

พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรของจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมในโครงชั้นวางสินค้าเหล็ก

Cyclic Behavior of Diagonal-to-Upright Connection in Steel Storage Rack

ธีรธัช สนธิสถาพร^{1,*} ณัฐพล บุญสุริยพันธ์² และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: teeratat.sont@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบสำหรับการจัดเก็บและเบิกจ่ายคลังสินค้าอัตโนมัติ (Automated Storage & Retrieval System : ASRS) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม ในการใช้งานระบบ ASRS จะมีการติดตั้งโครงสร้างชั้นวางสินค้าที่มีความสูงเป็นพิเศษ ทำให้โครงสร้างประเภทนี้มีความอ่อนไหวต่อการรับแรงทางด้านข้าง อาทิเช่น แรงจากการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว ในปัจจุบันพบว่ายังไม่มีข้อมูลผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับส่วนของพฤติกรรมบริเวณจุดต่อระหว่างเสา (Upright Member) และองค์อาคารทแยงมุม (Diagonal Member) ของโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็กประเภทนี้ที่มีการใช้งานในประเทศไทย บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมที่บริเวณจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมภายใต้แรงแบบสถิตและแบบวัฏจักรจากการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบจะติดตั้งในลักษณะที่เป็นแบบคานเอียงทำมุมเอียง 38 องศากับพื้น ส่วนองค์อาคารทแยงมุมจะติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับพื้น และมีการให้แรงกระทำตามแนวแกนขององค์อาคารทแยงมุม ผลจากการทดสอบที่สำคัญประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวและน้ำหนักบรรทุกที่บริเวณจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุม หลังจากการทดสอบจึงทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำการจำลองการรับแรงและศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงของจุดต่อที่มีตัวแปรค่าต่างๆ เพื่อนำผลไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างต่อไป

คำสำคัญ: ชั้นวางสินค้าเหล็ก, แรงแบบสถิต, แรงแบบวัฏจักร, พฤติกรรมจุดต่อระหว่างเสากับองค์อาคารทแยงมุม

Abstract

Currently, Automated Storage and Retrieval Systems (ASRS) are gaining popularity in the industrial sector. The ASRS generally utilizes ultra-high steel storage racks, which are sensitive to lateral forces such as seismic loads from earthquakes. To date, no experimental data exists on the behavior of the connection between the upright columns and diagonal bracing members in steel storage rack structures currently used in Thailand. This paper presents the experimental behavior of this connection under static and cyclic loading. The test specimens are configured as simply supported beams inclined at an angle of 38 degrees to the horizontal. The diagonal bracing members are oriented vertically, with the applied load acting along the bracing member. Key results include the load-displacement relationship at the column-to-

diagonal member connection. After testing, a finite element model is created to simulate the load-bearing behavior and study the behavior of the connection with varying parameters. The results can be used in future structural design analysis for this type of structure.

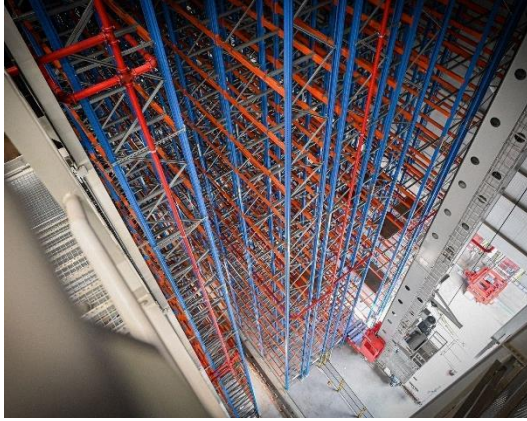
Keywords: steel storage racks, static load, cyclic load, behavior of column-to-diagonal member

1. คำนำ

ปัจจุบันความนิยมของระบบคลังชั้นวางสินค้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งในการจัดเก็บระยะสั้นและระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติบโตของธุรกิจออนไลน์และความต้องการระบบโลจิสติกส์ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งการแข่งขันที่รุนแรงของราคาสินค้าที่เพิ่มขึ้นผลักดันให้เกิดการนำเทคโนโลยีระบบจัดเก็บและเบิกจ่ายสินค้าอัตโนมัติ (ASRS) มาใช้แทนระบบคลังสินค้าแบบดั้งเดิม ส่งผลให้ใช้พื้นที่ในแนวดิ่งได้อย่างเต็มประสิทธิภาพด้วยการติดตั้งชั้นวางสินค้าที่มีลักษณะความสูงเป็นพิเศษ ดังรูปที่ 1

ชั้นวางสินค้าโดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมมักระบุเฉพาะค่าความหนาของเสา (Upright) และคาน (Beam) ตามขีดจำกัดน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตมักไม่ระบุค่าความต้านทานต่อแรงกระทำในแนวราบตามทิศทางตั้งฉากกับคาน (Cross-aisle direction) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเนื่องจากแรงกระทำในแนวราบ อันเป็นการจำลองสถานการณ์ผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวต่อจุดเชื่อมต่อระหว่างเสาของชั้นวางสินค้าและองค์อาคารทแยงมุม

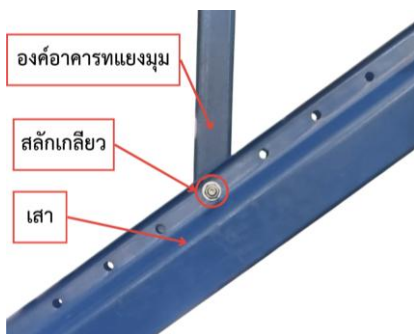
บทความนี้นำเสนอแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมของจุดต่อชั้นวางสินค้าระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุม ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเทียบกับผลการทดสอบตามมาตรฐานจากสถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American National Standards Institute, ANSI) เพื่อนำผลเทียบไปทำนายพฤติกรรมเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการเคลื่อนตัว (Load-Displacement Curve) ผ่านการจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจุดต่อแบบเดียวกันซึ่งจะทำให้ในการออกแบบในอนาคต จะสามารถนำวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์แทนการทดสอบ ทำให้ลดขั้นตอนในการทดสอบพฤติกรรมของจุดต่อส่งผลให้มีความรวดเร็วในการออกแบบ สามารถลดต้นทุนและไม่ก่อมลภาวะจากวัสดุเหลือทิ้งจากการทดสอบ อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดการศึกษาพฤติกรรมได้ในอนาคต



รูปที่ 1 ชั้นวางสินค้าที่มีความสูงพิเศษ

2. การทดสอบจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุม

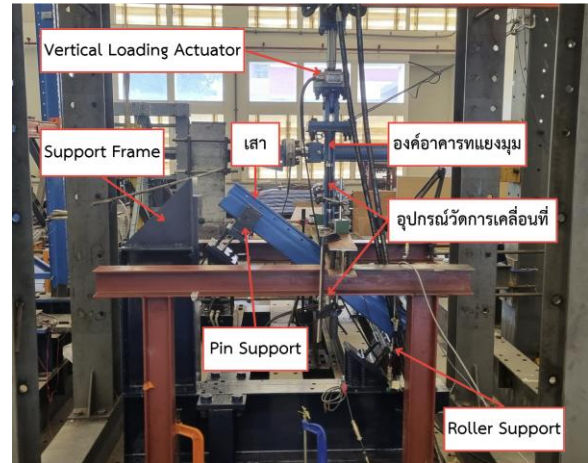
ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบการวิบัติของชิ้นส่วนจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมเมื่อมีแรงกระทำแบบสถิต (Static Loading) และแรงกระทำในแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หากล้ารับน้ำหนักบรรทุกที่จุดครากโดยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบลิเนียร์ (Elastic-Perfectly-Plastic, EPP) โดยมีงานวิจัยในอดีต [1-2] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวของแบบไม่เชิงเส้นโดยวิธีดังกล่าว ซึ่งผลทดสอบที่ได้จะนำมาเป็นฐานข้อมูลเทียบเคียงในการสร้างแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างการทดสอบเป็นการจำลองจากจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมของโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็กโดยเสามีความยาว 1 เมตร ช่วงความยาวฐานรองรับถึงฐานรองรับเท่ากับ 0.80 เมตร จะติดตั้งในลักษณะที่เป็นแบบคานอย่างง่าย ทำมุมเอียง 38 องศา กับพื้น ส่วนองค์อาคารทแยงมุมความยาว 0.576 เมตร จะติดตั้งในทิศทางตั้งฉากทำมุม 90 องศา กับพื้น และมีการให้แรงกระทำตามแนวแกนขององค์อาคารทแยงมุม โดยที่เสาเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ Q345 และองค์อาคารทแยงมุมเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ Q235 บริเวณจุดต่อระหว่างเสากับองค์อาคารทแยงมุมมีรูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สำหรับองค์อาคารทแยงมุม และสำหรับเสาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.44 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกับสลักเกลียวขนาด M10 เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.8 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ 8.8 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบจุดต่อระหว่างเสากับองค์อาคารทแยงมุม

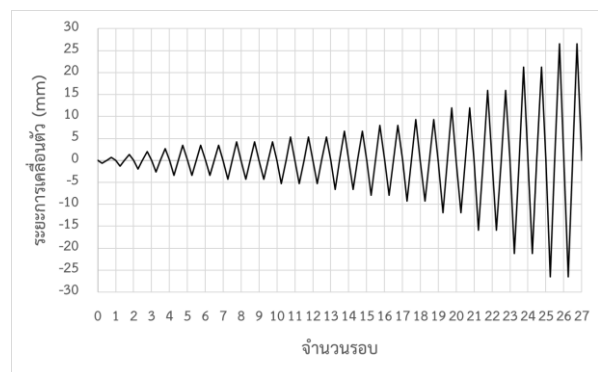
รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI MH16.1-2023 [3] โดยจะเริ่มทำการทดสอบ

แบบสถิตก่อน ซึ่งการทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3 และติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดระยะการเคลื่อนที่เพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพื่อนำไปคำนวณเป็นระยะการเคลื่อนตัวของจุดต่อตามมาตรฐานการทดสอบสำหรับแบบวัฏจักรต่อไป ในการทดสอบแบบสถิตจะให้แรงกระทำตามแนวแกนของชิ้นส่วนองค์อาคารทแยงมุมเพิ่มขึ้นต่อเนื่องโดยให้หัวให้น้ำหนัก (Vertical Loading Actuator) จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3 การติดตั้งและเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

กรณีให้แรงกระทำแบบวัฏจักรจะใช้รูปแบบการให้แรงโดยควบคุมระยะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4 การกำหนดชื่อของตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย ประเภทของแรงกระทำและลำดับการทดสอบ (TM คือ Tension Monotonic (Static), CM คือ Compression Monotonic (Static) และ C คือ Cyclic) - ความหนาขององค์อาคารทแยงมุม (ระยะขอบ) - ความหนาเสา - ประเภท (T คือ ทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ F คือ ไฟไนต์เอลิเมนต์) ตัวอย่างอาทิเช่น TM1-1.5(2)D-2.75U-T หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่มีแรงดึงกระทำแบบสถิตขึ้นทดสอบที่ 1 ความหนาขององค์อาคารทแยงมุม 1.5 มิลลิเมตร (ระยะขอบ 2D) ความหนาเสา 2.75 มิลลิเมตร ทดสอบในห้องปฏิบัติการ รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ (Displacement) กับน้ำหนักบรรทุก (Load) ในบทความนี้ได้ทำการหากลบระยะการเคลื่อนที่เนื่องจากการแอ่นตัวของเสาแล้ว



รูปที่ 4 การให้แรงกระทำแบบวัฏจักรควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนที่

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบจุดต่อสำหรับแรงกระทำแบบสถิต

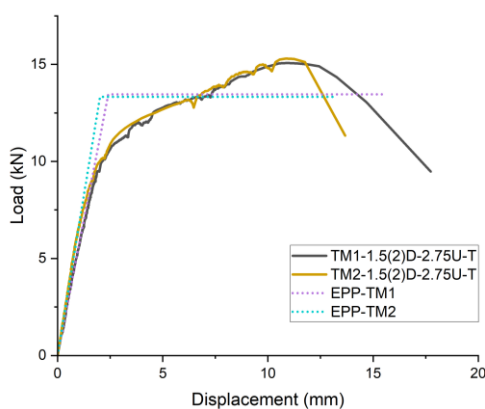
ชื่อตัวอย่าง	ความหนา องศาการทแยง มุม t_d (mm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางรูเจาะ องศาการทแยง มุม d_d (mm)	ความหนา เสา t_u (mm)	ระยะขอบ
TM1-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
TM2-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
CM1-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
CM2-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบจุดต่อสำหรับแรงกระทำแบบวัฏจักร

ชื่อตัวอย่าง	ความหนา องศาการทแยง มุม t_d (mm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางรูเจาะ องศาการทแยง มุม d_d (mm)	ความหนา เสา t_u (mm)	ระยะขอบ
C1-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
C2-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
C3-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D

2.1 ผลการทดสอบจุดต่อกรณีแรงกระทำแบบสถิต

จากการทดสอบนำข้อมูลพื้นฐานที่นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวกับน้ำหนักบรรทุกของจุดต่อแต่ละตัวอย่างทดสอบสำหรับกำลังรับแรงดึงสถิตและกำลังรับแรงอัดสถิต และทำการวิเคราะห์หาจุดครากโดยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบเลเนียร์ ได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ค่าสถิติพอส กำลังรับน้ำหนัก ระยะการเคลื่อนตัวที่จุดครากและจุดวิบัติแสดงได้ดังตารางที่ 3



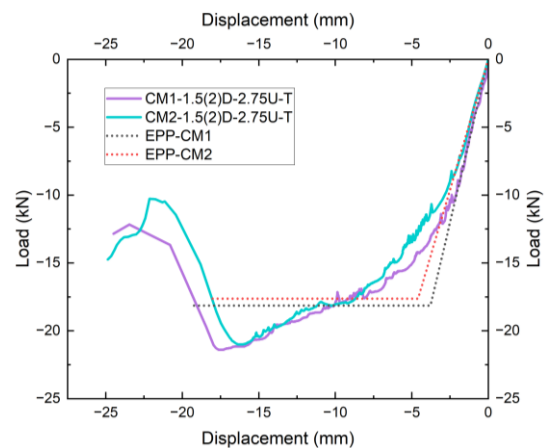
รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึงแบบสถิต TM1-1.5(2)D-2.75U-T และ TM2-1.5(2)D-2.75U-T

ตารางที่ 3 ค่าสถิติพอส กำลังรับน้ำหนักและระยะการเคลื่อนตัวที่จุดครากและวิบัติสำหรับแรงกระทำแบบสถิต

ชื่อตัวอย่าง	สถิติพอส	กำลังรับ น้ำหนัก	การเคลื่อนตัว ที่จุดคราก	กำลังรับ น้ำหนัก	การเคลื่อนตัว ที่จุดวิบัติ
--------------	----------	---------------------	-----------------------------	---------------------	-------------------------------

	k (kN/m)	ที่จุดคราก P_y (kN)	Δ_y (mm)	ที่จุดวิบัติ P_u (kN)	Δ_u (mm)
TM1-1.5(2)D-2.75U-T	5572.908	13.453	2.414	15.074	15.532
TM2-1.5(2)D-2.75U-T	6609.019	13.337	2.018	15.299	13.211
ค่าเฉลี่ย	6090.964	13.395	2.216	15.187	14.372
CM1-1.5(2)D-2.75U-T	4803.605	18.124	3.773	21.399	19.453
CM2-1.5(2)D-2.75U-T	3842.667	17.634	4.589	20.999	18.310
ค่าเฉลี่ย	4323.136	17.879	4.181	21.199	18.882

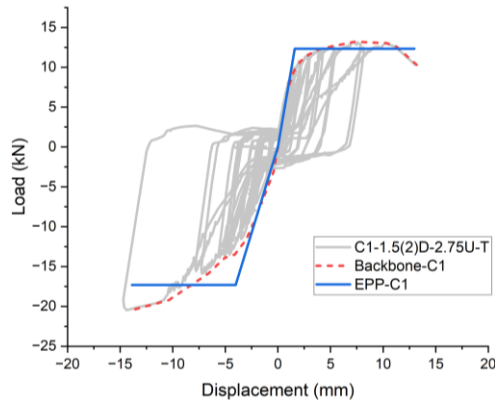
จากความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างทดสอบในรูปที่ 5 และ 6 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบทุกเหลี่ยมที่จุดครากและจุดวิบัติของการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบสถิตมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงแบบสถิต ดังแสดงในตารางที่ 3 ประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์และ 40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาพฤติกรรมของการทดสอบการเชื่อมต่อองศาการทแยงมุมแบบเหี่ยวสำหรับคาน้ำเหล็ก [4] แต่พบว่าค่าสถิติพอสเฉลี่ย ณ จุดครากของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบสถิตมีค่าสถิติพอสน้อยกว่า โดยเทียบกับกำลังรับแรงดึงแบบสถิตเท่ากับ 29 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ



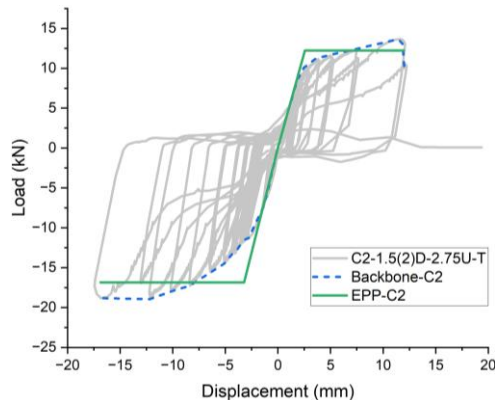
รูปที่ 6 ผลการทดสอบแรงอัดแบบสถิต CM1-1.5(2)D-2.75U-T และ CM2-1.5(2)D-2.75U-T

2.2 ผลการทดสอบจุดต่อกรณีแรงกระทำแบบวัฏจักร

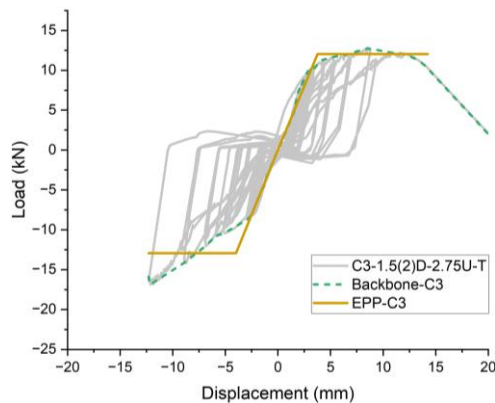
จากการทดสอบตัวอย่างภายใต้กรณีแรงกระทำแบบวัฏจักรและนำผลการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวกับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบเป็นวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ของแต่ละตัวอย่างทดสอบ และเส้นกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) และทำการวิเคราะห์หาจุดครากโดยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบเลเนียร์ ได้ดังรูปที่ 7 ถึง 9 จากรูปจะสามารถหาค่าสถิติพอส กำลังรับน้ำหนัก ระยะการเคลื่อนตัวที่จุดครากและจุดวิบัติแสดงได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 7 ผลการทดสอบแบบวิถจักร C1-1.5(2)D-2.75U-T



รูปที่ 8 ผลการทดสอบแบบวิถจักร C2-1.5(2)D-2.75U-T



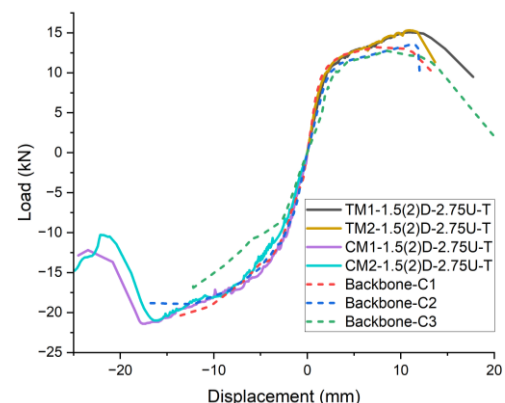
รูปที่ 9 ผลการทดสอบแบบวิถจักร C3-1.5(2)D-2.75U-T

จากความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างทดสอบในรูปที่ 7 ถึง 9 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกหาค่าเฉลี่ยที่จุดครากและจุดวิบัติของการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบวิถจักรมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงแบบวิถจักร ดังแสดงในตารางที่ 4 ประมาณ 29 เปอร์เซ็นต์และ 42 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องโดยส่วนใหญ่กับงานวิจัยในอดีต [4] แต่ค่าสลิปเฟสเฉลี่ย ณ จุดครากของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบวิถจักรมีค่าสลิปเฟสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงแบบวิถจักรประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 ค่าสลิปเฟส กำลังรับน้ำหนักและระยะการเคลื่อนตัวที่จุดครากและวิบัติสำหรับแรงกระทำแบบวิถจักร

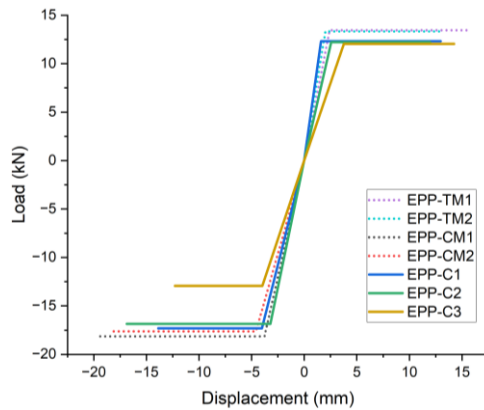
ชื่อตัวอย่าง	สลิปเฟส k (kN/m)	กำลังรับ น้ำหนัก ที่จุดคราก P_y (kN)	การเคลื่อนตัว ที่จุดคราก Δ_y (mm)	กำลังรับ น้ำหนัก ที่จุดวิบัติ P_u (kN)	การเคลื่อนตัว ที่จุดวิบัติ Δ_u (mm)
แรงกระทำด้านดึงแบบวิถจักร					
C1-1.5(2)D-2.75U-T	7707.942	12.325	1.599	13.200	12.981
C2-1.5(2)D-2.75U-T	4768.511	12.236	2.566	13.650	11.968
C3-1.5(2)D-2.75U-T	3193.471	12.033	3.768	12.750	14.254
ค่าเฉลี่ย	5223.308	12.198	2.644	13.200	13.068
แรงกระทำด้านอัดแบบวิถจักร					
C1-1.5(2)D-2.75U-T	4310.431	17.315	4.017	20.474	13.881
C2-1.5(2)D-2.75U-T	5245.641	16.849	3.212	18.949	16.879
C3-1.5(2)D-2.75U-T	3251.571	12.938	3.979	16.899	12.300
ค่าเฉลี่ย	4269.214	15.701	3.736	18.774	14.353

จากผลการทดสอบทั้งแบบสถิตในตารางที่ 3 และแบบวิถจักรในตารางที่ 4 ผลการทดสอบในรูปของเส้นกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) และผลจากการวิเคราะห์โดยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบลิเนียร์ สามารถนำมาเปรียบเทียบกันแสดงดังรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 รวมผลการทดสอบแบบสถิตและเส้นกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของแบบวิถจักร

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบทวนที่จุดครากและจุดวิบัติของการทดสอบกำลังรับแรงแบบสถิตจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับแบบวิถจักรในทุกกรณีทั้งแรงดึงและแรงอัด โดยกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยแบบวิถจักรเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์ และ 87 เปอร์เซ็นต์ของจุดครากและจุดวิบัติของกำลังรับแรงดึงแบบสถิตตามลำดับ ส่วนกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยแบบวิถจักรเท่ากับ 88 เปอร์เซ็นต์ และ 89 เปอร์เซ็นต์ ของจุดครากและจุดวิบัติของกำลังรับแรงอัดแบบสถิตตามลำดับ คาดการณ์ได้ว่าการกำลังจะลดลงในช่วง 9 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ



รูปที่ 11 รวมผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบโบลิเนียน์ (EPP)

ส่วนค่าสถิติเพนส ณ จุดคราก พบว่าแรงอัดแบบสถิตมีค่าสถิติเพนสมากกว่าแรงอัดแบบวิจักษ์ด้วยผลต่างเพียง 1 เปอร์เซนต์ สำหรับแรงดึงแบบวิจักษ์มีค่าสถิติเพนสเท่ากับ 86 เปอร์เซนต์ ของแรงดึงแบบสถิต

3. แบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

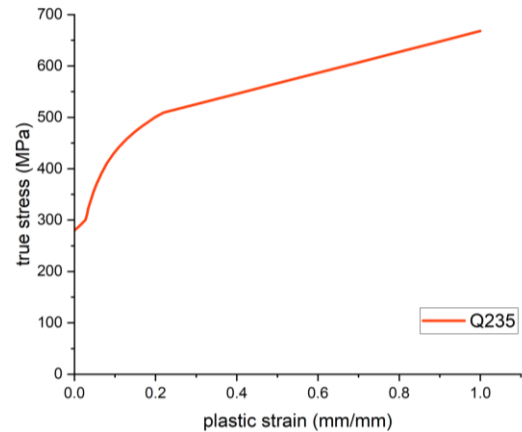
จากการทดสอบตัวอย่างภายในห้องปฏิบัติการและได้สรุปผลการทดสอบมาข้างต้นสรุปได้ว่าการวิบัติเป็นในกรณีแบบควบคุมโดยแรงดึง (Tension Control) ดังนั้นจึงดำเนินการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยพิจารณาในส่วนของแรงกระทำแบบดึงเป็นกรณีพิเศษเพื่อทำการปรับและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ โดยรายละเอียดแบบจำลองเป็นดังต่อไปนี้

3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วยเหล็กชั้นคุณภาพ Q345 สำหรับเสา เหล็กชั้นคุณภาพ Q235 สำหรับองค์อาคารทแยงมุม อังอิงจากงานวิจัยในอดีต [5] และสลักเกลียวชั้นคุณภาพ 8.8 อังอิงจากงานวิจัยในอดีต [6] โดยรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุภายในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อวัสดุ	โมดูลัสยืดหยุ่น E (GPa)	ความเค้น ณ จุดคราก F_y (MPa)	ความเค้น ณ จุดวิบัติ F_u (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง ν
Q235	206	280	445	0.3
Q345	193	504	604	0.3
Bolt grade 8.8	201	640	799	0.3

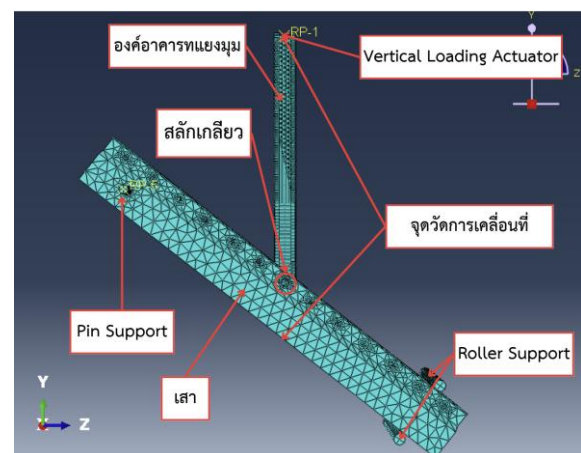


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่แท้จริงและระยะการยืดหดตัวพลาสติกในแบบจำลองขององค์อาคารทแยงมุม

สำหรับองค์อาคารทแยงมุมได้ อังอิงแนวทางในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่แท้จริงและระยะการยืดหดตัวพลาสติกหลังจุดความเค้นสูงสุดจากงานวิจัยในอดีต [5] และปรับเทียบให้ผลลัพธ์เข้าใกล้ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการและจากการสร้างแบบจำลองที่ระยะการยืดหดตัวพลาสติกแตกหักที่ค่าต่างๆพบว่าที่ระยะการยืดหดตัวพลาสติกแตกหัก (Fracture Strain) เท่ากับ 0.88 มีค่าเข้าใกล้ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการขณะเกิดการวิบัติ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่แท้จริงและระยะการยืดหดตัวพลาสติกในแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 12

3.2 ลักษณะของแบบจำลอง

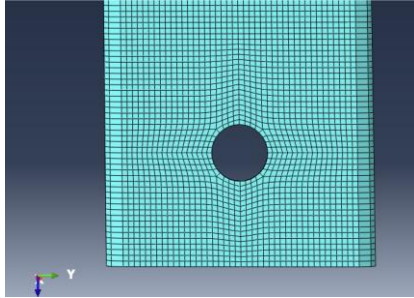
ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ทำการสร้างแบบจำลองเท่ากับขนาดและสัดส่วนจริงที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยติดตั้งท่ามุมเอียง 38 องศา กับพื้น (แกน z) ลักษณะรูปแบบคานอย่างง่ายดังรูปที่ 13



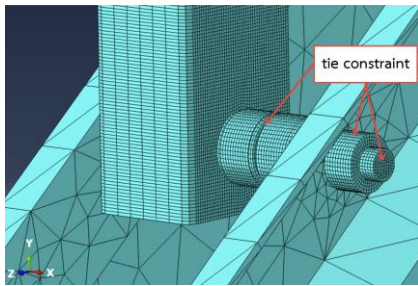
รูปที่ 13 ลักษณะแบบจำลองโดยรวมที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยจุดที่พิจารณาบริเวณจุดต่อสลักเกลียวกับองค์อาคารทแยงมุมจะใช้นาขนาดของตาข่าย (Mesh Size) เฉลี่ยเท่ากับ 1 มิลลิเมตร รูปแบบเอลิเมนต์เป็น C3D8R สำหรับองค์อาคารทแยงมุม ดังรูปที่ 14 ส่วนสลักเกลียวแหวนรองและน็อตลักษณะการยึดตรึงเป็นแบบ "Tie Constraint" ดังรูปที่ 15 ส่วนเสาใช้รูปแบบเอลิเมนต์เป็น C3D10 ขนาดของตาข่ายเฉลี่ยเท่ากับ

25 มิลลิเมตร ส่วนบริเวณจุดต่อกับสลักเกลียวใช้ขนาดตาข่ายเฉลี่ยเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 13 และกำหนดรูปแบบผิวสัมผัสเป็น “Hard Contact” ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นกรณี “Penalty” สำหรับผิวสัมผัสระหว่างเหล็กและเหล็กเท่ากับ 0.3 ในการสร้างแบบจำลอง



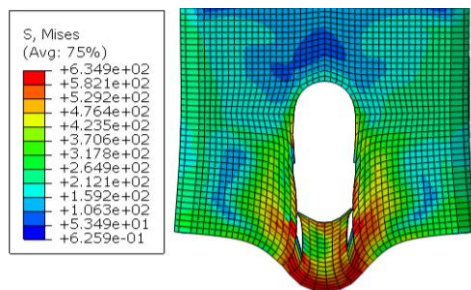
รูปที่ 14 ลักษณะตาข่ายขององค์อาคารทนแรงแบบบริเวณจุดต่อ



รูปที่ 15 สลักเกลียว แหวนรอง น็อตและรูปแบบการยึดรั้ง “Tie Constraint”

3.3 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยให้แรงกระทำแบบแรงดึงสถิตพบว่าองค์อาคารทนแรงแบบเกิดการวิบัติในลักษณะเฉือนแนวยาว (Longitudinal Shear Failure) ที่รูเจาะซึ่งเกิดความเค้นสูงสุดที่ 634.90 เมกะปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 16 รูปแบบของการวิบัติมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในกรณีของแรงดึงสถิตดังรูปที่ 17

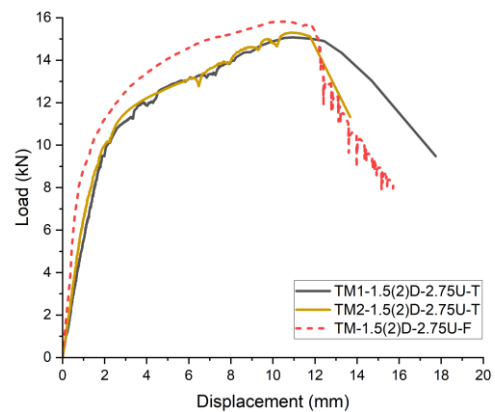


รูปที่ 16 การวิบัติจากการวิเคราะห์โดยแรงดึงแบบสถิตทางไฟไนต์เอลิเมนต์



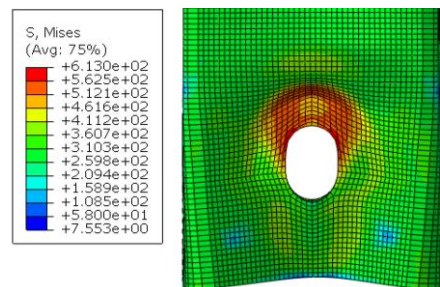
รูปที่ 17 การวิบัติจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากแรงดึงแบบสถิต

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลทดสอบภายในห้องปฏิบัติการจากแรงดึงแบบสถิตดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเนื่องจากแรงดึงแบบสถิต

กรณีของผลการวิเคราะห์โดยแรงกระทำแบบแรงอัดสถิตพบว่ารูปแบบของการวิบัติแตกต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิบัติในลักษณะแบกทาน (Bearing Failure) ที่ความเค้นสูงสุด 613 เมกะปาสกาล ดังแสดงในรูปที่ 19 ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิบัติในลักษณะเฉือนแนวยาว (Longitudinal Shear Failure) ดังแสดงในรูปที่ 20

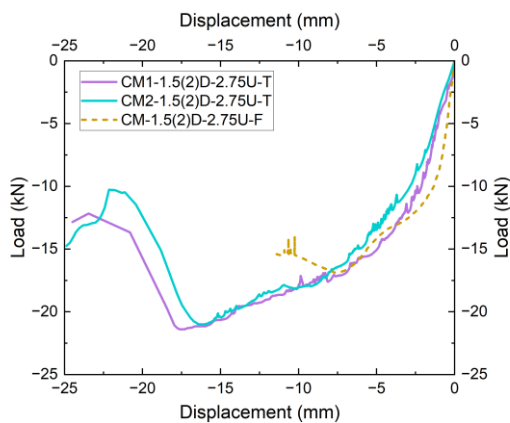


รูปที่ 19 การวิบัติจากการวิเคราะห์โดยแรงอัดแบบสถิตทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 20 การวิบัติจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากแรงอัดแบบสถิต

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลทดสอบภายในห้องปฏิบัติการจากแรงอัดแบบสถิตได้ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 ผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเนื่องจากแรงอัดแบบสถิต

ตารางที่ 6 แบบจำลองเพื่อการศึกษาความอ่อนไหว

ชื่อตัวอย่าง	ความหนา องศาการ ทแยงมุม t_d (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง รูเจาะองศาการทแยง มุม d_d (mm)	ความหนา เสา t_u (mm)	ระยะขอบ
TM-1.2(2)D-2.75U-F	1.2	10	2.75	2D
TM-1.2(2)D-2.3U-F	1.2	10	2.3	2D
TM-1.5(2)D-2.3U-F	1.5	10	2.3	2D
TM-1.5(2.5)D-2.75U-F	1.5	10	2.75	2.5D
TM-1.5(3)D-2.75U-F	1.5	10	2.75	3D
TM-1.8(2)D-2.75U-F	1.8	10	2.75	2D
TM-1.8(2)D-2.3U-F	1.8	10	2.3	2D
CM-1.2(2)D-2.75U-F	1.2	10	2.75	2D
CM-1.2(2)D-2.3U-F	1.2	10	2.3	2D
CM-1.5(2)D-2.3U-F	1.5	10	2.3	2D
CM-1.5(2.5)D-2.75U-F	1.5	10	2.75	2.5D
CM-1.5(3)D-2.75U-F	1.5	10	2.75	3D
CM-1.8(2)D-2.75U-F	1.8	10	2.75	2D

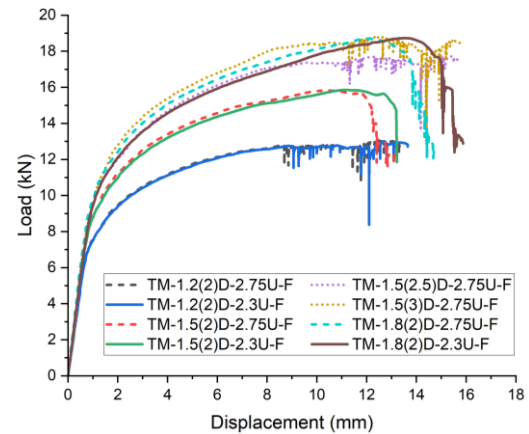
CM-1.8(2)D-2.3U-F	1.8	10	2.3	2D
-------------------	-----	----	-----	----

จากผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากรูปที่ 18 และ 21 พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบทานเฉลี่ยของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีของแรงดึงแบบสถิตมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบทานเฉลี่ยของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีของแรงอัดแบบสถิตพบว่ามีความมากกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

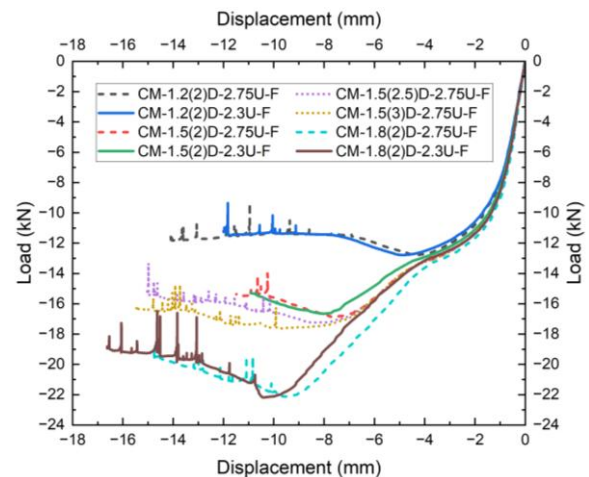
3.4 การศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้ว จึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาความอ่อนไหว และผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลอง โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ ความหนา และระยะขอบ ยกเว้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ ตามที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 6

ผลการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาขององศาการทแยงมุม ความหนาของเสา และระยะขอบขององศาการทแยงมุม แสดงดังรูปที่ 22 สำหรับแรงดึงสถิต และรูปที่ 23 สำหรับแรงอัดสถิต



รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์เนื่องจากแรงดึงแบบสถิต



รูปที่ 23 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากแรงอัดแบบสถิต

จากผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากแรงดึงแบบสถิต ดังรูปที่ 22 พบว่าเสาที่มีความหนา 2.3 มิลลิเมตร เคลื่อนตัวได้มากกว่า ความหนา 2.75 มิลลิเมตร เนื่องจากมีช่วงความยาวของสลักเกลียวเพิ่มมากขึ้นทำให้สลักเกลียวเกิดการแอ่นตัวได้มากขึ้นโดยที่ความสามารถในการรับน้ำหนักไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มความหนาขององค์อาคารทแยงมุม พบว่าสามารถรับน้ำหนักและเคลื่อนตัวได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะขอบ (End Distance) พบว่าที่ 2.5D (ระยะขอบ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) และ 3D (ระยะขอบ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) มีการพัฒนาการรับน้ำหนัก ได้ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะขอบ 3D ขององค์อาคารทแยงมุมความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดใกล้เคียงกับองค์อาคารทแยงมุมความหนา 1.8 มิลลิเมตร ที่ระยะขอบ 2D

ในส่วนของการวิเคราะห์เนื่องจากแรงอัดแบบสถิตดังรูปที่ 23 มีข้อสังเกตว่าความหนาขององค์อาคารทแยงมุม 1.2 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มระยะขอบ (End Distance) ที่ 2.5D และ 3D ทำให้เปลี่ยนรูปแบบเป็นการวิบัติโดยแรงอัดควบคุม (Compression Control) ซึ่งรูปแบบการเสียรูป คล้ายคลึงดังรูปที่ 19 โดยที่การเพิ่มความหนาขององค์อาคารทแยงมุมทำให้พัฒนาการรับน้ำหนักได้ดีกว่าการเพิ่มระยะขอบอย่างมากสำหรับการพิจารณาในส่วนของแรงอัดแบบสถิต โดยสรุปได้ดังตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์

ชื่อตัวอย่าง	ความหนา องค์อาคาร ทแยงมุม t_d (mm)	กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติ		รูปแบบการวิบัติ (แรงดึงควบคุม หรือ แรงอัดควบคุม)
		แรงดึงสถิต TM (kN)	แรงอัดสถิต CM (kN)	
1.2(2)D-2.75U-F	1.2	13.093	-12.771	แรงอัดควบคุม
1.2(2)D-2.3U-F	1.2	12.997	-12.784	แรงอัดควบคุม
1.5(2)D-2.75U-F	1.5	15.822	-16.867	แรงดึงควบคุม
1.5(2)D-2.3U-F	1.5	15.856	-16.656	แรงดึงควบคุม
1.5(2.5)D-2.75U-F	1.5	17.755	-17.240	แรงอัดควบคุม
1.5(3)D-2.75U-F	1.5	18.790	-17.633	แรงอัดควบคุม
1.8(2)D-2.75U-F	1.8	18.700	-22.128	แรงดึงควบคุม
1.8(2)D-2.3U-F	1.8	18.731	-22.187	แรงดึงควบคุม

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดสอบของจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุม โดยให้แรงกระทำแบบสถิต (Static Loading) และแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) เพื่อศึกษาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวที่บริเวณจุดต่อเสาและองค์อาคารทแยงมุมของโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็ก เพื่อนำมาเป็นฐานข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และนำไปปรับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการเฉื่อยแบบสถิตและแบบวัฏจักรมีความสามารถในการรับแรงอัดได้สูงกว่าแรงดึงส่งผลให้แรงดึงเป็นตัวควบคุม (Tension Control) แต่ค่าสถิติเอนเฉลี่ย

ในการทดสอบรับแรงดึงมีค่าสถิติเอนมากกว่าการทดสอบรับแรงอัด

2. กำลังรับแรงดึงและแรงอัดเฉลี่ยแบบวัฏจักรมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงและแรงอัดเฉลี่ยแบบสถิต และค่าสถิติเอนเฉลี่ยเป็นเช่นเดียวกัน
3. ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยให้แรงกระทำแบบแรงดึงสถิตพบว่าองค์อาคารทแยงมุมเกิดการวิบัติในลักษณะเฉือนแนวยาวที่รูเจาะโดยรูปแบบของการวิบัติมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
4. ผลการวิเคราะห์โดยแรงกระทำแบบแรงอัดสถิตพบว่ารูปแบบของการวิบัติแตกต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิบัติในลักษณะแบททานส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิบัติในลักษณะเฉือนแนวยาว
5. กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบททานเฉลี่ยของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีของแรงดึงแบบสถิตมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบททานเฉลี่ยของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีของแรงอัดแบบสถิตพบว่ามีความมากกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
6. จากการปรับพารามิเตอร์ในส่วนแรงดึงแบบสถิตพบว่าเสาที่มีความหนา 2.3 มิลลิเมตร เคลื่อนตัวได้มากกว่าความหนา 2.75 มิลลิเมตร เนื่องจากมีช่วงความยาวของสลักเกลียวเพิ่มมากขึ้นทำให้แอ่นตัวได้มากขึ้นโดยที่ความสามารถในการรับน้ำหนักไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มความหนาขององค์อาคารทแยงมุมพบว่าสามารถรับน้ำหนักและเคลื่อนตัวได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะขอบ พบว่าที่ 2.5D และ 3D มีการพัฒนาการรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะขอบ 3D ขององค์อาคารทแยงมุมความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดใกล้เคียงกับองค์อาคารทแยงมุมความหนา 1.8 มิลลิเมตร ที่ระยะขอบ 2D
7. ในส่วนผลการวิเคราะห์เนื่องจากแรงอัดแบบสถิตจากการปรับพารามิเตอร์ มีข้อสังเกตว่าความหนาขององค์อาคารทแยงมุม 1.2 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มระยะขอบที่ 2.5D และ 3D ทำให้เปลี่ยนรูปแบบเป็นการวิบัติโดยแรงอัดควบคุม โดยที่การเพิ่มความหนาขององค์อาคารทแยงมุมทำให้พัฒนาการรับแรงอัดได้ดีกว่าการเพิ่มระยะขอบอย่างมากส่งผลให้ยังคงเป็นแรงดึงควบคุม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานสถานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) และ บริษัท แม่น้ำแมคคานิกา จำกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohamed, N., Farghaly, A.S., Benmokrane, B. and Neale, K.W. (2014). Drift Capacity Design of Shear Walls Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal/November-December 2014*, 111-S119, pp. 1399.

- [2] Ahmed, A. and Teh, L.H. (2019). Thread effects on the stiffness of bolted shear connections. *Journal of Constructional Steel Research* (2019), 160, pp. 79.
- [3] American National Standards Institute (2023). *Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks (ANSI MH16.1-2023)*. American National Standards Institute, Inc., pp.57-62.
- [4] Natali, A., Morelli, F., Vulcu, C., Tsarpalis, D., Vamvatsikos, D., Salvatore, W., Hoffmeister, B. and Vayas I. (2024). Experimental behaviour of ductile diagonal connections for rack supported warehouses. *Bulletin of Earthquake Engineering* (2024), 22, pp. 6799-6828.
- [5] Huang, X., Yuan, Y., Zhao, J. and Wei, C. (2022). Comparative study on ultra-low-cycle-fatigue behavior of Q235 normal-steel and Q690 high-strength steel. *Journal of Constructional Steel Research* (2022), 194, 107308.
- [6] Kontolati, K., Koukouselis, A. and Panagouli, O. (2017). Numerical Investigation of Wek Axis I Profile Connections. *9th Hellenic National Conference on Steel Structures*, Thessaly, Greece, 5-7 October 2017

