



複合材料補強設計



1.0 簡介

1.1 產品系列與應用時機

1.2 複合材料補強優點

1.3 與鋼板補強比較

1.3.1 材料物性比較

1.3.2 成品物性比較

1.3.3 補強技術比較

2.0 產品說明

2.1 CFRP貼片普通型－

CFRP貼片和貼片補強用接著劑產品系列

2.1.1 CFRP貼片

2.1.2 普通型積層樹脂

2.1.3 普通型底漆

2.1.4 普通型環氧樹脂補土

2.2 CFRP貼片高濕型－

CFRP貼片和高溼環境補強用接著劑產品系列

2.2.1 CFRP貼片

2.2.2 高濕型積層樹脂

2.2.3 高濕型底漆

2.2.4 高濕型環氧樹脂補土

2.3 CFRP板預成型－

CFRP板和預成型板補強用接著劑產品系列

2.3.1 CFRP板

2.3.2 預成型板用樹脂接著劑

2.3.3 預成型板用(普通型)環氧樹脂補土

2.4 FRP薄殼水中型－

FRP薄殼和水中補強用接著劑產品系列

2.4.1 FRP薄殼

2.4.2 水中型樹脂接著劑

2.4.3 水中型環氧樹脂補土



3.0 系列產品應用的可行性

4.0 設計

4.1 採用CFRP貼片/

CFRP板對梁作抗彎與抗剪補強

4.1.1 設計步驟流程圖

4.1.2 計算未補強斷面標稱強度值

4.1.3 CFRP補強設計

4.1.4 計算補強後斷面設計強度值

4.2 採用CFRP貼片/

CFRP板對柱補強或耐震補強

4.2.1 柱設計步驟流程

4.2.2 計算未補強斷面標稱強度值

4.2.3 CFRP補強設計

4.2.4 柱混凝土強度補強

4.2.5 柱彎矩強度補強

4.2.6 柱剪力強度補強

4.3 柱圍束補強

4.4 柱塑鉸區鋼筋搭接圍束補強

4.5 柱撓曲韌性圍束補強

5.0 案例

附錄一 CFRP補強錨定評估

附錄二 不同CFRP補強型式下之錨定建議

附錄三 CFRP補強梁柱接頭



1.0 簡介

為推動建築、營造業的進步，為政府、業主、設計及承包商提供高品質、低成本的全方位服務，提供CFRP貼片/CFRP板系列產品，用於混凝土結構、鋼結構、木結構和磚構造進行外部粘貼補強。

1.1 產品系列與應用時機

CFRP貼片/CFRP板是針對混凝土結構、鋼結構、木結構和磚構造的高效能補強系統。

系統包括：

- 系列一 CFRP貼片普通型－CFRP貼片和貼片補強用接著劑
- 系列二 CFRP貼片高濕型－CFRP貼片和高溼環境補強用接著劑
- 系列三 CFRP板預成型－CFRP板和預成型板補強用接著劑
- 系列四 FRP薄殼水中型－FRP薄殼和水中補強用接著劑

→ 對混凝土結構、鋼結構、木結構和磚構造進行補強的主要時機為：

- 荷載增加
 - 使用荷重增加
 - 振動結構
 - 變更建築物使用功能
- 抗震需求
 - 柱韌性不足
 - 柱主筋鋼筋搭接
 - 增加RC牆或磚牆強度
 - 梁、板強度不足
- 結構損壞
 - 材料老化
 - 鋼筋鏽蝕
 - 其他人為因素造成構件損傷
- 設計或施工缺失
 - 斷面尺寸不足
 - 配筋不足
 - 混凝土強度不足
- 結構系統變更
- 改善結構現況
 - 減少變形
 - 降抑制裂縫成長
 - 低原有結構構件應力

→ 補強施工前必需將結構現有承受之荷載移除，以減低未補強結構現有之初始應變，避免結構有二次受力情況發生，影響結構補強效果。



1.2 複合材料補強優點

- 自重輕、厚度小，能於狹小空間施作，施工時不影響建築物內部正常使用。
- 具有柔軟性，能使用於複雜外形構件。
- 適用於各種構件補強(梁、柱、板、牆等)
- 強度高，能用於抗彎、抗剪及圍束箍筋補強，補強後不影響結構系統。
- 抗酸、抗鹼、防蝕、防水性佳和抗惡劣環境。
- 潮濕環境、潮濕表面可施工(用CFRP貼片高溼型)
- 水中可施工(用FRP薄殼水中型)，不需圍堰
- 施工容易，施工可用任意長度、易搭接
- 施工品質易控制
- 施工前、施工中、施工後，可對補強材料、補強貼附後成品檢驗
(有破壞性與非破壞性檢驗)，破壞性檢驗後構件易復原且補強功能不變。
- 施工完成面，表面披附粉刷容易。
- 後續補強維護容易。



1.3.1 材料物性比較

	SS-41 Steel	Graphite (碳纖)		E-Glass (玻纖)
密度 g/cm^3	7.85	1.8		2.54
張力強度 kg/cm^2	2400	49350		15500
張力模數 kg/cm^2	2.04×10^6	2.35×10^6		0.74×10^6
極限應變 % (steel 為降伏應變)	0.1	2.1		2.1
設計單層厚度(cm)	—	FAW200	.011	—
		FAW250	.01375	
		FAW300	.0165	
			.0118	



1.3.2 成品物性比較(CFRP含樹脂)

	SS-41 Steel	CFRP(T7)貼片		CFRP 板
密度 g/cm ³	7.85	1.50		1.57
張力強度 kg/cm ²	2400	> 12600		> 31000
張力模數 kg/cm ²	2.04×10 ⁶	0.74×10 ⁶		1.68×10 ⁶
極限應變% (steel 為降伏應變)	0.1	> 1.7		> 1.7
單層厚度 cm	—	FAW200	.038	.125~.13
		FAW250	.051	
		FAW300	.060	

1.3.3 補強技術比較

比較項目	複合材料補強	傳統鋼板補強
成本	較低	較高
時效	施工便利迅速	材料笨重施工緩慢
施工空間	施工空間無限制	需要較大的施工空間
補強物形狀	任何形狀皆可補強	限圓形或橢圓形
強度比較	強度值超過 35000kg/cm ²	強度值 2400kg/cm ²
補強後狀況	適合各種塗料，且不影響外觀形狀	改變補強前形狀及原結構系統
抗酸腐蝕比	抗酸、鹼、腐蝕及不滲透	易腐蝕
外觀瑕疵比	補強品質易檢測	補強品質無法檢測
單位補強面積重量(m ²)	0.27kg(0.15mm 厚)	23.5kg(3mm 厚)，47kg(6mm 厚)



柱第一根鋼筋降伏時，柱勁度提升率(%) (Ref. Seismic design and retrofit of bridges)

補強狀況	Steel Jacket	Concrete Jacket	Composite Material Jacket
圓形柱			
塑鉸補強(部份柱高)	10-20	20-50	0-5
剪力補強(全柱高)	20-40	25-75	0-5
方形柱	Elliptical Jacket		Rectangular Jacket
塑鉸補強(部份柱高)	20-40	20-50	0-10
剪力補強(全柱高)	40-70	25-75	0-5



2.0 產品說明

2.1. CFRP貼片普通型—CFRP貼片和貼片補強用接著劑產品系列

2.1.1 CFRP貼片

品名	MRL-T7-200	MRL-T7-250	MRL-T7-300	測試規範
單位面積重量 g/m ²	200	250	300	ASTM D3776 JIS K7071
積層板抗張強度 kg/cm.ply	> 470	> 590	> 700	ASTM D3039 JIS K7073
積層板抗張係數 kg/cm.ply	25800	32300	38700	ASTM D3039 JIS K7073
積層板抗曲強度 kg/mm ²	78	80	82	ASTM D790 JIS K7074
設計抗張係數(E _{cf}) kg/mm ²	23500	23500	23500	-
設計厚度(t) mm/ply	0.110	0.1375	0.165	-
伸長率(ε _u)%	1.7	1.7	1.7	ASTM D3039 JIS K7073



品名	MRL-T8-200	MRL-T8-250	MRL-T8-300	測試規範
單位面積重量 g/m ²	200	250	300	ASTM D3776 JIS K7071
積層板抗張強度 kg/cm.ply	> 560	> 700	> 820	ASTM D3039 JIS K7073
積層板抗張係數 kg/cm.ply	33000	41200	49500	ASTM D3039 JIS K7073
設計抗張係數(E _{cf}) kg/mm ²	30000	30000	30000	-
設計厚度(t) mm/ply	0.110	0.1375	0.165	-
伸長率(ε _u)%	1.7	1.7	1.7	ASTM D3039 JIS K7073

2.1.2 普通型積層樹脂

項 目	測 試 規 範	規 格 值
材 質		室溫硬化 型環氧樹脂
可操作時間@25°C	ASTM D2471 溫度上升法	60-120 min.
混合後初黏度@25°C	ASTM D2393 JIS K6833	900-3000 cps
抗張強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	ASTM D638 JIS K7113	>400 kg/cm ²
抗張係數 25°C R.H.65%硬化 7 天	ASTM D638 JIS K7113	>30000 kg/cm ²
彎曲強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	ASTM D790 JIS K7203	>800 kg/cm ²
剪切強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	ASTM D1002 JIS K6850	>100 kg/cm ²
不揮發份	JIS K7235	99%

主劑：硬化劑 = 100 : 35

2.1.3 普通型底漆

項目	測試規範	規格值
材質		室溫硬化 型環氧樹脂
混合後初黏度 @25°C	ASTM D2393 JIS K6833	600-1300 cps
可操作時間 @25°C	ASTM D2471 溫度上升法	60-120 min
接著強度(乾燥表面)	JIS K5400	>30 kg/cm ² (且混凝土破壞)

主劑：硬化劑 = 100 : 35



2.1.4 普通型環氧樹脂補土

項目	規格值	測試規範
壓縮強度	$>500 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D695 JIS K7208
抗張強度	$>180 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D638 JIS K7113
接著強度	$>30 \text{ kg/cm}^2$ (且混凝土破壞)	JIS K5400

2.2 CFRP貼片高濕型—CFRP貼片和高溼環境補強用接著劑產品系列

2.2.1 CFRP貼片

品名	MRL-T7-200	MRL-T7-250	MRL-T7-300	測試規範
單位面積重量 g/m ²	200	250	300	ASTM D3776 JIS K7071
積層板抗張強度 kg/cm.ply	> 470	> 575	> 690	ASTM D3039 JIS K7073
積層板抗張係數 kg/cm.ply	25800	32300	38700	ASTM D3039 JIS K7073
積層板抗曲強度 kg/mm ²	76	78	80	ASTM D790 JIS K7074
設計抗張係數 (E _{cf}) kg/mm ²	23500	23500	23500	-
設計厚度(t) mm/ply	0.110	0.1375	0.165	-
伸長率(ε _w)%	1.7	1.7	1.7	ASTM D3039 JIS K7073



品名	MRL-T8-200	MRL-T8-250	MRL-T8-300	測試規範
單位面積重量 g/m ²	200	250	300	ASTM D3776 JIS K7071
積層板抗張強度 kg/cm.ply	> 560	> 700	> 820	ASTM D3039 JIS K7073
積層板抗張係數 kg/cm.ply	33000	41200	49500	ASTM D3039 JIS K7073
設計抗張係數(E _{cf}) kg/mm ²	30000	30000	30000	-
設計厚度(t) mm/ply	0.110	0.1375	0.165	-
伸長率(ε _w)%	1.7	1.7	1.7	ASTM D3039 JIS K7073



2.2.2 高濕型積層樹脂

項目	規格值		測試規範
外觀	A 劑:白色. B 劑:褐色		
混合比	A:B= 100:60		
適用溫度 °C	10~40		
25 °C 時可操作時間(min)	>60		溫度上升法
抗張強度(kg/cm ²)	RH65% 25°C	>447	ASTM D638 JIS K7113
	RH95% 25°C	>454	
抗張係數(kg/cm ²)	RH65% 25°C	>26847	ASTM D638 JIS K7113
	RH95% 25°C	>26681	
彎曲強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	>750 kg/cm ²		ASTM D790 JIS K7203
剪切強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	>100 kg/cm ²		ASTM D1002 JIS K6850

2.2.3 高濕型底漆

項目	測試規範	規格值
材質		室溫硬化 型環氧樹脂
混合後初黏度 @25°C	ASTM D2393 JIS K6833	700-1100 cps
可操作時間 @25°C	ASTM D2471 溫度上升法	60-90 min
接著強度	JIS K5400	>30 kg/cm ² (且混凝土破壞)

主劑：硬化劑 = 100 : 60

2.2.4 高濕型環氧樹脂補土

項目	規格值	測試規範
壓縮強度	$>600 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D695 JIS K7208
抗張強度	$>190 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D638 JIS K7113
接著強度	$>30 \text{ kg/cm}^2$ (且混凝土破壞)	JIS K5400



2.3 CFRP板預成型－CFRP板和預成型板補強用接著劑產品系列

2.3.1 CFRP板

預成型CFRP板

品名	項目	規格	測試規範
MRL-T7-H5	尺寸	寬度:49~50mm 厚度:1.25~1.27 mm	
MRL-T7-H10	尺寸	寬度:100~101mm 厚度:1.27~1.3 mm	
	剛性	$1.68 \times 10^4 \text{Kg/mm}^2$	ASTM D3039 JIS K7073
	抗拉強度	$>310 \text{Kg/mm}^2$	ASTM D3039 JIS K7073
	斷裂伸長率	$>1.7\%$	ASTM D3039 JIS K7073
	硬度測試	>80	ASTM D2240 JIS K7215

L型預成型碳纖維板(MRL-T7-HL)

項 目	規 格	
長 度	雙向各 500mm	
R 角	>30mm	
寬 度	40~41mm	
厚 度	1.25+0.02mm	
剛 性	$1.48 \times 10^4 \text{Kg/mm}^2$	ASTM D3039 JIS K7073
抗拉強度	$>240 \text{Kg/mm}^2$	ASTM D3039 JIS K7073
斷裂伸長率	>1.6%	ASTM D3039 JIS K7073
硬度測試	>80	ASTM D2240 JIS K7215

2.3.2 預成型板用樹脂接著劑

項目	規格值	測試規範
外觀	A 劑:白色. B 劑: 灰色 混合後:灰色	
混合比	A:B= 100:35	
適用溫度 °C	10~40	
膠凝時間(min)	40~60	溫度上升法
不垂流度	3mm 以下(40 °C)	
抗張強度(kg/cm ²)	>300	ASTM D638 JIS K7113
抗張係數(kg/cm ²)	>8×10 ⁴	ASTM D638 JIS K7113
壓縮強度	900 kg/cm ²	ASTM D695 JIS K7208
接著強度(kg/cm ²)	>30 kg/cm ² (且混凝土破壞)	ASTM D4541 JIS K5400

2.3.3 預成型板用(與普通型相同)環氧樹脂補土

項目	規格值	測試規範
壓縮強度	$>500 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D695 JIS K7208
抗張強度	$>180 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D638 JIS K7113
接著強度	$>30 \text{ kg/cm}^2$ (且混凝土破壞)	ASTM D4541 JIS K5400



2.4 FRP 薄殼水中型—FRP 薄殼和水中補強用接著劑產品系列

2.4.1 FRP 薄殼

FRP 薄殼材質與規格，依業主需求訂製

2.4.2 水中型樹脂接著劑

項目	規格值	測試規範
外觀	A 劑:白色. B 劑:褐色	
混合比	A:B= 100:60	
適用溫度 °C	10~40	
可操作時間(min)	>120	ASTM D2471 溫度上升法
抗張強度(kg/cm ²)	>180(水中)	ASTM D638 JIS K7113
抗張係數(kg/cm ²)	>20000(水中)	ASTM D638 JIS K7113
彎曲強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	>500 kg/cm ²	ASTM D790 JIS K7203
剪切強度 25°C R.H.65%硬化 7 天	>90 kg/cm ²	ASTM D1002 JIS K6850
接著強度(kg/cm ²)	>30 kg/cm ² (且混凝土破獲)	ASTM D4541 JIS K5400



2.4.3 水中型環氧樹脂補土

項目	規格值	測試規範
壓縮強度	$>350 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D695 JIS K7208
抗張強度	$>180 \text{ kg/cm}^2$	ASTM D638 JIS K7113
接著強度	$>30 \text{ kg/cm}^2$ (且混凝土破壞)	ASTM D4541 JIS K5400

3.0系列產品應用的可行性

	應用型態	CFRP 貼片 普通型	CFRP 貼片 高濕型	CFRP 板 預成型	FRP 薄殼 水中型
梁 補 強	彎矩補強	☞☞☞	—	☞☞	—
	剪力補強	☞☞☞☞	—	☞☞☞	—
版補強	彎矩補強	☞☞	—	☞☞☞☞	—
柱 補 強	彎矩補強	☞☞	—	☞☞☞☞	—
	剪力補強	☞☞☞☞	—	☞☞	—
	圍束補強	☞☞☞☞	—	☞	—
	韌性補強	☞☞☞☞	—	☞	—
	搭接補強	☞☞☞☞	—	☞	—
牆 補 強	彎矩補強	☞☞☞	—	☞☞☞	—
	剪力補強	☞☞☞	—	☞☞☞	—
高濕環境結構補強		—	☞☞☞☞	—	—
水中結構補強		—	—	—	☞☞☞☞

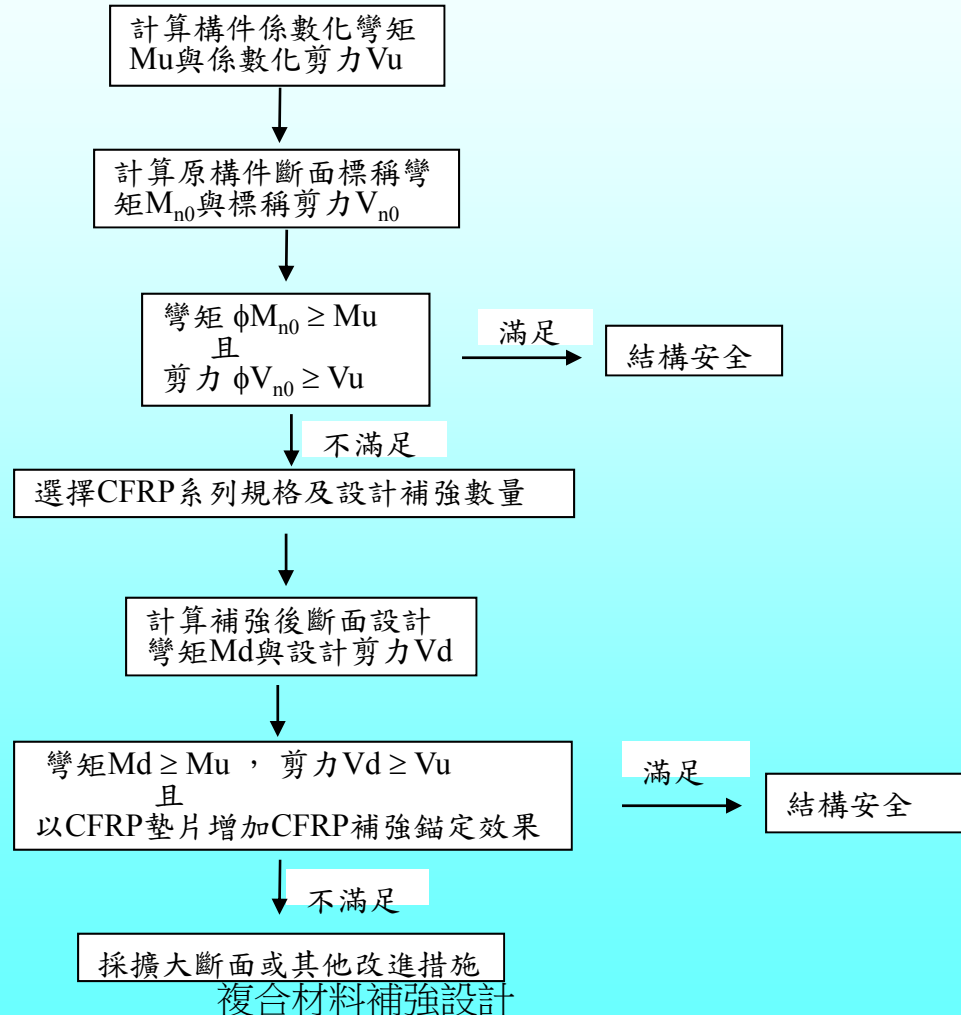
適用狀況：差☞；可☞☞；佳☞☞☞；最佳☞☞☞☞；不建議使用—

4.0 設計

本設計參照加拿大 Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers 和營建署補強設計計畫案

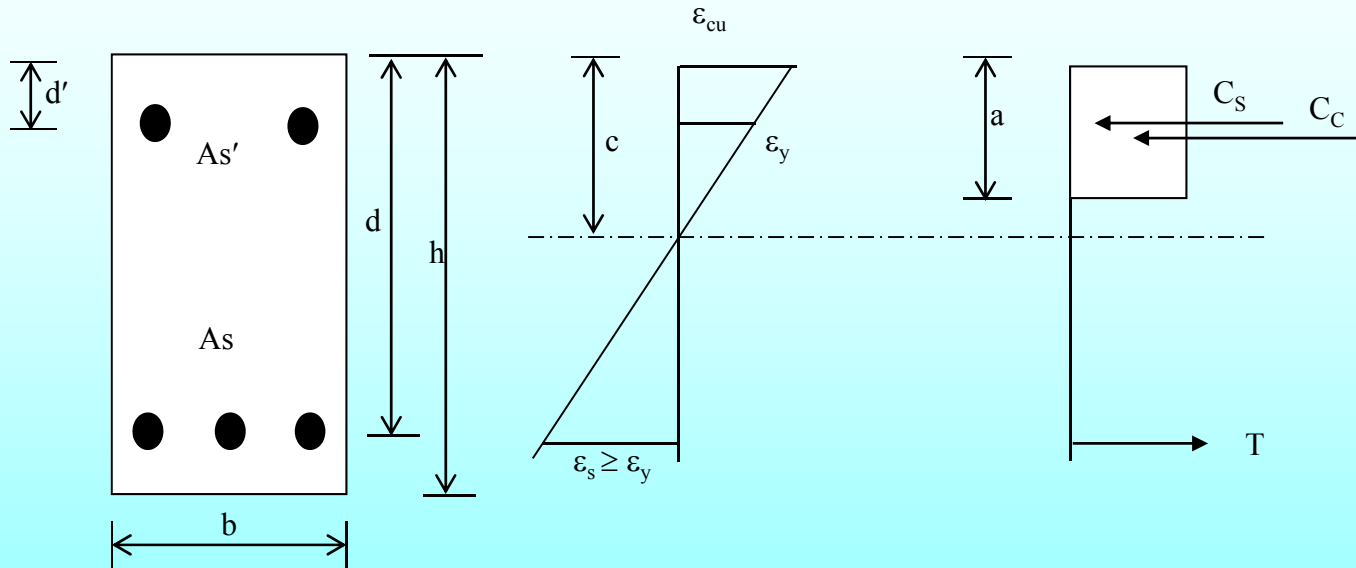
4.1 採用 CFRP 貼片 / CFRP 板對梁作抗彎與抗剪補強

4.1.1 設計步驟流程圖



4.1.2 計算未補強斷面標稱強度值

(1) 檢驗彎矩



由 $\epsilon_{cu}=0.003$ ， $T=C_C+C_S$ 得 a

$$M_{n0}=T \times (d-a/2)+C_S \times (a/2-d')$$

經結構分析計算構件係數化彎矩 $M_u=1.4M_d+1.7M_l$ (依法規規定計算)

若 $M_u \geq \phi M_{n0}$ 時，須斷面彎矩補強

(2)檢驗剪力

經結構分析計算構件係數化剪力 $V_u = 1.4V_d + 1.7V_l$ (依法規規定計算)

若 $V_u \geq \phi V_{n0}$ 時，須斷面剪力補強

4.1.3 CFRP補強設計

選取CFRP的設計參數； t =單層厚度， E_{cf} =彈性模數， ϵ_u =極限應變， n =補強層數

4.1.4計算補強後斷面設計強度值

(1)計算設計彎矩強度

I. 假設補強前，補強構件所受荷重已卸載，原斷面初始應變可忽略不計，計算補強後之彎矩強度

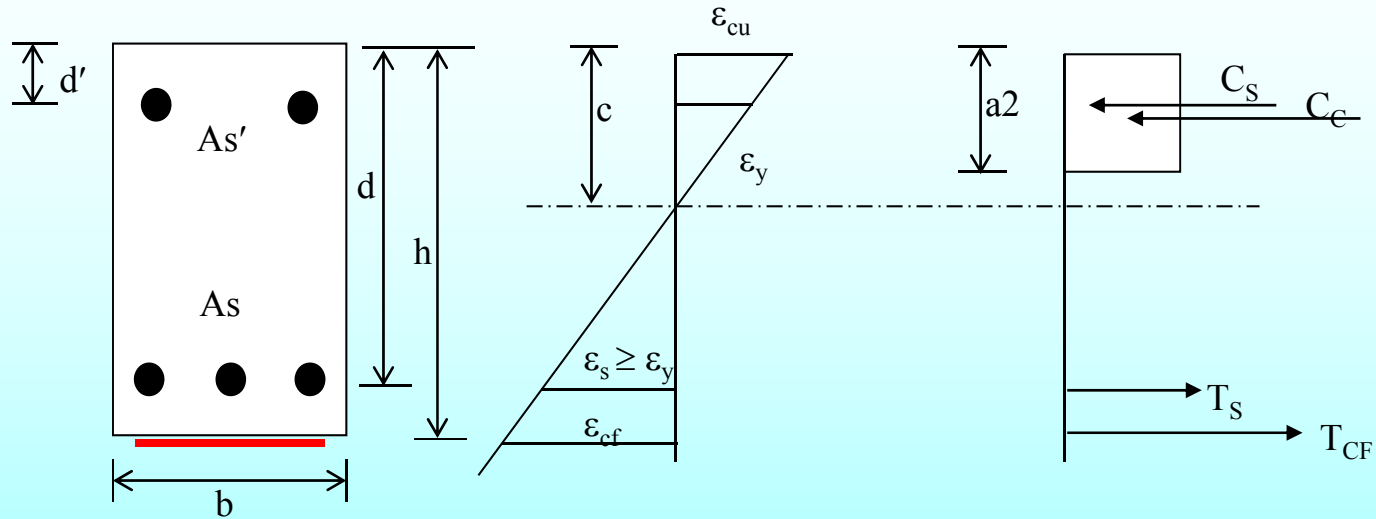
$$\epsilon_{cu} = 0.003, \epsilon_{cf} = 0.012 \text{ (無錨定或脫層破壞時)}$$

$$M_d = \phi \times M_{c,s} + \phi_{cf} \times M_{cf}, \phi = 0.9, \phi_{cf} = 0.75$$

梁斷面彎矩分析

1. 假設：同RC強度分析且纖維材料與混凝土粘結處不生相對位移
2. 斷面彎矩分析：

(a)鋼筋達降伏時(if混凝土應力、應變為直線時)



由應變圖：

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} = \frac{d(1-k)}{kd} = \frac{1-k}{k} \quad \frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon_c} = \frac{kd-d'}{kd} \quad \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_c} = \frac{d(1-k)+d'}{kd}$$

$$C_c + C_s = T_s + T_{cf}$$

$$\rightarrow A_s f_y + A_{cf} \times f_{cf} = A'_s f'_s + \frac{1}{2} f'_c b k d$$

$$\rightarrow \text{除 } bd \rightarrow \rho f_y + \rho_{cf} f_{cf} = \rho' f'_s + \frac{1}{2} f'_c k$$

→ 將應變關係代入 $\rho E_s \varepsilon_s + \rho_{cf} E_{cf} \varepsilon_{cf} = \rho' E_s \varepsilon'_s + \frac{1}{2} E_c \varepsilon_c k$

→ $\rho \frac{E_s}{E_c} \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} + \rho_{cf} \frac{E_{cf}}{E_c} \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_c} = \rho' \frac{E_s}{E_c} \frac{\varepsilon'_s}{\varepsilon_c} + \frac{1}{2} k$

→ $\rho n_1 \frac{1-k}{k} + \rho_{cf} \frac{d(1-k)+d'}{kd} \times n_2 = \rho' \times n_1 \frac{kd-d'}{kd} + \frac{1}{2} k$

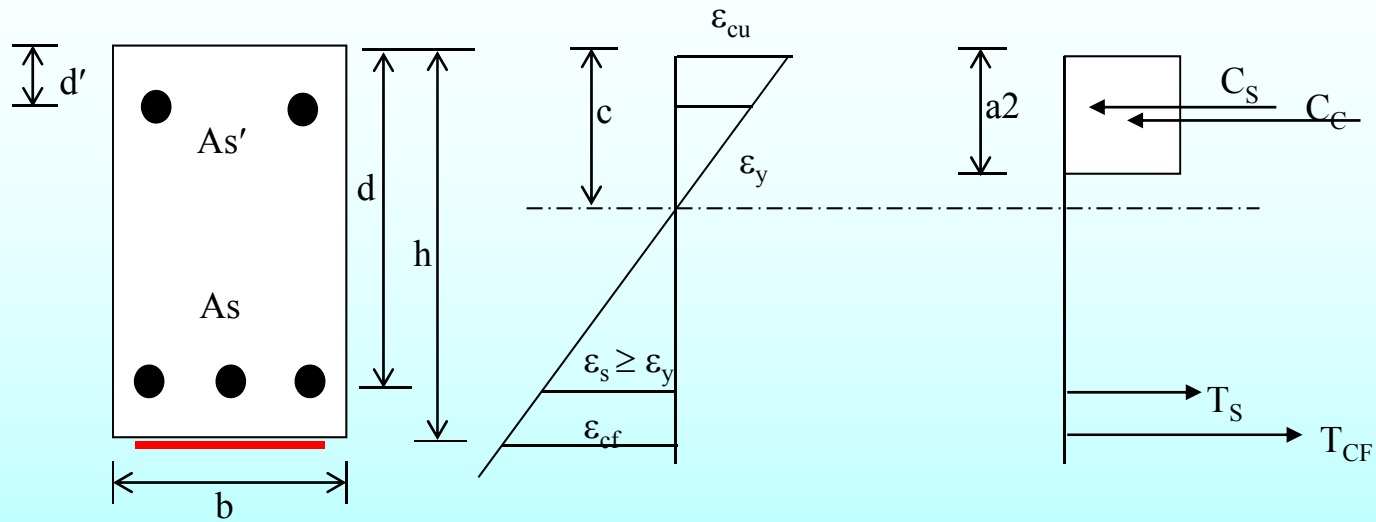
假如 $\rho = \frac{A_s}{bd}$, $\rho_{cf} = \frac{A_{cf}}{bd}$, $\rho' = \frac{A'_s}{bd}$, $\rho' = \frac{A'_s}{bd}$, $n_1 = \frac{E_s}{E_c}$, $n_2 = \frac{E_{cf}}{E_c}$

→ 可得K

∴得, $\varepsilon'_s, \varepsilon_{cf}, \varepsilon_c$, →得fs', f_{cf}, fc →得Cs, Cc, Ts, T_{cf}

如此可得My

(b) if 鋼筋降伏，混凝土壓碎時之M，即Mn



$$C_c = 0.85 f'_c b a = 0.85 f'_c b \beta_1 x$$

$$C_s = A'_s f'_s \quad , \quad T_s = A_s f_y$$

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \times \frac{x - d'}{x} \rightarrow f'_s = E_c \epsilon_c \frac{x - d'}{x} \leq f_y$$

$$\varepsilon_{cf} = \varepsilon_c \times \frac{h-x}{x} \rightarrow f_{cf} = E_{cf} \varepsilon_c \frac{h-x}{x} \leq \text{降伏值}$$

$$\varepsilon_c = 0.003$$

$$\therefore C_c + C_s = T_s + T_{cf} \rightarrow \text{得 } x$$

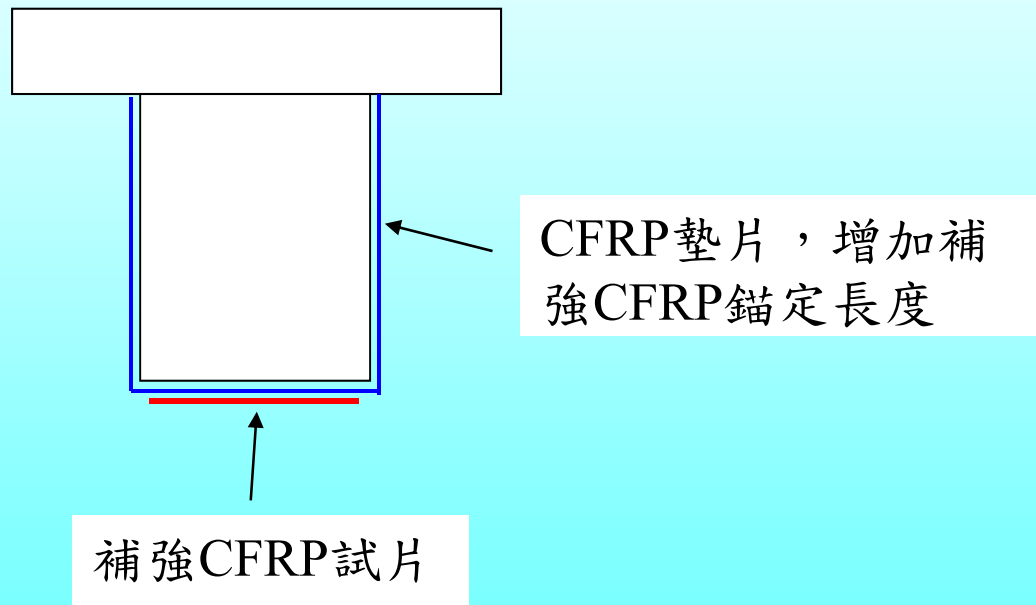
→ 得 f_s' , f_{cf} (二者均須小於降伏值, if 超過令 $f_s' = f_y$, $f_{cf} = f_u$)

$$\text{代回 } C_c + C_s = T_s + T_{cf} \text{)}$$

∴ 得 C_s , C_c , T_s , T_{cf} → 利用力量位置關係得

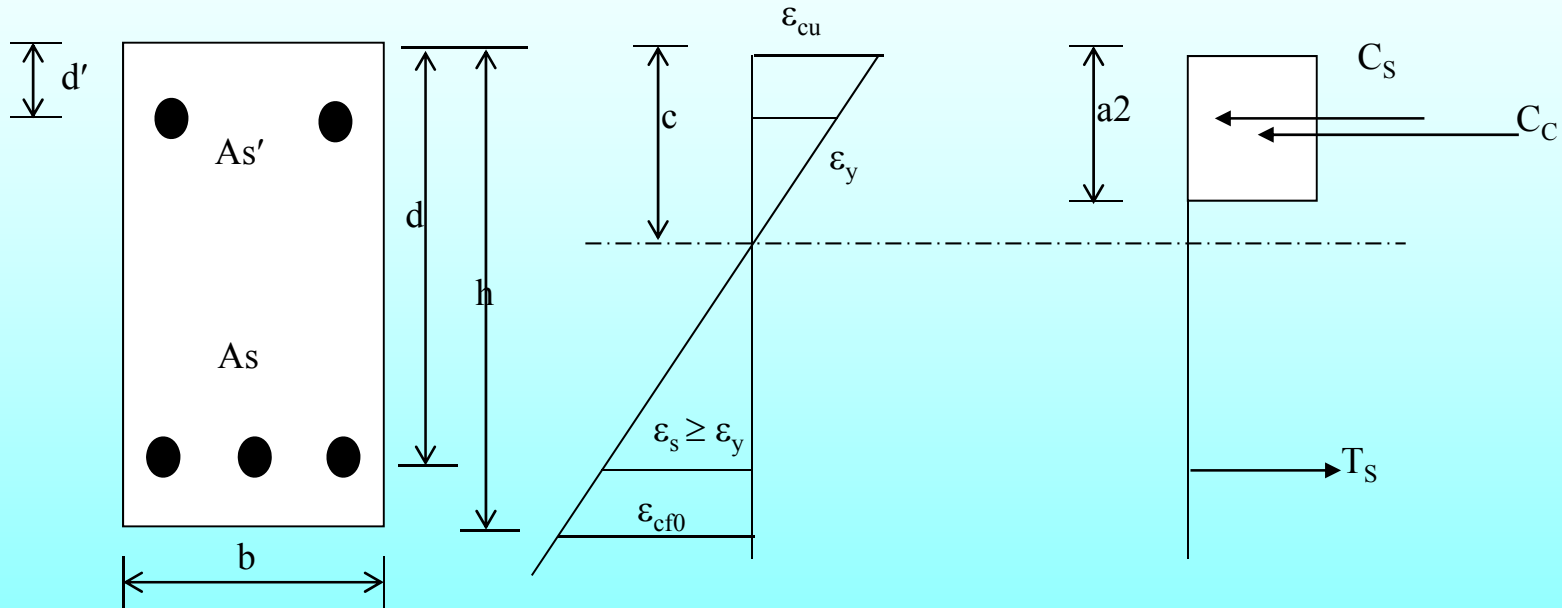
$$M_n = 0.85 f_c' b \beta_1 x \left(h - \frac{1}{2} \beta_1 x \right) + \rho' b d f_y (h - d') - \rho b d f_y (h - d)$$

- (c) 梁斷面設計彎矩 $M_d = \phi \times T_s \times (d - a/2) + \phi_{cf} \times T_{cf} \times (h - a/2)$ ， a 由上述(b)計算得
- (d) 延伸長度—補強至梁(板)邊
- (e) 錨定方式—以CFRP墊片取代錨定



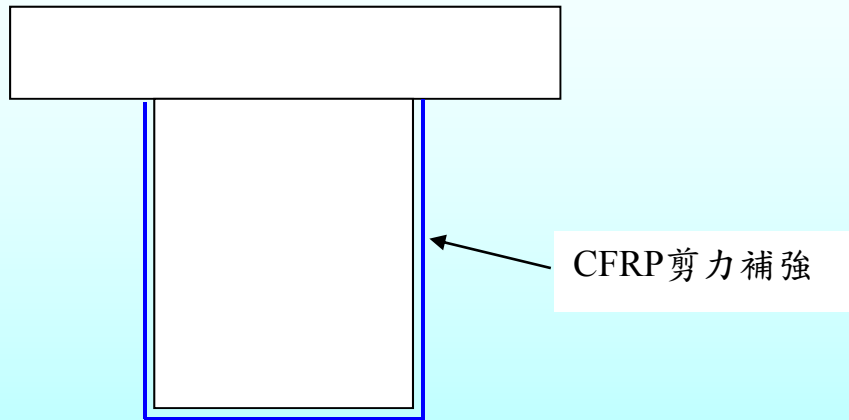
II. 考慮原斷面初始應變，計算補強後二次受力狀況下之彎矩強度

a) 計算初始彎矩 M_0 作用下，碳纖維補強區初始應變 ϵ_{cf0}



b) 同I.點a)至f)步驟，但b)項 ϵ_{cf} 改為 $\epsilon_{cf} - \epsilon_{cf0}$

(2) 計算設計剪力強度



$$a) V_d = V_c + V_s + V_{cf}, \quad \varepsilon_{cf} = 0.004 \text{ (except for confined)} \quad (\text{補單邊時 } \varepsilon_{cf} = 0.002)$$

$$V_d < 5 \times V_c \text{ (except for confined)}$$

$$V_c = 0.53 \times \phi_c \times (f_c')^{0.5} \times b_w \times d$$

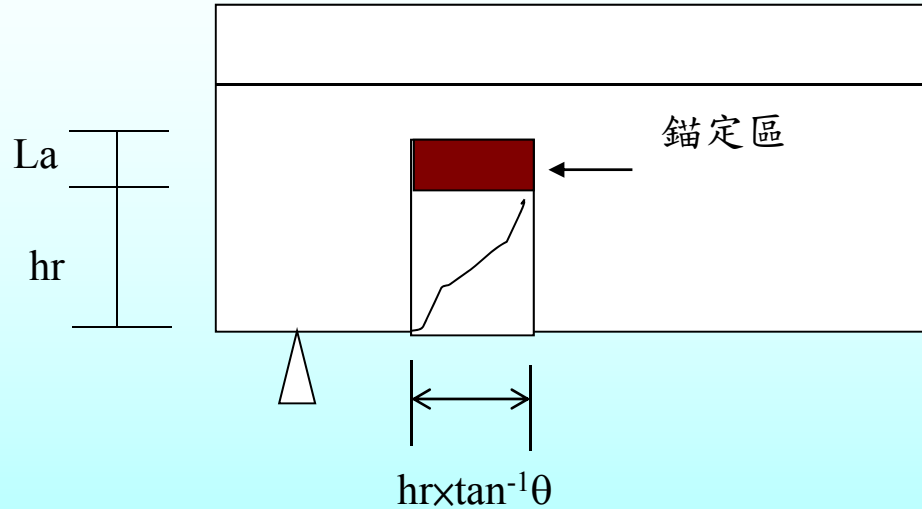
$$V_s = \phi_s \times A_v \times f_y \times d / s$$

$$V_{cf} = \phi_{cf} \times A_{cf} \times E_{cf} \times \varepsilon_{cf} \times d_{cf} / s_{cf}$$

$$\phi_c = \phi_s = 0.85, \quad \phi_{cf} = 0.75$$

$$A_{cf} = b_{cf} \times n \times t, \quad b_{cf} = \text{CFRP 單片寬}, \quad d_{cf} = \text{修補深度}$$

b) 錨定加固設計



L_a 有效粘接長度,最小值(延伸至混凝土受壓區長度;10cm)

① 混凝土粘結抗剪強度

$$V_{L1} = 2v_b A_b$$

v_b 混凝土表面的粘結強度 $\tau_{cf} = 0.5 \text{ Mpa}$

A_b 有效粘結面積 $A_b = hr \times \tan^{-1}\theta \times L_a$

②CFRP所提供的抗剪強度

$$V_{L2} = 2E_{cf} \times \varepsilon_{cf} \times t_{cf} \times hr \times \tan^{-1}\theta$$

$$t_{cf} = n \times t$$

③由接著劑抗剪所提供的抗剪強度

$$V_{L3} = 2A_b \times f_{av}$$

$$A_b = hr \times \tan^{-1}\theta \times L_a$$

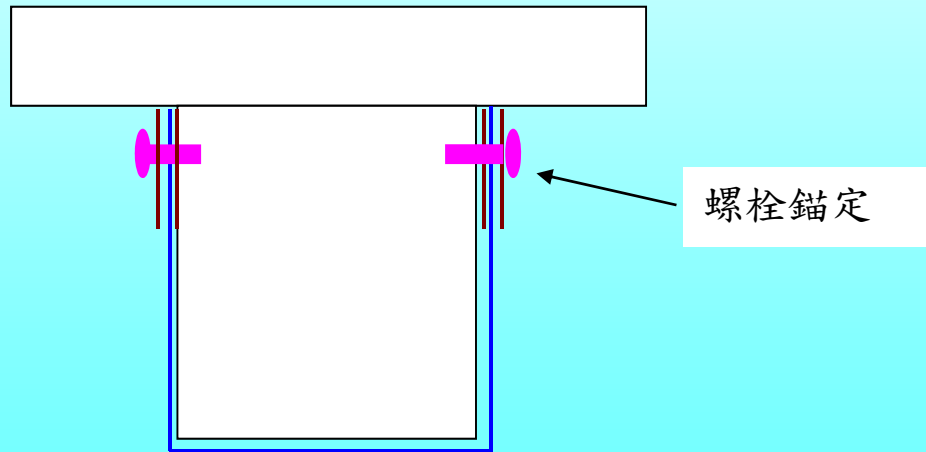
$$f_{av} = 100 \text{kg/cm}^2 \text{ 粘著劑極限抗剪強度}$$

④螺栓所提供之機械錨固

$$\text{若 } V_{L2} > \text{Min}(V_{L1}, V_{L3}), \Delta V_L = V_{L2} - \text{Min}(V_{L1}, V_{L3})$$

$$\Delta V_L = V_{\text{bolt}}$$

$$V_{\text{bolt}} \text{ 螺栓所提供的極限抗剪強度}$$





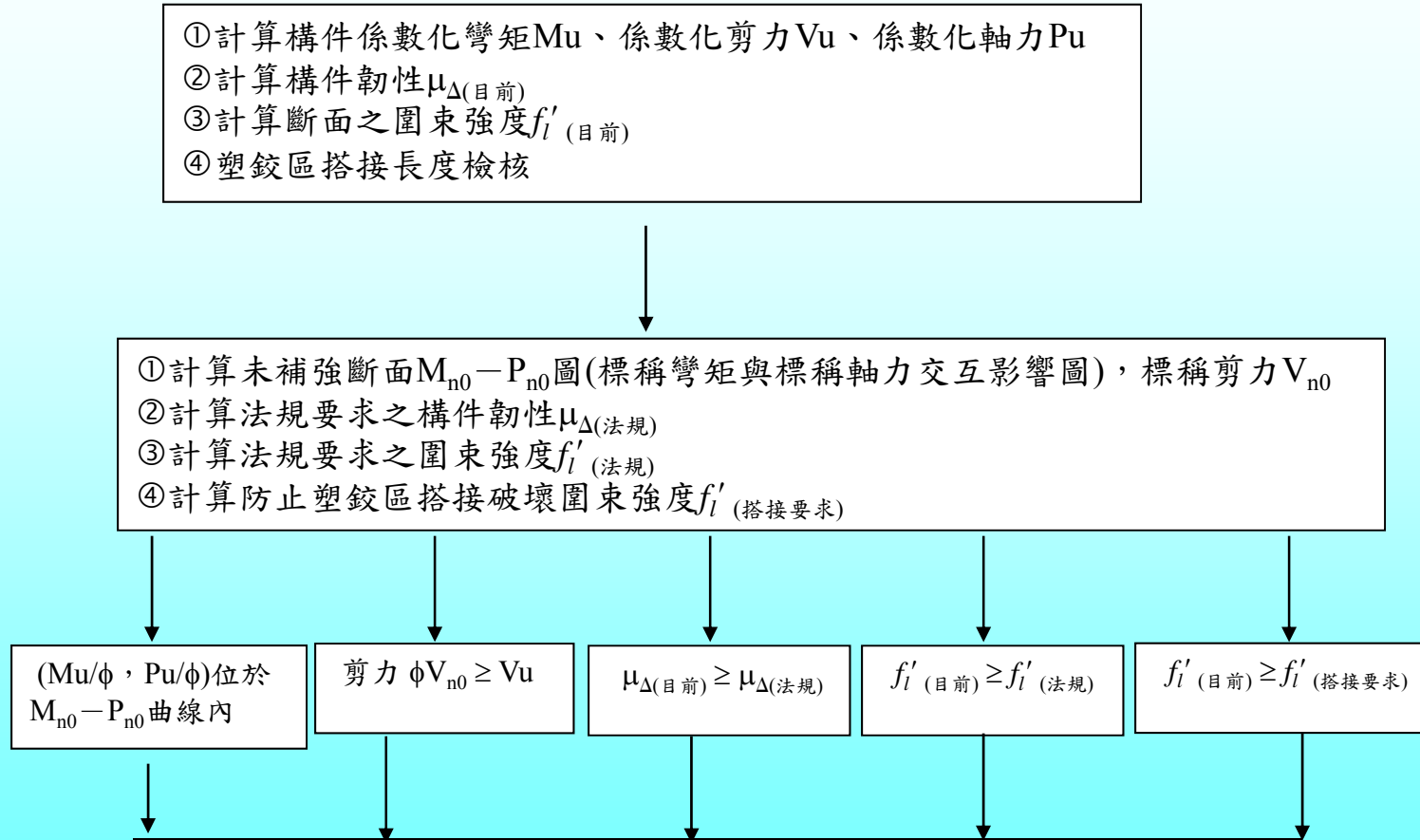
c) 剪力補強層數 $n > 3$ 時

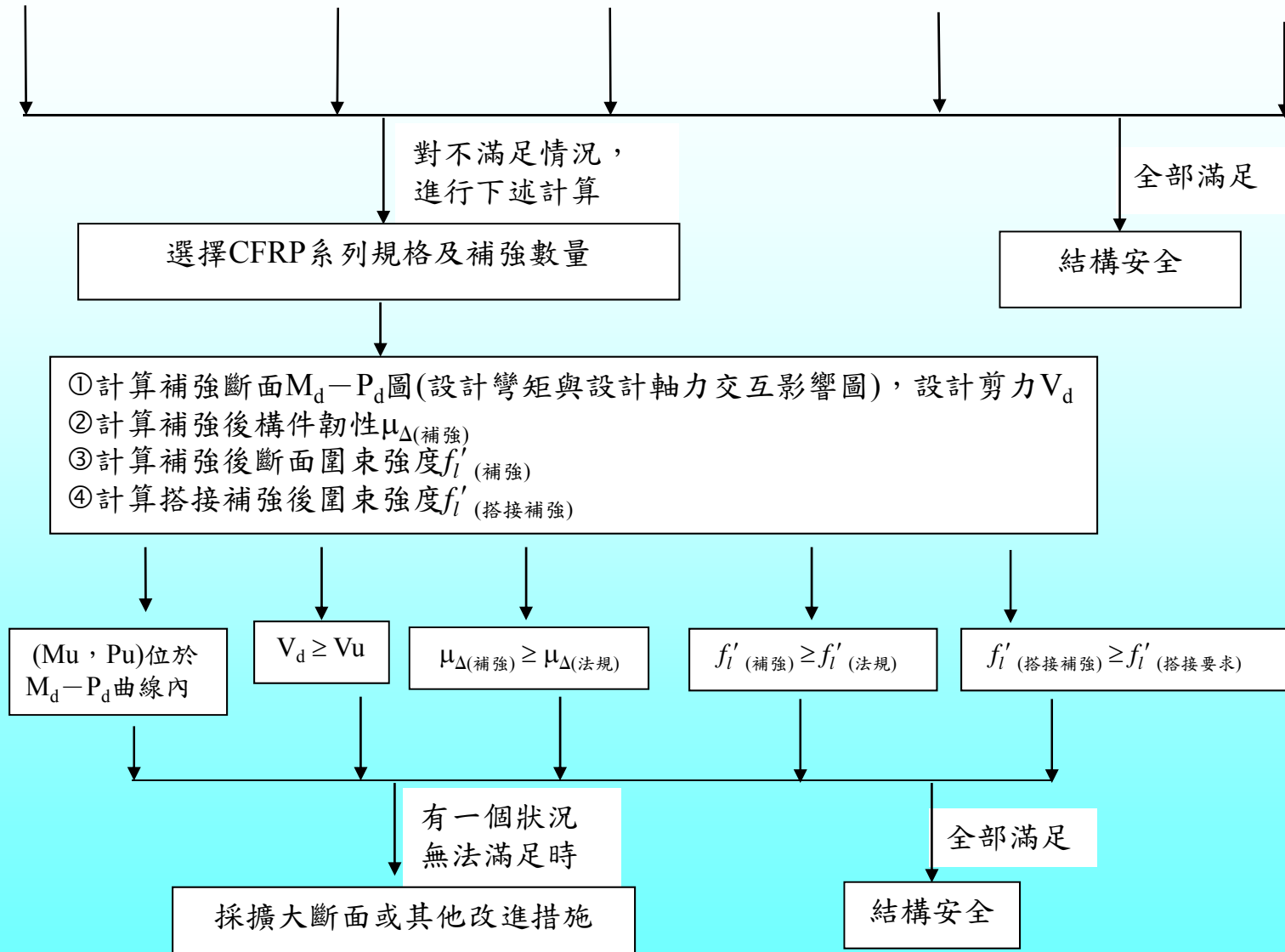
依前述方式計算當計算出之剪力補強層數較多時，
實際補強效果可能無法符合原先評估需求，
可能導致CFRP脫層或錨定處之局部破壞，造成浪費。

建議：計算層數 n 較多時，補強設計可以參考附錄一之相關資料設計與錨定。

4.2 採用CFRP貼片 / CFRP板對柱補強

4.2.1 柱設計步驟流程





4.2.2 計算未補強斷面標稱強度值

(1) 檢驗斷面 $M_{n0}-P_{n0}$ 圖

計算斷面標稱彎矩與標稱剪力之交互影響圖 ($M_{n0}-P_{n0}$ 圖)

若該斷面之載重情況 ($M_u/\phi, P_u/\phi$) 位於 $M_{n0}-P_{n0}$ 曲線內 → 不需補強

若該斷面之載重情況 ($M_u/\phi, P_u/\phi$) 位於 $M_{n0}-P_{n0}$ 曲線外 → 需補強

補強方式：

(a) 混凝土強度補強：以提升柱斷面之彎矩強度與軸向強度

(b) 彎矩補強：增加柱斷面之抗拉構材，以提升柱斷面之彎矩強度

(2) 檢驗剪力

若 $V_u \geq \phi V_{n0}$ 時，須斷面剪力補強

4.2.3 CFRP 補強設計

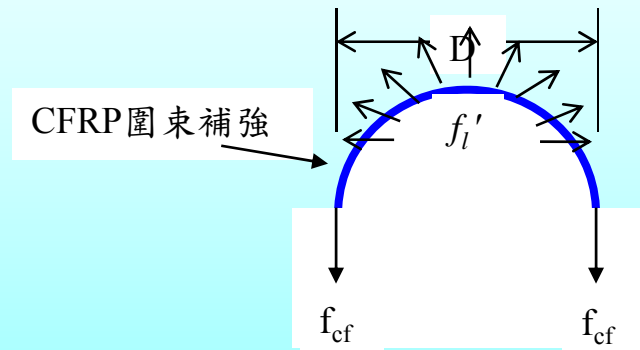
選取 CFRP 的設計參數； t =單層厚度， E_{cf} =彈性模數， ϵ_u =極限應變， n =補強層數

4.2.3 CFRP補強設計

選取CFRP的設計參數； t =單層厚度， E_{cf} =彈性模數， ϵ_u =極限應變， n =補強層數

4.2.4 柱混凝土強度補強

利用CFRP圍束於柱外部，當柱受軸壓力作用，因膨脹變形，造成CFRP產生圍束應力，因圍束應力之作用使得混凝土強度提升。



$$\Delta f_c' = 4.1 \times f_l'$$

有效圍束應力 $f_l' = k_c \times f_l$ ， $f_l = 0.5 \rho_{cf} \times f_{cf} \times \sin^2 \theta$ ， θ 為與柱主軸之夾角

圓形斷面 $k_c = 0.95$ ， $\rho_{cf} = 4t_{cf}/D \rightarrow \Delta f_c' = 8t_{cf} \times k_c \times f_{cf}/b$ (h或D)

矩形斷面 $k_c = 0.75$ ， $\rho_{cf} = 2t_{cf}(b+h)/bh$

矩形斷面 $k_c = 0.5$ (長邊/短邊 < 1.5)

$f_{cf} = E_{cf} \times \epsilon_{cf}$ ， ϵ_{cf} 依實驗得或保守採 0.01

4.2.5 柱彎矩強度補強

$$\Delta F = t_{cf} \times f_{cf}, f_{cf} = E_{cf} \times \varepsilon_{cf} \times \cos^2 \theta < \phi_{cf} \times f_{cfu}, \phi_{cf} = 0.75$$

θ 為與柱主軸之夾角

$$t_{cf} = n \times t$$

4.2.6 柱剪力強度補強

(1) 柱CFRP補強後剪力強度為 V_d

$$V_d = V_c + V_s + V_{cf}, \varepsilon_{cf} = 0.004 (\text{except for confined})$$

$$V_d < 5 \times V_c (\text{except for confined})$$

$$V_c = 0.53 \times \phi_c \times (f_c')^{0.5} \times b_w \times d (\text{kg/cm}^2)$$

$$V_s = \phi_s \times A_v \times f_y \times d / s$$

$$V_{cf} = \phi_{cf} \times A_{cf} \times E_{cf} \times \varepsilon_{cf} \times d_{cf} / s_{cf}$$

$$\phi_c = \phi_s = 0.85, \phi_{cf} = 0.75$$

$$A_{cf} = b_{cf} \times n \times t, b_{cf} = \text{CFRP單片寬}, d_{cf} = \text{修補深度}$$

(2) 剪力補強層數 $n > 3$ 時

依前述方式計算當計算出之剪力補強層數較多時，實際補強效果可能無法符合原先評估需求，可能導致CFRP脫層或錨定處之局部破壞，造成浪費。

建議：計算層數 n 較多時，補強設計可以參考附錄一之相關資料設計與錨定。

4.3 柱圍束補強

(1) 檢核柱斷面目前之圍束強度

$$\Delta f'_l = f'_{l(\text{法規})} - f'_{l(\text{目前})}, f'_{l(\text{法規})} = \text{依技術規則}$$

若 $\Delta f'_l > 0 \rightarrow$ 需圍束補強

若 $\Delta f'_l \leq 0 \rightarrow$ 不需補強

(2) CFRP補強設計

選取CFRP的設計參數； t =單層厚度， E_{cf} =彈性模數， ε_u =極限應變， n =補強層數

(3) 圍束補強計算

$$\Delta f'_l = 2t_{cf} \times k_c \times f_{cf} / b (h \text{ 或 } D)$$

圓形斷面 $k_c = 0.95$

方形斷面 $k_c = 0.75$

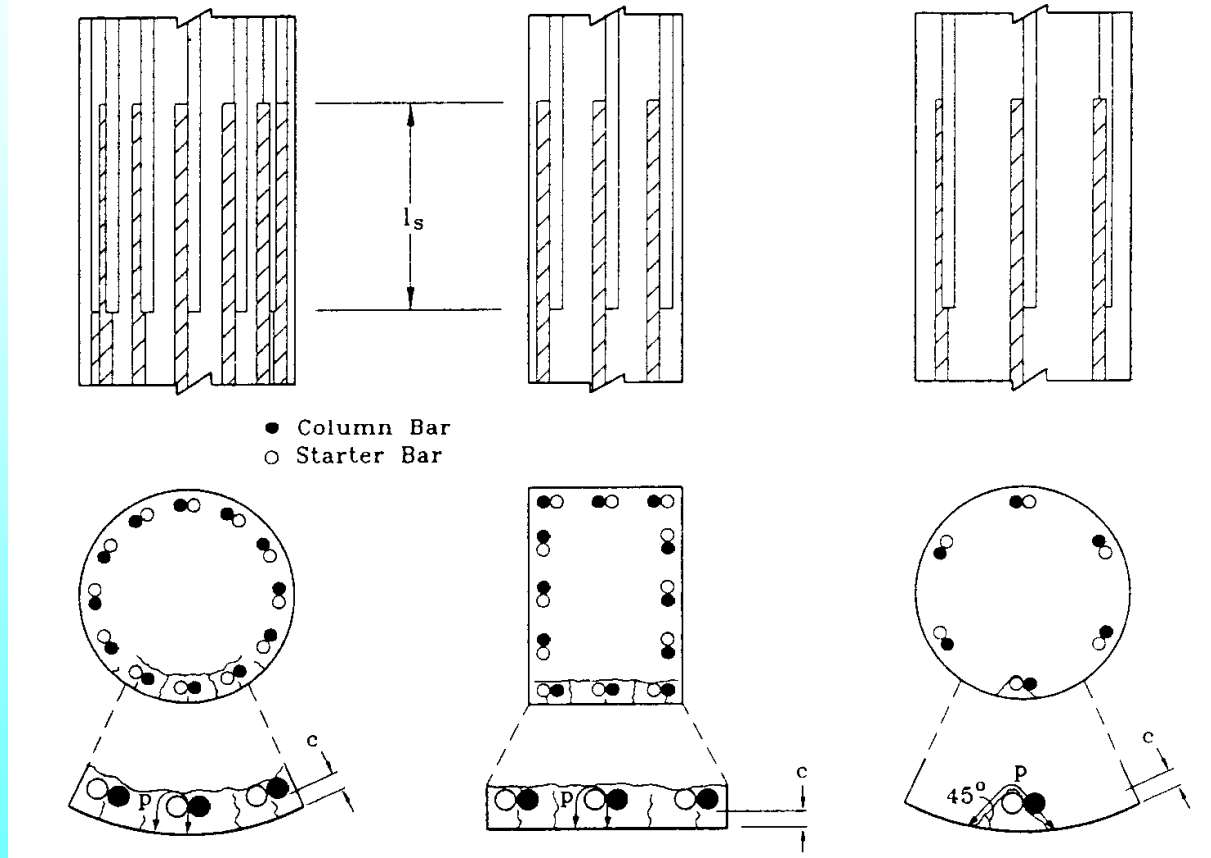
矩形斷面 $k_c = 0.5$ (長邊/短邊 < 1.5)

$f_{cf} = E_{cf} \times \varepsilon_{cf}$ ， ε_{cf} 依實驗得或保守採0.01

4.4 柱塑鉸區鋼筋搭接圍束補強

(1) 檢核柱塑鉸區鋼筋搭接圍束強度需求

表面混凝土裂縫發展，導致混凝土脹裂和鋼筋滑動





$\Delta f'_l = f'_{l(\text{搭接要求})} - f'_{l(\text{目前})}$
防止搭接破壞所提供之圍束力 $f'_{l(\text{搭接要求})} =$
 f_{yl} = 軸向鋼筋降伏強度
 $f'_{l(\text{目前})}$ 現有箍筋所提供之圍束力
若 $\Delta f'_l > 0 \rightarrow$ 需圍束補強
若 $\Delta f'_l \leq 0 \rightarrow$ 不需補強

(2) CFRP補強設計

選取CFRP的設計參數； t =單層厚度， E_{cf} =彈性模數， ε_u =極限應變， n =補強層數

(3) 搭接圍束補強計算

$$\Delta f'_l = f'_{l,cf}$$

$$\Delta f'_l = 2t_{cf} \times k_c \times f_{cf} / b \text{ (h或D)}$$

$$t_{cf} = n \times t$$

有效圍束面積係數 k_c

圓形斷面 $k_c = 0.95$

方形斷面 $k_c = 0.75$

矩形斷面 $k_c = 0.5$ (長邊/短邊 < 1.5)

$f_{cf} = E_{cf} \times \varepsilon_{cf}$ ， ε_{cf} 假設搭接破壞發生時的圓週應變量為 0.0015

4.5 柱撓曲韌性圍束補強

(1) 檢核柱構件目前之韌性

柱構件目前之韌性 $\mu_{\Delta(\text{目前})}$

技術規則規定韌性 $\mu_{\Delta(\text{法規})}$

若 $\mu_{\Delta(\text{目前})} > \mu_{\Delta(\text{法規})} \rightarrow$ 不需補強

若 $\mu_{\Delta(\text{目前})} \leq \mu_{\Delta(\text{法規})} \rightarrow$ 需韌性圍束補強

(2) CFRP 補強設計

選取 CFRP 的設計參數； t =單層厚度， E_{cf} =彈性模數， ε_u =極限應變， n =補強層數

(3) 韌性圍束補強計算

★ 塑鉸區混凝土於圍束狀況下極限壓應變為

a) 圓形柱 $\varepsilon_{cu} = 0.0040 + \frac{2.5\rho_{cf}f_u\varepsilon_u}{f'_{cc}}$

b) 矩形柱 $\varepsilon_{cu} = 0.0040 + \frac{1.25\rho_{cf}f_u\varepsilon_u}{f'_{cc}}$

c) ρ_{cf} =橫向圍束 FRP 體積比

● 圓形柱 $\rho_{cf} = 4t_{cf}/D$

矩形柱 $\rho_{cf} = 2t_{cf}(b+h)/bh$

★不變更原斷面下使用FRP修補矩形柱需符合下述條件方可使用

- a) $P \leq 0.15 f'_c A_g$
- b) 柱鋼筋比 $\rho_s \leq 0.03$
- c)

★圍束修補長度需從塑鉸區向柱體延伸至少L/8 或D/2

※為使修補後塑鉸區之狀況容易觀察，且避免圍束區CFRP受到軸向擠壓損壞，圍束區域需從柱支承處以外1cm開始施作

⊕圍束後柱壓力強度 f'_{cc} 為

$$f'_{cc} = f'_c + \Delta f'_c, = 4.1 \times f'_1$$

f'_1 是混凝土有效的側向圍束應力， $f'_1 = k_c \times f_1$

決定混凝土平均側向圍束應力得.

$$f_1 = 0.5 \rho_{cf} \times f_{cf} \times \sin^2 \theta, \theta \text{ 為與柱主軸之夾角}$$

有效圍束面積係數 k_c

$$\text{圓形斷面 } k_c = 0.95, \rho_{cf} = 4t_{cf}/D$$

$$\text{矩形斷面 } k_c = 0.75, \rho_{cf} = 2t_{cf}(b+h)/bh$$

$$\text{矩形斷面 } k_c = 0.5 (\text{長邊}/\text{短邊} < 1.5)$$

$$f_{cf} = E_{cf} \times \varepsilon_{cf}, \varepsilon_{cf} = \varepsilon_u$$

⊕ 由前述說明知CFRP疊層修補後混凝土的極限應變 ϵ_{cu} ，再經由M- ψ 分析

a) 第一根鋼筋降伏時的 ψ_1 、 M_1

b) 利用 $\epsilon_c=0.004$ 時之 C_u (中性軸距離)、 M_2

$$\psi_y = M_2/M_1 \times \psi_1$$

c) $\psi_u = \epsilon_{cu}/C_u$ ， $\mu_\phi = \psi_u/\psi_y$

d) 懸臂柱 μ_ϕ 為

$$\mu_\phi = 1 + (\mu_\Delta - 1) / [3(l_p/l_{eff})(1 - 0.5 \cdot l_p/l_{eff})]$$

l_p (塑鉸長) $= 0.08l_{eff} + 0.15d_b f_{yy}$ (f_{yy} 單位：ksi)

l_{eff} (柱有效長)，double bending $l_{eff} = \text{柱長}/2$

可得柱韌性 $\mu_{\Delta(\text{補強})}$

使得 $\mu_{\Delta(\text{補強})} > \mu_{\Delta(\text{法規})}$



5.0 案例

- 1.基隆某集合式住宅地下二層36根柱圍束補強，FRP補強設計、施工及施工品管，於86年2月完工。
- 2.台灣電力公司「大林棧橋碼頭預力基樁防蝕及補強修復工程」，規劃、補強設計、施工、施工品管，於87年4月完工。
- 3.台北市政府社會局委託工材所進行景美安養中心長春樓7層樓建築物之結構維修補強規劃、設計、監造，於87年11月完工。
- 4.工研院14館結構耐震補強規劃、設計、施工及施工品管，複材使用量約2,700 m²，於88年5月完工。
- 5.921地震協助災區完成崇光國小校舍補強工程，內容包括結構損壞評估、補強規劃設計及施工品管，工程金額1200萬元，碳纖複材使用量1800 m²，於89年3月完工。



6. 921地震後協助公路局進行溪南橋之結構補強工程，工程金額約500萬元，碳纖複材使用量1600 m²，於88年12月完工。
7. 協助公路局進行台9線坪林明隧補強工程，工程金額約150萬元，碳纖複材使用量475 m²，於89年4月完工。
8. 921地震協助台中縣成功國中進行圖書館結構之損壞評估、補強規劃設計及施工品管，工程金額700萬元，碳纖複材使用量1000 m²，於89年6月完工。
9. 接受公路局委託進行台一線中山橋之橋墩檢測評估、碳纖補強設計、施工及監造工作，目前已完成檢測評估、補強設計、施工、監測系統架設及資料頡取，預計於90年12月完成補強功能監測資料供本橋梁使用安全追蹤之用，工程金額約800萬元，碳纖複材使用量1500 m²。