

# 市區橋梁應用 FRP 補強手冊

委託單位：內政部營建署

執行單位：國立台北科技大學

中華民國九十八年十一月

## 目錄

一、前言 .....	1
二、纖維強化高分子複合材料(FRP)介紹 .....	3
三、FRP 貼片補強應用於橋柱補強 .....	7
3.1 工法概述 .....	7
3.2 材料使用要求 .....	9
3.3 FRP 貼片補強設計準則 .....	14
3.3 FRP 貼片補強施工準則 .....	24
3.4 FRP 貼片補強的品質驗收準則 .....	30
四、FRP 棒補強應用於梁、版補強 .....	34
4.1 工法概述 .....	34
4.2 材料使用要求 .....	34
4.3 FRP 棒補強設計方法 .....	35
4.4 FRP 棒施工方法 .....	46
五、FRP 格網補強應用於版補強 .....	47
5.1 工法概述 .....	47
5.2 材料使用要求 .....	49
5.3 FRP 格網補強設計方法 .....	53
5.4 FRP 格網補強施工方法 .....	57
5.5 FRP 格網補強包覆工法的品質管理 .....	59
參考文獻 .....	62
附錄(一) FRP 棒施工圖說	
附錄(二) FRP 格網施工圖說	

---

---

## 表目錄

表 1 各種 FRP 產品比較表 .....	2
表 2 FRP 材料之三個基本成份 .....	3
表 3 FRP 纖維材料之比較(施邦築, 1998) .....	4
表 4 材料輕質性(比強度、比彈性模數)比較表 .....	5
表 5 耐蝕性 FRP 與主要結構鋼材料之耐蝕性比較 .....	6
表 6 纏繞碳纖維測試項目及標準 .....	9
表 7 碳纖維貼片測試項目及標準 .....	9
表 8 玻璃纖維貼片測試項目及標準 .....	10
表 9 大氣中樹脂測試項目及標準 .....	10
表 10 水中樹脂測試項目及標準 .....	11
表 11 纏繞樹脂測試項目及標準 .....	11
表 12 底漆測試項目及標準 .....	12
表 13 補土測試項目及標準 .....	12
表 14 複合材料積層板測試項目及標準 .....	13
表 15 複合材料耐久性測試項目及標準 .....	13
表 16 FRP 完工後之缺陷與其處置方法 .....	32
表 17 孔洞、氣泡處置方式 .....	33
表 18 環境影響因素折減係數表 .....	38
表 19 各材料平衡鋼筋比(5,000 PSI) .....	40
表 20 低彈性型 PCM 之品質要求 .....	51

表 21 高強度型 PCM 之品質要求.....	52
表 22 EPOXY 樹脂之品質要求.....	53
表 23 PCM 的必要物理性質(橋面版等).....	60
表 24 PCM 的必要物理性質(斷面修復等).....	60
表 25 PCM 成品管理基準.....	61
表 26 環氧樹脂成品管理基準.....	61

---

---

## 圖目錄

圖 1 橋柱 FRP 剪力補強設計流程 .....	16
圖 2 FRP 棒取代鋼筋 .....	34
圖 3 混凝土的應力-應變關係數值模式圖 .....	36
圖 4 鋼筋應力-應變關係圖 .....	37
圖 5 碳纖維應力-應變關係圖 .....	38
圖 6 混凝土壓壞模式 .....	39
圖 7 平衡破壞模式 .....	40
圖 8 纖維斷裂模式 .....	40
圖 9 CFRP 棒與鋼筋混合梁斷面應力應變圖 .....	42
圖 10 CFRP 棒與鋼筋混合梁破壞模式分析與雙筋梁計算流程 .....	45
圖 11 FRP 格網 .....	48
圖 12 版結構標準補強斷面示意圖(使用 PCM 噴凝土) .....	48
圖 13 增厚部分詳細示意圖 .....	49
圖 14 設計斷面 .....	55
圖 15 搭接方式示意圖 .....	56

---

## 一、前言

市區道路系統，往往需藉橋梁跨越地形之阻礙(如貫穿市區之河流)，或節省土地使用空間，或利交通之順利運轉。台灣位處環太平洋地震帶，地震發生頻繁，對國內為數眾多既有橋梁的安全造成嚴重威脅，此外由於台灣經濟起飛，重車數量增加，為節省時間與成本，常有超重車行駛市區道路，造成道路與橋梁之破壞。故有必要採取合理有效的評估方法，進行橋梁耐震能力及承載能力評估，篩選能力不足橋梁，並採取必要之補強手段。

1989 年後，美國加州公路局(Caltrans)即進行大規模之既有橋梁檢測、評估、篩選、排序及補強。1994 年北嶺地震，經補強之橋梁於經歷地震後並無明顯損壞，證明橋梁補強可提高橋梁耐震能力。1995 年日本阪神地震，因橋梁耐震(韌性)能力不足產生破壞，其後進行相關橋梁結構補強亦見良好成效。由此可見，橋梁透過檢測、評估與補強，將可有效降低受載重或地震之破壞，且可延長使用壽命。

台灣為海島國家，天候溼熱多雨，鋼筋腐蝕嚴重，加上四面環海，海風中含有大量鹽分，更加速鋼筋腐蝕造成結構物劣化，此現象於臨近海域之結構物頗為常見。國內既有橋梁多為鋼筋混凝土橋，在生命週期考量下，為有效降低維護所需之人力與物力，並達防治鋼筋鏽蝕問題，使用替代性之營建材料，應用於土木新建結構物中，為國內外先進國家目前皆在研究之課題。

採用纖維強化高分子複合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)即為一良好選擇；除 FRP 複合材料取代傳統鋼筋，防止鋼筋混凝土結構物腐蝕機理發生，及採用新興之 FRP 組裝接合技術取代鋼筋混凝土之橫向箍筋，並可運用於版構件，用以取代傳統 RC 版結構。另因 FRP 材料抗電化學性、抗腐蝕及質輕、強度高等優點，為一絕佳之結構補強材料。

既有市區橋梁補強利用纖維高分子複合材料(FRP)包覆補強工法，具極高之經濟性與快速簡便及交通環境影響小之多項優點，此技術於國外已是普遍之

橋梁補強技術，惟國內之補強案例卻不普及，其原因在於國內無一套標準施工規範以及驗收規範，致橋梁管理者對施工者之信心不足。

本市區橋梁應用 FRP 補強手冊乃整合過去之研究成果，並擷取國內外研究之成果，擬訂一套符合實務運用，且適合本國之纖維高分子複合材料(FRP) 包覆補強標準作業流程與檢核機制，乃至於補強作業之設計準則、材料規格、施工規範、檢驗標準等，研訂一套完整之市區橋梁補強作業程序與維護管理制度、具體提昇補強施工作業之品質評估與控制能力。供業主與監造人明瞭施工內容及要求重點，並藉以監督、控制工程品質；亦可供承造人瞭解施工及材料要求標準及管理要項，以提昇施工技術水準及品質，建立本土化之資料與技術，提供國內業界參採使用，達成節省公帑、有效維護橋梁功能與安全之目標。

此外亦對 FRP 棒及格網材料進行相關施作手冊之擬定，使國內工程於設計施工上，有更多種材料可供採用，以符合耐久性需求。

對於 FRP 之貼片、棒、格網等各項產品在市區橋梁應用範圍整理，依適用性、適用結構範圍進行建議如表 1，提供國內工程人員未來設計使用上的選擇。

表 1 各種 FRP 產品比較表

FRP 產品	適用性	適用結構範圍
FRP 貼片	補強	柱、梁
FRP 棒	新建、補強	梁、版
FRP 格網	補強	版

本手冊將先對纖維強化高分子複合材料(FRP)進行介紹，令使用者對 FRP 材料有初步的了解，再藉由國內外施工經驗與相關規範，分別對 FRP 貼片、FRP 棒及 FRP 格網應用於橋梁補強之設計、施工與驗收等相關事項進行說明。期本手冊可作為在未有完整規範時應用及未來制定相關規範之參考依據。

## 二、纖維強化高分子複合材料(FRP)介紹

為達到國內橋梁快速補強及耐久性目標，部份的傳統材料已不符合此方面需求，故應運而生的是發展質量輕、強度高、彈性好之複合材料，纖維強化高分子複合材料(FRP)即是在這種情況下愈來愈被重視。表 2 為 FRP 材料之三個基本成份：纖維(Fiber Reinforcement)、基材(Matrix)及纖維－基材之界面(Interface)等，以下將對上列三種成份進行解釋。簡單的將 FRP 材料比擬為鋼筋混凝土材料，纖維的作用就如同鋼筋受拉力作用；基材的作用則具混凝土傳遞力量至鋼筋與固定鋼筋的作用，但缺少受壓力行為；界面則如同鋼筋與混凝土之間的握裹力作用。

表 2 FRP 材料之三個基本成份

纖維複合材料		
纖維	基材	界面
玻璃纖維	聚酯樹脂	纖維表面處理 基材改變
碳纖維	環氧樹脂	
克維拉纖維	熱塑性塑膠	

纖維為強化材料，使 FRP 材料具有很高的強度和彈性係數，且使 FRP 材料承受應力時不致於彎曲或破壞，亦為決定 FRP 材料機械性能的主要因素，纖維強化材料於 FRP 材料中之功能綜合歸納成下列五點：(1)承受主要負載；(2)限制微裂紋延伸；(3)提高材料強度與剛性；(4)改善材料抗疲勞，抗潛變性能；及(5)提高材料使用壽命與可靠性。由於纖維強化材料之各種特性，多具有方向性複合材料(Anisotropic Composite)的設計與應用，就更具競爭性與經濟性。最常應用於複合材料之纖維為玻璃纖維(Glass Fiber)、碳纖維(Carbon Fiber)及克維拉纖維(Kevlar)，比較上述纖維之拉力強度、壓力強度、彈性模數、耐久表現、耐疲勞能力、密度、抗鹼能力與價格，發現碳纖維為最佳之選擇，比

較表如表 3 所示。

表 3 FRP 纖維材料之比較(施邦築，1998)

項目	權值	評分：加權前(加權後)		
		碳纖維(Carbon)	Kevlar	玻纖維 (Glass)
權重範圍	1~3			
拉力強度	3	3 (9)	3 (9)	3 (9)
壓力強度	2	3 (6)	0 (0)	2 (4)
彈性模數	3	3 (9)	2 (6)	1 (3)
耐久表現	3	3 (9)	2 (6)	1 (3)
耐疲勞能力	2	3 (6)	2 (4)	1 (2)
密度	2	2 (4)	3 (6)	1 (2)
抗鹼能力	2	3 (6)	2 (4)	0 (0)
價格	3	2 (6)	2 (6)	3 (9)
總分數		(55)	(41)	(32)
排名		1	2	3
評分標準：極佳(3分)、佳(2分)、普通(1分)、不佳(0分)。 權值：依項目重要性，最高為3，最低為1。				

基材最主要的功能是傳送及分散應力到每根纖維中，並使纖維固定於所需之排列方向，基材可保護纖維免受到摩擦或侵蝕，同時也可結合纖維，使複合材料受應力時不致於破壞或變形。基材性質是決定纖維複合材料最高使用溫度、電氣特性等化學性質之主要因素。大部份的高分子化合物、熱固性樹脂、室溫硬化樹脂或熱塑性塑膠，均可加入纖維強化材料，最常用之熱固性樹脂為不飽和聚酯(Unsaturated Polyester Resin)和環氧樹脂(Epoxy Resin)。

纖維－基材的界面是決定複合材料使用壽命之重要因素，在界面處具有很高的局部應力，纖維複合材料可能從界面處先被破壞，故纖維－基材界面必須具有良好的物理和化學性質，以便使負荷能夠很順利的由基材傳送到纖維(強化材料)。利用偶合劑可改進界面之黏著現象，界面必須能抵抗由纖維和基材因不同熱膨脹所造成之應力，也必須能抵抗因樹脂硬化收縮所造成之現象，界面亦可避免複合材料受液體之滲透，幫助基材保護纖維。

## ◎ FRP 材料特性

為提升國內工程技術，除在工法創新外亦可利用創新材料的優點進行設計使用，以突破目前之工程難題。因此必須了解材料本身的特性，使其優點充分發揮於設計使用上。對國內橋梁結構而言，吾人可應用 FRP 材料之特性如下：

### 一、輕質性

結構材料之輕質性指標係將材料強度及彈性模數分別除以材料比重，稱為比強度( $\sigma/\rho$ )及比彈性模數( $E/\rho$ )，由表 4 材料輕質性(比強度、比彈性模數)比較表中可發現，FRP 材料之最大優點在於其比強度是鋼材的數十倍，原因在於 FRP 組成之材料均為輕量材料。故對橋梁輕量化有相當的幫助。

表 4 材料輕質性(比強度、比彈性模數)比較表

結構材料種類	比強度( $\sigma/\rho$ ) (MPa $\times$ cm <sup>3</sup> /g)	比彈性模數( $E/\rho$ ) (GPa $\times$ cm <sup>3</sup> /g)
碳鋼	51.0	26.4
鋁合金	1.7	2.7
鈦合金	2.1	2.5
玻璃纖維	500.0	21.5
碳纖維	1100.0	78.0

### 二、耐蝕性

FRP 材料中，各種化學纖維與基材皆具有比金屬材料優越的耐蝕性，處於酸、鹼、氯鹽的環境下，不易產生傳統鋼筋混凝土所發生的耐久性問題，此特性應用於海島型氣候的國內橋梁，可大幅降低橋梁結構維護費用及周期。表 5 為耐蝕性 FRP 與主要結構鋼材料之耐蝕性比較。

表 5 耐蝕性 FRP 與主要結構鋼材料之耐蝕性比較

藥液種類	耐蝕性 FRP	SS41	SUS32	鋁
稀硫酸	○	×	○	×
濃硫酸	○	○	○	×
稀鹽酸	○	×	×	×
濃鹽酸	○	×	×	×
稀磷酸	○	×	○	×
濃磷酸	○	×	○	×
鹽酸化合物	○	×	×	×

### 三、可設計性

此特性為 FRP 材料與傳統結構材料最大的不同點。FRP 構材可利用不同之成形方式製作成管狀、棒狀、版狀或片狀等設計需求形式，亦可透過不同纖維種類、含量選擇與不同基材的搭配，設計出所需要的強度及彈性模數，方便工程師使用。

國內橋梁多處於腐蝕環境中，超載現象又嚴重，加上混凝土品質不良等因素相互影響下，已嚴重影響橋梁安全。而 FRP 的三大特性運用在橋梁上，的確可解決目前國內之橋梁損壞原因，用以取代橋面版等上部結構除可以降低自重，亦可增加耐久性。工程師亦可藉其可設計性，發揮各種新建或補強之設計施工。

## 三、FRP 貼片補強應用於橋柱補強

### 3.1 工法概述

為改良鋼板包覆工法施工之不便性及後續之維護工作，因此引進纖維強化高分子複合材料(FRP)貼片補強技術，其中以碳纖維最適合橋柱補強。其優點在於材料輕，只需人工即可作業、不影響橋梁自重、不會腐蝕，補強後維護簡易、補強後可做造型設計，增加都市美觀等。

施工時先將柱表面有缺損部分應進行適當處理，使其與施工面平整，之後塗上底膠漆(Primer)，將表面凹洞補平之後塗上樹脂，依設計層數貼上碳纖維貼片，再上一層表面樹脂，最後以抗紫外線(UV)或防火塗料作面層處理。常見之外觀美化，除以油漆塗刷外，亦可使用洗石子等方式。

國內業界目前採用之 CFRP 補強施工準則，乃依照國外成功案例之施工準則，配合國內已實施成功案例之施工經驗所歸納出來的規範，為一套符合國情，且技術成熟的施工準則。

常用之專有用語解釋如下：

1. 碳纖維貼片：將碳纖維以單向或雙向配列成為片狀補強材料，而有單向碳纖維交片(Cross Sheet)、雙向碳纖維交片及單向碳纖維片等。
2. 含浸接著樹脂：於混凝土面層與補強複合材料上塗佈，使補強複合材料與結構物緊密接合之用，讓補強複合材料含浸形成 FRP 所用之樹脂材料。
3. 底漆：浸透於混凝土表層，除了補強混凝土表面並提昇與 FRP 間接合性所用之樹脂。
4. FRP：將含浸接著樹脂含浸於補強複合材料，硬化成複合材料板。
5. FRP 材料單位面積重：以碳纖維貼片每平公尺所含補強複合材料重量表示。
6. 底層處理工作：以砂輪等將混凝土表面的髒污、浮渣等去除之整平工作。

7. 斷面修復工作：將混凝土因剝落等造成之斷面缺損以樹脂砂漿修補之整平工作。
8. 不平整面調整工作：將模板誤差等比較輕微之凹凸用環氧樹脂補土使之平順之工作。
9. 裂縫注入工作：將混凝土龜裂處灌注環氧樹脂之工作。
10. 底漆工作：在混凝土表面，於補強複合材料膠合前塗佈底漆之工作。
11. FRP 膠合工作：塗佈含浸接著樹脂、黏貼補強複合材料，再將含浸接著樹脂含浸接著於結構體之工作。
12. 修飾工作(復原工程)：以保護或美化橋墩為目的，在補強複合材料外側予以塗裝、粉刷及防護等工作。
13. 維修：為確保耐久性或保持現存承載力須實施之對策。
14. 補修：為提升現有之承載力所實施之對策。
15. 纖度：纖維每 1000 m 長之質量
16. 開纖：從每束纖維群中挑出單根纖維
17. 搖變度：以黏度計測定黏度時，測定 6 rpm 時之黏度與 60 rpm 時之黏度比值稱之，搖變度愈大愈不容易垂流。
18. 玻璃轉移溫度：塑膠材料依力學性質、溫度、應變速度等，可區分為玻璃狀、黏彈性狀及橡膠狀等三種狀態。由黏彈性狀變化至玻璃狀之溫度稱為玻璃轉移溫度( $T_g$ )。玻璃轉移溫度不僅與力學性質有關，比容、熱容量、折射率等均會變化。

### 3.2 材料使用要求

FRP 補強橋墩所需之材料如纖維加勁材系統、樹脂系統，底漆系統、補土系統及複合材料積層板之測試項目及國內外相關測試標準詳列如下。

#### ◎ 纖維加勁材系統(Fiber Sheet System)測試標準

纖維加勁材料如纏繞碳纖維、碳纖維貼片及玻璃纖維布等材料之測試標準，並以表列如下。

##### 1. 碳纖維原材料(纏繞碳纖維用)

表 6 纏繞碳纖維測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
抗張強度	CNS 13553	ASTM D3379	JIS R7601
抗張係數	CNS 13553	ASTM D3379	JIS R7601
伸長率	CNS 13553	ASTM D3379	JIS R7601
單位長度之質量	CNS 13553 6.1	—	JIS R7601
表面處理劑含量(漿料含量)	CNS 13553 6.8.1	—	JIS R7601

##### 2. 碳纖維貼片

表 7 碳纖維貼片測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
單位面積重量	CNS 13062	ASTM D3776	JIS K7071
抗張強度	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
抗張係數	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
伸長率	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
彎曲強度	CNS 13556	ASTM D790	JIS K7074

註：碳纖維複合材料貼片之抗張強度、抗張係數與彎曲強度係將纖維含浸接著樹脂硬化後之碳纖維複合材料積層板進行測試所得，積層板層數限定為 4 層。

## 3. 玻璃纖維貼片(單一方向)

表 8 玻璃纖維貼片測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
單位面積重量	CNS 7397	ASTM D3776	—
彎曲強度	CNS 12780	ASTM D790	JIS K7055
抗張強度	CNS 12779	ASTM D3039	JIS K7054
抗張係數	CNS 12779	ASTM D3039	JIS K7054
伸長率	CNS 12779	ASTM D3039	JIS K7054

## ◎ 樹脂系統(積層樹脂)測試標準

大氣，水中與纏繞用含浸接著室溫硬化樹脂之測試標準，分別如表 9、表 10 與表 11 所示。

表 9 大氣中樹脂測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
不揮發成份	CNS 13069	註一	JIS K7235
可操作時間	CNS 13065	ASTM D2471	參考： 溫度上升方法
黏度	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
搖變度(註二)	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
玻璃轉移溫度	註三	ASTM D3418	註三
抗張強度	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113
抗張係數	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113
彎曲強度	CNS 4392	ASTM D790	JIS K7203
抗張剪切強度	CNS 5606	ASTM D1002	JIS K6850

註一：不揮發成份：揮發成份對人體有害，揮發成份愈高，毒性愈強，故必須限制其含量。

註二：搖變度：搖變度的大小會影響樹脂的黏滯度和垂流效果進而影響纖維的含浸效果以及操作性，因此搖變度要適當的控制。

註三：玻璃轉移溫度， $T_g$ ：複合材料在受力或溫度的影響下會有軟化之現象，如果溫度高於玻璃轉移溫度以上，材料的性質會變差，因此材料的使用環境必須加以限制。

表 10 水中樹脂測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
黏滯度	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
可操作時間	CNS 13065	ASTM D2471	參考： 溫度上升方法
抗張強度	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113
抗張係數	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113
彎曲強度	CNS 4392	ASTM D790	JIS K7203
抗張剪切強度	CNS 5606	ASTM D1002	JIS K6850
玻璃轉移溫度	註三	ASTM D3418	註三
混凝土 接著強度	CNS 11053	ASTM D4541	JIS K5400

註三同表 9。

表 11 纏繞樹脂測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
不揮發份	CNS 13069	註一	JIS K7235
可操作時間	CNS 13065	ASTM D2471	參考： 溫度上升方法
黏滯度	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
搖變度	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
玻璃轉移溫度	註三	ASTM D3418	註三
抗張強度	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113
抗張係數	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113
彎曲強度	CNS 4392	ASTM D790	JIS K7203
抗張剪切強度	CNS 5606	ASTM D1002	JIS K6850

註一與註三同表 9。

◎ 底漆系統(Primer System)測試標準

FRP 與混凝土表面接著用之底漆系統測試標準，如表 12 與表 13 所示。

表 12 底漆測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
黏滯度	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
可操作時間	CNS 13065	ASTM D2471	參考： 溫度上升方法
混凝土 拉拔強度	CNS 11053	ASTM D4541	JIS K5400
剝離強度	註四	註四	註四

註四：剝離強度測試是一種輔助接著強度的試驗法，它的試驗方法簡單，祇用一般的彈簧秤和夾子夾住積層在混凝土上的貼片，即可測出其剝離強度。

表 13 補土測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
可操作時間	CNS 13065	ASTM D2471	參考： 溫度上升方法
硬度	CNS 12628	ASTM D2240	JIS K7215
抗壓強度	CNS 12781	ASTM D695	JIS K7208
抗壓係數	CNS 12781	ASTM D695	JIS K7208
混凝土 拉拔強度	CNS 11053	ASTM D4541	JIS K5400
黏滯度	CNS 13065	ASTM D2393	JIS K6833
抗張強度	CNS 4396	ASTM D638	JIS K7113

## ◎ 複合材料積層板測試標準

表 14 複合材料積層板測試項目及標準

測試項目		CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
碳纖維複材	抗張強度	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
	抗張係數	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
	伸長率	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
	彎曲強度	CNS 13556	ASTM D790	JIS K7074
	彎曲係數	CNS 13556	ASTM D790	JIS K7074
玻璃纖維複材	抗張強度	CNS 12779	ASTM D3039	JIS K7054
	抗張係數	CNS 12779	ASTM D3039	JIS K7054
	伸長率	CNS 12779	ASTM D3039	JIS K7054
	彎曲強度	CNS 12780	ASTM D790	JIS K7055
	彎曲係數	CNS 12780	ASTM D790	JIS K7055
玻璃轉移溫度		註三	ASTM D3418	註三
層間剪切強度		CNS 13559	ASTM D2344	JIS K7057
氣泡含量		CNS 13557	ASTM D2734	--

註三同表 9。

## ◎ 複合材料耐久性實驗

補強複合材料貼片在積層時均使用黏著性強之接著樹脂，惟樹脂將隨時間和環境而老化，為確保材料使用年限，必須針對複合材料耐久性加以考慮。

表 15 複合材料耐久性測試項目及標準

測試項目	CNS 標準	ASTM 標準	JIS 標準
抗張強度	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
抗張係數	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
伸長率	CNS 13555	ASTM D3039	JIS K7073
抗張剪切強度	CNS 5606	ASTM D3165	JIS K6850
玻璃轉移溫度	註三	ASTM D3418	註三
層間剪切強度	CNS 13559	ASTM D2344	JIS K7057
硬度	CNS 12628	ASTM D2240	JIS K7215

註三同表 9。

複合材料耐久性環境測試種類有(1)抗水性；(2)抗紫外線；(3)抗鹽水性；及(4)抗鹼性等四種。

### 3.3 FRP 貼片補強設計準則

實際上橋柱同時受到軸力、剪力及彎矩共同作用，故在補強設計時，須先分析橋柱在此共同作用下，何種能力不足再做設計，橋柱補強設計主要分為剪力補強設計與韌性補強設計為主。

#### ◎ 橋柱剪力補強設計

##### 橋柱剪力補強設計原理

若橋柱之剪力強度不足以承擔產生塑鉸所須之剪力時，則可藉由 FRP 補強來增加其抗剪強度。而外包材料補強所須提供的剪力強度可由下式計算：

$$V_j = \frac{V^0}{\phi_s} - V_n \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中， $V_j$  為外包材料補強所提供的剪力強度， $V^0$  為橋柱產生塑鉸所須之橋柱的剪力強度， $\phi_s$  為剪力強度折減因子可取為剪力強度折減因子可取 0.85， $V_n$  為橋柱之剪力容量。

##### 橋柱 FRP 剪力補強

橋柱外包 FRP 補強可視為橫向鋼筋處理，其補強之剪力強度  $V_j$  計算如下：

#### 1. 圓形橋柱

$$V_j = \frac{\pi}{2} t_j f_{jd} D \cot \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

#### 2. 矩形橋柱

$$V_j = 2 t_j f_{jd} D \cot \theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中， $t_j$  為橋柱 FRP 補強之厚度， $D$  為圓形橋柱之直徑或矩形橋柱在受力方向之尺寸， $\theta$  為剪力裂縫與縱向鋼筋之夾角，設計時可採用  $\theta = 35^\circ$ ， $f_{jd}$  為 CFRP 之設計應力，因為環向之設計應變 (Hoop Strain)  $\varepsilon_{jd} = 0.004$ ，所以  $f_{jd} = E_j \varepsilon_{jd} = 0.004 E_j$ ， $E_j$  為 FRP 材料之彈性模數。

故由式(1)、式(2)和式(3)可得 FRP 補強之最小厚度  $t_j$  計算如下：

1. 圓形橋柱：

$$t_j \geq \frac{\frac{V^o}{\phi_s} - V_n}{\frac{\pi}{2} f_{jd} D \cot \theta} \dots\dots\dots(4)$$

2. 矩形橋柱：

$$t_j \geq \frac{\frac{V^o}{\phi_s} - V_n}{2 f_{jd} D \cot \theta} \dots\dots\dots(5)$$

補強後剪力容量  $V_n$  (6) 考量了混凝土的剪力容量  $V_c$  改為式(9)與箍筋的剪力容量  $V_s$  (8) 及 CFRP 的剪力容量  $V_f$  (7)

$$V_n = V_c + V_s + V_f \dots\dots\dots(6)$$

$$V_f = \frac{\pi}{2} t \cdot f_{jd} \cdot D \cdot \cot \theta \dots\dots\dots(7)$$

$$V_s = \frac{\pi}{2} \left( \frac{A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot D'}{S_t} \right) \cot \theta \dots\dots\dots(8)$$

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_{cc}} A_g \dots\dots\dots(9)$$

圓形橋柱 FRP 剪力補強設計流程如下(圖 1)

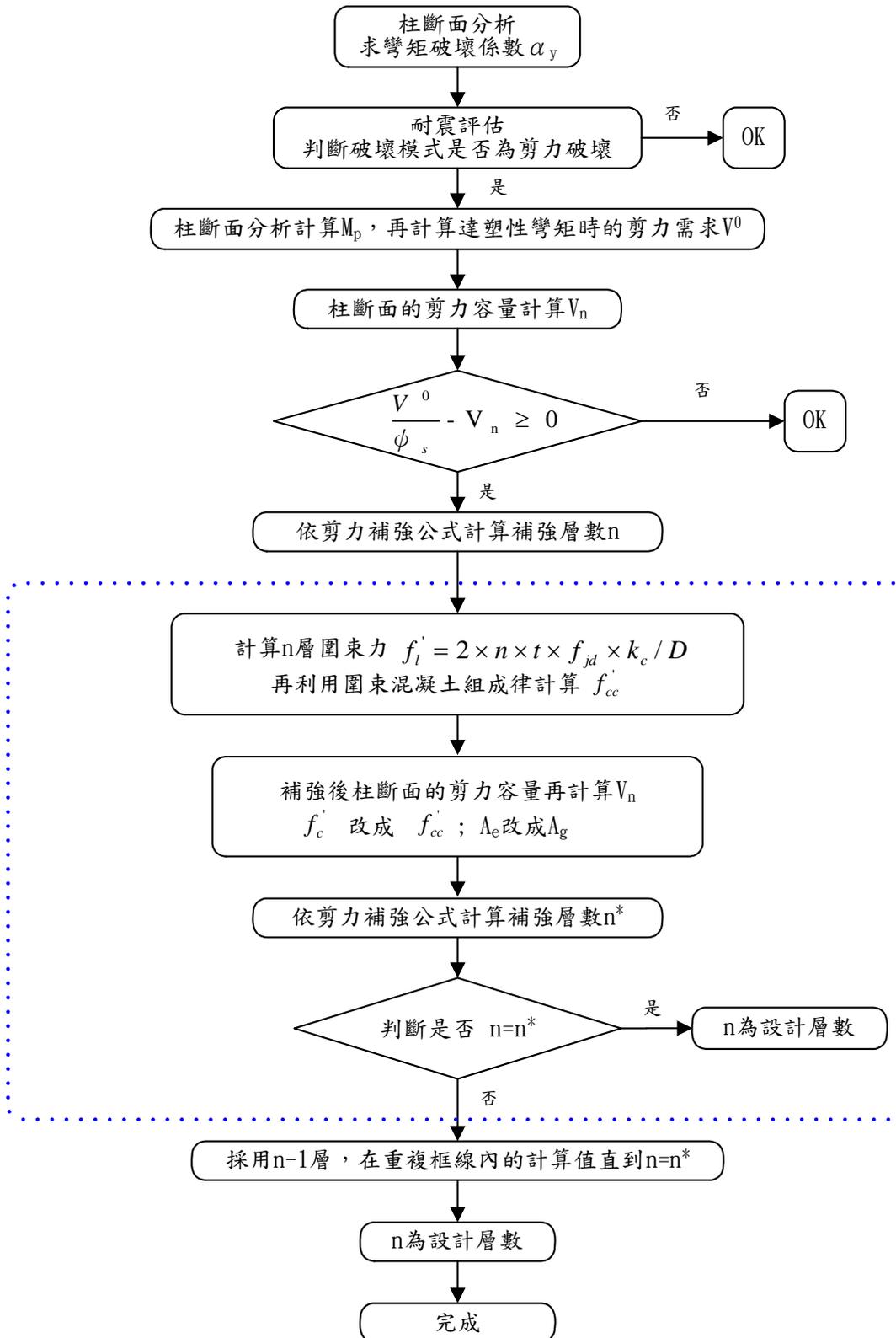


圖 1 橋柱 FRP 剪力補強設計流程(Li and Sung, 2004)

## ◎ 橋柱韌性補強設計

### 橋柱韌性補強設計原理

以下介紹各規範之最小橫向鋼筋比之規定：

#### 1. ATC-32 規範 (ATC-32, 1996)

(1) 圓形橋柱：最小橫向鋼筋量比之規定如下所示。

$$\rho_s = \frac{0.16f'_{ce}}{f_{ye}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{ce}A_g} \right] + 0.13(\rho_l - 0.01) \dots\dots\dots(10)$$

(2) 矩形橋柱：最小橫向鋼筋量之規定如下所示。

$$A_{sh} = 0.12s_t h_c \frac{f'_{ce}}{f_{ye}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{ce}A_g} \right] + 0.13s_t h_c (\rho_l - 0.01) \dots\dots\dots (11)$$

式中， $f'_{ce} = 1.3f'_c$ ； $f_{ye} = 1.1f_{yh}$ ； $h_c$  為圍束混凝土之平面尺寸； $\rho_l = \frac{A_{st}}{A_g}$

為縱向鋼筋量比； $A_{st}$  為縱向鋼筋之總斷面積； $\rho_s$  為塑鉸區所需之最小橫向鋼筋量比。

#### 2. Caltrans 規範 (Caltrans, 1986)

(1) 圓形橋柱：最小橫向鋼筋量比之規定如下所示。

當  $D \leq 1m$  時

$$\rho_s = 0.45 \left[ \frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f'_c}{f_{yh}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \dots\dots\dots(12)$$

當  $D > 1m$  時

$$\rho_s = 0.12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \dots\dots\dots(13)$$

式中  $A_c = \frac{\pi D^2}{4}$  為圍束區之段面積(包含縱向鋼筋總段面積)，但在塑鉸

區時，式(12)與式(13)不能小於下式所計算之值。

$$\rho_s = 0.45 \left[ \frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f'_c}{f_{yh}} \dots\dots\dots(14)$$

## (2) 矩形橋柱：

矩形橋柱之最小橫向鋼筋量之規定如下式所計算，並取大者。

$$A_{sh} = 0.30s_t h_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left[ \frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \dots\dots\dots(15)$$

$$A_{sh} = 0.12s_t h_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \dots\dots\dots(16)$$

## 3. 圍束混凝土之理論極限應變

圍束混凝土斷面的極限應變  $\varepsilon_{cu}$  與橫向鋼筋量比的關係(Priestley 等人, 1994)可依下式所計算。

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \dots\dots\dots(17)$$

式中， $\varepsilon_{su}$  為橫向鋼筋之極限應變， $f'_{cc}$  為圍束混凝土之抗壓強度 (Mander 等人, 1988)。

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_u} \dots\dots\dots(18)$$

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \dots\dots\dots(19)$$

$$L_p = 0.08L + 0.0022f_y d_b \text{ (FHWA, 1994.) (建議評估時用) } \dots\dots(20)$$

$$\text{或 } L_p = g + 2xd_b \text{ (Mander 等人, 1988) (建議補強時用) } \dots\dots(21)$$

$$\mu_\Delta = 1 + 3(\mu_\phi - 1) \frac{L_p}{L} \left[ 1 - 0.5 \frac{L_p}{L} \right] \dots\dots\dots(22)$$

式中， $c_u$  為中性軸與壓力緣外側之距離， $d_b$  為主筋直徑， $f_y$  為縱向鋼筋之降伏強度， $g$  為補強斷面與基礎或帽梁之距離，當  $f_y = 2800\text{kgf}/\text{cm}^2$  時， $x=6$ ；當  $f_y = 4200\text{kgf}/\text{cm}^2$  時， $x=9$ ， $\phi_y$ 、 $\phi_u$  各為斷面降伏與極限曲率， $\mu_\phi$  為斷面之曲率延展性， $\mu_\Delta$  橋柱之位移韌性， $L_p$  為理論之塑鉸長度。

## ◎ 橋柱 CFRP 韌性補強

使用外包材料補強增加橋柱塑鉸區之的韌性，原則上可視為連續性之橫向

鋼筋，用以增加對混凝土的圍束應力並改善其極限強度與應變，進而達到斷面曲率韌性、極限塑鉸轉角及整體橋梁韌性容量之需求。

### 1. 圓形橋柱

未補強橋柱之橫向鋼筋量比的計算如下所示：

$$\rho_s = \frac{4A_{sh}}{D's_t} \dots\dots\dots(23)$$

將上式之  $A_{sh}$  取  $t_j$ ， $s_t$  取 1， $D'$  取  $D$  即可求得圓形橋柱 FRP 包覆補強之等效橫向鋼筋量比，其計算如下所示：

$$\rho_j = \frac{4t_j}{D} \dots\dots\dots(24)$$

式中， $t_j$  為外包 FRP 補強之厚度。

### 2. 矩形橋柱

未補強橋柱之橫向鋼筋量比的計算如下所示：

$$\rho_s = \frac{2A_{sh}(B'+D')}{s_t B'D'} \dots\dots\dots(25)$$

將上式之  $A_{sh}$  取  $t_j$ ， $s_t$  取 1， $B'$  與  $D'$  各取  $B$ 、 $D$  即可求得矩形橋柱 FRP 包覆補強之等效橫向鋼筋量比，其計算如下所示：

$$\rho_j = 2t_j \left( \frac{B+D}{BD} \right) \dots\dots\dots(26)$$

式中， $D'$ 、 $B'$  為橫向鋼筋之圍束長與寬， $D$ 、 $B$  為矩形斷面之長與寬。

在瞭解上述之設計原理後，當採用 CFRP 補強橋柱時，可以下列方式進行補強設計。

#### 1. ATC-32 規範

##### (1) 圓形橋柱：

橋柱外包 FRP 可視為連續性之橫向鋼筋，故由式(10)和式(24)可得 FRP 補強之最小厚度  $t_j$  計算如下：

$$t_j = \frac{D}{4} \left\{ \frac{k_j f'_{ce}}{f_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right] + 0.13(\rho_l - 0.01) \right\} \dots\dots\dots(27)$$

式中， $f_{ju}$  為 CFRP 之極限應力， $k_j = 0.16$ 。

基於考量材料之長期耐久性，在碳纖維補強時，採用 0.9 之強度折減因子。補強後之橋柱韌性，需檢核其是否達到規範之要求，其檢核公式如式(2)，另外韌性計算如下所示：

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2 \times 1.4 \rho_j f_{ju} \varepsilon_{ju}}{f'_{cc}} \dots\dots\dots(28)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_j f_{ju} \varepsilon_{ju}}{f'_{cc}} \text{ (圓形 Priestley 建議)} \dots\dots\dots(29)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_u} \dots\dots\dots(30)$$

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \dots\dots\dots(31)$$

$$L_p = g + 2x d_b \dots\dots\dots(32)$$

$$\mu_\Delta = 1 + 3(\mu_\phi - 1) \frac{L_p}{L} \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L} \right) \dots\dots\dots(33)$$

式中， $\varepsilon_{cu}$  為補強後圍束混凝土斷面之極限應變， $f'_{cc}$  為圍束混凝土之 28 天抗壓強度， $\varepsilon_{ju}$  為 FRP 之極限應變， $c_u$  為中性軸與混凝土壓力緣外側之距離， $\mu_\phi$  為曲率韌性， $\phi_y$ 、 $\phi_u$  各為橋柱斷面採用彎矩曲率分析之降伏曲率與極限曲率， $L_p$  為塑鉸之長度， $g$  為補強斷面與基礎或帽梁之距離，一般可採用 5 cm， $d_b$ 、 $f_y$  各為縱向鋼筋之直徑與降伏強度，當  $f_y = 2800 \text{ kgf/cm}^2$  時， $x = 6$ ，當  $f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$  時， $x = 9$ ， $\mu_\Delta$  為位移韌性， $L$  為橋柱之高度。

另一方面，如果給定橋柱之位移韌性  $\mu_\Delta$ ，則由式(24)及式(28)~式(33)可得 FRP 補強之最小厚度  $t_j$  計算如下：

碳纖維補強：

$$t_j = 0.09 \frac{D(\varepsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f_{ju}\varepsilon_{ju}} \dots\dots\dots(34)$$

$$t_j = 0.1 \frac{D(\varepsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f_{ju}\varepsilon_{ju}} \text{ (考慮材料耐久性)} \dots\dots\dots(35)$$

(2) 矩形橋柱：

由式(11)、式(25)與式(26)可求得

$$t_j = \left\{ 0.12s_l h_c \frac{f'_{ce}}{f_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{ce}A_g} \right] + 0.13s_l h_c (\rho_l - 0.01) \right\} \frac{1}{2(B+D)} \dots\dots(36)$$

## 2. Caltrans 規範

(1) 圓形橋柱：

橋柱外包 FRP 可視為連續性之橫向鋼筋，基於能量平衡之考量及補強後混凝土有較高之應變，因此可將其係數提高 5 倍。故由式(13)和式(24)可得 FRP 補強之最小厚度  $t_j$  計算如下：

$$t_j = \frac{D}{4} \left\{ 0.6 \frac{f'_c}{f_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \right\} \dots\dots\dots(37)$$

基於考量材料之長期耐久性，在碳纖維補強時，採用 0.9 之強度折減因子，而在玻璃纖維補強時，採用 0.6 之強度折減因子，則 FRP 補強之最小厚度  $t_j$  計算如下：

碳纖維補強：

$$t_j = \frac{D}{6} \frac{f'_c}{f_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \dots\dots\dots(38)$$

(2) 矩形橋柱：

對於矩形橋柱之補強，採用與 ATC-32 規範建議之相同方法。

## 3. 圍束混凝土之理論極限應變

(1) 圓形橋柱：

由式(24)、式(28)可推求得其圓形橋柱之補強最小 FRP 厚度需求，其

計算如下所示：

$$t_j = \frac{0.09 \times D(\varepsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f_{ju}\varepsilon_{ju}} \dots\dots\dots(38)$$

上式中， $\varepsilon_{ju}$  為 FRP 之極限應變。其中上式中之  $\varepsilon_{cu}$  值求法如下所示：

步驟 1：假設對原始橋柱補強之位移韌性比需求為  $\mu_{\Delta}$ 。

步驟 2：將設計需求之  $\mu_{\Delta}$  代入式(22)即可推求得橋柱斷面之曲率韌性比  $\mu_{\phi}$  值，其計算如下所示。

$$\mu_{\phi} \equiv 1 + \frac{(\mu_{\Delta} - 1)}{3\left(\frac{L_p}{L}\right)\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L}\right)} \dots\dots\dots(40)$$

步驟 3：由式(40)可推算得橋柱斷面之極限曲率，其計算如下所示。

$$\phi_u = \phi_y \mu_{\phi} = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_u} \dots\dots\dots(41)$$

由式(40)即可推得圍束混凝土極限應變  $\varepsilon_{cu}$  值，其計算如下所示：

$$\varepsilon_{cu} = c_u \phi_y \mu_{\phi} \dots\dots\dots(42)$$

(2) 矩形橋柱：

矩形柱外包 FRP 補強，其增加之剪力強度  $v_{sj}$  之計算方式(Seible 等人, 1995)與橫向鋼筋同，惟若欲增加韌性，有時必須配置成橢圓形，其計算如下所示：

$$a = kb \dots\dots\dots(43)$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{D}{2k}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \dots\dots\dots(44)$$

$$k = \left(\frac{D}{B}\right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(45)$$

$$R_1 = \frac{b^2}{a}, R_3 = \frac{a^2}{b} \dots\dots\dots(46)$$

$$D_{equ} = R_1 + R_3 = \frac{b^3 + a^3}{ab} \dots\dots\dots(47)$$

將式(47)之  $D_{equ}$  取代式(39)之  $D$  值由此可得 FRP 補強之厚。

補強所增加之剪力強度計算近似於圓形橋柱，其強軸與弱軸方向之剪力強度計算如下所示：

(a) 在強軸方向：

$$V_j = 2t_j a f_{yj} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{b}{a} \right] \cot \theta \dots\dots\dots(48)$$

(b) 在弱軸方向：

$$V_j = 2t_j b f_{yj} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right) \frac{a}{b} \right] \cot \theta \dots\dots\dots(49)$$

式中， $a$ 、 $b$  為補強後橢圓之長軸、短軸， $D_{equ}$  為等效之柱直徑。

### ◎ CFRP 補強設計厚度之選擇

依據補強需求，分別求出所需之補強厚度，再由其中選擇補強厚度  $t_j$  最大值者，有  $t_j$  之後，可以選擇不同厚度規格的 CFRP 貼片，一層層貼附至厚度總合大於  $t_j$  即可，用以減低成本。例如  $t_j=0.44$  mm 時，可用 4 層 0.11 mm 或是 2 層 0.165 mm 加一層 0.11 mm 的 CFRP 貼片。本計畫之補強方式僅考慮地震力部分與耐久性(折減係數中考慮)，至於環境或其他外力等問題則應另外考慮。

### 3.3 FRP 貼片補強施工準則

本 FRP 貼片補強施工方法，乃參考國外之補強工法、經驗以及國內成功案例之經驗所歸納出之規範，為業界從事複合材料補強施工之重要遵循原則。

#### ◎ FRP 貼片補強施工順序

FRP 貼片補強施工順序依序為準備工程、混凝土表面處理工程、塗刷底層樹脂工程、不平整表面之再檢修、劃線定位工程、FRP 補強貼附工程、養護工程及表面防護或裝修工程等大項。

#### ◎ FRP 貼片補強準備工程

完善的事前準備工作，可達到優良的補強速度及補強效果。

1. 施工前，應先調查補強結構物之設計圖、竣工圖，規格書，並調查尺寸、配筋，使用材料等資料，做為補強設計時之參考資料。
2. 評估結構物損傷和破壞模式(變形、沈陷、龜裂、腐蝕或老化等)，以決定補強方式，以便製作補強計畫及施工計畫。
3. 藉由備有品質證明書或測試報告之施工材料，來判斷材料性能否合乎補強工程之品質要求，
4. 施工材料必須儲存於通風良好，溫度控制在材料規格溫度範圍內之儲藏所。
5. 重要施工過程必須重點拍照或攝影存檔，以做為施工品質優劣之判定依據。

#### ◎ 混凝土表面處理工程

FRP 貼片補強需將材料直接附於結構混凝土上，以確保達到有效強度，另因施工環境相對濕度達 90% 以上時，不利樹脂之硬化，且無法獲得良好的粘接強度，故須清除補強構件表面疏鬆、剝落及風化等劣化混凝土，露出混凝土結構層，並將其表面清理乾淨並保持乾燥。表面處理工程包含底層處理工程、裂縫灌注工程、斷面復舊工程，目前已有特殊樹脂可於相對濕度高或溫度低時使用，為使用時需提出樹脂材料相關測試證明才可使用。

- 1.底層處理工程，係使用砂輪機將混凝土表面的劣化層(風化、游離石灰、脫模劑、剝離之砂漿、粉刷層或污物等)除去並研磨至出現粗骨材為止，研磨完後以毛刷或高壓空氣鎗將粉塵及已鬆動的物質去除掉，然後以水或丙酮洗淨，並要確保充分乾燥且表面平整無灰塵。
- 2.若補強施工之構件為具有銳利隅角時，須將隅角磨成圓弧 R 角，以免圍束時造成應力集中而降低補強效果，惟補強位置僅為單面時可不需磨成 R 角。對矩形梁、柱而言使用 CFRP 補強結構物時圓弧 R 角之半徑為 3 公分以上。
- 3.若補強施工標的屬於凹角部位時，則需使用環氧樹脂砂漿或補平材料修整，使其凹面成曲線平滑化(內 R 角，半徑亦為 3 公分)，以利 CFRP 貼片貼附。
- 4.裂縫灌注工程，係當裂縫寬度大於 5 mm 以上 1 cm 以下時，則可以樹脂砂漿(大於混凝土設計強度以上)填入並留孔洞，然後抹平結構物表面，再以低壓樹脂砂漿灌注。若無法以水泥砂漿填注處，則以封塞劑先將裂縫處堵住，再以低壓樹脂注入法將灌注用樹脂注入裂縫中，等確認注入材硬化後再將多餘封塞劑和突出物除去，再以補平材料補平，使表面平坦化，維持局部表面高程差在 1 mm 以內。
- 5.斷面復舊工程係將斷面面層上有剝落、孔隙、蜂窩的部位，以研磨方式去除掉，再使用與混凝土具同強度以上的高分子砂漿(環氧樹脂砂漿或壓克力樹脂砂漿)進行修復。對於大區域凹洞之修補，則以無收縮水泥砂漿進行修補。另對於混凝土的接頭、模版之段差、表面是否有塗料殘存的小突出物，皆需分別作復舊與修整處理。鋼筋露出部位亦需做防銹處理，如銹蝕嚴重，須採更換新鋼筋或其他措施以確保安全。修復完工後的局部表面高度差應在 1 mm 以內，或調整成斜坡度 1：10 以下之斜面。

#### ◎ 塗刷底層樹脂工程

塗刷底層樹脂工程旨在使 FRP 貼片完全貼附於結構混凝土上，使中間無

空隙產生，以確保達到有效強度。

- 1.將底層樹脂之主劑和硬化劑依規定的配比稱重，然後置於攪拌槽中以電動攪拌器充分且均勻攪拌，一次的攪拌量為在可使用時間之施工量，超過可使用時間的材料不可再使用。
- 2.施工面以滾筒毛刷含浸底漆均勻塗佈，塗佈量隨施工面的狀況不同而異(標準塗佈量約  $0.3 \text{ kg/m}^2$ )，要斟酌使用，塗佈次數依現場狀況決定是否塗佈第二道，塗佈第二道時須等第一道初乾後再進行。
- 3.底層樹脂之指觸乾燥時間約 3~12 小時。施工前宜充分了解施工環境，混凝土表面會結露或會接觸水的地方不得施工，因為濕氣太高會導致樹脂與水氣產生作用而干擾了膠化過程。
- 4.如果迫於工期或其他因素不得不施工時，可藉有保溫和除濕設備以降低濕度，或選用濕潤面專用的底層樹脂施工，以確保施工品質。施工現場嚴禁火源，施工人員必須使用保護工具(如保護面罩、保護眼鏡和塑膠手套等)。

#### ◎ 不平整表面之再檢修

本施工步驟，係貼附 CFRP 工程前對混凝土表面再做檢查，並對較小區域之凹洞或凸出部分做填補或磨平之工作。

- 1.需將補平材料之主劑和硬化劑依所規定之配比稱重，然後置於攪拌器中攪拌，一次的攪拌量為在可使用時間之施工量，超過可使用時間的材料不可再使用。
- 2.混凝土表面凹陷之部位利用補平材料填補平整，於轉角處應用補平材料修復成光滑的圓弧，其半徑不小於 3 cm。
- 3.當底層樹脂乾燥後，將補平材料塗抹於上述之缺陷上，塗抹後施工面必須使用適當工具加以修整，使整個施工面平整光滑。待補平材料表面指觸乾燥後方可進行下一步之補強施工。

#### ◎ 劃線定位工程

黏貼碳纖維布前，應按照補強設計之部位劃線定位。依設計圖示，畫好貼

附位置以確保材料之補強效果，貼歪、貼錯位置均會影響材料之特性與補強效果，貼覆碳纖維布之纖維方向與箍筋方向相同。

### ◎ FRP 補強貼附工程

FRP 補強貼附工程，宜注意施工環境及施工過程，若施工環境於混凝土表面會結露或會接觸水的地方不得施工。如果迫於工期或其他因素，不得不施工時，則施工現場必須有除濕設備控制溫濕度在材料規定之範圍內，以確保底層樹脂表面或貼片表面沒有水氣存在。施工過程需注意施工場所需通風良好，若無法達到，現場需裝設通風設備，並應注意下列各項要點：

1. 塗佈接著樹脂前，必須先確認底層樹脂狀況為指觸乾燥。
2. 碳纖維布預先以剪刀或刀片依所設計的尺寸大小裁好，裁剪數量只裁當日所需用的數量，且為防止施工的不連續性，在還未黏貼前就須把所有的貼片裁好且標上記號以利黏貼。
3. 將環氧樹脂的主劑和硬化劑依所規定的配比稱重並攪拌，一次的攪拌量為在可使用時間之施工量，超過可使用時間的材料不可再使用。
4. 施工面以滾筒毛刷含浸接著樹脂均勻的塗佈，其使用量隨混凝土表面的狀況不同而斟酌使用。惟需避免樹脂過量導致纖維滑移或扭曲，或樹脂不足導致纖維含浸不足而影響補強功效。
5. 將纖維貼片平順的貼合在含浸樹脂的塗佈面，並用刮刀沿著纖維方向用力刮平以除去氣泡和貼平貼片，然後小心移除離形紙。
6. 利用 FRP 用脫滾輪或塑膠具凹槽型式塑膠滾輪沿著纖維方向來回滾壓以充分含浸樹脂和除去氣泡，拱起部位和角落容易產生氣泡，必須小心除泡。
7. 在貼上 FRP 貼片的上面，再度以含浸樹脂的滾筒毛刷將樹脂均勻的塗佈在上面，然後再重覆 6. 的步驟，務必使其含浸完全。纖維貼片貼附 30 分鐘後才能進行上層樹脂塗抹，並注意貼片是否有浮起，錯位現象，若有則以滾輪或刮刀壓平修正。
8. 二層以上的積層，重覆 4.~7. 的步驟，但以相隔一天的效果最好，若迫於

工時，則至少要間隔 1 小時以上。若氣溫在  $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$  之間施工以一日一層施工為原則，因品質最好。

9.纖維貼片貼附需要搭接時，貼片纖維方向交接處，搭接長度必須在 10 cm 以上。

10.施工中若有發生結露現象，則必須擦乾和保持乾燥才可施工，同時在貼附後要考慮施工環境對貼附的影響(如風壓效應，端部的固定等)。

11.施工完後要目視去確認層數，同時貼附處有不平地方均需將貼片拉平。

12.施工人員一定要穿著保護工具(如面罩、眼鏡、手套等)。

### ◎ 養護工程

戶外之 FRP 施工後，要用塑膠布等覆蓋布遮蔽 24 小時以上，以防雨淋或風砂，灰塵之污染。注意覆蓋布不能碰觸施工面。室內則視需要而定。溫度  $20^{\circ}\text{C}$  以上時須養護 1 週，溫度  $10^{\circ}\text{C}$  以下時須養護 2 週，溫度  $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  時，則養護 1~2 週。

### ◎ 表面防護或裝修工程

橋墩等以 FRP 補強後，為緩和車輛等衝撞 FRP 貼片表面，於 FRP 貼附硬化後於其表面噴塗砂漿等防護層，必要時可用掛網方式，使防護層和 FRP 獲得良好之附著強度。另因樹脂抗紫外線能力較差，易老化，於日光直接照射處，或為美觀，可於 FRP 表面噴塗耐候性塗料或表面裝飾材料。必要時可依設計，噴塗耐火材料於 CFRP 表面。

### ◎ 施工記錄(工程日報表)

施工必須做記錄，記錄內容至少必須包括：施工名稱及單位、天候(溫度、濕度)、施工項目、材料使用量、施工人員類別與出工人數、施工概要等。

### ◎ FRP 補強施工過程中之安全管理

本補強施工方法所使用材料有底漆、含浸接著樹脂、碳纖維貼片，細部修補材等多種材料。施工時要注意安全，同時亦需熟悉各種材料特徵，施工條件，作業環境等，並遵守下列施工安全注意事項：

- 1.充份確認材料的使用方法，保管及管理方法後才可施工。
- 2.安排整理好通道，施工架等作業環境，同時施工人員必備的口罩、面具、護目鏡、橡皮手套、安全罩等必須嚴格要求穿戴。
- 3.使用有機溶劑或密閉場所，必須注意通風問題，要有抽、送風機風管等設備以強制換氣，同時要避免吸入過多有機溶劑。
- 4.底漆、環氧樹脂、塗料等，若不小心沾到皮膚，應以肥皂水洗淨，如碰到眼睛，應即以大量清水沖洗，並緊急送醫作適當處理。
- 5.碳纖維貼片具導電性，飛散之碳纖維會造成電動機械的短路，因此在有機器開關部位，宜用塑膠布包封絕緣。
- 6.世界各國研究機構調查報告，尚未能證明飛散碳纖維是否危害人體。惟為安全起見，作業需帶防塵口罩。
- 7.提取碳纖維貼片時，可能造成皮膚過敏，故須帶保護手套提存。
- 8.碳纖維貼片之廢棄物，要以產業廢棄物處理方法處理。
- 9.注意火源應遠離工作場所，並配備滅火器具及設備。

### 3.4 FRP 貼片補強的品質驗收準則

FRP 貼片補強之品質管理，包括清點數量與材料性質檢測。清點數量以實際到貨量計算。碳纖維材料性質檢測，承商應會同業主及監造單位於現場取樣製作試片。每 1000 m<sup>2</sup>(每批)至少 3 片以上，以本節材料測試項目及其相關測試標準進行試驗。

完工驗收，應包含施工期間工程日報表及碳纖維貼覆完成後，進行之檢測，以確定補強品質。其步驟為：以目視檢測纖維貼片有無缺脂皺折等外表異常處；再持螺絲起子之塑膠柄輕劃過完工表面或以啄木鳥敲擊器，以聲音判斷是否有空孔存在；最後用硬度測試計測試其硬度。若硬度不足，則需視情形挑選局部區域切開。

由於施工過程中很多因素會影響施工品質，因此除施工前必須由材料製造商提出使用材料試驗報告等相關品質證明書外，施工過程中必須實施補強品質檢驗，才能控制施工品質，補強品質檢驗項目主要為現場接著強度試驗，測試要點和注意事項描述如下。

1. 施工現場為判斷 FRP 與混凝土表面的接著性能好壞以及判斷 FRP 層是否均勻而進行接著強度試驗。
2. 試驗的區域可在施工範圍內、施工範圍外或另外製作與施工體等同強度的混凝土面上製作同式樣貼片進行試驗，以判斷當時施工品質。
3. 施工範圍內所製作之試片，必須在做完測試後，恢復補強前之舊觀(樹脂配方，施工方式均與現場施工情況相同)。
4. 複合材料補強施工時，須確保補強材料系統及補強施工過程之品質管理，只要能掌控施工前和施工中的品質管理即可做好補強工作，惟整個補強工事品質好壞，並不能單憑目視或經驗來判斷，必須有一套合理的驗收標準加以衡量。

#### ◎ 施工前品質管理

補強材料品質影響施工後品質和補強效果，故施工前必須針對補強材料性

質作品質檢查，以確保材料品質。

FRP 補強材料系統主要有四項：(1)纖維系統；(2)樹脂系統；(3)底漆系統；與(4)補土系統。這些材料在使用前必須測試的項目列於 3.2 節，這些測試報告應由材料供應廠商提供，經設計單位確認合乎補強材料規格後方可進場施工。為確保材料品質，施工承攬廠商應會同監造單位於現場取樣，交由經認證之試驗機構進行材料確認測試。

1. 試驗項目：包含 FRP 纖維板的抗拉強度及係數試驗(CNS 13555)、樹脂固成份 99% 以上(CNS 13069)及樹脂之配合實驗：黏滯度(CNS 13065)和可使用時間(CNS 13065)。

2. 檢驗次數

a. 每次施工，樹脂的檢驗項目至少需做一組試驗。

b. 施工之 FRP 量超過 2000 m<sup>2</sup> 時，每 2000 m<sup>2</sup> 的纖維板需測試一組，施工量不足 2000 m<sup>2</sup> 時，纖維板測試亦做至少一組試驗。

以上檢查標準須符合材料強度規格值和樹脂性質。

### ◎ FRP 施工完工後的品質管理

1. 檢測項目及順序

a. 目視檢測

使用時機：完工後。

檢查標準：不能有間隙，缺脂區、皺紋、脫層、空孔及氣泡等缺陷。

b. 金屬槌測試

使用時機：完工後 3 天，目視檢測有疑問之大區域檢測。

檢測標準：完工後 3 天，以金屬槌輕敲整個修補區域，不能有空隙，脫層分離現象。

c. Durometer shore D (或 Durometer JIS D) 硬度測試(CNS 12628)

使用時機：完工後 3 天，金屬錘檢測無缺陷部位之檢測。

檢測標準：完工後 3 天，硬度值需達 80 以上視為合格。若未達 80 則

完工後 7 天重測，硬度值必須達 80 以上方為合格。

d. 接著強度測試(拉拔實驗)

使用時機：完工後 3 天，目視檢測、金屬錘測試、硬度測試均無疑問之部位。

檢測標準：

- (1) 若碳纖維貼片與混凝土黏結在一起剝落則為合格。
- (2) 若碳纖維貼片與混凝土發生界面剝離現象，則接著強度必須大於  $20 \text{ kgf/cm}^2$  始為合格。
- (3) 若碳纖維貼片產生層間剝離現象時為不合格。

FRP 完工後，若發現缺陷，可參照表 16 及表 17 建議方法進行處置。

表 16 FRP 完工後之缺陷與其處置方法

缺 陷	處置方法
間隙 ( Gaps)、缺脂區 (Starved Areas)	加補樹脂
皺紋 ( Wrinkles )	磨平再上樹脂
脫層(Delamination)	拆除、重新貼附
孔洞 ( Holes )、起泡 ( Blister )	如表 4.17 所示

表 17 孔洞、氣泡處置方式

氣泡長度	對 象	集中程度	處置方式	方 法
$\geq 3$ cm	全部氣泡	—	補修	凸出 3 cm 以上 拆去再貼付 凹陷 3 cm 以上 樹脂注入
$\geq 1$ cm 且 $< 3$ cm	7~10 個/m <sup>2</sup> 以上， 面積率 0.2% 程度以上	分散(*1)	補修	樹脂注入
	7~10 個/m <sup>2</sup> 以上， 面積率 0.2% 程度以上	密集(*1)	補修	再施工(拆去， 再貼附)
	7 個/m <sup>2</sup> 未滿，最大 直徑 2cm 以上	分散(*1)	合格	—
	7 個/m <sup>2</sup> 未滿，最大 直徑 2cm 以下	分散(*1)	合格	—
	7 個/m <sup>2</sup> 未滿	密集(*1)	補修	樹脂注入(*3)再 施工(拆去再貼 附)(*4)
$< 1$ cm	—	分散(*2)	合格	—
	—	密集(*2)	補修	再施工(拆去再 貼附)

\*1：對象面積在 20 cm×20 cm 中有佔 80%(5~8 個)以上為密集，若 80% 以下則為分散。

\*2：對象面積在 5 cm×5 cm 中有 5 個以上為密集，若 5 個以下則為分散。

\*3：氣泡直徑未滿 2 cm 的處理方式。

\*4：直徑大於 2 cm 的處理方式。

## 四、FRP 棒補強應用於梁、版補強

### 4.1 工法概述

為解決國內海島型氣候橋梁鹽害問題，及國內高氯離子含量結構物修復問題，故引進纖維強化高分子複合材料(FRP)棒補強技術(如圖 2 所示)。其中以碳纖維最適合橋面版與梁之修復補強。其優點在於材料輕，施工快速、不影響橋梁自重、不會腐蝕，補強後維護簡易等。施工時與一般鋼筋施作相同，惟需注意本材料係以纖維與樹脂組成，側向抗磨損能力較差，故施工、存放或搬運時須避免摩擦。材料不可焊接，因此搭接及綁紮方式以續接器為主或以塑膠束帶固定即可。



圖 2 FRP 棒取代鋼筋

### 4.2 材料使用要求

抗拉強度、抗拉應力與應變、抗拉模數等試驗值之測定，碳纖維棒可採用 CNS 13555 碳纖維強化塑膠抗拉性能試驗法進行試驗，玻璃纖維棒可採用 CNS 12779 玻璃維強化塑膠抗拉性能試驗法進行試驗。

### 4.3 FRP 棒補強設計方法

一般對 FRP 材料相較於鋼筋材料之認知，FRP 不如鋼筋材料具延展性，無法提供足夠之預警及韌性，惟 FRP 材料具有較高之強度與較低之彈性模數，故設計時應使用工作應力法設計，並以混凝土破壞為主要之破壞模式，及採較高之安全係數防止 FRP 棒突然斷裂，故藉設計適當的 FRP 鋼筋量及控制構件之破壞模式，亦可使結構於破壞前提供足夠之預警作用。

#### ◎ FRP 棒梁理論分析

根據 ACI 440.1R-03 碳纖維，基於下列原因，其分析與傳統 RC 略有不同：

1. 高強度，可達 $21,100 \text{ kgf/cm}^2$  (鋼筋為 $4220 \text{ kgf/cm}^2$ )
2. 低楊氏係數， $1.12 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  (鋼筋為 $2.04 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ )
3. 高變形，約1.3% (鋼筋 $\epsilon_y = 0.002$ )

梁分析之基本觀念在可用強度法或工作應力法，常用之作法為依強度法設計並檢核工作狀態下是否滿足相關需求。

#### ◎ 基本假設

RC 構件之分析，通常會作下列四項基本假設：

1. 彎曲前之平面斷面於彎曲後仍保持平面。
2. 鋼筋之應力-應變曲線已知，假設為彈塑性。
3. 混凝土張力強度可忽略不計。
4. 混凝土之應力-應變曲線為已知。

而對於用 CFRP 棒於 RC 構件之撓曲行為則增加以下假設：

5. CFRP 棒與混凝土完全握裹且不產生相對滑動。
6. CFRP 之應力-應變曲線為已知。

#### ◎ 鋼筋混凝土與 CFRP 材料應力-應變關係

(一) 混凝土的應力-應變關係數值模式最常為人使用模式如圖 3 所示：

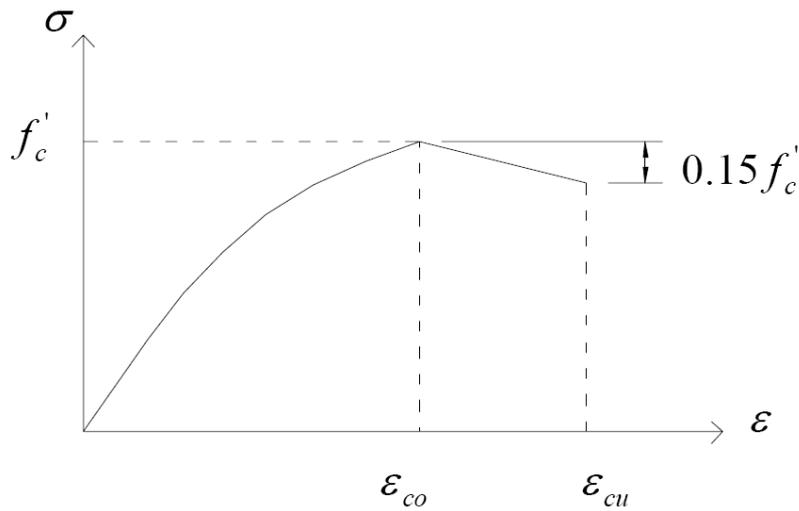


圖 3 混凝土的應力-應變關係數值模式圖

(1) 當  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}$  時，

$$f_c = f'_c \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (33)$$

(2) 當  $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{co}$  時，

$$f_c = f'_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right] \quad (34)$$

其中， $f'_c$  為混凝土極限應力； $\varepsilon_{co}$  為相對最大應力之應變； $\varepsilon_{cu}$  為混凝土極限應變。

(二) 鋼筋應力-應變關係以一彈塑性行為描述如圖 4 所示(Hognested, 1951)：

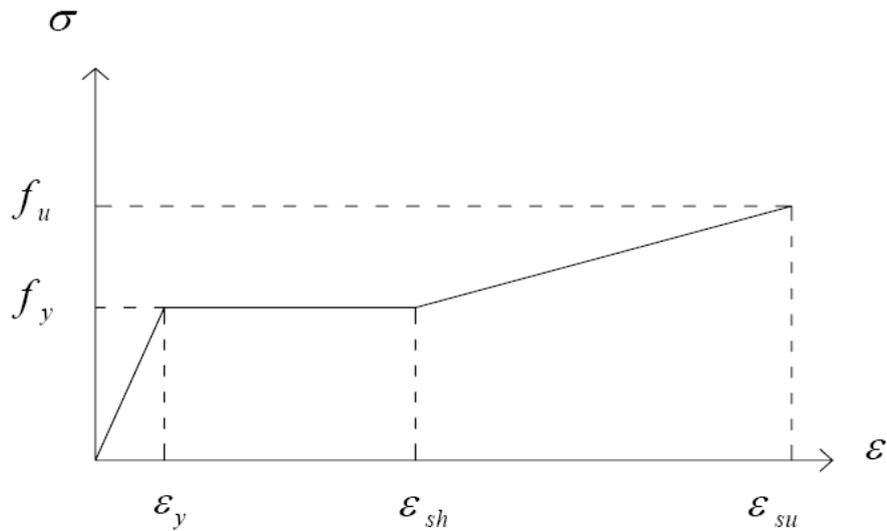


圖 4 鋼筋應力-應變關係圖

(1) 當  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$  時，

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (35)$$

(2) 當  $\varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$  時，

$$f_s = f_y \quad (36)$$

(3) 當  $\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s < \varepsilon_{su}$  時，

$$f_s = f_y + E_{sh} \cdot (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}) \quad (37)$$

其中， $f_y$  為鋼筋降伏應力； $f_u$  為鋼筋極限應力； $E_s$  為鋼筋彈性楊氏模數； $E_{sh}$  為應變硬化區域比例數； $\varepsilon_y$  為鋼筋降伏應變； $\varepsilon_{sh}$  為鋼筋應變硬化應變； $\varepsilon_{su}$  為鋼筋極限應變。

(三) 碳纖維應力-應變關係為一線彈性模式，如圖 5 所示：

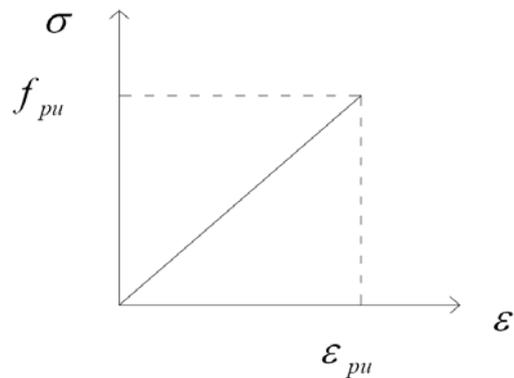


圖 5 碳纖維應力-應變關係圖

$$(1) \quad \varepsilon_{sp} \leq \varepsilon_{pu}$$

$$f_{sp} = E_{sp} \cdot \varepsilon_{sp} \quad (38)$$

其中， $f_{pu}$  為極限應力、 $\varepsilon_{pu}$  為極限應變

(四) 根據 ACI 440.1R-03，FRP 棒之設計張力強度  $f_{fu}$

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (39)$$

其中， $C_E$  為環境折減因素，如下表 18； $f_{fu}^*$  為 FRP 棒出廠保證強度。

表 18 環境影響因素折減係數表

暴露情況	纖維種類	環境折減因素 $C_E$
混凝土無暴露在環境中	Carbon	1.0
	Glass	0.8
	Aramid	0.9
混凝土有暴露在環境中	Carbon	0.9
	Glass	0.7
	Aramid	0.8

### ◎ 撓曲破壞模式

一般梁所受載重作用產生的應力，主要考慮有撓曲與剪力，但通常剪力造成影響較彎矩造成的小，因此大部份梁設計都先考慮撓曲，爾後再檢核剪力是

否符合需求。就傳統 RC 梁彎矩破壞而言，發生破壞之型態有以下三種(徐耀賜，2001)：

1. 平衡式破壞：拉力筋降伏與混凝土壓碎同時發生，此即所謂平衡筋梁 (Balanced Reinforced Beam)。
2. 拉力筋降伏破壞：拉力筋降伏時，受壓區混凝土仍未達壓碎(Crushing)之階段，此即所謂低筋梁(Under-Reinforced Beam)。
3. 混凝土受壓碎破壞：於拉力筋降伏之前，受壓區混凝土即受壓碎破壞，此乃所謂過筋梁(Over-Reinforced Beam)。此種破壞模式屬瞬間發生之脆性破壞，發生時毫無預警可言，故在設計時須絕對避免。

一般系統 RC 梁均為補強不足以確保破壞係由鋼筋降伏，方可提供足夠之預警及韌性，但 CFRP 基本上為材料行為屬線彈性，無法提供降伏之功能，故設計係採高安全係數。依照 ACI 440.1R-03，CFRP 梁之設計可採 CFRP 斷裂或混凝土壓碎之理念，只要強度及使用性均符合需求。一般而言，對 CFRP 棒之混凝土梁而言，混凝土壓碎之破壞模式較 CFRP 棒斷裂之破壞模式展現更好之韌性。

### ◎ 不同破壞模式之應力應變關係

由於 ACI 440.1R-03 為 CFRP 單筋梁規範，如下圖 6、圖 7、圖 8，分別為 (a)混凝土壓壞模式，(b)平衡破壞模式，及(c)纖維斷裂模式。

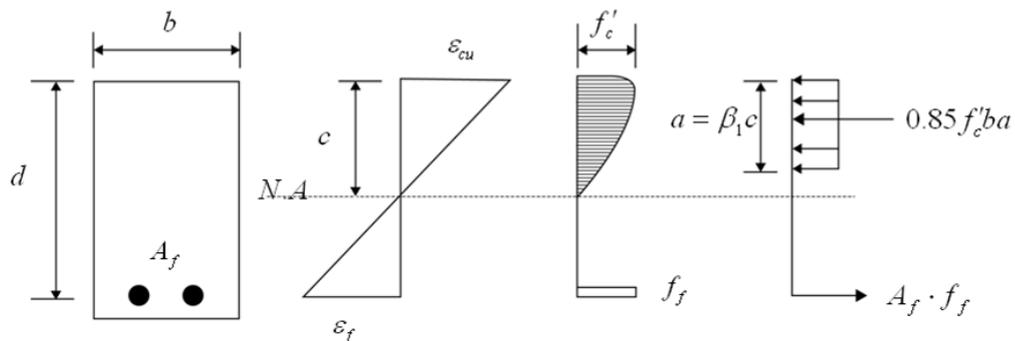


圖 6 混凝土壓壞模式

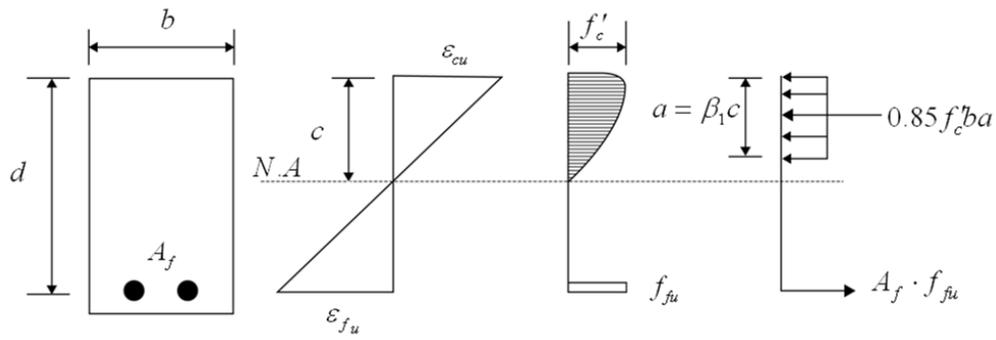


圖 7 平衡破壞模式

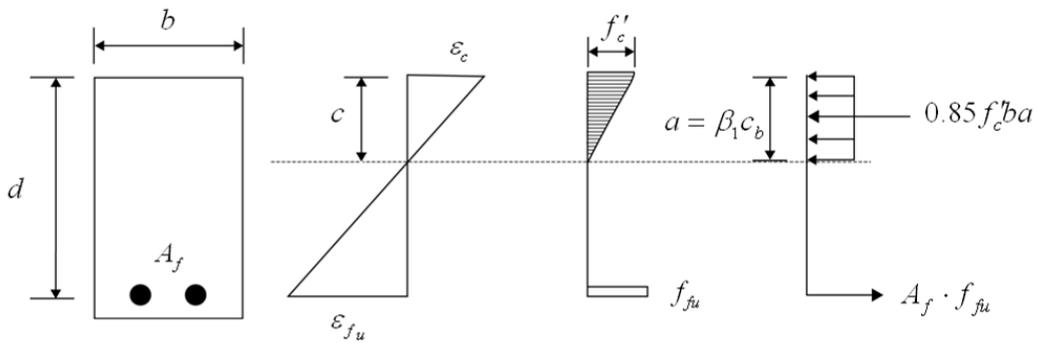


圖 8 纖維斷裂模式

◎ 撓曲強度計算

根據 ACI 440.1R-03，纖維之強度高於鋼筋，故依平衡關係所得之平衡比較低，如下表 19。

$$\text{複材比 } \rho_f = \frac{A_f}{bd} \tag{40}$$

$$\text{平衡複材比 } \rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \cdot \epsilon_{cu}}{E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}} \tag{41}$$

表 19 各材料平衡鋼筋比(5,000 psi)

種類	抗張強度, $f_y$ or $f_{fu}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	彈性模數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\rho_b$ or $\rho_{fb}$
鋼	4,220	$2.04 \times 10^6$	0.0335
GFRP	5,627	$4.22 \times 10^5$	0.0078
AFRP	11,947	$8.44 \times 10^5$	0.0035
CFRP	21,100	$1.55 \times 10^6$	0.0020

(1)  $\rho_f > 1.4\rho_{fb}$  當為混凝土壓碎破壞模式

$$M_n = A_f \cdot f_f \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (42)$$

$$a = \frac{A_f \cdot f_f}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (43)$$

$$f_f = E_f \cdot \varepsilon_{cu} \left( \frac{d-c}{c} \right) \quad (44)$$

(2)  $\rho_f < \rho_{fb}$ ，則為 CFRP 筋先破壞之模式，其計算式如下

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (45)$$

### ◎ 修正 ACI 440 雙筋梁規範與破壞模式分析理論

規範 ACI 440 (2003)，僅提供 FRP 梁之單筋梁理論與設計，但為使用於雙筋梁，因此將規範 ACI 318 與規範 ACI 440 比較後，發現公式並無不同，僅有材料參數之改變(如  $A_s \rightarrow A_f$ 、 $f_y \rightarrow f_{fu}$ 、 $f_s \rightarrow f_f$ 、 $E_s \rightarrow E_f$ )，因此利用規範 ACI 318 雙筋梁理論將材料參數修改為 FRP 梁雙筋梁理論是可行的。在 FRP 梁雙筋梁分析中，其基本假設與單筋梁相同(洪明中，2008)。

### ◎ CFRP 棒與鋼筋混合梁破壞模式分析與雙筋梁公式推導

目前規範 ACI 318 或 ACI 440 中，單筋梁或雙筋梁分析時，破壞模式是由鋼筋比(纖維比)與平衡鋼筋比(平衡纖維比)來判斷，而研究中 FRP 梁雙筋梁理論是以斷面分析藉由應變增量觀察壓力區混凝土或拉力區 CFRP 棒何者先達極限應變判斷其破壞模式。

以下為 CFRP 雙筋梁理論公式推導，圖 9 為 CFRP 棒與鋼筋混合梁斷面應力應變圖。

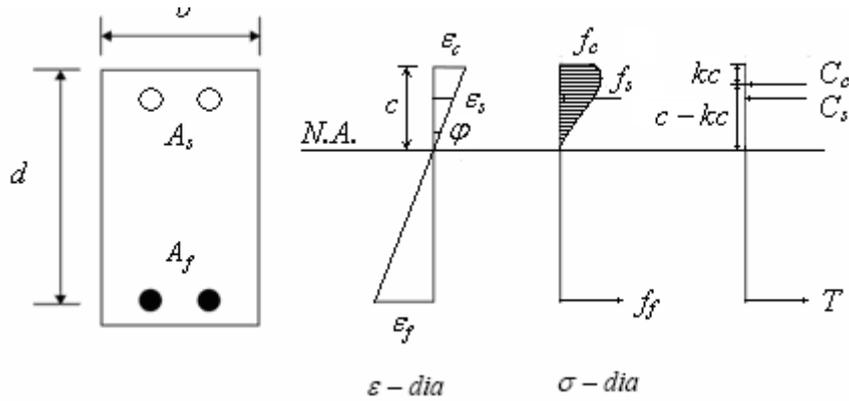


圖 9 CFRP 棒與鋼筋混合梁斷面應力應變圖

## ◎ 材料特性

$$f_c = E_c \times \varepsilon_c \quad (46)$$

$$f_s = E_s \times \varepsilon_s \quad (\text{當 } 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \text{ 時}) \quad (47)$$

$$f_s = f_y \quad (\text{當 } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \text{ 時}) \quad (48)$$

$$f_f = E_f \times \varepsilon_f \quad (49)$$

式(46)~(49)中， $f_c$ 為混凝土強度； $E_c$ 為混凝土之彈性模數； $\varepsilon_c$ 為混凝土之應變； $f_s$ 為鋼筋之應力； $E_s$ 為鋼筋之彈性模數； $\varepsilon_s$ 為壓力區鋼筋之應變； $f_y$ 為鋼筋降伏強度； $f_f$ 為 CFRP 棒之應力； $E_f$ 為 CFRP 棒之彈性模數； $\varepsilon_f$ 為拉力區 CFRP 棒之應變。

## ◎ 平衡條件

$$C_c = \int f_c dA = \int_0^c f_c (b dx) \quad (50)$$

$$C_s = A_s \times f_s \quad (51)$$

$$T = A_f \times f_f \quad (52)$$

$$T = C_c + C_s \quad (53)$$

式(50)~(53)中， $C_c$ 為受壓混凝土之合力； $C_s$ 為受壓鋼筋之合力； $A_s$ 為受壓鋼筋之斷面積； $b$ 為斷面寬度； $T$ 為斷面受拉之合力； $A_f$ 為受拉 CFRP 棒之

斷面積。

變形諧和：

$$\frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_f}{d-c} = \varphi \quad (54)$$

$$\varepsilon = \varphi \cdot x \quad (55)$$

$$x = \frac{d\varepsilon}{\varphi} \quad (56)$$

式(54)~式(56)中， $c$ 為中性軸到斷面頂部之距離； $d$ 為受拉鋼筋深度； $\varphi$ 為斷面曲率； $\varepsilon$ 為距中性軸距離 $x$ 處之應變； $d\varepsilon$ 為微小增量應變。

由式(56)帶入式(47)

$$C_c = \frac{b}{\varphi} \int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon \quad (57)$$

由式(54)代入式(57)

$$C_c = \frac{bc}{\varepsilon_c} \int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon \quad (58)$$

由 $C_c$ 對中性軸取力矩

$$k = 1 - \frac{1}{\varepsilon_c} \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c \varepsilon d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon} \quad (59)$$

由式(53)

$$\frac{bc}{\varepsilon_c} \int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon = T - C_s \quad (60)$$

$$c = \frac{\varepsilon_c (T - C_s)}{b \times \int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon} \quad (61)$$

$$M = C_c (d - kc) + C_s (d - d') \quad (62)$$

由試體梁彎矩分布圖中，可知力與彎矩的關係為

$$M = \frac{L}{2} \cdot \frac{P}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{L'}{2} \cdot \frac{P}{2} \quad (63)$$

式(64)中， $L$ 為下支承間距離； $L'$ 為上支承間距離，代入後得

$$P = \frac{M}{23.75} \quad (64)$$

式(59)~式(62)中， $k$ 為強度係數； $M$ 為斷面彎矩； $d'$ 為壓力鋼筋深度。由式(54)可知，拉力區 CFRP 棒應變  $\varepsilon_f$  與混凝土應變  $\varepsilon_c$  關係成正比，利用數值分析方式來進行運算，可先給一定值之混凝土最外圍應變  $\varepsilon_c$ ，利用混凝土材料性質可得到混凝土合力及位置，再假定任意中性軸之位置  $c$ ，依變形諧和關係求得拉力區 CFRP 棒應力應變，以合力平衡找出一恰當中性軸位置  $c$ ，所得之中性軸位置可計算彎矩，再另給定一增量  $d\varepsilon$  於混凝土最外圍應變  $\varepsilon_c$ ，重複上述步驟，直到壓力區混凝土達到破壞應變  $\varepsilon_{cu}$  或拉力區 CFRP 棒達到破壞應變  $\varepsilon_{fu}$  停止運算，即可得知其破壞模式為混凝土壓力破壞或 CFRP 棒拉力破壞。

純 CFRP 梁計算方式為將壓力鋼筋參數均改為 CFRP 棒(即  $E_s \rightarrow E_f$  與  $\varepsilon_s \rightarrow \varepsilon_f$ )再進行計算。將 CFRP 棒與鋼筋混合梁破壞模式分析與雙筋梁計算流程整理如圖 10。

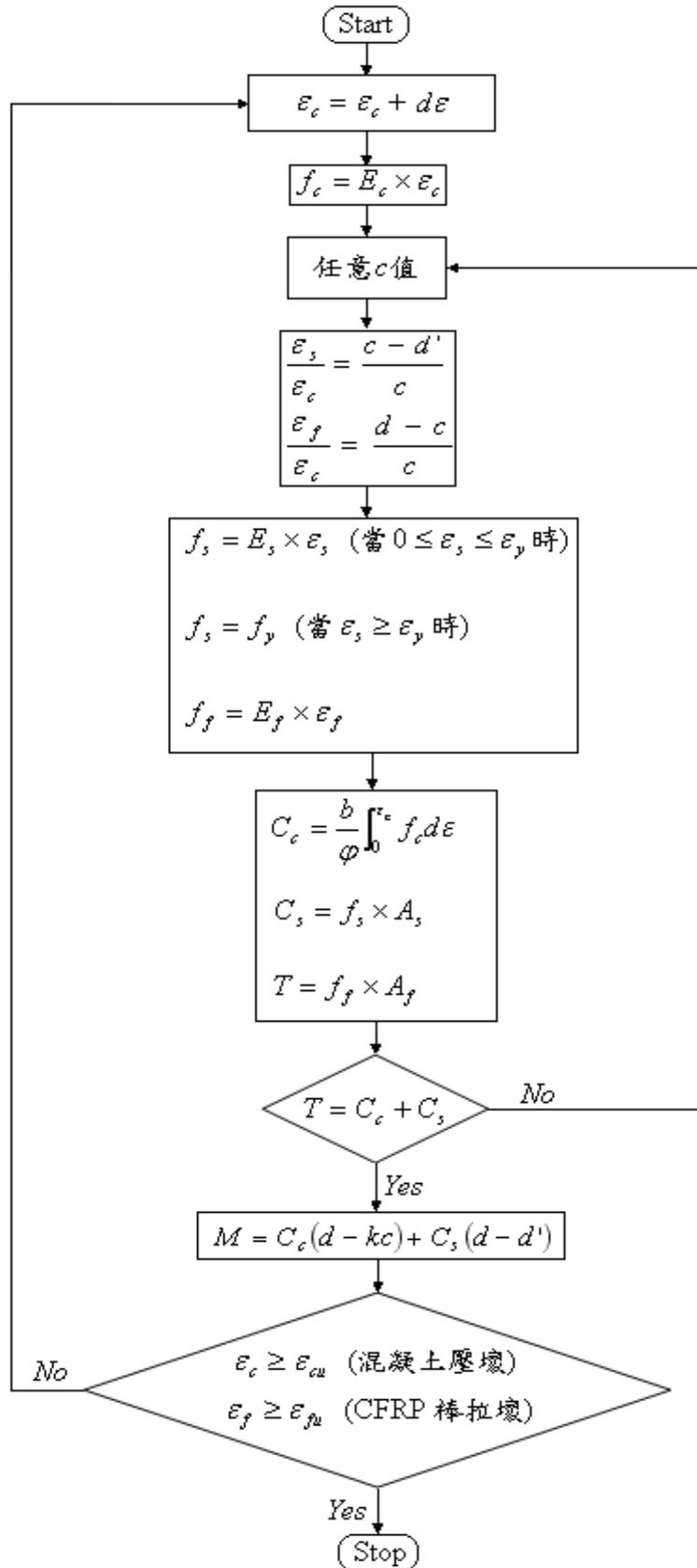


圖 10 CFRP 棒與鋼筋混合梁破壞模式分析與雙筋梁計算流程

---

#### 4.4 FRP 棒施工方法

FRP 棒係用於特殊環境下取代傳統鋼筋之材料，故於施工方式上皆與鋼筋相似，惟須注意存放、搬運及施工過程中，不可對表面過度的摩擦，因材料係以纖維與樹脂組成，側向抗磨損能力較差，若嚴重摩擦恐使纖維斷裂而降低強度。材料不可焊接，因此搭接及綁紮方式以續接器為主或以塑膠束帶固定即可。

搭接長度與混凝土強度有關，亦與各家廠牌所製造的竹節形式造成之磨擦力有關，因此在使用上不同於傳統鋼筋，廠商需提出經實驗驗證之搭接長度之證明文件，方可使用於搭接。

續接器亦須採具實驗驗證之專用搭配續接器。

附錄(一)為本研究對 FRP 棒所建議之施工圖說，提供參考。

## 五、FRP 格網補強應用於版補強

參考日本 FRP グリッド工法研究會所編撰之“FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強設計・施工マニュアル(案)”(FRP グリッド工法研究會,2007)進行相關探討,本計畫將介紹此工法之相關材料、設計、施工及驗收方式。

### 5.1 工法概述

本工法係高分子纖維複合材料編織成格網型式作為補強材料(如圖 11 所示),應用增厚材,如特殊聚合物噴凝土(PCM)、特殊樹脂砂漿、無收縮水泥砂漿等,使 FRP 格網與結構物連結成一體。本工法應用範圍為橋梁橋面版、混凝土梁、RC 橋墩之修復補強等,其他如混凝土隧道包覆或混凝土構造物亦適用。可有效增加既有結構物之承載能力及耐久性。本工法優點在於:

- 1.FRP 格網具有交叉格子部份,在補強材料與既有結構物一體化時,藉由增厚材料填充至格子中,使具較高的強度。
- 2.以道路橋梁橋面版為例,可藉由 FRP 格網補強既有鋼筋因承載量提高或鋼筋鏽蝕等致拉力強度不足處,提升橋梁承載能力,並提升疲勞耐久性。
- 3.本工法亦適用於隧道包覆混凝土之補強及海洋混凝土結構物受鹽害侵蝕之補強等,可有效抵抗腐蝕環境。
- 4.因 FRP 材料強度高,在補強後之厚度可較傳統補強方式之厚度為小,影響結構物自重甚小。



圖 11 FRP 格網

FRP 補強包覆工法，可利用噴凝土、徒手塗裝、環氧樹脂(Epoxy)灌入等增厚補強。本工法運用於版結構的標準補強斷面示意圖如圖 12 所示，增厚部分詳細示意圖如圖 13 所示

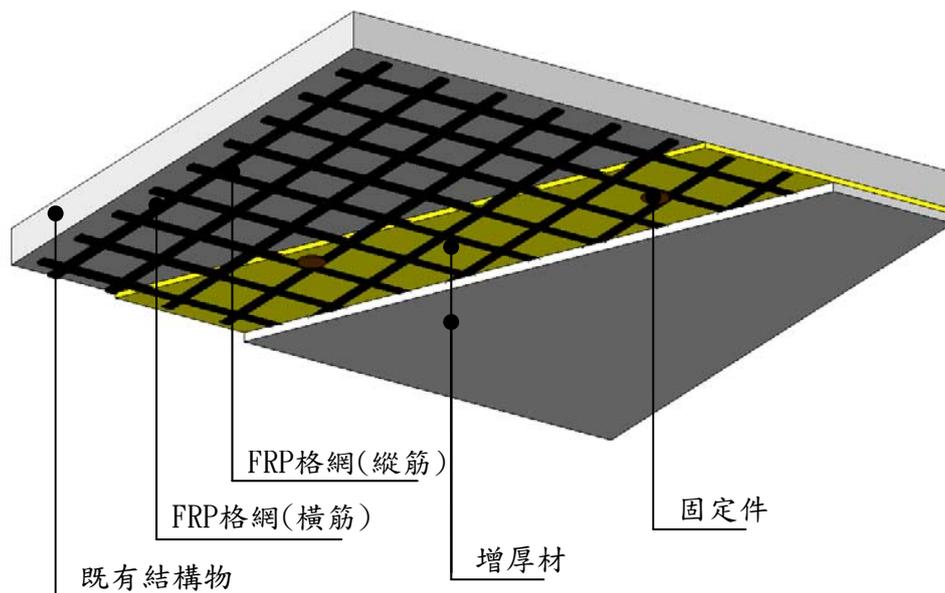


圖 12 版結構標準補強斷面示意圖(使用 PCM 噴凝土)

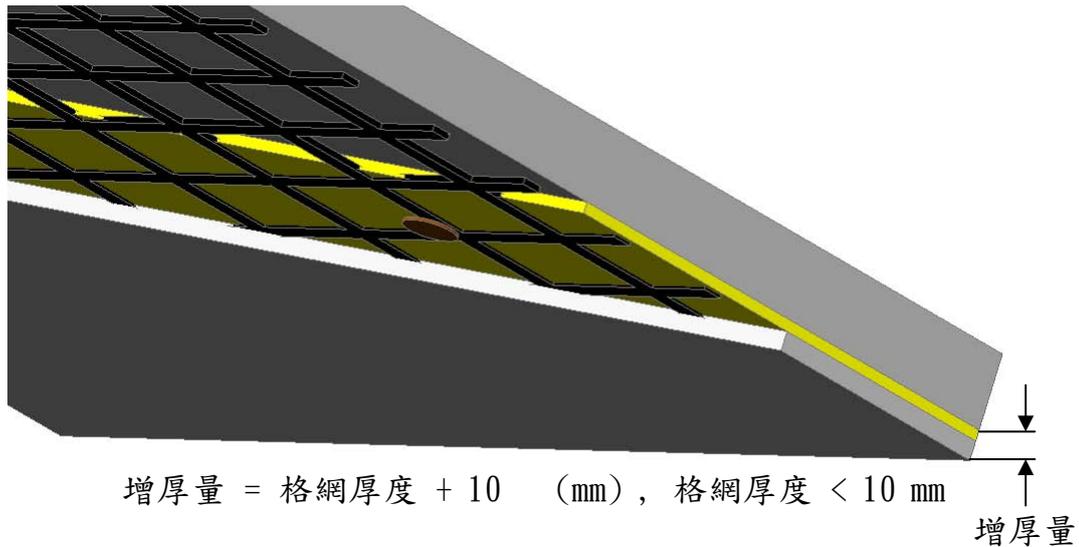


圖 13 增厚部分詳細示意圖

## 5.2 材料使用要求

本工法使用上須考量之主要使用材料為：FRP 格網、增厚材、環氧樹脂及既有混凝土結構物材料，敘述如下。

### ◎ FRP 格網(grid)

#### (一) FRP 格網之品質要求

FRP 格網之品質要求須考量於補強結構物時，是否可發揮足夠的強度以及補強後之耐久性，此外在格網交接處之品質亦須特別注意。

FRP 格網品質，須滿足拉力、楊氏係數、拉力剛性(EA)、標稱斷面積、格網間距等各項品質需求。FRP 格網係利用具高性能連續之高分子纖維絲，經由含浸耐化性(紫外線、酸、鹼、鹽等)性能優異之樹脂材料製成一體成型網格狀製品，故樹脂對材料之耐久性及使複合材料硬化性質具有較大的影響。為確保補強結構物之耐久性，必須確保 FRP 格網補強材料長期的耐久性。FRP 格網是由連續纖維及樹脂材料所結合之複合材料，故必須同時確保兩者之耐久性能後才可使用。

建議材料在出廠時應提出之 FRP 格網材料規格須包含纖維種類、經實驗驗證之對應鋼筋號數型號、標稱斷面積、拉力強度、楊氏係數、

格網間距等，並具相關測試報告。

## (二) FRP 格網之設計用值說明

(1) FRP 格網之設計面積以標稱斷面積表示，厚度以設計厚度表示。

FRP 格網係利用擠壓成型(Open-mold)製造，在連續纖維斷面積中，樹脂之含量對 FRP 格網之拉力強度及剛度影響甚小，因此格網之拉力強度及剛度是由連續纖維量控制。因此若斷面中可固定纖維量即可固定格網之拉力強度及剛度，故在設計斷面時可使用標稱斷面積表示，若設計上以厚度考量時，則以設計厚度表示。

(2) FRP 格網之拉力，原則上以拉力試驗之實驗值表示。

FRP 格網是由連續纖維及基材(纖維結合材-樹脂材料)所形成之複合材料，因此 FRP 格網之耐力(極限荷重)須以全斷面之耐力(極限荷重)表示。材料製造者藉由充分之試驗結果保證材料之耐力(極限荷重)及強度，以確保產品品質。

(3) FRP 格網之拉力強度為拉力除以標稱斷面積。

FRP 格網之拉力強度如下式所示。

$$f_{gu} = P_{max} / A_g \quad (65)$$

其中， $f_{gu}$  為 FRP 格網之拉力強度； $P_{max}$  為拉力試驗之最大荷重； $A_g$  為 FRP 格網之標稱斷面積。

(4) FRP 格網之壓力強度於設計上不需考慮。

FRP 格網之壓力剛性或剪力剛性，較混凝土之壓力剛性及剪力剛性甚小，因此對整體受壓斷面之壓力剛性影響甚小，一般在受壓強度及剪力強度部份，在設計上可不考慮。

(5) FRP 格網之楊氏係數，原則上以拉力試驗之實驗值表示。拉力試驗依 JSCE-E531 規範進行。

FRP 格網之楊氏係數如下式所示。

$$E_g = S_g / A_g \quad (66)$$

其中， $E_g$  為 FRP 格網之楊氏係數； $S_g$  為 FRP 格網之拉力剛性； $A_g$  為 FRP 格網之標稱斷面積。

材料製造者若藉由試驗方式訂定楊氏係數時，即可採用製造者所提供之值。

## ◎ 增厚材

### 聚合物水泥砂漿(PCM)

聚合物水泥砂漿(PCM)係做為結合 FRP 格網與既有混凝土結構之結合材料，故結合材與既有混凝土之附著強度應有所要求，在溼潤之混凝土表面，其附著效果亦必須符合要求。對 PCM 施工性要求，因 PCM 可用時間及黏度受環境溫度影響很大，故必須在良好的施工環境下才可發揮其施工性。對 PCM 之品質要求，使用於橋面版需符合表 20 之各項要求，並採用低彈性型之 PCM 增厚工法，以符合疲勞載重之需求。使用於隧道及一般靜態結構物(不受反覆載重)則需符合表 21 之各項要求，並採用高強度型之 PCM 增厚工法，以符合疲勞載重之需求。FRP 格網搭接部份，為使結構物一體化時不產生弱點部份，必須確認此部份的接著強度。

本增厚工法，對承受疲勞載重之構件如橋面版等，亦可利用輪荷載重試驗確保疲勞耐久性。

表 20 低彈性型 PCM 之品質要求

試驗名稱	標準值	試驗方法
附著試驗	1.7 N/mm <sup>2</sup> 以上	建研式拉拔試驗
壓縮試驗	27.0 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS R 5201
彎曲試驗	6.0 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS R 5201
靜彈性試驗	1.5×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> 以下	ASTM C 469

表 21 高強度型 PCM 之品質要求

試驗名稱		標準值	試驗方法
拉力接著 性試驗	養護完成時	1.5 N/mm <sup>2</sup> 以上	JHERI 416
	乾溼循環試驗後	1.3 N/mm <sup>2</sup> 以上	JHERI 416
裂縫抵抗性試驗		不可發生有害裂縫	JHERI 416
對鋼筋背側填充性試驗		不可發生 10 mm 以上之空隙，空隙長度合計不得超過 50 mm	JHERI 416
壓縮試驗		30.0 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS R 5201
彎曲試驗		6.0 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS R 5201
拉力試驗		2.5 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 1113
硬化收縮率		0.05 % 以下	JHS416
熱膨脹係數		2.0×10 <sup>-5</sup> /°C 以下	JHS416

### ◎ 環氧樹脂(Epoxy)

FRP 格網補強包覆工法之品質，是藉由接著環氧樹脂硬化後進行判斷。因此選擇可使補強材料與結構物一體化之環氧樹脂是必要的，亦必須確認環氧樹脂與砂漿結合後接著強度之要求。接著環氧樹脂可使 FRP 格網與既有混凝土一體化，並達到應力傳遞之效果。為達到一體化之效果，須確保施工方法、適當的黏度及適當的可工作時間。黏度會受施工環境的溫度影響，確認施工環境的溫度範圍才可有良好的作業性。另外，施工量需以可使用時間進行選擇(一次施工量去調配所需之樹脂量)。採用環氧樹脂(Epoxy)時，必須確保材料品質及耐久性。當 FRP 格網進行搭接時，亦必須確保搭接部份之環氧樹脂(Epoxy)品質。

某些特殊環氧樹脂在水中或濕潤之混凝土表面，皆可發揮優異之附著性能，故不須在乾燥之混凝土表面下方可施工，則可適用於河川、湖泊及港灣等混凝土結構物之修復補強。

環氧樹脂(Epoxy)之品質要求，需符合表 4.22 之各項要求。

表 22 Epoxy 樹脂之品質要求

項目	測試標準	標準值	備註
結著試驗	CNS 11053 ASTM D4541	2.0 N/mm <sup>2</sup> 以上	20°C×7 日 建研式拉拔試驗
彎曲試驗	CNS 4392 ASTM D790	49.0 N/mm <sup>2</sup>	20°C×7 日
拉力試驗	CNS 4396 ASTM D638	32.0 N/mm <sup>2</sup>	20°C×7 日

### ◎ 既有混凝土結構物材料

既有混凝土結構物材料的設計強度，在有顯著劣化狀態下，可藉由採樣並進行適當試驗查證。若無試驗時，則採用新建時的設計值。若修復補強之既有結構物混凝土有顯著劣化時，混凝土的強度可能降低，或鋼筋由於腐蝕將使斷面積減少，此時可採用現場儀器測試得知混凝土強度並測定鋼筋直徑，進而得知既有混凝土結構物的劣化狀況。構造物的實際混凝土強度若能達到當初設計的混凝土強度以上時，在修復補強設計時，混凝土強度可以當初的設計強度進行設計。

## 5.3 FRP 格網補強設計方法

本節概述 FRP 格網補強包覆工法應用於修復補強之設計方式，進行修復補強前應對既有混凝土結構物的性能進行評估，以確保於修復補強後之結構物可有效提升結構物之安全性、疲勞耐久性、使用性及環境耐久性等。

修復補強之結構物，應對各構件、材料與施工方法進行評估且皆需符合審查要求。對既有結構物補強之評估，除需對補強部分外，亦須對無補強部份進行整體性之評估。

### ◎ 載重

對於設計計算，載重及載重組合是以擬修復補強之結構物的構造及使用狀況進行判斷，原則上依各種結構物之相關設計規範進行設計載重及載重組合定義，構造之形式與使用狀況則以混凝土規範定義。

### ◎ 容許應力值

FRP 格網降伏後為一脆性破壞現象，故須以容許應力值表示降伏值，並以容許應力法設計之。FRP 格網之容許拉應力在設計載重作用時，以拉力強度的 1/3 設計之。FRP 格網之容許拉應力在極限載重作用時，以拉力強度的 2/3 設計之。鋼筋混凝土的容許應力原則上已現行規範定義。

### ◎ 受彎構件斷面之應力值的計算與評估

補強前之永久載重可以由補強前之既有斷面計算，活載重及補強後之永久載重則由補強後斷面進行計算，此等載重是應用合成應力值計算。對於混凝土斷面，鋼筋及 FRP 格網之應力值由下列方式計算。

1. FRP 格網應變由距中性軸比例計算。
2. 受拉側混凝土和沙漿增厚部份不計拉力強度。
3. 鋼筋及混凝土之楊氏係數比為 15。
4. FRP 格網及混凝土之楊氏係數比依式(66)計算。

FRP 格網補強包覆工法，係以補強前結構物所受之永久載重造成變形後進行施工，故無法承受補強前之永久載重。補強前所受之永久載重由補強前之既有斷面承受，補強後之永久載重及活載重則由補強後的斷面承受，如此即可以計算各載重之合成應力值。惟對於呆載重不影響的情況下，永久載重和活載重可用補強後的斷面承受。

FRP 格網與既有混凝土斷面一體化的合成斷面，混凝土斷面與鋼材及 FRP 格網的應力值，可由下列算式計算。

$$n_g = E_g / E_s \times n = 15 \times E_g / E_s \quad (67)$$

其中， $n_g$  為 FRP 格網與混凝土之楊氏係數比； $E_g$  為 FRP 格網之楊氏係數 (N/mm<sup>2</sup>)； $E_s$  為鋼筋之楊氏係數 (N/mm<sup>2</sup>)； $n$  為鋼筋與混凝土之楊氏係數比。

以下為受彎斷面補強後之應力值計算方式

#### (i) 計算斷面

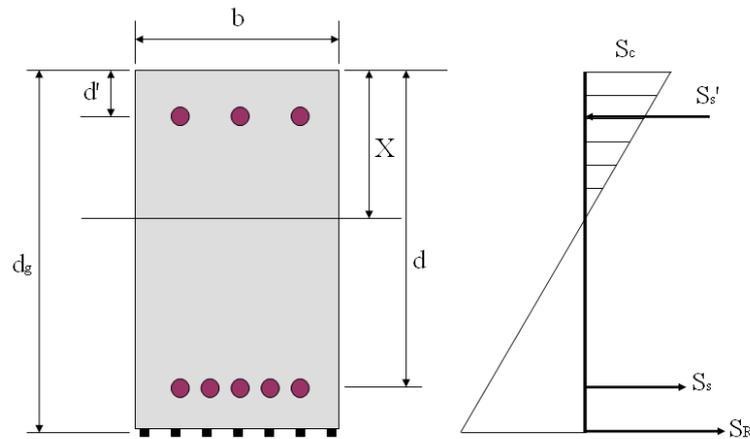


圖 14 設計斷面

其中， $X$  為受壓頂緣至中性軸之距離 (mm)； $b$  為斷面寬 (mm)； $d$  為拉力鋼筋有效深度 (mm)； $d'$  為壓力鋼筋有效深度 (mm)； $d_g$  為 FRP 格網有效深度 (mm)； $A_s$  為拉力鋼筋斷面積 ( $\text{mm}^2$ )； $A_s'$  為壓力鋼筋斷面積 ( $\text{mm}^2$ )； $A_g$  為 FRP 格網斷面積 ( $\text{mm}^2$ )。

由斷面轉換計算中性軸距後，帶入式(68)計算斷面二次彎矩。

$$I = I_c + n \times I_s + n_g \times I_g$$

$$= (b \cdot X^3) / 3 + n \cdot A_s \cdot (d - X)^2 + n \cdot A_s' \cdot (d' - X)^2 + n_g \cdot A_g \cdot (d_g - X)^2 \quad (68)$$

(ii) 計算應力值

混凝土應力

$$\sigma_c = M \cdot X / I \quad (\text{N/mm}^2) \quad (69)$$

拉力筋應力

$$\sigma_s = n \cdot M \cdot (d - X) / I \quad (\text{N/mm}^2) \quad (70)$$

壓力筋應力

$$\sigma_s' = n \cdot M \cdot (X - d') / I \quad (\text{N/mm}^2) \quad (71)$$

FRP 格網應力

$$\sigma_g = n_g \cdot M \cdot (d_g - X) / I \quad (\text{N/mm}^2) \quad (72)$$

其中， $M$  為設計彎矩 (N-m)。

### ◎ 受損傷之構件修復

為確保劣化損傷之混凝土構件經補強後的耐久性，須確認其劣化原因與損壞狀況，將劣化混凝土敲除後，對已銹蝕之鋼筋進行有效的除銹、防銹處理後，才可進行 FRP 格網補強包覆工作。

### ◎ 增厚量

增厚的厚度是為確保格網及增厚材的穩固，根據實驗顯示，由 FRP 格網設計厚度加上 10 mm 以上，或是 FRP 格網設計厚度的兩倍。原則上當格網設計厚度在 10 mm 以下時，增厚量為格網設計厚度加上 10 mm，當格網設計厚度在 10 mm 以上時，增厚量為格網設計厚度的兩倍才可得到補強效果。另外，修復受鹽害的結構物時，FRP 格網補強包覆之厚度應確保可防止鋼筋腐蝕。

### ◎ 搭接

FRP 格網之搭接原則上以重複搭接為原則，並以相疊之配置方式，標稱斷面積  $150 \text{ mm}^2$  以下之搭接長，應於應力方向有 3 個交叉點。標稱斷面積  $150 \text{ mm}^2$  以上之必要搭接長，則需透過實驗進行確認。圖 4.15 所示，相同形式之格網需 3 個交叉點(圖 4.15a)，不相同的形式則需各 3 個(圖 4.15b)。

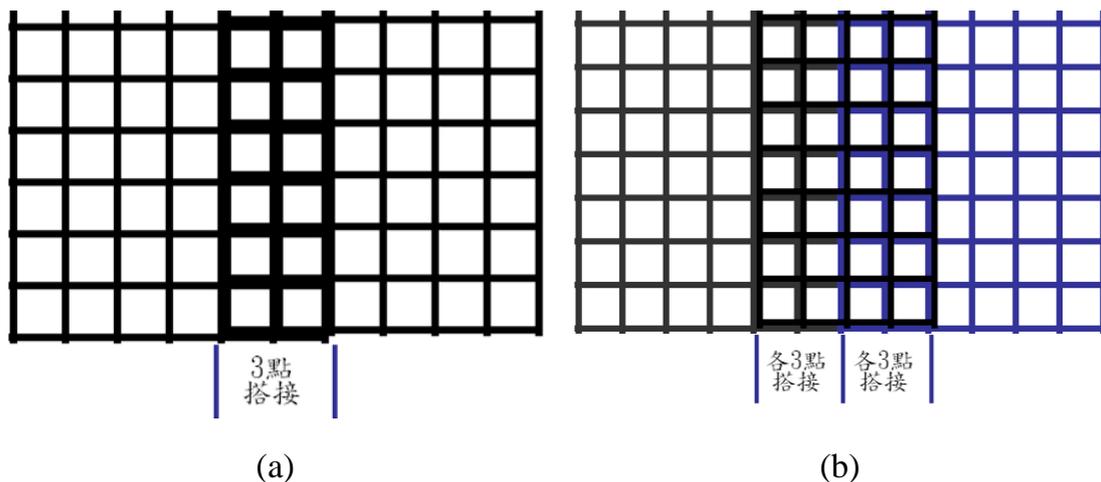


圖 15 搭接方式示意圖

## 5.4 FRP 格網補強施工方法

本節概述 FRP 格網補強包覆工法應用於修復補強之施工方式。

### ◎ 施工一般事項

以 FRP 格網補強包覆工法來進行施工，須對欲補強之結構物進行充分之調查，以確保施工後結構物修復補強後的安全性、疲勞耐久性、使用性，以及對各種環境的耐久性等。另外亦需確實的保管施工紀錄。

### ◎ 事前調查

以 FRP 格網補強包覆工法施工實施前，須先對所要補修補強的既有水泥建造物的損害狀況，進行詳細調查，並有十足把握。調查事項包含建築物設計書，水泥強度與鋼筋配置需充份掌握，若無法取得原始設計書，可考慮以別的方法進行調查，必要的話，亦須進行非破壞性檢查。此外可由構造物外觀是否有龜裂、游離石灰和銹水、鋼筋腐蝕等狀況來做判斷。漏水和積水都會降低建物耐久性，也是補強後的再劣化的原因，亦必須考量排水溝和除水裝置。藉由完整的事前調查結果，所擬出之補強計劃可有效率地進行施工，並提升施工準確度及有效性。

### ◎ 表面處理

為了達到所訂定之附著強度，FRP 格網補強包覆工法施工前，既有水泥表面上的脆弱層或油脂等不乾淨處，須徹底的進行表面處理。表面處理方式可利用水刀、鋼刷或高壓氣槍等工法去除混凝土表面雜質及鋼筋銹蝕部份。樹脂類增厚材在為確保接著強度的情形下，可利用打磨機方式進行粗造面處理。

### ◎ FRP 格網設置

為將 FRP 格網固定於既有的混凝土上，可利用高強度之錨釘或以植入鋼筋彎鉤等方式將格網確實固定於既有混凝土上，避免在噴塗增厚材時，格網產生移動，造成補強失敗。在設置 FRP 格網時，須注意不可磨傷到 FRP 格網。

### ◎ 聚合物水泥砂漿(PCM)增厚包覆增強

依據作業環境及所使用的 PCM 種類，進行適當的表面處理並選定適合的

施工方法和材料。適當的混凝土表面處理工程是為了確保增厚 PCM 與既有混凝土間具有足夠之附著力，除表面潔淨及具足夠粗糙面外，亦須注意表面的乾濕狀況，並依所選用之 PCM 來選定底漆材料進行塗抹。

選用 PCM 進行 FRP 格網補強包覆工法時，PCM 在攪拌混合時，必須按照一定的準則，例如攪拌混合需配合材料、適當比例、材料投入順序、攪拌器能力、攪拌混合的時間等。以達到所需之流動性、噴塗狀、強度需求等。

若使用噴凝土方式施工，須先依噴凝土規範確認流動性、附著性及強度等。PCM 的噴塗施工，需選用經驗豐富的塗裝工進行施工。第一次噴塗的建議厚度：天花板為 20~30 mm，壁面為 30~50 mm 又 FRP 格網的格子部份空隙，若 FRP 格網斷面積有 CR6 以上，則需以鏟刀整平後再噴塗一次 PCM。並依施工場所的溫、濕度進行溫、溼度管理，遵循材料及施工規範所訂之可施工溫、濕度進行施工。冬季或有風的施工場所，或有陽光直射的工地，灰漿表面容易乾燥，PCM 易產生龜裂造成裂縫，所以必須有相應養護對策。

若以鏟刀塗附方式施工，注意事項與使用噴凝土方式施工相同。

### ◎ 環氧樹脂施工

於接著樹脂的攪拌混合為了使接著樹脂的調配能達到所期望的強度，需視材料進行調配。此外攪拌機和攪拌混合時間都會影響到作業性、可使用時間、強度展現等。須確實按照一定的攪拌方法來實行，如攪拌混合機特性或攪拌混合的時間及環境溫、濕度。

採用樹脂注入工法需確實地計劃與設置模板及支撐工，使樹脂注入時不變形及外漏，特別在底部、接合處、固定處等處，要特別注意不使其漏出，待樹脂硬化後，才可撤去模板。

樹脂注入需確實地以幫浦壓送等方法注入，避免板模內充填不良，此外樹脂粘度過高，注入速度變化太大，皆可能會引起充填不良。

除事前確認無漏出情形再進行注入，施工中也需持續監視充填狀況，若發生樹脂外漏，不僅僅因為損失量引起使用量增加，也可能對自然環境有不良影

響。

環氧樹脂施工，必須遵守注入工法來實行。然而小規模施工，施工時間有控制或有障礙物時，注入工法可能不適用，得考量其他方法進行施工。

### ◎ 補土塗抹

為確保 FRP 格網貼附後之表面平整，可以手塗或補土刀於不平整面上進行補土抹平作業，把 FRP 格網確實包覆並貼緊壓平。完成品務必均一平坦，並留意有無空隙，以免引起強度下降。

附錄(二)為本研究對 FRP 格網所建議之施工圖說，提供參考。

## 5.5 FRP 格網補強包覆工法的品質管理

本節概述 FRP 格網材料及增厚材之品質管理。

### ◎ FRP 格網之品質管理

FRP 材料需經由製造過程中的品質記錄來確認品質。FRP 格網，因鑄型製造工法、軸筋的截面長度不同、樹脂與纖維含量比等，使實際的截面積會有所不同。故 FRP 格網的品質管理並非依照格網的形狀或面積，而是依其彈性模量或彈性剛性來進行確認。

### ◎ 增厚材材料的品質管理

#### 1. PCM 的品質管理

PCM 品質，可由攪拌混合方式、材料調配、與灰漿的配合、流動性、幫浦壓送性、附著性及強度等進行品質管理。建議於每施做 200 m<sup>2</sup> 實施一次壓縮、抗彎、附著強度及抗壓等試驗。各項試驗名稱及基準可依照表 23 及表 24 建議施行。壓縮及抗彎試驗用試體大小為 4 cm × 4 cm × 16 cm 之立方體塊。壓縮試驗實行時，依下列規定進行強度判別：

1. 第一次試驗結果為指定基準值的 85% 以上。
2. 三次試驗結果的平均值為指定基準值以上。靜彈性試驗的樣品為直徑 5 cm × 高度 10 cm 或直徑 10 cm × 高度 20 cm 的圓柱體。

表 23 PCM 的必要物理性質(橋面版等)

試驗項目	試驗標準	基準值(4週強度)
附著試驗	建研式	1.7 N/mm <sup>2</sup> 以上
壓縮試驗	JIS R 5201	27.0 N/mm <sup>2</sup> 以上
彎曲試驗	JIS R 5201	6.0 N/mm <sup>2</sup> 以上
靜彈性試驗	ASTM C 469	1.5×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上

表 24 PCM 的必要物理性質(斷面修復等)

試驗項目	試驗標準	基準值(4週強度)
附著力試驗	建研式	1.5 N/mm <sup>2</sup> 以上
壓縮試驗	JIS R 5201	原有構造物的設計基本強度或 24.0 N/mm <sup>2</sup> 以上。
彎曲試驗	JIS R 5201	6.0 N/mm <sup>2</sup> 以上
靜彈性試驗	ASTM C 469	與原有水泥同程度

## 2. 環氧樹脂的品質管理

接著樹脂的品質，係由製造公司的工廠製造過程的品質記錄來確定。接著樹脂依制定之調配，及實行適當的攪拌混合方法，可得到良好的施工性以及強度。建議進行一次以上的附著力試驗，來進行強度管理。最好能在所施工之混凝土構造物部分進行測定，若有困難，在相當的環境下製作試驗品來測定亦可。

### ◎ 增厚材的成品檢驗管理

#### 1. PCM 的成品檢驗管理

成品檢驗管理能確認施工量，因 FRP 格網為不會腐蝕之材料，所以成品可以總厚度來管理。成品管理是以計算面積和厚度進行，建議每 100 m<sup>2</sup> 設置檢測孔。

表 25 PCM 成品管理基準

管理內容	規格值	測定方法
施工面積	設計面積以上	測定縱向與橫向的長度來計算。
施工厚度	設計厚度以上	每塊設一檢測釘，每 100 m <sup>2</sup> 設一檢測孔。

## 2. 環氧樹脂的尺寸檢驗管理

尺寸檢驗係確認施工數量管理方式。具體而言，各塊施工面積和厚度皆有合適之測量方法。厚度可由檢測孔所量測的樹脂厚度來進行，若使用板模場合，則在已設置板模的填縫材料事先測定厚度。

表 26 環氧樹脂成品管理基準

管理內容	規格值	測定方法
施工面積	設計面積以上	縱、橫方向的長度測量並計算。若填縫材料等微少部份，並未對整體補修性能有所影響，則也包括在施工面積內。
施工厚度	設計厚度的 90% 以上	約每 100 m <sup>2</sup> 設置一檢測孔並量測其厚度。

## 參考文獻

1. AASHTO, AASHTO Maintenance Manual for Roadways and Bridges, (2007).
2. AASHTO, AASHTO Guide For Design of Pavement Structures, Washington, D.C., (1998).
3. AASHTO, AASHTO Maintenance Manual for Roadways and Bridges, (2003).
4. American Concrete Institute (ACI), “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars,” 440.1R, (2006).
5. American Concrete Institute (ACI), “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,” 440.2R, (2002).
6. American Concrete Institute (ACI), “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures,” 440.3R, (2004).
7. American Concrete Institute (ACI), “Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons,” 440.4R, (2004).
8. American Concrete Institute (ACI), “Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures,” 440R, (1996).
9. Arockiasamy, M., Chidambaram, S., Amer, A., and Shahawy, M., “Time-Dependent Deformations of Concrete Beams Reinforced with CFRP Bars,” Composites Part B: Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 577-592, (2000).
10. ASTM, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, American Society for Testing and Materials, ASTM D 6433-99, (1999).
11. California Department of Transportation (Caltrans), “Using Composite in Seismic Retrofit Applications,” ART-2005(7796)-2, (2005).
12. California Department of Transportation (Caltrans), “The Application of Qualification Testing, Field Testing, and Accelerated Testing for estimating long-term Durability of Composite Materials for Caltrans Applications,”

- 
- ADA433125, (2005).
13. California Department of Transportation (Caltrans), "Bridge Design Specification," (1986).
  14. Canadian Standards Association "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers," CAN/CSA-S806-02, (2002).
  15. Guadagnini, M., K. Pilakoutas, and P. Waldron, "Shear Resistance of FRP RC Beams: Experimental Study," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 6, pp. 464-473, (2006).
  16. Li, Y.-F., and Sung, Y.-Y., "A Study on the Shear-Failure Circular Sectioned Bridge Column Retrofitted by Using CFRP Jacketing," *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, Vol. 23, No. 8, pp. 811-830, (2004).
  17. Li, Y.-F., and T.-S. Fang, "A Constitutive Model for Concrete Confined by Steel Reinforcement and Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheet," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 18, No. 1, pp. 21-40, (2004).
  18. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model of Confined Concrete," *ASCE, Journal of Structural Division*, Vol. 114, No. 8, pp.1804-1826, (1988a).
  19. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete," *ASCE, Journal of Structural Division*, Vol. 114, No. 8, pp.1827-1849, (1988b).
  20. Priestley, M. J. N., Seible, F., "Seismic Assessment of Existing Bridges," 2, Queenstown, New Zealand, pp. 46-70, (1994).
  21. Priestley, M. J. N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R., "Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength, Part I: Theoretical Considerations and Test Design," *ACI Structural Journal*, 91(4), pp. 394-405, (1994).
  22. Priestley, M. J. N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R., "Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength, Part II: Test Results and Comparison with Theory," *ACI Structural Journal*, 91(5), pp.
-

- 537-551, (1994).
23. Priestley, M.J.N., Verma, R., and Xiao, Y., "Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns," ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 8, pp. 2310-2329, (1994).
  24. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Uang, C. M., "The Northridge Earthquake of January 17, 1994-Damage Analysis of Selected Freeway Bridges," Report No. SSRP-94/06, Structural Systems Research Project, Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California, San Diego, (1994).
  25. Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-94-052, (1994).
  26. CNS 4392 (ASTM D790) (JIS K7203), 硬質塑膠之撓曲性能測定法(Method of Test for Flexural Properties of Rigid Plastics.)
  27. CNS 4396 (ASTM D638) (JIS K7113), 塑膠之抗拉性能試驗法(Method of Test for Tensile Properties of Plastic.)
  28. CNS 5606 (ASTM D1002) (JIS K6850), 黏著劑之抗剪強度測定法(拉力負荷法)( Methods of Test for Strength Properties of Adhesive in Shear by Tension Loading.)
  29. CNS 11053 (JIS K5400), 粗糙水泥飾面噴髹材料檢驗法(Method of Test for Cement Stucco-like Coating.)
  30. CNS 12628 (ASTM D2240) (JIS K7215), 塑膠硬度(Durometer)測試定法 (Method of Test for Durometer Hardness of Plastics.)
  31. CNS 13062 (ASTM D3776) (JIS K7071), 碳纖維及環氧樹脂預浸材料檢驗法 (Methods of Test for Prepreg of Carbon Fiber and Epoxy Resins.)
  32. CNS 13063, 環氧樹脂及硬化劑試驗法總則(General Rules for Methods of Test for Epoxy Resins and Hardeners.)
  33. CNS 13064 (ASTM D792) (JIS K 6883, K7112), 環氧樹脂及硬化劑比重測

- 定法(Methods of Test for Specific Gravity of Epoxy Resins and Hardeners.)
34. CNS 13065 (ASTM D2471) (JIS K 6833), 環氧樹脂及硬化劑黏度測定法  
(Methods of Test for Viscosity of Epoxy Resins and Hardeners.)
35. CNS 13069 (JIS K7235), 溶劑稀釋型環氧樹脂不揮發成份試驗法(Methods  
of Test for Non-volatile Matter in Solvent-diluted Epoxy Resins.)
36. CNS 13553 (JIS K7601), 碳纖維試驗法(Method of Test for Carbon Fibers.)
37. CNS 13554 (JIS K7602), 碳纖維織物試驗法(Method of Test for Carbon Fiber  
Woven Fabrics.)
38. CNS 13555 (ASTM D3039) (JIS K7073), 碳纖維強化塑膠抗拉性能試驗法  
(Method of Test for Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics.)
39. CNS 13556 (ASTM D790) (JIS K7074), 碳纖維強化塑膠抗彎性能試驗法  
(Methods of Test for Flexural Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics.)
40. CNS 12779 (ASTM D3039) (JIS K7054), 玻璃纖維強化塑膠之抗拉性能測定  
法(Method of Test for Tensile Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics.)
41. CNS 12780 (ASTM D790) (JIS K7055), 玻璃纖維強化塑膠之抗彎性能測定  
法(Method of Test for Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics.)
42. CNS 7397 (ASTM D3776), 玻璃纖維製品檢驗(Method of Test for Fiber Glass  
Products.)
43. ASTM D3418, 高分子聚合物轉移溫度熱分析法(Tg)(Test Method for  
Transition Temperature of Polymer By Thermal Analysis.)
44. CNS 13557 (ASTM D2734), 碳纖維強化塑膠之纖維含量及空孔率試驗法  
(Methods of Test for Fiber Content and Void Content of Carbon Fiber  
Reinforced Plastics.)
45. CNS 13559 (ASTM D2344), 碳纖維強化塑膠層間剪斷強度試驗法(Method  
of Test for Apparent Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber Reinforced  
Plastics.)
46. FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強設

- 計・施工マニュアル(案)，FRP グリッド工法研究會，(2007)。
47. 朱國棟、盧廷鉅、邱佑宗、林英民，“複合材料補強 RC 構造物之發展與實例應用”，結構物檢測評估補強加固研討會論文集，第 69~100 頁，(1998)。
48. 李有豐、林安彥，「橋樑檢測評估與補強」，全華出版社，(2000)。
49. 林至聰，「碳纖維貼片補強鋼筋混凝土構件之研究」，博士論文，國立中央大學土木工程學系，(1999)。
50. 洪明中，「CFRP 棒應用於高強度混凝土梁之力學行為探討與耐久性之研究」，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災技術研究所，(2008)。
51. 高木秀敏，“碳纖維布對混凝土構造物之耐震補強工法、設計”，結構物檢測評估補強加固研討會論文集，第 51~68 頁，(1998)。
52. 柴村常喜，“碳纖維耐震補強工法之施工方法、注意事項及環氧樹脂的應用”，結構物檢測評估補強加固研討會論文集，第 127~149 頁，(1998)。
53. 徐耀賜，「以複合材料碳纖維貼片補強鋼筋混凝土樑彎矩之設計原理」，土木工程技術，第五卷，第一期，第 17-48 頁，(2001)。