แรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้น
Buckling-Restrained Forces of Reinforcing Bars

อนันทพงษ์ กระจาย[1] สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน[2,*] ปรีดา ไชยมหาวัน[3] และ ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์[4]

[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

โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะมีการเสริมเหล็กปลอกค่อนข้างห่างและมีโอกาสเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวแล้วดันให้คอนกรีตหุ้มแตกหากเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง ดังนั้นการเสริมกำลังในเสาจึงจำเป็นต้องยับยั้งการโก่งเดาะนี้ การศึกษานี้ทำการทดสอบกำลังอัดของเหล็กเส้นที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะ ตัวอย่างเหล็กเส้นเป็นเกรด SD40 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กจะเพิ่มมากขึ้นหลังจากจุดครากและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเครียดอัดที่เพิ่มขึ้น 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 จึงทำให้โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารดังกล่าวอาจเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรง ดังที่พบเห็นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวรุนแรงที่เกิดขึ้นในอดีต ยกตัวอย่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศกรีซและตุรกี ขนาด 6.9-7.0 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ. 2563 ที่มีอาคารพังถล่มลงมาแล้วทำให้มีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บเป็นจำนวนมาก [1] และเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยขนาด 6.1 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ที่มีโครงสร้างอาคารเสียหายจำนวนมากโดยเฉพาะอาคารเก่าที่ก่อสร้างมานาน [2] จากการศึกษาของ Lynn et al. [3] ที่ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารที่ก่อสร้างก่อนปี ค.ศ.1970 ซึ่งเหล็กปลอกในเสาค่อนข้างห่างคล้ายเสาในประเทศไทยที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเรียงเหล็กปลอกที่ห่างนั้นทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติแบบเฉือนและมีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวดันให้คอนกรีตหุ้มแตกออก ส่งผลเสามีพฤติกรรมที่มีความเหนียวจำกัดหรือมีความสามารถในการโยกตัวด้านข้างได้น้อย ดังนั้น เพื่อลดการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงกว่าที่คาดการณ์ไว้ โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารเก่าในประเทศไทยจึงจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว

จากการศึกษาของ Dhakal and Maekawa [4] และ Gomes and Appleto [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้นและเสนอสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้นที่รับแรงอัดแล้วเกิดการโก่งเดาะ พฤติกรรมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูด L/D โดยที่ L คือ ความยาวช่วงการโก่งเดาะ และ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้าอัตราส่วนความชะลูดมากจะทำให้กำลังรับแรงอัดตกลงจากจุดครากอย่างรวดเร็ว จากการศึกษากำลังอัดจะตกลงไม่มากเมื่ออัตราส่วนความชะลูดมีค่าอยู่ในช่วง 5-6 ดังนั้น การยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในเสาที่มีเหล็กปลอกเรียงห่าง จึงควรเน้นไปที่การควบคุมให้เหล็กเส้นเกิดการโก่งเดาะในช่วงอัตราส่วนความชะลูดที่ 5-6 นอกจากนี้ Dhakal and Maekawa [6] ได้เสนอค่าความแข็งของสปริงที่จะยึดรั้งให้เหล็กเส้นโก่งเดาะที่ช่วงความยาว L ใด ๆ การศึกษาพบว่าการควบคุมให้เหล็กเส้นโก่งเดาะในช่วงความยาว L ที่สั้น (อัตราส่วนความชะลูดน้อย L/D น้อย) จะมีความต้องการความแข็งของสปริงที่มากกว่าเหล็กเส้นที่มีการโก่งเดาะในช่วงความยาว L ที่ยาว (อัตราส่วนความชะลูดมาก L/D มาก) แต่การศึกษาไม่ได้เสนอเป็นค่าแรงยึดรั้งจึงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการออกแบบเสริมกำลังเสาคอนกรีตเพื่อยับยั้งการโก่งเดาะได้

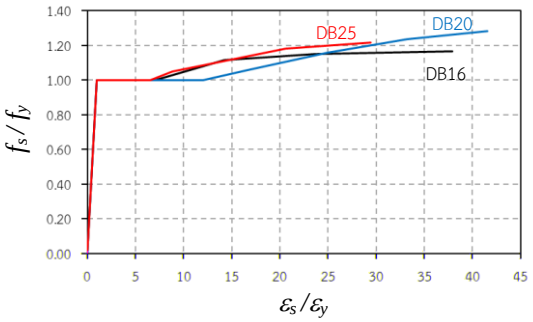
ประเทศไทยหลังปี พ.ศ. 2550 อาคารสาธารณะหรืออาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 15 เมตร ขึ้นไปในเขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว จะถูกบังคับให้ทำการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวด้วย โดยมีมาตรฐานประกอบการ

ออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301) ที่ให้แนวทางการเสริมเหล็กที่ทำโครงสร้างมีความเหนียวจำกัด [7] โดยช่วงวิกฤตบริเวณปลายเสาทั้งด้านบนและด้านล่างจะต้องทำการเสริมเหล็กปลอกที่มีระยะเรียงลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง คือ ครึ่งหนึ่งของความลึก

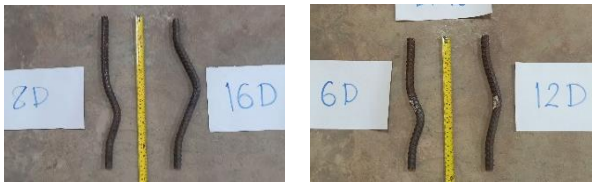
3. ผลการทดสอบ

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 โดยค่าที่แสดงจะทำให้ไร้หน่วยด้วยการหารความเค้นด้วยกำลังคราก และการหารความเครียดด้วยความเครียดที่จุดคราก ทั้งนี้ความเครียดวัดจากระยะยืดในช่วงความยาวเกจ 5*D*

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



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงดึง



(ก) DB 16

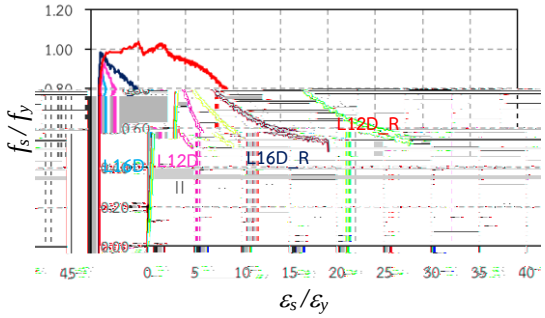


(ข) DB 20

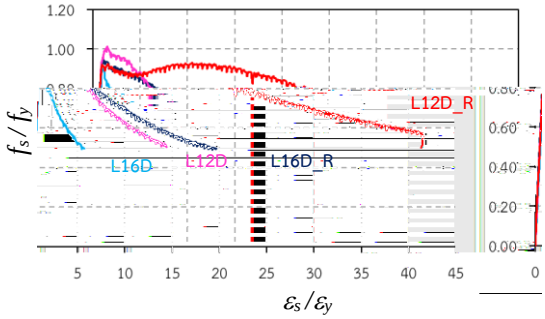


(ค) DB 25

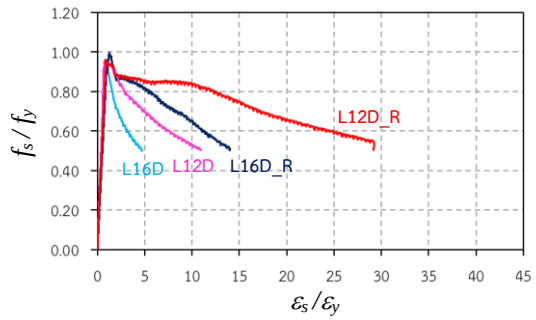
รูปที่ 3 ลักษณะการโก่งเดาะของตัวอย่างทดสอบ



(ก) DB16



(ข) DB20



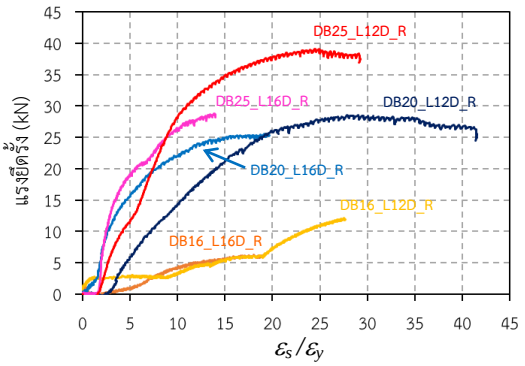
(ค) DB25

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงอัด

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

จะมีค่าค่อนข้างคงที่หรือลดลงจากกำลังรับแรงอัดที่จุดครากเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเหล็กที่มีระยะการโก่งเดาะ 8*D* จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดลดลงทันทีหลังจากจุดคราก จึงพอสรุปได้ว่าอัตราส่วนความยาวช่วงการโก่งเดาะต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะคล้ายการครากของเหล็กเส้นเมื่อรับแรงดึง จากข้อมูลนี้การออกแบบการเสริมกำลังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กปลอกเรียงห่างหรือเหล็กปลอกมีความแข็งแรงไม่เพียงพอควรพิจารณาควบคุมให้เหล็กเกิดการโก่งเดาะในช่วงความยาว 6*D*

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



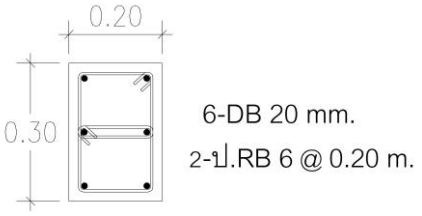
รูปที่ 5 แรงยับยั้งการโก่งเดาะ

ตารางที่ 2 แรงยึดรั้งที่กำลังอัดลดลงเหลือ 80% และ 50% ของกำลังคราก

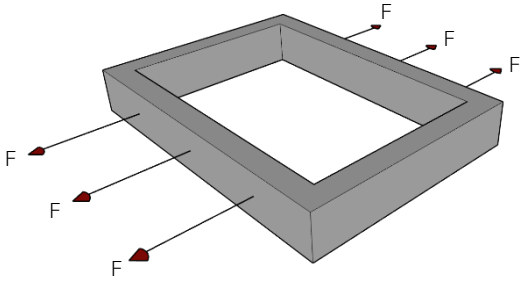
ชื่อตัวอย่าง	แรงยึดรั้งที่กำลังอัดเหลือ 80% (kN)	แรงยึดรั้งที่กำลังอัดเหลือ 50% (kN)
DB16_L16D_R	1	6
DB16_L12D_R	5	12
DB20_L16D_R	18	25
DB20_L12D_R	27	28
DB25_L16D_R	20	28
DB25_L12D_R	31	38

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 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความชะลูดจะได้ L/D เท่ากับ 10 ซึ่งคาดว่ากำลังอัดคงจะตกลงอย่างรวดเร็วหลังจากเหล็กเสริมคราก หากทำการเสริมกำลังให้เสาโดยการโอบรัดด้วยเหล็กเส้นแบนเพื่อควบคุมการโก่งเดาะให้มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 6 จะได้ระยะเรียงเท่ากับ 6*D* = 0.12 m ในที่นี้จะพิจารณาว่าเกิดการโก่งเดาะทางด้านยาว หากต้องการให้ความเครียดอัดของเสาประมาณ 10 เท่าของความเครียดที่จุดคราก แรงยึดรั้งของตัวอย่างเหล็กเส้นขนาด DB20 จากรูปที่ 5 จะมีค่าประมาณ F=15 kN แรงยึดรั้งนี้จะกระทำต่อเหล็กโอบรัดดังรูปที่ 7 เมื่อคำนวณค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเส้นแบนจะได้ค่าประมาณ 1.0 kN-m เมื่อนำไปเลือกขนาดเหล็กเส้นแบนพบว่าต้องใช้เหล็กเส้นแบนที่กว้าง 50 mm และหนา 25 mm ที่มีค่าโมดูลัสหน้าตัด Z เท่ากับ 5208 mm^3 โดยการเสริมกำลังที่ป้องกันการโก่งเดาะจะทำเฉพาะจุดที่เสารับโมเมนต์ดัดมาก ๆ เท่านั้น แนวทางการเสริมกำลังนี้จะทำการศึกษาต่อไปโดยทำการทดสอบให้เสาที่เสริมกำลังรับแรงอัดและแรงด้านข้าง



รูปที่ 6 ตัวอย่างหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 7 แรงกระทำเหล็กเส้นแบนโอบรัดเสา

5. สรุปผล

จากการผลการทดสอบเพื่อศึกษาแรงเพื่อยับยั้งการโก่งของเหล็กเส้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวอย่างเหล็กเส้นที่ไม่มีการยับยั้งการโก่งเดาะ (เหล็กโก่งเดาะในช่วงความยาว 16*D* และ 12*D*) จะมีกำลังอัดที่ลดลงจากจุดครากอย่างรวดเร็ว โดยกำลังอัดลดลงมาที่ 50% ของกำลังคราก เมื่อความเครียดอัดประมาณ 5 เท่า และ 10 ของความเครียดที่จุดคราก สำหรับเหล็กโก่งช่วง 16*D* และ 12*D* ตามลำดับ

2. การยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงความยาวไม่ได้ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการโก่งเดาะเกิดขึ้นหลังจากแรงอัดถึงกำลังครากแล้ว แต่จะช่วยชะลอไม่ให้กำลังอัดตกลงเร็ว โดยกำลังอัดลดลงมาที่ 50% ของกำลังคราก เมื่อความเครียดอัดประมาณ 16 เท่า และ 25 ของความเครียดที่จุดคราก สำหรับเหล็กโก่งช่วง 8*D* และ 6*D* ตามลำดับ

3. ตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่ทำให้เหล็กโก่งในช่วงระยะ 6*D* กำลังรับแรงอัดหลังจุดครากจะตกลงเพียงเล็กน้อยและยังคงกำลัง

อัดได้ไปถึง 10 เท่าของความเครียดคราก ในขณะที่ตัวอย่างเหล็กเส้นที่มีการยับยั้งการโก่งเดาะที่ทำให้เหล็กโก่งในช่วงระยะ 8*D* กำลังอัดจะตกลงทันทีหลังจากจุดคราก ดังนั้น การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควรยับยั้งการโก่งเดาะที่ระยะ *6D*

4. แรงยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการโก่งเดาะมากขึ้น โดยแรงยับยั้งให้เกิดการโก่งเดาะ *6D* จะมากกว่าการโก่งเดาะ 8*D* และแรงยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดเหล็กเส้น โดยแรงที่ได้จากการศึกษานี้จะมีประโยชน์ในการออกแบบวิธีเสริมกำลังในเสาต่อไป

5. จากผลการศึกษานี้ทำให้ตั้งข้อสังเกตได้ว่าการศึกษาการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการโก่งเดาะของเหล็กตามยาวโดยทำการทดสอบ ไม่ควรลดสเกลของเสาลงเนื่องจากแรงยับยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าต่างกัน 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.