บทที่ 2

ทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์กำลังดัดของรอยต่อแบบเชื่อมของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง (Moment-curvature) โดยวิเคราะห์หน้าตัดที่ไม่มีรอยเชื่อมต่อก่อน แล้วจึงใช้วิธีการในทำนองเดียวกัน ทำการวิเคราะห์หน้าตัดที่มีรอยเชื่อมต่อ โดยพิจารณาผลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในรอยต่อเชื่อม เช่น การเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมยึดแผ่นเหล็ก การสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กเมื่อรอยเชื่อมรับกำลังถึงหน่วยแรงคลาก เป็นต้น ในการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง เราต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Stress-strain) ของวัสดุต่าง ๆ ก่อน เพื่อนำไปใช้ประกอบในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดของรอยเชื่อมต่อของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง จะศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองตัวอย่างในพฤติกรรมการดัด การแอ่นตัว และการแตกร้าว แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองตัวอย่างนั้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพฤติกรรมโดยแท้จริงของเสาเข็มที่มีการรับแรงอัดร่วมกับแรงดัด และใช้ผลการศึกษาให้เป็นประโยชน์ในการหาขนาดของรอยเชื่อมต่อของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงให้สามารถรับแรงได้อย่างมีประสิทธิผลต่อไป การศึกษาจะทำตามลำดับขั้นตอนของการวิจัยตามที่ได้เสนอเป็นหัวข้อหลัก ๆ ไว้ในบทที่ 1 ดังนี้

2.1 แบบจำลองของวัสดุและรอยต่อแบบเชื่อม ของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง

2.1.1 แบบจำลองคุณสมบัติหลักของวัสดุ

ก. คอนกรีต

คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดีแต่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ คอนกรีตที่ใช้ในงานเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มาตรฐาน มอก. 398-2524 (8) ซึ่งเป็นมาตรฐานของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จแบบแรงเหวี่ยง ที่กำหนดขึ้นโดยอาศัยแนวทางของ JIS A 5335-1986 : Pretensioned Spun Concrete Piles ได้กำหนดให้ใช้ค่ากำลังอัด จากการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. เมื่ออายุ 28 วัน (f_c') ไม่น้อยกว่า 500 กก./ซม.^{2} และกำลังอัดขณะถ่ายแรงไม่น้อยกว่า 250 กก./ซม.^{2} ทั้งนี้เพราะคอนกรีตจะต้องต้านทานหน่วยแรงที่สูงมากบริเวณปลายชิ้นส่วนในขณะที่มีการถ่ายแรงอัดเริ่มแรกเข้าสู่องค์อาคาร นอก

จากนี้การใช้คอนกรีตกำลังสูง จะทำให้เกิดการคืบและการหดตัวน้อยลง ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียแรงอัดขณะถ่ายแรงอัดเริ่มแรกจนถึงช่วงเวลาใช้งานมีค่าน้อยลงด้วย

ในการวิเคราะห์กำลังของคอนกรีตโดยละเอียด จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต โดยทั่วไปในช่วงที่หน่วยแรงมีค่าน้อยประมาณ 0.5fc' ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงค่อนข้างเป็นเส้นตรง จนถึงค่าความเครียดสูงสุดมีค่าประมาณ 0.002 หลังจากนั้นหน่วยแรงจะลดลงในอัตราที่เร็วขึ้น จนถึงความเครียดที่ภาวะประลัย โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.003 ถึง 0.008 ได้มีผู้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในรูปสมการหลายท่าน ในที่นี้จะพิจารณาใช้สมการที่เสนอโดย Hognestad (9) ซึ่งแสดงในรูปของหน่วยแรงในเทอมของความเครียดเขียนได้ดังนี้

$$fc = fc' \left[2(\varepsilon/\varepsilon_0) - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2 \right] \qquad (2.1)$$

โดยที่

fc = หน่วยแรงในคอนกรีตที่ระดับใด ๆ , กก./ซม.^{2}

fc' = กำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน , กก./ซม.^{2}

ε = ความเครียดในคอนกรีตที่ระดับใด ๆ , ซม./ซม.

ε_0 = ความเครียดที่กำลังอัดสูงสุด , ซม./ซม.

ในรูปที่ 2.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดตามสมการที่ 2.1 มาตรฐาน ACI (10) ได้กำหนดให้ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Secant Modulus, E_c) ที่หน่วยแรงเท่ากับ 0.45 fc' สำหรับคอนกรีตมวลรวมปกติ หน่วยน้ำหนัก 2400 กก./ซม.^{2} เท่ากับ $15{,}120\sqrt{fc'}$ กก./ซม.^{2} และกำหนดค่าความเครียดสูงสุดที่ภาวะประลัย (ε_u) เท่ากับ 0.003 ในการวิเคราะห์กำลังของคอนกรีตในที่นี้ จะใช้ค่าการกระจายของหน่วยแรงตามสมการที่ 2.1 จนถึงความเครียดที่ภาวะประลัยของคอนกรีต ตามข้อกำหนดของ ACI

คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำมาก โดยปกติจะมีค่าประมาณ 15-20% ของกำลังอัด (10) การทดสอบกำลังรับแรงดึงอาจใช้วิธีกดคอนกรีตตามแนวยาว (Splitting Tensile Test) หรืออาจทำได้โดยการกดคานคอนกรีตล้วนหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 ซม. แล้วจึงคำนวณหากำลังดึงหรือโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture, fr) ซึ่งมีค่าเท่ากับโมเมนต์ดัด ในขณะที่คานแตกร้าวหารด้วยโมดูลัสของหน้าตัด (Section Modulus) มาตรฐาน ACI ได้กำหนด ให้ค่าต่ำสุดของโมดูลัสการแตกร้าวมีค่าเท่ากับ $1.99\sqrt{fc'}$ กก./ซม.^{2} ในการวิเคราะห์กำลังดัดของคอนกรีตในที่นี้จะไม่พิจารณากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่อยู่ต่ำกว่าแกนสะเทินของหน้าตัด หลังจากเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต ส่วนกำลังดึงก่อนการแตกร้าวใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดเช่นเดียวกับคอนกรีตรับกำลังอัด

ข. <u>ลวดเหล็กอัดแรง</u>

ลวดเหล็กอัดแรงที่ใช้กับเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง เป็นลวดเหล็กอัดแรงชนิดกลมเส้นเดี่ยวแบบมีรอยย้ำมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. เนื้อที่หน้าตัดเป็น 0.3848 ซม.^{2} ผลิต ตามมาตรฐาน ASTM A421 : Uncosted Stress Relieved Wire for Prestressed Concrete ซึ่งเป็นการผลิตโดยผ่านขบวนการดึงเย็น แล้วนำมาให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ เพื่อลดหน่วยแรงภายในซึ่งทำให้ความเหนียวของลวดเพิ่มขึ้นมีค่ากำลังดึงสูงสุด (f_{pu}) ไม่น้อยกว่า 16,500 กก./ซม.^{2} และค่ากำลังคลากวัดค่าหน่วยแรงดึงที่ 1 % ของความเครียด (f_{py}) ไม่น้อยกว่า 13,220 กก./ซม.^{2}

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดเหล็กอัดแรงโดยทั่วไป จะไม่แสดงจุดคลากที่แน่ชัด อัตราการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงก่อนถึงพิกัดเส้นตรง (Proportional Limit) ในช่วงแรกจะมีค่ามาก หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีความเครียดเพิ่มขึ้น จนถึงค่ากำลังประลัย ซึ่งมีค่าความเครียดประมาณ 0.05-0.06 ค่ากำลังคลากที่จะทำได้จากการกำหนดค่าความเครียด สำหรับลวดชนิดนี้ มาตรฐาน ASTM กำหนดให้ใช้ค่าความเครียดที่ 0.010 ในการคิดกำลังคลาก มีผู้เสนอสมการของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดไว้หลายท่าน ในที่นี้จะใช้สมการที่เสนอโดย Devalapura และ Tadros (11) ซึ่งได้ทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่ผลิตตามมาตรฐาน ASTM จำนวนหนึ่ง แล้วปรับปรุงสมการพื้นฐานในรูปสมการยกกำลัง (Power formula) พร้อมทั้งได้กำหนดค่าคงที่สำหรับเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM ชนิดต่าง ๆ โดยมีรูปสมการดังนี้

$$f_{ps} = \varepsilon_{ps} \left\{ A + B / [\, 1 + (C\varepsilon_{ps})^{D} \,]^{1/D} \right\} \leq f_{pu} \qquad (2.2)$$

โดย

f_{ps} = หน่วยแรงของลวดอัดแรงที่ระดับใด ๆ , กก./ซม.^{2}

ε_{ps} = ความเครียดในลวดอัดแรงที่ระดับใด ๆ , ซม./ซม.

A,B,C,D = ค่าคงที่ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับกำลังของลวดอัดแรง

รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดเหล็กอัดแรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยค่าคงที่ต่างๆ สามารถหาได้เมื่อทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง(E_{ps}), ค่ากำลังดึงสูงสุด (f_{pu}), ค่าความเครียดที่ f_{pu} (ε_{pu}), ค่ากำลังคลาก (f_{py}) และค่าความเครียดที่ f_{py} (ε_{py}) สำหรับลวดอัดแรงที่ใช้การวิจัยนี้ กรณีที่ใช้ค่าต่ำสุดตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM และใช้ค่า E_{ps} เท่ากับ 2×10^6 กก./ซม.^{2} จะได้ค่าคงที่ A,B,C, และ D เป็น 28.34, 2,011, 133.1 และ 5.463 ตามลำดับ

ในการผลิตใช้วิธีการอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน ลวดเหล็กอัดแรงจะถูกเหยียดด้วยแรงดึงประมาณ 70-75 % ของแรงดึงสูงสุด หลังจากคอนกรีตมีกำลังอัดตามที่ต้องการแล้วจึงปล่อยแรงอัดสู่คอนกรีต แรงดึงประสิทธิผลของลวดเหล็กอัดแรง (f_{se}) ที่เกิดขึ้นจะได้จากแรงดึงเริ่มแรกหักการสูญเสีย ซึ่งเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ คือ การสูญเสียแบบทันทีทันใดเนื่องจากการหดตัวแบบอีลาสติก และการสูญเสียตามเวลาซึ่งประกอบด้วยการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการคืบ, การสูญเสียความชื้น และการล้าของลวดเหล็กอัดแรง

ค. <u>เหล็กเสริม</u>

เหล็กเสริม ที่ใช้กับรอยต่อเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงเป็นเหล็กข้ออ้อย ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A 615 หรือ มอก. 24-2527 ชั้นคุณภาพ SD 40 มีค่ากำลังดึงที่จุดคลาก (fy) ไม่ต่ำกว่า 4,000 กก./ซม.^{2} และมีค่าอีลาสติกโมดูลัส (E_s) ไม่ต่ำกว่า 2.1x10^6 กก./ซม.^{2} ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้เป็น แบบอีลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์ โดยไม่นำช่วงสะเตรนฮาร์ดเดนนิงมาคิด กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 2.3

ง. <u>แผ่นเหล็ก</u>

แผ่นเหล็กที่ใช้กับรอยต่อเชื่อมของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A 36 มีค่ากำลังดึงที่จุดคลากไม่ต่ำกว่า 2,500 กก./ซม.^{2} และมีค่าอีลาสติกโมดูลัสไม่ต่ำกว่า 2.1 x 10^6 กก./ซม.^{2} ค่ากำลังดึงสูงสุดไม่ต่ำกว่า 4,000 กก./ซม.^{2} และค่าโมดูลัสการเฉือนประมาณ 0.80 x 10^6 กก./ซม.^{2} ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของแผ่นเหล็กประมาณเป็นแบบ อีลาสติก - พลาสติกสมบูรณ์ เช่นเดียวกับเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 2.8

2.1.2 <u>แบบจำลองการรับกำลังดัดของรอยต่อแบบเชื่อม</u>

รูปแบบของการเชื่อมต่อเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง แสดงดังรูปที่ 3.1 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการรับกำลังดัดของรอยเชื่อมต่อ ก็คือ การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ขนาดของรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็ก และการรับกำลังประสิทธิผลของวัสดุที่ประกอบกันเป็นรอยเชื่อมต่อ เป็นต้น

ก. <u>การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต</u>

การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต จะเป็นไปอย่างสมบู รณ์ได้นั้น หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond Stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม จะต้องมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีความเครียดสอดคล้อง ถ้าค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมมีค่ามาก

โดยที่ระยะยึดเหนี่ยว (Development Length) ของเหล็กเสริมไม่เพียงพอ ก็จะเกิดการ slip ขึ้น ก่อนที่เหล็กเสริมจะสามารถรับแรงดึงได้สูงสุด

ความยาวของเหล็กเสริมที่เพียงพอ ที่จะไม่ทำให้เกิดการ slip ขึ้นนั้น ACI Building Code 1989 (10) ได้กำหนดไว้โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ระยะหุ้มของคอนกรีต ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม ตำแหน่งของเหล็กเสริมในเนื้อคอนกรีต ชนิดของมวลรวมคละของคอนกรีต ปริมาณของเหล็กเสริม อิทธิพลของเหล็กปลอก และลักษณะผิวของเหล็กเสริม เป็นต้น

ข. <u>แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมและสมมติฐานที่ใช้ในการวิจัย</u>

ในการวิจัยนี้ได้ใช้ความยาวของระยะยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในการรับแรงดึงและแรงอัดตามข้อเสนอแนะของ ACI 318-89 โดยคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตมวลรวมปกติ เหล็กเสริมปราศจากวัสดุเคลือบและสนิมขุม เหล็กเสริมจะสามารถรับกำลังได้สูงสุดจนถึงกำลังคลาก,(fy) เมื่อมีระยะยึดเหนี่ยวเพียงพอไม่น้อยกว่าที่กำหนด สำหรับเหล็กเสริมบริเวณส่วนปลายที่อยู่นอกขอบเขตของระยะยึดเหนี่ยวนั้น ในที่นี้จะกำหนดให้สามารถรับกำลังได้ลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรง โดยมีค่าเท่ากับกำลังคลากในส่วนของเหล็กเสริมที่มีระยะยึดเหนี่ยวไม่น้อยกว่าข้อกำหนด และลดลงเรื่อย ๆ จนเป็นศูนย์ที่ปลายสุดของเหล็กเสริม

สำหรับค่าระยะยึดเหนี่ยวพื้นฐาน ของเหล็กเสริมในการรับแรงดึง ที่เพียงพอโดยไม่ทำให้เกิดการ slip เป็นไปตามสมการ

$$l_{dt} = 0.0594\, A_b\, f_y / \sqrt{f_c'} \qquad (2.3)$$

โดย

l_{dt} = ระยะยึดเหนี่ยวพื้นฐานของเหล็กเสริมรับแรงดึง, ซม.

A_b = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, ซม.^{2}

f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริม, กก./ซม.^{2}

f_c' = กำลังอัดของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

ระยะยึดเหนี่ยวพื้นฐานของเหล็กเสริมรับแรงดึงขนาดต่าง ๆ กัน แสดงได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของวัสดุกับระยะยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมดังรูปที่ 2.5

สำหรับค่าระยะยึดเหนี่ยวพื้นฐาน สำหรับเหล็กเสริมรับแรงอัด จะมีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริ มรับแรงดึง เนื่องจากแรงแบกทานที่ปลายของเหล็กเสริมจะมีส่วนช่วยในการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตได้มากขึ้น เป็นไปตามสมการ

$$l_{dc} = 0.0754\, d_b\, f_y / \sqrt{f_c'} < 0.004266\, d_b f_y \qquad (2.4)$$

โดย l_{dc} = ระยะยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมรับแรงอัด, ซม.

d_b = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม, ซม.

f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริม, กก./ซม.^{2}

f_c' = กำลังอัดของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

ความยาวของระยะยึดเหนี่ยวพื้นฐานของเหล็กเสริมทั้งในการรับแรงดึงและแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้เนื่องจากอิทธิพลของระยะหุ้มของคอนกรีตและระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม แสดงได้ดังรูปที่ 2.6

ตั้งสมมติฐานให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังในเนื้อคอนกรีตแปรเป็นสัดส่วนตรง ดังนี้

$$f_s = (l_x / l_d)\, f_y \quad \text{เมื่อ} \quad l_x < l_d$$

และ $$f_s = f_y \quad \text{เมื่อ} \quad l_x \geq l_d \qquad (2.5)$$

เมื่อ f_s = หน่วยแรงสูงสุดที่เหล็กเสริมสามารถรับได้ก่อนจะเกิดการ slip, กก./ซม.^{2}

f_y = กำลังคลากของเหล็กเสริม, กก./ซม.^{2}

l_x = ระยะของเหล็กเสริมที่ฝังในเนื้อคอนกรีตวัดจากปลายเหล็กเสริม, ซม.

l_d = ระยะยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัดที่กำหนดตามสมการที่ 2.3 และ 2.4, ซม.

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังในเนื้อคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด แสดงได้ดังรูปที่ 2.4

ค. <u>รอยเชื่อม (Welded)</u>

การเชื่อมที่ใช้เป็นการเชื่อมไฟฟ้า (Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากในการต่อองค์อาคารเหล็กเข้าด้วยกันเพราะมีประสิทธิภาพสูง มีความรวดเร็วในการประกอบและติดตั้ง ประหยัดเหล็กโครงสร้าง สามารถประกอบติดตั้งในสนามได้โดยใช้อุปกรณ์มาตรฐานที่มีอยู่ทั่วไป การต่อโดยการเชื่อมชนิดนี้เป็นวิธีการต่อแผ่นโลหะให้ติดกันโดยใช้ความร้อนเผาโลหะตรงบริเวณรอยต่อให้หลอมละลาย แล้วพร้อมกันนั้น ใช้ลวดเชื่อมหลอมติดแผ่นโลหะนั้นเข้าด้วยกัน โดยปกติกำลังของรอยเชื่อมจะมีค่าสูงมาก โดยกำลังของรอยเชื่อมที่สมบูรณ์นั้นเทียบได้กับโลหะที่ทำลวดเชื่อม (Electrods) ตามที่แสดง

ในตารางที่ 2.1 แสดงค่ากำลังคลากต่ำสุดและกำลังดึงสูงสุดอย่างต่ำของโลหะที่ทำลวดเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM A5.1 และ ASTM A233 และเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM ที่นิยมใช้กันทั่วไป (12) จะเห็นว่าค่ากำลังคลากต่ำสุดของลวดเชื่อมชนิด E60xx จะมีค่าสูงกว่าเหล็กโครงสร้างชนิด A7, A373 และ A36 ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ลวดเชื่อมชนิด E70xx ยังมีค่ากำลังคลากสูงกว่าเหล็กโครงสร้างดังกล่าวมากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุที่สำคัญที่ลวดเชื่อมหรือรอยเชื่อมที่สมบูรณ์มีกำลังสูงกว่าแผ่นเหล็กที่ใช้งานด้วยกัน เพราะแกนของลวดเชื่อมทำจากเหล็กที่มีคุณสมบัติพิเศษ มีมาตรฐานในการระบุรายละเอียดสูงกว่าแผ่นเหล็กโครงสร้าง ขณะที่ทำการเชื่อมการหลอมละลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เพราะมีเปลือกหุ้มแกนของลวดเชื่อมไว้ รวมทั้งในเปลือกหุ้มจะมีส่วนผสมเพิ่มเติมที่ทำให้เกิดการไล่ออกซิเจนและทำให้ได้ผลึกโลหะที่สม่ำเสมอ มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เทียบเท่ากับเหล็กที่ได้จากเตาหลอม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและระยะยืด (Elongation) ของโลหะที่ทำลวดเชื่อมและแผ่นเหล็กโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.7 (12) จะเห็นว่าค่าอีลาสติกโมดูลัสของลวดเชื่อมชนิดต่าง ๆ เทียบกับเหล็กโครงสร้างมีค่าเท่ากัน แต่ลวดเชื่อมมีกำลังคลากและกำลังสูงสุดมากกว่า ขณะที่ภาวะประลัย เหล็กโครงสร้างจะมีระยะยืดมากกว่าแสดงว่ามีความเหนียวมากกว่าลวดเชื่อม อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายอย่างที่จะทำให้รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ มีผลทำให้กำลังของรอยเชื่อมลดลงเพราะคุณสมบัติเฉพาะของรอยเชื่อมมีมากมาย ขึ้นอยู่กับฝีมือการทำงานของช่างเชื่อม เช่น การหลอมละลายบกพร่อง, การเกิดรูพรุน, ควบคุมขนาดรอยเชื่อมไม่ได้ตามต้องการ, การเว้าของรอยเชื่อม (Undercut) เป็นต้น ดังนั้นมาตรฐานต่าง ๆ จึงต้องกำหนดค่าความปลอดภัยในการออกแบบเพื่อใช้งานไว้ค่อนข้างสูง การตรวจสอบรอยเชื่อมโดยละเอียด สามารถทำได้โดยใช้วิธี Radiographic หรือ Ultrasonic และวัดขนาดโดยใช้แผ่นเกจวัดรอยเชื่อม

การเลือกใช้ชนิดของลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับเหล็กที่ใช้งาน ต้องคำนึงถึงส่วนผสม ทางเคมีของเหล็กที่จะเชื่อม และอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมขณะที่ทำการเชื่อมด้วย จึงจำเป็นต้องใช้รายงานของการผลิตเหล็กจากโรงงานเป็นข้อมูลในการพิจารณาใช้ลวดเชื่อม ส่วนประกอบสำคัญทางเคมีที่ใช้ในการพิจารณา คือ ปริมาณของคาร์บอน (C) และแมงกานีส (Mn) ที่ผสมในเหล็กนั้น ๆ สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กและการให้ความร้อนในการเชื่อม เพื่อให้รอยเชื่อมมีประสิทธิภาพ ในการรับกำลังสูงสุดของเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM A36 และเหล็กข้ออ้อยที่ใช้กันทั่วไปนั้น ประกอบด้วยคาร์บอนไม่เกิน 0.35 เปอร์เซ็นต์และแมงกานีสไม่เกิน 0.90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสภาวะการเชื่อมในสนามโดยทั่วไปมาตรฐาน AWS แนะนำให้ใช้ลวดเชื่อมชนิด E60xx หรือ 70xx ชนิดที่มี ไฮโดรเจนต่ำ

ง. <u>ขนาดและการรับกำลังประสิทธิผลของรอยเชื่อม</u>

รอยเชื่อมที่ใช้เชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กตามแนวเส้นรอบวงของเสาเข็มนั้น เป็นรอยเชื่อมแบบร่องลึกเพียงบางส่วน (Partial Penetration Groove Welds) ลักษณะร่องรูปตัว วีเดี่ยว (Single-V) ดังแสดงใน

รูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นการเชื่อม โดยให้รอยเชื่อมซึมลึกเข้าไปในเนื้อแผ่นโลหะตามลักษณะของร่องที่เตรียมไว้เพื่อยึดประกอบแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นเข้าด้วยกัน

เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อมที่ใช้รับแรงมีค่าเท่ากับ ความยาวของรอยเชื่อมคูณด้วยความหนาประสิทธิผลตรงคอของรอยเชื่อม ขนาดคอประสิทธิผลของรอยเชื่อม (t_e) ได้แก่ ความกว้างที่น้อยสุดของรอยเชื่อม ซึ่งการวิบัติจะเกิดขึ้นในระนาบนี้ มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของรอยเชื่อม สำหรับรอยเชื่อมแบบร่องลึกเพียงบางส่วนนั้นมีขนาดคอประสิทธิผลขึ้นอยู่กับมุมของร่องรูปตัววี (α) กรณีที่ค่ามุมน้อย การซึมของเนื้อโลหะลวดเชื่อมจะลงไปไม่ถึงความลึกของร่อง มาตรฐาน AISC (1978) ได้กำหนดไว้ดังนี้

เมื่อ $45^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ ขนาดคอประสิทธิผลมีค่าเท่ากับความลึกของร่องลบ 3 มม.

เมื่อ $\alpha \geq 60^\circ$ ขนาดคอประสิทธิผลมีค่าเท่ากับความลึกของร่อง

อย่างไรก็ตามมาตรฐาน AISC ก็ได้กำหนดขนาดคอประสิทธิผลต่ำสุดสำหรับการเชื่อมชนิดนี้ไว้ตามความหนาของแผ่นเหล็ก,(t_p)ด้วย เพื่อป้องกันการบิดและการหลอมละลายของแผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อย เนื่องจากเกิดความร้อนขณะที่ทำการเชื่อมมากเกินไป ตามข้อกำหนดถ้าความหนาของแผ่นเหล็กไม่เกิน 6 มม. ใช้ขนาดคอประสิทธิผล(t_e) ไม่น้อยกว่า 3 มม., $6 < t_p \leq 12$ ใช้ $t_e \geq 5$ มม., $12 < t_p \leq 19$ ใช้ $t_e \geq 6$ มม. , $19 < t_p \leq 38$ ใช้ $t_e \geq 8$ มม. เป็นต้น

การรับกำลังประสิทธิผลของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกระทำด้วย AISC 1978 ได้กำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของรอยเชื่อมชนิดนี้ไว้ ดังนี้

- แรงดึงกระทำขนานกับแกนของรอยเชื่อมหรือแรงอัดในทุกทิศทางใช้หน่วยแรงที่ยอมให้เท่ากับแผ่นเหล็ก
- แรงดึงกระทำตั้งฉากกับเนื้อที่ประสิทธิผลให้ใช้หน่วยแรงที่ยอมให้ไม่เกิน 30% ของกำลังดึงสูงสุด แต่ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในแผ่นเหล็กต้องไม่เกิน 0.6Fy
- หน่วยแรงเฉือนบนเนื้อที่ประสิทธิผลไม่เกิน 30% ของกำลังดึงสูงสุด แต่ค่าหน่วยแรงเฉือนในแผ่นเหล็กต้องไม่เกิน $0.4F_y$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของรอยเชื่อมที่ใช้ในการวิจัยใช้รูปแบบเช่นเดียวกันกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.8

สำหรับรอยเชื่อมที่ใช้เชื่อมต่อเหล็กข้ออ้อยเข้ากับแผ่นเหล็กเป็นรอยเชื่อมแบบพอกโดยรอบ มาตร-ฐาน AWS D12.1-61 ได้ให้คำแนะนำในการเชื่อมเหล็กเสริมคอนกรีตทั่วไป โดยใช้รอยเชื่อมแบบพอกสำหรับแรงกระทำทุกทิศทาง ซึ่งกำหนดในรูปของหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้บนเนื้อที่ประสิทธิผลของรอย

เชื่อม เท่ากับ 960 กก./ซม.^{2} หรือคิดเป็นแรงบนขารอยเชื่อมเท่ากับ 678 w_1 กก./ความยาว 1 ซม. (w_1 คือ ขนาดขาของรอยเชื่อมแบบพอกชนิดขาเท่ากัน)

2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง ในรูปของคานที่มีแรงกระทำตามขวาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัวของคานตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงแรงสูงสุดของคาน ก่อนที่จะวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดจะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดต้านทานและความโค้ง(Moment-Curvature) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของหน้าตัดคานขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์กระทำและคุณสมบัติของวัสดุ ณ หน้าตัดที่พิจารณา จากหลักกลศาสตร์ของวัสดุ โมเมนต์ต้านทานเกิดจากผลหมุนของแรงอัดและแรงดึง ในคอนกรีตและเหล็กเสริม ส่วนค่าความโค้งคือค่าความชันของเส้นความเครียดบนหน้าตัด

2.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานและความโค้ง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานและความโค้งของหน้าตัดใด ๆ จะใช้ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต ลวดเหล็กอัดแรงและเหล็กเสริม ดังหัวข้อที่ 2.1 การวิ-เคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยหลายท่าน (6,7) และได้ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดยังคงรักษาระนาบเดิมก่อนและหลังการดัด
2. การแจกแจงความเครียดบนหน้าตัด เป็นเส้นตรง
3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ยกเว้นในบริเวณปลายของเหล็กเสริมที่มีระยะยึดเหนี่ยว (Development length) ไม่เพียงพอตามต้องการก็จะเกิดการเคลื่อนตัว ค่าหน่วยแรงของเหล็กเสริมบนหน้าตัดก็จะลดลง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2
4. ความโค้งหลังการแตกร้าวของหน้าตัดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความโค้งสูงสุดที่หน้าตัดแตกร้าวและความโค้งต่ำสุดที่อยู่กึ่งกลางระหว่างรอยแตกร้าว (ดูรูปที่ 2.9)
5. องค์อาคารวิบัติเนื่องจากการดัด คานมีกำลังเฉือนเพียงพอและเหล็กเสริมมีการยึดเกาะหรืออุปกรณ์ยึดไม่เกิดการวิบัติขึ้นก่อนการวิบัติเนื่องจากการดัด
6. พิจารณากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในช่วงก่อนการแตกร้าวของหน้าตัดเท่านั้น

ในการวิเคราะห์หน้าตัดคอนกรีตอัดแรงสามารถแจกแจงการกระจายของความเครียดบนหน้าตัดของเสาเข็มได้ ดังรูปที่ 2.10 โดยหน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ความเครียดใด ๆ จะได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่จุดนั้น ๆ การหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานและ

ความโค้งจะเริ่มโดยกำหนดค่าความเครียดอัดที่ผิวบนของหน้าตัด(ε_c) แล้วใช้ขั้นตอนของการทำซ้ำเพื่อหาตำแหน่งของแกนสะเทิน (Neutral axis, N.A.) ที่ทำให้ผลของแรงอัดเท่ากับแรงดึง เมื่อกำหนดให้ค่า ε_c เปลี่ยนแปรตั้งแต่ค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุดที่หน้าตัดเกิดการวิบัติ ก็จะได้กราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ต้านทานและความโค้งของหน้าตัดที่พิจารณา

การหาหน่วยแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริม เพื่อนำไปหาค่าโมเมนต์ต้านทานของหน้าตัด ณ ความโค้งที่พิจารณานั้น สามารถแยกดำเนินการทีละส่วนแล้วนำมารวมกันภายหลัง (Superposition) ได้ดังนี้

ก. <u>หน่วยแรงของคอนกรีต</u>

พิจารณาหน้าตัดกลมของคอนกรีตในรูปที่ 2.10(a) ซึ่งมีการแจกแจงความเครียดและหน่วยแรงดังรูปที่ 2.10(b) และ 2.10(c) ตามลำดับ โดยการกระจายของหน่วยแรงเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย Hognestad ดังสมการที่ 2.1 คือ

$$f_c = f_c' \left[2 \left(\varepsilon/\varepsilon_0 \right) - \left(\varepsilon/\varepsilon_0 \right)^2 \right]$$

จากรูปที่ 2.10(b) ความเครียดในคอนกรีตที่ระยะ x จากระดับแกนสะเทิน, $\varepsilon(x)$ จะเท่ากับ φx ดังนั้น จากสมการที่ 2.1 หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} f_c(x) &= f_c' \left[2(\varphi x/\varepsilon_0) - (\varphi x/\varepsilon_0)^2 \right]; \quad \varphi = \varepsilon_c/c \\ &= f_c' \left[2Sx - S^2 x^2 \right]; \quad S = \varphi/\varepsilon_0 \end{aligned} \tag{2.6}$$

พิจารณารูปที่ 2.10(a)

$$\begin{aligned} (x + h) &= R\sin\theta \\ x &= R\sin\theta - h \\ dx &= R\cos\theta \, d\theta \end{aligned}$$

และ $$b(x) = 2R\cos\theta \tag{2.7}$$

ดังนั้นเปลี่ยนรูปสมการ (2.6) ให้อยู่ในระบบพิกัดเชิงมุมจะได้

$$\begin{aligned} f_c(x) &= f_c' \left[2S(R\sin\theta - h) - S^2 (R\sin\theta - h)^2 \right] \\ &= f_c' \, S\left[2R\sin\theta - 2h - SR^2\sin^2\theta + 2SRh\sin\theta - Sh^2 \right] \end{aligned} \tag{2.8}$$

พิจารณาจากรูปที่ 2.10(c) จะได้แรงอัดในคอนกรีต

$$C_C = \int_0^c f_C(x)\, b(x)\, dx \qquad (2.9)$$

แทนค่าโดยสมการ (2.7) และ (2.8) จะได้

$$C_C = 2R^2 f_C'S \int_{\theta 1}^{\pi/2} [\,(2R+2SRh)\sin\theta\cos^2\theta - SR^2\sin^2\theta\cos^2\theta - (2h+sh^2)\cos^2\theta\,]\, d\theta$$

$$= 2R^2 f_C'S\,[\,(2R/3+2ShR/3)\cos^3\theta_1 - (SR^2/32)(2\pi - 4\theta_1 + \sin 4\theta_1) - (h/2 + Sh^2/4)(\pi - 2\theta_1 - \sin 2\theta_1)\,] \qquad (2.10)$$

หาระยะจุดศูนย์ถ่วงของแรง C_C จากหลักกลศาสตร์ดังนี้

$$\bar{x} = \int_0^c f_C(x)\, b(x)\, x\, dx \,/\, Cc \qquad (2.11)$$

$$\int_0^c fc(x)b(x)x\, dx = 2R^2 f_C'S \int_{\theta_1}^{\pi/2} [2R\sin\theta - 2h - SR^2\sin^2\theta + 2SRh\sin\theta - Sh^2]\,(R\sin\theta - h)\cos^2\theta\, d\theta$$

$$= 2R^3 f_C'S \int_{\theta_1}^{\pi/2} [(2R+2SRh)\sin^2\theta\cos^2\theta - SR^2\sin^3\theta\cos^2\theta - (2h+Sh^2)\cos^2\theta\sin\theta\,]\, d\theta - h.C_C$$

$$= 2R^3 f_C'S\,[\,(2R+2SRh)(2\pi - 4\theta_1 + \sin 4\theta_1)/32 - SR^2(\cos^3\theta_1/3 - \cos^5\theta_1/5) - (2h+Sh^2)\cos^3\theta_1/3\,] - h.C_C$$

ดังนั้น

$$\bar{x} = 2R^3 f_C'S\,[\,(R+SRh)(2\pi - 4\theta_1 + \sin 4\theta_1)/16 - (SR^2+2h+Sh^2)\cos^3\theta_1/3 + SR^2\cos^5\theta_1/5\,] / Cc - h \qquad (2.12)$$

สำหรับหน้าตัดของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง ซึ่งมีหน้าตัดกลมกลวง ดังรูปที่ 2.11(a) สามารถแจกแจงความเครียดและหน่วยแรงของคอนกรีตได้ดังรูปที่ 2.11(b)และ(c) ตามลำดับ โดยสามารถหาค่าแรงอัดในหน้าตัดคอนกรีต (C_C) และ จุดศูนย์ถ่วงของแรง ($\bar{x}$) ตามสมการที่ 2.10 และ 2.12 ตามลำดับ

กรณีที่ ระยะจากผิวบนของหน้าตัดถึงระดับแกนสะเทิน (c) มากกว่าความหนาของหน้าตัดเสาเข็ม (c>T) สามารถหาค่า C_c และ $\bar{x}$ ของหน้าตัดกลมกลวง โดยใช้หลักการรวมผล (Superposition) ดังนี้

แรงอัดลัพท์ $C_c = C_{c1} - C_{c2}$ (2.9a)

โดยที่ $C_{c1} = 2R_1^2 fc'S [(2R_1/3 + 2 ShR_1/3) \cos^3\theta_1 - SR_1^2 (2\pi - 4\theta_1 + \sin4\theta_1)/32 - (h/2 + Sh^2/4) (\pi - 2\theta_1 - \sin2\theta_1)]$

และ

$C_{c2} = 2R_2^2 fc'S [(2R_2/3 + 2 ShR_2/3) \cos^3\theta_2 - SR_2^2 (2\pi - 4\theta_2 + \sin4\theta_2)/32 - (h/2 + Sh^2/4) (\pi - 2\theta_2 - \sin2\theta_2)$ (2..10a)

และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงอัดแต่ละแรง

$\bar{x}_1 = 2R_1^3 fc'S / C_{c1} [(R_1+SR_1h) (2\pi - 4\theta_1 + \sin4\theta_1)/16 - (SR_1^2+2h+Sh^2)\cos^3\theta_1 /3 + SR_1^2 \cos^5\theta_1 /5] - h$

$\bar{x}_2 = 2R_2^3 fc'S / C_{c2} [(R_2+SR_2h) (2\pi - 4\theta_2 + \sin4\theta_2)/16 - (SR_2^2+2h+Sh^2)\cos^3\theta_2 /3 + SR_2^2 \cos^5\theta_2 /5] - h$

โดยที่ $\theta_1 = \sin^{-1}h/R_1$, $\theta_2 = \sin^{-1}h/R_2$

$S = \varphi/\varepsilon_0$

และจะได้จุดศูนย์ถ่วงของแรงรวม

$\bar{x} = (C_{c1}\bar{x}_1 + C_{c2}\bar{x}_2) / C_c$ (2.12a)

ข. <u>หน่วยแรงในลวดอัดแรง</u>

พิจารณาหน้าตัดเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ในรูปที่ 2.12(a) พิจารณาเฉพาะลวดเหล็กอัดแรงเพียงอย่างเดียว เมื่อหน้าตัดเสาเข็มรับแรงอัดเริ่มแรก จะได้ค่าความเครียดอัดสม่ำเสมอ (ε_{ce}) ซึ่งเกิดจากแรงอัดประสิทธิผล (f_{se}) มีค่าเท่ากับ

$\varepsilon_{ce} = A_{ps} f_{se} / A_n E_c$ (2.13)

เมื่อ A_{ps} = พื้นที่หน้าตัดของลวดอัดแรงทั้งหมด = $\sum (A_{ps})_i$

A_n = หน้าตัดสุทธิของเสาเข็ม = $A_g - A_{ps}$

A_g = หน้าตัดทั้งหมดของเสาเข็ม

พิจารณาการกระจายของความเครียดบนหน้าตัดดังรูปที่ 2.12(c) สมมติว่าลวดทุกเส้นมีค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Prestress) เนื่องจากแรงอัดเริ่มแรกเท่า ๆ กัน เมื่อกำหนดให้ความเครียดอัดที่ผิวบนของหน้าตัดเท่ากับ ε_c จะได้ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงที่ระดับลวดต่าง ๆ คือ

$$(\Delta\varepsilon_{ps})_i = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_c [(d_{ps})_i - c] / c \qquad (2.14)$$

โดย

$(d_{ps})_i$ = ระยะจากผิวบนสุดของหน้าตัดถึงจุดกึ่งกลางลวดเหล็กที่ระดับใด ๆ

c = ระยะจากผิวบนสุดของหน้าตัดถึงแกนสะเทิน

ค่าความเครียดของลวดเหล็กที่ระดับต่าง ๆ จะเป็น

$$(\varepsilon_{ps})_i = \varepsilon_{pe} + (\Delta\varepsilon_{ps})_i \qquad (2.15)$$

เมื่อ ε_{pe} = ค่าความเครียดในลวดเหล็กเนื่องจากแรงดึงประสิทธิผล

ถ้าค่า $(\varepsilon_{ps})_i$ น้อยกว่า ε_{pp} (Proportional Limit Strain) ค่าความเค้น (Stress) ในลวดหาได้จาก

$$(f_{ps})_i = E_{ps} (\varepsilon_{ps})_i \qquad (2.16)$$

กรณีที่ $(\varepsilon_{ps})_i$ มากกว่า ε_{pp} ค่าความเค้นในลวดจะหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain Curve) ของลวด

ค่าแรงดึงของลวดเหล็กในระดับต่าง ๆ หาได้จาก

$$T_{ip} = (A_{ps})_i (f_{ps})_i \qquad (2.17)$$

ดังนั้นรวมแรงในแนวแกนของหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงทั้งหมดจะได้

$$P_n = \sum_j C_{cj} - \sum_i T_{ip} \qquad (2.18)$$

โดย $P_n = 0$ กรณีที่หน้าตัดมีโมเมนต์ดัดกระทำเพียงอย่างเดียว (Pure Moment)

รวมค่าโมเมนต์ ซึ่งเกิดจากแรงในคอนกรีตและลวดเหล็กอัดแรง โดยให้ทิศทางของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวก และคิดผลรวมของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของหน้าตัด จะได้

$$M_n = \sum_j C_{cj} (h + \bar{x}_j) + \sum_i T_{ip} (d_{psi} - D_1/2) \qquad (2.19)$$

และจะได้ค่าความโค้ง

$$\varphi = \varepsilon_c / c \qquad (2.20)$$

ค. <u>หน่วยแรงในเหล็กเสริมข้ออ้อย</u>

กรณีที่หน้าตัดประกอบด้วย ลวดอัดแรง (Prestressed) และเหล็กเสริม (Nonprestressed Reinforcement) ดังรูปที่ 2.10(b) สามารถหาแรงดึงรวม, (T_i) โดยรวมแรงดึงของลวดอัดแรง, (T_{ip}) และแรงดึงของเหล็กเสริม, (T_{ks}) เข้าด้วยกัน จะได้

$$T_i = T_{ip} + T_{ks} \qquad (2.21)$$

โดยที่ T_{ip} หาจากสมการ (2.17) และ T_{ks} ที่ทำให้ค่าความต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดเพิ่มขึ้น เราต้องหาค่าความเครียดในเหล็กเสริมที่ระดับต่าง ๆ เช่นเดียวกัน ให้ ε_{se} เป็นค่าความเครียดอัดในเหล็กเสริม (Compressive Strain) ซึ่งเกิดจากแรงดึงประสิทธิผลเพียงอย่างเดียว โดย

$$\varepsilon_{se} = - A_{ps} f_{se} / A_t E_c \qquad (2.22)$$

ซึ่ง $A_t = A_n + n_s A_s$, A_s = หน้าตัดรวมของเหล็กเสริม , n_s = Moduli Ratio

ในกรณีหน้าตัดประกอบนี้ จะได้ค่าความเครียดอัดในเนื้อคอนกรีต, $\varepsilon_{ce} = |\varepsilon_{se}|$

ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงในเหล็กเสริมระดับต่าง ๆ

$$(\Delta\varepsilon_s)_k = \varepsilon_c [(d_s)_k - c] / c \qquad (2.23)$$

โดย

$(d_s)_k$ = ระยะจากผิวบนสุดของหน้าตัดถึงกึ่งกลางเหล็กเสริม

และจะได้ค่าความเครียดของเหล็กเสริมในระดับต่าง ๆ เป็น

$$(\varepsilon_s)_k = \varepsilon_{se} + (\Delta\varepsilon_s) \quad (2.24)$$

เมื่อค่า $|\varepsilon_{si}|$ น้อยกว่า ε_y ค่าความเค้นในเหล็กเสริมที่ระดับใด ๆ หาได้จาก

$$(f_s)_k = E_s (\varepsilon_s)_k \quad (2.25)$$

แต่ถ้า $|\varepsilon_{si}|$ มากกว่า ε_y ค่าความเค้น หาได้จาก

$$(f_s)_k = \pm E_s \varepsilon_y \quad (2.26)$$

โดยค่าจะเป็นบวก เมื่อ $(\varepsilon_s)_k$ เป็นบวก, และเป็นลบ เมื่อ $(\varepsilon_s)_k$ เป็นลบ

ค่าแรงดึงของเหล็กเสริมที่ระดับใด ๆ ก็คือ

$$T_{ks} = (A_s)_k (f_s)_k \quad (2.27)$$

และจะได้ค่าแรงลัพท์ และค่าความต้านทานโมเมนต์ ดังนี้

$$P_n = \sum_i C_{cj} - \sum_j T_{ip} - \sum_k T_{ks} \quad (2.28)$$

$$M_n = \sum_i C_{cj}(h+\bar{x}_j) + \sum_j T_{ip} (d_{psi} - D_1) + \sum_k T_{ip} (d_{sk} - D_1) \quad (2.29)$$

และจะได้ค่าความโค้ง

$$\varphi = \varepsilon_c / c \quad (2.20)$$

2.2.2 <u>การวิเคราะห์การแอ่นตัวของเสาเข็ม</u>

ในการวิเคราะห์การแอ่นตัวของเสาเข็มในรูปของคานที่มีแรงกระทำแบบสถิตย์ตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.16(a) จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานและความโค้งของหน้าตัด ในหัวข้อที่ 2.2.1 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวของคาน ณ หน้าตัดและแรงกระทำใด ๆ การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานในช่วงอิลาสติกและอินอิลาสติก มีหลายวิธี เช่น วิธีพื้นที่ความโค้ง วิธีคานคอนจูเกต

หรือวิธีการใช้หลักของงานเสมือน (Principle of virtual work) เป็นต้น ในที่นี้จะใช้วิธีการใช้หลักของงานเสมือน เพื่อให้ง่ายสำหรับการหาคำตอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้ (พิจารณาจากรูปที่ 2.16(a) - 2.16(e))

1. จากฟังค์ชันของแรงกระทำภายนอกวิเคราะห์ไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด
2. ที่หน้าตัดต่าง ๆ ของคานหาค่าความโค้ง ,$\varphi(x)$ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ดัด,$M(x)$ เหล่านั้น โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานและความโค้งของหน้าตัด
3. วิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว ณ หน้าตัดที่ต้องการทราบ, Δz โดยใช้หลักการของงานเสมือนดังนี้

$$\Delta z = \int_0^L \varphi(x)\, m(x)\, dx \qquad (2.30)$$

ซึ่ง $m(x)$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากแรงกระทำ 1 หน่วย (Unit Load) กระทำ ณ ตำแหน่งและทิศทางเดียวกันกับค่าการแอ่นตัวที่ต้องการหา

ในการอินทิเกรตตลอดช่วงความยาวของคาน จะแบ่งความยาวออกเป็นช่วงย่อย ๆ แล้วใช้กฎของซิมพ์สัน (Simpson's Rule) หาค่าการอินทิเกรตแต่ละช่วงมารวมกัน มีวิธีดังนี้

$$\int_a^b f(x)\, dx = (h/6)\,[\, f(a) + 4\, f(m) + f(b)\,] \qquad (2.31)$$

เมื่อ $f(x)$ เป็นอินทิแกรนด์ a และ b เป็นจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของช่วงที่พิจารณา h เป็นความยาวช่วง $f(a)$, $f(m)$ และ $f(b)$ เป็นค่าของ $f(x)$ ที่จุดต้น, จุดกลาง และจุดสุดท้าย ตามลำดับ

2.2.3 <u>การวิเคราะห์พฤติกรรมการอัดร่วมกับการดัด</u>

การรับแรงของเสาเข็มโดยปกติ จะมีทั้งแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดกระทำพร้อมกัน การวิเคราะห์กำลังร่วมแรงดัดและแรงอัดของเสาเข็ม ใช้หลักการและสมมติฐานเช่นเดียวกับการวิเคราะห์กำลังดัด โดยผลรวมของแรงต้านทานแรงอัดจะเท่ากับแรงอัดภายนอก และคิดโมเมนต์ดัดต้านทานรอบศูนย์พลาสติกของหน้าตัด ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและแรงอัดจะแสดงในรูปของกราฟความเกี่ยวพัน (Interaction Curve) ในทางปฏิบัติจะวิเคราะห์เพื่อหาความต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงอัดที่กำลังประลัยของหน้าตัด ให้ค่าความเครียดอัดที่ผิวบนของหน้าตัดเป็น 0.003 สำหรับขั้นตอนการหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงอัดบนกราฟความเกี่ยวพันนั้น ทำได้โดยกำหนดค่าความเครียดที่ผิวบนของหน้าตัดดังกล่าว แล้วเปลี่ยน

แปลงตำแหน่งของแกนสะเทินเป็นระยะต่าง ๆ หาค่าโมเมนต์ดัดและแรงอัดที่ระยะของแกนสะเทินนั้น ๆ ก็จะได้กราฟความเกี่ยวพันตามต้องการ

ในเสายาวที่มีแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์ หรือรับโมเมนต์ดัดกระทำจากภายนอก ความสามารถในการรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดประลัยของเสายาว จะลดลงจากแรงต้านทานประลัยของหน้าตัด เนื่องจากขณะที่เสาเกิดการแอ่นตัวเนื่องจากโมเมนต์หลัก แรงอัดในเสากระทำผ่านการแอ่นตัวของเสาก่อให้เกิดโมเมนต์รองเพิ่มขึ้น ทำให้โมเมนต์ดัดรวมมีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ดัดทั้งสองชนิดมีผลต่อเสาเหมือนกับว่าระยะเยื้องศูนย์มีค่ามากกว่าระยะเยื้องศูนย์จริงของแรงอัด ดังนั้น ถ้าเสามีค่าการแอ่นตัวมากก็จะทำให้ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (Moment Magnification) มากขึ้นด้วย เป็นผลให้เสารับกำลังได้น้อยลง ในกรณีของเสาเข็มที่มีรอยต่อก็เช่นกัน ถ้าสติฟเนสของรอยต่อมีน้อย จะทำให้การแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้น มีค่ามากเป็นผลให้เสาเข็มรับแรงได้น้อยลงด้วย

การแจกแจงการกระจายของความเครียดและหน่วยแรงในเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงที่มีความยาวโดยปราศจากการค้ำยันด้านข้างแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 โดยหน่วยแรงในหน้าตัดเสาเข็มที่กำลังประลัยประกอบด้วย หน่วยแรงจากแรงดึงก่อน แรงกระทำตามแนวแกน และโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากค่าเยื้องศูนย์ของแรงตามแนวแกนหรือโมเมนต์ดัดที่มากระทำ รวมทั้งค่าโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวของเสาเข็มด้วย

เมื่อเสาเข็มอยู่เหนือดินหรืออยู่ในชั้นดินอ่อนมาก ๆ จะมีลักษณะดังเช่นเสายาวที่ปราศจากการค้ำยันด้านข้าง (หรือมีการค้ำยันเพียงบางส่วน) ค่าความชะลูด (Slenderness Ratio, h'/r) มากกว่าศูนย์ ในกรณีนี้ค่าโมเมนต์กระทำสูงสุด, Mu จะน้อยกว่าค่าโมเมนต์ต้านทานประลัยของหน้าตัด, Mu^* ดังนั้นอัตราส่วน Mu^*/Mu ขึ้นอยู่กับสัดส่วน h'/r และนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ ค่าของแรงอัดประลัย, Pu ค่าความสูงประสิทธิผล, h' สติฟเนสของหน้าตัด, EI และการกระจายของแรงดัดบนหน้าตัดเสาเข็ม การหาค่าโมเมนต์กระทำสูงสุดใช้สมมติฐานดังนี้

พิจารณาเสาเข็มที่ไม่มีการรองรับด้านข้าง ถูกกระทำด้วยแรง Pu และมีระยะเยื้องศูนย์ e ขณะที่ใกล้จะวิบัติอันเกิดจากแรงร่วมของโมเมนต์ดัดและแรงอัด $Pu\ (e + \Delta_{max})$ โดย Δ_{max} คือ ค่าการแอ่นตัวซึ่งเกิดจากโมเมนต์กระทำและการเพิ่มขึ้นของระยะแอ่นตัวเนื่องจาก Magnification Factor จากทฤษฎีของ Elastic Buckling จะได้

$$Mu^* = Mu \sec \sqrt{Pu\ h'^2 / (4\ EI)} \qquad (2.32)$$

โดยสมมติให้ค่าสติฟเนสของการดัด, EI มีค่าคงที่ตลอดความยาวของชิ้นส่วนที่พิจารณา ในกรณีของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง พฤติกรรมของเสาเข็มเป็นแบบไม่อีลาสติก (Non-elastic) ซึ่งต้องใช้ขั้นตอน

อย่างละเอียดในการพิจารณาคุณสมบัติที่แท้จริงของแต่ละหน้าตัดบนเสาเข็ม ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1.1 เพื่อหารูปแบบการแอ่นตัวขั้นสุดท้ายของเสาเข็ม (Deflection Shape) ดังนั้นเพื่อการคำนวณค่าโมเมนต์ต้านทาน, Mu^* ณ จุดที่วิบัติ จึงต้องทำการหาค่า EI ที่เปลี่ยนแปลงของแต่ละหน้าตัด ตลอดความยาวของเสาเข็ม

เพื่อลดขั้นตอนในการหาค่า Mu^* จึงได้ตั้งสมมติฐานที่ง่าย แต่ให้ผลที่อนุรักษ์ (7) โดยสมมติให้ค่า EI น้อยที่สุด ณ หน้าตัดที่เกิดการวิบัติเป็นค่าคงที่ ที่ใช้ตลอดความสูง h' ดังนั้นทั้งค่าอิลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต, E และค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัด, I จะลดลง ขึ้นอยู่กับระดับความเครียดในบริเวณหน้าตัดรับแรงอัด และขึ้นอยู่กับการแตกร้าวของหน้าตัด

จากสมการที่ 2.32 ซึ่งเป็น Secant Formula สำหรับเสายาวสามารถหาค่า EI ที่จะนำไปใช้ได้ดังนี้

ค่าความโค้ง ณ จุดที่เสาเข็มวิบัติ

$$\varphi = \varepsilon_u / c = Mu^*/EI$$

ดังนั้น

$$EI = c\, Mu^* / \varepsilon_u \qquad (2.33)$$

เมื่อ c คือระยะจาก N.A. ถึงผิวบนสุดของหน้าตัดซึ่งเกิดความเครียดอัดสูงสุดเท่ากับ ε_u เขียนสมการใหม่ จะได้ค่าโมเมนต์กระทำสูงสุด

$$Mu = Mu^* / \sec \sqrt{Pu\, h'^2 / (4\, EI)} \qquad (2.34)$$

โดยที่ตำแหน่งของ N.A. ใด ๆ จะมีค่าแรงตามแนวแกนสูงสุด Pu และค่าโมเมนต์ต้านทานสูงสุด Mu^* เพียงค่าเดียวที่เป็นไปตามสมการที่ 2.33 และ 2.34 ค่าโมเมนต์ที่มากระทำสูงสุด, Mu ขึ้นอยู่กับค่าของเทอม $\sqrt{Pu\, h'^2 / (4\, EI)}$ ตามสมการที่ 2.32 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง $\pi/2$

ในการสร้างกราฟความเกี่ยวพัน โดยพิจารณาการโก่งตัวเนื่องจากความยาวของเสาเข็มนั้น จะกำหนดให้ค่าความชะลูด h'/r แปรเปลี่ยนจาก ศูนย์ ซึ่งเป็นค่าที่ให้กำลังต้านทานของหน้าตัดสูงสุด และให้ค่า h'/r มากขึ้น ซึ่งทำให้กำลังต้านทานของหน้าตัดลดลงตามลำดับ

2.3 การวิเคราะห์กำลังดัดของรอยเชื่อม

กำลังของรอยเชื่อมที่ต้องการสำหรับรอยต่อนั้น จะต้องไม่น้อยกว่ากำลังของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง ทั้งในด้านการรับโมเมนต์ดัดและแรงอัด และสามารถรักษาตำแหน่งสัมพัทธ์ของการโก่งตัวไว้โดยที่ค่าความโค้ง ณ หน้าตัดของรอยเชื่อม มีค่าไม่มากกว่าค่าความโค้งของหน้าตัดเสาเข็มที่กำลังประลัย

การวิเคราะห์กำลังของรอยเชื่อมจะทำโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ต้านทานและความโค้งของหน้าตัดรอยเชื่อม เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์หน้าตัดเสาเข็ม เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์การรับกำลังร่วมแรงอัดและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดรอยเชื่อม ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการหาขนาดของรอยเชื่อมที่เหมาะสมต่อไป

2.3.1 การวิเคราะห์หน้าตัดรับแรงอัดร่วมแรงดัดของรอยเชื่อม

พิจารณารอยเชื่อมตามเส้นรอบวงของเสาเข็ม ซึ่งมีความหนาประสิทธิผล t_e ดังรูปที่ 2.14(a) มีการแจกแจงการกระจายของความเครียดดังรูปที่ 2.14(b) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในด้านแรงดึงและแรงอัดเช่นเดียวกับแผ่นเหล็กที่เชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะได้ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงในหน้าตัดรอยเชื่อมกรณีที่หน่วยแรงอัดที่ผิวบนสุดของรอยเชื่อมน้อยกว่ากำลังคลากของรอยเชื่อม และหน่วยแรงอัดมากกว่ากำลังคลาก ดังรูปที่ 2.14(c) และ 2.14(d) ตามลำดับ

กรณีที่ $\varepsilon_w(x) < \varepsilon_{wy}$

กรณีที่ค่าความเครียดที่ระยะใดๆ ของหน้าตัดรอยเชื่อม, $\varepsilon_w(x)$ น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความเครียดที่จุดคลาก, ε_{wy} หน่วยแรงของรอยเชื่อมที่ระยะ x จากระดับแกนสะเทิน, $f_w(x)$ มีค่าเท่ากับ

$$f_w(x) = \varepsilon_w(x)\, E_w = \varphi_w \times E_w \qquad (2.35)$$

E_w = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรอยเชื่อม

φ_w = ค่าความโค้งของหน้าตัดรอยเชื่อม

$= \varepsilon_w(x) / x$

จากรูปที่ 2.13(b) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$x + h_w = R_w \sin \theta_w$$

$$x = R_w \sin \theta_w - h_w$$

โดย

$$h_w = R_w - c_w$$

ค่าแรงอัดของรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ

$$C_{w1} = \int_{Aw} f_w(x)\, dA_w = 2 \int_{\theta_{w1}}^{\theta_{wy}} \varphi_w E_w (R_w \sin\theta_w - h_w) R_w\, d\theta_w\, t_e$$

$$= 2 R_w t_e \varphi_w E_w [R_w (\cos\theta_{w1} - \cos\theta_{wy}) - h_w (\theta_{wy} - \theta_{w1})] \quad (2.36)$$

และค่าแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ

$$T_{w1} = 2 \int_{\theta_{wa}}^{\theta_{w1}} \varphi_w E_w (R_w \sin\theta_w - h_w) R_w\, d\theta_w\, t_e$$

$$= 2 R_w t_e \varphi_w E_w [R_w (\cos\theta_{wa} - \cos\theta_{w1}) - h_w (\theta_{w1} - \theta_{wa})] \quad (2.37)$$

โดย

$\theta_{w1} = \sin^{-1} (h_w / R_w)$;

$\theta_{wy} = \sin^{-1} [(\varepsilon_{wy} / \varphi_w + h_w) / R_w)]$; $\varepsilon_{wy} = f_{wy} / E_w$;

$\theta_{wy} = \pi/2$ กรณีที่ $\varepsilon_{wc} \le \varepsilon_{wy}$;

$\theta_{wa} = \sin^{-1} [(h_w - \varepsilon_{wy} / \varphi_w) / R_w)]$

หาจุดศูนย์ถ่วงของแรง C_{w1} จากหลักกลศาสตร์ดังนี้

$$\bar{x}_{Cw1} = \int_{Aw} x\, f_w(x)\, dA_w / C_{w1} = 2 \int_{\theta_{w1}}^{\theta_{wy}} \varphi_w E_w (R_w \sin\theta_w - h_w)^2 R_w\, d\theta_w\, t_e / C_{w1}$$

$$= 2 R_w t_e \varphi_w E_w \{ 0.5 R_w^2 [\theta_{wy} - \theta_{w1} - 0.5(\sin 2\theta_{wy} - \sin 2\theta_{w1})]$$
$$+ 2R_w h_w (\cos\theta_{wy} - \cos\theta_{w1}) + h_w^2 (\theta_{wy} - \theta_{w1}) \} / C_{w1} \quad (2.38)$$

ทำนองเดียวกัน หาจุดศูนย์ถ่วงของแรง T_{w1} ได้ดังนี้

$$\bar{x}_{Tw1} = 2 R_w t_e \varphi_w E_w \{ 0.5 R_w^2 [\theta_{w1} - \theta_{wa} - 0.5(\sin 2\theta_{w1} - \sin 2\theta_{wa})]$$
$$+ 2R_w h_w (\cos\theta_{w1} - \cos\theta_{wa}) + h_w^2 (\theta_{w1} - \theta_{wa}) \} / T_{w1} \quad (2.39)$$

<u>กรณีที่ $\varepsilon_w(x) > \varepsilon_{wy}$</u>

กรณีที่ค่าความเครียดที่ระยะใด ๆ ของหน้าตัดรอยเชื่อม, $\varepsilon_w(x)$ มากกว่าค่าความเครียดที่จุดคลาก, ε_{wy} หน่วยแรงของรอยเชื่อมที่ระยะ x จากระดับแกนสะเทิน, $f_w(x)$ มีค่าเท่ากับ

$$f_w(x) = f_{wy} \tag{2.40}$$

ค่าแรงอัดของรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ

$$C_{w2} = 2 \int_{\theta_{wy}}^{\pi/2} f_{wy} R_w \, d\theta_w \, t_e$$

$$= 2 R_w t_e f_{wy} (\pi/2-\theta_{wy}) \tag{2.41}$$

ค่าแรงดึงของรอยเชื่อมมีค่าเท่ากับ

$$T_{w2} = 2 \int_{\pi/2}^{\theta_{wa}} f_{wy} R_w \, d\theta_w \, t_e$$

$$= 2 R_w t_e f_{wy} (\pi/2+\theta_{wa}) \tag{2.42}$$

หาจุดศูนย์ถ่วงของแรง C_{w2}

$$\bar{x}_{Cw2} = 2 \int_{\theta_{wy}}^{\pi/2} (R_w \sin\theta_w - h_w) f_{wy} R_w \, d\theta_w \, t_e / C_{w2}$$

$$= 2 R_w t_e f_{wy} [(R_w \cos\theta_{wy} - h_w (\pi/2-\theta_{wy})] / C_{w2} \tag{2.43}$$

ทำนองเดียวกัน หาจุดศูนย์ถ่วงของแรง T_{w2} ได้ดังนี้

$$\bar{x}_{Tw2} = 2 R_w t_e f_{wy} [(-R_w \cos\theta_{wa} - h_w (\pi/2+\theta_{wa})] / T_{w2} \tag{2.44}$$

คิดผลรวมแรงในแนวแกนทั้งหมด

$$P_w = \sum_{i=1,2} C_{wi} + \sum_{i=1,2} T_{wi}$$

$$= C_{w1} + C_{w2} + T_{w1} + T_{w2} \qquad (2.45)$$

โดยค่า $P_w = 0$ ในกรณีที่หน้าตัดรับเฉพาะแรงดัดอย่างเดียว

คิดผลรวมของโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของหน้าตัดจะได้

$$M_w = \sum_{i=1,2} C_{wi} (h_w + \bar{x}_{Cwi}) + \sum_{i=1,2} T_{wi} (\bar{x}_{Twi} + h_w)$$

$$= C_{w1}(h_w+\bar{x}_{Cw1}) + C_{w2}(h_w+\bar{x}_{Cw2}) + T_{w1}(\bar{x}_{Tw1}+h_w) + T_{w2}(\bar{x}_{Tw2}+h_w) \qquad (2.46)$$

จะได้ค่าความโค้งของหน้าตัด

$$\varphi_w = \varepsilon_{wc} / c_w \qquad (2.47)$$

สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดรอยเชื่อม สามารถทำได้โดยกำหนดค่าความเครียดอัดที่ผิวบนสุดของหน้าตัดรอยเชื่อม (ε_{wc}) แล้วใช้ขั้นตอนของการทำซ้ำ เพื่อหาตำแหน่งของแกนสะเทินที่ทำให้ผลของแรงอัดเท่ากับแรงดึง ($P_w = 0$) เมื่อกำหนดให้ค่า ε_{wc} เปลี่ยนแปรตั้งแต่ค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการ ก็จะได้กราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของหน้าตัดรอยเชื่อมที่พิจารณา

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด (Interaction Curve) ณ ค่าความเครียดอัดที่ผิวบนสุดของหน้าตัดรอยเชื่อม (ε_{wc}) ใด ๆ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปรค่าความโค้งให้มีค่าต่าง ๆ กัน แล้วหาค่าแรงดึงและแรงอัดตามสมการข้างต้น ก็จะได้แรงรวมบนหน้าตัดและค่าโมเมนต์ดัดตามต้องการ

2.3.2 <u>แรงดัดในแผ่นเหล็ก</u>

แผ่นเหล็กเป็นตัวกลางที่จะถ่ายแรงดัดระหว่างเสาเข็มสองท่อนที่นำมาต่อเชื่อมกันโดยผิวหน้าด้านหนึ่งของแผ่นเหล็กยึดติดกับลวดเหล็กอัดแรงและเหล็กข้ออ้อย และอีกด้านหนึ่งยึดติดด้วยรอยเชื่อมเข้ากับเสาเข็มอีกท่อนหนึ่งที่นำมาต่อกัน การวิเคราะห์มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาความหนาของแผ่นเหล็กที่เหมาะ

สม ที่สามารถรับแรงดัดจากโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเสาเข็มได้ โดยความหนาน้อยที่สุดของแผ่นเหล็กนั้นจะพิจารณาจากขนาดของรอยเชื่อมที่ใช้ในการรับกำลัง ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.3.1 และความหนาต่ำสุดของแผ่นเหล็กที่ต้องการสำหรับรอยเชื่อมขนาดดังกล่าว ตามมาตรฐาน AISC-1978

พิจารณาแรงดัดของแผ่นเหล็กด้านล่างสุดของหน้าตัด ด้านหนึ่งมีแรงดึงจากรอยเชื่อมและอีกด้านหนึ่งยึดรั้งไว้โดยเหล็กข้ออ้อยและลวดอัดแรงโดยมีแขนของโมเมนต์เท่ากับระยะจากจุดศูนย์ถ่วงของของแรงดึงเนื่องจากรอยเชื่อมจนถึงระดับเหล็กเสริมที่กึ่งกลางของความหนาเสาเข็ม จะได้ค่าหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในช่วงอีลาสติกคือ

$$f_p = M\,c\,/\,I \quad < \quad 0.6\,fy \qquad (2.48)$$

โดย M คือค่าโมเมนต์ดัด, c คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาแผ่นเหล็ก = $t_p/2$, I คือ ค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดแผ่นเหล็กที่ระดับเหล็กเสริม = $b_p t_p^{\,3}$ /12 , b_pเป็นค่าความกว้างของแผ่นเหล็กที่ระดับเหล็กเสริม แผ่นเหล็กต้องหนาเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแอ่นตัวมากไปกว่าค่าการเปลี่ยนรูปของหน้าตัดอื่น ๆ บริเวณรอยต่อ และหนาเพียงพอที่จะถ่ายแรงลงสู่ผิวหน้าของคอนกรีตได้อย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าสัมผัส

2.3.3 <u>พฤติกรรมการรับแรงร่วมระหว่างรอยเชื่อมกับผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กและคอนกรีต</u>

พิจารณารูปที่ 2.15(a) ซึ่งเป็นหน้าตัดของรอยเชื่อมร่วมกับผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีต ที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กที่นำมาประกบกัน 2 แผ่น จะมีระยะห่างเล็กน้อยเนื่องจากความไม่สมบูรณ์จากการประกอบติดตั้ง (Imperfaction) โดยทั่วไประยะห่างระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กจะใช้ค่าในรูปของความเครียดเท่ากับ 1/1000 ส่วนที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กกับคอนกรีตไม่มีระยะห่างเนื่องจากผลของการอัดแรงก่อน (Prestressed) เมื่อหน้าตัดเริ่มรับแรงดัดรอยเชื่อมจะรับแรงเพียงอย่างเดียวก่อนจนกระทั่งผิวหน้าของแผ่นเหล็กด้านบนเหนือแกนสะเทินมาสัมผัสกัน คอนกรีตบริเวณนั้นก็จะช่วยรับแรงอัดด้วย สมมติให้ลักษณะการแจกแจงความเครียดของรอยเชื่อมและคอนกรีตเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.15(b) และให้การแจกแจงหน่วยแรงของรอยเชื่อมและคอนกรีตดังรูปที่ 2.15(c) และ2.15(d) ตามลำดับ (ใช้ตามโมเดลทั่วไปในหัวข้อที่ผ่านมา) ใช้วิธีการวิเคราะห์ในทำนองเดียวกันหน้าตัดเสาเข็มและรอยเชื่อม สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง และความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและโมเมนต์ดัดได้สำหรับหน้าตัดรับแรงอัดร่วมแรงดัดของรอยต่อ ตั้งข้อสังเกตุได้ว่าเมื่อรอยเชื่อมถึงจุดคลากขณะที่หน้าตัดเสาเข็มยังสามารถรับแรงอัดได้อยู่นั้น รอยต่อจะถ่ายแรงจากแผ่นเหล็กไปยังคอนกรีตได้จนถึงกำลังสูงสุดของหน้าตัดเสาเข็ม