

พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปด้วยรอยต่อแบบการเชื่อมทาบเหล็กเส้น

Seismic Behavior of Precast Concrete Load Bearing Walls with Welded Rebar Connections

เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย^{1*} พงษ์ศักดิ์ วิวัฒน์โรจนกุล² พิชัย สุวรรณสายะ³ อมร พิมานมาศ⁴

¹อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี 12110

²นักวิจัย, ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 กม. 41 ถนนพหลโยธิน อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120

³นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

58 หมู่ 9 กม. 42 ถนนพหลโยธิน อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120

⁴อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ.งามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กทม 10900

Ekkachai Yooprasertchai^{1*} Pongsak Wiwatrojanagul² Pichaya Suwansaya³ Amorn Pimanmas⁴

¹Lecturer, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 12110

²Researcher, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Rangsit Campus, P.O. Box 22, Pathum Thani 12121, 12120

³Doctoral Candidate, School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology, Klong Luang, Pathumthani, 12120

⁴Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

*Corresponding author: Email: ekkachai_y@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปที่นิยมใช้ในประเทศไทย ต่อแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการทดสอบแบบแรงสลับทิศกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ (วัฏจักรแบบกึ่งสถิต) ในห้องปฏิบัติการและวิเคราะห์แบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PERFORM3D ผนังและรูปแบบรอยต่อที่ศึกษานั้นมีขนาดที่ถูกลดส่วนลงด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 4 ผนังสำเร็จรูปถูกนำไปประกอบติดตั้งกับฐานรากโดยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาจากฐานรากกับเหล็กข้ออ้อยที่ฝังไว้ในกำแพง และทำการเปิดบริเวณรอยต่อที่เชื่อมและรอยต่อที่ผิวระหว่างผนังกับฐานรากด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว ผลการศึกษาพบว่าผนังรูปแบบนี้มีกำลังและความแข็งแรงสูง เกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วหลังจากที่พัฒนากำลังได้สูงสุด พฤติกรรมเป็นลักษณะเปราะ ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์สามารถทำนายพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบได้ มีความสอดคล้องกัน ผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปประเภทนี้สามารถออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวที่ไม่รุนแรง และอยู่ในช่วงยืดหยุ่นได้

คำสำคัญ: ผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จ, การทดสอบแบบวัฏจักรกึ่งสถิต, แผ่นดินไหว, การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น

ABSTRACT

This paper presents seismic behavior of precast concrete (PC) load bearing wall panels widely constructed in Thailand through experimental and analytical programs. A quasi-static reversed cyclic loading test was conducted on an ¼ scaled PC load bearing wall panels to investigate and evaluate cyclic responses of the wall. The analytical program was verified with the experimental results using PERFORM3D. The PC wall specimen and the cast-in-situ foundation was connected using welded, short reinforcing steels. The connection was later grouted using nonshrink grout cement to achieve a structural integrity. The experimental results obviously indicated that the specimen could develop large strength and stiffness. However, after reaching its peak, the force-deformation of the wall was dramatically dropped and the specimen was failed. Analytical study also shows a good agreement with test results. The results reveal that the wall could be constructed in low seismic hazard area by considering that the walls behave within elastic range.

Keyword: Precast concrete load bearing wall panels, quasi-static reversed cyclic loading test, earthquake, nonlinear analysis

1. บทนำ

ณ ปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารแบบโครงสร้างผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปเริ่มเป็นที่นิยมในประเทศไทยจากการสำรวจเบื้องต้นโดยคณะผู้ดำเนินการวิจัยบริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ในช่วงปี พ.ศ. 2559 พบว่าวิศวกรผู้ออกแบบนิยมใช้โครงสร้างนี้สำหรับอาคารเตี้ยถึงสูงปานกลางในอาคารพักอาศัย เช่น บ้านพักอาศัย 2 ชั้น อพาร์ทเมนต์ หรือคอนโดมิเนียม เนื่องจากการแข่งขันที่สูงทางด้านราคาและความรวดเร็ว โครงสร้างประเภทนี้จึงมักเป็นตัวเลือกลำดับต้นๆ เพราะสามารถดำเนินการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว มีการควบคุมคุณภาพที่ดี ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

ผนังคอนกรีตเป็นโครงสร้างเป็นที่เข้าใจกันดีว่ามีประสิทธิภาพสำหรับการต้านทานแรงกระทำด้านข้างและมักนำมาใช้เป็นระบบหลักในการต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างผนังคอนกรีตจะมีความทนทานต่อแรงดัดและแรงเฉือนที่สูง และสามารถจำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า

โครงสร้างเสา-คานซึ่งพบเห็นได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมา [1]

ระบบโครงสร้างผนังคอนกรีตนั้นมีทั้งแบบหล่อในที่และแบบผนังสำเร็จรูปที่หล่อมาจากโรงงาน สำหรับระบบผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำด้านข้างและรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งได้ดีระบบหนึ่ง

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ระบบผนังสำเร็จรูปในพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวยังมีไม่มากนัก โดยปัจจุบันประเทศไทยได้มีมาตรฐานการออกแบบผนังสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการออกแบบแล้วแต่ก็มักเน้นที่การรับแรงในแนวตั้งและแรงลม [2]

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Northridge ในปี พ.ศ. 2537 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป ทำให้มีการประกาศห้ามใช้โครงสร้างประเภทนี้ ถ้าไม่มีการทดสอบยืนยันว่ารูปแบบของโครงสร้างนี้มีความแข็งแรงและความเหนียวที่เพียงพอต่อความต้องการ [3, 4]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปต่อแรงแผ่นดินไหวทั้งในประเทศและต่างประเทศมักจะเน้นเรื่องการพัฒนาารูปแบบรอยต่อให้มีความแข็งแรงและความเหนียวสำหรับอาคารปานกลางไปถึงอาคารสูง [5, 6] โดยรูปแบบรอยต่อที่พัฒนานี้จะเป็นการผสมผสานระหว่างเหล็กที่ใช้ในการก่อสร้าง 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การใช้เหล็กเสริมข้ออ้อย และ 2) ลวดอัดแรง 7 เส้นตีเกลียวทำงานร่วมกัน ระบบนี้เรียกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กระบบไฮบริด เหล็กทั้ง 2 ประเภทจะถูกออกแบบให้รับแรงดัดและแรงเฉือนที่จุดต่อ โดยจะมีลักษณะพิเศษเพิ่มเติมคือ เหล็กเสริมข้ออ้อยจะทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการสลายพลังงาน ลดการสั่นเนื่องจากแผ่นดินไหว ในขณะที่ลวดอัดแรงจะทำหน้าที่ดึงโครงสร้างกลับมาที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งระบบใหม่นี้มีพฤติกรรมที่เหนือกว่าระบบการต่อด้วยระบบดั้งเดิมที่ใช้ระบบเปียกหรือระบบแห้ง ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมเหล็ก การใช้ข้อต่อเหล็ก (Coupler) และเทหุ้มปิดด้วยคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม การจะนำความรู้ใหม่ๆ นี้มาใช้ในการก่อสร้างเป็นเรื่องยากที่จะดำเนินการได้อย่างทันทั่วทั้งที่ไม่ใช่เป็นการถ่ายโอนความรู้ใหม่ๆ ให้กับเจ้าของและผู้ออกแบบ รวมไปถึงช่างก่อสร้างที่มีความรู้ความเข้าใจ

นอกจากนี้รูปแบบโครงสร้างระบบดั้งเดิมยังคงถูกออกแบบและนำมาใช้อย่างต่อเนื่องในปัจจุบันโดยที่ไม่มีการปรับปรุงรายละเอียดให้มีกำลังและความเหนียวที่ดี และไม่ได้ตระหนักถึงความเสี่ยงหรือความอ่อนแอของโครงสร้างผนังระบบดั้งเดิมนี้ต่อภัยแผ่นดินไหว

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งล่าสุดในประเทศไทยขนาด 6.1 ตามมาตราโมเมนต์แมกนิจูด เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ที่อำเภอ แม่ลาว จังหวัดเชียงราย ที่ผ่านมามีเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใหญ่ที่สุดที่เคยเกิดขึ้นในประวัติศาสตร์ของประเทศไทยในรอบ 79 ปี หลังจากที่เคยเกิด ขนาด 6.3 ขึ้นที่อำเภอ ปัว จังหวัดน่าน เมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2478 [7] เหตุการณ์แผ่นดินไหวเหล่านี้ทำให้วิศวกร นักวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนถึงประชาชนที่อาศัย

อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย ได้ตระหนักเพิ่มมากขึ้น ถึงภัยแผ่นดินไหวที่ไม่ใช่เรื่องไกลตัวอีกต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวในประเทศไทยที่ผ่านมา นั้น มักจะเน้นที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก จะเห็นได้ว่าองค์ความรู้ ความเข้าใจในพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างผนังสำเร็จรูปที่ได้สร้างมาแล้วในอดีตและกำลังจะก่อสร้างตามมาโดยใช้การต่อขึ้นส่วนสำเร็จรูปในรูปแบบเดิมต่อแรงแผ่นดินไหวยังมีน้อย บทความวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของระบบผนังสำเร็จรูปที่นิยมสร้างกันในประเทศไทยโดยจำกัดขอบเขตของการศึกษาที่รอยต่อระหว่างผนังและฐานรากซึ่งเป็นรอยต่อที่สำคัญที่สุดในการรับแรงแผ่นดินไหว ตัวอย่างที่นำมาศึกษานี้ ผนังจะถูกหล่อขึ้นก่อนและนำไปประกอบติดตั้งกับฐานรากที่ตำแหน่งทดสอบด้วยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาจากฐานรากกับเหล็กข้ออ้อยที่ฝังไว้ในกำแพง ซึ่งการก่อสร้างตัวอย่างทดสอบนั้นจำลองการก่อสร้างแบบเดียวกับที่ดำเนินการก่อสร้างจริงในงาน โดยผนังคอนกรีตรับแรงสำเร็จรูปนั้น ถูกทำการย่อส่วนในห้องปฏิบัติการด้วยอัตราส่วนของขนาดระหว่างตัวอย่างทดสอบกับผนังจริงเท่ากับ 1 ต่อ 4 และทำการทดสอบด้วยวิธีวิวิจจักรแบบกึ่งสถิต (Quasi static reversed cyclic loading test) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากสะดวกและสามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างได้เป็นอย่างดี ผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ที่ได้ถูกทำการพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม PERFORM3D [8] โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถทำนายพฤติกรรมช่วงไม่เชิงเส้นได้ ผลการศึกษาพบว่าผนังรูปแบบนี้สามารถรับแรงได้ในระดับหนึ่งจากนั้นจะเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็ว จนไม่สามารถรับแรงทางข้างได้อีกต่อไป พฤติกรรมเป็นลักษณะเปราะ ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์สามารถทำนายพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบได้เป็นอย่างดี มีความสอดคล้องกัน

2. รูปแบบของรอยต่อระหว่างผนังรับแรงสำเร็จรูป

ระบบที่ใช้ในการยึดผนังรับแรงสำเร็จรูปให้ต่อเนื่องกันเป็นโครงสร้างกันนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพื่อให้โครงสร้างทุกชิ้นส่วนทำงานร่วมกัน ถ่ายเทแรงไปให้โครงสร้างใกล้เคียงได้ตามที่ออกแบบไว้ ไม่มีการเสียรูปเกินขีดจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องรับแรงด้านข้างเช่นแรงลม และแรงแผ่นดินไหว จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนยังมีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างมาก จุดต่อจะต้องมีกำลังรับน้ำหนัก และความแกร่ง (Stiffness) เพียงพอ ที่จะยึดให้ชิ้นส่วนทุกชิ้นทำงานร่วมกัน

จากการสำรวจโดยคณะผู้ดำเนินการวิจัยพบว่าการยึดระหว่างชิ้นส่วนผนังสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยนั้นมี 3 วิธีได้แก่ 1) การยึดโดยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาระหว่างผนังและฐานราก 2) การฝังเหล็กรูปพรรณไว้ที่ผนังและฐานราก จากนั้นยึดโดยการเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยเหล็กฉาก และ 3) การใช้ท่อ Corrugated duct ที่ใช้กันมากในงานลวดอัดแรงฝังไว้ที่ผนัง จากนั้นสอดเหล็กที่ยื่นออกมาจากฐานรากเข้าไป แล้วเทกรอกเข้าไปด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว รูปที่ 1 แสดงรูปแบบรอยต่อที่กล่าวมาข้างต้น บทความนี้จำกัดขอบเขตการศึกษาที่รูปแบบรอยต่อที่ 1 เท่านั้น

3. วิธีการทดสอบ

แบบจำลองย่อส่วนตัวอย่างทดสอบของโครงสร้าง (Physical Model) ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักและกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของชิ้นส่วน และรอยต่อของผนังรับแรงสำเร็จรูปกับฐานรากในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างดังกล่าวภายใต้แรงวัฏจักรแบบกึ่งสถิตตามที่ได้นแนะนำโดย FEMA461 [9] วิธีการทดสอบรูปแบบนี้สามารถตรวจสอบกำลัง ความแกร่ง การเสื่อมถอยของกำลัง และการเสื่อมถอยของความแกร่งของโครงสร้างภายใต้แรงวัฏจักรได้เป็นอย่างดี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 รูปตัวอย่างแบบรอยต่อที่นิยมใช้ในประเทศไทย (ก) การเชื่อมเหล็กเส้น (ข) การเชื่อมด้วยเหล็กฉาก และ (ค)

การใช้ท่อ Corrugated duct

3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คอนกรีตที่จะถูกออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยที่ประมาณ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน และอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 โดยทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C39 [10] และระหว่างทำการทดสอบได้ทำการติดอุปกรณ์วัดความเครียด

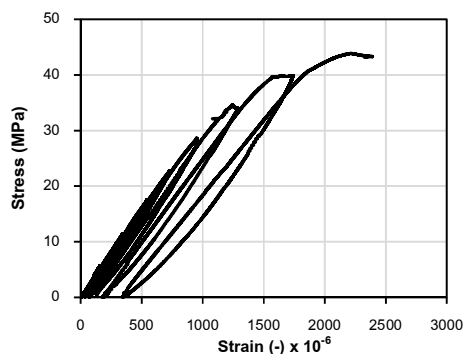
ด้วย Strain gage ที่ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์ต่อไป เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง การทดสอบหากล้างอัดประลัยของคอนกรีตนั้น เป็นวิธีการแบบวัฏจักรด้านแรงอัดอย่างเดียว ตัวอย่างทดสอบมีกล้างอัดคอนกรีตเฉลี่ยแบบไม่โอบรัด (Unconfined compressive strength) อยู่ที่ 42 MPa ดังแสดงในรูปที่ 2

เหล็กเสริมที่ใช้สำหรับการยึดผนังและฐานรากเข้าด้วยกันเลือกเป็นเหล็กข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 mm (DB10) เกรด SD40 มีกล้างคราก (Yielding strength) ที่ 0.2% offset เท่ากับ 427 MPa และ กล้างประลัย (Tensile strength) เท่ากับ 647 MPa ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM A370 [11] ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 3

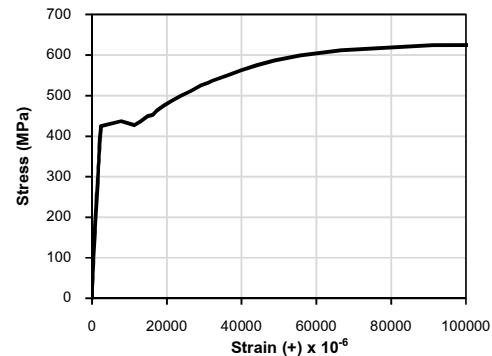
ในส่วนของเหล็กที่เสริมในผนังกำแพงนั้นเป็นลวดเหล็กดิ่งยื่นตะแกรงสำเร็จรูปขนาด 4 mm ระยะห่าง 10 x 10 mm มีกล้างครากระบุไม่น้อยกว่า 550 MPa

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการหล่อตัวอย่าง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ปูนซีเมนต์	น้ำ	หิน	ทราย
465	200	1008	725



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างคอนกรีต

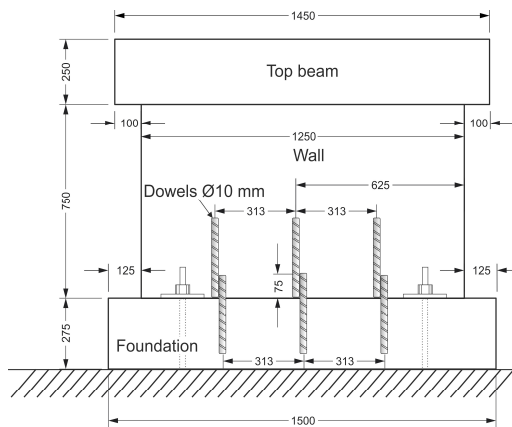


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10

3.2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างผนังที่นำมาทำการศึกษานั้นพิจารณาจากอาคารพักอาศัยตั้งแต่ 2-8 ชั้น จากการสำรวจโดยคณะผู้วิจัยพบว่า อาคารที่พิจารณานี้มีความยาวช่วงอยู่ระหว่าง 3,000-5,000 mm มีความสูงชั้น 2,500-3,000 mm มีความหนาของผนังระหว่าง 100-150 mm มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของผนังในแนวแกนดิ่งต่อกำลังอัดคอนกรีตคูณด้วยพื้นที่หน้าตัด (Axial load ratio) อยู่ที่ 0.5-5% ซึ่งเมื่อเทียบกับโครงสร้างเสาที่มีอัตราส่วนนี้อยู่ประมาณ 15-40% แล้วถือว่ามีความน้อยมาก

ผนังนี้มีการใช้เหล็กเส้นเชื่อมต่อทาบอยู่ที่บริเวณรอยต่อในแนวราบอยู่ที่ 2 ถึง 5 ตำแหน่งต่อหนึ่งรอยต่อ เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาพิจารณาออกแบบตัวอย่างทดสอบจะได้ว่าผนังทดสอบนี้มีขนาด 1250 mm (ความยาว) x 750 mm (ความสูง) x 100 mm (ความหนา) ดังแสดงในรูปที่ 4 ตัวอย่างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จมีรอยต่อในแนวราบจำนวน 3 ตำแหน่ง มีการเชื่อมต่อทาบด้วยเหล็ก DB10 เกรด SD40 ด้วยระยะทาบ 75 mm ด้วยขนาดรอยเชื่อมประมาณ 6 mm ผนังตัวอย่างสำเร็จรูปนี้วางอยู่บนฐานรากที่มีความหนา 275 mm ซึ่งยึดแน่นกับพื้นห้องปฏิบัติการ ที่ด้านบนของผนังมีคานคอนกรีตถูกออกแบบให้ยึดแน่นกับผนัง เพื่อรับแรงจากกระบอกไฮดรอลิกซึ่งมีตำแหน่งของกระบอกอยู่ที่กึ่งกลางคานนี้ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งมีค่าน้อย ผนังนี้จึงไม่ได้ทำการใส่แรงในแนวดิ่ง



รูปที่ 4 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (หน่วย: mm)

3.3 ทดสอบและการตรวจวัด

การให้น้ำหนักบรรทุกจะเป็นแบบแรงแนวราบกึ่งสถิต กระทำเป็นวัฏจักร ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) โดยตัวอย่างทดสอบนั้นถูกยึดด้วยกระบอกลไฮดรอลิก (Hydraulic actuator) ที่สามารถให้แรงกับตัวอย่างทดสอบได้ ± 500 kN และมีระยะยึดของกระบอกลอยู่ที่ ± 500 mm โดยกระบอกลไฮดรอลิกนี้สามารถควบคุมการให้น้ำหนักทางข้างได้ทั้งทิศไปและทิศกลับ โดยบทความนี้หากตัวอย่างถูกดึงด้วยกระบอกลไฮดรอลิก (ทิศทางขวา) แรงและระยะการโยกตัวมีค่าเป็นบวก และตัวอย่างถูกดันด้วยกระบอกลไฮดรอลิก (ทิศทางซ้าย) แรงและระยะการโยกตัวมีค่าเป็นลบ กระบอกลไฮดรอลิกนี้มีเซ็นเซอร์อ่านค่าแรงและระยะการเคลื่อนตัวติดตั้งอยู่ในกระบอกล

สำหรับการทดสอบนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกควบคุมโดยระยะการยึด-หดของกระบอกลในทิศทางด้านข้าง (In plane) ของผนังตัวอย่างทดสอบ โครงเหล็กแข็งได้ติดตั้งด้านข้างตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวนอกแกน (Out of plane) การให้น้ำหนักบรรทุกจะกระทำตามรูปแบบที่เป็นมาตรฐานโดยการปรับเพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral drift ratio) ทีละน้อยๆ (ประมาณ 0.05%-0.1% ช่วงแรกๆ) ดังแสดงดังรูปที่ 5 (ข) โดย Lateral drift ratio คืออัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวทางข้างและความสูงของกระบอกลไฮดรอลิก เทียบกับฐานราก คิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่งของกระบอกลไฮดรอลิกนั้นจะเริ่มจากศูนย์

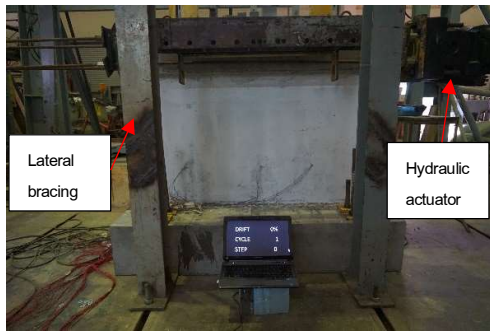
มาทางขวากลับมาศูนย์ มาทางซ้าย และกลับมาที่ศูนย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่งรอบ โดยแต่ละ Lateral drift ratio นั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 2 รอบก่อนที่จะเพิ่มระยะในรอบต่อไป ซึ่งจะทำได้สามารถตรวจสอบการเสื่อมถอยของกำลังและความแข็งแรงของผนังได้อัตราส่วนนี้จะค่อยๆปรับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติ โดยจะทำการวัดค่าแรงและการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าเซ็นเซอร์ต่างๆจะถูกส่งเข้าที่อุปกรณ์เก็บข้อมูลและเข้าคอมพิวเตอร์ต่อไป

4. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์

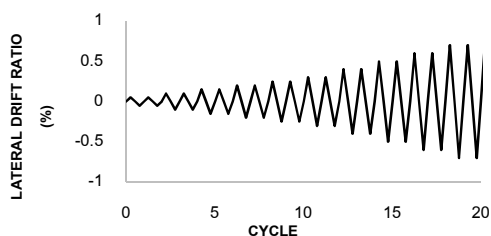
คณะผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Numerical Model) ของตัวอย่างผนังหล่อสำเร็จรูป เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงและนำมาอธิบายพฤติกรรมโดยรวมของกำแพงหล่อสำเร็จ โดยกำแพงตัวอย่างจะถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม CSI PERFROM-3D ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite Element ที่มีชื่อเสียงในด้านการวิเคราะห์โครงสร้างองค์อาคารบ้านเรือนเสา คาน ผนังรับแรงเฉือน รวมไปถึง ผนังหล่อสำเร็จ โดยโปรแกรมนี้อาจจะสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่ถูกแรงทางข้างกระทำสลับข้างไปมา (Cyclic Pushover Analysis) ซึ่งเหมือนกับตัวอย่างทดสอบที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในด้านของ แรงทางข้าง (Lateral Load) ระยะการโก่งตัวด้านข้าง และ ความเสียหายในสถานะต่าง (Damage State)

กำแพงตัวอย่างจะถูกจำลองโดยใช้ MVLEM (Multi Vertical Line Element Model) พัฒนาโดย Orakcal et al., [12] และ Orakcal และ Wallace [13] ใน PERFORM3D ซึ่ง Element นี้จะสามารถจำลองความสามารถในการรับแรงดัดและแรงเฉือนของผนังกำแพงรับแรงได้ ในการจำลองการรับแรงดัดของกำแพงนั้น กำแพงจะถูกแบ่งเป็น Fiber แนวตั้งขนาดเล็กๆ ซึ่งแต่ละ Fiber จะเปรียบเสมือนคอนกรีตและเหล็กเสริมที่อยู่ในกำแพงนั้น และจะมีสปริงแนวอนสำหรับจำลองแรงเฉือนดังแสดงใน

รูปที่ 6 ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตและเหล็ก (Material Properties) ใน Fiber ต่างๆ จะได้มาจากการสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคอนกรีตและเหล็กเสริมในห้องปฏิบัติการ

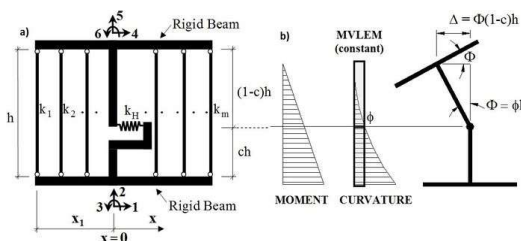


(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) แสดงการทดสอบและการให้ระยะการเคลื่อนที่ด้วยกระบอกไฮดรอลิก และ (ข) แสดงการให้ระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงชิ้นส่วนของกำแพงที่ถูกจำลองโดย MVLEM [12, 13]

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตใน Fiber จะถูกจำลองโดยใช้ Inelastic 1D Concrete Material แบบ Trilinear with

Strength Loss ที่อยู่ในโปรแกรม PERFROM3D ดังแสดงในรูปที่ 7 จุดต่างๆบนกราฟแสดงความเสียหายในสถานะต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเหล็กเสริมใน Fiber นั้นถูกจำลองโดยใช้ Inelastic Steel Material Non-Buckling แบบ Trilinear with Strength Loss ดังแสดงในรูปที่ 8 จุดต่างๆบนกราฟแสดงความเสียหายในสถานะต่างๆ และในส่วนของแรงเฉือนในสปริงจะถูกจำลองโดยใช้ Inelastic Shear Material สำหรับกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 9 จุดต่างๆ บนกราฟแสดงความเสียหายในสถานะต่างๆ โดยที่กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (V_u) จะคำนวณโดยสมการของ ACI 318-14 [14] ซึ่งจะใช้ค่าน้อยกว่าของสมการที่ 1 และ 2

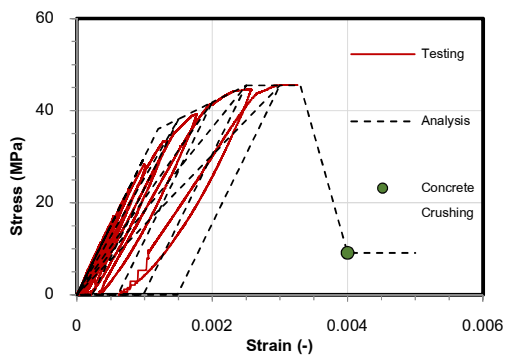
$$V_n = 0.27\sqrt{f_c}hd + \frac{N_u d}{4l_w} \quad (1)$$

$$V_n = \left[0.05\sqrt{f_c} + \frac{l_w (0.10\sqrt{f_c} + 0.20\frac{N_u}{l_w h})}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{l_w}{2}} \right] hd \quad (2)$$

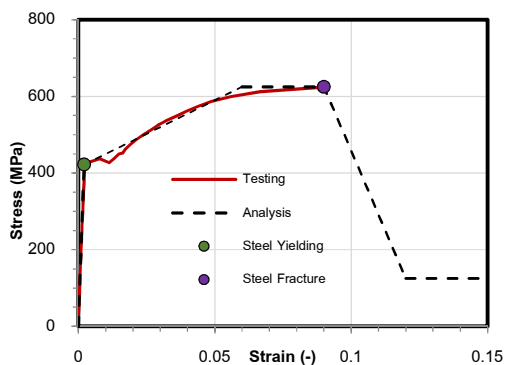
โดยที่ f_c' = กำลังอัดของคอนกรีต (MPa) h = ความหนาของกำแพง (mm) d = ความลึกประสิทธิภาพของกำแพง (mm) l_w = ความกว้างของผนัง (mm) N_u = แรงในแนวแกน (N) M_u และ V_u = แรงดัด (N-mm) และแรงเฉือน (N) ที่หน้าตัดวิกฤตตามลำดับ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของแรงตามแนวแกน N_u ในสมการที่ 1 และ 2 มีค่าเป็นศูนย์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนที่จุดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9 นั้น สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Rigidity, G) โดยที่ $G = 0.35E$ (E คือ Modulus of elasticity ของคอนกรีต หาได้จากมาตรฐาน ACI ข้างต้น) จากคำแนะนำของมาตรฐาน ASCE 41-06 [15] ได้กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดสูงสุด (Peak) เป็นแบบเชิงเส้นตรง 3 เส้น (Trilinear Relationship) แต่เนื่องจากในโปรแกรม PERFORM-3D นั้นจะยอมให้ใส่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนได้เพียง 2 เส้น (Bilinear Relationship) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงถูก

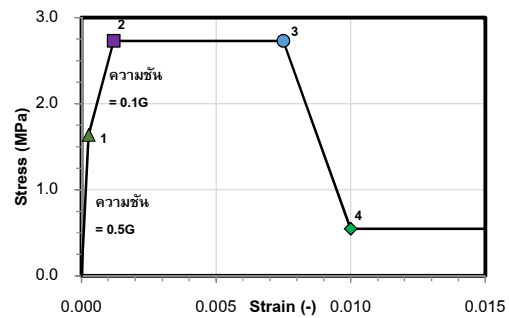
ปรับแก้โดยให้จุดที่เกิดรอยร้าวจากแรงเฉือน (จุดที่ 1, shear crack) มีความเค้นของแรงเฉือนเท่ากับ $0.6v_n$ และมีความชันเท่ากับโมดูลัสของแรงเฉือนประสิทธิผล (Effective Shear Rigidity, G_{eff}) เท่ากับ $0.5G$ ตามที่มาตรฐานทั่วไปแนะนำ ส่วนความชันของเส้นตรงที่ต่อจากจุดที่เกิดรอยร้าวจากแรงเฉือนถึงจุดที่มีความเค้นสูงสุด (จุดที่ 2, peak strength) นั้นใช้ตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASCE 41-06 ซึ่งมีความชันเท่ากับ $0.1G$ หลังจากไปถึงจุดที่มีกำลังสูงสุดแล้ว ผนังจะเกิดการวิบัติของแรงเฉือนที่จุด 3 (Shear Failure) และจะลดลงเหลือ 20% ที่จุด 4 ($0.2v_n$) โดยความเค้นของจุดที่เกิดการวิบัติของแรงเฉือน และจุดที่ 4 นั้นมีค่าเท่ากับ 0.75% และ 1.00% ตามลำดับ ซึ่งเป็นคำแนะนำอยู่ในมาตรฐานข้างต้น



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนในผนัง

หลังจากที่จำลองกำแพงตัวอย่างโดยใช้ MVLEM แล้ว กำแพงจะถูกเชื่อมต่อกับรากฐานโดยสมมติให้กำแพงต่อเชื่อมกับสปริงที่แนวนอนรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (Shear slip) และสปริงแนวตั้งที่จำลองการเปิดและปิด (Gap open and close) ของปูนทรายชนิดไม่หดตัว (Grout material) โดยสปริงของปูนทรายเป็นชนิดรับแรงอัดเท่านั้น จะไม่ถ่ายเทแรงหากเกิดแรงดึง แต่สามารถพิจารณาถึงระยะที่เกิดขึ้นจากแรงดึงได้

สปริงแนวตั้งที่จำลองเหล็กเสริมข้ออ้อย (Dowel) ยึดต่อกับฐานรากแบบยึดติด (Fixed Base) ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (V_n) และระยะไถล (Slip) สำหรับสปริงรับแรงเฉือนเลื่อนไถลจะถูกจำลองโดยใช้ Inelastic Bar แบบ E-P-P with Strength Loss ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยที่กำลังรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (V_n) จะถูกคำนวณโดยสมการที่แสดงใน [16] ดังแสดงในสมการที่ 3 ถึง 5 โดยเมื่อกำลังเกินค่าสูงสุดแล้วจะเริ่มเกิดการไถลมาที่ 20% ของค่าสูงสุดที่ 2.2 mm ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้สูงสุดจากการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ควรจะระวังไว้ว่าสมมติฐานนี้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อให้โมเดลมีเสถียรภาพในการคำนวณในคอมพิวเตอร์

$$V_{Rd,s} = V_{dd} + V_{fd} \quad (3)$$

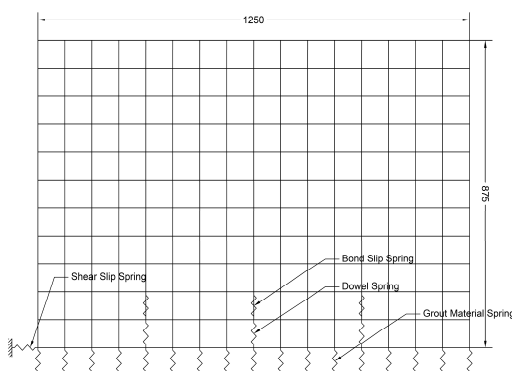
$$V_{dd} = 0.25f_y A_s \quad (4)$$

$$V_{fd} = \mu_f f_y A_s \quad (5)$$

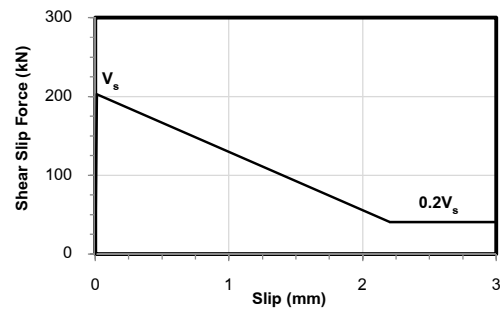
โดยที่ $V_{Rd,s}$ = กำลังรับแรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อระหว่าง
ผนังและฐานราก (N) V_{dd} = กำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อเนื่อง
จากเหล็กข้ออ้อย (N) V_{fd} = กำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อเนื่อง
จากแรงเสียดทาน (N) f_y = ความเค้นที่จุดครากของเหล็ก
เสริม (MPa) A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (mm^2) μ_f =
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่รอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.6

ความสัมพันธ์ของวัสดุประสานจะถูกจำลองโดยใช้
Inelastic 1D Concrete Material แบบ E-P-P with
Strength Loss ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยกำลังรับแรงกด
($f'_c A_g$) มาจากผลการทดสอบวัสดุประสาน สำหรับเหล็ก
Dowel นั้นจะถูกจำลองคล้ายกับเหล็กเสริมในกำแพงแต่
แตกต่างกันที่เพิ่มแบบจำลองของแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง
เหล็กกับคอนกรีตโดยการตอบสนองของแรงยึดเหนี่ยวเป็น
อนุกรมเข้ากับสปริงของเหล็กเสริม (รูปที่ 10) ซึ่งเหล็ก
Dowel จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และ
ความเครียด (Strain) ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยที่แรงยึด
เหนี่ยว (v_b) ของเหล็กข้ออ้อย Dowel (มีหน่วยเป็น MPa)
จะถูกคำนวณโดยวิธีที่นำเสนอโดย [17] ดังแสดงในสมการที่
6 และรูปที่ 13 โดยที่ C_0 คือระยะห่างระหว่างขั้วของเหล็ก
เสริม มีค่าเท่ากับ 6 mm ซึ่งได้มาจากการวัดระยะห่างของ
เหล็กจริงที่ใช้ในการทดสอบ

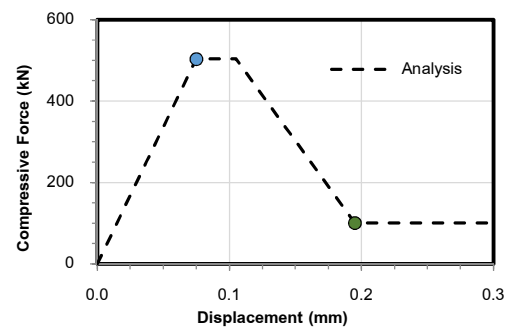
$$v_b = 2.57\sqrt{f'_c} \quad (6)$$



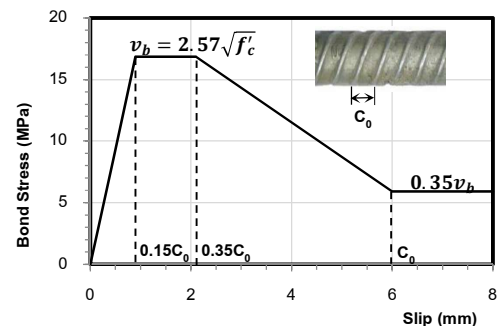
รูปที่ 10 แบบจำลองจุดต่อระหว่างผนังสำเร็จรูป และฐาน
ราก (หน่วย: mm)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนเลื่อนไถลและระยะ
เลื่อนไถลของผนังสำเร็จรูป



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวของ
วัสดุประสาน



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะ
เลื่อนไถลของเหล็กเสริม [17]

เมื่อสร้างแบบจำลองกำแพงเสร็จสิ้น กำแพงจะถูกใส่
แรงกระทำทางข้าง ในตำแหน่งเดียวกับที่ทำการทดสอบใน
ห้องปฏิบัติการเพื่อให้เกิดการโยกตัวทางข้างสัมพันธ์
เช่นเดียวกับการทดสอบ

5. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

รูปที่ 14 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและ Lateral drift ratio ที่ได้จากการตรวจวัด จะเห็นว่าขึ้นทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) ถึงช่วงระยะเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ $\pm 0.15\%$ มีกำลังทางข้างสูงสุดเท่ากับ 91.20 kN และ 79.92 kN เมื่อตัวอย่างกำแพงถูกกระบอกไฮดรอลิกดึงและดันตามลำดับ และเมื่อผลักขึ้นทดสอบต่อไปเกินกว่าระยะนี้กำลังรับน้ำหนักเริ่มลดลง และจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะเคลื่อนตัวทางข้าง $\pm 0.20\%$ และหลังจากที่ตัวอย่างกำแพงเคลื่อนตัวเกินระยะเคลื่อนตัวทางข้างนี้แรงกระทำด้านข้างในรอบที่ 2 จะตกลงมาจากแรงกระทำด้านข้างในรอบแรกมาก โครงสร้างนี้แสดงถึงการถดถอยของความแข็งแรงอย่างเห็นได้ชัดเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในกำแพงและรอยร้าวที่เกิดขึ้นมากขึ้น ทำให้เส้นโค้งของกราฟ (Hysteretic loops) มีลักษณะโค้งแบนเข้าหาจุดศูนย์กลาง (Pinching) ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางข้าง (หมายถึงความแกร่งต่ำ หากเกิดแรงเพียงเล็กน้อยจะเกิดการเคลื่อนตัวมาก)

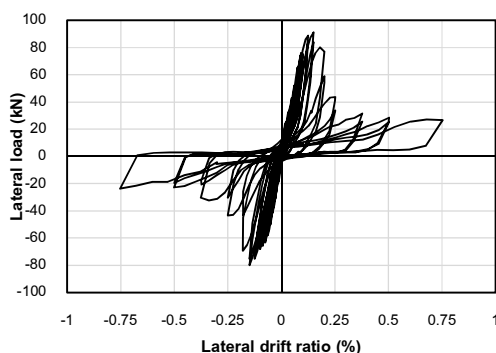
เนื่องจากผนังตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนระหว่างตำแหน่งของแรงต่อความยาวของกำแพง (Shear span ratio) เท่ากับ 0.7 ซึ่งถือว่าน้อยมาก ทำให้ผนังตัวอย่างทดสอบถูกควบคุมด้วยแรงเฉือนเป็นหลัก เมื่อผนังตัวอย่างทดสอบเคลื่อนที่ไปที่ระยะทางข้าง $\pm 0.10\%$ เกิดรอยร้าวแรกที่บริเวณรอยต่อระหว่างผนังและกำแพง และที่ตำแหน่งเดียวกันนี้ ค่าความเครียดที่วัดได้ของเหล็กเสริมที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างเริ่มคราก (Dowel yielding) ตามทิศทางการให้ระยะการโยกตัว เช่น เมื่อดึงตัวอย่างทดสอบมาทางขวา เหล็กเส้นริมทางซ้ายสุดเกิดการคราก ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์พบว่าเหล็กเสริมในรอยต่อเกิดการครากเช่นเดียวกัน

เมื่อผนังมีการโยกตัวทางข้างเท่ากับ $\pm 0.20\%$ การพัฒนารอยร้าวบนผนังตัวอย่างทดสอบมากขึ้นตามลำดับ มีรอยร้าว Splitting crack เกิดขึ้นที่บริเวณปลายของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในผนังและใช้สำหรับการเชื่อมทาบ เป็นผล

เนื่องจากการถ่ายเทแรงยึดเหนี่ยวจากเหล็กเสริมข้ออ้อยเข้าสู่ผนังที่สูงเกินกว่าแรงดึงที่คอนกรีตสามารถรับได้ ทำให้แรงของผนังตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อผนังมีการโยกตัวทางข้างเท่ากับ $\pm 0.25\%$ มีรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณปูนที่เทปิดรอยต่อหลังจากการเชื่อมเหล็ก เป็นผลทำให้เหล็กเสริมในกำแพงเริ่มเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Bond slip) ความเครียดที่วัดได้ในเหล็กลดลงต่ำกว่าจุดคราก เกิดความเครียดคงค้าง (Residual strain) เป็นผลทำให้กำแพงสูญเสียกำลังอย่างรวดเร็ว เมื่อโยกผนังไปที่ $\pm 0.75\%$ พบว่าเหล็ก Dowel สูญเสียกำลังจนถึงกำลังต่ำสุด มีรอยร้าวเกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้น และรอยร้าวที่เกิดขึ้นตั้งแต่ระยะการโยกตัวน้อยๆ ขยายความกว้างของรอยร้าวมากขึ้น รอยร้าวที่กว้างที่สุดอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างผนังและฐานรากมีความกว้างประมาณ 2-5 mm การทดสอบเกินกว่าช่วงนี้อาจทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการพังถล่มลงมาและทำให้เครื่องมือเสียหายได้ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้หยุดการทดสอบ จากนั้นจึงเก็บข้อมูลรอยร้าวตามที่แสดงในรูปที่ 14 (ข)

รูปที่ 15 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์ (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ (เส้นประ) พบว่าแรงสูงสุดที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อยประมาณ 12-13% ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียง อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ระยะการโยกตัวทางข้างที่ทำให้เกิดแรงทางข้างสูงสุดนั้นเท่ากันมีค่าเท่ากับ $\pm 0.15\%$ เมื่อทำการพิจารณาการสูญเสียความแข็งแรง (Stiffness degradation) โดยการนำค่าความแข็งแรงที่ระยะการโยกตัวต่าง ๆ ทั้งทางด้านทิศบวกและทิศลบ มาหารด้วยค่าความแข็งแรงสูงสุด (Normalized stiffness) มาพล็อตเทียบกับระยะการโยกตัวทางข้าง ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยเส้นทึบเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และเส้นประเป็นผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าการเสื่อมถอยของกำลังมีการลดลงรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดสอบที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก

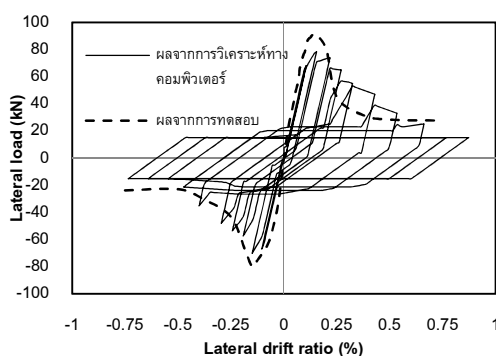


(ก)

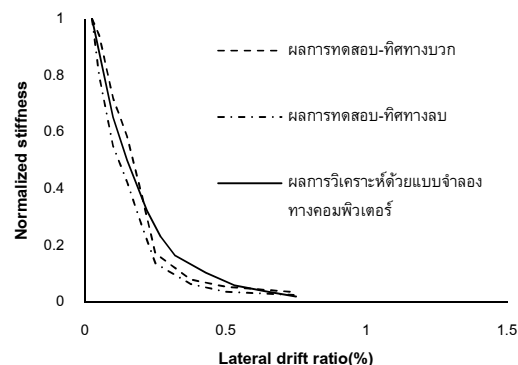


(ข)

รูปที่ 14 ผลการทดสอบ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่าง (ข) รูปแสดงความเสียหายเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่างที่ได้จากวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized stiffness และการเคลื่อนที่ทางข้างของผนังตัวอย่าง

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาในระยะเริ่มต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปโดยมีรูปแบบการต่อโดยใช้การทาบและเชื่อมเหล็กเป็นระยะสั้นๆ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้กันรูปแบบหนึ่งในประเทศไทย คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาโดยการทดสอบความสามารถการรับแรงและการโยกตัวทางข้างโดยการทดสอบ และทำการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM3D

ผลการศึกษาพบว่า ระบบผนังนี้มีกำลังและความแข็งแรงที่สูง สามารถพัฒนากำลังสูงสุดได้ที่ระยะการโยกตัว $\pm 0.15\%$ หลังจากนั้นผนังตัวอย่างทดสอบเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วทั้งทางด้านกำลัง ความแข็งแรง และรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ตัวผนัง ความเหนียวของผนังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ element ที่เรียกว่า MVLEM ที่ถูกพัฒนาขึ้นที่ต่างประเทศมาจำลองพฤติกรรมของตัวผนัง มาประกอบรวมกับสปริงแกนเดียวที่สามารถประเมินพฤติกรรมช่วงไม่เชิงเส้นได้ มาจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อที่มีการพิจารณาถึงการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว และมีการใช้สปริงไม่เชิงเส้นมาจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนไถลของผนัง ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงในการประเมิน

พฤติกรรมของผนัง มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในระยะเริ่มต้นนี้ จะเห็นได้ว่าระบบผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปที่ใช้รูปแบบการประกอบโดยใช้การเชื่อมเหล็กเป็นระยะสั้นๆนี้มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งทางช้างที่สูง มีพฤติกรรมแปรปรวนอย่างไรก็ดีการศึกษาเป็นเพียงการศึกษามันสำเร็จรูปแผ่นเดียว เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างจริง จะพบว่าผนังสำเร็จรูปนั้นจะประกอบกัน 4 ด้านเป็นเหมือนรูปกล่อง ทำให้ความแข็งแรงของระบบโครงสร้างเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวกับระบบโครงสร้างรูปแบบนี้ หากแรงที่เกิดขึ้นในผนังแต่ละแผ่น ไม่เกินช่วงยืดหยุ่นของตัวผนังเอง โครงสร้างนี้ก็จะสามารถรับแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย

อย่างไรก็ดีพฤติกรรมของผนังนี้อาจเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก หากระบบของโครงสร้างนี้มีน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวแกนตั้ง ซึ่งเป็นผลให้กำลังรับแรงของตัวผนังเองสูงขึ้น อีกทั้งทำให้ความสามารถในการป้องกันการไหลบริเวณรอยต่อสูงขึ้น นอกจากนี้ในอาคารจริง ลักษณะการถ่ายเทแรงทางช้างเข้าสู่ผนังต่างๆมีความซับซ้อน เป็นผลให้อัตราส่วนของระยะแรงต่อความยาวของผนังเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ผนังอาจมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงแรงดัดเป็นหลัก ซึ่งจะต้องทำการศึกษาประเด็นต่างๆนี้เพิ่มเติมต่อไป เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ความเข้าใจ สามารถประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว และหาวิธีป้องกันความเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5830008 ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัย และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียที่อำนวยความสะดวกทางด้านสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.K. Ghosh, "Observations on the performance of structures in the Kobe Earthquake of January 17, 1995," PCI journal, vol. 40, no. 2, pp. 14-22, 1995.
- [2] มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง, มาตรฐาน วสท. 1008-38, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 7, 2554.
- [3] NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program, "Recommendation provisions for seismic regulations for new buildings, Part 1 – Provisions. Building Seismic Safety Council," Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA., 1994.
- [4] J. F. Hall, "Northridge Earthquake January 17, 1994 – Preliminary reconnaissance," Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, USA, 1994.
- [5] E. Yooprasertchai, I. J. Hadiwijaya, and P. Warnitchai, "Seismic performance of precast concrete rocking walls with buckling restrained braces," Magazine of Concrete Research, vol. 68, no. 9, pp. 462-476, 2015.
- [6] E. Yooprasertchai and P. Warnitchai, "An application of precast hybrid moment-resisting frames for seismic improvement," Magazine of Concrete Research, vol. 68, no. 20, pp. 1051-1069, 2016.
- [7] T. Ornthammarath and P. Warnitchai, "5 May 2014 MW 6.1 Mae Lao (Northern Thailand) Earthquake: Interpretations of recorded ground motion and structural damage," Earthquake Spectra, vol. 32, no. 2, pp. 1209-1238, 2016.

- [8] G.H. Powell, "Perform-3D CSI. User Manual and User Guide," Powell Inc., 2000.
- [9] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing," FEMA 461, 2007.
- [10] Standard test methods for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM C39, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2005.
- [11] Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, ASTM A370, American Society For Testing And Materials, West Conshohocken, PA, 2005.
- [12] K. Orakcal, J. P. Conte, and J. W. Wallace, "Flexural modeling of reinforced concrete structural walls- model attributes," ACI Structural Journal, vol. 101, no. 5, pp. 688-698, 2004.
- [13] K. Orakcal and J. W. Wallace, "Flexural modeling of reinforced concrete structural walls – experimental verification," ACI Structural Journal, vol. 103, no. 2, pp. 196-206, 2006.
- [14] Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary, ACI Committee, American Concrete Institute, Farmington Hills, United States, 2014.
- [15] Seismic rehabilitation of existing buildings (ASCE/SEI 41-06). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007.
- [16] T. Salonikios, I. Tegos, A. Kappos, and G. Penelis, "Squat R/C walls under inelastic shear reversals," In Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996, paper no. 749.
- [17] M. Suthasit and P. Warnitchai, "Modeling of gravity load designed RC frame buildings for nonlinear dynamic analysis," In The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008, paper no. 05-01-492.