บทที่ 2

ทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์หน้าตัด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตท้องเรียบ ชนิดอัดแรงบางส่วนซึ่งเป็นโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่ง ที่รวมเอาคุณสมบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ในองค์อาคารเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงทั้งทางด้านกำลัง (Strength) , ความเหนียว (Ductility) ของหน้าตัด และคุณสมบัติด้านการให้บริการ (Serviceability) ซึ่งได้แก่ ความกว้างรอยแตกร้าว (Crack Width) และการแอ่นตัว (Deflection) การวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างของหน้าตัดใช้วิธีความเครียดสอดคล้อง (Strain Compatibility) ซึ่งมีหลักการว่า ความเครียดที่เปลี่ยนไปในคอนกรีต มีค่าเท่ากับความเครียดที่เปลี่ยนไปในเหล็กเสริมและความเครียดตลอดหน้าตัดเป็นเส้นตรง วิธีความเครียดสอดคล้องและคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถทราบได้จากการทดสอบจะทำให้ทราบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้งในเหล็กเสริมและคอนกรีต และจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง (Moment Curvature Relationship,M - ϕ Diagram) ซึ่งทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของหน้าตัดทางด้านกำลังและการให้บริการได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพล ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องว่ามีผลต่อพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตท้องเรียบชนิดอัดแรงบางส่วนอย่างไร และเนื่องจากบางขั้นตอนของการวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดและความโค้งมีความยุ่งยากจำเป็นต้องทำการคำนวณโดยการแทนค่าลองผิดลองถูกและคำนวณซ้ำ งานวิจัยนี้จึงทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่วยในการวิเคราะห์ให้การทำงานสะดวกขึ้น

2.1 วัสดุและแบบจำลองคุณสมบัติหลัก

2.1.1 คอนกรีต

คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดีแต่ไม่เหมาะสมในการรับแรงดึง คุณสมบัติด้านกำลังอัดคอนกรีตสามารถทราบได้โดยการทดสอบหาความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรง และ

ความเครียด (Stress - Strain Curve) คอนกรีตที่ใช้ในงานแผ่นพื้นไร้คาน ควรเป็นคอนกรีตกำลังสูง และมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำเพื่อลดการหดตัวในระหว่างการแข็งตัว เพราะแผ่นพื้นมีพื้นที่ให้น้ำระเหยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรอีกทั้งการเทคอนกรีตเป็นไปได้โดยสะดวกจึงสามารถใช้คอนกรีตที่ไม่เหลวมากได้ กำลังอัดคอนกรีต (f_c') ที่นิยมใช้กันมากอยู่ในช่วงระหว่าง 300 ถึง 350 กก./ซม.^{2} อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จะพิจารณากำลังอัดคอนกรีตในช่วง 100 - 500 กก./ซม.^{2}

ก. <u>ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด</u>

พฤติกรรมของคอนกรีตล้วนภายใต้การอัดสามารถทราบได้ จากการทดสอบแท่งทรงกระบอกตัวอย่างซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. หรือจากแท่งคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม. เมื่อแท่งคอนกรีตตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน จากกราฟรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่างๆ กัน จะเห็นว่าในช่วงที่หน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าประมาณ 0.5 fc' ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเกือบจะเป็นเส้นตรง ค่าความเครียดที่หน่วยแรงสูงสุด (ϵ_o) ของกราฟมีค่าประมาณ 0.002 ความเครียดที่ภาวะประลัย (ϵ_u) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.003 ถึง 0.008 และเพื่อความปลอดภัย มาตรฐาน ACI ได้กำหนดให้ ϵ_u เท่ากับ 0.003 และสำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E_c) ของคอนกรีตมวลปกติ - ACI กำหนดให้มีค่า เท่ากับ $15210\sqrt{f_c'}$ กก./ซม.^{2} Hognestad (8) ได้เสนอสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต ดังสมการที่ 2.1

$$f_c = f_c' \left[2(\epsilon/\epsilon_o)-(\epsilon/\epsilon_o)^2 \right] \qquad (2.1)$$

โดยที่

f_c = หน่วยแรงในคอนกรีตที่ระดับใด ๆ

f_c' = กำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก

ϵ = ความเครียดในคอนกรีตที่ระดับใด ๆ

ϵ_o = ความเครียดที่ตำแหน่ง f_c' (โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.002)

ข. พฤติกรรมรับแรงดึง

คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำมาก โดยปกติจะมีค่าไม่เกิน 20 % ของกำลังอัด การทดสอบกำลังรับแรงดึงอาจใช้วิธี Split Tensile Test ดังรูปที่ 2.2 หรืออาจทดสอบโดยการกดคานคอนกรีตล้วนหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 x 15 ซม. แล้วจึงคำนวณหากำลังรับแรงดึงหรือโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture ,f_r) ซึ่งมีค่าเท่ากับ MC/I มาตรฐาน ACI กำหนดให้โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $1.99\sqrt{fc'}$ กก./ซม.^{2}

2.1.2 ลวดกำลังสูง

ลวดกำลังสูงที่ใช้ในคอนกรีตอัดแรงเป็นลวดเกลียว (Strand) ผลิตตามมาตรฐาน ASTM A-416 มีกำลังดึงสูงสุด 270 ksi หรือประมาณ 19,000 กก./ซม.^{2} ลวดเกลียวที่ใช้จะมัดรวม 7 เส้น (Seven Wire Strand) มีขนาดตั้งแต่ 1/4" ถึง $1\ ^{11}/_{16}$" แต่ที่นิยมใช้กันมากกับระบบดึงลวดภายหลัง (Post Tension) คือ ขนาด 1/2" หรือ 13 มม. มีเนื้อที่หน้าตัดเฉลี่ยประมาณ 0.99 ซม.^{2} และมีกำลังดึงประลัย (f_{pu}) ถึงประมาณ 19,000 กก. แต่มักจะระบุให้ดึงที่ประมาณ 70 % ของกำลังประลัย คือประมาณ 12 - 13 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดกำลังสูง ได้แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ในช่วงแรกเป็นเส้นตรง มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E_c) ประมาณ 2×10^6 กก./ซม.^{2} อัตราการเพิ่มของหน่วยแรงจะค่อยๆ ลดลงเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นมากกว่าความเครียดที่พิกัดเส้นตรง (Proportional Limit) หน่วยแรงคลาก (Yield Stress) ไม่สามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจน จึงมักกำหนดหน่วยแรงที่ความเครียด 1 % เป็นหน่วยแรงคลากซึ่งมีค่าประมาณ 17,500 กก./ซม.^{2}

2.1.3 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ว่าด้วยเหล็กเสริมคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป ที่นิยมใช้คือ SD30 , SD40 และ SD 50 ซึ่งมีกำลังคลาก (Yield Strength ; f_y) 3,000 , 4,000 และ 5,000 กก./ซม.^{2} และ มีการยืดตัวสูงสุดเกิน

กว่า 18 ,17 และ 16 % ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริม (Typical Stress Strain Curve) ได้แสดง ดังรูปที่ 2.4 กราฟแสดงหน่วยแรงคลากชัดเจน และ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) ประมาณ 2×10^6 กก./ซม.^{2}

2.2 การวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง

ในช่วงหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว การแจกแจงหน่วยแรงบนหน้าตัดจะไม่เป็นเส้นตรง NED H. BURN (9) ได้เสนอวิธีวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้องซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้คือ

1. เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความเครียดในเหล็กเสริม และคอนกรีต จะมีค่าเท่ากัน สมมุติฐานนี้ สามารถใช้ได้กับการอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (Bond Tendon) เท่านั้น ไม่สามารถใช้กับการอัดแรงชนิดไม่มีการยึดเหนี่ยว (Unbond Tendon) ได้ เนื่องจากลวดอัดแรงจะเกิดการเคลื่อนตัว (Slip) จากผิวสัมผัสคอนกรีตขณะรับแรง
2. การแจกแจงความเครียดบนหน้าตัด เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5
3. องค์อาคารมีกำลังรับแรงเฉือนอย่างพอเพียง, การอัดน้ำปูน (Grout) และการยึดด้วยสมอยึดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยการวิบัติขององค์อาคาร จะเนื่องมาจากการดัดเท่านั้น
4. แรงอัดลัพธ์ในคอนกรีตและแรงดึงในเหล็กเสริม จะมีค่าเท่ากัน ตามกฎการสมดุลย์และโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่ขณะใด ๆ จะเท่ากับโมเมนต์ดัด ที่กระทำบนหน้าตัด
5. สามารถทราบความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ของคอนกรีต, เหล็กเสริมและลวดกำลังสูง

การวิเคราะห์หน้าตัดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ในช่วงก่อนการแตกร้าวและหลังการแตกร้าว ในช่วงก่อนการแตกร้าวการแจกแจงหน่วยแรงบนหน้าตัดเป็นเส้นตรง การวิเคราะห์สามารถใช้ทฤษฎีอีลาสติก (Elastic)ได้ และ ในช่วงหลังการแตกร้าวพฤติกรรมจะ

เป็นแบบอินอีลาสติก (Inelastic) คอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทิน (Neutral Axis) ถือว่าไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดังนั้น แรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดทั้งหมดจะถูกรับโดยเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว การแจกแจงหน่วยแรงอัดในพื้นที่หน้าตัดไม่เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.6 การคำนวณแรงอัดลัพธ์ (C_c) และ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง ($\bar{x}$) ของแรงอัดลัพธ์สามารถหาได้โดยวิธีการอินทิเกรด พิจารณาจากรูปที่ 2.6 ความเครียดในคอนกรีตที่ระยะ x จากแกนสะเทินจะเท่ากับ ϕx จากสมการที่ 2.1 หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ

$$f_c(x) = f_c' \left[(2\phi x/\epsilon_o) - (\phi x/\epsilon_o)^2 \right] \qquad (2.2)$$

$$C_c = \int_0^c f_c(x) b \, dx$$

$$= \int_0^c b f_c' \left[(2\phi x/\epsilon_o) - (\phi x/\epsilon_o)^2 \right] dx$$

$$= b f_c' \left[(\phi c^2/\epsilon_o) - (\phi^2 c^3/3\epsilon_o^2) \right]$$

ดังนั้น $$C_c = b f_c' \phi (c^2/\epsilon_o)[1 - (\phi c/3\epsilon_o)] \qquad (2.3)$$

หาระยะจุดศูนย์ถ่วงของแรง C_c จากหลักกลศาสตร์ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\int_0^c f_c(x) b x \, dx}{C_c} \qquad (2.4)$$

$$\int_0^c f_c(x) b x \, dx = b f_c' \int_0^c \left[(2\phi x^2/\epsilon_o) - (\phi^2 x^3/\epsilon_o^2) \right] dx$$

$$= b f_c' \left[2\phi c^3/3\epsilon_o - \phi^2 C^4/4\epsilon_o^2 \right]$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\bar{x} = \frac{bf_c'\phi(c^2/\epsilon_o)\,[\,2c/3 - \phi c^2/4\epsilon_o\,]}{bf_c'\phi(c^2/\epsilon_o)\,[1-(\phi c/3\epsilon_o)]}$$

$$\bar{x} = \frac{c\,[\,8\epsilon_o - 3\phi c\,]}{4\,[\,3\epsilon_o - \phi c\,]} \qquad (2.5)$$

2.3 ความสัมพันธ์โมเมนต์ดัดและความโค้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง จะสามารถทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของหน้าตัดทั้งทางด้านกำลังและ ความเหนียวได้ การหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง ความโค้งหลังการแตกร้าวของหน้าตัดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความโค้งสูงสุดที่หน้าตัดแตกร้าว และความโค้งต่ำสุดที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างรอยแตกร้าวดังแสดงในรูปที่ 2.7 การวิบัติของคอนกรีตพิจารณาเมื่อเกิดความเครียดในคอนกรีต (ϵ_c) เท่ากับ 0.003 มม./มม.ดังรูปที่ 2.8 การหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งจะพิจารณาที่แรงกระทำต่างๆกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำ (M = 0)

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อความเครียดในคอนกรีตที่ระดับลวดกำลังสูง (ϵ_{cs}) เท่ากับศูนย์

ขั้นตอนที่ 3 ที่จุดเริ่มต้นของการแตกร้าว ($M = M_{crack}$)

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อเหล็กเสริมธรรมดาถึงจุดคลาก

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อกำหนดให้ความเครียดที่ผิวบนคอนกรีต (ϵ_c) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 0.003

ในขั้นตอนที่ 4 และ 5 เป็นช่วงหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์และความโค้งมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นโดยการกำหนดความเครียดที่ผิวบนของหน้าตัด (ϵ_c)
2. สมมติระยะจากผิวบนของหน้าตัดถึงแกนสะเทิน (C_{top})

3. จากค่า ϵ_c และ C_{top} จะหาค่าความเครียดที่ระดับต่างๆได้ และโดยอาศัยสมการที่ 2.1 จะสามารถทราบค่าหน่วยแรงที่ระดับต่างๆ และ คำนวณหาแรงอัดลัพธ์ (C_c) และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงได้
4. ทำการคำนวณความเครียดในเหล็กเสริมและลวดอัดแรง ($\epsilon_s, \epsilon_{ps}$)แล้วจึงหาค่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมและลวดอัดแรงจากกราฟความสัมพันธ์ หน่วยแรงและความเครียด
5. ตรวจสอบแรง C_c สมดุลย์กับ T หรือไม่ ถ้าไม่เท่ากัน จะต้องทำการเปลี่ยนค่า C_{top} แล้วทำตามขั้นตอนที่ 3-5 ใหม่
6. เมื่อทำการทดลองจนได้ค่า C_c สมดุลย์กับ T แล้ว จึงสามารถคำนวณค่าโมเมนต์ดัดและความโค้งได้

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยสร้างแบบจำลองหน้าตัดแผ่นพื้นมีขนาดความกว้าง (b) 100 ซม., มีความหนา 25 ซม.,และความลึกประสิทธิผล (d) 21 ซม. ภายในหน้าตัดประกอบด้วยตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ กำลังอัดคอนกรีต (f_c'),กำลังคลากเหล็กเสริม (f_y),ปริมาณเหล็กเสริม (ρ_s) และปริมาณลวดอัดแรง (ρ_p)

2.4 การควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าว

เมื่อเกิดหน่วยแรงดึงในคอนกรีตเกินกว่ากำลังรับแรงดึง ของคอนกรีตที่สามารถรับได้จะเกิดรอยแตกร้าวขึ้น ซึ่งขนาดของรอยแตกร้าวจะเปลี่ยนแปลง ตามขนาดของแรงกระทำ การคำนวนหาความกว้าง ของรอยแตกร้าวและระยะห่างรอยแตกร้าว (Crack Spacing) สามารถพิจารณาจากความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตหรือเหล็กเสริม จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความยาวที่เปลี่ยนไป (Δl) ดังสมการ $\epsilon = \Delta l / l_o$ สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการหาความกว้างรอยแตกร้าวและระยะห่างรอยแตกร้าวโดยที่ Δl คือความกว้างของรอยแตกร้าวเฉลี่ยและ l_o คือระยะห่างของรอยแตกร้าวเฉลี่ย (Everage Crack Spacing)

เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงบางส่วนเป็นโครงสร้างที่ยอมให้เกิดรอยแตกร้าวได้ที่สภาวะการรับน้ำหนักใช้งาน ดังนั้นเงื่อนไขสำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบหน้าตัดโดยวิธีอัดแรงบางส่วน คือ การตรวจสอบขนาดความกว้าง ของรอยแตกร้าวไม่ให้เกินตามที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากหน้าตัดที่มีรอยแตกร้าวกว้างเกินไป จะส่งผลต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมโดยสภาวะแวดล้อม สูตรที่นิยมใช้ในการทำนายความกว้างของรอยแตกร้าวสำหรับคอนกรีตอัดแรงบางส่วน คือสูตรซึ่งเสนอโดย Gergely และ Lutz (4) ซึ่งปัจจุบันได้ถูกบรรจุในมาตรฐานของ ACI, สูตรของ CEB - FIP (7) และ สูตรของ Nawy และ Chiang (5)

- <u>สูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าว ของ CEB - FIP</u> (7)

จากสมการพื้นฐาน $\epsilon = \Delta l/l_o$ สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของความกว้างรอยแตกร้าวและระยะห่างรอยแตกร้าวดังสมการที่ 2.6

$$W_m = S_{rm} \cdot \epsilon_{sm} \qquad (2.6)$$

เมื่อ W_m = ความกว้างรอยแตกร้าวเฉลี่ย ,มม.

S_{rm} = ระยะห่างรอยแตกร้าวเฉลี่ย ,มม.

ϵ_{sm} = ความเครียดในเหล็กเสริมที่เปลี่ยนไป เมื่อเทียบกับผิวคอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเสริม ,เรเดียล/มม.

และเนื่องจากแรงภายในเหล็กเสริมทั้งหมด (T) จะถูกถ่ายแรงให้กับคอนกรีต (R) จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$T = R$$

$$K\, S_{rm} \cdot f_{bm} \cdot \Sigma u = A_c \cdot f_{ct} \qquad (2.7)$$

ดังนั้น $$S_{rm} = K (f_{ct}/f_{bm}).(A_{ct}/ \Sigma u) \quad (2.8)$$

เมื่อ S_{rm} = ระยะห่างรอยแตกร้าวเฉลี่ย ,ซม.

K = สัมประสิทธิ์ที่กำหนดให้ เนื่องจากการกระจาย หน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากเหล็กไปยังคอนกรีต จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.50

f_{bm} = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ย , กก./ซม.^{2}.

f_{ct} = หน่วยแรงดึงในคอนกรีต , กก./ซม.^{2}.

A_{ct} = พื้นที่คอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึง , ซม.^{2}.

Σu = ผลรวมเส้นรอบวงของเหล็กเสริมรับแรงดึง , ซม.

จากการทดสอบพบว่าทั้ง f_{ct} และ f_{bm} มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วน กับกำลังคอนกรีต (f_c') และพบว่าอัตราส่วน f_{ct}/f_{bm} สำหรับเหล็กข้ออ้อยมีค่าเท่ากับ 0.4 และมีค่า 0.8 สำหรับเหล็กกลม และจากการศึกษาเพิ่มเติม ถึงอิทธิพลของระยะหุ้ม (Covering) และระยะห่างเหล็กเสริม (Bar Spacing) พบว่ามีความสัมพันธ์กับระยะห่างของรอยแตกร้าว ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.9

$$S_{rm} = 2(C + 0.1S) + K (f_{ct}/f_{bm})(A_{ct}/\Sigma u) \quad (2.9)$$

$$S_{rm} = 2(C + 0.1S) + 0.5 (f_{ct}/f_{bm})(A_t/\Sigma u) \quad (2.10)$$

เมื่อ C = ระยะหุ้มเหล็กเสริม , ซม.

S = ระยะห่างเหล็กเสริม , ซม.

พิจารณาจากรูปที่ 2.9 จะพบว่าการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมไปยังคอนกรีตมีระยะทางที่จำกัดอยู่ระหว่างรอยแตกร้าว ซึ่ง CEB ได้เสนอ พื้นที่คอนกรีตรับแรงดึงประสิทธิผล (Effective Concrete Area) ให้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของพื้นที่รับแรงดึงทั้งหมด

CEB - FIP ได้เสนอสูตร ทำนายความเครียดเฉลี่ยในคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริม (ϵ_{sm}) ดังสมการที่ 2.11

$$\epsilon_{sm} = K'.\epsilon_{s2} \qquad (2.11)$$

เมื่อ ϵ_{s2} = ความเครียดในเหล็กเสริม ณ แรงกระทำที่พิจารณา

K' = สัมประสิทธิ์ที่กำหนดให้เนื่องจากผลของสติฟเนสของคอนกรีต

$= 1-0.5\ \beta_1 (f_{sr}/f_{s2})^2$

β_1 = 0.4 สำหรับเหล็กข้ออ้อย

0.8 สำหรับเหล็กกลม

f_{sr} = หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมเมื่อหน่วยแรงดึงในคอนกรีตมีค่าสูงสุด หรือเท่ากับ $1.99\sqrt{f_c'}$, กก./ซม.^{2}.

f_{s2} = หน่วยแรงในเหล็กเสริม ณ แรงกระทำที่พิจารณา, กก./ซม.^{2}.

จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 จะสามารถคำนวณหาค่าความกว้างของรอยแตกร้าวเฉลี่ยจากสมการที่ 2.6 ได้ อย่างไรก็ตาม CEB -FIP ได้เสนอสูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด (Maximum Crack Width) มีค่าเท่ากับ 1.7 เท่าของความกว้างรอยแตกร้าวเฉลี่ย

$$W_{max} = 1.7\ W_m \qquad (2.12)$$

- <u>สูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าว ของ Gergely และ Lutz (4)</u>

Gergely และ Lutz ได้เสนอสูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดดังสมการที่ 2.13 ซึ่งต่อมาสูตรนี้ได้ถูกบรรจุในมาตรฐาน ACI สูตรของ Gergely และ Lutz นี้ สามารถประยุกต์ใช้กับคอนกรีตอัดแรงบางส่วนได้โดยแทนค่า f_s ด้วย Δf_{ps}

$$W_{max} = 1.081\times10^{-5}\ \beta f_s \sqrt[3]{d_c A_t} \qquad (2.13)$$

เมื่อ W_{max} = ความกว้างของรอยแตกร้าวสูงสุดที่ระดับเหล็กเสริมธรรมดา (มม.)

f_s = หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม หรือเท่ากับ Δf_{ps} ในกรณีที่ประยุกต์ใช้กับคอนกรีตอัดแรงบางส่วน (กก./ซม.^{2})

Δfps = หน่วยแรงในลวดอัดแรงที่เปลี่ยนไป เทียบกับหน่วยแรงในลวดอัดแรงเมื่อความเครียดในคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริมเท่ากับศูนย์ ($\epsilon_{cs} = 0$)

A_t = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึงต่อเหล็กเสริมหนึ่งเส้น (ซม.^{2})

d_c = ระยะหุ้มคอนกรีตถึงตำแหน่งเหล็กเสริมธรรมดา (ซม.)

β = อัตราส่วนระหว่างระยะจากผิวรับแรงดึงถึงแกนสะเทิน และ ระยะศูนย์ถ่วงเหล็กเสริมถึงแกนสะเทิน

- สูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าว ของ Nawy และ Chiang (5)

Nawy และ Chiang ได้ทำการศึกษาถึง สูตรความกว้างของรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตชนิดอัดแรงทีหลัง (Post Tension) โดยเริ่มต้นจากสมการพื้นฐาน $\epsilon = \Delta l/l_o$ เช่นเดียวกับของ CEB โดยได้พิจารณาถึงตัวแปรที่มีผลต่อรอยแตกร้าวใกล้เคียงกับของ CEB มาก จากการถ่ายแรงภายในเหล็กเสริม (T) สู่คอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กเสริมโดยแรงยึดเหนี่ยว (R) ซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลย์ คือ

$$T = R$$

$$f.a_{cs}.u_m.\Sigma O = A_t.f_t' \qquad (2.14)$$

เมื่อ a_{cs} = ระยะห่างรอยแตกร้าวเฉลี่ย ,ซม.

f = สัมประสิทธิ์การระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยว

u_m = หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (เป็นฟังก์ชั่นของ $\sqrt{f_c'}$)

ΣO = ผลรวมของเส้นรอยรูปเหล็กเสริมทั้งหมด (ซม.)

At = พื้นที่คอนกรีตในส่วนที่รับแรงดึง (ซม.^{2})

f_t' = กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})

จากสมการที่ 2.14 สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$a_{cs} = C.(f_t'/ \sqrt{f_c'}).(A_t / \Sigma O) \qquad (2.15)$$

ค่าคงที่ C ในสมการที่ 2.15 สามารถทราบได้จากการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า C มีค่าประมาณ 0.243 และจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าสัดส่วนของ $f_t' / \sqrt{f_c'}$ มีค่าประมาณ 6.35 เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.15 จะได้

$$a_{cs} = 1.54 (A_t / \Sigma O) \qquad (2.16)$$

Nawy และ Chiang ได้ศึกษาถึง สูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด (w_{max}) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไประหว่างรอยร้าว 2 รอยที่อยู่ติดกัน ความเครียดของคอนกรีต สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.17

$$w_{max} = K.a_{cs}.\epsilon_s = K'[(A_t/\Sigma O).\Delta f_s] \qquad (2.17)$$

เมื่อ

K' = ค่าคงที่ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบ

W_{max} = ความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุด ที่ระดับเหล็กเสริม (ซม.)

ϵ_s = ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเหล็กเสริม มีค่าเท่ากับ $\Delta f_s/E_s$

Δf_s = $f_{nt} - f_d$ (กก./ซม.^{2})

f_{nt} = หน่วยแรงในลวดกำลังสูง ณ แรงกระทำที่พิจารณา, กก./ซม.^{2}

fd = หน่วยแรงในลวดกำลังสูง ณ แรงกระทำที่ ทำให้ความเครียดในคอนกรีตที่ระดับเหล็กเสริมเท่ากับศูนย์ , กก./ซม.^{2}

จากการทดสอบพบว่าค่าคงที่ K' มีค่าเท่ากับ 9.26×10^{-6} จากสมการที่ 2.17 สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$W_{max} = 9.26x10^{-6} (A_c/\Sigma O).(\Delta fs) \quad (2.18)$$

สำหรับความกว้างของรอยแตกร้าวสูงสุด ที่ผิวนอกสุด สามารถหาได้จากสมการที่ 2.19

$$W_{max} = 9.26x10^{-6} (A_c/\Sigma O).(\Delta fs).R_i \quad (2.19)$$

เมื่อ R_i = อัตราส่วนระหว่าง ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวรับแรงดึงนอกสุดและระยะจากแกนสะเทินถึงศูนย์ล่างเหล็กเสริม

- <u>ความกว้างรอยแตกร้าวที่ยอมให้</u>

เนื่องจากสภาพความรุนแรงของสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน จะส่งผลต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริม ในอัตราที่ต่างกัน มาตรฐานต่าง ๆ จึงมักกำหนดความกว้างของรอยแตกร้าวที่ยอมให้ภายใต้สภาวะแวดล้อมหนึ่ง ๆ ACI Committee 224 ได้เสนอขีดจำกัดความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดที่ยอมให้ที่สภาวะน้ำหนักใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ดังนี้

พื้นผิวภายในอาคาร (Dry Air, Protective Membrane)	=	0.40 มม.
พื้นผิวภายนอก (Moist Air, Soil)	=	0.30 มม.
โครงสร้างสัมผัสน้ำทะเล (Wetting and Drying)	=	0.15 มม.
โครงสร้างกักเก็บน้ำ (Water Retaining)	=	0.10 มม.

ในขณะที่ มาตรฐาน CEB - FIP 1990 กำหนดความกว้างของรอยแตกร้าวสูงสุดที่ยอมให้เกิดได้ในหน้าตัดหนึ่ง ๆ ดังนี้

พื้นผิวสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก	=	0.30 มม.
พื้นผิวสำหรับคอนกรีตอัดแรง	=	0.20 มม.