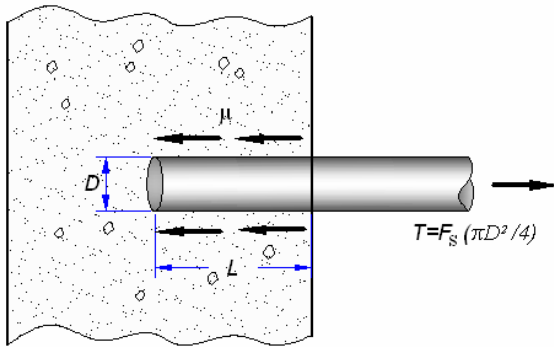


13

Reinforced Concrete Design

Bond, Anchorage, and

Development Length



- หน่วยแรงยึดเหนี่ยวในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- กำลังยึดเหนี่ยวโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน
- การฝังยึดโดยใช้เหล็กข้ออ้อย
- ความยาวฝังยึด (Development Lengths)
- ความยาวฝังยึดโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. และ ACI

Mongkol JIRAVACHARADET

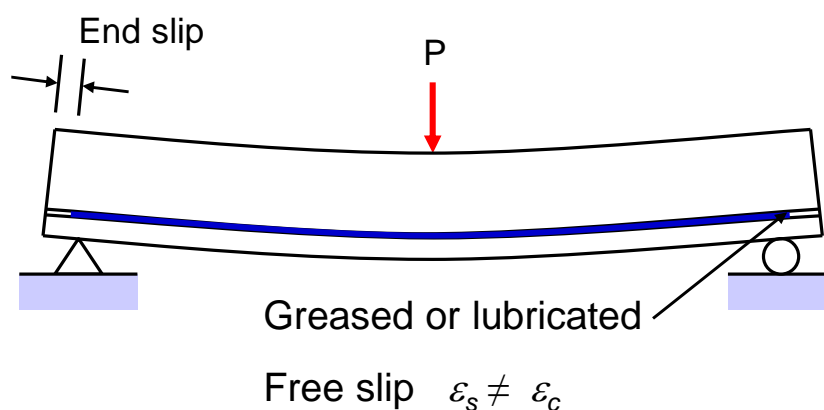
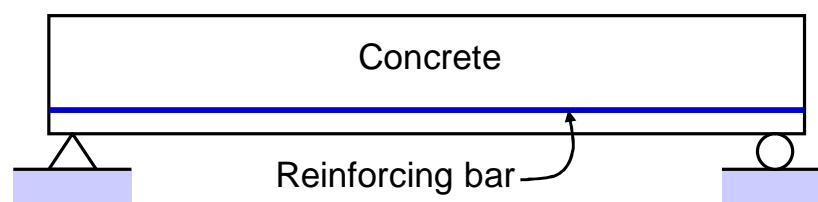
SURANAREE

INSTITUTE OF ENGINEERING

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

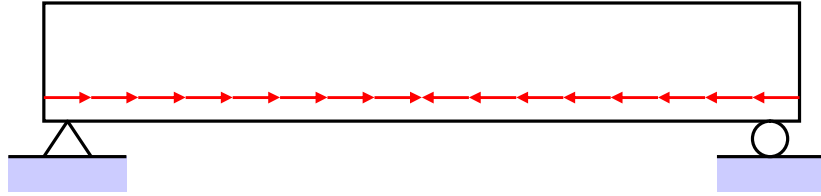
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

Bond Stresses in Beam



Bond Stresses in Beam

Bond forces acting on concrete

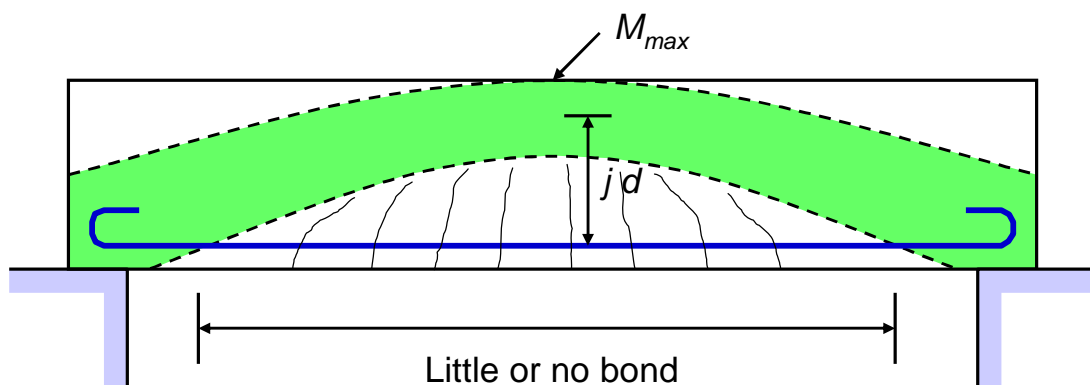


Bond forces acting on steel



Tied-arch action in a beam with little or no bond

Round bar reinforcing



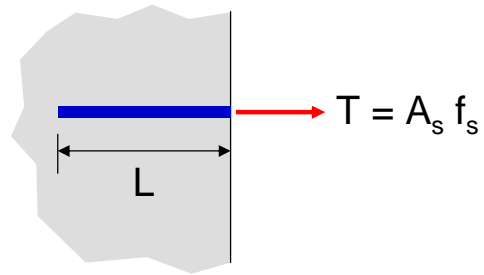
- ▶ เนื่องจากกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมผิวเรียบมีค่าน้อย การทำงานของจะช่วยให้เพิ่มการยึดรั้งที่ปลายคาน ทำให้เกิดการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมไปยังคอนกรีต
- ▶ คานจะมีพฤติกรรมเหมือน **Tied arch** โดยส่วนของโครงโค้งคอนกรีตรับแรงอัด และเหล็กเสริมรับแรงดึง

Anchorage Bond

WSD

แรงดึงในเหล็ก = $A_s f_s = \frac{\pi d^2}{4} f_s$

แรงยึดเหนี่ยว = $\pi d L u$



แรงยึดเหนี่ยว = แรงดึงในเหล็ก $\rightarrow \pi d L u = \frac{\pi d^2}{4} f_s$

ระยะฝังหรือระยะทาบของเหล็กเสริม

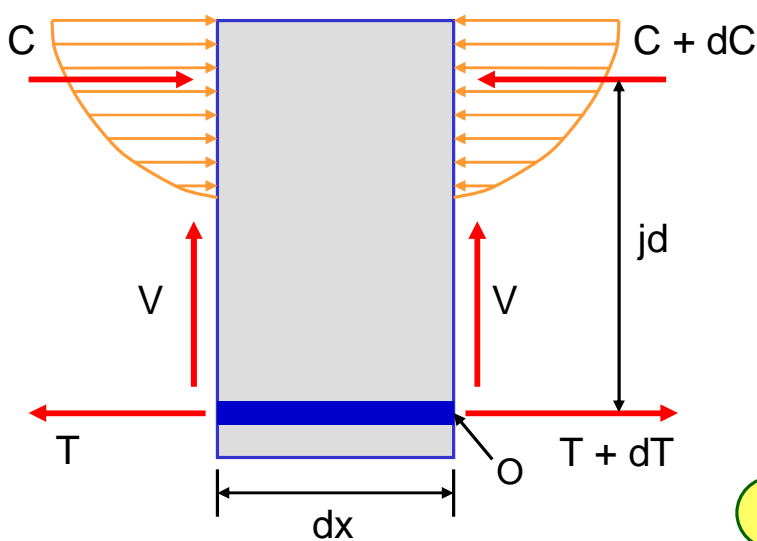
$$L = \frac{d f_s}{4u}$$

u = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของเหล็กเสริม (กก./ชม.²)

Flexural Bond

WSD

Bond Stress Based on Simple Cracked Analysis



$[\Sigma M_o = 0] \quad jd(dT) = V(dx)$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{V}{jd} \quad \text{--- 1}$$

$[\Sigma F_x = 0]$

$$u \Sigma_o dx = dT \quad \text{--- 2}$$



$$u = \frac{V}{\Sigma_o jd}$$

Elastic Cracked Section Equation

Σ_o = ผลรวมของเส้นรอบวงเหล็กเสริมตามยาว (ชม.)

ข้อสอบภย**ข้อที่ : 129**

เหล็กเสริม DB12 SD30 ฝังในเนื้อคอนกรีตลึก 50 cm กำหนดให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ 11 ksc เมื่อออกแบบการรับแรงดึงโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เหล็กเสริมจะรับแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ได้เท่าไร

$$T = \frac{\pi d^2}{4} f_s$$

$$= \frac{\pi \times 1.2^2}{4} \times 1,500$$

$$= 1,696 \text{ kg}$$

Control

$$T = \pi d L u$$

$$= \pi \times 1.2 \times 50 \times 11$$

$$= 2,073 \text{ kg}$$

ข้อสอบภย**ข้อที่ : 130**

จงหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดของจุดต่อระหว่างคานกับเสา เมื่อคานรับแรงเฉือนที่จุดต่อ $V=6555 \text{ kg}$ มีค่า $jd=39.735 \text{ cm}$ มีเหล็กเสริมที่พิจารณาในการคำนวณแรงยึดเหนี่ยวคือ 4 เส้น ขนาด RB15

$$u = \frac{V}{\sum_o jd} = \frac{6555}{4 \times \pi \times 1.5 \times 39.735}$$

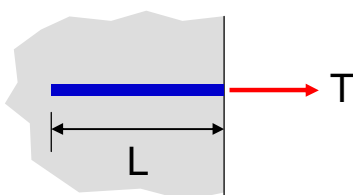
$$= 8.75 \text{ ksc}$$

วิธีหน่วยแรงใช้งาน ว.ส.ท. 1007-34**WSD**

- ▶ ในองค์อาคารรับแรงดัด ซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึงขนานกับผิวรับแรงอัด หน่วยแรงยึดเหนี่ยวอันเกิดจากแรงดัดที่หน้าตัดใดๆ ให้หาจาก

$$u = \frac{V}{\sum_o jd}$$

- ▶ เพื่อป้องกันการครูดของเหล็กเสริม หรือการปริแตกเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมรับแรงดึงที่หน้าตัดใดๆ จะต้องมีความยาวระยะฝัง L ที่เพียงพอ



$$u = \frac{T}{\sum_o L}$$

▶ หน่วยแรงยึดหมวกที่คำนวณได้ ต้องมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ต่อไปนี้

→ สำหรับเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึง:

$$\text{เหล็กบน} \quad \frac{2.29\sqrt{f'_c}}{D} \quad \text{หรือไม่เกิน} \quad \mathbf{25} \quad \text{กก./ชม.}^2$$

$$\text{เหล็กอื่นนอกจากเหล็กบน} \quad \frac{3.23\sqrt{f'_c}}{D} \quad \text{หรือไม่เกิน} \quad \mathbf{35} \quad \text{กก./ชม.}^2$$

→ สำหรับเหล็กข้ออ้อยรับแรงอัด $1.72\sqrt{f'_c}$ หรือไม่เกิน **28** กก./ชม.²

→ สำหรับเหล็กข้อกลมผิวเรียบให้ใช้กำลังครึ่งหนึ่งแต่ไม่เกิน **11** กก./ชม.²

→ เหล็กบนหมายถึงเหล็กเสริมแนวอนที่มีคอนกรีตอยู่ใต้เหล็กนั้นเกิน **30** ซม.

ข้อสอบภย

ข้อที่ : 27

ถ้าไม่ทำ "ของมาตรฐาน" ระยะที่ต้องฝังเหล็กกลมผิวเรียบ (RB 15 มม.) จากหน้าตัดวิกฤต (critical section) มีค่าประมาณเท่าใด กำหนดให้ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ $u = 11$ กก./ตร.ชม. (สูตรคำนวณ $L = d_b f_s / 4u$)

$$\text{RB15} \rightarrow d_b = 1.5 \text{ cm} \quad L = \frac{d_b f_s}{4u} = \frac{1.5 \times 1200}{4 \times 11} = \mathbf{40.9} \text{ ซม.}$$

ข้อสอบภย

ข้อที่ : 72

ถ้าระยะฝังยึดของเหล็กเสริมรับแรงดึง(ที่ไม่ใช่เหล็กบน) ถูกจำกัดให้ไม่เกินกว่า 80 ซม. จงใช้วิธี WSD หาขนาดโตสุดของเหล็กข้ออ้อย (SD30) ที่สามารถนำมาใช้ได้ กำหนด $f'_c = 150$ กก./ชม.²

$$u = \frac{3.23\sqrt{f'_c}}{d_b} = \frac{3.23\sqrt{150}}{d_b} = \frac{39.6}{d_b}$$

$$L = \frac{d_b f_s}{4u} \rightarrow d_b = \frac{4uL}{f_s} = \frac{4 \times 39.6 / d_b \times 80}{1500} = \mathbf{2.91 \text{ cm}}$$

เลือกเหล็ก **DB28** : $u = \frac{3.23\sqrt{150}}{2.8} = 14.13 \text{ ksc} < 35 \text{ ksc}$ OK

$$L = \frac{2.8 \times 1500}{4 \times 14.13} = 74.3 \text{ ซม.} < 80 \text{ ซม.}$$
 OK

ข้อสอบภย

ข้อที่ : 73



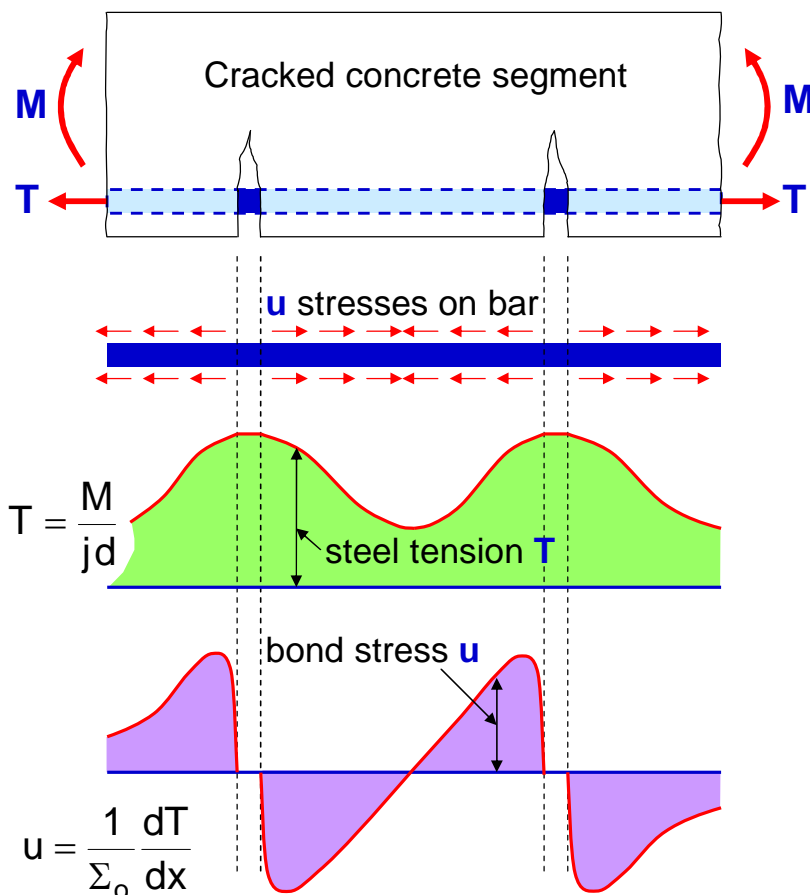
จงประมาณระยะฝังยึดจากหน้าตัดวิกฤตถึงตำแหน่งที่ต้องเริ่มงอเหล็กเสริมเพื่อทำเป็น สำหรับเหล็ก DB25 ($A_s = 4.91 \text{ ซม.}^2$) ที่รับแรงดึง ซึ่งวิธี WSD กำหนดว่า "ของมาตรฐาน" มีกำลังรับแรงดึงได้เท่ากับ 700 กก./ซม.^2 กำหนดให้ $f_c' = 200 \text{ กก./ซม.}^2$, $f_y = 3000 \text{ กก./ซม.}^2$ และหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ของ DB25 = 13 กก./ตร.ซม.

$$\text{แรงดึงทั้งหมด } A_s f_s = 4.91 \times 1500 = 7365 \text{ kg}$$

$$\text{แรงยึดเหนี่ยวที่ต้องการ} = 7365 - 700 \times 4.91 = 3928 \text{ kg}$$

$$\text{ระยะฝังยึด} : \pi \times 2.5 \times 13 \times L = 3928 \rightarrow L = 38.5 \text{ cm}$$

Steel Force and Bond Stress



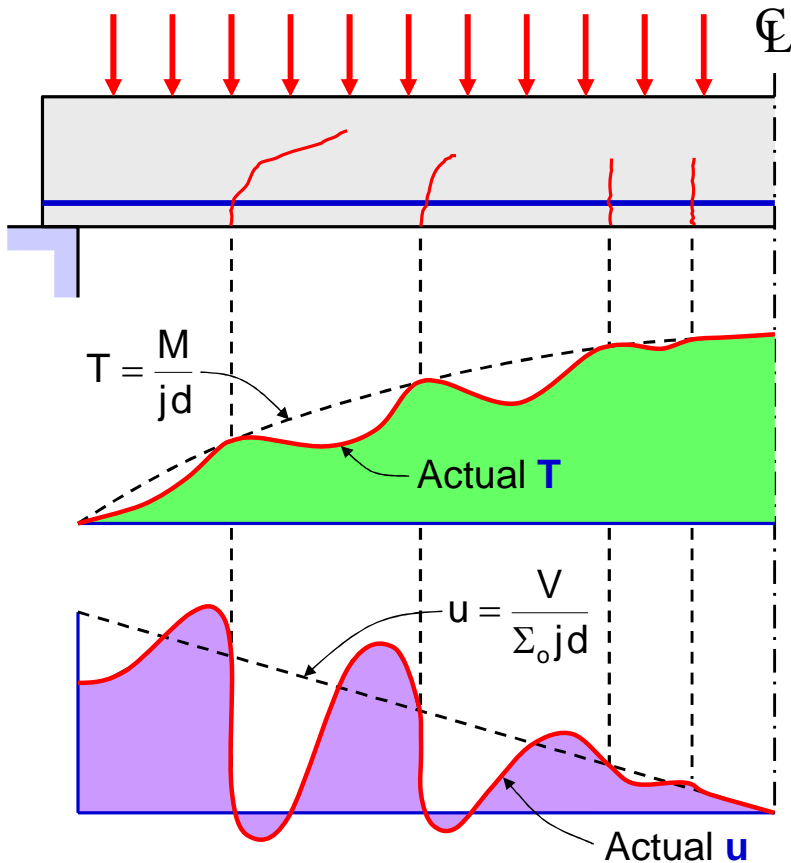
คานคอนกรีตภายใต้การตัดจะเกิดรอยร้าวขึ้นซึ่งเหล็กจะไม่ติดกับคอนกรีต

จึงไม่มีหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่รอยร้าว $u = 0$

แรงดึง T ในเหล็กเสริมมีค่ามากที่สุดที่รอยร้าว

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวจึงไม่ต่อเนื่องบริเวณรอยร้าว

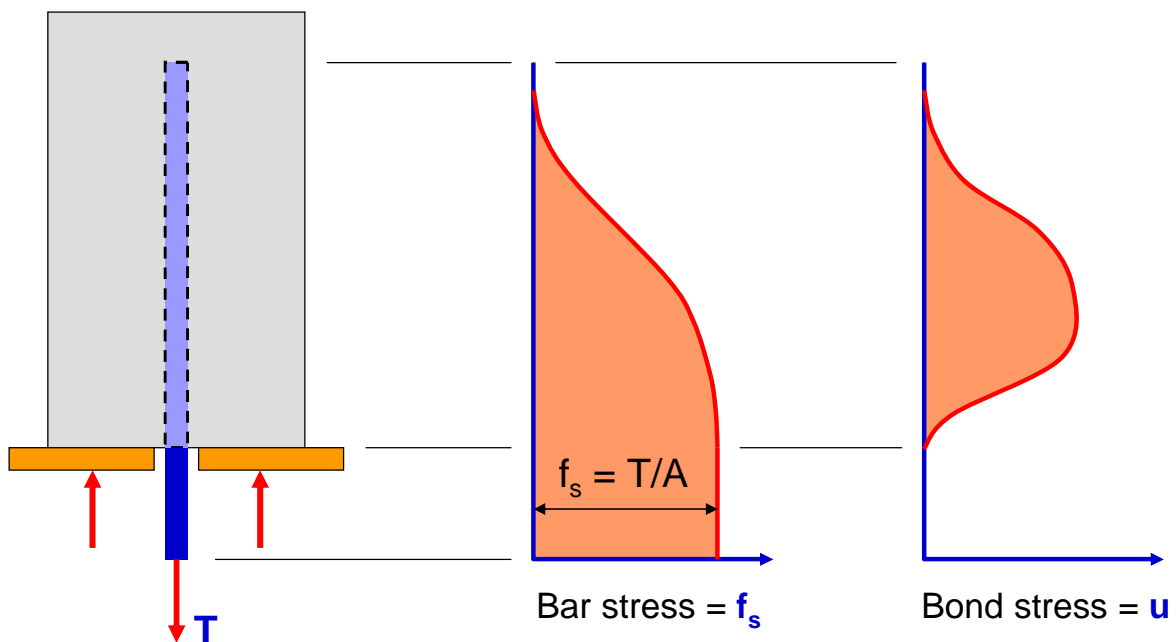
Actual Distribution of Flexural Bond Stress



ดังนั้นในความเป็นจริงแล้ว
หน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีค่าไม่
แน่นอนเนื่องจากมีรอยร้าว
ตามช่วงความยาวคาน

Bond Stress in a Pull-out Test

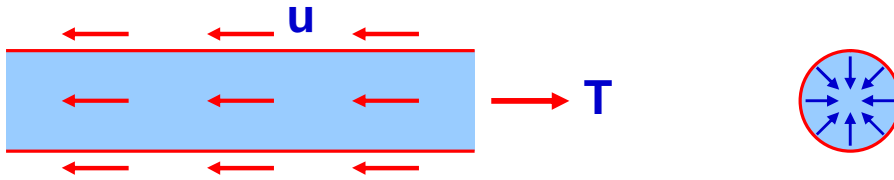
วิธีการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเส้นและคอนกรีต ใช้อย่างแพร่หลายก่อน
ปี 1950 หลังจากนั้นจะใช้การทดสอบคานแทน



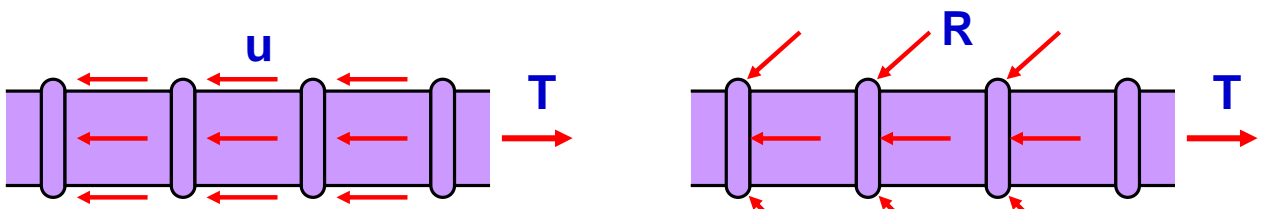
จากการทดสอบจะพบว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีค่าไม่คงที่ตลอดความยาวเหล็กเส้น

การฝังก่อโดยใช้เหล็กข้ออ้อย

เหล็กกลมผิวเรียบยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตโดยการยึดเกาะทางเคมีและแรงเสียดทาน ซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเหล็กเส้นถูกดึงให้ยืด เหล็กเส้นจะมีขนาดลดลง



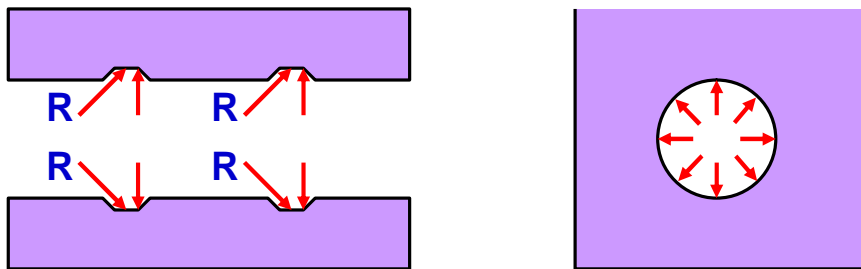
ในกรณีของเหล็กข้ออ้อย นอกจากการยึดเกาะทางเคมีและแรงเสียดทานแล้ว ข้ออ้อยจะทำให้เกิดการฝังก่อเชิงกลโดยมีแรงปฏิกิริยากระทำต่อคอนกรีต



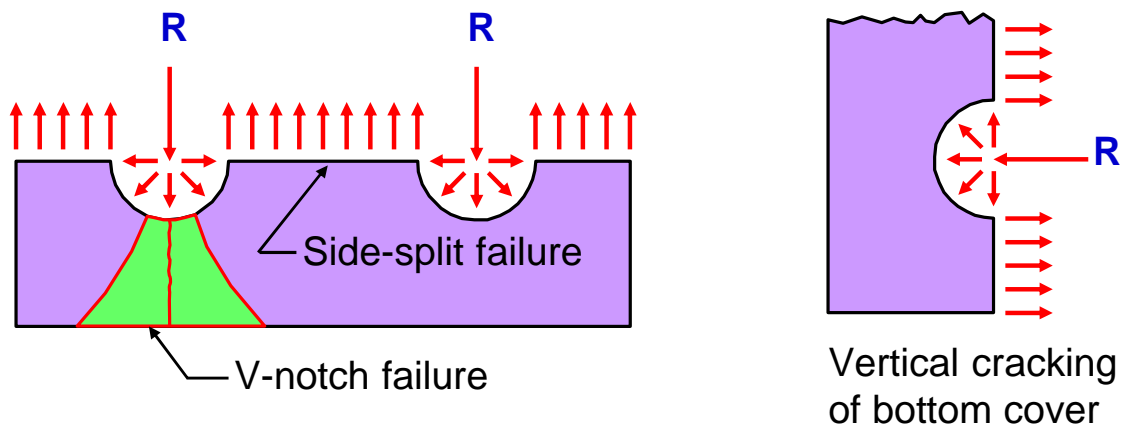
แรงยึดเกาะทางเคมีและแรงเสียดทานระหว่างเหล็กและคอนกรีต

การฝังก่อเชิงกลที่ข้ออ้อย

แรงจากการฝังก่อในคอนกรีต

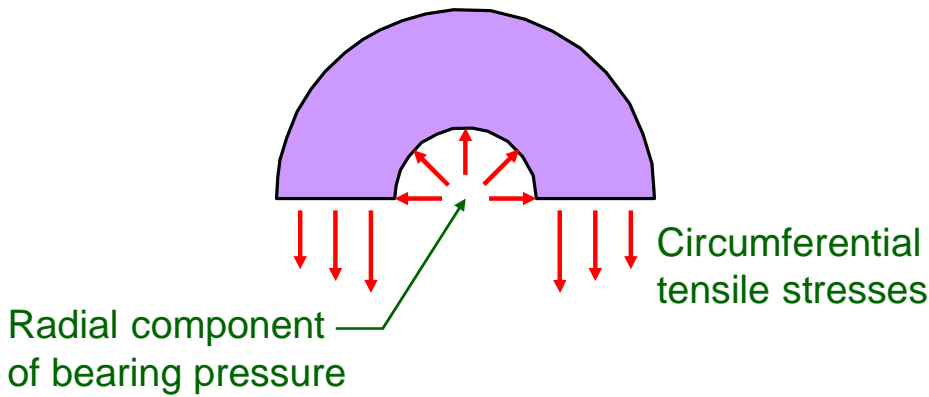


ผลของการฝังก่อทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาในคอนกรีต

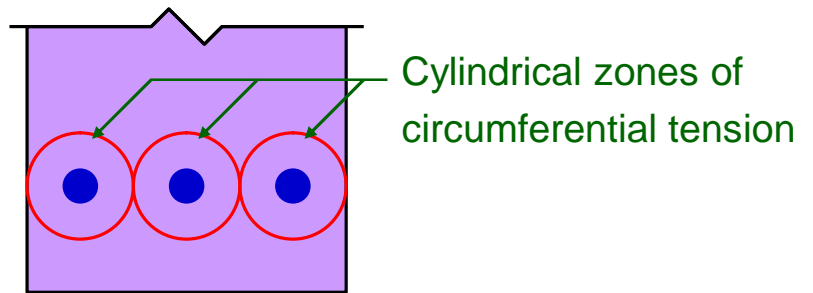


การกระจายหน่วยแรงจากการฝึงยึดในคอนกรีต

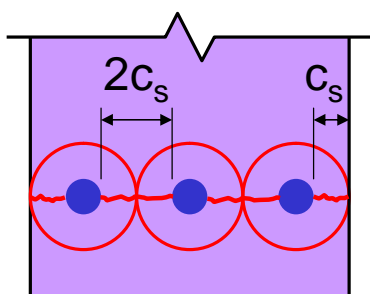
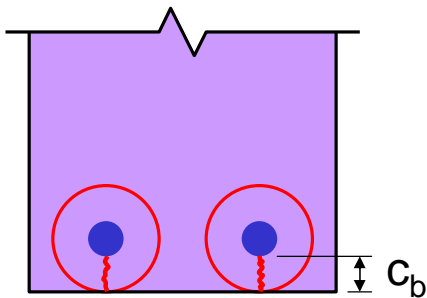
องค์ประกอบของแรงในทิศทางรัศมีจากเหล็กเส้นทำให้เกิดหน่วยแรงดึงกระจายออกไปยังคอนกรีตโดยรอบ



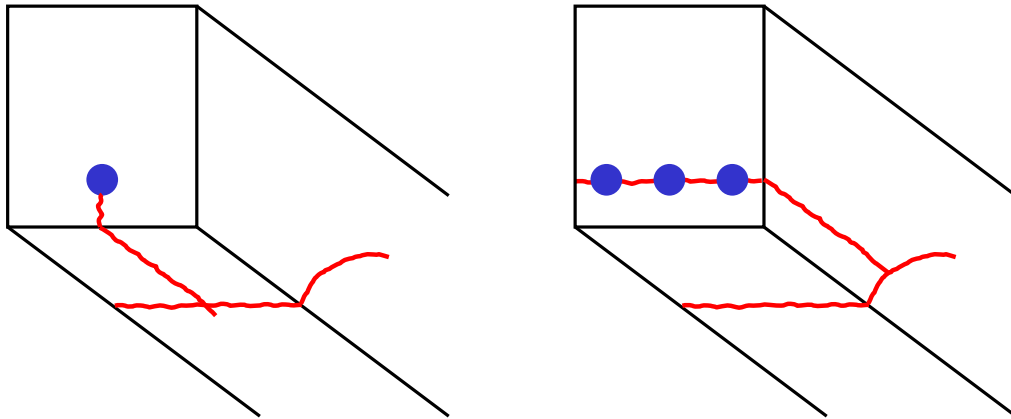
หน่วยแรงจะลดลงตามระยะทาง
ดังนั้นจึงต้องมีระยะห่างระหว่าง
เหล็กเส้นและระยะขอบที่เพียงพอ



Minimum Bar Covering and Spacing



Splitting of concrete along reinforcement



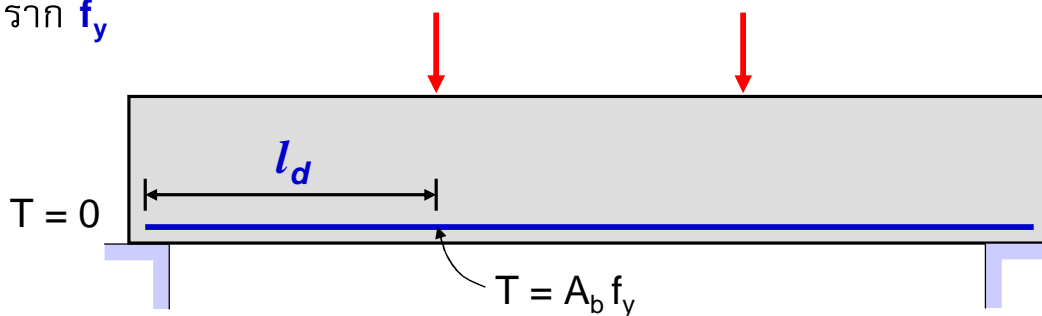
ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกร้าวแบบ splitting

- ▶ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมหรือระยะหุ้มคอนกรีต ถ้ามีไม่เพียงพออาจเกิดการแตกร้าว
- ▶ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต
- ▶ แรงจากการฝึงยึดถ้ามีมากอาจทำให้เกิดการแตกร้าว

ความยาวฝึงยึด (Development Length)

เนื่องจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีค่าไม่แน่นอนตามความยาวเหล็กเสริม มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ในปัจจุบันจึงเปลี่ยนมาใช้แนวคิดของ**ความยาวฝึงยึด**แทน

ความยาวฝึงยึด l_d คือความยาวสั้นที่สุดที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงกำลังคราก f_y



ปัจจัยที่มีผลต่อความยาวฝึงยึด l_d

- ▶ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต
- ▶ ระยะหุ้มและระยะห่างเหล็กเสริม
- ▶ เหล็กปลอก

ความยาวฝังยึดของเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึง

- ▶ ความยาวฝังยึด $l_d =$ ความยาวฝังยึดพื้นฐาน $l_{db} \times$ ตัวคูณปรับค่า
- ▶ ความยาวฝังยึดพื้นฐาน $l_{db} = \frac{0.06 A_b f_y}{\sqrt{f'_c}}$ สำหรับเหล็กขนาดไม่เกิน **36** ม.ม.
- ▶ ตัวคูณปรับค่าจะขึ้นกับระยะหุ้ม ระยะห่างเหล็กเสริม และเหล็กเสริมทางขวาง

ความยาวฝังยึดของเหล็กข้ออ้อยรับแรงอัด

- ▶ ความยาวฝังยึดพื้นฐาน $l_{db} = \frac{0.075 d_b f_y}{\sqrt{f'_c}}$ แต่ต้องไม่น้อยกว่า $0.0043 d_b f_y$

ว.ส.ท. 1008-38 = ACI 1989

ใช้งานยุ่งยากดังนั้นตั้งแต่ **ACI 1995** จึงมีการเปลี่ยนแปลงใหม่

ความยาวฝังยึดของเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึง

- ▶ ความยาวฝังยึด $l_d = \frac{0.28 f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} d_b$ แต่ต้องไม่น้อยกว่า **30** ซม.

โดยที่เทอมเกี่ยวกับการโอบรัด $(c_b + K_{tr})/d_b$ จะใช้ได้ไม่เกิน **2.5** และ $K_{tr} = \frac{40 A_{tr}}{sn}$

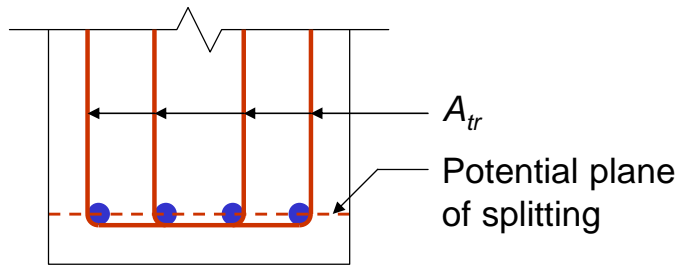
เมื่อ **n** คือจำนวนเส้นของเหล็กเสริมในการฝังยึดตามระนาบการแตกร้า

อาจใช้ค่า $K_{tr} = 0$ สำหรับการออกแบบอย่างง่ายแม้ว่าจะมีเหล็กเสริมทางขวาง

$A_{tr} =$ พื้นที่เหล็กเสริมทางขวางทั้งหมดภายในระยะ **s**

s = ระยะห่างเหล็กเสริมทางขวางมากที่สุดภายในความยาว l_d

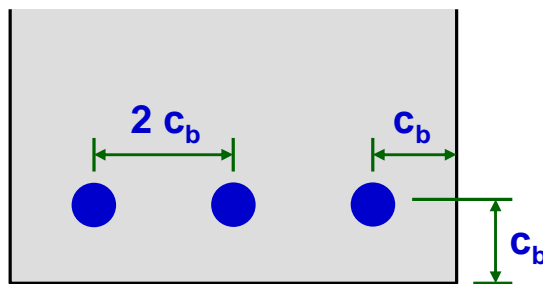
Definition of A_{tr}



c_b คือค่าที่น้อยกว่าระหว่าง

(ก) ระยะจากศูนย์กลางเหล็กเสริมถึงผิวคอนกรีตที่ใกล้ที่สุด

(ข) ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม



▶ ตัวคูณปรับค่าสำหรับความยาวฝังยึดของเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึง :

ψ_t ตำแหน่งเหล็กเสริม

เหล็กเสริมบน เป็นเหล็กเสริมในแนวนอน มีคอนกรีตอยู่เบื้องล่างมากกว่า 30 ซม.

$\psi_t = 1.3$

เหล็กเสริมตำแหน่งอื่น

$\psi_t = 1.0$

ψ_e เหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซี

เหล็กเสริมมีระยะหุ้มน้อยกว่า $3 d_b$ หรือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเส้นน้อยกว่า $6 d_b$

$\psi_e = 1.5$

เหล็กเสริมเคลือบอีพ็อกซีกรณีอื่นทั้งหมด

$\psi_e = 1.2$

เหล็กเสริมไม่เคลือบอีพ็อกซี

$\psi_e = 1.0$

อย่างไรก็ตามผลคูณของ $\psi_t \psi_e$ จะต้องไม่เกิน 1.7

ψ_s ขนาดเหล็กเสริม

เหล็กเส้นขนาด 20 มม. และเล็กกว่า

$\psi_s = 0.8$

เหล็กเส้นขนาด 25 มม. และใหญ่กว่า

$\psi_s = 1.0$

▶ ตัวคูณปรับค่าสำหรับเหล็กเสริมเกิน : $(A_s \text{ required}) / (A_s \text{ provided})$

อาจลดความยาวฝังยึดได้เมื่อเหล็กเสริมในองค์อาคารรับแรงดัดมีเกินกว่าที่
ต้องการจากการวิเคราะห์ ยกเว้นกรณีที่มีการยึดปลาย หรือการฝังยึดสำหรับ
 f_y ตามที่ต้องการโดยเฉพาะ หรือเหล็กเสริมที่ถูกลอกแบบภายใต้ข้อกำหนด
ของเรื่องแผ่นดินไหว

สูตรคำนวณความยาวฝังยึดอย่างง่าย

แทนการใช้สูตรอย่างละเอียด ในทางปฏิบัติอาจใช้สูตรอย่างง่ายในการคำนวณความ
ยาวฝังยึด โดยกำหนดให้ $(c_b + K_{tr}) / d_b = 1.5$

	DB20 and smaller	DB25 and larger
<p>Case A: (1) covering = d_b clear c-c = d_b min. stirrup (2) covering = d_b clear c-c = $2d_b$</p>	$\left(\frac{0.15 f_y \psi_t \psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b$ <p style="text-align: center;">(A - 1)</p>	$\left(\frac{0.19 f_y \psi_t \psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b$ <p style="text-align: center;">(A - 2)</p>
<p>Case B: others</p>	$\left(\frac{0.23 f_y \psi_t \psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b$ <p style="text-align: center;">(B - 1)</p>	$\left(\frac{0.28 f_y \psi_t \psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b$ <p style="text-align: center;">(B - 2)</p>

ตารางความยาวฝังยึด

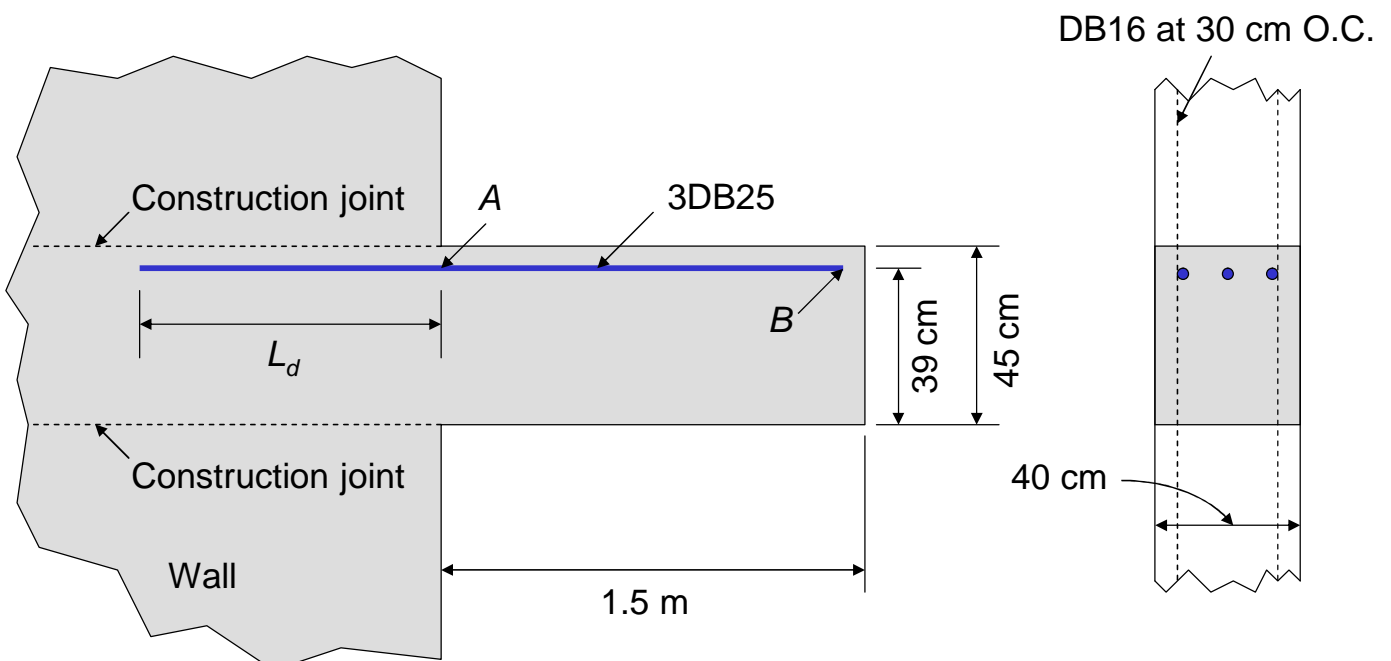
SDM

สำหรับ $f'_c = 240$ กก./ชม.² และ $f_y = 4,000$ กก./ชม.²

เหล็กเส้น	ความยาวฝังยึด (ชม.)	
	Case A	Case B
DB10	38.7	49.1
DB12	46.5	58.9
DB16	62.0	78.5
DB20	77.5	98.1
DB25	123	181
DB28	137	202
DB32	157	231
DB36	177	260
DB40	196	289

ตัวอย่าง การคำนวณความยาวฝังยึดของเหล็กเสริมตรงรับแรงดึง

คานยื่นออกจากผนังคอนกรีตเสริมเหล็กบน 3DB25 กำหนดระยะฝังยึดน้อยที่สุดของเหล็กเสริมในคาน กำหนด $f'_c = 240$ กก./ชม.² และ $f_y = 4,000$ กก./ชม.²



วิธีทำ ลองทำทั้งสองวิธีคือ ใช้สูตรอย่างง่าย และสูตรอย่างละเอียด ตามมาตรฐาน ACI

1. คำนวณระยะห่างและการโอบรัดโดยเหล็กปลอก

ในกรณีนี้ไม่มีเหล็กปลอก แต่มีเหล็ก DB16 ในแนวตั้งภายในผนังทั้งสองข้าง

$$\text{ระยะหุ้มด้านข้าง} = 4 + 1.6 = 5.6 \text{ ซม. (2.24d}_b\text{)}$$

$$\text{ระยะห่างเหล็กเส้น} = (40 - 2(4+1.6) - 3 \times 2.5) / 2 = 10.65 \text{ ซม. (4.26d}_b\text{)}$$

เนื่องจากระยะหุ้มมากกว่า d_b และระยะห่างเหล็กเส้นมากกว่า $2d_b$ และเหล็กเส้น DB25 ดังนั้นเป็นกรณี (A-2)

2. คำนวณความยาวฝังยึด

$$l_d = \frac{0.19f_y \psi_t \psi_e}{\sqrt{f'_c}} d_b = \frac{0.19 \times 4,000 \times 1.3 \times 1.0}{\sqrt{240}} \times 2.5 = 159.4 \text{ cm}$$

เหล็กบน

ดังนั้นใช้ความยาวฝังยึดเข้าไปในผนัง **1.60 เมตร**

หรือจากตาราง = 123×1.3
= 159.9 cm

3. คำนวณความยาวฝังยึดโดยใช้สูตรอย่างละเอียด $l_d = \frac{0.28f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}\right)} d_b$

c_b คือค่าที่น้อยกว่าระหว่าง

(ก) ระยะจากศูนย์กลางเหล็กเสริมถึงผิวคอนกรีตที่ใกล้ที่สุด

$$\text{ระยะหุ้มด้านข้าง} = 4 + 1.6 + 2.5/2 = 6.85 \text{ ซม.}$$

(ข) ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม

$$= 0.5 \left(\frac{40 - 2 \times 6.85}{2} \right) = 6.58 \text{ ซม.}$$

$c_b = 6.58$ ซม.

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn}$$

เมื่อ s คือระยะห่างเหล็กเสริมทางขวางในระยะฝังยึด = **30 ซม.**

$$= \frac{40 \times 4.02}{30 \times 3}$$

A_{tr} คือพื้นที่เหล็กปลอกในระนาบตัดกว้าง

$$= \text{DB16 ทั้งสองข้าง} = 2 \times 2.01 = 4.02 \text{ ซม.}^2$$

$$= 1.79 \text{ ซม.}$$

n = จำนวนเหล็กเส้นที่ฝังยึด = **3**

$$\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} = \frac{6.58 + 1.79}{2.5} = 3.35 > 2.5$$

USE 2.5

$$l_d = \frac{0.28 f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} d_b = \frac{0.28 \times 4,000 \times 1.3}{\sqrt{240} \times 2.5} \times 2.5 = 94.0 \text{ cm.}$$

USE 95 cm

