

พฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำพลศาสตร์

Behaviors of Precast Concrete Beam-Column Joints Under Dynamic Loading

พลกฤต จิตต์มาตร^{1*} นันทชัย ชุติลป์¹ และจุฑามาศ ลักษณะกิจ¹

Phonlakit Jitmart^{1*} Nuntachai Chusilp¹ and Chuthamat Laksanakit¹

Received: December 9, 2024; Revised: December 20, 2024; Accepted: December 25, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อชิ้นส่วนคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ เปรียบเทียบระหว่างรอยต่อคานเสาชนิดหล่อในที่ Cast in Place Beam-Column Joints (CCJ) กับรอยต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป Precast Beam-Column Joints with Plate and Tube (PCPT) ที่เสริมเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 50 mm หนา 4.5 mm ยาว 300 mm ไว้ภายในจุดต่อรูปแบบชิ้นงานทดสอบประกอบด้วย เสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150 x 150 mm สูง 450 mm คานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150 x 250 mm ยาว 500 mm จากขอบเสาทั้ง 2 ด้าน ทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบสถิตที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสาและให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 60 และ 80 ของแรงกระทำแบบสถิต ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz จากการทดสอบพบว่ารอยต่อคานเสาคอนกรีต CCJ และรอยต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT สามารถรับแรงกระทำแบบสถิตได้ 225.90 และ 193.04 kN จากนั้นทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์พบว่ารอยต่อคานเสามีรูปแบบการแตกร้าวเพิ่มขึ้นแปรผันตรงไปตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของความถี่และแรงกระทำ โดยจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT มีความสามารถรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ได้ดีกว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีต CCJ โดยสามารถรับแรงกระทำที่ความถี่ 5.0 Hz จำนวน 200 รอบ จากนั้นทำการสอบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ารอยต่อคานเสาคอนกรีต CCJ และรอยต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT สามารถรับแรงกระทำแบบสถิตสูงสุดได้ 234.86 และ 205.90 kN ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ร้อยละ 3.96 และ 6.66 จากผลการทดสอบพบว่าการเสริมเหล็กกล่องในจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถนำมาพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับจุดต่อด้านการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์เป็นระยะเวลาต่อเนื่องในสภาวะใช้งานได้ดีเมื่อเทียบกับจุดต่อคานเสาชนิดหล่อในที่

คำสำคัญ : คานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป; รอยต่อคานเสาคอนกรีต; พฤติกรรมการวิบัติ; แรงกระทำแบบพลศาสตร์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 0070 8898, E - mail: phonlakit.j@rmutsvmail.com

Abstract

This paper presents the behavior of precast concrete beam-column joints under dynamic loading, Compares two types of beam-column joints: cast in place beam-column joints (CCJ) and precast beam-column joints with plate and tube (PCPT). The experimental setup consists of square columns (150 × 150 mm, height 450 mm) and rectangular beams (150 × 250 mm, length 500 mm on both sides of the column). The PCPT joints incorporate a rectangular steel tube (100 × 50 mm, 4.5 mm thickness, 300 mm length) at the joints. Static loading at the column's midspan and dynamic loading at 40 % 60 % and 80 % of the static load, with frequencies of 1.0 - 5.0 Hz, were applied. The results reveal that the ultimate static load capacities of CCJ and PCPT were 225.90 kN and 193.04 kN, respectively. Under dynamic loading, cracking increased proportionally with load ratio and frequency. The PCPT joints demonstrated superior performance under 80 % load at a frequency of 5.0 Hz, sustaining 200 cycles. Finite element analysis calibrated against experimental results showed maximum static load capacities of 234.86 kN for CCJ and 205.90 kN for PCPT, with deviations of 3.96 % and 6.66 % from the experimental results, respectively. The test results indicate that reinforcing beam-column joints of precast concrete with steel tube can be developed to enhance the performance of the joints in resisting dynamic loads over extended periods under service loading, compared to cast in place beam-column joints.

Keywords: Precast Beam-Column; Beam-Column Joints; Failure Behaviors; Dynamic Load

บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างระบบคานเสาชนิดหล่อในที่ ซึ่งวิธีการก่อสร้างในรูปแบบดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างค่อนข้างนาน อีกทั้งยังพบความผิดพลาดในระหว่างการก่อสร้างประกอบกับการก่อสร้างในระบบดังกล่าวต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นในการลดระยะเวลา ลดความผิดพลาดและอุบัติเหตุ โดยยังสามารถควบคุมคุณภาพได้ วิธีการแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นคือ การก่อสร้างโครงสร้างอาคารแบบสำเร็จรูปจากโรงงานหรือภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (Ahn et al., 2020; Kim, S., Hwang and Son, 2022) เช่น คานคอนกรีตสำเร็จรูป เสาคอนกรีตสำเร็จรูป พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น (Thumrongvut et al., 2013; Kongkaew et al., 2021) ซึ่งจะกำหนดขนาด รูปร่างและรูปแบบจุดต่อที่แน่นอนจากสถานที่ผลิตก่อนนำมาติดตั้งภายในสถานที่ก่อสร้าง แต่การก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมรอยต่อของโครงสร้างรวมถึงวิธีการยึดรอยต่อเข้าด้วยกันเพื่อป้องกันอันตรายและความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ในอดีตการออกแบบโครงสร้างรอยต่อในแนวแกนคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปมักจะไม่ได้รับการออกแบบให้มีความสามารถในการรองรับความเสียหายจากแรงกระทำแบบพลศาสตร์หรือแรงกระทำซ้ำ ๆ แบบต่อเนื่องมากนัก ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหลัก ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของรอยต่อแต่ละประเภทจึงควรทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อก่อนการปรับปรุงจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปมีการเสริมเหล็กข้ออ้อย DB 10 mm ภายในจุดต่อที่มีความยาว 1.5 เท่าของความลึกประสิทธิภาพของคาน (Hansapinyo et al., 2016) พบว่าการเพิ่มเหล็กเสริมตามแนวยาวที่ระดับกลางภายในบริเวณจุดต่อยาวต่อเนื่องไปจนถึงปลายคานสามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ดีขึ้นในด้านกำลัง รูปแบบการวิบัติแบบเหนียวได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน การเสริมเหล็กข้ออ้อยภายในจุดต่อยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการติดตั้งกับแผ่นเหล็กหนา 20 mm เชื่อมยึดกับเหล็กข้ออ้อย DB 16 mm ที่ความยาว 0.5 1.0 และ 1.5 m (Kongkaew et al., 2021) ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มความยาวของเหล็กข้ออ้อยสามารถเพิ่มค่าการแอ่นตัวของคาน $L/240$ เทียบกับการเสริมเหล็ก

ที่ความยาว 0.5 เท่ากับ 4.27 และ 12.23 % นอกจากการเสริมเหล็กข้ออ้อยยังมีการศึกษาการติดตั้งวัสดุอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปอีกหลายรูปแบบ อาทิเช่น การเสริมเหล็กแผ่นและเหล็กกล่องภายในจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อย้ายจุดหมุนพลาสติก (Choi et al., 2013) พบว่าการติดตั้งแผ่นเหล็กภายในจุดต่อมีกำลังรับแรงของจุดต่อมากขึ้น 1.15 เท่าเทียบกับจุดต่อแบบหล่อในที่อีกทั้งสามารถเพิ่มระยะการแอ่นตัวได้ร้อยละ 3.5 มีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำทั้งแบบวัฏจักรของจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป โดยการติดตั้งเหล็กรูปตัวทีภายในจุดต่อ (Ketiyot, 2017) ผลการทดสอบพบว่า การเสริมเหล็กหน้าตัดรูปตัวทีจำนวน 2 ชุดภายในจุดต่อส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดของหน้าตัดคานบริเวณหน้าเสาซึ่งมีความยาวเท่ากับความลึกประสิทธิภาพของคานมีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ๆ เท่ากับ 1.25 เท่า เนื่องจากการย้ายจุดหมุนพลาสติกออกจากหน้าเสา นอกจากนี้มีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้แผ่นเหล็กยึดติดกับสลักเกลียวยึดติดกับเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอฝังในคานคอนกรีตสำเร็จรูป (Zhang et al., 2020) ร่วมกับคอนกรีตผสมไฟเบอร์โดยพบว่าจุดต่อมีการย้ายจุดหมุนพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาแบบจุดต่อคานเสาคอนกรีตค่อนข้างมาก แต่การศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยการติดตั้งเหล็กรูปพรรณชนิดรีดเย็นร่วมกับเหล็กแผ่นนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงได้นำเหล็กรูปพรรณชนิดรีดเย็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดตั้งภายในจุดต่อระหว่างคานและเสาคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อศึกษาพฤติกรรมด้านการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ ซึ่งการทดสอบรูปแบบของรอยต่อชนิดต่าง ๆ ต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้มีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือแต่การทดสอบอาจมีข้อผิดพลาดได้ทั้งจากกรณีของวัสดุหรือขั้นตอนของการปฏิบัติงาน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อนำมาประยุกต์และวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ซึ่งจะหาคำตอบประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ละเอลิเมนต์ สร้างสมการในแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันทำให้เกิดระบบสมการรวมเพื่อตรวจสอบปัญหาที่แท้จริง ที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการทดสอบมากขึ้น โดยพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากกับทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Tejaswini et al., 2015; Atichat et al., 2017; Ketiyot, 2017)

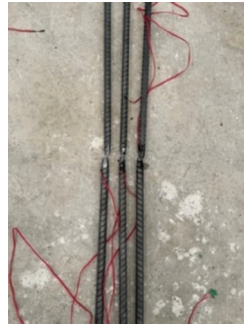
วิธีดำเนินการวิจัย

1. คุณสมบัติวัสดุ

วัสดุที่ใช้สำหรับการศึกษาประกอบด้วย คอนกรีต มอร์ตาร์ เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย เหล็กแผ่น เหล็กกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเหล็กฉากขนาดเท่ากัน (รูปที่ 1(ก) - (จ)) โดยคุณสมบัติทางกลเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ทดสอบคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 (2018) ทดสอบมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 5 วัน ตามมาตรฐานการหาค่ากำลังของมอร์ตาร์ ASTM C109 (2021) และตามมาตรฐานการหาค่ากำลังมอร์ตาร์ซีเมนต์ ASTM C190 (1985) เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ RB9 mm ทดสอบตาม มอก. 20-2559 (Thai Industrial Standard, 2016a) เหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB12 mm ตาม มอก. 24-2559 (Thai Industrial Standard, 2016b) เหล็กแผ่นหนา 12 mm ทดสอบตาม มอก. 1479-2558 (Thai Industrial Standard, 2015) เหล็กกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (H x B) เท่ากับ 100 x 50 mm หนา 4.5 mm และเหล็กฉากเท่ากันขนาด 65 x 65 mm หนา 5 mm ตาม มอก. 107-2561 (Thai Industrial Standard, 2018) ทดสอบกำลังรับแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน ASTM A500 (2018) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับคุณสมบัติทางกลที่ได้กำหนดไว้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2



(ก) เหล็กรูปพรรณ



(ข) เหล็กเส้น



(ค) ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



(ค) ทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์



(ง) ทดสอบกำลังดึงมอร์ตาร์



(จ) ทดสอบกำลังดึงคอนกรีต

รูปที่ 1 วัสดุและเครื่องมือทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นและเหล็กรูปพรรณ

Material	f_y (MPa)	f_y^* (MPa)	f_u (MPa)	f_u^* (MPa)	E (GPa)	E^* (GPa)
DB12 mm	566	390	662	560	206	210
RB9 mm	431	235	559	385	221	210
PL 100x200x12 mm	367	235	445	400	200	210
L 65x65x5 mm	338	235	485	400	204	210
T 100x50x20x4.5 mm	411	245	470	400	210*	210

* ค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นและเหล็กรูปพรรณอยู่ในค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานโดยเหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย DB12 mm มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 566 MPa และค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_u) 662 MPa เหล็กเส้นกลมชนิดผิวเรียบ RB9 mm ค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) มีค่าเท่ากับ 431 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_u) เท่ากับ 559 MPa จากนั้นเมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเหล็กแผ่นหนา 12 mm (PL100 x 200 x 12 mm) เหล็กฉากขาเท่ากัน (L65 x 65 x 5 mm) และเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (T100 x 500 x 20 x 4.5 mm) มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 367 338 และ 411 MPa และค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (f_u) เท่ากับ 445 485 และ 470 MPa ตามลำดับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมไทยกำหนดไว้

ตารางที่ 2 ผลทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตและมอร์ตาร์

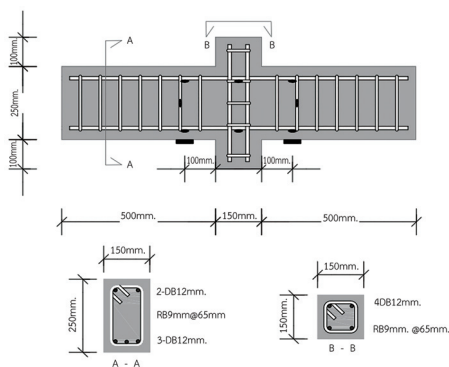
Material	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c (GPa)
Concrete 28 _d	28.99	2.61	25.31
Mortar 5 _d	37.75	2.00	28.88

กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน (f'_c) ของแท่งคอนกรีตทรงลูกบาศก์เท่ากับ 28.99 MPa และค่ากำลังดึงประลัยที่ 28 วัน (f'_t) ของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกเท่ากับ 2.61 MPa โดยมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับเทหุ้มรอยต่อระหว่างคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปมีค่ากำลังอัดประลัยที่ 5 วัน (f'_c) ของแท่งมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์เท่ากับ 37.75 MPa และกำลังรับแรงดึงประลัยที่ 5 วัน (f'_t) ของแท่งทรงบริเคทเท่ากับ 2.00 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) ของคอนกรีตและมอร์ตาร์คำนวณตาม ACI 318-19 (2019) เป็นไปตามสมการที่ (1)

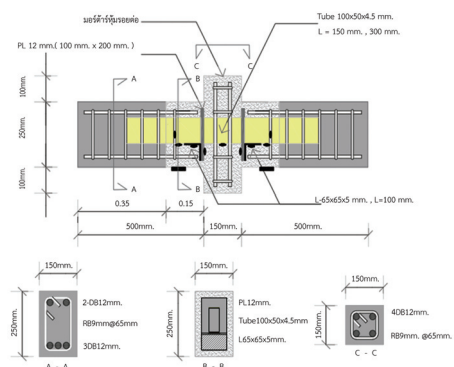
$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบเป็นจุดต่อคานเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่และคานเสาชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150 x 150 mm สูง 450 mm หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150 x 250 mm ยาว 500 mm จากขอบเสาทั้ง 2 ด้าน ตัวอย่างคานเสาคอนกรีตจำนวน 6 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 Cast in Place Beam-Column Joints (CCJ) เป็นรูปแบบคานเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่ทำการเสริมเหล็ก DB12 mm ภายในคานจำนวน 5 เส้น แบ่งเป็นด้านล่าง 3 เส้น ด้านบน 2 เส้น และเสริมเหล็ก DB12 mm ภายในเสาจำนวน 4 เส้น เหล็กปลอกทั้งหมดใช้เป็นเหล็ก RB9 mm ระยะห่าง 65 mm ตาม มยพ.1301/1302-61 (Hansapinyo et al., 2016; DPT Committee 1301/1302-61, 2020) จากนั้นเทคอนกรีตคานเสาเป็นชิ้นเดียวกันดังรูปที่ 2(ก) รูปแบบที่ 2 Precast Beam-Column Joints with Plate and Tube (PCPT) เป็นรูปแบบคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูปทำการเสริมเหล็ก DB12 mm ภายในคานและเสาเหมือนกับรูปแบบชนิดหล่อในที่ โดยที่เหล็กเสริมในคานแยกออกจากกันไม่ฝากเหล็กเข้าภายในเสา จากนั้นทำการฝังเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 50 mm หน้า 4.5 mm ยาว 300 mm ในคานคอนกรีตทั้ง 2 ด้าน เทคอนกรีตคานโดยเว้นระยะจากขอบคาน 150 mm ทำการเชื่อมยึดเหล็กกล่องกับเหล็กฉากเท่ากันขนาด 65 x 65 mm หน้า 5.0 mm เชื่อมติดกับเหล็กแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 200 mm หน้า 12 mm ที่ติดตั้งภายในเสาคอนกรีต จากนั้นเทมอร์ตาร์หุ้มรอยต่อระหว่างคานเสาให้เป็นชิ้นเดียวกันดังรูปที่ 2(ข)



(ก) รูปแบบคานเสา CCJ

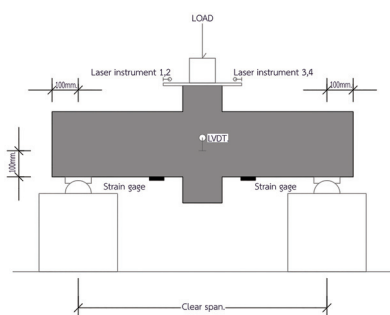


(ข) รูปแบบคานเสา PCPT

รูปที่ 2 รูปแบบจุดต่อคานเสาคอนกรีต

วิธีการทดสอบ

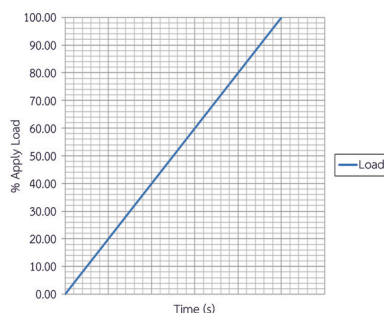
ทำการติดตั้งชิ้นงานคานเสาชนิดหล่อในที่และคานเสาชนิดสำเร็จรูปดังรูปที่ 2(ก) - (ข) กับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาดกำลัง 500 kN โดยติดตั้งแผ่นเหล็กหนา 12 mm บริเวณด้านบนเพื่อทำการถ่ายแรงกระทำจากเครื่องทดสอบมายังชิ้นงานจากนั้นทำการติดตั้ง Laser Instrument Sensor ที่บริเวณมุมแผ่นเหล็กถ่ายแรงจำนวน 4 ชุด และติดตั้งอุปกรณ์ LVDT ที่บริเวณจุดกลางของเสาคอนกรีตเพื่อทำการเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนตัวตามแนวดิ่ง ติดตั้ง Strain Gauge ภายในเหล็กและผิวคอนกรีตเพื่อตรวจสอบความเครียดที่เกิดขึ้น รูปที่ 3(ก) - (ข) จากนั้นทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบสถิตที่บริเวณด้านบนของชิ้นงานโดยเพิ่มแรงกดต่อเนื่องที่อัตรา 2 mm/min จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการวิบัติไม่สามารถต้านแรงกระทำได้ ดังรูปที่ 3(ค) เพื่อให้ทราบถึงกำลังสูงสุดที่สามารถรับได้ของแต่ละรูปแบบ เมื่อทราบกำลังสูงสุดของแต่ละรูปแบบแล้วจึงทำการติดตั้งชิ้นงานขึ้นใหม่ทั้งชิ้นงานคานเสาชนิดหล่อในที่ CCJ และชิ้นส่วนคานเสาชนิดสำเร็จรูป PCPT จากนั้นทดสอบชิ้นงานโดยให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่น้ำหนักแรงกระทำร้อยละ 40 60 และ 80 ของน้ำหนักแรงกระทำสูงสุดแบบสถิตที่ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz จำนวน 200 รอบ ดังรูปที่ 3(ง)



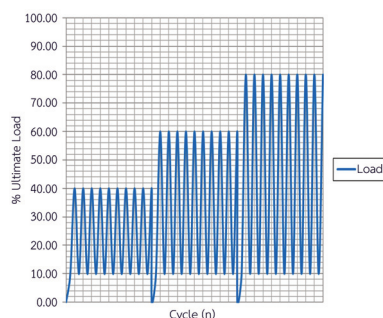
(ก) รูปแบบการติดตั้งชิ้นงาน



(ข) แสดงการติดตั้งชิ้นงาน



(ค) รูปแบบแรงกระทำแบบสถิต



(ง) รูปแบบแรงกระทำแบบพลศาสตร์

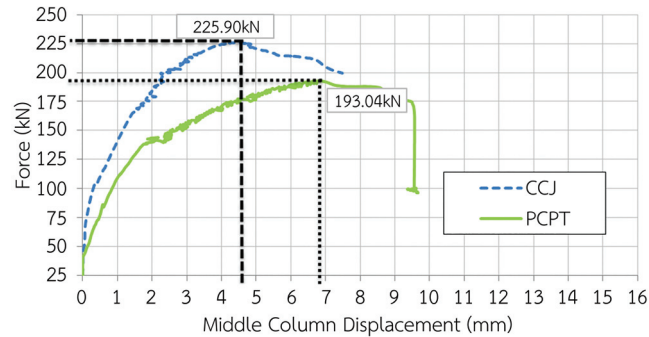
รูปที่ 3 รูปแบบการติดตั้งและการให้แรงกระทำขึ้นตัวอย่างทดสอบ

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

พฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อคานเสาภายใต้แรงกระทำแบบสถิต

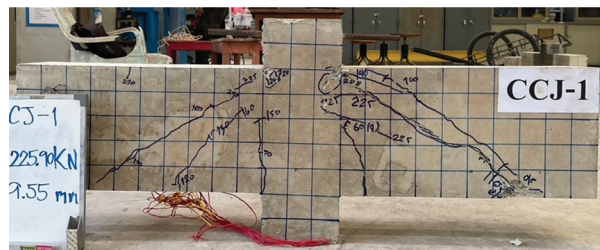
รูปที่ 4 แสดงแผนภาพของความสัมพันธ์ระหว่างการให้แรงกระทำแบบสถิตที่ด้านบนของเสากับระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางเสา จากแผนภาพพบว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) จุดต่อทั้ง 2 รูปแบบมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่แตกต่างกัน ผลของตัวอย่าง CCJ มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 225.90 kN ตัวอย่าง PCPT มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 193.04 kN ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม 14.54 % จากนั้นเมื่อเข้าสู่ในช่วงที่สองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ตัวอย่างทดสอบ CCJ มีความสามารถในการรับแรงกระทำค่อย ๆ ลดลง ค่าการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางเสามีค่าเพิ่มขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ

ตัวอย่างทดสอบ PCPT เมื่อจุดต่อรับแรงกระทำถึงจุดสูงสุด จุดต่อมีกำลังรับแรงกระทำลดลงเล็กน้อยแต่มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจาก 7 mm ไปจนถึง 9.55 mm จากนั้นจุดต่อแอ่นตัวเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใดจากการวิบัติของเหล็กกล่องขาดออกจากเหล็กแผ่นภายในเสา ซึ่งเป็นการวิบัติจากรอยเชื่อมระหว่างเหล็กแผ่นที่เชื่อมยึดกับเหล็กกล่องขาดออกจากกัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการแอ่นตัว

ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีต



(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



(ข) จุดต่อคานเสา PCPT

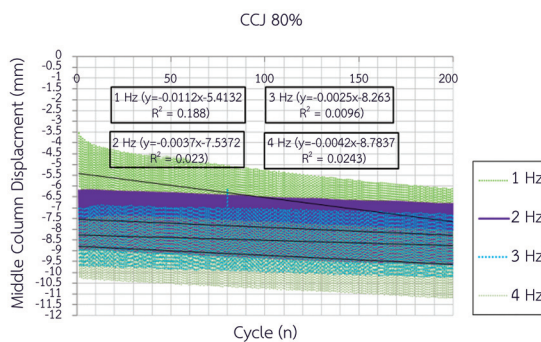
รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบสถิต

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิบัติและรูปแบบการแตกร้าว จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ ตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดรอยร้าวในแนวตั้งทำมุมประมาณ 15 องศา ที่แรงกระทำ 60 kN โดยรอยร้าวห่างจากขอบเสาประมาณ 5 cm และมีความยาว 15 cm หลังจากเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำจนถึง 50 % ของแรงกระทำสูงสุดพบมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นจากขอบเสาเป็นแนวทแยงประมาณ 45 องศา จากขอบเสาไปยังจุดรองรับทั้ง 2 ด้าน และที่น้ำหนักแรงกระทำ 70 - 80 % ของแรงกระทำสูงสุดรอยร้าวมีการปรากฏอย่างชัดเจนที่บริเวณจุดรองรับและบริเวณด้านบนของคานจากการอัดแตกของพฤติกรรมรับแรงอัดของคอนกรีต โดยจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่สามารถรับน้ำหนักแรงกระทำสูงสุดได้ 225.90 kN จุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT เมื่อทำการให้น้ำหนักแรงกระทำไปถึง 40 kN จุดต่อเริ่มมีรอยแตกร้าวของคอนกรีตเป็นแนวตั้งที่บริเวณขอบเสาคอนกรีต จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำไปที่ 35 - 50 % ของแรงกระทำสูงสุดพบคอนกรีตบริเวณคานทดสอบห่างจากแนวรอยต่อขอบเสาประมาณ 10 cm มีรอยแตกร้าวเป็นแนวนอนและแนวเฉียงโดยมีทิศทางไปด้านจุดรองรับ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำไปจนถึง 75 - 85 %

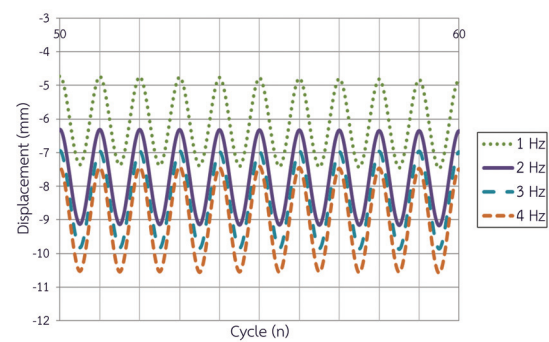
พบรอยแตกร้าวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นห่างจากขอบเสา 15 cm เป็นแนวทแยงมุม 45 องศาไปยังจุดรองรับและเมื่อเพิ่มน้ำหนักแรงกระทำไปจนถึงจุดวิบัติ จุดต่อคานเสาสามารถรับแรงกระทำสูงสุดได้ 193.40 kN โดยเหล็กกล่องที่เชื่อมถ่ายแรงระหว่างแผ่นเหล็กภายในเสาขาดออกซึ่งเป็นการวิบัติจากรอยเชื่อมระหว่างเหล็กแผ่นที่เชื่อมยึดกับเหล็กกล่องขาดออกจากกัน

พฤติกรรมการรับแรงของจุดต่อคานเสาภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์

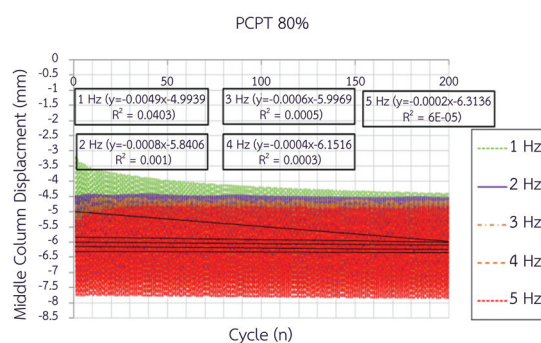
เมื่อทราบกำลังรับแรงกระทำสูงสุดของแต่ละจุดต่อแล้วจากนั้นทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz ที่น้ำหนักแรงกระทำอัตราส่วนร้อยละ 40 60 และ 80 ของกำลังรับแรงกระทำสูงสุด จำนวนรอบการให้แรงกระทำ 200 รอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อในด้านของความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับจำนวนรอบและความถี่การให้แรงกระทำ รวมถึงลักษณะการวิบัติของจุดต่อ ดังรูปที่ 6(ก) - (ง)



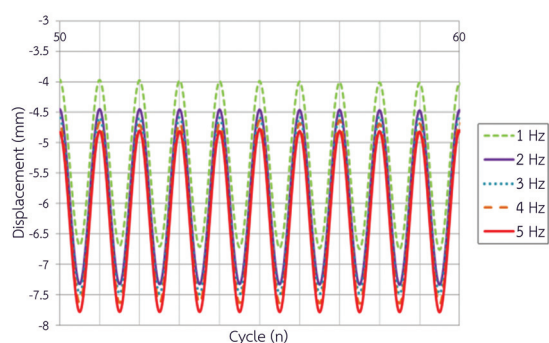
(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



(ข) ขยายจุดต่อคานเสา CCJ



(ค) จุดต่อคานเสา PCPT



(ง) ขยายจุดต่อคานเสา PCPT

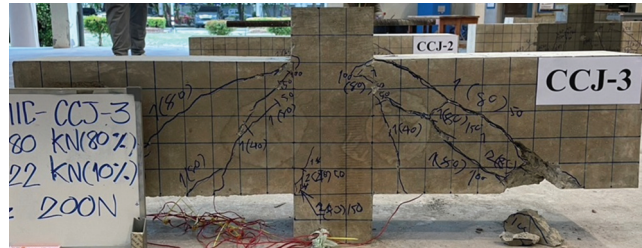
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวกับจำนวนรอบและความถี่การให้แรงกระทำ

จากการทดสอบเมื่อให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่น้ำหนักแรงกระทำอัตราส่วนร้อยละ 80 ของความสามารถรับน้ำหนักสูงสุดจุดต่อทั้ง 2 รูปแบบมีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการให้แรงกระทำและเมื่อเพิ่มความถี่โดยจุดต่อ CCJ ที่เป็นตัวอย่างควบคุมเมื่อให้น้ำหนักแรงกระทำที่ความถี่ 1.0 Hz พบว่าจุดต่อมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของแรงกระทำมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงความถี่แรงกระทำที่ 2.0 - 4.0 Hz และจุดต่อ CCJ สามารถรับน้ำหนักกระทำที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ความถี่แรงกระทำ 4 Hz จำนวน 200 รอบ จุดต่อ PCPT พบว่าสามารถรับแรงกระทำที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ได้ดีที่สุด สามารถรับความถี่แรงกระทำ 5.0 Hz โดยความสัมพันธ์ของการแอ่นตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ 1.0 Hz จุดต่อมีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามจำนวนรอบของแรงกระทำและที่ความถี่ 2.0 - 5.0 Hz มีค่าการแอ่นตัวใกล้เคียงกันเนื่องจากการเสริมเหล็กกล่องภายในทำให้จุดต่อมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

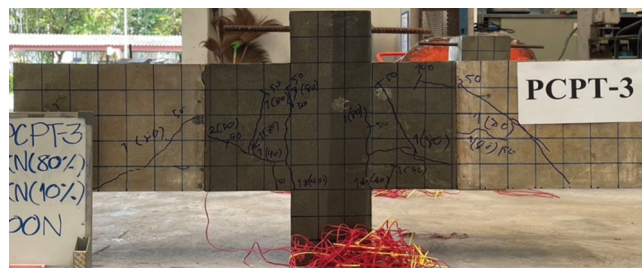
ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์

รูปที่ 7(ก) แสดงลักษณะการวิบัติและรูปแบบการแตกร้าว จุดต่อคานเสาชนิดหล่อในที่ CCJ มีรูปแบบการแตกร้าวเป็นแนวทแยงทำมุม 45 องศาจากขอบเสาไปยังจุดรองรับ โดยรอยร้าวมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ของ

แรงกระทำที่ 4.0 Hz คอนกรีตบริเวณจุดรองรับเกิดการปริแตกเสียหายอย่างรุนแรงไม่สามารถเพิ่มความถี่แรงกระทำได้ จุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT เมื่อเพิ่มความถี่แรงกระทำไปที่ 5.0 Hz จุดต่อสามารถรับแรงกระทำได้ตามเดิม ไม่มีความเสียหายเพิ่มขึ้นจากความถี่แรงกระทำ 1.0 2.0 3.0 4.0 Hz โดยรูปแบบการแตกร้าวเกิดขึ้นเป็นแนวตั้ง บริเวณรอยต่อของคานและขอบเสาจากนั้นพบรอยร้าวเพิ่มขึ้นจากขอบเสาด้านบนเป็นแนวทแยงไปยังจุดรองรับ โดยรอยร้าวยังไม่เกิดความเสียหายขั้นรุนแรงจุดต่อยังสามารถรับน้ำหนักแรงกระทำเพิ่มได้ ดังรูปที่ 7(ข)



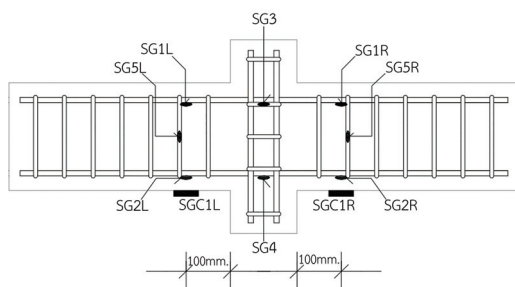
(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



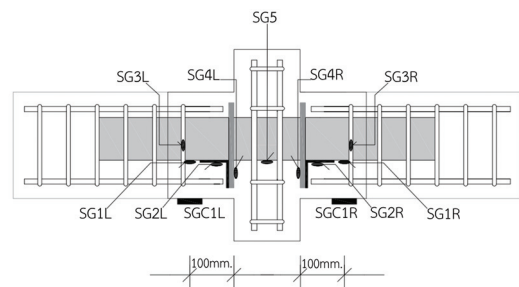
(ข) จุดต่อคานเสา PCPT

รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของจุดต่อคานเสาคอนกรีตภายใต้แรงกระทำแบบพลศาสตร์

การกระจายความเครียดภายในจุดต่อคาน-เสาคอนกรีต



(ก) จุดต่อคานเสา CCJ



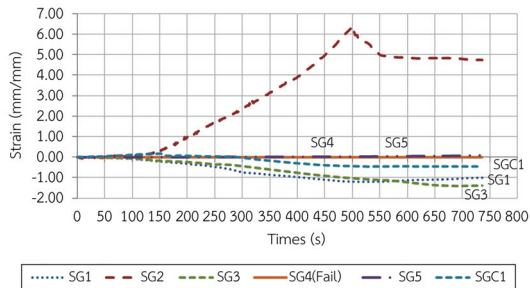
(ข) จุดต่อคานเสา PCPT

รูปที่ 8 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauge

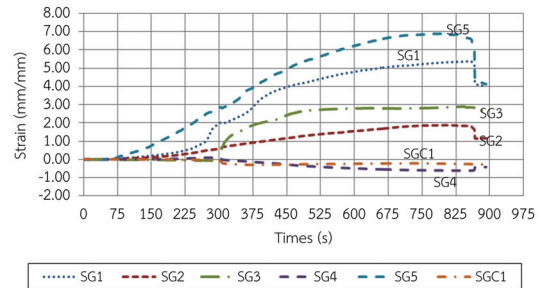
จากการทดสอบได้ทำการติดตั้งชุด Strain Gauge ไว้ภายในเหล็กเสริมและผิวคอนกรีตเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมและคอนกรีตในขณะรับแรงกระทำแบบสถิตและแรงกระทำซ้ำแบบพลศาสตร์ โดยตำแหน่งการติดตั้งดังรูปที่ 8(ก) - (ข)

รูปที่ 9(ก) - (ข) พบว่าพฤติกรรมความเครียดของเหล็กเสริมของจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ เมื่อรับแรงกระทำแบบสถิตพบว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลักด้านล่างของคานตำแหน่งห่างจากขอบเสา 10 cm ถึงจุดคราก หลังจากนั้นเข้าสู่สภาวะไม่เป็นเชิงเส้นก่อนจุดต่อคานเสาคอนกรีตเกิดการวิบัติ จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูป

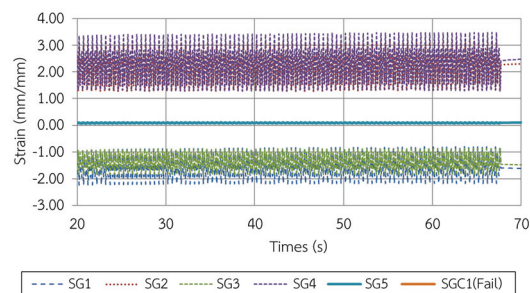
PCPT เมื่อให้น้ำหนักแรงกระทำพบว่าเหล็กกล่องบริเวณภายในเสาถึงจุดครากและเข้าสู่สภาวะไม่เป็นเชิงเส้นก่อนเกิดการวิบัติของจุดต่อ ทั้งนี้เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่ความถี่ 4.0 5.0 Hz พบว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมยังอยู่ในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้นยังไม่ถึงจุดคราก โดยจุดต่อ CCJ พบว่าเหล็กเสริมมีความเครียดมากกว่าจุดต่อ PCPT รูปที่ 9(ค) - (ง)



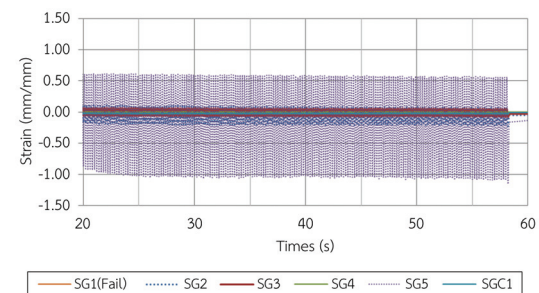
(ก) ความเครียดภายในจุดต่อ CCJ แรงสถิต



(ข) ความเครียดภายในจุดต่อ PCPT แรงสถิต



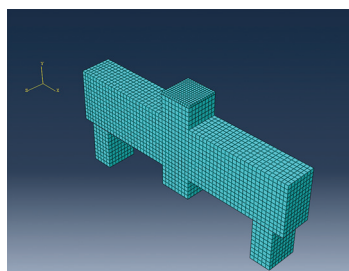
(ค) ความเครียดภายในจุดต่อ CCJ แรงพลศาสตร์
รูปที่ 9 แผนภาพแสดงความเครียดภายในจุดต่อคานเสาคอนกรีต



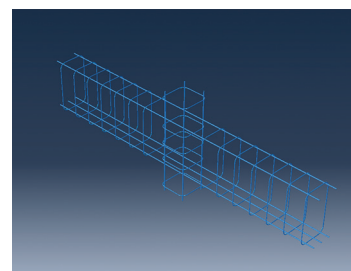
(ง) ความเครียดภายในจุดต่อ PCPT แรงพลศาสตร์

ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวอย่างจุดต่อทั้ง 2 รูปแบบทำการจำลองจุดต่อด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS (Dassault Systemes Simulia Corp, 2014) กำหนดชนิดเอลิเมนต์คอนกรีต เหล็กแผ่นและเหล็กgrupฉากเป็นชนิด C3D8R กำหนดชนิดเอลิเมนต์เหล็กเสริมเป็นชนิด T3D2 (Atichat et al., 2017) และกำหนดชนิดเอลิเมนต์เหล็กกล่องเป็นชนิด S4A กำหนดการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตกำหนดให้เป็นแบบ Embedded Region กำหนดการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกล่องและคอนกรีตเป็นแบบ Tie กำหนดขอบเขตระหว่างคอนกรีตวางอยู่บนจุดรองรับแบบ Interaction (Atichat et al., 2017) จากนั้นทำการแบ่งเอลิเมนต์แต่ละชิ้นส่วนออกเป็นขนาด 20 - 30 mm ดังรูปที่ 10(ก) - (ง)

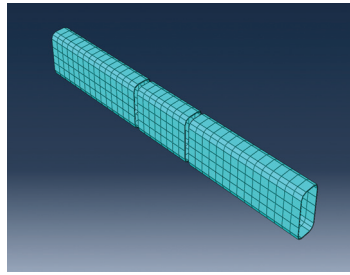


(ก) รูปแบบเอลิเมนต์ C3D8R

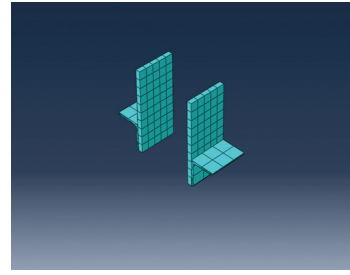


(ข) รูปแบบเอลิเมนต์ T3D2

รูปที่ 10 ชนิดเอลิเมนต์ของแบบจำลองจุดต่อคานเสาคอนกรีต



(ค) รูปแบบเอลิเมนต์ S4A

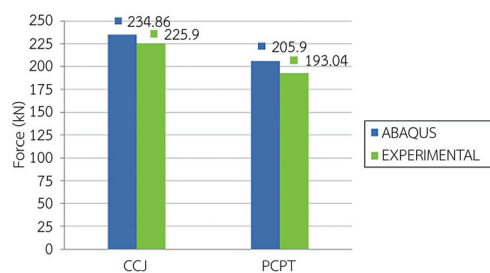


(ง) รูปแบบเอลิเมนต์ C3D8R

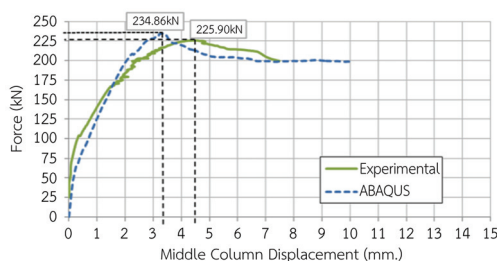
รูปที่ 10 ชนิดเอลิเมนต์ของแบบจำลองจุดต่อคานเสาคอนกรีต (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

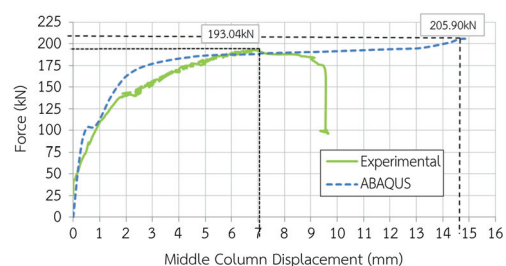
จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดที่ 234.86 kN เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 225.90 kN โดยคำตอบจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอัตราส่วนร้อยละ 3.96 จุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูป PCPT มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดที่ 205.90 kN เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 193.04 kN รูปที่ 11(ก) คำตอบจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอัตราส่วนร้อยละ 6.66 ผลที่ได้ทั้ง 2 รูปแบบมีกำลังรับแรงกระทำระหว่างแบบจำลองกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการใกล้เคียงกัน (Tejaswini and Rama Raju, 2015; Atichat et al., 2017) แตกต่างกันเล็กน้อยในช่วงพฤติกรรมการแอ่นตัวในขณะรับแรงกระทำดังรูปที่ 11(ข) - (ค) ซึ่งจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดสำเร็จรูป PCPT มีการยืดตัวเพิ่มขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ



(ก) เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุด



(ข) เปรียบเทียบความสัมพันธ์แรงกระทำ CCJ

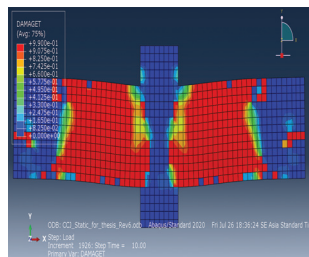


(ค) เปรียบเทียบความสัมพันธ์แรงกระทำ PCPT

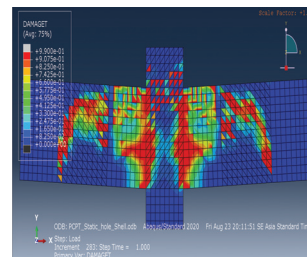
รูปที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการให้แรงกระทำกับระยะแอ่นตัว

รูปแบบความเสียหายของจุดต่อคานเสาคอนกรีต

จากแบบจำลองจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่และชนิดสำเร็จรูปพบว่ามีลักษณะการวิบัติและรูปการแตกร้าวในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยจุดต่อเริ่มมีความเสียหายจากบริเวณขอบเสานั่นมีรอยแตกร้าวเป็นแนวทแยง 45 องศาไปยังจุดรองรับ ดังรูปที่ 12(ก) - (ข)



(ก) จุดต่อคานเสาคอนกรีต CCJ

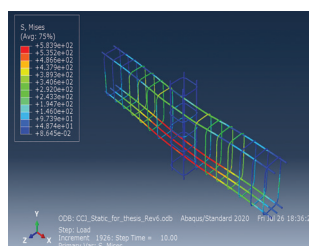


(ข) จุดต่อคานเสาคอนกรีต PCPT

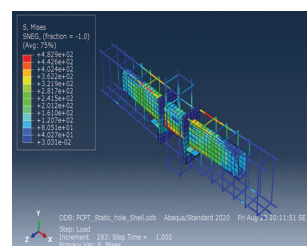
รูปที่ 12 แบบจำลองความเสียหายจุดต่อคานเสาคอนกรีต

การกระจายความเค้นภายในจุดต่อคานเสาคอนกรีต

จากผลการจำลองพบว่าจุดต่อคานเสาชนิดหล่อในที่ CCJ มีค่าความเค้นของเหล็กเสริมเท่ากับ 583.9 MPa ที่บริเวณเหล็กเสริมด้านล่างของคานจากนั้นความเค้นค่อย ๆ กระจายออกไปจนถึงจุดรองรับและจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT มีค่าความเค้นของเหล็กเท่ากับ 482.9 MPa โดยจุดที่มีความเค้นมากที่สุดคือ บริเวณด้านล่างของเหล็กกล่องภายในที่เชื่อมยึดกับแผ่นเหล็กภายในจุดต่อ ซึ่งจากพฤติกรรมของการกระจายความเค้นภายในจุดต่อ สอดคล้องกับผลของความเครียดในเหล็กเสริมที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 13 (ก) - (ข)



(ก) ความเค้นในเหล็กเสริมจุดต่อ CCJ



(ข) ความเค้นในเหล็กเสริมจุดต่อ PCPT

รูปที่ 13 ความเค้นภายในเหล็กเสริมจุดต่อคานเสาคอนกรีต

บทสรุป

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำพลศาสตร์ทำการเปรียบเทียบระหว่างคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่กับคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปที่ทำการเสริมเหล็กกล่องภายในจุดต่อ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ CCJ มีกำลังรับแรงกระทำได้สูงสุดเท่ากับ 225.90 kN จุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูป PCPT มีกำลังรับแรงกระทำสูงสุดแบบสถิติได้ 193.04 kN ซึ่งน้อยกว่าจุดต่อควบคุมในอัตราส่วนร้อยละ 14.54 เมื่อทำการทดสอบโดยการให้แรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่ความถี่ 1.0 - 5.0 Hz จำนวน 200 รอบ พบว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่สามารถรับความถี่แรงกระทำได้ 4.0 Hz โดยมีความเสียหายของจุดต่อปริแตกรุนแรงที่บริเวณจุดรองรับและจุดต่อคานเสาคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถรับแรงกระทำซ้ำแบบพลศาสตร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 80 ของแรงกระทำสูงสุดได้ดีกว่าจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่ โดยสามารถรับความถี่แรงกระทำได้ที่ 5.0 Hz โดยที่ความเสียหายของจุดต่อไม่รุนแรง เนื่องจากความเหนียวที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมเหล็กกล่องภายใน และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในด้านกำลังรับน้ำหนักแรงกระทำสูงสุดแบบสถิติของจุดต่อมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้มีความแตกต่างกันระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของจุดต่อ CCJ และ PCPT ในอัตราส่วนร้อยละ 3.96 และ 6.66 ซึ่งผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการเสริมเหล็กกล่องภายในคานคอนกรีตสำเร็จรูปและภายในเสาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับจุดต่อในด้านการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์หรือ

แรงกระทำซ้ำ ๆ เป็นระยะเวลาต่อเนื่องในสภาวะการใช้งานได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับจุดต่อคานเสาคอนกรีตชนิดหล่อในที่อีกทั้งยังลดความเสียหายรุนแรงในจุดต่อโครงสร้างประเภทสำเร็จรูปได้ดี สามารถนำมาพัฒนาเป็นทางเลือกในการลดระยะเวลาก่อสร้าง เหมาะสำหรับนำมาใช้ในโครงสร้างที่รับแรงกระทำแบบพลศาสตร์หรือรับแรงกระทำแบบซ้ำ ๆ ต่อเนื่อง เช่น โครงสร้างรองรับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร อัฒจันทร์ และอาคารจอดรถ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและนักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีและสนับสนุนในการใช้สถานที่ เครื่องมือและช่วยเหลือในการทดสอบที่จำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

References

- ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Ahn, S., Crouch, L. and Rameezdeen, R. (2020). Comparison of Worker Safety Risks Between Onsite and Offsite Construction Methods: A Site Management Perspective. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(9), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001890](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001890)
- ASTM C190. (1985). *Standard Test Methods for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM A500. (2018). *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Round and Shapes*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C39. (2018). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C109. (2021). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, PA, USA.
- Atichat, A., Sirimontree, S. and Witchayangkoon, B. (2017). Behaviors of Concrete Beam to Column Connections under Static Load Using Finite Element Method. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 8(2), 57-67. <https://tuengr.com/V08/057.pdf>
- Choi, H.-K., Choi, Y.-C. and Choi, C.-S. (2013). Development and Testing of Precast Concrete Beam-to-column Connections. *Engineering Structures*, 56, 1820-1835. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.021>
- Dassault Systemes Simulia Corp. (2014). *Abaqus Analysis User's Manual 6.14*. P., RI, USA.
- DPT Committee 1301/1302-61. (2020). *Thailand Seismic Code*. Department of Public Works and Town & Country Planning, Bangkok, Thailand.
- Hansapinyo, C., Pansomboon, R. and Wongmatar, P. (2016). Plastic Hinge Relocation of Interior Beam-column Concrete Frames using Longitudinal Intermediate Bars. *RMUTL Engineering Journal*, 1(1), 9-16. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ/article/view/184067/129726> (in Thai)
- Ketiyot, R. (2017). *Cyclic Behavior of Precast Concrete Beam-column Connections with Plastic Hinge Relocation using T-section Steel Insert* [Doctoral dissertation, Chaing Mai University]. http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2017/enci80417rtktyp_tpg.pdf (in Thai)

- Kim, S., Hwang, S. and Son, J. (2022). Safety Management Guidelines for Precast Concrete Production Plants Using Importance-Performance Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002298](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002298)
- Kongkaew, C., Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2021). Effect of Embedded Length of Deformed Bars Welded to Steel Plate on Precast Reinforced Concrete Beam. *The 26th National Convention on Civil Engineering*. 1-6. (in Thai)
- Tejaswini, T. and Rama Raju, M.V. (2015). Analysis of RCC Beams using ABAQUS. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJET)*, 5(3), 248-255.
- Thumrongvut, J., Seangatith, S. and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. *RMUTI Journal*, 6(2), 15-30. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/16074/14631> (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2015). *Hot Rolled Flat Steel For General Structure (TIS 1479-2558)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2016a). *Steel Bars For Reinforced Concrete: Round Bars (TIS 20-2559)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2016b). *Steel Bars For Reinforced Concrete: Deformed Bars (TIS 24-2559)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. (2018). *Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561)*. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Zhang, J., Ding, C., Rong, X., Yang, H. and Li, Y. (2020). Development and Experimental Investigation of Hybrid Precast Concrete Beam-column Joints. *Engineering Structures*, 219, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110922>