

การเสริมกำลังรับแรงเฉือนและการยึดรั้งการโก่งเดาะของเสาคอนกรีต  
เสริมเหล็กโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบน



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
พฤษภาคม 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การเสริมกำลังรับแรงเฉือนและการยึดรั้งการโก่งเดาะของเสาคอนกรีต  
เสริมเหล็กโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบน



อนันตพงษ์ กระจาย

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

SHEAR STRENGTHENING AND REBAR BUCKLING RESTRAINING  
OF RC COLUMNS BY STEEL FLAT BAR CONFINEMENT



A Thesis Submitted to University of Phayao  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering  
May 2023

Copyright 2023 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเสริมกำลังรับแรงเฉือนและการยึดรั้งการโก่งเดาะของเสาคอนกรีต  
เสริมเหล็กโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบน

ของ อนันท์พงษ์ กระจ่าง

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัยรัตน์ แก้วเจือ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ เชื้องฉิน)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนุรักษ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

<b>เรื่อง:</b>	การเสริมกำลังรับแรงเฉือนและการยึดรั้งการโก่งเดาะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบน
<b>ผู้วิจัย:</b>	อนันท์พงษ์ กระเจาย, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2565
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา:</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ เชื้อยงฉิน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน
<b>คำสำคัญ:</b>	การโก่งเดาะของเหล็กเสริม, แรงยับยั้ง, การเสริมกำลังเสา

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยมีอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบให้โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว โครงสร้างเสาจึงออกแบบให้รับแรงในแนวแกนโดยมีเหล็กปลอกที่เรียงระยะห่างมาก จึงทำให้โครงสร้างเสาไม่สามารถรับแรงเฉือนจากแรงแผ่นดินไหวได้ อีกทั้งมีโอกาสที่เหล็กเสริมตามยาวจะเกิดการโก่งเดาะได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงศึกษาแรงยึดรั้งตามขวางที่ต้องการเพื่อให้เหล็กเส้นรับแรงอัดมีช่วงความยาวการโก่งเดาะที่ต้องการ โดยการทดสอบ และศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงด้านข้างที่มีลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน หรือแรงเฉือนและแรงดัด ทั้งก่อนทำการเสริมความแข็งแรง และหลังทำการเสริมความแข็งแรงโดยใช้เหล็กเส้นแบนโอบรัด โดยใช้โปรแกรม ABAQUS

ผลการศึกษาการโก่งเดาะและแรงยึดรั้งในเหล็กเส้น พบว่า ตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีช่วงการโก่งเดาะเท่ากับ 16 เท่า และ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว (16D และ 12D) กำลังรับแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการโก่งเดาะ โดยกำลังอัดลดลงเหลือ 50% ของกำลังคราก ที่ความเครียดอัดประมาณ 5 เท่า และ 10 ของความเครียดที่จุดคราก เมื่อให้มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่กึ่งกลางช่วงทำให้เกิดช่วงการโก่งเดาะ 8D และ 6D กำลังอัดจะตกลงช้า โดยค่าความเครียดที่กำลังอัดลดลงมาที่ 50% ของกำลังคราก ประมาณ 16 เท่า และ 25 ของความเครียดที่จุดคราก ตามลำดับ โดยแรงยึดรั้งจะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดหน้าตัดของเหล็กเส้น โดยช่วงความยาวการโก่งเดาะที่น้อยจะต้องการแรงยับยั้งที่มาก การเสริมกำลังเสาเพื่อควบคุมการโก่งเดาะจะต้องโอบรัดเสาให้ช่วงความยาวการโก่งเดาะประมาณ 6D โดยขนาดของเหล็กเส้นแบนจะขึ้นกับแรงยับยั้งที่ต้องการตามผลการทดสอบ

การวิเคราะห์การรับแรงด้านข้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้เหล็กเส้นแบนคาดรัดเพื่อควบคุมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวและเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน โดยใช้โปรแกรม ABAQUS พบว่า โครงสร้างเสาที่เสริมกำลังสามารถรับแรงด้านข้างและโยกตัวทางด้านข้างได้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแบบเฉือนเป็นแบบดัดที่มีความเหนียวได้ ดังนั้น การเสริมกำลังโครงสร้างเสาโดยวิธีคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม เพราะเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย และมีขั้นตอนการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยาก

**Title:** SHEAR STRENGTHENING AND REBAR BUCKLING RESTRAINING  
OF RC COLUMNS BY STEEL FLAT BAR CONFINEMENT

**Author:** Anuntapong Karjai, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2022

**Advisor:** Assistant Professor somboon shaingchin Co–advisor Associate Professor Dr.Preeeda  
Chaimahawan

**Keywords:** Buckling of reinforcement, Restrained force, Column retrofit

### ABSTRACT

Currently, Thailand has reinforced concrete buildings that are not designed to withstand earthquakes. The structural columns are designed to support axial loads with large spacing of stirrup. As a result, the columns cannot resist the shear force induced by earthquake. In addition, there is a chance that the longitudinal steel reinforcement will be buckled easily. This research aims to study the required holding force for control buckling length of longitudinal bars by testing and to study the behavior of reinforced concrete columns, before and after strengthened by banding with steel flat bar, which is subjected to lateral loading and failed by shear or flexure–shear using ABAQUS program.

The results of rebar buckling and holding force show that for rebar samples with buckling length of 16 times and 12 times of diameter (16D and 12D), the compressive strengths decrease sharply when buckling induced. The compressive strengths are reduced to 50% of the yield strength at approximately 5 times and 10 times of the yield strains, respectively. When buckling is suppressed at the center of length, the buckling length are reduced to 8D and 6D and the compressive strengths fall slowly. The compressive stress decreased to 50% of the yield strength at about 16 times and 25 times of the yield strains, respectively. The holding forces increase with larger cross–sectional size of the rebar and shorter buckling length. Based on the test results, the columns should be controlled the buckling length of 6D by banding the steel flat bar. The size of the flat bar depends on the required holding force according to the test results.

Analysis of reinforced concrete columns strengthened by banding of steel flat bar to control buckling of longitudinal bars and to increase shear strength subjected to lateral loading by using ABAQUS program shows that the significant improvement. The columns could resist higher lateral load and displacement. The failure mode is changed from brittle shear mode to ductile bending mode. Thus, strengthening the columns by tying with steel flat bar is one suitable method because it is an easily available material and has a simple installation process.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ เชื้องนิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำและให้คำปรึกษา เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้ความรู้ คำแนะนำต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่อนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ และคอยช่วยเหลือให้คำแนะนำ การใช้เครื่องมือต่าง ๆ จนทำให้ขั้นตอนการทดสอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา คนในครอบครัว ที่คอยช่วยให้กำลังใจ และช่วยสนับสนุน ทั้งทุนและโอกาสในการศึกษามาโดยตลอด รวมถึงเหล่าบุคคลใกล้ชิดทั้ง เพื่อน พี่ และน้อง ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และแนะนำแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดหรือขาดตกบกพร่องประการใด ทางผู้เขียนต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้

อนันตพงษ์ กระจาย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
ขอบเขตของการวิจัย .....	3
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	5
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต.....	5
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้น .....	12
พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	16
การเสริมความแข็งแรงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	20
บทที่ 3 การโก่งเดาะและแรงยึดรั้งของเหล็กเส้น .....	27
วิธีการศึกษาการโก่งเดาะและแรงยึดรั้ง .....	27
ผลการศึกษาการโก่งเดาะและแรงยึดรั้ง .....	31
การเสริมกำลังเพื่อชะลอการโก่งเดาะ.....	39
บทที่ 4 ประสิทธิภาพการเสริมกำลังให้เสาเพื่อรับแรงดัด.....	45

รายละเอียดตัวอย่างเสา.....	45
การเสริมกำลังเสาโดยวิธีคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบน.....	47
การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS.....	51
ผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตที่วิบัติจากแรงเฉือน (Shear failure).....	54
ผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตที่วิบัติจากแรงเฉือนและแรงดัด (Flexure-Shear failure).....	74
บทที่ 5 สรุปผล.....	104
สรุปผลการรับแรงอัดของเหล็กเส้น.....	104
สรุปผลของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	105
บรรณานุกรม.....	108
ประวัติผู้วิจัย.....	110



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตัวอย่างทดสอบการโก่งเดาะของเหล็กเส้น .....	28
ตาราง 2 ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการวิเคราะห์ .....	46
ตาราง 3 กำลังอัดคอนกรีตและแรงตามแนวแกนของตัวอย่างเสา .....	46
ตาราง 4 รายละเอียดเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา.....	46
ตาราง 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับแรงเฉือนจากโมเมนต์ดัด .....	49
ตาราง 6 ขนาดของเหล็กเส้นคาตรัดสำหรับยั้งยั้งการโก่งเดาะ .....	51
ตาราง 7 ขนาดและชนิดเอสิเมนต์ของวัสดุ .....	53
ตาราง 8 แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่ความยาวช่วง 8D.....	105
ตาราง 9 แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่ความยาวช่วง 6D.....	105
ตาราง 10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสา ก่อนเสริมกำลังกับผลการทดสอบ .....	106
ตาราง 11 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาไม่ได้เสริมกำลัง .....	106
ตาราง 12 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่เสริมกำลัง.....	107

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 การวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โรงเรียนพานพิทยาคม จังหวัด เชียงราย.....	2
ภาพ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัด .....	6
ภาพ 3 คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กเสริมตามขวาง .....	7
ภาพ 4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดจาก .....	10
ภาพ 5 แบบจำลองกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต .....	11
ภาพ 6 แบบจำลองกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต .....	12
ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงดึง .....	13
ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงอัด.....	14
ภาพ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงดึง และแรงอัด. 16	
ภาพ 10 ผลของแรงอัดตามแนวแกน 3CLH18 (ชาย) 3CMH18 (ขวา).....	17
ภาพ 11 ผลของแรงอัดตามแนวแกน NCR-9 (ชาย) NCR-10 (ขวา).....	17
ภาพ 12 ผลของปริมาณเหล็กเสริมตามยาว 3SLH18 (ชายบน) 2SLH18 (ขวาบน) 2CMH18 (ชายล่าง) 3CMH18 (ขวาล่าง).....	18
ภาพ 13 ผลของปริมาณเหล็กเสริมตามยาว NCR-1 (ชาย) NCR-3 (ขวา).....	19
ภาพ 14 ผลของระยะเรียงเหล็กปลอก 3CMH18 (ชาย) 3CMD12 (ขวา) .....	19
ภาพ 15 การวิบัติของตัวอย่างคาน.....	21
ภาพ 16 ตัวอย่างเสาที่เสริมความแข็งแรงเพื่อลดการโก่งเดาะ .....	23
ภาพ 17 ผลการเสริมความแข็งแรงเพื่อลดการโก่งเดาะ .....	24
ภาพ 18 ตำแหน่งของการหุ้มตัวอย่างเสา.....	25
ภาพ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างกับการโยกตัวของเสา .....	26

ภาพ 20 ความสัมพันธ์และความเครียดเมื่อรับแรงดึงของตัวอย่างเหล็กเส้น .....	28
ภาพ 21 หัวจับตัวอย่างเหล็ก.....	29
ภาพ 22 การติดตั้งการทดสอบ.....	30
ภาพ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก DB16.....	32
ภาพ 24 แรงยึดรั้งของเหล็ก DB16.....	33
ภาพ 25 รูปแบบการโก่งเดาะของเหล็ก DB16 .....	33
ภาพ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก DB20 .....	35
ภาพ 27 แรงยึดรั้งของเหล็ก DB20 .....	35
ภาพ 28 รูปแบบการโก่งเดาะของเหล็ก DB20.....	36
ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก DB25 .....	37
ภาพ 30 แรงยึดรั้งของเหล็ก DB25.....	38
ภาพ 31 รูปแบบการโก่งเดาะของเหล็ก DB25.....	38
ภาพ 32 แรงยึดรั้งการโก่งเดาะในช่วงความยาว 6D.....	39
ภาพ 33 ตัวอย่างหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	41
ภาพ 34 แรงกระทำเหล็กเส้นแบนโอบรัดเสา .....	41
ภาพ 35 เสาตัวอย่าง C0 (ซ้าย) เสาตัวอย่าง C1 (ขวา) .....	42
ภาพ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัดของเสา.....	42
ภาพ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัดเฉลี่ยในเหล็กเส้น.....	43
ภาพ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดในเหล็กคาคาร์ดี .....	43
ภาพ 39 ลักษณะการวิบัติของเสา C0.....	44
ภาพ 40 ลักษณะการวิบัติของเสา C1.....	44
ภาพ 41 รูปแบบการเสริมเหล็กปลอก .....	47
ภาพ 42 ลักษณะแรงดึงและแรงอัดในเสา .....	48
ภาพ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับโมเมนต์ดัดในเสา .....	49

ภาพ 44	แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่กระทำต่อเหล็กยึดรั้ง.....	50
ภาพ 45	ลักษณะของสร้างโมเดลที่วิเคราะห์.....	51
ภาพ 46	ชื่อและหมายเลขของเหล็กเสริม.....	54
ภาพ 47	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการทดสอบ และการวิเคราะห์เสา 3CMH18.....	56
ภาพ 48	ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	56
ภาพ 49	ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	57
ภาพ 50	ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	57
ภาพ 51	ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	57
ภาพ 52	ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	58
ภาพ 53	ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	58
ภาพ 54	ลักษณะการเสียรูปของเสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	59
ภาพ 55	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์ก่อน เสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เสา 3CMH18.....	60
ภาพ 56	ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	60
ภาพ 57	ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	61
ภาพ 58	ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	61
ภาพ 59	ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	61
ภาพ 60	ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	62
ภาพ 61	ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	62
ภาพ 62	ค่าความเค้นในเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน เสา 3CMH18.....	62
ภาพ 63	ค่าความเค้นในเหล็กโอบรัดรับลดระยะการโก่งเดาะ เสา 3CMH18.....	63
ภาพ 64	ลักษณะการเสียรูป เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง.....	63

ภาพ 65 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ด้านข้าง จากการทดสอบและการวิเคราะห์ เสา 3CMD12.....	65
ภาพ 66 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง .....	65
ภาพ 67 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง.....	66
ภาพ 68 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง .....	66
ภาพ 69 ความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง .....	66
ภาพ 70 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 3 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง .....	67
ภาพ 71 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 3 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง....	67
ภาพ 72 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 4 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง.....	67
ภาพ 73 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 4 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง ...	68
ภาพ 74 ลักษณะการเสียรูป เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง.....	68
ภาพ 75 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ด้านข้าง จากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เสา 2CMD12.....	70
ภาพ 76 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง.....	70
ภาพ 77 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง .....	71
ภาพ 78 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง .....	71
ภาพ 79 ความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง.....	71
ภาพ 80 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง.....	72
ภาพ 81 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง.....	72
ภาพ 82 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง .....	72
ภาพ 83 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง ...	73
ภาพ 84 ความเค้นในเหล็กโอบรับรับแรงเฉือน เสา 3CMD12.....	73
ภาพ 85 ความเค้นในเหล็กโอบรับดัดระยะการโก่งเดาะ เสา 3CMD12.....	73
ภาพ 86 ลักษณะการเสียรูป เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง.....	74

ภาพ 87 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ตัวด้านข้าง จากการทดสอบและการวิเคราะห์ เสา 2CLH18 .....	75
ภาพ 88 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง .....	76
ภาพ 89 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	76
ภาพ 90 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	76
ภาพ 91 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	77
ภาพ 92 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	77
ภาพ 93 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง .....	77
ภาพ 94 ลักษณะการเสียรูป เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง.....	78
ภาพ 95 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ตัวด้านข้าง จากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เสา 2CLH18 .....	79
ภาพ 96 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง.....	80
ภาพ 97 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง.....	80
ภาพ 98 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง .....	80
ภาพ 99 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง.....	81
ภาพ 100 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง.....	81
ภาพ 101 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง.....	81
ภาพ 102 ความเค้นในเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน เสา 2CLH18 .....	82
ภาพ 103 ความเค้นในเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะ เสา 2CLH18.....	82
ภาพ 104 ลักษณะการเสียรูป เสา 2CLH18 หลังเสริมกำลัง.....	82
ภาพ 105 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ตัวด้านข้าง จากการทดสอบและการวิเคราะห์ เสา No. 2.....	84
ภาพ 106 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	84
ภาพ 107 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา No. 2 ก่อนเสริมกำลัง .....	85

ภาพ 108 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	85
ภาพ 109 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	85
ภาพ 110 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	86
ภาพ 111 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	86
ภาพ 112 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	86
ภาพ 113 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	87
ภาพ 114 ลักษณะการเสียรูป เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง.....	87
ภาพ 115 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการวิเคราะห์ ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เส้า No. 2.....	89
ภาพ 116 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	89
ภาพ 117 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	90
ภาพ 118 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	90
ภาพ 119 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	90
ภาพ 120 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	91
ภาพ 121 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	91
ภาพ 122 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	91
ภาพ 123 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	92
ภาพ 124 ความเค้นในเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน เส้า No. 2.....	92
ภาพ 125 ความเค้นในเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะ เส้า No. 2.....	92
ภาพ 126 ลักษณะการเสียรูป เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง.....	93
ภาพ 127 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการทดสอบ และการวิเคราะห์ เส้า No. 4.....	94
ภาพ 128 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง.....	95
ภาพ 129 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง.....	95

ภาพ 130 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	95
ภาพ 131 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีตของเส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	96
ภาพ 132 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	96
ภาพ 133 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	96
ภาพ 134 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	97
ภาพ 135 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	97
ภาพ 136 ลักษณะการเสียรูป เส้า No. 4 ก่อนเสริมกำลัง .....	97
ภาพ 137 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการวิเคราะห์ ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เส้า No. 4 .....	99
ภาพ 138 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	99
ภาพ 139 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	100
ภาพ 140 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	100
ภาพ 141 ความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	100
ภาพ 142 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 3 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	101
ภาพ 143 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 3 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	101
ภาพ 144 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 4 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	101
ภาพ 145 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 4 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	102
ภาพ 146 ความเค้นในเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน เส้า No. 4 .....	102
ภาพ 147 ความเค้นในเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะ เส้า No. 4 .....	102
ภาพ 148 ลักษณะการเสียรูป เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง .....	103

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยในมีการก่อสร้างอาคารสูงคอนกรีตเสริมเหล็ก 3-4 ชั้น มาเป็นจำนวนมาก เดิมทีกฎหมายไม่ได้ควบคุมให้วิศวกรคำนึงถึงแรงแผ่นดินไหว จะมีเพียงมาตรฐานระยะเรียงเหล็กปลอกเบื้องต้น คือ ไม่มากกว่าความลึกประสิทธิภาพ 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว และ 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามขวาง ซึ่งมีระยะเรียงที่ห่างมากเกินไป ต่อมาเมื่อปี พ.ศ. 2550 ได้มีมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ 1301 (1301, 2007, กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2564) โดยจะลดระยะเรียงการเสริมเหล็กตามขวางให้ถี่ขึ้นจากเดิมครึ่งหนึ่ง คือ ไม่มากครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพ ครึ่งหนึ่งของความกว้างเสา 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว และ 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามขวาง แต่หลักการในการออกแบบโครงสร้างให้สามารถต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวจะต้องออกแบบให้คานซึ่งมีพฤติกรรมแบบเหนียว มีกำลังรับโมเมนต์ตัดได้น้อยกว่าเสา เพื่อให้โครงสร้างสลายพลังงานที่บริเวณคาน โดยที่เสาไม่เกิดความเสียหาย เพราะถ้าหากเสาเกิดความเสียหายมากจนเกินไป อาคารจะพังทลายลงมาได้ ปัจจุบันนี้ประเทศไทยมีรายงานการเกิดแผ่นดินไหวที่บ่อยขึ้นและรุนแรงขึ้นเนื่องจากรอยเลื่อนในประเทศไทยมีอยู่จำนวนมาก เช่น รอยเลื่อนพะเยา รอยเลื่อนอุตรดิตถ์ รอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงคาดการณ์ว่า อาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจำนวนมากมีโอกาสเสี่ยงจะเกิดการพังทลายหากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงขึ้น ถ้าหากเป็นอาคารสาธารณะที่มีจำนวนผู้ใช้หรือผู้อยู่อาศัยจำนวนมาก หากอาคารพังถล่มจะทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินอย่างมาก ตัวอย่างการเกิดแผ่นดินไหว ขนาด 6.3 ริกเตอร์ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2557) สิ่งปลูกสร้างในจังหวัดเชียงรายและใกล้เคียงได้รับความเสียหาย และสามารถรับรู้แรงสั่นสะเทือนถึงตึกสูงในจังหวัดกรุงเทพฯ และจากการลงตรวจสอบสวนความเสียหาย พบว่า การวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนในโครงสร้างเสาเป็นหลัก (ดูภาพ 1) โดยเหล็กเสริมตามยาวจะโก่งเดาะและต้นคอนกรีตที่หุ้มเหล็กไว้จนแตก ซึ่งเกิดจากเหล็กปลอกมีระยะเรียงที่ห่างมากจนเกินไป



ภาพ 1 การวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
โรงเรียนพานพิทยาคม จังหวัดเชียงราย

ที่มา: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2557, สืบออนไลน์

เมื่อเสารับแรงด้านข้าง จะเกิดแรงอัดและแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กตามยาวในแต่ละด้าน โดยด้านที่รับแรงดึงเหล็กตามยาวจะเกิดการยืดตัวซึ่งส่งผลกระทบต่อเหล็กปลอกและคอนกรีตที่หุ้มเหล็ก แต่ในด้านที่รับแรงอัดเมื่อแรงในเหล็กตามยาวถึงจุดครากเหล็กตามยาวจะเกิดการโก่งตัวจนไปดันเหล็กปลอกเนื่องจากระยะการโก่งเดาะที่เพิ่มมากขึ้น หากเหล็กปลอกสามารถรับแรงดันทที่เกิดจากการโก่งเดาะได้จะทำให้ช่วงการโก่งเดาะมีค่าเท่ากับระยะเรียงของเหล็กปลอก (1S) แต่ถ้าเหล็กปลอกรับแรงดันทที่เกิดขึ้นไม่ไหวจะทำให้เกิดช่วงการโก่งเดาะที่มากกว่าระยะเรียง อาจจะเป็น 2 หรือ 3 เท่าของระยะเรียงเหล็กปลอก (2S, 3S) และเมื่อเหล็กตามยาวเกิดการโก่งเดาะเหล็กจะไปดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กจนแตกไม่สามารถรับแรงอัดได้อีกต่อไป

การวิบัติของเสาเนื่องจากการรับแรงทางด้านข้างโดยทั่วไปจะมีการวิบัติอยู่ 4 แบบ คือ (ก) การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด (Flexural failure) จะเกิดรอยแตกกว้างเป็นแนวราบขนานไปกับหน้าตัดเสา (ข) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear failure) เกิดรอยแตกกว้างเป็นทแยงที่ตำแหน่งโคนเสาหรือปลายเสาในระยะ  $1.5D$  โดย  $D$  คือ ความกว้างเสา (ค) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (Shear-flexural failure) จะเกิดทั้งรอยแตกในแนวราบและรอยแตกแนวทแยง (ง) การวิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว (Rebar buckling) เหล็กเสริมตามยาวจะโก่งออกด้านข้างและดันคอนกรีตหุ้มจนแตกหลุดออกมาที่ตำแหน่งโคนเสาหรือ

ปลายเสาในระยะ 1.5D ซึ่งโครงสร้างเสาของอาคารเดิมที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว เมื่อต้องรับแรงด้านข้างแล้วจะวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน หรือแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด รวมถึงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติแบบเปราะที่ต้องหลีกเลี่ยง ทำให้มีผู้ศึกษาวิจัยพยายามหาวิธีการเสริมความแข็งแรงให้กับเสาเพื่อไม่ให้วิบัติในลักษณะดังกล่าว เช่น การหุ้มเสาดด้วยแผ่นเหล็ก (Steel jacketing) การพันเสาดด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP wrapping) และการหุ้มเสาดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete jacketing) ซึ่งทำให้โครงสร้างเสาสามารถรับแรงเฉือนได้มากขึ้นและโยกตัวด้านข้างได้มากขึ้น (Truong, Kim and Choi, 2017) แต่การซ่อมแซมด้วยวิธีดังกล่าวมีต้นทุนที่สูง และมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก ในการศึกษาวิจัยนี้ จึงศึกษาวิธีการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างเสาโดยใช้เหล็กเส้นแบน (Steel flat bar) โอบรัดเป็นระยะ ๆ เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน และลดความยาวช่วงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเสามีความสามารถในการโยกตัวด้านข้างได้มากขึ้น และสลายพลังงานได้มากขึ้น หากผลการศึกษาเป็นที่น่าพอใจ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบซ่อมแซมเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงด้านข้างที่มีลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear failure) หรือแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด (Shear-flexural failure) โดยใช้โปรแกรม ABAQUS
2. เพื่อศึกษาแรงยึดรั้งตามขวางที่ต้องการเพื่อให้เหล็กเส้นรับแรงอัดในช่วงความยาวการโก่งเดาะที่ต้องการโดยการทดสอบ
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงด้านข้างที่มีลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear failure) หรือแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด (Shear-flexural failure) แล้วทำการเสริมความแข็งแรงโดยใช้เหล็กเส้นแบนโอบรัด โดยใช้โปรแกรม ABAQUS

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความเสียหายของโครงสร้างเสาชั้นที่ 1 โดยจะออกแบบแรงกระทำเป็นแรงด้านข้างเพื่อจำลองแรงแผ่นดินไหว
2. คุณสมบัติของเหล็กเส้นแบนที่ใช้ในการเสริมความแข็งแรงจะเป็นเหล็กแบนที่มีขายตามท้องตลาดเพื่อให้ง่ายต่อการจัดหาและการติดตั้ง

### ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงแรงยึดรั้งที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามขวางที่จำเป็นเมื่อเหล็กเสริมตามยาวรับแรงอัดแล้วเกิดการโก่งเดาะในความยาวช่วงที่เหมาะสมเพื่อนำแรงดังกล่าวไปออกแบบการเสริมความแข็งแรงต่อไป
2. มีแนวทางการเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างเสาโดยวิธีเหล็กเส้นแบนโอบรัดได้อย่างเหมาะสม



## บทที่ 2

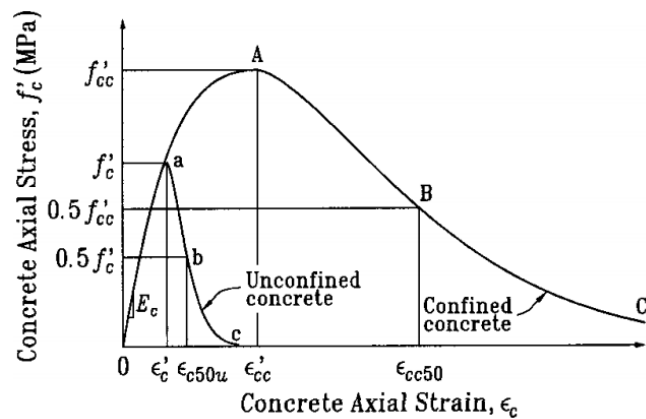
### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการศึกษาและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้เป็นอย่างดี โดยคอนกรีตจะถูกจำลองให้เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันถึงแม้จะมีรอยแตกร้าวขึ้นโดยพิจารณาความเค้นและความเครียดในทิศทางหลัก (Principal directions) และจำลองเหล็กเส้นเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงเฉพาะแรงในแนวแกน ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีความถูกต้องเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเส้นนั้นใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงเฉพาะเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต และเหล็กเส้น และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในการรับแรงดันท่าง

#### ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต

##### 1. แบบจำลองกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

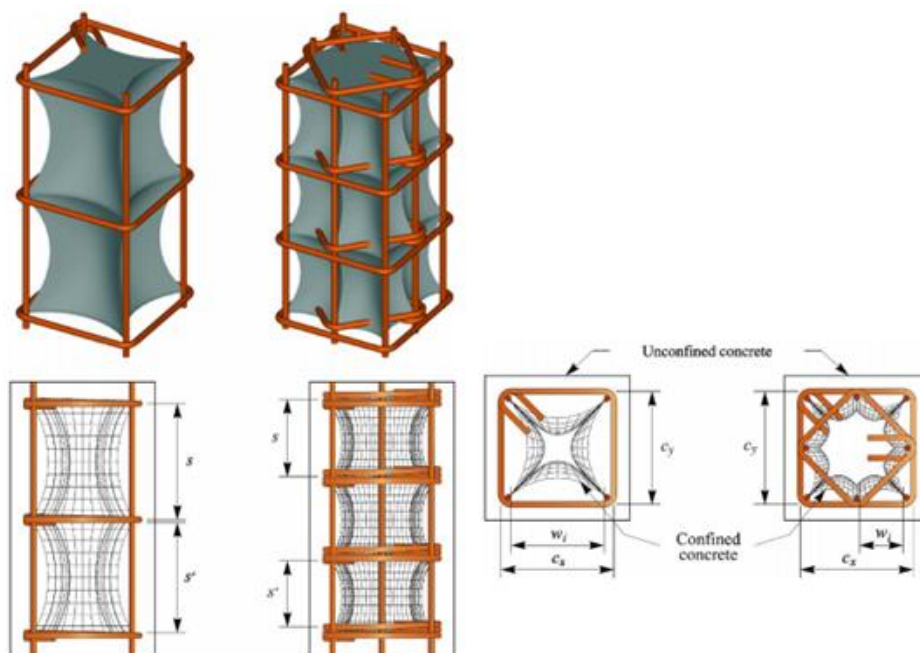
เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งมีงานวิจัยหลายชิ้นได้นำเสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยส่วนใหญ่สมการจะขึ้นอยู่กับจุดที่กำลังอัดสูงสุด และจุดที่กำลังอัดตกเหลือ 50% ดังแสดงในภาพที่ 2 ถ้าเป็นคอนกรีตเปล่าไม่ได้ถูกโอบรัดจุดที่กำลังอัดสูงสุด คือ จุด a ( $\epsilon_c', f_c'$ ) และจุดที่กำลังอัดตกเหลือ 50% คือ จุด b ( $\epsilon_{cc50}, 0.5f_c'$ ) ซึ่งมีความเครียดน้อยมากประมาณ 0.004-0.005 กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีแรงดันโอบรัดจากเหล็กปลอก ซึ่งแรงดันจากเหล็กปลอกจะเกิดขึ้นเมื่อเสาคอนกรีตรับแรงอัดตามแนวแกนแล้วคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกด้านข้าง เหล็กปลอกที่โอบรัดไว้จึงออกแรงดันต้านไว้ ทำให้จุด A กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น  $f_{cc}$  ที่ความเครียด  $\epsilon_{cc}'$  และจุด B ที่กำลังอัดตกเหลือ 50% ความเครียดจะยืดออกไปเป็น  $\epsilon_{cc50}$  ซึ่งจะยืดออกไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงดันโอบรัดจากเหล็กปลอก ด้วยพฤติกรรมนี้จึงมีแนวคิดการเสริมเหล็กปลอกให้โครงสร้างเสาเพื่อให้คอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้โดยที่ความเครียดอัดแตกเพิ่มขึ้น แล้วพฤติกรรมการโยกตัวของโครงสร้างเสาจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัด

ที่มา: Legeron and Paultre, 2003

ภาพ 3 แสดงคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กเสริมตามขวาง หากพิจารณาในแนวตั้ง จะเห็นว่าคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะมีพื้นที่มาก ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมตามขวาง และมีพื้นที่น้อยลงสำหรับคอนกรีตที่อยู่ระหว่างเหล็กเสริมตามขวาง เมื่อพิจารณาหน้าตัดเสาจะพบว่า คอนกรีตที่มุมเหล็กปลอกจะถูกโอบรัดมาก และน้อยลงเมื่อคอนกรีตอยู่ระหว่างมุมเหล็กปลอก ดังนั้นประสิทธิภาพของเหล็กปลอกในการโอบรัดคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการเสริมเหล็กเสริมตามขวาง และระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวาง



ภาพ 3 คอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กเสริมตามขวาง

ที่มา: Legeron and Paultre, 2003

ในที่นี้จะลองนำสมการที่เสนอโดย (Legeron and Paultre, 2003) มาแสดงรายการคำนวณเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด ในที่นี้สมมติว่าเสามีขนาด  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  เสริมเหล็กตามยาว 8-DB16 เสริมเหล็กปลอก RB9 ระยะเรียง 150 mm และกำลังอัดของคอนกรีตไม่ได้ถูกโอบรัดเท่ากับ 24 MPa ความเครียดที่จุดกำลังตกเหลือ 50% เท่ากับ 0.0038 การคำนวณจะมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 อัตราส่วนของเหล็กปลอก ( $\rho_s$ )

$$\rho_s = \left( \frac{N_x \pi D^2}{C_x S} + \frac{N_y \pi D^2}{C_y S} \right) / 2 = \left( \frac{2\pi(9)^2}{220 \times 150} + \frac{2\pi(9)^2}{220 \times 150} \right) / 2 = 0.003856$$

โดย  $N_x N_y$  คือ จำนวนของเหล็กปลอกในแต่ละแนวแกน  
 $C_x C_y$  คือ ความยาวเหล็กปลอกในแต่ละแนวแกน (mm)  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กปลอก (mm)  
 $S$  คือ ระยะช่องว่างระหว่างเหล็กปลอกถึงเหล็กปลอก (mm)

ขั้นตอนที่ 2 อัตราส่วนของเหล็กตามยาวต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่ผูกโอบรัด ( $\rho_{cc}$ )

$$\rho_{cc} = \frac{A_{sl}}{C_x C_y} = \frac{8\pi(16)^2}{4 \times 220 \times 220} = 0.03323$$

โดย  $A_{sl}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กตามยาว (mm<sup>2</sup>)

ขั้นตอนที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงประสิทธิภาพของเหล็กปลอก ( $K_e$ )

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum W_i^2}{6C_x C_y}\right) \left(1 - \frac{S'}{2C_x}\right) \left(1 - \frac{S'}{2C_y}\right)}{(1 - \rho_{cc})} = \frac{\left(1 - \frac{8 \times (77)^2}{6 \times 220 \times 220}\right) \left(1 - \frac{141}{2 \times 220}\right) \left(1 - \frac{141}{2 \times 220}\right)}{(1 - 0.03323)} = 0.4386$$

โดย  $W_i$  คือ ระยะช่องว่างระหว่างเหล็กตามยาวถึงเหล็กตามยาวของเสา (mm)

$S'$  คือ ระยะช่องว่างระหว่างเหล็กปลอกถึงเหล็กปลอก (mm)

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาจุดกำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่าสูงขึ้น

1. เหล็กปลอกประสิทธิผล ( $\rho_{se}$ )

$$\rho_{se} = K_e \rho_s = 0.4386 \times 0.003856 = 0.001691$$

2. พารามิเตอร์สำหรับพิจารณากำลังโอบรัดของเหล็กปลอก ( $\kappa$ )

$$\kappa = \frac{f'_c}{\rho_{se} E_s \varepsilon'_c} = \frac{24}{0.001691 \times 200000 \times 0.002} = 35.47$$

โดย  $f'_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตไม่ได้ผูกโอบรัด เท่ากับ 24 MPa

$E_s$  คือ โมดูลัสของยัง ของเหล็ก เท่ากับ 200000 MPa

$\varepsilon'_c$  คือ ความเครียดที่กำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 0.002

3. ความเค้นดึงในเหล็กปลอกขณะที่โอบรัด ( $f'_h$ ) คำนวณได้จาก

$$f'_h = \begin{cases} f_{hy} & \kappa \leq 10 \\ \frac{0.25 f'_c}{\rho_{se} (\kappa - 10)} \geq 0.43 \varepsilon'_c E_s \neq f_{hy} & \kappa > 10 \end{cases} = 172 \text{ MPa}$$

โดย  $f_{hy}$  คือ ความเค้นครากของเหล็กปลอก เท่ากับ 240 MPa

4. แรงดันประสิทธิผลที่เหล็กปลอกโอบรัด ( $f'_{le}$ )

$$f'_{le} = \rho_{se} f'_h = 0.001691 \times 172 = 0.291 \text{ MPa}$$

5. ดัชนีแรงดันโอบรัดที่จุดกำลังอัดสูงสุด ( $I'_e$ )

$$I'_e = \frac{f'_{le}}{f'_c} = \frac{0.291}{24} = 0.0121$$

6. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ( $f'_{cc}$ )

$$f'_{cc} = \left[ 1 + 2.4(I'_e)^{0.7} \right] f'_c = \left[ 1 + 2.4(0.0121)^{0.7} \right] 24 = 26.6 \text{ MPa}$$

7. ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ( $\epsilon'_{cc}$ )

$$\epsilon'_{cc} = \left[ 1 + 35(I'_e)^{1.2} \right] \epsilon'_c = \left[ 1 + 35(0.0121)^{1.2} \right] 0.002 = 0.00235$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาจุดกำลังอัดของคอนกรีตที่ตกเหลือ 50%

1. ดัชนีแรงดันโอบรัดที่จุดกำลังตกเหลือ 50% ( $I_{e50}$ )

$$I_{e50} = \rho_{se} \frac{f_{hy}}{f'_c} = 0.001691 \frac{240}{24} = 0.01691$$

2. ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดที่กำลังอัดตกเหลือ 50% ( $\epsilon_{cc50}$ )

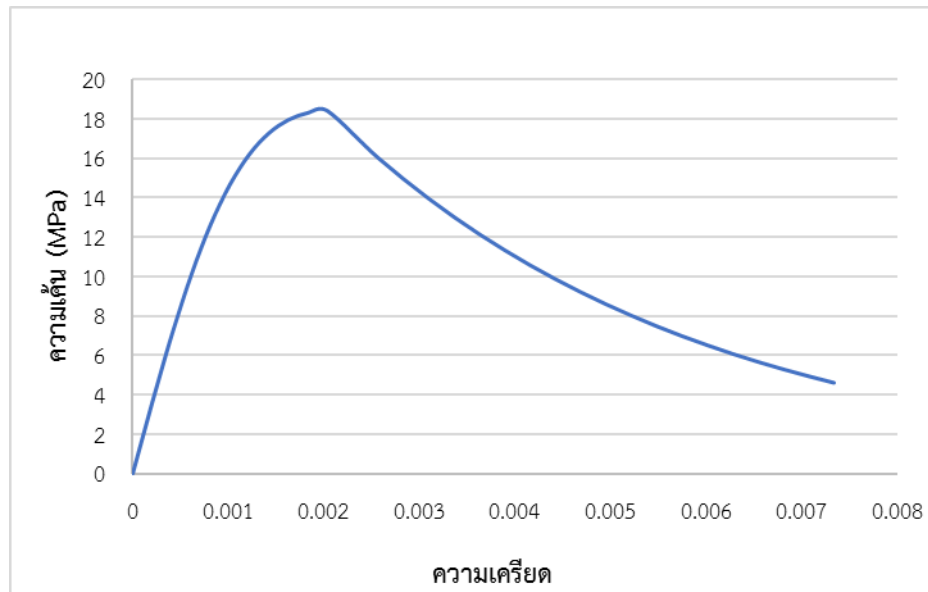
$$\epsilon_{cc50} = \left[ 1 + 60I_{e50} \right] \epsilon_{c50} = \left[ 1 + (60 \times 0.01691) \right] 0.0038 = 0.007656$$

ขั้นตอนที่ 6 นำค่าความเค้นและความเครียดที่จุดกำลังอัดสูงสุดและที่จุดกำลังอัดตกลงมา 50% มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด โดยแบ่งสมการเป็น 2 ช่วงตามความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ( $\epsilon'_{cc}$ )

$$f_{cc} = f'_{cc} \left[ \frac{k(\epsilon_{cc} / \epsilon'_{cc})}{k - 1 + (\epsilon_{cc} / \epsilon'_{cc})^k} \right] \quad \text{ในช่วง } \epsilon_{cc} \leq \epsilon'_{cc}$$

$$f_c = f'_{cc} \exp \left[ k_1 (\epsilon_{cc} - \epsilon'_{cc})^{k_2} \right] \quad \text{ในช่วง } \epsilon_{cc} > \epsilon'_{cc}$$

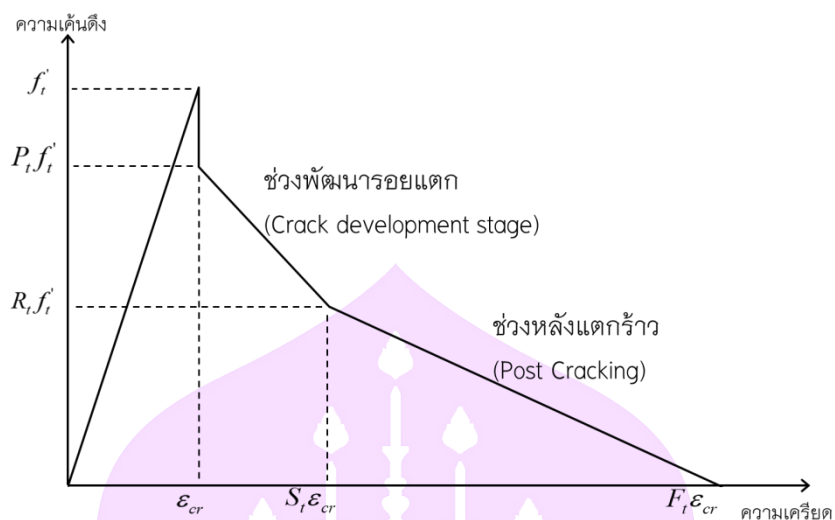
จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดดังภาพที่ 4 ซึ่งมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด



ภาพ 4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจาก

## 2. แบบจำลองกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

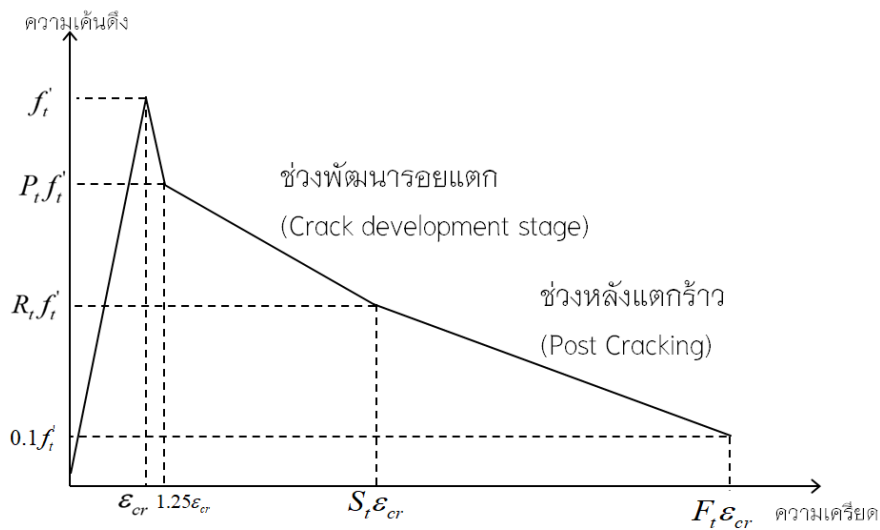
โดยทั่วไปจุดเด่นของคอนกรีตอยู่ที่การรับแรงอัดได้ดี แต่กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังอัดประมาณ  $0.1f'_c$  เมื่อคอนกรีตรับแรงดึงถึงจุดกำลังรับแรงดึงแล้วจะเกิดรอยแตกกว้าง เมื่อคอนกรีตแตกกว้างจะทำให้โครงสร้างมีการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงจำเป็นต้องพิจารณาการรับแรงดึงของคอนกรีตด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของการรับแรงดึงของคอนกรีต ในการวิเคราะห์จะต้องครอบคลุมถึงช่วงหลังจุดความเค้นดึงสูงสุดด้วย เนื่องจากจะเป็นจุดที่คอนกรีตมีความเค้นดึงลดลง (Tension softening) และเริ่มเกิดการแตกกว้าง ซึ่งจะมีผลต่อการรับแรงดึงของคอนกรีตเป็นอย่างมาก มีนักวิจัยหลายคนเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงดึง (Nayal and Rasheed, 2006) ได้ศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเมื่อมีการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมตามยาว โดยเสนอกำลังรับแรงดึงแตกกว้าง  $f'_t = 0.3f'_c{}^{2/3}$  และแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตหลังแตกกว้าง โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงพัฒนารอยแตก ( $\epsilon_{cr} - S_t \epsilon_{cr}$ ) และ ช่วงหลังแตกกว้าง ( $S_t \epsilon_{cr} - F_t \epsilon_{cr}$ ) ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งพารามิเตอร์  $P_t$ ,  $R_t$ ,  $S_t$  และ  $F_t$  ได้จากวิเคราะห์ทางสถิติที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ โดยมีค่า 0.80 0.45 4.0 และ 10.0 ตามลำดับ



ภาพ 5 แบบจำลองกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ที่มา: Noyal and Rasheed, 2006

ต่อมา (Wahalathantri, et al., 2011) ได้ปรับแก้สมการของ (Noyal and Rasheed, 2006) เพียงเล็กน้อย โดยพบว่า ค่าคงที่บางตัวมีค่าลดลงเล็กน้อย ได้แก่  $P_t$  และ  $F_t$  ลดเหลือ 0.77 และ 8.7 ตามลำดับ ส่วนความเครียดเริ่มต้นของช่วงพัฒนารอยแตกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย เป็น  $1.25\varepsilon_{cr}$  ซึ่งก่อนหน้านี้นี้จะเป็นจุดเดียวกับจุดความเค้นดึงสูงสุด และค่าความเค้นดึงสุดท้ายเมื่อเกิดการวิบัติจาก 0 เพิ่มขึ้นเป็น  $0.1f'_t$  ได้รูปแบบของกราฟความเค้นต่อความเครียดดังภาพที่ 6

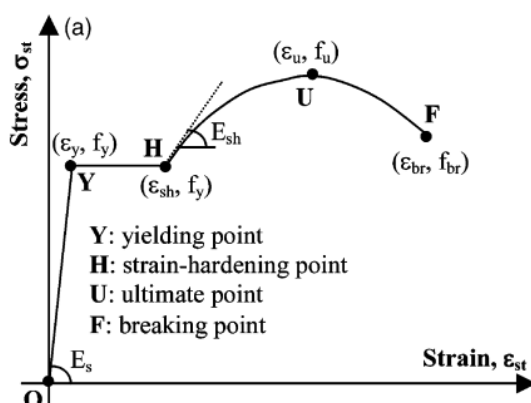


ภาพ 6 แบบจำลองกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ที่มา: Wahalathantri, et al., 2011

#### ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้น

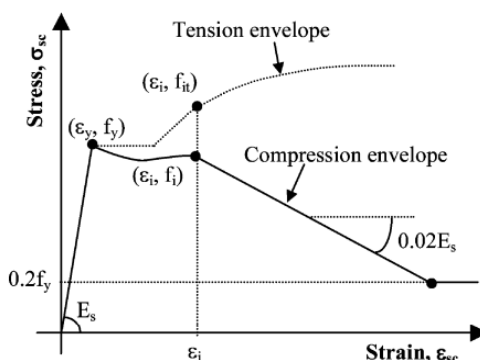
เป็นที่ทราบกันดีว่าคุณสมบัติเด่นของเหล็กคือการรับแรงดึง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงดึงแสดงในภาพที่ 7 โดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ (1) ช่วงอีลาสติก (O-Y) คือ ช่วงที่ความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด (2) ช่วงคราก (Y-H) เป็นช่วงที่เหล็กครากโดยยึดออกโดยที่แรงดึงคงที่ (3) ช่วงความเครียดที่กำลังดึงเพิ่มขึ้น (H-U) เป็นช่วงที่เหล็กเริ่มเกิดคอคอดทำให้หน้าตัดของเหล็กในส่วนนั้นเล็กลงเรื่อย ๆ แต่การรับกำลังดึงจะเพิ่มมากขึ้น (4) ช่วงประลัย (U-F) เป็นช่วงที่มีกำลังดึงสูงสุด แต่ผลจากคอคอดทำให้เหล็กบริเวณนั้นเกิดรอยฉีกและรอยฉีกขยายออกจนเหล็กขาด



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงดึง

ที่มา: Dhakal and Maekawa, 2002

การรับแรงอัดของเหล็กเส้นจะมีกำลังน้อยกว่ากำลังรับแรงดึง พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกำลังการรับแรงอัดของเหล็ก คือ ความยาวช่วงการโก่งเดาะ ( $L$ ) เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D$ ) และกำลังคราก  $f_y$  ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงอัดจะมีลักษณะดังภาพ 8 โดยมี 3 ช่วง คือ (1) ช่วงอิลาสติก ช่วงที่ความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด (2) ช่วงเริ่มเกิดการโก่งเดาะหลังจากจุดคราก กำลังอัดของเหล็กเส้นอาจตกลงเพียงเล็กน้อย (3) ช่วงหลังโก่งเดาะ เมื่อเหล็กเส้นรับแรงอัดจนโก่งเดาะอย่างชัดเจนจะทำให้กำลังรับแรงอัดตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีนักวิจัยหลายคนเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงอัด เช่น Dhakal and Maekawa (2002); Lynn (et al., 1996)



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงอัด

ที่มา: Dhakal and Maekawa, 2002

ในที่นี้จะลงนําสมาการที่เสนอโดย (Dhakal and Maekawa, 2002) มาแสดงการคำนวณ เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงดึง และแรงอัด กำหนดให้เหล็กขนาด ( $D$ ) เท่ากับ 20 mm ความเค้นสูงสุด ( $f_u$ ) เท่ากับ 500 MPa ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด ( $\epsilon_u$ ) 0.1 ความเค้นที่จุดคราก ( $f_y$ ) เท่ากับ 290 MPa ความเครียดที่จุดคราก ( $\epsilon_y$ ) เท่ากับ 0.00145 โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก ( $E_s$ ) เท่ากับ 200 GPa กรณีสรับแรงอัดความยาวช่วงการโก่งเดาะ ( $L$ ) เท่ากับ 160 mm ขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

1. เหล็กเส้นรับแรงดึง

1.1 ช่วงอีลาสติก  $\epsilon_{st} \leq \epsilon_y$

ค่าความเค้น  $\sigma_{st} = E_s \epsilon_{st}$

1.2 ช่วงคราก  $\epsilon_y < \epsilon_{st} \leq \epsilon_{sh}$

ค่าความเค้น  $\sigma_{st} = f_y$

1.3 ช่วงความเครียดที่กำลังดึงเพิ่มขึ้น  $\epsilon_{sh} < \epsilon_{st} \leq \epsilon_u$

1.3.1 หาค่าความเครียดที่กำลังดึงเพิ่มขึ้น ( $\epsilon_{sh}$ )

$$\epsilon_{sh} = 11.7 \epsilon_y \quad \text{ได้ค่า} \quad \epsilon_{sh} = 0.0169$$

1.3.2. หาค่าโมดูลัสของยัง ของเหล็กที่กำลังดึงเพิ่มขึ้น ( $E_{sh}$ )

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{\epsilon_u - \epsilon_{sh}} \quad \text{ได้ค่า} \quad E_{sh} = 2529.05 \text{ MPa}$$

1.3.3 หาค่าพารามิเตอร์ควบคุมเส้นโค้ง ( $P$ )

$$P = E_{sh} \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}{f_u - f_y} \right) \quad \text{ได้ค่า } P = 1.0$$

$$\text{ค่าความเค้น } \sigma_{st} = f_u + (f_y + f_u) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^P$$

## 2. เหล็กเส้นรับแรงอัด

$$2.1 \text{ ช่วงอีลาสติก } \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_y$$

$$\text{ค่าความเค้น } \sigma_{sc} = E_s \varepsilon_{sc}$$

$$2.2 \text{ ช่วงเริ่มเกิดการโก่งเดาะหลังจากจุดคราก } \varepsilon_y < \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_i$$

$$2.2.1 \text{ หาค่าจุดความเครียดเริ่มต้นของ ช่วงหลังโก่งเดาะ } (\varepsilon_i)$$

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_y} = 55 - 2.3 \sqrt{\frac{f_y L}{100 D}}; \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_y} \geq 7 \quad \text{ได้ค่า } \varepsilon_i = 0.0343$$

$$2.2.2 \text{ หาค่าจุดความเค้นเริ่มต้นของ ช่วงหลังโก่งเดาะ } \left( \frac{f_i}{f_{it}} \right)$$

$$\frac{f_i}{f_{it}} = \alpha \left( 1.1 - 0.016 \sqrt{\frac{f_y L}{100 D}} \right); \frac{f_i}{f_y} \geq 0.2$$

$$\text{โดยค่า } \alpha = 0.75 + \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}{300 \varepsilon_y}; \alpha \leq \frac{f_u}{1.5 f_y}; 0.75 \leq \alpha \leq 1.0$$

$$\text{ค่าความเค้น } \frac{\sigma_{sc}}{\sigma_t} = 1 - \left( 1 - \frac{f_i}{f_{it}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{sc} - \varepsilon_y}{\varepsilon_i - \varepsilon_y} \right) \quad \text{โดย } \sigma_t \text{ คือ ค่าความเค้นดึง}$$

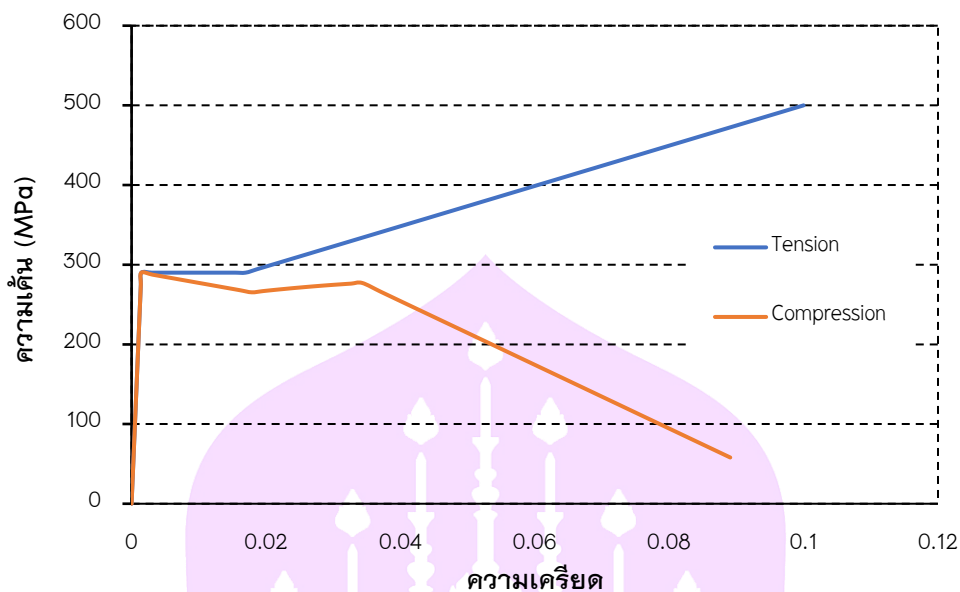
ที่ความเครียด  $\varepsilon_i$

$$2.3 \text{ ช่วงหลังโก่งเดาะ } \varepsilon_{sc} > \varepsilon_i$$

$$\text{ค่าความเค้น } \sigma_{sc} = f_i - 0.02 E_s (\varepsilon_{sc} - \varepsilon_i); \sigma_{sc} \geq 0.2 f_y$$

เมื่อนำค่าความเค้นและความเครียดที่ได้จากสมการในแต่ละช่วงมาวาดกราฟ

ความสัมพันธ์จะได้ดังภาพที่ 9

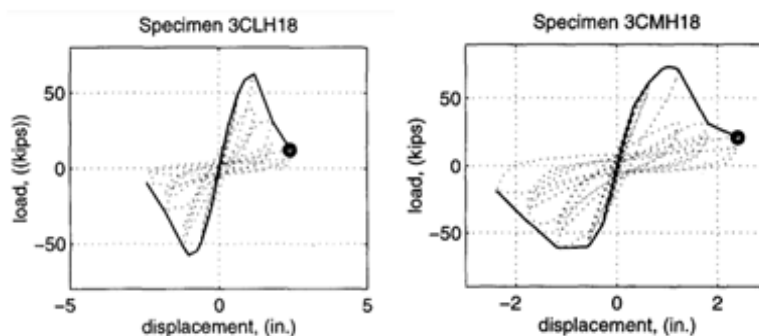


ภาพ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นรับแรงดึงและแรงอัด

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงต้านข้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 1. แรงอัดตามแนวแกน

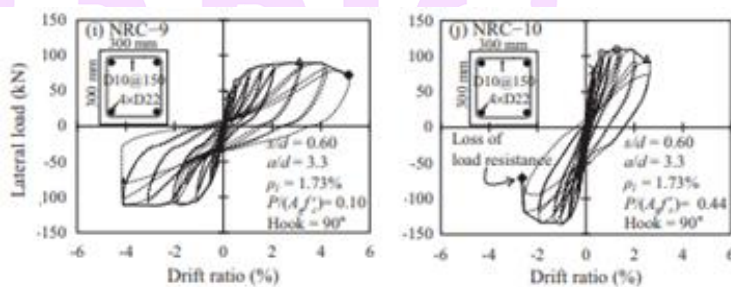
Lynn, et al. (1996) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงต้านข้างของเสาเนื่องจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยมีตัวอย่างทดสอบที่ให้แรงอัดตามแนวแกนต่างกัน คือ ตัวอย่าง 3CLH18 ที่มีแรงอัดตามแนวแกนเท่ากับ  $0.12A_g f_c'$  และตัวอย่าง 3CMH18 ที่มีแรงอัดตามแนวแกนเท่ากับ  $0.35A_g f_c'$  ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าแรงกระทำตามแนวแกนที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการโยกตัวของเสาลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มแรงที่ไม่มาก แต่ในทางกลับกันพบว่ากำลังรับแรงต้านข้างของเสาเพิ่มมากขึ้น



ภาพ 10 ผลของแรงอัดตามแนวแกน 3CLH18 (ชาย) 3CMH18 (ขวา)

ที่มา: Lynn, et al., 1996

Choi, Truong and Kim (2016) ได้ทำการทดสอบเสาตัวอย่าง NRC-9 และ NRC-10 ที่มีแรงตามแนวแกนอยู่ที่  $0.10A_g f'_c$  และ  $0.44A_g f'_c$  ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มแรงอัดตามแนวแกนจะส่งผลให้ความสามารถในการโยกตัวของเสาลดลงอย่างเห็นได้ชัด และกำลังการรับแรงดันทันข้างก็เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกัน



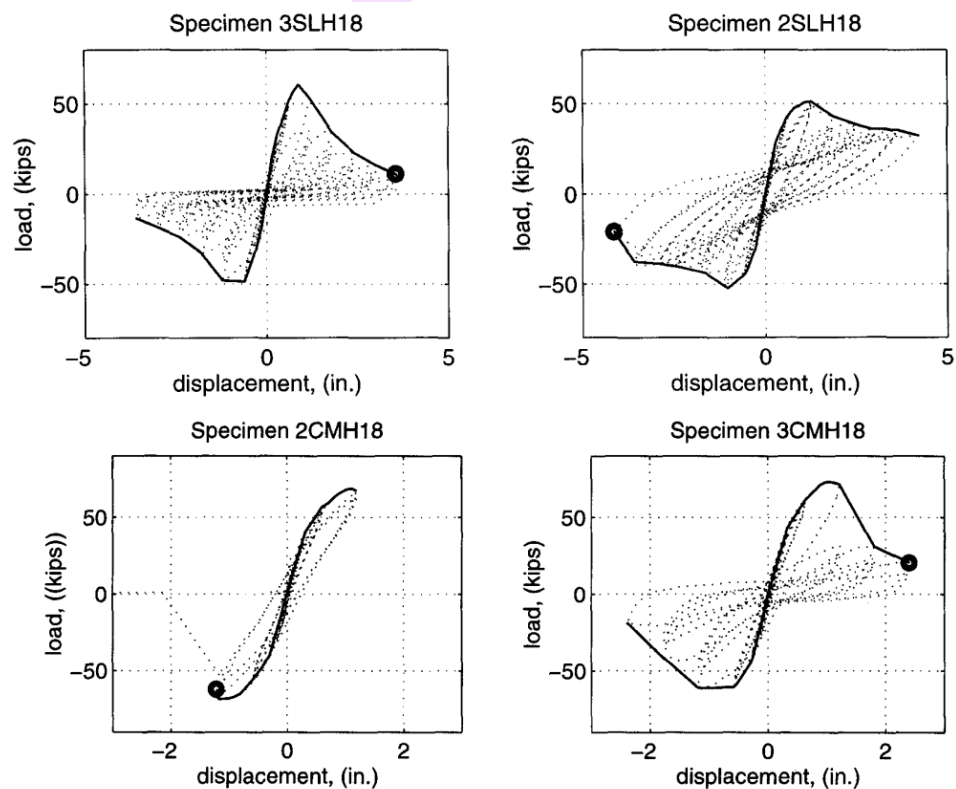
ภาพ 11 ผลของแรงอัดตามแนวแกน NRC-9 (ชาย) NRC-10 (ขวา)

ที่มา: Choi, Truong and Kim, 2016

## 2. ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว

Lynn, et al. (1996) ศึกษาผลของปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงดันทันข้างของเสา ตัวอย่างเสา 3SLH18 เทียบกับ 2SLH18 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่อพื้นที่หน้าตัดเสา เท่ากับ 3% และ 2% ตามลำดับ และตัวอย่างเสา 2CMH18 เทียบกับ

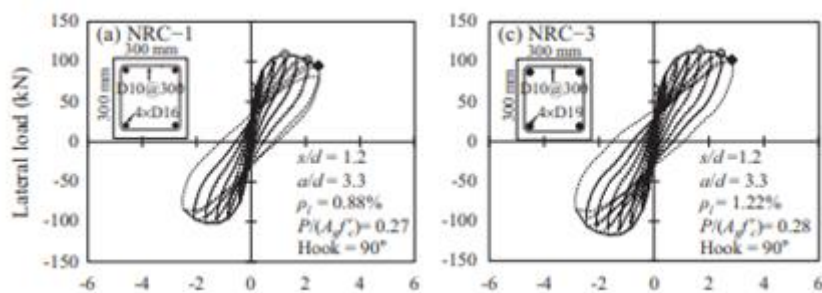
3CMH18 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 2% และ 3% ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามยาวทำให้ความสามารถในการรับแรงด้นข้างของเสาสูงขึ้น เล็กน้อย แต่กลับทำให้ความสามารถในการโยกตัวของเสาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงใน ภาพที่ 12



ภาพ 12 ผลของปริมาณเหล็กเสริมตามยาว 3SLH18 (ซ้ายบน) 2SLH18 (ขวาบน) 2CMH18 (ซ้ายล่าง) 3CMH18 (ขวาล่าง)

ที่มา: Lynn, et al., 1996

Choi, Truong and Kim (2016) ได้ทดสอบเสาที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่างกัน คือ ตัวอย่าง NRC-1 และ ตัวอย่าง NRC-3 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวต่อพื้นที่หน้าตัดเสา เท่ากับ 0.88% และ 1.22% ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แม้จะเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามยาว การโยกตัวของเสาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

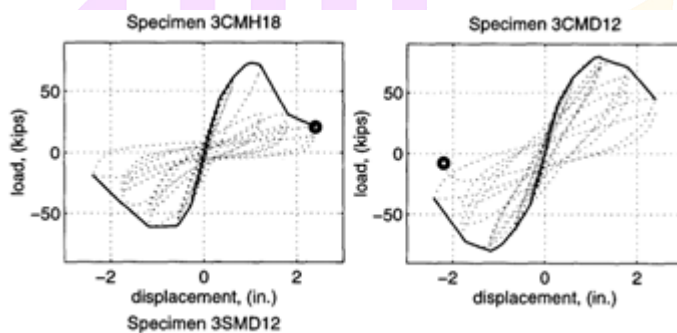


ภาพ 13 ผลของปริมาณเหล็กเสริมตามยาว NCR-1 (ชาย) NCR-3 (ขวา)

ที่มา: Choi, Truong and Kim, 2016

### 3. ระยะเรียงเหล็กปลอก

Lynn, et al. (1996) ทำการทดสอบตัวอย่างเสา 3CMH18 ที่มีระยะเรียง 18 นิ้ว เทียบกับตัวอย่าง 3CMD12 ระยะเรียง 12 นิ้ว ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 14 จะพบว่า ระยะเรียงเหล็กปลอก มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการรับแรงดันทันข้าง โดยรับแรงได้เพิ่มขึ้นและสามารถโยกตัวด้านข้างได้มากขึ้น นอกจากนี้เหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่าง 3CMH18 มีการโค้งเดาะ จึงทำให้กำลังการรับแรงดันทันข้างลดลงอย่างรวดเร็ว



ภาพ 14 ผลของระยะเรียงเหล็กปลอก 3CMH18 (ซ้าย) 3CMD12 (ขวา)

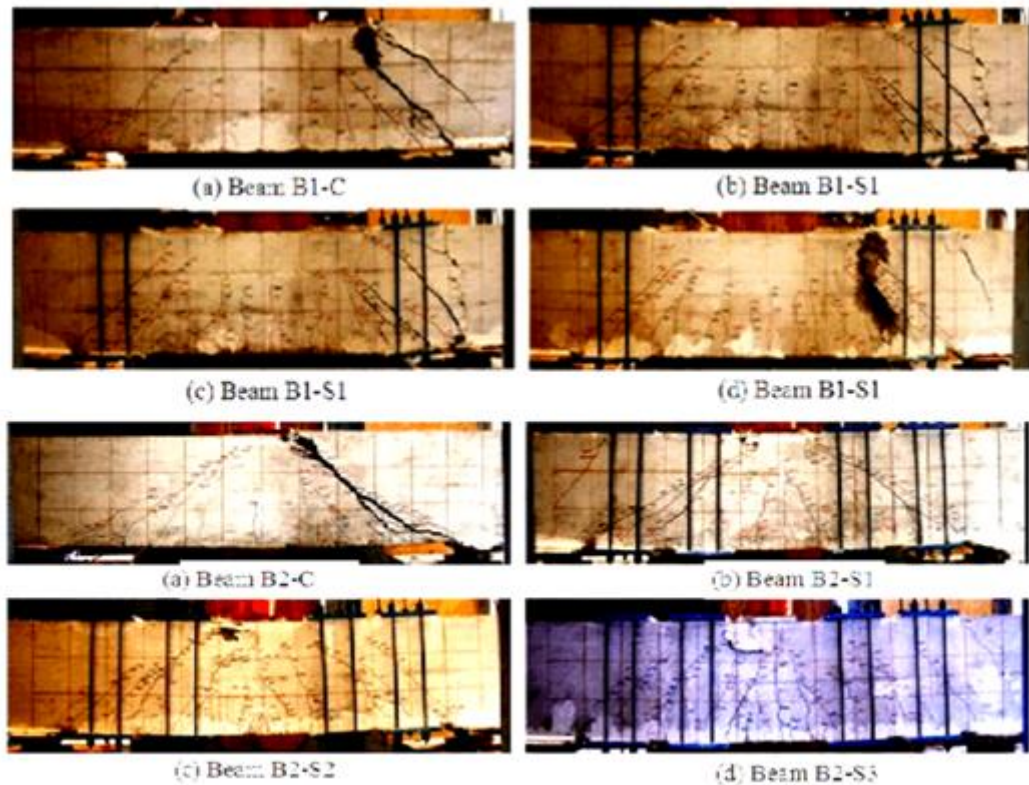
ที่มา: Lynn, et al., 1996

Dhakal and Maekawa (2002) พบว่า เหล็กปลอกมีผลต่อความยาวโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ถ้าเหล็กปลอกมีความแข็งแรงเพียงพอเหล็กเสริมตามยาวจะโก่งเดาะในช่วงระยะเรียงของเหล็กปลอก แต่ถ้าเหล็กปลอกมีความแข็งแรงไม่เพียงพอเหล็กเส้นจะโก่งเดาะในช่วงความยาวเท่ากับจำนวนเท่าของระยะเรียง ( $nS$ ) โดย  $n$  คือ จำนวนช่องของเหล็กปลอกที่เกิดการโก่งเดาะ Dhakal and Maekawa ได้เสนอค่าสตีเฟนสของเหล็กปลอกต่ำสุดที่สามารถยึดรั้งให้เหล็กเสริมตามยาวโก่งเดาะในช่วงเดียวของระยะเรียงเท่ากับ  $0.75\pi^4 EI / S^3$  โดยที่ค่า  $EI$  มีค่าเท่ากับ  $0.5EI_g$

### การเสริมความแข็งแรงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 1. การเสริมความแข็งแรงในการรับแรงเฉือน

Sirimontree, et al. (2011) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานที่อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกคาน ( $a/d$ ) ที่ 1.5 เท่า จำนวน 4 ตัวอย่าง และ 2.0 เท่า จำนวน 4 ตัวอย่าง ซึ่งถ้าไม่ทำการเสริมความแข็งแรงตัวอย่างคาน (B1-C และ B2-C) จะวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนโดยมีรอยแตกร้าวในแนวทแยงขนาดใหญ่ โดยที่เหล็กเสริมตามยาวยังไม่เกิดการยึดตัว และตัวอย่างที่ทำการเสริมความแข็งแรงในการรับแรงเฉือนด้วยการอัดแรงตามขวางให้กับคานโดยใช้เหล็กเกลียวอัดแรงขนาด 12.7 mm. ที่แรงอัดต่าง ๆ กัน (B1-S และ B2-S) จะช่วยให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นโดยไม่มีรอยแตกร้าวในแนวทแยงขนาดใหญ่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 15 จึงทำให้คานรับแรงและแอ่นตัวได้มากขึ้น



ภาพ 15 การวิบัติของตัวอย่างคาน

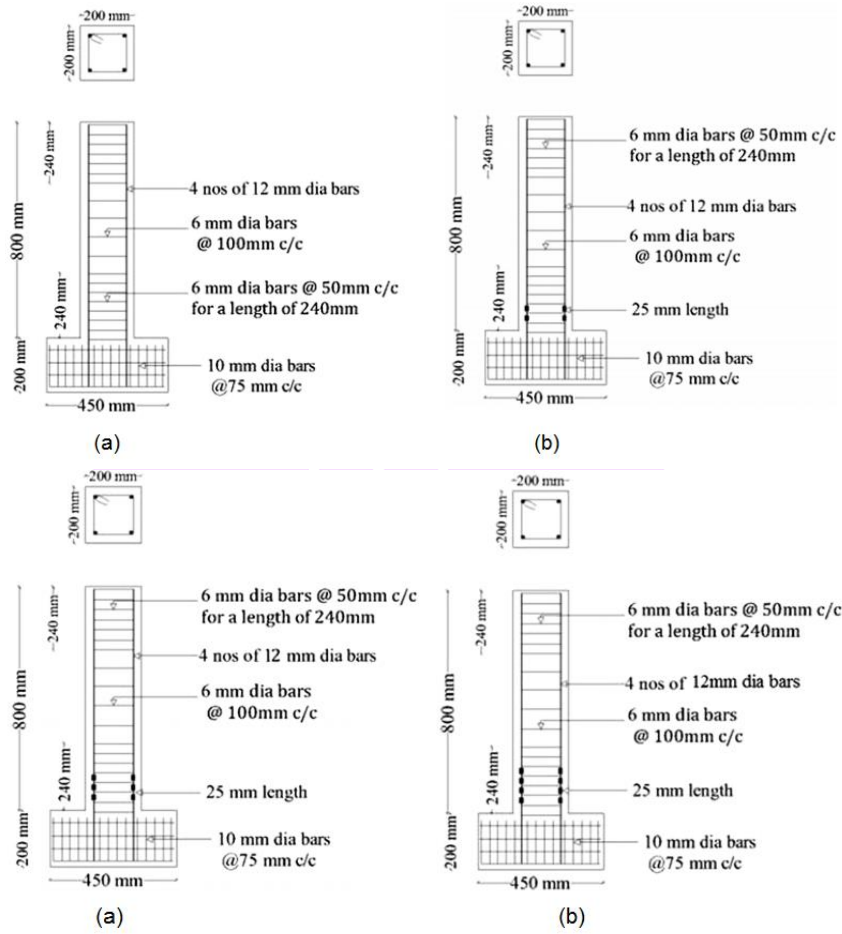
ที่มา: Sirimontree, et al., 2011

Barnes, et al. (2001) ได้เสนอวิธีการเสริมความแข็งแรงในการรับแรงเฉือนให้กับคานที่มีความสามารถในการรับแรงเฉือนต่ำ โดยการนำแผ่นเหล็กที่มีความหนาแตกต่างกัน มาติดตั้งบริเวณด้านข้างของคาน วิธีการติดตั้งแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรก (EPG1) ใช้อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) ในการยึดแผ่นเหล็กเข้ากับคาน ชุดที่สอง (EP1) ให้สลักเกลียวขนาด 16 mm ในการยึดและใช้แผ่นเหล็กมาติดตั้งบริเวณช่วงล่างเพื่อเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดให้กับคาน ตัวอย่างทั้งหมดถูกออกแบบอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกคาน ( $a/d$ ) ที่ 1.25 เท่า ผลการทดสอบ พบว่าการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธีใช้สลักเกลียวยึด ทำให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าการยึดด้วยอีพอกซีเรซิน (epoxy resin) โดยการยึดด้วยสลักเกลียวให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นถึง 185% สำหรับแผ่นเหล็กหนา 2.0 mm. และ ประมาณ 252% สำหรับแผ่นเหล็กหนา 4.0 และ 6.0 mm ซึ่งต่างจากการยึดด้วยอีพอกซีเรซินมีความสามารถในการรับแรงที่ต่ำกว่ามาก โดยกำลังเพิ่มขึ้นประมาณ 175% อันเนื่องมาจากการหลุดร่อนของแผ่นเหล็กขณะรับแรง

การอ่อนตัวของคานที่ทำการยึดแผ่นเหล็กด้วยสลักเกลียวช่วยเพิ่มการอ่อนตัวได้จากเดิมประมาณ 3 เท่า

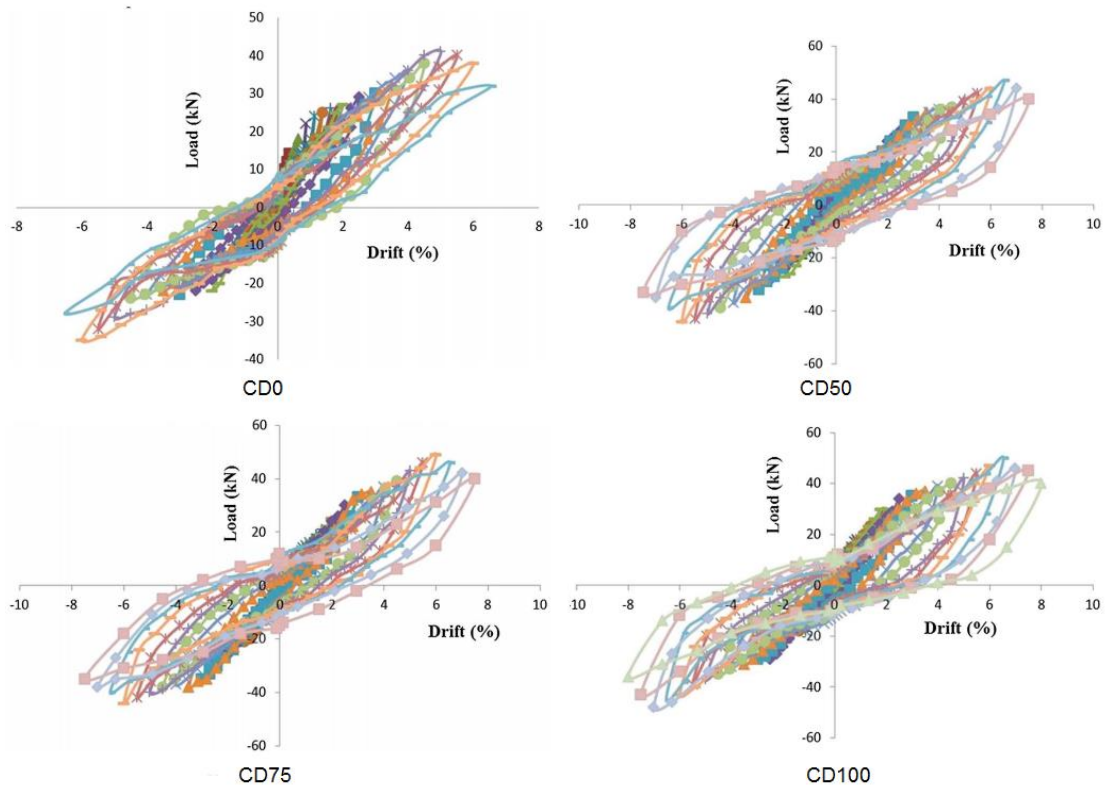
## 2. การเสริมความแข็งแรงเพื่อลดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในเสา

Chitra and Rugmini (2020) ทำการทดสอบเสาที่ได้รับแรงดันท่างโดยการเสริมความแข็งแรงให้เหล็กเสริมตามยาวบริเวณช่วงจุดหมุนแบบพลาสติก เพื่อช่วยต้านทานการโก่งเดาะ และเพิ่มระยะการเสริมเหล็กปลอกจากเดิมทำให้ช่วยลดการแออัดของเหล็กเสริม และลดต้นทุนการก่อสร้างได้อีกทาง โดยใช้ท่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 mm หนา 2 mm ยาว 25 mm มาสวมเข้ากับเหล็กตามยาวในตำแหน่งระหว่างเหล็กปลอก โดยเสริมท่อเหล็ก 3 รูปแบบ คือ 2 ช่วงเหล็กปลอก 3 ช่วงเหล็กปลอก และ 4 ช่วงเหล็กปลอก ภาพที่ 16 แสดงรูปแบบการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งมี 4 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรง (CDO) ตัวอย่างที่สวมท่อ 2 ช่วงเหล็กปลอก (CD50) ตัวอย่างที่สวมท่อ 3 ช่วงเหล็กปลอก (CD75) และตัวอย่างที่สวมท่อ 4 ช่วงเหล็กปลอก (CD100) ในการทดสอบจะให้แรงตามแนวแกนอยู่ที่ 15% ของกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสา และให้แรงดันท่างเป็นแบบสลับทิศจนกว่าชิ้นงานจะเกิดการวิบัติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการสวมท่อเหล็กเข้าไปทำให้เสามีกำลังรับแรงดันท่าง ได้มากขึ้น 7.1% 16.3% และ 24.4% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรง ค่าการโยกตัวของเสาเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพ 16 ตัวอย่างเสาที่เสริมความแข็งแรงเพื่อลดการโก่งเดาะ

ที่มา: Chitra and Rugmini, 2020



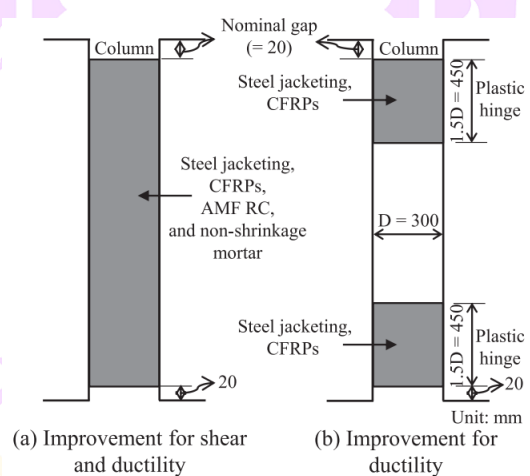
ภาพ 17 ผลการเสริมความแข็งแรงเพื่อลดการโก่งเดาะ

ที่มา: Chitra and Rugmini, 2020

### 3. การเสริมความแข็งแรงเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงต้านข้างของเสา

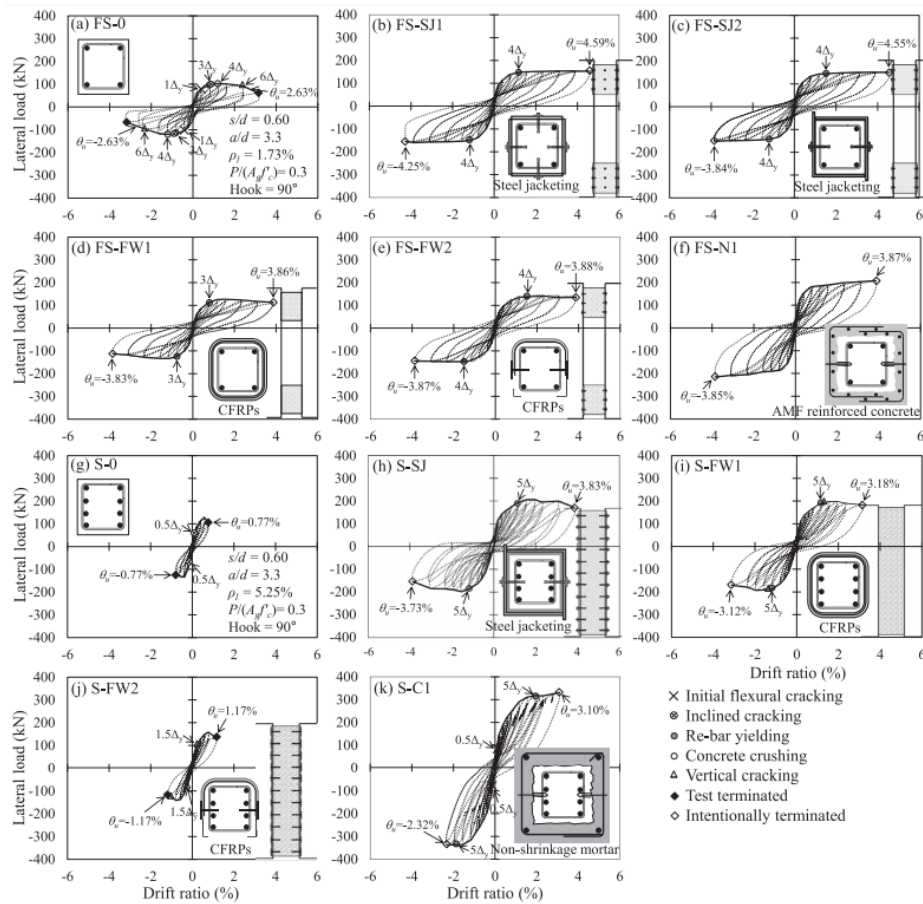
Truong, Kim and Choi (2017) ศึกษาการเสริมความแข็งแรงให้กับเสาที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รับแรงแผ่นดินไหวในประเทศเกาหลี การเสริมความแข็งแรงจะใช้วิธีการนำวัสดุมาห่อหุ้มเสา วัสดุที่นำมาใช้ ได้แก่ แผ่นเหล็กหนา 3 mm คาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และ คอนกรีตแบบไม่หดตัวเสริมเหล็ก เกือบทั้งหมดจะใช้เหล็กเดือย (Steel dowel) ในการยึด โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ชุด ชุดแรก (FS series) ออกแบบมาให้วิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (Flexure-shear failure) โดยควบคุมแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาคือความสามารถในการรับแรงเฉือนของเสา ( $V_p/V_n$ ) อยู่ในช่วง 0.6–1.0 และเสริมความแข็งแรงโดยการหุ้มเสาเฉพาะส่วนโคนเสากับปลายเสา ในช่วงระยะ 1.5D โดย D คือ ความกว้างเสา ชุดที่ 2 (S series) จะเพิ่มเหล็กเสริมเหล็กตามยาวขึ้นเพื่อให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาคือความสามารถในการรับแรงเฉือนของเสา ( $V_p/V_n$ ) มากกว่า 1.0 และเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน (shear failure) การเสริมความแข็งแรงจะทำโดย

การหุ้มเสาตลอดความยาวเสา ดังแสดงในภาพที่ 18 ผลจากการทดสอบแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งพบว่า ชุดแรก (FS series) มีชิ้นงานควบคุม คือ FS-0 (ชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรง) มีการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด โดยรับแรงดันทันข้างอยู่ที่ประมาณ 100 kN และมีอัตราการโยกตัวสูงสุดอยู่ที่ 2.63% แต่เมื่อมีการเสริมความแข็งแรงแล้ว พบว่า มีการวิบัติเปลี่ยนเป็นแบบโมเมนต์ดัด เสารับแรงดันทันข้างเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 130 kN และมีอัตราการโยกตัวสูงสุดประมาณ 4.00% ในส่วนของชุดที่ 2 (S series) มีชิ้นงานควบคุมคือ S-0 เนื่องจากเป็นชุดที่มีการเสริมเหล็กตามยาวเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการวิบัติจากแรงเฉือน มีการรับแรงดันทันข้างที่น้อยมาก และอัตราการโยกตัวที่ต่ำ แต่เมื่อมีการเสริมความแข็งแรงแล้วพบว่ามีความสามารถในการรับแรงดันทันข้างเพิ่มสูงขึ้นมาก และมีความสามารถในการโยกตัวสูงจากเดิมมากอยู่ที่ประมาณ 4.00 % จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็ก จะมีจุดเด่นในการเพิ่มความสามารถในการโยกตัว เพราะมีความเหนียวจากแผ่นเหล็กมาช่วยในการรับแรง แต่การเสริมความแข็งแรงด้วยคอนกรีตไม่หดตัวหุ้มจะมีจุดเด่นในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันทันข้าง เพราะมีพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพ 18 ตำแหน่งของการหุ้มตัวอย่างเสา

ที่มา: Truong, Kim and Choi, 2017



ภาพ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทันข้างกับการโยกตัวของเสา

ที่มา: Truong, Kim and Choi, 2017

### บทที่ 3

## การโก่งเดาะและแรงยึดรั้งของเหล็กเส้น

การวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การเสริมกำลังโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและลดความยาวช่วงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวโดยใช้เหล็กเส้นแบบโอบรัด เพื่อให้การออกแบบเหล็กเส้นแบบที่จะนำมาใช้โอบรัดมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะลดความยาวช่วงการโก่งเดาะได้ จำเป็นต้องทราบแรงที่ใช้ยึดรั้งการโก่งเดาะในช่วงความยาวที่เหมาะสม การวิจัยนี้จึงต้องทำการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเส้นและการหาแรงที่ใช้ยึดรั้งเป็นลำดับแรก หลังจากนั้นจะนำข้อมูลไปออกแบบเหล็กเส้นโอบรัดเสาดังกล่าวแล้วทำการทดสอบเสารับแรงอัดตามแนวแกน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเหล็กเส้นแบบที่โอบรัดต่อการป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีต

### วิธีการศึกษาการโก่งเดาะและแรงยึดรั้ง

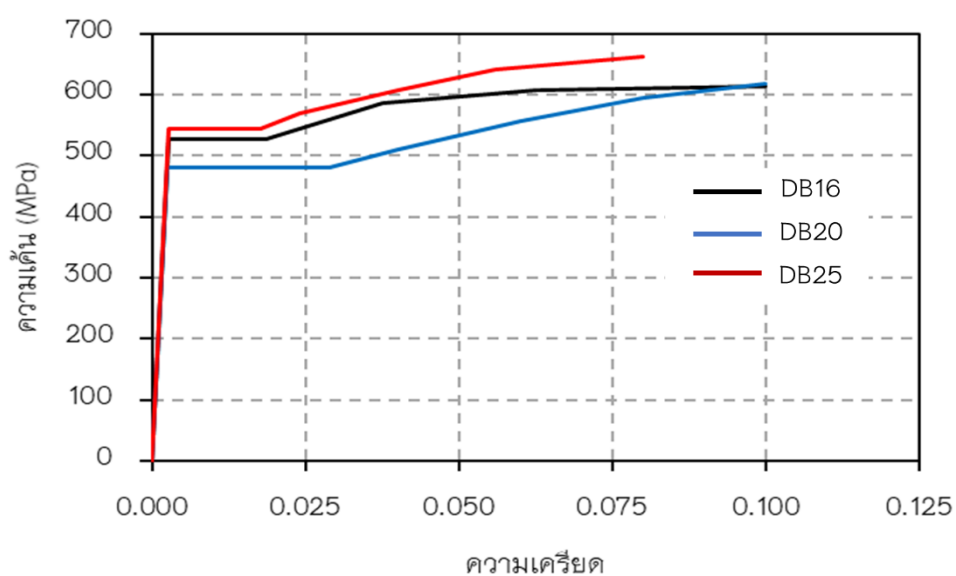
#### 1. ตัวอย่างทดสอบ

การวิจัยนี้มีตัวอย่างทดสอบ 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเส้นที่มีความยาวช่วงการโก่งเดาะ  $L$  เท่ากับ 12D และ 16D (D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก) ซึ่งเป็นรูปแบบการโก่งเดาะของเหล็กเส้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนเสริมกำลัง รูปแบบที่ 2 เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเส้นที่มีการยึดรั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของตัวอย่างเหล็กรูปแบบที่ 1 แล้วทำให้ความยาวช่วงการโก่งเดาะลดลงเป็น  $L/2$  เท่ากับ 6D และ 8D ซึ่งเป็นรูปแบบการโก่งเดาะที่จะเกิดขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลัง การศึกษานี้จะใช้เหล็กเกรด SD40 ตัวอย่างเหล็กเส้นข้ออ้อยที่ใช้กันในการก่อสร้างในประเทศไทย 3 ขนาด ได้แก่ เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm (DB16) 20 mm (DB20) และ 25 mm (DB25) ดังแสดงในตารางที่ 1

เมื่อนำตัวอย่างเหล็กเส้นทั้ง 3 ขนาด มาทำการทดสอบหากำลังรับแรงดึงตามมาตรฐาน มอก. 24-2559 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559) ได้กำลังรับรับแรงดึงของตัวอย่างเหล็กข้ออ้อย DB16 DB20 และ DB25 ที่จุดคราก  $f_y$  เท่ากับ 527.2 MPa 481.6 MPa และ 543.9 MPa ตามลำดับ ที่จุดประลัย  $f_u$  เท่ากับ 613.7 MPa 618.5 MPa และ 672.3 MPa ตามลำดับ ภาพ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงดึงของตัวอย่างเหล็กเส้นที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างทดสอบ

ตาราง 1 ตัวอย่างทดสอบการโก่งเดาะของเหล็กเส้น

รูปแบบ	ชื่อตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง D (mm)	ความยาว L (mm)	การยึดรั้ง	ความยาวช่วงการโก่งเดาะ (mm)
1	DB16_L16D	16	16D = 256	ไม่มี	16D = 256
	DB20_L16D	20	16D = 320	ไม่มี	16D = 320
	DB25_L16D	25	16D = 400	ไม่มี	16D = 400
	DB16_L12D	16	12D = 192	ไม่มี	12D = 192
	DB20_L12D	20	12D = 240	ไม่มี	12D = 240
	DB25_L12D	25	12D = 300	ไม่มี	12D = 300
2	DB16_L16D_R	16	16D = 256	มี	8D = 128
	DB20_L16D_R	20	16D = 320	มี	8D = 160
	DB25_L12D_R	25	12D = 300	มี	6D = 150
	DB16_L12D_R	16	12D = 192	มี	6D = 96
	DB20_L12D_R	20	12D = 240	มี	6D = 120
	DB25_L12D_R	25	12D = 300	มี	6D = 150



ภาพ 20 ความสัมพันธ์และความเครียดเมื่อรับแรงดึงของตัวอย่างเหล็กเส้น

## 2. การติดตั้งการทดสอบ

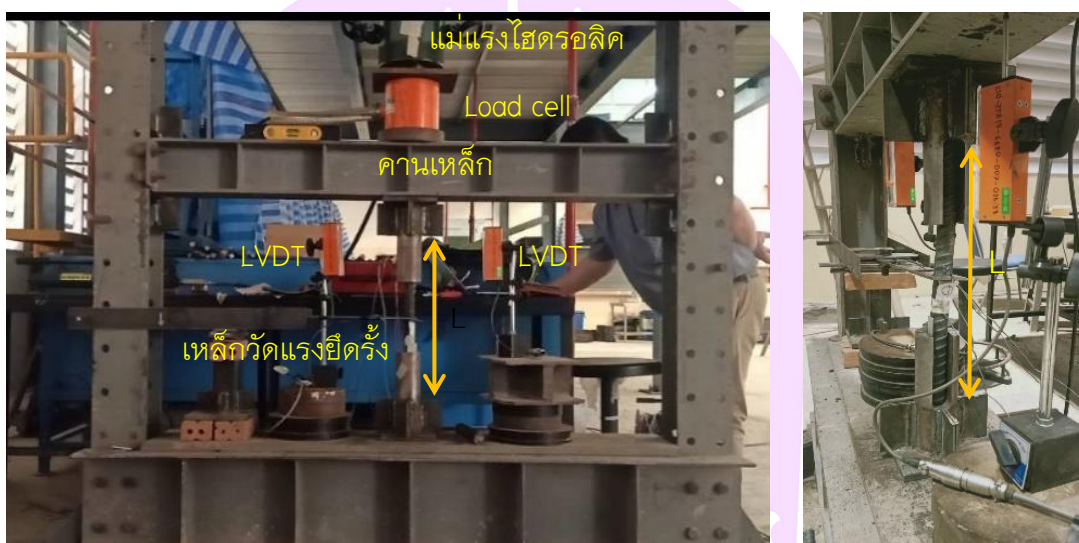
ตัวอย่างเหล็กเส้นจะถูกตัดที่ความยาวเท่ากับ ความยาว  $L$  ตามตาราง 1 รวมกับ ระยะจับตัวอย่างเหล็กทั้งด้านบนและด้านล่าง หัวจับตัวอย่างแสดงในภาพ 21 ฐานหัวจับเป็นเหล็กแผ่นหนา 12 mm เชื่อมยึดแท่งเหล็กที่เจาะรูขนาดเดียวกันกับเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ของตัวอย่างเหล็ก ความลึกของรูที่หัวจับเท่ากับ  $3D$  เพื่อให้เกิดลักษณะการจับยึดแบบยึดแน่น (Fixed support) นอกจากนี้ หัวจับจะบล็อกตัวอย่างเหล็กเส้นให้โค้งเดาะในทิศทางที่เปิดช่องไว้เท่านั้น เมื่อนำหัวจับมาสวมที่ปลายของตัวอย่างเหล็กทดสอบทั้ง 2 ด้าน จะทำให้มีระยะช่วงการโค้งเดาะ เท่ากับ  $L$  ตามที่ต้องการ จากนั้นจึงนำไปตัวอย่างที่ติดตั้งหัวจับไปให้แรงอัดที่โครงเพรททดสอบ



ภาพ 21 หัวจับตัวอย่างเหล็ก

โครงเพรททดสอบจะมีเสา 2 ต้น และมีคานเหล็กที่ยึดแน่นกับเสา 2 ต้น ที่ด้านบนและด้านล่างของโครงเพรท หัวจับด้านล่างจะวางบนคานเหล็กที่ยึดแน่นด้านล่าง หัวจับด้านบนจะถูกคานถ่ายแรงวางพาดไว้ โดยคานถ่ายแรงจะติดตั้งล้อย่นเสาด้านข้างไว้เพื่อประคองไม่ให้คานถ่ายแรงเกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างแต่เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวแรงที่กด คานเหล็กด้านบนจะยึดกับแม่แรงไฮดรอลิคเพื่อให้แรงอัดเข้าสู่คานถ่ายแรงและตัวอย่างทดสอบ โดยแรงอัดจะวัดผ่านอุปกรณ์วัดแรง (Load cell) และการเคลื่อนที่ระหว่างหัวจับด้านบนและด้านล่างวัดจะวัดจากอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Linear Variable Differential Transformers, LVDTs) จำนวน 2 ตัว ที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 mm โดยติดตั้งเพื่อวัดระยะระหว่างคานด้านล่างและคานถ่ายแรง ที่ตำแหน่งห่างจากตัวอย่างทดสอบ 200 mm ดังแสดงในภาพ 22 ในตัวอย่างที่มีการยึดรั้งการโค้งเดาะ จะใช้เหล็กเส้นแบนกว้าง 50 mm หนา 3.8 mm และยาว 300 mm ที่เจาะรูให้ตัวอย่างเหล็กเส้นสอดผ่านรู โดยเหล็กเส้นแบนนี้จะอยู่ตรงกลางช่วงที่ระยะ  $L/2$  เหล็กเส้นแบนจะถูกยึดไว้ที่เสาของโครงเพรท เมื่อตัวอย่างเหล็กเส้นรับแรงอัดและเริ่มเกิด

การโก่งเดาะ ตัวอย่างเหล็กเส้นจะดันเหล็กเส้นแบนที่ยึดรั้งไว้ โดยแรงยึดรั้งจะวัดค่าจาก อุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) 2 ตัว ที่ติดไว้กับเหล็กเส้นแบนนี้โดยนำมาต่อวงจร แบบฮาฟบริดจ์ (Half bridge) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบค่าเพื่อแปลงเป็นแรงดึงแล้ว ทั้งนี้เหล็กเส้นแบน ที่ใช้นี้จะรับแรงดึงได้สูงสุดก่อนถึงจุดครากเท่ากับ 57 kN การทดสอบรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่าง จะทำโดยให้แรงอัดไปจนกระทั่งกำลังอัดถึงจุดสูงสุดแล้วตกลงมาที่ 50% ของกำลังรับแรงอัด สูงสุด



ภาพ 22 การติดตั้งการทดสอบ

### 3. การเก็บข้อมูลการทดสอบ

การวัดค่าการทดสอบจะประกอบด้วยแรงอัดได้จากอุปกรณ์วัดแรง ค่าความเครียดที่วัดจากการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดที่ติดตั้งบนตัวอย่างเหล็ก ค่าการเคลื่อนที่แนวตั้งจากอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDTs) ค่าแรงยึดรั้งจากอุปกรณ์วัดความเครียดที่ติดไว้บนเหล็กเส้นแบน โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปที่เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ทุก ๆ 0.5 วินาที เพื่อเก็บข้อมูล ค่าที่บันทึกไว้จะนำมาคำนวณเป็นค่าความเค้นอัดเท่ากับแรงอัด  $P$ หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างเหล็ก  $A$  ตามสมการที่ 1 สำหรับค่าความเครียดในช่วงก่อนการโก่งเดาะจะใช้ค่าความเครียดที่ได้จากอุปกรณ์วัดความเครียดที่ติดกับตัวอย่างเหล็กเส้น ช่วงหลังการโก่งเดาะจะคำนวณค่าความเครียดโดยใช้ค่าการเคลื่อนที่เฉลี่ยที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ 2 ตัว  $\delta_{ave}$  หารด้วยความยาวตัวอย่างเหล็กเส้น  $L$  ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_{ave}}{L} \quad (2)$$

### ผลการศึกษากาการโก่งเดาะและแรงยึดรั้ง

ตัวอย่างทดสอบมี 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ไม่มีการการยึดรั้งการโก่งเดาะ และรูปแบบที่ 2 มีการยึดรั้งการโก่งเดาะที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาว ในหัวข้อนี้จึงแสดงผล การทดสอบโดยการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างทดสอบที่มีและไม่มีการยึดรั้งการโก่งเดาะ ของเหล็กเส้นแต่ละขนาด

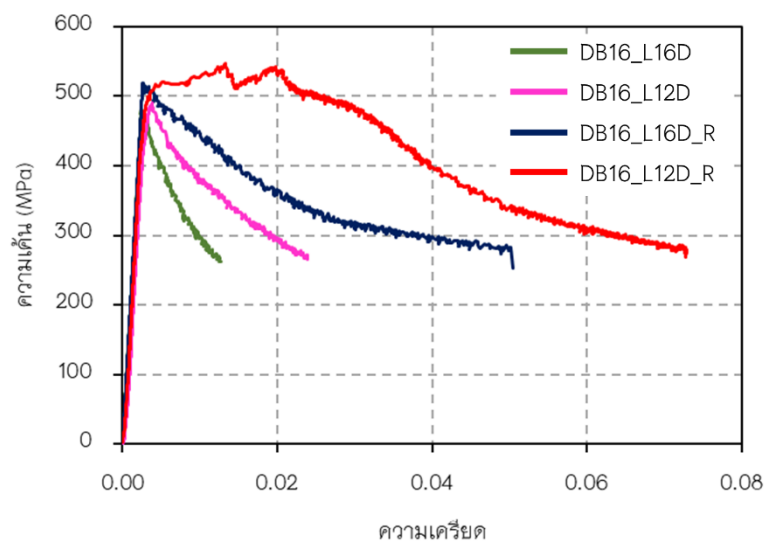
#### 1. เหล็กเส้น DB16

**ตัวอย่าง DB16\_L16D , DB16\_L16D\_R** กราฟความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียด ดังภาพ 23 จะพบว่า การรับแรงอัดของตัวอย่าง DB16\_L16D\_R จะมากกว่า DB16\_L16D อยู่เล็กน้อย โดยมีค่า 519 MPa และ 481 MPa ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาการรับ แรงอัดหลังจากเกิดการโก่งเดาะแล้วจะพบว่า การรับแรงอัดของตัวอย่าง DB16\_L16D\_R ที่เกิด การโก่งเดาะที่ตำแหน่งด้านล่างของการยึดรั้ง (ภาพ 25) ยังสามารถรับแรงอัดได้ตั้งแต่อัฒเริ่มเกิด การโก่งเดาะแล้ว ความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงช้าเมื่อเทียบกับตัวอย่าง DB16\_L16D ซึ่งเกิดการโก่งเดาะที่ระยะกึ่งกลางความยาวเหล็กแล้วกำลังการรับแรงอัดลดลงทันที ความเครียด ของทั้งสองตัวอย่างพบว่าตัวอย่าง DB16\_L16D\_R มีความเครียดที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่าง DB16\_L16D อย่างเห็นได้ชัดโดยมีค่าความเครียดที่กำลังรับแรงอัดลดเหลือ 50% อยู่ที่ 0.0514 และ 0.0155 ตามลำดับ

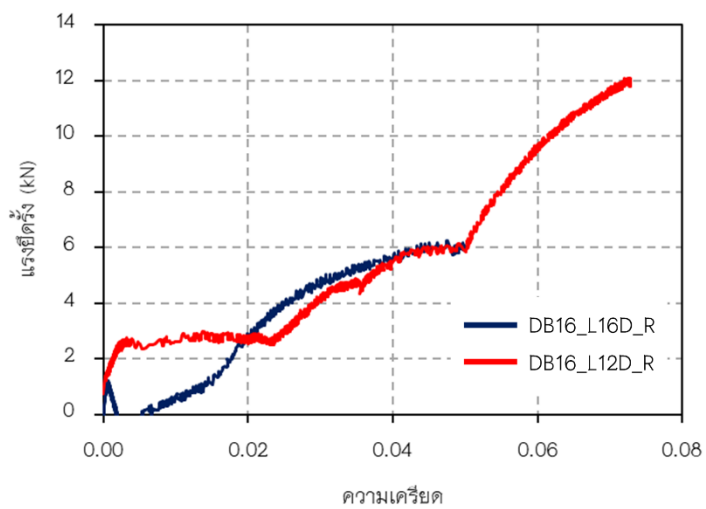
**ตัวอย่าง DB16\_L12D , DB16\_L12D\_R** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของตัวอย่าง DB16\_L12D และ DB16\_L12D\_R (ภาพ 23) กำลังรับแรงอัดสูงสุด มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 489 MPa และ 527 MPa ตัวอย่าง DB16\_L12D\_R หลังจากเกิดการโก่งเดาะ ที่ตำแหน่งด้านล่างของการยึดรั้ง (รูปภาพ 25) พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไปอีก โดยไปสูงสุดอยู่ที่ 547 MPa ที่ค่าความเครียด 0.0132 ในช่วงนี้พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้าง คงที่จนความเครียดเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 0.0340 กำลังรับแรงอัดจึงค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่ การรับแรงอัดของตัวอย่าง DB16\_L12D มีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการโก่งเดาะ หลังจากนั้น กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง DB16\_L12D\_R ลดลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น ตามระยะการโก่งที่มาก โดยมีค่าความเครียดที่กำลังรับแรงอัดลดเหลือ 50% อยู่ที่ 0.0222 และ 0.0723 ตามลำดับ

ภาพ 24 แสดงแรงยึดรั้งของตัวอย่าง DB16\_L16D\_R และ DB16\_L12D\_R แรงที่ใช้ในการยึดรั้งของตัวอย่าง DB16\_L16D\_R มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 6.5 kN เมื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง DB16\_L16D (ภาพ 23) กับกราฟแรงยึดรั้ง (ภาพ 24) จะพบว่า ในช่วงต้นที่แรงอัดยังมีค่าน้อยกว่าแรงที่จุดครากแรงยึดรั้งมีค่าน้อย แต่เมื่อเกิดการโก่งเดาะแรงยึดรั้งกลับมาเพิ่มขึ้นทันทีและเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามการโก่งเดาะที่มากขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงอย่างช้า ๆ

แรงที่ใช้ในการยึดรั้งของตัวอย่าง DB16\_L12D\_R มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 11.80 kN (ภาพ 24) จะเห็นว่าแรงยึดรั้งเพิ่มขึ้นทันทีที่การโก่งเดาะเมื่อเทียบกับกราฟความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง DB16\_L12D\_R (ภาพ 23) มีค่าคงที่จนค่าความเครียดถึง 0.0340 จากนั้นแรงยึดรั้งเริ่มกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งตามกำลังรับแรงอัดที่ลดลง และกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนอีกครั้งที่ค่าความเครียด 0.0435 จนมีค่าสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก DB16



ภาพ 24 แรงยึดรั้งของเหล็ก DB16



ภาพ 25 รูปแบบการโก่งเดาะของเหล็ก DB16

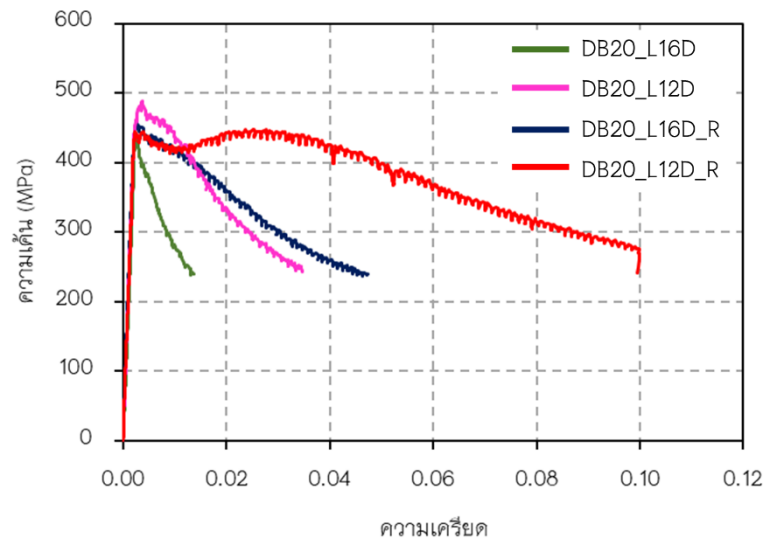
## 2. เหล็กเส้น DB20

**ตัวอย่าง DB20\_L16D, DB20\_L16D\_R** เมื่อนำกราฟของทั้งสองตัวอย่างมาเปรียบเทียบกันได้ดังภาพ 26 พบว่า กำลังรับแรงอัดของเหล็กทั้งสองตัวอย่างมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกันที่ 433 MPa และ 457 MPa ตามลำดับ ในตัวอย่าง DB20\_L16D\_R เกิดการโก่งเดาะที่ตำแหน่งด้านบนของการยึดครั้งแรก (ภาพ 28) การรับแรงอัดหลังเกิดการโก่งเดาะของตัวอย่าง DB20\_L16D จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ตัวอย่าง DB20\_L16D\_R กำลังในการรับแรงอัดค่อย ๆ ลดลง โดยมีค่าความเครียดที่กำลังรับแรงอัดลดเหลือ 50% อยู่ที่ 0.0163 และ 0.0489 ตามลำดับ

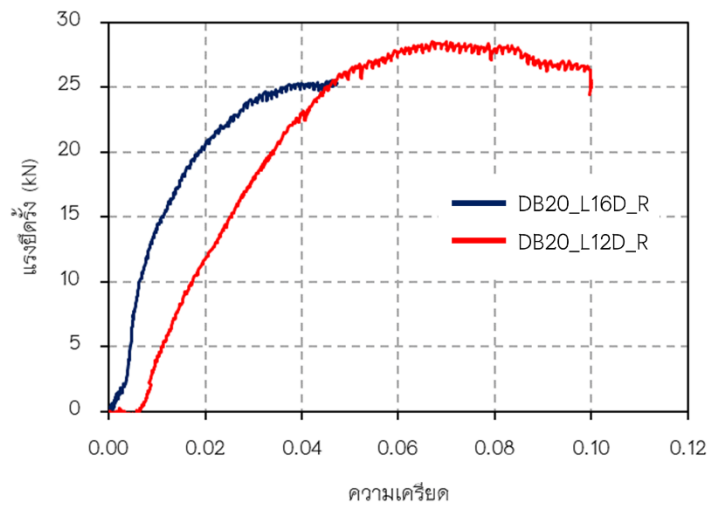
**ตัวอย่าง DB20\_L12D, DB20\_L12D\_R** จากการนำกราฟของทั้งสองตัวอย่างมาเปรียบเทียบกัน (ภาพ 26) พบว่า กำลังรับแรงอัดของทั้งสองตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 488 MPa และ 443 MPa ตามลำดับ เกิดการโก่งเดาะที่ตำแหน่งด้านล่างของการยึดครั้งแรก (ภาพ 28) แต่การรับแรงอัดหลังเกิดการโก่งเดาะของตัวอย่าง DB20\_L12D\_R จะมีค่อนข้างค่าคงที่ไปจนถึงค่าความเครียดที่ 0.0300 และหลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่ตัวอย่าง DB20\_L12D กำลังในการรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วทันทีเมื่อเกิดการโก่งเดาะ จนมีค่าความเครียดที่กำลังรับแรงอัดลดเหลือ 50% อยู่ที่ 0.0337

แรงที่ใช้ในการยึดครั้งแรกของตัวอย่าง DB20\_L16D\_R มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 25.64 kN แสดงในภาพ 27 เมื่อเทียบกับกราฟความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง DB20\_L16D\_R (ภาพ 26) พบว่า แรงยึดครั้งแรกเพิ่มขึ้นทันทีที่เกิดการโก่งเดาะของเหล็กรับแรงอัด โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการโก่งเดาะที่ค่าความเครียด 0.004 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดที่ค่อย ๆ ลดลง จนมีค่าคงที่เมื่อกำลังรับแรงอัดลดเหลือ 50%

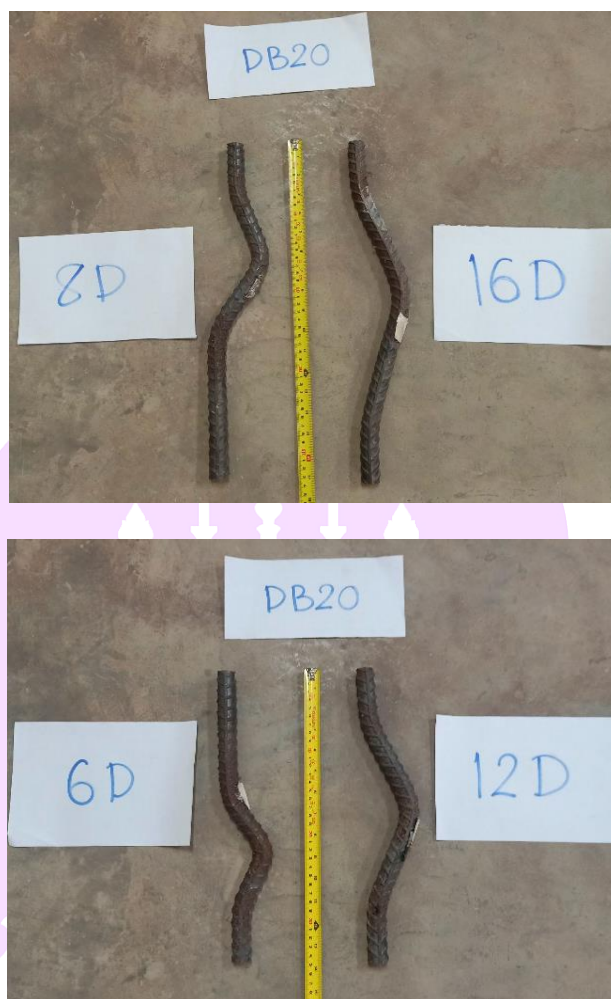
แรงที่ใช้ในการยึดครั้งแรกของตัวอย่าง DB20\_L12D\_R มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 28.53 kN (ภาพ 27) จากการเทียบกับกราฟความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง DB20\_L12D\_R (ภาพ 26) พบว่า เมื่อเกิดการโก่งเดาะรูปแบบการเพิ่มขึ้นของแรงยึดครั้งแรกมีค่าคงที่ในช่วงที่กำลังการรับแรงอัดของเหล็กมีค่าคงที่ จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นช้าลงเมื่อกำลังรับแรงอัดค่อย ๆ ลดลง



ภาพ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก DB20



ภาพ 27 แรงยึดรั้งของเหล็ก DB20



ภาพ 28 รูปแบบการโก่งเดาะของเหล็ก DB20

### 3. เหล็กเส้น DB25

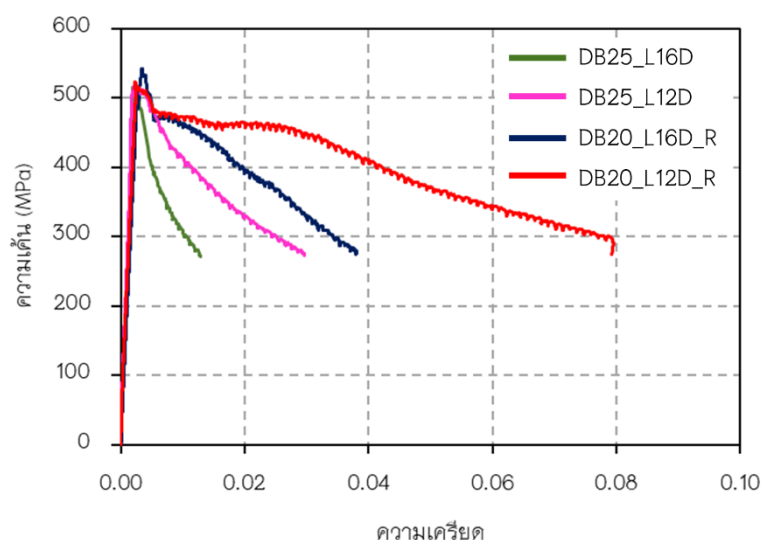
ตัวอย่าง BD25\_L16D, DB25\_L16D\_R เมื่อนำกราฟของทั้งมาเปรียบเทียบกัน (กราฟ 3-9) พบว่า กำลังรับแรงอัดของเหล็กทั้งสองตัวอย่าง DB25\_L16D, DB25\_L16D\_R มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ที่ 515 MPa และ 541 MPa ตามลำดับ กำลังการรับแรงอัดหลังเกิดการโก่งเดาะของตัวอย่าง DB25\_L16D ลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในตัวอย่าง DB25\_L16D\_R เกิดการโก่งเดาะที่ตำแหน่งด้านล่างของการยึดรั้ง (รูป 30) กำลังในการรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นที่ค่าความเครียด 0.0080 หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ตัวอย่าง DB25\_L16D และ DB25\_L16D\_R มีค่าความเครียดที่กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 50% อยู่ที่ 0.0146 และ 0.0380 ตามลำดับ

ตัวอย่าง BD25\_L12D, DB25\_L12D\_R จากกราฟมาเปรียบเทียบกัน (ภาพ 29)

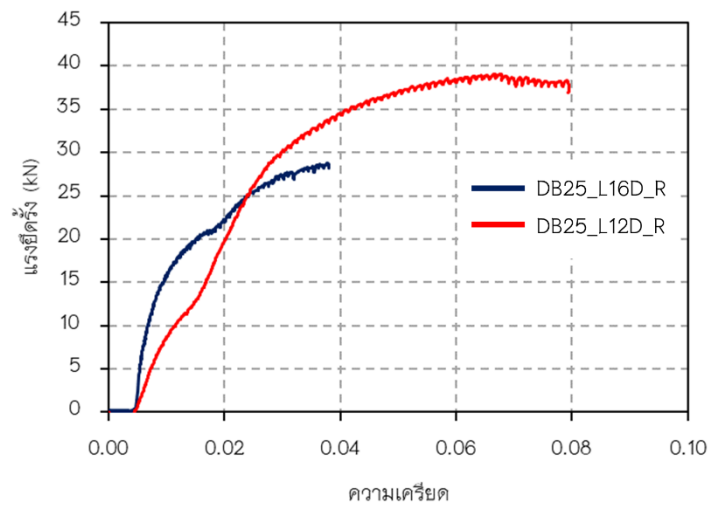
กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง DB25\_L12D และ DB25\_L12D\_R คือ 517 MPa และ 522 MPa ตามลำดับ ตัวอย่าง DB25\_L12D\_R เกิดการโก่งเดาะที่ตำแหน่งด้านล่างของการยัดรี้ง (ภาพ 31) หลังเกิดการโก่งเดาะ การรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นจนถึงค่าความเครียด 0.0082 แล้วกำลังการรับแรงอัดจึงเริ่มคงที่จนถึงค่าความเครียด 0.0514 กำลังรับแรงอัดจึงลดลงอีกครั้ง จนกระทั่งหยุดการทดสอบ ส่วนตัวอย่าง DB25\_L12D หลังเกิดการโก่งเดาะกำลังรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วทันทีจนกระทั่งกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 50% มีค่าความเครียดอยู่ที่ 0.0345 และ 0.0780 ตามลำดับ

แรงที่ใช้ในการยัดรี้งของตัวอย่าง DB25\_L16D\_R มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 39.06 kN ดังแสดงในภาพ 30 เมื่อเทียบกับกราฟความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง DB25\_L16D\_R (ภาพ 29) พบว่า แรงยัดรี้งเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อเหล็กรับแรงอัดเกิดการโก่งเดาะ ก่อนที่จะเริ่มคงที่ที่ค่าความเครียด 0.0300–0.034 แต่เมื่อสังเกตจากกราฟความเค้นและความเครียด พบว่าเป็นช่วงที่กำลังรับแรงอัดยังลดลงอย่างคงที่ หลังจากนั้นแรงยัดรี้งจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่าสูงสุด

แรงที่ใช้ในการยัดรี้งของตัวอย่าง DB25\_L12D\_R มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 39.06 kN (ภาพ 30) จากการเทียบกับกราฟความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง DB25\_L12D\_R (ภาพ 29) พบว่า แรงยัดรี้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงค่าความเครียด 0.0080–0.0600 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความเค้นและความเครียดที่กำลังรับแรงอัดมีค่าค่อนข้างคงที่ หลังจากนั้นแรงยัดรี้งเพิ่มขึ้นช้าลง เมื่อกำลังรับแรงอัดค่อย ๆ ลดลงแบบคงที่



ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก DB25



ภาพ 30 แรงยึดดึงของเหล็ก DB25

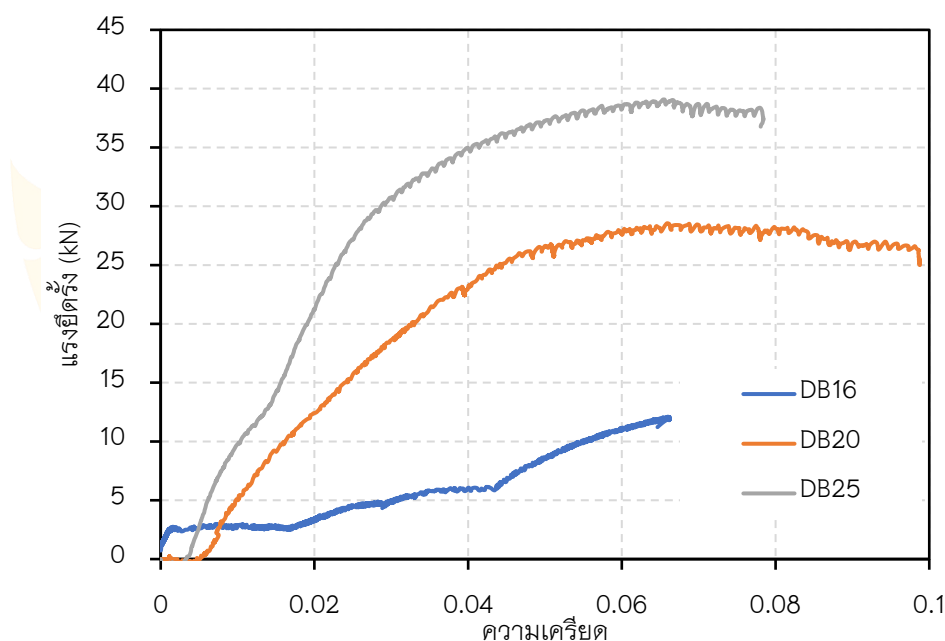


ภาพ 31 รูปแบบการโก่งเดาะของเหล็ก DB25

### การเสริมกำลังเพื่อชะลอการโก่งเดาะ

การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวจะส่งผลให้กำลังรับโมเมนต์ดัดและการเคลื่อนตัวของเสาได้น้อยลง เนื่องจากเหล็กที่โก่งเดาะจะดันเหล็กปลอกและคอนกรีตหุ้มให้แตกออก การเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจึงจำเป็นต้องควบคุมให้เหล็กโก่งเดาะในช่วงความยาวที่สั้นประมาณ 6D เพราะผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าเหล็กที่โก่งเดาะในช่วง 6D นั้น จะคงกำลังรับแรงอัดได้ดี จึงคาดว่าจะส่งผลให้ความสามารถของเสาในการเคลื่อนตัวด้านข้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การเสริมกำลังเสาจะทำได้โดยการใช้เหล็กเส้นแบนคาตรัดที่โคนเสาโดยเรียงห่างกันให้มีช่องว่างเท่ากับ 6D ในช่วงระยะ 1 เท่าของความลึกประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นช่วงที่จะเกิดจุดหมุนพลาสติก

จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงแรงที่ใช้ยึดรั้งเพื่อให้เกิดการโก่งเดาะในช่วงความยาว 6D ดังแสดงในภาพ 32 โดยมีค่าแรงยึดรั้งที่ทำให้เหล็กเส้นมีความเครียดอัดประมาณ 0.02 เท่ากับ 6 kN 25 kN และ 35 kN สำหรับเหล็กเส้น DB16 DB20 และ DB25 ตามลำดับ

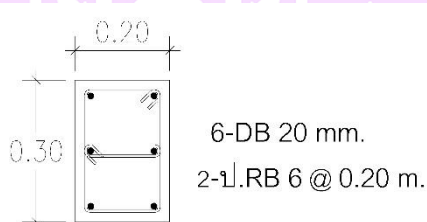


ภาพ 32 แรงยึดรั้งการโก่งเดาะในช่วงความยาว 6D

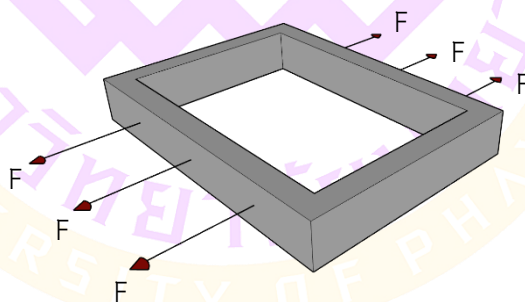
การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กตามยาว ทำได้โดยโอบรัดเสาคอนกรีตไว้โดยนำแรงยึดรั้งที่ได้จากการทดสอบมากระทำ ยกตัวอย่างเช่น เสาคอนกรีตขนาดหน้าตัดกว้าง 0.20 m ยาว 0.30 m เสริมเหล็กตามยาว DB20 จำนวน 6 เส้น และเสริมเหล็กปลอก 2 วง ด้วยเหล็ก RB6 ระยะเรียง 0.20 m ดังแสดงในภาพที่ 33 จากรายละเอียดหน้าตัดเสา คาดว่าเหล็กเสริมตามยาวในเสาจะเกิดการโก่งเดาะในช่วงระยะระหว่างเหล็กปลอก 0.20 m เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชะลุดจะได้อัตราส่วน  $L/D$  เท่ากับ 10 ซึ่งคาดว่ากำลังอัดคงจะตกลงอย่างรวดเร็ว หลังจากเหล็กเสริมคราก หากทำการเสริมกำลังให้เสาโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบนเพื่อควบคุมการโก่งเดาะให้อัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 6 จะได้ระยะเรียงเท่ากับ  $6D = 0.12$  m ในที่นี้จะพิจารณาว่าเกิดการโก่งเดาะทางด้านยาว หากต้องการให้เสารับแรงอัดจนความเครียดอัดของเสาประมาณ 0.02 แรงยึดรั้งของตัวอย่างเหล็กเส้นขนาด DB20 จากภาพ 32 จะมีค่าประมาณ  $F = 15$  kN แรงยึดรั้งนี้จะกระทำต่อเหล็กโอบรัด ดังภาพ 34 เมื่อคำนวณค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเส้นแบนจะได้ค่าประมาณ 1.0 kN-m เมื่อนำไปเลือกขนาดเหล็กเส้นแบน พบว่า ต้องใช้เหล็กเส้นแบนที่กว้าง 50 mm และหนา 25 mm ที่มีค่าโมดูลัสหน้าตัด  $Z$  เท่ากับ  $5208$  mm<sup>3</sup>

เมื่อทำการหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 450 mm โดยกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 22.1 MPa เหล็กข้ออ้อยมีกำลังดึงคราก เท่ากับ 502.1 MPa และเหล็กเส้นกลมมีกำลังดึงคราก เท่ากับ 459.8 MPa จำนวน 2 ต้น เสาต้นแรก C0 เป็นตัวอย่างเสาที่ไม่ได้เสริมกำลัง และเสาต้นที่ 2 เป็นเสา C1 ทำการเสริมกำลังโดยคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนที่มีหน้ากว้าง 50 mm หนา 25 mm ยึดกันด้วยสลักเกลียว ดังภาพที่ 35 ทั้งนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) ไว้ การคำนวณความเค้นทำได้โดยนำแรงอัดหารด้วยพื้นที่หน้าตัด และความเครียดได้จากกระบวนการเคลื่อนที่อัดหารด้วยความสูงเสา 450 mm ภาพที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัด จะเห็นได้ว่าเสาตัวอย่าง C0 ความเค้นอัดในเสามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น จนมีค่า 23.31 MPa หลังจากนั้นความเค้นเพิ่มขึ้นช้าลงจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 26.87 MPa ที่ความเครียด 0.0095 และลดลงอย่างรวดเร็วจนเกิดการวิบัติที่ความเครียด 0.0166 ส่วนในตัวอย่างเสา C1 ความเค้นอัดในเสาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่า 33.34 MPa และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 38.28 MPa ที่ความเครียด 0.0142 หลังจากนั้นความเค้นลดลงอย่างช้า ๆ จนเกิดการวิบัติที่ ความเครียด 0.0474 โดยทั้งสองตัวอย่างเหล็กเส้นเกิดการโก่งเดาะที่ฝั่งด้านยาวของเสา เมื่อพิจารณาค่าความเครียดในเหล็กเส้นจากอุปกรณ์วัดความเครียด จากภาพที่ 37 จะเห็นว่าจุดที่เหล็กเสริมเริ่มโก่งเดาะเมื่อค่าความเครียดเปลี่ยนทิศทางจากทิศทางแรงอัดเป็นทิศทางตรงกันข้าม เสาตัวอย่าง C0 มีจุดเริ่มการโก่งเดาะ

ที่ความเครียดประมาณ 0.0156 และทำให้ความเค้นอัดในเหล็กลดลงอย่างรวดเร็ว คอนกรีตถูกเหล็กตามยาวที่เกิดการโก่งเดาะดันออกมาจนแตกและหลุดออก ภาพที่ 39 ในขณะที่ตัวอย่างเสา C1 ที่เสริมกำลังไว้มีการโก่งเดาะที่ความเครียดอัดประมาณ 0.0095 แต่ความเค้นอัดในเหล็กยังคงเพิ่มขึ้นอยู่ สอดคล้องความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดในเหล็ก คาคาร์ต ภาพที่ 38 ที่เกิดแรงดึงจนถึงความเค้นครากทั้งฝั่งด้านสั้น และด้านยาวของเสาแต่ฝั่งด้านยาว จะมีค่าความเครียดที่มากกว่าด้านสั้นเนื่องจากเป็นด้านที่เหล็กเส้นเกิดการโก่งเดาะ ลักษณะการวิบัติของเสา C1 แสดงในภาพที่ 40 มีลักษณะคล้ายกับตัวอย่าง C0 แต่การโก่งเดาะของเหล็กตามยาวจะน้อยกว่า ดังนั้น การคาคาร์ตด้วยเหล็กเส้นแบนช่วยชะลอการโก่งเดาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้เสาสามารถรับแรงได้สูงขึ้นเนื่องจากแรงอัดในเหล็กเส้นไม่ลดลงเร็วเกินไปเมื่อเกิดการโก่งเดาะ



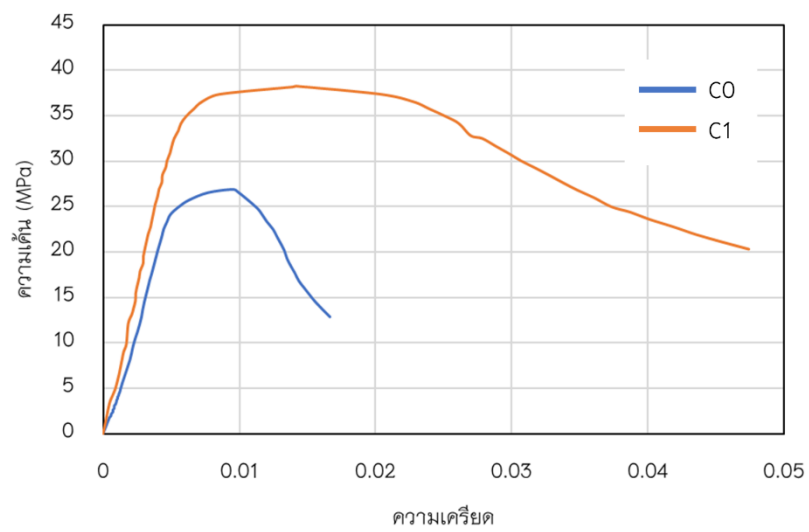
ภาพ 33 ตัวอย่างหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



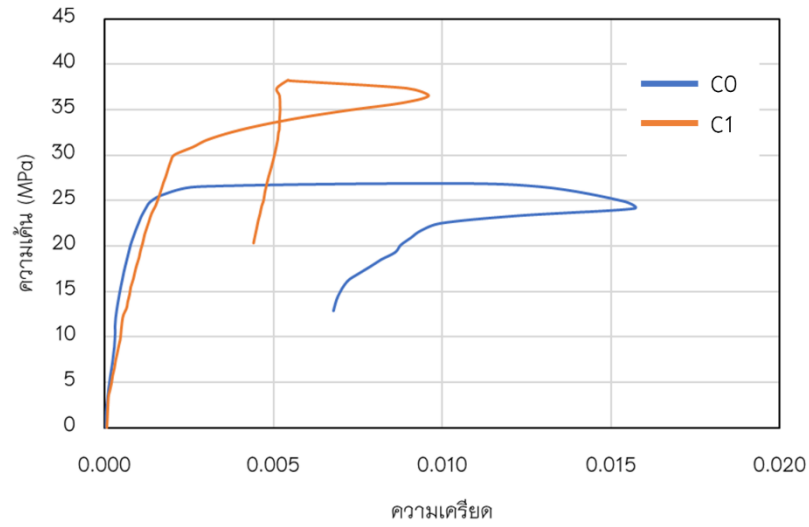
ภาพ 34 แรงกระทำเหล็กเส้นแบนโอบรัดเสา



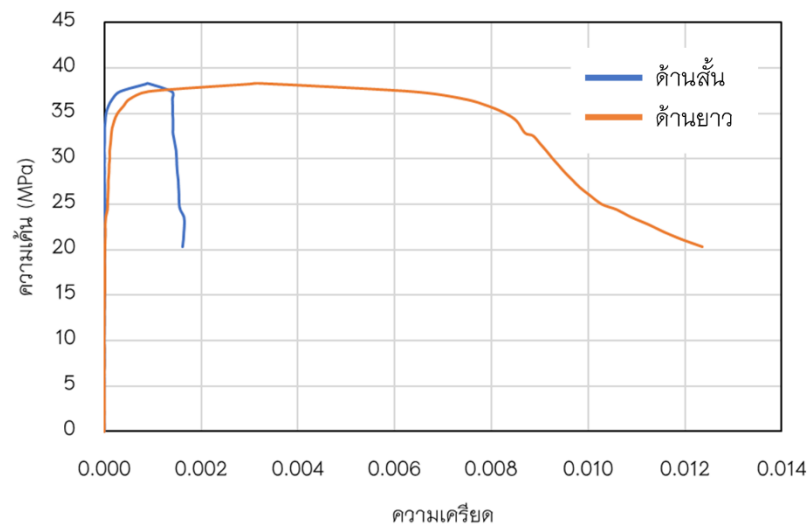
ภาพ 35 เสาคัดตัวอย่าง C0 (ซ้าย) เสาคัดตัวอย่าง C1 (ขวา)



ภาพ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัดของเสา



ภาพ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัดเฉลี่ยในเหล็กเส้น



ภาพ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดในเหล็กคานรัด



ภาพ 39 ลักษณะการวิบัติของเสา C0



ภาพ 40 ลักษณะการวิบัติของเสา C1

## บทที่ 4

### ประสิทธิภาพการเสริมกำลังให้เสาเพื่อรับแรงดันทันข้าง

ในบทนี้จะศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดันทันข้างที่เสริมกำลังด้วยการคาดรัดของเหล็กเส้นแบน โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เลือกมาทำการศึกษาจะเป็นเสาจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ทำการทดสอบภายใต้แรงอัดแนวแกนและแรงดันทันข้างที่มีการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear failure) หรือแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (Flexure-shear failure) และมีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวรวมอยู่ด้วย ข้อมูลของเสาดังกล่าวจะค้นหาจากฐานข้อมูลของศูนย์วิจัย Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) เว็บไซต์ <https://nisee.berkeley.edu/spd/search.html> ((PEER), 2557) ผลการค้นหา พบว่า มีตัวอย่างเสาสี่เหลี่ยมที่วิบัติจากแรงเฉือน 2 ตัวอย่าง และเสาที่วิบัติจากแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด 3 ตัวอย่าง การวิจัยนี้จึงจะนำเสาดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ แล้วทำการออกแบบขนาดของเหล็กเส้นแบนที่เหมาะสมสำหรับเสริมกำลัง หลักการออกแบบคือป้องกันไม่ให้เกิดวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน และสามารถยึดรั้งเหล็กเสริมตามยาวให้โก่งเดาะในความยาวช่วงที่เหมาะสม การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างเสาไม้ได้เสริมกำลังกับเสาที่เสริมกำลังจะแสดงไว้ในบทนี้

#### รายละเอียดตัวอย่างเสา

ตัวอย่างเสาที่จะทำการวิเคราะห์มี 5 ตัวอย่าง โดยมีรูปแบบการวิบัติแบบเฉือนและแบบเฉือนและโมเมนต์ดัด ดังแสดงในตาราง 2 ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Lynn, et al. (1998) จำนวน 3 ตัวอย่าง Sezen and Moehle (2002) จำนวน 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาทั้งหมดมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 457 mm ความสูงเสาเท่ากับ 2946 mm ให้แรงตามแนวแกนคงที่และให้แรงดันทันข้างกระทำแบบวัฏจักรโดยที่ควบคุมให้ปลายเสาทั้ง 2 ด้าน ไม่มีการหมุน ค่ากำลังอัดคอนกรีต และแรงตามแนวแกนของแต่ละตัวอย่าง แสดงในตาราง 3 รายละเอียดเหล็กเสริมแสดงในตาราง 4 โดยรูปแบบของเหล็กปลอกมี 2 แบบ คือ แบบ Hoop (H) และแบบ Hoop & Diamond (HD) ดังแสดงในภาพ 41 จากข้อมูลของเสาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเสริมเหล็กปลอกที่น้อยมาก จึงทำให้ผลการทดสอบเสาไปวิบัติแบบเฉือน หรือแบบเฉือนและโมเมนต์ดัด หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพให้เสาสามารถรับแรงดันทันข้างได้จำเป็นต้องทำการเสริมกำลัง ซึ่งการศึกษานี้จะใช้วิธีคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบน ผลการวิเคราะห์เสาดังกล่าวและเสาดังกล่าวที่ทำการเสริมกำลังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตาราง 2 ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการวิเคราะห์

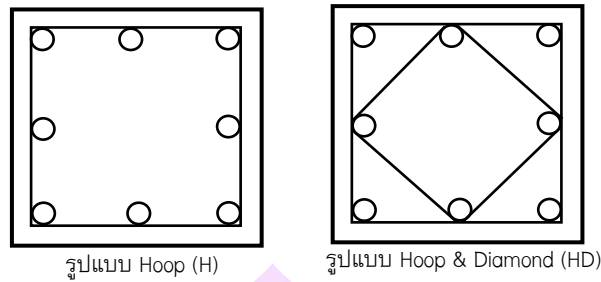
งานวิจัย	ตัวอย่างเสา	รูปแบบการวิบัติ
Lynn, et al. (1998)	3CMH18	แรงเฉือน
Lynn, et al. (1998)	3CMD12	แรงเฉือน
Lynn, et al. (1998)	2CLH18	แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด
Sezen and Moehle (2002)	No. 2	แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด
Sezen and Moehle (2002)	No. 4	แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

ตาราง 3 กำลังอัดคอนกรีตและแรงตามแนวแกนของตัวอย่างเสา

ตัวอย่างเสา	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	แรงตาม แนวแกน (N) (kN)	$\frac{N}{f'_c A_g}$
3CMH18	27.6	14860.8	1512	0.262
3CMD12	27.6	14955.3	1512	0.262
2CLH18	33.1	17934.4	503	0.073
No. 2	22.1	11323.1	2669	0.578
No. 4	21.8	11704.9	667	0.146

ตาราง 4 รายละเอียดเหล็กเสริมในตัวอย่างเสา

ตัวอย่าง เสา	เหล็กเสริมตามยาว				เหล็กปลอก				
	ขนาด (mm)	จำนวน (เส้น)	$f_y$ (Mpa)	$f_u$ (Mpa)	ขนาด (mm)	ระยะเรียง (mm)	รูปแบบ	$f_y$ (Mpa)	$f_u$ (Mpa)
3CMH18	31.8	8	331	496	9.5	457.2	H	399.9	558
3CMD12	31.8	8	331	496	9.5	304.8	HD	399.9	558
2CLH18	25.4	8	331	496	9.5	457.2	H	399.9	558
No. 2	28.7	8	434.4	645	9.5	304.8	HD	476	724
No. 4	28.7	8	434.4	645	9.5	304.8	HD	476	724



ภาพ 41 รูปแบบการเสริมเหล็กปลอก

### การเสริมกำลังเสาโดยวิธีค้ำรัดด้วยเหล็กเส้นแบน

เนื่องจากระยะเรียงของเหล็กปลอกในตัวอย่างเสามีระยะเรียงค่อนข้างห่างกำลังรับแรงเฉือนของเสาจึงรับโดยคอนกรีตที่มาตรฐาน ACI318 ให้สูตรการคำนวณตามสมการที่ 3

$$V_c = \left( 1 + \frac{N}{14A_g} \right) \left( \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right) bd \quad (3)$$

โดยที่  $V_c$  คือ กำลังรับแรงเฉือนโดยคอนกรีต (N)

$N$  คือ แรงตามแนวแกน (N)

$A_g$  คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต ( $\text{mm}^2$ )

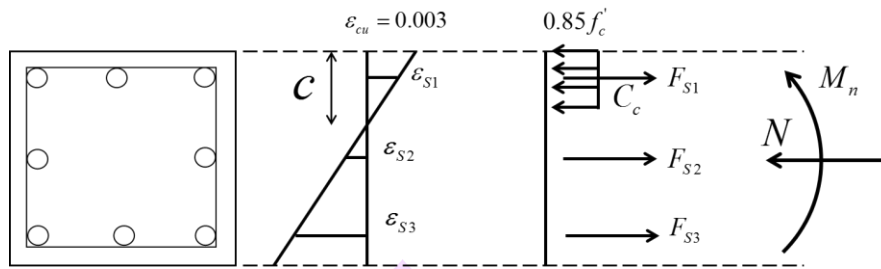
$f'_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีต (MPa)

$b$  คือ ความกว้างหน้าตัดเสา (mm)

$d$  คือ ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดเสา (mm)

สำหรับกำลังรับโมเมนต์ค้ำรัดคำนวณได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดเสาตามโต๊ะแกรมในภาพ 42 เมื่อหน้าตัดเสารับแรงอัด  $N$  และรับโมเมนต์ค้ำรัด  $M_n$  ที่ทำให้คอนกรีตถูกอัดแตก ( $\epsilon_{cu} = 0.003$ ) โดยมีระยะที่คอนกรีตรับแรงอัด  $C$  แรงอัดในคอนกรีต  $C_c$  และ  $\beta_1$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรผันตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังแสดงในสมการ 4 แรงดึงในเหล็กเสริมมีอยู่ 3 แรง ( $F_{S1}$   $F_{S2}$   $F_{S3}$ ) ตามตำแหน่งการวางเหล็ก คำนวณได้จากสมการที่ 5 และ 6

$$\beta_1 \begin{cases} 0.85 & f'_c \leq 280 \text{ ksc} \\ 0.85 - 0.05 \left( \frac{f'_c - 280}{70} \right) & 280 \text{ ksc} < f'_c \leq 560 \text{ ksc} \\ 0.65 & f'_c > 560 \text{ ksc} \end{cases} \quad (4)$$



ภาพ 42 ลักษณะแรงดึงและแรงอัดในเสา

$$C_c = 0.85 f'_c b \beta_1 c \quad (5)$$

$$F_{si} = E_s \frac{\varepsilon_{cu}}{c} (c - d_i) \leq f_y A_{si} \quad (6)$$

โดยที่  $d_i$  คือ ความลึกประสิทธิผลของเหล็กเสริมในลำดับแถว  $i$  (mm)

$A_{si}$  คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรวมในลำดับแถว  $i$  (mm<sup>2</sup>)

$f_y$  คือ กำลังครากของเหล็กเสริม (MPa)

ผลรวมของแรงอัดคอนกรีต และแรงในเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับแรงอัดลัพธ์กระทำบนหน้าตัดเสา ตามสมการที่ 7 ซึ่งแก้สมการหาระยะ  $c$  ที่ทำให้สมการเป็นจริงได้

$$N = C_c + \sum_{i=1}^3 F_{si} \quad (7)$$

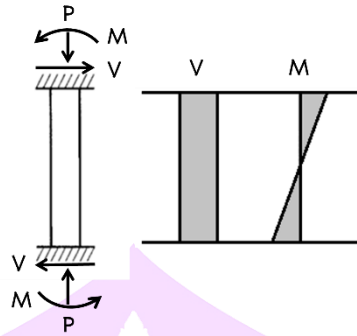
จากนั้นคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัด  $M_n$  ได้จากสมการที่ 8

$$M_n = C_c \left( \frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \sum_{i=1}^3 F_{si} \left( \frac{h}{2} - d_i \right) \quad (8)$$

จากกำลังรับโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้ จะนำไปคำนวณแรงดันทันข้างที่สมดุลกับกำลังรับโมเมนต์ดัด (ดูภาพ 43) ได้ตามสมการที่ 9

$$V_f = \frac{2M_n}{H} \quad (9)$$

โดยที่  $H$  คือ ความสูงของเสา (m)



ภาพ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับโมเมนต์ดัดในเสา

เมื่อทำการคำนวณกำลังรับแรงเฉือน  $V_c$  และกำลังรับโมเมนต์ดัด  $M_n$  และแรง  $V_f$  ได้ดังแสดงในตาราง จะเห็นได้ว่าตัวอย่างเสามีกำลังรับแรงเฉือน  $V_c$  ที่ต่ำกว่าแรงเฉือนที่รับโมเมนต์ดัด  $V_f$  ดังนั้น ผลการทดสอบเสาจึงวิบัติแบบเฉือนได้

ในการเสริมกำลังจะออกแบบให้โครงสร้างเสาเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติแบบเฉือนเป็นวิบัติแบบดัด แสดงว่ากำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างเสาต้องมากกว่า  $V_f$  หากพิจารณาให้เหล็กคานดัดรับแรงเฉือนรวมกับคอนกรีต โดยมีระยะเรียงของเหล็กคานดัดเท่ากับ  $d/2$  จะคำนวณพื้นที่ของเหล็กคานดัดที่ต้องการได้ตามสมการที่ 10

$$A_{sf} = \frac{V_f - V_c}{2f_{yh}} \quad (10)$$

โดยที่  $f_{yh}$  คือ กำลังครากของเหล็กคานดัด (240 MPa)

$A_{sf}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กคานดัด

จากนั้นนำพื้นที่หน้าตัดของแต่ละตัวอย่างที่ได้ ( $A_{sf}$ ) ไปเลือกหน้าตัดของเหล็กคานดัด ดังแสดงในตาราง 5

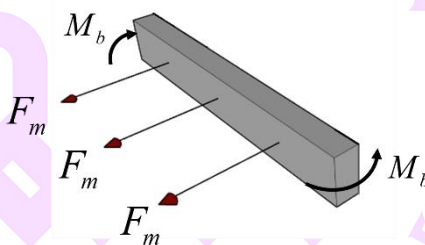
ตาราง 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับแรงเฉือนจากโมเมนต์ดัด

ตัวอย่างเสา	$V_c$ (kN)	$M_n$ (kN-m)	$V_f$ (kN)	$V_f - V_c$ (kN)	$A_{sf}$ (mm <sup>2</sup> )	หน้าตัดเหล็กคานดัด (mm <sup>2</sup> )
3CMH18	246	538	363	117	248.55	65x9
3CMD12	246	538	363	117	248.55	65x9
2CLH18	208	343	231	23	48.86	50x9
No. 2	278	456	308	30	63.73	50x9
No. 4	177	471	318	141	299.54	50x9

เมื่อโครงสร้างเสาจะวิบัติแบบดัดแล้ว เพื่อให้โครงสร้างมีความเหนียวจะต้องควบคุมให้เหล็กเสริมตามยาวไม่โก่งเดาะ จากการศึกษาในบทที่แล้ว ต้องควบคุมให้เหล็กเสริมตามยาวโก่งเดาะในช่วงความยาว  $6D$  จึงจะรับแรงอัดได้ดี และค่าแรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้นจะเพิ่มขึ้นตามขนาดหน้าตัดเหล็ก จากการทดสอบเหล็ก DB25 ซึ่งมีกำลังครากเท่ากับ 543.9 MPa พบว่า แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่ความเครียดอัด 0.02 มีค่าเท่ากับ 21.5 kN ตัวอย่างเสาใช้เหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดใหญ่กว่าแต่มีกำลังครากที่น้อยกว่า จึงจำเป็นต้องปรับแก้แรงยับยั้งนี้โดยมีหลักการว่าแรงยับยั้งขึ้นอยู่กับกำลังรับโมเมนต์ดัดของเหล็กเส้น ดังนั้น แรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  และมีกำลังครากเท่ากับ  $f_y$  จะใช้แรงยับยั้ง ประมาณจากสมการที่ 11

$$F_m = 21.5 \left( \frac{f_y}{543.9} \right) \left( \frac{D}{25} \right)^3 \quad (11)$$

โดยแรงนี้จะถูกนำไปกระทำกับเหล็กเส้นแบนคาตรัดตั้งภาพ 44 แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัด ( $M_b$ ) แล้วทำการออกแบบหน้าตัดของเหล็กเส้นแบนให้ความเค้นไม่เกินความเค้นที่จุดคราก จะได้ค่าโมดูลัสของหน้าตัดตามสมการที่ 12



ภาพ 44 แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่กระทำต่อเหล็กยึดตั้ง

$$S = \frac{M_b}{f_{yh}} \quad (12)$$

โดยที่  $f_{yh}$  คือ กำลังครากของเหล็กคาตรัด (240 MPa)

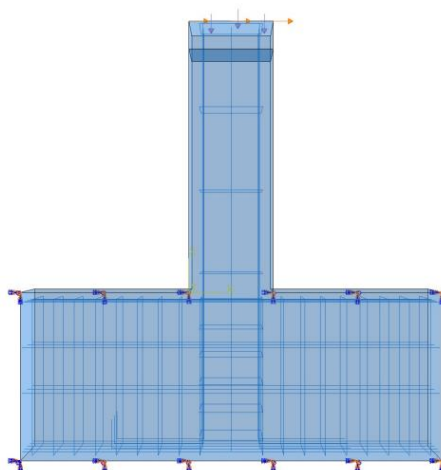
ตารางที่ 6 แสดงค่าโมดูลัสหน้าตัดของเหล็กเส้นแบนที่ต้องการยับยั้งการโก่งเดาะและขนาดของเหล็กเส้นแบนที่ถูกเลือกใช้ยับยั้งการโก่งเดาะ โดยใช้เสริมช่วงโคนและปลายเสาที่เกิดโมเมนต์ดัดมาก

ตาราง 6 ขนาดของเหล็กเส้นคานรััดสำหรับยั้งยั้งการโก่งเดาะ

ตัวอย่างเสา	แรงยับยั้ง (kN)	โมดูลัสหน้าตัดที่ ต้องการ (mm <sup>3</sup> )	เลือกหน้าตัดเหล็กคาน รััด (mm <sup>2</sup> )
3CMH18	26.93	11684.06	150x25
3CMD12	26.93	11684.06	150x25
2CLH18	13.72	5948.25	100x25
No. 2	25.98	11046.75	100x25
No. 4	25.98	11046.75	100x25

### การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS

ในวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS สร้างโมเดลเสาที่มีความสูงครึ่งต้นของเสาดตัวอย่างเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ โดยทุกตัวอย่างมีความสูงครึ่งต้น 1473.2 mm เสามีขนาดหน้าตัด 457.2 x 457.2 mm<sup>2</sup> ฐานรองรับของเสาดตัวอย่างมีคุณสมบัติแบบยึดแน่น (Fixed Support) ทั้งด้านล่างและด้านบนของฐานเสา (ภาพ 45) ที่หัวเสา 150 mm กำหนดให้คุณสมบัติคอนกรีตเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) เพื่อป้องกันผลกระทบจากการวิบัติของคอนกรีตเนื่องจากแรงตามแนวแกน ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Covering) อยู่ที่ 50.8 mm



ภาพ 45 ลักษณะของสร้างโมเดลที่วิเคราะห์

## 1. พารามิเตอร์และการสร้างแบบจำลอง

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งหมด 5 ตัวอย่าง มีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ( $f'_c$ ) คุณสมบัติของเหล็กเสริม ตามยาว ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก จำนวนเหล็ก กำลังที่จุดคราก ( $f_y$ ) กำลังที่จุดประลัย ( $f_u$ ) คุณสมบัติของเหล็กปลอก ได้แก่ ระยะเรียง ( $S$ ) รูปแบบของเหล็กปลอก กำลังที่จุดคราก ( $f_y$ ) กำลังที่จุดประลัย ( $f_u$ ) รวมไปถึงแรงตามแนวแกนคงที่กระทำที่หัวเสา

### 1.1 แบบจำลองคอนกรีต

การวิเคราะห์ความเสียหายของคอนกรีตด้วยโปรแกรม ABAQUS มีตัวเลือก รูปแบบพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีตอยู่หลายรูปแบบ แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่ รูปแบบของการให้แรงอย่างต่อเนื่อง (Monotonic loading) โดยใช้แบบจำลองความเสียหายของ คอนกรีตแบบพลาสติก (Concrete Damaged Plasticity) ซึ่งเป็นการรวมพฤติกรรมของคอนกรีต ทั้งการรับแรงอัด (Compressive behavior) และการรับแรงดึง (Tensile behavior) โดยมีพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

1.1.1 มุมขยาย (Dilation angle) เป็นมุมของแรงเสียดทานภายในของวัสดุ ขึ้นอยู่กับ ส่วนผสมของคอนกรีต โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 30-40 องศา โดยการศึกษาครั้งนี้จะใช้มุมอยู่ที่ 30 องศา

1.1.2 ความเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity) เป็นการไหลของพลังงานศักย์แบบเยื้องศูนย์กลาง สามารถคำนวณอย่างง่ายจากอัตราส่วนระหว่างแรงดึงต่อแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไป จะมีค่าอยู่ที่ 0.1

1.1.3  $f_{bo} / f_{co}$  เป็นตัวแปรที่อธิบายความเค้นอัดที่จุดครากสองแกนต่อความเค้น อัดครากแกนเดียว ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 5/3 หรือ 1.16

1.1.4  $K_c$  เป็นค่าความเค้นคงที่อันดับสอง (The second stress invariant) บนเส้น เมอริเดียนของแรงดึงและแรงอัด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 2/3 หรือ 0.667

1.1.5 Damage Parameter ค่าความหนืด เป็นตัวแปรความเสียหายของแรงดึง (Compressive damage parameter) โดยใช้อัตราส่วนความเครียดไม่ยืดหยุ่นกับความเครียดรวม และความเสียหายของแรงอัด (Tensile damage parameter) โดยใช้อัตราส่วนความเครียดแตกร้าวก บัความเครียดรวม ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 0.001

พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตจะใช้สมการที่เสนอโดย Legeron and Paultre (2003) ดังแสดงในบทที่ 2 แบบจำลองกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัด โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 3

ส่วนพฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีตจะใช้สมการที่แสดงในบทที่ 2 เสนอแบบจำลองโดย Wahalathantri โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 3 เช่นเดียวกัน

### 1.2 แบบจำลองเหล็กเสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทั้งกำลังการรับแรงอัดและแรงดึงของเหล็กตามยาวแต่ละขนาด จะใช้การที่เสนอโดย Dhakal and Maekawa (2002) ดังแสดงในบทที่ 2 และใช้อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.3 โดยเหล็กตามยาวก่อนเสริมกำลังจะใช้ความยาวการโก่งเดาะ  $L$  เท่ากับระยะเรียงของเหล็กปลอก ส่วนในตัวอย่างเสาที่ทำการเสริมกำลังแล้วจะใช้ความยาวการโก่งเดาะเท่ากับ  $6D$  โดย  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 4

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกำลังการรับแรงดึงในเหล็กปลอกเพื่อความสะดวกจะใช้ความแบบเส้นตรง โดยสนใจค่าความเค้นและความเครียดที่ 3 จุด จุดที่เหล็กเริ่มคราก จุดค่าความเค้นเพิ่มขึ้น และจุดค่าความเค้นสูงสุด โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 4 ใช้อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.3

### 1.3 แบบจำลองเหล็กคานรัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกำลังการรับแรงดึงในเหล็กคานรัด จะสนใจค่าความเค้นและความเครียดที่ 3 จุด เช่นเดียวกับเหล็กปลอก โดยเหล็กคานรัดที่นำมาวิเคราะห์จะเป็นเหล็กรูปพรรณที่หาได้ตามท้องตลาด และได้ตามมาตรฐานมอก 24-2548 โดยให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก  $E_s$  200 GPa ความเค้นที่จุดคราก  $f_y$  240 MPa ความเครียดที่จุดความเค้นเพิ่มขึ้น  $\epsilon_{sh}$  0.01 ความเค้นสูงสุด  $f_u$  350 MPa ความเครียดที่ความเค้นสูงสุด  $\epsilon_u$  0.1 ใช้อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.3

## 2. ขนาดและชนิดของเอลิเมนต์

เป็นการแบ่งชิ้นส่วนของวัสดุแต่ละประเภทออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) การวิเคราะห์ในครั้งนี้ จะแบ่งขนาดของเอลิเมนต์ และชนิดของเอลิเมนต์แตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตาราง 7 ขนาดและชนิดเอลิเมนต์ของวัสดุ

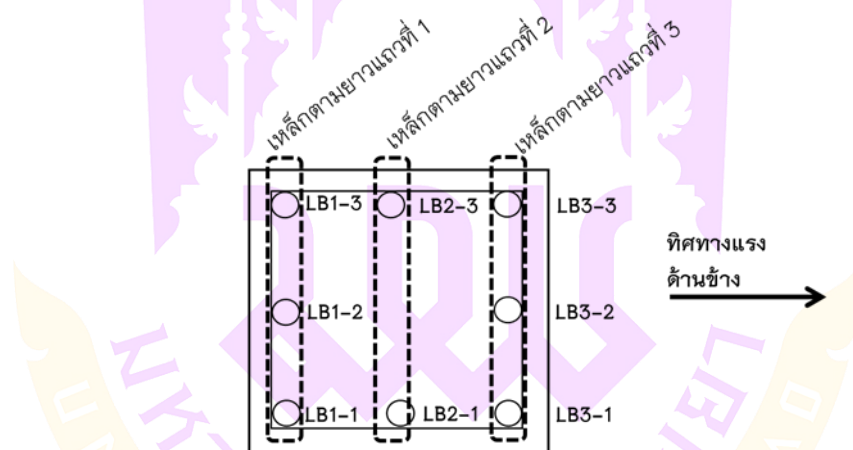
วัสดุ	ขนาดของเอลิเมนต์ (mm)	ชนิดของเอลิเมนต์
คอนกรีต	45.72	Solid element
เหล็กตามยาว	45.72	Truss element
เหล็กปลอก	20	Truss element
เหล็กคานรัด	25	Solid element

### 3. การให้แรงกระทำ

การให้แรงกระทำจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะเป็นการให้แรงแบบแผ่กระจาย (Uniform load) ที่หัวเสาตรงที่ตลอดการวิเคราะห์ โดยค่อย ๆ เพิ่มแรง 0.2 MPa/sec จนแรงตามแนวแกนมีค่าถึงแรงที่กำหนด ส่วนชั้นที่สองจะเป็นการให้ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา โดยจะให้ที่ตำแหน่งหน้าตัดของหัวเสา โดยจะเพิ่มระยะการเคลื่อนตัว 1 mm/sec จนเสาคอนกรีตเกิดการวิบัติ

### 4. การเก็บข้อมูล

ตำแหน่งที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในการทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวด้านข้างจะเก็บข้อมูลที่ปลายเสา ส่วนค่าความเค้นและความเครียดในวัสดุจะเก็บข้อมูลที่เอลิเมนต์ที่มีค่าหน่วยแรงสูงสุด โดยค่าความเค้นและความเครียดในเหล็กเสริมตามยาว จะแบ่งเป็น 3 แถว ดังแสดงในภาพ 46



ภาพ 46 ชื่อและหมายเลขของเหล็กเสริม

### ผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตที่วิบัติจากแรงเฉือน (Shear failure)

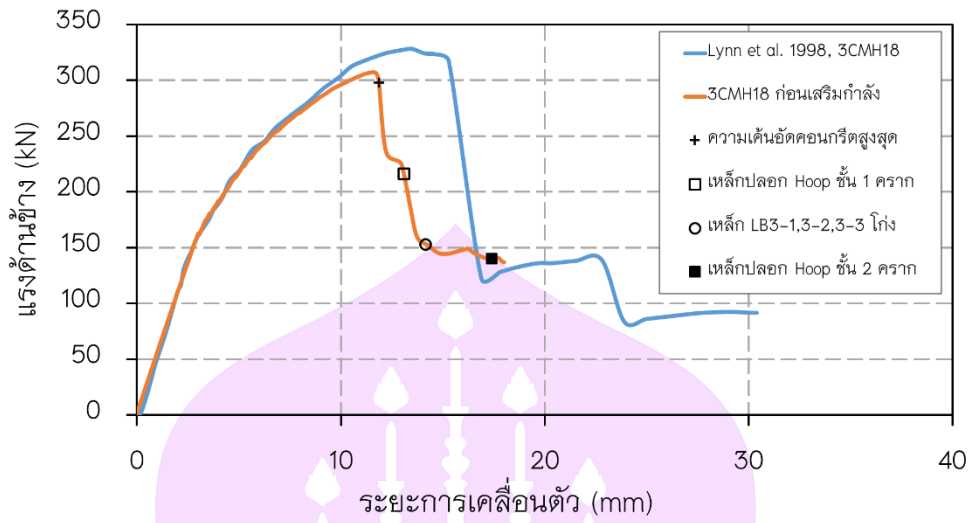
ตัวอย่างเสาคอนกรีตที่เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนเกิดจากการกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกค่าน้อยกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในเสา จึงทำให้กำลังรับแรงดึงในเหล็กปลอกถึงจุดครากในและทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกบริเวณโคนหรือปลายเสา ขณะที่เหล็กตามยาวยังมีกำลังไม่ถึงจุดครากแต่เนื่องจากคอนกรีตเสียหายอย่างหนักจนทำให้เสาเกิดการวิบัติในที่สุด

## 1. การวิเคราะห์ตัวอย่างเสา 3CMH18

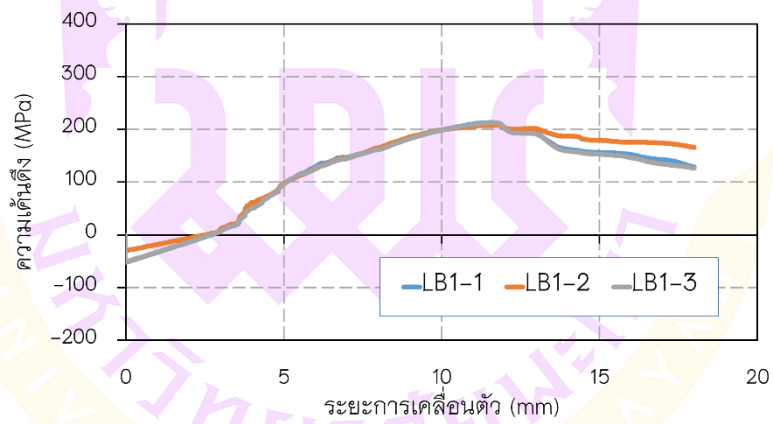
### 1.1 ผลการวิเคราะห์เสาก่อนเสริมกำลัง

ในตัวอย่างนี้จากการทดสอบจริงพบว่ามีการรับแรงด้านข้างสูงสุด 328.00 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 13.50 mm แรงด้านข้างเมื่อเกิดการวิบัติอยู่ที่ 91.40 kN และมีระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนกำลังรับแรงด้านข้างตกลง ที่ระยะ 30.40 mm

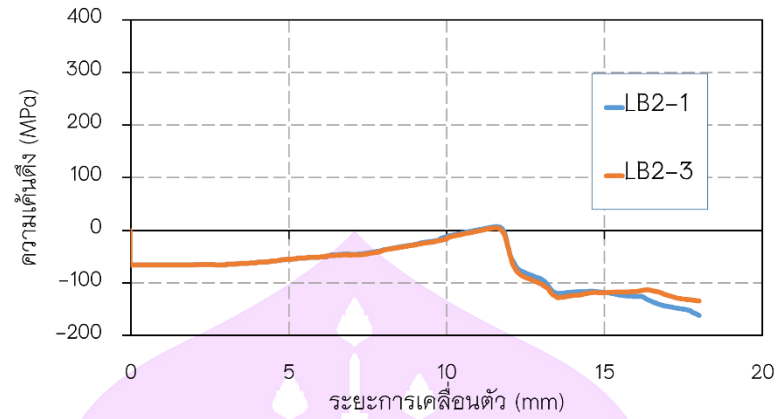
ผลการวิเคราะห์ก่อนทำการเสริมกำลัง จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบจริงเทียบกับผลการวิเคราะห์ (ดูภาพ 47) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันมากกว่าผลการทดสอบจริง แต่ทำนายกำลังรับแรงด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้น้อยกว่าผลการทดสอบ ผลการวิเคราะห์จะสามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ โดยแรงด้านข้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 307.07 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 11.60 mm น้อยกว่าผลการทดสอบจริง จากนั้นกำลังรับแรงด้านข้างลดลงทันทีอย่างรวดเร็ว ที่ระยะ 11.86 mm เป็นระยะที่ขึ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดถึงกำลังอัดสูงสุด คือ 30.22 MPa (ภาพ 51) ก่อนที่จะลดลงทำให้แรงด้านข้างลดลงเหลือ 216.31 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 13.08 mm และทำให้แรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 (ภาพ 52) มีค่าแรงดึงถึงจุดครากแรงด้านข้างลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือ 153.11 kN ที่ระยะ 14.15 mm เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 (ภาพ 50) รับแรงอัดจนถึงจุดครากจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 จากนั้นแรงด้านข้างมีค่าคงที่เล็กน้อย เนื่องจากแรงดึงในเหล็กปลอกชั้นที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดคราก (ภาพ 53) ที่ระยะ 17.38 mm และกลับมาลดลงอีกครั้งจนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากเหลือเพียง 9.55 MPa จึงถือว่าเกิดการวิบัติโดยมีแรงด้านข้าง 136.69 kN ที่ระยะ 18.00 mm ในตัวอย่างนี้เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับแรงอัดจนถึงจุดครากทำให้เกิดแรงดึงในเหล็กปลอกจนถึงจุดครากที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 แต่ในส่วนของเหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 (ภาพ 48) รับความเค้นดึงน้อยกว่าจุดคราก เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 ถือว่าเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือน (Shear Failure) ภาพ 54 แสดงการเคลื่อนตัวของเสาหลังจากวิบัติจะเห็นได้ว่าจะเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณช่วงเหล็กปลอก 1-2 จึงจะทำการเสริมกำลังให้กับเสาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงด้านข้าง ความสามารถในการเคลื่อนตัวด้านข้าง และเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติให้เป็นการวิบัติแบบดัดและเฉือน (Flexural-shear failure) ต่อไป



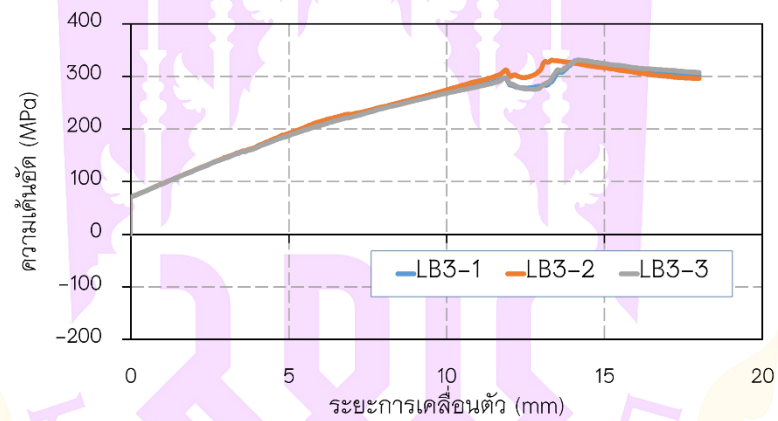
ภาพ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการทดสอบ และการวิเคราะห์เสา 3CMH18



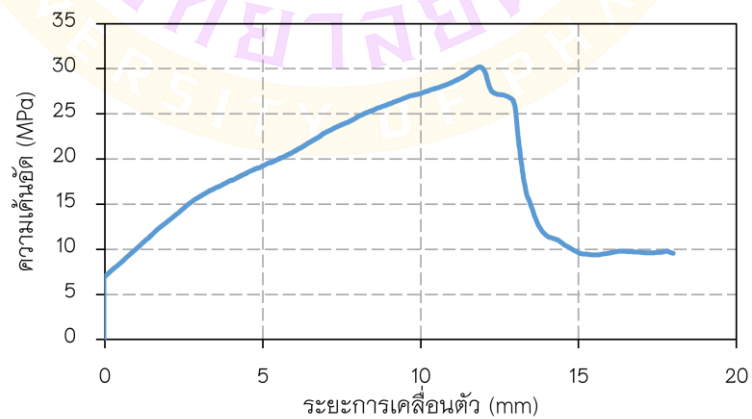
ภาพ 48 ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง



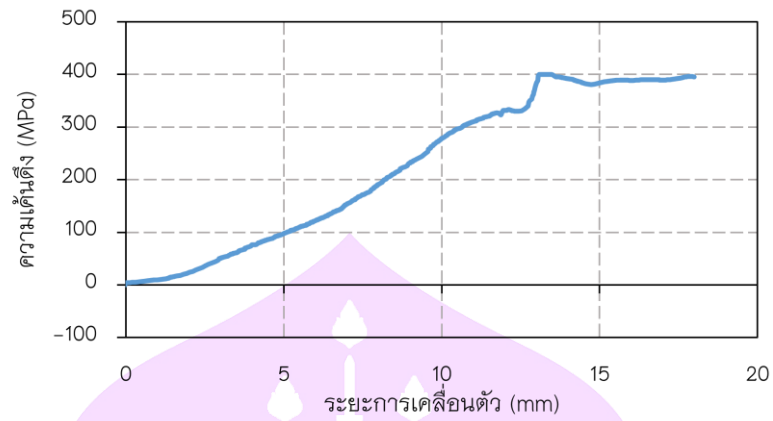
ภาพ 49 ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง



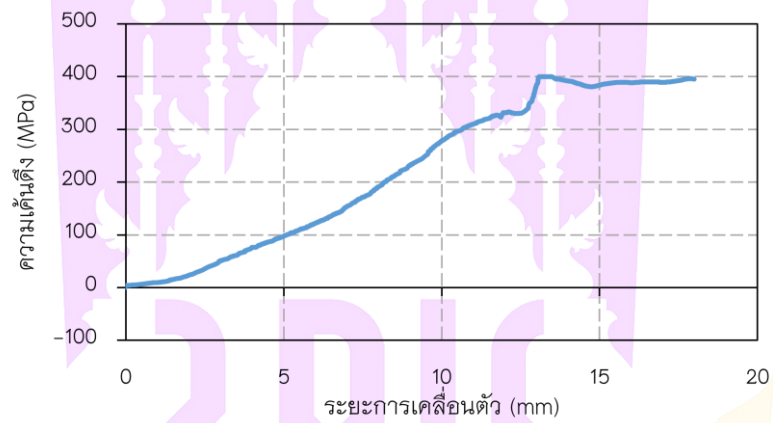
ภาพ 50 ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง



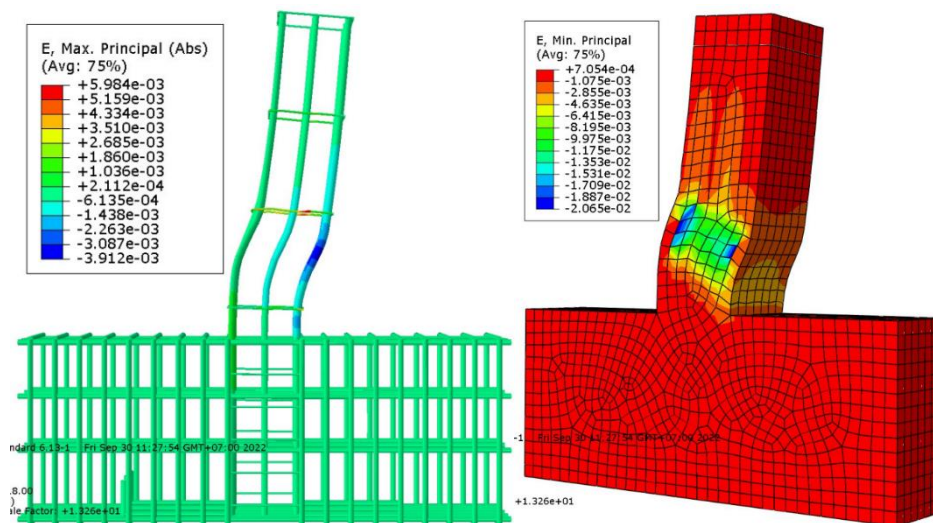
ภาพ 51 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 52 ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสอา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 53 ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสอา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง

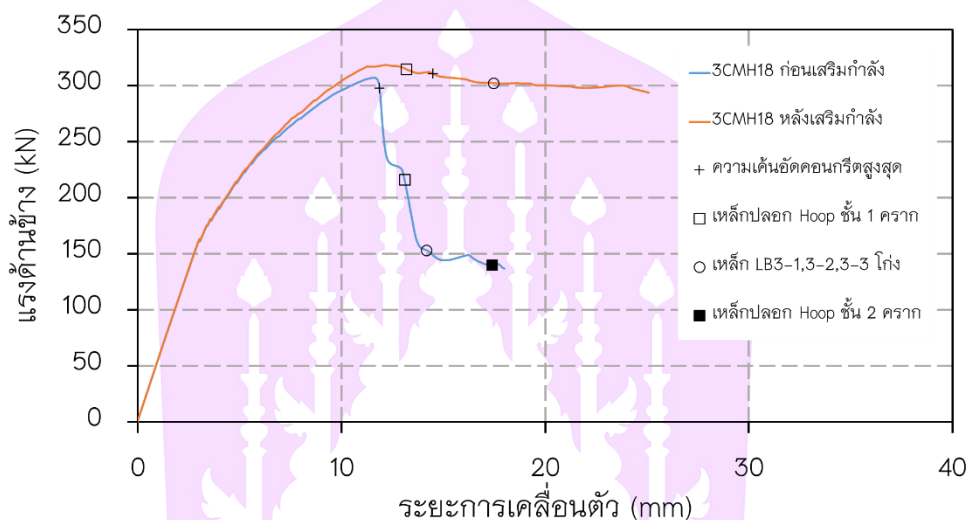


ภาพ 54 ลักษณะการเสียรูปของเสา 3CMH18 ก่อนเสริมกำลัง

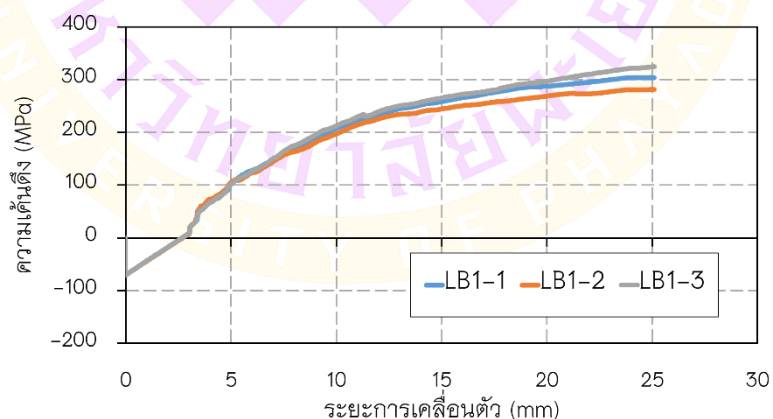
## 1.2 ผลการวิเคราะห์เสาที่เสริมกำลัง

เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่ทำการเสริมกำลังจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันท่างและการเคลื่อนที่ดันท่างจากผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลังเทียบกับผลการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง (ภาพ 55) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันเท่ากัน ทำนายกำลังรับแรงดันท่างและระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่าผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง สามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ โดยมีแรงดันท่างสูงสุดอยู่ที่ 318.14 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 12.16 mm แล้วจึงค่อย ๆ ลดลงที่การเคลื่อนที่ดันท่าง 12.16 mm เหล็กปลอกชั้นที่ 1 (ภาพ 60) รับแรงดึงจนถึงจุดครากแรงดันท่างลดลงอย่างต่อเนื่องที่ระยะ 14.48 mm เป็นจุดที่ชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุด (ดูภาพ 59) คือ 34.15 MPa แรงดันท่างยังลดลงอย่างคงที่เท่าเดิม จนถึงระยะ 17.45 mm เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 (ภาพ 58) รับแรงดึงจนถึงจุดครากจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอก 1-2 แต่พบว่าอาการลดลงของแรงดันท่างค่อย ๆ ลดช้าลงจนค่าความเค้นอัดในคอนกรีตมีค่าลดลงจะเหลือ 50% จากความเค้นอัดสูงสุด แรงดันท่างลดเหลือ 293.39 kN ที่ระยะ 25.09 mm จึงถือว่าเกิดการวิบัติ ในตัวอย่างนี้เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับแรงอัดจนเกิดการโก่งเดาะ ทำให้เกิดความเค้นดึงในเหล็กปลอกจนถึงจุดคราก แต่เหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 (ภาพ 61) เกิดแรงดึงน้อยกว่าจุดครากทั้งนี้อาจเกิดจากระยะของเหล็กปลอกเป็นระยะที่ตรงกับระยะของเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะซึ่งพบว่าเกิดความเค้นดึงน้อยกว่าจุดคราก (ภาพ 63) ส่วนเหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 รับความเค้นดึงน้อยกว่าจุดคราก (ภาพ 56)

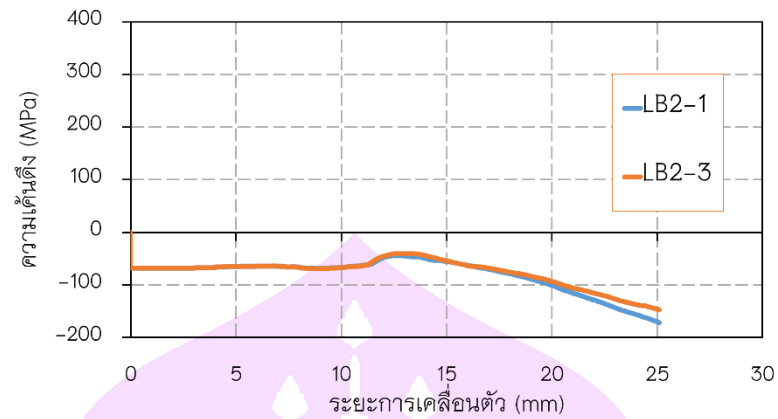
และพบว่า เหล็กโอบรับแรงเฉือนมีความเค้นดึงสูงสุดที่ชั้นที่ 2 (ภาพที่ 62) แต่ยังมีค่าน้อยกว่าจุดครากอยู่ จึงถือว่าเสายังเกิดการวิบัติแบบแรงดัด (Flexural failure) ภาพ 64 แสดงการเคลื่อนตัวของเสาหลังจากวิบัติจะเห็นได้ว่าเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณโคนเสา ซึ่งถือว่าจากการเสริมกำลังให้กับเสาแม้จะไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของเสาได้แต่ทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันท่างและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างได้มากขึ้น



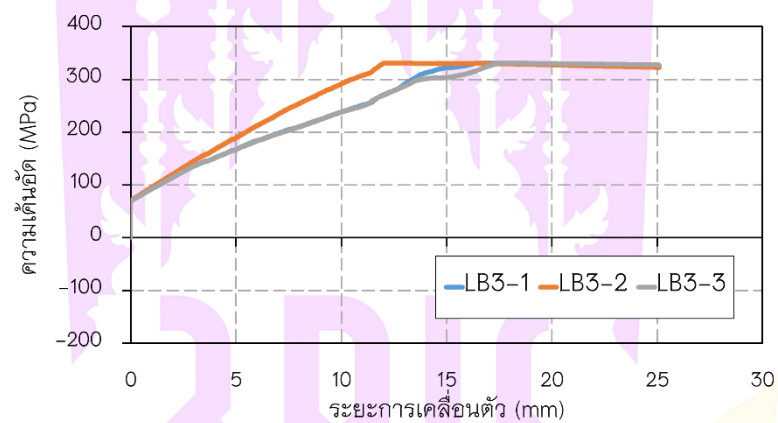
ภาพ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เสา 3CMH18



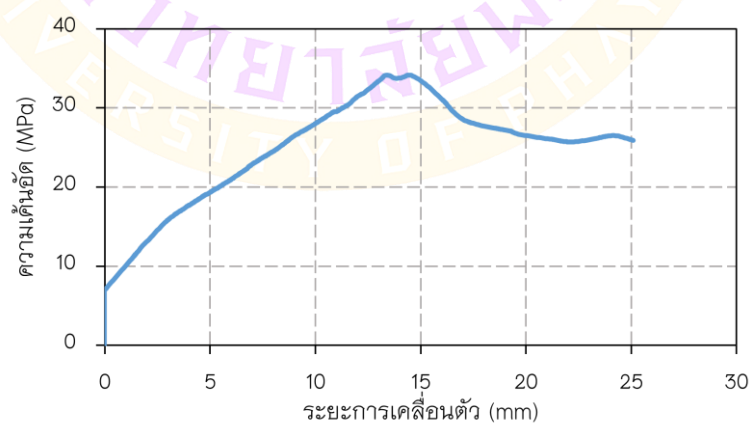
ภาพ 56 ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง



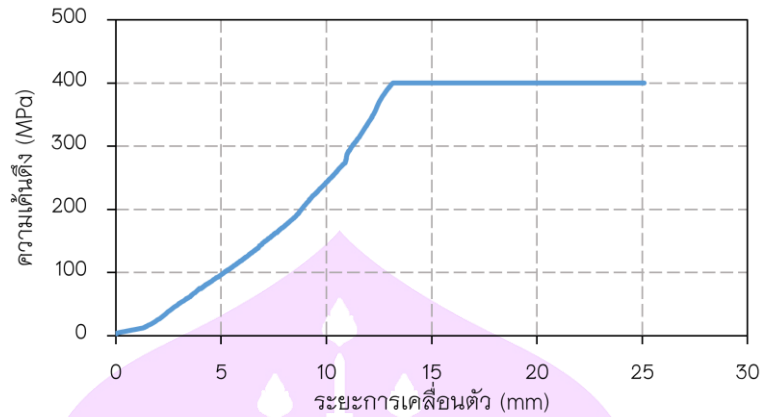
ภาพ 57 ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง



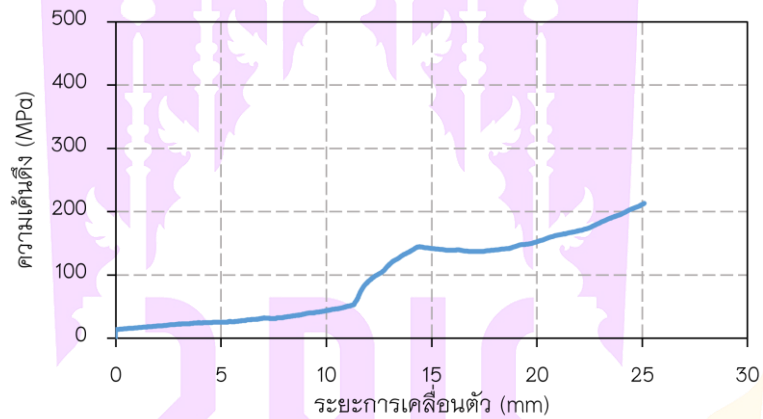
ภาพ 58 ค่าความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง



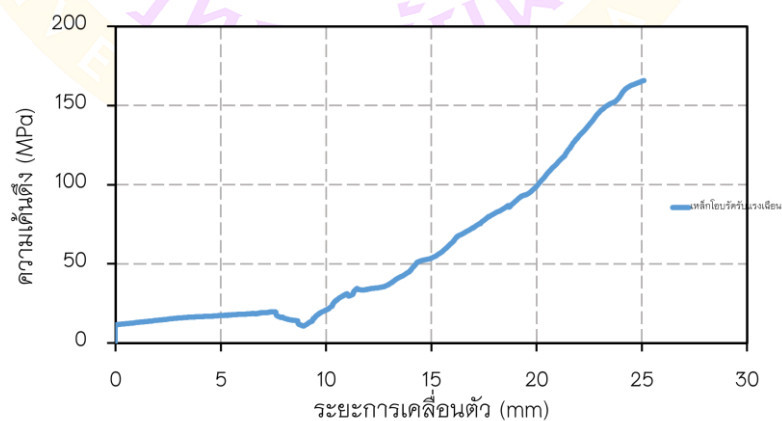
ภาพ 59 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMH18 หลังเสริมกำลัง



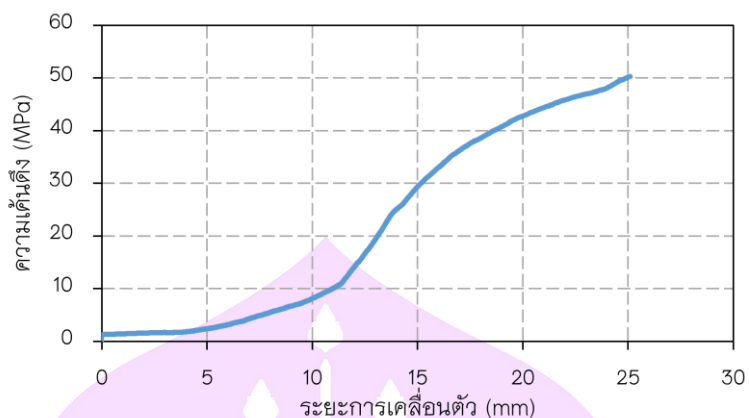
ภาพ 60 ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า 3CMH18 หลังเสริมกำลัง



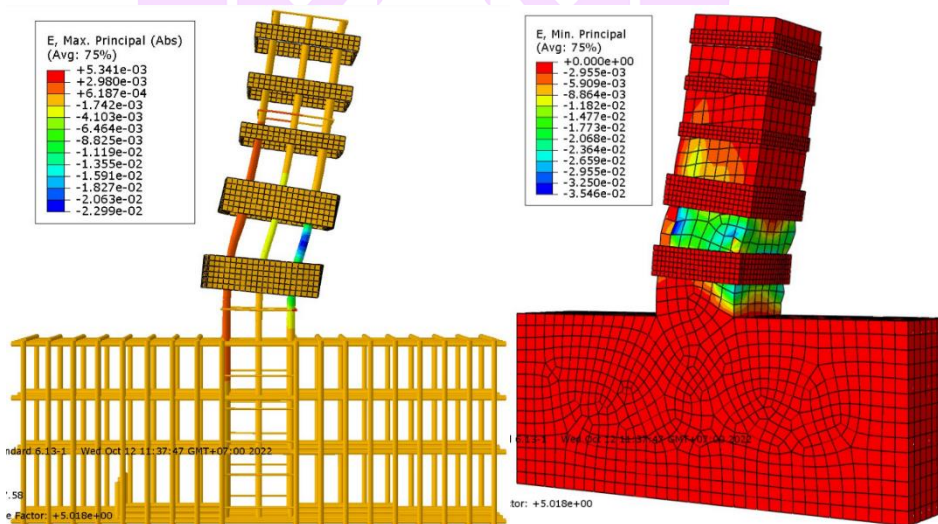
ภาพ 61 ค่าความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า 3CMH18 หลังเสริมกำลัง



ภาพ 62 ค่าความเค้นในเหล็กโอบรับแรงเฉือน เส้า 3CMH18



ภาพ 63 ค่าความเค้นในเหล็กโอบรับลดระยะการโก่งเดาะ เส้า 3CMH18



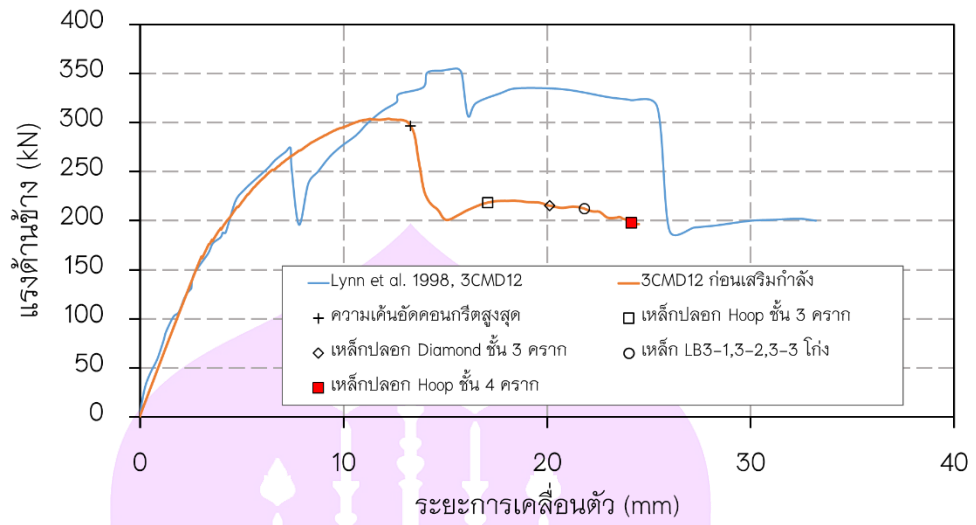
ภาพ 64 ลักษณะการเสียรูป เส้า 3CMH18 หลังเสริมกำลัง

## 2. การวิเคราะห์ตัวอย่างเส้า 3CMD12

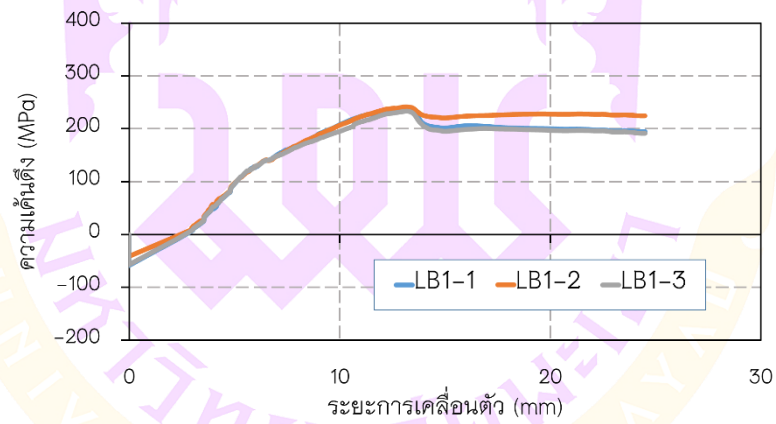
### 2.1 ผลการวิเคราะห์เส้าก่อนเสริมกำลัง

ในตัวอย่างนี้พบว่าผลการทดสอบจริง พบว่า มีกำลังการรับแรงดันทันข้างสูงสุด 355.00 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 15.60 mm แรงดันทันข้างเมื่อเกิดการวิบัติอยู่ที่ 200.00 kN และมีระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนกำลังรับแรงดันทันข้างตกลง ที่ระยะ 33.20 mm

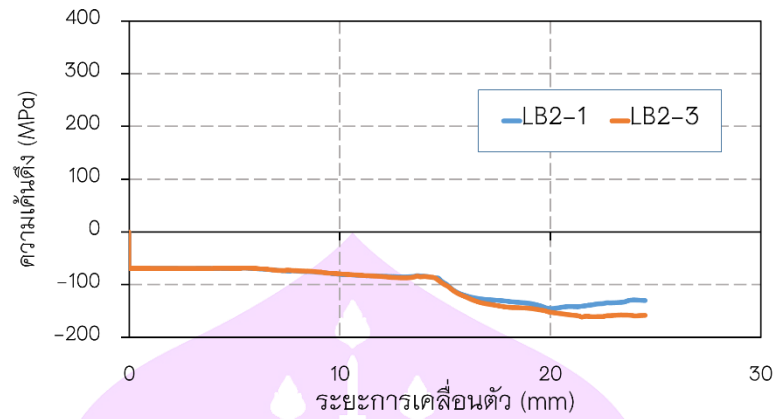
ผลการวิเคราะห์ก่อนทำการเสริมกำลัง จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทันข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบจริงเทียบกับผลการวิเคราะห์ (ภาพ 65) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันมากกว่าผลการทดสอบจริง ทำนายกำลังรับแรงดันทันข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้น้อยกว่าผลการทดสอบ ผลการวิเคราะห์จะสามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ พบว่าแรงดันทันข้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีกำลังรับแรงดันทันข้างสูงสุดอยู่ที่ 303.86 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 12.21 mm จากนั้นกำลังการรับแรงดันทันข้างลดลงทันทีอย่างรวดเร็วที่ระยะ 13.28 mm เป็นระยะที่ชั้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดถึงกำลังอัดสูงสุดคือ 30.28 MPa (ภาพ 69) ก่อนที่จะลดลงทำให้แรงดันทันข้างลดลงเหลือเพียง 201.16 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 15.18 mm และทำให้แรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop และ Diamond ชั้นที่ 3 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop มีความเค้นถึงจุดครากที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 17.08 mm (ภาพ 70) ทำให้แรงดันทันข้างจึงมีค่าคงที่จนถึงระยะ 20.12 mm แรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 3 มีค่าถึงจุดคราก (ภาพ 71) และเหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 เกิดการโก่งเดาะ ที่ระยะ 21.82 mm (ภาพ 66) ทำให้แรงดันทันข้างค่อย ๆ ลดลงอีกครั้ง และลดลงอย่างต่อเนื่องจนแรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 4 (ภาพ 72) มีค่าถึงจุดครากที่ระยะ 24.11 mm แต่เหล็กปลอก Diamond ชั้นที่ 4 มีค่าความเค้นดึงน้อยมาก (ภาพ 73) และกำลังรับแรงดันทันข้างของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมาก เหลือเพียง 5.60 MPa จึงถือว่าการวิบัติโดยมีแรงดันทันข้าง 196.56 kN ที่ระยะ 24.50 mm ในตัวอย่างนี้เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 จุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอก ชั้นที่ 1-2 เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 (ภาพ 66) เกิดแรงดึงน้อยกว่าจุดคราก จุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) เกิดที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 3-4 ถือว่าการวิบัติแบบแรงเฉือน (Shear Failure) ภาพ 74 แสดงการเคลื่อนตัวของเสาหลังจากวิบัติจะเห็นได้ว่าเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณสูงกว่าโคนเสาเล็กน้อย จึงจะทำการเสริมกำลังให้กับเสาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันทันข้าง ความสามารถในการเคลื่อนตัวด้านข้าง และเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติ ให้เป็นการวิบัติแบบดัดและเฉือน (Flexural-shear failure) ต่อไป



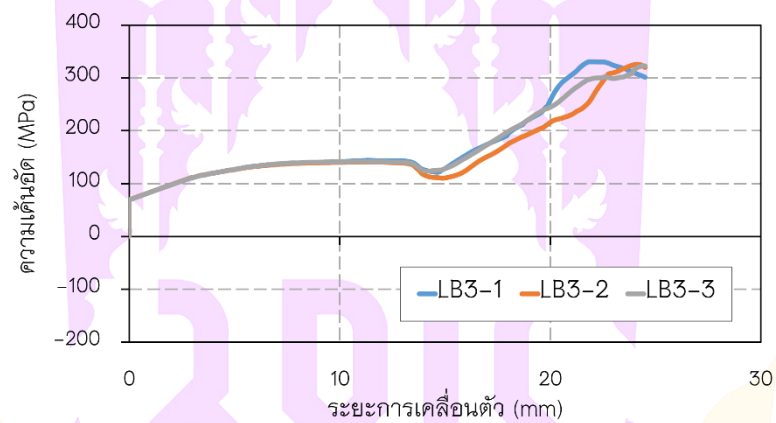
ภาพ 65 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการทดสอบและการวิเคราะห์ เส้า 3CMD12



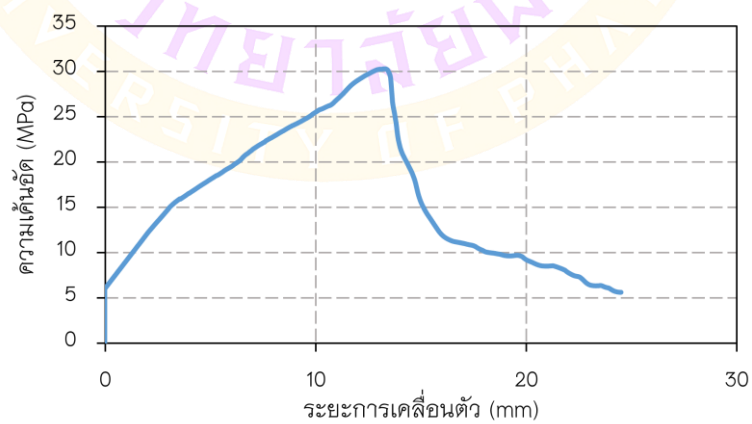
ภาพ 66 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เส้า 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง



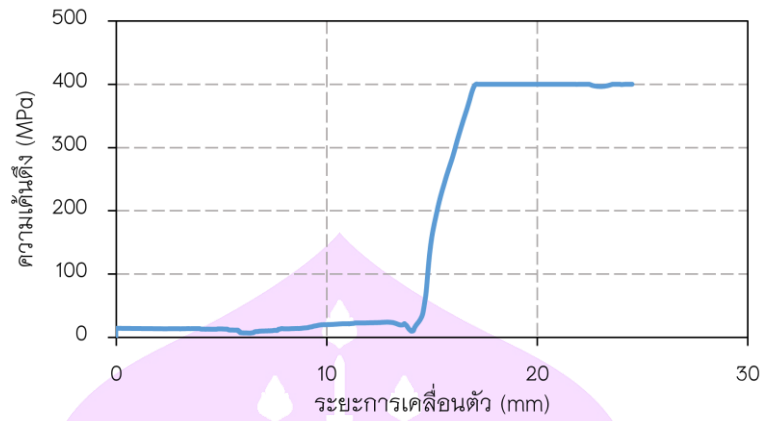
ภาพ 67 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง



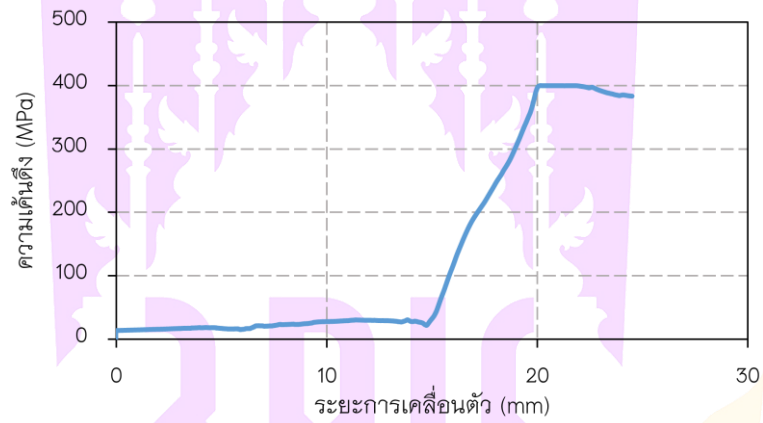
ภาพ 68 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง



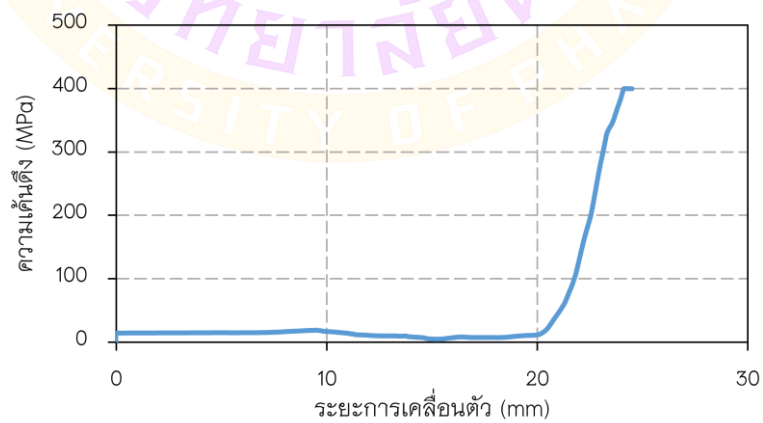
ภาพ 69 ความเค้นอัดในชั้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง



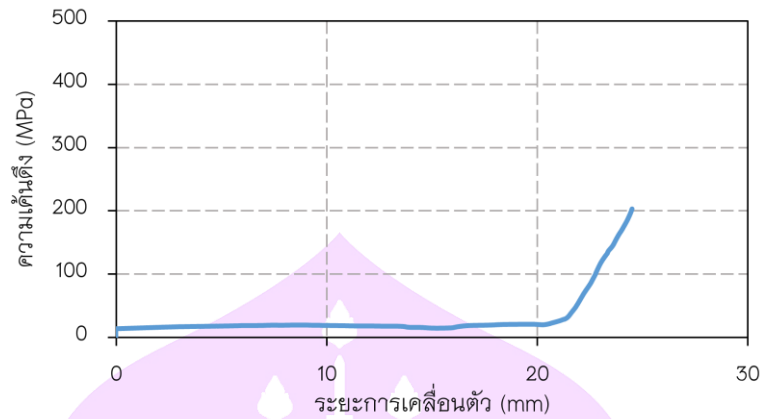
ภาพ 70 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Hoop ชั้นที่ 3 เส้า 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



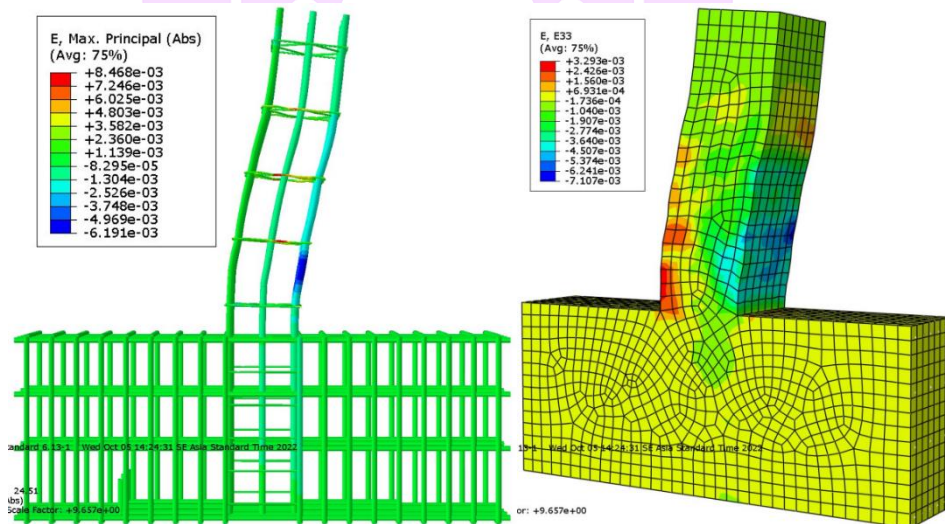
ภาพ 71 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Diamond ชั้นที่ 3 เส้า 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



ภาพ 72 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Hoop ชั้นที่ 4 เส้า 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



ภาพ 73 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 4 เสာ 3CMD12 หลังเสริมกำลัง

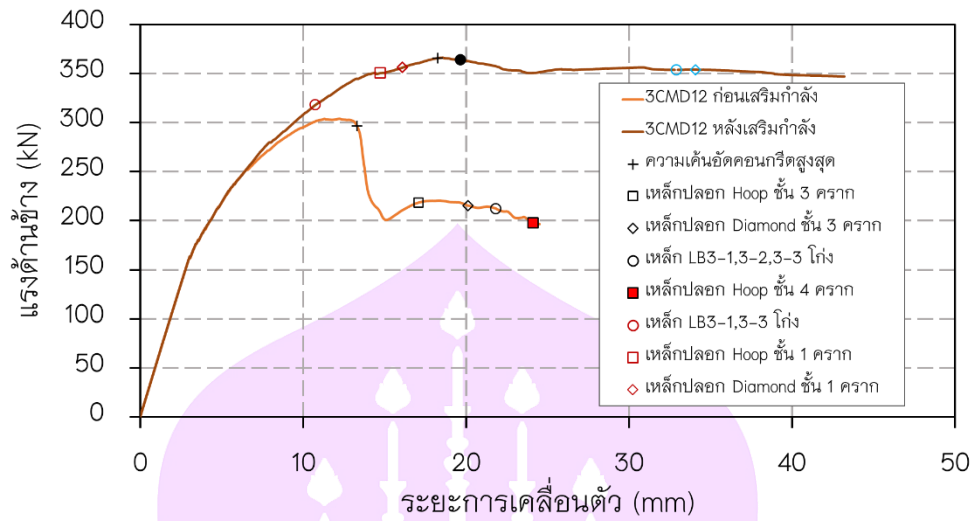


ภาพ 74 ลักษณะการเสียรูป เสา 3CMD12 ก่อนเสริมกำลัง

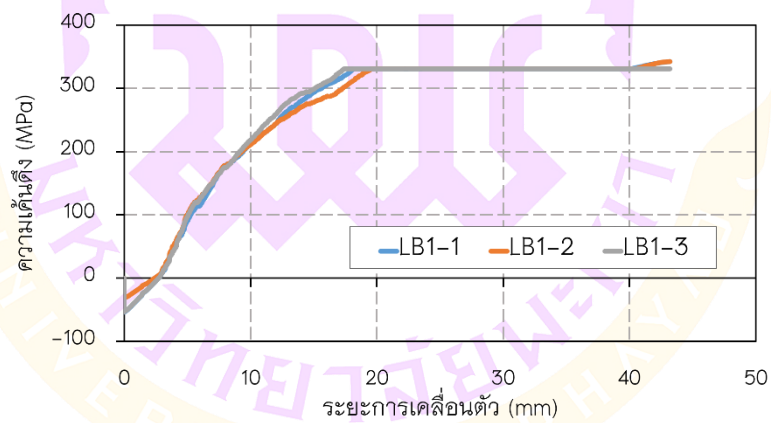
## 2.2 ผลการวิเคราะห์เสาที่เสริมกำลัง

เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่ทำการเสริมกำลังจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง เทียบกับผลการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง (ภาพ 75) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันเท่ากัน ทำนายกำลังรับแรงต้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่าผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง สามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้

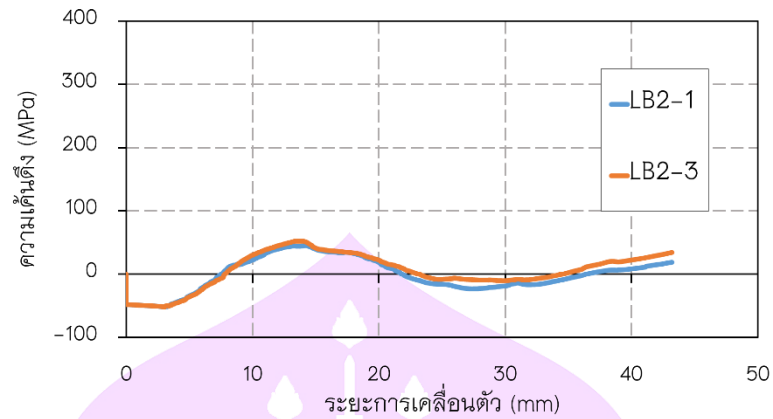
พบว่าที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 10.74 mm เหล็ก LB3-1, LB3-3 (ภาพ 78) จุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งโคนเสาช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1 รับแรงอัดจนถึงจุดคราก ทำให้แรงดึงในเหล็กปลอกทั้งรูปแบบ Hoop และ Diamond ในชั้นที่ 1 (ภาพ 80, 81) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดครากที่ระยะ 14.73 mm และ 16.08 mm ตามลำดับ แรงด้านข้างยังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงที่ระยะ 18.26 mm เป็นจุดที่ชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุด (ภาพ 79) คือ 40.54 MPa จากนั้นกำลังรับแรงอัดจะลดลงและเป็นระยะที่แรงด้านข้างมีค่าสูงสุด คือ 365.81 kN ก่อนที่แรงด้านข้างจะลดลง ต่อมาที่ระยะ 19.63 mm เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 (ภาพ 76) รับแรงดึงจนถึงจุดคราก ทำให้แรงด้านข้างลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงระยะ 23.92 mm แรงด้านข้างมีค่าคงที่ 354.00 kN โดยคงที่จนถึงที่ระยะ 32.88 mm เหล็ก LB3-2 (ภาพ 78) รับแรงอัดจนถึงจุดครากทำให้แรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 (ภาพ 83) มีค่าถึงจุดครากที่ระยะ 34.08 mm แรงด้านข้างลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงที่ระยะ 43.19 mm ค่าความเค้นอัดในคอนกรีตมีค่าลดลงจะเหลือ 50% จากความเค้นอัดสูงสุด จึงถือว่าเกิดการวิบัติ ในตัวอย่างนี้เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 รับความเค้นดึงจนถึงจุดคราก และเหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับความเค้นอัดจนเกิดการโก่งเดาะ ทำให้เกิดความเค้นดึงในเหล็กปลอกจนถึงจุดคราก มีเพียงเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 ที่แรงดึงน้อยกว่าจุดคราก(ภาพ 82) ส่วนเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน และเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะความเค้นดึงยังน้อยกว่าจุดคราก (ภาพ 84, 85) จึงถือว่าเสาเกิดการวิบัติแบบดัดและเฉือน (Flexural-shear failure) ภาพ 86 แสดงการเคลื่อนตัวของเสาหลังจากการวิบัติ จะเห็นได้ว่าเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณโคนเสา ซึ่งถือว่าจากการเสริมกำลังให้กับเสาช่วยให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างได้มากขึ้น และยังทำให้รูปแบบการวิบัติของเสาเปลี่ยนไปจากเดิมที่วิบัติด้วยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียวให้กลายเป็นวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงดัด ซึ่งถือว่าเสาสามารถรับแรงด้านข้างได้อย่างเต็มที่



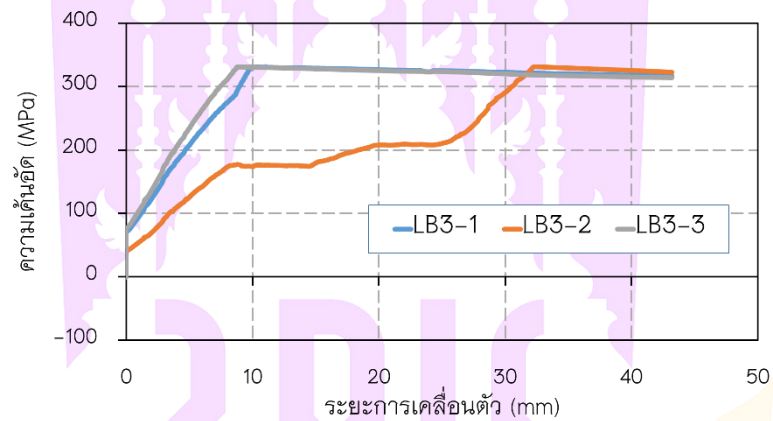
ภาพ 75 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เสา 2CMD12



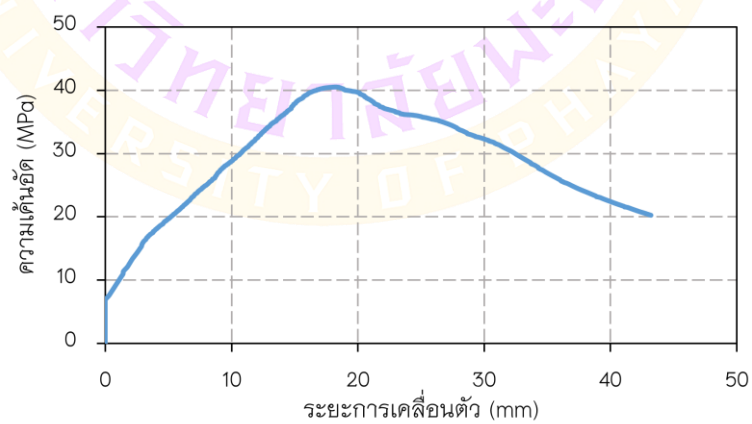
ภาพ 76 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



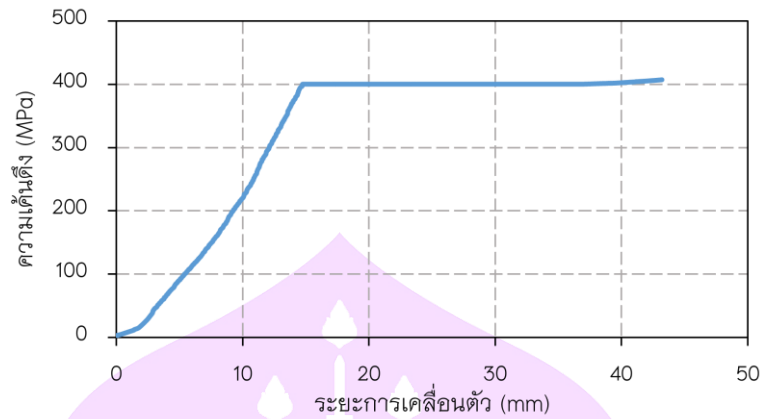
ภาพ 77 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



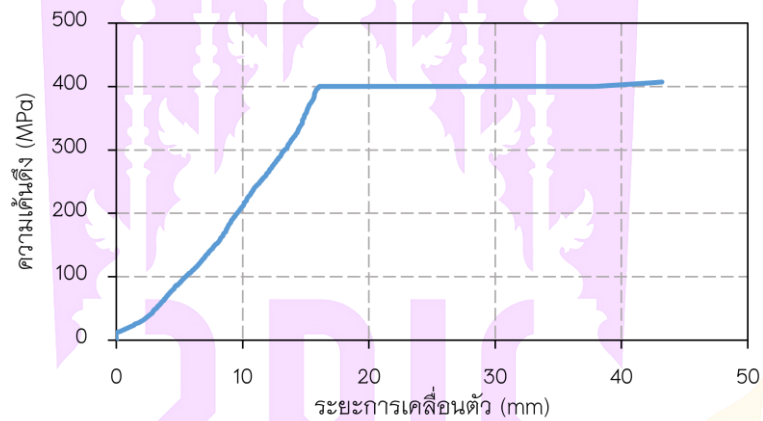
ภาพ 78 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



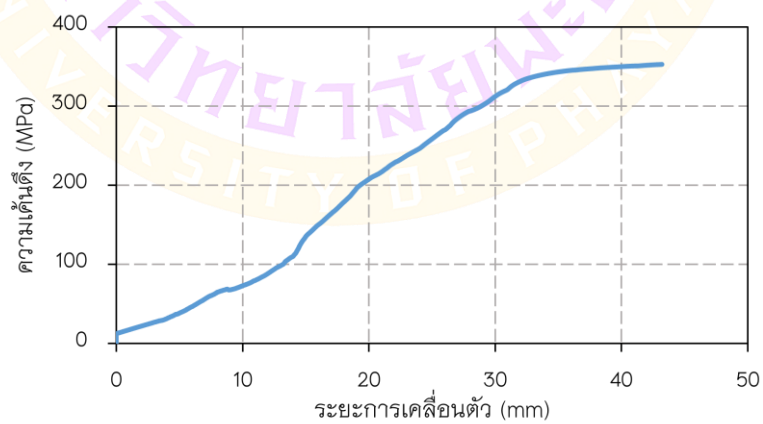
ภาพ 79 ความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



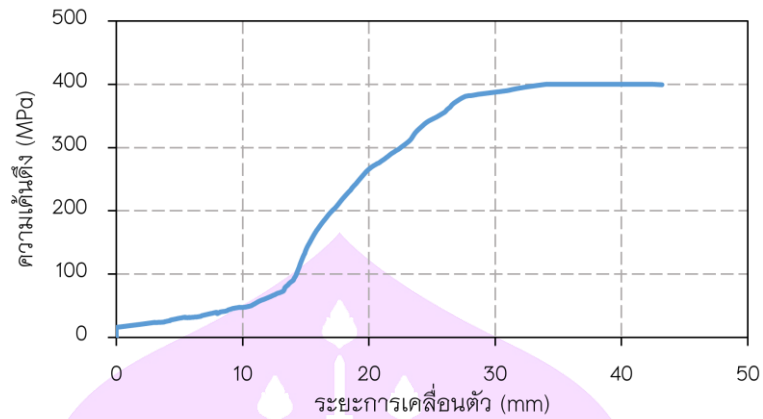
ภาพ 80 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



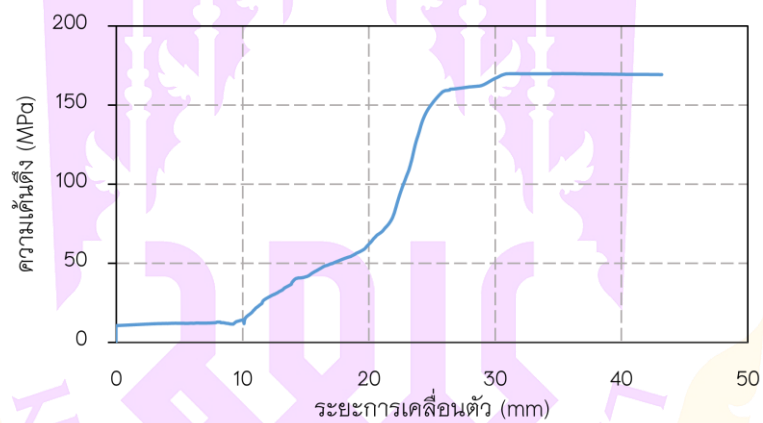
ภาพ 81 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เส้า 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



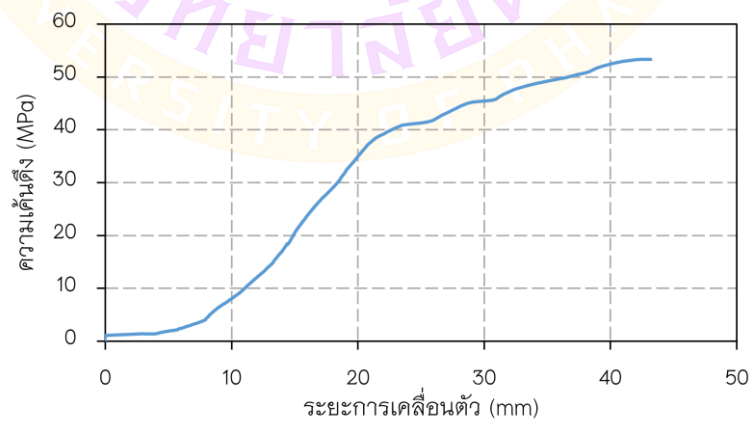
ภาพ 82 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า 3CMD12 หลังเสริมกำลัง



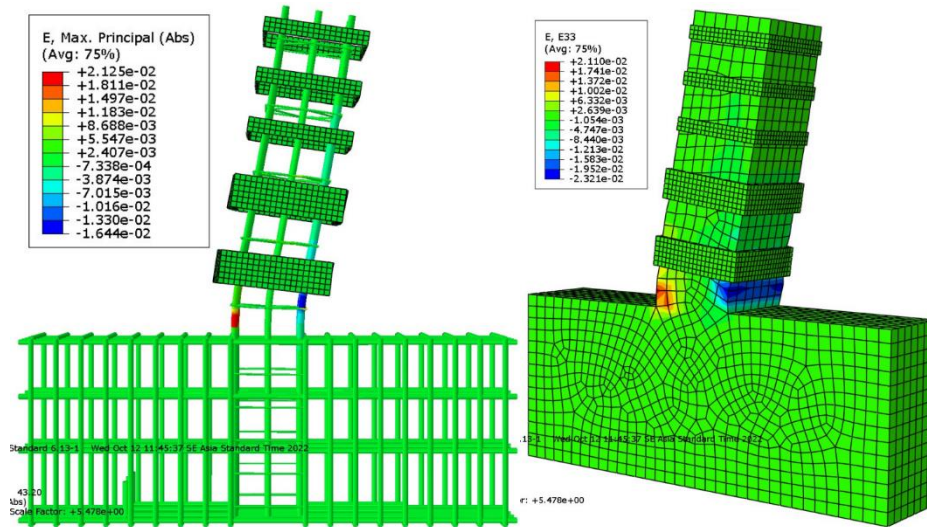
ภาพ 83 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เสา 3CMD12  
หลังเสริมกำลัง



ภาพ 84 ความเค้นในเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน เสา 3CMD12



ภาพ 85 ความเค้นในเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะ เสา 3CMD12



ภาพ 86 ลักษณะการเสียรูป เสာ 3CMD12 หลังเสริมกำลัง

## ผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตที่วิบัติจากแรงเฉือนและแรงดัด (Flexure-Shear failure)

ตัวอย่างเสาคอนกรีตที่เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนดัดเกิดจากการที่ภายในเสาก่อเกิดโมเมนต์ดัดที่เพิ่มมากขึ้นจนเหล็กตามยาวฝั่งรับแรงดึงมีกำลังถึงจุดคราก และเหล็กตามยาวฝั่งรับแรงอัดจนเกิดการโก่งเตาะและไปดันเหล็กปลอก จึงทำให้เหล็กปลอกเกิดแรงดึงเนื่องจากการโก่งตัวของเหล็กตามยาวและรับแรงดึงเนื่องจากแรงเฉือนภายในเสาจนทำให้เหล็กปลอกมีความเค้นดึงถึงจุดคราก และเกิดการวิบัติในที่สุด

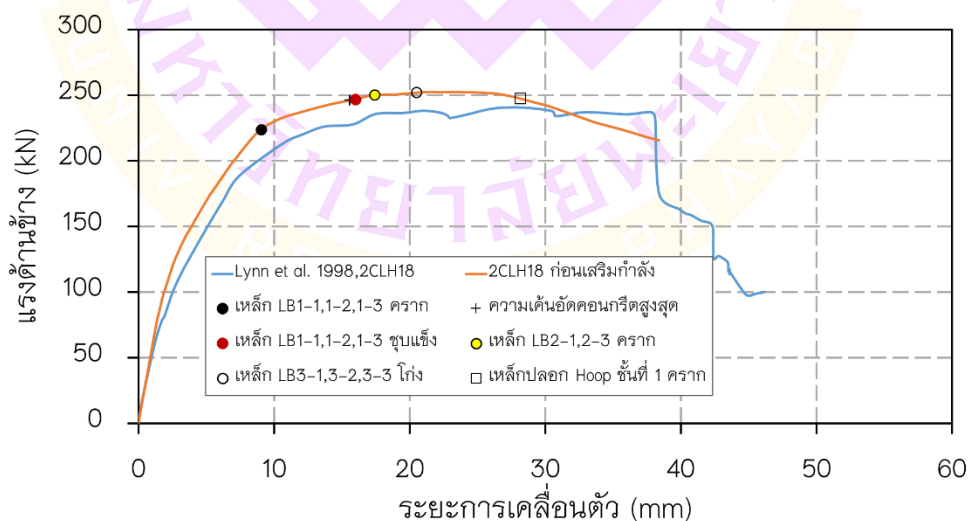
### 1. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสา 2CLH18

#### 1.1 ผลการวิเคราะห์เสาก่อนเสริมกำลัง

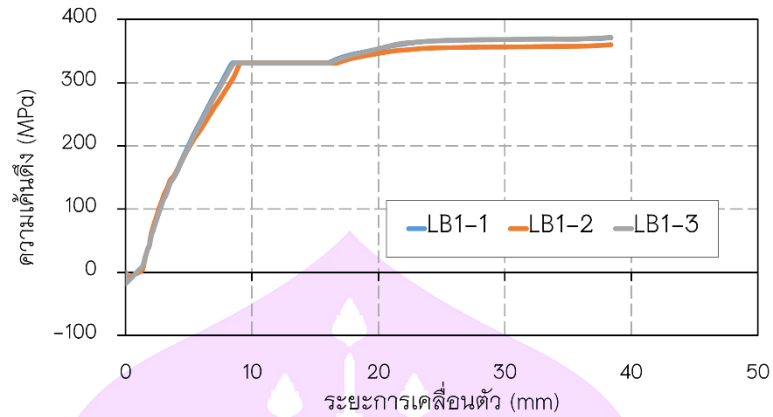
ตัวอย่างเสานี้จากผลการทดสอบจริงพบว่ามีกำลังการรับแรงต้านข้างสูงสุด 240.77 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 28.30 mm แรงต้านข้างเมื่อเกิดการวิบัติอยู่ที่ 233.37 kN และมีระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนกำลังรับแรงต้านข้างตกลงที่ระยะ 38.10 mm

ผลการวิเคราะห์ก่อนทำการเสริมกำลัง จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบจริงเทียบกับผลการวิเคราะห์ (ภาพ 87) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันมากกว่าผลการทดสอบจริง แต่ทำนายกำลังรับแรงต้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ผลการวิเคราะห์จะสามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ จึงพบว่า ที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 9.04 mm เหล็กตามยาว LB1-1 LB1-2 และ LB1-3 (ภาพ 88) จุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งโคนเสาชวงเหล็กปลอกชั้นที่ 1 รับแรงดึงจนมีค่าความเค้น

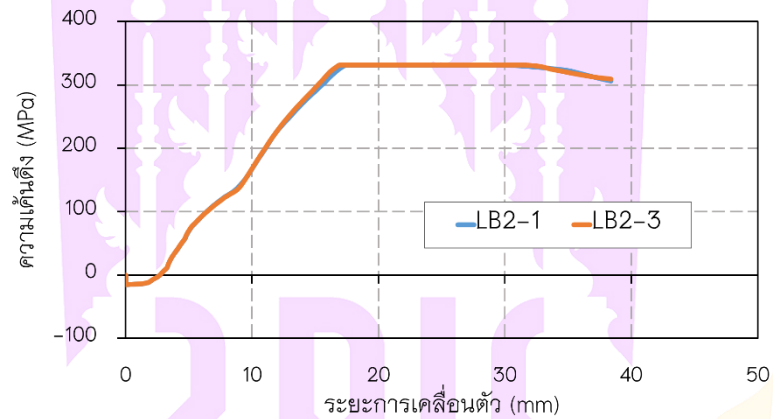
ถึงจุดคราก ทำให้แรงดันทันข้างเริ่มขึ้นช้าลงอย่างเห็นได้ชัด ที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 15.55 mm ชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดถึงกำลังอัดสูงสุดคือ 28.06 MPa (ภาพ 91) และเหล็ก LB1-1 LB1-2 และ LB1-3 จะยึดตัวถึงจุดที่ความเค้นแข็งขึ้น (Strain hardening) ที่การเคลื่อนตัวด้านข้าง 16.01 mm แต่กำลังรับแรงดันทันข้างยังเพิ่มขึ้นจนถึงการเคลื่อนตัวด้านข้าง 17.41 mm เหล็ก LB2-1 และ LB2-3 รับแรงดึงจนถึงจุดคราก (ภาพ 89) ทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงดันทันข้างลดลงอีกครั้ง จนถึงการเคลื่อนที่ด้านข้าง 20.51 mm เหล็ก LB3-1 LB3-2 และ LB3-3 รับแรงอัดจนมีความเค้นถึงจุดครากและเกิดการโก่งเดาะ (ภาพ 90) กำลังการรับแรงดันทันข้างเริ่มคงที่ก่อนที่ จะมีค่าสูงสุด 252.55 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 23.25 mm หลังจากนั้น แรงดันทันข้างจะตกลง เนื่องจากเกิดการโก่งเดาะของเหล็ก LB3-1 LB3-2 และ LB3-3 พร้อมกับแรงดึงในเหล็กปลอก ชั้นที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเค้นครากที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 28.17 mm (ภาพ 92) ทำให้แรงดันทันข้างลดลงอย่างรวดเร็วจนกำลังการรับแรงดันทันข้างเหลือ 215.69 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 38.38 mm ความเค้นอัดในคอนกรีตมีค่าตกลงเหลือ 50% จากความเค้นอัดสูงสุดในตัวอย่างนี้ เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 รับความเค้นดึงจนถึงจุดคราก และเหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับความเค้นอัดจนเกิดการโก่งเดาะ ทำให้เกิดความเค้นดึงในเหล็กปลอกจนถึงจุดคราก แต่เหล็กปลอกชั้นที่ 2 มีค่าความเค้นดึงน้อยมาก (ภาพ 93) จึงถือว่าเสาเกิดการวิบัติแบบดัดและเฉือน (Flexural-shear failure) ภาพ 94 แสดงการเคลื่อนตัวของเสาหลังจากวิบัติจะเห็นได้ว่า เกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณโคนเสา จึงจะทำการเสริมกำลังให้กับเสาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันทันข้าง และความสามารถในการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อไป



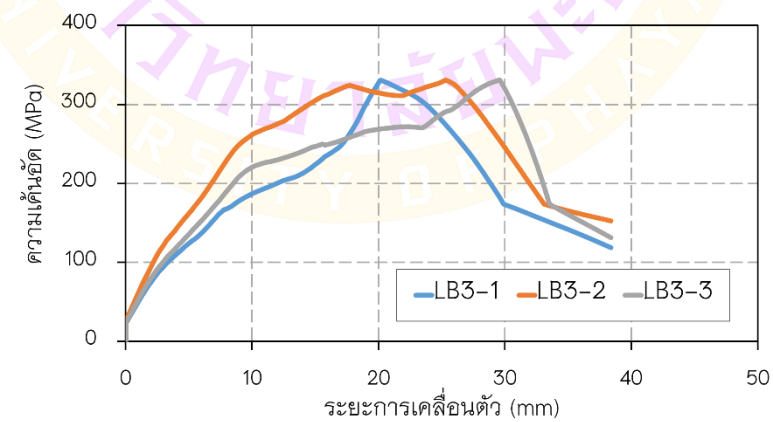
ภาพ 87 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการทดสอบและการวิเคราะห์ เสา 2CLH18



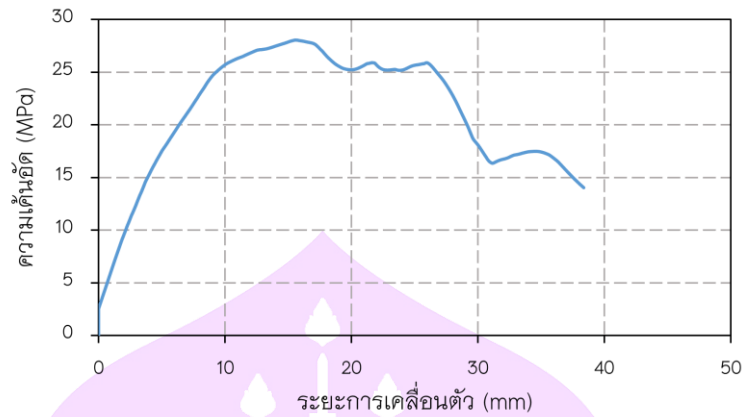
ภาพ 88 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง



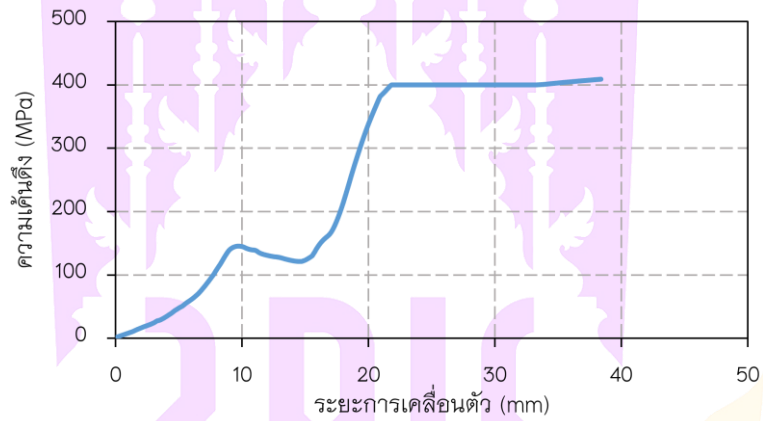
ภาพ 89 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง



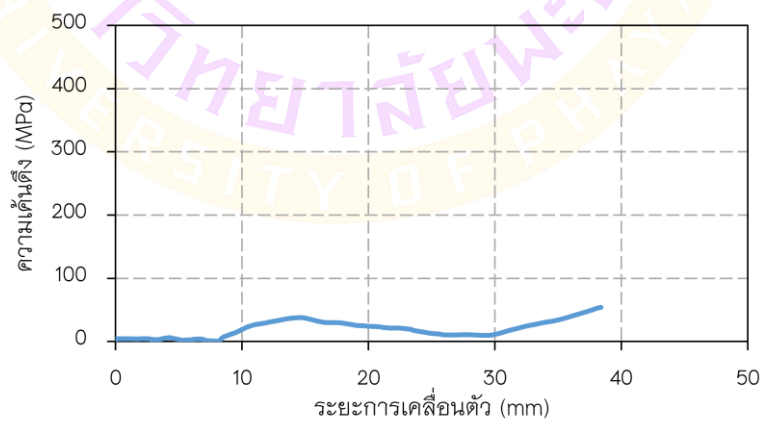
ภาพ 90 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง



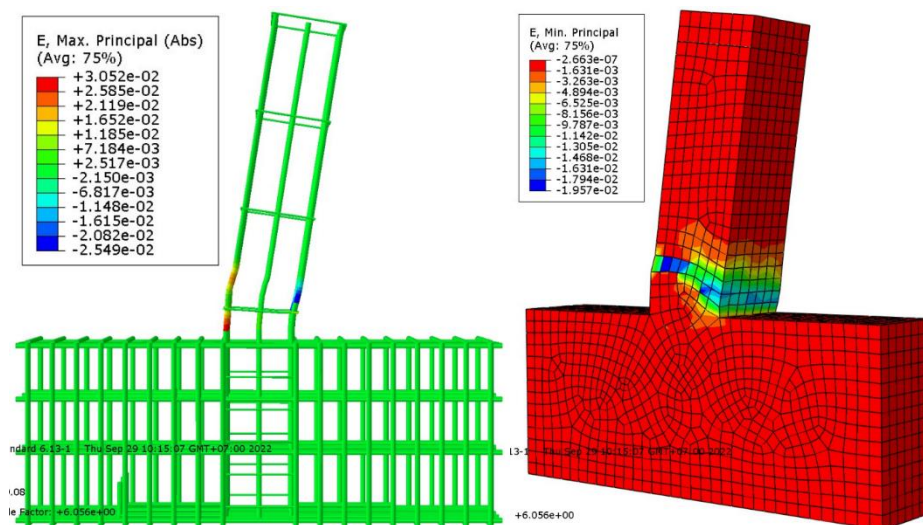
ภาพ 91 ค่าความเค้นอัดในชั้นส่วนคอนกรีต เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 92 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 93 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง

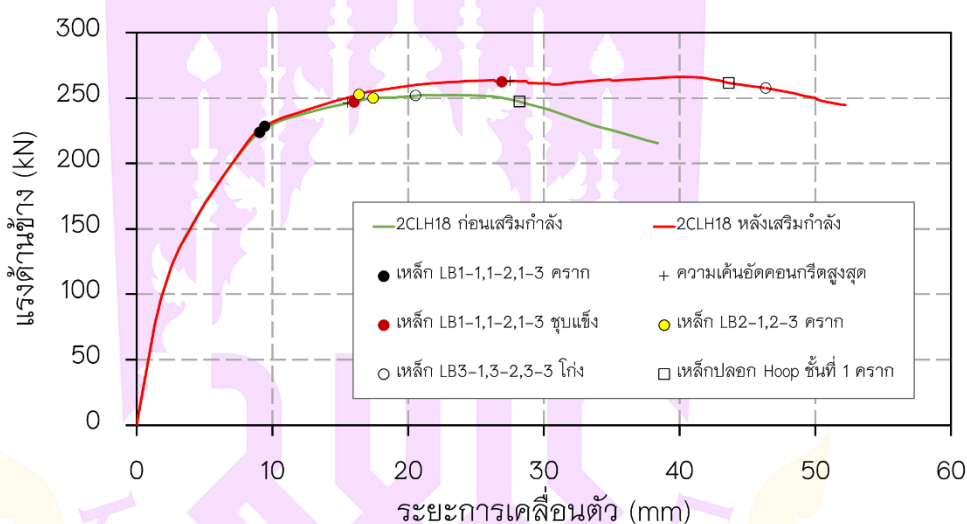


ภาพ 94 ลักษณะการเสียดรูป เสา 2CLH18 ก่อนเสริมกำลัง

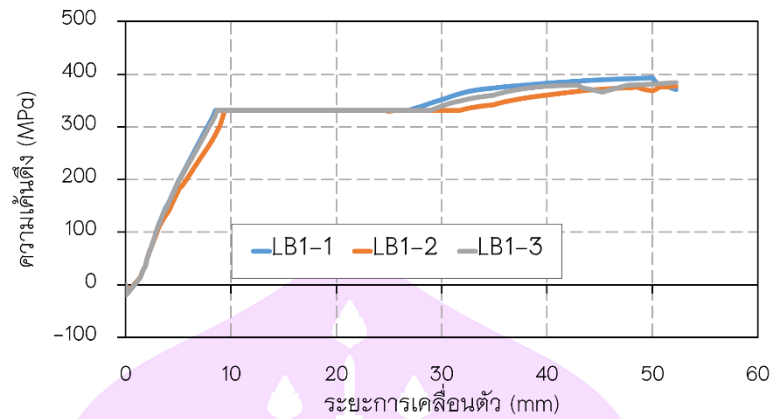
## 1.2 ผลการวิเคราะห์เสาที่เสริมกำลัง

เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่ทำการเสริมกำลังจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันท่างและการเคลื่อนที่ดันท่างจากผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลังเทียบกับผลการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง (ภาพ 95) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันเท่ากัน ทำนายกำลังรับแรงดันท่างและระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่าผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง สามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้พบว่า ที่การเคลื่อนที่ดันท่าง 9.41 mm เหล็กตามยาว LB1-1 LB1-2 และ LB1-3 (ภาพ 96) จุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งโคนเสาช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1 รับแรงดึงจนมีค่าความเค้นถึงจุดครากใกล้เคียงกับตัวอย่างก่อนเสริมกำลัง ทำให้แรงดันท่างเริ่มขึ้นช้าลงอย่างเห็นได้ชัด ต่อมาที่ระยะ 16.37 mm เหล็ก LB2-1, LB2-3 (ภาพ 97) รับแรงดึงจนถึงจุดครากทำให้ความชันของแรงดันท่างลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าคงที่จนถึงระยะ 26.87 mm เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 ยึดตัวถึงจุดที่ความเค้นแข็งขึ้น (Strain hardening) ใกล้เคียงกับจุดที่ขึ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุด คือ 31.95 MPa ที่ระยะ 27.50 mm (ภาพ 99) ทำให้แรงดันท่างลดลงเล็กน้อย แล้วจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่าสูงสุด 266.43 kN ที่ระยะ 40.33 mm ก่อนที่แรงดันท่างจะลดลงที่ระยะ 43.61 mm เนื่องจากเหล็กปลอกชั้นที่ 1 รับแรงดึงจนถึงจุดคราก (ภาพ 100) และลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงระยะ 46.31 mm เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 (ภาพ 98) รับแรงอัดจนมีค่าความเค้นถึงจุดครากและเกิดการโก่งเดาะ แรงดันท่างลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่จนกำลังการรับแรงดันท่างเหลือ 244.76 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 52.22 mm กำลังรับแรงอัดของ

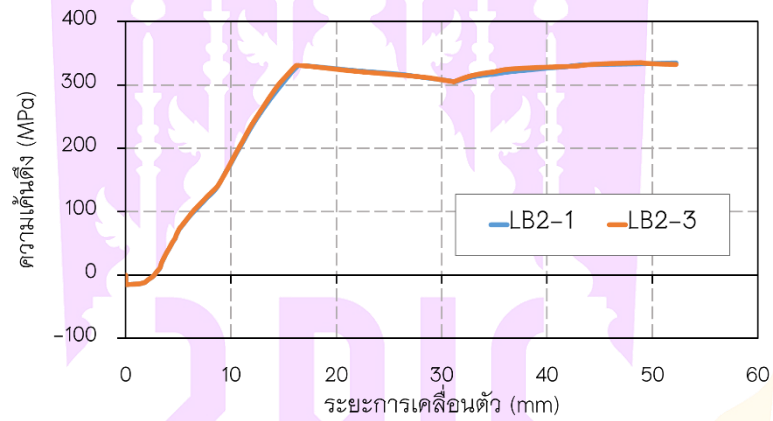
คอนกรีตมีค่าลดลงจะเหลือ 50% จากความเค้นอัดสูงสุด จึงถือว่าเกิดการวิบัติ ในตัวอย่างนี้ เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 รับความเค้นดึงจนถึงจุดคราก และเหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับความเค้นอัดจนเกิดการโก่งเดาะ ทำให้เกิดความเค้นดึงในเหล็กปลอกจนถึงจุดคราก แต่เหล็กปลอกชั้นที่ 2 มีค่าความเค้นดึงน้อยมาก (ภาพ 101) ส่วนเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน และเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะความเค้นดึงยังน้อยกว่าจุดคราก(ภาพ 102, 103) จึงถือว่าเสาเกิดการวิบัติแบบดัดและเฉือน (Flexural-shear failure) ภาพ 104 แสดงการเคลื่อนตัวของเสา หลังจากวิบัติจะเห็นได้ว่าจะเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณโคนเสา ซึ่งถือว่าการเสริมกำลังให้กับเสาทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดข้างและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างได้มากขึ้น



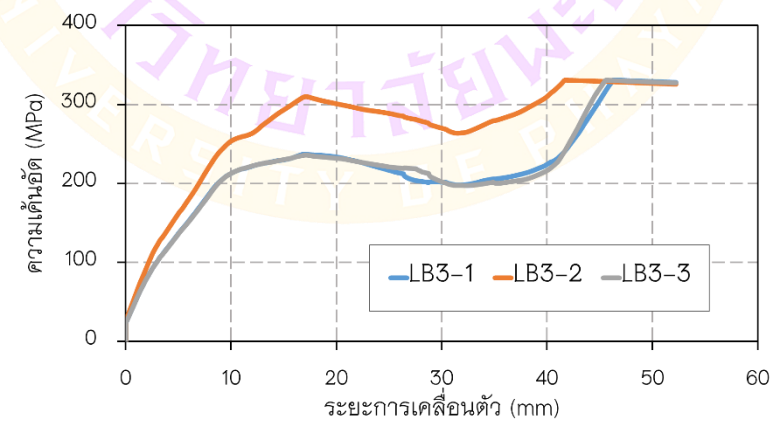
ภาพ 95 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง เสา 2CLH18



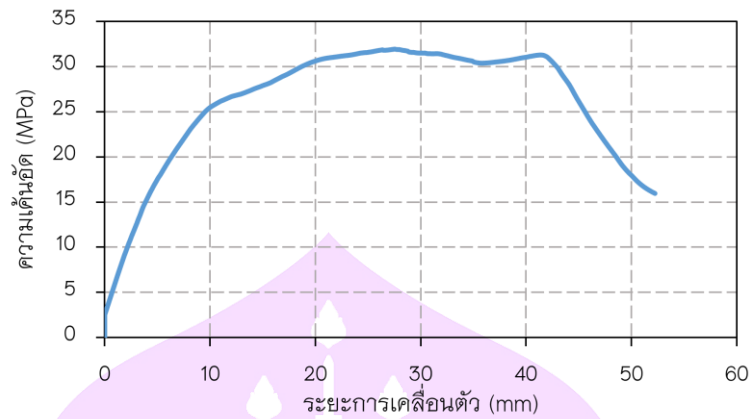
ภาพ 96 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง



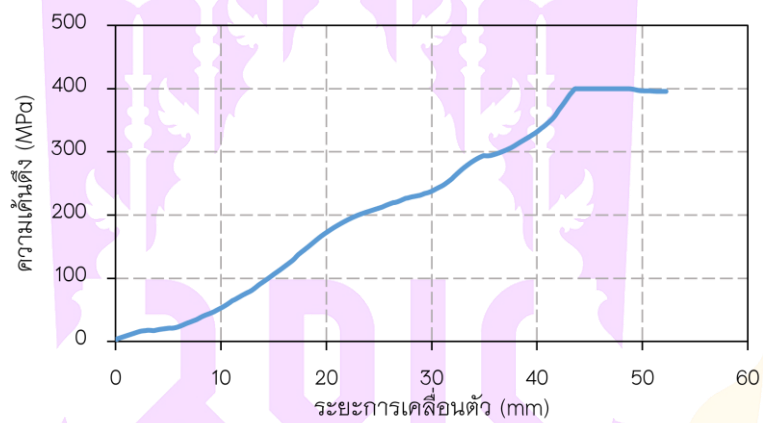
ภาพ 97 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง



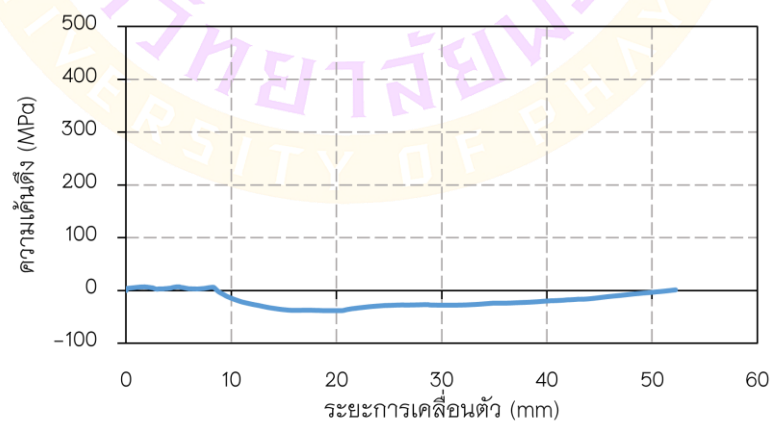
ภาพ 98 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง



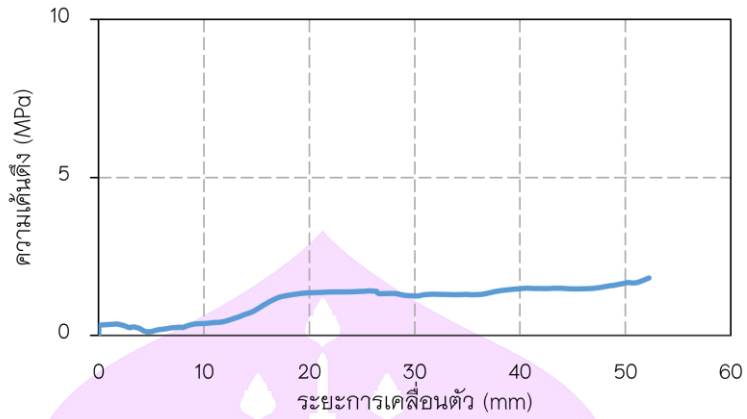
ภาพ 99 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง



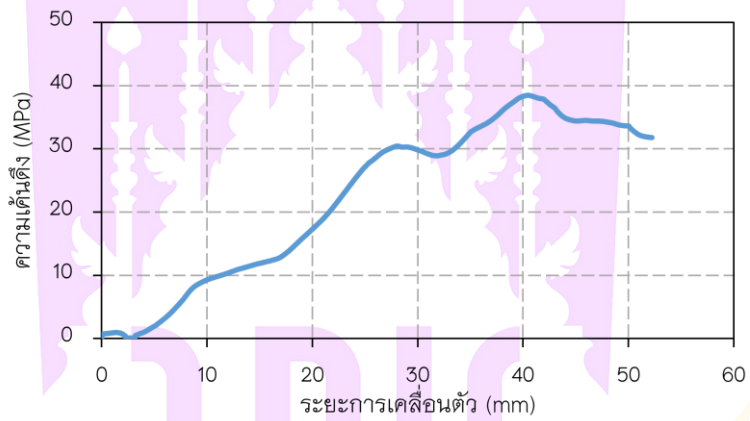
ภาพ 100 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง



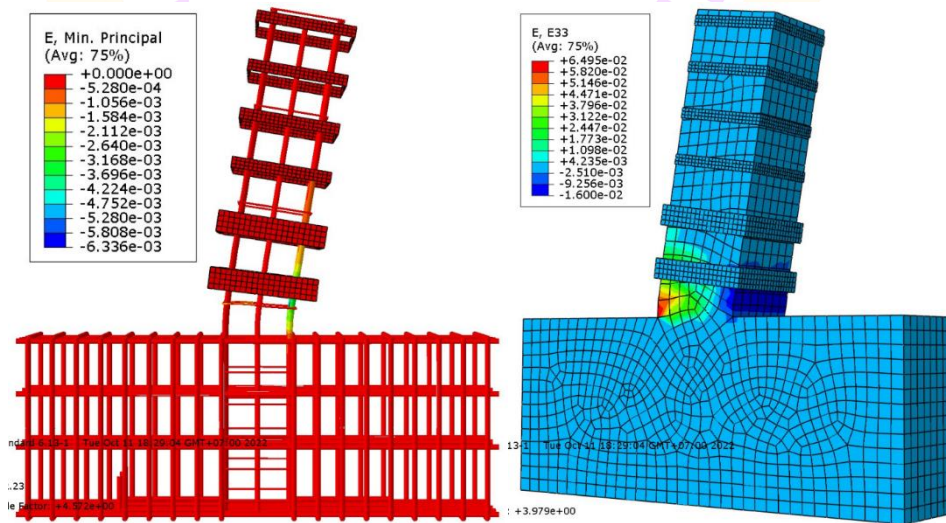
ภาพ 101 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง



ภาพ 102 ความเค้นในเหล็กโอบรับแรงเฉือน เส้า 2CLH18



ภาพ 103 ความเค้นในเหล็กโอบรับดลระยะการโก่งเดาะ เส้า 2CLH18



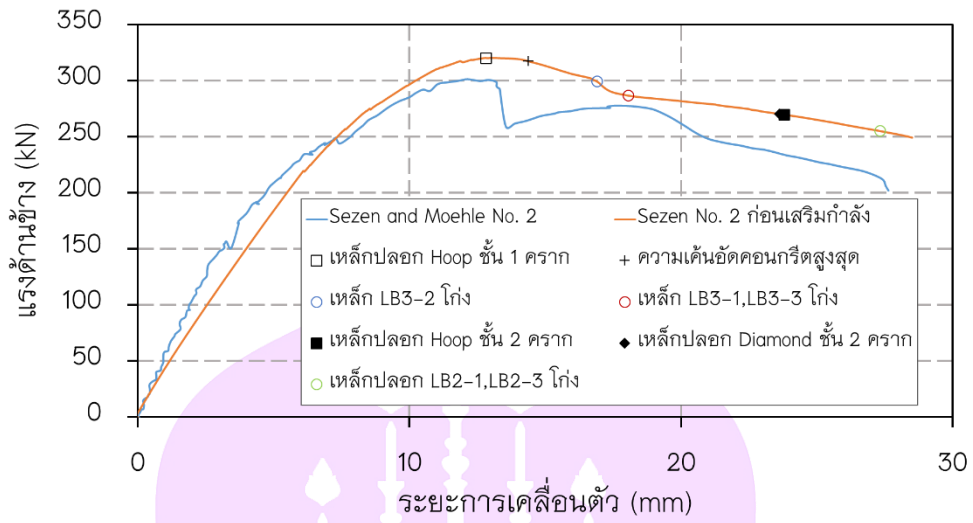
ภาพ 104 ลักษณะการเสียรูป เส้า 2CLH18 หลังเสริมกำลัง

## 2. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสา No. 2

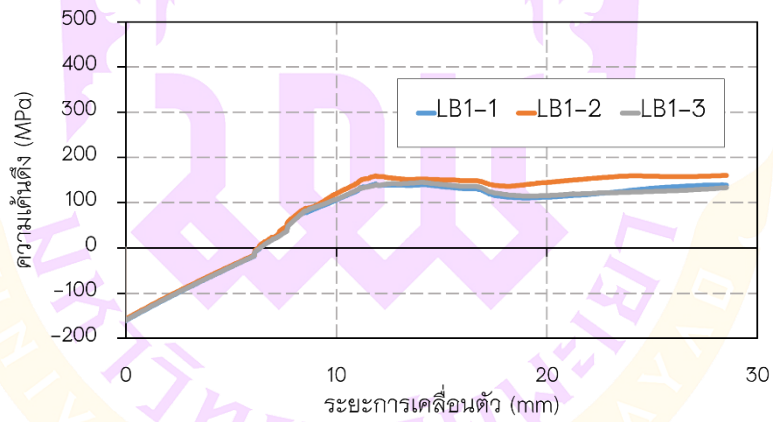
### 2.1 ผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมกำลัง

ในตัวอย่างนี้จากผลการทดสอบจริง พบว่า มีกำลังการรับแรงดันทันข้างสูงสุด 300.99 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 12.14 mm แรงดันทันข้างเมื่อเกิดการวิบัติอยู่ที่ 201.70 kN และมีระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนกำลังรับแรงดันทันข้างตกลง ที่ระยะ 27.63 mm

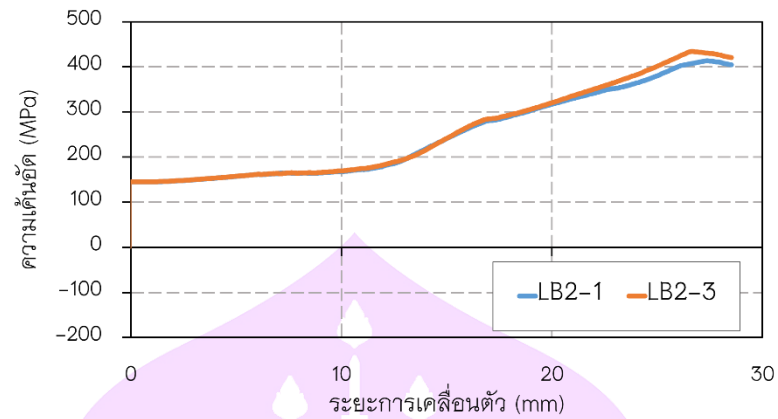
ผลการวิเคราะห์ก่อนทำการเสริมกำลัง จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทันข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบจริงเทียบกับผลการวิเคราะห์ (ภาพ 105) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันน้อยกว่าผลการทดสอบจริง แต่ทำนายกำลังรับแรงดันทันข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่าผลการทดสอบ ผลการวิเคราะห์จะสามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ โดยพบว่าแรงดันทันข้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนค่าสูงสุดอยู่ที่ 320.25 kN ที่ระยะ 12.80 mm เป็นระยะเดียวกับที่เหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 (ภาพ 110) รับแรงดึงจนถึงจุดคราก ทำให้แรงดันทันข้างเริ่มลดลง ต่อมาที่ระยะ 14.38 mm เป็นระยะที่ขึ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดถึงกำลังอัดสูงสุดคือ 27.14 MPa (ภาพ 109) แรงดันทันข้างยังลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะ 16.89 mm เหล็ก LB3-2 (ภาพ 108) รับแรงอัดจนถึงจุดครากจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ช่วงระหว่างเหล็กปลอก ชั้นที่ 1-2 จากนั้นที่ระยะ 18.05 mm เหล็ก LB3-1, LB3-3 (ภาพ 108) รับแรงอัดจึงถึงจุดคราก แรงดันทันข้างมีแนวโน้มลดต่ำลงเนื่องจากแรงดึงในเหล็กปลอกในชั้นที่ 2 ทั้งรูปแบบ Hoop และ Diamond (ภาพ 112, 113) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดครากที่ระยะ 23.86 mm และ 23.62 mm ตามลำดับทำให้ที่ระยะ 27.31 mm เหล็ก LB2-1, LB2-3 (ภาพ 107) รับแรงอัดจนถึงจุดคราก แรงดันทันข้างลดลงอย่างต่อเนื่องจนกำลังการรับแรงดันทันข้างเหลือ 249.16 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 28.52 mm กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงจะเหลือ 50% จากความเค้นอัดสูงสุด จึงถือว่าเกิดการวิบัติ ในตัวอย่างเสานี้เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับแรงอัดจนถึงจุดคราก ทำให้แรงดึงในเหล็กปลอก รูปแบบ Hoop และ Diamond ชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าถึงจุดคราก โดยเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 (ภาพ 111) มีแรงดึงต่ำกว่าจุดครากเล็กน้อย แต่ในส่วนของเหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 แรงดึงยังมีค่าน้อยกว่าจุดคราก (ภาพ 106) จุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1 ตัวอย่างนี้เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 (ภาพ 114) ถือว่าเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือน (Shear Failure) จึงจะทำการเสริมกำลังให้กับเสาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันทันข้างและความสามารถในการเคลื่อนตัวด้านข้างต่อไป



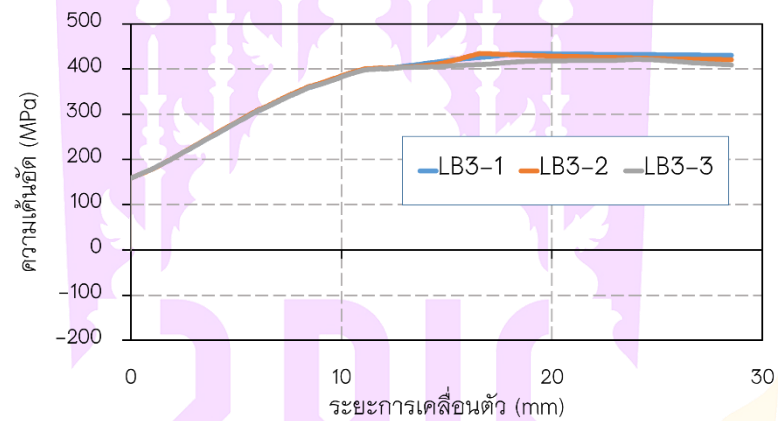
ภาพ 105 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการทดสอบและการวิเคราะห์ เส้า No. 2



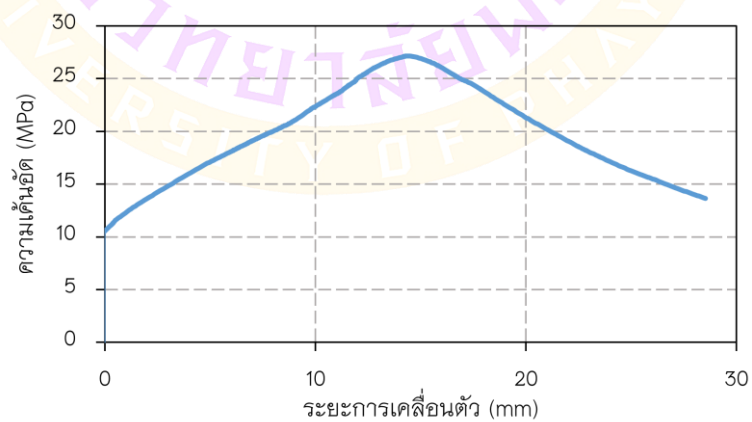
ภาพ 106 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



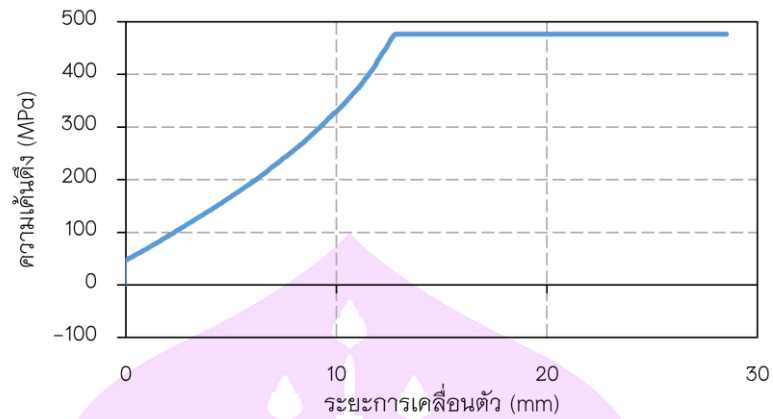
ภาพ 107 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



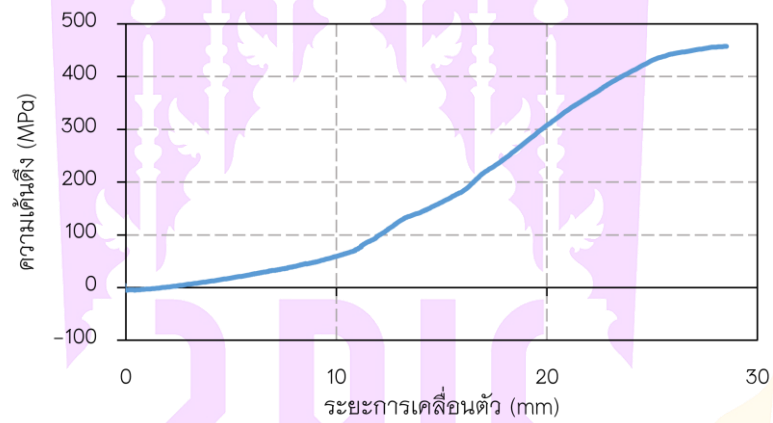
ภาพ 108 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



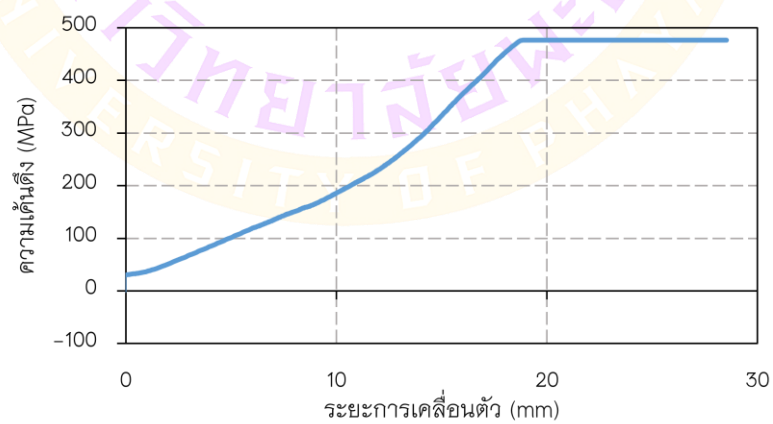
ภาพ 109 ค่าความเค้นอัดในชั้นส่วนคอนกรีต เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



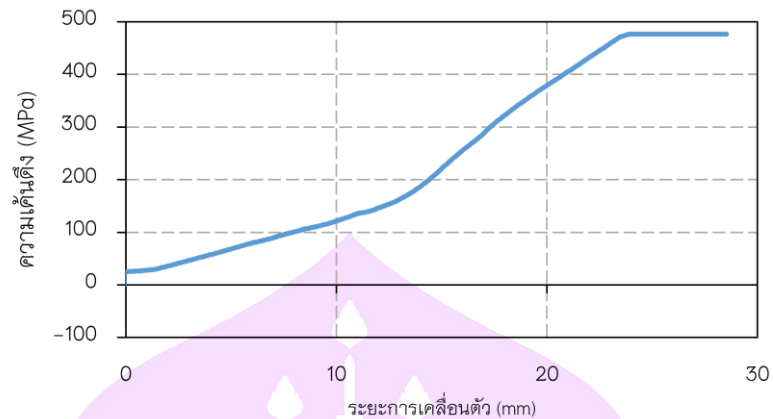
ภาพ 110 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



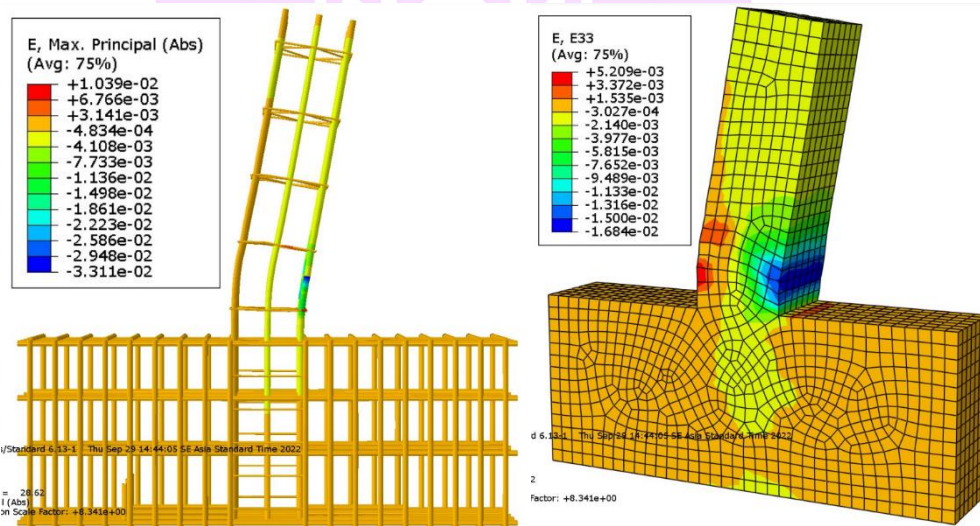
ภาพ 111 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เสา No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 112 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา No. 2 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 113 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง

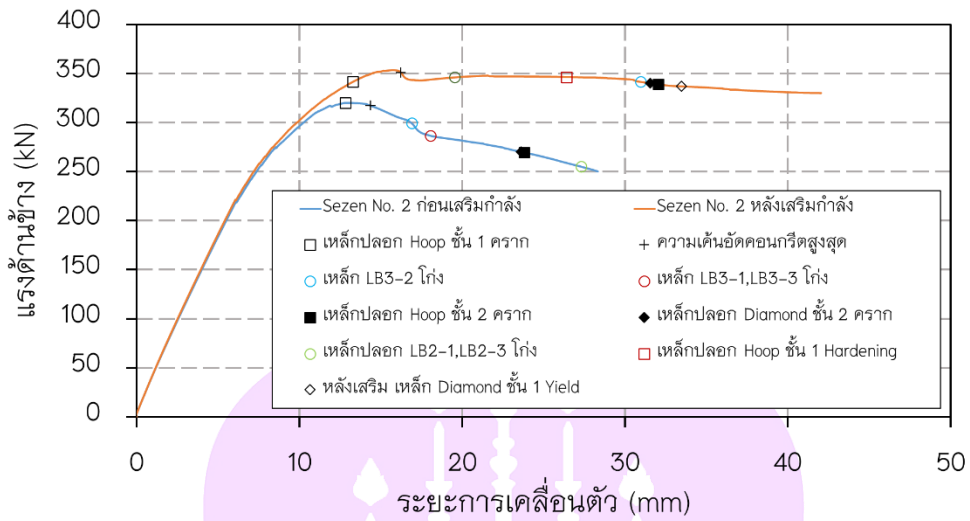


ภาพ 114 ลักษณะการเสีयरูป เส้า No. 2 ก่อนเสริมกำลัง

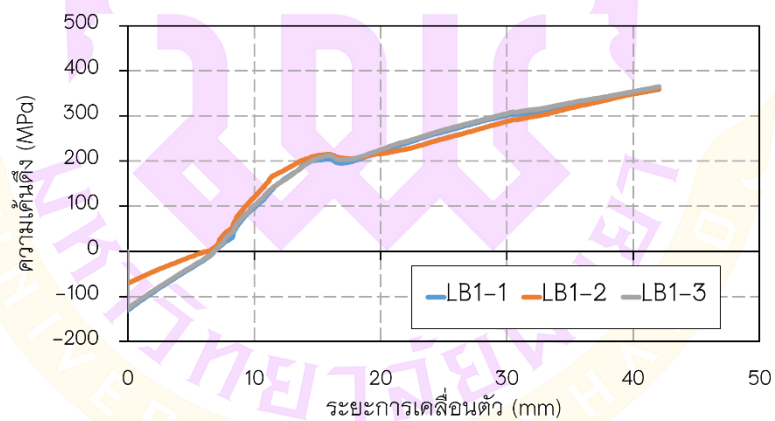
## 2.2 ผลการวิเคราะห์เส้าที่เสริมกำลัง

เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเส้าที่ทำการเสริมกำลังจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทันข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง เทียบกับผลการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง (ภาพ 115) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันเท่ากัน ทำนายกำลังรับแรงดันทันข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่าผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง สามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้พบว่า ที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 13.29 mm เหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 (ภาพ 120) รับแรงดึง

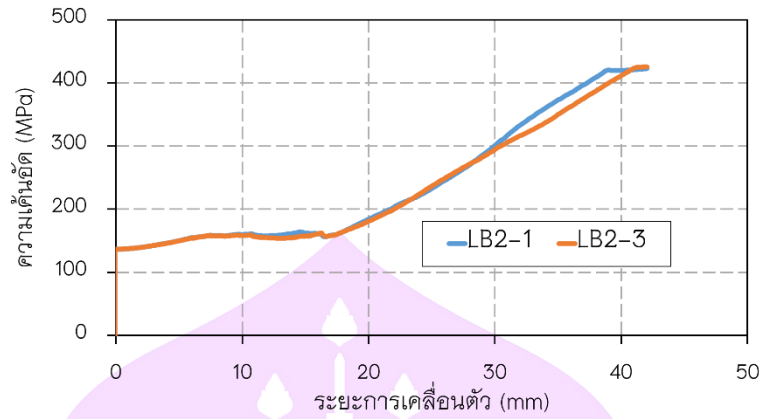
จนถึงจุดคราก แรงต้านข้างยังมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยจนมีค่าสูงสุด 353.50 kN ที่ระยะ 15.73 mm จากนั้นที่ระยะ 16.22 mm แรงต้านข้างจึงลดลงจากเดิมเล็กน้อยเนื่องจากชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุด (ภาพ 119) คือ 26.45 MPa ที่ระยะ 19.52 mm เหล็ก LB3-1, LB3-3 รับแรงอัดจนถึงจุดคราก (ภาพ 118) ทำให้แรงต้านข้างมีค่าคงที่ 246.00 kN จนถึงระยะ 26.40 mm ค่าความเค้นดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 ยึดตัวถึงจุดที่ความเค้นแข็งขึ้น (Strain hardening) แต่แรงต้านข้างเริ่มลดลงอีกครั้งจนถึงระยะ 30.95 mm เหล็ก LB3-2 (ภาพ 118) รับแรงอัดจนถึงจุดคราก จุดที่เกิดความเค้นสูงสุดอยู่ช่วงระหว่างเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 ทำให้ต่อมาเหล็กปลอกชั้นที่ 2 ทั้งรูปแบบ Hoop และ Diamond (ภาพ 122, 123) รับแรงดึงจนถึงจุดคราก ที่ระยะ 31.55 mm และ 32.05 mm ตามลำดับ ค่าแรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 (ดูภาพ 121) มีค่าถึงจุดครากที่ระยะ 33.45 mm แรงต้านข้างลดลงอย่างต่อเนื่องจนกำลังการรับแรงต้านข้างเหลือ 330.09 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 42.03 mm กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต มีค่าลดลงจะเหลือ 50% จากความเค้นอัดสูงสุด จึงถือว่าเกิดการวิบัติ ในตัวอย่างเสานี้เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับแรงอัดจนถึงจุดครากจนเกิดการโก่งเดาะ ทำให้แรงดึงในเหล็กปลอกทั้งรูปแบบ Hoop และ Diamond ชั้นที่ 1 และ 2 เพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดคราก ในส่วนของเหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 (ภาพ 116) มียังคงมีแรงดึงต่ำกว่าจุดคราก ส่วนเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน และเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะความเค้นดึงยังน้อยกว่าจุดคราก (ภาพ 124, 125) ที่ช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) (ภาพ 126) ถือว่าเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือน (Shear Failure) ซึ่งถือว่าจากการเสริมกำลังให้กับเสายังไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติให้กับตัวอย่างเสานี้ได้ ทั้งนี้อาจเกิดจากโหลดตามแนวแกนที่สูงมาก จึงทำให้ค่าความเค้นดึงในเหล็กเสริมตามยาวมีค่าเพิ่มขึ้นช้า แต่การเสริมกำลังให้กับเสาช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงต้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างได้มากขึ้น



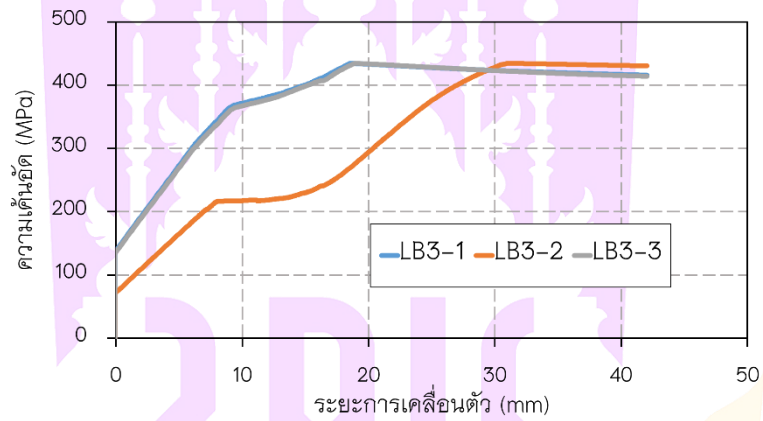
ภาพ 115 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลังเสา No. 2



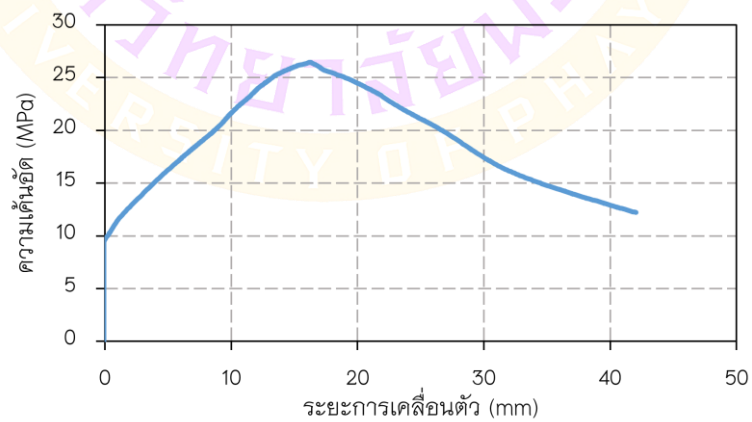
ภาพ 116 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา No. 2 หลังเสริมกำลัง



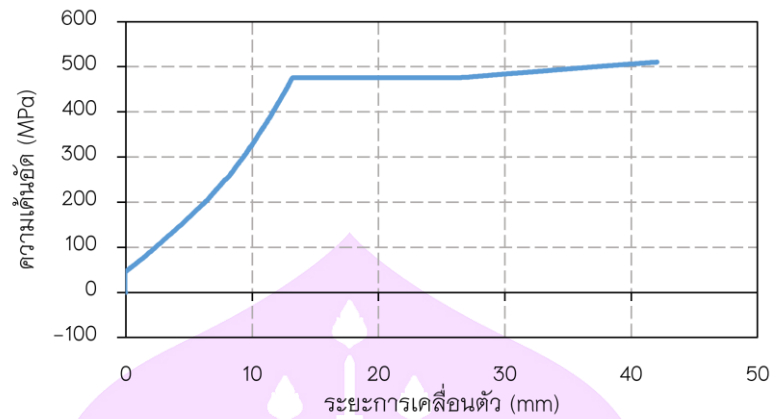
ภาพ 117 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง



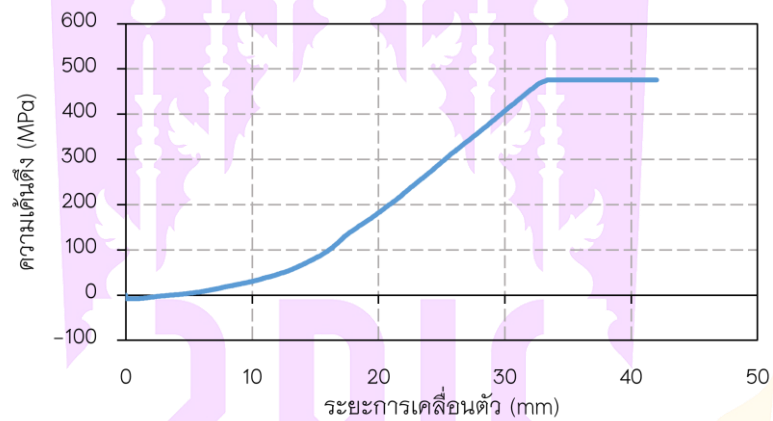
ภาพ 118 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง



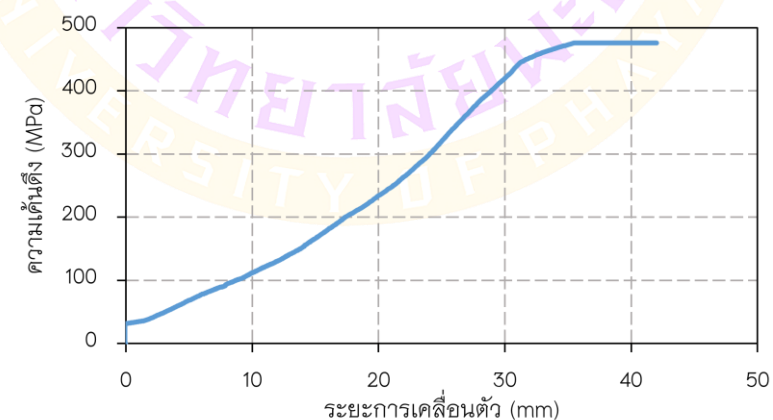
ภาพ 119 ค่าความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง



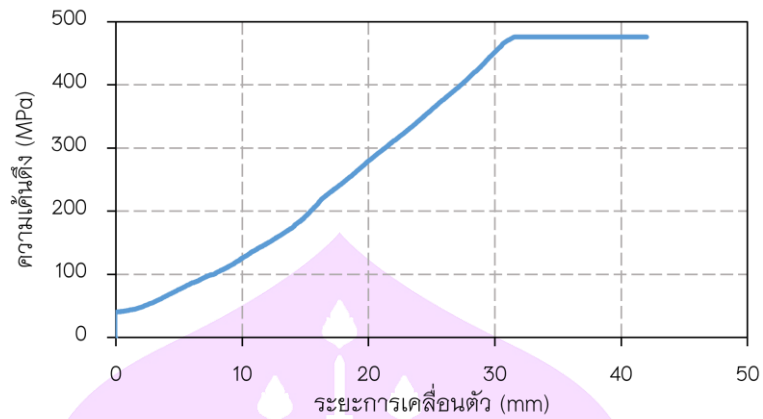
ภาพ 120 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง



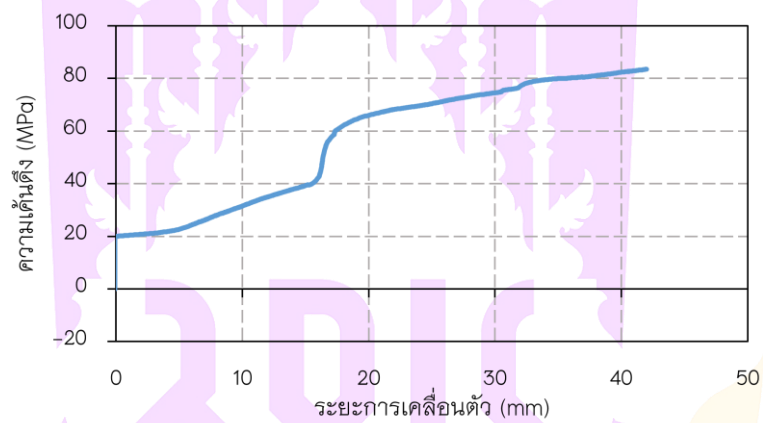
ภาพ 121 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง



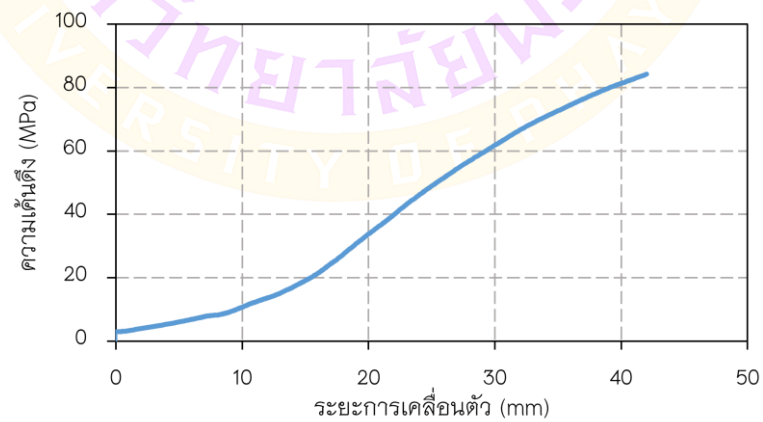
ภาพ 122 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เส้า No. 2 หลังเสริมกำลัง



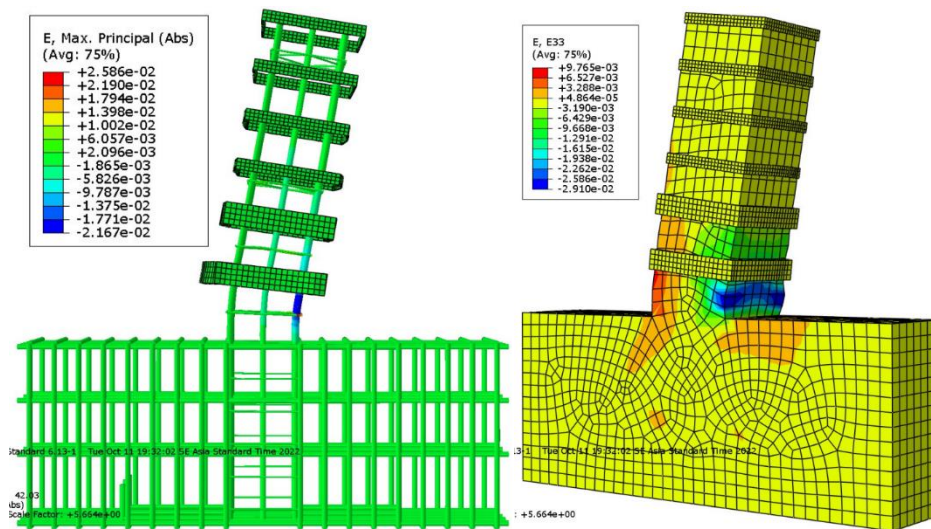
ภาพ 123 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เสา No. 2 หลังเสริมกำลัง



ภาพ 124 ความเค้นในเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน เสา No. 2



ภาพ 125 ความเค้นในเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะ เสา No. 2



ภาพ 126 ลักษณะการเสียรูป เสา No. 2 หลังเสริมกำลัง

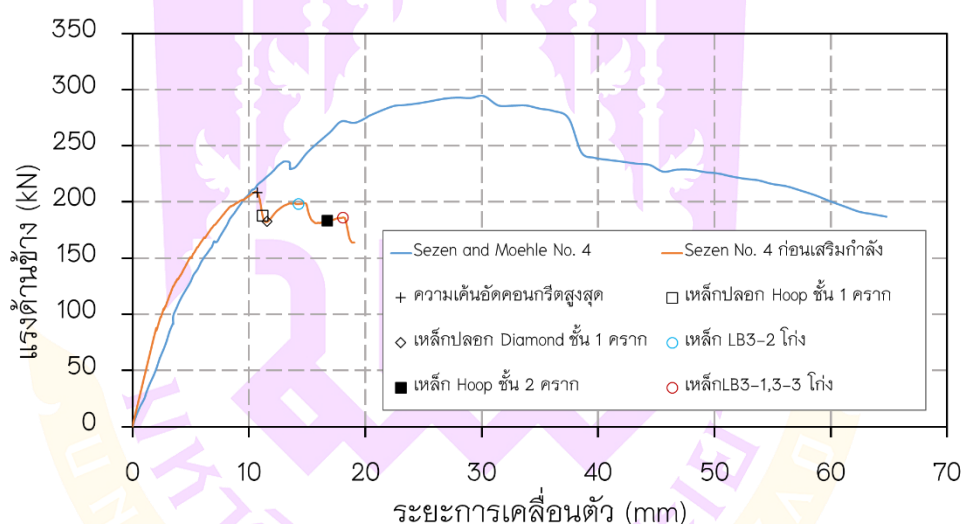
### 3. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง No. 4

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์เสาก่อนเสริมกำลัง

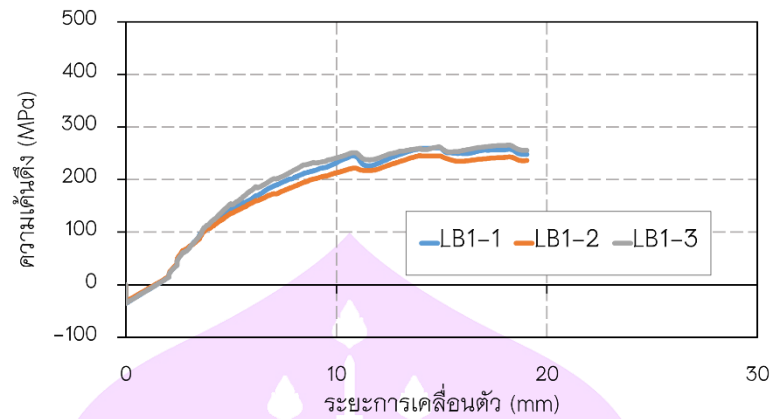
ในตัวอย่างนี้จากผลการทดสอบจริงพบว่ามีกำลังการรับแรงต้านข้างสูงสุด 294.58 kN ที่ระยะการเคลื่อนตัว 30.15 mm แรงต้านข้างเมื่อเกิดการวิบัติอยู่ที่ 187.10 kN และมีระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนกำลังรับแรงต้านข้างตกลงที่ระยะ 64.77 mm

ผลการวิเคราะห์ก่อนทำการเสริมกำลัง จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการทดสอบจริงเทียบกับผลการวิเคราะห์ (ภาพ 127) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ในช่วงต้นมีค่าความชันน้อยกว่าผลการทดสอบจริง ทำนายกำลังรับแรงต้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้น้อยกว่าผลการทดสอบ ผลการวิเคราะห์จะสามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ โดยแรงต้านข้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีกำลังรับแรงต้านข้างสูงสุดอยู่ที่ 209.373 kN ที่ระยะ 10.58 mm ใกล้เคียงกับระยะที่ชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดถึงกำลังอัดสูงสุด คือ 20.30 MPa (ภาพ 131) ก่อนที่จะลดลงทำให้แรงต้านข้างลดลง ที่ระยะการเคลื่อนตัว 11.17 mm เหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 (ภาพ 132) รับแรงดึงจนถึงจุดคราก ต่อมาที่ระยะ 11.57 mm เหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 (ภาพ 133) รับแรงดึงจนถึงจุดคราก เป็นระยะที่แรงต้านข้างลดเหลือ 182.43 kN จากนั้นแรงต้านข้างเพิ่มขึ้นจนมีค่า 198.24 kN และมีค่าคงที่เล็กน้อย จนถึงระยะ 14.26 mm เหล็ก LB3-2 (ภาพ 130) รับแรงอัดจนถึงจุดครากทำให้แรงต้านข้างลดลงอีกครั้งเหลือ 181.911 kN ที่ระยะ 16.22 mm เหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 2 (ภาพ 134) รับความแรงดึงจนถึงจุดคราก

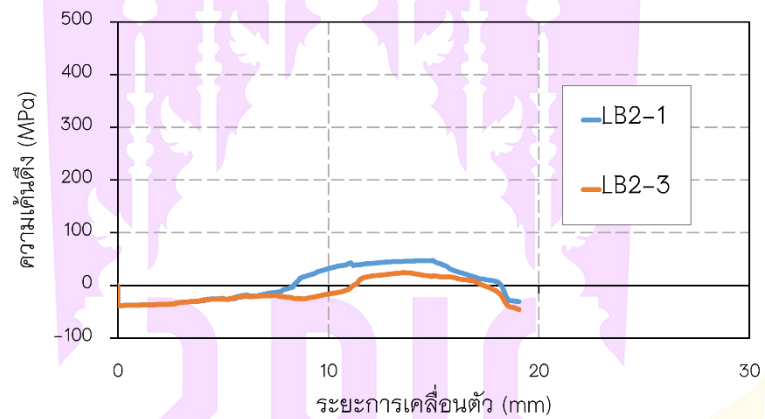
และทำให้เหล็ก LB3-1, LB3-3 (ภาพ 130) รับความแรงอัดจนถึงจุดครากทำให้แรงดันทันข้างลดลงทันที และค่าความเค้นอัดในคอนกรีตลดลงเหลือเพียง 6.55 MPa จึงถือว่าเกิดการวิบัติที่ระยะ 19.05 mm แรงดันทันข้างลดลงเหลือ 164.06 kN ในตัวอย่างนี้เหล็ก LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับแรงอัดจนถึงจุดคราก และแรงดึงในเหล็กปลอกมีค่าถึงจุดครากที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 มีเพียงเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 2 (ภาพ 135) ที่เกิดแรงดึงน้อยกว่าจุดคราก ในส่วนของเหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 รับแรงดึงน้อยกว่าจุดคราก เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ที่ตำแหน่งช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 1-2 ถือว่าเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือน (Shear Failure) (ภาพ 138) แสดงการเคลื่อนตัวของเสาหลังจากวิบัติจะเห็นได้ว่าจะเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาที่บริเวณสูงกว่าโคนเสาเล็กน้อย จึงจะทำการเสริมกำลังให้กับเสาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันทันข้าง ความสามารถในการเคลื่อนตัวดันทันข้าง และเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติให้เป็นการวิบัติแบบดัดและเฉือน (Flexural-shear failure) ต่อไป



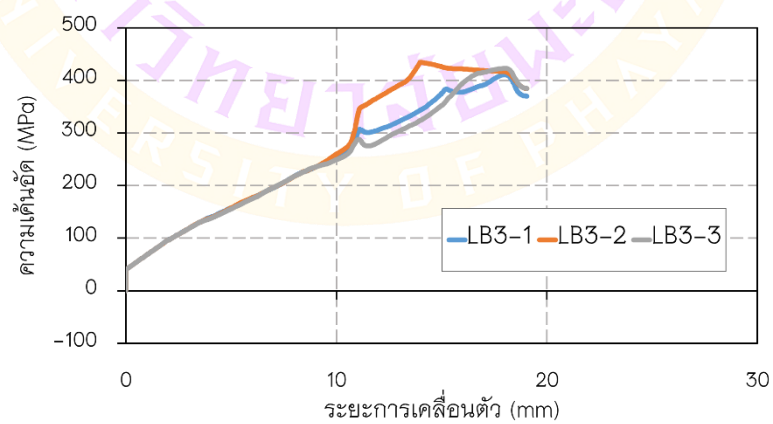
ภาพ 127 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวดันทันข้าง  
จากการทดสอบและการวิเคราะห์ เสา No. 4



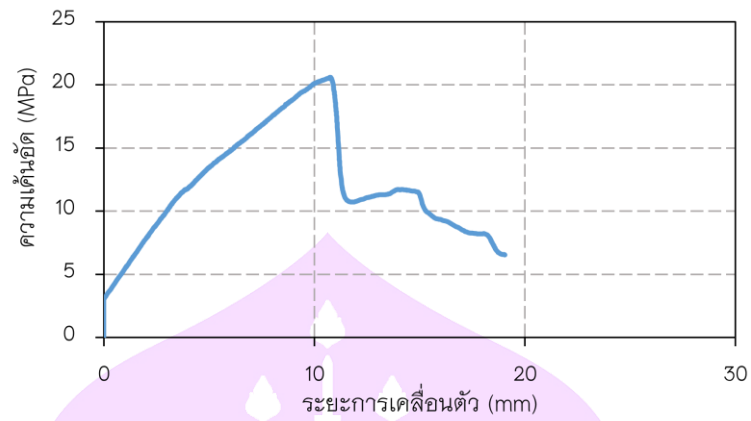
ภาพ 128 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



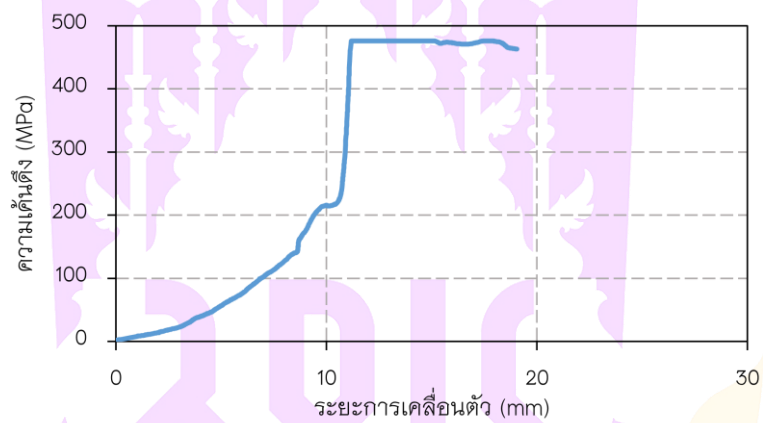
ภาพ 129 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



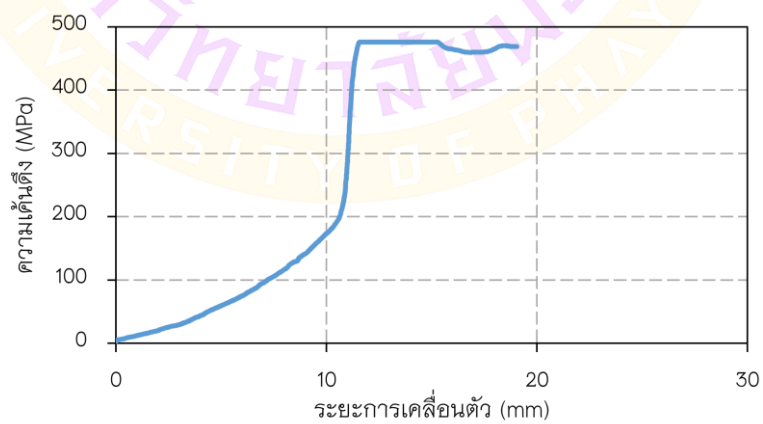
ภาพ 130 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



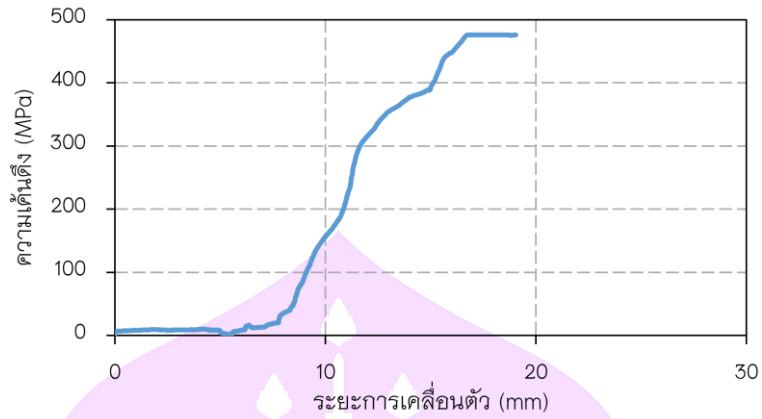
ภาพ 131 ค่าความเค้นอัดในชั้นส่วนคอนกรีตของเสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



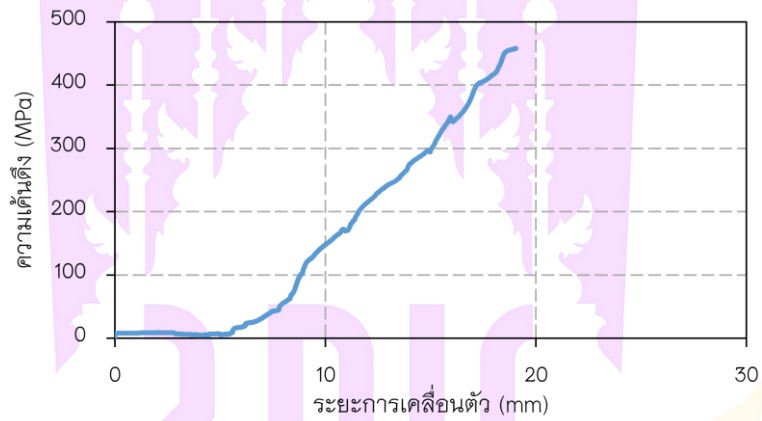
ภาพ 132 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 1 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



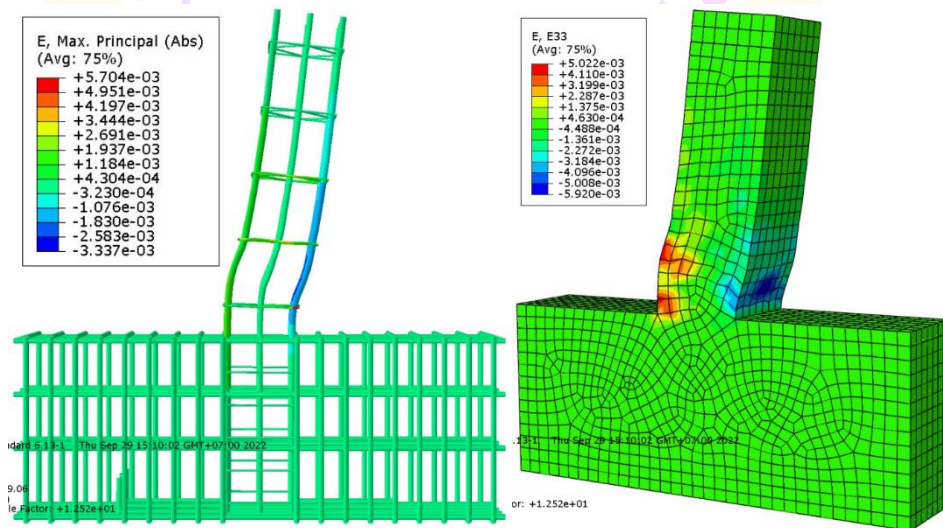
ภาพ 133 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 1 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



ภาพ 134 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Hoop ชั้นที่ 2 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



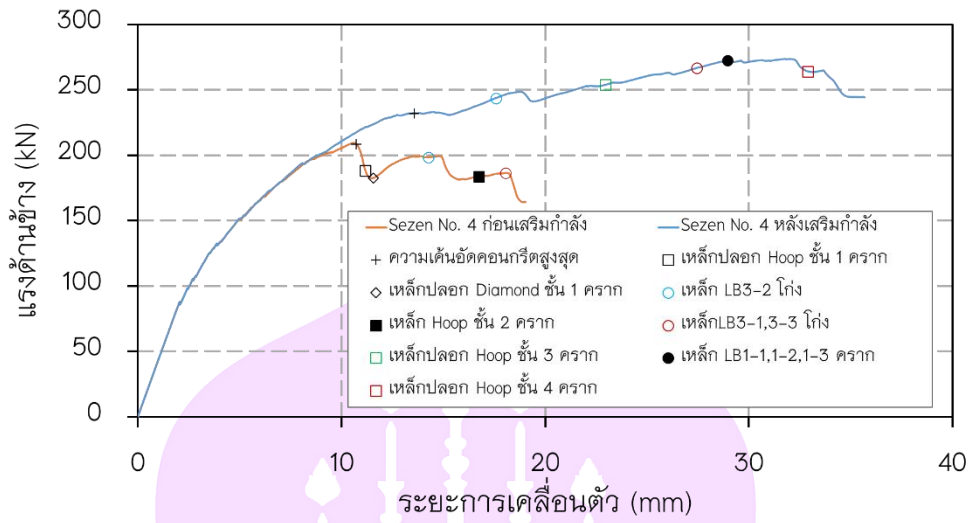
ภาพ 135 ความเค้นในเหล็กปลอกแบบ Diamond ชั้นที่ 2 เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง



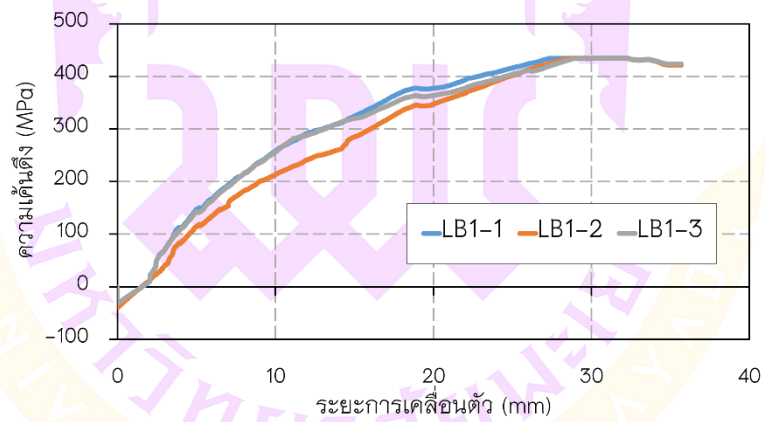
ภาพ 136 ลักษณะการเสียรูป เสา No. 4 ก่อนเสริมกำลัง

### 3.3 ผลการวิเคราะห์เสาที่เสริมกำลัง

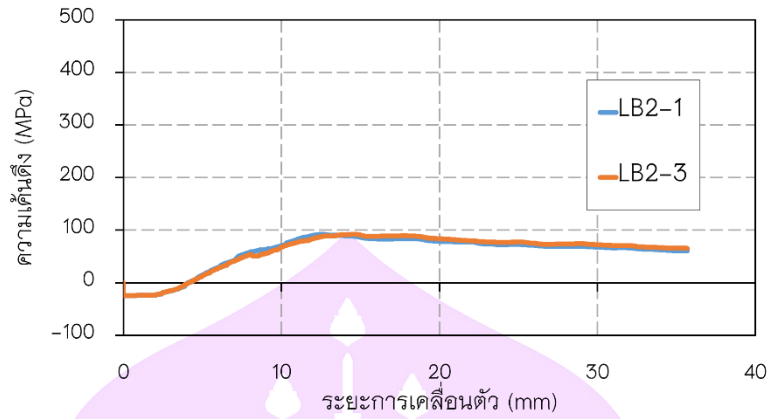
เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่ทำการเสริมกำลังจากการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างจากผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง เทียบกับผลการวิเคราะห์หลังเสริมกำลัง (ภาพ 137) ค่าความชันของกราฟจากการวิเคราะห์ ในช่วงต้นมีค่าความชันเท่ากัน ทำนายกำลังรับแรงดัดข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้มากกว่า ผลการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง สามารถดึงข้อมูลความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเส้นได้ พบว่าที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 13.57 mm ชั้นส่วนคอนกรีตรับแรงอัดถึงกำลังอัดสูงสุด คือ 22.37 MPa (ภาพ 141) ทำให้แรงดัดข้างมีค่าคงที่จนถึงระยะ 15.50 mm แรงดัดข้างเพิ่มขึ้น อีกครั้ง จนเหล็ก LB3-2 (ภาพ 140) รับแรงอัดถึงจุดครากที่ระยะ 17.58 mm แรงดัดข้างเพิ่ม ถึง 246.55 kN จึงลดลงเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จนถึงระยะ 22.97 mm เหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 3 (ภาพ 142) รับแรงดึงจนถึงจุดครากแต่แรงดัดข้างยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ระยะ 27.45 mm เหล็ก LB3-1, LB3-3 (ภาพ 140) รับแรงอัดจนถึงจุดครากทำให้ต่อมาที่ระยะ 28.95 mm เหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 (ภาพ 138) รับแรงดึงจนถึงจุดคราก แรงดัดข้างเพิ่มขึ้น จากเดิมเล็กน้อยจนมีค่าสูงสุด 273.46 kN ที่ระยะ 31.79 mm หลังจากนั้นแรงดัดข้างจึงเริ่ม ลดลง โดยเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 4 (ภาพ 144) รับแรงดึงจนถึงจุดครากที่ระยะ 32.88 mm ทำให้แรงดัดข้างลดลงทันทีและแรงอัดในคอนกรีตลดลงเหลือเพียง 15.33 MPa จึงถือว่าการวิบัติที่ระยะ 35.68 mm แรงดัดข้างลดลงเหลือ 244.21 kN ส่วนเหล็กเสริมกำลังพบว่า ทุกเส้นมีค่าความเค้นดึงที่น้อยกว่าจุดคราก ในตัวอย่างเสานี้เหล็กตามยาว LB3-1, LB3-2, LB3-3 รับแรงอัดจนถึงจุดคราก ทำให้เกิดแรงดึงในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 3 และ 4 จนถึงจุดคราก (ภาพ 142, 144) แต่ในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ทั้งชั้นที่ 3 และ 4 (ภาพ 143, 145) ยังมีค่าแรงดึงน้อยกว่าจุดคราก ในส่วนของเหล็ก LB1-1, LB1-2, LB1-3 รับแรงดึงถึง จุดครากทั้ง 3 เส้น ส่วนเหล็กโอบรัดรับแรงเฉือน และเหล็กโอบรัดลดระยะการโก่งเดาะ ความเค้นดึงยังน้อยกว่าจุดคราก (ภาพ 146, 147) และช่วงเหล็กปลอกชั้นที่ 3-4 เกิดจุดหมุน พลาสติก (Plastic Hinge) (ดูภาพ 148) ถือว่าเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนและแรงดัด (Flexure-Shear Failure) ซึ่งถือว่าจากการเสริมกำลังให้กับเสาทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดข้าง และระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างได้มากขึ้น และยังทำให้รูปแบบการวิบัติของเสาเปลี่ยนไปจากเดิม ที่วิบัติด้วยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว ให้กลายเป็นวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงดัด ซึ่งถือว่าเสา สามารถรับแรงดัดข้างได้อย่างเต็มที่



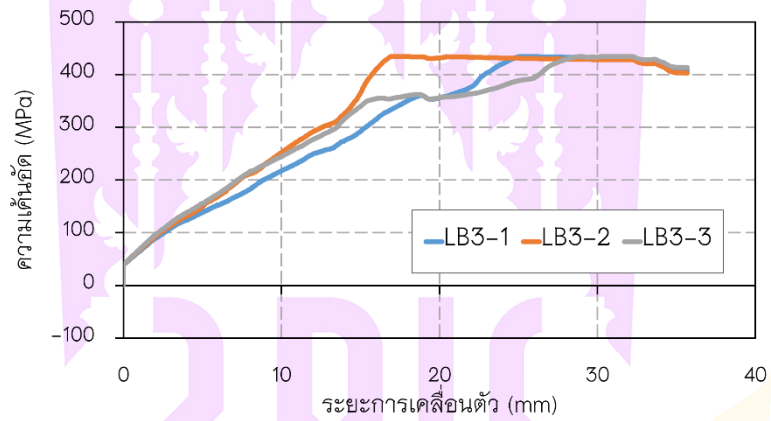
ภาพ 137 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์ก่อนเสริมกำลัง และการวิเคราะห์หลังเสริมกำลังเสา No. 4



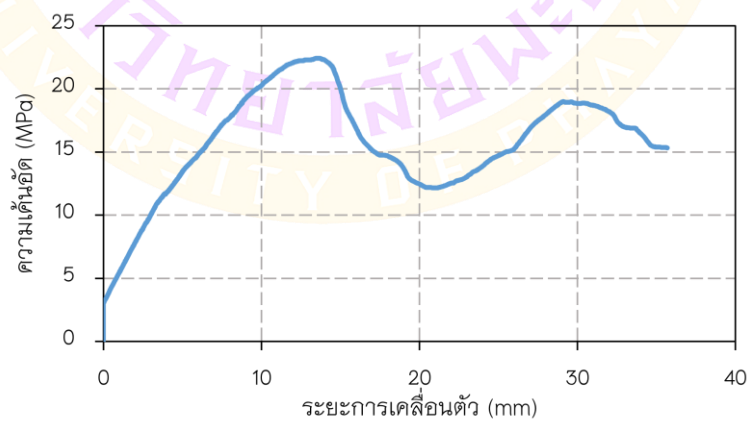
ภาพ 138 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 1 เสา No. 4 หลังเสริมกำลัง



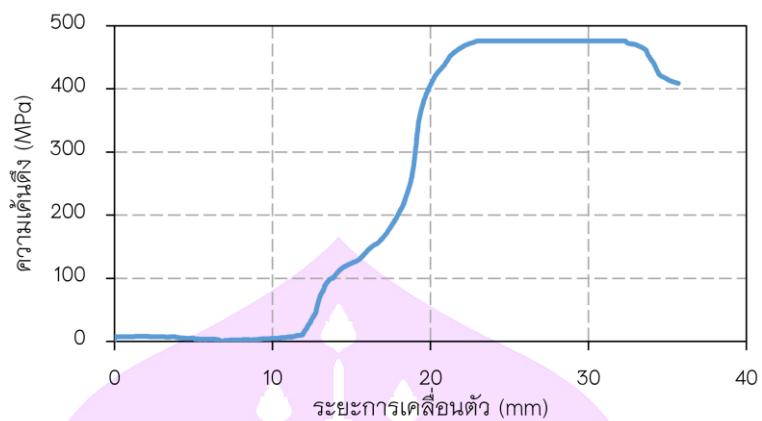
ภาพ 139 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 2 เสา No. 4 หลังเสริมกำลัง



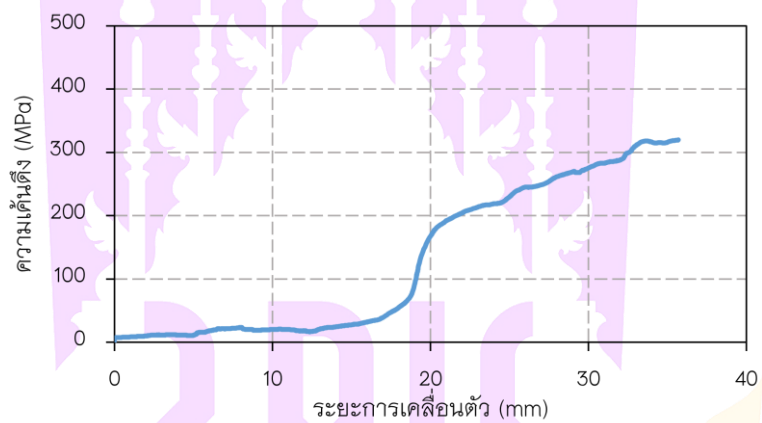
ภาพ 140 ความเค้นในเหล็กตามยาวแถวที่ 3 เสา No. 4 หลังเสริมกำลัง



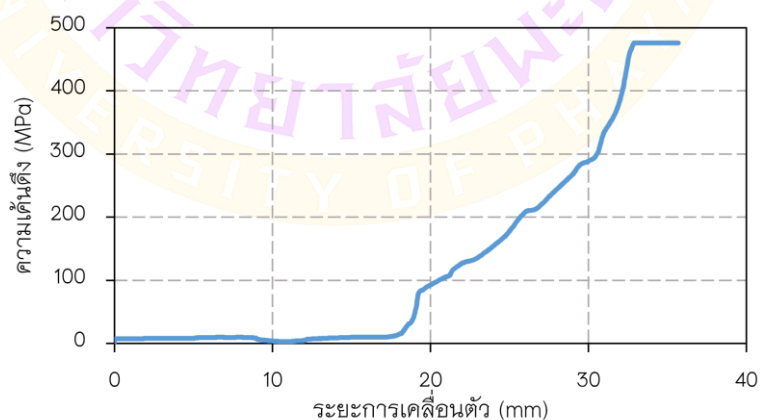
ภาพ 141 ความเค้นอัดในชิ้นส่วนคอนกรีต เสา No. 4 หลังเสริมกำลัง



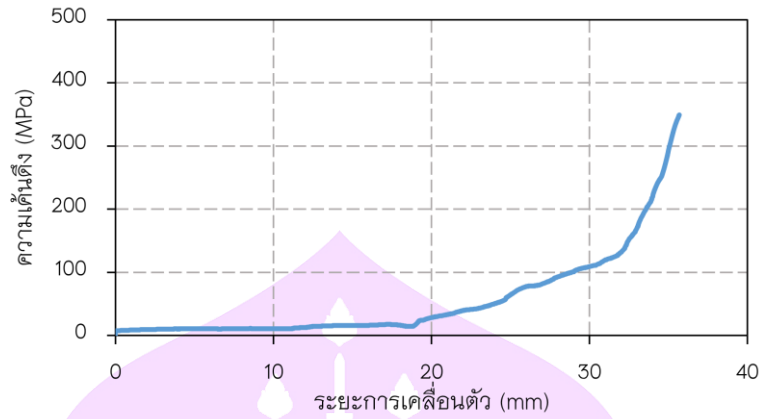
ภาพ 142 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 3 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง



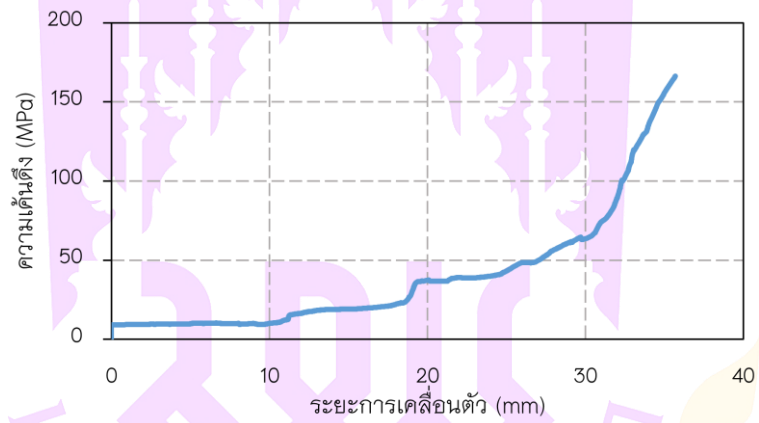
ภาพ 143 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 3 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง



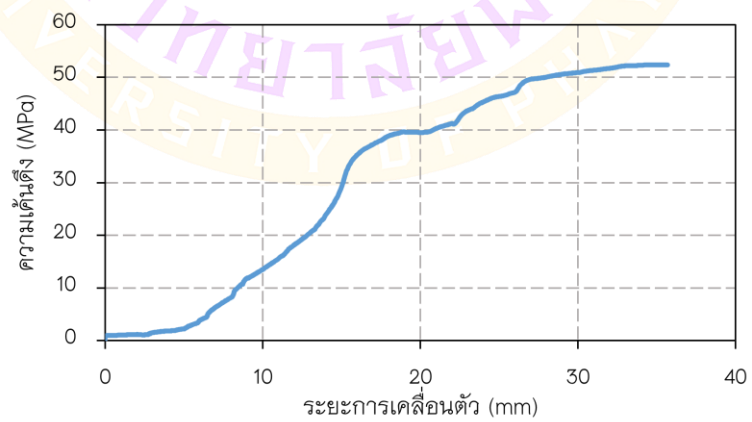
ภาพ 144 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Hoop ชั้นที่ 4 เส้า No. 4 หลังเสริมกำลัง



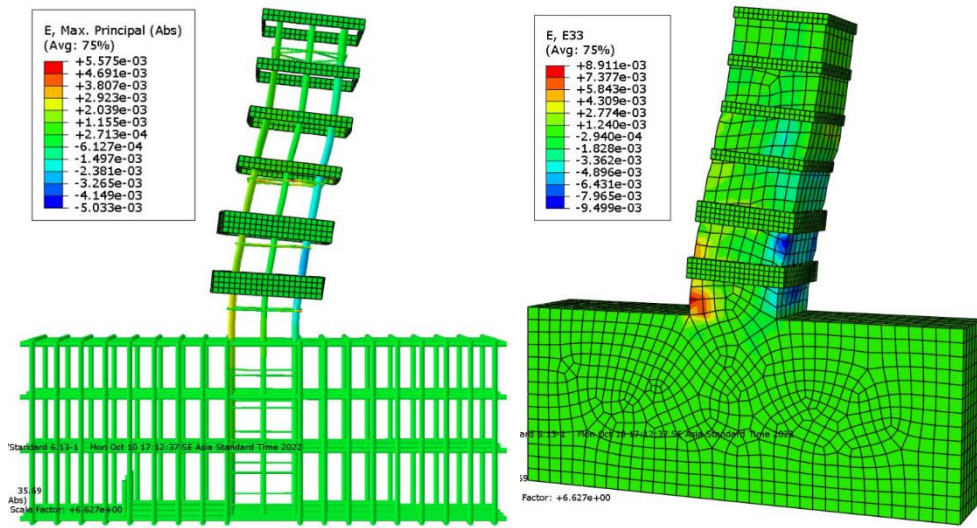
ภาพ 145 ความเค้นในเหล็กปลอกรูปแบบ Diamond ชั้นที่ 4 เสา No. 4 หลังเสริมกำลัง



ภาพ 146 ความเค้นในเหล็กโอบรับแรงเฉือน เสา No. 4



ภาพ 147 ความเค้นในเหล็กโอบลดระยะการโก่งเดาะ เสา No. 4



ภาพ 148 ลักษณะการเสียรูป เสา No. 4 หลังเสริมกำลัง



## บทที่ 5

### สรุปผล

จากผลการทดสอบการรับแรงอัดของเหล็กเส้นที่เกิดโก่งเดาะ และผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาที่ทำการเสริมกำลังโดยใช้เหล็กเส้นแบนโอบรัดเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและชะลอการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว สามารถสรุปได้ดังนี้

#### สรุปผลการรับแรงอัดของเหล็กเส้น

พฤติกรรมการรับแรงอัดสูงสุดก่อนเกิดการโก่งเดาะของเหล็กมีค่าใกล้เคียงกับกำลังคราก แต่ตัวอย่างที่มีความยาวช่วงการโก่งเดาะที่มาก (ไม่มีการยึดรั้งการโก่งเดาะ) จะมีกำลังการรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็วหลังเกิดการโก่งเดาะ ในขณะที่ตัวอย่างที่มีการยึดรั้งการโก่งเดาะ จะมีความยาวช่วงการโก่งเดาะลดลง จึงทำให้กำลังการรับแรงอัดลดลงช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด ตัวอย่างที่มีการยึดรั้งให้ความยาวช่วงการโก่งเดาะเกิดขึ้น 8D กำลังการรับแรงอัดลดลงเหลือ 50% ของกำลังที่จุดคราก ที่ค่าความเครียดประมาณ 30 เท่าของความเครียดที่จุดคราก ส่วนในตัวอย่างที่มีการยึดรั้งให้โก่งเดาะช่วง 6D กำลังการรับแรงอัดหลังจุดครากจะค่อนข้างคงที่จนถึงค่าความเครียดประมาณ 20 เท่าของความเครียดที่จุดคราก ก่อนที่ กำลังการรับแรงอัดจะค่อย ๆ ลดลง จนกำลังรับแรงอัดเหลือ 50% ของกำลังที่จุดคราก ที่ค่าความเครียดประมาณ 60 เท่าของความเครียดที่จุดคราก จึงสรุปได้ว่าความยาวช่วงการโก่งเดาะของเหล็กเส้น มีผลต่อกำลังการรับแรงอัดหลังจุดครากเป็นอย่างมาก ซึ่งข้อสรุปนี้จะส่งต่อไปถึงแนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างเสาโดยควบคุมให้เหล็กเส้นเกิดโก่งเดาะได้ในช่วงความยาวไม่เกิน 6D

การควบคุมให้เหล็กเส้นโก่งเดาะในช่วงความยาวที่ต้องการนั้น จะต้องทราบถึงแรงยึดรั้งหรือแรงยับยั้งการโก่งเดาะ จากการทดสอบแรงยับยั้งการโก่งเดาะพบว่าแรงยับยั้งการโก่งเดาะจะเพิ่มขึ้นหลังจากเหล็กเหล็กรับแรงอัดถึงจุดครากแล้ว โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 80% ของความเค้นที่จุดคราก ส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงยับยั้งจะช้าลงในช่วงที่กำลังการรับแรงอัดลดลงเหลือ 50% แล้ว ขนาดหน้าตัดของเหล็กรับแรงอัดและความยาวช่วงการโก่งเดาะมีผลต่อแรงยับยั้ง ขนาดเหล็กที่ใหญ่และความยาวช่วงการโก่งเดาะที่สั้น จะต้องใช้แรงยับยั้งที่มากกว่า จากการลดความยาวช่วงการโก่งเดาะจาก 8D เป็น 6D แรงยับยั้งการโก่งเพิ่มขึ้นประมาณ 30% ค่าของแรงยึดรั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบการเสริมกำลังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อยับยั้งการโก่งเดาะที่จะเกิดขึ้นได้

ค่าของแรงยับยั้งการโก่งเดาะที่ความยาวช่วงการโก่งเดาะ 8D และ 6D ที่ความเครียดอัด 0.02 และ 0.04 สรุปได้ดังตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

**ตาราง 8 แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่ความยาวช่วง 8D**

ขนาดเหล็ก	แรงยับยั้งการโก่งเดาะ (kN) ที่ความเครียดอัด		
	0.02	0.04	0.06
DB16	3.00	5.50	-
DB20	20.5	25.0	-
DB25	22.5	29.0	-

**ตาราง 9 แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่ความยาวช่วง 6D**

ขนาดเหล็ก	แรงยับยั้งการโก่งเดาะ (kN) ที่ความเครียดอัด		
	0.02	0.04	0.06
DB16	3.00	5.50	10.0
DB20	12.5	23.0	28.0
DB25	20.0	35.0	39.0

### สรุปผลของการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

การศึกษานี้ได้นำตัวอย่างเสา 5 ตัวอย่าง จากงานวิจัยในอดีต ที่ได้ทำการทดสอบแล้ว วิบัติแบบเฉือน 2 ตัวอย่าง และวิบัติแบบเฉือนและการดัด 3 ตัวอย่าง มาทำการเสริมกำลัง โดยใช้เหล็กเส้นแบนโอบรัดภายนอก เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS ผลการศึกษา พบว่า

1. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่วิบัติแบบเฉือนจะได้ค่าแรงต้านข้างน้อยกว่าผลการทดสอบจริง แต่ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่วิบัติแบบดัดได้ค่าแรงต้านข้างใกล้เคียงกับผลการทดสอบ จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมทำนายพฤติกรรมการรับแรงเฉือนได้ต่ำไป แต่ทำนายพฤติกรรมการรับแรงดัดได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 10

ตาราง 10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาก่อนเสริมกำลังกับผลการทดสอบ

ตัวอย่างเสา	แรงต้านข้างสูงสุด (kN)		ระยะเคลื่อนที่ เมื่อแรงตกลง 80% (mm)	
	วิเคราะห์	ทดสอบ	วิเคราะห์	ทดสอบ
3CMD18	307.66	328.00	12.10	15.74
3CMD12	303.86	355.00	13.83	26.00
2CLH18	252.55	240.77	38.1	38.00
No. 2	320.25	301.00	27.01	22.66
No. 4	209.37	294.58	18.68	43.22

2. จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่ทำการเสริมกำลังโดยใช้เหล็กเส้นแบนมาเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและลดความยาวช่วงการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว พบว่า ทุกตัวอย่างมีกำลังการรับแรงต้านข้างที่เพิ่มขึ้นจากเดิม ในตัวอย่างที่เปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแรงเฉือนเป็นแรงเฉือนและแรงดัดมีกำลังการรับแรงต้านข้างเพิ่มขึ้นประมาณ 25% ระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น 46% ส่วนตัวอย่างที่เปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแรงเฉือนเป็นแรงดัด พบว่ามีระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น 78% แต่ในตัวอย่างเสาที่เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนและแรงดัดเป็นแรงดัด แรงต้านข้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียง 8% และระยะการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอีก 32% ซึ่งสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 11, 12 ดังนั้น การเสริมกำลังด้วยการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

ตาราง 11 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาไม่ได้เสริมกำลัง

ตัวอย่างเสา	แรงต้านข้าง สูงสุด (kN)	ระยะเคลื่อนที่	ระยะเคลื่อนที่	รูปแบบการวิบัติ
		เมื่อแรงสูงสุด (mm)	เมื่อแรงตกลง 80% (mm)	
3CMD18	307.66	11.60	12.10	แรงเฉือน
3CMD12	303.86	12.21	13.83	แรงเฉือน
2CLH18	252.55	23.25	38.1	แรงดัดและแรงเฉือน
No. 2	320.25	12.80	27.01	แรงเฉือน
No. 4	209.37	10.53	18.68	แรงเฉือน

ตาราง 12 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาที่เสริมกำลัง

ตัวอย่างเสา	แรงต้านข้าง สูงสุด (kN)	ระยะเคลื่อนที่ เมื่อแรงสูงสุด (mm)	ระยะเคลื่อนที่ เมื่อแรงตกลง 80% (mm)	รูปแบบการวิบัติ
3CMD18	318.14	12.16	25.09	แรงดัด
3CMD12	365.81	19.63	43.19	แรงดัดและแรงเฉือน
2CLH18	266.43	40.33	52.22	แรงดัด
No. 2	353.50	15.73	42.03	แรงดัด
No. 4	273.46	31.79	35.68	แรงดัดและแรงเฉือน



## บรรณานุกรม

- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2564). **มาตรฐานการออกแบบอาคาร**  
**ต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว** (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: กรม  
โยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2559). **มาตรฐาน**  
**ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย**. กรุงเทพฯ:  
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- Abraham, C., Lynn, M. E., Jack, P., Moehle, M. E., Stephen, A. and William, T. H. (1996).  
Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Building Columns. **Earthquake**  
**Spectra**, 12(4), 715–739.
- Barnes, R. A., Baglin, P.S. and Mays, G. C. (2001). Subedi External steel plate systems for  
the shear strengthening of reinforced concrete beams. **Engineering Structures**,  
**23**, 1162–1176
- Chitra, M. D. and Rugmini, B. K. (2020). Influence of Buckling Restrained Reinforcement  
on Behavior of Columns. **ASCE**, 25(4), 1–8.
- Choi, K. K., Truong, G. T. and Kim, J. C. (2016). Seismic performance of lightly shear  
reinforced RC columns. **Engineering Structures**, 126(2016), 490–504.
- Dhakal, P. R. and Maekawa, K. (2002). Path–dependent cyclic stress–strain relationship of  
reinforcing bar including buckling. **Engineering Structures**, 24, 1383–1396
- Gomes, A. and Appleton, J. (1997). Nonlinear cyclic stress–strain relationship of reinforcing  
bars including buckling. **Engineering Structures**, 19(10), 822–826.
- Geron, Fre´de´ric Le´ and Paultre, P. (2003). Uniaxial Confinement Model for Normal– and  
High–Strength Concrete Columns. **Journal of structural engineering**, 241–252.
- Gia Toai Truong, Jong–Chan Kim, Kyoung–Kyu Choi. (2017). Seismic performance of  
reinforced concrete columns retrofitted by various methods. **Engineering**  
**Structures**, 134(1), 217–235.
- Nayal, R and Rasheed, H. A. (2006). Tension Stiffening Model for Concrete Beams  
Reinforced with Steel and FRP Bars. **Journal of materials in civil engineering**,

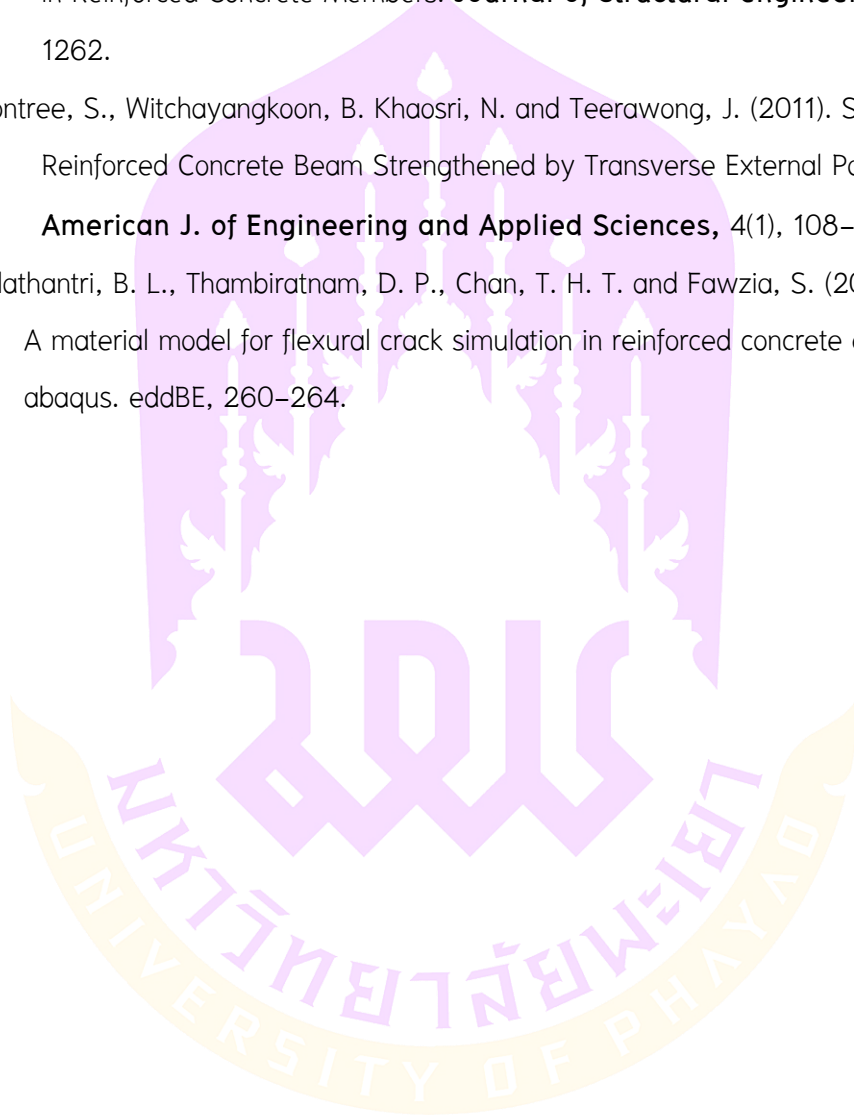
18, 831–841.

Paultre, P. and Légeron, F. (2008). Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns. **Journal of structural engineering**, 738–749.

Rajesh, P. D. and Koichi, M. (2002). Reinforcement Stability and Fracture of Cover Concrete in Reinforced Concrete Members. **Journal of structural engineering**, 1253–1262.

Sirimontree, S., Witchayangkoon, B. Khaosri, N. and Teerawong, J. (2011). Shear Strength of Reinforced Concrete Beam Strengthened by Transverse External Post-tension. **American J. of Engineering and Applied Sciences**, 4(1), 108–115.

Wahalathantri, B. L., Thambiratnam, D. P., Chan, T. H. T. and Fawzia, S. (2011). A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using abaqus. *eddBE*, 260–264.



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	อนันตพงษ์ กระจาย
วัน เดือน ปี เกิด	15 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	อุตรดิตถ์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2561 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	34 หมู่ที่ 6 ตำบลแสนตอ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000
ผลงานตีพิมพ์	อนันตพงษ์ กระจาย, สมบูรณ์ เชียงฉิน, ปรีดา ไชยมหาวัน และภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ (ผู้บรรยาย). (24-26 สิงหาคม 2565). แร่งยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้น. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 (หน้า 1-5). เชียงราย: โรงแรมเดอะแธริเทรจ.
รางวัลที่ได้รับ	-

