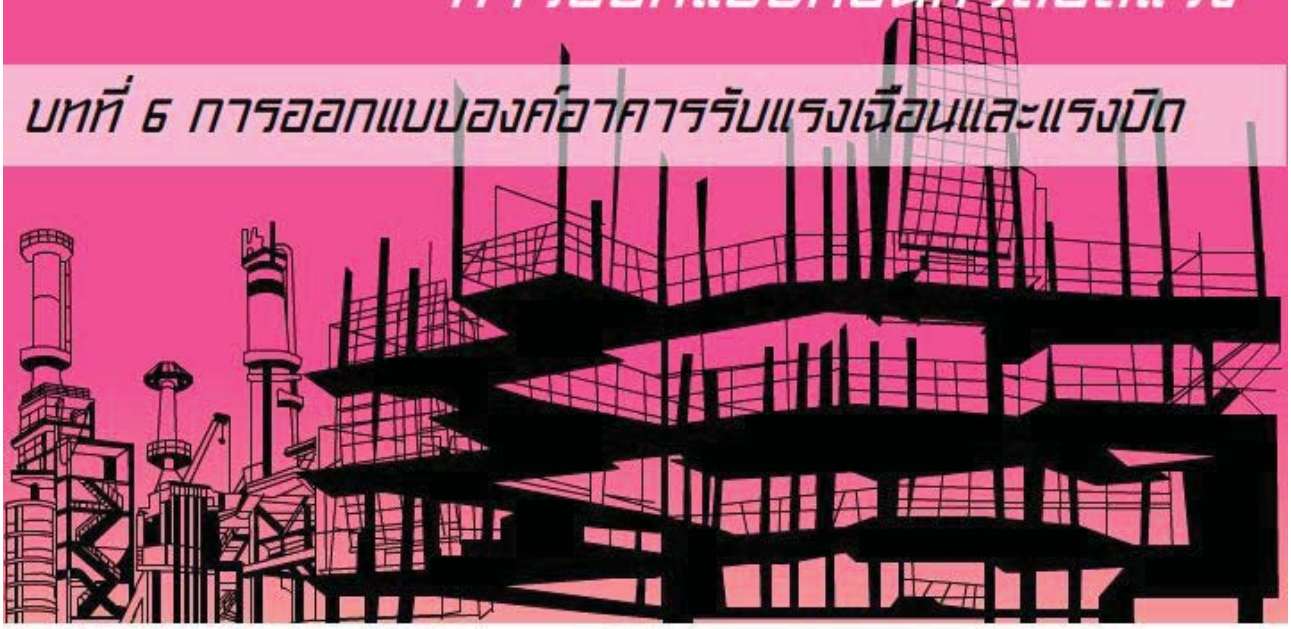
CEN 432

การออกแบบคอนกรีตอัดแรง

บทที่ 6 การออกแบบองค์อาคารรับแรงเฉือนและแรงบิด



มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

6.1 แรงเฉือน (shear) ในคอนกรีตอัดแรง

การพูดถึงการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคานนั้น ในความเป็นจริงไม่ใช่ผลของแรงเฉือนในแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว เพราะกำลังในการรับแรงเฉือนในแนวดิ่งเพียงอย่างเดียวของหน้าตัดคานนั้นสูงมาก แต่เมื่อแรงเฉือนเกิดรวมตัวกับโมเมนต์ดัดจะก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงตามแนวทแยง เนื่องจากกำลังในการรับแรงดึงตามแนวทแยงจากผลของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่จะทำให้เกิดการแตกร้าว

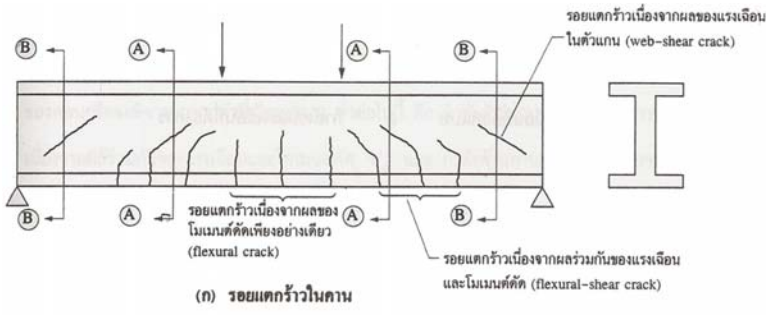
มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

6.1 แรงเฉือน (shear) ในคอนกรีตอัดแรง

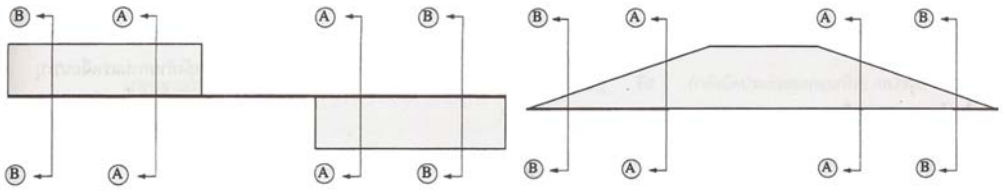
6.1.1 การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear cracking)

ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (flexural-shear cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (web-shear cracking)

ลักษณะการแตกร้าวในคานเนื่องจากแรงเฉือน



(ก) รอยแตกร้าวในคาน



(ข) แผนภาพของแรงเฉือน

(ค) แผนภาพของโมเมนต์ดัด

6.1.2 การออกแบบสำหรับรับแรงเฉือน

ในการออกแบบหน้าตัดคานสำหรับรับแรงเฉือน จะต้องออกแบบให้กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ V_n ไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ V_u

กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ $\geq$ กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ

$$\phi V_n \geq V_u$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังของแรงเฉือนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 (ดูตารางที่ 1.5)

V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ (nominal shear strength) ของหน้าตัด

กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุสามารถหาได้จากสมการ

$$V_n = V_c + V_s$$

โดยที่ V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต

V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

6.1.3 กำลังต้านทานแรงเฉือนในช่วงของคอนกรีต

คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ ซึ่งกำลังในการต้านทานรงเฉือนของคอนกรีตนี้ เป็นตัวกำหนดว่ามีความจำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงหรือไม่ ถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตนี้มีมากเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอกได้อย่างปลอดภัยก็ไม่จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในทางตรงกันข้ามถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในของคอนกรีตน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับแรงเฉือนภายนอก ก็จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมของแรงเฉือนและโมเมนต์

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}\, b_w d_p + V_d + \frac{\Delta V_i \Delta M_{cr}}{\Delta M_{max}} \qquad (6.3)$$

โดยที่ V_{ci} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด และมีค่าไม่น้อยกว่า $0.45\sqrt{f'_c}\, b_w d_p$, กก.

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

b_w คือ ความกว้างของตัวแกนของคาน, ซม.

d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 0.8 h โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด, ซม.

V_d คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา, กก.

ΔV_i คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วน (factored shear) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา, กก.

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมของแรงเฉือนและโมเมนต์

ΔM_{max} คือ โมเมนต์เพิ่มส่วน (factored moment) ที่มากที่สุด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก

โดยที่ I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดคาน, ซม.^{4}

y_t คือ ระยะที่วัดจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวของคอนกรีตที่จะแตกร้าว, ซม.

f_r คือ โมดูลัสของการแตกหักซึ่งในกรณีนี้ให้ใช้ค่าเท่ากับ $1.6\sqrt{f'_c}$, กก./ซม.^{2}

f_{pe} คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดแรง, กก./ซม.^{2}

f_d คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง, กก./ซม.^{2}

ข) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน

$$V_{cw} = \left(0.93\sqrt{f'_c} + 0.3 f_{pc}\right) b_w d_p + V_p \qquad (6.5)$$

โดยที่ V_{cw} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน, กก.

f_{pc} คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เนื่องจากการอัดแรง, กก./ซม.^{2}

V_p คือ แรงประกอบย่อยแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณาซึ่งมีค่าเท่ากับ $P\sin\alpha$ หรือ $P\alpha$, กก.

d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะนี้ต้องไม่น้อยกว่า 0.8 h โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด, ซม.

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

ข) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน

ในการคำนวณหาค่า V_c สำหรับกรณีที่คานคอนกรีตอัดแรงมีแรงดึงประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ของกำลังดึงประลัยของเหล็ก หากไม่ต้องการคำนวณโดยละเอียดจากค่าน้อยของ V_{ci} และ V_{cw} แล้ว อาจหาค่า V_c โดยประมาณจากสมการที่ 6.6

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 49\frac{V_u d_p}{M_u}\right) b_w d_p \qquad (6.6)$$

โดยที่ V_u คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วนที่หน้าตัดที่พิจารณา, กก.

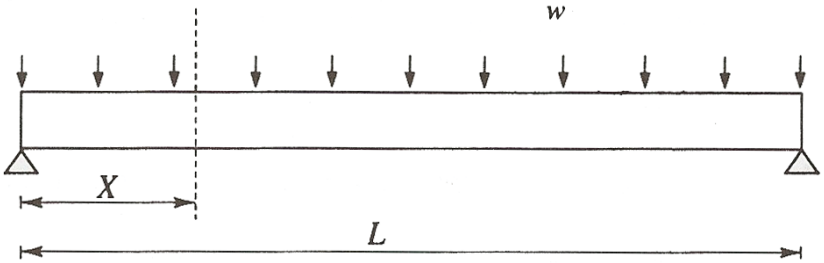
M_u คือ โมเมนต์เพิ่มส่วนที่เกิดขึ้นพร้อมกับแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u ที่หน้าตัดที่พิจารณา, กก.-ซม.

ค่าของ $V_u d_p / M_u$ ในสมการที่ 6.6 จะต้องไม่มากกว่า 1 และค่า V_c (หน่วยเป็นกก.) มีค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c}\, b_w d_p$ และไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c}\, b_w d_p$

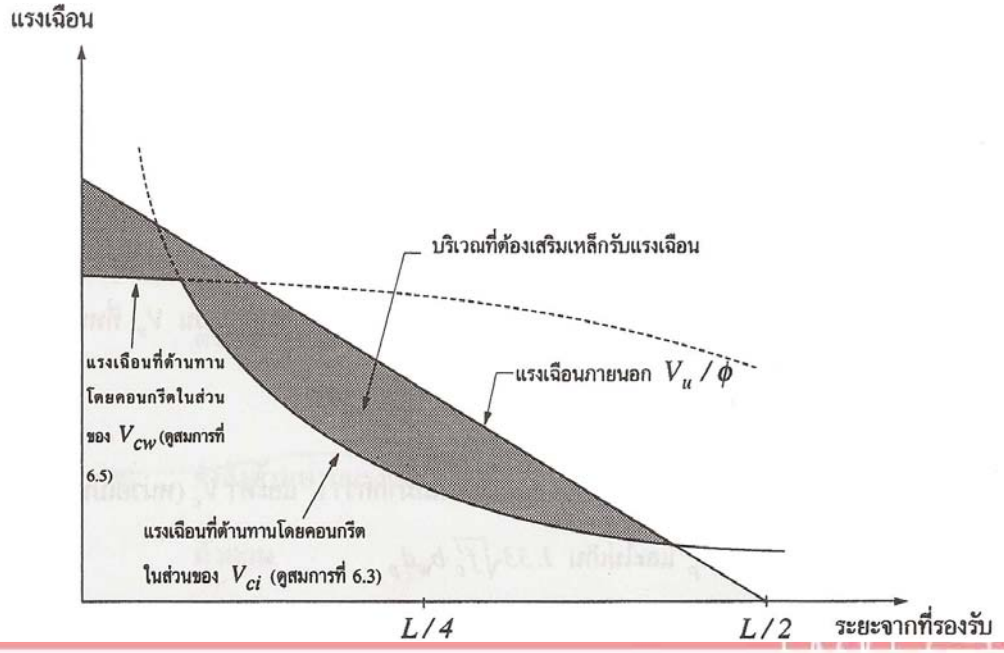
คานรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผน

สำหรับกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงที่เป็นคานช่วงเดียวและรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่ ค่าของ $\frac{\Delta V_i}{\Delta M_{max}}$ และ $\frac{V_u}{M_u}$ ในสมการที่ 6.3 และสมการที่ 6.6 อาจหาค่าได้จากสมการที่ 6.7 (ดูรูปที่ 6.2 ประกอบ)

ที่ระยะ x ใด ๆ $$\frac{V}{M} = \frac{\frac{wL}{2} - wx}{\frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2}} = \frac{L-2x}{x(L-x)} \qquad (6.7)$$



ค่า V_{ci},V_{cw} ที่ระยะต่างๆจากที่รองรับ และบริเวณที่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน สำหรับคอนกรีตอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกชนิดแผ่



6.1.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือนภายนอกจากสมการ

$$\phi(V_c + V_s) \geq V_u$$

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

หรือ V_s ที่น้อยที่สุดที่ต้องช่วยในการรับแรงเฉือน คือ $V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c$

โดยที่ V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

V_u คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการหาได้จาก $1.4V_D + 1.7V_L$ โดยที่ V_D และ V_L คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร ตามลำดับ

V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต ซึ่งเป็นค่าที่น้อยระหว่าง V_{ci} และ V_{cw}

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

ก) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กปลอกวางตั้งฉากกับแนวแกนขององค์อาคาร

$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s}$$

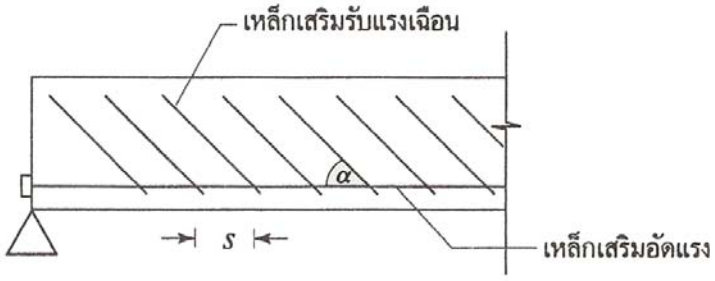
โดยที่ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ซึ่งโดยปกติเหล็กเสริมรับแรงเฉือนนี้จะดัดเป็นปลอกสี่เหลี่ยมทำให้ A_v ของเหล็กปลอกมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ใช้, ซม.^{2}

f_y คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, กก./ซม.^{2}

s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, ซม.

d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.

ข) กรณีเหล็กเสริมเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกวางเอียงกับแนวแกนองค์อาคาร



$$A_s = \frac{A_v f_y d_p}{s}(\sin\alpha + \cos\alpha)$$

α คือ มุมระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกับแนวแกนของคานดังรูปที่ 6.4

คานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนวางเอียงกับแกนของคาน

ค) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กคอม้า ซึ่งประกอบด้วยเหล็กเส้นเดียวหรือกลุ่มของเหล็กที่ขนานกัน และดัดขึ้นที่ระยะห่างจากที่รองรับเท่ากัน

$$V_s = A_v f_y \sin\alpha \leq 0.80\sqrt{f'_c}\, b_w d_p \qquad (6.11)$$

ง) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กคอม้า ซึ่งประกอบด้วยชุดของเหล็กคอม้าที่ขนานกัน ซึ่งถูกดัดขึ้นที่ระยะต่าง ๆ จากที่รองรับ ค่า V_s ให้คำนวณจากสมการที่ 6.10

6.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

6.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ก) ระยะเรียง (spacing) ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

- ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่วางตั้งฉากกับแนวแกนของคานจะต้องไม่ห่างเกิน $\frac{3}{4}h$ หรือ 60 ซม. และถ้าค่า V_s มีค่าเกิน $1.06\sqrt{f'_c}\, b_w d_p$ ระยะเรียงจะต้องลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

- เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เป็นเหล็กปลอกที่วางเอียงและเหล็กคอม้า จะต้องจัดวางโดยที่เส้นตรงทุกเส้นที่ลากจากจุดกึ่งกลางความลึกของคาน ทำมุม 45 ° ไปยังแนวเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึง จะต้องผ่านเหล็กเสริมรับแรงเฉือนนี้อย่างน้อย 1 เส้น

6.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ข) ปริมาณการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

- ค่า V_s ในการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จะต้องมีค่าไม่มากกว่า $2.12\sqrt{f'_c}\, b_w d_p$ ถ้ามากกว่าให้ออกแบบขนาดหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

- ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $\left(V_u \le \frac{\phi V_c}{2}\right)$ ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน (ยกเว้นกรณีต่อไปนี้คือ แผ่นพื้น ฐานราก และคานซึ่งมีความลึกไม่มากกว่า 25 ซม. หรือ 2.5 เท่าของความหนาของปีกคาน หรือครึ่งหนึ่งของความกว้างของตัวแกน ทั้งนี้ให้ใช้ค่าที่มากที่สุด)

- ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u มีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $\left(V_u > \frac{\phi V_c}{2}\right)$ ให้เสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าปริมาณต่ำสุดของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน $(A_v)_{min}$ ซึ่งหาจากสมการที่ 6.12

$$(A_v)_{min} = \frac{3.5 b_w s}{f_y} \quad \text{(หน่วยเป็นซม.}^2\text{)} \qquad (6.12)$$

6.1.5 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ในกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีแรงอัดประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรง P_e ไม่น้อยกว่า 40% ของกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง F_{pu} ปริมาณต่ำสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอาจใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างสมการที่ 6.12 และ 6.13

$$(A_v)_{min} = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d_p}\sqrt{\frac{d_p}{b_w}} \quad \text{(หน่วยเป็นซม.}^2\text{)} \qquad (6.13)$$

โดยที่ A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.^{2}

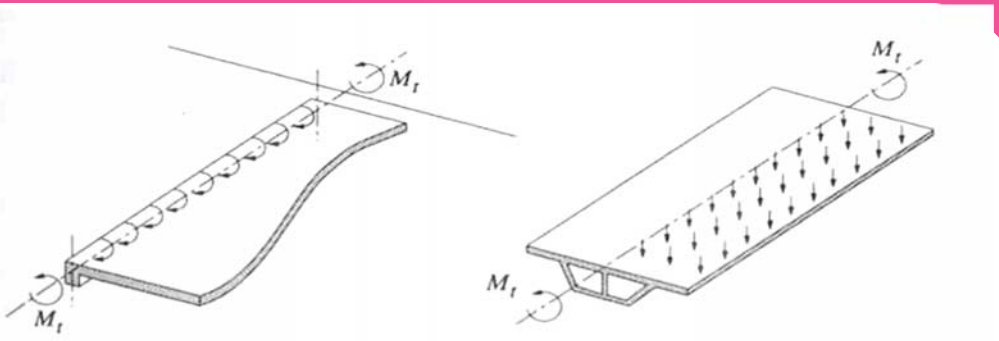
f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงที่จุดประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง, กก./ซม.^{2}

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

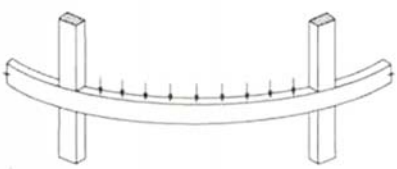
6.2 แรงบิด (torsion) ในคอนกรีตอัดแรง

แรงบิดเป็นรูปแบบของโมเมนต์บิต (torque) กระทำต่อองค์อาคาร ก่อให้เกิดแรงบิดรอบแกนขององค์อาคาร โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตมักจะเกิดการบิดเนื่องจากการกระทำที่ไม่สมมาตรแต่ว่าขนาดของโมเมนต์บิดเหล่านี้อาจมีขนาดไม่มากดังนั้นการออกแบบโดยทั่วไปมักจะไม่คิดถึงผลของแรงบิด แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างบางส่วนอาจมีแรงบิดกระทำมากจนไม่สามารถละเลยในการออกแบบได้

โครงสร้างที่รับแรงบิด

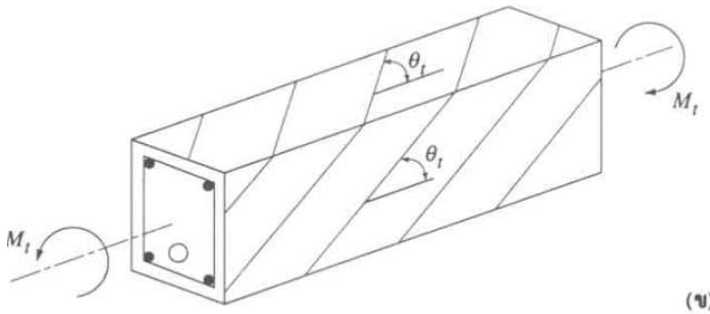


(ก) คานรับพื้นยื่น (ข) สะพานรับน้ำหนักบรรทุกไม่สมมาตร

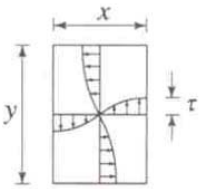


(ค) คานโค้ง

คอนกรีตอัดแรงรับแรงบิด



(ก) รอยแตกร้าวในคานคอนกรีตอัดแรงเนื่องจากแรงบิด



(ข) หน่วยแรงเฉือนที่เกิดบนหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงเนื่องจากแรงบิด

หน่วยแรงเฉือนบิด (tersional shear stress)

$$\tau = \frac{M_t}{\eta x^2 y}$$

M_t	คือ	โมเมนต์บิด
τ	คือ	หน่วยแรงเฉือนที่มากที่สุดที่เกิดจากโมเมนต์บิด
η	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของการบิด
x	คือ	ด้านสั้นของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า
y	คือ	ด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

หน่วยแรงเฉือนบิด (tersional shear stress)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการบิด η นี้ ACI กำหนดให้ใช้เท่ากับ 1/3 สำหรับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กไม่อัดแรง แต่ไม่ได้กำหนดค่า η สำหรับหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง อย่างไรก็ดีจากผลการทดลองของ Zia และ McGee ซึ่งได้ทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงรับแรงบิด ได้เสนอให้ใช้ค่า η สำหรับหน้าตัดคอนกรีตอัดแรงดังสมการที่ 6.15

$$\eta = \frac{0.35}{0.75 + x/y} \qquad (6.15)$$

ถ้าให้โมเมนต์บิด M_t จนกระทั่งการแตกร้าวเกิดขึ้น ดังนั้นสมการที่ 6.14 สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ 6.16

$$\tau_{cr} = \frac{M_{tcr}}{\eta x^2 y} \qquad (6.16)$$

โดยที่ τ_{cr} คือ หน่วยแรงเฉือนเนื่องจากการบิดขณะเกิดการแตกร้าว

M_{tcr} คือ โมเมนต์บิดที่ทำให้เกิดการแตกร้าว

หน่วยแรงเฉือนบิด (tersional shear stress)

สำหรับในกรณีของหน้าตัดรูปตัว T, I หรือ L ACI แนะนำให้ใช้สมการที่ 6.17 แทนสมการที่ 6.16 ดังนี้

$$\tau_{cr} = \frac{M_{tcr}}{\sum \eta x^2 y} \qquad (6.17)$$

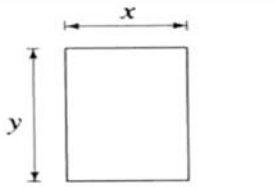
โดยที่ x คือ ด้านสั้นของสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นหน้าตัด

y คือ ด้านยาวของสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นหน้าตัด

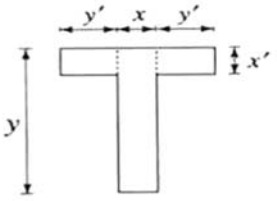
$\sum \eta x^2 y$ คือ ผลรวมของ $\eta x^2 y$ ย่อย โดยที่ถ้ามีทางเลือกหลายทางให้ใช้ค่ามากที่สุดของแต่ละทางเลือก

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

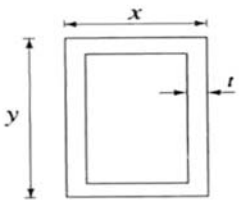
ค่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงบิด สำหรับหน้าตัดต่างๆ



$$\tau_{cr} = \frac{M_{tcr}}{\eta x^2 y}$$



$$\tau_{cr} = \frac{M_{tcr}}{\sum \eta x^2 y} = \frac{M_{tcr}}{\left(\eta x^2 y + 2\eta x'^2 y'\right)}$$



ถ้า $t \geq \frac{x}{4}$ $\quad \tau_{cr} = \frac{M_{tcr}}{\sum \eta x^2 y}$

ถ้า $\frac{x}{10} \leq t < \frac{x}{4}$ $\quad \tau_{cr} = \frac{M_{tcr}}{\frac{4t}{x}\sum \eta x^2 y}$

ถ้า $t < \frac{x}{10}$ ต้องคำนวณโดยพิจารณาค่าสติฟเนสของผนัง

6.2.2กำลังต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากการบิด (torsional cracking strength)

$$(\tau_{cr})_{prestressed} = \left(\sqrt{1+\frac{10\sigma_p}{f'_c}}\right)(\tau_{cr})_{nonprestressed}$$

$$(\tau_{cr})_{prestressed} = 1.6\sqrt{f'_c}\sqrt{1+\frac{10\sigma_p}{f'_c}}$$

โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, กก./ซม.^{2}

σ_p คือ หน่วยแรงอัดเฉลี่ยเนื่องจากการอัดแรง $= \frac{P}{A_c}$, กก./ซม.^{2}

6.2.3 กำลังการบิดหลังจากเกิดการแตกร้าว

คอนกรีตไม่เสริมเหล็กไม่รับแรงบิดจะเกิดการแตกร้าวแรงคอนกรีตจะไม่สามารถรับแรงบิดได้อีกลน แต่คอนกรีตที่เสริมเหล็กสำหรับรับแรงบิดคอนกรีตก็จะสามารถแงบิดได้ไม่ถึงกับเกิดแตกร้าว แต่อย่างไรก็ดีความสามารถในการับแรงบิดหลังจากแต่ร้าวเกิดขึ้น จะมีค่าน้อยกำลังในการต้านทานแรงบิดก่อให้เกิดการแต่ร้าวนอกจากนี้ยังได้เสนอเพิ่มอีกว่ากรณีในการสูญเสียกำลังการแตกร้าวจากแรงบิดแรงอัดจะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตเสริมเหล็กไม่อัดแรง

6.2.3 กำลังการบิดหลังจากเกิดการแตกร้าว

$$(\tau_{cr} - \tau_c)_{prestressed} \cong (\tau_{cr} - \tau_c)_{nonprestressed} \qquad (6.20)$$

สมการที่ 6.20 บอกให้ทราบว่าการสูญเสียกำลังในการต้านทานการบิดหลังจากการแตกร้าวเกิดขึ้นของคอนกรีตอัดแรงและไม่อัดแรงเท่ากัน พูดอีกนัยหนึ่งก็คือ ผลต่างของกำลังในการต้านทานการบิดก่อนและหลังการแตกร้าวจะเท่ากันระหว่างคอนกรีตอัดแรงและคอนกรีตไม่อัดแรง แต่อย่างไรก็ดี กำลังในการต้านทานการบิดก่อนและหลังการแตกร้าวของคอนกรีตอัดแรงจะสูงกว่าของคอนกรีตไม่อัดแรง

สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กไม่อัดแรง

$$\tau_{cr} - \tau_c = \tau_{cr} - \mu\tau_{cr} = (1-\mu)\tau_{cr} = k\tau_{cr} \qquad (6.21)$$

โดยที่ $\mu = 0.4$ (จากการทดลองของ Hsu) ดังนั้น k = 0.6

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

6.2.3 กำลังการบิดหลังจากเกิดการแตกร้าว

สำหรับคอนกรีตอัดแรง

จากสมการที่ 6.20 และ 6.21 จะได้ว่า

$$(\tau_{cr} - \tau_c)_{prestressed} \cong k(\tau_{cr})_{nonprestressed} \qquad (6.22)$$

ถ้ากำหนดให้ $(\tau_{cr})_{nonprestressed}$ มีค่าเท่ากับ $1.6\sqrt{f'_c}$ จากสมการที่ 6.19 และ 6.22 จะสามารถหาค่ากำลังในการต้านทานการบิดหลังการแตกร้าวของคอนกรีตอัดแรง ได้ดังสมการที่ 6.23

$$(\tau_c)_{prestressed} = 1.6\sqrt{f'_c}\left(\sqrt{1+\frac{10\sigma_\rho}{f'_c}} - k\right) \qquad (6.23)$$

Zia และ McGee เสนอให้ใช้ค่า k เท่ากับ $1-0.133/\eta$ โดยที่ η หาได้จากสมการที่ 6.15 และค่าของ x/y ในสมการที่ 6.15 ให้ใช้จากสี่เหลี่ยมที่ใหญ่ที่สุดในหน้าตัดคาน

6.2.4 การออกแบบเหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด

การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับแรงบิดต้องเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\phi M_{tn} \geq M_{tu}$$

โดย M_{tu} คือ กำลังในการรับแรงบิดที่ต้องการ ซึ่งเป็นโมเมนต์บิดเพิ่มส่วน (factored torsional moment)

M_{tn} คือ กำลังต้านทานแรงบิดระบุ (nominal torsional strength)

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังของแรงบิด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85 (ดูตารางที่ 1.5)

6.2.4 การออกแบบเหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด

กำลังต้านทานแรงบิดระบุ M_{tn} สามารถหาได้จาก

$$M_{tn} = M_{tc} + M_{ts} \tag{6.25}$$

โดยที่ M_{tc} คือ กำลังต้านทานแรงบิดในส่วนของคอนกรีต

M_{ts} คือ กำลังต้านทานแรงบิดในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงบิด

6.2.4 การออกแบบเหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด

กำลังต้านทานแรงบิดในส่วนของคอนกรีต M_{tc} สามารถหาได้จากสมการที่ 6.26

$$M_{tc} = \left(\sum \eta x^2 y\right)\tau_c \tag{6.26}$$

โดยที่ η คือ สัมประสิทธิ์ของการบิดมีค่าเท่ากับ $\dfrac{0.35}{0.75 + x/y}$

τ_c คือ กำลังในการต้านทานการบิดหลังการแตกร้าวของคอนกรีตอัดแรง สามารถหาได้จากสมการที่ 6.23

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

6.2.4 การออกแบบเหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด

กำลังต้านทานแรงบิดในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงบิด M_{ts} สามารถหาได้จากสมการที่ 6.27

$$M_{ts} = \frac{A_t \alpha_t x_1 y_1 f_y}{s} \qquad (6.27)$$

โดยที่ A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด (คิดเพียง 1 ขา ของเหล็กปลอก 1 รอบ)

s คือ ระยะห่างของเหล็กปลอกรับแรงบิด

x_1 คือ ด้านสั้นของเหล็กปลอกรัดรอบ (วัดจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง)

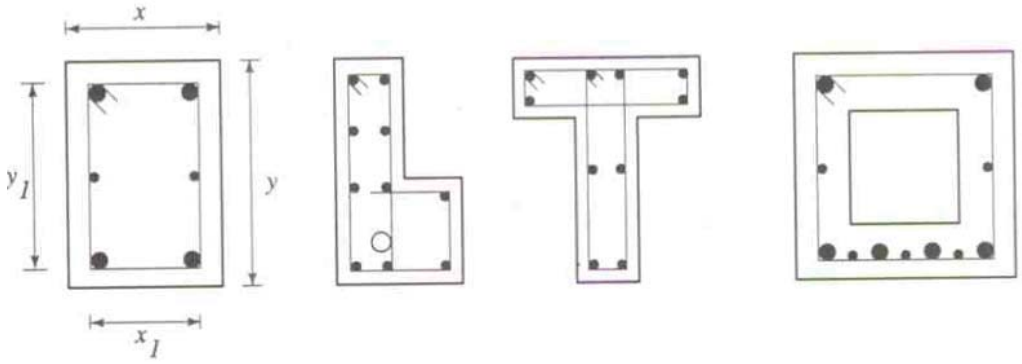
y_1 คือ ด้านยาวของเหล็กปลอกรัดรอบ (วัดจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง)

f_y คือ กำลังคลากของเหล็กปลอกและต้องไม่เกิน 4,000 กก./ซม.^{2}

α_t คือ ค่าตัวแปรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของด้านยาวต่อด้านสั้นของเหล็กปลอกรัดรอบ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 6.28

$$\alpha_t = 0.66 + 0.33\frac{y_1}{x_1} \leq 1.5 \qquad (6.28)$$

รูปแบบการใส่เหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด



รูปแบบการใส่เหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด

สำหรับคอนกรีตอัดแรง Naaman ได้เสนอว่าปริมาณเหล็กเสริมตามแนวแกนเพื่อรับแรงบิด สามารถใช้สมการที่ 6.29 เพียงสมการเดียวก็เพียงพอในการออกแบบ โดยที่ Zia และ Hsu ได้เสนอเพิ่มเติมว่า สำหรับคอนกรีตอัดแรง ค่าของ A_l ในสมการที่ 6.29 ต้องมีค่าไม่มากกว่าค่าของ A_l ในสมการที่ 6.32 และ 6.33

$$A_l \leq \frac{3.5 b_w s}{f_y}\left(1+\frac{12\sigma_p}{f'_c}\right)\left(\frac{x_1+y_1}{s}\right) \qquad (6.32)$$

$$\leq \frac{14 b_w s}{f_y}\left(\frac{x_1+y_1}{s}\right) \qquad (6.33)$$

การใส่เหล็กเสริมตามแนวแกนต้องใช้เหล็กขนาดไม่เล็กกว่า 9 มม. วางกระจายไปตามเส้นรอบรูปของเหล็กปลอกและจะวางห่างกันได้ไม่เกิน 30 ซม. โดยที่ทุกมุมของหน้าตัดต้องมีเหล็กเสริมตามแนวแกนนี้อย่างน้อย 1 เส้น

6.2.5 การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามแนวแกนที่รับแรงบิด

$$A_l = 2A_t\left(\frac{x_1+y_1}{s}\right)$$

$$A_l = \left[\frac{28xs}{f_y}\left(\frac{M_{tu}}{M_{tu}+V_u/3C_t}\right)-2A_t\right]\left(\frac{x_1+y_1}{s}\right)$$

$$C_t = \frac{b_w d}{\sum x^2 y}$$

M_{tu}	คือ	โมเมนต์บิดเพิ่มส่วน (factored moment)	s	คือ	ระยะห่างของเหล็กปลอกรับแรงบิด, ซม.
V_u	คือ	แรงเฉือนเพิ่มส่วน (factored shear), กก.	x, y	คือ	ด้านสั้นและด้านยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลำดับ, ซม.
b_w	คือ	ความกว้างของตัวแกนของหน้าตัด, ซม.	x_1, y_1	คือ	ด้านสั้นและด้านยาวของเหล็กปลอกรัดรอบตามลำดับ, ซม.
d	คือ	ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด, ซม.	A_t	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกรัดรอบเพื่อรับแรงบิด, ซม.^{2}

6.2.6 ข้อกำสำหรับการออกแบบหน้าตัดรับแรงบิด

ก) การคำนวณผลของแรงบิดทั้งในคอนกรีตเหล็กเสริมไม่อัดแรง และคอนกรีตเหล็กเสริมอัดแรงต้องคำนวณจากโมเมนต์ดัดและค่าเฉือน โมเมนต์บิดเพิ่มส่วน

6.2.6 ข้อกำสำหรับการออกแบบหน้าตัดรับแรงบิด

ข) ปริมาณเหล็กปลอกที่น้อยที่สุด

- สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กไม่อัดแรง มาตรฐาน ACI กำหนดปริมาณเหล็กปลอกที่น้อยที่สุด ดังสมการที่ 6.34

$$A_v + 2A_t = \frac{14 b_w s}{f_y} \qquad (6.34)$$

โดยที่ A_v คือ ปริมาณเหล็กปลอกสำหรับรับแรงเฉือน, ซม.^{2}

A_t คือ ปริมาณเหล็กปลอกสำหรับรับแรงบิด, ซม.^{2}

- สำหรับคอนกรีตอัดแรง Zia และ Hsu ได้เสนอปริมาณเหล็กปลอกที่น้อยที่สุด ดังสมการที่ 6.35

$$A_v + 2A_t = \frac{3.5 b_w s}{f_y}\left(1 + \frac{12\sigma_p}{f'_c}\right) \le \frac{14 b_w s}{f_y} \qquad (6.35)$$

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

6.2.6 ข้อกำสำหรับการออกแบบหน้าตัดรับแรงบิด

ค) ระยะเรียงของเหล็กปลอก ต้องเป็นไปตามสมการที่ 6.36 และ 6.37

$$s \leq \frac{x_1 + y_1}{4} \quad (6.36)$$

$$\leq 30 \text{ ซม.} \quad (6.37)$$

ง) การเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือน จะต้องเสริมให้เลยจุดที่ต้องการออกไปอีกไม่น้อยกว่าระยะ d+b โดยที่ d คือ ความลึกประสิทธิผล (ใช้ d_p สำหรับคอนกรีตอัดแรง) และ d ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.8h (h คือ ความลึกทั้งหมดขององค์อาคาร) ส่วน b คือ ความกว้างของด้านที่รับแรงอัดขององค์อาคารนั้น

6.2.6 ข้อกำสำหรับการออกแบบหน้าตัดรับแรงบิด

จ) ค่าสูงสุดของโมเมนต์บิดเพิ่มส่วน $(M_{tu})_{max}$ ที่ยอมให้

- สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กไม่อัดแรง (M_{tu}) จะต้องไม่เกินค่า $(M_{tu})_{max}$ ซึ่งได้จากสมการที่ 6.38

$$(M_{tu})_{max} = 5\phi M_{tc} \quad (6.38)$$

โดยที่ M_{tc} คือ กำลังต้านทานแรงบิดในส่วนของคอนกรีตหาได้จากสมการที่ 6.26

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังของแรงบิด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

6.2.6 ข้อกำสำหรับการออกแบบหน้าตัดรับแรงบิด

- สำหรับคอนกรีตอัดแรง Zia และ McGee ได้เสนอค่า $(M_{tu})_{max}$ ไว้ดังสมการที่ 6.39

$$(M_{tu})_{max} = \frac{0.0884\sum x^2 y\, C\left(\sqrt{1+10\sigma_p/f'_c}\right)\sqrt{f'_c}}{\sqrt{1+\left(\frac{CV_u\sqrt{1+10\sigma_p/f'_c}}{30\,C_t\,M_{tu}}\right)^2}} \quad \text{(หน่วยเป็น กก.-ซม.)} \qquad (6.39)$$

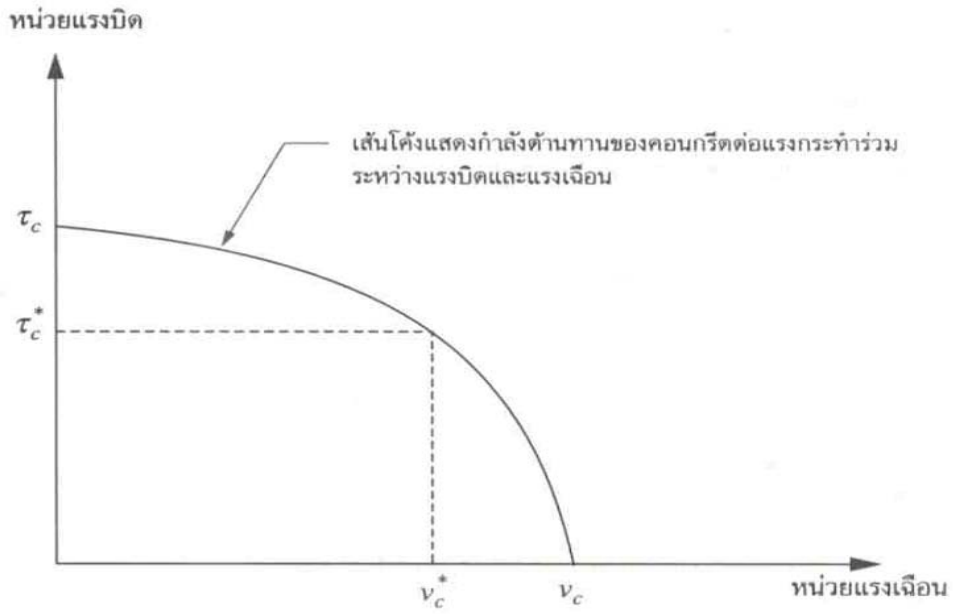
โดยที่ $$C = 12-10\sigma_p/f'_c \qquad (6.40)$$

และ C_t หาได้จากสมการที่ 6.31

6.2.7 โครงสร้างรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและเฉือน

โดยทั่วไปแทบจะไม่มีองค์อาคารรับแรงเฉพาะแรงบิดเพียงอย่างเดียว องค์อาคารมักจะรับแรงกระทำด้วย เช่น แรงดัด และแรงบิด แต่อย่างไรก็ดี มาตรฐาน ACI กำหนดให้การออกแบบองค์อาคารรับโมเมนต์ดัดสามารถทำได้อิสระโดยไม่ต้องคิดถึงแรงกระทำร่วม ดังนั้นจึงเหลือการคำนวณแรงกระทำร่วมเฉพาะแรงเฉือนกับแรงบิด

แผนภาพของกำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน



แผนภาพของกำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน

$$\left(\frac{\tau_c^*}{\tau_c}\right)^2 + \left(\frac{v_c^*}{v_c}\right)^2 = 1 \qquad (6.41)$$

โดยที่ τ_c^* คือ กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมทั้งแรงบิดและแรงเฉือน

τ_c คือ กำลังรับแรงบิดของคอนกรีตเมื่อรับเฉพาะแรงบิด

v_c^* คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมทั้งแรงบิดและแรงเฉือน

v_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเมื่อรับเฉพาะแรงเฉือน

จัดรูปสมการที่ 6.41 ใหม่ ทำการแทนค่า τ_c^*/v_c^* ด้วย τ_u/v_u และแทนค่า v_c กับ τ_c ด้วย $0.53\sqrt{f'_c}$ และ $0.64\sqrt{f'_c}$ ตามลำดับจะได้ว่า

สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กไม่อัดแรง $\tau_c^* = \dfrac{0.64\sqrt{f'_c}}{\sqrt{1+(1.2v_u/\tau_u)^2}}$ (6.42)

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

แผนภาพของกำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน

สำหรับในกรณีของคอนกรีตอัดแรง Zia และ Hsu ได้เสนอสมการสำหรับการออกแบบองค์อาคารรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน ดังนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรง $\tau_c^* = \dfrac{\tau_c}{\sqrt{1+\left(\dfrac{\tau_c}{v_c}\cdot\dfrac{v_u}{\tau_u}\right)^2}}$ (6.43)

$v_c^* = \dfrac{v_c}{\sqrt{1+\left(\dfrac{v_c}{\tau_c}\cdot\dfrac{\tau_u}{v_u}\right)^2}}$ (6.44)

แผนภาพของกำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน

โดยที่ $\tau_c = 1.6\sqrt{f'_c}\left(\sqrt{1+\dfrac{10\sigma_p}{f'_c}}-0.6\right)$ หน่วยเป็น กก./ซม.^{2} (6.45)

v_c คือ ค่าที่น้อยที่สุดระหว่าง v_{ci} และ v_{cw} ซึ่งได้จากสมการที่ 6.3 และ 6.5 ตามลำดับ, กก./ซม.^{2}

v_u คือ กำลังในการรับแรงเฉือนที่ต้องการ $= \dfrac{V_u}{b_w d_p}$, กก./ซม.^{2} ($d_p > 0.8h$ โดยที่ h คือ ความลึกทั้งหมดขององค์อาคารนั้น)

τ_u คือ กำลังในการรับแรงบิดที่ต้องการ $= \dfrac{M_{tu}}{\sum \eta x^2 y}$, กก./ซม.^{2}

τ_c^* คือ กำลังในการรับแรงบิดของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมทั้งแรงบิดและแรงเฉือน $= \dfrac{M^*_{tc}}{\sum \eta x^2 y}$, กก./ซม.^{2}

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000

แผนภาพของกำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน

v_c^* คือ กำลังในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมทั้งแรงบิดและแรงเฉือน $= \frac{V_c^*}{b_w d_p}$, กก./ซม.^{2}

M_{tc}^* คือ โมเมนต์บิดที่รับได้ของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมทั้งแรงบิดและแรงเฉือน, กก.-ซม.

V_c^* คือ แรงเฉือนที่รับได้ของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมทั้งแรงบิดและแรงเฉือน, กก.

M_{tu} คือ โมเมนต์บิดเพิ่มส่วนที่ต้องการ, กก.-ซม.

V_u คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วนที่ต้องการ, กก.

แผนภาพของกำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือน

ดังนั้นสำหรับกรณีองค์อาคารรับแรงกระทำร่วมระหว่างแรงบิดและแรงเฉือนนี้ ต้องใช้

รที่ 6.46 แทนสมการที่ 6.25 ซึ่งเป็นสมการสำหรับองค์อาคารรับแรงบิดอย่างเดียว

$$M_{tn} = M_{tc}^* + M_{ts} \qquad (6.46)$$

มหาวิทยาลัยรังสิต http://www.rsu.ac.th
52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถนนพหลโยธิน หลักหก ปทุมธานี 12000