

การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงแผ่นดินไหว ด้วยการคาดรัดของเหล็กเส้นแบน

Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Columns by Banding Reinforcement of Steel Flat Bar

สมบูรณ์ เชียงฉิน^{1,*} อนันตพงษ์ กระจาย² และ ปรีดา ไชยมหาวัน³

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

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

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในระดับที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงมีข้อกังวลว่าเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างมาก่อนมีกฎหมายบังคับเกี่ยวกับแรงแผ่นดินไหวนั้น จะมีกำลังรับแรงแผ่นดินไหวเพียงพอหรือมีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนที่ไม่สามารถสลายพลังงานได้ดี เสาของอาคารที่ตั้งในพื้นที่เสี่ยงภัยจึงควรได้รับการเสริมกำลังให้มีสมรรถนะในการรับแรงแผ่นดินไหวที่เหมาะสม การศึกษานี้จึงเสนอแนวทางการเสริมกำลังเสาด้วยการคาดรัดของเหล็กเส้นแบนเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเส้นตามยาว การพิจารณาประสิทธิภาพการเสริมกำลังทำด้วยการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดกว้าง 200 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร สูง 1.25 เมตร โดยให้แรงอัดคงที่และแรงดัดข้างแบบสลับทิศ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนช่วยเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากการวิบัติแบบเฉือนเป็นการวิบัติแบบดัดได้ จึงทำให้เสามีกำลังรับแรงดัดข้างที่สูงขึ้น และการคาดรัดช่วยเพิ่มความเหนียวและประสิทธิภาพในการสลายพลังงานได้อย่างชัดเจน ดังนั้น การคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการเสริมกำลังในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย

คำสำคัญ: การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, การคาดรัด, เหล็กเส้นแบน, สลายพลังงาน, รูปแบบการวิบัติ

Abstract

Thailand is prone to higher level of earthquake risk. There is a concern that the columns of reinforced concrete buildings constructed before the enforced regulation of seismic force have insufficient strength to withstand earthquakes or shear failure characteristic that does not dissipate energy well. Therefore, the columns of buildings located in risky areas should be properly strengthening to increase the capacity and ductility.

This study proposes a method of banding reinforcement of steel flat bar to increase shear strength and prevent longitudinal buckling of longitudinal rebar. Efficiency determination of strengthening is made by testing reinforced concrete columns with a cross-sectional size of 200x300 mm² and 1.25 m high under compressive and cyclic lateral loads. Test results show that steel flat bar strapping can change the failure mode from shear failure to flexural failure. The banding is not only increased higher lateral capacity but also significantly improved ductility and energy dissipation. Therefore, the proposed steel flat bar strapping is another option for seismic strengthening of RC columns of buildings that are not earthquake designed in Thailand.

Keywords: strengthening of RC columns, confinement, steel flat bar, energy dissipation, modes of failure

1. บทนำ

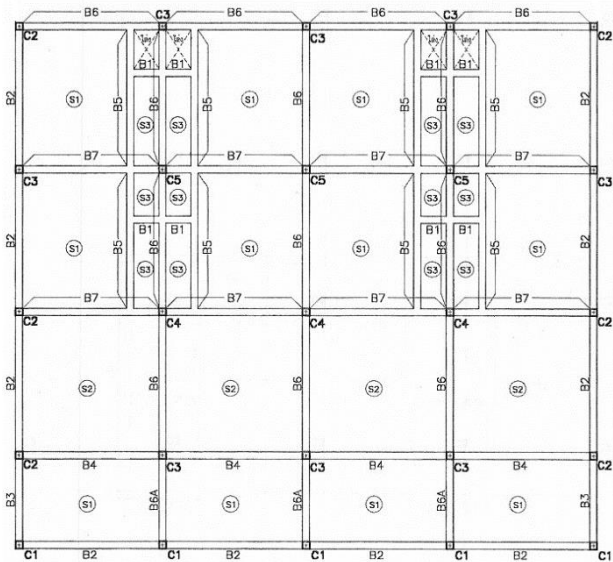
จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีต อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงประมาณ 3-4 ชั้น ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยบริเวณภาคเหนือจะได้รับความเสียหายมาก เนื่องจากโครงสร้างของอาคารมีความถี่ธรรมชาติที่พ้องกับความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว แต่อาคารที่ก่อสร้างก่อนมีกฎหมายบังคับเกี่ยวกับแรงแผ่นดินไหวจะมีโครงสร้างเสาที่เสริมเหล็กปลอกที่น้อย และไม่ได้ออกแบบให้โครงสร้างเสามีความเหนียว ในปี พ.ศ. 2550 ได้มีกฎกระทรวงเกี่ยวกับแรงแผ่นดินไหว และมีมาตรฐาน มยผ. 1301 การเสริมเหล็กให้โครงสร้างมีความเหนียวจำกัด [1] โดยมีข้อกำหนดให้ลดระยะเรียงการเสริมเหล็กปลอกครึ่งหนึ่งเป็น 8 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก และครึ่งหนึ่งของหน้าตัดเสาที่สั้นสุด จึงทำให้โครงสร้างเสามีความแข็งแรงที่จะรับแรงแผ่นดินไหว แต่ผู้ออกแบบไม่ได้ควบคุมให้การวิบัติในโครงสร้างเสาเป็นแบบดัด หากเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงกว่าข้อกำหนด โครงสร้างเสาอาจวิบัติจากแรงเฉือนได้

ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติที่ทำให้โครงสร้างเสถียรแบบทันทีและไม่สามารถสลายพลังงานได้ดี ดังนั้น โครงสร้างเสา (โดยเฉพาะเสาชั้น 1) จะต้องทำการเสริมกำลังให้เสามีกำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าแรงเฉือนที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบดัด

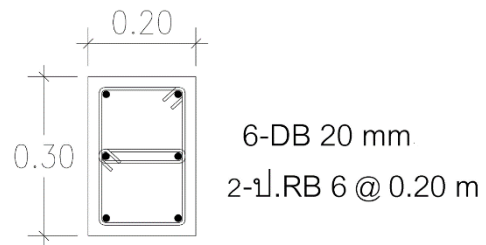
โครงสร้างเสาที่มีความเหนียวและสลายพลังงานได้ดี จะมีการวิบัติแบบดัดโดยที่เหล็กเสริมตามยาวคราก ACI318 [2] กำหนดว่าโครงสร้างเสาจะมีความเหนียวถ้าเหล็กเสริมยึดเกินจุดครากไปถึงความเครียด 0.005 นอกจากนี้เหล็กเสริมตามยาวที่รับแรงอัดจะต้องไม่โค้งงอมาต้นคอนกรีตหุ้มให้แตกออก โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างจะพิจารณาจากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram) หากเสารับแรงอัดตามแนวแกนมาก โครงสร้างเสาจะวิบัติแบบอัด (Compression failure) เพราะที่กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดคอนกรีตรับแรงอัดถึงจุดแตกโดยที่เหล็กเสริมรับแรงดึงไม่ถึงจุดคราก แต่ถ้าโครงสร้างเสารับแรงอัดน้อย โครงสร้างเสาจะวิบัติแบบดึง (Tension failure) เพราะที่กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดคอนกรีตรับแรงอัดถึงจุดแตกหลังจากที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเลยจุดครากแล้ว โครงสร้างเสาที่วิบัติแบบอัดจะมีความเหนียว ในขณะที่โครงสร้างเสาที่วิบัติแบบดึงจะมีความเหนียวและสลายพลังงานจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้ดี ดังนั้น การเสริมกำลังโครงสร้างเสาจะต้องคำนึงด้วยว่าโครงสร้างเดิมนั้นมีลักษณะการวิบัติแบบใด การศึกษานี้จะมุ่งไปที่โครงสร้างเสาที่วิบัติแบบดึง ซึ่งสามารถสลายพลังงานได้ดี ถ้าทำการเสริมกำลังรับแรงเฉือนให้เพียงพอและป้องกันการโค้งงอของเหล็กเสริมตามยาวได้

2. การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้นำแบบโครงสร้างตึกแถวอนุรักษ์ ภาคเหนือ 4 ชั้น ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (โครงการแบบบ้านเพื่อประชาชน ไทยอนุรักษ์) ที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว มาใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อพิจารณาแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเสาชั้นล่างสุด โครงสร้างอาคารมีความสูง 17 m ความกว้าง 16 m และความยาว 15 m ความสูงจากพื้นถึงชั้นลอย เท่ากับ 2.50 m ชั้นลอยถึงพื้นชั้น 2 เท่ากับ 2.50 m และความสูงระหว่างชั้นถัดไปจะเท่ากับ 3.00 m จากแบบแปลนโครงสร้างคาน พื้นชั้นที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่ามีการสร้างเสาภายในอาคารที่จะต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกมาก ๆ คือ เสา C4 และ C5 ในการศึกษานี้ได้เลือกทำการศึกษาเสา C4 ซึ่งมีขนาดหน้าตัด 200x300 mm² ที่ชั้นล่างสุดมีการเสริมเหล็กตามยาว DB20 จำนวน 6 เส้น และมีเหล็กปลอก RB6 เรียงทุกระยะ 200 mm ดังรูปที่ 2 ในแบบโครงสร้างระบุกำลังอัดคอนกรีตไม่น้อยกว่า 20 MPa และใช้เหล็กข้ออ้อยเกรด SD40 เหล็กเส้นกลมเกรด SR24 ซึ่งมีกำลังดึงครากไม่น้อยกว่า 400 MPa และ 240 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยพิจารณาแรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน y ด้วยวิธีสเปกตรัมผลตอบสนองตามมาตรฐาน มผศ. 1301/1302 [3] จะพบว่าเสา C4 ชั้นล่างสุด (เสาจากพื้นถึงชั้นลอย) ต้องรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด ของการรวมแรง 4 กรณี ดังแสดงตารางที่ 1 โดยที่ DL คือน้ำหนักบรรทุกคงที่ LL คือน้ำหนักบรรทุกจร EQ คือแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 1 แบบแปลนโครงสร้างคาน พื้น ชั้นที่ 1 ของอาคารตัวอย่าง

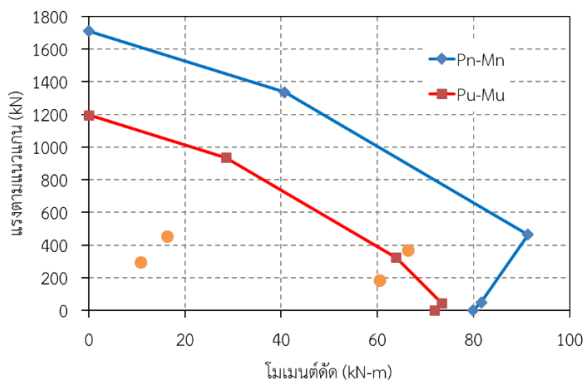


รูปที่ 2 หน้าตัดเสา C4 ของอาคารตัวอย่าง

ตารางที่ 1 แรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดภายในโครงสร้างเสา C4 ชั้นล่างสุด

การรวมแรง	แรงตามแนวแกน N (kN)	โมเมนต์ดัด M (kN-m)
(1) DL+LL	296.41	10.81
(2) 1.4DL+1.7LL	452.16	16.26
(3) 0.75(1.4DL+1.7LL)+EQ	369.26	66.34
(4) 0.9DL+EQ	185.37	60.47

จากการวิเคราะห์หน้าตัดเสา C4 จะได้แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram) ดังรูปที่ 3 เส้นนอกคือเส้น Pn-Mn เป็นเส้นที่พิจารณาให้โครงสร้างเสาวิบัติ เส้นในคือเส้น Pu-Mu คือเส้น Pn-Mn ที่คูณแฟกเตอร์ลดกำลัง ϕ เท่ากับ 0.70 สำหรับเสาที่วิบัติแบบอัด และ 0.90 สำหรับเสาที่วิบัติแบบดึง เมื่อนำค่าแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดดังแสดงในตารางที่ 1 มาแสดงจุดวงกลมในรูปที่ 3 จะเห็นว่าจุดของค่าแรงภายในอยู่ภายใน 3 กรณีการรวมแรง อยู่ในเส้นแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ Pu-Mu และมีเพียงกรณีการรวมที่ (3) ที่เลยเส้นแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ Pu-Mu เพียงเล็กน้อย แสดงว่าหน้าตัดเสาสามารถรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดได้ โดยเสริมความแข็งแรงให้คอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้นด้วยการโอบรัด



รูปที่ 3 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของหน้าตัดเสา C4

โดยทั่วไปการรับแรงเฉือนจะรับโดยคอนกรีตและเหล็กปลอก แต่ในกรณีที่ระยะเรียงเหล็กปลอกห่างกันมากกว่า $d/2$ โดยที่ d คือความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัดจะไม่พิจารณาให้เหล็กปลอกช่วยรับแรงเฉือน ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนจะรับโดยคอนกรีตเพียงอย่างเดียว กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c ของโครงสร้างเสาคำนวณได้ตามมาตรฐาน ACI318 [2] ดังสมการที่ (1)

$$V_c = \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \frac{\sqrt{f'_c}}{6} b_w d \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

โดยที่ N_u คือแรงอัดตามแนวแกน A_g คือพื้นที่หน้าตัดเสา f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีต b_w คือความกว้างหน้าตัดเสา และ d คือความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ของเสา C4 จะได้กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างเสามีกำลังรับแรงเฉือนออกแบบ ϕV_c ($\phi = 0.85$) ที่ต่ำกว่าแรงเฉือนจากการวิเคราะห์โครงสร้างในกรณีที่มีแรงแผ่นดินไหว ($\phi = 0.85$) ดังนั้นโครงสร้างเสาจึงต้องเสริมกำลังรับแรงเฉือนให้เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2 แรงเฉือนในโครงสร้างเสา C4 ชั้นล่างสุด

การรวมแรง	V_c (kN)	ϕV_c (kN)	แรงเฉือน V (kN)
(1) DL+LL	52.43	44.57	9.97
(2) 1.4DL+1.7LL	59.62	50.68	15.03
(3) 0.75(1.4DL+1.7LL)+EQ	55.79	47.43	53.77
(4) 0.9DL+EQ	47.31	40.21	48.26

อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวได้ควบคุมให้โครงสร้างเสาชั้นที่ 1 ควรมีความเหนียวที่เพียงพอโดยควบคุมให้โครงสร้างเสาเกิดการวิบัติแบบดัดและหลีกเลี่ยงการวิบัติแบบเฉือน เพื่อให้โครงสร้างอาคารไม่พังถล่มลงมาในกรณีที่ความรุนแรงของแผ่นดินไหวมากกว่าที่กฎหมายกำหนด เมื่อพิจารณาการรวมแรงกรณี (3) แรงตาม

แนวแกน $P = 369.26$ kN จากเส้น Pn-Mn ในรูปที่ 2 จะทำให้ทราบว่ารับโมเมนต์ดัดที่จุดวิบัติได้สูงสุด Mn ประมาณ 89 kN-m หากค่าโมเมนต์ดัด Mn เกิดขึ้นที่หัวเสาและโคนเสาจะคำนวณแรงเฉือนสูงสุด V_{max} ได้เท่ากับ $2Mn/L$ เมื่อแทนค่า Mn และความสูงของเสา C4 ที่ 2.50 m จะได้ V_{max} เท่ากับ 71.2 kN ซึ่งมากกว่าแรงเฉือนจากการวิเคราะห์ จึงทำนายได้ว่าหากมีแรงแผ่นดินไหวที่รุนแรง โครงสร้างเสานี้จะวิบัติแบบเฉือนและพังทลายทันที ดังนั้น โครงสร้างเสานี้จึงจำเป็นต้องเสริมกำลังรับแรงเฉือนให้สูงกว่าแรงเฉือนสูงสุด V_{max} ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่จุดวิบัติ ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างเสานี้เปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแบบเฉือนเป็นการวิบัติแบบดัด ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างเสาสามารถสลายพลังงานได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติเป็นแบบดัดแล้ว จะต้องระวังการโก่งค้ำของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งจะไดกล่าวต่อไปในหัวข้อการเสริมกำลังเสา

3. การเสริมกำลังโครงสร้างเสาตัวอย่าง

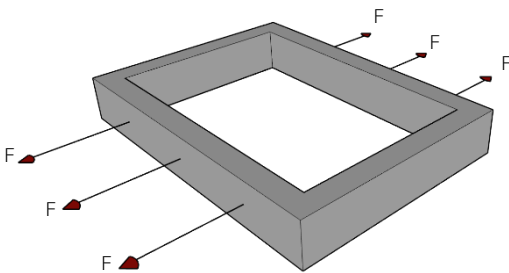
Truong et al. [4] ศึกษาการเสริมความแข็งแรงให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รับแรงแผ่นดินไหวในประเทศเกาหลี การเสริมความแข็งแรงจะใช้วิธีการนำวัสดุมาหุ้มเสา วัสดุที่นำมาใช้ ได้แก่ แผ่นเหล็กหนา 3 mm แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และคอนกรีตแบบไม่หดตัวเสริมเหล็ก โดยหุ้มเสาตลอดความยาวเสา เพื่อยึดเสาดิมกับวัสดุที่หุ้มจะมีการเสียบเหล็กเดียวไว้กับเสาดิมด้วย ผลจากการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเสริมความแข็งแรงแล้วเสามีความสามารถในการรับแรงด้านข้างและการโยกตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นมาก การเสริมแรงด้วยแผ่นเหล็กจะมีจุดเด่นในการเพิ่มความสามารถในการโยกตัวเพราะมีความเหนียวจากแผ่นเหล็กมาช่วยในการรับแรง แต่การเสริมความแข็งแรงด้วยคอนกรีตไม่หดตัวหุ้มจะมีจุดเด่นในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงด้านข้างเพราะมีพื้นที่หน้าตัดที่ขยายขึ้น ส่วนการหุ้มด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะต้องทำการปรับขอบเสาให้โค้งมนเพื่อให้โอบรัดได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีราคาแพง

Sirimontree et al. [5] ศึกษาการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานด้วยการอัดแรงตามขวางภายนอกให้กับคานโดยใช้เหล็กเกลียวอัดแรงขนาด 12.7 mm บีบอัดแรงตามแนวขวางของคาน ผลการทดสอบพบว่าคานจะมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นโดยไม่มียอยแตกร้าวในแนวทแยงขนาดใหญ่เกิดขึ้น จึงทำให้คานรับแรงได้มากขึ้นและแอนตัวได้มากขึ้น

จากที่กล่าวข้างต้น การเสริมกำลังเสาที่มีการเจาะเสียบเสาดิมหรือปรับแต่งเสาดิม เจ้าของอาคารอาจมีความกังวลถึงความแข็งแรงของโครงสร้างเสาดิม ผู้วิจัยจึงนำแนวคิดจากการศึกษาของ Sirimontree et al. [5] มาประยุกต์ใช้โดยใช้เหล็กเส้นแบนมาค้ำรัดเสาเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและค้ำรัดป้องกันการโก่งค้ำของเหล็กเสริมตามยาวโดยไม่ต้องเจาะเสียบกับโครงสร้างเสาดิมน่าจะเป็นวิธีที่ดีเพราะเจ้าของอาคารไม่กังวลต่อความเสียหายของเสาดิม และเหล็กเส้นแบนเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย

การศึกษาของ อนันท์พงษ์ และคณะ [6] และ Dhakal and Maekawa [7] พบว่าเหล็กเสริมตามยาวที่มีความยาวช่วงโก่งค้ำ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (6D) รับแรงอัดได้ดีโดยกำลังรับแรงอัดไม่ตกลงเร็วหลังจากรับแรงอัดถึงจุดคราก และแรงที่ใช้ยับยั้งการโก่งค้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตาม

ความเครียดอัด [6] ดังนั้น การเสริมกำลังเพื่อควบคุมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวจะต้องกำหนดว่าเหล็กเสริมตามยาวจะรับแรงอัดไปถึงความเครียดใด ในการศึกษาเลือกใช้ความเครียดของเหล็กรับแรงอัดที่ 0.02 แรงที่ใช้ยังยั้งการโก่งเดาะจะมีค่าประมาณ $F = 15 \text{ kN}$ เมื่อนำแรงนี้ไปกระทำกับเหล็กเส้นแบนโอบรัดดังรูปที่ 4 เหล็กเส้นแบนจะโก่งออกด้านข้างทำให้มีค่าโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นประมาณ 1 kN-m เมื่อนำไปเลือกขนาดเหล็กเส้นแบนพบว่าต้องใช้เหล็กเส้นแบนที่กว้าง 50 mm และหนา 25 mm จึงจะรับโมเมนต์ดัดนี้ได้ เนื่องจากเหล็กมีความหนาที่เพียงพอจึงใช้วิธีการยึดแต่ละด้านด้วยสกรูขนาด M10 เกรด 8.8 เกลียว 1.25 mm จำนวน 2 ตัว ที่แต่ละมุม ดังรูปที่ 5 ระยะเกลียวทั้งหมด 50 mm ซึ่งมีกำลังคราก 640 MPa กำลังรับแรงเฉือน 480 MPa เมื่อนำมาคำนวณกำลังรับแรงดึงของสกรูได้ 50.2 kN/ตัว และแรงเฉือนได้ 37.6 kN/ตัว ซึ่งเพียงพอที่จะนำไปใช้เสริมกำลังเสารับแรงเฉือนและป้องกันการโก่งเดาะ



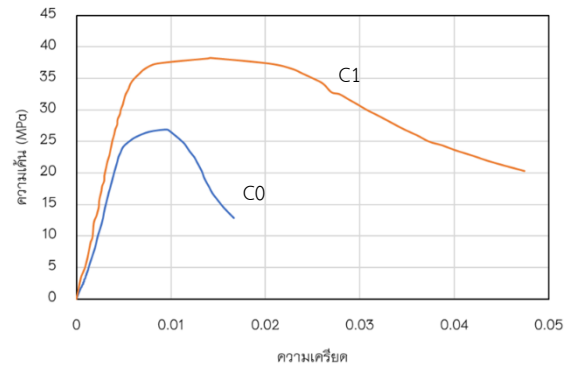
รูปที่ 4 แรงกระทำเหล็กเส้นแบนโอบรัด



รูปที่ 5 เหล็กเส้นแบนที่ยึดด้วยสกรู

ก่อนที่จะทำการทดสอบโครงสร้างเสารับแรงด้านข้างเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังโดยการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบน เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเหล็กคาดรัดนี้สามารถโอบรัดเสาคอนกรีตแล้วป้องกันการโก่งเดาะและช่วยเพิ่มความเครียดอัดให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ จึงทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดดังรูปที่ 1 สูง 450 mm โดยมีเหล็กปลอกที่ด้านบน ตรงกลาง และด้านท้าย โดยมีระยะเรียง 200 mm รับแรงอัดตามแนวแกน เสาต้นแรก C0 เป็นตัวอย่างเสาที่ไม่ได้เสริมกำลัง และเสาต้นที่ 2 เป็นเสา C1 ทำการเสริมกำลังโดยการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนที่ได้ออกแบบไว้โดยช่องว่างระหว่างเหล็กเส้นแบนจะมีความยาวเท่ากับ 120 mm (ระยะ 6D) กำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 22.1 MPa เหล็กข้ออ้อยมีกำลังดึงครากเท่ากับ 502.1 MPa และเหล็กเส้นกลมมีกำลังดึงครากเท่ากับ 459.8 MPa การทดสอบจะให้แรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียวโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด ค่าความเค้นคำนวณได้โดยนำ

แรงอัดหารด้วยพื้นที่หน้าตัด และความเครียดได้จากระยะการเคลื่อนที่อัดของเครื่องทดสอบหารด้วยความสูงตัวอย่างเสา 450 mm รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัด จะเห็นได้ว่าเสาตัวอย่าง C0 มีความเค้นอัดสูงสุด 26.87 MPa ที่ความเครียด 0.0095 และลดลงอย่างรวดเร็วจนเกิดการวิบัติที่ความเครียด 0.0166 ส่วนในตัวอย่างเสา C1 มีความเค้นอัดสูงสุดที่ 38.28 MPa ที่ความเครียด 0.0142 หลังจากนั้นความเค้นลดลงอย่างช้า ๆ จนเกิดการวิบัติที่ความเครียด 0.0474



รูปที่ 6 ความเค้นและความเครียดอัดของเสารับแรงอัดแนวแกน



(ก) เสา C0



(ข) เสา C1

รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของเสารับแรงอัดตามแนวแกน

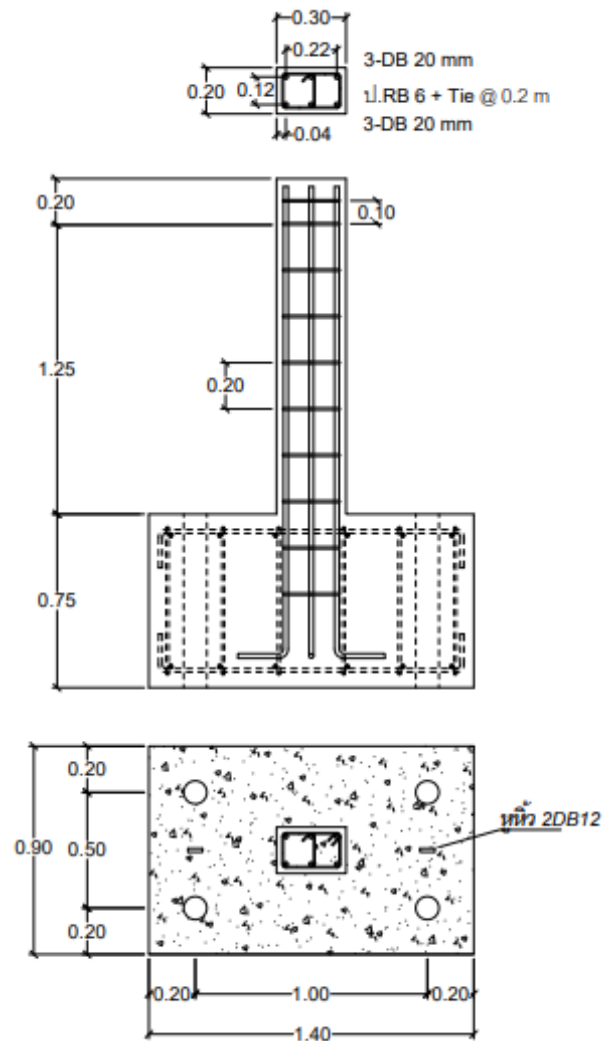
รูปที่ 7 แสดงลักษณะการวิบัติของเสาทั้งสองตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าเสา C0 จะเกิดการโก่งเดาะเท่ากับระยะเรียงของเหล็กปลอก 200 mm (10D) ในขณะที่ทำการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนจะโก่งเดาะในช่วงที่สั้นลงประมาณ 120 mm (6D) จึงทำให้เหล็กเส้นรับกำลังอัดได้ดีและชะลอการ

โก่งเดาะที่จะดันคอนกรีตให้แตกออกได้ดี จึงทำให้เสา C1 รับกำลังอัดได้สูงกว่าเสา C0 อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนที่ยึดด้วยสกรูจะช่วยป้องกันการโก่งเดาะได้และช่วยเพิ่มความเหนียวให้คอนกรีตได้มากอย่างมีนัยสำคัญ จึงนำไปใช้ในการทดสอบโครงสร้างเสารับแรงด้านข้างต่อไป

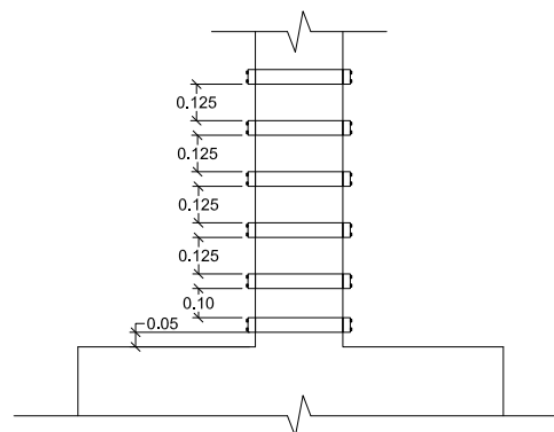
4. ประสิทธิภาพการเสริมกำลังโครงสร้างเสารับแรงด้านข้าง

4.1 ตัวอย่างทดสอบ

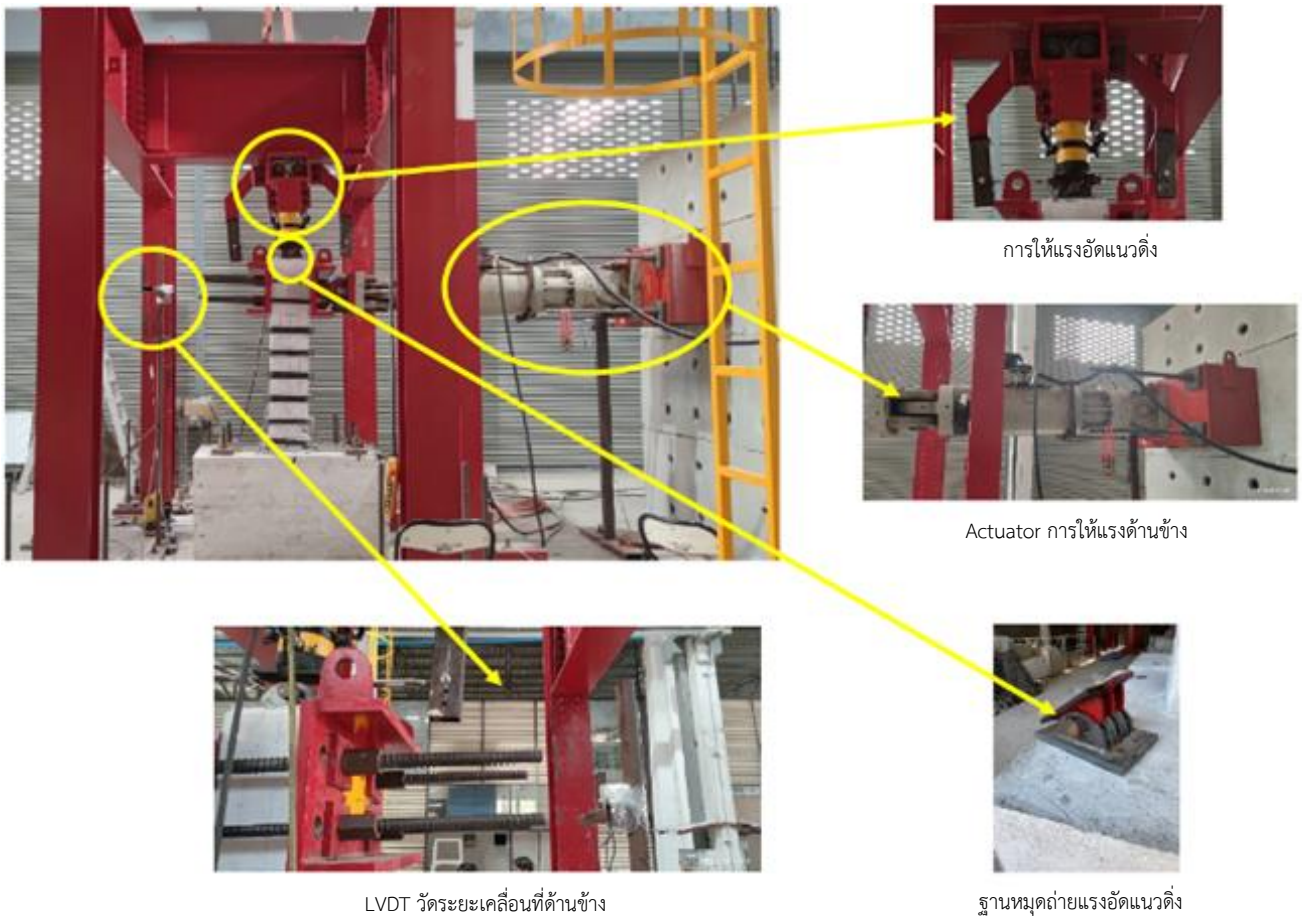
ตัวอย่างเสาทดสอบมี 2 ตัวอย่าง คือ เสาตัวอย่าง C0 เป็นเสาเดิม และเสาตัวอย่าง C1 เป็นเสาที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนเสา C0 แต่เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นแบนคาดรัด เสาตัวอย่าง C0 จะมีหน้าตัดกว้าง 200 mm ยาว 300 mm และเสริมเหล็กเหมือนโครงสร้างเสา C4 ของอาคารที่ทำการศึกษ เสาตัวอย่างสูง 1,450 mm หล่อขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของฐาน โดยจุดศูนย์กลางการให้แรงด้านข้างที่ความสูง 1,250 mm ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงของโครงสร้างเสา C4 ฐานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดกว้าง 900 mm ยาว 1,400 mm และหนา 750 mm ใส่ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ที่ตำแหน่งมุมทั้ง 4 ของฐานคอนกรีตเพื่อใช้เป็นจุดยึดระหว่างฐานกับพื้นห้องทดสอบ โดยจะมีรายละเอียดการเสริมเหล็ก ดังรูปที่ 8 คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต f_c' เท่ากับ 22.1 MPa เหล็กตามยาวเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm (DB20) มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากและจุดประลัยเท่ากับ 520.4 MPa 616.5 MPa ตามลำดับ เหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (RB6) มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากและจุดประลัยเท่ากับ 387.9 MPa 511.8 MPa ก่อนหล่อคอนกรีตจะติด Strain gauge ที่เหล็กปลอกจำนวน 6 จุด และที่เหล็กตามยาวจำนวน 4 จุด เสาตัวอย่าง C1 มีลักษณะทางกายภาพและรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนกับเสาตัวอย่าง C0 แต่เสริมกำลังโดยการคาดรัดภายนอกด้วยเหล็กเส้นแบนจำนวน 6 ชั้น ดังรูปที่ 9 ที่โคนเสาจะมีช่องว่างระหว่างเหล็กเส้นแบน 100 mm เพื่อควบคุมให้เหล็กโก่งเดาะในช่วง 5D ซึ่งคาดหวังว่าพฤติกรรมการรับแรงอัดของเหล็กเส้นจะดีขึ้นกว่า 6D ที่ได้ทำการศึกษไว้ ส่วนช่องว่างอื่น ๆ จะมีหน้าที่รับแรงเฉือนซึ่งควรมีระยะเรียงไม่เกิน $d/2$ (130 mm) การศึกษานี้จึงเลือกใช้ช่องว่างของเหล็กคาดรัดเป็นระยะ 125 mm นั้นหมายความว่าเหล็กคาดรัด 1 อัน ต้องรับแรงเฉือนให้ได้จากข้อมูลของสกรู M10 เกรด 8.8 รับแรงดึงได้ 50.2 kN/ตัว และรับแรงเฉือนได้ 37.6 kN/ตัว จะการคาดรัดใช้สกรูทั้งหมด 4 ตัว ในการรับแรงเฉือนที่จะเกิดขึ้นในเสา ดังนั้นเหล็กคาดรัดนี้จึงรับแรงเฉือนได้ทั้งหมด 200.8 kN กรณีที่รับผ่านแรงดึง และ 150.4 kN ซึ่งมากกว่าแรงเฉือนที่จะเกิดขึ้นในโครงสร้างเสา จึงคาดว่าเหล็กคาดรัดนี้จะช่วยเสริมกำลังการรับแรงด้านข้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 8 รายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับเสาตัวอย่าง



รูปที่ 9 ตำแหน่งการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบน



รูปที่ 10 การติดตั้งการทดสอบ

4.2 วิธีการทดสอบ

ตัวอย่างเสาจะถูกนำไปทดสอบให้แรงตามแนวแกนคงที่และแรงด้านข้างแบบสลับทิศ รูปแบบการให้แรงสลับทิศจะเป็นการควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนที่ (Drift ratio) โดยที่ละ 0.25% ของความสูงเสา (1250 mm) จนถึงอัตราส่วนการเคลื่อนที่ 1% หลังจากนั้นจะเพิ่มอัตราส่วนการเคลื่อนที่ที่ละ 0.50% ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ ที่แต่ละอัตราส่วนการเคลื่อนที่จะทำวนซ้ำ 2 รอบ การทดสอบจะทำการในห้องปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างจริง ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น การติดตั้งการทดสอบแสดงในรูปที่ 10 แรงด้านข้างแบบสลับทิศให้โดยระบบไฮดรอลิกที่ควบคุมระยะการยืดหดได้ (Actuator) และแรงตามแนวแกนคงที่จะให้แรงผ่านไฮดรอลิก ที่ฐานไฮดรอลิกจะยื่นคานผ่านล้อเพื่อให้ตำแหน่งของแรงแนวแกนเลื่อนไปตามระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของหัวเสาได้ แรงตามแนวแกนคงที่ควรจะให้แรงในช่วง 185 – 370 kN ตามผลการวิเคราะห์ที่โครงสร้างอาคาร แต่แรงดังกล่าวเกินความจุของอุปกรณ์การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การศึกษาที่ใช้แรงตามแนวแกนคงที่เท่ากับ 120 kN ซึ่งคิดเป็น $0.10f_c'A_g$ ซึ่งพฤติกรรมก่อนเสริมกำลังยังคงเป็นการวิบัติแบบเฉือนเช่นเดิม

4.3 ผลการทดสอบ

4.3.1 เสาเดิม CO ไม่ได้เสริมกำลัง

รอยแตกร้าวแรกเป็นรอยแตกร้าวคด (flexural crack) ที่โคนเสาเมื่อให้อัตราการเคลื่อนที่ 0.50 % เมื่อเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่มากขึ้นขนาดและจำนวนของรอยร้าวคดจะมีเพิ่มขึ้น เมื่อถึงอัตราการเคลื่อนที่ 1.00 % ปรากฏรอยแตกร้าวเฉือน (shear crack) กว้างประมาณ 0.05 mm ถึง 0.20 mm กระจายอยู่ภายในบริเวณช่วงความสูงจากฐาน 150 - 600 mm ดังรูปที่ 11 และพบว่าเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกเริ่มเกิดการคราก อัตราการเคลื่อนที่ 1.50 % และ 1.59 % ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่มากขึ้น ขนาดและจำนวนของรอยร้าวแรงคดและแรงเฉือนก็จะมี การเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และถึงจุดที่แรงทางข้างกระทำสูงสุด (peak load) ที่อัตราการเคลื่อนที่ 1.77 % เมื่อถึงช่วงอัตราการเคลื่อนที่ 2.00 % จะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่ารอยร้าวเฉือนมีขนาดกว้างขึ้นโดยมีขนาดประมาณ 1 mm และจำนวนรอยร้าวแรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อถึงอัตราการเคลื่อนที่ 2.50 % รอยร้าวเฉือนมีขนาดกว้างขึ้นอยู่ที่ประมาณ 5 - 10 mm และคอนกรีตเริ่มมีการหลุดร่อนเกิดขึ้น ดังรูปที่ 12 และเมื่อถึงอัตราการเคลื่อนที่ 3.00 % คอนกรีตถูกบดแตก (crushing) ที่บริเวณระยะ 150 - 450 mm จากฐาน จนกระทั่งที่อัตราการเคลื่อนที่ 3.5 % คอนกรีต

ถูกบดแตกภายในบริเวณระยะ 0 - 60 cm จนสามารถเห็นเหล็กเสริมได้ จึงสรุปได้ว่าเสา C0 นี้วิบัติแบบเฉือน (shear failure) รูปที่ 13 แสดงลักษณะการวิบัติหลังหยุดการทดสอบ



รูปที่ 11 รอยแตกกร้าวของเสาตัวอย่าง C0 ที่อัตราการเคลื่อนที่ 1.00 %

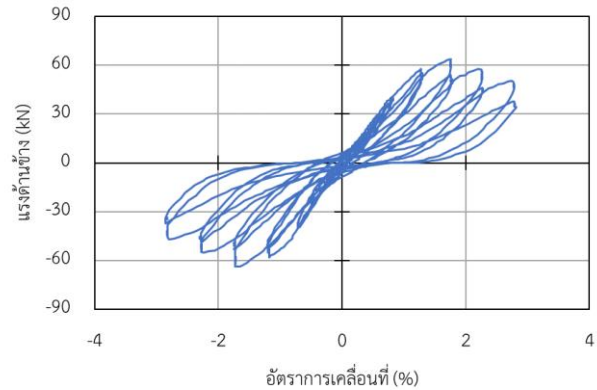


รูปที่ 12 คอนกรีตเริ่มมีการหลุดร่อนเกิดขึ้นของเสาตัวอย่าง C0 ที่อัตราการเคลื่อนที่ 2.50 %



รูปที่ 13 การวิบัติเมื่อสิ้นสุดการทดสอบของเสาตัวอย่าง C0

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างกับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ด้านข้างสำหรับเสาตัวอย่าง C0 แสดงในรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคอคอด (Pinching effect) จากการเปิดและปิดของรอยแตกกร้าวเฉือนขนาดใหญ่ จึงทำให้โครงสร้างนี้สลายพลังงานได้น้อยมาก



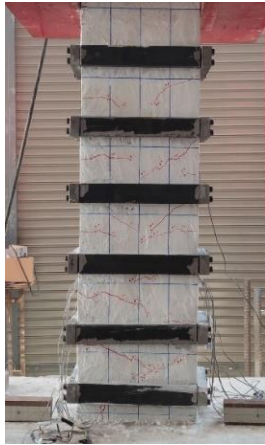
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างกับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ด้านข้างสำหรับเสาตัวอย่าง C0

4.3.2 เสา C1 ที่เสริมกำลัง

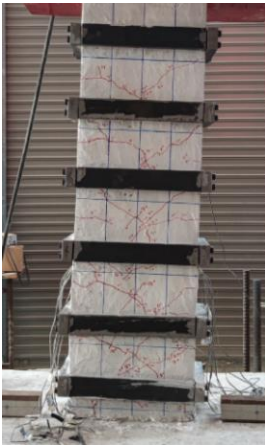
รอยแตกกร้าวเกิดขึ้นที่อัตราการเคลื่อนที่ 0.50 % มีขนาดความกว้างประมาณ 0.05 mm เมื่อเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่มากขึ้นขนาดและจำนวนของรอยร้าวแรงตัดจะมีมากขึ้น เมื่อถึงอัตราการเคลื่อนที่ 1.50 % ปรากฏรอยร้าวเฉือนเริ่มต้น (shear crack) มีขนาดความกว้างประมาณ 0.05 mm กระจายอยู่ภายในบริเวณระยะ 150 - 750 mm จากฐาน ดังรูปที่ 15 เหล็กเสริมตามยาวเกิดการครากที่อัตราการเคลื่อนที่ประมาณ 1.47 % และถึงจุดที่แรงทางข้างกระทำสูงสุด (peak load) ที่อัตราการเคลื่อนที่ 2.75 % คอนกรีตเริ่มมีการหลุดร่อนเกิดขึ้น (spalling) ที่ตำแหน่งโคนเสาที่ติดกับฐานที่อัตราการเคลื่อนที่ 3.50 % ดังรูปที่ 16 และเมื่อเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่มากขึ้น ขนาดและจำนวนของรอยร้าวแรงเฉือนจะมีการเพิ่มเพียงเล็กน้อย พบว่าเหล็กปลอกเกิดการครากที่อัตราการเคลื่อนที่ ประมาณ 4.70 % และเมื่อถึงอัตราการเคลื่อนที่ 5.00 % คอนกรีตที่โคนเสาถูกบดแตก (crushing) และสังเกตเห็นได้ชัดว่ารอยร้าวเฉือนมีขนาดกว้างขึ้นประมาณ 1 mm และจำนวนรอยร้าวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบที่อัตราการเคลื่อนที่ 6.50 % พบการบดแตกของคอนกรีตกระจายอยู่ภายในบริเวณระยะ 0 - 15 cm จาก พบการโก่งคด (buckling) ของเหล็กเสริมตามยาวเพียงเล็กน้อยระหว่างทดสอบให้แรงทางข้าง จากการสังเกตรอยแตกกร้าวเฉือนมีความกว้างที่น้อยมากเพราะได้เหล็กค้ำยันช่วยไว้ สำหรับเหล็กเส้นแบนจากการสังเกตและรื้อถอนหลังทดสอบเสร็จ ไม่เกิดความเสียหายใด ๆ จึงสรุปได้ว่าตัวอย่างเสา C1 เป็นการวิบัติแบบคด (flexure failure) ดังรูปที่ 17

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างกับอัตราส่วนการเคลื่อนที่สำหรับเสาตัวอย่าง C1 แสดงในรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นรูปค้อนข้างที่กว้างเนื่องจากรอยแตกกร้าวมีขนาดที่เล็ก การเปิดและปิดของรอยแตกกร้าวจึงไม่ทำให้เกิดคอคอด อีกทั้งเหล็กเสริมตามยาวของในเสา C1 ถูกยึดเลย

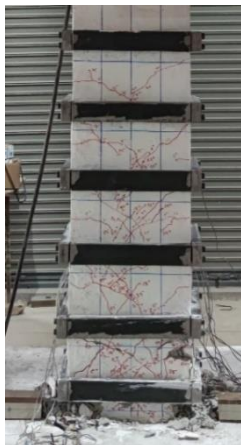
จุดครากไปมาก เสา C1 จึงมีความเหนียวที่มากและสลายพลังงานได้ดีกว่า
ตัวอย่างเสา C0 อย่างชัดเจน



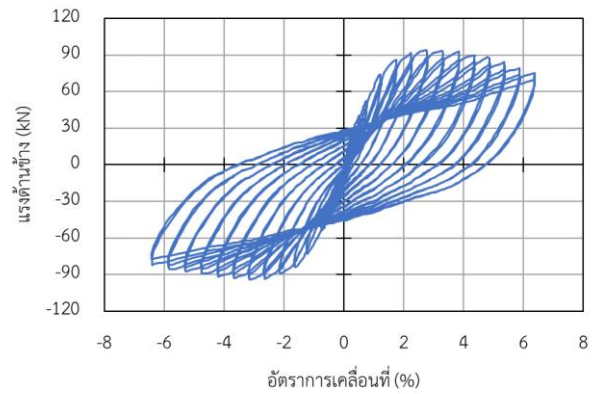
รูปที่ 15 รอยแตกร้าวของเสาตัวอย่าง C1 ที่อัตราการเคลื่อนที่ 1.50 %



รูปที่ 16 คอนกรีตเริ่มมีการหลุดร่อนเกิดขึ้นของเสาตัวอย่าง C1
ที่อัตราการเคลื่อนที่ 3.50 %



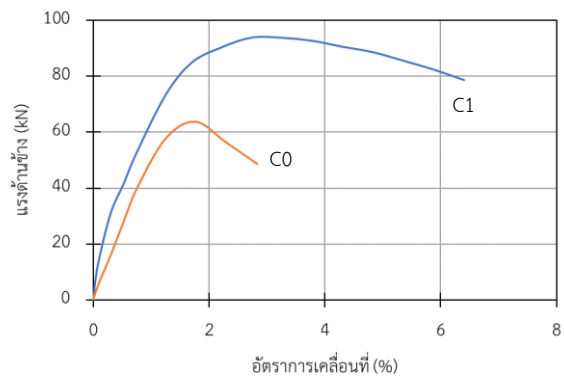
รูปที่ 17 การวิบัติเมื่อสิ้นสุดการทดสอบของเสาตัวอย่าง C1



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างกับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ด้านข้าง
สำหรับเสาตัวอย่าง C1

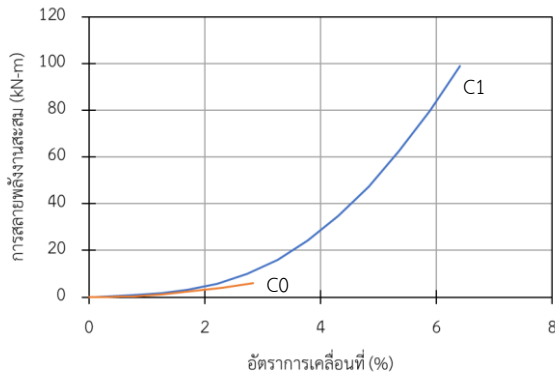
4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบ

จากการทดสอบการรับแรงทางข้างแบบวิบัติของเสาเดิม C0 และเสา C1 ที่เสริมกำลัง เมื่อทำการลากเส้นล้อมความสัมพันธ์ระหว่างแรงและอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างเฉลี่ยของเสาทั้ง 2 ตัวอย่าง มาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 19 จะสังเกตเห็นประสิทธิภาพการเสริมกำลังโดยวิธีคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนได้อย่างชัดเจน เสาตัวอย่าง C1 สามารถรับแรงทางข้างสูงสุดเฉลี่ยได้ 93.95 kN มากกว่าเสาตัวอย่าง C0 โดยที่แรงทางข้างกระทำสูงสุดเฉลี่ยได้ 63.88 kN เนื่องจากการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนไปเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ส่งผลให้ลักษณะการวิบัติเปลี่ยนจากแบบเฉือน (Shear failure) เป็นแบบดัด (Flexural failure) เนื่องจากเสา C0 วิบัติแบบเฉือนจึงไม่มีความเหนียว แต่เสา C1 วิบัติแบบดัด โดยมีการครากของเหล็กเสริมตามยาวที่อัตราการเคลื่อนที่ 1.47 % และมีอัตราการเคลื่อนที่เมื่อแรงด้านข้างตกลงมา 80% ที่ 6.38 % ดังนั้น เสา C1 จึงมีความเหนียวเท่ากับ 4.34 การเกิดรอยร้าวของเสาตัวอย่าง C1 มีจำนวนและความกว้างที่น้อยกว่าเสาตัวอย่าง C0 อย่างชัดเจน ส่งผลให้การซ่อมแซมหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวของเสา C1 ที่เสริมกำลังจะทำได้ง่ายกว่าเสา C0 ที่อาจซ่อมแซมไม่ได้ต้องรื้อถอนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงทางข้าง

การสลายพลังงานของโครงสร้างเสาทำได้โดยการหาพื้นที่ภายใต้รูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ด้านข้าง [8] รูปที่ 20 แสดงค่าการสลายพลังงานสะสม จะเห็นได้ว่าโครงสร้างเสา C1 สามารถสลายพลังงานได้มากกว่าเสา C0 หลายเท่า ดังนั้น การเสริมความแข็งแรงของเสาด้วยวิธีการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการประหยัดและหาวัสดุได้ง่าย



รูปที่ 20 การสลายพลังงานสะสม

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างเสาที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวโดยการใช้เหล็กเส้นแบนคาดรัด และพิจารณาประสิทธิภาพโดยทำการทดสอบโดยการให้แรงด้านข้างแบบวิภูจักร ตัวอย่างเสา 2 ตัวอย่าง คือ เสาตัวอย่าง C0 เป็นตัวแทนของเสาเดิมไม่เสริมกำลัง และเสาตัวอย่าง C1 เป็นเสาที่มีขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนเสา C0 แต่ทำการเสริมกำลังโดยการคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนหนา 25 mm กว้าง 50 mm โดยใช้สกรู M10 เกรด 8.8 เป็นตัวยึด ประสิทธิภาพการเสริมกำลังพิจารณาจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบซึ่งพบว่า การคาดรัดด้วยเหล็กเส้นแบนนั้นช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนให้กับโครงสร้างเสาได้เป็นอย่างดี และป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวได้ตามที่คาดหวัง โครงสร้างเสาจึงเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแบบเฉือนเป็นแบบดัด ส่งผลให้กำลังรับแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น 47 % (จาก 63.88 kN ของเสา C0 เป็น 93.95 kN ของเสา C1) และเสา C1 มีความสามารถในการเคลื่อนที่ด้านข้างได้มากขึ้นหลังจากเหล็กเสริมตามยาวครากโดยมีความเหนียว 4.34 เท่า อีกทั้งการแตกร้าวในเสาตัวอย่าง C1 มีขนาดเล็กกว่ารอยแตกร้าวในเสาตัวอย่าง C0 ทำให้สลายพลังงานได้ดีกว่า และสามารถทำการซ่อมแซมโครงสร้างได้ง่ายกว่า ดังนั้น เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นแบนคาดรัดจึงมีประสิทธิภาพในการเพิ่มสมรรถนะให้โครงสร้างต้านทานแรงด้านข้างจากแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการจัดตั้งหน่วยความเป็นเลิศ (UoE) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ของมหาวิทยาลัยพะเยา ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดสอบ ขอขอบคุณคณะนิสิตสาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ช่วยปฏิบัติการทดสอบให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะทำงาน มยผ. 1301 (2007). *มาตรฐานประกอบอาคารออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว*. กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย.
- [2] ACI318 committees (2014). *Building code requirements for structure concrete (ACI318-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [3] คณะทำงาน มยผ. 1301/1302-61 (2561). *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว*. กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย.
- [4] Truong, G.T., Kim, J.-C. and Choi, K.-K. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. *Engineering Structures*, 134, pp. 217-235.
- [5] Sirimontree, S., Witchayangkoon, B., Khaosri, N. and Teerawong, J. (2011). Shear strength of reinforced concrete beam strengthened by transverse external post-tension. *Engineering and Applied Sciences*, 4, pp.108-115.
- [6] อนันท์พงษ์ กระจ่าง, สมบูรณ์ เชิญจิน, ปรีดา ไชยมหาวัน และ ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ (2565). แรงยับยั้งการโก่งเดาะของเหล็กเส้น. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565.
- [7] Dhakal, R.P. and Maekawa, K. (2002). Modeling for post yield buckling of reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(9), pp.1139-1147.
- [8] Paulay, T. and Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of RC and masonry buildings*, John Wiley & Sons.