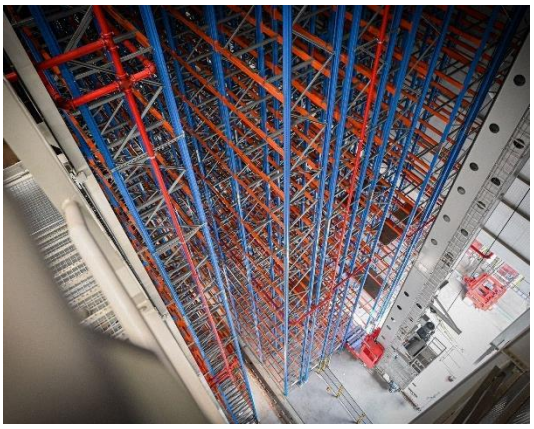
พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรของจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมในโครงชั้นวางสินค้าเหล็ก

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

ธีรธัช สนธิสถาพร[1,*] ณัฐพล บุญสุริยพันธ์[2] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[3]

1,2,



รูปที่ 1 ชั้นวางสินค้าที่มีความสูงพิเศษ

2. การทดสอบจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุม

ในบทความนี้ ได้ทำการทดสอบการวิบัติของชิ้นส่วนจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมเมื่อมีแรงกระทำแบบสถิต (Static Loading) และแรงกระทำในแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดครากโดยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบลิเนียร์ (Elastic-Perfectly-Plastic, EPP) โดยมีงานวิจัยในอดีต [1-2] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนตัวแบบไม่เชิงเส้นโดยวิธีดังกล่าว ซึ่งผลทดสอบที่ได้จะนำมาเป็นฐานข้อมูลเทียบเคียงในการสร้างแบบจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างการทดสอบเป็นการจำลองจากจุดต่อระหว่างเสาและองค์อาคารทแยงมุมของโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็กโดยเสามีความยาว 1 เมตร ช่วงความยาวฐานรองรับถึงฐานรองรับเท่ากับ 0.80 เมตร จะติดตั้งในลักษณะที่เป็นแบบคานอย่างง่าย ทำมุมเอียง 38 องศากับพื้น ส่วนองค์อาคารทแยงมุมความยาว 0.576 เมตร จะติดตั้งในทิศทางตั้งฉากทำมุม 90 องศากับพื้น และมีการให้แรงกระทำตามแนวแกนขององค์อาคารทแยงมุม โดยที่เสาเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ Q345 และองค์อาคารทแยงมุมเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ Q235 บริเวณจุดต่อระหว่างเสากับองค์อาคารทแยงมุมมีรูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สำหรับองค์อาคารทแยงมุม และสำหรับเสาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.44 มิลลิเมตร เชื่อมต่อด้วยสลักเกลียวขนาด M10 เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.8 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ 8.8 แสดงดังรูปที่ 2



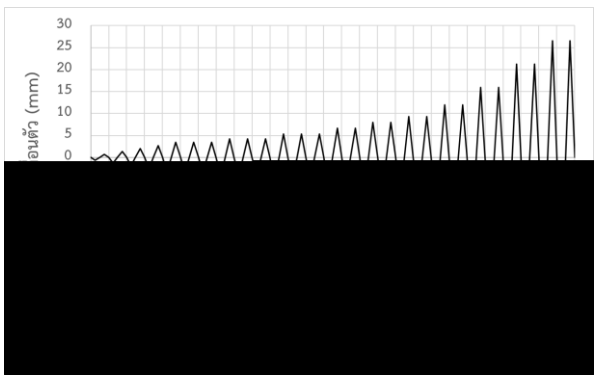
รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบจุดต่อระหว่างเสากับองค์อาคารทแยงมุม

รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ANSI MH16.1-2023 [3] โดยจะเริ่มทำการทดสอบแบบสถิตก่อน ซึ่งการทดสอบจะติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3 และติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดระยะการเคลื่อนที่เพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัว ณ ขณะน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพื่อนำไปคำนวณเป็นระยะการเคลื่อนตัวของจุดต่อตามมาตรฐานการทดสอบสำหรับแบบวัฏจักรต่อไป ในการทดสอบแบบสถิตจะให้แรงกระทำตามแนวแกนของชิ้นส่วนองค์อาคารทแยงมุมเพิ่มขึ้นต่อเนื่องโดยหัวให้น้ำหนัก (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) - ความหนาองค์อาคารทแยงมุม (ระยะขอบ) – ความหนาเสา - ประเภท (T คือ ทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ F คือ ไฟไนต์เอลิเมนต์) ตัวอย่างอาทิเช่น TM1-1.5(2)D-2.75U-T หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่มีแรงดึงกระทำแบบสถิตชิ้นทดสอบที่ 1 ความหนาองค์อาคารทแยงมุม 1.5 มิลลิเมตร(ระยะขอบ 2D) ความหนาเสา 2.75 มิลลิเมตร ทดสอบในห้องปฏิบัติการ รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแสดงในตาราง ที่ 1 และ 2 ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ (Displacement) กับน้ำหนักบรรทุก (Load) ในบทความนี้ได้ทำการหักลบระยะการเคลื่อนที่เนื่องจากการแอ่นตัวของเสาแล้ว



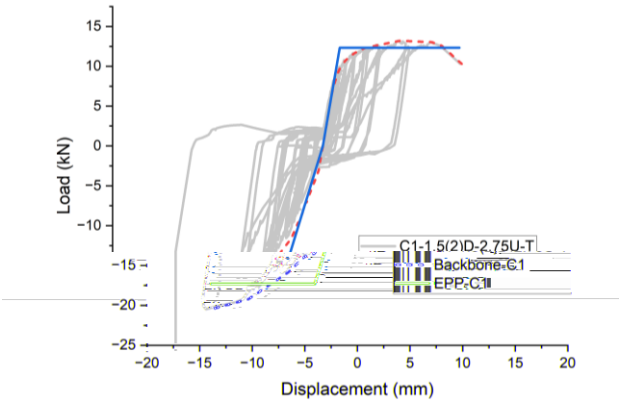
รูปที่ 4 การให้แรงกระทำแบบวัฏจักรควบคุมด้วยระยะการเคลื่อนตัว

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบจุดต่อสำหรับแรงกระทำแบบสถิต

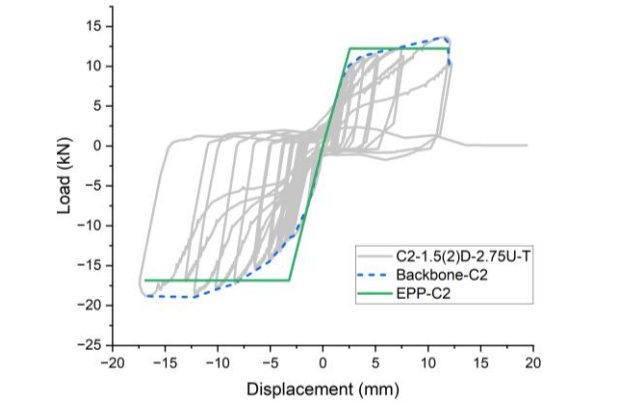
ชื่อตัวอย่าง	ความหนาองค์อาคารทแยงมุม t_d (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะองค์อาคารทแยงมุม d_d (mm)	ความหนาเสา t_u (mm)	ระยะขอบ
TM1-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
TM2-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
CM1-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D
CM2-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบจุดต่อสำหรับแรงกระทำแบบวัฏจักร

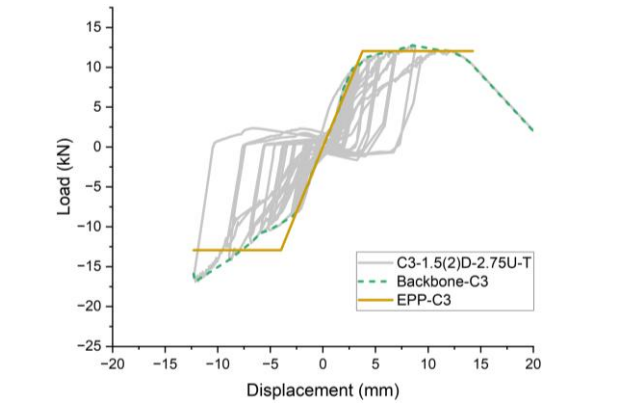
ชื่อตัวอย่าง	ความหนาองค์อาคารทแยงมุม t_d (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะองค์อาคารทแยงมุม d_d (mm)	ความหนาเสา t_u (mm)	ระยะขอบ
C1-1.5(2)D-2.75U-T	1.5	10	2.75	2D



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



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



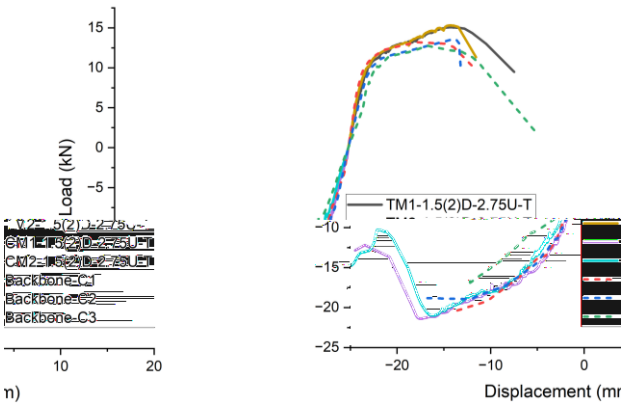
รูปที่ 9 ผลการทดสอบแบบวัฏจักร C3-1.5(2)D-2.75U-T

จากความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างทดสอบในรูปที่ 7 ถึง 9 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบกทานเฉลี่ยที่จุดครากและจุดวิบัติของการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบวัฏจักรมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงแบบวัฏจักร ดังแสดงในตารางที่ 4 ประมาณ 29 เปอร์เซ็นต์และ 42 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องโดยส่วนใหญ่กับงานวิจัยในอดีต [4] แต่ค่าสติฟเนสเฉลี่ย ณ จุดครากของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบวัฏจักรมีค่าสติฟเนสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดึงแบบวัฏจักรประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 ค่าสติฟเนส กำลังรับน้ำหนักและระยะการเคลื่อนตัวที่จุดครากและวิบัติสำหรับแรงกระทำแบบวัฏจักร

ชื่อตัวอย่าง	สติฟเนส k (kN/m)	กำลังรับน้ำหนักที่จุดคราก P_y (kN)	การเคลื่อนตัวที่จุดคราก Δ_y (mm)	กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติ P_u (kN)	การเคลื่อนตัวที่จุดวิบัติ Δ_u (mm)
แรงกระทำด้านดึงแบบวัฏจักร					
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**
แรงกระทำด้านอัดแบบวัฏจักร					
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 และแบบวัฏจักรในตารางที่ 4 ผลการทดสอบในรูปของเส้นกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) และผลจากการวิเคราะห์โดยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบลิเนียร์ สามารถนำมาเปรียบเทียบกันแสดงดังรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 รวมผลการทดสอบแบบสถิตและเส้นกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของแบบวัฏจักร

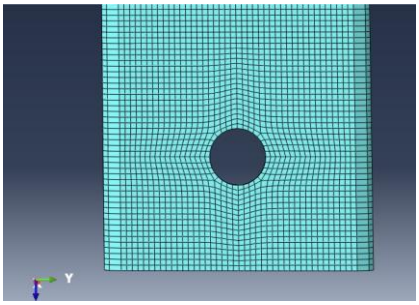
จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 จะสังเกตได้ว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบกทานที่จุดครากและจุดวิบัติของการทดสอบกำลังรับแรงแบบสถิตจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับแบบวัฏจักรในทุกกรณีทั้งแรงดึงและแรงอัด โดยกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยแบบวัฏจักรเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์ และ 87 เปอร์เซ็นต์ของจุดครากและจุดวิบัติของกำลังรับแรงดึงแบบสถิตตามลำดับ ส่วนกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยแบบวัฏจักรเท่ากับ 88 เปอร์เซ็นต์ และ 89 เปอร์เซ็นต์ ของจุดครากและจุดวิบัติของกำลังรับแรงอัดแบบสถิตตามลำดับ คาดการณ์ได้ว่ากำลังจะลดลงในช่วง 9 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

รูปที่ 11 รวมผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นอุดมคติแบบไบลิเนียร์ (EPP)

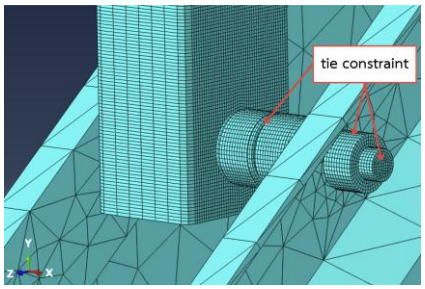
ส่วนค่าสติฟเนส ณ จุดคราก พบว่าแรงอัดแบบสถิตมีค่าสติฟเนสมากกว่าแรงอัดแบบวัฏจักรด้วยผลต่างเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแรงดึงแบบวัฏจักรมีค่าสติฟเนสเท่ากับ 86 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดึงแบบสถิต

3. แบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

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



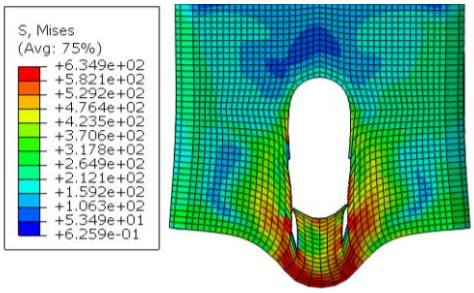
รูปที่ 14 ลักษณะตาข่ายขององค์อาคารทแยงมุมบริเวณจุดต่อ



รูปที่ 15 สลักเกลียว แหวนรอง น็อตและรูปแบบการยึดรั้ง “Tie Constraint”

3.3 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยให้แรงกระทำแบบแรงดึงสถิตพบว่าองค์อาคารทแยงมุมเกิดการวิบัติในลักษณะเฉือนแนวยาว (Longitudinal Shear Failure) ที่รูเจาะซึ่งเกิดความเค้นสูงสุดที่ 634.90 เมกะปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 16 รูปแบบของการวิบัติมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในกรณีของแรงดึงสถิตดังรูปที่ 17

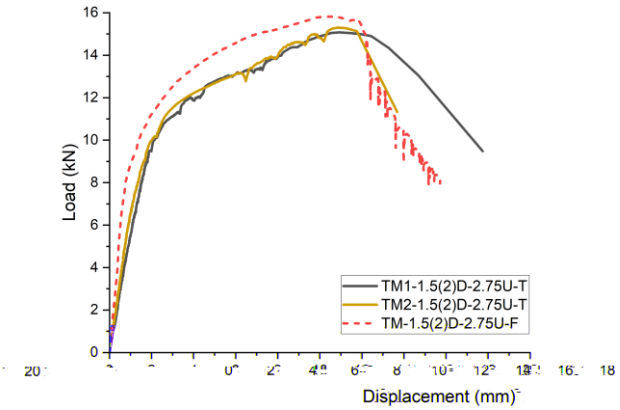


รูปที่ 16 การวิบัติจากการวิเคราะห์โดยแรงดึงแบบสถิตทางไฟไนต์เอลิเมนต์



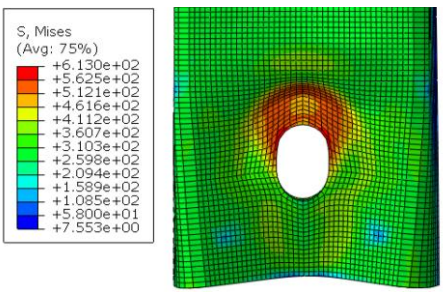
รูปที่ 17 การวิบัติจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากแรงดึงแบบสถิต

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลทดสอบภายในห้องปฏิบัติการจากแรงดึงแบบสถิตดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเนื่องจากแรงดึงแบบสถิต

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

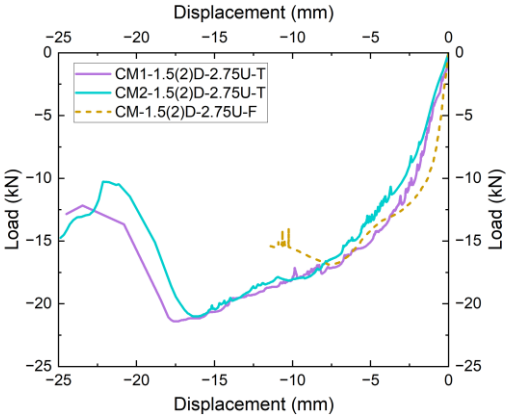


รูปที่ 19 การวิบัติจากการวิเคราะห์โดยแรงอัดแบบสถิตทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 20 การวิบัติจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจากแรงอัดแบบสถิต

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลทดสอบภายในห้องปฏิบัติการจากแรงอัดแบบสถิตได้ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 ผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเนื่องจากแรงอัดแบบสถิต

ตารางที่ 6 แบบจำลองเพื่อการศึกษาความอ่อนไหว

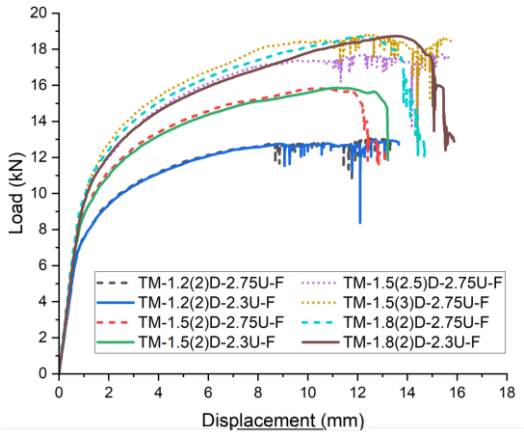
ชื่อตัวอย่าง	ความหนาองค์อาคารทแยงมุม t_d (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะองค์อาคารทแยงมุม d_d (mm)	ความหนาเสา t_u (mm)	ระยะขอบ
TM-1.2(2)D-2.75U-F	1.2	10	2.75	2D
TM-1.2(2)D-2.3U-F	1.2	10	2.3	2D
TM-1.5(2)D-2.3U-F	1.5	10	2.3	2D
TM-1.5(2.5)D-2.75U-F	1.5	10	2.75	2.5D
TM-1.5(3)D-2.75U-F	1.5	10	2.75	3D
TM-1.8(2)D-2.75U-F	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 พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบกทานเฉลี่ยของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีของแรงดึงแบบสถิตมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบกทานเฉลี่ยของการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีของแรงอัดแบบสถิตพบว่ามีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

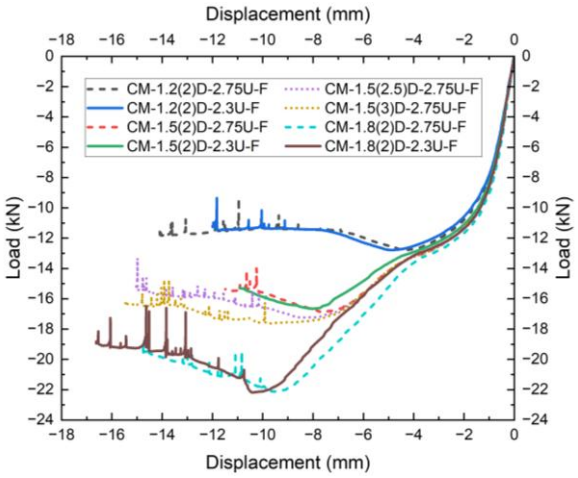
3.4 การศึกษาความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

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

ผลการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาขององค์อาคารทแยงมุม ความหนาของเสา และระยะขอบขององค์อาคารทแยงมุม แสดงดังรูปที่ 22 สำหรับแรงดึงสถิต และรูปที่ 23 สำหรับแรงอัดสถิต



รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์เนื่องจากแรงดึงแบบสถิต



รูปที่ 23 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์เนื่องจากแรงอัดแบบสถิต

จากผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากแรงดึงแบบสถิตดังรูปที่ 22 พบว่าเสาที่มีความหนา 2.3 มิลลิเมตร เคลื่อนตัวได้มากกว่าความหนา 2.75 มิลลิเมตร เนื่องจากมีช่วงความยาวของสลักเกลียวเพิ่มมากขึ้นทำให้สลักเกลียวเกิดการแอ่นตัวได้มากขึ้นโดยที่ความสามารถในการรับน้ำหนักไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเพิ่มความหนาขององค์อาคารทแยงมุม พบว่าสามารถรับน้ำหนักและเคลื่อนตัวได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะขอบ (End Distance) พบว่าที่ 2.5D (ระยะขอบ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) และ 3D (ระยะขอบ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) มีการพัฒนากำลังรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะขอบ 3D ขององค์อาคารทแยงมุมความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีกำลังรับน้ำหนักสูงสุดใกล้เคียงกับองค์อาคารทแยงมุมความหนา 1.8 มิลลิเมตร ที่ระยะขอบ 2D

ในส่วนของผลการวิเคราะห์เนื่องจากแรงอัดแบบสถิตดังรูปที่ 23 มีข้อสังเกตว่าที่ความหนาองค์อาคารทแยงมุม 1.2 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มระยะขอบ (End Distance) ที่ 2.5D และ 3D ทำให้เปลี่ยนรูปแบบเป็นการวิบัติโดยแรงอัดควบคุม (Compression Control) ซึ่งรูปแบบการเสียรูปคล้ายคลึงดังรูปที่ 19 โดยที่การเพิ่มความหนาขององค์อาคารทแยงมุมทำให้พัฒนากำลังรับน้ำหนักได้ดีกว่าการเพิ่มระยะขอบอย่างมากสำหรับการพิจารณาในส่วนของแรงอัดแบบสถิต โดยสรุปได้ดังตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์

ชื่อตัวอย่าง	ความหนาองค์อาคารทแยงมุม t_d (mm)	กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติ		รูปแบบการวิบัติ (แรงดึงควบคุม หรือ แรงอัดควบคุม)
		แรงดึงสถิต TM (kN)	แรงอัดสถิต CM (kN)	

[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

1