บทที่ 3

การทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

ในการทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบการรับแรงดัดของรอยต่อเชื่อมของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่าง ๆ กัน โดยมีขนาดของรอยเชื่อมแปรเปลี่ยนตามขนาดของเสาเข็ม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเฉพาะการรับแรงดัดอย่างเดียว (Pure Bending) โดยให้ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำแบบสถิตย์แบบสองจุดในรูปของคานช่วงเดียวรับแรงดัด เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดัด การแอ่นตัว และการแตกร้าว ของตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบทำขึ้น ณ ห้องทดสอบโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยตัวอย่างทดสอบได้จากผู้ผลิตซึ่งเตรียมจากโรงงานของผู้ผลิต (13) จึงอาจมีข้อจำกัดในการควบคุมขนาดของรอยต่อเชื่อมให้ได้ตามต้องการเพื่อสามารถศึกษาพฤติกรรมที่สมบูรณ์ของรอยต่อเชื่อมได้ แต่อย่างไรก็ตามคาดว่าผลการทดสอบก็จะสามารถแสดงผลได้ตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบพอควร

3.1 รายการทดสอบและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ก. รายการทดสอบ

การทดสอบได้เตรียมตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจำนวน 4 ชิ้น เป็นเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงที่มีรอยต่อแบบเชื่อมที่กึ่งกลางความยาวของเสาเข็ม ตัวอย่างทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันคือ 40 ซม., 45 ซม., 60 ซม. และ 80 ซม. มีความยาวทั้งหมด 600 ซม. และมีช่วงทดสอบยาว 570 ซม. ลักษณะของตัวอย่างการเสริมเหล็กและหน้าตัด รวมทั้งรายละเอียดของรอยต่อแบบเชื่อมตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยใช้ชื่อตัวอย่างและคุณสมบัติดังที่แสดง ในตารางที่ 3.1 โดยได้เรียกชื่อตัวอย่างตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเริ่มตั้งแต่ ตัวอย่าง SPD-40 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 ซม. จนถึง SPD-80 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซม. ตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบการรับแรงดัดภายใต้แรงกระทำสถิตย์จนกระทั่งวิบัติ ทำการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ คือ แรงที่กระทำ วัดค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างที่ระยะ 110 ซม. จากจุดรองรับ ระยะ 40 ซม. จากจุดกึ่งกลาง และวัดการทรุดตัวของจุดรองรับ สังเกตุลักษณะการแตกร้าวของหน้าตัดเสาเข็ม และการเปลี่ยนแปลงของรอยต่อเชื่อมรวมไปถึงรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

ข. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่นำมาใช้ได้จากโรงงานของผู้ผลิต (13) มีรายละเอียดในการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบดังนี้

คอนกรีต

หินและทรายที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต ตรวจสอบขนาดคละ (Gradation) ตามข้อกำหนดของมวลรวมผสม ASTM C33-86 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามข้อกำหนดของ ASTM C 150-86 TYPE I หรือ TYPE III การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต จะต้องควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มากกว่า 0.45 โดยน้ำหนัก ปริมาณของซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 400 กก. ต่อ คอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร มีค่าการยุบตัวระหว่าง 5-10 ซม. เพื่อออกแบบให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัยของแท่งทรงกระบอกขนาดมาตรฐานเมื่ออายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 500 กก./ซม.^{2} และค่ากำลังอัดของคอนกรีตขณะถ่ายแรงไม่ต่ำกว่า 250 กก./ซม.^{2} จากผลการทดสอบสามารถหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัยได้เท่ากับ 525 กก./ซม^2 และใช้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรงเฉลี่ยเท่ากับ 310 กก./ซม^2

เหล็กเสริมสำหรับเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง

ลวดเหล็กอัดแรงที่ใช้เป็นลวดเหล็กอัดแรงชนิดกลมเส้นเดี่ยวแบบมีรอยย้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. ตามข้อกำหนด ASTM A421 มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 16,500 กก./ซม.^{2} ลวดเหล็กอัดแรงจะถูกเหยียดด้วยแรงดึงไม่น้อยกว่า 70-75% ของแรงดึงสูงสุด เพื่อใช้เป็นกำลังความต้านทานแรงดึงในขั้นแรก ในที่นี้ใช้ค่าแรงดึงก่อนเท่ากับ 11,550 กก./ซม^2 และค่าแรงดึงประสิทธิผลหลังจากหักค่าสูญเสีย 20.18 % แล้วเท่ากับ 9,220 กก./ซม^2

ลวดเหล็กปลอกเกลียวที่ใช้เป็นลวดเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มม. และ 4.2 มม. ตามข้อกำหนด มอก. 194-2519 มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 4,100 กก./ซม.^{2}

ส่วนประกอบของรอยต่อแบบเชื่อม

แผ่นเหล็กที่ใช้ ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A36 มีผลการทดสอบค่ากำลังดึงที่จุดคลากเฉลี่ยเท่ากับ 2,530 กก./ซม.^{2} มีค่าอีลาสติกโมดูลัส 2.1x10^6 กก./ซม.^{2} และค่ากำลังดึงสูงสุด 4,080 กก./ซม.^{2}

ลวดเชื่อมใช้วัสดุตามมาตราฐาน AWS A5.1 และ ASTM A233 ชนิด E60xx มีค่ากำลังดึงที่จุดคลากต่ำสุด 3,520 กก./ซม.^{2} และค่ากำลังดึงสูงสุดไม่ต่ำกว่า 4,366 กก./ซม.^{2}

เหล็กเสริมข้ออ้อยที่ใช้เป็นเหล็ก Dowel bar ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A615 ชนิด SD-40 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. ทดสอบค่ากำลังดึงที่จุดคลากได้ค่าเฉลี่ย 4,320 กก./ซม.^{2} และมีค่าอีลาสติกโมดูลัสเฉลี่ย 2.1x10^6 กก./ซม.^{2}

คุณสมบัติทางด้านกำลังของวัสดุทดสอบต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2

<u>การผลิตเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง</u>

เสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงได้ทำการผลิตในโรงงานโดยมีขั้นตอนดังนี้คือ ตัดลวดเหล็กอัดแรงตามขนาดที่ต้องการนำมาประกอบเข้ากับลวดเหล็กปลอกเกลียวและแผ่นเหล็กประกบปลายทั้งสองด้านของเสาเข็ม ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับเหล็กเสริมคอนกรีต เพื่อใช้สำหรับเป็นรอยต่อเชื่อมในภายหลัง ติดตั้งโครงเหล็กดังกล่าวลงบนแบบหล่อเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยแบบหล่อครึ่งวงกลมสองส่วนยึดติดกันด้วยวงแหวน หลังจากที่เข้าแบบและนำลงวางบนเพลาหมุนแล้ว ป้อนคอนกรีตที่ผ่านการผสมและตรวจสอบคุณภาพแล้วเข้าสู่แบบหล่อจนเต็ม หลังจากนั้นทำการดึงลวดเหล็กอัดแรงด้วยแรงดึงไม่น้อยกว่า 70% ของแรงดึงสูงสุด ปลายของลวดเหล็กอัดแรงทุกเส้นจะยึดติดกับแผ่นเหล็กสำหรับต่อเชื่อม หลังจากนั้นให้เครื่องจักรขับเพลาซึ่งสัมผัสกับวงแหวนของแบบหล่อให้หมุน แบบหล่อก็จะหมุนตามไปด้วย ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงอัดคอนกรีตเข้าแทนที่ช่องว่างภายในแบบหล่อจึงทำให้ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นเป็นพิเศษ ได้ค่ากำลังอัดสูง จากนั้นทำการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ หลังจากถอดแบบหล่อแล้วทำการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้กำลังอัดตามต้องการ

<u>การต่อเชื่อมเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง</u>

นำเสาเข็มที่ได้จากการผลิต ความยาวท่อนละ 6.00 เมตร มาตัดที่กึ่งกลางเป็นสองท่อนเหตุที่ใช้เสาเข็มจากการผลิตท่อนเดียวกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติของหน้าตัดที่ใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นนำปลายเสาเข็มด้านที่มีแผ่นเหล็กมาประกบกันเพื่อต่อเชื่อม โดยให้ตำแหน่งของลวดอัดแรงตรงกัน สำหรับชุดของรอยต่อเชื่อม ประกอบด้วยแผ่นเหล็กเชื่อมติดกับเหล็กข้ออ้อยฝังในเนื้อคอนกรีต และปลายของลวดเหล็กอัดแรงยึดติดกับแผ่นเหล็กด้วยพร้อมทั้งมีปลอกเหล็กบาง ๆ หุ้มบริเวณหัวเสาเข็มเพื่อกันแตกอีกชั้นหนึ่ง แผ่นเหล็กจะลบมุมไว้เป็นมุม 30 องศา เมื่อนำเสาเข็มทั้งสองท่อนมาประกบกันก็จะเป็นรอยบากรูปตัววี (V) มุม 60 องศา แล้วเชื่อมด้วยรอยเชื่อมแบบร่องลึกลงไปบางส่วน (Partial Groove Penetration Groove Welded) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้ขนาดของรอยเชื่อมและส่วนประกอบของรอยต่อเชื่อม ดังตารางที่ 3.1(b)

3.2 การติดตั้งและขั้นตอนในการทดสอบ

การติดตั้งชิ้นตัวอย่างและเครื่องมือทดสอบแสดงในรูปที่ 3.2 ถึง 3.6 โดยให้ชิ้นตัวอย่างวางบนจุดรองรับที่มีช่วงทดสอบยาวเท่ากับ 570 ซม. ลักษณะแรงกระทำแบบสถิตย์ที่ใช้ทดสอบเป็นแบบแรงกดสองจุด โดยส่งผ่านแรงจากเครื่องกดน้ำหนักไฮโดรลิกที่มีระยะห่างระหว่างแรงกระทำเท่ากับ 200 ซม. ใช้เครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัวที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นตัวอย่าง โดยที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางความยาว 40 ซม. ทั้งสองด้านใช้เครื่องมือวัดค่าการเปลี่ยนระยะในแนวดิ่งแบบไฟฟ้า LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers) ซึ่งสามารถวัดค่าการแอ่นตัวในแนวดิ่งของชิ้นตัวอย่างได้ละเอียดถึง 0.0001 มม. ที่ระยะห่างจากจุดรองรับเท่ากับ 110 ซม. และที่จุดรองรับทั้งสองด้านใช้ Dial gauge วัดค่าการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่างและการทรุดตัวของจุดรองรับ รวมมีการวัดค่าระยะเปลี่ยนแปลงบนชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 6 จุด

สำหรับการอ่านค่าจากเครื่องมือนั้น แรงกดจากเครื่องกดน้ำหนักไฮโดรลิกที่ใช้ใน ที่นี้มีแรงกระทำสูงสุด 100 ตัน เครื่องควบคุมสามารถปรับขอบเขตของแรงกระทำสูงสุดได้จาก 10, 20, 50, 100 และ 150 ตัน โดยค่าเชิงตัวเลขที่อ่านได้จากแผงควบคุมจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำสูงสุดตามขอบเขตที่ได้ปรับไว้ ซึ่งการปรับขอบเขตของแรงกระทำสูงสุดต้องให้สัมพันธ์กับค่าที่คาดคะเนไว้โดยประมาณทางทฤษฎีเพื่อให้ได้ค่าจากการอ่านที่ละเอียดยิ่งขึ้น สำหรับการอ่านค่าจากเครื่อง LVDT's หลังจากที่ต่อสายนำสัญญาณเข้ากับเครื่องแปลงสัญญาณ (Data Logger) ซึ่งถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเครื่อง LVDT's จะถูกแปลงเป็นระยะแอ่นตัว ข้อมูลที่ผ่านการแปลงสัญญาณแล้วจะปรากฏขึ้นบนแผงควบคุมเป็นเชิงตัวเลข โดยแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของระยะแอ่นตัวสูงสุดตามขอบเขตที่ได้ปรับไว้เช่นเดียวกัน ในที่นี้ระยะแอ่นตัวสูงสุดที่สามารถวัดได้เท่ากับ 50 มม.โดยสามารถปรับขอบเขตของระยะแอ่นตัวสูงสุดได้ได้ตั้งแต่ 10, 20, 50 และ 100 มม. ตามลำดับ สำหรับการอ่านค่าจาก Dial gauge ได้จากการอ่านโดยตรง ซึ่ง Dial gauge ที่ใช้มีค่าความละเอียด 0.01 มม.และ 0.001 นิ้ว (0.0254 มม.)

ในแต่ละขั้นตอนของการเพิ่มแรงกระทำให้อ่านค่าการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่างทุกจุด และสังเกตุการแตกร้าว โดยสเก็ตรอยแตกร้าวพร้อมกับทำการบันทึกภาพไว้ จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติ แล้วสังเกตุลักษณะการวิบัติ

3.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัว โดยจะพิจารณาค่าของแรงกระทำ ค่าการแอ่นตัว ตำแหน่งที่เกิดการแตกร้าวเริ่มแรก ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ และรูปแบบของการวิบัติ ของตัวอย่างทดสอบดังนี้

ก. ผลการทดสอบตัวอย่าง SPD-40

ผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.3 ตรวจสอบสภาพของเสาเข็มและรอยต่อก่อนการทดสอบ พบว่าเสาเข็มอยู่ในสภาพสมบูรณ์ เมื่อนำมาแม่แรงมาวางบนตำแหน่ง ปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างเกิดการแอ่นเริ่มต้นเนื่องจากน้ำหนักของแม่แรงและน้ำหนักของตัวเองเล็กน้อย แต่แรงกระทำยังคงเป็นศูนย์ เพิ่มแรงกระทำอย่างช้า ๆ ครั้งละประมาณ 100 กก. การแอ่นตัวก็เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ 1,100 กก. เริ่มสังเกตุเห็นรอยแตกร้าวเริ่มแรก 2 รอย ที่ระยะประมาณ 55 ซม. จากจุดกึ่งกลางทั้งสองข้าง โดยรอยแตกร้าวลึกประมาณ 6 ซม. ตั้งฉากกับความยาวชิ้นส่วน เมื่อเพิ่มแรงกระทำถึง 1,400 กก. สังเกตุเห็นรอยแตกร้าว 2 รอย อยู่นอกช่วงของการดัดใกล้กับตำแหน่ง ของแรงกระทำทั้งสองข้าง ส่วนรอยแตกร้าวภายในช่วงของการดัดมี 2 รอย ลึกประมาณครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นส่วน สังเกตุที่รอยต่อแบบเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดและคอนกรีตบริเวณรอยต่อก็ไม่มีรอยแตกร้าว จนกระทั่งถึงแรงกระทำเท่ากับ 2,600 กก. จึงเริ่มมีการแตกร้าวของคอนกรีต ที่ระยะห่างจากรอยต่อประมาณ 15 ซม. เพิ่มแรงกระทำมากขึ้นเรื่อย ๆ การแอ่นตัวและรอยแตกร้าวมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งแรงกระทำเพิ่มขึ้นไปถึง 3,200 กก. และช่วงนี้การแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่างจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเกิดการวิบัติ โดยสามารถอ่านค่าแรงกระทำสูงสุดได้เท่ากับ 3,200 กก. และมีรอยแตกร้าวทั้งหมดที่นับได้จำนวน 11 รอย ส่วนมากอยู่ในช่วงของการดัด ซึ่งมีจำนวน 7 รอยและอยู่นอกช่วงของการดัด จำนวน 4 รอยอยู่ใกล้ตำแหน่งแรงกระทำ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นกระจายอย่างสม่ำเสมอบริเวณช่วงการดัด โดยสังเกตุได้ว่าความลึกของรอยแตกร้าว บริเวณใกล้กับรอยต่อจะมีค่าลดลงตามลำดับเนื่องจากหน้าตัดบริเวณรอยต่อมีค่าสติฟเนสสูงกว่า จุดที่เกิดการวิบัติอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของชิ้นส่วนเท่ากับ 62 ซม. อยู่นอกบริเวณรอยต่อ ลักษณะของรอยแตกร้าวตั้งฉากกับชิ้นส่วนลึกประมาณ 32 ซม. โดยที่ลวดเหล็กอัดแรงด้านล่างขาดก่อนที่คอนกรีตที่ผิวบนเกิดการกะเทาะ ซึ่งเป็นการวิบัติโดยการดัด (Flexure failure) ส่วนรอยต่อแบบเชื่อมสังเกตุเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดยังคงสภาพสมบูรณ์คงเดิม ภาพถ่ายการแตกร้าวขณะเกิดการวิบัติ, รอยต่อเชื่อมหลังจากการวิบัติ และภาพสเก็ตแสดงรูปแบบของรอยแตกร้าว แสดงในรูปที่ 3.7, 3.8 และ 3.15 ตามลำดับ

ข. ผลการทดสอบตัวอย่าง SPD-45

ผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.4 ตรวจสอบสภาพของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงและรอยต่อเชื่อมก่อนการทดสอบ พบว่าอยู่ในสภาพสมบูรณ์ เมื่อนำแม่แรงมาวางลงบนตำแหน่ง ปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างเกิดการแอ่นตัวเริ่มต้น เนื่องจากน้ำหนักของแม่แรงและน้ำหนักของตัวเองเล็กน้อย แต่แรงกระทำยังคงเป็นศูนย์ เพิ่มแรงกระทำอย่างช้า ๆ ครั้งละประมาณ 400 กก. การแอ่นตัวก็เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ 2,000 กก. เริ่มสังเกตุเห็นรอยแตกร้าวครั้งแรก จำนวน 2 รอย ที่ระยะประมาณ 52

ซม. จากจุดกึ่งกลางทั้งสองข้าง โดยรอยแตกร้าวลึกประมาณ 15 ซม. เป็นแนวตั้งฉากกับความยาวของชิ้นส่วน เพิ่มน้ำหนักบรรทุกอีกครั้งละ 200 กก. การแอ่นตัวและรอยแตกร้าวก็มีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ 3,800 กก. สังเกตุเห็นรอยแตกร้าว จำนวน 9 รอย กระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมี 8 รอย อยู่ในช่วงของการดัด และมี 1 รอย อยู่นอกช่วงของการดัด ความลึกของรอยแตกร้าวในช่วงการดัดลึกเฉลี่ยประมาณ 30 ซม. และรอยแตกร้าวบริเวณใกล้รอยต่อมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 14 ซม. ตั้งฉากกับความยาวของชิ้นส่วนสังเกตุที่รอยต่อแบบเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เมื่อเพิ่มแรงกระทำมากขึ้นเรื่อย ๆ การแอ่นตัวและรอยแตกร้าวมีอัตราเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วจนกระทั่งแรงกระทำเพิ่มขึ้นไปถึง 5,100 กก. จึงเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใดจนไม่สามารถอ่านค่าการแอ่นตัวได้ทัน มีรอยแตกร้าวทั้งหมดที่นับได้ จำนวน 11 รอย อยู่ในช่วงของการดัดจำนวน 8 รอย และอยู่นอกช่วงการดัดจำนวน 3 รอย ซึ่งอยู่ใกล้กับตำแหน่งน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นกระจายอย่างสม่ำเสมอบริเวณช่วงการดัด โดยสังเกตุได้ว่าความลึกของรอยแตกร้าวจะลดลงตามลำดับเมื่อเข้าใกล้บริเวณของรอยต่อเนื่องจากหน้าตัดบริเวณรอยต่อมีสติฟเนสสูงกว่า จุดที่เกิดการวิบัติอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลางของชิ้นส่วนเท่ากับ 50 ซม. ซึ่งอยู่นอกบริเวณรอยต่อ ลักษณะของรอยแตกร้าวตั้งฉากกับชิ้นส่วน ลึกประมาณ 37 ซม. โดยที่ลวดเหล็กอัดแรงด้านล่างขาดก่อนที่คอนกรีตที่ผิวบนเกิดการกะเทาะ ซึ่งเป็นการวิบัติโดยการดัด ส่วนรอยต่อแบบเชื่อมสังเกตุเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ภาพถ่ายแสดงการวิบัติ, รอยต่อแบบเชื่อมหลังจากการวิบัติ และภาพสเก็ตแสดงรูปแบบของรอยแตกร้าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.9, 3.10 และ 3.16 ตามลำดับ

ค. <u>ผลการทดสอบตัวอย่าง SPD-60</u>

ผลการทดสอบแสดงอยู่ใน ตารางที่ 3.5 ตรวจสอบสภาพของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงและรอยต่อแบบเชื่อมก่อนการทดสอบอยู่ในสภาพสมบูรณ์ นำแม่แรงวางลงบนตำแหน่งและเพิ่มแรงกระทำอย่างช้า ๆ ครั้งละประมาณ 400 กก. การแอ่นตัวก็เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ 6,700 กก. เริ่มสังเกตุเห็นรอยแตกร้าวเริ่มแรก 2 รอย ที่ระยะประมาณ 90 ซม. จากจุดกึ่งกลางทั้งสองข้าง โดยรอยแตกร้าวลึกประมาณ 25 ซม. ตั้งฉากกับความยาวของชิ้นส่วน เพิ่มแรงกระทำต่อไป การแอ่นตัวและรอยแตกร้าวก็มีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ 10,440 กก. จึงเริ่มเกิดรอยแตกร้าวในช่วงของการเฉือน จำนวน 1 รอย และมีรอยแตกร้าวในช่วงของการดัดจำนวน 6 รอย กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ สังเกตุที่บริเวณรอยต่อแบบเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนแปลง และหน้าตัดคอนกรีตบริเวณข้างเคียงทั้งสองด้านไม่มีรอยแตกร้าว เมื่อเพิ่มแรงกระทำจนถึง 13,600 กก. รอยแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นเป็น 13 รอย เป็นรอยแตกร้าวในช่วงการดัด 6 รอย และนอกช่วงการดัดอีก 7 รอย ลักษณะของรอยแตกร้าววางตัวเป็นแนวทะแยงมุม จากจุดเริ่มแตกร้าววิ่งเข้าหาตำแหน่งของแรงกระทำ สำหรับบริเวณรอยต่อแบบเชื่อมที่หน้าตัดห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากับ 25 ซม. ด้านหนึ่งเริ่มมีรอยแตกร้าวลึกประมาณ 25 ซม. ทำมุมตั้งฉากกับชิ้นส่วน แต่ที่รอยเชื่อมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เมื่อเพิ่มแรงกระทำจนถึง 14,230 กก. จึงได้เกิดการวิบัตินอกบริเวณรอยต่อที่ระยะ 90 ซม. จากจุดกึ่งกลางของชิ้นส่วน ซึ่งเป็นการวิบัติการโดยการดัด โดยที่ลวดเหล็กอัดแรงด้านล่างขาด

ก่อนที่คอนกรีตที่ผิวบนเกิดการกะเทาะ จำนวนของรอยแตกร้าวยังคงเดิม แต่มีความลึกเพิ่มมากขึ้น สังเกตุรอยแตกร้าวจะมีทั้งการแตกร้าวโดยการเฉือนและการดัดร่วมกัน ส่วนที่รอยต่อแบบเชื่อม สังเกตุเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ภาพถ่ายแสดงการวิบัติ, รอยต่อแบบเชื่อมหลังจากการวิบัติ และภาพสเก็ตแสดงรูปแบบของรอยแตกร้าว แสดงไว้ในรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.17 ตามลำดับ

ง. <u>ผลการทดสอบตัวอย่าง SPD-80</u>

ผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.6 ตรวจสอบสภาพของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงและรอยต่อแบบเชื่อมก่อนการทดสอบ พบว่ามีรอยแตกร้าวเล็กน้อยที่หน้าตัดบริเวณปลายเสาเข็มทั้งสองด้าน เป็นรอยแตกร้าวตั้งฉากกับเส้นรอบวงของหน้าตัดเสาเข็ม เพิ่มแรงกระทำอย่างช้า ๆ ครั้งละประมาณ 1,000 กก. การแอ่นตัวก็เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ยังไม่เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงแรงกระทำประมาณ 14,000 กก. ได้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของเสาเข็ม เป็นรอยแตกร้าวที่ผิวบนสุดของเสาเข็ม ตั้งฉากกับเส้นรอบวงของหน้าตัด เป็นแนวยาวขนานกับความยาวของชิ้นส่วน ยาว 30 ซม. เมื่อเพิ่มแรงกระทำมากขึ้น ก็เกิดรอยแตกร้าวในลักษณะเดียวกันที่ผิวบนของปลายเสาเข็มอีกด้านหนึ่ง และเพิ่มการแตกร้าวที่ผิวด้านข้างและด้านล่างของหน้าตัดเสาเข็มที่ปลายทั้งสองด้าน โดยรอยแตกร้าวทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะวิ่งเข้าสู่กึ่งกลางความยาวของชิ้นส่วน เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก 42,000 กก. จึงได้เกิดการวิบัติที่ปลายด้านหนึ่งของเสาเข็ม ซึ่งเป็นการวิบัติในลักษณะของท่อกลมรับแรงดัด (Arch Action) พบว่ามีคอนกรีตแยกออกจากกันเป็นแนวตามความยาวของเสาเข็ม ที่ด้านบน, ด้านล่างและด้านข้างทั้งสองด้าน โดยเหล็กปลอกเกลียวขาดตลอดแนวของรอยแตกร้าว ความยาวของรอยแตกร้าวมากที่สุดประมาณ 250 ซม. ส่วนที่รอยต่อแบบเชื่อมสังเกตุเห็นได้ว่าไม่มีการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ และที่รอยเชื่อมก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ภาพแสดงการวิบัติ, รอยต่อแบบเชื่อมหลังจากการวิบัติและภาพสเก็ตแสดงรูปแบบของรอยแตกร้าว แสดงไว้ในรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.18 ตามลำดับ

จ. <u>ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวจากผลการทดสอบ</u>

นำผลการทดสอบกำลังดัดข้างต้น มาคำนวณเพื่อหาค่าแรงและการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากในการใช้เครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่าง จะเริ่มวัดค่าเมื่อได้นำชิ้นตัวอย่างวางลงบนจุดรองรับและนำแม่แรงวางลงบนชิ้นตัวอย่างแล้ว จึงเกิดการแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองและน้ำหนักของแม่แรงไปก่อน ซึ่งค่าการแอ่นตัวเริ่มต้นนี้ สามารถประมาณได้โดยการใช้ค่าเทียบเท่าจากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีค่าของแรงและการแอ่นตัวเริ่มต้นเมื่อนำไปรวมกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่าง SPD-40, SPD-45, SPD-60 และ SPD-80 ดังตารางที่ 3.7 ถึง 3.10 ตามลำดับ และแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.25 ถึง 3.28 ตามลำดับ

3.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวตั้งแต่รับแรงกระทำจนกระทั่งถึงวิบัติ

ก. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบ

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่าง ใช้ทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์ที่กล่าวถึงในบทที่ 2 และใช้คุณสมบัติของวัสดุตามตัวอย่างทดสอบ โดยคิดค่าการแอ่นตัว ณ จุดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดค่าไว้คือที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง 40 ซม. และที่ระยะห่างจากจุดรองรับ 110 ซม. จากนั้นนำค่าแรงและการแอ่นตัวที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ณ ตำแหน่งเดียวกัน ก่อนที่จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัว จะทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของหน้าตัดต่าง ๆ ก่อน เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบโดยใช้หลักการของงานเสมือน ซึ่งจะแบ่งหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบตามคุณสมบัติของหน้าตัดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยหน้าตัดที่ 1 คือ หน้าตัดคอนกรีตอัดแรงทั่วไป, หน้าตัดที่ 2-6 คือ หน้าตัดที่ประกอบด้วยคอนกรีตอัดแรงและเหล็กเสริมข้ออ้อยบริเวณรอยต่อซึ่งหน้าตัดบริเวณนี้จะมีสติฟเนสสูงกว่าหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงโดยคำนึงถึงผลของความยาวของเหล็กเสริมข้ออ้อยที่ฝังในเนื้อคอนกรีต (Development Length) หน้าตัดที่เหล็กเสริมข้ออ้อยมีความยาววัดจากปลายสุดของเหล็กเสริมน้อยกว่าระยะยึดเหนี่ยวที่กำหนด หน่วยแรงสูงสุดของเหล็กในหน้าตัดนั้นจะน้อยกว่าค่ากำลังคลาก (f_y), หน้าตัดที่ 7 คือ หน้าตัดที่ผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กและคอนกรีตรับแรงร่วมกับรอยเชื่อม ส่วนหน้าตัดที่ 8 คือ หน้าตัดรอยเชื่อมในขั้นตอนของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาปาสคาลช่วยในการวิเคราะห์เนื่องจากมีลำดับขั้นตอนซ้ำ ๆ กัน และต้องหารากของสมการซึ่งมีความยุ่งยาก การวิเคราะห์หน้าตัดเสาเข็มแสดงได้ตามผังการคำนวณ (Flow Chart) ในรูปที่ 3.20 ส่วนการวิเคราะห์หน้าตัดอื่น ๆ ก็ใช้ขั้นตอนในการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกัน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.21 ถึง 3.24 จะเห็นว่าหน้าตัดที่ 1 ซึ่งเป็นหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงสามารถรับโมเมนต์ดัดจนถึงกำลังประลัยได้น้อยที่สุด ขณะที่ค่าความโค้งซึ่งมีผลทำให้เกิดการแอ่นตัวมีค่ามากที่สุด สำหรับหน้าตัดที่ 2-6 ซึ่งเป็นหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงและเหล็กเสริมข้ออ้อย สามารถรับโมเมนต์ดัดได้มากขึ้นและมีค่าความโค้งซึ่งมีผลทำให้ค่าการแอ่นตัวน้อยลง ส่วนหน้าตัดที่ 7 และ 8 ซึ่งเป็นหน้าตัดบริเวณรอยเชื่อมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้สูงมากโดยที่มีค่าความโค้งน้อย ซึ่งขนาดรอยเชื่อมที่ใช้ในการทดสอบนี้มีความหนามากกว่าขนาดที่ต้องการสำหรับการรับแรงดัดเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานได้ว่าหน้าตัดบริเวณรอยเชื่อมมีผลต่อการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบน้อยมากเนื่องจากมีค่าสติฟเนสสูงและมีความหนาน้อยเมื่อเทียบกับความยาวทดสอบ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

โมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดต่าง ๆ จะเห็นว่าเสาเข็มตัวอย่างสามารถรับโมเมนต์ดัดได้ไม่เกินความต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง (หน้าตัดที่ 1) จึงสามารถทำนายได้ว่าจะเกิดการแตกร้าวและการวิบัติขึ้น ณ จุดนี้ก่อน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก สามารถวิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวได้โดยใช้ขั้นตอนในการวิเคราะห์ ตามหัวข้อที่ 2.2.2 เริ่มจากการวิเคราะห์หาไดอะแกรมของโมเมนต์ดัดจากฟังก์ชั่นของแรงกระทำภายนอก และใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.5(ก) เพื่อหาค่าความโค้งที่สอดคล้องกับโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากแรงกระทำภายนอก ณ หน้าตัดต่าง ๆ บนช่วงความยาวของคาน แล้วใช้หลักการของงานเสมือน วิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวในตำแหน่งที่ต้องการทราบได้ ซึ่งในการวิเคราะห์จะคิดผลการแอ่นตัวเริ่มแรกเนื่องจากน้ำหนักแผ่เฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบก่อนที่จะใส่แรงกระทำเข้าไปด้วยผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่าง SPD-40, SPD-45, SPD-60 และ SPD-80 แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.7 ถึง 3.10 ตามลำดับ และแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.25 ถึง 3.28 ตามลำดับ

ข. <u>การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวจากผลทดสอบเทียบกับการวิเคราะห์</u>

ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่าง โดยนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี พิจารณาค่าแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ จุดแตกร้าวและจุดวิบัติ รวมถึงพิจารณาความสัมพันธ์ในช่วงอื่น ๆ ตลอดช่วงการวิเคราะห์และการทดสอบ ค่าการรับแรงดัดและการแอ่นตัวสูงสุดจากผลการทดสอบเทียบกับการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 3.11 อธิบายการเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบแต่ละขนาดดังนี้

<u>การเปรียบเทียบตัวอย่าง SPD-40</u>

พิจารณารูปที่ 3.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่าง SPD-40 โดย เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 110 ซม.จากจุดรองรับ (Dset1) และค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 40 ซม. จากจุดกึ่งกลาง (Dset2) สังเกตุกราฟในช่วงแรกก่อนเกิดการแตกร้าวของหน้าตัด (โดยแรงกระทำที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวจากผลการทดสอบเท่ากับ 2,400 กก.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวจากผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมากจนแทบเป็นกราฟเส้นเดียวกัน หลังจากนั้นกราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกันมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ ได้ค่าแรงกระทำประลัยจากผลการทดสอบเท่ากับ 4,200 กก. และจากการวิเคราะห์เท่ากับ 4,520 กก. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.93 เท่าของผลการวิเคราะห์, ค่าการแอ่นตัวสูงสุด ของตัวอย่างที่ระยะห่างจากจุดรองรับ 110 ซม.(นอกบริเวณรอยต่อ) จากผล

I 16894832

การทดสอบได้เท่ากับ 29.47 มม. ค่าจากผลการวิเคราะห์เท่ากับ 35.16 มม. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.84 เท่าของผลการวิเคราะห์, และค่าการแอ่นตัวสูงสุดของตัวอย่างที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง 40 ซม.(ภายในบริเวณรอยต่อ) จากผลการทดสอบได้เท่ากับ 53.85 มม. จากผลการวิเคราะห์เท่ากับ 61.98 มม. ได้ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.84 เท่าของผลการวิเคราะห์ ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างจากการทดสอบเป็นการวิบัติโดยการดัด (Flexural failure) และเกิดขึ้นนอกบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการวิเคราะห์

<u>การเปรียบเทียบตัวอย่าง SPD-45</u>

พิจารณารูปที่ 3.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่าง SPD-45 โดย เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 110 ซม.จากจุดรองรับ (Dset1) และค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 40 ซม. จากจุดกึ่งกลาง (Dset2) สังเกตุกราฟในช่วงแรกก่อนเกิดการแตกร้าวของหน้าตัด (โดยแรงกระทำที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวจากผลการทดสอบเท่ากับ 3,000 กก.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวจากผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมากจนแทบเป็นกราฟเส้นเดียวกัน หลังจากนั้นกราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกันเล็กน้อย จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ ได้ค่าแรงกระทำประลัยจากผลการทดสอบเท่ากับ 6,100 กก. ขณะที่ค่าจากการวิเคราะห์ได้เท่ากับ 6,230 กก. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.98 เท่าของผลการวิเคราะห์, ค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างที่ระยะห่างจากจุดรองรับ 110 ซม.(นอกบริเวณรอยต่อ) จากผลการทดสอบได้เท่ากับ 23.11 มม. ขณะที่ผลการวิเคราะห์ได้เท่ากับ 27.23 มม. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.85 เท่าของผลการวิเคราะห์, และค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง 40 ซม.(ภายในบริเวณรอยต่อ) จากผลการทดสอบได้เท่ากับ 49.70 มม. ขณะที่ผลการวิเคราะห์ได้เท่ากับ 48.63 มม. ได้ค่าจากผลการทดสอบเป็น 1.02 เท่า ของผลการวิเคราะห์, สำหรับค่าการแอ่นตัวทั้งสองจุดที่นำมาเปรียบเทียบกันของตัวอย่างนี้ ใช้ค่าการแอ่นตัวที่แรงกระทำเท่ากับ 6,000 กก. เนื่องจากเป็นค่าสุดท้ายที่สามารถอ่านค่าการแอ่นตัวได้จากการทดสอบ ก่อนที่ชิ้นตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างจากการทดสอบเป็นการวิบัติโดยการดัด (Flexural failure) และเกิดขึ้นนอกบริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการวิเคราะห์

<u>การเปรียบเทียบตัวอย่าง SPD-60</u>

พิจารณารูปที่ 3.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่าง SPD-60 โดย เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 110 ซม.จากจุดรองรับ (Dset1) และค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 40 ซม. จากจุดกึ่งกลาง (Dset2) สังเกตุกราฟในช่วงแรกก่อนเกิดการแตกร้าวของหน้าตัด (โดยแรงกระทำที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวจากผลการทดสอบเท่ากับ 7,780 กก.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวจากผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมากจนแทบเป็นกราฟเส้นเดียวกัน หลังจากนั้น

กราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกันมากขึ้น โดยขณะที่แรงกระทำเท่า ๆ กัน ค่าการแอ่นตัวจากผลการทดสอบน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ ได้ค่าแรงกระทำประลัยจากผลการทดสอบเท่ากับ 15,230 กก. และจากการวิเคราะห์เท่ากับ 13,020 กก. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 1.17 เท่าของผลการวิเคราะห์, ค่าการแอ่นตัวสูงสุด ของตัวอย่างที่ระยะห่างจากจุดรองรับ 110 ซม.(นอกบริเวณรอยต่อ) จากผลการทดสอบได้เท่ากับ 28.08 มม. ค่าจากผลการวิเคราะห์เท่ากับ 28.91 มม. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.97 เท่าของผลการวิเคราะห์, และค่าการแอ่นตัวสูงสุดของตัวอย่างที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง 40 ซม.(ภายในบริเวณรอยต่อ) จากผลการทดสอบได้เท่ากับ 50.33 มม. จากผลการวิเคราะห์เท่ากับ 52.18 มม. ได้ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.96 เท่าของผลการวิเคราะห์ ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างจากการทดสอบเป็นการวิบัติโดยการดัด (Flexural เกิดขึ้นนอกบวณรอยต่อซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการวิเคราะห์

<u>การเปรียบเทียบตัวอย่าง SPD-80</u>

จากผลการทดสอบพบว่าการแตกร้าวของตัวอย่างนี้ เกิดการแตกร้าวในแนวตั้งฉากกับเส้นรอบวงของหน้าตัด บริเวณปลายเสาเข็มตัวอย่างทั้งสองด้าน โดยเริ่มแตกร้าวที่ผิวล่างด้านในและผิวนอกด้านบนก่อนและต่อมาแตกร้าวที่ผิวนอกด้านข้างทั้งสองข้าง ซึ่งเป็นผิวรับแรงดึงของคอนกรีตเพราะคอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้น้อยและค่าแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดเหล่านี้จึงเกิดการแตกร้าวจนกระทั่งเกิดการวิบัติขึ้นตามรอยแตกร้าว โดยเหล็กปลอกเกลียวขาดตลอดแนวของรอยแตกร้าว ซึ่งเป็นการวิบัติในรูปของท่อกลมรับแรงอัด (Arch Action) ดังนั้นลักษณะของการวิบัติจึงไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ซึ่งเป็นการวิบัติโดยการดัด (Flexural failure) ซึ่งเกิดจากสาเหตุที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่างเสาเข็มมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับช่วงความยาวทดสอบ ตามข้อกำหนดของ ACI การวิบัติโดยการดัดจะเกิดขึ้นได้เมื่อ ช่วงความยาวของการเฉือน (Shear span) ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของขนาดความลึกของคาน ดังนั้นตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากับ 185/80 = 2.3 เท่า จึงมีโอกาสทำให้เกิดการวิบัติตามรูปแบบดังกล่าวได้

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.28 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่าง SPD-80 จะเห็นว่าผลการทดสอบไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี, โดยค่าแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้เกิดการวิบัติจากผลการทดสอบเท่ากับ 22,100 กก. ขณะที่ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้ค่าแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 36,780 กก. ค่าจากผลการทดสอบเป็น 0.60 เท่าของผลการวิเคราะห์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของชิ้นตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบ ณ แรงกระทำสูงสุดที่หน้าตัดเกิดการวิบัติจากการทดสอบเท่ากับ 22,100 กก. จะได้ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 110 ซม. จากจุดรองรับ จากผลการทดสอบประมาณ 1.77 เท่า ของผลการวิเคราะห์ (4.95 มม./2.80 มม.) และได้ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ 40 ซม. จากจุดกึ่งกลาง จากผลการทดสอบประมาณ 1.72 เท่า ของผลการวิเคราะห์ (8.64 มม./5.03 มม.) ซึ่งค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบดังกล่าวเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์.

ค. <u>การเปรียบเทียบเสาเข็มรับแรงอัดร่วมแรงดัดจากผลการทดสอบกับการวิเคราะห์</u>

พฤติกรรมในการรับแรงของเสาเข็มมักจะรับทั้งแรงอัดและแรงดัดร่วมกันเสมอ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบการรับแรงอัดร่วมแรงดัดของเสาเข็ม ดังนั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวจึงได้นำผลการทดสอบที่ผ่านมา เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ใช้ในที่นี้ เพื่อหากำลังประลัยของหน้าตัดเสาเข็มและใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาขนาดของรอยเชื่อมรับแรงอัดร่วมแรงดัดที่เหมาะสมต่อไป

ศ.ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ (15) ได้ทำการทดสอบแรงอัดร่วมแรงดัดของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 ซม. จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีคุณสมบัติของหน้าตัดและกำลังของวัสดุเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (จากผู้ผลิตเดียวกัน,13) โดยใช้เสาเข็มความยาว 13.00 ม. ช่วงทดสอบ 12.00 ม. เพิ่มแรงดัดโดยใช้แรงกระทำด้านข้างแบบ 2 จุด ที่ระยะ 1/3 ของช่วงทดสอบ โดยตัวอย่างแรกรับแรงอัดตามแนวแกน 50 ตัน และตัวอย่างที่สองรับแรงอัดตามแนวแกน 100 ตัน ทำการวัดระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงโดยใช้ LVDT และติด Strain Gauge เพื่อวัดความเครียดที่ผิวบนและล่างไปพร้อมกัน

จากผลการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ซึ่งเกิดจากแรงกระทำด้านข้างและน้ำหนักตายตัวของเสาเข็มรวมกับแรงตามแนวแกนคูณกับระยะแอ่นตัว และค่าความโค้งจากการวัดค่าความเครียดที่ผิวบนและล่าง สำหรับตัวอย่างแรก (P=50 ตัน) ได้ค่าโมเมนต์สูงสุด 38.49 ตัน-ม. และค่าความโค้งสูงสุดวัดได้ 0.00825 เรเดียน/ม. ตัวอย่างที่สอง (P=100 ตัน) ได้ค่าโมเมนต์สูงสุด 41.04 ตัน-ม. และค่าความโค้งสูงสุดวัดได้ 0.0079 เรเดียน/ม. เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างแรก (P=50 ตัน) ได้ค่าโมเมนต์สูงสุด 35.89 ตัน-ม. คิดเป็น 0.93 เท่าของผลทดสอบ ตัวอย่างที่สอง (P=100 ตัน) ได้ค่าโมเมนต์สูงสุด 44.85 ตัน-ม. คิดเป็น 1.09 เท่าของผลทดสอบ ส่วนค่าความโค้งที่จุดประลัยจากผลการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าผลการทดสอบทั้งสองตัวอย่างซึ่งมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าจากการทดสอบที่สามารถอ่านได้ แต่อย่างไรก็ตามกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งในช่วงแรกก่อนหน้าตัดแตกร้าวมีความสอดคล้องกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.29

ในรูปที่ 3.30 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดร่วมแรงดัด (Interaction Curve) ของหน้าตัดเสาเข็มที่กำลังประลัย จากผลการวิเคราะห์หน้าตัดเสาเข็มสามารถรับแรงอัดได้สูงสุด 737 ตัน และหน้าตัดเสาเข็มรับแรงดัดอย่างเดียวได้ 25.75 ตัน-ม. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ที่กำลังประลัยของหน้าตัดเมื่อมีแรงอัดกระทำ 50 ตัน และ 100 ตัน เห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันมาก