บทที่ 2

ทฤษฎี (Theory)

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาถึงสูตรและวิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมของหน้าตัดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนที่ทำการอัดแรงแบบไม่ยึดเหนี่ยว โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างจำนวน 5 ชุด และหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวซึ่งอาจแปลงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งได้ จากผลการทดสอบ จะนำมาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี 2 แบบ ซึ่งใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งของหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงแบบยึดเหนี่ยว คือ วิธีความเครียดสอดคล้อง(Strain Compatibility) และวิธีของ Siriaksorn และ Naaman (7) งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงสูตรทำนายกำลังดัดประลัยของหน้าตัดจากสูตรของ ACI , Nedderman และ วิธีความเครียดสอดคล้อง

2.1 วัสดุและแบบจำลองคุณสมบัติหลัก

2.1.1 คอนกรีต

คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดีแต่ไม่เหมาะสมในการรับแรงดึง คุณสมบัติด้านกำลังอัดคอนกรีตสามารถทราบได้โดยการทดสอบหาความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรง และความเครียด (Stress - Strain Curve) คอนกรีตที่ใช้ในงานแผ่นพื้นไร้คาน ควรเป็นคอนกรีตกำลังสูง และมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำเพื่อลดการหดตัวในระหว่างการแข็งตัว เพราะแผ่นพื้นมีพื้นที่ให้น้ำระเหยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรอีกทั้งการเทคอนกรีตเป็นไปได้โดยสะดวกจึงสามารถใช้คอนกรีตที่ไม่เหลวมากได้ กำลังอัดคอนกรีต (f_c') ที่นิยมใช้กันมากอยู่ในช่วงระหว่าง 300 ถึง 350 กก./ซม.^{2}

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

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 (6) ได้เสนอสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต ดังสมการที่ 2.1 และรูปที่ 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)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. <u>พฤติกรรมรับแรงดึง</u>

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 $1.99\sqrt{f_c'}$ 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 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดกำลังสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถทราบได้จากการทดสอบ

2.1.3 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ว่าด้วยเหล็กเสริมคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป งานวิจัยนี้ใช้เหล็กเสริมเกรด SD40 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมทราบได้จากการทดสอบ

2.2 การวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง

ในช่วงหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว การแจกแจงหน่วยแรงบนหน้าตัดจะไม่เป็นเส้นตรง Ned H. Burns (9) ได้เสนอวิธีวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้องซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้คือ

1. เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความเครียดในเหล็กเสริม และคอนกรีต จะมีค่าเท่ากัน สมมุติฐานนี้ สามารถใช้ได้กับการอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (Bond Tendon)
2. การแจกแจงความเครียดบนหน้าตัด เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3
3. องค์อาคารมีกำลังรับแรงเฉือนอย่างพอเพียง, การอัดน้ำปูน (Grout) และ

การยึดด้วยสมอยึดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยการวิบัติขององค์อาคาร จะเนื่องมาจากการดัดเท่านั้น

4. แรงอัดลัพธ์ในคอนกรีตและแรงดึงในเหล็กเสริม จะมีค่าเท่ากัน ตามกฎการสมดุลย์และโมเมนต์ของแรงคู่ควบที่จุดใด ๆ จะเท่ากับโมเมนต์ดัด ที่กระทำบนหน้าตัด
5. สามารถทราบความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ของคอนกรีต, เหล็กเสริมและลวดกำลังสูง

การวิเคราะห์หน้าตัดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ในช่วงก่อนการแตกร้าวและหลังการแตกร้าว ในช่วงก่อนการแตกร้าวการแจกแจงหน่วยแรงบนหน้าตัดเป็นเส้นตรง การวิเคราะห์สามารถใช้ทฤษฎีอีลาสติก (Elastic) ได้ และ ในช่วงหลังการแตกร้าวพฤติกรรมจะเป็นแบบอินอีลาสติก (Inelastic) คอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทิน (Neutral Axis) ถือว่าไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดังนั้น แรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดทั้งหมดจะถูกรับโดยเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว การแจกแจงหน่วยแรงอัดในพื้นที่หน้าตัดไม่เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.4 การคำนวณแรงอัดลัพธ์ (C_c) และ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง (x) ของแรงอัดลัพธ์สามารถหาได้โดยวิธีการอินทิเกรต พิจารณาจากรูปที่ 2.4 ความเครียดในคอนกรีตที่ระยะ x จากแกนสะเทินจะเท่ากับ ϕx จากสมการที่ 2.1 หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ

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

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

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

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

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หาระยะจุดศูนย์ถ่วงของแรง C_c จากหลักกลศาสตร์ดังนี้

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

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

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

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

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

2.3 การวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีของ Siriaksorn และ Naaman

สมการทั่วไปในการคำนวณค่าการแอ่นตัว เขียนในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียล ได้ดังนี้

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{E_c I_{eff}} \qquad (2.6)$$

เมื่อ y = ระยะการแอ่นตัว

x = ระยะตามความยาวของคาน

$E_c I_{eff}$ = สติฟเนสของแผ่นพื้น

พิจารณารูปที่ 2.5 สำหรับการแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ทั้งก่อน และ

หลังการแตกร้าว Siriaksorn และ Naaman ได้เสนอสมการในการหาค่าแอ่นตัวของคานที่มีฐานรองรับแบบง่าย ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ 2 จุด จากสมการดิฟเฟอเรนเชียล ข้างต้นให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการใช้งานดังนี้

$$\text{Camber} = -\frac{FL^2}{8EI}\left(e_2 - \frac{5}{6}(e_1 - e_2)\right) \qquad (2.7)$$

$$\text{Deflection} = \left[\frac{L^2}{8} - \frac{b^2}{6}\right]\frac{M}{E_c I_{eee}} \qquad (2.8)$$

โดยที่ I_{eee} = โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล

สำหรับค่า I_{eee} ได้ถูกเสนอโดย Branson (ACI Recommend) ดังนี้

$$I_{eee} = I_{cr} + \left[\frac{(M_{cr})}{(M_a)}\right]^3 (I_g - I_{cr}) \leqslant I_g \qquad (2.9)$$

เมื่อ I_g = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดไม่แตกร้าวอาจเป็นหน้าตัดปรกติ (Gross Section) หรือหน้าตัดที่แปลงค่าเหล็ก (Trans form Section)

I_{cr} = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่แตกร้าว

สำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่า I_{cr} สามารถคำนวณจากสมการ

$$I_{cr} = \frac{b.c^3}{3} + \frac{A_{ps}.E_{ps}.(d_{ps}-c)^2}{E_c} + \frac{A_s.E_s.(d_s-c)^2}{E_c} \qquad (2.10)$$

2.4 ความสัมพันธ์โมเมนต์ดัดและความโค้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง จะสามารถทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของหน้าตัดทั้งทางด้านกำลังและ ความเหนียวได้ การหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง ความโค้งหลังการแตกร้าวของหน้าตัดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความโค้งสูงสุดที่หน้าตัดแตกร้าว และความโค้งต่ำสุดที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างรอยแตกร้าวดังแสดงในรูปที่ 2.7 การวิบัติของคอนกรีตพิจารณาเมื่อเกิดความเครียดในคอนกรีต (ϵ_c) เท่ากับ 0.003 มม./มม.ดังรูปที่ 2.6 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 และคำนวณหาแรงอัดลัพธ์ (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 ได้แสดงไว้ในส่วนของตัวอย่างการคำนวณ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วน โดยหล่อแบบทดสอบแผ่นพื้นมีขนาดความกว้าง 70 ซม. มีความหนา 15 ซม., ยาว 6 เมตร ภายในหน้าตัดประกอบด้วยปริมาณเหล็กเสริมและอัตราการอัดแรงต่างๆกัน

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัว

พิจารณารูปที่ 2.8 ชิ้นส่วนของโครงสร้างซึ่งมีโมเมนต์ที่ปลายทั้ง 2 ข้างเท่ากัน ค่าความโค้ง (R) วัดจากแกนสะเทิน การหมุนระหว่างปลายของชิ้นส่วนทั้ง 2 ข้างมีค่า

$$d_x/R = \epsilon_c \, dx/kd \qquad (2.11)$$

ค่าความโค้ง $(\phi) = 1/R = \epsilon_c/kd \qquad (2.12)$

$$\phi = (M/EI).(kd/kd)$$

$$= M/EI \qquad (2.13)$$

ค่าการแอ่นตัว (y) สามารถหาได้จากการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมการการโค้งของคาน พิจารณารูปที่ 2.9

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-M}{EI} \qquad (2.14)$$

y = ค่าการแอ่นตัวของคาน

x = ระยะในแนวราบตลอดความยาวของคาน

$$\Sigma M_{RR} = 0 \quad ; \quad R_1 L = \int_0^L f(q).(L-c)dc$$

$$R_1 = (1/L) \int_0^L f(q).(L-c)dc \qquad (2.15)$$

และค่าโมเมนต์ที่ระยะ x เมื่อวัดจาก R_1

$$Mx = R_1 x - \int_0^x f(q)\ (x-c)\ dc \qquad (2.16)$$

เมื่อแทนสมการ 2.16 ลงไปในสมการ 2.14 แล้วแก้สมการจะหาค่าการแอ่นตัวได้

2.6 การวิเคราะห์กำลังดัดประลัยของหน้าตัด

การวิเคราะห์กำลังดัดประลัยของหน้าตัด อาจทำได้ 3 วิธี คือ วิธีความเครียดสอดคล้อง, วิธีของ ACI และจากวิธีของ Nedderman

- วิธีของ ACI

ในคอนกรีตจากพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมเสมือนของ Whitney ซึ่งได้นำเสนอในมาตรฐาน ACI ดังรูปที่ 2.6 ACIกำหนดความเครียดสูงสุดในคอนกรีต (ϵ_c) เท่ากับ 0.003 ขนาดของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.85 f_c' และแผ่สม่ำเสมอบนพื้นที่รับแรงอัด ab ดังนั้นแรงอัดลัพธ์ในคอนกรีต (C_c) จะเท่ากับ 0.85 $f_c'ba$ โดยที่ระยะ a มีค่าเป็นสัดส่วนกับระยะแกนสะเทิน (Neutral Axis) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\beta_1 c$ ค่าของ β_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัด(f_c') น้อยกว่าหรือเท่ากับ 280 กก/ซม^2 และค่าของ β_1 จะลดลงในอัตรา 0.05 สำหรับอัตคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 70 กก/ซม^2 แต่ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.65 สำหรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงที่กำลังดัดประลัย ACI ได้เสนอสูตรทำนายค่าหน่วยแรงสำหรับระบบอัดแรงแบบไม่มีการยึดเหนี่ยว (Unbond System) ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18 แต่ทั้งนี้หน่วยแรงอัดประสิทธิผล (f_{se}) ต้องไม่น้อยกว่า 0.50 f_{pu} สำหรับหน่วยแรงในเหล็กเสริมจะถือว่าถึงจุดคลาก (Yield) ที่สภาวะรับน้ำหนักประลัย

เมื่อ Span-to-Depth Ratio < 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_c'}{100\rho_p} \quad (ksc) \qquad (2.17)$$

แต่จะต้องไม่น้อยกว่า f_{py} หรือไม่น้อยกว่า $f_{se} + 4220$

เมื่อ Span-to-Depth Ratio > 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p} \quad (ksc) \qquad (2.18)$$

แต่จะต้องไม่น้อยกว่า f_{py} หรือไม่น้อยกว่า $f_{se} + 2110$

จากรูปที่ 2.5 จะได้ว่า

$$T = C_c$$

$$A_{ps}f_{ps} + A_sf_y = 0.85\, f_c'\, ba$$

ดังนั้น
$$a = (A_{ps}f_{ps} + A_sf_y) / (0.85\, f_c'b) \qquad (2.19)$$

ดัชนีเหล็กเสริม
$$\bar{\omega} = \frac{A_{ps}f_{ps}}{bdfc'} + \frac{A_sf_y}{bdfc'} \qquad (2.20)$$

$$a = (d/0.85)(\omega_p + \omega_s)$$

ดังนั้น
$$a = 1.176\, d\, (\bar{\omega}) \qquad (2.21)$$

กำลังดัดประลัย
$$M_u = \phi\, T\, (d-a/2)$$

$$M_u = \phi\, (A_{ps}f_{ps} + A_sf_y)\, [d - (0.59\, d\, \bar{\omega})]$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$M_u = \phi\, bd\, f_c' (\bar{\omega}) (d - 0.59\, d\, \bar{\omega})$$

ดังนั้นกำลังดัดประลัย $M_u = \phi\, bd^2 f_c' (\bar{\omega}) (1 - 0.59\, \bar{\omega})$ (2.22)

- <u>วิธีของ Nedderman</u>

Nedderman ได้เสนอสูตร ทำนายค่ากำลังดัดประลัยของหน้าตัดคอนกรีตดังสมการที่ (2.23)

$$M = C(d - k_2 c) \quad (2.23)$$

เมื่อ C = แรงอัด = $0.58\, f_c' bc$

k_2 = อัตราส่วนระหว่างระยะจากผิวบนถึงจุดศูนย์กลางแรงอัดต่อระยะจากผิวบนถึง Nutral axis = 0.37

ดังนั้น $M = 0.58\, f_c' bc (d - 0.37c)$ (2.24)

2.7 <u>สูตรระยะห่างระหว่างรอยร้าวของ CEB - FIP</u>

CEB - FIP (18) ได้เสนอสูตรสำหรับหาค่าระยะห่างของรอยร้าวดังนี้

$$S_{rm} = 2\left(\frac{C + s}{10}\right) + K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{\phi}{\rho r} \quad (2.25)$$

S_{rm} = ระยะห่างเฉลี่ยของรอยร้าว (Crack Spacing) (ม.ม.)

C = ระยะห่อหุ้มคอนกรีต (Covering) (ม.ม.)

s = ระยะห่างระหว่างเหล็กเส้น หรือเหล็กที่มัดรวมเป็นกลุ่ม(Bundles)(ม.ม.)

K_1 = ค่าคงที่เป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยว (bond properties)

High Bond Bar	=	0.4
Ribbed Prestressing	=	0.6
Plain Bars and Plain, Indented or Crimped Prestressing Wires	=	0.8

K_2 = เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้กับการกระจายหน่วยแรงดึงมีค่าดังนี้

แรงดัด = 0.125

แรงดึง = 0.25

ϕ = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็ก (ม.ม.) สำหรับเหล็กที่ bundles ให้ใช้ค่า $\phi.\sqrt{n}$

$$\rho_r = \frac{A_s}{Ac(ten)}$$

Ac(ten) = หน่วยแรงของคอนกรีตที่รับแรงดึง สำหรับพื้นที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีค่าเท่ากับ $(c_b \cdot b)/2$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย