ประสิทธิภาพการเสริมกำลังจุดต่อเสา – คานผสมเศษคอนกรีตย่อยโดยใช้ระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง

Strengthening performance of column – beam joint made of 100% recycled aggregate concrete using prestressed metal strapping

ภัคจิรา อ่อซ้าย[1*], สิริลักษณ์ ใจห้าว[2], กรวิชญ์ ชูหอยทอง[3], สุทัศน์ แก้วชุม[4] และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ[5]

[1,2,3,4,5] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช
**Corresponding author; E-mail address: pakjira.ao@mail.wu.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นศึกษาการทดลองประสิทธิภาพของข้อต่อคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกำลังอัดต่ำด้วยเศษคอนกรีตย่อยที่เสริมด้วยสายรัดโลหะแบบตึงรัดรอบภายหลัง (PTMS) จุดมุ่งหมายของงานนี้มีอยู่สองประการ (1) เพื่อกำหนดประสิทธิภาพของการเสริมแรงการเชื่อมต่อของเสา-คานด้วยโปรไฟล์การเสริมแรงไม่เพียงพอโดยใช้ PTMS และ (2) เพื่อสร้างการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์แบบไม่เชิงเส้นเพื่อกำหนดประสิทธิภาพของการเสริมแรงของเสาภายใต้โหลดแบบไซคลิก ในตัวอย่างแรกชิ้นงานทดสอบที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็กต่ำกว่ามาตรฐานตาม ACI 318-05 ได้รับการทดสอบภายใต้แรงแผ่นดินไหวเพื่อกระตุ้นให้เกิดรอยแตกร้าวแรก ในขณะที่ในตัวอย่างที่สองชิ้นงานทดสอบได้รับการเสริมความแข็งแรงด้วยสายรัดโลหะแบบตึงรัดรอบภายหลัง (PTMS) ที่โซนเชื่อมต่อคานและเสาทำการทดสอบในตัวอย่างที่สอง

จากผลการทดสอบเทคนิค PTMS ประสบความสำเร็จอย่างมากในการเสริมแรงคอนกรีต มีราคาถูก สะดวก และใช้ง่าย แรงกระทำสูงสุดและต่ำสุดในชิ้นงานทดสอบแบบไม่เสริมกำลังคือ +2.16 และ -1.91 ตันตามลำดับ เมื่อตัวอย่างมีการเสริมกำลังแรงกระทำสูงสุดและต่ำสุดคือ +3.10 และ -2.72 ตัน ตามลำดับ ระยะการเคลื่อนตัวที่ 3.70 มม. และความกว้างของรอยแตกประมาณ 1.0 – 2.0 มม. พบว่าเมื่อใช้การเสริมแรงรอยแตกร้าวลักษณะการแตกร้าวจะพบได้น้อยและความกว้างของรอยแตกก็ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: จุดต่อเสา-คาน , แผ่นเหล็กอัดแรงรัดรอบภายหลัง , เสริมกำลัง , แผ่นดินไหว

Abstract

The purpose of this study was to determine the efficacy of post- tensioned metal strapping (PTMS) on the seismic performance of beam-column joints of low compressive strength reinforced concrete with recycled aggregate concrete. The scope of this study was (1) to determine beam- to- column reinforcement (PTMS) with insufficient reinforcement profiles, and (2) to construct a nonlinear finite element model to determine efficiency of column reinforcement under cyclic loads in the early stages to start the first crack. Test specimens with insufficient reinforcement profile according to ACI 318- 05 are subjected to seismic loads cyclic in the second example. The specimens were strengthened using a tensioned metal strapping (PTMS) at the beam and column connection zones.

PTMS technology has been proven to be particularly effective in concrete reinforcement, it is affordable and practical. and easy to use. The maximum and minimum load applied to the unreinforced specimen are +2.16 and -1.91 tons respectively, and the maximum and minimum rebar loads are +3.10 and -2.72 tons, respectively, with a pitch of 3.70 mm and a 3.70 mm wide, about 1.0–2.0 mm in diameter, the type of crack is unusual. and the width of the crack is comparable.

Keywords: Column- beam connection point, Post- Tensioned Metal Strapping, Reinforcement, Earthquake

1. คำนำ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมสูงสุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่น ๆ อย่างไรก็ตามอาคารที่ก่อสร้างแล้วหลาย ๆ อาคาร คำนึงถึงเพียงแค่การออกแบบเพื่อรองรับแรงกระทำจากน้ำหนักในแนวดิ่งเท่านั้น โดยมิได้คำนึงถึงผลจากแรงด้านข้าง พฤติกรรมชั้นที่อ่อนแอและพฤติกรรมของโครงสร้างมีลักษณะ “เสาอ่อน-คานแข็ง” ซึ่งเมื่ออาคารลักษณะนี้ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว มีความเสี่ยงที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่เสาและจุดต่อคาน-เสาตัวอย่างเช่น จากในเหตุการณ์แผ่นดินไหว 6.3 ริกเตอร์ที่ อ.พาน จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 5 พค. 2557 ที่ผ่านมาก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างบ้านเรือนอย่างมาก เหตุการณ์แผ่นดินไหวในครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเสาเป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดของอาคารเพราะเสาเป็นโครงสร้างที่รองรับน้ำหนักของอาคารทั้งหลัง ดังนั้นความแข็งแรงของเสาจึงเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดของอาคารในการต้านแผ่นดินไหว [1] ซึ่งโดยทั่วไปมาตรฐานของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในอดีตมิได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ที่เรียกว่า Substandard seismic design เมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหว การวิบัติก็มักจะเกิดที่บริเวณจุดรอยต่อระหว่างเสาและคานซึ่งเป็นผลทำให้องค์อาคารโดยรวมเกิดการวิบัติได้ [2]การนำเศษคอนกรีตเก่ามาใช้ทดแทนหินธรรมชาติเป็นการลดใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติ และนำวัสดุเหลือใช้นำกลับมาใช้ใหม่ โดยคุณภาพของคอนกรีตที่ได้ต่างจากคอนกรีตปกติที่ใช้หินจากธรรมชาติทำให้มีความแข็งแรง และความสะอาดน้อยกว่าหินธรรมชาติ นอกจากนี้เศษคอนกรีตเก่าจะมีความพรุนที่มากกว่าหินธรรมชาติ ทำให้มีอัตราการดูดซึมน้ำมากกว่าเป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบจะต่ำกว่าคอนกรีตปกติจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยวัสดุและการผลิตเศษคอนกรีตเก่ามาใช้ทดแทนหินธรรมชาติ

ในประเทศไทย คณะวิจัยโดย Imjai และคณะ [3] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัดด้วยวิธี PTMS และ EBR และได้คิดค้นวิธีการหุ้มรอบและอุปกรณ์จับยึด เพื่อลดปัญหาจากการคลายตัวในระยะยาว เช่น Stress relaxation โดยการเพิ่มการจับยึดด้วย Mechanical anchorage โดยการใช้ Chemical bolt ระหว่างช่วงของเหล็กพืด แล้วพิจารณาพื้นที่หน้าตัดสุทธิในการออกแบบ และทำการออกแบบ Clip lock ซึ่งเป็นเหล็ก low strength เกิดสนิมได้ง่าย จึงได้มีการเปลี่ยนมาใช้ Aluminum clip lock ซึ่งจะประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังจุดต่อเสา-คานสำหรับงานวิจัยนี้

2. วัตถุประสงค์

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบของพฤติกรรมจุดต่อคาน - เสารูปตัวที (T) จำนวน 2 ตัวอย่าง คือ JC และ JC-S โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังจุดต่อเสาคานคอนกรีตกำลังอัดต่ำโดยวิธี Active Confinement และพัฒนาแบบจำลอง Finite element analysis เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังจุดต่อคาน-เสา

3. วิธีการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างในการศึกษา

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาสำหรับการทดสอบถูกออกแบบโดยไม่ได้พิจารณาแรงแผ่นดินไหว ซึ่งมีรายละเอียดของขนาดมิติของชิ้นส่วนโครงสร้างและเหล็กเสริม และมีคุณสมบัติของเหล็กเสริมโดย RB6 มีค่า Fu = 385 MPa, Fy = 235 MPa, e = 21 และ DB16 มีค่า Fu = 560 MPa, Fy = 390 MPa, e = 15

3.2 คุณสมบัติของเศษคอนกรีตย่อย

การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามมาตรฐาน ASTM C39 [4] เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC type 1) อัตราส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม. โดยที่กำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน (f'c) เท่ากับ 15 MPa ดังตารางที่ 1 และคุณสมบัติของเศษคอนกรีตย่อย ดังตารางที่ 2 โดยมีสัดส่วนคละของมวลรวมดังรูปที่ 1

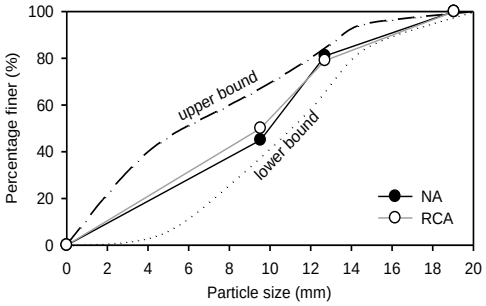
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีต **1** ลบ.ม.

Mix proportion (kg/m^3)				w/c ratio	Slump
Cement	CA RCA	FA RCA	Water		
250	1120	757.42	200	0.80	75

หมายเหตุ CA คือ Coarse aggregates, FA คือ Fine aggregates

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเศษคอนกรีตย่อย

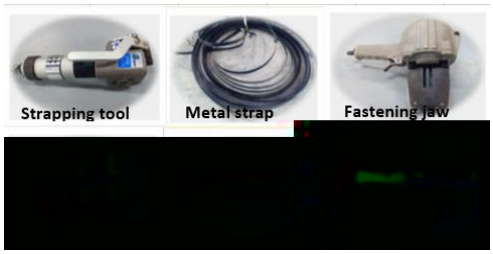
Properties	NCA	RCA
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.7	2.43
Unit Weight (kg/m^3)	1730	1397
Water Absorption (%)	0.28	4.59
Moisture (%)	0.61	2.24
Max. size (mm)	19.1	18.6



รูปที่ 1 สัดส่วนคละของมวลรวม

3.3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้รัดรอบตัวอย่างคอนกรีต

การพัฒนาเทคนิคใหม่สำหรับการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาที่ใช้วิธี Post-Tensioned Metal Straps (PTMS) (รูปที่ 2) เทคนิคนี้ใช้สายรัดที่มีความแข็งแรงสูงและทนทานต่อแรงดึงโดยใช้ชุดอุปกรณ์สำหรับเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตรับแรงอัด โดยค่าความแข็งแรงของสายโลหะโดยทั่วไปจะแตกต่างกันไประหว่าง 300 ถึง 1000 MPa เครื่องปรับแรงดึงจะถูกควบคุมโดยแรงดันอากาศ/แรงดันไฮดรอลิก (รูปที่ 3) ซึ่งแรงดึงจะถูกควบคุมโดยผู้ติดตั้งเครื่องอัดแรงดันทรงกระบอกและเครื่องตึงระบบไฮดรอลิก โดยผลจากการอัดแรงขณะติดตั้งเหล็กพืด จะเป็นการเพิ่มแรงรัดรอบองค์อาคารคอนกรีต เรียกว่า Confinement ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 20-40% [5,6]



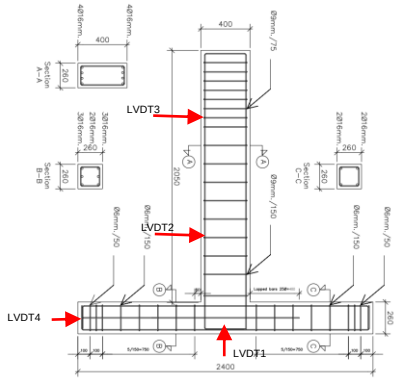
รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์อัดแรง PTMS



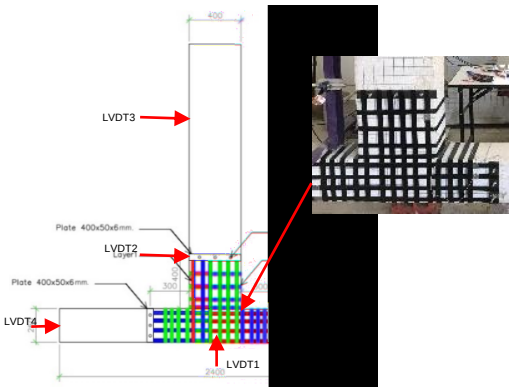
รูปที่ 3 การรัดรอบตัวอย่างด้วยวิธี Post-tensioned metal strapping (PTMS)

3.4 ตัวอย่างทดสอบ JC และ JC-S

ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา มีรายละเอียดขนาดหน้าตัดเหล็ก การเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 4 โดยตัวอย่างที่ 1 ไม่มีการเสริมกำลังให้กับตัวอย่าง ตัวอย่างที่ 2 ทำการโอบรัดด้วยเหล็กพืดอัดแรง (PTMS) รูปที่ 5



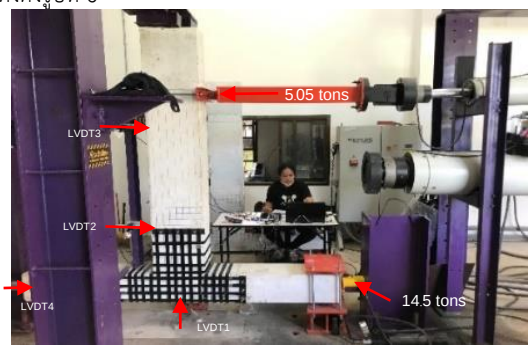
รูปที่ 4 รายละเอียดขนาดหน้าตัด



รูปที่ 5 การเสริมแรงในตัวอย่าง จุดต่อระหว่างคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก

3.5 การติดตั้งและการทดสอบตัวอย่าง

การติดตั้งสำหรับการทดสอบ โดยกำหนดสภาวะยึดรั้งแบบล้อเลื่อน (roller support) และเคลื่อนที่ได้ 1 มิติ ที่ตำแหน่งฐานเสาทั้งสองข้าง กำหนดให้มีสภาวะยึดรั้งแบบหมุน(pin support) ส่วนปลาย เสาด้านบนปล่อยให้เคลื่อนที่อิสระ (free-end) มีตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัวทั้งหมด 4 ชุด สำหรับการทดสอบใช้แรงกระทำด้านข้างแบบสลับทิศที่บริเวณด้านบนของคาน โดยควบคุมการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ทุกๆ 1 มม. โดยในแต่ละการเคลื่อนที่ทำการทดสอบวนซ้ำ 2 รอบ หลังจากนั้นจึงเพิ่มระดับการเคลื่อนที่ต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างมีการเคลื่อนที่ถึง 10 มม. แสดงดังรูปที่ 6

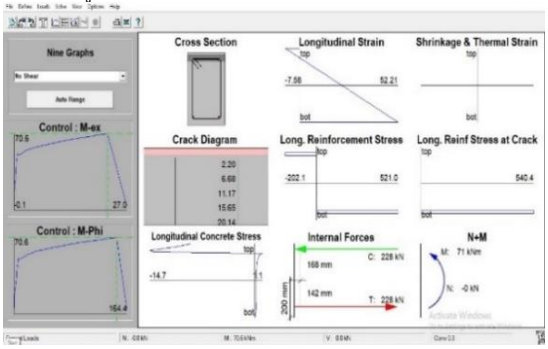


รูปที่ 6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

4. การวิเคราะห์ผลทดสอบ

4.1 การวิเคราะห์หน้าตัด

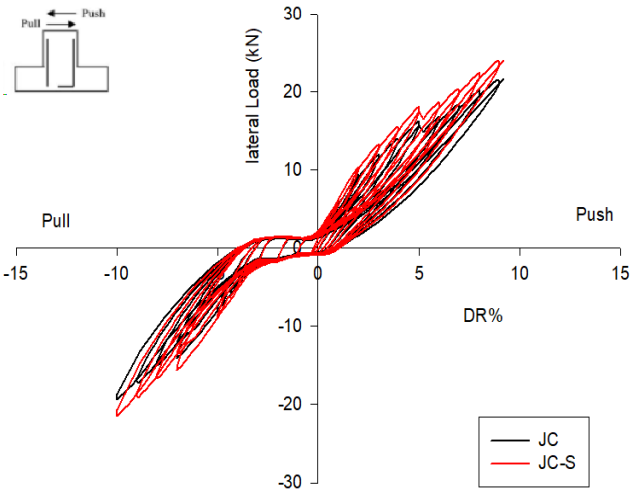
การวิเคราะห์กำลังหน้าตัดร้าว (Cracked-sectional analysis, CSA) จะใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุ (คอนกรีตและเหล็กเสริม) จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากคานตัวอย่างถูกออกแบบให้กำลังรับแรงดัดต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือน ดังนั้นคานตัวอย่างจะวิบัติภายใต้แรงดัด คณะวิจัยได้ทำการวิเคราะห์กำลังหน้าตัดร้าวของคาน โดยใช้โปรแกรม RESPONSE 2000 แสดงดังรูปที่ 7 ที่พัฒนาขึ้นโดย Benz และคณะ [7] ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎี Modified Compressive Field Theory [8] ซึ่งต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของคอนกรีตที่ใช้จริง จึงจะสามารถวิเคราะห์กำลังหน้าตัดของคานคอนกรีตใช้อย่างถูกต้อง ในช่วงน้ำหนักภาวะใช้งานจนถึงช่วงวิบัติ [9]



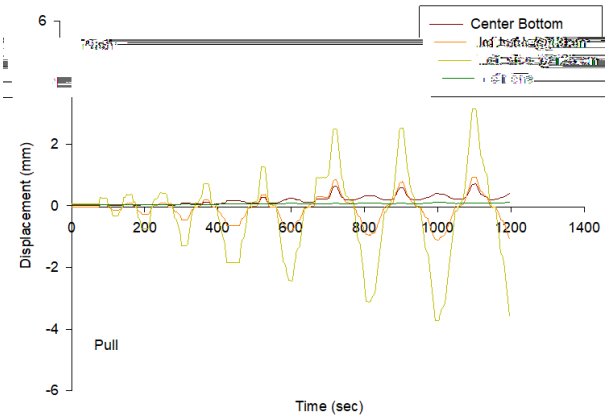
รูปที่ 7 การวิเคราะห์ภาคตัดขวางโดยโปรแกรม Response 2000

4.2 ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา JC และ JC-S

ตัวอย่าง JC มีพฤติกรรม hysteresis แสดงดังรูปที่ 8 โดยตัวอย่างเริ่มเกิดรอยร้าวแรกเป็นแนวทแยง (disgonal crack) ที่ระยะการเคลื่อนตัว 5 มม. แต่ยังไม่เห็นรอยร้าวที่แน่ชัดจึงทำการเพิ่มแรงขึ้นไป เริ่มเกิดรอยร้าวเพิ่มมากขึ้นจากรอยร้าวเดิม จากนั้นเมื่อระยะการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆทำให้เกิดรอยร้าวสะสมขึ้นที่บริเวณจุดต่อคาน-เสาเพิ่มขึ้น เมื่อการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นถึง 10 มม. ตามที่ได้กำหนดไว้ค่าแรงที่กระทำต่อตัวอย่างมีค่าเป็น 2.2 ตัน จึงหยุดทำการทดสอบโดยที่ตัวอย่างมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 9 และตัวอย่าง JC-S ทำการเสริมกำลังโดยการรัดรอบด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง โดยการรัดรอบจะแบ่งการรัดออกเป็น 3 ชั้น ประกอบด้วยชั้นที่ 1 ทำการโอบรัดบริเวณคานเป็นระยะ 660 มม. วัดจากด้านล่างของเสา ชั้นที่ 2 ทำการโอบรัดตามแนวยาวของเสาเป็นระยะ 1000 มม. และชั้นที่ 3 ทำการโอบรัดรอบเสาและคานเป็นช่วงดัง รูปที่ 5

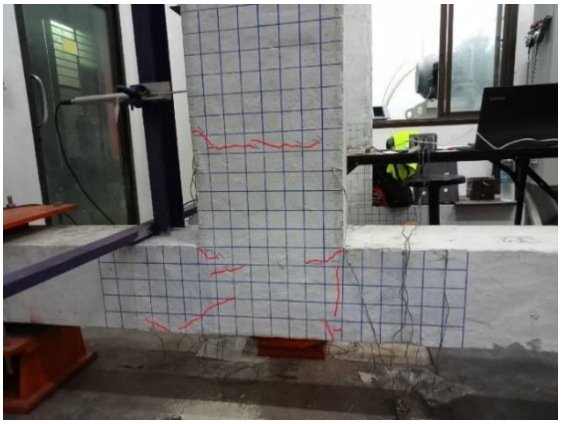


รูปที่ 8 พฤติกรรม hysteresis ของตัวอย่าง JC and JC-S



รูปที่ 9 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง JC

ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – % Drift ratio ของตัวอย่าง JC แสดงดังรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ% Drift ratio ของ ตัวอย่าง JC ตั้งแต่ % Drift ratio 0.2 หรือ 5 มม. ถึง % Drift ratio เท่ากับ 5 หรือ 125 มม. โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและความสัมพันธ์จะมีค่าเป็นลบเมื่อให้แรงกับตัวอย่างในทิศทางลงผลจากรูปที่ 8 จะพบว่าแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดเท่ากับ 21.64 kN ที่ระยะปลายคานเท่ากับ 3.70 มม. หรือ Drift Ratio เท่ากับ 9.80% และต่ำสุดเท่ากับ -19.10 kN ที่ ระยะเคลื่อนตัวที่ปลายคานเท่ากับ -3.70 มม. ดังรูปที่ 8 หรือ Drift ratio เท่ากับ -9.80 % จากรูปตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 4 หรือ %Drift Ratio ที่ 0.2 , 0.25 , 0.35 และ 0.5 จะมีลักษณะความชันของกราฟที่เป็นเส้นตรงคือแสดงถึงว่าช่วงดังกล่าวตัวอย่างยังคงมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติกนอกจากนั้นช่วงลูปที่แคบแสดงให้เห็นว่ามีการแตกร้าวและการสลายพลังงานที่น้อย ในช่วงตำแหน่งที่ 4 พบว่าเป็นจุดที่กราฟเริ่มเปลี่ยนความชันและเป็นช่วงที่กราฟเริ่มมีลูปที่กว้างกว่ารอบก่อนหน้าแสดงถึงการแตกร้าวและการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ตำแหน่งที่ 5 ถึง ตำแหน่งที่ 8 หรือ %Drift Ratio ที่ 0.75 , 1.0 , 1.4 , 1.75 หากดูจากกราฟ จะเห็นว่าลูปแต่ละรอบในช่วงดังกล่าวมีการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกันและค่อยๆแตกต่างที่ตำแหน่งที่ 8 แต่พฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันในช่วงดังกล่าวจึงทำให้กราฟในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรงตำแหน่งที่ 9 เป็นรอบที่ลูปกว้างมากเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้าการแตกร้าวเกิดขึ้นมากพฤติกรรมโครงสร้างมีความเป็นอินอีลาสติกอย่างชัดเจนรอบดังกล่าวตัวอย่างสามารถรับกำลังได้สูงสุดและเกิด plastic hinge หลังจากเกิด plastic hinge กำลังจะตกลงที่ตำแหน่ง 10 และ 11 แต่ตำแหน่งที่ 10 มีการลดลงของความชันที่มากกว่าทั้งนี้นั้น รอบที่ 10 และ 11 ก็ยังคงมีลูปที่กว้างแสดงให้เห็นว่าการสลาย พลังงานยังคงเกิดขึ้นในรูปของการแตกร้าวแต่รอบที่ 12 กลับพบว่ากำลังตกอย่างมากและลูปที่เกิดขึ้นก็แคบลงเช่นกันหลังจากที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าวอย่างรุนแรงในรอบก่อนหน้า ซึ่งจากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างเสา-คาน ถูกรัดรอบด้วยแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลังเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้รัดรอบโหลดสูงสุดในทิศทางผลักและดึง เกิดขึ้นที่ DR% 8 และ 10 มีค่าเท่ากับ +26 kN และ -21 kN ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างในทิศทางที่ผลักและดึงจึงมีค่าเท่ากับ 1.11 จะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนจะใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ได้รัดรอบและเกิดขึ้นที่คานรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเสริมความแข็งแรงมีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงถึง 30% และ 25% ในทิศทางการผลักและการดึงตามลำดับ นอกจากนี้แรงกระทำสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ดริฟท์ที่สูงขึ้น การตอบสนองแบบ hysteresis ของตัวอย่าง JC-S ยังมีเคลื่อนตัวแม้จะอยู่ในระดับที่มีดริฟท์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง (JC) ดังนั้นวิธีการเสริมความแข็งแรงจึงทำให้ลดผลกระทบจากการบีบตัวเนื่องจากมีการป้องกันการเปิดของรอยแตกร้าวที่มากเกินไประหว่างการทดสอบ เมื่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงรอยร้าวมักจะเกิดขึ้นระหว่างการให้โหลดในทิศทางที่เกิดการดึงหรือทิศทางที่มีความอ่อนแอ เนื่องจากรอยร้าวที่มีอยู่ก่อนหน้านี้แล้วการเสริมความแข็งแรงที่บริเวณจุดต่อเสา-คานจึงมีรอยร้าวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวที่ไม่ได้เสริมกำลัง แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการดัดที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง JC การเสริมความแข็งแรงของจุดต่อเสา-คาน ทำให้เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและความเหนียวของจุดต่อเสา-คาน ได้ดี จากการตรวจสอบเส้นโค้งของหน่วยเสริมกำลังพบว่ามีการบีบเล็กน้อยในการตอบสนองก่อนถึงจุดสูงสุดแม้ว่าบริเวณจุดต่อเสา-คาน จะเกิดการแตกร้าวแต่หลังจากนั้นลูปหลังจุดสูงสุดจะไม่เกิดความสูญเสียความแข็งแรงไปจนหมดเมื่อใกล้กับจุดศูนย์กลาง หลังจากการทดสอบตัวอย่างแล้วความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ JC หลังการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 10 และความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ JC-S หลังการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ JC หลังการทดสอบ



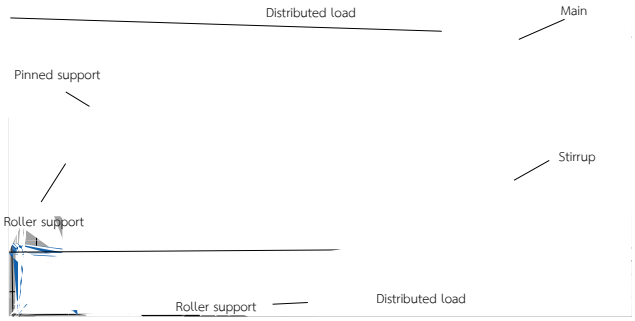
รูปที่ 11 ความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ JC-S หลังการทดสอบ

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

4.3.1 มิติแบบจำลองและการแบ่งชิ้นส่วนย่อย

การวิเคราะห์การแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบจุดต่อเสา-คาน โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS version 6.14 [10] มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบจุดต่อเสา-คานแบบขนาดจริง เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนาม โดยแบบจำลองรูปแบบชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้

สำหรับคอนกรีตขึ้นรูปโมเดลเป็น 3 มิติคือ ชนิด 8-node linear brick (C3D8R) และสำหรับเหล็กเสริมกับเหล็กปลอกโมเดลเป็น 2 มิติคือ ชนิด 2-node linear 3-D truss (T3D2) ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบเอลิเมนต์ภายในขอบเขตตามที่ผู้ใช้กำหนด (User define) ในส่วนของการจำลองรูปแบบการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม จะกำหนดคอนกรีตเป็น Master เหล็กเสริมกับเหล็กปลอก กำหนดเป็น Slave การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมกับเหล็กปลอกจะใช้เป็น Embedded



รูปที่ 12 แบบจำลอง 3 มิติ ไฟไนท์อิลิเมนต์

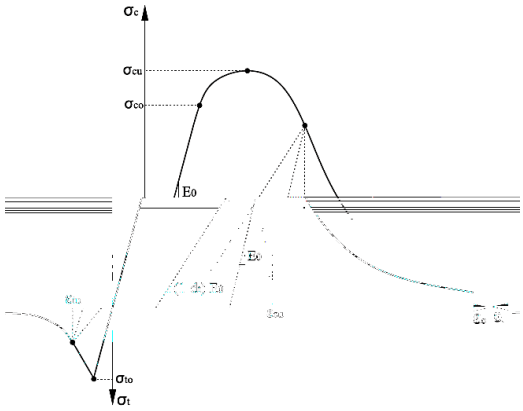
4.3.2 แบบจำลองคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบ Concrete Damaged Plasticity [11] เนื่องจากแบบจำลองชนิดนี้สามารถจำลองพฤติกรรมที่ละเอียดที่สุดคล้ายพฤติกรรมจริง แบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดคุณสมบัติเป็นคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3 ที่สามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนอง ได้ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Concrete damage plasticity, CDP) จึงถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 13 พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด เป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเชิงเส้นที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดตามคำแนะนำของ ACI318-11 [12] หรือ 0.45fc' ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira D.J. และ Chu K.H. [13] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อนและหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในภาพของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (stiffness degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 14

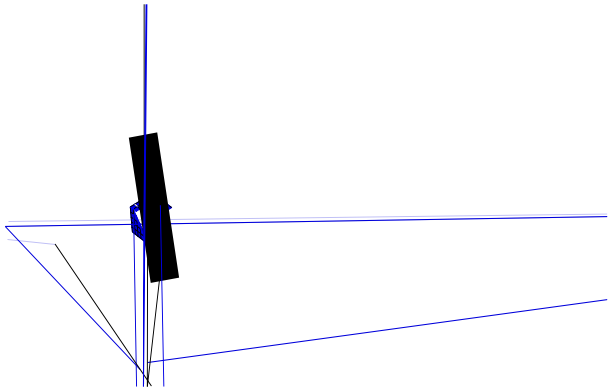
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ใน CDP model สำหรับแบบจำลองคอนกรีต [10]

E (MPa)	v	Ψ	ε	σ	K_c	μ
18203	0.2	0.1	1.1	0.6667	0	30

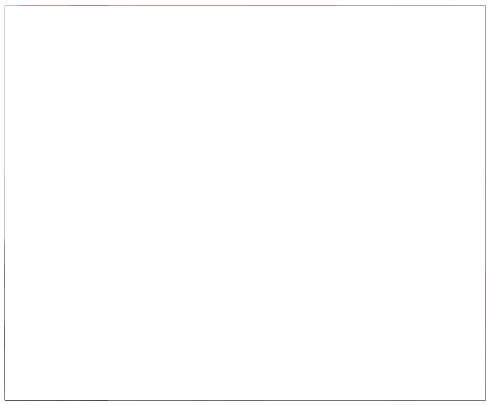
หมายเหตุ : E คือ Young's modulus, v คือ Poisson's Ratio, Ψ คือ Dilation Angle, ε คือ Eccentricity, σ คือ Ratio of the strength in the biaxial state to the strength in the uniaxial state, Kc คือ Plastic Yield surface Parameters, μ คือ Viscosity ทั้งหมดนี้นำมาใช้เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง



รูปที่ 13 รูปแสดงพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นแบบ von Mises



รูปที่ 15 Concrete damage

ในการวิเคราะห์ดัชนีความเสียหายซึ่งในโปรแกรม Abaqus จะสามารถตรวจและจำลองความเสียหาย เช่น ตำแหน่งรอยร้าวของตัวอย่างทดสอบเป็นความเสียหายแบบการอัด (DAMGEC) และความเสียหายโดยการดึง (DAMGET) โดยรอยร้าวจะเกิดขึ้นบนโครงสร้างคอนกรีตเมื่อค่า DAMGET > 1.0 ซึ่งความเสียหายโดยการดึงนี้จะแสดงรูปแบบและตำแหน่งรอยร้าวได้ ดังแสดงใน (รูปที่ 15) และเปรียบเทียบกับตำแหน่งรอยร้าวบนตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 10-11) พบความกว้างรอยร้าว 1-2 มม.

5. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างจุดต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบให้รองรับแรงแผ่นดินไหว โดยใช้ระบบแผ่นเหล็กเหนียวอัดแรงรัดรอบภายหลัง จำนวน 2 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่า

1. จากผลการวิเคราะห์ความเค้นจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ตัวอย่างทดสอบจุดต่อเสา-คาน ของคอนกรีตและเหล็กเสริมคอนกรีต พบว่า ค่าความเค้น von Mises มีค่าสูงสุดเท่ากับ 161.907 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.6Fy (240 MPa)

2. จากตัวอย่าง JC พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.16 ตัน และเมื่อตัวอย่าง JC-S มีการเสริมกำลังแรงที่กระทำปลายคานมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 3.10 ตัน ที่ระยะปลายคานมีค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับ 3.70 มิลลิเมตร

3. จากตัวอย่าง JC พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง แรงกระทำที่ปลายคาน (Load) ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ -1.91 ตัน และเมื่อตัวอย่าง JC-S มีการเสริมกำลังแรงที่กระทำปลายคานมีค่าเพิ่มขึ้นต่ำสุดเท่ากับ 2.72 ตัน ที่ระยะปลายคานมีค่าการเคลื่อนตัวเท่ากับ -3.70 มิลลิเมตร

4. ลักษณะการเสียหายของตัวอย่าง JC ณ จุดแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุด พบว่าเกิดรอยร้าวที่บริเวณข้อต่อเสา-คาน (Beam-Column joint) มีความกว้างรอยร้าวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง JC-S เมื่อมีการเสริมกำลัง พบว่ามีพฤติกรรมรอยร้าวที่มีการเสริมกำลังรอยร้าวจะเกิดน้อยกว่าและมีความกว้างรอยร้าวที่ใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.ทนงศักดิ์ อิ่มใจ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.มนเทียร เสร็จกิจ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทดสอบในครั้งนี้ และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การอ้างอิง

[1] Frangou M. Strengthening of concrete by lateral confinement. Ph. D. thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, UK. 1996.

[2] Pilakoutas, K., Dritsos, S., 1992. Design of structural repair schemes for RC structures. Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, July 1992.

[3] Imjai T, Guadagnini M, Garcia R, Pilakoutas K. A practical method for determining shear crack induced deformation in FRP RC members. Engineering Structures 2016;126:253-364.

[4] ASTM C3 9 / C3 9 M- 1 8 , " Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," Philadelphia, USA, 2001.

[5] Frangou, M., 1996. Strengthening of concrete by lateral confinement. Ph. D. thesis, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, UK.

[6] Imjai, T., Chaisakulkiet, C., Garcia, R, and Pilakoutas, K. (2018) Strengthening of RC members using Post-tensioned Metal Straps: state of the research. Lowland Technology International (LTI) journal, vol. 20 (2), pp. 187-196.

[7] Bentz, E.C., 2000. Sectional Analysis of Reinforced Concrete, PhD Thesis, University of Toronto.

[8] Vecchio, F. J. and Collins, M. P., 1986. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", ACI Journal, Proceedings 83(2) : 219-231.

[9] Vecchio, F.J, Collins, M.P., 1993. Compression Response of Cracked Reinforced Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, 119, (12) : 3590-3610.

[10] ABAQUS. (2016). "FEA software and User's Manual version 6.14" Hibbitt, karlsson Sorensen Inc., Rhode Island, USA, http://www.abaqus.com., [1 March 2020]

[11] Sinaei, H., Shariati, M., Abna, A. H., Aghaei, M., & Shariati, A. (2012). Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by ABAQUS. Scientific Research and Essays, 7(21), 2002-2009.

[12] ACI Committee 318 – 11, " Building code requirements for reinforced concrete and commentary, American concrete institude, detroit, pp. 417-463, 2011.

[13] Carreira DJ and Chu KH, "Stress strain relationship for plaine concrete in tension, ACI Journal, pp. 82-72 : 797-804, 1985.