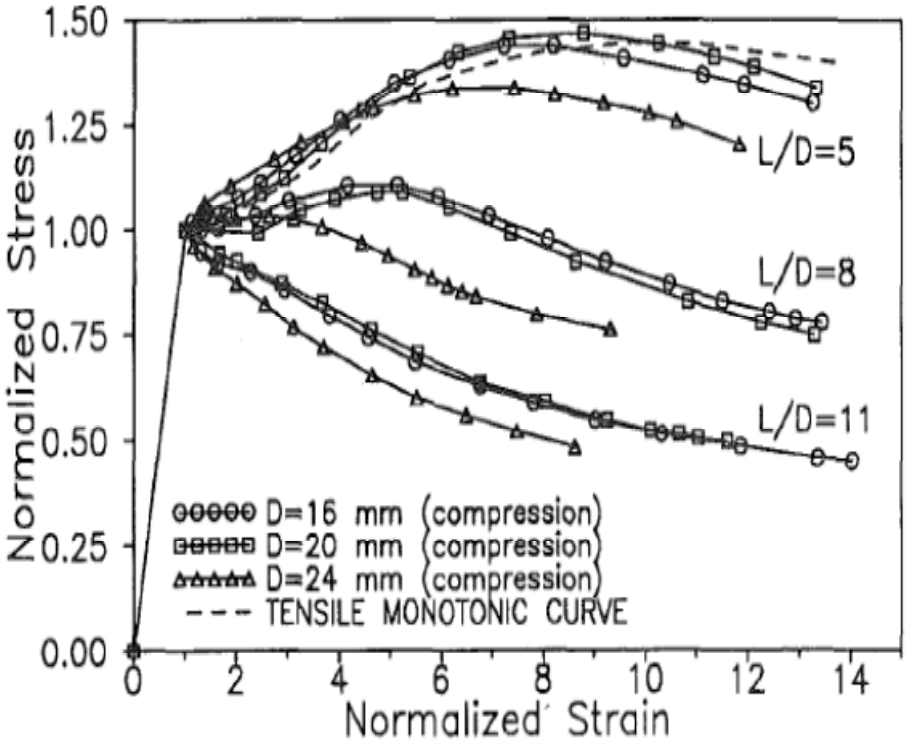
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม

Monti และ Nuti (1992) ได้ทำการทดสอบเหล็กเส้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่มีพฤติกรรมแบบทิศทางเดียวและแบบวัฏจักร โดยใช้วัสดุที่มีกำลังคราก 440 เมกะพาสคาลและอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (L/D) 5, 8 และ 11 ใน

ภาพที่ 2.6 จากผลที่ได้ภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.8 ดังแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นเท่ากับ 5 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเมื่อเลยจุดครากจะมีกำลังของเหล็กเส้นเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 8 และ 11 และที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นเท่ากับ 11 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดเมื่อเลยจุดครากจะมีกำลังลดลงอย่างชัดเจนเนื่องมาจากผลของการโก่งเดาะ เมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดึงในบริเวณที่มีพฤติกรรมแบบพลาสติกหรือเลยจุดครากไปแล้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังของวัสดุรับแรงอัดจะลดลงมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น ยิ่งมีค่ามากทำให้ผลอันเนื่องจากการโก่งเดาะมาก กำลังรับแรงอัดยิ่งน้อยลง

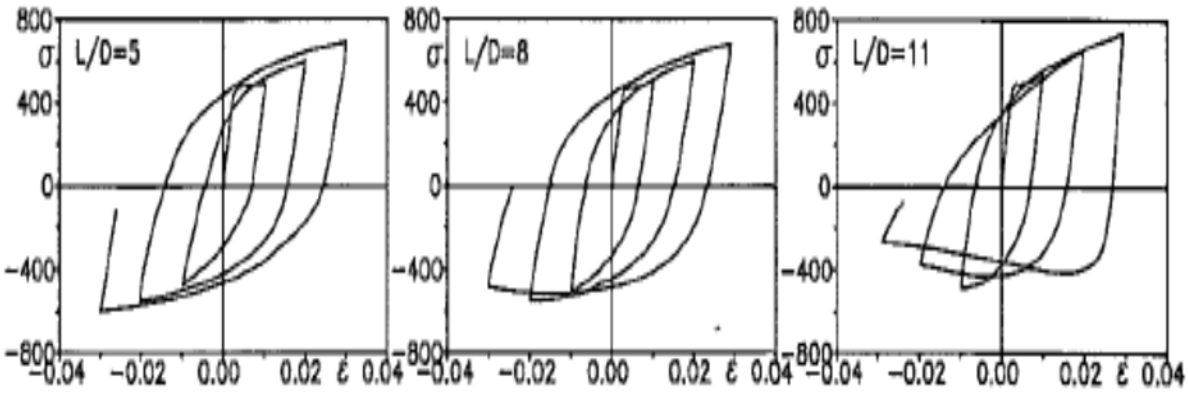


ภาพที่ 2.6 รูปแสดงเครื่องมือที่นำมาทดสอบเหล็กเส้นที่รับแรงดึงและแรงอัด
(ที่มา Monti และ Nuti, 1992)



\

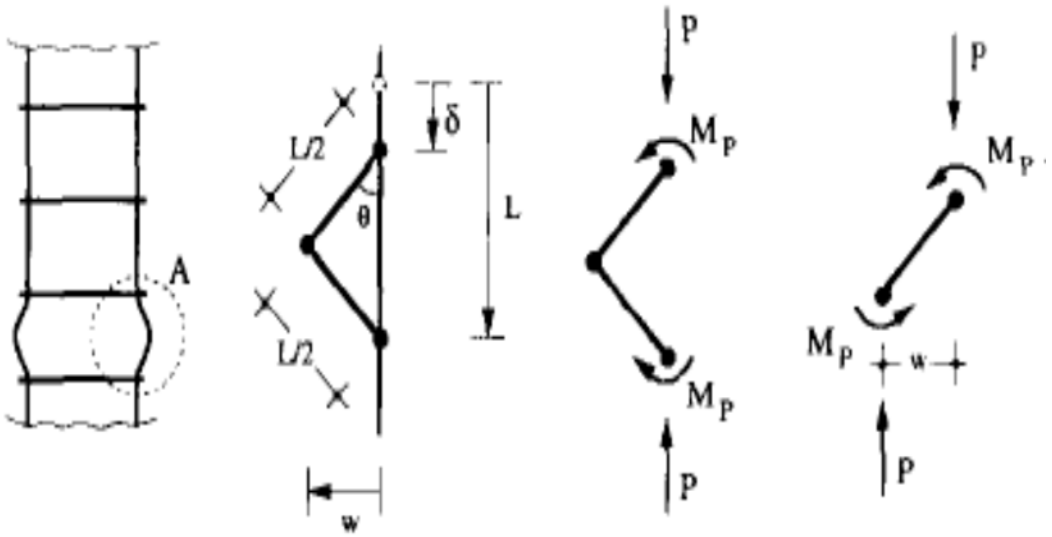
ภาพที่ 2.7 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดแบบทิศทางเดียวที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 5, 8 และ 10 (ที่มา Monti และ Nuti, 1992)



ภาพที่ 2.8 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดแบบวัฏจักรที่อัตราส่วนอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 5, 8 และ 10 (ที่มา Monti และ Nuti, 1992)

Gomes และ Appleton (1996) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน โดยกำหนดให้พฤติกรรมช่วงที่เกิดการโก่งเดาะมีลักษณะเป็นจุดหมุนพลาสติก 3 จุด และ

ใช้หลักการของความสมดุลของแรงในการหาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด อันเนื่องมาจากแรงภายในชิ้นส่วนดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แบบจำลองอย่างง่ายของเหล็กเสริมยืนในช่วงที่มีการโก่งเดาะเกิดขึ้น
(ที่มา Gomes และ Appleton, 1996

เริ่มจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการ Equilibrium $\sum M=0$

$$P=\frac{2M_P}{W} \tag{6}$$

$$M_P=Z_P\sigma_{so}=0.424\pi r^3\sigma_{so} \tag{7}$$

โดยที่ $w=L/2\sin\theta$ และ $\delta=L(1-\cos\theta)$

L คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง ที่เกิดการโก่งเดาะ

σ_{s0} คือ ความเค้นที่ยอมให้ในช่วงพลาสติก

r คือ รัศมีของเหล็กเส้นหน้าตัดวงกลม

w คือ ระยะการเสียรูปทางด้านข้าง

δ คือ ระยะการเสียรูปในแนวแกน

θ คือ มุมที่เกิดขึ้น ดังรูป 2.9

หาความสัมพันธ์ระหว่าง w-δ โดยการขยายอนุกรม และไม่คิดผลของสมการที่มีเลขชี้กำลังสองจะได้

$$w=\sqrt{\delta L/2} \tag{8}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการของแรงเนื่องมาจากสมการสมดุลในรูปของ $P-\delta$ ได้ดังนี้

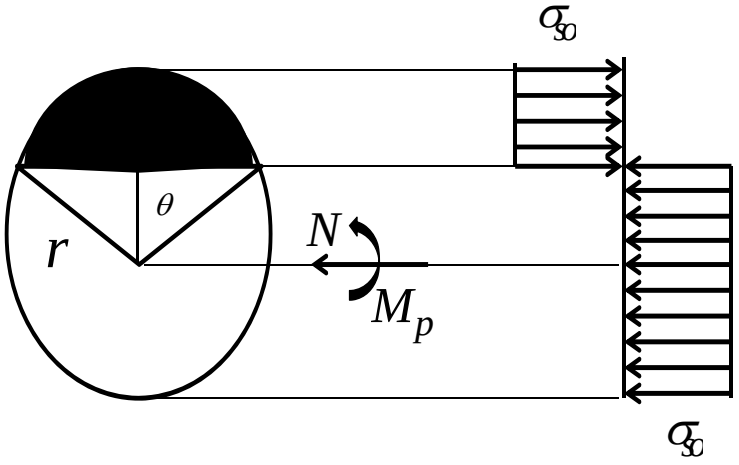
$$P=\frac{2\sqrt{2}M_P}{\sqrt{L}}.\frac{1}{\sqrt{\delta}} \tag{9}$$

จาก $\varepsilon_s=\delta/L$ และ $\sigma_s=P/A$

พิจารณาความเค้นภายในหน้าตัดที่เกิดขึ้นจากแรงกดที่กระทำ สามารถเขียนความสัมพันธ์ $\sigma-\varepsilon$ ได้ดังนี้

$$\sigma_S=\frac{2\sqrt{2}M_P}{AL}.\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_S}} \tag{10}$$

กรณีที่พิจารณาผลของโมเมนต์และแรงภายในหน้าตัดของเหล็กเสริมหน้าตัดวงกลม จะพิจารณาตามพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงอัดในแนวแกนตามรูป



ภาพที่ 2.10 ความเค้นพลาสติกที่กระจายตัวอยู่ในหน้าตัดของเหล็กเสริม

(ที่มา Gomes และ Appleton, 1996)

$$P=r^2(\pi-2\theta+\sin 2\theta)\sigma_{so}$$
$$M_P=\frac{4}{3}r^3\sin^3\theta\sigma_{so} \quad (11)$$

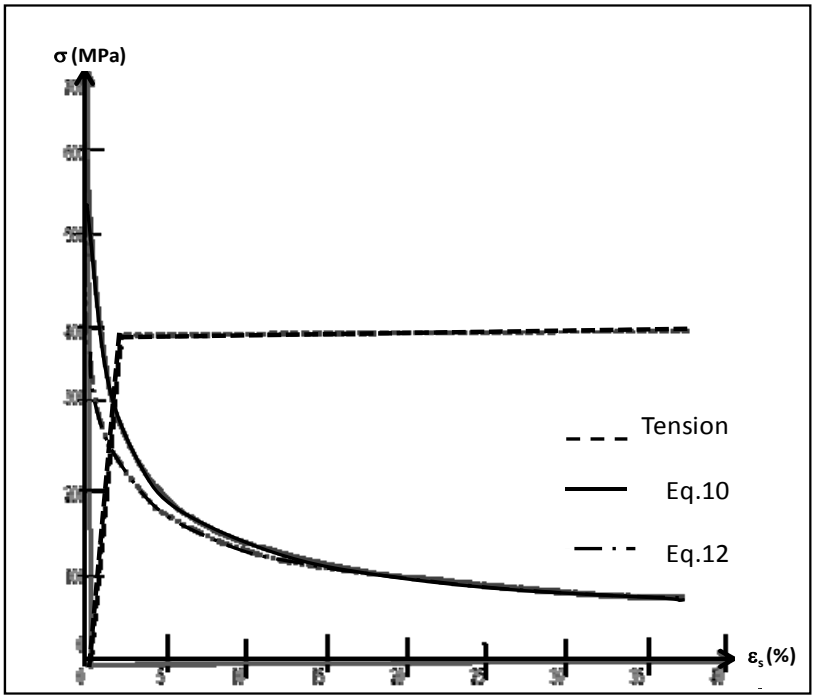
พิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัด (σ_S) ที่เกิดจากมีแรงอัดมากระทำโดยหาความสัมพันธ์ของแรง (P) และโมเมนต์ภายใน (M_P) สามารถเขียนความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดังนี้

$$\sigma_S=\frac{2\sqrt{2}}{A_S L}\cdot\frac{4}{3}r^3\sin^3\theta\sigma_{so}\cdot\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_S}} \quad (12)$$

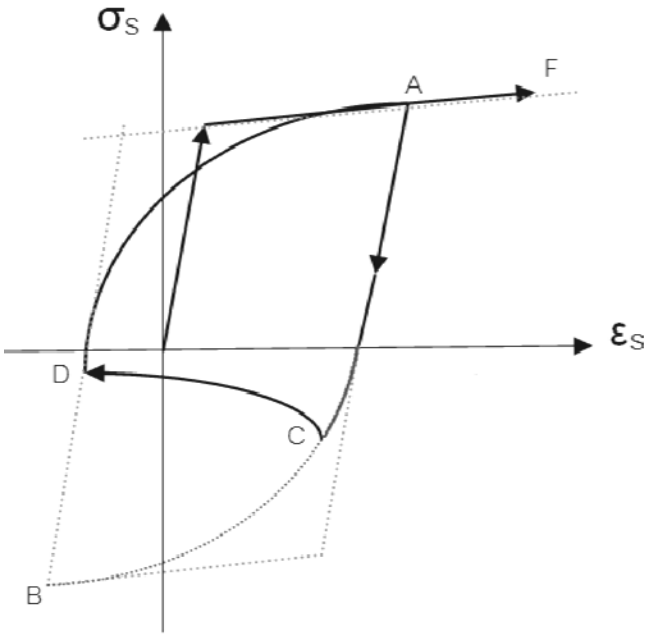
ผลของความเครียดคงค้างของเหล็กเสริมก่อนที่จะเกิดการโก่งเดาะ (ε_{sQ}) ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการโก่งเดาะ (ε_{sr}) จะเป็นไปตามสมการ

$$\varepsilon_{sr}=\varepsilon_S-\varepsilon_{sQ} \quad (13)$$

จากแบบจำลองของ Gomes และ Appleton (1996) สามารถทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเมื่อเหล็กรับแรงอัด แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุมีคุณสมบัติเป็นแบบพลาสติกอย่างสมบูรณ์ โดยแสดงในรูปสมการความสัมพันธ์ของผลเนื่องจากแรงและโมเมนต์ดังสมการที่10 และขนาดหน้าตัดวงกลมของเหล็ก, ความยาวช่วงของระยะห่างของเหล็กตามขวางดังสมการที่ 12 ซึ่งให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังรูป 2.11 พร้อมทั้งทำการปรับปรุงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่มีแรงกระทำแบบวัฏจักรของ Menegotto และ Pinto (1973) กับผลการโก่งเดาะที่ได้จากงานวิจัยดังภาพที่ 2.12

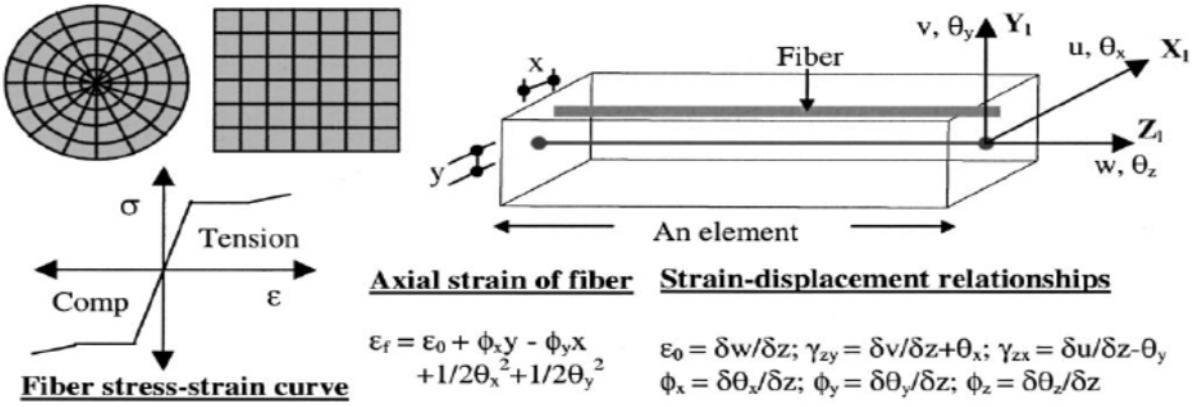


ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัด a.) แบบช่วงพลาสติก b.) คิดผลตามสมการที่ 10 c.) คิดผลตามสมการที่ 12 (ที่มา Gomes และ Appleton, 1996)

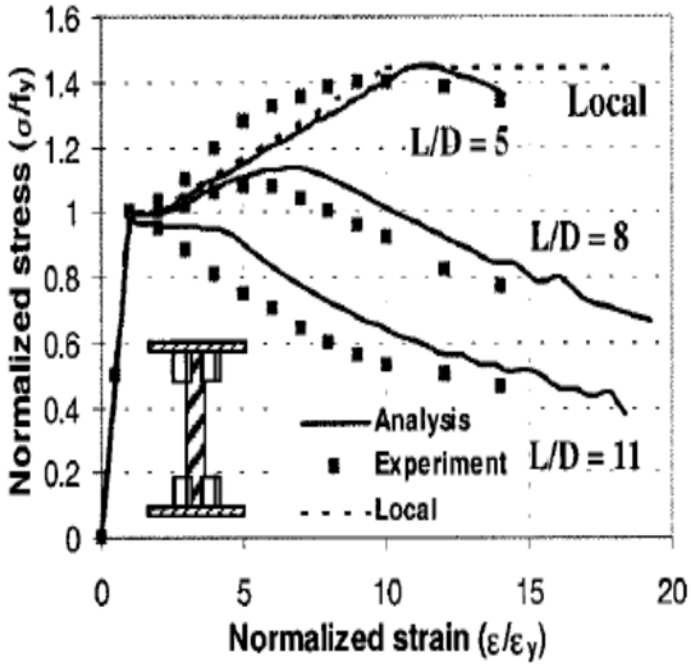


ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่มีแรงกระทำแบบวัฏจักรเมื่อพิจารณาผลของการโก่งเดาะของเหล็กเส้น (ที่มา Gomes และ Appleton, 1996)

Dhakal และ Maekawa (2002) ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเส้น ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการโก่งเดาะ เมื่อเลยจุดครากของเหล็กเสริม ทำการแยกพฤติกรรมความสัมพันธ์ในเทอมของตัวแปรในรูปของรากที่สองของกำลังครากและอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟเบอร์ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ดังภาพที่ 2.13 กับผลที่ได้จากการทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) ดังภาพที่ 2.14 โดยใช้เหล็กเส้นที่มีกำลังคราก 480 เมกะพาสคาล ในอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (L/D) ที่เท่ากันคือ 5, 8 และ 11 ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นเท่ากับ 5



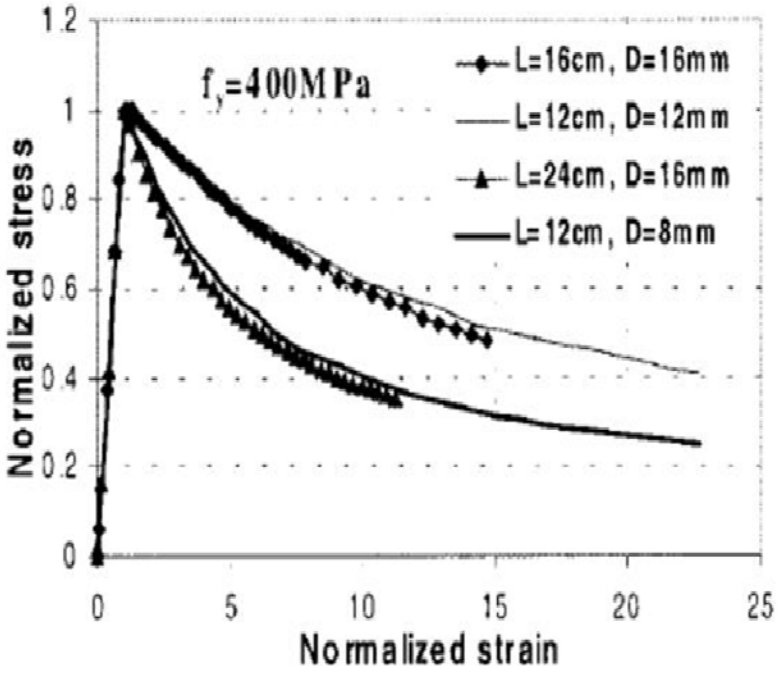
ภาพที่ 2.13 รูปแสดงแบบจำลองไฟเบอร์ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์
(ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002)



ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์กับชิ้นส่วนทดสอบของ Monti และ Nuti (1992) (ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ดังกล่าว Dhakal และ Maekawa (2002) จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาความเกี่ยวเนื่องระหว่างค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (L/D) กับกำลังกำลังรับแรงที่จุดคราก (F_y) และความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อเลยจุดคราก

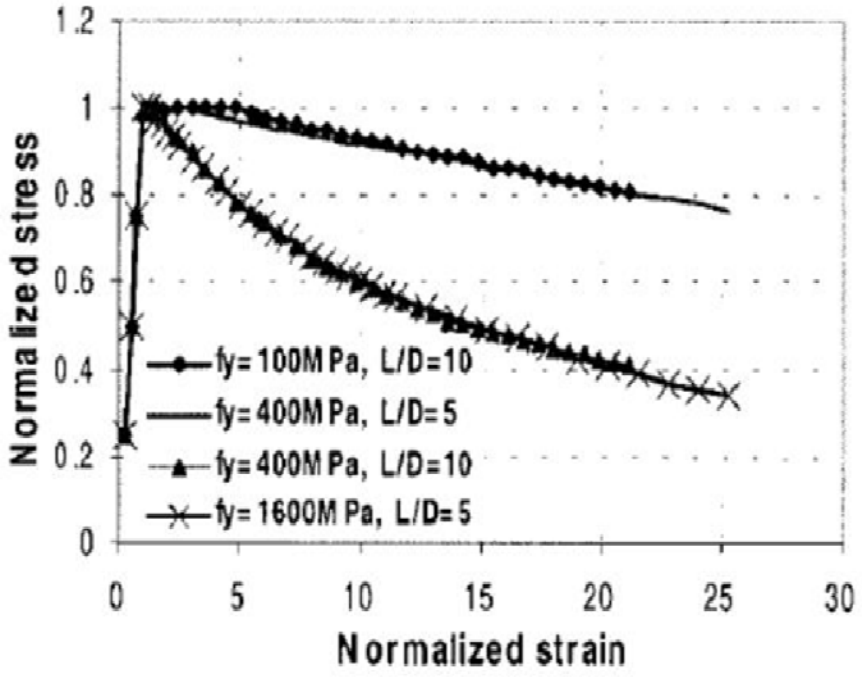
ทำการวิเคราะห์หาความเกี่ยวเนื่องระหว่างค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (L/D) กับกำลังกำลังรับแรงที่จุดคราก (F_y) ด้วยการกำหนดค่าตัวแปรที่จะนำมาศึกษาดังภาพที่ 2.15 ทำให้ทราบว่าที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นและกำลังกำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากัน จะให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างความเค้นที่จุดใดๆต่อกำลังที่จุดคราก (σ/F_y) - ความเครียด ณ ตำแหน่งใดๆต่อความเครียดที่จุดคราก ($\varepsilon/\varepsilon_y$) ที่เหมือนกันในแง่ของกำลัง แต่วัสดุที่มีหน้าตัดน้อยกว่ามีผลของความเหนียวของเหล็กเส้นที่ดีกว่า แม้ว่าจะมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นและกำลังกำลังรับแรงที่จุดครากเท่ากัน



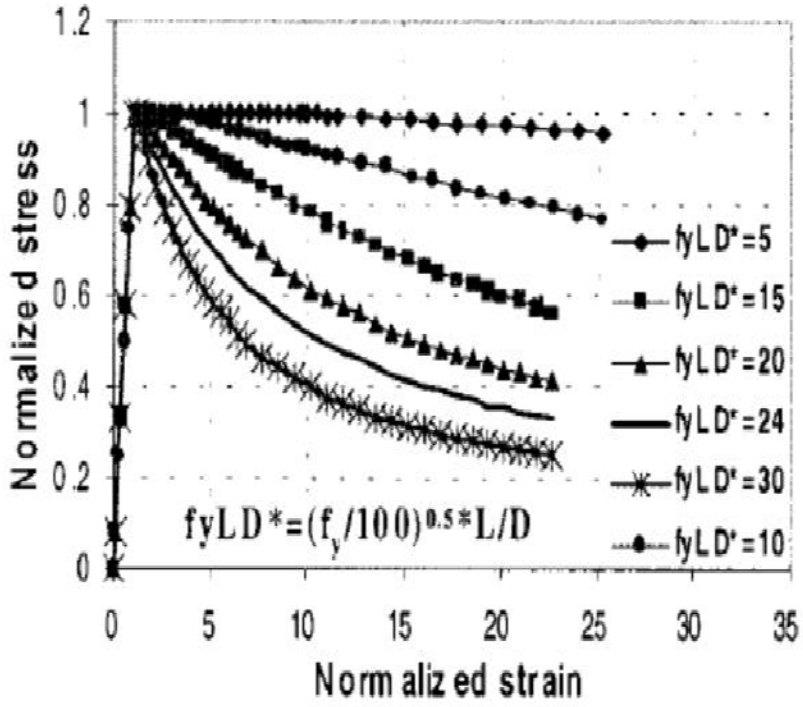
ภาพที่ 2.15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-อัตราส่วนความเครียดของเหล็กเส้นที่ F_y=400Mpa อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น 10 และ 15 ตามลำดับ (ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002)

จากข้อมูลดังกล่าว Dhakal และ Maekawa (2002) ทำการกำหนดผลการวิเคราะห์เพื่อหาความเกี่ยวเนื่องของตัวแปรต่างๆ ดังภาพที่ 2.16 และภาพที่ 2.17 ซึ่งให้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างความเค้นที่จุดใดๆต่อกำลังที่จุดคราก (σ/F_y) - ความเครียด ณ ตำแหน่งใดๆต่อความเครียดที่จุดคราก ($\varepsilon/\varepsilon_y$) ที่สอดคล้องกันดังแสดงในสมการที่ 14 ยิ่งค่า f_yLD^* มาก กำลังของเหล็กเส้นเมื่อเลยจุดครากยิ่งมีค่ากำลังตกลง

$$f_yLD^* = \left(f_y/100\right)^{0.5} L/D \qquad (14)$$

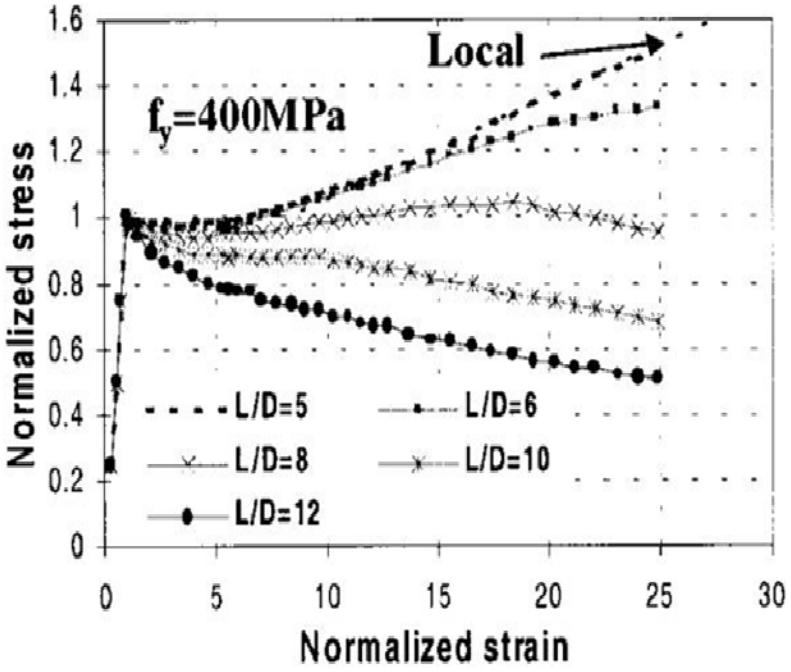


ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์เนื่องมาจากอัตราส่วน L/D ที่เท่ากันกับค่า F_y ที่ต่างกัน (ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002)

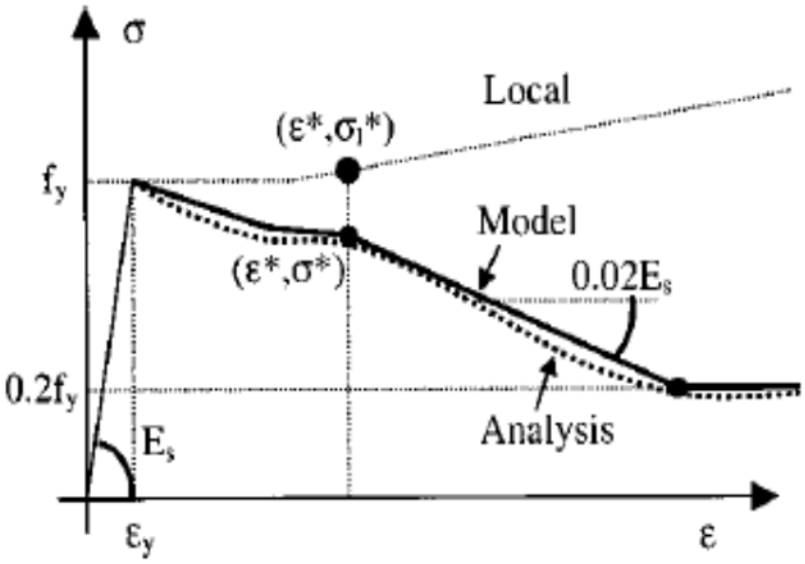


ภาพที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-อัตราส่วนความเครียด ตามสมการที่ 14 (ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002)

Dhakal และ Maekawa (2002) ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อเลยจุดครากที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นเท่ากับ 5, 6, 8, 10 และ12 ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.18 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นเท่ากับ 5 ทำให้เกิดความสัมพันธ์ระว่างความเค้น-ความเครียดเมื่อเลยจุดครากมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกำลังของวัสดุที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆคงที่เมื่อค่าstrain มากๆ และยิ่งอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นมากขึ้น ความสัมพันธ์ระว่างความเค้น-ความเครียดเมื่อเลยจุดครากก็ยิ่งลดลง ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นเท่ากับ 12 ความสัมพันธ์ระว่างความเค้น-ความเครียดเมื่อเลยจุดครากมีค่าลดลงต่ำที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเมื่อเลยจุดครากได้ภาพที่ 2.19, สมการที่ 15 และสมการที่ 16



ภาพที่ 2.18 แสดงผลของความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-อัตราส่วนความเครียด ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นต่างๆกัน (ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002)



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด ที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิเมนต์ (ที่มา Dhakal และ Maekawa, 2002)

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

$$\frac{\sigma}{\sigma_l} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma^*}{\sigma^*_l}\right).\left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^*_l}\right) \tag{15}$$

และ $\varepsilon \ge \varepsilon^*$ โดยที่ $\sigma \ge 0.2f_y$;

$$\sigma = \sigma^* - 0.02E_S(\varepsilon - \varepsilon^*) \tag{16}$$

สามารถหาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน, (σ^*,ε^*) ได้จาก

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_y} = 5.5 - 2.3\sqrt{\frac{f_y}{100}}.\frac{L}{D} \tag{17}$$

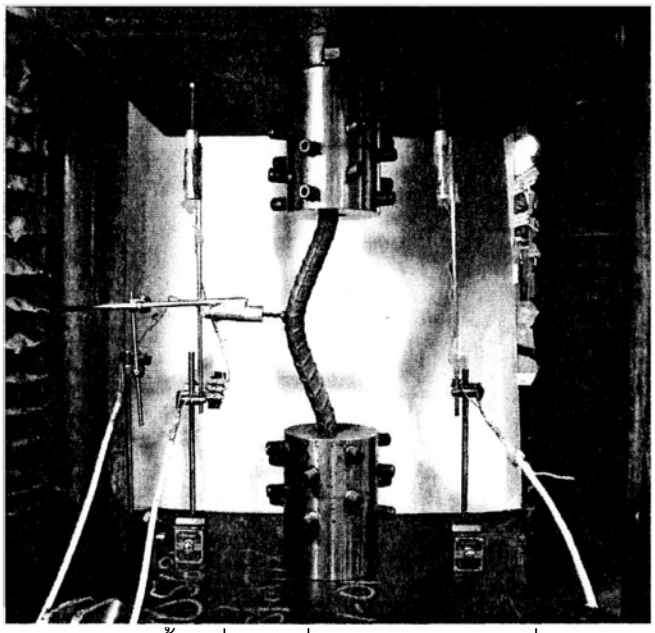
$$\frac{\sigma^*}{\sigma_l^*} = \alpha\left(1.1 - 0.016\sqrt{\frac{f_y}{100}}.\frac{L}{D}\right) \quad (18)$$

โดยที่ $\varepsilon^*/\varepsilon_y \geq 7$

และ $\sigma^* \geq 0.2f_y$

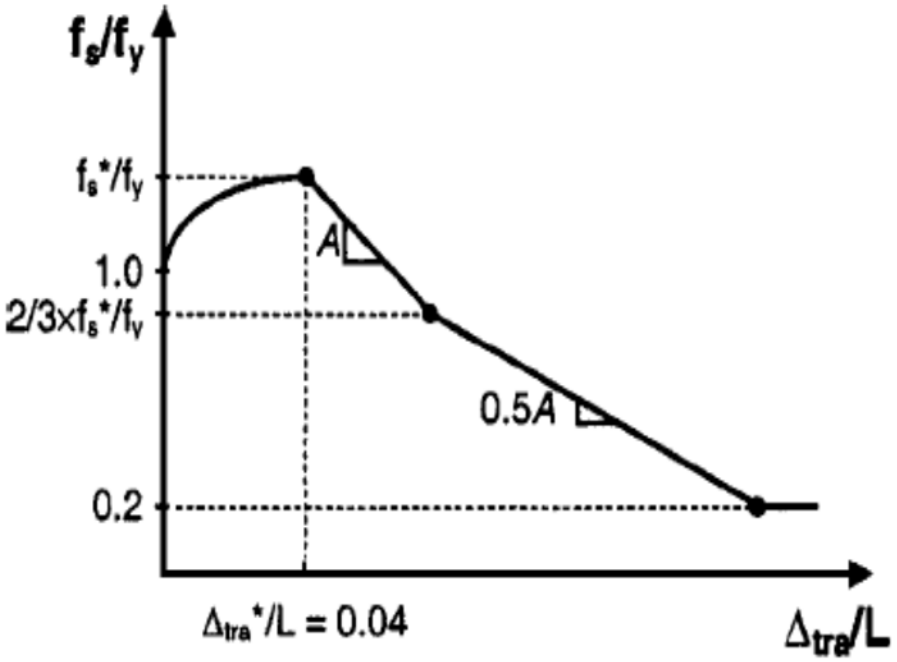
α=1.00 ถ้าไม่พิจารณาผลเนื่องจากการโก่งเดาะ, α=0.75 ถ้าพิจารณาผลเนื่องจากการโก่งเดาะ

Bae และคณะ (2005) ทำการศึกษาค้นคว้าพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตที่มีการเสียรูปเมื่อมีแรงมากระทำเกินขีดจำกัด โดยมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมยืนภายใต้แรงอัดเมื่อเลยจุดครากของเหล็กเสริม โดยใช้การทดสอบทั้งหมด 162 ชุด ทำการทดสอบโดยใช้เหล็กเสริม Grade 60 กำลังรับแรงที่จุดคราก 437 เมกะพาสคาล เบอร์ 8 เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร จำนวน 108 ครั้ง และกำลังรับแรงที่จุดคราก 444 เมกะพาสคาล เบอร์ 10 เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดเท่ากับ 32.3 มิลลิเมตร จำนวน 54 ครั้ง ด้วยอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (L/D) 4, 5, 6, 7, 8, 9 , 10, 11 และ 12 , อัตราส่วนระยะการโก่งเดาะเริ่มต้นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (e/D) 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ โดยทำการติดตั้งเครื่องมือที่นำมาทดสอบภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ภาพแสดงการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ (ที่มา Bae และคณะ, 2005)

ผลที่ได้จากการทดสอบ Bae และคณะ (2005) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นต่อความเค้นที่จุดคราก (f_s/f_y) กับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างต่อความยาว (Δ_{tra}/L)ภาพที่ 2.21 และหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนทดสอบ (ε_{avg}) จากสมการที่ 24 จากความสัมพันธ์ของความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเริ่มต้น (ε_{tra}) กับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างต่อความยาว(Δ_{tra}/L) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้นอัดในแนวแกน-อัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างต่อความยาว (ที่มา Bae และคณะ, 2005)

ช่วงที่1 $\left(\frac{\Delta_{tra}}{L} \le 0.04\right)$

$$\frac{f_s}{f_y} = 1 + \left(\frac{f_s^*}{f_y} - 1\right) \times \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_{tra}}{\Delta_{tra}^*} - 1\right)^2} \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{f_s^*}{f_y} > 1 \tag{19}$$

$$\frac{f_s}{f_y} = \left(\frac{f_s^*}{f_y} - 1\right)\frac{\Delta_{tra}}{\Delta_{tra}^*} + 1 \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{f_s^*}{f_y} \le 1 \tag{20}$$

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

$$\frac{f_s - f_s^*}{f_y} = \mathrm{A}\left(\frac{\Delta_{tra} - \Delta_{tra}^*}{\mathrm{L}}\right) \qquad \text{เมื่อ} \quad \frac{f_s}{f_y} \geq \frac{2}{3}\frac{f_s^*}{f_y} \tag{21}$$

$$\frac{f_s - 2/3 f_s^*}{f_y} = \frac{\mathrm{A}}{2}\left(\frac{\Delta_{tra}}{\mathrm{L}} - x_1\right) > 0.2 \qquad \text{เมื่อ} \quad \frac{f_s}{f_y} < \frac{2}{3}\frac{f_s^*}{f_y} \tag{22}$$

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

(23)

โดยที่ ζ คือ f_u/f_y

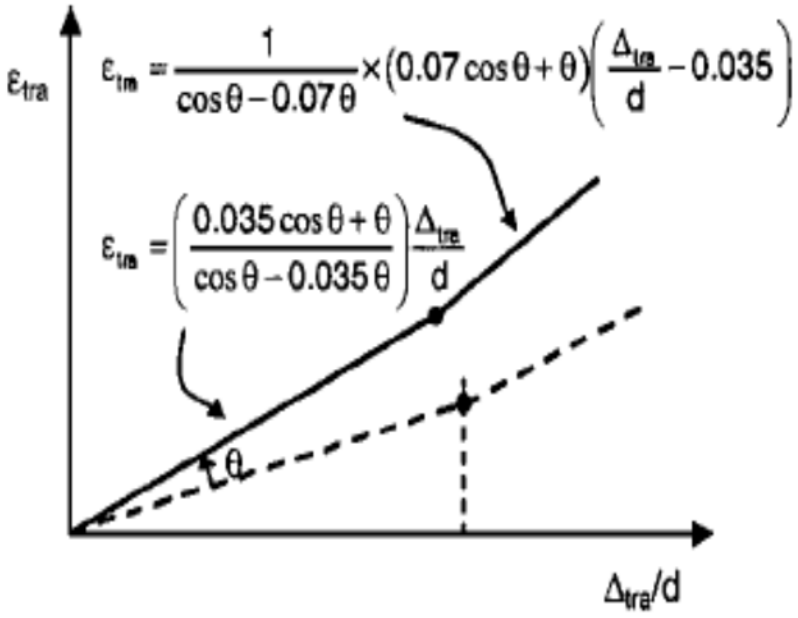
Δ_{tra} คือ ระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างที่กึ่งกลางช่วง

L คือ ความยาวระยะห่างระหว่างจุดรองรับ

f_y คือ ความเค้นที่จุดคราก

f_u คือ ความเค้นที่กำลังประลัย

A คือ $4(\xi - 1)^2 - 5$



ภาพที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเริ่มต้น-อัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางด้านข้างต่อความยาว (ที่มา Bae และคณะ, 2005)

$$\varepsilon_{avg} = \varepsilon_s + \varepsilon_{tra} \tag{24}$$

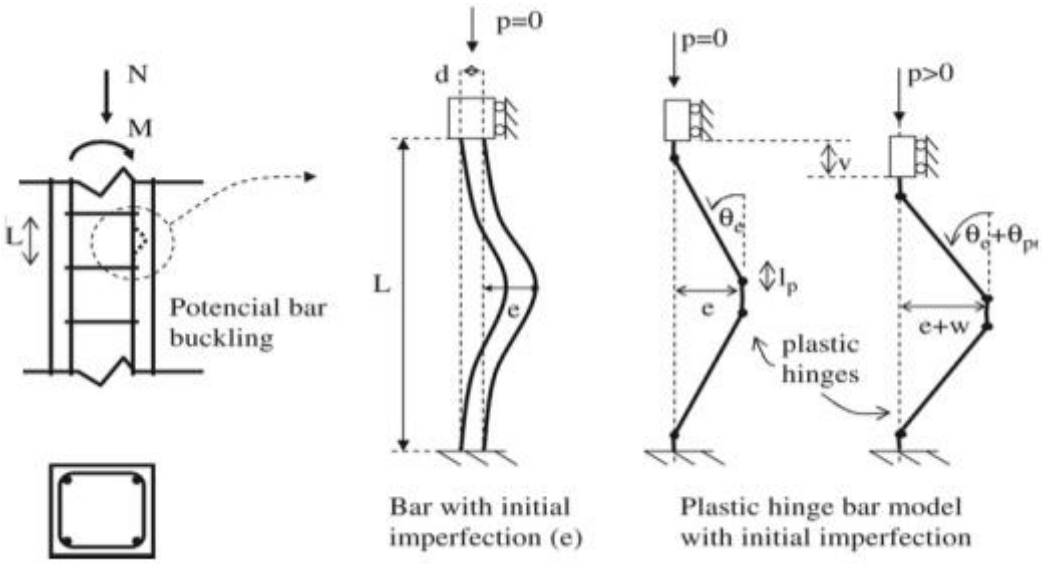
$$\varepsilon_{tra} = \max \begin{cases} \left(\dfrac{0.035\cos\theta + \theta}{\cos\theta - 0.035\theta} \right) \dfrac{\Delta_{tra}}{d} \\ \dfrac{1}{\cos\theta - 0.07\theta} \times \left(0.07\cos\theta + \theta\right) \left(\dfrac{\Delta_{tra}}{d} - 0.035 \right) \end{cases} \tag{25}$$

โดยที่ ε_s คือ ความเครียดที่เกิดจากความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของเหล็ก ดังรูป 2.1

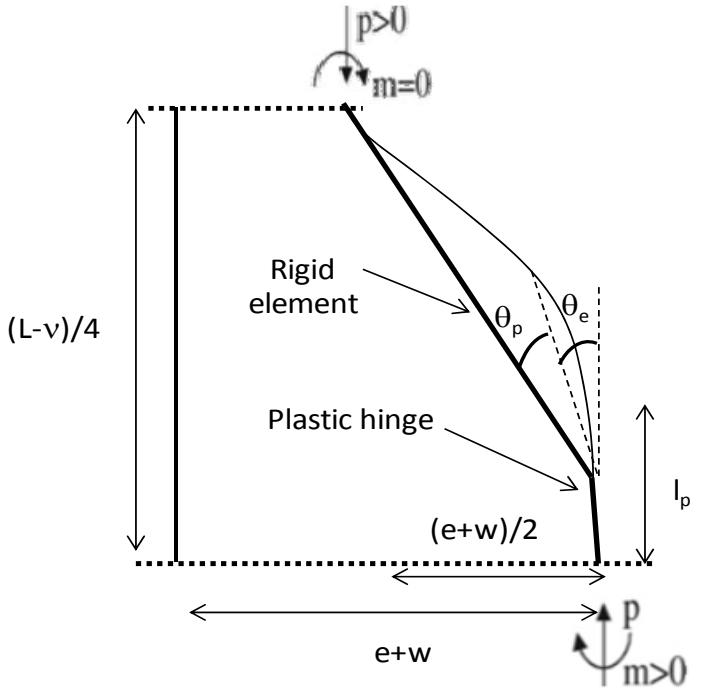
$$f_s = f_u + \left(f_u - f_y \right) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_s}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^{E_{sh}\left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}{f_u - f_y} \right)} \tag{26}$$

โดยที่ θ คือ $6.9/\left(\mathrm{L/d}\right)^2 - 0.05$

Massone และ Moroder (2009) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีผลอันเนื่องมาจากการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น (Initial imperfection) โดยการใส่แรงกระทำทางด้านข้างชั่วคราว และผลอันเนื่องการโก่งเดาะของเหล็กเส้นรับแรงในแนวแกน ทำการทดสอบโดยใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมตามขวางยาว (L) มียึดปลายทั้ง 2 ข้าง ปลายด้านบนยอมให้เคลื่อนที่ตามแนวแกนได้ โดยแบบจำลองจะพิจารณาช่วงที่เกิดการโก่งเดาะแบ่งเป็นจุดหมุนพลาสติก 4 จุด ดังภาพที่ 2.23 แล้วทำการวิเคราะห์แบบจำลองการโก่งเดาะที่ความยาวหนึ่งในสี่ของระยะห่างของเหล็กปลอก หลังจากเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและการในแนวแกน ดังภาพที่ 2.24



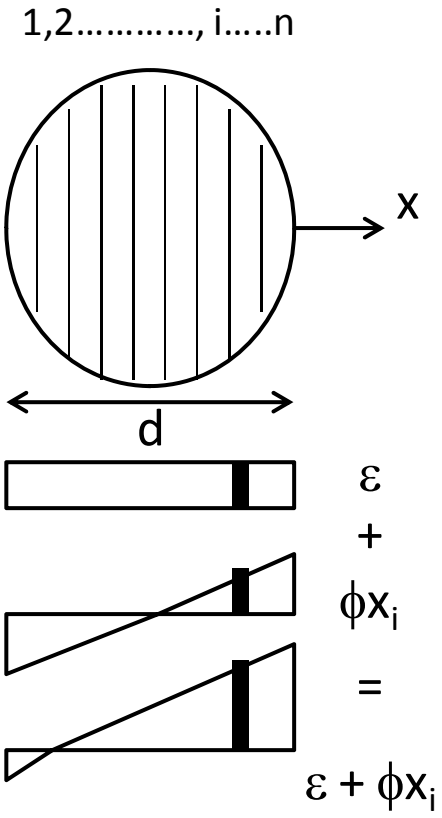
ภาพที่ 2.23 แสดงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่พิจารณาผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเริ่มต้น (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)



ภาพที่ 2.24 การวิเคราะห์แบบจำลองการโก่งเดาะที่ช่วงความยาว 1 ใน 4 (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)

จากสมการสมดุล $\sum M=0$ จะได้

$$m=p\frac{(e+w)}{2} \tag{27}$$



ภาพที่ 2.25 แสดงหน้าตัดของด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)

จากแบบจำลองการโก่งเดาะที่พิจารณาความยาวช่วงการโก่งเดาะแบ่งเป็นความยาว 1 ใน 4 ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทางด้านข้างกับการเสียรูปเชิงมุมดังสมการที่ 28 และความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในแนวแกนกับการเสียรูปเชิงมุมดังสมการที่ 32 จากข้อมูลที่ได้นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเส้น ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์แสดงในภาพที่ 2.25 แล้วทำการวิเคราะห์ผลตามกระบวนการเชิงตัวเลขดังแสดงในภาพที่ 2.26 จึงสามารถหาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเส้นที่พิจารณาผลของการโก่งเดาะและการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตามกระบวนการวิธีเชิงตัวเลข กับผลการทดสอบ Bayrak และ Sheikh (2002) ดังภาพที่ 2.27

$$e+w=\frac{\sin\left(\theta_e+\theta_p\right)}{\cos\theta_e}.\left(\frac{L}{2}-l_p\right) \quad (28)$$

$$\theta_e=\phi_e l_p \quad (29)$$

$$\theta_p=\phi_p l_p \quad (30)$$

$$\phi_e=\tan^{-1}\left(\frac{e}{L/2-l_p}\right)\Big/ l_p \quad (31)$$

$$\upsilon=\upsilon_\phi+\upsilon_\varepsilon=\left(L-2l_p\right).\left[1-\frac{\cos\left(\theta_e+\theta_p\right)}{\cos\theta_e}\right]+4l_p\varepsilon_p \quad (32)$$

สามารถหาแรงภายในที่เกิดขึ้นในหน้าตัด ได้ดังนี้

$$\bar{\sigma}=\frac{P}{\sum_i A_i}=\frac{P}{A} \quad (33)$$

$$\bar{\varepsilon}=\frac{\upsilon}{L} \quad (34)$$

โดยที่ w คือ การเสียรูปทางด้านข้างที่เพิ่มเข้ามาที่ ตรงกลางแท่งเหล็กเสริม

θ_e คือ มุมที่เกิดขึ้นที่การโก่งเดาะของเหล็กเสริมเริ่มต้น

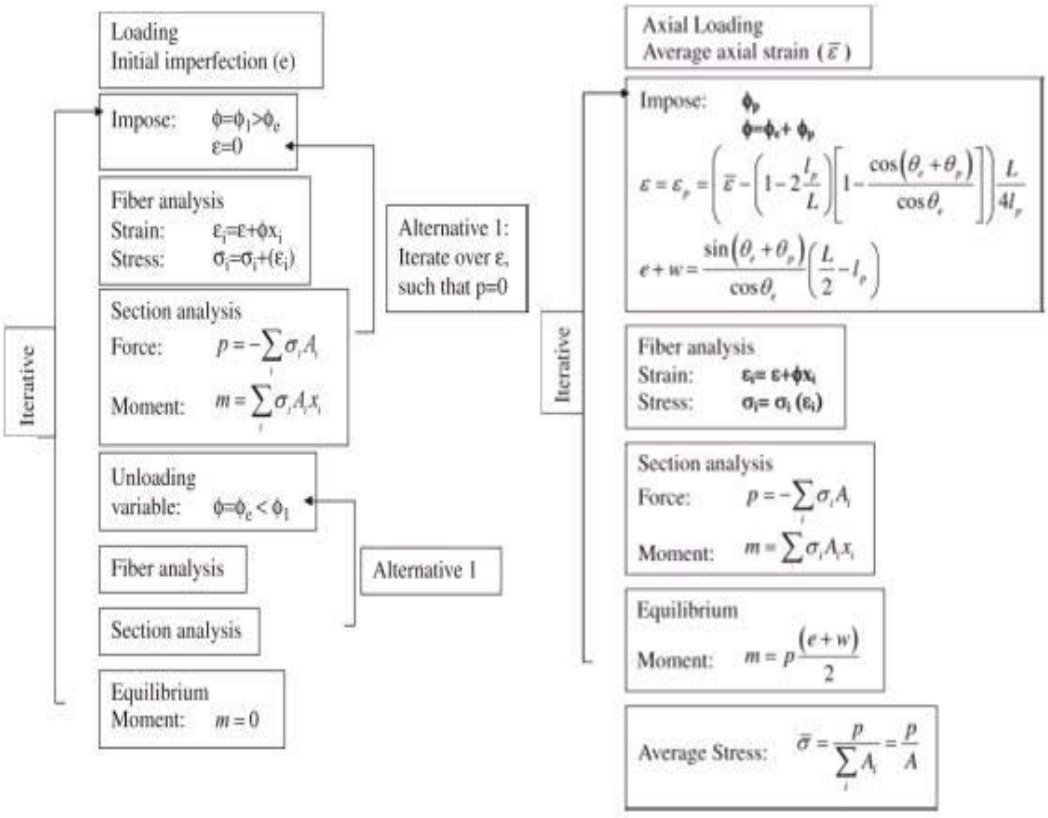
θ_p คือ มุมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใส่แรงในแนวแกนเพิ่มขึ้น

ϕ_p คือ ส่วนโค้งการเสียภาพที่เพิ่มขึ้นจากแรงในแนวแกนมากระทำ

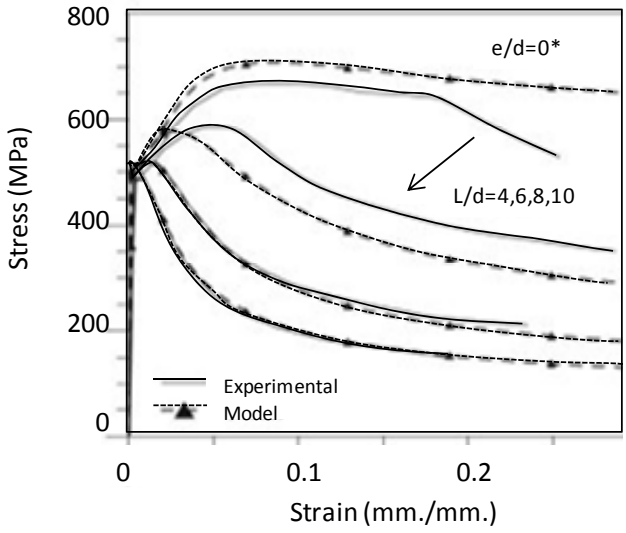
l_p คือ ความยาวช่วงที่เกิดจุดหมุนพลาสติก

ε_p คือ ความเค้นช่วงที่เกิดจุดหมุนพลาสติก

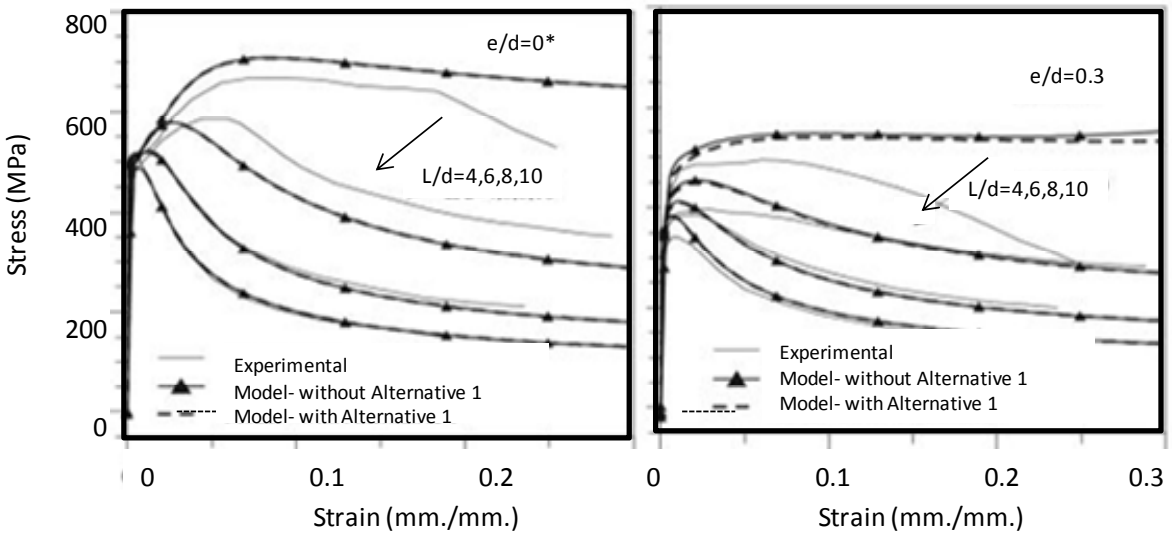
A คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้น



ภาพที่ 2.26 รูปแบบกระบวนการเชิงตัวเลขที่นำไปวิเคราะห์การโก่งเดาะ (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)



ภาพที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่คิดผลของการโก่งเดาะและการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น จากการวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการทดสอบ (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)



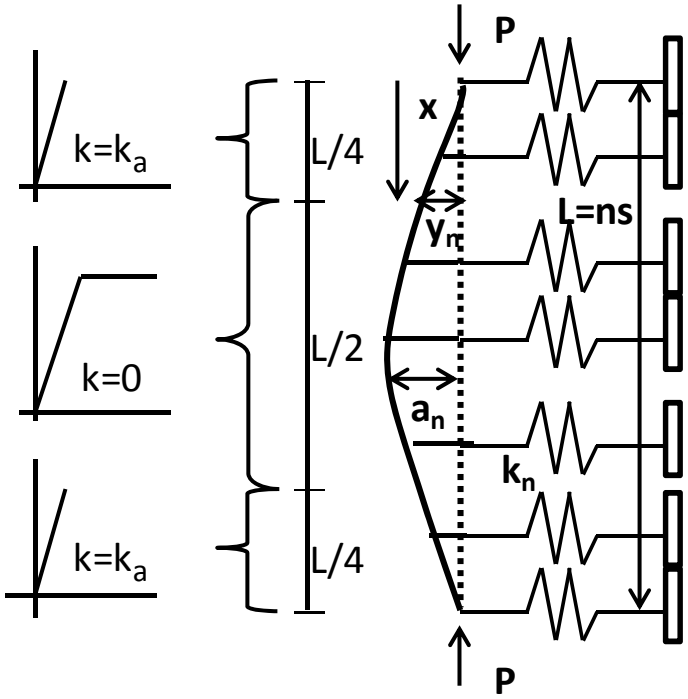
ภาพที่ 2.28 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่คิดผลของการโก่งเดาะและการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น (ที่มา Massone และ Moroder, 2009)

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาของ Massone และ Moroder, (2009) สามารถสรุปผลที่ได้จากการศึกษาว่า ที่ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้น (L/D) เท่ากัน เหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะเริ่มต้นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเส้นมาก จะทำให้กำลังความเค้นของเหล็กเสริมลดลงตั้งแต่ช่วงที่เกิดความเครียดครากไปจนถึงค่ากำลังประลัยลดลง 5% ถึง15% และความแตกต่างของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอันเนื่องจากผลของความเครียดคงค้างในหน้าตัดจะมีค่าสูงตาม

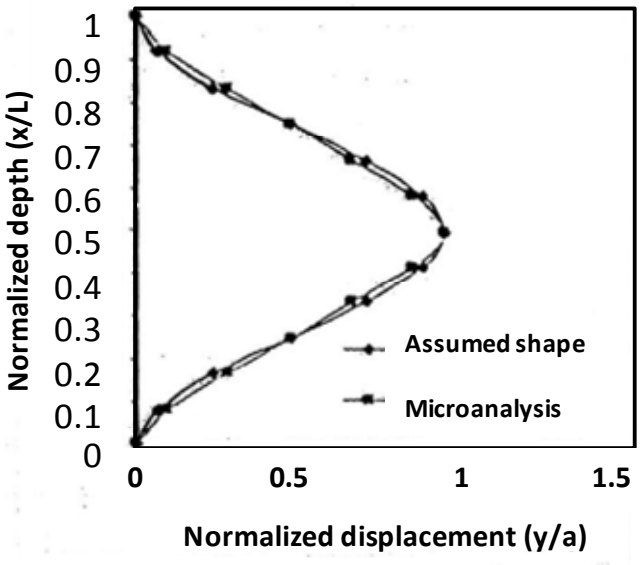
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่พิจารณาผลของเหล็กปลอก

Dhakal (2000) ได้อธิบายแบบจำลองและกระบวนการคำนวณช่วงยาวของการโก่งเดาะที่มีการพิจารณาผลของเหล็กปลอก โดยที่แบบจำลองเหล็กปลอกรัดรอบมีลักษณะเฉพาะจุดเป็นสปริงเชิงเส้น โดยจะแสดงพฤติกรรมสปริงเชิงเส้นก่อนหน้าที่จะเกิดความเครียดคราก ค่ากำลังของวัสดุจะลดลงเข้าใกล้สู่ศูนย์เหล็กปลอกที่อยู่บริเวณตรงกลางจะมีความเครียดดึง มีการเสียรูป

ทางด้านข้างมากอันเนื่องมาจากผลของเหล็กเสริมยืน เพื่อให้ผลใกล้เคียงความจริงจึงให้สปริงอยู่ภายในที่บริเวณตรงกลางของช่วงที่เกิดการโก่งเดาะตามภาพที่ 2.29แต่เพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นจะต้องให้พฤติกรรมเป็นไปตามคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดสปริงเชิงเส้น ดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.29 ภาพจำลองของการวิเคราะห์สภาพที่เกิดขึ้นของการโก่งทางด้านข้างของเหล็กเสริมยืน (ที่มา Dhakal, 2000)



ภาพที่ 2.30 เปรียบเทียบรูปแบบการเสียรูปโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (ที่มา Dhakal, 2000)

แสดงรูปแบบการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนอยู่ในรูปของฟังก์ชันกราฟโคไซน์ตามสมการที่ 35 ซึ่งโดยปรกติจะถูกนำมาแสดงการเสียรูปของเสาที่มีการยึดแน่นทั้งสองด้านภายใต้แรงอัดในแนวแกน

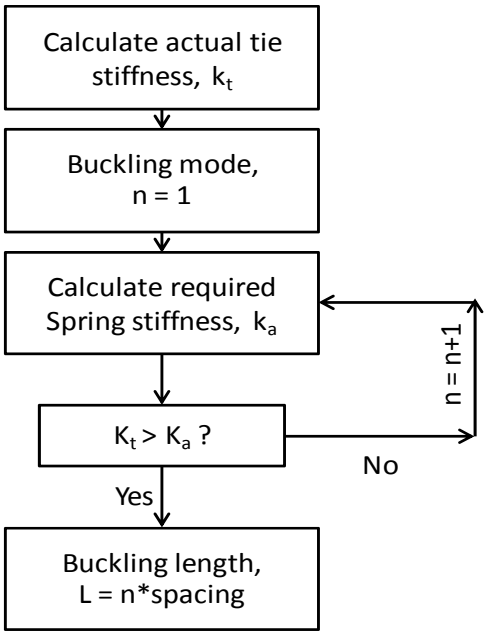
$$y=\frac{a}{2}\left(1-\cos\frac{2\pi x}{L}\right) \tag{35}$$

เมื่อ y คือ ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่ระยะ x จากปลายด้านบน

a คือ การเสียรูปทางด้านข้างสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกลางของระยะที่เกิดการโก่งเดาะ

L คือ ระยะที่เกิดการโก่งเดาะ

โดยสมการที่ 35 จะต้องเป็นไปตามสภาพเงื่อนไข เช่น ที่จุดรองรับการเสียรูปทางด้านข้างเท่ากับ 0 และความชันเท่ากับ 0 (ที่ระยะ x เท่ากับ 0 และที่ระยะ x เท่ากับ L) และจุดที่มีการเสียรูปทางด้านข้างมากที่สุดความชันเท่ากับ 0 (ตำแหน่งตรงกลางความยาว) เปรียบเทียบกับกระบวนการตามวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ และได้แสดงการเปรียบเทียบที่เป็นไปตามสมการที่ 35 ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 การคำนวณช่วงการเกิดโก่งเดาะ (ที่มา Dhakal, 2000)

กระบวนการทั้งหมดของการคำนวณช่วงยาวของการโก่งเดาะได้ถูกแสดงในภาพที่ 2.31 อันดับแรกต้องคำนวณประสิทธิผลจริงของความแข็งของเหล็กรัดรอบต่อแต่ละช่วงของเหล็กเสริมยืน จากนั้นหาค่าต่ำสุดของสติฟเนสของสปริงที่ต้องการเพื่อคงรูปของเหล็กเสริมยืนที่เกิดการโก่งเดาะในรูปแบบต่างๆ โดยใช้พลังงาน การคำนวณเริ่มจากการโก่งเดาะรูปแบบที่ 1 (n = 1) หาค่าสติฟเนสที่ต้องการแล้วนำไปเปรียบเทียบกับสติฟเนสที่เกิดขึ้นจริงในเหล็กรัดรอบ เพื่อจะตรวจสอบความเสถียรของเหล็กเสริมที่รูปแบบการโก่งเดาะนั้นๆ รูปแบบการโก่งเดาะที่เสถียรที่สุดคือรูปแบบที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (n น้อยที่สุด) ที่ซึ่งค่าสติฟเนสของสปริงที่ต้องการน้อยกว่าสติฟเนสที่เกิดขึ้นจริงในเหล็กรับรอบ ผลที่ได้จากรูปแบบการโก่งเดาะที่เสถียรที่สุดและระยะห่างของเหล็กรัดรอบนี้คือช่วงยาวการโก่งเดาะของเหล็กเสริมหลักที่ได้จากการจัดเรียงระยะของเหล็กรัดรอบนี้

โดยไม่นำผลของคอนกรีตหุ้มเหล็กรัดรอบมาใช้ในการวิเคราะห์ เพราะผลของคอนกรีตหุ้มต่อความแข็งดึงเริ่มต้นของสปริงแบบไม่เชิงเส้นมีค่าน้อยกว่าผลของเหล็กรัดรอบ นอกจากนี้รอยแยกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมยืนและค่าความแข็งของสปริงแบบไม่เชิงเส้นนี้จะลดลงจนสามารถละทิ้งได้โดยเปรียบเทียบกับความแข็งของสปริงแบบเชิงเส้นที่เกิดจากเหล็กรัดรอบ

สังเกตว่าวิธีการนี้ไม่สามารถใช้ในการคำนวณช่วงความยาวของเหล็กเสริมยืนในชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีเหล็กรัดรอบ ในกรณีนี้ช่วงยาวของการโก่งเดาะขึ้นอยู่กับความต้านทานของคอนกรีตหุ้มเท่านั้น และเป็นการยากในการคำนวณช่วงยาวของการโก่งเดาะ อย่างไรก็ตามสามารถพูดได้ว่าช่วงยาวของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมหลักจะมีค่าสูงมากถ้าไม่มีการเสริมเหล็กรัดรอบ ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการตรวจสอบด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ การเปลี่ยนช่วงความยาวของการโก่งเดาะไม่มีผลต่อการตอบสนองโดยเฉลี่ยของเหล็กเสริมรับแรงอัดมากนัก ถ้าอัตราของส่วนช่วงยาวของการโก่งเดาะต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมยืนมีค่ามาก ดังนั้นเราสามารถประมาณได้ว่าช่วงยาวของการโก่งเดาะมีค่าเท่ากับ 30 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมยืนที่ไม่มีเหล็กรัดรอบ

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม

งานวิจัย	ผู้แต่ง	e/D	L/D	อื่นๆ	เนื้อหาของงานวิจัย	หมายเหตุ
1. แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนที่พิจารณาผลอันเนื่องจากการเสียรูปการทางด้านข้างเริ่มต้น	Massone และ Moroder (2009)	e/D =0-0.3	4,6,8 และ10	1.) F_y 400Mpa 2.) D=19.5mm, 20M	ทำการเปรียบเทียบ แบบจำลองกับการทดสอบ ที่ e/D ต่างๆ และที่ L/D ต่างกัน โดยพิจารณาผลอันเนื่องจากการเสียรูปการทางด้านข้างเริ่มต้น ด้วยแรงกระด้านข้าง, ϕ_e แล้วให้แรงอัดกระทำในแนวแกนเลยจุดครากโดยให้แรงกระด้านข้าง, ϕ_p แล้วหาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ย	งานวิจัย, Eng Structure

2.การโก่งเดาะในช่วงที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเหล็กเสริมยืน	Bea, Mieses และ Bayrak (2005)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5	4, 5, 6, 7, 8, 9 , 10, 11 และ 12	1.) เหล็ก Grade 60 2.) F_y 437 Mpa, No. 8 และ D= 25.4 mm. 3.) F_y 440 Mpa, No. 10 และ D= 32.3 mm. 4.) 20M	ทำการศึกษาพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นที่คิดผลของการโก่งเดาะหลังจุดครากและที่เริ่มต้น ที่ L/D และ e/D ต่างๆจนได้ค่าสมการความสัมพันธ์ของผลเนื่องจากอัตราส่วนการเสียรูปทางด้านข้าง(Δ_{tra}/L) กับความเค้น (f_s/f_y) และความเครียดที่เกิดจากการเสียรูปทางด้านข้าง (ε_{tra}) ค่าความเครียดเฉลี่ยทั้งหมด $\varepsilon_{avg}=\varepsilon_s+\varepsilon_{tra}$ แล้วทำการเปรียบเทียบผลกับการทดสอบแบบทิศทางเดียว และทฤษฎีจากงานวิจัยของ Mander แบบวัฏจักร	งานวิจัย, ASCE
3. แบบจำลองการโก่งเดาะที่เกิดเมื่อเหล็กเสริมยืนมีความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเลยจุดคราก	Dhakal และ Maekawa, (2002)	-	6-15	1). F_y 100-1600 Mpa	หาความสัมพันธ์ที่เกิดจากค่าตัวแปร $\sqrt{f_y}, L, D$ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะ จนกระทั่งถึงจุดกำลังประลัย แล้วเขียนสมการ แสดงกราฟเพื่ออธิบายสมการ ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ	งานวิจัย, ASCE

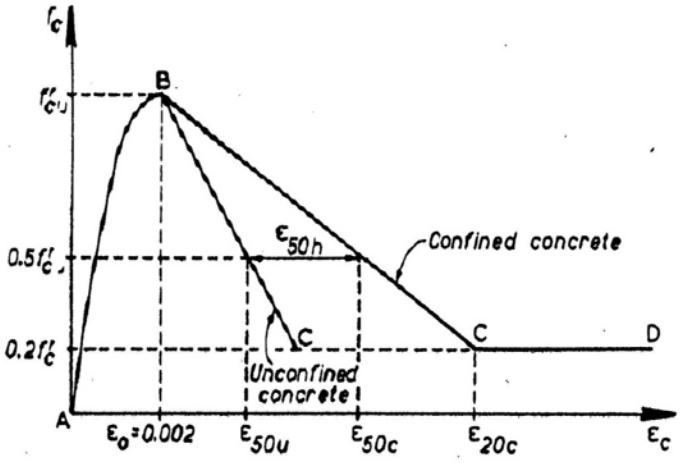
4.การเสียรูปและการเปรียบเทียบรูปแบบการเสียรูป	Dhakal, (2000)	-	-	-	ทำการศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการเสียรูปของเหล็กเสริมยืนที่เกิดการโก่งเดาะ และจำลองรูปแบบการเสียรูปเนื่องจากเหล็กปอกรัดรอบ มาทำนายพฤติกรรมการเสียรูป โดยมีลักษณะคล้ายสปริง และกล่าวถึงการแก้ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	เอกสารประกอบการสอน
5. ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเกิดพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นแบบวัฏจักรที่ใช้พิจารณาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม	Gomes และ Appleton, (1997)	-	-	1.) แบบจำลอง Menegotto และ Pinto, (1973) มีค่าตัวแปร $R_0=20$, $a_1=19$ และ $a_2=0.3$	ทำแบบจำลองการโก่งเดาะวิเคราะห์แบบการจำลองเป็น จุดหมุนพลาสติก 4 จุด แล้วหาความสัมพันธ์ในหน้าตัด แบบวงกลมเพื่อหาความสัมพันธ์เนื่องจากการโก่งเดาะ ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ชิ้นส่วนเป็นแบบพลาสติกโดยสมบูรณ์ แล้วหาเส้นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของ Menegotto-Pinto, (1973)	งานวิจัย, Eng Struct

6.พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นแบบวัฏจักรของเหล็กเสริมที่ที่ผลของการโก่งเดาะ	Monti และ Nuti (1992)	-	5, 8 และ 11	1.) F_y = 440Mpa 2). D=16, 20 และ24 mm.	ได้ทำการทดสอบเหล็กเสริมยืนที่มีอัตราส่วนความยาวต่อหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5, 8 และ 11 โดยใช้การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ แล้วกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเหล็กเส้นทดสอบทั้งแบบทิศทางเดียวและวัฏจักร หาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่ช่วงต่างๆ อธิบายการเกิดช่วงที่กำลังเค้นสูงขึ้นหลังจุดคราก (Hardening) L/D =5 และช่วงที่กำลังเค้นต่ำลงหลังจุดคราก (Degradation) L/D $\geq$ 5 ด้วยสมการเชิงพลังงาน K (Kinematic), I (Isotropic), M (Memory) และ S (Saturation)	งานวิจัย, ASCE

2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมอันเนื่องมาจากผลของเสาคอนกรีตที่มีการโอบรัด

Kent และ Park, (1971) ได้ทำการศึกษาชิ้นส่วนรับแรงดัดที่มีผลของคอนกรีตที่มีการโอบรัด (Confined concrete) โดยพิจารณาผลอันเนื่องมาจากช่วงที่รับแรงอัดของคานคอนกรีตหรือเสาคอนกรีต จะถูกโอบรัดโดยเหล็กรัดรอบที่มีระยะห่างพอเพียงหรือมีของอหรือเป็นเหล็กปลอกเกลียวคอนกรีตพฤติกรรมที่ได้จะมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นและมีค่ากำลังประลัยสูง จากการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของชิ้นส่วนทดสอบที่มีการโอบรัดโดยเหล็กเสริมทางด้านข้าง, เหล็กปลอก, ของอ หรือเหล็กปลอกเกลียว ในตัวอย่างนี้ได้ใช้การหาคุณสมบัติของความเค้นอัดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของชิ้นส่วนรับแรงดัดที่มีผลของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ณ ตำแหน่งความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ

จากการศึกษาของ Kent และ Park, (1971) ได้อธิบายความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตจากพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด (Unconfined concrete) และพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัด (Confined concrete) เนื่องจากเหล็กเสริมทางขวางที่มีเหล็กรัดรอบหรือของอที่จัดเรียงระยะห่างน้อยๆ ที่ความเค้นในแนวแกนต่ำเหล็กเสริมทางด้านข้างจะมีความเค้นเกิดขึ้นน้อยมาก คอนกรีตอยู่ในสภาพที่ไม่มีผลของการโอบรัดเมื่อคอนกรีตมีความเค้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดรอยแตกร้าวภายใน และพยายามเบ่งออกทางด้านข้างจนเกิดการต้านกับเหล็กเสริมทางขวางซึ่งทำให้เกิดแรงต้านโอบรัดคอนกรีต โดยได้แสดงผลดังภาพที่ 2.33 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดและไม่มีการโอบรัดได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และไม่มีการโอบรัด (ที่มา Kent และ Park, 1971)

ช่วง AB ในช่วงนี้เหล็กโอบรัดไม่ได้แสดงผลต่อรูปร่างของเส้นโค้ง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองต่างๆที่แสดงว่าความเค้นในเหล็กปลอกจะมีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเค้นในคอนกรีตเข้าใกล้ความเค้นสูงสุด และสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่าค่าความเค้นดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นทั้งในคอนกรีตที่มีการโอบรัดและไม่มีการโอบรัดก็มีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน ค่าความเครียดที่ความเค้นสูงสุดมีค่าโดยประมาณที่ 0.002 (ε_0) เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดที่เกิดขึ้นนั้น สามารถแสดงอยู่ในรูปของเส้นโค้งความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_c = f_c^{'}\left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2\right] \qquad (36)$$

โดยที่ ε_0 คือ ค่าความเครียดของคอนกรีตที่ 0.002

ε_C คือ ค่าความเครียดของคอนกรีต ณ จุดใดๆ ในช่วงAB

f_c คือ กำลัง ณ จุดใดๆ ของคอนกรีตในช่วงAB มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว (psi)

ช่วง BC จะมีค่าความเค้นลดลงจะแสดงด้วยเส้นตรง โดยค่าความชันของเส้นกราฟจะหาโดยการหาค่าความเครียดที่จุดที่มีความเค้นเท่ากับ 0.5 เท่าของความเค้นสูงสุดแล้วลากเส้นตรงระหว่างจุดนี้และจุดที่มีความเค้นสูงสุด

คอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด (Unconfined concrete) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุด ($f_c^{'}$) และความเครียดที่ 50% ของความเค้นสูงสุด (ε_{50u}) ซึ่งได้จากผลการทดสอบได้ดังสมการที่ 37 และคอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วยเหล็กปลอก (Confined concrete) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ดังสมการ 38

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.002 f_c^{'}}{f_c^{'} - 1000} \qquad (37)$$

$$\varepsilon_{50h} = \varepsilon_{50c} - \varepsilon_{50u} \qquad (38)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4}\rho^{''}\sqrt{\frac{b^{''}}{s}} \qquad (39)$$

$$f_c = f_c^{'}\left[1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)\right] \qquad (40)$$

$$Z=\frac{0.5}{\varepsilon_{50h}+\varepsilon_{50u}-\varepsilon_0} \quad (41)$$

ช่วง CD จะเกิดในกรณีที่คอนกรีตที่มีการโอบรัด และมีค่าความเค้นลดลงเท่ากับ 20%ของค่าความเค้นสูงสุดตลอดช่วงจนกระทั่งเกิดการวิบัติ

โดยที่ $f_c^{'}$ คือ กำลังสูงสุดของคอนกรีตที่มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.002 มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว (psi)

ε_{50u} คือ ค่าความเครียดที่ค่าความเค้นของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดเท่ากับ 50% ของความเค้นสูงสุด, $0.5f_c^{'}$

ε_{50c} คือ ค่าความเครียดที่ค่าความเค้นของคอนกรีตที่มีการโอบรัดเท่ากับ 50% ของความเค้นสูงสุด $0.5f_c^{'}$

ε_{50h} คือ ผลต่างของความเครียดของคอนกรีตระหว่างที่มีการโอบรัดกับที่ไม่มีการโอบรัด ณ ตำแหน่ง 50% ของความเค้นสูงสุด

ρ คือ อัตราส่วนปริมาตรของเหล็กรัดรอบ (The volumetric ratio of confining hoops)

$A_s^{"}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่มีการโอบรัด มีหน่วยเป็นตารางนิ้ว

$b^{"}$ คือ ความกว้างของหน้าตัด มีหน่วยเป็นนิ้ว

$d^{"}$ คือ ความลึกของหน้าตัด มีหน่วยเป็นนิ้ว

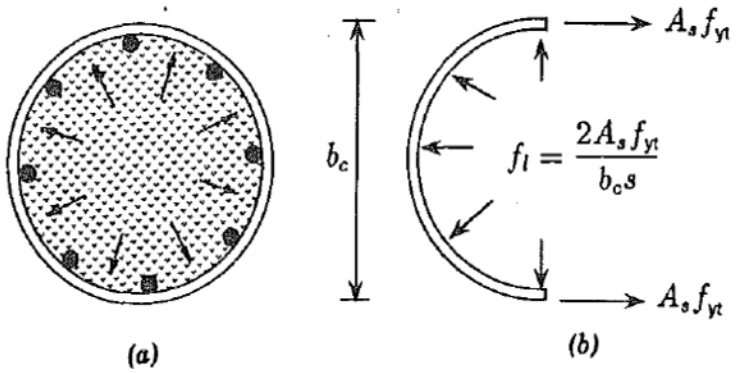
s คือ ระยะเรียงของเหล็กปลอก วัดจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางเหล็กเสริมตามขวาง

Z คือ ค่าตัวแปรที่แสดงผลต่างของกำลัง

Saatcioglu และ Razvi (1992) ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองโดยอ้างอิงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด เพื่อนำไปใช้การคำนวณแรงดันที่เกิดจากการโอบรัดทางด้านข้างในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยม และนำผลที่ได้ไปอธิบายค่ากำลังและความเหนียวที่เกิดขึ้นในหน้าตัด จากการทดสอบหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนมากทั้งในกรณีที่คอนกรีตมีการโอบรัดอย่างดีและคอนกรีตมีการโอบรัดต่ำ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ จากผลของการโอบรัดตลอดหน้าตัดในแต่ละจุดหน้าตัดคอนกรีตที่นำมาทดสอบจะอยู่ในช่วงความเค้นเท่ากับ 85% ของความเค้นสูงสุดไปจนถึง

20% ของความเค้นสูงสุด (Confined concrete) แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบในหน้าตัดรูปร่างต่างๆกัน

จากการศึกษาวิจัยของ Saatcioglu และ Razvi (1992) อธิบายการเกิดความเค้นในแนวแกนของชิ้นทดสอบหน้าตัดทรงกลมที่เกิดแรงดันทางด้านข้างของเหล็กปลอกเกลียวมีระยะเรียงที่เพียงพอ ดังภาพที่ 2.34



ภาพที่ 2.33 แรงดันทางด้านข้างของเสาหน้าตัดวงกลม (a) แสดงแรงดันสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด (b) แรงเทียบเท่าของแรงดันทางด้านข้างกับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอก (ที่มา Saatcioglu และ Razvi, 1992)

หาความสัมพันธ์ของกำลังของคอนกรีตหน้าตัดวงกลมที่มีการโอบรัดได้จากสมการ

$$f'_{cc} = f'_{co} - k_1 f_l \tag{42}$$

$$k_1 = 6.7(f_l)^{-0.17} \tag{43}$$

$$f_l = \frac{2A_s f_{yt}}{b_c s} \tag{44}$$

โดยที่ f'_{cc} คือ ความเค้นของคอนกรีตที่มีการโอบรัด

f'_{co} คือ ความเค้นของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด

f_l คือ แรงดันทางด้านข้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการโอบรัดของเหล็กปลอก มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

k_1 คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันทางด้านข้างที่ได้มาจากการทดสอบของ Richart et al (1928)

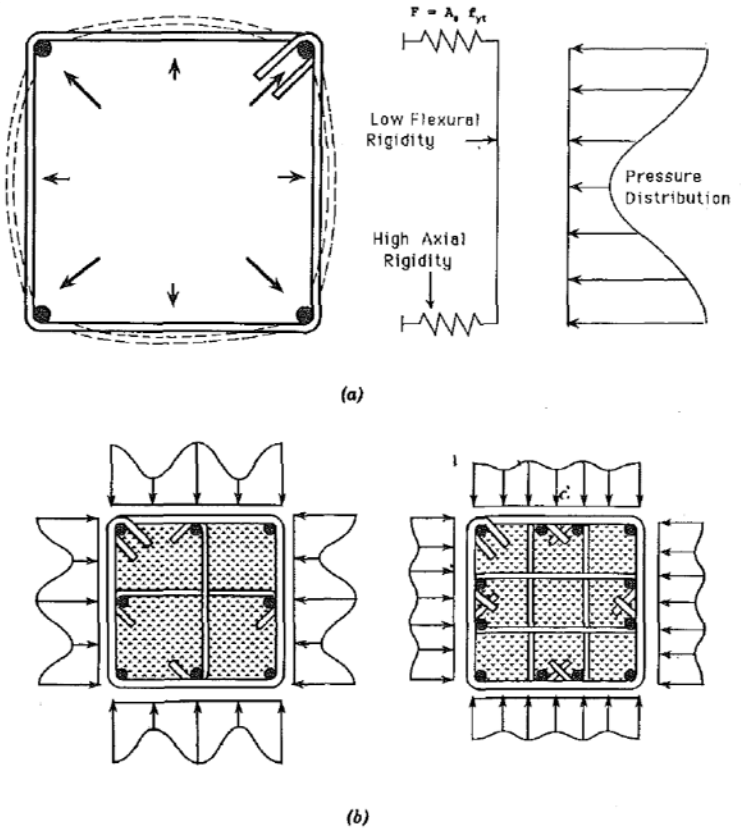
A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

f_{yt} คือ ความเค้นที่จุดครากของเหล็กรัดรอบ มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

b_c คือ ความกว้างของหน้าตัดวงกลม วัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กปลอกอีกด้าน

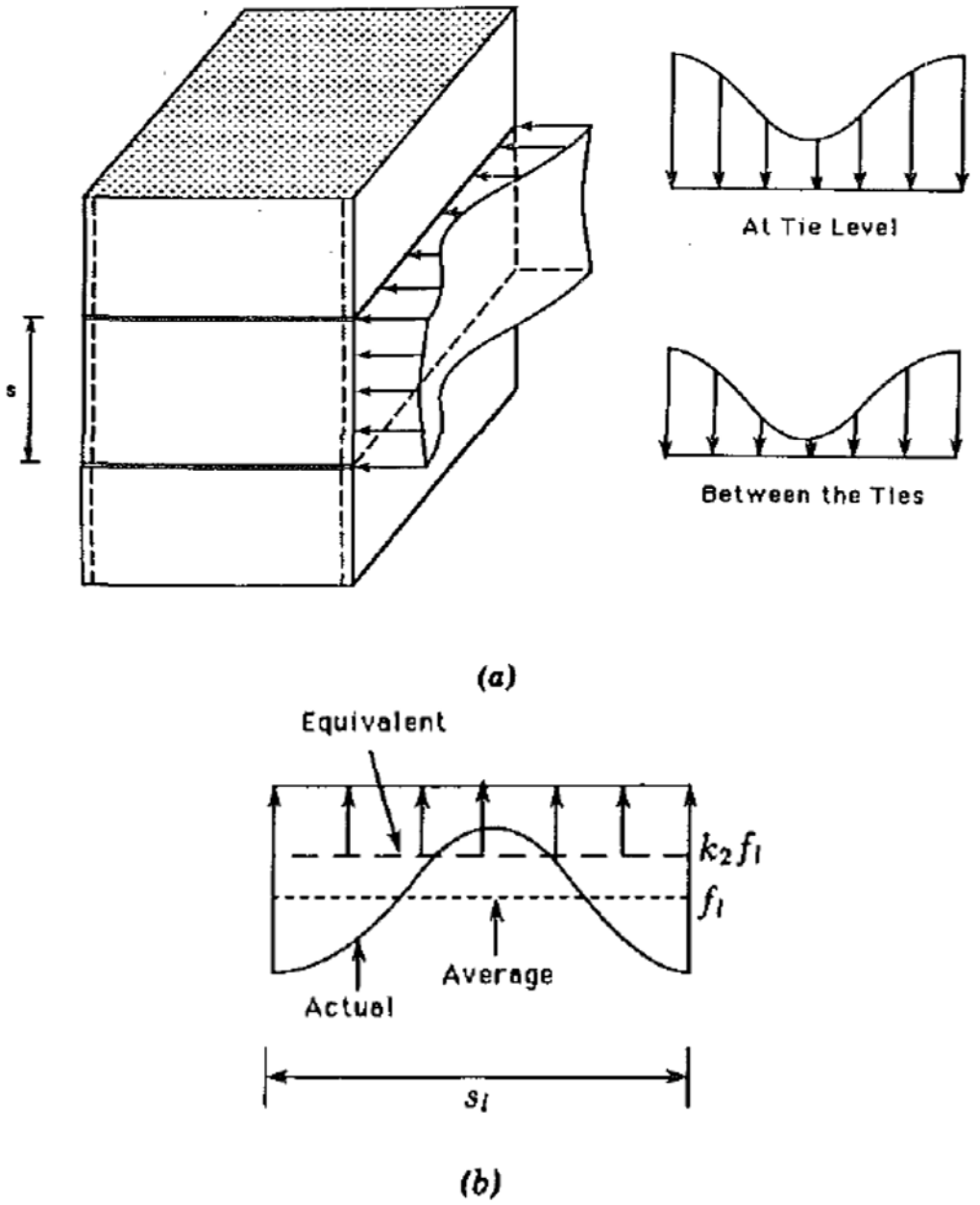
s คือ ระยะเรียงของเหล็กรัดรอบของเหล็กเสริมตามขวาง

ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนของชิ้นทดสอบหน้าตัดจัตุรัส แรงดันโอบรัดที่เกิดขึ้นในเหล็กรัดรอบขึ้นอยู่กับแรงต้านทานโดยรวมของเหล็กปลอกจะเกิดแรงยึดรั้งสูงบริเวณมุม มีเหล็กเสริมตามขวางเป็นจุดรองรับทางด้านข้าง และมีแรงยึดรั้งต่ำบริเวณช่วงระหว่างมุม ความสามารถการยึดรั้งดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมตามขวาง, พื้นที่, กำลังของเหล็กปลอก และการจัดเรียงตัวของเหล็กเสริม หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีแรงต้านทานที่สูงบริเวณจุดรองรับมากกว่าบริเวณระหว่างช่วงจุด ซึ่งจะเป็นไปตามส่วนของความแข็งเกร็งแบบเชิงเส้นของเหล็กปลอกจนกระทั่งถึงจุดคราก ดังแสดงดังภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.34 แรงดันทางด้านข้างของเสาหน้าตัดจัตุรัส (a) แสดงแรงดันสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดจัตุรัส (b) แรงดันด้านข้างที่กระจายตัวตามการจัดเรียงของเหล็กเสริม
(ที่มา Saatcioglu และ Razvi, 1992)

การโอบรัดของเหล็กเสริมเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยรอบ ซึ่งปรากฏการณ์ต่างๆจะไม่สามารถพิจารณาแค่ในหน้าตัดแต่จำเป็นต้องพิจารณาความแปรปรวนของแรงดันทางด้านข้างตามชิ้นส่วนด้วย ตามภาพที่ 2.36a มีแรงดันเกิดขึ้นที่จุด (เหล็กเสริมตามยาว) ที่มีเหล็กปลอกเป็นจุดรองรับที่มีการกระจายตัวตลอดความยาวของเหล็กเสริมยืนเนื่องจากรับแรงอัดในแนวแกนด้วยช่วงสั้นๆ จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาเฉลี่ยค่าแรงดัน ที่ไม่ได้พฤติกรรมตามแรงเนื่องจากการโอบรัดของเหล็กปลอกอย่างแท้จริงดังภาพที่ 2.36b



ภาพที่ 2.35 การกระจายตัวแรงดันทางด้านข้างของเสาหน้าตัดจัตุรัส (a).แสดงแรงดันสม่ำเสมอตลอดความยาว (b).แสดงค่าเกิดขึ้นจริง, ค่าเฉลี่ย และค่าแรงดันเทียบเท่า
(ที่มา Saatcioglu และ Razvi, 1992)

หาความสัมพันธ์ของกำลังของคอนกรีตหน้าตัดจัตุรัสที่มีการโอบรัดได้จากสมการ

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} - k_1 f_{le} \qquad (45)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \tag{46}$$

$$f_l = \frac{\sum A_s f_{yt} \sin\alpha}{b_c s} \tag{47}$$

$$k_2 = 0.26\sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right)\left(\frac{b_c}{s_l}\right)\left(\frac{1}{f_l}\right)} \le 1.0 \tag{48}$$

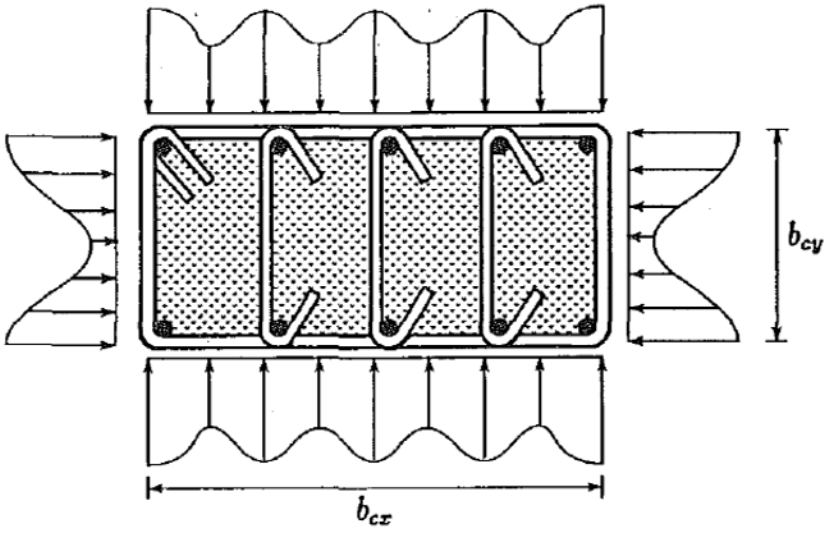
โดยที่

α คือ มุมระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง มีหน่วยเป็นองศา

k_2 คือ ค่าคงที่ปรับลดเนื่องจากผลของค่าเฉลี่ยของแรงดันทางด้านข้างที่ได้มาจากการทดสอบชิ้นส่วนทดสอบ

s_l คือ ความยาวของช่วงในเหล็กรัดรอบที่ระหว่างจุดรองรับ

ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนของชิ้นทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เกิดแรงดันโอบรัดในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันที่แตกต่างกันทั้งทางด้านสั้นและด้านยาวของหน้าตัด ดังรูป 2.37



ภาพที่ 2.36 การกระจายตัวแรงต้านทานทางด้านข้างของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า
(ที่มา Saatcioglu และ Razvi, 1992)

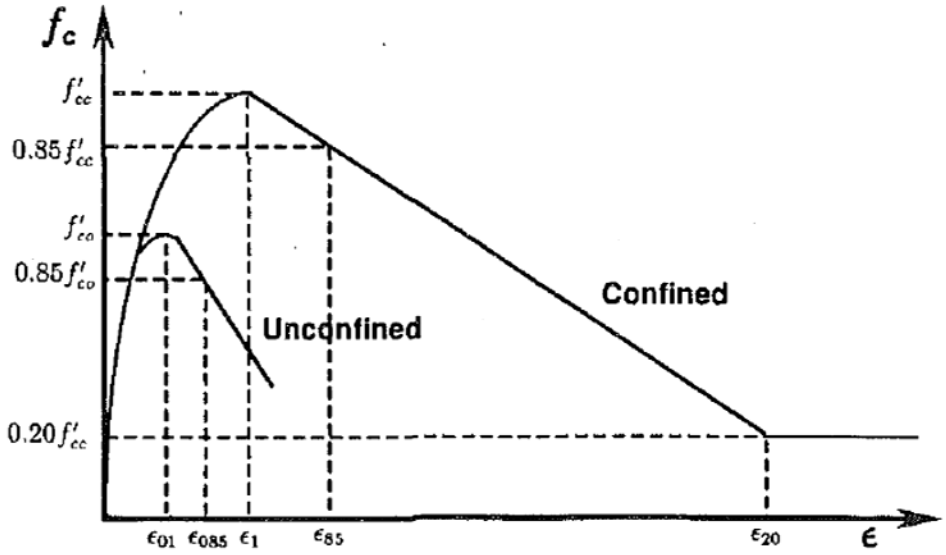
หาความสัมพันธ์ของกำลังของคอนกรีตหน้าตัดสี่เผลี่ยมผืนผ้าที่มีการโอบรัดได้จากสมการ

$$f_{le}=\frac{f_{lex}b_{cx}+f_{ley}b_{cy}}{b_{cx}+b_{cy}} \quad (49)$$

โดยที่ b_{cx} คือ ความกว้างของหน้าตัดวงกลมทางแกน X

b_{cy} คือ ความกว้างของหน้าตัดวงกลมทางแกน Y

จากค่ากำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำของคอนกรีตที่มีการยึดรั้งเนื่องจากเหล็กปลอกของหน้าตัดวงกลม, จัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถนำไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามภาพที่ 2.38



ภาพที่ 2.37 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่นำมาอ้างอิง
(ที่มา Saatcioglu และ Razvi, 1992)

$$\varepsilon_1=\varepsilon_{01}\left(1+5\left(\frac{k_1 f_{le}}{f'_{co}}\right)\right) \quad (50)$$

$$\varepsilon_{85}=260\left(\frac{\sum A_s}{s\left(b_{cx}+b_{cy}\right)}\right)\varepsilon_1+\varepsilon_{085} \quad (51)$$

โดยที่ ε_1 คือ ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่มีผลแรงต้านทานการเบ่งตัว

ε_{01} คือ ความเครียดสูงสุดที่เกิดจากคอนกรีตที่ไม่มีผลแรงต้านทานการเบ่งตัว โดยทั่วไปนิยมใช้ค่าเท่ากับ 0.002

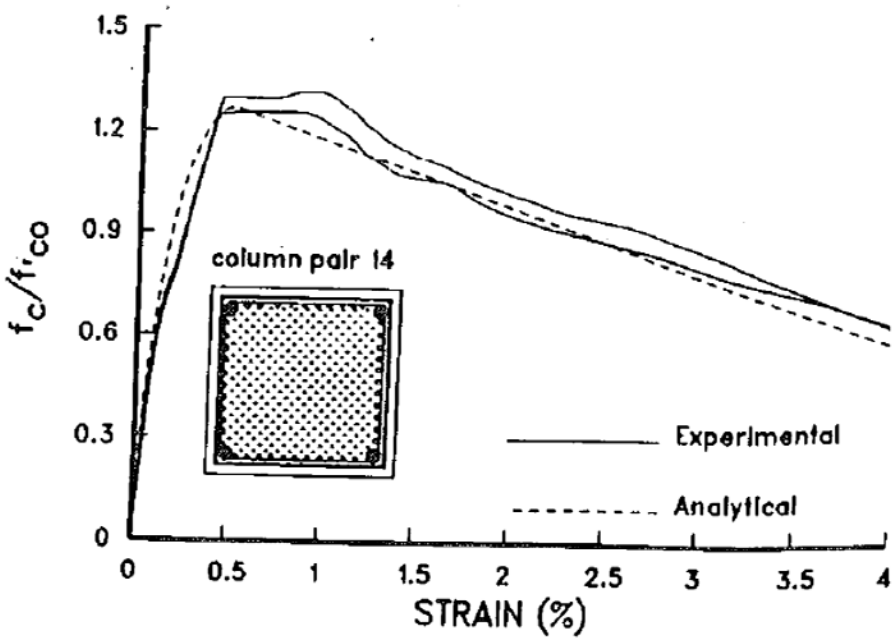
ε_{85} คือ ความเครียดที่ความเค้น 85%ของความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่มีผลแรงต้านทานการเบ่งตัว

ε_{085} คือ ความเครียดที่ความเค้น 85%ของความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่ไม่มีผลแรงต้านทานการเบ่งตัว

b_{cx} คือ ความกว้างของหน้าตัดวงกลมทางแกน X

b_{cy} คือ ความกว้างของหน้าตัดวงกลมทางแกน Y

จากความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่มาจากเสาหน้าตัดแบบต่างๆ วงกลม, จัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากการศึกษาของ Saatcioglu และ Razvi (1992) สามารถนำมาเปรียบเทียบค่าความเค้นของคอนกรีตที่มีผลการโอบรัด กับความเค้นสูงสุดของคอนกรีตไม่มีผลการโอบรัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดจัตุรัส จากการวิเคราะห์และผลการทดสอบให้ผลที่สอดคล้องกันว่ากำลังของคอนกรีตเนื่องจากการโอบรัดจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20%

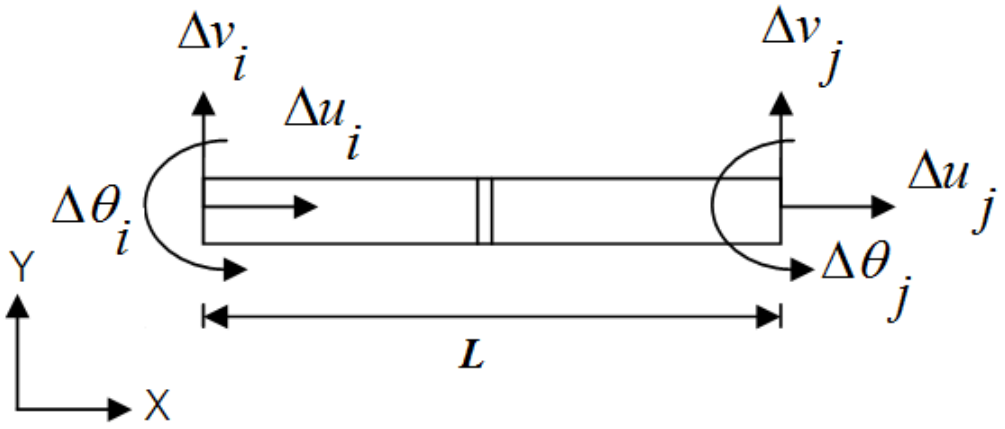


ภาพที่ 2.38ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นต่อความเค้นสูงสุดที่ไม่มีผลการโอบรัด-ความเครียดที่นำมาอ้างอิง (ที่มา Saatcioglu และ Razvi, 1992)

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์

การวิเคราะห์เหล็กเสริมยืนในเสาที่รับแรงอัดและเกิดการโก่งเดาะนั้น มีความซับซ้อนอยู่หลายประการ เนื่องจากหน้าตัดบางส่วนมีหน่วยแรงเกิดขึ้นเกินกว่ากำลังคราก ทำให้หน้าตัดมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์ด้วยวิธีทั่วไปไม่อาจให้ผลลัพธ์ที่แสดงถึงพฤติกรรมที่แท้จริงได้ วิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาประเภทนี้คือการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์นั้นมีข้อดีคือการแบ่งหน้าตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆทำให้สามารถกำหนดคุณสมบัติที่แตกต่างกันของหน้าตัดชิ้นเล็กๆเหล่านั้นได้ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำโปรแกรม OpenSees มาใช้ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์ของเหล็กเสริมที่รับแรงอัดจนเกิดการโก่งเดาะ โดยโปรแกรมดังกล่าวสามารถสร้างหน้าตัดไฟเบอร์ได้ดี รวมถึงวิเคราะห์ปัญหาในรูปแบบต่างๆได้กว้างขวางด้วย

การวิเคราะห์จะแบ่งหน้าตัดเหล็กเสริมออกเป็นชิ้นย่อยๆและตามแนวยาวของเหล็กจะแบ่งออกเป็นชั้นๆ จากนั้นกำหนดความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดให้แก่ชิ้นส่วนย่อยๆนั้น โดยใช้วิธีสติฟเนส (Stiffness Method) จะสามารถหาค่าสติฟเนสของหน้าตัดได้โดยการรวมค่าสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดของหน้าตัด ที่หน้าตัดของชิ้นส่วนย่อยจะมีดีกรีความอิสระเท่ากับ 3 ได้แก่ การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับแกนของชิ้นส่วนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากแรงเฉือน การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามแนวแกนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากแรงตามแนวแกน และการหมุนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากการดัด ดังแสดงในภาพที่ 2.40



ภาพที่ 2.39 ดีกรีการเคลื่อนที่อิสระของชิ้นส่วน

ความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดจะเกิดจาก 2 ส่วนคือความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกนและความเครียดเนื่องจากการหมุน ดังสมการที่ 52 และ 53 ตามลำดับ

$$\Delta\varepsilon_c = \frac{\Delta u_j - \Delta u_i}{L} \quad (52)$$

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\theta_j - \Delta\theta_i}{L} \quad (53)$$

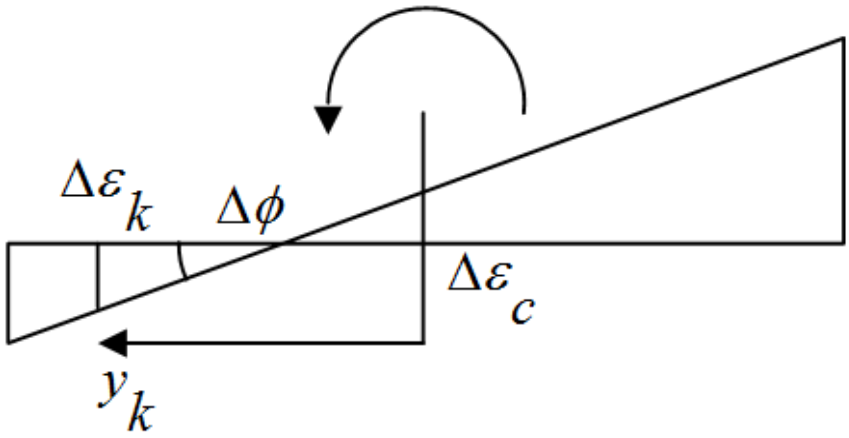
โดยที่ $\Delta u_i, \Delta u_j$ คือ การเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i และ j ตามลำดับ

$\Delta\theta_i, \Delta\theta_j$ คือ มุมหมุนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i และ j ตามลำดับ

L คือ ความยาวของชิ้นส่วนย่อย

ดังนั้นความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละไฟเบอร์ของหน้าตัดจึงเป็นผลรวมของความเครียดทั้งสองส่วนที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยมีสมมติฐานว่าหน้าตัดของเหล็กเสริมยังคงเป็นระนาบตรงตลอดการเสียรูปและตั้งฉากกับแกนตามยาว (Longitudinal axis) ของเหล็กเสริม จะสามารถหาค่าความเครียดของไฟเบอร์แต่ละชิ้นได้ตามสมการ

$$\Delta\varepsilon_k = \Delta\varepsilon_c - y_k \cdot \Delta\phi \quad (54)$$



ภาพที่ 2.40 การกระจายความเครียดในหน้าตัดที่ใช้วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์

เมื่อได้ค่าความเครียดของแต่ละไฟเบอร์แล้วจะสามารถหาค่าความเค้นของแต่ละไฟเบอร์ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม ใช้การหาปริพันธ์ของความเครียดที่เปลี่ยนไปในแต่ละชั้นของเหล็กเสริม(ตามแนวยาว)จะได้แรงตามแนวแกน, โมเมนต์ดัด และแรงเฉือนที่เปลี่ยนไปในแต่ละชั้นนั้นดังสมการ

$$\Delta N=\int_A \Delta\sigma dA=\sum_{n=1}^{k}(\Delta\varepsilon_k E_{kt} A_k)=EA_t\Delta\varepsilon_c - EG_t\Delta\phi \quad (55)$$

$$\Delta M=-\int_A \Delta\sigma y dA=-\sum_{n=1}^{k}(\Delta\varepsilon_k E_{kt} A_k y_k)=-EG_t\,\Delta\varepsilon_c + EI_t\,\Delta\phi \quad (56)$$

$$\Delta Q=-\frac{d\Delta M}{dx} \quad (57)$$

โดยที่ k คือ จำนวนไฟเบอร์ทั้งหมดของหน้าตัด

A_k คือ พื้นที่หน้าตัดของไฟเบอร์เหล็กเสริม

E_{kt} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

y_k คือ ระยะห่างของไฟเบอร์เหล็กเสริมที่วัดจากแนวแกนสะเทิน

โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งที่หาได้ตามกระบวนการข้างต้นจะสามารถหาสติฟเนสของแต่ละชั้นของเหล็กเสริมตามแนวยาวได้ ดังสมการที่ 58 โดยค่าสติฟเนสนี้จะไม่คงที่เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ค่าสติฟเนสจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเค้น-ความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของเหล็กเสริม

$$\{\Delta f\}=\left[k_t\right]\{\Delta u\} \quad (58)$$

$$\left\{\Delta u\right\}=\left\{\Delta u_i \quad \Delta v_i \quad \Delta\theta_i \quad \Delta u_j \quad \Delta v_j \quad \Delta\theta_j\right\}^T \quad (59)$$

$$\{\Delta f\}=\left\{\Delta N_i \quad \Delta Q_i \quad \Delta M_i \quad \Delta N_j \quad \Delta Q_j \quad \Delta M_j\right\}^T \quad (60)$$

$$\left[k_t\right]=\begin{bmatrix} \frac{EA_t}{L} & 0 & -\frac{EG_t}{L} & -\frac{EA_t}{L} & 0 & \frac{EG_t}{L} \\ 0 & \frac{12EI_t}{L^3} & \frac{6EI_t}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_t}{L^3} & \frac{6EI_t}{L^2} \\ -\frac{EG_t}{L} & \frac{6EI_t}{L^2} & \frac{4EI_t}{L} & \frac{EG_t}{L} & -\frac{6EI_t}{L^2} & \frac{2EI_t}{L} \\ -\frac{EA_t}{L} & 0 & \frac{EG_t}{L} & \frac{EA_t}{L} & 0 & -\frac{EG_t}{L} \\ 0 & -\frac{12EI_t}{L^3} & -\frac{6EI_t}{L^2} & 0 & \frac{12EI_t}{L^3} & -\frac{6EI_t}{L^2} \\ \frac{EG_t}{L} & \frac{6EI_t}{L^2} & \frac{2EI_t}{L} & -\frac{EG_t}{L} & -\frac{6EI_t}{L^2} & \frac{4EI_t}{L} \end{bmatrix} \quad (61)$$

$\Delta N_i = -\Delta N$ คือ แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i

$\Delta N_j = \Delta N$ คือ แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย j

$\Delta Q_i = -\Delta Q$ คือ แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i

$\Delta Q_j = \Delta Q$ คือ แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย j

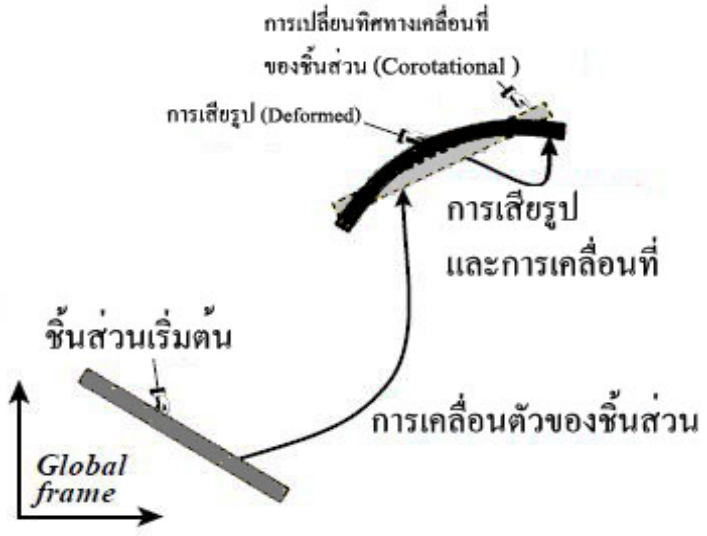
$\Delta M_i = -\Delta Q \cdot \frac{L}{2} - \Delta M$ คือ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย i

$\Delta M_j = -\Delta Q \cdot \frac{L}{2} + \Delta M$ คือ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ปลาย

2.6 ทฤษฎี Corotational

ในการแก้ปัญหาการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่รับแรงอัดในแนวแกน การหาผลที่เกิดจากการโก่งเดาะนั้น ต้องหาวิธีในการแทนค่าสติฟเนสในโครงสร้างที่เหมาะสม วิธีการหาค่าสติฟเนสแบบเชิงเส้น หรือการใช้วิธี P-Δ ไม่เพียงพอ ที่จะนำไปสู่พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัดอย่างแท้จริง วิธี Corotational จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ ที่มีพฤติกรรมแบบ Non-Linear

วิธี Corotation เป็นวิธีที่เหมาะในการใช้แก้ปัญหา ประเภท ที่มีการเสียรูปมากและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อย กระบวนการในการหาคำตอบ จะเริ่มจากพิจารณาการเคลื่อนที่ ในแบบ Rigid body motion ก่อน โดยมีการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นส่วนเริ่มต้น แล้วหาค่าการกระจัดของทิศทางที่เปลี่ยนไป เทียบกับแกนตั้งต้น หลังจากนั้นก็จะพิจารณา ค่าการเสียรูปในชิ้นส่วน จากหลักการนี้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย เพื่อแก้ปัญหาการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน เนื่องจากวิธีแก้ปัญหาเชิงเส้นทั่วไป ไม่เหมาะสมเพียงพอที่จะแสดงถึงพฤติกรรม การโก่งเของเหล็กเสริมได้ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.41



ภาพที่ 2.41 แสดงวิธี Corotaional ที่ใช้การแก้ปัญหาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาที่กล่าวในบทนี้เป็นขั้นตอนการดำเนินของงานวิจัย การวางแผนการดำเนินงานแล้วทำการเก็บรวมรวมผลที่ได้จากการวิจัย เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผล โดยสามารถอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยได้ดังนี้

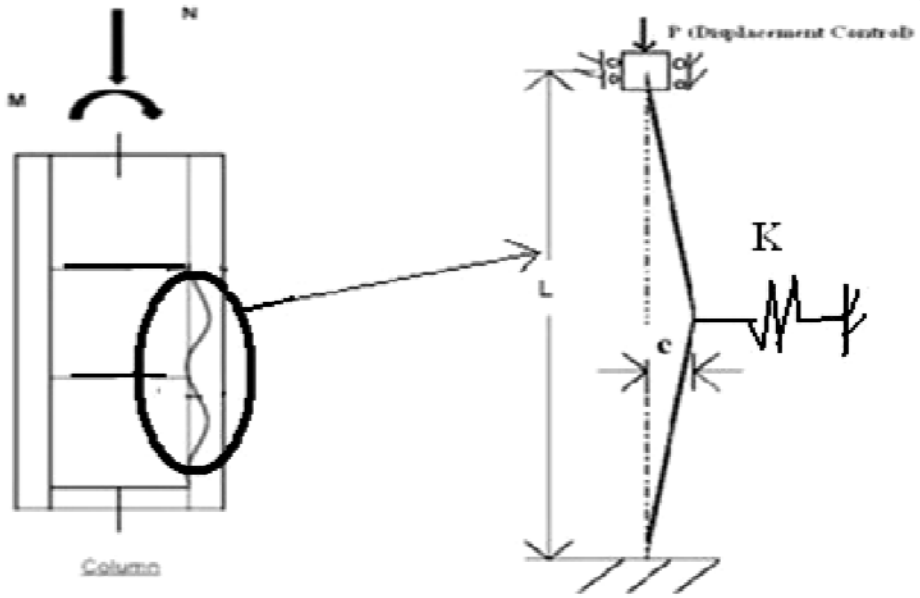
3.1 ทำการศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมา

ทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ พฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงในแนวแกน ที่มีความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียดแบบทิศทางเดียวและแบบวัฏจักร, พฤติกรรมการโก่งเดาะเหล็กเสริมรับแรงอัด, การต้านทานการโก่งเดาะทางด้านข้างของเหล็กปลอก และการวิเคราะห์แบบจำลองไฟเบอร์

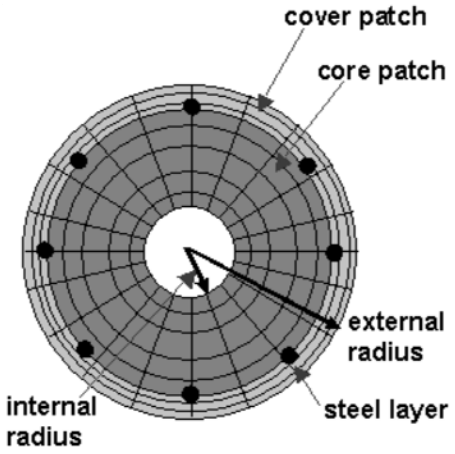
3.2 ศึกษาโปรแกรม OpenSees

ในการวิเคราะห์การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวางด้วยแบบจำลองไฟเบอร์ โดยเลือกใช้โปรแกรม OpenSees เป็นเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย เนื่องจากโปรแกรม OpenSees สามารถใช้ในการศึกษาแบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา Non-Linear และแบบจำลองไฟเบอร์ได้ นำมาวิเคราะห์โครงสร้างที่มีแรงในแนวแกน โดยให้แรงกระทำแบบทิศทางเดียวด้วยวิธี Displacement control หรือกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ได้ เหมาะกับการแก้ปัญหา Non-Linear ในโครงสร้างที่รับแผ่นดินไหว สามารถเลือกใช้กระบวนการเชิงตัวเลขแบบ Non-linear ในวิเคราะห์ผล และแก้ปัญหาได้ และการประมวลผล สามารถแสดงผลที่ได้จากโปรแกรมเป็นไฟล์ข้อความได้ เพื่อนำค่ามาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

โปรแกรม OpenSees ได้ถูกนำมาปรับใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเหล็กเสริมรับแรงอัด ที่มีผลของการโก่งเดาะ เพื่อจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างของแบบจำลอง ให้เหมือนกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของโครงสร้างจริงมากที่สุด ดังภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2



ภาพที่ 3.1 จำลองพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างภายหลังจากคอนกรีตสูญเสียกำลังการรับแรงอัด



ภาพที่ 3.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลองไฟเบอร์ที่โปรแกรม OpenSees ใช้ในการวิเคราะห์

1 เริ่มต้นศึกษาโปรแกรม OpenSees

ในการทำการศึกษาโปรแกรมได้เริ่มทำการศึกษา จากแบบจำลองทางคณิตศาตร์ ที่เป็นตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OpenSees จากแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น คู่มือการใช้โปรแกรม และจากเว็ปไซด์ http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_User ที่เป็นแหล่งข้อมูลสำคัญ สำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาโปรแกรม มีการแนะนำและข้อเสนอแนะ วิธีการใช้คำสั่ง

เครื่องมือ และตัวอย่างปัญหา ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการแก้ปัญหาแบบ 2 มิติ วิธีการสร้างแบบจำลองเบื้องต้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของโปรแกรม OpenSees นั้น จะถูกแบ่งเป็นส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วนคือ

1.1) คำสั่งสร้างแบบจำลอง (Model command) คือการสร้าง จำนวนข้อต่อ การยึดจับหรือยึดรั้งของข้อต่อ ชิ้นส่วนอิลิเมนต์ ประเภทของอิลิเมนต์เป็น ชิ้นส่วนรับแรงในแนวแกนหรือโครงข้อแข็ง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ การเชื่อมต่อของชิ้นส่วน และการใส่แรงกระทำต่อชิ้นส่วนโครงสร้าง

1.2) คำสั่งวิเคราะห์แบบจำลอง (Analytical command) เป็นคำสั่งหรือชุดคำสั่ง ที่ช่วยในการแก้ปัญหา ให้เหมาะสมกับประเภทของปัญหา เช่นปัญหาที่เป็นเชิงเส้น หรือมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น สามารถเลือกกระบวนการทางคณิตศาตร์ต่างๆที่จะใช้ในการแก้ปัญหาให้เหมาะสม การปรับแก้ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้

1.3) คำสั่งเก็บข้อมูล (Recorder command) จะแบ่งเป็นการเก็บข้อมูลที่ข้อต่อ แรงในข้อต่อ การระยะการเสียรูป เก็บข้อมูลของชิ้นส่วน แรงภายในชิ้นส่วน ค่าความเค้น-ความเครียด การเสียรูป เป็นต้น

เนื่องจากในการวิเคราะห์ปัญหาการโก่งเดาะของเหล็กเสริม แทบจะไม่มีตัวอย่างเลย ตัวอย่างส่วนใหญ่ จะเป็นปัญหาการวิเคราะห์เสายื่นมากกว่า ดังนั้นจึงต้องเอาตัวอย่างเสามาปรับให้เป็นเหล็กเสริม ซึ่งในตอนแรกนั้นยังไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความไม่เข้าใจในการใช้โปรแกรม จึงได้ทำการศึกษาปัญหาเสายื่น เพื่อให้เข้าใจคำสั่งและส่วนต่างๆ ในโปรแกรม ควบคู่กับศึกษาโปรแกรมด้วยคู่มือ โดยสามารถดาว์นโหลดได้จากเว็ปไซด์ข้างต้น

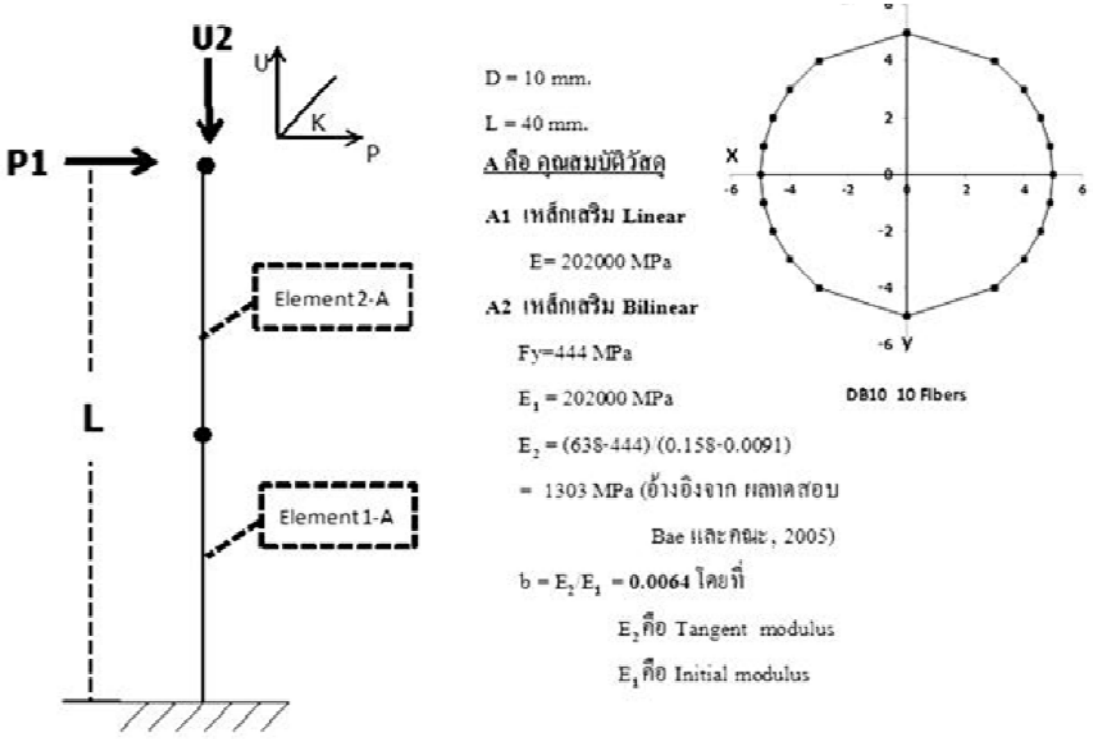
2.ศึกษาตัวอย่างการวิเคราะห์เสายื่นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ก่อนที่จะวิเคราะห์เหล็กเสริมนั้น ได้เริ่มศึกษาการสร้างแบบจำลอง จากปัญหาเสายื่นที่มีตัวอย่าง โดยเริ่มจากโครงสร้างที่ง่าย ไปสู่ปัญหาที่ซับซ้อนขึ้น ศึกษาปัญหาแบบจำลองของเสายื่นที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นที่เริ่มต้น โดยทำการศึกษาคำสั่ง วิธีการใส่คุณสมบัติของวัสดุ การคำนวณ และการเก็บข้อมูล หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ปัญหาที่ยากขึ้นมาเรื่อยๆ จากเสายื่นที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีหน้าตัดเป็นสีเหลี่ยมจตุรัส จนกระทั่งเสายื่นที่มีพฤติกรรมเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นและใช้หน้าตัดไฟเบอร์ในการวิเคราะห์ในที่สุด รวมไปถึงวิธีการใส่แรงกระทำต่อโครงสร้างด้วยวิธี Force control และวิธี Displacement Control

3.แบบจำลองเหล็กเสริม

เริ่มจากการปรับปัญหาเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ไปเป็นปัญหา เหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว เริ่มต้นโดยกำหนดให้หน้าตัดเหล็ก มีค่าพื้นที่และโมเมนต์ของความเฉื่อย เป็นค่าคงที่หนึ่งค่า เริ่มจากการวิเคราะห์เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลิเมตร มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น โดยเหล็กเสริมมีค่าโมดูลัสคงที่ตลอดทั้งพฤติกรรม สาเหตุที่เลือกใช้หน้าตัดนี้เพราะง่ายต่อการแบ่งชิ้นส่วนไฟเบอร์ในอนาคต โครงสร้าที่ใช้จะเป็นพฤติกรรมคล้ายเสายื่น ทำการวิเคราะห์และตรวจสอบผลที่ได้จากการเก็บข้อมูล แล้วทำการพัฒนาปัญหา คุณสมบัติของเหล็กเสริมเป็นแบบ Biliinear ทำการวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล

4.แบบจำลองเหล็กเสริมด้วยวิธีไฟเบอร์โมเดล



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาเริ่มต้น

หลังจากที่ได้ปรับแบบจำลองตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นโครงสร้างเหล็กเสริมที่มีลักษณะเสายื่นแล้ว ทำการเปลี่ยนพฤติกรรมของเหล็กเสริมมีลักษณะเป็น Non-linear จากการใส่คุณสมบัติของหน้าตัดด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ทำการพัฒนาแบบจำลองเป็นหน้าตัดไฟเบอร์ โดยจำลองให้โครงสร้างเป็นหน้าตัดไฟเบอร์แบบสี่เหลี่ยม โดยมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมแบบวงกลม ซึ่งเบื้องต้นใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตรวจสอบ

คุณสมบัติวัสดุที่ได้จากแบบจำลอง โดยการใส่แรง 1 หน่วยทางด้านข้าง และแรงการเคลื่อนที่ 1 หน่วยในแนวแกน ที่ปลายด้านบนของแบบจำลอง หลังจากนั้นเปลี่ยนหน้าตัดแบบจำลองไฟเบอร์เป็นหน้าตัดเหล็กเสริมกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น ตามระยะทางแกน y พร้อมทั้งตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุของ แบบจำลองที่ได้แสดงดังภาพที่ 3.3

5.แบบจำลองเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ

จากแบบจำลองเหล็กเสริมที่มีพฤติกรรมไม่ซับซ้อน ก็เริ่มพัฒนาแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง เมื่อเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะภาพที่ 3.1 โดยใช้วิธี Displacement Control ให้การเคลื่อนที่ด้วยแรงอัดในแนวแกนที่ปลายด้านบนของแบบจำลอง โดยที่ปลายด้านบนมีพฤติกรรมแบบยึดแน่น ยอมให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกนเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดจากนี้ จะกล่าวในบทถัดไป

3.3 วิเคราะห์แบบจำลอง

ภายหลังจากทำการศึกษาการใช้โปรแกรมแล้ว ได้นำเอาคำสั่งต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรม มาปรับใช้กับแบบจำลองเหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะ ทำการวิเคราะห์ หารูปแบบของโครงสร้างที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถจำลองพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับ พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด

3.4 สอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบ

นำโครงสร้างที่จำลองพฤติกรรม การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว มาสอบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสอบเทียบผลการทดสอบ 2 งานวิจัยคือ

1. Bae และคณะ, 2005 โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด แบบทิศทางเดียว โดยเลือกสอบเทียบกับชิ้นส่วนทดสอบหมายเลข 10 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม 32.3 มิลลิเมตร ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 5.1.1
2. Bayrak และ Sheikh, 2002 ทำการสอบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้ กับแบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมยืน ขนาด 19.5 มิลลิเมตร ใช้

เหล็ก SD400 20M ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม 4, 5, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ ดังจะแสดงในหัวข้อ5.1.2

3.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อได้ทำการศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสม ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรทการโก่งเดาะของเหล็กเสริม จึงทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมโดยแบ่งแบบจำลอง ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็น 2 แบบจำลองคือ

1. แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว
2. แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวาง

3.6 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

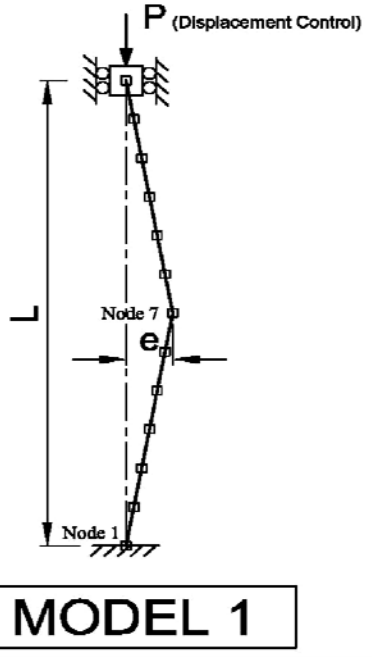
นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ มาสรุปค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ที่ได้จากแบบจำลองแบบที่ 1 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาว และแบบจำลองแบบที่ 2 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวาง พร้อมทั้งแนะนำแนวทางที่จะสามารถศึกษาได้ต่อ จากข้อมูลที่มีในงานวิจัยนี้

บทที่ 4

วิเคราะห์แบบจำลอง

ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์ผล อันเนื่องมาจากเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ ต้องมีการหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ โดยโครงสร้างที่เหมาะสมนี้จะต้องไม่ก่อให้เกิดค่าความเคลื่อนเนื่องจากแบบจำลอง หรือมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดแต่เพียงพอที่จะสามารถ แก้ปัญหาได้ ดังนั้นก่อนที่จะได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง จะต้องมีการทำ Sensitivity test ก่อน เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม ดังจะรายอย่างละเอียดในบทนี้

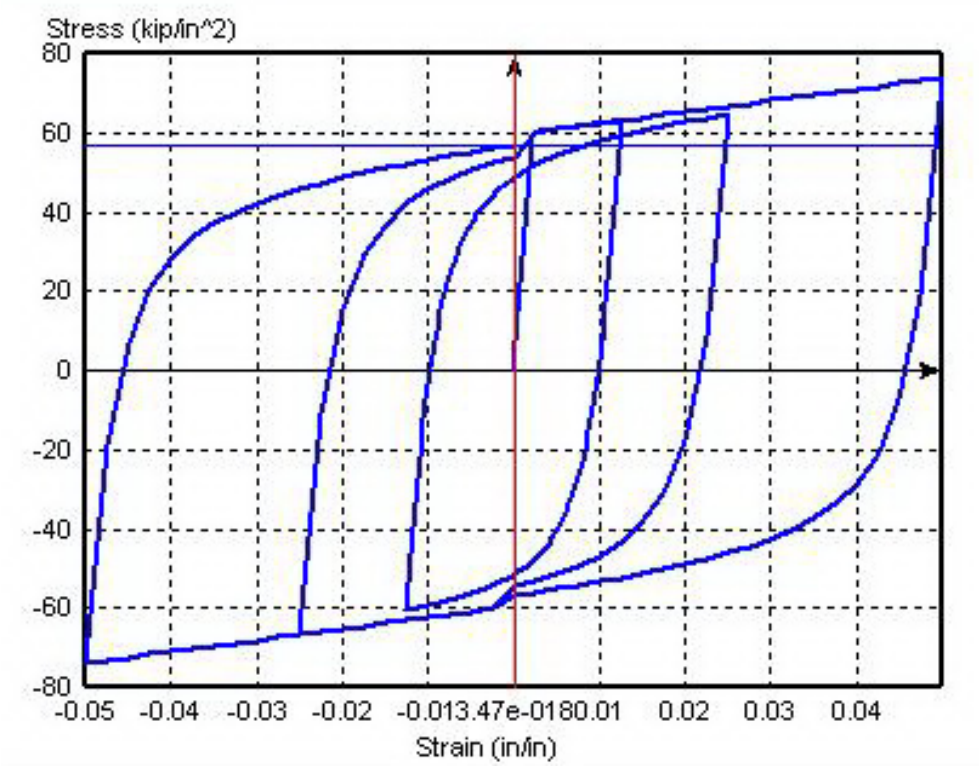
งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เหล็กเสริมตามยาว โดยจำลองพฤติกรรมการโก่งเดาะของโครงสร้างเหล็กเสริมยืน ที่พิจารณาการรับแรงอัดแบบช่วงเดียว โดยแบบจำลองแบบจำลองแบบที่ 1 ให้มีโครงสร้างแบบยึดแน่นที่ปลายด้านล่างและยอมให้มีการเสียรูปในแนวแกนที่ปลายด้านบน โดยที่ตรงกึ่งกลางของโครงสร้าง จะยอมให้มีการเสียรูปทางด้านข้างเริ่มต้น ด้วยอัตราส่วน การเสียรูปทางด้านข้างต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (e/D) เท่ากับ 0.01 ดัง ภาพที่ 4.1 เพื่อนำเข้าสู่พฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะของเสริมยืนอันเนื่องมาจากแรงอัด ในที่นี้ แรงในแนวแกนที่ใช้ในการวิเคราะห์จะให้มีพฤติกรรมแบบ Monotonic ด้วยวิธี Displacement control ที่ปลายด้านบน โดยรายละเอียดของโครงสร้าง ที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 จะกล่าวในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4.1 แบบจำลองแบบที่ 1

4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

ทำการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยใช้เหล็กเสริมยืน เกรดSD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่มีค่าความเค้นที่จุดคราก 444 MPa ความเครียดที่จุดคราก 0.0022 ค่า Young's modulus ของเหล็กเสริม เท่ากับ 202000 MPa และมีพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจุดครากใช้ค่า Tangent Modulus เท่ากับ 1293 Mpa โดยจำลองพฤติกรรมค่าความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริม เป็นแบบ Bilinear โดยอ้างจากแบบจำลองของ Menegotto และ Pinto, (1973) ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 คุณสมบัติความเค้น-ความเครียดที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 (Menegotto และ Pinto, 1973)

4.1.1 จำนวนอิลิเมนต์

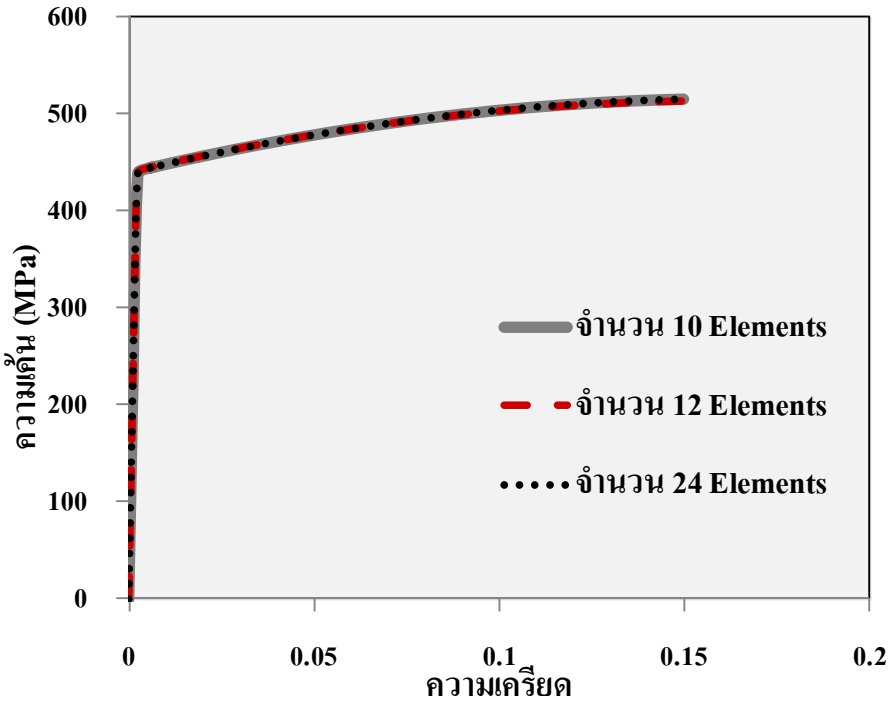
วิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 โดยใช้เหล็กเสริมยืนขนาด 10 มม. ชิ้นส่วนไฟเบอร์ในหน้าตัดทั้งหมด 20 ชิ้น ในการหาจำนวนอิลิเมนต์ที่เหมาะสมได้ทำ Sensitivity test เพื่อหาจำนวนชิ้นส่วนโครงสร้าง ดังแสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วน Stain

hardening ในตารางหมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสเริ่มต้นต่อค่า Tangent modulus ดังสมการที่ 62

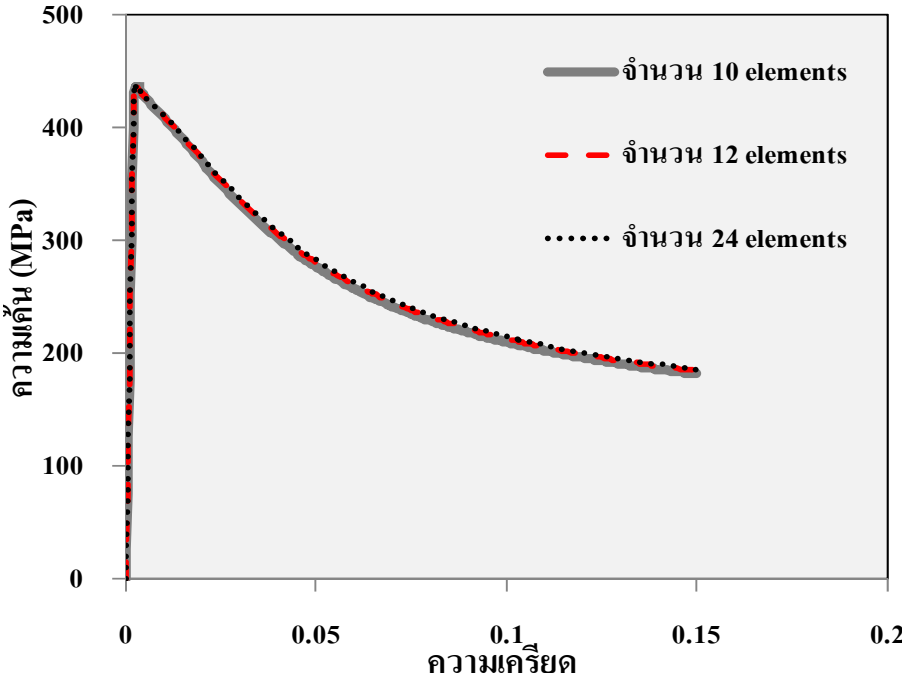
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 เพื่อหาจำนวน Element

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	จำนวนอิลิเมนต์	จำนวนไฟเบอร์	L/D	คุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1			
				ความเค้นคราก (MPa)	ความเครียดคราก	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น (MPa)	ค่าอัตราส่วน Strain hardening
10	10	20	4	444	0.0022	202000	0.0064
			8	444	0.0022	202000	0.0064
	12	20	4	444	0.0022	202000	0.0064
			8	444	0.0022	202000	0.0064
	24	20	4	444	0.0022	202000	0.0064
			8	444	0.0022	202000	0.0064

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 โดยใช้จำนวนอิลิเมนต์ต่างๆกัน 10 ชิ้น, 20 ชิ้น และ 24 ชิ้น เพื่อหาจำนวนอิลิเมนต์ที่เหมาะสมได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนค่าความเค้น-ความเครียดของแต่ละชิ้นอิลิเมนต์ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งที่อัตราส่วนความยาวเหล็กเสริมยืนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม เท่ากับ 4 และ 8 ดังนั้นจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงเลือกใช้จำนวนชิ้นส่วนโครงสร้าง จำนวน 12 อิลิเมนต์ เพื่อให้ง่ายต่อการ พัฒนาแบบจำลองเป็นแบบ 2 ช่วง และ 3 ช่วงต่อไป เพราะทำให้โครงสร้างสมมาตรทั้งแบบ 2 และ 3 ช่วง



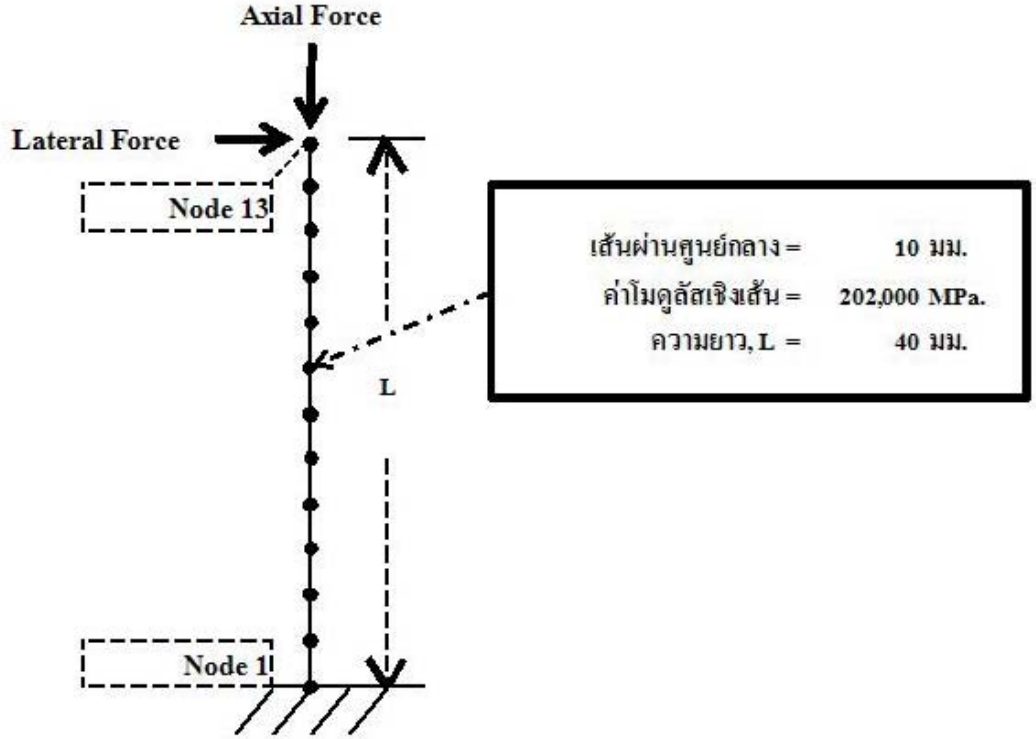
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของแบบจำลองแบบที่ 1 เมื่อจำนวน Element ต่างๆกัน ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4



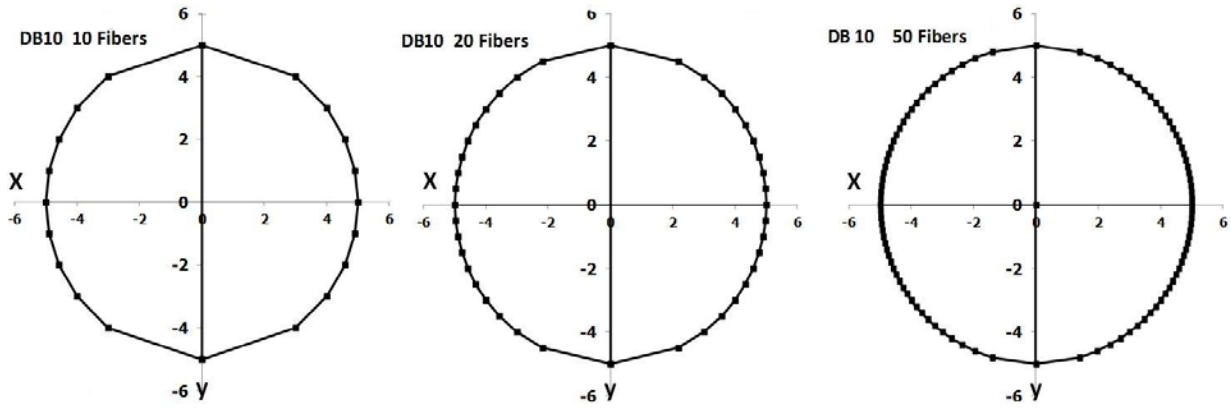
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของแบบจำลองแบบที่ 1 เมื่อจำนวน Element ต่างๆกัน ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8

4.2 จำนวนไฟเบอร์

จากจำนวนอิลิเมนต์ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.1.1 ใช้จำนวนอิลิเมนต์ในการวิเคราะห์แบบจำลอง จำนวน 12 ชิ้น แล้วทำการวิเคราะห์แบบจำลองของเสาดังภาพที่ 4.5 เพื่อหาจำนวนชิ้นส่วนไฟเบอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์จำนวนอิลิเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 วิเคราะห์หาพื้นที่ และโมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดเหล็กเสริม เพื่อหาจำนวนหน้าตัดชิ้นส่วนไฟเบอร์ที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.5 วิเคราะห์แบบจำลองของเสาโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์



ภาพที่ 4.6 รูปแสดงจำนวนชิ้นส่วนไฟเบอร์ต่างๆกันในเหล็กเสริม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองของเสาเพื่อหาจำนวน Fiber

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	อัคราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม	จำนวนอิลิเมนต์	จำนวนไฟเบอร์
10	4	12	10
			20
			50
			100

ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่หน้าตัด และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเสริม จากแบบจำลองของเสา โดยใช้จำนวนไฟเบอร์ 10 ชิ้น, 20 ชิ้น, 50 ชิ้นและ 100 ชิ้น ตามลำดับ ดังแสดงตัวอย่างหน้าตัดไฟเบอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดัง

ภาพที่ 4.6 และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการหาพื้นที่ขนาดหน้าตัดเหล็กเสริมจากสมการที่ 63 และสมการหาค่าโมเมนต์ของความเฉื่อย เหล็กเสริมตามสมการที่ 64 กับผลที่ได้จากแบบจำลองของเสา โดยให้แบบจำลองของเสา มีความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแบบเชิงเส้น เพื่อหาจำนวนชิ้นส่วนหน้าตัดไฟเบอร์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1

$$\text{Area (A)} = \frac{\Pi D^2}{4} \tag{62}$$

$$\text{Moment of inertia (I)} = \frac{\Pi D^4}{64} \tag{63}$$

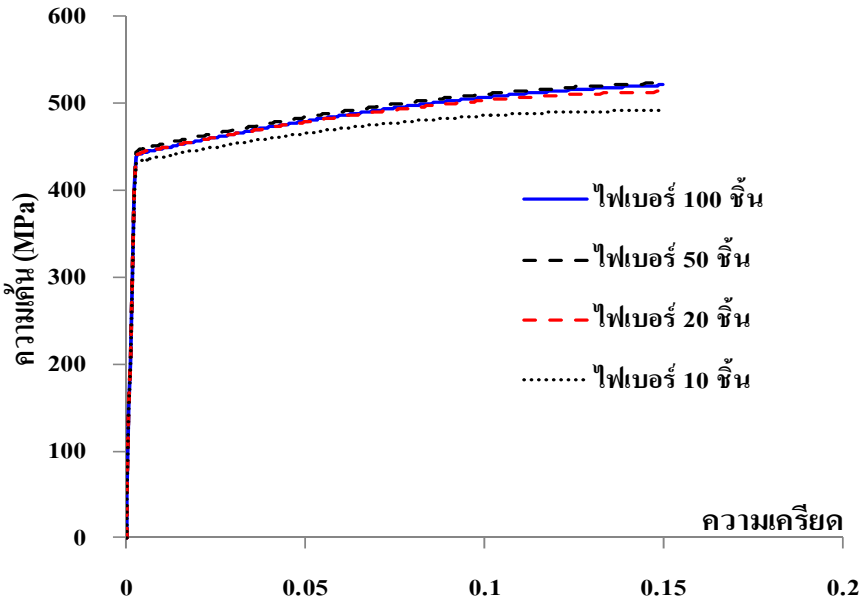
โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

จากวิธีการดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปค่าพื้นที่หน้าตัด และโมเมนต์ของความเฉื่อย ได้ดังตารางที่ 4.3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะพบว่ายิ่งจำนวนชิ้นส่วนที่เพิ่มขึ้น ยิ่งทำให้ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยใกล้ค่าที่ได้จากสมการเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจำนวนชิ้นส่วนหน้าตัดไม่มีผลต่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และที่จำนวนชิ้นส่วนไฟเบอร์ 20 ชิ้น ค่าพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกับ ค่าที่ได้จากสมการมากที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองไฟเบอร์หน้าตัดเท่ากับ 20 ไฟเบอร์ เพราะให้ค่าพื้นที่ และโมเมนต์ของความเฉื่อย ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ

มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% และเมื่อนำแบบจำลองไฟเบอร์ที่มีชิ้นส่วนต่างๆกัน ในแบบจำลองแบบที่1 ในภาพที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าความเค้น-ความเครียดที่ได้ใกล้เคียงกับที่จำนวนชิ้นส่วนไฟเบอร์ที่มากกว่าดังภาพที่ 4.7 อีกทั้งการเลือกใช้จำนวนไฟเบอร์ที่น้อยกว่า ทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบพฤติกรรมในแต่ละตำแหน่ง ในแต่ละชิ้นส่วนไฟเบอร์

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัด และค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของเหล็กเสริม DB10 ที่จำนวนไฟเบอร์ต่างกัน กับค่า Exact solution

เหล็กเสริมตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.	พื้นที่หน้าตัด (มม.^{2})	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่หน้าตัด	โมเมนต์ของความเฉื่อย (มม.^{4})	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโมเมนต์ของความเฉื่อย ของหน้าตัด
Exact solution	78.54		490.87	
จำนวนไฟเบอร์ 10 ชิ้น	75.92	3.33%	441.52	10.06%
จำนวนไฟเบอร์ 20 ชิ้น	77.69	1.17%	471.50	3.95%
จำนวนไฟเบอร์ 50 ชิ้น	77.46	1.37%	488.88	0.41%
จำนวนไฟเบอร์ 100 ชิ้น	77.46	1.37%	488.88	0.41%

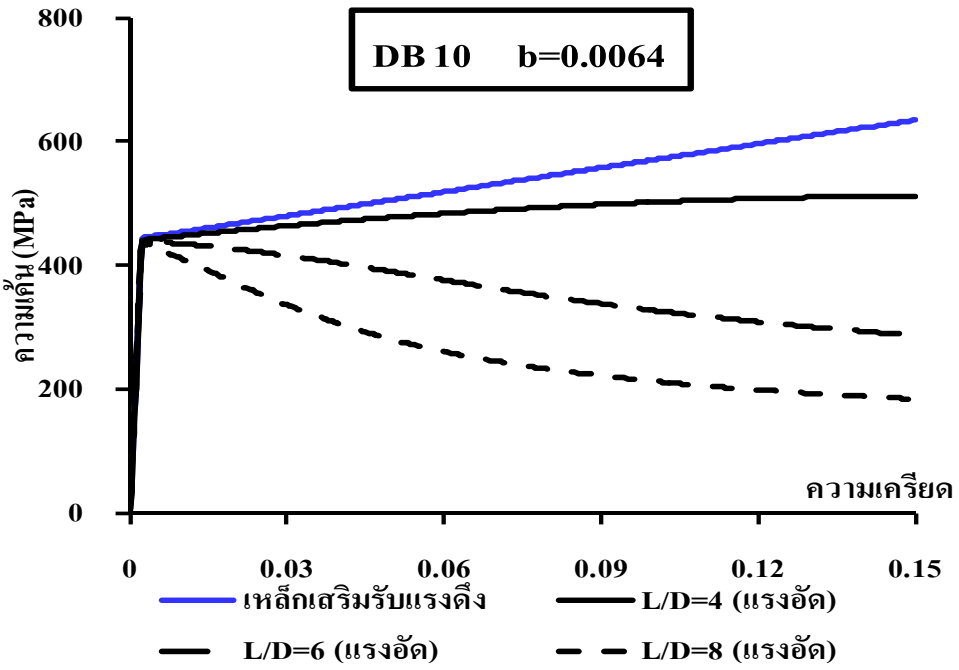


ภาพที่ 4.7 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ใช้จำนวนไฟเบอร์ต่างๆกัน

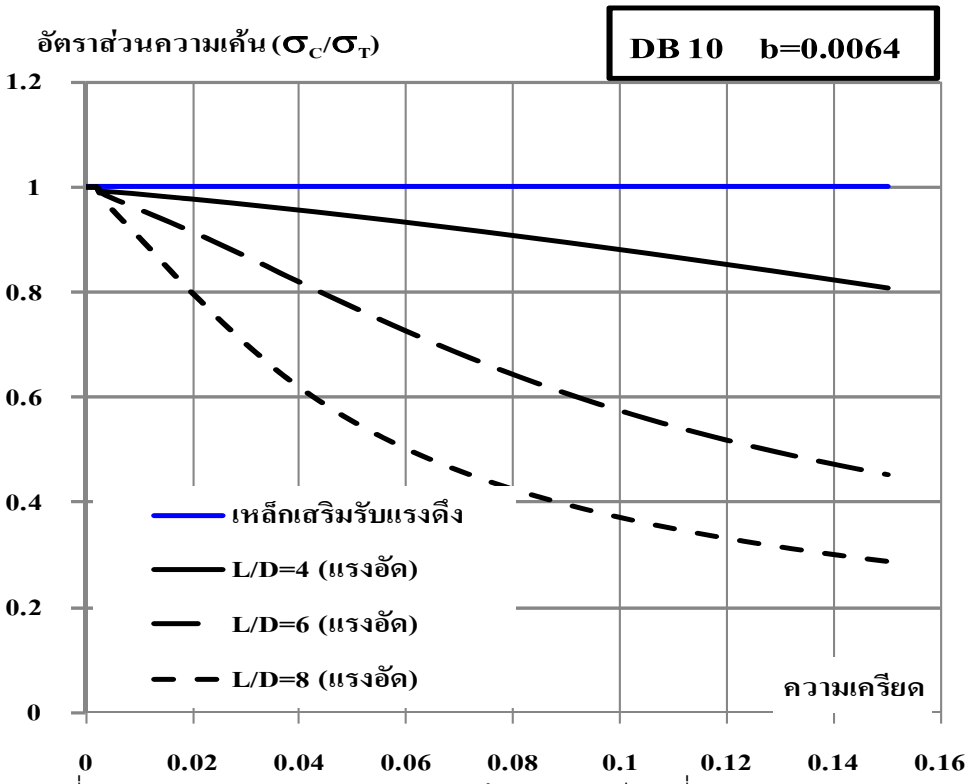
4.3 ความแปรผันของค่าความชันในรูปของอัตราส่วนค่า Strain Hardening

ในการวิเคราะห์ปัญหาเหล็กเสริม ค่าตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือค่าความชันของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด หลังจุดคราก ที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะแทนค่าตัวแปรดังกล่าวด้วยอัตราส่วนค่า Young's modulus (E_S) ต่อ Tangent modulus (E_T) หลังจุดคราก ดังสมการที่ 64 และเพื่อหาค่าความแปรผันของตัวแปรนี้ จึงได้ทำ Sensitivity test เพื่อหาค่าความเกี่ยวเนื่องของอัตราส่วน Strain hardening ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน แล้วนำเสนอในรูปของค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ตามภาพที่ 4.8 และอัตราส่วนความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมดังภาพที่ 4.9 วิเคราะห์ผลของอัตราส่วนค่า Strain hardening ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม โดยทำการวิเคราะห์ที่ อัตราส่วนค่า Strain hardening เท่ากับ 0.0064 และที่ค่าอัตราส่วน Strain hardening ใกล้เคียงกัน แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์จากอัตราส่วน Strain hardening ที่ได้และสามารถนำมาปรับใช้กับแบบจำลองแบบที่ 1 เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้คียงและเหมาะสมกับโครงสร้างเหล็กสริม ที่เกิดการโก่งเดาะมากที่สุด

$$b=\frac{E_S}{E_T} \qquad (64)$$



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมขนาดอัตราส่วน L/D ต่างๆกัน



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน

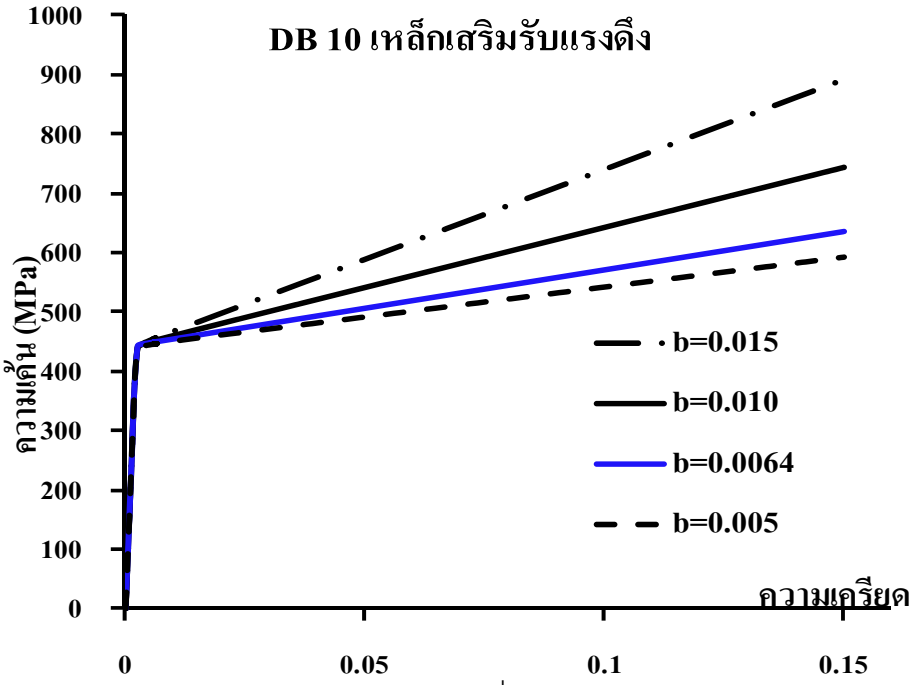
ทำ Sentivity test แบบจำลองแบบที่ 1 ดัง ตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วน Strain hardening จะให้ค่าความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อแสดงผลอยู่ในรูปความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ดังจะเห็นได้ชัดเจนในภาพที่ 4.10 เมื่อเหล็กเสริมในแบบจำลองแบบที่ 1 รับแรงดึงที่ปลายด้านบน ภาพที่ 4.11 เหล็กเสริมรับแรงอัดแล้วเกิดการโก่งเดาะที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 ให้แนวโน้มความสัมพันธ์ดังนี้ ที่อัตราส่วนค่า Strain hardening มาก ค่าความเค้นหลังจุดคราก ก็จะสูงตาม และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดความเค้นประลัย ที่ความเครียดเท่ากับ 0.15 ดังภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.15

จากค่าความสัมพันธ์เหล่านี้นำมาพิจารณาในรูปของ อัตราส่วนความเค้นอัด (σ_C) ต่อความเค้นดึง (σ_T) ที่ค่าความเครียดใดๆ จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนความเค้นความเครียดเมื่ออยู่ในรูปของ ค่า Normalized แล้ว ผลที่ได้จะมีค่าความแตกต่างน้อยมาก เมื่อเทียบกับอัตราส่วนความเค้นดึงที่เกิดขึ้นของแต่ละค่าอัตราส่วน Strain hardening และยิ่งให้ค่าใกล้เคียงกันมากที่อัตราส่วน L/D มาก ดังเช่นที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 ณจุดที่ ค่าความเครียดอัด 0.15 ดังภาพที่ 4.16 หรือที่ค่า L/D อื่นๆ ดังภาพที่ 4.14และ ภาพที่ 4.12 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของค่าอัตราส่วน Strain hardening ที่เราเลือกใช้นั้น ควรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเหล็กเสริม ที่ได้มาจาก

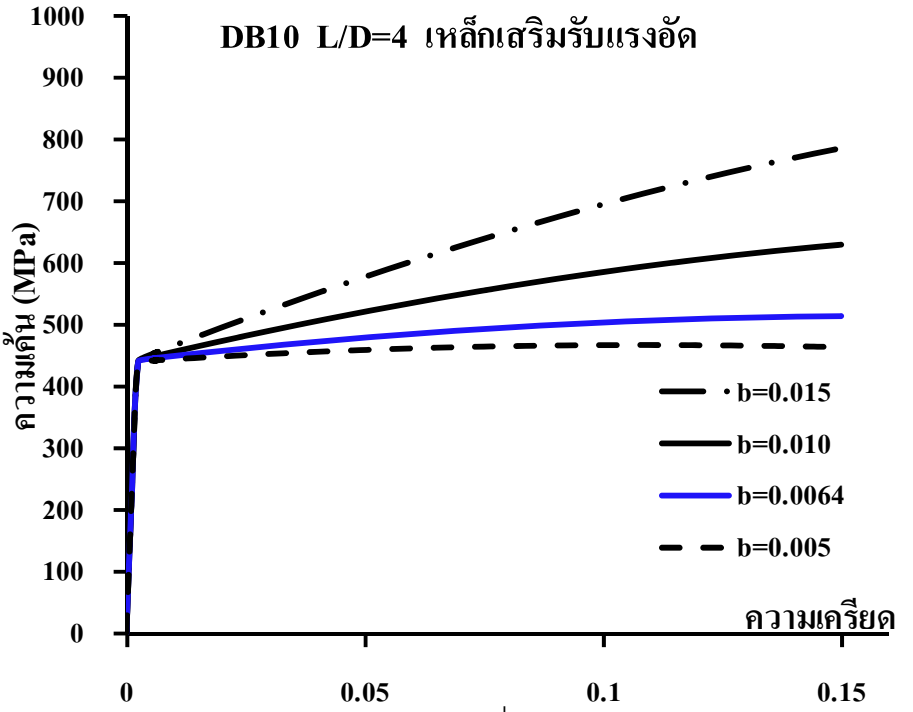
การทดสอบ หรือการจำลองแบบจำลอง โดยใช้ค่าอัตราส่วน Strain Hardening ที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ หลักการทฤษฎีพลังงานในการหาค่าอัตราส่วน Strain hardening ดังจะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าอัตราส่วน Strain hardening ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1

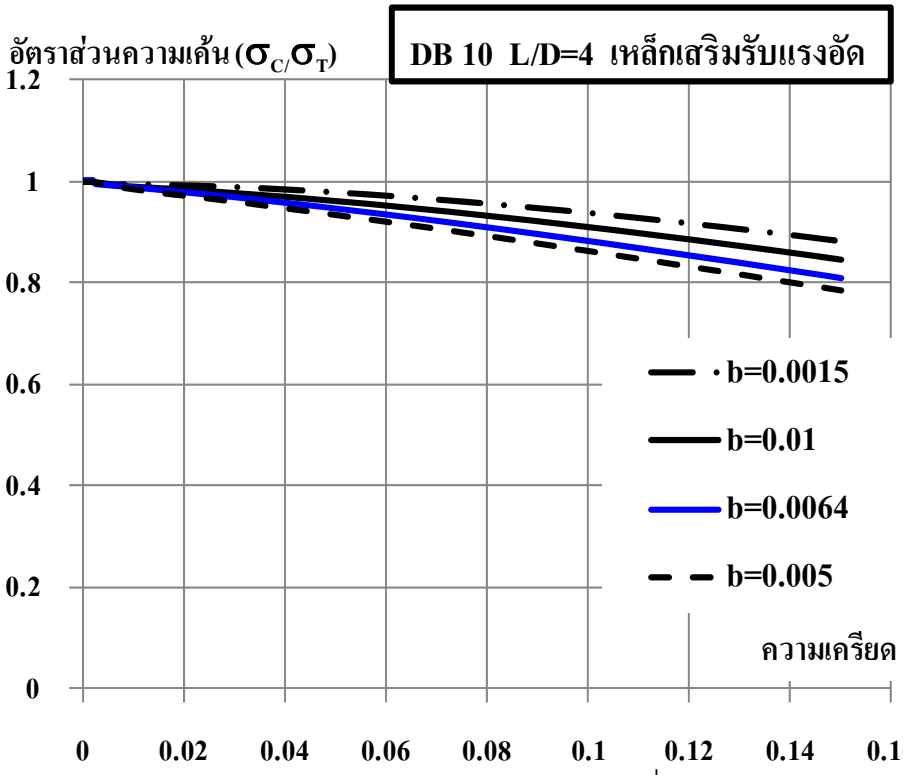
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	L/D	คุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1			
		ความเค้นคราก (MPa)	ความเครียดคราก	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น (MPa)	ค่าอัตราส่วน Strain hardening
10	4	444	0.0022	202000	0.0064
					0.005
					0.010
					0.015
	6	444	0.0022	202000	0.0064
					0.005
					0.010
					0.015
	8	444	0.0022	202000	0.0064
					0.005
					0.010
					0.015



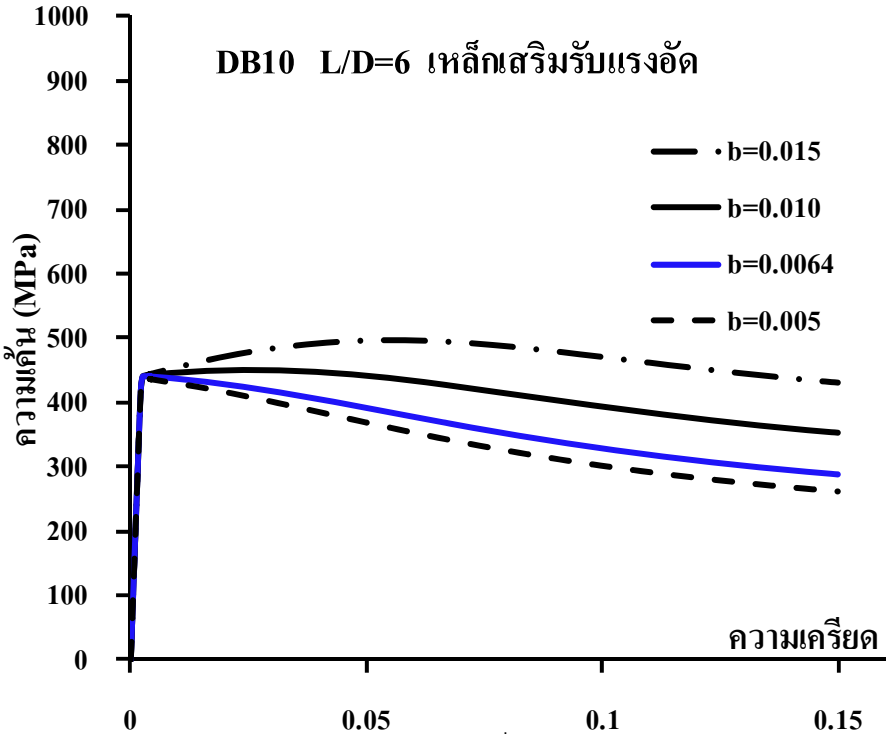
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดึงที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน ของแบบจำลองแบบที่ 1



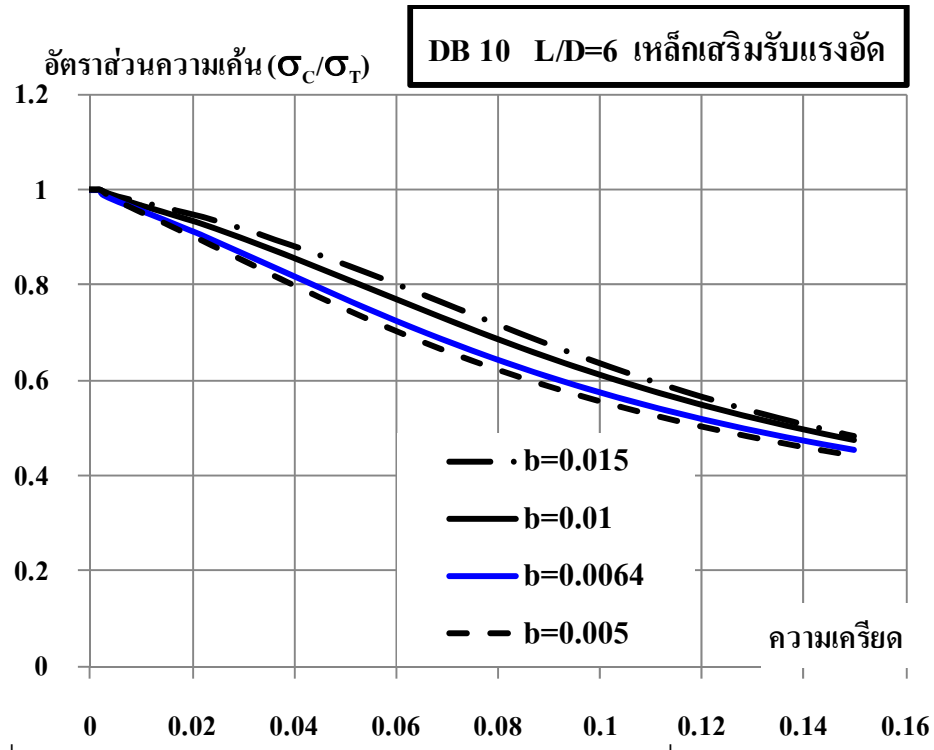
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=4



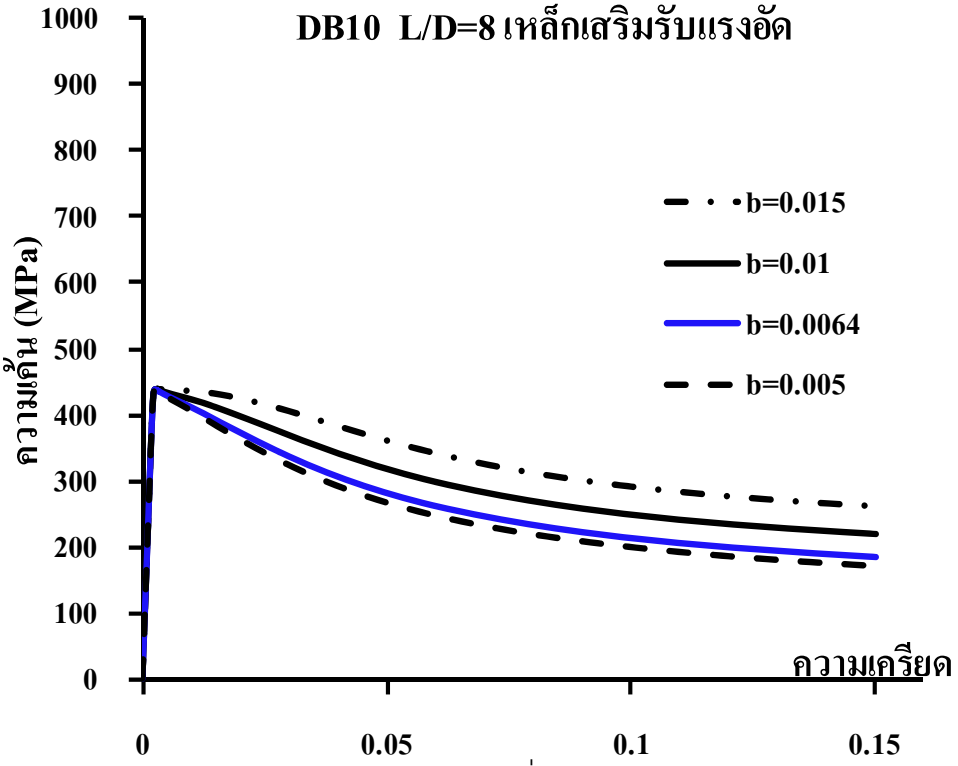
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดอัด ที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=4



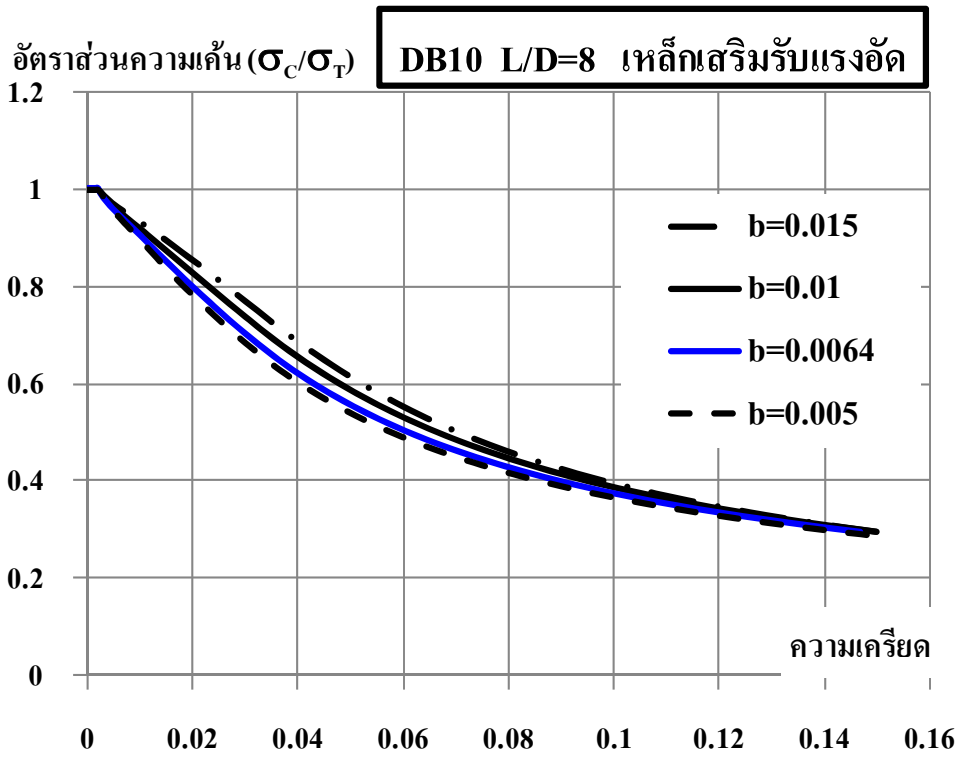
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=6



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดอัด ที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=6



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดอัดที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=8



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียดอัด ที่อัตราส่วน Strain hardening ต่างๆกัน เมื่ออัตราส่วน L/D=8

บทที่ 5

สอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบ

จากแบบจำลองที่ได้ทำการศึกษาข้างต้น ก่อนที่จะนำแบบจำลองมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้ทำการสอบเทียบแบบจำลอง กับผลการทดสอบของงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ได้จากแบบจำลอง และผลที่ได้จากโครงสร้างจริง ดังจะแสดงดังต่อไปนี้

5.1 การสอบเทียบแบบจำลองแบบที่ 1

นำผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ทำการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดและพิจาณาผลอันเนื่องมาจากการโก่งเดาะ ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้

5.1.1 ผลการทดสอบของ Bae และคณะ, 2005

จากการทำ Sensitivity test ค่าที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 ได้นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยเปรียบเทียบกับการทดสอบของ Bae และคณะ, 2005 โดยค่าตัวแปรต่างๆ ที่ Bae และคณะ ได้มาจากการทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อย No. 10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.3 มิลลิเมตร ได้แสดงในตารางที่ 5.1 โดยนำค่าที่ได้จากการทดสอบ มาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่1 ด้วยอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม (L/D) ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และหาค่าอัตราส่วน Strain hardening ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ จากทฤษฎีอนุรักษ์พลังงาน โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด จากผลการทดสอบของเหล็กเสริมรับแรงดึง เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่1 เหล็กเสริมรับแรงดึง แล้วหาพื้นที่ใต้กราฟจากภาพที่ 5.1 จากการหาพิ้นที่ใต้กราฟได้ค่าอัตราส่วน Strain hardening ของกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดหลังจุดคราก เท่ากับ 0.0093 ดังแสดงในตาราง นำค่าคุณสมบัติของอัตราส่วน Strain hardening หลังจุดคราก มาใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสอบเทียบ ของเหล็กเสริมรับแรงอัดที่ L/D ต่างๆกัน ด้วยแบบจำลองแบบที 1 จะได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 5.2

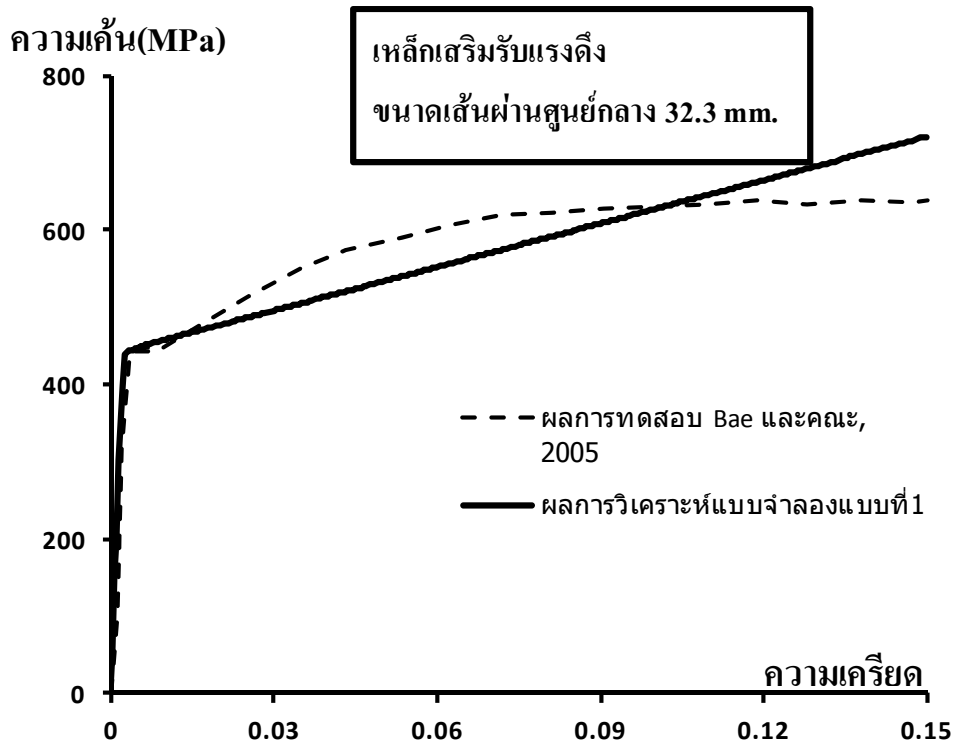
จากผลที่ได้จากการสอบเทียบจะเห็นว่า ที่ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 ถึง L/D เท่ากับ 6 จะให้ผลของความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงแล้ว ผลอันเนื่องมาจากพื้นผิวของเหล็กข้ออ้อย น่าจะมีส่วนช่วยในเรื่องของกำลัง ต้านทานการเกิดการโก่งเดาะในช่วงเริ่มต้น ซึ่งแบบจำลองนี้ไม่ได้จำลองถึงส่วนที่เป็นพื้นที่ผิวขรุขระนั้น ดังนั้นที่อัตราสวน L/D เท่ากับ 4 เป็นช่วงที่เหล็กเสริมมีพฤติกรรมต้านทานการเสียรูปเริ่มต้นมากพอ จะให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างกับผลทดสอบมากที่สุด ณ จุดกำลังประลัยดังภาพที่ 5.2 และภาพที่ 5.3 ซึ่งจากค่าที่ได้แสดงค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 20% และที่อัตราส่วนความสัมพันธ์ L/D ที่มากขึ้น จนกระทั่งถึงที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 12 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบที่ 1 จะให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบของ Bae และคณะ เพราะเหล็กเสริมสามารถเกิดช่วง Degradation ได้ง่ายกว่า ที่อัตราส่วน L/D น้อย

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าตัวแปรจากผลการทดสอบของ Bae และคณะ, 2005 No.10

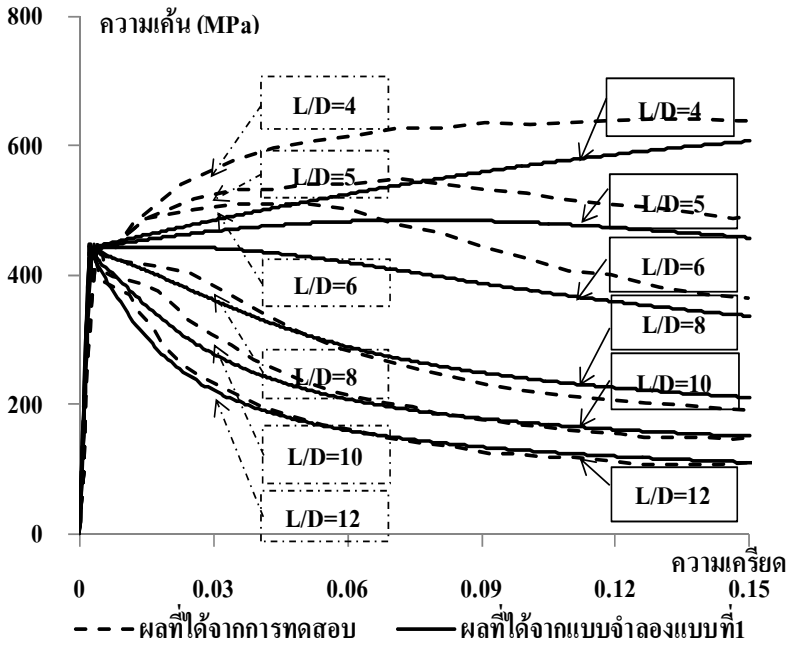
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	เหล็กเสริมรับแรงอัดช่วงอิลาสติก			เหล็กเสริมรับแรงอัดหลังจุดคราก		
	ความเค้นคราก (MPa)	ความเครียดคราก	ค่า Young's Modilus (MPa)	ค่าความเครียดที่เริ่มต้น ช่วง Strain hardening	ค่าความเค้นประลัย (MPa)	ค่าความเครียดประลัย
32.3	444	0.0022	202000	0.0091	638	0.158

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 ที่นำมาสอบเทียบกับผลการทดสอบของ Bae และคณะ, 2005

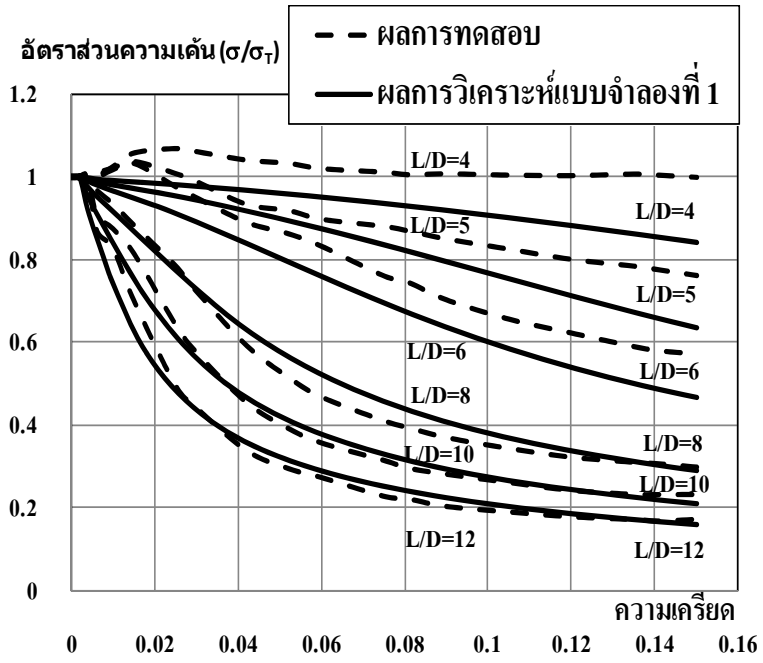
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	จำนวนอิลิเมนต์	จำนวนไฟเบอร์	L/D	คุณสมบัติของแบบจำลองแบบที่ 1			
				ความเค้นดราก (MPa)	ความเครียดดราก	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น	ค่าอัตราส่วน Strain Hardening
32.3	12	20	4	444	0.0022	202000	0.0093
			5	444	0.0022	202000	0.0093
			6	444	0.0022	202000	0.0093
			8	444	0.0022	202000	0.0093
			10	444	0.0022	202000	0.0093
			12	444	0.0022	202000	0.0093



ภาพที่ 5.1 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32.3 มม.



ภาพที่ 5.2 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของ Bae และคณะ,2005 กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม 32.3 มม.



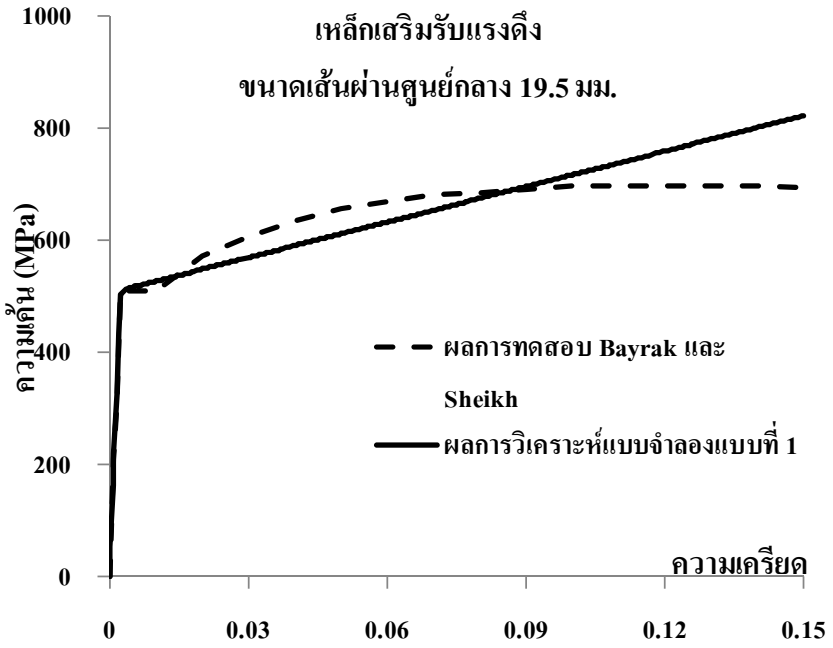
ภาพที่ 5.3 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของ Bae และคณะ,2005 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหล็กเสริม ในรูปของความสัมพันธ์ในอัตราส่วนความเค้น-ความเครียด

5.1.2 ผลการทดสอบ Bayrak และ Sheikh, 2002

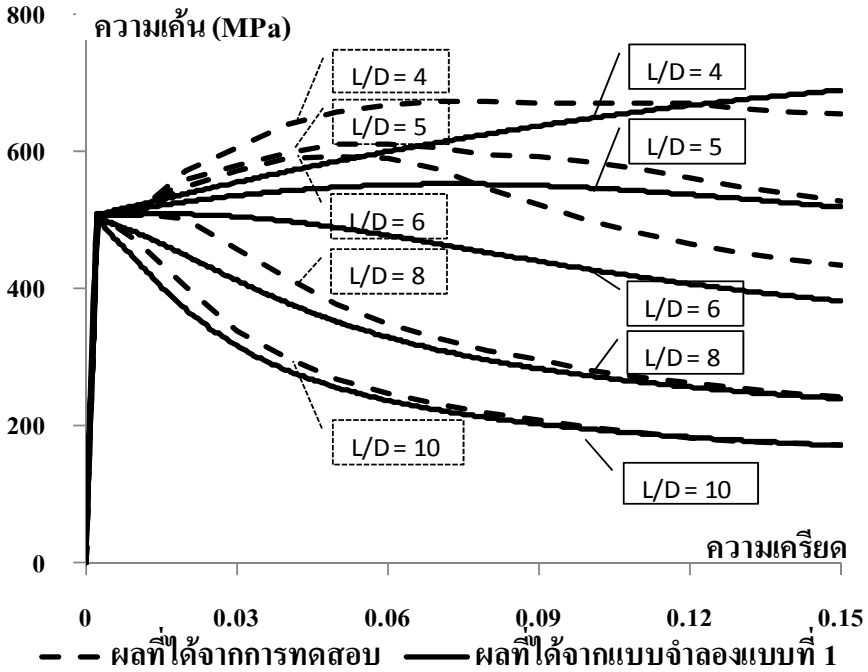
เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 กับผลการทดสอบของ Bayrak และ Sheikh ที่ทำการทดสอบเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงและแรงอัด โดยใช้เหล็กเส้นเกรด 400 ขนาด 20M ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.5 มม.ที่ค่าอัตราส่วน L/D ต่างๆกัน ดังแสดงตารางที่ 5.3 และหาค่าอัตราส่วน Strain hardening จาก กฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยทำการหาพื้นที่ใต้กราฟ เหล็กเสริมรับแรงดึงของ Bayrak และ Sheikh, 2002 เท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของเหล็กเสริมรับแรงดึง ที่ได้จากแบบจำลองแบบที่ 1 โดยได้ค่าอัตราส่วน Strain hardening เท่ากับ 0.0097 ดังจะเห็นจากภาพที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 แสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 1 เพื่อทำการเปรียบเทียบที่ได้จากการทดสอบของ Bayrak และ Sheikh

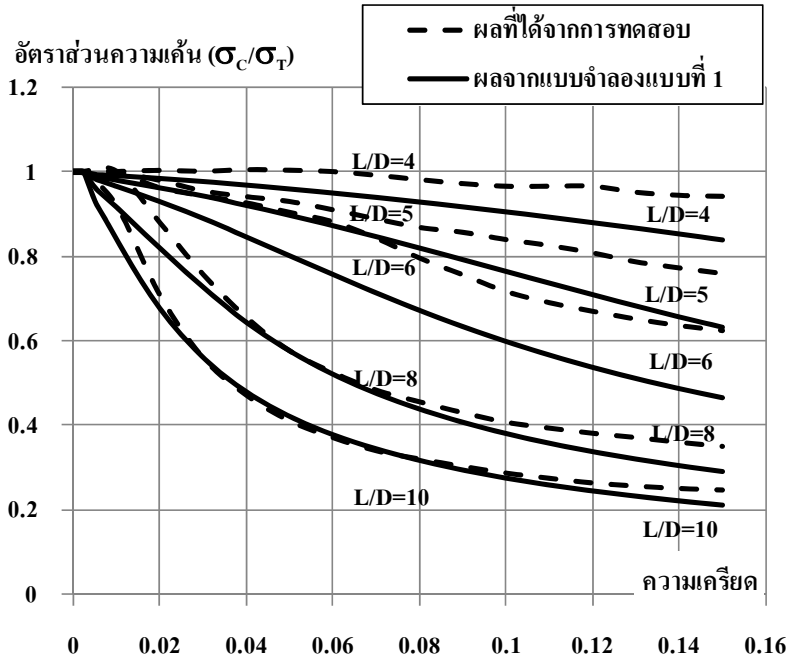
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	จำนวนอิลิเมนต์	จำนวนไฟเบอร์	L/D	คุณสมบัติวัสดุ			
				ความเค้นดราก (MPa)	ความเครียดดราก	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น	ค่าอัตราส่วน Strain Hardening
19.5	12	20	4	511	0.00235	217500	0.0097
			5	511	0.00235	217500	0.0097
			6	511	0.00235	217500	0.0097
			7	511	0.00235	217500	0.0097
			8	511	0.00235	217500	0.0097
			9	511	0.00235	217500	0.0097
			10	511	0.00235	217500	0.0097



ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.5 มม.



ภาพที่ 5.5 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ ผลการทดสอบของ Bayrak และ Sheikh, 2002 กับผลที่การวิเคราะห์ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม 19.5 มม.



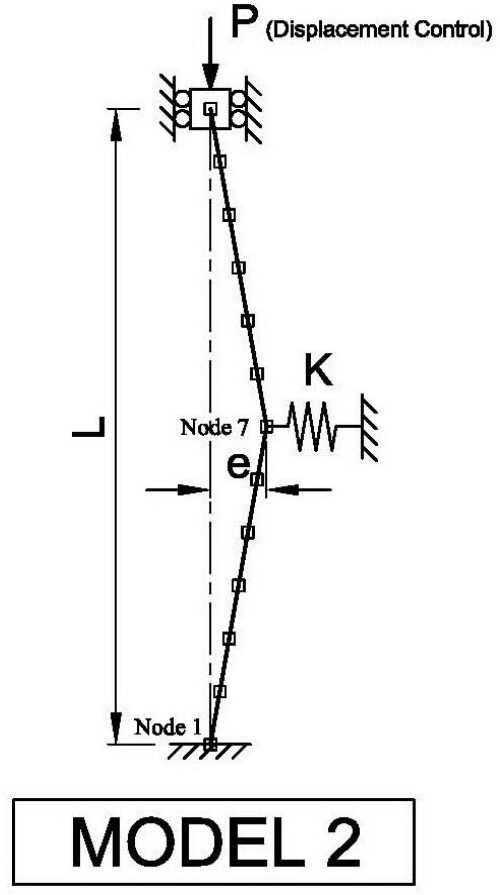
ภาพที่ 5.6 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของ Bayrak และ Sheikh, 2002 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหล็กเสริม ในรูปของความสัมพันธ์ในอัตราส่วนความเค้น-ความเครียด

ผลที่ได้จะเห็นได้ว่าทีอัตราส่วน L/D ต่ำกว่า 8 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแตกต่างจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดสอบ แต่เมื่อค่าอัตราส่วน L/D มากกว่า 6 ตั้งแต่ 8 ขึ้นไป จะให้ค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบการทดสอบของ Bae และคณะ ที่ได้กล่าวมาก่อน เมื่อพิจารณาในรูปของความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ดังภาพที่ 5.6 จะเห็นว่าช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อเทียบกับผลการทดสอบมากที่สุด คือที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 6 มีค่าความคลาดเคลื่อน ณ จุดความเครียดประลัยประมาณ 20% และค่าความเคลื่อนที่อัตราส่วน L/D มาก ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองแบบที่ 1 .สามารถแสดงพฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบเหล็กเสริมรับแรงอัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน L/D สูง ที่สามารถนำเข้าสู่พฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะในเหล็กเสริมได้ง่ายกว่าที่ L/D ต่ำ

5.2 แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่พิจารณาผลการต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างอันเนื่องมาจากเหล็กปลอก แบบจำลองแบบที่ 2

จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 ที่ได้กล่าวในหัวข้อ 6.1 ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมยืน โดยไม่ได้พิจารณาผลอันเนื่องมาจากเหล็กปลอก แต่ในหัวข้อนี้แบบจำลองแบบที่ 2 จะเพิ่มการพิจารณาผลการต้านทานการเสียรูปทางด้านข้าง อันเนื่องมาจากการค้ำยันของเหล็กปลอก

แบบจำลองแบบที่ 2 จะมีจุดรองรับแบบยึดแน่นด้านล่าง และที่ปลายด้านบนจะต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างและการหมุน ยอมให้มีการเสียรูปในแนวแกน โดยเลือกใช้วิธีให้แรงในแนวแกนแบบ Monotonic ด้วยวิธี Displacement control ให้เหมาะสมกับปัญหาที่วิเคราะห์แบบ Non-linear เหมือนแบบจำลองแบบที่ 1 แต่จะเพิ่มผลของค่าสติฟเนสของสปริง (K) เข้ามา ที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงความยาว ภายใต้สมมติฐานว่าค่าสติฟเนสของสปริงคือ ค่าตัวแปรแสดงความต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กปลอกดังภาพที่ 5.7



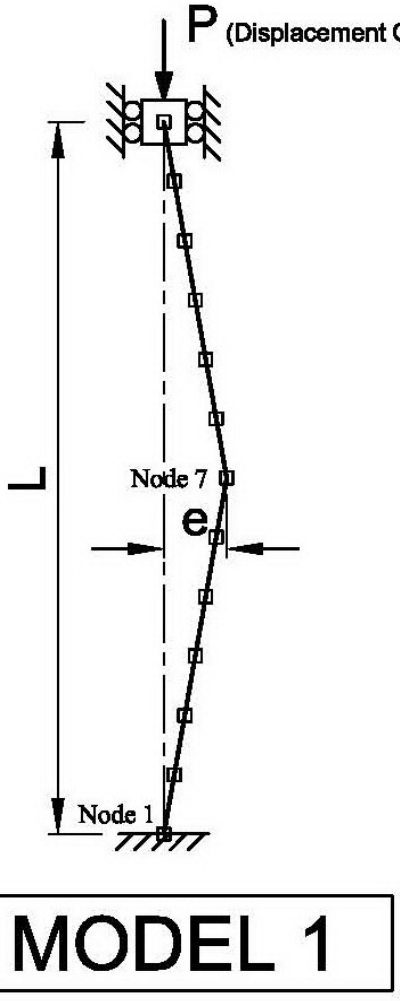
ภาพที่ 5.7 แบบจำลองแบบที่ 2

บทที่ 6

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำผลการศึกษา Sensitivity Test จากบทที่แล้ว นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 แบบจำลองของเหล็กเสริมที่ไม่พิจารณาผลของการค้ำยันทางด้านข้าง และแบบจำลองแบบที่ 2 แบบจำลองของเหล็กเสริมที่พิจารณาผลของการค้ำยันทางด้านข้าง

6.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1



ภาพที่ 6.1 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกดแบบช่วงเดียวที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาค่าตัวแปรสำคัญ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมนั้น จะประกอบด้วยค่าอัตราส่วน L/D และค่าความเค้นที่จุดคราก (F_y) โดยงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองแบบที่ 1 ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงกด ที่เกี่ยวข้องกับค่าตัวแปรข้างต้น แล้ววิเคราะห์ผลของพฤติกรรมในรูปของ อัตราส่วนความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้น และรูปของค่าอัตราส่วนความเค้น (σ_C/σ_T)-ความเครียด ในแบบจำลองแบบที่ 1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน แล้วนำไปพัฒนาเพื่อสืบค้น พฤติกรรมที่เกี่ยวเนื่องกันของเหล็กเสริมตามขวาง โดยใช้แบบจำลองแบบที่ 2 ต่อไป

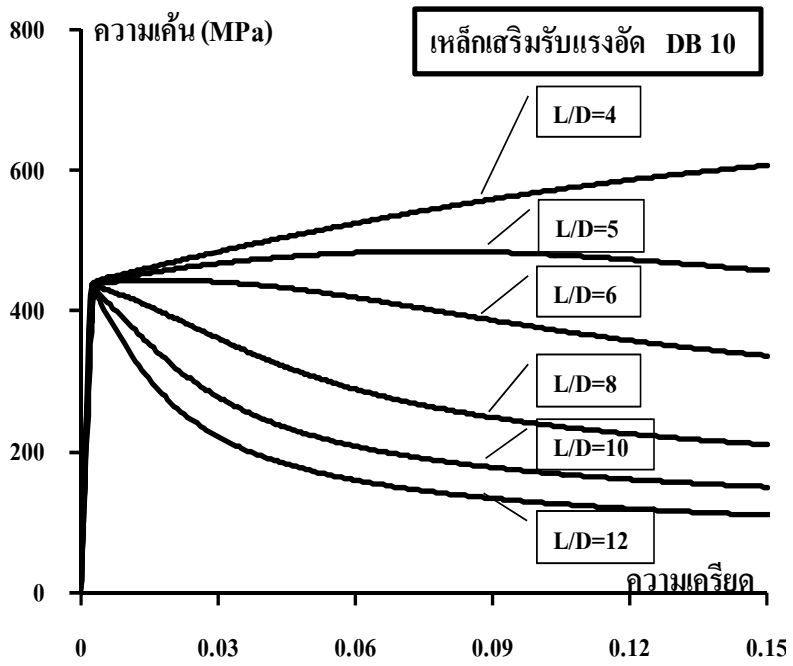
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองของเหล็กเริมรับแรงกดที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง จะแสดงผลการวิเคราะห์ตามหัวข้อต่างๆดังนี้

6.1.1 อัตราส่วนความยาวเหล็กเสริมยืนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม (L/D)

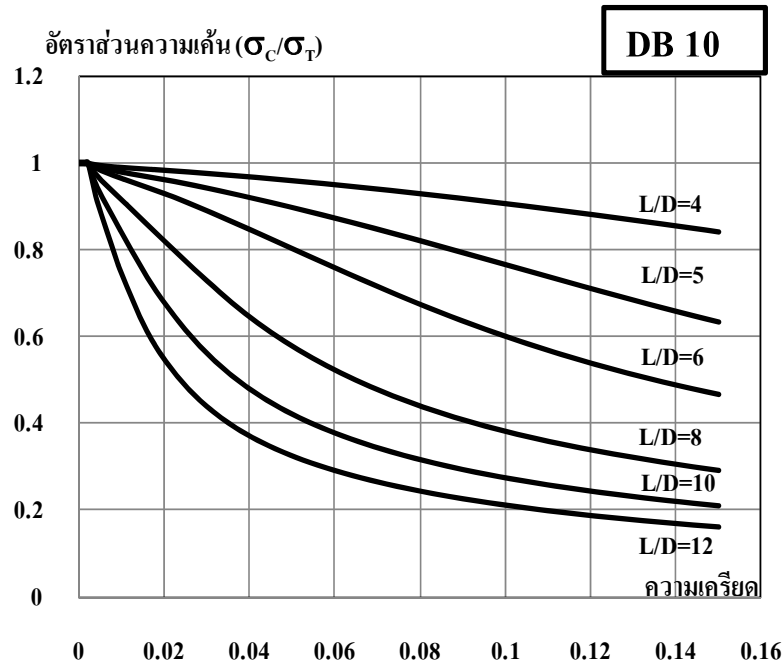
ในการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกด ที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง โดยกดที่ปลายด้านบน กดแบบจำลองเหล็กเสริมจนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะ ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน โดยค่าที่ใช้ในแบบจำลอง ดังตารางที่ 6.1 แล้วแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ดังรูป

ตารางที่ 6.1 ตารางที่แสดงค่าตัวแปรและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ใน แบบจำลองแบบที่ 1 ที่ค่าอัตราส่วน L/D ต่างๆกัน

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	L/D	คุณสมบัติของเหล็กเสริม			
		ความเค้นคราก (MPa)	ความเครียดคราก	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น	ค่าอัตราส่วน Strain Hardening
10	4	444	0.0022	202000	0.0093
	5	444	0.0022	202000	0.0093
	6	444	0.0022	202000	0.0093
	8	444	0.0022	202000	0.0093
	10	444	0.0022	202000	0.0093
	12	444	0.0022	202000	0.0093



ภาพที่ 6.2 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.



ภาพที่ 6.3 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

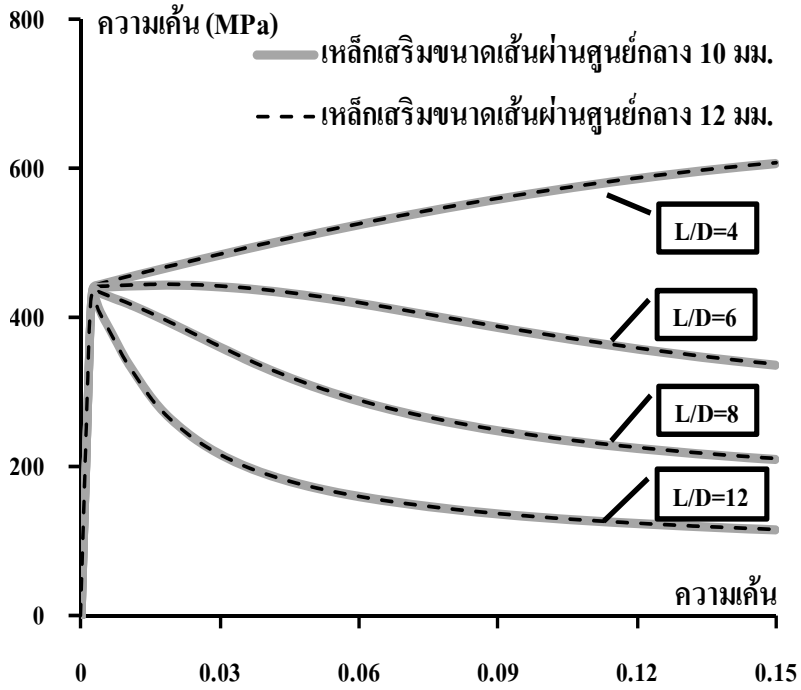
6.1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (D)

จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 1 ที่ขนาด L/D ต่างๆกัน ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการโก่งเดาะที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจึงใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ผล โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบจำลองที่แตกต่างกัน แต่พิจารณาที่อัตราส่วน L/D เท่ากัน แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อหาว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ส่งผลต่อพฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะด้วยหรือไม่ โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ ขนาเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมขนาด 10 มิลลิเมตร, 12 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6.2

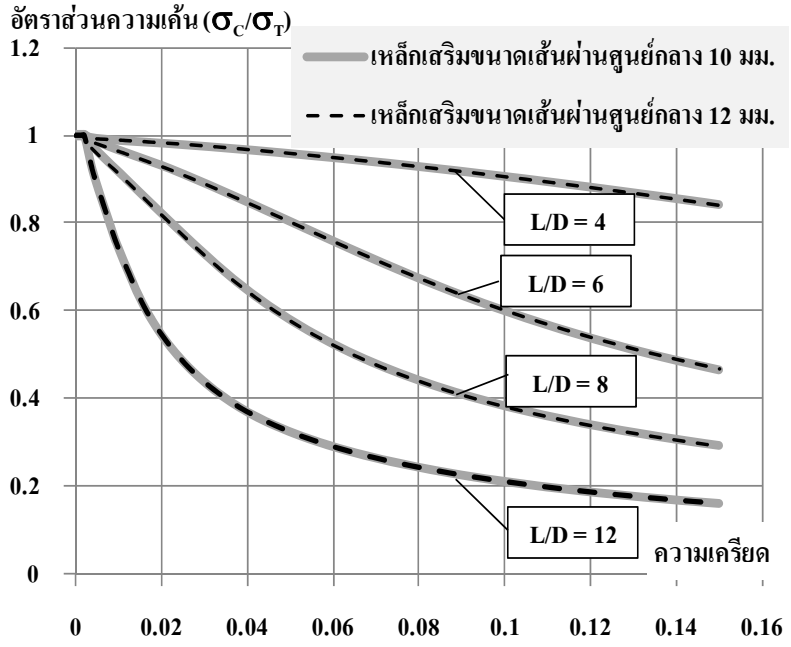
จากผลที่ได้นำมาวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อแบบจำลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆ โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน แล้วนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้ดังภาพที่ 6.4 หรือจะเปรียบเทียบอยู่ในรูปของอัตราส่วนความเค้น (σ_C/σ_T)-ความเครียดดังภาพที่ 6.5 เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ค่าที่กำลังที่ลดลง เนื่องมาจากการโก่งเดาะ ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกัน แล้วเปรียบเทียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆกัน

ตารางที่ 6.2 ค่าแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยืน ที่อัตราส่วน L/D ต่างๆกันที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

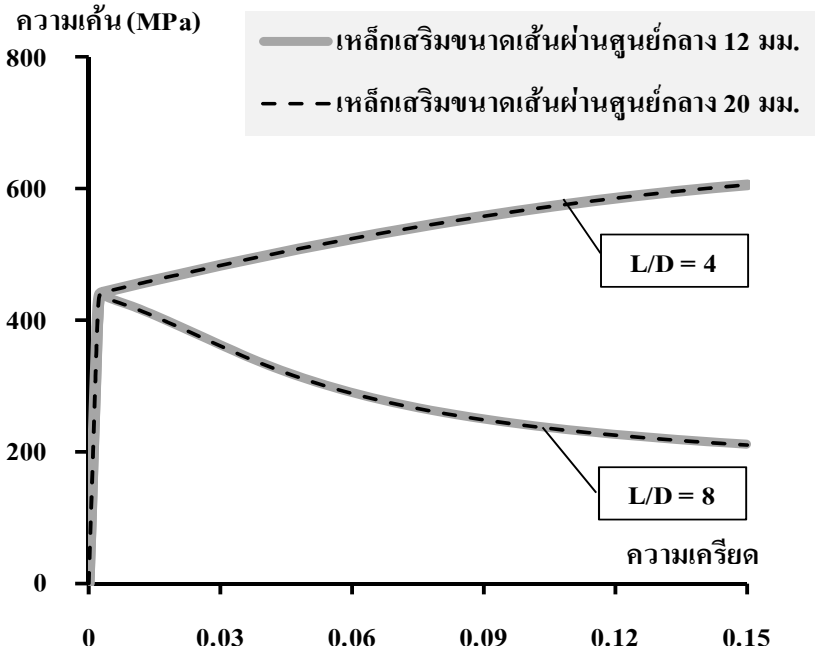
ค่าอัตราส่วน L/D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมยืน (มม.)		
L/D	DB10	DB12	DB20
	4	4	4
	6	6	
	8	8	8
	12	12	



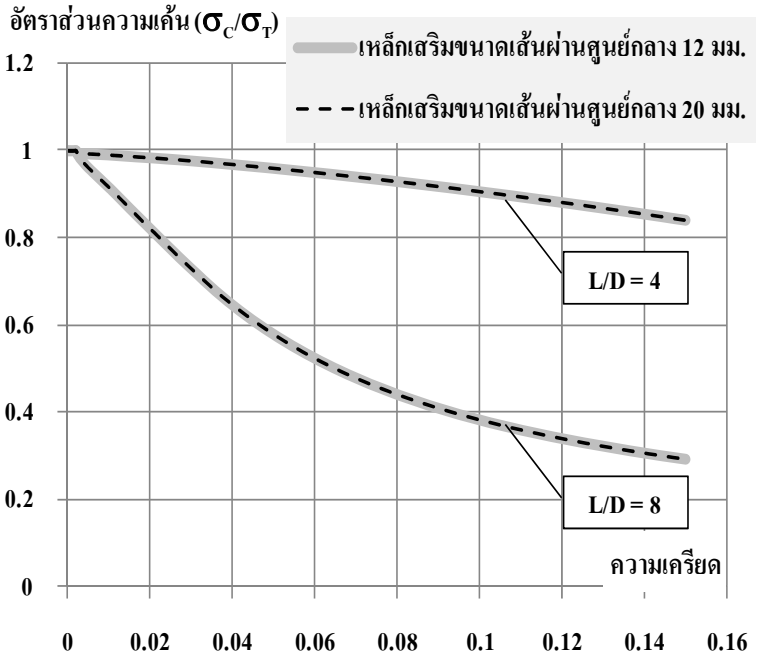
ภาพที่ 6.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 12 มม. ที่อัตรส่วน L/D ต่างๆกัน



ภาพที่ 6.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 12 มม. ที่อัตรส่วน L/D ต่างๆกัน



ภาพที่ 6.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. และ 20 มม. ที่อัตรส่วน L/D เท่ากับ 4 และ 8



ภาพที่ 6.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. และ 20 มม. ที่อัตรส่วน L/D D เท่ากับ 4 และ 8

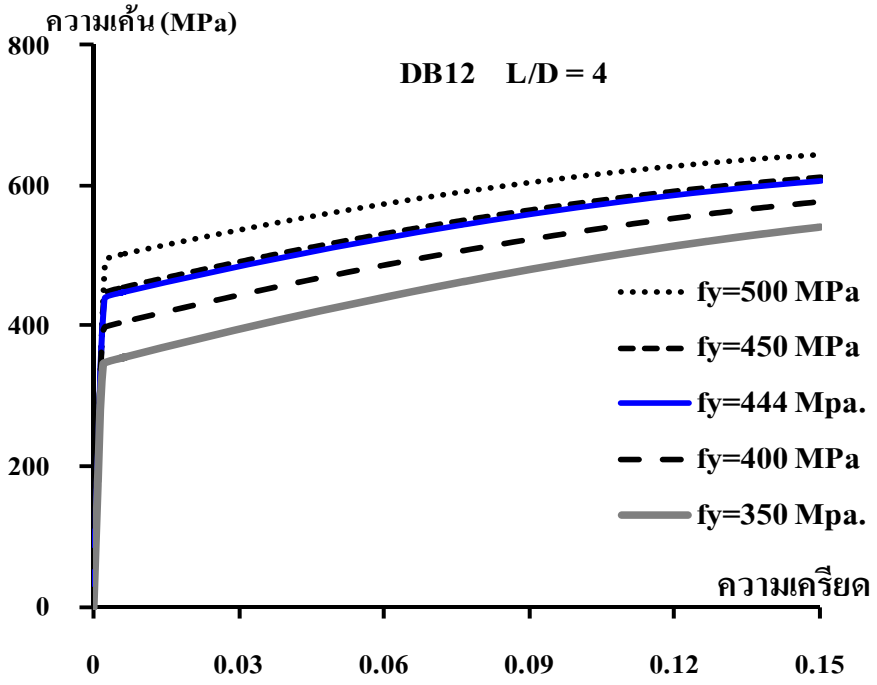
6.1.3 กำลังของเหล็กเสริม F_y

จากงานวิจัยที่มีมาก่อน ได้พิจารณาเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อเหล็กเสริม นอกจาก อัตราส่วน L/D แล้วยังมีค่าความเค้นครากอีกด้วย แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ ได้ใช้เหล็กเสริมเกรด SD 40 ในการวิเคราะห์ตั้งแต่ต้น จึงเลือกทำการศึกษาค่าจุดคราก ที่มีความเค้นอยู่ในช่วง 350 – 500 MPa เพื่อตรวจสอบว่า ในกรณีที่กำลังของเหล็กเสริมที่มาจากโรงงาน อาจคลาดเคลื่อนจากที่ได้ในผลทดสอบ เพื่อนำมาเป็นกรณีศึกษาสำหรับเหล็กเกรด SD 40 ว่าผลของค่าความเค้น และความเครียดที่จุดคราก (ε_y,σ_y) มีความสำคัญต่อพฤติกรรมแบบจำลองแบบที่ 1 กรณีที่เหล็กเสริมไม่มีการค้ำยันทางด้านข้างเนื่องจากเหล็กปลอก มากน้อยเพียงใด ดังจะแสดงผลจากการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 6.3 ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 และ 8 ที่ใช้คุณสมบัติของเหล็กเสริมต่างๆกัน

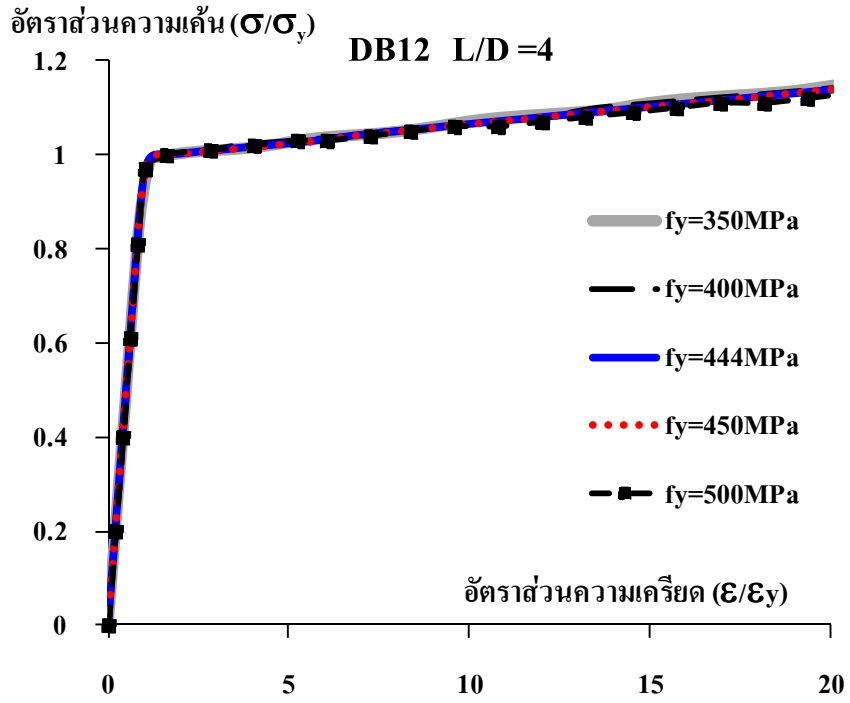
นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ มาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดังภาพที่ 6.8 และความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น (σ/σ_y)-ความเครียด ($\varepsilon/\varepsilon_y$) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 ดังภาพที่ 6.9 ในกรณีที่เกิด Strain hardening และที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 ในกรณีที่เกิดการโก่งเดาะ ในภาพที่ 6.11

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ ในการวิเคราะห์ที่ค่าจุดครากต่างๆกัน

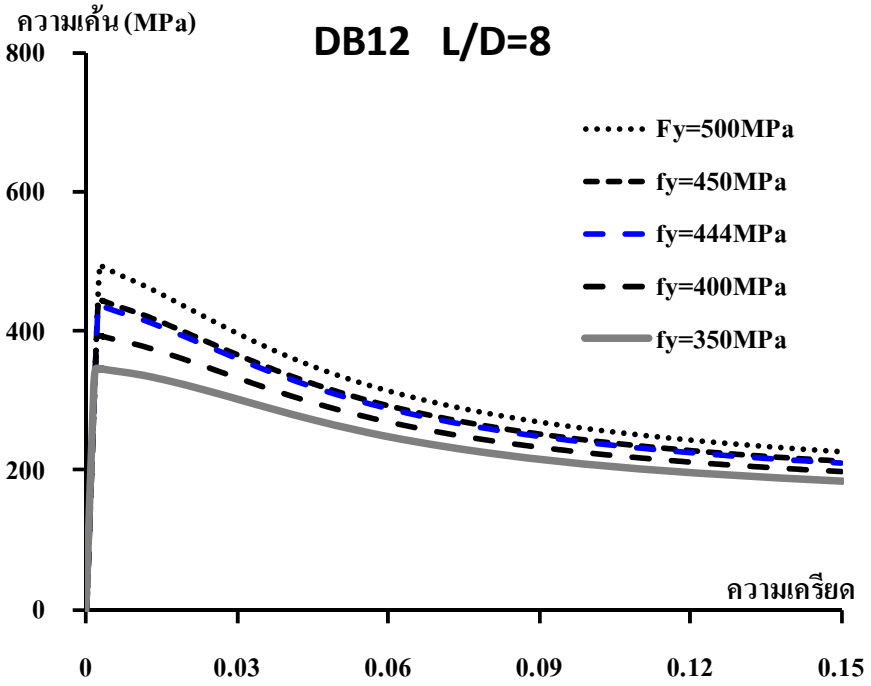
เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	L/D	คุณสมบัติของเหล็กเสริม		
		ความเค้นคราก (MPa)	ความเครียดคราก	ค่าโมดูลัสเชิงเส้น
12	4	350	0.0022	202000
	8	400	0.00173	202000
		444	0.00198	202000
		450	0.00223	202000
		500	0.00248	202000



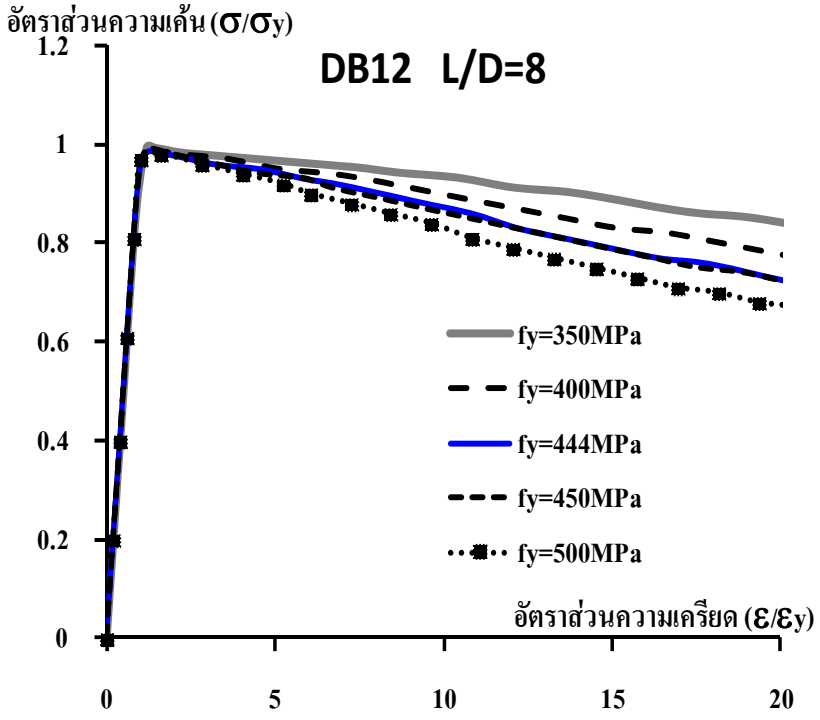
ภาพที่ 6.8 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 โดยที่ค่า F_y ต่างๆกัน



ภาพที่ 6.9 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น (σ/σ_y)-ความเครียด ($\varepsilon/\varepsilon_y$) ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 โดยที่ค่า F_y ต่างๆกัน

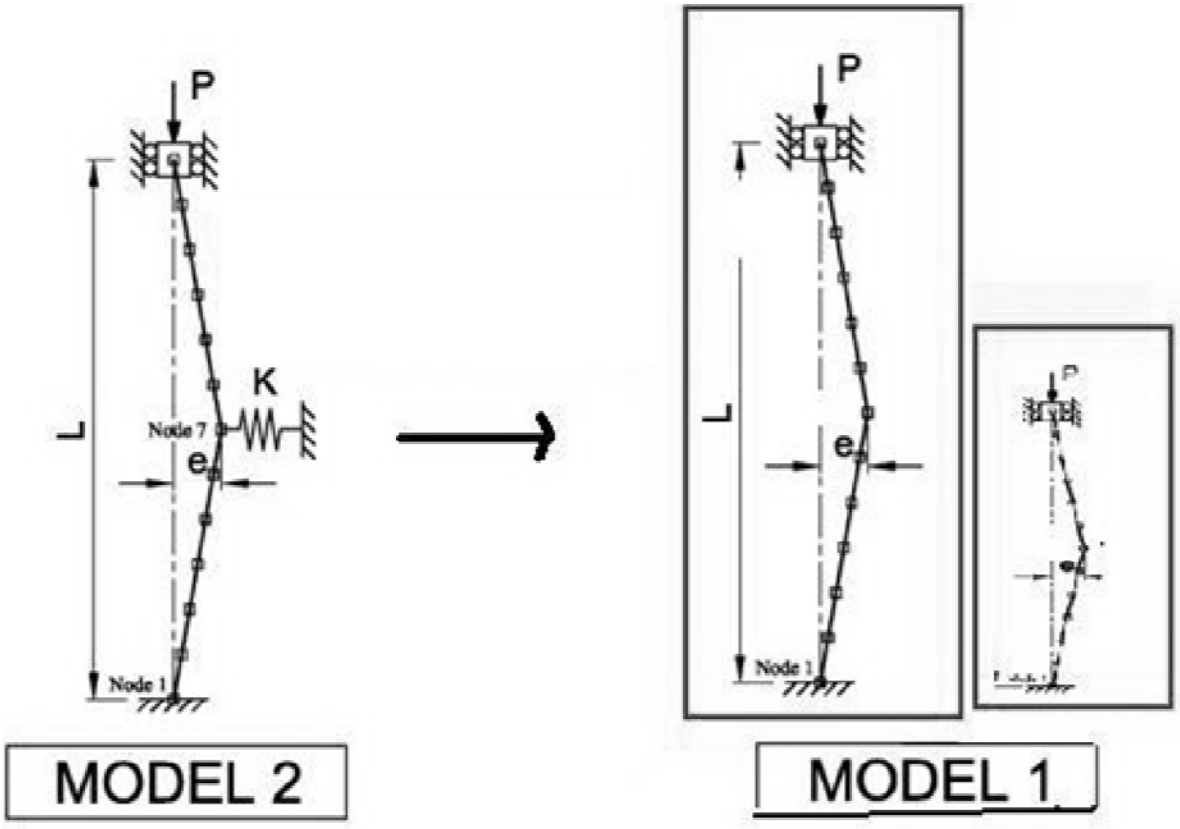


ภาพที่ 6.10 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 8 โดยที่ค่า F_y ต่างๆกัน



ภาพที่ 6.11 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น (σ/σ_y)-ความเครียด ($\varepsilon/\varepsilon_y$) ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 8 โดยที่ค่า F_y ต่างๆกัน

6.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 2



ภาพที่ 6.12 แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกดที่มีการค้ำยันด้านข้างอันเนื่องมาจากเหล็กปลอก เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1

ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 2 เหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีการค้ำยันข้างอันเนื่องมาจากเหล็กปลอก จะพิจารณาค่าที่ใช้ในการค้ำยัน ในรูปของค่าสติฟเนสของสปริง (K_s) ที่กึ่งกลางช่วงดังแสดงในภาพที่ 6.12 และค่าสติฟเนสของสปริงที่ใช้ จะมีลักษณะเป็นสปริงเชิงเส้น ทำหน้าที่ต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างอันเนื่องจาก การโก่งเดาะเหล็กเสริมยืนเมื่อรับแรงกด

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 2 โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้กับ อัตราส่วน L/D ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นคู่ โดยทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีความยาว เท่ากับ L และแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีความยาวครึ่งหนึ่งของความยาว L (L/2) โดยการเพิ่มค่าสติฟเนสของ

สปริง โดยให้ค่าสติฟเนสของสปริง เริ่มต้นตั้งแต่ K_s เท่ากับ 0 จนเพิ่มเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าพลังงานเพิ่มขึ้น โดยค่าสติฟเนสของสปริงจะถูกนำเสนอ ในรูปของค่าตัวแปร N_k ดังแสดงในสมการที่ 65

$$N_k = \frac{K_S}{K_L} \quad (65)$$

$$K_L = \frac{192EI}{L^3} \quad (66)$$

โดยที่ K_S คือ ค่าสติฟเนสเชิงเส้นของสปริงที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 2

K_L คือ ค่าสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมยืน

E คือ ค่าโมดูลัสเชิงเส้นของเหล็กเสริม

I คือ ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยในหน้าตัดกลม ดังสมการที่ 65

L คือ ความยาวช่วงของแบบจำลองแบบที่ 2

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองที่ L/D และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่างๆกัน ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ตารางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และอัตราส่วน L/D ที่ใช้ในแบบจำลองแบบที่ 2

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	แบบจำลองแบบที่ 2	แบบจำลองแบบที่ 1	
	L/D	L_2/D ช่วงสั้น ($L_2=L_1/2$)	L_1/D ช่วงยาว ($L_1=L$)
10	8	4	8
12	10	5	10
20	12	6	12

ในการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 2 เพื่อศึกษาค่า K_S ที่เหมาะสม จนสามารถทำให้แบบจำลองที่เดิม ไม่มีผลของการค้ำยันทางด้านข้าง มีพฤติกรรมที่ดีขึ้น จนกระทั่งมีค่า

ความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด ที่แข็งแรงขึ้น ต้านทานการเสียรูปได้มากขึ้น เทียบเท่ากับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่มีค่าอัตราส่วน L/D น้อยเป็นสองเท่า ดังแสดงในภาพที่ 6.13

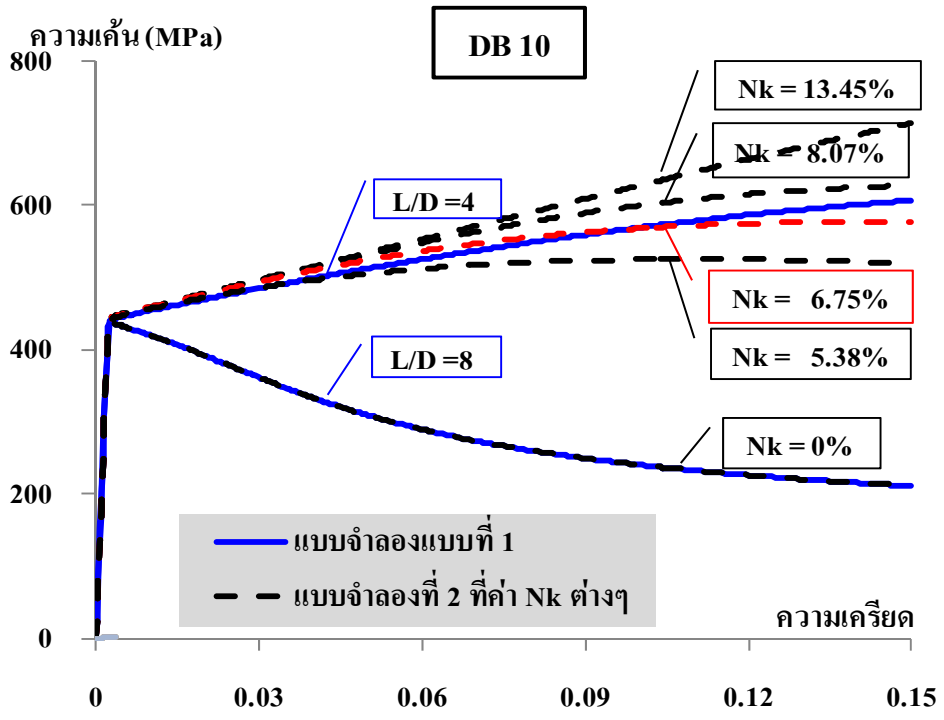
ทำการ Trial ค่า K_S ในแบบจำลองแบบที่ 2 แล้วนำค่าที่ได้จากเหล็กเสริมรับแรงกด ของแบบจำลองมาวิเคราะห์ผล ในรูปของอัตราส่วน ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้น แล้วเปรียบเทียบอยู่ในรูปของค่า N_k จากสมการที่ 66 ดังตัวอย่าง โดยใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลิเมตร ค่าความเค้นที่จุดคราก 444 MPa ค่าYoung's modulus 202000 MPa และอัตราส่วนความฆ้น 0.0093 โดยใช้คุณสมบัติของเหล็กเสริมของ Menegotto-Pinto โดยค่า K_S ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังในตารางที่ 6.5 พิจารณาแบบจำลองแบบที่ 2 ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8

นำค่ากราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริม ของแบบจำลองแบบที่ 1 ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 มาหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นโดยหาพื้นที่ใต้กราฟ ของกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 2 ที่มีการค้ำยันทางด้านข้างอันเนื่องมาจากค่าสติฟเนสของสปริง (K_S) ต่างๆกัน ที่อยู่ในรูปของอัตราส่วนสติฟเนส (N_k) หาพื้นที่ใต้กราฟที่ได้ที่แต่ละค่า ดังภาพที่ 6.14 นำมาวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ ของค่าพลังงานของแบบจำลอง ที่แต่ละอัตราส่วนค่าสติฟเนส ก็ได้แนวโน้มของพฤติกรรม ของเหล็กเสริมเมื่อมีการค้ำยันทางด้านข้าง

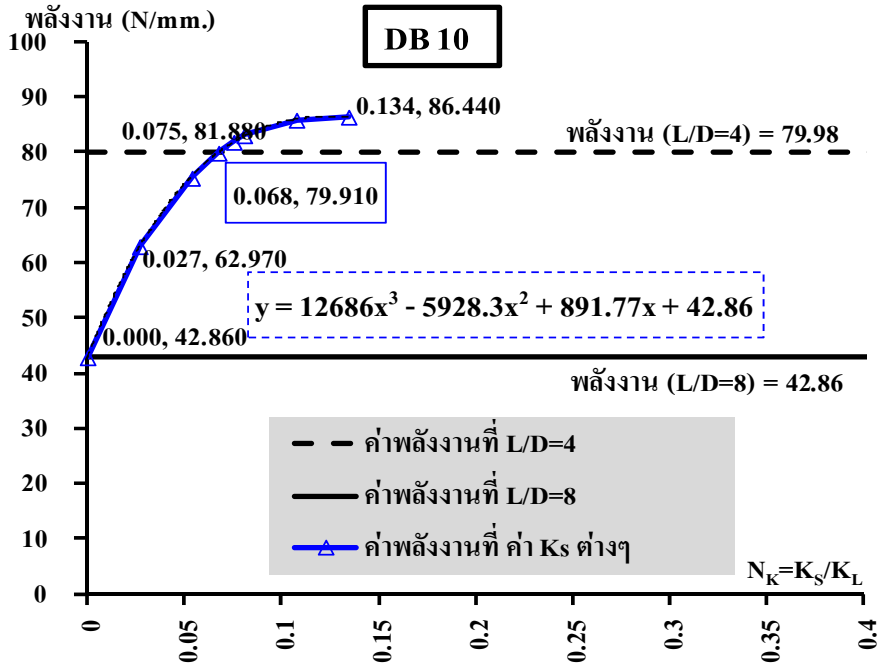
วิเคราะห์ผลที่กล่าวมาข้างต้น เปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 2 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ค่า K_S ต่างๆ หาพลังงานที่เกิดขึ้นและทำการเปรียบเทียบที่ค่าอัตราส่วนสติฟเนสต่างๆกัน โดยทำการศึกษาที่ค่าอัตราส่วน L/D และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่างๆกัน เพื่อหาพฤติกรรมที่เกี่ยวเนื่องกัน ของแบบจำลองโครงสร้างเหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งเดาะ และมีการค้ำยันทางด้านข้างของเหล็กปลอก ที่อยู่ในรูปค่าสติฟเนสของสปริง (K_S) ดังแสดงในตารางที่ 6.6 และค่าพลังงานที่ได้จากค่าอัตราส่วนสติฟเนส (N_k) ต่างๆกัน ดังในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.5 ตารางแสดงค่า KS และอัตราส่วนสติฟเนส (Nk) ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลิเมตร ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 ของแบบจำลองแบบที่ 2

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	อัตราส่วน L/D	K_L (N/mm.)	K_S (N/mm.)	N_k%
10	8	37183	0	0%
		37183	1000	2.69%
		37183	2000	5.38%
		37183	2510	6.75%
		37183	3000	8.07%
		37183	5000	13.45%

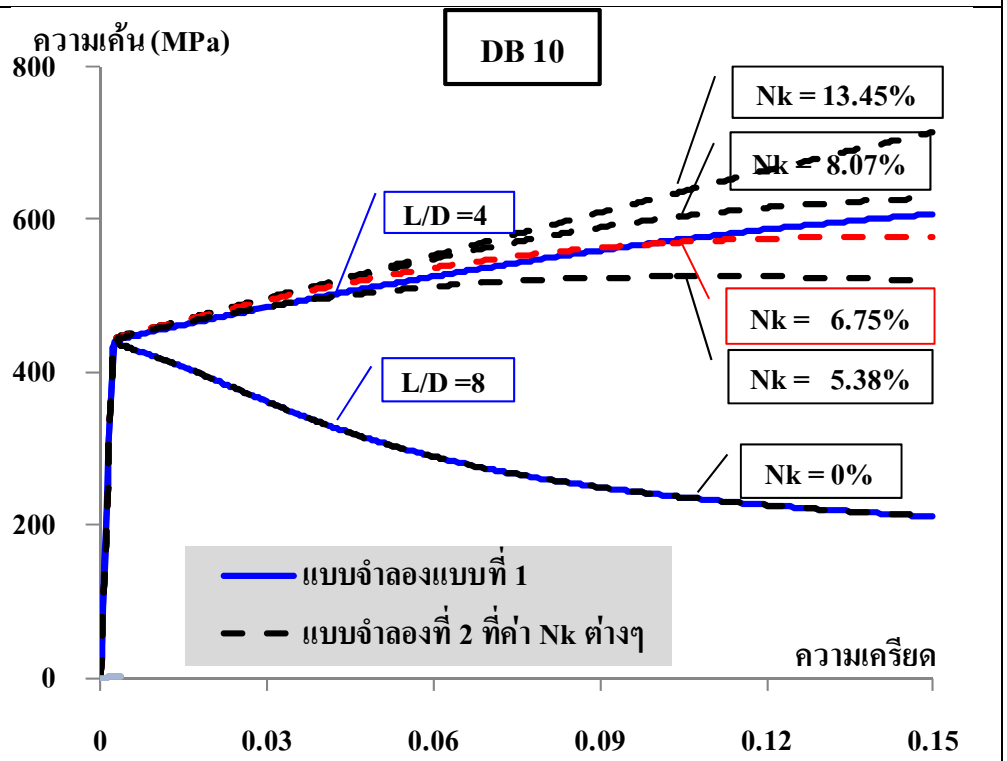


ภาพที่ 6.13 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.



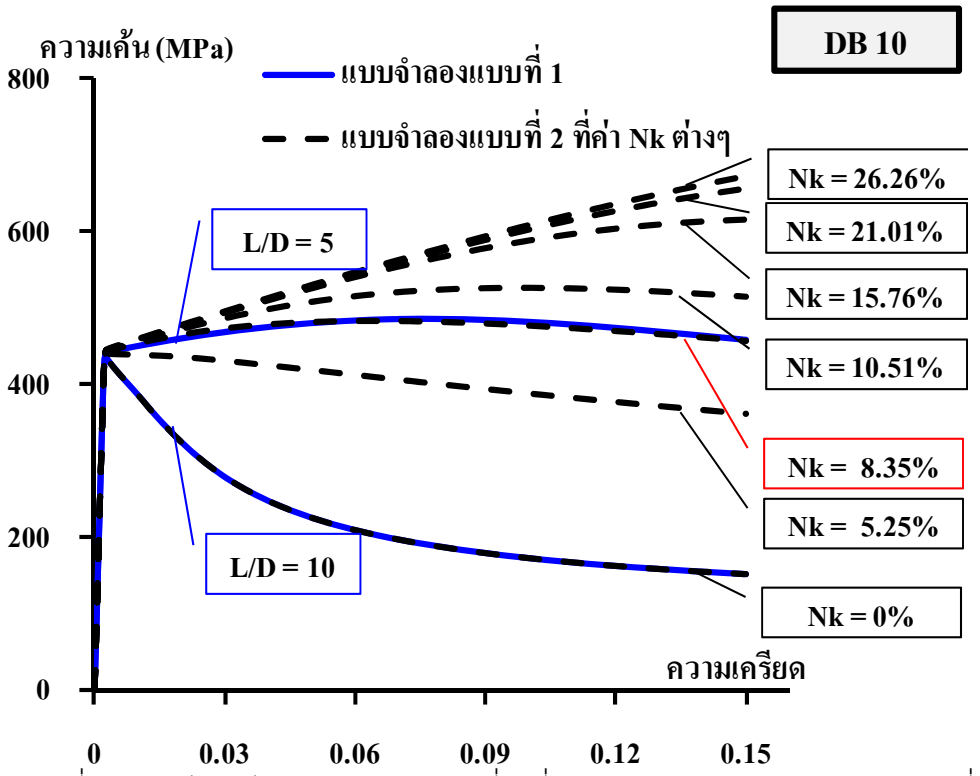
ภาพที่ 6.14 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

ตารางที่ 6.6 ตารางแสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 กับแบบจำลองแบบที่ 1 และผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น-ความเครียด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	L/D	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้			ผลที่ได้จากการวิเคราะห์
		K_L (N/mm.)	K_S (N/mm.)	N_k%	
10	8	37183	0	0%	
			1000	2.69%	
			2000	5.38%	
			2510	6.75%	
			3000	8.07%	
			5000	13.45%	

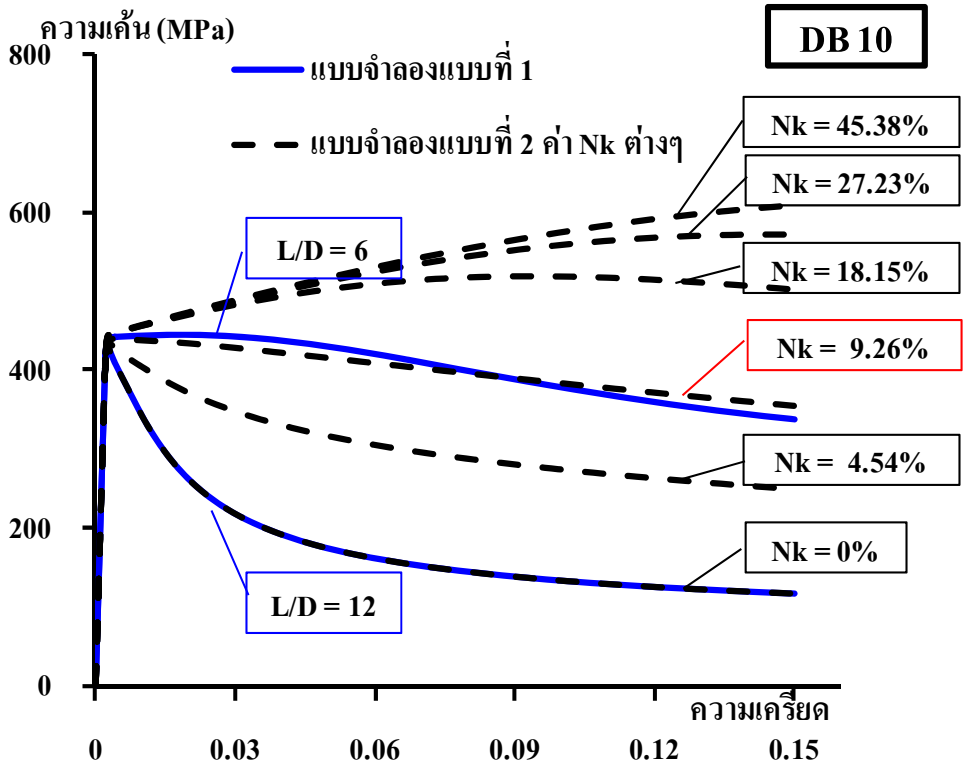
ภาพที่ 6.15 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

10	10	19038	0	0%
			1000	5.25%
			1590	8.35%
			2000	10.51%
			3000	15.76%
			4000	21.01%
			5000	26.26%



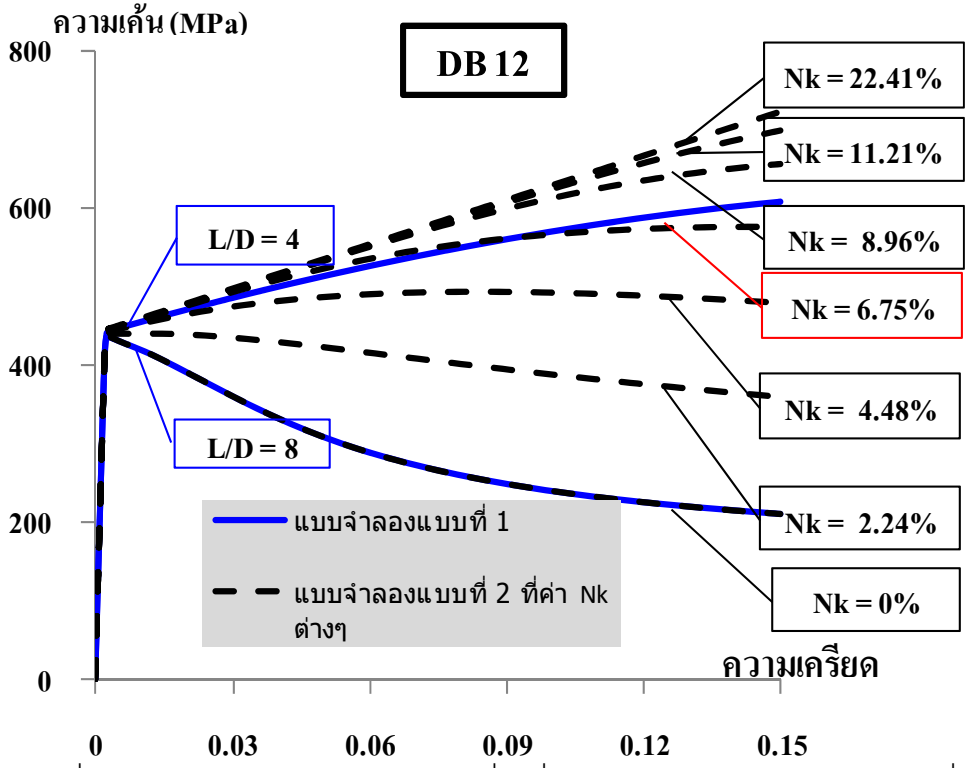
ภาพที่ 6.16 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 และ 10 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

10	12	11017	0	0%
			500	4.54%
			1000	9.08%
			1020	9.26%
			2000	18.15%
			3000	27.23%
			5000	45.38%



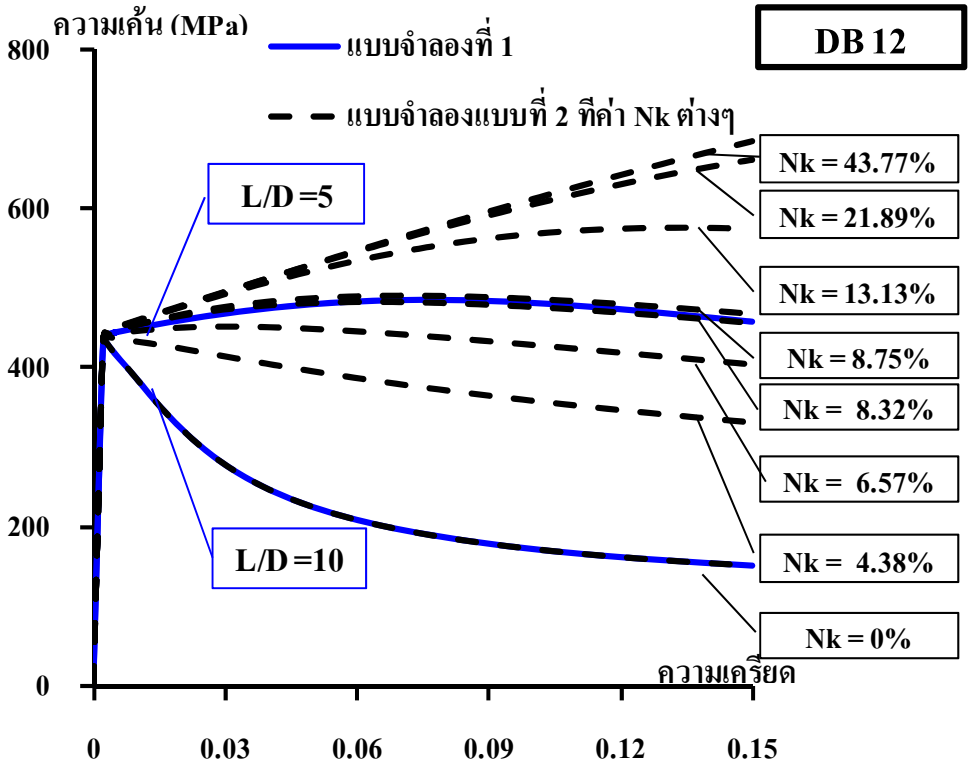
ภาพที่ 6.17 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

12	8	44621	0	0%
			1000	2.24%
			2000	4.48%
			3010	6.75%
			4000	8.96%
			5000	11.21%
			10000	22.41%



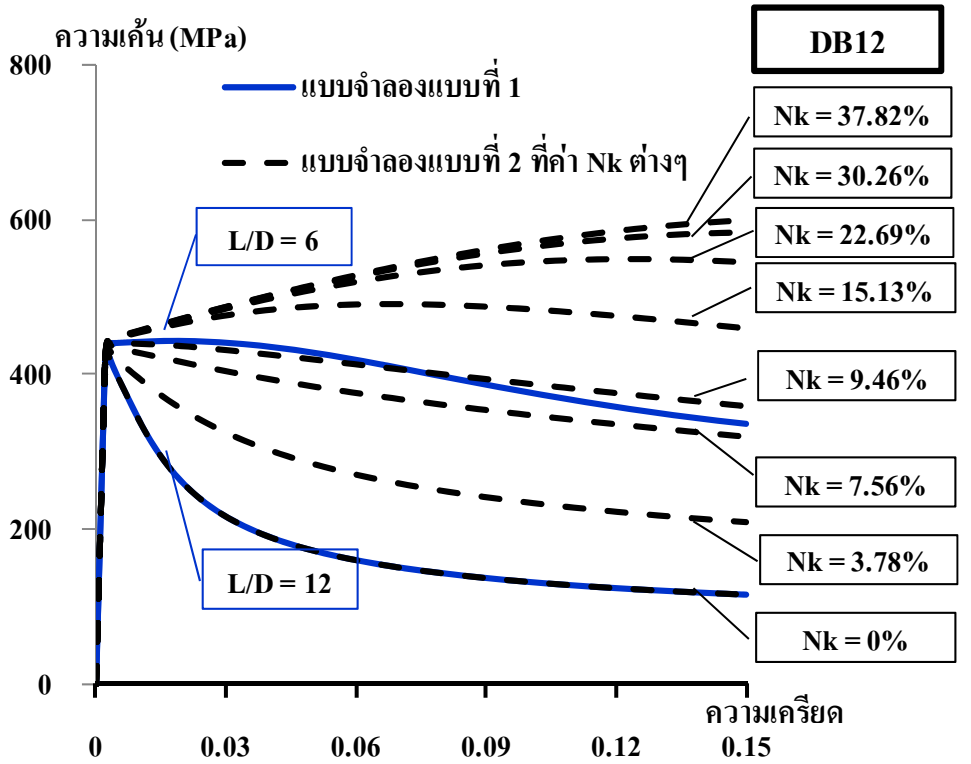
ภาพที่ 6.18 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

12	10	22846	0	0%
			1000	2.24%
			1500	4.48%
			1900	6.75%
			2000	8.75%
			3000	8.96%
			4000	13.13%
			5000	21.89%
			10000	43.77%



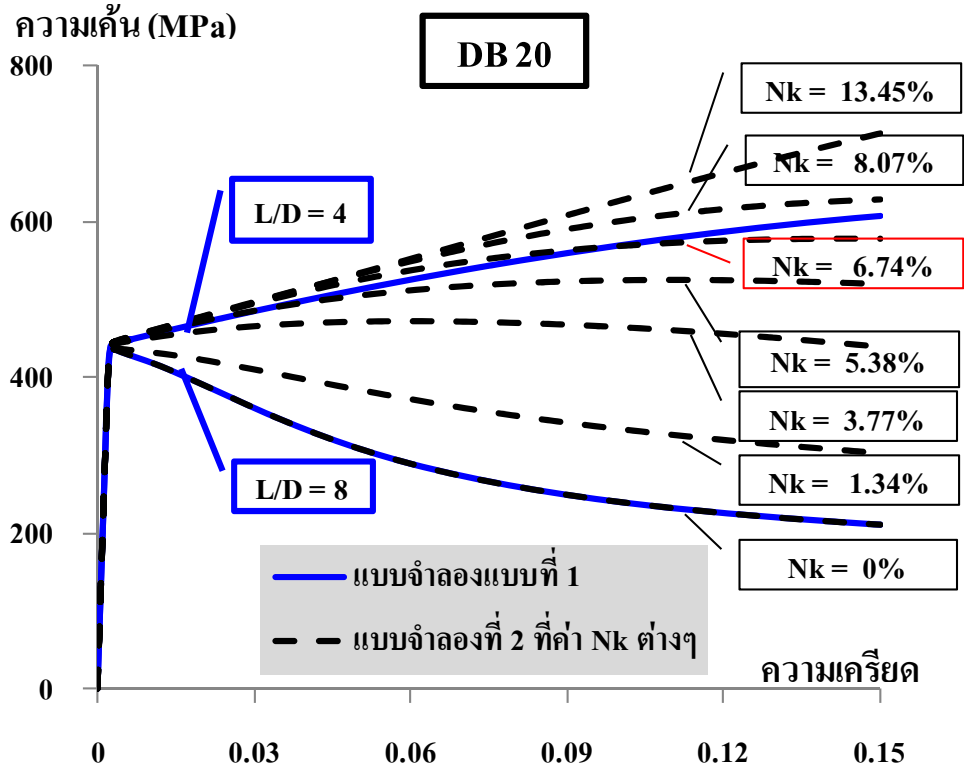
ภาพที่ 6.19 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 และ 10 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

12	12	13221	0	0%
			500	3.78%
			1000	7.56%
			1250	9.46%
			2000	15.13%
			3000	22.69%
			4000	30.26%
			5000	37.82%



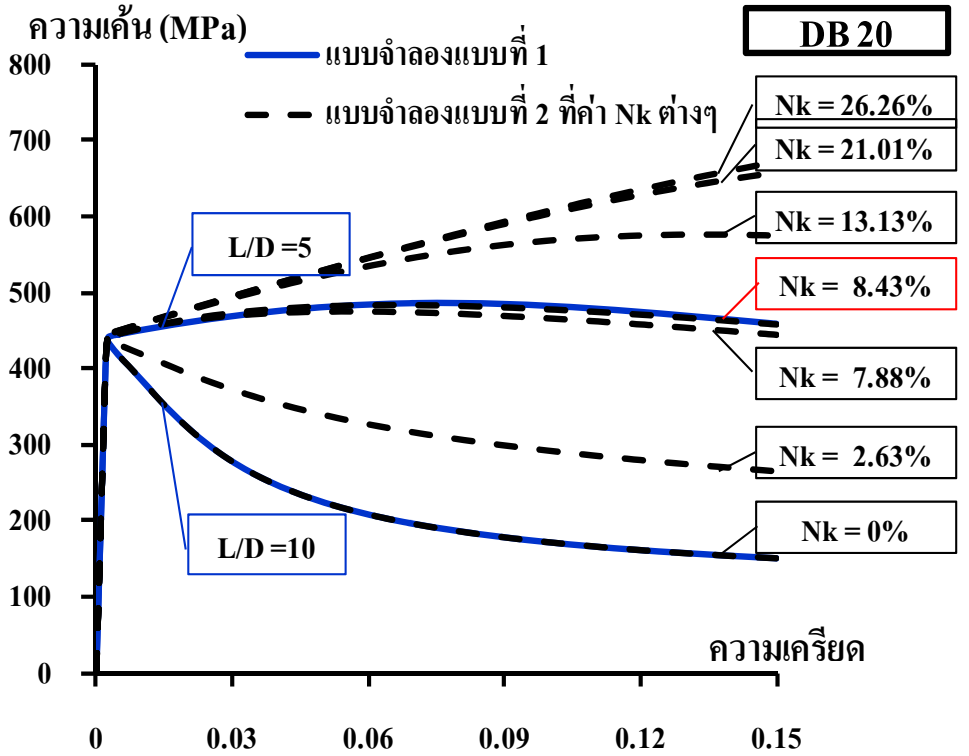
ภาพที่ 6.20 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

20	8	74367	0	0%
			1000	1.34%
			2800	3.77%
			4000	5.38%
			5012	6.74%
			6000	8.07%
			10000	13.45%



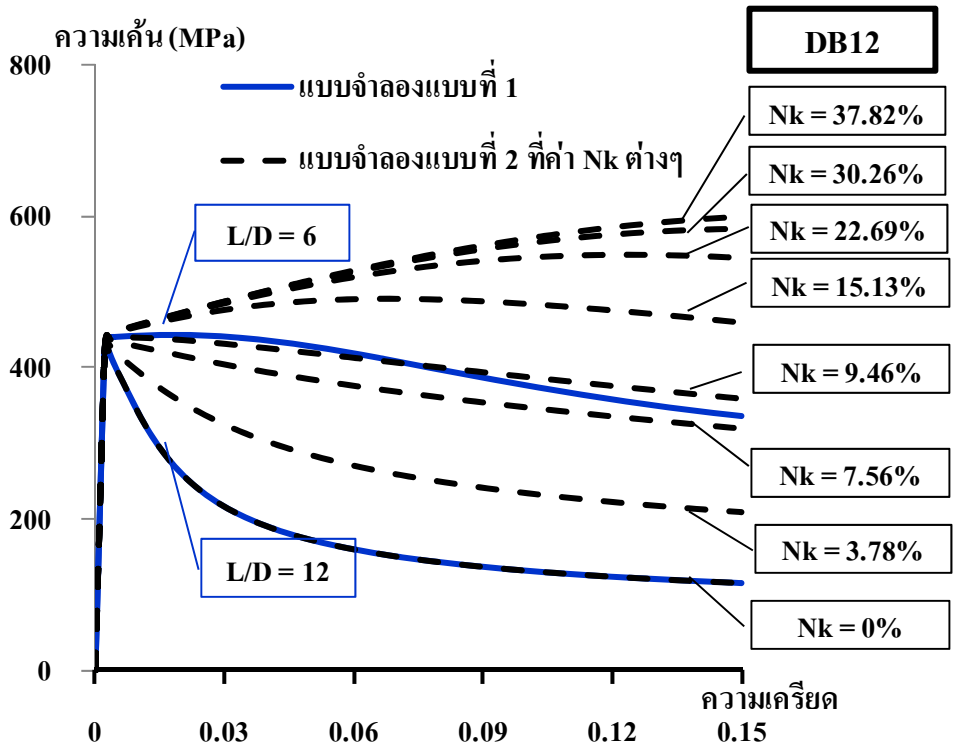
ภาพที่ 6.21 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 และ 8 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

20	10	38076	0	0%
			1000	2.63%
			3000	7.88%
			3210	8.43%
			5000	13.13%
			8000	21.01%
			10000	26.26%



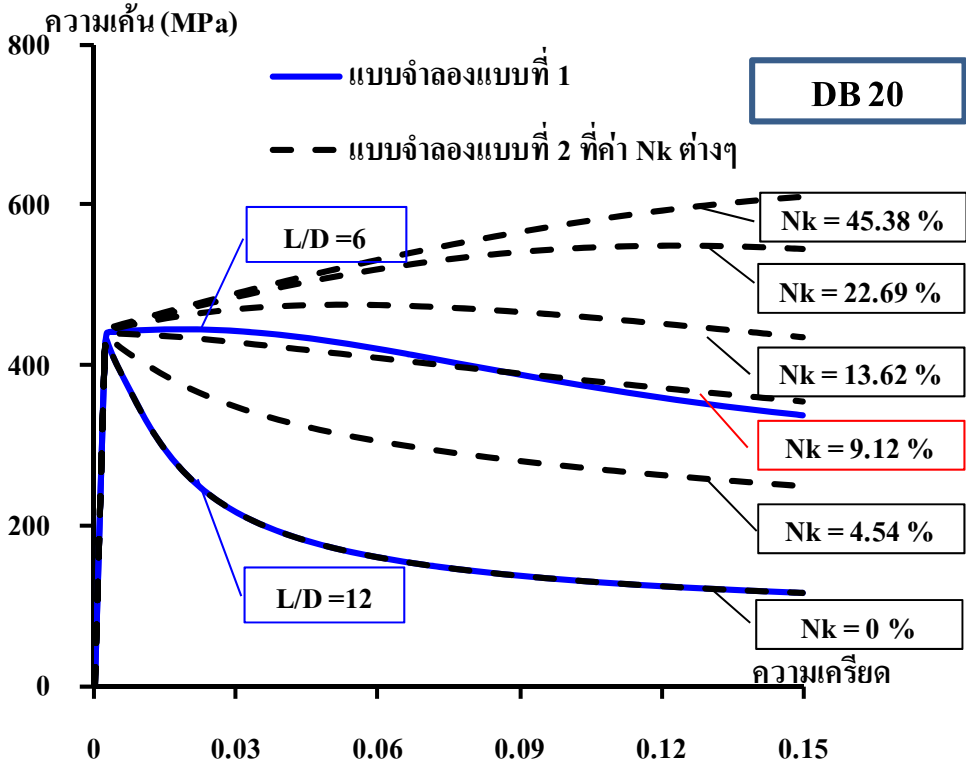
ภาพที่ 6.22 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 และ 10 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

20	12	13221	0	0%
			500	3.78%
			1000	7.56%
			1250	9.46%
			2000	15.13%
			3000	22.69%
			4000	30.26%
			5000	37.82%



ภาพที่ 6.23 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

20	12	13221	0	0%
			500	3.78%
			1000	7.56%
			1250	9.46%
			2000	15.13%
			3000	22.69%
			4000	30.26%
			5000	37.82%

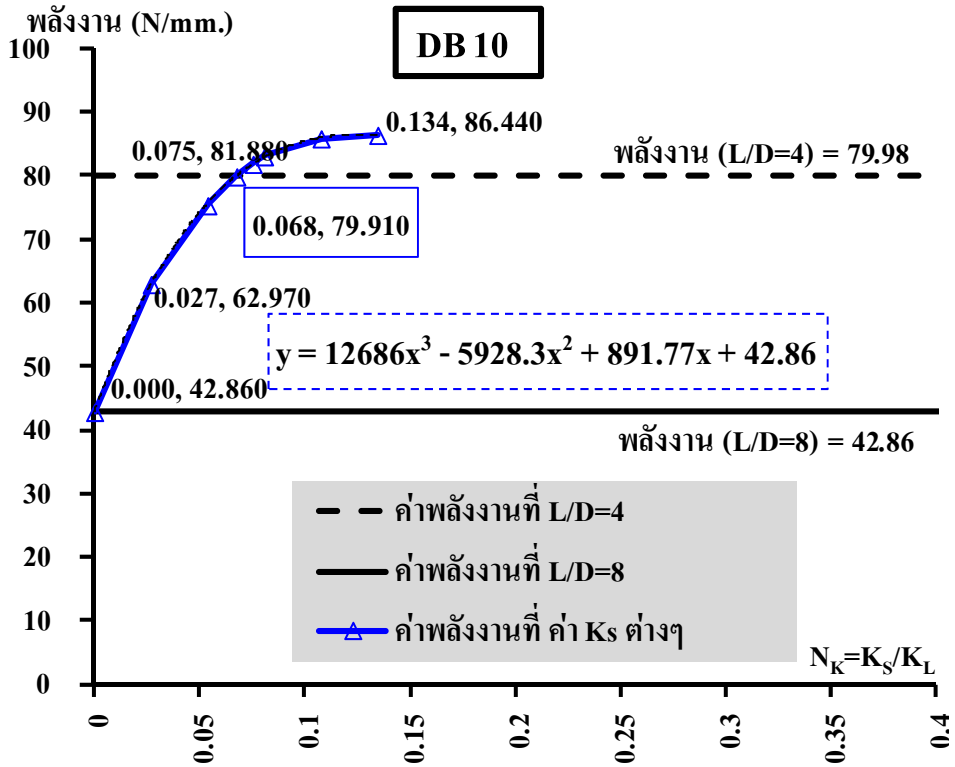


ภาพที่ 6.23 เปรียบเทียบแบบจำลองแบบที่ 2 ที่ L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 และ 12 โดยเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงพลังงานที่เกิดขึ้น ที่ค่าอัตราส่วนสติฟเนส (N_k) ต่างๆ ของแบบจำลองแบบที่ 2 เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบที่ 1

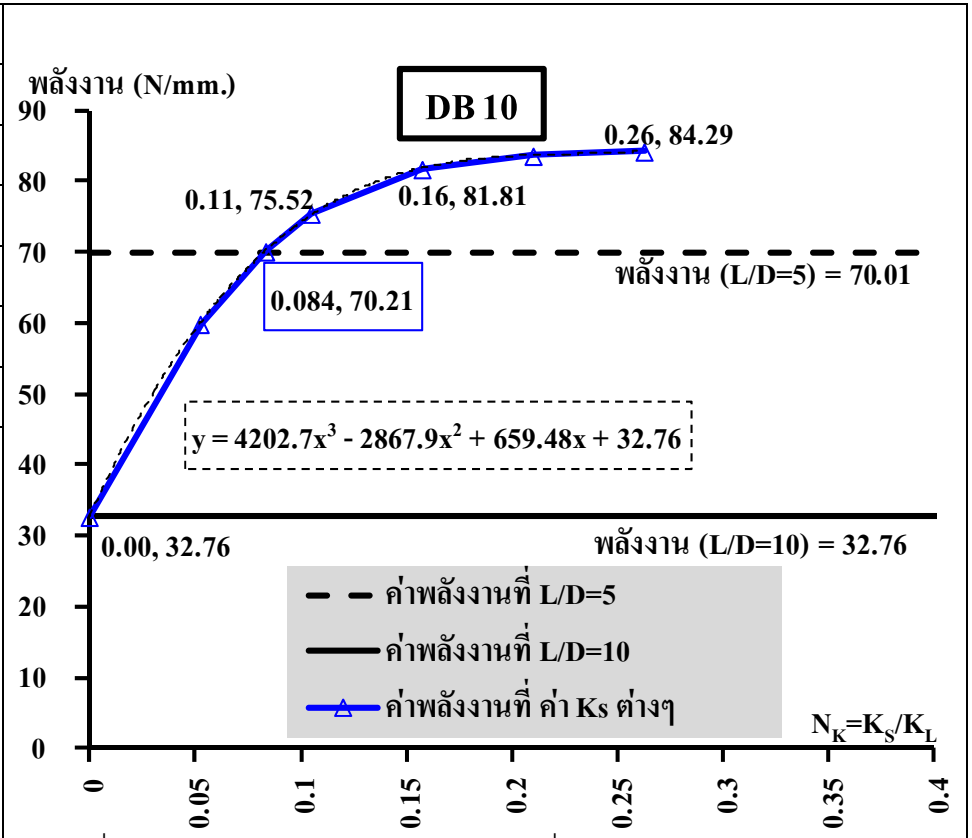
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	แบบจำลองแบบที่ 1			แบบจำลองแบบที่ 2			
	L_1/D	ค่าพลังงาน (N/mm.)	L_2/D	ค่าพลังงาน (N/mm.)	L/D	ค่าพลังงาน (N/mm.)	N_k
10	8	42.86	4	79.98	8	42.86	0
						62.75	0.027
						75.37	0.054
						79.91	0.068
						81.88	0.075
						83.08	0.081
						85.89	0.107
						86.44	0.134

ผลการวิเคราะห์



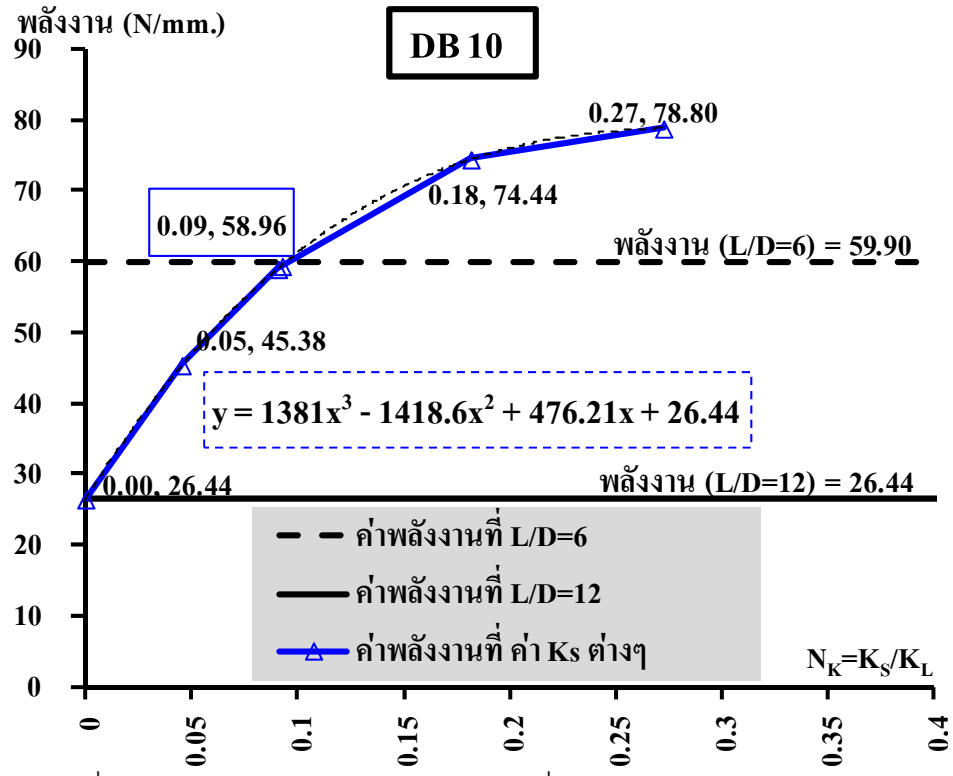
ภาพที่ 6.24 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

10	10	32.76	5	70.01	10	32.76	0
						59.97	0.053
						70.21	0.083
						75.52	0.106
						81.81	0.158
						83.69	0.210
						84.29	0.262



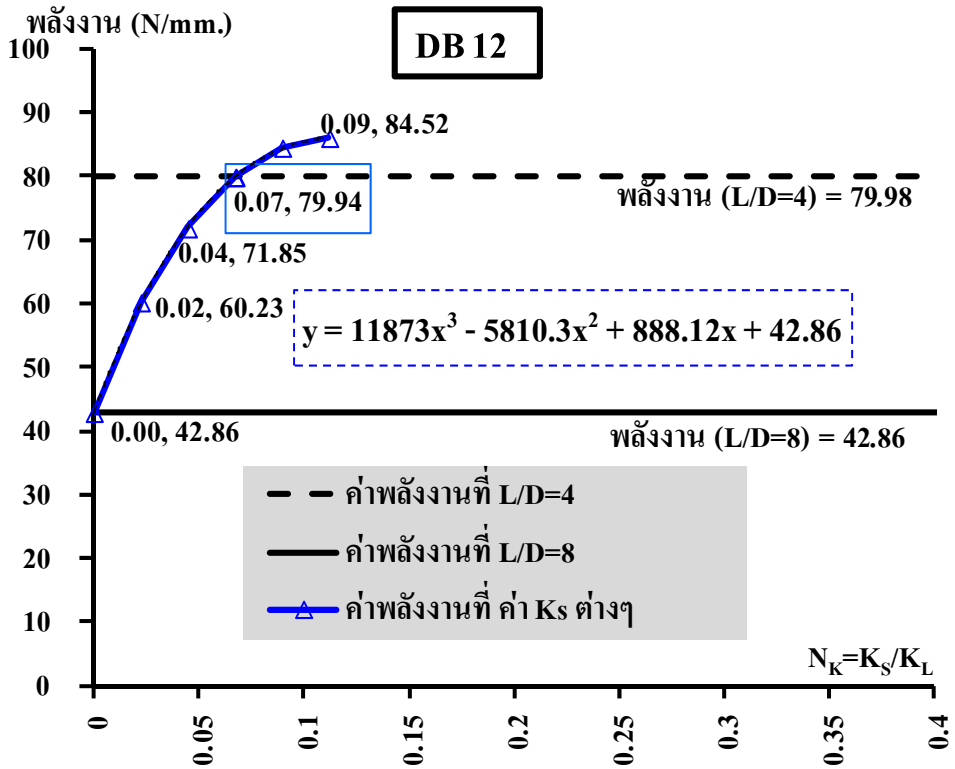
ภาพที่ 6.25 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

10	12	26.44	6	59.90	12	26.44	0
						45.38	0.045
						58.96	0.091
						59.40	0.093
						74.44	0.181
						78.80	0.272



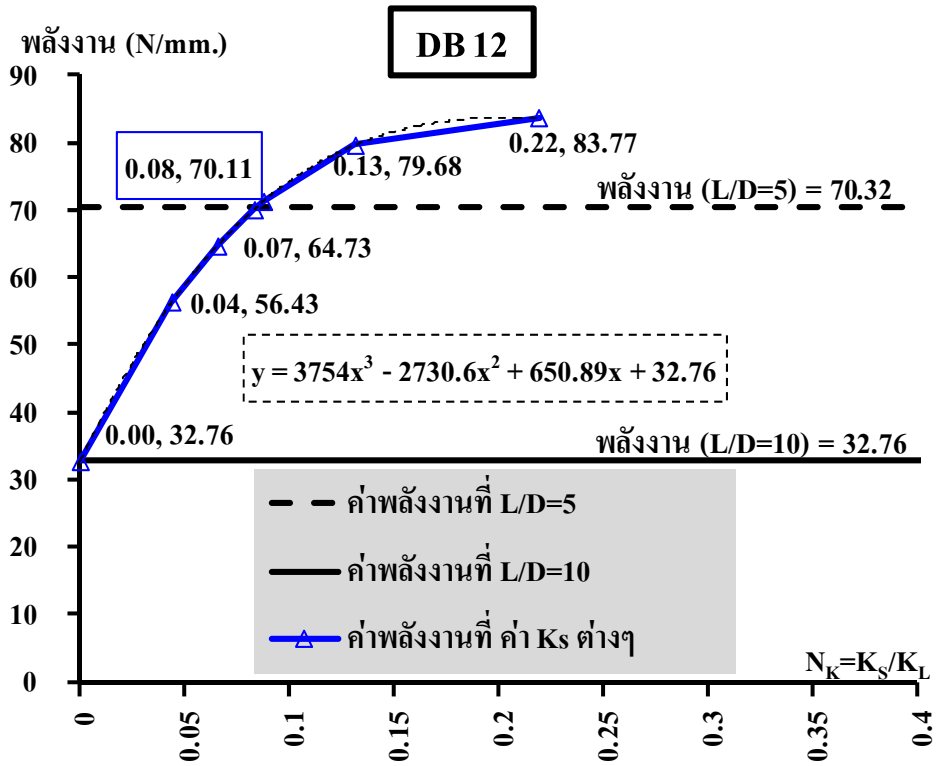
ภาพที่ 6.26 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

12	8	42.86	4	79.98	8	42.86	0
						60.23	0.022
						71.85	0.045
						79.87	0.067
						79.94	0.068
						84.52	0.090



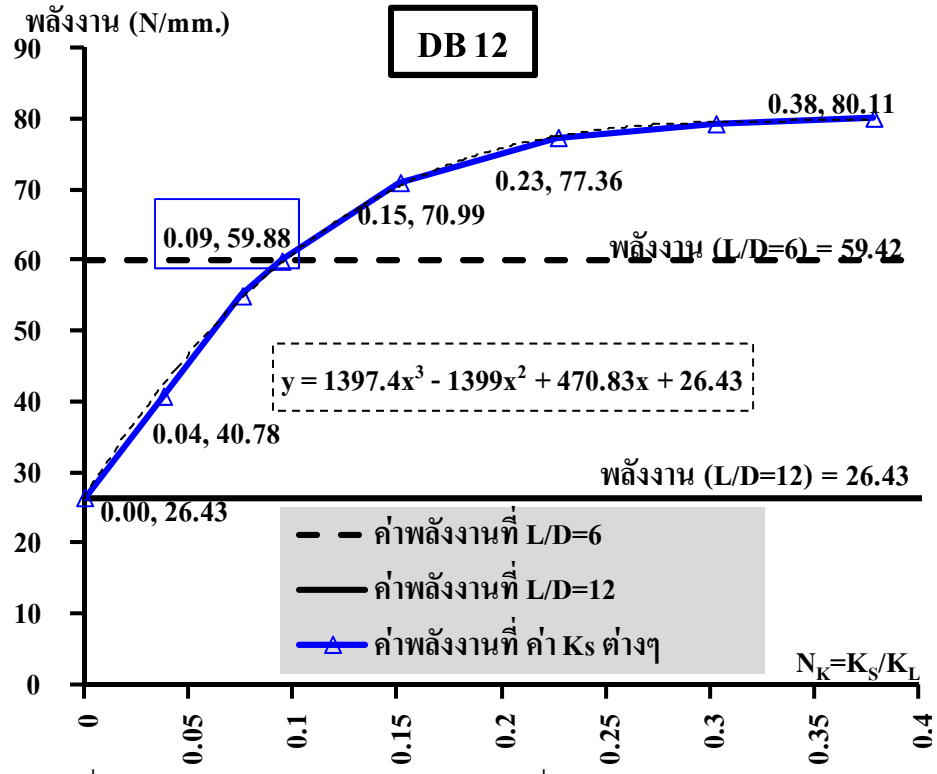
ภาพที่ 6.27 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

12	10	32.76	5	70.32	10	32.76	0
						56.43	0.044
						64.73	0.066
						70.11	0.083
						71.34	0.088
						79.68	0.131
						83.77	0.219



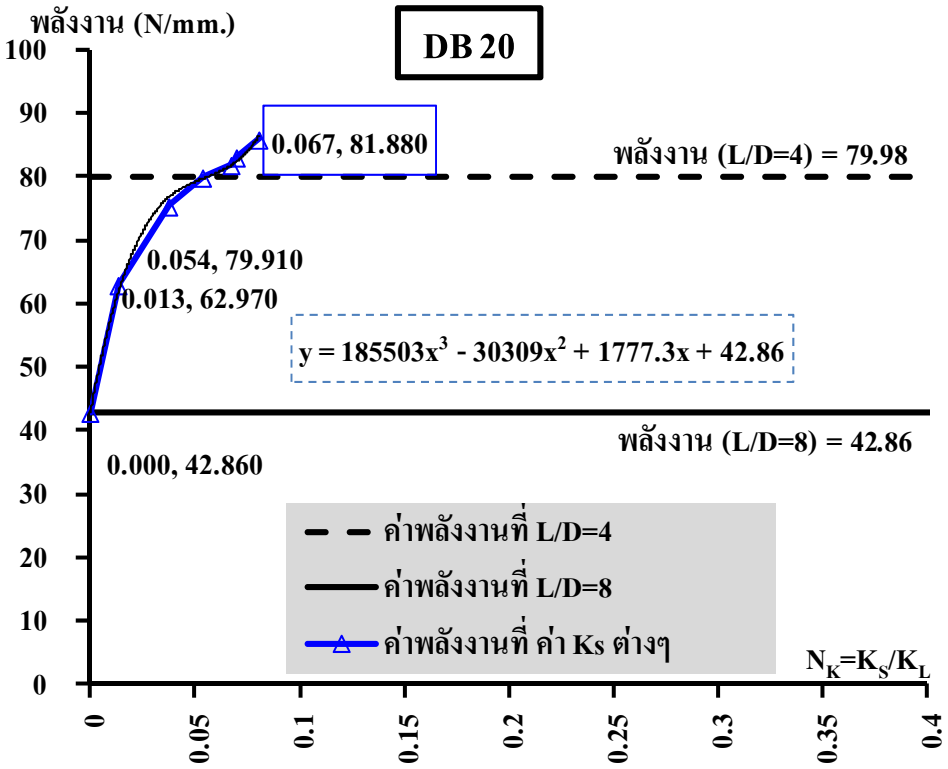
ภาพที่ 6.28 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

12	12	26.43	6	59.42	12	26.42	0
						40.78	0.038
						54.96	0.077
						59.88	0.095
						70.99	0.151
						77.36	0.227
						79.30	0.303
							0.378



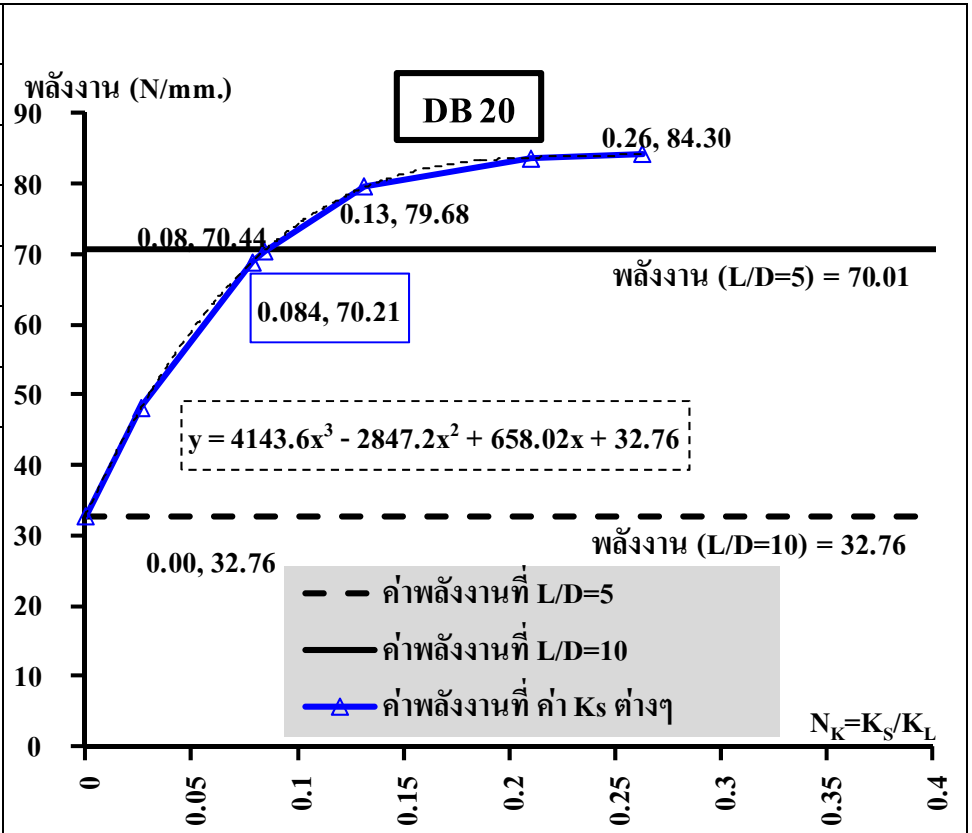
ภาพที่ 6.29 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.

20	8	42.86	4	79.98	12	42.86	0
						62.97	0.013
						75.37	0.038
						79.91	0.054
						81.88	0.067
						83.08	0.070
						85.89	0.081
						86.44	0.134



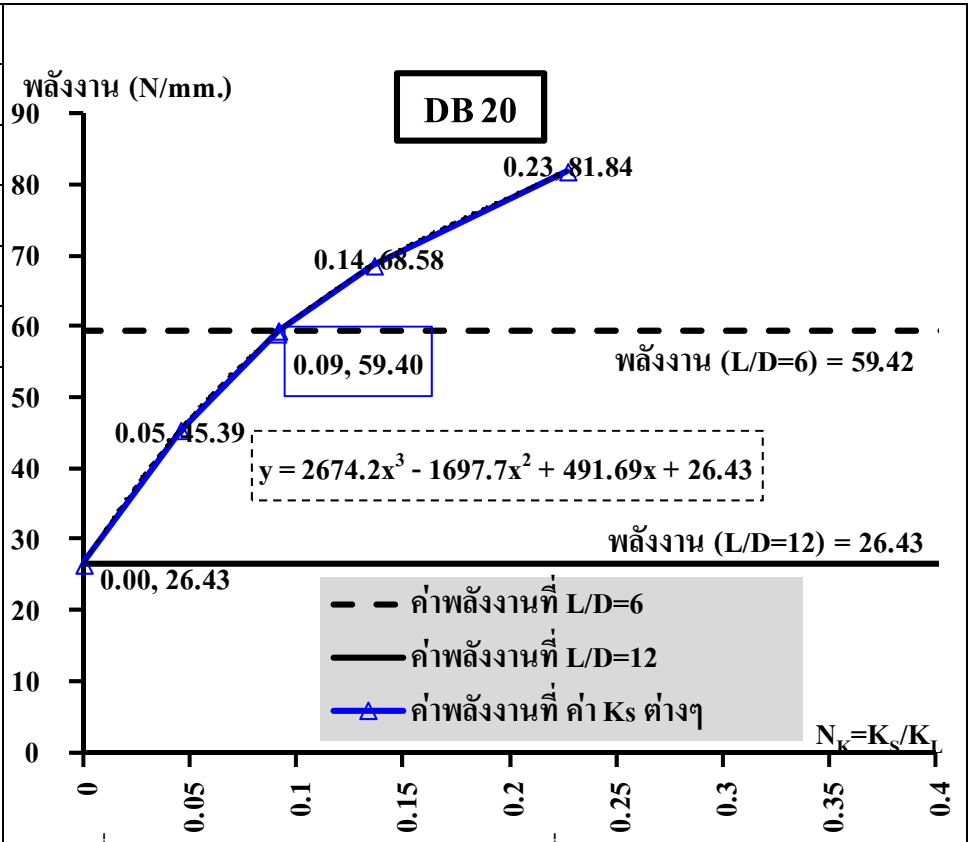
ภาพที่ 6.30 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 8 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 4 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

20	10	32.76	5	70.01	10	32.76	0
						48.15	0.026
						68.84	0.079
						70.44	0.084
						79.68	0.131
						83.62	0.210
						84.30	0.263



ภาพที่ 6.31 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 10 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 5 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

20	12	26.43	6	59.42	12	26.43	0
						45.39	0.045
						59.00	0.091
						59.40	0.091
						68.58	0.136
						81.84	0.227



ภาพที่ 6.32 ค่าพลังงานของแบบจำลองแบบที่ 2 L/D เท่ากับ 12 กับแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ L/D เท่ากับ 6 ของเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของเหล็กเสริมตามยาว ที่ไม่มีการค้ำยันของเหล็กเสริมตามขวาง และเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันของเหล้กเสริมตามขวาง โดยทำการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองไฟเบอร์ได้ถูกนำมาช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ที่ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ค่าความเค้นและความเครียดที่จุดคราก และค่าอัตราส่วนสติฟเนสอันเนื่องมาจาก ผลของการค้ำยันทางด้านข้าง จากการทำการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

1.จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองเหล็กเสริมรับแรงกด ที่ไม่มีค้ำยันทางด้านข้าง จะเห็นว่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดการโก่งเดาะของโครงสร้าง เมื่อให้แบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวรับแรงกดในแนวแกน ผลของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ในช่วงอิลาสติกจะมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นเหมือนกัน แต่พอพฤติกรรมเลยจุดครากแล้ว จะเห็นว่าที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม เท่ากับ 4 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด หลังจุดครากจะเกิดช่วง Strain hardening กำลังของเหล็กเสริมจะสูงขึ้นมากกว่าค่าความเค้นคราก และลดลงที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4 ค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดจะลดลง ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม เท่ากับ 5 ค่าจะค่อยๆลดลง จนต่ำกว่าจุดครากในช่วงพลาสติก และที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตั้งแต่ 6 ขึ้นไป ค่ากำลังจะลดลง ตั้งแต่พฤติกรรมเลยจุดคราก อันเนื่องมาจากผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4 กำลังของเหล็กเสริมที่ลดลงอันเนื่องมาจากผลของการโก่งเดาะ ของเหล็กเสริมยืนรับแรงอัด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปของอัตราส่วนความเค้น (σ_C/σ_T)-ความเครียด จะเห็นว่าที่ยิ่งอัตราส่วน L/D เพิ่มขึ้นมาก กำลังของเหล็กเสริมก็ยิ่งลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

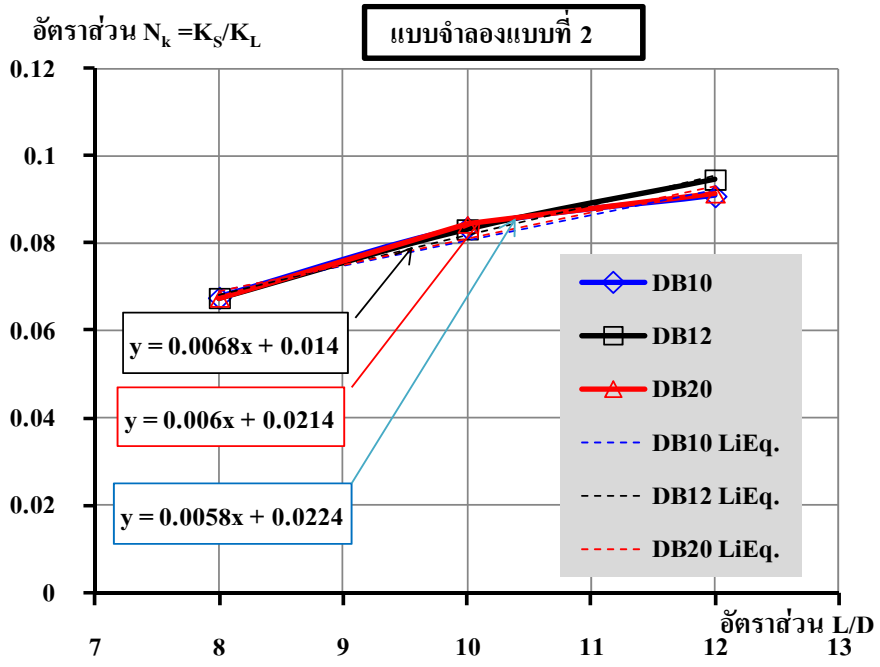
2.การเปรียบเทียบ โดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ในแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวแบบช่วงเดียว ที่อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเท่ากัน ทำให้ทราบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงอัด เมื่อวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาตร์ ตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรมคือ อัตราส่วนความยาวต่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม

3.จากการวิเคราะห์แบบจำลองการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง ด้วยค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่จุดครากต่างๆกัน โดยให้แบบจำลองแบบที่ 1 ใช้ค่า F_y ตั้งแต่ 350 ถึง 500 MPa ซึ่งมีจุดครากใกล้อยู่ในช่วงของเหล็กเสริมข้ออ้อยเกรด SD40 โดยที่ค่า F_y จะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 4 ที่ไม่เกิดการโก่งเดาะหลังจุดคราก แต่ค่า F_y จะส่งผลต่อพฤติกรรมมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมยืน เพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 8 ค่า F_y ที่มีค่ามากจะทำให้เกิดการโก่งเดาะได้มากยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากการลดลง ของค่าความสัมพันธ์อัตราส่วนความเค้น (σ/σ_y)-อัตราส่วนความเครียด ($\varepsilon/\varepsilon_y$) เปรียบเทียบที่จุดคราก ในกรณีที่ค่า F_y เท่ากับ 500 MPa กำลังของเหล็กเสริมตามยาวจะลดลงมากกว่าที่ค่าความเค้นครากต่ำกว่า ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าคุณสมบัติที่จุดครากของเหล็กเสริมจะมีผลต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ ที่อัตราส่วน L/D มากกว่า 4 โดยยิ่งเหล็กเสริมมีกำลังที่จุดครากสูง การเกิดการลดลงของกำลังของเหล็กเสริมก็จะเพิ่มขึ้นตาม

4.ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันด้านข้างของเหล็กเสริมตามขวาง ที่ช่วงความยาวช่วงยาว L โดยจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวาง ด้วยค่าสติฟเนสของสปริง (K_s) กับแบบจำลองเหล็กเสริมตามยาวที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามขวาง ความยาวช่วงยาว L และความยาวช่วงสั้น ครึ่งหนึ่งของความยาว L ทำให้ทราบว่า เหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันด้วยเหล็กเสริมตามขวาง สามารถมีทำให้กำลังการรับแรงกดของโครงสร้างแข็งแรงขึ้นได้ โดยพิสูจน์ด้วยการใส่ค่าสติฟเนสของสปริงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่กึ่งกลางของแบบจำลอง จะทำให้พฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดดีขึ้น ยิ่งใส่ค่าสัมประสิทธ์ของสปริงมาก พฤติกรรมก็ยิ่งดีขึ้นมาก จนกระทั่งมีความสัมพันธ์ใกล้เท่ากับที่อัตราส่วน L/D น้อยกว่าเป็นสองเท่า และเมื่อใส่ค่าสติฟเนสของปริงเพิ่มขึ้นมาก

พฤติกรรมของแบบจำลองแบบที่ 2 ก็จะเข้าสู่แบบจำลองแบบช่วงเดียวที่มีการค้ำยันด้านข้าง เป็นแบบจำลองแบบสองช่วงที่อัตราส่วน เป็นครึ่งหนึ่งของอัตราส่วน L/D เดิม

5.จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบที่ 2 เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะที่มีการค้ำยันทางด้านข้างด้วยเหล็กเสริมตามขวาง โดยใช้กฎการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อเปรียบเทียบหาความเกี่ยวเนื่อง ของจุดที่เปลี่ยนพฤติกรรม ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของแบบจำลองแบบที่ 2 เป็นแบบจำลองแบบที่ 1 ที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้าง แต่มีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าเป็นครึ่งหนึ่ง ของแบบจำลองแบบที่ 2 โดยทำการวิเคราะห์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน L/D ของแบบจำลองแบบที่ 2 ต่างๆกัน แล้วทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว หาค่าพลังงานจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ จะเห็นว่าค่าพลังงานที่ได้ จะมีความเกี่ยวเนื่องอย่างเป็นนัยสำคัญ นำมาสรุปเป็นกราฟจะเห็นดังภาพที่ 7.1 สามารถสรุปความสัมพันธ์ค่าสติฟเนสของสปริง ที่ใช้ต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว ที่ทำให้คุณสมบัติของเหล็กเสริมตามยาวที่อัตราส่วน L/D แข็งแรงขึ้นเทียบเท่ากับที่ อัตราส่วน L/D ลดลงเป็นครึ่งหนึ่ง ดังสมการที่ 67 โดยที่ค่า N_k คืออัตราส่วนสติฟเนสของสปริง ต่อค่าสติฟเนสต้านทานการเสียรูปด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว ที่กึ่งกลางช่วงความยาว



ภาพที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนสติฟเนส (N_k) กับอัตราส่วน L/D

$$N_k = 0.006(L/D) + 0.02 \quad (67)$$

จากกราฟและสมการที่ได้จะเห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมที่ได้จากสมการ แต่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมต่างหาก ที่เป็นตัวแปรสำคัญ ที่กำหนดพฤติกรรมของโครงสร้างการเกิดการโก่งเดาะ

7.2 **ข้อเสนอแนะ**

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางปฏิบัติในอนาคตได้ดังต่อไปนี้

1.งานวิจัยนี้ควรทำการศึกษา แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันด้านข้างด้วยเหล็กเสริมตามขวาง โดยจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามขวางเป็นค่าสติฟเนสของสปริงแบบเชิงเส้น บริเวณกึ่งกลางช่วงความยาว ให้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนที่ เมื่อค่าสติฟเนสของสปริงไม่เป็นเชิงเส้นต่อไป

2.จากการวิเคราะห์แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันด้านข้างด้วยเหล็กเสริมตามขวาง ควรเพิ่มจำนวนตำแหน่งของสปริง จากกึ่งกลางช่วงความยาว เป็นทุกๆ 1 ใน 3 ของความยาวช่วง และ 1 ใน 4 ของความยาวช่วง เพื่อนำมาสรุปความสัมพันธ์ หรือทำให้เกิดแนวคิดใหม่ๆขึ้น ในการจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริม

รายการอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

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

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

Dhakal R.P. and Meakawa K. Modeling for postyield buckling of reinforcement. ASCE Journal of Structural Engineering 128 (2002) : 139-147

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.

Dodd L.L. and Restrepo-Posada JI. Model for predicting cyclic behavior of reinforcing steel. ASCE Journal of Structural Engineering 121(1995) : 433-435.

Felippa C.A. and Haugen B. Unified formulation of small-strain corotational finite element : I theory. Center of aeroplace structures : Collage of engineering university of Colorado, 2005.

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

Kent D.C. and Park R. Flexural members with confined concrete. ASCE Journal of Structural Engineering 97(1971) : 1969-1991.

Mander J.B., Priestley M.J.N., and Park R. Seismic design of bridge piers. Department of civil engineering. Department of civil engineering : University of Canterbury, 84-2 (1984).

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

Menegotto M. and Pinto P.E. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plain frame including changes in geometry and non-elastic behavior of

element under combined normal force and bending. In Proceeding : IABSE symposuim, 1973.

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

Saatcioglu M. and Razvi S.R. Strength and ductility of confined concrete. ASCE Journal of Structural Engineering 118 (1992) : 1590-1607.

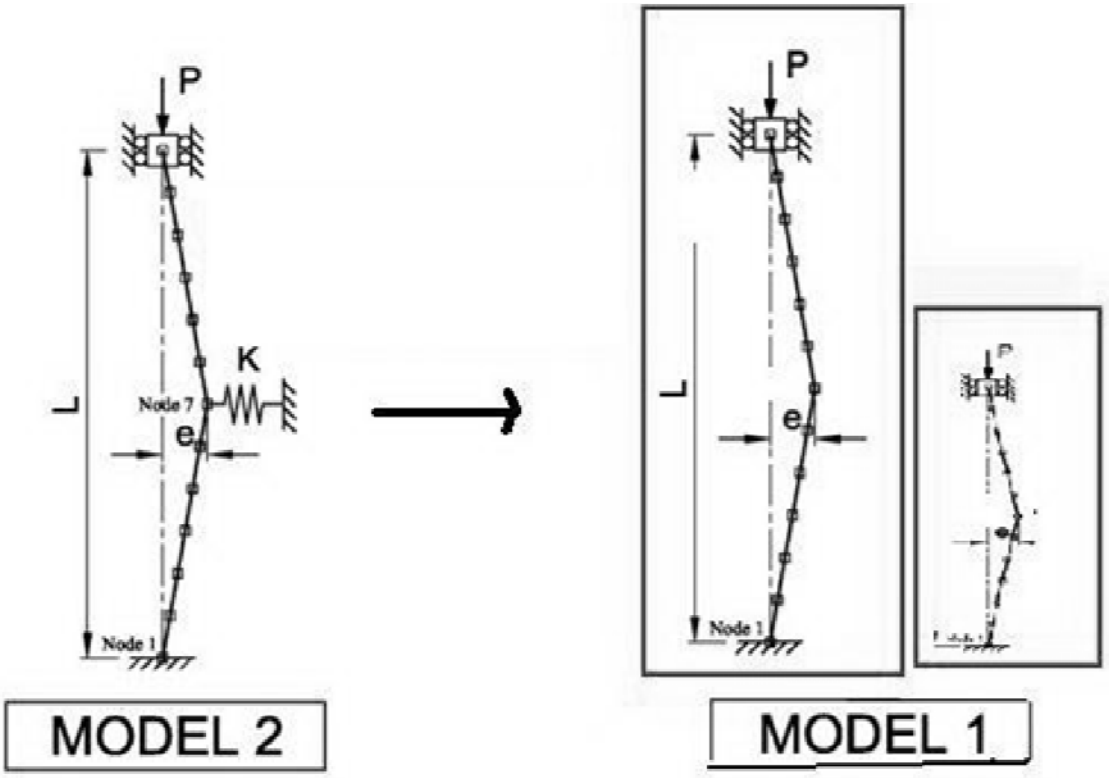
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

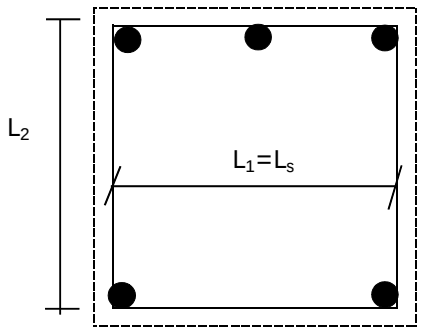
ตัวอย่าง การประยุกต์ใช้ ค่าสติฟเนสของสปริงที่ได้จากแบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่พิจารณาผลของการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวาง

ก.1 แผนภูมิรูปภาพแสดงขั้นตอนในการคำนวณ ค่า K_S

ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ที่พิจารณาผลการค้ำยันทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามขวางดังแสดงในภาพที่ ก. 1 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้หาระยะเรียงของเหล็กเสริมตามยาวที่เหมาะสมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ภาพที่ ก. 2

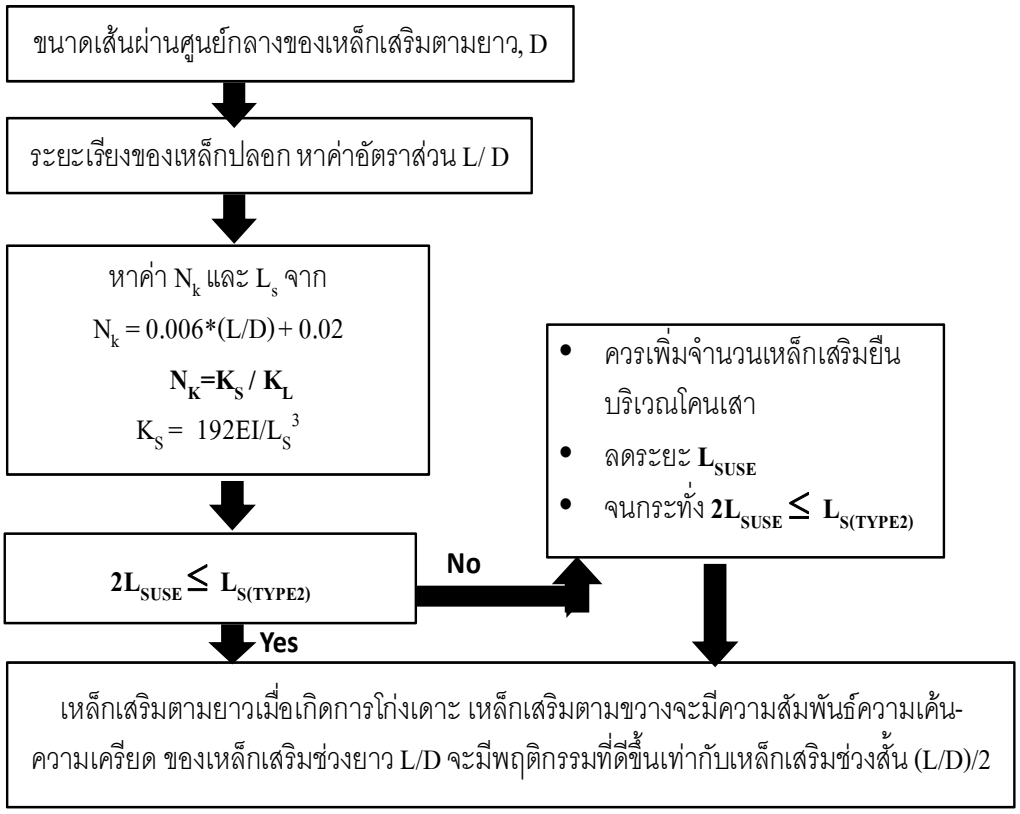


ภาพที่ ก. 1 การเปรียบเทียบผลของเหล็กเสริมตามยาว ที่มีการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวางและที่ไม่มีการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวาง



ภาพที่ ก. 2 ระยะเรียงของเหล็กเสริมตามยาว ในหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

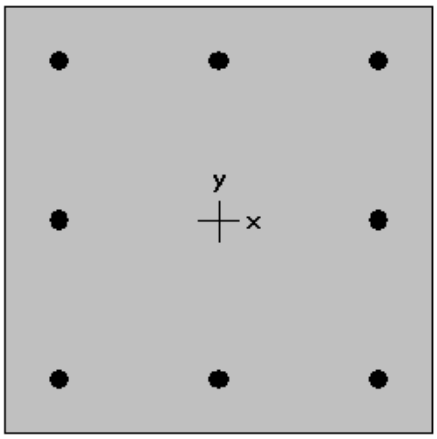
ขั้นตอนในการนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม จะจัดแสดงอยู่ในรูปของแผนภูมิรูปภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณดังภาพที่ ก. 3 เพื่อหาระยะเรียงที่เพียงพอที่ใช้ในการวิเคราะห์ คำนวนหาค่า K_S ที่เป็นผลอันเนื่องมาจากเหล็กเสริมตามขวาง ที่ทำให้ความพันธ์ความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมตามยาวที่มีค่าอัตราส่วน L/D แบบช่วงยาว มีพฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด สูงขึ้นเท่ากับที่อัตราส่วน L/D สั้นลงเป็นครึ่งหนึ่ง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.2



ภาพที่ ก. 3แผนภูมิรูปภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณระยะเรียงจากค่า K_S ที่ได้

ก.2 ตัวอย่างรายการคำนวณ ของเหล็กเสริมตามยาวที่มีการค้ำยันทางด้านข้างโดยเหล็กเสริมตามขวาง

ดังที่ได้แสดงแผนภูมิแสดงรายการคำนวณ จากหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะมีการแสดงตัวอย่างรายการคำนวณ เพื่อเพิ่มความเข้าใจในขั้นตอนต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในแผนภูมิ และให้ผู้ที่นำไปศึกษาต่อ สามารถเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนี้



ภาพที่ ก. 4 หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการแสดงตัวอย่างการคำนวณ

เสาขนาด 400x400 mm^2 เหล็กเสริมยืน 8-DB20 SD40 คิดเป็นร้อยละ 1.57% ของหน้าตัด โดยมีระยะหุ้ม 35 mm. เหล็กปลอกมีขนาด RB9@100 mm SD24

1. หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว, D

1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้ ใช้เหล็กเสริมขนาด 20 mm.

2. หาระยะเรียงของเหล็กปลอกและอัตราส่วน L/D

2.1 เหล็กปลอกขนาด RB9@100 mm ประเภท SD24 ดังนั้น ระยะห่างของเหล็กปลอก2 ช่วง เท่ากับ 200 mm. ตามรูปแบบการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนบริเวณโคนเสา

2.2 อัตราส่วน L/D = 200/20 = 10

3. หาค่าอัตราส่วน N_K และ K_S

3.1 ค่าอัตราส่วน สติฟเนสของสปริงอันเนื่องมาจากเหล็กเสริมตามขวางต่อค่าสติฟเนสต้านทานการเสียรูปทางด้านข้างของเหล็กเสริมตามยาว (N_K) จากสมการที่ 67

$$N_k = 0.006(L/D) + 0.02$$

อัตราส่วน L/D=10, N_K = 0.08

3.2 หาค่าสติฟเนสของสปริงอันเนื่องมาจากเหล็กเสริมตามขวาง (K_S)

จากการคำนวณหาค่าอัตราส่วน N_K ที่ได้จากผลการวิเคราะห์เท่ากับ 0.08 นำมาหาค่าอัตราส่วนของสปริงของเหล็กเสริมตามขวาง ดังนี้

$$N_k = \frac{K_S}{K_L}$$

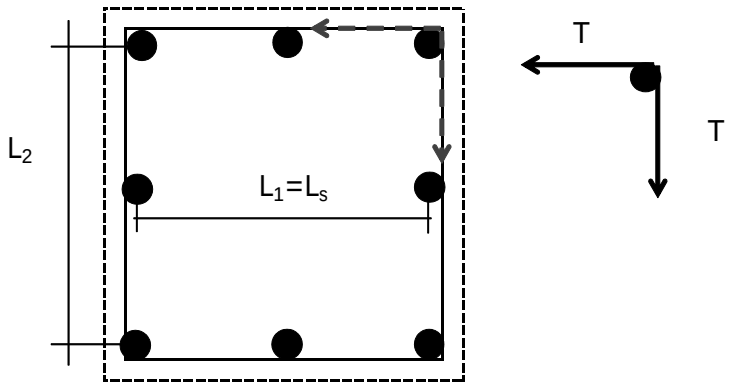
$$K_L = \frac{192EI}{L^3}$$

E = 202,000 MPa., I = $\Pi D^4/64$ = 7,854 mm^4, K_L = 38,076 N/mm.

K_S = 3,046 N/mm.

4. หาค่าระยะห่างของเหล็กเสริมยืน L_S

4.1 หาระยะเรียงของเหล็กเสริมตามยาวตัวริม (Type 1), L_{T1}



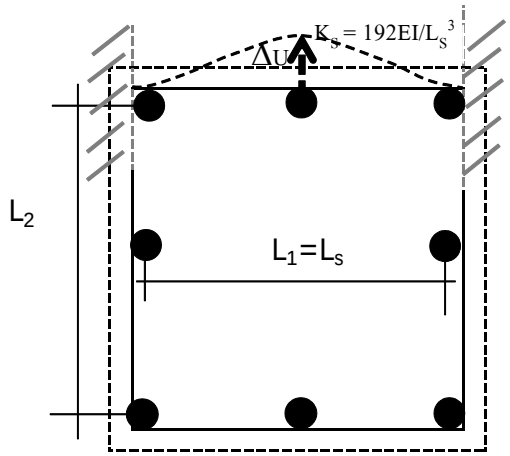
ภาพที่ ก. 5 รูปหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อพิจารณาส่วนของเหล็กเสริมตัวริม

จากการคำนวณหาค่าอัตราส่วน N_K ที่ได้จากผลการวิเคราะห์เท่ากับ 0.08 นำมาหาค่า K_Sของเหล็กเสริมตามยาวตัวริม จากสมการ

$$K_S = \frac{EA}{L_{S1}}$$

หาค่า L_{S1} จาก K_S = 3,046 N/mm., A = 63.6 mm^2, E = 202,000 จะได้ระยะเรียงของเหล็กเสริมตัวริม (L_{S1}) = 4,218 mm.

4.2 หาระยะห่างของเหล็กเสริมตามยาวตัวกลาง (Type 2), L_{T2}



ภาพที่ ก. 6 รูปหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อพิจารณาส่วนของเหล็กเสริมตัวกลาง

$$K_S = \frac{192EI}{{L_{S2}}^3}$$

หาค่า L_{S2} จาก K_S = 3,046 N/mm., I = 322 mm^4, E = 202,000 จะได้ระยะเรียงของเหล็กเสริมตัวกลาง (L_{S2}) = 160 mm.

4.3 หาระยะห่างของเหล็กเสริมตามยาว L_S

หาค่า L_S ที่ทำให้ค่าดีขึ้น เมื่อความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่มีอัตราส่วน L/D = 10 มีค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเท่ากับอัตราส่วน L/D =5

$L_{S1} > L_{S2}$ ดังนั้น $L_S = L_{S2}$ = 160 mm.

4.4 เปรียบเทียบระยะเรียง L_S ที่คำนวณได้กับ ที่ได้จากหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.4.1 ระยะห่างของเหล็กเสริมยืนที่กำหนดไว้จาก ACI 318 ที่ระบุไว้ว่าระยะห่างของเหล็กเสริมยืนที่ใช้ในการออกแบบ ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 mm.

ดังนั้น L_{USE} = 200+20 =220 mm.

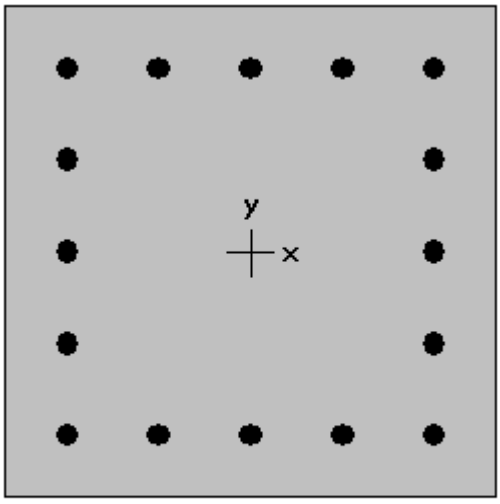
$2L_{USE}$ = 440 mm.

4.4.2 $2L_{USE}$ ที่ได้จากหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก = 400–(35x2) –(9x2) –20 = 292 mm.

4.4.3 จากผลการคำนวณจะพบว่า $2L_{USE}$ = 292 mm. < L_S = 160 mm.

5. ลดระยะห่างของเหล็กเสริมยืน L_S

ทำการเพิ่มจำนวนเหล็กเสริมตามยืน บริเวณโคนเสาเห็กเสริมตามยาว 8-DB20 เป็น 16-DB20 ดังภาพที่ ก. 7



ภาพที่ ก. 7 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเพิ่มจำนวนเหล็กเสริมยืน เพื่อให้เหล็กปลอกมีประสิทธิภาพการต้านทานการโก่งเดาะเพิ่มขึ้น

หาค่า L_S ที่ได้จากการเพิ่มจำนวนเหล็กเสริมยืนโดยที่

LS = [(400-70-9x2-20)/4] x 2 = 140 mm.

6.การเพิ่มจำนวนเหล็กเสริมยืนในหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามที่ได้แสดงรายการคำนวณข้างต้น จะทำให้พฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่มีการแตกร้าว เหล็กเสริมยืนที่ทำหน้าที่ควบคุมพฤติกรรมการรับแรงอัด เมื่อมีพฤติกรรมความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเลยจุดคราก ที่อัตราส่วน L/D = 10 มีค่าความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดเท่ากับอัตราส่วน L/D = 5 เนื่องจากจะทำให้ความยาวของช่วงการเสียรูปของการโก่งเดาะเป็น 2 ช่วง หรือถ้าไม่มีการเพิ่มเหล็กเสริมยืน จะต้องเพิ่มระยะเรียงของเหล็กปลอกเป็น RB9@75mm. เพื่อให้ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมเมื่อเลยกำลังครากดีขึ้นเท่ากับ อัตราส่วน L/D = 3.75 $\approx$ 4 ทำให้ความยาวของช่วงการเสียรูปของการโก่งเดาะเป็น 3 ช่วงระยะของเหล็กปลอก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว พรพรรณ วงศ์เมืองแก่น เกิดวันพุธที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่พะเยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552