

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

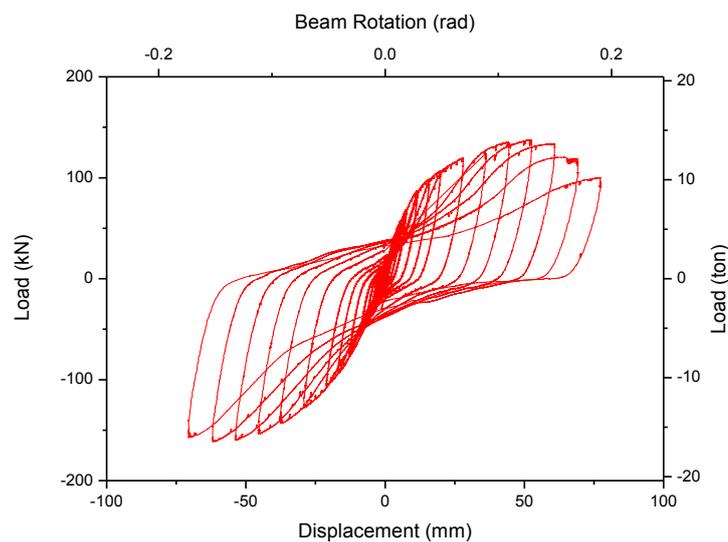
งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบตัวอย่างคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งในห้องปฏิบัติการเพื่อแสดงพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบสองตัวอย่างที่ออกแบบให้พฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือนและแรงคัดตามลำดับ ผลการทดสอบหลัก คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (Hysteretic) ค่ากำลังรับแรง ค่าสติฟเนส (Stiffness) และการสลายพลังงาน (Energy Dissipation) และได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบยึดครึ่งบางส่วนของงานวิจัยนี้กับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบยึดแน่นในงานวิจัยที่ผ่านมา

4.1 ผลการทดสอบโดยรวมและลักษณะการวิบัติ

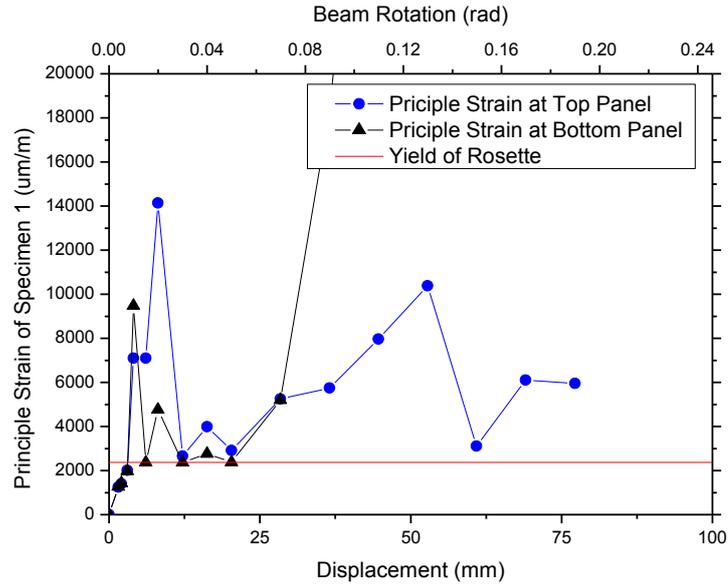
ตัวอย่างทดสอบที่ 1

การทดสอบคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนด้วยแรงสลับทิศในห้องปฏิบัติการสองตัวอย่างทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของคานเหล็กที่มีพฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือน (ตัวอย่างทดสอบที่ 1) และแบบแรงคัด (ตัวอย่างทดสอบที่ 2) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบที่ 1 แสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 การทดสอบในช่วงแรกตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถรับแรงสลับทิศได้โดยคานเหล็กไม่เกิดการครากและผนังรับแรงเฉือนไม่เกิดการแตกร้าวจนกระทั่งถึงมุมการเสียรูป (γ) มีค่าเท่ากับ 0.015 เรเดียน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปมีลักษณะการเกิด pinching ซึ่งเป็นลักษณะการเสียรูปของจุดต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Angle ที่มีการเปิด-ปิดของ Gap ระหว่างเหล็กฉากและผนัง เมื่อค่ามุมการเสียรูปในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.04 เรเดียน การครากจึงเกิดขึ้นที่บริเวณเอวของคานเหล็ก (Web) สังเกตได้จากค่าความเครียดที่สเตรเกจทั้งสามตัว (Rosette Strain Gage) ที่ติดตั้งไว้บริเวณเอวของคานเหล็กอ่านได้มากกว่าค่าความเครียดที่จุดครากของแผ่นเหล็กดังรูปที่ 4.2 การวิบัติดังกล่าวของคานเหล็กเป็นการวิบัติในรูปแบบแรงเฉือนตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยค่าแรงที่วัดได้ที่จุดครากนี้มีค่าประมาณ 98 กิโลนิวตัน ที่จุดครากของแผ่นเอวคานเหล็กนี้ (0.04 เรเดียน) ยังไม่พบรอยร้าวในผนังรับแรงเฉือน ตัวอย่างทดสอบที่ 1 เริ่มเกิดรอยร้าวขึ้นเล็กน้อยที่มุมการเสียรูปเท่ากับ 0.07 เรเดียน หรือที่ค่าแรงประมาณ 120 กิโลนิวตัน เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไปการแตกร้าวของผนังรับแรงเฉือนจะเกิดมากขึ้นตามลำดับ สลักเกลียวที่ฝังไว้กับผนังรับแรงเฉือนสำหรับยึดจุดต่อยึดครึ่งบางส่วน (รูปที่ 4.3) จะเริ่มเกิดการครากและถอนออกเล็กน้อย

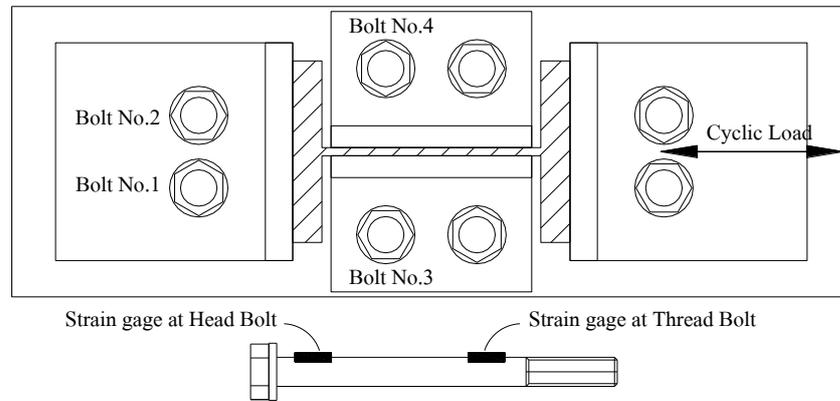
ซึ่งค่าความเครียดที่มากที่สุดของแต่ละรอบการทดสอบของสลักเกลียวแสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 โดยค่าความเครียดที่จุดครากของสลักเกลียวมีค่าเท่ากับ $4790 \mu\text{m}/\text{m}$ จากค่าความเครียดดังกล่าวพบว่าการถอนออกเริ่มขึ้นเมื่อมุมการเสียวรูปมีค่า 0.09 และ 0.13 เรเดียน ตามลำดับ สังเกตได้จากค่าความเครียดที่มีค่าสูงขึ้นอย่างทันทีทันใดแสดงว่าคอนกรีตด้านในเริ่มแตกร้าวและสลักเกลียวเริ่มมีการขยับตัวภายในเนื้อคอนกรีต การครากเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณปลายของสลักเกลียวโดยที่บริเวณหัวสลักเกลียวไม่เกิดการคราก จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะสังเกตได้ว่าสลักเกลียวหมายเลข 3 และ 4 (รูปที่ 4.3) ที่รับแรงเฉือนเป็นหลักมีค่าความเครียดไม่เกินค่าความเครียดที่จุดคราก จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียวรูปพบว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 มีกำลังรับแรงสูงสุดเมื่อมุมการเสียวรูปมีค่าเท่ากับ 0.13 เรเดียน เมื่อการทดสอบถึงมุมการเสียวรูป 0.17 เรเดียน ผนังรับแรงเฉือนเกิดการแตกร้าวในลักษณะแบบกรวย (Shear Cone) และสลักเกลียวที่ฝังไว้ที่ผนังรับแรงเฉือนเกิดการถอนออกประมาณ 1-1.5 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.8 การทดสอบจึงสิ้นสุดเนื่องจากตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติมากจนไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป รูปแบบการเสียวรูปของคานเหล็กและเหล็กฉากของจุดต่อยี่ครั้งบางส่วนขณะทดสอบ และขณะสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.9 ถึง 4.20



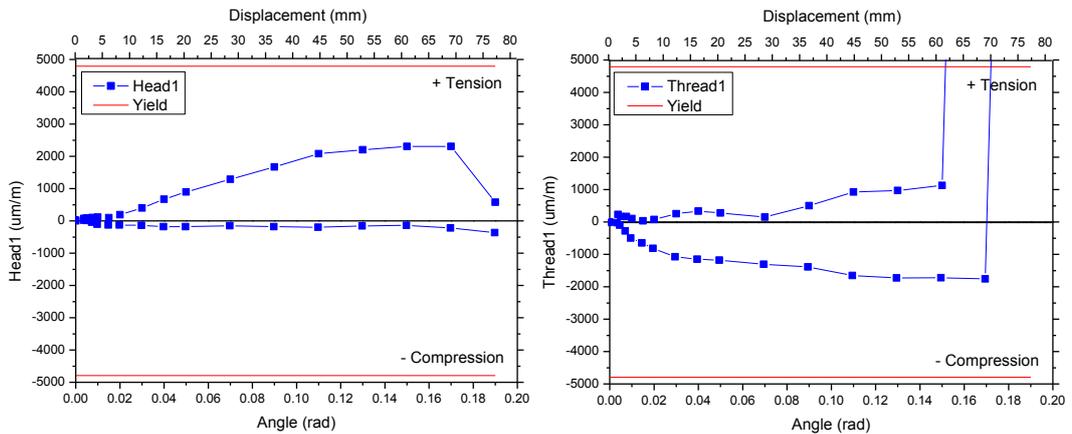
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียวรูปของตัวอย่างที่ 1



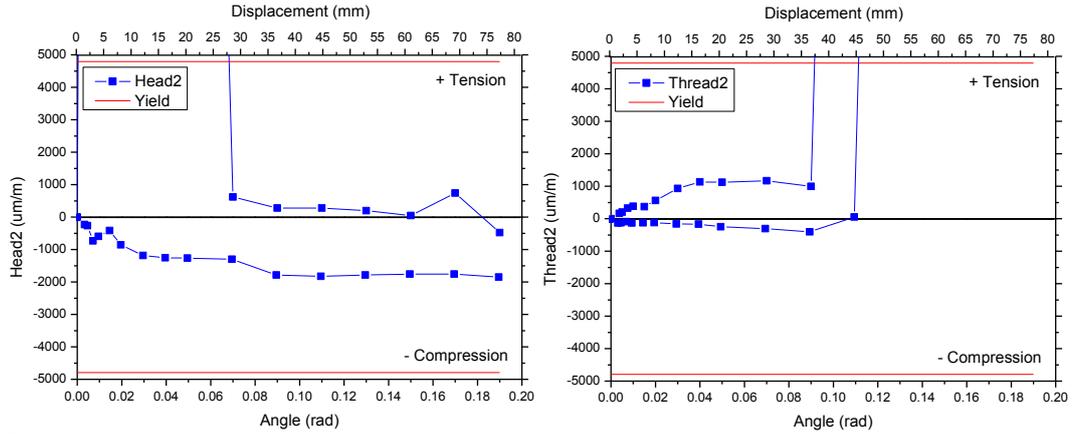
รูปที่ 4.2 ค่าความเครียดการเหือน (Rosette Strain) สูงสุดในแต่ละรอบการทดสอบที่เอวคานเหล็กของตัวอย่างทดสอบที่ 1



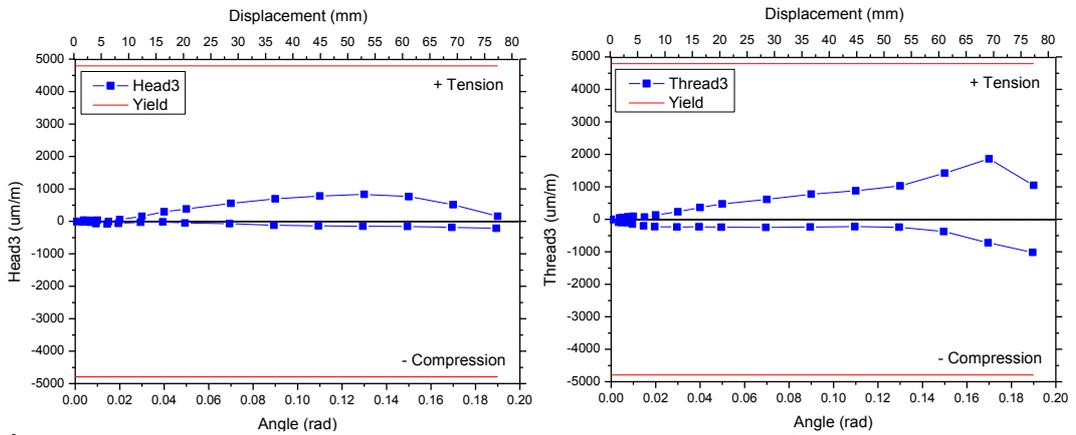
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งสลักเกลียว (Anchor Bolt) ที่ฝังกับผนังรับแรงเหือน



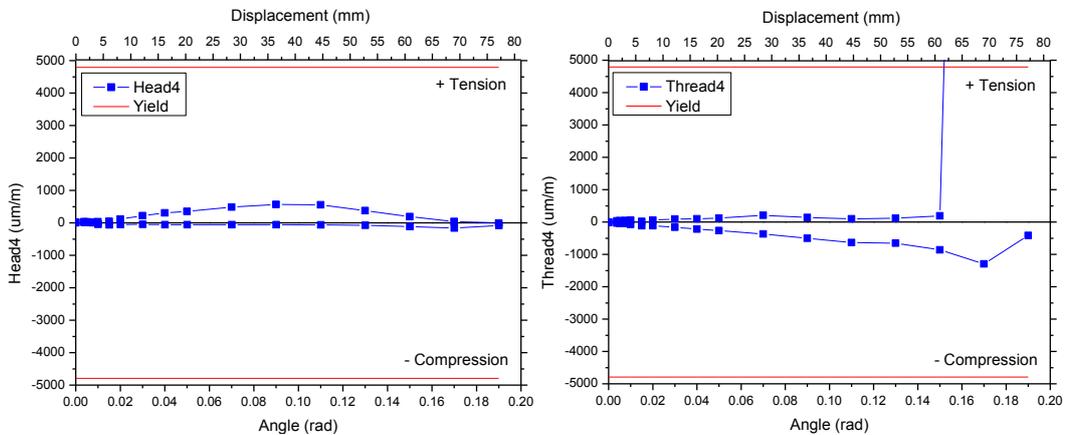
รูปที่ 4.4 ค่าความเครียดสูงสุดที่แต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเหือนจากแรงดึงถอนตัวที่ 1



รูปที่ 4.5 ค่าความเครียดสูงสุดของแต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเนื่องจากรวมแรงดึงรอบตัวที่ 2



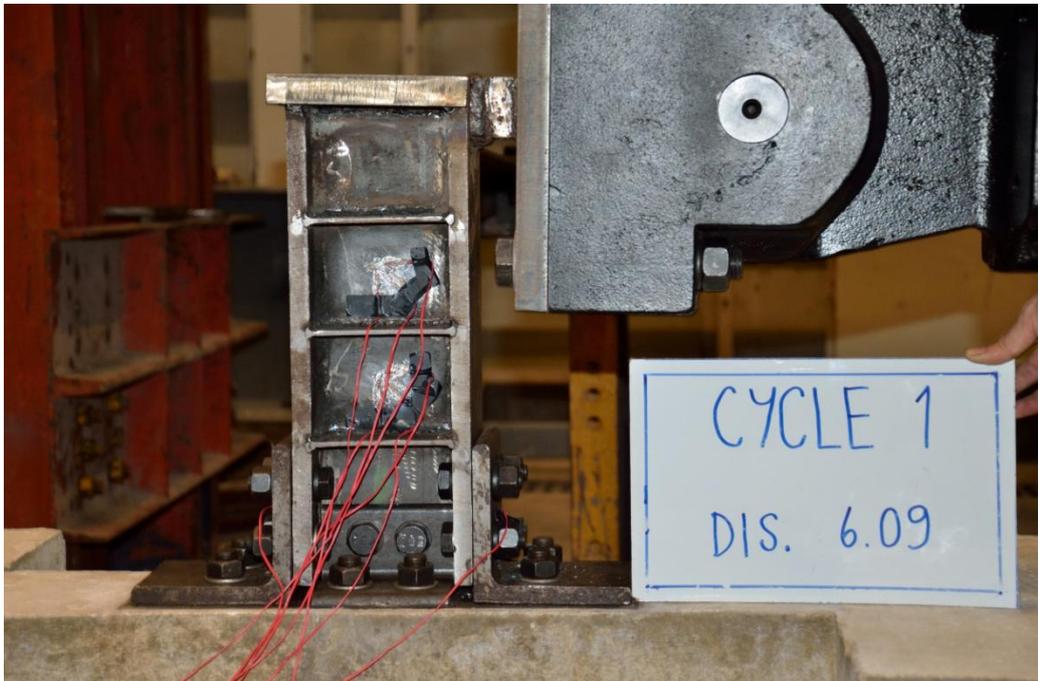
รูปที่ 4.6 ค่าความเครียดสูงสุดของแต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเนื่องจากรวมแรงดึงรอบตัวที่ 3



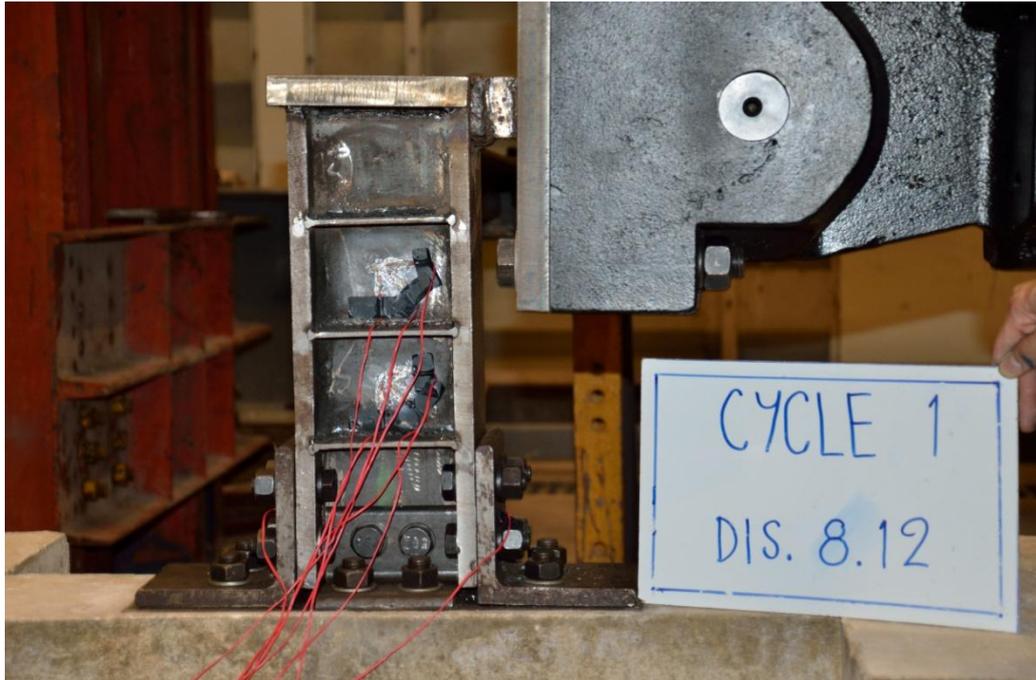
รูปที่ 4.7 ค่าความเครียดสูงสุดของแต่ละรอบของการรับแรงของสลักเกลียวที่ฝังในผนังรับแรงเนื่องจากรวมแรงดึงรอบตัวที่ 4



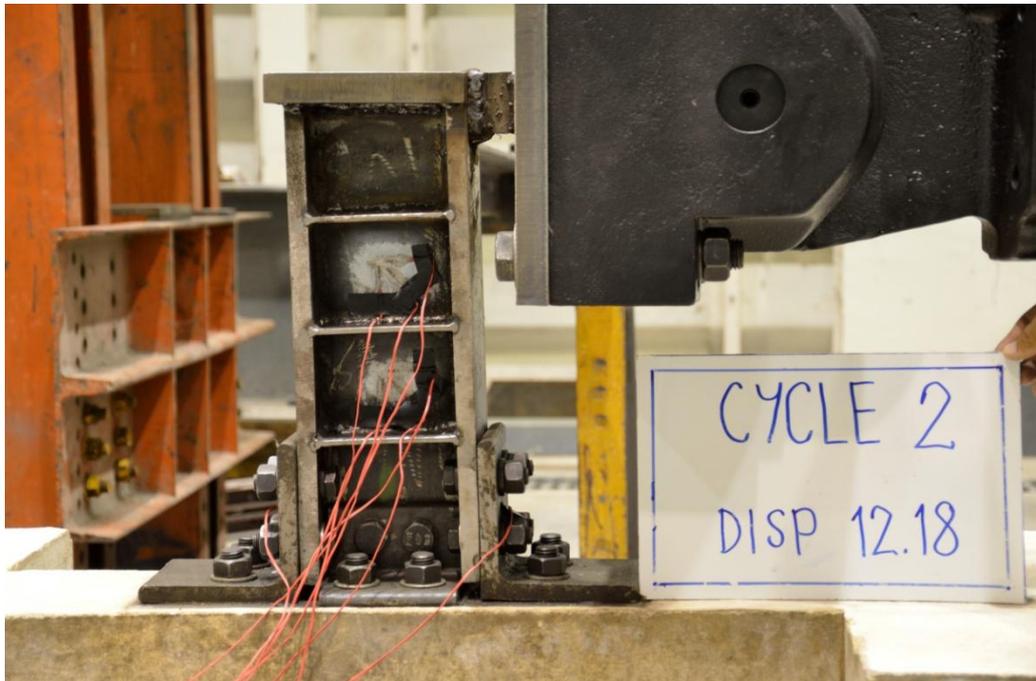
รูปที่ 4.8 สลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ถูกถอนออก 1-1.5 เซนติเมตร



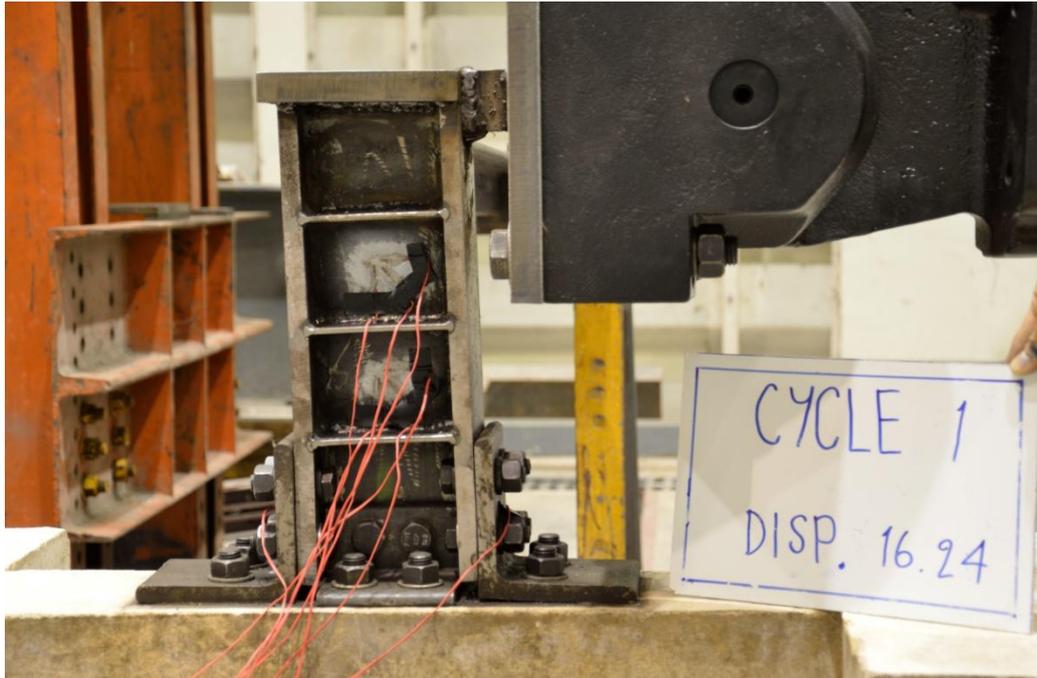
รูปที่ 4.9 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเลี้ยวรูป 0.015 เรเดียน



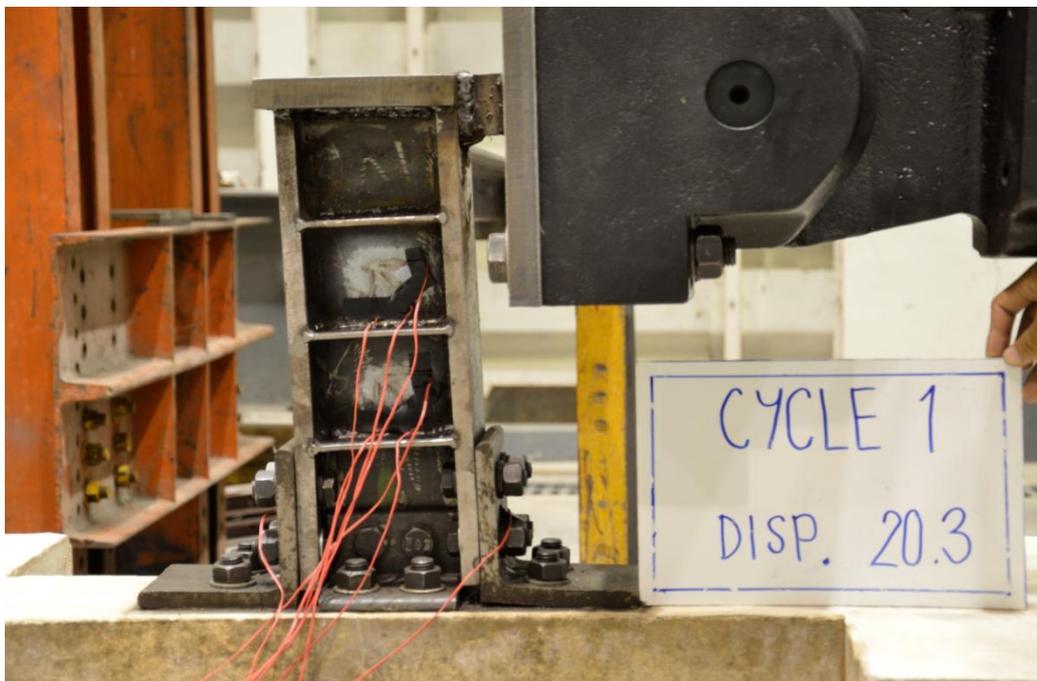
รูปที่ 4.10 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียดรูป 0.02 เรเดียน



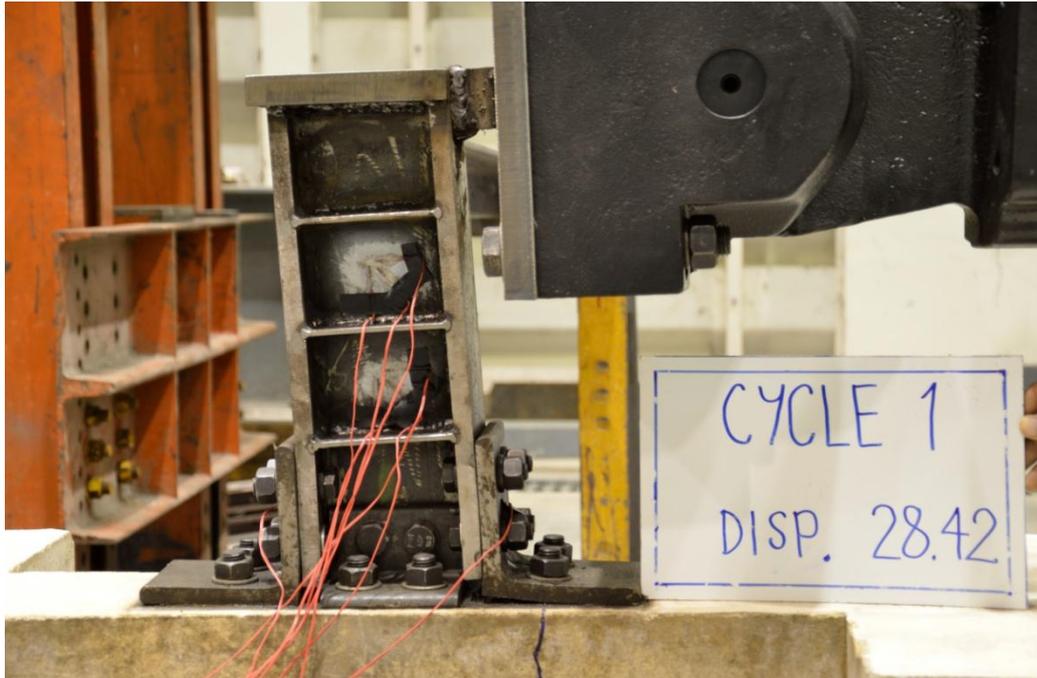
รูปที่ 4.11 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียดรูป 0.03 เรเดียน



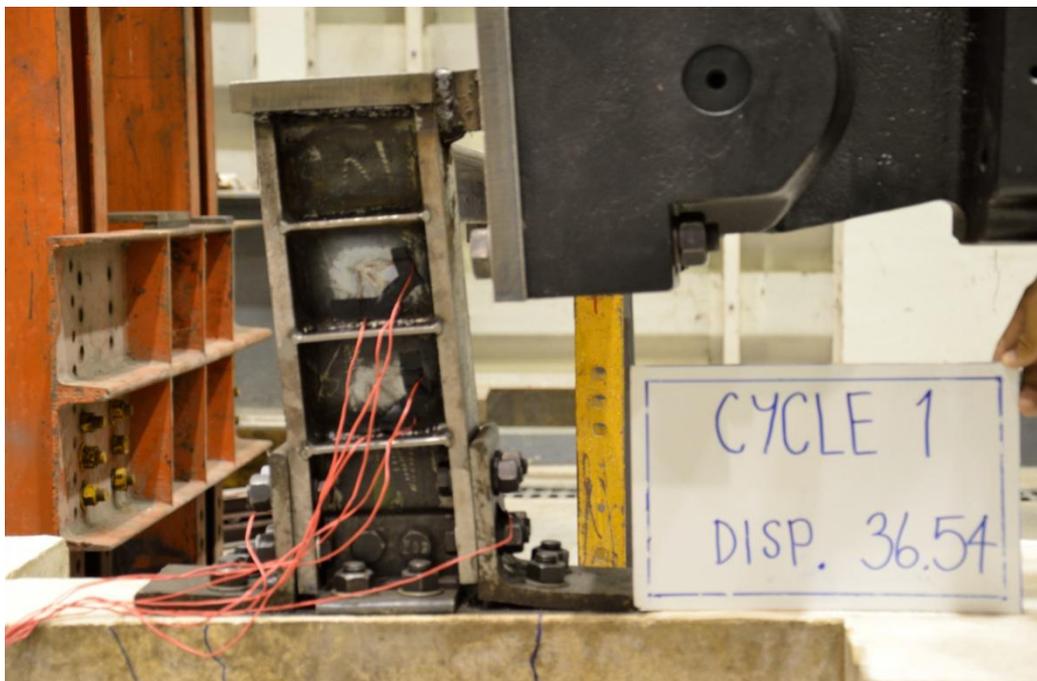
รูปที่ 4.12 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียรูป 0.04 เรเดียน



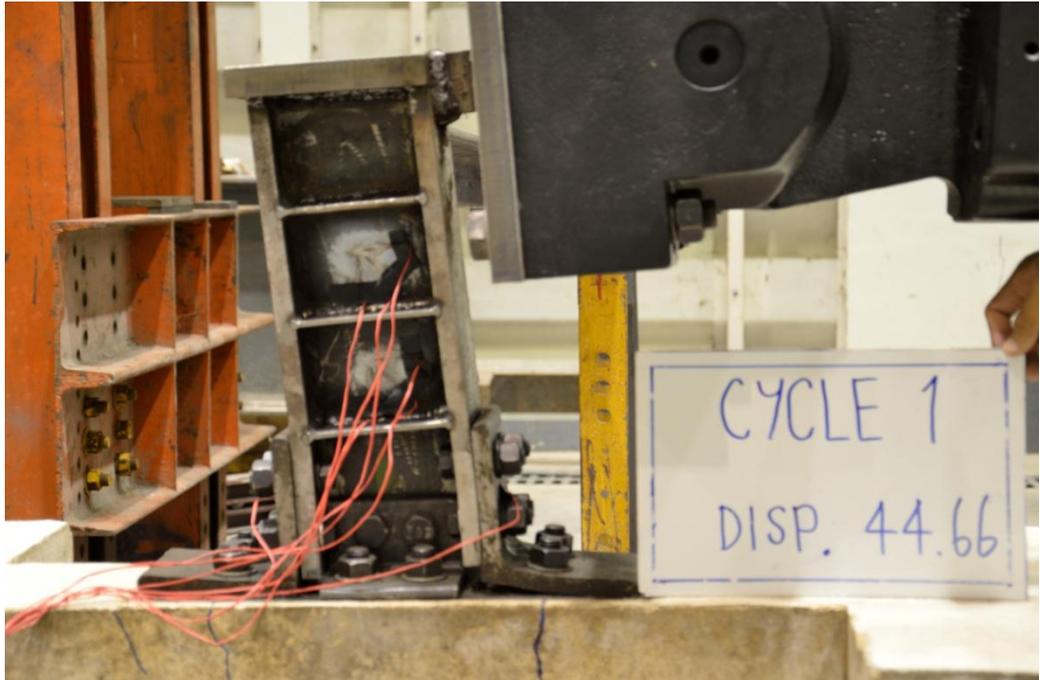
รูปที่ 4.13 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียรูป 0.05 เรเดียน



รูปที่ 4.14 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียรูป 0.07 เรเดียน



รูปที่ 4.15 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียรูป 0.09 เรเดียน



รูปที่ 4.16 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียรูป 0.11 เรเดียน



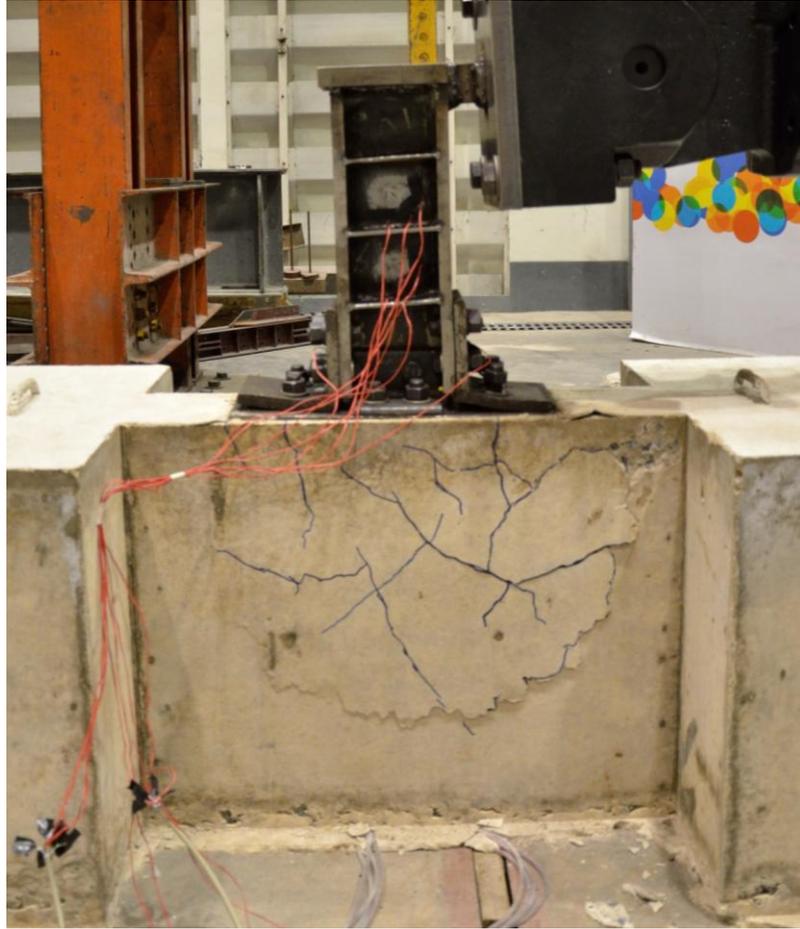
รูปที่ 4.17 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเสียรูป 0.13 เรเดียน



รูปที่ 4.18 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเลี้ยวรูป 0.15 เรเดียน



รูปที่ 4.19 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 มุมการเลี้ยวรูป 0.17 เรเดียน

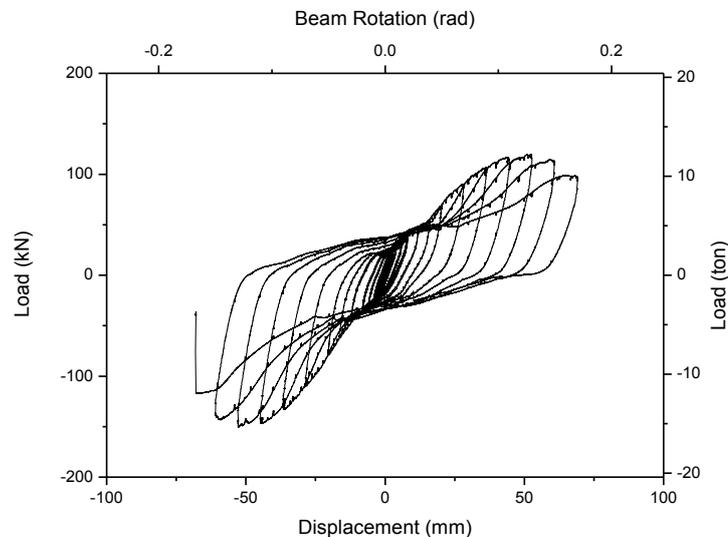


รูปที่ 4.20 การทดสอบตัวอย่างที่ 1 ที่สิ้นสุดการทดสอบ

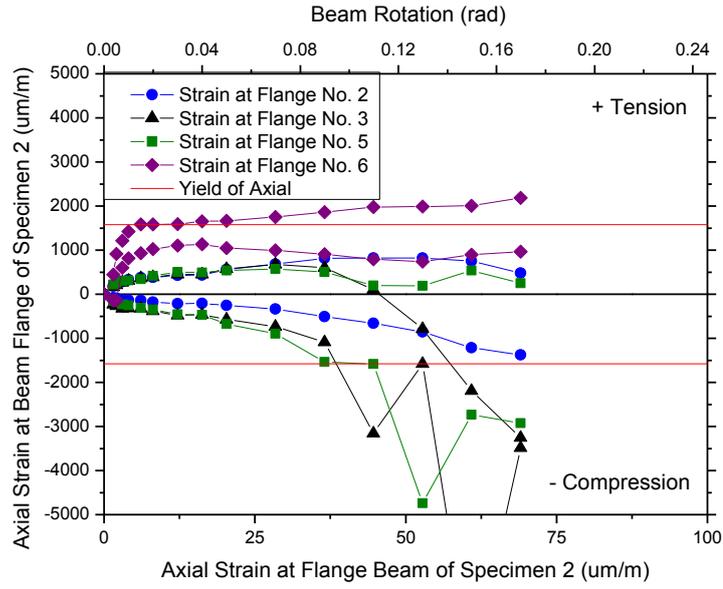
ตัวอย่างทดสอบที่ 2

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบที่ 2 แสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 การทดสอบไม่พบการครากของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งและไม่พบการแตกร้าวของผนังรับแรงเฉือนจนกระทั่งมุมการเสียรูปมีค่าเท่ากับ 0.015 เรเดียน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปมีการเกิด pinching ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมการเสียหายของจุดต่อแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle การออกแบบตัวอย่างทดสอบที่ 2 เน้นพฤติกรรมการเสียรูปในรูปแบบแรงคดจึงทำให้ pinching เกิดขึ้นได้ง่ายและสังเกตเห็นได้ชัดเจน จากการเกิด Hardening ทำให้ตัวอย่างทดสอบที่ 2 ยังคงสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นได้ การแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบที่ 2 เริ่มเกิดขึ้นเล็กน้อยที่มุมการเสียรูป 0.09 เรเดียน เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไป การแตกร้าวของผนังรับแรงเฉือนจะเกิดมากขึ้นตามลำดับจนกระทั่งเมื่อมุมการเสียรูปมีค่าเท่ากับ 0.11 เรเดียน การครากจึงเกิดขึ้นที่ปีกคานเหล็ก (flange) สังเกตได้จากค่าความเครียดที่อ่านได้จากสเตรเกจที่ติดตั้งไว้ที่บริเวณปีกคานเหล็กมีค่ามากกว่าค่าความเครียดที่จุดครากดังรูปที่ 4.22 มุมการเสียรูปนี้ไม่พบการครากที่บริเวณเอวคานเหล็ก สังเกตได้จากค่าความเครียด

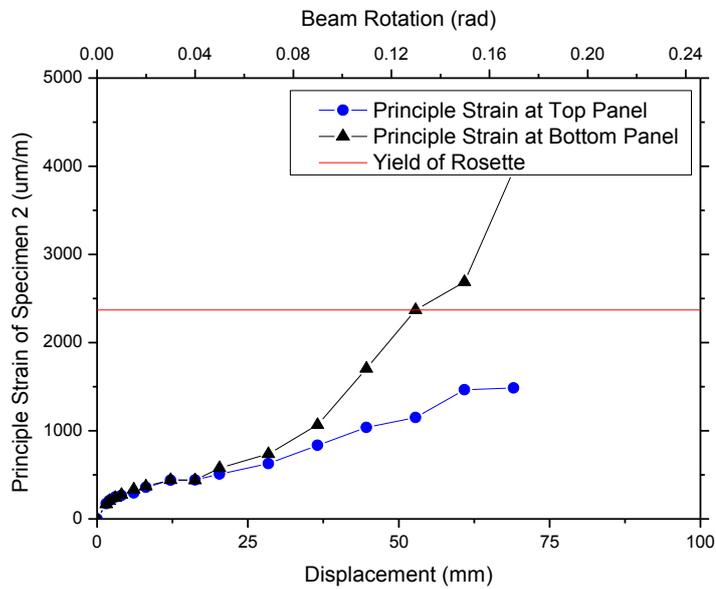
ที่อ่านได้จากสเตรเกจทั้งสามตัว (Rosette Strain Gage) ที่ติดตั้งไว้ที่บริเวณเอวคานเหล็กมีค่าไม่ถึงค่าความเครียดที่จุดครากของแผ่นเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.23 การวิบัติดังกล่าวของคานเหล็กเป็นการวิบัติในรูปแบบแรงคดตามที่ได้ออกแบบไว้ ที่มุมการเสยรูปนี้ (0.11 เรเดียน) จะเริ่มเห็นสลักเกลียวที่ยึดไว้กับผนังรับแรงเฉือนเริ่มถอนออก (รูปที่ 4.29) จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสยรูปพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่ 2 มีกำลังรับแรงสูงสุด 119 กิโลนิวตัน ที่มุมการเสยรูป 0.13 เรเดียน เมื่อการทดสอบถึงมุมการเสยรูป 0.17 เรเดียน ผนังรับแรงเฉือนเกิดการแตกร้าวในลักษณะแบบกรวย (Shear Cone) และสลักเกลียวที่ฝังไว้ที่ผนังรับแรงเฉือนเกิดการถอนออกประมาณ 1-1.5 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.24 การทดสอบจึงสิ้นสุดเนื่องจากตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติมากจนไม่สามารถรับแรงได้ รูปแบบรอยแตกร้าวในผนังรับแรงเฉือน และการเสยรูปของคานเหล็กขณะทดสอบ และขณะสิ้นสุดการทดสอบของตัวอย่างที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.25 ถึง 4.35



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสยรูปของตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.22 ค่าความเครียดการดึงที่ปีกคานเหล็กของตัวอย่างทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.23 ค่าความเครียดการเนื้องานที่เอวคานเหล็กของตัวอย่างทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.24 สลักเกลียวของตัวอย่างทดสอบที่ 2 ถูกถอนออก 1-1.5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.25 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเสียรูป 0.015 เเรเดียน



รูปที่ 4.26 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.02 เรเดียน



รูปที่ 4.27 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.03 เรเดียน



รูปที่ 4.28 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.04 เรเดียน



รูปที่ 4.29 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.05 เรเดียน



รูปที่ 4.30 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.07 เรเดียน



รูปที่ 4.31 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.09 เรเดียน



รูปที่ 4.32 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.11 เรเดียน



รูปที่ 4.33 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเลี้ยวรูป 0.13 เรเดียน



รูปที่ 4.34 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 มุมการเสีรูป 0.15 เรเดียน

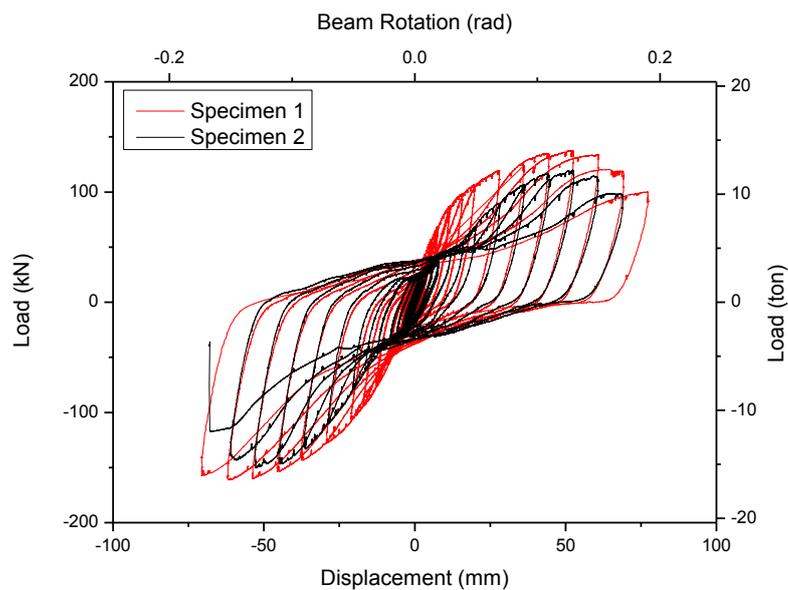


รูปที่ 4.35 การทดสอบตัวอย่างที่ 2 ที่สิ้นสุดการทดสอบ (0.17 เรเดียน)

เปรียบเทียบผลการทดสอบ

เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสีรูปของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบทั้งสองเริ่มมีการวิบัติที่จุดต่อที่มุมการเสีรูป 0.015 เรเดียน ทั้งสองตัวอย่าง จุดต่อยี่ครั้งบางส่วนเป็นจุดต่อที่มีการเสีรูปได้ง่ายเนื่องจากลักษณะการเปิด-ปิดของ

Gap ซึ่งสามารถสังเกตได้จาก pinching ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป ในตัวอย่างทดสอบที่ 1 การเกิด pinching ในช่วงแรกจะมีน้อยกว่าเนื่องจากออกแบบเน้นพฤติกรรมการครากในรูปแบบแรงเฉือน ในขณะที่การเกิด pinching ของตัวอย่างที่ 2 เกิดมากในช่วงแรก เนื่องจากออกแบบเน้นการเสียรูปในแบบแรงดัด และทำให้รอบของแรงการทดสอบมีวงรอบการทดสอบขนาดเล็กกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 และมีการพัฒนากำลังรับแรงน้อยกว่าตัวอย่างที่ 1 ที่ระดับการเสียรูปเดียวกันด้วย และเนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 2 เน้นการเสียรูปแบบแรงดัดการแตกร้าวที่ผนังรับแรงเฉือนจึงพบที่มุมการเสียรูป 0.09 เรเดียน ซึ่งเป็นมุมการเสียรูปที่มากกว่าของตัวอย่างทดสอบที่ 1 โดยที่ตัวอย่างทดสอบที่ 1 นั้นพบการแตกร้าวที่มุมการเสียรูป 0.07 เรเดียน

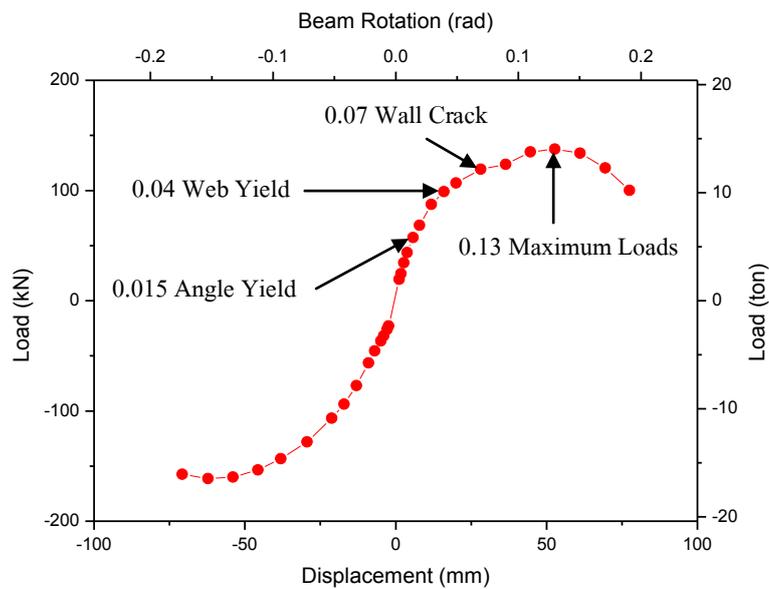


รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของตัวอย่างที่ 1 และ 2

4.2 ค่ากำลังรับแรง

ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปสามารถนำมาสร้างกราฟกำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ได้ดังรูปที่ 4.37 สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และรูปที่ 4.38 สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 2 เนื่องจากคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งและผนังรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (รูปที่ 4.37) ไม่เกิดการครากและการแตกร้าวในช่วงแรก กำลังจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปเกิด pinching (0.015 เรเดียน) การเพิ่มขึ้นของกำลังจึงลดลง เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 1 ออกแบบเน้นการเสียรูปแบบแรงเฉือน การพัฒนากำลังจึงลดลงเล็กน้อย เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไปจนที่บริเวณเอวคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งเกิดการครากขึ้น (0.04 เรเดียน) การครากที่บริเวณเอวคานเหล็กจะทำให้การพัฒนากำลังช้าลง แต่กำลังยังคงเพิ่มขึ้นได้เนื่องจาก

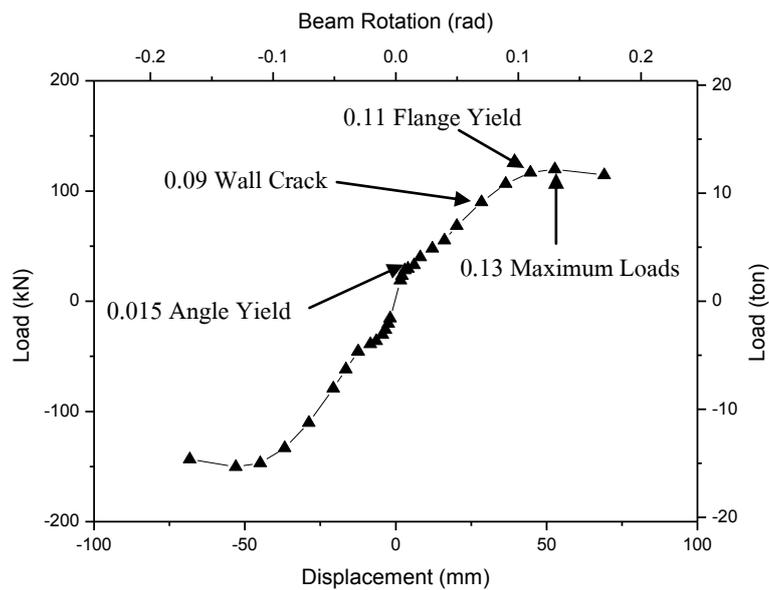
ความเครียดแข็ง (Strain Hardening) แรงที่วัดได้ขณะที่คานเหล็กเกิดการครากมีค่าประมาณ 98 และ -93 กิโลนิวตัน การทดสอบดำเนินต่อไปจนกระทั่งผนังรับแรงเฉือนเริ่มเกิดรอยแตกร้าว (0.07 เเรเดียน) การพัฒนากำลังจึงลดลงเล็กน้อย แรงขณะผนังรับแรงเฉือนแตกร้าววัดได้ประมาณ 120 และ -128 กิโลนิวตัน การพัฒนากำลังยังสามารถเพิ่มได้อีกเล็กน้อยก่อนที่จะซาลงอีกครั้งเนื่องจากสลักเกลียวหมายเลข 1 (รูปที่ 4.2) เกิดการครากและถอนออก (0.09 เเรเดียน) ค่าแรง ณ จุดนี้วัดได้ประมาณ 123 และ -143 กิโลนิวตัน อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงสูงสุด สามารถพัฒนา (0.13 เเรเดียน) ได้ถึง 137 และ -159 กิโลนิวตัน จากนั้นกำลังรับแรงของคานเหล็กเชื่อมต่อผนังรับแรงเฉือนลดลงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการถอนออกของสลักเกลียวที่ฝึดกับผนังรับแรงเฉือน จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการเสียหายอย่างมากการทดสอบจึงสิ้นสุดที่มุมการเสี้ยวรูป 0.17 เเรเดียน



รูปที่ 4.37 กำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1

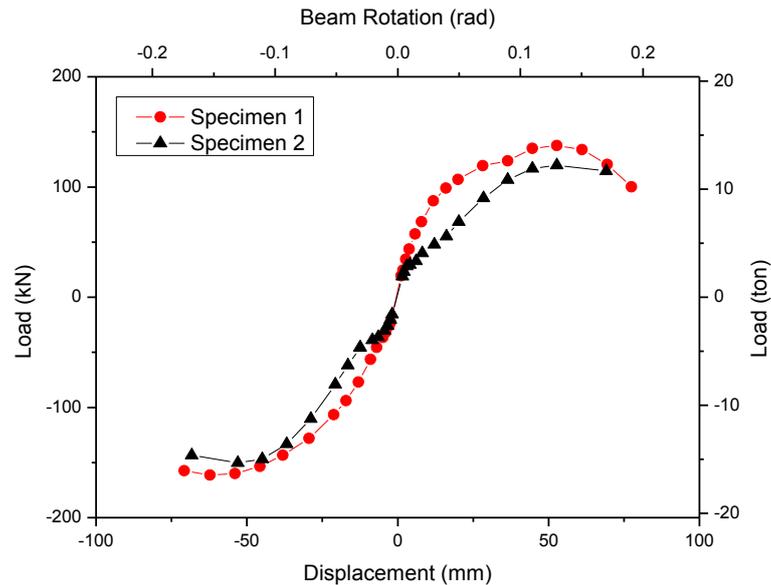
จากกราฟกำลังรับแรงหลักในรูปที่ 4.38 ของตัวอย่างทดสอบที่ 2 จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังในช่วงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากไม่มีการครากของคานเหล็กเชื่อมผนังและไม่มีการแตกร้าวของผนังรับแรงเฉือน เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสี้ยวรูปเกิด pinching ซึ่งเกิดจากการครากของเหล็กฉาก (0.015 เเรเดียน) การพัฒนากำลังซาลงมาก เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 2 ออกแบบเน้นให้เกิดการครากจากแรงดัด ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสี้ยวรูปจึงเกิด pinching ขึ้นได้ง่าย โดยค่าแรงที่วัดได้มีค่าประมาณ 32 และ -36 กิโลนิวตัน แต่ด้วยความเครียดแข็ง (Hardening) การพัฒนากำลังจึงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งผนังรับแรงเฉือนเริ่มเกิดการแตกร้าว (0.07 เเรเดียน) ค่าแรงขณะที่ผนังรับแรงเฉือนเกิดการแตกร้าววัดได้ประมาณ 68 และ -79 กิโลนิวตัน การพัฒนากำลังยังคงสามารถเพิ่มขึ้น

ได้อย่างต่อเนื่อง จนมีการครากเกิดขึ้นที่บริเวณปีกคานเหล็กซึ่งเป็นรูปแบบการเสียหายแบบแรงคัต (0.11 เเรเดียน) ที่จุดครากนี้ยังพบว่าสลักเกลียวหมายเลข 1 (รูปที่ 4.3) เกิดการครากและถอนออก ทำให้การพัฒนากำลังข้างมาก ที่มุมการเสียรูปนี้สามารถวัดค่าแรงได้ประมาณ 106 และ 133 กิโลนิวตัน กำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถพัฒนาได้สูงสุดถึง 117 และ -147 กิโลนิวตัน (0.13 เเรเดียน) จากนั้นกำลังรับแรงของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการถอนออกของสลักเกลียวที่ฝังกับผนังรับแรงเหมือนจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบนั้นเกิดการเสียหายอย่างมากจึงสิ้นสุดการทดสอบที่มุมการเสียรูป 0.17 เเรเดียน



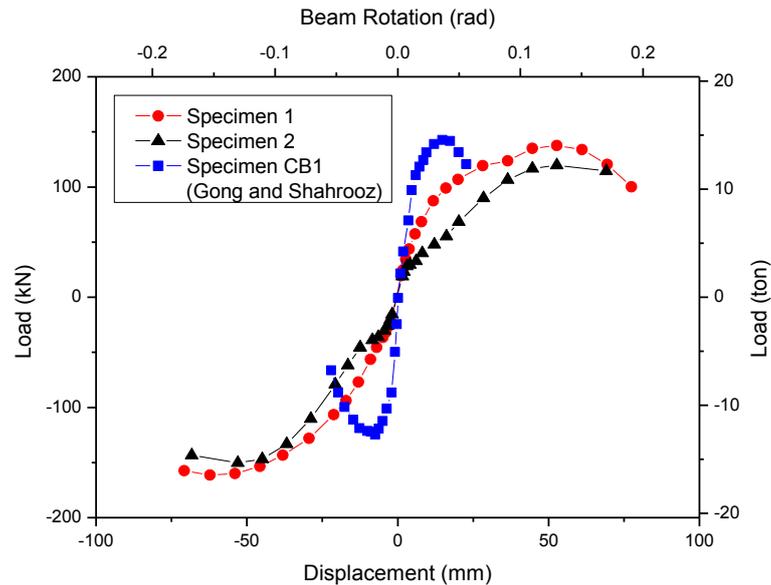
รูปที่ 4.38 กำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

เส้นกราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงหลักของทั้งสองตัวอย่างทดสอบซึ่งมีการออกแบบที่แตกต่างกัน เป็นดังรูปที่ 4.39 ในช่วงแรกการพัฒนากำลังรับแรงของทั้งสองตัวอย่างทดสอบจะใกล้เคียงใกล้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบทั้งสองยังไม่เกิดการครากและการแตกร้าวจนกระทั่งค่าการเสียรูป 0.015 เเรเดียน กำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบที่ 2 จึงเริ่มมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 เมื่อเทียบในระดับการเสียรูปเดียวกัน แต่ด้วยความเครียดแข็งทำให้ท้ายที่สุดตัวอย่างทดสอบที่ 2 สามารถพัฒนากำลังรับแรงเพิ่มขึ้นได้จนกระทั่งสามารถรับแรงได้สูงสุดประมาณ 117 และ -147 กิโลนิวตัน (0.13 เเรเดียน) ค่าแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบที่ 1 ที่วัดได้ประมาณ 138 และ -162 กิโลนิวตัน สังเกตได้ว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.39 กำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2

เมื่อเปรียบเทียบผลของกำลังรับแรงหลักระหว่างตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนในงานวิจัยนี้ (ตัวอย่างทดสอบ 1 และ 2) กับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบฝังยึดในงานวิจัยในอดีต [7] (ตัวอย่างทดสอบ CB1) ดังรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบยึดครึ่งบางส่วนสามารถพัฒนา กำลังรับแรงได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบฝังยึด (Fully Restrained Connection) แต่เนื่องจากจุดต่อแบบฝังยึดมีความแข็ง (Stiffness) ที่มากกว่าจุดต่อยึดครึ่งบางส่วน ตัวอย่างทดสอบ CB1 จึงมีการพัฒนาได้รวดเร็วจนถึงแรงสูงสุด โดยที่การพัฒนา กำลังรับแรงจะช้าลงเมื่อคานเหล็กเชื่อมต่อ ผนังเกิดการครากขึ้น ค่าแรงที่วัดได้มีค่าประมาณ 97 และ -86 กิโลนิวตัน สังเกตได้จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของ Gong และ Shahrooz ความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ทำให้ตัวอย่างทดสอบ CB1 สามารถพัฒนา กำลังได้สูงสุดได้ประมาณ 142 และ -124 กิโลนิวตัน และลดลงเมื่อคอนกรีตของผนังรับแรงเอนรอบคานเหล็กเกิดการวิบัติ เนื่องจากจุดต่อของ CB1 เป็นแบบฝังยึด การเสียรูปที่แรงสูงสุด (0.036 เเรเดียน) จึงน้อยกว่าการเสียรูปตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ (0.13 เเรเดียน)



รูปที่ 4.40 กำลังรับแรงหลัก (Backbone Curve) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 2 และ CB1

4.3 สติฟเนส (Stiffness)

ค่าความชันของกราฟกำลังรับแรงหลักในรูปที่ 4.37 และ 4.38 แสดงถึงค่าสติฟเนส (Stiffness) ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าสติฟเนสของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (รูปที่ 4.37) แบ่งออกได้เป็นหลายช่วง ขึ้นกับระดับความเสียหายที่แตกต่างกันของจุดต่อยึดครึ่งบางส่วน ผนังรับแรงเฉือน และคานเหล็กเชื่อมต่อนั่ง ตัวอย่างทดสอบที่ 1 มีค่าสติฟเนสสูงในช่วงแรกเนื่องจากยังไม่เกิดการครากทั้งจุดต่อและคานเหล็ก เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปเกิด pinching ซึ่งเกิดจากการเสียรูปของจุดต่อยึดครึ่งบางส่วน (0.015 เรเดียน) ค่าความชันที่ลดลงจากการเสียรูปของจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่ 1 ออกแบบเน้นการเสียหายเป็นแบบแรงเฉือน ค่าความชันของสติฟเนสจะคงที่จนกระทั่งที่บริเวณเอนคานเหล็กเกิดการคราก (0.04 เรเดียน) ค่าสติฟเนสจึงลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผนังรับแรงเฉือนเกิดการแตกร้าว (0.07 เรเดียน) ค่าความชันของสติฟเนสลดลงอีกครั้งเมื่อการทดสอบดำเนินไปจนถึงจุดที่สลักเกลียวหมายเลข 1 และ 2 (รูปที่ 4.2) เกิดการครากและถอนออก (0.09 และ 0.13 เรเดียน) ซึ่งเป็นช่วงที่มี Gap ระหว่างเหล็กฉากและผนังรับแรงเฉือนมาก ค่าความชันของสติฟเนสจึงมีค่าน้อยมาก และเมื่อสลักเกลียวที่ฝังไว้เกิดการถอนออก 1-1.5 เซนติเมตร (รูปที่ 4.8) ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ไม่สามารถรับแรงได้ ค่าความชันของสติฟเนสจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็นลบการทดสอบจึงสิ้นสุดลง

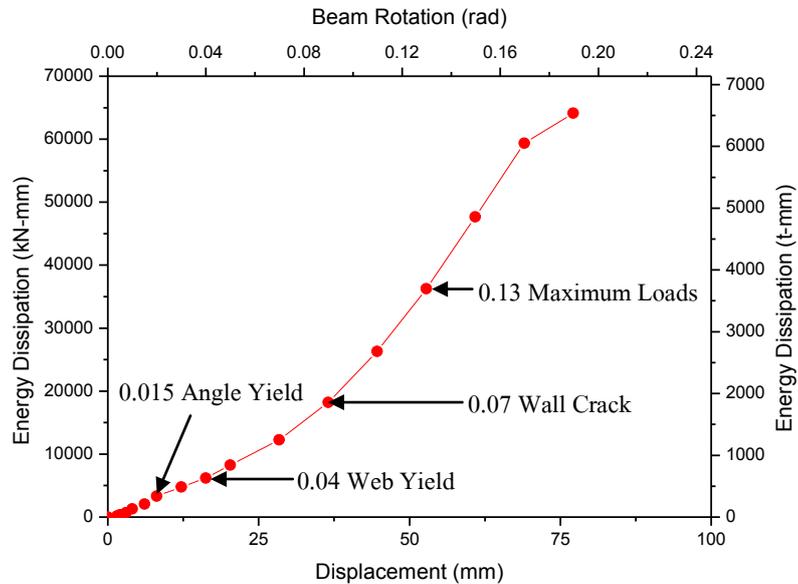
สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 2 ค่าสตีเฟนจะสูงในช่วงแรกของการทดสอบ เนื่องจากยังไม่พบการเสียหายใดๆทั้งในจุดต่อยึดครึ่งบางส่วน คานเหล็ก และผนังรับแรงเฉือน (รูปที่ 4.36) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบนี้เน้นการครากแบบแรงดัด ทำให้จุดต่อเกิดการครากจากแรงดัด (0.015 เรเดียน) เมื่อการครากเกิดขึ้นที่บริเวณจุดต่อ ค่าความชันของสตีเฟนจึงลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กำลังรับแรงยังคงสามารถเพิ่มขึ้นด้วยความเครียดแข็ง ค่าความชันของสตีเฟนสมิค่าคงที่ จนกระทั่งเกิดรอยแตกร้าวที่ผนังรับแรงเฉือน (0.07 เรเดียน) ค่าสตีเฟนจึงลดลง ความชันของสตีเฟนลดลงอย่างมาก (0.11 เรเดียน) เมื่อการครากเกิดขึ้นที่ปีกคานเหล็กและค่าความชันของสตีเฟนสมิค่าน้อยมาก (0.13 เรเดียน) เมื่อสลักเกลียวเกิดการถอนออก 1-1.5 เซนติเมตร (0.11 เรเดียน) ก่อนที่จะลดลงจนมีค่าเป็นลบการทดสอบจึงสิ้นสุด

ในช่วงที่คานเหล็กเชื่อมต่อนั่งและเหล็กฉากของทั้งสองตัวอย่างทดสอบยังไม่เกิดการคราก ค่าสตีเฟนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าสตีเฟนของตัวอย่างทดสอบในอดีตที่มีจุดต่อแบบฝังยึด [7] (ตัวอย่างทดสอบ CB1) จนถึงการเสียรูปที่ 0.015 เรเดียน จุดต่อยึดครึ่งบางส่วนเกิดการครากทำให้ค่าความชันของสตีเฟนน้อยกว่าจุดต่อแบบฝังยึด เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนมีช่วงการครากหลายช่วง และความเครียดแข็งทำให้สตีเฟนสมิมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงการครากของเหล็กฉากและการครากของคานเหล็ก ในขณะที่คานเหล็กเชื่อมต่อนั่งที่มีจุดต่อแบบฝังยึดจะมีการครากเกิดขึ้นที่เอวของคานเหล็กเพียงอย่างเดียว ทำให้สตีเฟนลดลงเมื่อคานเหล็กเกิดการครากและไม่สามารถรับแรงได้อีก ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนทั้งสองตัวอย่างจึงมีสตีเฟนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนที่ใช้รอยต่อแบบฝังยึดในผนัง ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนทั้งสองมีความสามารถในการเสียรูป (Deformation Capacity) มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบฝังยึด โดยตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนมีมุมการเสียรูป 0.09 เรเดียน ในขณะที่จุดต่อแบบฝังยึดเสียรูปได้เพียง 0.011 เรเดียน

4.4 การสลายพลังงาน (Energy Dissipation)

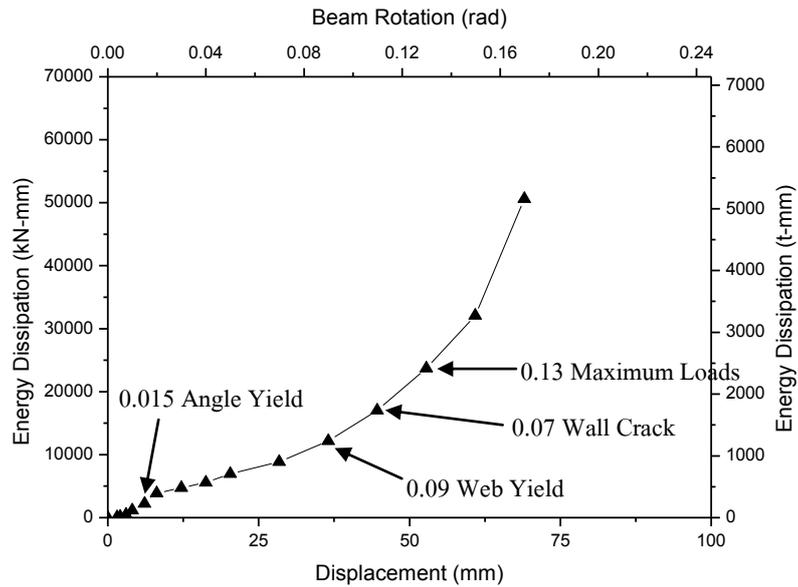
การสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวสามารถหาได้จากพื้นที่ภายในวงรอบการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 ในช่วงต้นการสลายพลังงานเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากจุดต่อและคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งยังไม่เกิดการครากและมีการเสียรูปเกิดขึ้นเล็กน้อย (0.015 เรเดียน) อัตราการสลายพลังงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อคานเหล็กเกิดการครากที่บริเวณเอวคานเหล็ก (0.04 เรเดียน) โดยพลังงานที่สลายได้มีค่าประมาณ 6,200 กิโลนิวตันมิลลิเมตร อัตราการ

สลายพลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อสลักเกลียวที่ทำการฝังไว้กับผนังรับแรงเฉือนเกิดการครากและถอนออก (0.09 เรเดียน) จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ (มุมการเสี้ยวรูป 0.17 เรเดียน) ตัวอย่างทดสอบสามารถสลายพลังงานได้ 60,000 กิโลนิวตันมิลลิเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.41



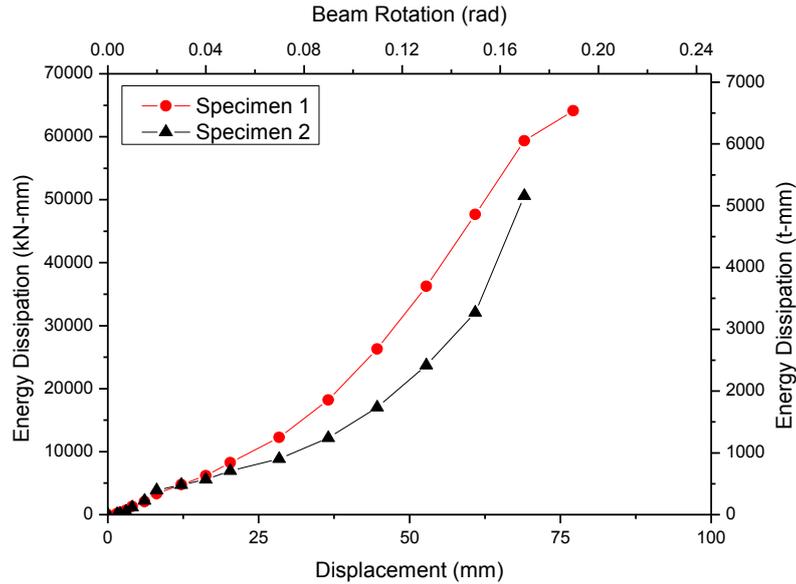
รูปที่ 4.41 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 1

การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.42 ในช่วงต้นการสลายพลังงานเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากทั้งจุดต่อยึดครึ่งบางส่วนเกิดการเสี้ยวรูปเล็กน้อย จุดต่อเกิดการวิบัติในลักษณะเปิดปิดของ Gap ระหว่างเหล็กฉากและผนัง (pinching) ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสี้ยวรูปมีลักษณะแฉกแฉงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสี้ยวรูปมีลักษณะแฉกแฉงการสลายพลังงานจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อปีกคานเหล็กเกิดการครากและพบการถอนออกของสลักเกลียว (0.11 เรเดียน) จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ (มุมการเสี้ยวรูป 0.17 เรเดียน) ตัวอย่างทดสอบสามารถสลายพลังงานได้ประมาณ 50,000 กิโลนิวตันมิลลิเมตร



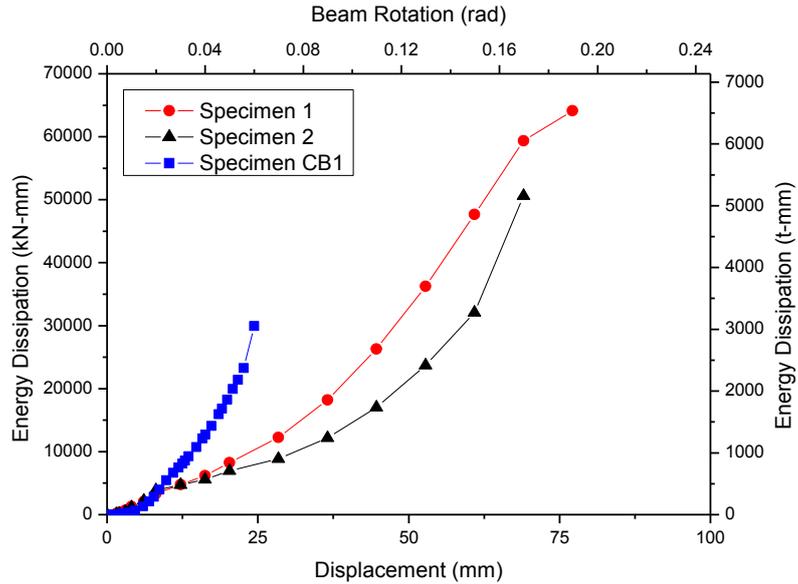
รูปที่ 4.42 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 2

การเปรียบเทียบการสลายพลังงานจากผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบทั้งสองเป็นดังรูปที่ 4.43 ซึ่งแสดงว่าช่วงต้นๆ ของการทดสอบ ตัวอย่างทั้งสองตัวอย่างมีการสลายพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ใกล้เคียงกัน จนกระทั่งที่การเสียรูปประมาณ 0.04 เรเดียน ตัวอย่างทดสอบที่ 1 จะมีการสลายพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 2 เมื่อเริ่มเกิดการครากขึ้นที่บริเวณเอวคานเหล็ก การครากที่จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน และการแตกร้าวของผนังรับแรงเฉือน ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 2 เริ่มเกิดการครากที่ตัวเหล็กฉากรับแรงดึง การเสียรูปจึงเกิด pinching ที่มาก ทำให้การสลายพลังงานลดน้อยลงพลังงานที่สลายจึงได้น้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 ที่ระดับการเสียรูปเดียวกันผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการออกแบบโดยให้เกิดการครากจากแรงเฉือน (ตัวอย่างทดสอบที่ 1) มีการสลายพลังงานที่มีเสถียรภาพกว่า เนื่องจากการคราก จะเกิดในคานเหล็ก ในขณะที่การออกแบบโดยให้เกิดการครากจากแรงดึง การเสียรูปส่วนมากจะเกิดกับตัวเหล็กฉากซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีความบอบบางกว่าตัวคานเหล็ก



รูปที่ 4.43 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบยึดครึ่งบางส่วนทั้งสอง (ตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2) ของงานวิจัยนี้กับกราฟผลการทดสอบของ Gong และ Shahrooz [7] ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีจุดต่อแบบฝังยึด (ตัวอย่างทดสอบ CB1) (รูปที่ 4.44) จะเห็นได้ว่าการสลายพลังงานในช่วงต้นที่ของการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันถึงมุมการเสียรูปที่ 0.02 เรเดียน โดยพลังงานที่สลายมีค่าประมาณ 3,000-4,000 กิโลนิวตันมิลลิเมตร เนื่องจากตัวอย่างทดสอบ CB1 มีจุดต่อแบบฝังยึดซึ่งมีสติเฟเนสที่สูงกว่า การวิบัติของคานเหล็กจึงเกิดขึ้นโดยมีมุมการเสียรูปที่ต่ำกว่าตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบ CB1 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่มุมการเสียรูปประมาณ 0.06 เรเดียน ตัวอย่างทดสอบ CB1 สามารถสลายพลังงานได้ประมาณ 30,000 กิโลนิวตันมิลลิเมตร ที่จุดนี้เป็นช่วงที่ตัวอย่างทดสอบที่ 1 มีการครากเกิดขึ้นที่บริเวณเอวคานเหล็กที่ จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน สลักเกลียวมีการถอนออก และผนังมีการแตกร้าว ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 2 มีการครากที่บริเวณปีกคานเหล็ก ที่จุดต่อยึดครึ่งบางส่วน สลักเกลียวมีการถอนออกเล็กน้อย และผนังมีการแตกร้าวเช่นกัน แต่ตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 ยังสามารถพัฒนากำลังรับแรงและสามารถสลายพลังงานต่อได้ถึงมุมการเสียรูป 0.13 เรเดียน และมีค่าการสลายพลังงานที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบ CB1



รูปที่ 4.44 การสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบที่ 1 2 และ CB1

4.5 ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

เนื่องด้วยการออกแบบต้องการให้มีการเสียหายที่คานเหล็ก การออกแบบจึงมีการเพิ่มกำลังรับแรงให้กับองค์อาคารส่วนอื่นของตัวอย่างทดสอบ เช่น ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ต้องการให้พฤติกรรมการครากเป็นแบบแรงเฉือนหรือเป็นพฤติกรรมที่การครากเกิดขึ้นที่บริเวณเอวคานเหล็ก (Web) การออกแบบจึงให้ปีกคานเหล็กและจุดต่อรับแรงที่เกิดจากการครากของแผ่นเอวของคานเหล็ก เพื่อให้มีความเครียดแข็ง ตัวอย่างทดสอบนี้จึงได้เพิ่มกำลังรับแรงเท่ากับ 1.1 เท่า ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ 2 ที่ต้องการให้พฤติกรรมการครากเป็นแบบแรงคดหรือเป็นพฤติกรรมที่การครากเกิดขึ้นที่บริเวณปีกคานเหล็ก (Flange) การออกแบบจึงให้ส่วนของเอวคานเหล็กให้รับแรงที่เกิดจากการครากของปีกคานและเพิ่มแรงขึ้นอีก 1.3 เท่า ผลจากการทดสอบเมื่อการทดสอบตัวอย่างทดสอบทั้งสองสิ้นสุดลง พบว่าการพัฒนาำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบทั้งสองมีความเครียดแข็งรับแรงมากกว่าการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

	Strain Hardening Ratio		
	Push	Pull	Average
Specimen 1	1.51	1.78	1.65
Specimen 2	1.20	1.50	1.35

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าในการออกแบบควรมีการเผื่อค่าความเครียดแข็ง (Hardening) เท่ากับ 1.65 และ 1.35 สำหรับการครากแบบแรงเฉือนและแบบแรงดัดตามลำดับ

4.6 การวิบัติของสลักเกลียว

จุดต่อยึดครึ่งบางส่วนแบบ Top and Seat Angle with Double Web Angle เป็นจุดต่อที่ใช้สลักเกลียวในการยึดคานเหล็กและยึดเหล็กฉากเข้ากับผนังรับแรงเฉือน การออกแบบสลักเกลียวที่ยึดคานเหล็กเข้ากับเหล็กฉากจะทำให้สลักเกลียวรับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว สำหรับสลักเกลียวด้านที่ฝังไว้กับผนัง (Anchor Bolt) ที่ใช้ในการยึดเหล็กฉากที่บริเวณเอวคานเหล็กจะออกแบบให้รับแรงเฉือน ส่วนสลักเกลียวที่ใช้ในการยึดเหล็กฉากด้านบนและล่างเป็นตัวรับแรงดิ่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อการทดสอบสิ้นสุด สลักเกลียวที่ฝังกับผนังสำหรับยึดเหล็กฉากที่เอวคานเหล็กมีลักษณะถอนออกเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานในการออกแบบที่ให้สลักเกลียวบริเวณเอวของคานเหล็กรับแต่แรงเฉือนเพียงอย่างเดียว แต่สลักเกลียวที่ฝังกับผนังสำหรับยึดเหล็กฉากด้านบนและล่างเกิดการถอนออกและโค้งงออย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 สลักเกลียวที่ฝังกับผนังเกิดการถอนและโค้งงอ

การถอนและเสียรูปแบบ โค้งงอของสลักเกลียวที่ใช้ในการยึดเหล็กฉากด้านบนและล่างดังที่ได้กล่าวในข้างต้นจะเห็นได้ว่าสลักเกลียวดังกล่าวไม่ได้รับแรงดิ่งเพียงอย่างเดียวสมมุติฐานที่ตั้งไว้ถอนออกแบบ การเสียรูปของสลักเกลียวดังกล่าวเมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายแรงที่ส่งผ่านจากเหล็กฉากสู่สลักเกลียวโดยวิธีการสมดุลแรงดังรูปที่ 4.46 ทำให้พบว่าสลักเกลียวที่ยึดเหล็กฉากที่ปีกบนและล่างของคานเหล็กต้องรับแรงดิ่ง แรงเฉือน และแรงดัด ดังนั้น ในการออกแบบกำลังรับแรงสามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

$$M = P \cos(\gamma_p) \times h \tag{4.1}$$

$$V = P \sin(\gamma_p) \tag{4.2}$$

$$T = \frac{P \cos(\gamma_p) \times e}{a} \tag{4.3}$$

โดยที่ P คือ แรงที่กระทำตามแนวของเหล็กฉาก

M คือ แรงโมเมนต์ที่สลักเกลียวได้รับ

V คือ แรงเฉือนที่สลักเกลียวได้รับ

T คือ แรงดึงที่สลักเกลียวได้รับ

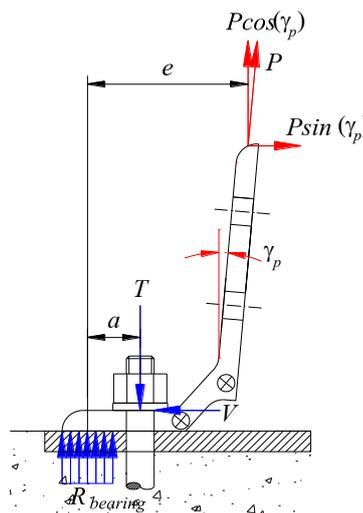
e คือ ระยะแรงกระทำในแนวตั้งถึงกึ่งกลางแรงอัดที่เหล็กฉากกระทำกับผนัง

a คือ ระยะแรงดึงที่ฉากเกลียวถึงกึ่งกลางแรงอัดที่เหล็กฉากกระทำกับผนัง

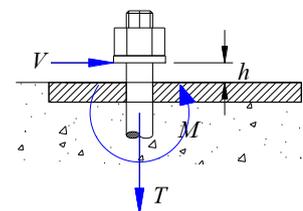
γ_p คือ มุมการเสียรูปของเหล็กฉาก



a) Undeformed Bolt



b) Equilibrium of Angle



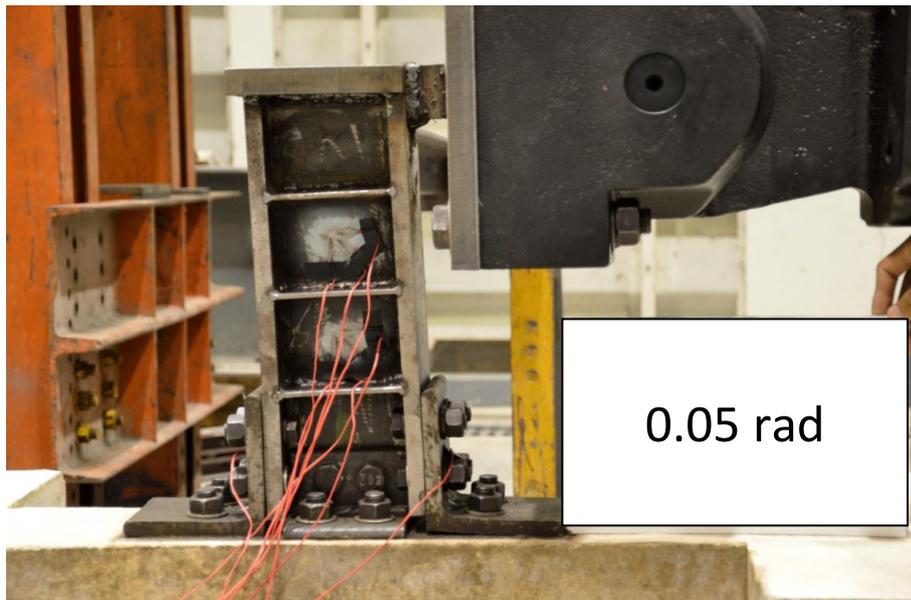
c) Equilibrium of Anchor Rod

รูปที่ 4.46 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นกับเหล็กฉากบนและสลักเกลียว

4.7 การวิบัติของสลักเกลียว

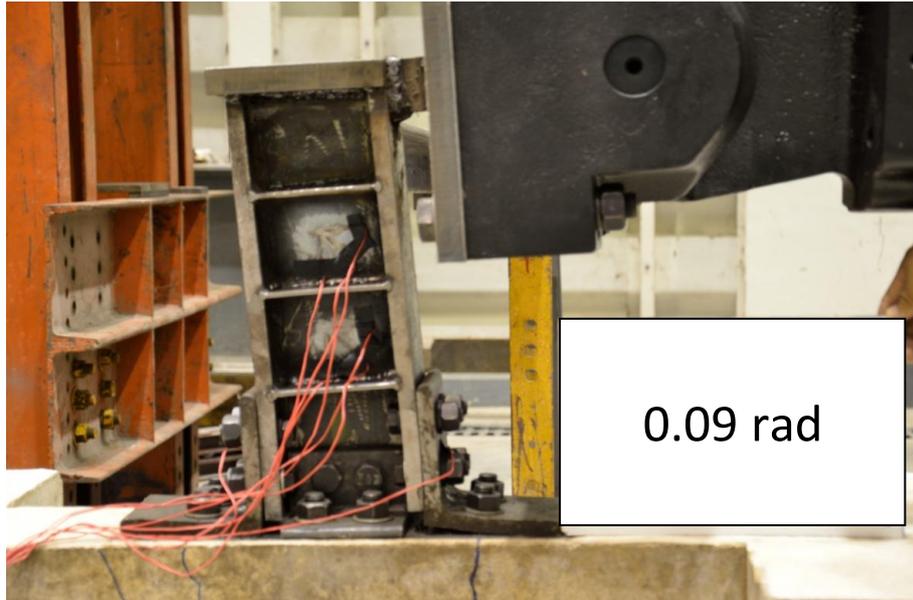
การทดสอบสิ้นสุดลง ผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาในข้างต้นและประเมินความเสียหายจากลักษณะการแตกร้าวของผนังคอนกรีต ลักษณะการเสียรูปของจุดต่อ และการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง

สองพบว่า ตัวอย่างทดสอบคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนคู่ควบที่มีพฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือนมีความเสถียรภาพมากกว่าคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนคู่ควบที่มีพฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือน ดังนั้น จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าสำหรับการนำไปใช้งาน การซ่อมแซมคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนคู่ควบที่มีพฤติกรรมการครากแบบแรงเฉือนสามารถทำได้ในกรณีที่มีการเสียรูปไม่เกิน 0.09 เเรเดียน ความยากง่ายในการซ่อมแซมจะขึ้นกับระดับการเสียรูป ผนังคอนกรีตจะไม่มี การแตกร้าวที่มุมการเสียรูปไม่เกิน 0.05 เเรเดียน ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ในการเสียรูปที่ระดับนี้ การซ่อมแซมคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนสามารถทำได้โดยง่าย โดยการเปลี่ยนเหล็กฉากที่บริเวณ จุดต่อและคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือน



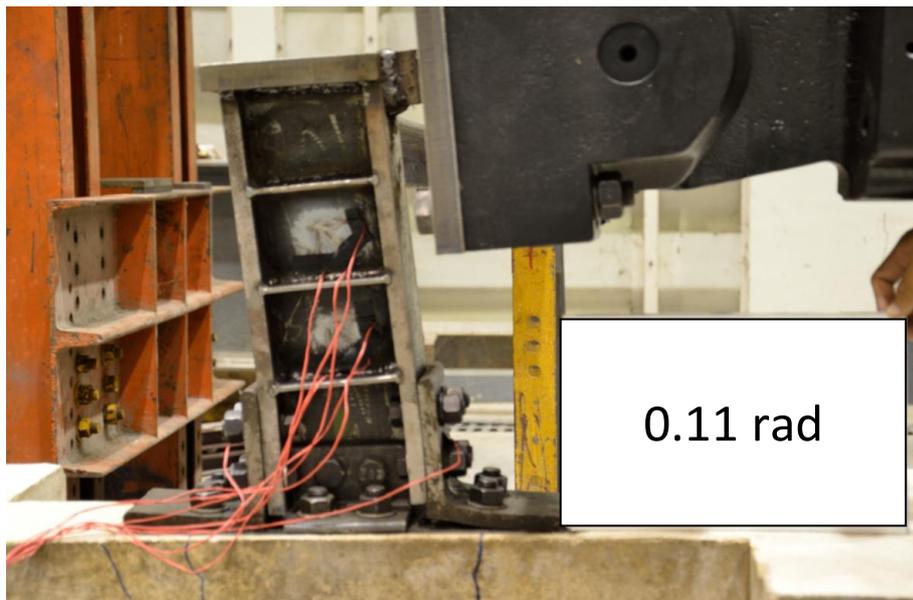
รูปที่ 4.47 ความเสียหายของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนที่มุมการเสียรูป 0.05 เเรเดียน

ที่ระดับการเสียรูปประมาณ 0.05-0.09 เเรเดียน ของทั้งสองตัวอย่างทดสอบ ผนังรับแรงเฉือนอาจเกิด การแตกร้าวขึ้นที่บริเวณผิวนอกและสลักเกลียวถูกถอนออกมากขึ้น การซ่อมแซมให้กลับคืนสภาพ เดิมยังสามารถกระทำได้เพียงแต่มีความยุ่งยากมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 ความเสียหายของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนที่มุมการเสียรูป 0.09 เรเดียน

เมื่อมุมการเสียรูปเกินกว่า 0.09 เรเดียน การแตกร้าวแบบ Shear Cone จะเริ่มเกิดขึ้น และที่มุมการเสียรูประดับนี้จะเริ่มเกิดการถอนของสลักเกลียวการซ่อมแซมจึงไม่สามารถทำได้ดังรูปที่ 4.49 ดังนั้น จึงไม่แนะนำกรณีมุมการเสียรูปที่มากกว่า 0.09 เรเดียน



รูปที่ 4.49 ความเสียหายของคานเหล็กเชื่อมต่อนั่งรับแรงเฉือนที่มุมการเสียรูป 0.11 เรเดียน