

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

THAI INDUSTRIAL STANDARD

มอก. 2973-2562

คู่มือการออกแบบและก่อสร้าง GFRP

พอลิเมอร์เสริมเส้นใย

สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง

FIBRE-REINFORCED POLYMERS FOR NON-PRESTRESSED CONCRETE
STRUCTURES

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

ICS 91.100

ISBN 978-616-475-268-9

รศ.ดร. สมิตร ส่งพิริยะกิจ

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

11 กพ 2569 สภาวิศวกร



AGENDA

Materials & Specification

Flexural Member Design

Long-term Behavior and Serviceability

Examples (not added here)

Introduction

วัสดุคอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยฝังอยู่ในเรซินพอลิเมอร์ หรือที่รู้จักกันในชื่อของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเสริมแรงทดแทนเหล็ก ในโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้น **ไม่ผุกร่อน**จากปัญหาแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้แท่ง FRP ยังมีคุณสมบัติอีกมากมาย เช่นสามารถรับแรงดึงได้สูงซึ่งทำให้เหมาะแก่ การใช้เสริมแรงในโครงสร้างคอนกรีต

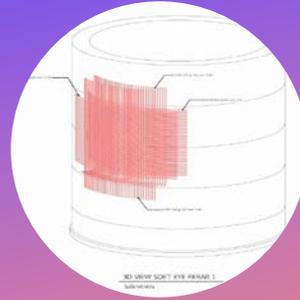


Different Behaviors

พฤติกรรมทางกลของแท่ง FRP แตกต่างจากพฤติกรรมของเหล็กเสริม หลักการออกแบบแบบเดิมของโครงสร้างคอนกรีต ไม่สามารถใช้ได้ ต้องปรับปรุงให้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่แตกต่างกัน

แท่ง FRP สามารถรับแรงดึงได้สูงในทิศทางของเส้นใยเสริมแรงเท่านั้น ส่งผลต่อแรงเฉือนและพฤติกรรม dowel รวมถึงประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยว

นอกจากนี้แท่ง FRP ยังไม่มีจุดคราก ดังนั้นการออกแบบต้องคำนึงถึงความ “ไม่เหนียว” ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมด้วยแท่ง FRP



Key Behaviors of GFRP

- กำลังดึงสูงมาก
- ไม่เป็นสนิม
- เบา
- นำความร้อนน้อย
- ห้ามใช้รับแรงอัด
- Elastic Modulus ต่ำกว่าเหล็ก 5 เท่า
- เป็นวัสดุเปราะ ไม่มีจุดคราก
- ทนความร้อนได้น้อยกว่าเหล็กมาก $T_g = 120^{\circ}\text{C}$

Thermal Expansion

การขยายตัวทางขวางของ GFRP มีค่ามากกว่าคอนกรีต 2 – 3 เท่า ⁶

ในการออกแบบจึงควรระวัง การแตกร้าวเนื่องจากการขยายตัวด้านข้างของ GFRP

+

ทิศทาง	เหล็ก	GFRP	CFRP	AFRP	คอนกรีต
ตามยาว	11.7	6.0-10.0	-9.0-0.0	-6.0-2.0	7.2-10.8
ตามขวาง	11.7	21.0-23.0	74.0-104.0	60.0-80.0	7.2-10.8

Tensile Behaviors

	เหล็ก	GFRP	CFRP	AFRP
กำลังครากระบุ (MPa)	300-500	-	-	-
กำลังประลัยระบุ (MPa)	480-1600	480-690	600-3690	1720-2540
มอดุลัสยืดหยุ่น (GPa)	200	30-50	120-580	40-125
ความเครียดที่จุดคราก (%)	0.14-0.24	-	-	-
ความเครียดที่จุดวิบัติ (%)	13.0-17.0	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4

Strength VS Diameter

ประเภทเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นที่มีหน้าตัดระบกลมหรือความกว้างของเส้นที่มีหน้าตัดระบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (mm)	พื้นที่หน้าตัดขวางระบ ¹ (mm ²)	ความต้านแรงดึงตามแนวยาวต่ำสุด ² (MPa)	การระบุรหัสชั้นคุณภาพ ³
แก้ว	4	12	750	G0-Eb-Dc
แทนด้วยสัญลักษณ์ G	5	19.6	750	
	6	32	750	
	8	50	750	
	9	63	750	
	10	71	750	
	12	113	700	
	13	129	650	
	15	199	650	
	20	284	600	
	22	387	550	
	25	510	550	
	30	645	500	
	32	819	450	
36	1006	450		

ประเภทเส้นใย	มอดูลัสยืดหยุ่นตามแนวยาวต่ำสุด ¹ (GPa)					
	ชั้นคุณภาพ I		ชั้นคุณภาพ II		ชั้นคุณภาพ III	
	เส้น	เส้นใบตะแกรง	เส้น	เส้นใบตะแกรง	เส้น	เส้นใบตะแกรง
A	50	40	70	60	90	80
C	80	70	110	100	140	130
G	40	30	50	40	60	50

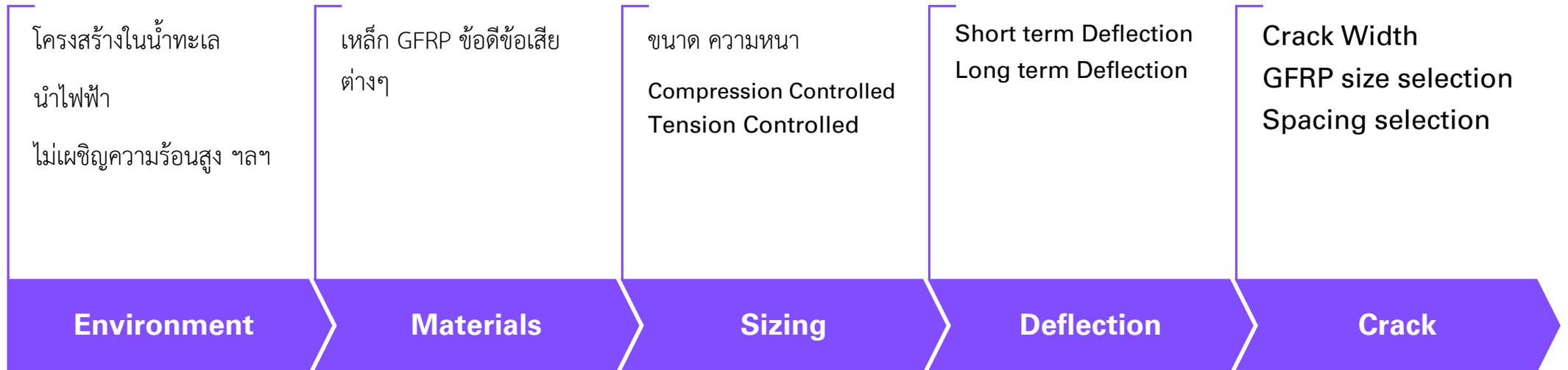
Elastic Modulus and Class



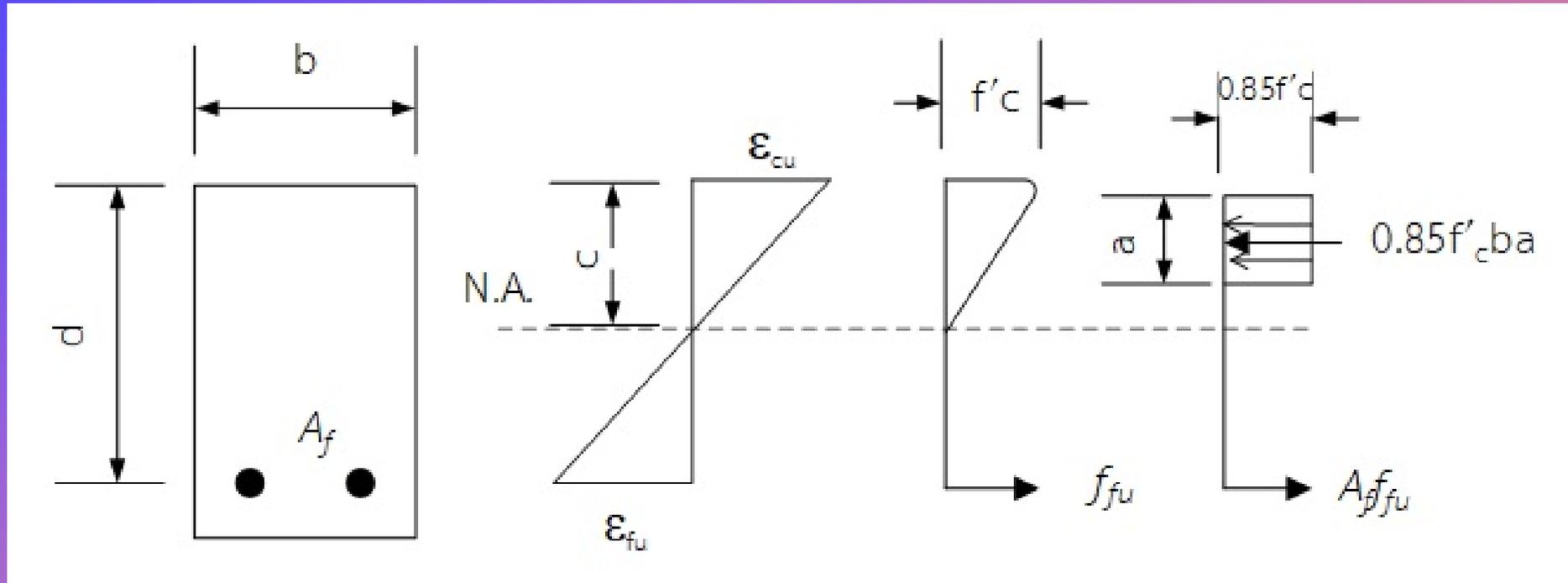
DESIGN CRITERIA



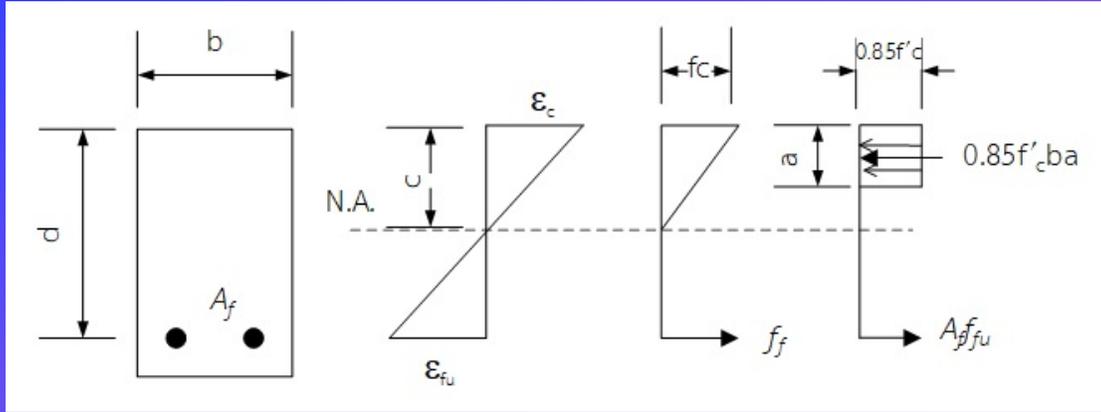
Design Step



FLEXURAL MEMBER

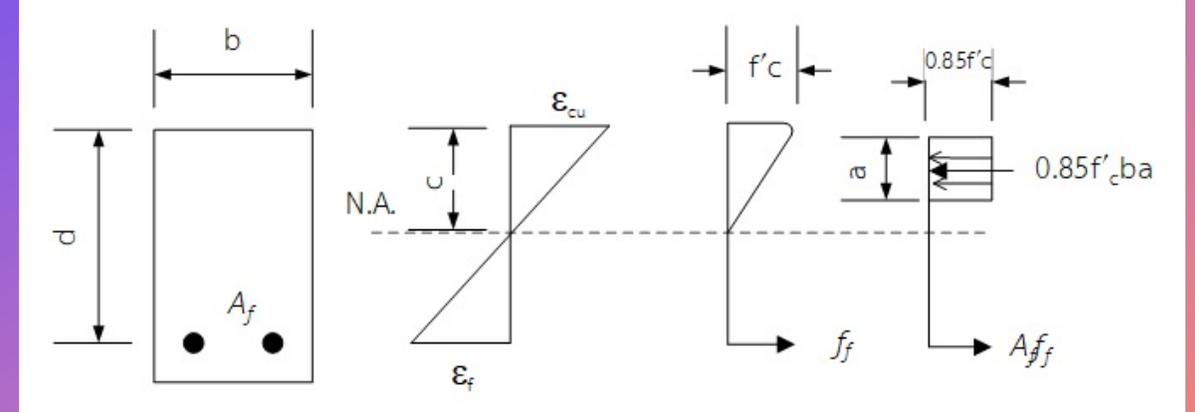


Balanced Strain Condition



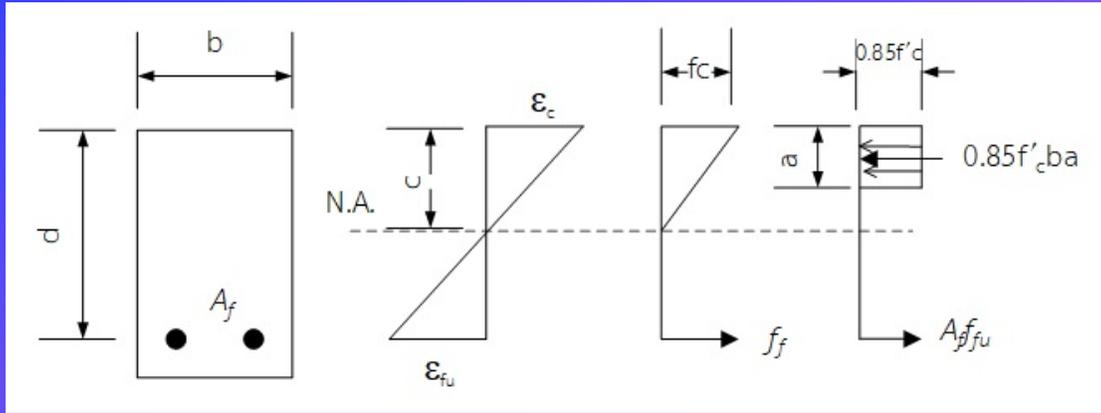
Under Reinforcement

- GFRP reaches ultimate strength
- Concrete strain is still under 0.003
- The member is brittle



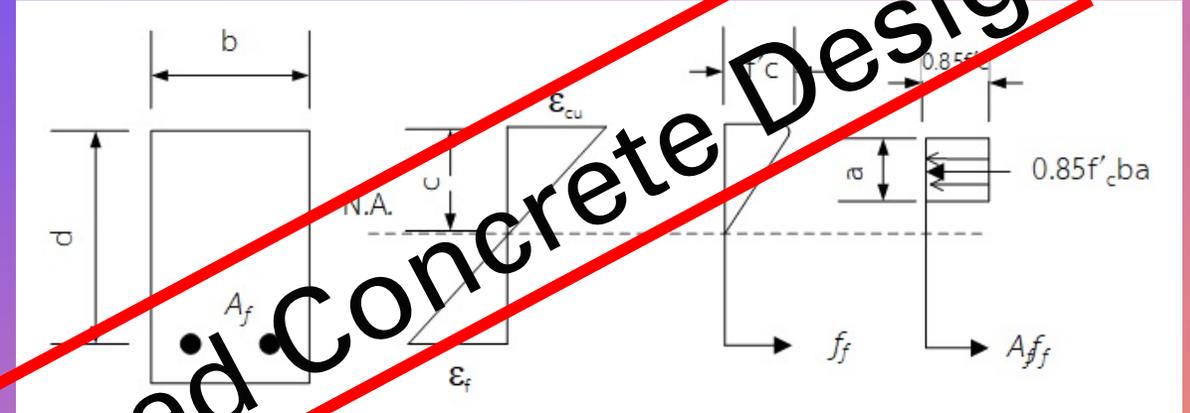
Over Reinforcement

- GFRP does not reach ultimate strength
- Concrete strain reaches 0.003
- The member is much better ductile



Under Reinforcement

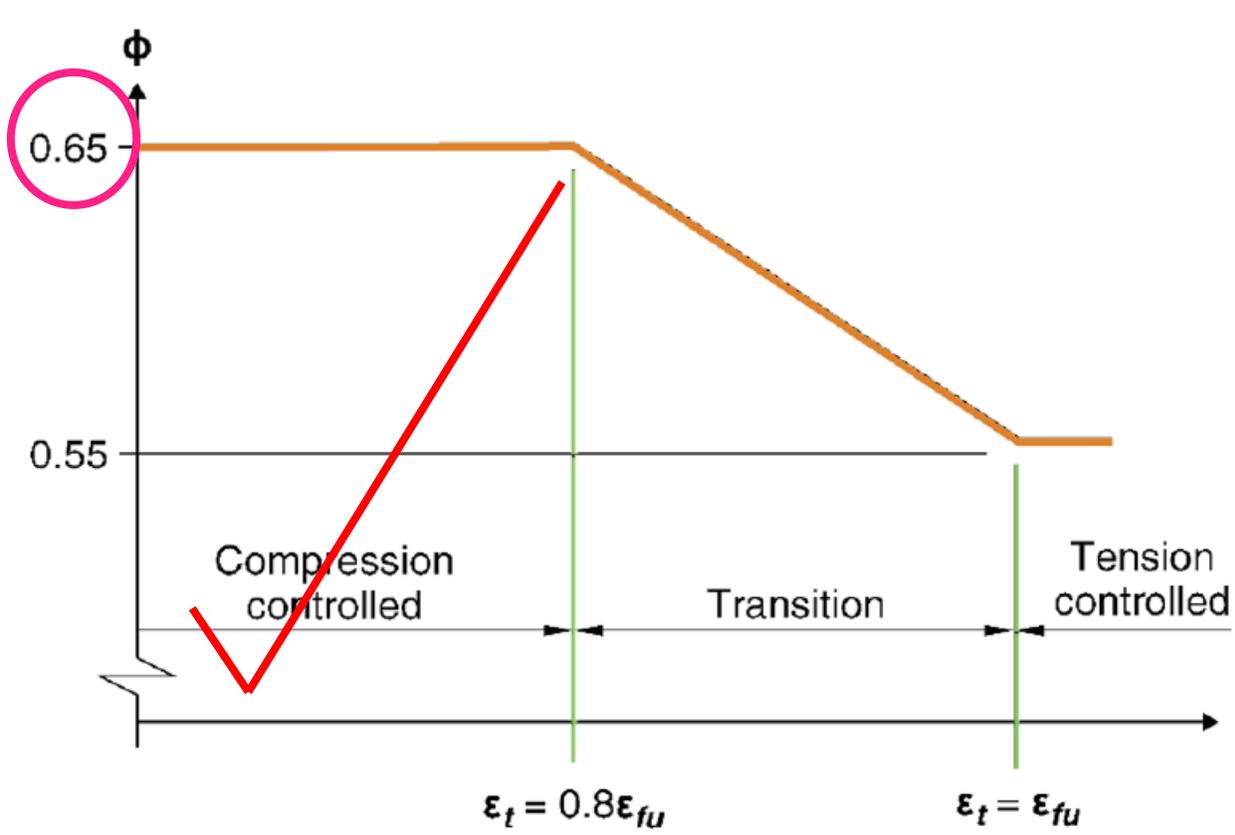
- GFRP reaches ultimate strength
- Concrete strain is still under 0.003
- The member is brittle



Over Reinforcement

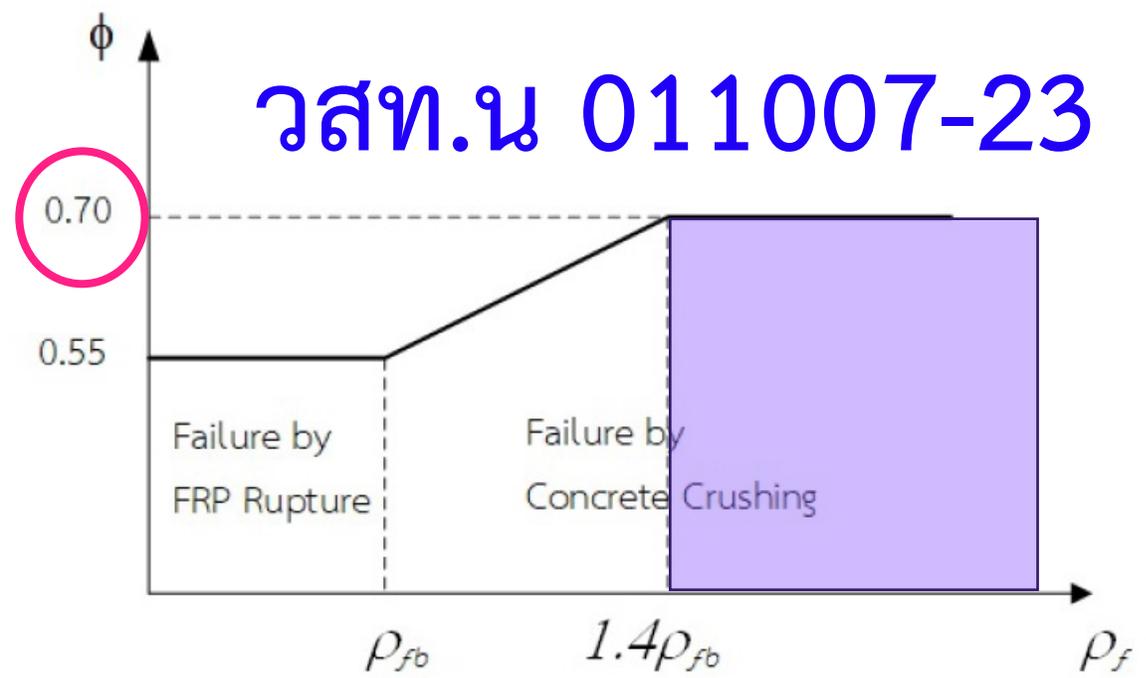
- GFRP does not reach ultimate strength
- Concrete strain reaches 0.003
- The member is much better ductile

ACI 318 - Steel Reinforced Concrete Design



15

วสท.น 011007-23



ACI440.1R

รูปที่ 8.3 - ตัวคูณลดกำลัง ϕ ในรูปฟังก์ชันของอัตราส่วนการเสริมแรง

Compression Controlled

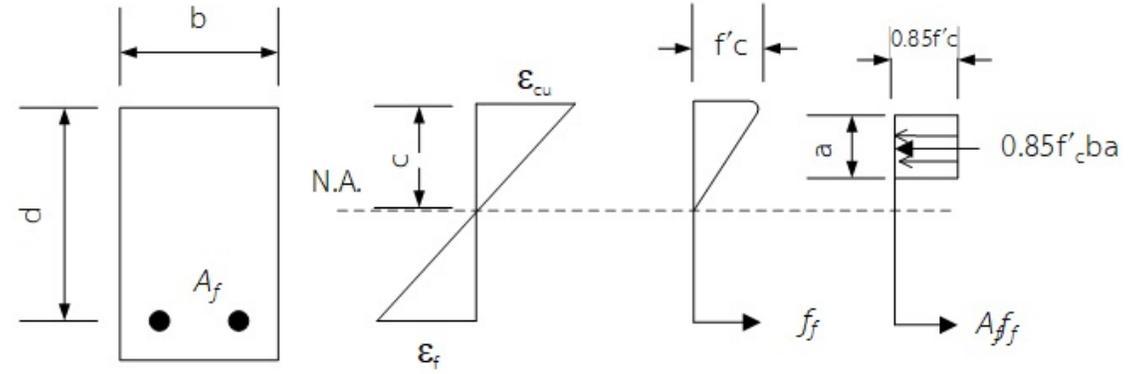
16

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (8-4\eta)$$

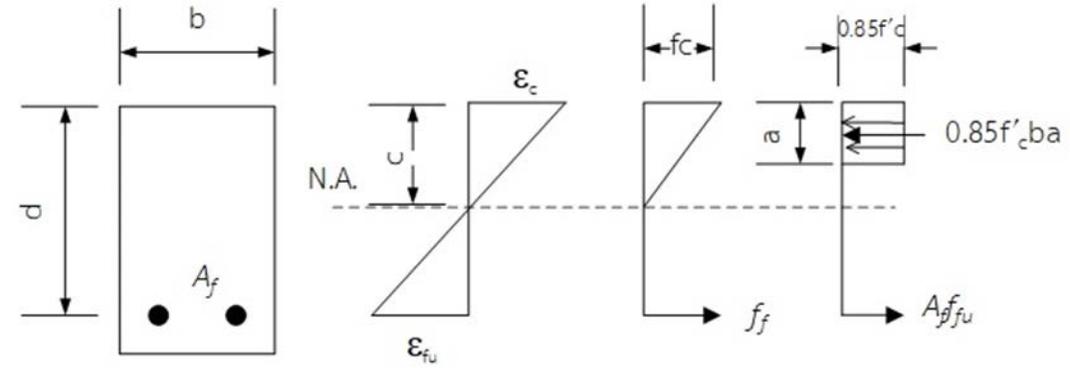
$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f'_c b} \quad (8-4\upsilon)$$

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad (8-4\varphi)$$

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu} \quad (8-4\chi)$$



Tension Controlled



เมื่อ $\rho_f < \rho_{fb}$ ขีดจำกัดการวิบัติของโครงสร้างรับแรงดัดจะเป็นแบบแท่ง FRP แตกร้าว การคำนวณหาความต้านทานการดัดสามารถหาได้โดยอาศัยแผนภาพที่ 8.2(ค)

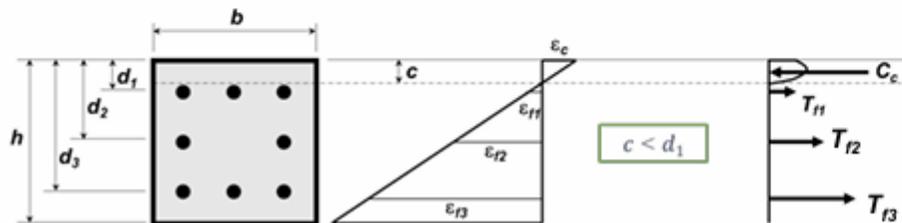
ความต้านทานการดัด ณ หน้าตัดใด สามารถคำนวณได้จากสมการ (8-6ก)

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (8-6ก)$$

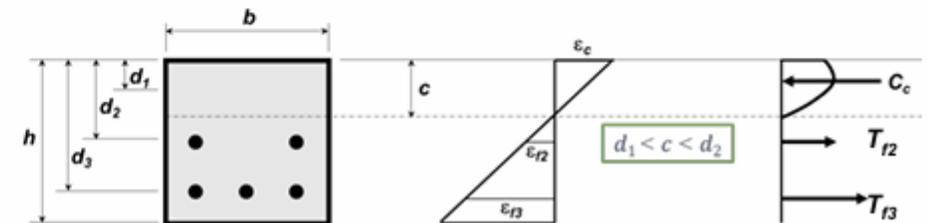
COLUMN COMPRESSION MEMBER

Column Design Philosophy

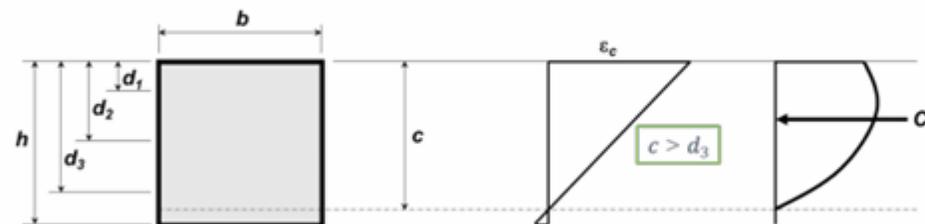
At lower axial loads, all bars are in tension



As axial loads increase, bars in compression “disappear” (treated as concrete)



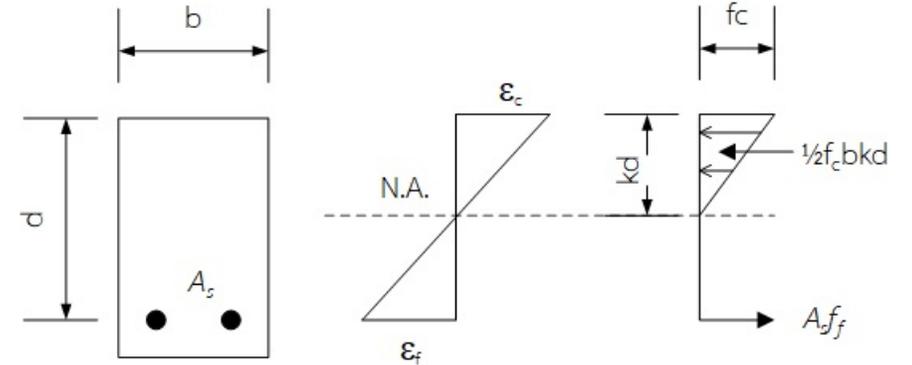
At higher axial loads, all bars “disappear” in compression



For $P_u > 0.1f'_c A_g$,
GFRP design tensile
strain in GFRP is
limited to 0.01

SHEAR

V_c Beam Shear



$$V_c = \left(\frac{2}{5} k \right) \sqrt{f'_c} b_w d$$

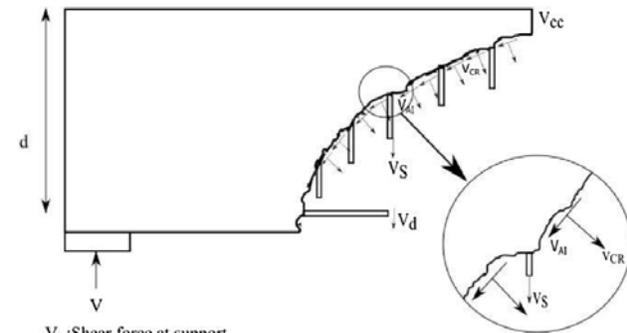
เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ $V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d$ ที่ วสท 1008 ใช้สำหรับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก

V_s

- $V_s = V_u - V_c$

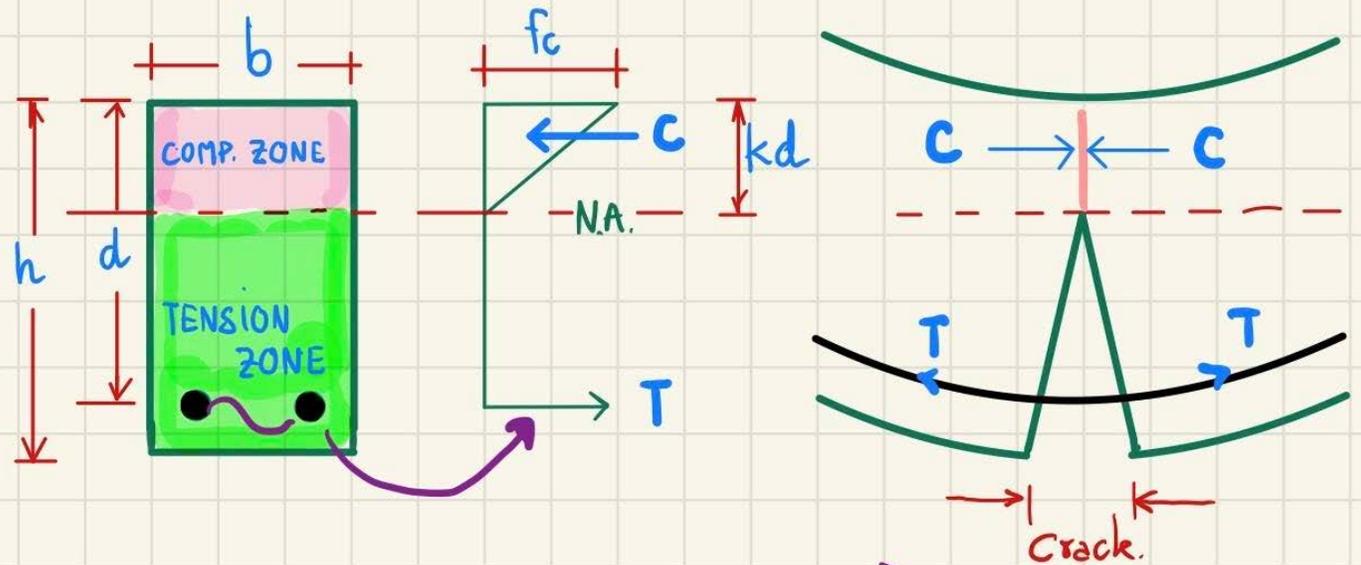
+ Punching Shear

- $V_c = \left(\frac{2}{5} k \right) \sqrt{f'_c} b_w d \times 2$



V : Shear force at support
 V_{AI} : Aggregate interlock
 V_{CR} : Residual tensile stress in concrete
 V_S : Shear force in shear zone
 V_{CC} : Shear force in compression zone
 V_d : Dowel action

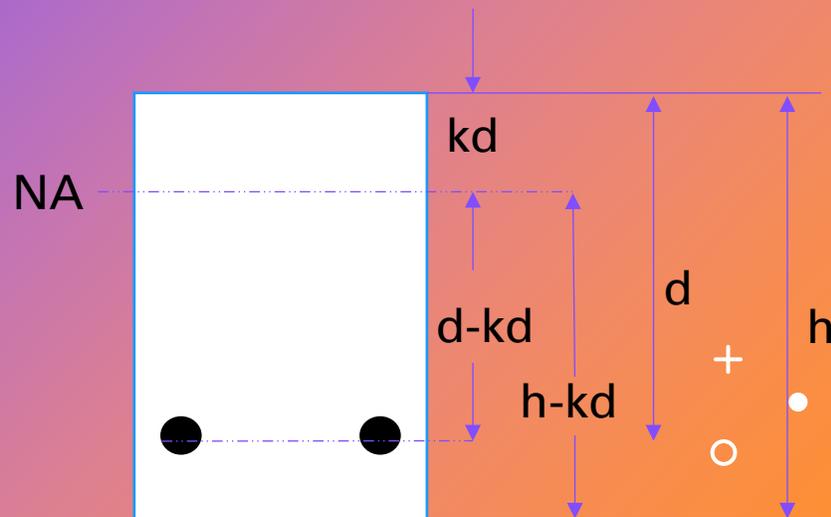
Lower Shear Strength of Concrete



คอนกรีตที่อยู่ใต้เส้น N.A. จะสูญเสีย aggregate interlocking ไป จึงสามารถรับแรงเฉือนได้น้อย และจะน้อยลงมากๆ เมื่อ crack กว้างขึ้น



CRACK



Spacing and Covering

$$S_{\max} = 1.15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2.5 c_c \leq 0.92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \quad (8-9a)$$

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2 f_{fs} \beta k_b} \quad (8-9b)$$

$$\beta = \frac{(h - kd)}{(d - kd)}$$

$$f_{f,s} = M_s \frac{n_f d (1 - k)}{I_{cr}}$$

DEFLECTION

$\lambda = 1$
normal concrete

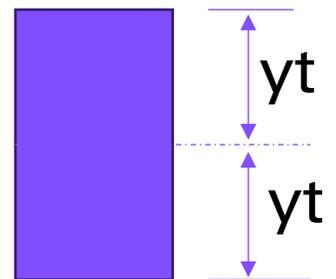
$$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL}l^2}{48E_c(I_e)_{DL+LL}}$$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g \quad \text{เมื่อ } M_a \leq M_{cr} \quad (8-13\text{ก})$$

$$\gamma = 1.72 - 0.72(M_{cr}/M_a) \quad (8-13\text{ข})$$

$$M_{cr} = \frac{0.6\lambda\sqrt{f'_c}I_g}{y_t} \quad (8-13\text{ค})$$

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0.6\xi(\Delta_i)_{sus}$$



DEVELOPMENT LENGTH

โดยทั่วไปเมื่อเสริมแรงด้วยแท่ง FRP ความยาวระยะฝังสำหรับ แท่ง FRP หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} \quad (11-6)$$

หรือ

$$l_d \leq \frac{\phi M_n}{V_u} + l_a \quad (11-7)$$

- เมื่อ
- M_n คือความต้านทานในการรับโมเมนต์ที่คำนวณได้จากทฤษฎี
 - f_{fr} คือความเค้นที่เกิดขึ้นในแท่ง FRP หาได้จากสมการที่ 8.4ง
 - l_a คือค่าที่มากกว่าระหว่าง ความลึกของคานหรือ 12 เท่าของ d_b

TEMPERATURE STEEL

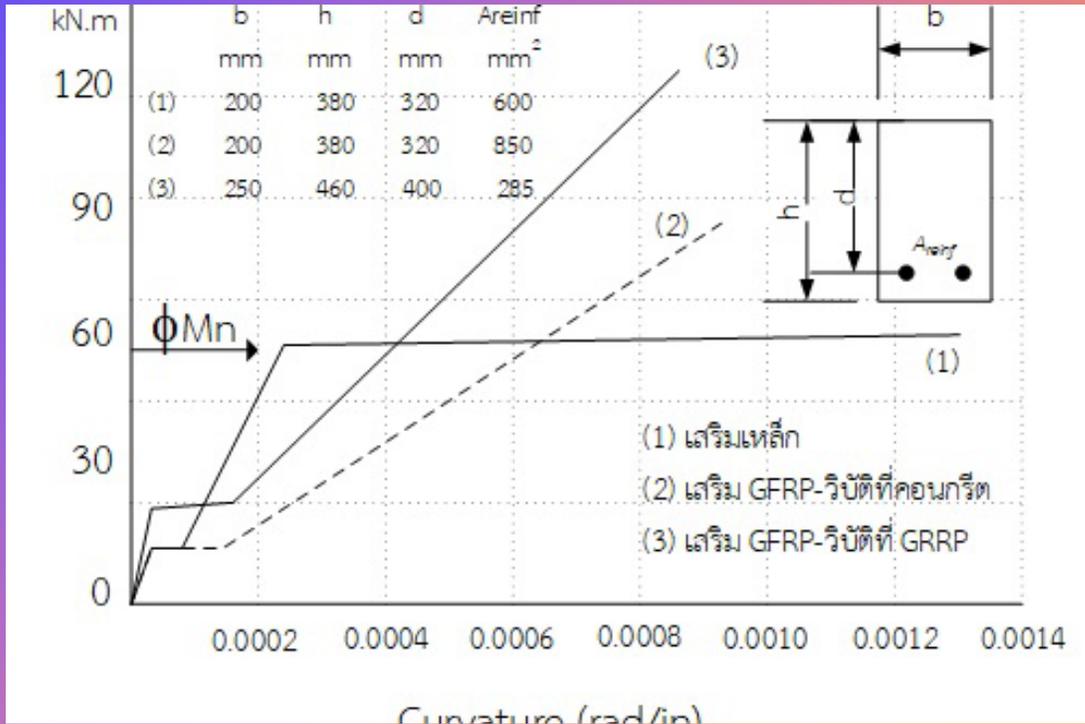
คู่มือฉบับนี้เสนอให้ใช้ปริมาณแท่ง FRP โดยคำนวณจากสมการ (10-1)

$$\rho_{f,ts} = 0.0018 \times \frac{420}{f_{fu}} \frac{E_s}{E_f} \quad (10-1)$$

+

•

○



Summary

GFRP is recommended for special purposes not for all purposes.

- Long term degradation **as same as that of steel**
- Long term deflection **as same as that of steel**
- Long term cracks **as same as that of steel**

Must be taken care



+



o



.



THANK YOU

Assoc Prof Smith Songpiriyakij
smith.s@cit.kmutnb.ac.th