

พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังภายนอกของเสา

Behavior of Reinforced Concrete Structures with External Strengthening of Columns

วีระชัย หิรัญวัฒนเกษม (Weerachai Hirunwattanakasem)* ดร.ธัญดา พรหมเชษฐ์ (Dr.Tanyada Pannachet)^{1**}

เมธี บุญพิเชฐวงศ์ (Maetee Boonpichetvong)** พนมเทพ เนตรพระ (Panomthep Natepra)*

(Received: June 4, 2020; Revised: August 17, 2020; Accepted: August 18, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและการหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้ภัยพิบัติแผ่นดินไหวเพิ่มเติมโดยวิธีผลัดล้ม ผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังสามารถต้านทานแรงด้านข้างและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น การเสริมเสาด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยเพิ่มความต้านทานและความเหนียวของโครงสร้าง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างและแสดงให้เห็นถึงการกระจายโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างก่อนเสริมกำลัง ส่วนการเสริมกำลังเสาด้วยการหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้าง ความเหนียว และสติฟเนส การขยายหน้าตัดขององค์อาคารอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง และการกระจายแรงภายในในโครงสร้าง ซึ่งมีผลกระทบต่อชิ้นส่วนอื่นๆ ในโครงสร้าง

ABSTRACT

This paper presents a study on dynamic properties and comparison of structural behavior of reinforced concrete buildings strengthened by fiber-reinforced polymer (FRP) jacketing and by reinforced concrete (RC) jacketing. The structures were evaluated according to additional earthquake and analyzed by the pushover analysis. The result indicated that the strengthened structures could resist more lateral load and had higher ductility. The dynamic properties of the FRP-strengthened structures, as well as distribution of the bending moments and the shear forces, did not show any difference from its original structure. Besides higher strength and ductility, higher structural stiffness was also obtained in the RC-strengthened structure. The significant enlargement of the column sections was a cause to change in dynamic properties of the original structure and redistribution of the bending moments and the shear forces, also affecting the other structural members besides the strengthened ones.

คำสำคัญ: วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีการผลัดล้ม

Keywords: Fiber reinforced polymer, Reinforced concrete, Pushover analysis

¹Corresponding author: tanpan@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

หลายสิบปีที่ผ่านมา อุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยเติบโตอย่างมาก มีการก่อสร้างมากมาย โดยโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกออกแบบให้รับเพียงแรงกระทำแนวตั้งเท่านั้น แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลายครั้งซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศไทยในหลายภูมิภาค ในปี 2017 Jampila [1] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงค่าความเร่งผลตอบแทนบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยพิจารณาผลกระทบจากรอยเลื่อนท่าแขกและรอยเลื่อนเพชรบูรณ์ พบว่า ค่าความเร่งผลตอบแทนที่ได้จากการศึกษามีค่าสูงกว่าที่ถูกเสนอในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1302 [2] ถึง 2-2.4 เท่า ส่งผลให้อาคารเก่าที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวมีความเสี่ยงต่อการต้านทานแรงมากขึ้น จากการประเมินความเสียหายโครงสร้างอาคารพาณิชย์ที่มีการเสื่อมสภาพในการศึกษาของ Natepra [3] ภายใต้อาการเร่งผลตอบแทนดังกล่าวพบว่า โครงสร้างอาคารพาณิชย์ในบางรูปแบบไม่สามารถต้านทานแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้

เนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหวมีแนวโน้มเพิ่มความรุนแรงมากขึ้นในปัจจุบัน การเสริมกำลังโครงสร้างจึงเป็นส่วนสำคัญและมีความจำเป็นเพื่อให้โครงสร้างยังคงมีความปลอดภัยเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำเพิ่มเติม ในปัจจุบัน เทคนิคในการเสริมกำลังมีหลากหลายวิธี ทั้งการเสริมกำลังแบบทั้งระบบ (Global strengthening) [4] หรือการเสริมกำลังแบบเฉพาะที่ (Local strengthening) [5-7] ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการเสริมความแข็งแรงขององค์อาคารแบบเฉพาะที่ ซึ่งเป็นการเสริมกำลังแบบภายนอก การเสริมความแข็งแรงแบบเฉพาะที่สามารถทำได้โดยการติดตั้งหรือพันโอบรัดชิ้นส่วนด้วยวัสดุที่มีกำลังสูง มีความบาง น้ำหนักเบา และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม เช่น วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymer; FRP) ซึ่งเป็นที่พิสูจน์แล้วในหลากหลายงานวิจัยว่า FRP สามารถเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนกับโมเมนต์ดัดได้ นอกจากนี้ การเสริมกำลังด้วย FRP ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลังรับแรงต่อน้ำหนักที่สูง ไม่ทำให้เกิดการเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้าง จึงเหมาะกับการเสริมกำลังเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวเพิ่มเติม สำหรับการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบวิธีเสริมกำลังนั้น วิธีการเสริมกำลังที่ได้เลือกมาในการศึกษานี้ ได้แก่การขยายหน้าตัดของค้ำอาคาร ซึ่งเป็นการเสริมกำลังด้วยการหุ้มองค์อาคารเดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อดีของวิธีนี้คือวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุที่หาได้โดยทั่วไป และวิศวกรสามารถออกแบบการเสริมกำลังโดยใช้พื้นฐานของทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็กได้ แต่ข้อเสียคือขนาดขององค์อาคารจะใหญ่ขึ้น ซึ่งจะมีผลกับองค์อาคารที่เชื่อมต่อกัน

ในบทความนี้ จะนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างก่อนและหลังการเสริมกำลัง และผลการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังภายนอก 2 วิธี คือการหุ้มด้วยวัสดุพอลิเมอร์ หรือที่เรียกว่า FRP Jacketing และการหุ้มด้วยคอนกรีต หรือเรียกว่า RC Jacketing ซึ่งการเสริมกำลังลักษณะนี้เป็นการเสริมกำลังโดยการโอบรัดแบบ Passive วัสดุที่โอบรัดจะทำงานก็ต่อเมื่อมีแรงเพิ่มเติมกระทำต่อโครงสร้าง

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้อาการเร่งแผ่นดินไหวเพิ่มเติมบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนและหลังการเสริมกำลังเสาด้วยวัสดุภายนอก ซึ่งได้แก่ วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และคอนกรีตเสริมเหล็ก

วิธีการวิจัย

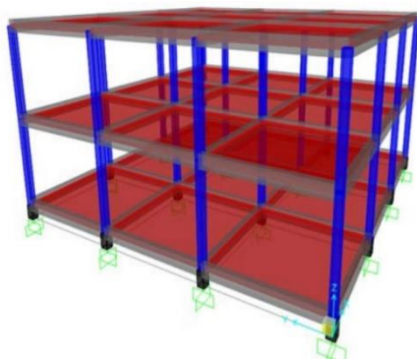
รายละเอียดอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ ใช้ตัวอย่างอาคารตามการศึกษาของ Natepra [3] ซึ่งเป็นอาคารพาณิชย์คอนกรีตเสริมเหล็ก 3 คูหา 2 ชั้น มีลักษณะสมมาตร กว้าง 12 เมตร ลึก 12 เมตร สูง 6.5 เมตร เสาตอม่อสูง 0.5 เมตร เสาระหว่างชั้นสูง 3 เมตร และระยะห่างระหว่างเสา เท่ากับ 4 เมตร อาคารดังกล่าวได้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ACI318-19) [8] แต่ไม่ได้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว ในการออกแบบ ผู้ออกแบบได้พิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออาคาร ได้แก่ น้ำหนักพื้นและวัสดุตกแต่งพื้น รวม 360 กก./ตร.ม. น้ำหนักผนัง 150 กก./ตร.ม. น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารพาณิชย์ 300 กก./ตร.ม. และ แรงลมสำหรับอาคารสูงไม่เกิน 10 เมตร 50 กก./ตร.ม. ผู้ออกแบบได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต เท่ากับ 210 กก./ตร.ซม. เหล็กเสริมตามยาวชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก เท่ากับ 4000 กก./ตร.ซม. และเหล็กเสริมตามขวางชั้นคุณภาพ SR24 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก เท่ากับ 2400 กก./ตร.ซม.

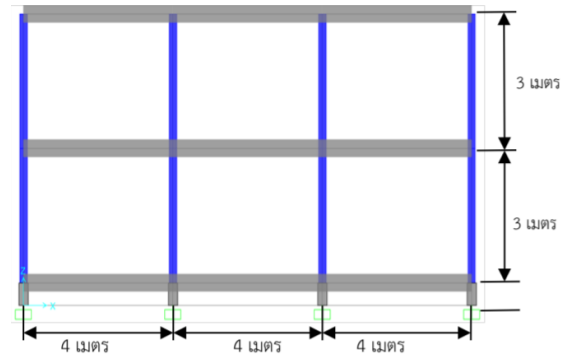
นอกจากนั้น เพื่อกำหนดถึงสภาพความเสียหายของอาคารที่มีอายุการใช้งานมาแล้ว ในการศึกษาของ Natepra [3] ยังได้มีการสำรวจสภาพอาคารที่มีอายุการใช้งานยาวนานเกิน 20 ปี ในพื้นที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น โดยการหากำลังอัดของคอนกรีตของอาคารใช้วิธีค้อนกระแทกแบบสมิทท์ (Schmidt's Rebound Hammer) และขนาดของเหล็กเสริมที่เกิดการเสื่อมสภาพใช้วิธีกะเทาะคอนกรีตบริเวณที่เสื่อมสภาพออกและใช้กระดากทรายขัดเอาสนิมออก จากนั้นจึงใช้เวอร์เนียวัดขนาดของเหล็กเสริม และได้สร้างการจำลองสภาพอาคารตามผลการสำรวจอาคารดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วยการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น 1 รอบนอกอาคาร เนื่องจากคอนกรีตเสื่อมสภาพและเหล็กเสริมมีการสึกกร่อน สำหรับในการศึกษานี้ อาคารดังกล่าวได้ถูกเลือกเพื่อใช้ในการศึกษาการออกแบบการเสริมกำลังและศึกษาพฤติกรรมของอาคารหลังจากการเสริมกำลัง โดยมีปริมาณการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริมตามยาวของเสาชั้น 1 รอบนอกที่ 40% ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 162 กก./ตร.ซม. และเหล็กเสริมตามยาวมีพื้นที่หน้าตัดลดลง 40% ตามการศึกษาของ Natepra [3] รายละเอียดของอาคารในการศึกษาเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2

การจำลองพฤติกรรมของโครงสร้าง

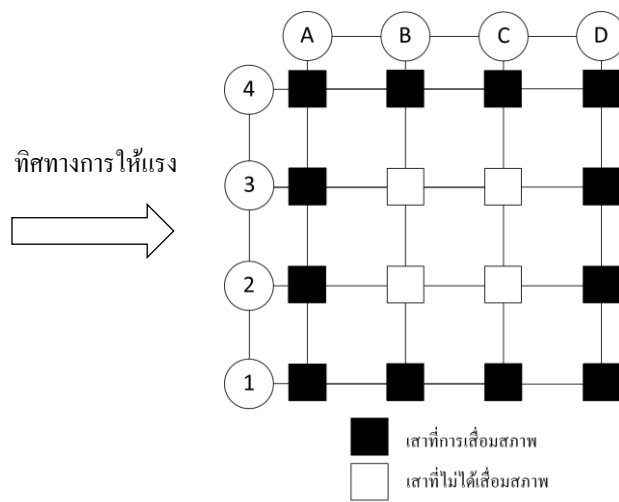
ในการศึกษานี้ การจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารอยู่ในรูปแบบของแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านโปรแกรม SAP2000 [9] โครงสร้างอาคารถูกจำลองในลักษณะของ โครงข้อแข็งสามมิติ ที่มีจุดรองรับที่ฐานของโครงสร้างแบบยึดแน่น มีการลดทอนโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเสาและคานาให้เหลือ 70% และ 35% เพื่อกำหนดถึงผลของการแตกร้าวที่มีต่อสตีฟเนส ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ACI318-19 [8] นอกจากนี้ น้ำหนักจากพื้นและผนังก่ออิฐได้ถูกถ่ายลงที่ชิ้นส่วนคานาโดยตรง โดยไม่ได้พิจารณาผลของการรับแรงร่วมจากผนังก่ออิฐและแผ่นพื้น



(ก) รูปสามมิติ

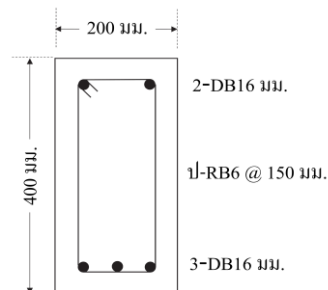


(ข) รูปด้านข้าง

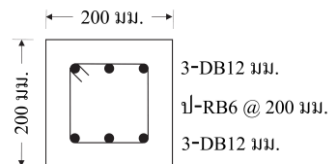


(ค) นิยามตำแหน่งเส้าและทิศทางการให้แรง

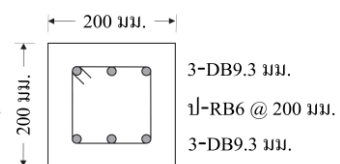
ภาพที่ 1 อาคารพาณิชย์ในการศึกษา



(ก) คาน



(ข) เสาปกติ

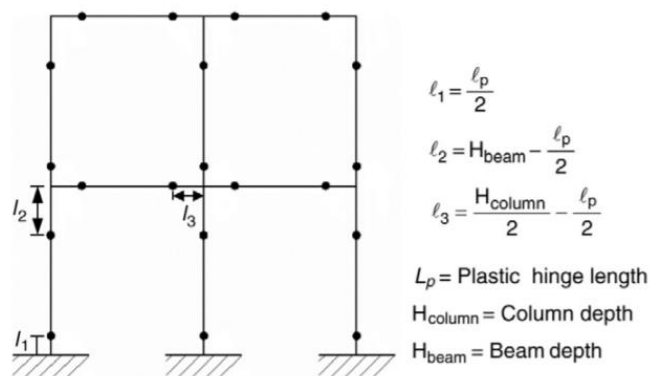


(ค) เส้าที่เชื่อมต่อสภาพ

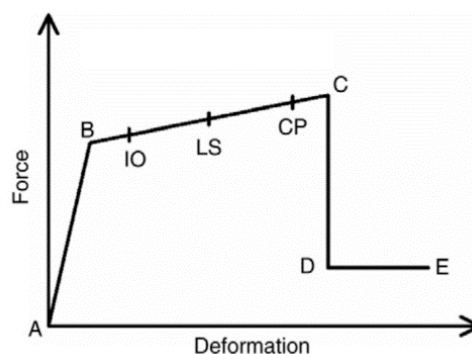
ภาพที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคานและเสา

การวิเคราะห์โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นโดยใช้วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโมเมนต์ (Modal response spectrum analysis) เพื่อหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายสำหรับไว้ใช้ในการวิเคราะห์ส่วนที่ 2 ระดับความรุนแรงแผ่นดินไหวที่พิจารณา 2 ระดับได้แก่ ความรุนแรงแผ่นดินไหวปลอดภัยขั้นพื้นฐาน (Basic safety earthquake; BSE) และความรุนแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design earthquake; DE) ตามการศึกษาของ Natepra [3]

สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์โดยวิธีสถิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น หรือวิธีผลักลิ้ม (Pushover analysis) การจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาและคานทำได้โดยหลักการรวมผลพลาสติก (lumped plasticity) โดยกำหนดตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกที่ปลายทั้งสองของเสาและคาน ดังแสดงในภาพที่ 3 ในที่นี้ คุณสมบัติและพฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกในรูปของความสัมพันธ์โมเมนต์ดัดและมุมหมุน ได้ถูกกำหนดโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASCE41-13 [10] ดังแสดงในภาพที่ 4 นอกจากนั้น ยังมีการกำหนดเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะด้วยสัญลักษณ์ IO, LS และ CP โดยที่ IO คือเกณฑ์การยอมรับระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate occupancy level), LS คือ เกณฑ์การยอมรับระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life safety level) และ CP คือ เกณฑ์การยอมรับระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention level)



ภาพที่ 3 การกำหนดตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกในโครงข้อแข็ง [11]



ภาพที่ 4 นิยามความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของจุดหมุนพลาสติกและเกณฑ์ระดับสมรรถนะ

นอกจากนั้น ในการศึกษาี้ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงข้อแข็งได้ถูกสมมติให้มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น และทำการตรวจสอบความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนที่ชิ้นส่วนและจุดต่อ หากค่าแรงเฉือนมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือน

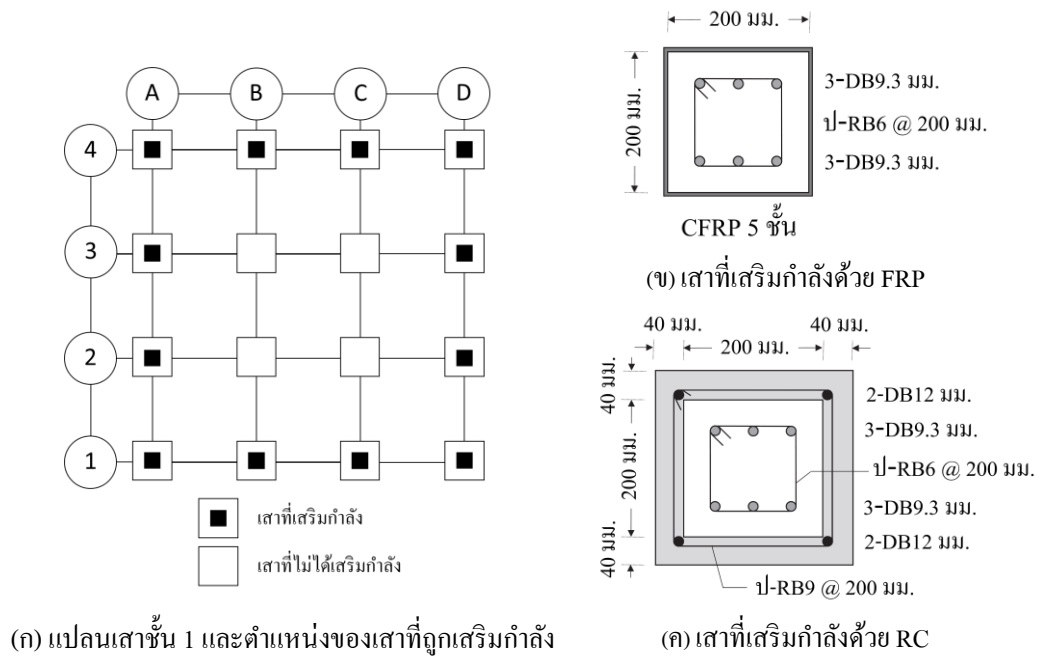
การเสริมกำลังโครงสร้างอาคาร

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีผลัดล้ม ทำให้สามารถประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารและนำไปสู่การออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างอาคาร ในการศึกษาี้ ได้เลือกวิธีการเสริมกำลังภายนอกขององค์อาคาร 2 แบบ ได้แก่ การหุ้มด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และการพอกด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการออกแบบการเสริมกำลัง จะมีการตรวจสอบว่าองค์อาคารใดบ้างที่มีกำลังต้านทานต่อแรงด้านข้างไม่ผ่านเกณฑ์สมรรถนะในระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS) และทำการเสริมกำลังให้เพียงพอที่จะผ่านเกณฑ์สมรรถนะดังกล่าว

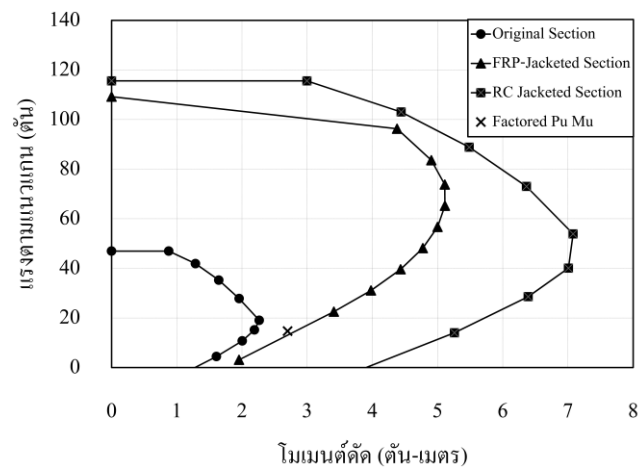
จากผลการวิเคราะห์แบบผลัดล้ม (รายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 8) พบว่าองค์อาคารที่ต้องเสริมกำลังมีเพียงเสาที่มีความเสื่อมสภาพทั้ง 12 ต้น ซึ่งเป็นเสาชั้น 1 บริเวณรอบนอกอาคาร รายละเอียดของหน้าตัดเสาที่เสริมกำลังจะเป็นดังแสดงในภาพที่ 5 ในการเสริมกำลังเสาด้วย FRP จะใช้ FRP ชั้นคุณภาพ CF300 จำนวน 5 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีความหนา 0.166 มม. กำลังรับแรงดึงออกแบบ 35,500 กก./ตร.ซม. โมดูลัสแรงดึงออกแบบ 2,350,000 กก./ ตร.ซม. และการยืดตัว 1.5 % ส่วนการเสริมกำลังโดยการพอกด้วย RC จะออกแบบให้สามารถรับแรงได้เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับการเสริมกำลังด้วย FRP มากที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดของการเสริมกำลังตามมาตรฐานการออกแบบ ACI318-19 [8] ซึ่งกำหนดว่าคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีกำลังอัดประลัยมากกว่าหรือเท่ากับของคอนกรีตเดิม และมีความหนาไม่น้อยกว่า 4 ซม. สำหรับการพัน และไม่น้อยกว่า 10 ซม. สำหรับการหล่อในที่ เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยื่นต้องไม่เล็กกว่า 12 มม. และเหล็กปลอกไม่เล็กกว่า 9 มม. สำหรับในการศึกษาี้ กำลังอัดประลัยของส่วนพอกขยายคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกกำหนดให้เท่ากับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแกนก่อนเสื่อมสภาพ นั่นคือ 210 กก./ ตร.ซม. การเปรียบเทียบความสามารถของหน้าตัดในรูปแผนภาพปฏิสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัดจะเป็นดังแสดงในภาพที่ 6

การจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีการเสริมกำลัง

ดังที่ได้กล่าวในก่อนหน้านี้ การจำลองพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นในชิ้นส่วนได้ใช้หลักการรวมผลพลาสติก ผ่านการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและมุมหมุนที่ตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกในคานและเสา สำหรับหน้าตัดที่เสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP และ RC นั้น การจำลองพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสา จะทำโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง (Moment-curvature relation) ของหน้าตัด จากแบบจำลองไฟเบอร์ในโปรแกรม SAP2000 [9] โดยหน้าตัดจะถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย และมีการกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแต่ละวัสดุ ซึ่งสำหรับหน้าตัดเสาที่มีการพันโอบรัดด้วย FRP จะใช้แบบจำลองของ Lam และ Teng [12] หลังจากนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งจะถูกคำนวณเป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมหมุน เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติกในการวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป



ภาพที่ 5 ตำแหน่งและรายละเอียดการเสริมกำลังของเสา



ภาพที่ 6 แผนภาพปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของเสาในการศึกษา

ผลการวิจัย

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น โครงสร้างอาคารเป็นแบบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดาได้ถูกพิจารณาให้มีโหมดการเคลื่อนที่ในทิศทาง X ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเพียงโหมดที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากเป็นโหมดที่มีอัตราส่วนผลรวมของมวล (Modal participation mass ratio) มากที่สุด จึงเป็นโหมดหลักในการกำหนดพฤติกรรมของโครงสร้าง การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างก่อนการเสริมกำลังและโครงสร้างที่เสริมด้วย FRP มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่การเสริมกำลังด้วย

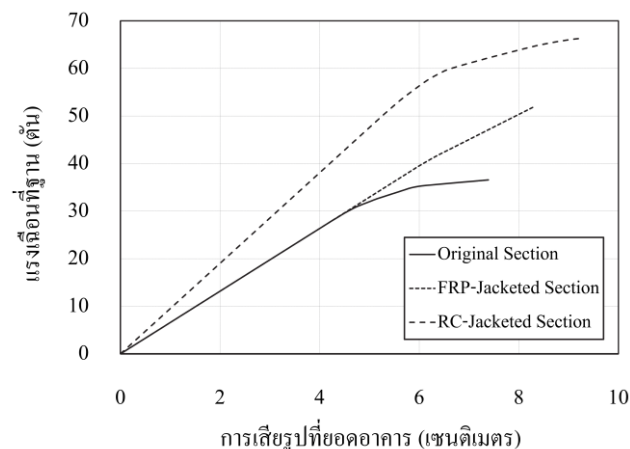
RC จะทำให้โครงสร้างมีค่าคาบการสั่นพื้นฐานลดลง ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงขึ้น และค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายลดลงไปจากค่าที่ได้ในโครงสร้างเดิม ทั้งนี้ เนื่องมาจากน้ำหนักของโครงสร้างที่มากขึ้น และสติฟเนสของโครงสร้างที่สูงขึ้น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างในการศึกษา

โครงสร้าง	คาบการสั่น พื้นฐาน (s)	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (g)		ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (ซม.)	
		เกณฑ์ BSE	เกณฑ์ DE	เกณฑ์ BSE	เกณฑ์ DE
ก่อนเสริม	0.9886	0.1346	0.2691	4.031	8.063
เสริมด้วย FRP	0.9886	0.1346	0.2691	4.031	8.063
เสริมด้วย RC	0.7508	0.1772	0.3543	3.383	6.767

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงและการเสียรูปของโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์โดยวิธีหลักสัณของโครงสร้างอาคารก่อนเสริมกำลังและหลังเสริมกำลัง สามารถแสดงได้ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนรวมที่ฐานกับการเคลื่อนที่ของจุดควบคุมที่ขอยคอาคาร (Pushover curve) ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งโครงสร้างจะถูกผลักโดยควบคุมการเสียรูปที่จุดยอดจนขึ้นส่วนคานหรือเสาใดๆเกิดการวิบัติ (มีระดับสมรรถนะเกินเกณฑ์ CP)



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนรวมที่ฐานกับการเคลื่อนที่ขอยคอาคารของโครงสร้างในการศึกษา

จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่า หลังจากการเสริมกำลังด้วยการพันโอบรัดเสาด้วย FRP หรือพอกด้วย RC โครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างมากขึ้นและมีความเหนียวมากขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลที่ได้จากการเสริมกำลังทั้งสองแบบมีความแตกต่างกัน โดยการเสริมกำลังด้วย FRP สามารถเพิ่มกำลังต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้างเดิมให้สูงขึ้น แต่ไม่ได้เพิ่มสติฟเนสให้กับโครงสร้าง ในขณะที่การเสริมกำลังด้วย RC ทำให้สติฟเนสของโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มกำลังต้านทานแรงด้านข้างให้สูงขึ้นอีกด้วย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของโครงสร้างทั้งสาม ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและการเสียรูปที่ขอยคอาคารที่ใส่รายละเอียดของการพัฒนาสถานะของจุดหมุนพลาสติกในชิ้นส่วน โครงข้อแข็ง จะเป็นดังแสดงใน

ภาพที่ 8-10 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโมเมนต์ในชิ้นส่วนเสาและคานของโครงสร้างทั้งสามไม่ได้พัฒนาไปถึงจุดคราก (ไม่เกิดการเสียรูปเชิงมุมแบบพลาสติก) ที่การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้แผ่นดินไหวความปลอดภัยพื้นฐาน (BSE)

อย่างไรก็ตาม ที่การเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DE) พบว่า โครงสร้างก่อนการเสริมความมั่นคงแข็งแรงไม่สามารถเสียรูปจนไปถึงค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายได้ มีการพัฒนาสถานะของจุดหมุนพลาสติกในเสาชั้น 1 โดยเริ่มเกิดการครากจากเสาบริเวณรอบนอก (เสาที่มีความเสื่อมสภาพ) และต่อมาที่เสาด้านใน ที่จุดวิบัติพบว่าโครงสร้างเกิดความเสียหายที่เสาชั้น 1 บริเวณรอบนอกโดยมีระดับสมรรถนะไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมให้ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, >CP) ทำให้โครงสร้างไม่สามารถต้านแรงด้านข้างได้ ดังแสดงในภาพที่ 8

โครงสร้างอาคารที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย FRP สามารถเคลื่อนที่ไปถึงค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DE) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 9 ความเสียหายได้เกิดขึ้นในเสาชั้นที่ 1 โดยเริ่มเกิดโมเมนต์ครากในชิ้นส่วนเสาภายใน (ซึ่งไม่ได้เสริมกำลัง) ก่อนเสารอบนอก (ที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP) และที่การเคลื่อนที่เป้าหมาย จะพบว่าเสาภายในมีระดับสมรรถนะไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมให้ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) หากผลักโครงสร้างให้มากกว่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย จะพบว่าชิ้นส่วนเสาภายในเกิดการวิบัติ

พฤติกรรมของโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย RC มีความแตกต่างจากโครงสร้างที่เสริมด้วย FRP ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่เป้าหมายภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DE) ชิ้นส่วนเสาและคานทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้ระดับเข้าใช้อาคารได้ อย่างไรก็ตาม หากผลักโครงสร้างต่อไปจนเกิดการวิบัติ การพัฒนาระดับโมเมนต์ที่เกิดในจุดหมุนพลาสติกจะมีความแตกต่างจากโครงสร้างที่เสริมด้วย FRP อย่างสิ้นเชิง มีการกระจายตัวขององค์อาคารที่เกิดโมเมนต์ครากอันประกอบไปด้วยเสาชั้น 1 เสาชั้น 2 และคานชั้น 2 บริเวณริมอาคาร โดยในท้ายที่สุดแล้ว อาคารจะเกิดการวิบัติที่เสาชั้น 1 รอบนอก ซึ่งเป็นเสาที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย RC อย่างเทียบเคียงกับ FRP

สำหรับการตรวจสอบแรงเฉือนที่ชิ้นส่วนและจุดต่อ พบว่า ไม่มีชิ้นส่วนหรือจุดต่อใดที่มีค่าแรงเฉือนเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดหรือจุดต่อ โดยในโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วย FRP มีค่าอัตราส่วนแรงเฉือนที่ต้องต้านทานต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคาน (Shear demand-capacity ratio; DCR) เท่ากับ 0.73 ค่า DCR แรงเฉือนสูงสุดของเสา เท่ากับ 0.70 และค่า DCR แรงเฉือนสูงสุดของจุดต่อ เท่ากับ 0.63 ในโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วย RC มีค่า DCR แรงเฉือนสูงสุดของคาน เท่ากับ 0.76 ค่า DCR แรงเฉือนสูงสุดของเสา เท่ากับ 0.87 และค่า DCR แรงเฉือนสูงสุดของจุดต่อ เท่ากับ 0.67

ผลของการเสริมกำลังที่มีผลต่อการกระจายแรงที่เปลี่ยนแปลงไปในโครงสร้าง

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในผลการวิเคราะห์โดยวิธีผลกัมได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของการกระจายแรงภายในที่เปลี่ยนไปในโครงสร้างทั้งสาม ดังภาพที่ 11(ก) และ 11(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของแรงภายในของโครงสร้างหลังการเสริมกำลังกับแรงภายในของโครงสร้างก่อนการเสริมกำลัง ที่ค่าการเคลื่อนที่ของจุดควบคุมที่ 7 ซม. โดยแรงภายในที่ศึกษาประกอบไปด้วยโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงตามแนวแกนของเสาชั้นที่ 1 โดยค่าอัตราส่วนของแรงภายในแต่ละต้นจะถูกแสดงที่ตำแหน่งเสา

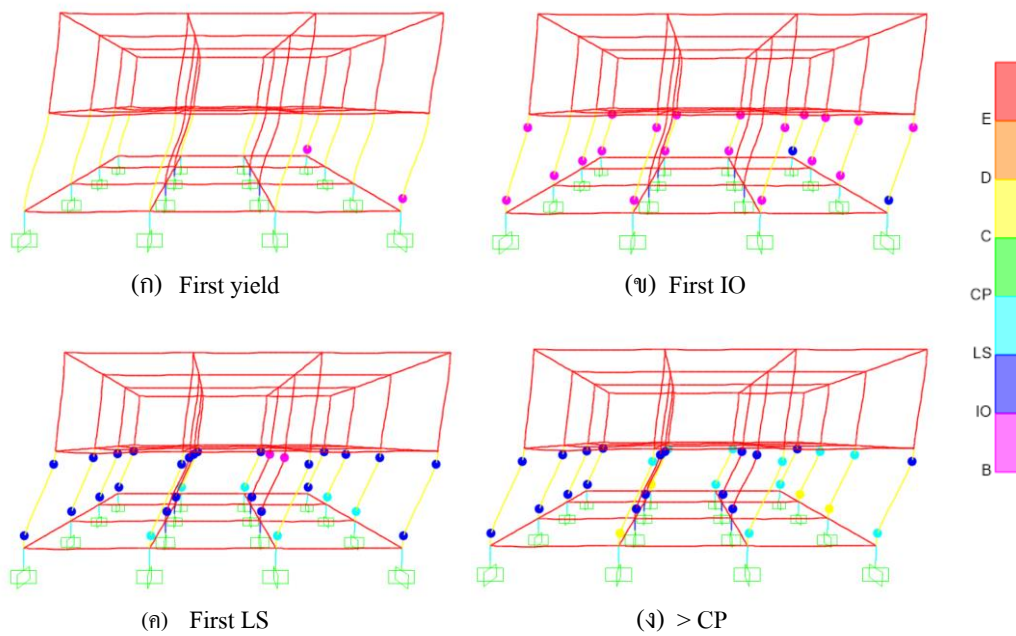
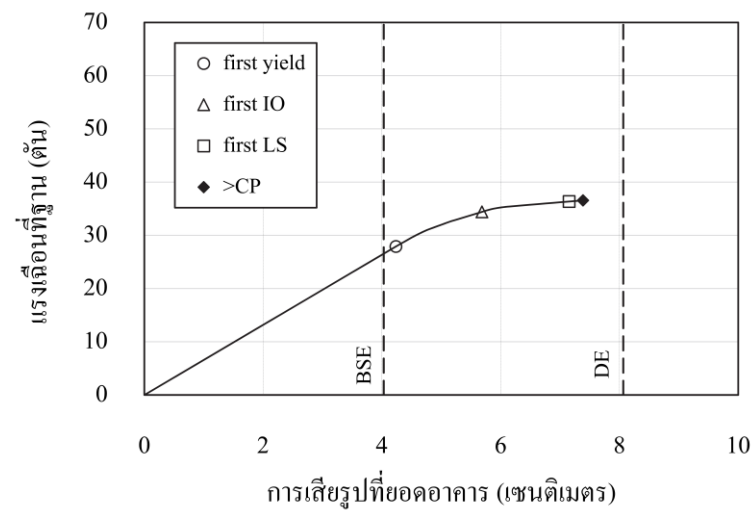
จากภาพที่ 11(ก) ซึ่งแสดงอัตราส่วนของแรงภายในที่เกิดขึ้นในโครงสร้างหลังการเสริมกำลังด้วย FRP พบว่าการเสริมกำลังที่บริเวณเสารอบนอกทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงภายในได้เพิ่มขึ้นจากเดิม โดยแรงภายในที่รับได้เพิ่มขึ้นนั้นถูกต้านทานโดยชิ้นส่วนเสาที่ได้รับการเสริมกำลัง สังเกตได้จากการที่เสาด้านในไม่ได้เกิดแรงภายในที่สูงขึ้น (อัตราส่วนแรงเท่ากับ 1 หมายถึง แรงที่เกิดขึ้นหลังเสริมกำลังมีค่าเท่ากับแรงที่เกิดขึ้นก่อนเสริมกำลัง) ส่วนเสารอบนอกของอาคารมีอัตราส่วนของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากก่อนเสริมกำลังประมาณ 1.3-1.5 เท่า

การกระจายอัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ได้รับเสริมกำลังด้วย RC มีความแตกต่างออกไปจากกรณีของ FRP ค่าอัตราส่วนของแรงภายในที่ค่าการเคลื่อนที่ของจุดควบคุม 7 มม. เป็นดังภาพที่ 11(ข) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างหลังการเสริมกำลังด้วย RC ได้เกิดการครากในเสาชั้น 1 และชั้น 2 (ตามภาพที่ 10) โดยมีอัตราส่วนโมเมนต์คัตและอัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาบนนอกของอาคาร อยู่ระหว่าง 1.9-2.4 เท่า ในขณะที่เสาต้นในซึ่งไม่ได้มีการเสริมกำลังมีค่าอัตราส่วนโมเมนต์คัตและอัตราส่วนแรงเฉือนที่ลดลงเหลือเพียง 0.8 เท่า ของค่าแรงในเสาเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากเสาที่เสริมกำลังด้วย RC มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีสติเฟนสเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการกระจายโมเมนต์คัตและแรงเฉือนใหม่ในโครงสร้าง ซึ่งนั่นหมายความว่าหากออกแบบการเสริมกำลังไม่เพียงพอกับค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นในเสาที่เสริมกำลัง โอกาสที่เสาที่เสริมกำลังจะวิบัติก็มีได้สูง

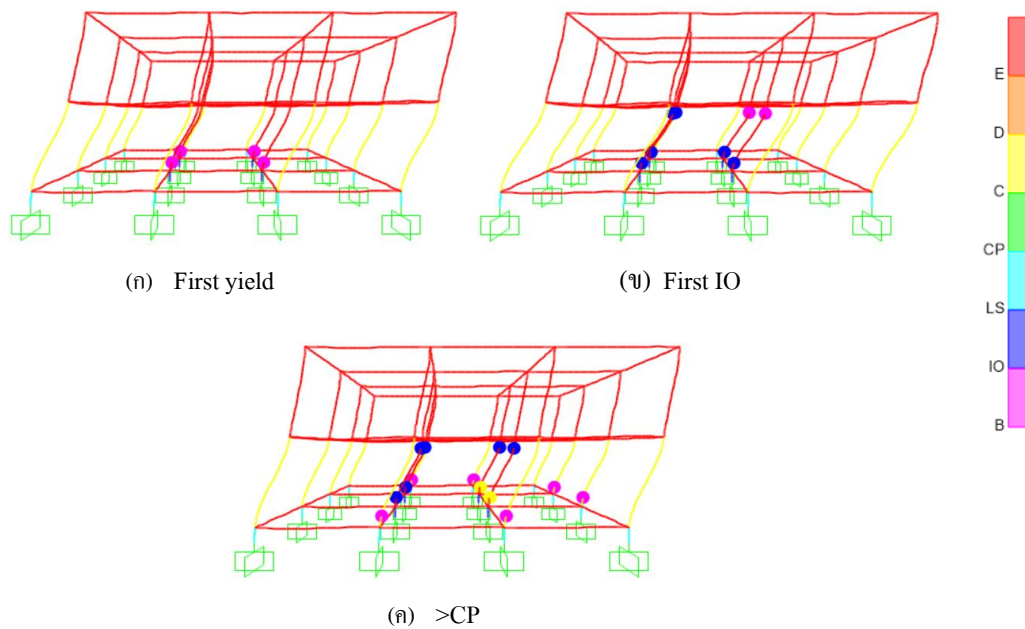
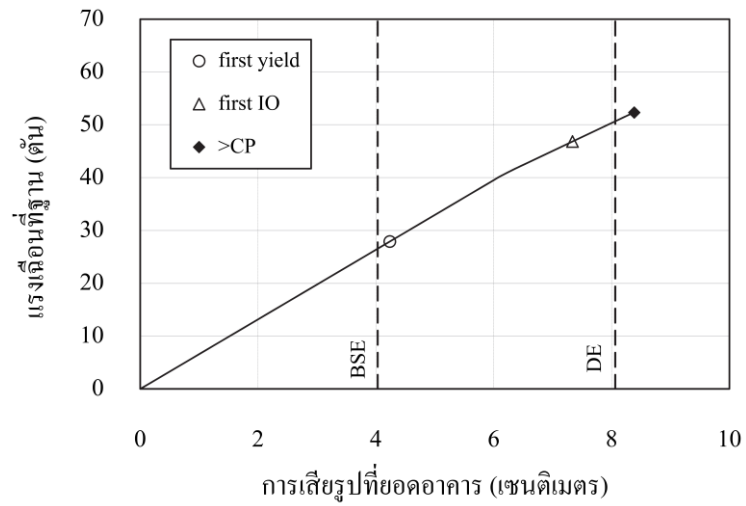
สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารก่อนและหลังการเสริมความมั่นคงแข็งแรงด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

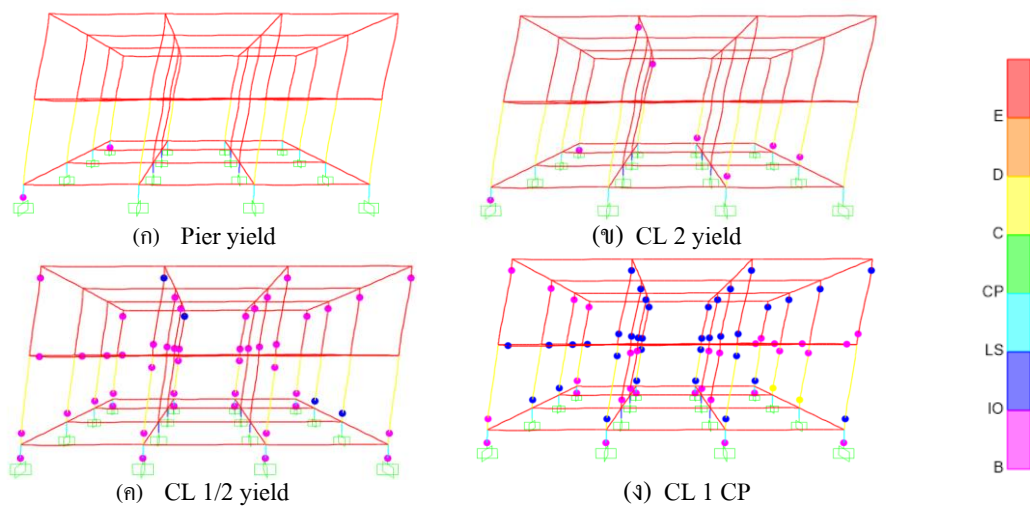
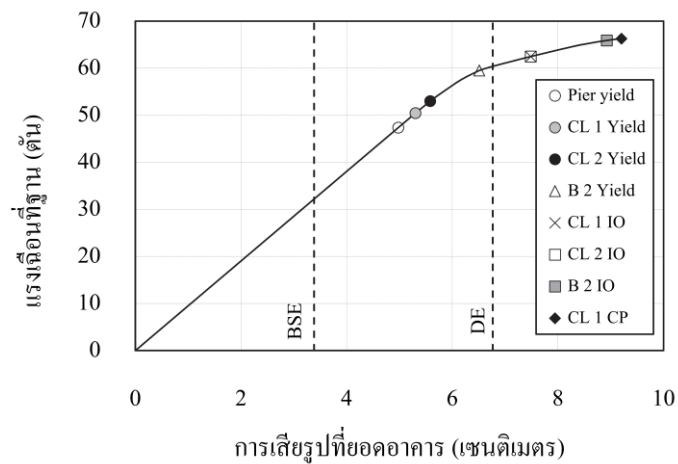
1. การเสริมกำลังด้วยการพันเสาด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและการพอกเสาด้วยวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้อาคารมีความสามารถในการต้านทานแรงด้านข้างมากขึ้นและมีความเหนียวที่สูงขึ้น นอกจากนี้ การพอกด้วยวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กทำให้สติเฟนสของโครงสร้างสูงขึ้นอีกด้วย
2. คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่ได้แตกต่างจากโครงสร้างก่อนการเสริมกำลัง ในขณะที่คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างในกรณีที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมวลและขนาดของหน้าตัดเสาที่เพิ่มขึ้น
3. จากการวิเคราะห์แบบผลกัลม พบว่า ความเสียหายของโครงสร้างก่อนเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดขึ้นที่บริเวณเสาชั้นที่ 1 ในขณะที่ความเสียหายของโครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการกระจายตัวไปที่เสาชั้นสองและคานด้วย เมื่อตรวจสอบการกระจายแรงภายในที่เกิดขึ้นพบว่า โครงสร้างที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมีค่าของโมเมนต์คัตและแรงเฉือนเพิ่มขึ้นในชั้นส่วนที่เสริมกำลัง แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อเสาอื่นที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่ในกรณีของการเสริมกำลังเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่า เสาที่เสริมกำลังมีค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากสติเฟนสของเสาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เสาที่ไม่ได้เสริมกำลังมีค่าโมเมนต์คัตและแรงเฉือนลดลง ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวทำให้วิศวกรผู้ออกแบบการเสริมกำลังอาคารจะต้องมีความระมัดระวังในการออกแบบเพื่อให้อาคารสามารถต้านทานแรงได้เพิ่มขึ้นโดยไม่เกิดความเสี่ยงต่อการวิบัติในชั้นส่วนที่เสริมกำลังด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก



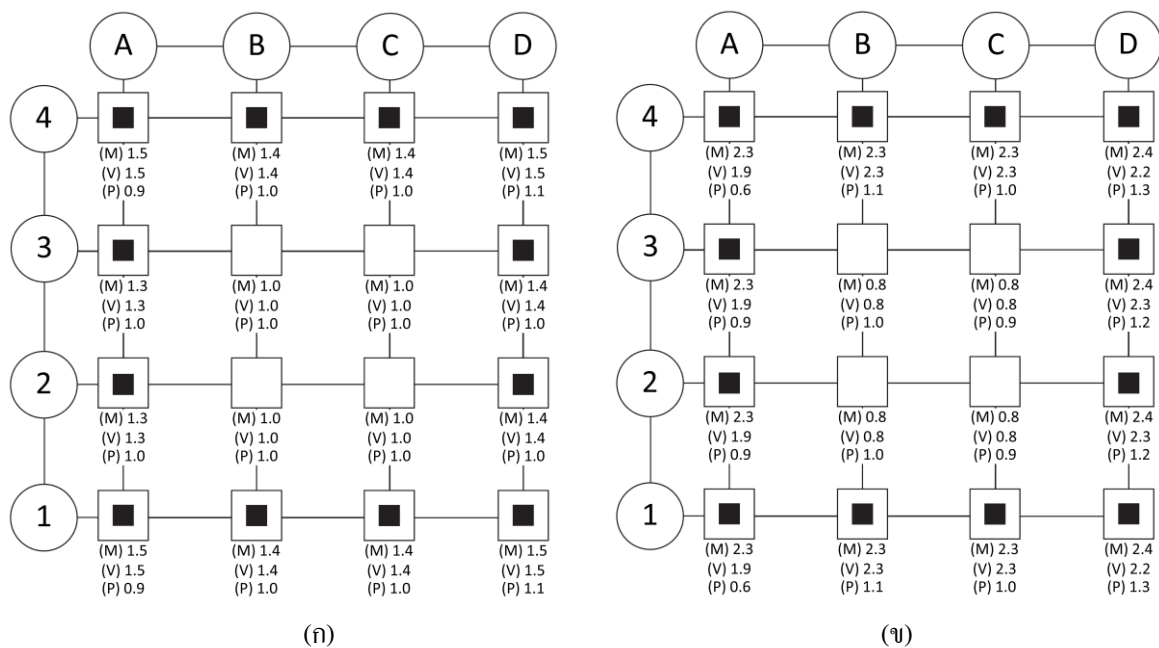
ภาพที่ 8 พฤติกรรมของโครงสร้างก่อนเสริมกำลัง



ภาพที่ 9 พฤติกรรมของโครงสร้างที่มีการเสริมกำลังด้วย FRP



ภาพที่ 10 พฤติกรรมของโครงสร้างที่มีการเสริมกำลังด้วย RC



ภาพที่ 11 อัตราส่วนแรงภายในที่เกิดขึ้นหลังการเสริมกำลังต่อแรงภายในที่เกิดขึ้นก่อนการเสริมกำลังที่ค่าการเคลื่อนที่จุดควบคุม 7 ซม. (ก) หลังการเสริมกำลังด้วย FRP (ข) หลังการเสริมกำลังด้วย RC

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ สำหรับนักศึกษابัณฑิตศึกษา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Janpila A. Seismic hazard assessment in the North-Eastern Area of Thailand [MSc thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2017. Thai.
2. Department of Public Works and Town & Country Planning. Standard seismic resistant design of building (DPT1302-52). Bangkok: Thailand. 2009. Thai.
3. Natepra P. Damage Assessment of Deteriorated RC Residential Structures under Possible Earthquake Loading in the Northeastern region of Thailand [MSc thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2019. Thai.
4. Kaplan H, Yilmaz S. Seismic strengthening of reinforced concrete buildings. In Earthquake-Resistant Structures-Design, Assessment and Rehabilitation. InTechOpen. 2012; 407-428.
5. Balsamo A, Colombo A, Manfredi G, Negro P, Prota A. Seismic behavior of a full-scale RC frame repaired using CFRP laminates. Engineering Structures. 2005; 27: 769-780.
6. Tayeh BA, Naja MA, Shihada S, Arafa M. Repairing and strengthening of damaged RC columns using thin concrete jacketing. Advances in Civil Engineering. 2019; 1-16.
7. The Thailand Research Fund (TRF). Handbook of engineers and technicians. 2016: 41-70.
8. ACI Committee. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318-19). American Concrete Institute. 2019.
9. SAP2000 21. CSI, Integrated Software for Structural Analysis and Design", Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, U.S.A.
10. American Society of Civil Engineers. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13). Reston, VA.: American Society of Civil Engineers. 2013.
11. Inel M, Ozmen HB. Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings. Engineering Structures. 2006; 28(11): 1494-1502.
12. Lam L, Teng JG. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Construction and Building Materials. 2003; 17(6-7): 471-489.