



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมการรับแรงสลับทิศของข้อต่อคานเหล็ก-เสาคอนกรีตที่นิยมใช้ในประเทศไทย

Seismic Behavior of Steel Beam to Reinforced Concrete Column Connections  
practically used in Thailand

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256109A1080016

สัญญาเลขที่ ๑๕๙/๒๕๖๑

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

พฤติกรรมการรับแรงสลับทิศของข้อต่อคานเหล็ก-เสาคอนกรีตที่นิยมใช้ในประเทศไทย

Seismic Behavior of Steel Beam to Reinforced Concrete Column Connections  
practically used in Thailand

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน ๒๕๖๒

## ABSTRACT

The study was performed on experiment of two steel beam-reinforced concrete column connections. S1 and S2 were built with 500x500 mm. reinforced concrete columns with steel beam sections of H400x200x66 kg/m and H500x200x79.5 kg/m, respectively. Beams were welded to 250x550x16 mm. and 250x650x16 mm. steel plates with a fillet weld of 6-mm. size for S1 and S2, correspondingly. S1 and S2 specimens were bolted to columns with 12 and 14 chemical bolts. The results of two tests show a similar seismic behavior. No pull-out of chemical bolts is observed during the test. Yielding of beam also noticed and concrete crack in the panel zones of columns. The brittle fracture of weld materials mainly causes these two connections fail. This failure mode perhaps generates from the insufficient of weld size. Further investigation need to confirm this observation.

Keywords: steel beam-reinforced concrete column connection, Seismic, Bolt

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง พฤติกรรมการรับแรงสลับทิศของข้อต่อคานเหล็ก-เสาคอนกรีตที่นิยมใช้ใน  
ประเทศไทย ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2561 จาก สำนักงานคณะกรรมการ  
วิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	21
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	35
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	45
เอกสารอ้างอิง	48

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างภายในหลักที่ใช้ในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างในเกือบทุกประเภทในปัจจุบัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้สูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยผู้ออกแบบส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นๆ ได้พิจารณาการออกแบบโครงสร้างให้สามารถรับแรงดังกล่าวได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้าง และมาตรฐานที่มีอยู่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการรับแรงประเภทต่างๆ เช่น แรงดึง, แรงดัด, แรงอัด, แรงเฉือน และแรงประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไป จุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไปเช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมให้มีความสามารถรับแรงประเภทต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ใหม่ที่ต้องการ รูปแบบโครงสร้างที่นิยมใช้ปรับปรุงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นคือ คานและเสาเหล็กรูปพรรณในการก่อสร้างส่วนเพิ่มเติม โดยยังใช้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กต้นริมของอาคารเดิมรวมกับระบบเสาและคานเหล็กใหม่

กรณีศึกษาการปรับปรุงอาคารโรงงานประลองคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เพื่อเปลี่ยนการใช้งานอาคารโรงประลอง ซึ่งเดิมเป็นอาคารพื้นโล่งสูงประมาณ 15 เมตร มีหลังคาโครงถักเหล็กคลุม ขนาดพื้นที่โล่งประมาณ 450 ตารางเมตร ต้องการปรับปรุงเป็นอาคารปฏิบัติการสูง 3 ชั้น มีพื้นที่ใช้สอยชั้นละ 450 ตารางเมตร มีห้องต่างๆ ประกอบด้วย ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ห้องพักอาจารย์ ห้องเรียน และห้องอื่นๆ ในครั้งนี้โครงสร้างที่เลือกใช้คือ การใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดตัวเอช (H) เป็นเสาและคาน และใช้แผ่นพื้นสำเร็จกลวงเป็นพื้นอาคาร การปรับปรุงดังกล่าวต้องทำการเสริมเสาเข็มและฐานราก จากนั้นทำการตั้งเสาเหล็กที่บริเวณอาคารช่วงใน และติดตั้งคานเหล็กโดยปลายด้านนอกจะยึดกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (เสา.ส.ล.) ของอาคารเดิม และปลายด้านในยึดกับเสาเหล็กที่ตั้งใหม่ จากนั้นทำการวางแผ่นพื้นสำเร็จและทำการเทคอนกรีตสำเร็จทับหน้า และงานสถาปัตย์จะดำเนินการต่อจากนั้นจนอาคารแล้วเสร็จใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ใหม่ที่กำหนดไว้ ขั้นตอนการก่อสร้างแสดงดังรูปที่

จากรูปพบว่า ที่บริเวณข้อต่อระหว่างคานเหล็กยึดติดกับเสา ค.ส.ล. ของอาคารเดิม นั้น ผู้ออกแบบได้ใช้สลักเกลียวชนิดเคมี (Chemical bolt) ฝังในเสา ค.ส.ล. และรอยสลักเกลียวผ่านแผ่นเหล็กรองรับคานเหล็กที่เชื่อมเต็มหน้าตัดคาน H ติดกันแล้วทำการขันน็อตจนแน่น จากการคำนวณและผลการทดสอบสลักเกลียวชนิดเคมีแสดงว่า องค์กรนี้อาคารนี้สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งได้ตามมาตรฐานการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม จากองค์ความรู้เดิมพบว่า ข้อต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำด้านข้างเช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหวหรือแรงคลื่นสึนามิได้น้อยมาก ดังนั้นทำให้เกิดโจทย์ปัญหาทางวิศวกรรมถึงศักยภาพการรับแรงของข้อต่อชนิดคานเหล็ก-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กของเสาต้นริม โดยเฉพาะเมื่อต้องรับแรงกระทำด้านข้างในลักษณะสลับทิศ จึงเป็นที่มาของการศึกษาในครั้งนี้

งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถและศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อคานเหล็ก-เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ของเสาต้นริม ที่มีรายละเอียดการเสริมเหล็ก และขนาดตามงานก่อสร้างจริงในประเทศไทย ในการรับแรงสลับทิศโดยการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่ใกล้เคียงขนาดใช้งานจริง ในห้องปฏิบัติการเพื่อเตรียมความพร้อมและปรับปรุงพฤติกรรมโครงสร้างนี้ เพื่อรองรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต



รูปที่ 1 การปรับปรุงอาคารโรงงานประลองคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา



## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อประยุกต์ใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่มีอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการทดสอบข้อต่อคานเหล็ก-เสา ค.ส.ล. ของเสาต้นริม โดยใส่แรงสลับทิศ
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมข้อต่อคานเหล็ก-เสา ค.ส.ล. ของเสาต้นริม ที่ออกแบบและก่อสร้างในประเทศไทย โดยใช้มาตรฐานการออกแบบทั่วไปของประเทศไทย (การออกแบบโดยคำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งเท่านั้น) ภายใต้แรงแผ่นดินไหว

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นการประเมินพฤติกรรมตอบสนองต่อแผ่นดินไหว และความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของข้อต่อคานเหล็ก-เสา ค.ส.ล. ของเสาต้นริม ที่ก่อสร้างในประเทศไทย โดยวิธีการทดสอบโครงสร้างดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

- 1) สร้างตัวอย่าง และทำการทดสอบข้อต่อคานเหล็ก-เสา ค.ส.ล. ของเสาต้นริมที่มีรายละเอียดการก่อสร้างเหมือนกับข้อมูลการก่อสร้างที่รวบรวมมาในข้อ 1 ด้วยการใช้แรงสลับทิศ
- 2) วิเคราะห์ผลการทดสอบของตัวอย่างโดยการประเมินจากผลตอบสนอง ลักษณะการพัง ความยืดหยุ่น ความเหนียว และพลังงานแผ่นดินไหวที่ตัวอย่างทดสอบสามารถดูดซับได้ และหาสาเหตุของการทำให้ข้อต่อชนิดนี้เสียหาย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการพัฒนาเครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยบูรพา ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่โดยใช้เครื่อง UTM ซึ่งจะเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยขั้นสูงต่อไป
- 2) ทำให้ทราบถึงศักยภาพด้านกำลัง ความเหนียว ความสามารถในการสลายพลังงาน และลักษณะความเสียหายของข้อต่อคานเหล็ก-เสา ค.ส.ล. ก่อสร้างโดยมาตรฐานทั่วไปที่คำนึงถึงแรงในแนวตั้งเท่านั้นภายใต้แรงสลับทิศ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ข้อต่อคาน-เสา

แรงแผ่นดินไหวมีผลกระทบต่อโครงสร้างในลักษณะที่แตกต่างจากแรงอื่นๆ กล่าวคือ แรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารจากแผ่นดินไหวเป็นผลจากการที่ฐานของอาคารถูกทำให้เคลื่อนตัวออกไป (โดยพื้นดิน) แต่มวลเฉื่อย (Inertia) ของอาคารทำให้ส่วนต่างๆ เช่น เสา คาน พื้น โครงหลังคาของอาคาร ไม่เคลื่อนตัวไปพร้อมกับฐานทันที ยังผลทำให้เกิดการเสียรูปในองค์อาคารต่างๆ เช่น เสา คาน ข้อต่อคาน-เสา เป็นต้น การออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่ยอมรับกันอย่างสากลคือ ภายใต้แผ่นดินไหวขนาดเล็กจะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนหนึ่งส่วนใดของตัวอาคาร ภายใต้แผ่นดินไหวขนาดปานกลางจะต้องไม่เกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างที่รับแรง และภายใต้แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ อาคารอาจเกิดความเสียหายแก่ส่วนของโครงสร้างรับแรงได้ แต่ต้องไม่พังถล่มลงมา เพื่อความปลอดภัยแก่ชีวิตผู้อยู่อาศัย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โครงสร้างจะต้องถูกออกแบบให้มีความเหนียวดีพอเพื่อให้อาคารนั้นสามารถทนต่อการสั่นไหว จนถึงขั้นเกิดการแตกร้าว และเกิดการครากขององค์อาคารได้พอสมควร โดยยังคงกำลังส่วนใหญ่ไว้ได้ (80% ของกำลังสูงสุด)

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบโดยคำนึงถึงแรงในแนวดิ่ง (น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร) รวมกับแรงลมเป็นหลัก โดยวิศวกรจะคำนวณองค์อาคารแต่ละส่วนแยกกันเช่น พื้น คาน เสา และ ฐานราก วิศวกรทั่วไปจะออกแบบให้องค์อาคารมีกำลังเพียงพอกับแรงดังกล่าว โดยใช้ความรู้พื้นฐานต่างๆ และมักไม่คำนึงถึงความสามารถในการเสียรูปขององค์อาคารย่อย และ/หรือองค์อาคารรวม การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมในองค์อาคาร ค.ส.ล. เหล่านี้ ก็จะมีมุ่งเน้นไปที่ความสามารถในการรับแรงขององค์อาคารแต่ละส่วนดังกล่าวเป็นหลัก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วิศวกรโดยทั่วไป จะออกแบบอาคาร ค.ส.ล. ให้มีพฤติกรรมอยู่ในสภาวะอิลาสติก และควบคุมการเสียรูปขององค์อาคารให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนด เช่น คาน ควรมีระยะแอนไม่เกินความยาวคาน ( $L/360$ ) เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำ เป็นต้น

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับโดยทั่วแล้วว่าข้อต่อคาน-เสาเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงแผ่นดินไหว การออกแบบข้อต่อต้องมีความยืดหยุ่นและความเหนียวเพียงพอต่อการต้านแรงแผ่นดินไหวที่รุนแรง เกณฑ์ในการออกแบบข้อต่อคาน-เสาที่มีความเหนียวที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีดังนี้

- 1) กำลังของเสาต้องเพียงพอที่ไม่ส่งผลให้โครงสร้างพังทลาย
- 2) ขณะเกิดแผ่นดินไหวขนาดกลางข้อต่อคาน-เสาควรมีความยืดหยุ่นที่เพียงพอ

- 3) ค่าการเคลื่อนตัวของข้อต่อคาน-เสาต้องมีค่าไม่มากเกินไป
- 4) ต้องมีการเสริมเหล็กในบริเวณข้อต่อเพื่อให้แน่ใจว่าข้อต่อสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ แต่ไม่ควรก่อสร้างยาก
- 5) ใช้หลักการออกแบบข้อต่อเป็นแบบคานอ่อน-เสาแข็ง (Weak beam-Strong column)

## 2.2 ทฤษฎีของข้อต่อคาน-เสา

### 2.2.1 เกณฑ์ทั่วไปของการออกแบบข้อต่อคาน-เสา

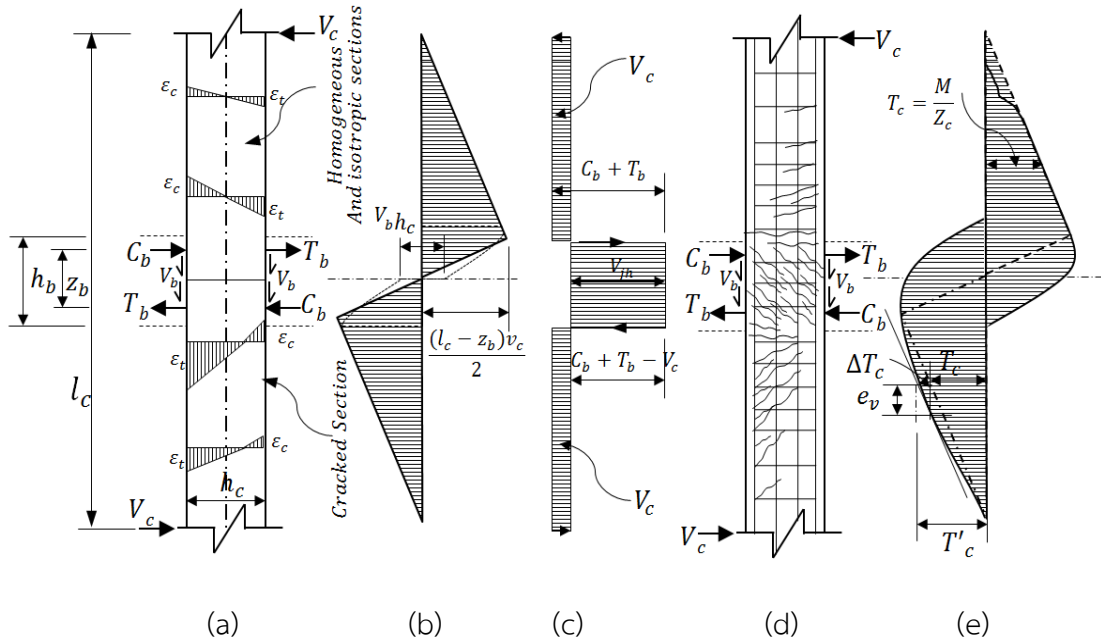
ปัจจุบันมีการยอมรับโดยทั่วแล้วว่าข้อต่อคาน-เสาเป็นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงแผ่นดินไหว และต้องออกแบบโครงสร้างในสภาวะยืดหยุ่น(Elastic)โดยให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่นและความเหนียวเพียงพอต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่รุนแรง เนื่องจากขณะที่โครงสร้างต้องเผชิญกับแรงแผ่นดินไหวเกิดโมเมนต์ภายในเสาในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณเหนือและใต้ข้อต่อ ส่วนในคานเกิดโมเมนต์ตัดกระทำในทิศทางตรงกันข้ามเช่นกัน ส่งผลให้เกิดแรงเฉือนในแนวราบและแนวตั้งกระทำที่ข้อต่อ การออกแบบควรคำนึงถึงผลของการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเนื่องจากผลจากโมเมนต์ตัดที่เกิดขึ้นในคานทำให้เกิดแรงอัดและแรงดึงผ่านเหล็กเสริมของคานไปกระทำที่มุมของข้อต่อ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่สูงจะช่วยต้านทานแรงเหล่านี้ได้และต้านทานไม่ให้เกิดการวิบัติเนื่องจากการยึดเหนี่ยวอีกด้วยซึ่งเกณฑ์ที่ใช้เป็นสมการในการออกแบบข้อต่อคาน-เสาที่มีความเหนียวที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีดังนี้

- 1) ความแข็งแรงของข้อต่อคาน-เสาเพียงพอที่จะต้านทานแรงแผ่นดินไหว
- 2) กำลังของเสาต้องเพียงพอที่ไม่ส่งผลให้โครงสร้างพังทลาย ซึ่งต้องพิจารณาข้อต่อคาน-เสาเป็นส่วนหนึ่งของเสา
- 3) ขณะเกิดแผ่นดินไหวขนาดกลางข้อต่อคาน-เสาควรมีความยืดหยุ่นที่เพียงพอ
- 4) ค่าการเคลื่อนตัวของข้อต่อคาน-เสาควรมีค่าไม่มากเกินไป
- 5) การเสริมเหล็กที่บริเวณข้อต่อเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้แน่ใจว่าโครงสร้างสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ แต่ไม่ควรทำให้การก่อสร้างเกิดความยากลำบากมากนัก
- 6) ใช้หลักการในการออกแบบให้ออกแบบโครงสร้างข้อแข็งเป็นแบบคานเปราะ-เสาแข็งแรง (Weak beam – strong column) ซึ่งเป็นวิธีค่อนข้างง่ายที่ทำให้แน่ใจตามที่ต้องการว่าข้อต่อยังคงอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น(elastic)

### 2.2.2 พฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสา

ภายใต้ผลของแรงแผ่นดินไหวทำให้เกิดแรงเฉือนขนาดใหญ่กระทำภายในข้อต่อคาน-เสาแรงเฉือนนี้ส่งผลให้เกิดวิบัติที่มุมของข้อต่อและนำไปสู่การพังทลายจากแรงเฉือนหรือจากแรงยึดเหนี่ยวหรือทั้ง 2 อย่าง

#### 1) เกณฑ์สมดุล



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเสาและพฤติกรรมของข้อต่อ (a) แรงที่กระทำกับเสา (b) โมเมนต์ดัด (c) แรงเฉือน (d) ลักษณะรอยแตก (e) การเปลี่ยนแปลงของแรงดัดตลอดความยาวของเสา

เนื่องจากข้อต่อเป็นส่วนหนึ่งของเสา แรงภายในของข้อต่อที่เกิดขึ้นคือแรงภายในเสาเช่นกัน รูปที่ 2.1 เป็นแผนภาพแรง (Free-body diagram) แสดงแรงภายในต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวจากรูปที่ 2.1(a) แรงกระทำที่หน้าเสาทั้ง 2 ด้านเกิดจากผลของโมเมนต์ดัดดัดของคาน โดยที่โมเมนต์ดัดในคานนี้ทำให้เกิดแรงดึง ( $T_b$ ) และแรงอัด ( $C_b$ ) ในเหล็กเสริมตามยาวของคานแล้วส่งผ่านมากกระทำที่หน้าเสา กำหนดให้  $T_b = C_b$  และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในทิศทางแตกต่างกันของข้อต่อนั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากแผนภาพแรง (Free-body diagram) สามารถเขียนสมการแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาได้ดังนี้

$$V_c = \frac{2T_b z_b + V_b h_c}{l_c} \quad (2.1)$$

จากรูปที่ 2.1(b) แสดงกราฟโมเมนต์ดัด(BMD)และแรงเฉือน(SFD) ที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสา เห็นได้ว่าเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหว บริเวณข้อต่อนั้นมีแรงเฉือนภายในเกิดขึ้นจำนวนมากอย่างกะทันหัน ดังนั้นจากแผนภาพแรง(Free-body diagram), BMDและSFDเราสามารถหาปริมาณแรงเฉือนในแนวราบในบริเวณข้อต่อได้จากสมการที่ 2.2

$$V_{jh} = C_b + T_b - V_c = \left(\frac{l_c}{z_b} - 1\right) V_c - \frac{h_c}{z_b} V_b \quad (2.2)$$

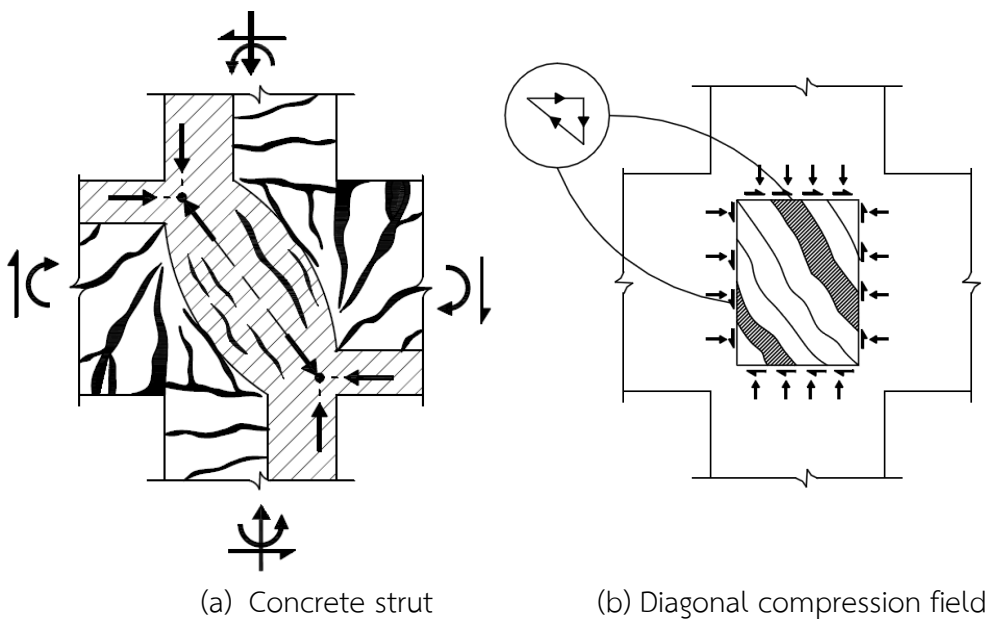
ในช่วงครึ่งบนของรูปที่ 2.1(d) เห็นได้ว่ามีรอยแตกในแนวราบของคอนกรีตซึ่งเกิดจากแรงดึงภายในเนื้อคอนกรีต ( $T_c$ ) การวิเคราะห์รอยแตกนี้มีผลขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ดัดภายในเสา ถ้ามีค่าโมเมนต์น้อยส่งผลให้เกิดรอยแตกหรือไม่เกิดรอยแตกเกิดขึ้นเลย ดังนั้นจะกำหนดให้  $T_c = \frac{M}{Z_c}$  ซึ่ง  $Z_c$  คือระยะวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางของเสาไปหาตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า ในช่วงครึ่งล่างของรูปที่ 2.3(d) ผลของแรงเฉือน  $V_c$  ทำให้เกิดรอยแตกในแนวเอียง รอยแตกนี้เกิดขึ้นจากแรงดึงภายในเพิ่มขึ้น ( $\Delta T_c$ ) จากเดิม เพราะฉะนั้นแรงดึงทั้งหมดที่เกิดภายในเสาช่วงล่างมีค่าเท่ากับ  $T_c + \Delta T_c$  ซึ่งก็เช่นเดียวกันแรงดึงที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถหาสมการที่ 2.1

$$\Delta T_c \approx \frac{e_v}{z_c} V_c \quad (2.3)$$

โดยที่  $e_v$  คือ Tension shift ซึ่งโดยปกติแล้วค่า  $\frac{e_v}{z_c}$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-1.0 การเพิ่มขึ้นของแรงดึง ( $\Delta T_c$ ) นั้นเป็นค่าตามอัตราส่วนของแรงเฉือนของคอนกรีต ( $V_c$ ) ในบริเวณที่พิจารณา สำหรับผลของแรงดึงและโมเมนต์ดัดจากเหล็กเสริมภายในข้อต่อส่งผลให้ข้อต่อเกิดการขยายตัวในแนวตั้งฉากกับข้อต่อ หลังจากนั้นเกิดรอยแตกในแนวเอียงของเนื้อคอนกรีตภายในข้อต่อและเกิดการขยายตัวในแนวราบของข้อต่อตามมา

## 2) กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength)

แรงภายในถูกถ่ายไปตามชิ้นส่วนเข้าสู่ข้อต่อดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) ผลของแรงเฉือนที่กระทำบริเวณมุมของข้อต่อคาน-เสาทั้งในแนวตั้งและแนวราบทำให้เกิดแรงลัพธ์มีทิศทางเอียงเป็นแนวทแยงมุมของข้อต่อส่งผลให้เกิดแรงอัดและแรงดึงกระทำที่มุมของข้อต่อเสาคาน เมื่อแรงลัพธ์นี้เพิ่มขึ้นมากกว่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตจะส่งผลให้เกิดรอยแตกเป็นแนวเอียงบริเวณมุมของข้อต่อคาน-เสา



รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนของแรงเฉือนที่ส่งผ่านเข้าไปที่ข้อต่อภายนอก

แรงภายในบางแรงของคอนกรีตถูกถ่ายเข้าไปในลักษณะของ Diagonal strut ส่วนแรงภายในอื่นๆถูกถ่ายเข้าสู่ข้อต่อโดยเหล็กเสริมของคานและเสาซึ่งก็คือแรงยึดเหนี่ยว แรงภายในเหล่านี้ทำให้เกิดการถ่ายแรงเข้าสู่ข้อต่อในลักษณะเดียวกับชิ้นส่วนโครงถัก(truss)

การขัดขวางการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนนี้ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนทั้งในแนวตั้งและแนวราบ การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนนี้สามารถช่วยรับแรงอัดในทิศทางเอียงดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) โดยที่ปริมาณของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวราบต้องมากกว่าที่ต้องการจริง สำหรับการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนของเสานี้จะอยู่ในรูปของเหล็กปลอกหรือตะขอเหล็ก

เมื่อการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่เพียงพอทำให้เหล็กปลอกหรือตะขอเหล็กนี้เกิดการครากและส่งผลให้เกิดรอยแตกในแนวเอียง หลังจากนั้นเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเหล่านี้ทำหน้าที่ถ่ายแรงดึงเท่านั้น

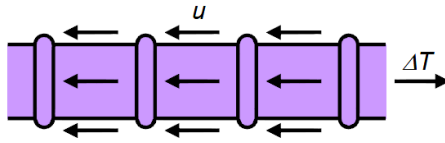
จึงเกิดการยึดตัวจนอยู่ในสภาวะไม่ยืดหยุ่น(Inelastic)เนื่องจากเกิดการครากไปแล้วซึ่งไม่สามารถหดตัวคืนกลับมาได้ ในระหว่างการเกิดแรงภายนอกกระทำกับโครงสร้าง เหล็กปลอกสามารถช่วยต้านทานกับแรงเฉือนนี้เท่านั้น ถ้าเหล็กปลอกนี้เกิดการยึดตัวอาจทำให้ความแข็ง(Stiffness)ลดลงอย่างรุนแรงและความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกน้อยลงเช่นกันอีกทั้งการสลายพลังงานเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวลดลงตามไปด้วย

เมื่อเหล็กรับแรงเฉือนถึงจุดคราก ผิวหน้าของคอนกรีตที่ข้อต่อจะหลุดร่อนเนื่องจากแรงอัดในแนวเอียงและต้องพิจารณาสาเหตุของการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นอย่างแรก อย่างไรก็ตามการวิบัติในลักษณะนี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ควรที่จะออกแบบให้โครงสร้างมีกำลังมากกว่าความเป็นจริง (over strength)

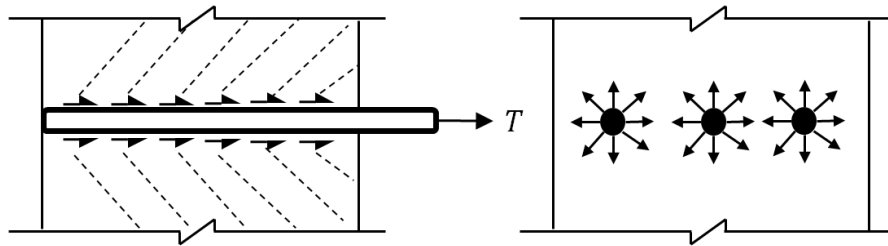
### 3) หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond strength)

กลไกสำคัญของคอนกรีตเสริมเหล็กคือการทำงานร่วมกันในการต้านทานแรงภายนอก นั่นคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่เพียงพอจะทำให้เกิดการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต การถ่ายแรงอาจเกิดจากการยึดติดที่ผิวเหล็กหรือความขรุขระของเหล็กเสริมแบบข้ออ้อย แรงยึดเหนี่ยวถูกอธิบายในรูปของระยะฝัง(Development Length) ซึ่งเป็นความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังปลายในคอนกรีต แรงยึดเหนี่ยวของข้อต่อคาน-เสาภายนอกนี้จะเกี่ยวข้องกับระยะฝังตัวและการงอปลายของเหล็ก ส่วนในข้อต่อคาน-เสาภายใน แรงยึดเหนี่ยวจะเกิดกับเหล็กจะฝังผ่านจากข้อต่อหนึ่งไปอีกข้อต่อหนึ่งและไปงอปลายที่ข้อต่อคาน-เสาภายนอกสำหรับโครงสร้างที่มีความเหนียวปานกลาง การลื่นไถลของเหล็กเสริมเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวนี้จะสามารถเกิดขึ้นได้ แต่ผลจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นบริเวณข้อต่อคาน-เสาภายในจะไม่ส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังอย่างทันทีทันใด แต่ถ้าหากมีการงอปลายที่ข้อต่อคาน-เสาภายนอกไม่ดีก็จะส่งผลเสียหายต่อข้อต่อภายในตามมาทีหลัง

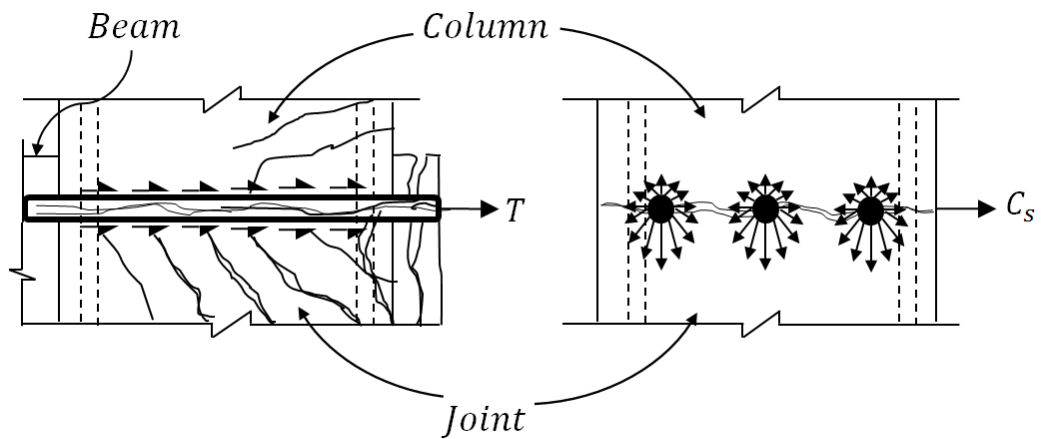
รูปแบบของการวิบัติอาจเกิดจากการที่เหล็กเสริมถูกดึงออกมาจากเนื้อคอนกรีต (Pullout Failure) แต่ที่พบบ่อยไปกว่านั้นคือแบบที่คอนกรีตโดยรอบแยกออกจากกัน (Splitting) อันนี้เนื่องมากจากการหดตัวที่มากเกินไปของเหล็กเสริมเนื่องจากการแยกตัวของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความสามารถของคอนกรีตที่ต้านทานแรงดึงซึ่งขึ้นอยู่กับระยะหุ้มเหล็กเสริมและระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม รวมถึงการบีบรัดของเหล็กปลอกด้วย



รูปที่ 2.3 แรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีต



รูปที่ 2.4 แรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต และเมื่อเหล็กพยายามจะลื่นไถลทำให้เกิดรอยแตกในคอนกรีตซึ่งแนวของรอยแตกเป็นแนวเอียงทำมุมกับผิวเหล็กตามเส้นประ



รูปที่ 2.5 การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กงอปลายในข้อต่อคาน-เสาภายนอกและเหล็กที่ฝังผ่านข้อต่อคาน-เสาภายใน



### 2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

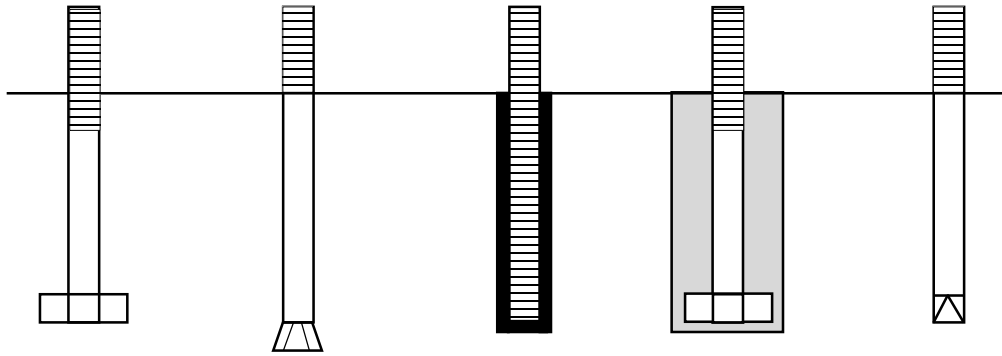
สลักเกลียวฝังคอนกรีตหรือพุก (Anchor bolt) แสดงในรูปที่ 2.6 เป็นอุปกรณ์ในงานก่อสร้างทำหน้าที่ในการถ่ายแรงและยึดระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต หรือรอยต่อระหว่างคอนกรีตและเหล็ก รูปพรรณ การติดตั้งสลักเกลียวฝังคอนกรีตสามารถทำได้ 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

- 1) Cast-in-place System ซึ่งเป็นการติดตั้งสลักเกลียวฝังคอนกรีตก่อนเทคอนกรีต (รูปที่ 2.6 ก) ใช้ถ่ายแรงโดย Bearing Action เป็นหลัก ซึ่งการติดตั้งวิธีนี้ต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ต่างๆไว้ล่วงหน้า และทำการยึดติดกับเหล็กเสริมโดยวิธีต่างๆ เช่น เชื่อม ลวดผูก เป็นต้น
- 2) Drilled-in place System ซึ่งเป็นการติดตั้งสลักเกลียวฝังคอนกรีต เข้าไปในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete) (รูปที่ 2.6ข-จ) ในกรณี Post-installed System จะต้องระวังไม่ให้เกิดการเจาะรูไปตัดเหล็กเสริมที่มีอยู่เดิมและต้องทำความสะอาดรูเจาะ และการใช้อุปกรณ์ยึดให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของโครงสร้าง

สลักเกลียวฝังคอนกรีตที่ใช้ในระบบ Post-installed สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการถ่ายแรงได้ดังนี้ Mechanical System และ Bonded Anchor System

Mechanical system: สลักเกลียวฝังคอนกรีตที่อาศัยการถ่ายแรงทางกล ได้แก่ Undercut Anchor (รูปที่ 2.6ข) ซึ่งใช้ Baring Action (Keying Action) ในการถ่ายแรง และ Expansion Anchor: รูปที่ 2.6จ) ซึ่งอาศัยแรงเสียดทานในการถ่ายแรง Expansion Anchor ยังสามารถจำแนกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ ชนิด Torque Controlled และ Displacement Controlled หลักการทำงานของ Expansion Anchor คือ อาศัยหลักการเคลื่อนที่ขึ้น (ในกรณี Torque-controlled) หรือการเคลื่อนที่ลง (ในกรณี Deformation-controlled) ของ Cone ซึ่งทำให้ปลอก (Sleeve) เกิดการขยายตัวด้านข้าง ซึ่งด้วยแรงนี้เอง ทำให้เกิดแรงเสียดทานซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการถ่ายแรงของ Expansion Anchor

Bonded Anchor: สลักเกลียวฝังคอนกรีตที่อาศัยการถ่ายแรงโดยผ่านทางแรงยึดเหนี่ยวที่พื้นผิวของสลักเกลียวฝังคอนกรีตกับมอร์ต้าหรือ Epoxy ชนิดพิเศษ ซึ่งมี 2 ประเภท คือ (Resin Polymeric Based System: รูปที่ 2.6ค) หรือ วัสดุประสาน (Cementitious Based System: รูปที่ 2.6ง)



ก) Cast-in-Place      ข) Undercut      ค) Adhesive      ง) Grouted      จ) Expansion

รูปที่ 2.6 สลักเกลียวฝังคอนกรีตหรือพุก (Anchor bolt) ชนิดต่างๆ [8]

ลักษณะการวิบัติของสลักเกลียวฝังคอนกรีตนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ

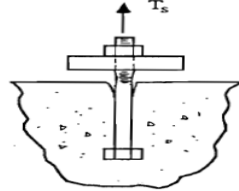
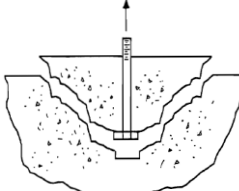
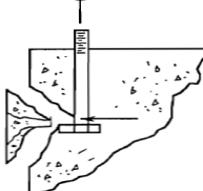
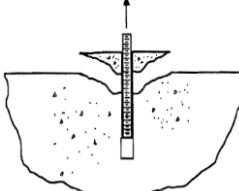
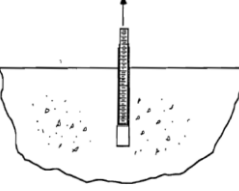
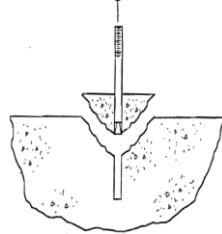
- 1) การวิบัติในคอนกรีต (Concrete Failure-concrete Cone Failure)
- 2) การวิบัติใน Anchor (Anchor หรือ Steel Failure)
- 3) การวิบัติที่เกิดจากการลื่นไถลที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและ Anchor (Concrete-steel Slip Failure)

ในการออกแบบข้อต่อประเภทที่ต้องใช้สลักเกลียวฝังคอนกรีตนั้น วิศวกรจะออกแบบให้เกิดการวิบัติขึ้นใน ตัวสลักเกลียวฝังคอนกรีต ซึ่งเกิดจากการครากของเหล็กที่เป็นวัสดุของสลักเกลียวด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

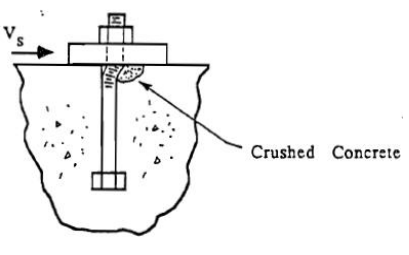
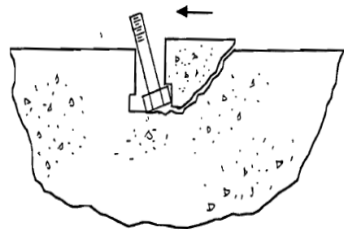
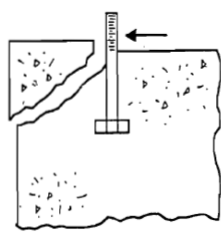
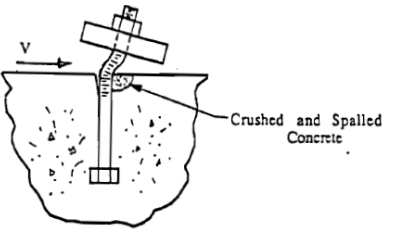
- 1) เป็นการวิบัติแบบเหนียว ซึ่งรอยต่อไม่วิบัติโดยทันทีที่เหล็กเกิดการคราก แต่จะยึดตัวได้มาก และเป็นการเตือนถึงการเกิดวิบัติที่จะเกิดขึ้น
- 2) การคำนวณหาแรงที่เกิดการวิบัติที่เกิดจากการครากของสลักเกลียวฝังคอนกรีตกระทำได้แม่นยำ

อย่างไรก็ตามการวิบัติของตัวสลักเกลียวฝังคอนกรีตเอง อาจเป็นการวิบัติแบบเปราะได้เช่นกัน หากเป็นกรณีที่ยึดต่อรับแรงกระทำซ้ำๆ (Repeated load หรือ Fatigue) ในกรณีที่เป็นการวิบัติแบบเปราะ การวิบัติจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันและรุนแรง ซึ่งสาเหตุมาจากการเกิดรอยร้าวเล็กๆ ในเนื้อเหล็กกลายเป็นรอยร้าวขนาดของรอยร้าวนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของความเค้นซ้ำๆ ที่กระทำ และจำนวนรอบการวิบัติในลักษณะนี้เรียกว่า Fatigue failure ซึ่งการวิเคราะห์ให้แม่นยำเป็นไปได้ยาก

ตารางที่ 1 ลักษณะการวิบัติของสลักเกลียวฝังคอนกรีตจำแนกตามประเภทของแรงกระทำ

Type of Loading	Failure Modes	
Tension	Steel Failure	
	Pullout-Cone Failure	
	Local Blowout-Cone Failure	
	Plug/Cone-Pullout Failure	
	Plug-Pullout Failure	
	Excessive Slip Failure with Shallow Pullout Cone	

ตารางที่ 1 ลักษณะการวิบัติของสลักเกลียวฝังคอนกรีตจำแนกตามประเภทของแรงกระทำ (ต่อ)

Shear	Anchor Yielded by Shear	
	Pullout Cone Failure	
		
Combined Tension and Shear	Anchor Yielded by Tension and Shear	

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะการวิบัติของสลักเกลียวฝังคอนกรีตจำแนกตามประเภทของแรงกระทำ ดังนี้คือ การวิบัติเนื่องจากแรงดึง การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน และการวิบัติเนื่องจากแรงดึงและเฉือน จากตารางยังพบว่าหากแบ่งการวิบัติที่เกิดขึ้นกับวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น การวิบัติที่เกิดกับตัวสลักเกลียวฝังคอนกรีตเองเช่น steel failure, anchor yielded และการวิบัติที่เกิดกับตัวคอนกรีตเช่น pullout-cone failure, local blowout-cone failure, excessive slip failure with shallow pullout cone เป็นต้น

การออกแบบสลักเกลียวสำหรับยึดคานเหล็กเข้ากับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จะใช้หลักการเดียวกันกับวิธีการออกแบบและทดสอบพฤติกรรมของแผ่นเหล็กรองรับเสา (Column Base Plate) และสลักเกลียวฝังคอนกรีต [11] โดยการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนที่แผ่นเหล็กรองรับเสา ( $V$ ) ที่ยึดด้วยสลักเกลียวสามารถคำนวณได้จาก

$$V = \sqrt{(0.25\pi d^2 n F_u)^2 - \left(\frac{16}{9}\right) P^2} \quad (2.4)$$

โดยที่  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว (ไม่คำนึงถึงผลกระทบของเกลียว)  
 $n$  คือ จำนวนสลักเกลียว  
 $F_u$  คือ กำลังรับหน่วยแรงดึงสูงสุด  
 $P$  คือ แรงดึงที่สลักเกลียวได้รับ

เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมีลักษณะเป็นแรงกระทำรูปแบบสลับทิศทาง ช่องว่างระหว่างสลักเกลียวฝังคอนกรีตกับแผ่นเหล็กรองรับเสา (Base Plate) จึงเกิดการไถล (Slip) หรือขยับไปมาในขณะที่รับแรงแผ่นดินไหว วิธีการป้องกันการไถลจะใช้วิธีการเชื่อมแหวนรองหัวสลักเกลียว (Washer) ที่มีขนาดรูเจาะใกล้เคียงกับสลักเกลียวฝังคอนกรีตเข้ากับแผ่น End Plate ดังรูปที่ 2.7 อย่างไรก็ตามการเชื่อมแหวนรองหัวสลักเกลียวนี้ยังสามารถช่วยกระจายแรงแบกทาน (Bearing Stress) ให้สลักเกลียวฝังคอนกรีตรับแรงเท่าๆ กันทุกตัวอีกด้วย การเชื่อมต่อแหวนรองเข้ากับ Base Plate นั้น จะทำให้แรงแบกทานกระทำเป็นจุด (Point Load) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดัดขึ้นกับสลักเกลียวฝังคอนกรีต [12] ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นในการคำนวณและออกแบบจึงต้องคำนึงถึงแรงดึง แรงเฉือน และแรงดัด โดยให้แรงดัดอยู่ในเทอมของแรงดึงดังนี้

$$f_t = f_{ta} + f_{tb} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $f_{ta}$  คือ หน่วยแรงตามแนวแกนจากแรงตามแนวแกน  
 $f_{tb} = \frac{M}{nZ}$  คือ หน่วยแรงตามแนวแกนจากแรงดัด  
 $M$  คือ แรงโมเมนต์ที่กระทำสลักเกลียว  
 $Z = \frac{d^3}{6}$  คือ โมดูลัสพลัสติกของรูปวงกลม

กำลังรับแรงเฉือนที่ฐาน ( $V$ ) พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นทั้งสาม คือแรงดึง แรงเฉือน และแรงดัด [12] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V = \frac{d^2 \sqrt{(12\pi^2 k l F_u n d)^2 + (15\pi F_u n d^2)^2 - (80P)^2} - 64\pi P k l d}{96(\pi k l)^2 + 150d^2} \quad (2.6)$$

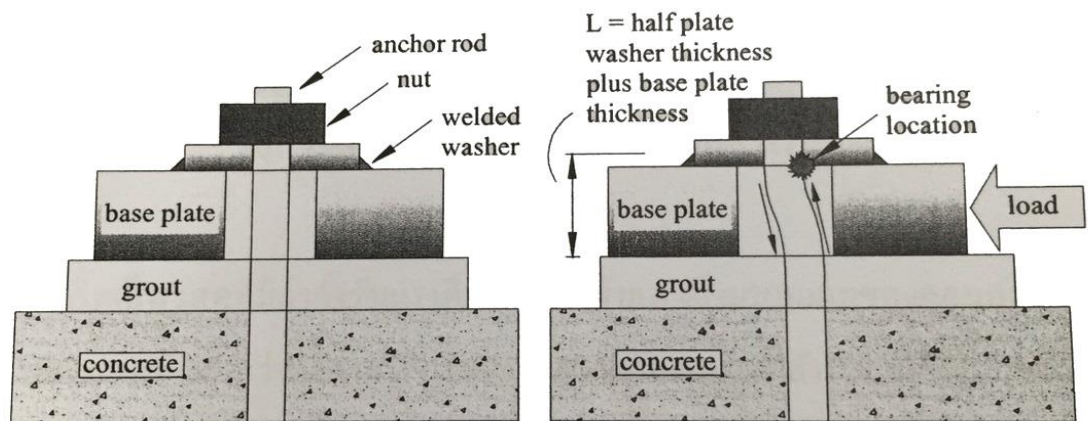
เมื่อ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพ

$l$  คือ ความยาวประสิทธิภาพ

วิธีการคำนวณข้างต้นเป็นวิธีการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนที่ฐานที่ลดกำลังรับหน่วยแรงดึงสูงสุด ( $F_u$ ) ลงร้อยละ 75 เนื่องจากสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของ Anchor rod จากการทำเกลียว ( $F_{nt} = 0.75F_u, F_{nv} = 0.75 \times 0.6F_u$ ) ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ฐาน (สมการที่ 2.6) จึงมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นในการคำนวณจะการใช้การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดจริงของ Anchor rod (ตารางที่ 7-18 ใน AISC Manual 2005) ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนที่ฐาน ( $V$ ) [12] สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left( \frac{4P}{\pi d_u^2} + \frac{V}{0.15\pi d_u^2} \right)^2 + \left( \frac{V}{0.15\pi d_u^2} \right)^2 = (nF_u)^2 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $d_u$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (คำนึงถึงผลกระทบของเกลียว)

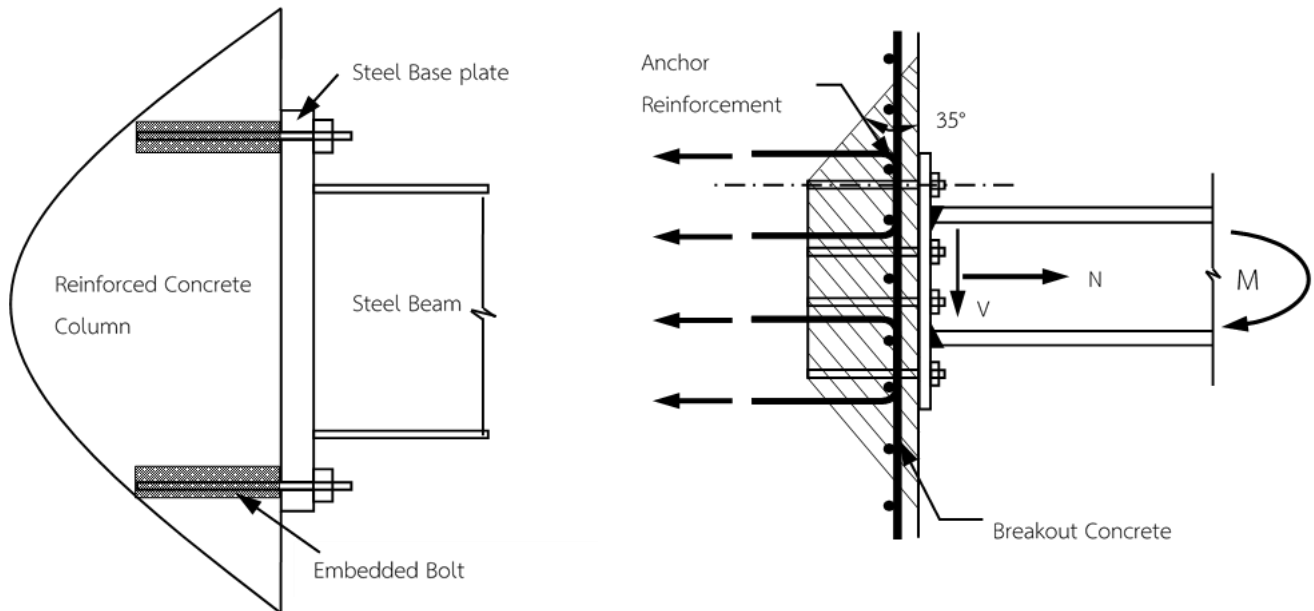


รูปที่ 2.7 การเชื่อมแหวนรองหัวสลักเกลียวและแรงดัดเกิดขึ้นในตัวสลักเกลียว [12]

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงต่ำ กำลังรับแรงดึงแบบแตกของคอนกรีต (Concrete Breakout) จึงมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่ต้องการ การคำนวณและออกแบบกำลังรับแรงดึงแตกของคอนกรีตสามารถใช้กำลังของเหล็กเสริมบริเวณใกล้เคียงกับสลักเกลียวฝังคอนกรีต หรือเหล็กพิเศษเพิ่มเข้าไปได้ โดยเหล็กที่สามารถนำมารับแรงดึงเพื่อดำเนินการแตกของคอนกรีตต้องอยู่ในบริเวณไม่เกิน 0.5 เท่าของระยะฝังของสลักเกลียวฝังคอนกรีตดังรูปที่ 2.8 ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ACI318-08 [2] กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมพิเศษสามารถหาได้จาก

$$T_u = \phi n A_{gb} f_y \quad (2.8)$$

เมื่อ  $T_n$  คือ กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมพิเศษ  
 $\phi$  คือ ตัวคูณลดแรง (0.75)  
 $A_{gb}$  คือ พื้นที่เหล็กเสริมพิเศษ  
 $n$  คือ จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ



รูปที่ 2.8 การเสริมเหล็กพิเศษรับแรงดึงบริเวณสลักเกลียวฝังคอนกรีต [8]

Paulay และคณะ [17] ทำการศึกษาข้อต่อคาน-เสาภายนอก 3 ตัวอย่าง ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวนอนภายในข้อต่ออาจลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้ง (ที่ตรงกึ่งกลางข้อต่อ) จะเหมือนกันทุกตัวอย่าง และเมื่อลดปริมาณแรงในแนวแกนลงจะส่งผลให้ค่า Stiffness, ความแข็งแรง, การสลายพลังงานของข้อต่อภายใต้แรงวัฏจักรลดลงตามไปด้วย

Ehsani และคณะ [10] ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาภายนอก 6 ตัวอย่างภายใต้แรงวัฏจักร จากทฤษฎีข้อต่อคาน-เสาต้องหลีกเลี่ยงการเกิด plastic hinges ในข้อต่อ ดังนั้นเพื่อจะหลีกเลี่ยงการเกิด plastic hinges ค่าอัตราส่วนกำลังดัด (Flexural strength ratio) ไม่ควรน้อยกว่า 1.4 นอกจากนี้หน่วยแรงเค้นเฉือนที่มากที่สุดของข้อต่อไม่ควรมากกว่า  $12\sqrt{f'_c}$  (psi) เพื่อลดความเสียหายในข้อต่อ และลดการพังแบบหลุดออกของเหล็กในเสาและคาน จากการทดสอบพบว่าถ้าอัตราส่วนกำลังดัด (Flexural strength ratio) กำลังรับแรงเฉือนในข้อต่อ และการงอปลายเหล็กคาน ให้มีค่ามากกว่ามาตรฐานกำหนดไว้สามารถลดปริมาณเหล็กเสริมตามขวางภายในข้อต่อ

Hakuto และคณะ [13] ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาภายในและภายนอกภายใต้แรงวัฏจักรที่มีรายละเอียดต่ำกว่ามาตรฐานและก่อสร้างก่อนปี ค.ศ. 1970 ข้อต่อคาน-เสาภายนอกมีการเสริมเหล็กตามขวางภายในแกนข้อต่อน้อยมาก และมีการงอปลายเฉพาะเหล็กบนของคานที่ฝังเข้าไปในเสา ส่วนเหล็กล่างจากคานจะเพียงยื่นตรงเข้าไปในเสาแต่ไม่มีการงอปลาย ผลการทดลองพบว่าการงอปลายเหล็กคานทั้งบนและล่างช่วยให้ข้อต่อมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Astaneh-Asl [6] 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

Tahir และคณะ (ค.ศ. 2008) [19] ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กประเภท End-Plate จำนวน 8 ตัวอย่าง โดยมีการคำนึงถึงตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดและความหนาของแผ่น End-Plate ขนาดและจำนวนของสลักเกลียว ขนาดของคานและเสา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความหนาแผ่น End-



Plate ขนาดสลักเกลียว และขนาดคาน มีผลกระทบต่อกำลังของข้ออย่างมาก ค่าการรับแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการออกแบบของ Eurocode3

Sun และคณะ (ค.ศ. 2014) [16] 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) รับแรงได้มากกว่าเหล็กเกรดปกติ ประมาณ 30% อย่างไรก็ตาม สลักเกลียวที่ใช้กับแผ่นเหล็ก End-Plate ที่ทำจากเหล็กเกรดสูง มีแนวโน้มของการฉีกขาด ดังนั้นสำหรับเหล็กเกรดสูงจึงแนะนำให้ใช้แผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อยลง หรือใช้สลักเกลียวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อป้องกันการฉีกขาดของสลักเกลียว นอกจากนี้พฤติกรรมของข้อต่อ End-Plate ที่เสามีความแข็งแรงมากกว่าคาน มีลักษณะการพังเหมือนกับข้อต่อ End-Plate ที่มีความแข็งแรงของเสาน้อยกว่าคาน สมการที่ใช้หาค่าโมเมนต์ของข้อต่อ End-Plate เสนอโดย Euro code 3 สามารถทำนายค่ากำลังของโมเมนต์ได้ดี ถึงแม้ว่าเหล็ก End-Plate ที่ใช้จะเป็นเหล็กเกรดสูง

อานนท์ วงษ์แก้ว และคณะ [18] ได้ทำการทดสอบข้อต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กของเสาต้นริมขนาดใหญ่เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว จำนวน 2 ตัวอย่างที่มีการออกแบบและรายละเอียดการเสริมเหล็กเพื่อรับแรงในแนวตั้งเป็นหลัก (bc1) เปรียบเทียบกับข้อต่อที่ก่อสร้างตามมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวหรือ “มยพ. 1301-50(มยพ. 1302-52)” (bc2) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังสูงสุดของทั้งสองข้อต่อทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามข้อต่อ bc2 สามารถหมุนและสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้มากกว่า bc1 ส่วนลักษณะการแตกของคอนกรีตรอบข้อต่อทั้งสอง พบว่า bc2 เกิดรอยแตกขนาดใหญ่ขึ้นที่รอยต่อระหว่างคาน-เสา ส่วนรอยแตกของ bc1 เกิดขึ้นในลักษณะทแยงมุมที่บริเวณผิวหน้าคอนกรีตของข้อต่อซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า bcs2

### บทที่ 3

#### การสร้างตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินการทดสอบ

#### 3.1 ลักษณะของตัวอย่าง

ในโครงการนี้ได้ยกตัวอย่างมาจากอาคารที่ใช้งานจริง มีลักษณะของตัวอย่างเป็นข้อต่อคาน-เสา ภายนอกของอาคารโดยเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบ ว.ส.ท. 1008-38 ตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบนั้นได้แบ่งครึ่งความยาวของเสาและคานจากความยาวเดิม โดยได้มีการลดรายละเอียดของตัวอย่างจากการคำนวณแรงตัดในเสาและคาน

#### 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

##### 3.2.1 คอนกรีต

ในการออกแบบตัวอย่างนี้จะใช้กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 250 ksc. โดยในทั้ง 4 ตัวอย่างนี้จะใช้กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากันทั้งหมด

##### 3.2.2 เหล็กเสริมในเสาและเหล็กรูปพรรณ

ในการออกแบบตัวอย่างนี้จะใช้เหล็กเสริมตามยาว โดยใช้เหล็กข้ออ้อย 2 ขนาด คือ DB 16 และ DB 20 ในเสาและคาน และมีการเสริมเหล็กปลอก 2 ขนาด คือ RB 6 และ RB 9 โดยมีค่ากำลังคราก ( $F_y$ ) ของเหล็กเสริมในตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้คานที่ใช้ทำตัวอย่างเป็นหน้าตัด H โดยใช้เหล็กเกรด SS400/SM400 (เทียบเท่าเกรด A36)

ตารางที่ 3.1 กำลังของเหล็กเสริม

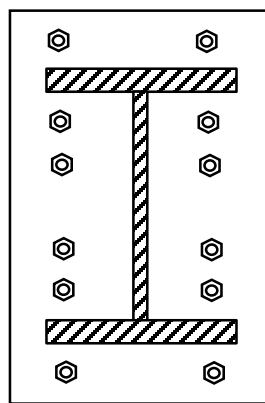
ชนิดของเหล็กเสริม	ขนาด (mm.)	$F_y$ (ksc)	$F_u$ (ksc)
เหล็กเสริมตามยาว	DB 16	4,000	5,700
	DB 20	4,000	5,700
เหล็กปลอก	RB 6	2,400	3,900
	RB 9	2,400	3,900

### 3.3 รายละเอียดของตัวอย่าง

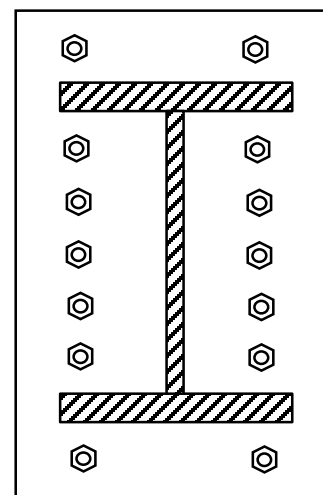
ในการทดสอบนี้จะมีทั้งหมด 2 ตัวอย่าง รายละเอียดโครงสร้างที่นำมาหล่อนั้นใช้มาตรฐานการออกแบบทั่วไปของประเทศไทย (ว.ส.ท. 1008-38) โดยชิ้นส่วนโครงสร้างที่จำลองขึ้นมาจะเหมือนกับชิ้นส่วนข้อต่อคาน-เสาในอาคารของเสารับพื้นชั้นต่างๆ โดยมีการออกแบบให้รับแรงบรรทุกในแนวตั้งเท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดของตัวอย่างดังตารางที่ 3.2 และแสดงดังรูปที่ 3.1-3.7 โดยในการทดสอบนี้จะเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของกำลังรับโมเมนต์คัตของเสาต่อคานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ชื่อ	เสาคอนกรีต (mm-mm)	คานเหล็ก	เสายาว (m)	คานยาว (m)	แผ่นเหล็กรองเสา (กว้างxลึกxหนา) (mm)	จำนวน Bolt
S1	400x400	H400x200x66 kg/m	2.73	2.42	250x550x16	12
S2	400x400	H500x200x79.5 kg/m	2.73	2.42	250x650x16	14

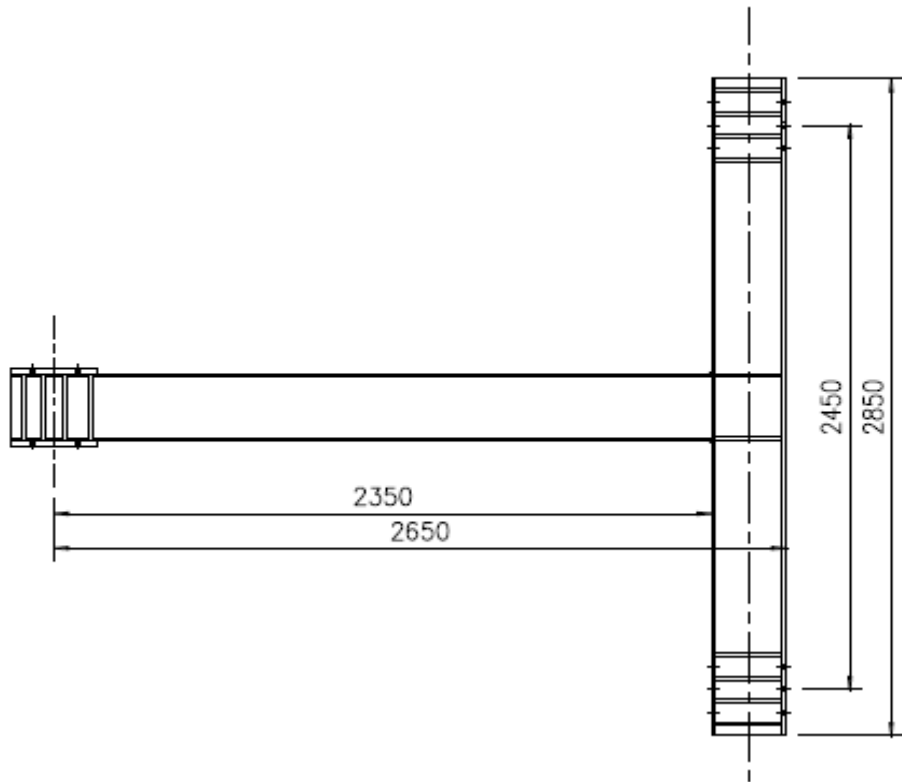


S1

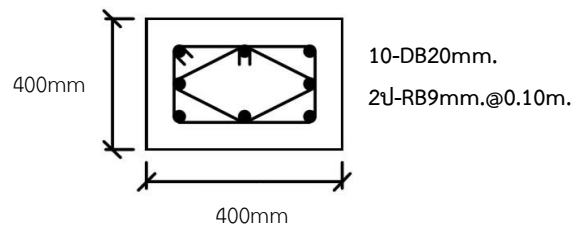


S2

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของตัวอย่างทดสอบ



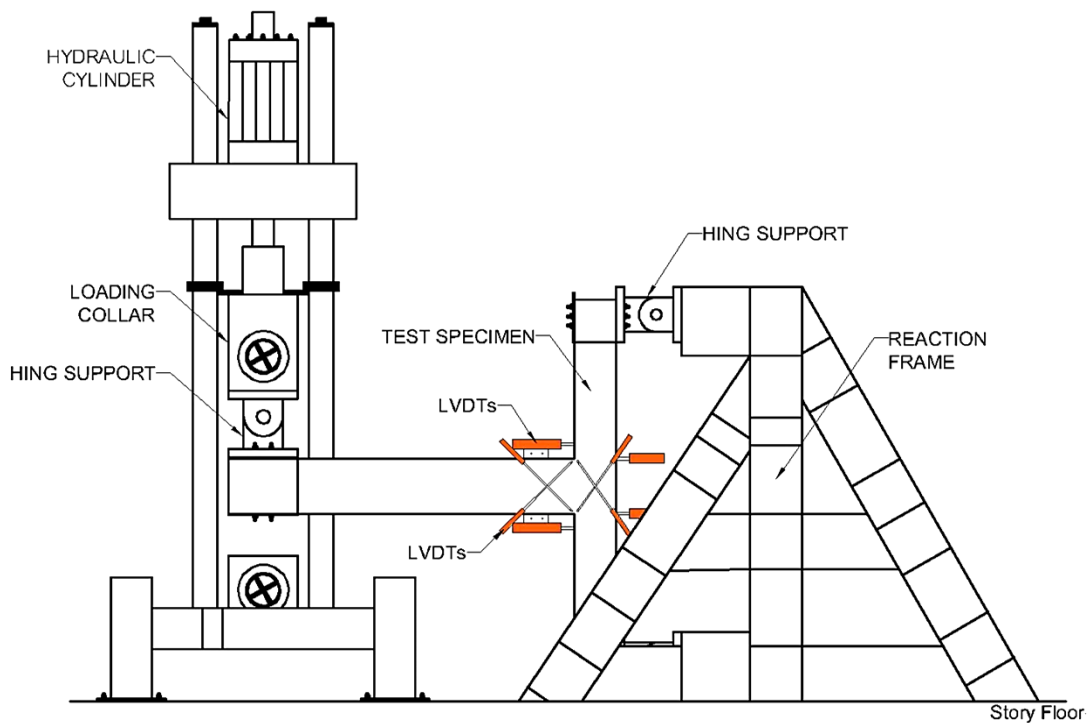
รูปที่ 3.3 ขนาดคานและเสาของตัวอย่าง S1 และ S2

### 3.4 เครื่องทดสอบ

การทดสอบนี้จะติดตั้งเสาในแนวตั้ง ยึดปลายเสาทั้งสองข้างไว้กับ Hing Support จากนั้นติดตั้งปลายคานเข้ากับ Hing Support ที่ติดกับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ดังรูปที่ 3.4-3.5 โดยการทำงานของเครื่องทดสอบ UTM จะใช้แรงดันน้ำมันไฮดรอลิกส์ในการควบคุมกระบอกสูบไฮดรอลิกส์ให้เคลื่อนที่ขึ้นลง ซึ่งกระบอกสูบไฮดรอลิกส์สามารถเคลื่อนที่สูงสุดได้ 250 มิลลิเมตร จะแบ่งเป็นการ

เคลื่อนที่ขึ้น 125 มิลลิเมตร และเคลื่อนที่ลง 125 มิลลิเมตร โดยเครื่อง UTM มีกำลังสูงสุด 150 กิโลนิวตัน โดยเครื่อง UTM นี้จะให้แรงที่ปลายคานผ่าน Hing Support

ในการทดลองนั้น การเก็บข้อมูลแรงที่ปลายคานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ UTM จะเก็บข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์ที่ถูกติดตั้งไว้ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกเชื่อมโยงไว้กับเครื่องทดสอบ UTM เมื่อตัวอย่างชิ้นงานถูกแรงนี้กระทำ จะเกิดเป็นแรงภายในขึ้นทั้งในเหล็กเสริม และคอนกรีต เป็นทั้งแรงดึง และแรงอัดที่ถ่ายเข้าสู่ข้อต่อคาน-เสา ซึ่งสามารถคำนวณหาแรงภายในต่าง ๆ เหล่านี้ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง และกฎสมมูล

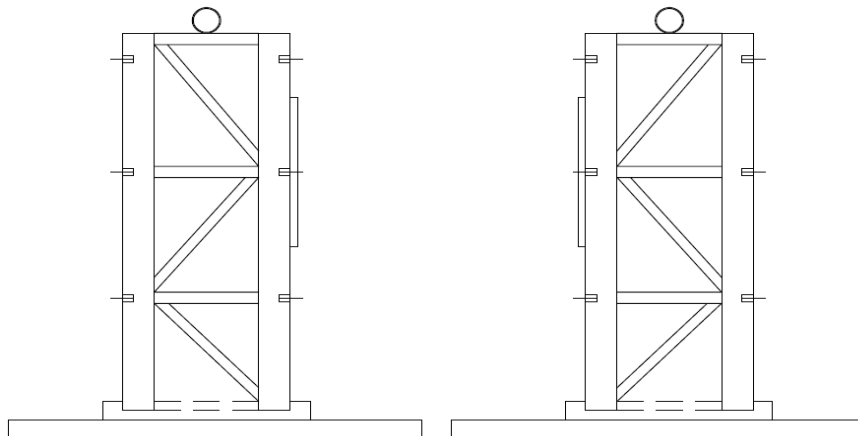


รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ



รูปที่ 3.5 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

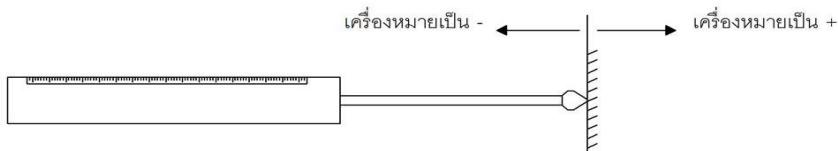
3. อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น เป็นชุดอุปกรณ์ที่นำโครงสร้างเหล็กที่ไม่ได้ใช้งานแล้วนำมาปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปแบบให้สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยในการทดสอบโดยมีหน้าที่ค้ำยันด้านข้างคาน ๓ ตำแหน่งกึ่งกลางของคานโดยมีลักษณะเป็นเสาคู่ โครงสร้างเป็นชนิดโครงถัก (Truss) รูปสี่เหลี่ยม ฐานล่างเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กหนาซึ่งได้ทำร่อง Slot บังคับการเคลื่อนที่ไว้ตรงกลางแผ่น และประกอบวางไว้บนแผ่นเหล็กหนาที่ยึดติดด้วย Stud bolt กับพื้นคอนกรีต เคลื่อนที่ปรับระยะตามแนวร่อง Slot บังคับการเคลื่อนที่เมื่อได้ระยะจะขันยึดแน่น



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ค้ำยันด้านข้างแบบยึดฐานแน่นด้วยฟิกเจอร์แบบแผ่น

### 3.5 เครื่องมือวัดผลและเก็บข้อมูล

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



รูปที่ 3.7 แสดงค่าเครื่องหมายจาก LVDT

### 3.6 การกำหนดแรงสลับทิศ (Cyclic Loading)

ในการทดสอบครั้งนี้ ต้องการให้ชิ้นงานได้รับแรงภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยให้แรงที่ปลายของคาน และกำหนดการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นตัวควบคุมในการทดสอบ ซึ่งตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ตามสมการ

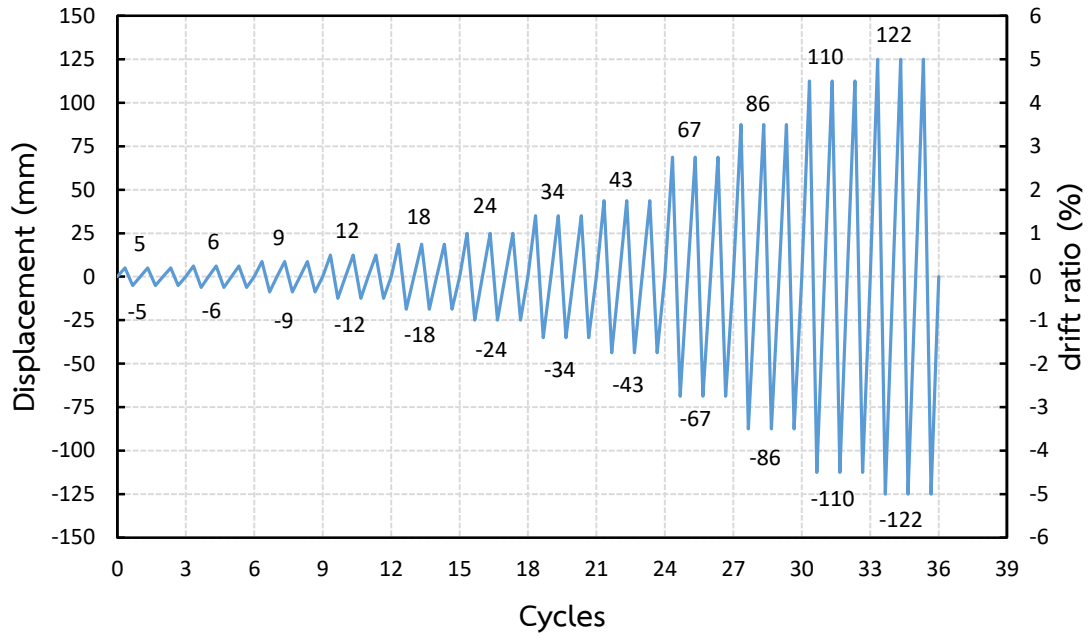
$$\Delta = \theta \times (L_b + \frac{d_c}{2})$$

โดยจะบังคับให้ปลายของคานเคลื่อนที่ขึ้น - ลงทั้งหมด 3 รอบ ในแต่ละการตำแหน่งที่ควบคุม โดยใช้ตามมาตรฐาน ACI T1.1-01 (ACI 2001) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.3 ซึ่งแต่ละตำแหน่งการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.3 ตารางการให้แรงสลับทิศของตัวอย่าง

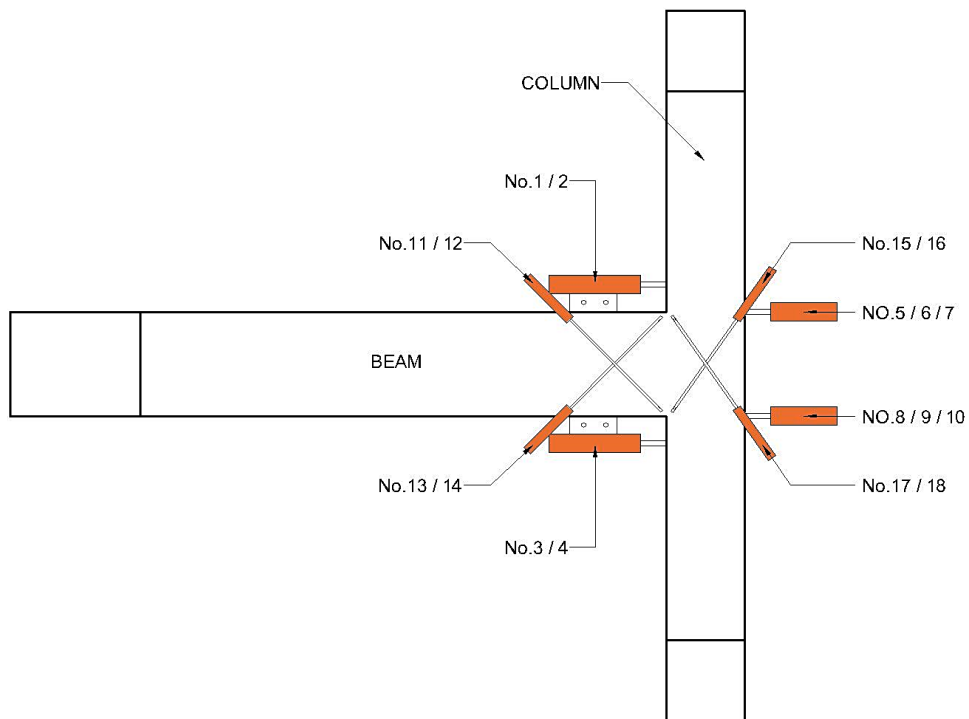
Drift Ratio (%)	Drift ( $\theta$ , rad)	Cycle	$\Delta$ (mm)	
			กลุ่มตัวอย่างที่ 1	กลุ่มตัวอย่างที่ 2
0.2	0.002	3	5	5
0.25	0.0025	3	6	6
0.35	0.0035	3	9	9
0.5	0.005	3	12	12
0.75	0.0075	3	19	18
1	0.01	3	25	24
1.4	0.014	3	35	34
1.75	0.0175	3	44	43
2.75	0.0275	3	69	67
3.5	0.035	3	87	86
4.5	0.045	3	112	110
5	0.05	3	125	122





รูปที่ 3.8 รูปแบบการให้แรงตัวอย่างทดสอบ

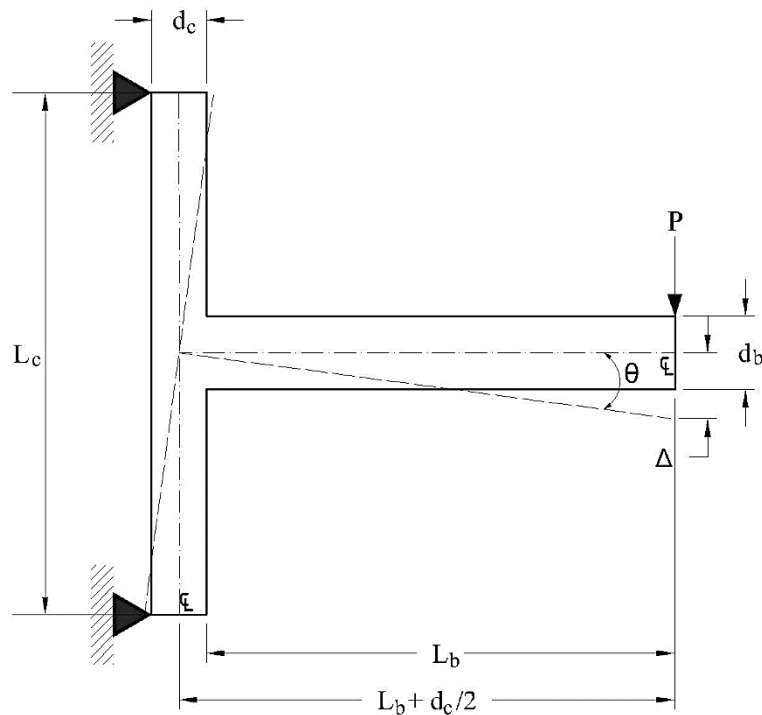
### 3.7 การคำนวณหาค่ามุมหมุนของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการติดตั้ง LVDTs

## 1. การวัดมุมหมุนทั้งหมด (Drift Ratio)

Drift Ratio คือ  $\theta$  ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดของมุมคอร์ตของเสา และมุมคอร์ตของคาน จากตำแหน่งเริ่มต้นเทียบกับตัวอย่างที่เปลี่ยนรูปเนื่องจากมีแรงมากระทำ ตำแหน่งเริ่มต้น คือ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงมากระทำนอกจากน้ำหนักของตัวมันเอง โดยที่คอร์ต คือ เส้นตรงที่ลากระหว่างจุดกึ่งกลางของข้อต่อไปยังตำแหน่งที่แรงมากระทำ การให้แรงกับตัวอย่างเป็นการให้แรงกระทำในแนวตั้ง ทั้งขึ้นและลงตั้งฉากกับคอร์ตของคานในตำแหน่งปลายคาน ทำให้ตัวอย่างเปลี่ยนรูปไปตามแรงที่กระทำ (P) และมีระยะการเสียรูป ( $\Delta$ ) ในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาการโยกตัวทั้งหมดได้ดังสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.10 การวัดมุมหมุนทั้งหมด

$$\text{Drift Ratio } (\theta_{\text{total}}) = \frac{\Delta}{L_b + \frac{d_c}{2}} \quad (3.1)$$

$$\% \text{ Drift Ratio } (\theta_{\text{total}}) = \left( \frac{\Delta}{L_b + \frac{d_c}{2}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

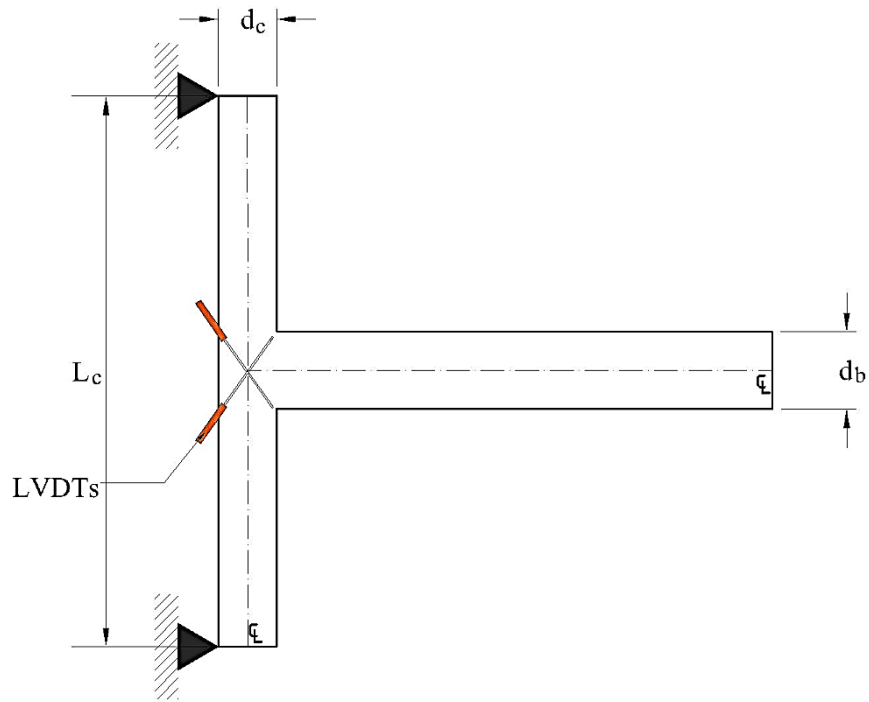
โดยที่  $\Delta$  คือ ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของคานที่อ่านได้จากเครื่อง UTM

$L_b$  คือ ความยาวของคานจากตำแหน่งที่ใส่แรงถึงด้านหน้าของข้อต่อ

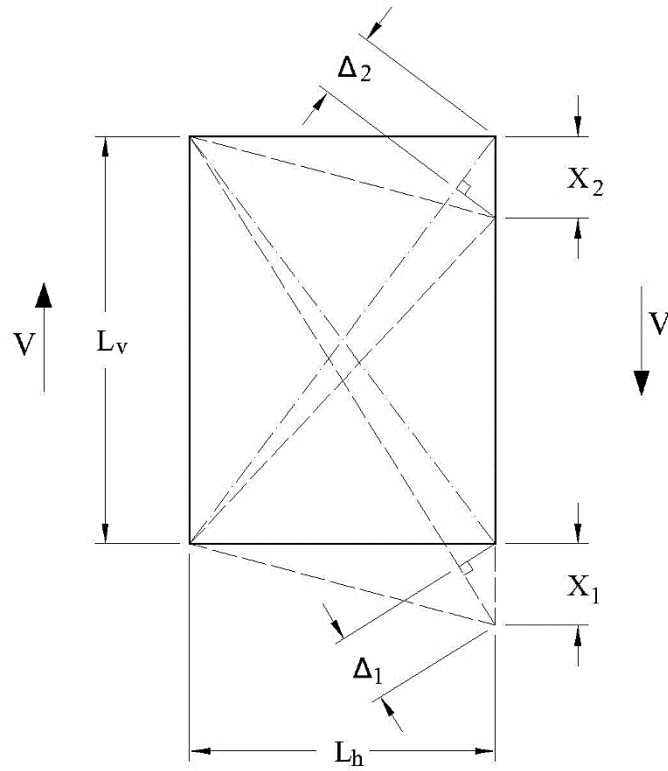
$d_c$  คือ ความกว้างของเสา

## 2. การวัดมุมหมุนของข้อต่อ ( $\gamma_{pz}$ )

การวัดมุมหมุนของข้อต่อสามารถวัดได้จาก LVDTs ที่ถูกติดตั้งในรูปแบบไขว้กันบริเวณข้อต่อ ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นการวัดแบบการเปลี่ยนรูปเฉือน โดยเมื่อมีแรงมากกระทำที่ปลายคานทำให้เกิดแรงเฉือนตลอดความยาวคาน ซึ่งแรงควมคู่นี้ทำให้เกิดการหมุนจึงส่งผลให้ LVDTs เกิดการยืดและหดตัวลงดังรูปที่ 3.12 โดยข้อมูลที่ได้มานั้นสามารถคำนวณหาค่ามุมหมุนของข้อต่อ( $\gamma_{pz}$ )ได้ดังสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.11 การติดตั้ง LVDTs วัดมุมหมุนของข้อต่อ



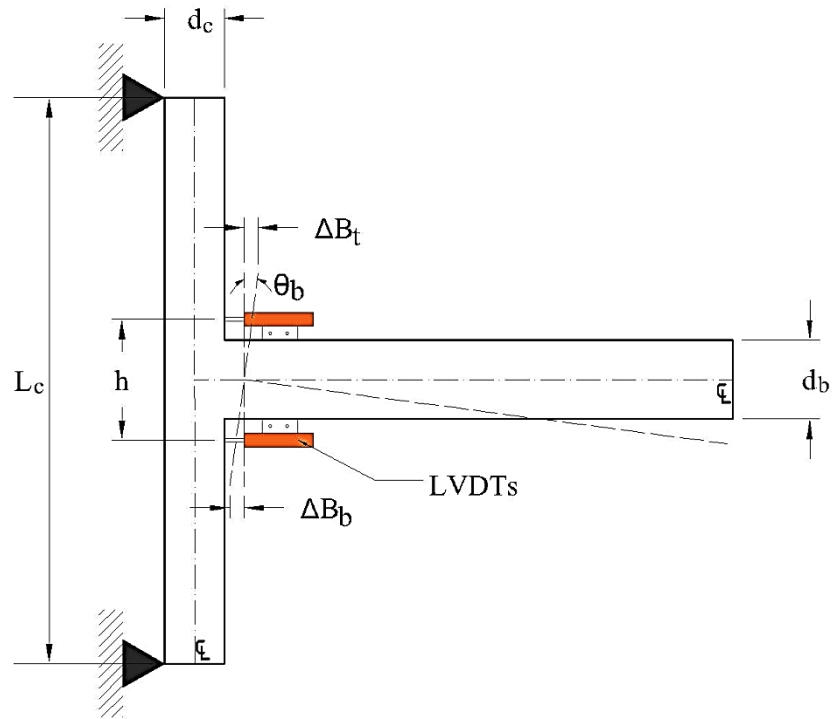
รูปที่ 3.12 การวัดการเปลี่ยนรูปเฉือน

$$\gamma_{pz} = \frac{\sqrt{(L_h)^2 + (L_v)^2}}{2(L_h)(L_v)} \times (\Delta_2 - \Delta_1) \quad (3.3)$$

- โดยที่  $L_h$  คือ ระยะห่างในแนวราบระหว่าง LVDTs ทั้ง 2 ตัว  
 $L_v$  คือ ระยะห่างในแนวตั้งระหว่าง LVDTs ทั้ง 2 ตัว  
 $\Delta_1$  และ  $\Delta_2$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของ LVDTs ในแต่ละตัว  
 $V$  คือ แรงเฉือนในคาน

### 3. การวัดมุมหมุนของคาน (Beam Rotation, $\theta_b$ )

การวัดมุมหมุนของคาน (Beam Rotation) สามารถวัดได้จาก LVDTs ที่ถูกติดตั้งไว้ด้านบน และด้านล่างของคานบริเวณใกล้ข้อต่อ ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งข้อมูลที่ได้มานั้นสามารถประยุกต์ใช้กับทฤษฎีพริทากอรัสเพื่อคำนวณหาค่ามุมหมุนของคาน ดังสมการที่ 3.4



รูปที่ 3.13 การวัดมุมหมุนของคาน

$$\theta_b = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta B_b - \Delta B_t}{h}\right) \quad (3.4)$$

โดยที่  $\Delta B_t$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของ LVDTs ด้านบน

$\Delta B_b$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของ LVDTs ด้านล่าง

$h$  คือ ระยะห่างระหว่าง LVDTs ด้านบน และ LVDTs ด้านล่าง

#### 4. การวัดมุมหมุนของเสา ( $\theta_c$ )

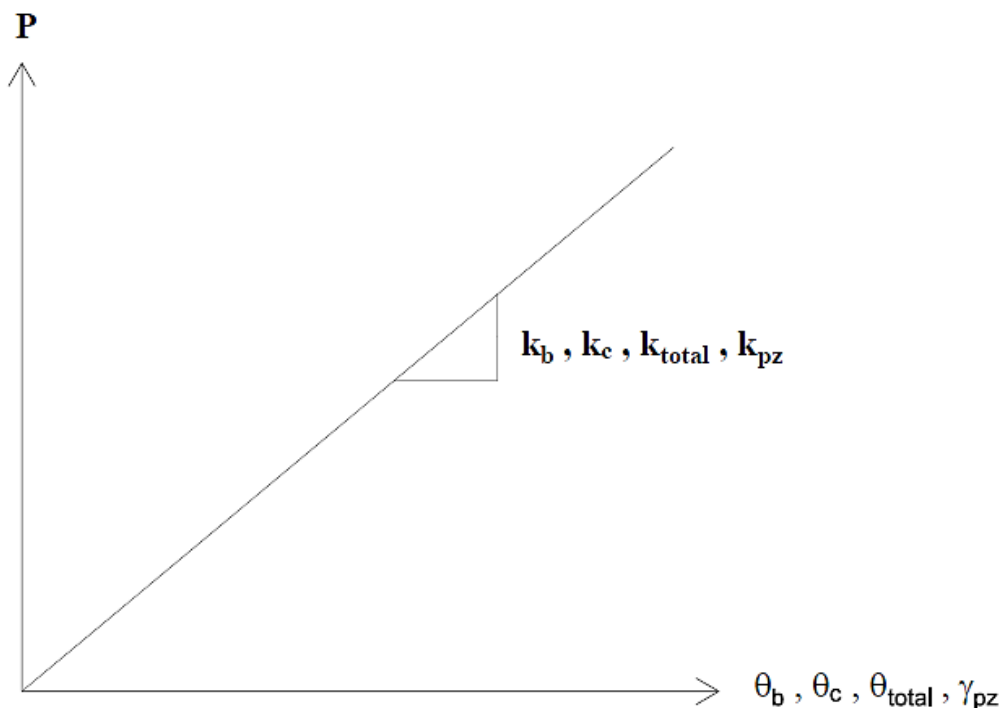
การวัดมุมหมุนของเสานั้นสามารถนำข้อมูลของมุมหมุนทั้งหมด มุมหมุนของข้อต่อและมุมหมุนของคานมาใช้ในการคำนวณหาค่ามุมหมุนของเสาได้ โดยสามารถคำนวณหาค่ามุมหมุนของเสาได้จากสมการที่ 3.6

$$\theta_{\text{total}} = \gamma_{pz} + \theta_b + \theta_c \quad (3.5)$$

$$\theta_c = \theta_{\text{total}} - \gamma_{pz} - \theta_b \quad (3.6)$$

#### 5. การคำนวณหามุมหมุนพลาสติก (Plastic Rotation)

การคำนวณหามุมหมุนพลาสติก (Plastic Rotation) หาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลแรงในแนวแกน  $y$  กับ มุมหมุนต่างๆในช่วงสภาวะยืดหยุ่นในแนวแกน  $x$  ดังรูปที่ 3.14 จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมุมหมุนต่างๆสามารถคำนวณได้ตามหัวข้อ1-4 สมการที่ใช้คำนวณหามุมหมุนพลาสติกแสดงในสมการที่ 3.7-3.10



รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลแรงกับมุมหมุนต่างๆในสภาวะยืดหยุ่น

$$\theta_{total}^P = \theta_{total} - \left(\frac{P}{k_{total}}\right) \quad (3.7)$$

$$\theta_c^P = \theta_c - \left(\frac{P}{k_c}\right) \quad (3.8)$$

$$\theta_b^P = \theta_b - \left(\frac{P}{k_b}\right) \quad (3.9)$$

$$\gamma_{pz}^P = \gamma_{pz} - \left(\frac{P}{k_\gamma}\right) \quad (3.10)$$

โดยที่	$\theta_{total}$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่าง
	$\theta_b$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของคาน
	$\theta_c$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของเสา
	$\gamma_{pz}$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของข้อต่อ
	$\theta_{total}^P$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของตัวอย่างในสภาวะไม่ยืดหยุ่น
	$\theta_b^P$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของคานในสภาวะไม่ยืดหยุ่น
	$\theta_c^P$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของเสาในสภาวะไม่ยืดหยุ่น
	$\gamma_{pz}^P$	คือ มุมหมุนทั้งหมดของข้อต่อในสภาวะไม่ยืดหยุ่น
	$k_{total}$	คือ ความชันในช่วงเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P- $\theta_{total}$
	$k_b$	คือ ความชันในช่วงเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P- $\theta_b$
	$k_c$	คือ ความชันในช่วงเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P- $\theta_c$
	$k_{pz}$	คือ ความชันในช่วงเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P- $\gamma_{pz}$

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

#### 4.1 ผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ S1

##### 4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนตัว

ตัวอย่างทดสอบ S1 คานเหล็กหน้าตัด H ขนาด 400x200x66 kg/m ถูกเชื่อมด้วยรอยเชื่อมแบบพอกขนาด 6 มิลลิเมตรรอบหน้าตัดติดกับแผ่นเหล็กขนาด 250x550 มม. และใช้ bolt จำนวน 12 ตัวในการยึดคานและเสา กระบวนการทดสอบเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างเซตตำแหน่งการติดอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน จากนั้นยกตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ (UTM) อย่างระมัดระวังและยึดตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการติดอุปกรณ์วัดอย่างระมัดระวังเพื่อความถูกต้องและความปลอดภัยของอุปกรณ์โดยตัวอย่าง S1 นั้นทำการทดสอบได้ปกติไม่มีการขัดข้องใดๆเกิดขึ้นโดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างนั้นมีการครากที่บนบริเวณคานและบริเวณแผ่นเหล็กเป็นหลัก จากนั้นที่บริเวณรอบเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กและคานเกิดการฉีกขาดทั้งบริเวณปีกคานด้านบนและด้านล่างรอยขาดนั้นเป็นแนวยาวตลอดปีกคาน โดยรอยฉีกของรอยเชื่อมนั้นเริ่มเกิดขึ้นที่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Displacement) เท่ากับ 101.08 มิลลิเมตร รอยฉีกขาดเพิ่มขึ้นโดยรอยขาดของรอยเชื่อมนั้นได้ขาดเข้าไปในแผ่นเอวของคานทั้งบนและล่างของปีกคาน ความลึกของรอยขาดนั้นความยาวประมาณ 4 ซม. โดยตัวอย่างทดสอบ S1 นี้ได้ทำการหยุดทดสอบที่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Displacement) เท่ากับ 101.08 มิลลิเมตร โดยมุมการเคลื่อนที่  $\theta=0.05$  เรเดียน เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีขนาดคาน 400 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดคานที่มีความใหญ่พอสมควร รอยขาดที่เปิดขึ้นนั้นขากทั้งปีกคานด้านบนและล่าง รวมถึงที่บริเวณเอวคานบางส่วน เพื่อความปลอดภัยในการนำตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบและผู้ทำการทดสอบรวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ

##### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างทดสอบ S1

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานและระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของตัวอย่าง S1 จากผลการทดสอบที่บริเวณคานเริ่มเกิดการครากสามารถรับแรงกระทำที่ปลายคานได้ 36.64 กิโลนิวตัน และช่วงที่ทำให้ข้อต่อเริ่มเกิดรอยฉีกขาดที่รอยเชื่อมที่บริเวณปีกคานด้านล่างสามารถ



รับแรงกระทำที่ปลายคานได้ 45.38 กิโลนิวตัน โดยการทดสอบตัวอย่าง S1 นี้ได้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดได้ 30.34 มิลลิเมตร แรงที่กระทำที่ปลายคานได้ 33.90 กิโลนิวตัน ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ขึ้น และได้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดได้ 101.146 มิลลิเมตร แรงที่กระทำที่ปลายคานได้ 49.70 กิโลนิวตัน ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ลง

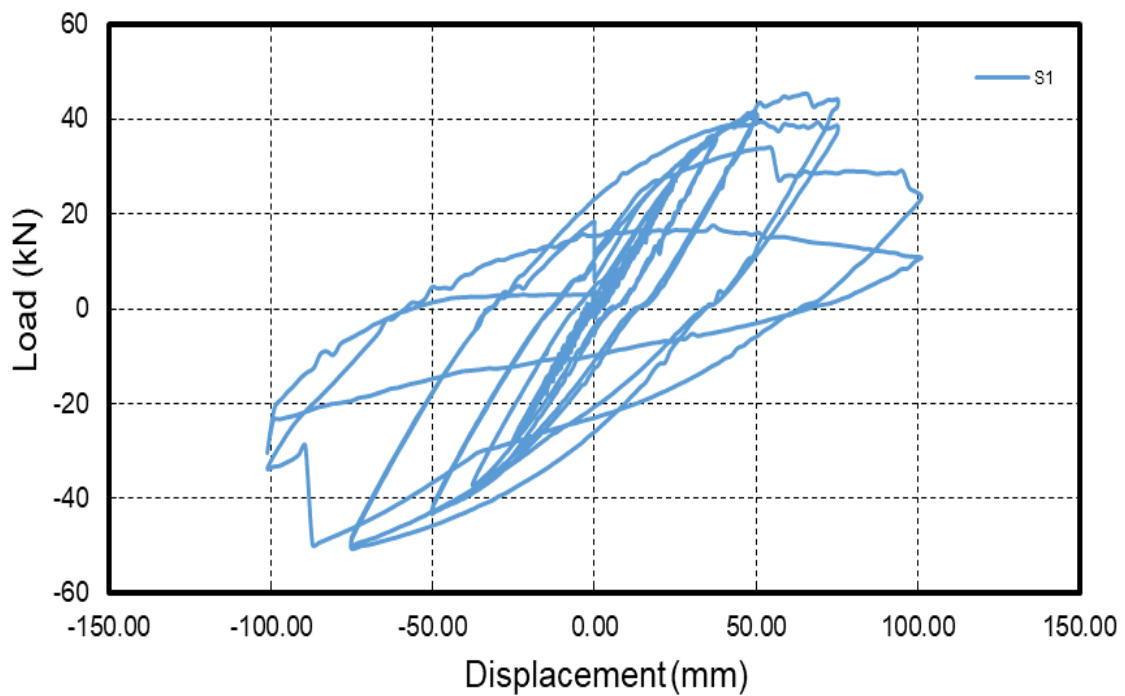
รูปที่ 4.2 ถึง รูปที่ 4.5 เป็นกราฟการคำนวณมูมหมุนในช่วงพลาสติกของชิ้นงานโดยในข้อต่อของชิ้นงานตัวอย่างนั้นมูมหมุนพลาสติกทั้งหมดเกิดจากการหมุนที่ข้อต่อ 3 ส่วน คือมูมหมุนพลาสติกของ Panel Zone มูมหมุนพลาสติกของคาน และมูมหมุนพลาสติกของคาน การคำนวณค่ามูมหมุนพลาสติกแต่ละส่วนนั้นคำนวณจากสูตร 3.1-3.10 ผลการทดสอบตัวอย่าง S1 นั้น มูมหมุนพลาสติกทั้งหมดนั้นมีค่าอยู่ที่ 0.035857 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 113.46 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.030700 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -126.27 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ลง ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟของมูมการหมุนพลาสติกนั้นบ่งบอกถึงความสามารถของข้อต่อว่าข้อต่อมีความสามารถในการสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวได้มากน้อยเพียงใดและได้คำนวณแยกออกมาว่าในข้อต่อนั้นแต่ละส่วนเกิดการหมุนมากน้อยเพียงใด

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์หน้าเสากับมูมหมุนพลาสติกที่คาน (รูปที่ 4.4) พบว่าที่มีค่ามูมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.015000 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น 106.65 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.01640 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -118.69 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ลง

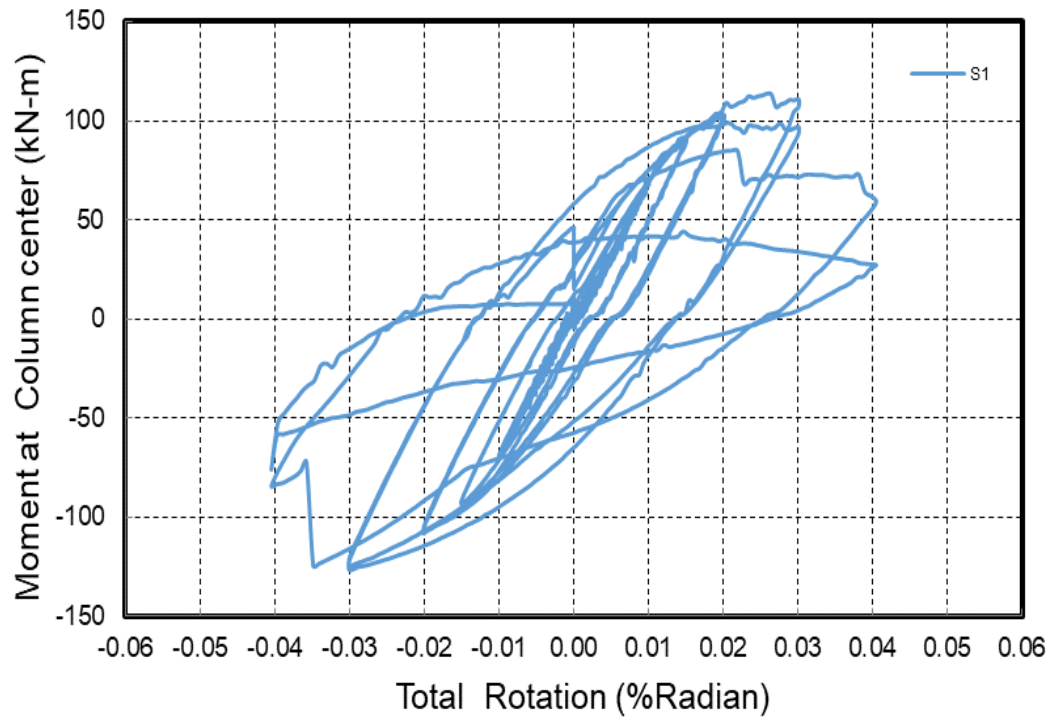
การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กึ่งกลางเสากับมูมหมุนพลาสติกที่ Panel Zone (รูปที่ 4.5) พบว่าที่มีค่ามูมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.015211 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 113.46 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.01868 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น -126.27 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ลง

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์หน้าเสากับมูมหมุนพลาสติกที่เสา (รูปที่ 4.6) พบว่าที่มีค่ามูมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.0012354 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น 113.46 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.00571 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -126.27 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หวัคเคลื่อนที่ลง

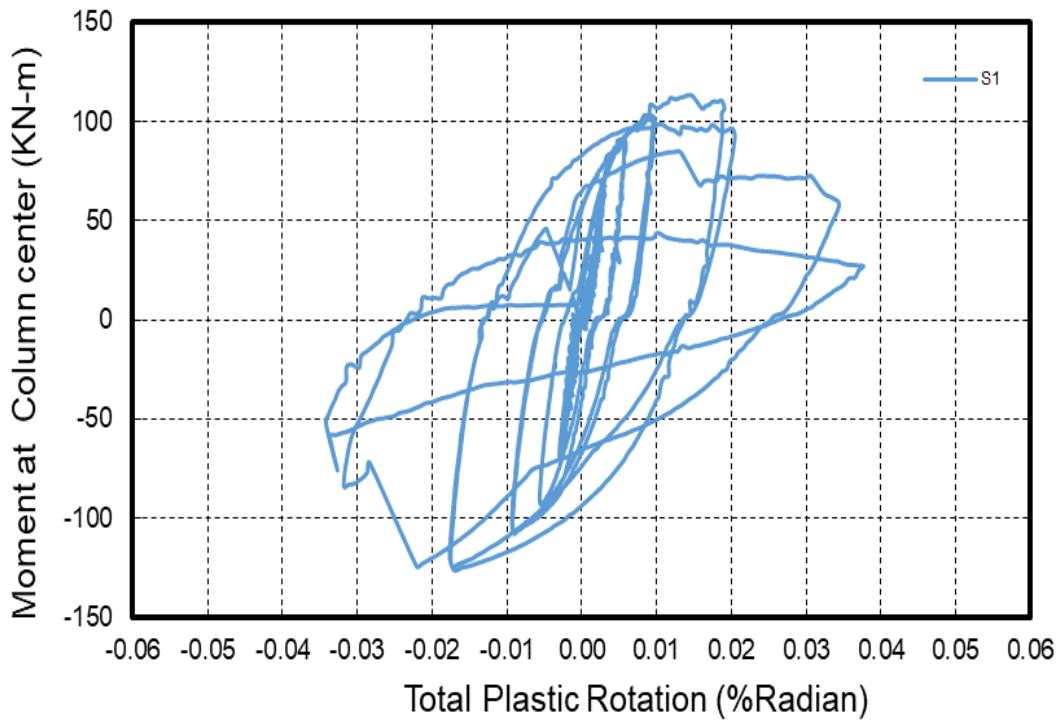
จากค่ามอดุลในช่องพลาสติกของคาน เสา Panel Zone จะเห็นว่าที่บริเวณมอดุลในช่องพลาสติกของ Panel Zone มีค่ามากที่สุด โดยค่ามอดุลในช่องพลาสติกของคาน และเสานั้นมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นที่บริเวณ Panel Zone นั้นจะเกิดการสลายพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่บริเวณคาน เสา นั้น เกิดการสลายพลังงานได้มากกว่า 20-40% ดังนั้นการเสียหายของข้อต่อนี้จะเสียหายมากที่สุดที่บริเวณ Panel Zone



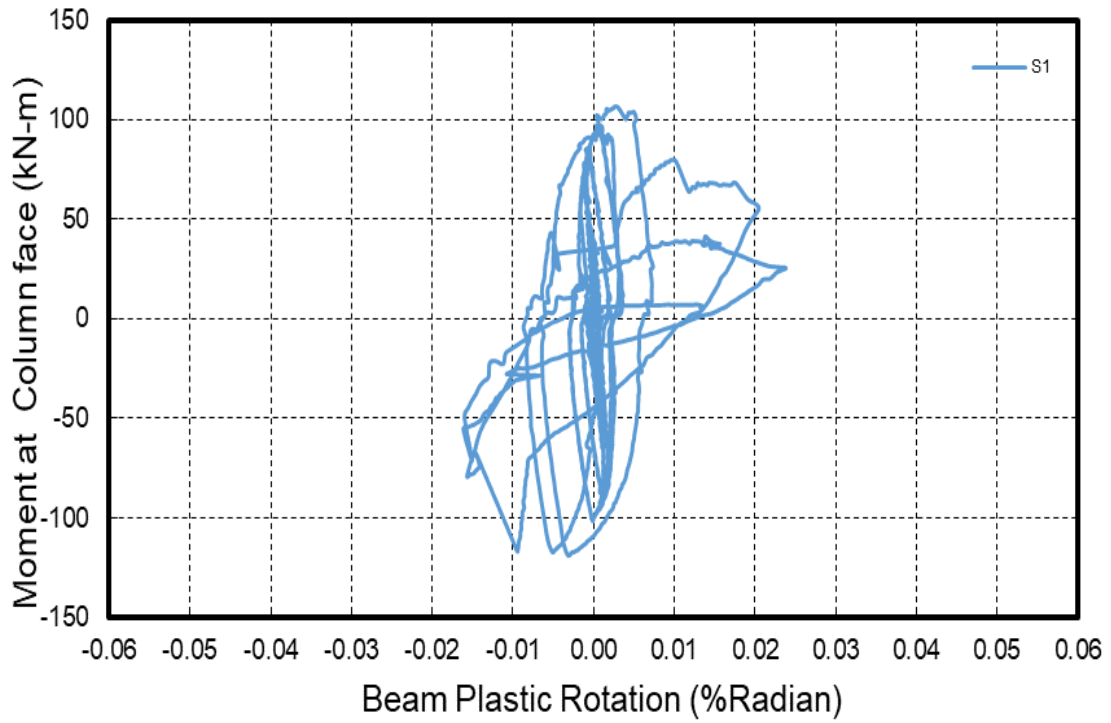
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (S1)



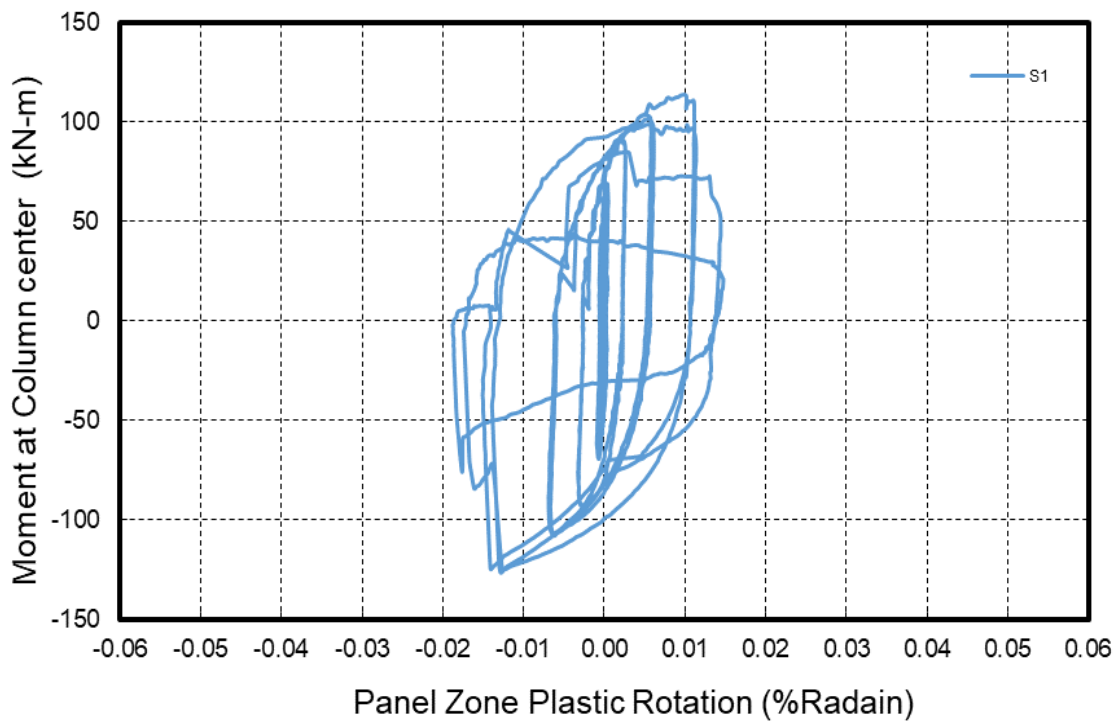
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Total Rotation (S1)



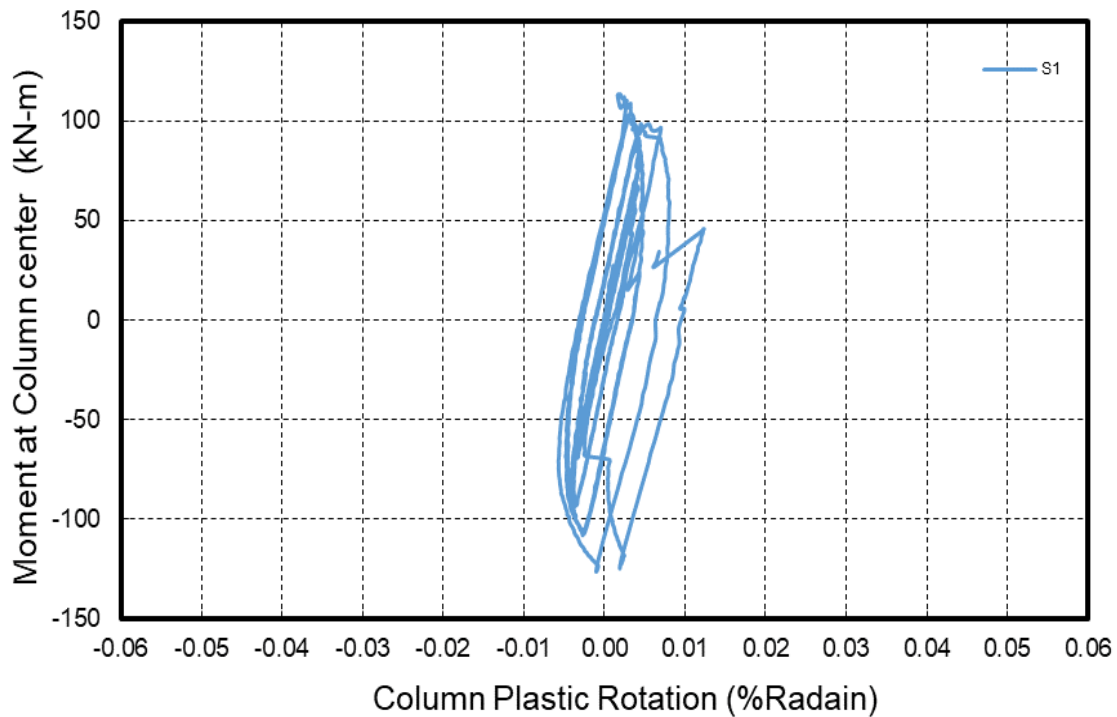
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Total Plastic Rotation (S1)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam Plastic Rotation (S1)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Panel Zone Plastic Rotation (S1)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Column Plastic Rotation (S1)

#### 4.2 ผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ S2

ตัวอย่างทดสอบ S2 คานเหล็กหน้าตัด H ขนาด 500x200x79.5 kg/m ถูกเชื่อมด้วยรอยเชื่อมแบบพอกขนาด 6 มิลลิเมตรรอบหน้าตัดติดกับแผ่นเหล็กขนาด 250x650 ทน 16 มม. และใช้ bolt จำนวน 14 ตัวในการยึดคานและเสา ตัวอย่าง S2 มีพฤติกรรมเหมือนตัวอย่าง S1 กล่าวคือความเสียหายเริ่มจากการฉีกขาดของรอยเชื่อม เริ่มเกิดขึ้นเมื่อระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Displacement) เท่ากับ 101.08 มิลลิเมตร พบรอยฉีกขาดเพิ่มขึ้นโดยรอยขาดของรอยเชื่อมนั้นได้ขาดขึ้นเข้าไปในแผ่นเอวของคานทั้งบนและล่างของปีกคาน ความลึกของรอยขาดนั้นความยาวประมาณ 3 ซม. โดยตัวอย่างทดสอบ S2 นี้ได้ทำการหยุดทดสอบที่ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Displacement) เท่ากับ 101.08 มิลลิเมตร โดยมุมการเคลื่อนที่  $\theta=0.05$  เรเดียน

#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างทดสอบ S2

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำที่ปลายคานและระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของตัวอย่าง S2 จากผลการทดสอบที่บริเวณปีกคานเริ่มเกิดการครากสามารถรับแรงกระทำที่ปลายคานได้ 40.30 กิโลนิวตัน และช่วงที่ทำให้ข้อต่อเริ่มเกิดรอบฉีกขาดที่รอยเชื่อมที่บริเวณปีกคานด้านล่างสามารถรับแรงกระทำที่ปลายคานได้ 67.20 กิโลนิวตัน โดยการทดสอบตัวอย่าง S2 นี้ได้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดได้ 101.462 มิลลิเมตร แรงที่กระทำที่ปลายคานได้ 67.20 กิโลนิวตัน ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และได้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดได้ 101.475 มิลลิเมตร แรงที่กระทำที่ปลายคานได้ 74.80 กิโลนิวตัน ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

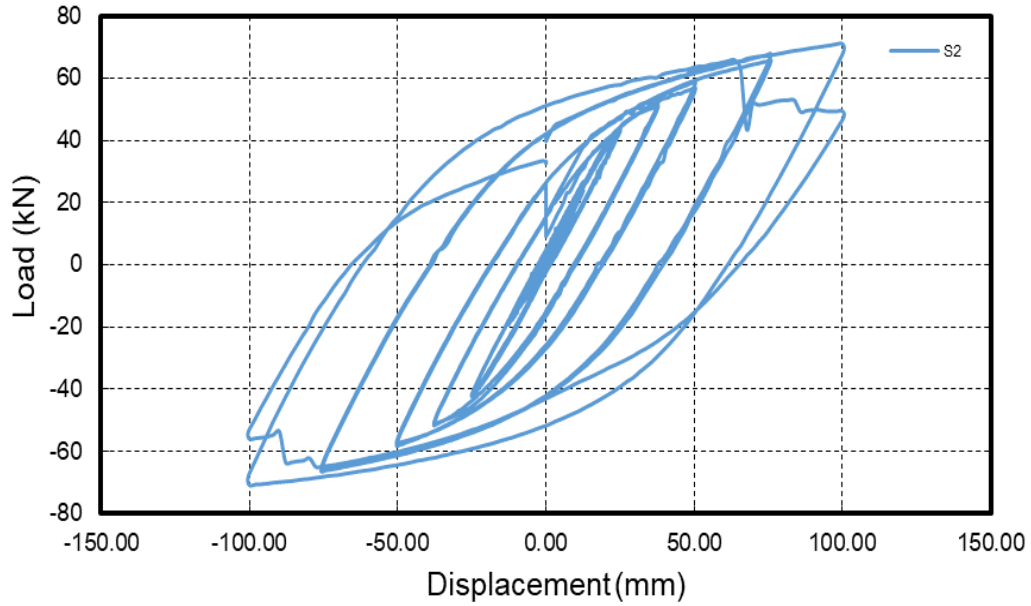
รูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.12 เป็นกราฟการคำนวณมุมหมุนในช่วงพลาสติกของชิ้นงานโดยในข้อต่อของชิ้นงานตัวอย่างนั้นมุมหมุนพลาสติกทั้งหมดเกิดจากการหมุนที่ข้อต่อ 3 ส่วน คือมุมหมุนพลาสติกของ Panel Zone มุมหมุนพลาสติกของคาน และมุมหมุนพลาสติกของคาน ผลการทดสอบตัวอย่าง S2 นั้นมุมหมุนพลาสติกทั้งหมดนั้นมีค่าอยู่ที่ 0.027841 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 117.74 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.027030 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -117.25 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์หน้าเสากับมุมหมุนพลาสติกที่คาน (รูปที่ 4.10) พบว่าที่มีค่ามุมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.014625 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น 167.08 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.018188 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -166.61 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

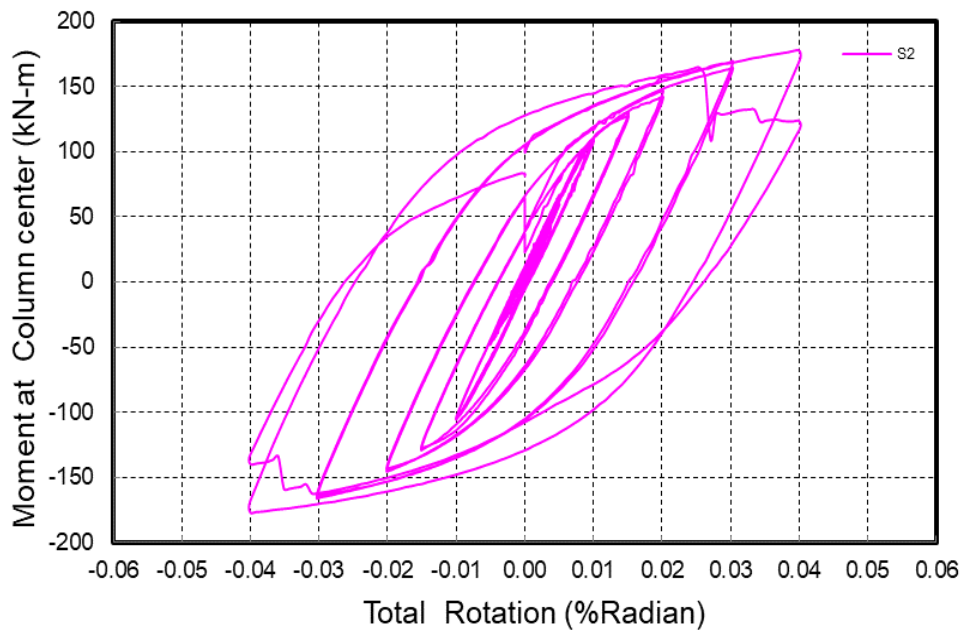
การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กึ่งกลางเสากับมุมหมุนพลาสติกที่ Panel Zone (รูปที่ 4.11) พบว่าที่มีค่ามุมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.016844 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น 177.74 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ -0.015687 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์กึ่งกลางเสาที่เกิดขึ้น -177.25 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง

การคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์หน้าเสากับมุมหมุนพลาสติกที่เสา (รูปที่ 4.12) พบว่าที่มีค่ามุมหมุนพลาสติกสูงสุด 0.000489 เพอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น 177.74 กิโล

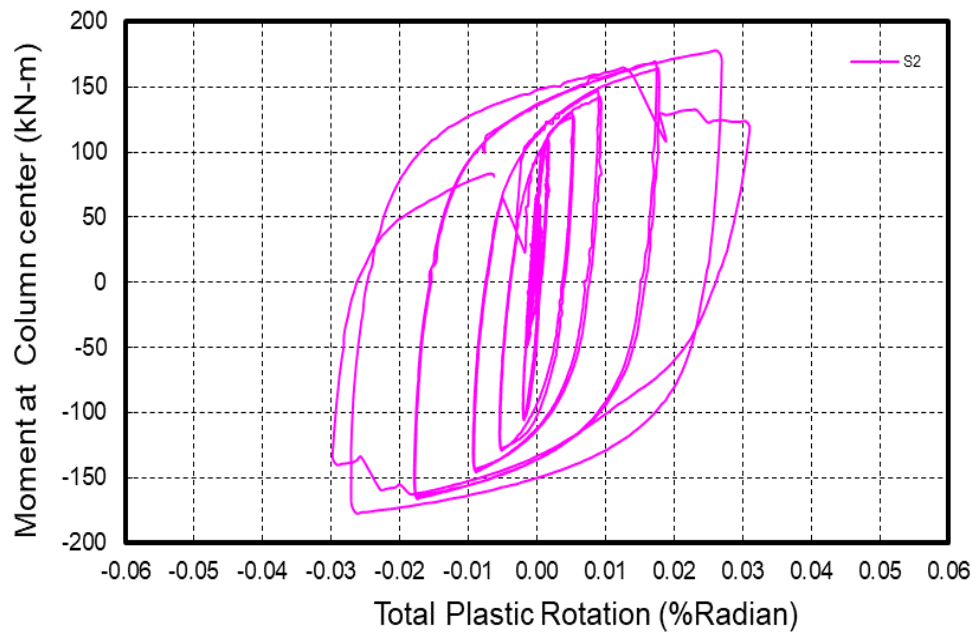
นิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ขึ้น และ  $-0.000588$  เปอร์เซ็นต์เรเดียน โมเมนต์หน้าเสาที่เกิดขึ้น -  
177.25 กิโลนิวตัน-เมตร ในด้านที่หัวกดเคลื่อนที่ลง



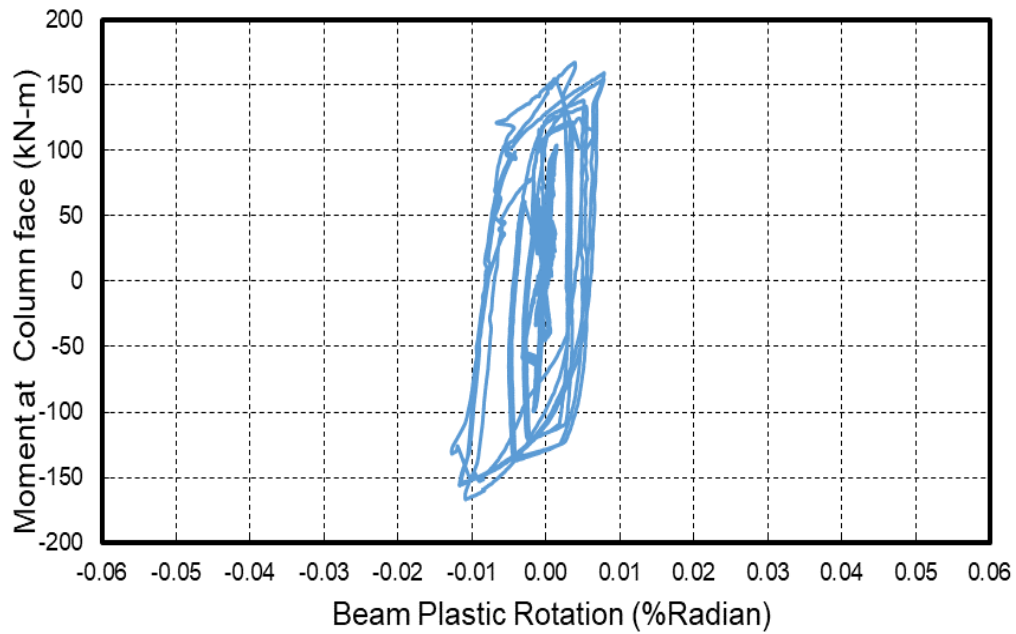
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (S2)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Total Rotation (S2)

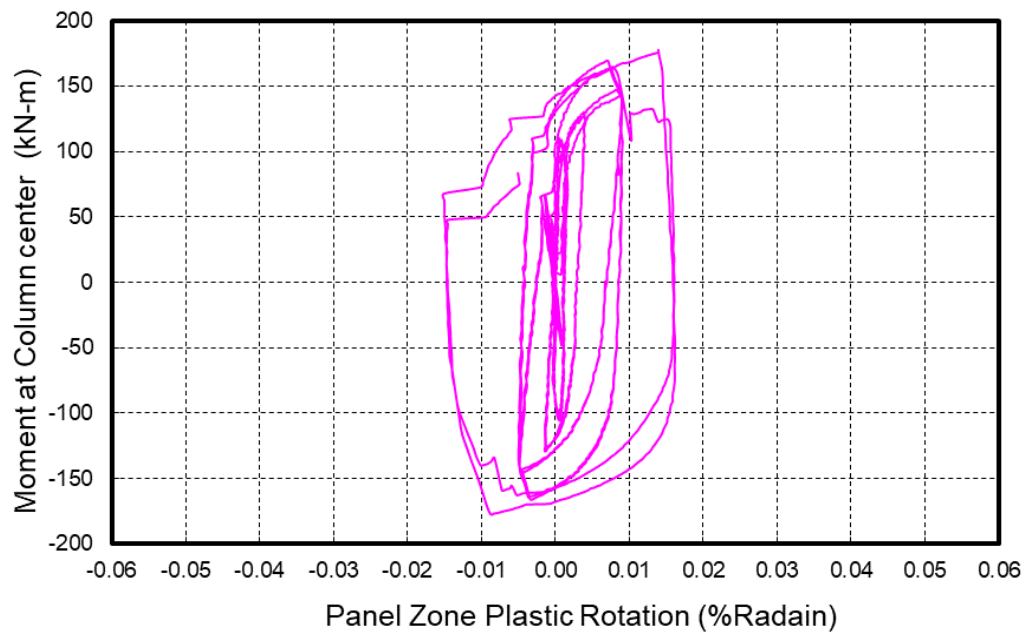


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Total Plastic Rotation (S2)

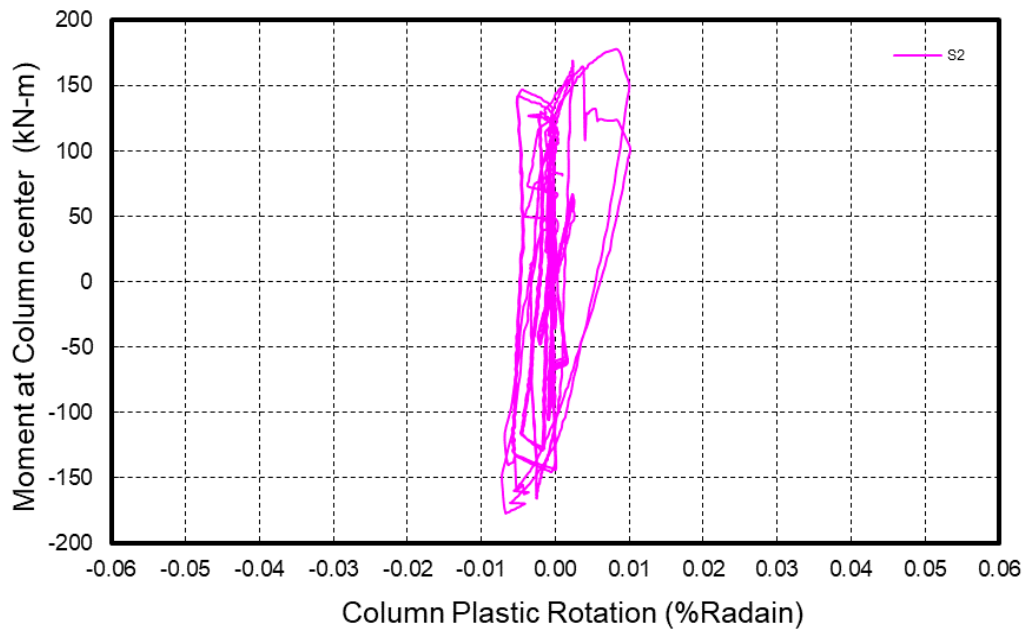


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at Column face กับ Beam Plastic Rotation (S2)





รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Panel Zone Plastic Rotation (S2)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment at center Column กับ Column Plastic Rotation (S2)

## บทที่ 5

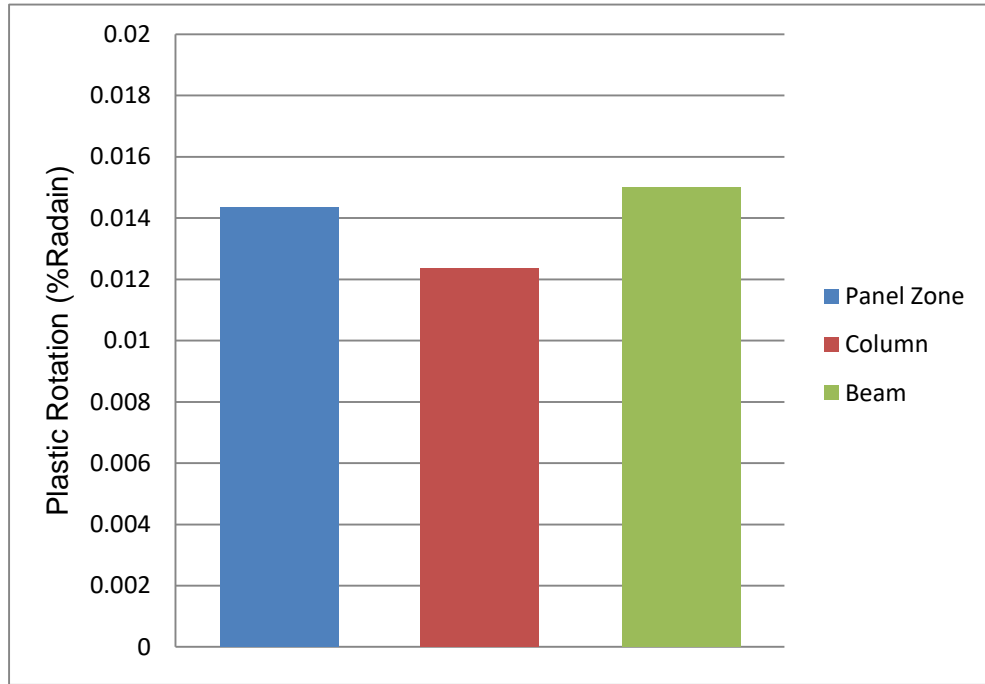
### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 ตัวอย่าง S1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง S1

ค่าที่ต้องการวัด	S1	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงสูงสุดที่ห้กวด UTM (kN)	45.38	49.70
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	101.129	101.146
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	113.46	126.27
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	266.63	296.72
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	266.63	296.71
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	36.64	37.30
มุมหมุนพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.033585	0.030700
มุมหมุนพลาสติกของเสา (%radian)	0.012354	0.00571
มุมหมุนพลาสติกของคาน (%radian)	0.015000	0.01640
มุมหมุนพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.015221	0.01868

รูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นค่าการหมุนในช่วงพลาสติกโดยรวมของแต่ละส่วนจะเห็นได้ว่าในส่วนของคาน มีค่าการหมุนในช่วงพลาสติกมากที่สุด รองลงมาคือ Pane Zone และเสา โดยจากการทดสอบนั้นสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณ Pane Zone กับคานนั้นเกิดการหมุนบิดไปพร้อมๆกันทำให้ค่าการหมุนที่ออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง S1 เกิดการสลายพลังงานมากที่สุดที่บริเวณคาน รองลงมาคือ Panel Zone และเสา

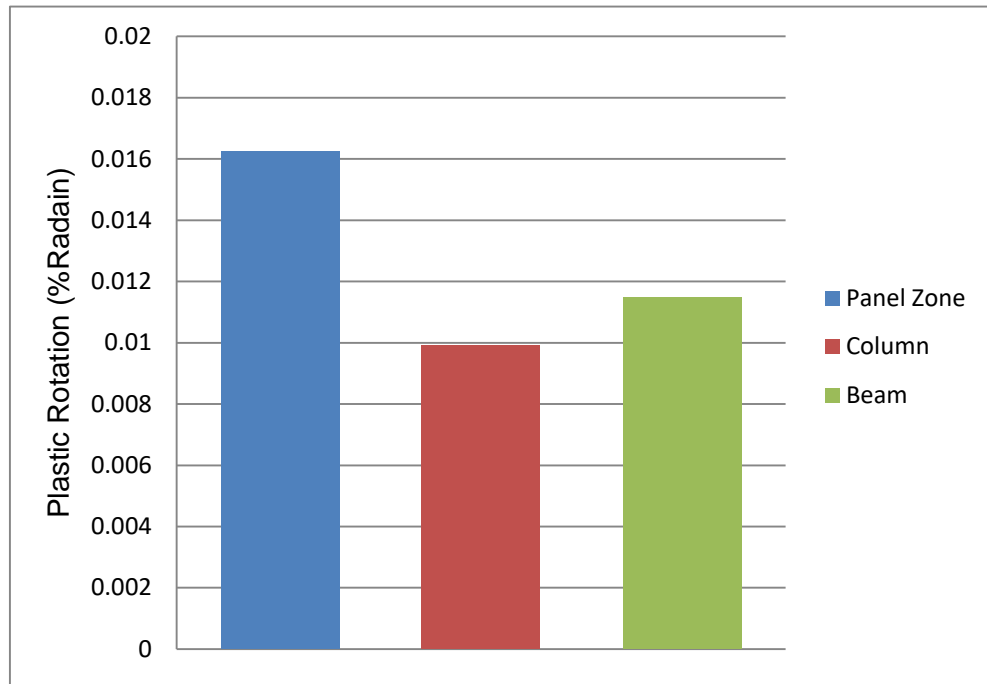


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงสัดส่วนค่าการหมุนในช่วงพลาสติกของ S1

## 5.2 ตัวอย่าง S2

ตารางที่ 5.2 แสดงผลค่าสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบตัวอย่าง S2

ค่าที่ต้องการวัด	S2	
	รอบการเคลื่อนที่ขึ้น	รอบการเคลื่อนที่ลง
แรงสูงสุดที่ห้กด UTM (kN)	67.20	74.80
ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (mm)	100.462	100.475
โมเมนต์ที่กึ่งกลางเสา (kN-m)	177.74	177.25
แรงที่ดึง (T) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	334.16	333.23
แรงที่อัด (C) กระทำส่วนปีกหน้าเสา (kN)	334.16	333.23
แรงที่ปลายคานทำให้ Panel Zone Yield (kN)	40.30	46.20
มุมหมุนพลาสติกทั้งหมด (%radian)	0.03084	0.02960
มุมหมุนพลาสติกของเสา (%radian)	0.009912	0.006892
มุมหมุนพลาสติกของคาน (%radian)	0.006375	0.011486
มุมหมุนพลาสติกของ Panel Zone (%radian)	0.01623	0.01510



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงสัดส่วนค่าการหมุนในช่วงพลาสติกของ S2

รูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นค่าการหมุนในช่วงพลาสติกโดยรวมของแต่ละส่วนจะเห็นได้ว่าในส่วนของ Pane Zone มีค่าการหมุนในช่วงพลาสติกมากที่สุด รองลงมาคือ คาน และเสา โดยจากการทดสอบนี้สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณ Pane Zone กับคานนั้นเกิดการหมุนบิดไปพร้อมๆกันทำให้ค่าการหมุนที่ออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง S2 เกิดการสลายพลังงานมากที่สุดที่บริเวณ Pane Zone รองลงมาคือ คาน และเสา

## เอกสารอ้างอิง

- 1) ACI Committee 318 (1999). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318), American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA.
- 2) ACI (2008). Building Code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331.
- 3) American Institute of Steel Construction (2003). “Extended End-Plate Moment Connections Seismic and Wind Applications”, AISC, 2nd Edition, Chicago, Illinois.
- 4) American Institute of Steel Construction (2005). “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
- 5) American Institute of Steel Construction (2010). “Seismic Provisions for Structural Steel Building”, AISC, Chicago, Illinois.
- 6) Astaneh-Asl, A. (1995). “Seismic Design of Bolted Steel Moment-Resisting Frames”, Steel Tips, Structural Steel Education Council, Moraga, CA, pp. 82.
- 7) Chayut Cheejaroen. (2004). “Effect of Bond Deterioration on Seismic of R/C Interior Beam-Column Joint without Seismic Detailing”. Thesis No. ST-04-5, Asian Institute of Technology.
- 8) Cook, R.A., Doerr, G.T., and Klingner, R.E. (1989). “ Design Guide for Steel-to-Concrete Connections”. Research Report No. 1126-4F, Univ. of Texas, Austin, Texas.
- 9) Do Tein Thinh. (2003). “Seismic Performance of Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages without Seismic Detailing”. Thesis No. ST-03-30, Asian Institute of Technology.
- 10) Ehsani, M., R., and Wight, J., K., (1985). “Exterior Reinforced Concrete Beam-to-Column Connections Subjected to Earthquake-Type Loading,” ACI Journal, July-August, pp. 492-499.
- 11) Fisher, J.M. and Kloiber, L.A., (2006). “Steel Design Guide 1- Base Plate and Anchor Rod Design”, 2<sup>nd</sup> Edition, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- 12) Gomez, I.R., Kanvinde, A.M., Smith, C.M., and Deierlein, G.G., (2009). “Shear Transfer in Exposed Column Base Plates”, Report Submitted to American Institute of Steel Construction, Chicago.

- 13) Hakuto et al., (2000). “Seismic load tests on interior and exterior beam-column joints with substandard reinforcing details”, *ACI Structural Journal* 97(1), 11–25.
- 14) MacGregor G. (1997). “Reinforced Concrete: Mechanics and Design”, 3rd Ed., Prentice Hall.
- 15) K. Maekawa, A. Pimanmas and H.Okamura, 2003. “Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete”, Spon Press.
- 16) 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.
- 17) T. Paulay, and R., Park, (1984). “Joints of Reinforced Concrete Frames Designed for Earthquake Resistance”, Research Report 84-89, Department of Civil Engineering, University of Caterbury, Christchurch.
- 18) T. Paulay and M.J.N. Priestley, (1992). “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”, USA: John-Wiley & Sons.
- 19) Tahir, M., and Hussein., Md., A. (2008), “Experimental Tests on Extended End-Plate Connections with Variable Parameters”, *Steel Structures*, Vol. 8, pp. 369-381.
- 20) 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.
- 21) กระทรวงมหาดไทย, กฎกระทรวงฉบับที่ 50 (พ.ศ. 2550) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- 22) อานนท์ วงษ์แก้ว และ คณะ (2558) “การทดสอบข้อต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กของเสาต้นริมภายใต้แรงวัลจจักร” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 STR448 หน้า 1-9