

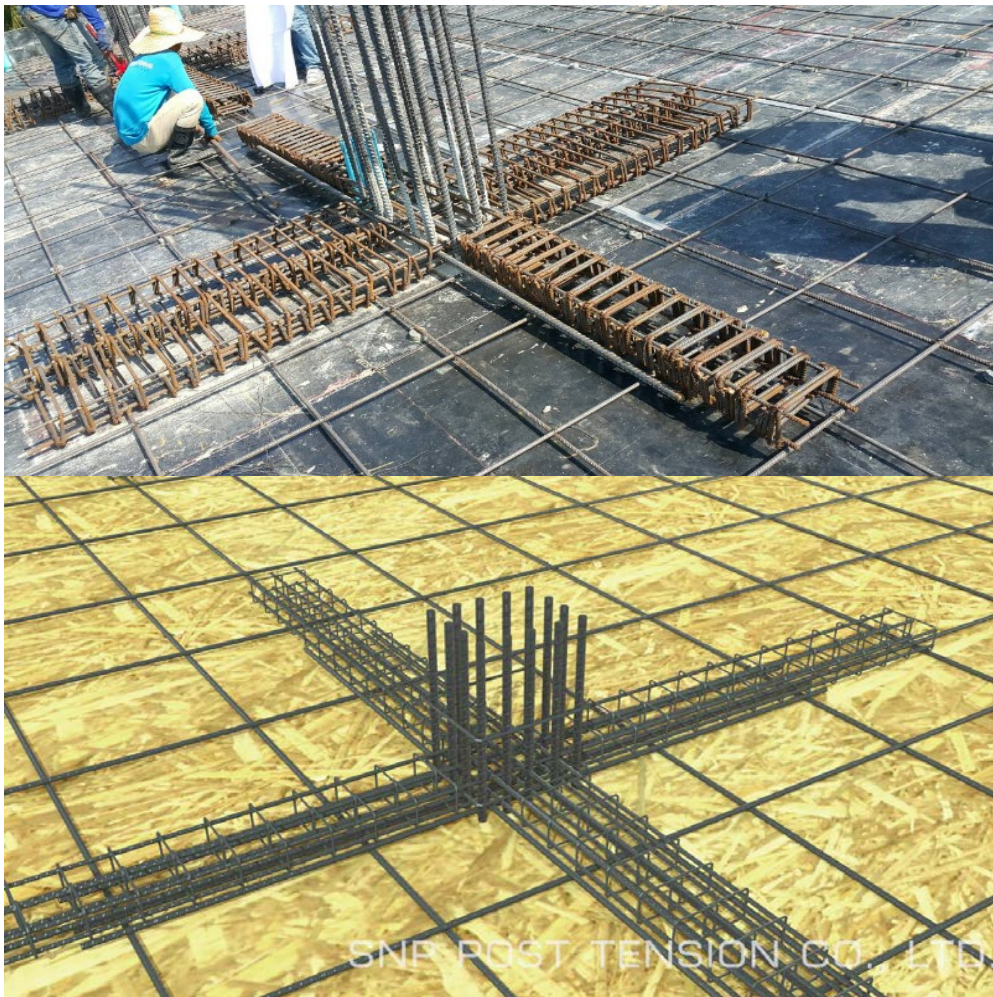
แรงเฉือนเจาะทะลุในพื้นที่ Post tension (ตอนที่ 2)

จากบทความเรื่องแรงเฉือนตอนที่ 1 เราทราบถึงวิธีการคำนวณแรงเฉือนเจาะทะลุที่ถูกต้อง และถ้าตรวจสอบแล้วพบว่ากำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุไม่เพียงพอ เราสามารถใส่ Column capital ได้ และถ้ากำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุและโมเมนต์ลบที่หัวเสาไม่เพียงพอ เราเลือกใส่เป็น Drop panel ได้ ส่วนในกรณีที่เราไม่ต้องการเพิ่มความหนาของพื้นบริเวณหัวเสา เราสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้ด้วย 3 วิธี คือ

1. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กเสริม (Shear reinforcement consisting of bars)
2. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กรูปพรรณ (Shear reinforcement consisting of steel I or C shaped sections, shearhead)
3. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กหัวหมุดเฉือน (Headed shear stud reinforcement, shear studs)

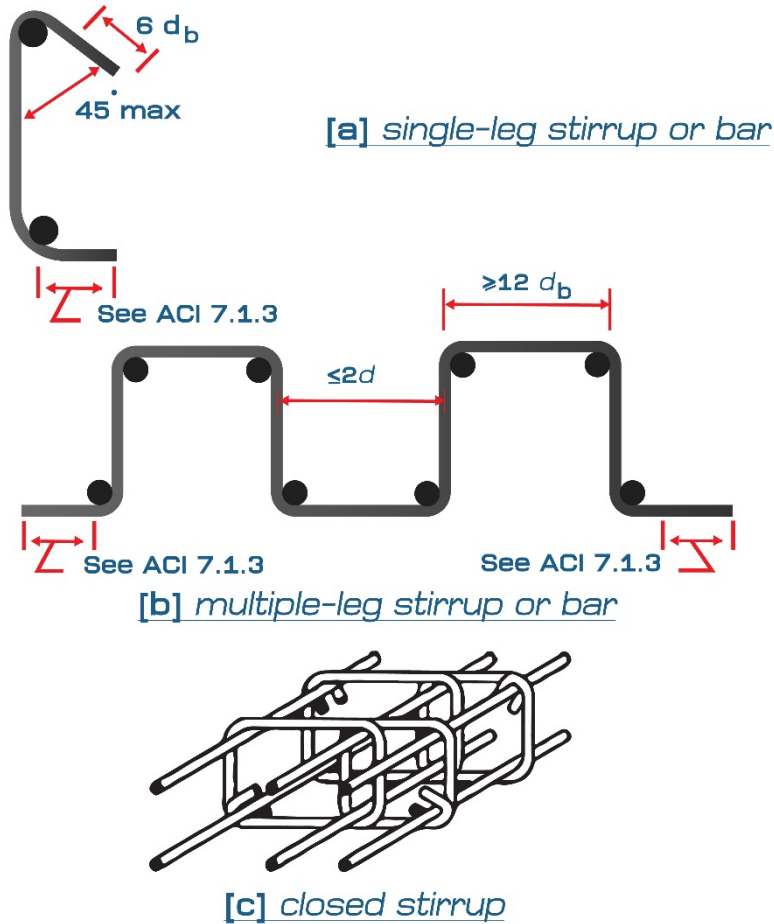
โดยทั้งสามวิธีมีรายละเอียดการระบุขนาด, ตำแหน่งและการติดตั้งดังนี้

1. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กเสริม (Shear reinforcement consisting of bars)



ข้อกำหนดเกี่ยวกับความหนาของพื้นที่ใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ACI 11.11.3 กล่าวว่า “เหล็กเสริมรับแรงเฉือนประกอบด้วยเหล็กปลอกที่เป็นเหล็กหรือลวดเหล็กที่เป็นขาคเดี่ยวหรือหลายขา อนุญาตให้ใช้ในพื้นที่หรือฐานรากที่มีความลึกประสิทธิผลมากกว่าหรือเท่ากับ 15cm แต่ต้องไม่น้อยกว่า 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก ดังนั้นลักษณะของเหล็กปลอกแสดงดังรูป



ดังนั้น จากข้อกำหนดข้างต้น เราสามารถหาความหนาขั้นต่ำของพื้นที่สามารถใส่เหล็กปลอกรับแรงเฉือนได้จากระยะความลึกประสิทธิผลต้องไม่น้อยกว่า 15cm ระยะหุ้มคอนกรีตของพื้นที่เท่ากับ 2cm ดังนั้นความหนาพื้นที่น้อยที่สุดจะเท่ากับ 17 cm แต่ต้องพิจารณาข้อกำหนดเกี่ยวกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกด้วย

ถ้าใช้เหล็กปลอก RB9mm → 16dia. =14.4cm ความหนาพื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 15+2 = 17cm

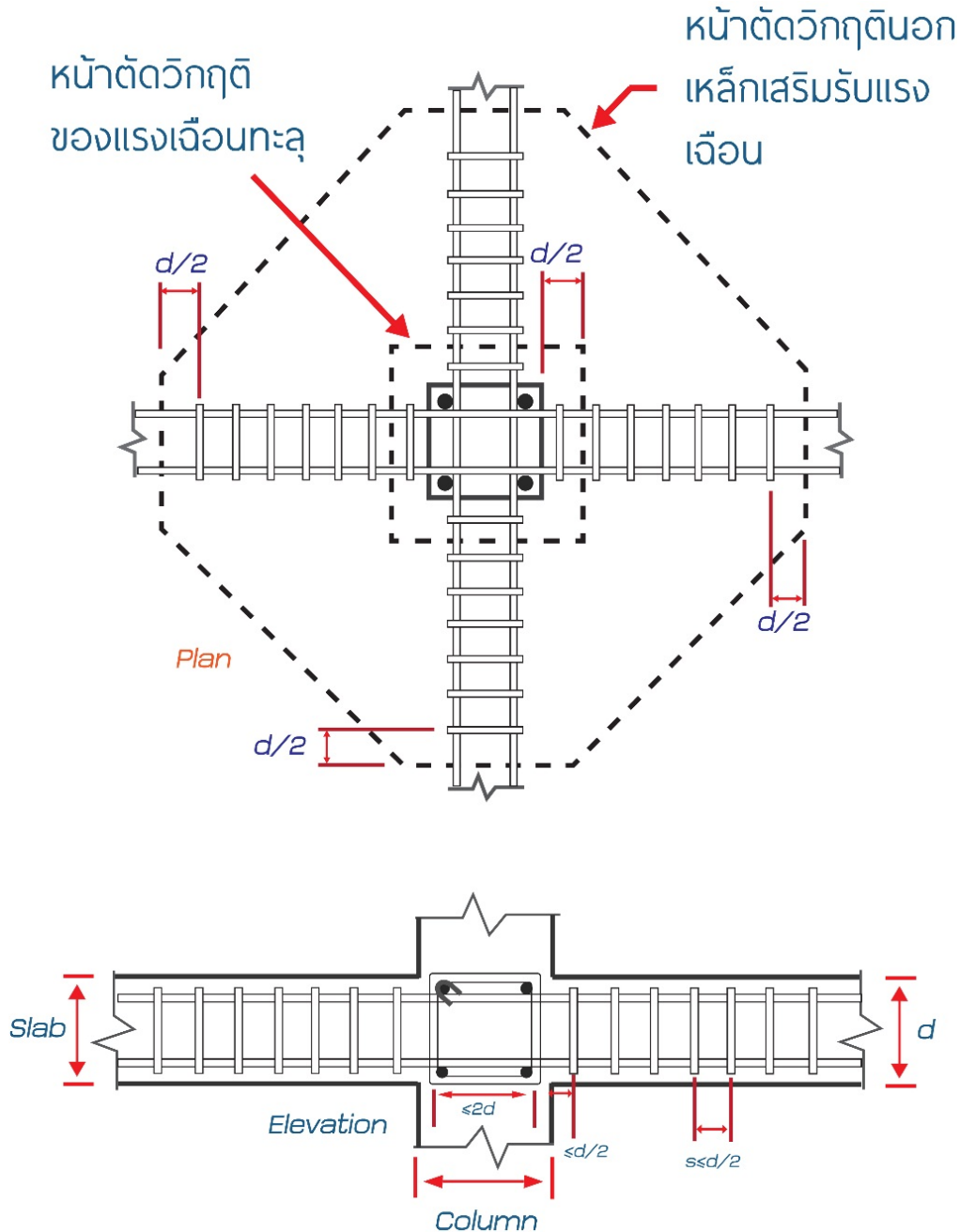
ถ้าใช้เหล็กปลอก DB10mm → 16dia. =16.0cm ความหนาพื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 16+2 = 18cm

ถ้าใช้เหล็กปลอก DB12mm → 16dia. =19.2cm ความหนาพื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 19.2+2 =

21.2cm

ข้อกำหนดเกี่ยวกับระยะห่าง

- ระยะระหว่างขอบเสาถึงเหล็กปลอกตัวแรกต้องไม่เกิน $d/2$
- ระยะห่างระหว่างขาของเหล็กปลอกจะต้องไม่เกิน $2d$ โดยวัดในทิศทางขนานกับหน้าเสา
- ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก ไม่เกิน $d/2$



ข้อกำหนดเกี่ยวกับการงอของเหล็กปลอก

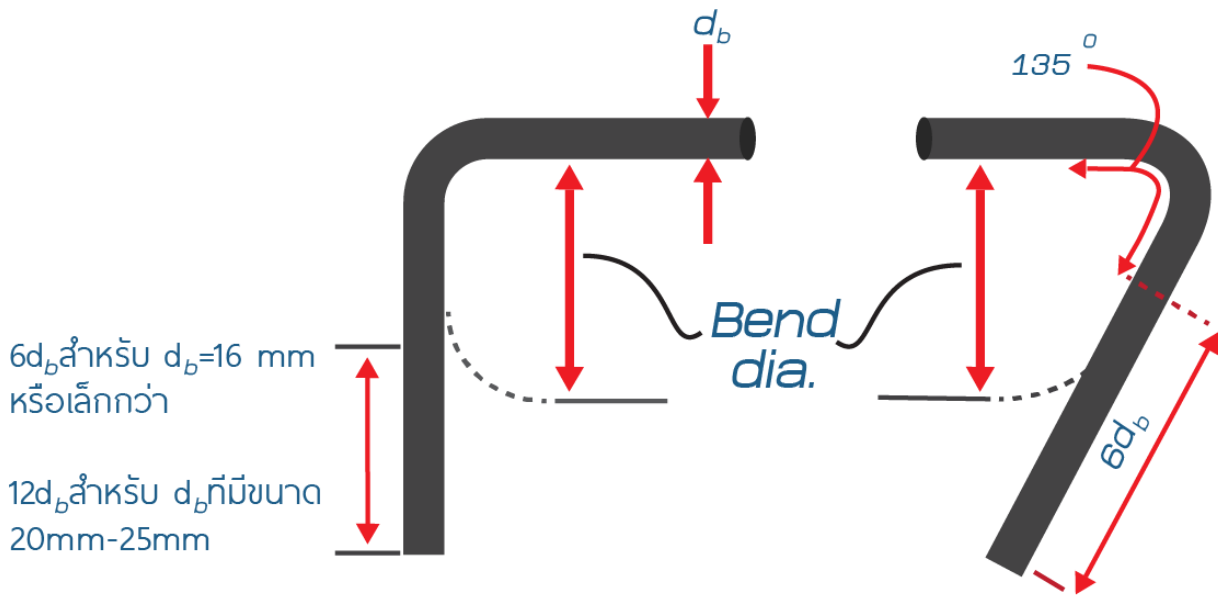
กำหนดให้ d_b เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กปลอก

- d_b เท่ากับ 16mm หรือเล็กกว่า งอขอ 90 องศา บวกระยะยึดไปอีก 6 db
- d_b เท่ากับ 20mm ถึง 25mm งอขอ 90 องศา บวกระยะยึดไปอีก 12 db
- d_b เท่ากับ 6mm ถึง 25mm งอขอ 135 องศา บวกระยะยึดไปอีก 6 db

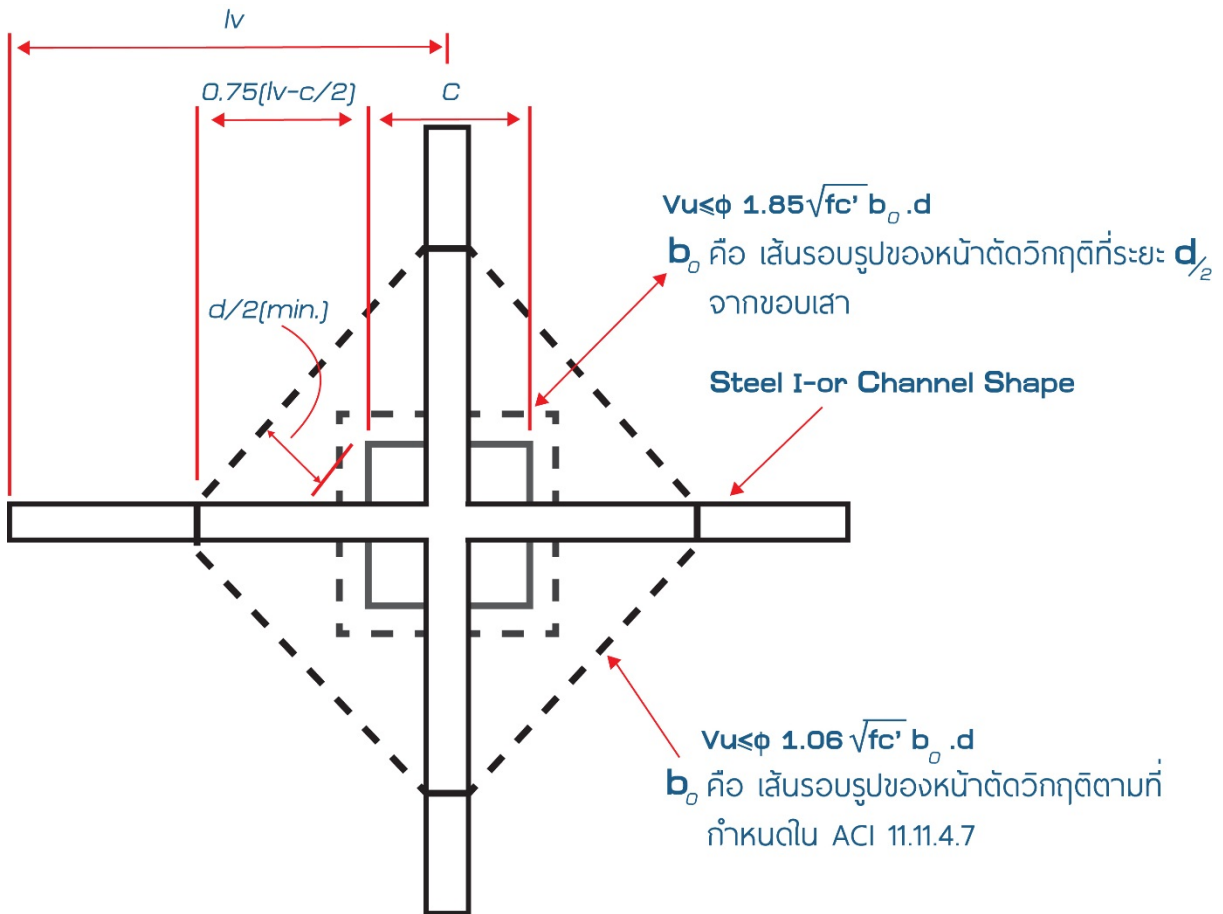
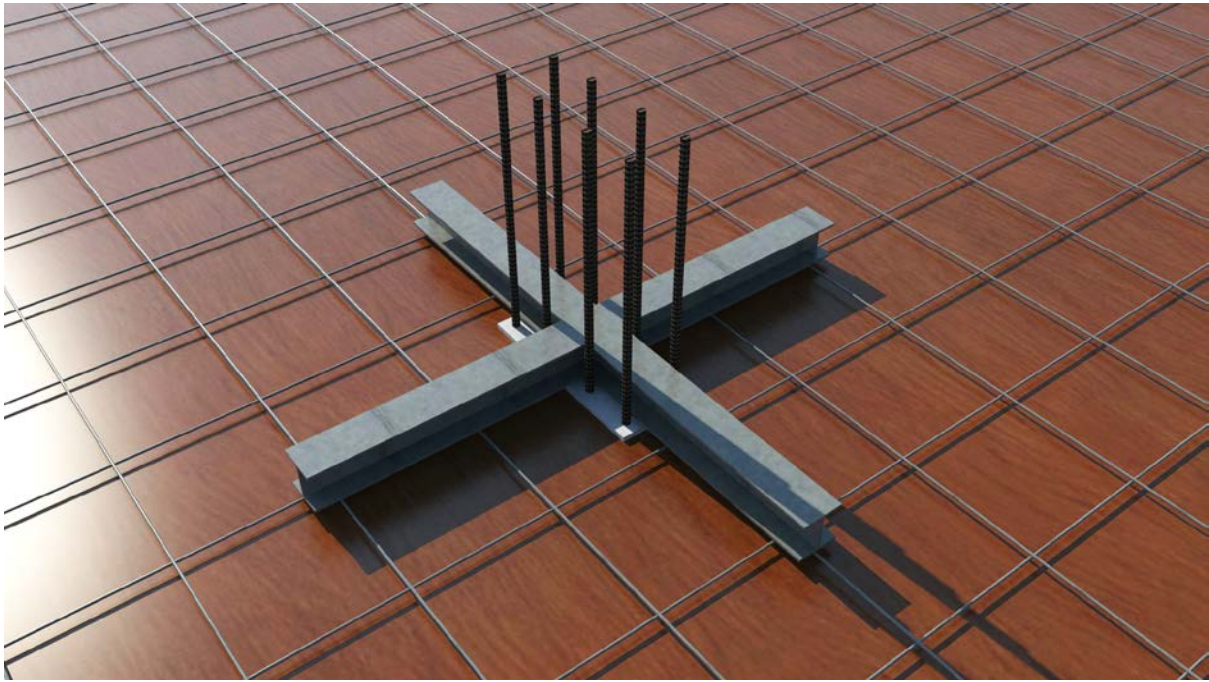
เส้นผ่านศูนย์กลางวงโค้งของเหล็กปลอก (Bend diameter) มีค่าดังนี้

- d_b เท่ากับ 6mm ถึง 25mm เส้นผ่านศูนย์กลางวงโค้งของเหล็กปลอกไม่น้อยกว่า 6 d_b
- d_b เท่ากับ 28mm ถึง 36mm เส้นผ่านศูนย์กลางวงโค้งของเหล็กปลอกไม่น้อยกว่า 8 d_b
- d_b เท่ากับ 43mm ถึง 57mm เส้นผ่านศูนย์กลางวงโค้งของเหล็กปลอกไม่น้อยกว่า 10 d_b

ยกเว้นเมื่อเหล็กเสริมหลักมีขนาดเล็กกว่า 16mm เส้นผ่านศูนย์กลางวงโค้งของเหล็กปลอกไม่น้อยกว่า 4 d_b จากข้อกำหนดเกี่ยวกับการงอขอ เมื่อ d_b มีขนาดตั้งแต่ 16mm ขึ้นไป จะงอขอตามมาตรฐานยาก สำหรับพื้นที่ที่มีความหนาน้อยกว่า 25cm

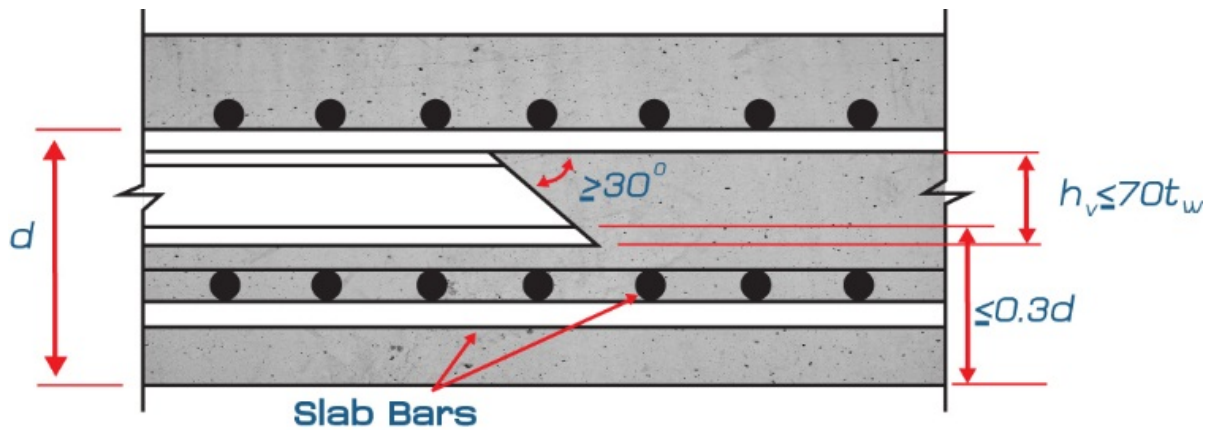


2. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กรูปพรรณ (Shear reinforcement consisting of steel I or C shaped sections, shearhead)



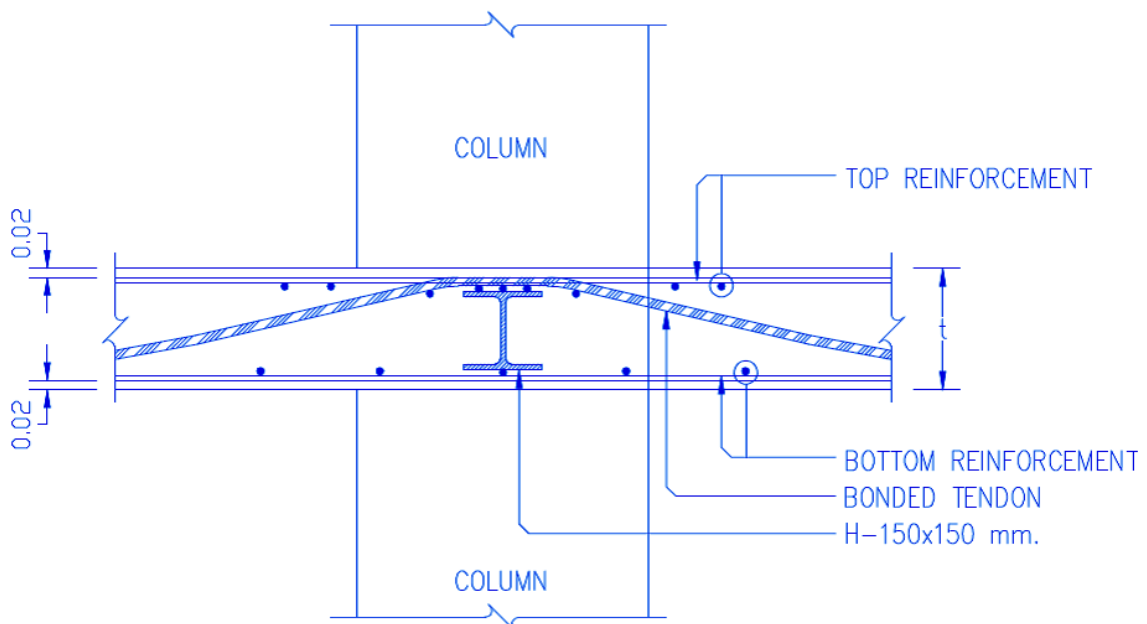
ข้อกำหนดสำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของ Shearhead มีดังนี้

1. แต่ละแขนของ shearhead จะต้องเชื่อมติดกับแขนที่ตั้งฉากด้วยรอยเชื่อมแบบ full penetration และต้องต่อเนื่องกันผ่านเสา
2. ความลึกของ shearhead จะต้องไม่เกิน 70 เท่าของความหนาของเอวของเหล็กรูปพรรณ
3. ปลายของ shearhead สามารถตัดให้เป็นมุมไม่น้อยกว่า 30 องศา
4. ปีกรับแรงอัดจะต้องอยู่ภายในระยะ 0.3d จากผิวรับแรงอัดของพื้น

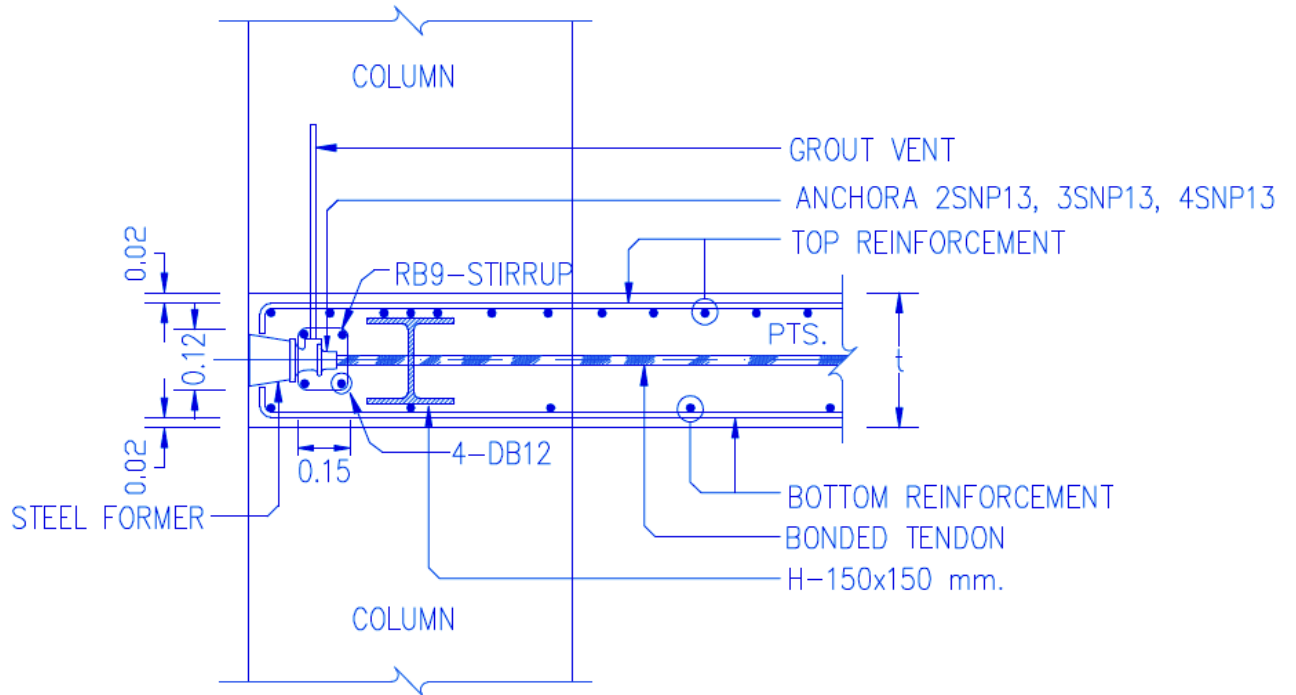


ข้อเสนอแนะในการเลือกใช้ shearhead

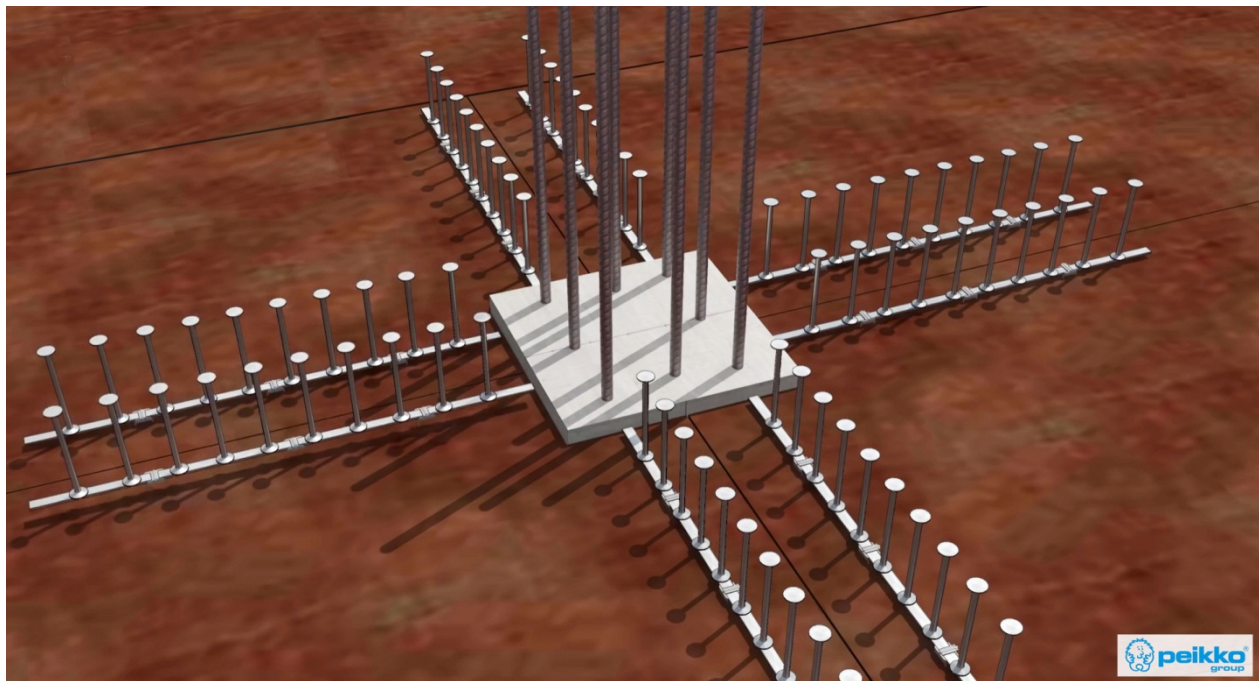
1. จากรูปด้านล่าง จะเห็นว่าลวดจะต้องข้าม H-Beam ได้ ทำให้พื้นที่บริเวณหัวเสาต้องมีความหนาพอสมควร อีกทั้งมีระยะของH-beam ที่จะต้องใส่ตามข้อกำหนด และต้องใส่เหล็กเสริมบน-ล่างได้ โดยทั่วไปพื้นควรมีความหนาประมาณ 30cm ถึงจะสามารถเสริม H-beam เป็น shear head ได้



2. สำหรับหัวเสาบริเวณขอบหรือมุมอาคาร ลวดจำเป็นต้องออกที่กึ่งกลางความหนาพื้น ซึ่งเมื่อใส่ shearhead แล้ว จะขวางแนวลวดอัดแรง ดังนั้นจึงเป็นปัญหาหนึ่งในการเลือกใช้ ซึ่งในกรณีที่เลือกใช้ shearhead บริเวณนี้ จะต้องเจาะ H-beam ให้ลวดอัดแรงสามารถผ่านได้

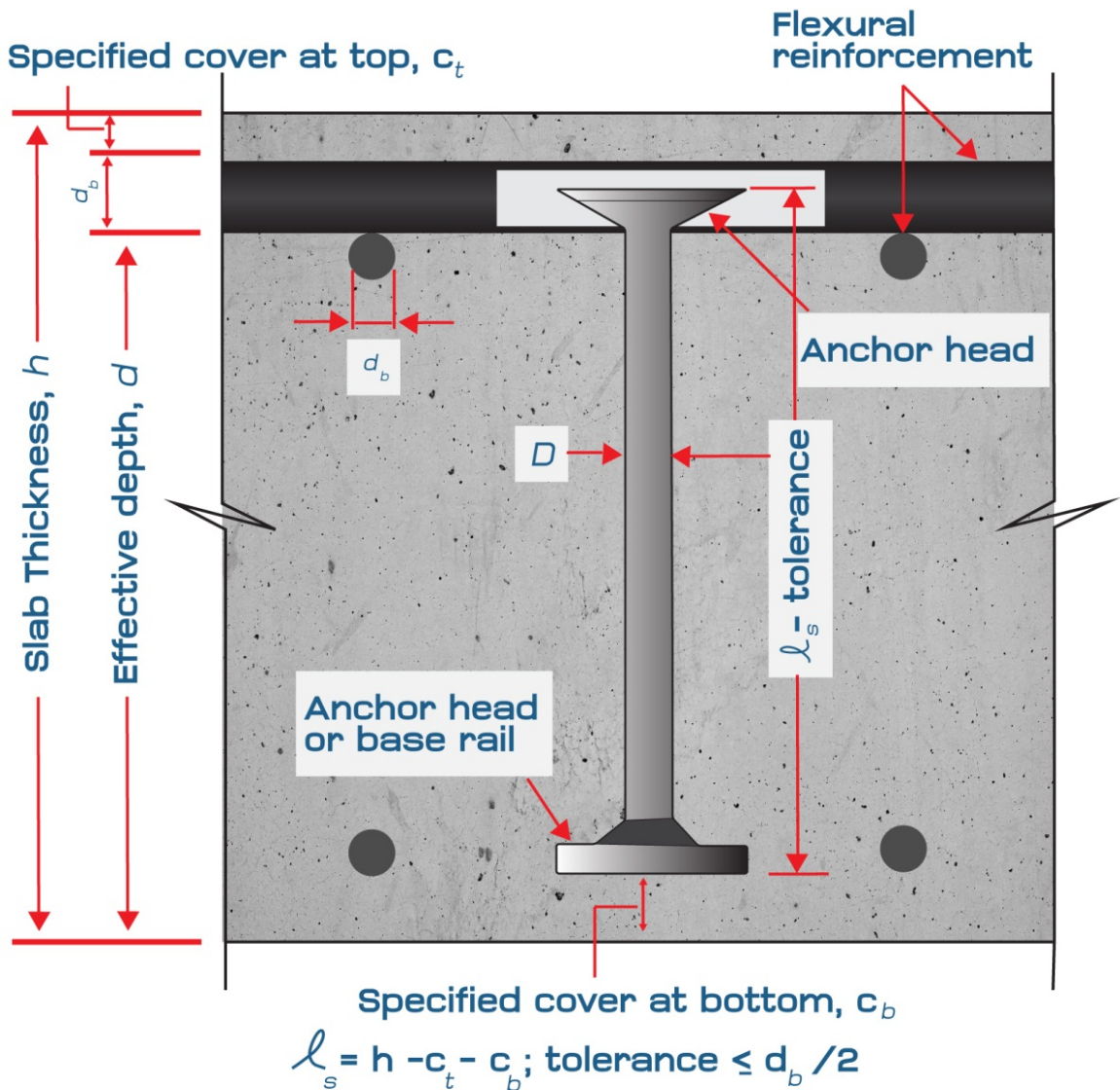
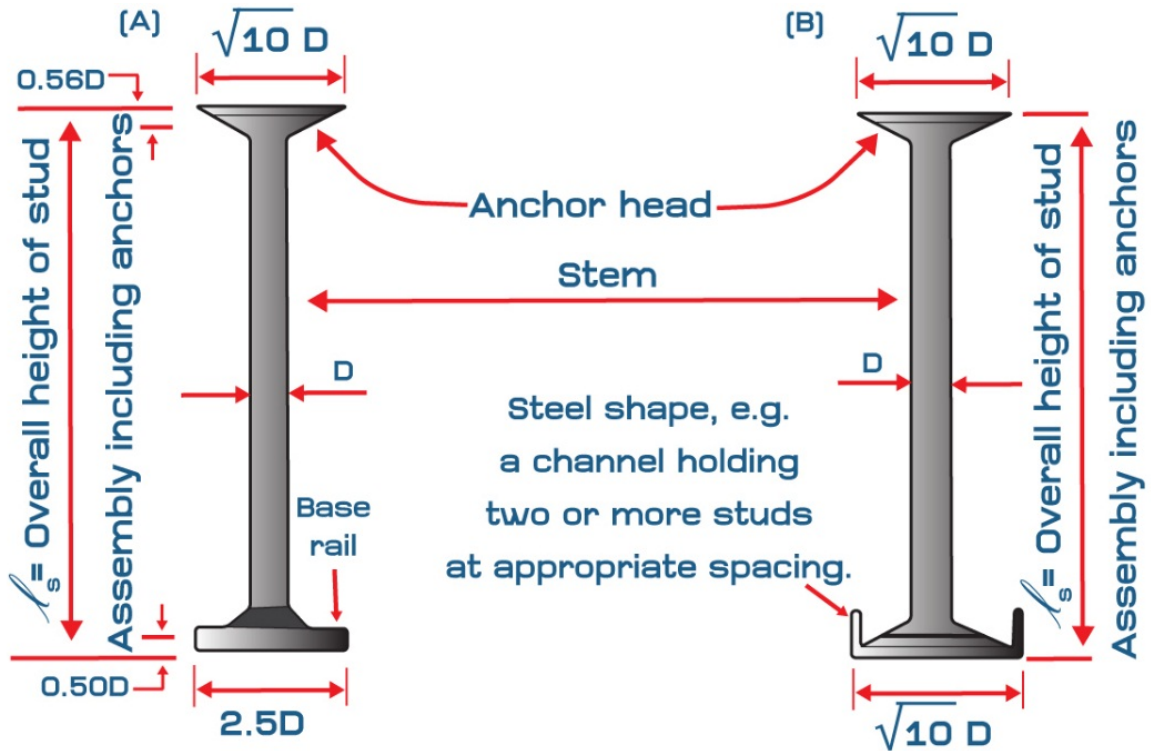


3. การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเจาะทะลุด้วยเหล็กหัวหมุดเฉือน (Headed shear stud reinforcement, shear studs)



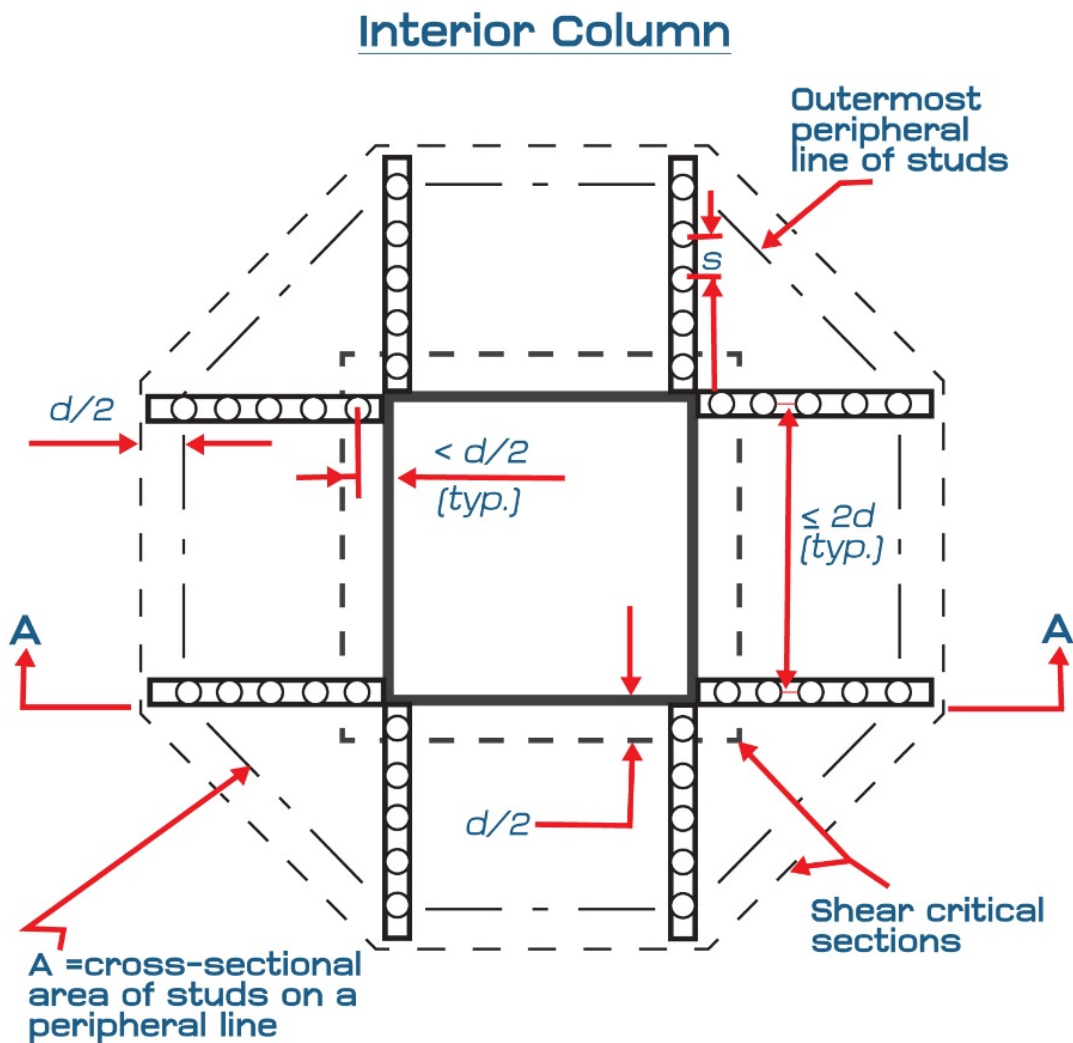
Stud และ Base rail ที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตาม ASTM A1044 กำหนดให้ D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ stud

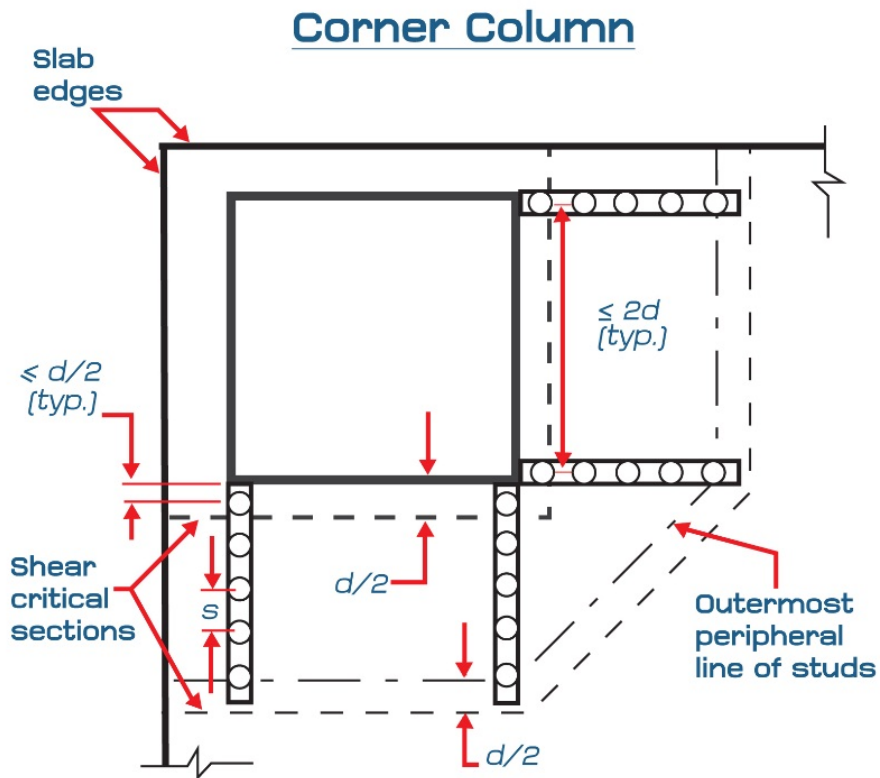
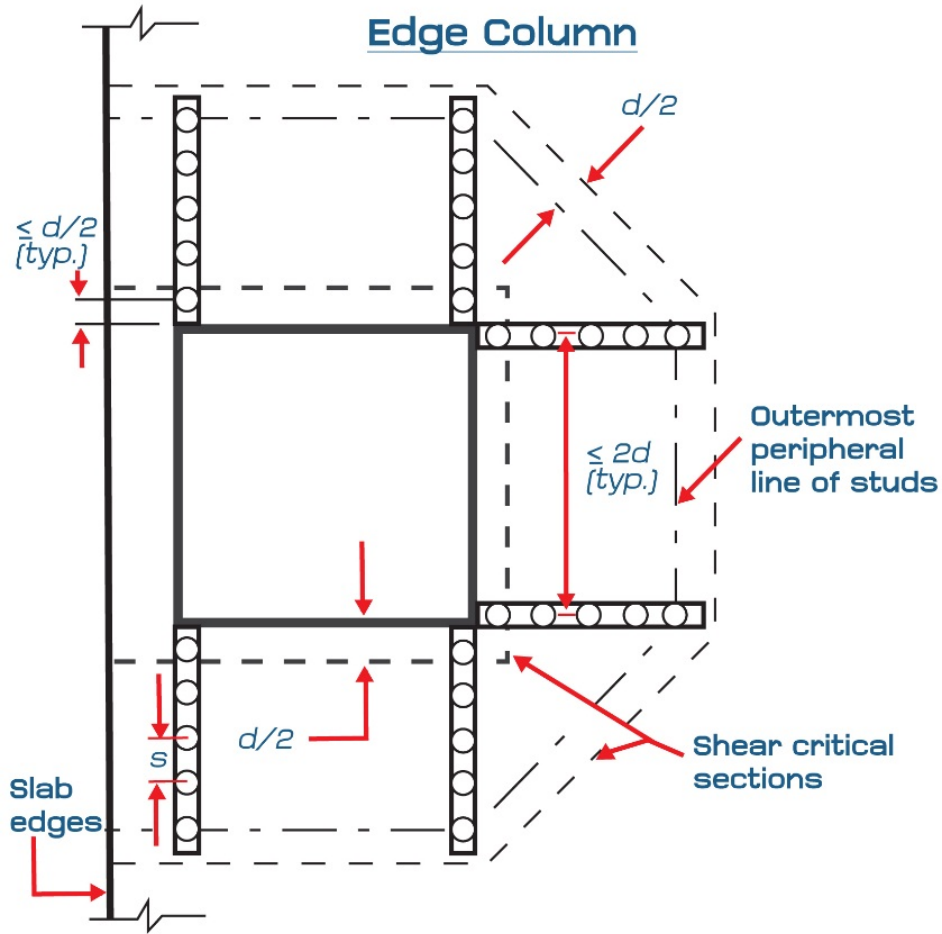
- ขนาดของหัวหมุดของ stud จะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า $\sqrt{10} D$
- ขนาดของ Base rail มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.5D และมีความกว้างไม่น้อยกว่า 2.5D



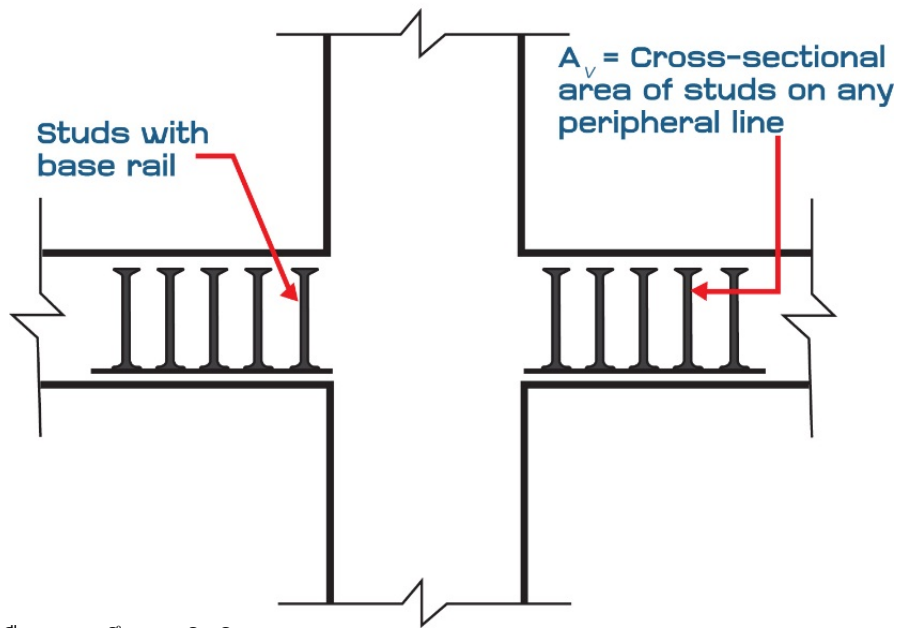
การคำนวณความสูง stud จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดคือ ความสูงทั้งหมดต้องไม่น้อยกว่าความหนาของ
พื้นลอบอกด้วย

1. ระยะหุ้มคอนกรีตของเหล็กเสริมบน
2. ระยะหุ้มคอนกรีตของแผ่นเหล็กฐาน
3. ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากการดัด





Section A-A



กำหนดให้ d คือ ความลึกประสิทธิภาพ

- ระยะห่างของ shear stud แถวแรกจากขอบเสาถึงศูนย์กลางของ stud แถวแรกต้องไม่เกิน $d/2$
- ระยะห่างระหว่างแถวของ shear stud วัดออกไปตามแนวตั้งฉากกับขอบเสาจะต้องมีค่าคงที่โดยสำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรง ระยะห่างต้องไม่เกิน $0.75d$
- สำหรับพื้นที่ประเภทอื่นระยะห่างจะขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือนรวมที่เกิดขึ้น
 - a) $0.75d$ เมื่อความเค้นเฉือนรวมน้อยกว่าหรือเท่ากับ $\Phi 1.5\sqrt{f_c'}$
 - b) $0.50d$ เมื่อความเค้นเฉือนรวมมากกว่า $\Phi 1.5\sqrt{f_c'}$
- ระยะระหว่างขอบ base rail จะต้องไม่เกิน $2d$

เอกสารอ้างอิง

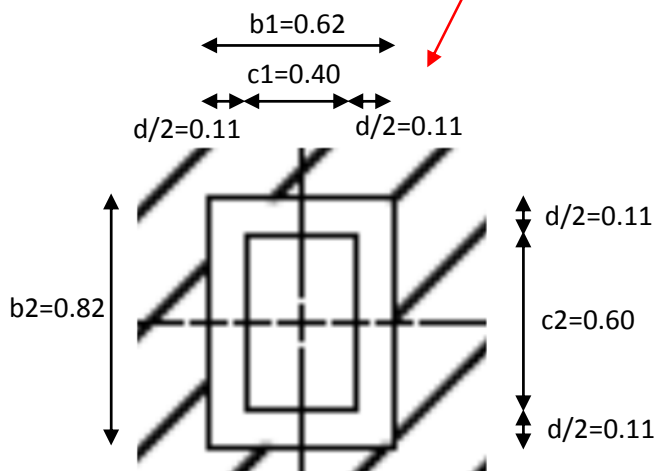
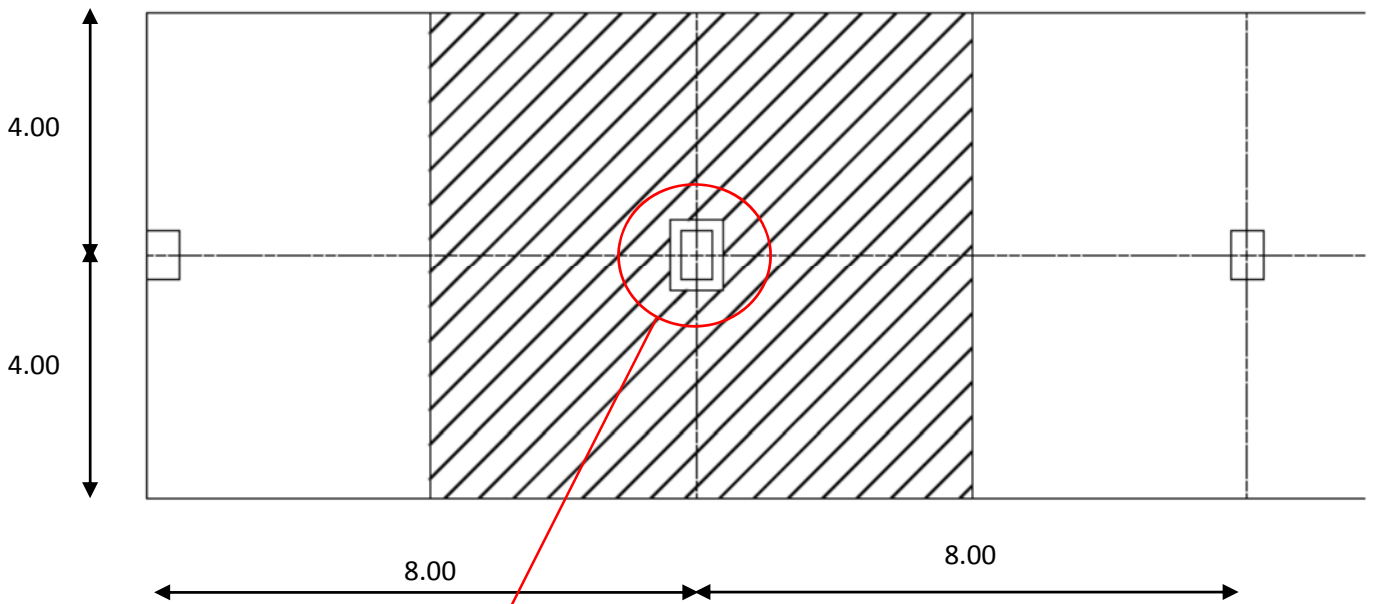
1. ACI Committee 318; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary"
2. M.E. Kamara, L.C. Novak; Notes on ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete with Design Application
3. ACI-ASCE Committee 421; "Guide to Shear Reinforcements for Slabs" (ACI 421.1R-08)
4. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง ; สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

เรียบเรียงโดย

ภาคภูมิ วานิชกมลนันท์ [วย. 1924]

ตัวอย่างการคำนวณ

Example



SDL = 300 kg/m²

LL = 400 kg/m²

Column Height = 3.00m

$b_o = 82 \times 2 + 62 \times 2 = 288 \text{ cm}$

$t = 0.25 \text{ m}$

$d = 0.22 \text{ m } (> 0.8h = 0.20 \text{ m})$

$f_c' = 320 \text{ ksc}, f_y = 4,000 \text{ ksc}$

$w_d = 2400 \times 0.25 + 300 = 900 \text{ kg/m}^2$

$w_l = 400 \text{ kg/m}^2$

$w = w_d + w_l = 1300 \text{ kg/m}^2$

$w_u = 1.4w_d + 1.7w_l = 1940 \text{ kg/m}^2$

$V_u = 1940 (8 \times 8 - 0.82 \times 0.62) = 123,174 \text{ kg}$

$\phi V_c = 0.85 \times 1.06 \sqrt{f_c'} \times b_o \times d = 102,121 \text{ kg}$

ACI สมการ 11-33

กำหนด Unbalanced moment = 5,530 kg-m

ตรวจสอบผลของอัตราส่วนระหว่างด้านยาวและด้านสั้นของเสา

$$\phi V_c = \phi \left(0.53 + \frac{1.06}{\beta} \right) \lambda \sqrt{f_c'} b_o \cdot d$$

ACI สมการ 11-31

$$\beta = 0.60/0.40 = 1.50$$

$$\phi V_c = 119,141 \text{ kg} - 32$$

ตรวจสอบผลกระทบของค่าอัตราส่วนระหว่าง b_o/d

$$\phi V_c = \phi \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 0.53 \right) \lambda \sqrt{f_c'} b_o \cdot d$$

ACI สมการ 11-32

$\alpha_s = 40$ สำหรับเสาภายใน

$$\phi V_c = 129,070 \text{ kg}$$

ดังนั้นสามารถสรุปค่าน้อยที่สุดคือ $\phi V_c = 102,121 \text{ kg}$

คำนวณแรงเฉือนจะทะลุรวมกับผลของ unbalanced moment

$$\gamma_f = \frac{1}{1 + \left(\frac{2}{3} \right) \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} = 0.633$$

ACI สมการ 13-1

$$\gamma_f = 1 - \gamma_v = 0.367$$

ACI สมการ 11-37

$$J/c = J/c' = \frac{b_1 d (b_1 + 3b_2) + d^3}{3} = 143,587 \text{ cm}^3$$

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d} + \frac{\gamma_v M_u c}{J} = 20.85 \text{ ksc}$$

$$v_u = \frac{V_u}{b_o d} - \frac{\gamma_v M_u c}{J} = 18.03 \text{ ksc}$$

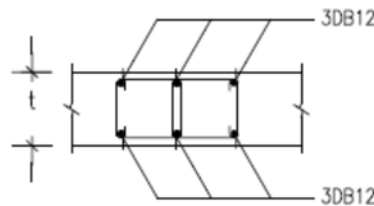
Max. $v_u = 20.85 \text{ kg} > \phi 1.06 \sqrt{f_c'} = 16.12 \text{ ksc}$ ต้องการเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

- การเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนด้วยเหล็กเสริม

ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนมากที่สุดที่รับได้ เมื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธีการเสริมเหล็ก

$$\begin{aligned} \phi V_{max} &= \phi 1.59 \sqrt{f_c'} b_o d = 153,181.5 \text{ kg} \\ V_u &= 20.85 \times 288 \times 22 = 132,128.4 \text{ kg} < \phi V_{max} \quad \text{OK} \\ \phi V_c \text{ ที่ } d/2 \text{ จากขอบเสา} &= \phi 0.53 \sqrt{f_c'} b_o d = 51,060 \text{ kg} \\ \phi V_s &= V_u - \phi V_c = \phi \frac{n A_v f_{y d}}{s} \end{aligned}$$

กำหนดให้ใช้เหล็กปลอก DB12mm จำนวน 2 ปลอก และเหล็กปลอกยื่นกระจายไปทั้ง 4 ด้านของเสา ดังนั้น $n = 4$ ด้วย มี spacing = s



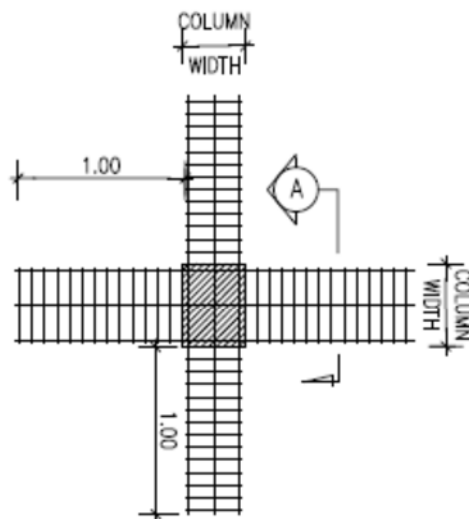
$$\begin{aligned} 132,128.4 - 51,060 &= 0.85 \times 4 \times 4 \times 1.13 \times 4000 \times 22 / s \\ s &= 25.47 \text{ cm } (> d/2 = 11 \text{ cm}) \\ \text{use spacing, } s &= 10 \text{ cm} \end{aligned}$$

use DB12mm@0.10m กระจายออกไปในแต่ละทิศทางของเสา

คำนวณระยะยื่นของเหล็กปลอก, l_v กำหนดให้หน้าตัดวิกฤตที่สุดที่ปลายแขนยื่นของเหล็กปลอกมีกำลังรับแรงเฉือนจะทะลุเท่ากับ $\phi 0.53 \sqrt{f_c'} b_o d$

$$\begin{aligned} V_u &= \phi 0.53 \sqrt{f_c'} b_o d \\ 132,128.4 &= 0.85 \times 0.53 \sqrt{f_c'} (4\sqrt{2} l_v + 2 \times 40 + 2 \times 60) (22) \\ l_v &= 96.4 \text{ cm} \end{aligned}$$

use DB12mm@0.10m(4legs) length 1.00m



SHEAR STIRRUP TYPE "A"



SECTION (A)

- การเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนด้วย shearhead

ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนมากที่สุดที่รับได้ เมื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนด้วย shearhead

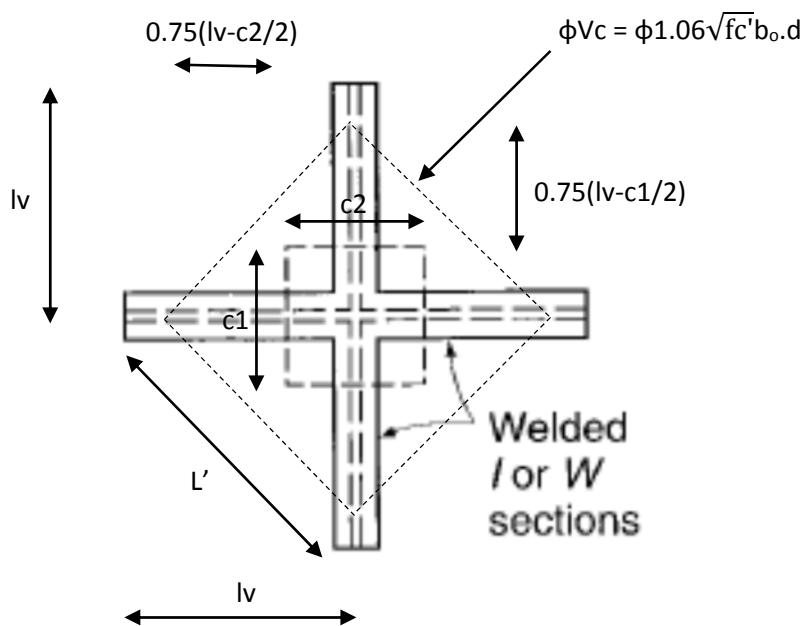
$$\phi V_{max} = \phi 1.855 \sqrt{f_c'} b_o d = 178,711.7 \text{ kg}$$

$$V_u = 20.85 \times 288 \times 22 = 132,128.4 \text{ kg} < \phi V_{max} \quad \text{OK}$$

ที่หน้าตัดวิกฤตินอกสุด กำลังรับแรงเฉือนจะต้องมีค่าเท่ากับ $\phi 1.06 \sqrt{f_c'} b_o d$

$$132,128.4 = 0.85 \times 1.06 \sqrt{f_c'} b_o d$$

$$b_o = 372.63 \text{ cm}$$



$$b_o = 4L'$$

$$L' = 93.16 \text{ cm}$$

$$(L')^2 = [0.75(lv-c2/2)+c2/2]^2 + [0.75(lv-c1/2)+c1/2]^2$$

$$(93.16)^2 = [0.75(lv-30)+30]^2 + [0.75(lv-20)+20]^2$$

$$lv = 79.48 \text{ cm use } lv = 80 \text{ cm}$$

$$\text{Effective width} = c2+d/2+d/2 = 60+22 = 82 \text{ cm}$$

$$\text{Assume top reinforcement in effective width} = 5\text{-DB16mm} = 10.05 \text{ cm}^2$$

$$n = E_s/E_c = 2.04e6 / 15210\sqrt{f_c'} = 7.5$$

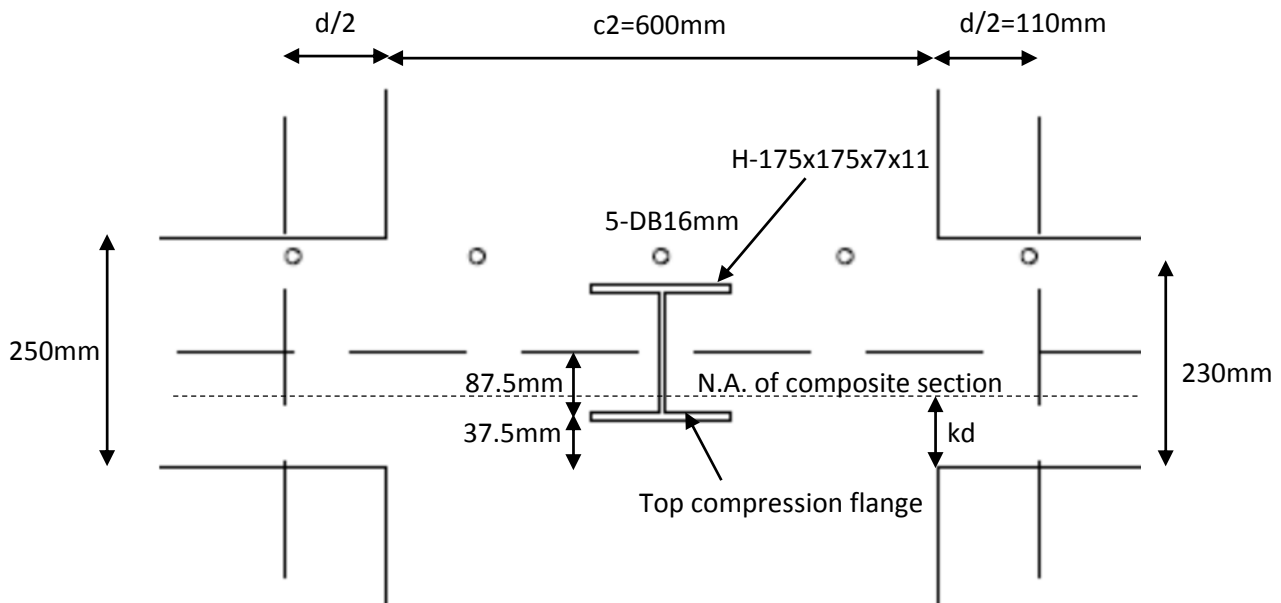
$$\text{Try H-175x175x7.5x11 (w=40.2kg/m) } hv=175\text{mm} < 70tw = 525\text{mm} \quad \text{OK}$$

$$A = 51.21 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 2880 \text{ cm}^4$$

$$S_x = 330 \text{ cm}^3$$

*การเลือก H-175x175 สำหรับพื้นหนา 25cm จะทำงานติดตั้งได้ยาก ในตัวอย่างนี้เลือกใช้ เพราะต้องการให้เห็นการเปรียบเทียบกับ shear reinforcement และ shear stud



$$0.30d = 0.30 \times 220 = 66\text{mm}$$

$$\text{Top compression flange} = 37.5 + 11 = 48.5\text{mm} < 0.3d \quad \text{OK}$$

Check neutral axis of composite section (N.A)

ผลรวมของโมเมนต์รอบ N.A. เท่ากับศูนย์

$$82 (kd)^2 / 2 = n.A_s.(23 - kd) + n.A_{\text{steel}}.(12.5 - kd)$$

$$41 (kd)^2 = (7.5)(10.05)(23 - kd) + (7.5)(51.21)(12.5 - kd)$$

$$kd = 8.21\text{cm}$$

คำนวณค่า $I_{\text{composite}}$

$$\begin{aligned} I_{\text{composite}} &= (1/12) b (kd)^3 + A_s (kd)^2 + n.I_{\text{steel}} + n.A_s.(23 - kd)^2 + n.A_{\text{steel}}.(12.5 - kd)^2 \\ &= (1/12)(82)(8.21)^3 + (82 \times 8.21)(8.21)^2 + 7.5(10.05).(23 - 8.21)^2 + 7.5.(51.21).(12.5 - 8.21)^2 \\ &= 72,715.7 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

คำนวณค่า $\alpha_v = n.I_s / I_{\text{composite}}$

$$= 7.5 \times 2880 / 72715.7 = 0.297 > 0.15 \quad \text{OK}$$

เพื่อที่จะแน่ใจว่ากำลังรับแรงตัดสามารถรับได้แน่ ต้องหาค่าพลาสติกโมเมนต์, M_p ของแต่ละแขนก่อน

$$\phi M_p = \frac{V_u}{2n} [h_v + \alpha_v (l_v - 0.5c_1)] = \frac{132,128.4}{2 \times 4} [0.175 + 0.297(0.80 - 0.4/2)] = 5833.47 \text{ kg-m}$$

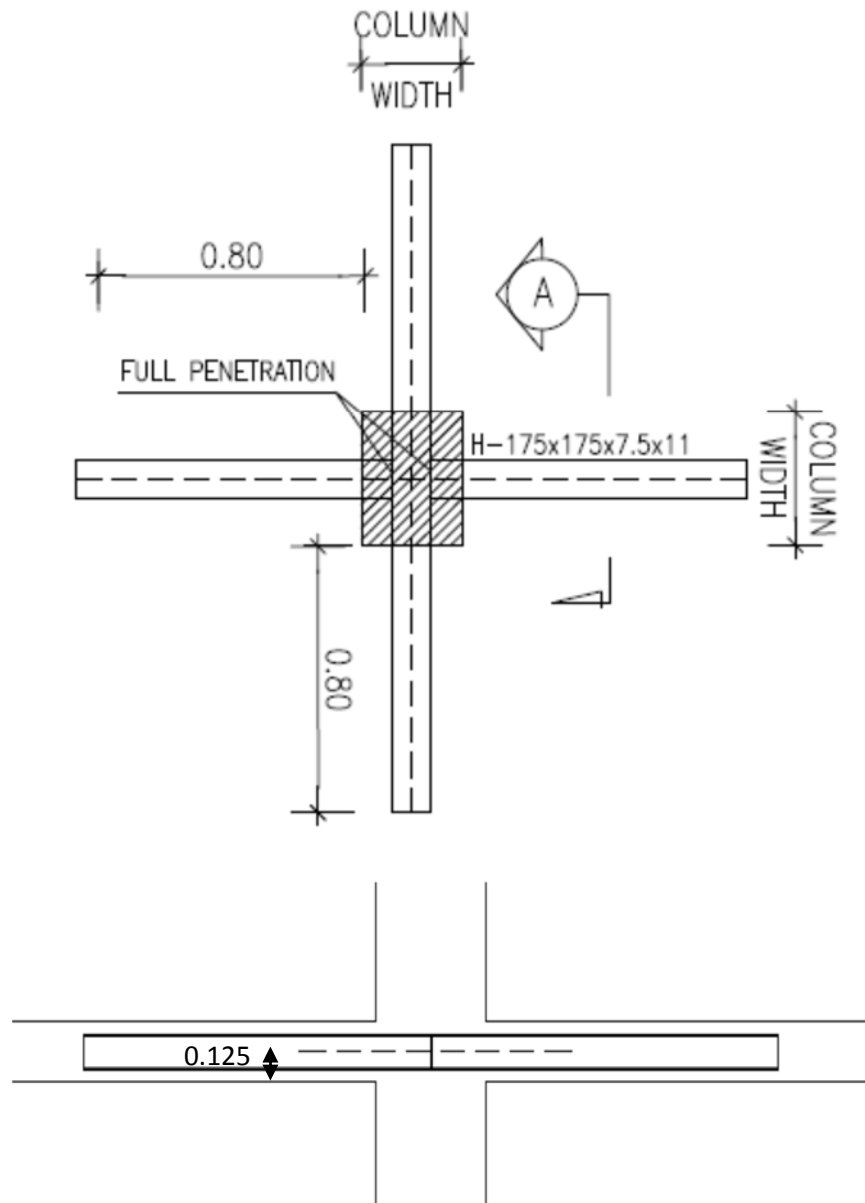
$$M_p = 6,862.9 \text{ kg-m}$$

$$S_{req} = 6,862.9 \times 100 / 2500 = 274.52 \text{ cm}^3 < S_x = 330 \text{ cm}^3 \quad \text{OK}$$

คำนวณค่า $M_v = \frac{\phi \alpha_v V_u}{2n} (l_v - 0.5c_1)$

$$M_v = \frac{0.90(0.297)(132,128.4)}{2 \times 4} (0.80 - 0.5 \times 0.4) = 2648.84 \text{ kg-m}$$

ดังนั้นค่า M_v เป็นค่าน้อยระหว่าง $(M_v, 0.30M_u, M_p) = 2648.84 \text{ kg-m}$



- การเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนด้วย shear studs

ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนมากที่สุดที่รับได้ เมื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนด้วย shearhead

$$\phi V_{max} = \phi 2.12 \sqrt{f_c'} b_o d = 204,242 \text{ kg}$$

$$V_u = 20.85 \times 288 \times 22 = 132,128.4 \text{ kg} < \phi V_{max} \quad \text{OK}$$

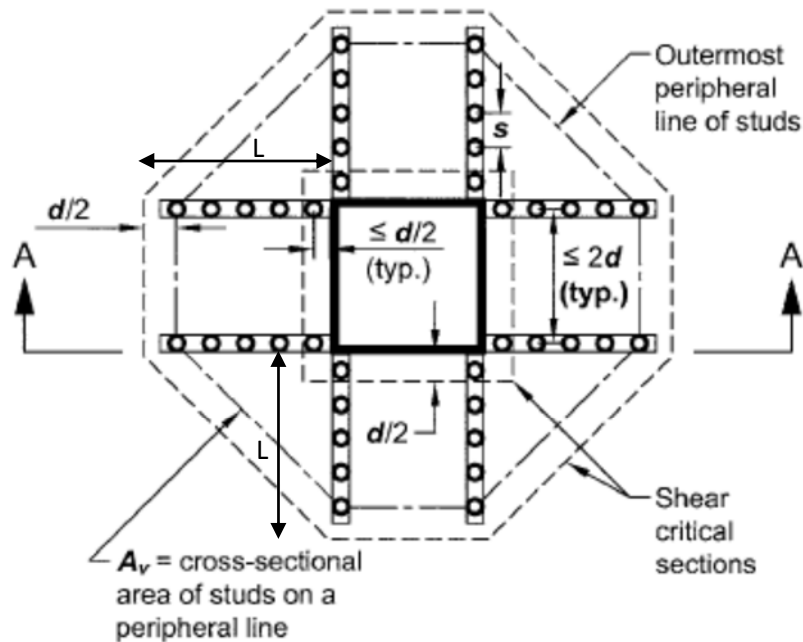
ที่หน้าตัดวิกฤติ $d/2$ จากขอบเสา ACI Code กำหนดให้ค่า ϕV_c มีค่าเท่ากับ $\phi 0.795 \lambda \sqrt{f_c'} b_o d$

$$\phi V_c = 76,590 \text{ kg}$$

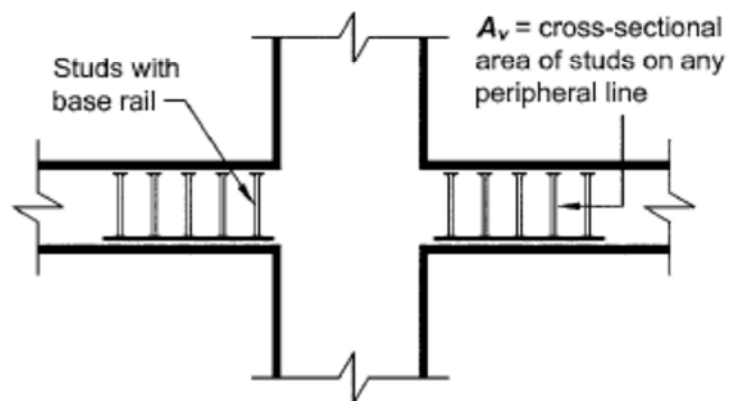
$$\phi V_s = V_u - \phi V_c = 132,128.4 - 76,590 = 55,538.4 \text{ kg}$$

Try stud dia. 12mm $f_y = 3500 \text{ ksc}$ $A = 1.13 \text{ cm}^2$

เสริมยื่นออกไปทั้ง 4 ด้านของเสา ในแต่ละด้านเสริมระนาบละ 2 ตัว



Interior column



Section A-A

$$\phi V_s = \phi \frac{n A_v f_y d}{s} = 55,538.4 \text{ kg}$$

$$s = (0.85 \times 4 \times 2 \times 1.13 \times 3500 \times 22) / 55,538.4 = 10.65 \text{ cm}$$

use spacing, $s = 10 \text{ cm}$

$$\phi 1.59 \sqrt{f_c'} = 24.17 \text{ ksc}$$

$$v_u = 20.85 \text{ ksc} < 1.59 \sqrt{f_c'} \quad s_{, \text{max}} = 0.75d = 16.5 \text{ cm}$$

use stud dia.12mm spacing 10cm

กำหนดให้ $A_v f_y / (b_o s)$ จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $0.53 \sqrt{f_c'}$

$$0.53 \sqrt{f_c'} = 9.48 \text{ ksc}$$

$$A_v f_y / (b_o s) = (4 \times 2 \times 1.13 \times 3500) / (288 \times 10) = 10.99 \text{ ksc} > 9.48 \text{ ksc} \quad \text{OK}$$

คำนวณหาระยะยื่นของแขน shear stud โดยจะยื่นไปจนกระทั่งหน้าตัดวิกฤตินอกสุดสามารถรับแรงเฉือนได้ไม่น้อยกว่า $\phi 0.53 \sqrt{f_c'} b_o d$

$$V_u = \phi 0.53 \sqrt{f_c'} b_o d$$

$$132,128.4 = 0.85 \times 0.53 \sqrt{f_c'} (4\sqrt{2} L + 2c_1 + 2c_2) (22)$$

$$L = 96.39 \text{ cm}$$

$$\text{คำนวณจำนวนของ shear stud} = (L - d/2 - d/2) / s + 1 = (96.39 - 11 - 11) / 10 + 1 = 8.439$$

Use 9 แถวของ stud dia.12mm spacing 10cm

$$\text{ความยาวของ base rail} = (9-1) \times 10 + d/2 + d/2 = 80 + 11 + 11 = 102 \text{ cm} > 96.39 \text{ cm OK}$$

