

碳纖維複合材料包覆混凝土補強之高溫性能研究(一〇)

內政部建築研究所自行研究報告(99年度)

碳纖維複合材料包覆混凝土補強 之高溫性能研究(1/3)

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 99 年 12 月

099301070000G2034

碳纖維複合材料包覆混凝土補強 之高溫性能研究(1/3)

研究人員：厲妮妮、曹源暉

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 99 年 12 月

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 預期成果.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
第一節 FRP 簡介.....	3
第二節 施工步驟.....	9
第三節 複合材料圍束混凝土之表現.....	13
第四節 圍束混凝土在高溫下之表現.....	14
第三章 強度預測公式.....	17
第一節 現有預測公式之預測與驗證.....	17
第二節 本研究之預測與驗證.....	27
第四章 實驗規劃.....	35
第一節 實驗參數.....	35
第二節 試體製作.....	35
第三節 實驗設備.....	38
第四節 實驗規劃.....	39
第五章 結論與建議.....	41
第一節 結論.....	41
第二節 建議.....	42
附錄 歷次審查之會議紀錄.....	41
參考書目.....	49

表 次

表 2-1	複合材料之應用範圍	3
表 2-2	典型複合材料、鋼材與鋁之物理特性	6
表 2-3	FRP 與鋼板包覆補強工法之比較	7
表 3-1	現有公式預測結果與文獻實驗結果之比較（常溫）	19
表 3-2	本研究公式預測結果與文獻實驗結果之比較	28
表 4-1	使用之 CFRP 材料性質表	36
表 4-2	使用之底漆材料性質表	36
表 4-3	使用之膠結材料性質表	37
表 4-4	本研究之試體規劃	40

圖 次

圖 2-1	FRP 材料之成分.....	4
圖 2-2	CFRP、GFRP、AFRP 與鋼材之比較.....	6
圖 2-3	CFRP 結構耐震補強施工流程圖.....	13
圖 3-1	公式 R&B 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖.....	20
圖 3-2	公式 R&B 預測誤差與 f_c 之關係圖.....	21
圖 3-3	公式 M&P 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖.....	21
圖 3-4	公式 M&P 預測誤差與 f_c 之關係圖.....	22
圖 3-5	公式 S&R 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖.....	22
圖 3-6	公式 S&R 預測誤差與 f_c 之關係圖.....	23
圖 3-7	公式 A&S 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖.....	23
圖 3-8	公式 A&S 預測誤差與 f_c 之關係圖.....	24
圖 3-9	公式 H&K 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖.....	24
圖 3-10	公式 H&K 預測誤差與 f_c 之關係圖.....	25
圖 3-11	公式林預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖.....	25
圖 3-12	公式林預測誤差與 f_c 之關係圖.....	26
圖 3-13	本研究公式預測誤差與 f_{cc} 之關係圖.....	31
圖 3-14	本研究公式預測誤差與 f_c 之關係圖.....	31
圖 3-15	本研究公式預測誤差與 f_L 之關係圖.....	32
圖 3-16	本研究公式預測誤差與溫度 T 之關係圖.....	32
圖 4-1	CFRP 貼覆工作程序圖.....	38
圖 4-2	本研究實驗使用之烘箱.....	38
圖 4-3	本研究實驗使用之萬能試驗機.....	39

摘 要

關鍵詞：纖維複合材料貼片、補強、高溫

一、研究緣起

對於既有鋼筋混凝土構件作貼片是工程界中常用的補強手法，其中又分為鋼板補強及纖維複合材料貼片等二種。然而由於鋼板本身重量較重、易產生鏽蝕、施工不便、作業空間大、相當耗費人力與需配合大型機具調度等，顯得施作麻煩且高成本；而纖維複合材料貼片補強具有重量輕、耐腐蝕、施工容易、作業空間較小，且在人力與機具配合上需求量較小、成本較低等等優點，特別是其纖維複合材料貼片為高強度，符合需求，於是在歐美和日本之建築物等結構修復補強應用中，相當受到歡迎，可謂成為結構補強的新趨勢。

但是，已使用纖維複合材料貼片補強的鋼筋混凝土構件，如遇有高溫情況，是否還能維持原有強度？其影響程度如何？都是需要進一步實驗觀察與分析。若經高溫洗禮後的纖維複合材料貼片補強構件，或許在外觀上並無差異，但實際上已無法提供足夠的強度，又能如何面對下一次的災害？這是工程人員應正視的課題。

二、研究方法及過程

本研究規劃以三年的時間完成：

第一年：蒐集國內外文獻資料，從中習得相關理論及實驗要項，並規劃三年藍圖。另對於預測公式加以驗證，並就溫度、圍束力等因子，提出新的預測公式。

第二年：以不同之混凝土強度、溫度及圍束力為變數，進行實驗，

以取得大量數據，做為預測公式之推導依據；並在實驗中觀察圍束效果於高溫下所產生之變化現象。

第三年：進行實驗結果之歸納整理，若第二年之實驗結果如有欠缺之處予以補足，並修正新的預測公式。

三、重要發現

(一) 以四份文獻之實驗數據對六個預測公式進行驗證，其結果如下：

1. 統計上常用之 R^2 值分析之。公式 A&S 最接近實驗結果 ($R^2=0.76$)，而公式 R&B、公式 S&R 與公式 H&K 之 R^2 值也達到 0.7 以上。相較之下，公式 M&P 在此則顯得不太適用 ($R^2=0.56$)。
2. 以誤差值來看，以公式 M&P 與公式 S&R 之正負誤差值大於 50% 者有 4 組為最低，而公式 R&B、公式林各有 7 組為最高。
3. 此六個預測公式之應用範圍以 f_{cc} 在 400kg/cm^2 以下之混凝土為宜。 f_c 值若超過 200kg/cm^2 ，則不建議採此六個公式進行預測。

(二) 以四份文獻之實驗數據對本研究所建立之預測公式進行驗證，其結果如下：

1. 本研究之預測公式 $R^2=0.73$ ，與之前的六個預測公式相較，算是有不錯的準確程度。
2. 而以誤差值來看，本預測公式之正負誤差大於 50% 者有 7 組，僅佔 10.29%，故本公式之準確性可說是表現優良的。
3. 加熱至 700°C 左右，出現較大的預測誤差。但總結來說，本研究的預測公式對於溫度因子之掌握，表現良好。

四、主要建議事項

立即可行建議—以更多之實驗數據，驗證本研究預測公式之可信度

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各公私立大學或機關團體之材料研究室

一個預測公式之適用範圍的廣度，以及可信度，需有眾多實驗數據在背後支持與考驗。本公式僅以少數文獻之實驗數據做為推導依據，其可信度實有不足。在後續年度應加強取得實驗數據數量，對本公式進行較大規模之驗證與修正。

中長期性建議—進行方形斷面柱試體之實驗，以瞭解 FRP 補強對有角邊者之圍束效果

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各公私立大學或機關團體之材料研究室

本研究係以混凝土圓柱試體做為研究及實驗對象，但 FRP 對於有角邊試體之圍束效果定與圓柱試體有所不同。其差別如何？FRP 是否會在角隅處發生應力集中而導致圍束力降低？值得進行觀察與探討。

中長期性建議—觀察並瞭解水分對於圍束混凝土受高溫之影響

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各公私立大學或機關團體之材料研究室

一般的混凝土受到高溫，其內部之水蒸氣在其孔隙間形成壓力，影響混凝土強度。不少文獻由於研究期程短暫，多以剛完成養護之混凝土試體直接進行圍束高溫實驗，此時試體之含水量最高。然而以 FRP 圍束補強之混凝土，由於其水蒸氣逸散更顯困難，對其混凝土之強度與破壞表現上，剛完成養護階段者與完成養護後歷經數月、數年者，其結果是否不同？可進一步探討。

Abstract

Keyword: CFRP, retrofitting, heat resistance

It is a common method of reinforcement to strengthen RC constructions with wrapped sheets in civil engineering industry, which is divided into two categories as steel plate reinforcement and fiber reinforced plastic (FRP). However, since steel plates are heavy, easy to rust and hard to install, and need a lot of operating space, large consumption of manpower, and to cooperate with large-scale machines with a lot of troubles and high costs; the characteristics of FRP reinforcement include lightness, rust resistance, rust durability, easy construction, smaller operating space, low consumption of manpower, low demand for dispatching machines, and low costs. The high intensity of FRP is particularly welcome in the application for building construction restoration and reinforcement in Europe, America, and Japan, and has become a new trend for construction reinforcement.

However, can RC constructions with wrapped FRP sheets keep the original intensity in high heat situations, and how about the degree of influence? It is necessary to have further experiment observations and analyses. How can a reinforced construction with wrapped FRP sheets face the next disaster when it has been a high-heat situation, and become insufficient for density even it has a complete appearance? The above mentioned issue should be valued by professional engineers.

The study is expected to finish the issues as follows in three years:

Year 1: Collect literatures and data from domestic and foreign organizations, and learn the related theories and important experiment items to plan a three-year blueprint. In addition, identify the prediction

formulas, and bring out new prediction formulas for factors of temperature and confining pressure.

Year 2: Implement experiments with different variables of concrete intensity, temperature, and confining pressure to obtain a lot of data for the basis of prediction formula derivation; observe the variations in confining effects in a high-heat situation of an experiment.

Year 3: Generalize and arrange the results of experiments. Revise the new prediction formulas, and supplement to the insufficiency of experimental result of the second year.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

臺灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊交界處，屬環太平洋地震帶之一部分，地震活動十分頻繁。依據中央氣象局公布之網站資料[1]顯示，自 2001 年迄今，臺灣之災害地震計有 10 起，除 93 年 5 月 1 日之花蓮新城地震規模為 5.8 以外，其餘規模均超過 6.2，甚至高達 7.0；而 95 年 4 月 1 日台東卑南地震事件中，房屋全毀者有 14 件。還有上個世紀、那令人餘悸猶存的九二一集集地震與三三一花蓮地震，造成房屋全倒、半倒等嚴重程度不一的震損情形更是不計其數。於是乎，不論是建築物、公共工程等結構體的安全，一下子便成為輿論所關心的焦點。然而，身處於臺灣的我們，時時刻刻面對地震的威脅，該如何對於建築物等結構安全作一有效補強，確實為相當重要的課題。

對於既有鋼筋混凝土構件作貼片是工程界中常用的補強手法，其中又分為鋼板補強及纖維複合材料貼片等二種。然而由於鋼板本身重量較重、易產生鏽蝕、施工不便、作業空間大、相當耗費人力與需配合大型機具調度等，顯得施作麻煩且高成本；而纖維複合材料貼片補強具有重量輕、耐腐蝕、施工容易、作業空間較小，且在人力與機具配合上需求量較小、成本較低等等優點，特別是其纖維複合材料貼片為高強度，符合需求，於是在歐美和日本之建築物等結構修復補強應用中，相當受到歡迎，可謂成為結構補強的新趨勢。

但是，已使用纖維複合材料貼片補強的鋼筋混凝土構件，如遇有高溫情況，是否還能維持原有強度？其影響程度如何？都是需要進一步實驗觀察與分析。若經高溫洗禮後的纖維複合材料貼片補強構件，或許在外觀上並無差異，但實際上已無法提供足夠的強度，又能如何面對下一次的災害？這是工程人員應正視的課題。

第二節 預期成果

- 一、歸納 FRP 補強後抗壓強度與溫度區間之關係。
- 二、綜整圍束效果於高溫下所產生之變化現象。
- 三、提出採用 FRP 補強之初步建議及注意事項（針對高溫環境作用）。
- 四、提出補強後抗壓強度之預測公式。

第二章 文獻回顧

第一節 FRP 簡介

纖維強化高分子複合材料(Fiber Reinforced Polymers, FRP)在運用於土木結構的補強上，已有二十多年的歷史。第一個成功的應用案件是在德國的 Kattenbusch Bridge (1986-87)，利用玻璃纖維強化高分子複合材料(GFRP)的薄板來強化該橋樑的承接點。瑞士亦有類似的方法用在補強因預力鋼鍵(Prestressed Tendon)損壞的 Ibach 橋樑。而美國加州洛杉磯的 2 號及 5 號公路橋樑的 15 根 RC 柱以 FRP 補強後，歷經 1994 年的北嶺大地震而依舊完好，更是 FRP 適合用於補強之良好實證[2]。

FRP 應用相當廣泛，從日常生活至航太工業皆可見其相關產品，大致可整理如下：

表 2-1 複合材料之應用範圍

產業別	應用例
航太工業	飛機內裝材、次要結構、主要結構、直昇機螺旋槳、人造衛星原件、雷達罩、隱形戰機等。
船艇工業	遊艇、帆船、魚船、交通船、貨船、巡邏船、救生艇、水上摩托車、浮筒、隱形戰艦等。
建築用材	衛浴設備、組合房屋、門窗框、化糞槽、除水槽、浪板、隔間板、廚房櫃台等。
公共工程	自來水管、井管、導管、電線桿、電纜線、護欄、隔音牆、坡坎護網、交通標誌、儲油槽、風力發電葉片等。
機械工程	機械外殼、飛輪、連桿、紡織機械零件、縫紉機、壓縮機葉片、機械人手臂、模具等。
防蝕用材	防蝕內襯、地下儲油槽、油管、接頭、污水管、人孔、化學槽、污水處理槽等。
電子資訊	電器外殼、事務儀器外殼、電機零件、絕緣零

	件、喇叭音箱、天線、積體電路板等。
交通運輸	汽車外板、傳動軸、引擎罩、汽車保險桿、擾流板、車燈座、電聯車箱、各種車體等。
運動器材	網球拍、羽毛球拍、釣竿、高爾夫球桿、壘球棒、滑雪用品、自行車骨架、輪圈、衝浪板等。
其他	安全帽、模特兒、人造骨、生化器材、家具桌椅、園藝造景等。

(資料來源：參考書目[3])

FRP 是一種複合材料，是在基材(matrix)中加入高抗張強度的纖維，藉由基材的物理特性將纖維連結起來。纖維可彌補基材強度不高的弱點，而基材可將原本呈散狀的纖維集束成型，使其用途更為廣泛。

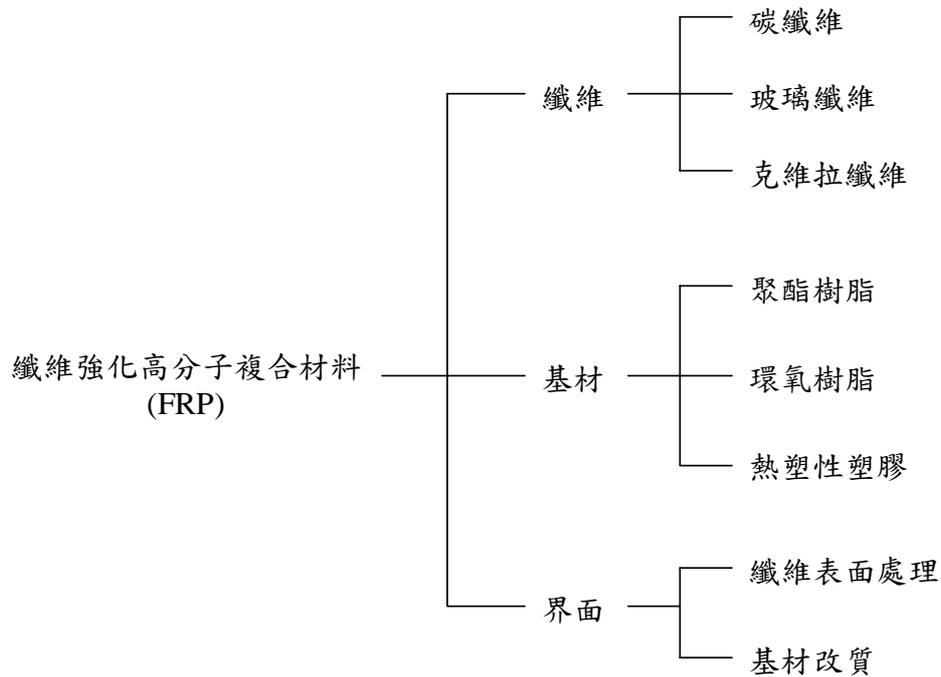


圖 2-1 FRP 材料之成分

(資料來源：參考書目[2])

用於鋼混凝土補強的 FRP，主要有三大類[3]：

- 一、碳纖維(Carbon FRP, CFRP)，工程界簡稱為碳纖。FRP 有二代系列，即 PAN 系列與 Pitch 系列。PAN 為聚丙烯 Polyacrylnitrile 之簡稱，Pitch 則通稱之瀝青。目前工程界所使用之 CFRP 絕大多數屬於 PAN 系列。
- 二、玻璃纖維(Glass FRP, GFRP)，工程界以玻纖簡稱。工業界較常用之玻纖有 S-Glass 與 E-Glass 兩大類，S-Glass 之強度與造價均比 E-Glass 高，因此，土木與建築工程界以採用 E-Glass 之玻纖為主。
- 三、克維拉纖維(Kevlar)，是有機纖維 Aramid 之典型代表，簡稱 AFRP。土木工程界較常用有 Kevlar 29 與 Kevlar 49 兩大類。

圖 2-2 為以上三種 FRP 與鋼的應力—應變性質之比較。其在力學性質上的差異有[3]：

- 一、CFRP 之強度最高，AFRP 次之，GFRP 最小。但這三者抗拉強度皆比鋼材高出許多。
- 二、FRP 的應力—應變是線性，並不像鋼材有降伏與塑性應變的階段。
- 三、FRP 之單位重比鋼材低甚多，故相較於傳統之鋼板包覆，以 FRP 補強較具輕巧之優點，施工性較佳。

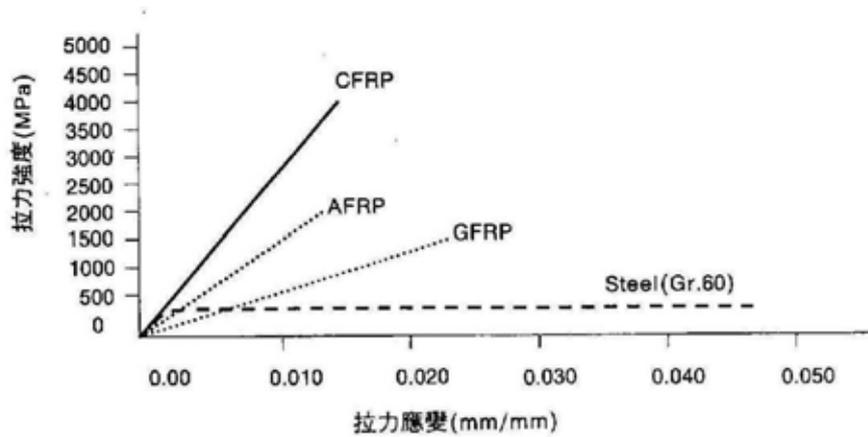


圖 2-2 CFRP、GFRP、AFRP 與鋼材之比較

(資料來源：參考書目[3])

表 2-2 典型複合材料、鋼材與鋁之物理特性

材料		抗拉強度		抗拉彈性模數		密度	
		MPa	Kg/cm ² (10 ³)	GPa	Kg/cm ² (10 ⁶)	g/cm ³	
鋁		310	304	69~70	68~69	207~208	
鋼材		1034	1014	200	196	7.5~7.8	
FRP	碳纖	PAN 系	3500~5500	3432~5394	220~290	216~284	1.7~1.8
		瀝青系	1700~2300	1667~2256	380~700	373~686	1.9~2.1
	玻纖	E-Glass	3450	3383	70~74	69~73	2.4~2.6
		S-Glass	4500	4413	82~88	80~86	2.4~2.6
	Aramid	Kevlar 29	3792	3719	62	61	1.44
		Kevlar 49	3792	3719	131	128	1.47

說明：1.FRP 之力學性質依各廠商而有所差異

2.Kevlar 乃杜邦公司(E. I. Dupont)產品為芳香族聚烯胺有機纖維，與 Kevlar 有關之材料性質可參考杜邦公司出版之“Kevlar, Aramid Fiber-Technical Guide”。

(資料來源：參考書目[3])

表 2-3 FRP 與鋼板包覆補強工法之比較

項目	FRP 補強	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	需較大之施工空間
補強物形狀	任何形狀皆可補強	較適用於圓形或橢圓形
抗拉強度比較	可超過 35000kg/cm ² 以上	約 2400kg/cm ²
補強後狀況	適合各種塗料，且不影響外觀形狀	補強後之形狀可能稍異
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	補強品質較難檢測
單位補強面積重量 (m ²)	0.27kg (0.15mm 厚)	23.5kg (3mm 厚) 47kg (6mm 厚)

註：FRP 與鋼板包覆補強各有其適用時機與對象，設計者應有自己之工程判斷。

(資料來源：參考書目[3])

由於採用 FRP 補強有以上甚多優點，故能成為全球土木工程對於鋼筋混凝土結構物補強手法的新趨勢。

2.1.1 碳纖維

CFRP 是土木工程使用最多的 FRP 種類，分為二大系列，即 PAN (聚丙烯) 系列與 Pitch (瀝青) 系列。碳纖維之性能、優點及缺點略述如下：

一、碳纖維的性能[4]：

(一) 物理性能：碳纖維的體積質量大於其他高性能的有機纖維，但小於無機纖維碳纖維以外的品種，強度大、模量

大是其特點。

- (二) 化學性能：纖維完全由碳元素組成，不燃燒，化學性能穩定，不受酸、鹽等溶媒侵蝕。高溫空氣下，對高氧化性酸抵抗力弱，高溫下形成含碳化物，多孔性，表面活性化，表面有吸附性能。
- (三) 熱性能：線膨脹係數小，使得碳纖維處於極低溫領域小熱傳導率小，而在高溫領域下機械性能變化小。

二、碳纖維的優點[5]：

- (一) 強度高：碳纖維的抗拉強度約可達鋼的 10 倍，能有效的提供所需強度。對於潛變和疲勞的抵抗性質碳纖維皆優於鋼板。
- (二) 重量輕：碳纖維的重量大約只有鋼的 1/100，不需要大型工具及作業場所，易於運輸及施工，省時省力。
- (三) 剪裁及造形容易：碳纖維可適用於各種尺寸形狀之修補需要。鋼板貼片則限於直線狀或曲度較小的圓形及橢圓形，和混凝土結合時會有間隙，需再做灌漿填補空隙，增加成本及施工品質的不確定因素。
- (四) 連續性佳：碳纖維產品為連續狀，在長尺寸修補下毫無問題，鋼板則受生產、搬運及重量的限制，往往需要焊接，亦增加成本及品質控制的問題。
- (五) 不腐蝕：碳纖維長期不需維修，而鋼板易受環境影響而有鏽蝕情況產生，需定期維護。

三、碳纖維的缺點[5]：

- (一) 延展性較差：碳纖維屬於較脆性之材料，延展性不如鋼板，對補強構件之韌性增加較少。
- (二) 價格及接受度較差：碳纖維係新發展之材料，價格較高，

其市場接受度不如鋼板。近年已有成功應用實例，加上國內研發生產，大大提高價格競爭力。

2.1.2 基材[6]

基材的主要功能之傳遞應力，以及將應力分散至每根纖維，並使纖維固定其排列方向，且可保護纖維免受摩擦或侵蝕。另一項功能，基材可以結合纖維，使複合材料受到應力作用時不致破壞或變形。基材的性質是決定纖維複合材料使用最高溫度、化學性質、電氣特性之主要因素。

基材大致可分為熱固性樹脂及熱塑性塑膠。最常用的熱固性樹脂為不飽和聚酯和環氧樹脂。一般使用的熱塑性塑膠則為尼龍、聚丙烯等。

2.1.3 纖維與基材之界面[6]

纖維與基材之界面材料是決定此複合材料之使用壽命之重要因素。因為界面處之應力集中，最有可能從此處先行破壞，故該界面必須能夠具備良好性質，將基材上的作用力傳遞至纖維。利用偶合劑可改進界面的黏結現象，界面材料必須能抵抗由纖維和基材因為不同熱膨脹係數所造成之應力，也須能抵抗因樹脂硬化所造成之現象。界面亦可以避免複合材料受液體滲透，幫助基材保護纖維。

第二節 施工步驟[3]

以目前採FRP補強之案件中，以CFRP之使用為最多。以下以CFRP為例介紹施工步驟：

一、面層處理

- (一) 以砂輪機去除混凝土表面之劣化層（如粉刷層、剝離的砂漿、污物等），並予以研磨。
- (二) 去除待補強區之粉塵與鬆動物質（可藉助空壓噴嘴、砂輪機與毛刷等工具）。若用水洗淨，須使充分乾燥。

二、斷面修復

- (一) 清除混凝土面層之不良部分（如剝落、孔隙、蜂窩、腐蝕等）。若遇有鋼筋外露，須先作好防蝕處理，再以強度相等或大於原混凝土的環氧樹脂砂漿、壓克力樹脂砂漿等材料作為修補。
- (二) 裂縫以環氧樹脂灌注。
- (三) 裂縫或打除部分遇有漏水情形時，先作好止水、導水。修復完成後高差應控制在 1mm 以下。

三、表面修正

- (一) 為求表面平整，表面之小突起等以切割機或砂輪機將其剷除並使其平滑。打除後的凹陷部分以環氧樹脂補土或樹脂砂漿填補。
- (二) 轉角處需磨至凸角 $R=30\text{mm}$ （ R 為曲率半徑）以上，凹角以樹脂砂漿填補。

四、底漆塗佈

氣溫在 5°C 以下，雨天或 $\text{RH}>95\%$ 時，不可施工。施工範圍的溫度、溼度確認後，選用適當的底漆。施工現場為空氣流通場所，並嚴禁煙火。施工時必須穿帶護目鏡、橡皮手套及口罩等保護裝備。

- (一) 將主劑和硬化劑依使用說明之配比均勻拌合。須注意的是，一次的拌合量須在可使用時間內使用完畢。超過可使用之時間的材料，則不可使用。

- (二) 以毛刷滾輪均勻塗佈，依現場狀況決定是否於初乾之後塗佈第二道。塗佈量隨施工面的方向及粗糙程度有所變化。
- (三) 指觸乾燥時間約 3~12 小時。

五、強化纖維的黏貼

氣溫在 5°C 以下，雨天或 $\text{RH}>95\%$ 時，不可施工。施工範圍的溫度、溼度確認後，選用適當的環氧樹脂。

- (一) 纖維貼片預先按照所需尺寸剪裁。其剪裁尺寸、長度於 2m 之內最適當。為防止保管期間發生破損，剪裁數量宜只裁所需使用的數量。
- (二) 施工面底漆之乾燥程度可以指觸確認。底漆施工過一星期以上時，應以砂輪機磨平。
- (三) 將環氧樹脂的主劑和硬化劑依使用說明之配比均勻拌合。須注意的是，一次的拌合量須在可使用時間內使用完畢。超過可使用之時間的材料，則不可使用。
- (四) 環氧樹脂用毛刷滾輪平均塗佈（塗於底漆上）。塗佈量隨施工面的表面粗糙程度會有所變化，轉角部分要多塗。
- (五) 強化纖維黏貼於樹脂塗佈面之後，以毛刷滾輪和橡皮刮刀順著纖維方向用力推平，使樹脂浸透並去除氣泡。長向纖維方向的搭接長度至少要留 10cm，短向則不用留。
- (六) 黏貼後置放 30 分鐘。若有纖維浮出或脫線等情況，則以滾輪或橡皮刮刀壓平修正。
- (七) 單向強化纖維表面再塗佈樹脂（塗於面層）。與（五）相同要領，以毛刷滾輪或橡皮刮刀順著纖維方向用力推展，使樹脂充分浸透和補充。
- (八) 兩層以上的強化纖維相疊貼時，重覆步驟（四）～（七）。施工現場為空氣流通場所，並嚴禁煙火。施工時必須穿帶護目鏡、橡皮手套及口罩等保護裝備。

六、養護

要防止雨淋，且不讓水、砂、灰塵等附著。最好能蓋布遮蔽以作為防護。

- (一) 確認指觸乾燥後，最好能以塑膠布覆蓋，並注意覆蓋的布不要碰到施工面。
- (二) 覆蓋布的養護需 24 小時以上。
- (三) 平均氣溫 10°C，養護期間為二週；平均氣溫 20°C，養護期間為一週。

七、完工後表面塗刷耐紫外線塗層或與原混凝土顏色相近之塗層。

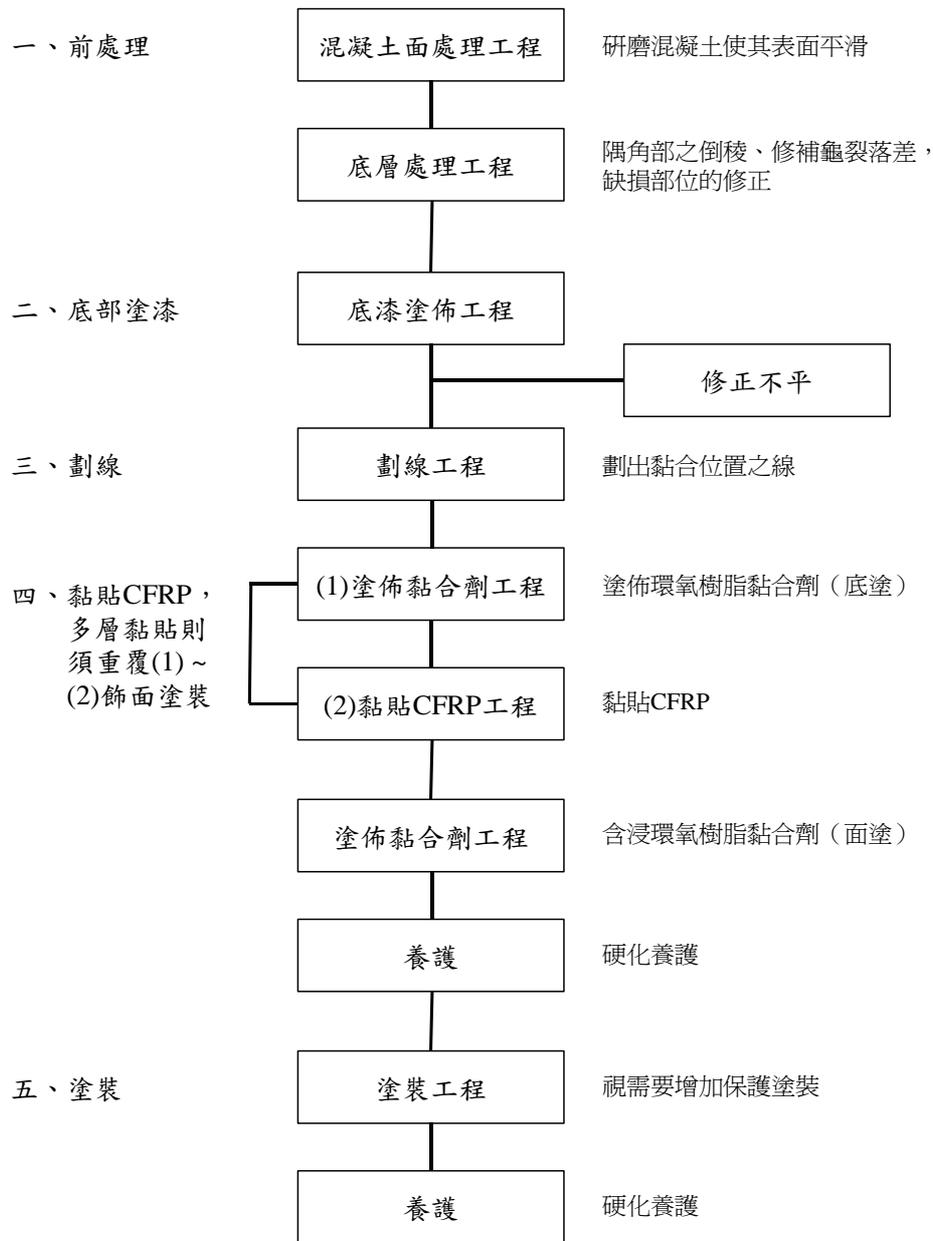


圖 2-3 CFRP 結構耐震補強施工流程圖

（資料來源：參考書目[3]）

第三節 複合材料圍束混凝土之表現

民國 95 年，楊清宏[6]以九組不同強度、圍束厚度的試體進行實驗，另以數值分析方式模擬複合材料圍束混凝土之試體極限強度。結

果顯示，低強度混凝土圍束補強效果，不論是強度或韌性之提高率皆較中、高強度混凝土者佳。

民國 88 年，林至聰[5]製作 108 個圓柱試體，並以混凝土強度、試體尺寸及碳纖維貼片層數為變因參數。在試驗過程中發現，在壓力強度接近極限強度時，可聽見細微的纖維斷裂聲，隨即試體產生極迅速的爆裂。經比較試驗結果，發現：束圍試體力強度的增加倍數隨碳纖維的層數增加而增加，隨圓柱試體之直徑增加而減少；束圍試體的整體強度是束圍力的增加而增加，且當束圍力為一定時，強度增加量隨混凝土強度增加而增加，其增加量約為束圍力的 4.7~7.0 倍，隨束圍力增大而倍數量變小。

民國 86 年，陳照堂[7]以 63 個試體進行實驗，以混凝土強度、纖維種類（碳纖維、玻璃纖維）及纖維數作為變因參數。結果顯示：當纖維纏繞紗束愈多時，或純混凝土強度愈高時，試體愈有可能以爆裂的方式破壞；應力—應變關係先為雙線性，達極限載重後呈急速遞減之不穩定曲線；對於提高混凝土試體的抗壓強度而言，纏繞碳纖維優於纏繞玻璃纖維；對於提高混凝土試體的韌性而言，纏繞玻璃纖維優於纏繞碳纖維。

第四節 圍束混凝土在高溫下之表現

民國 94 年，宋中仁[8]使用混凝土設計抗壓強度 140kg/cm^2 、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之混凝土圓柱試體，分為未圍束、圍束單層、圍束雙層，以及常溫、定載（有 135kg/cm^2 、 140kg/cm^2 、 180kg/cm^2 、 210kg/cm^2 ）後加溫至 500°C 等變因參數。其結論為：單層與雙層 CFRP 圍束混凝土試體，在溫度未達 182°C 時，圍束力即失效，其破壞屬 EPOXY 黏結劑因抗剪應力不足、混凝土本身強度及碳纖維貼片拉力破壞；在溫度已達 224°C （含）以上時，圍束力失效，屬 EPOXY 黏結劑之黏結強度破

壞。

民國 97 年，楊欽雄[9]以 60 顆混凝土圓柱試體進行包覆 FRP 後之耐高溫試驗，其變因參數包括混凝土試體強度、試體尺寸、包覆層數、纖維種類、溫度等。其結論為：雖然無機聚合樹脂包覆補強在常溫及 100°C 不如環氧樹脂補強來得優異，但環氧樹脂一層及兩層補強分別在 350°C 及 250°C 產生爆裂現象，均已完全崩解，而無機聚合樹脂包覆補強在 710°C 才接近失效。

民國 92 年，薛宏德[4]以環氧樹脂作為黏結劑，探討各溫度範圍的 CFRP 圍束混凝土試體之強度、應力應變關係之變化情形。由結果得知，溫度 50°C 以上時，原混凝土試體強度無明顯折減，但包覆一層或二層碳纖維之圍束混凝土試體之強度有明顯下降；當高溫時，一層或二層圍束混凝土分別於 400°C 與 350°C 發生爆裂情況。

第三章 強度預測公式

第一節 現有預測公式之預測與驗證

3.1.1 現有公式之介紹

纖維複合材料(FRP)在此既然是用於混凝土之補強功能，對於究竟能提供多少的幫助，想必是大家關心的焦點。除了實際以實驗方式取得補強後的混凝土強度值之外，前人亦針對其補強效果進行預測。以下介紹六個預測公式[5]：

一、Richart, Brandtzaeg 與 Brown 之強度預測公式(以下簡稱 R&B)：

$$f_{cc} = f_c + 4.1f_L$$

二、Mander、Priestley 和 Park 之強度預測公式(以下簡稱 M&P)：

$$f_{cc} = f_c \left[-1.254 + 2.254 \left(1 + 7.94 \frac{f_L}{f_c} \right)^{0.5} - 2 \frac{f_L}{f_c} \right]$$

三、Saticioglu 與 Razvi 之強度預測公式(以下簡稱 S&R)：

$$f_{cc} = f_c + 6.7f_L^{0.83}$$

四、Ahmad 與 Shah 之強度預測公式(以下簡稱 A&S)：

$$f_{cc} = f_c \left(1 + 4.2556 \frac{f_L}{f_c} \right) \quad \text{當 } \frac{f_L}{f_c} < 0.68$$

$$f_{cc} = f_c \left(1.7757 + 3.1171 \frac{f_L}{f_c} \right) \quad \text{當 } \frac{f_L}{f_c} > 0.68$$

五、Hoshikuma 和 Kawashima 與之強度預測公式(以下簡稱 H&K)：

$$f_{cc} = f_c + 3.8f_L$$

六、林至聰強度預測公式(以下簡稱林)：

$$f_{cc} = f_c + (1.0 + 0.324f_c^{0.5})f_L$$

其中，

f_{cc} = 圍束試體之軸向壓力強度(kg/cm²)

f_c = 無圍束試體之軸向壓力強度(kg/cm²)

f_L = 圍束強度(kg/cm²)

3.1.2 利用文獻實驗結果驗證

在國際上，於常溫環境下以 FRP 進行圍束混凝土強度之實驗研究成果相當豐碩，國內這方面也有不少。由於前述預測公式多為外國研究學者提出，是否亦能適用於國內之圍束混凝土強度預測？又其準確率如何？以下謹借用陳慶修[10]、楊欽雄[9]、宋中仁[8]、薛宏德[4]等四人之實驗結果，對上述六個預測公式進行驗證，瞭解其預測準確性。

表 3-1 為彙總陳慶修等四人之實驗所得結果，並以上述公式預測相較。

表 3-1 現有公式預測結果與文獻實驗結果之比較 (常溫)

實驗數據 來源	無圍束混 凝土試體軸 向壓力強 度 f_c	圍束強 度 f_L	圍束混 凝土試 體之軸 向壓力 強度 f_{cc}	1.R&B		2.M&P		3.S&R		4.A&S		5.H&K		6.林	
				計算值	誤差%	計算值	誤差%	計算值	誤差%	計算值	誤差%	計算值	誤差%	計算值	誤差%
陳慶修 [10]	185.2	51.70	320.33	397.17	23.99	413.02	28.94	362.32	13.11	405.21	26.50	381.66	19.14	464.86	45.12
	185.2	103.40	411.77	609.14	90.16	533.97	66.69	500.07	56.11	625.23	95.18	578.12	80.47	744.52	132.42
	350	51.70	433.63	561.97	75.43	620.59	93.73	527.12	64.55	570.01	77.94	546.46	70.59	715.08	123.23
	350	103.40	551.00	773.94	141.60	797.30	148.90	664.87	107.55	790.03	146.63	742.92	131.92	1080.16	237.20
楊欽雄 [9]	106.37	34.47	190.92	247.68	-22.68	250.86	-21.69	232.88	-27.30	253.05	-21.01	237.34	-25.91	256.01	-20.08
	105.21	51.70	245.82	317.18	-0.98	289.70	-9.56	282.33	-11.86	325.22	1.53	301.67	-5.83	328.73	2.62
	181.99	34.47	252.87	323.30	0.93	351.93	9.86	308.50	-3.69	328.67	2.60	312.96	-2.30	367.11	14.60
	181.57	51.70	316.00	393.54	22.85	407.94	27.35	358.69	11.97	401.58	25.36	378.03	18.01	458.98	43.28
	106.37	68.93	249.07	389.00	21.43	323.11	0.87	331.26	3.41	399.72	24.78	368.32	14.98	405.65	26.63
	105.21	103.40	298.83	529.15	65.19	364.88	13.91	420.08	31.14	509.13*	58.94	498.13	55.50	552.24	72.40
	181.99	68.93	322.22	464.62	45.04	455.10	42.07	406.88	27.02	475.34	48.39	443.94	38.59	552.22	72.39
181.57	103.40	399.04	605.51	89.02	527.20	64.58	496.44	54.98	621.60	94.05	574.49	79.34	736.40	129.88	
宋中仁 [8]	135.16	51.70	389.27	347.13	8.37	339.23	5.90	312.28	-2.51	355.17	10.88	331.62	3.52	381.60	19.13
	135.16	103.40	535.41	559.10	74.54	434.00	35.48	450.03	40.49	575.19	79.56	528.08	64.85	628.04	96.06
薛宏德 [4]	83.4	103.40	402.30	507.34	58.38	307.65	-3.96	398.27	24.33	470.40*	46.85	476.32	48.70	492.7	53.82
$R^2 =$				0.70		0.56		0.70		0.76		0.71		0.68	

註：*表示其 $f_L/f_c > 0.68$ ，不列入 R^2 計算中。

(資料來源：參考書目[4]、[8]、[9]、[10]，及本研究計算)

在此，我們以統計上常用之 R^2 值來瞭解預測公式之準確性。 R^2 值愈是接近 1，表示預測公式與實驗結果愈吻合，此公式之準確度就愈強。以上表來看，公式 A&S 最接近實驗結果($R^2=0.76$)，而公式 R&B、公式 S&R 與公式 H&K 之 R^2 值也達到 0.7 以上。相較之下，公式 M&P 在此則顯得不太適用($R^2=0.56$)。

我們從另一個角度，以誤差值來看預測公式的準確度。

一、公式 R&B：

從表 3-1 可以得知，此公式之正負誤差值大於 50% 者有 7 組，佔 46.67%。

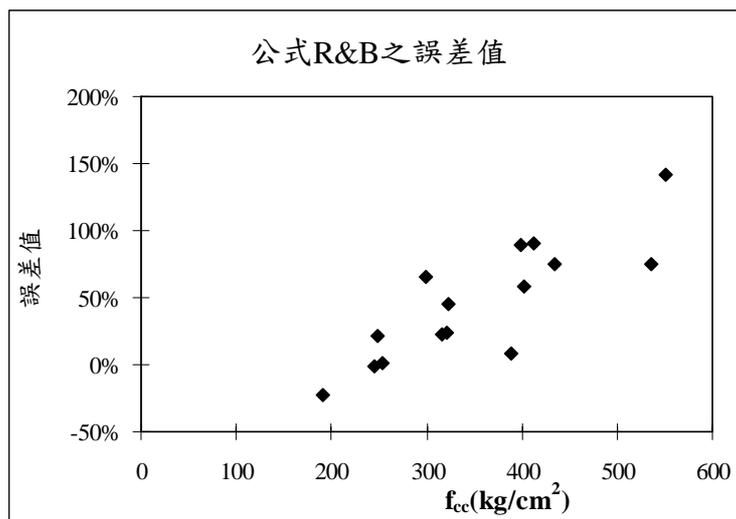


圖 3-1 公式 R&B 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

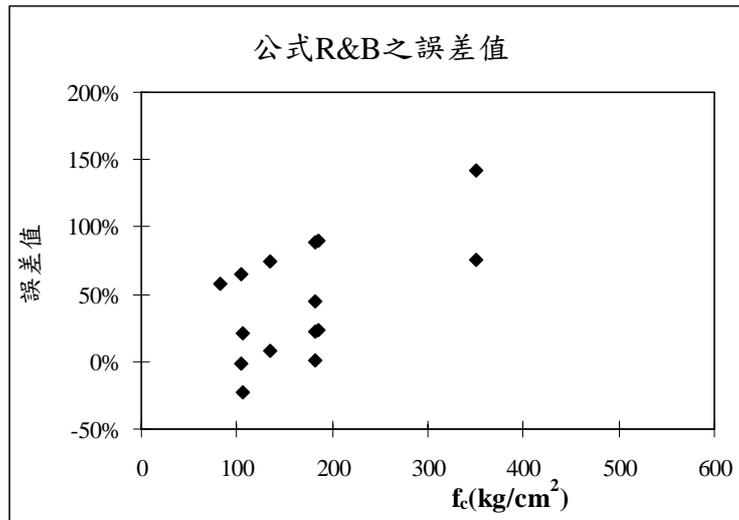


圖 3-2 公式 R&B 預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

二、公式 M&P：

從表 3-1 可以得知，此公式之正負誤差值大於 50% 者有 4 組，佔 26.67%。

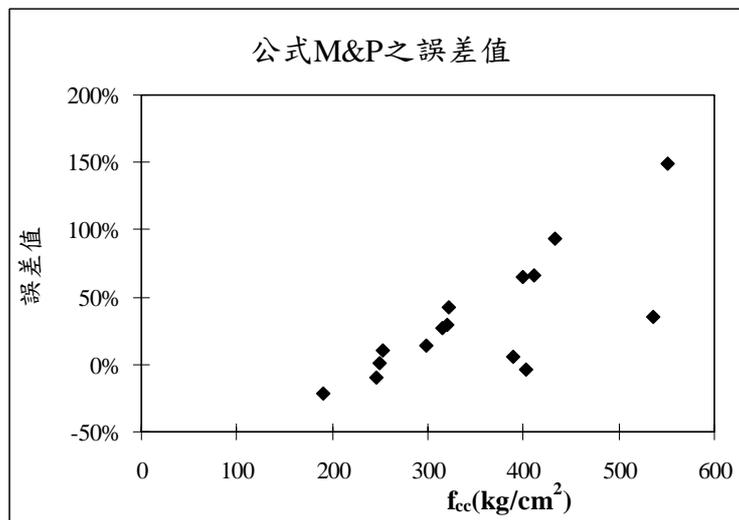


圖 3-3 公式 M&P 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

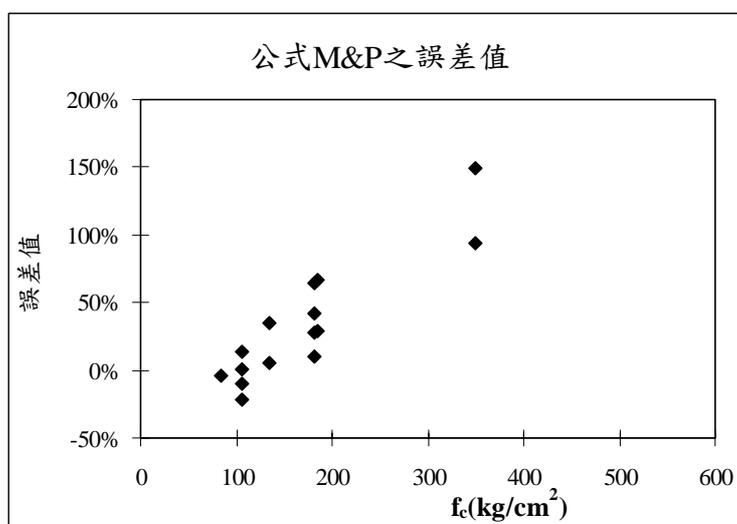


圖 3-4 公式 M&P 預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

三、公式 S&R：

從表 3-1 可以得知，此公式之正負誤差值大於 50% 者有 4 組，佔 26.67%。

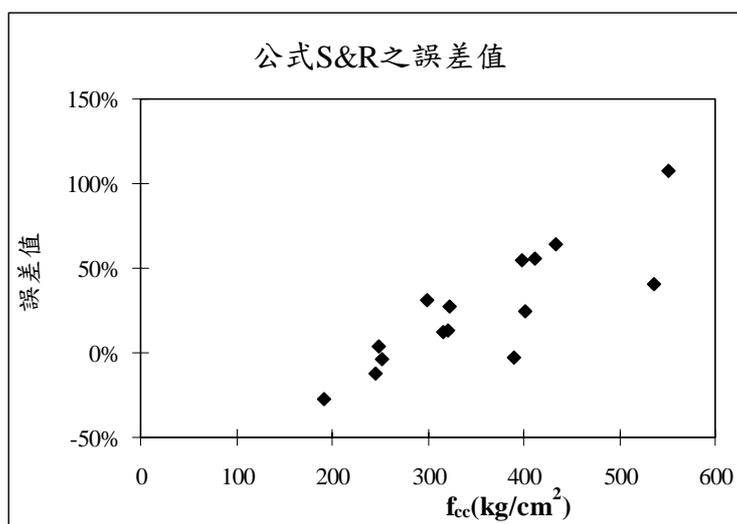


圖 3-5 公式 S&R 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

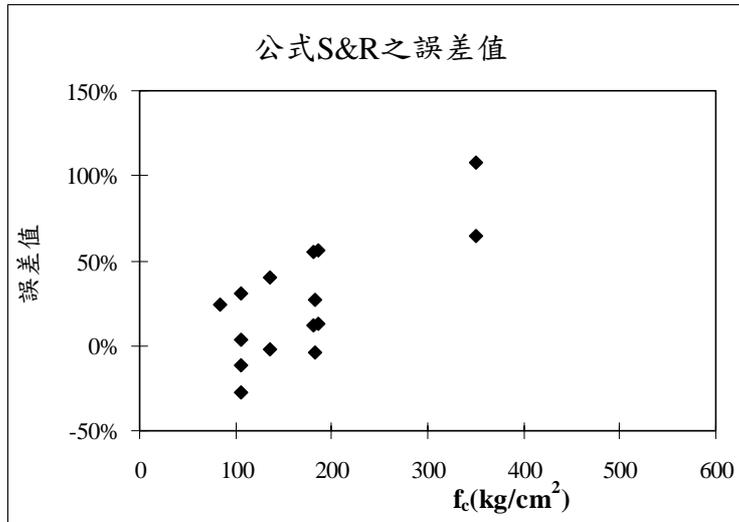


圖 3-6 公式 S&R 預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

四、公式 A&S：

從表 3-1 可以得知，此公式之正負誤差值大於 50% 者有 6 組，佔 40%。

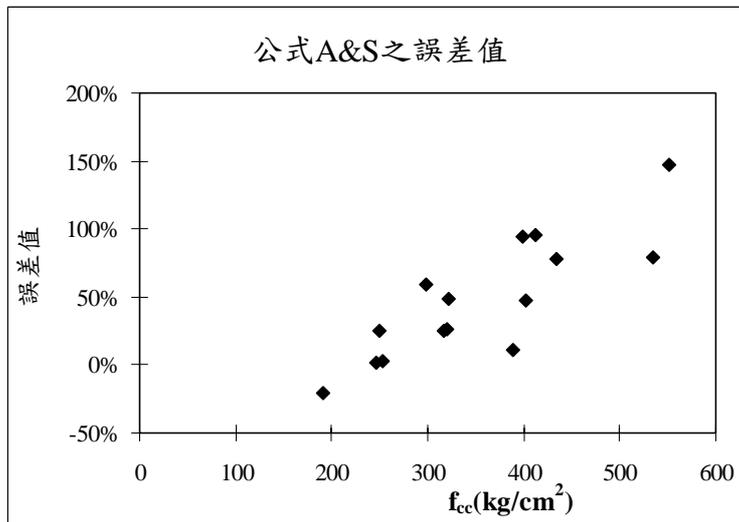


圖 3-7 公式 A&S 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

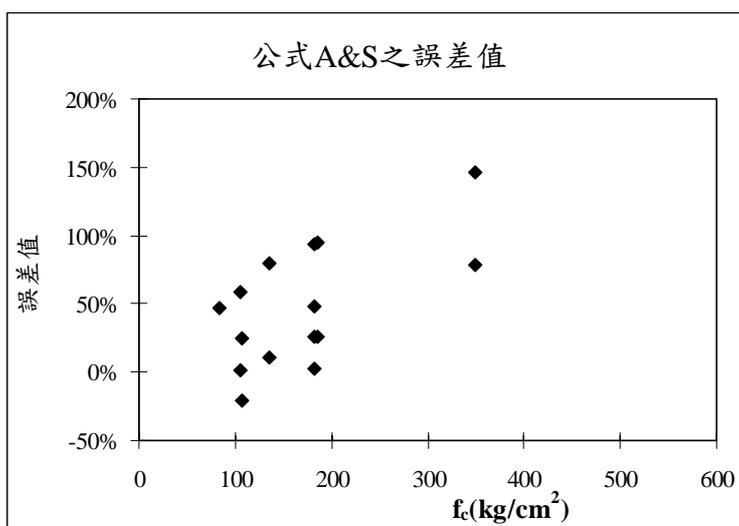


圖 3-8 公式 A&S 預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

五、公式 H&K：

從表 3-1 可以得知，此公式之正負誤差值大於 50% 者有 6 組，佔 40%。

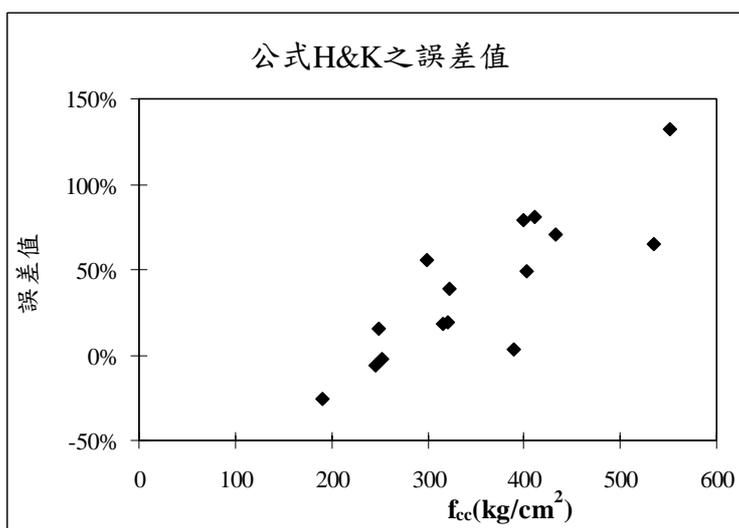


圖 3-9 公式 H&K 預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

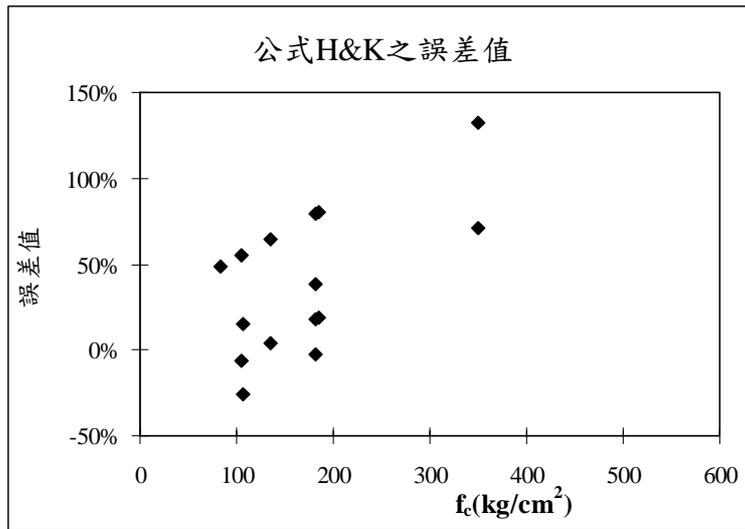


圖 3-10 公式 H&K 預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

六、公式林：

從表 3-1 可以得知，此公式之正負誤差值大於 50% 者有 7 組，佔 46.67%。

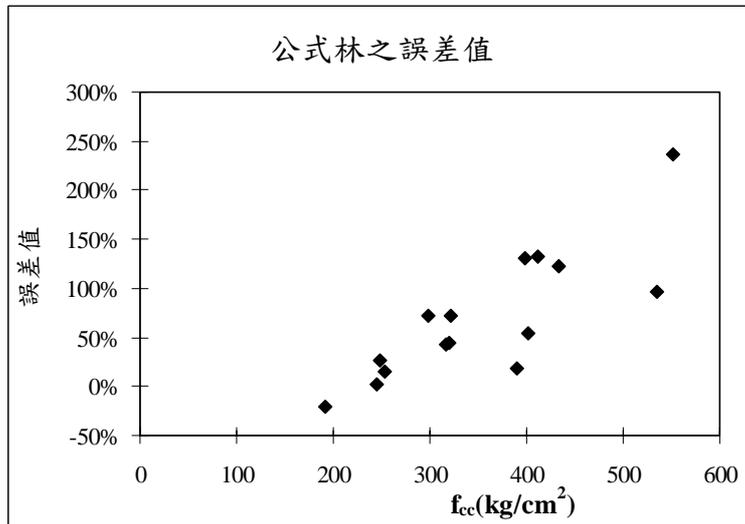


圖 3-11 公式林預測誤差與實驗值 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

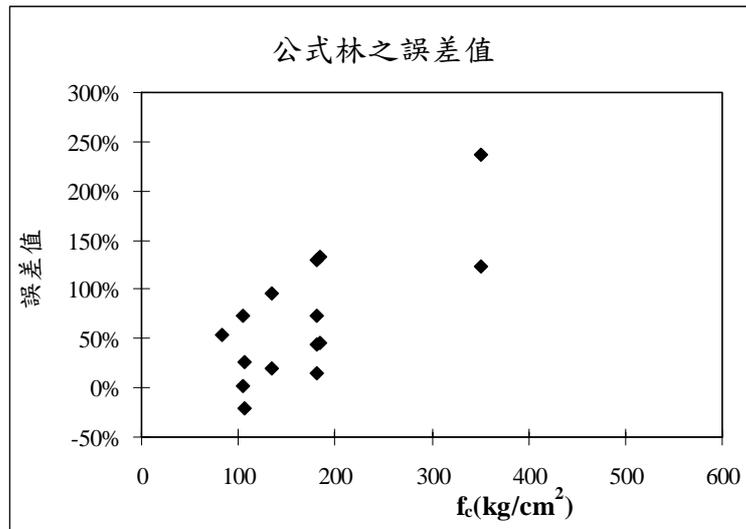


圖 3-12 公式林預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

由以上的圖 3-1、圖 3-3、圖 3-5、圖 3-7、圖 3-9 和圖 3-11 可以看出，當實驗測得之 f_{cc} 愈高，預測公式之誤差值也就愈顯現，表示此六公式之應用範圍以 f_{cc} 在 400kg/cm^2 以下之混凝土為宜。而以圖 3-2、圖 3-4、圖 3-6、圖 3-8、圖 3-10 和圖 3-12 分析之， f_c 值若超過 200kg/cm^2 ，則不建議採此六公式進行預測。

再仔細觀察圖 3-1、圖 3-3、圖 3-5、圖 3-7、圖 3-9 和圖 3-11，實驗測得之 f_{cc} 與預測公式誤差值之間，似乎存在著一種微妙的線性關係。若將此關係找出，再回饋做為預測公式之修正，來看應是可行。

第二節 本研究之預測與驗證

3.2.1 本研究預測公式之介紹

以上預測公式皆為常溫環境下之混凝土圍束強度之預測，但無考慮受高溫作用後之情況。那麼，高溫作用對混凝土強度影響如何？是否能如常溫狀況一般，利用公式預測其強度？為此，本研究提出包括圍束及溫度等二影響因子之強度預測公式，希望能增強預測公式之適用範圍。

本研究之強度預測公式：

$$f_{cc} = 194.6 \left(\frac{f_L}{f_c} \right)^{0.8} - 0.0003(T - 25)^2 + 0.131(T - 25) + f_c$$

其中，

f_{cc} = 圍束試體之軸向壓力強度(kg/cm²)

f_c = 無圍束試體之軸向壓力強度(kg/cm²)

f_L = 圍束強度(kg/cm²)

T = 加熱於混凝土之最高溫度(°C)， $T \geq 25$

3.2.2 利用文獻實驗結果驗證

國內對於圍束混凝土加溫後其強度之研究並不多見。以下謹借用陳慶修[10]、楊欽雄[9]、宋中仁[8]、薛宏德[4]等四人之實驗結果，對本研究預測公式進行驗證，瞭解其預測準確性。

表 3-2 為彙總陳慶修等四人之實驗所得結果，並以本研究公式預測相較。

表 3-2 本研究公式預測結果與文獻實驗結果之比較

溫度與圍束狀態	實驗數據來源	常溫無圍束混凝土試體軸向壓力強度 f_c	圍束強度 f_L	加熱溫度 $T(^{\circ}C)$	加熱圍束混凝土試體之軸向壓力強度 f_{cc}	7.本研究預測公式		
						計算值	誤差%	
常溫	陳慶修 [10]	185.2	51.70	25	320.33	255.32	-20.3%	
		185.2	103.40	25	411.77	307.28	-25.4%	
		350	51.70	25	433.63	392.14	-9.6%	
		350	103.40	25	551.00	423.37	-23.2%	
	楊欽雄 [9]	106.37	34.47	25	190.92	185.37	-2.9%	
		105.21	51.70	25	245.82	215.44	-12.4%	
		181.99	34.47	25	252.87	233.40	-7.7%	
		181.57	51.70	25	316.00	252.81	-20.0%	
		106.37	68.93	25	249.07	243.91	-2.1%	
		105.21	103.40	25	298.83	297.13	-0.6%	
		181.99	68.93	25	322.22	271.50	-15.7%	
		181.57	103.40	25	399.04	305.60	-23.4%	
	宋中仁 [8]	135.16	51.70	25	389.27	225.37	-42.1%	
		135.16	103.40	25	535.41	292.23	-45.4%	
	薛宏德 [4]	83.4	103.40	25	402.30	314.51	-21.8%	
	高溫無圍束	陳慶修 [10]	185.2	0	782.3	92.6	112.36	21.3%
			185.2	0	669.3	130	145.07	11.6%
185.2			0	420.5	157.5	190.08	20.7%	
楊欽雄 [9]		181.99	0	100	170.77	190.13	11.3%	
		181.99	0	100	180.32	190.13	5.4%	
		181.99	0	100	160.97	190.13	18.1%	
		181.99	0	100	176.45	190.13	7.8%	
		181.99	0	250	144.41	196.28	35.9%	
		181.99	0	250	149.63	196.28	31.2%	
		181.99	0	250	143.22	196.28	37.0%	
		181.99	0	250	141.24	196.28	39.0%	
		106.37	0	600	76.64	82.51	7.7%	
		106.37	0	600	80.08	82.51	3.0%	
106.37		0	600	76.68	82.51	7.6%		
106.37		0	600	75.17	82.51	9.8%		

溫度與圍狀	實驗數據來源	常溫無圍束混凝土試體軸向壓力強度 f_c	圍束強度 f_L	加熱溫度 $T(^{\circ}C)$	加熱圍束混凝土試體之軸向壓力強度 f_{cc}	7.本研究預測公式	
						計算值	誤差%
		106.37	0	710	54.74	55.34	1.1%
		106.37	0	710	58.48	55.34	-5.4%
		106.37	0	710	46.83	55.34	18.2%
		106.37	0	710	45.82	55.34	20.8%
	薛宏德 [4]	83.4	0	200	84.4	97.14	15.1%
		83.4	0	350	87.9	94.29	7.3%
		83.4	0	400	85.3	90.34	5.9%
		83.4	0	450	87.7	84.89	-3.2%
		83.4	0	550	62.3	69.49	11.5%
高溫有圍束	陳慶修 [10]	185.2	51.70	732.7	230.00	197.77	-14.0%
		185.2	51.70	502.7	255.00	249.44	-2.2%
		185.2	51.70	336.3	285.00	267.02	-6.3%
		185.2	103.40	786	285.00	233.24	-18.2%
		185.2	103.40	657.3	334.00	270.17	-19.1%
		185.2	103.40	426.7	379.00	311.49	-17.8%
	楊欽雄 [9]	181.99	34.47	100	258.08	241.53	-6.4%
		181.99	51.70	100	309.88	261.23	-15.7%
		181.99	68.93	100	335.20	279.63	-16.6%
		181.99	103.40	100	405.17	313.93	-22.5%
		181.99	34.47	250	239.68	247.68	3.3%
		181.99	51.70	250	298.77	267.38	-10.5%
		181.99	68.93	250	334.62	285.78	-14.6%
		181.99	103.40	250	434.70	320.08	-26.4%
		106.37	34.47	600	184.54	161.50	-12.5%
		106.37	51.70	600	137.61	191.77	39.4%
		106.37	68.93	600	239.49	220.05	-8.1%
		106.37	103.40	600	266.61	272.75	2.3%
		106.37	34.47	710	56.64	134.33	137.2%
		106.37	51.70	710	50.20	164.60	227.9%
		106.37	68.93	710	61.49	192.88	213.7%
	106.37	103.40	710	50.89	245.58	382.6%	

溫度與圍狀	圍束狀態	實驗數據來源	常溫無圍束混凝土試體軸向壓力強度 f_c	圍束強度 f_L	加熱溫度 $T(^{\circ}C)$	加熱圍束混凝土試體之軸向壓力強度 f_{cc}	7.本研究預測公式	
							計算值	誤差%
		薛宏德 [4]	83.4	51.70	100	264.30	224.28	-15.1%
			83.4	103.40	100	330.10	322.65	-2.3%
			83.4	51.70	200	164.60	229.88	39.7%
			83.4	103.40	200	227.50	328.25	44.3%
			83.4	51.70	250	138.00	230.43	67.0%
			83.4	103.40	250	203.10	328.80	61.9%
			83.4	51.70	350	116.20	227.03	95.4%
$R^2=$							0.73	

註：常溫之加熱溫度 T 以 $25^{\circ}C$ 計之。

(資料來源：參考書目[4]、[8]、[9]、[10]，及本研究計算)

同樣地，我們以統計上常用之 R^2 值來瞭解預測公式之準確性。以上表來看，本研究之預測公式 $R^2=0.73$ ，與之前的六個預測公式相較，算是有不錯的準確程度；而以誤差值來看，本預測公式之正負誤差大於 50% 者有 7 組，僅佔 10.29%，故本公式之準確性可說是表現優良的。

現在我們分別以 f_{cc} 、 f_c 、 f_L 與溫度 T 四種因子來探討其與預測公式之誤差情形。

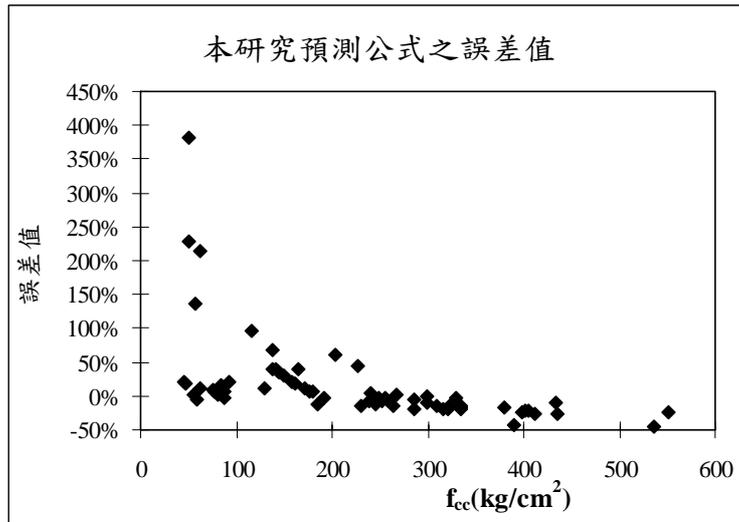


圖 3-13 本研究公式預測誤差與 f_{cc} 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

由上圖很明顯地看出，本研究預測公式在 f_{cc} 高之情況下，預測結果仍然很不錯， $f_{cc} > 230 \text{kg/cm}^2$ 之預測誤差便在 $\pm 50\%$ 之內。然而就 $f_{cc} < 230 \text{kg/cm}^2$ 之範圍來看，除了 7 組數據有大幅度的異常情況之外，本預測公式之表現尚稱良好。

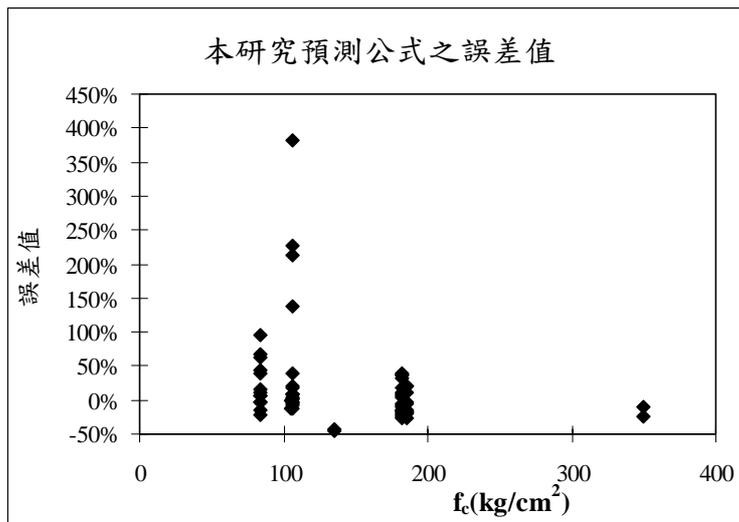


圖 3-14 本研究公式預測誤差與 f_c 之關係圖

(資料來源：本研究繪製)

上圖之 700°C 左右，出現較大的預測誤差。但總結來說，本研究的預測公式對於溫度因子之掌握，表現良好。

第四章 實驗規劃

本研究之主要目的在於觀察並瞭解以纖維複合材料包覆之混凝土，其高溫下之行為表現。前半階段先就常使用之強度 210kg/cm^2 、溫度於 200°C 以下之混凝土情況進行瞭解與分析，待建立實驗經驗、完整之安全設備與初步瞭解後，於後續年度進行較多樣參數、較高溫度範圍之實驗。

第一節 實驗參數

本研究之實驗主軸係將單純之圓柱混凝土，以工程界常用之碳纖維複合材料(CFRP)進行圍束補強，模擬補強後之混凝土於高溫場所之強度變化，同時觀察其破壞行為。為考量時間、實驗經驗、實驗設備、場地與能量等因素，今年度(第一年)所設定之變因參數先就溫度(200°C 以下)與圍束層數進行探討，至於其他如混凝土強度、試體尺寸、升溫速率等則採固定值。

第二節 試體製作

4.2.1 材料

一、混凝土試體：

(一) 強度：

本研究所採之混凝土設計強度為 210kg/cm^2 。

(二) 配比 (為 0.12m^3 混凝土之材料用量)：

1. 水泥：48.7kg

2. 水：28.5kg

3. 粗骨材：150.5kg

4. 細骨材：104.6kg

(三) 尺寸

採用 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體。

二、包覆圍束材料：

使用財團法人工業技術研究院工業材料研究所研發之複合材料貼片 FAW 200 材料系統，其 CFRP 之材料性質如表 4-1 所示。

表 4-1 使用之 CFRP 材料性質表

材料	抗拉模數 E_{cf}	破壞應變 ϵ	極限 抗拉強度	貼片厚度 t	波生比
FAW 200	2.35×10^6 kgf/cm ²	0.015	450 kgf/cm ² ·層	0.011 cm	0.02~0.03

(資料來源：參考書目[5])

三、底漆

採用工業研究院之材料，以底漆主劑(MRL-A2)與環氧樹脂硬化劑(MRL-B2)以重量比 100:35 混合而成。

表 4-2 使用之底漆材料性質表

材料種類	黏度	工作時間	養護時間
底漆	400~2000cps	40~120 分鐘	7 天(20°C)或 14 天(10°C)

(資料來源：參考書目[4])

四、膠結材料

是由環氧樹脂主劑(MRL-A3)與環氧樹脂硬化劑(MRL-B2)以重量比 100:35 混合而成。

表 4-3 使用之膠結材料性質表

材料種類	黏度	工作時間	養護時間
環氧樹脂	5000~20000cps	40~120 分鐘	7 天(20°C)或 14 天(10°C)

(資料來源：參考書目[4])

4.2.2 製作程序

一、混凝土圓柱試體製作

依國家標準 CNS 1230 「試驗室混凝土試體製作及養護法」製作並養護混凝土試體。使用之試體尺寸為 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體。

二、CFRP 圍束[4]

待試體養護完成後，即將碳纖維複合材料貼片(CFRP)貼覆於試體表面。其程序如圖 4-1 所示。

- (一) 表面修整：先以砂紙或砂輪機打磨試體表面突出處，再將試體表面擦試清理乾淨。
- (二) 塗底漆：按照第 4.2.1 節之比例調合主劑與硬化劑成為底漆，再以刷子等工具將其塗佈於預黏著之處，使其滲入混凝土內。其作用在於防止表面剝離，造成纖維貼片剝離。
- (三) 貼纖維複合材料貼片：待底漆固結後，再塗上環氧樹脂，並將 CFRP 貼上。切記務必使 CFRP 平整且無破損，而且避免貼片表面留有氣泡及凹凸不平現象，否則將影響實驗結果。CFRP 貼覆完畢後，其外再上一層表面樹脂。圍束纖維疊接長度至少留 10cm。黏貼第二層 CFRP 時，可重複上述黏貼步驟。兩層圍束的黏貼時間須相隔一天以上。

(四) 試體養護：圍束黏貼工作全部完畢後，須至少一週以上時間才得進行後續實驗。

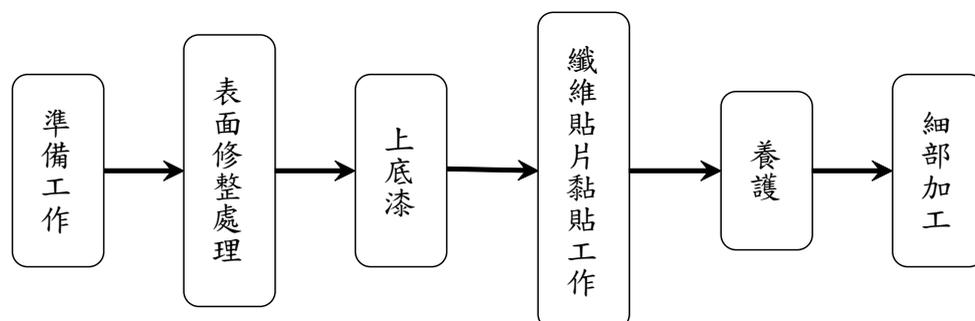


圖 4-1 CFRP 貼覆工作程序圖

(資料來源：參考書目[4])

第三節 實驗設備

本研究實驗進行階段可分為升溫與抗壓，所使用的儀器設備如下。

一、升溫設備

本實驗使用熱風循環烘箱，可升溫至 200°C ，電壓220伏特。如下圖所示。



圖 4-2 本研究實驗使用之烘箱

(資料來源：本研究拍攝)

二、抗壓設備

本實驗使用駿諺精機公司出品之300噸微電腦萬能材料試驗機，如下圖所示。



圖 4-3 本研究實驗使用之萬能試驗機

(資料來源：本研究拍攝)

第四節 實驗規劃

本實驗規劃製作六組不同溫度的混凝土圓柱試體，分別以未圍束、圍束一層或二層 CFRP 之混凝土試體，進行常溫、升溫至 50°C、75°C、100°C、150°C 及 200°C 等不同溫度影響下之抗壓強度實驗。

每個變因參數之試體有六個，共計為 108 個試體。除常溫者之外，餘皆置於烘箱中升溫至目標溫度並恆溫一小時，取出後冷卻至常溫後進行抗壓強度實驗。

本研究之試體規劃，詳見表 4-4。

表 4-4 本研究之試體規劃

溫度條件	CFRP 圍束層數	試體數量 (個)	備註
常溫	0	6	1.為考量試體養護完成時，其含水量高，易影響實驗結果，故本研究以試體養護完成後置於室內環境約三個月後，再進行測試。 2.升溫至目標溫度後，恆溫 1 小時後取出，待冷卻至常溫後進行抗壓強度實驗。
	1	6	
	2	6	
升溫至 50°C	0	6	
	1	6	
	2	6	
升溫至 75°C	0	6	
	1	6	
	2	6	
升溫至 100°C	0	6	
	1	6	
	2	6	
升溫至 150°C	0	6	
	1	6	
	2	6	
升溫至 200°C	0	6	
	1	6	
	2	6	
合計		108	

(資料來源：本研究規劃)

第五章 結論與建議

第一節 結論

一、以文獻研究歸納纖維複合材料(FRP)補強混凝土之效果，大致可綜整如下：

- (一) 就強度、韌性提高率而言，低強度混凝土之圍束補強效果大於中、高強度混凝土。
- (二) 圍束的 FRP 層數增加，圍束試體強度增強倍數亦隨之增加。
- (三) 若圍束力一定，當混凝土強度較高時，補強後之強度增加量亦較高，且其增加量約為圍束力的 4.7~7.0 倍。
- (四) 纖維纏紗束較多，或純混凝土強度較高，則試體以爆裂方式破壞可能性亦趨高。
- (五) 若欲提高混凝土抗壓強度，採用碳纖維複合材料(CFRP)較玻璃纖維複合材料(GFRP)為佳；若欲提高混凝土韌性，採用玻璃纖維複合材料(GFRP)較碳纖維複合材料(CFRP)為佳。
- (六) 在 224°C 之溫度下，EPOXY 黏結劑強度遭受破壞，其圍束力失效；若使用無機聚合樹脂黏結劑，則溫度可至 710°C。

二、以四份文獻之實驗數據對六個預測公式進行驗證，其結果如下：

- (一) 統計上常用之 R^2 值分析之。公式 A&S 最接近實驗結果 ($R^2=0.76$)，而公式 R&B、公式 S&R 與公式 H&K 之 R^2 值也達到 0.7 以上。相較之下，公式 M&P 在此則顯得不太適用 ($R^2=0.56$)。
- (二) 以誤差值來看，以公式 M&P 與公式 S&R 之正負誤差值大於 50% 者有 4 組為最低，而公式 R&B、公式林各有 7 組為最高。
- (三) 此六個預測公式之應用範圍以 f_{cc} 在 400kg/cm^2 以下之混凝土

為宜。 f_c 值若超過 200kg/cm^2 ，則不建議採此六個公式進行預測。

三、以四份文獻之實驗數據對本研究所建立之預測公式進行驗證，其結果如下：

- (一) 本研究之預測公式 $R^2=0.73$ ，與之前的六個預測公式相較，算是有不錯的準確程度。
- (二) 而以誤差值來看，本預測公式之正負誤差大於 50% 者有 7 組，僅佔 10.29%，故本公式之準確性可說是表現優良的。
- (三) 加熱至 700°C 左右，出現較大的預測誤差。但總結來說，本研究的預測公式對於溫度因子之掌握，表現良好。

第二節 建議

建議一

以更多之實驗數據，驗證本研究預測公式之可信度：**立即可行建議**

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各公私立大學或機關團體之材料研究室

一個預測公式之適用範圍的廣度，以及可信度，需有眾多實驗數據在背後支持與考驗。本公式僅以少數文獻之實驗數據做為推導依據，其可信度實有不足。在後續年度應加強取得實驗數據數量，對本公式進行較大規模之驗證與修正。

建議二

進行方形斷面柱試體之實驗，以瞭解 FRP 補強對有角邊者之圍束效果：**中長期性建議**

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各公私立大學或機關團體之材料研究室

本研究係以混凝土圓柱試體做為研究及實驗對象，但 FRP 對於有角邊試體之圍束效果定與圓柱試體有所不同。其差別如何？FRP 是否會在角隅處發生應力集中而導致圍束力降低？值得進行觀察與探討。

建議三

觀察並瞭解水分對於圍束混凝土受高溫之影響：中長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：各公私立大學或機關團體之材料研究室

一般的混凝土受到高溫，其內部之水蒸氣在其孔隙間形成壓力，影響混凝土強度。不少文獻由於研究期程短暫，多以剛完成養護之混凝土試體直接進行圍束高溫實驗，此時試體之含水量最高。然而以 FRP 圍束補強之混凝土，由於其水蒸氣逸散更顯困難，對其混凝土之強度與破壞表現上，剛完成養護階段者與完成養護後歷經數月、數年者，其結果是否不同？可進一步探討。

附錄 歷次審查之會議紀錄

內政部建築研究所 99 年度第 3 次研究業務協調會議紀錄

- 一、時間：99 年 3 月 24 日（星期三）上午 9 時整
- 二、地點：本所簡報室
- 三、主持人：陳代理所長瑞鈴
- 四、研究計畫簡報：略。
- 五、綜合討論及建議事項：
 - （一）本案試體於高溫狀態下所發生之現象，請仔細觀察與描述，以歸納其問題與原因，作為日後研究之檢討課題；另請就本案之高溫設定量度範圍界定釐清。
 - （二）因全案研究規劃期程為三年，題目應修正為「混凝土包覆纖維複合材料補強之高溫性能研究(1/3)」，以示其延續性。
- 六、散會：上午 11 時 30 分。

- 5.FRP 貼片於高溫環境中之表現較差應已熟知，若有些在補強後再包覆水泥砂漿或其他隔材，如此一體試驗是否亦為第二、三年之項目？

林教授文山：

- 1.本研究利用 FRP 包覆混凝土圓柱試體，經升溫至 200°C 後冷卻再進行抗壓實驗，以獲得抗壓強度、高溫及圍束效應之關係。
- 2.由於升溫至 200°C，混凝土應不致受損，故本案研究重點應為膠結材料、底漆、FRP 受溫等因素造成可能發生失去圍束力之情形。
- 3.為考量使用 FRP 之材料性質可能與所列文獻資料有所出入，建議自行試驗或請 FRP 廠商提供。
- 4.由於試體可能先從圍束纖維疊接處發生破壞，建議可藉由今年實驗結果確認，或許未來可將疊接長度列入參數之一。
- 5.本研究是先升溫冷卻再進行抗壓試驗。由於膠結材料、底漆等在高溫狀態下性能表現較差，建議研究中期或後期可增加定載（工作載重）再加溫，以瞭解載重與溫度之雙重影響。
- 6.關於試體之製作，建議由預拌廠一次提供，可得均一性質，降低試體差異，以利後續之比較。

中華民國結構工程技師公會全聯會 陳技師正平：

- 1.CFRP 之研究已進行多年，但仍無相關設計規範可供設計者使用。
- 2.CFRP 之錨定較為困難，尤其是用於梁之剪力補強方面。建議可納為研究方向之一。

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

- 1.本研究就混凝土包覆纖維複合材料(FRP)補強後，不同溫度區間與抗壓強度關係之比較。
- 2.FRP 在建築及公共工程領域之使用層面既多且廣，建議本案之中期或後期研究可就複合材料補強注意事項向業界請益，以達到研究目的與預期成果。

研究單位回應：

- 1.由於今年為本研究案之第一年度，雖多方蒐集閱讀相關文獻，但仍有許多考量不周、細節不甚清楚之處。感謝各位委員之寶貴意見及建議。
- 2.本研究所選用之複合材料為 CFRP。為更符合研究內容，爰修正計畫名稱為「碳纖維複合材料包覆混凝土補強之高溫性能研究(1/3)」。
- 3.各位委員所提建議已列入參採，將視自身實驗能量與時間，規劃於今年度或後續年度之研究範圍。

七、會議結論：

- (一)研究團隊針對各位審查委員之意見，除於本會議中作綜合性回應外，並請於期末報告時，依詳實記錄之與會專家學者及機關團體代表意見，提出詳細回復。
- (二)請將研究進度納入報告書中，並將已完成事項及待完成事項等條列說明。
- (三)本會議審查通過「鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究」、「混凝土包覆纖維複合材料補強之高溫性能研究(1/3)」及「室外型奈米塗料耐久耐候性能之試驗研究(1/2)」等三項研究計畫之期中報告。

八、散會：中午 12 時整。

內政部建築研究所 99 年度自辦研究計畫「室外型奈米塗料耐久耐候性能之試驗研究(1/2)」、「碳纖維複合材料包覆混凝土補強之高溫性能研究(1/3)」及「紅外線熱影像法於水泥砂漿材料老化溫度特性之檢測研究」等 3 案期末審查會議紀錄

一、時間：99 年 11 月 26 日（星期五）下午 2 時 30 分

二、地點：討論室（一）

三、主持人：林組長建宏 記錄：曹源暉、厲妮妮、林谷陶

四、出席人員：如簽到單

五、簡報內容：略。

六、綜合討論意見：

（一）「碳纖維複合材料包覆混凝土補強之高溫性能研究(1/3)」案：

台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉：

1. 本案針對 FRP 進行補強後抗壓強度與溫度區間關係之研究，具參考價值。
2. 本研究案已符合原預期成果。

邱顧問昌平：

1. 以 CFRP 包覆補強圓柱體混凝土構件，國內外已有多年之研究。本計畫以林至聰教授之研究成果[5]為主，利用文獻[4]、[8]、[9]、[10]之實驗結果，代入國內、外之 6 個預測公式，以比較其預測之誤差程度。本研究另導出一預測公式（但未說明如何推導），亦做相同之比較。初步成果尚可，惟宜加強文字內容。
2. 圍束強度 f_L 如何得知，宜引用其他文獻以詳細交代。
3. 為求報告書內容順暢，文字宜再做修改或增註。

石建築師正義：

- 1.本研究由現有公式預測結果，並以迴歸方式找出新的預測公式，表現很好。
- 2.後續研究建議可分為二方向：
 - (1)進行與文獻相同(如溫度與層數)，歸納 FRP 補強後之抗壓強度與溫度區間關係，並與已蒐集之研究案結果相比較。
 - (2)進行與文獻不同溫度及層數之研究，以期獲得不同之新結論，並可藉此探討 FRP 層數與溫度的經濟性關係。

中華民國全國建築師公會 陳建築師昶良：

- 1.本案纖維複合材料之補強使用方式，係採「包覆」作法，與「摘要」、「研究緣起」所提之「貼片」方式似有區分，建請補述。
- 2.本案之實驗規劃，均以未受作用力之試體進行實驗，與一般所稱「補強」觀念似有不同，建議於報告書中敘明本案為「強化」研究試驗。
- 3.建議考量紫外光對纖維複合材料老化影響，作為後續研究方向之一。
- 4.本案內容較偏向於「高溫後」之性能研究，而非「高溫中」性能研究。
- 5.本案實驗規劃，其溫度範圍為 50~200°C，是否有其依據？

意見回覆情形：

- 1.本案為 3 年期之研究，第 1 年與第 2 年先以 FRP 包覆圓柱試體之方式進行實驗，以瞭解其抗壓強度與圍束強度、溫度之關係。至於溫度範圍，由於本研究初期對此

類實驗尚無操作經驗，不敢貿然將溫度提升至 700、800 °C 並進行「高溫中」性能研究，恐生意外，故先規劃以 200 °C 以下之溫度範圍進行探討。

2. 本案規劃以未受作用力之試體進行實驗，係基於試體之均一性、減少試體差異為出發點，查文獻亦多以新製試體進行研究。報告書內之相關文字敘述將酌作修正。
3. 感謝委員寶貴意見。本案將再仔細考量自身之人力支援、實驗能量後適度調整研究內容與方向。

八、結論：

- (一) 綜合討論之建議事項，請各案主持人參採辦理或妥予回應，納入最後之成果報告；有關期中與期末報告審查會議之審查意見，應以回應表之方式逐項回覆，並詳實呈現於期末成果報告之附錄中。
- (二) 本次 3 案之期末報告審查原則通過，請掌握後續之研究期程，確實完成各項計畫之執行，充實研究內容，完成成果報告書之撰寫與印製。

九、散會：下午 4 時 50 分。

參考書目

1. 中央氣象局全球資訊網，<http://www.cwb.gov.tw/V6/indexsimap.htm>，二十一世紀(2001-)台灣地區災害性地震。
2. 吳振隆，「碳纖維高分子複合材料應用於結構補強技術研究及發展」，<http://www.ctci.org.tw/public/Attachment/911010173771.pdf>。
3. 徐耀賜，「複合材料(FRP)—混凝土橋梁結構補強加固之利器」，土木技術，第 37 期，民國 90 年 3 月。
4. 薛宏德，「複合纖維圍束補強耐高溫性能之研究」，國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文，民國 92 年。
5. 林至聰，「碳纖維貼片補強鋼筋混凝土構件之研究」，國立中央大學土木工程學系博士論文，民國 88 年。
6. 楊清宏，「複合材料圍束混凝土構材受軸力行為之數值分析」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，民國 95 年。
7. 陳照堂，「碳纖維和玻璃纖維圍束混凝土之行為」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，民國 86 年。
8. 宋中仁，「應用 EPOXY 黏結劑圍束 CFRP 混凝土定載下高溫性能之研究」，國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文，民國 94 年。
9. 楊欽雄，「無機聚合樹脂應用於混凝土試體包覆 FRP 補強之耐高溫研究」，國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文，民國 97 年。
10. 陳慶修，「無機聚合樹脂粘貼 CFRP 包覆試體之高溫性質研究」，國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文，民國 95 年。
11. 林雅萍，「紅外線熱影像法在混凝土結構 CFRP 修補品質之評估」，國立中興大學土木工程學系碩士學位論文，民國 95 年。

12. 盧廷鈺、邱佑宗、葉日翔、吳文嘉、林美秀、林英民，「混凝土結構物 FRP 補強」，強化塑膠，第 94 期，民國 92 年 3 月。
13. 李天河、李有豐、施邦築，「應用 FRP 複合材料補強鋼筋混凝土建築結構物～碳纖維貼片補強施工案例介紹與探討」，土木技術，第 17 期，民國 88 年 7 月。
14. 游新旺、黃世建，「纖維貼片補強鋼筋混凝土梁之剪力暨撓曲強度評估研究」，中國土木水利工程學刊，第 16 卷第 1 期，民國 93 年 3 月。
15. F. E. Richart, A. Brandtzaeg, and R. L. Brown, “A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses”, University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin No. 185, pp.104, 1928.
16. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., “Orthotropic Model of concrete for Triaxial Stresses”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp.165-181, 1989.
17. M. Stacioglu, and S. R. Razvi, “Strength and Ductility of Confined Concrete”, J. Struct. Div., ASCE, 118(6), pp.1590-1607, 1992.
18. Cruz C. R., “Elastic Properties of Concrete at High Temperatures”, PAC Research Bulletin, 1971.
19. Fardis, M. N., and Khalili, H. H., “FRP-encased concrete as a structural material”, Mag, Concrete Res., Vol. 34, No. 121, pp.191-202, Dec., 1982.