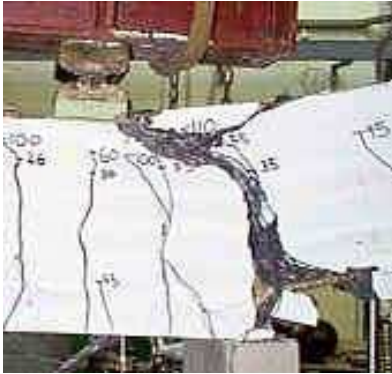


8

Reinforced Concrete Design

Shear in Beams 2



- Shear design summary
- More detail shear design
- Shear span
- Deep beam

Mongkol JIRAVACHARADET

SURANAREE

INSTITUTE OF ENGINEERING

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

Shear Design Summary

WSD

$$\text{Shear: } V = V_{DL} + V_{LL}$$

$$\text{Concrete: } V_c = 0.29\sqrt{f'_c} b d$$

$$\text{Steel: } V_s = V - V_c$$

$$\text{Spacing: } s = A_v f_s d / V_s$$

$$\text{Min. Stirrup: } s_{\max} = A_v / 0.0015 b$$

$$\text{Chk. light shear: } V \leq 0.795\sqrt{f'_c} b d$$

$$s_{\max} \leq d/2 \leq 60 \text{ cm}$$

$$\text{Chk. heavy shear: } V \leq 1.32\sqrt{f'_c} b d$$

$$s_{\max} \leq d/4 \leq 30 \text{ cm}$$

SDM

$$\text{Shear: } V_u = 1.4 V_{DL} + 1.7 V_{LL}$$

$$V_n = V_u / \phi$$

$$\text{Concrete: } V_c = 0.53\sqrt{f'_c} b d$$

$$\text{Steel: } V_s = V_n - V_c$$

$$\text{Spacing: } s = A_v f_y d / V_s$$

$$\text{Min. Stirrup: } s_{\max} = A_v f_y / 3.5 b$$

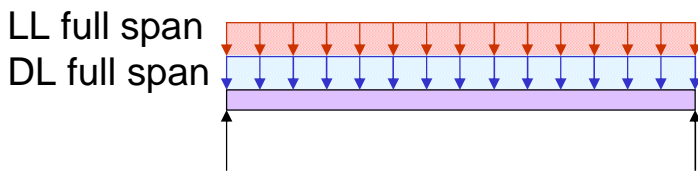
$$\text{Chk. light shear: } V_s \leq 1.1\sqrt{f'_c} b d$$

$$s_{\max} \leq d/2 \leq 60 \text{ cm}$$

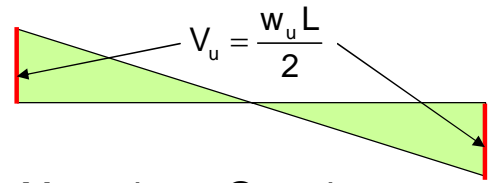
$$\text{Chk. heavy shear: } V_s \leq 2.1\sqrt{f'_c} b d$$

$$s_{\max} \leq d/4 \leq 30 \text{ cm}$$

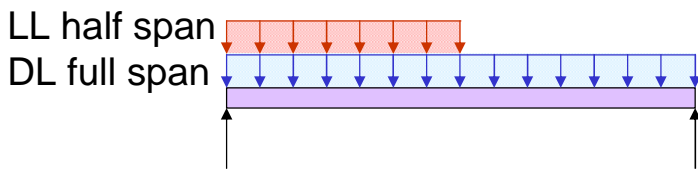
แรงเฉือนที่กลางช่วงคานรับน้ำหนักแผ่



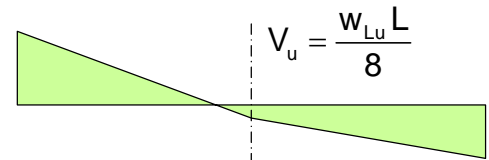
(ก) น้ำหนักคงที่และน้ำหนักจรเต็มช่วงคาน



Max. shear @ ends

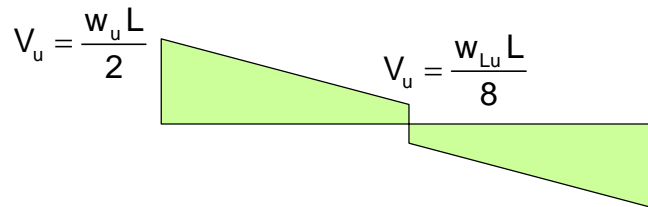


(ข) น้ำหนักคงที่ที่เต็มช่วงและน้ำหนักจรครึ่งช่วงคาน



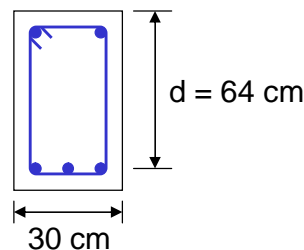
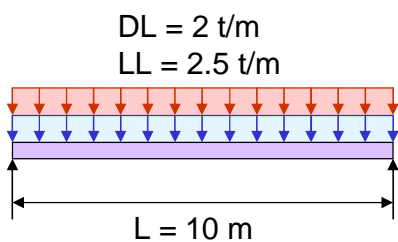
Max. shear @ midspan

(ค) Shear force envelop



EXAMPLE 6-2 More Detailed Design of Vertical Stirrups SDM

The simple beam supports a uniformly distributed service dead load of 2 t/m, including its own weight, and a uniformly distributed service live load of 2.5 t/m. Design vertical stirrups for this beam. The concrete strength is 250 ksc, the yield strength of the flexural reinforcement is 4,000 ksc.



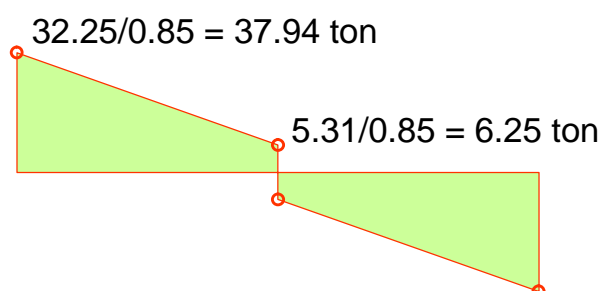
$$w_u = 1.4(2) + 1.7(2.5) = 7.05 \text{ t/m}$$

$$w_{Lu} = 1.7(2.5) = 4.25 \text{ t/m}$$

$$w_u L / 2 = 7.05(10) / 2 = 32.25 \text{ ton}$$

$$w_{Lu} L / 8 = 4.25(10) / 8 = 5.31 \text{ ton}$$

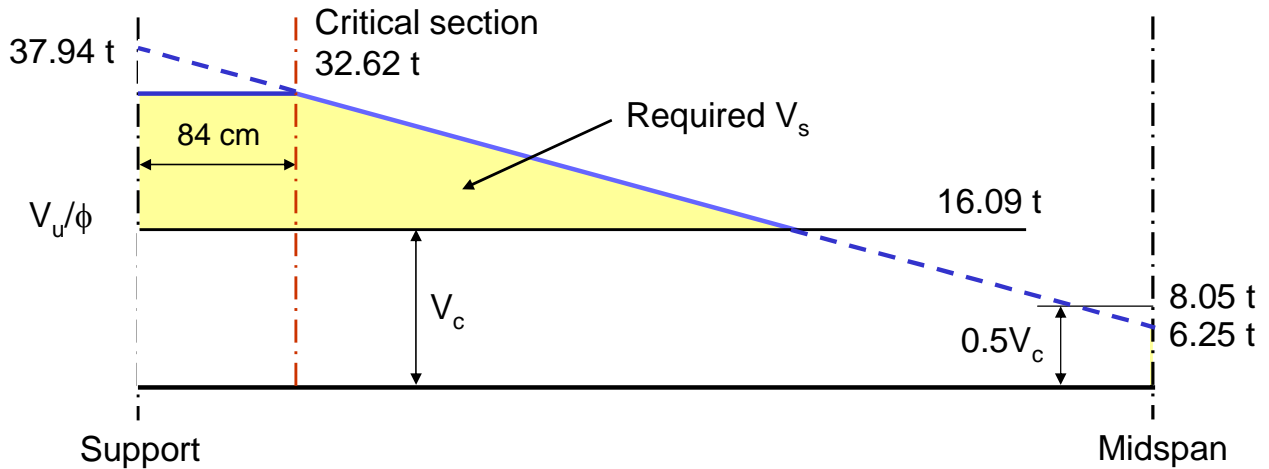
V_u / ϕ Diagram :



assume column width = 0.40 m

$$V_u / \phi \text{ at } d = 37.94 - (0.84/5)(37.94 - 6.25) = 32.62 \text{ ton}$$

$$\text{Shear strength of concrete } V_c = 0.53\sqrt{f'_c} bd = 0.53\sqrt{250} (30)(64)/1,000 = 16.09 \text{ ton}$$



Is the cross section large enough?

$$V_{n,max} = V_c + 2.1\sqrt{f'_c} bd = 16.09 + 2.1\sqrt{250} (30)(64)/1,000 = 79.84 > 32.62 \text{ ton} \quad \text{OK}$$

$$V_c + 1.1\sqrt{f'_c} bd = 16.09 + 1.1\sqrt{250} (30)(64)/1,000 = 55.6 > 32.62 \text{ ton}$$

$$\Rightarrow s_{max} \leq d/2 \leq 60 \text{ cm}$$

Shear2_12

Minimum stirrup : (ACI 11.5.6.3) USE RB9 : $A_v = 2(0.636) = 1.27 \text{ cm}^2$, $f_y = 2400 \text{ ksc}$

$$A_{v,min} = 0.2\sqrt{f'_c} \frac{bs}{f_y} \quad (\text{ACI Eq. 11-13})$$

$$\text{Rearranging gives } s_{max} = \frac{A_v f_y}{0.2\sqrt{f'_c} b} = \frac{1.27(2,400)}{0.2\sqrt{250} (30)} = 32 \text{ cm}$$

$$\text{but not less than } s_{max} = \frac{A_v f_y}{3.5b} = \frac{1.27(2,400)}{3.5(30)} = 29 \text{ cm}$$

Use $s_{max} = 29 \text{ cm}$ < $[d/2 = 64/2 = 32 \text{ cm}] < 60 \text{ cm}$

Compute stirrup required at d from support

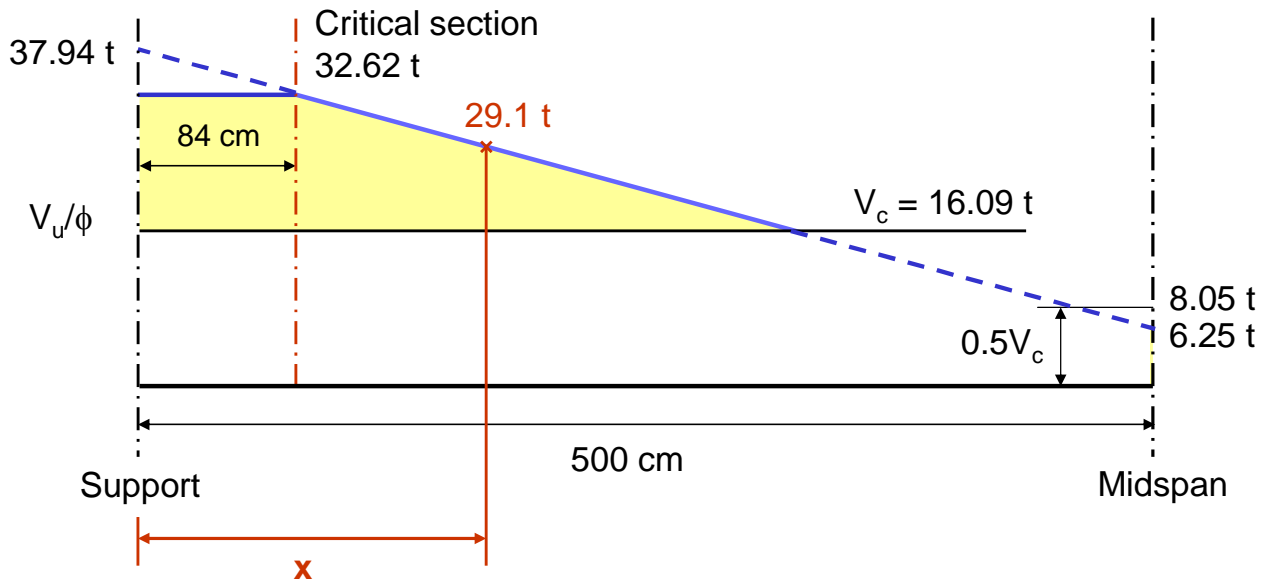
$$s = \frac{A_v f_y d}{V_u / \phi - V_c} = \frac{1.27(2.4)(64)}{32.62 - 16.09} = 11.8 \text{ cm}$$

Use RB9@0.11m. Change spacing to $s = 15 \text{ cm}$ where this is acceptable, and then to the maximum spacing of 29 cm.

Compute V_u / ϕ where s can be increased to 15 cm.

$$\frac{V_u}{\phi} = \frac{A_v f_y d}{s} + V_c = \frac{1.27(2.4)(64)}{15} + 16.09 = 29.1 \text{ ton}$$

Shear2_13



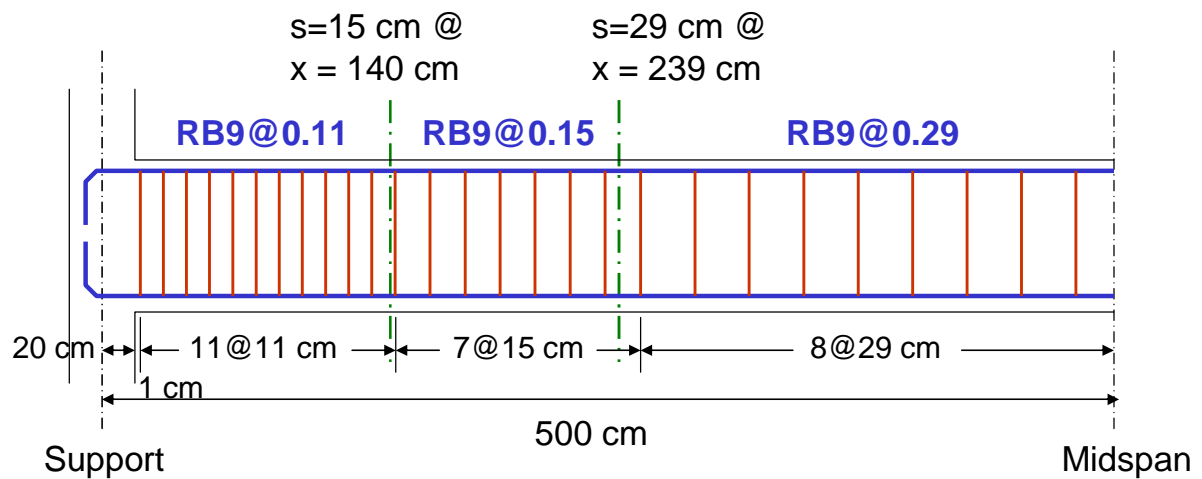
$$x = \frac{37.94 - 29.1}{37.94 - 6.25} \times 500 = 140 \text{ cm from support}$$

Change s to 29 cm, compute V_u/ϕ

$$\frac{V_u}{\phi} = \frac{A_v f_y d}{s} + V_c = \frac{1.27(2.4)(64)}{29} + 16.09 = 22.82 \text{ ton}$$

$$x = \frac{37.94 - 22.82}{37.94 - 6.25} \times 500 = 239 \text{ cm from support}$$

Shear2_14



RB9 @ 0.11 m : $20+1+11@11 = 142 \text{ cm} > 140 \text{ cm}$ **OK**

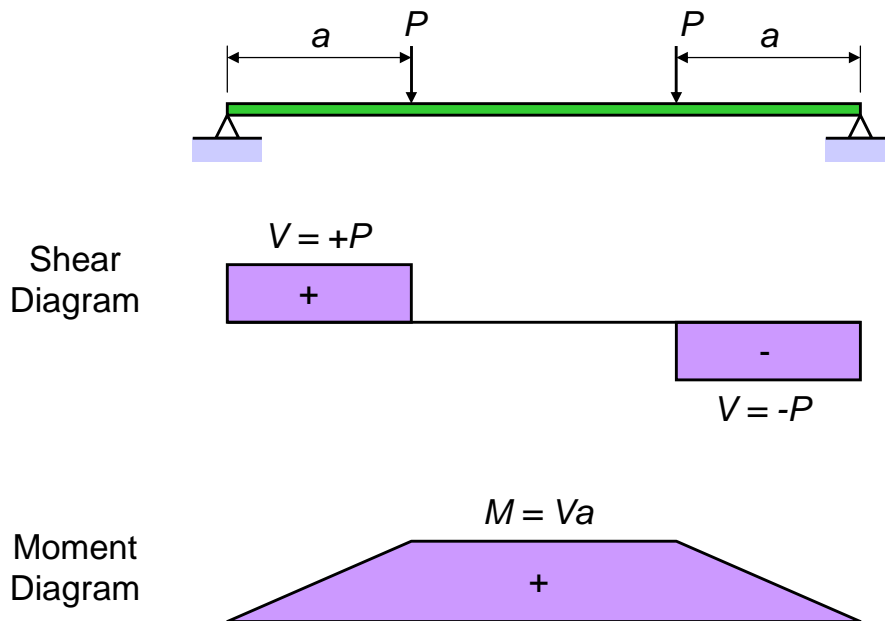
RB9 @ 0.15 m : $142+7@15 = 247 \text{ cm} > 239 \text{ cm}$ **OK**

RB9 @ 0.29 m : $247 + 8@29 = 479 \text{ cm}$

Shear2_15

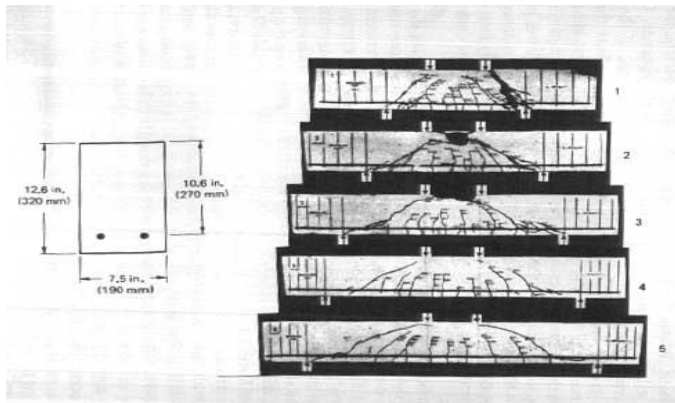
Shear Span ($a = M / V$)

Distance a over which the shear is constant



Shear2_16

Crack Pattern in Several Lengths of Beam



Mark	Span (m)	a/d
1	0.90	1.0
2	1.15	1.5
3	1.45	2.0
4	1.70	2.5
5	1.95	3.0
6	2.35	4.0
7/1	3.10	5.0
8/1	3.60	6.0
10/1	4.70	8.0
9/1	5.80	7.0

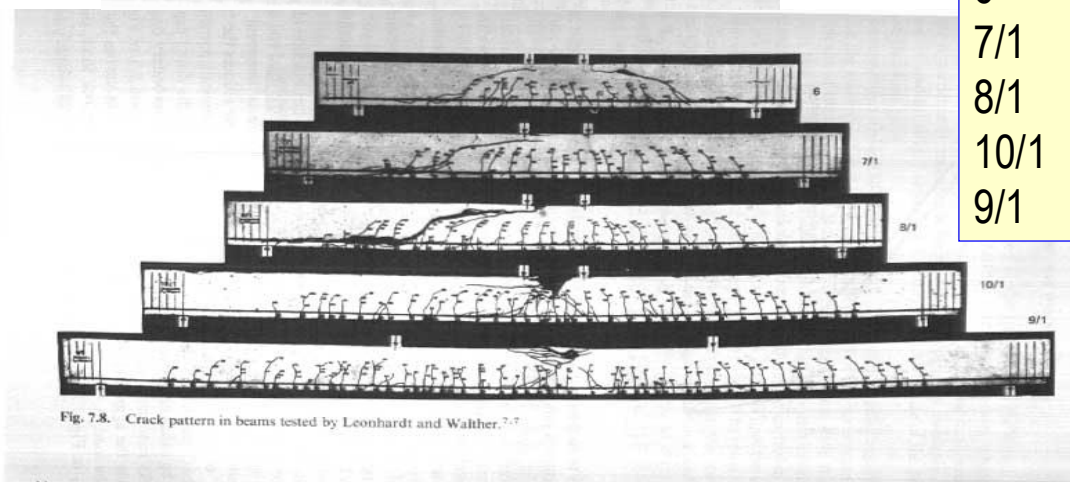
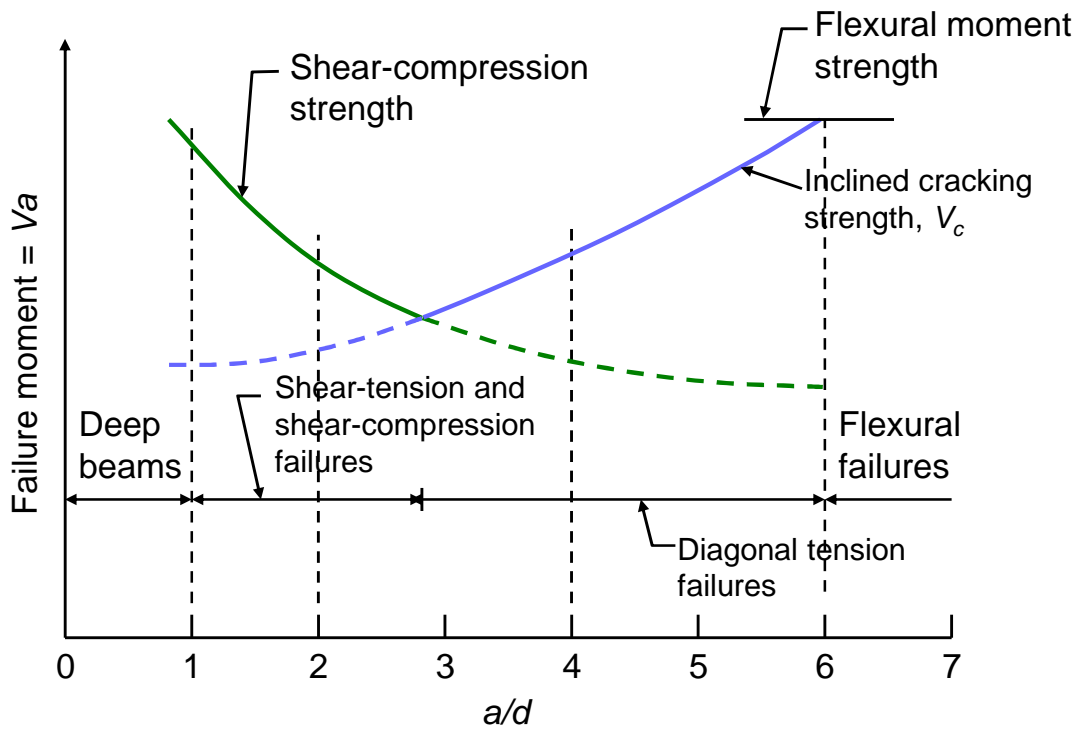


Fig. 7.8. Crack pattern in beams tested by Leonhardt and Walther.⁷⁻⁷

Shear2_17

Variation in Shear Strength with a/d for rectangular beams



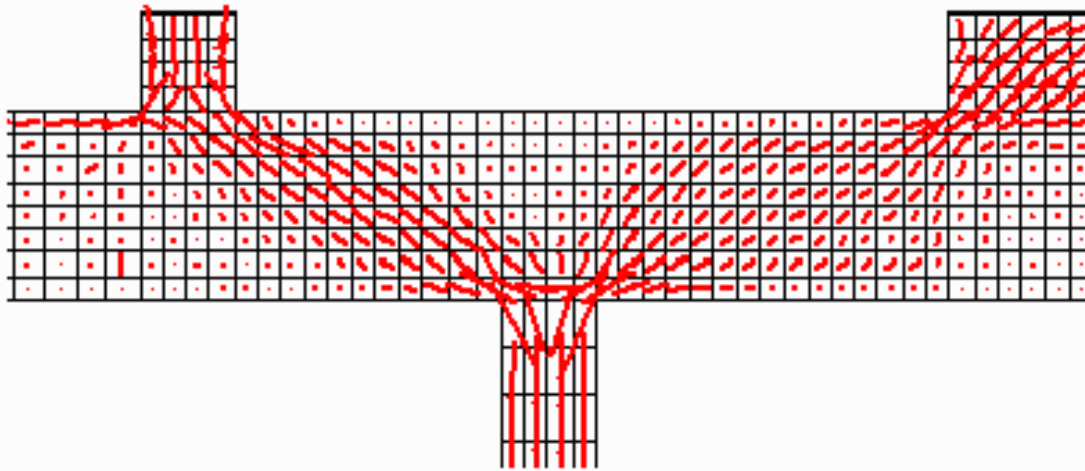
Shear2_18



Brunswick Building. Note the deep concrete beams at the top of the ground columns. These 168-ft beams, supported on four columns and loaded by closely spaced fascia columns above, are 2 floors deep. Shear stresses and failure mechanisms were studied on a small concrete model. (Chicago, Illinois)

Shear2_19

Figure 2: Principal compressive strain trajectories in a transfer girder.



Shear2_20

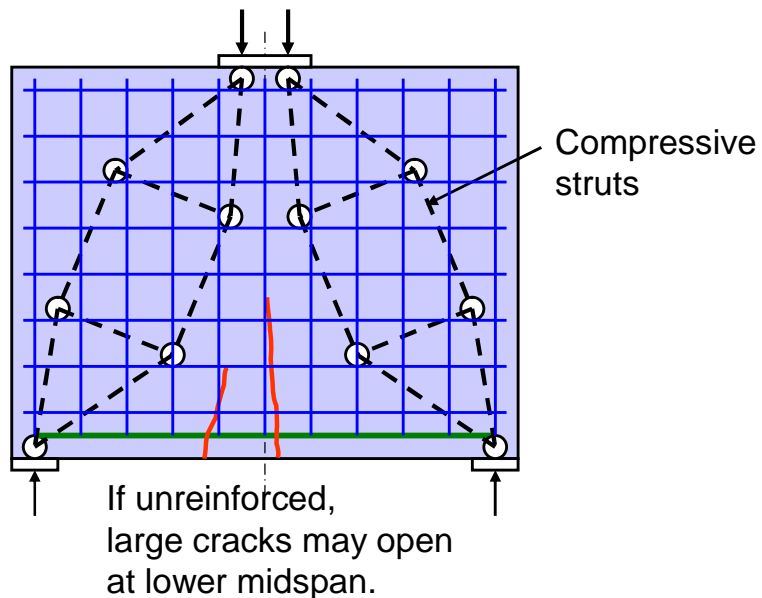
Deep Beams

Deep beams are structural elements loaded as beams in which a significant amount of the load is transferred to the supports by a compression thrust joining the load and the reaction.

When shear span $a = M/V$ to depth ratio < 2

Mechanism:

Use both horizontal and vertical may prevent cracks

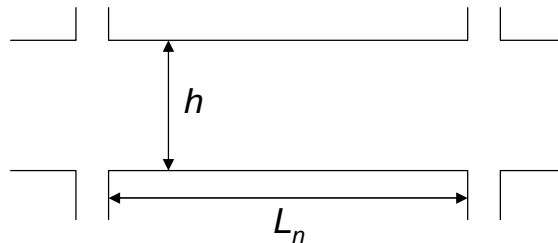


Shear2_21

Definition of Deep Beam

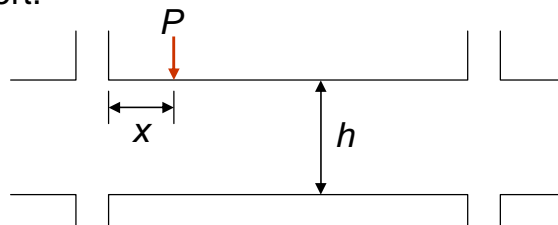
ACI 10.7.1 – Deep beams are members loaded on one face and supported on the opposite face so that compression struts can develop between the loads and the supports, and have either:

- (a) clear spans, L_n , equal to or less than four times the overall member depth; or



$$L_n / h \leq 4$$

- (b) regions with concentrated loads within twice the member depth from the face of the support.



$$x < 2h$$

Shear2_22

Design Criteria for Shear in Deep Beams

Basic Shear Strength: $\phi V_n \geq V_u$

where $V_n = V_c + V_s$

Location for Computing Factored Shear:

(a) Simply Supported Beams

(Critical section located at distance z from face of support)

- $z = 0.15L_n \geq d$ for uniform loading

- $z = 0.50a \geq d$ for concentrated loading

(b) Continuous Beams

Critical section located at face of support

Limitation on Nominal Shear Strength

$$V_{n,max} = 2.7\sqrt{f'_c} bd$$

Shear2_23

Shear Strength of Concrete, V_c

$$V_c = \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \left(0.50 \sqrt{f'_c} + 176 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) b d \leq 1.6 \sqrt{f'_c} b d$$

where $1.0 \leq 3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \leq 2.5$

If some minor unsightly cracking is not tolerated, the designer can use

Simplified method: $V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d$

Shear Reinforcement, V_s

$$V_s = \left[\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{1 + L_n/d}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_h} \left(\frac{11 - L_n/d}{12} \right) \right] f_y d$$

เมื่อ A_v = พื้นที่เหล็กตั้งรับแรงเฉือน (ชม.²), A_{vh} = พื้นที่เหล็กนอนรับแรงเฉือน (ชม.²)

s_v = ระยะห่างเหล็กปลอกตั้ง (ชม.), s_h = ระยะห่างของเหล็กนอน (ชม.)

Shear2_24

Minimum Shear Reinforcement

$$\text{maximum } s_v \leq \frac{d}{5} \leq 30 \text{ cm}$$

$$\text{maximum } s_h \leq \frac{d}{5} \leq 30 \text{ cm}$$

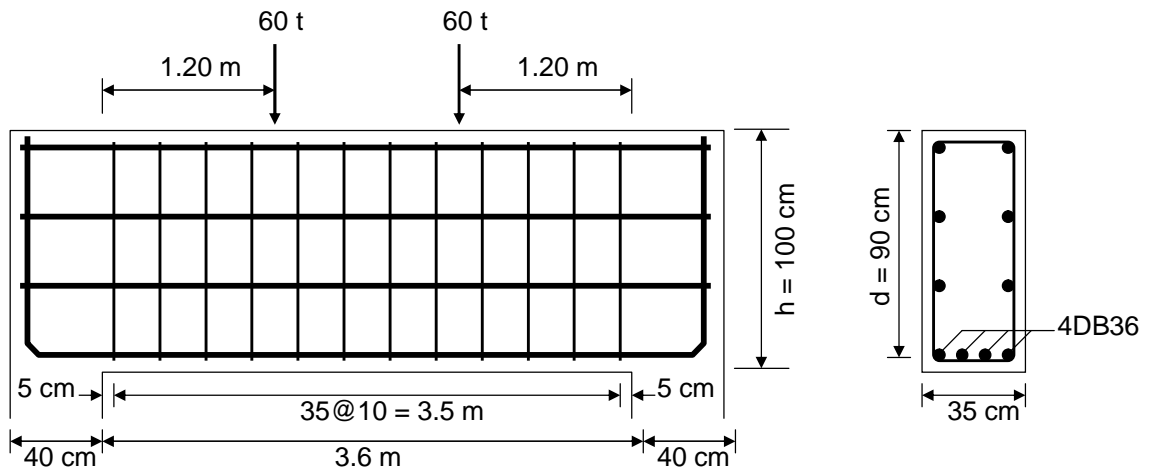
and

$$\text{minimum } A_{vh} = 0.0015 b s_h$$

$$\text{minimum } A_v = 0.0025 b s_v$$

Shear2_25

ตัวอย่างที่ 5.6 ออกแบบเหล็กรับแรงเฉือนสำหรับคานช่วงเดียวรับน้ำหนักกระทำสองจุดของน้ำหนักใช้งานจร 60 ตันในแต่ละจุดในช่วงกว้างคาน 3.6 เมตร คานกว้าง 35 ซม. และความลึกประสิทธิภาพ $d = 90$ ซม. ใช้ $f'_c = 280$ กก./ซม.² และ $f_y = 4,000$ กก./ซม.²



วิธีทำ (a) พิจารณาว่าเป็นคานเล็กหรือไม่สำหรับคานนี้

$$L_n/h = 360/100 = 3.6 < 4.0$$

ดังนั้นเป็นคานเล็ก

Shear2_26

(b) หน้าตัดวิกฤตสำหรับน้ำหนักกระทำเป็นจุด โดยใช้ช่วงคานเฉือน $a = 1.20$ ม.

$$0.50a = 0.5(1.20) = 0.60 \text{ เมตร} < [d = 0.90 \text{ เมตร}]$$

หน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ 0.60 ม. จากผิวของจุดรองรับ

(c) กำลังเฉือนของคานโดยไม่มีเหล็กรับแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤต น้ำหนักกระทำเป็นจุดประลัยคือ

$$1.7 LL = 1.7(60) = 102 \text{ ตัน}$$

ละลายน้ำหนักคงที่ซึ่งน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักกระทำเป็นจุด โดยใช้วิธีละเอียดที่หน้าตัดวิกฤต

$$\frac{M_u}{V_u d} = \frac{102(60)}{102(90)} = 0.67$$

ตัวคูณสำหรับคานเล็กคือ $3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} = 3.5 - 2.5(0.67) = 1.83 < 2.5$ **OK**

$$v_c = 1.83 \left[0.50\sqrt{f'_c} + 176 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right]$$

$$\rho_w = \frac{4(10.18)}{35(90)} = 0.0129$$

Shear2_27

$$v_c = 1.83 \left[0.50\sqrt{280} + \frac{176 (0.0129)}{0.67} \right]$$

$$= 1.83[8.37 + 3.39] = 21.5 \text{ กก./ชม.}^2 \longleftarrow \text{ควบคุม}$$

Upper limit: $v_c = 1.6\sqrt{f'_c} = 1.6\sqrt{280} = 26.77 \text{ kg/cm}^2$

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต $V_c = v_c b_w d = 21.5(35)(90)/1,000 = 67.8$ ตัน

(ด) กำลังเฉือนที่หน้าตัดวิกฤต

$$\text{Required } V_n = \frac{V_u}{\phi} = \frac{102}{0.85} = 120 \text{ ton}$$

$$V_{n,\max} = 2.7\sqrt{f'_c} b d = 2.7\sqrt{280}(35)(90)/1,000$$

$$= 142 \text{ ตัน} > 120 \text{ ตัน} \quad \text{OK}$$

เนื่องจาก V_n ที่ต้องการ $> V_c$ ($120 > 67.8$) ดังนั้นต้องการเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

Shear2_28

(e) การเสริมเหล็กรับแรงเฉือน

$$\frac{A_v}{s} \left(\frac{1+L_n/d}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_2} \left(\frac{11-L_n/d}{12} \right) = \frac{V_s}{f_y d}$$

สำหรับ $L_n/d = 4$: $V_s = 120 - 67.8 = 52.2$ ตัน

$b = 35$ ชม. และ $f_y = 4,000$ กก./ชม.²

$$\frac{A_v}{s_v} \left(\frac{5}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_h} \left(\frac{7}{12} \right) = \frac{52.2}{4.0(90)} = 0.145$$

$\min A_v = 0.0025 b s_v$ $\max s_v = d/5 = 18$ ชม.

$\min A_{vh} = 0.0015 b s_h$ $\max s_h = d/5 = 18$ ชม.

ลองใช้ DB12 วางในแนวนอนในแต่ละด้านมีระยะห่างกัน $s_h = 18$ ชม.

$$\min A_{vh} = 0.0015(35)(18) = 0.945 \text{ ชม}^2$$

ค่าที่เตรียมให้ $A_{vh} = 2(1.13) = 2.26 \text{ ชม}^2 > 0.945 \text{ ชม}^2$ **OK**

Shear2_29

แทนค่า A_{vh} ลงในสมการ $\frac{A_v}{s} \left(\frac{5}{12} \right) + \frac{2.26}{18} \left(\frac{7}{12} \right) = 0.145$

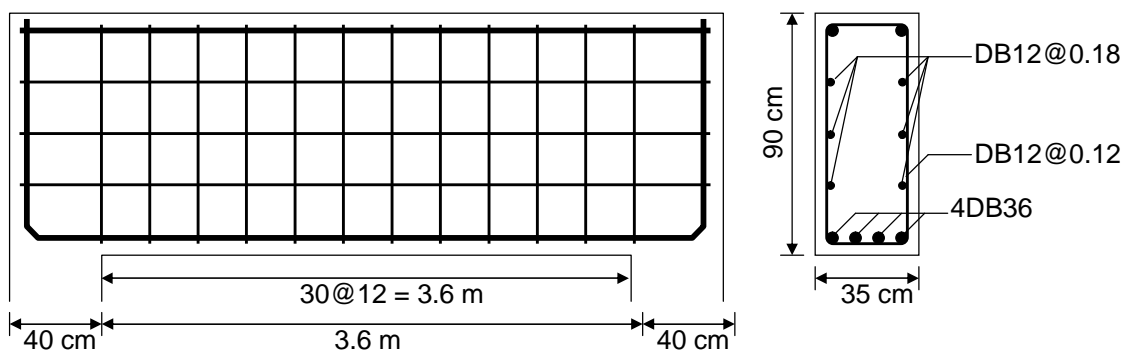
$$\frac{A_v}{s} = [0.145 - 0.0732] \frac{12}{5} = 0.172$$

สำหรับเหล็กกล้าต่ง DB12: $A_v = 2(1.13) = 2.26 \text{ ซม.}^2$

ต้องการ $s = 2.26/0.172 = 13.1 \text{ ซม.} < [d/5 = 18 \text{ ซม.}]$ **OK**

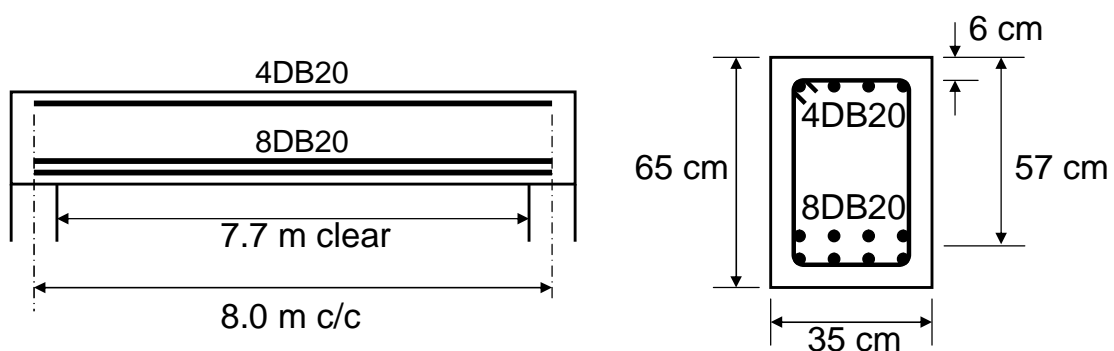
$\min A_v = 0.0025(35)(18) = 1.58 \text{ ซม.}^2 < [A_v = 2.26 \text{ ซม.}^2]$ **OK**

ดังนั้นใช้ DB12 เป็นเหล็กกล้าต่งทุกระยะ 12 ซม. ตลอดทั้งช่วงคาน ■



Shear2_30

ตัวอย่างที่ 6.1 สำหรับคานดังแสดงในรูป พิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรมากที่สุด จากนั้นออกแบบเหล็กรับแรงเฉือนโดยใช้เหล็กปลอกในแนวตั้ง สมมุติให้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักจรต่อน้ำหนักคงที่ใช้งานเท่ากับ 1.5 $f'_c = 240 \text{ กก./ซม.}^2$ และ $f_y = 4,000 \text{ กก./ซม.}^2$

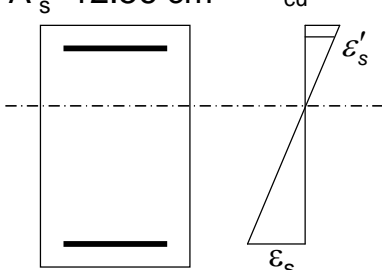


a) ตรวจสอบว่าเหล็กต่งมีมากกว่าที่ยอมให้หรือไม่

$$x_b = \frac{6,120d}{6,120 + f_y} = \frac{6,120 (57)}{6,120 + 4,000} = 34.5 \text{ ซม.}$$

$$\max x = 0.75 x_b = 0.75(34.5) = 25.9 \text{ ซม.}$$

สำหรับ $x = 25.9$ ซม.

$A'_s = 12.56 \text{ cm}^2$ $\epsilon_{cu} = 0.003$

 $\epsilon'_s = \frac{25.9 - 6}{25.9} (0.003) = 0.0023 > [\epsilon_y = 0.0020] \rightarrow f'_s = f_y$
 $\max C_c = 0.85 b \beta_1 (\max x)$
 $= 0.85 (0.24) (35) (0.85) (25.9)$
 $= 157.2$ ตัน
 $\max A_s = 51.9 \text{ cm}^2$
 $\text{Real } A_s = 49.28 \text{ cm}^2$ $C_s = A'_s f_y = 12.56 (4.0) = 50.2$ ตัน

$$\max T = \max C = 157.2 + 50.2 = 207.4 \text{ ตัน}$$

$$\max A_s = \frac{\max T}{f_y} = \frac{207.4}{4.0} = 51.9 \text{ cm}^2 > 49.28 \text{ cm}^2 \quad \text{OK}$$

(b) หากำลังดัด M_n และน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน โดยสมมติให้เหล็กอัดคราก

$$0.85 f'_c b \beta_1 x + A'_s f_y = A_s f_y$$

$$0.85 (0.24) (35) (0.85 x) + 12.56 (4.0) = 49.28 (4.0)$$

$$x = 24.2 \text{ ซม.}$$

$$\epsilon'_s = 0.003 \frac{24.2 - 6.0}{24.2} = 0.0023 > \epsilon_y \quad \text{ยืนยันสมมติฐานว่าเหล็กอัดคราก}$$

$$C_c = 0.85 f'_c b \beta_1 x = 0.85 (0.24) (35) (0.85) (24.2) = 146.9 \text{ ตัน}$$

$$C_s = A'_s f_y = 12.56 (4.0) = 50.2 \text{ ตัน}$$

$$T = A_s f_y = 49.28 (4.0) = 197.1 \text{ ตัน}$$

$$d - \frac{a}{2} = 57 - \frac{1}{2} (0.85) (24.2) = 46.7 \text{ cm}$$

$$M_n = 146.9 (46.7) / 100 + 50.2 (57 - 6) / 100 = 94.2 \text{ ตัน-เมตร}$$

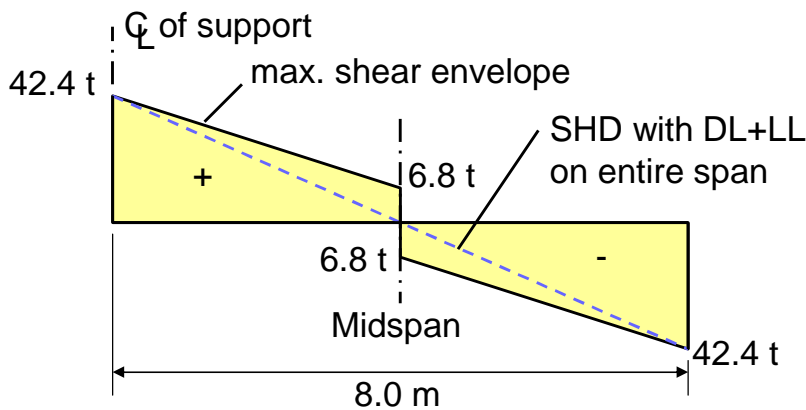
$$M_u = \frac{1}{8} w_u (8)^2 = \phi M_n = 0.90(94.2) = 84.8 \text{ ตัน-เมตร} \longrightarrow w_u = 10.6 \text{ ตัน/เมตร}$$

จากโจทย์กำหนด $w_L = 1.5w_D$ ดังนั้น $w_u = 1.4w_D + 1.7(1.5w_D)$

น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ใช้งาน $w_D = 10.6 / (1.4 + 2.55) = 2.7 \text{ ตัน/เมตร}$

น้ำหนักจรใช้งาน $w_L = 1.5(2.7) = 4.0 \text{ ตัน/เมตร}$

(c) ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน



Max. shear at support:

$$V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{10.6(8)}{2} = 42.4 \text{ ton}$$

Max. shear at midspan when half LL on span:

$$V_u = \frac{w_u L}{8} = \frac{10.6(8)}{8} = 6.8 \text{ ton}$$

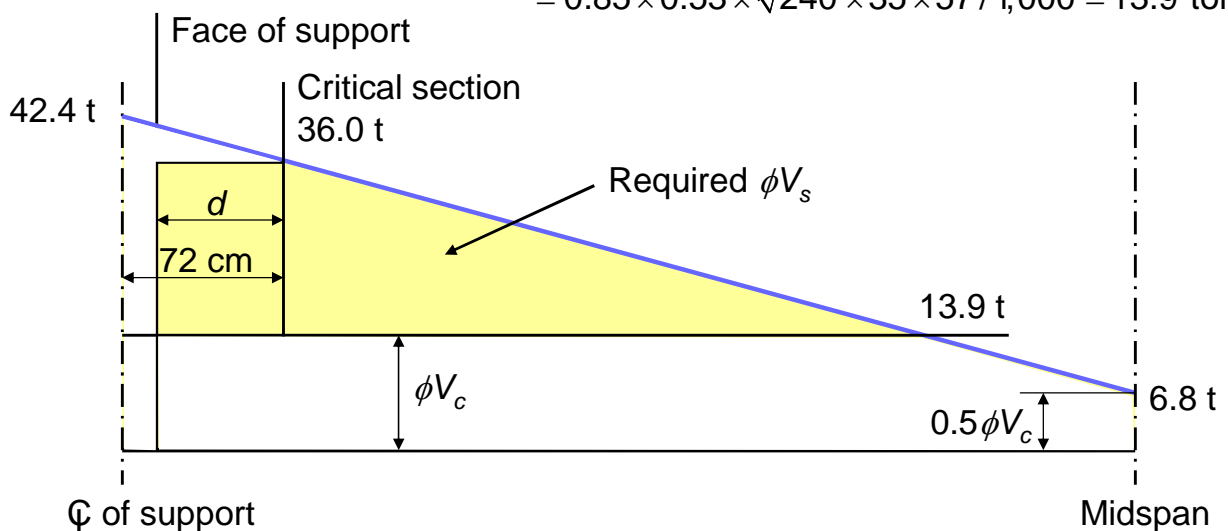
Critical section from face of support $d = 57 \text{ cm}$, support width = 30 cm

Therefore compute V_u at $57 + 30/2 = 72 \text{ cm}$

$$V_u = 42.4 - \frac{(42.4 - 6.8)}{4(100)} \times 72 = 36.0 \text{ ton}$$

Shear strength of concrete $\phi V_c = \phi (0.53 \sqrt{f'_c} b_w d)$

$$= 0.85 \times 0.53 \times \sqrt{240} \times 35 \times 57 / 1,000 = 13.9 \text{ ton}$$



$$\text{Required } \phi V_s = V_u - \phi V_c = 36.0 - 13.9 = 22.1 \text{ ton}$$

$$\text{Min } \phi V_s = 0.85(3.5)(35)(57)/1,000 = 5.9 \text{ ton}$$

$$\text{Max } \phi V_s (\text{for } s = d/2) = 0.85 \times 1.1 \sqrt{240} \times 35 \times 57 / 1,000 = 28.9 \text{ ton}$$

Since $5.9 \text{ ton} < \text{Required } \phi V_s < 28.9 \text{ ton}$, $\text{max } s = d/2$

$$\text{USE DB10 stirrup: } s = \frac{\phi A_v f_y d}{\phi V_s} = \frac{0.85 \times 2 \times 0.78 \times 4.0 \times 57}{22.1} = 13.7 \text{ cm} \quad @ \text{ Critical section}$$

USE $s = 13 \text{ cm}$ from $z = 0$ to 57 cm from face of support

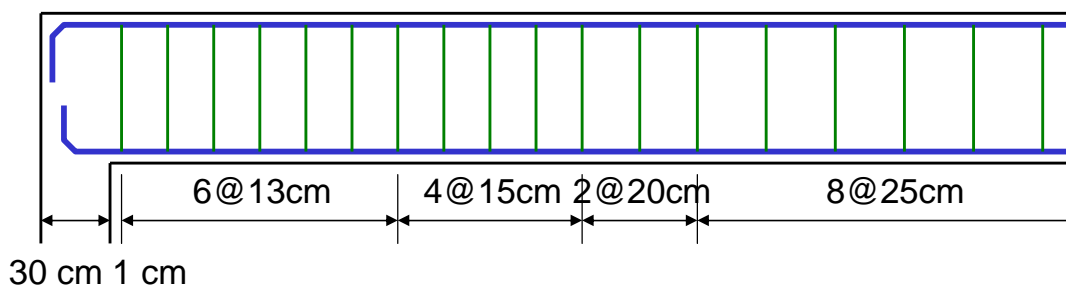
$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_y d}{s} = \frac{0.85 \times 2 \times 0.78 \times 4.0 \times 57}{13} = 23.2 \text{ ton}$$

From $z = 57 \text{ cm}$, set $\phi V_n = V_u$

$$z = 57 + \frac{22.1 - \phi V_s}{36.0 - 6.8} (400 - 72)$$

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและกำลังสำหรับเหล็กปลอกในแนวตั้ง

s (cm)	ϕV_s (ton)	z (cm)
13.7	22.1 (Max)	0 to 57
15	20.1	79
20	15.1	135
25	12.1	169
28.5 (d/2)	10.6	186
51.2 (NG)	5.9 (Min)	238



Shear Strength of Members under Combined Bending and Axial Load

Axial Compression

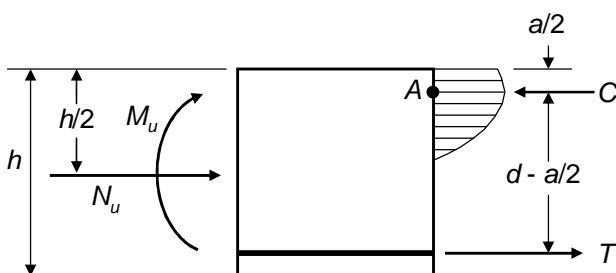
Simplified method:
$$V_c = 0.53 \left(1 + \frac{N_u}{140A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d$$

where N_u = Factored axial compressive load

A_g = Gross area of the concrete section

More detailed equation:
$$V_c = \left(0.5\sqrt{f'_c} + 176 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.93 \sqrt{f'_c} b_w d$$

Replace M_u with M_m , where
$$M_m = M_u - N_u \left(\frac{4h - d}{8} \right)$$



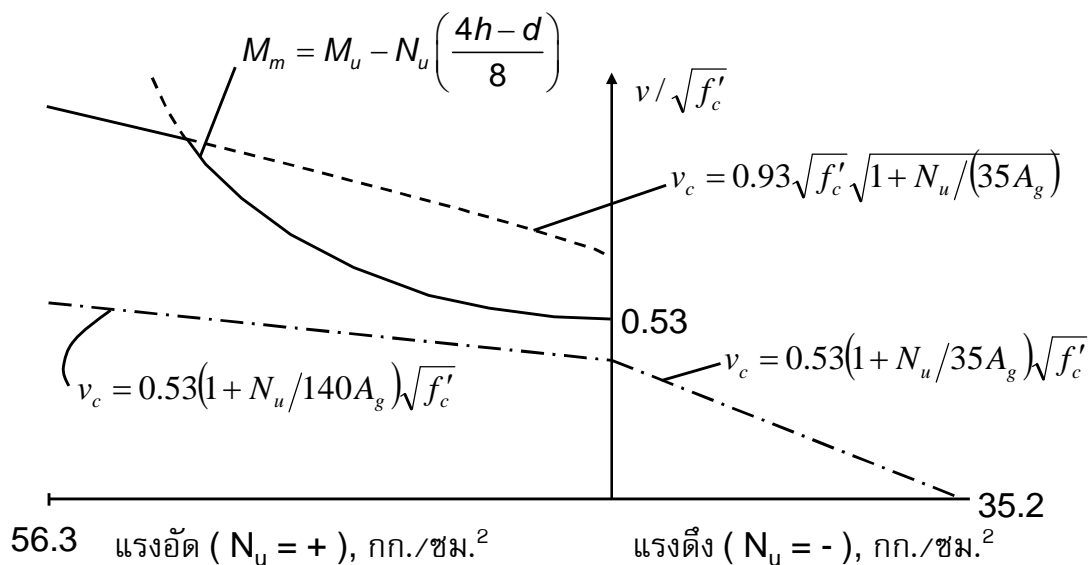
$$[\Sigma M_A = 0] \quad T \left(d - \frac{a}{2} \right) = M_u - N_u \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right)$$

$$V_c (\text{upper limit}) = 0.93 \sqrt{f'_c} \sqrt{1 + \frac{N_u}{35A_g}} b_w d$$

Axial Tension

$$V_c = 0.53 \left(1 + \frac{N_u}{35A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$v_c = 0.50 \sqrt{f'_c} + 176 \frac{\rho_w V_u d}{M_m}$$



Strength V_c - Continuous Beams

Simplified method: $V_c = 0.53\sqrt{f'_c} b_w d$

More detailed procedure: $V_c = \left(0.50\sqrt{f'_c} + 176\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.93\sqrt{f'_c} b_w d$

Strength V_s - Continuous Beams

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

Minimum Shear Reinforcement:

$$\min A_v = 0.0015 b_w s \text{ where } s \leq d/5 \leq 45 \text{ cm}$$

$$\min A_{vh} = 0.0025 b_w s_2 \text{ where } s_2 \leq d/3 \leq 45 \text{ cm}$$

Limitation on Nominal Shear Strength

Nominal stress $v_n = V_n / (\phi b_w d)$

$$\max v_n \leq 2.1\sqrt{f'_c} \text{ for } \frac{L_n}{d} < 2$$

$$\max v_n = 0.18 \left(10 + \frac{L_n}{d} \right) \sqrt{f'_c} \text{ for } \frac{L_n}{d} \geq 2$$

$$2.1\sqrt{f'_c} \leq \max v_n \leq 2.7\sqrt{f'_c}$$