บทที่ 4

การออกแบบรอยต่อเชื่อม

รอยต่อแบบเชื่อม (Welded Connector) ของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง ประกอบด้วยแผ่นเหล็กเชื่อมติดกับเหล็กข้ออ้อยฝังไว้ในเนื้อคอนกรีต และปลายของลวดอัดแรงทุกเส้นยังยึดติดกับแผ่นเหล็กในขั้นตอนผลิต และเชื่อมต่อเสาเข็มระหว่างท่อนเข้าด้วยกันโดยใช้การเชื่อมไฟฟ้า

ในการออกแบบรอยต่อจะพิจารณาให้แผ่นเหล็กยึดติดกับปลายเสาเข็มอย่างสมบูรณ์แล้วหาขนาดของรอยเชื่อมที่เพียงพอโดยกำหนดแนวทางว่า รอยเชื่อมจะต้องสามารถรับกำลังได้ไม่น้อยกว่าหน้าตัดเสาเข็มทั้งการรับแรงดัดและการรับแรงอัดร่วมแรงดัด ในขณะเดียวกันรอยต่อจะต้องมีสติฟเนสมากเพียงพอเมื่อเทียบกับหน้าตัดเสาเข็มเพื่อไม่ให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไป เปรียบได้เสมือนเสาเข็มที่ไม่มีรอยต่อ การออกแบบรอยเชื่อมจะพิจารณาตามลำดับดังนี้

4.1 การออกแบบรอยเชื่อมรับโมเมนต์ดัด

ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้องดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง ตั้งแต่หน้าตัดเริ่มรับแรง, หน้าตัดเริ่มแตกร้าว จนกระทั่งถึงโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด

พิจารณาตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของหน้าตัดเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 ซม. ดังรูปที่ 4.1(a) จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงตั้งแต่เริ่มรับแรงจนถึงกำลังประลัยของหน้าตัด ให้อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง (M/φ) ณ จุดใด ๆ บนกราฟ เป็นค่าสติฟเนสของหน้าตัดเสาเข็ม สังเกตุว่าในช่วงก่อนการแตกร้าวของหน้าตัดจะมีค่าสติฟเนสสูง หลังจากนั้นจะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ จนถึงกำลังประลัยของหน้าตัด วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดรอยเชื่อมโดยใช้หลักของความเครียดสอดคล้องเช่นกัน สำหรับหน้าตัดรอยเชื่อมนั้น กราฟความสัมพันธ์ช่วงแรกก่อนถึงจุดคลากจะเป็นเส้นตรง(ช่วงอีลาสติก) โดยมีอัตราส่วนของ $M/\varphi = EI$ ของหน้าตัดรอยเชื่อม หลังจากที่เลยจุดคลากแล้วความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรง เมื่อกำหนดให้ขนาดของรอยเชื่อมแปรเปลี่ยนเป็นขนาดต่าง ๆ จะเห็นว่าหน้าตัดรอยเชื่อมถึงแม้ว่าจะมีขนาด

เล็กก็ให้ค่าความต้านทานโมเมนต์สูงแต่มีความชันของกราฟในช่วงแรกหรือค่าสติฟเนสต่ำ โดยทำให้ค่าสติฟเนสเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดความหนาของรอยเชื่อม

ในการออกแบบความหนาของรอยเชื่อมเพื่อให้หน้าตัดของรอยเชื่อมมีสติฟเนสมากเพียงพอเมื่อเทียบกับหน้าตัดเสาเข็ม จะพิจารณาใช้ค่าสติฟเนสของเสาเข็มที่หน้าตัดแตกร้าวเริ่มแรกมาใช้ในการออกแบบ เนื่องจากช่วงก่อนการแตกร้าวจะมีค่าสติฟเนสสูง และโดยทั่วไปชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงจะใช้หน้าตัดแตกร้าวมาเป็นขีดจำกัดในการออกแบบ โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งที่หน้าตัดแตกร้าวนี้ สามารถหาได้จากการกำหนดให้ผิวล่างสุดของหน้าตัดรับแรงดึงมีหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงดึงสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 1.99 $\sqrt{f_c'}$ ดังนั้นสามารถหาขนาดหน้าตัดของรอยเชื่อมที่มีสติฟเนสเท่ากับหน้าตัดแตกร้าวของเสาเข็ม (Secant Stiffness) ได้จาก

$$(M/\varphi)_{crack} = (M/\varphi)_{welded} = (EI)_{welded} \qquad (4.1)$$

โดย

$(M/\varphi)_{crack}$ = ค่าสติฟเนสที่หน้าตัดแตกร้าวของเสาเข็ม, กก-ซม^2

$(M/\varphi)_{welded}$ = ค่าสติฟเนสของหน้าตัดรอยเชื่อมในช่วงอีลาสติก = $(EI)_{welded}$, กก-ซม^2

E = ค่าอีลาสติกโมดูลัสของรอยเชื่อม, กก/ซม^2

I = ค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรอยเชื่อม, ซม^4

$= \pi (D_1^4 - D_0^4) / 64$

D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหน้าตัดเสาเข็ม, ซม.

$D_0 = D_1 - 2\,t_e$,

t_e = ความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อม, ซม.

ดังนั้นจะได้ขนาดความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อมในการรับแรงดัด (Pure Bending),

$$t_e = 0.5 \{ D_1 - [D_1^4 - 64 (M/\varphi)_{crack} / (\pi E)]^{1/4} \} \qquad (4.2)$$

โดยรอยเชื่อมแบบร่องลึกเพียงบางส่วนลักษณะร่องรูปตัววีที่ใช้ในที่นี้ มีมุมของร่องรูปตัววีมากกว่าหรือเท่ากับ 60 องศา จะได้ขนาดความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อมเท่ากับความลึกของร่อง ($t_e = b$)

ตัวอย่างการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40, 45, 60 และ 80 ซม. มีค่ากำลังอัดของคอนกรีต 500 กก/ซม^2 แสดงดัง

ตารางที่ 4.1 ถึง 4.4 ตามลำดับ และสามารถหาขนาดของรอยเชื่อมโดยใช้ค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวเริ่มแรกของหน้าตัดเสาเข็มเป็นตัวกำหนด แสดงได้ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดเสาเข็มและรอยเชื่อมในรูปที่ 4.1(b), 4.2(b), 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยได้ขนาดของรอยเชื่อมสำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40, 45, 60 และ 80 ซม. เท่ากับ 7.0, 7.5, 9.0 และ 13.0 มม. ตามลำดับ

4.2 การออกแบบรอยเชื่อมรับแรงอัดร่วมแรงดัด

ความสามารถในการรับแรงอัดร่วมแรงดัดของหน้าตัดเสาเข็ม วิเคราะห์โดยใช้วิธีความเครียดสอดคล้อง โดยแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและโมเมนต์ดัดดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 พิจารณาตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 ซม. ดังรูปที่ 4.5 หน้าตัดเสาเข็มสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดเมื่อไม่มีโมเมนต์ดัดกระทำบนหน้าตัด ความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีโมเมนต์ดัดกระทำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งแรงอัดถึงจุดสมดุลจะได้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด หลังจากนั้นค่าโมเมนต์ดัดจะลดลง จนกระทั่งแรงอัดเป็นศูนย์จะได้ค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับกรณีของหน้าตัดรับแรงดัดเพียงอย่างเดียว

ในการออกแบบความหนาของรอยเชื่อมเพื่อให้สามารถรับกำลังได้ไม่น้อยกว่าหน้าตัดเสาเข็ม จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดรับแรงอัดร่วมแรงดัดของหน้าตัดรอยเชื่อมจะเห็นว่าผลคูณของพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อมที่รับแรงอัดกับหน่วยแรงคลากของรอยเชื่อมตองมากกว่าแรงอัดสูงสุดของหน้าตัดเสาเข็ม จึงจะสามารถรับแรงอัดร่วมแรงดัดได้มากกว่าหน้าตัดเสาเข็ม ดังนั้นในการออกแบบความหนาของรอยเชื่อมจึงกำหนดขนาดหน้าตัดที่รอยเชื่อมถึงจุดคลากดังนี้

$$P_{ult} = A_w f_y \qquad (4.3)$$

โดย

P_{ult} = แรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของหน้าตัดเสาเข็ม, กก.

f_y = กำลังคลากของรอยเชื่อม, กก/ซม^2

A_w = หน้าตัดประสิทธิผลของรอยเชื่อม, ซม^2

$= \pi (D_1^2 - D_0^2) / 4$

D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็ม, ซม.

D_0 = $D_1 - 2 t_e$,

t_e = ความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อม, ซม.

ดังนั้นจะได้ความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อมในการรับแรงอัดร่วมแรงดัด

$$t_e = 0.5 \{ D_1 - [D_1^2 - 4 P_{ult} / (\pi f_y)]^{1/2} \} \quad (4.4)$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40, 45, 60 และ 80 ซม. มีค่ากำลังอัดของคอนกรีต 500 กก/ซม^2 แสดงดังตารางที่ 4.5 ถึง 4.8 ตามลำดับ และสามารถหาขนาดของรอยเชื่อมโดยใช้ค่าแรงอัดสูงสุดของหน้าตัดเสาเข็มเป็นตัวกำหนด แสดงได้ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสาเข็มและรอยเชื่อมในรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 ตามลำดับ ซึ่งได้ขนาดของรอยเชื่อมที่เพียงพอในการรับแรงอัดร่วมแรงดัดสำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40, 45, 60 และ 80 ซม. เท่ากับ 11.5, 12.5, 16.0 และ 19.0 มม. ตามลำดับ

4.3 การออกแบบรอยต่อเชื่อมสำหรับเสาเข็มขนาดต่าง ๆ

พฤติกรรมในการรับแรงของเสาเข็มมีทั้งการรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียวและการรับแรงอัดร่วมกับแรงดัด ดังนั้นในการออกแบบรอยต่อของเสาเข็มต้องสามารถรับแรงกระทำต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับเสาเข็ม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงและหน้าตัดรอยเชื่อม จะเห็นว่าเมื่อกำหนดให้หน้าตัดรอยเชื่อมมีขนาดเพียงพอสำหรับการรับแรงอัดตามแนวแกนได้ ก็จะสามารถรับแรงอัดร่วมแรงดัดได้ด้วย และในทำนองเดียวกันค่าสติฟเนสของหน้าตัดรอยเชื่อมก็มีค่ามากกว่าหน้าตัดเสาเข็มด้วย

สำหรับหน้าตัดรอยเชื่อมที่ออกแบบให้รับแรงดัดได้เพียงอย่างเดียวเมื่อนำมาพิจารณาในรูปของหน้าตัดรับแรงอัดร่วมแรงดัด หน้าตัดรอยเชื่อมจะถึงจุดคลากก่อนถึงแรงอัดประลัยของหน้าตัด หลังจากนั้นผิวหน้าของแผ่นเหล็กจะเป็นตัวถ่ายแรงอัดสู่เนื้อคอนกรีตทำให้สามารถรับแรงได้เทียบเท่ากับหน้าตัดเสาเข็มเช่นเดียวกัน แต่ในแง่ของการออกแบบที่มีประสิทธิผลแล้วควรพิจารณาเลือกใช้หน้าตัดรอยเชื่อมในช่วงก่อนถึงกำลังคลาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้สมการที่ 4.4 เป็นข้อจำกัดในการออกแบบ

เสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตตามมาตราฐาน มอก. 398-2524 (8) ใช้กำลังอัดไม่น้อยกว่า 500 กก/ซม^2 มีหน้าตัดเสาเข็มขนาดมาตราฐานที่ใช้กันโดยทั่วไปดังตารางที่ 4.9 สามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวและโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดได้ดังตารางที่ 4.10 และกราฟรูปที่ 4.9 และหาขนาดหน้าตัดของรอยเชื่อมที่เพียงพอต่อการรับแรงดัดได้ดังตารางที่ 4.10 และกราฟรูปที่ 4.11 ส่วนความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของหน้าตัดเสาเข็มแสดงดังตารางที่ 4.11 และกราฟรูปที่ 4.10 โดยมีขนาดของรอยเชื่อมที่เหมาะสมต่อการรับแรงอัดร่วมแรงดัดแสดงงดังตารางที่ 4.11 และกราฟรูปที่ 4.11

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรงที่ใช้กันโดยทั่วไปและขนาดความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.11 นั้น กราฟเส้นทึบด้านบนหมายถึงขนาดความหนาของรอยเชื่อมที่ควรเลือกใช้เพราะสามารถรับแรงอัดร่วมแรงดัดได้อย่างมีประสิทธิผล กราฟเส้นประด้านล่างหมายถึงขนาดความหนาของรอยเชื่อมที่สามารถรับแรงดัดได้แต่ไม่สามารถรับแรงอัดร่วมแรงดัดได้อย่างมีประสิทธิผล ส่วนเส้นประด้านบนแสดงขนาดความหนาของแผ่นเหล็กน้อยที่สุดที่กำหนดตามความหนาของรอยเชื่อมเพื่อให้การเชื่อมเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์และรับแรงได้อย่างมีประสิทธิผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย