Damage index of steel storage rack connections under cyclic loading

[1], , ,

[1,2,4,5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
[3]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
Corresponding author; E-mail address: kanit.707@mail.kmutt.ac.th

ปัจจุบันมีการใช้งานชั้นวางสินค้าที่มีความสูงเป็นพิเศษเพิ่มมากขึ้น เพื่อ

(Human Cause) อย่างไรก็ตามโครงสร้างประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้งานในบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว



1 ชั้นวางสินค้าที่สูงเป็นพิเศษ

การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการทดสอบหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของจุดต่อคาน-เสา แบบให้แรงกระทำทิศทางเดียว (Monotonic Loading) และแบบแรงสลับทิศ (Cyclic Loading) และรวบรวมผลการทดสอบที่มีในอดีต จากนั้นนำมาวิเคราะห์การเสียรูป ที่จุดต่อ และการสลายพลังงานสะสม และนำมาคำนวณหาตัวประกอบและคำนวณหาดัชนีความเสียหาย (Damage Index) บริเวณจุดต่อคาน-เสาโครงสร้างชั้นวางเหล็ก เพื่อการประเมินความเสี่ยงภัยและระดับความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวหรือแรงกระทำด้านข้าง เป็นแนวทางการประเมินความสามารถในการใช้งานได้ของโครงสร้าง

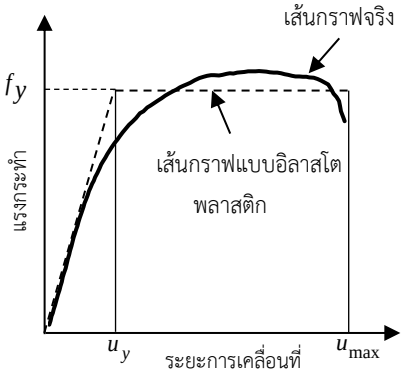
2. Park-Ang

ดัชนีความเสียหายหมายถึง ดัชนีที่ใช้วัดความเสียหายในเชิงปริมาณจากการคำนวณโดยอาศัยค่าการเสียรูปและปริมาณการสลายพลังงาน กล่าวคือโครงสร้างที่มีแรงภายนอกมากระทำเช่น แรงแผ่นดินไหว แรงกระทำด้านข้าง การเสียรูปและการสลายพลังงานจะทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งสามารถประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ด้วยการบอกระดับของดัชนีความเสียหาย โดยเกณฑ์พื้นฐานที่ใช้ในการบ่งบอกความเสียหายของโครงสร้างจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 คือไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับโครงสร้างและ 1 คือ มีความเสียหายเกิดขึ้นกับโครงสร้างจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งดัชนีความเสียหายที่ได้รับการยอมรับคือ ดัชนีความเสียหายของ Park-Ang โดยมีหลักการวิเคราะห์มาจากการรวมแบบเชิงเส้นของ ความเสียหายเนื่องจากการเสียรูปสูงสุดและความเสียหายเนื่องจากพลังงานความเครียดที่สลายไปในโครงสร้าง [1] สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E}{Q_y \delta_u} \qquad (1)$$

โดยที่ DI คือ ดัชนีความเสียหาย, δ_m คือ การเสียรูปสูงสุดภายใต้แรงสลับทิศ, δ_u คือ ค่าความสามารถในการเสียรูปสูงสุดภายใต้แรงทิศทางเดียว, β คือ ค่าคงที่สำหรับคำนวณค่าดัชนีความเสียหาย, E คือ พลังงานที่สลายภายใต้แรงสลับทิศ, Q_y คือ กำลังที่จุดครากที่ได้จากการคำนวณ

การคำนวณหาจุดครากในสมการข้างต้น สามารถประมาณด้วยวิธีการสร้างเส้นกราฟเส้นตรงสองความชัน (Bilinear curve) โดยเป็นการสมมุติว่าวัสดุที่รับแรงจนถึงจุดคราก แล้วไม่สนใจพฤติกรรมช่วงที่เกิดการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening) ในช่วงนี้วัสดุจะเกิดการยืดอย่างต่อเนื่องโดยที่แรงกระทำคงที่ หรือเรียกว่าการยืดแบบสมบูรณ์ (Perfectly Plastic) ดังนั้นแรงสูงสุดที่รับได้เท่ากับแรงที่จุดคราก แสดงดังรูปที่ 2

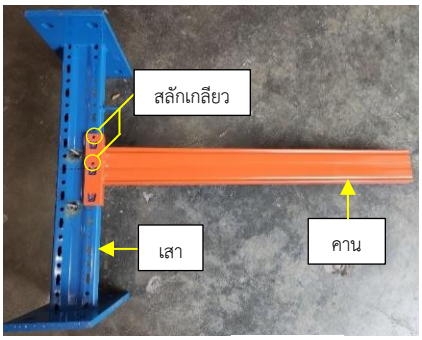


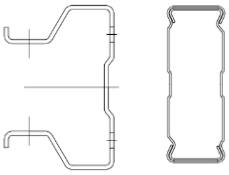
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนที่ของเส้นกราฟจริงและเส้นกราฟแบบอิลาสโตพลาสติกเพื่อหากำลังคราก

การเสียรูปสูงสุดภายใต้แรงทิศทางเดียว (δ_u)และแรงสลับทิศ (δ_m) หาจากมุมที่จุดต่อหมุนไปมากที่สุดก่อนจุดต่อวิบัติ โดยกำหนดเกณฑ์การวิบัติว่า โมเมนต์ลดลงจากค่าสูงสุดเหลือร้อยละ 85 ของโมเมนต์สูงสุด สำหรับการหาพลังงานที่สลายไปภายใต้แรงกระทำสลับทิศ (E) สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟโมเมนต์กับมุมหมุนภายใต้แรงสลับทิศ

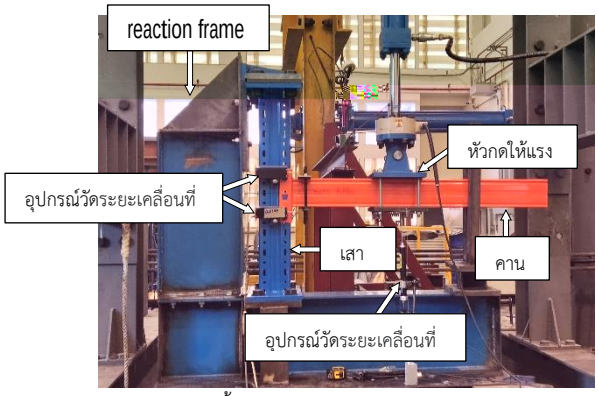
3.

ในการศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบการเสียรูปของชิ้นส่วนจุดต่อคานเสาเมื่อรับแรงทิศทางเดียว(Monotonic Loading) และแบบแรงสลับทิศ (Cyclic Loading) จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์การเสียรูปที่จุดต่อคานเสา และการสลายพลังงานสะสม เพื่อนำมาหาค่าคงที่ β ตัวอย่างการทดสอบเป็นการจำลองจากจุดต่อคานเสาของโครงสร้างชั้นวางเหล็กในลักษณะเสาตั้งและมีคานยื่น บริเวณจุดต่อระหว่างคานกับเสาเป็นแบบเสียบล็อคเข้าด้วยกัน โดยที่เสามีรูเจาะตลอดแนวความสูง ปลายคานเชื่อมเข้ากับแผ่นเหล็กที่มีตะขอสำหรับเกี่ยวรูเจาะของเสา ตัวอย่างจุดต่อคาน-เสาแสดงดังรูปที่ 3 และรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานEN 15512 [2] การทดสอบติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 4 สำหรับวัดการเคลื่อนที่เพื่อนำไปคำนวณเป็นมุมหมุนของจุดต่อ การทดสอบให้แรงกระทำคานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ กรณีให้แรงสลับทิศจะใช้รูปแบบการให้แรงโดยควบคุมมุมหมุนดังรูปที่ 5



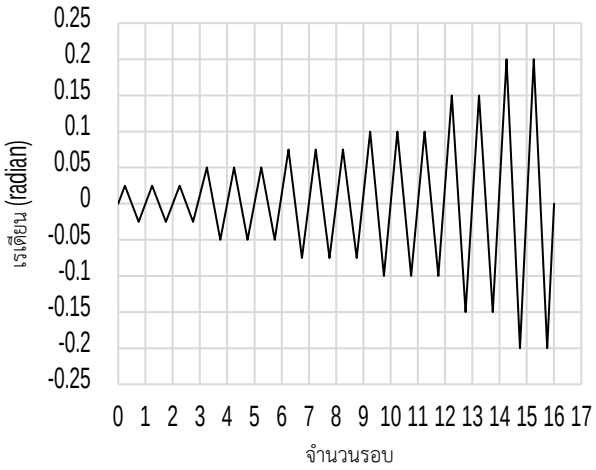


ตัวอย่างทดสอบจุดต่อคานเสา



การติดตั้งและเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

การกำหนดชื่อของตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย ความหนาเสา-ความหนาคาน-จำนวนกลักเกลียว-ชนิดของการให้แรง (M คือ Monotonic และ C คือ Cyclic) ตัวอย่างอาทิเช่น 2.75U-110B-2B-M หมายถึง ตัวอย่างที่มีความหนาเสา 2.75 มิลลิเมตร ความลึกคาน 110 มิลลิเมตร ใส่สลักเกลียว 2 ตัว และให้แรงแบบทิศทางเดียว รายละเอียดตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 1 และ 2



การให้แรงโดยควบคุมด้วยมุมหมุน

รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบจุดต่อแบบแรงทิศทางเดียว

ชื่อตัวอย่าง	d_b (mm)	t_u (mm)	t_b (mm)	T
2.75U-110B-3T-2B-M	110	2.75	1.5	3
2.3U-110B-3T-2B-M	110	2.30	1.5	3
2.0U-110B-3T-2B-M	110	2.00	1.5	3
2.75U-110B-3T-1B-M	110	2.75	1.5	3
2.3U-110B-3T-1B-M	110	2.3	1.5	3
2.0U-110B-3T-1B-M	110	2.0	1.5	3

หมายเหตุ d_b คือความลึกคาน (มิลลิเมตร), t_u คือความหนาเสา (มิลลิเมตร), t_b คือความหนาคาน (มิลลิเมตร), T คือจำนวนตะขอเกี่ยว

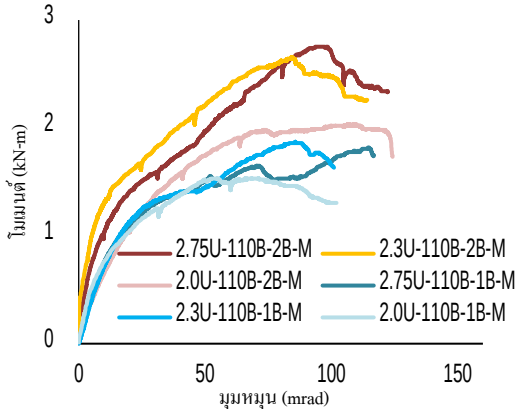
รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบจุดต่อแบบแรงสลับทิศ

ชื่อตัวอย่าง	d_b (mm)	t_u (mm)	t_b (mm)	T
2.75U-110B-3T-2B-C	110	2.75	1.5	3
2.3U-110B-3T-2B-C	110	2.30	1.5	3
2.0U-110B-3T-2B-C	110	2.00	1.5	3
2.75U-110B-3T-1B-C	110	2.75	1.5	3
2.3U-110B-3T-1B-C	110	2.3	1.5	3
2.0U-110B-3T-1B-C	110	2.0	1.5	3

หมายเหตุ d_b คือความลึกคาน (มิลลิเมตร), t_u คือความหนาเสา (มิลลิเมตร), t_b คือความหนาคาน (มิลลิเมตร), T คือจำนวนตะขอเกี่ยว

3.1 ผลการทดสอบจุดต่อแบบให้แรงทิศทางเดียว

จากการทดสอบนำข้อมูลที่บันทึกมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และมุมหมุนของแต่ละจุดต่อ ได้ดังรูปที่ 6 และค่าโมเมนต์และมุมหมุนสูงสุดแสดงได้ดังตารางที่ 3



ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และมุมหมุนแบบแรงทิศทางเดียว

โมเมนต์และมุมหมุนสูงสุดแบบให้แรงทิศทางเดียว

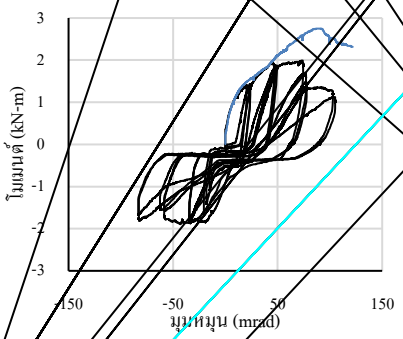
ชื่อตัวอย่าง	โมเมนต์บวกสูงสุด M^{+}_{max} kN-m	มุมหมุนบวกสูงสุด θ^{+}_{max} mrad	รูปแบบการวิบัติ
2.75U-110B-2B-M	2.75	80.53	W
2.3U-110B-2B-M	2.65	89.88	W
2.0U-110B-2B-M	2.03	124.26	W
2.75U-110B-1B-M	1.82	116.94	T
2.3U-110B-1B-M	1.87	101.03	T+C
2.0U-110B-1B-M	1.53	102.09	T+C

หมายเหตุ W = รอยแตงเฉือนบริเวณคานช่วง, T = คอนกรีตยึดขยาย, C = รูปแบบของเสา

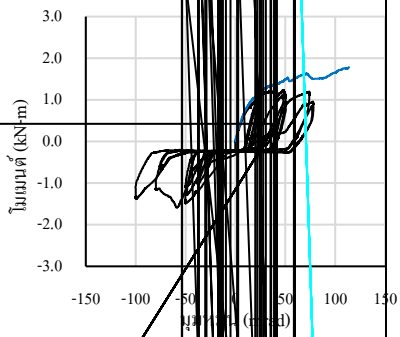
จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และมุมหมุนของตัวอย่างในรูปที่ 6 พบว่า เมื่อจุดต่อคาน-เสารับโมเมนต์จนถึงจุดสูงสุดแล้ว กำลังรับแรงจุดต่อจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงที่ตะขอบนและล่างขาด การใส่สลักเกลียวบริเวณตรงกลางจะทำหน้าที่เป็นจุดต่อหมุด (pined joint) กล่าวคือ เป็นสลักนิรภัย ช่วยป้องกันไม่ให้จุดต่อวิบัติแบบทันทีทันใด ผลของการใส่สลักเกลียวพบว่าจุดต่อที่ใส่สลักเกลียว 2 ตัว สามารถรับโมเมนต์ดัดได้สูงกว่าจุดต่อที่ใส่สลักเกลียว 1 ตัว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาผลกระทบของการใส่สลักเกลียว [3]

3.2 ผลการทดสอบจุดต่อแบบให้แรงสลับทิศ

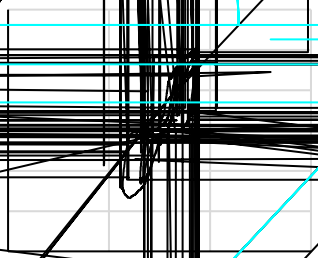
จากการทดสอบตัวอย่างภายใต้แรงสลับทิศและนำผลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และมุมหมุนแบบเป็นวงรอบ (hysteresis loop) ของแต่ละตัวอย่างทดสอบ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการรับแรงดัดของจุดต่อแบบให้แรงทิศทางเดียว ได้ดังรูปที่ 7 ถึง 12



ผลการทดสอบ2.75U-110B-2B-Cและ 2.75U-110B-2B-M



ผลการทดสอบ2.75U-110B-1B-Cและ 2.75U-110B-1B-M



ผลการทดสอบ2.3U-110B-2B-Cและ 2.3U-110B-2B-M

ผลการทดสอบ2.3U-110B-1B-Cและ 2.3U-110B-1B-M

ผลการทดสอบ2.0U-110B-2B-Cและ 2.0U-110B-2B-M

ผลการทดสอบ2.0U-110B-1B-Cและ 2.0U-110B-1B-M

จากผลการทดสอบแบบให้แรงสลับทิศนำมาเขียนเป็นเส้นกำลังหลัก (backbone curve) แสดงดังรูปที่ 13 จากรูปแสดงให้เห็นว่า จุดต่อที่ใส่สลักเกลียว 2 ตัว ส่งผลให้สามารถรับโมเมนต์ดัดได้สูงกว่า จุดต่อที่ใส่สลักเกลียวตัวเดียว สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบให้แรงทิศเทางเดียว และในช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น จุดต่อที่ใส่สลักเกลียว 2 ตัว และ 1 ตัว ค่ามุมหมุนสูงสุดที่รับได้มีค่าที่ใกล้เคียงกันหมายความว่า การใส่สลักเกลียวไม่ส่งผลในเชิงบวกต่อความเหนียวของจุดต่อ

3.3 ลักษณะความเสียหาย

ลักษณะความเสียหายของจุดต่อแบบให้แรงทิศทางเดียวคล้ายกับแบบให้แรงสลับทิศ โดยความเสียหายที่สังเกตได้ด้วยตา ได้แก่ ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม ความเสียหายบริเวณตะขอเกี่ยว และความเสียหายบริเวณแผ่นเหล็กปลายคานรูปแบบความเสียหายแบบต่างๆสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1.ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมระหว่างคานกับแผ่นเหล็ก รอยเชื่อมขาดจนถึงกึ่งกลางของคาน ตัวอย่างความเสียหายเนื่องจากรอยเชื่อมขาดแสดงดังรูปที่ 14

เส้นกำลังหลัก (backbone curve) ของการทดสอบจุดต่อภายใต้แรงดัดแบบให้แรงสลับทิศ

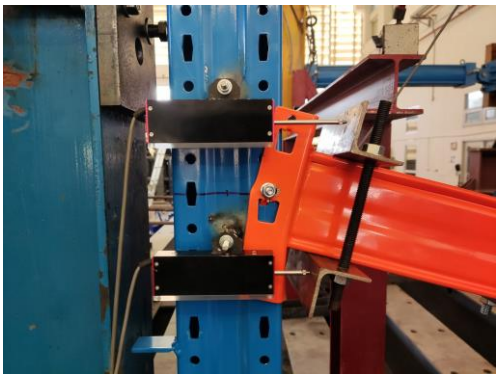
จากรูปที่ 7 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับมุมหมุนของผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้แรงสลับทิศจะได้ค่ากำลังน้อยกว่าผลการทดสอบแบบให้แรงทิศทางเดียว ทั้งนี้เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นคือผลรวมเชิงเส้นของความเสียหายอันเนื่องมาจากการเสียรูปสูงสุด และ ความเสียหายอันเนื่องมาจากการสลายพลังงาน การทดสอบแบบให้แรงสลับทิศทำให้จุดต่อต้องสลายพลังมากกว่าการทดสอบแบบให้แรงทิศทางเดียว จึงเกิดความเสียหายเนื่องจากการสลายพลังงานมากกว่า เป็นผลให้โมเมนต์ดัดที่รับได้น้อยลง

ลักษณะการวิบัติที่รอยเชื่อมคานของตัวอย่าง 2.75U-110B-2B-M

2.ความเสียหายบริเวณตะขอเกี่ยวเสา เนื่องจากตะขอรับแรงดัดจนเกินความสามารถของตะขอ จนตะขอขาดแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 15 รูปแบบนี้เป็นรูปแบบความเสียหายที่ควรจะเป็น เพราะตะขอทำหน้าที่รับแรงเต็มประสิทธิภาพ

ค่าโมเมนต์และมุมหมุนสูงสุดแบบให้แรงสลับทิศ (Cyclic Loading)

ชื่อตัวอย่าง	โมเมนต์บวกสูงสุด M^{+}_{max} kN-m	โมเมนต์ลบสูงสุด M^{-}_{max} kN-m	มุมหมุนบวกสูงสุด θ^{+}_{max} mrad	มุมหมุนลบสูงสุด θ^{-}_{max} mrad	รูปแบบการวิบัติ
2.75U-110B-2B-C	1.99	1.89	94.42	62.34	W+T



ก)



ข)

ลักษณะการวิบัติที่ตะขอของตัวอย่าง 2.75U-110B-1B-M

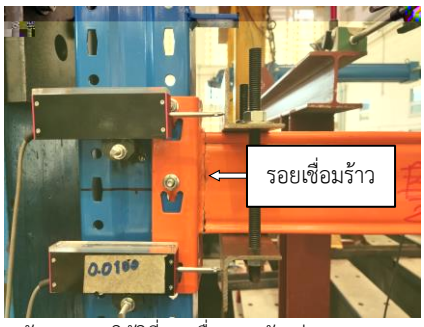
ก) ภาพด้านหน้าจุดต่อ ข) ภาพด้านหลังจุดต่อ

3.ความเสียหายบริเวณรูเจาะเสา เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังจากตะขอเกี่ยวเสียรูป โดยปกติรูเจาะของเสามักจะไม่เสียหายเพราะว่า เสามักจะแข็งมากกว่าตะขอ กรณีนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อ ความหนาเสาน้อยเกินไป หรือสลักเกลียวนิรภัยที่ใส่เข้าไปเกิดการต้านการหมุนที่จุดต่อ



ลักษณะการวิบัติที่รูเจาะเสาของตัวอย่าง 2.75U-110B-1B-M

จากการทดสอบพบว่าการใส่สลักเกลียว 2 ตัว และ 1 ตัว มีรูปแบบความเสียหายที่ต่างกัน การใส่สลักเกลียว 1 ตัว พบความเสียหายส่วนใหญ่บริเวณ ตะขอเกี่ยว เมื่อเพิ่มสลักเกลียวเป็น 2 ตัว ทำให้รูปแบบความเสียหายเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมแทน เนื่องจากสลักเกลียวช่วยรับแรง ทำให้บริเวณรอยเชื่อมที่เป็นจุดที่อ่อนกว่าสลักเกลียวและเป็นจุดที่เกิดความเข้มข้นความเค้นสูงจึงเกิดรอยร้าวและพัฒนาจนจุดต่อวิบัติดังรูปที่ 17



ลักษณะการวิบัติที่รอยเชื่อมของตัวอย่าง 2.75U-110B-2B-C

4.

เนื่องจากการศึกษาหาดัชนีความเสียหายของจุดต่อคานเสาเมื่อได้รับแรงแผ่นดินไหว ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่แตกต่างกัน เพื่อให้การวิเคราะห์ความเสียหายครอบคลุมปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อความเสียหาย จึงต้องใช้ข้อมูลผลทดสอบจำนวนมากมาวิเคราะห์ การศึกษานี้จึงรวบรวมผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดสอบที่ทำในการศึกษานี้ แสดงดังตารางที่ 5

รายละเอียดตัวอย่างที่รวบรวมจากงานวิจัยในอดีต

ชื่อตัวอย่าง	d_b (mm)	t_u (mm)	t_b (mm)	T
70ECCS 2.0C-70B-3 [4]	70	2.0	1.5	3
2.0C-100B-3-twobolt [7]	100	2.0	1.5	3
2.0C-100B-3-lowerbolt [7]	100	2.0	1.5	3
2.0C-100B-3-upperbolt [7]	100	2.0	1.5	3
2.0C-100B-3-boltless [7]	100	2.0	1.5	3
1.8C2-120B-3TB [3], [5]	120	1.8	1.5	3
2.3C2-105B-3TB [3], [5]	105	2.3	2.0	3
2.6UT-105BD-5L [6]	105	2.6	1.5	5
2.0UT-105BD-5L [6]	105	2.0	1.5	5
C-m1 2.5C-130B-5 [8]	130	2.5	1.5	5
130ECCS 2.0C-130B-3 [4]	130	2.0	2.0	3
2.3C2-120B-3TB [3], [5]	120	2.3	1.5	3
2.8C2-120B-3TB [3], [5]	120	2.8	1.5	3
2.3C2-120B-2TB [3], [5]	120	2.3	1.5	2
2.0C-121B-4 [9]	121	2.0	1.5	4
2.3C2-145B-3TB [3], [5]	145	2.3	1.5	3

หมายเหตุ d_b คือความลึกคาน (มิลลิเมตร), t_u คือความหนาเสา (มิลลิเมตร), t_b คือความหนาคาน (มิลลิเมตร), T คือจำนวนตะขอเกี่ยว

5. การหาค่าคงที่ β

การหาค่า β ที่เหมาะสมจะทำโดยทำนายค่า β ตั้งแต่ 0.12 ถึง 0.22 ที่จะทำให้คำนวณหาดัชนีความเสียหายใกล้เคียง 1 จากนั้นคำนวณหาดัชนีความเสียหายจากสมการที่ 1 จากแต่ละตัวอย่าง ค่า β ที่เหมาะสมจะหาโดยใช้วิธีทางสถิติหาช่วงความเชื่อมั่นจากค่า DI ที่คำนวณได้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่า β ที่เหมาะสม จะคำนวณหาดัชนีความเสียหายโดยให้ขอบเขตล่างของช่วงความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับ 1 หรือมากกว่า เพราะจะมั่นใจว่าค่า β ที่นำไปใช้คำนวณหาดัชนีความเสียหายมีความปลอดภัย ดังตารางที่ 6 ค่า β ที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 0.22 โดยมีดัชนีความเสียหายมีช่วงขอบเขตล่างและขอบเขตบนเท่ากับ 1.01ถึง1.26 ซึ่งคำนวณจากตัวอย่างทดสอบจำนวน 22 ตัวอย่าง

ค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ของค่าดัชนีความเสียหาย

ช่วงความเชื่อมั่น	ค่าคงที่ β					
	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22
ค่าดัชนีความเสียหายเฉลี่ย	0.93	0.97	1.01	1.06	1.10	1.15
ระดับความเชื่อมั่น	95	95	95	95	95	95
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.20	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27
จำนวนตัวอย่าง	22	22	22	22	22	22
ค่าความเชื่อมั่น	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11
ค่าขอบเขตล่าง	0.84	0.88	0.92	0.96	0.99	1.03
ค่าขอบเขตบน	1.01	1.06	1.11	1.16	1.21	1.26

6.

เมื่อนำค่า β ที่เหมาะสมที่ 0.22 นำมาคำนวณดัชนีความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่จุดต่อรับโมเมนต์ถึงจุดครากและรับโมเมนต์ถึงจุดสูงสุด เพื่อหาระดับความเสียหาย ผลการคำนวณได้ค่าดัชนีความเสียหายที่จุดการรับแรงต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 7

ดัชนีความเสียหาย ที่การรับแรงระดับต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ดัชนีความเสียหายที่จุดคราก	ดัชนีความเสียหายที่จุดกำลังรับแรงสูงสุด
2.75U-110B-3T-2B	0.25	0.88
2.3U-110B-3T-2B	0.41	0.83
2.0U-110B-3T-2B	0.27	0.86
2.75U-110B-3T-1B	0.14	0.90
2.3U-110B-3T-1B	0.29	0.64
2.0U-110B-3T-1B	0.27	0.94
เฉลี่ย	0.27	0.84

ค่าดัชนีความเสียหายมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าดัชนีความเสียหายเท่ากับ 0 หมายถึงไม่เกิดความเสียหาย และค่าดัชนีความเสียหายเท่ากับ 1 หมายถึงเกิดความเสียหายจนตัวอย่างวิบัติ จากตารางที่ 7 พบว่า จุดต่อคานเสารับโมเมนต์ถึงจุดคราก มีค่าดัชนีความเสียหายเฉลี่ย 0.27 และเมื่อจุดต่อคานเสารับโมเมนต์ถึงจุดสูงสุด พบว่าดัชนีความเสียหายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.84 แสดงว่าจุดต่อสามารถเกิดความเสียหายได้อีกเพียงเล็กน้อยก่อนวิบัติ นั้นหมายความว่าจุดต่ออยู่ในเกณฑ์ที่อันตรายมากเพียงพอที่จะทำให้จุดต่อเกิดการวิบัติได้ ดังนั้นไม่ควรให้จุดต่อรับโมเมนต์จนถึงค่าสูงสุด จึงใช้เกณฑ์ที่จุดครากและจุดสูงสุดกำหนดระดับความเสียหาย โดยที่กำหนดให้ช่วงที่รับแรงต่ำกว่าจุดคราก คือระดับปลอดภัย ช่วงที่รับแรงมากกว่าจุดครากแต่น้อยกว่าจุดสูงสุด คือระดับที่เกิดความเสียหายขึ้นแต่สามารถซ่อมแซมหรือแก้ไขได้ และช่วงที่รับแรงมากกว่าจุดสูงสุด คือระดับความเสียหายหายมากเข้าใกล้จุดวิบัติ ระดับค่าดัชนีความเสียหายสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8

เกณฑ์การพิจารณาระดับความเสียหาย

การพิจารณา	ไม่เสียหาย	เสียหายเล็กน้อยสามารถแก้ไขหรือซ่อมแซมได้	เสียหายมาก
ดัชนีความเสียหาย (DI)	$\leq$ 0.25	0.26-0.74	$\geq$ 0.75

7.

งานวิจัยนี้เสนอผลการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดของจุดต่อคาน-เสาแบบให้แรงกระทำทิศทางเดียว (Monotonic Loading) และแบบแรงสลับทิศ (Cyclic Loading) เพื่อใช้ในการคำนวณหาดัชนีความเสียหาย (Damage Index) บริเวณจุดต่อคานเสาโครงสร้างชั้นวางสินค้าเหล็ก เพื่อการประเมินความเสี่ยงภัยและระดับความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวหรือแรงกระทำด้านข้าง ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเสียหายที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อม ความเสียหายบริเวณตะขอเกี่ยว และความเสียหายบริเวณรูเจาะเสา โดยที่ความเสียหายบริเวณรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กกับคาน พบว่ามีความเสี่ยงที่รอยเชื่อมคานจะเกิดการขาดในทันทีทันใด เป็นความเสียหายที่ต้องควบคุมและหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเสียหายในลักษณะนี้
2. จำนวนสลักเกลียว และความหนาเสาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังที่จุดต่อรับได้เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลเชิงบวกต่อความเหนียวของจุดต่อ
3. ค่าคงที่ β สำหรับการคำนวณดัชนีความเสียหายที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 0.22 โดยใช้วิธีทางสถิติคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และ ค่าคงที่ β ที่เหมาะสมอาจเปลี่ยนแปลงได้ ถ้าหากมีจำนวนตัวอย่างทดสอบเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ครอบคลุมจุดต่อหลายขนาดและหลายรูปแบบ
4. เกณฑ์การพิจารณาระดับความเสียหายกำหนดดังนี้ ดัชนีความเสียหายมีค่าน้อยกว่า 0.25 ไม่เกิดความเสียหาย ดัชนีความเสียหายมีค่าอยู่ระหว่าง 0.26-0.74 เสียหายเล็กน้อยสามารถซ่อมแซมได้ และสุดท้ายดัชนีความเสียหายมีค่ามากกว่า 0.75 ความเสียหายสูงมากเข้าใกล้จุดวิบัติ

8.

[1] Young-Ji Park1 and Alfredo H.-S. Ang,2 F. ASCE (1985). MECHANISTIC SEISMIC DAMAGE MODEL FOR REINFORCED CONCRETE. Journal of Structural Engineering, pp. 723-732.

[2] European Standard (2019). Steel static storage systems - Adjustable pallet racking systems - Principles for structural design (EN 15512). pp. 98-103

[3] Liusi Dai, Xianzhong Zhao,and Kim J.R. Rasmussen (2018). Cyclic performance of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. Journal of Constructional Steel Research, pp. 31-35.

[4] Carlo Andrea Castiglioni. Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems (2016). Dynamics of Structures. University of California at Berkeley, pp. 79-80, 82-83, 91-92, 94-97, 94-97.

[5] Liusi Dai, Xianzhong Zhao,and Kim J.R. Rasmussen (2018). Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. Thin-Walled Structures, pp. 210-213.

[6] Mahdi Shariatia (2018). Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections. Engineering Failure Analysis, pp. 160-162.

[7] Lingfeng Yin, Gan Tang (2016). Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks. Engineering Structures, pp. 45-50.

[8] Federico Gusella, Giovanni Lavacchini, Maurizio Orlando (2018). Monotonic and cyclic tests on beam-column joints of industrial pallet racks. Journal of Constructional Steel Research, pp. 101-103.

[9] Carlos Aguirre (2005). Seismic behavior of rack structures. Journal of Constructional Steel Research, pp. 616-619.

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ภายใต้แผนกงาน Spearhead ด้านเศรษฐกิจ ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) และได้รับการสนับสนุนวัสดุทดสอบจากบริษัทแม่น้ำเมคคานิกา