รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว ในประเทศไทย: การวิเคราะห์และการทดสอบ

Use of Steel Beam-Column Connections with the Reduced Beam Section Details for Earthquake Load in Thailand: Analytical and Experiment Study

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2560A10802185

สัญญาเลขที่ ๒๔/๒๕๖๐

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานสำหรับรับแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย การวิเคราะห์และการทดสอบ

Use of Steel Beam-Column Connections with the Reduced Beam Section Details for Earthquake Load in Thailand Analytical and Experiment Study

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน ๒๕๖๒

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.อานนท์ วงษ์แก้ว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา
โครงการวิจัยเรื่อง

การประยุกต์ใช้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานสำหรับรับแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย การวิเคราะห์และการทดสอบ

Use of Steel Beam-Column Connections with the Reduced Beam Section Details for Earthquake Load in Thailand Analytical and Experiment Study
รหัสโครงการ 2560A10802185
สัญญาเลขที่ ๒๔/๒๕๖๐ ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น ๕๙๔,๐๐๐ บาท
ระยะเวลาการดำเนินงาน ๑ ปี (ตค.๒๕๕๙-กย.๒๕๖๐)

ABSTRACT

This research is aimed to investigates the viability for seismic resistance of two fully welded steel moment connections with reduced beam section (RBS) scheme. These connections were designed as the exterior beam-column connections with fully welded beams to columns following Thailand-steel practice. The RBS scheme guided by AISC358-05 was implemented. Test specimens with designate as RBS1 and RBS2 were built with SS400/SM400 steel grade using H300x300x106 kg/m and H300x300x87 kg/m as columns, respectively. A steel section of H300x200x58.6 kg/m was selected as beams for both specimens with the same steel grade. Hysteretic behavior, plastic rotations, and failure modes are the studied reports. RBS1 shows very poor seismic behavior due to premature brittle fracture of the welded material around beam flange. After fracture the specimen suddenly lost its ability to resist further applied loads. On the other hand, RBS2 delivers the acceptable seismic behavior. The maximum moment capacity of the reduced beam can be achieved even though the fracture of welded material is observed.

Keywords: Steel Moment Connection, Reduced Beam Section (RBS), Seismic Behavior

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การประยุกต์ใช้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานสำหรับรับแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย การวิเคราะห์และการทดสอบ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2560 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 การสร้างตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินการทดสอบ	20
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	32
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ภัยแผ่นดินไหวเป็นภัยธรรมชาติที่ก่อให้เกิดความเสียหายได้อย่างรุนแรง ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมากในหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะโครงสร้างหรือองค์อาคารต่างๆ เหตุการณ์ล่าสุดเมื่อวันที่ 6 พฤษภาคม 2557 เกิดแผ่นดินไหวที่บริเวณภาคเหนือของไทยซึ่งตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับรอยแยกทางธรณีวิทยา อีกทั้งแรงแผ่นดินไหวครั้งนี้ยังส่งผลให้กรุงเทพมหานครรับรู้ถึงแรงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้ได้ ถึงแม้ว่ากรุงเทพมหานครอยู่ห่างจากต้นกำเนิดคลื่นแผ่นดินไหวมาก แต่ทั้งนี้กรุงเทพมหานครตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งดินเหนียวมีความสามารถดูดซับคลื่นแล้วขยายเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้

ปัจจุบันการก่อสร้างด้วยโครงสร้างเหล็กกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างเหล็กสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและสะดวกกว่าโครงสร้างคอนกรีต และคุณสมบัติของเหล็กที่สามารถรับแรงอัดและแรงดึงได้ดี และโครงสร้างเหล็กยังมีคุณสมบัติด้านความเหนียวและกำลังหลังจุดครากที่สูง เมื่อรับแรงจึงไม่เกิดการวิบัติแบบฉับพลัน วิศวกรส่วนใหญ่จึงเชื่อว่าโครงสร้างเหล็กจะเสียหายน้อยมากเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวจะถูกสลายไปที่บริเวณข้อต่อและองค์อาคารยึดรั้งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นบริเวณข้อต่อและองค์อาคารยึดรั้งจึงควรมีความเหนียวเพียงพอที่จะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงรูป และสลายพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวโดยไม่มีรอยแตกร้าว

อย่างไรก็ตามจากเหตุการณ์ เมื่อวันที่ 17 มกราคม ค.ศ. 1994 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางขึ้นที่เมืองเล็กๆชื่อ Northridge ใกล้กับเมือง Los Angeles ซึ่งต่อมาถูกเรียกชื่อว่าแผ่นดินไหว Northridge แผ่นดินไหวครั้งนี้ได้สร้างความเสียหายเป็นบริเวณกว้าง และจากการสำรวจความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น พบว่าโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นต่ำเช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อาคารจอดรถที่สร้างจากคอนกรีตอัดแรง จะได้รับผลกระทบต่อโครงสร้างโดยมีการพังทลายทั้งอาคาร ส่วนองค์อาคารเหล็กนั้น พบความเสียหายภายนอกเพียงเล็กน้อยและไม่พบการพังทลายของอาคาร อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสำรวจภายในโดยละเอียดพบว่า มีรอยแตกเกิดขึ้นบริเวณข้อต่อคาน-เสาเป็นจำนวนมากกว่า 100 อาคารในบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหว จากการวิเคราะห์โดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญด้านโครงสร้างมีบทสรุปว่า [17] รอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรอยแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและกะทันหัน ซึ่งในบางกรณีอาจนำไปสู่การพังทลายของ

โครงสร้างได้ โดยพบว่าสาเหตุที่ทำให้ข้อต่อโครงสร้างเหล็กเกิดการเสียหายแบบเปราะนั้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น รายละเอียดการก่อสร้างของข้อต่อ คุณสมบัติวัสดุ ความชำนาญของคนงาน วัสดุเชื่อม และการกระบวนการก่อสร้างของข้อต่อนั้นๆ เป็นต้น

หลังเหตุการณ์แผ่นดินไหว Federal Emergency Management Agency (FEMA) ได้ริเริ่มโครงงานศึกษาวิจัยองค์อาคารเหล็กแบบต่างๆ ที่เกิดหรืออาจเกิดผลกระทบจากแผ่นดินไหว โครงงานวิจัยมีระยะเวลา 4 ปี โดยเป็นการให้ทุนวิจัยแก่หน่วยงาน SAC Joint Venture ซึ่งเป็นองค์กรที่ประกอบด้วย Structural Engineers Association of California (SEAOC), Applied Technology Council (ATC), California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREe) รวมถึงนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาต่างๆที่เกี่ยวข้องตามมหาวิทยาลัยต่างๆในประเทศสหรัฐอเมริกา SAC [17-19] ได้สรุปผลงานวิจัยโดยตีพิมพ์ในเอกสาร FEMA 267 และ FEMA 350 ถึง 355 [9-14]

ตามเอกสาร FEMA 350[11] ได้สรุปและนำเสนอวิธีปรับปรุงการให้รายละเอียดบริเวณรอยต่อใหม่ เพื่อให้รอยต่อแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น มีความเหนียวสูง เหมาะในการประยุกต์ใช้กับโครงข้อแข็งเหล็กที่มีอยู่เดิมหรือที่จะสร้างใหม่ในอนาคต ซึ่งข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (Reduced Beam Section: RBS) ก็เป็นข้อต่ออีกประเภทหนึ่งที่มีการแนะนำโดย FEMA 350 [11] ถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้กับโครงข้อแข็งเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว

สำหรับประเทศไทยนั้นมีแผ่นดินไหวเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี โดยเฉพาะภาคเหนือของประเทศไทย ถึงแม้ว่าขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดเล็กถึงปานกลาง แต่ก็สร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างขนาดต่างๆเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ประเทศไทยได้ออกกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารเพื่อรับแรงจากแผ่นดินไหวคือ “กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2550” [24] และกรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดทำมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวหรือ “มยผ. 1301-50” ขึ้น อย่างไรก็ตามข้อกำหนดนี้เป็นข้อกำหนดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งยังไม่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับโครงสร้างเหล็ก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวมากนัก และยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวโดยตรง การนำมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กจากต่างประเทศมาใช้โดยตรงอาจเป็นการสิ้นเปลือง และอาจไม่เหมาะสมกับสภาวะการเกิดแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมและศักยภาพของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงข้อแข็งเหล็กในประเทศไทยจึงเป็นความท้าทายและมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทำให้เกิดความเข้าใจและเกิดองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีต่างประเทศได้ถูกต้องและเหมาะสมกับประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1) เพื่อประยุกต์ใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่มีอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ของเสาต้นริมโดยใส่แรงสลับทิศ
2) เพื่อทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ
3) เพื่อศึกษาพฤติกรรม ศักยภาพ ความเหนียว และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวและการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่การประเมินพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรง และลักษณะการพังของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ของเสาต้นริม (Exterior Connection) ของโครงสร้างเหล็กในประเทศไทยเมื่อรับแรงวัฏจักร ด้วยวิธีการทดสอบตัวอย่างข้อต่อขนาดใหญ่ในห้องฏิบัติการ โดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลัง, การยืดหยุ่น (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกและลักษณะการพังของข้อต่อเสาต้นริม เช่น ขนาดของคาน ขนาดของเสา รายละเอียดของรอยเชื่อม และนำเสนอการประยุกต์ใช้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ของเสาต้นริมที่ก่อสร้างด้วยรายละเอียดวิธีการก่อสร้างที่นิยมใช้ในประเทศไทย เพื่อให้มีพฤติกรรมการรับแรงที่เหมาะสมกับแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในประเทศไทยในอนาคต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เป็นการพัฒนาเครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยบูรพา ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่โดยใช้เครื่อง UTM ซึ่งจะเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยชั้นสูงต่อไป
2) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่นี้ จะทำให้ทราบถึงศักยภาพของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ที่ก่อสร้างตามมาตรฐานการก่อสร้างในประเทศไทยเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งยังไม่เคยมีการทดลองมาก่อน และจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาการใหม่ให้โครงสร้างประเภทนี้ สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นในประเทศไทยได้โดยไม่พังทลายและทำความเสียหายแก่ทรัพย์สิน

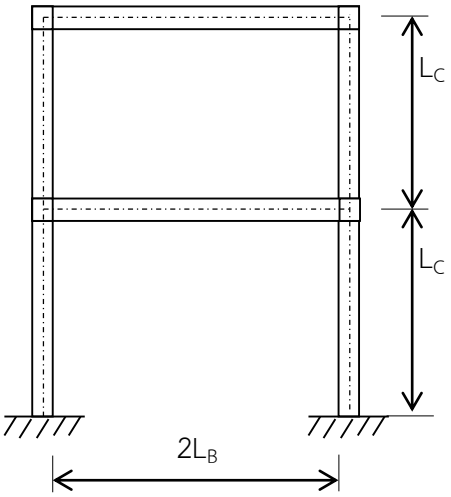
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

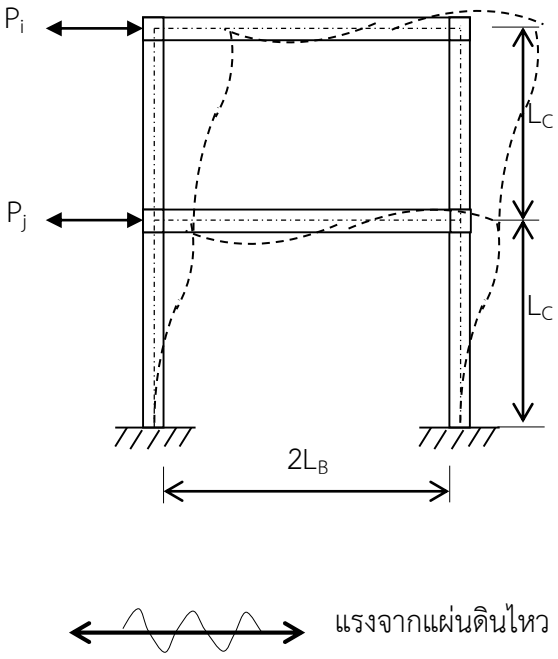
จากการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของข้อต่อ ที่รวบรวมข้อมูลจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ทำให้ทราบว่า บริเวณข้อต่อของโครงสร้างมีส่วนสำคัญมากต่อความแข็งแรงและความเหนียวขององค์อาคาร โดยผลจากการสำรวจหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ Northridge ในปี 1994 ประเทศสหรัฐอเมริกา และแผ่นดินไหวที่ Kobe ในปี 1995 ประเทศญี่ปุ่น พบว่าโครงข้อแข็งจำนวนมากเกิดรอยแตกร้าวบริเวณข้อต่อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงข้อแข็งที่ออกแบบตามมาตรฐานก่อนปี 1994 นั้นมีความเหนียวต่ำกว่าที่ควรจะเป็นอย่างมาก หลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวทั้งสองเหตุการณ์นี้ทำให้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมโครงข้อแข็งอย่างแพร่หลายมากขึ้นในต่างประเทศ โดยเฉพาะบริเวณข้อต่อ ซึ่งจากผลการวิจัยเหล่านั้น ส่งผลให้มาตรฐานการออกแบบโครงข้อแข็ง มีการปรับปรุงเป็นอย่างมากจนมาเป็นมาตรฐาน AISC Seismic Provisions ในปัจจุบัน ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยก็เริ่มที่จะได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวบ่อยมากขึ้น ประกอบกับรูปแบบของข้อต่อรวมถึงวิธีการก่อสร้างที่นิยมใช้ในประเทศไทยก็มีความแตกต่างไปจากต่างประเทศ ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติของโครงสร้างที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายจึงเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อเป็นการประเมินความสามารถของข้อต่อ เมื่อต้องเผชิญกับเหตุการณ์แผ่นดินไหว

เมื่อโครงสร้างได้รับแรงแผ่นดินไหวอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน (Ground Motion) โครงสร้างจะเกิดการโยกตัวไปมาและมีความเร่งเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของโครงสร้าง ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างต่อโครงสร้างซึ่งแรงนี้เป็นแรงเฉื่อยที่เกิดจากความเร่งและมวลของโครงสร้างนั่นเอง เมื่อเกิดความหน่วงจากแรงแผ่นดินไหวแล้วส่วนต่างๆขององค์อาคารไม่สามารถเคลื่อนตัวไปพร้อมกับฐานรากได้จึงทำให้องค์อาคารนั้นเกิดการเสียรูปโดยเฉพาะบริเวณข้อต่อคาน-เสาเหล็ก ซึ่งเป็นจุดที่อ่อนแอและได้รับความเสียหายมากที่สุด ดังนั้นเราจึงได้นำข้อต่อบริเวณนี้มาทำการทดสอบในรูปแบบของการรับแรงแบบแรงสลับ ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำคาน-เสาเหล็ก ต้นนอกสุดขององค์อาคารมาทำการทดสอบ เนื่องจาก จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าเสาต้นนอกสุดได้รับโมเมนต์มากสุดจากแรงที่มากระทำ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวแผ่นดินจะมีการเคลื่อนตัวในลักษณะคลื่น (Wave) ทำให้เกิดแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏจักร (Cyclic Load) โดยมีลักษณะไป-กลับ (ซ้าย – ขวา) เมื่อโครงข้อแข็งเหล็กรับแรงแผ่นดินไหว จึงเสมือนว่าถูกแรงกระทำด้านข้างกระทำ ดังแสดงในรูป 2.1ก และ 2.1ข ส่วนรูป 2.1ค แสดงไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของโครงข้อแข็งเหล็ก เมื่อรับแรง

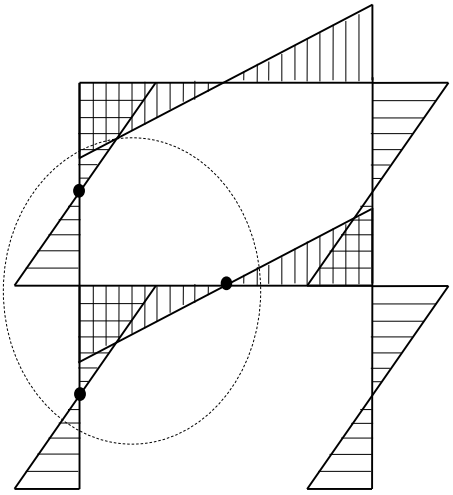
ด้านข้าง จะเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางเสาชิ้นบน – ล่าง และจุดกึ่งกลางช่วงคาน จะเป็นจุดที่โมเมนต์ดัดเป็นศูนย์ (จุดดัดกลับของโมเมนต์ดัด) นั้นหมายความว่า ชิ้นส่วนคาน-เสาตรงบริเวณนี้ ซึ่งเป็นบริเวณข้อต่อระหว่างคานกับเสา สามารถจำลองสภาพการใส่แรง และเงื่อนไขการยึดรั้งได้ดังรูปที่ 2.1ง กล่าวโดยสรุป ข้อต่อคาน-เสาแบบถ่ายโมเมนต์ของเสาต้นริม เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว สามารถจำลองลักษณะการใส่แรงได้ โดยใส่แรงวัฏจักรที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงคาน โดยที่ปลายเสาทั้งบนและล่างจะมีเงื่อนไขของการยึดรั้งเป็นแบบสลัก (Pin Support) รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายโมเมนต์และแรงเฉือนจากคานสู่เสาเมื่อปลายคานได้รับแรงกระทำและปลายเสาเป็นการยึดรั้งแบบหมุนอิสระ ตามรูปพบว่าค่าโมเมนต์ดัดในเสาจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณปีกคานบนและปีกคานล่าง นอกจากนี้มีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกึ่งกลางเสา ส่วนค่าแรงเฉือนในเสามีค่าคงที่จากตำแหน่งรองรับด้านบนถึงบริเวณปีกคานด้านบนและมีค่าเท่ากับค่าแรงเฉือนจากปีกคานล่างถึงตำแหน่งรองรับด้านล่าง ส่วนในพื้นที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างปีกคานบนถึงปีกคานล่างค่าแรงเฉือนจะมีค่าสม่ำเสมอและมีค่าสูงสุด



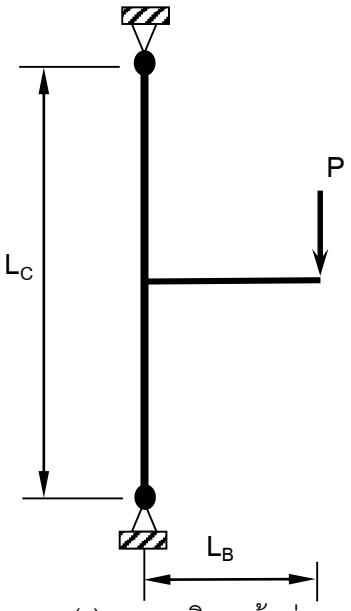
(ก) การจำลองโครงข้อแข็งเหล็กเพื่อวิเคราะห์การรับแรงด้านข้าง



(ข) การจำลองการเสียรูปของโครงข้อแข็งเหล็กเมื่อรับแรงด้านข้าง

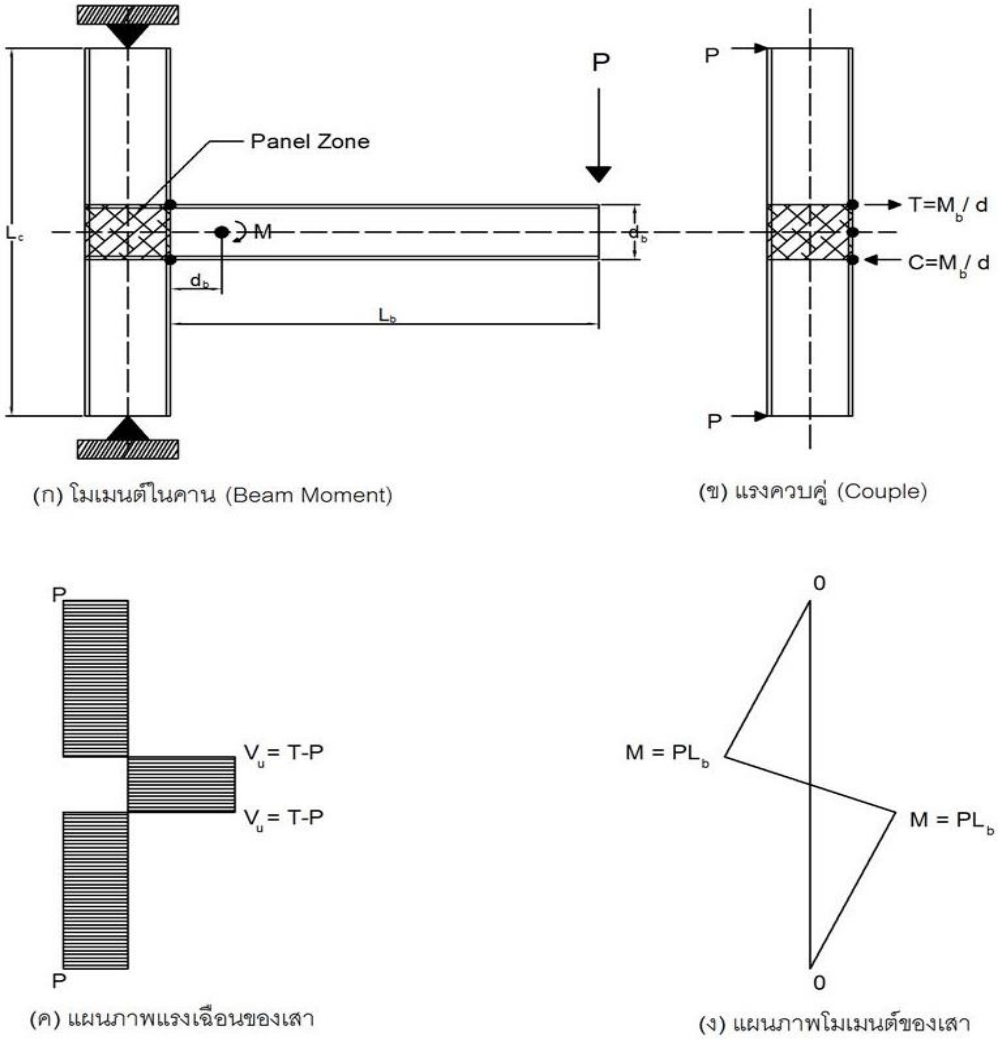


(ค) แผนภาพแสดงโมเมนต์ภายในของโครงสร้างเหล็ก



(ง) ขยายบริเวณข้อต่อ

รูปที่ 2.1 โครงข้อแข็งเหล็กเมื่อมีการรับแรงแผ่นดินไหว



(ก) โมเมนต์ในคาน (Beam Moment)

(ข) แรงควบคู่ (Couple)

(ค) แผนภาพแรงเฉือนของเสา

(ง) แผนภาพโมเมนต์ของเสา

รูป 2.2 แสดงการถ่ายโอนโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างขณะที่ปลายคานได้รับแรงกระทำ

จากการศึกษาพบว่ามีวิธีการปรับปรุงพฤติกรรมของโครงข้อแข็ง โดยทำให้โครงข้อแข็งสามารถแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นได้มากขึ้นเมื่อต้องรับแรงแผ่นดินไหวซึ่งมีอยู่กันหลายวิธี เป็นการลดความเสี่ยงของการเกิดรอยแตกที่บริเวณจุดต่อให้น้อยลง วิธีการที่นิยมใช้คือ การกำหนดให้หน้าตัดคานบริเวณอื่นนอกเหนือจากบริเวณปลายคานที่เชื่อมติดกับหน้าเสาเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ก่อนที่ความเค้นบริเวณรอยต่อจะมีค่าเกินค่าสูงสุดของกำลังวัสดุ วิธีการกำหนดจุดหมุนพลาสติกของคานที่บริเวณอื่นนี้สามารถทำได้ 2 วิธีคือ การเสริมกำลัง (Strengthening) หรือการลดกำลัง (Weakening) ของหน้าตัดคาน วิธีการเสริมกำลังทำได้โดยการเสริมกำลังที่บริเวณข้อต่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยการเสริมแผ่นเหล็กซึ่งมีวิธี และรูปแบบการเสริมหลายรูปแบบ ส่วนวิธีการ

ลดกำลังเป็นวิธีการที่ตรงกันข้ามกับวิธีแรก โดยการกำหนดบริเวณบริเวณหน้าตัดคานที่จะให้เกิดจุดหมุนพลาสติกล่วงหน้า ซึ่งมักจะเป็นระยะประมาณครึ่งหนึ่งของความลึกของคานวัดจากหน้าเสา วิธีการนี้ทำได้ด้วยการตัดส่วนของปีกคานออกเพื่อให้หน้าตัดคานที่บริเวณนี้มีความแข็งแรงน้อยลง ดังนั้นจะทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติกก่อนหน้าตัดคานที่บริเวณอื่นๆ จากการทดสอบชิ้นทดสอบคาน-เสาขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่า ทั้งสองวิธีการนี้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี ได้มีการนำเสนอวิธีการคำนวณและรายละเอียดการก่อนสร้างข้อต่อคาน-เสาของโครงข้อแข็งเหล็กหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถนำไปใช้ปรับปรุงข้อต่อของอาคารที่ยังใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการศึกษาเชิงพาณิชย์พบว่าค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคารโครงข้อแข็งเหล็กเดิมให้มีพฤติกรรมที่ดีขึ้นจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ระหว่าง 30-100 เหรียญสหรัฐต่อพื้นที่ 1 ตารางฟุต ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางสถาปัตยกรรมของอาคารนั้น

ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) นั้นเป็นข้อต่อที่ถูกออกแบบและก่อสร้างอยู่บนสมมุติฐานที่ต้องการให้จุดหมุนพลาสติกของคานเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดคานในตำแหน่งที่ห่างจากบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างปลายคานกับหน้าเสา ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาการเกิดความเค้นสะสมที่บริเวณจุดเชื่อมต่อนั้นเอง การกำหนดตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของคานนั้น กระทำได้โดยอาศัยเทคนิคการก่อสร้างคือ การลดขนาดของปีกคานทั้งบนและล่าง ด้วยวิธีการตัดเนื้อแผ่นเหล็กของปีกคานบนและล่างของหน้าตัดคานออก ในลักษณะสมมาตรทั้งแกนในแนวดิ่งและแนวราบ เพื่อลดพื้นที่รับแรงของปีกคานบนและล่างลง ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของคานที่เหมาะสมนั้นกำหนดโดยสมการออกแบบตามเอกสาร FEMA 350 [11] นอกจากนี้ ปีกคานตรงตำแหน่งจุดต่อระหว่างปลายคานกับแผ่นปีกเสาจะเป็นการเชื่อมเต็ม โดยรอยเชื่อมต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน FEMA 352 [12] สิ่งสำคัญที่กำหนดไว้สำหรับข้อต่อประเภทนี้อีกข้อหนึ่งคือ ต้องไม่มีการเสริมแผ่นเหล็กเพิ่มความแข็งที่บริเวณแผ่นปีกและแผ่นเอวของคาน แผ่นเอวของคานสามารถเชื่อมติดกับแผ่นปีกเสาโดยตรง หรือติดกับแผ่นเหล็กถ่ายแรงเฉือนด้วยสลักเกลียวก็ได้ รูปที่ 2.4 แสดงรายละเอียดและลักษณะของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานที่ใช้กันอยู่ทั่วไปตามเอกสาร FEMA 350 [11] และกำหนดให้ข้อต่อประเภทนี้สามารถใช้ได้กับโครงข้อแข็งเหล็กชนิดพิเศษและธรรมดา โดยมีข้อจำกัดต่างๆการใช้ตามที่ถูกระบุไว้ในตารางที่ 1

ขั้นตอนและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบสมการข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ที่เสนอในเอกสาร FEMA 350 [11] มีวิธีการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดตำแหน่งและขนาดความยาวของปีกคานที่ต้องการตัดออก ให้คำนวณตามสมการ

$$a \cong (0.5 \text{ to } 0.75)b_f$$
$$b \cong (0.65 \text{ to } 0.85)d_b$$

a และ b แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

b_f และ d_b ความกว้างของแผ่นปีกคานและความลึกของหน้าตัดคาน

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาความลึกของการตัดแผ่นปีกคาน (ค่า c) ดังนี้

2.1) สมมุติค่า $c = 0.20b_f$

2.2) คำนวณค่า Z_{RBS}

2.3) คำนวณค่า $M_{pr} = C_{pr}R_yZ_eF_y$

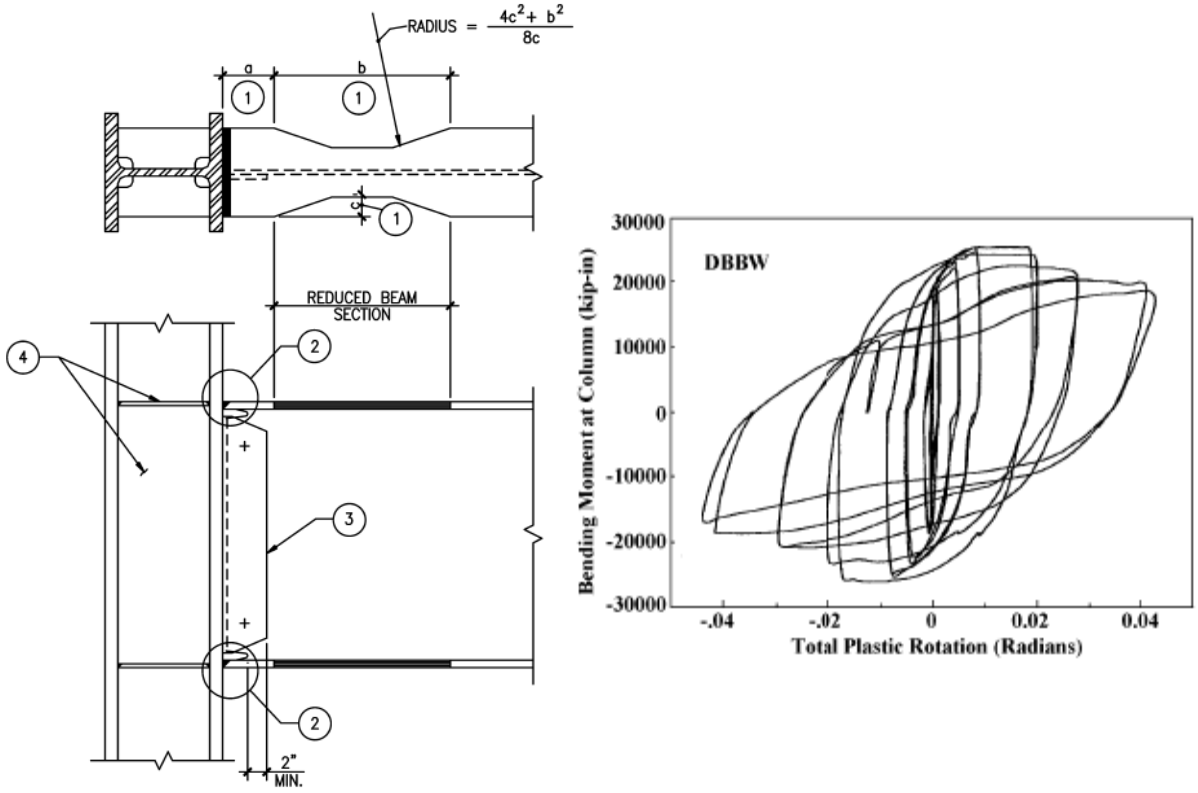
2.4) คำนวณค่า $M_f = M_{pr} - V_pX$ แสดงดังรูปที่ 2.5

2.5) ถ้า $M_f < C_{pr}R_yZ_eF_y$ ใช้ได้ แต่ถ้ามีค่ามากกว่าให้เพิ่มค่า c แต่ควรมีค่าไม่เกิน $0.25b_f$

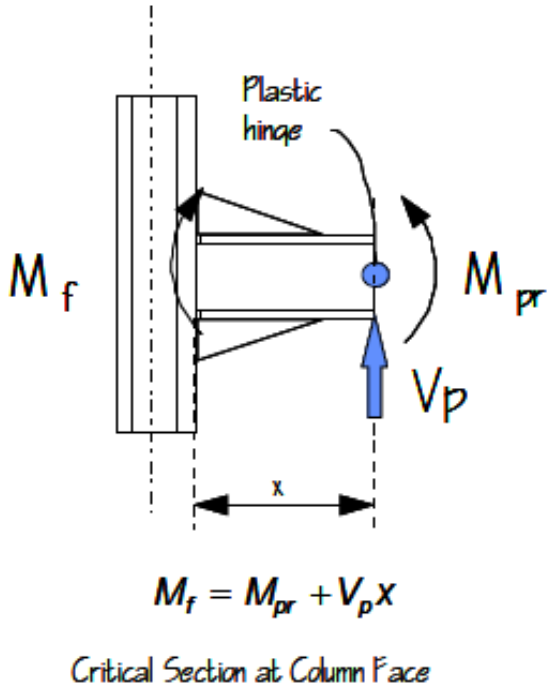
C_{pr} มีค่าเท่ากับ 1.15

R_y ค่า Overstrength factor ของเหล็กอ่านจากตาราง AISC 1997 [3]

Z_e ค่าโมดูลัสพลาสติกหน้าตัดประสิทธิผลที่ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของคาน



รูปที่ 2.4 รายละเอียดข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) และพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดสลับทิศของข้อต่อ [11]



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของคาน และการคำนวณค่า M_f M_{pr} [11]

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดสำหรับข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน [11]

ข้อกำหนดทั่วไป	
โครงข้อแข็งเหล็กที่ใช้ได้	OMF[1] หรือ SMF[2]
ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของคาน	$d_c/2 + a + b/2$
ข้อกำหนดตัวแปรสำคัญของคาน	
หน้าตัดคาน	W36 หรือ คานที่มีความลึกน้อยกว่า 36 นิ้ว (มีน้ำหนักไม่เกิน 300 ปอนด์ต่อฟุต)
อัตราส่วนระหว่างความกว้าง span ต่อด้วยความลึกคานที่ต่ำที่สุด	OMF[1] : 5 SMF[2] : 7
$b_f/2t_f$	มากสุดเท่ากับ $52/\sqrt{F_y}$
ความหนาของปีกคาน	มากสุด 1.75 นิ้ว
ชนิดของเกรดเหล็กที่กำหนด	A572 Grade 50 หรือ A992 Grade 50/S75
ค่าตัวแปรสำหรับการลดขนาดปีกคาน	ตามสมการออกแบบที่กำหนด
ข้อกำหนดตัวแปรสำคัญของเสา	
หน้าตัดเสา	OMF[1] : ไม่จำกัด SMF[2] : W12 และ W14
ชนิดของเกรดเหล็กที่กำหนด	A572 Grade 50 หรือ A913 Grade 50 หรือ A992

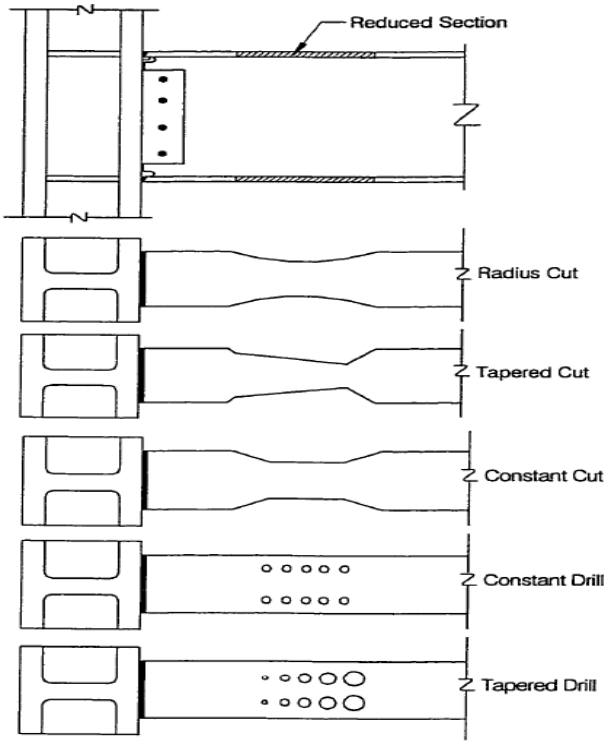
[1]OMF: Ordinary Moment Frame [2]SMF: Special Moment Frame

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1980 Andre Plumier เป็นคนแรกที่เริ่มคิดค้นข้อต่อที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำให้ความแข็งแรงในคานลดน้อยลง (อ่อนตัวลง) ในตอนแรกอาจจะเห็นข้อขัดแย้งของแนวความคิดนี้ เนื่องจากข้อต่อจะสูญเสียความแข็งแรงและความคงทนในขณะเดียวกันจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ามีการออกแบบข้อต่ออย่างถูกต้อง ผลของความเหนียวที่เพิ่มมากขึ้นจะสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนรูปของข้อต่อเนื่องจากการสูญเสียความแข็งแรงและความคงทนได้ ในช่วงต้นปี 1990 Arbed (Luxembourg Base Steel Producer) ได้ยื่นจดทะเบียนข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (Reduced Beam Section (RBS) Connections) หรือเป็นที่เรียกกันว่าแนวคิด Dog Bone

Andre Plumier ได้รับเงินสนับสนุนจาก Arbed (Luxembourg Base Steel Producer) และ European Union เพื่อทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) หลายการทดสอบมีทั้งการลดหน้าตัดบนปีกคานแบบคงที่และลดหน้าตัดบนปีกคานแบบเรียว

อย่างไรก็ตามหลังจากการเกิดแผ่นดินไหวที่เมือง Northridge ได้ไม่นาน ในปี 1994 Arbed ได้ยกเลิกการเก็บค่าลิขสิทธิ์สำหรับผู้ที่ต้องการใช้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) ในการก่อสร้างอาคารและโครงสร้างอื่นๆ ทำให้ข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) เป็นที่สนใจในการนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาความเปราะของข้อต่อโครงสร้างเหล็ก เนื่องจากข้อต่อที่มีรายละเอียดการเชื่อมต่อแบบ BWWF (Bolted-Web-Welded-Flange Moment Connection) ไม่สามารถใช้ได้ในโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ หลายการทดสอบได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) โดยมีรูปแบบหลายและวิธีการที่ทำให้ความแข็งแรงในคานลดลงถูกนำเสนอเพิ่มเติมอีกหลายรูปแบบ วิธีการเหล่านั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงการลดหน้าตัดบริเวณใกล้เคียงกันเพื่อรองรับ Stress ที่เกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อระหว่างปลายคานและหน้าเสา มีทั้งการตัดปีกคานออกเป็นวงกลม [Arc], ตัดเรียว, ตัดแบบรูปทรงคงที่, หรือเจาะรูแบบคงที่ หรือเจาะแบบมีความแตกต่างของขนาดรูเจาะไปตามความยาวคานแสดงตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแบบของข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) [22]

Chen กับ Iwankiw ทดสอบข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อRBS) ในรูปแบบการตัดปีกคานออกแบบคงที่และการตัดปีกคานออกแบบเรียว [Chen96],[Iwa96]

Englehardt กับ Popov รวบรวมการทดสอบข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อ RBS) ในรูปแบบการตัดปีกคานออกเป็นทรงกลม (Circular-cut profile of RBS) [Eng96],[Pop96]

The Federal Emergency Management Agency [FEMA] แนะนำถึงการแก้ปัญหาชั่วคราวสำหรับการก่อสร้างแบบใหม่ด้วยการออกแบบใช้ข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อRBS) [SAC95a],[SAC97a] โดยนำข้อจำกัดต่างๆของการทดสอบและข้อมูลทดสอบข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อRBS) ที่ดำเนินการทดสอบของประสบความสำเร็จในรูปแบบต่างๆ มาผสมผสานกันเพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อRBS)

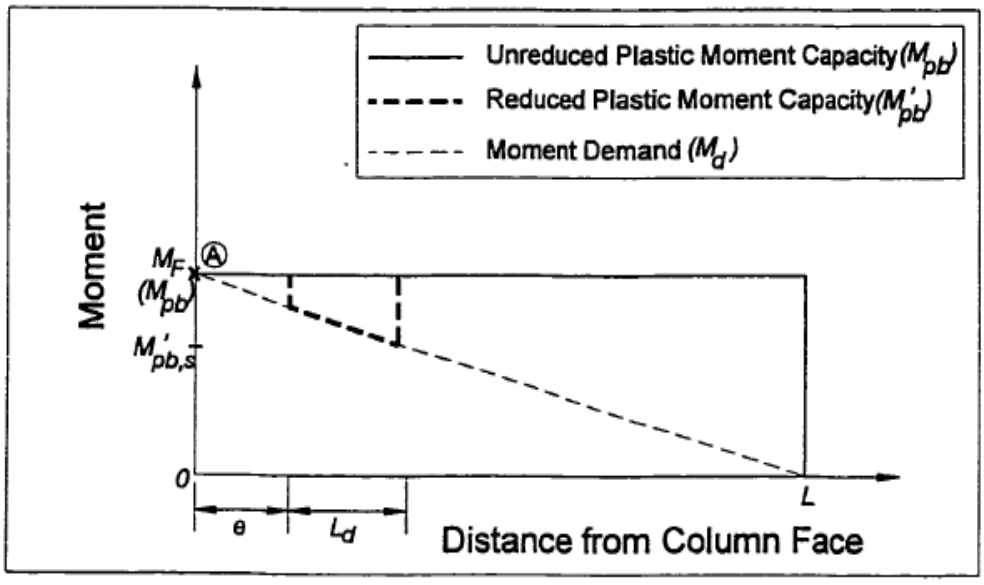
ถึงแม้ว่าจะมีการนำเสนอแนวคิดการออกแบบข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อ RBS) ในรูปแบบต่างๆที่แตกต่างกันออกไป แต่จุดประสงค์ของแนวคิดเหล่านี้คือ การลดโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าเสา การลดโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าเสาจะต้องทำให้ Plastic hinge zone อยู่

ไกลออกไปจากหน้าเสา เพราะ Plastic hinge zone จะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงหรือความอ่อนตัวของข้อต่อในเบื้องต้น ถ้าทำการลดหน้าตัดบริเวณปีกคานได้ถูกต้องจะทำให้ Plastic hinge zone อยู่ห่างออกมาจากหน้าเสา ปีกคานเป็นจุดแรกที่เป็นองค์ประกอบที่จะทำให้ Plastic hinge zone เคลื่อนที่เนื่องจากปีกคานเป็นตัวกระจายความแข็งดัด (flexural strength) ของคาน

รายละเอียดประเภทของข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อ RBS) มี 2 แบบคือ การตัดแบบเรียว (tapered-cut) และการตัดแบบทรงกลม (radius-cut) โดยพื้นฐานแล้วข้อต่อนี้ประกอบด้วย 2 โซนใหญ่นั่นคือ โซนส่งผ่าน (Transition zone) และโซนจุดคราก (yielding zone)

ข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (ข้อต่อRBS) ในรูปแบบการตัดแบบเรียว (tapered–cut) กรณีการตัดปีกคานออกแบบแบบเรียว (tapered–cut) โซนพลาสติก (Plastic zone) ควรจะได้รับการพัฒนาการครากให้มีความสม่ำเสมอมากกว่า การพัฒนา ระยะการตัดปีกคานออกตามความยาวคาน L_d ถ้าปีกคานถูกตัดออกทั้งสองข้างเหมือนกัน [Iwa96]

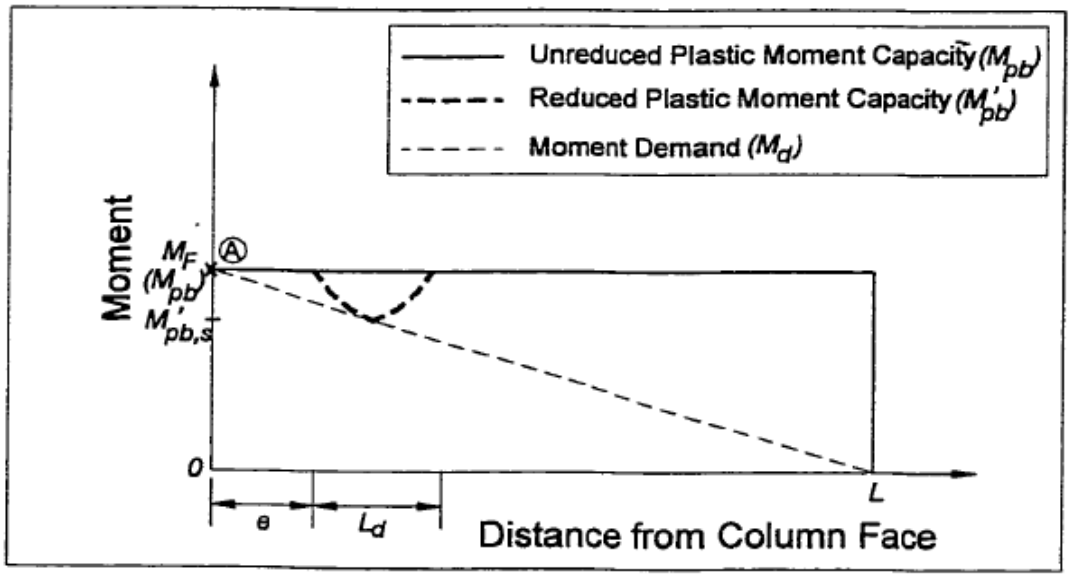
การออกแบบโซนส่งผ่าน (Transition zone) มีจุดประสงค์เพื่อให้โซนนี้รองรับความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของคานในทิศทางตามขวาง การออกแบบโซนจุดคราก (Yielding zone) มีจุดประสงค์เพื่อทำหน้าที่ในการรองรับโซนพลาสติก (Plastic zone) เพื่อให้สามารถพัฒนา Plastification ในเบื้องต้นได้



รูปที่ 2.7 ค่าโมเมนต์ที่ต้องการและค่ากำลังโมเมนต์ของหน้าตัดของข้อต่อคาน-เสาประเภทการลดหน้าตัดคานแบบ Tapered Cut

รูปที่ 2.7 แสดงภาพระหว่างค่าโมเมนต์ที่ต้องการ (moment demand) M_d ค่าโมเมนต์ที่ต้องการที่หน้าเสา M_F ค่ากำลังโมเมนต์ของหน้าตัดช่วงพลาสติก (plastic moment capacity) M_{pb} กับระยะห่างจากหน้าเสา L ซึ่งค่าค่าโมเมนต์ที่ต้องการ (moment demand) M_d คือแรงกระทำแบบจุดในแนวดิ่ง (Vertical point load) คูณกับระยะทางที่ห่างจากหน้าเสา L ซึ่งกรณีนี้เป็นการเลียนแบบเงื่อนไขของกลศาสตร์การแกว่ง (sway mechanism) เมื่อวัตถุที่เป็นค้ำยันภายนอกของโครงข้อแข็งเหล็กได้รับค่าโมเมนต์ที่ต้องการ (moment demand) และแรงด้านข้าง (lateral load) ที่ข้อต่อ (joint) การตัดปีกคานออกเป็นการลดอัตราส่วนของค่าโมเมนต์ที่ต้องการ (moment demand) M_d ลดค่ากำลังโมเมนต์ของหน้าตัด (moment capacity) M'_{pb} ให้คงที่และเหลือน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะการตัดปีกคานออกตามความยาวคาน L_d และทำให้ข้อต่อเกิดการกระจายการคราก ตรงพื้นที่บริเวณข้อต่ออย่างสม่ำเสมอ (Uniform)

โมเมนต์ที่จุด A เป็นสภาวะที่อัตราส่วนของ M_F / M_{pb} เท่ากับหนึ่งหน่วย การออกแบบอัตราส่วน M_F / M_{pb} ในกรณีส่วนใหญ่ควรจะออกแบบให้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งเพื่อหลีกเลี่ยง Plastic hinge ที่หน้าเสา การลดอัตราส่วนของโมเมนต์นี้จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ห่างจากหน้าเสา L และพื้นที่ที่ตัดปีกคานออก (กรณีการตัดหน้าตัดคานออกแบบเรียว)



รูปที่ 2.8 ค่าโมเมนต์ที่ต้องการและค่ากำลังโมเมนต์ของหน้าตัดของข้อต่อคาน-เสาประเภทการลดหน้าตัดคานแบบ Radius Cut

ข้อต่อคาน-เสาประเภทการลดหน้าตัดคานในรูปแบบการตัดแบบทรงกลม (radians-cut connection) จะมีความแตกต่างจากข้อต่อคาน-เสาประเภทการลดหน้าตัดคานในรูปแบบการตัดแบบเรียว (tapered-cut) คือข้อต่อจะเกิดการกระจายการคราก แบบไม่สม่ำเสมอ (Non Uniform) บนพื้นที่ทั้งหมดตรงบริเวณข้อต่อ การเกิดครากนี้สังเกตได้จากอัตราส่วนของ M_d / M'_{pb} จะมีค่าแตกต่างกันไปตามระยะการตัดปีกคานออกตามความยาวคาน L_d ในการกระจายการครากของข้อต่อพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดบนปีกคานและค่ากำลังโมเมนต์หน้าตัด (moment capacity) $M'_{pb,s}$ ควรจะได้รับการพัฒนาเป็นลำดับแรก การกระจายการคราก (yielding) ควรจะแพร่จากพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดบนปีกคานที่อยู่บริเวณตรงกลางปีกคานเข้าไปที่โซนส่งผ่าน (transition zone) ประสิทธิผลของการคราก (effectiveness of yielding) จะขึ้นอยู่กับค่าความเค้นพื้นที่บริเวณโซนส่งผ่าน (transition zone) ในทางกลับกัน การถ่ายโมเมนต์กลับไปที่หน้าเสา ซึ่งแสดงใน รูปที่ 2.8 เส้นโค้งของค่าโมเมนต์ที่ต้องการ (moment demand) M_d ผ่านจุด ค่ากำลังโมเมนต์หน้าตัด (moment capacity) $M'_{pb,s}$ การออกแบบอัตราส่วนของ M_F / M_{pb} จะต้องออกแบบให้อัตราส่วนนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดบนปีกคาน หรือจุดสูงสุดของส่วนโค้งบริเวณที่ปีกคานถูกตัดออกตามขวาง การออกแบบโมเมนต์ที่ต้องการที่หน้าเสา M_F จะต้องออกแบบให้ความชันโมเมนต์ขึ้นอยู่กับจุดสูงสุดของส่วนโค้งบริเวณที่ปีกคานถูกตัดออกตามขวาง หรือจุดค่ากำลังโมเมนต์หน้าตัด (moment capacity) $M'_{pb,s}$ กับระยะห่างจากหน้าเสา L

จากการศึกษาของโครงการ SAC Joint Venture ช่วงที่ 1 และ 2 [17-19] รวบรวมผลทดสอบข้อต่อที่มีรายละเอียดการออกแบบและก่อสร้างก่อนเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมือง Northridge (Pre-Northridge Connection) จากงานวิจัยต่างๆ มาตรวจสอบทั้งหมด 12 ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงแผ่นดินไหวของข้อต่อเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบข้อต่อแบบใหม่หรือปรับปรุงข้อต่อแบบเดิม การทดสอบนี้ใช้คานขนาดใหญ่ (W30x99 กับ W36x150) เหล็กเกรด A36 เสาขนาด (W14x176กับ W14x257) เหล็กเกรด A36 โดยออกแบบข้อต่อให้เกิดการเสียรูปแบบอินอิลาสติกใน Panel Zone และยอมให้เกิดค่าเฉลี่ยการเสียหายไม่เกิน 20-30 เปอร์เซ็นต์ ผลงานวิจัยแสดงว่าตัวอย่างทดสอบจำนวน 9 ตัวอย่างมีค่ามุมการหมุนพลาสติก (θ_{pb}) น้อยกว่า 0.005 เรเดียนและมีความเหนียวต่ำ ความเสียหายส่วนมากเกิดขึ้นที่ใกล้ๆรอยเชื่อมปีกคานข้อต่อ การพังของเสาเกิดการแตก (Crack) และแตกทะลุผ่านเข้าไปที่ Panel Zone ส่วนตัวอย่างทดสอบอีก 3 ตัวอย่างมีค่ามุมการหมุนพลาสติก (θ_{pb}) ประมาณ 0.01-0.014 เรเดียน และใน 3 ตัวอย่างนี้ปีกคานเกิดการโก่งเดาะ จากการสังเกตรูปแบบการเสียหายทั้งหมดของข้อต่อ การเสียหายส่วนใหญ่เป็นการ

แตกที่รอยเชื่อมปีกคาน แล้วการแตกกระจายเข้าสู่รอยเชื่อมของปีกคานและหน้าเสา หรือรอยแตกกระจายเข้าสู่แผ่นเอวคานที่บริเวณข้อต่อ สรุปโดยรวมว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบเปราะ และเกิดได้จากหลายสาเหตุเช่น คุณภาพของการเชื่อม คุณภาพของวัสดุเชื่อม Backing Bar และอื่นๆ ที่บริเวณฐานของรอยเชื่อมระหว่าง Backing Bar และปีกเสาจะเกิดช่องว่างเล็กๆเกิดขึ้นเมื่อช่างเชื่อมขาดความระมัดระวังจะทำให้เกิดการตกค้างของ Slag ซึ่งรอยแตกมักจะเริ่มต้นจากจุดนี้

การศึกษาของ Scott A. Civjan, Michael D. Engelhardt, และ John L. Gross [6] เป็นการประเมินและปรับปรุงข้อต่อเหล็กในการถ่ายแรงของโมเมนต์ (Steel moment connection) จากการกระทำของแรงแผ่นดินไหว โดยมีการทดสอบชิ้นงานโดยใส่แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) กับชนิด Welded Unreinforced Flanges-Bolted Web ผลการทดสอบชิ้นงานจากสภาพภายนอกแสดงให้เห็นว่าเมื่อรอยเชื่อมมีความเหนียวต่ำ ความแข็งแรงของปีกล่างของคานจะไม่เพียงพอต่อแรงกระทำ ซึ่งจากการสังเกตทำให้เกิดการปรับปรุงปีกล่างโดยการแทนที่ที่ปีกคานด้วยร่องของรอยเชื่อม ซึ่งรอยเชื่อมมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้เกิดการแตกในบริเวณขอบบนของคาน

Chen [5] ทดสอบตัวอย่างทดสอบข้อต่อประเภทการเชื่อมต่อแบบลดหน้าตัดคาน (RBS) จำนวน 5 ตัวอย่างในรูปแบบการตัดปีกคานออกแบบเรียว (Tapered-Cut) ใช้คานขนาดกลาง W24 เหล็กเกรด A36 เชื่อมต่อกับเสาเป็นเหล็กกล่องแข็ง กำหนดระยะการเกิดจุดหมุนพลาสติกที่หน้าตัดคานอยู่ที่ระยะ $d_b/12$ และ $d_b/5$ ใช้ความยาวของข้อต่อเท่ากับ (7/12 ถึง 3/4) ของ d_b ทำการตัดพื้นที่ปีกคานของข้อต่อออกบางส่วนเพื่อที่ว่าต้องการจะลดค่ากำลังโมเมนต์หน้าตัดของคาน (Moment Capacity of Beam) M_{pb} ให้ต่ำกว่าโมเมนต์ที่ต้องการ (Moment Demand) การใส่แรงกระทำเป็นการให้แรงแบบการเคลื่อนที่ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างทั้งหมดแสดงค่าความแกร่ง (Stiffness) ของข้อต่อที่ดีเยี่ยม ความแข็ง (Strength) มีค่ามากขึ้น 20-30 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังโมเมนต์หน้าตัดของคาน (Moment Capacity of Beam) M_{pb} มีค่าลดลง 3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการหมุนตัวช่วงพลาสติกของคาน (θ_{pb}) สูงสุดอยู่ที่ 0.023-0.048 เรเดียน ตัวอย่างทั้งหมดเกิดการพังที่แผ่นปีกคานด้านบน ซึ่งการพังเริ่มต้นที่กลางปีกคาน และเกิดการโก่งเดาะที่ปีกคานด้านบนเนื่องจากแรงอัดที่ปีกคาน

Iwankiw [15] ทำการทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสาประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) จำนวน 4 ตัวอย่าง ข้อต่อ RBS มีการลดหน้าตัดคานแบบการตัดแบบเรียว (Tapered–Cut) ตัวอย่างข้อต่อ

ทดสอบมีทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ โดยใช้คานหน้าตัด W30x99 กับเสาหน้าตัด W14x146 และคานหน้าตัด W36x150 กับเสาหน้าตัด W14x257 คานใช้เหล็กเกรด A36 และเสาใช้เหล็ก ASTM572 เกรด 50 การตัดที่ปีกคานออกแบบเรียวครั้งนี้ ให้ความสำคัญไปที่การตัดปีกคานแต่ละข้างออกมากถึง 45 เปอร์เซ็นต์ของปีกคาน และมีอัตราส่วนโมเมนต์ของ M_F / M_{pb} มากกว่าหรือเท่ากับ 0.85 การทดสอบคุณสมบัติเหล็ก (Coupon Test) แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล็กจากคานมีกำลังรับแรงดึงมากกว่าวัสดุเหล็กจากเสา ค่าการหมุนตัวช่วงพลาสติกของคานทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.04 เรเดียน รูปแบบการคราก (Yielding) ในขั้นต้นเริ่มต้นที่การครากที่รอยเชื่อมปีกคานที่ข้อต่อ โดยเริ่มการครากเริ่มต้นจากพื้นที่หน้าตัดปีกคานที่เล็กที่สุด (บริเวณที่ปีกคานถูกตัดออกมากที่สุด) ผ่านเข้าไปที่หน้าเสา ส่วนปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ เกิดขึ้นที่บริเวณรอยเชื่อมปีกคานกับหน้าเสา และบริเวณใกล้ๆมุมของแผ่น shear tab รอยเชื่อมในแผ่นเอวคานที่ข้อต่อทั้งหมดยังไม่ฉีกขาดหรือเกิดความเสียหาย การแตกของปีกคานและปีกเสาเกิดขึ้นในรอบการเคลื่อนที่สูงๆ

Englehard [8] ทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน (RBS) แบบเชื่อมเต็มทั้งหน้าตัด (All-Welds Connection) และตัดปีกคานออกเป็นทรงกลม (Radius-Cut Shape) ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยใช้คาน W36x150 กับ W36x194 เหล็กเกรด A36 กับ เสาขนาดใหญ่ W14x257 กับ W14x426 เหล็กชนิด ASTM572 เกรด 50 ทำการตัดปีกคานออกเพื่อให้อัตราส่วนโมเมนต์ของ M_F / M_{pb} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.9 จากผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดแสดงพฤติกรรมที่ดีมาก ให้ความเหนียวสูง ค่าเฉลี่ยของการหมุนช่วงพลาสติกคาน θ_{pb} เท่ากับ 0.037 เรเดียน ข้อต่อไม่เกิดการแตกการเสียหายหรือการพัง เมื่อรอบการใส่การเคลื่อนที่สูงๆ ตัวอย่างเกิดการบิดตัวของปีกคานและแผ่นเอวคานเกิดการโก่งเดาะ นอกจากนี้พบปัญหาอื่นๆ คือการรอยแตกขนาดเล็กใกล้กับแผ่นเอวคาน จากการศึกษาข้อต่อ RBS นี้ให้ผลที่ดีมาก ข้อต่อแสดงความเหนียวที่ดีและเกิดการครากของข้อต่อตรงบริเวณส่วนปีกคานที่ถูกตัดออกซึ่งเป็นไปตามที่คาดเอาไว้

Lee และคณะ [16] ทำการรวบรวมผลการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานในช่วงปีที่ผ่านมา จนถึงปี 2006 พบว่า การทดสอบข้อต่อชนิดนี้ส่วนใหญ่แสดงพฤติกรรมการรับแรงวัฏจักรที่ไม่ดี กล่าวคือ ข้อต่อเกิดการฉีกขาดก่อนค่าที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ยังไม่เกิดจุดหมุนพลาสติกตรงบริเวณหน้าตัดคานที่มีการลดลงด้วย จึงทำให้ไม่เป็นไปตามหลักการออกแบบของข้อต่อประเภทนี้ นักวิจัยนำเสนอแนวความคิดใหม่ในการปรับปรุงข้อต่อชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเสนอรูปแบบแผ่นและวิธีการออกแบบแผ่น shear tab ใหม่ เพื่อลดปัญหาการเคลื่อนตัวของแผ่น shear tab และเสนอวิธีการปรับปรุงมุมการกว้านช่องเว้นสำหรับการเชื่อมใหม่ นักวิจัยได้สร้าง

แบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อพิสูจน์แนวความคิดในการปรับปรุงข้อต่อนี้ ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นบนปีกคานที่บริเวณช่องเว้นการเชื่อมลดลงอย่างมากเมื่อปรับปรุง และพบว่าการออกแบบและใช้แผ่น shear tab แบบใหม่สามารถลดการขยับตัวของแผ่นเอวคานได้ดี นอกจากนี้นักวิจัยยังทำการทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคานที่ปรับปรุงใหม่ ผลการทดสอบยืนยันผลการวิเคราะห์ได้เป็นอย่างดี ข้อต่อที่ปรับปรุงแสดงพฤติกรรมการส่งถ่ายโมเมนต์ที่ดี และเกิดจุดหมุนพลาสติกตรงบริเวณหน้าตัดคานที่กำหนดไว้ตามทฤษฎีการออกแบบข้อต่อประเภทนี้ทุกประการ

Swati และคณะ [21] ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็ก 2 ตัวอย่างเปรียบเทียบกัน โดยตัวอย่างที่ 1 เป็นข้อต่อชนิดเชื่อมเต็มหน้าตัดคานกับปีกเสา ส่วนตัวอย่างที่ 2 มีรายละเอียดข้อต่อเหมือนตัวอย่างที่ 1 ยกเว้นมีการลดหน้าตัดคานบริเวณใกล้รอยเชื่อมตามข้อกำหนดของ AISCI เกี่ยวกับข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดคาน ตัวอย่างทั้งสองจัดเตรียมด้วยวิธีการก่อสร้างที่ปฏิบัติในประเทศอินเดีย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ข้อต่อที่มีการลดหน้าตัดคานแสดงพฤติกรรมการรับแรงวัฏจักรได้ดีกว่าข้อต่อที่ไม่ลดหน้าตัดเป็นอย่างมาก และไม่พบการฉีกขาดหรือรอยแตกในรอยเชื่อมและคาน ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนอิลิเมนต์ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบทุกประการ

จากการศึกษาด้วยวิธีไฟไนอิลิเมนต์ของอานนท์ วงษ์แก้ว [25] พบว่า ที่บริเวณข้อต่อคาน-เสานั้นจะเกิดการรวมตัวของแรงเค้นที่บริเวณปีกคาน ซึ่งมีค่าสูงมาก ในทางตรงกันข้าม กลับไม่มีแรงเค้นกระจายตัวผ่านแผ่นเอวของคานเลย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ปีกคานแตกหัก (Brittle Fracture) ก่อนถึงค่าที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวของข้อต่อลดลงอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 3 และมีการสลายพลังงานแผ่นดินไหวน้อยมาก

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 บทนำ

ใบบทนี้จะนำเสนอรายละเอียดของตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบซึ่งมีแบบตัวอย่างที่จะเลือกนำมาทดสอบอ้างอิงจากแบบโครงการก่อสร้างโรงงานเอทานอล ของบริษัท ทรัพย์ทิพย์ จำกัด 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

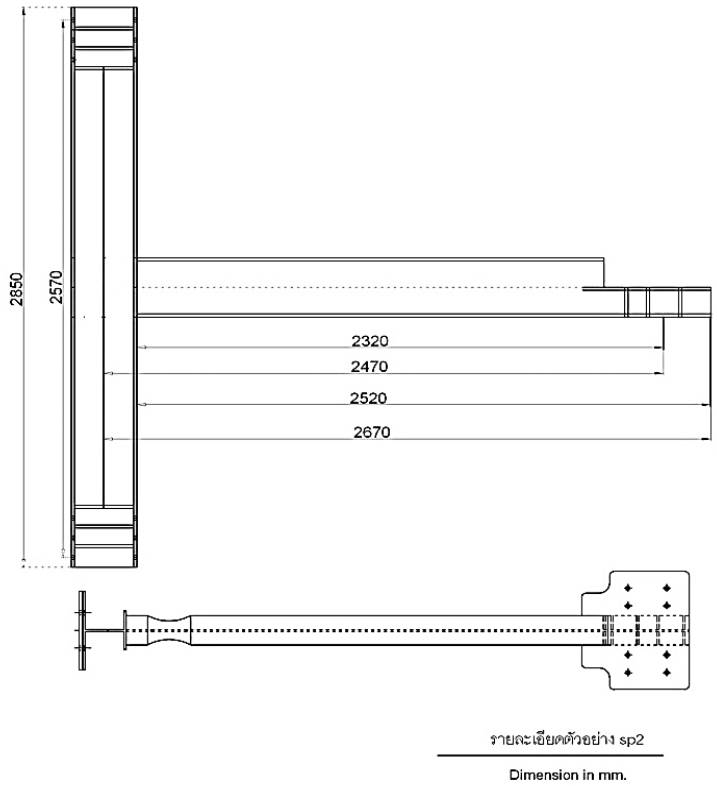
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะและขนาดโดยรวมของตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2 ซึ่งมีลักษณ์เป็นเสา-คานต้นริมของโครงสร้างในองค์อาคารประกอบด้วยคานยาว 2375 มม. (ขนาดตามตาราง 3.1) ปลายคานติดกับ Support ที่ปลายคาน สำหรับยึดติดกับหัวกดเครื่อง Universal Testing Machine, (UTM) และเสายาว 2844 มม. (ขนาดตามตาราง 3.1) ปลายเสาทั้งสองด้านเจาะรูและเสริมความแข็งแรง (stiffener) สำหรับยึดกับโครงสร้างรับแรงปฏิริยา การยึดแผ่นเพลทและแผ่นเหล็กเสริมความแข็งแรงกับปีกคานจะใช้วิธีการเชื่อมแบบพอกทั้งหมด โดยกำหนดความหนาของรอยเชื่อมเท่ากับ 6 มม.

ตาราง 3.1 แสดงขนาดและลักษณะการของเชื่อมต่อชิ้นงาน

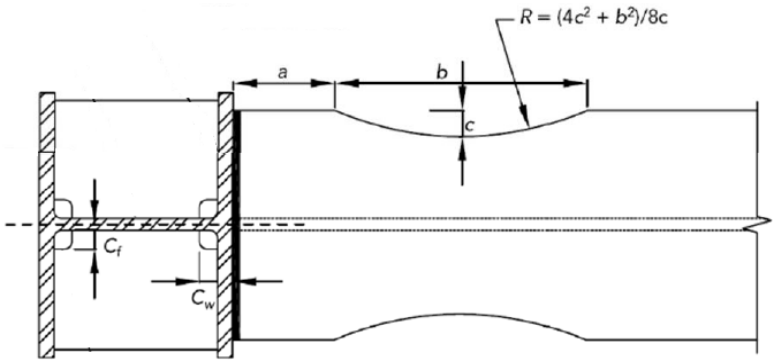
ชื่อตัวอย่าง	ขนาดของคาน	ขนาดของเสา	ลักษณะของการเชื่อมต่อ
RBS1	H300x200x56.8 kg/m	H300x300x106 kg/m	Fully welded moment connection & Reduce beam section
RBS2	H300x200x56.8 kg/m	H300x300x87 kg/m	Fully welded moment connection & Reduce beam section

3.2.3 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2

รูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2 ซึ่งประกอบด้วยคานยาว 2630 มม. ปลายคานติดกับแผ่นเพลทสำหรับยึดกับหัวกด UTM และเสาขนาด 2850 มม. ตัวอย่างทดสอบ RBS1 รายละเอียดเพลทจะเหมือนกันกับตัวอย่างทดสอบ RBS2 ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 3.1 ตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2 มีการลดขนาดหน้าตัดของคาน (Reduce beam-section) บริเวณใกล้ข้อต่อ เป็นตัดปีกคานทั้งด้านบนและด้านล่าง ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาบางส่วนออกแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะและขนาดของตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2



ระยะที่ทำการ Reducd Beam Section ของตัวอย่างทดสอบ

ขนาด Beam	b_{bf}	d_b	$a=0.5b_{bf}$	$b=0.65d_b$	$c=0.1b_{bf}$	R
H 300x200x56.8 kg/m	200	294	100	191.1	20	238.25

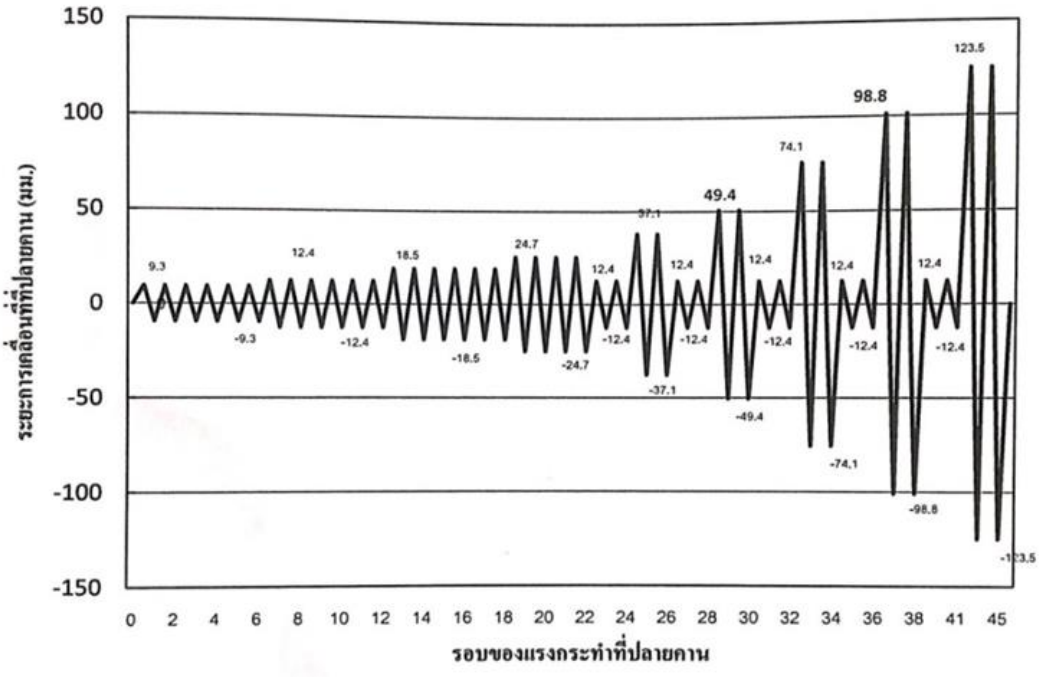
รูปที่ 3.2 การลดขนาดหน้าตัดของคานตามมาตรฐาน AISC358-05

รูปที่ 3.3 ภาพตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2

รูป 3.3 แสดงการเชื่อมต่อปลายคานกับเสาของตัวอย่างทดสอบ RBS1 และ RBS2 โดยการเชื่อมพอกมีขนาด 6 มม. ใช้ลวดเชื่อมคุณสมบัติตามมาตรฐาน AWS A5.1 E6013 และมีการลดหน้าตัดของคานบริเวณใกล้ข้อต่อ โดยทำการตัดปีกคานทั้งด้านบนและด้านล่าง ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาตามมาตรฐาน AISC358-05

3.3 การกำหนดแรงกระทำแบบสลับทิศทาง (แรงวัฏจักร)

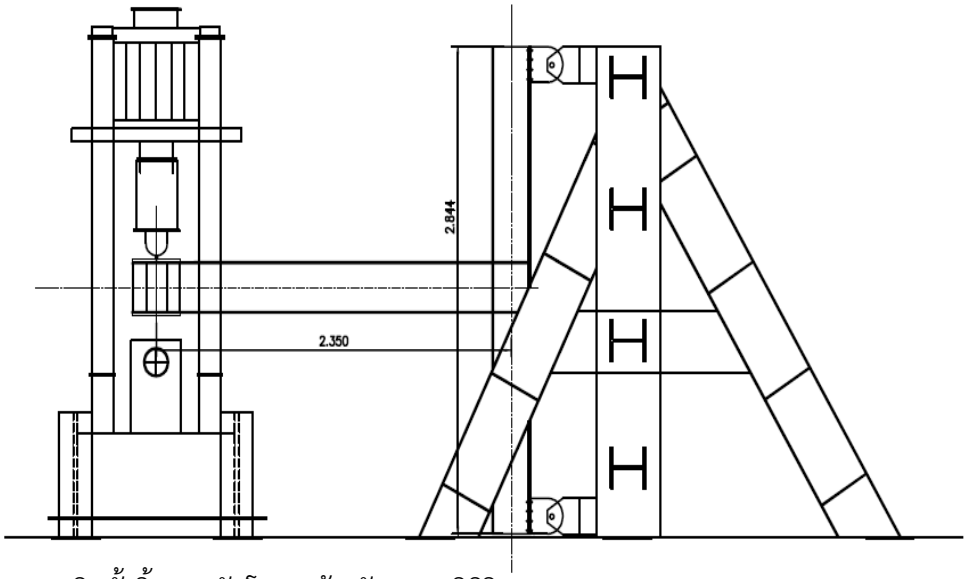
การให้ดำเนินการทดสอบจะใช้วิธีเดียวกันทุกตัวอย่าง โดยจะกำหนดระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานในลักษณะไป-กลับ เป็นรอบๆ ซึ่งการเพิ่มระยะการเคลื่อนที่กับจำนวนรอบจะกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว (SAC 1997) ซึ่งมาตรฐานนี้จะกำหนดการเคลื่อนที่ของปลายคานจากสมการ $\Delta = \theta^{*}(L_b + d_c/2)$ ซึ่งจะกำหนดมุมการเคลื่อนที่มาให้เพื่อหาระยะการเคลื่อนที่จากปลายคาน ดำเนินการทดสอบไปเรื่อยๆจนจะครบตามกำหนด หรือจนกว่าชิ้นงานคาน-เสาจะเกิดการวิบัติและไม่สามารถรับแรงต่อไปได้ ระยะการเคลื่อนที่และจำนวนรอบการเคลื่อนที่จะแสดงไว้ในตาราง 3.2 ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐาน การทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ภายใต้การรับแรงแผ่นดินไหว (SAC 1997) รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่กับรอบของแรงกระทำที่ปลายคานจากกราฟจะเห็นว่าหลังจากกราฟการเคลื่อนที่ 24.7 มม. ขึ้นไป การเคลื่อนที่ที่ปลายคานจะมีระยะ 12.4 มม.



รูปที่ 3.4 แสดงระยะเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับรอบของแรงที่กระทำต่อที่ปลายคาน

ตารางที่ 3.2 มุม ระยะการเคลื่อนที่ และจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของปลายคานที่ใช้ในการทดสอบ

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 3.5 การติดตั้งชิ้นงานกับโครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งและทดสอบ

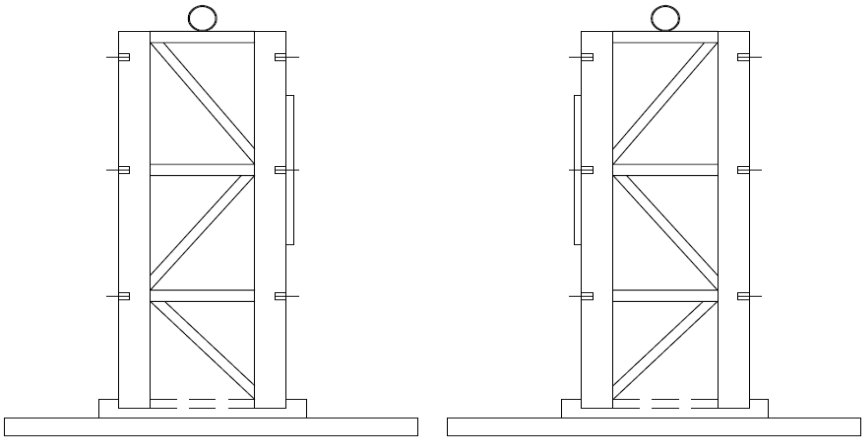
1. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine, (UTM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ระบบการทำงานโดยแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกส์มีกำลัง 1500 กก.ม./วินาที^{2} ระบายความร้อนด้วยน้ำ ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงและจับปล่อยชิ้นงานโดย Electrical control vale ปฏิบัติการด้วยโปรแกรม Instron ซึ่งกระบอกไฮดรอลิกส์สามารถยืดออกสูงสุดได้เท่ากับ 250 มม. ซึ่งในการทดสอบเราจะให้กระบอกไฮดรอลิกส์เคลื่อนที่ขึ้นลงเท่ากับ 120 มม.

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)

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

รูปที่ 3.7 โครงสร้างรับแรงปฏิกิริยา (Reaction frame)

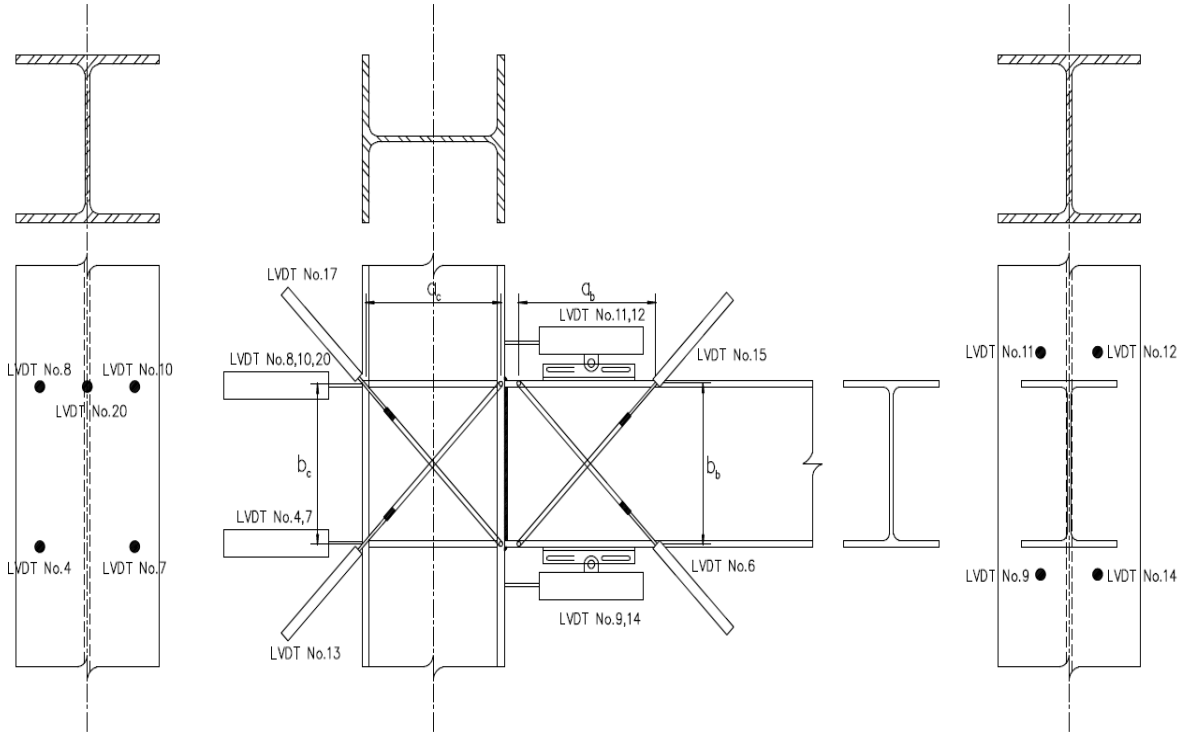
3. อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น เป็นชุดอุปกรณ์ที่นำโครงสร้างเหล็กที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำมาปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปแบบให้สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยในการทดสอบโดยมีหน้าที่ค้ำยันด้านข้างคาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคานโดยมีลักษณะเป็นเสาคู่ โครงสร้างเป็นชนิดโครงถัก (Truss) รูปสี่เหลี่ยม ฐานล่างเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กหนาซึ่งได้ทำร่อง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



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น

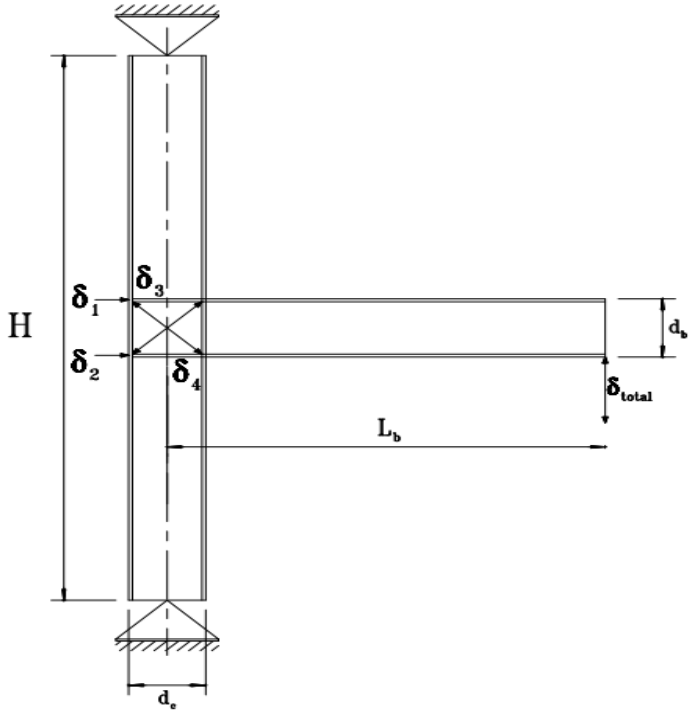
3.5 เครื่องมือวัดผลและเก็บข้อมูล

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



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้ง LVDT ระยะการวัดที่ใช้คำนวณและเบอร์ของ LVDT (RBS1 และ RBS2)

3.6 สมการที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

ข้อมูลที่สำคัญๆที่เราต้องการนำเสนอจะประกอบไปด้วยความสามารถในหารหมุนในช่วงพลาสติกของคาน เสา Panel Zone และความสามารถในการหมุนทั้งหมดของชิ้นงาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญที่บ่งบอกได้ว่า ตัวอย่างมีความสามารถทนต่อสภาวะรับแรงสลับได้มากน้อยเพียงใดหากเกิดการหมุนในช่วงพลาสติกนั้นไม่สามารถวัดจากการติดเครื่องมือวัดโดยตรงได้ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณจากสมการโดยนำข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเคลื่อนที่ของคาน เสา Panel Zone คำนวณ ซึ่งตำแหน่งและการติดตั้งเครื่องมือดังกล่าวได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยค่าที่ได้จากการวัดสามารถนำคำนวณค่าการหมุนได้ดังสมการต่อไปนี้

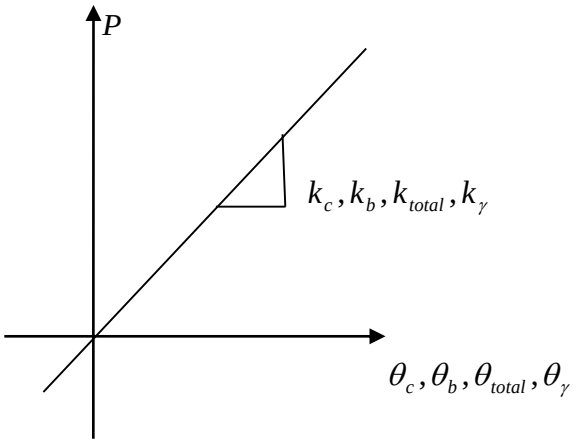
$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab}(\delta_4 - \delta_3)$$

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

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

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

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



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

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

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

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

L_b = ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางหัวกดเครื่องทดสอบกับหน้าเสา

d_c = ความลึกของหน้าตัดเสา

δ_b = ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน

H = ความสูงของเสา

$\boldsymbol{a}$ = ระยะของ Panel zone ในแนวนอน

$\boldsymbol{b}$ = 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) โดยที่ค่าความยืดหยุ่นนั้นสามารถคำนวณจากการณ์วิเคราะห์เชิงเส้นของข้อมูลการทดสอบในช่วงการเปลี่ยนรูปก่อนจะมีพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่น (Elastic)

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวอย่างคาน-เสาเหล็กต้นรินในองค์อาคารรับแรงวัฏจักร ทั้งหมด 2 ตัวอย่าง RBS1 และ RBS2 โดยนำเสนอผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Displacement

2) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Rotation

3) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Total Plastic Rotation

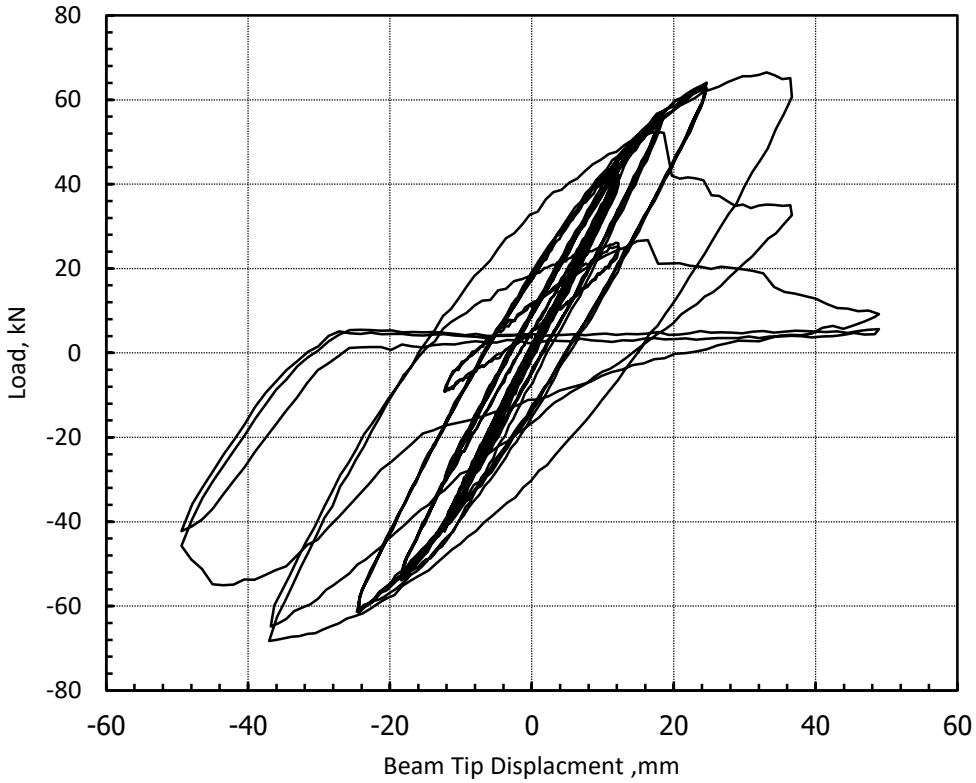
4) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment - Beam Plastic Rotation

5) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment – Column Plastic Rotation

6) ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment - Beam Plastic Rotation

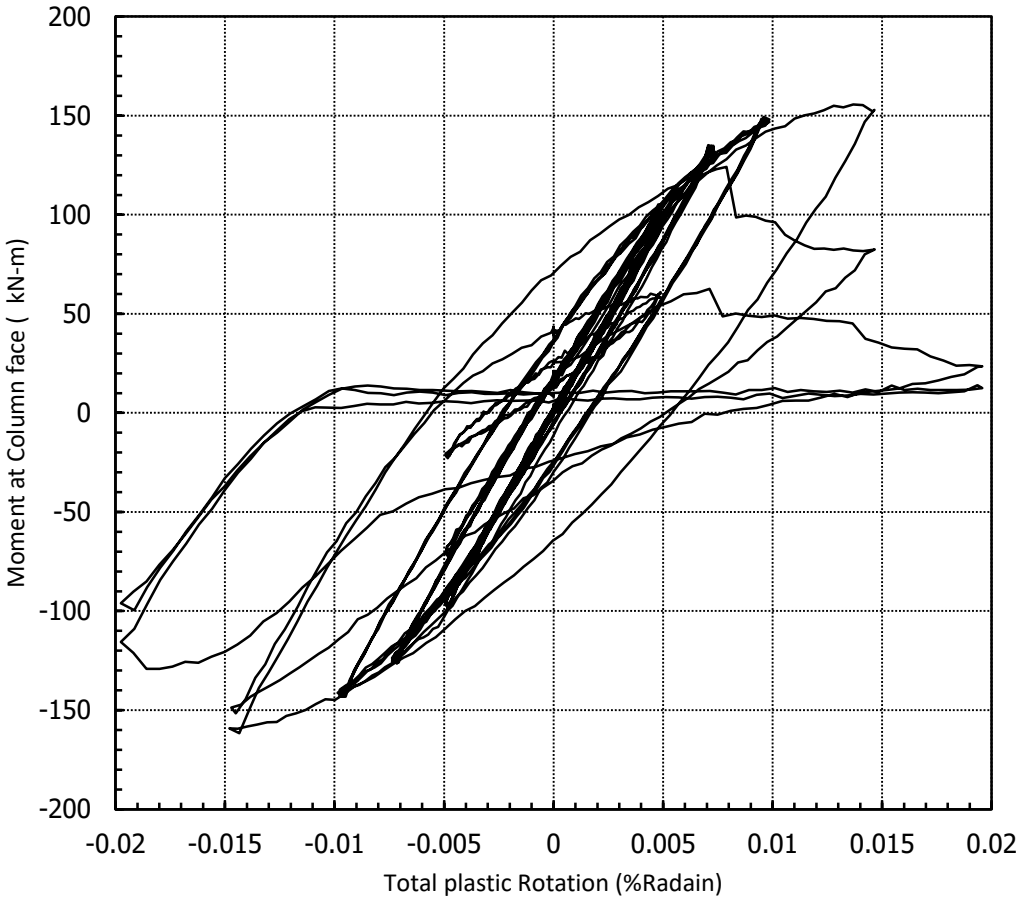
4.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ RBS1

ตัวอย่างทดสอบ RBS1 เป็นข้อต่อคาน-เสาประเภทเชื่อมเต็มหน้าตัดและลดหน้าตัดคาน (Fully welded moment connection & Reduce beam section) การทดลองนี้ดำเนินการทดสอบได้ปกติ การเสียหายของตัวอย่างทดสอบเป็นการแตกหรือการฉีกขาดที่รอยเชื่อมของข้อต่อ โดยการแตกเริ่มจากรอยเชื่อมปีกคานด้านล่างแพร่ไปสู่แผ่นเอวคานและปีกคานด้านบนตัวอย่างทดสอบนี้เกิดการครากที่ Panel zone บริเวณหน้าเสา ปีกคานด้านบนและที่ปีกคานด้านล่าง การเสียหายของตัวอย่างทดสอบเกิดการฉีกขาดแบบเหนียว



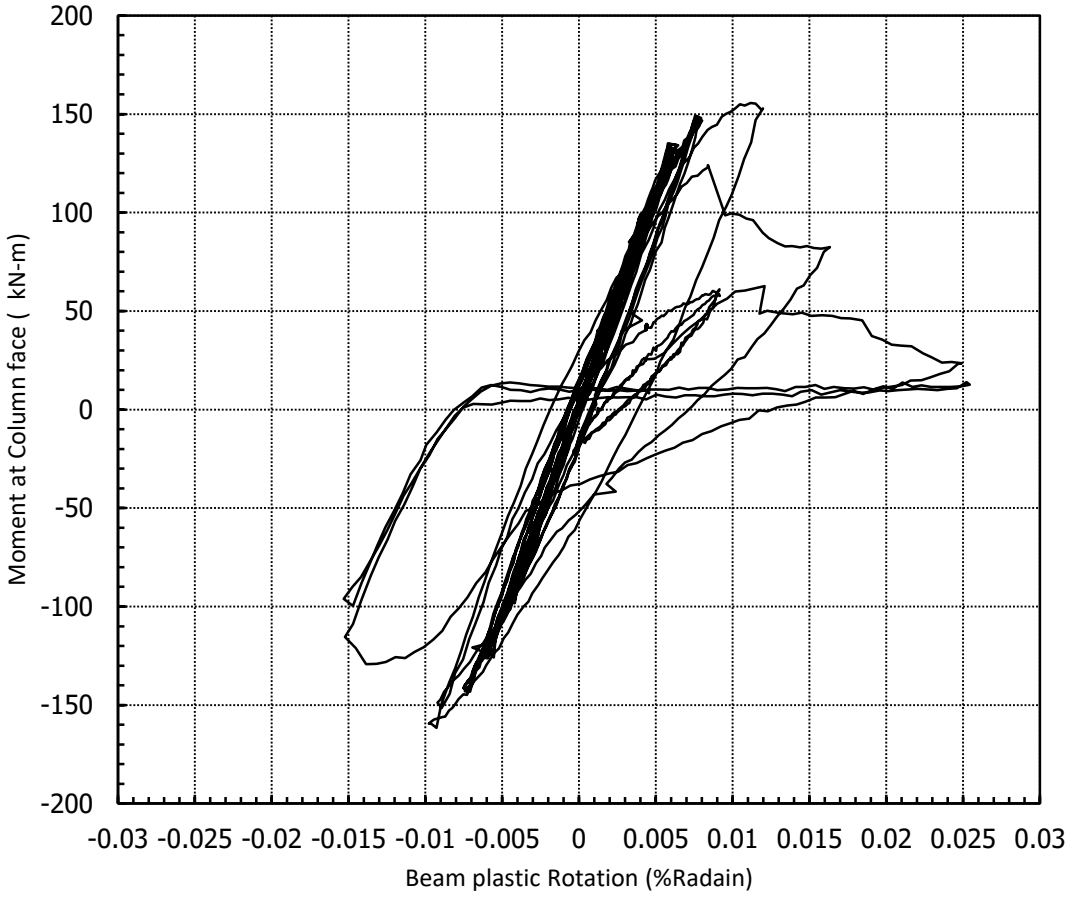
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Beam tip displacement (RBS1)

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับแรงกระทำต่อปลายคาน จากกราฟจะเห็นว่าปลายคานสามารถเคลื่อนตัวไปเป็นระยะสูงสุดเท่ากับ 48.94 มิลลิเมตร มีแรงกระทำที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 66.197 กิโลนิวตัน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และเคลื่อนที่ไปได้สูงสุด 49.39 มิลลิเมตร มีแรงกระทำที่ปลายคานสูงสุด 68.77 กิโลนิวตัน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ผลการทดสอบแรงการเคลื่อนที่ที่ปลายคานกับแรงกระทำต่อปลายคานทั้งด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและด้านการเคลื่อนที่ลงมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบจากลักษณะกราฟนี้แสดงให้เห็นว่ามีการถ่ายแรงจากหัวเครื่องกดไปยังปลายคานได้อย่างสม่ำเสมอ และตัวอย่างทดสอบนี้มีการยืดหยุ่นที่ดี



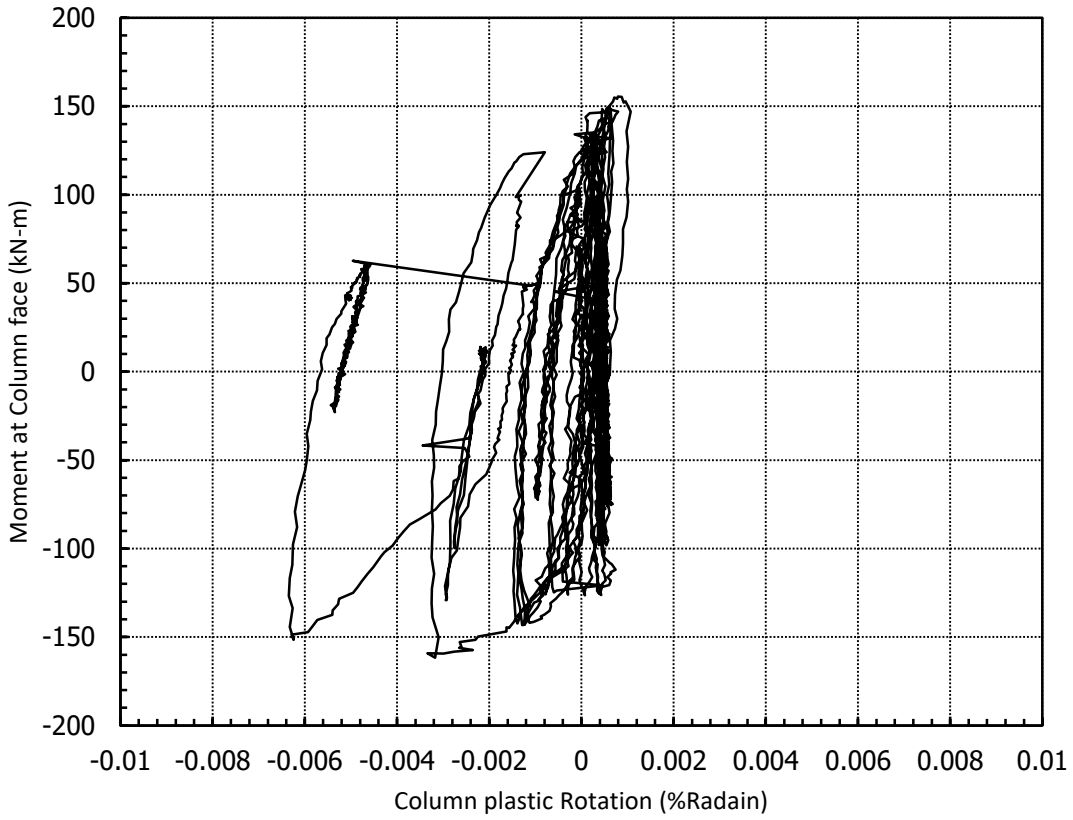
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Total plastic rotation (RBS1)

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ที่หน้าเสากับการหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมด จากกราฟจะเห็นว่าค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมดจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.019578 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.01975 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ค่าซึ่งค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมดจะประกอบไปด้วย การหมุนตัวช่วงพลาสติกคาน การหมุนตัวในช่วงพลาสติกเสาและการหมุนตัวในช่วงพลาสติก Panel Zone ส่วนค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาของ RBS1 ค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 155.564 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ161.626 กิโลนิวตัน-เมตร สำหรับด้านการเคลื่อนที่ลง



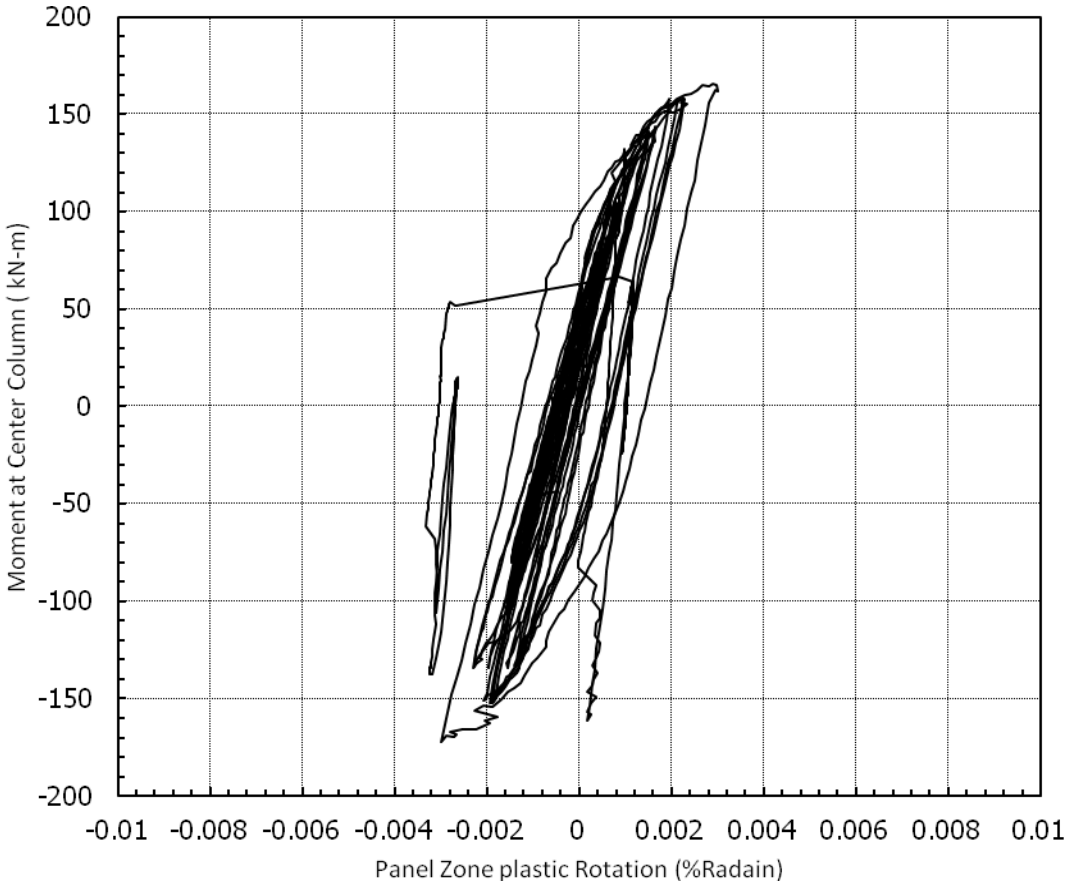
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Beam plastic rotation (RBS1)

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่หน้าเสากับค่าการหมุนในช่วงพลาสติกคานของตัวอย่าง RBS1 โดยการหมุนในช่วงพลาสติกคานที่มากที่สุดเท่ากับ 0.025436เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.01531 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลงค่าเฉลี่ยการหมุนตัวของคานเท่ากับ 0.020373 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ส่วนค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาของ RBS1 ค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 155.564.4 กิโลนิวตัน-เมตร สำหรับด้านการเคลื่อนที่ขึ้นและ 161.625 กิโลนิวตัน-เมตร สำหรับด้านการเคลื่อนที่ลง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at column face กับ Column plastic rotation RBS1

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าโมเมนต์ที่หน้าเสากับการหมุนในช่วงพลาสติกของเสา โดยจะเห็นว่าการหมุนพลาสติกมากที่สุดเท่ากับ 0.001068 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.00634 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ค่าเฉลี่ยการหมุนพลาสติกเสาเท่ากับ 0.003704 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ค่าโมเมนต์ที่หน้าเสาสูงสุดเท่ากับ 155.56 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และ 161.625 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ลง



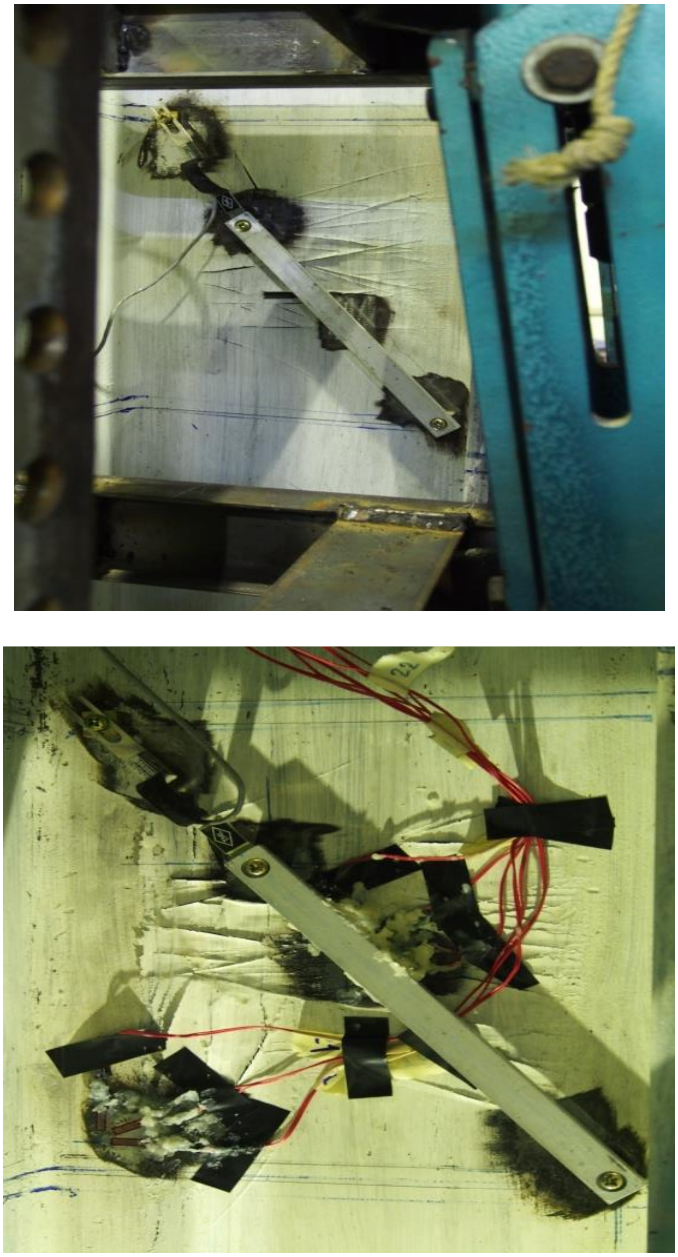
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ Moment at center column กับ Panel zone plastic rotation (RBS1)

จากรูป 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่กึ่งกลางเสากับการหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone ของตัวอย่าง RBS1 จากกราฟจะเห็นว่ามีพื้นที่ใต้กราฟน้อยกว่าค่าการหมุนตัวในช่วงพลาสติกคาน โดยการหมุนในช่วงพลาสติก Panel zone มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.002997 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และเท่ากับ -0.00332 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ในด้านการเคลื่อนที่ลง ค่าเฉลี่ยการหมุนช่วงพลาสติกของ Panel Zone เท่ากับ 0.003159 เปอร์เซ็นต์เรเดียน ส่วนโมเมนต์ที่กึ่งกลางเสามีค่ามากที่สุดเท่ากับ 165.494 กิโลนิวตัน-เมตร. ในด้านการเคลื่อนที่ขึ้น และเท่ากับ 171.943 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านการเคลื่อนที่ลง

ตาราง 4.1 สรุปผลการทดสอบตัวอย่าง RBS1

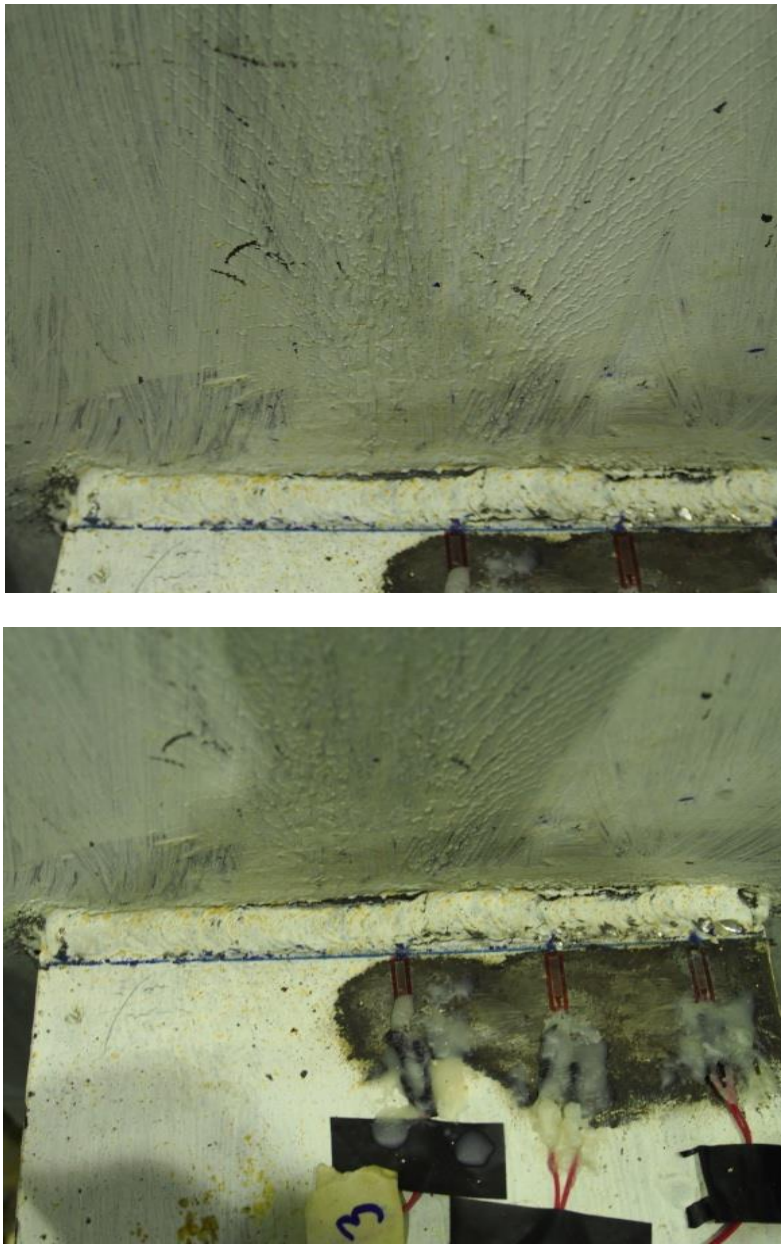
ค่าที่ต้องการวัด	ค่ามากที่สุดที่วัดได้	
	ด้านการเคลื่อนที่ขึ้น	ด้านเคลื่อนที่ด้านลง
แรงที่หัวเครื่องกด UTM (กิโลนิวตัน)	66.197	68.77
ระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน (มิลลิเมตร)	48.94	49.39
โมเมนต์ที่หน้าเสา (กิโลนิวตัน-เมตร.)	155.564	161.625
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (กิโลนิวตัน-เมตร)	165.494	171.943
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์เรเดียน)	0.019578	0.01975
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของคาน (เปอร์เซ็นต์เรเดียน)	0.025436	0.01531
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของเสา (เปอร์เซ็นต์เรเดียน)	0.001068	0.00634
การหมุนตัวในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (เปอร์เซ็นต์เรเดียน)	0.002997	0.00332

4.3 ภาพแสดงการเสียหายของตัวอย่างทดสอบ RBS1



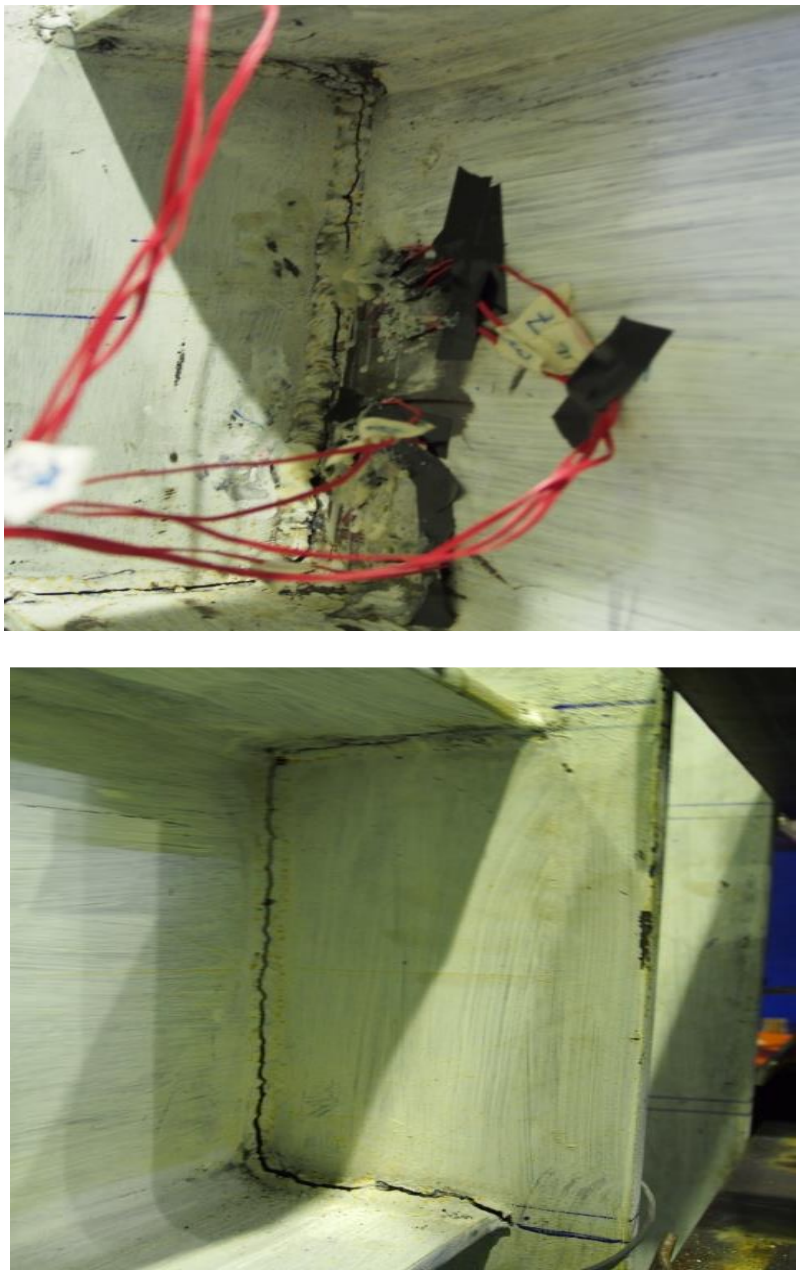
รูปที่ 4.6 การครากบริเวณ Panel zone RBS1

รูปที่ 4.6 เป็นภาพแสดงลักษณะภายหลังการทดสอบบริเวณ Panel zone ทั้งสองด้านของแผ่นเอวเสาซึ่งจะเห็นการครากเป็นรอยย่นของสีที่เป็นเส้นของชิ้นงานตัวอย่างทดสอบบริเวณ Panel zone การกระจายครากลักษณะนี้เป็นการกระจายการครากแบบไม่สม่ำเสมอ การเสียหายของชิ้นงานนี้เกิดขึ้นอย่างราบเรียบ ทำให้พายเกจที่ติดเพื่อวัดการยืดตัว Panel zone ยังคงติดอยู่



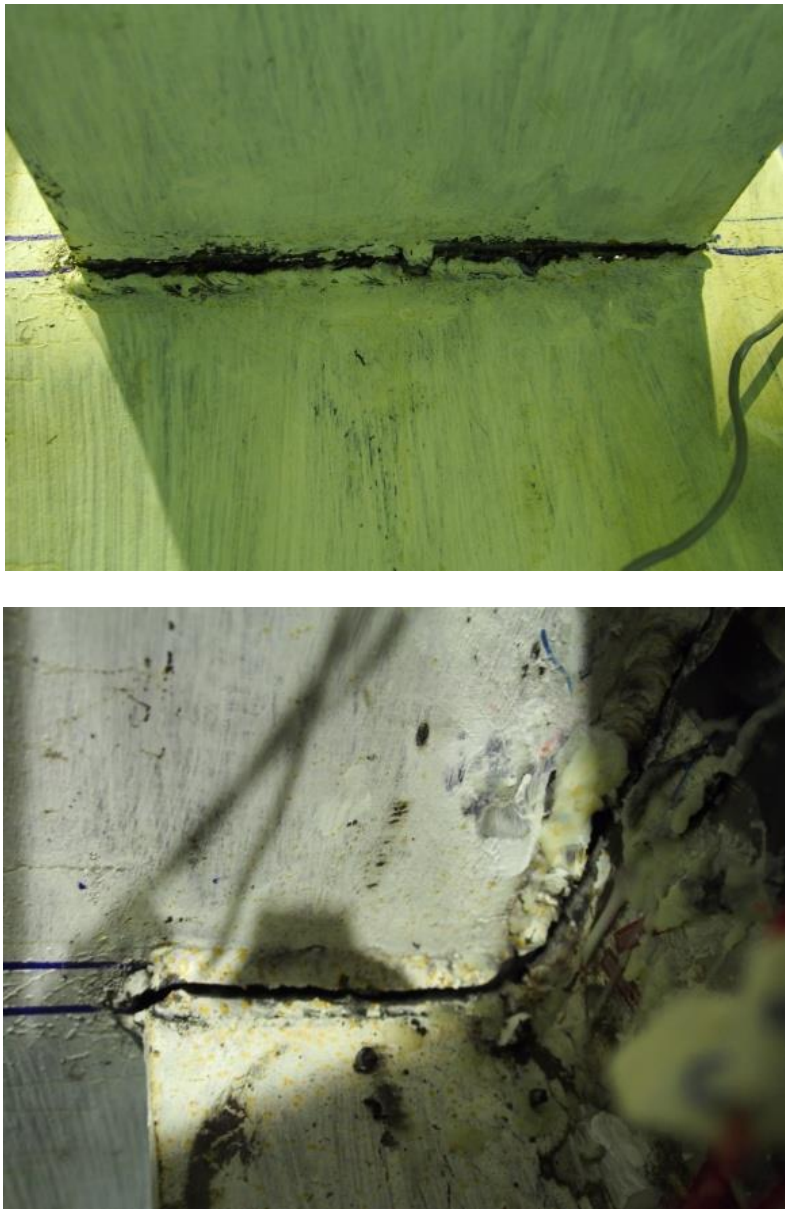
รูปที่ 4.7 การครากบริเวณหน้าเสา RBS1

รูปที่ 4.7 เป็นภาพแสดงลักษณะการครากที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าเสาซึ่งจะเห็นเป็นรอยย่นเป็นเส้นของสีที่บริเวณปีกเสา



รูปที่ 4.8 การฉีกขาดที่รอยเชื่อมบริเวณแผ่นเอวคาน RBS1

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายการฉีกขาดบริเวณรอยเชื่อมตรงบริเวณแผ่นเอวคานตัวอย่างทดสอบ RBS1 หลังการทดสอบทั้งสองด้านของแผ่นเอวคานซึ่งจะเห็นเป็นรอยแตกบริเวณรอยเชื่อมของข้อต่อ การแตกจะเริ่มแตกหรือการฉีกขาดจะเริ่มจากรอยเชื่อมปีกคานด้านล่างไปสู่แผ่นเอวคานและปีกคานด้านบนที่ติดอยู่กับปีกเสา หลังการทดสอบจะเห็นรอยเชื่อมปีกคานด้านบนยังคงเหลือติดอยู่กับปีกเสา



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายการฉีกขาดบริเวณปีกคานด้านล่าง RBS1

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายลักษณะการฉีกขาดบริเวณรอยเชื่อมด้านล่างปีกคานตัวอย่างทดสอบ RBS1 หลังการทดสอบ เป็นการแตกหรือการฉีกขาดของปีกคานด้านล่างรอยเชื่อมของปีกคานด้านล่างกับแผ่นปีกเสารอยเชื่อมปีกคานด้านล่างจะเกิดการฉีกขาดออกทั้งหมด

4.4 ผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ RBS2

ตัวอย่างทดสอบ RBS2 เป็นตัวอย่างทดสอบที่ประเภทของข้อต่อเป็นแบบ (Fully welded moment connection) คือ หน้าตัดเชื่อมเต็มความหนาขาเชื่อม 6 มิลลิเมตร โดยกระบวนการคือ เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างเซตตำแหน่งการติดอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน จากนั้นยกตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ (UTM) อย่างระวังระวังและยึดตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการติดอุปกรณ์วัดอย่างระมัดระวังเพื่อความถูกต้องและความปลอดภัยของอุปกรณ์โดยตัวอย่าง RBS2 นั้นทำการทดสอบได้ปกติไม่มีการขัดข้องใดๆเกิดขึ้นโดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างนั้นมีการครากที่บนบริเวณ Panel Zone และบริเวณหลังเสาเป็นหลัก ที่บริเวณรอบเชื่อมของข้อต่อนั้นเกินความเสียหายแบบฉีกขาดทั้งบริเวณปีกคานด้านบนและด้านล่างรอยขาดนั้นเป็นแนวยาวตลอดปีกคานโดยรอยฉีกของรอยเชื่อมนั้นเริ่มเกิดขึ้นที่ที่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน(Displacment)เท่ากับ 126.35 มิลลิเมตร พบรอยฉีกขาดเพิ่มขึ้นโดยรอยขาดของรอยเชื่อมนั้นได้ขาดขึ้นเข้าไปในแผ่นเอวของคานทั่งบนและล่างของปีกคาน ความลึกของรอยขาดนั้นความยาวประมาณ 4 ซม. โดยตัวอย่างทดสอบ RBS2 นี้ได้ทำการหยุดทดสอบที่ที่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน(Displacment)เท่ากับ 75.81 มิลลิเมตร โดยมุมการเคลื่อนที่ θ=0.06 เรเดียน เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีขนาดคาน 300 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดคานที่มีความใหญ่พอสมควร รอยขาดที่เปิดขึ้นนั้นขากทั้งปีกคานด้านบนและล่างรวมถึงที่บริเวณเอวคานบางส่วน เพื่อความปลอดภัยในการนำตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบและผู้ทำการทดสอบรวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ

รูปที่ 4.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำที่ปลายคานและระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของตัวอย่าง RBS2 จากผลการทดสอบที่บริเวณ Panel Zone เริ่มเกิดการครากสามารถรับแรงกระทำที่ปลายคานได้ 60.049 กิโลนิวตัน และช่วงที่ทำให้ข้อต่อเริ่มเกิดรอบฉีกขาดที่รอยเชื่อมที่บริเวณปีกคานด้านล่างสามารถรับแรงกระทำที่ปลายคานได้ 99.967 กิโลนิวตัน โดยการทดสอบตัวอย่าง RBS2 นี้ได้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดได้ 125.376 มิลลิเมตร แรงที่กระทำที่ปลายคานได้ 26.338 กิโลนิวตัน ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และได้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดได้ 125.391 มิลลิเมตร แรงที่กระทำที่ปลายคานได้ 131.979 กิโลนิวตัน ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

รูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.15 เป็นกราฟการคำนวณมุมหมุนในช่วงพลาสติกของชิ้นงานโดยในข้อต่อของชิ้นงานตัวอย่างนั้นมุมหมุนพลาสติกทั้งหมดเกิดจากการหมุนที่ข้อต่อ 3 ส่วน คือมุมหมุนพลาสติกของ Panel Zone มุมหมุนพลาสติกของคาน และมุมหมุนพลาสติกของคาน การคำนวณค่า

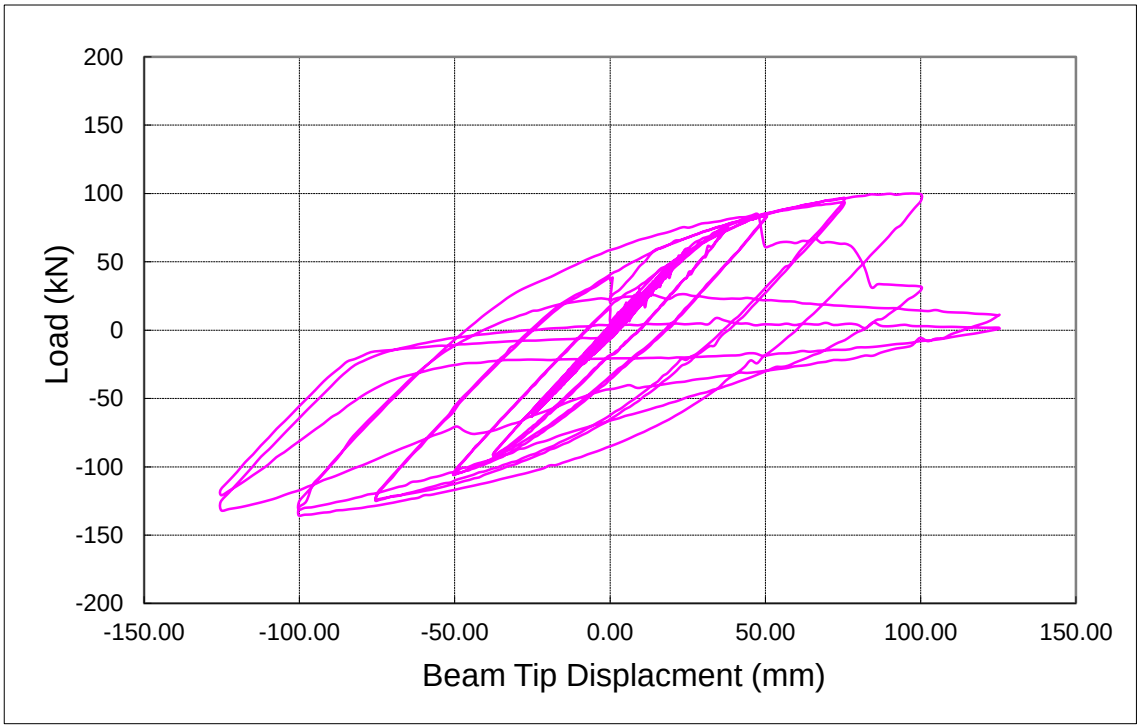
มุมหมุนพลาสติกแต่ละส่วนนั้นคำนวณจากสูตรในบทที่ 3 ผลการทดสอบตัวอย่าง RBS2 นั้น มุมหมุนพลาสติกทั้งหมุนนั้นมีค่าอยู่ที่ 0.049963 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 249.917 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.030715 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -338.782 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟของมุมการหมุนพลาสติกนั้นบ่งบอกถึงความสามารถของข้อต่อว่าข้อต่อมีความสามารถในการสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวได้มากน้อยเพียงใดและได้คำนวณแย่งออกมาว่าในข้อต่อนั้นแต่ละส่วนเกิดการหมุนมากน้อยเพียงใด

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์หน้าเสากับมุมหมุนพลาสติกที่คาน (รูปที่ 4.2.22) พบว่าที่มีค่ามุมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.02541 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น 234.922 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.016808 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -318.455 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

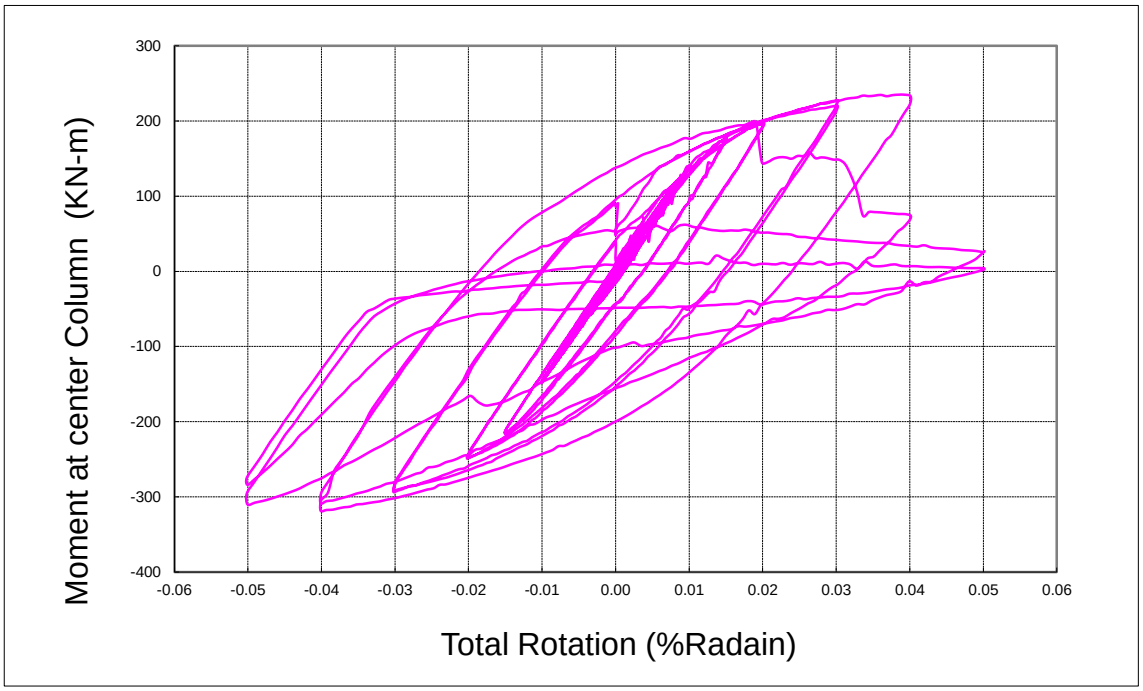
การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กึ่งกลางเสากับมุมหมุนพลาสติกที่ Panel Zone (รูปที่ 4.2.23) พบว่าที่มีค่ามุมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.018701 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 249.917 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.011937 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น -338.782 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กึ่งกลางเสากับมุมหมุนพลาสติกที่เสา (รูปที่ 4.2.24) พบว่าที่มีค่ามุมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.007190 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 249.917 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.004803 เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น -238.782กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

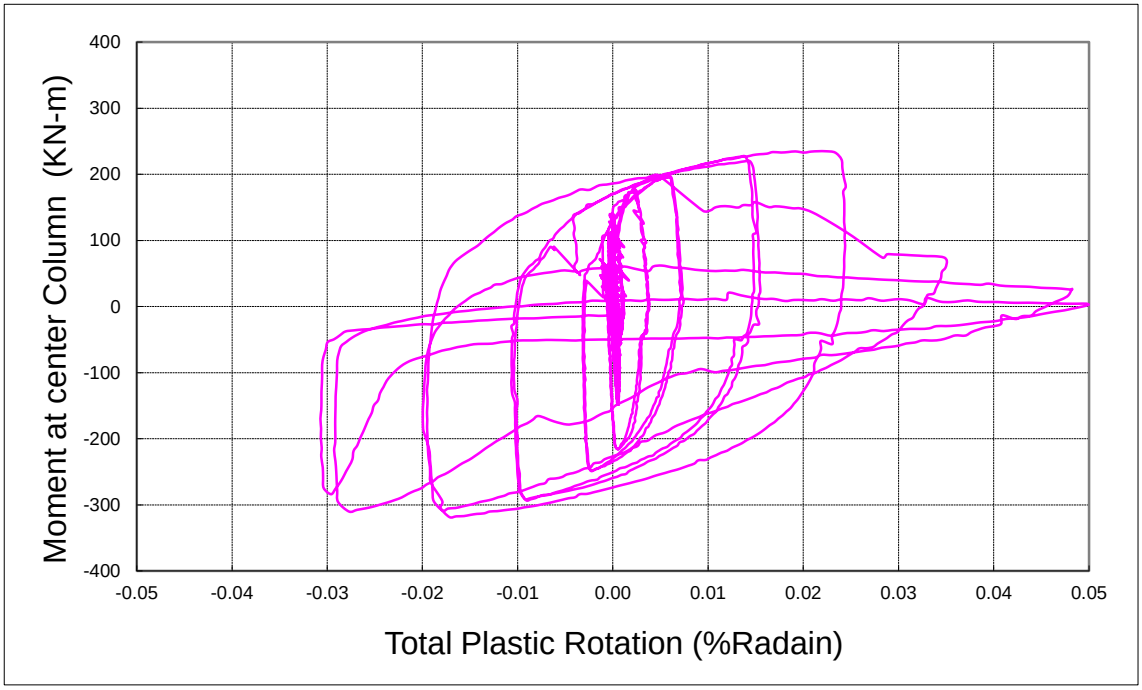
จากค่ามุมหมุนในช่วงพลาสติกของคาน เสา Panel Zone จะเห็นว่าที่บริเวณมุมหมุนในช่วงพลาสติกของ Panel Zone มีค่ามากที่สุด โดยค่ามุมหนุนในช่วงพลาสติกของคาน และเสานั้นมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นที่บริเวณ Panel Zone นั้นจะเกิดการสลายพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่บริเวณคาน เสานั้น เกิดการสลายพลังงานได้มากว่า 50-60% ดังนั้นการเสียหายของข้อต่อนี้จะเสียหายมากที่สุดที่บริเวณ Panel Zon



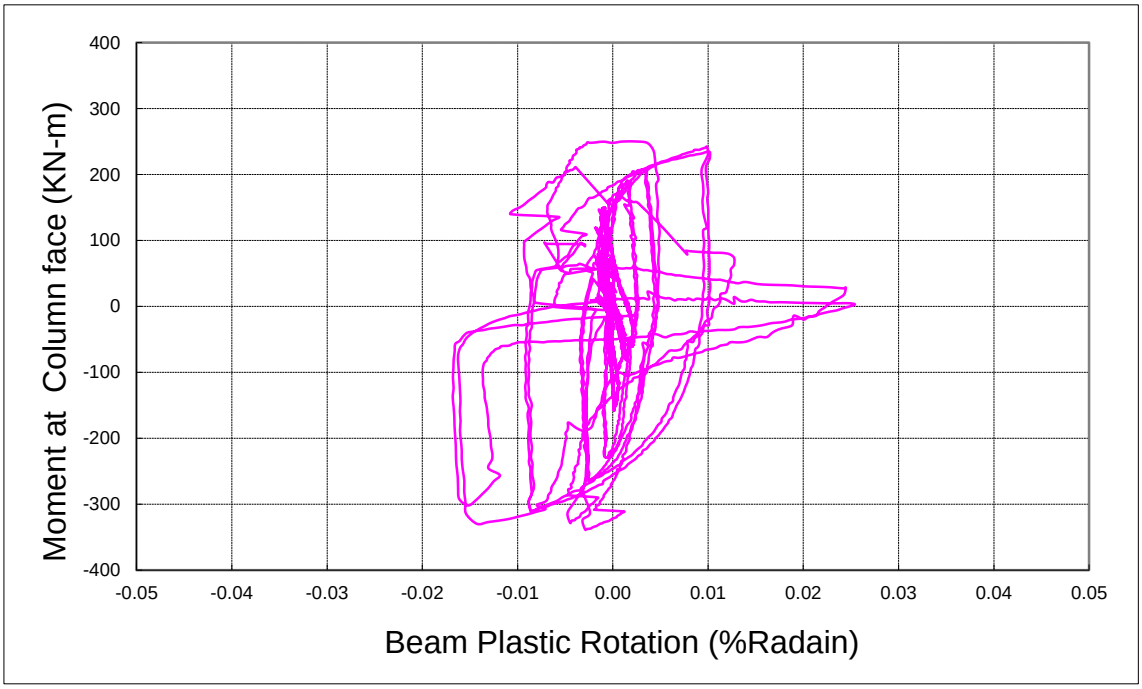
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (RBS2)



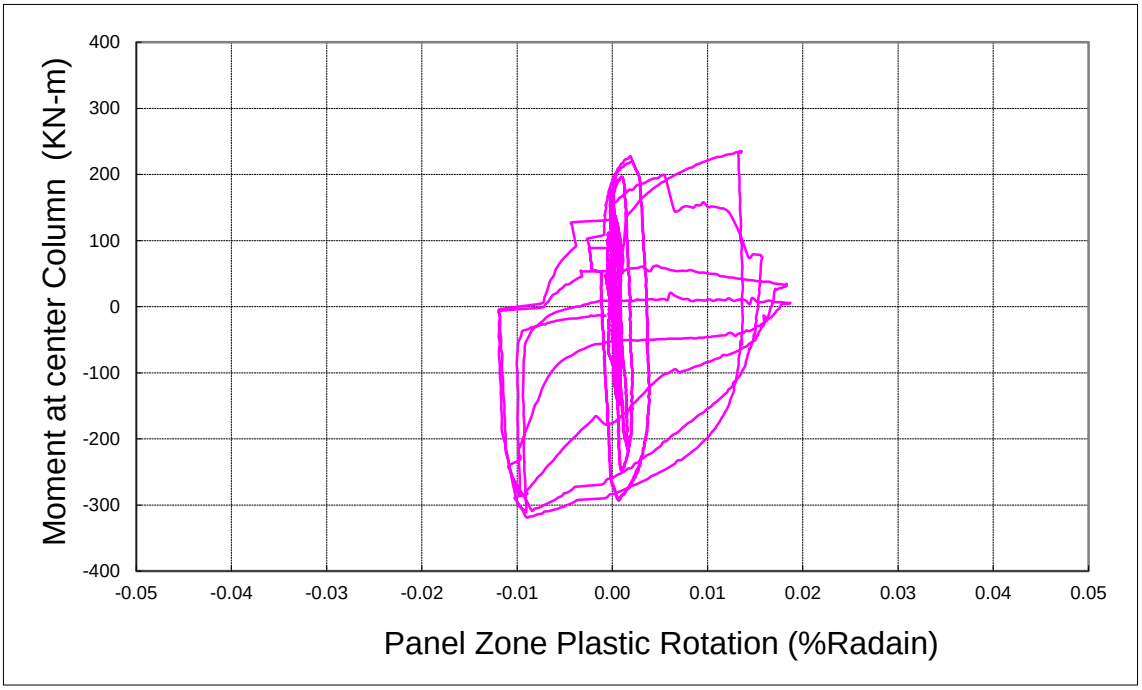
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Total Rotation (RBS2)



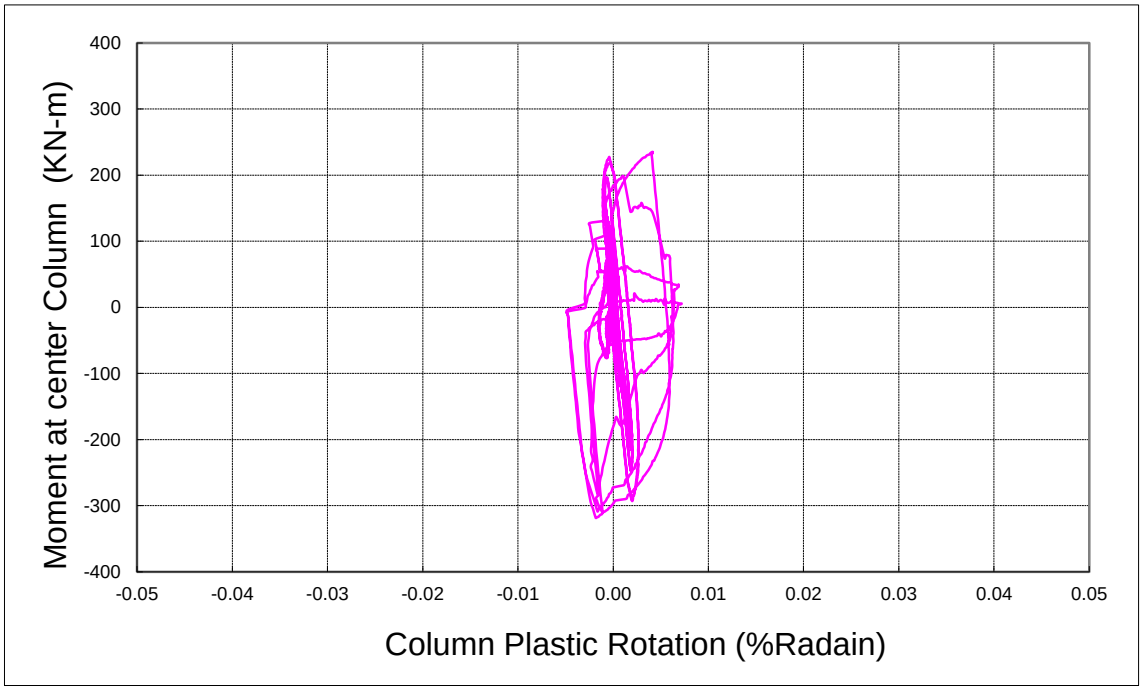
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Total Plastic Rotation (RBS2)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam Plastic Rotation (RBS2)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Panel Zone Plastic Rotation (RBS2)

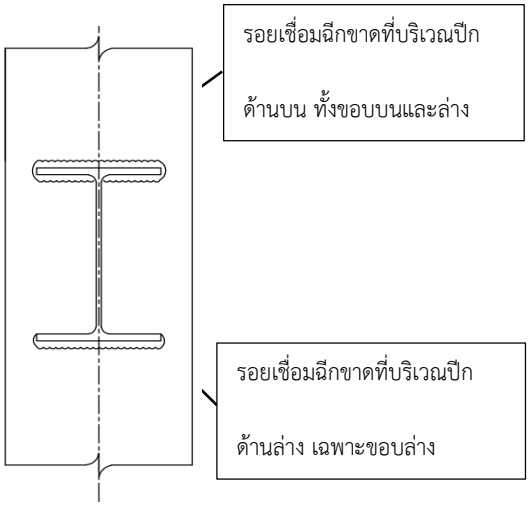


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Column Plastic Rotation (RBS2)

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าผลการทดสอบตัวอย่างข้อต่อประเภท (Fully welded moment connection)

ค่าที่ต้องการวัด	RBS2	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงสูงสุดที่หัวกด UTM (kN)	99.967	125.766
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	125.376	125.391
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	249.917	338.782
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	783.073	1061.516
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	783.073	1061.516
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	60.049	63.252
มุมหมุนในช่วงพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.049963	0.030715
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของเสา (%radian)	0.007190	0.0048037
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของคาน (%radian)	0.02541	0.016808
มุมหมุนในช่วงพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.018701	0.011937

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะการพังของข้อต่อ

ตัวอย่าง	ลักษณะความเสียหายที่ข้อต่อ
RBS2	

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและศักยภาพของข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภทลดหน้าตัดขนาดใหญ่ใน ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ตัวอย่างทดสอบที 1 และ 2 (RBS1 และ RBS2) ถูกออกแบบและมีรายละเอียดเป็นข้อต่อคาน-เสาประเภทเชื่อมเต็มหน้าตัดและลดหน้าตัดคาน (Fully welded moment connection & Reduce beam section) ทั้งนี้ตัวอย่างทดสอบทั้งสองตัวอย่างก่อสร้างด้วยช่างที่ชำนาญการในประเทศไทย จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เครื่องทดสอบ UTM สามารถประยุกต์ใช้ในการทดสอบตัวอย่างข้อต่อคาน-เสาเหล็กนอกแกนเครื่องทดสอบ UTM ให้ผลการทดสอบดีมากเมื่อเทียบกับผลการทดสอบจากนักวิจัยท่านอื่นๆ

2) ตัวอย่างทดสอบที่ 1 (RBS1) รับแรงกระทำที่ปลายคานได้สูงสุดเท่ากับ 66.20 กิโลนิวตัน เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ขึ้น และสามารถรับแรงได้เท่ากับ 68.77 กิโลนิวตัน เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ลง

3) ตัวอย่างทดสอบที่ 2 (RBS2) รับแรงกระทำที่ปลายคานได้สูงสุดเท่ากับ 99.97 กิโลนิวตัน เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ขึ้นและสามารถรับแรงได้เท่ากับ 125.77 กิโลนิวตัน เมื่อปลายคานเคลื่อนที่ลง

4) ตัวอย่างทดสอบที่ 1 (RBS1) มีระยะเคลื่อนที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 49.39 มิลลิเมตร ตัวอย่างทดสอบที่ 2 (RBS2) มีระยะเคลื่อนที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 125.39 มิลลิเมตร

5) ตัวอย่างทดสอบที่ 2 (RBS2) มีระยะการเคลื่อนที่ได้มากกว่าตัวอย่างที่ 1 (RBS1) 153 เปอร์เซ็นต์

6) ตัวอย่างทดสอบที่ (RBS1) 1 สามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 0.025436 เปอร์เซ็นต์เรเดียน และตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถหมุนได้สูงสุดเท่ากับ 0.049963 เปอร์เซ็นต์เรเดียน

7) ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (RBS1) ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างรุนแรง การเสียหายเริ่มจากการแตกหรือการของรอยเชื่อมของข้อต่อที่ปีกคานด้านล่างไปแพร่ไปสู่รอยเชื่อมแผ่นเอวคานและรอยเชื่อมปีกคานด้านบนที่ติดอยู่กับหน้าเสา แต่เมื่อสิ้นสุดการทดสอบรอยเชื่อมปีกคานด้านบนยังคงติดอยู่กับหน้าเสาอยู่ รอยเชื่อมบริเวณปีกคานด้านบนที่ติดกับปีกเสาจะเกิดรอยแตกการเสียหายทำให้เกิดการครากที่บริเวณปีกเสา รวมทั้งปีกคานด้านบน ปีกคานด้านล่างและ Panel zone เกิดการเสียหายอย่างรุนแรงที่ในรอบการเคลื่อนที่ขนาดใหญ่

8) ความเสียหายของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (RBS2) มีความแตกต่างจากตัวอย่างทดสอบที่ 1 (RBS1) คือชิ้นงานนี้เกิดการเสียหายอย่างราบเรียบ แม้ชิ้นงานจะเกิดการเสียหายจากรอยเชื่อมปีกคานด้านล่างแพร่ไปสู่รอยเชื่อมแผ่นเอวคานและรอยเชื่อมปีกคานด้านบน และเกิดการครากที่บริเวณปีกเสา รวมทั้ง ปีกคานด้านบน ปีกคานด้านล่าง และ Panel zone เหมือนตัวอย่างทดสอบที่ 1 RBS1 แต่การเสียหายจะเกิดอย่างราบเรียบเมื่อได้รับแรงสลับในรอบการเคลื่อนที่ขนาดใหญ่

เอกสารอ้างอิง

1) ABAQUS (2004), “User’s Manual I-VI Version 6.3”, Hibbit, Karission, and Sorenson, Inc, 1080 Main Street, Pawtucket, RI 02860.
2) American Institute of Steel Construction (1994), “Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings”, AISC, 2nd Edition, Chicago, Illinois.
3) American Institute of Steel Construction (1997), “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
4) American Institute of Steel Construction (2000), “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
5) Chen, S.J., Yeh, C.H., and Chu, J.M. (1996), “Ductile Steel Beam-to-Column Connections for Seismic Resistance”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 11. November, pp. 1292-1299.
6) Civjan, S.A., Engelhardt, M.D., and Gross, J.L. (2000), “Retrofit of Pre-Northridge Moment-Resisting Conncections”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 4, April, pp. 445-452.
7) El-Tawil, S., Vidarsson, E., Mikesell, T., and Kunnath, S. (1999), “Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections”, Report No. SAC/BD-98/01, SAC Joint Venture, Sacramento, California.
8) Englehardt, M.D. (1996), “Test Reports on Curved Dogbone”, Report, University of Texas-Austin, Dec.-Feb. 1996.
9) FEMA-267 (1995), Interim Guidelines, Inspection, Evaluation, Repair, Upgrade and Design of Welded Moment Resisting Steel Structures, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
10) FEMA-273 (1997), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, prepared by the Applied Technology Council for the Building Seismic Safety Council, published by the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
11) FEMA-350 (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

12) FEMA-352 (2000), Recommended Postearthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded Steel Moment-Frame Buildings, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
13) FEMA-355C (2000), State of the Art Report on Systems Performance of Steel Moment Frames Subject to Earthquake Ground Shaking, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
14) FEMA-355D (2000), State of the Art Report on Connection Performance, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
15) Iwankin, N.R., and Carter, C.J. (1996), "The Dogbone: A New Idea to Chew on", Modern Steel Construction, AISC, April, pp. 18-23.
16) Lee, C.H., and Kim, J.H. (2007), "Seismic Design of Reduced Beam Section Steel Moment Connections with Bolted Web Attachment", Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 63, pp. 522-531.
17) SAC (1995), "Analytical and Field Investigations of Buildings Affected by the Northridge Earthquake: Part 2", Report SAC 95-04, SAC Joint Venture, Sacramento California.
18) SAC (1996), "Experimental Investigation of Beam-Column Subassemblages: Part 1 and Part 2", Report SAC 96-01, SAC Joint Venture, Sacramento California.
19) SAC (1996), "Steel Connection Subassemblage: Testing Investigations, Northridge Earthquake, Report SAC 96-01, SAC Joint Venture, Sacramento California.
20) 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.
21) Swati, A.K., and Gaurang, V. (2014), "Study of Steel Moment Connection with and without Reduced Beam Section", Case Studies in Structural Engineering, Elsevier, Vol. 1, pp. 26-31.
22) Theeravat K. (2001), "Seismic Performances of Reduced Beam Section Frames", Ph.D. Dissertation, Illinois Institute of Technology, Illinois.
23) Wongkaew, A., Goel, S.C., and Stojadinovic, B. (2002), "Development of Improved Details for Unreinforced Welded Steel Moment Connections", Report UMCEE 01-20, Dept. of Civ. & Env. Engrg., Unv. Of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

24) กระทรวงมหาดไทย, กฎกระทรวงฉบับที่ 50 (พ.ศ. 2550) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
25) อานนท์ วงษ์แก้ว, “การวิเคราะห์ไฟไนอิลิเมนต์ข้อต่อคาน-เสาเหล็กก่อสร้างตามมาตราฐานประเทศไทยภายใต้แรงวัฏจักร”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, เล่มที่ 1, หน้า STR 352-359, 2556.
26) 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.
27) Tahir, M., and Hussein., Md., A. (2008), “Experimental Tests on Extended End-Plate Connections with Variable Parameters”, Steel Structures, Vol. 8, pp. 369-381.
28) 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.
29) 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.
30) 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., Unv. of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
31) กระทรวงมหาดไทย, กฎกระทรวงฉบับที่ 50 (พ.ศ. 2550) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
32) อานนท์ วงษ์แก้ว, “การวิเคราะห์ไฟไนอิลิเมนต์ข้อต่อคาน-เสาเหล็กก่อสร้างตามมาตราฐานประเทศไทยภายใต้แรงวัฏจักร”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, เล่มที่ 1, หน้า STR 352-359, 2556.

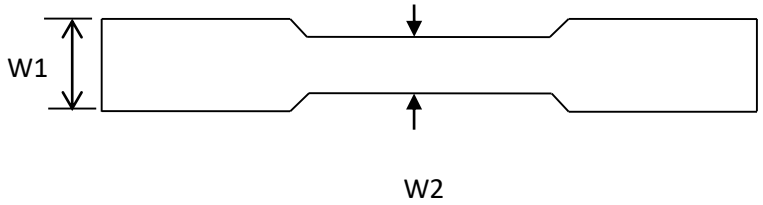
ภาคผนวก

การทดสอบวัสดุเหล็ก

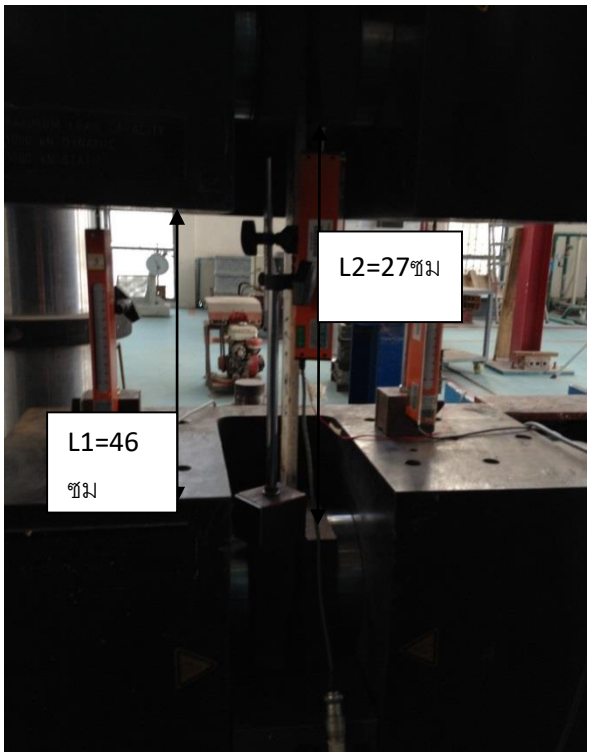
การทดสอบวัสดุเหล็กเป็นการทดสอบแผ่นเหล็กที่เป็นชิ้นส่วนต่างๆของข้อต่อคาน-เสาเหล็ก (Coupon Test) ของตัวอย่างทดสอบ RBS1 เสา ยาว 2819 มิลลิเมตร และคานยาว 2625 มิลลิเมตร ข้อต่อทั้งสองตัวอย่างใช้เหล็กเกรด SS400/SM400 (เทียบเท่าได้เท่ากับ A36) ทดสอบโดยการให้แรงดึงเพื่อหาค่าความเค้นที่จุดครากและความเค้นสูงสุดของชิ้นส่วนนั้นๆเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการเสียหายของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในครั้งนี้คือชิ้นส่วนของตัวอย่างทดสอบ RBS1 มีทั้งหมด 12 ชิ้นคือ 1. ปีกคานด้านบนข้างซ้าย 2. ปีกคานด้านบนข้างขาว 3. ปีกคานด้านล่างข้างซ้าย 4. ปีกคานด้านล่างข้างขวา 5. ปีกเสาด้านบนข้างขาว 6. ปีกเสาด้านบนข้างซ้าย 7. ปีกเสาด้านล่างข้างขวา 8. ปีกเสาด้านล่างข้างซ้าย 9. แผ่นเอวคานด้านบน 10. แผ่นเอวคานด้านล่าง 11. แผ่นเอวเสาด้านบน 12. แผ่นเอวเสาด้านล่าง ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ RBS2 มีทั้งหมด 12 ชิ้นคือ 1. ปีกคานด้านบนข้างซ้าย 2. ปีกคานด้านบนข้างขาว 3. ปีกคานด้านล่างข้างซ้าย 4. ปีกคานด้านล่างข้างขวา 5. ปีกเสาด้านบนข้างขาว 6. ปีกเสาด้านบนข้างซ้าย 7. ปีกเสาด้านล่างข้างขวา 8. ปีกเสาด้านล่างข้างซ้าย 9. แผ่นเอวคานด้านบน 10. แผ่นเอวคานด้านล่าง 11. แผ่นเอวเสาด้านบน 12. แผ่นเอวเสาด้านล่าง

วิธีการทดสอบวัสดุเหล็ก (Coupon Test)

ในการทดสอบวัสดุเหล็ก ที่เป็นชิ้นส่วนทดสอบ (Coupon Test) จะใช้เครื่อง LVDT ในการหาระดับค่าหัวกดของ UTM เพื่อให้ได้ระดับหัวกด UTM ที่เท่ากันในการทดสอบแต่ละชิ้นงาน ระยะ L1 คือระยะห่างการยกหัวกด UTM ระยะ L2 คือระยะห่างของตัวยึดชิ้นงานด้านบนและด้านล่าง การทดสอบชิ้นงานทดสอบโดยใช้การให้แรงดึง



รูปแบบการตัดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบวัสดุเหล็ก (Coupon Test)



รูปแสดงค่า L1 และ L2

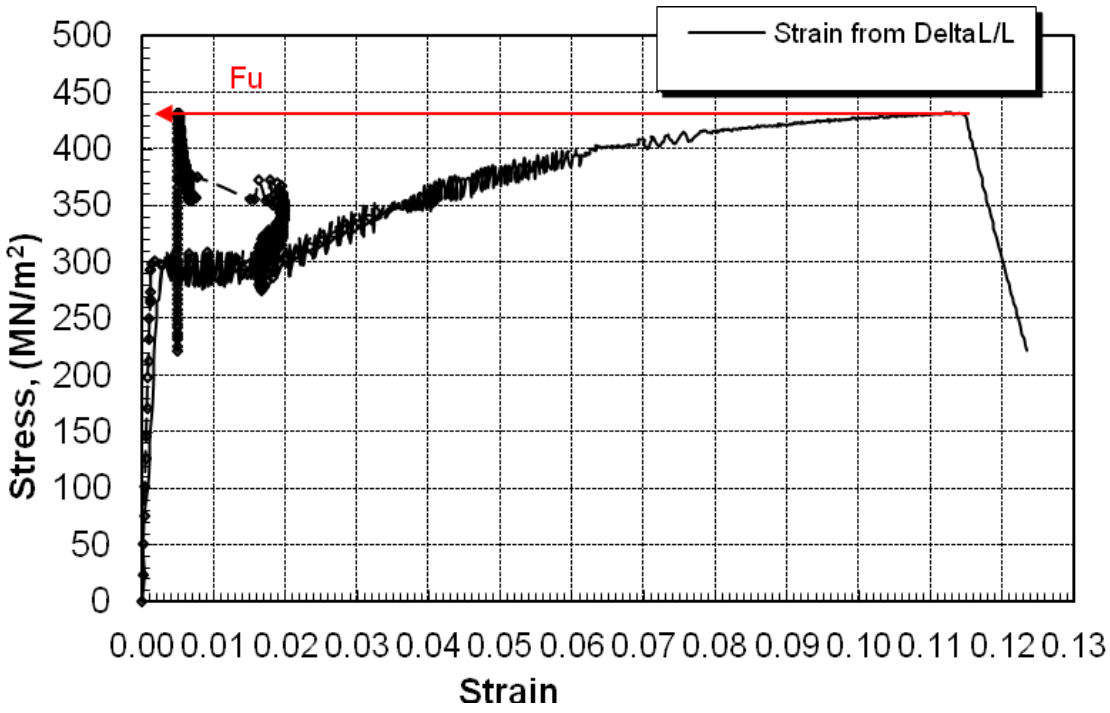
ตารางขนาดของชิ้นงาน RBS1 และ RBS2

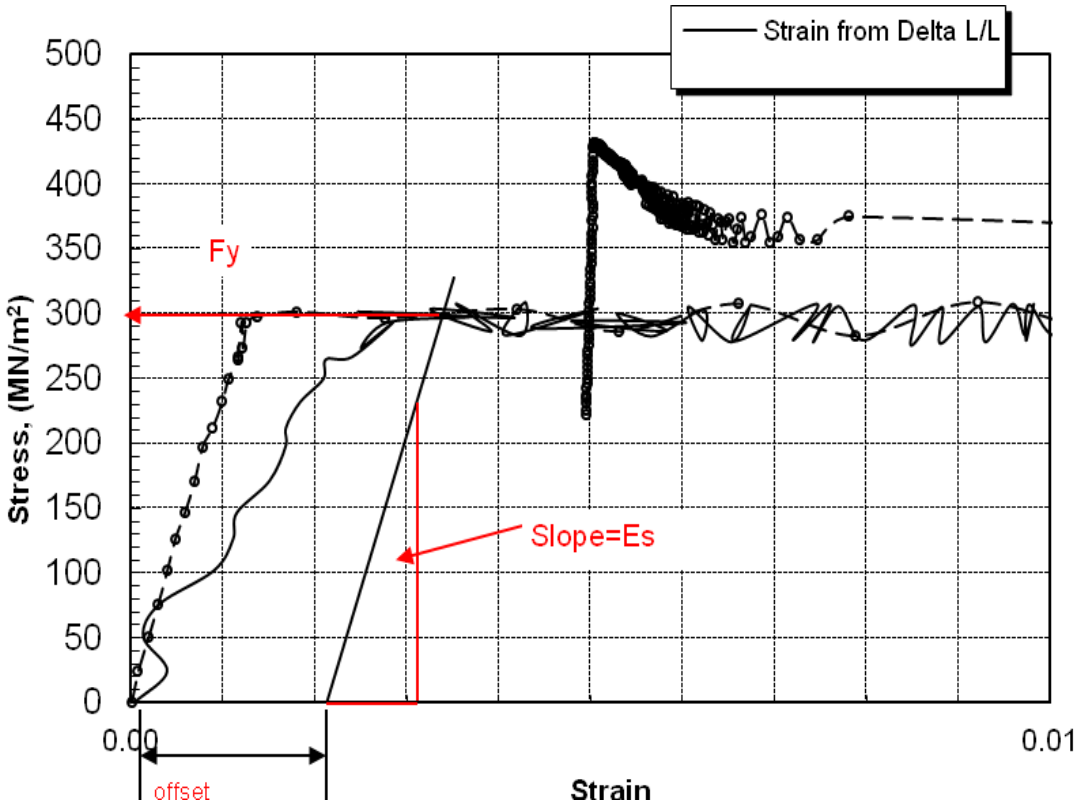
NAME	L_1 (ซม.)	L_2 (ซม.)	W_1 (มม.)	W_2 (มม.)	t (มม.)
BBFLRBS1:ปีกคานล่างด้านซ้ายRBS1	46	27	61	67	10
BBFLRBS2:ปีกคานล่างด้านซ้ายRBS2	46	27	29.1	29.9	10
BBFRRBS1:ปีกคานล่างด้านขวาRBS1	46	27	61	58.1	10
BBFRRBS2:ปีกคานล่างด้านขวาRBS2	46	27	28.9	28	10
BBWRBS1:แผ่นเอวคานด้านล่างRBS1	46	27	61.35	60.5	7.1
BBWRBS2:แผ่นเอวคานด้านล่างRBS2	46	27	30.4	30.2	10
BCFLRBS1:แผ่นปีกเสาด้านล่างซ้ายRBS1	35.5	_	61.5	62.1	11
BCFLRBS2:แผ่นปีกเสาด้านล่างซ้ายRBS2	46	27	64.7	67	12
BCFRRBS1:แผ่นปีกเสาด้านล่างขวาRBS1	46	27	66	62.15	12
BCFRRBS2:แผ่นปีกเสาด้านล่างขวาRBS2	46	27	63.7	67.1	12
BCWRBS1:แผ่นเอวเสาRBS1	46	27	74	71.1	8
BCWRBS2:แผ่นเอวเสาRBS2	46	27	68.7	67.1	8
TBFLRBS1:แผ่นปีกเสาด้านบนขิ้างซ้ายRBS1	46	27	63.3	60.6	10
TBFLRBS2:แผ่นปีกเสาด้านบนข้างซ้ายRBS2	46	27	30.4	30.5	10
TBFRRBS1:แผ่นปีกเสาด้านบนข้างขวาRBS1	46	27	63.8	60	10
TBFRRBS2:แผ่นปีกเสาด้านบนข้างขวาRBS2	46	27	31	31	10
TBWRBS1:แผ่นเอวคานด้านบนRBS1	46	27	41.25	43.6	7.1
TBWRBS2:แผ่นเอวคานด้านบนRBS2	46	27	65.7	65	7
TCFLRBS1:แผ่นปีกเสาด้านล่างข้างซ้ายRBS1	33.9	_	65.3	62	11
TCFLRBS2:แผ่นปีกเสาด้านล่างข้างซ้ายRBS2	46	27	67.5	71.7	12
TCFRRBS1:แผ่นปีกเสาด้านล่างข้างขวาRBS1	46	27	62.2	65.3	12
TCFRRBS2:แผ่นปีกเสาด้านล่างข้างขวาRBS2	46	27	71.5	75.3	12
TCWRBS1:แผ่นเอวเสาด้านบนRBS1	46	27	68	70	8
TCWRBS2:แผ่นเอวเสาด้านบนRBS2	46	27	67.1	68.1	8

การหาค่าความเค้นที่จุดครากและความเค้นสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

การหาค่าความเค้นที่จุดครากและความเค้นสูงสุดของตัวอย่าง Bottom beam flange left RBS1 (BBFLRBS1) ปีกคานด้านล่างข้างซ้ายของ RBS1

NAME	L_1(มม.)	L_2(มม.)	W_1(มม.)	W_2(มม.)	t(มม.)	Avg Area: มม^2
BBFLRBS1	460	270	61	67	10	0.00064





จากรูป

ค่า slope (E_s) = 230,000 เมกะนิวตัน/ตารางเมตร ทำขนานกับกราฟ strain from strain Guage

ค่าความเค้นที่จุดคราก(F_y) = 3,000 เมกะนิวตัน/ตารางเมตร

ค่าความเค้นที่จุดสูงสุด (Fu) = 4,300 เมกะนิวตัน/ตารางเมตร อ่านจากกราฟบนค่าสูงสุดของกราฟ strain from DeltaL/L

ตารางสรุปผลการทดสอบวัสดุเหล็ก (Coupon Test)

ตัวอย่างทดสอบ	คาน (กำลังคราก/ค่ากำลังสูงสุด/ค่าอิลาสติกโมดูลัส) (เมกะนิวตัน/ตารางเมตร)		เสา (กำลังคราก/ค่ากำลังสูงสุด/ค่าอิลาสติกโมดูลัส) (เมกะนิวตัน/ตารางเมตร)	
	H300x200x56.8 กก./ม. RBS1	H300x200x56.8 กก./ม. RBS2	H300x300x106 กก./ม. RBS1	H300x300x87 กก./ม. RBS2
TFL*	3,200/4,600/200,000	-	3,600/5,200/260,000	2,600/3,200/140,000
TFR*	3,300/4,700/200,000	3,400/5,100/280,000	3,600/5200/280,000	3,800/5,400/200,000
BFL*	3,000/4,300/230,000	3,500/4,900/230,000	1,400/4,800/หาไม่ได้	1,400/1,800/160,000
BFR*	3,200/4,600/220,000	3,400/4,400/180,000	3,800/5,400/250,000	4,000/5,600/140,000
TBW*	4,600/6,200/110,000	2,700/3,400/140,000	2,900/3800/140,000	2,700/3,700/140,000
BBW*	2,600/3,400/120,000	3,000/3,800/170,000	2,800/3,800/160,000	2,800/3,900/160,000

Note: * TFL = ปีกบนด้านซ้าย TFR = ปีกบนด้านขวา BFL = ปีกล่างด้านซ้าย BFR = ปีกล่างด้านขวา TBW = แผ่นเอวคานส่วนบน BBW = แผ่นเอวคานส่วนล่าง

สรุปผลการทดสอบวัสดุเหล็ก (Coupon Test)

ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ RBS1 มีกำลังคราก (yield) สูงสุดเท่ากับ 4,600 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ที่ชิ้นส่วนด้านบนแผ่นเอวคาน (TBWRBS1) กำลังครากสูงสุด (Ultimate stress) เท่ากับ 5,400 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ที่ชิ้นส่วนแผ่นปีกเสาด้านล่างข้างขวา (BCFRRBS1) และมีค่า Elastic Modulus steel (Es) สูงสุดเท่ากับ 280,000 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ที่ชิ้นส่วนแผ่นปีกเสาด้านบนข้างขวา (TCFRRBS1)

ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ RBS2 มีกำลังคราก (yield) สูงสุดเท่ากับ 3,500 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ที่ชิ้นส่วนแผ่นปีกคานด้านล่างข้างซ้าย (BBFLRBS2) กำลังครากสูงสุด (Ultimate stress) เท่ากับ 5,600 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ที่ชิ้นส่วนแผ่นปีกเสาด้านล่างข้างขวา (BCFRRBS2) และมีค่า Elastic Modulus steel (Es) สูงสุดเท่ากับ 280,000 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร ที่ชิ้นส่วนแผ่นปีกคานด้านบนข้างขวา (TBFRRBS2)