

แรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้น Buckling-Restrained Forces of Reinforcing Bars

อนันตพงษ์ กระจ่าง¹ สมบูรณ์ เชียงฉิน^{2,*} ปรีดา ไชยมหาวัน³ และ ภาสกร ชัยวิริยวงค์⁴

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: somboon.sh@up.ac.th

บทคัดย่อ

โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะมีการเสริมเหล็กปลอกคั่นข้างห่างและมีโอกาสเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวแล้วดันให้คอนกรีตหุ้มแตกหากเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง ดังนั้นการเสริมกำลังในเสาจึงจำเป็นต้องยับยั้งการโก่งเดาะนี้ การศึกษานี้ทำการทดสอบกำลังอัดของเหล็กเส้นที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะตัวอย่างเหล็กเส้นเป็นเกรด SD40 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กจะเพิ่มมากขึ้นหลังจากจุดครากและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเครียดที่เพิ่มขึ้น สำหรับเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่จำเป็นต้องใช้แรงยับยั้งการโก่งเดาะที่มากกว่า ซึ่งผลการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบการเสริมกำลังในเสาต่อไป

คำสำคัญ: การโก่งเดาะของเหล็กเสริม, แรงยับยั้ง, การเสริมกำลังเสา

Abstract

Reinforced concrete columns in existing buildings that were not designed to resist seismic loading have a wide stirrup spacing and there is a chance that the longitudinal reinforcement is buckled and then covering concrete is spalled off in the event of a severe earthquake. Therefore, the columns should be retrofitted by restraining the buckling of reinforcing bars. This study tested the compressive strength of reinforcing bars with horizontal force restraining the buckling. The specimens are grade SD40 and have diameters of 16 mm, 20 mm and 25 mm. The test results show that the restraining force increases after the yield point and increases progressively with increasing compressive strain. For reinforcing bar with large diameter, greater restraining force is required. The results of this test can be applied for the design of column retrofit in the future study.

Keywords: buckling of reinforcement, restrained force, column retrofit

1. บทนำ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3-4 ชั้น ที่ทำการก่อสร้างก่อนปี พ.ศ. 2550 จำนวนมากไม่ได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหวในการออกแบบ จึงทำให้โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารดังกล่าวอาจเกิดการวิบัติ

เนื่องจากแรงเฉือนและการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรง ดังที่พบเห็นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวรุนแรงที่เกิดขึ้นในอดีต ยกตัวอย่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศกรีซและตุรกี ขนาด 6.9-7.0 ริกเตอร์ เมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ. 2563 ที่มีอาคารพังถล่มลงมาแล้วทำให้มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บเป็นจำนวนมาก [1] และเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยขนาด 6.1 ริกเตอร์ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ที่มีโครงสร้างอาคารเสียหายจำนวนมากโดยเฉพาะอาคารเก่าที่ก่อสร้างมานาน [2] จากการศึกษาของ Lynn et al. [3] ที่ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารที่ก่อสร้างก่อนปี ค.ศ.1970 ซึ่งเหล็กปลอกในเสาคั่นข้างห่างคล้ายเสาในประเทศไทยที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเรียงเหล็กปลอกที่ห่างนั้นทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติแบบเฉือนและมีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวดันให้คอนกรีตหุ้มแตกออก ส่งผลเสามีพฤติกรรมที่มีความเหนียวจำกัดหรือมีความสามารถในการโยกตัวด้านข้างได้น้อย ดังนั้น เพื่อลดการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงกว่าที่คาดการณ์ไว้ โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารเก่าในประเทศไทยจึงจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

จากการศึกษาของ Dhakal and Maekawa [4] และ Gomes and Appleto [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้นและเสนอสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นที่รับแรงอัดแล้วเกิดการโก่งเดาะ พฤติกรรมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความขะลุด L/D โดยที่ L คือ ความยาวช่วงการโก่งเดาะ และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าอัตราส่วนความขะลุดมากจะทำให้กำลังรับแรงอัดตกลงจากจุดครากอย่างรวดเร็ว จากการศึกษากำลังอัดจะตกลงไม่มากเมื่ออัตราส่วนความขะลุดมีค่าอยู่ในช่วง 5-6 ดังนั้น การยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในเสาที่มีเหล็กปลอกเรียงห่าง จึงควรเน้นไปที่การควบคุมให้เหล็กเส้นเกิดการโก่งเดาะในช่วงอัตราส่วนความขะลุดที่ 5-6 นอกจากนี้ Dhakal and Maekawa [6] ได้เสนอค่าความแข็งของสปริงที่จะยึดรั้งให้เหล็กเส้นโก่งเดาะในช่วงความยาว L ไต ๆ การศึกษาพบว่าการควบคุมให้เหล็กเส้นโก่งเดาะในช่วงความยาว L ที่สั้น (อัตราส่วนความขะลุดน้อย L/D น้อย) จะมีความต้องการความแข็งของสปริงที่มากกว่าเหล็กเส้นที่มีการโก่งเดาะในช่วงความยาว L ที่ยาว (อัตราส่วนความขะลุดมาก L/D มาก) แต่การศึกษาไม่ได้เสนอเป็นค่าแรงยึดรั้งจึงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการออกแบบเสริมกำลังเสาคอนกรีตเพื่อยับยั้งการโก่งเดาะได้

ประเทศไทยหลังปี พ.ศ. 2550 อาคารสาธารณะหรืออาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 15 เมตร ขึ้นไปในเขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว จะถูกบังคับให้ทำการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวด้วย โดยมีมาตรฐานประกอบการ

ออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301) ที่ให้แนวทางการเสริมเหล็กที่โครงสร้างมีความเหนียวจำกัด [7] โดยช่วงวิกฤตบริเวณปลายเสาทั้งด้านบนและด้านล่างจะต้องทำการเสริมเหล็กปลอกที่มีระยะเรียงลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง คือ ครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผล ครึ่งหนึ่งของความกว้างเสา 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาวในเสา และ 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามขวาง ซึ่งดูเหมือนว่าจะช่วยให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะด้วยอัตราส่วนความชะลุดประมาณ 8 แต่จากการวิจัยที่ผ่านมา เช่น การศึกษาของ Lukkunaprasit and Sittipunt [8] พบว่าถึงแม้ระยะเรียงของเหล็กปลอกจะมีค่าประมาณ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว แต่เหล็กปลอกที่แข็งแรงไม่เพียงพอที่จะต้านแรงดันจากการโก่งเดาะของเหล็กตามยาว เหล็กปลอกจะเสียรูปจึงส่งผลให้เหล็กตามยาวเกิดการโก่งเดาะที่ความยาว 2 เท่าของระยะเรียงเหล็กปลอก ดังนั้น การกำหนดระยะเรียงของเหล็กปลอกในเสาตาม มยผ.1301 นั้น ไม่ได้ทำให้มั่นใจว่าเหล็กปลอกจะช่วยควบคุมให้เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะในช่วงความยาวที่เท่ากับระยะเรียงได้

Truong et al. [9] ศึกษาการเสริมความแข็งแรงให้กับเสาที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รับแรงแผ่นดินไหวในประเทศเกาหลี โดยสเกลขนาดลงมาครึ่งหนึ่งจากขนาดเสาจริง การเสริมความแข็งแรงจะใช้วิธีการนำวัสดุต่าง ๆ มาห่อหุ้มเสา วัสดุที่นำมาใช้ ได้แก่ แผ่นเหล็กหนา 3 mm คาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และ คอนกรีตแบบไม่หดตัวเสริมเหล็ก การศึกษาพบว่าก่อนเสริมกำลังเสาเกิดการวิบัติแบบเฉือนและการดัด แต่เมื่อมีการเสริมความแข็งแรงแล้วการวิบัติเปลี่ยนเป็นแบบการดัด จึงทำให้เสารับแรงด้านข้างเพิ่มขึ้นประมาณ 30% และมีการโยกตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 52% อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Truong et al. มีการลดสเกลของเสาจริงจึงทำให้ปริมาณเหล็กเสริมและขนาดเสาลดลง การเสริมกำลังด้วยวิธีข้างต้นจึงยับยั้งการโก่งเดาะได้ แต่มีข้อสังเกตว่าหากเปลี่ยนเป็นเสาขนาดจริง แรงที่ใช้ในการยับยั้งการโก่งเดาะจะเพิ่มขึ้น การเสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าวจะเพียงพอหรือไม่ เพื่อให้การเสริมกำลังในเสาสามารถยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้อย่างเหมาะสมการศึกษาจึงทำการทดสอบเพื่อหาแรงยับยั้งการโก่งเดาะ และเสนอแนะแนวทางการเสริมกำลังเพื่อช่วยยับยั้งการโก่งเดาะในเสา

2. ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

การวิจัยนี้จะจำลองเหล็กเสริมตามยาวในเสาที่มีระยะเรียงเหล็กปลอกเท่ากับ $16D$ และ $12D$ โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว เหมือนเสาที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว เมื่อรับแรงทางด้านข้างจะทำให้เหล็กเสริมตามยาวในเสาเกิดการโก่งเดาะช่วงความยาว L เท่ากับ $16D$ และ $12D$ ซึ่งทราบกันดีว่ากำลังอัดของเหล็กเส้นจะตกลงอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการเสริมกำลังเพื่อยับยั้งการโก่งเดาะ โดยทำการยึดรั้งด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วง ความยาวช่วงการโก่งเดาะจะลดลงครึ่งหนึ่งเป็น $L/2$ เท่ากับ $8D$ และ $6D$ การศึกษานี้เน้นที่เหล็กเส้นเกรด SD40 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยเลือกทดสอบเหล็กเส้นขนาด 16 mm 20 mm และ 25 mm ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบจึงมีทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 1

2.2 การติดตั้งการทดสอบ

รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งการทดสอบ ตัวอย่างเหล็กเส้นจะถูกสวมหัวจับกวดที่ปลายทั้งสองด้าน โดยหัวจับจะมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ความลึกของรูเท่ากับ $3D$ เพื่อให้มีลักษณะการจับยึดแบบยึดแน่น (fixed support)

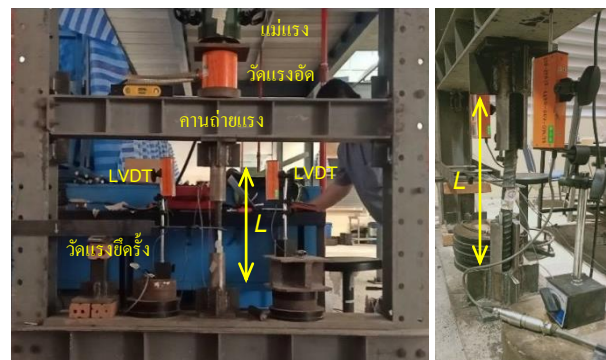
และมีช่วงความยาวที่จะโก่งเดาะได้เท่ากับ L ตามที่กำหนดไว้ของแต่ละตัวอย่าง หัวจับกวดด้านล่างอยู่บนคานยึดแน่น ส่วนหัวจับกวดด้านบนอยู่บนคานถ่างแรง ที่ปลายคานถ่างแรงจะมีล้อยันเสาไว้เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้าง บนคานถ่างแรงมีอุปกรณ์วัดแรงอัด (Load cell) และมีแม่แรงไฮดรอลิกติดกับคานยึดแน่นด้านบน เมื่อปัมแรงดันในแม่แรง แรงจะอัดไปที่อุปกรณ์วัดแรงและคานถ่างแรงแล้วถ่ายลงสู่ตัวอย่างเหล็กเส้น

สำหรับตัวอย่างที่มีการยึดรั้งด้านข้าง จะมีเหล็กเส้นแบนเจาะรูให้ตัวอย่างเหล็กเส้นสอดผ่าน และยึดแน่นกับเสาเหล็กเมื่อตัวอย่างเหล็กเส้นจะโก่งเหล็กเส้นแบนนี้จะช่วยยับยั้งการโก่งเดาะ เหล็กเส้นแบนที่ใช้ในการศึกษานี้มีขนาดกว้าง 50 mm หนา 3.8 mm ยาว 300 mm กำลังครากเท่ากับ 300 MPa จึงรับแรงดึงได้ก่อนถึงจุดครากเท่ากับ 57 kN การวัดแรงที่ยึดรั้งทำโดยติดอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gages) 2 ตัว ที่เหล็กเส้นแบน แล้วนำไปสอบเทียบค่าที่วัดความเครียดได้กับค่าแรงดึงที่ได้จากเครื่องทดสอบ

ตัวอย่างเหล็กเส้นจะถูกติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ (Strain gages) เพื่อวัดค่าความเครียดในช่วงก่อนการโก่งเดาะ นอกจากนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (LVDTs) เพื่อใช้เป็นข้อมูลมาคำนวณความเครียดเฉลี่ยหลังการโก่งเดาะ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกเข้าคอมพิวเตอร์ทุก 0.5 วินาที

ตารางที่ 1 ตัวอย่างทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด	ความยาว L	การยึดรั้ง
DB16_L16D	16 mm	$16D=256$ mm	ไม่มี
DB16_L16D_R	16 mm	$16D=256$ mm	มี
DB20_L16D	20 mm	$16D=320$ mm	ไม่มี
DB20_L16D_R	20 mm	$16D=320$ mm	มี
DB25_L16D	25 mm	$16D=400$ mm	ไม่มี
DB25_L16D_R	25 mm	$16D=400$ mm	มี
DB16_L12D	16 mm	$12D=192$ mm	ไม่มี
DB16_L12D_R	16 mm	$12D=192$ mm	มี
DB20_L12D	20 mm	$12D=240$ mm	ไม่มี
DB20_L12D_R	20 mm	$12D=240$ mm	มี
DB25_L12D	25 mm	$12D=300$ mm	ไม่มี
DB25_L12D_R	25 mm	$12D=300$ mm	มี

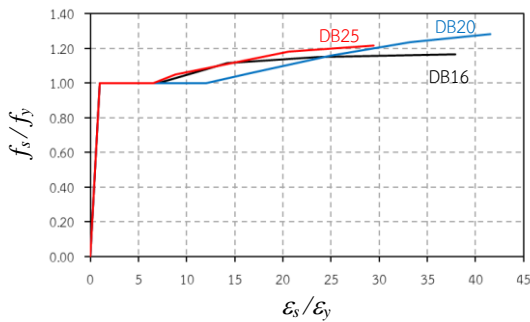


รูปที่ 1 การติดตั้งการทดสอบ

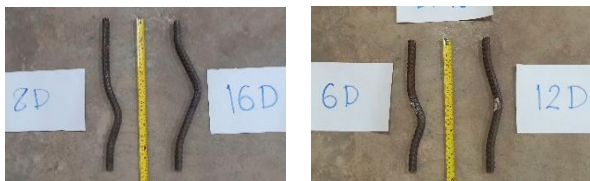
3. ผลการทดสอบ

จากการนำตัวอย่างเหล็กเส้นขนาด 16 mm 20 mm และ 25 mm ไปทดสอบรับแรงดึง จะได้กำลังคราก f_y เท่ากับ 527.2 MPa 481.6 MPa และ 543.9 MPa กำลังดึงประลัย f_u เท่ากับ 613.7 MPa 618.5 MPa และ 672.3 MPa ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงดึง โดยค่าที่แสดงจะทำให้หน่วยด้วยการหารความเค้นด้วยกำลังคราก และการหารความเครียดด้วยความเครียดที่จุดคราก ทั้งนี้ความเครียดวัดจากระยะยึดในช่วงความยาว เกจ 5D

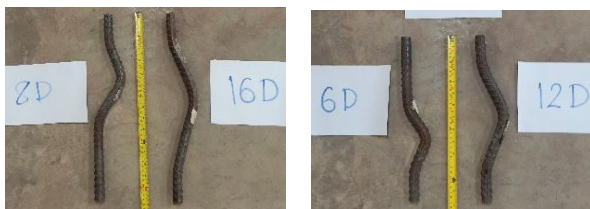
การทดสอบรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างจะทำโดยให้แรงอัดไปจนกระทั่งกำลังอัดตกลงมาที่ 50% ของกำลังคราก รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างเหล็กเส้นหลังการทดสอบ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ไม่มีการยับยั้งการโก่งเดาะจะมีความยาวช่วงการโก่งเดาะเท่ากับความยาว L (เท่ากับ 16D หรือ 12D) ในขณะที่ตัวอย่างที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่กึ่งกลางช่วงจะเกิดการโก่งเดาะในช่วงความยาวที่ลดลงเป็น $L/2$ (8D หรือ 6D)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงดึง



(น) DB 16

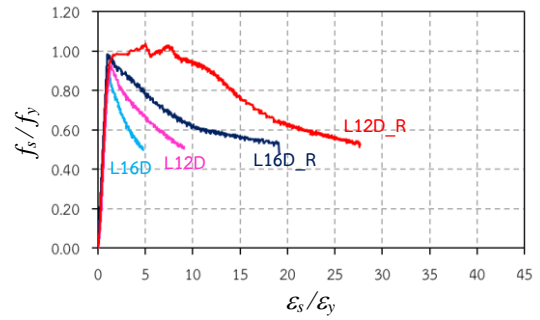


(ข) DB 20

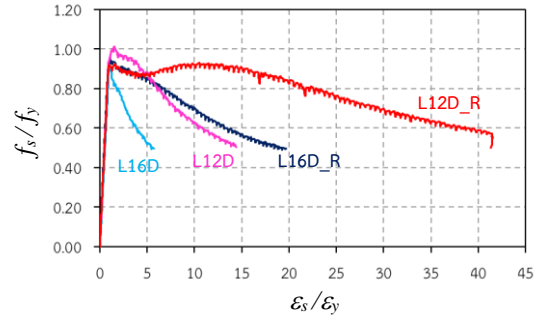


(ค) DB 25

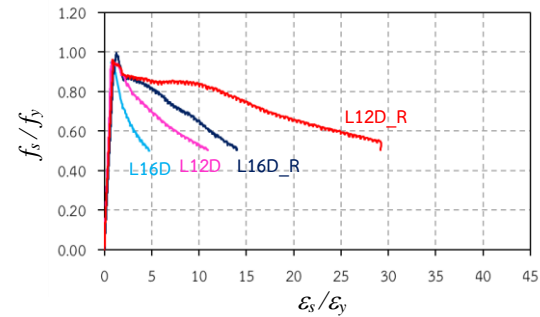
รูปที่ 3 ลักษณะการโก่งเดาะของตัวอย่างทดสอบ



(น) DB16



(ข) DB20



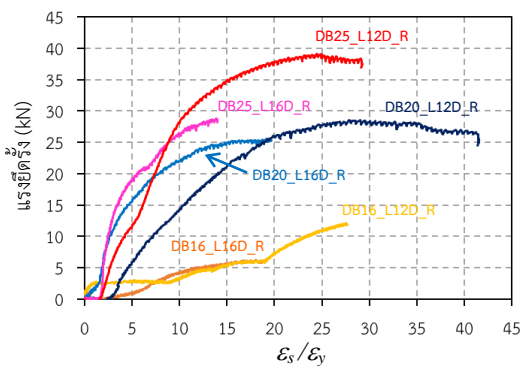
(ค) DB25

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงอัด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงอัด โดยแสดงผลเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างที่ไม่มีการยับยั้งการโก่งเดาะ ค่าความเค้นคำนวณจากแรงอัดหารด้วยพื้นที่หน้าตัด ค่าความเครียดในช่วงก่อนการโก่งเดาะจะใช้ค่าจากอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gages) ที่ติดไว้กับตัวอย่างทดสอบ ในช่วงหลังการโก่งเดาะจะใช้ค่าความเครียดเฉลี่ยที่คำนวณจากระยะยึดตัวที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดระยะ (LVDTs) หารด้วยความยาว L ของแต่ละตัวอย่างทดสอบ จากรูปจะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเหล็กรับแรงอัดถึงกำลังที่จุดครากแล้วและเกิดการโก่งเดาะในช่วงไม่ยืดหยุ่น (Inelastic buckling) แต่ในตัวอย่างที่เกิดการโก่งเดาะในช่วง L (16D และ 12D) จะมีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในตัวอย่างที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่กึ่งกลางช่วงแล้วเกิดการโก่งเดาะในช่วง $L/2$ (8D และ 6D) จะมีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงช้ากว่า โดยตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีความยาว L เท่ากับ 16D และมีการยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าความเครียดอัดเมื่อกำลังอัดลดลงเป็น 50% ของกำลังครากประมาณ 15 เท่าของความเครียดที่จุดคราก และตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีความยาว L เท่ากับ 12D และมีการยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าความเครียดอัดเมื่อแรงอัดลดลงเป็น 50% ของกำลังครากประมาณ 25 เท่าของความเครียดที่จุดคราก สิ่งที่น่าสนใจคือเหล็กที่มีระยะการโก่งเดาะเท่ากับ 6D กำลังรับแรงอัดจะไม่ตกลงแบบทันทีหลังผ่านจุดครากแต่

จะมีค่าค่อนข้างคงที่หรือลดลงจากกำลังรับแรงอัดที่จุดครากเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเหล็กที่มีระยะการโก่งเดาะ 8D จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดลดลงทันทีหลังจากจุดคราก จึงพอสรุปได้ว่าอัตราส่วนความยาวช่วงการโก่งเดาะต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะคล้ายการครากของเหล็กเส้นเมื่อรับแรงดึง จากข้อมูลการออกแบบการเสริมกำลังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กปลอกเรียงห่างหรือเหล็กปลอกมีความแข็งแรงไม่เพียงพอควรพิจารณาควบคุมให้เหล็กเกิดการโก่งเดาะในช่วงความยาว 6D

การทดสอบตัวอย่างที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะ จะทำการวัดแรงที่ยึดรั้งไว้ด้วย รูปที่ 5 แสดงแรงที่ยึดรั้งที่ความเครียดอัดใด ๆ จะเห็นว่าแรงยึดรั้งจะเกิดขึ้นเมื่อเหล็กเส้นถูกอัดผ่านจุดครากแล้ว โดยแรงยึดรั้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แรงยึดรั้งสูงสุดจะมีค่ามากเมื่อเหล็กมีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ และแรงที่ใช้ยึดรั้งเหล็กเส้นที่มีความยาว $L=12D$ จะมากกว่าเหล็กเส้นที่มีความยาว $L=16D$ โดยแรงยึดรั้งที่กำลังอัดลดลงเหลือ 80% และ 50% ของกำลังคราก จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งค่าของแรงยึดรั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบการเสริมกำลังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อยับยั้งการโก่งเดาะที่จะเกิดขึ้นได้



รูปที่ 5 แรงยึดรั้งการโก่งเดาะ

ตารางที่ 2 แรงยึดรั้งที่กำลังอัดลดลงเหลือ 80% และ 50% ของกำลังคราก

ชื่อตัวอย่าง	แรงยึดรั้งที่กำลังอัดเหลือ 80% (KN)	แรงยึดรั้งที่กำลังอัดเหลือ 50% (KN)
DB16_L16D_R	1	6
DB16_L12D_R	5	12
DB20_L16D_R	18	25
DB20_L12D_R	27	28
DB25_L16D_R	20	28
DB25_L12D_R	31	38

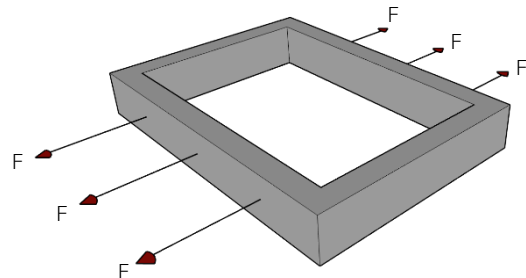
4. แนวทางการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

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 ดังแสดงในรูปที่ 6 จากรายละเอียดหน้าตัดเสา คาดว่าเหล็กเสริมตามยาวในเสาจะเกิดการโก่งเดาะในช่วงระยะระหว่างเหล็กปลอก 0.20 m เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความ

จะลุดจะได้ L/D เท่ากับ 10 ซึ่งคาดว่ากำลังอัดคงจะตกลงอย่างรวดเร็วหลังจากเหล็กเสริมคราก หากทำการเสริมกำลังให้เสาโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบนเพื่อควบคุมการโก่งเดาะให้มีอัตราส่วนความลุดเท่ากับ 6 จะได้ระยะเรียงเท่ากับ $6D = 0.12$ m ในที่นี้จะพิจารณาว่าเกิดการโก่งเดาะทางด้านยาว หากต้องการให้ความเครียดอัดของเสาประมาณ 10 เท่าของความเครียดที่จุดคราก แรงยึดรั้งของตัวอย่างเหล็กเส้นขนาด DB20 จากรูปที่ 5 จะมีค่าประมาณ $F=15$ kN แรงยึดรั้งนี้จะกระทำต่อเหล็กโอบรัดตั้งรูปที่ 7 เมื่อคำนวณค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเส้นแบนจะได้ค่าประมาณ 1.0 kN-m เมื่อนำไปเลือกขนาดเหล็กเส้นแบนพบว่าต้องใช้เหล็กเส้นแบนที่กว้าง 50 mm และหนา 25 mm ที่มีค่าโมดูลัสหน้าตัด Z เท่ากับ 5208 mm³ โดยการเสริมกำลังที่ป้องกันการโก่งเดาะจะทำเฉพาะจุดที่เสารับโมเมนต์ดัดมาก ๆ เท่านั้น แนวทางการเสริมกำลังนี้จะทำการศึกษาต่อไป โดยทำการทดสอบให้เสาที่เสริมกำลังรับแรงอัดและแรงดัดข้าง



รูปที่ 6 ตัวอย่างหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 7 แรงกระทำเหล็กเส้นแบนโอบรัดเสา

5. สรุปผล

จากการผลการทดสอบเพื่อศึกษาแรงเพื่อยับยั้งการโก่งของเหล็กเส้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- ตัวอย่างเหล็กเส้นที่ไม่มีการยับยั้งการโก่งเดาะ (เหล็กโก่งเดาะในช่วงความยาว 16D และ 12D) จะมีกำลังอัดที่ลดลงจากจุดครากอย่างรวดเร็ว โดยกำลังอัดลดลงมาที่ 50% ของกำลังคราก เมื่อความเครียดอัดประมาณ 5 เท่า และ 10 ของความเครียดที่จุดคราก สำหรับเหล็กโก่งช่วง 16D และ 12D ตามลำดับ
- การยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงความยาว ไม่ได้ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการโก่งเดาะเกิดขึ้นหลังจากแรงอัดถึงกำลังครากแล้ว แต่จะช่วยเหลือไม่ให้กำลังอัดตกลงเร็ว โดยกำลังอัดลดลงมาที่ 50% ของกำลังคราก เมื่อความเครียดอัดประมาณ 16 เท่า และ 25 ของความเครียดที่จุดคราก สำหรับเหล็กโก่งช่วง 8D และ 6D ตามลำดับ
- ตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่ทำให้เหล็กโก่งในช่วงระยะ 6D กำลังรับแรงอัดหลังจุดครากจะตกลงเพียงเล็กน้อยและยังคงกำลัง

อัดได้ไปถึง 10 เท่าของความเครียดคราก ในขณะที่ตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่ทำให้เหล็กโก่งในช่วงระยะ 8D กำลังอัดจะตกลงทันทีหลังจากจุดคราก ดังนั้น การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควรยับยั้งการโก่งเดาะที่ระยะ 6D

4. แรงยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการโก่งเดาะมากขึ้น โดยแรงยับยั้งให้เกิดการโก่งเดาะ 6D จะมากกว่าการโก่งเดาะ 8D และแรงยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดเหล็กเส้น โดยแรงที่ได้จากการศึกษานี้จะมีประโยชน์ในการออกแบบวิธีเสริมกำลังในเสาต่อไป

5. จากผลการศึกษานี้ทำให้ตั้งข้อสังเกตได้ว่าการศึกษารเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการโก่งเดาะของเหล็กตามยาวโดยทำการทดสอบ ไม่ควรลดสเกลของเสาเนื่องจากแรงยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าต่างกัน ทำให้พฤติกรรมของเสาที่ลดสเกลไม่แสดงผลกระทบจากการโก่งเดาะที่แท้จริงได้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการจัดตั้งหน่วยความเป็นเลิศ (UoE) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ของมหาวิทยาลัยพะเยา และขอขอบคุณบุคลากรห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ช่วยจัดหาเครื่องมือสำหรับการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Onat, O., Yön, B., Öncü, M.E., Varolgüneş, S., Karaşin A. and Cemalgil, S. (2022). Field reconnaissance and structural assessment of the October 30, 2020, Samos, Aegean Sea earthquake: an example of severe damage due to the basin effect. *Natural Hazards*, 112, pp.75-117.
- [2] Lukkunaprasit, P., Ruangrassamee, A., Boonyatee, T., Chintanapakdee, C., Jankaew, K., Thanasisathit, N. and Chandrangsu, T. (2015). Performance of structures in the Mw 6.1 Mae Lao earthquake in Thailand on May 5, 2014 and implications for future construction. *Journal of Earthquake Engineering*, 20(2), pp.219-242.
- [3] Lynn, A.C., Moehle, J.P., Mahin, S.A. and Holmes, W.T. (1996). Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns. *Earthquake Spectra*, 12(4), pp.715-739.
- [4] Dhakal, R.P. and Maekawa, K. (2002). Modeling for postyield buckling of reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(9), pp.1139-1147.
- [5] Gomes, A. and Appleton, J. (1997). Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling. *Engineering Structures*, 19(10), pp.822-826.
- [6] Dhakal, R.P. and Maekawa, K. (2002). Reinforcement stability and fracture of cover concrete in reinforced concrete members. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(10), pp.1253-1262.
- [7] คณะทำงาน มยผ. 1301 (2007). มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย.
- [8] Lukkunaprasit, P. and Sittipunt, C. (2003). Ductility enhancement of Moderately Confined Concrete Tied

Columns with hook-clips. *ACI Structural Journal*, 100(4), pp. 422-429.

- [9] Truong, G. T., Kim, J-C. and Choi, K-K. Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. *Engineering Structures*, (2017). Volume 134, Pages 217-235.