



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate
ที่ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

Evaluation of Flexural Strength and Ductility of Steel Beam-Column End-Plate
Connections Constructed in Thailand under Earthquake Load

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2559A10802009

สัญญาเลขที่ ๑๔๘/๒๕๕๙

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate
ที่ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

Evaluation of Flexural Strength and Ductility of Steel Beam-Column End-Plate
Connections Constructed in Thailand under Earthquake Load

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน ๒๕๖๑

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

Evaluation of Flexural Strength and Ductility of Steel Beam-Column End-Plate Connections Constructed in Thailand under Earthquake Load

รหัสโครงการ 2559A10802009 สัญญาเลขที่ ๑๔๘/๒๕๕๙ ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น ๖๐๓,๙๐๐ บาท (หกแสนสามพันเก้าร้อยบาท)

ระยะเวลาการดำเนินงาน ๑ ปี (ต.ค.๒๕๕๙-ก.ย.๒๕๖๐)

บทคัดย่อ

Three large bolted end-plate steel moment-resisting connection were experimentally studied. These connections were single-sided beam-column assemblies that representative of exterior beam-column connections. ST1, ST2, and ST3, the designate names for the test specimens, were composed of H300x94 kg/m Grade SS400/SM400 columns and H300x56.8 kg/m, H400x66 kg/m, H500x79.5 kg/m as beams, respectively, with the same column grade. The specimens were built according to Thailand-steel practice with fully welding beam sections to the end-plates. Then, the end-plates were bolted to the column flanges eventually. The hysteretic behavior, plastic rotations, and failure modes are the studied reports. The findings illustrated that the smaller beam size specimen (ST1) shows less energy dissipation compared to the increased beam sizes specimens (ST2 and ST3). Increased beam sections demonstrate better hysteretic and failure behaviors. Fracture of weld between beam and end-plate observed for all specimens can be concluded that the fillet weld with current practice is inadequate to deliver the plastic moment capacity of beams. End-plated connections with Thailand-steel practice show an insufficient ductility for strong wind or seismic applications.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2559 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	15
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	28
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	50
เอกสารอ้างอิง	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การก่อสร้างด้วยโครงสร้างเหล็กกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างเหล็กสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและสะดวกกว่าโครงสร้างคอนกรีต และคุณสมบัติของเหล็กที่สามารถรับแรงอัดและแรงดึงได้ดี เนื่องจากเหล็กผลิตด้วยกรรมวิธีที่มีการควบคุมคุณภาพที่ดี ทำให้ไม่มีปัญหาด้านโครงสร้างวัสดุ นอกจากนี้โครงสร้างเหล็กยังมีคุณสมบัติด้านความเหนียวและกำลังหลังจุดครากที่สูง เมื่อรับแรงจึงไม่เกิดการวิบัติแบบฉับพลัน วิศวกรส่วนใหญ่จึงเชื่อว่าโครงสร้างเหล็กจะเสียหายน้อยมากเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวจะถูกสลายไปที่บริเวณข้อต่อและองค์อาคารยึดรั้งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นบริเวณข้อต่อและองค์อาคารยึดรั้งจึงควรมีความเหนียวเพียงพอที่จะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงรูป และสลายพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวโดยไม่มีรอยแตกร้าว

อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1994 ได้เกิดแผ่นดินไหวขึ้นที่เมือง Northridge ในประเทศ สหรัฐอเมริกา เมื่อสำรวจความเสียหายด้านโครงสร้าง พบว่า ความเสียหายส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นต่ำ เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อาคารคอนกรีตอัดแรง โดยอาคารเหล่านี้พังทลายทั้งอาคาร ส่วนอาคารโครงสร้างเหล็กนั้น พบความเสียหายเพียงเล็กน้อย และไม่พบการพังทลายของอาคารเหล็กเลย พบเพียงรอยแตกบริเวณข้อต่อคาน-เสาเป็นจำนวนมาก ซึ่งองค์อาคารเหล็กที่พบในเมือง Northridge นั้น ส่วนใหญ่เป็นโครงข้อแข็งแบบพิเศษ (Special Moment Frame, SMF) ซึ่งจากข้อกำหนดของ AISC ระบุว่า โครงสร้างเหล็กประเภทนี้มีความยืดหยุ่นสูงสุด สามารถรองรับการหมุนได้ไม่น้อยกว่า 0.03 radians เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว การค้นพบครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าโครงข้อแข็งที่ออกแบบตามมาตรฐานก่อนปี 1994 นั้น มีความเหนียวต่ำกว่าที่ควรจะเป็น จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับข้อต่อคาน-เสาเหล็กอย่างจริงจังเพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัยของอาคารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และพัฒนารูปแบบข้อต่อคาน-เสาเหล็กให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

สำหรับประเทศไทยนั้น ยังไม่เคยมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กที่ออกแบบโดยใช้มาตรฐานการออกแบบของประเทศไทยภายใต้แผ่นดินไหวอย่างจริงจัง และยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวโดยตรง ดังนั้นทำให้ปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กเหล่านี้ได้เหมือนกับที่เกิดขึ้นมาแล้วในประเทศอื่นๆ เมื่อเกิดแผ่นดินไหว นอกจากนี้รายละเอียดของการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กในประเทศไทย ก็แตกต่างไปจากมาตรฐานของประเทศอื่น ๆ ซึ่งรายละเอียดการก่อสร้างนี้ส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณข้อต่อ รอยต่อ และระบบยึดรั้ง ซึ่งส่วนเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งใน

การดูดซับพลังงานจากแผ่นดินไหว รายละเอียดการก่อสร้างที่ใช้ในประเทศไทยเหล่านี้ ยังมิได้รับการศึกษาอย่างจริงจังถึงศักยภาพและพฤติกรรมเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว การนำมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กในต่างประเทศมาใช้โดยตรงอาจเป็นการสิ้นเปลือง และอาจเป็นการไม่ถูกต้องเนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กในประเทศไทยอาจแตกต่างกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กในต่างประเทศ ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นการรวบรวม วิเคราะห์ และนำเสนอข้อมูลที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อโครงสร้างเหล็กที่ก่อสร้างอยู่ในประเทศไทย ซึ่งถูกออกแบบสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้ง และแรงลมเท่านั้น จากนั้นจะทำการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างนี้ว่าจะมีพฤติกรรมอย่างไรเมื่อต้องถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำ มีความสามารถและศักยภาพในการต้านแรงแผ่นดินไหวได้ในระดับใด โดยจะเน้นที่องค์อาคารที่เป็นจุดอ่อนต่อการต้านทานแผ่นดินไหว คือ ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อรวบรวมข้อมูลวิธีการออกแบบและการก่อสร้างข้อต่อคาน-เสาโครงสร้างเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทย (Typical Detail and Practice)
- 2) เพื่อประยุกต์ใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่มีอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการทดสอบข้อต่อคาน-เสาโครงสร้างเหล็กประเภท End-Plate ของเสาต้นริมโดยใส่แรงสลับทิศ
- 3) เพื่อทดสอบข้อต่อคาน-เสาประเภท End-Plate ที่เป็นตัวแทนของมาตรฐานการก่อสร้างในประเทศจากข้อที่ 1 ในห้องปฏิบัติการ
- 4) เพื่อศึกษาพฤติกรรม ศักยภาพ ความเหนียว และข้อบกพร่องที่อาจมี ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว และการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) เก็บข้อมูลข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ออกแบบโดยใช้มาตรฐานการออกแบบของประเทศไทยและข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดของ คุณสมบัติเหล็ก ลักษณะการต่อระหว่างคาน-เสา วัสดุเชื่อม สลักเกลียว ที่ใช้ในการก่อสร้างในประเทศไทย
- 2) สร้างตัวอย่าง และทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ของเสาต้นริมที่มีรายละเอียดการก่อสร้างเหมือนกับข้อมูลการก่อสร้างที่ได้รวบรวมมาในข้อ 1

- 3) วิเคราะห์ผลการทดสอบของตัวอย่างโดยการประเมินจากผลตอบสนอง ลักษณะการพัง ความยืดหยุ่น ความเหนียว และพลังงานแผ่นดินไหวที่ตัวอย่างทดสอบสามารถดูดซับได้ และหาสาเหตุของการทำให้ข้อต่อคาน-เสาชนิดนี้เสียหาย
- 4) เสนอแนะแนวทางการปรับปรุงพฤติกรรมข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างอยู่แล้ว หรือจะก่อสร้างในอนาคต เพื่อให้มีพฤติกรรมการรับแรงที่เหมาะสมกับผลกระทบของแรงแผ่นดินไหว ที่อาจเกิดขึ้นในประเทศไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการพัฒนาเครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยบูรพา ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่โดยใช้เครื่อง UTM ซึ่งจะเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยขั้นสูงต่อไป
- 2) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่นี้ จะทำให้ทราบถึงศักยภาพของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างตามมาตรฐานการก่อสร้างในประเทศไทย เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งยังไม่เคยมีการทดลองมาก่อน และจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาการใหม่ให้โครงสร้างประเภทนี้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในประเทศไทยได้โดยไม่พังทลาย และทำความเสียหายแก่ทรัพย์สิน

บทที่ 2

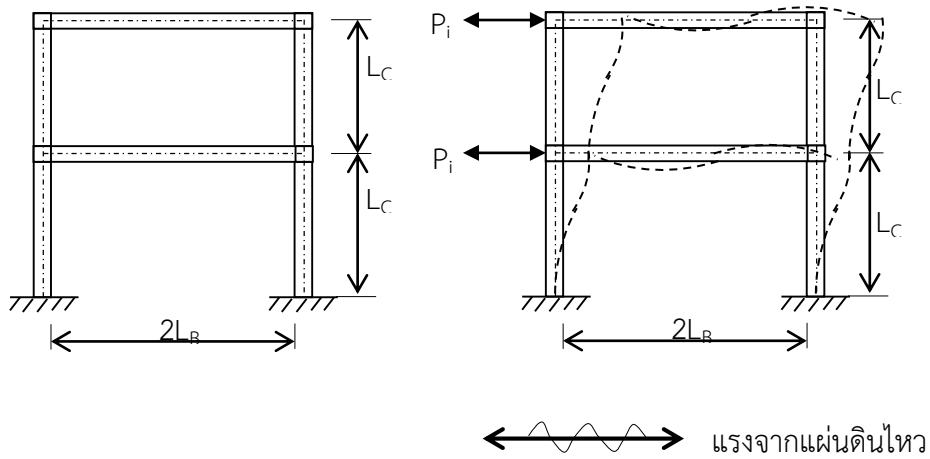
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างสากลคือ ภายใต้อาคารขนาดเล็จะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนหนึ่งส่วนใดของตัวอาคาร ภายใต้อาคารขนาดปานกลางจะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างที่รับแรง และภายใต้อาคารขนาดใหญ่ อาคารอาจเกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างรับแรงได้ แต่ต้องไม่พังถล่มลงมา เพื่อความปลอดภัยแก่ชีวิตผู้อยู่อาศัย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โครงสร้างจะต้องถูกออกแบบให้มีความเหนียวดีพอ เพื่อให้อาคารนั้นสามารถทนต่อการสั่นไหวจนถึงขั้นเกิดการแตกร้าว และเกิดการครากขององค์อาคารได้พอสมควร โดยยังคงกำลังส่วนใหญ่ไว้ได้ (80% ของกำลังสูงสุด) ดังนั้น เมื่อโครงสร้างเหล็ก ที่ถูกออกแบบรายละเอียดให้มีความเหนียวจะสามารถดูดซับพลังงานจากการสั่นไหวเมื่อเกิดแผ่นดินไหวได้ดี โดยที่รักษากำลังส่วนใหญ่ของอาคารไว้ได้ และไม่พังทลาย ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว ในทางตรงกันข้าม ถ้าโครงสร้างเหล็กมีส่วนหนึ่งส่วนใดเช่น ข้อต่อ ที่มีความเหนียวไม่เพียงพอหรือไม่แข็งแรงพอ ก็จะไม่สามารถรับแรงแผ่นดินไหว และแรงแนวตั้งต่อไปได้ และเกิดการวิบัติเสียก่อน และจะทำให้องค์อาคารรวมเกิดการวิบัติตามมาอย่างรวดเร็ว

โครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในเขตที่มีแผ่นดินไหว โดยเฉพาะในอาคารประเภทโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เหล็กนั้นโดยตัววัสดุเองเป็นวัสดุที่มีความเหนียวในตัว โดยมากแล้ววิศวกรจึงมีความเชื่อว่า โครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบเหนียวเช่นเดียวกับตัววัสดุ ในความเป็นจริงนั้นโครงสร้างเหล็กจะมีพฤติกรรมแบบเหนียวได้ จะต้องได้รับการออกแบบและให้รายละเอียดที่ถูกต้องเหมาะสม จากผลงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็ก รวมถึงข้อมูลที่น่าวิจัยรวบรวมมาได้จากแผ่นดินไหวในระยะหลังทำให้วิศวกรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กมากขึ้นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวมีการปรับปรุงเป็นอันมากในระยะหลัง อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันมักจะเน้นที่การศึกษาพฤติกรรมและหาวิธีการออกแบบอาคารเหล็กในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวสูง เช่น ชุดโครงการวิจัยของ Federal Emergency Management [16] และของ SAC Joint Venture โดยโครงการวิจัยเหล่านี้ เน้นไปที่การทดสอบจุดต่อระหว่างเสาและคานของโครงสร้างเหล็กที่ได้รับการออกแบบไว้เพื่อรับแรงไหว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอาคารเหล็กที่มีได้ออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว ยังมีอยู่น้อยมาก เช่นงานของ Astaneh-Asl et al. [11] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย มีงานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างเหล็กรับแรงแผ่นดินไหวน้อยมาก และไม่มีงานวิจัยใดเลยที่ศึกษาถึงความพร้อมและศักยภาพของโครงสร้างเหล็กที่มีอยู่เดิม ซึ่งถูกออกแบบตามมาตรฐาน

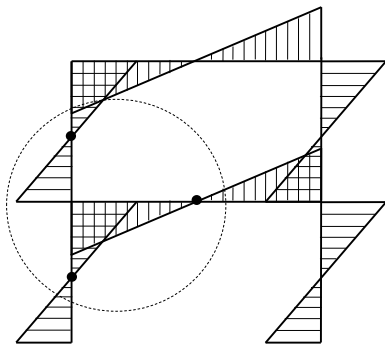
การออกแบบและก่อสร้างที่ใช้อยู่ในประเทศไทย โดยอาจเป็นตามมาตรฐาน AISC วิธี ASD หรือ LRFD ก็ตาม กล่าวอีกนัยหนึ่ง โครงสร้างเหล็กเหล่านี้มิได้ถูกออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวโดยตรง จึงอาจมีคำถามถึง พฤติกรรมความสามารถ และศักยภาพของโครงสร้างเหล็กเหล่านี้เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ถึงแม้ว่าประเทศไทย โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร อาจมีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็กถึงขนาดปานกลางก็ตาม

เมื่อโครงสร้างได้รับแรงแผ่นดินไหวอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน (Ground Motion) โครงสร้างจะเกิดการโยกตัวไปมาและความเร่งเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของโครงสร้าง ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้าง ต่อโครงสร้างซึ่งแรงนี้เป็นแรงเฉื่อยที่เกิดจากความเร่งและมวลของโครงสร้างนั่นเอง เมื่อเกิดความหน่วงจาก แรงแผ่นดินไหวแล้วส่วนต่างๆขององค์อาคารไม่สามารถเคลื่อนตัวไปพร้อมกับฐานรากได้จึงทำให้องค์อาคาร นั้นเกิดการเสียรูปโดยเฉพาะบริเวณข้อต่อคาน-เสาเหล็ก ซึ่งเป็นจุดที่อ่อนแอและได้รับความเสียหายมากที่สุด ดังนั้นเราจึงได้นำข้อต่อบริเวณนี้มาทำการทดสอบในรูปแบบของการรับแรงแบบแรงสลับ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ นำคาน-เสาเหล็ก ต้นนอกสุดขององค์อาคารมาทำการทดสอบ เนื่องจาก จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าเสา ต้นนอกสุดได้รับโมเมนต์มากที่สุดจากแรงที่มากระทำ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวแผ่นดินจะมีการเคลื่อนตัวในลักษณะ คลื่น (Wave) ทำให้เกิดแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏจักร (Cyclic Load) โดยมีลักษณะไป- กลับ (ซ้าย – ขวา) เมื่อโครงข้อแข็งเหล็กรับแรงแผ่นดินไหว จึงเสมือนว่าถูกแรงกระทำด้านข้างกระทำ ดัง แสดงในรูป 2.1ก และ 2.1ข ส่วนรูป 2.1ค แสดงไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของโครงข้อแข็งเหล็ก เมื่อรับแรง ด้านข้าง จะเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางเสาชั้นบน – ล่าง และจุดกึ่งกลางช่วงคาน จะเป็นจุดที่โมเมนต์ดัด เป็นศูนย์ (จุดดัดกลับของโมเมนต์ดัด) นั้นหมายความว่า ชิ้นส่วนคาน-เสาตรงบริเวณนี้ ซึ่งเป็นบริเวณข้อต่อระหว่างคาน กับเสา สามารถจำลองสภาพการใส่แรง และเงื่อนไขการยึดรั้งได้ดังรูปที่ 2.1ง กล่าวโดยสรุป ข้อต่อคาน-เสา แบบถ่ายโมเมนต์ของเสาต้นริม เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว สามารถจำลองลักษณะการใส่แรงได้ โดยใส่แรงวัฏจักร ที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงคาน โดยที่ปลายเสาทั้งบนและล่างจะมีเงื่อนไขของการยึดรั้งเป็นแบบสลัก (Pin Support) รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนจากคานสู่เสาเมื่อปลายคานได้รับแรงกระทำและ ปลายเสาเป็นการยึดรั้งแบบหมุนอิสระ ตามรูปพบว่าค่าโมเมนต์ดัดในเสาจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณปีกคานบนและ ปีกคานล่าง นอกจากนี้มีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกึ่งกลางเสา ส่วนค่าแรงเฉือนในเสามีค่าคงที่จากตำแหน่งรองรับ ด้านบนถึงบริเวณปีกคานด้านบนและมีค่าเท่ากับค่าแรงเฉือนจากปีกคานล่างถึงตำแหน่งรองรับด้านล่าง ส่วน ในพื้นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างปีกคานบนถึงปีกคานล่างค่าแรงเฉือนจะมีค่าสม่ำเสมอและมีค่าสูงสุด

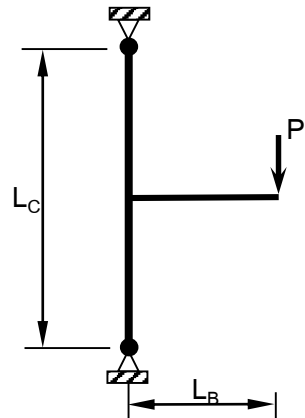


(ก) การจำลองโครงข้อแข็งหลักเพื่อวิเคราะห์
การรับแรงด้านข้าง

(ข) การจำลองการเสียรูปของโครงข้อแข็งหลัก
เมื่อรับแรงด้านข้าง

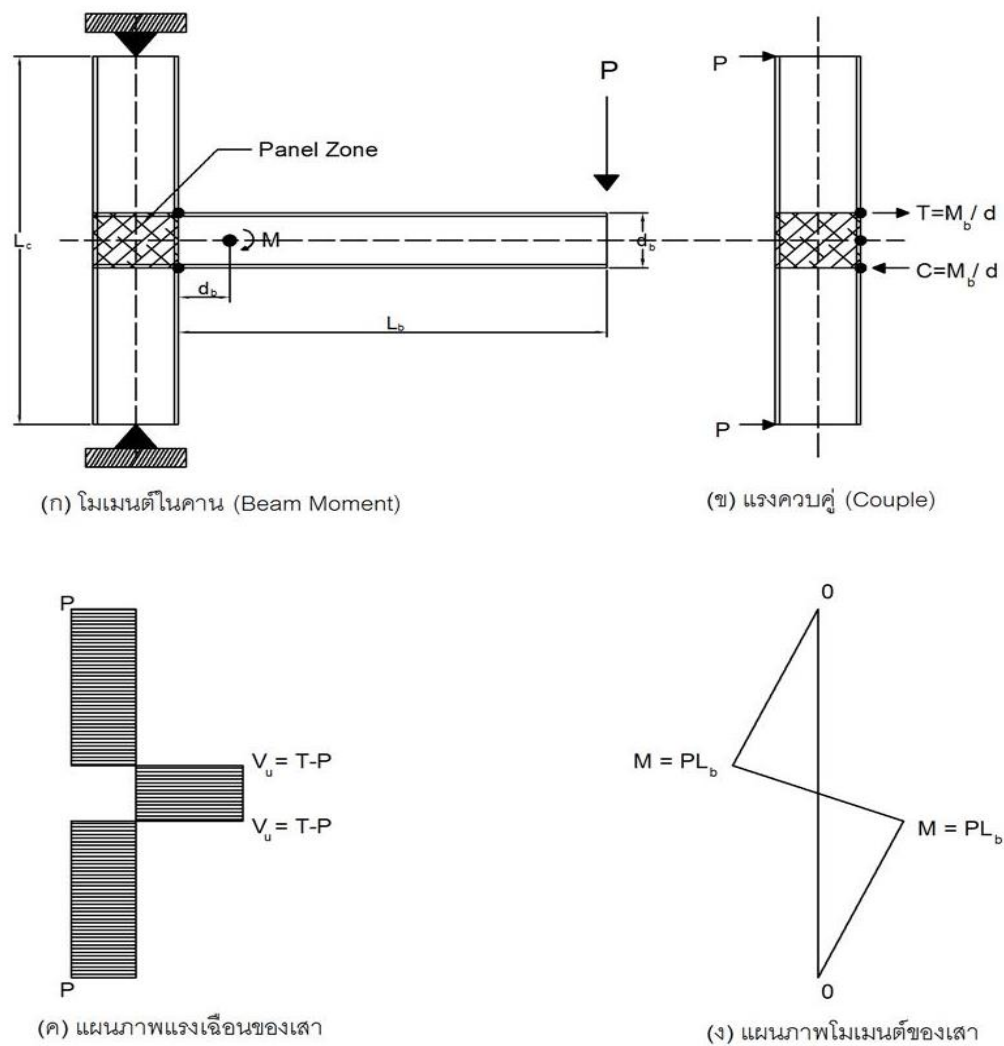


(ค) แผนภาพแสดงโมเมนต์ภายในของโครงสร้างหลัก



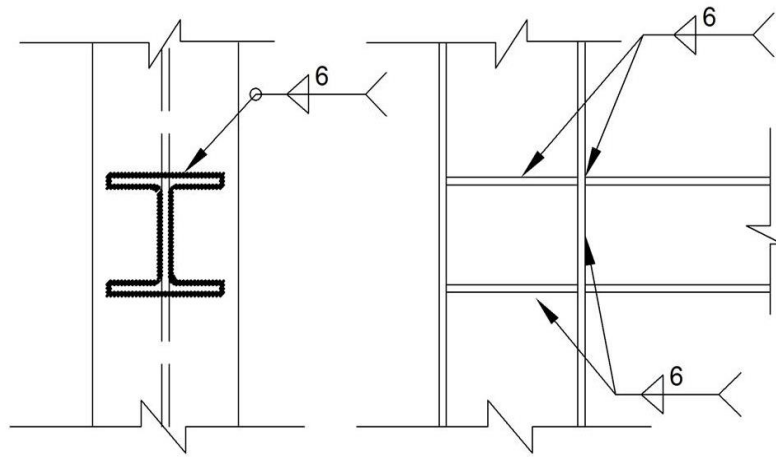
(ง) ขยายบริเวณข้อต่อ

รูปที่ 2.1 โครงข้อแข็งหลักเมื่อมีการรับแรงแผ่นดินไหว



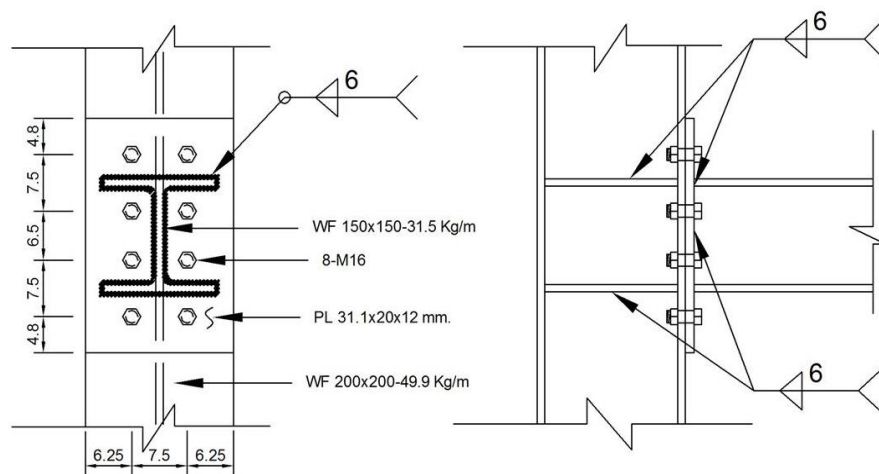
รูป 2.2 แสดงการถ่ายโอนโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างขณะที่ปลายคานได้รับแรงกระทำ

จากการรวบรวมข้อมูลการก่อสร้างโครงเหล็กในประเทศไทยในปัจจุบัน พบข้อมูลว่าข้อต่อระหว่างคาน-เสาที่วิศวกรโยธามักนิยมออกแบบ นอกจากใช้การเชื่อมต่อด้วยวัสดุเชื่อมเป็นหลักแล้วยังนิยมใช้ข้อต่อประเภท End-Plate ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



การเชื่อมต่อแบบเชื่อมเต็มทั้งหน้าตัด

รูปที่ 2.3 รายละเอียดข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทเชื่อมเต็มหน้าตัด ที่ก่อสร้างในประเทศไทย



การเชื่อมต่อโดยสลักเกลียว

รูปที่ 2.4 รายละเอียดข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทย

หลังการเกิดแผ่นดินไหวปี คศ. 1994 มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงแผ่นดินไหวของประเทศสหรัฐอเมริกาได้รับการปรับปรุงและรวบรวมรายละเอียดการก่อสร้างข้อต่อคาน-เสาเหล็กไว้ในเอกสาร FEMA350 [16] โดยแบ่งชนิดข้อต่อคาน-เสาเหล็กออกเป็นประเภทต่างๆ ซึ่งข้อต่อแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมกับบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดต่างๆกัน สำหรับข้อต่อเหล็กประเภท End-Plate ที่ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 4 ประเภท แสดงในตารางที่ 1 เมื่อเทียบเคียงข้อต่อ

คาน-เสาเหล็ก End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทยนั้นสามารถเทียบได้กับข้อต่อ End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรง (Bolt Unstiffened End-Plate, BUEP) ซึ่งข้อต่อประเภทนี้สามารถใช้ได้กับทั้งโครงข้อแข็งชนิด OMF¹ หรือ SME² มาตรฐานการออกแบบ AISC ปี 2005 สำหรับโครงข้อแข็งรับแรงแผ่นดินไหว (AISC Seismic Provision 2005) [10] ได้กำหนดให้โครงข้อแข็งแบบพิเศษ (SMF) ต้องมีความสามารถรองรับการหมุนได้อย่างน้อย 0.04 เรเดียน ส่วนโครงข้อแข็งแบบธรรมดา (OMF) จะต้องหมุนได้อย่างน้อย 0.01 เรเดียน รูปที่ 2.5 แสดงข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมและไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงตามมาตรฐาน AISC (American Institute of Steel Construction) [9]

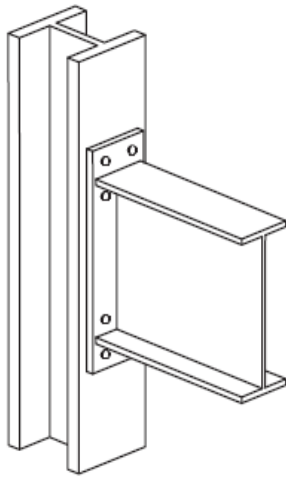
ตารางที่ 1 ข้อต่อคาน-เสาเหล็ก End-Plate ที่ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการตาม FEMA 350 [16]

ชนิดของข้อต่อคาน-เสา	ชนิดโครงข้อแข็ง
ข้อต่อ End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรง (Bolt Unstiffened End-Plate, BUEP)	OMF ¹ หรือ SME ²
ข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรง (Bolt stiffened End-Plate, BSEP)	OMF ¹ หรือ SME ²
ข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นปีกโลหะ (Bolt Flange Plate, BEP)	OMF ¹ หรือ SME ²
ข้อต่อ End-Plate ชนิดใช้ลวดเชื่อมและสลักเกลียว (Double Split Tee, DST*)	OMF ¹

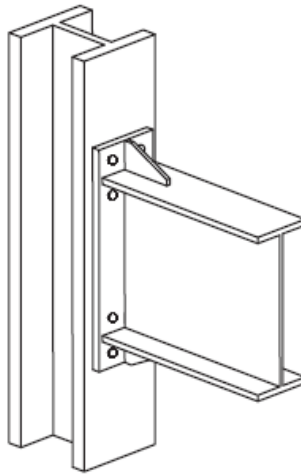
*ข้อต่อชนิดนี้ อาจเป็นแบบยึดเต็มหรือยึดบางส่วน

¹OMF: Ordinary Moment Frame

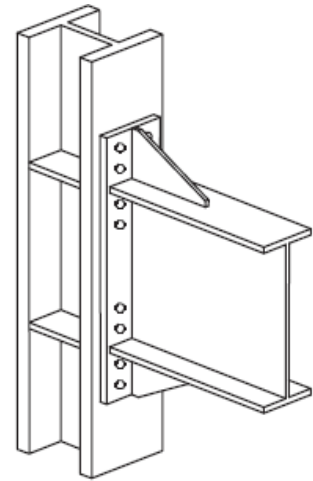
²SMF: Special Moment Frame



ข้อต่อ End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็ก
เพิ่มความแข็งแรง ใช้สลักเกลียว 4 ตัว



ข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นเหล็กเพิ่ม
ความแข็งแรง ใช้สลักเกลียว 4 ตัว



ข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นเหล็กเพิ่ม
ความแข็งแรง ใช้สลักเกลียว 8 ตัว

รูปที่ 2.5 ข้อต่อคาน-เสาเหล็ก End-Plate ชนิดต่างๆตามมาตรฐาน AISC (American Institute of Steel Construction) [8]

การศึกษาของ Scott A. Civjan, John L. Gross (2000) [22] เป็นการประเมินและปรับปรุงข้อต่อเหล็กในการถ่ายแรงของโมเมนต์ (Steel moment connection) จากการกระทำของแรงแผ่นดินไหว โดยมีการทดสอบชิ้นงานโดยใช้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic loading) กับชนิด Welded Unreinforced Flanges-Bolted Web ผลการทดสอบชิ้นงานจากสภาพภายนอกแสดงให้เห็นว่าเมื่อรอยเชื่อมมีความเหนียวต่ำ ความแข็งแรงของปีกคานของคานจะไม่เพียงพอต่อแรงกระทำ ซึ่งจากการสังเกตทำให้เกิดการปรับปรุงปีกคานโดยการแทนที่ที่ปีกคานด้วยร่องของรอยเชื่อม ซึ่งรอยเชื่อมมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้เกิดการแตกในบริเวณขอบบนของรอยเชื่อม

D.Grecea, A. Stratan, A. Ciutina, D. Dubina [15] เป็นการศึกษาตามมาตรฐานในการออกแบบแบบใหม่ซึ่งแสดงพฤติกรรมของข้อต่อโดยมีตัวแปร 3 ตัวคือ กำลัง (Strength) ความแข็งแรง (Stiffness) ความเหนียว (Ductility) และการต้านทานโมเมนต์ของข้อต่อซึ่งความเหนียวจะถูกวัดออกมาในรูปแบบของการหมุนได้ ข้อต่อจะถูกแบ่งโดยการจัดหมวดหมู่ ซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบความเหนียวของข้อต่อดังนี้

- 1) ระดับที่ 1 ข้อต่อแบบเหนียว ซึ่งความเหนียวของข้อต่อจะถูกพัฒนามาจากการต้านโมเมนต์แบบพลาสติกโมเมนต์และสามารถหมุนได้ในปริมาณที่มาก
- 2) ระดับที่ 2 ข้อต่อแบบมีความเหนียวปานกลาง ซึ่งความเหนียวของข้อต่อจะถูกพัฒนามาจากการต้านโมเมนต์แบบพลาสติกโมเมนต์และมีข้อจำกัดในการหมุน

3) ระดับที่ 3 ข้อต่อที่ไม่มีความเหนียว โดยจะเกิดการพังแบบเปราะบริเวณข้อต่อก่อนที่จะเกิดค่าพลาสติกโมเมนต์

งานวิจัยในปีค.ศ. 1990 โดย Ghobarah [18] และคณะ ได้ทำงานทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสา เหล็กประเภท End-Plate ที่มีการเสริมและไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อจำนวนทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยใส่แรงกระทำแบบแรงวัฏจักรและมีการใส่แรงกระทำในแนวแกนของเสาด้วยในบางตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ข้อต่อ End-Plate ที่มีสัดส่วนความแข็งแรงระหว่างแผ่นเหล็ก End-Plate คาน และเสา ที่เหมาะสมสามารถสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้ดี โดยไม่สูญเสียความแข็งแรงของข้อต่อ กลุ่มนักวิจัยท่านนี้ได้เสนอการออกแบบข้อต่อ End-Plate ที่ไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อไว้ว่า สลักเกลียวและแผ่นเหล็ก End-Plate ควรถูกออกแบบให้มีค่ากำลังโมเมนต์พลาสติกประมาณ 1.3 เท่าของค่ากำลังโมเมนต์พลาสติกของคาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสียหายในสลักเกลียวและแผ่นเหล็ก End-Plate เนื่องจากการถ่ายแรง ในส่วนของข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อนั้น สลักเกลียวและแผ่นเหล็ก End-Plate ควรถูกออกแบบให้มีค่ากำลังโมเมนต์พลาสติกเท่ากับค่าโมเมนต์พลาสติกของคาน

Astaneh-Asl (ค.ศ. 1995) [11] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสา End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อจำนวน 2 ตัวอย่าง เพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างนี้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กของ AISC (American Institute of Steel Construction) สำหรับรับแรงกระทำในแนวดิ่งเท่านั้น มิได้ถูกออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการรับแรงแผ่นดินไหวแต่อย่างใด ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 1 แสดงความเหนียวของข้อต่อที่ดี อย่างไรก็ตามเกิดการโก่งเดาะของปีกคานเมื่อข้อต่อรับแรงอัด ในส่วนของตัวอย่างที่ 2 พบว่า การหนุน (shim) บริเวณแผ่นเหล็ก End-Plate กับปีกเสาด้วยเหล็กหน้าตัด I แสดงพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อได้ดีกว่าตัวอย่างที่ 1 จนกระทั่งเหล็กหน้าตัดตัว I เกิดการครากด้วยแรงอัด จึงสรุปว่าข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate สามารถใช้รับแรงแผ่นดินไหวได้ แต่ควรมีการหนุนด้วยเหล็กที่มีความแข็งแรงกว่าแผ่น End-Plate

งานวิจัยโดย Adey และคณะ (ค.ศ. 1997, 1998, 2000) [2, 3, 4] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างข้อต่อ End-Plate จำนวน 15 ตัวอย่าง เป้าหมายของการศึกษาคือต้องการหาผลกระทบของตัวแปร 4 ตัวต่อพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อ ซึ่งตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือ ขนาดคาน การจัดวางสลักเกลียว ความหนาของแผ่น End-Plate และแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อ ตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างใส่แรงกระทำแบบวัฏจักร ส่วนที่เหลืออีก 10 ตัวอย่างเป็นการใส่แรงกระทำในแนวดิ่งทางเดียวเท่านั้น ตัวอย่างทดสอบ 12 ตัวอย่างถูกออกแบบให้ข้อต่อ End-Plate มีค่าโมเมนต์พลาสติกน้อยกว่าค่าโมเมนต์พลาสติกของคานและเสา

เพื่อต้องการศึกษาลักษณะการครากของแผ่น End-Plate ส่วนตัวอย่างอีก 3 ตัวอย่างถูกออกแบบให้คานเกิดการครากทั้งหน้าตัด โดยกำหนดค่าโมเมนต์พลาสติกของคานน้อยกว่าแผ่นเหล็ก เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายในข้อต่อ End-Plate เกิดก่อนการเสียหายในคาน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการสลายพลังงานของข้อต่อประเภท End-Plate ลดลงเมื่อขนาดหน้าตัดคานใหญ่ขึ้น แผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อช่วยเพิ่มความสามารถในการสลายพลังงานของข้อต่อ นอกจากนี้ยังสรุปว่าทฤษฎี Yield line สามารถใช้ในการออกแบบความหนาของแผ่น End-Plate ได้ ส่วนการออกแบบขนาดสลักเกลียวโดยให้มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอีก 12% มากกว่าขนาดสลักเกลียวที่ออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบสลักเกลียวของ AISC เพื่อรับ prying force ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่วงแรงของสลักเกลียวนั้นให้ผลการทดสอบที่ดี

Meng และ Murray (ค.ศ. 1997) [21] ทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสา End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อจำนวน 4 ตัวอย่าง โดยข้อต่อถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงมากกว่ากำลังของคานและเสา ความหนาของแผ่น End-Plate ถูกออกแบบด้วยทฤษฎี Yield line และขนาดของสลักเกลียวถูกออกแบบด้วยสมการปรับปรุงของ Kennedy จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ข้อต่อ End-Plate ที่มีการเว้นช่องสำหรับการเชื่อมต่อ (Access hole) ระหว่างปีกคานกับแผ่น End-Plate เกิดการฉีกขาดบริเวณปีกคานตรงตำแหน่งระหว่างช่อง (Access hole) กับแผ่น End-Plate เมื่อการทดสอบเข้าสู่ช่วงอินเลาสติกเพียงเล็กน้อย ส่วนข้อต่อที่ไม่มีการเว้นช่องสำหรับการเชื่อมนั้นจะไม่เกิดการฉีกขาดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ยังช่วยยืนยันว่า การมีช่องเว้นสำหรับการเชื่อมต่อเพิ่มค่าความเค้นบริเวณปีกคานที่บริเวณรอยเชื่อมจนอาจทำให้เกิดการฉีกขาดได้ จึงสรุปว่าไม่ควรมีช่องเว้นการเชื่อมต่อ (Access hole) สำหรับข้อต่อประเภท End-Plate นอกจากนี้ยังมีข้อสรุปเสนอให้ใช้ข้อต่อคาน-เสาประเภท End-Plate กับโครงข้อแข็งเหล็กที่ใช้ในบริเวณแผ่นดินไหวด้วย

Gebbeken และคณะ (ค.ศ. 1994) [17] ได้ศึกษาพฤติกรรมข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมุ่งเน้นเพื่อพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจำลองพฤติกรรมของข้อต่อประเภทนี้ในสภาวะอินเลาสติก ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

Bahaari และ Sherbourne (ค.ศ. 1994, 1996) [12, 13, 14] ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS วิเคราะห์พฤติกรรมข้อต่อ End-Plate ชนิด 4 รูเจาะแบบเสริมและไม่เสริมความแข็งแรงของข้อต่อด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ แบบจำลองถูกสร้างด้วยเอลิเมนต์ประเภท Plate Brick และ Truss เพื่อทำการจำลองรูปร่างของคาน เสา แผ่นเหล็ก สลักเกลียวและอื่นๆ นอกจากนี้ยังใส่คุณสมบัติของวัสดุทั้งในช่วงอี

ลา-สติกและอินอีลาสติก เพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์เหมือนจริงมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบ นักวิจัยทั้งสองท่านสรุปว่า แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมีความเที่ยงตรงสูง สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อประเภทนี้ได้ดีเยี่ยม

ในปีค.ศ. 2000, Mays [20] ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนลิเมนต์ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบข้อต่อประเภท End-Plate นักวิจัยได้สร้างแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ของข้อต่อประเภทนี้ทั้งหมด 16 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมและไม่เสริมความแข็งแรงบริเวณข้อต่อ มีทั้งการใช้สลักเกลียวแบบ 4 และ 8 สลักเกลียว ผลการวิเคราะห์แสดงค่าตอบสนองของแบบจำลองได้ดีเมื่อเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Tahir และคณะ (ค.ศ. 2008) [25] ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate จำนวน 8 ตัวอย่าง โดยมีการคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดและความหนาของแผ่น End-Plate ขนาดและจำนวนของสลักเกลียว ขนาดของคานและเสา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความหนาแผ่น End-Plate ขนาดสลักเกลียว และขนาดคาน มีผลกระทบต่อกำลังของข้อต่ออย่างมาก ค่าการรับแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการออกแบบของ Eurocode 3

Wang และคณะ (ค.ศ. 2013) [26] ได้ทำการวิเคราะห์ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ด้วยโปรแกรมไฟไนลิเมนต์ ABAQUS โดยแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ของข้อต่อนั้นได้พิจารณาถึงชนิดของอีลิเมนต์คุณสมบัติเหล็กเมื่อรับแรงชั่วครู่ คุณสมบัติสลักเกลียว พฤติกรรมการสัมผัสระหว่างสลักเกลียวและแผ่นเหล็ก End-Plate และแรงที่ใช้ในการศึกษาเป็นแรงชั่วครู่ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ข้อต่อ End-Plate ที่มีการออกแบบที่ดี สามารถรับแรงชั่วครู่สูงสุดได้ดีเทียบเท่ากับข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทเชื่อม แต่จะมีลักษณะการลดลงของกำลังและการเสียหายที่ต่างกัน ข้อต่อ End-Plate ที่มีการเสริมกำลังที่ข้อต่อด้วยแผ่นเหล็ก มีความสามารถในการรับแรงและแสดงลักษณะการพังที่ดีกว่าข้อต่อ End-Plate ที่ไม่เสริมกำลัง

Wang และคณะ (ค.ศ. 2013) [27] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงเหล็กที่มีข้อต่อคาน-เสาประเภท End-Plate ด้วยการทดสอบโครงเหล็กที่มีขนาด $1/4$ ของโครงสร้างจริง และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ โครงสร้างดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบผล จากการทดสอบสรุปได้ว่า 1) โครงเหล็กที่ใช้ข้อต่อ End-Plate แสดงพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวได้ดี มีความเหนียวสูงสามารถเข้ากับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ได้ 2) จุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคาน ค่าความเค้นและค่าเสียรูปของข้อต่อมีค่าน้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นที่โคนเสาและปลายคาน นอกจากนี้ยังสรุปว่าโครงเหล็กที่ก่อสร้าง

ด้วยข้อต่อชนิดนี้แสดงพฤติกรรมเป็นตามหลักการออกแบบเสาแข็ง-คานอ่อน (strong column weak beam) อีกด้วย

Sun และคณะ (ค.ศ. 2014) [23] ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยที่ตัวอย่างที่ 1 แผ่นเหล็ก End-Plate ก่อสร้างด้วยเหล็กชนิด Q345 (เหล็กเกรดปกติ) ส่วนอีก 2 ตัวอย่างแผ่นเหล็ก End-Plate ก่อสร้างด้วยเหล็กชนิด Q690 (เหล็กเกรดสูง) ผลการทดสอบพบว่า ข้อต่อ End-Plate ที่ทำจากเหล็กเกรดสูง (กำลังสูง) รับแรงได้มากกว่าเหล็กเกรดปกติประมาณ 30% อย่างไรก็ตาม สลักเกลียวที่ใช้กับแผ่นเหล็ก End-Plate ที่ทำจากเหล็กเกรดสูง มีแนวโน้มของการฉีกขาด ดังนั้นสำหรับเหล็กเกรดสูงจึงแนะนำให้ใช้แผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อยลง หรือใช้สลักเกลียวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อป้องกันการฉีกขาดของสลักเกลียว นอกจากนี้พฤติกรรมของข้อต่อ End-Plate ที่เสามีความแข็งแรงมากกว่าคาน มีลักษณะการพังเหมือนกับข้อต่อ End-Plate ที่มีความแข็งแรงของเสาน้อยกว่าคาน สมการที่ใช้หาค่าโมเมนต์ของข้อต่อ End-Plate เสนอโดย Euro code 3 สามารถทำนายค่ากำลังของโมเมนต์ได้ดี ถึงแม้ว่าเหล็ก End-Plate ที่ใช้จะเป็นเหล็กเกรดสูง

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 บทนำ

ใบบทนี้จะนำเสนอรายละเอียดของตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบซึ่งมีแบบตัวอย่างที่จะเลือกนำมาทดสอบอ้างอิงจากแบบโครงการก่อสร้างโรงงานเอทานอล ของบริษัท ทรัพย์ทิพย์ จำกัด เป็นข้อต่อคาน-เสา ชนิดใช้สลักเกลียวในการยึดรั้ง (Bolted end-plate connection) โดยตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นเสาต้นริมที่มีคานด้านเดียว นอกจากนี้วิธีการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างกับเครื่องทดสอบ วิธีการดำเนินการทดสอบ ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดผลการทดสอบ การเก็บข้อมูล รวมถึงการตั้งค่าโปรแกรมบันทึกผลการทดสอบก็จะถูกนำเสนอในบทนี้ด้วย

3.2 การออกแบบชิ้นงานตัวอย่าง และรายละเอียดชิ้นงาน

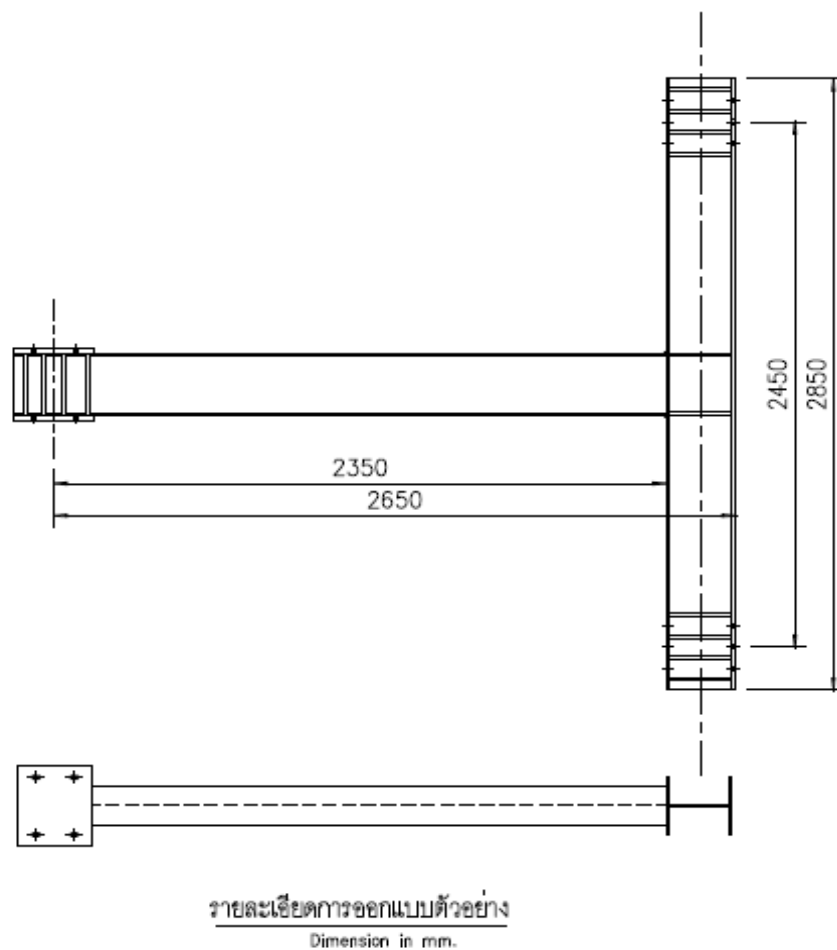
3.2.1 การออกแบบชิ้นงาน

การออกแบบชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบครั้งนี้ อ้างอิงจากตามแบบก่อสร้างโครงการก่อสร้างโรงงานเอทานอล ของบริษัท ทรัพย์ทิพย์ จำกัด โดยตัวอย่างใช้เหล็กเกรด SS400/SM400 (เทียบเท่าเกรด A36) สำหรับการออกแบบตัวอย่างจะมีข้อแตกต่างกันคือ รายละเอียดของการเชื่อมต่อของข้อต่อคาน-เสา และการลดหน้าตัดตัวปีกคานด้านบนด้านล่าง ซึ่งรายละเอียดของตัวอย่างทั้งหมดได้คัดเลือกจากวิธีการเชื่อมต่อของข้อต่อคาน-เสาที่ได้รับความนิยมในการก่อสร้างในประเทศไทยจากเหตุผลด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเหตุผลด้านค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ความสะดวกรวดเร็วในการก่อสร้าง โดยตัวอย่างที่จะใช้ในการพิจารณาเพื่อนำมาทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 3.1

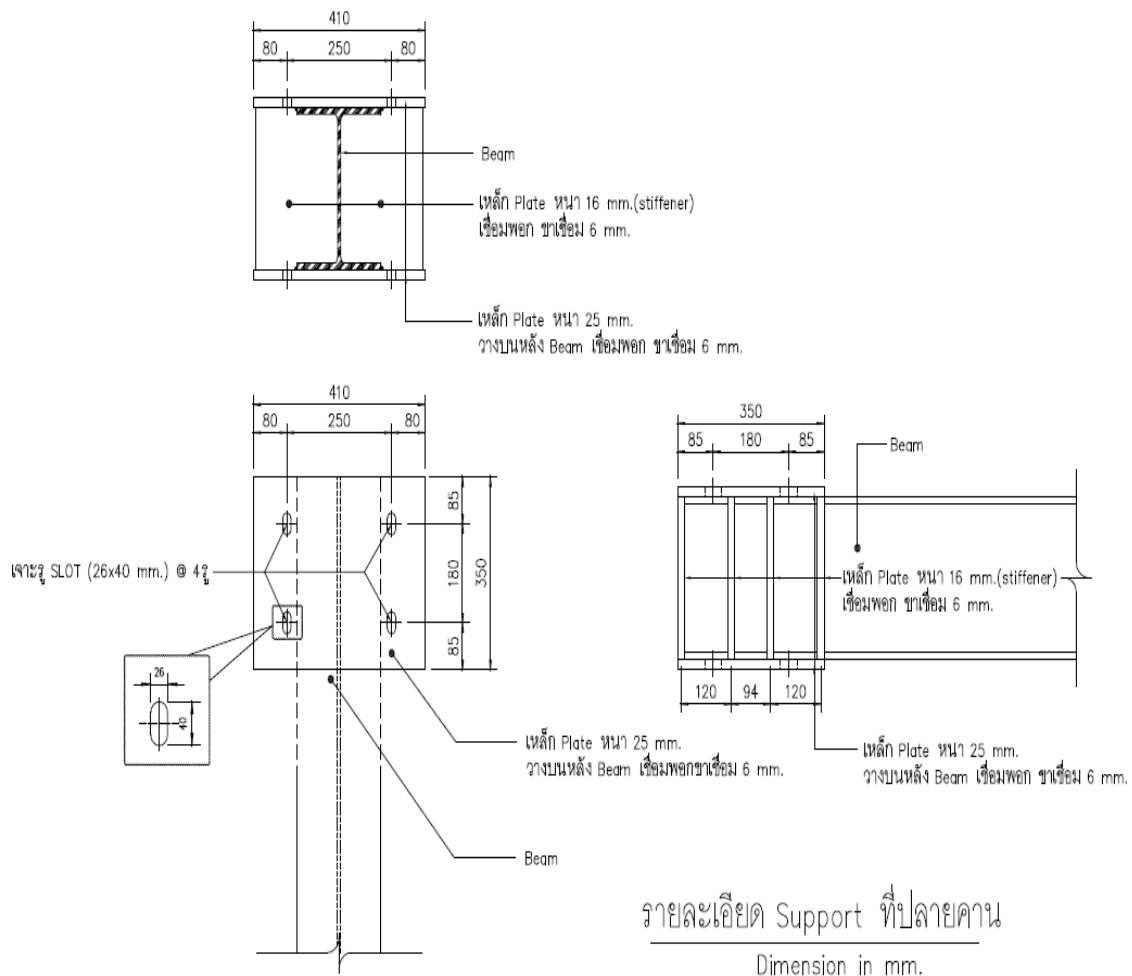
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะและขนาดโดยรวมของตัวอย่างทดสอบ ST1 ถึง ST3 ซึ่งมีลักษณะเป็นเสา-คาน ต้นริมของโครงสร้างในองค์อาคารประกอบด้วยคานยาว 2375 มม. (ขนาดตามตาราง 3.1) ปลายคานติดกับ Support ที่ปลายคาน สำหรับยึดติดกับหัวกดเครื่อง Universal Testing Machine, (UTM) และเสายาว 2844 มม. (ขนาดตามตาราง 3.1) ปลายเสาทั้งสองด้านเจาะรูและเสริมความแข็งแรง (stiffener) สำหรับยึดกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา การยึดแผ่นเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงกับปีกคานจะใช้วิธีการเชื่อมแบบพอกทั้งหมด โดยกำหนดความหนาของรอบเชื่อมเท่ากับ 6 มม.

ตาราง 3.1 แสดงขนาดและลักษณะการของเชื่อมต่อชิ้นงาน

ชื่อ ตัวอย่าง	ขนาดของเสา	ขนาดของคาน	ลักษณะของการเชื่อมต่อ
ST1	H 300x300-94 kg/m	H 300x200-56.8 kg/m	Bolted end-plate connection
ST2	H 300x300-94 kg/m	H 400x200-66 kg/m	Bolted end-plate connection
ST3	H 300x300-94 kg/m	H 500x200-79.5 kg/m	Bolted end-plate connection



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของตัวอย่างทดสอบ ST1-ST3



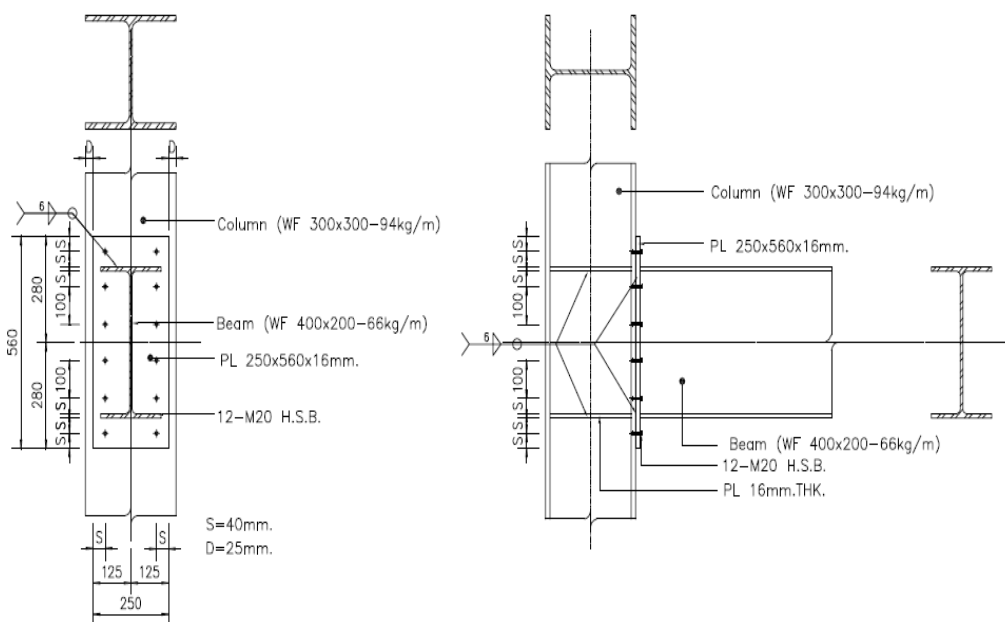
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะรายละเอียด Support ที่ปลายคานของตัวอย่างทดสอบ ST1-ST3

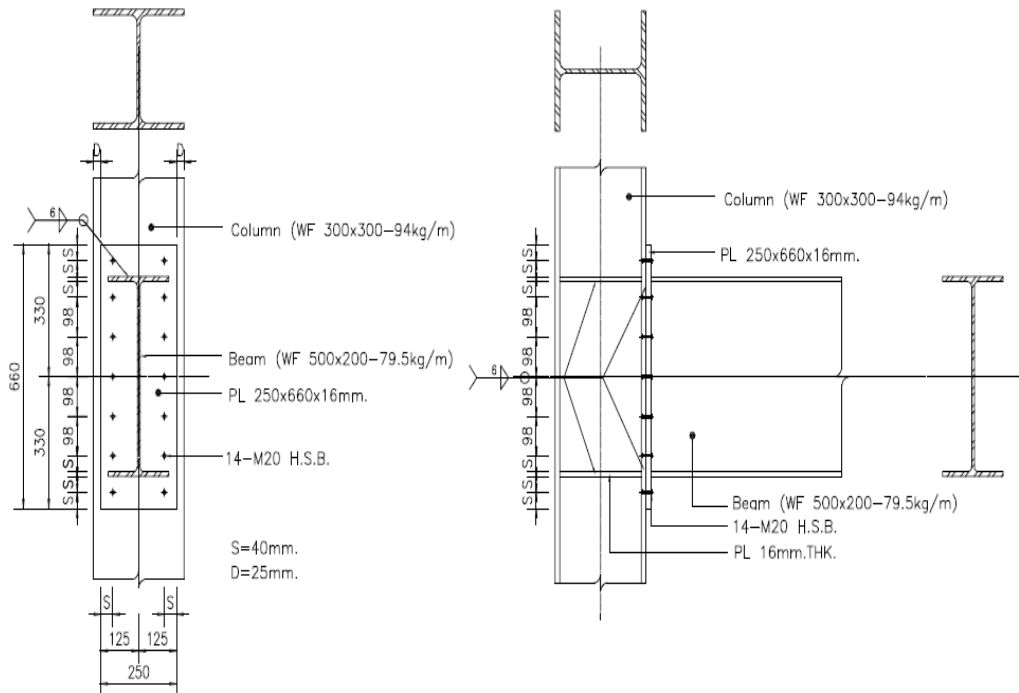
จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของ Support ที่ติดกับปลายคานใช้สำหรับยึดติดกับหัวกดเครื่อง Universal Testing Machine, (UTM) โดยใช้เหล็กเพลทขนาด 410 x 350 มม. เจาะรูแบบ Slot (26x40 มม.) จำนวน 4 รู ประกอบกับคานทั้งบนและล่าง และเสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กเพลท (stiffener) การยึดแผ่นเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงกับปีกคานจะใช้วิธีการเชื่อมแบบพอกทั้งหมด โดยกำหนดความหนาของรอบเชื่อมเท่ากับ 6 มม.

3.2.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบข้อต่อชนิดใช้สลักเกลียวในการยึดรั้ง

รายละเอียดข้อต่อคาน-เสาตัวอย่างทดสอบที่มีลักษณะของข้อต่อชนิดใช้สลักเกลียวในการยึดรั้ง (Bolted end-plate connection) ตัวอย่างที่ ST1 – ST3 (ตารางที่ 3.1) ซึ่งในการเชื่อมต่อกาน-เสาในตัวอย่างทดสอบ โดยจะเชื่อมปลายคานเข้ากับเหล็กเพลท ใช้วิธีการเชื่อมแบบพอกขนาดขารอยเชื่อม 6 มม. ตลอดทั้งหน้าตัด จะใช้ลวดเชื่อมคุณสมบัติตามมาตรฐาน AWS A5.1 E6013 และใช้ Bolt ขนาด M20 (A360)

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะรายละเอียดข้อต่อของตัวอย่าง ST2





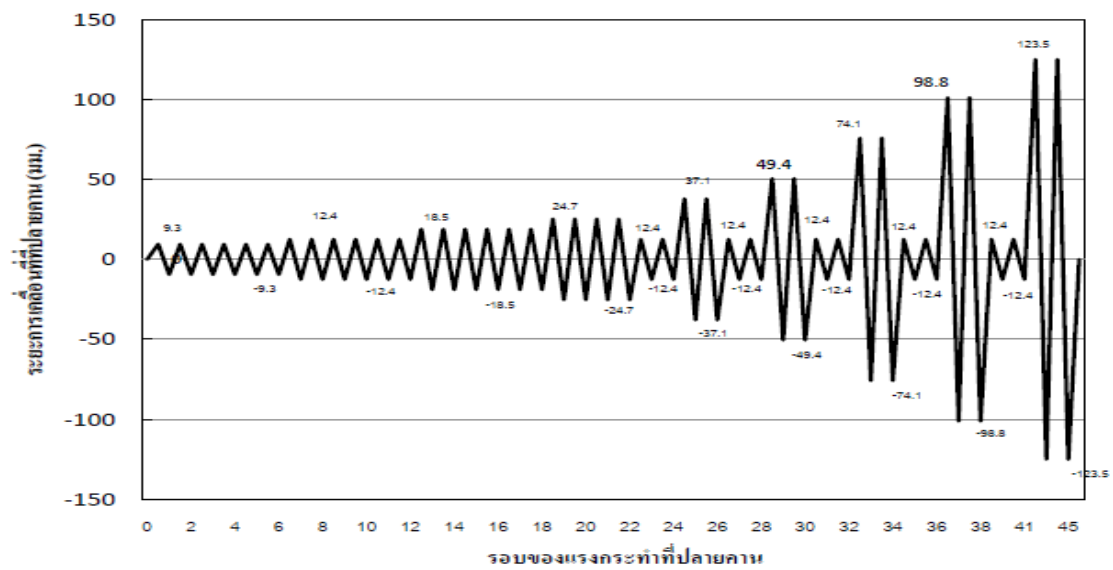
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะรายละเอียดข้อต่อของตัวอย่าง ST3

3.3 การกำหนดแรงกระทำแบบสลับทิศทาง (แรงวัฏจักร)

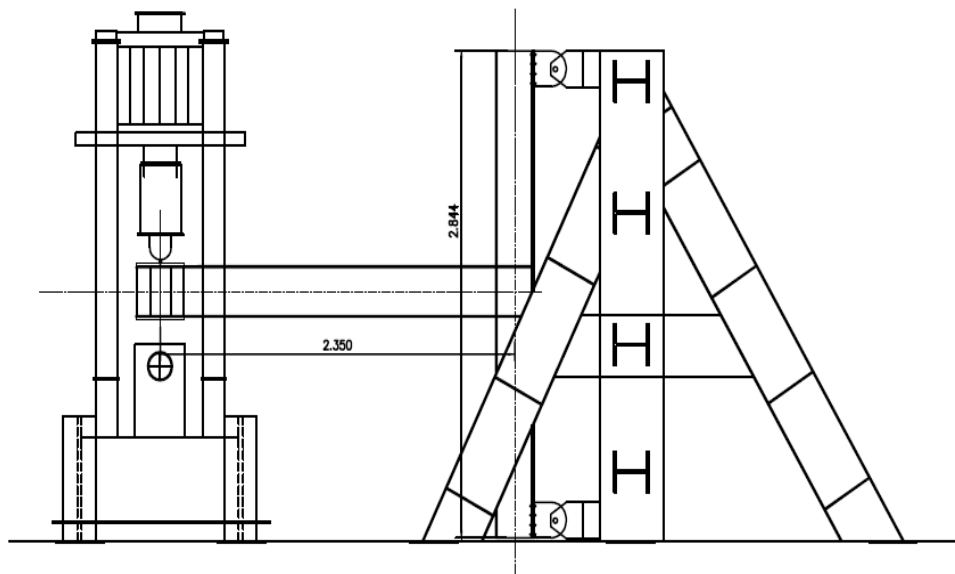
การให้ดำเนินการทดสอบจะใช้วิธีเดียวกันทุกตัวอย่าง โดยจะกำหนดระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานในลักษณะไป-กลับ เป็นรอบๆ ซึ่งการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่กับจำนวนรอบจะกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว (SAC 1997) ซึ่งมาตรฐานนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่ของปลายคานจากสมการ $\Delta = \theta^*(L_b + d_c/2)$ ซึ่งจะกำหนดมุมการเคลื่อนที่มาเพื่อให้หาระยะการเคลื่อนที่จากปลายคาน ดำเนินการทดสอบไปเรื่อยๆจนจะครบตามกำหนด หรือจนกว่าชิ้นงานคาน-เสาจะเกิดการวิบัติและไม่สามารถรับแรงต่อไปได้ ระยะการเคลื่อนที่และจำนวนรอบการเคลื่อนที่จะแสดงไว้ในตาราง 3.2 ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐาน การทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว (SAC 1997) รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่กับรอบของแรงกระทำที่ปลายคานจากกราฟจะเห็นว่าหลังจากกราฟการเคลื่อนที่ 24.7 มม. ขึ้นไป การเคลื่อนที่ที่ปลายคานจะมีระยะ 12.4 มม.

ตารางที่ 3.2 มุม ระยะการเคลื่อนที่ และจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของปลายคานที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่าง

มุมที่ปลายคาน (θ) (เรเดียน)	ระยะการเคลื่อนที่ปลายคาน (Δ) (มม.)	จำนวนรอบ
0.00375	9.47625	6
0.005	12.635	6
0.0075	18.9525	6
0.01	25.270	4
0.005	12.635	2
0.015	37.905	2
0.005	12.635	2
0.02	50.540	2
0.005	12.635	2
0.03	75.810	2
0.005	12.635	2
0.04	101.08	2
0.005	12.635	2
0.05	126.35	2



รูปที่ 3.6 แสดงระยะเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับรอบของแรงที่กระทำต่อที่ปลายคาน



รูปที่ 3.7 การติดตั้งชิ้นงานกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งและทดสอบ

1. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine, (UTM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ระบบการทำงาน โดยแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกส์มีกำลัง 1500 กก.ม./วินาที² ระบายความร้อนด้วยน้ำ ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงและจับปล่อยชิ้นงานโดย Electrical control vale ปฏิบัติการด้วยโปรแกรม Instron ซึ่งกระบอกไฮดรอลิกส์สามารถยืดออกสูงสุดได้เท่ากับ 250 มม. ซึ่งในการทดสอบเราจะให้กระบอก ไฮดรอลิกส์เคลื่อนที่ขึ้นลงเท่ากับ 120 มม.



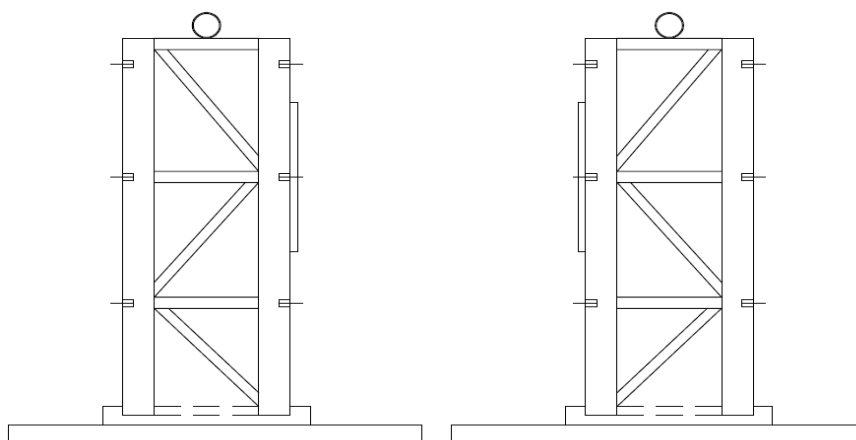
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)

2. โครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา (Reaction frame) ถูกสร้างขึ้นเพื่อการรองรับแรงดึงและแรงกด (Tension/Compression) โดยจะติดตั้งชิ้นงานรองรับจุดหมุนของเสา (Hinge Support) ซึ่งจะติดตั้งที่ตำแหน่งคานบนและคานล่าง เพื่อให้สามารถรองรับแรง (Reaction) ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.9 โครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา (Reaction frame)

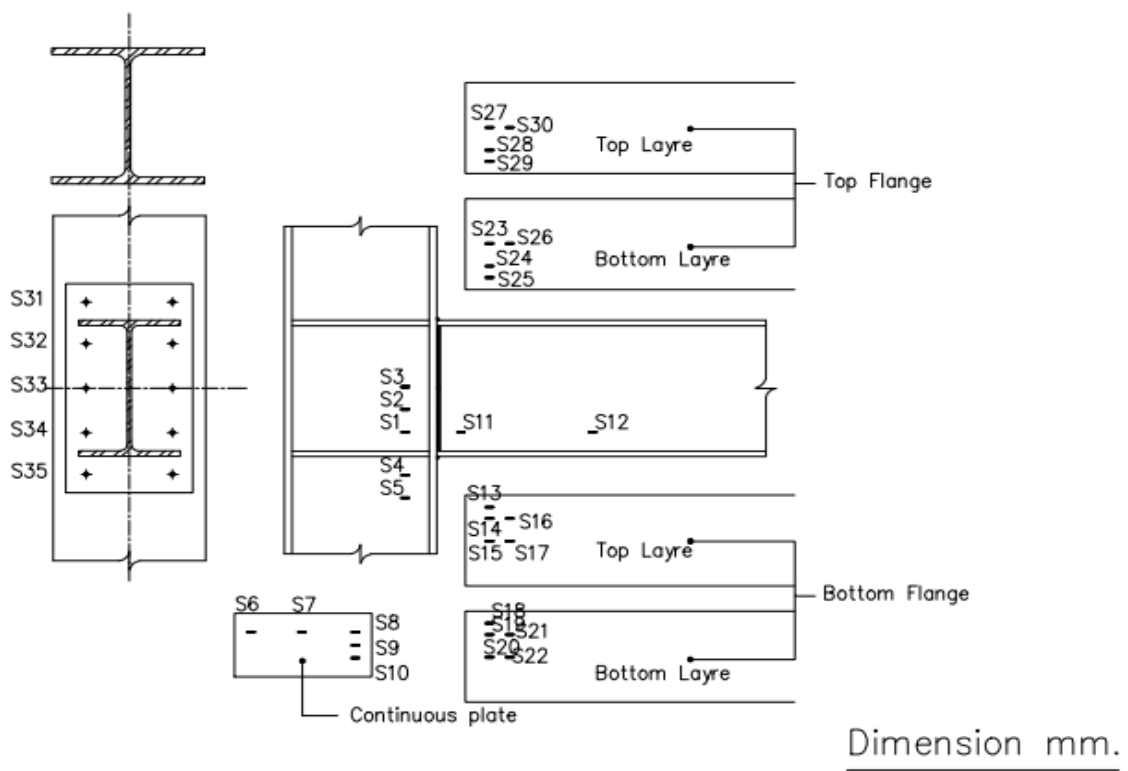
3. อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น เป็นชุดอุปกรณ์ที่นำโครงสร้างหลักที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำมาปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปแบบให้สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยในการทดสอบโดยมีหน้าที่ค้ำยันด้านข้างคาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคานโดยมีลักษณะเป็นเสาคู่ โครงสร้างเป็นชนิดโครงถัก (Truss) รูปสี่เหลี่ยม ฐานล่างเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กหนาซึ่งได้ทำร่อง Slot บังคับการเคลื่อนที่ไว้ตรงกลางแผ่น และประกอบวางไว้บนแผ่นเหล็กหนาที่ยึดติดด้วย Stud bolt กับพื้นคอนกรีต เคลื่อนที่ปรับระยะตามแนวร่อง Slot บังคับการเคลื่อนที่เมื่อได้ระยะจะขันยึดแน่น



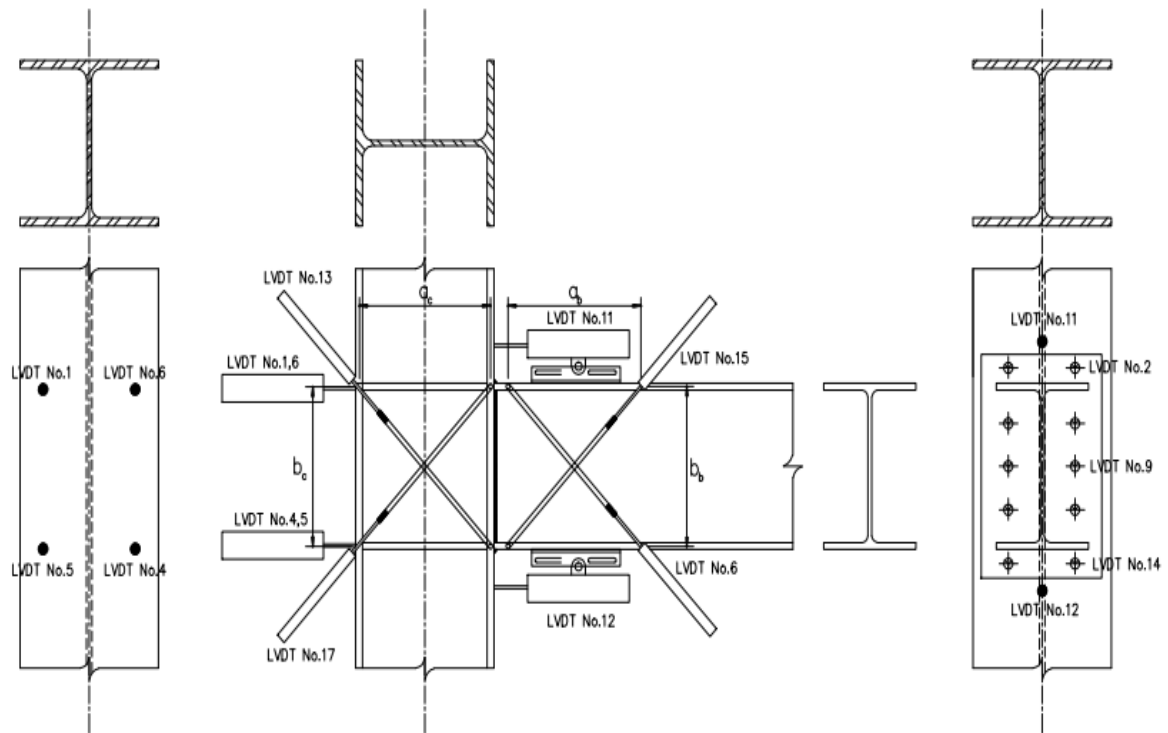
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น

3.5 เครื่องมือวัดผลและเก็บข้อมูล

เครื่องมือวัดผลในการทดลองสำหรับตัวอย่างทั้งหมดประกอบไปด้วย Strain Gauge Transducer และ LVDT โดยที่เครื่องมือวัดผลทั้งหมดรวมไปถึงปริมาณแรงที่กระทำต่อปลายคานซึ่งวัดได้โดยเครื่อง Universal Testing Machine, (UTM) จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อทำการแปลงสัญญาณและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลในเวลาเดียวกันทั้งหมด สำหรับ Transducer และ LVDT นั้นจะใช้สำหรับวัดค่าการเคลื่อนที่ในบริเวณที่สนใจศึกษาและต้องการเก็บข้อมูล ส่วน Strain Gauge ใช้สำหรับเก็บค่าความเครียดและความเครียดเฉือนซึ่งรายละเอียดและตำแหน่งการติดเครื่องมือวัดต่างๆ จะแสดงดังรูปต่อไปนี้

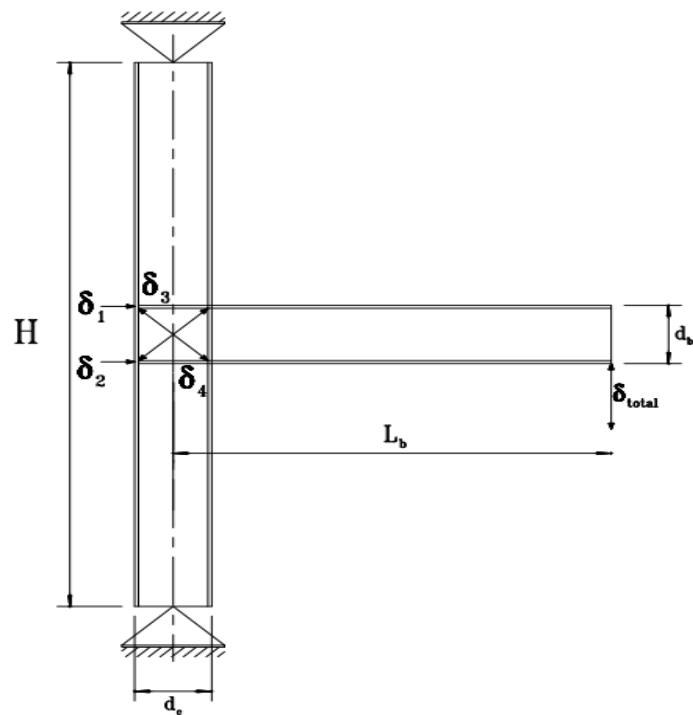


รูปที่ 3.11 ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauges ระยะการวัดและเบอร์ของ Strain Gauges (ST1-ST3)



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ระยะการวัดที่ใช้คำนวณและเบอร์ของ LVDT (ST1-ST3)

3.6 สมการที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

ข้อมูลที่สำคัญๆที่เราต้องการนำเสนอจะประกอบไปด้วยความสามารถในการหมุนในช่วงพลาสติกของคาน เสา Panel Zone และความสามารถในการหมุนทั้งหมดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญที่บ่งบอกได้ว่าตัวอย่างมีความสามารถทนต่อสภาวะรับแรงสลับได้มากน้อยเพียงใดหากเกิดการหมุนในช่วงพลาสติกนั้นไม่สามารถวัดจากการติดเครื่องมือวัดโดยตรงได้ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณจากสมการโดยนำข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเคลื่อนที่ของคาน เสา Panel Zone คำนวณ ซึ่งตำแหน่งและการติดตั้งเครื่องมือดังกล่าวได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยค่าที่ได้จากการวัดสามารถนำคำนวณค่าการหมุนได้ดังสมการต่อไปนี้

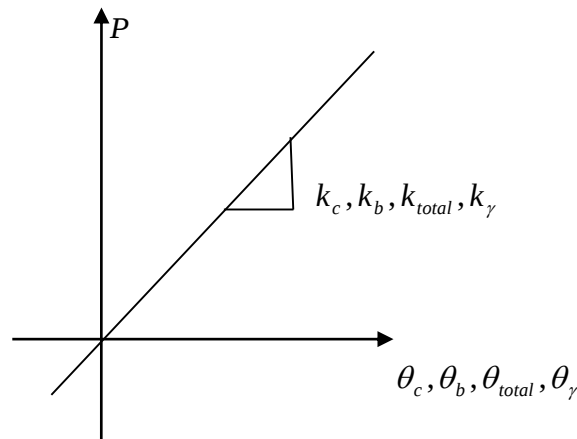
$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} (\delta_4 - \delta_3)$$

$$\theta_c = \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_b} - \gamma \left(1 - \frac{d_b}{H}\right)$$

$$\delta_b = \delta_{total} - \gamma L_b + \frac{\gamma d_b}{H} \left(L_b + \frac{d_c}{2}\right) - \theta_c \left(L_b + \frac{d_c}{2}\right)$$

$$\theta_b = \frac{\delta_b}{L_b}$$

$$\theta_{total} = \theta_b + \theta_c + \gamma$$



$$\theta_c^p = \theta_c - \left(\frac{P}{k_c}\right)$$

$$\theta_b^p = \theta_b - \left(\frac{P}{k_b}\right)$$

$$\theta_\gamma^p = \theta_\gamma - \left(\frac{P}{k_\gamma}\right)$$

$$\theta_{total}^p = \theta_{total} - \left(\frac{P}{k_{total}}\right)$$

L_b = ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางหัวกดเครื่องทดสอบกับหน้าเสา

d_c = ความลึกของหน้าตัดเสา

δ_b = ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน

H = ความสูงของเสา

a = ระยะของ Panel zone ในแนวนอน

b = ระยะของ Panel zone ในแนวตั้ง

θ_{total} = การหมุนทั้งหมดของข้อต่อ

θ_b = การหมุนของคาน

θ_c = การหมุนของเสา

γ = การหมุนของ Panel zone

θ_{total}^p = การหมุนในช่วงพลาสติกของข้อต่อ

θ_c^p = การหมุนในช่วงพลาสติกเสา

θ_b^p = การหมุนในช่วงพลาสติกคาน

θ_γ^p = การหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone

ในการคำนวณค่าการหมุนในช่วงพลาสติกนั้นเกิดหลังจากมีการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานดังนั้นในการคำนวณค่าการหมุนพลาสติกสามารถคำนวณจากโดยคิดผลของแรงที่กระทำที่ปลายคาน (P)หารค่าความยืดหยุ่น (K) โดยที่ค่าความยืดหยุ่นนั้นสามารถคำนวณจากการวิเคราะห์เชิงเส้นของข้อมูลการทดสอบในช่วงการเปลี่ยนรูปก่อนจะมีพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่น (Elastic)

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวอย่างคาน-เสาเหล็กต้นรินในองค์อาคารรับแรงวัฏจักรทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ST1 ST2 ST3 โดยนำเสนอผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement
- 2) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Rotation
- 3) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Plastic Rotation
- 4) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment - Beam Plastic Rotation
- 5) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Column Plastic Rotation
- 6) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment - Beam Plastic Rotation

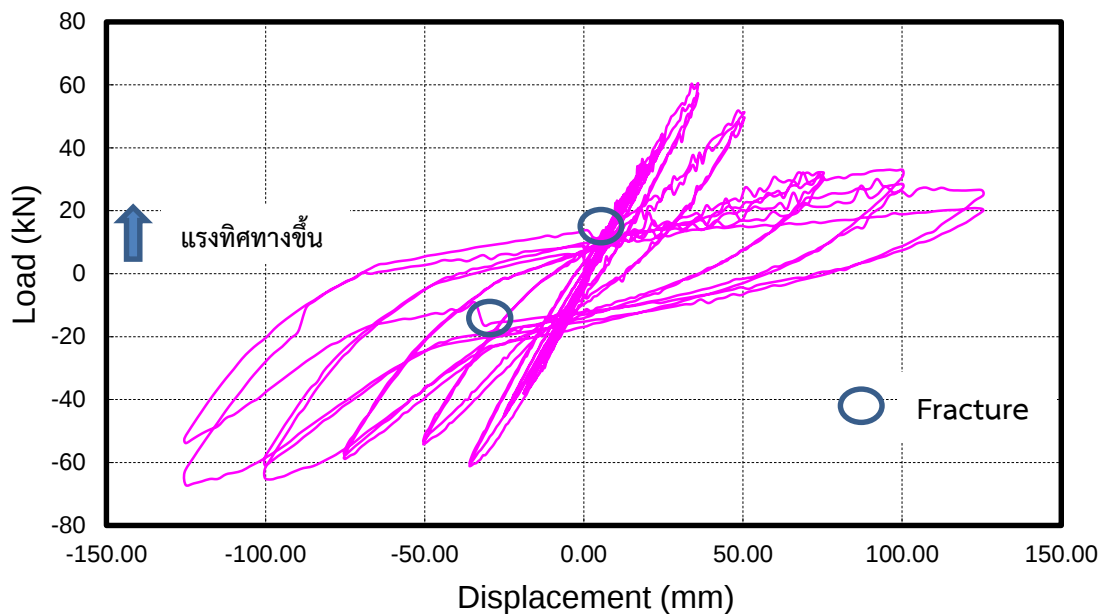
4.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวอย่าง ST1

ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement ของตัวอย่าง ST1

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ ระยะการเคลื่อนที่ปลายคาน (Displacement) ของตัวอย่าง ST1 ตั้งแต่ Displacement 9 mm. ถึง Displacement 126 mm. โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นลบเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง พบว่าแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดเท่ากับ 56.0 KN ที่ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน 35.3 mm. และต่ำสุดเท่ากับ -67.1 KN ที่ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน 125.0 mm. จากรูปที่ Displacement 25 mm. ลักษณะความชันของกราฟเป็นเส้นตรงคือแสดงถึงยังเป็นช่วงที่ตัวอย่างยังคงมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก (Elastic) นอกจากนั้นช่วงลูปที่แคบแสดงให้เห็นว่ามีการสะสมพลังงานที่น้อย ที่ Displacement 50 mm. ลักษณะความชันของกราฟเริ่มเปลี่ยนความชันและมีช่วงกราฟมีลูปที่กว้างกว่ารอบก่อนหน้าอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสะสมพลังงานที่มากขึ้น ที่ Displacement 50

mm. จนถึง Displacement 50 mm. ลักษณะความชันของกราฟเปลี่ยนความชันและแรงกระทำที่ปลายคาน ในทิศทางขึ้นต่ำลง ส่วนแรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงยังคงเพิ่มขึ้น กราฟมีรูปที่กว้างมากแสดงให้เห็นว่า เป็นช่วงที่ตัวมีพฤติกรรมเป็นอินอีลาสติก (Inelastic) และรอยเชื่อมของข้อต่อมีการฉีกขาดที่ปีกคานด้านล่าง ก่อนเกิดขึ้นในรอบการทดสอบที่ Displacement 125 mm. และฉีกขาดที่คานด้านบนในรอบการทดสอบ เดียวกัน

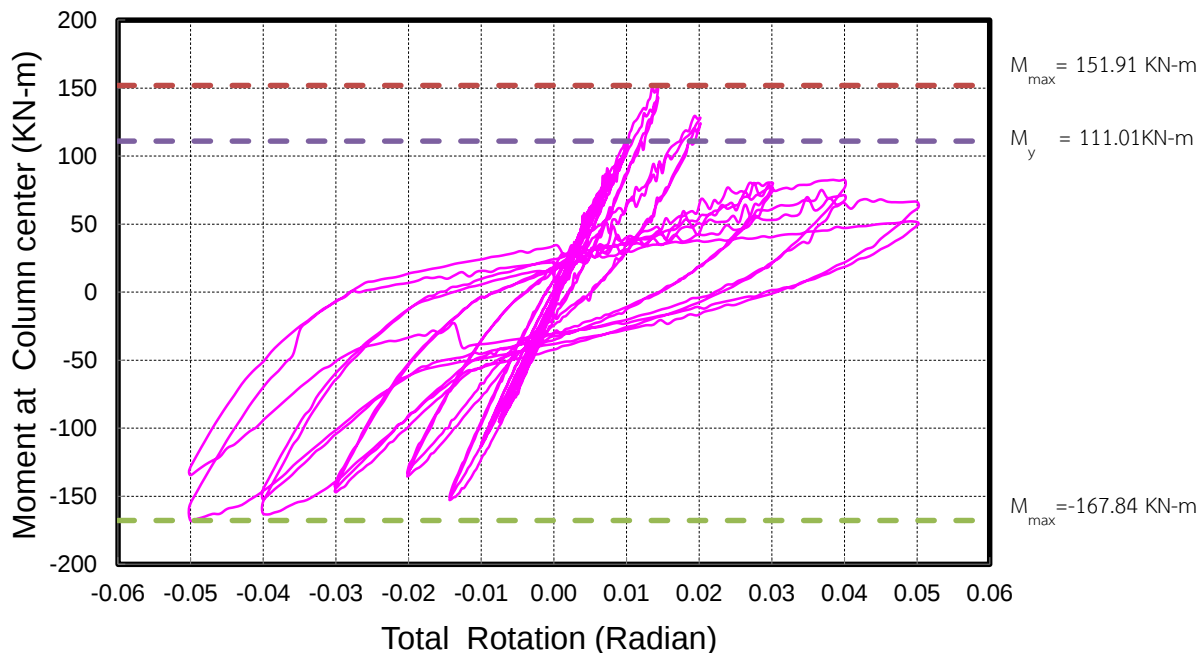


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement (ST1)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Rotation ของตัวอย่าง ST1

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ (Moment) ขึ้น สามารถคำนวณสมการ $Moment = P \times (L_b + d_c/2)$ (KN-m) ที่พยายามจะตัดให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Total Rotation โดย Total Rotation คือมุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่างในช่วงสภาวะยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 151.91 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0141 rad หรือ Displacement 35.3 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -167.84 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.050 rad หรือ Displacement -

125.0 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้น ในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 111.0 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0112 rad หรือ Displacement 28 mm.

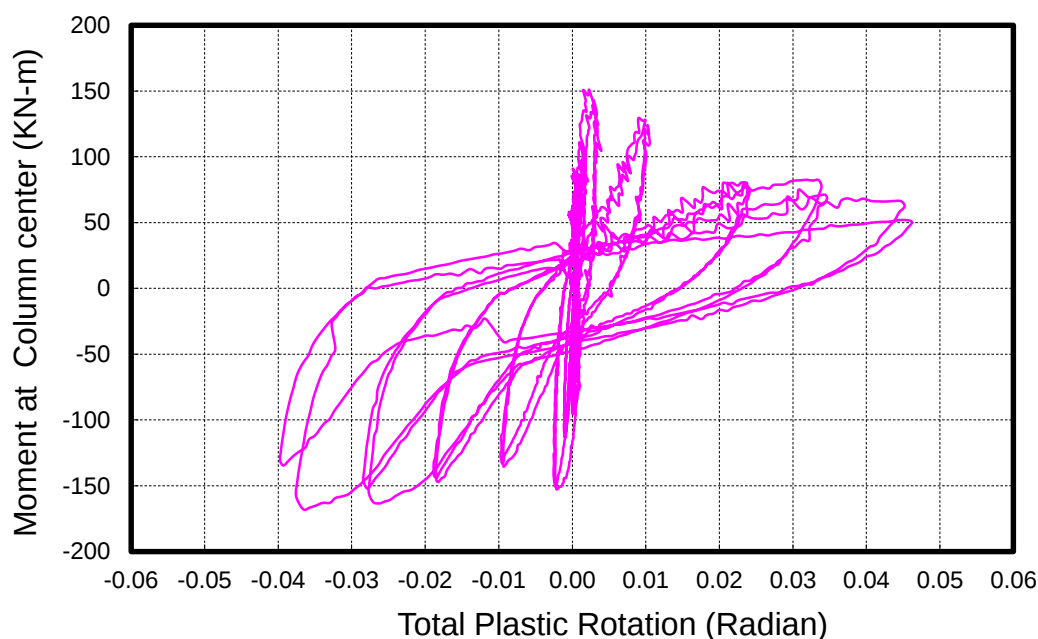


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Total Rotation (ST1)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST1

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ (Moment) ขึ้น สามารถคำนวณสมการ Moment $= P \times (L_b + d_c/2)$ (KN-m) ที่พยายามจะดัดให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมดในช่วงที่ไม่ยืดหยุ่น (Total Plastic Rotation) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Total Plastic Rotation โดย Total Plastic Rotation คือมุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่าง ในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 151.91 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00832 rad หรือ Displacement 35.3 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -167.84 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0394 rad หรือ Displacement -125.0 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดู

จากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 111.0 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00581 rad หรือ Displacement 28 mm.

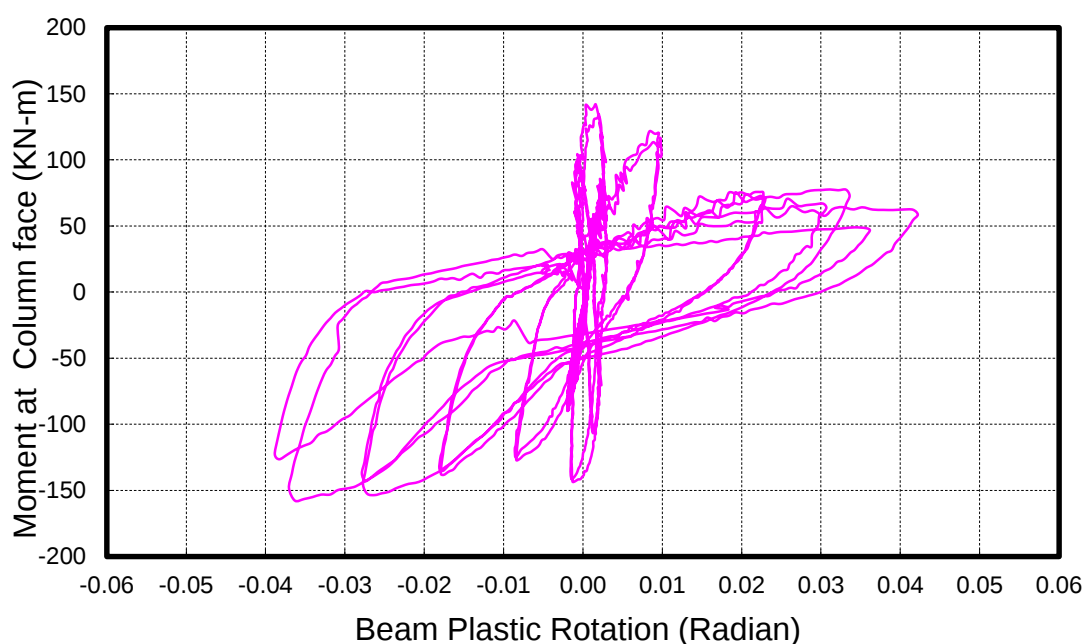


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Total Plastic Rotation (ST1)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Beam Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST1

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของคาน (Beam Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์จะเป็นค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของข้อต่อหรือก็คือบริเวณหน้าเสาค่าโมเมนต์ดัดคือแรงกระทำปลายคานคูณกับระยะแรงกระทำถึงหน้าเสา (L_b) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face – Beam Plastic Rotation โดย Beam Plastic Rotation คือมุมหมุนบริเวณคานของตัวอย่างในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 141.85 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00364 rad หรือ Displacement 35.3 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -157.76 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0385 rad หรือ Displacement -125.0 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 104.34 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ

0.00113 rad หรือ Displacement 28 mm สังเกตช่วงรูปของคานมีความกว้างที่สุดลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกับมุมหมุนทั้งแสดงให้เห็นว่าคานจะสะสมพลังงานมากที่สุดและจะเกิดความเสียหายมากที่สุด

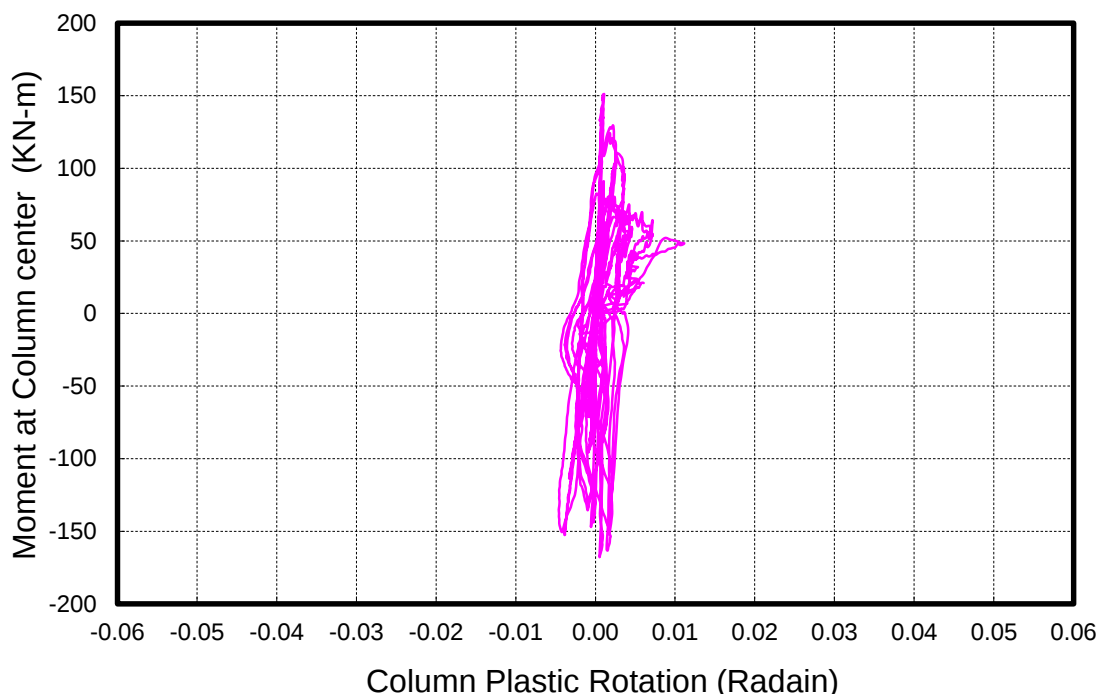


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam Plastic Rotation (ST1)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment –Column Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST1

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของเสา (Column Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา ($L_b + d_c/2$) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Column Plastic Rotation โดย Column Plastic Rotation คือมุมหมุนที่บริเวณเสาของตัวอย่าง ในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 151.91 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0010 rad หรือ Displacement 35.3 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -167.84 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0092 rad หรือ Displacement -125.0 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากรูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 111.0 KN-m ที่ Rotation

เท่ากับ 0.0085 rad หรือ Displacement 28 mm. สังเกตช่วงรูปของเสาค่อยข้างที่จะแคบมากแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณเสามีพฤติกรรมในการสลายพลังงานได้ดี

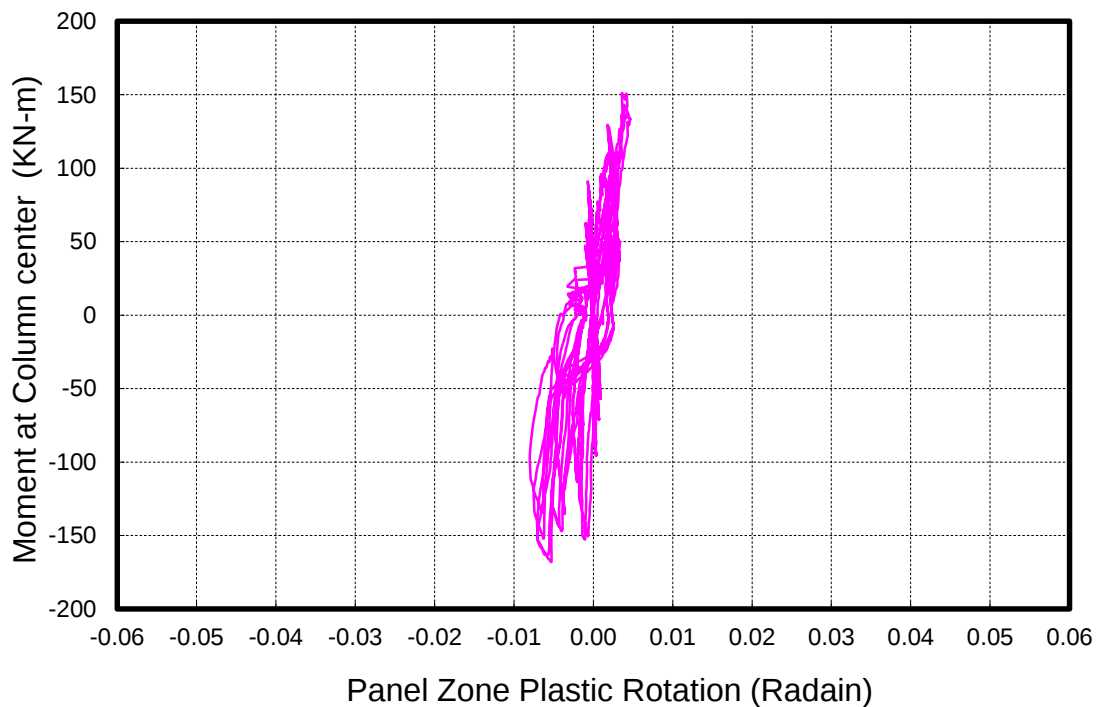


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Column Plastic Rotation (ST1)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Panel Zone Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST1

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของ Panel Zone (Panel Zone Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา ($L_b + d_c/2$) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Panel Zone Plastic Rotation โดย Panel Zone Plastic Rotation คือ มุมหมุนที่บริเวณ Panel Zone ของตัวอย่างในช่วงสภาวะที่ไม่ยึดหย่อน จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 151.91 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00359 rad หรือ Displacement 35.3 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -167.84 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.00527 rad หรือ Displacement -125.0 mm. โดย M_y เป็น

โมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 111.0 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00341 rad หรือ Displacement 28 mm. สังเกต ช่วงลูปของ Panel Zone ค่อยข้างที่จะแคบมากแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณเสามีพฤติกรรมในการสลายพลังงานได้ต่ำ



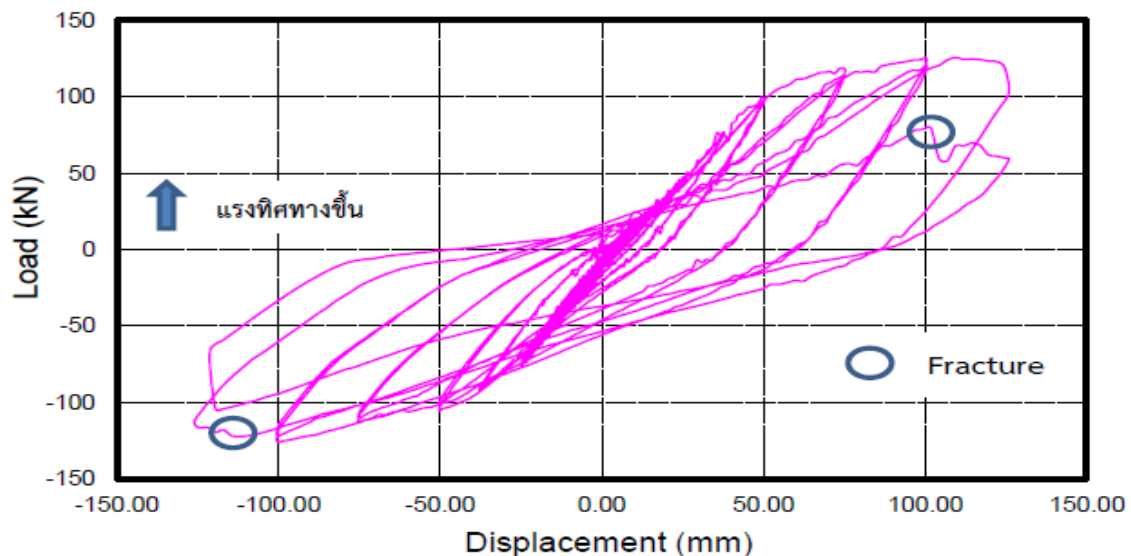
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Panel Zone Plastic Rotation (ST1)

ผลการทดสอบตัวอย่าง ST 2

ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement ของตัวอย่าง ST2

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ ระยะการเคลื่อนที่ปลายคาน (Displacement) ของตัวอย่าง ST2 ตั้งแต่ Displacement 9 mm. ถึง Displacement 126 mm. โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นลบเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง พบว่าแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดเท่ากับ 133.2 KN ที่ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน 100.5 mm. และต่ำสุดเท่ากับ -117.9 KN ที่ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน 100.4 mm. จากรูปที่ Displacement 37.9 mm. ลักษณะความชันของกราฟเป็นเส้นตรงคือแสดงถึงยังเป็นช่วงที่ตัวอย่างยังคงมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก (Elastic) นอกจากนั้นช่วงลูปที่แคบแสดงให้เห็นว่ามีการสลายพลังงานที่น้อยที่ Displacement 50 mm. ลักษณะความชันของกราฟเริ่มเปลี่ยนความชันและมีช่วงกราฟมีลูปที่กว้างกว่า

รอบก่อนหน้าอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสลายพลังงานที่มากขึ้น ที่ Displacement 75 mm. จนถึง Displacement 126 mm. ลักษณะความชันของกราฟเปลี่ยนความชันและแรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและแรงในทิศทางลงมีการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน กราฟมีรูปแบบที่กว้างมากแสดงให้เห็นว่าเป็นช่วงที่ตัวมีพฤติกรรมเป็นอินอีลาสติก (Inelastic) และรอยเชื่อมของข้อต่อมีการฉีกขาดที่ปีกคานด้านล่างก่อนเกิดขึ้นในรอบการทดสอบที่ Displacement 125 mm. และฉีกขาดที่คานด้านบนในรอบการทดสอบเดียวกัน

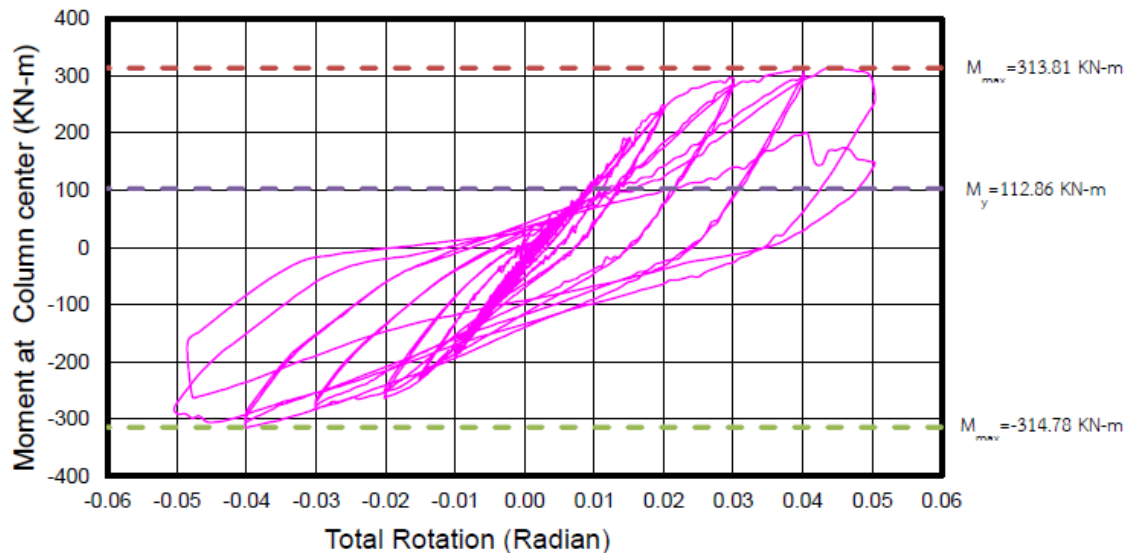


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement (ST2)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Rotation ของตัวอย่าง ST2

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ (Moment) ขึ้น สามารถคำนวณสมการ $Moment = P \times (L_b + d_c/2)$ (KN-m) ที่พยายามจะตัดให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Total Rotation โดย Total Rotation คือมุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่างในช่วงสภาวะยึดหยุ่นและไม่ยึดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 313.81 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0437 rad หรือ Displacement 109.4 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -314.78 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0402 rad หรือ Displacement -100.5 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้น

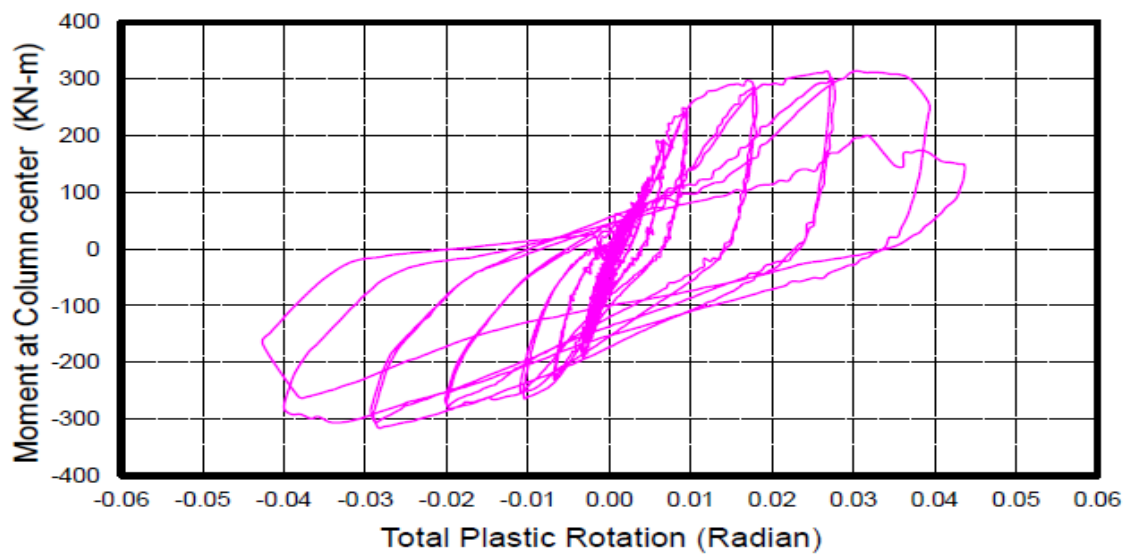
ในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 112.86 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00983 rad หรือ Displacement 24.5 mm.



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Total Rotation (ST2)

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST2

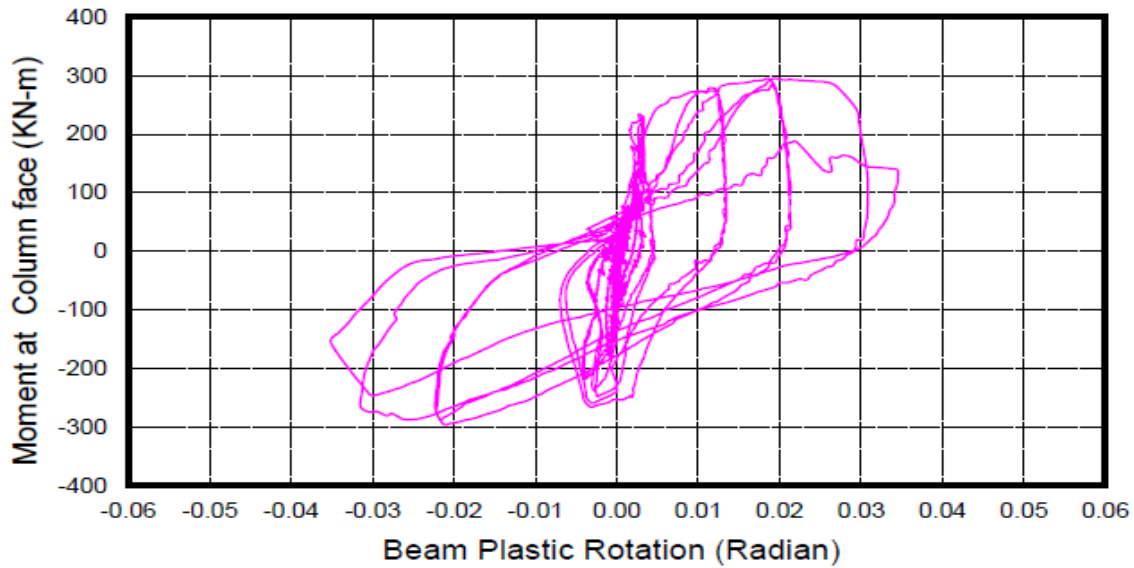
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ (Moment) ขึ้น สามารถคำนวณสมการ Moment = $P \times (L_b + d_c/2)$, (KN-m) ที่พยายามจะตัดให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมดในช่วงที่ไม่ยืดหยุ่น (Total Plastic Rotation) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Total Plastic Rotation โดย Total Plastic Rotation คือมุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่าง ในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 313.81 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0304 rad หรือ Displacement 109.4 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -314.78 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0283 rad หรือ Displacement -100.5 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 112.86 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00454 rad หรือ Displacement 24.5 mm.



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Total Plastic Rotation (ST2)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Beam Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST2

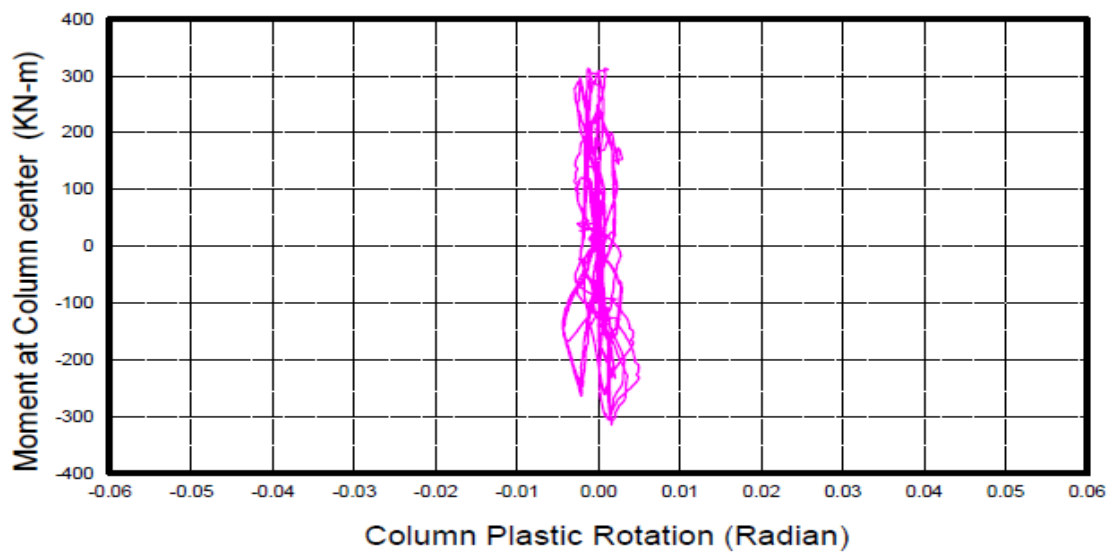
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของคาน (Beam Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์จะเป็นค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของข้อต่อหรือก็คือบริเวณหน้าเสาค่าโมเมนต์ดัดคือแรงกระทำปลายคานคูณกับระยะแรงกระทำถึงหน้าเสา (L_b) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face – Beam Plastic Rotation โดย Beam Plastic Rotation คือมุมหมุนบริเวณคานของตัวอย่างในช่วงสภาวะที่ยึดหุ่ย จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 294.98 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0194 rad หรือ Displacement 109.4 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -295.89 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0212 rad หรือ Displacement -100.5 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 105.51 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00225 rad หรือ Displacement 24.5 mm. สังเกตช่วงลูปของคานมีความกว้างที่สุดลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกับมุมหมุนทั้งแสดงให้เห็นว่าคานจะสลายพลังงานมากที่สุดและจะเกิดความเสียหายมากที่สุด



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam Plastic Rotation (ST2)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment –Column Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST2

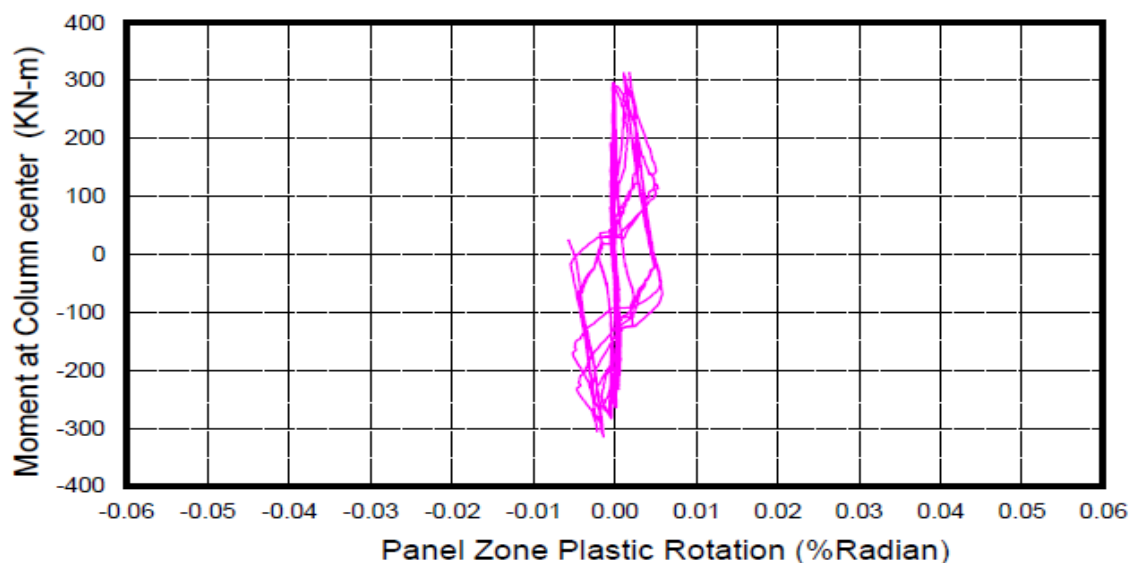
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของเสา (Column Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา ($L_b + d_c/2$) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Column Plastic Rotation โดย Column Plastic Rotation คือมุมหมุนที่บริเวณเสาของตัวอย่าง ในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 313.81 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00084 rad หรือ Displacement 109.4 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -314.78 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.00162 rad หรือ Displacement -100.5 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากรูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 112.86 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00101 rad หรือ Displacement 24.5 mm. สังเกตช่วงรูปของเสาค่อยข้างที่จะแคบมา แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณเสามีพฤติกรรมในการสลายพลังงานได้ต่ำ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Column Plastic Rotation (ST2)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Panel Zone Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST2

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของ Panel Zone (Panel Zone Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา ($L_b + d_c/2$) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Panel Zone Plastic Rotation โดย Panel Zone Plastic Rotation คือ มุมหมุนที่บริเวณ Panel Zone ของตัวอย่างในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 313.81 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00180 rad หรือ Displacement 109.4 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -314.78 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.00141 rad หรือ Displacement -100.5 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากรูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 112.86 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00030 rad หรือ Displacement 24.5 mm. สังเกตช่วงรูปของ Panel Zone ค่อยข้างที่จะแคบมากแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณเสามีพฤติกรรมในการสลายพลังงานได้ต่ำ

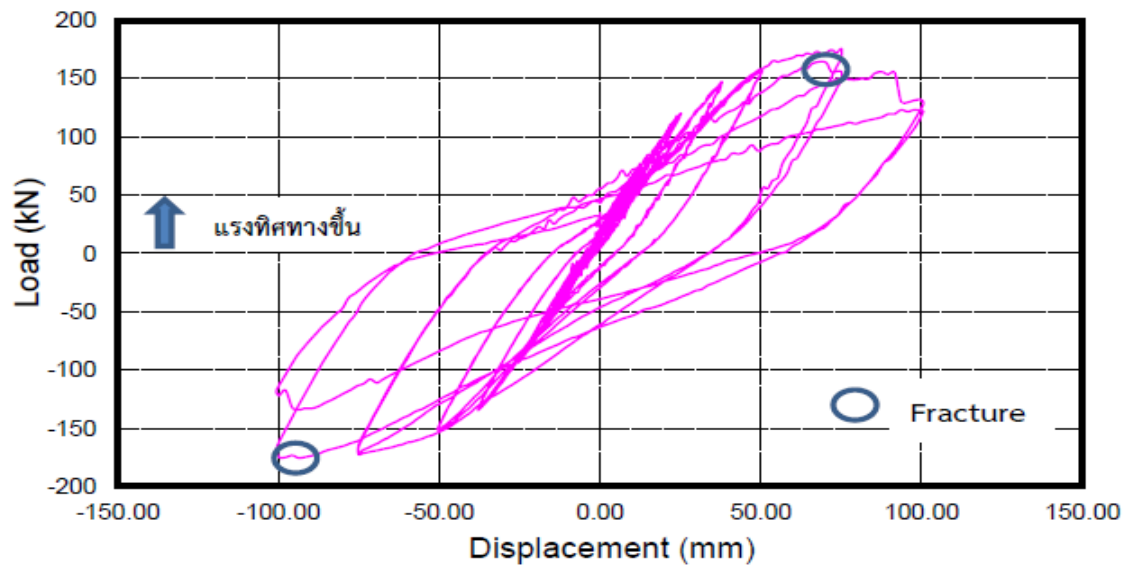


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Panel Zone Plastic Rotation (ST2)

ผลการทดสอบตัวอย่าง ST 3

ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement ของตัวอย่าง ST3

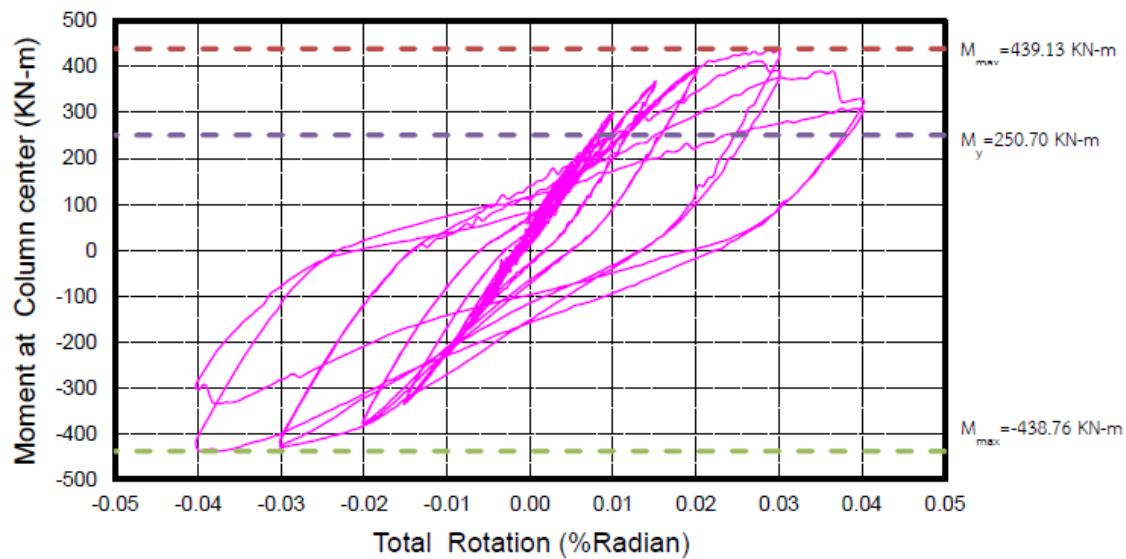
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) กับ ระยะการเคลื่อนที่ปลายคาน (Displacement) ของตัวอย่าง ST3 ตั้งแต่ Displacement 9 mm. ถึง Displacement 101 mm. โดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวกเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นลบเมื่อให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง พบว่าแรงกระทำที่ปลายคาน (Load) สูงสุดเท่ากับ 175.5 KN ที่ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน 75.1 mm. และต่ำสุดเท่ากับ -175.4 KN ที่ระยะเคลื่อนที่ปลายคาน 100.46mm. จากรูปที่ Displacement 37.9 mm. ลักษณะความชันของกราฟเป็นเส้นตรงคือแสดงถึงยังเป็นช่วงที่ตัวอย่างยังคงมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก (Elastic) นอกจากนั้นช่วงลูปที่แคบแสดงให้เห็นว่ามีการสลายพลังงานที่น้อยที่ Displacement 50 mm. ลักษณะความชันของกราฟเริ่มเปลี่ยนความชันและมีช่วงกราฟมีลูปที่กว้างกว่ารอบก่อนหน้าอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสลายพลังงานที่มากขึ้น ที่ Displacement 75 mm. จนถึง Displacement 101 mm. ลักษณะความชันของกราฟเปลี่ยนความชันและแรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและแรงในทิศทางลงมีการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน กราฟมีลูปที่กว้างมากแสดงให้เห็นว่าเป็นช่วงที่ตัวมีพฤติกรรมเป็นอินอีลาสติก (Inelastic) และรอยเชื่อมของข้อต่อมีการฉีกขาดที่ปีกคานด้านล่างก่อนเกิดขึ้นในรอบการทดสอบที่ Displacement 101 mm. และฉีกขาดที่คานด้านบนในรอบการทดสอบเดียวกัน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement (ST3)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Rotation ของตัวอย่าง ST 3

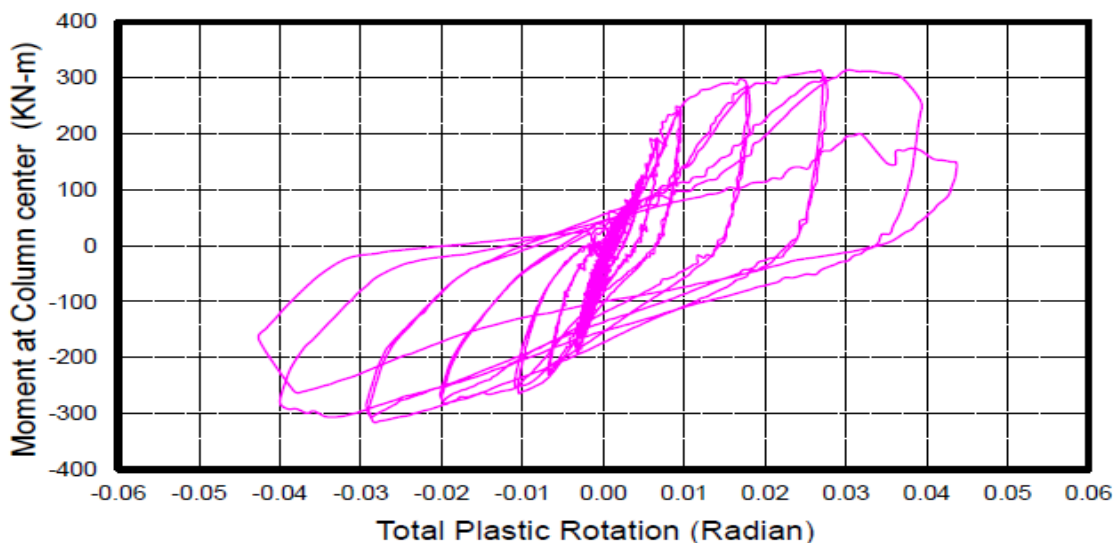
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ (Moment) ขึ้น สามารถคำนวณสมการ $Moment = P \times (L_b + d_c/2)$ (KN-m) ที่พยายามจะดัดให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Total Rotation โดย Total Rotation คือมุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่างในช่วงสภาวะยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 439.13 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.030 rad หรือ Displacement 75.1 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -438.76 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0374 rad หรือ Displacement -100.6 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 250.70 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00788 rad หรือ Displacement 19.7 mm.



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Total Rotation (ST3)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST3

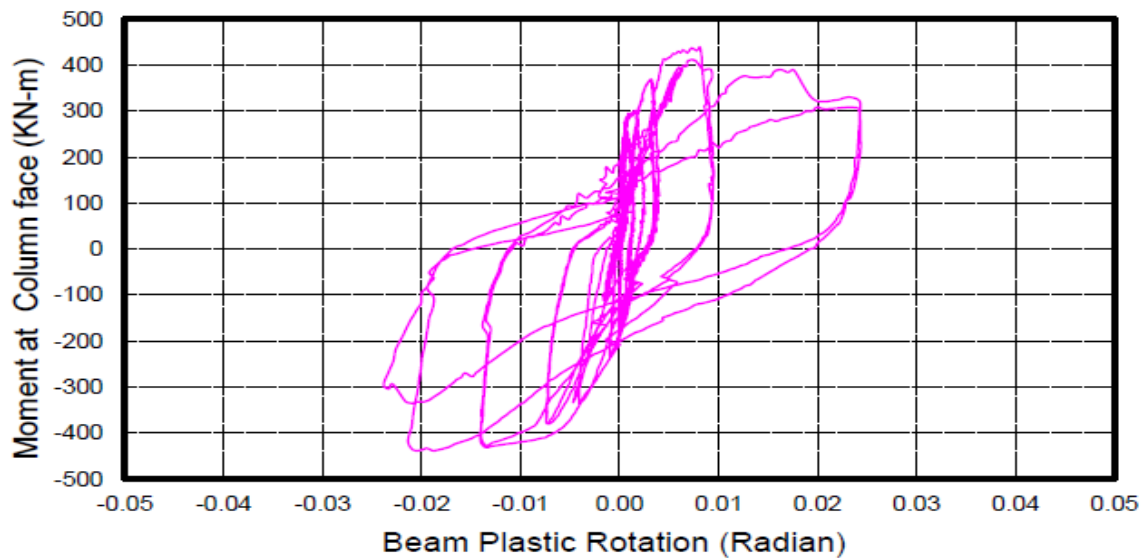
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ (Moment) ขึ้น สามารถคำนวณสมการ Moment $= P \times (L_b + d_c/2)$,(KN-m) ที่พยายามจะดัดให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมดในช่วงที่ไม่ยืดหยุ่น (Total Plastic Rotation) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Total Plastic Rotation โดย Total Plastic Rotation คือมุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่าง ในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 439.13 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.0170 rad หรือ Displacement 75.1 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -438.76 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.0211 rad หรือ Displacement -100.6 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 250.70 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00118 rad หรือ Displacement 19.7 mm.



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Total Rotation (ST3)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Beam Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST3

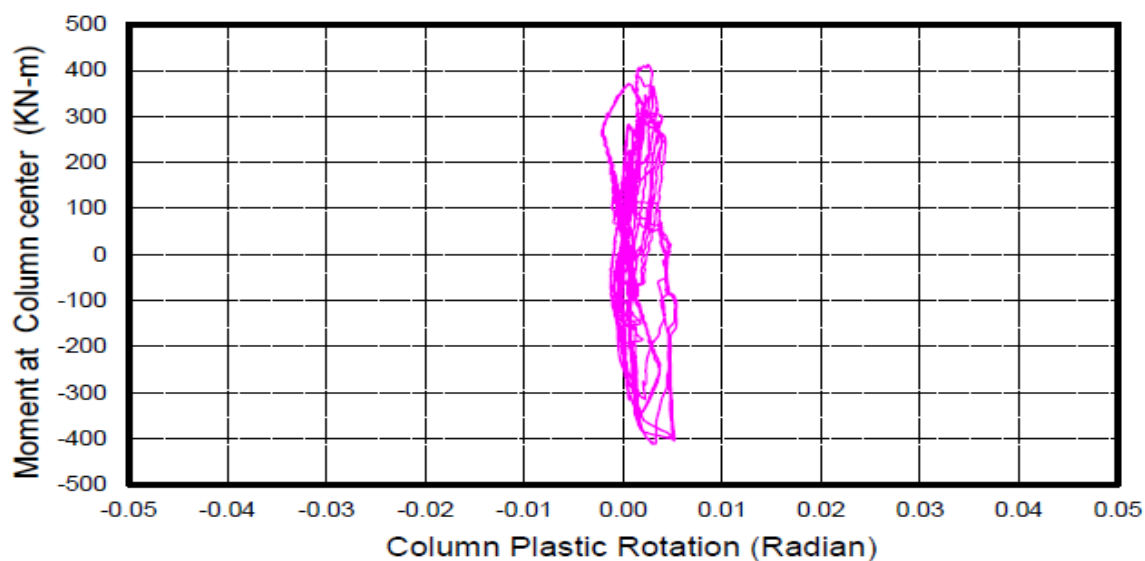
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของคาน (Beam Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์จะเป็นค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของข้อต่อหรือก็คือบริเวณหน้าเสาค่าโมเมนต์ดัดคือแรงกระทำปลายคานคูณกับระยะแรงกระทำถึงหน้าเสา (L_b) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face – Beam Plastic Rotation โดย Beam Plastic Rotation คือมุมหมุนบริเวณคานของตัวอย่างในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 412.78 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00811 rad หรือ Displacement 75.1 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -412.43 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.00188 rad หรือ Displacement -100.6 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 235.65 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00047 rad หรือ Displacement 19.4 mm. สังเกตช่วงลูปของคานมีความกว้างที่สุดลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกับมุมหมุนทั้งแสดงให้เห็นว่าคานจะสลายพลังงานมากที่สุดและจะเกิดความเสียหายมากที่สุด



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam Plastic Rotation (ST3)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment –Column Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST3

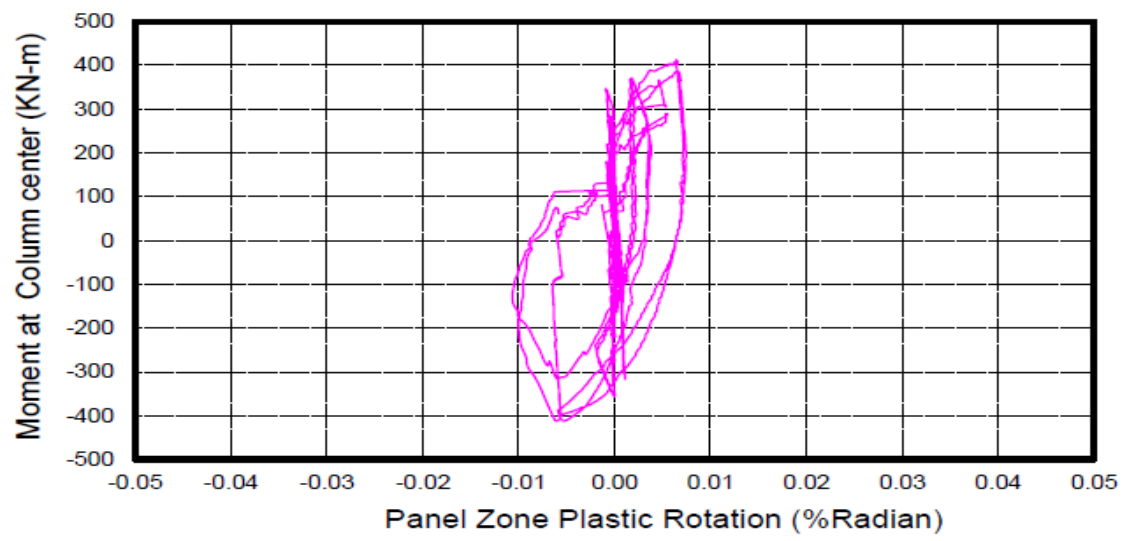
เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของเสา (Column Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา ($L_b + d_c/2$) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Column Plastic Rotation โดย Column Plastic Rotation คือมุมหมุนที่บริเวณเสาของตัวอย่าง ในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 439.13 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00254 rad หรือ Displacement 75.1 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -438.76 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.00294 rad หรือ Displacement -100.6 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 250.70 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00098 rad หรือ Displacement 19.4 mm. สังเกตช่วงลูปของเสาค่อยข้างที่จะแคบมา แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณเสามีพฤติกรรมในการสลายพลังงานได้ต่ำ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center กับ Column Plastic Rotation (ST3)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Panel Zone Plastic Rotation ของตัวอย่าง ST3

เมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัด (Moment) ที่พยายามจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหมุนทั้งหมด (Total Rotation) และมุมหมุนของ Panel Zone (Panel Zone Rotation) ก็เป็นส่วนหนึ่งของการหมุนทั้งหมดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงผลในหัวข้อนี้ โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นค่าโมเมนต์ที่บริเวณกึ่งกลางของข้อต่อที่เกิดจากแรงกระทำที่ปลายคานคูณกับระยะจากแรงกระทำถึงจุดกึ่งกลางของข้อต่อหรือกึ่งกลางเสา ($L_b + d_c/2$) โดยโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นบวกเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางขึ้นและโมเมนต์ที่ให้ค่าเป็นลบเกิดจากการให้แรงที่ปลายคานในทิศทางลง รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column center – Panel Zone Plastic Rotation โดย Panel Zone Plastic Rotation คือ มุมหมุนที่บริเวณ Panel Zone ของตัวอย่างในช่วงสภาวะที่ไม่ยืดหยุ่น จะพบว่าเมื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางขึ้นจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ 439.13 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00641 rad หรือ Displacement 75.1 mm. ในขณะที่ให้แรงกระทำที่ปลายคานในทิศทางลงจะเกิดค่า Maximum Moment เท่ากับ -438.76 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ -0.00294 rad หรือ Displacement -100.6 mm. โดย M_y เป็นโมเมนต์ที่ทำให้ตัวอย่างเริ่มคราก (Yield) ดูจากลูปของกราฟที่เริ่มมีช่องว่างเกิดขึ้นในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ Moment เท่ากับ 250.70 KN-m ที่ Rotation เท่ากับ 0.00027 rad หรือ Displacement 19.4 mm. สังเกตช่วงลูปของ Panel Zone ค่อยข้างที่จะแคบมากแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณเสามีพฤติกรรมในการสลายพลังงานได้ดี



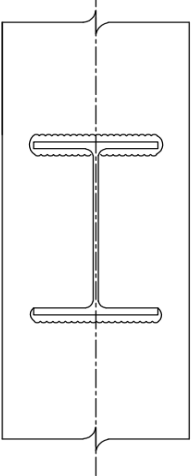
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Panel Zone Plastic Rotation (ST3)

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าผลการทดสอบตัวอย่างข้อต่อประเภท (Bolted end-plate connection)

ค่าที่ต้องการวัด	ST1		ST2		ST3	
	รอบการเคลื่อนที่	รอบการเคลื่อนที่	รอบการเคลื่อนที่	รอบการเคลื่อนที่	รอบการเคลื่อนที่	รอบการเคลื่อนที่
แรงสูงสุดที่หักกด UTM (kN)	56.002	67.350	133.191	117.912	148.635	187.470
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	125.430	125.458	125.978	126.028	100.638	100.647
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	150.908	167.838	333.81	294.58	389.132	488.762
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	472.846	525.89	784.452	692.732	731.568	977.524
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	472.846	525.89	784.452	692.732	731.568	977.524
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	41.613	45.228	55.29	60.54	100.281	101.514
มุมหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.04533	0.03747	0.043707	0.04258	0.030333	0.026865
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.011125	0.004604	0.005006	0.004393	0.005401	0.002150
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.04035	0.03497	0.034544	0.03507	0.023006	0.020826
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของ Panel Zone	0.004645	0.008008	0.005830	0.005751	0.007249	0.010371

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะการพังของข้อต่อ

ตัวอย่าง	ลักษณะความเสียหายที่ข้อต่อ
ST1	รอยเชื่อมฉีกขาดที่บริเวณปีก ด้านบน ทั้งขอบบนและล่าง แผ่นเพลทมีการบิดงอ Bolt เกลียวหลุด รอยเชื่อมฉีกขาดที่บริเวณปีก ด้านบน ทั้งขอบบนและล่าง แผ่นเพลทมีการบิดงอ Bolt เกลียวหลุด
ST2	รอยเชื่อมฉีกขาดที่บริเวณปีก ด้านบน แผ่นเพลทมีการบิดงอ เล็กน้อย Bolt ไม่มีความเสียหาย รอยเชื่อมฉีกขาดที่บริเวณปีก ด้านบน แผ่นเพลทมีการบิดงอ เล็กน้อย Bolt ไม่มีความเสียหาย

ตัวอย่าง	ลักษณะความเสียหายที่ข้อต่อ
ST3	 รอยเชื่อมฉีกขาดที่บริเวณปีก เล็กน้อย แผ่นเพลทมีการบิดงอ Bolt เกลียวฉุด รอยเชื่อมฉีกขาดที่บริเวณปีก เล็กน้อย แผ่นเพลทมีการบิดงอ Bolt เกลียวฉุด  

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ผลการทดสอบข้อต่อคาน-เสาประเภท Bolted end-plate connection สรุปแสดงดังตารางที่ 5.1-5.3

ตารางที่ 5.1 แสดงผลค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง ST1

ค่าที่ต้องการวัด	ST1	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงสูงสุดที่หวัคด UTM (kN)	56.002	67.350
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	125.430	125.458
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	150.908	167.838
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	472.846	525.89
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	472.846	525.89
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	41.613	45.228
มุมหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.04533	0.03747
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.011125	0.004604
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.04035	0.03497
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.004645	0.008008

ตารางที่ 5.2 แสดงผลค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง ST2

ค่าที่ต้องการวัด	ST2	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงสูงสุดที่หัวกด UTM (kN)	133.191	117.912
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	125.978	126.028
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	333.81	294.58
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	784.452	692.732
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	784.452	692.732
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	55.29	60.54
มุมหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.043707	0.04258
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.005006	0.004393
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.034544	0.03507
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.005830	0.005751

ตารางที่ 5.3 แสดงผลค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง ST3

ค่าที่ต้องการวัด	ST3	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงสูงสุดที่หัวกด UTM (kN)	148.635	187.470
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	100.638	100.647
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	389.132	488.762
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	731.568	977.524
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	731.568	977.524
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	100.281	101.514
มุมหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.030333	0.026865
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.005401	0.002150
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.023006	0.020826
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.007249	0.010371

เอกสารอ้างอิง

- 1) ABAQUS (2004), “User’s Manual I-VI Version 6.3”, Hibbit, Karission, and Sorenson, Inc, 1080 Main Street, Pawtucket, RI 02860.
- 2) Adey, B.T., Grondin, G.Y., Cheng, J.J.R (1997), “Extended End-Plate Moment Connections Under Cyclic Loading”, Structural Engineering Report No. 216, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Alberta, Canada.
- 3) Adey, B.T., Grondin, G.Y., Cheng, J.J.R (1998), “Extended End-Plate Moment Connections Under Cyclic Loading”, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier Applied Science, 46(1-3), Paper No. 133.
- 4) Adey, B.T., Grondin, G.Y., Cheng, J.J.R (2000), “Cyclic Loading of End-Plate Moment Connections”, Canadian Journal of Civil Engineering, National Research Council of Canada, 27(4), 683-701.
- 5) American Institute of Steel Construction (1994), “Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings”, AISC, 2nd Edition, Chicago, Illinois.
- 6) American Institute of Steel Construction (1997), “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
- 7) American Institute of Steel Construction (2000), “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
- 8) American Institute of Steel Construction (2003), “Extended End-Plate Moment Connections Seismic and Wind Applications”, AISC, 2nd Edition, Chicago, Illinois.
- 9) American Institute of Steel Construction (2005), “Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications”, AISC, Chicago, Illinois.
- 10) American Institute of Steel Construction (2005), “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
- 11) Astaneh-Asl, A. (1995), “Seismic Design of Bolted Steel Moment-Resisting Frames”, Steel Tips, Structural Steel Education Council, Moraga, CA, pp. 82.
- 12) Bahaari, M.R., and Sherbourne, A.N. (1994), “Computer Modeling of an Extended End-Plate Bolted Connection”, Computers and Structures, Vol. 52, pp. 879-93.

- 13) Bahaari, M.R., and Sherbourne, A.N. (1996a), "Structural Behavior of End-Plate Bolted Connections to Stiffened Columns", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 122(8), pp. 926-935.
- 14) Bahaari, M.R., and Sherbourne, A.N. (1996a), "3D Simulation of Bolted Connections to Unstiffened Columns – II. Extended Endplate Connections", *Journal of Constructional Steel Research, Elsevier Applied Science*, 40(3), pp. 189-223.
- 15) D.Grecea,A.Stratan,A.Ciutina,D.Dubina,Politehnica University of Timisoara,Romania.at present.Prof. to INSA Rennes France.
- 16) Federal Emergency Management Agency (2000), "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings", Report FEMA-350, SAC Joint Venture, Sacramento, California.
- 17) Gebbeken, N., Rothert, H., and Binder, B. (1994), "On the Numerical Analysis of Endplate Connections", *Journal of Constructional Steel Research, Elsevier Applied Science*, 30(1), pp. 177-196.
- 18) Ghobarah, A., Osman, A., and Korol, R.M. (1990), "Behavior of Extended End-Plate Connections Under Cyclic Loading", *Engineering Structures, Elsevier Science*, Vol. 12, pp. 15-26.
- 19) Goel, S.C., and Stojadinovic, B., and Lee, K.H., Margarian, A.G., Choi, J.H., Wongkaew, A., Reyher, B.P., and Lee, D.Y. (1998), "Conduct Parametric Tests of Unreinforced Connections", Preliminary Report to SAC, Task 7, Subtak 7.02, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan
- 20) Mays, T.W. (2000), "Application of the Finite Element Method to the Seismic Design and Analysis of Large Moment End-Plate Connections", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- 21) Meng, R.L., and Murray, T.M. (1997), "Seismic Performance of Bolted End-Plate Moment Connections", *Proceedings of the 1997 National Steel Construction Conference, Chicago, Illinois, AISC*, May 7-9, 1997, 30-1 -30-14.
- 22) Scott, A.C., Michael, D.E., and John, L.G. (2000), "Retrofit of Pre-Northridge Moment-Resisting Connections", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 4, April, pp. 445-452.

- 23) Sun, F., and Sun, Mi, Li, G. (2014), “Experimental Study on Seismic Behavior of High-Strength Steel Beam-to-Column End-Plate Connections”, *Journal of Building Structures*, 35(4), pp. 116-124.
- 24) Stojadinovic, B., Goel, S., Lee, H.K., Margarian, A.G., and Choi, J.H. (2000), “Parametric Tests on Unreinforced Steel Moment Connections”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, January, pp. 40-49.
- 25) Tahir, M., and Hussein., Md., A. (2008), “Experimental Tests on Extended End-Plate Connections with Variable Parameters”, *Steel Structures*, Vol. 8, pp. 369-381.
- 26) Wang, M., Shi, Y., Wang, Y., and Shi, G. (2013), “Numerical Study on Seismic Behaviors of Steel Frame End-Plate Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 90, November, pp. 140-152.
- 27) Wang, T., Wang, Z., and Wang, J. (2013), “Experimental Study and Finite Element Analysis of Hysteretic Behavior of End-Plate Connection Semi-Rigid Space Steel Frames”, *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 7, pp. 68-76.
- 28) Wongkaew, A., Goel, S.C., and Stojadinovic, B. (2001), “Development of Improved Details for Unreinforced Welded Steel Moment Connections”, Report UMCEE 01-20, Dept. of Civ. & Env. Engrg., Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- 29) กระทรวงมหาดไทย, กฎกระทรวงฉบับที่ 50 (พ.ศ. 2550) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- 30) อานนท์ วงษ์แก้ว, “การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ข้อต่อคาน-เสาเหล็กก่อสร้างตามมาตรฐานประเทศไทย ภายใต้แรงวัฏจักร”, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, เล่มที่ 1, หน้า STR 352-359, 2556.*