



การศึกษาพฤติกรรมและความคุ้มค่าของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร
STUDY OF BEHAVIOR AND VALUE OF STEEL-FIBER-REINFORCED CONCRETE COLUMNS
SUBJECTED TO CYCLIC LOADING

ณัฐนันท์ รัตนไชย¹ และณัฐวุฒิ ไชยวิน^{2*}

^{1,2*} อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Corresponding author, E-mail: ch.natawut@gmail.com

บทคัดย่อ

ความเสียหายหรือผลกระทบที่เกิดกับอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวใหญ่ในประเทศไทยในอดีต ทำให้การออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบสูง โดยกฎกระทรวงว่าด้วยแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 มีการเพิ่มบริเวณพื้นที่บังคับใช้ให้ครอบคลุมมากขึ้น อย่างไรก็ตามอาคารหรือบ้านพักอาศัยที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงแต่ไม่เข้าเกณฑ์บังคับของกฎกระทรวง ส่วนใหญ่ไม่ก่อสร้างตามมาตรฐานอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากมีต้นทุนค่าก่อสร้างสูง ดังนั้นการเสริมกำลังบางส่วนของโครงสร้างโดยใช้เส้นใยเหล็กเป็นอีกทางเลือกในการป้องกันหรือบรรเทาความเสียหายจากแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตและวิธีเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก โดยพิจารณาทั้งด้านโครงสร้างและด้านต้นทุน ตัวอย่างเสาจำนวน 3 ตัวอย่าง ถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรเพื่อหาประสิทธิภาพการเสริมกำลัง โดยพิจารณาจากความเหนียวของเสาที่เพิ่มขึ้น จากนั้นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นเดียวถูกใช้เป็นอาคารตัวอย่างในการวิเคราะห์ต้นทุนการเสริมกำลัง และประเมินความคุ้มค่าจากความเหนียวที่เพิ่มขึ้นต่อต้นทุนที่สูงขึ้น ผลการศึกษาพบว่า การเสริมเส้นใยเหล็กและการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกทำให้ความเหนียวของเสาพัฒนาขึ้นร้อยละ 103 และ 33 ตามลำดับ มีต้นทุนสูงขึ้นร้อยละ 2.56 และ 0.57 ตามลำดับ โดยคิดเป็นความคุ้มค่าเท่ากับ 40 และ 58 ตามลำดับ
คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใย; เส้นใยเหล็ก; แผ่นดินไหว; การวิเคราะห์ต้นทุน

ABSTRACT

Building damage or impacts due to large earthquakes in Thailand has resulted in the requirement of earthquake-resistant design for new buildings, especially in high earthquake-prone regions. The current building regulation has also extended more areas considered earthquake-prone zones. However, most of the new buildings or houses in high-risk areas, which are not regulated, do not adopt the seismic design standard due to an increase of project cost. Hence, partial reinforcement of structures with an emphasis on low cost is another option to prevent or mitigate damage from earthquakes. This research aims to study strengthening methods for reinforced concrete columns using steel fibers and additional stirrups, and to compare both in terms of structural performance and cost. Three columns were tested under lateral cyclic loads to determine the efficiencies of steel fibers and additional stirrups by an enhancement in column ductility. Besides, a one-story reinforced concrete building was selected as a

sample for a cost analysis and value evaluation of two different strengthening techniques. Value was considered from a ratio of a percentage increase in ductility to a percentage increase in cost. The study has found that strengthening columns with steel fibers and additional stirrups improved the ductility by 103 and 33 percent, respectively, and increased the total cost of the columns by 2.56 and 0.57 percent, respectively, which were the values of 40 and 58, respectively.

KEYWORDS: Fiber-reinforced concrete; Steel fiber; Earthquake; Cost analysis

1. บทนำ

แผ่นดินไหวในประเทศไทยเคยสร้างความเสียหายรุนแรงต่ออาคารบ้านเรือนจำนวนมาก โดยเฉพาะแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ส่งผลให้เกิดการถดถอยและพบว่าอาคารที่เสียหายส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว [1] สอดคล้องกับผลการสำรวจอาคารสูงไม่เกิน 3 ชั้น ในจังหวัดเชียงใหม่จำนวน 100 อาคาร ที่ระบุว่าอาคารจำนวนมากถึงร้อยละ 80 ไม่ผ่านเกณฑ์การประเมิน เนื่องจากอาคารส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกออกแบบให้เป็นอาคารต้านทานแผ่นดินไหว และมีความไม่สม่ำเสมอของรูปร่างอาคาร [2] นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวก็แสดงให้เห็นว่าแผ่นดินไหวในประเทศไทยพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพื้นที่ที่รอยเลื่อนมีพลังพาดผ่าน ได้แก่ บริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคใต้ มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวในอนาคต [3] ดังนั้นอาคารที่สร้างใหม่จึงควรออกแบบให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ โดยเฉพาะอาคารที่อยู่ในเกณฑ์ของกฎกระทรวงว่าด้วยการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 ซึ่งบังคับใช้สำหรับอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน โดยให้อาคารสาธารณะ อาคารขนาดใหญ่พิเศษ หรืออาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 10 เมตร หรือ 3 ชั้นขึ้นไป ที่อยู่ในบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อาจได้รับผลกระทบในระดับสูงจำเป็นต้องออกแบบเป็นอาคารต้านทานแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามบ้านพักอาศัยหรืออาคารที่ไม่เข้าเกณฑ์ข้อบังคับนี้อาจได้รับความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวได้เช่นกัน ดังตัวอย่างการวิบัติของเสาและความเสียหายของบ้านพักอาศัยจากเหตุแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ดังรูปที่ 1 บ้านพักอาศัยและอาคารที่ไม่ถูกบังคับด้วยกฎหมายเหล่านี้ส่วนใหญ่ออกแบบและก่อสร้างโดยไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากการออกแบบและก่อสร้างอาคารตามมาตรฐานอาคารต้านทานแผ่นดินไหวทำให้ต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้นมาก โดยอาจเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 14.07 [4] ดังนั้นการใช้วิธีการเสริมกำลังบางส่วน of อาคารเหล่านี้ แม้จะเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างได้ไม่เท่ากับการออกแบบตามมาตรฐานอาคารต้านทานแผ่นดินไหว แต่มีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการปฏิบัติ จึงเป็นอีกทางเลือกในการป้องกันหรือบรรเทาความเสียหายจากแผ่นดินไหว

เนื่องจากเสาเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญในการรับน้ำหนักอาคาร การวิบัติของเสาอาจส่งผลให้เกิดการพังทลายแบบต่อเนื่องของอาคาร ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพเสาให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวจึงเป็นที่นิยมนานและสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกในเสาซึ่งเป็นวิธีเสริมกำลังแบบดั้งเดิมที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพ [5] การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymer, FRP) โดยวิธีนี้นิยมใช้สำหรับโครงสร้างที่สร้างเสร็จและมีการใช้งานแล้ว การใช้คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced concrete, FRC) ซึ่งเป็นอีกวิธีที่ใช้กันแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เป็นต้น



รูปที่ 1 การวิบัติของเสาและความเสียหายของบ้านพักอาศัย [6]

การเสริมกำลังคอนกรีตด้วยเส้นใยต้องคำนึงถึงชนิดและปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม โดยเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) เป็นหนึ่งในเส้นใยที่นิยมใช้เนื่องจากมีค่าโมดูลัสสูงทำให้สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตภายใต้แรงดัดได้ดี อีกทั้งยังง่ายต่อการจัดการ การศึกษาจำนวนมากก่อนหน้านี้ระบุว่า การผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตช่วยพัฒนาความเค้นอัดสูงสุดได้น้อย แต่ช่วยเพิ่มความเครียดที่ความเค้นอัดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่วัสดุดูดซับก่อนวิบัติ [7-9] งานวิจัยช่วงหลังแสดงให้เห็นว่าการผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตด้วยปริมาณร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร สามารถพัฒนากำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตร้อยละ 26 และ 36 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมกำลัง [10] เช่นเดียวกับผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่พบว่ามีการพัฒนาขึ้นร้อยละ 60 และ 88 ตามลำดับ เมื่อผสมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 1 โดยปริมาตร [11] ขณะที่เส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 2 โดยปริมาตร สามารถทำให้กำลังรับแรงดัดของ FRC เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งการเพิ่มของกำลังขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นใยด้วย การใช้เส้นใยเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าส่งผลให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มสูงกว่า [12, 13] นอกจากนี้พบว่า เมื่อใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ โดยเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของ FRC ได้สูงกว่าเส้นใยเหล็กชนิดตรง [14] รูปร่างลักษณะของเส้นใยเหล็กชนิดงอปลายแสดงดังรูปที่ 2

ผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กสามารถพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตและพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างได้ การนำเส้นใยเหล็กมาเสริมกำลังจุดต่อเสากับฐานรากที่รับแรงกระทำแบบวัฏจักร จึงทำให้เสามีความเหนียวสูงขึ้น และไม่สูญเสียกำลังแบบทันทีทันใดซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้าง [15, 16] นอกจากศึกษาคุณสมบัติของ FRC แล้ว ในปี พ.ศ. 2564 Kongtun และคณะ [17] ได้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนด้านวัสดุของเส้นใยเหล็กที่มีรูปร่างและกำลังที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเลือกใช้เส้นใยเหล็กได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเสริมกำลังทั้งในด้านโครงสร้างและต้นทุนการก่อสร้างยังมีจำนวนน้อย การเสริมเส้นใยและการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกในเสาคอนกรีตเป็น 2 วิธี ที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับนำมาใช้กับบ้านพักอาศัยหรืออาคารที่ไม่เข้าเกณฑ์แต่ต้องการเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยใช้ต้นทุนต่ำ ดังนั้นการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมโครงสร้างและต้นทุนระหว่างการเสริมเส้นใยเหล็กและการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกในเสาจะเกิดองค์ความรู้ ทำให้สามารถเลือกใช้การเสริมกำลังได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่า ช่วยพัฒนาประสิทธิภาพของอาคารและเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว



รูปที่ 2 เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย [18]

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมและการพัฒนาความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีการเสริมเส้นใยเหล็กและวิธีการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร โดยควบคุมกำลังรับแรงด้านข้างที่เพิ่มขึ้นให้เท่ากัน รวมถึงศึกษาค้นคว้าวัสดุและค่าแรงเพื่อประเมินความคุ้มค่าจากอัตราส่วนความเหนียวที่เพิ่มขึ้นต่อต้นทุนที่สูงขึ้น

3. ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาอาคารที่ไม่เข้าเกณฑ์บังคับของกฎกระทรวงว่าด้วยแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 โดยเลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้น ขนาด 12 เมตร x 20 เมตร ที่อยู่ในบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบในระดับสูงจากแผ่นดินไหวเป็นกรณีศึกษา

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

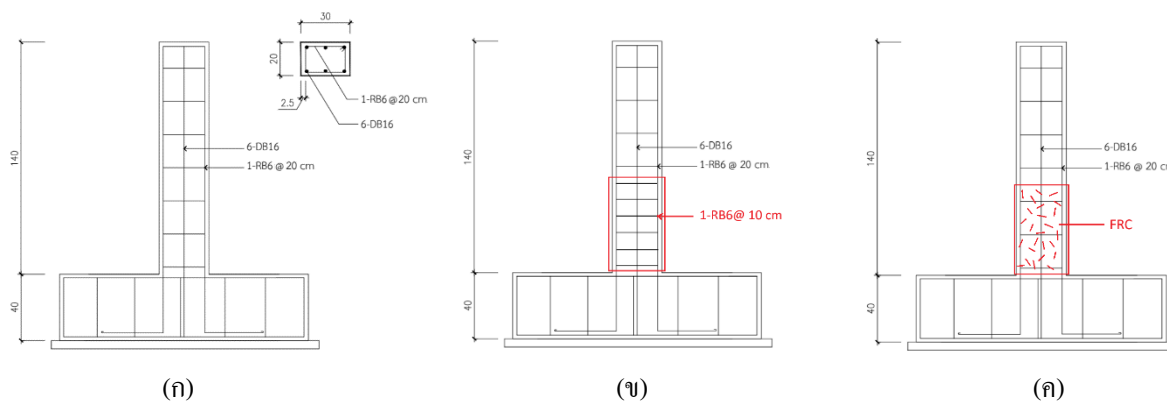
การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาด้านโครงสร้างและด้านต้นทุน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ด้านโครงสร้าง

การทดสอบตัวอย่างเสาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านโครงสร้างของเสาอาคารที่เสริมกำลังเพื่อรับแรงแบบวัฏจักร ตัวอย่างเสาถูกยึดปลายด้านล่างกับฐานเสาและปล่อยปลายด้านบนอิสระ เสามีขนาดหน้าตัด 0.20 เมตร x 0.30 เมตร ความสูงรวมฐานเสา 1.80 เมตร ระยะความสูงจากโคนเสาถึงตำแหน่งรับแรงกระทำทางข้างเท่ากับ 1.25 เมตร เสริมเหล็กตามยาว DB16 จำนวน 6 เส้น คิดเป็นปริมาณร้อยละ 2.01 และเสริมเหล็กปลอก RB6 ทุกระยะห่าง 20 เซนติเมตร โดยเริ่มเสริมเหล็กปลอกแรกสูงจากโคนเสาขึ้นมา 5 เซนติเมตร มีระยะหุ้มของคอนกรีต 2.50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) เสาที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวน 3 ต้น ซึ่งมีขนาด รูปทรง และการเสริมเหล็กตามยาวเหมือนกัน แต่มีรายละเอียดการเสริมกำลังรับแรงทางข้างแตกต่างกัน โดยตัวอย่างควบคุม C-1 ไม่มีการเสริมกำลังเพิ่มเติม ขณะที่ตัวอย่างเสา C-TIE เสริมกำลังด้วยการเพิ่มจำนวนเหล็กปลอกตามมาตรฐาน มยพ.1301/1302 เฉพาะบริเวณที่คาดว่าจะเกิดจุดหมุนแบบพลาสติก (Plastic hinge region) หรือเกิดการวิบัติ โดยเสริมเหล็กปลอกทุกระยะห่าง 10 เซนติเมตร จนถึงความสูง 50 เซนติเมตร จากโคนเสา ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) และตัวอย่างเสา C-FRC เสริมกำลังด้วยการใส่เส้นใยเหล็กชนิดงอปลายที่มีความยาว 35 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มิลลิเมตร ในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ตั้งแต่โคนเสาถึงความสูง 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ค) โดยปริมาณเส้นใยที่ใช้ อ้างอิงจากผลการวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งการเสริมเส้นใยที่มีประสิทธิภาพจะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 [10-14] และเลือกเสริมเส้นใยในปริมาณไม่มากเพื่อควบคุมให้ต้นทุนต่ำ การเตรียมคอนกรีตเสริมเส้นใยทำโดยผสมคอนกรีตปกติ จากนั้นใส่เส้นใยและคนให้เส้นใยกระจายตัวเข้ากับคอนกรีตได้อย่างสม่ำเสมอด้วยไม้ผสม

คอนกรีต คอนกรีตผสมเส้นใยจะมีความหนืดมากกว่าคอนกรีตปกติ สำหรับการเตรียมเสา C-FRC เริ่มจากเทคอนกรีตส่วนฐาน เมื่อคอนกรีตเริ่มก่อตัวจึงเทคอนกรีตผสมเส้นใยช่วง โคนเสา เมื่อคอนกรีตเสริมเส้นใยเริ่มก่อตัวจึงเทเสาส่วนที่เหลือด้วยคอนกรีตปกติ การถ่ายแรงที่รอยต่อของคอนกรีตจะถ่ายผ่านเหล็กเสริมและเส้นใยเหล็ก

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยที่ 28 วัน ได้จากค่าเฉลี่ยการทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกอย่างละ 5 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยคอนกรีตธรรมดามีกำลังอัดเฉลี่ย 24.7 เมกะปาสคาล ที่ความเครียดเท่ากับ 0.003 และคอนกรีตผสมเส้นใยมีกำลังอัดเฉลี่ย 25.6 เมกะปาสคาล ที่ความเครียดเท่ากับ 0.073 เหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 488 เมกะปาสคาล และ 295 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เส้นใยเหล็กที่ใช้มีกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 1,098 เมกะปาสคาล

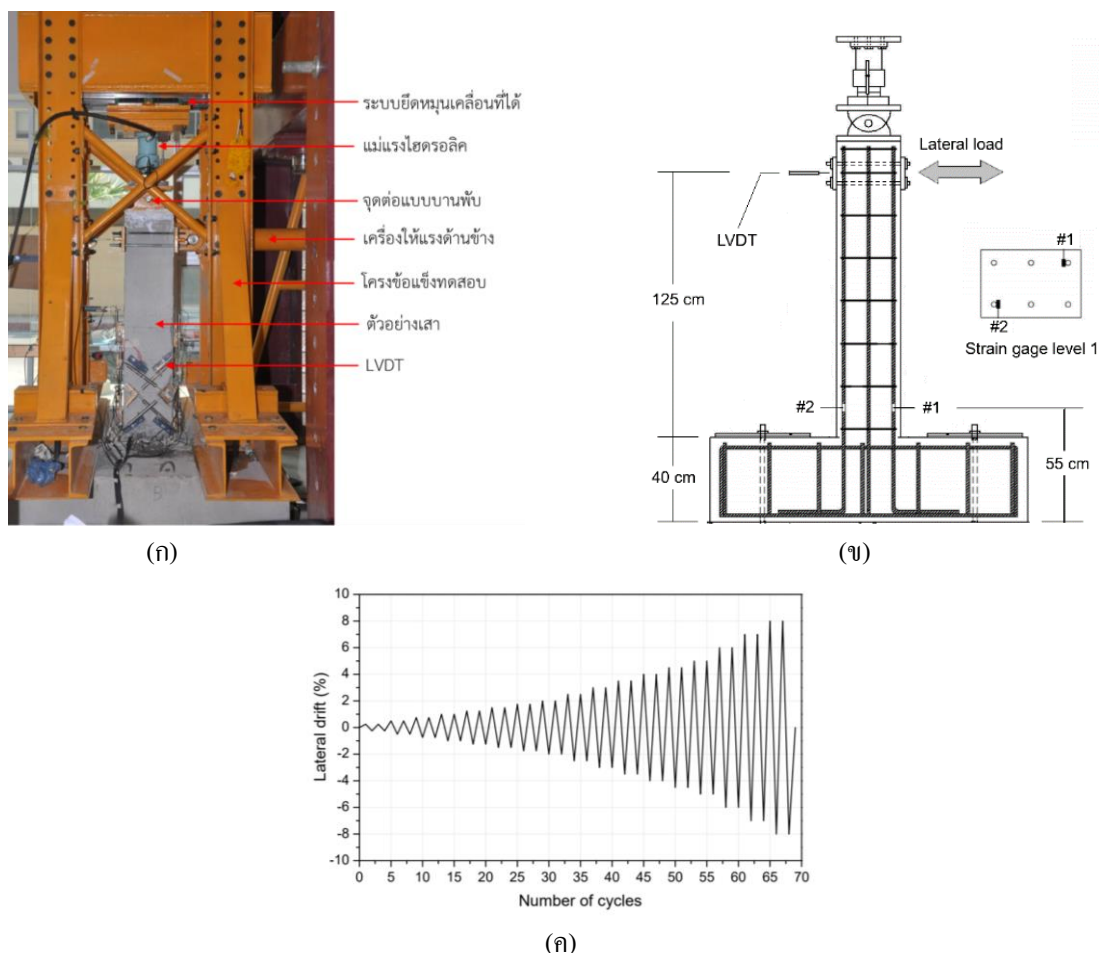


รูปที่ 3 เสาทดสอบและรายละเอียดการเสริมกำลัง (ก) C-1 (ข) C-TIE (ค) C-FRC

ตัวอย่างทดสอบถูกติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการเคลื่อนที่ LVDT (Linear variable differential transformer) จำนวน 13 ตัว โดยติดตั้ง LVDT แนวตั้งบนหัวเสา 1 ตัว สำหรับวัดระยะเคลื่อนตัวตามแนวแกน และแนวนอน 2 ตัว ที่หัวเสาและกึ่งกลางความสูงของเสาสำหรับวัดระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา ขณะที่ LVDT ที่ติดตั้งในแนวดิ่งด้านข้างเสา 6 ตัว ใช้สำหรับหาโมเมนต์กับมุมความโค้ง (Moment-curvature) ของเสา และ LVDT 4 ตัว ติดตั้งแนวทะแยงเพื่อวัดระยะเคลื่อนตัวแนวทะแยงบริเวณ โคนเสา ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) นอกจากนี้เกจวัดความเครียด (Strain gage) ถูกติดตั้งบนเหล็กเสริมตามยาว 2 จุด ที่ตำแหน่งสูงจากฐานเสา 15 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) เพื่อใช้ตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมระหว่างการทดสอบ ข้อมูลการเคลื่อนที่ทางข้างของเสา ความเครียดของเหล็กเสริม รูปแบบการแตกร้าว และพฤติกรรมการวิบัติ ถูกบันทึกโดยละเอียดตลอดการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างเสาเริ่มต้นด้วยการให้แรงอัดตามแนวแกน 300 กิโลนิวตัน และคงแรงอัดนี้ไว้ตลอดการทดสอบเพื่อจำลองน้ำหนักบรรทุกของอาคาร แม่แรงไฮดรอลิกที่ยึดกับโครงข้อแข็งเหล็กแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Linear roller system) และจุดต่อระหว่างแม่แรงไฮดรอลิกกับหัวเสาที่เป็นแบบบานพับ (Hinge connection) ช่วยให้แม่แรงสามารถเคลื่อนตัวตามเมื่อเสาทดสอบเคลื่อนตัวด้านข้างทำให้แรงอัดผ่านแนวแกนของเสาตลอด การติดตั้งโครงข้อแข็งทดสอบแสดงดังรูปที่ 4(ก) ขณะที่คงแรงอัดได้ให้แรงกระทำทางข้างแบบวัฏจักรที่ระยะสูงจากโคนเสา 1.25 เมตร ด้วยเครื่องให้แรงด้านข้าง (Actuator) แสดงดังรูปที่ 4(ข) โดยใช้การควบคุมระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของหัวเสา (Displacement control) ซึ่งประกอบด้วยวัฏจักรต่อเนื่องกัน โดยแบ่งการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้าง (Lateral drift) เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเพิ่มครั้งละร้อยละ 0.25 เมื่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างถึงร้อยละ 2 จึง

เพิ่มครั้งละร้อยละ 0.50 จนกระทั่งถึงร้อยละ 5 และหลังจากนั้นเพิ่มครั้งละร้อยละ 1 โดยประวัติแรงกระทำทางข้างแบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-static lateral load) แสดงดังรูปที่ 4(ค) การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างกำหนดด้วยอัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนที่ด้านข้างต่อความสูงจากโคนเสาถึงจุดที่แรงทางข้างมากระทำ



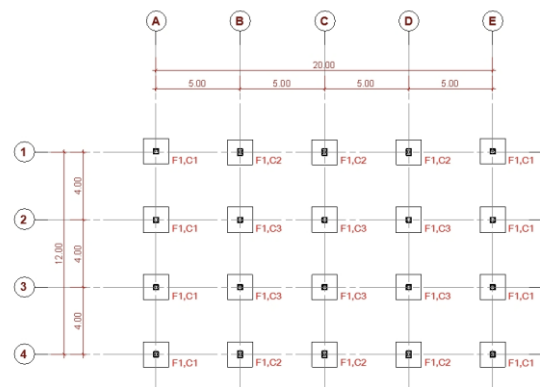
รูปที่ 4 การทดสอบเสา (ก) การติดตั้งการทดสอบ (ข) ตำแหน่งเครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง เกจวัดความเครียด และแรงกระทำ (ค) รูปแบบแรงกระทำทางข้างแบบวิถัจกร

4.2 ด้านต้นทุน

อาคารที่นำมาเป็นกรณีศึกษาในการเปรียบเทียบต้นทุนค่าวัสดุและค่าแรงงานเป็นอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้น ขนาดพื้นที่ 12 เมตร x 20 เมตร แบบจำลองอาคารที่ใช้ศึกษาและฝังเสาแสดงดังรูปที่ 5 เสาของอาคารแบ่งเป็นเสา C1 จำนวน 8 ต้น มีขนาดหน้าตัด 20 เซนติเมตร x 20 เซนติเมตร เสริมเหล็กตามยาว DB12 จำนวน 4 เส้น และเสา C2 จำนวน 6 ต้น มีขนาดหน้าตัด 20 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร เสริมเหล็กตามยาว DB16 จำนวน 6 เส้น โดยทั้งเสา C1 และ C2 มีความสูง 4.5 เมตร และเสริมเหล็กตามขวาง RB6 ทุกระยะห่าง 20 เซนติเมตร ขณะที่เสาภายใน C3 จำนวน 6 ต้น เป็นเสาตอม่อที่มีความสูงถึงระดับคานชั้นล่างเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกจากคานชั้นล่างเท่านั้น ดังนั้นจึงพิจารณาการเสริมกำลังเฉพาะเสา C1 และ C2 โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีเพิ่ม

ปริมาณเหล็กปลอกและวิธีเสริมเส้นใยเหล็กในคอนกรีต โดยทั้งเสา C1 และ C2 จะต้องเสริมกำลังตั้งแต่โคนเสาขึ้นไปถึงความสูง 75 เซนติเมตร เหมือนกันตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302

การเปรียบเทียบต้นทุนจะพิจารณาเฉพาะค่าวัสดุและค่าแรงซึ่งอ้างอิงจากบัญชีราคาค่าวัสดุและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 [19] ยกเว้นราคาเส้นใยเหล็กได้จากการสืบราคาจากท้องตลาด โดยสมมติให้ค่าจัดเก็บวัสดุสำหรับเส้นใยเหล็กและเหล็กเส้นกลมที่เสริมพิเศษมีต้นทุนเท่ากันเนื่องจากเป็นวัสดุประเภทเดียวกันและปริมาณที่ใช้ใกล้เคียงกัน รวมถึงกำหนดให้ความหนาแน่นของเหล็กเส้นกลมและเส้นใยเหล็กเท่ากับ 7,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

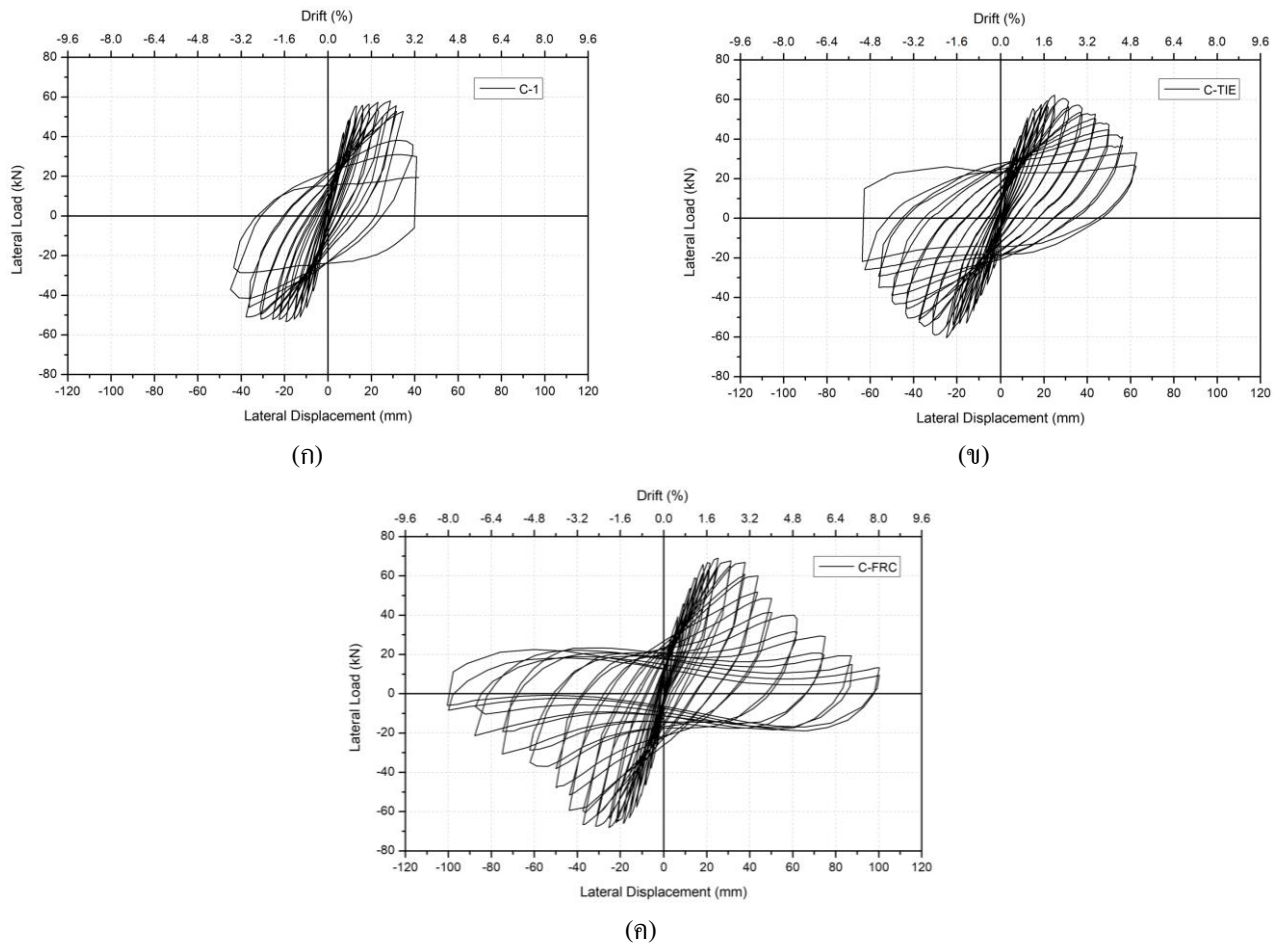


รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติ (ซ้าย) และผังฐานรากและเสา (ขวา) ของอาคารที่ใช้ศึกษา

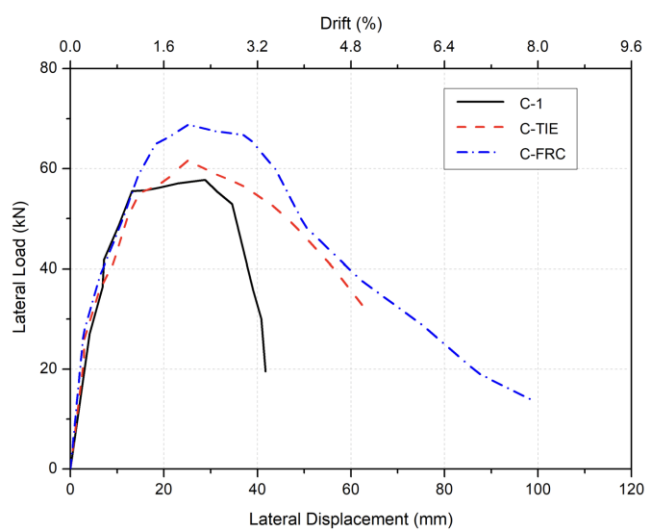
5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 แรงกระทำและการเคลื่อนตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างเสาทั้ง 3 ต้น ที่ได้จากการทดสอบถูกแสดงดังรูปที่ 6 และเส้นขอบเขต (Envelope curves) ของเสาทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 7 ผลการทดสอบที่สำคัญสรุปในตารางที่ 1 จากข้อมูลพบว่าพฤติกรรมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis behavior) ของเสาที่เสริมกำลังมีการพัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับเสาควบคุม C-1 โดยเสา C-FRC และเสา C-TIE สามารถรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุด 69 และ 65 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกันมากและถือว่าเทียบเท่ากัน รวมถึงมีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดครากใกล้เคียงกัน แต่มีระยะเคลื่อนตัวด้านข้างที่วิบัติเท่ากับ 100 และ 63 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้นเสา C-FRC มีความเหนียวมากกว่าเสา C-TIE และเส้นใยเหล็กมีประสิทธิภาพดีกว่าในด้านการพัฒนาความเหนียวเมื่อเทียบกับเสาที่เสริมกำลังกับเสาควบคุมพบว่า เสา C-TIE มีกำลังรับแรงด้านข้างและความเหนียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 และ 33 ตามลำดับ ในขณะที่เสา C-FRC มีกำลังรับแรงด้านข้างและความเหนียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 19 และ 103 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวด้านข้าง (ก) C-1 (ข) C-TIE (ค) C-FRC



รูปที่ 7 เส้นขอบเขตของตัวอย่างเสา

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวอย่างเสา

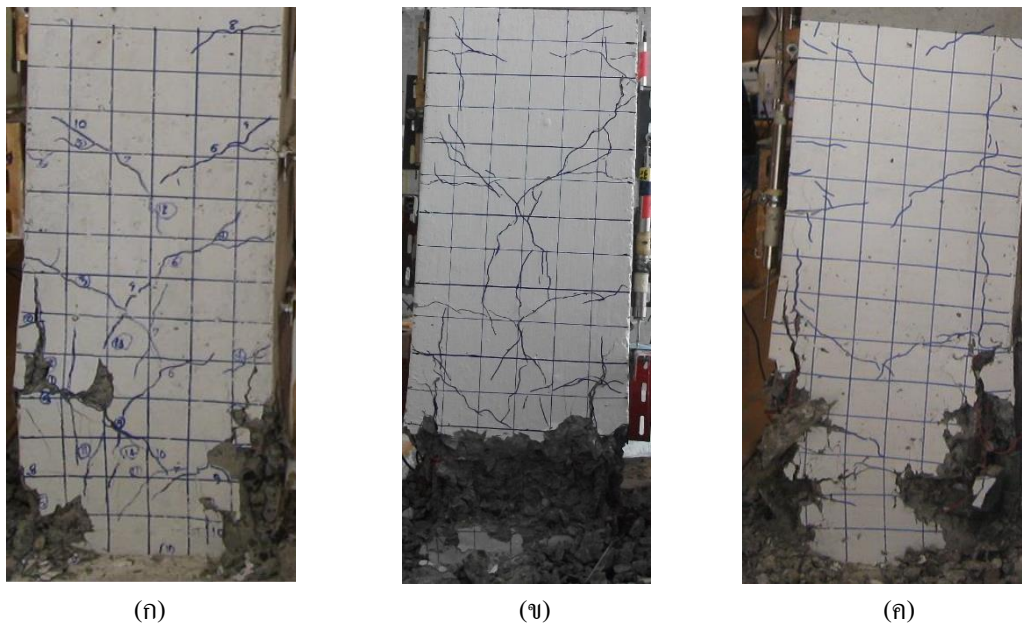
ผลการทดสอบ	ตัวอย่างทดสอบ		
	C-1	C-TIE	C-FRC
แรงกระทำด้านข้างสูงสุด (กิโลนิวตัน)	58.1	65	69.2
การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างที่ร้อยละ 80 ของแรงกระทำสูงสุด (ร้อยละ)	2.9	4.0	3.8
ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างที่จุดคราก (มม.)	12.8	14.3	15
ระยะเคลื่อนตัวด้านข้างที่วบัติ (มม.)	41.7	63	100
ความเหนียว	3.3	4.4	6.7
ความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ C-1 (ร้อยละ)	-	33	103

5.2 รูปแบบความเสียหาย

ตัวอย่างเสาควบคุม C-1 เริ่มเกิดรอยร้าวแนวนอนหรือรอยร้าวคด (Flexural crack) ขนาดเล็กที่ระยะความสูงจากโคนเสาประมาณ 12 เซนติเมตร โดยมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างเท่ากับร้อยละ 0.5 เมื่อเพิ่มการเคลื่อนที่ด้านข้างถึงร้อยละ 2 รอยแตกร้าวมีจำนวนมากกระจายทั่วเสาและขยายตัวตามยาวในทิศทางเฉียง บริเวณ โคนเสามีรอยร้าวขนาดกว้างและเกิดการหลุดล่อน (Spalling) ของคอนกรีตเนื่องจากแรงอัด เมื่อเพิ่มระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาอย่างต่อเนื่อง รอยร้าวและการหลุดล่อนมีความรุนแรงมากขึ้น เหล็กเสริมตามยาวโผล่เกาะ และตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างเท่ากับร้อยละ 3.3 โดยมีลักษณะเป็นการวิบัติเชิงคด (Flexural failure) แสดงดังรูปที่ 8(ก)

สำหรับการทดสอบตัวอย่างเสา C-TIE พบว่ารอยร้าวคดเริ่มเกิดขึ้นที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างเท่ากับร้อยละ 1 และเมื่อการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.5 สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวแบบเส้นตรงบริเวณความสูงจากโคนเสาประมาณ 50 เซนติเมตร ซึ่งเป็นจุดที่หุขเสริมเหล็กปลอกพิเศษ เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับร้อยละ 2 รอยร้าวขยายตัวกว้างและยาวขึ้น รวมถึงเริ่มมีการหลุดล่อนของคอนกรีต เมื่อเพิ่มการเคลื่อนตัวของเสามากขึ้น รอยร้าวมีจำนวนและขนาดเพิ่มขึ้น เกิดการหลุดล่อนของคอนกรีตที่โคนเสาฐานแรง และตัวอย่างทดสอบวิบัติเชิงคดที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างเท่ากับร้อยละ 5 ดังแสดงในรูปที่ 8(ข) พฤติกรรมของเสา C-TIE แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกบริเวณ โคนเสาช่วยลดการเกิดรอยร้าวแบบเส้นตรง รวมถึงชะลอการหลุดล่อนของคอนกรีต ช่วยป้องกันการโผล่เกาะของเหล็กเสริมตามยาว และเพิ่มความเหนียวของเสาทดสอบ

ในส่วนการทดสอบเสา C-FRC พบว่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ด้านข้างที่ร้อยละ 0.5 ทำให้เสาเริ่มเกิดรอยร้าวคดขนาดเล็ก เมื่อการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับร้อยละ 1.5 รอยร้าวแบบเส้นตรงปรากฏขึ้นชัดเจนบริเวณความสูงจากโคนเสาประมาณ 50 เซนติเมตร ซึ่งเป็นจุดที่หุขเสริมเส้นใยเหล็ก นอกจากนี้รอยร้าวเดิมมีการขยายใหญ่ขึ้น จำนวนรอยร้าวเพิ่มขึ้นกระจายทั่วเสา และที่การเคลื่อนตัวร้อยละ 3 คอนกรีตเริ่มเกิดการหลุดล่อน จากนั้นคอนกรีตที่โคนเสาหลุดล่อนอย่างรุนแรงที่การเคลื่อนตัวด้านข้างที่ร้อยละ 5 ก่อนเกิดการวิบัติเชิงคดบริเวณ โคนเสาที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้านข้างที่ร้อยละ 8 ดังแสดงในรูปที่ 8(ค) พฤติกรรมของเสา C-FRC แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กช่วยควบคุมความกว้างของรอยร้าว ชะลอการหลุดล่อนของคอนกรีต และทำให้เสาไม่สูญเสียกำลังแบบฉับพลัน



รูปที่ 8 รูปแบบความเสียหายของเสาทดสอบที่วัด (ก) C-1 ที่ 3.3% (ข) C-TIE ที่ 5% (ค) C-FRC ที่ 8%

5.3 ค่าวัสดุและค่าแรงงาน

การเปรียบเทียบค่าวัสดุและค่าแรงที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมกำลังโครงสร้างจะพิจารณาต้นทุนการก่อสร้างอาคารเฉพาะในส่วน
ของงาน โครงสร้างเท่านั้น อาคารก่อนเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีต้นทุนงาน โครงสร้าง 915,755.48 บาท รายละเอียด
ต้นทุนเฉพาะเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก C1 และ C2 แสดงในตารางที่ 2 โดยรวมค่าวัสดุและค่าแรงเท่ากับ 53,872.56 บาท ปริมาณวัสดุ
รวมถึงค่าวัสดุและค่าแรงที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยเหล็กปลอกเสริมพิเศษและเส้นใยเหล็กแสดงในตารางที่ 3

จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กมีต้นทุนสูงกว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก เนื่องจากเส้นใยเหล็กมี
ราคาสูงกว่าเหล็กปลอกค่อนข้างมากถึงแม้จะมีต้นทุนค่าแรงน้อยกว่า แต่หากปริมาณการใช้เส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นอาจทำให้ต้นทุนค่า
วัสดุลดลง เมื่อเทียบกับต้นทุนงานโครงสร้างทั้งหมดการเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กและเหล็กปลอกจะมีต้นทุนสูงขึ้นร้อยละ 0.15
และ 0.03 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับเฉพาะค่าก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า การเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กและเหล็ก
ปลอกจะมีต้นทุนสูงขึ้นร้อยละ 2.56 และ 0.57 ตามลำดับ การเสริมกำลังโครงสร้างเสาทั้ง 2 วิธี ที่ใช้ในการศึกษานี้ทำให้ต้นทุนการ
ก่อสร้างของอาคารเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับต้นทุนการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นของอาคารที่ออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบ
อาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ซึ่งมีรายงานจากการวิจัยว่าสูงขึ้นร้อยละ 12.22 ถึง 14.07 [4]

จากผลการทดสอบ การเสริมกำลังทั้ง 2 วิธี สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างได้ดี ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรซึ่งมี
พฤติกรรมคล้ายแรงแผ่นดินไหว โดยแรงกระทำด้านข้างสูงสุดที่เสาเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กและเหล็กปลอกเสริมพิเศษสามารถ
รับได้ มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงถือว่ามีความสามารถในการพัฒนากำลังรับแรงเทียบเท่ากัน ขณะที่การเสริมกำลังด้วยเส้นใยสามารถ
พัฒนาความเหนียวของเสาได้มากกว่าเหล็กปลอกเสริมพิเศษอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อประเมินความคุ้มค่าของการเสริมกำลัง
ด้วยเส้นใยและเหล็กปลอกเสริมพิเศษ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนความเหนียวที่เพิ่มขึ้นต่อต้นทุนที่สูงขึ้นพบว่าเท่ากับ 40 และ 58
ตามลำดับ ดังนั้นการเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความเหนียวของโครงสร้างได้ดีกว่า ขณะที่เมื่อพิจารณาด้านต้นทุนร่วมด้วย การ
เสริมกำลังโดยการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกมีความคุ้มค่ามากกว่า

ตารางที่ 2 รายการปริมาณและราคางานโครงสร้างเสาอาคาร

รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรง		รวมค่าวัสดุและค่าแรง (บาท)
			ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	
คอนกรีตผสมเสร็จ 240 กก./ตร.ชม. / 210 กก./ตร.ชม.	3.21	ลบ.ม.	2,420	7,768.20	419	1,344.99	9,113.19
ไม้แบบทั่วไปและไม้คร่าว	58.03	ลบ.ฟ.	400	23,212	139	8,066.17	31,278.17
ตะปู ขนาดต่าง ๆ	11.16	กก.	36	401.76	-	-	401.76
เหล็กกลมผิวเรียบ SR24 ขนาด RB6 มม.	65.88	กก.	23.30	1,535	4.40	289.87	1,824.87
เหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาด DB12 มม.	139.69	กก.	22.05	3,080.16	3.60	502.88	3,583.04
เหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาด DB16 มม.	284.12	กก.	21.85	6,208	3.60	1,022.83	7,230.83
ลวดผูกเหล็กขนาด ๑.25 มม.	14.69	กก.	30	440.70	-	-	440.70
รวมค่าวัสดุและค่าแรงของเสา C1 และ C2							53,872.56

ตารางที่ 3 รายการปริมาณและราคางานเสริมกำลังโครงสร้างเสา C1 และ C2

รายการงานเสริมกำลังโครงสร้าง	จำนวน (กิโลกรัม)	ค่าวัสดุ		ค่าแรง		รวมค่าวัสดุและค่าแรง	
		ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	เหล็กปลอก (บาท)	เส้นใยเหล็ก (บาท)
เหล็กปลอก 6 มม. เสริมพิเศษ - C1	5.7	23.30	132.81	4.40	25.08	157.89	-
เหล็กปลอก 6 มม. เสริมพิเศษ - C2	5.4	23.30	125.82	4.40	23.76	149.58	-
เส้นใยเหล็ก HE35 - C1	9.4	69.00	648.60	0.05	0.47	-	649.07
เส้นใยเหล็ก HE35 - C2	10.6	69.00	731.40	0.05	0.53	-	731.93
รวมค่าวัสดุและค่าแรงของเสา C1 และ C2						307.47	1,381.00

การออกแบบอาคารตามมาตรฐานเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารที่ไม่อยู่ในเกณฑ์ข้อบังคับ เช่น บ้านพักอาศัยหรืออาคารที่สูงน้อยกว่า 10 เมตร หรือน้อยกว่า 3 ชั้น อาจเกิดความจำเป็นหรือดำเนินการก่อสร้างจริงได้ยากในโครงการที่มีงบประมาณจำกัด อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังในบางชิ้นส่วนของอาคารเหล่านี้ โดยใช้เส้นใยเหล็กหรือโดยการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกเป็นวิธีที่เหมาะสมและคุ้มค่า เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นน้อยแต่สามารถพัฒนาความเหนียวของโครงสร้างได้มาก อีกทั้งยังช่วยต่อการใช้งานจริง ช่วยลดความเสียหายของอาคารและเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งานเมื่อเกิดเหตุแผ่นดินไหว

6. สรุปผล

การวิจัยนี้ศึกษาการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีผสมเส้นใยเหล็กและวิธีเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกเพื่อหาประสิทธิภาพในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวและต้นทุนในการดำเนินการ โดยสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมเส้นใยเหล็กและการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกเป็นวิธีพัฒนาพฤติกรรมโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านกำลังรับแรงดัดข้าง ความเหนียว และการควบคุมความกว้างรอยร้าว โดยเสาเสริมเส้นใยเหล็กมีกำลังรับแรงดัดข้างและความเหนียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 19 และ 103 ตามลำดับ ในขณะที่เสาเสริมเหล็กปลอกพิเศษมีกำลังรับแรงดัดข้างและความเหนียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 และ 33 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเสาควบคุม โดยความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กส่งผลให้อาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2. การวิเคราะห์ต้นทุนการเสริมกำลังอาคารพบว่า การเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กมีต้นทุนสูงกว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 วิธี มีต้นทุนน้อยกว่าการออกแบบตามมาตรฐานอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวมาก โดยการใช้เส้นใยและเหล็กปลอกเสริมพิเศษมีต้นทุนสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.15 และ 0.03 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับต้นทุนงานโครงสร้าง และคิดเป็นร้อยละ 2.56 และ 0.57 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเฉพาะต้นทุนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

3. การเสริมกำลังโครงสร้างทั้ง 2 วิธี มีประสิทธิภาพและต้นทุนที่ต่างกัน การเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กช่วยเพิ่มความเหนียวของโครงสร้างได้ดีกว่ามาก อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาอัตราส่วนความเหนียวที่เพิ่มขึ้นต่อต้นทุนที่สูงขึ้น สำหรับเส้นใยเหล็กและเหล็กปลอกเสริมพิเศษจะมีค่าเท่ากับ 40 และ 58 ตามลำดับ ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างเสาด้วยวิธีเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกมีความคุ้มค่ามากกว่า

4. วิธีการเสริมกำลังเสาอาคารในงานวิจัยนี้ โดยไม่ได้ออกแบบตามมาตรฐานอาคารต้านทานแผ่นดินไหว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างได้ แต่อาจไม่เทียบเท่าการออกแบบตามมาตรฐาน อย่างไรก็ตามวิธีนี้เหมาะสำหรับบ้านพักอาศัยหรืออาคารที่มีงบประมาณจำกัด และไม่เข้าเกณฑ์ข้อกำหนดของอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนงานเสริมกำลังและบรรเทาความเสียหายของอาคารจากแรงแผ่นดินไหว

5. การเสริมกำลังคอนกรีตด้วยเส้นใยมีผลต่อพฤติกรรมโครงสร้างและต้นทุนการก่อสร้างมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะ และปริมาณของเส้นใย การศึกษานี้เสนอผลการเปรียบเทียบในด้านโครงสร้างและด้านต้นทุน เฉพาะกรณีการใช้เส้นใยเหล็กชนิดอปลาย ปริมาณร้อยละ 0.5 ในการเสริมกำลัง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีอื่นต่อไป

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hansapinyo, C. 5 May 2014 Chiang Rai earthquake lesson learned for future earthquake preparedness. *Engineering Journal of Research and Development*, 2015, 26(3), pp. 23-31. [in Thai]
- [2] Noojew, K. *et al.* Earthquake capacity evaluation of low-rise residential buildings in Chiang Mai. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 2015, 5(2), pp. 86-102. [in Thai]
- [3] Nuangnun, C. *et al.* Earthquake trends in Thailand and Myanmar. *Thaksin University Journal*, 2018, 21(3), pp. 167-173. [in Thai]

- [4] Thongpanya, W. *Comparison of construction costs of reinforced concrete building with and without consideration of earthquake resistance: A case study of 4-story conservative buildings of the department of public works and town & country planning*. Master's Thesis, Suranaree University of Technology, 2014. [in Thai]
- [5] Hussain, Q. and Joyklad, P. Effect of lateral reinforcement ratio on strength and ductility of RC columns. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 2017, 7(1), pp. 1-16.
- [6] Warnitchai, P. *Mealao Earthquake [Photograph]*. Mealao, Chiang Rai, Thailand, 12 May 2014.
- [7] Fanela, D. and Naaman, A. Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression. *ACI Journal Proceedings*, 1985, 82(4), pp. 475-483.
- [8] Ezeldin, A. and Balaguru, P. Normal and high strength fiber reinforced concrete under compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1992, 4(4), pp. 415-429.
- [9] Nataraja, M. *et al.* Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(5-6), pp. 383-390.
- [10] Carneiro, J. A. *et al.* Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 46, pp. 65-72.
- [11] Afroughsabet, V. *et al.* Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. *Composite Structures*, 2017, 181, pp. 273-284.
- [12] Belyaev, A. V. *et al.* Design features of three-layer slab reinforced concrete structures. *Materials Science Forum*, 2018, 931, pp. 264-268.
- [13] Shilov, A. *et al.* Initial crack effect on the strength of oblique cross sections of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019, 110, pp. 01053.
- [14] Pajak, M. and Ponikiewski, T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, 2013, 47, pp. 397-408.
- [15] Caballero-Morrison, K. *et al.* Behaviour of steel-fibre-reinforced normal-strength concrete slender columns under cyclic loading. *Engineering Structures*, 2012, 39, pp. 162-175.
- [16] Bharti, R. *et al.* Influence of fiber reinforced concrete on plastic behavior on exterior beam column joint under cyclic loading. *Procedia Engineering*, 2017, 173, pp. 1122-1129.
- [17] Kongtun, S. *et al.* Mechanical properties and material cost of concrete reinforced with steel fibers with different tensile strengths. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2021, 31(4), pp. 700-710. [in Thai]
- [18] Mailyan, L. R. *et al.* Improving the structural characteristics of heavy concrete by combined disperse reinforcement. *Applied Sciences*, 2021, 11(13), pp. 6031.
- [19] Office of the basic education commission. *Table of construction material price and labor cost 2024*. Bangkok: Office of the basic education commission, 2024. Available from: https://mdh.go.th/view.php?article_id=9223 [Accessed 15 May 2024]. [in Thai]