

การวิเคราะห์ความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารที่พักอาศัยผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูป ที่มีจุดต่อแบบต่อทาบ

Seismic Resistance Analysis of Bearing Wall Building with Lap splicing Joint

ศุภากร นิ่มพฤทธิ์¹ และ พชร เครือวิทย์^{2,*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: pochara.k@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการก่อสร้างบ้านพักอาศัยด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นจำนวนมาก ทั้งในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งจากการศึกษา รอยเลื่อนแผ่นดินไหวในจังหวัดกาญจนบุรีมีโอกาสส่งผลกระทบก่อให้เกิด ความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการศึกษา พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปขนาดเตี้ยและผลกระทบภายใต้ แรงแผ่นดินไหวยังมีจำนวนจำกัด งานวิจัยนี้ศึกษาการสรางแบบจำลองเพื่อ เป็นแนวทางในการประเมินสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารผนัง รับแรงคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีจุดต่อแบบต่อของเหล็กเสริมแบบเชื่อมทาบ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ทำการก่อสร้างในประเทศไทย โดยจุดต่อของอาคาร ตัวอย่างถูกพิจารณาด้วยคุณสมบัติวัสดุไม่เชิงเส้นโดยพิจารณาการยึด เหนี่ยวซีเมนต์ชนิดไม่หดตัวและความสามารถรับแรงในทิศทางต่างๆของ เหล็กเสริมแบบเชื่อมทาบ โดยใช้แบบจำลองพลาสติกสปริง วิเคราะห์ แบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม ETABS จากผลการวิเคราะห์ พบว่าแบบจำลองพฤติกรรมผนังคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยคุณสมบัติความเค้น- ความเครียดและแบบจำลองพลาสติกสปริงที่นำเสนอ สามารถทำนาย พฤติกรรมของผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูปได้ มีความสอดคล้องกับ พฤติกรรมจริง ซึ่งนำไปใช้ในการประเมินสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหว ของอาคารผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูป

คำสำคัญ: แบบจำลองไม่เชิงเส้น ,แผ่นดินไหว, คอนกรีตสำเร็จรูป, ผนังรับ แรง, จุดต่อแบบเชื่อมทาบ

Abstract

Currently, a large number of residential buildings are being constructed using precast concrete systems, particularly in Bangkok and its metropolitan areas. According to studies on active fault lines in Kanchanaburi Province, there is a significant risk of seismic activity that could cause considerable damage to life and property. However, research on the seismic behavior of low-rise precast concrete structures remains limited. This study aims to develop a modeling approach for assessing the seismic

performance of precast concrete shear wall buildings, with a focus on lap-spliced welded reinforcement joints—a common construction practice in Thailand. The joint behavior in the model considers nonlinear material properties, including the bond characteristics of non-shrink grout and the multi-directional load resistance of the lap-spliced welded steel reinforcement. A plastic spring model was employed, and nonlinear analysis was conducted using the ETABS software. The results indicate that the proposed stress-strain material model and plastic spring representation can accurately predict the behavior of precast concrete shear walls. The modeled results correspond well with observed structural responses, demonstrating the applicability of the method for evaluating the seismic performance of precast concrete shear wall buildings.

Keywords: Nonlinear modeling, earthquake, precast concrete, shear wall, lap-spliced welded joint

1. คำนำ

ปัจจุบันมีการก่อสร้างบ้านพักอาศัยด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete System) เป็นจำนวนมาก เนื่องจากอุตสาหกรรม การก่อสร้างที่อยู่อาศัยในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่กรุงเทพมหานครและ ปริมณฑล ได้มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ จำนวนประชากรและอัตราการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจ ทำให้ความ ต้องการที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กลุ่มพัฒนาโครงการบ้านจัดสรรมี ความต้องการลดปัญหาขาดแคลนแรงงาน ฝีมือแรงงานในการก่อสร้าง การ ลดต้นทุนการผลิต ควบคุมระยะเวลาในการก่อสร้าง และควบคุมคุณภาพ ของการก่อสร้างภายใต้งบประมาณที่กำหนด ทำให้การก่อสร้างรูปแบบการ หล่อโครงสร้างในที่นั้นไม่ตอบโจทย์ต่อความต้องการ จึงเกิดเป็นรูปแบบการ ก่อสร้างแบบใหม่ซึ่งเป็นระบบโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ระบบ โครงสร้างประเภทนี้ถูกพัฒนายาวนานในต่างประเทศ เพื่อให้ความสามารถ ด้านต้านแรงกระทำในแนวดิ่ง แรงกระทำด้านข้างจากแรงแผ่นดินไหว และ

โครงสร้างประเภทนี้ยังมีคุณสมบัติโดดเด่นในด้านคุณภาพเนื่องจากสามารถควบคุมกระบวนการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปได้ตั้งแต่กระบวนการผลิตในโรงงานไปจนถึงกระบวนการติดตั้ง นอกจากนี้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง (Bearing Wall) มีความแข็งแรงทนทานมากกว่าผนังก่อฉาบ มีความหนาแน่นสูงสามารถต้านทานไฟสูงไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง และสามารถป้องกันเสียงรบกวนจากภายนอกได้

ในการออกแบบและก่อสร้างโดยใช้ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ในช่วงก่อนกฎกระทรวงฉบับที่ 46 (พ.ศ. 2540) และกฎกระทรวง พ.ศ. 2550 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 จะมีผลบังคับใช้ มิได้คำนึงถึงการคำนวณและการออกแบบให้โครงสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหวได้

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวล่าสุด รอยเลื่อนสกาย เมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2568 ที่ประเทศเมียนมา เกิดคลื่นการสั่นขนาดใหญ่ทำให้ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ในประเทศไทยหลายพื้นที่และหนึ่งในพื้นที่ที่เกิดผลกระทบและความเสียหายอย่างรุนแรงมากคือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในครั้งนี้ทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมากทำให้วิศวกร นักวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนประชาชนที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยได้ตระหนักเพิ่มมากขึ้นถึงภัยแผ่นดินไหวที่ไม่ใช่เรื่องไกลตัวอีกต่อไป

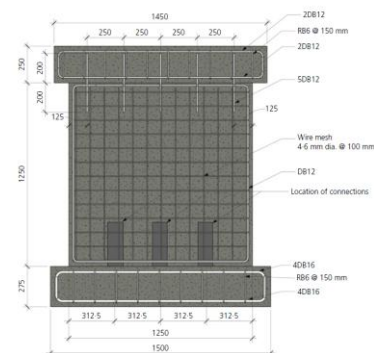
งานวิจัยศึกษาการสร้างแบบจำลองของระบบผนังคอนกรีตรับแรงสำเร็จรูปเพื่อจำลองพฤติกรรมอาคารคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหวของอาคารขนาดเตี้ย ประเภทพักอาศัย ซึ่งเป็นขนาดทั่วไปที่นิยมก่อสร้างในประเทศไทยและก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง (Bearing Wall) โดยมีจุดต่อแบบการเชื่อมต่อแบบเหล็กเสริม เนื่องจากการยึดติดกันเหมือนกับคอนกรีตหล่อในที่และยังนิยมใช้ทำการก่อสร้างอาคารพักอาศัยในปัจจุบันอีกทั้งเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานงานก่อสร้างอาคารด้วยระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป มยผ. 1108-65 พ.ศ. 2565 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป โดยพิจารณาเทียบผลการวิเคราะห์กับแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยของ A. Pimanmas, E. Yooprasertchai. [2] และ AM. Rahman and JI. Restrepo-Posada. (2000). [5]

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

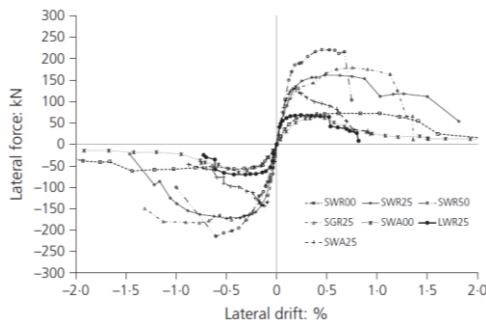
H.Gonzales, F.Lopez Almans [1] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารที่มีผนังรับแรงสำเร็จรูป ในละติน ประเทศอเมริกา มีความต้องการที่อยู่อาศัยอย่างเร่งด่วน ดังนั้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาอาคารสูงปานกลาง (โดยปกติสูงไม่เกิน 5 ชั้น) จำนวนมากที่ถูกสร้างขึ้นด้วยผนังสำเร็จรูป (Bearing wall) สำหรับอาคารที่พักอาศัยราคาประหยัดในโบลิเวีย โคลอมเบีย เวกวาดอร์ เม็กซิโก เปรู เวเนซุเอลา และในประเทศอื่นๆ ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว โดยอาคารเหล่านี้ส่วนใหญ่มีผนังที่มีความหนาประมาณ 10 เซนติเมตรและมีการเสริมเหล็กด้วยตาข่าย (wire mesh) ชั้นเดียว เทคโนโลยีการก่อสร้างนี้มีข้อดีหลัก 2 ประการ ได้แก่ ราคาประหยัดและมีความรวดเร็วในการก่อสร้าง ทั้งนี้อาคารเหล่านี้ไม่เป็นไปตามมาตรฐานแผ่นดินไหวระหว่างประเทศ กฎระเบียบข้อบังคับของบาง

ประเทศมีข้อกำหนดค่อนข้างน้อย ไม่สามารถป้องกันการเกิดแผ่นดินไหวได้ เนื่องจากโครงสร้างมีความเหนียวต่ำ ข้อมูลการทดลองไม่เพียงพอ ไม่มีความเสียหายที่สังเกตได้ ในงานวิจัยนี้จึงบรรยายถึงขั้นตอนเริ่มต้นของการทำวิจัยที่กว้างขึ้น เพื่อจัดทำแนวทางการออกแบบอาคารผนังคอนกรีตสำเร็จรูปให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการป้องกันแผ่นดินไหวและเสนอเกณฑ์การออกแบบเบื้องต้นให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่อาคารที่ตั้งอยู่ในเปรู ซึ่งเป็นตัวแทนของสถานการณ์ในประเทศอื่นๆ ที่อาจจะได้รับความเสี่ยงจากการเกิดแผ่นดินไหว ขั้นตอนแรกของการวิจัย เลือกผนังมา 7 ชั้น แล้วมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PERFORM-3D ด้วยวิธี Static nonlinear(Push-over) และ วิธี nonlinear time-history โดยใส่ค่าแผ่นดินไหวสูงสุดในเปรู โดยส่วนใหญ่อยู่ที่ชายฝั่งแปซิฟิก เมื่อพิจารณาจากความแข็งแรง (stiffness) ของอาคารจึงพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างและอธิบายพฤติกรรมของดินโดยใช้ค่าสปริงแนวตั้งแบบไม่เชิงเส้น ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของอาคารที่วิเคราะห์นั้นไม่เพียงพอต่อการป้องกันแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในการออกแบบโครงสร้างอาจปรับปรุงประสิทธิภาพในการป้องกันแผ่นดินไหวได้

A. Pimanmas, E. Yooprasertchai [2] ทำการทดสอบโดยให้แรงทางด้านข้างแบบวัฏจักรกับผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่ออกแบบให้รับน้ำหนักตามแรงโน้มถ่วง โดยตัวอย่างทดสอบมีขนาดความกว้าง 1250 มม. ความยาว 1250 มม. และผนังมีความหนา 100 มม. และการเสริมเหล็กในผนังคอนกรีตรับแรงสำเร็จรูป ดังรูปที่ 1 จำนวน 7 ผนัง โดยได้ประเมินการเชื่อมต่อกับฐานรากแบบที่ใช้กันทั่วไปมากที่สุด 3 แบบในประเทศไทย ได้แก่ เชื่อมตอแบบเหล็กเสริม (SWR) เชื่อมด้วยเหล็กฉาก (SWA) และ การเชื่อมต่อด้วยท่อ Corrugated duct (SGR) คอนกรีตที่ใช้จะถูกออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยเฉลี่ยแบบไม่โอบรัด (Unconfined compressive strength) ที่ประมาณ 42.5 MPa ที่อายุ 28 วัน เหล็กเสริมที่ใช้สำหรับการยึดผนังและฐานรากเข้าด้วยกันเป็นเหล็กข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มม. เกรด SD40 มีกำลังคราก 427 MPa และมีกำลังที่จุดประลัย 647 MPa



รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของชิ้นตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ [2] (หน่วย : มม.)



รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและการเคลื่อนที่ของผนังตัวอย่าง [2]

นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลกระทบของการรับน้ำหนักโดยแรงโน้มถ่วงที่อัตราส่วนการรับน้ำหนักตามแนวแกนของผนังระหว่าง 0 ถึง 5.0% ด้วยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชิ้นตัวอย่างในแง่ของพฤติกรรมและความเสียหายที่สังเกตได้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างกับการเคลื่อนที่ และการสูญเสียพลังงาน โดยผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าผนังที่เชื่อมต่อโดยใช้เหล็กฉากมีความแข็งแรงและความเหนียวน้อยกว่าผนังอื่นๆ การรับน้ำหนักโดยแรงโน้มถ่วงส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของผนัง

นอกจากนี้ยังพบว่าจากการทดสอบตามเกณฑ์ ACI ผนังที่มีการเชื่อมต่อแบบเหล็กเสริมสามารถพัฒนาความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว และการกระจายพลังงานได้ในระดับหนึ่ง

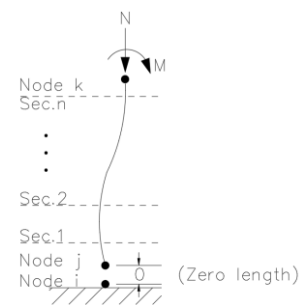
ปริดา ไชยมหาวัน และ ชยานนท์ หรรษภิญโญ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมที่มีการเชื่อมต่อระหว่างเหล็กฉากและเหล็กเสริมของกำแพงคอนกรีตหล่อสำเร็จภายใต้แรงแผ่นดินไหว ที่ใช้ก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น ขนาดชิ้นตัวอย่างทดสอบมีความกว้าง 1000 มม. ความยาว 2100 มม. และมีความหนาของผนังที่ 75 มม. ภายในเสริมเหล็กตะแกรง DB10@275 มม. โดยผนังที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งเท่านั้น นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการผลทดสอบพบว่า จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ หากเทียบแปลความเป็นค่าความเหนียวตามกราฟความสัมพันธ์ พบว่าได้ค่าประมาณ 3.5 ซึ่งเป็นระดับของกำแพงที่มีความเหนียวจำกัด (limited ductility) แสดงว่าผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จและจุดต่อดังกล่าวสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวในระดับต่ำถึงระดับปานกลางได้ ซึ่งหากนำไปประยุกต์ใช้ในเขตที่มีความเข้มงวดในการออกแบบอาคารด้านแผ่นดินไหวจะต้องมีการปรับปรุงรายละเอียดของจุดต่อเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน

E. Yooprasertchai, P. Wiwatrojanagul [4] ทำการศึกษาความแตกต่างของจุดต่อผนังรับแรงสำเร็จรูป ได้ศึกษาโดยการต่อท่อ Corrugated duct ระหว่างผนังรับแรงเฉือนและฐานราก ขนาดชิ้นตัวอย่างทดสอบมีความกว้าง 1040 มม. ความยาว 800 มม. และผนังมีความหนา 120 มม. ทำการทดสอบผนังรับแรงสำเร็จรูป 3 แบบ แบบแรกผนังหล่อในที่หล่อเป็นชั้นเดียวกับฐานราก (RCWS) แบบที่สองผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปเชื่อมกับฐานรากโดยใช้ท่อ corrugated (PGWS) และแบบสุดท้ายผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปเชื่อมกับฐานรากโดยใช้การต่อเหล็กเสริมพร้อมทำการเกร้าด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว (grouted sleeve splices) (PCWS) ผนังทั้งหมด

ได้รับการทดสอบภายใต้แรงโน้มถ่วงและแรงสลับทิศกลับไปกลับมาแบบวัฏจักรกึ่งสถิติ พบว่าประสิทธิภาพของ PGWS ของตัวอย่างได้รับการควบคุมโดยการโยก (Rocking) ก่อนพบการสูญเสียของการเชื่อมต่อ ประสิทธิภาพของชิ้นตัวอย่างค่าแรงทางข้างสูงสุด ความเหนียว ความแข็งแรง และการกระจายพลังงานของชิ้นตัวอย่าง RCWS และ PCWS มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่พลังงานที่กระจายชิ้นตัวอย่าง PGWS นั้นต่ำกว่าชิ้นตัวอย่าง RCWS และ PCWS อย่างมาก

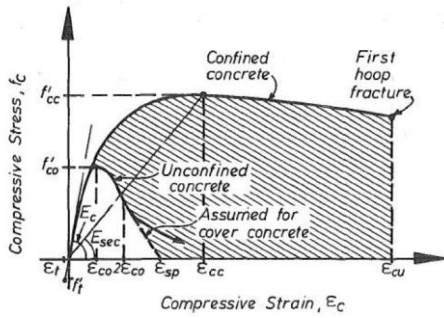
AM. Rahman and JI. Restrepo-Posada [5] ทำการศึกษาความต้านทานแผ่นดินไหวของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่เป็นผนังยื่นที่มีลวดอัดแรงในประเทศนิวซีแลนด์ โดยทำการทดสอบผนังสำเร็จรูปขนาด 3700 x 1350 มม. ผนังหนา 125 มม. จำนวน 3 ผนัง ทำการทดสอบโดยให้แรงตามแนวโน้มถ่วงโลกและให้แรงสลับทิศทางกลับไปกลับมาแบบวัฏจักรกึ่งสถิติจากการทดลองพบว่าผนังคอนกรีตรับแรงสำเร็จรูปกลไกการโยกของผนังกับฐานรากจะส่งผลให้เกิดแรงอัดคอนกรีตจำนวนมาก ระดับการเคลื่อนตัวสูงเกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่างของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีลวดอัดแรง โดยมีเพียงความเสียหายเล็กน้อยที่กระจุกตัวอยู่ที่ปลายผนัง เกิดความเสียหายน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับผนังหล่อในที่แบบชั้นเดียวที่ได้รับการออกแบบให้มีความเหนียวเต็มที่ พฤติกรรมที่ยืดหยุ่นของลวดอัดแรงยังคงอยู่แม้จะมีระดับการเคลื่อนตัวที่สูง ผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูปแบบมีลวดอัดแรงมีประสิทธิภาพมากในการกระจายพลังงานให้กับการตอบสนองแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นของระบบ

J. Zhao and S. Sritharan. [6] ให้คำแนะนำเกี่ยวกับ zero length section element คือการกำหนดระยะระหว่างโหนดที่ i ถึง โหนดที่ j ให้มีความยาวเท่ากับศูนย์หรือการกำหนดจุด 2 จุดเป็นจุดเดียว ดังรูปที่ 3 เพื่อให้การจำลองสปริงมีความสัมพันธ์ในการถ่ายแรงไปยัง element ได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 3 แสดงระยะศูนย์ zero length

J.B. Mander, M.J.N. Priestly and R. Park [7] ทำการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และ ความเครียด (strain) ของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด (Unconfined concrete) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่มีกรวด [7]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการ 1 ถึง 5

$$\sigma = \frac{f'_c \cdot x^r}{r - 1 + x^r}; \varepsilon < \varepsilon_{sp} \quad (1)$$

$$\sigma_c = 0.2 f'_c; \varepsilon \geq \varepsilon_{sp} \quad (2)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (3)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (4)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (5)$$

โดยที่ σ_c หมายถึงความเค้นในคอนกรีต (Stress), ε_c หมายถึงความเครียดในคอนกรีต (Strain), f'_c หมายถึงกำลังอัดคอนกรีต (Compression concrete), E_c หมายถึงโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic modulus), E_{sec} หมายถึงโมดูลัสซีแคนต์ (Secant modulus), ε_c หมายถึงค่าความเครียดสูงสุด, ε_{cc} หมายถึงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะที่ความเค้นสูงสุด เท่ากับ 0.002, ε_{cp} หมายถึงค่าความเครียด เท่ากับ 0.008

3. รูปแบบของรอยต่อระหว่างผนังสำเร็จรูป

ระบบที่ใช้ในการยึดผนังรับแรงสำเร็จรูปเป็นสิ่งสำคัญมาก เพื่อให้โครงสร้างทุกชั้นสามารถทำงานร่วมกัน ถ่ายเทแรงไปให้โครงสร้างใกล้เคียงได้ตามที่ออกแบบไว้ ไม่มีการเสียรูปเกินขีดจำกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องรับแรงด้านข้างเช่นแรงลมและแรงแผ่นดินไหว จุดต่อจะต้องมีกำลังรับน้ำหนัก และความแกร่ง (stiffness) เพียงพอ ที่จะยึดให้ชั้นส่วนทุกชั้นทำงานร่วมกัน

มยพ.1108-65 [8] มาตรฐานงานก่อสร้างอาคารด้วยระบบโครงสร้างชั้นส่วนสำเร็จรูป คอนกรีตหล่อสำเร็จได้นำมาใช้ในหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวสูง โดยมาตรฐานการออกแบบได้กำหนดให้สามารถใช้คอนกรีตหล่อสำเร็จในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวได้หากองค์อาคารต่างๆของระบบโครงสร้างแบบคอนกรีตหล่อสำเร็จมีการ

ยึดเสมือนกับคอนกรีตแบบหล่อในที่ ซึ่งเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเสมือนกับคอนกรีตหล่อในที่ (Emulative Design) จุดเชื่อมต่อชั้นส่วนแบบเสมือนหล่อในที่นี้ อาจใช้เป็นการต่อทาบเหล็ก (Lap Splicing) การเชื่อม (Welding) หรือการต่อด้วยอุปกรณ์ต่อตรงเชิงกล (Mechanical Coupler) และทำคอนกรีตให้มีความต่อเนื่องกันด้วยการเทปูนเกราดคุณภาพสูงชนิดที่ไม่หดตัว (High Quality Non-Shrink Grout) หรือการเทด้วยคอนกรีตหล่อในที่ลงในรอยต่อขนาดใหญ่พอที่สามารถทำได้ หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือ การใช้รอยต่อที่แข็งแรงไม่น้อยกว่าแบบคอนกรีตหล่อในที่

รูปแบบการยึดผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับอาคารที่พักอาศัยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย [3] นั้นมี 3 รูปแบบได้แก่ รูปแบบแรกการยึดโดยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาระหว่างผนังแล้วปิดทับด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัวหรือที่เรียกกันว่าการเชื่อมทาบเหล็กเสริมแล้วปิดทับด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว รูปแบบที่สองการฝังเหล็กรูปพรรณไว้ที่ผนังส่วนใหญ่จะใช้เป็นเหล็กแผ่นเหล็กฉาก จากนั้นยึดโดยการเชื่อมเข้าด้วยกันแล้วปิดทับด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว และรูปแบบสุดท้ายการใช้รอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กที่ฝังในผนังกับเหล็กเสริมแล้วปิดทับด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว ดังรูปที่ 5 แสดงรูปแบบรอยต่อที่กล่าวมาข้างต้น บทความนี้จำกัดขอบเขตการศึกษาที่รูปแบบรอยต่อโดยการเชื่อมทาบเหล็กเท่านั้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 แสดงรูปตัวอย่างรอยต่อที่นิยมใช้ในประเทศไทย

(ก) การเชื่อมทาบเหล็กเสริม

(ข) การเชื่อมด้วยเหล็กฉาก (ค) การเชื่อมด้วยเหล็กเสริมและเหล็กฉาก [3]

4. วิธีการวิจัย

ทำการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Numerical Model) ของตัวอย่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผล

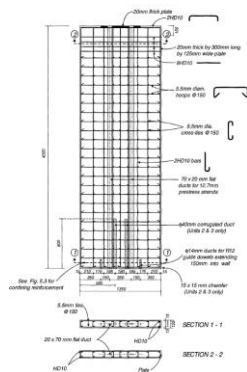
การทดสอบจริง และนำมาอธิบายพฤติกรรมโดยรวมของผนังคอนกรีตสำเร็จรูป โดยผนังคอนกรีตสำเร็จรูปจะถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม ETABS ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite Element ที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับจากวิศวกรทั่วโลก ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในด้านของแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Load) และระยะการเคลื่อนที่ทางข้าง (Lateral drift ratio) ตัวอย่างที่นำมาศึกษานี้เป็นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่ประกอบติดตั้งกับฐานรากเชื่อมด้วยการทาบทเหล็กระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาจากฐานรากกับเหล็กข้ออ้อยที่ฝังไว้ในกำแพงแล้วปิดทับด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว โดยแบบจำลองผนังจะพิจารณาจำนวน element ของผนังที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของผนังที่มีพฤติกรรมควบคุมแบบดัด เทียบกับผลทดสอบของ AM. Rahman and JI. Restrepo-Posada [5] โดยพิจารณาจุดต่อที่ฐานแบบยึดแน่น (Fix Support) เพื่อพิจารณาจำนวน element ที่เหมาะสมของผนัง และจากนั้นพิจารณาผนังที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของผนังเป็นพฤติกรรมควบคุมแบบดัดและเฉือน โดยศึกษาแบบจำลอง 2 แบบ คือ 1. พิจารณาจุดต่อที่ฐานแบบยึดแน่น (Fix Support) เพื่อพิจารณาจำนวน element ที่เหมาะสมของผนัง โดยใช้ชื่อตัวอย่างวิเคราะห์นี้ว่า SWF (Short bearing wall fix support) และ 2. พิจารณาจุดต่อที่ฐานโดยการจำลองสปริงในแบบจำลอง โดยใช้ชื่อตัวอย่างวิเคราะห์นี้ว่า SWS (Short bearing wall spring) ผลการวิเคราะห์จะตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ทางข้าง (Lateral drift ratio) พร้อมทั้งตรวจสอบความสามารถในการรับแรงของแบบจำลองสปริง แล้วนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสอบเทียบกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

4.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

4.1.1 ตัวอย่างผนัง

• ตัวอย่างผนังที่มีพฤติกรรมควบคุมแบบดัด

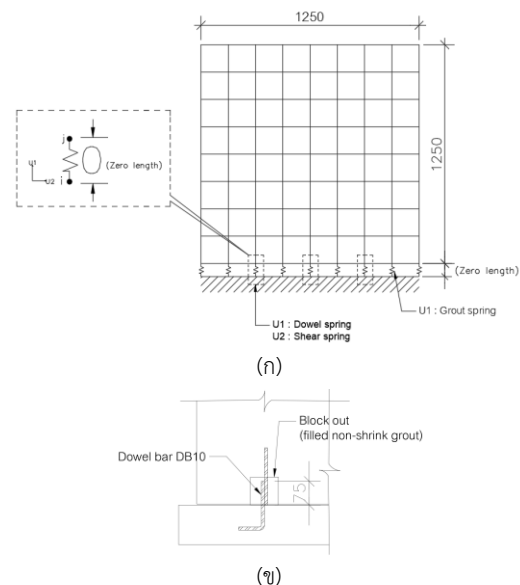
ตัวอย่างผนังที่นำมาศึกษาจำนวน element ที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง โดยสอบเทียบกับงานวิจัยของ AM. Rahman and JI. Restrepo-Posada. (2000). [5] ซึ่งเป็นผนังที่มีอัตราส่วนผนังเป็นพฤติกรรมควบคุมแบบดัด ขนาดความกว้าง 1350 มม. ความยาว 3700 มม. เป็นระยะที่กระบอกไฮดรอลิกกระทำแรงทางด้านข้างพอดี และผนังมีความหนา 125 มม. เหล็กเสริมภายในผนังมีกำลังครากระบุไม่น้อยกว่า 430 MPa และกำลังอัดประลัยคอนกรีตแบบไม่โอบรัดเฉลี่ยประมาณ 49 MPa ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองผนังสำเร็จรูปและฐานรากผนังพฤติกรรมต้านทานแรงดัด [5]
(หน่วย: มม.)

• ตัวอย่างผนังที่มีพฤติกรรมควบคุมแบบดัดและเฉือน

ตัวอย่างผนังที่นำมาศึกษาเกี่ยวข้องกับการจำลองจุดต่อแบบเชื่อมทาบท โดยสอบเทียบกับงานวิจัยของ A. Pimanmas, E. Yooprasertchai. [2] ซึ่งเป็นผนังที่มีอัตราส่วนผนังเป็นพฤติกรรมควบคุมแบบดัดและเฉือน ขนาดความกว้าง 1250 มม. ความยาว 1250 มม. และผนังมีความหนา 100 มม. ดังรูปที่ 1 ตัวอย่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูปมีรอยต่อในแนวราบจำนวน 3 ตำแหน่งซึ่งมีระยะห่างกันที่ 312.5 มม. มีการเชื่อมทาบทเหล็กด้วยเหล็ก DB10 เกรด SD40 ด้วยระยะทาบท 75 มม. (Dowel Spring) ยึดติดกับฐานราก มีปูนทรายชนิดไม่หดตัว (Grouting Spring) และมีแรงเฉือนไกล (Shear Spring) ดังรูปที่ 7 และกำลังอัดประลัยคอนกรีตแบบไม่โอบรัด อยู่ที่ประมาณ 42 MPa



รูปที่ 7 (ก) แบบจำลองจุดต่อระหว่างผนังสำเร็จรูปและฐานราก (ข) จุดต่อแบบเชื่อมทาบทเหล็กเสริม (หน่วย: มม.)

4.1.2 ประเภทของชิ้นส่วนโครงสร้าง

จำลองความสามารถในการต้านทานแรงดัดและแรงเฉือนของผนังรับแรงสำเร็จรูปโดยใช้ Layer shell element ซึ่งจะสามารถกำหนดขนาดเหล็กเสริมคอนกรีตได้เพื่อจำลองความสามารถในการต้านทานแรงดัดและแรงเฉือนของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปพร้อมทำการแบ่ง mesh

4.1.3 แบบจำลองคุณสมบัติวัสดุของผนังคอนกรีตสำเร็จรูป

คุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

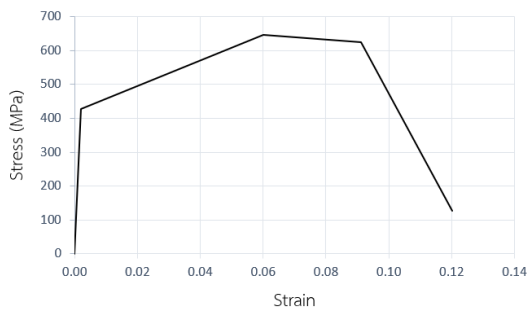
• กำลังอัดประลัยคอนกรีตแบบไม่โอบรัด

ในงานวิจัยได้พิจารณากำลังอัดประลัยคอนกรีตแบบไม่โอบรัด (Unconfined compressive strength) ตามคุณสมบัติวัสดุจากงานวิจัย

[2] และ [5] โดยนำมาสร้างแบบจำลองคุณสมบัติคอนกรีตตามสมการที่ 1-5 [7]

• กำลังรับของเหล็กเสริม

สำหรับคุณสมบัติของเหล็กเสริมพิจารณาจากคุณสมบัติวัสดุจากผลทดสอบวัสดุ [2] และ [5] โดยงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมจุดต่อแบบเชื่อมทาบเหล็กเสริมพิจารณาคุณสมบัติเหล็กเสริมที่ใช้สำหรับการยึดผนังและฐานรากเข้าด้วยกันเป็นเหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มม. (DB10) เกรด SD40 มีกำลังคราก (Yielding strength) ที่ 0.2% offset เท่ากับ 427 MPa และกำลังประลัย (Tensile strength) เท่ากับ 647 MPa ดังรูปที่ 8 ในส่วนของเหล็กที่เสริมในผนังกำแพงนั้นเป็นลวดเหล็กไวโรเมชขนาด 4 มม. มีระยะเรียงเท่ากับ 100 มม. และมีกำลังครากระบุไม่น้อยกว่า 550 MPa



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม

• แบบจำลองของจุดเชื่อมต่อรูปแบบสปริง

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยคุณสมบัติสปริงแบบ Spring Multilinear Plastic Link โดยจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหล็กเสริมและคอนกรีต แปลงเป็นค่าความแข็งแรง (Stiffness) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเสียรูป (Deformation) โดยพฤติกรรมของจุดต่อแบบเชื่อมทาบเหล็กเสริมจะพิจารณาจากระยะปราศจากการยัดรัง (L) และขนาดของเหล็กเสริม (A) และพฤติกรรมของปูนทรายชนิดไม่หดตัวจะพิจารณาจากขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผนังกับฐานราก (A) และความหนาของปูนทรายชนิดไม่หดตัวที่ปราศจากการยัดรัง (L) ดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่าความแข็งแรงและการเสียรูปได้จากสมการที่ 6-7

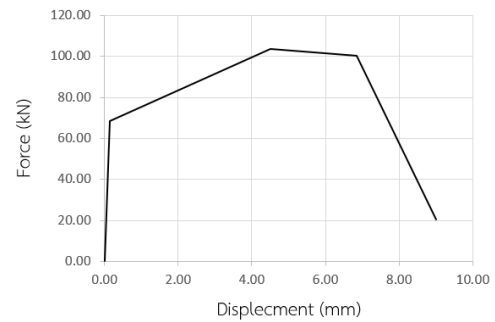
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

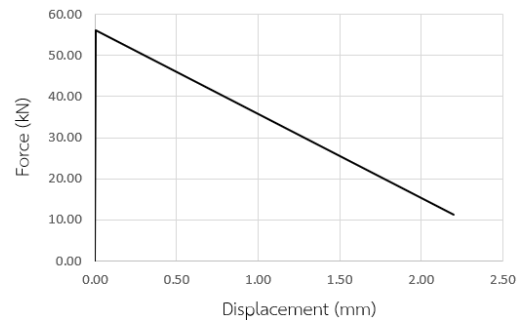
โดยที่ P หมายถึงแรง (Force), A หมายถึงพื้นที่หน้าตัด (Area), L หมายถึงระยะปราศจากการยัดรัง (Length), ΔL หมายถึงระยะการเสียรูป (Deformation)

เมื่อจำลองผนังคอนกรีตสำเร็จรูปเสร็จสิ้น ผนังจะต่อเชื่อมกับฐานรากด้วยสปริง สปริงในแกน U1 จะทำหน้าที่รับแรงในแนวแกนและสปริงในแกน U2 ทำหน้าที่รับแรงเฉือน ดังรูปที่ 7 (ก) สำหรับการจำลองเหล็กเสริมข้อ

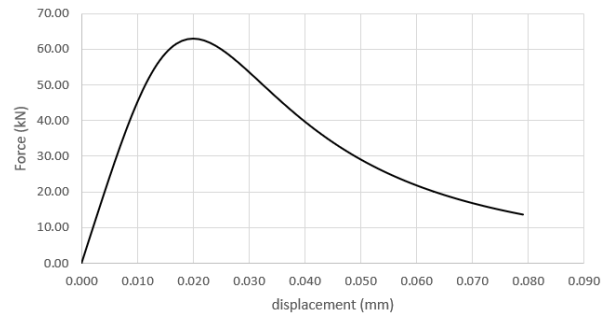
อ้อย (Dowel bar) ยึดต่อกับฐานรากแบบยึดแน่น (Fixed Base) กำหนดค่าความแข็งแรงและการเสียรูปที่แกน U1 ดังรูปที่ 9 (ก) กำหนดค่าความแข็งแรงและการเสียรูปของสปริงที่แกน U1 สำหรับจำลองปูนทรายชนิดไม่หดตัว (Grout material) โดยสปริงของปูนทรายเป็นชนิดรับแรงอัดเท่านั้น จะไม่ถ่ายเทแรงหากเกิดแรงดึง แต่สามารถพิจารณาถึงระยะที่เกิดขึ้นจากแรงดึง ดังรูปที่ 9 (ค) กำหนดสปริงแกน U2 แบบ nonlinear function เพื่อจำลองการรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (Shear Spring) ดังรูปที่ 9 (ข)



(ก)



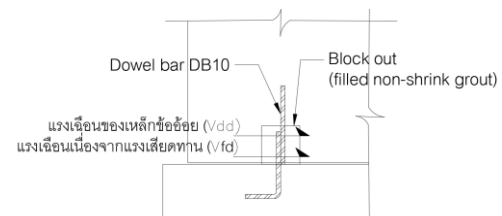
(ข)



(ค)

รูปที่ 9 (ก) แบบจำลองสปริงของเหล็กข้ออ้อย (ข) แบบจำลองแรงเฉือนไถล (ค) แบบจำลองสปริงของปูนทรายชนิดไม่หดตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนเลื่อนไถลและระยะไถล (Slip) โดยที่ กำลังรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (V_s) จะถูกคำนวณโดยสมการแสดงในสมการที่ 8 ถึง 10 [13]



รูปที่ 10 แบบจำลองพฤติกรรมของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นของจุดต่อระหว่างผนัง
สำเร็จรูปและฐานราก

$$V_s = V_{dd} + V_{fd} \quad (8)$$

$$V_{dd} = 0.25 f_y A_s \quad (9)$$

$$V_{fd} = \mu_f f_y A_s \quad (10)$$

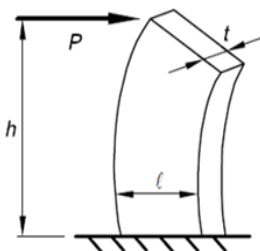
โดยที่ V_s หมายถึงกำลังรับแรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อระหว่างผนังและฐานราก, V_{dd} หมายถึงกำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อเนื่องจากเหล็กข้ออ้อย, V_{fd} หมายถึงกำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเหล็กเสริมและปูนทรายชนิดไม่หดตัว, f_y หมายถึงความเค้นที่จุดครากของเหล็กเสริม (MPa), A_s หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (ตร.มม.), μ_f หมายถึงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่รอยต่อ เท่ากับ 0.60 โดยเมื่อกำลังเกินค่าเกินค่าสูงสุดแล้วจะเริ่มเกิดการไถลมาที่ 20% ของค่าสูงสุดที่ 2.20 มม.

เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จสิ้น ผนังจะถูกให้น้ำหนักบรรทุกทุกจะเป็นแรงแนวราบและให้แรงตามแรงโน้มถ่วงโลก ในตำแหน่งปลายยื่นของผนังตำแหน่งเดียวกับกับการทดสอบเพื่อให้เกิดการโยกตัวทางข้าง การวิเคราะห์จะถูกควบคุมด้วยการเคลื่อนที่ในช่วงไม่เชิงเส้น (Displacement control nonlinear static) เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ทางข้าง (Lateral drift ratio) และแรงผลึกทางข้าง (Lateral Force)

4.1.4 การแบ่ง Mesh

เป็นการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเรขาคณิตขนาดเล็กเพื่อให้สามารถวิเคราะห์เทียบเคียงสูตรคำนวณแบบง่ายได้ ดังนั้นการสร้าง Mesh จึงมีความสำคัญอย่างมากในการจำลองแบบวิเคราะห์ หากแบ่งชิ้นงานขนาดไม่เหมาะสมอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่สมเหตุผลหรืออาจผิดเพี้ยนได้ Mesh หนึ่งชิ้นจะเรียกว่า Element และในแต่ละ Element จะมีจุดเรียกว่า Node ซึ่งเป็นส่วนที่โปรแกรมใช้ในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ ดังนั้นหากจุด Node มีปริมาณมากโปรแกรมวิเคราะห์จะใช้เวลาในการวิเคราะห์มากขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ด้วย

วิธีการการแบ่ง mesh ของแบบจำลองผนังยื่นที่ให้แรงเฉือนด้าน In plane สามารถคำนวณได้จากการคำนวณการเคลื่อนที่สูงสุดของผนังดังสมการที่ 11 คณะผู้วิจัยได้ทำการคำนวณเพื่อหาระยะการเคลื่อนที่สูงสุดและทำการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่สูงสุดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนขนาดของ mesh ไปเรื่อยๆจนได้ค่าใกล้เคียงกับสมการที่ 11 มากที่สุด



รูปที่ 11 แสดงสัญลักษณ์ของสมการการเคลื่อนที่สูงสุดในช่วงเชิงเส้น

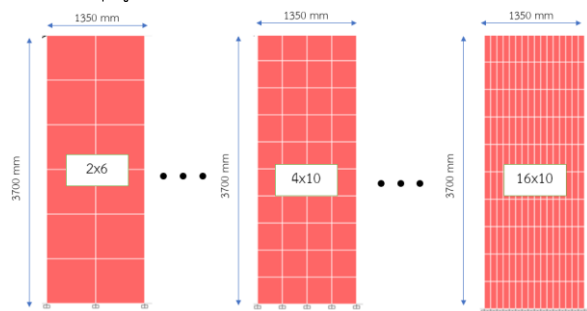
$$\Delta_{max} = \frac{Ph^3}{3EI} + \frac{1.2Ph}{AG} \quad (11)$$

โดยที่ Δ_{max} หมายถึงการเคลื่อนที่สูงสุด (displacement maximum), h หมายถึงความสูงผนัง, E หมายถึงค่าความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity), I หมายถึงโมเมนต์ของส่วนหน้าตัด (Modulus of Section), G หมายถึงโมดูลัสการเฉือน (Shear Modulus)

5. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

5.1 ผลการศึกษามังพฤติกรรมกรรมการด้านทานแรงดัด

ในการจำลองคณะผู้วิจัยได้ทำการจำลองผนังที่มีอัตราส่วนของผนังเป็นพฤติกรรมด้านทานแรงดัดและจะถูกจำลองโดยไม่มีการจำลองของสปริงเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของแรงทางข้างและการเคลื่อนที่ทางข้างของการแบ่ง mesh เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ [5] มากที่สุดในช่วงการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ขนาดผนังที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ผนังมีความกว้าง 1350 มม. และมีความสูง 3700 มม. ดังรูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของการแบ่ง mesh หรือจำนวน element โดยการเพิ่มจำนวน element ของผนังไปเรื่อยๆ และนำผลการเคลื่อนที่สูงสุดของผนังมาพล็อตเป็นกราฟเทียบกับจำนวน element ดังรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าสำหรับผนังที่มีพฤติกรรมด้านทานแรงดัดเป็นหลักและขนาดของ Mesh จะอยู่ช่วงประมาณ 40 element หรือประมาณ 330-370 มม. เป็นขนาด mesh ที่มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบเมื่อคุณสมบัติอยู่ในช่วงไม่เชิงเส้นและหากมีการแบ่งละเอียดกว่านี้ระยะการเคลื่อนที่จะเริ่มคงที่ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ยังมีความใกล้เคียงกับการคำนวณเมื่อคุณสมบัติวัสดุอยู่ในช่วงเชิงเส้นอีกด้วย

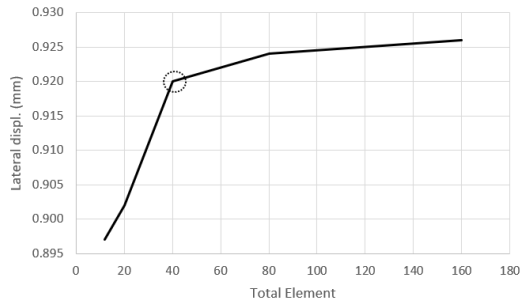


รูปที่ 12 แสดงการแบ่งชิ้นส่วน element ของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงดัด

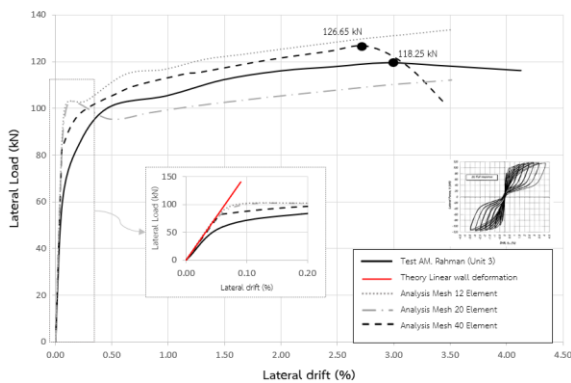
ตารางที่ 1 รายละเอียดจำนวน element ต่อระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงดัด

ลำดับ	จำนวน mesh (Element)	ระยะการเคลื่อนที่ (มม.)
1	12.00	0.897
2	20.00	0.902
3	40.00	0.920

4	80.00	0.924
5	160.00	0.926



รูปที่ 13 แสดงการเคลื่อนตัวสูงสุดของการแบ่ง mesh ของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงดัด



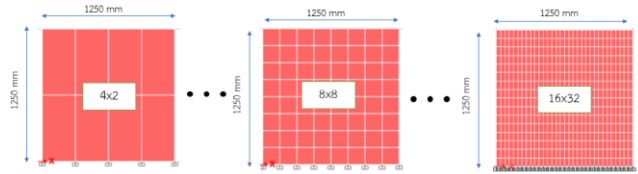
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและระยะการเคลื่อนที่ทางข้างของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงดัด

จากผลการทดสอบของ AM. Rahman and JI. Restrepo-Posada [5] เมื่อพิจารณาค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดมีค่าประมาณ 118.25 kN ระยะการเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ 3.43% และเมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์แรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนที่ทางข้าง ดังรูปที่ 14 แล้วผลของการวิเคราะห์ของการแบ่ง mesh 40 element นั้นมีค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุดประมาณ 126 kN ระยะการเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ 2.76% นำผลวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและระยะการเคลื่อนที่ทางข้างของผลทดสอบแล้ว ผลการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าผลทดสอบประมาณ 7.10% ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์การเสียรูปที่สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีอย่างง่ายในช่วงเชิงเส้น สมการที่ 11 มีผลการคำนวณที่มีความใกล้เคียงกันกับผลวิเคราะห์ทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกด้วย แสดงให้เห็นว่าวิธีการแบ่ง mesh นี้สามารถยอมรับได้

5.2 ผลการศึกษาผนังพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือน

เมื่อได้พฤติกรรมของการแบ่ง element ที่เหมาะสมแล้ว ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ของผนังที่มีพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือนเป็นหลักนั้นมี

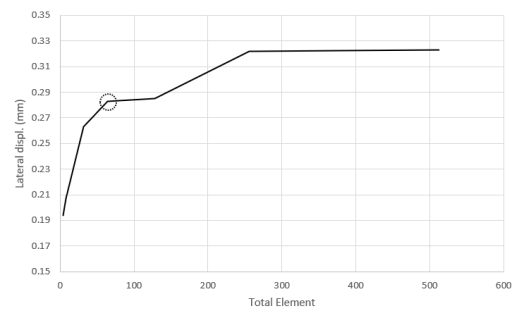
ขนาดของผนังที่ใช้ทำการวิเคราะห์มีความกว้าง 1250 มม. ความยาว 1250 มม. ดังรูปที่ 15 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของการแบ่ง mesh หรือจำนวน element ขนาดของ mesh ที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 150-160 มม. ดังรูปที่ 16



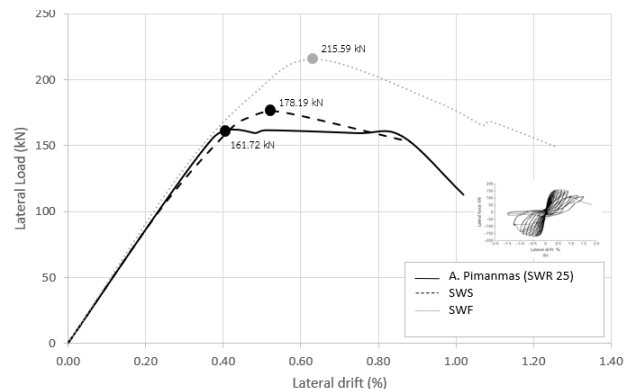
รูปที่ 15 แสดงการแบ่งชิ้นส่วน element ของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือน

ตารางที่ 2 รายละเอียดจำนวน element ต่อระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือน

ลำดับ	จำนวน mesh (Element)	ระยะการเคลื่อนที่ (มม.)
1	8.00	0.207
2	32.00	0.263
3	64.00	0.283
4	128.00	0.285
5	512.00	0.323



รูปที่ 16 แสดงการเคลื่อนตัวสูงสุดของการแบ่ง mesh ของผนังพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือน

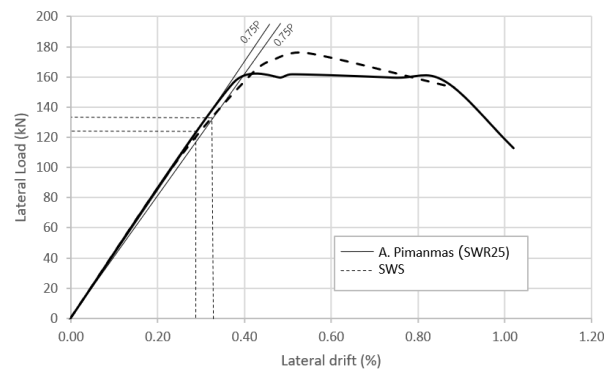


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์

จากรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบผนัง SWR25 ของ A. Pimanmas, E. Yooprasertchai and P. Wiwatrojanagul [2] มีกำลังสูงสุดที่ 161.72 kN ระยะเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ 0.40% ผนังที่จำลองแบบ SWF ซึ่งมีช่วงระยะเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ 0.64% มีค่าแรงทางข้างประมาณ 215.59 kN เมื่อผลักขึ้นทดสอบต่อไปเกินกว่าระยะนี้กำลังรับน้ำหนักเริ่มลดลง และผนัง SWS มีช่วงระยะเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ 0.54% มีค่าแรงทางข้างประมาณ 178.19 kN เมื่อผลักขึ้นทดสอบต่อไปเกินกว่าระยะนี้กำลังรับน้ำหนักเริ่มลดลงเช่นกัน

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปของผนัง SWF และผนัง SWS เปรียบเทียบกับผลทดสอบดังรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่ากราฟความโค้งที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่เกิดขึ้นในช่วงไม่เชิงเส้นและผนังที่ SWF มีค่ากำลังที่มากกว่าผนัง SWS เนื่องจากผนัง SWF ที่ไม่มีการจำลองสปริงมีการเชื่อมต่อของจุด (Node) แบบยึดแน่นจึงทำให้ผนังมีความแข็งแกร่ง (Stiffness) มากกว่าผนัง SWS ที่มีการจำลองสปริงและผนังที่มีการจำลองสปริงมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในด้านการรับแรงด้านข้างซึ่งมีความใกล้เคียงกันประมาณ 8.86% ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสปริงที่จุดเชื่อมต่อระหว่างฐานรากและผนังมีความสัมพันธ์กับแบบจำลองผนังเนื่องจากแรงที่ลดลงของสปริงเกิดจากค่าความแข็งแกร่ง

(Stiffness) ของจุดเชื่อมต่อคือ เหล็กข้ออ้อย แรงเฉือนไกล ปูนทรายชนิดไม่หดตด ดังนั้นโครงสร้างนี้แสดงให้เห็นถึงการถดถอยของความแข็งแกร่งเป็นผลเนื่องมาจากความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมในกำแพง กำแพงคอนกรีต และจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังกับฐานราก ทำให้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งจากการสูญเสียเสถียรภาพของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีจุดต่อแบบเชื่อมทาบเหล็ก



รูปที่ 18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์และผลทดสอบของ A. Pimanmas, E. Yooprasertchai and P. Wiwatrojanagul

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ของผนังที่มีพฤติกรรมด้านทานแรงเฉือนที่มีการจำลองพลาสติกสปริง (Spring Multilinear Plastic Link)

Specimen	Analysis Result		75% Secant		Stiffness (kN/m)	% error	
	Lateral force (kN)	Lateral drift (%)	Lateral force (kN)	Lateral drift (%)		Lateral force Ratio	Lateral drift Ratio
A. Pimanmas, E. (Specimen: SWR 25)	161.72	0.40	121.29	0.28	505.38	1.00	1.00
SWS	178.19	0.54	133.64	0.37	412.48	1.10	1.35
SWF	215.59	0.64	161.69	0.39	421.07	1.33	1.60

จากรูปที่ 18 เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและการเคลื่อนที่ทางข้างที่ได้จากผลทดสอบผนังคอนกรีตสำเร็จรูป [2] มาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและระยะการเคลื่อนที่ทางข้างกับผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่จำลองสปริงแบบ Spring Multilinear Plastic Link ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากผลการวิเคราะห์พบว่า แรงทางข้างที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีค่าประมาณ 178.19 kN มี Secant Stiffness ประมาณ 133.64 kN และค่าจากผลทดสอบมีค่าประมาณ 161.72 kN มี Secant Stiffness เท่ากับ 121.29 kN ผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วผลต่างที่ได้มีค่าประมาณ 10.18% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ในขณะที่ผลการเคลื่อนที่ทางข้างจากผลทดสอบมีค่าประมาณ 0.28% และจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.37%

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้แสดงถึงพฤติกรรมของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปโดยมีรูปแบบการต่อโดยใช้การทาบเชื่อมเหล็กซึ่งรูปแบบที่นิยมใช้กันในประเทศไทยโดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาพบว่า ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปมีกำลังรับแรงทางข้างควบคุมด้วยจุดต่อ แสดงถึงพฤติกรรมความสามารถหลังการรับแรงสูงสุดของผนังจะมีกำลังความแข็งแกร่งถดถอยเนื่องจากความสามารถรับแรงของแบบจำลองของจุดต่อรับแรงเฉือนในผนังคอนกรีตสำเร็จรูปมีค่าแรงที่เกิดขึ้นภายในอยู่ในช่วงไม่เชิงเส้นของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่เกิดความเสียหายบริเวณจุดต่อ จึงได้แนวทางในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Layer element ร่วมกับสปริงที่มี

คุณสมบัติแบบพลาสติก (Multilinear Plastic Link) ทำให้สามารถประเมินพฤติกรรมของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปช่วงไม่เชิงเส้นได้ การจำลองพฤติกรรมบริเวณการเชื่อมต่อของผนังที่มีการพิจารณาถึงการสูญเสียแรงดึงและแรงอัด มีการใช้สปริงไม่เชิงเส้นมาจำลองพฤติกรรมกลของผนัง เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ประเมินประสิทธิภาพอาคารระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหวต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Gonzales, F. Lopez-Almansa. (2012). Seismic performance of buildings with thin RC bearing walls. *Engineering Structures (Elsevier)*, 34, pp. 244-258.
- [2] A. Pimanmas, E. Yooprasertchai and P. Wiwatrojagul. (2019). Cyclic loading test of precast concrete load-bearing walls designed for gravitational loading. *Magazine of concrete research*, 73, pp. 595-607.
- [3] ปรีดา ไชยมหาวัน และ ชยานนท์ ทรราชวิทยุ. (2558). พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตหล่อสำเร็จภายใต้แรงแผ่นดินไหว. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 134-136.
- [4] E. Yooprasertchai, P. Wiwatrojagul, P. Saingam and K. Khan. (2023). Cyclic Behavior of Different Connections in Precast Concrete Shear Walls: Experimental and Analytical Investigations. *Buildings*, 13(6), 1433.
- [5] AM. Rahman and JI. Restrepo-Posada. (2000). earthquake resistant precast concrete buildings: seismic performance of cantilever walls prestressed using unbonded tendon. Ph.D. Dissertation, University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
- J. Zhao and S. Sritharan. (2007). Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structure. *ACI structural journal*, academia.edu, 104, pp. 135.
- J.B. Mander, M.J.N. Priestley and R. Park. (1988). Theoretical stress-strain model for confine concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), pp.1804-1826.
- [6] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2565). *มาตรฐานงานก่อสร้างอาคารด้วยระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป* (มยผ. 1108-65). บริษัท ลายเส้น ครีเอชั่น จำกัด, สำนักพิมพ์. หน้า 75-87
- [7] CSI. (2018). ETABS Integrated Analysis and Design of Building Systems version 18. Computer & Structures, Inc., pp.251-307.
- [8] ACI-ASCE Committee 550. (2001). *Emulating Cast-in-Place Detailing in Precast Concrete Structures (ACI 550.1R-01)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, United States, pp.550.1R-7
- [9] มงคล จิรวีระเดช. (2563). คู่มืออบรมการใช้งานโปรแกรมอีแทปส์ ETABS (2018) สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง. Tumcivil Training Center. สำนักพิมพ์, หน้า 1-122.
- [10] มงคล จิรวีระเดช. (2563). *Advance Reinforced concrete design handbook strength Design Method*. เอ็มแอนด์เอ็ม เลเซอร์พริ้นต์. สำนักพิมพ์, หน้า 399-429.
- [11] เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย, พงษ์ศักดิ์ วิวัฒน์โรจนกุล, พิษย สุวรรณสายะ และอมร พิมาณมาศ. (2561). พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปด้วยรอยต่อแบบการเชื่อมทาบเหล็กเส้น. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 39-51.