บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สมมุติฐานเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์คานประกอบคอนกรีต - อิฐเสริมเหล็ก

ในการคำนวณออกแบบคานประกอบคอนกรีต - อิฐเสริมเหล็ก ใช้สมมุติฐานดังต่อไปนี้ คือ

2.1.1 พื้นที่หน้าตัดซึ่งเป็นระนาบก่อนรับแรงดัด ยังคงเป็นระนาบอยู่หลังจากรับแรงดัดแล้ว

2.1.2 ขณะที่บรรทุกน้ำหนักใช้งาน ก็อว่าวัสดุ (คอนกรีต อิฐ และเหล็ก)ที่ใช้ยังอยู่ในช่วงพิกัดยืดหยุ่น

2.1.3 แรงดึงในคอนกรีต และอิฐละทิ้งไว้ไม่นำมาคิดในการคำนวณ ฉะนั้นเหล็กเสริมจะรับแรงดึงทั้งหมด ส่วนคอนกรีต และอิฐรับแรงอัดทั้งหมดด้วยกัน

2.1.4 หน่วยแรงเริ่มแรกเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage) ขณะที่คอนกรีตแข็งตัว และสูญเสียความชื้นไป และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ไม่นำมาคิด

2.1.5 การยึดหน่วงระหว่างปูนสอกับอิฐ หรือปูนสอกับคอนกรีต หรือคอนกรีตกับอิฐ ก็อว่ามีการยึดหน่วงอย่างสมบูรณ์ (perfect bond) ไม่ทำให้เกิด local failure

2.1.6 อิฐรูปตัว U ที่ใช้เทคอนกรีต และปูนสอชั้นที่ก่อติดกับอิฐรูปตัว U ให้ก็อเสมือนเป็นเนื้อคอนกรีตเดียวกัน ซึ่งต้านแรงอัดด้วยกัน ทั้งนี้เพราะว่ากำลังอัดของอิฐ และปูนสอมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต และมีเนื้อที่หน้าตัดน้อยมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีต

2.1.7 รอยเชื่อมต่อปูนสอระหว่างอิฐทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง ให้ก็อเสมือนว่าเป็นเนื้อของอิฐ ฉะนั้นระนาบในแนวราบเป็นเนื้อเดียวกันตลอด

2.2 <u>โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ</u>

2.2.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (E_s) ในกรณีที่ไม่ได้ทดลองหาค่าออกมา มาตรฐาน ว.ส.ท. 1001 - 16 อนุโลมให้ใช้ 2.04×10^6 ก.ก./ซ.ม.^{2} แต่ในการวิจัยนี้ได้หาจากการทดสอบดึงเหล็ก โดยติด Dial gage และติด Strain gage เพื่อวัดระยะยืด หรือค่าความเครียดของเหล็ก แล้วนำค่าหน่วยแรงดึง และความเครียดมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 3.3 (ภาคผนวก ก.) จะได้ค่าเฉลี่ย $E_s = 2.24 \times 10^6$ ก.ก./ซ.ม.^{2}

2.2.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ในกรณีที่ไม่ได้ทดลองหาค่าออกมา มาตรฐาน ว.ส.ท. 1001 - 16 อนุโลมให้หาจาก $E_c = 4270\ w^{1.5}\sqrt{fc'}$ แต่ในการวิจัยได้หาจากการทดสอบกดแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก ซึ่งได้ค่าดังนี้

เมื่อ $fc' = 230$ ก.ก./ซ.ม.^{2} จะได้ $E_c = 2.27 \times 10^5$ ก.ก./ซ.ม.^{2}

เมื่อ $fc' = 260$ ก.ก./ซ.ม.^{2} จะได้ $E_c = 2.39 \times 10^5$ ก.ก./ซ.ม.^{2}

เปรียบเทียบกับของ ว.ส.ท. จะได้ค่าดังนี้

เมื่อ $fc' = 230$ ก.ก./ซ.ม.^{2} จะได้ $E_c = 2.41 \times 10^5$ ก.ก./ซ.ม.^{2}

เมื่อ $fc' = 260$ ก.ก./ซ.ม.^{2} จะได้ $E_c = 2.56 \times 10^5$ ก.ก./ซ.ม.^{2}

ค่าที่ได้จากมาตรฐาน ว.ส.ท. จะมากกว่าจากการทดสอบ มีค่า 6% และ 7% ตามลำดับ นับว่าใกล้เคียงกันมาก ในที่นี้จะใช้ค่า E_c ที่ได้จากการทดลอง

2.2.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ (E_b)

Glanville และ Barnett [18] ได้ทดลองหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐดินเหนียวต่าง ๆ กัน แล้วสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_b = 300\ f_b'$$

ในการวิจัยนี้ได้ค่า $E_b = 9.33 \times 10^4$ ก.ก./ซ.ม.^{2} และ $fb' = 310$ ก.ก./ซ.ม.^{2} ถ้าแทนค่าในสมการของ Glanville และ Barnett จะได้ $E_b = 9.30 \times 10^4$ ก.ก./ซ.ม.^{2} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก

2.2.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของปูนสอ (E_j)

Hilsdorf (19) ได้ทดลองหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนสอชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้การเลือกปูนสอในกรณีที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นค่าวิกฤต ได้ผลดังนี้

เมื่ออัตราส่วนปูนสอ ซีเมนต์ : ทราย = 1 : 3 โดยปริมาตรจะได้

$$E_j = 2.53 \times 10^5 \text{ ก.ก./ซ.ม.}^2$$

เมื่ออัตราส่วนปูนสอ ปูนขาว : ปูนซีเมนต์ : ทราย = 1 : 2 : 8 โดยปริมาตรจะได้

$$E_j = 3.60 \times 10^4 \text{ ก.ก./ซ.ม.}^2$$

เมื่ออัตราส่วนปูนสอ ปูนขาว : ทราย = 1 : 3 โดยปริมาตรจะได้

$$E_j = 6.6 \times 10^3 \text{ ก.ก./ซ.ม.}^2$$

สูตรเอ็มไพริกัลของโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนสอ มีค่าดังนี้

$E_j = 1000\, fj'$ เหมาะสำหรับกำลังปูนสอกำลังต่ำ

$E_j = 4270\, w^{1.5} \sqrt{fj'}$ เหมาะสำหรับกำลังปูนสอกำลังสูง

---

(18) Glanville and Barnett : " Medianical Properties of Brick and Brickwork Masonry " Department of Scientific and Industrial Research, Building Research, Special Report No. 22, Building Research Station, Garstons, Watford, Herts. Her Majesty's Stationery Office, London, 1934.

(19) Hilsdorf, H.K. : " Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerksfestigkeit, " Bericht Nr. 40, Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule, München, 1965.

โดยที่ w = น้ำหนักของปูนสอต่อหน่วยปริมาตร

f_j = กำลังอัดประลัยของปูนสอ

2.2.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของงานก่อ (E_m)

Glanville และ Barnett, Hilsdorf, SCPRF [20] ได้ทดลองหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของงานก่ออิฐ ซึ่งจะให้ผลลัพธ์อยู่ระหว่างค่า

$E_m = 1000\ f'_m$ และ E_m $400\ f'_m$

โดยที่ f'_m = กำลังอัดประลัยของงานก่อ

การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของงานก่ออิฐอย่างหยาบ ๆ จะใช้สมการดังนี้

$$E_m = 700\ f'_m$$

Sven Sahlin [21] ได้หาทฤษฎีของโมดูลัสยืดหยุ่นของงานก่ออิฐ ดังนี้

$$\frac{E_m}{E_b} = \frac{1 + r}{1 + \frac{r}{\beta}}$$

หรือ

$$E_m = \frac{1}{\frac{1-\delta}{E_j} + \frac{\delta}{E_b}}$$

---

20. Structural Clay Products Research Foundation : "Compressive and Transverse Strength Test of Four-inch Brick Wall" Research Report No. 9, Geneva, Illinois, 1965

21. Sven Sahlin "Structural Masonry" Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1971 p.53

โดยที่ $\gamma = \dfrac{t_j}{t_b}$ $\beta = \dfrac{E_j}{E_b}$ $\delta = \dfrac{t_j}{t_b + t_j}$

t_j = ความหนาของปูนสอ

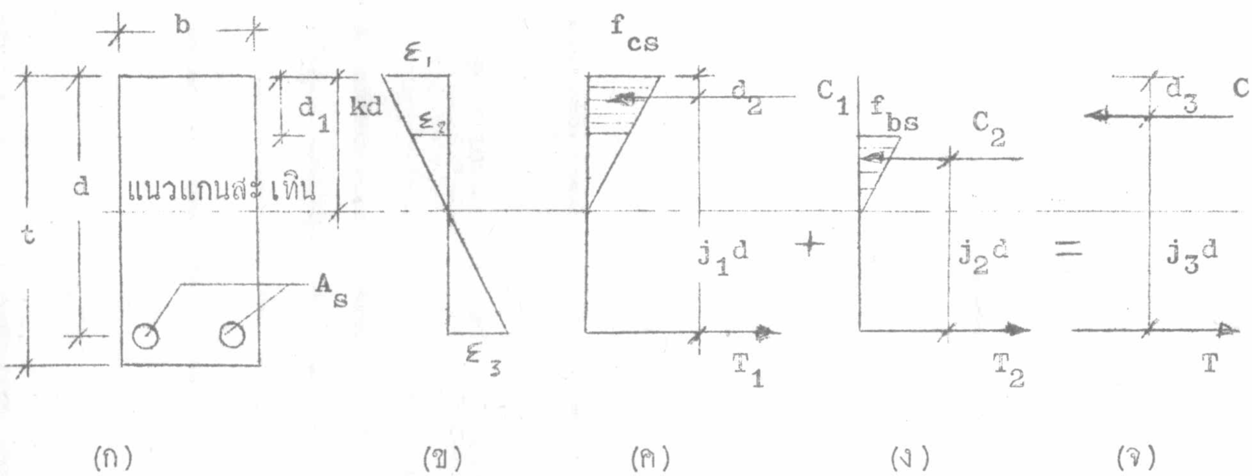
t_b = ความหนาของอิฐก้อนเดียว

2.3 ทฤษฎีอีลัสติกของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก

ทฤษฎีอีลัสติกของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก จะมีหลักการอย่างเดียวกับทฤษฎีอีลัสติกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังต่อไปนี้ คือ

2.3.1 คานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวภายใต้แรงอัด

พิจารณาคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด b x t มีความลึกของคอนกรีตส่วนบน d_1 (รวมความหนาของอิฐรูปตัว ບ และปูนสอที่ติดกันด้วย) เสริมเหล็กรับแรงดึง A_s เพียงอย่างเดียววางเรียงโดยมีความลึกประสิทธิผล d ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงรูปหน้าตัด (ก) ความเครียด (ข) และแรงต่าง ๆ (ค,ง,จ) ของคานตามทฤษฎีอีลัสติก

ให้ $n_c = \dfrac{E_s}{E_c}$ $n_b = \dfrac{E_s}{E_b}$ และ $p = \dfrac{A_s}{bd}$

2.3.1.1 กรณีที่เหล็กเสริมเอกถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (f_s) ก่อนที่คอนกรีตจะถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (f_c) นั่นคือ $\varepsilon_3 = \varepsilon_s = \frac{f_s}{E_s}$

การหาตำแหน่งของแนว แกนสะเทิน

$$\varepsilon_1 = \frac{kd}{d-kd}\,\varepsilon_3 = \frac{kd}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{E_s}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{kd-d_1}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{E_s}$$

$$f_{cs} = \varepsilon_1 E_c = \frac{kd}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{E_s}\cdot E_c = \frac{kd}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{n_c}$$

$$f_{bs} = \varepsilon_2 E_b = \frac{kd-d_1}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{E_s}\cdot E_b = \frac{kd-d_1}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{n_b}$$

$$C_1 = \frac{1}{2}\left[\frac{kd}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{n_c} + \frac{kd-d_1}{d-kd}\cdot\frac{f_s}{n_c}\right] d_1 b$$

$$= \frac{1}{2}\left[\frac{2kd-d_1}{d-kd}\right]\frac{f_s}{n_c}\, d_1 b$$

$$C_2 = \frac{1}{2}\left[\frac{(kd-d_1)^2}{d-kd}\right]\frac{f_s}{n_b}\, b$$

$$T = T_1 + T_2 = A_s f_s = pbd\, f_s$$

จากการสมดุลย์ของแรงในแนวราบ $T = C$

$$pbdf_s = \frac{1}{2}\left[\frac{2kd-d_1}{d-kd}\right]\frac{f_s}{n_c}\cdot d_1 b + \frac{1}{2}\,\frac{(kd-d_1)^2}{d-kd}\,\frac{f_s}{n_b}\, b$$

$$2\,pdn_b n_c\,(d-kd) = (2kd-d_1)\, d_1 n_b + \left[(kd)^2 - 2kdd_1 + d_1^2\right] n_c$$

$$n_c(kd)^2 - 2(d_1 n_c - d_1 n_b - pdn_b n_c)\, kd + (d_1^2 n_c - d_1^2 n_c - 2pd^2 n_b n_c) = 0$$

$$k=\frac{2(d_1n_c-d_1n_b-pdn_bn_c)\pm\sqrt{4(d_1n_c-d_1n_b-pdn_bn_c)^2-4n_c(d_1^2n_c-d_1^2n_c-2pd^2n_bn_c)}}{2\,n_cd}$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ (2.3-1)$$

ให้จุดที่แรง C_1 กระทำอยู่ห่างจากขอบผิวบนสุดของคอนกรีตเป็นระยะ d_2

$$\therefore\quad d_2=\frac{d_1}{3}\left[\frac{\left(\frac{kd}{d-kd}\right)\left(\frac{f_s}{n_c}\right)+2\left(\frac{kd-d_1}{d-kd}\right)\left(\frac{f_s}{n_c}\right)}{\left(\frac{kd}{d-kd}\right)\left(\frac{f_s}{n_c}\right)+\left(\frac{kd-d_1}{d-kd}\right)\left(\frac{f_s}{n_c}\right)}\right]$$

$$d_2=\frac{d_1}{3}\left[\frac{3kd-2d_1}{2kd-d_1}\right]$$

$$j_1d=d-d_2=d-\frac{d_1}{3}\left[\frac{3kd-2d_1}{2kd-d_1}\right]$$

$$j_1=1-\frac{d_1}{3d}\left(\frac{3kd-2d_1}{2kd-d_1}\right)\qquad\ldots\ldots\ldots\ldots\ (2.3-2)$$

$$j_2d=d-d_1-\frac{1}{3}\left(kd-d_1\right)=d-\frac{kd}{3}-\frac{2}{3}d_1$$

$$j_2=1-\frac{k}{3}-\frac{2}{3}\cdot\frac{d_1}{d}\qquad\ldots\ldots\ldots\ldots\ (2.3-3)$$

ให้ระยะ d_3 เป็น Centroid ของแรงอัด C_1 และแรงอัด C_2 โดยวัดจากขอบผิวบนสุดของคอนกรีตมายังเส้นแนวแกนสะเทิน

$$d_3 = \frac{C_1 d_2 + C_2 \left[d_1 + \frac{1}{3}(kd - d_1) \right]}{C_1 + C_2}$$

$$d_3 = \frac{n_b d_1^2 (3kd - 2d_1) + n_c (kd + 2d_1)(kd - d_1)^2}{3n_b d_1 (2kd - d_1) + 3n_c (kd - d_1)^2} \quad \ldots.(2.3\text{-}4)$$

$$j_3 d = d - d_3$$

$$j_3 = 1 - \frac{1}{d} \left[\frac{n_b d_1^2 (3kd - 2d_1) + n_c (kd+2d_1)(kd-d_1)^2}{3n_b d_1 (2kd - d_1) + 3n_c (kd-d_1)^2} \right] \quad ..(2.3\text{-}5)$$

$$M_s = Tj_3 d = A_s f_s j_3 d$$

$$\therefore \quad M_s = A_s f_s \left[d - \frac{n_b d_1^2 (3kd - 2d_1) + n_c (kd+2d_1)(kd-d_1)^2}{3n_b d_1 (2kd-d_1) + 3n_c (kd-d_1)^2} \right] \quad \ldots..(2.3\text{-}6)$$

หรือ $M_s = C_1 j_1 d + C_2 j_2 d$

$$\therefore \quad M_s = \frac{1}{2} \left(\frac{2kd - d_1}{(1-k)}\right) \frac{f_s}{n_c} d_1 b\, j_1 + \frac{1}{2} \frac{(kd - d_1)^2}{1 - k} \cdot \frac{f_s}{n_b} b j_2 \quad \ldots.(2.3\text{-}7)$$

สมการ (2.3-6) และสมการ (2.3-7) จะมีค่าเท่ากัน

2.3.1.2 กรณีที่คอนกรีตถึงค่าหน่วยแรงอัด (f_c) ก่อนที่เหล็กเสริมเอกจะถึงค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (f_s) นั่นคือ $\varepsilon_1 = \varepsilon_c = \frac{f_c}{E_c}$

การหาตำแหน่งของแนวแกนสะเทิน

$$\varepsilon_2 = \frac{kd - d_1}{kd} \cdot \varepsilon_c = \frac{kd - d_1}{kd} \frac{f_c}{E_c}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{d - kd}{kd} \cdot \varepsilon_c = \frac{d - kd}{kd} \frac{f_c}{E_c}$$

$$f_{bs} = \mathcal{E}_2 E_b = \frac{kd - d_1}{kd} \cdot \frac{f_c}{E_c} \cdot E_b \cdot \frac{E_s}{E_s}$$

$$f_{bs} = \frac{kd - d_1}{kd} \quad \frac{n_c}{n_b} \quad fc$$

$$f_{sc} = \mathcal{E}_3 \quad E_s = \frac{d - kd}{kd} \cdot \frac{f_c}{E_c} \quad E_s$$

$$f_{sc} = \frac{d - kd}{kd} \quad n_c f_c$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left[f_c + \frac{(kd - d_1)}{kd} \quad fc \right] \quad d_1 b$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \cdot bd_1 f_c \frac{(2kd - d_1)}{kd}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \cdot bf_c \frac{n_c}{n_b} \frac{(kd - d_1)^2}{kd}$$

$$T = T_1 + T_2 = A_s f_{sc} = pbd \; n_c f_c \left(\frac{d-kd}{kd} \right)$$

$$\therefore \quad T = C_1 + C_2$$

$$pbdn_c f_c \left(\frac{d-kd}{kd} \right) = \frac{1}{2} bd_1 f_c \frac{(2kd - d_1)}{kd} + \frac{1}{2} bf_c \frac{n_c}{n_b} \frac{(kd - d_1)^2}{kd}$$

$$n_c (kd)^2 - 2(n_c d_1 - n_b d_1 - pdn_b n_c) kd + (n_c d_1^2 - n_b d_1^2 - 2pd^2 n_b n_c) = 0$$

$$\therefore k = \frac{2(d_1 n_c - d_1 n_b - pdn_b n_c) \pm \sqrt{4(d_1 n_c - d_1 n_b - pdn_b n_c)^2 - 4n_c (d_1^2 n_c - d_1^2 n_b - 2pd^2 n_b n_c)}}{2 \, n_c d}$$

..........(2.3-8)

$$d_2 = \frac{d_1}{3}\left[\frac{fc + 2\,(\frac{kd-d_1}{kd})f_c}{f_c + (\frac{kd-d_1}{kd})fc}\right]$$

$$d_2 = \frac{d_1}{3}\ (\frac{3kd - 2d_1}{2kd - d_1})$$

$$j_1d = d-d_2 = d - \frac{d_1}{3}\ (\frac{3kd - 2d_1}{2kd - d_1})$$

$$j_1 = 1 - \frac{d_1}{3d}\ (\frac{3kd - 2d_1}{2kd - d_1}) \qquad ....(2.3-9)$$

$$j_2d = d-d_1 - \frac{1}{3}\,(kd-d_1) = d - \frac{kd}{3} - \frac{2}{3}\ d_1$$

$$j_2 = 1-\frac{k}{3} - \frac{2}{3}\ \frac{d_1}{d} \qquad ....(2.3-10)$$

$$M_c = C_1\ j_1d + C_2\ j_2d$$

$$\therefore M_c = \frac{1}{2}\ bd_1f_cj_1\ (\frac{2kd - d_1}{k}) + \frac{1}{2}\ b\ f_c\ \frac{n_c}{n_b}\ j_2\ \frac{(kd - d_1)^2}{k} \qquad .....(2.3-11)$$

จากทั้ง 2 กรณี จะเห็นว่า สมการ (2.3-1) และ สมการ (2.3-8) มีค่าเท่ากัน สมการ (2.3-2) และสมการ (2.3-9) มีค่าเท่ากัน สมการ (2.3-3) และสมการ (2.3-10) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ ไม่ว่าคานนั้นจะถูกควบคุมด้วยหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมหรือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตก็ตาม แนวแกนสะเทินและค่าช่วงแขนของโมเมนต์เนื่องจากแรงอัด C_1 และแรงอัด C_2 จะมีค่าคงที่เสมอ

2.3.2 หน่วยแรงเฉือน

หน่วยแรงเฉือนของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก จะประมาณโดยใช้ทฤษฎีของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะได้เปรียบเทียบจากการทดลอง

ค่าหน่วยแรงเฉือน (v) หาจากสูตร

$$v = \frac{V}{bd}$$

โดยที่ V เป็นค่าแรงเฉือนที่หน้าตัดที่กำลังพิจารณา b และ d เป็นความกว้างและความลึกของคานตามลำดับ

คานคอนกรีตซึ่งไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ก็มีส่วนต้านทานหน่วยแรงเฉือนด้วย โดยพิจารณาเฉพาะส่วนที่ต้านโดยคอนกรีตล้วนที่ตำแหน่งห่างจากขอบฐานรองรับเป็นระยะ d ดังนี้

$$v_c = 0.29\sqrt{fc'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.3\text{-}12)$$

โดยที่ fc' เป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีต มีหน่วยเป็น กก / ซม.^{2}

สำหรับการคำนวณที่ละเอียด มาตรฐาน ว.ส.ท. 1001-16 กำหนดไว้ดังนี้

$$v_c = 0.265\sqrt{fc'} + 91.4\,p\,\frac{Vd}{M} \quad \ldots\ldots(2.3\text{-}13)$$

โดยที่ p เป็นอัตราส่วนเนื้อที่เหล็กเสริมต่อหน้าตัด bd

M เป็นโมเมนต์ที่หน้าตัดที่พิจารณา แต่ M จะต้องไม่น้อยกว่า Vd

ค่า v_c ที่ได้จากการสมการ (2.2-13) ต้องไม่เกิน $0.464\sqrt{fc'}$

2.3.3 หน่วยแรงยึดหน่วง

ในคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กนั้น เหล็กเสริมเอกอยู่ในเนื้อคอนกรีต เพราะฉะนั้น หน่วยแรงยึดหน่วงจึงเหมือนกับในคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

2.3.4 ระยะโก่ง

การคำนวณหาระยะโก่ง ($\triangle$) ที่เกิดขึ้นทันทีทันใด เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะเขียนในรูปทั่ว ๆ ไปได้ดังนี้

$$\triangle = \frac{F(\text{น้ำหนักบรรทุก, ช่วงความยาวคาน})}{E_c I} \quad \ldots\ldots(2.3\text{-}14)$$

โดยที่ $E_c I$ เป็นค่าความแกร่งต่อแรงดัด และ F (น้ำหนักบรรทุก, ช่วงความยาวยาวคาน) เป็นฟังค์ชั่นของน้ำหนักบรรทุกและช่วงความยาวคาน เช่น คานช่วงเดี่ยวยาว L รับน้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอ (w) ต่อหน่วยความยาว จะได้ระยะโก่ง

$$\triangle = \frac{5}{384}\frac{wL^4}{E_c I} \quad \text{ดังนั้น F มีค่าเท่ากับ} \quad \frac{5}{384} wL^4$$

ในการวิจัยนี้เป็นคานช่วงเดี่ยวยาว L มีน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ Third point loading จะได้ระยะโก่งดังนี้

$$\triangle = \frac{23}{1296}\frac{PL^3}{EI}$$

โดยที่ P เป็นน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด E เป็นโมดูลัสยืดหยุ่น I เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชีย

สำหรับค่าโมเมนต์อินเนอร์เชีย มาตรฐาน ว.ส.ท. 1001-16 ให้ใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดทั้งหมด สำหรับ $p f_y$ มีค่าไม่เกิน 35 กก./ซม.^{2} และให้ใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดแปลงร้าวสำหรับ $p f_y$ เกินกว่า 35 กก./ซม.^{2}

มาตรฐาน ACI 318-71 กำหนดไว้ว่า ในการคำนวณหาระยะโก่ง ให้ใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผล (I_c) ดังนี้ คือ

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad \ldots\ldots(2.3\text{-}16)$$

โดยที่ $M_{cr} = \dfrac{f_r I_g}{Y_t}$ ....(2.3-17)

$f_r = 1.99 \sqrt{fc'}$ ....(2.3-18)

M_a = แรงดัดสูงสุดในคานตอนที่คำนวณหาระยะโก่ง

M_{cr} = แรงดัดแตกร้าว

I_g = โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดทั้งหมด

I_{cr} = โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดแปลงร้าว

f_r = โมดูลัสแตกร้าว

Y_t = ระยะจากแนวแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดทั้งหมด (ละทิ้งเหล็กเสริม) ถึงขอบนอกสุดในการรับแรงดึง

f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

แต่ค่า I_e จะต้องไม่มากกว่า I_g ถ้า M_a มีค่าน้อยกว่า M_{cr} ให้ใช้ I_g แทนลงในสมการ (2.3-14) ได้เลย

ส่วนระยะโก่งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกาลเวลา จะหาได้จากการคำนวณระยะโก่งที่เกิดขึ้นทันทีทันใด แล้วคูณด้วยตัวคูณดังนี้

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1001-16 และมาตรฐาน ACI 318-63 กำหนดให้คูณด้วย ด้วย 2 เมื่อ $A_s' = 0$ หรือ 1.2 เมื่อ $A_s' = 0.5\,A_s$ หรือ 0.8 เมื่อ $A_s' = A_s$

มาตรฐาน ACI 318-71 ให้คูณด้วย

$$2 - 1.2\,(A_s'/A_s) \geq 0.6$$

ค่าระยะโก่งที่เกิดขึ้นทันทีทันใดที่ยอมให้ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีค่า L/360

2.4 ทฤษฎีกำลังประลัยของคานประกอบคอนกรีต–อิฐเสริมเหล็ก

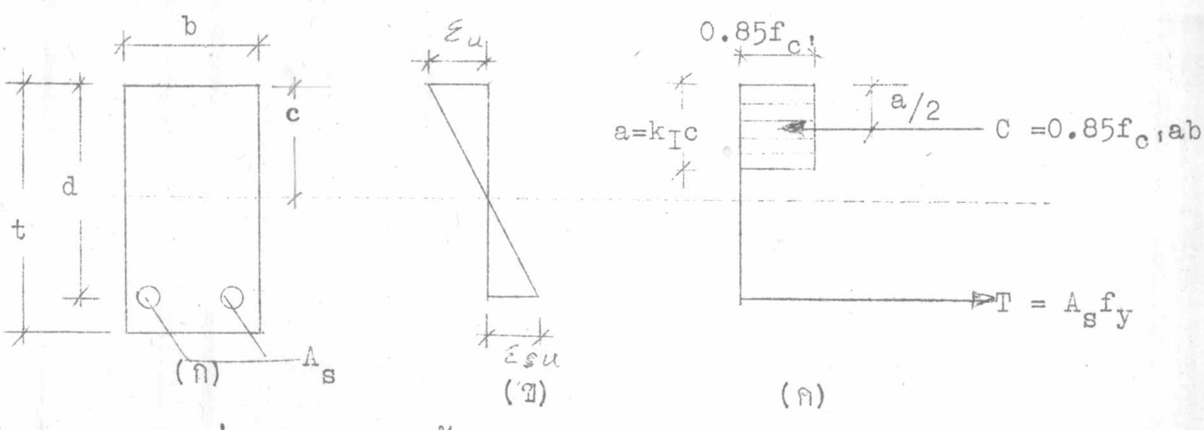
2.4.1 คานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เสริมเฉพาะเหล็กรับแรงดึงภายใต้แรงดัด

พิจารณาคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด b x t มีความลึกของคอนกรีตส่วนบน d_1 (รวมความหนาของอิฐรูปตัว U และปูนสอที่ติดกับอิฐรูปตัว U ด้วย) เสริมเหล็กรับแรงดึง A_s เพียงอย่างเดียว วางเรียงให้มีความลึกประสิทธิผล d ให้การแผ่ของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตหรือของอิฐเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยให้ขนาดของหน่วยหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและอิฐมีค่าเป็น 0.85 f'_c และ 0.85 f'_b ตามลำดับ มีความลึกของบล็อกหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $a = k_1 c$ โดยที่ c เป็นระยะจากขอบบนซึ่งเกิดแรงอัดสูงสุดถึงแกนสะเทิน และ k_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับกำลังอัดคอนกรีต f'_c ที่มีค่าเท่ากันหรือน้อยกว่า 280 กก./ซม.^{2} และค่าจะลดลงตามลำดับในอัตรา 0.05 สำหรับกำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 70 กก./ซม.^{2} เมื่อคอนกรีตมีค่า f'_c สูงกว่า 280 กก/ซม.^{2}

แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

2.4.1.1 เมื่อ c มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ d_1

คานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก กรณีนี้จะเหมือนกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป อิฐจะไม่ทำหน้าที่รับแรงอัดเลย ฉะนั้นสมการที่ใช้คำนวณจะเหมือนกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงรูปหน้าตัด (ก) ความเครียด (ข) และแรง (ค) ของคานตามทฤษฎีกำลังประลัย

ณ สภาวะสมดุลย์ หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีต $\varepsilon_u = 0.003$ และเหล็กเสริมถึงกำลังดึงคลาก f_y จะได้

$$p_b = 0.85\ k_1\ \frac{f'_c}{f_y}\ \frac{0.003}{\frac{f_y}{E_s} + 0.003} \qquad \text{...........(2.4-1)}$$

ในการคำนวณและออกแบบตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1001-16 กำหนดอัตราส่วน p ให้ใช้ได้ไม่เกิน 0.75 ของอัตราส่วน p_b ทั้งนี้เพื่อให้คานวิบัติโดยแรงดึง ดังนั้น

$$p_{max} = 0.75\ p_b \qquad \text{...........(2.4-2)}$$

$$p_{min} = \frac{14}{f_y} \qquad \text{...........(2.4-3)}$$

จากการสมดุลย์ของแรงบนหน้าตัด จะได้ C = T

$$\therefore \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85\ f'_c b} = \frac{p\ f_y\ d}{0.85\ f'_c} \qquad \text{...........(2.4-4)}$$

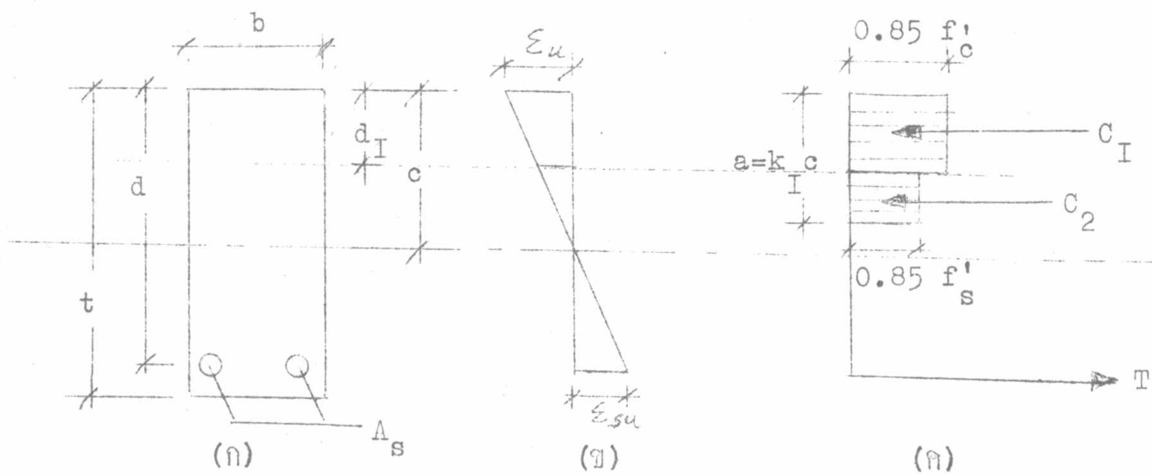
$$M'_u = A_s\ f_y\ (d - \frac{a}{2}) \qquad \text{...........(2.4-5)}$$

หรือ

$$M'_u = bd^2\ f'_c\ q\ (1 - 0.59\ q) \qquad \text{...........(2.4-6)}$$

โมเมนต์ที่ใช้ออกแบบ $M_u = \phi\ M'_u$ ....(2.4-7)

2.4.1.2 เมื่อ c มีค่ามากกว่า d_1



รูปที่ 2.3 แสดงรูปหน้าตัด (ก) ความเครียด (ข) และแรงของคาน
ตามทฤษฎีกำลังประลัย

กรณีนี้จะเกิดขึ้น เมื่อ $T > C_1$

$$T = A_s f_y$$

$$C_1 = 0.85 f'_c d_1 b$$

$$C_2 = 0.85 f'_b (a - d_1) b$$

จากการสมดุลย์ของแรงบนหน้าตัด $T = C_1 + C_2$ จะได้

$$a = \frac{A_s f_y - 0.85 bd_1 (f'_c - f'_b)}{0.85 f'_b d} \qquad \text{........(2.4-8)}$$

ให้จุด Centroid ของแรงอัด C_1 และแรงอัด C_2 อยู่ห่างจากขอบผิวบนสุดของคอนกรีต เป็นระยะ y

$$\therefore \quad y = \frac{C_1 \frac{d_1}{2} + C_2 (d_1 + \frac{a - d_1}{2})}{C_1 + C_2}$$

$$y = \frac{f'_c d_1^2 + f'_b (a^2 - d_1^2)}{2 f'_c d_1 + 2 f'_b (a - d_1)} \qquad \text{..........(2.4-9)}$$

$$M'_u = T (d - y)$$

$$M'_u = A_s f_y \left[d - \frac{f'_c d_1^2 + f'_b (a^2 - d_1^2)}{2 f'_c d_1 + 2 f'_b (a - d_1)} \right] \qquad \text{........(2.4-10)}$$

2.4.2 หน่วยแรงเฉือนประลัย

หน่วยแรงเฉือนประลัยของคานประกอบคอนกรีต–อิฐเสริมเหล็กจะประมาณโดยใช้ทฤษฎีคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

ค่าหน่วยแรงเฉือนประลัย (v_u) หาจาก

$$v_u = \frac{V_u}{b\, d} \qquad \text{...........(2.4-11)}$$

คานที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนสามารถต้านหน่วยแรงเฉือนประลัยที่ตำแหน่งห่างจากขอบฐานรองรับเป็นระยะ d ได้ดังนี้

$$v_{cu} = 0.53 \sqrt{f'_c} \qquad \text{...........(2.4-12)}$$

สำหรับการคำนวณที่ละเอียดให้ใช้

$$v_{cu} = 0.504 \sqrt{f'_c} + 176\, p \frac{Vd}{M} \qquad \text{...........(2.4-13)}$$

แต่ทั้งนี้ v_{cu} จะต้องไม่เกิน $0.93\sqrt{f'_c}$ ค่า V และ M เป็นแรงเฉือนและโมเมนต์ที่หน้าตัดนั้นตามลำดับ และ M จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า Vd

2.4.3 หน่วยแรงยึดหน่วงประลัย

เนื่องจากคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก มีเหล็กเสริมเอกอยู่ในเนื้อคอนกรีตเช่นเดียวกันกับในคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ฉะนั้นหน่วยแรงยึดหน่วงประลัยจึงเหมือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก