



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่
ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

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. 2560

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2560A10802184

สัญญาเลขที่ ๒๓/๒๕๖๐

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่
ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

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 ๒๕๖๒

ABSTRACT

Experimental study of two steel beam-column end-plate connections has been conducted to investigate their capability for seismic resistance. These connections were designed as the exterior beam-column connections with fully welded beams to bolted end-plate to columns with 8 bolts following Thailand-steel practice. Hysteretic behavior, plastic rotations, and failure modes are the studied reports. SP1 shows very well seismic behavior, oppositely to SP2. Yielding of the steel end-plate was observed from SP1, but rather fracture of welded material in the end-plate for SP2. Also, the analytical study of 8 and 12 bolts of 8 connections with the same columns and 4 pairs of the beam sections were achieved. The analytical results show that specimens with 8 bolts can resist almost the same load as 12 under elastic behavior, reverse behavior observed under inelastic.

Keywords: Steel Moment Connection, Welded End-Plate, Seismic Behavior, Bolt

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหวได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2560 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 การสร้างตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินการทดสอบ	15
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	32
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	50
เอกสารอ้างอิง	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การก่อสร้างด้วยโครงสร้างเหล็กกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างเหล็กสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและสะดวกกว่าโครงสร้างคอนกรีต และคุณสมบัติของเหล็กที่สามารถรับแรงอัดและแรงดึงได้ดี เนื่องจากเหล็กผลิตด้วยกรรมวิธีที่มีการควบคุมคุณภาพที่ดี ทำให้ไม่มีปัญหาด้านโครงสร้างวัสดุ นอกจากนี้โครงสร้างเหล็กยังมีคุณสมบัติด้านความเหนียวและกำลังหลังจุดครากที่สูง เมื่อรับแรงจึงไม่เกิดการวิบัติแบบฉับพลัน วิศวกรส่วนใหญ่จึงเชื่อว่าโครงสร้างเหล็กจะเสียหายน้อยมากเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวจะถูกสลายไปที่บริเวณข้อต่อและองค์อาคารยัดตั้งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นบริเวณข้อต่อและองค์อาคารยัดตั้งจึงควรมีความเหนียวเพียงพอที่จะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงรูป และสลายพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวโดยไม่มีรอยแตกร้าว

อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1994 ได้เกิดแผ่นดินไหวขึ้นที่เมือง Northridge ในประเทศ สหรัฐอเมริกา เมื่อสำรวจความเสียหายด้านโครงสร้าง พบว่า ความเสียหายส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นต่ำ เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อาคารคอนกรีตอัดแรง แสดงดังรูปที่ 1.1 และ 1.2 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 และยังไม่มีการมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวโดยตรง ดังนั้นทำให้ปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กเหล่านี้ได้เหมือนกับที่เกิดขึ้นมาแล้วในประเทศอื่นๆ เมื่อเกิดแผ่นดินไหว นอกจากนี้รายละเอียด

ของการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กในประเทศไทย ก็แตกต่างไปจากมาตรฐานของประเทศอื่น ๆ ซึ่งรายละเอียด การก่อสร้างนี้ส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณข้อต่อ รอยต่อ และระบบยึดรั้ง ซึ่งส่วนเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งใน การดูดซับพลังงานจากแผ่นดินไหว รายละเอียดการก่อสร้างที่ใช้ในประเทศไทยเหล่านี้ ยังมีได้รับการศึกษา อย่างจริงจังถึงศักยภาพและพฤติกรรมเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว การนำมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กใน ต่างประเทศมาใช้โดยตรงอาจเป็นการสิ้นเปลือง และอาจเป็นการไม่ถูกต้องเนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้าง เหล็กในประเทศไทยอาจแตกต่างกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กในต่างประเทศ ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จะ เป็นการรวบรวม วิเคราะห์ และนำเสนอข้อมูลที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อโครงสร้างเหล็กที่ก่อสร้างอยู่ใน ประเทศไทย ซึ่งถูกออกแบบสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้ง และแรงลมเท่านั้น จากนั้นจะทำการประเมิน พฤติกรรมของโครงสร้างนี้ว่าจะมีพฤติกรรมอย่างไรเมื่อต้องถูกแรงแผ่นดินไหวกระทำ มีความสามารถและ ศักยภาพในการต้านแรงแผ่นดินไหวได้ในระดับใด โดยจะเน้นที่องค์อาคารที่เป็นจุดอ่อนต่อการต้านทาน แผ่นดินไหว คือ ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทย



รูปที่ 1.1 ความเสียหายของอาคารเหล็กภายหลังการเกิดแผ่นดินไหว



รูปที่ 1.2 ความเสียหายของอาคารคอนกรีตเหล็กภายหลังการเกิดแผ่นดินไหว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อประยุกต์ใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่มีอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการทดสอบข้อต่อคาน-เสาโครงสร้างเหล็กประเภท End-Plate ของเสาต้นริม โดยใส่แรงสลับทิศ
- 2) เพื่อทดสอบข้อต่อคาน-เสาประเภท End-Plate ที่เป็นตัวแทนของมาตรฐานการก่อสร้างในประเทศ
- 3) 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 ของเสาต้นริมที่มีรายละเอียดการก่อสร้างเหมือนกับข้อมูลการก่อสร้างที่รวบรวมมาในข้อ 1
- 3) วิเคราะห์ผลการทดสอบของตัวอย่างโดยการประเมินจากผลตอบสนอง ลักษณะการพัง ความยืดหยุ่น ความเหนียว และพลังงานแผ่นดินไหวที่ตัวอย่างทดสอบสามารถดูดซับได้ และหาสาเหตุของการทำให้ข้อต่อคาน-เสาชนิดนี้เสียหาย

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

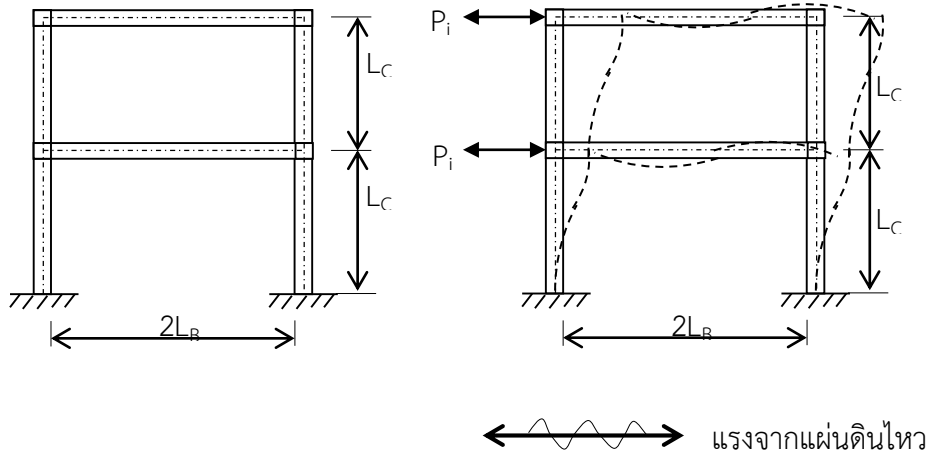
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างสากลคือ ภายใต้อาคารขนาด เล็กจะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนหนึ่งส่วนใดของตัวอาคาร ภายใต้อาคารขนาดปานกลางจะต้องไม่ เกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างที่รับแรง และภายใต้อาคารขนาดใหญ่ อาคารอาจเกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างรับแรงได้ แต่ต้องไม่พังถล่มลงมา เพื่อความปลอดภัยแก่ชีวิตผู้อยู่อาศัย กล่าวอีก นัยหนึ่งคือ โครงสร้างจะต้องถูกออกแบบให้มีความเหนียวดีพอ เพื่อให้อาคารนั้นสามารถทนต่อการสั่นไหว จนถึงขั้นเกิดการแตกร้าว และเกิดการครากขององค์อาคารได้พอสมควร โดยยังคงกำลังส่วนใหญ่ไว้ได้ (80% ของกำลังสูงสุด) ดังนั้น เมื่อโครงสร้างเหล็ก ที่ถูกออกแบบรายละเอียดให้มีความเหนียวจะสามารถดูดซับ พลังงานจากการสั่นไหวเมื่อเกิดแผ่นดินไหวได้ดี โดยที่รักษากำลังส่วนใหญ่ของอาคารไว้ได้ และไม่พังทลาย ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว ในทางตรงกันข้าม ถ้าโครงสร้างเหล็กมีส่วนหนึ่งส่วนใดเช่น ข้อต่อ ที่มีความเหนียวไม่ เพียงพอหรือไม่แข็งแรงพอ ก็จะไม่สามารถรับแรงแผ่นดินไหว และแรงแนวตั้งต่อไปได้ และเกิดการวิบัติ เสียก่อน และจะทำให้องค์อาคารรวมเกิดการวิบัติตามมาอย่างรวดเร็ว

โครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในเขตที่มีแผ่นดินไหว โดยเฉพาะในอาคาร ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เหล็กนั้นโดยตัววัสดุเองเป็นวัสดุที่มีความเหนียวในตัว โดยมากแล้ววิศวกร จึงมีความเชื่อว่า โครงสร้างเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบเหนียวเช่นเดียวกับตัววัสดุ ในความเป็นจริง นั้นโครงสร้างเหล็กจะมีพฤติกรรมแบบเหนียวได้ จะต้องได้รับการออกแบบและให้รายละเอียดที่ถูกต้อง เหมาะสม จากผลงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็ก รวมถึงข้อมูลที่นักวิจัยรวบรวมมาได้จาก แผ่นดินไหวในระยะหลังทำให้วิศวกรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กมากขึ้นอย่าง มาก ซึ่งส่งผลให้มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวมีการปรับปรุงเป็นอันมากใน ระยะหลัง อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันมักจะเน้นที่การศึกษาพฤติกรรมและหาวิธีการออกแบบ อาคารเหล็กในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวสูง เช่น ชุดโครงการวิจัยของ Federal Emergency Management [16] และของ SAC Joint Venture โดยโครงการวิจัยเหล่านี้ เน้นไปที่การทดสอบจุดต่อ ระหว่างเสาและคานของโครงสร้างเหล็กที่ได้รับการออกแบบไว้เพื่อรับแรงไหว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอาคาร เหล็กที่มีได้ออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว ยังมีอยู่น้อยมาก เช่นงานของ Astaneh-Asl et al. [11] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย มีงานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างเหล็กรับแรงแผ่นดินไหวน้อยมาก และไม่มี

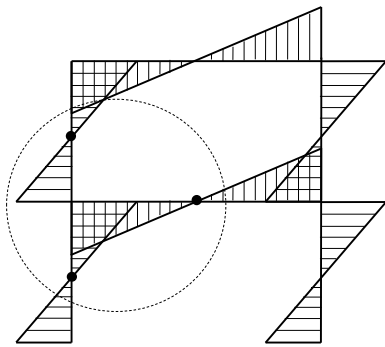
งานวิจัยใดเลยที่ศึกษาถึงความพร้อมและศักยภาพของโครงสร้างเหล็กที่มีอยู่เดิม ซึ่งถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างที่ใช้ในประเทศไทย โดยอาจเป็นตามมาตรฐาน AISC วิธี ASD หรือ LRFD ก็ตาม กล่าวอีกนัยหนึ่ง โครงสร้างเหล็กเหล่านี้มิได้ถูกออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวโดยตรง จึงอาจมีคำถามถึงพฤติกรรมความสามารถ และศักยภาพของโครงสร้างเหล็กเหล่านี้เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ถึงแม้ว่าประเทศไทย โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร อาจมีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็กถึงขนาดปานกลางก็ตาม

เมื่อโครงสร้างได้รับแรงแผ่นดินไหวอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน (Ground Motion) โครงสร้างจะเกิดการโยกตัวไปมาและความเร่งเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของโครงสร้าง ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างต่อโครงสร้างซึ่งแรงนี้เป็นแรงเฉื่อยที่เกิดจากความเร่งและมวลของโครงสร้างนั่นเอง เมื่อเกิดความหน่วงจากแรงแผ่นดินไหวแล้วส่วนต่างๆขององค์อาคารไม่สามารถเคลื่อนตัวไปพร้อมกับฐานรากได้จึงทำให้องค์อาคารนั้นเกิดการเสียรูปโดยเฉพาะบริเวณข้อต่อคาน-เสาเหล็ก ซึ่งเป็นจุดที่อ่อนแอและได้รับความเสียหายมากที่สุด ดังนั้นเราจึงได้นำข้อต่อบริเวณนี้มาทำการทดสอบในรูปแบบของการรับแรงแบบแรงสลับ ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำคาน-เสาเหล็ก ต้นนอกสุดขององค์อาคารมาทำการทดสอบ เนื่องจาก จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าเสาต้นนอกสุดได้รับโมเมนต์มากที่สุดจากแรงที่มากระทำ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวแผ่นดินจะมีการเคลื่อนตัวในลักษณะคลื่น (Wave) ทำให้เกิดแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏจักร (Cyclic Load) โดยมีลักษณะไป-กลับ (ซ้าย - ขวา) เมื่อโครงสร้างข้อต่อเหล็กรับแรงแผ่นดินไหว จึงเสมือนว่าถูกแรงกระทำด้านข้างกระทำ ดังแสดงในรูป 2.1ก และ 2.1ข ส่วนรูป 2.1ค แสดงไดอะแกรมโมเมนต์ตัดของโครงสร้างข้อต่อเหล็ก เมื่อรับแรงด้านข้าง จะเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางเสาชั้นบน - ล่าง และจุดกึ่งกลางช่วงคาน จะเป็นจุดที่โมเมนต์ตัด เป็นศูนย์ (จุดตัดกลับของโมเมนต์ตัด) นั้นหมายความว่า ชั้นส่วนคาน-เสาตรงบริเวณนี้ ซึ่งเป็นบริเวณข้อต่อระหว่างคานกับเสา สามารถจำลองสภาพการใส่แรง และเงื่อนไขการยึดรั้งได้ดังรูปที่ 2.1ง กล่าวโดยสรุป ข้อต่อคาน-เสาแบบถ่ายโมเมนต์ของเสาต้นริม เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว สามารถจำลองลักษณะการใส่แรงได้ โดยใส่แรงวัฏจักรที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงคาน โดยที่ปลายเสาทั้งบนและล่างจะมีเงื่อนไขของการยึดรั้งเป็นแบบสลัก (Pin Support) รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนจากคานสู่เสาเมื่อปลายคานได้รับแรงกระทำและปลายเสาเป็นการยึดรั้งแบบหมุนอิสระ ตามรูปพบว่าค่าโมเมนต์ตัดในเสาจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณปีกคานบนและปีกคานล่าง นอกจากนี้มีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกึ่งกลางเสา ส่วนค่าแรงเฉือนในเสามีค่าคงที่จากตำแหน่งรองรับด้านบนถึงบริเวณปีกคานด้านบนและมีค่าเท่ากับค่าแรงเฉือนจากปีกคานล่างถึงตำแหน่งรองรับด้านล่าง ส่วนในพื้นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างปีกคานบนถึงปีกคานล่างค่าแรงเฉือนจะมีค่าสม่ำเสมอและมีค่าสูงสุด

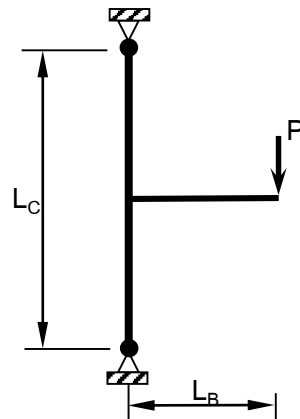


(ก) การจำลองโครงข้อแข็งเหล็กเพื่อวิเคราะห์การรับแรงด้านข้าง

(ข) การจำลองการเสียรูปของโครงข้อแข็งเหล็กเมื่อรับแรงด้านข้าง

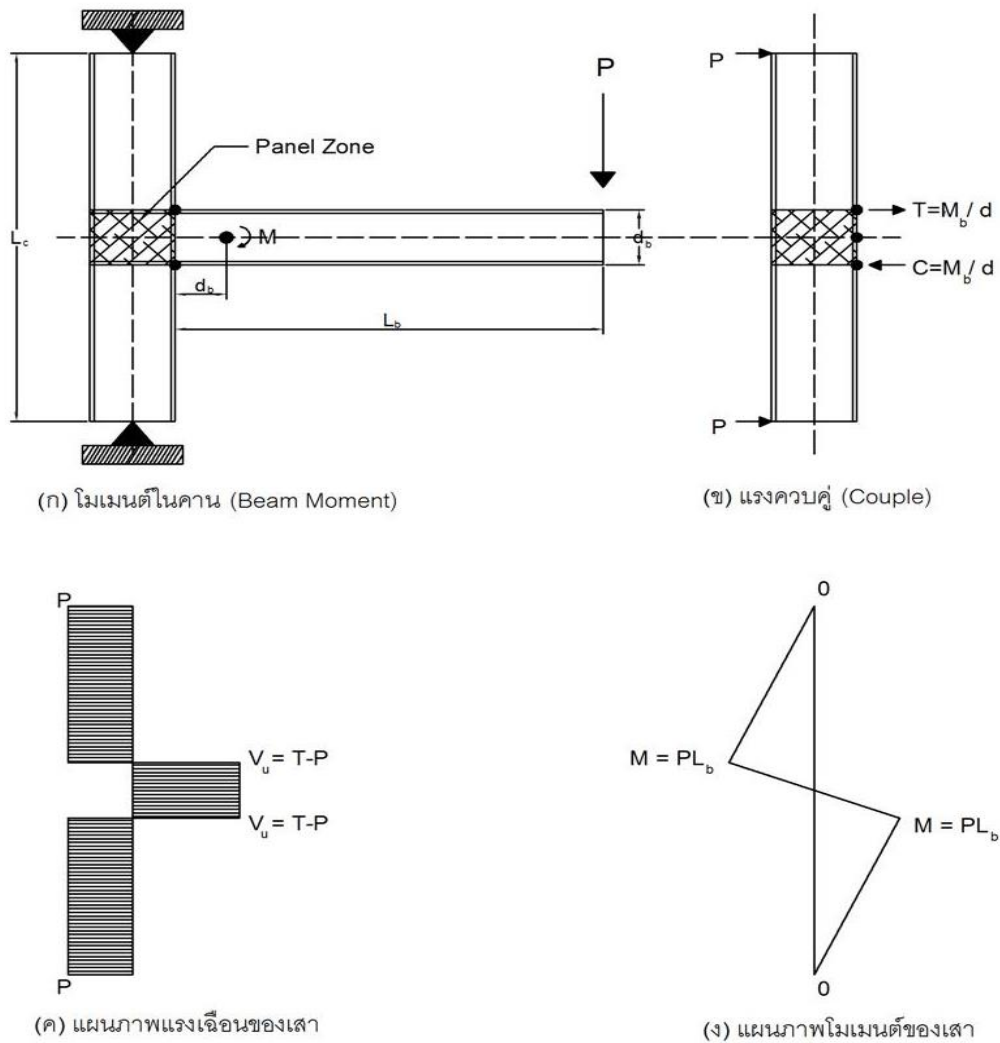


(ค) แผนภาพแสดงโมเมนต์ภายในของโครงสร้างเหล็ก



(ง) ขยายบริเวณข้อต่อ

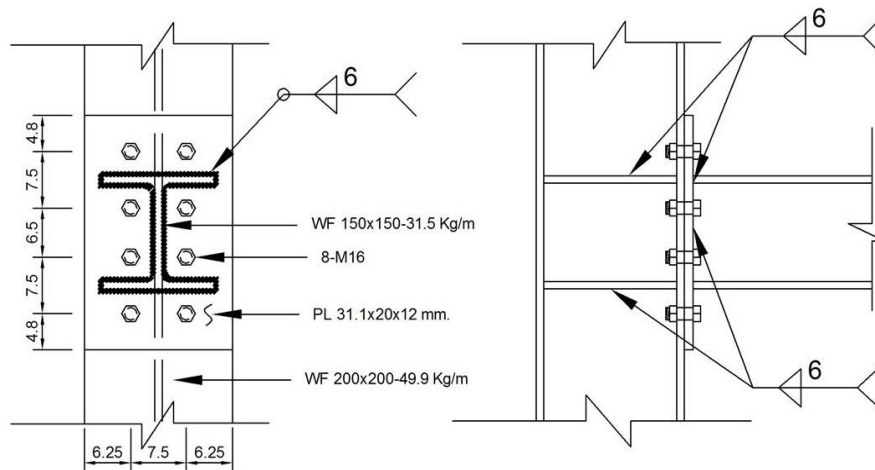
รูปที่ 2.1 โครงข้อแข็งเหล็กเมื่อมีการรับแรงแผ่นดินไหว



รูป 2.2 แสดงการถ่ายโอนโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างขณะที่ปลายคานได้รับแรงกระทำ

จากการรวบรวมข้อมูลการก่อสร้างโครงเหล็กในประเทศไทยในปัจจุบัน พบข้อมูลว่าข้อต่อระหว่างคาน-เสาที่วิศวกรโยธามักนิยมออกแบบ นอกจากใช้การเชื่อมต่อด้วยวัสดุเชื่อมเป็นหลักแล้วยังนิยมใช้ข้อต่อประเภท End-Plate ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หลังการเกิดแผ่นดินไหวปี ค.ศ. 1994 มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงแผ่นดินไหวของประเทศสหรัฐอเมริกาได้รับการปรับปรุงและรวบรวมรายละเอียดการก่อสร้างข้อต่อคาน-เสาเหล็กไว้ในเอกสาร FEMA350 [16] โดยแบ่งชนิดข้อต่อคาน-เสาเหล็กออกเป็นประเภทต่างๆ ซึ่งข้อต่อแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมกับบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดต่างๆกัน สำหรับข้อต่อเหล็กประเภท

End-Plate ที่ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 4 ประเภท แสดงในตารางที่ 1 เมื่อเทียบเคียงข้อต่อคาน-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) ต้องมีความสามารถรองรับการหมุนได้น้อย 0.04 เรเดียน ส่วนโครงข้อแข็งแบบธรรมดา (OMF) จะต้องหมุนได้น้อย 0.01 เรเดียน รูปที่ 2.4 แสดงข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมและไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงตามมาตรฐาน AISC (American Institute of Steel Construction) [9]



การเชื่อมต่อโดยสลักเกลียว

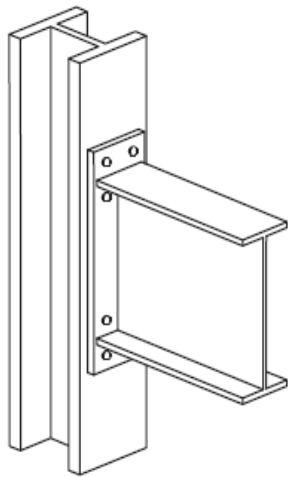
รูปที่ 2.3 รายละเอียดข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ที่ก่อสร้างในประเทศไทย

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

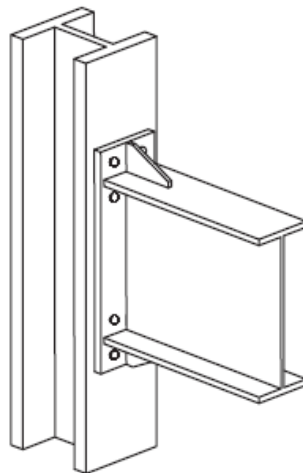
ชนิดของข้อต่อคาน-เสา	ชนิดโครงข้อแข็ง
ข้อต่อ End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรง (Bolt Unstiffened End-Plate, BUEP)	OMF ¹ หรือ SME ²
ข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรง (Bolt stiffened End-Plate, BSEP)	OMF ¹ หรือ SME ²
ข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นปีกโลหะ (Bolt Flange Plate,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

*ข้อต่อชนิดนี้ อาจเป็นแบบยึดเต็มหรือยึดบางส่วน ¹OMF: Ordinary Moment Frame

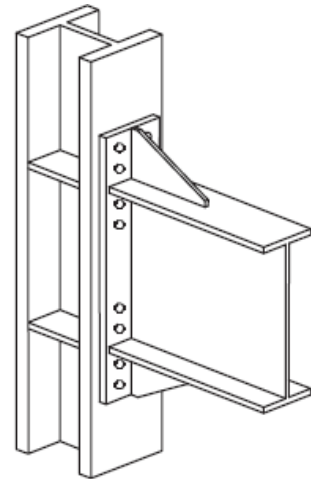
²SMF: Special Moment Frame



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 2.4 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 โดยมี การทดสอบชิ้นงานโดยใส่แรงแบบวัฏจักร (Cyclic loading) กับชนิด Welded Unreinforced Flanges-Bolted Web ผลการทดสอบชิ้นงานจากสภาพภายนอกแสดงให้เห็นว่าเมื่อรอยเชื่อมมีความเหนียวต่ำ ความ แข็งแรงของปีกคานของคานจะไม่เพียงพอต่อแรงกระทำ ซึ่งจากการสังเกตทำให้เกิดการปรับปรุงปีกคานโดย การแทนที่ที่ปีกคานด้วยร่องของรอยเชื่อม ซึ่งรอยเชื่อมมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้เกิดการแตกในบริเวณ ขอบบนของรอยเชื่อม

D.Grecea, A. Stratan, A. Ciutina, D. Dubina [15] เป็นการศึกษามาตรฐานในการออกแบบแบบใหม่ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของข้อต่อโดยมีตัวแปร 3 ตัวคือ กำลัง (Strength) ความแข็ง (Stiffness) ความเหนียว (Ductility) และการต้านทานโมเมนต์ของข้อต่อซึ่งความเหนียวจะถูกวัดออกมาในรูปแบบของการหมุนได้ ข้อ ต่อจะถูกแบ่งโดยการจัดหมวดหมู่ ซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบความเหนียวของข้อต่อดังนี้

- 1) ระดับที่ 1 ข้อต่อแบบเหนียว ซึ่งความเหนียวของข้อต่อจะถูกพัฒนามาจากการต้านโมเมนต์แบบ พลาสติกโมเมนต์และสามารถหมุนได้ในปริมาณที่มาก
- 2) ระดับที่ 2 ข้อต่อแบบมีความเหนียวปานกลาง ซึ่งความเหนียวของข้อต่อจะถูกพัฒนามาจากการต้าน โมเมนต์แบบพลาสติกโมเมนต์และมีข้อจำกัดในการหมุน
- 3) ระดับที่ 3 ข้อต่อที่ไม่มีความเหนียว โดยจะเกิดการพังแบบเปราะบริเวณข้อต่อก่อนที่จะเกิดค่า พลาสติกโมเมนต์

งานวิจัยในปีค.ศ. 1990 โดย Ghobarah [18] และคณะ ได้ทำงานทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสา เหล็กประเภท End-Plate ที่มีการเสริมและไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อจำนวนทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยใส่แรงกระทำแบบแรงวัฏจักรและมีการใส่แรงกระทำในแนวแกนของเสาด้วยในบางตัวอย่าง ผล การทดสอบแสดงให้เห็นว่า ข้อต่อ End-Plate ที่มีสัดส่วนความแข็งแรงระหว่างแผ่นเหล็ก End-Plate คาน และ เสา ที่เหมาะสมสามารถสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้ดี โดยไม่สูญเสียความแข็งแรงของข้อต่อ กลุ่มนักวิจัยท่าน นี้ได้เสนอการออกแบบข้อต่อ End-Plate ที่ไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อไว้ว่า สลักเกลียวและ แผ่นเหล็ก End-Plate ควรถูกออกแบบให้มีค่ากำลังโมเมนต์พลาสติกประมาณ 1.3 เท่าของค่ากำลังโมเมนต์ พลาสติกของคาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสียหายในสลักเกลียวและแผ่นเหล็ก End-Plate เนื่องจากการถ่าย แรง ในส่วนของข้อต่อ End-Plate ชนิดเสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อนั้น สลักเกลียวและแผ่น เหล็ก End-Plate ควรถูกออกแบบให้มีค่ากำลังโมเมนต์พลาสติกเท่ากับค่าโมเมนต์พลาสติกกระบุของคาน

Astaneh-Asl (ค.ศ. 1995) [11] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสา End-Plate ชนิดไม่เสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งแรงบริเวณข้อต่อจำนวน 2 ตัวอย่าง เพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างนี้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กของ AISC (American Institute of Steel Construction) สำหรับรับแรงกระทำในแนวตั้งเท่านั้น 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 ตัวอย่างเป็นการใส่แรงกระทำในแนวตั้งทางเดียวเท่านั้น ตัวอย่างทดสอบ 12 ตัวอย่างถูกออกแบบให้ข้อต่อ End-Plate มีค่าโมเมนต์พลาสติกกระบุนน้อยกว่าค่าโมเมนต์พลาสติกกระบุนของคานและเสา 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 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายแรงของสลักเกลียวนั้นให้ผลการทดสอบที่ดี

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 เมื่อการทดสอบเข้าสู่ช่วงอินีลาสติกเพียงเล็กน้อย ส่วนข้อต่อที่ไม่มีการเว้นช่องสำหรับการเชื่อมนั้นจะไม่เกิดการฉีกขาดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนลิเมนต์ยังช่วยยืนยันว่า การมีช่องเว้นสำหรับการเชื่อมต่อเพิ่มความเค้นบริเวณปีกคานที่บริเวณรอยเชื่อมจนอาจทำให้เกิดการฉีกขาดได้ จึงสรุปว่าไม่ควรมีช่องเว้นการเชื่อมต่อ (Access hole) สำหรับข้อต่อประเภท End-Plate นอกจากนี้ยังมีข้อสรุปเสนอให้ใช้ข้อต่อคาน-เสาประเภท End-Plate กับโครงข้อแข็งเหล็กที่ใช้ในบริเวณแผ่นดินไหวด้วย

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

Bahaari และ Sherbourne (ค.ศ. 1994, 1996) [12, 13, 14] ใช้โปรแกรมไฟไนลิเมนต์ ANSYS วิเคราะห์พฤติกรรมข้อต่อ End-Plate ชนิด 4 รูเจาะแบบเสริมและไม่เสริมความแข็งแรงของข้อต่อด้วยแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ 3 มิติ แบบจำลองถูกสร้างด้วยอิเลเมนต์ประเภท Plate Brick และ Truss เพื่อทำการจำลองรูปร่างของคาน เสา แผ่นเหล็ก สลักเกลียวและอื่นๆ นอกจากนี้ยังใส่คุณสมบัติของวัสดุทั้งในช่วงอีลา-สติกและอินีลาสติก เพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์เสมือนจริงมากที่สุด จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองเทียบกับผลการทดสอบ นักวิจัยทั้งสองท่านสรุปว่า แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมีความเที่ยงตรงสูงสามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อประเภทนี้ได้ดีเยี่ยม

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 ขนาดสลัก

เกลียว และขนาดคาน มีผลกระทบต่อกำลังของข้ออย่างมาก ค่าการรับแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการออกแบบของ Eurocode 3

Wang และคณะ (ค.ศ. 2013) [26] ได้ทำการวิเคราะห์ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของข้อต่อนั้นได้พิจารณาถึงชนิดของเอลิเมนต์คุณสมบัติเหล็กเมื่อรับแรงวัฏจักร คุณสมบัติสลักเกลียว พฤติกรรมการสัมผัสระหว่างสลักเกลียวและแผ่นเหล็ก End-Plate และแรงที่ใช้ในการศึกษาเป็นแรงวัฏจักร ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ข้อต่อ End-Plate ที่มีการออกแบบที่ดี สามารถรับแรงวัฏจักรสูงสุดได้ดีเทียบเท่ากับข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทเชื่อม แต่จะมีลักษณะการลดลงของกำลังและการเสียหายที่ต่างกัน ข้อต่อ End-Plate ที่มีการเสริมกำลังที่ข้อต่อด้วยแผ่นเหล็ก มีความสามารถในการรับแรงและแสดงลักษณะการพังที่ดีกว่าข้อต่อ End-Plate ที่ไม่เสริมกำลัง

Wang และคณะ (ค.ศ. 2013) [27] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงเหล็กที่มีข้อต่อคาน-เสาประเภท End-Plate ด้วยการทดสอบโครงเหล็กที่มีขนาด $1/4$ ของโครงสร้างจริง และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงสร้างดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบผล จากการทดสอบสรุปได้ว่า 1) โครงเหล็กที่ใช้ข้อต่อ End-Plate แสดงพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวได้ดี มีความเหนียวสูงสามารถใช้กับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ได้ 2) จุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้นที่บริเวณปลายคาน ค่าความเค้นและค่าเสียรูปของข้อต่อมีค่าน้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้นที่โคนเสาและปลายคาน นอกจากนี้ยังสรุปว่าโครงเหล็กที่ก่อสร้างด้วยข้อต่อชนิดนี้แสดงพฤติกรรมเป็นตามหลักการออกแบบเสาแข็ง-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 ที่ใช้
จะเป็นเหล็กเกรดสูง

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 บทนำ

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

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 2 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะและขนาดโดยรวมของตัวอย่างทดสอบ SP1 ถึง SP2 ซึ่งมีลักษณะเป็นเสา-คานตันริมของโครงสร้างในองค์อาคารประกอบด้วยคานยาว 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.

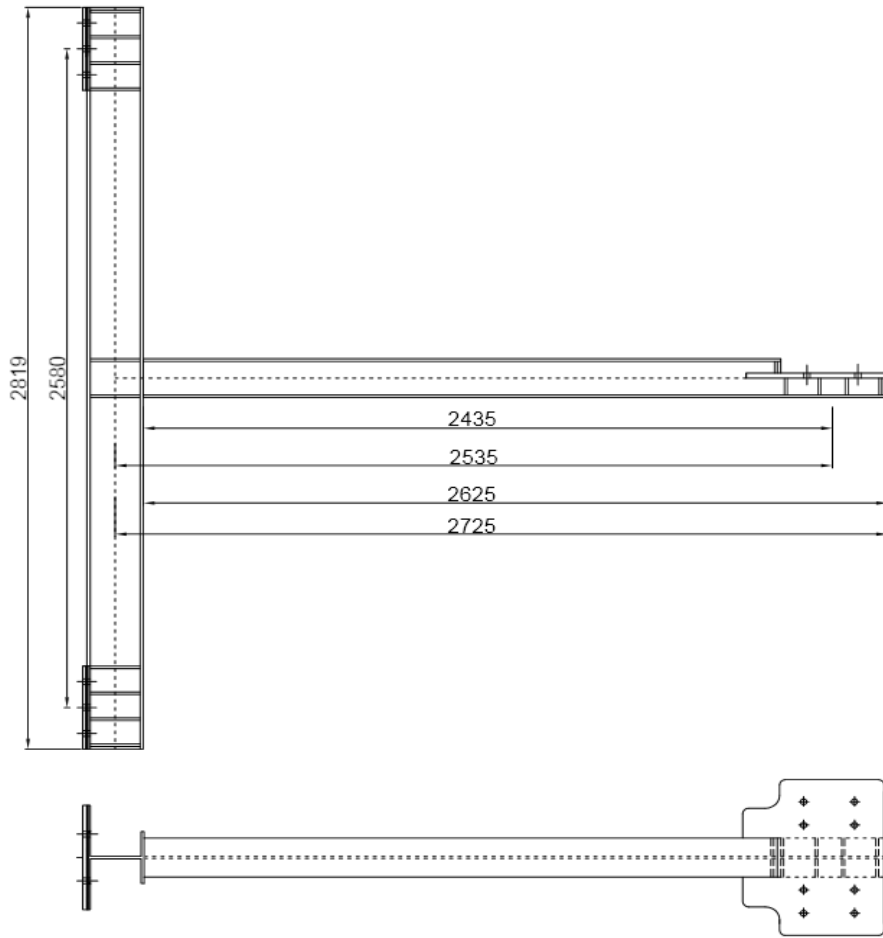
ตาราง 3.1 แสดงขนาดและลักษณะการของเชื่อมต่อชิ้นงาน

ชื่อ ตัวอย่าง	ขนาดของเสา	ขนาดของคาน	จำนวน Bolt	ลักษณะของการเชื่อมต่อ
SP1	H 200x200-49.9 kg/m	H 150x150-31.5 kg/m	8	Bolted end-plate connection
SP2	H 300x300-106 kg/m	H 300x200-56.8 kg/m	8	Bolted end-plate connection

รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะและขนาดโดยรวมของตัวอย่าง SP1 และ SP2 ซึ่งตัวอย่าง SP1 ประกอบด้วยคานขนาดหน้าตัด H150x31.5 Kg/m. ยาว 2625 มิลลิเมตร ปลายคานติดกับแผ่นเพลทสำหรับยึดกับหัวกด UITM และเสาขนาดหน้าตัด H200x49.9 Kg/m. ยาว 2819 มิลลิเมตร ปลายเสาทั้งสองด้านติดแผ่นเพลทสำหรับยึดกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา รายละเอียดแผ่นของเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงที่ปลายคานแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 โดยแผ่นเพลทมีขนาดเท่ากับ 600x500 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร 8 รู สำหรับยึดกับหัวกด UTM และเสริมความแข็งแรงระหว่างเพลทกับปลายคานด้วยแผ่นเหล็กขนาด 71.25x65 มิลลิเมตร 6 แผ่น เพื่อยึดแผ่นเพลทกับปีกคานด้านล่างและขนาด 65x45 มิลลิเมตร 2 แผ่น เพื่อยึดแผ่นเพลทกับปีกคานด้านบน การยึดแผ่นเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงกับปีกคานจะใช้วิธีการเชื่อมแบบเซาะร่องทั้งหมด โดยกำหนดความหนาของรอยเชื่อมเท่ากับ 6 มิลลิเมตร



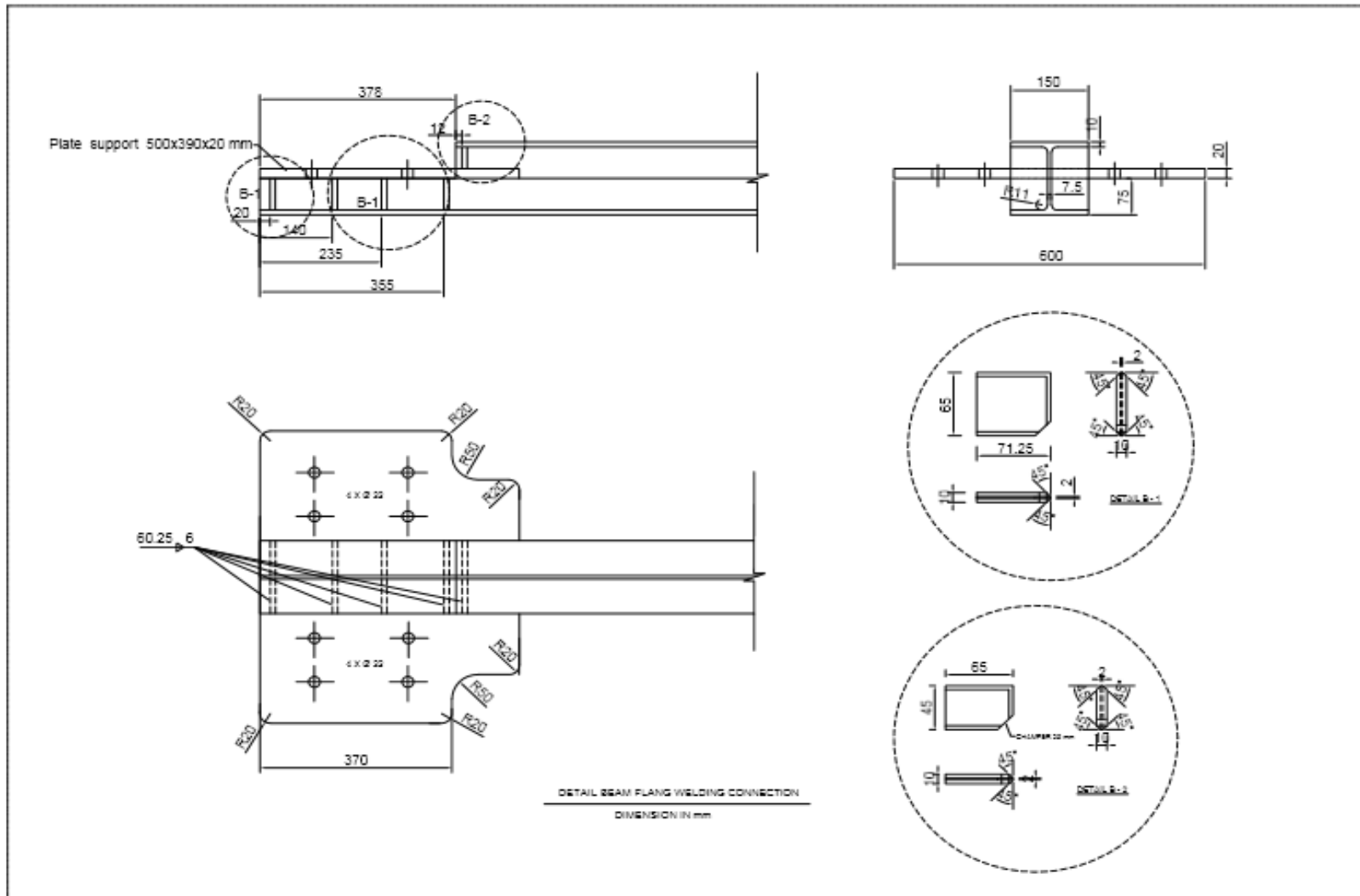
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ



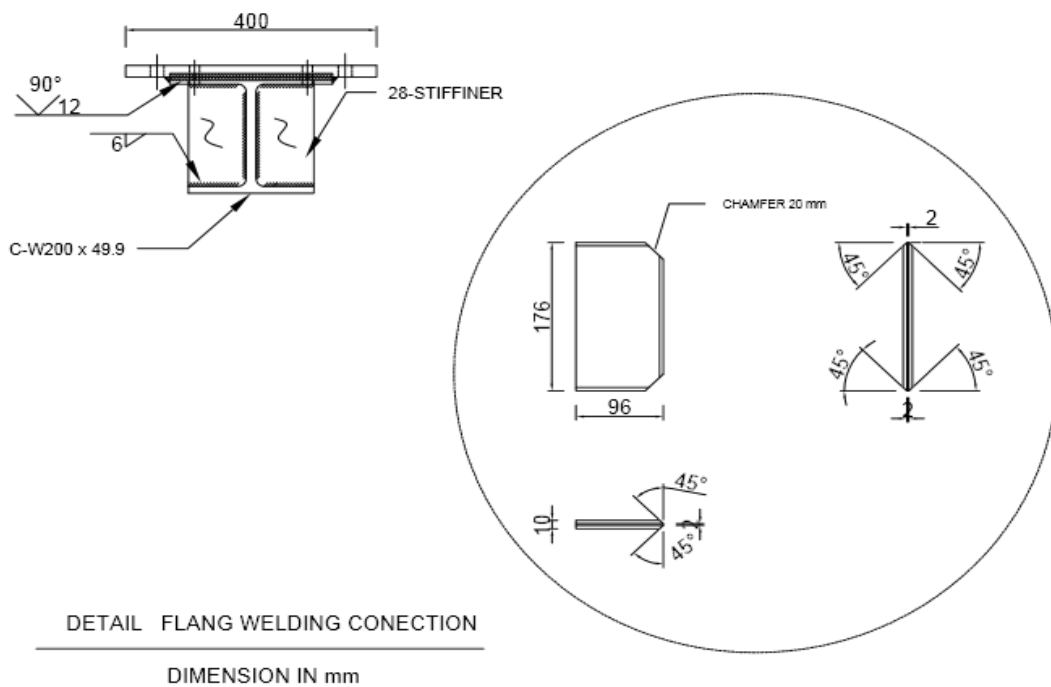
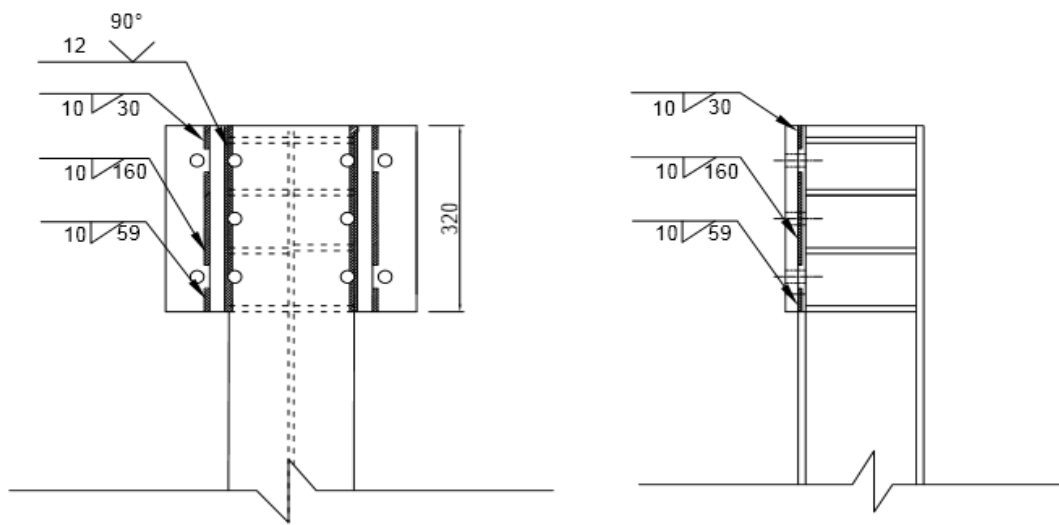
รายละเอียดตัวอย่าง

Dimension in mm.

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะและขนาดของตัวอย่าง SP1 และ SP2



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะรายละเอียด Support ที่ปลายคานของตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2

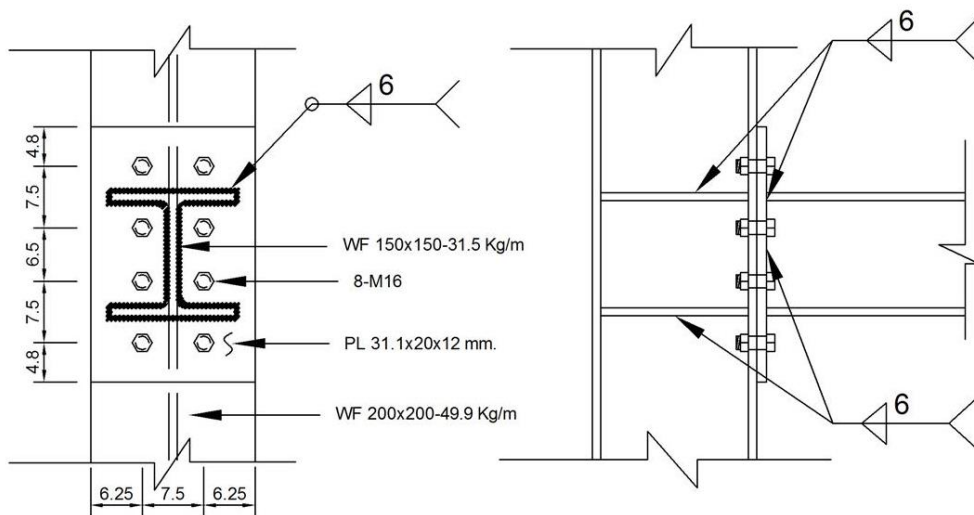


รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดแผ่นเหล็กและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงที่ปลายเสาตัวอย่าง SP1 และ SP2

จากรูป 3.4 แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดการติดแผ่นเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงที่บริเวณปลายเสา แผ่น Plate1 และ Plate2 จะถูกเชื่อมติดกับแผ่นปีกเสาและเจาะรูขนาด 22 มิลลิเมตร 10 รู เพื่อยึดปลายเสากับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา โดย plate1 มีขนาดเท่ากับ 400x320x15 มิลลิเมตรและ Plate2 มีขนาด 320x100x12 มิลลิเมตร ส่วนแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงมีขนาด 176x96 มิลลิเมตร 8 แผ่น ใช้สำหรับยึดปีกเสาทั้งสองด้านเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่บริเวณปลายเสา การยึดเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงกับปีกเสาจะยึดโดยการเชื่อมแบบเซาะร่อง โดยรายละเอียดการเซาะร่องและการเชื่อมสามารถดูได้จากในรูปภาพ

3.2.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบข้อต่อชนิดใช้สลักเกลียวในการยึดรั้ง

ในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นรายละเอียดตัวอย่าง SP1 ซึ่งประกอบด้วยคานขนาด H150x31.5 Kg/m. ยาว 2630 มิลลิเมตร ปลายคานติดกับแผ่นเพลทสำหรับยึดกับหัวกด UTM และเสาขนาด H200x49.9 Kg/m. ยาว 2844 มิลลิเมตร ปลายเสาทั้งสองด้านติดแผ่นเพลทสำหรับยึดกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา ส่วนรายละเอียดการของแผ่นเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงที่ปลายคาน ปลายเสา ของตัวอย่าง SP1 จะเหมือนกันกับตัวอย่าง SP2 ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



การเชื่อมต่อโดยสลักเกลียว

รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อแบบ Bolted end-plate connection

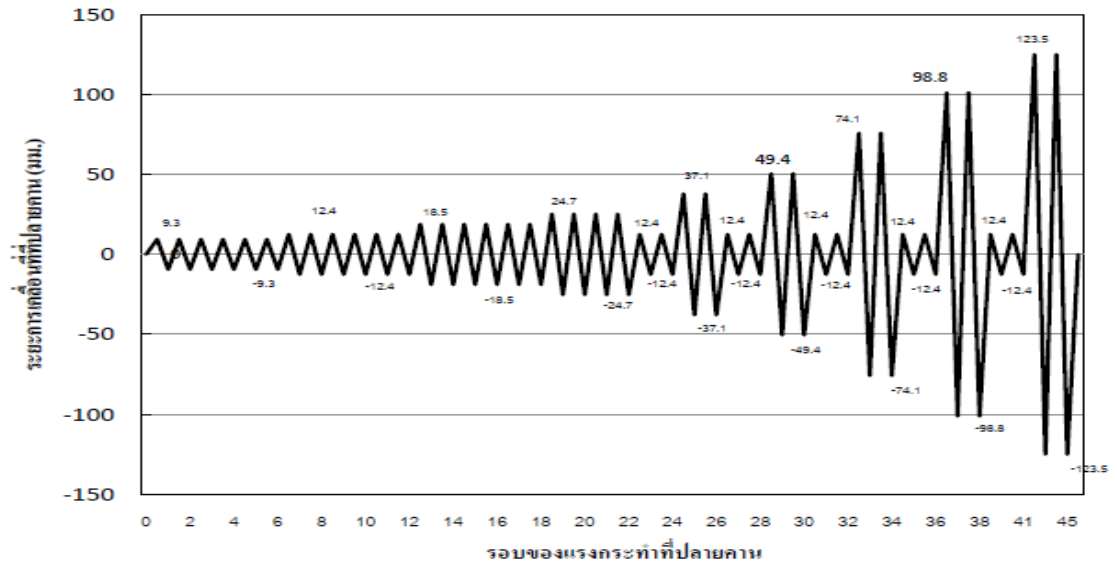
จากรูป 3.5 แสดงให้เห็นการเชื่อมต่อแบบ Bolted end-plate connection ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อคาน-เสาในตัวอย่าง SP1 และ SP2 โดยเชื่อมพอกปลายคานเข้ากับแผ่นเพลทขนาด 311x200x12 มิลลิเมตร เป็นการเชื่อมเต็มทั้งหน้าตัดรอยเชื่อมนี้มีขนาด 6 มิลลิเมตร และใช้ลวดเชื่อมชนิดเดียวกันกับ SP2 จากนั้นใช้สลักเกลียวขนาด M16 จำนวน 8 ตัว เพื่อยึดแผ่นปีกเสาด้านหน้าแผ่นเพลท

3.3 การกำหนดแรงกระทำแบบสลับทิศทาง (แรงวัฏจักร)

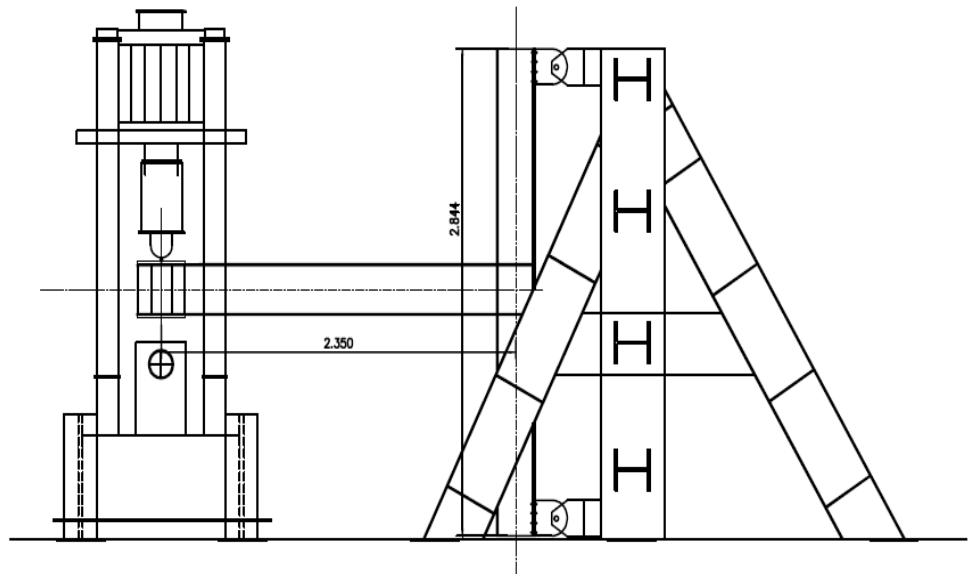
การให้ดำเนินการทดสอบจะใช้วิธีเดียวกันทุกตัวอย่าง โดยจะกำหนดระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานในลักษณะไป-กลับ เป็นรอบๆ ซึ่งการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่กับจำนวนรอบจะกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว (SAC 1997) ซึ่งมาตรฐานนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่ของปลายคานจากสมการ $\Delta = \theta^*(L_b + d_c/2)$ ซึ่งจะกำหนดมุมการเคลื่อนที่มาให้เพื่อหาระยะการเคลื่อนที่จากปลายคาน 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 และจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของปลายคานที่ใช้ในการทดสอบ
ตัวอย่าง

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 แสดงระยะเคลื่อนที่ที่ปลายคานากับรอบของแรงที่กระทำต่อที่ปลายคาน



รูปที่ 3.7 การติดตั้งชิ้นงานกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งและทดสอบ

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



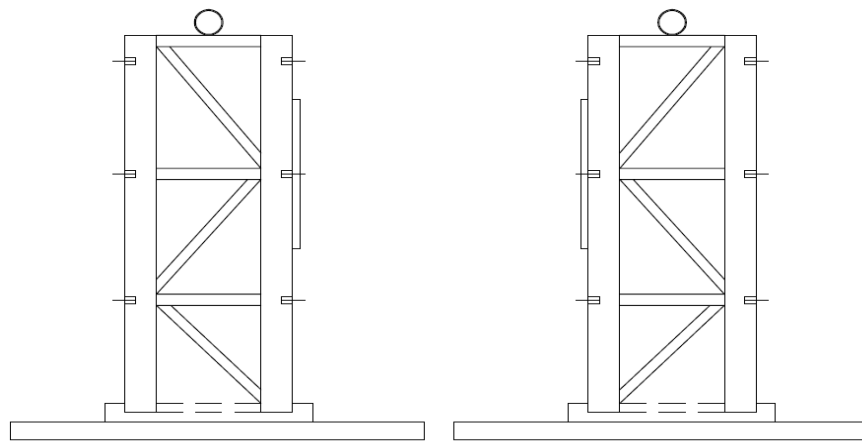
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)

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



รูปที่ 3.9 โครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา (Reaction frame)

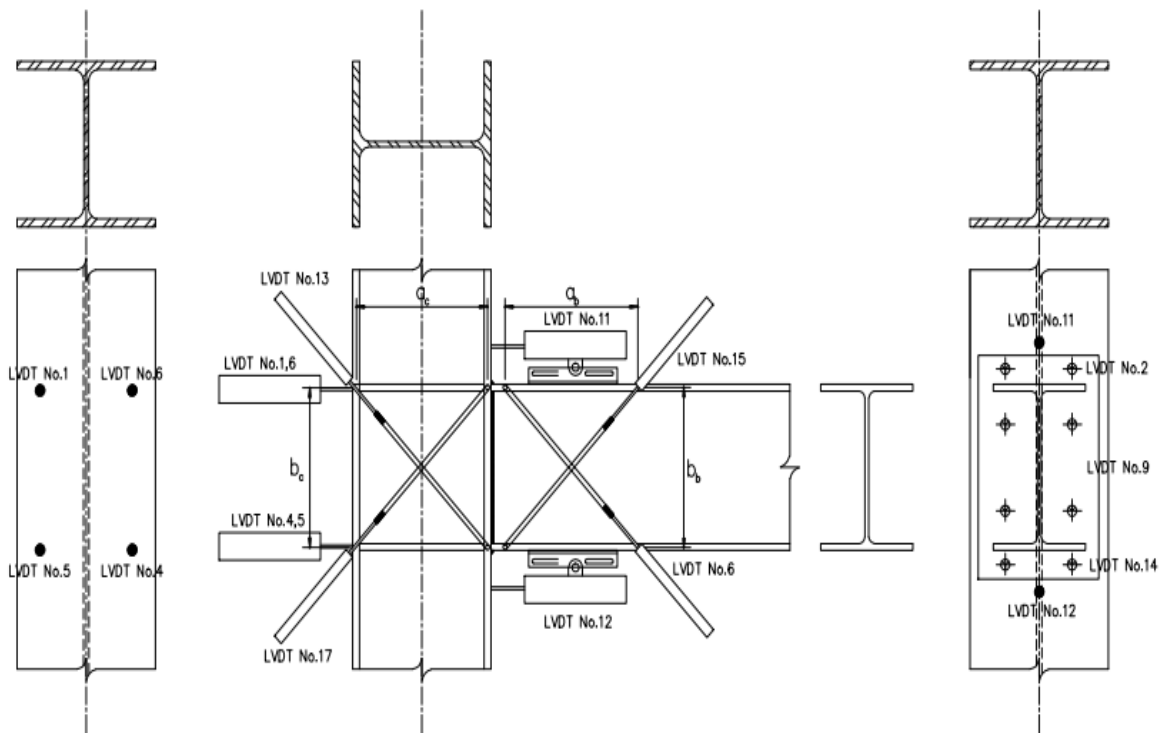
3. อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น เป็นชุดอุปกรณ์ที่นำโครงสร้างเหล็กที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำมาปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปแบบให้สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยในการทดสอบโดยมีหน้าที่ค้ำยันด้านข้างคาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคานโดยมีลักษณะเป็นเสาคู่ โครงสร้างเป็นชนิดโครงถัก (Truss) รูปสี่เหลี่ยม ฐานล่างเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กหนาซึ่งได้ทำร่อง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



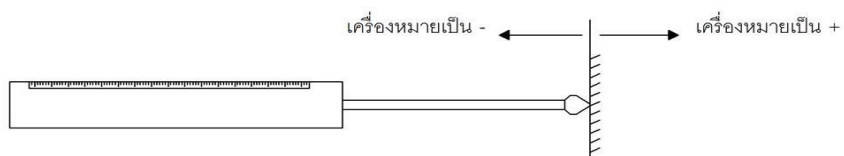
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น

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 ใช้สำหรับเก็บค่าความเครียดและความเครียดเฉือนซึ่งรายละเอียดและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ จะแสดงดังรูปต่อไปนี้



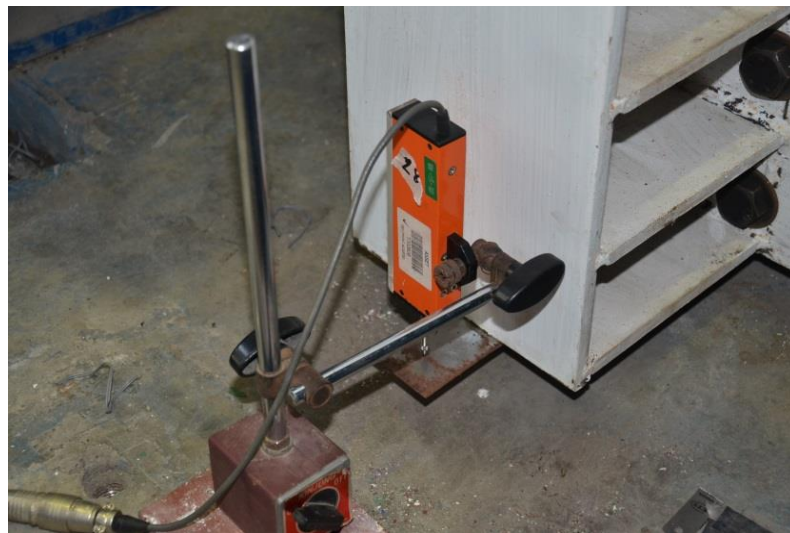
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ระยะการวัดที่ใช้คำนวณและเบอร์ของ LVDT (SP1-SP2)



รูปที่ 3.12 แสดงค่าเครื่องหมายจาก LVDT



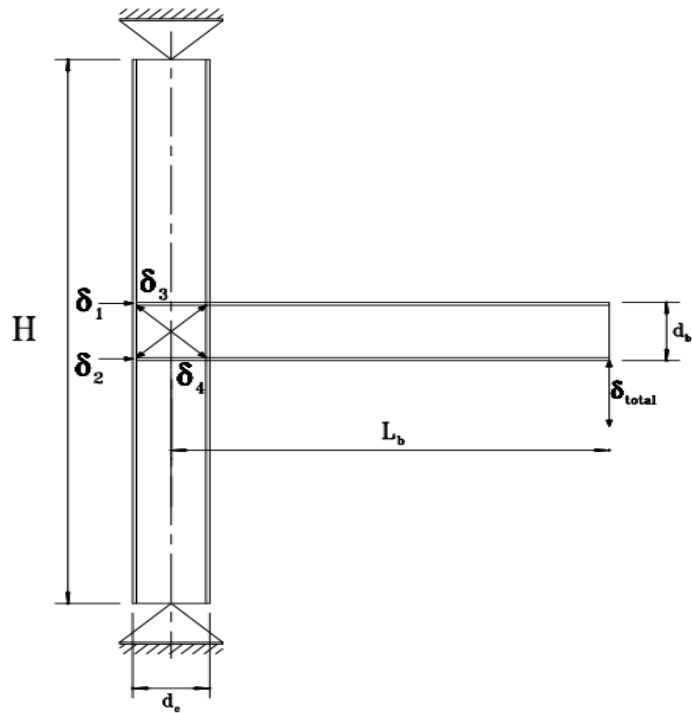
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการติดตั้ง LVDT ขนาด 100 มิลลิเมตรที่ปลายคาน



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะการติดตั้ง LVDT ขนาด 50 มิลลิเมตรที่ปลายเสา

รูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นลักษณะการอ่านค่าจาก LVDT ซึ่งเมื่อปลายของ LVDT ถูกกดเข้า ระยะการเคลื่อนที่จะมีค่าเป็นเครื่องหมายบวก ถ้าปลาย LVDT ยึดตัวออกระยะการเคลื่อนที่จะมีค่าเป็นลบ ส่วนในรูป 3.13 และ 3.14 แสดงให้เห็นลักษณะการติดตั้ง LVDT ขนาด 100 มม. และ 50 มม. ซึ่งการติดตั้งจะต้องคำนึงถึงความตึงฉากระหว่าง LVDT กับ บริเวณที่จะวัดระยะการเคลื่อนที่ โดยใช้ไม้ฉากหรือระดับน้ำในการช่วยติดตั้ง

3.6 สมการที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

ข้อมูลที่สำคัญๆที่เราต้องการนำเสนอจะประกอบไปด้วยความสามารถในการหมุนในช่วงพลาสติกของคาน เสา Panel Zone และความสามารถในการหมุนทั้งหมดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ สำคัญที่บ่งบอกได้ว่า ตัวอย่างมีความสามารถทนต่อสภาวะรับแรงสลับได้มากน้อยเพียงใดหากเกิดการ หมุนในช่วงพลาสติกนั้นไม่สามารถวัดจากการติดตั้งเครื่องมือวัดโดยตรงได้ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณ จากสมการโดยนำข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเคลื่อนที่ของคาน เสา Panel Zone คำนวณ ซึ่ง ตำแหน่งและการติดตั้งเครื่องมือดังกล่าวได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยค่าที่ได้จากการวัดสามารถนำ คำนวณค่าการหมุนได้ดังสมการต่อไปนี้

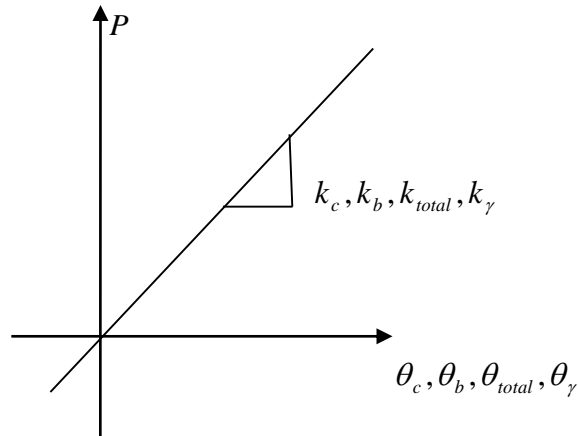
$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} (\delta_4 - \delta_3)$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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) หาค่าความยืดหยุ่น (K) โดยที่ค่าความยืดหยุ่นนั้นสามารถคำนวณจากการวิเคราะห์เชิงเส้นของข้อมูลการทดสอบในช่วงการเปลี่ยนรูปก่อนจะมีพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่น (Elastic)

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

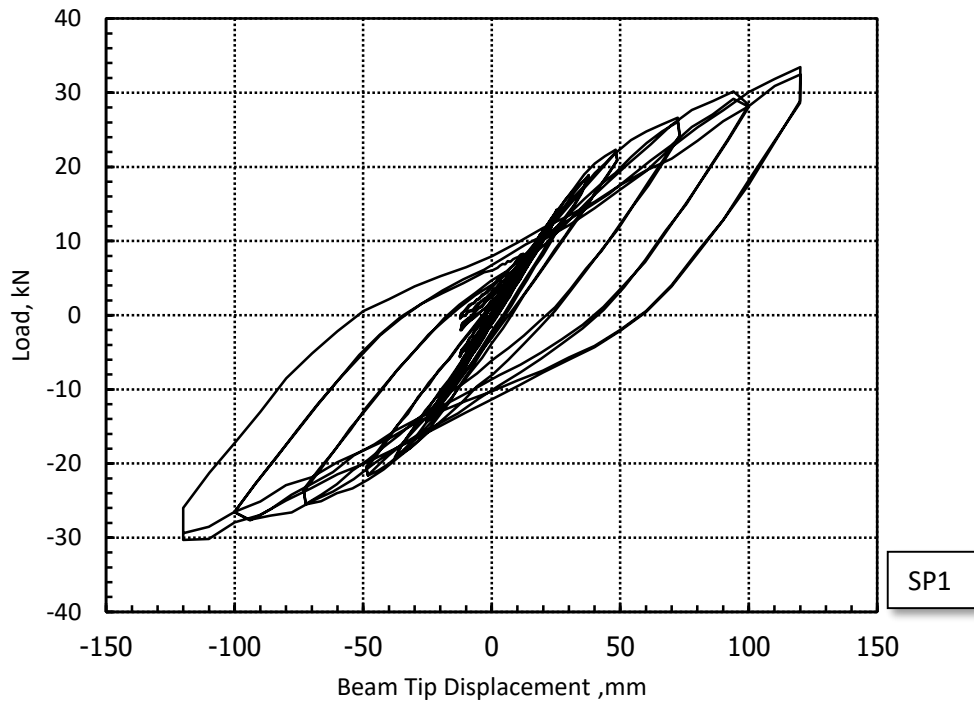
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวอย่างคาน-เสาเหล็กต้นรินในองค์อาคารรับแรงวิภูจักรทั้งหมด 2 ตัวอย่าง SP1 SP2 โดยนำเสนอผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

- 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

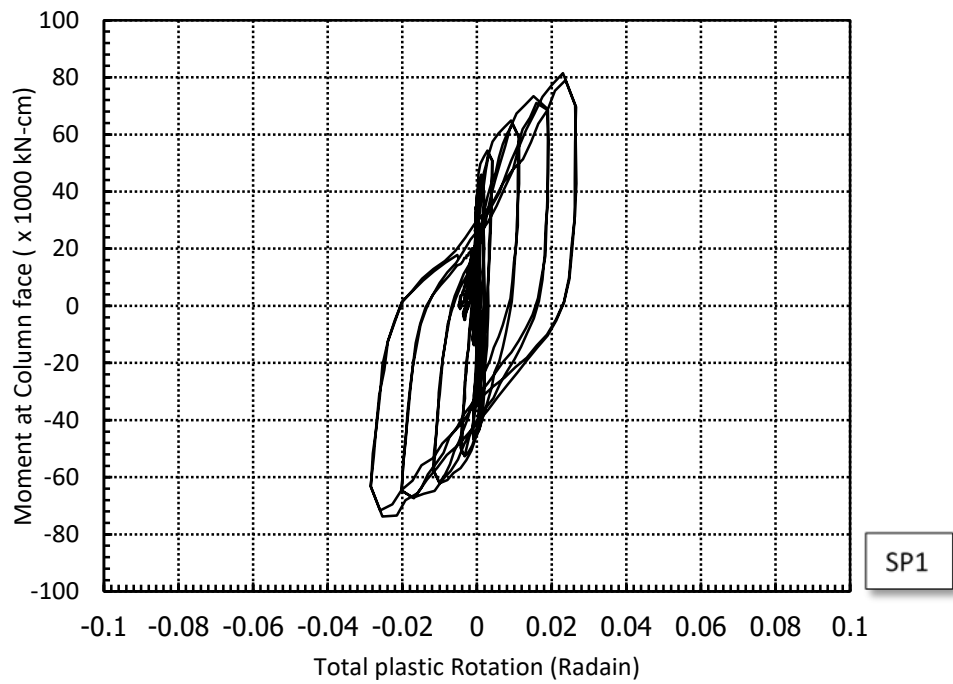
4.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบตัวอย่าง SP1

เมื่อเริ่มดำเนินการทดลองถึงการเคลื่อนที่ของปลายคานเป็นระยะ 12.63 มิลลิเมตร สีที่ทาไว้ที่แผ่นเพลทที่ยึดปลายคานกับหน้าเสาบริเวณรอบๆสลักเกลียวก็เริ่มหลุดร่อนออก ทำให้ทราบว่าบริเวณนี้เริ่มเกิดการครากแล้ว จากนั้นเมื่อปลายคานเคลื่อนที่ไปเป็นระยะ 25.27 มิลลิเมตรก็เกิดอุบัติเหตุเครื่องทดสอบ UTM หยุดการทำงานในขณะกำลังทำการทดสอบจึงต้องหยุดการทดสอบชั่วคราว เมื่อกลับมาดำเนินการทดสอบต่อไปอีกประมาณ 30 นาที เครื่องทดสอบ UTM ก็หยุดทำงานอีกครั้ง ผู้ทดสอบจึงทำการหยุดพักเครื่องไว้ก่อน และเมื่อกลับมาทำการทดสอบอีกครั้งและคานเคลื่อนที่ไปเป็นระยะ 75.81 มิลลิเมตร ก็เริ่มมีการหลุดร่อนของสีในบริเวณ Panel Zone และในช่วงที่ปลายคานเคลื่อนที่ไปเป็นระยะสูงๆ จะสังเกตเห็นว่าแผ่นเพลทที่ยึดปลายคานกับหน้าเสาจะเริ่มแยกออกจากหน้าเสาอย่างชัดเจน โดยตำแหน่งที่เกิดการแยกตัวมากที่สุดก็คือบริเวณที่ติดกับปีกบนและปีกล่างของคาน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Beam tip displacement (SP1)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Total plastic rotation (SP1)

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับแรงกระทำต่อปลายคาน จากกราฟจะเห็นว่าปลายคานสามารถเคลื่อนตัวไปเป็นระยะสูงสุดเท่ากับ 120.03 mm. มีแรงกระทำที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 33.45 kN. ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และเคลื่อนที่ไปได้สูงสุด 120.05 mm. มีแรงกระทำที่ปลายคานสูงสุด 33.28 kN. ในด้านการเคลื่อนที่ลง หลังจากที่ย้ายคานเคลื่อนที่ไปเป็นระยะประมาณ 50 mm ทั้งด้านการเคลื่อนที่ลงและด้านการเคลื่อนที่ขึ้น จะเห็นว่าความแข็งแรงของตัวอย่างก็ค่อยๆลดลงเรื่อยๆนั้นแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างได้เกิดการครากแล้วนั่นเอง สาเหตุที่ความแข็งแรงของตัวอย่างลดลงอย่างหนึ่ง อาจเกิดจากแผ่นเพลทที่เชื่อมปลายคานเข้ากับหน้าเสาเกิดการครากและยึดตัวออกเมื่อปลายคานเคลื่อนที่ในระยะสูงๆทำให้การถ่ายแรงจากปลายคานเข้าสู่หน้าเสาทำได้ไม่สมบูรณ์ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ตัวอย่างก็ยังสามารถรับแรงต่อไปได้เรื่อยๆจนจบการทดลอง

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่หน้าเสากับการหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมดจากกราฟจะเห็นว่าค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมดจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.0266 เรเดียน และ -0.028 เรเดียน ค่าซึ่งค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมดจะประกอบไปด้วยการหมุนตัวในช่วงพลาสติกคานการหมุนตัวในช่วงพลาสติกเสาและการหมุนตัวในช่วงพลาสติก Panel Zone ส่วนค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาของ SP1 ค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 81451.72 kN-mm. ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ 73739.83 kN-mm. สำหรับด้านการเคลื่อนที่ลง

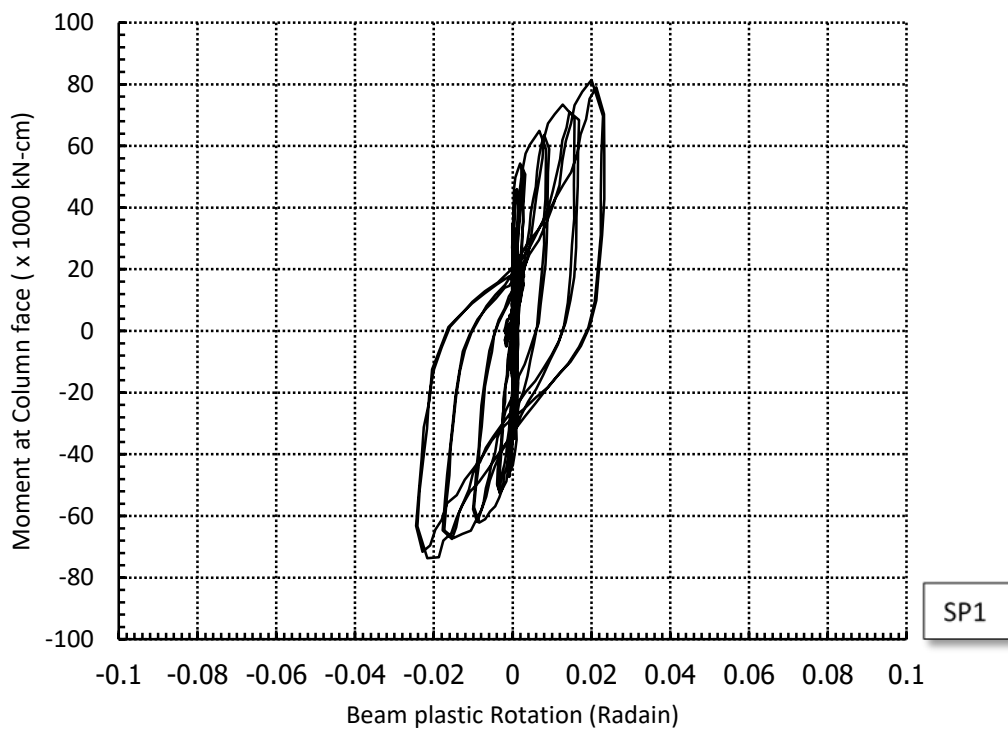
รูป 4.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่หน้าเสากับค่าการหมุนในช่วงพลาสติกคานของตัวอย่าง SP1 ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่ามัลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับกราฟของค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมด โดยจะมีค่าการหมุนในช่วงพลาสติกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น โดยการหมุนในช่วงพลาสติกคานที่มากที่สุดเท่ากับ 0.023 เรเดียน และ -0.024 เรเดียน ส่วนค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาของ SP1 ค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 81451.72 kN-mm. สำหรับด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ 73739.83 kN-mm. สำหรับด้านการเคลื่อนที่ลง

รูป 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่หน้าเสากับค่าการหมุนในช่วงพลาสติกเสาสำหรับตัวอย่าง SP1 จะเห็นว่าพื้นที่ใต้กราฟจะน้อยมากเมื่อเทียบกับกราฟค่าการหมุนในช่วงพลาสติกคาน โดยค่าการหมุนในช่วงพลาสติกของเสาเสาที่มากที่สุดเท่ากับ 0.0065 เรเดียน

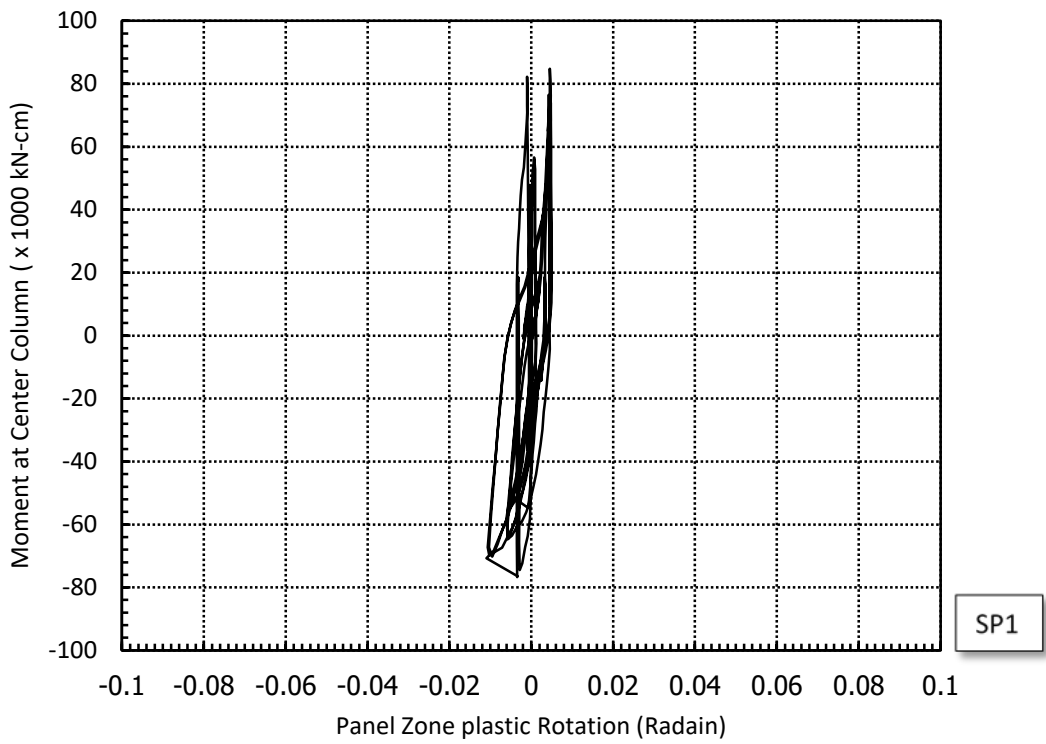
และเท่ากับ -0.0049 เรเดียน ส่วนค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 81451.72 kN-mm. ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ 73739.83 kN-mm. ในด้านการเคลื่อนที่ลง

รูป 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่กึ่งกลางเสากับการหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone ของตัวอย่าง SP1 จากกราฟจะเห็นว่า มีพื้นที่ใต้กราฟน้อยกว่าค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกคาน โดยการหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.005 เรเดียน และเท่ากับ -0.010 เรเดียน ส่วนโมเมนต์ที่กึ่งกลางเสามีค่ามากที่สุดเท่ากับ 84796.76 kN-mm. ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และเท่ากับ 76768.16 kN-mm. ในด้านการเคลื่อนที่ลง

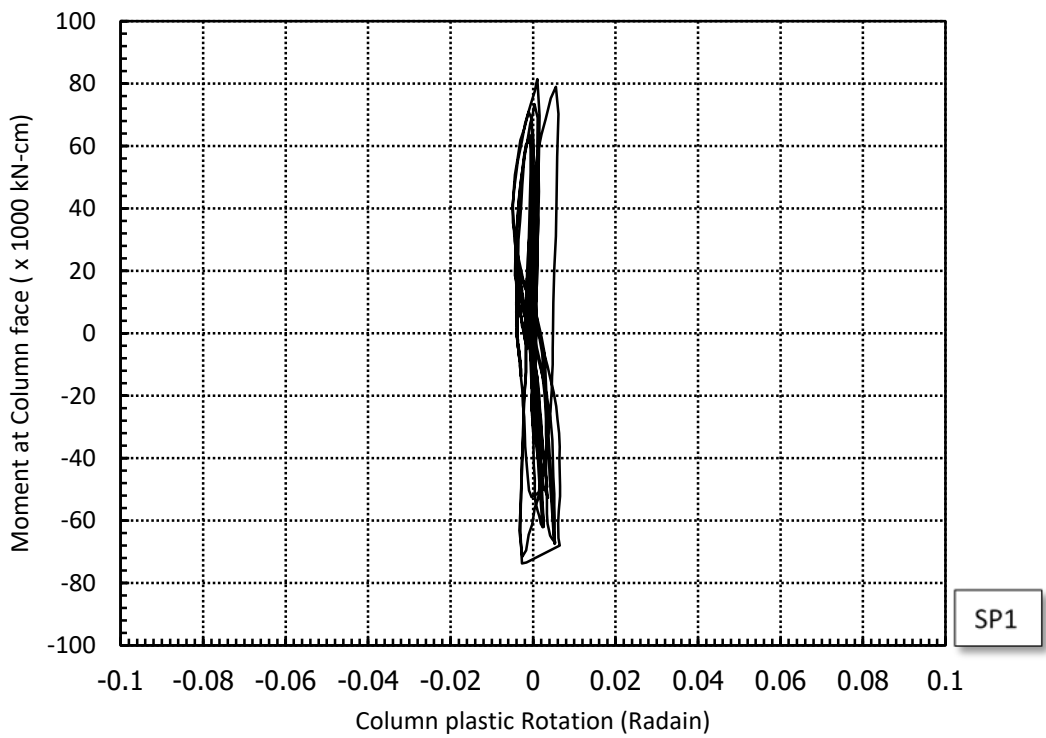
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์และค่าการหมุนในช่วงพลาสติก คาน เสา และ Panel Zone จะเห็นว่า ค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกคานจะมีค่าสูงสุดซึ่งทำให้มีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่าง SP1 มีการดูดซับหรือสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวขึ้นมากที่สุดในส่วนคาน รองลงมาจะเป็นเสาและ Panel zone ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Beam plastic rotation (SP1)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Column plastic rotation (SP1)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ Moment at center column กับ Panel zone plastic rotation (SP1)



รูปที่ 4.6 การครากที่บริเวณแผ่นปีกบนของคาน และเพลทระหว่างหน้าเสากับปลายคาน SP1



รูปที่ 4.7 รอยแตกของรอยเชื่อมระหว่างปลายคานกับแผ่นเพลทที่ยึดกับปีกเสาคาน SP1



รูปที่ 4.8 การครากที่บริเวณแผ่นปิกด้านล่างของคาน SP1

รูป 4.6 แสดงให้เห็นถึงรอยครากที่บริเวณแผ่นเพลาที่ยึดปลายคานเข้ากับหน้าเสา จะเห็นว่า รอยการหลุดร่อนของสีจะเป็นเส้นยาวออกจากรูเจาะสำหรับใส่สลักเกลียว ซึ่งแผ่นเพลานี้เป็นบริเวณ แรกที่สังเกตเห็นรอยการคราก นอกจากรอยครากบนแผ่นเพลาแล้ว ในรูปยังแสดงให้เห็นถึงรอยคราก ที่บริเวณปิกคานด้านบนซึ่งจะอยู่ในช่วง 10 เซนติเมตร จากแผ่นเพลาปลายคาน รูปที่ 4.7 แสดงให้ เห็นถึงรอยแตกที่รอยเชื่อมที่ปิกคานด้านบนกับแผ่นเพลา รอยแตกที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากกึ่งกลางของ หน้าคานและแพร่ขยายไปทั้งสองข้างของปิกคาน แต่อย่างไรก็ตาม รอยแตกนี้ไม่ได้ขยายไปทั่วทั้งรอย เชื่อม และไม่ได้มีขนาดเพียงพอที่จะทำให้ตัวอย่างแยกตัวออกจากกัน ส่วนรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็น ถึงการครากที่บริเวณปิกคานด้านล่าง และรอยแตกที่รอยเชื่อมระหว่างปิกคานกับแผ่นเพลา ซึ่งจะ เห็นว่ารอยแตกกระจายไปทั่วความยาวรอยเชื่อม ส่วนรอยการครากที่เกิดขึ้นบนปิกคานจะอยู่ในระยะ 10 เซนติเมตรจากแผ่นเพลา ส่วนรอยครากบริเวณรอบสลักเกลียวจะพบน้อยกว่าที่ด้านบน



รูปที่ 4.9 แสดงการครากที่บริเวณด้านหลังของแผ่นปีกเสา SP1



รูปที่ 4.10 แสดงการเคลื่อนตัวของเพลทปลายคานที่ติดกับหน้าเสาขณะทำการทดสอบ SP1

รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงการครากที่ด้านหลังของเสา ซึ่งจะเห็นว่าการครากจะเกิดขึ้นใกล้ๆ บริเวณที่ตรงกับแผ่น Continuity plate ซึ่งแผ่นเพลทนี้จะตรงกับบริเวณที่ปีกคานด้านบนและด้านล่างมาเชื่อมต่อกับเสา นอกจากนี้ในรูป ยังสามารถสังเกตเห็นการครากที่บริเวณ Panel zone ซึ่งในตัวอย่าง SP1 การครากในบริเวณ Panel zone ที่สังเกตเห็นจะมีน้อยมาก รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการยึดตัวของแผ่นเพลทที่ยึดระหว่างปลายคานกับหน้าเสา เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ไปเป็นระยะสูงๆ ทั้งในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและด้านการเคลื่อนที่ลง แผ่นเพลทจะยึดตัวออกอย่างชัดเจน โดยบริเวณที่เชื่อมต่อกับปีกคานบนและล่างจะเกิดการยึดตัวมากที่สุด

สรุปผลการทดสอบตัวอย่าง SP1

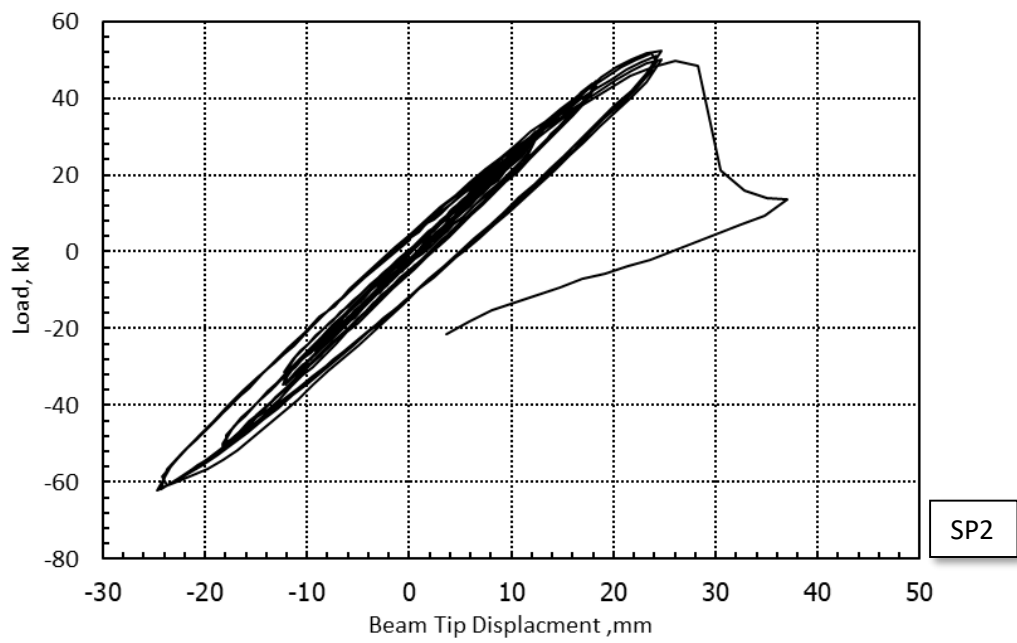
สำหรับตัวอย่าง SP1 นั้น ไม่ได้มีการบิดตัวของชิ้นงานแต่อย่างใด แต่ขณะทำการทดสอบเครื่องกด UTM เกิดการหยุดทำงาน 2 ครั้ง แต่ก็ไม่ได้ส่งผลต่อตัวอย่างแต่อย่างใด ในระหว่างทำการทดลองจะสังเกตเห็นว่าเริ่มมีการครากเกิดขึ้นที่บริเวณรอบๆสลักเกลียวด้านบนและล่างของแผ่นเพลทที่เชื่อมระหว่างปลายคานกับหน้าเสาเป็นตำแหน่งแรก หลังจากนั้นก็เกิดการครากที่ปีกเสาด้านหลังปีกคานบนและล่าง และ Panel Zone โดยใน Panel Zone จะเกิดการครากน้อยมาก แผ่นเพลทที่ติดปลายคานกับหน้าเสามีการครากทั่วบริเวณ โดยเริ่มจากขอบรูของสลักเกลียวด้านบนและด้านล่าง นอกจากนี้ระหว่างการทดสอบจะสังเกตเห็นได้ชัดว่าแผ่นเพลทที่ติดปลายคานกับหน้าเสาเกิดการบิดตัวเมื่อปลายคานเคลื่อนที่ไปเป็นระยะมากๆ ผลการทดลองจะสรุปในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง SP1

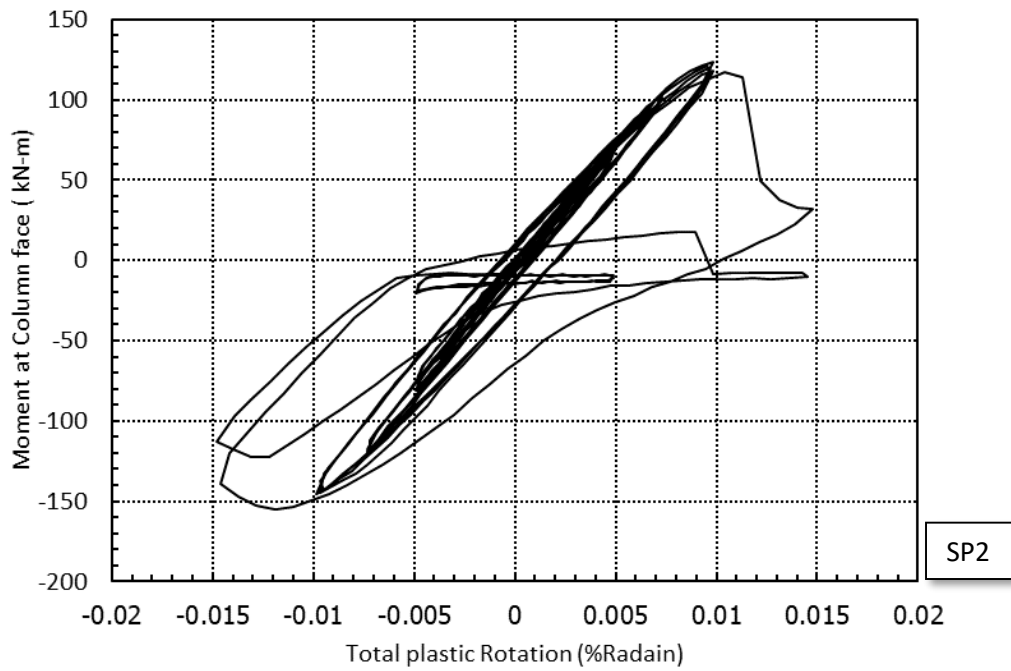
ค่ารายงาน	ค่ามากที่สุดที่วัดได้	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงที่หัวเครื่องกด UTM (kN)	33.450	30.283
ระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน (mm)	120.032	120.054
โมเมนต์ที่หน้าเสา (kN-mm)	81451.72	73739.83
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-mm)	84796.76	76768.16
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.0266	0.0494
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.0232	0.0284
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.0065	0.0049
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของPanel Zone (%radian)	0.0049	0.0109

ผลการทดสอบตัวอย่าง SP2

รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงกระทำที่ปลายคานกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของตัวอย่าง SP1 จะเห็นว่าแรงกระทำที่ปลายคานมากที่สุดในการเคลื่อนที่ขึ้นเท่ากับ 52.44 กิโลนิวตัน และ 65.94 กิโลนิวตัน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 37 มิลลิเมตร ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ 36.99 มิลลิเมตร ในด้านการเคลื่อนที่ลง ลักษณะกราฟแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการยืดหยุ่นที่ดีของตัวอย่างทดสอบ เพราะมีการเคลื่อนที่สูงสุดด้านการเคลื่อนที่ขึ้นกับด้านการเคลื่อนที่ลงใกล้เคียงกัน

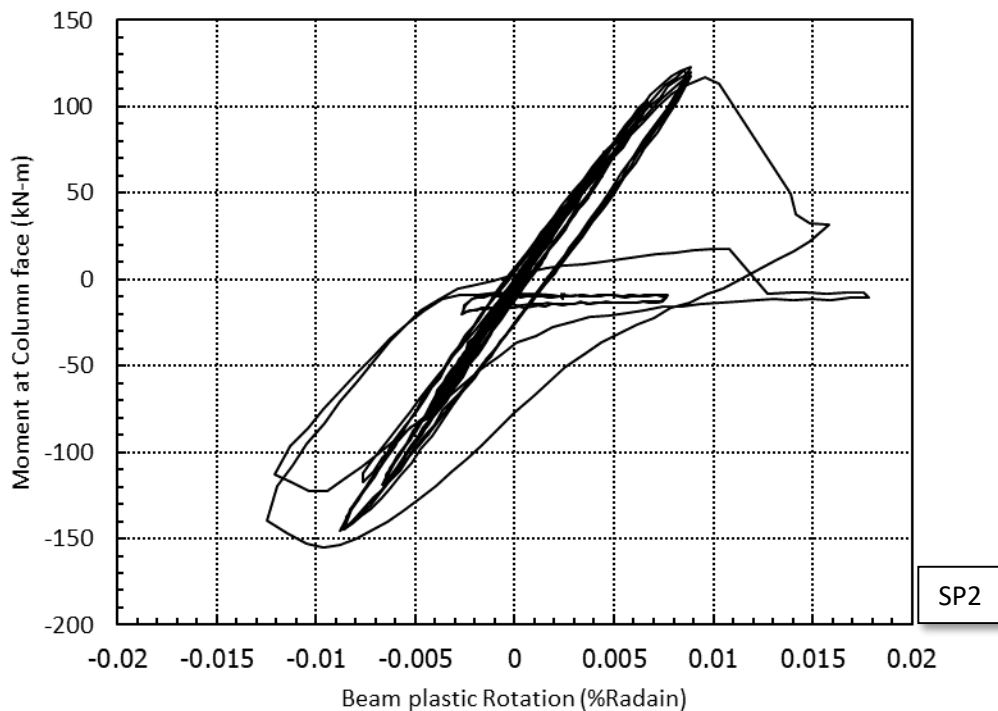


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน SP2



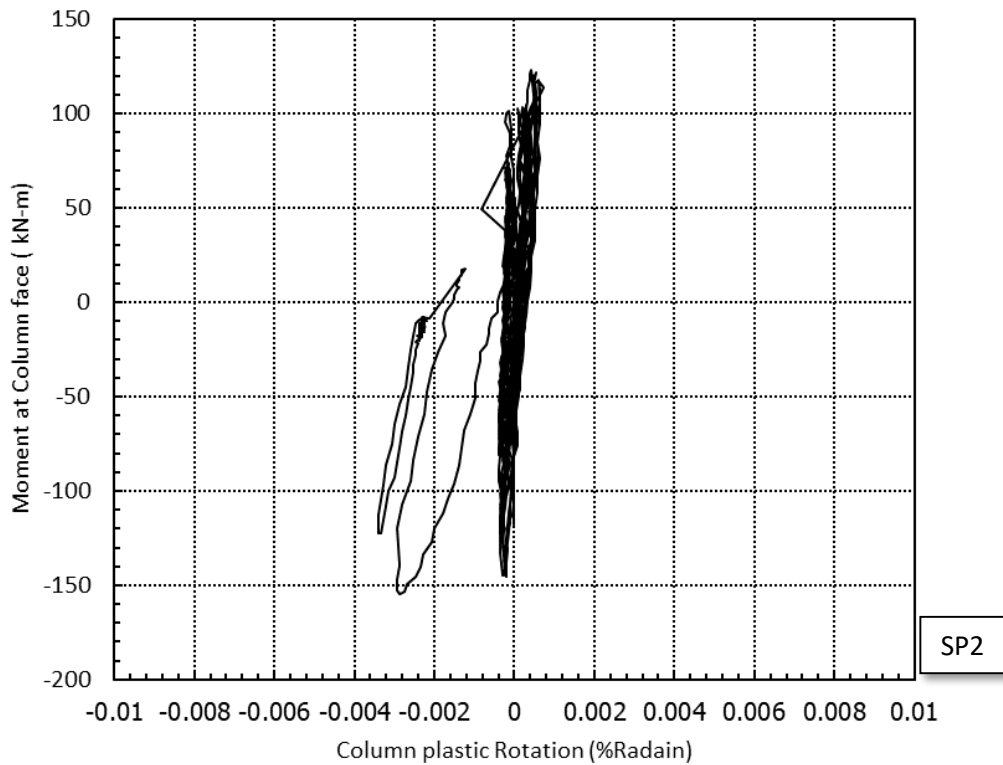
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Total plastic rotation SP2

รูป 4.12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่หน้าเสากับการหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟของการหมุนพลาสติกจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของข้อต่อว่ามีความสามารถในการสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวได้มากน้อยเพียงใด โดยจากกราฟจะเห็นว่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมดจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.014801 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.01479 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลงและค่าการหมุนตัวช่วงพลาสติกเฉลี่ย 0.014796 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาสูงสุดเท่ากับ 123.24 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ 154.95 กิโลนิวตัน-เมตร. สำหรับด้านการเคลื่อนที่ลง ซึ่งความแตกต่างของโมเมนต์เป็นผลมาจากแรงกระทำที่ปลายคานในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและด้านการเคลื่อนที่ลงไม่เท่ากัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั่นเอง โดยการหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมดจะประกอบด้วย การหมุนในช่วงพลาสติกคาน การหมุนในช่วงพลาสติกเสา และการหมุนในช่วงพลาสติก Panel Zone



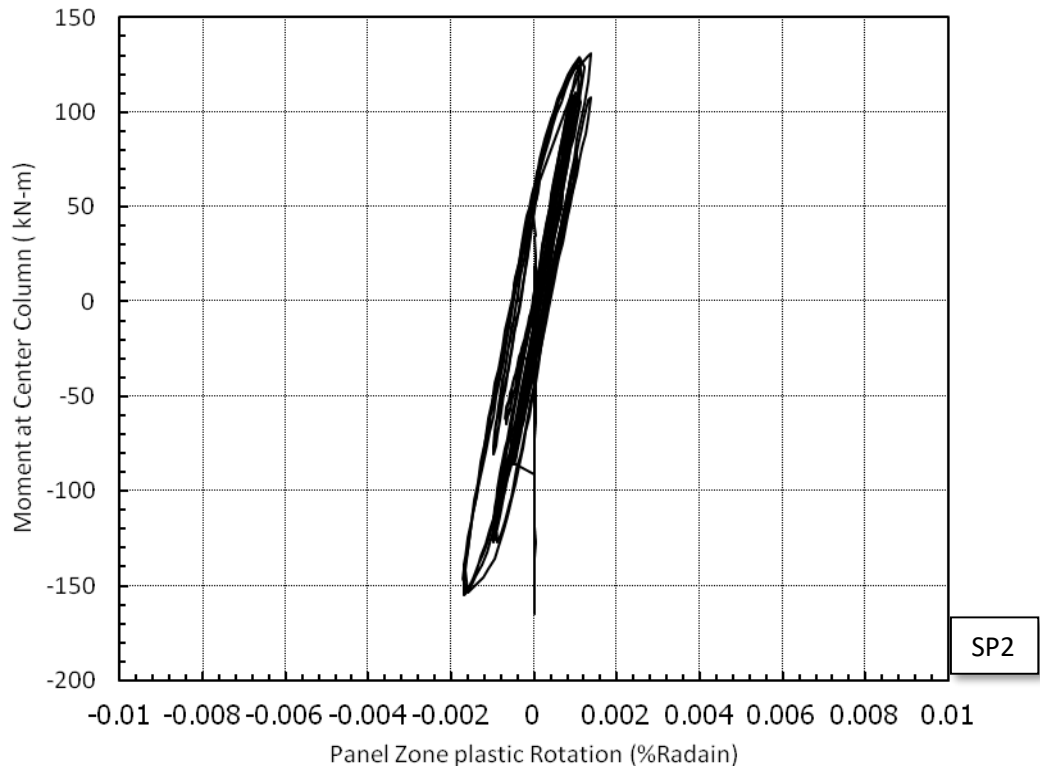
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam plastic rotation SP2

รูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่หน้าเสากับการหมุนในช่วงพลาสติกคานซึ่งการหมุนตัวในช่วงพลาสติกคานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.017811 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ -0.01248 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ค่าเฉลี่ยมากที่สุดของการหมุนในช่วงพลาสติกคานเท่ากับ 0.015146 เปอร์เซ็นต์เรเดียน 123.24 กิโลนิวตัน-เมตร 154.95 กิโลนิวตัน-เมตร และในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและด้านการเคลื่อนที่ลงตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Column plastic rotation SP2

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าโมเมนต์ที่หน้าเสากับการหมุนในช่วงพลาสติกเสา โดยจะเห็นว่า การหมุนพลาสติกมากที่สุดเท่ากับ 0.000742 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.00341 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ค่าเฉลี่ยมากที่สุดของการหมุนในช่วงพลาสติกเสาเท่ากับ 0.002076 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาสูงสุดเท่ากับ 123.24 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ 154.95 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ลง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center column กับ Panel zone plastic rotation SP2

รูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่กึ่งกลางเสากับการหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone โดยจะเห็นว่า การหมุนพลาสติกของ Panel zone มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.001368 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ -0.00172 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ค่าเฉลี่ยมากที่สุดของการหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone เท่ากับ 0.001544 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โดยโมเมนต์ที่หน้าเสาสูงสุดมีค่าเท่ากับ 131.11 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ 164.84 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ลงตามลำดับ

ตาราง 4.2 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบ SP2

ค่าที่ต้องการวัด	ค่ามากที่สุดที่วัดได้	
	ด้านการเคลื่อนที่ขึ้น	ด้านการเคลื่อนที่ลง
แรงที่หัวเครื่องกด UTM (กิโลนิวตัน)	52.44	65.94
ระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน (มิลลิเมตร)	37	36.99
โมเมนต์ที่หน้าเสา (กิโลนิวตัน-เมตร)	123.24	154.95
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (กิโลนิวตัน-เมตร)	131.11	164.84
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%เรเดียน)	0.014801	0.01479
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของคาน (%เรเดียน)	0.017811	0.01248
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของเสา (%เรเดียน)	0.000742	0.00341
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (%เรเดียน)	0.001368	0.00172

จากค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกของคาน เสา Panel zone จะเห็นว่า บริเวณเสาเกิดการหมุนในช่วงช่วงพลาสติกน้อยที่สุด รองลงมาเป็น Panel zone และคานตามลำดับ การที่บริเวณเสามีค่าการหมุนในช่วงพลาสติกน้อยที่สุดนั้นทำให้เราทราบว่าตัวอย่างทดสอบ SP2 จะเกิดการสลายพลังงานน้อยที่สุดที่บริเวณเสาซึ่งแสดงว่าความเสียหายจะเกิดขึ้นที่บริเวณเสาน้อยที่สุด หรือตัวอย่างทดสอบ SP2 จะเกิดการสลายพลังงานมากที่สุดบริเวณคาน ความเสียหายจะเกิดขึ้นที่บริเวณคานมากที่สุด และค่าโมเมนต์ที่ได้จากตัวอย่างทดสอบนี้ปรากฏว่าโมเมนต์บริเวณ Panel Zone จะมีค่ามากกว่าโมเมนต์บริเวณหน้าเสา

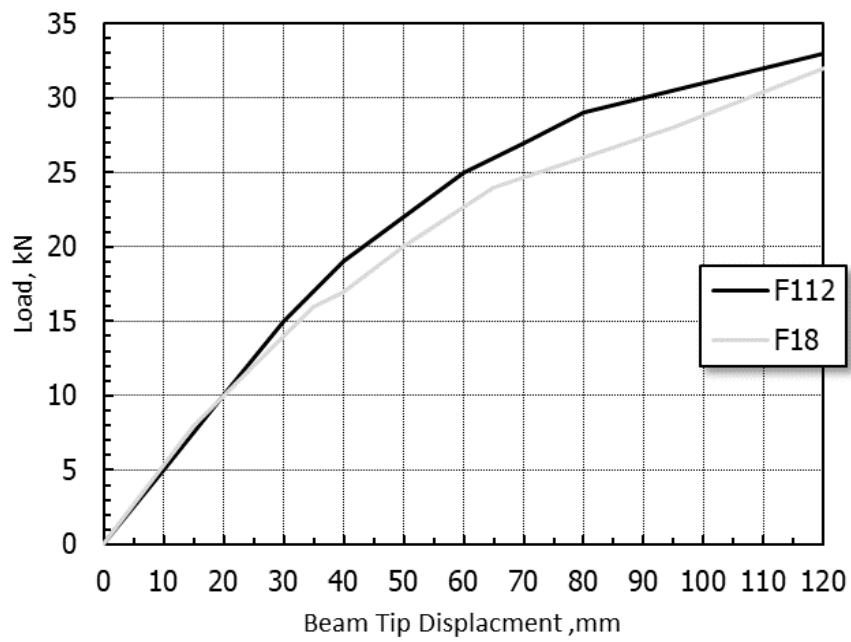
การศึกษาจำนวน Bolt ต่อพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อ

การศึกษาจำนวน Bolt ต่อพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อจะถูกนำเสนอในส่วนนี้ ตาราง ตัวอย่างและจำนวน Bolt แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์นำเสนอด้วยกราฟแสดง ความสัมพันธ์แรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน ขนาดเสาใช้ขนาด H300x300x94 kg/m ส่วน ขนาดคานใช้ขนาด H150x150x31.5 kg/m H300x200x56.8 kg/m H400x200x66 kg/m และ H 500x200x79.5.8 kg/m โดยจะใช้ Bolt จำนวน 8 และ 12 ตัวในการศึกษา

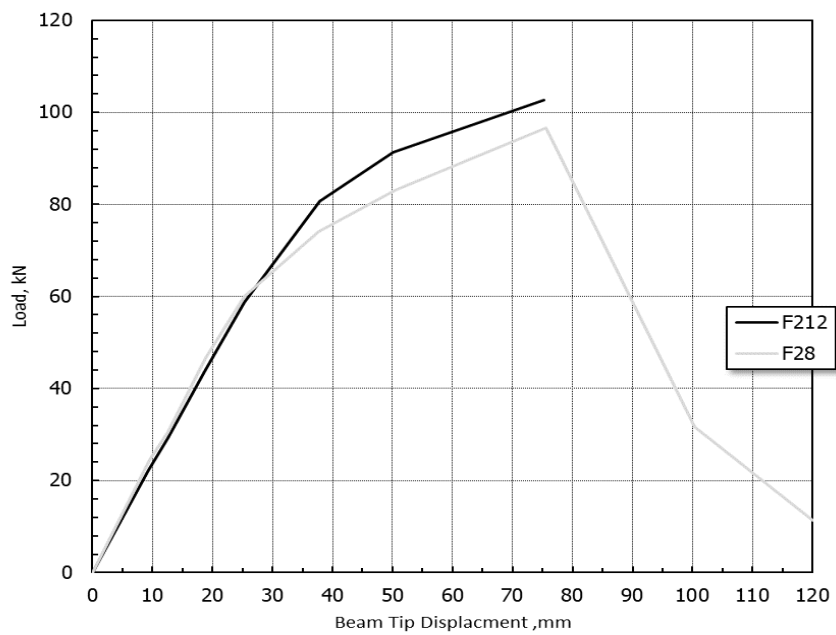
ตาราง 4.3 แสดงขนาดและลักษณะการของเชื่อมต่อชิ้นงาน

ชื่อตัวอย่าง	ขนาดของเสา	ขนาดของคาน	จำนวน Bolt
F18	H300x300x94 kg/m	H150x150x31.5 kg/m	8
F112	H300x300x94 kg/m	H150x150x31.5 kg/m	12
F28	H300x300x94 kg/m	H300x200x56.8 kg/m	8
F212	H300x300x94 kg/m	H300x200x56.8 kg/m	12
F38	H300x300x94 kg/m	H400x200x66 kg/m	8
F312	H300x300x94 kg/m	H400x200x66 kg/m	12
F48	H300x300x94 kg/m	500x200x79.5.8 kg/m	8
F412	H300x300x94 kg/m	500x200x79.5.8 kg/m	12

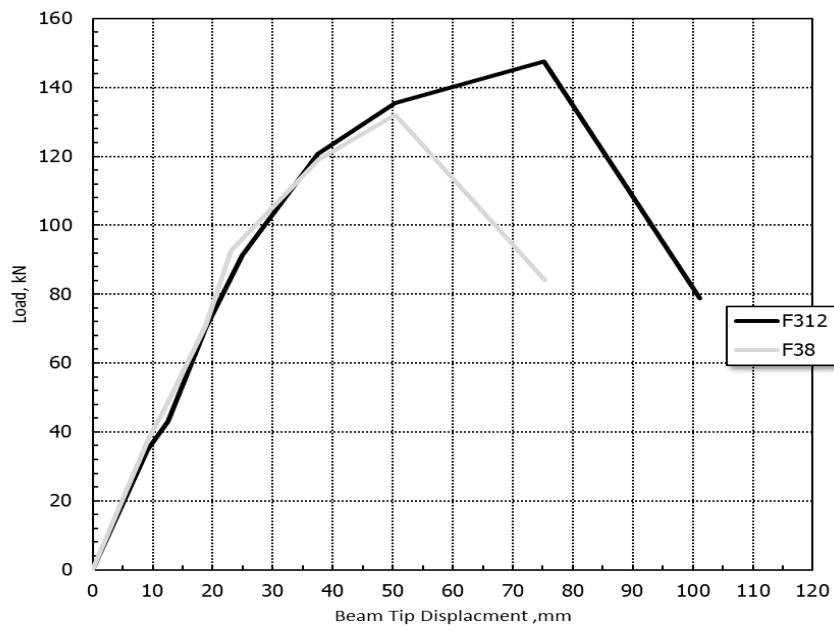
กราฟ 4.16-4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานตัวอย่าง ที่มีขนาดเสา คาน และจำนวน Bolt ตามตาราง 4.3 จากรูปพบว่าในช่วงฮิสตริกตัวอย่างที่ยึดด้วย Bolt 8 ตัวจะรับแรงได้เท่ากับตัวอย่างยึดด้วย Bolt 12 แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงฮิสตริกตัวอย่างที่ยึดด้วย Bolt 8 ตัวจะรับแรงได้น้อยกว่า 12 ตัวเล็กน้อย



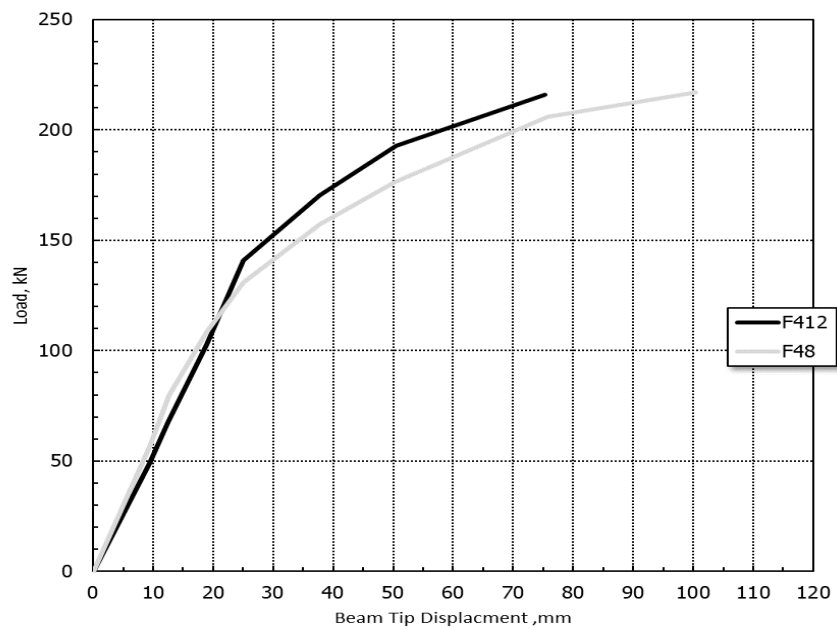
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานตัวอย่าง F18 และ F112



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานตัวอย่าง F28 และ F212



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานตัวอย่าง F38 และ F312



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานตัวอย่าง F48 และ F412

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและศักยภาพของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate ขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 (SP1 และ SP2) ถูกออกแบบและมีรายละเอียดเป็นข้อต่อคาน-เสาประเภทเชื่อมเต็มหน้าตัดกับแผ่นเหล็กที่เจาะรูและใช้ Bolt ยึดปีกเสาและแผ่นเหล็กจำนวน 8 ตัว ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบทั้งสองตัวอย่างก่อสร้างด้วยช่างที่ชำนาญการในประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาจำนวน Bolt ต่อพฤติกรรมการรับแรงของข้อต่อโดยทำการเปรียบเทียบจำนวน Bolt 8 และ 12 ตัว จากการศึกษาพบว่าเครื่องทดสอบ UTM สามารถประยุกต์ใช้ในการทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสาเหล็กนอกแกน เครื่องทดสอบ UTM ให้ผลการทดสอบดีมาก ในช่วงฮิสตริกตัวอย่างที่ยึดด้วย Bolt 8 ตัวจะรับแรงได้เท่ากับตัวอย่างยึดด้วย Bolt 12 แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงอินฮิสตริกตัวอย่างที่ยึดด้วย Bolt 8 ตัวจะรับแรงได้น้อยกว่า 12 ตัวเล็กน้อย

ค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง SP1/SP2

ค่ารายงาน	ค่ามากที่สุดที่วัดได้	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น (SP1/SP2)	รอบการเคลื่อนที่ลง (SP1/SP2)
แรงที่หัวเครื่องกด UTM (kN)	33.5/52.4	30.3/66
ระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน (mm)	120/37	120/37
โมเมนต์ที่หน้าเสา (kN-mm)	81452/123240	73740/154950
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-mm)	84797/131110	76768/164840
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.0267/0.0148	0.049/0.0148
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.0232/0.0178	0.0284/0.0125
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.0065/0.0074	0.0049/0.00341
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.0049/0.0014	0.0109/0.0017

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-เสาเหล็กก่อสร้างตามมาตรฐานประเทศไทยภายใต้แรงวัฏจักร", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, เล่มที่ 1, หน้า STR 352-359, 2556.