

96-28-7247

MOTC-IOT-95-H1DB002

# 活性粉混凝土補強 R.C.構件與 耐久性之研究 (2/2)



交通部運輸研究所  
中華民國 96 年 4 月

96-28-7247  
MOTC-IOT-95-H1DB002

# 活性粉混凝土補強 R.C.構件與 耐久性之研究 (2/2)

著者：陳桂清、柯正龍、張大鵬、黃兆龍  
林秉如、張淳勛、王金圳、陳柏存  
吳崇聖、高進驊、呂冠群、展維賢  
丁小真

交通部運輸研究所  
中華民國 96 年 4 月

96

活性粉混凝土補強刀の構件與耐久性之研究  
(2/2)

交通部運輸研究所

GPN : 1009600780

定價 300 元

活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性之研究. (2  
/2) / 陳桂清等著. -- 初版. -- 臺北市：  
交通部運研所，民96  
面： 公分  
參考書目：面  
ISBN 978-986-00-9245-5（平裝）

1. 混凝土

440.327

96005991

**活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性之研究 (2/2)**

著 者：陳桂清、柯正龍、張大鵬、黃兆龍、林秉如、張淳勛、王金圳、  
陳柏存、吳崇聖、高進驊、呂冠群、展維賢、丁小真

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路240號

網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw)（中文版＞中心出版品）

電 話：（04）26587176

出版年月：中華民國96年4月

印 刷 者：福島實業有限公司

版（刷）次冊數：初版一刷130冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價：300 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：（02）23496880

國家書坊臺視總店：臺北市八德路3段10號B1・電話：（02）25781515

五南文化廣場：臺中市中山路6號・電話：（04）22260330

GPN：1009600780 ISBN：978-986-00-9245-5（平裝）

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。



## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<b>出版品名稱：活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究 (2/2)</b>			
國際標準書號 (或叢刊號) 978-986-00-9245-5 (平裝)	政府出版品統一編號 1009600780	運輸研究所出版品編號 96-28-7247	計畫編號 95-H1DB002
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳桂清 研究人員：柯正龍 聯絡電話：04-26587118 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立臺灣科技大學 計畫主持人：張大鵬 協同主持人：黃兆龍 研究助理：林秉如 研究人員：王金圳、張淳勛、陳柏存 吳崇聖、高進驊、呂冠群 展維賢、丁小真 地址：臺北市基隆路四段 43 號 聯絡電話：02-27376577		研究期間 自 95 年 3 月 至 95 年 10 月
<b>關鍵詞：活性粉混凝土 (RPC)，補強，碳纖維貼片 (CFRP)</b>			
<b>摘要：</b> <p>本研究根據第一年之研究成果，由15組中選取一組較佳活性粉混凝土 (RPC) 配比，重新進行基本力學試驗，並同時以未補強、RPC補強1 cm、碳纖維貼片 (CFRP) 補強一層等方式，進行縮小尺寸之補強R.C圓柱及矩梁構件性能試驗，並探討其補強性能差異。</p> <p>結果顯示，在力學性質方面，由於RPC含有大量卜作嵐材料 (矽灰、爐石及飛灰)，且未經高溫高壓催化，故直到28天齡期後才逐漸發展，與Mortar和NC明顯不同。在28天齡期時，<math>E_{RPC}/E_{NC}</math>與<math>E_{RPC}/E_{Mortar}</math>分別為1.67、2.03，卜松比皆介於0.19至0.21之間，顯示以RPC進行水泥砂漿基材或混凝土基材修補，具良好之材料相容性。</p> <p>縮小RC圓柱試體以CFRP補強一層之補強效果較佳，惟其破壞時為瞬時爆裂剝落，不具預警功能，若經RPC補強1 cm後，雖然抗壓強度提升效果並不顯著，但因RPC補強具有良好的韌性行為，使得柱體本身達到極限強度之後，仍能保持完整性，對於修補後結構再次受到破壞時能保有一定的安全性。</p> <p>縮小斷面RC梁經RPC或CFRP補強後，皆可提高斷面之抗剪強度，由補強前之斜剪破壞改變為撓曲破壞，但經RPC補強後，其變形吸收能量提升率較高。</p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
96 年 4 月	266	300	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<b>機密等級：</b> 密   機密   極機密   絕對機密 (解密條件：     年   月   日解密，   公布後解密，   附件抽存後解密， 工作完成或會議終了時解密，   另行檢討後辦理解密) 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS  
INSTITUTE OF TRANSPORTATION  
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

<b>TITLE: Retrofit of R.C. Members with Reactive Powder Concrete and Its Durability (2/2)</b>			
ISBN (OR ISSN) 978-986-00-9245-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009600780	IOT SERIAL NUMBER 96-28-7247	PROJECT NUMBER 95-H1DB002
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Kuei-Ching Cheng PROJECT STAFF: Jeng-Long Ko PHONE: (04) 26587118 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM March 2006 TO October 2006
RESEARCH AGENCY: National Taiwan University of Science and Technology PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ta-Peng Chang ASSISANT INVESTIGATOR: Chao-Lung Hwang PROJECT STAFF: Ping-Ju Lin, Jin-Jun Wang, Chun-Hsin Chang, Bo-Tsun Chen, Chung-Sheng Wu, Jin-Hua Kao, Guan-Chun Lu, Wei-Hsian Chan, Hsiao-Jen Ding ADDRESS: #43, Sec, 4, Keelung Rd, Dept. of Construction Eng., NTUST, Taipei 106, Taiwan, R.O.C. PHONE: (02) 27376577			
KEY WORDS: <b>Reactive powder concrete (RPC), retrofit, carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)</b>			
<b>ABSTRACT:</b> <p>According to the research results from the first year, among 15 sets of mix proportioning, this study selects the best one to mix design the reactive powder concrete (RPC). Basic mechanical tests were re-conducted. Three types of retrofitting methods including the control set, RPC retrofitted of thickness of 10 mm and CFRP retrofitted of one layer are used to test the performance of the scale-down RC cylindrical column and long rectangular cross-section beam members and compare the difference among these two retrofitting functions.</p> <p>Experimental results indicate that, due to the massive amount of added pozzolanic materials (silica fume, slag and fly ash) and normal curing without activation by high temperature and pressure, the mechanical properties of RPC begins to develop after 28 days apparently unlike the counter sets of mortar and NC. At the age of 28 days, the ratios of <math>E_{RPC}/E_{NC}</math> and <math>E_{RPC}/E_{Mortar}</math> are 1.67 and 2.03, respectively. The values of Poisson's ratio range from 0.19 to 0.21. These results indicate that good strain compatibility can be expected between the interface of RPC retrofitting material and the base material of cement mortar or concrete.</p> <p>The scale-down cylindrical column specimen with one layer of retrofitting CFRP has a better performance, but is abruptly failed by spalling and pop-up without precaution. If the column is retrofitted with RPC of 10 mm thick, the enhancement of compressive strength is not apparent but the failure mode turns to a good ductile type such that the integrity of member can still be maintained even its ultimate strength has been reached. When such damaged retrofitted members are subject to failure load again, certain degree of safety can still be preserved.</p> <p>The scale-down long rectangular beam retrofitted by either RPC or CFRP can both raise their shear resistances of cross-section so that the failure mode is changed from the shear mode of control set to the flexural mode after the retrofitting. However, the rate of energy absorption resulting from deformation for the RPC retrofitting is higher.</p>			
DATE OF PUBLICATION April 2007	NUMBER OF PAGES 266	PRICE 300	CLASSIFICATION RESTRICTED      CONFIDENTIAL SECRET            TOP SECRET UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 目 錄

中文摘要	I
中文摘要	II
表目錄	VIII
圖目錄	X
照片目錄	XIV
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究項目與流程	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 活性粉混凝土材料	5
2.1.1 活性粉混凝土之發展	5
2.1.2 活性粉混凝土之原理	5
2.1.3 添加鋼纖維對活性粉混凝土的影響	6
2.1.4 添加矽灰、石英粉對活性粉混凝土的影響	7
2.2 補強原理	7
2.2.1 一般剪力梁破壞模式	9
2.2.2 無剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度	10
2.2.3 FRP 對剪力強度的影響	10
2-2-4 圍束鋼筋混凝土組成律	13
2.2.5 纖維複合材料圍束混凝土組成律	16
2.3 混凝土結構物之補強	19

2.3.1 補強材料特性考量 -----	19
2.3.2 混凝土結構之補強材料 -----	20
2.3.3 混凝土結構補強工法 -----	21
2.3.4RPC 修補混凝土結構物-----	22
第三章 構件補強分析原理 -----	27
3.1 具有剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度-----	27
3.2 鋼筋混凝土梁之剪力行為-----	28
3.3 無箍筋之鋼筋混凝土梁剪力行為. -----	28
3.4 有 CFRP 補強之鋼筋混凝土梁剪力分析 -----	30
3.4.1 CFRP 補強梁剪力分析（一） -----	30
3.4.2 CFRP 補強梁剪力分析（二） -----	34
3.5 鋼筋混凝土梁鋼板補強力學行為-----	36
3.6 無圍束之鋼筋混凝土柱軸力行為-----	39
3.7 鋼筋混凝土柱軸力設計強度-----	39
3.8 有 CFRP 圍束之鋼筋混凝土柱軸力行為.-----	40
3.9 鋼筋混凝土柱 CFRP 補強設計原理-----	40
3.9.1 CFRP 剪力破壞補強設計-----	41
3.9.2 CFRP 撓曲破壞補強設計-----	42
3.9.3 CFRP 搭接長度不足補強設計 -----	42
3.10 圓形橋柱鋼板補強設計原理 -----	43
3.10.1 剪力破壞鋼板補強設計 -----	44
3.10.2 橋柱韌性補強設計 -----	44
3.10.3 避免橋柱挫屈鋼板補強設計 -----	45
3.10.4 搭接長度不足鋼板補強設計 -----	46

3.10.5 圓形橋柱鋼板補強之最小厚度需求	47
第四章 修補材料與修補工法	55
4.1 前言	55
4.2 結構體修復補強工法探討	55
4.2.1 裂縫環氧樹脂灌注工法	56
4.2.2 鋼板（樑）補強工法	57
4.2.3 碳纖維補強工法	58
4.2.4 混凝土表面破損修補工法	60
4.2.5 斷面擴大補強工法	61
4.3 修復補強材料之種類	62
4.3.1 填補用修補材料	62
4.3.2 補強修補材料	63
第五章 試驗計劃	73
5.1 試驗材料	73
5.2 試驗儀器及設備	76
5.3 試驗項目	77
5.3.1 基本力學試驗	77
5.3.2 碳纖維貼片與活性粉混凝土補強成效試驗	77
5.4 試驗方法	78
5.4.1 流度試驗	78
5.4.2 基本力學試驗	78
5.4.3 碳纖維貼片與活性粉混凝土補強成效試驗	80
第六章 試驗成果與討論	101
6.1 水泥質材料之基本力學性質	101

6.2 小型抗彎抗壓補強成效-----	103
6.3 柱補強試驗結果-----	104
6.3.1 控制組 -----	104
6.3.2 CFRP 組 -----	106
6.3.3 RPC 組 -----	107
6.4 梁補強試驗結果-----	108
第七章 RPC 補強施工程序及評估與補強方針-----	139
7.1 補強施工程序-----	139
7.1.1 RPC 圓柱補強工法 -----	139
7.1.2 RPC 梁剪力補強施工程序 -----	139
7.1.3 梁剪力補強施工程序 -----	140
7.1.4 面板底層補強施工程序 -----	141
7.2 評估與補強方針-----	142
7.2.1 評估方式 -----	142
7.2.2 補強方針 -----	143
第八章 結論與建議-----	147
8.1 結論 -----	147
8.1.1 RPC 基本材料性質 -----	147
8.1.2 小型抗彎抗壓補強成效 -----	147
8.1.3 縮小斷面柱補強功效 -----	148
8.1.4 縮小斷面梁補強功效 -----	148
8-2 建議 -----	149
參考文獻 -----	151
附錄一：期中審查意見及處理情形 -----	159

附錄二：期末審查意見及處理情形 -----	165
附錄三：期中進度整合會議 -----	169
附錄四：期末進度整合會議 -----	183
附錄五：教育訓練講義與剪影 -----	195
附錄六：期末簡報 -----	227

## 表目錄

表 4-1 內政部營建署混凝土結構物劣化評等標準 -----	66
表 4-2 RPC 材料特性-力學性質.-----	67
表 4-3 RPC 材料特性-耐久性質-----	67
表 5-1 RPC 配比表 -----	82
表 5-2 卜特蘭第一型水泥之物理性質 -----	82
表 5-3 卜特蘭第一型水泥之化學性質 -----	83
表 5-4 矽灰基本性質試驗報告 -----	83
表 5-5 水泥砂漿配比表 (kg/m <sup>3</sup> ) -----	84
表 5-6 碳纖維貼片基本性質表 -----	84
表 5-7 底漆基本性質表 -----	84
表 5-8 積層樹脂基本性質表 -----	85
表 5-9 應變計規格表 -----	85
表 5-10 水泥質材料基本力學試驗試體數量表 -----	86
表 5-11 補強性能試驗試體數量表 -----	86
表 6-1 RPC 流度試驗結果-----	110
表 6-2 NC 坍度試驗結果 -----	110
表 6-3 RPC、NC 與 Mortar 抗壓強度試驗結果-----	111
表 6-4 RPC 與 NC 劈裂強度試驗結果.-----	111
表 6-5 RPC、NC 與 Mortar 彈性模數與卜松比量測結果-----	112
表 6-6 RPC 補強 Mortar 抗彎試驗結果-----	112
表 6-7 混凝土圓柱抗壓補強成效 -----	113
表 6-8 控制組韌性表 -----	113



表 6-9 CFRP 補強組韌性表 -----	114
表 6-10 RPC 補強組韌性表 -----	114
表 6-11 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C.梁降伏與極限載重表 ---	114
表 6-12 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C.梁之位移能量表 -----	115

## 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	4
圖 2-1 鋼纖維破壞模式	23
圖 2-2 深梁 ( $a/d \leq 1$ ) 之破壞模式	23
圖 2-3 短梁 ( $1 < a/d \leq 2.5$ ) 之剪力破壞模式	24
圖 2-4 中度跨距梁 ( $2.5 < a/d \leq 6$ ) 之斜張破壞模式	24
圖 2-5 長梁 ( $6 < a/d$ ) 彎曲破壞模式	25
圖 2-6 各種不同纖維複材圍束混凝土模式之比較	25
圖 3-1 具剪力箍筋鋼筋混凝土梁剪力強度示意圖	48
圖 3-2 三分點載重剪力彎矩與裂縫示意圖	48
圖 3-3 無箍筋鋼筋混凝土梁計算說明示意圖	49
圖 3-4 鋼筋混凝土梁之拱作用	50
圖 3-5 CFRP 貼片定義	50
圖 3-6 RC 梁剪力貼片補強斷面	51
圖 3-7 垂直向部分複合三明治樑	51
圖 3-8 典型單軸向受壓混凝土之應力-應變曲線示意圖	52
圖 3-9 CFRP 包覆圍束示意圖	52
圖 3-10 不同 CFRP 包覆厚度之混凝土應力-應變圖	53
圖 3-11 圓形橋柱主筋搭接示意圖	53
圖 4-1 結構體修補面上可能產生的載重	68
圖 4-2 修補介面鍵結力機構示意圖	68
圖 4-3 裂縫灌注修補工法示意圖	69
圖 4-4 鋼板補強工法示意圖	69

圖 4-5 鋼樑補強工法示意圖 -----	70
圖 4-6 碳纖維補強工法示意圖 -----	70
圖 4-7 混凝土表面破損修補工法示意圖 -----	71
圖 4-8 混凝土斷面擴大補強工法示意圖 -----	72
圖 4-9 修補材料選擇之基本考量 -----	72
圖 5-1 細粒料粒徑分佈圖 -----	87
圖 5-2 鋼筋彎鈎規範示意圖 -----	87
圖 5-3 RPC 抗彎補強試驗試體-----	88
圖 5-4 抗壓性能補強試驗-----	88
圖 5-5 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體 -----	89
圖 5-6 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體 -----	90
圖 5-7 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體應變計及位移計架設位置 -----	91
圖 5-8 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體應變計及位移計架設位置 -----	91
圖 6-1 RPC、NC 與 Mortar 抗壓強度發展曲線-----	116
圖 6-2 RPC 與 NC 劈裂強度發展曲線-----	116
圖 6-3 RPC 與 NC 彈性模數發展曲線-----	117
圖 6-4 控制組試體破壞外觀 -----	117
圖 6-5 控制組試體破壞外觀 -----	118
圖 6-6 控制組試體保護層剝落外觀 -----	118
圖 6-7 控制組試體箍筋長度量測 -----	119
圖 6-8 控制組柱軸向壓力與軸向位移圖 -----	119
圖 6-9 控制組編號 1 柱軸向應力與軸向、側向應變圖 -----	120
圖 6-10 控制組編號 2 柱軸向應力與軸向、側向應變圖-----	120
圖 6-11 控制組編號 3 柱軸向應力與軸向、側向應變圖-----	121

圖 6-12 控制組編號 1 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	----121
圖 6-13 控制組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	----122
圖 6-14 控制組編號 3 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	----122
圖 6-15 CFRP 補強組試體破壞外觀(1)	-----123
圖 6-16 CFRP 補強組試體破壞外觀(2)	-----123
圖 6-17 CFRP 補強組柱軸向壓力與軸向位移圖	-----124
圖 6-18 CFRP 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向、側向應變圖	-----124
圖 6-19 CFRP 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向、側向應變圖	-----125
圖 6-20 CFRP 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向、側向應變圖	-----125
圖 6-21 CFRP 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	-----126
圖 6-22 CFRP 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	-----126
圖 6-23 CFRP 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	-----127
圖 6-24 RPC 補強組試體破壞外觀(1)	-----127
圖 6-25 RPC 補強組試體破壞外觀(2)	-----128
圖 6-26 RPC 補強組試體破壞後界面黏結情形	-----128
圖 6-27 RPC 補強組柱軸向壓力與軸向位移圖	-----129
圖 6-28 RPC 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向、側向應變圖	-----129
圖 6-29 RPC 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向、側向應變圖	-----130
圖 6-30 RPC 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向、側向應變圖	-----130
圖 6-31 RPC 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	-----131

圖 6-32 RPC 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	-----131
圖 6-33 RPC 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖	-----132
圖 6-34 未補強 RC 梁載重與中點變位圖	-----132
圖 6-35RPC 補強 1 cm 梁載重與中點變位圖	-----133
圖 6-36 CFRP 補強 1 cm 梁載重與中點變位圖	-----133
圖 6-37 典型 NC 未補強加載前後之外觀	-----134
圖 6-38 典型以 RPC 進行剪力補強加載前後之外觀	-----135
圖 6-39 典型以 CFRP 進行剪力補強加載前後之外觀	-----136
圖 6-40 典型 NC 加載後裂縫狀況	-----137
圖 6-41 典型以 RPC 進行剪力補強加載前後之情形	-----137
圖 7-1 RPC 圓柱補強工法示意圖	-----145
圖 7-2 RPC 梁剪力補強（預鑄版塊補強方式）補強工法示意圖	-----145
圖 7-3 RPC 梁剪力補強（現場澆注補強方式）補強工法示意圖	-----146
圖 7-4 RPC 面板底層補強工法示意圖	-----146

## 照片目錄

照片 5-1 波特蘭第一型水泥	92
照片 5-2 矽砂	92
照片 5-3 矽灰	92
照片 5-4 石英粉	93
照片 5-5 飛灰	93
照片 5-6 爐石粉	93
照片 5-7 鋼纖維	94
照片 5-8 強塑劑...	94
照片 5-9 碳纖維貼片	94
照片 5-10 底漆	95
照片 5-11 面漆	95
照片 5-12 鋼筋	96
照片 5-13 拌和機	97
照片 5-14 流度台	97
照片 5-15 200T 電腦式自動抗壓試驗機	98
照片 5-16 資料截取系統	98
照片 5-17 MTS 600 T 萬能試驗機	99

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與背景

鋼筋混凝土材料為廿世紀最重要的土木工程材料之一，為結合高抗壓強度混凝土材料及高抗拉強度鋼筋材料之高強度複合材料，相較於傳統的磚石構造，鋼筋混凝土有著極佳的高強度、耐久性質，也較能承受劇烈氣候的影響，與木構造、鋼構造比較，亦有著極佳的耐火能力與體積穩定性，因此廣泛受到許多工程採用，為當今營造工程主要的建材。然而，鋼筋混凝土構造往往受到天然災害、環境侵蝕與人為影響等三個主要因素而造成劣化：

### 1.天然災害

台灣地處太平洋地震帶上，是全球地震發生率最頻繁的地區之一，平均每年發生次數超過四千次，有感地震可達二百餘次，此災害輕則造成鋼筋混凝土構造龜裂、剝落，重則造成傾倒、損壞，尤以早期之鋼筋混凝土建築，其設計規範未依循耐震設計的要求，因此就結構方面而言，進行整體構造強度補強評估是目前首當之趨。

### 2.環境侵蝕

台灣四周環海，構造物接觸海域環境甚多，加上亞熱帶環境特有的颱風侵襲，及土石流的沖刷，容易造成混凝土材料因裂縫中氯離子、水分的滲透造成鋼筋鏽蝕、混凝土劣化、導致膨脹開裂，進而強度降低，值得注意的是此一腐蝕機理是一直週而復始的發生，並且發生位置往往是在橋墩下緣、碼頭平台腹部等水涯線往返之處，因此就耐久性方面而言，如何以良好的材料進行補強，避免侵蝕的發生，也是減輕鋼筋混凝土劣化研究主要目標之一。

### 3.人為影響

良好的鋼筋混凝土材料仍須有良好的施工品質，如果施工過程不

良，品質控制不一，或使用時超過原設計的用途，造成增加額外載重、反覆之疲勞現象，或遭受外物撞擊、機械之週期震動等，對構造物造成一定程度安全性降低，無論是強度、耐久性均有影響，對於局部的損傷，補強是一項經濟、且又迅速獲得成效的方法，因此如何採用有效、經濟、迅速的補強方法亦為重要的研究主題。

## 1.2 研究目的

隨著混凝土材料的研發日新月進，許多高強度、高性能的配比與材料陸續被發展出來，其中礦物摻料及化學藥劑的添加更使得混凝土突破了舊有工作性與強度、耐久性無法取得平衡的問題，目前工程上常見的高強度混凝土 (HSC)、高性能混凝土 (HPC)、自充填混凝土 (SCC)、活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete，簡稱 RPC) 等均是更為先進的混凝土配比材料。

活性粉混凝土 (RPC) 原為法國國防部之軍事機密。1990 年法國營造公司 Bouygues 集團也開始研發這種材料，並在 1994 年公開發表部分成果後，相關活性粉混凝土的研究於美國、加拿大也陸續呈現結果。RPC 的最主要特性為<sup>[1-3]</sup>：

1. 去除粗骨材以改善均勻性。
2. 骨材級配採最佳化，藉以提高密實性。
3. 添加鋼纖維以增加韌性。
4. 使用良好的養護技術以改善混凝土微觀結構。
5. 抗彎、抗壓、彈性模數都比 HPC 為高。
6. 相較於混凝土的脆性破壞，RPC 破壞則屬於延展性破壞。
7. 因為密實性佳，因此滲透係數極低，具有良好耐久性。
8. 水泥、砂石的用量降低，對環境影響最小，具環保機能。



9.施工方法同普通混凝土之拌和與澆置的方式。

國內對 RPC 材料的研發亦頗多著墨，但是對於應用在結構體上的補強則是尚在起步階段，故瞭解 RPC 材料對鋼筋混凝土梁、柱結構補強的行為及探討補強成效，為本計畫的研究目的。

### 1.3 研究項目與流程

本計畫於第一年參考國內外 RPC 相關文獻，建立 RPC 緻密配比設計理論重新設計多組 RPC 配比，並挑選其中一組較佳者，進行相同之基本性能、耐久性試驗及補強成效試驗。研究成果顯示：

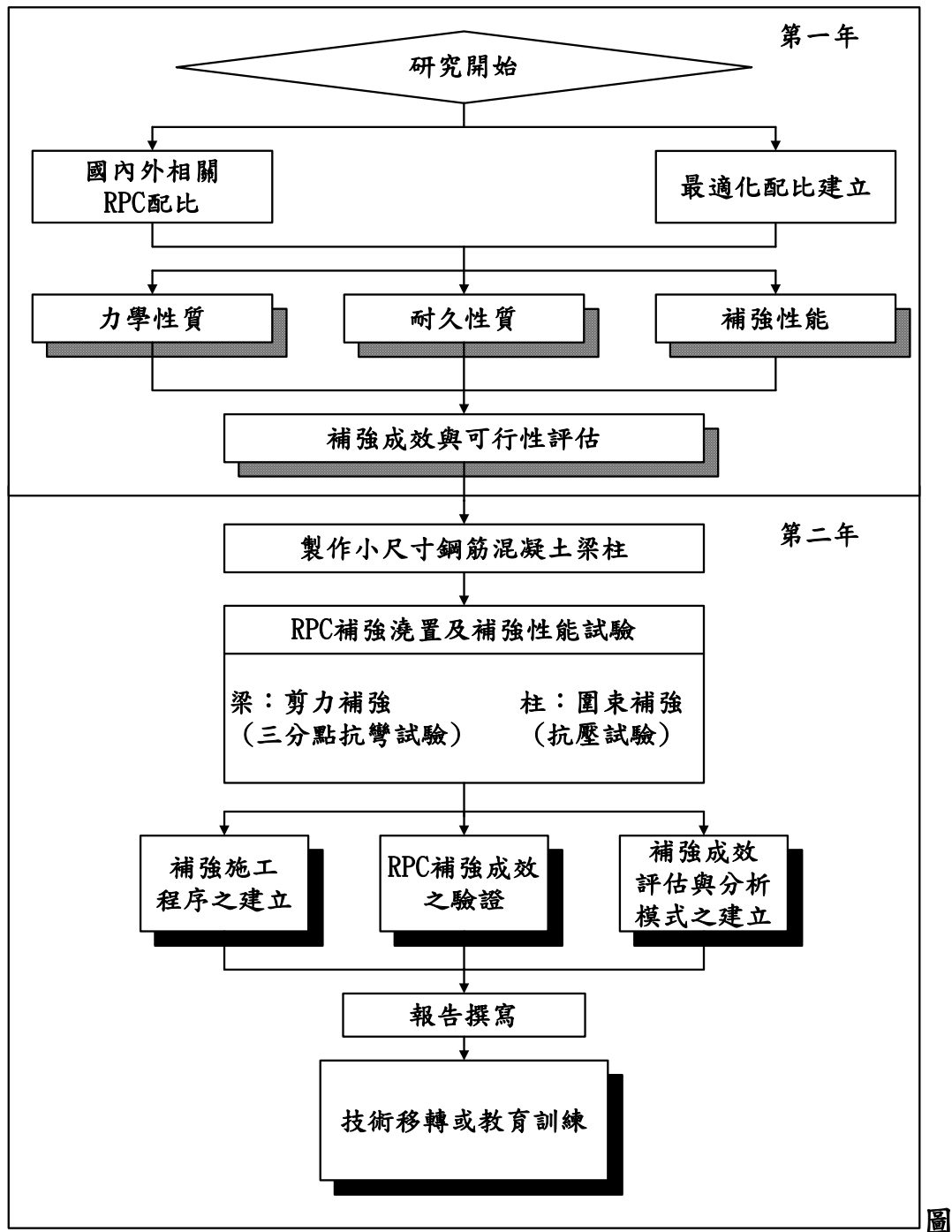
- 1.RPC 在 28 天齡期抗壓強度約為一般混凝土 1.8~3 倍，劈裂強度最高可達 7.5MPa，抗彎強度則可提高原來強度之 68%，顯示出其高強度及高韌性之材料性能。
- 2.RPC 氯離子電滲量低於 100 庫倫；表面電阻值最大可達 1500 k $\Omega$ -cm；沒有碳化的痕跡，超音波速約介於 4300~4600 m/s，氣體滲透係數約為  $1.716 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，在水中浸 72 小時吸水率僅 0.76%，經 500 轉同心圓車輪磨耗之磨損深度僅 0.13 mm。
- 3.以 RPC 進行 10 mm 圓柱補強時，能提升抗壓強度約 9~28%；當修補強厚度為 15 mm 時，則能提升抗壓強度達 40%，另外以 RPC 進行 U 型補強方式，不但可得到良好的抗彎強度，且延展性也大幅增加。

本年度計畫延續第一年之研究成果，將著重在補強實體 RC 構件之性能，茲分述如下：

- 1.依建築技術規則製作縮小尺寸鋼筋混凝土梁、柱，並進行補強，以實際 R.C.構件驗證活性粉混凝土補強效果。
- 2.進行碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗。

3.建立補強施工程序及評估與補強方針。

4.技術移轉給各使用單位及教育訓練說明。依據前述四項主要研究項目，茲擬定研究流程如圖 1-1 所示。



1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 活性粉混凝土材料

#### 2.1.1 活性粉混凝土之發展

活性粉混凝土(Reactive Powder Concrete, 簡稱 RPC)是繼高強度、高性能混凝土之後, 由法國最大的營造公司 Bouygues 以 Pierre Richard 為主要的研究團隊, 於 1993 年率先研發展出來的新型混凝土材料, 由於此材料具有高強度、高耐久性、高韌性, 以及具有良好的體積穩定性與環保生態指標, 在相同的強度要求下, 有著較小的結構尺寸, 並能適用於反覆侵蝕的環境, 現今已成為國內外土木材料界眾所矚目研究的焦點。

相較於其他混凝土的脆性, RPC 具有高韌性的性質, 是因為加入了直徑 0.15~0.2 mm、長度 3~12 mm 的鋼纖維, 使得此材料於破壞時有接近金屬般的韌性, 經蒸汽養護後材料強度可達 200 MPa, 如經高溫高壓處理, 則強度可達 800 MPa, 抗彎強度也具有 30~60 MPa, 此強度相當於鋼鐵材料, 但材料之成本單價卻相當低, 因此無論是運用於結構主體或進行構造物補強, 均有其經濟價值<sup>[4-7]</sup>。

#### 2.1.2 活性粉混凝土之原理

RPC 是由級配良好的水泥、細砂、石英粉、矽灰、飛灰、鋼纖維、高性能減水劑等組成, 由於水泥、石英粉、矽灰、飛灰之粒徑介於 0.1~1  $\mu\text{m}$  間, 提高了細度及材料的活性, 使得內部的孔隙降低到最少, 所以能具有高強度、高韌性、低孔隙率, 主要的具體作法有<sup>[8]</sup>:

1. 去除粒徑大於 1 mm 以上的粗粒料, 以改善及增進材料內部的均勻性。
2. 採用能與水泥等活性粉材料相容、良好的減水劑, 以降低用水

量，一般而言水膠比控制在 0.21 以下。

- 3.在材料成型的過程中施加壓力，以提高結構內部的密實性。
- 4.添加鋼纖維，以增加韌性及體積穩定性。
- 5.透過高溫養護來加速活性粉末間之水化反應，改善材料微觀結構，並且促進細骨材與活性粉間之膠結力。

### 2.1.3 添加鋼纖維對活性粉混凝土的影響

RPC 中加入鋼纖維材料，除可增進原有混凝土材料之抗拉強度外，並可將脆性的基材轉換成韌性的基材，相對的也增加了抗彎、抗剪等力學性質，及提高耐磨性，此外，鋼纖維於混凝土中具有束制效果，因此可降低混凝土內孔隙或裂縫的發生或延伸。

但是纖維的數量、形狀、長度、材料性質及排列方式等將會影響 RPC 的強度及工作性，纖維含量愈高，其抗拉、抗彎、耐磨性均提高，但是工作性則相對降低，過多的鋼纖維有可能糾結成團狀，造成纖維在混凝土內分佈不均勻，進而造成較弱的破壞位置，糾成團狀也可能造成水泥砂漿無法充分填實，造成空隙的增加，因此，選擇適量的鋼纖維，將有助於強度、工作性二者的提升<sup>[9-11]</sup>。

鋼纖維在混凝土中之抗拉強度與混凝土界面間握裹強度並不相同，一般鋼纖維的破壞模式可分為三項，如圖 2-1 所示<sup>[10]</sup>：

#### 1. 拉脫破壞

纖維與混凝土之界面間，因纖維的柏松比作用，致使側向收縮，拉斷二者間的鍵結力，使得纖維產生拉脫、剝落現象，此外，若纖維所受的拉應力大於界面間的的剪力強度，也會造成纖維滑脫破壞。

#### 2. 拉斷破壞

纖維所受的拉應力大於纖維本身的抗拉強度，且小於界面間的剪力強度，造成纖維自身斷裂。

#### 3. 剪力破壞

纖維所受的剪應力大於纖維本身的抗剪強度，造成纖維自身被剪斷破壞。

#### 2.1.4 添加矽灰、石英粉對活性粉混凝土的影響

矽灰在 RPC 中的主要作用有三點<sup>[12]</sup>：1.填滿粒徑間的孔隙。2.產生良好的圓珠潤滑作用及流變性。3.與水泥水化後的產物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  產生膠體，降低孔隙率、增加密實性、提高耐久性、控制鹼骨材反應。所以選用的矽灰其  $\text{SiO}_2$  含量應大於 90%以上，粒徑小於  $1\ \mu\text{m}$ ，平均粒徑約  $0.1\ \mu\text{m}$ ，比表面積大於  $20\ \text{m}^2/\text{g}$ ，密度約  $2.2\ \text{g}/\text{cm}^3$ ，顆粒呈圓球形狀。

RPC 中添加矽灰、石英粉可增加抗壓強度，原理乃為二者均具有活性，於高溫時易加速反應，但是二者對溫度的需求各有不同，矽灰在一般室溫  $20\ ^\circ\text{C}$  條件的養護下，強度貢獻比石英粉高，如加溫至  $90\ ^\circ\text{C}$  養護，其強度貢獻指數可達 40%，而此時石英粉貢獻有限，當以高溫  $200\sim 250\ ^\circ\text{C}$  進行養護時，石英粉明顯產生較多的 C-S-H 膠體，強度貢獻指數可達 15%<sup>[13]</sup>。

## 2.2 補強原理

當混凝土受損需進行補強時，應考慮補強材料的相容性與黏結性，其中相容性包括熱膨脹係數、彈性模數、乾縮、潛變及化學相容性等等<sup>[14]</sup>，黏結性則與溫度及濕度有很大的關係<sup>[15]</sup>。補強的工法隨鋼筋混凝土損傷位置的不同、所採用的方法及材料也各有所不同，目前工程界常採用的材料可分為下列三類<sup>[16]</sup>：

### 1.填補用修補材料：

當鋼筋混凝土結構物有裂縫及混凝土或保護層剝落時，以此材料填充空隙用，其特性為(1)灌注、填滿時具有良好的施工性、(2)與現有的混凝土有良好的黏結性、(3)修補材料其力學行為不亞於混凝土。

## 2.黏結用修補材料：

主要用於將原有鋼筋混凝土與補強構件間作一有效的黏結，以達成力量有效傳遞。

## 3.主要受力用修補材料：

用以分擔原有鋼筋混凝土結構的力量，以達到結構補強之目的。如以補強工法區分，則可分為下列四類<sup>[16]</sup>：

### 1.裂縫灌注環氧樹脂工法：

利用壓力注入寬度 0.3 mm 以上之裂縫，以防止水分滲入，造成鋼筋腐蝕，但環氧樹脂僅能將開裂之混凝土黏合，並無法提升整體混凝土強度。

### 2.鋼筋混凝土補強工法：

先敲除鬆動之混凝土，再將鋼筋植入，灌注水泥質材料或樹脂砂漿修補，但須注意新舊混凝土界面之黏結性。

### 3.鋼板包覆補強工法：

此工法常見於補強受損的梁構件，需藉由環氧樹脂黏結及螺栓固定，可以有效提升整體強度，缺點是鋼板自重大，補強元件幾何形狀易受限制，施工不易，且修補成本較高。

### 4.纖維複合材料補強工法：

以纖維複合材料（FRP）對梁、柱、版牆等結構元件補強，其質輕且施工容易，一般常採用碳纖維複合材料（CFRP）及玻璃纖維複合材料（GFRP）兩種材質，欲補強的混凝土表面需光滑平整，且貼覆 FRP 貼片需確保與混凝土表面緊密黏結，否則將會造成應力集中，降低補強效果。

本期研究計畫旨在探討補強成效，並製作縮小尺寸梁、柱進行評估，其中梁乃進行剪力補強評估，柱進行圍束補強評估，因此文獻中

將針對梁之剪力及柱之圍束進行回顧，並於試驗中予以驗證比較。

### 2.2.1 一般剪力梁破壞模式<sup>[17]</sup>

#### 1. 深梁 ( $a/d \leq 1$ )

剪應力為影響深梁破壞之最主要因素，當裂縫產生時，會在內部形成壓力拱，如圖 2-2(a)之陰影部份所示，當裂縫持續延伸，梁構件因而成為一繫拱系統 (tied-arch system)，如圖 2-2(b)所示，並造成四種破壞型式：1. 錨錠破壞：支承處之張力鋼筋拔出造成混凝土破壞；2. 承壓破壞：承壓處之混凝土碎裂；3. 撓曲破壞：因壓力拱上方混凝土碎裂或張力筋降伏所引起；4. 肋拱破壞：將導致支承處上方之混凝土出現張力裂縫或肋拱內部之混凝土碎裂。

#### 2. 短梁 ( $1 < a/d \leq 2.5$ )

與深梁一樣，其剪力強度較斜裂縫強度高。當撓剪裂縫 (flexure-shear crack) 產生，會隨著載重增加而延伸至上方受壓區，並同時在鋼筋處產生二次裂縫，並隨著鋼筋方向水平延伸，如圖 2-3 所示，最後導致兩種可能破壞模式：1. 剪張破壞：即鋼筋之錨錠破壞；2. 剪壓破壞：上方受壓面附近之混凝土破碎。

#### 3. 中等跨度梁 ( $2.5 < a/d \leq 6$ )

其破壞模式為先產生垂直撓曲裂縫，接著形成撓剪裂縫。當許多撓曲裂縫欲彎曲延伸時，就如同將梁構件下方切成齒狀 (tooth)，如圖 2-4 所示，而每個梁塊將無法承受持續增加之彎矩，最後造成斜撓—剪裂縫 (inclined flexure-shear crack) 而破壞。

#### 4. 長梁 ( $6 < a/d$ )

在最大彎矩處之底部鋼筋會首先降伏，最後導致混凝土碎裂。除了最大彎矩處為垂直裂縫之外，在最大彎矩處及支承處之間皆為斜裂縫。而強度係由最大彎矩來決定，不受剪力之影響，如圖 2-5 所示。

前述所提為一般鋼筋混凝土梁破壞模式，如加上 FRP 或 RPC 後，由於材料行為模式不同，將會有不同的變化，亦為本研究的內容。

### 2.2.2 無剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度

依據中國土木工程學會於民國九十三年十一月修訂之混凝土工程設計規範與解說<sup>[18]</sup>之規定，當混凝土無剪力鋼筋，並僅承受剪力及撓曲之構材時，當混凝土之主拉應力達到破裂模數時，即達到剪力強度，亦為斜裂縫形成之開裂強度，其剪力計算強度  $V_c$  可由公式 (2-1) 表示：

$$V_c = \left( 0.53\sqrt{f'_c} + 175\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.93\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2-1)$$

式中：

$f'_c$ : 混凝土抗壓強度； $\text{kgf}/\text{cm}^2$

$V_c$ : 混凝土剪力計算強度； $\text{kgf}$

$V_u$ : 斷面之設計剪力強度； $\text{kgf}$

$M_u$ : 斷面之設計彎矩強度； $\text{kgf}-\text{cm}$

$\rho_w$ : 鋼筋比

$b_w$ : 斷面寬； $\text{cm}$

$d$ : 斷面最外受壓纖維至受拉鋼筋斷面重心之距離； $\text{cm}$

### 2.2.3 FRP 對剪力強度的影響

Malek 與 Saadatmanesh<sup>[19]</sup>利用桁架模式及壓力場理論分析鋼筋混凝土梁於 FRP 補強後力學行為，假設垂直裂縫延伸方向最大主張應力，並依壓力場理論求得裂縫角度  $\theta_c$ ，考慮平衡條件可得混凝土桿件應力  $f_c$  與縱向鋼筋及複合材料上之軸力  $\Delta N$  如(2-2)~(2-4)式所示：

$$\tan^2 \theta_c = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_y - \varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_y}{\varepsilon_1 - \varepsilon_x} \quad (2-2)$$



$$f_c = \frac{V}{b_v h_v \sin \theta_c \cos \theta_c} \quad (2-3)$$

$$\Delta N = \frac{V}{\tan \theta_c} \quad (2-4)$$

式中：

$\theta_c$ : 混凝土裂縫與水平方向的夾角

$\varepsilon_x$ : 縱向應變

$\varepsilon_y$ : 橫向應變

$\varepsilon_1$ : 主張應變

$\varepsilon_2$ : 主壓應變

$V$ : 斷面剪力

$b_v$ : 斷面之箍筋寬度

$h_v$ : 斷面之箍筋高度

假設混凝土與 FRP 界面黏結良好，無相對位移產生，以傳統分析複合材料方法計算 FRP 貼片之應力，再以變形諧和條件分析鋼筋混凝土梁與 FRP 之應變及應力，可得 FRP 及垂直箍筋所提供之剪力，將 FRP 及垂直箍筋所提供之剪力組合視為斷面之剪力強度如下：

$$F_p = ht_p \left[ \overline{Q_{13}} \varepsilon_2 + \overline{Q_{23}} \varepsilon_1 + \frac{\overline{Q_{12}} \varepsilon_2 + \overline{Q_{22}} \varepsilon_1}{\tan \theta_c} \right] = ht_p \left( \sigma_{12} + \frac{\sigma_{11}}{\tan \theta_c} \right) \quad (2-5)$$

$$F_v = E_s \varepsilon_y A_v \frac{h_v}{\tan \theta_c \times s} \quad (2-6)$$

$$V_i = F_v + F_p \quad (2-7)$$

式中：

$F_p$ : FRP 提供之剪力

$F_v$ : 箍筋提供之剪力

$h$ : 斷面高

$t_p$ : 梁腹兩側 FRP 總厚度

$E_s$ : 箍筋彈性模數

$A_s$ : 箍筋斷面積

$\varepsilon_y$ : 箍筋降服應變

$s$ : 箍筋間距

分析方法為先假設一斷面內剪力，選定介於  $20^\circ \sim 60^\circ$  之  $\theta_c$  為初始值，並依(2-4)式所得縱向鋼筋及複合材料上之軸力  $\Delta N$ ，分別按勁度分配至縱向鋼筋及 FRP 上以求得縱向應變  $\varepsilon_x$ ，依(2-3)式所得混凝土桿件應力  $f_c$  求得主壓應變  $\varepsilon_2$ ，再依 (2-2)式壓力場理論求得主張應變  $\varepsilon_1$  及橫向應變  $\varepsilon_y$ ，最後帶入(2-5)至(2-7)式可得該梁於補強後之剪力強度，重複前述步驟直至依(2-7)式所得梁之剪力強度等於所假設之斷面內剪力時，此時之所選定  $\theta_c$  即為裂縫夾角。

Malek 與 Saadatmanesh<sup>[19]</sup>再簡化上列複雜分析方法，改以(2-8)式所示：

$$V_f = \frac{h}{\tan \theta_c} F_{pu} t_p \quad (2-8)$$

式中：

$V_f$ : FRP 提供之剪力

$F_{pu}$ : FRP 垂直於於混凝土裂縫上之極限強度

依其研究結果發現，該式在應用低彈性模數之 FRP 如玻璃纖維等，才能真正發揮強度直至斷裂，對於彈性模數較高之 FRP 如碳纖維等，最大應變量仍需再修正。

#### 2.2.4 圍束鋼筋混凝土組成律<sup>[20]</sup>

無圍束作用之鋼筋混凝土承受軸向壓力時，為單純軸向壓縮與橫向擴張之應變變化之模式，當有圍束作用下，將從單軸向模式轉換成多軸向的行為模式，此時混凝土承受壓應力、拉應力、剪應力等多重複雜的問題，為瞭解並進行此方向之研究，將就國內外有關圍束方面的文獻做一整理與回顧。

Kent and Park[1971] 提出應力應變模式由兩段曲線組成，上升段採用二次拋物線，而下降段採用直線。此模式中假設圍束效果與箍筋體積比及箍筋降伏強度成比例，而圍束效應與應力下降區段的斜率有關<sup>[21]</sup>。

Muguruma et al.[1980] 以試驗結果建立一套運用兩段二次曲線模擬極限強度前之混凝土應力-應變行為，而以一線性直線模擬其下降區段；並以混凝土最大應力值與相對應之極限應變來決定圍束混凝土的應力-應變曲線<sup>[22]</sup>。

Sheikh and Uzumeri[1982] 提出應力應變模式，以極限應力值和有效圍束係數來考慮圍束混凝土之效果，而有效圍束係數與箍筋體積比及箍筋捆紮方式有關<sup>[23]</sup>。

Mander et al.[1988] 以 40 個圓形、方形與矩形的混凝土柱，以螺旋、圓形或矩形箍筋圍束後，作軸向壓力載重試驗，並且導入有效補強面積的觀念，認為有效補強面積和環向補強材料之疏密程度以及被補強材料包覆的核心斷面體積有關。並探討下列參數：柱斷面形式、箍筋形式、反覆載重與應變速率。試驗結果發現，在單軸壓力試驗下，以橫向箍筋圍束混凝土構件確實可以增加構件的強度與延展性；並提出修正上述 Park 等人的模式之公式，其最大抗壓強度  $f_{cc}$  可以下式表示：

$$f_{cc} = f_c \left[ -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \left( \frac{f'_l}{f_c} \right)} - 2 \left( \frac{f'_l}{f_c} \right) \right] \quad (2-9)$$

式中  $f'_l$  表有效之側向圍束應力。此模式加上形狀因素與有效圍束係數後，可用來預測圓形、方形與矩形斷面混凝土的最大應力值<sup>[24]</sup>。

Fujii et al.[1988] 提出應力應變模式，上升段及下降段分別由二次拋物線及三次曲線組成，此模式之有效圍束係數乃參考 Kent and Park 之模式<sup>[25]</sup>。

Saatcioglu and Razvi[1992] 以螺旋箍筋與橫箍筋圍束圓形、方形與矩形斷面之不同尺寸的柱，於軸心載種與偏心載重作用下，建立一套以二次曲線模擬極限強度之前的圍束混凝土行為，並以一線性直線來模擬其下降區段，且下降區段的斜率決定於混凝土最大應力值的 85%，同時提出混凝土超過極限應力之後，縱向鋼筋的行為明顯影響混凝土的變形，由於箍筋外圍部份混凝土的剝落，造成縱向鋼筋容易挫屈，因此若提供足夠的側向箍筋量，將可以提高縱向鋼筋的穩定性。並且由實驗結果發現圍束補強之混凝土柱所受的圍壓分佈並非均勻的，但可採用等效之平均圍壓來計算，進一步推導出螺旋箍筋圍束混凝土的單軸抗壓強度等於未圍束混凝土的單壓強度與混凝土側向圍束應力之總合，即為

$$f_{cc} = f_c + K_1 \times f_l \quad (2-10)$$

式中  $K_1$  為係數， $f_l$  為側向圍束應力，兩者之間的關係可經由實驗資料求得，在不同程度的靜水壓力下，當側向圍束應力較高時，所對應的係數  $K_1$  較低，若在較高的側向圍束壓應力範圍， $K_1$  接近為一常數<sup>[26]</sup>。經由回歸分析後修正文獻 Richart[Richart 等，1928] 提出  $K_1 = 6.7 \times (f_l)^{-0.17}$ ，並建立圓形混凝土受箍筋圍束之強度預測公式為<sup>[27]</sup>：

$$f_{cc} = f_c + 6.7 \times f_l^{0.83} \quad (2-11)$$

Hoshikuma et al.[1997]以 31 個不同斷面型式、不同尺寸大小的柱試體以及不同抗壓強度、不同箍筋排列及錨定方式做為變數來探討箍筋對混凝土的圍束效應，並依據其抗壓實驗結果建立箍筋圍束混凝土

柱的應力-應變關係模式。結果顯示極限應力、極限應力所對應的破壞應變及破壞應變之後的應力下降率皆影響混凝土應力-應變關係曲線中較為重要的因素，同時又指出：

- (1) 初始勁度與箍筋之鋼筋比無關。
- (2) 若箍筋的鋼筋比增加，則極限應力與極限應力所對應的應變都會跟著增加，而使得極限應力所對應的應變之後的應力下降較為平緩。
- (3) 箍筋之鋼筋比不變時，減小箍筋間距會使得極限應力後的應力下降率較為平緩，且縱向鋼筋不會嚴重地向外挫曲。
- (4) 影響圍束效應的主要變數有箍筋體積比、箍筋間距、箍筋彎勾的形式、箍筋的降伏強度、柱斷面型式、未圍束之混凝土強度；若箍筋配置得當，則箍筋間距與彎勾形式之影響較不明顯。

經由回歸分析建立圍束混凝土強度  $f_{cc}$  之預測公式為<sup>[28]</sup>

$$f_{cc} = f_c + 3.8 \times f_l \quad (2-12)$$

Mirmiran and Shahaway[1997]製作 30 個  $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$  的混凝土圓柱試體，其中 24 個試體利用單向玻璃纖維料以  $\pm 15^\circ$  角圍繞，然後進行單軸壓縮試驗。探討的參數包括混凝土的水灰比、玻璃纖維的厚度與圍束的層數。試驗過程中發現接近極限強度時，可以聽到試體內部的玻璃纖維所產生的爆裂聲；而大約於極限強度的 60~70 % 時，試體中央處開始出現由樹脂產生的白色斑點的小碎片，然後慢慢延伸到試體的頂部與底部。而研究結果顯示<sup>[29]</sup>：

- (1) 以往對於纖維圍束補強的研究報告所提出來的強度預測過於高估，在設計上也有安全的疑慮。
- (2) 在單軸壓力試驗下，具有 FRP 套管圍束的混凝土圓柱試體的確能有效地增加其極限強度與延展性。且其應力-應變曲線沒有下降段（軟化區），而是呈現一雙線性的上升曲線，此與一般箍筋圍束

的行為不同

Mirmiran[1997]並提出強度預測公式：

$$f_{cc} = f_c + 4.269 \times f_l^{0.587} \quad (2-13)$$

### 2.2.5 纖維複合材料圍束混凝土組成律

Fardis and Khalili[1982]進行玻纖圍束混凝土軸壓試驗，試體尺寸為 75×150 mm 及 100×200 mm 圓柱試體共 46 個。並提出雙曲線模式之應力應變模型，適用於圓形斷面，模式中圍束混凝土強度和極限應變二者與圍束應力及無圍束混凝土強度有關<sup>[30]</sup>。

Karbhari and Gao[1997]進行玻纖及碳纖圍束混凝土軸壓試驗，改變不同層數、疊層角度及樹脂配方共 19 個試體。由實驗結果整理並提出雙線性應力應變模型，適用於圓形斷面。模式中圍束混凝土強度和極限應變二者與纖維複材強度及無圍束混凝土強度有關，可分別由理論公式與經驗公式求得<sup>[31]</sup>。

Kawashima et al.[1997]進行一連串之碳纖圍束混凝土軸壓試驗，試體尺寸為 200×600 mm，其參數包括：斷面形狀(圓形、方形)、碳纖厚度、碳纖彈性模數，並提出分別適用圓形及方形斷面之分數回歸模型。其應力應變模式由兩段曲線組成，在上升段採用分數模式，而第二段採用直線，可模擬纖維複材圍束混凝土軟化之現象。模式中圍束混凝土強度和極限應變與纖維複材強度、複材補強體積比及無圍束混凝土強度有關，可分別求得圓形及方形斷面之圍束混凝土應力應變模式<sup>[32]</sup>。

Samaan et al.[1998]進行玻纖纏繞圍束混凝土軸壓試驗，試體尺寸為 152.5×305 mm，改變不同混凝土強度及纏繞角度共 30 個試體。並提出四參數雙線性分數模式之應力應變模型，適用於圓形斷面，模式中圍束混凝土強度和極限應變與纖維複材強度及無圍束混凝土強度有關<sup>[33]</sup>。

Miyauchi et al.[1999]進行碳纖圍束混凝土軸壓試驗，試體規格為 150×300 mm 及 100×200 mm 圓柱試體，改變不同混凝土強度、疊層厚度及試體尺寸共 28 個試體。由實驗結果整理並提出兩段式應力應變模式，第一段為拋物線模式，第二段為直線模式，適用於圓形斷面。模式中圍束混凝土強度和極限應變與圍束應力及無圍束混凝土強度有關<sup>[34]</sup>。

Toutanji[1999]進行玻纖及碳纖圍束混凝土軸壓試驗，試體尺寸為 76×305 mm，改變不同碳纖彈性模數及極限應變共 18 個試體。由實驗結果整理並提出兩段式應力應變模式，第一段為雙曲線模式，第二段為回歸分數模式，適用於圓形斷面。模式中圍束混凝土強度和極限應變與纖維複材強度、極限應變及無圍束混凝土強度有關<sup>[35]</sup>。

Saafi et al.[1999]進行玻纖及碳纖圍束混凝土軸壓試驗，試體尺寸為 152.4×435 mm，改變不同碳纖彈性模數、極限應變及複材圍束厚度共 30 個試體。同樣由實驗結果整理並提出兩段式應力應變模式，第一段為雙曲線模式，第二段為回歸分數模式，適用於圓形斷面。模式中圍束混凝土強度和極限應變與纖維複材強度、極限應變及無圍束混凝土強度有關<sup>[36]</sup>。

Spoelstra and Monti[1999]提出理論解析模式，由軸壓應變與側向應變之關係，應用 Mander et al. 之圍束混凝土應力應變模式，迭代求得圍束混凝土應力應變關係曲線，此模式適用於圓形斷面<sup>[37]</sup>。

Xiao and Wu[2000]進行碳纖圍束混凝土軸壓試驗，試體尺寸為  $\phi 152 \times 305$  mm，改變不同混凝土強度及碳纖圍束厚度共 36 個試體。由實驗結果整理並提出雙線性應力應變模型，此模式適用於圓形斷面。模式中圍束混凝土強度和極限應變與纖維複材強度、極限應變及無圍束混凝土強度有關<sup>[38]</sup>。

Li et al.[2003]提出的 Modified L-L Model 以莫耳-庫倫破壞準則為基礎理論所推導出來的，同時適用於混凝土受箍筋圍束、CFRP 圍束以及箍筋與 CFRP 共同圍束之應力-應變模式。由於混凝土圓柱試體

包覆 FRP 之受力行為與土壤受三軸應力試驗之力學行為較為相似，因此可以依據莫耳-庫倫（Mohr-Columb）之土壤三軸應力關係來推導混凝土受圍束補強的破壞模式與準則。在側向圍束壓力作用下，依據莫耳-庫倫破壞包絡線（Mohr-Columb Failure Envelope）可得軸向最大應力  $\sigma_1$  為

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2}\right) \quad (2-14)$$

式中：

$\sigma_1$ : 軸向最大應力

$\sigma_3$ : 側向圍束應力

$c$ : 純剪強度

$\Phi$ : 內摩擦角

若將(2-14)式視為混凝土圍束，再加上軸壓試驗之三軸圍束應力關係式，其中  $\sigma_3$  為圍束應力，因此  $f_l = \sigma_3$ ， $\sigma_1$  為軸向最大壓應力，因此  $f_{cc} = \sigma_1$ 。當  $\sigma_3 = 0$  時即為無圍束狀況，則

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2}\right) \quad (2-15)$$

此為無圍束狀況之純混凝土試體的強度，因此

$$f_c = 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2}\right) \quad (2-16)$$

由上述之土壤三軸試驗應力關係式，並考量混凝土與 CFRP 間的變形一致性及圍束斷面的力平衡關係後，所提出圍束混凝土強度模式即為 M. L-L Model，其圍束混凝土之抗壓強度公式如下<sup>[39]</sup>：

$$f_{cc} = f_c + f_l \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2}\right) \quad (2-17)$$



Yuan et al.[2001]綜合整理以上各學者所提出之應力應變模式進行比較，採用 Xiao and Wu 之實驗結果。試體尺寸為 152×305 mm，純混凝土強度為 33.7 MPa、 $E_c = 4730\sqrt{f'_c}$  (MPa) 且混凝土之柏松比  $\nu$  為 0.18，碳纖圍束厚度為 1.143 mm，材料之極限強度為 1577 MPa，彈性模數為 105 GPa。比較以上各種不同圍束混凝土模式之結果如圖 2-6[葉芳耀，2003]所示，由圖中可以看出不同 FRP 圍束混凝土應力應變模式所預測之結果有非常大的差異<sup>[40]</sup>。

林慶昌等[1998]製作 47 個  $\phi 150 \times 300$  mm 之純混凝土圓柱試體，以玻璃纖維作圍束補強試驗，探討玻璃纖維混凝土材料的圍束效應。其探討的參數包括：混凝土的強度、黏貼的材料、玻璃纖維布的編織方式、補強的層數以及玻璃纖維纏繞的連續性。研究的結果顯示：以玻璃纖維圍束補強結構物，任何一種方式之補強皆可有效增加柱之軸向極限強度與延展性；而玻璃纖維厚度愈厚其效果愈明顯；以編織方式而言，其中以單向編織的玻璃纖維效果最好；而應力-應變曲線是由雙曲線的上升曲線部分，與突然掉落並逐漸衰退的下降曲線部分所構成，此結果有異於一般的箍筋圍束混凝土。所提出的理論強度預測公式為<sup>[41]</sup>：

$$f_{cc} = f_c \times \left[ 1 + 105.1 \times f_l^{-1.1} \times \left( \frac{f_l}{f_c} \right)^{2.15} \right] \quad \text{for} \quad \left( \frac{f_l}{f_c} \right) \leq (0.30923 f_c^{0.3})^{\frac{1}{0.26}} \quad (2-18)$$

$$f_{cc} = f_c \times \left[ 1 + 32.5 \times f_l^{-0.8} \times \left( \frac{f_l}{f_c} \right)^{1.59} \right] \quad \text{for} \quad \left( \frac{f_l}{f_c} \right) > (0.30923 f_c^{0.3})^{\frac{1}{0.26}} \quad (2-19)$$

## 2.3 混凝土結構物之補強

本節將概略性回顧補強材料考量、常見之補強材料與工法，細節將在第四章做詳盡介紹。

### 2.3.1 補強材料特性考量

當混凝土結構物因為設計不當、施工品質控制不良、受到衝擊載重、火害或化學侵害等因素，使混凝土劣化且強度衰減，導致結構承載力不足，有危害安全之虞，若此時欲增加結構物之使用年限，便需進行結構補強，選擇混凝土結構補強所需之修補材料，必須考量混凝土底材與修補材料相容性，包括熱膨脹係數、彈性模數、乾縮量、潛變及化學相容性等。

Wall等[1988]以斜剪試驗測試新舊混凝土之黏結性，發現當修補材料之彈性模數與混凝土之彈性模數相近時，黏結效果最佳<sup>[42]</sup>。Cabrera等人[1997]認為材料黏結強度與溫度及濕度有很大的關係，並且藉由斜剪試驗結果得知，在相同載重之下，當修補材料與混凝土之彈性模數不同時，兩者將產生相對應力，此時低彈性模數之材料將產生較大之變形，顯示混凝土結構補強不僅考量修補材料之強度，修補材料與舊有底材之相容性亦非常重要<sup>[48]</sup>。

### 2.3.2 混凝土結構之補強材料<sup>[49]</sup>

鋼筋混凝土結構物依其受損行為不同，所使用的補強材料及修復工法也不盡相同，目前工程界常用的修復補強材料，依其用途約可分為下列三種：

#### 1. 填補用修復補強材料

填補用修復補強材料主要用於填充鋼筋混凝土結構物有裂縫及大塊混凝土或保護層剝落；此種補強材料特性通常具有良好的施工性(灌注、填滿)，且能與既有的混凝土有良好的黏結性，故其修復補強材料其力學行為不亞於混凝土；目前工程界常用的填補用修復補強材料針對裂縫部分主要有低粘滯性環氧樹脂，針對大塊混凝土或保護層剝落部分，則有樹脂砂漿系列之修補材料。

#### 2. 黏結用修復補強材料

黏結用修復補強材料主要用於將原有鋼筋混凝土與補強外加受力構件間作一有效的黏結，以達成力量有效傳遞之目的；目前工程界常

用的黏結用修復補強材料有：黏著外加貼片(鋼板、FRP)的環氧樹脂、黏著植入鋼筋的化學膠結劑及黏著植入螺栓專用的化學螺栓固結劑。

### 3.主要受力用修復補強材料

主要受力用修復補強材料則著重於分擔原有鋼筋混凝土結構的力量，以達到結構補強之目的；所有新建的結構工程用材料，均可在修復補強工程中使用，如型鋼、鋼板、鋼筋、混凝土及纖維複合材料(CFRP、GFRP)。

#### 2.3.3 混凝土結構補強工法<sup>[49]</sup>

針對鋼筋混凝土結構不同構件之損害，需使用不同之修補工法來補強，一般較常採用的混凝土結構補強工法分為下列四種<sup>[43-52]</sup>：

##### 1.裂縫灌注環氧樹脂工法

利用壓力注射可修補寬度0.3 mm以上之裂縫，以修復受損之梁、柱、版牆等結構元件，防止水分滲入造成鋼筋腐蝕；但環氧樹脂僅能黏合開裂之混凝土，並無法提升整體混凝土強度。

##### 2.鋼筋混凝土補強工法

當混凝土結構嚴重開裂或大量剝落時，需先敲除鬆動之混凝土，配合鋼筋植入灌注水泥質材料或樹脂砂漿修補，須注意新舊混凝土界面之黏結性。

##### 3.鋼板包覆補強工法

此工法主要用於補強受損之梁構件，需藉由環氧樹脂黏結及螺栓固定，可有效提升整體強度；其缺點為鋼板自重大，補強元件幾何形狀易受限制，施工不易，且修補成本較高。

##### 4.纖維複合材料補強工法

一般較常採用碳纖維複合材料(CFRP)及玻璃纖維複合材料(GFRP)，施作時混凝土補強表面需光滑平整，且貼覆FRP貼片需確保

與混凝土表面緊密黏結，否則會造成應力集中，降低補強之效果。

目前國內以碳纖維(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)作為RC構件補強材料的相關研究工作則有相當好的成果，CFRP作為RC構件補強具有重量輕、強度高、工期短、成本低、耐腐蝕、適用範圍廣、施作容易迅速等優點，可用為橋梁結構、房屋結構、隧道工程、管線工程、煙囪、古蹟等補強修復材料，主要補強方法包括柱包裹方式補強圍束力、梁及版貼片方式補強彎矩或剪力等工法，也大多具有相當好的成效。

#### 2.3.4 RPC 修補混凝土結構物

吳夢嚴[2002]曾製作活性粉質砂漿及市售無收縮水泥砂漿分別補強混凝土撓曲型裂縫，結果顯示在適量含砂量下，這兩種裂縫修補材料皆可增加修補材料與混凝土介面間的互鎖性與體積穩定性，進而提高其修復成效<sup>[53]</sup>。

吳建興[2003]曾製作小型混凝土梁構件，分別以CFRP補強一層、兩層及活性粉混凝土補強1 cm厚，進行抗彎試驗，結果顯示以CFRP貼片補強混凝土有很好的補強效果，隨著補強層數增加，抗壓強度有明顯的提升；以活性粉混凝土補強之試體，補強效果又比貼覆一層CFRP貼片為佳，且其黏結界面未發生破壞，顯示活性粉混凝土可適用於結構修復補強<sup>[54]</sup>。

李明君等人[2002]以活性粉混凝土進行梁柱接頭修補，並施予反覆荷重模擬地震行為，結果顯示經補強後抗剪行為極佳，在承受反覆荷重過程中，其剪應力與剪應變關係亦保持彈性行為，並無剪力衰退現象，顯示較佳之耐震效果<sup>[55]</sup>。

由以上文獻可知，由於活性粉混凝土具有超高強度及高韌性，具備了混凝土結構物修復補強材料之特性，而目前國內對於利用RPC作為RC構件修補或補強材料的研究並不多見，仍有待積極發展。

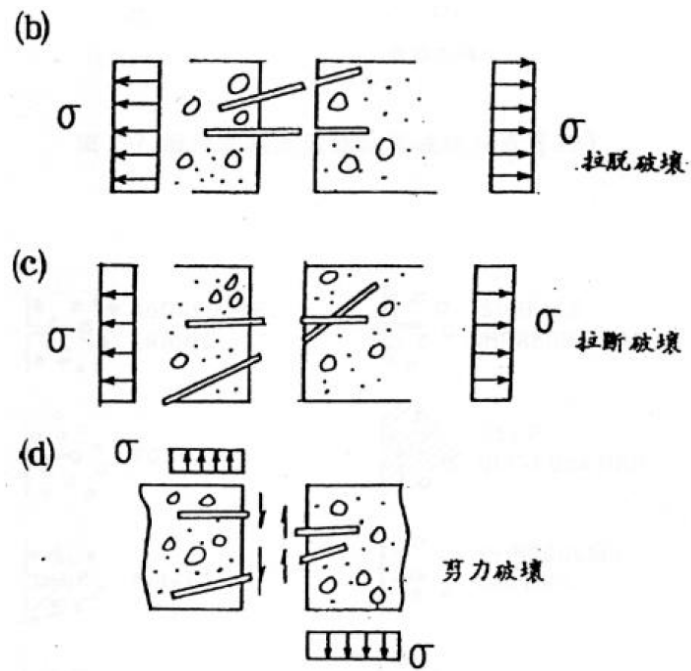


圖 2-1 鋼纖維破壞模式<sup>[10]</sup>

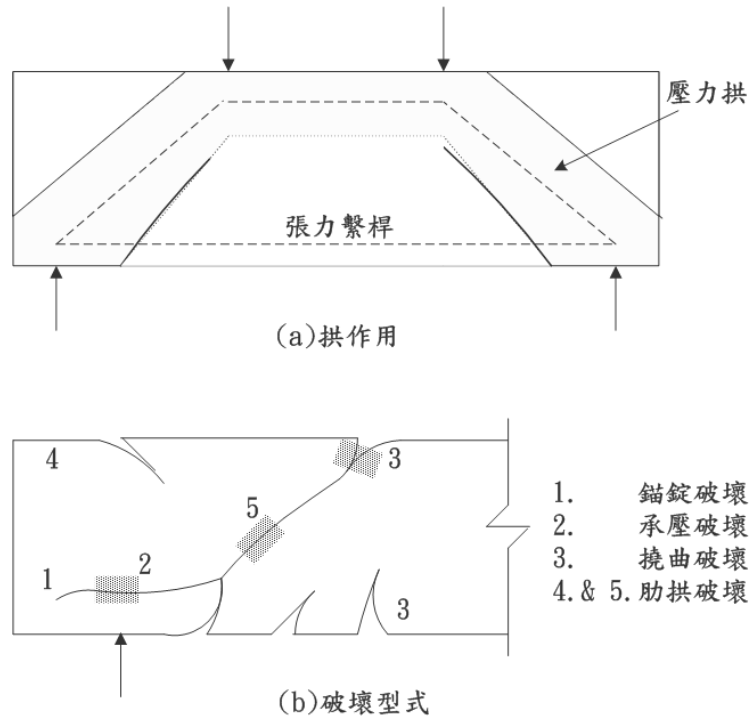
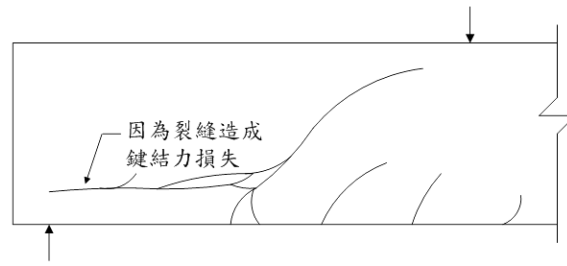
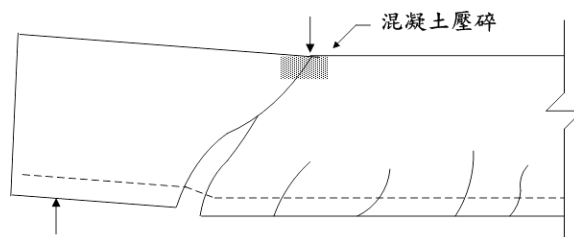


圖 2-2 深梁 ( $a/d \leq 1$ ) 之破壞模式<sup>[17]</sup>



(a)剪張破壞



(b)剪壓破壞

圖 2-3 短梁 ( $1 < a/d \leq 2.5$ ) 之剪力破壞模式<sup>[17]</sup>

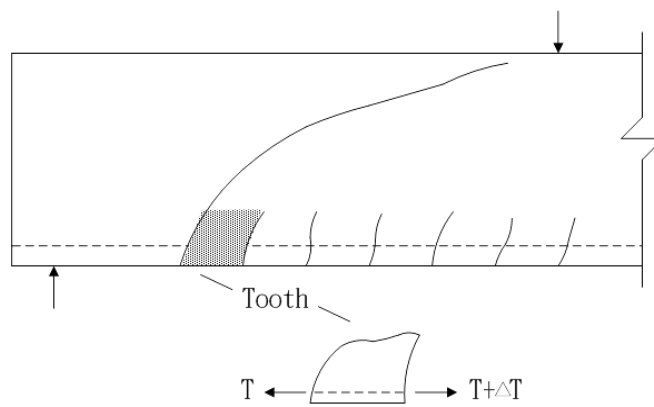


圖 2-4 中度跨距梁 ( $2.5 < a/d \leq 6$ ) 之斜張破壞模式<sup>[17]</sup>

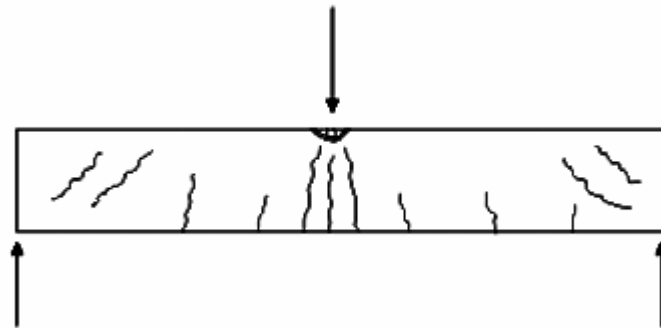


圖 2-5 長梁 ( $6 < a/d$ ) 彎曲破壞模式<sup>[17]</sup>

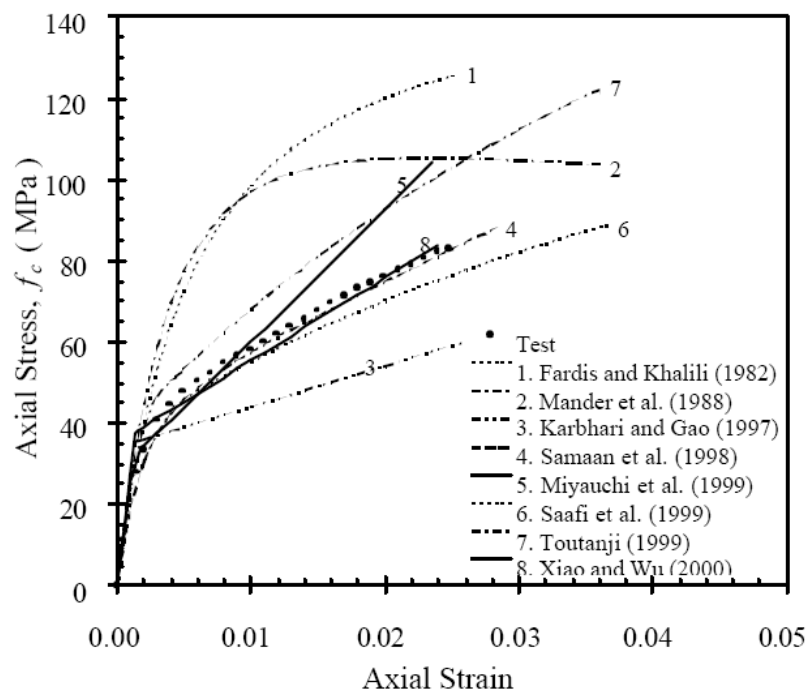


圖 2-6 各種不同纖維複材圍束混凝土模式之比較<sup>[20]</sup>

### 第三章 構件補強分析原理

#### 3.1 具有剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度

剪力強度係基於在全部有效斷面 $b_w d$ 上之平均剪應力。無剪力筋鋼筋混凝土梁剪力假設由混凝土腹版承受，具有剪力筋鋼筋混凝土梁部份剪力假設由混凝土承受，其餘則由剪力筋鋼筋承受。梁不論有無剪力筋，其混凝土剪力計算強度 $V_c$ 皆假設一樣。因此具剪力筋之鋼筋混凝土梁剪力設計，通常假設RC梁之剪力強度，為混凝土之剪力強度與剪力筋所提供剪力強度兩者之和，則

$$V_n = V_c + V_s \quad (3-1)$$

式中： $V_n$  = 具剪力筋之剪力強度

$V_c$  = 混凝土提供之剪力強度

$V_s$  = 剪力筋提供之剪力強度，不可取大於 $2.12\sqrt{f'_c}b_w d$

穿越裂縫之剪力筋所承受之極限剪力

$$V_s = nA_v f_y \sin\alpha$$

由圖3-1得， $nS = d(\cot 45^\circ + \cot\alpha)$

$$= d(1 + \cot\alpha)$$

因此， $V_s = \frac{d(1 + \cot\alpha)}{S} A_v f_y \sin\alpha$

$$\Rightarrow V_s = \frac{A_v f_y d(\sin\alpha + \cot\alpha)}{S} \quad (\text{剪力筋為斜向肋筋}) \quad (3-2)$$

若 $\alpha = 90^\circ$ （剪力筋垂直排列）則

$$\Rightarrow V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (\text{剪力筋為垂直肋筋}) \quad (3-3)$$

以標稱剪應力表示之，則



$$v_s = \frac{V_s}{b_w d} = \frac{A_v f_y (\sin\alpha + \cos\alpha)}{b_w S}$$

若  $\alpha = 90^\circ$ （剪力筋垂直排列）則

$$\Rightarrow v_s = \frac{A_v f_y}{b_w S} \quad (3-4)$$

由上列之公式知，裂縫至少須有一支剪力筋通過，剪力筋方能提供剪力，若剪力筋間距過大則梁將如無箍筋梁一樣，此時規定剪力筋最大間距之原因。

### 3.2 鋼筋混凝土梁之剪力行為

鋼筋混凝土梁受載重作用時，內部斷面可能同時承受彎矩及剪力的作用，由圖 3-2<sup>[56]</sup>之典型三分點載重（亦為本次梁補強研究之試驗方法）中剪力彎矩途中可得知，除了 BC 段為純彎矩作用外，AB 段及 CD 段均承受剪力及彎矩共同作用，其中長度 "a" 稱為剪跨長度 (shear span length)，"a" 與梁有效深度 "d" 的比值稱為剪跨比 (shear span ratio)。

從圖 3-2 之裂縫生成方式可以瞭解，BC 段受純彎矩作用，於梁底部產生裂縫，此裂縫為垂直向上延伸，稱之為撓曲裂縫 (flexure crack)，支承處因彎矩趨近於 0，剪力變成主要影響之作用力，梁腹部形成與水平方向成  $45^\circ$  傾斜之裂縫，此裂縫稱之為剪力裂縫 (shear crack)，而 AB、CD 段中間受剪力及彎矩交互作用，梁底部形成撓曲裂縫，梁腹部形成剪力裂縫，二裂縫結合形成撓剪裂縫 (flexure-shear crack)。本次研究計畫中梁於試驗區段並未排列箍筋，所以以下將針對無箍筋之鋼筋混凝土梁進行探討。

### 3.3 無箍筋之鋼筋混凝土梁剪力行為

圖 3-3(a)<sup>[56]</sup> 為一典型無箍筋梁受作用力產生之裂縫示意圖，主要

裂縫為撓剪裂縫及剪力裂縫。撓剪裂縫通常出現在剪跨長度較大的情形下，從圖 3-3(b)<sup>[56]</sup> 自由體圖中可得知此區域的混凝土塊承受四種作用力：(1)拉力區鋼筋鋼筋之拉力  $T$ ，(2)壓力區混凝土之壓力  $C$ ，(3)橫斷面之彎矩  $M$ ，(4)橫斷面之剪力  $V$ 。由圖上可得左側彎矩  $M$  可由下式表示之：

$$M = T \cdot jd \quad (3-5)$$

式中：

$jd$ : 彎矩之力臂，假設為一常數

同理右側彎矩  $M + \Delta M$  可由下式表示之：

$$M + \Delta M = (T + \Delta T) \cdot (jd) \quad (3-6)$$

由 (3-5) 式、(3-6) 式可得

$$\Delta M = \Delta T \cdot jd \quad (3-7)$$

再由斷面之彎矩平衡可得

$$\Delta M = V \cdot \Delta x \quad (3-8)$$

由 (3-7) 式、(3-8) 式可得

$$\Delta T = \frac{V \cdot \Delta x}{jd} \quad (3-9)$$

依據參考文獻 [67-68] 可將 (3-9) 式重新表示為：

$$V = \frac{d}{dx}(Tjd) \quad (3-10)$$

展開為

$$V = \frac{d(T)}{dx} \cdot jd + \frac{d(jd)}{dx} \cdot T \quad (3-11)$$

上式意涵著二種狀況的產生，即為梁作用 (beam action) 與拱作用 (arch action)，根據傳統彈性梁理論 (elastic beam theory)，假設

力臂“ $jd$ ”為常數，則(3-11)式可改寫為

$$V = \frac{d(T)}{dx} \cdot jd \quad (3-12)$$

上式中  $\frac{d(T)}{dx}$  表示介於拉力鋼筋與受壓力區間的水平剪力流 (shear flow)，如圖 3-3(c) 所示。就鋼筋混凝土梁而言，若梁作用存在，則剪力流必定存在。

另一種情況是剪力流等於 0，則(3-11)式可改寫為

$$V = \frac{d(jd)}{dx} \cdot T \quad (3-13)$$

上式中“ $jd$ ”為變數，意涵著“ $jd$ ”沿著鋼筋混凝土梁而變化，水平剪力流並不存在，或受到斜裂縫存在而阻隔，此情形鋼筋混凝土梁的剪力傳遞屬於拱作用，如圖 3-4<sup>[60]</sup> 所示，在拱作用的情形下，剪跨範圍內的壓力“ $C$ ”仍呈現傾斜的形式，鋼筋拉力“ $T$ ”位於下緣保持水平，且“ $C$ ”、“ $T$ ”都是常數。

拱作用可增強鋼筋混凝土梁的抗剪強度，例如短跨距的深梁、托架等等，不過大部分鋼筋混凝土梁的剪跨距比甚大，因此剪力行為通常可以梁作用來進行模擬。

### 3.4 有 CFRP 補強之鋼筋混凝土梁剪力分析

本研究計畫中梁之補強方法為兩側進行 RPC 包覆，試驗中 CFRP 亦進行相同補強方法，為瞭解其行為行為是否與 CFRP 有關，本單元將提出兩種 CFRP 之分析方法，以供試驗時之參考依據。

#### 3.4.1 CFRP 補強梁剪力分析（一）

規範 ACI[1995]<sup>[59]</sup> 及 AASHTO[1992]<sup>[60]</sup> 均提到鋼筋混凝土梁的標稱剪力強度由混凝土本身及箍筋二者共同提供，如加上 CFRP 貼

片輔以補強，則標稱剪力強度可以下式表示：

$$V_n = V_c + V_s + 0.85V_f \quad (3-14)$$

式中：

$V_n$ ：鋼筋混凝土梁標稱剪力強度

$V_c$ ：混凝土標稱剪力強度

$V_s$ ：鋼筋標稱剪力強度

$V_f$ ：CFRP 標稱剪力強度

其中係數 0.85 為強度折減因數，雖為規範規定，但也可是實際情況而設定，依據參考文獻[61-62]之建議，CFRP 之  $V_f$  值可由下列步驟求得。

#### 1. 求取有效寬度 $w_{fe}$ (effective width)

本研究為兩側包覆，可得有效寬度  $w_{fe}$  為

$$w_{fe} = d_f - 2L_e \quad (3-15)$$

上式中  $d_f$  為 CFRP 有效深度 (effective depth)，可採用鋼筋混凝土梁之有效深度， $L_e$  為 CFRP 有效膠結長度 (effective bonded length)，依據參考文獻[61]之建議可以下式決定：

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} L_0 \quad (3-16)$$

式中： $n$ ：CFRP 於主要承受剪力方向黏貼之層數

$L_0$ ：單層 CFRP 有效膠結長度

#### 2. 計算鋼筋混凝土梁橫斷面剪力強度折剪因數 R

由下列三式中取最小值

$$R = \min \begin{cases} 0.5622(\rho_f E_f)^2 - 1.2188(\rho_f E_f) + 0.778 & (3-17a) \\ \frac{(f_c)^{2/3} w_{fe}}{\varepsilon_{fu} d_f} [738.93 - 4.06(t_f E_f)] \times 10^{-6} & (3-17b) \\ \frac{0.005}{\varepsilon_{fu}} & (3-17c) \end{cases}$$

式中：

$$\rho_f : \text{為 CFRP 面積比例常數，由下式定義：} \quad \rho_f = \frac{2t_f}{b} \times \frac{w_f}{s_f} \quad (3-18)$$

$t_f$  : CFRP 之厚度 (mm)

$b$  : 梁斷面寬度 (mm)

$w_f$  : 條狀 CFRP 之寬度(mm)，如圖 3-5<sup>[27]</sup>所示

$s_f$  : 兩條 CFRP 之中心距離(mm)，如圖 3-5<sup>[27]</sup>所示

$E_f$  : CFRP 之彈性模數 (GPa)

$\varepsilon_{fu}$  : CFRP 之極限拉應變

在  $R$  之判別式中，(3-17a)式只適用於 CFRP 斷裂時之破壞模式，並且必須滿足  $\rho_f E_f \leq 0.7 \text{GPa}$ ，(3-17b)式只適用於 CFRP 剝離 (debonding, delamination) 時之破壞模式，且軸向勁度 (axial rigidity) 需介於  $20 \text{ mm} \cdot \text{GPa} \leq t_f E_f \leq 90 \text{ mm} \cdot \text{GPa}$  之間<sup>[30-31]</sup>。

此外，另依據參考文獻[61]也可將  $R$  表示為下式：

$$R = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \varepsilon_{fu}} \leq \frac{0.005}{\varepsilon_{fu}} \quad (3-19)$$

此式中左側是限制 CFRP 貼片剝離的破壞模式，右側則是確保骨材連結的效應 (aggregate interlock)，其中

$$k_1 = \left( \frac{f'_c}{4000} \right)^{2/3} \quad (3-20)$$

$$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} \quad (3-21)$$

$$d_{fe} = d_f - 2L_e \quad (3-22)$$

(3-24)式僅適用於兩側包覆，亦為本次研究之方法，就一般補強工作而言，R 值通常介於 0.25~0.35 之間，也就是 CFRP 貼片承受有效剪力約為 CFRP 極限斷裂強度的 25%~35% 之間。

3.計算 CFRP 貼片提供之剪力強度  $V_f$

$$f_{fe} = Rf_{fu} \quad (3-23)$$

$$V_f = \frac{A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \leq \left( \frac{2\sqrt{f'_c} bd}{3} - V_s \right) \quad (3-24)$$

式中：

$f_{fu}$ ：CFRP 極限斷裂強度

$f_{fe}$ ：CFRP 剪力破壞時之有效剪力

$A_f = 2t_f w_f$ ，CFRP 提供之剪力補強面積

$V_s$ ：鋼筋提供之標稱剪力強度

$\beta$ ：條狀 CFRP 貼片方向與鋼筋混凝土梁縱向方向所成的角度

$f'_c$ ：混凝土 28 天抗壓強度

當 (3-24) 式已求得 CFRP 貼片之剪力強度，則梁之設計剪力強度帶至(3-14) 式可表示為

$$\phi V_n = V_c + V_s + 0.85V_f \quad (3-25)$$

其中折減因數  $\phi$  以 CFRP 補強而言，一般取 0.7，為了確保 CFRP

剪力補強的效果，另參考文獻 [61]應滿足下列二式：

$$V_f \leq 4\sqrt{f'_c}bd \quad (3-26)$$

$$V_s + V_f \leq 8\sqrt{f'_c}bd \quad (3-27)$$

### 3.4.2 CFRP 補強梁剪力分析（二）

彭添富等曾針對國內施工與材料特性，提出一套適合國內補強設計模式，如下所示，CFRP 貼片補強於鋼筋混凝土梁構件之表面，將結合鋼筋、混凝土及 CFRP 成為三合一之結構桿件，對於桿件的彎矩強度、剪力強度及軸向強度等之提昇，可依設計之不同，達到所要的補強強度<sup>[55]</sup>。

I. 針對 RC 樑(如圖 3-6)之剪力補強設計，通常可做下列基本假設<sup>[18]</sup>：

- (a)補強後 RC 梁之剪力強度係由混凝土，剪力箍筋及 CFRP 三部分共同提供。決定標稱剪力強度  $V_n$  時，係假設在複合材料貼片破壞前箍筋已先降伏。
- (b) $V_c$  之強度依「混凝土工程設計規範」簡算式之規定。 $V_s$  則僅考慮最常用之垂直剪力筋之強度。
- (c)為防止裂縫形成瞬間斷面突然破壞，規範有箍筋最小斷面  $A_{v,min}$  之規定。

$$A_{v,min} = \frac{3.5 \times b_w \times s}{f_y} \quad (cm^2) \quad (3-28)$$

- (d)剪力筋所提供之剪力計算強度  $V_s$  不可取大於  $2.12\sqrt{f'_c}b_w d$  (kgf)。
- (e)剪力鋼筋之配置垂直於構材軸向者，其間距在非預力混凝土中不得超過， $d/2$ ，且不得大於 60cm。若  $V_c$  大於  $1.06\sqrt{f'_c}b_w d$ ，則所規定之最大間距應減半。

$$V_s \leq 1.06\sqrt{f'_c}b_w d, s_{\max} = \left(\frac{d}{2}, 60\text{cm}\right) \quad (3-29)$$

$$1.06\sqrt{f'_c}b_w d < V_s < 2.12\sqrt{f'_c}b_w d, s_{\max} = \left(\frac{d}{4}, 30\text{cm}\right)$$

(f)除特別規定外， $\sqrt{f'_c} \leq 26.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。

(g)為有效控制斜拉開裂之寬度，剪力鋼筋之設計降伏強度不得大於  $4200\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。

(h)構材端部，由於支承力所造成之壓應力，限制的裂縫的發展進而使其剪力強度增加，規範規定距支承  $d$  範圍內各斷面可依距支承  $d$  處斷面來設計。

(i) $\phi = 0.85$ 。

## II. RC 梁剪力補強設計原理

若 RC 梁之剪力強度不足已承載外力所產生之剪力時，則可藉由 CFRP 貼片補強來增加其抗剪強度。而 CFRP 材料補強後所提供的剪力強度應符合下式：

$$V_n(\phi, \phi_{cf}) \geq V_u \text{ (kgf)} \quad (3-30)$$

式中， $V_u$  為 RC 梁斷面之設計所需要剪力強度， $\phi$  為剪力強度折減因數，依「混凝土工程設計規範」之規定， $\phi = 0.85$ ， $\phi_{cf}$  為碳纖維之強度折減係數。以上各項剪力強度可由下列各公式分別求得。

(a) 斷面設計需要剪力強度  $V_u$

$V_u$  係依「建築技術規則」組合使用載重及「混凝土工程設計規範」載重因數之規定，經由結構分析得之。

(b) RC 梁之斷面剪力計算強度  $V_n$

補強後斷面所提供之剪力強度為：

$$V_n = V_c + V_s + V_{cf} \text{ (kgf)} \quad (3-31)$$

式中：



(1) 混凝土剪力計算強度  $V_c$

依「混凝土工程設計規範」之規定。

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} b_w d \quad (\text{kgf}) \quad (3-32)$$

(2) 剪力鋼筋之剪力計算強度  $V_s$

當剪力鋼筋為垂直肋筋時依「混凝土工程設計規範」之規定計算如下：

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{S} \quad (\text{kgf}) \quad (3-33)$$

(3) CFRP 貼片之剪力強度  $V_{cf}$

RC 梁兩側貼 CFRP 補強其剪力強度  $V_{cf}$  計算如下：

$$V_{cf} = 2 \times d_{cf} \times f_{cf} \times t_{cf} \quad (\text{kgf}) \quad (3-34)$$

式中， $f_{cf} = E_{cf} \times \varepsilon_{cf}$ ，應變量可由試驗求得，以保守設計可假設  $\varepsilon_{cf} = 0.004$ 。

(4) 補強後  $V_n$  值不可大於  $5V_c$ 。

(c) CFRP 剪力補強貼片之厚度  $t_{cf}$

由上節 (b) 中，令  $V_n = V_u/\phi$  可得 CFRP 補強之最小厚度  $t_{cf}$ ：

$$t_{cf} \geq \frac{V_u - (V_c + V_s) \phi}{2 \times \phi_{cf} \times d_{cf} \times f_{cf}} \quad (\text{cm}) \quad \phi = 0.85, \phi_{cf} = 0.75 \quad (3-35)$$

### 3.5 鋼筋混凝土梁鋼鈹補強力學行為

RC 樑因強度不足時，鋼鈹黏貼的補強方式是工程實務界經常採用之方式。然而，學術界針對鋼鈹補強設計方式之研究，較不多見，以致迄今仍無一具體可行的分析設計方式可資遵循，因而大部份工程

師仍以工程直覺判斷作為設計基礎。其中，部分的補強設計或許有效，但都無法以定量的方式去評估其效果，另外則有部分的鋼板補強設計方式，對 RC 樑強度毫無助益，祇是增加結構體之載重而已<sup>[66]</sup>。

鋼筋混凝土梁鋼板補強模擬為層狀複合材料梁，則介面結合情形對複合材料梁的力學性質有很大影響，若介面達完全結合效果，則水平向層狀之複合材料梁，可以依轉換斷面方式，來評估梁的力學行為。垂直向層狀之複合材料梁，若介面達完全結合效果，僅須依勁度比分配承受之外力。對水平向層狀複合樑而言，若介面無法達到完全複合效果，則在力學分析上須額外考慮不同材質間之相對垂直位移(介面層壓縮)及不同材質間之相對水平位移(介面層滑動)。

參考文獻[67]、[68]將介面層假設為均勻分佈的壓縮彈簧及阻尼緩衝器，以有限元素法分析複合三明治樑不同材質間的垂直相對位移問題，其研究並未將不同材質間的水平相對位移列入考慮。

參考文獻[69-71]以 RC 樑底用環氧樹脂粘貼鋼板為例，解析三明治樑在不同材質間的水平複合問題，其中假設環氧樹脂膠結層為均勻分佈的壓縮及剪力兩種彈簧組合，其推導過程中，先將兩種不同材質間的垂直相對位移假設為相同，以便分離軸力與撓曲的耦合聯立微分程式，最後再以線性疊加的方式，求解膠結層的剪應力及正應力。Roberts 的解析方法是目前在 RC 樑以鋼板補強彎矩強度研究上已常被引用的方式，唯其解析過程中，將軸力與撓曲的耦合聯立微分程式分離，唯其準確性有待進一步驗證。

RC 構件的鋼板貼片補強方式，1967 年就有補強設計實例出現<sup>[69]</sup>，後續許多補強工程案例也採用此種補強方式。鋼板貼片補強方式以貼樑底或樑頂(補強彎矩)及貼樑兩側(補強剪力)的方式最為常見。而較為具體可行只有樑彎矩補強一項而已，剪力及軸力補強仍有待進一步研究。

蕭興臺針對垂直向部分複合三明治樑之撓曲理論及補強應用，作簡略說明，如圖3-7<sup>[66]</sup>。利用能量原理推導垂直向複合三明治樑之撓曲

理論，可得二條四階之聯立微分方程式，如下：

$$E_1 I_1 v_1'''' - \frac{kh^3}{12} (v_1'' - v_2'') + kh(v_1 - v_2) = q_1 \quad (3-36)$$

$$E_2 I_2 v_2'''' - \frac{kh^3}{12} (v_1'' - v_2'') - kh(v_1 - v_2) = q_2 \quad (3-37)$$

式中：

下標"1"為第一種材料(如R.C.梁)及下標"2"為第二種材料(如兩側鋼鈑)。

$v_1$  及  $v_2$  分別為第一種材料及第二種材料之y向位移函數

$E_1 I_1$  及  $E_2 I_2$  分別為第一種材料及第二種材料之撓曲剛度

$k$ 為剪力彈簧常數

當膠結層之剪力彈簧常數為  $k=0$  時，上兩式為兩獨立之撓曲微分方程式，再若膠結層之剪力彈簧常數  $k=\infty$  時，上兩式隱含  $v_1=v_2$  之束制條件，亦即完全複合時兩種樑變形完全相同，此時 RC樑與兩側鋼鈑可直接依撓曲勁度比  $EI_S/EI_{RC}$  分配外力。亦即兩側鋼鈑與RC樑分配所得之剪力比  $V_S/V_{RC}$  與彎矩比  $M_S/M_{RC}$  其值與兩側鋼鈑及 RC樑之撓曲勁度比相同。亦即

$$EI_S/EI_{RC} = V_S/V_{RC} = M_S/M_{RC}。$$

但由於實際之膠結層剪應力彈簧常數為有限值，且樑端點位移及旋轉彈簧與端點螺栓配置有關，亦為有限值。故實際上之鋼鈑補強後 RC 樑，並無法達到真正完全複合之效果。亦即實務上之 RC 樑兩側補強鋼鈑應為一垂直向部分複合之三明治樑。文獻[蕭興臺，1997]分析結果顯示，一懸臂兩側鋼鈑補強之 RC 樑，補強鋼鈑並無法依其相對撓曲勁度分擔外力（剪力及彎矩），在支承面處會有逆向剪力發生，即因補強鋼板反而增加原 RC 樑之剪力。Sho-bond Co [1984]指出，側面補強鋼鈑的剪力補強方式，僅可抑制初期剪力裂縫之發生，唯對極

限剪力強度幫助不大（因局部挫屈而剝離）<sup>[72]</sup>。

### 3.6 無圍束之鋼筋混凝土柱軸力行為

當鋼筋混凝土柱承受軸向壓力作用時，從柏松比 (poisson's ratio) 可得知軸向應變壓縮或使得橫向應變擴張，一般而言，當軸向應力增加到混凝土抗壓強度  $f'_c$  之 75%~80% 倍時，柱體將產生龜裂，由圖 3-8[徐耀賜等，2002]觀察無鋼筋圍束之混凝土柱受軸向壓力載重之應力應變圖，當混凝土達開裂應變  $\epsilon_{cr}$  後，此時橫向應變  $\epsilon_A$  將迅速擴張，而軸向應變  $\epsilon_c$  則是趨緩，此為無圍束作用下的基本力學性質。

### 3.7 鋼筋混凝土柱軸力設計強度

依據中國土木工程學會之混凝土工程設計規範與解說之規定，柱軸力設計強度  $\phi P_n$  不得超過下列規定值：

$$\text{螺箍筋柱： } P_{n,max} = \phi 0.85 \left[ 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right] \quad (3-38)$$

$$\text{橫箍筋柱： } P_{n,max} = \phi 0.8 \left[ 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right] \quad (3-39)$$

$A_g$  = 總斷面積。

$A_{st}$  = 縱向鋼筋之總斷面積。

柱之縱向鋼筋之總斷面積  $A_{st}$  應符合下式規定：

$$0.01A_g \leq A_{st} \leq 0.08A_g \quad (3-40)$$

若使用過高之鋼筋比，則造成澆置混凝土時施工之困難度增加，需考慮改用較大之柱斷面積以降低鋼筋比、或使用較高強度之混凝土或鋼筋，同時使用搭接方式續接之柱，其使用鋼筋量一般以不超過  $0.04A_g$  為原則。最低鋼筋量之規定，用以確保柱符合鋼筋混凝土之基本行為，鋼筋在混凝土持續受壓時可減少混凝土乾縮及潛變的效應，

試驗結果顯示乾縮與潛變會將若干載重自混凝土轉移自鋼筋，增加鋼筋之應力，鋼筋比降低將大幅增加鋼筋之應力。最大鋼筋量之限制是基於考慮經濟與澆置需求之實用上限。

螺箍筋之體積比  $\rho_s$  須符合下式之規定：

$$\rho_s \geq 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \quad (3-41)$$

式中  $f_y$  為螺箍筋設計所用之規定降伏強度，但不得大於  $4200 \text{ kgf/cm}^2$ 。

柱之橫箍筋相關規定如下：

主鋼筋不大於 D32 者須用 D10 以上之箍筋；主鋼筋大於 D32 或為束筋者須用 D13 以上之箍筋。橫箍筋間距不得大於主鋼筋直徑之 16 倍或箍筋直徑之 48 倍，亦不得大於柱之最小邊寬。

### 3.8 有 CFRP 圍束之鋼筋混凝土柱軸力行為

當鋼筋混凝土柱以碳纖維貼片包覆時，如圖 3-9 所示<sup>[56]</sup>，包覆的 CFRP 將具有防止柱體橫向擴張的功能，當軸向載重作用初期，CFRP 尚未產生圍束功能，當載重增加很大時，圍束的作用也隨之增加，並且包覆的厚度(即黏貼層數)與圍束的效果也有關，從圖 3-10 可發現，當圍束層數愈多，所能承受的應力也就愈大，直到貼片受拉力斷裂為止。依據 Nanni 等之研究發現，在圓形、方形及矩形斷面的柱體試驗中，以圓柱的包覆圍束補強效果最好，方形次之，再其次是矩形斷面<sup>[73]</sup>。

### 3.9 鋼筋混凝土柱 CFRP 補強設計原理

本節就圓形斷面橋柱以 CFRP 剪力、撓曲與搭接破壞之設計作介紹。

### 3.9.1 CFRP 剪力破壞補強設計

若橋柱之剪力強度不足以承擔產生塑性鉸所需剪力時，可藉由外包 CFRP 補強來增加抗剪強度，外包 CFRP 補強所提供之剪力強度  $V_f$  可由下式計算得到：

$$V_f = \frac{V^0}{\phi_s} - V_n \quad (3-42)$$

式中， $V_f$  為橋柱外包 CFRP 補強所提供之剪力強度， $V^0$  為橋柱產生塑性鉸所須之柱剪力強度， $\phi_s$  為剪力強度折剪因子可取 0.85， $V_n$  為橋柱剪力容量。

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

$$V_f = \frac{\pi}{2} t_j f_{jd} D \cot \theta \quad (3-43)$$

式中：

$t_j$ : CFRP 補強之厚度

$D$ : 鋼筋混凝土圓柱直徑

$\theta$ : 剪力裂縫與縱向鋼筋的夾角，設計時可假設  $\theta = 35^\circ$

$f_{jd}$ : CFRP 之設計應力，環向的設計應變 (Hoop Strain) 若為  $\varepsilon_{jd} = 0.004$ ，則  $f_{jd} = E_j \varepsilon_{jd} = 0.004 E_j$ ，其中  $E_j$  為 CFRP 材料之彈性模數。

由上兩式可得 CFRP 補強之最小厚度，計算如下：

$$t_j \geq \frac{\frac{V^0}{\phi_s} - V_n}{\frac{\pi}{2} f_{jd} D \cot \theta} \quad (3-44)$$

### 3.9.2 CFRP 撓曲破壞補強設計

CFRP 撓曲破壞補強設計厚度分述如下：

(i) ATC-32 規範<sup>[74]</sup>

$$t_j = \frac{D}{22.5} \left\{ \frac{f'_{ce}}{f_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right] + 0.13(\rho_l - 0.01) \right\} \quad (3-45)$$

式中， $D$ ：鋼筋混凝土圓柱直徑， $f'_{ce}$  取  $1.3 f'_c$ ， $f_{ju}$  為 CFRP 之極限應力， $P$  為柱之軸向壓力， $f'_c$  為混凝土極限壓應力， $A_g$  為柱之全斷面積， $\rho_l = \frac{A_{st}}{A_g}$  為縱向鋼筋比。

(ii) AASHTO 規範<sup>[60]</sup>

$$t_j = \frac{D f'_c}{6 f_{ju}} \quad (3-46)$$

(iii) Caltrans 規範<sup>[75]</sup>

$$t_j = \frac{D f'_c}{6 f_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \quad (3-47)$$

(iv) 圍束混凝土之理論極限應變<sup>[76]</sup>

$$t_j = 0.1 \frac{D(\varepsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f_{ju} \varepsilon_{ju}} \quad (3-48)$$

式中， $\varepsilon_{cu}$  為補強後圍束混凝土斷面之極限應變， $f'_{cc}$  為圍束混凝土之極限強度， $f_{ju}$  及  $\varepsilon_{ju}$  分別為 CFRP 之極限應力與極限應變。

### 3.9.3 CFRP 搭接長度不足補強設計

橋柱主筋的配置，若從基礎延伸至搭接段，再與柱底鋼筋搭接，常因搭接長度不足而無法發揮塑鉸區主筋應力超市降伏應力之需求。鋼筋搭接長度不足將會使混凝土與主筋接觸面發生開裂現象，降低主筋與混凝土間的接觸面積與握裹力。藉由補強的設計可增加混凝土的圍束應力，進而加大鋼筋即將發生搭接破壞時之混凝土開裂面之摩擦力。所需之圍束應力計算如下<sup>[77-78]</sup>：

$$f_l \geq \frac{A_b f_s}{\mu p l_s} \quad (3-49)$$

其中，圓形橋柱之搭接破壞時混凝土開裂之周長  $p$  計算如下：

$$p = \frac{\pi D'}{2n_b} + 2(d_b + cc) \leq 2\sqrt{2}(d_b + cc) \quad (3-50)$$

式中， $A_b$  為縱向鋼筋之斷面積， $cc$  為混凝土保護層厚度，若在塑鉸區搭接時，計及實際降伏強度高於標準降伏強度  $f_y$ ，且計及應變硬化， $f_s$  取  $1.5f_y$ 。 $\mu$  為摩擦係數，取 1.4。 $l_s$  為搭接長度， $p$  為搭接破壞時之混凝土開裂面之周長， $f_l$  為橫向鋼筋之應變  $\varepsilon_s = 0.0015$  時之圍束力。然而，主筋之搭接長度應該要檢驗其最小需求已達安全之標準。

$$l_{s(\min)} \geq \frac{0.15d_b f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (3-51)$$

基於 CFRP 圓形橋柱圍束補強而言，其 CFRP 補強之最小厚度，計算如下：

$$t_j = \frac{f_l D}{2f_{jd}} \quad (3-52)$$

為防止搭接處鋼筋產生滑動，則採用 CFRP 環向之設計極限應變  $\varepsilon_j = 0.0015$ ，故可得 CFRP 之設計應力  $f_{jd} = E_j \varepsilon_j = 0.0015E_j$ 。

由上式可得 CFRP 補強之最小厚度：

$$t_j = \frac{f_l D}{0.003E_j} \quad (3-53)$$

### 3.10 圓形橋柱鋼板補強設計原理

柱鋼板包覆補強設計方法，按橋柱之剪力、韌性、預防主筋挫屈及搭接長度等設計原理，介紹如下。



### 3.10.1 剪力破壞鋼板補強設計

若橋柱之剪力強度不足以承擔產生塑性鉸所需剪力時，可藉由外包鋼板補強來增加抗剪強度，外包鋼板視為連續性橫向鋼筋處理，可求得圓形橋柱需補強之最小鋼板厚度，計算如下：

$$t_j \geq \frac{\frac{V^0}{\phi_s} - V_n}{\frac{\pi}{2} f_{yj} D \cot \theta} \quad (3-54)$$

式中， $D$  為柱受力方向之斷面尺寸， $t_j$  為鋼板厚度， $f_{yj}$  為鋼板降伏強度， $\theta$  可取  $35^\circ$ ， $V^0$  為橋柱產生塑性鉸所須之柱剪力強度。 $\phi_s$  為剪力強度折剪因子可取 0.85， $V_n$  為橋柱剪力容量。而補強後應檢驗  $V^0/A_c$  是否超過  $0.2f'_c$ 。如超過  $0.2f'_c$ ，即使補強很厚鋼板，可能會達不到預期的效果<sup>[76]</sup>。

### 3.10.2 橋柱韌性補強設計

外包鋼板補強來增加橋柱塑性鉸區的韌性，原則上視為連續性橫向鋼筋處理，用以增加混凝土圍束應力並改善極限強度與應變，達到斷面曲率韌性、極限塑性鉸轉角及整體橋樑韌性容量之需求。

#### (i) ATC-32 規範

外包鋼板視為連續性橫向鋼筋，故可求得圓形橋柱需補強之最小鋼板厚度，計算如下：

$$t_j = \frac{D}{4} \rho_j = \frac{D}{4} \left\{ \frac{0.16f'_{ce}}{f_{je}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{ce} A_g} \right] + 0.13(\rho_l - 0.01) \right\} \quad (3-55)$$

式中， $f'_{ce}$  取  $1.3f'_c$ ， $f_{je}$  取  $1.1f_{yj}$ ， $\rho_l = \frac{A_{st}}{A_g}$  為縱向鋼筋比。

#### (ii) AASHTO 規範

因補強後可忽略保護層剝落後鋼筋提供的圍束強度計算，故可計

算圓形橋柱塑鉸區需補強之最小鋼板厚度，如下所示：

$$t_j = 0.03D \frac{f'_c}{f_{yj}} \quad (3-56)$$

(iii) Caltrans 規範

同上所述，計算圓形橋柱塑鉸區需補強之最小鋼板厚度，如下所示：

$$t_j = 0.03D \frac{f'_c}{f_{yj}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \quad (3-57)$$

(iv) 圍束混凝土之理論極限應變

由 Mander 等人與 Hoshikuma 等人之圍束混凝土之理論極限應變，可計算圓形橋柱塑鉸區需補強之最小鋼板厚度，如下所示<sup>[57、61]</sup>：

$$t_j = \frac{0.18 \times D (\varepsilon_{cu} - 0.004) f'_{cc}}{f_{yj} \varepsilon_{ju}} \quad (\text{Mander 等人}) \quad (3-58)$$

$$t_j = \frac{5.6 \times D (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cc}) f_c^2}{f_{yj} f'_{cc}} \quad (\text{Hoshikuma 等人}) \quad (3-59)$$

式中， $\varepsilon_{ju}$  為鋼板之極限應變， $f'_{cc}$  為圍束混凝土之抗壓強度， $\varepsilon_{cc}$  為圍束混凝土在抗壓強度  $f'_c$  時所對應之應變， $\varepsilon_{cu}$  為圍束混凝土之極限應變。

### 3.10.3 避免橋柱挫屈鋼板補強設計

若由未補強圓形橋柱橫向鋼筋比小於 ATC-32 規範[ATC-32,1996]規定之最小橫向鋼筋比之需求時，則應對橋柱採取預防挫屈補強設計，可由下式得補強之最小鋼板厚度。

$$t_j = \frac{D n_b f_s^2}{8.89 E_{ds} E_t} \quad (3-60)$$

其中，

$$E_{ds} = \frac{4E_{su}E_i}{(\sqrt{E_{su}} + \sqrt{E_i})^2} \quad (3-61)$$

上(11)中只需用於細長柱之檢查，也就是  $\frac{L}{D} = \frac{M}{VD} > 4$  時。

式中， $n_b$  為縱向鋼筋根數， $f_s$  為縱向鋼筋挫屈時之應力， $E_t$  為橫向鋼筋的彈性模數， $E_i$  為縱向鋼筋的彈性模數， $E_{su}$  為  $f_s$  至  $f_{su}$  之割線斜率， $f_{su}$  為縱向鋼筋之最高強度。

### 3.10.4 搭接長度不足鋼板補強設計<sup>[77-78]</sup>

藉由補強的設計可增加混凝土的圍束應力，進而加大鋼筋即將發生搭接破壞時之混凝土開裂面之摩擦力。由所需之圍束應力及鋼板與橫向鋼筋所提供之圍束力可求得其縱向鋼筋搭接長度不足時所需補強之最小鋼板厚度，計算如下：

$$t_j = \frac{D(f_{l(\text{需求})} - f_{l(\text{橫向鋼筋})})}{6120} \quad (3-62)$$

其中，

$$f_{l(\text{橫向鋼筋})} = \frac{2A_{sh}f_{sh}}{D'} \quad (3-63)$$

$$f_{l(\text{需求})} \geq \frac{A_b f_s}{\mu p l_s} \quad (3-64)$$

$$p = \frac{\pi D'}{2n_b} + 2(d_b + cc) \leq 2\sqrt{2}(d_b + cc) \quad (3-65)$$

式中， $A_b$  為縱向鋼筋之斷面積， $cc$  為混凝土保護層厚度，若在塑鉸區搭接時，計及實際降伏強度高於標準降伏強度  $f_y$ ，且計及應變硬化， $f_s$  取  $1.5f_y$ 。 $\mu$  為摩擦係數，取 1.4。 $l_s$  為搭接長度， $p$  為搭接破壞時之混凝土開裂面之周長（如圖 3-11）， $f_l$  為橫向鋼筋之應變  $\varepsilon_s = 0.0015$  [Priestley 等，1996] 時之圍束力， $f_{sj}$  與  $f_{sh}$  各為鋼板與橫向鋼筋在環向應變 0.0015 時之應力， $D$  為柱之直徑， $D'$  為圍束斷面之直

徑， $f_{l(\text{橫向鋼筋})}$  為橫向鋼筋所提供之圍束力。

### 3.10.5 圓形橋柱鋼板補強之最小厚度需求

以上各項所求得之圓形橋柱補強鋼板之最小厚度值，建議可依其補強需求而採用所計算之最大值補強之。

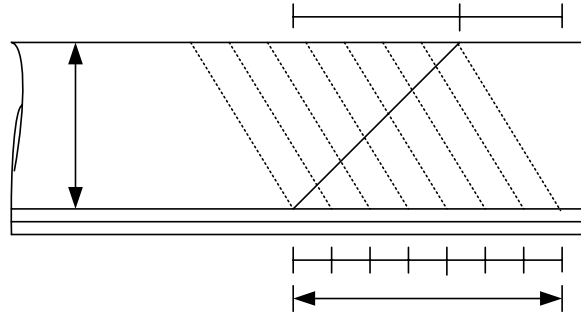


圖 3-1 具剪力箍筋鋼筋混凝土梁剪力強度示意圖

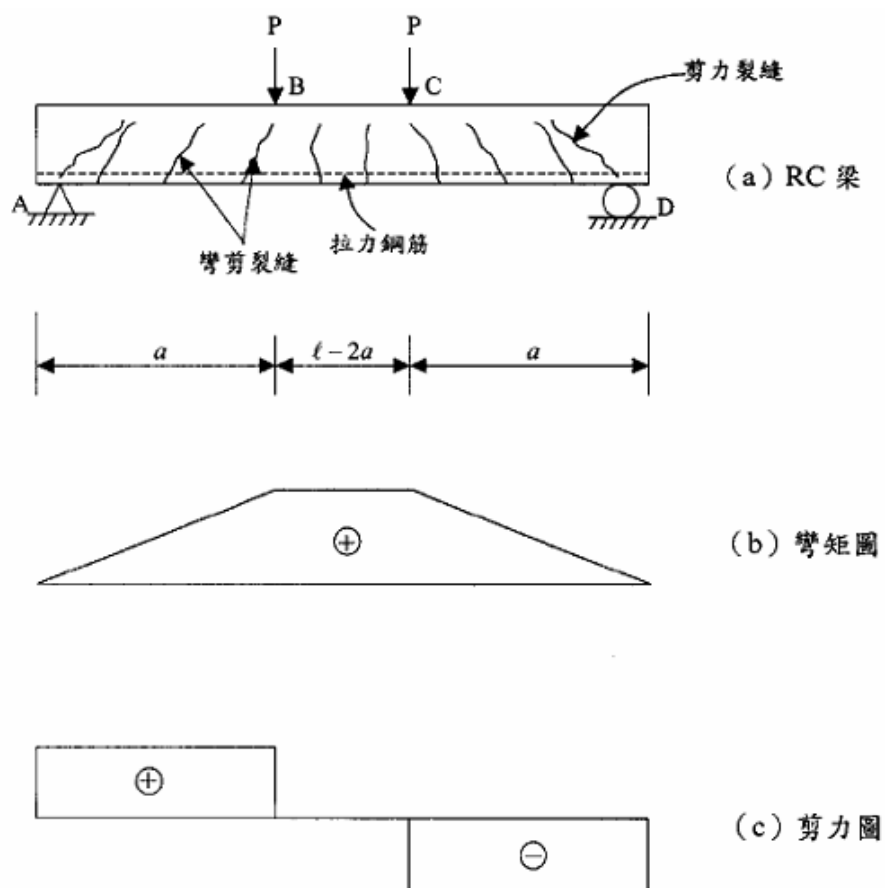


圖 3-2 三分點載重剪力彎矩與裂縫示意圖<sup>[56]</sup>

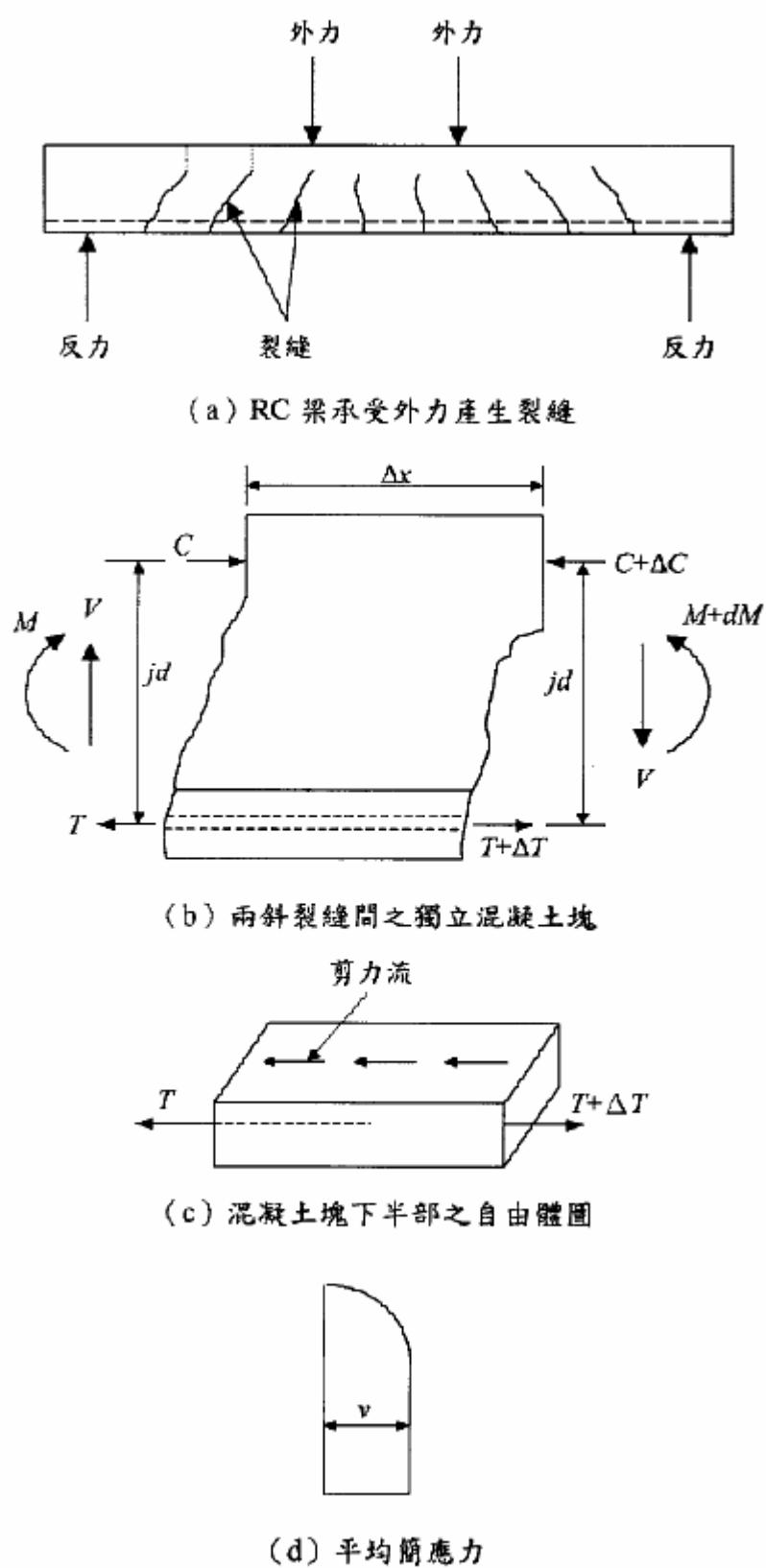


圖 3-3 無箍筋鋼筋混凝土梁計算說明示意圖<sup>[56]</sup>

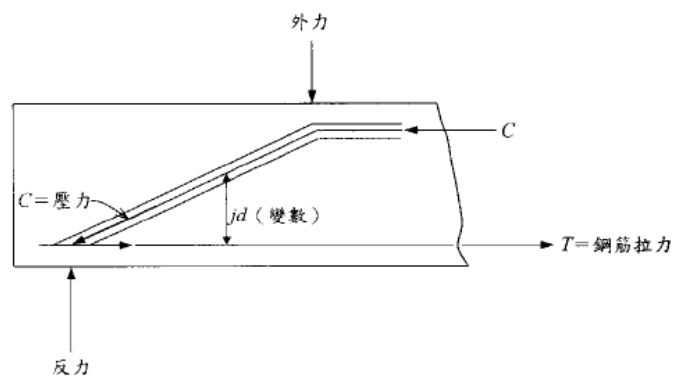


圖 3-4 鋼筋混凝土梁之拱作用<sup>[56]</sup>

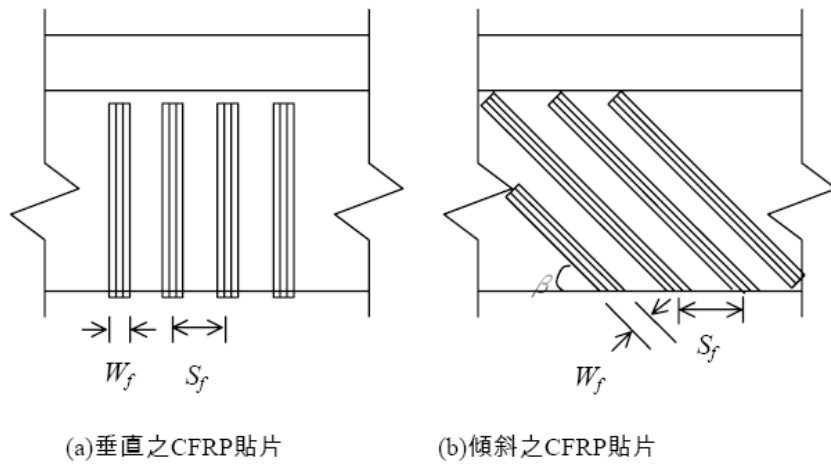


圖 3-5 CFRP 貼片定義<sup>[56]</sup>

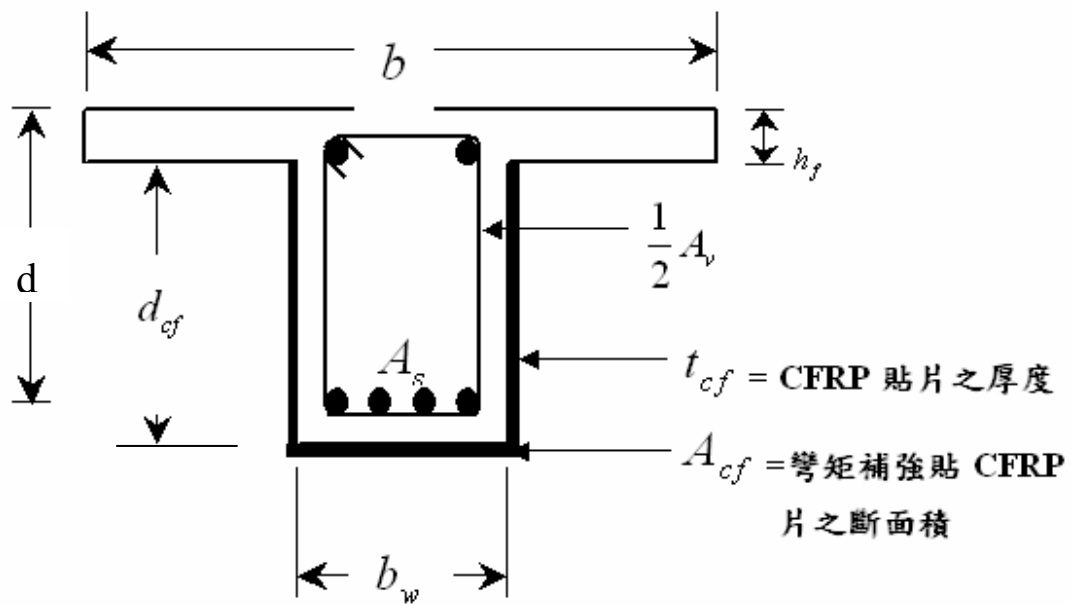


圖 3-6 RC 梁剪力貼片補強斷面

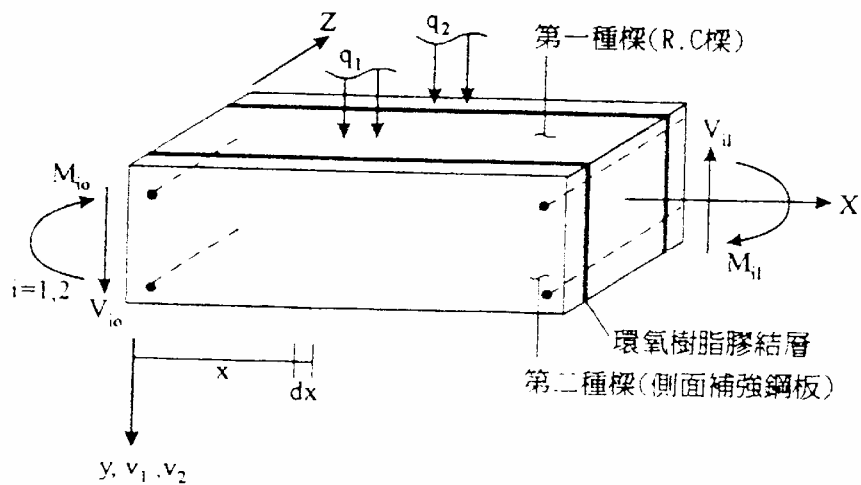
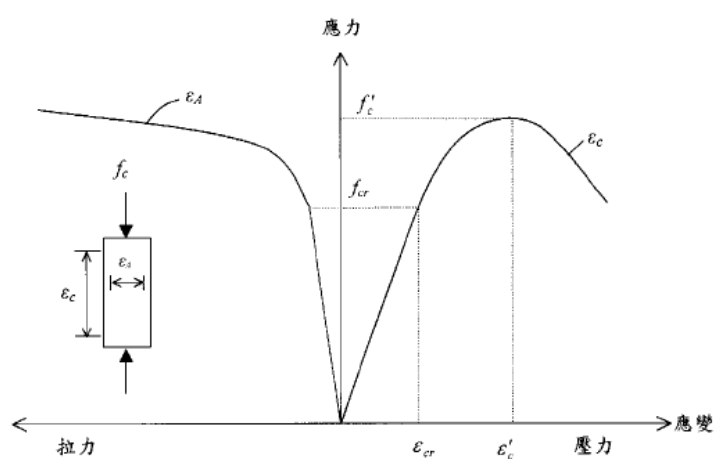


圖 3-7 垂直向部分複合三明治樑<sup>[66]</sup>





說明：1.無鋼筋圍束混凝土

2.  $\epsilon_c$  = 混凝土之軸向應變

3.  $\epsilon'_c$  = 混凝土最大應力下所對應之應變

4.  $\epsilon_{cr}$  = 裂縫初產生時之應變

圖 3-8 典型單軸向受壓混凝土之應力-應變曲線示意圖<sup>[56]</sup>

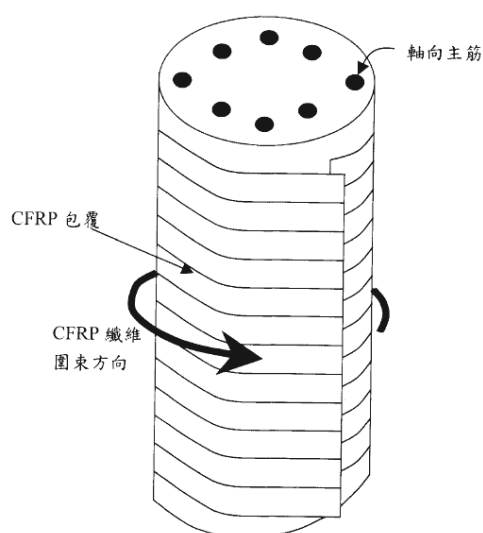


圖 3-9 CFRP 包覆圍束示意圖<sup>[56]</sup>

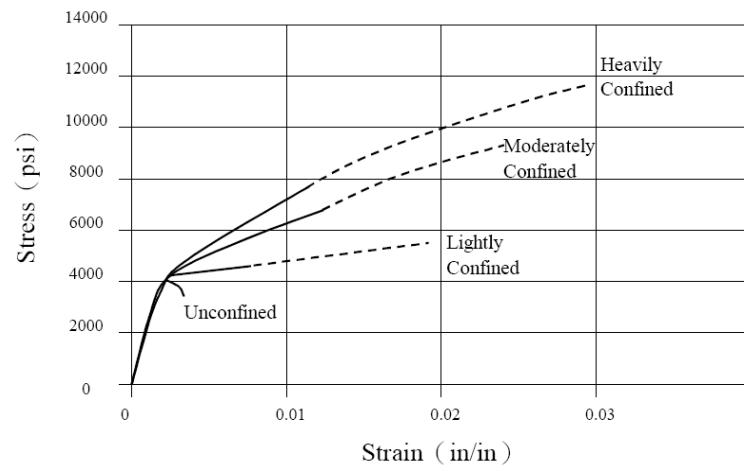


圖 3-10 不同 CFRP 包覆厚度之混凝土應力-應變圖<sup>[73]</sup>

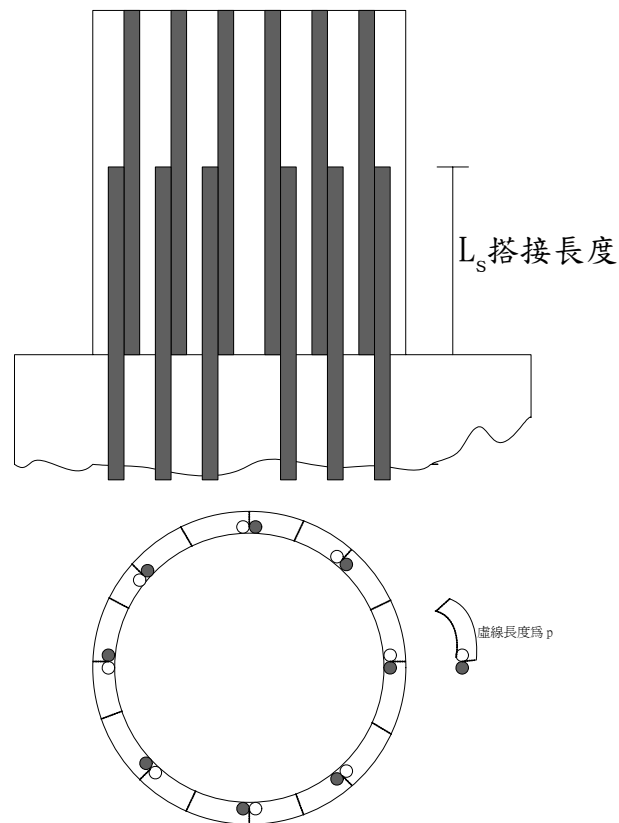


圖 3-11 圓形橋柱主筋搭接示意圖

## 第四章 修補材料與修補工法

### 4.1 前言

傳統混凝土結構物設計服務性能著眼於，滿足服務環境的機械性能，長期耐久性與結構安全性，不因環境與使用服務的交互影響而有劣化的情形，結構體修補面上可能產生的載重如圖 4-1 所示。但事實上常因設計因素，施工問題及使用材料等等問題，而影響到結構物的耐久性及安全性，自 921 大地震後，倒塌與受損的建築物是最好的證明。

修復補強系統內包含基材(R.C)、修補材料、黏著材料及外包覆補強材料。基材(原結構體)因外力（地震、載重）或環境作用，致使基材功能受損導致強度降低，無法提供預期服務性能，需依賴外包覆型補強材料（如鋼板、碳纖維或混凝土等），恢復及提昇原設計及預期的服務性能。而欲發揮修補材料的性能，須藉由黏著材料（例如：環氧樹脂、壓克力樹脂、不飽和聚脂樹脂或無收縮砂漿等），將基材與修復補強的材料結合在一起，在受力或使用環境作用下，均能結合而無分離的現象，圖 4-2 所示為修補介面鍵結力機構示意圖。

### 4.2 結構體修復補強工法探討

結構體之設計即為提供安全耐久之良好服務性能，但常因設計不當，施工不良或是外力的作用而造成損壞，尤其是大自然的破壞力，其中以地震的破壞模式最為常見，而此種破壞模式對人民生命、財產之威脅也遠大於其他破壞模式。

震害後受損之結構體如何修復或補強為一大課題外；再則因耐震設計規範改變後許多以前依舊設計規範所設計興建之結構物之柱構件耐震能力不足部份，迄需加以補強來使這些結構物之結構構件符合現

行耐震規範之要求，即是所謂補強(Rehabilitation)。一般而言，在選擇補強的方法時通常要考慮以下因素：(1)結構之安全性；(2)結構使用年限；(3)拆修結構之成本；(4)維修保養費用；(5)新維修材料或技術之成本等，才能探討補強的成本效益。

結構物受損後，基本上有修復(Repair)及補強(Rehabilitation)兩種處理方式，修復旨在恢復結構物之原有設計強度，補強與加固則是將受損之結構構件，提升至未受損前之強度或超過原有構件之原始設計強度。唯修復補強的材料與工法種類繁多，故在選擇修復補強工法時，應考量：(1)目的：結構安全性。(2)方式：修復或補強。(3)修補材料的性能及規格。(4)結果：結構物使用年限要求。

以下針對目前工程界常用於 RC 構造物之修復補強工法作一簡單說明。

#### 4.2.1 裂縫環氧樹脂灌注工法

常用之裂縫環氧樹脂灌注工法施作程序，如圖 4-3 所示。

##### 1. 裂縫表面處理

以鋼刷或砂輪機，將裂縫部份之表面粉刷層或飾面磨除並以空壓機將粉塵及鬆動物質清除乾淨。

##### 2. 安置灌注頭基座

於灌注頭基座以膏狀之環氧樹脂補土(EPOXY PUTTY)塗抹底部，以每隔 20~30cm 之距離黏貼於裂縫上。

##### 3. 封塞灌注頭基座及裂縫

以膏狀之封塞劑封塞灌注頭基座四周使之固定,並沿裂縫表面披塗封塞劑，以防止灌漿時漏漿。

##### 4. 安裝持續加壓式灌注頭

將持續加壓式灌注頭安裝於基座上。

## 5. 灌注修補材料

- (1) 將混合好之修補材料灌注裂縫。
- (2) 灌注時應以由下往上之順序為原則。
- (3) 檢視灌注過之注射筒內殘餘之修補材料劑量，若殘餘劑量所剩無幾，表示裂縫內尚未灌滿，應即刻補灌，直到不再吃漿為止。

## 6. 敲除灌注頭及其基座

待裂縫內部之修補材料完全硬化後，即可敲除灌注頭及其基座。

## 7. 表面復原處理

用砂輪機或鑿子將表面突出部份去除至與原壁面平齊，再以補土填平後恢復原飾面或粉刷層。

### 4.2.2 鋼板（樑）補強工法

常用之鋼板（樑）補強工法施作程序，如圖 4-4 及 4-5 所示。

#### 1. 表面處理

以破碎機將粉刷層去除，以利膠結材接著。

#### 2. 鋼板（樑）裁切及鑽孔

按設計裁切鋼板（樑）並於鋼板（樑）上鑽出灌注孔、出氣孔及固定孔。鑽孔位置及數量按實際需要而定。

#### 3. 鋼板（樑）安裝固定

視狀況需要以膨脹螺絲或化學螺栓將鋼板（樑）固定於正確位置。

#### 4. 安裝灌注孔及出氣孔

以膏狀之環氧樹脂補上(EPOXY Putty)塗抹於預留之灌注孔及出氣孔四周，封塞並使之固定。

5.鋼鈹(樑)四周及螺絲固定孔以膏狀之封塞劑封塞四周使之固定，以防止灌漿時漏漿。

#### 6.高壓低速灌注膠結材

(1)採用氣動 Pump 將混合好之膠結材以高壓低速之方式灌注入，待膠結材從另一灌注孔溢出時，即可停灌注動作，封塞灌注孔並移置下一孔重複上述之步驟。

(2)灌注時應以由下往上之順序為原則。

#### 7.去除灌注頭及出氣頭

待鋼鈹(樑)內部之膠結材完全硬化後，即可去除灌注頭及出氣頭。

#### 8.鋼鈹表面處理

將鋼鈹(樑)表面之鐵鏽去除後，以紅丹漆噴塗於鋼鈹(樑)表面做為防鏽處理，再視需要上漆或噴塗樹脂砂漿。

### 4.2.3 碳纖維補強工法

常用之碳纖維補強工法施作程序，如圖 4-6 所示。

#### 1.面層處理

(1)混凝土表面的劣化層（風化、游離石灰、脫模劑、剝離的砂漿、粉刷層、污物等）以砂輪機去除並研磨。

(2)以空壓噴嘴和毛刷將粉塵及鬆動物質去除，用水洗淨時，必須使其充分乾燥。

#### 2.斷面復舊

(1)將混凝土面層的不良部份（剝落、孔隙、蜂窩、腐蝕等）清除。若有鋼筋外露情形，先做好防鏽處理，再以強度相等或大於混凝土的環氧樹脂砂漿修補。

(2)裂縫以環氧樹脂灌注。

(3)裂縫或打除部份若有漏水情形時，應先以其他方法，做止水、導水處理。

### 3.不平整修正

表面凸出部份（小突起等）以切割機或砂輪機將其削除並使其平滑，凹陷部份（打除部份）則以環氧樹脂補土或樹脂砂漿填補之。

### 4.底漆塗佈

(1)將主劑和硬化劑依所規定的配比放置於拌合桶中，使用手提式電動拌合機，使其均勻的混合（約兩分鐘）。一次的拌合量為在可使用時間內的施工量，超過可使用時間的東西，不可使用。（可使用時間依材料使用說明指示）。

(2)以毛刷滾輥均勻塗佈，依現場狀況決定是否塗佈第二道（初乾之後）。塗佈量隨施工面的方向及粗糙的程度有所變化。

(3)指觸乾燥時間約三個小時～半天。

(4)表面凸出處以砂輪機或切割機等削除，依狀況必要時用環氧樹脂補土做平整修正。

### 5.單向性強化纖維的粘貼

(1)單向纖維預先以剪刀、刀子依所設計的尺寸大小裁好。依使用量、裁剪尺寸、長度在兩米以內最適當。為防止保管期間的破損，裁剪數量只裁當日所需用的數量。

(2)施工面的底漆乾燥以指觸確認。底漆施工超過一個星期以上時，應以砂紙打磨。

(3)將環氧樹脂的主劑和硬化劑依所規定的配比放置於拌合桶中，使用手提式電動拌合機，使其均勻的混合（約兩分鐘）。一次的拌合量為在可使用時間內的施工量，超過可使用時間的東西，不可使

用。(可使用時間依使用說明指示)。

- (4)環氧樹脂用毛刷滾輥平均塗佈(塗於底漆上)。塗佈量因施工面的方向、粗糙度等影響會有變化，轉角部份要多塗。
- (5)單向強化纖維粘貼於樹脂塗佈面後，撕去離型紙，然後以脫泡滾輥和橡皮刮刀順著纖維方向用力推平兩、三次，使樹脂浸透並去除氣泡。纖維(長向)方向的搭接長度要留 10cm，短向則不用留。
- (6)粘貼後放置 30 分鐘，若纖維有浮出或脫線情形發生時，以滾輥或橡皮刮刀壓平修正。
- (7)單向強化纖維表面再塗佈樹脂(塗於面層)。與 5)相同要領，以脫泡滾輥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。
- (8)兩層以上的單向強化纖維相疊粘貼時，重複(4)-(7)的步驟。

#### 6. 養護

為達成設計強度，下列養護時間是必要的。平均氣溫 10℃，養護期間兩週。平均氣溫 20℃，養護期間一週。

#### 7. 完工後面層保護噴漆

- (1)碳素纖維本身有阻擋紫外線防止樹脂劣化的效果。施工面如受日光直接照射時，耐候性塗料噴塗保護較為適當。
- (2)噴塗保護漆要等樹脂初期硬化後施行。
- (3)施工要依各種塗料的標準施工法施工。

### 4.2.4 混凝土表面破損修補工法

常用之混凝土表面破損修補工法施作程序，如圖 4-7 所示。

#### 1. 混凝土破損處鑿除作業



(1)以破碎機將混凝土破損處鑿除(約 2-3cm)。

(2)以空壓機將鑿除表面之粉塵清除乾淨。

## 2.鋼筋除鏽及防鏽作業

(1)以鋼刷將鋼筋表面鏽斑清除。

(2)將防銹漆塗刷於鋼筋表面，做為防鏽處理。

## 3.破損處保護層修復補強作業

(1)於舊有混凝土表面以混凝土新舊接著劑處理。

(2)以壓克力樹脂拌合預拌式樹脂砂漿作成樹脂砂漿粉刷於混凝土破損表面。

## 4.表面復原處理

(1)於舊有混凝土表面以混凝土新舊接著劑處理。

(2)以壓克力樹脂拌合預拌式樹脂砂漿作成樹脂砂漿噴塗於舊有混凝土表面，噴塗厚度約 2~3mm。

(3)砂漿粉平後恢復原飾面。

### 4.2.5 斷面擴大補強工法

常用之混凝土斷面擴大補強工法施作程序，如圖 4-8 所示。

#### 1.混凝土破損處鑿除作業

(1)以破碎機將混凝土鑿除(約 2-3cm)保護層。

(2)以空壓機將鑿除表面之粉塵清除乾淨。

#### 2.鋼筋除鏽及防鏽作業

(1)以鋼刷將鋼筋表面鏽斑清除。

(2)將防銹漆塗刷於鋼筋表面，做為防鏽處理。

### 3.鋼筋彎紮補強作業

按設計要求之數量及位置，將補強鋼筋彎紮固定於設計位置。

### 4.模板工程

按設計要求之數量及位置，將模板固定於設計位置。

### 5.混凝土灌漿作業

按設計要求之強度、數量及位置，將混凝土澆注於模板內。

### 6.養護

按設計要求，依不同位置進行拆模及養護。

### 7.表面處理

按設計要求，進行表面處理。

## 4.3 修復補強材料之種類

修補材料選擇的基本考量點如圖 4-9 所示。

### 4.3.1 填補用修補材料

#### 1.水泥砂漿

針對混凝土保護層剝落之修復，要求具有低用水量、低乾縮值、良好施工性及與既有混凝土可有效結合，故使用傳統的卜特蘭水泥砂漿為一經濟有效的方法。

#### 2.樹脂砂漿系修補材料

鋼筋混凝土構造發生混凝土保護層剝落時，除可使用上述的水泥砂漿來修補外，尚可以樹脂砂漿系列之修補材料加以修補。樹脂砂漿一般可分為環氧樹脂系砂漿(Epoxy-based mortar)、不飽和聚脂樹脂系砂漿(Unsaturated Polyester-based Mortar)及壓克力樹脂系砂漿

(Acrylic-based mortar)等三大類樹脂砂漿。對工程而言，若能滿足(1)與原混凝土基材充分粘結；(2)強度及耐久性高於原混凝土基材等條件，均可作為混凝土剝落的適宜修補材料。

### 3. 裂縫灌注修補材料

結構體裂縫形成因素繁多，但可確定的為裂縫產生後，必因增加水及空氣的入侵途徑，而影響結構體的耐久性及安全性，是以各國皆對結構體裂縫寬度有所規範（見表 4-1），對於裂縫的修補方式，一般採用外加壓力的方式將修補材料灌入裂縫中，使用的灌注材料有水泥及樹脂類的裂縫灌注材，依修補目的不同而採不同之灌注材料。

#### 4.3.2 補強修補材料

鋼筋混凝土構造物之修復補強工法中，常以外加貼片（鋼板、FRP…）、植入鋼材（螺栓、鋼筋）或擴大原有斷面等方法，以補強原有鋼筋混凝土構造。在既有鋼筋混凝土構造物上，欲外加貼片或植入鋼材，常須採適當之粘結材料加以確實粘結，以確保外加之貼片或植入之鋼材得以有效發揮其補強效果。

##### 1. 粘結材料：

目前在工程界常被採用的粘結用修復補強材料約有(1)粘著外加貼片的環氧樹脂；(2)粘著植入鋼筋的化學膠結劑；(3)粘著植入螺栓專用的化學螺栓固結劑等三類粘結材料。

##### 2. 貼片補強材料：

貼片補強設計的基本要領就是要使補強後的複合結構達到其完全的「撓曲強度」並保證其「韌性」存在，一般常用的材料有鋼板、碳纖維、玻璃纖維、克維拉纖維及 RPC 預鑄材，因此適當選取貼片種類，結構除可達到其最高破壞強度且增加其勁度外，尚可保持韌性破壞模態。完整的貼片設計應是在考慮各類荷重及折減因子後，根據材料極限強度及結構型態決定貼片的使用層數、搭接長度、粘接長度以及端

點附近施加之錨碇或拴接的固定方式。

#### (1)鋼板材料

鋼板貼片補強之鋼材並無特殊規定，一般依設計選取所需之尺寸，並符合 ASTM A183-98<sup>[79]</sup> 規範即可。

#### (2)纖維複合材料<sup>[80-87]</sup>

纖維貼片補強是近年來美、日等先進國家所研發應用在土木工程修復補強方法，FRP 乃由高強度纖維（如碳纖維 Carbon Fiber，玻璃纖維 Glass Fiber 或克維拉纖維 Kevlar）及樹脂（通常是環氧樹脂 Epoxy Resins）在常溫常壓下形成。纖維的排列方式為單向或雙向編織；一般土木工程，於 RC 結構物補強作業時，FRP 往往以手積層或預浸布積層的方式施作。

### 3、擴大原有斷面補強材料

在舊有混凝土斷面，敲除鬆動、腐蝕及品質不良之鋼筋及混凝土，以植筋或安裝點焊鋼絲網方式補強拉力部分，並於其外部灌注補強材料，以擴大斷面方式達到原設計斷面，甚至超越原設計要求。而灌注補強材料可分為下列兩項：

#### (1)無收縮水泥砂漿

無收縮水泥砂漿，係以天然石英骨材、波索蘭材料、無收縮添加劑與彈性乳膠複合而成。其材料必須符合抗壓強度(ASTM C 109)，泌水率(ASTM C 243)，膨脹率(ASTM C 827)及流度(ASTM C 230)之規定。

#### (2)RPC 活性粉混凝土

活性粉混凝土(RPC)具有超高強度、超高韌性和耐久性，自此材料於 1994 年被公開後，發展至今僅有 10 餘年歷史，此種材料在未來混凝土補強工程應用上會是一種重要之材料；由於 RPC 的強度、韌度及耐久性都超過傳統混凝土甚多。未來將會在土木、建築及許多特殊

工程中廣泛地應用，法國所研發的 RPC 不但具有超高 200 MPa (29,000 psi) 的抗壓強度。而且經特殊預鑄製程後更可高達 810MPa (117,500 psi)，且其抗彎強度也是超高的，約為 45MPa (6,500 psi) 抗彎強度，經特殊預鑄製程後更可達到 140 MPa (20,300 psi)，另外其氯離子滲透係數僅為高性能混凝土的 3.3% 或是普通混凝土的 1.8% <sup>[1][5]</sup>，如表 4-2 及表 4-3 所示，故其耐久性能亦相當優異，因此是一種良好的補強材料。

表 4-1 混凝土結構物劣化評等標準<sup>[18]</sup>

判定等級 檢查項目		A	B	C	D
裂縫	雙向裂縫	裂縫寬度大於 0.1 mm，且間隔大於 60 cm	(1)裂縫寬度大於 0.1 mm，且間隔 40~60 cm 間 (2)裂縫寬度小於 0.2 mm，且集中或呈龜甲狀	(1)裂縫寬度大於 0.1 mm，且間隔小於 40 mm (2)裂縫寬度大於 0.2 mm，且集中或呈龜甲狀	混凝土剝落，或有明顯之裂縫預測會剝落，可能造成第三者之障礙
	單向裂縫	裂縫寬度介於 0.1~0.2 mm，且間隔大於 1 m	(1)裂縫寬度大於 0.2 mm，且間隔 50~100 cm 之間 (2)裂縫寬度介於 0.1~0.2 mm，且集中	(1)裂縫寬度大於 0.2 mm，且間隔小於 50 cm (2)裂縫寬度大於 0.2 mm，且集中	混凝土剝落，或有明顯之裂縫預測會剝落，可能造成第三者之障礙
剝落		剝離面積小於 0.1 m <sup>2</sup>	(1) 剝離面積介於 0.1~0.3 m <sup>2</sup> (2) 小塊剝落(直徑小於 50 cm)	(1) 剝離面積大於 0.3 m <sup>2</sup> (2) 大塊剝落(直徑大於 50 cm)	剝落或持續性剝落，可能造成第三者之障礙
蜂窩		局部有蜂窩	面積小於 0.2 m <sup>3</sup> 之蜂窩	面積大於 0.2 m <sup>3</sup> 之蜂窩	—
空洞		(1) 稍有不良聲音 (2) 局部有空洞	(1)面積小於 0.2 m <sup>3</sup> 之空洞 (2)主構件局部有明顯之空洞	面積大於 0.2 m <sup>3</sup> 之空洞	—
彎曲、變形		—	—	—	變形量大於規範之容許值
鋼筋、鋼腱或錨錠部位外露、鏽蝕		—	主筋外露長度小於 30 cm	(1)主筋外露長度 30~50 cm，或主筋局部外露、鏽蝕 (2) PC 鋼材局部外露	(1)主筋外露長度大於 50 cm，或主筋鏽蝕 (2)PC 鋼材外露 50 cm 以上或 PC 錨錠部位外露
滲水及游離石灰、鏽水流出		少量之滲水及游離石灰	(1)滲水及游離石灰，鏽水流出面積小於 0.3 m <sup>3</sup> (2)游離石灰單向發生	(1)滲水及游離石灰，鏽水流出面積大於 0.3 m <sup>3</sup> (2)游離石灰雙向發生，間隔 50 cm 以下	滲水並造成第三者之障礙
基礎入土深度		—	達原設計 4/5 以上	原設計 4/5~2/3	在 2/3 以下
阻水面積比		低於 5 %	介於 5~10 %	高於 10 %	—
橋墩方向與河川流向角度		低於 5 度以下	介於 5~10 度	介於 15~30 度	大於 30 度
異常聲音異常振動		—	有異常之聲音發生	主構件有搖晃之情形，於橋面站立時感覺有異常振動，或因車輛之衝擊有大的異常聲音發生	—
其他損傷		—	—	(1) 端隔梁浮起 (2) 橋面版間隙顯著	—

**表 4-2 RPC 材料特性-力學性質<sup>[1-2]</sup>**

性質	普通 混凝土	高性能 混凝土	玻纖水泥 GRC	活性粉混凝 土 RPC-200	活性粉混凝 土 RPC-800
抗壓強度 (MPa)	10-40	60-100	50-80	170-230	500-810
抗彎強度 (MPa)	3-6	6-10	20-30	30-60	45-140
彈性模數 (GPa)	30-35	35-45	10-20	50-60	65-75

**表 4-3 RPC 材料特性-耐久性質<sup>[1-2]</sup>**

性質	普通混凝土	高性能混凝土	活性粉混凝土
氯離子滲透係數 ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	1.1	0.6	0.02
碳化深度(mm)	10	2	0
凍融試驗脫落量( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	> 1000	900	7
吸水量( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	-	0.35	0.05
腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{年}$ )	-	0.25	< 0.01

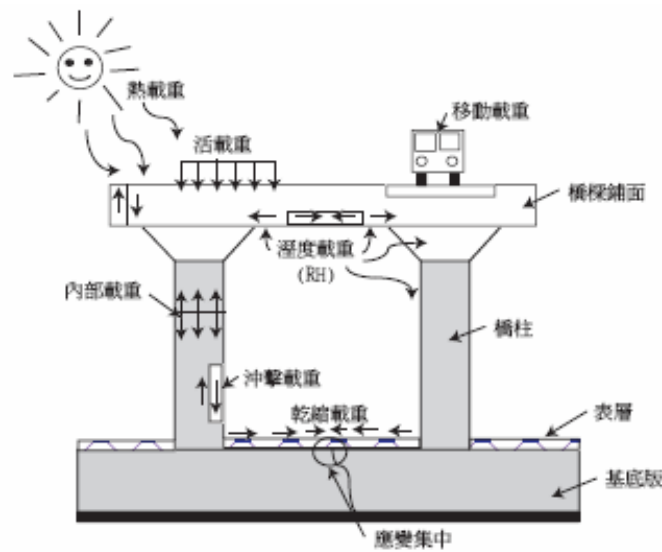


圖 4-1 結構體修補面上可能產生的載重

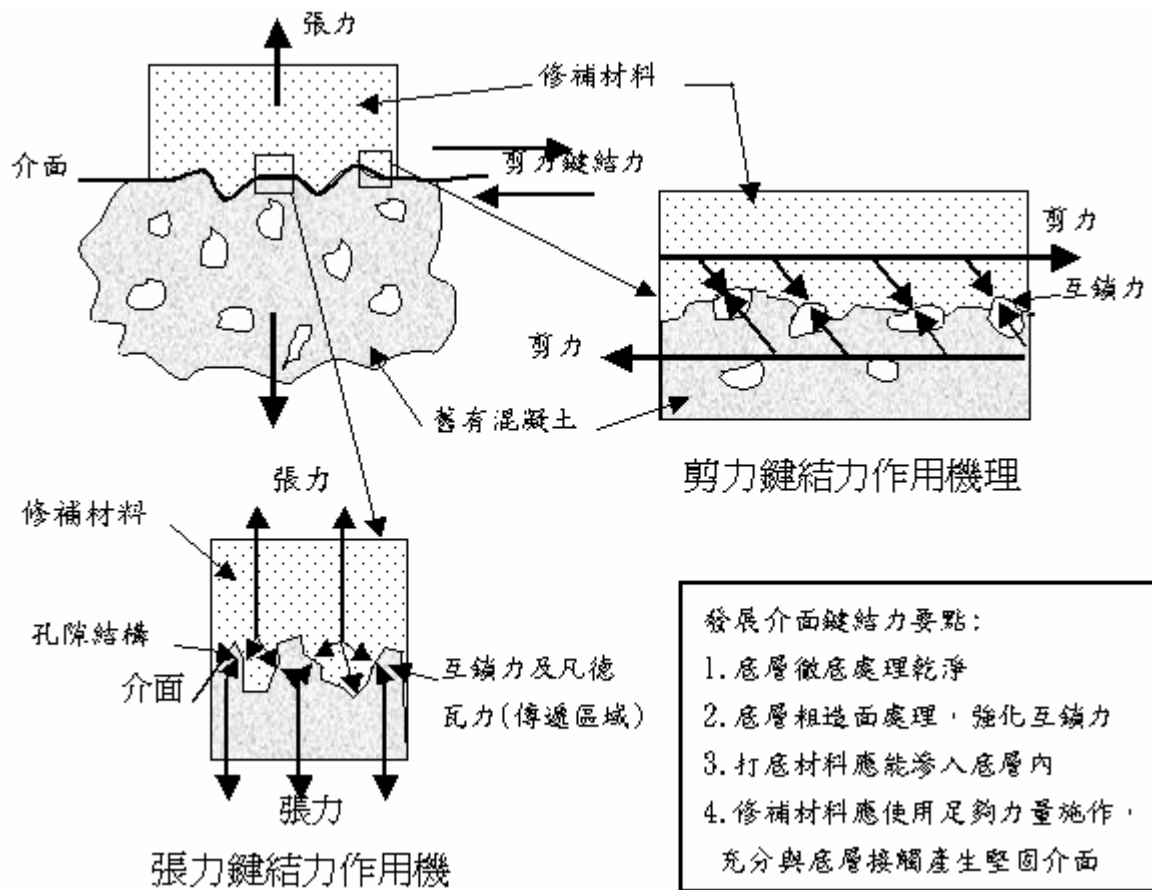
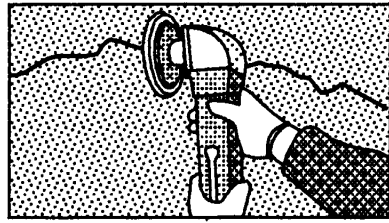
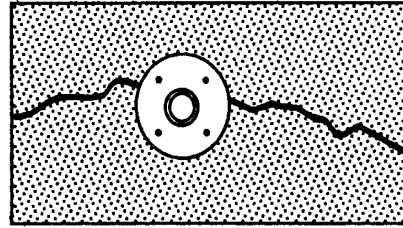


圖 4-2 修補介面鍵結力機構示意圖

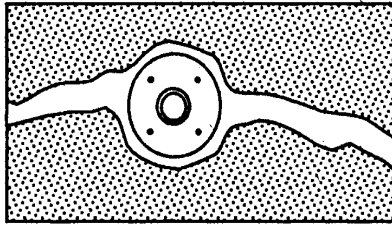




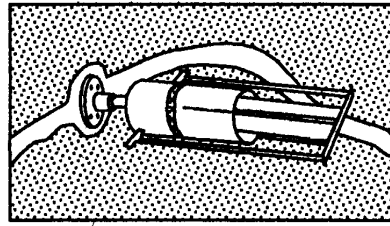
(1) 裂縫表面處理



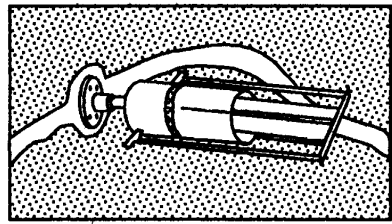
(2) 安置灌注頭基座



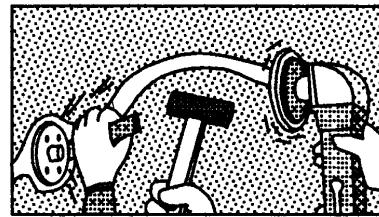
(3) 封塞灌注頭基座及裂縫



(4) 封塞裂縫



(5) 敲除灌注頭及其基座



(6) 表面復原處理

圖 4-3 裂縫灌注修補工法示意圖

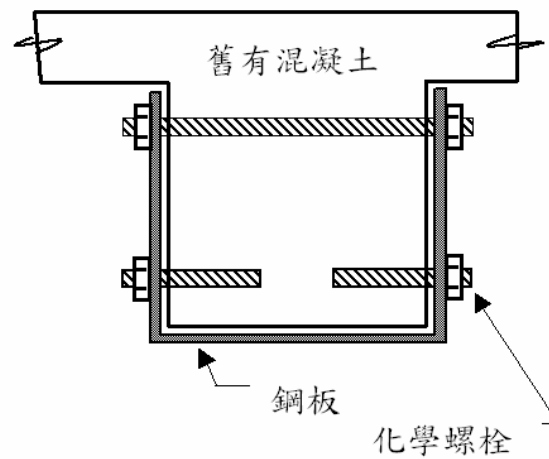


圖 4-4 鋼板補強工法示意圖

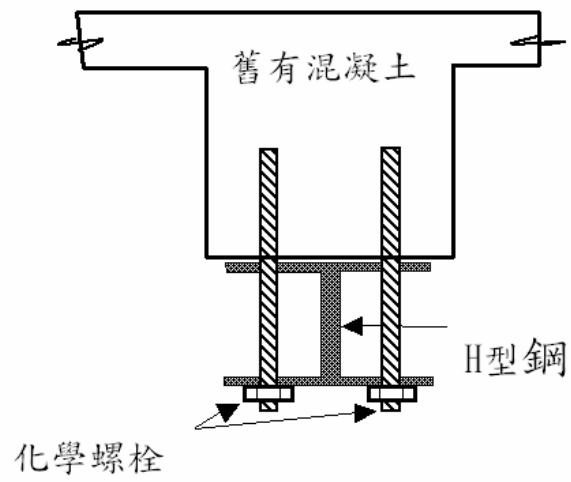


圖 4-5 鋼樑補強工法示意圖

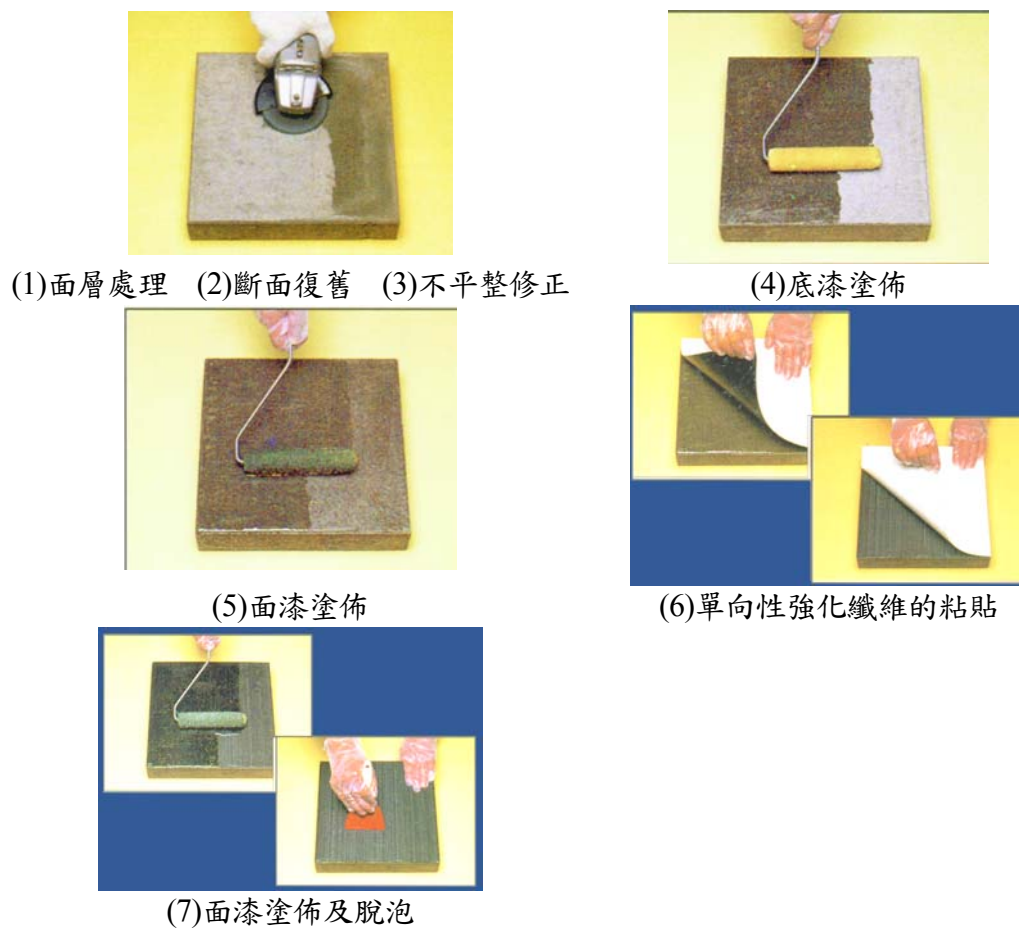
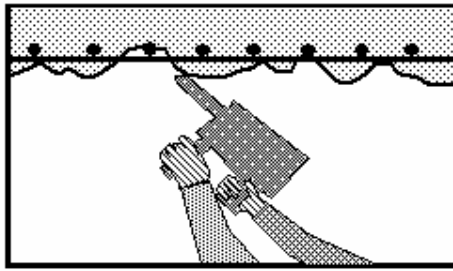
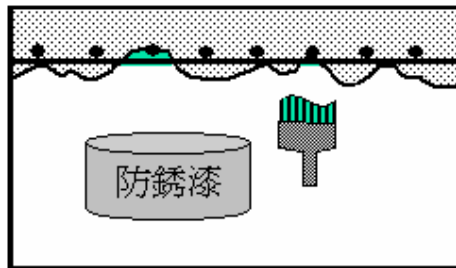


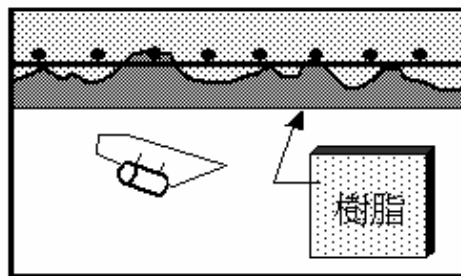
圖 4-6 碳纖維補強工法示意圖



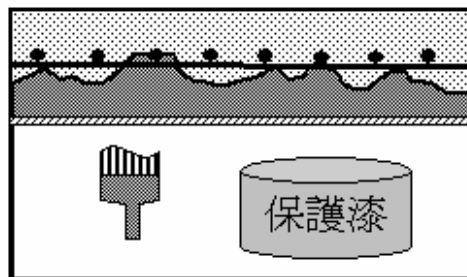
(1)混凝土破損處鑿除作業



(2)鋼筋除鏽及防鏽作業



(3)破損處保護層修復補強作業



(4)表面復原處理

圖 4-7 混凝土表面破損修補工法示意圖

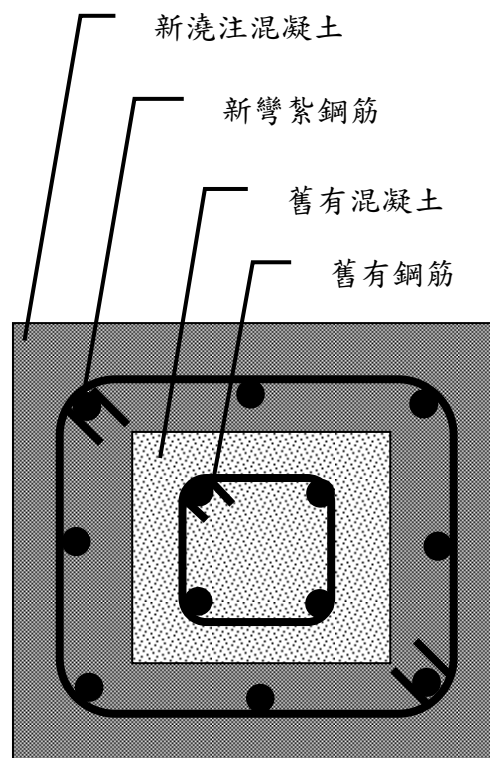


圖 4-8 混凝土斷面擴大補強工法示意圖

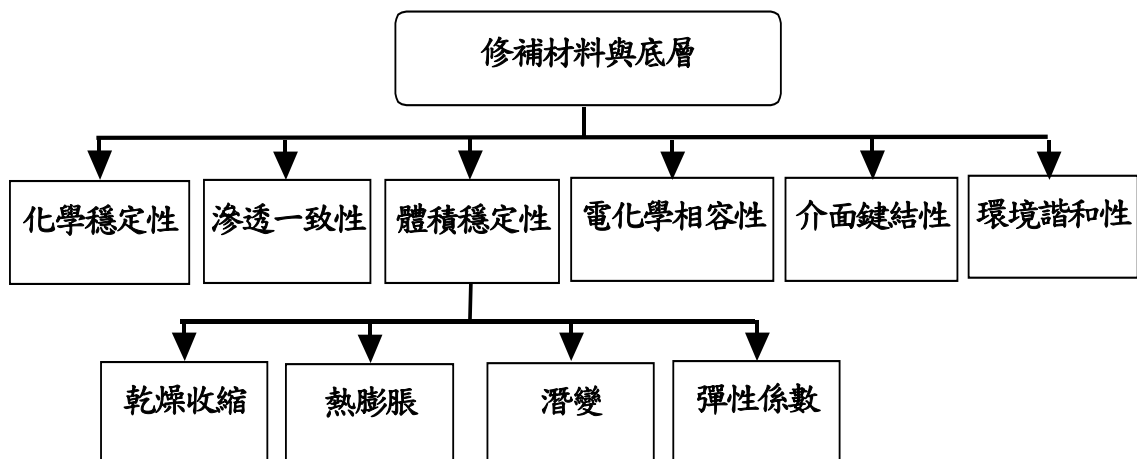


圖 4-9 修補材料選擇之基本考量

## 第五章 試驗計畫

### 5.1 試驗材料

本研究主要研究對象為活性粉混凝土，但為了配合試驗成果比較及補強試驗所需，仍須使用普通混凝土、水泥砂漿、碳纖維強化複合材料、鋼筋及應變計等材料。茲分述於下：

#### 一、活性粉混凝土（RPC）

本年度研究計畫採用第一年計畫中所建議之第15組RPC配比，配比如表5-1所示，其拌合材料茲分述如下：

##### 1.水泥：

使用卜特蘭一型水泥，如照片 5-1 所示，其化學成分與性質如表 5-2、5-3 所示。

##### 2.矽砂：

使用國內生產之矽砂，如照片 5-2 所示， $\text{SiO}_2$  含量高，含泥成分低，耐火性好且粒度控制均勻細緻，粒徑範圍 150~600  $\mu\text{m}$ 。

##### 3.矽灰：

採用國外進口之矽灰，如照片5-3所示，粒徑約0.1~0.2  $\mu\text{m}$ 物理及化學性質列於表5-4。

##### 4.石英粉：

使用國內生產之石英粉，如照片5-4所示，粒徑約5~20  $\mu\text{m}$ ，比重 2.7，為玻璃研磨而得， $\text{SiO}_2$  含量高，約佔99%，與水泥顆粒粒徑屬同等級。

##### 5.飛灰：

採用飛灰為F級飛灰(平均粒徑為23  $\mu\text{m}$ )，如照片5-5所示。

#### 6. 爐石粉：

本研究係採用爐石粉為之特細爐石粉，如照片5-6所示。

#### 7. 拌和水：

本研究之拌和水均取用自來水，水質潔淨且不含油脂、酸、鹼、鹽類、有機物或其它有害物質。

#### 8. 鋼纖維：

使用之鋼纖維，如照片5-7所示，長為10 mm，直徑為0.2 mm，表面光滑經過鍍銅處理呈金黃色，可防止因閒置於空氣中氧化而造成生鏽。

#### 9. 強塑劑：

本研究所使用之強塑劑為羧酸系，如照片5-8所示，其優異之減水及流變性再礦摻料技術應用上，具有良好坍度維持功能，能提高強度及耐久性，符合現代營建工程之需求，採用一次購入的方式，使用前皆予以均勻搖動，防止沉澱，其藥劑特性可分為三點：

- (1) 高效分散工作，優良減水流變特性可降低水灰比提供高強度、高品質的混凝土，經濟效益顯著。
- (2) 具流變效應，可有效控制坍度損失，在運輸時間長仍具有高流動性、高強度需求，所以有緩凝之特性。
- (3) 施工時具有緻密性之功能，充分填充鋼柱內部，亦可降低施工噪音。

### 二、常重混凝土

採用台北地區某預拌廠之預拌混凝土，設計強度為  $210 \text{ kgf/cm}^2$ ，設計坍度 250 mm，具高流動性之高性能混凝土。

### 三、水泥砂漿

係於實驗室內自行拌合製作，配比如表 5-5 所示，其拌合材料茲分述如下：

1. 水泥：使用台灣水泥公司提供之卜特蘭一型普通水泥。
2. 砂：使用國內生產之河砂，粒徑分佈情形如圖 5-1 所示，其細度模數 (F.M.) 為 3.32。
3. 拌和水：同 RPC。

#### 四、碳纖維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymers, CFRP)

本試驗採用的碳纖維貼片是由國內生產之UCP-200型CFRP貼片，如照片 5-9 所示。CFRP 貼片之物理性質及測試規範列於表 5-6。

用 CFRP 貼片黏貼於混凝土試體表面尚需依靠黏結劑黏結，其黏結劑包括底漆及積層樹脂。

##### (1) 底漆 (primer)：

底漆分為主劑與硬化劑二種，如照片 5-10 所示，其物理性質與測試規範列於表 5-7，使用時依重量比例為主劑：硬化劑=100：50 調製而成，用攪拌器攪拌使二種劑量能均勻混合，塗抹於混凝土表面，使得 CFRP 貼片能與混凝土表面的接觸更加緊密，並且防止混凝土碎塊的剝落。

##### (2) 積層樹脂：

底漆亦分為主劑與硬化劑二種，如照片 5-11 所示，其物理性質與測試規範如表 5-8 所示，使用時依重量比例為主劑：硬化劑=100：50 調製而成，用攪拌器攪拌使二種劑量能均勻混合。積層樹脂與底漆皆屬熱固性環氧樹脂，用途為黏結 CFRP 貼片於混凝土表面，並在 CFRP 貼片表層塗抹一層積層樹脂以膠結纖維材料。

#### 4. 鋼筋

本研究計劃中縮小尺寸鋼筋混凝土梁、柱試體部分，其內部需配置

鋼筋，故採用#3、#4及#5三種竹節鋼筋號數，如照片5-12所示，依照縮小尺寸鋼筋混凝土梁及柱試體所需的內部配置，根據CNS規範對主筋及箍筋做裁切及彎曲處理，如圖5-2所示。

## 5.應變計

本研究所使用之應變計為TML PFL-30-11-3L之應變計，其長度規格可依實驗之需求做選擇，本研究中所使用之應變計長度選用30 mm，附有3公尺導線，其規格係數如表5-9。

## 5.2 試驗儀器及設備

### 1.電子秤

載重達3000 g，精度0.2 g，並有歸零裝置。

### 2.拌和機

符合CNS C3655 之小型拌合機，如照片5-13所示，用於活性粉混凝土(RPC)及水泥砂漿之拌和。

### 3.流動台

符合CNS-1012 之流動台，如照片5-14所示，用以測定工作度。

### 4.流度錐

為符合CNS-1012 之流動台之附屬配件，如照片5-14所示，為上直徑7公分、下直徑10公分、高度5公分之錐型銅模。

### 5. 200 T 萬能試驗機

為型號HT-8391PC，內部試驗垂直空間400 mm、水平空間380 mm，油缸行程可達70 mm，最大力量噸數可到200T，用以測定混凝土試體之強度，如照片5-15所示。

### 6.資料截取系統



為 Instronet Model 100 資料截取系統具 16 個頻道，如照片 5-16 所示，用來截取並記錄載重規 (Load Cell)及應變計 (Strain Gauge)所得到之數值。

## 7. MTS 600 T 萬能試驗機

為國立台灣科技大學結構實驗室所提供之 MTS 600 T 萬能試驗機，如照片 5-17 所示，作為縮小尺寸梁柱補強載重試驗。

## 5.3 試驗項目

### 5.3.1 基本力學試驗

對於本研究中之活性粉混凝土及常重混凝土等水泥質材料，將進行流度試驗與各齡期之抗壓強度、劈裂強度、抗彎強度、彈性模數與卜松比量測等基本力學試驗，其試驗齡期項目及數量如表5-10所示。

### 5.3.2 碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗

本研究之補強成效試驗項目分為以下三部份：

- 1.以水泥砂漿做為基材製作抗彎試體，底部澆灌1 cm厚之活性粉混凝土，並進行抗彎試驗。
- 2.以混凝土做為基材製作抗壓試體，外圍澆置1 cm厚之活性粉混凝土與碳纖維貼片做為補強，並進行抗壓試驗。
- 3.常重混凝土灌製之鋼筋混凝土梁與柱做為補強基材，利用碳纖維貼片與活性粉混凝土分別進行梁側邊與圓柱圍束補強，試體尺寸項目齡期如表5-11所示，分別比較兩種不同補強材料之補強成效與特性，並將建立活性粉混凝土補強工法程序與分析計算模式，以驗證第一年活性粉混凝土之補強成效。

## 5.4 試驗方法

### 5.4.1 流度試驗

活性粉混凝土之工作性測試係比照水泥砂漿，依ASTM C230M-03規定進行流度試驗，先以濕布將流度台及流度錐潤濕擦拭乾淨，再將流度錐放置流度台中央，分二層填入活性粉混凝土，每層搗實25下，再用刮刀將超過錐頂的水泥砂漿刮平，然後將流度錐提起，並啟動電動式流度台，於15秒內跌落25次，量取水泥砂漿之平均直徑，並依下式流度值：

$$Flow(\%) = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \times 100\% \quad (5-1)$$

其中，D1：錐底直徑，

D2：量得之水泥砂漿平均直徑。

### 5.4.2 基本力學試驗

#### 1. 抗壓試驗

抗壓強度是水泥質材料品質檢驗最重要之標的，亦是混凝土結構設計之依據。在抗壓試驗中，加載的速率及時間與試體的含水率皆會影響混凝土抗壓強度。若加載速率過快且時間過短，所測得的強度會比正常高出約15 %；若加載時間過長，所測得的強度則會比正常低約30 %。因為活性粉混凝土之抗壓強度，比高性能混凝土高出許多，為避免加載時間過長，所以本研究抗壓試驗之加載速率為每秒4.5~7.14 kgf/cm<sup>2</sup>，每組三個圓柱試體，依據ASTM C31、C192、C617之規定，活性粉混凝土試體尺寸比照一般水泥砂漿為 Φ 50×100 mm，普通混凝土試體尺寸 Φ 100×200 mm，並於飽和石灰水中養護，測試時石膏蓋平試體表面，以200T電腦式自動抗壓試驗機測試試體。

## 2. 彈性模數與卜松比量測

彈性模數 $E_c$ 與卜松比 $\nu$ 為結構計算中重要之材料參數，其量測方式係於待測試體表面上之軸向與側向黏貼應變計，並連接至截取系統上，利用系統程式直接讀取試體在受壓過程中加載與應變之曲線，藉由所繪得之應力應變曲線計算彈性模數與卜松比。

## 3. 劈裂試驗

藉由劈張試驗可間接求取混凝土之抗拉強度，試體分為普通混凝土與活性粉混凝土兩種，普通混凝土試體尺寸為  $\Phi 100 \times 200 \text{ mm}$ ，活性粉混凝土試體尺寸為  $\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$  圓柱試體，根據ASMT C469-96或CNS 3801 進行試驗，以每分鐘7~14  $\text{kgf/cm}^2$ 之加載速率加壓，直到圓柱試體裂成兩半，求得材料張力強度，其計算式如下：

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi dh} \quad (5-2)$$

式中 $f_{ct}$ ：材料劈張強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

P：最大荷重 ( $\text{kgf}$ )

d：試體直徑 ( $\text{cm}$ )

h：試體高度 ( $\text{cm}$ )

## 4. 抗彎試驗

活性粉混凝土抗彎試驗係依 ASTM 之規定，採三分點載重方式進行，試體尺寸大小為  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ ，加壓直至試體破壞，記錄最大破壞載重，其破裂模數計算式如下：

$$f_r' = \frac{PL}{bh^2} \quad (\text{當破壞面在中心點} L/3 \text{之內}) \quad (5-3)$$

$$f_r' = \frac{3PL}{bh^2} \quad (\text{當破壞面在中心點} L/3 \text{之外，不超過} 0.05L) \quad (5-4)$$

式中 $f_r'$ ：破裂模數( $\text{kgf/cm}^2$ )；

P：最大荷重(kgf)；

L：跨距(cm)；

b：試體寬度(cm)；

h：試體高度(cm)。

### 5.4.3 碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗

#### 一、抗彎性能補強

以水泥砂漿製作抗彎試體，於底部貼附 1 cm厚之RPC補強材料，如圖5-3所示，並分別在RPC齡期 3天、7天、28天、56天、90天，依CNS或ASTM規範進行抗彎試驗，量測抗彎強度，進行補強後之破壞行為探討。

#### 二、抗壓性能補強

以混凝土灌製標準與縮小斷面圓柱試體，分別以未包覆、包覆一層CFRP貼片及1 cm厚 RPC補強材料等三種方式，如圖5-4所示，依CNS或ASTM規範進行抗壓試驗，量測抗壓強度，並貼附應變計記錄應力應變曲線。

#### 三、縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體規劃

製作 NC 組 R.C.圓柱試體，分別包覆一層 CFRP 貼片及 1 cm 厚 RPC 材料，其中主筋、腰部箍筋與混凝土表面貼上應變計，在鋼筋混凝土柱試體外圍分別包覆 CFRP、RPC 材料與未包覆，如圖 5-5 所示，按 CNS 或 ASTM 規範進行抗壓試驗，量取其抗壓強度，並記錄應力應變曲線，應變計貼附位置如圖 5-7 所示，用以評估不同方式之補強成效。

##### 1.NC 組：

試體標稱尺寸  $\phi 28.5 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 2$  支，試體採用 6 支#5 為主筋，#3 為箍筋，間距 9.2 cm。

## 2.CFRP 組：

試體標稱尺寸  $\phi 28.5 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 2$  支，試體採用 6 支#5 為主筋，#3 為箍筋，間距 9.2 cm，外圍進行 1 層 CFRP 補強。

## 3.RPC 組：

試體標稱尺寸  $\phi 28.5 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 2$  支，試體採用 6 支#5 為主筋，#3 為箍筋，間距 9.2 cm，外圍進行 1 cm 厚 RPC 補強。

## 四、縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體規劃

製作縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體，一組立面兩側包覆一層 CFRP 貼片，另一組立面兩側各灌注 1 cm 厚 RPC 材料，如圖 5-6 所示，內部縱向鋼筋貼上應變計，混凝土表面亦埋設應變計，按 CNS 或 ASTM 規範進行三分點抗彎試驗，量取其抗彎強度，比較其立面兩側包覆 CFRP、RPC 材料與未包覆之 NC 試體三者抗彎、抗剪強度之差異；並記錄應力應變曲線，應變計及位移計架設位置如圖 5-8 所示，用以評估不同方式之補強成效。

### 1.NC 組：

試體標稱尺寸  $16 \text{ cm} \times 24 \text{ cm} \times 210 \text{ cm} \times 2$  支，試體採用 5 支#4 為主筋，#3 為箍筋，間距 10 cm。

### 2.CFRP 組：

試體標稱尺寸  $16 \text{ cm} \times 24 \text{ cm} \times 210 \text{ cm} \times 2$  支，試體採用 5 支#4 為主筋，#3 為箍筋，間距 10 cm，兩側面進行 1 層 CFRP 補強。

### 3.RPC 組：

試體標稱尺寸  $16 \text{ cm} \times 24 \text{ cm} \times 210 \text{ cm} \times 2$  支，試體採用 5 支#4 為主筋，#3 為箍筋，間距 10 cm，兩側面進行 1 cm 厚 RPC 補強。

表 5-1 活性粉混凝土(RPC)配比表 (kg/m<sup>3</sup>)

石英砂				飛灰	石英粉	矽灰	爐石粉	水泥	水	強塑劑	鋼纖維
#30	#50	#100	#200								
413	296	206	146	166	70	79	184	553	165	41	156

表 5-2 卜特蘭第一型水泥之物理性質

物理性質	細度		330 m <sup>2</sup> /kg
	正常稠度用水量		-
	假凝結		85 min
	凝結時間	初凝	2.1 hr
		終凝	3 hr
	健度		0.04%
	抗壓強度	3 天	197 kgf/cm <sup>2</sup>
		7 天	296 kgf/cm <sup>2</sup>
		28 天	410 kgf/cm <sup>2</sup>

表 5-3 卜特蘭第一型水泥之化學性質

化 學 成 分	二氧化矽 SiO <sub>2</sub>	21.32%
	氧化鋁 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.17%
	氧化鐵 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10%
	氧化鈣 CaO	64.5%
	氧化鎂 MgO	2.17%
	三氧化硫 SO <sub>3</sub>	1.93%
	游離石灰(Free Lime)	0.75%
	燒失量(L.O.I.)	0.56%
	不溶殘渣	0.2%
	矽酸三鈣 C <sub>3</sub> S	45
	矽酸二鈣 C <sub>2</sub> S	26
	鋁酸三鈣 C <sub>3</sub> A	11.1
	鋁鐵酸四鈣 C <sub>4</sub> AF	9.4

表5-4 矽灰基本性質試驗報告

試驗項目	單位	試驗結果	規範
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )	%	94.59	ASTM C1240
燒失量(LOI)	%	0.97	
細度(NO.325 濕篩法通過量)	%	93.65	
與水泥拌和 7 天之活性指數	%	98.47	
比重	-	2.22	
※備註： 試驗地點—國立中興大學&台灣電力公司混凝土試驗研究中心			

表 5-5 水泥砂漿配比表 (kg/m<sup>3</sup>)

水	水泥	砂	強塑劑
235	392	1636	0.98

表5-6 碳纖維貼片基本性質表

	結果	測試規範
纖維種類	高強度碳纖維	—
纖維重量(g/m <sup>2</sup> )	200	ASTM D3776 JIS K7071
纖維比重	1.80	—
設計厚度(cm/ply)	0.011	—
抗拉強度(kgf/cm/ply)	≥ 390	—
設計抗拉強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	42000	—
抗拉彈性係數(kgf/cm/ply)	≥ 25800	—
設計抗拉彈性係數(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.35±0.35×10 <sup>6</sup>	—
破壞極限應變	0.018	—
厚度(cm/layer)	0.011	—
纖維伸長率(%)	≥ 1.5	ASTM D3039 JIS K7073

表 5-7 底漆基本性質表

		試驗規範	測試結果
固成份(%)		CNS 13069	99.80
接著強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	乾燥面	CNS 11053 JIS 5400	5.3
	濕潤面	CNS 11053 JIS 7113	30.3
※備註：試驗地點－工業技術研究院化學工程研究所			



**表 5-8 積層樹脂基本性質表**

	試驗規範	測試結果
固成份(%)	CNS 13069	99.80
抗張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	ASTM D638，JIS 7113	520
抗張彈性係數(kgf/cm <sup>2</sup> )	ASTM D638，JIS 7113	30500
彎曲強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	ASTM D790，JIS 7203	920
抗張剪切強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	ASTM D1002，JIS 6850	162
※備註：試驗地點－工業技術研究院化學工程研究所		

**表 5-9 應變計規格表**

Gauge length	30 mm
Gauge factor	2.13 ± 1%
Gauge resistance	120.4 ± 0.5 Ω
Temp. compensation	11 ×10 <sup>-6</sup> /°C
Transverse sensitivity	-0.7 %
Lead wires	10 / 0.12 3m

表 5-10 水泥質材料基本力學試驗試體數量表

試體 名稱	試體 尺寸	試驗項目	試驗齡期					
			新拌	3 天	7 天	28 天	56 天	90 天
活性粉 混凝土	$\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$	1.流度試驗	2	—	—	—	—	—
		2.抗壓試驗	—	3	3	3	3	3
		3.E、 $\nu$ 量測	—	3	3	3	3	3
		4.劈裂試驗	—	3	3	3	3	3
常重 混凝土	$\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$	1.流度試驗	2	—	—	—	—	—
		2.抗壓試驗	—	3	3	3	3	3
		3.E、 $\nu$ 量測	—	3	3	3	3	3
		4.劈裂試驗	—	—	3	3	—	3

表 5-11 補強性能試驗試體數量表

	試體尺寸	試驗項目	試驗齡期				
			3 天	7 天	28 天	56 天	90 天
Mortar / RPC	40 mm×40 mm×160 mm	抗彎補強試驗	3	3	3	3	3
NC 圓柱試體 (控制組)	$\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$	抗壓補強試驗	3	3	3	3	3
CFRP 組補強 圓柱試體	$\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 外圍包覆一層 CFRP 貼布		3	3	3	3	3
RPC 組補強 圓柱試體	$\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 外圍包覆 1cm 厚 RPC		3	3	3	3	3
NC 組	240 mm×160mm×2100mm	三分點 抗彎試驗	—	—	2	—	—
CFRP 組			—	—	2	—	—
RPC 組			—	—	2	—	—
NC 組	$\phi 285 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$	抗壓試驗	—	—	2	—	—
CFRP 組			—	—	2	—	—
RPC 組			—	—	2	—	—

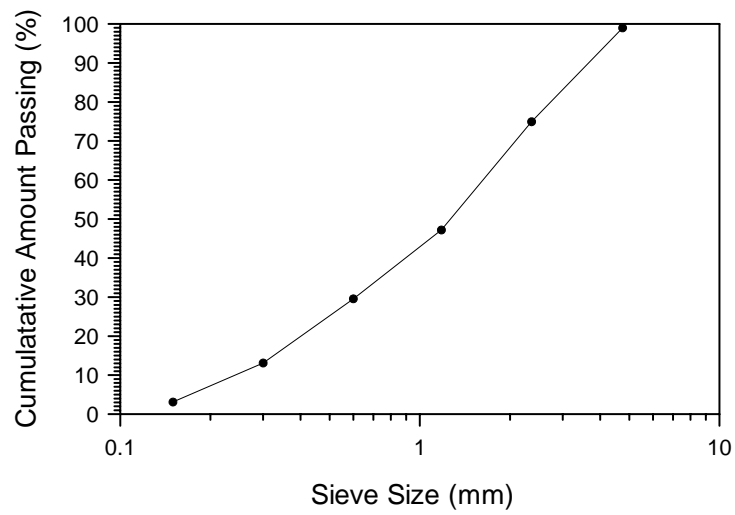


圖 5-1 細粒料粒徑分佈圖

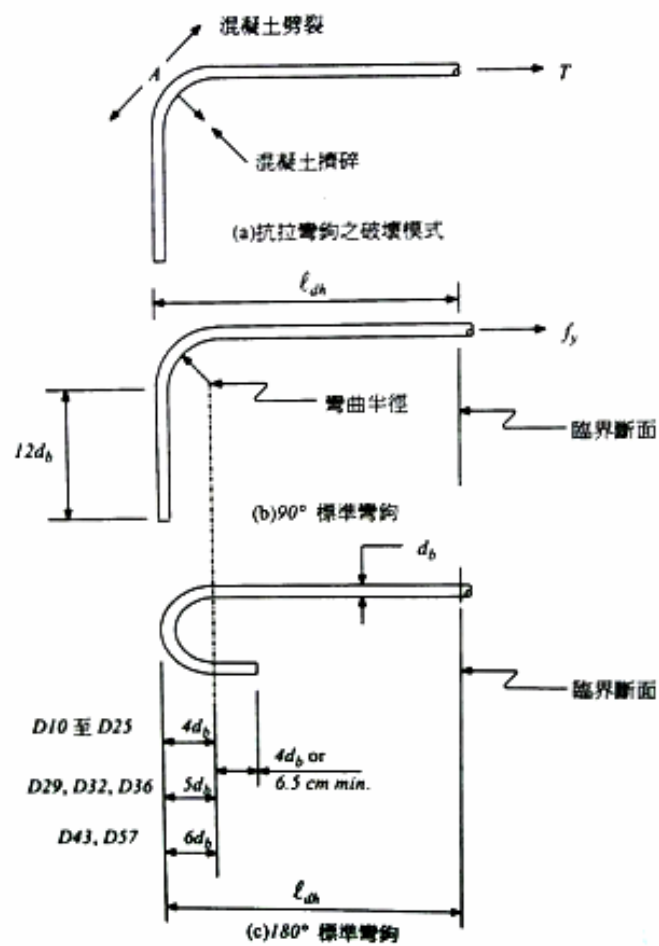


圖 5-2 鋼筋彎鉤規範示意圖 [18]

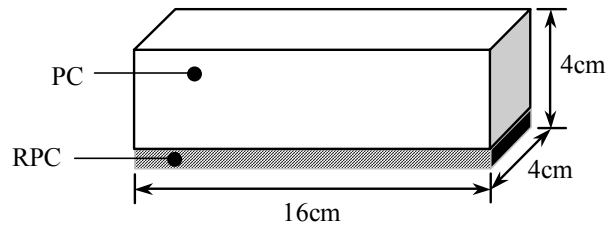
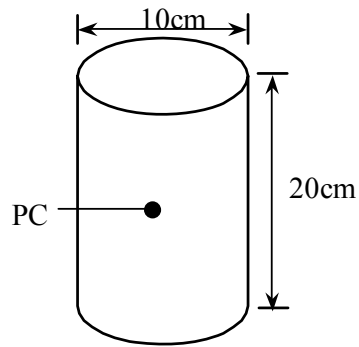
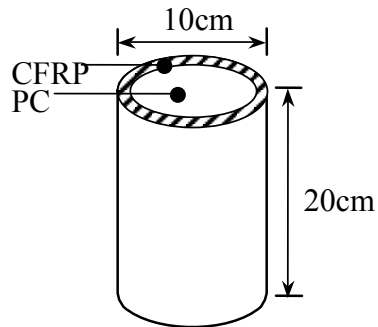


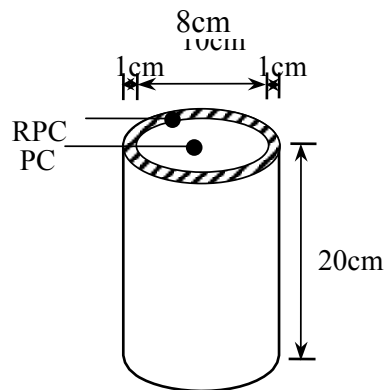
圖 5-3 RPC 抗彎補強試驗試體



(a) NC 控制組

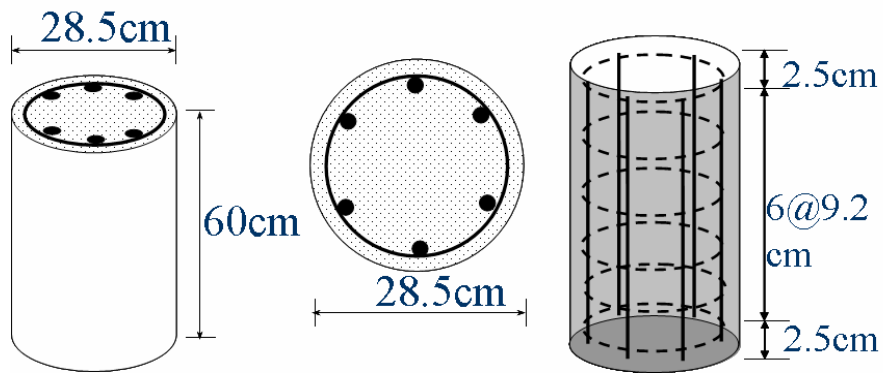


(b) CFRP 組

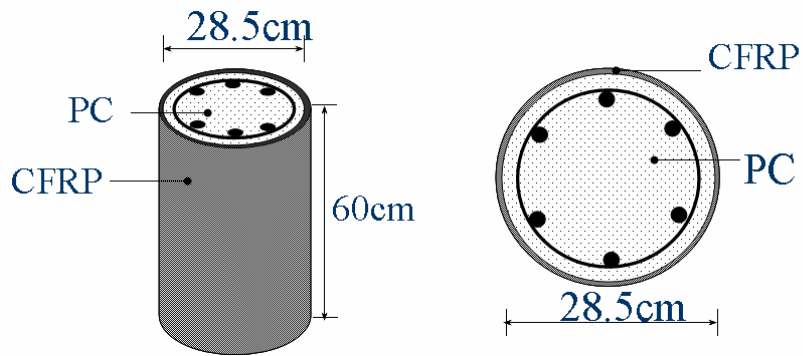


(c) RPC 組

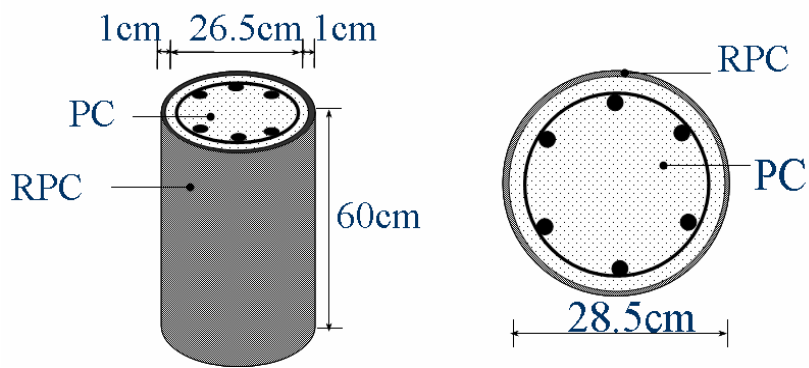
圖 5-4 抗壓性能補強試驗



(a) NC 控制組

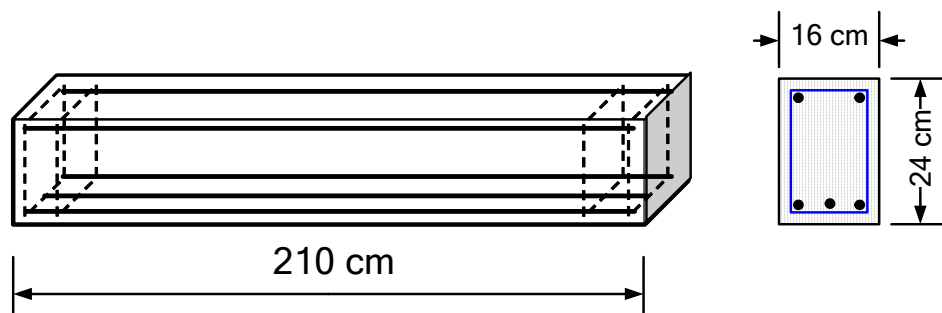


(b) CFRP 組

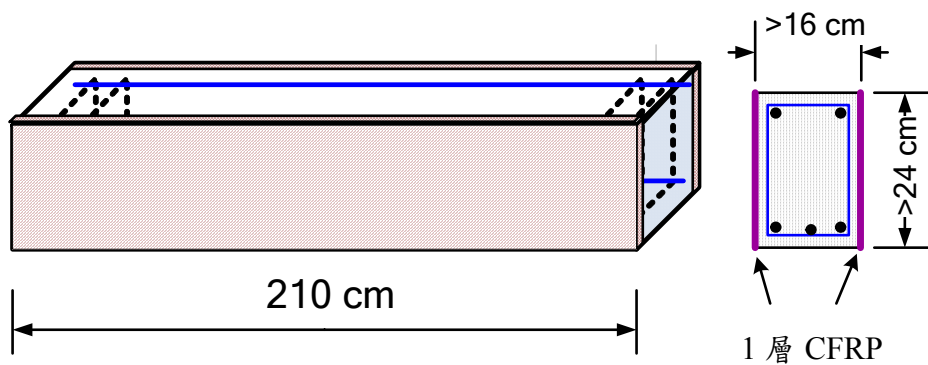


(c) RPC 組

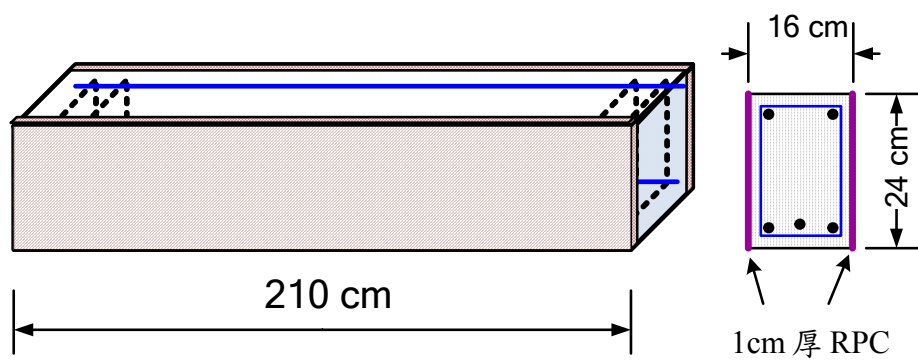
圖 5-5 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體



(a) NC 控制組



(b) CFRP 組



(c) RPC 組

圖 5-6 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體

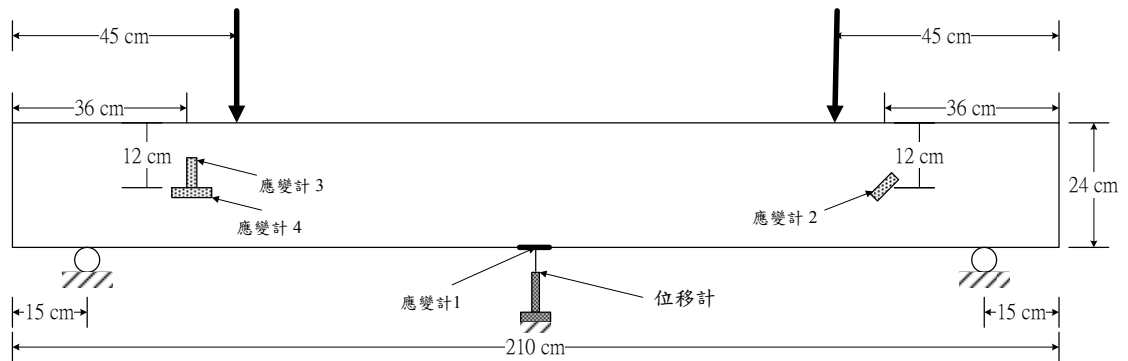


圖 5-7 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體應變計及位移計架設位置

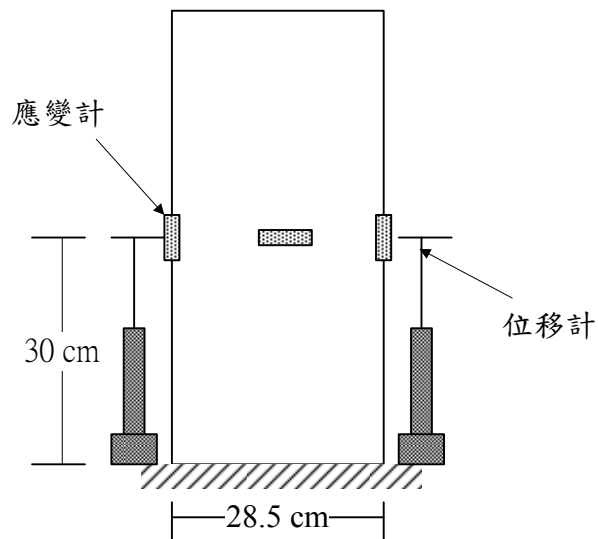


圖 5-8 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體應變計及位移計架設位置



照片 5-1 波特蘭第一型水泥



照片 5-2 矽砂



照片 5-3 矽灰





照片 5-4 石英粉



照片 5-5 飛灰



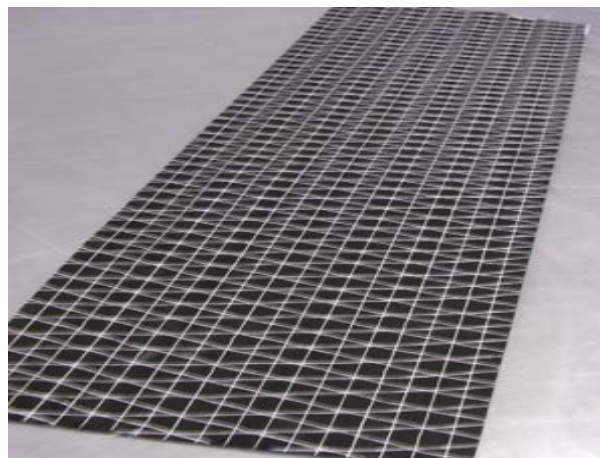
照片 5-6 爐石粉



照片 5-7 鋼纖維



照片 5-8 強塑劑



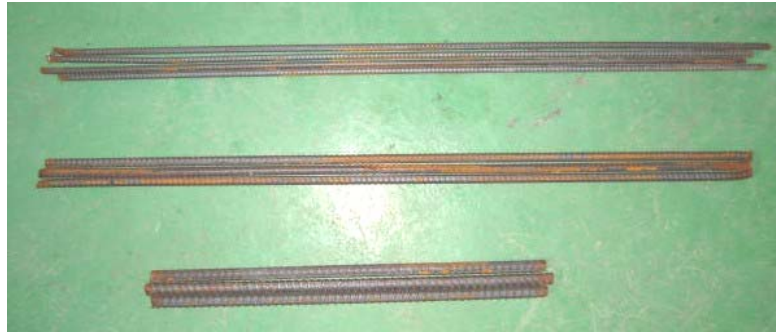
照片 5-9 碳纖維貼片



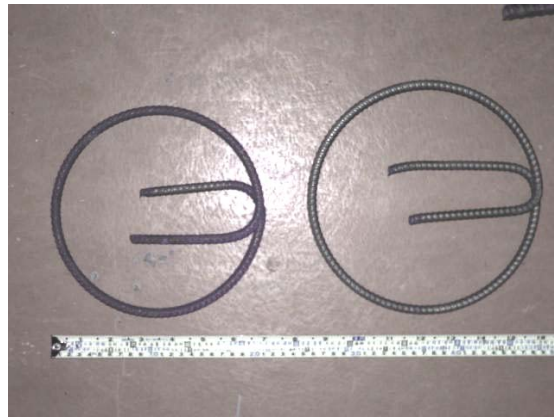
照片 5-10 底漆



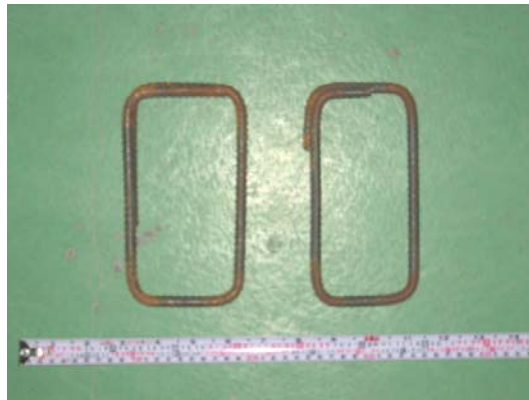
照片 5-11 面漆



(a) #3、#4 及#5 鋼筋



(b) #3 圓箍筋



(c) #3 方箍筋

照片 5-12 鋼筋





照片 5-13 拌和機



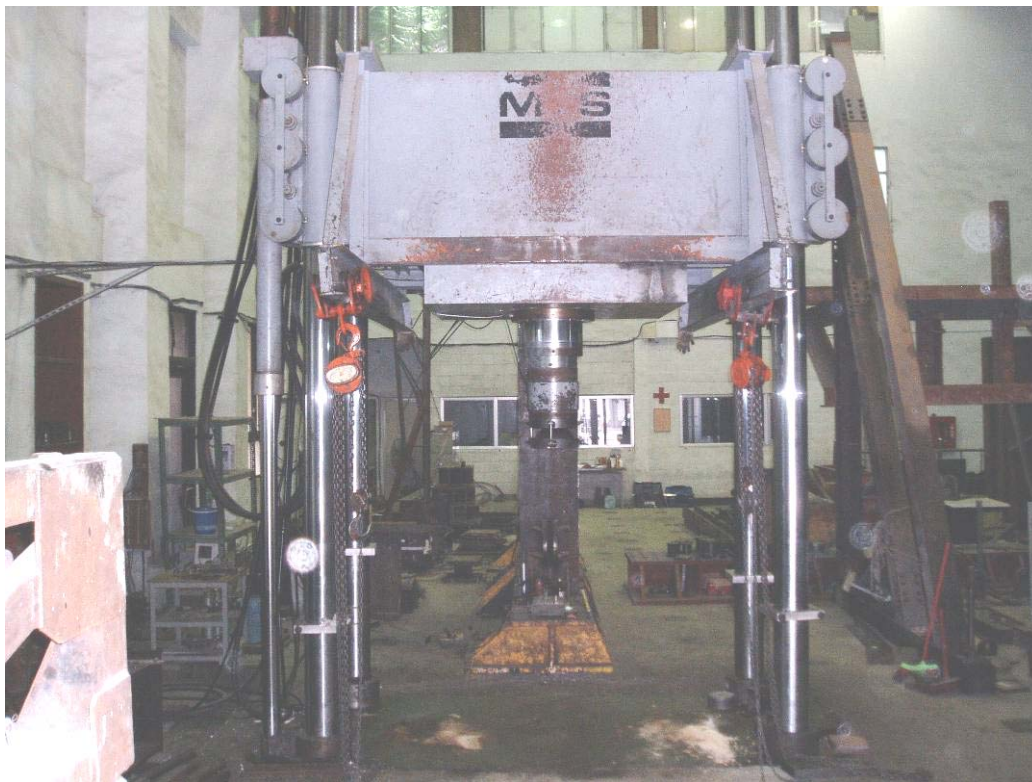
照片 5-14 流度台



照片 5-15 200T 電腦式自動抗壓試驗機



照片 5-16 資料截取系統



照片 5-17 MTS 600 T 萬能試驗機

## 第六章 試驗成果與討論

本研究中水泥質材料之基本力學試驗、柱補強性能試驗與梁補強性能試驗結果，茲分述如下：

### 6.1 水泥質材料之基本力學性質

#### 1. 工作性

RPC 流度試驗結果如表 6-1 所示，平均直徑約 240 mm，流度達 140 %，於本年度研究中更改強塑劑型號之後，工作性獲得相當程度改善，已能符合現場進行補強施工所需。

用以灌注被補強基材之 NC，係採用高流動性預拌混凝土，經實際進行坍度試驗後，結果如表 6-2 所示，平均坍度達 233 mm，具有相當好的工作性，澆灌時只需少許震動即可充滿角隅。

#### 2. 抗壓強度

RPC、NC、Mortar 於不同齡期的抗壓強度試驗結果如表 6-3 及圖 6-1 所示，從圖中可明顯看出 RPC 早期強度發展緩慢，3 天與 7 天齡期之抗壓強度幾乎並無太大差異，28 天齡期之抗壓強度僅達 85.67 MPa，強度不若國內外相關研究，主要係因在本研究中考量修補材料與基材兩者之諧和性，故不採用高溫高壓之養護方式來提高 RPC 之強度，但隨著齡期發展，由於內部卜作嵐材料（爐石、飛灰等）產生卜作嵐反應，致使結構更為緻密，抗壓強度便明顯提升，至 90 天齡期時抗壓強度提升為 114.08 MPa。

NC 的抗壓強度發展則與 RPC 不同，從圖 6-1 中可看出，抗壓強度於初期迅速提升，28 天齡期時抗壓強度為 30.17 MPa，而晚期強度發展趨緩，90 天齡期僅為 37.30 MPa。另外，Mortar 的抗壓強度發展在 7 天齡期時達 20.29MPa，之後無明顯提升，28 天與 90 天齡期時抗



壓強度分別為 21.07 MPa、23.43 MPa，此一強度發展趨勢與 NC 相似。

### 3. 劈裂強度

RPC 與 NC 劈裂強度試驗結果如表 6-4、圖 6-2 所示，RPC 與 NC 之劈裂強度發展與抗壓強度一致，RPC 於早期發展緩慢晚期，28 天齡期之劈裂強度為 12.41 MPa，至 90 天齡期時則明顯提升至 13.59 MPa。NC 之劈裂強度於 28 天齡期時達 2.89 MPa，之後發展漸緩，90 天齡期之劈裂強度為 3.68 MPa。

由照片中可明顯看出，因 RPC 試體中含有鋼纖維，在試體破壞後仍達到牢繫膠結材料之效果，使試體並未完全碎裂，仍保持原型。

### 4. 彈性強度與卜松比量測

彈性模數與卜松比的量測結果，如表 6-5 及圖 6-3 所示，由圖中可知 Mortar 的彈性模數發展最快，約在 7 天齡期已大致發展完成，而 RPC 與 NC 的彈性模數則在 28 天齡期後緩慢提升。RPC、NC 與 Mortar 在 28 天齡期時的彈性模數分別為 41.66、24.96、20.55 GPa， $E_{RPC}/E_{NC}$  與  $E_{RPC}/E_{Mortar}$  分別為 1.67、2.03，當齡期為 90 天時，RPC、NC 與 Mortar 的彈性模數分別為 42.63、27.40、21.01 GPa， $E_{RPC}/E_{NC}$  與  $E_{RPC}/E_{Mortar}$  分別為 1.55、2.03。另外，三種材料之卜松比在七天齡期之後皆相當接近，約 0.19 至 0.21 之間，由此可知，以 RPC 進行水泥砂漿基材或混凝土基材修補作業，可以得到很好之材料相容性，對於修補成效有很大的助益。

### 5. 綜合討論

綜合上述結果，可知在基本力學性質表現方面，Mortar 和 NC 的抗壓強度、劈裂強度及彈性模數在養護初期便大致發展完成，RPC 則因添加卜作嵐材料（矽灰、爐石及飛灰）且未經高溫高壓催化，故直到 28 天齡期後才逐漸發展。另外，由於 RPC 彈性模數與卜松比相當接近，使用 RPC 進行 R.C. 修補作業，將有很好之修補成效。

## 6.2 小型抗彎抗壓補強成效

### 1. 水泥砂漿抗彎補強成效

Mortar 抗彎補強成效試驗結果如表 6-6 所示，本試驗中之實驗組試體製作係先澆灌 Mortar，待其終凝後再澆灌 RPC，故兩種材料之齡期相同，其中未補強 Mortar 在 28 天齡期時強度達到最高，而經 RPC 補強後，抗彎強度可提升 38.10%，效果顯著。隨著齡期增加，未補強之 Mortar 抗彎強度有逐漸下降的趨勢，即便如此，經 RPC 補強後，抗彎強度仍可提升超過 40%。

### 2. 混凝土圓柱抗壓補強成效

混凝土圓柱抗壓補強成效試驗結果如表 6-7 所示，其中未補強 NC 組其抗壓強度與彈性模數於不同補強齡期緩慢上升，主要係因本試驗在 NC 養護 28 天，才進行 RPC 與 CFRP 補強，當時其強度已大致發展完成。以 RPC 補強縮小斷面 NC 圓柱 1 cm 之補強成效在 3 天補強齡期時，提升率僅 0.12%，但隨著補強齡期增加，補強成效就愈明顯，在 90 天補強齡期時提升率已達 26.56%，另外，經 RPC 補強後會提高材料彈性模數與卜松比，此一現象顯示以 RPC 補強後能承受較多的載重，但側向變形也相當顯著。

另外，以 CFRP 補強 NC 圓柱之補強成效在不同補強齡期皆很穩定，補強後抗壓強度約 51.94 MPa ~ 55.28 MPa，較 RPC 補強後的抗壓强度高，而 CFRP 補強前後之材料彈性模數與卜松比則無太大變化。

### 3. 綜合討論

根據上述成果可知，由於 RPC 係為水泥質材料，在無高溫高壓的養護條件下，其補強效果無立即性，須隨著其強度發展才有明顯之補強成效，在補強齡期 28 天後，對於 Mortar 的抗彎補強成效超過 38%，對於 NC 的抗壓補強成效則超過 13%，其補強機制係利用 RPC 具高彈性模數之特性，與內部 NC 組成複合材料，以承載較高之軸向載重，

這點可由補強後材料之彈性模數介於 NC 與 RPC 之間得知，另外補強後之卜松比增加，意即在受力過程中側向變形較為明顯，且因 RPC 具有鋼纖維，可有效減緩裂縫擴大，避免爆裂，兼具警示意義。

而 CFRP 之抗壓補強成效超過 42 %，且材料的彈性模數及卜松比並無太大改變，顯示其補強機制係提供內部 NC 圍束力，與 RPC 補強機制不同。

## 6.3 柱補強試驗結果

本計畫圓柱之補強著重於比較不同圍束材料所提供的效果，其中控制組為一般鋼筋混凝土柱，內部除箍筋外，外圍無圍束材料；CFRP 補強組則是在立面外圍包覆一層 CFRP；RPC 補強組是將原橫斷面厚度內縮 1 cm，並改以 RPC 材料澆住，每組試體均製作三支以進行試驗。

### 6.3.1 控制組

#### 1. 試體觀察

圖 6-4~6-5 為試體破壞外觀，從圖上可明瞭軸壓力作用使得試體側向水平張力增加，混凝土表面因此產生裂縫，由於張力作用為徑向，所以主要裂縫的走向為垂直。圖 6-6 為無圍束之保護層剝落後柱體核心，核心部分混凝土雖有開裂，因箍筋圍束的效應，尚能維持柱體本身完整性，也提升極限載重及相對應之應變值。

#### 2. 公式驗證

圖 6-7 為試體編號 1 箍筋長度量測，經測量得其變形後總伸長量  $\ell_2 = 78.5 \text{ cm}$ ，原始週長  $\ell_1 = 73.8 \text{ cm}$ ，以應變公式(6-1)計算得其應變量

$$\varepsilon_s = \frac{\ell_2 - \ell_1}{\ell_1} \quad (6-1)$$

得  $\varepsilon_s = 0.064$ ，超過降伏應變  $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = \frac{2800}{2.04 \times 10^6} = 0.0014$ ，但從圖 6-12 應變計監測中其側向應變低於 0.0011，推測箍筋因受壓導致鬆脫、變形，並未產生降伏。主筋的降伏應變為  $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = \frac{4200}{2.04 \times 10^6} = 0.0021$ ，觀察圖 6-12 可得當抗壓強度達 33.45 MPa 時主筋已降伏。

圖 6-8 為軸向壓力與軸向位移圖，從圖上可得極限載重平均約為 235 t，試體經極限載重後，破壞變形加大，採公式(6-2)標稱抗壓強度  $P_n$  檢核其數值

$$P_n = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y \quad (6-2)$$

式中  $f'_c$  從小型圓柱試體抗壓試驗可得為  $350 \text{ kgf/cm}^2$ ，#5 鋼筋降伏強度  $f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$ ，帶入(6-2)式得  $P_n = 236 \text{ t}$ ，發現試驗值與理論值相當接近，因此可確認試驗成果的可靠度。

### 3. 應變監測

圖 6-9~6-11 顯示柱軸向應力與混凝土表面軸向、側向應變圖，從曲線中發現，當壓應力作用後，軸向應變隨之產生，由於卜松比效應，側向應變亦隨之產生，直至極限應力後迅速增大，以編號 1 試體為例，其極限應力 33 MPa 時，軸向應變為 0.0016，側向應變 0.00032，二者之比例關係是為混凝土卜松比 0.2。

基本上柱之設計應於極限載重前箍筋達到降伏，表示發揮圍束效果，以及主筋應達到降伏避免脆性破壞，圖 6-12~6-17 為柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖，從箍筋應變中可得知因側向張力的作用，使得箍筋的圍束力量增加，進而促使橫向應變逐漸增加，由於箍筋間距較大，並未發揮完整圍束效應，至試體達到極限強度前箍筋均未達到降伏應變，破壞型式屬於脆性破壞。除試體編號 1 於極限載重主筋應變開始降伏外，試體編號 2、3 均於極限載重後主筋才開始降伏，依據 Murat[Murat 等，1992]對於圍束混凝土韌性研究的定義，取

韌性係數為極限載重下降 85%時之位移 $\delta_u$ 與主筋降伏時之位移 $\delta_y$ 的比值，由於控制組主筋大多於極限載重後降伏，可知其韌性係數極低，表 6-8 顯示試體編號 2 之韌性係數為 1.51。

### 6.3.2 CFRP 補強組

#### 1. 試體觀察

圖 6-15~6-16 為 CFRP 補強組試體破壞外觀，從外表觀察發現，經由 CFRRP 圍束後的圓柱當 CFRP 達到極限強度時，瞬間產生爆裂聲及斷裂，並與混凝土保護層一同脫落，顯示當軸壓力增加到混凝土極限載重時，混凝土內部已產生碎裂，此時依賴 CFRP 的圍束效果，一旦 CFRP 受拉力斷裂，其柱體本身的抗壓強度也隨之降低，值得注意的是，CFRP 的破壞是瞬時瞬間發生，並無預警現象。

#### 2. 公式驗證

圖 6-17 為 CFRP 補強組柱軸向壓力與軸向位移圖，與圖 6-8 比較可以發現其極限載重較高，平均約為 280 t，三支試體全數強度均大於控制組，平均高約 20%，顯示 CFRP 的圍束提供了圓柱更高的抗壓能力，但是比較二圖破壞後曲線下降斜率發現控制組的斜率較為和緩，CFRP 補強組較為傾斜，說明了 CFRP 瞬時的爆裂造成破壞後的迅速變形。

已知 CFRP 材料如表 5-6 所示，帶入(3-33)~(3-35)式可求得圍束混凝土抗壓強度為  $382 \text{ kgf/cm}^2$ ，再將此抗壓強度帶入(6-2)式得其標稱抗壓強度 245 t，試驗結果大於計算結果，顯示試驗結果具有可信度。

#### 3. 應變監測

圖 6-18~6-20 為 CFRP 補強組柱軸向應力與表面 CFRP 軸向、側向應變圖，由於 CFRP 於表面並不承受軸力，但圍束提升了整體圓柱強度，與控制組相比較有較高的軸向應變；此外，相較於控制組箍筋僅是單一區域的圍束，CFRP 為全面性的圍束，因此當軸向應變產生

後，受卜松比效應，側向應變隨即產生，當側向應變達到破壞極限應變時，CFRP 即產生爆裂破壞。

圖 6-21~6-23 為 CFRP 補強組柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖，其中箍筋側向應變於極限強度之前，幾乎無應變發生，這表示柱體本身的側向應變均由 CFRP 取代，直到 CFRP 斷裂後之後，箍筋才發揮圍束作用，並迅速產生應變，但此時柱體已破壞。換言之，當採用 CFRP 進行圍束時，箍筋效果已被 CFRP 取代。相較於控制組，主筋之降伏均於極限載重前發生，但此時混凝土已碎裂，全賴 CFRP 圍束，因此當 CFRP 斷裂後，載重及位移迅速滑落，從表 6-9 CFRP 補強組韌性中可得其中 2 組韌性係數平均約為 1.2。

### 6.3.3 RPC 補強組

#### 1. 試體觀察

圖 6-24~6-25 為 RPC 補強組試體破壞外觀，與圖 6-4~6-5 控制組比較後可以發現，經補強後的 RPC 材料達極限強度破壞後，裂縫產生較少，主要集中於初始的主要裂縫，另由於 RPC 抗壓強度較一般混凝土高，受壓後承受了軸向壓力及側向張力，於破壞時柱腹位置產生類似挫曲的水平裂縫，這與控制組之垂直裂縫有明顯的差異。因為 RPC 屬於高韌性材料，其變形行為有如金屬般，所以柱體達到極限強度破壞後，整體外觀仍保持良好，並無 CFRP 補強組瞬間爆裂剝落的現象。

圖 6-26 為試體破壞後觀察內部原混凝土與 RPC 二者界面，觀察發現，RPC 的主要裂縫會與原混凝土柱的裂縫一致，開裂之後由於界面黏結效果良好，因此破壞後二者變形仍保持諧和性。

#### 2 公式驗證

圖 6-27 為 RPC 補強組柱軸向壓力與軸向位移圖，從圖上可得極限載重平均約為 230 t，與控制組相似，由於 RPC 尚無可結構計算應用之公式，並且受力過程中除軸向作用力外，尚承擔圍束柱體本身並承受側向張力作用，其實際所貢獻之強度行為尚待推導。

### 3.應變監測

圖 6-28~6-30 為 RPC 補強組柱軸向應力與表面 RPC 軸向、側向應變圖，無論從軸向應變或側向應變均可以發現其行為與 CFRP 類似，側向應變顯示 RPC 於受力初期即開始承擔張力作用，軸向應變與 CFRP 不同的是，CFRP 是材料貼附於混凝土表面，屬混凝土的變形，但 RPC 材料本身也承受軸力作用，因此顯示材料的應變過程，側向應變除試體編號 3 應變計斷裂外，韌性的作用使得試體編號 1、編號 2 在達到極限載重後均有較長和緩水平傾斜應變。

圖 6-31~6-33 為 RPC 補強組柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖，其中箍筋的應變行為較為特別，於試體破壞之前，其應變大多屬於正值，據此推論箍筋均無承受側向張力作用，直至極限強度 RPC 開裂喪失圍束效果後才開始產生橫向應變，此破壞前幾乎不受張力的情形與 CFRP 相似，不同的是破壞後 RPC 發揮了韌性，均無柱體剝落的現象，不過，由於經 RPC 補強後之柱結構行為，目前尚無相關文獻可供參考，故對於此推論，仍有待進一步驗證。主筋之降伏均在極限載重之後，與控制組相同，表 6-10 顯示 RPC 補強組之韌性係數平均約為 1.29。

## 6.4 梁補強試驗結果

梁補強試驗結果如表 6-11 所示，載重與中點變位關係曲線如圖 6-34~6-36 所示，試驗前及試驗後破壞裂縫情形如圖 6-37~6-39 所示。

在初始階段，載重與中點位移係為線彈性關係，當載重持續增加，當超過某一臨界值時，載重與中點變位關係曲線之斜率明顯改變，該臨界值所對應之載重及變形分別定義為混凝土梁之降伏載重  $P_y$  及混凝土破裂變形  $\delta_y$ ，未補強前之混凝土平均破裂載重  $P_y$  為 25.26 ton，經 RPC 側邊補強 1 cm 或 CFRP 補強後皆能提高混凝土破裂載重，前者為 33.42 ton，後者為 34.06 ton，兩種剪力補強方式皆能提高約 32 %

破裂載重，且所得到之破裂載重相當接近。

當載重繼續增大，梁底部張應力完全由拉力筋所承擔，因此載重與中點變位曲線得以緩慢增加，直到梁底部裂縫持續延伸至頂端，喪失承載能力，曲線便迅速下降，而曲線最高點所對應之載重定義為混凝土極限載重  $P_u$ ，未補強前之混凝土平均極限載重  $P_u$  為 29.73 ton，經 RPC 補強 1 cm 後及 CFRP 補強後分別為 37.69 ton 及 37.75 ton，兩種剪力補強方式皆能提高約 27 % 破裂載重，且所得到之極限載重相當接近。

若將載重位移曲線下方所涵蓋之面積視為該梁承受載重過程中所吸收能量大小，並仿照 ASTM C1018-92 韌性指數計算的方式，分別計算各梁在  $\delta_y$ 、 $3\delta_y$  及  $5.5\delta_y$  時載重位移曲線下方面積，計算結果如表 6-12 所示，明顯發現經 RPC 補強後提升效果最佳，在  $\delta_y$ 、 $3\delta_y$  及  $5.5\delta_y$  時吸收能量之提升率分別為 50.29 %、42.77 % 及 36.52 %。

梁裂縫之發展過程如圖 6-40~6-41 所示，未補強的 RC 梁底部混凝土在承受 12.50 kg 時出現開裂，裂縫多出現在梁中央處，且方向多為垂直方向，隨著載重增加至 20 kg 時，既有裂縫向上延伸，並且有新的剪斜裂縫出現在支承處與載重處之間，當載重繼續增加至 25 kg，在梁中央處之垂直向撓曲裂縫及兩側之斜向剪力裂縫向上延伸，梁上方承壓處部份混凝土已有壓碎情形，之後剪力裂縫隨著載重增加而迅速延伸向上至梁頂部，造成剪力破壞。

經 RPC 側邊補強 1 cm 後之 RC 梁，初始階段與未補強的 RC 梁相似，垂直向的開裂裂縫出現在梁中央處，不同的是，當載重增加至 25 kg 才有剪斜裂縫出現在支承處與載重處之間，最後造成 RC 梁失去承載力的是 14D-13A 的裂縫，造成撓曲破壞，顯見經 RPC 側邊補強 1 cm 後能有效增加 RC 梁之抗剪能力。

由於經 CFRP 補強之 RC 梁，在載重過程中不易觀察其裂縫發展，僅聽到長向纖維拉斷劈裂聲，最後當載重接近極限載重時，梁中央處纖維明顯延著與混凝土之介面開裂，並伴隨著裂縫迅速向上發展，造



成撓曲破壞，過程相當迅速。

表 6-1 RPC 流度試驗結果

	平均直徑 (mm)	流度值 (%)	平均流度 (%)
1	245	145	140
2	235	135	
3	240	140	

表 6-2 NC 坍度試驗結果

	坍度值 (mm)	平均坍度 (mm)
1	230	233
2	235	

表 6-3 RPC、NC 與 Mortar 抗壓強度試驗結果

齡期 (天)	平均抗壓強度 (MPa)		
	RPC	NC	Mortar
3	75.27	10.51	9.54
7	75.87	18.82	20.29
28	85.67	30.17	21.07
56	86.49	33.73	22.15
90	114.08	37.30	23.43

表 6-4 RPC 與 NC 劈裂強度試驗結果

齡期 (天)	平均劈裂強度 (MPa)	
	RPC	NC
3	10.06	—
7	11.14	2.45
28	12.41	2.89
56	12.61	—
90	13.59	3.68

表 6-5 RPC、NC 與 Mortar 彈性模數與卜松比量測結果

齡期 (天)	平均彈性模數 (GPa)			平均卜松比		
	RPC	NC	Mortar	RPC	NC	Mortar
3	34.56	13.46	16.51	0.197	0.192	0.171
7	38.11	16.75	20.29	0.212	0.207	0.197
28	41.66	24.96	20.55	0.201	0.221	0.192
56	41.98	25.00	20.87	0.208	0.219	0.196
90	42.63	27.40	21.01	0.215	0.203	0.201

表 6-6 RPC 補強 Mortar 抗彎試驗結果

補強齡期 (天)	未補強 平均抗彎強度 (MPa)	RPC 補強 1cm		
		$n=E_{RPC}/E_{Mortar}$	平均抗彎強度 (MPa)	提升率 (%)
3	13.02	2.09	13.06	0.31
7	13.08	1.88	19.55	49.46
28	14.54	2.03	20.08	38.10
56	14.48	2.01	20.65	42.61
90	13.82	2.03	19.76	42.98

表 6-7 混凝土圓柱抗壓補強成效

補強齡期 (天)	未補強 NC			RPC 補強 1cm				CFRP 補強			
	平均 抗壓 強度 (MPa)	平均 彈性 模數 (GPa)	平均 卜松比	抗壓強度		材料參數		抗壓強度		材料參數	
				平均值 (MPa)	提升率 (%)	彈性 模數 (GPa)	卜松比	平均值 (MPa)	提升率 (%)	彈性 模數 (GPa)	卜松比
3	32.68	24.67	0.219	32.72	0.12	35.72	0.265	54.57	61.78	22.67	0.195
7	33.97	24.12	0.192	34.54	1.68	32.90	0.222	54.90	61.61	23.19	0.190
28	33.76	26.85	0.219	39.89	18.16	33.23	0.226	51.94	53.85	25.65	0.197
56	36.65	28.23	0.244	41.72	13.83	37.83	0.277	52.39	42.95	27.91	0.207
90	37.92	28.27	0.221	47.99	26.56	39.34	0.277	55.28	45.78	28.12	0.226

表 6-8 控制組韌性表

試體編號	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$
NC1	1.426	應變計斷裂	×
NC2	0.751	1.137	1.51
NC3	應變計斷裂	×	×

表 6-9 CFRP 補強組韌性表

試體編號	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\delta_u/\delta_y$
CFRP1	0.882	應變計斷裂	×
CFRP2	0.701	0.809	1.15
CFRP3	0.7565	0.931	1.23

表 6-10 RPC 補強組韌性表

試體編號	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\delta_u/\delta_y$
RPC1	應變計斷裂	×	×
RPC2	1.281	1.7255	1.35
RPC3	1.1985	1.475	1.23

表 6-11 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C.梁降伏與極限載重表

	RC 未補強			RPC 側邊補強 1cm				CFRP 補強			
	1	2	平均值	1	2	平均值	提升率	1	2	平均值	提升率
$P_y$ (ton)	26.36	24.15	25.26	34.29	32.54	33.42	32.30 %	33.76	34.35	34.06	34.84 %
$P_u$ (ton)	30.08	29.38	29.73	39.6	35.78	37.69	26.96 %	36.28	39.21	37.75	26.77 %

表 6-12 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C.梁之位移能量表

	RC 未補強			RPC 側邊補強 1cm				CFRP 補強			
	1	2	平均值	1	2	平均值	提升率	1	2	平均值	提升率
$\delta_y$ (mm)	7.40	7.00	7.20	7.32	8.07	7.70	6.94%	7.56	7.08	7.32	1.67%
3 $\delta_y$ (mm)	22.20	21.00	21.60	21.96	24.21	23.09	—	22.68	21.24	21.96	—
5.5 $\delta_y$ (mm)	40.70	38.50	39.60	40.26	44.39	42.33	—	41.58	38.94	40.26	—
P- $\delta_y$ (ton•mm)	113.14	96.39	104.77	151.86	163.06	157.46	50.29%	148.75	140.17	144.46	37.88%
P-3 $\delta_y$ (ton•mm)	509.50	467.16	488.33	694.43	699.93	697.18	42.77%	648.90	654.34	651.62	33.44%
P-5.5 $\delta_y$ (ton•mm)	1041.65	955.28	998.47	1363.14	—	1363.14	36.52%	1257.05	1202.14	1229.60	23.15%

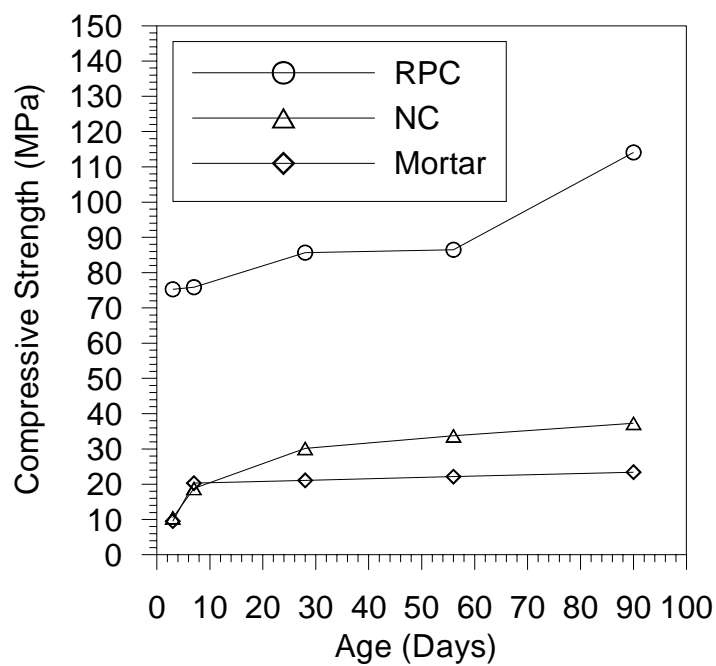


圖 6-1 RPC、NC 與 Mortar 抗壓強度發展曲線

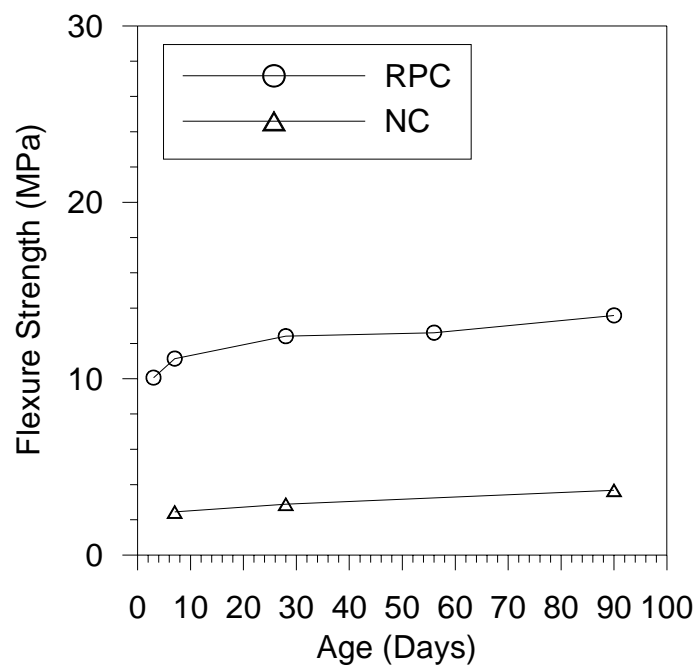


圖 6-2 RPC 與 NC 劈裂強度發展曲線

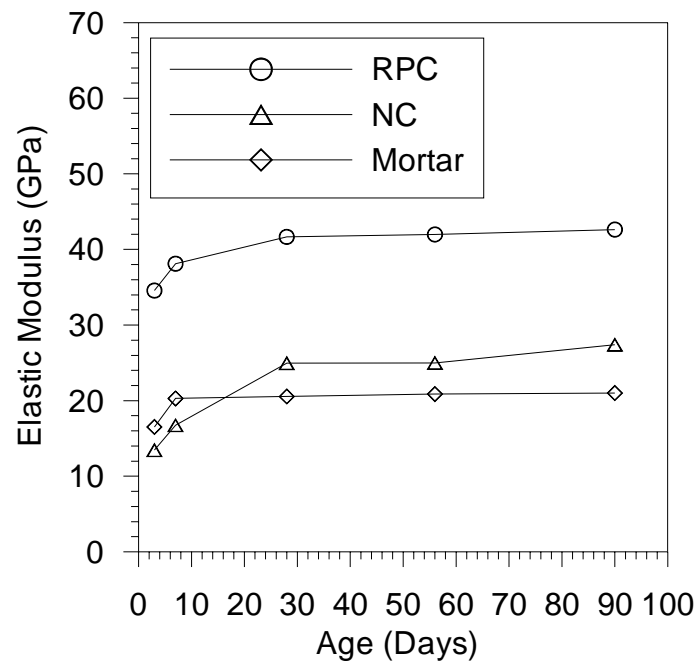


圖 6-3 RPC 與 NC 彈性模數發展曲線



圖 6-4 控制組試體破壞外觀(1)





圖 6-5 控制組試體破壞外觀(2)

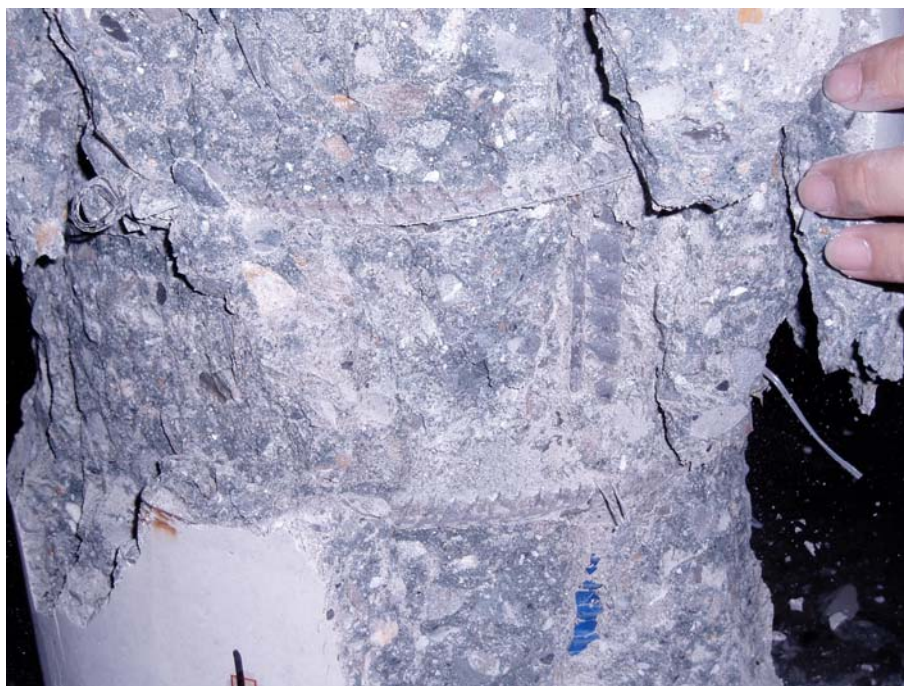


圖 6-6 控制組試體保護層剝落外觀



圖 6-7 控制組試體箍筋長度量測

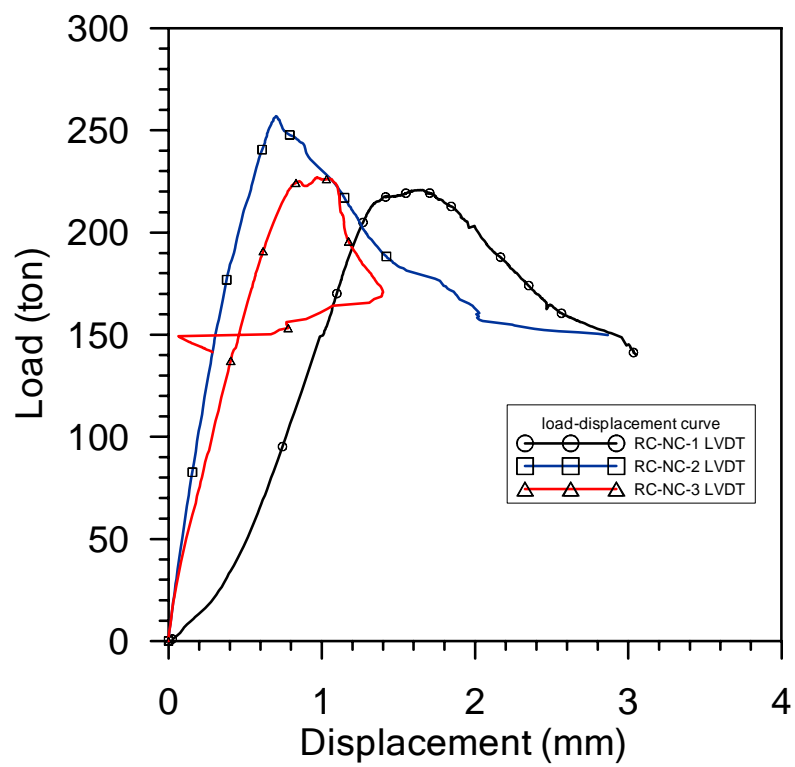


圖 6-8 控制組柱軸向壓力與軸向位移圖

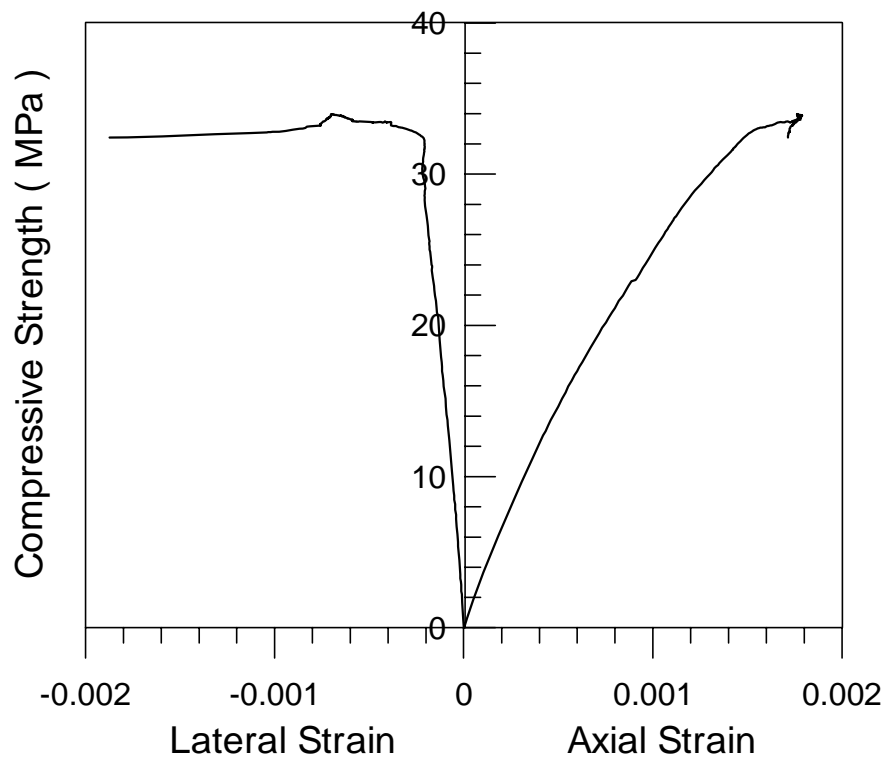


圖 6-9 控制組編號 1 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

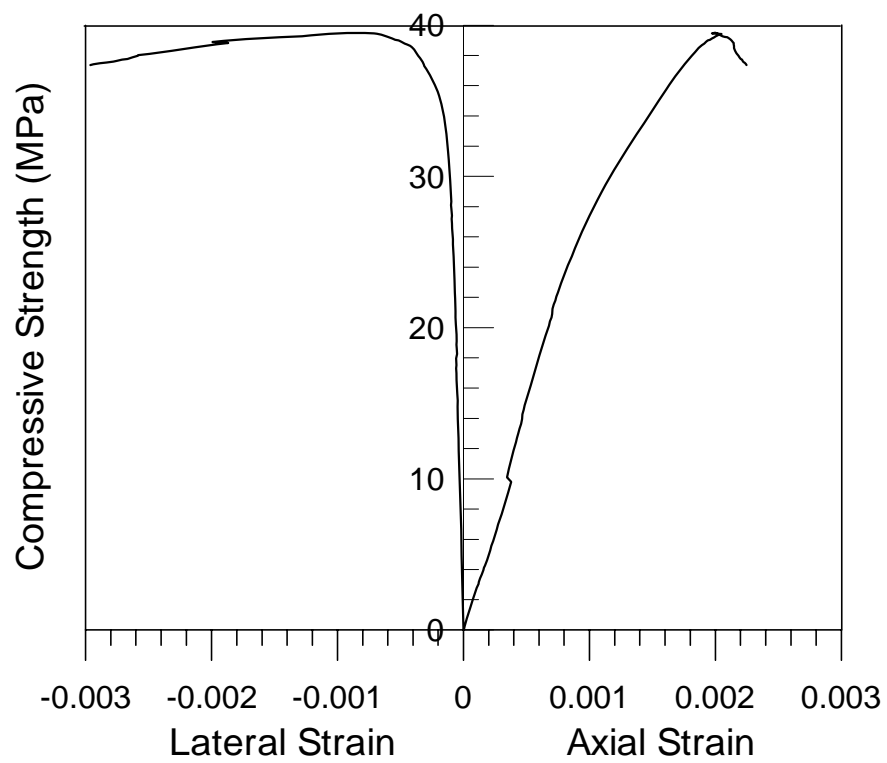


圖 6-10 控制組編號 2 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

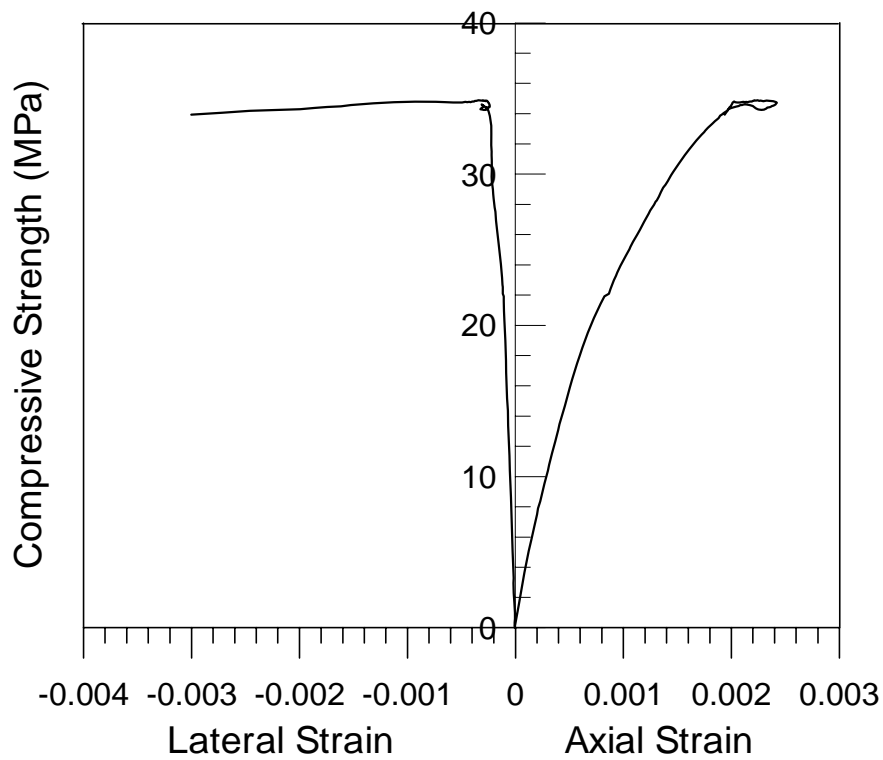


圖 6-11 控制組編號 3 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

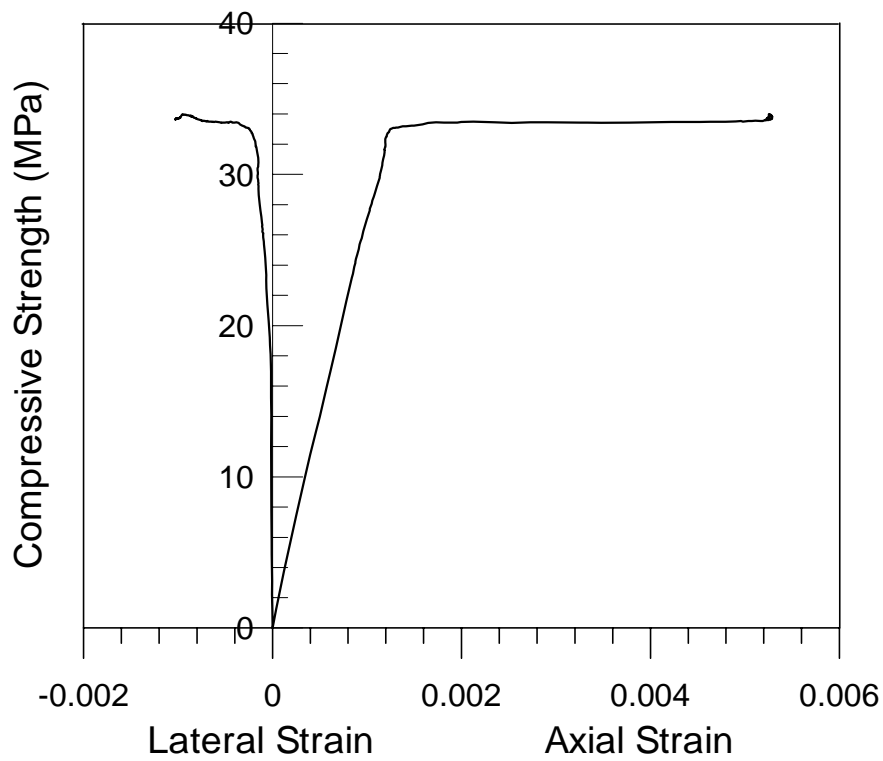


圖 6-12 控制組編號 1 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

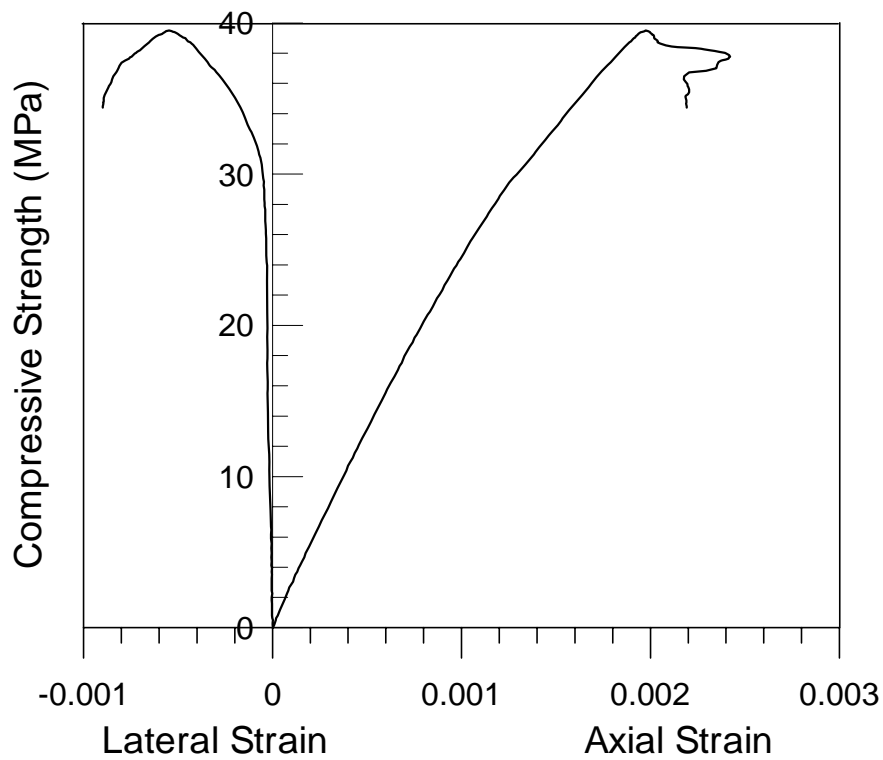


圖 6-13 控制組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

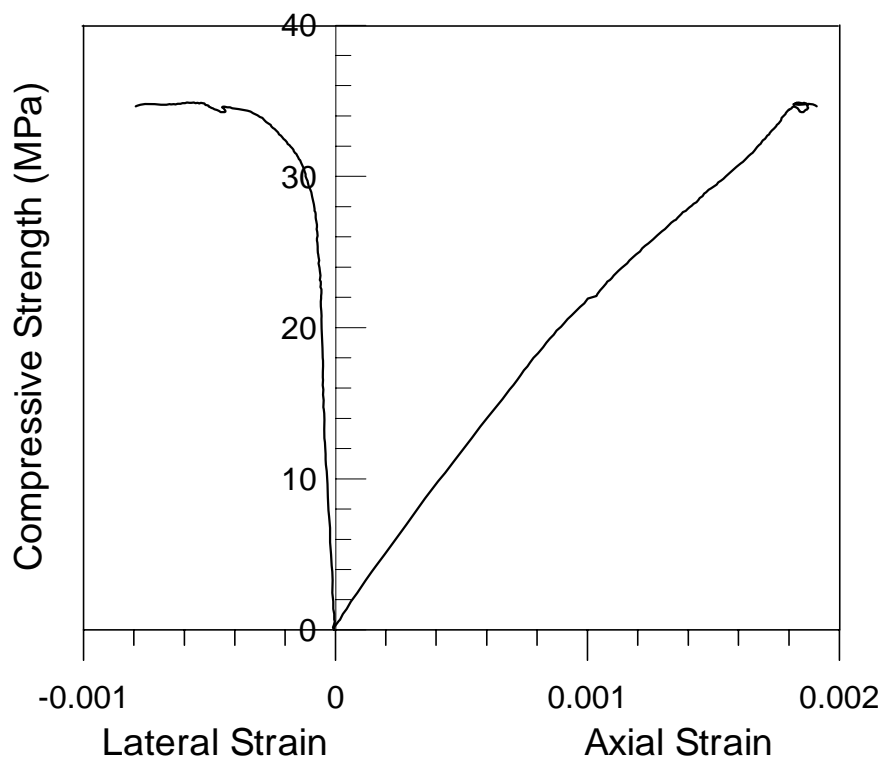


圖 6-14 控制組編號 3 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖





圖 6-15 CFRP 補強組試體破壞外觀(1)



圖 6-16 CFRP 補強組試體破壞外觀(2)

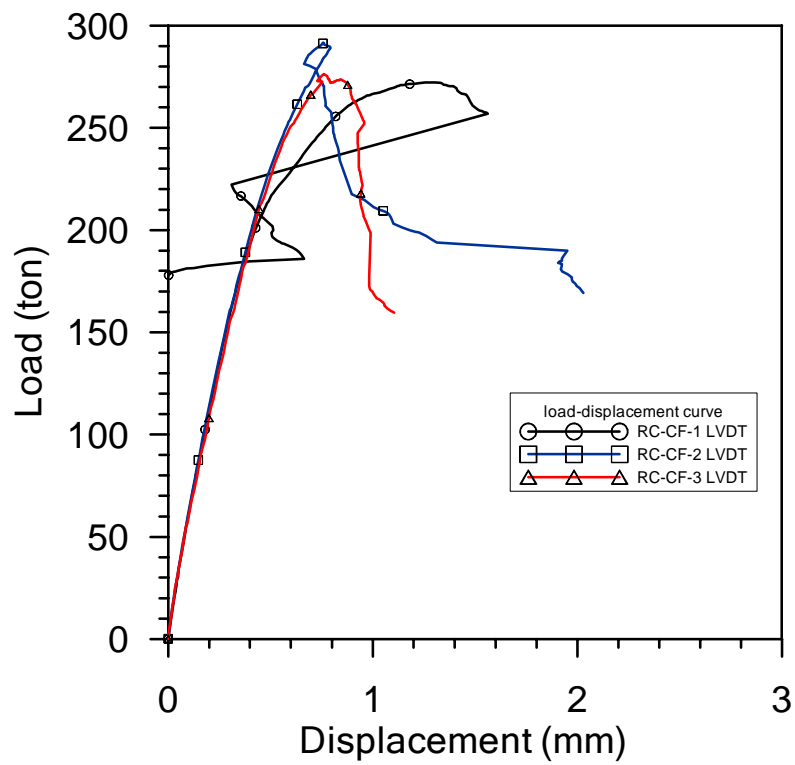


圖 6-17 CFRP 補強組柱軸向壓力與軸向位移圖

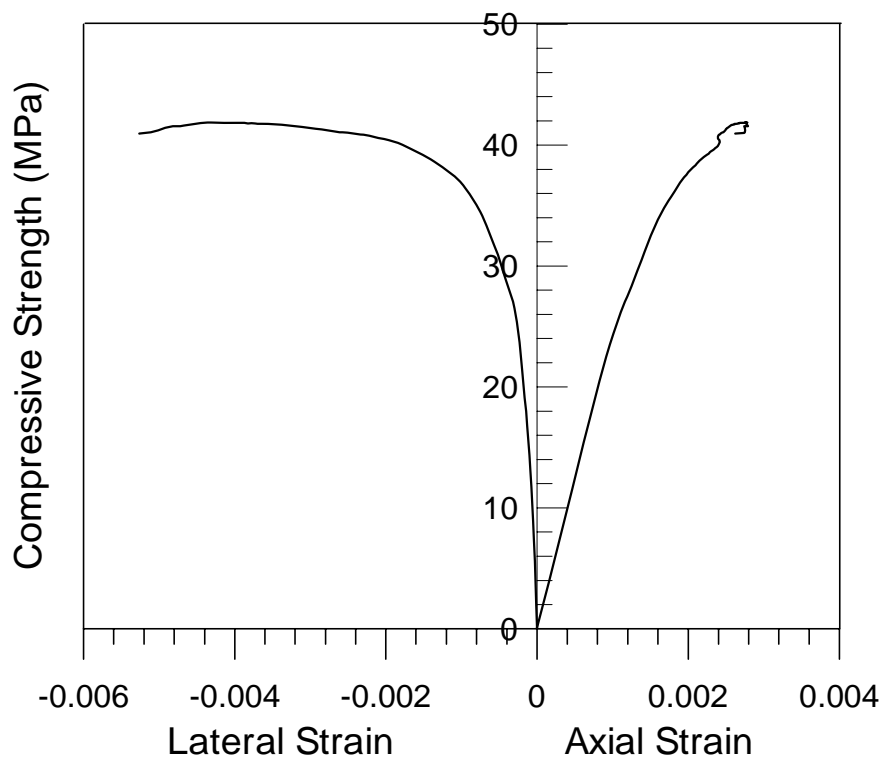


圖 6-18 CFRP 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

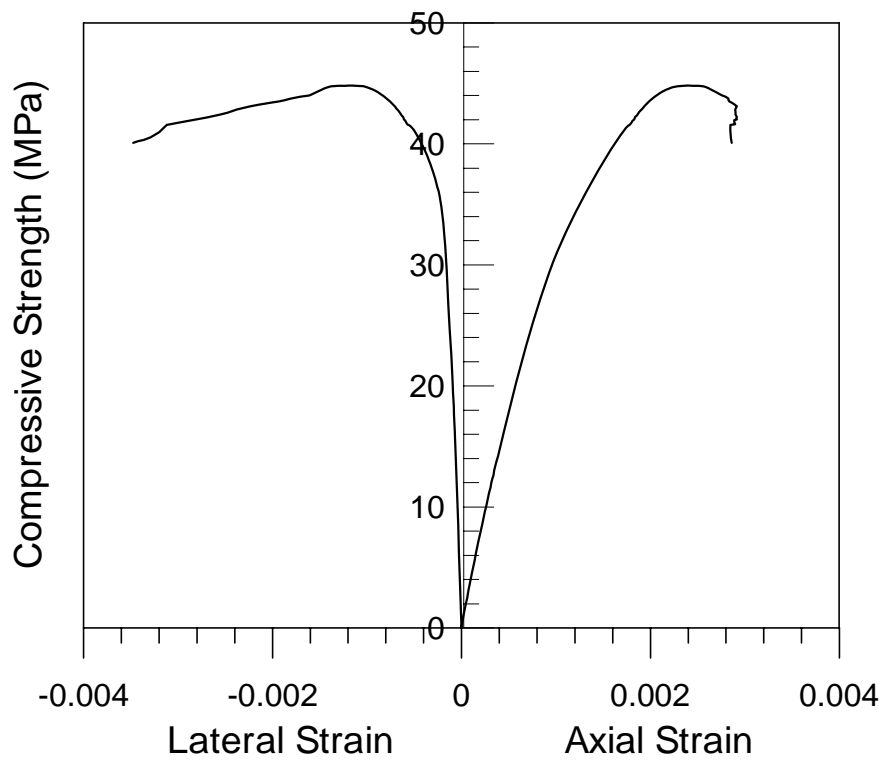


圖 6-19 CFRP 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

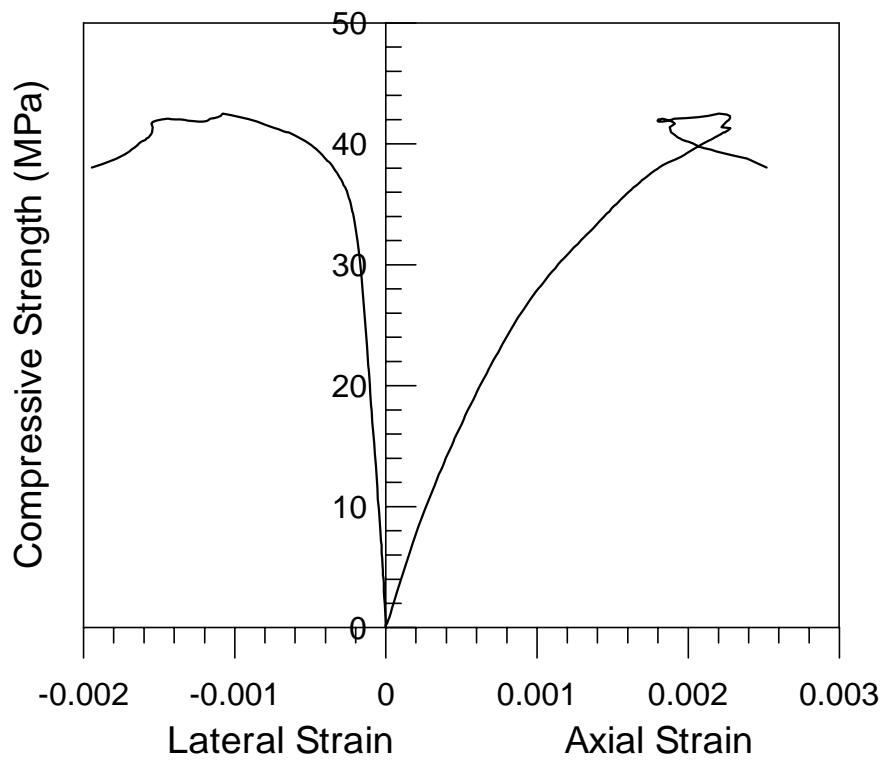


圖 6-20 CFRP 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向、側向應變圖



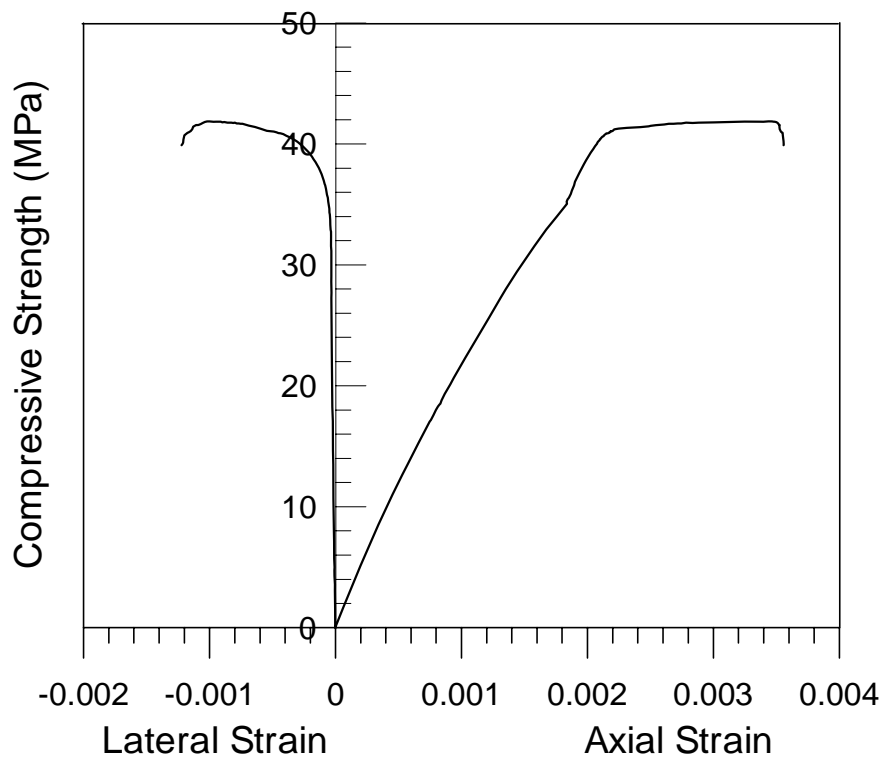


圖 6-21 CFRP 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

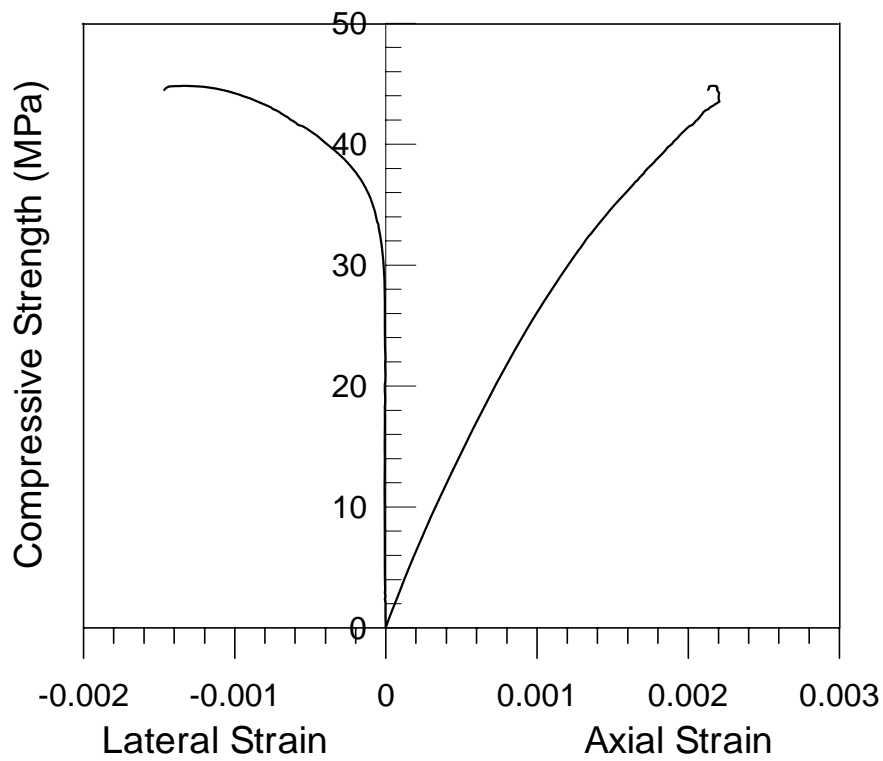


圖 6-22 CFRP 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

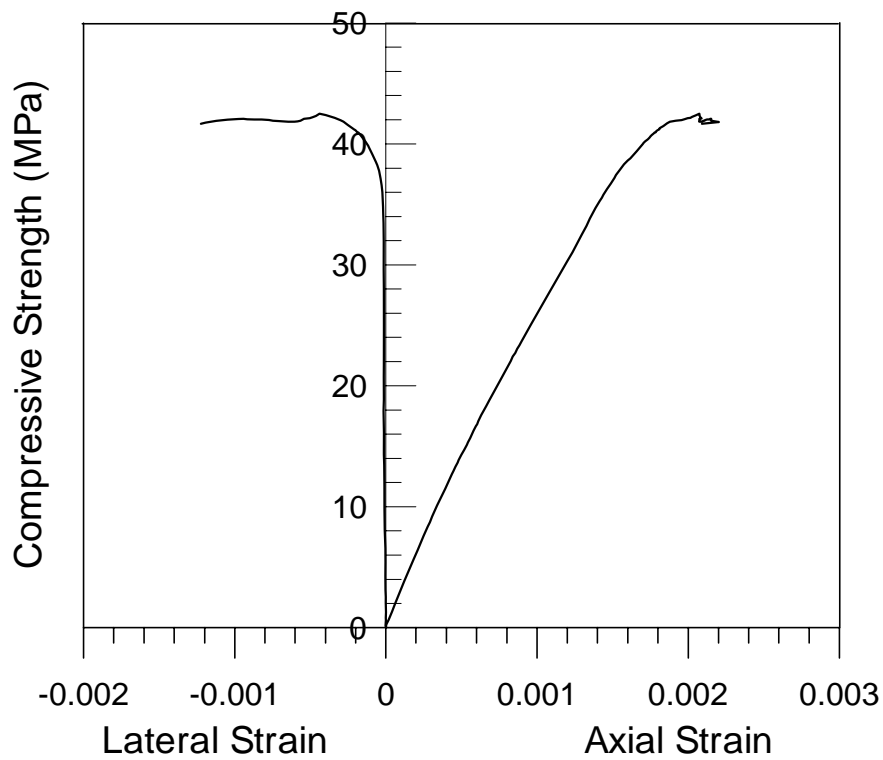


圖 6-23 CFRP 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖



圖 6-24 RPC 補強組試體破壞外觀(1)



圖 6-25 RPC 補強組試體破壞外觀(2)



圖 6-26 RPC 補強組試體破壞後界面黏結情形

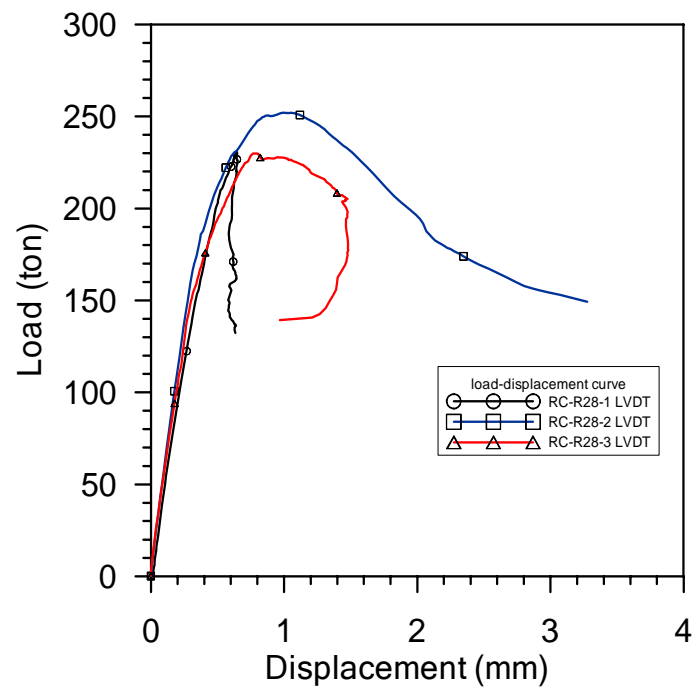


圖 6-27 RPC 補強組柱軸向壓力與軸向位移圖

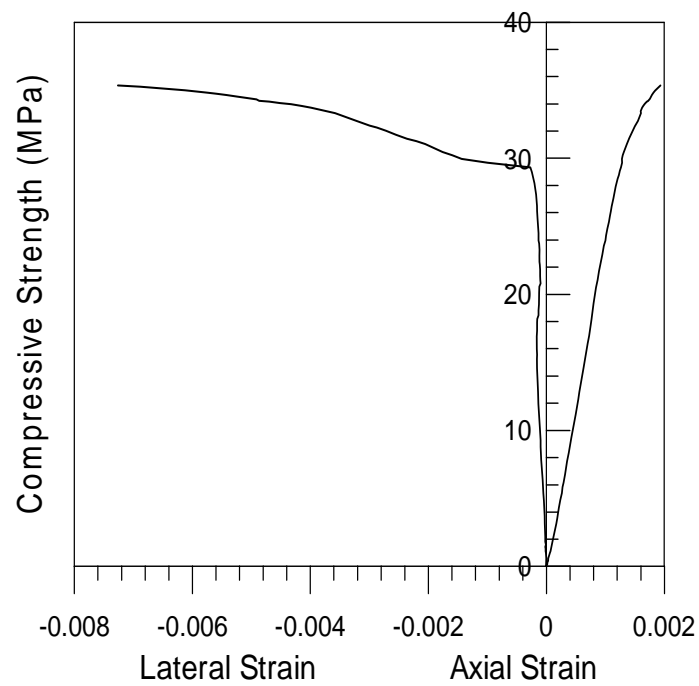


圖 6-28 RPC 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

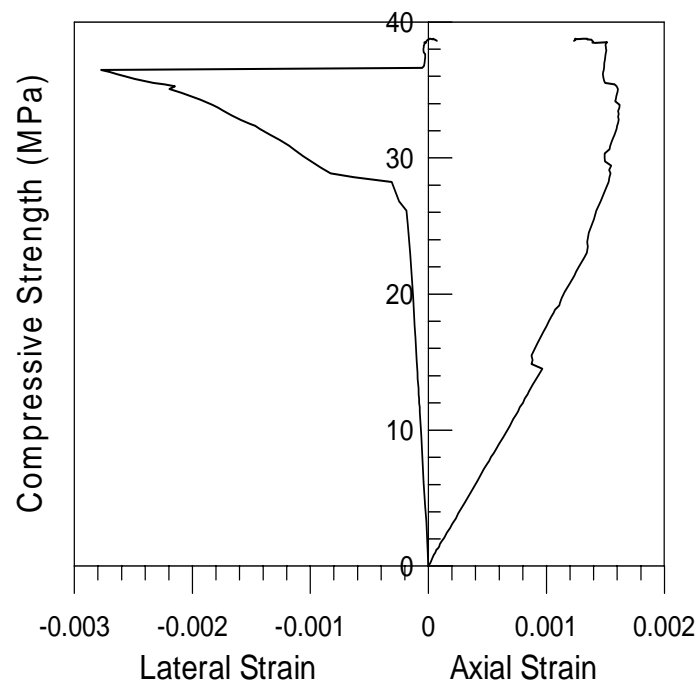


圖 6-29 RPC 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

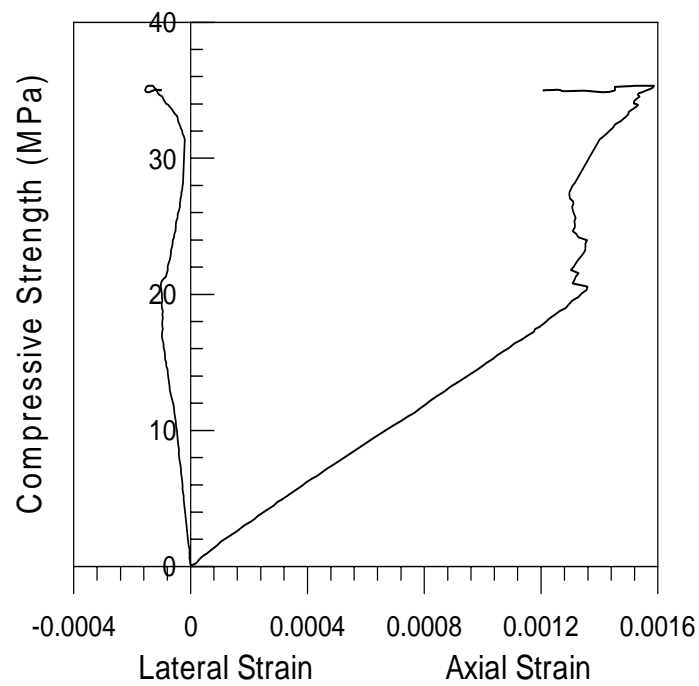


圖 6-30 RPC 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向、側向應變圖

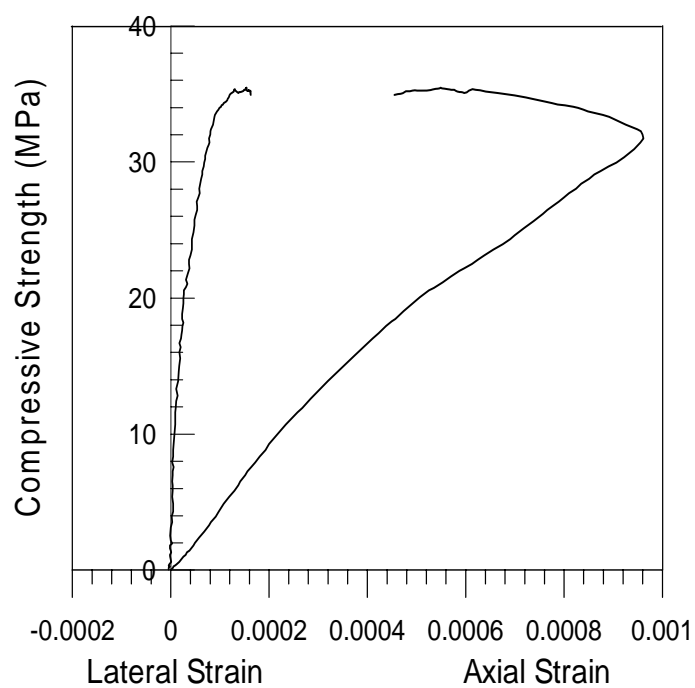


圖 6-31 RPC 補強組編號 1 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

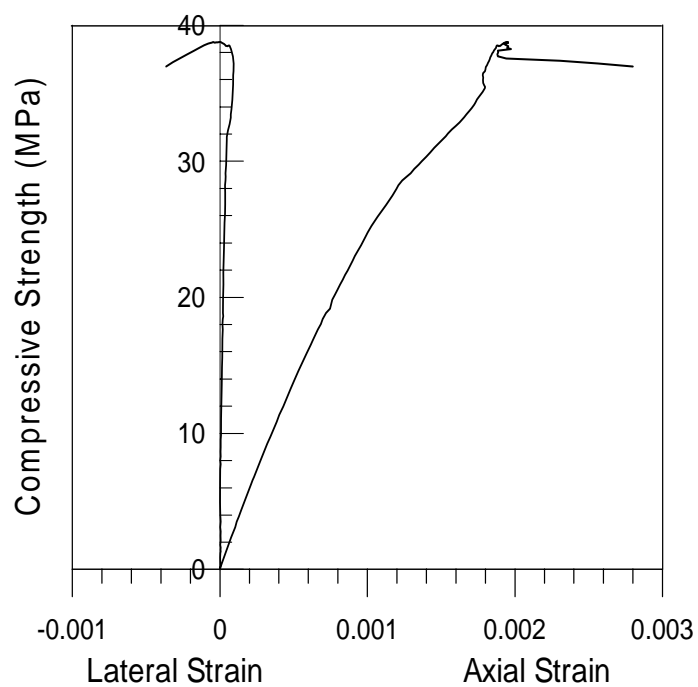


圖 6-32 RPC 補強組編號 2 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

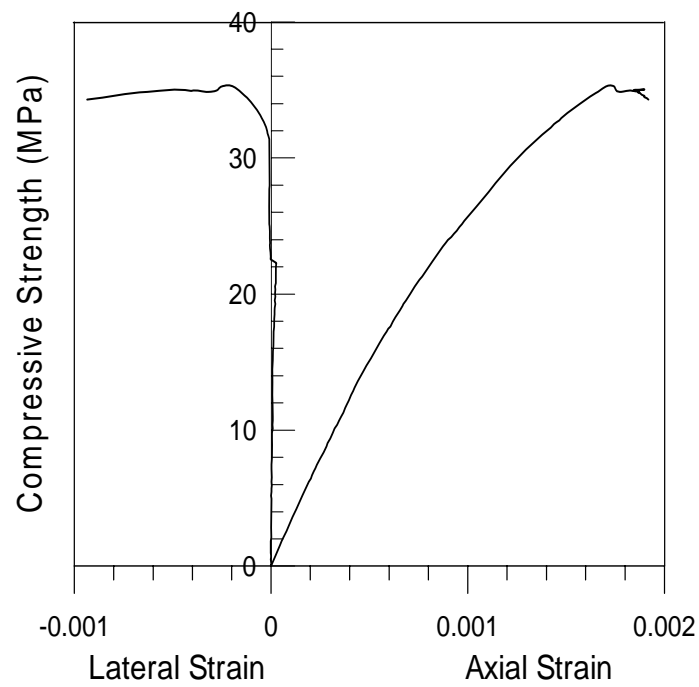


圖 6-33 RPC 補強組編號 3 柱軸向應力與軸向主筋、側向箍筋應變圖

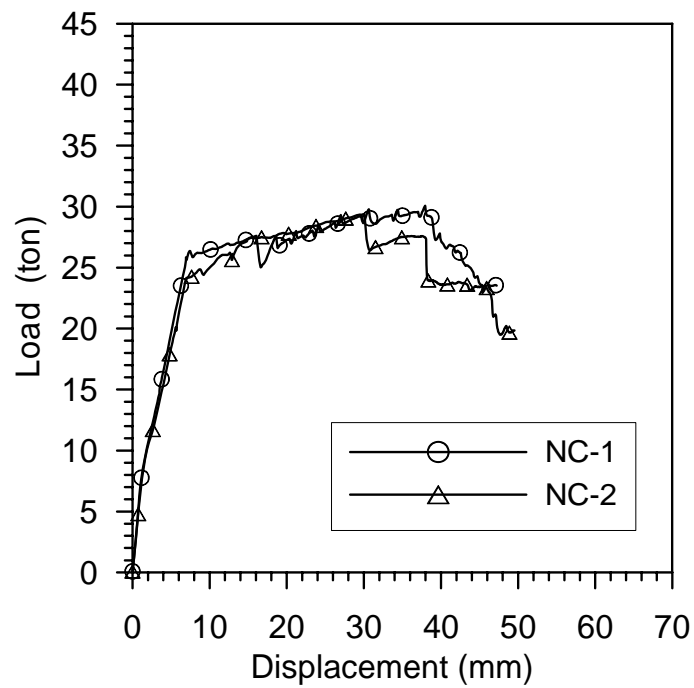


圖 6-34 未補強 RC 梁載重與中點變位圖

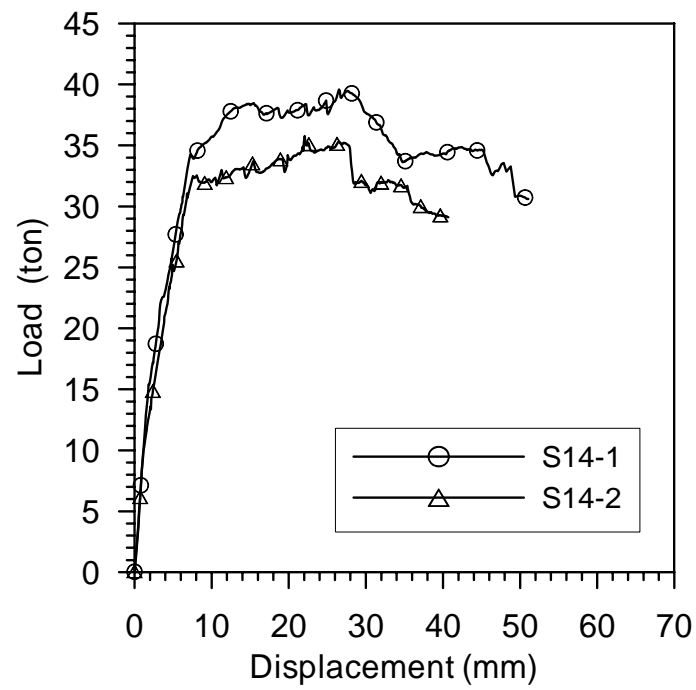


圖 6-35 RPC 補強 1 cm 梁載重與中點變位圖

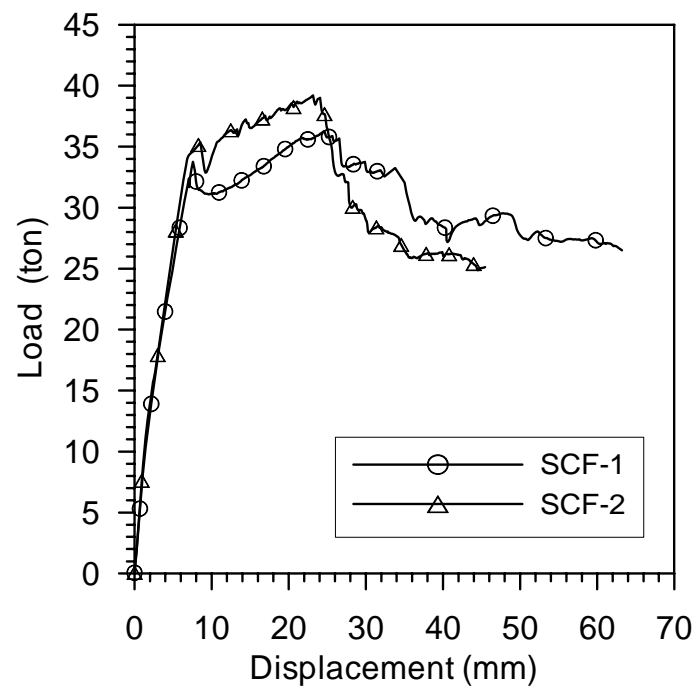
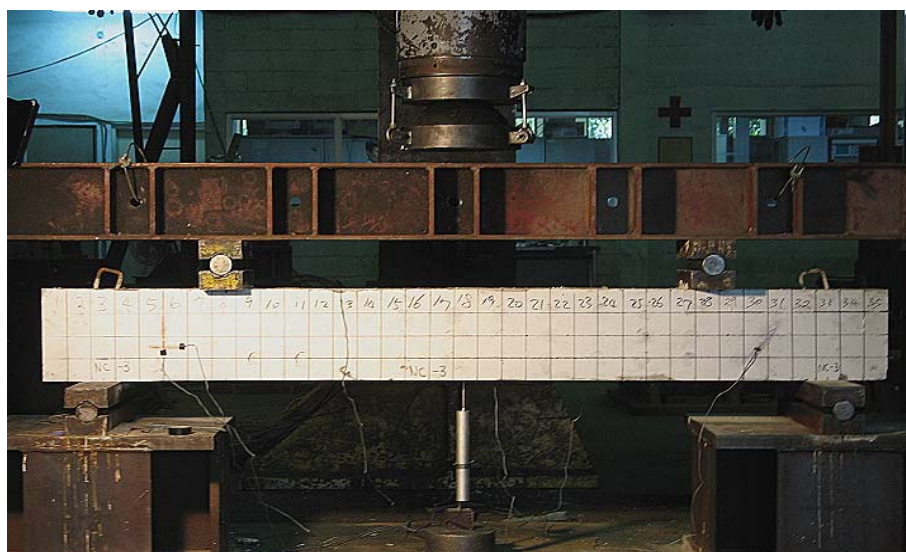
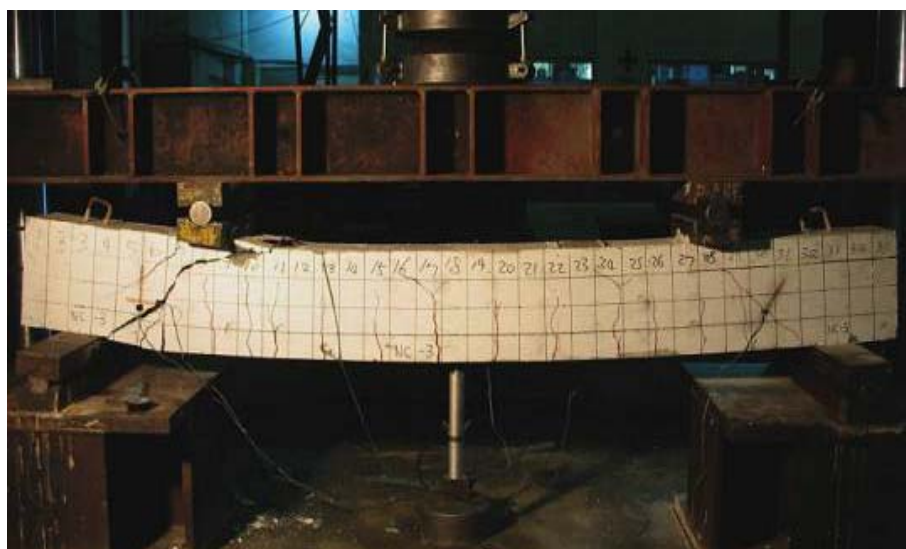


圖 6-36 CFRP 補強梁載重與中點變位圖



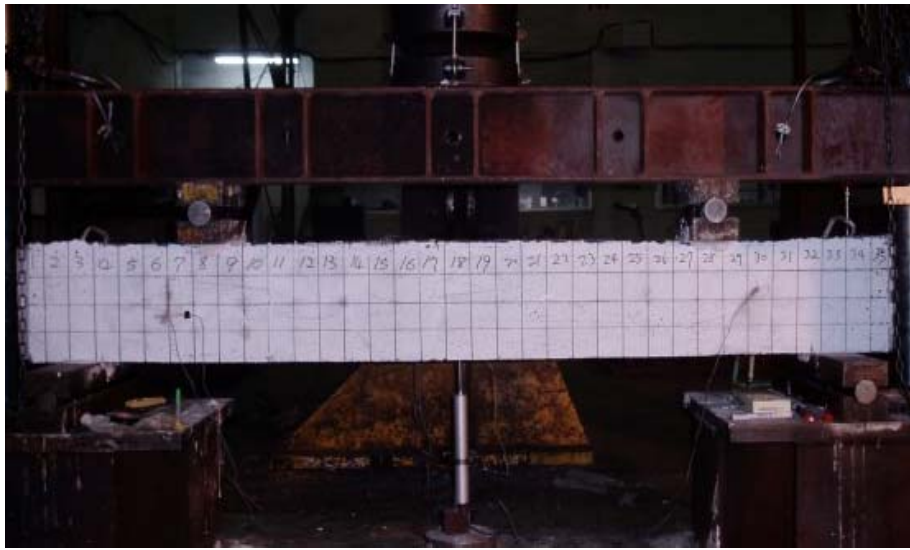


(a) 破壞前



(b) 破壞後

圖 6-37 典型未補強 RC 梁加載前後之外觀



(a) 破壞前



(b) 破壞後

圖 6-38 典型以 RPC 進行剪力補強加載前後之外觀



(a) 破壞前



(b) 破壞後

圖 6-39 典型以 CFRP 進行剪力補強加載前後之外觀

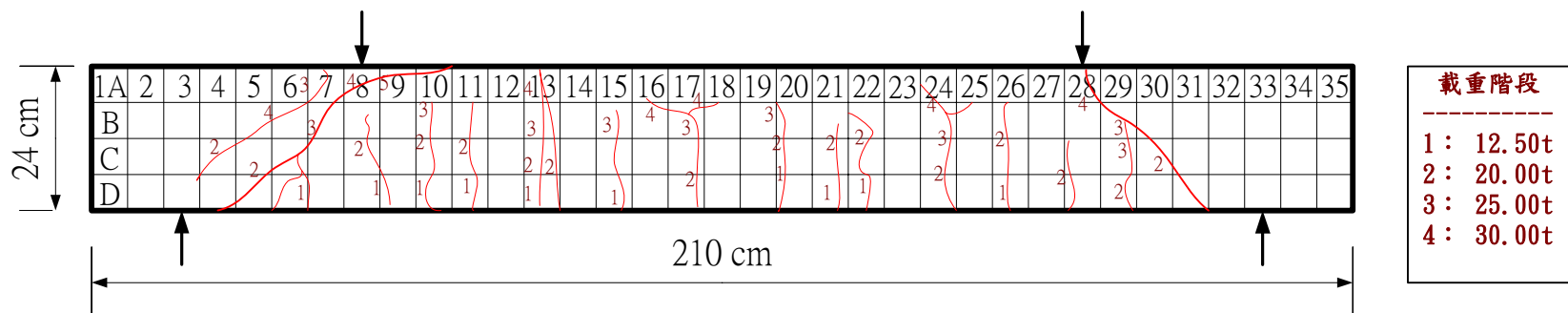
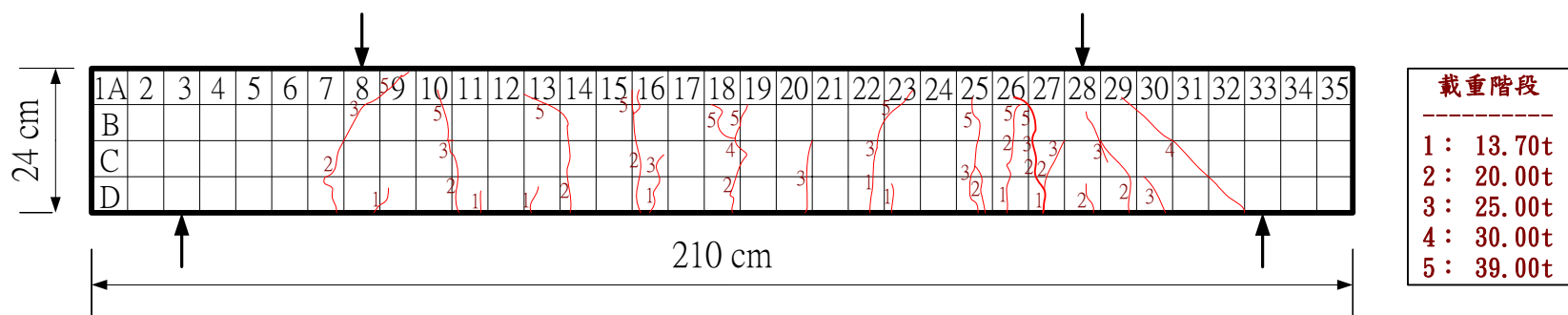


圖 6-40 典型未補強 RC 梁加載後裂縫狀況



(b) RPC 側邊補強 1 cm

圖 6-41 典型以 RPC 進行剪力補強加載後裂縫狀況

## 第七章 RPC 補強施工程序及評估與補強方針

### 7.1 補強施工程序

#### 7.1.1 RPC 圓柱補強工法

RPC 圓柱補強工法施作程序如圖 7-1 所示，並分述如下：

##### 1. 混凝土破損處鑿除作業

(1) 以破碎機將混凝土鑿除(約 2-3cm)保護層。

(2) 以空壓機將鑿除表面之粉塵清除乾淨。

##### 2. 鋼筋除鏽及防鏽作業

(1) 以鋼刷將鋼筋表面鏽斑清除。

(2) 將防銹漆塗刷於鋼筋表面，做為防鏽處理。

##### 3. 鋼筋彎紮或點焊鋼絲網補強作業

按設計要求之數量及位置，將補強鋼筋彎紮或點焊鋼絲網固定於設計位置。

##### 4. 模板工程

按設計要求之數量及位置，將模板固定於設計位置。

##### 5. RPC 灌漿作業

按設計要求之強度、數量及位置，將 RPC 澆注於模板內。

##### 6. 養護

按設計要求，依不同位置進行拆模及養護。

##### 7. 表面處理

#### 7.1.2 RPC 梁剪力補強施工程序

即預鑄 RPC 版塊補強方式，程序如圖 7-2 所示，並分述如下：

#### 1.表面處理

以破碎機將粉刷層去除，以利膠結材接著。

#### 2.RPC 預鑄版安裝固定

視狀況需要以鋼製夾具將 RPC 預鑄版固定於正確位置。

#### 3.安裝灌注孔及出氣孔

以膏狀之環氧樹脂補上(EPOXY Putty)塗抹於預留之灌注孔及出氣孔四周，封塞並使之固定。

#### 4.RPC 預鑄版四周以膏狀封塞劑封塞使之固定，以防止灌漿時漏漿。

#### 5.高壓低速灌注膠結材

(1)採用氣動 Pump 將混合好之膠結材以高壓低速之方式灌注入，待膠結材從另一灌注孔溢出時，即可停灌注動作，封塞灌注孔並移置下一孔重複上述之步驟。

(2)灌注時應以由下往上之順序為原則。

#### 6.去除灌注頭及出氣頭

待 RPC 預鑄版內部膠結材完全硬化後，即可去除灌注頭及出氣頭。

#### 7.RPC 預鑄版表面處理

將預鑄版表面上漆或噴塗樹脂砂漿。

### 7.1.3 梁剪力補強施工程序

即現場澆置 RPC 補強方式，程序如圖 7-3 所示，並分述如下：

#### 1.混凝土破損處鑿除作業

(1)以破碎機將混凝土鑿除(約 2-3cm)保護層。



(2)以空壓機將鑿除表面之粉塵清除乾淨。

## 2.鋼筋除鏽及防鏽作業

(1)以鋼刷將鋼筋表面鏽斑清除。

(2)將防銹漆塗刷於鋼筋表面，做為防鏽處理。

## 3.鋼筋彎紮補強作業

按設計要求之數量及位置，將補強鋼筋彎紮固定於設計位置。

## 4.模板工程

按設計要求之數量及位置，將模板固定於設計位置。

## 5.RPC 補強材灌漿作業

按設計要求之強度、數量及位置，將 RPC 補強材澆注於模板內。

## 6.養護

按設計要求，依不同位置進行拆模及養護。

## 7.表面處理

按設計要求，進行表面處理。

### 7.1.4 面板底層補強施工程序

此法適用於港灣工程中混凝土面板底層施工，程序如圖 7-4 所示，並分述如下：

#### 1.表面處理

以破碎機將粉刷層去除，以利膠結材接著。

#### 2.RPC 模版安裝固定

視狀況需要以鋼製夾具將 RPC 模版固定於修補面下方。

#### 3.鑽掘灌注孔及出氣孔

在面層上方兩側之適當距離處鑽掘灌注孔及出氣孔。

#### 4. 灌注 RPC。

利用 RPC 之良好工作性，由灌注孔以自流方式灌入 RPC 材料，灌注時，須在同一側之灌注孔採來回依序施作，待另一側之所有灌注孔皆有 RPC 溢出時，即可停灌注動作。

## 7.2 評估與補強方針

### 7.2.1 評估方式

#### 1. 界面黏結性評估

##### (1) 聲測法

本法係採用敲擊鎚在修補面做掃描式敲擊，藉由發出的聲響判斷修補材料與基材之間是否密合，當修補品質良好，敲擊聲音較為低沉，若有孔洞時則會較為響亮。

##### (2) 敲擊回音法

1983 年，Carino 及 Sansalone 研究發展敲擊回音法，改變了應力波激發源為機械性的敲擊方式，接收器改成由點接觸之位移訊號接收器，除了直接在時間領域上，對量測到的位移波形作訊號分析外，亦透過快速傅利葉轉換（FFT）的處理，在頻率域上作訊號分析，藉由頻率域波形變化可應用於偵測版狀混凝土結構內部之各種瑕疵。

##### (3) 超音波法

超音波法乃藉由壓電式探頭發出超音波脈衝後量測回波之時距，由時距之長短來求得該物體之波速及缺陷位置，接觸式量測的超音波探頭基本上是一個面接觸的感測器，運用平面波的假設有其方便性，此法也較為眾人熟知，應用也相當廣泛。

#### 2、膠結材料評估

##### (1) 基本材料物性、化性評估



依照CNS、ASTM及JIS規範，對於膠結材料進行固成份、不揮發性、混合後初黏度、可操作時間等物化性質試驗與評估。

## (2)硬固性質評估

依照ASTM及JIS規範，對於膠結材料進行接著強度及硬化七天之抗張強度、抗張彈性係數、彎曲強度、抗張剪切強度等硬固性質試驗與評估。

## 3. RPC 材料評估

### (1)基本材料物性、化性評估

依照CNS及ASTM規範，對於RPC進行比重、工作度、凝結時間、SEM/EDS微觀分析等物化性質試驗。

### (2)硬固性質評估

依照CNS及ASTM規範，對於RPC進行抗壓強度、抗彎強度、劈裂強度、碳化試驗、電滲試驗、磨耗試驗等硬固性質試驗。

## 7.2.2 補強方針

### 1. RPC 補強材料之優點：

- (1)可配合現地構造物形狀澆置不同修補方式。
- (2)具有良好的耐久性、耐候性、韌性及強度。
- (3)與混凝土基材有良好的界面強度。
- (4)可藉由材料組成變化調整成不同彈性係數的材料，減少修補材與基材之間的差異變形。
- (5)與混凝土基材同為水泥質材料。

### 2. RPC 補強材料之缺點：

- (1)生產單價較高。
- (2)需較嚴謹的製程與品管程序，方能維持良好工作性及硬固性

質。

(3)如在現場澆置則需要模板組立作業成本及空間。

(4)需有養護時間才能發揮強度。

(5)不適合薄層修補。

(6)補強功效受到基材表面濕潤度的影響。

### 3.結構型態適用性補強方針之考量：

(1)港灣工程碼頭混凝土面版底層修補。

(2)船埠邊緣損傷混凝土修補。

(3)局部損傷的梁柱構件補強。

(4)不規則曲面構造物損傷補強。

(5)水工結構物受沖刷損傷面層之補強。

(6)剛性路面防止高度磨耗損傷之補強。

### 4.修補方式、費用及技術補強方針之考量：

(1)受損 RC 構件可進行局部修補以節省施工費用之情況。

(2)需使用貫穿孔配合倒吊模板澆置 RPC 之施工情況。

(3)RC 構造物具有大面積平面狀損傷範圍之修補。

(4)受損傷構件邊緣具有銳角面之修補。

### 5.維修保養費用補強方針之考量：

(1)修補構材須長期使用在潮濕或水流沖蝕環境以減低高維修費用之情況。

(2)傳統修補工法所使用環氧樹脂黏結材因老化而喪失功能之環境。

(3)修補材料在長期使用期間可能會發生裂縫損傷，但仍可具備

某種程度之強度與韌性之修補情況。

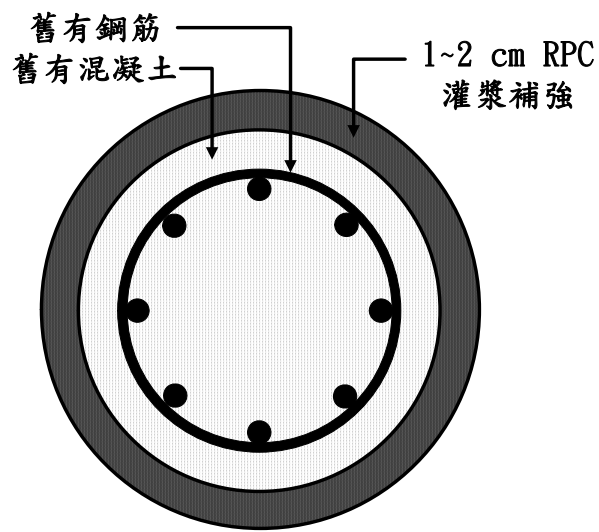


圖 7-1 RPC 圓柱補強工法示意圖

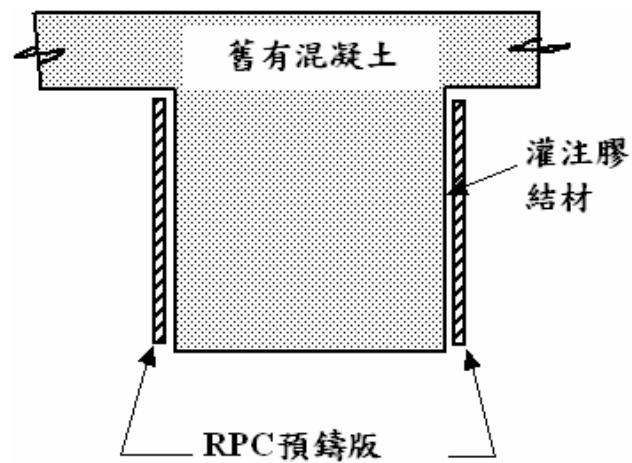


圖 7-2 RPC 梁剪力補強 (預鑄版塊補強方式) 補強工法示意圖

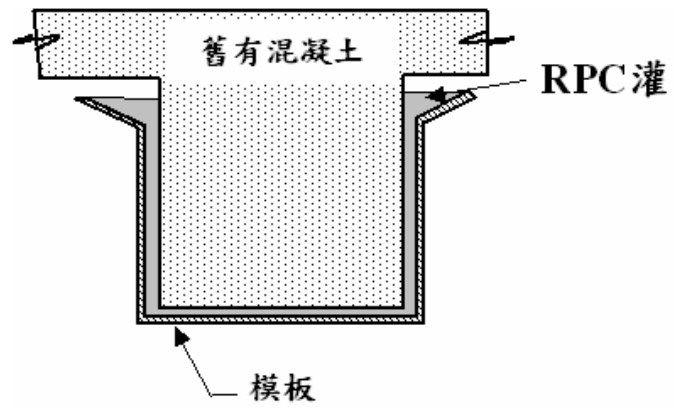


圖 7-3 RPC 梁剪力補強 (現場澆注補強方式) 補強工法示意圖

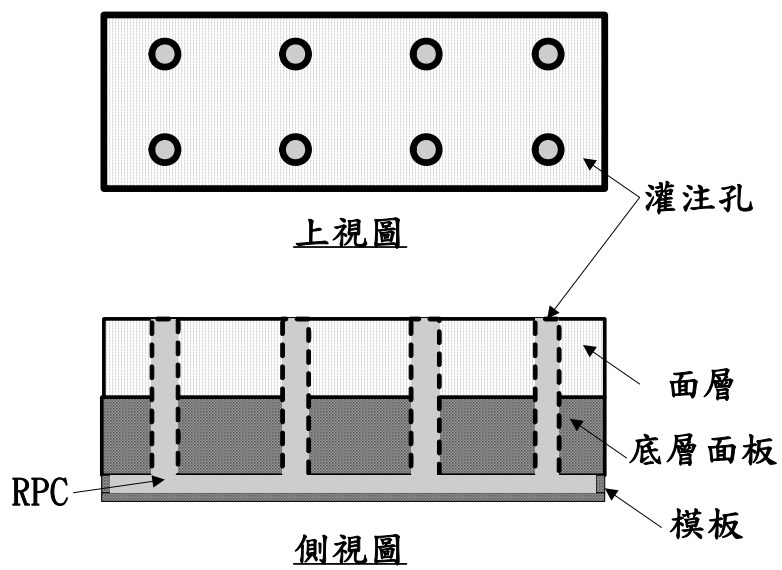


圖 7-4 RPC 面板底層補強工法示意圖

## 第八章 結論與建議

### 8.1 結論

#### 8.1.1 RPC 基本材料性質

- 1、RPC 流度試驗結果平均直徑約 240 mm，流度達 140 %，工作度已獲得相當程度改善，符合現場進行補強施工所需。
- 2、在基本力學性質表現方面，Mortar 和 NC 的抗壓強度及劈裂強度在養護初期便大致發展完成，但由於本研究之 RPC 組成材料中，含有大量卜作嵐材料（矽灰、爐石及飛灰），且未經高溫高壓催化，故直到 28 天齡期後才逐漸發展。在 28 天齡期時，RPC 抗壓強度為 85.67 MPa、劈裂強度為 12.41 MPa；在 90 天齡期時，RPC 抗壓強度為 114.08 MPa、劈裂強度為 13.59 MPa。
- 3、在材料性質方面，Mortar 的彈性模數發展最快，約在 7 天齡期已大致發展完成，RPC 與 NC 的彈性模數則在 28 天齡期後緩慢提升。在 28 天齡期時，RPC 彈性模數為 41.66 GPa， $E_{RPC}/E_{NC}$  與  $E_{RPC}/E_{Mortar}$  分別為 1.67、2.03；在 90 天齡期時，RPC 彈性模數為 42.63 GPa， $E_{RPC}/E_{NC}$  與  $E_{RPC}/E_{Mortar}$  分別為 1.55、2.03。而三種材料之卜松比在七天齡期之後皆介於 0.19 至 0.21 之間，故以 RPC 進行水泥砂漿基材或混凝土基材修補，具良好之材料相容性，對於修補成效有很大的助益。

#### 8.1.2 小型抗彎抗壓補強成效

- 1、RPC 係為水泥質材料，在無高溫高壓的養護條件下，其補強效果無立即性，須待具一定強度後才有明顯之補強成效。以 RPC 補強 1 cm，其補強齡期 28 天後，對於 Mortar 的抗彎補強成效超過 38 %，對於 NC 的抗壓補強成效則超過 13 %。
- 2、RPC 抗壓補強機制係利用本身高彈性模數特性，與內部基材組成複合材料後，而能承載較大之軸向載重。由於補強後抗壓構件之

卜松比增加，受力過程中側向變形明顯，但因外層 RPC 具鋼纖維，減緩裂縫擴大及爆裂情形；以 CFRP 補強一層後其抗壓強度提升超過 42 %，且材料的彈性模數及卜松比並無太大改變，顯示其補強機制係提供內部 NC 圍束力，與 RPC 補強機制不同。

### 8.1.3 縮小斷面柱補強功效

- 1、縮小斷面 RC 柱以 CFRP 補強一層之補強效果較佳，惟其破壞時為瞬時爆裂剝落，不具預警功能，若經 RPC 補強 1 cm 後，雖然抗壓強度提升效果並不顯著，但因 RPC 補強具有良好的韌性行為，使得柱體本身達到極限強度之後，仍能保持完整性，對於修補後結構再次受到破壞時能保有一定的安全性。
- 2、縮小斷面 RC 柱經 RPC 或 CFRP 補強後，在受力過程中箍筋幾乎不受張力作用，直到 RPC 或 CFRP 達到極限強度產生主要裂縫後，箍筋才產生作用。
- 3、RPC 與 NC 二者卜松比相似，在受力作用後變形均能保持諧和性。
- 4、本試驗進行為圓柱圍束，對於矩形等斷面進行圍束補強時，其角隅必須進行圓角處理，CFRP 才能發揮效果，但 RPC 材料則無須考量此點，即可進行力量傳遞，且無纖維之方向性問題。
- 5、對於結構補強時，因 CFRP 不耐磨損、高溫、火害、衝撞等，必須另做表面處理，但 RPC 具高耐磨、耐蝕、耐侵害之能力，前述之情形對於 RPC 材料均不會造成太大影響。

### 8.1.4 縮小斷面梁補強功效

- 1、縮小斷面 RC 梁經 RPC 補強 1 cm 後，提升 32 %開裂載重與 27 %極限載重，且提升效果與 CFRP 補強一層相同。
- 2、以 RPC 補強 1 cm 之縮小斷面 RC 梁中點位移為  $\delta y$ 、 $3\delta y$  及  $5.5\delta y$  時吸收能量之提升率分別為 50.29 %、42.77 %及 36.52 %，比 CFRP 補強時高，顯示經 RPC 補強 1 cm 後較不易變形。
- 3、縮小斷面 RC 梁經 RPC 或 CFRP 補強後，皆可提高斷面之抗剪強度，由補強前之斜剪破壞改變為撓曲破壞。

## 8.2 建議

- 1、縮小斷面 RC 柱經 RPC 補強後，由於材料本身承受軸向作用力並負擔整體柱身圍束效果，因此詳細的承壓與圍束雙模分析理論仍待進一步研究；另外對於 RPC 用於混凝土構件修補，其勁度公式之歸納整理，也待後續研究。
- 2、實際狀況下撓曲構件往往需承受反覆承載，經 RPC 補強後所形成之複合撓曲構件，對於承受反覆承載能力值得進一步研究探討。
- 3、在本研究中，所採用之基材及修補材（RPC）均為單一配比，考量現地實際狀況，後續可進行基材性質不同時，RPC 材料其修補成效及諧和性評估研究。

## 參考文獻

- [1] 苗伯霖，「新型高性能超高強建築材料-活性粉混凝土」，營建知訊，1996 年 7 月，162，pp. 52-60。
- [2] Richard, P. and M. Cheyrezy, “Composition of Reactive Powder Concretes”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
- [3] 陳振川、苗伯霖、李明君，「超高強高性能混凝土配比及性質研究」，期末報告，財團法人台灣營建研究院，1996。
- [4] 李騰芳、姚錫齡、徐力平、廖淑萍，「以活性粉混凝土（RPC）製造低階核廢料貯藏桶包封容器之研究」，土木水利，第二十六卷，第四期，第 72-78 頁，2000。
- [5] Dugat, J., N. Roux, and G. Bernier, “Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete”, Materials and Structures, Vol. 29, pp. 233-240, 1996.
- [6] Roux, N., C. Andrade, and M. Sanjuan, “Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes”, Journal of Materials in Civil Engineering, February, pp. 1-6, 1996.
- [7] Bonneau, O., M. Lachemi, E. Dallaire, J. Dugat, and P.-C. Aitcin, “Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes”, ACI Material Journal, Vol. 94, No. 4, pp. 286-290, 1997.
- [8] 任望東、段英麗，「活性粉末混凝土的性能研究及應用前景」，中外建築，第三期，第 194-196 頁，2004。
- [9] 賴榮森，「纖維混凝土之發展與應用」，財團法人台灣營建研究院，1983。
- [10] 宋佩瑄，「纖維混凝土實務」，現代營建雜誌社出版，台北，1991。



- [11] 楊錦懷、陳振川，「纖維與混凝土界面握裹力研究及纖維混凝土應用於預鑄接頭」，纖維混凝土發展與應用，台北，第 77-121 頁，1997。
- [12] 陳健、劉紅彬、賈玉丹、鞠楊，「活性粉末混凝土的研究與應用」，工業建築，第三十五期，第 663-667,672 頁，2005。
- [13] 何峰、黃政宇，「矽灰和石英粉對活性粉末混凝土抗壓強度貢獻的分析」，混凝土，第一九五期，第 39-42 頁，2006。
- [14] 吳建興，「活性粉混凝土補強混凝土構件與耐久性能之測試研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程研究所，台中，2003。
- [15] Cabrera, P. J. G. and A. S. Al-Hasan, "Performance Properties of Concrete Repair Materials", Construction and Building Materials Journal, Vol. 11, No. 5-6, pp. 283-290, 1997.
- [16] 何明錦、吳傳威、彭添家，「鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編」，內政部建築研究所專題研究計畫成果報告，1998。
- [17] Wang Salmon 原著，凌合、高芳傑、彭生富共譯，「鋼筋混凝土設計」，高立圖書有限公司，1992。
- [18] 中國土木水利學會，「混凝土工程設計規範與解說」，科技圖書，P4-1~4-7，2005。
- [19] Malek, A. M., and Saadatmanesh, H., "Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Web-Bonded Fiber-Reinforced Plastic Plates," ACI Structural Journal, V. 95, No. 4, July-August, pp. 391-399 (1998).
- [20] 葉芳耀，「碳纖圍束混凝土柱軸壓強度與極限應變之影響因子研究」，博士論文，國立台灣大學土木工程研究所，台北，2003。
- [21] Kent, D. C., and Park, R., "Flexural members with confined concrete," Journal of the structural division, ASCE, Vol. 97, No. 7, pp. 1969-1990(1971).

- [22] Muguruma, H., Watanabe, S., Katsuta, S., and Tannka, S., "A stress-strain model of confined concrete," Proceedings, JCA Cement and Concrete, Vol. 34, Japan Cement Assn., Tokyo, Japan, pp. 429-432 (1980).
- [23] Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Analytical model for concrete confinement in tied columns," Journal of the structural division, ASCE, Vol. 108, No. 12, pp. 2703-2722 (1982).
- [24] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical stress strain model for confined concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826 (1988).
- [25] Fujii, M., Kobayashi, K., Miyagaya, T., Inoue, S., and Matsumoto, T., "A study on the application of a stress-strain relation of concrete," Proceedings, JCA Cement and Concrete, Vol. 42, Japan Cement Assn., Tokyo, Japan, pp. 311-314 (1988).
- [26] Saatcioglu, M., and Razvi, S. R., "Strength and ductility of confined concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607 (1992).
- [27] Richart, F. E., 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.
- [28] Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A. W., "Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers," Journal of structural engineering, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633 (1997).
- [29] Mirmiran, A., and Shahawy, M. (1997). "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites." Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(5), 583-590.
- [30] Fardis, M. N., and Khalili, H., "FRP-encased concrete as a structural material," Magazine of Concrete Research, Vol. 34, No. 122, pp. 191-202 (1982).

- [31] Karbhari, V. M., and Gao, Y., "Composite jacketed concrete under uniaxial compression verification of simple design equations," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 185-193 (1997).
- [32] Kawashima, K., Hosotani, M., and Hoshikuma, J., "A Model for Confinement Effect for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets," NCEER-INCEDE Workshop on Earthquake Engrg. Frontiers of Transp. Fac., NCEER, State University of New York, Buffalo, N.Y., (1997).
- [33] Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of concrete confined with fiber composite," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 9, 1025-1031 (1998).
- [34] Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., and Kobayashi, A., "Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet," *Transactions of Japan Concrete Institute*, Vol. 114, pp. 143-150 (1999).
- [35] Toutanji, H. A., "Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets," *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 3, 397-404 (1999).
- [36] Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of concrete column confined with fiber reinforced polymer tubes," *ACI Materials Journal*, ASCE, Vol. 96, No. 4, 500-509 (1999).
- [37] Spoelstra, M. R., and Monti, G., "FRP-confined concrete model," *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol.3, No. 3, 143-150 (1999).
- [38] Xiao, Y. and Wu, H., "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 139-146 (2000).
- [39] Li, Y.-F., C.-T. Lin and Y.-Y. Sung, " A Constitutive Model for Concrete Confined with Carbon Fiber Reinforced Plastics ", *Mechanics of Materials*, 35, pp.603-619 (2003).

- [40] Yuan, X. F., Lam, L., and Smith, S. T., "FRP-confined RC columns under combined bending and compression: a comparative study of concrete stress-strain models," FRP Composites in Civil Engineering, Vol. I, pp. 749-758 (2001).
- [41] 林慶昌、施晉車、鄭皓元、李秉乾、廖為忠（1998），「玻璃纖維複合材料圍束補強混凝土之承載行為探討」，第四屆結構工程研討會，pp. 2173-2180.
- [42] Wall, J. S. and N. G. Shrive, "Factors Affecting Bond between New and Old Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 2, pp 117-125, 1988.
- [43] 林至聰、張寬勇、施邦築，「RC 材料以 CFRP 圍束補強後受往複力作用試驗之研究」，第四屆結構工程研討會，pp. 2149-2156，民國 87 年 9 月。
- [44] 張寬勇、林至聰、施邦築，「RC 構件以 CFRP 補強之耐久性試驗研究」，第四屆結構工程研討會，pp. 2093-2100，民國 87 年 9 月。
- [45] 施邦築、李有豐、朱國棟，「RC 結構補強之材料及工法」，土木技術，第 5 期，第 118-127 頁，民國 87 年 7 月。
- [46] 張瑞元，「纖維布貼片與水泥混凝土黏結效果之研究」，國立中央大學土木研究所，碩士論文，民國 86 年 6 月。(黃偉慶教授指導)
- [47] 李秉乾、吳岱祐、李宗澤、廖為忠，「鋼筋混凝土樑以玻璃纖維強化高分子貼片補強之研究」，八十七年度行政院公共工程委員會委託專案研究-橋樑結構修補技術研討會論文集，pp. C1-C20，民國 87 年，台北。
- [48] 黃培彰、徐耀賜，「利用複合材料進行彎矩及剪力現地補強鋼筋混凝土 T 形梁之研究」，結構工程，民國 91 年 03 月，第 29-41 頁。楊錦懷、陳振川，「纖維與混凝土界面握裹力研究及纖維

混凝土應用於預鑄接頭」，纖維混凝土發展與應用，台北，第 77-121 頁，1997。

- [49] 邱佑宗、朱國棟，「橋柱之檢測及碳纖維補強設計與施工」，強化塑膠，民國 91 年 6 月，第 50-59 頁。
- [50] 李有豐、朱育正、張國鎮，「碳纖維高分子複合材料於圓形 RC 橋柱撓曲破壞耐震補強之理論與實驗驗證」，中國土木水利工程學刊，民國 91 年 6 月，第 343-351 頁。
- [51] 徐耀賜、黃培彰，「RC 連續梁運用複合材料碳纖維貼片(CFRP) 剪力補強之研究」，結構工程，民 90 年 6 月，第 31-44 頁。
- [52] 王仲宇、洪維鈞、林澄政，「矩形鋼筋混凝土橋柱碳纖維包覆耐震補強之實驗與分析」，中國土木水利工程學刊，90 年 3 月，第 71-85 頁。
- [53] 吳夢嚴，「混凝土裂縫修補後強度及破裂韌性之研究--活性粉質砂漿及無收縮水泥砂漿」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程研究所，台中，2003。(干裕成教授指導)
- [54] 吳建興，「活性粉混凝土補強混凝土構件與耐久性能之測試研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程研究所，台中，2003。(李明君教授指導)
- [55] 李明君、王勇智、吳建興、何偉智，「新材料應用於核能電廠防護或核廢料貯藏設施老劣化、腐蝕與抑制技術之基礎研究」，國科會研究報告，民國 91 年。(計畫編號：NSC 91-NU-7-324-001)
- [56] 徐耀賜，魏志霖，「混凝土橋梁構件之補強與加固」，現代營建，260 期，pp32，2002。
- [57] Park, Robert and Thomas Paulay, “Reinforced Concrete Structures”, A Wiley-Interscience Publication, Wiley, New York, 1975, pp. 769.

- [58] Schlaich, Joerg Kurt Schaefer, and Mattias Jennewein, "Towards a Consistent Design of Reinforced Concrete Structures", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 32, No. 3, May-June 1987.
- [59] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-95)and Commentary(ACI 318R-95), American Concrete Institute, Detroit, MI, 1995, 369 pgs.
- [60] AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 15<sup>th</sup> Edition, Washington D. C., 1992.
- [61] Khalifa, A., Gold, W., Nanni, A., and Abdel-Aziz M.I., "Contribution of Externally Bonded FRP to the Shear Capacity of RC Flexural Members", Journal of Composites for Construction(JCC) -ASCE, Vol. 2, No.4, Nov. 1998, pp.195-202.
- [62] Maeda, T., Asano, Y., Sato, U., Ueda, T., and Kakuta, Y., "A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceeding of the Third Symposium, Vol. 1, Japan, Oct. 1997, pp. 279-286.
- [63] Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L.-W., and Connelly, G. M. "External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics.", ACI Struct. J., 88(4), 490-500, 1991.
- [64] Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. "RC beams strengthened with FRP plates, I: Experimental study.", J. Struct. Engrg., ASCE,117911, 3417-3433., 1991.
- [65] 彭添富，李有豐，張寬勇，陳威杰，「碳纖維強化高分子複合材料（CFRP）補強 RC 構件設計之研究」，結構工程，第十六卷，第二期，第 3-14 頁(1991)。
- [66] 蕭興臺，「複合三明治樑之撓曲理論及其在 RC 樑鋼板補強之應用」，中國土木水利工程學刊，第九卷，第三期，第 399-407 頁(1997)。
- [67] Chen, Y. H. and Sheu, J. T., "Dynamic Characteristics of Layered Beam with Flexible Core, " Journal of Vibration and Acoustics, ASME. Vol.116, pp.350-356 (1994).

- [68] Chen, Y. H. and Sheu, J. T., "Beam on Viscoelastic Foundation and Layered Beam, " Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.121, No.2, pp.340-344 (1995).
- [69] Roberts, T. M., and H. Haji-kazemi, "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates," Proceeding of Institution of Civil Engineers, Vol. 187, No 2, pp. 39-55 (1989a).
- [70] Roberts, T. M., "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams," The Structural Engineer, Vol. 67, No. 12. pp. 229-233 (1989b).
- [71] Roberts, T. M., "Shear and Normal Stresses in Adhesive Joints," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 115, No. II. pp. 2460-2479 (1989c).
- [72] Sho-bond Co., "R.C.板及樑補強工法之研究", 日本建築研究所報告, 1984。
- [73] Nanni, A. and Bradford, N., "FRP Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression", Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 2, 4, pp. 115-124, 1995.
- [74] ATC-32, Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations, Applied Technology Council, Redwood City California, 1996.
- [75] Caltrans, Bridges, Design Specifications, 1995.
- [76] Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [77] Priestley, M. J. N., and Seible, F., "Seismic and Retrofit of Bridges," Structural Systems Research Project, Report No. SSRP-93/06, University of California, San Diego, La Jolla, CA, July 1991.
- [78] Priestley, M. J. N., Seible, F. and Chai, Y. H., "Design Guidelines for Assessment Retrofit and Repair of Bridges for Seismic

Performance,” Structural Systems Research Project, Report No. SSRP-93/06, University of California, San Diego, La Jolla, CA, August 1992.

- [79] ASTM A183-998 , “Specification for Carbon-Steel Track Bolts and Nuts”.
- [80] CNS 13553(JIS K7601) , 碳纖維試驗法(Method of Test for Carbon Fibers).
- [81] 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.)
- [82] CNS 13555 (ASTM D3039) (JIS K7073) , 碳纖維強化塑膠抗拉性能試驗法(Methods of Test for Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics.)
- [83] 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.)
- [84] CNS 7397 (ASTM D3776) , 玻璃纖維製品檢驗(Methods of Test for Fiber Glass Products.)
- [85] CNS 12780 (ASTM D790) (JIS K7055) , 玻璃纖維強化塑膠之抗彎性能測定法(Methods of Test for Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics.)
- [86] CNS 13559 (ASTM D2344) , 碳纖維強化塑膠層間剪斷強度試驗法(Methods of Test for Apparent Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber Reinforced Plastics.)
- [87] 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.)



## **附錄一：期中報告審查意見及處理情形**

附錄一： 交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

☒期中☐期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：「活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究（2/2）」

計畫編號：MOTC-IOT-95-H1DB002

執行單位：臺灣科技大學

審查日期：95 年 7 月 30 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<b>國立成功大學黃忠信教授</b>		
1.第二年 RPC 配比是否與第一年所獲得 RPC 最佳配比相同。	是。	同意處理方式
2.柱中 RPC 修補層若僅為 1 公分，則 RPC 中是否仍須使用鋼纖維。	是。為了考量柱構件有延展性之破壞行為，因此有其必要於 RPC 中添加鋼纖維。	同意處理方式
3.普通混凝土並無抗彎強度之量測。	依據第二年工作計畫書內容並無此試驗規劃，不過有本年度計畫有規劃進行 $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 圓柱試體之劈裂試驗，因此仍可獲得混凝土之抗張強度。	同意處理方式
4.縮小尺寸之梁柱修補試驗結果，是否存在尺寸效應？	原研究計畫內容即為進行縮小尺寸之梁柱修補試驗；由於在此項縮小尺試體之試驗中，雖試體外形大小尺寸有所不同，但雖所用的混凝土粒料粒徑、鋼纖維長度及斷面等均仍使用相同尺寸大小之材料，材料並未隨外形尺寸之縮小而亦隨之縮小，因此，如試圖以此種僅在外形以等比例縮小但其內組成材料仍為相同尺寸之小試體所得的試驗結果，作為推估大試體的補強效應，在理論上，此種存在之尺寸效應很難評估；最好解決方式仍另須以實際尺寸大梁柱進行相關試驗，方可	同意處理方式

	評估實際尺寸之大型梁柱的補強功效；本研究計畫的提案中，並未有規劃此項實際梁柱尺寸的相關試驗，因此，如欲瞭解 RPC 補強效果之尺寸效應仍需另案執行進一步的研究評估。	
5.第 94 及 95 頁，圖 6-9 及 6-10 中，上下部鋼筋載重應變圖，是否應對稱？	因上下部鋼筋之應變計未在同一斷面，因此形成不對稱圖形。	同意處理方式
<b>臺灣海洋大學張建智教授</b>		
1.內容豐富，文字表達清晰，可讀性佳。	謝謝審查委員之評語。	同意處理方式
2.利用 RPC 修補時，RPC 與基材間的黏結效果如何？	本研究利用 RPC 修補時，係採用將新拌 RPC 直接澆置在欲修補之硬固混凝土試體外緣，並未進行額外界面處理；截至目前所得試驗結果顯示：RPC 與基材間之黏結效果確有部份情況似有不佳現象，但大部份情形均尚屬良好。	同意處理方式
3.抗壓強度測試時，為何提高加壓速率（4.5～7.14 kgf/cm <sup>2</sup> ），有無特別實驗上的考量？	由於活性粉混凝土之抗壓強度，比高性能混凝土高出許多，經長期試驗所得經驗顯示：酌予提高加壓速率，對抗壓強度之測試結果並未發現有異常變異情形。	同意處理方式
4.第 51 頁建議表 4-1 重新繕打，以增加清晰度。	感謝指正，將報告中之表 4-1 重新繕打。	同意處理方式
5.第 102 頁結論 3.中“兩者因材料參數相近”，建議註明其為卜松比。	感謝指正，依審查委員之意見進行修正。	同意處理方式
6.些許筆誤之處請更正： a.頁碼“ I ”中，2-1-4 標題錯誤。 b.第 7 頁第 7 行，“與水泥中 Ca(OH) <sub>2</sub> .....”，建議修	感謝指正，依審查委員之意見進行修正。	同意處理方式

正為“與水泥水化後的產物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ....”		
<b>朝陽科技大學李明君 教授</b>		
1.報告內容完整，符合進度。	謝謝審查委員之評語。	同意處理方式
2.第七章 7-2 後續進度未說明 RPC 補強成效之驗證方法？尺寸效應如何驗證？	後續進度中會針對 RPC 補強成效進行理論分析與試驗結果之成效驗證。 由於在此項縮小尺試體之試驗中，雖試體外形大小尺寸有所不同，但雖所用的混凝土粒料粒徑、鋼纖維長度及斷面等均仍使用相同尺寸大小之材料，材料並未隨外形尺寸之縮小而亦隨之縮小，因此，如試圖以此種僅在外形以等比例縮小但其內組成材料仍為相同尺寸之小試體所得的試驗結果，作為推估大試體的補強效應，在理論上，此種存在之尺寸效應很難評估；最好解決方式仍另須以實際尺寸大梁柱進行相關試驗，方可評估實際尺寸之大型梁柱的補強功效；本研究計畫的提案中，並未有規劃此項實際梁柱尺寸的相關試驗，因此，如欲瞭解 RPC 補強效果之尺寸效應仍需另案執行進一步的研究評估。	同意處理方式
3.第 69 頁與圖 5-5 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體標稱尺寸不符（ $\phi 30 \times 60\text{cm}$ 與 $\phi 28.5 \times 60\text{cm}$ ）。	感謝指正，此為繕打作業疏失，應為 $\phi 28.5 \times 60\text{cm}$ 。	同意處理方式
4.第 70 頁與圖 5-6 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體鋼筋主筋數量不符（4 支與 5 支 #5 鋼筋）。	感謝指正，4 支 #5 鋼筋為本計畫初期先行試做之試驗，實際研究計畫為 5 支 #5 鋼筋。	同意處理方式

港灣技術研究中心 陳桂清研究員

<p>1. 實際尺寸與縮小尺寸試體在實務修補（強）上及力學行為分析，如何評估其尺寸差異效應？</p>	<p>由於在此項縮小尺試體之試驗中，雖試體外形大小尺寸有所不同，但雖所用的混凝土粒料粒徑、鋼纖維長度及斷面等均仍使用相同尺寸大小之材料，材料並未隨外形尺寸之縮小而亦隨之縮小，因此，如試圖以此種僅在外形以等比例縮小但其內組成材料仍為相同尺寸之小試體所得的試驗結果，作為推估大試體的補強效應，在理論上，此種存在之尺寸效應很難評估；最好解決方式仍另須以實際尺寸大梁柱進行相關試驗，方可評估實際尺寸之大型梁柱的補強功效；本研究計畫的提案中，並未有規劃此項實際梁柱尺寸的相關試驗，因此，如欲瞭解 RPC 補強效果之尺寸差異效應仍需另案執行進一步的研究評估。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>2. 報告內容中使用之文字、名詞、試驗規範應求統一，諸如，（橋樑↔橋梁）、（NC，常重混凝土、普通混凝土）.....等，（第 62 頁與第 64 頁，卜特蘭一型中度低熱水泥↔卜特蘭一型普通水泥）、（第 63 頁 9. 強塑劑段第三行，敘述不明）、（第 64 頁倒數第三行，（2）積層樹脂部份之文字敘述有誤。</p>	<p>感謝指正，依審查委員之建議進行修正。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>3. 第 69~70 頁中之試體尺寸與第 77 及 78 頁中之試體尺寸圖示標示有差異。</p>	<p>感謝指正，此為繕打作業疏失，應為 <math>\phi 28.5 \times 60</math> cm。</p>	<p>同意處理方式</p>

4.第 75 頁表 5-10 中常重混凝土部份，為何沒有抗彎試驗？	依據第二年工作計畫書內容並無此試驗規劃，不過有本年度計畫有規劃進行 $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 圓柱試體之劈裂試驗，因此仍可獲得混凝土之抗張強度。	同意處理方式
<b>港灣技術研究中心 簡仲璟科長</b>		
1.試驗計畫採用第一年計畫中所建議之 RPC 配比？是依據什麼？是抗彎或抗壓強度？請補充說明。	因考量國內外相關 RPC 材料之研究皆使用了高水泥用量，且修補材料與被補強基材之材料性質（E、 $\nu$ ）不宜差距過大，抗壓強度也不須過高，故採用第一年計畫中所建議之配比，以添加卜作嵐材料（爐石取代部份水泥，飛灰取代部份矽灰）達到上述考量目的。	同意處理方式
2.若依抗彎強度來看，RPC 補強厚度與鋼纖含量（包括鋼纖長度）間之關係如何？	根據第一年計畫研究結果顯示，抗彎構件之 RPC 補強厚度增加，其抗彎強度增加效果有限。另外，國內外相關研究顯示，鋼纖含量愈多，於抗彎強度也隨之提升，但流動性不佳，將不利於工作度。	同意處理方式
3.為配合後續之教育訓練，對於不同構件條件與強度需求，RPC 之配比設計、補強施工程序或流程及其他注意事項，應事先有明確準則或規範。	感謝簡科長建議，相關事項將儘量在教育訓練資料時一併納入。	同意處理方式

## **附錄二：期末報告審查意見及處理情形**

附錄二：

**交通部運輸研究所臺灣技術研究中心  
研究計畫案期末報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：「活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究（2/2）」

計畫編號：MOTC-IOT-95-H1DB002

執行單位：台灣科技大學

審查日期：95 年 11 月 17 日

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
成功大學土木工程系 黃忠信 教授		
1.RPC 材料性質變異性很大，如何提供使用者足夠之材料標準配比（如上下限等），以確保其品質。	感謝委員建議，因計畫執行經費與時限關係，僅能就單一 RPC 配比進行補強構件試驗，故本計畫僅對所採用之 RPC 配比材料標準做敘述。	同意處理方式
2.縮小尺寸試驗中，鋼筋尺寸似未改變，其試驗成效與實尺寸之結果差異如何判斷？	在試驗中已縮小鋼筋尺寸為 #3、#4、#5，目前試驗結果所呈現之現象可供為判斷實際尺寸時之參考。	同意處理方式
3. RPC 材料中包含鋼纖維，實際使用可否將其減用或去除？	RPC 材料具有高強度、高韌性及耐久性三大特點，而鋼纖維係提供 RPC 材料具有高韌性之來源，另外，鋼纖維用量也會影響 RPC 材料之工作性，因此建議對於鋼纖維是否減用或去除，需視構件補強功用及工作性要求而決定。	同意處理方式
4. RPC 用於混凝土構件修補，其強度公式是否須考量構件修補後應視為複合材之性質。	本研究過程中有試圖以鋼鈹補強、複合材料等分析公式與試驗結果現象相互對照，但皆不相符，故此點將納入建議事項，作為後續研究之參考。	同意處理方式



1.內容詳實，架構完整，具實用參考價值。	感謝委員悉心閱讀。	同意處理方式
2.請修正文中部份繕打錯誤之處：  a.圖目錄中（圖 4-1～圖 4-3）頁次不符。 b.p65 彈性模數的單位 Gpa(表 4-2)。 c. p77 抗彎試體尺寸：40 × 40 × 160 mm。 d. p79 第 13 行抗壓強度修正為抗彎強度。 e. p83 表 5-7 試驗規範重覆。 f. p5 去除粒徑大於 1 mm 以上的“骨材”。 g. p99 無照片 6-1。 h. p110 表 6-6，齡期 3 天的 $\mu$ 值是否有誤？	感謝委員指正。  a.已完成修改。 b.已完成修改。 c.已完成修改。 d.已完成修改。 e.已重製表格。 f.已完成修改。 g.改以數值表示。 h.實為計算錯誤，已訂正修改。	同意處理方式
3.本研究中，基材及修補材（RPC）均為單一配比，考量現地實際狀況，倘基材性質不同時，其修補成效及兩者間的諧和性如何，建議可加入 8.2 建議中，列入後續的研究。	感謝委員建議，已列入 8.2 節做為後續研究參考。	同意處理方式
4.請補充說明表 5-5 水泥砂漿配比的構想。	感謝委員建議，已補充於第 5.1 節。	同意處理方式

朝陽科技大學營建工程系 李明君 教授（請假，書面審查）		
1.本研究報告完整，具參考價值。	感謝委員悉心閱讀。	同意處理方式
2.結論 8.1.3 與 8.1.4 有關“補強功效”是否能修改為“補強成效”，如此可與研究目的和項目較一致。	感謝委員指正，已修改完成。	同意處理方式
3.有關第二章文獻回顧 2.3.4 RPC 修補混凝土結構物部份，說明國內此方面的研究成果發表很少。弟願提供 2002 年國科會與原委會編號 NSC91-NU-7-324-001 的研究報告內容有活性粉混凝土修補梁柱接頭試驗成效，敬請卓參。	感謝委員提供資料，已完成閱讀，並補充摘錄介紹於第 2.3.4 節。	同意處理方式
4.有關結論 8.1.2、8.1.3 與 8.1.4 內容中，應說明 CFRP 補強層數（1 層）與 RPC 補強厚度（1 公分）。	感謝委員指正，已修改完成。	同意處理方式
港灣技術研究中心 陳桂清 研究員		
1.研究內容及方向符合原規劃目標。	感謝計畫執行期間，港灣技術研究中心給予指導與協助，讓研究順利完成。	同意處理方式
2.實際尺寸與縮小比例試體在力學行為分析差異性可能很大，如何評斷？	已縮小鋼筋尺寸為#3、#4、#5，目前試驗結果所呈現之現象可供為判斷實際尺寸時之參考，如要數據定量化，則有其困難性。	同意處理方式
3.應用於港灣 R.C.底板之修補，其可行性如何？	感謝委員建議，相關修補程序已補充於第 7.1.4 節。	同意處理方式
港灣技術研究中心 饒正研究員		
1.請將其中審查意見及處理情形，加入本報告書內，以供參考。	感謝委員指正，期中及期末之審查意見皆已補充。	同意處理方式
2.在第七章「RPC 補強施工程序及評估與補強方針」中可否增加碼頭混凝土面板底層 RPC 補強工法之示意圖，最好有施工程序。	感謝委員建議，相關修補程序已補充於第 7.1.4 節。	同意處理方式

3.請將去年之研究成果列入本報告書內。	感謝委員建議，已補充於第 1.3 節。	同意處理方式
港灣技術研究中心 柯正龍 副研究員		
1.研究報告之編輯方式，請依本中心規定格式辦理。	感謝委員指正，已按規定重新編排完成。	同意處理方式
2.p4 圖 1-1 研究流程圖建議改為縱向，方便報告閱讀。	感謝委員建議，已修改。	同意處理方式
3.p129 圖 6-31、圖 6-32 之鋼筋應變特性，建議補充說明。	感謝委員建議，已補充討論於第 6.3.3 節。	同意處理方式
4.p139 有關第 7.2.1 節之膠結材料與 RPC 材料評估內容，建議補充說明。	感謝委員建議，已補充，請詳第 7.2.1 節。	同意處理方式

### **附錄三：期中進度整合會議**

### 附錄三：「活性混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究(2/2)」 期中整合階段會議紀錄

---

#### 「活性混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究(2/2)」 期中整合階段會議紀錄

一、開會時間：中華民國 95 年 6 月 9 日 上午 10:00 至 12:00

二、開會地點：國立台灣科技大學 營建系 E2-222

三、出席人員：王金圳、張淳勛、陳柏存、高進驊

四、會議主席：張大鵬、黃兆龍

會議紀錄：陳柏存

五、主持人說明摘要：

1. 首先感謝港灣研究所朱金元科長及柯正龍先生蒞臨指導本次研究案的期中整合會議，由於本研究案須於 6 月 29 日前提出期中報告，本次會議係就其中報告前的工作內容及進度作為說明與檢討，以期能準時提出期中報告。
2. 請相關人進行目前工作之簡報說明。

六、工作進度報告

1. 高進驊目前進度報告內容摘要（詳附件一）

七、綜合討論（略）

八、港灣研究所說明摘要：

1. 從簡報中可知道貴研究團隊花了相當多的心力完成試驗準備工作，相當不容易。
2. 實驗進度宜加快，並注意期中報告繳交期限。

九、結論

1. 尚未完之資料整理、配比理論及試驗工作宜儘快在本週內做階段性切割，就完成部份提早將資料整理，做為期中報告的初步成果。
2. 完整期中報告請在 6 月 29 日前完成，以利檢討與補充期中報告內容。

期中整合階段會議出席人員簽到單

活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究

(2/2)

工作會議簽到單

一、時間：95 年 6 月 9 日(星期一)上午 10 點

二、地點：台灣科技大學 E2-222 會議室

三、主持人：

張大鵬教授 張大鵬

黃兆龍教授 黃兆龍

四、出席人員：

朱金元 科長 朱金元

柯正龍 先生 柯正龍

蘇吉立 先生 \_\_\_\_\_

王金圳 先生 王金圳

張淳勛 先生 張淳勛

陳柏存 先生 陳柏存

吳崇聖 先生 \_\_\_\_\_

高進驊 先生 高進驊

交通部運輸研究所合作研究計畫  
活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究  
(2/2)

期中整合階段會議



委託單位：交通部運輸研究所  
執行單位：國立臺灣科技大學營建工程系  
會議時間：95 年 6 月 9 日  
會議地點：營建系 E2-222 室  
計畫主持人：張大鵬教授  
協同主持人：黃兆龍教授  
研究助理：林秉如、王金圳、張淳勛  
陳柏存、吳崇聖、高進驊  
展維賢、呂冠群、丁小真

## 壹、前言

近年來有關混凝土結構物維修補強的課題，在全世界各地正積極的進行中。本計畫為應用活性粉混凝土（RPC）補強鋼筋混凝土（R.C.）構件之研究，本計畫團隊於第一年建立 RPC 配比計算模式並完成 RPC 工程性質、耐久性質與補強性能之試驗，第二年的研究內容將著重在補強實體 RC 構件之性能，茲分述如下：

- 1、建立 RPC 補強材料配比設計，並依據建築技術規則製作縮小尺寸鋼筋混凝土梁、柱補強，以實際 R.C.構件驗證活性粉混凝土補強效果。
- 2、進行碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗。
- 3、建立補強施工程序及評估與補強方針。
- 4、技術移轉給各使用單位及教育訓練說明。

本次期末整合階段報告係依上述四個主要研究項目，分別報告已完成項目、尚未完成項目及預計進度，並將簡單展示已完成項目之初步結果。

## 貳、研究計畫工作項目及進度說明

### 一、RPC 補強材料配比設計與基本力學性質試驗

#### 1、簡述：

將第一年計畫建議採用之 RPC 配比進行小幅修正，增加其工作性，以符合現場進行補強狀況，並重新進行其基本力學試驗及 E、 $\nu$  值量測，以作為結構補強分析時計算之依據。

#### 2、試驗配比

表一 本計畫採用之 RPC 配比 ( $\text{kg/m}^3$ )

試體 名稱	石英砂				飛 灰	石 英 粉	矽 灰	爐 石 粉	水 泥	水	強 塑 劑	鋼 纖 維
	#30	#50	#100	#200								
RPC	413	296	206	146	166	70	79	184	553	165	41	156



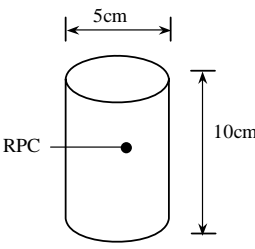
### 3、試驗項目與齡期

表二 RPC 補強材料試驗項目與齡期

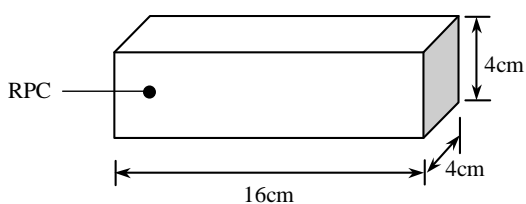
試體名稱	試體尺寸	試驗項目	試驗齡期 (天)					
			新拌	3	7	28	56	90
RPC	$\Phi 5 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$	1.流度試驗	✓	—	—	—	—	—
		2.抗壓試驗	—	✓	✓	未完成	未完成	未完成
		3.E、 $\nu$ 量測	—	✓	✓	未完成	未完成	未完成
		4.劈裂試驗	—	✓	✓	未完成	未完成	未完成
	4 cm $\times$ 4 cm $\times$ 16 cm	5.抗彎試驗	—	✓	✓	未完成	未完成	未完成

試體略圖



RPC 抗壓與劈裂試驗試體



RPC 抗彎試驗試體

## 二、碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗

### (1) 抗彎性能補強

#### 1、簡述：

以水泥砂漿製作抗彎試體，並於底部貼鋪 1 cm 厚之 RPC 補強材料，按 CNS 或 ASTM 規範進行抗彎試驗，量測抗彎強度，並記錄變形曲線，進行補強後之破壞行為探討。

#### 2、試驗材料配比與基本力學試驗

RPC 補強材料配比與基本力學試驗同表一，水泥砂漿配比如表三所示，其基本力學試驗如表四所示。

表三 抗彎補強試驗採用之水泥砂漿配比 ( $\text{kg/m}^3$ )

試體名稱	水	水泥	砂	強塑劑
Mortar	235	392	1636	0.98

表四 水泥砂漿基本力學試驗

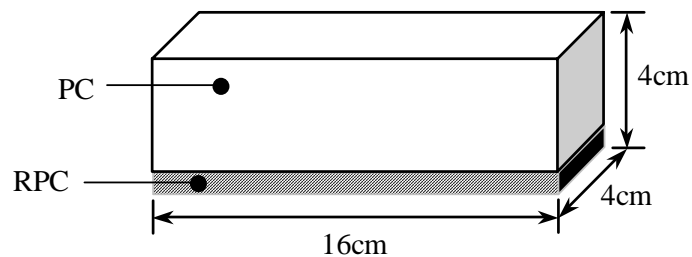
試體 名稱	試體尺寸	試驗項目	試驗齡期(天)			
			新拌	7	28	90
Mortar	$\Phi 5 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$	1.流度試驗	未完成	—	—	—
		2.抗壓試驗	—	未完成	未完成	未完成
		3. E、 $\nu$ 量測	—	未完成	未完成	未完成
	4 cm $\times$ 4 cm $\times$ 16 cm	4.抗彎試驗	—	未完成	未完成	未完成

## 3、試驗項目與齡期

表五 Mortar / RPC 抗彎性能補強試驗

	試體尺寸	試驗項目	補強齡期(天)				
			3	7	28	56	90
Mortar / RPC	4 cm $\times$ 4 cm $\times$ 16 cm	抗彎補強試驗	未完成	未完成	未完成	未完成	未完成

試體略圖

RPC 抗彎補強試驗試體

## (2) 抗壓性能補強

## 1、簡述：

以混凝土灌製標準與縮小斷面圓柱試體，分別以未包覆、包覆一層 CFRP 貼片及 1 cm 厚 RPC 補強材料等三種方式，按 CNS 或 ASTM 規範進行抗壓試驗，量測抗壓強度，並記錄應力應變曲線。

## 2、試驗配比

RPC 補強材料配比與基本力學試驗同表一，混凝土配比係採設計強度 210

kg/cm<sup>2</sup>之預拌混凝土，其基本力學試驗如表六所示。

表六 混凝土基本力學試驗

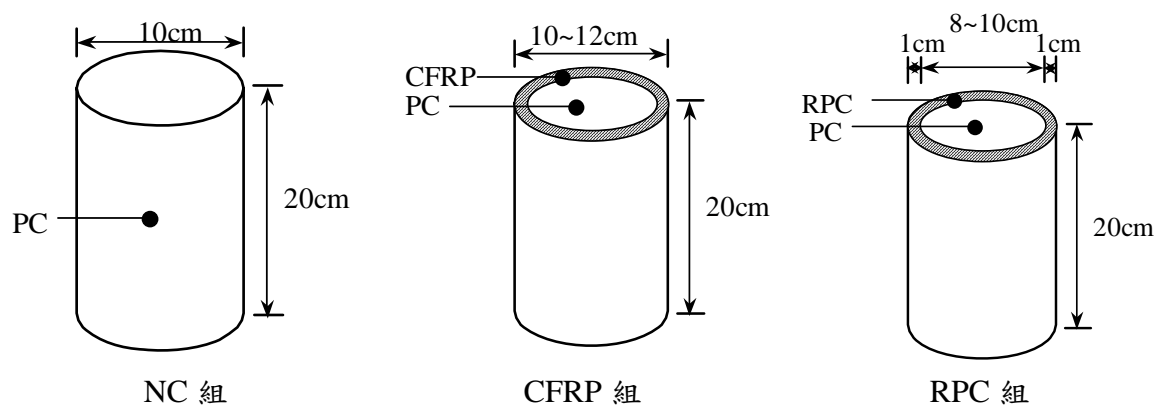
試體名稱	試體尺寸	試驗項目	試驗齡期(天)				
			新拌	3	7	28	90
NC	Φ 10cm×20 cm	1.坍度試驗	✓	—	—	—	—
		2.抗壓試驗	—	✓	✓	未完成	未完成
		3.E、ν 量測	—	✓	✓	未完成	未完成
		4.劈裂試驗	—	—	✓	未完成	未完成

### 3、試驗項目與齡期

表七 抗壓性能補強試驗

	試體尺寸	試驗項目	補強齡期(天)			
			3	7	28	56
NC 圓柱試體 (控制組)	φ 10cm×20cm	抗壓補強試驗	✓	✓	未完成	未完成
CFRP 組補強 圓柱試體	φ 10cm×20cm 外圍 包覆一層 CFRP 貼布		未完成	未完成	未完成	未完成
RPC 組補強 圓柱試體	φ 10cm×20cm 外圍 包覆 1cm 厚 RPC		未完成	未完成	未完成	未完成

試體略圖



### (3) 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體製作

#### 1、簡述：

製作縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體，一組立面兩側包覆一層 CFRP 貼片，另一組立面兩側各灌注 1cm 厚 RPC 材料，內部縱向鋼筋貼上應變計，混凝土表面亦埋設應變計，按 CNS 或 ASTM 規範進行三分點抗壓試驗，量取其抗壓強度，比較其立面兩側包覆 CFRP、RPC 材料與未包覆之 NC 試體三者抗彎、抗剪強度之差異；並記錄應力應變曲線，用以評估不同方式之補強成效。

## 2、試驗配比

RPC 補強材料配比與基本力學試驗同表一，混凝土配比係採設計強度  $210 \text{ kg/cm}^2$  之預拌混凝土，基本力學試驗同表六。

## 3、試驗項目與齡期

表八 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試驗

	試體尺寸	試驗項目	補強齡期 28 天
NC 組	24cm×16cm×210cm	三分點抗彎試驗	未完成
CFRP 組			未完成
RPC 組			未完成

試體略圖

The diagram illustrates three types of reinforced concrete beam specimens, each with a length of 210 cm. The cross-sections are as follows:

- NC 控制組 (NC Control Group):** The cross-section is 16 cm wide and 24 cm high. It shows a standard reinforced concrete beam with internal longitudinal and transverse reinforcement.
- CFRP 組 (CFRP Group):** The cross-section is wider than 16 cm and taller than 24 cm. It features one layer of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) reinforcement applied to the vertical faces of the beam.
- RPC 組 (RPC Group):** The cross-section is 18 cm wide and 24 cm high. It features 1 cm thick RPC (Reactive Powder Concrete) reinforcement applied to the vertical faces of the beam.

#### (4) 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體製作

##### 1、簡述：

製作 NC 組 R.C.圓柱試體，分別包覆一層 CFRP 貼片及 1cm 厚 RPC 材料，其中主筋、腰部箍筋與混凝土表面貼上應變計，按 CNS 或 ASTM 規範進行抗壓試驗，量取其抗壓強度，比較鋼筋混凝土柱試體外圍包覆 CFRP、RPC 材料與未包覆之 NC 試體三者之抗壓強度之差異，並記錄應力應變曲線，用以評估不同方式之補強成效。

##### 2、試驗配比

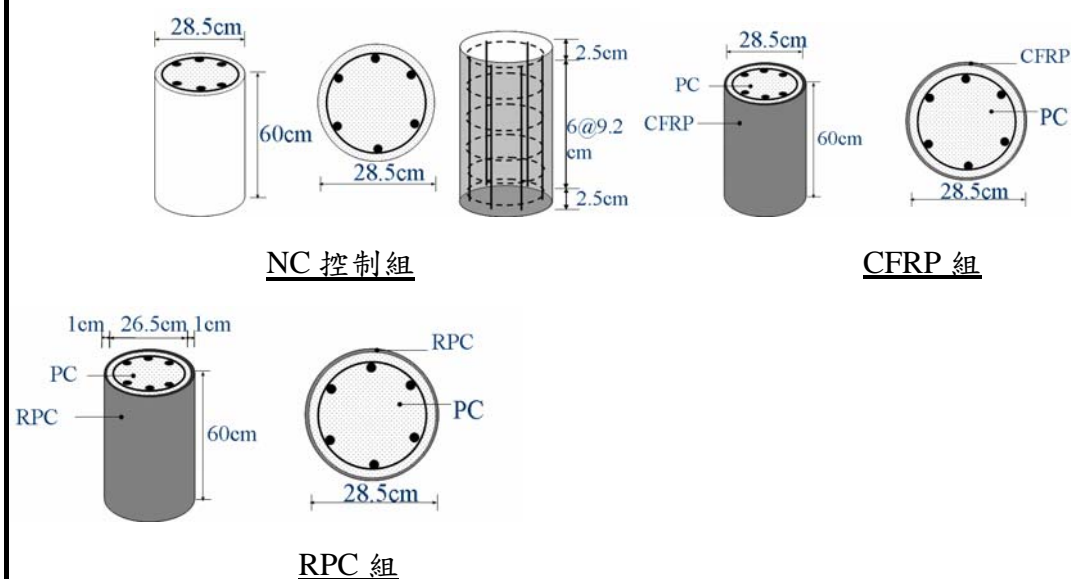
RPC 補強材料配比與基本力學試驗同表一，混凝土配比係採設計強度  $210 \text{ kg/cm}^2$  之預拌混凝土，基本力學試驗同表六。

##### 3、試驗項目與齡期

表七 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試驗

	試體尺寸	試驗項目	補強齡期 28 天
NC 組	$\phi 28.5\text{cm} \times 60\text{cm}$	抗壓試驗	未完成
CFRP 組			未完成
RPC 組			未完成

試體略圖



## 參、已完成研究項目之進度

### 一、RPC 補強材料配比設計與基本力學性質試驗

#### 1、工作性

為了符合日後現場進行補強施工所需，在更改強塑劑型號之後，目前 RPC 流度已獲得相當程度改善，如照片一、二所示。試驗結果如表八所示。

表八 RPC 流度試驗結果

	平均直徑(mm)	流度值(%)
改善前	160	60%
改善後	240	140%



照片一 改善前流度試驗結果



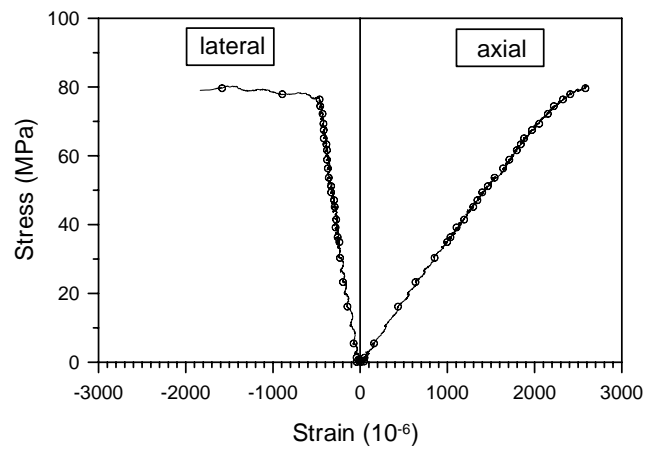
照片二 改善前流度試驗結果

#### 2、基本力學性質

目前已完成 3 天及 7 天齡期之基本力學試驗，試驗結果如表九所示。試驗照片如照片三至六所示。

表九 RPC 基本力學試驗結果

試體 名稱	試驗項目	試驗齡期(天)				
		3	7	28	56	90
RPC	1.抗壓強度 $f'_c$ (MPa)	87	93	未完成	未完成	未完成
	2.劈裂強度 $f_{SD}$ (MPa)	11.9	13.1	未完成	未完成	未完成
	3.彈性模數 $E_c$ (GPa)	35.87	39.69	未完成	未完成	未完成
	4.卜松比 $\nu$	0.23	0.21	未完成	未完成	未完成
	5.抗彎強度 $f_t$ (MPa)	16.3	18.9	未完成	未完成	未完成



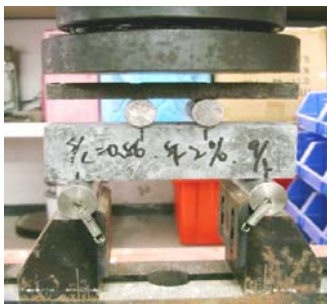
圖一 典型 RPC 應力應變圖 (齡期三天)



照片三 RPC 抗壓試驗後試體



照片四 劈裂試驗後試體



照片五 RPC 抗彎試驗



照片六 抗彎試驗後試體

## 二、碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗

### (1) 抗彎性能補強

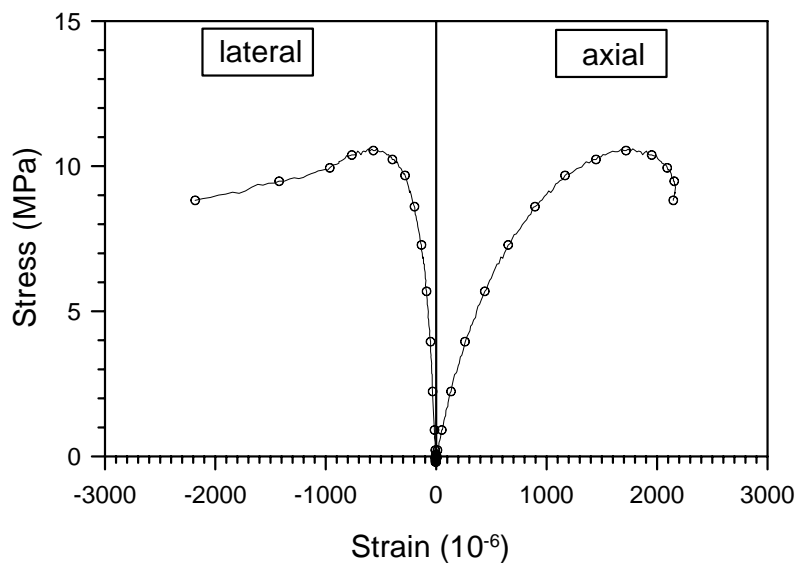
預訂 6/10（六）會進行試體灌製，並將按前文所述，進行相關材料之基本力學試驗。

## (2) 抗壓性能補強

混凝土圓柱試體已灌製完成，混凝土坍度為 23 cm。目前已完成 3 天及 7 天齡期之基本力學試驗，試驗結果如表十所示。

表十 NC 基本力學試驗結果

試體 名稱	試驗項目	試驗齡期(天)				
		3	7	28	56	90
NC	1.抗壓強度 $f'_c$ (MPa)	10.50	18.82	未完成	未完成	未完成
	2.劈裂強度 $f_{SD}$ (MPa)	—	2.89	未完成	—	未完成
	3.彈性模數 $E_c$ (GPa)	17.72	19.48	未完成	未完成	未完成
	4.卜松比 $\nu$	0.21	0.20	未完成	未完成	未完成



圖二 典型 NC 應力應變圖（齡期三天）

## (3) 縮小尺寸鋼筋混凝土梁試體製作

本試體於 5 月 19 日澆置完成，相關照片如照片七至十四所示，現進行自然環境中養護，俟混凝土齡期達到 28 天之後，將進行補強及結構試驗。

## (4) 縮小尺寸鋼筋混凝土柱試體製作



本試體於5月19日澆置完成，相關照片如照片七至十四所示，現進行自然環境中養護，俟混凝土齡期達到28天之後，將進行補強及結構試驗。



照片七 灌製前縮小尺寸梁及柱之模具



照片八 灌製前縮小尺寸梁之模具



照片九 灌製前縮小尺寸柱之模具  
(CFRP 補強)



照片十 灌製前縮小尺寸柱之模具  
(RPC 補強)



照片十一 混凝土坍度試驗 (坍度 230 mm)



照片十二 灌製完成之圓柱試體



照片十三 灌製完成之縮小尺寸梁



照片十四 灌製完成之縮小尺寸柱

#### 肆、後續進度

依研究之進度規劃，後續除各齡期之試驗進行外，從補強的過程中並建立補強施工程序，對於結構試驗結果進行評估與研擬補強方針，此外，於施作過程均予詳實記錄，以便進行日後技術移轉給各使用單位及教育訓練說明。

## **附錄四：期末進度整合會議**

## 附錄四：「活性混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究(2/2)」期末整合階段會議紀錄

---

### 「活性混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究(2/2)」 期末整合階段會議紀錄

十、開會時間：中華民國 95 年 10 月 24 日 上午 10:00 至 12:00

十一、開會地點：國立台灣科技大學 營建系 E2-222

十二、出席人員：林秉如、陳柏存、高進驊、展維賢、丁小真

十三、會議主席：黃兆龍 會議紀錄：陳柏存

十四、主持人說明摘要：

1. 首先感謝港灣研究所柯正龍研究員蒞臨指導本次研究案的其中整合會議，由於本研究案須於 10 月 30 日前提出期末報告，本次會議係就目前試驗結果作說明與檢討，以期能準時提出期末報告。
2. 請相關人進行目前工作之簡報說明。

十五、工作進度報告

1. 高進驊目前進度報告內容摘要（詳附件一）

十六、綜合討論（略）

十七、港灣研究所說明摘要：

1. 相關補強試驗照片建議多附於期末簡報中。
2. 實驗進度已大致完成，注意期末報告送達期限。

十八、結論

1. 宜儘快完成報告撰寫工作，並備妥期末簡報。
2. 完整期末報告請在 10 月 30 日前送達。

十九、附件：出席人員簽到單

期末整合階段會議出席人員簽到單

活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究 (2/2)

期末整合階段會議

開會簽到單

一、時間：95 年 10 月 24 日(星期二)上午 11.時 00 分

二、地點：台灣科技大學 T2-221 會議室

三、計畫委託單位（交通部運輸研究所）

出席人員：柯正龍先生 柯正龍

四、計畫主持人：張大鵬教授 張大鵬

五、協同主持人：黃兆龍教授 黃兆龍

六、出席人員：

林秉如 林秉如

王金圳 王金圳

張淳勛 張淳勛

陳柏存 陳柏存

高進驊 高進驊

展維賢 展維賢

呂冠群 呂冠群

丁小真 丁小真

交通部運輸研究所合作研究計畫  
活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究  
(2/2)

期末整合階段會議



委託單位：交通部運輸研究所  
執行單位：國立臺灣科技大學營建工程系  
會議時間：95 年 10 月 24 日  
會議地點：營建系 E2-222 室  
計畫主持人：張大鵬教授  
協同主持人：黃兆龍教授  
研究助理：林秉如、王金圳、張淳勛  
陳柏存、吳崇聖、高進驊  
展維賢、呂冠群、丁小真

## 壹、前言

近年來各國積極投入研究有關混凝土結構物維修補強的課題，本計畫為應用活性粉混凝土（RPC）補強鋼筋混凝土（R.C.）構件之研究，本計畫團隊於第一年已完成建立 RPC 配比計算模式及 RPC 材料之力學性質、耐久性質與撓曲補強性能之試驗，第二年的研究內容將著重在補強實體 RC 構件之性能，如下所列，並將簡單展示已完成項目之初步結果：

- 5、建立 RPC 補強材料配比設計，並依據建築技術規則製作縮小尺寸鋼筋混凝土梁、柱補強，以實際 R.C.構件驗證活性粉混凝土補強效果。
- 6、進行碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗。
- 7、建立補強施工程序及評估與補強方針。
- 8、技術移轉給各使用單位及教育訓練說明。

## 貳、研究結果

### 2-1 水泥質材料之基本力學性質


本研究計畫使用到的水泥質材料為水泥砂漿（Mortar）、普通混凝土（NC）與活性粉混凝土（RPC）。

#### 一、工作性


RPC 流度試驗結果如表 2-1 所示，平均直徑約 240 mm，流度達 140 %，於本年度研究中更改強塑劑型號之後，改善工作性，符合現場進行補強施工所需。

表 2-1 RPC 流度試驗結果

	平均直徑 (mm)	流度值 (%)	平均流度 (%)
1	245	145	140
2	235	135	
3	240	140	



RPC #4  
SF-2/  
流度: 16 (流動前)  
16 (流動後)  
於 5:30



(a) 改善前


(b) 改善後



用以灌注被補強基材之 NC，係採用高流動性預拌混凝土，經實際進行坍度試驗後，結果如表 2-2 所示，平均坍度達 233 mm，澆灌時只需少許震動即可充滿角隅，具有相當好的工作性。

表 2-2 NC 坍度試驗結果

	坍度值 (mm)	平均坍度 (mm)
1	230	233
2	235	



NC 坍度試驗

## 二、抗壓強度

RPC、NC、Mortar 於不同齡期的抗壓強度試驗結果圖 2-1 所示，可明顯看出 RPC 早期強度發展緩慢，3 天與 7 天齡期之抗壓強度幾乎並無太大差異，28 天齡期之抗壓強度僅達 85.67 MPa，強度不若國內外相關研究，主要係因在本研究中考量修補材料與基材兩者之諧和性，故不採用高溫高壓之養護方式所致。

NC 的抗壓強度發展則於初期迅速提升，28 天齡期時抗壓強度為 30.17 MPa，而晚期強度發展趨緩，90 天齡期僅為 37.30 MPa。另外，Mortar 的抗壓強度發展在 7 天齡期時達 20.29MPa，之後無明顯提升，發展趨勢與 NC 相似。

## 三、劈裂強度

RPC 與 NC 之劈裂強度發展與抗壓強度一致，RPC 於早期發展緩慢晚期，28 天齡期之劈裂強度為 12.41 MPa，至 90 天齡期時則明顯提升至 13.59 MPa。NC 之劈裂強度於 28 天齡期時達 2.89 MPa，之後發展漸緩，90 天齡期之劈裂強度為 3.68 MPa。

由照片中可明顯看出，因 RPC 試體中含有鋼纖維，在試體破壞後仍達到牢繫膠結材料之效果，使試體並未完全碎裂，仍保持原型。



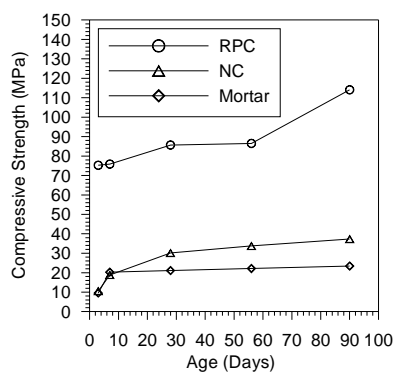


圖 2-1 RPC、NC 與 Mortar 抗壓強度發展曲線

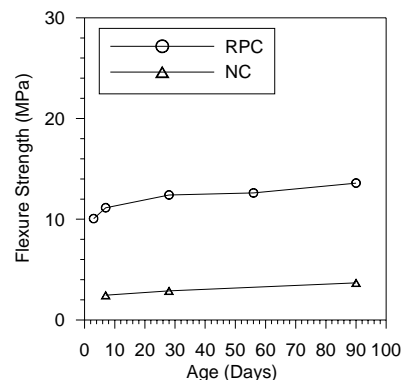


圖 2-2 RPC、NC 劈裂強度發展曲線

#### 四、彈性模數與卜松比量測

彈性模數與卜松比的量測結果，如表 2-3 所示，由圖中可知 Mortar 的彈性模數發展最快，約在 7 天齡期已大致發展完成，而 RPC 與 NC 的彈性模數則在 28 天齡期後緩慢提升。RPC、NC 與 Mortar 在 28 天齡期時的彈性模數分別為 41.66、24.96、20.55 GPa，當齡期為 90 天時，RPC、NC 與 Mortar 的彈性模數分別為 42.63、27.40、21.01 GPa，在 28 天齡期後  $E_{RPC}/E_{NC}$  約為 1.5~1.6， $E_{RPC}/E_{Mortar}$  則為 2.03。

另外，三種材料之卜松比在七天齡期之後皆相當接近，約 0.19 至 0.21 之間，由此可知，以 RPC 進行水泥砂漿基材或混凝土基材修補作業，可以得到很好之材料相容性，對於修補成效有很大的助益。

表 2-3 RPC、NC 與 Mortar 彈性模數與卜松比量測結果

齡期 (天)	平均彈性模數 (GPa)			$E_{RPC}/E_{NC}$	$E_{RPC}/E_{Mortar}$	平均卜松比		
	RPC	NC	Mortar			RPC	NC	Mortar
3	34.56	13.46	16.51	2.57	2.09	0.197	0.192	0.171
7	38.11	16.75	20.29	2.28	1.88	0.212	0.207	0.197
28	41.66	24.96	20.55	1.67	2.03	0.201	0.221	0.192
56	41.98	25.00	20.87	1.68	2.01	0.208	0.219	0.196
90	42.63	27.40	21.01	1.56	2.03	0.215	0.203	0.201

#### 2-2 小型抗彎抗壓補強成效試驗

## 一、水泥砂漿抗彎補強成效

Mortar 抗彎補強成效試驗結果如表 2-4 所示，本試驗中之實驗組試體製作係先澆灌 Mortar，待其終凝後再澆灌 RPC，故兩種材料之齡期相同，其中未補強 Mortar 在 28 天齡期時抗彎強度達到最高，且經 RPC 補強後，抗彎強度可提升 38.10%。之後隨著齡期增加，未補強 Mortar 抗彎強度逐漸下降，但經 RPC 補強後，抗彎強度仍可提升超過 40%。

表 2-4 RPC 補強 Mortar 抗彎試驗結果

補強齡期 (天)	未補強 平均抗彎強度 (MPa)	RPC 補強 1cm		
		$n=E_{RPC}/E_{Mortar}$	平均抗彎強度 (MPa)	提升率 (%)
3	13.02	1.92	13.06	0.31
7	13.08	1.88	19.55	49.46
28	14.54	2.03	20.08	38.10
56	14.48	2.01	20.65	42.61
90	13.82	2.03	19.76	42.98

## 二、混凝土圓柱抗壓補強成效

混凝土圓柱抗壓補強成效試驗結果如表 2-5 所示，由於本試驗在 NC 養護 28 天，才進行 RPC 與 CFRP 補強，當時其強度已大致發展完成，故未補強 NC 組其抗壓強度與彈性模數於不同補強齡期無太大變化。

以 RPC 補強縮小斷面 NC 圓柱其補強成效無立即性，在 3 天補強齡期時，提升率僅 0.12%，但隨著補強齡期增加，補強成效就愈明顯，在 90 天補強齡期時提升率已達 26.56%，其補強機制係利用 RPC 具高彈性模數之特性，與內部 NC 組成複合材料，以承載較高之軸向載重，這點可由補強後材料之彈性模數介於 NC 與 RPC 之間得知，另外補強後之卜松比增加，意即在受力過程中側向變形較為明顯，且因 RPC 具有鋼纖維，可有效減緩裂縫擴大，避免爆裂，兼具警示意義。

以 CFRP 補強 NC 圓柱之補強成效在不同補強齡期皆很穩定，補強後抗壓強度約 51.94 MPa ~ 55.28 MPa，較 RPC 補強後的抗壓强度高，而 CFRP 補強前後之材料彈性模數與卜松比則無太大變化，顯示其補強機制係提供內部 NC 圍束力，與 RPC 補強機制不同。。

表 6-7 混凝土圓柱抗壓補強成效

補強齡期 (天)	未補強 NC			RPC 補強 1cm				CFRP 補強			
	平均 抗壓 強度 (MPa)	平均 彈性 模數 (GPa)	平均 卜松比	抗壓強度		材料參數		抗壓強度		材料參數	
				平均值 (MPa)	提升率 (%)	彈性 模數 (GPa)	卜松比	平均值 (MPa)	提升率 (%)	彈性 模數 (GPa)	卜松比
3	32.68	24.67	0.219	32.72	0.12	35.72	0.265	54.57	61.78	22.67	0.195
7	33.97	24.12	0.192	34.54	1.68	32.90	0.222	54.90	61.61	23.19	0.190
28	33.76	26.85	0.219	39.89	18.16	33.23	0.226	51.94	53.85	25.65	0.197
56	36.65	28.23	0.244	41.72	13.83	37.83	0.277	52.39	42.95	27.91	0.207
90	37.92	28.27	0.221	47.99	26.56	39.34	0.277	55.28	45.78	28.12	0.226

### 2-3 縮小斷面 RC 柱抗壓補強成效試驗

未補強前之 RC 柱極限載重平均約為 235 t，經 CFRP 補強後平均約為 280 t，三支試體全數強度均大於控制組，平均高約 20%，顯示 CFRP 的圍束提供了圓柱更高的抗壓能力，但是比較二圖破壞後曲線下降斜率發現控制組的斜率較為和緩，CFRP 補強組較為傾斜，說明了 CFRP 瞬時的爆裂造成破壞後的迅速變形。

經 RPC 補強後極限載重與未補強前相當，但裂縫主要集中於初始的主要裂縫，並於破壞時柱腹位置產生類似挫曲的水平裂縫，與補強前所發生之垂直裂縫有明顯的差異。因為 RPC 屬於高韌性材料，所以柱體達到極限強度破壞後，整體外觀仍保持良好，並瞬間爆裂剝落的現象。

另外，縮小斷面 RC 柱經 RPC 或 CFRP 補強後，在受力過程中箍筋幾乎不受張力作用，直到 RPC 或 CFRP 達到極限強度產生主要裂縫後，箍筋才產生作用。由於 RPC 與 NC 二者卜松比相似，在受力過程中，柱體變形均能保持良好之諧和性。



圖 2-3 灌製前縮小尺寸柱之模具  
(CFRP 補強)



圖 2-4 灌製前縮小尺寸柱之模具  
(RPC 補強)



(a) RC 未補強

(b) CFRP 補強

(c) RPC 補強

圖 2-5 縮小斷面 RC 柱加載破壞後外觀

## 2-4 縮小斷面 RC 梁剪力補強成效試驗

梁補強試驗結果如表 2-8 所示，載重與中點變位關係曲線如圖 2-6 所示，試驗後破壞裂縫情形如圖 2-7 所示。

在初始階段，載重與中點位移係為線彈性關係，當載重持續增加，當超過某一臨界值時，載重與中點變位關係曲線之斜率明顯改變，該臨界值所對應之載重及變形分別定義為混凝土梁之降伏載重  $P_y$  及混凝土破裂變形  $\delta_y$ ，未補強前之混凝土平均破裂載重  $P_y$  為 25.26 ton，經 RPC 側邊補強 1 cm 或 CFRP 補強後皆能提高混凝土破裂載重，前者為 33.42 ton，後者為 34.06 ton，兩種剪力補強方式皆能提高約 32 % 破裂載重，且所得到之破裂載重相當接近。

當載重繼續增大，梁底部張應力完全由拉力筋所承擔，因此載重與中點變位曲線得以緩慢增加，直到梁底部裂縫持續延伸至頂端，喪失承載能力，曲線便迅速下降，而曲線最高點所對應之載重定義為混凝土極限載重  $P_u$ ，未補強前之混凝土平均極限載重  $P_u$  為 29.73 ton，經 RPC 補強 1 cm 後及 CFRP 補強後分別為 37.69 ton 及 37.75 ton，兩種剪力補強方式皆能提高約 27 % 破裂載重，且所得到之極限載重相當接近。

若將載重位移曲線下方所涵蓋之面積視為該梁承受載重過程中所吸收能量大小，並仿照 ASTM C1018-92 韌性指數計算的方式，分別計算各梁在  $\delta_y$ 、 $3\delta_y$  及  $5.5\delta_y$  時載重位移曲線下方面積，計算結果如表 6-12 所示，明顯發現經 RPC 補強後提升效果最佳，在  $\delta_y$ 、 $3\delta_y$  及  $5.5\delta_y$  時吸收能量之提升率分別為 50.29 %、42.77 % 及 36.52 %。

梁裂縫之發展過程如圖 2-8~2-9 所示，未補強的 RC 梁底部混凝土在承受 12.50 kg 時出現開裂，裂縫多出現在梁中央處，且方向多為垂直方向，隨著載重增加至 20 kg 時，既有裂縫向上延伸，並且有新的剪斜裂縫出現在支承處與載重處之間，當載重繼續增加至 25 kg，在梁中央處之垂直向撓曲裂縫及兩側之斜向剪力裂縫向

上延伸，梁上方承壓處部份混凝土已有壓碎情形，之後剪力裂縫隨著載重增加而迅速延伸向上至梁頂部，造成剪力破壞。

經 RPC 側邊補強 1 cm 後之 RC 梁，初始階段與未補強的 RC 梁相似，垂直向的開裂裂縫出現在梁中央處，不同的是，當載重增加至 25 kg 才有剪斜裂縫出現在支承處與載重處之間，最後造成 RC 梁失去承載力的是 14D-13A 的裂縫，造成撓曲破壞，顯見經 RPC 側邊補強 1 cm 後能有效增加 RC 梁之抗剪能力。

由於經 CFRP 補強之 RC 梁，在載重過程中不易觀察其裂縫發展，僅聽到長向纖維拉斷劈裂聲，最後當載重接近極限載重時，梁中央處纖維明顯延著與混凝土之介面開裂，並伴隨著裂縫迅速向上發展，造成撓曲破壞，過程相當迅速。

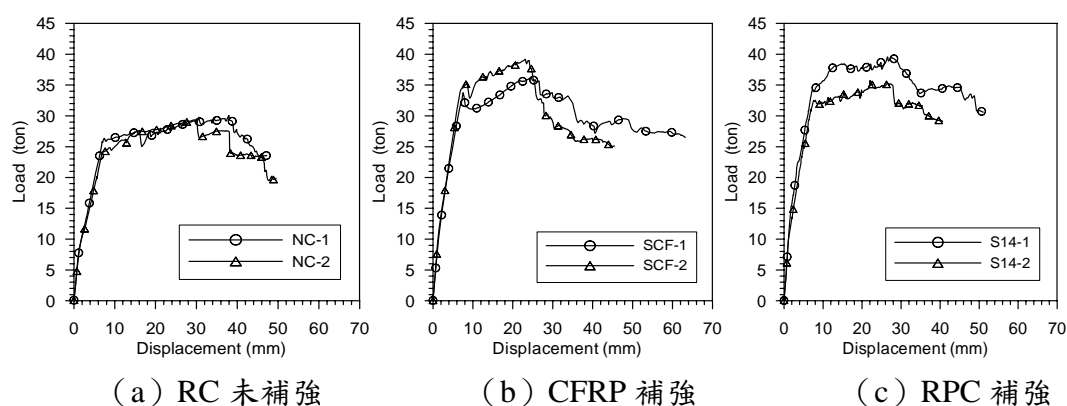


圖 2-6 未補強 RC 梁載重與中點變位圖

表 2-8 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C.梁降伏與極限載重表

	RC 未補強			RPC 側邊補強 1cm				CFRP 補強			
	1	2	平均值	1	2	平均值	提升率	1	2	平均值	提升率
$P_y$ (ton)	26.36	24.15	25.26	34.29	32.54	33.42	32.30 %	33.76	34.35	34.06	34.84 %
$P_u$ (ton)	30.08	29.38	29.73	39.6	35.78	37.69	26.96 %	36.28	39.21	37.75	26.77 %

表 2-9 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C.梁之位移能量表

	RC 未補強			RPC 側邊補強 1cm				CFRP 補強			
	1	2	平均值	1	2	平均值	提升率	1	2	平均值	提升率

$\delta_y$ (mm)	7.40	7.00	7.20	7.32	8.07	7.70	6.94%	7.56	7.08	7.32	1.67%
$3\delta_y$ (mm)	22.20	21.00	21.60	21.96	24.21	23.09	—	22.68	21.24	21.96	—
$5.5\delta_y$ (mm)	40.70	38.50	39.60	40.26	44.39	42.33	—	41.58	38.94	40.26	—
P- $\delta_y$ (ton•mm)	113.14	96.39	104.77	151.86	163.06	157.46	50.29%	148.75	140.17	144.46	37.88%
P-3 $\delta_y$ (ton•mm)	509.50	467.16	488.33	694.43	699.93	697.18	42.77%	648.90	654.34	651.62	33.44%
P-5.5 $\delta_y$ (ton•mm)	1041.65	955.28	998.47	1363.14	—	1363.14	36.52%	1257.05	1202.14	1229.60	23.15%



(a) RC 未補強



(b) CFRP 補強



(c) RPC 補強

圖 2-7 縮小斷面 RC 梁加載破壞後外觀

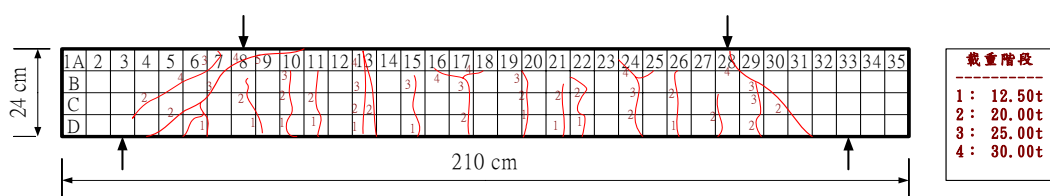


圖 2-8 典型未補強 RC 梁加載後裂縫狀況

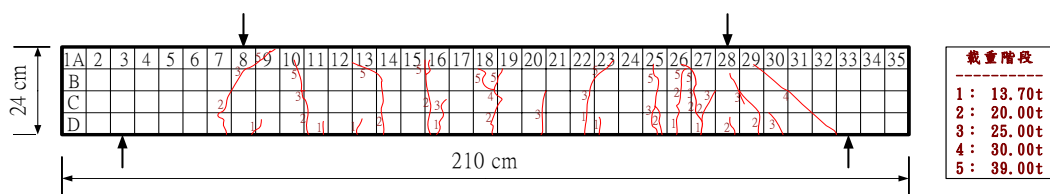


圖 2-9 典型以 RPC 進行剪力補強加載後裂縫狀況

## 肆、後續進度

目前試驗已全部完成，期末報告撰寫已進入修改排版階段，預計本週即可印製，確定在計畫執行期限前可完成。

## **附錄五：教育訓練簡報與剪影**

## 附錄五

95 -138-7227

# 活性粉混凝土補強 R.C.構件與 耐久性之研究教育訓練講義



主辦單位：交通部運輸研究所

協辦單位：台灣科技大學

中 華 民 國 95 年 10 月



**活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究教育訓練計畫**

地 點	交通部運輸研究所港灣技術研究中心 2 樓階梯教室		
時 間	95/10/12(四) 9:00~12:00		
邀 請 參與單位	各港務局及相關單位總計 30 人		
時 間	課程題目	課 程 內 容	講 員
09:00 ~ 09:50	活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 組成與行為	1.活性粉混凝土(RPC)之組成 2.活性粉混凝土(RPC)之工程材料性質 3.活性粉混凝土(RPC)之耐久性性質	國立臺灣科技大學 營建工程系 張大鵬教授
09:50 ~ 10:00	休 息		
10:00 ~ 10:50	道鋼筋混凝土 (RC)構件行為	1.鋼筋混凝土(RC)圓柱承受軸力之構件行為 2.鋼筋混凝土(RC)樑承受剪力之構件行為 3.RPC 圍束補強鋼筋混凝土(RC)圓柱承受軸力之構件行為 4.RPC 剪力補強鋼筋混凝土(RC)樑承受剪力之構件行為	國立臺灣科技大學 營建工程系 張大鵬教授
10:50 ~ 11:50	RPC 補強施工程序	1.RPC 補強 R.C.構件之施工程序與評估 2. RPC 補強 R.C.構件之補強方針。	國立臺灣科技大學 營建工程系 張淳勛博士候選人
課程結束			

交通部運輸研究所 港灣技術研究中心  
活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性  
研究教育訓練

第一單元 活性粉混凝土組成與行為

主講人：張大鵬 教授

主辦單位：交通部運輸研究所

協辦單位：國立臺灣科技大學 營建系

中華民國九十五年十月十二日

1/36

第一單元

活性粉混凝土組成與行為

- 活性粉混凝土(RPC)之組成
- 活性粉混凝土(RPC)之工程材料性質
- 活性粉混凝土(RPC)之耐久性質



2/36

1-1 活性粉混凝土起源與發展 (1/3)

1990年開始，法國Bouygues公司投入研發製作與瞭解材料特性。

- 1994年以前，RPC一直是法國軍方的機密，僅用於軍事工程。
- P. Richard於1994年舊金山的美國混凝土學會春際會議上首次公開其研究成果。
- 公開為世人所知後，歐美日各國急起直追，相繼投入研發競爭的行列。



3/36

1-1 活性粉混凝土起源與發展 (2/3)

- ❖ 過去幾十年中，各國學者專家力求改善混凝土之性能，大致採下列三種方式：
- 細粉緻密系統 (Densified System Containing ultra-fine Particles, DSP)：以細粉來增加水泥漿體之密實性，提高強度。
- 無巨觀缺陷砂漿 (Macro-Defect Free, MDF)：將含高分子材料之水泥砂漿擠壓成型，降低孔隙率，提升抗壓及抗拉強度。
- 鋼鐵水泥 (Slurry Infiltrated Fibered Concrete, SIFCON)：將高流動性水泥漿或砂漿注入預先埋好鋼鐵的模具內，改善材料之韌性。

4/36

## 1-1 活性粉混凝土起源與發展 (3/3)

□ P. Richard & M. Cheyrezy (1995) :



5/36

## 1-2 活性粉混凝土之應用現況 (1/5)

□ 加拿大：

於1997年興建世界第一座Sherbrooke行人與腳踏車通行之實驗RPC橋。

6/36

## 1-2 活性粉混凝土之應用現況 (2/5)

□ 日本：

於2002年以RPC建造之人行步道橋Sunyudo Bridge、Akakura-Onsen Yukemuri bridge 及 Sakata Mirai Bridge。

7/36

## 1-2 活性粉混凝土之應用現況 (3/5)

□ 美國：

美國步兵工兵署透過研究計畫 (CPAR, 1994-1997) 整合產官學力量，並經法國技術轉移，建立配比及產製技術，製作直徑1.3 公尺的輸水管原型樣品。

□ 南韓：

於2002年以RPC興建一座人行陸橋，全長120公尺，橫跨漢江兩岸，連接首爾及仙遊島。

8/36



## 1-2 活性粉混凝土之應用現況 (4/5)

### □ 法國：

研究較早，所以應用範圍更廣泛，包括水管、板  
材構材、核廠冷卻塔和核廢料貯藏桶等。

其中Matte與Torrenti等人利用RPC材料製作核  
廢料高完整性貯藏桶（High Integrity Container,  
HIC），並進行適用性測試，結論顯示RPC緻密  
性較普通混凝土及高性能混凝土優異，故為適合  
製作HIC的優良材料。

9/36

## 1-3 活性粉混凝土之組成 (1/8)

### □ 國內外RPC常用之組成材料：

P. Richard & M. Cheyrezy 於1995年發表RPC 200  
型與RPC 800型兩種活性粉混凝土配比，其材料包  
括水泥、細砂、石英粉、矽灰、鋼纖維、高性能減  
水劑。

11/36

## 1-2 活性粉混凝土之應用現況 (5/5)

### □ 國內：

台灣營建研究院苗伯霖博士於1996年首度在國內  
「營建知訊」第162期首度發表「新型高性能超高  
強建築材料—活性粉混凝土」。

目前從事RPC研究工作之產學機構包括：台灣大學、  
成功大學、台灣科技大學、中央大學、朝陽科技大  
學、台灣營建研究院、交通部運輸研究所港研中心、  
榮民工程公司及潤泰集團等單位。

實用方面包括：無鋼筋覆工版、核廢料貯藏桶及其  
包封容器、金融機構保險庫、公車停車站處剛性路  
面。

10/36

## 1-3 活性粉混凝土之組成 (2/8)

□ 由於水泥、石英粉、矽灰、飛灰之平均粒徑介於 0.1 ~ 500  
 $\mu\text{m}$ ，提高材料細度及活性，也使得內部的孔隙降低到最  
少，所以能具有高強度、高韌性、低孔隙率。

□ 各國學者近年發  
表不同RPC配比，  
但在組成材料方  
面並無改變。

材料	比重	粒徑	建議
水泥	3.15	16 $\mu\text{m}$	卜特蘭II或V型水泥
石英砂	2.62	325 $\mu\text{m}$ (150-500 $\mu\text{m}$ )	
矽灰	2.2	0.4 $\mu\text{m}$ (0.1-0.7 $\mu\text{m}$ )	用量約為水泥之20~30%
石英粉	2.46	8.3 $\mu\text{m}$ (5-20 $\mu\text{m}$ )	
鋼纖維	7.8	直徑約0.2-0.7mm； 長約13-20mm之間	用量不超過3%(重量比)
水	1.0		
強塑劑			需著重減水效能
消泡劑			為強塑劑重量之0.2%

12/36

### 1-3 活性粉混凝土之組成 (3/8)

□ 添加矽灰、石英粉對活性粉混凝土的影響：

矽灰在 RPC 中的主要作用有三點：

- (1) 填滿粒徑間的孔隙。
- (2) 產生良好的圓珠潤滑作用及流變性。
- (3) 與水泥水化產物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  產生卜作嵐反應，降低孔隙率、增加密實性、提高耐久性、控制鹼骨材反應。

此外，在高溫下矽灰、石英粉易加速反應。在  $90^\circ\text{C}$  條件的養護下，矽灰其強度貢獻指數可達 40%，若養護溫度提高至  $200\sim 250^\circ\text{C}$ ，則石英粉強度貢獻指數可達 15%。

13/36

### 1-3 活性粉混凝土之組成 (4/8)

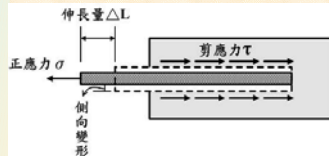
□ 添加鋼纖維對活性粉混凝土的影響：

- (1) 增進原有混凝土材料之抗拉強度
- (2) 將脆性基材轉換成韌性，增加了抗彎、抗剪等力學性質及提高耐磨性。
- (3) 鋼纖維於混凝土中具有束制效果，因此可降低混凝土內孔隙或裂縫的發生或延伸。
- (4) 鋼纖維數量、形狀、長度、材料性質及排列方式等影響 RPC 強度及工作性。鋼纖維若分佈不均勻而糾結成團狀會造成填實不充分，而增加空隙。

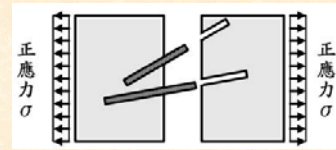
14/36

### 1-3 活性粉混凝土之組成 (5/8)

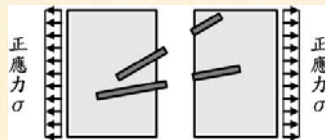
□ 混凝土內部鋼纖維破壞模式：



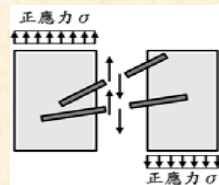
(1) 鋼纖受力拉長



(2) 鋼纖拉脫破壞



(3) 鋼纖拉斷破壞



(4) 鋼纖剪力破壞

15/36

### 1-3 活性粉混凝土之組成 (6/8)

□ 國內外相關 RPC 配比面臨之問題：

- ❖ 水泥使用量大，水化熱高，不利於混凝土耐久性。
- ❖ 且為了減少水化熱，皆建議採用第二型水泥，但提高了生產單價。
- ❖ 國內石英粉與矽灰單價高，增加生產單價。
- ❖ 配比計算尚無完整之依循理論。

16/36



### 1-3 活性粉混凝土之組成 (7/8)

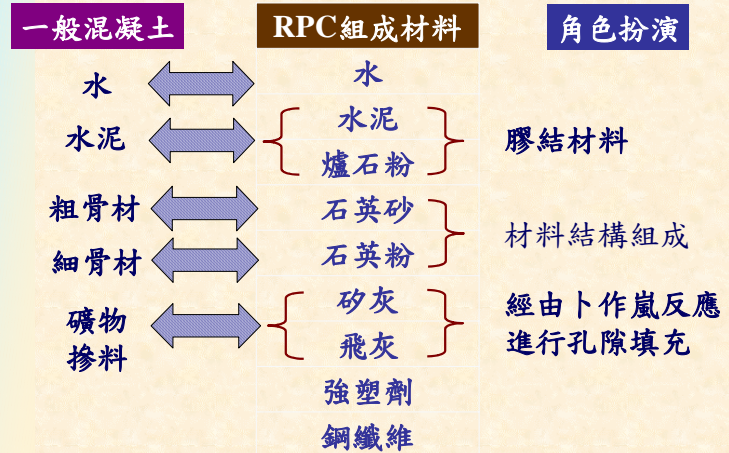
□ 本研究建議之RPC常用之組成材料：

試體 名稱	石英砂				飛 灰	石 英 粉	砂 灰	爐 石 粉	水 泥	水	強 塑 劑	鋼 纖 維
	#30	#50	#100	#200								
RPC	413	296	206	146	166	70	79	184	553	165	41	156

- ❖ 以爐石粉取代部份水泥量，由於水泥用量減少，便可採用第一型水泥，增加耐久性與降低生產單價。
- ❖ 採高性能混凝土緻密堆積理論所發展之最適化配比計算，作為配比計算依據。
- ❖ 以飛灰取代部份砂灰作為填充材料，經配比計算得到石英粉、砂灰和飛灰最佳比例，增加強度與降低生產單價。

17/36

### 1-3 活性粉混凝土之組成 (8/8)



18/36

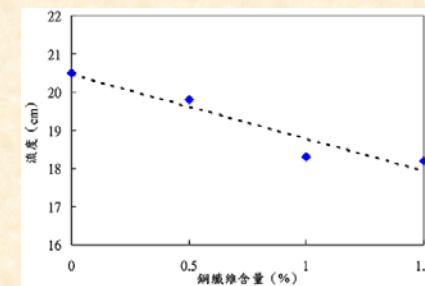
### 1-4 活性粉混凝土新拌性質 (1/3)

- 新拌混凝土的工作度對於施工者而言，是非常重要的指標。通常受到骨材形狀、用水量、含氣量、添加摻料與水泥種類等因素影響。
- 由於活性粉混凝土的工作性為求材料均勻性而在配比中除去粗骨材，因此將使得稠度增加，故通常必須藉由添加摻料來增加其工作性，另外其工作性也會受到鋼纖維添加量的影響。

19/36

### 1-4 活性粉混凝土新拌性質 (2/3)

- 何耀宇(2000)分別以0%、1%、2%鋼纖含量拌製2 kg及80 kg活性粉混凝土，發現不管拌製量多寡，流度都會隨著鋼纖維含量增加而減少。大型拌和機具較大空間，能使鋼纖維有足夠的空間均勻分佈。
- 吳建興(2003)：流度隨鋼纖維含量增加而減少。



20/36

## 1-4 活性粉混凝土新拌性質 (3/3)

□ 本研究：

	平均直徑(mm)	流度值 (%)
改善前	160	60%
改善後	240	140%



改善前



改善後

21/36

## 1-5 活性粉混凝土硬化性質 (2/6)

□ 何耀宇(2000)分別以0%、1%、2%鋼纖含量之活性粉混凝土，製成40×40×160 mm (寬×高×長)試體的RPC-200抗彎試體，並採用跨徑50 mm、三分點載重方式進行抗彎試驗。

23/36

## 1-5 活性粉混凝土硬化性質 (1/6)

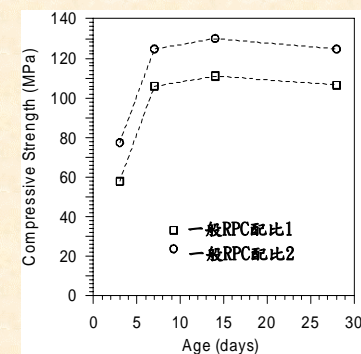
□ P. Richard(1995)：採高溫高壓養護條件下，可激發矽灰及石英粉活性，與水泥水化生成的氫氧化鈣進行卜作嵐反應，產生穩定矽酸鈣水化物 (C-S-H)，不但減少混凝土內之孔隙，也提高混凝土強度。

性質	普通混凝土	高性能混凝土	玻璃水泥 GRC	活性粉混凝土 RPC-200	活性粉混凝土 RPC-800
抗壓強度 (MPa)	10-40	60-100	50-80	170-230	500-810
抗彎強度 (MPa)	3-6	6-10	20-30	30-60	45-140
彈性模數 (Gpa)	30-35	35-45	10-20	50-60	65-75

22/36

## 1-5 活性粉混凝土硬化性質 (3/6)

□ 根據去年本研究結果，一般RPC配比如使用水泥及矽灰用量過高時，所產生之水化熱會導致微觀結構缺陷，7~14天齡期後，抗壓強度大部份都有降低的情形。



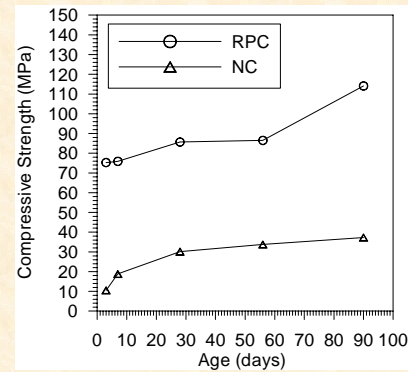
24/36



## 1-5 活性粉混凝土硬化性質 (4/6)

□ 本研究之RPC與NC基本力學性質比較—抗壓強度

齡期 (天)	抗壓強度(MPa)	
	RPC	一般混凝土
3	75.27	10.51
7	75.87	18.82
28	85.67	30.17
56	86.49	33.73
90	114.08	37.30

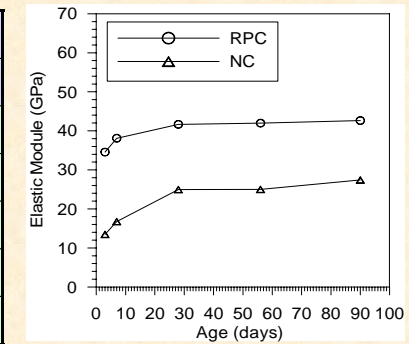


25/36

## 1-5 活性粉混凝土硬化性質 (5/6)

□ 本研究之RPC與NC基本力學性質比較—彈性模數

齡期 (天)	彈性模數(GPa)	
	RPC	一般混凝土
3	34.56	13.46
7	38.11	16.75
28	41.66	24.96
56	41.98	25.00
90	42.63	27.40



26/36

## 1-5 活性粉混凝土硬化性質 (6/6)

□ 考量未來補強施工時不易進行高溫高壓養護，僅採用一般水養護，所得到之抗壓強度如結果雖較國外相關研究低，但以修補相容性而言，卻是較為適合。

27/36

## 1-6 活性粉混凝土耐久性質(1/3)

□ 水份吸收試驗：

	1 hr	24 hr	72 hr
RPC	0.47%	0.73%	0.76%
NC	1.02%	1.60%	1.66%
Mortar	2.74%	3.88%	3.95%

28/36



## 1-6 活性粉混凝土耐久性質(2/3)

### □ 碳化試驗：



水泥砂漿  
(碳化深度3.1mm)



普通混凝土  
(碳化深度1.2mm)



RPC  
(碳化深度0mm)

29/36

## 1-7 活性粉混凝土拌和程序 (1/4)

□ Step 1：秤各材料所需重量。

□ Step 2：將水泥及爐石倒入，並添入部份水及強塑劑，以低速攪拌。



31/36

## 1-6 活性粉混凝土耐久性質(3/3)

### □ 磨耗試驗：

	500 轉車輪磨耗深度 mm
RPC	0.13 mm
NC	0.49 mm
Mortar	0.59 mm



30/36

## 1-7 活性粉混凝土拌和程序 (2/4)

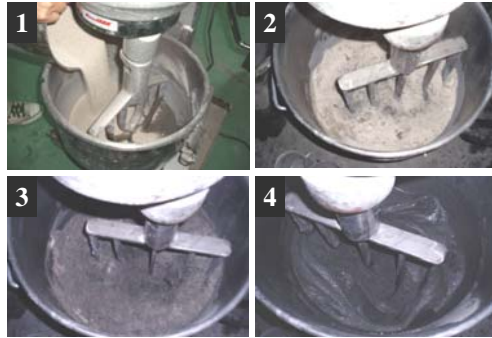
□ Step 3：再將飛灰、矽灰、石英粉與部份拌和水倒入，持續以低速攪拌。



32/36

### 1-7 活性粉混凝土拌和程序 (3/4)

- Step 4：加入石英砂，並將剩餘之拌和水與強塑劑混合後倒入，此時仍以低速攪拌。



33/36

### 1-7 活性粉混凝土拌和程序 (4/4)

- Step 5：等待至流動性出現後，將鋼纖均勻放入拌和。
- Step 6：當所有材料加入後，即可以中速拌和，為了確保拌和均勻並具有良好工作度，中速拌和時間需超過15分鐘。



34/36

### 1-8 結語

- 活性粉混凝土因組成材料粒徑尺寸小，結構緻密，強度與耐久性皆較一般混凝土佳。
- 經本研究以爐石粉取代部份水泥，以飛灰取代部份矽灰做為改良策略，並採用緻密配比理論得到最適化配比，已有效改善工作性、經濟性及增進耐久性。

35/36

簡報完畢  
敬請指教

交通部運輸研究所 港灣技術研究中心  
活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性  
研究教育訓練

第二單元 鋼筋混凝土(RC)構件行為

- 主 講 人：張大鵬 教授
- 主辦單位：交通部運輸研究所
- 協辦單位：國立臺灣科技大學 營建系
- 中華民國九十五年十月十二日

1/47

綱 要

- 2-1 鋼筋混凝土(RC)圓柱承受軸力之構件行為
- 2-2 鋼筋混凝土(RC)樑承受剪力之構件行為
- 2-3 圍束補強鋼筋混凝土(RC)圓柱之設計
- 2-4 剪力補強鋼筋混凝土(RC)樑之設計

2/47

2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(1/7)

- 圍束鋼筋混凝土組成律
  - 無圍束之鋼筋混凝土行為
  - 有圍束之鋼筋混凝土行為
  - 圍束鋼筋混凝土抗壓強度
- 鋼筋混凝土柱軸力設計強度

3/47

2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(2/7)  
無圍束作用之鋼筋混凝土行為(1/2)

- 無圍束作用  
鋼筋混凝土承受軸向壓力時，為單純軸向壓縮與橫向擴張之應變變化之模式。

4/47

## 2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(3/7)

### 無圍束作用之鋼筋混凝土行為(2/2)

- 軸向應力增加到混凝土抗壓強度之 75% ~80% 倍時，柱體將產生龜裂
- 混凝土達開裂應變  $\epsilon_{cr}$  後，此時橫向應變  $\epsilon_A$  將迅速擴張

5/47

## 2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(4/7)

### 有圍束作用之鋼筋混凝土行為(1/2)

- 有圍束作用  
多軸向的行為模式，混凝土承受壓應力、拉應力、剪應力等多重複雜的問題。

6/47

## 2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(5/7)

### 有圍束作用之鋼筋混凝土行為(2/2)

- 應力應變模式由兩段曲線組成。
- 箍筋圍束混凝土可以增加構件的強度與延展性。

7/47

## 2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(6/7)

### 圍束鋼筋混凝土之抗壓強度

- 受螺箍筋圍束之混凝土能承受額外載重，是由密間距之螺箍筋作用於柱心混凝土的側壓力造成
- $f_{cc} = f_c + K_1 \times f_2 \quad (1)$

8/47



## 2-1 RC圓柱承受軸力之構件行為(7/7)

### 鋼筋混凝土柱軸力之設計強度

- 混凝土工程設計規範與解說之規定，柱軸力設計強度  $\phi P_n$  不得超過下列規定值：

$$\text{螺箍筋柱：} P_{n,max} = \phi \cdot 0.85 \left[ 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right] \quad (2)$$

$$\text{橫箍筋柱：} P_{n,max} = \phi \cdot 0.8 \left[ 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right] \quad (3)$$

9/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (1/11)

1. RC梁基本破壞行為
2. 無剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度
3. 具有剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度

10/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (2/11)

### RC梁基本破壞行為

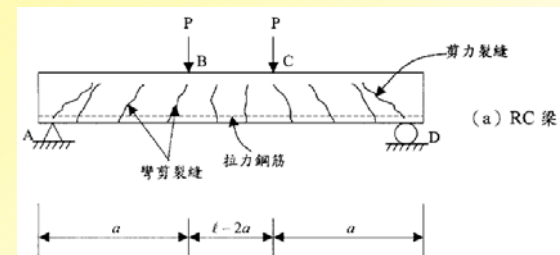
- 結構桿件承受外力作用而產生破壞時，可分為**撓曲破壞**及**剪力破壞**。
- 一般在進行混凝土梁結構設計時，均先使撓曲裂縫產生，使得結構物進入彈塑性範圍，產生消能機制，進而產生撓曲破壞，如此可避免無消能機制的脆性剪力破壞。
- **撓曲破壞**屬延展性破壞有預警性，**剪力破壞**屬脆性破壞，發生時易造成生命財產較大損失，是故對於梁的剪力補強有其必要性。



11/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (3/11)

### RC梁破壞裂縫

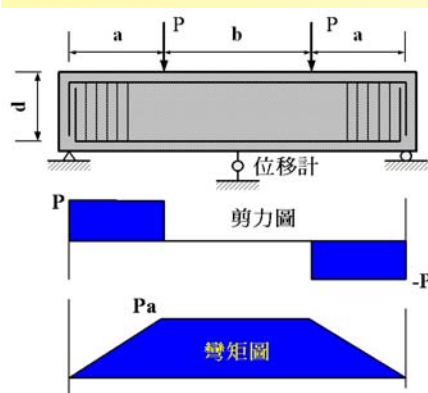


- **剪力裂縫**：靠近支承處，自梁腹產生與水平方向  $45^\circ$  之裂縫。
- **彎剪裂縫**：由梁底部之彎矩裂縫及剪力裂縫合併形成。

12/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (4/11)

### 一般剪力梁破壞模式



剪力跨距與斷面深度之比值 ( $a/d$ ) 不同將導致四種不同破壞模式。

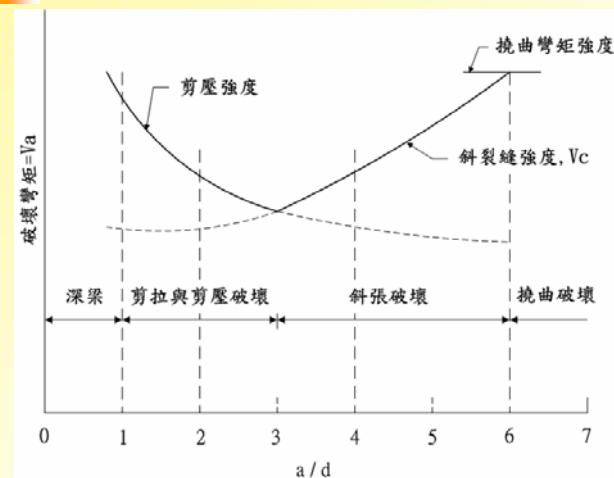
$a$  : 剪跨長度  
 $d$  : 梁有效深度

RC梁三分點抗彎試驗示意圖

13/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (5/11)

### RC梁三分點抗彎試驗破壞機制



14/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (6/11)

### RC梁之深梁破壞 ( $a/d \leq 1$ )

- ◆ 錨錠破壞：支承處張力鋼筋拔出造成混凝土破壞
- ◆ 承壓破壞：承壓處之混凝土碎裂
- ◆ 撓曲破壞：壓力拱上方混凝土碎裂或張力筋降伏
- ◆ 肋拱破壞：支承處上方混凝土出現張力裂縫或肋拱內部之混凝土碎裂

15/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (7/11)

### RC梁之短梁破壞 ( $1 < a/d \leq 2.5$ )

- ◆ 剪張破壞：鋼筋之錨錠破壞
- ◆ 剪壓破壞：上方受壓面附近之混凝土破碎

16/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (8/11)

### RC梁之中度跨距梁破壞 ( $2.5 < a/d \leq 6$ )

- ◆ 首先產生垂直撓曲裂縫
- ◆ 接著形成彎剪裂縫
- ◆ 當許多撓曲裂縫欲彎曲延伸時，就如同將梁構件下方切成齒狀 (tooth)
- ◆ 每個梁塊將無法承受持續增加之彎矩，最後造成斜撓-剪裂縫 (inclined flexure-shear crack) 而破壞

17/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (9/11)

### RC梁之長梁破壞 ( $6 < a/d$ )

- ◆ 在最大彎矩處之底部鋼筋會首先降伏，最後導致混凝土碎裂。
- ◆ 除最大彎矩處為垂直裂縫之外，在最大彎矩處及支承處之間皆為斜裂縫。
- ◆ 強度係由最大彎矩來決定，不受剪力之影響。

18/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (10/11)

### 無剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度

- 混凝土工程設計規範與解說之規定：

剪力計算強度  $V_c$ ：

$$V_c = \left( 0.5\sqrt{f'_c} + 175\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.93\sqrt{f'_c} b_w d \quad (4)$$

- 為了方便常假設上式第二項等於  $0.03\sqrt{f'_c}$ ，使  $V_c$  等於  $0.53\sqrt{f'_c} b_w d$

$f'_c$ : 混凝土抗壓強度

$V_c$ : 混凝土剪力計算強度

$V_u$ : 斷面之設計剪力強度

$M_u$ : 斷面之設計彎矩強度

$\rho_w$ : 鋼筋比

$b_w$ : 斷面寬

$d$ : 斷面最外受壓纖維至受拉鋼筋斷面重心之距離



19/47

## 2-2 RC樑承受剪力之構件行為 (11/11)

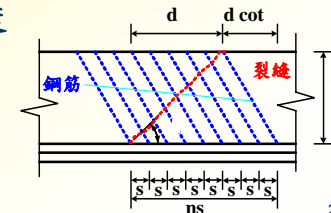
### 具有剪力筋鋼筋混凝土梁之剪力強度

- RC梁之剪力強度： $V_n = V_c + V_s$

- 剪力筋為斜向肋筋：
$$V_s = \frac{A_s f_y d (\sin\alpha + \cot\alpha)}{S} \quad (5)$$

- 剪力筋為垂直肋筋：
$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (6)$$

$V_s$ : 剪力筋提供之剪力強度



20/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (1/19)

➤ 圓形橋柱CFRP補強設計原理

➤ 圓形橋柱鋼板補強設計原理

21/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (2/19)

### 圓形橋柱CFRP補強設計原理

■ CFRP 剪力破壞補強設計

■ CFRP 撓曲破壞補強設計

■ CFRP搭接長度不足補強設計

22/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (3/19)

### CFRP 剪力破壞補強設計 (1/2)

橋柱剪力強度不足承擔塑性鉸產生所需之剪力時，可由外包CFRP補強來增加抗剪強度

➤ 外包CFRP提供之剪力強度 $V_f$ ，由下式計算得：

$$V_f = \frac{V^0}{\phi_s} - V_n \quad (7)$$

➤ CFRP補強視為橫向鋼筋處理，補強之剪力強度計算如下：

$$V_f = \frac{\pi}{2} t_j f_{jd} D \cot \theta \quad (8)$$

➤ 由上兩式可得CFRP補強之最小厚度：

$$t_j \geq \frac{\frac{V^0}{\phi_s} - V_n}{\frac{\pi}{2} f_{jd} D \cot \theta} \quad (9)$$

23/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (4/19)

### CFRP 剪力破壞補強設計(2/2)

$D$ : 鋼筋混凝土圓柱直徑

$\theta$ : 剪力裂縫與縱向鋼筋的夾角 (可採 $35^\circ$ )

$$f_{jd} = E_j \epsilon_{jd} = 0.004 E_j$$

$E_j$ : CFRP 材料之彈性模數

$V_n$ : 橋柱剪力容量

$\phi_s$ : 剪力強度折剪因子可取0.85

$V^0$ : 橋柱產生塑性鉸所須之柱剪力強度

24/47

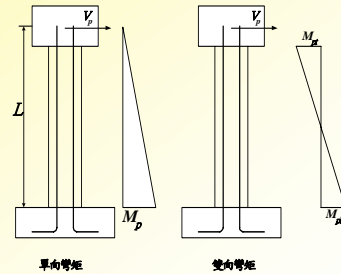


## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (5/19)

### 橋柱產生塑性鉸所須之柱剪力強度 $V^0$

$$V^0 = k_s \left[ \frac{M_p}{L} \right] \quad \text{單向彎矩} \quad (10)$$

$$V^0 = k_s \left[ \frac{M_{pt} + M_{pb}}{L} \right] \quad \text{雙向彎矩} \quad (11)$$



$M_p = 1.3M_n$ : 單向彎矩之彎矩容量

$M_{pt}; M_{pb}$ : 雙向彎矩之柱頂及柱底彎矩容量

$k_s$ : 剪力放大因子, 可取 1.15

25/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (6/19)

### 橋柱剪力容量 $V_n$

- 橋柱剪力容量  $V_n$  計算, 有 Aschheim & Moehle、ATC-32 等多種, 其中以 Aschheim & Moehle 是工程界一般認為與試驗結果最為吻合, 計算如下:

$$V_n = V_c + V_s \quad (12)$$

$$V_c = 0.93 \left( k + \frac{P}{140A_g} \right) \sqrt{f'_c} A_c \quad k = \begin{cases} 1 & \text{for } \mu_\Delta \leq 1 \\ \frac{4}{3} - \frac{1}{3}\mu_\Delta & \text{for } 1 \leq \mu_\Delta \leq 4 \\ 0 & \text{for } \mu_\Delta \geq 4 \end{cases} \quad (13)$$

$V_c$ : 混凝土剪力強度

$V_s$ : 橫向鋼筋剪力強度

$\mu_\Delta$ : 柱體位移韌性比

$P$ : 鋼筋混凝土柱所承受之軸力

$A_g$ : 柱體總橫斷面積

$A_c$ : 柱體有效橫斷面積, 一般圓柱取  $0.84A_g$

26/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (7/19)

### CFRP 圓柱撓曲破壞補強設計 (1/2)

撓曲破壞補強, 四種 CFRP 設計厚度分述如下:

◆ ATC-32 規範:

$$t_j = \frac{D}{22.5} \left\{ \frac{f'_{cc}}{f'_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{cc} A_g} \right] + 0.13(\rho_l - 0.01) \right\} \quad (14)$$

◆ AASHTO 規範:

$$t_j = \frac{D}{6} \frac{f'_c}{f'_{ju}} \quad (15)$$

◆ Caltrans 規範:

$$t_j = \frac{D}{6} \frac{f'_c}{f'_{ju}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \quad (16)$$

◆ 圍束混凝土之理論極限應變:

$$t_j = 0.1 \frac{D(\epsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f'_{ju}\epsilon_{ju}} \quad (17)$$

註: 美國聯邦公路局 (FHWA) 及加州交通部 (CALTRANS) 等資助下發展之一系列與橋樑抗震設計規範修訂之有關研究工作, 以完成 ATC-18, ATC-32 和 ATC-40 等研究報告及技術指南。

27/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (8/19)

### CFRP 圓柱撓曲破壞補強設計 (2/2)

$D$ : 橋柱直徑

$$f'_{cc} = 1.3f'_c$$

$f'_{ju}$  與  $\epsilon_{ju}$ : CFRP 之極限應力與極限應變

$P$ : 柱之軸向壓力

$A_g$ : 柱之全斷面積

$\rho_l = A_s / A_g$  縱向鋼筋比

$A_s$ : 縱向鋼筋面積

$\epsilon_{cu}$ : 補強後圍束混凝土斷面之極限應變

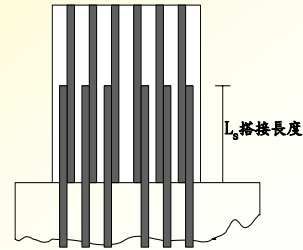
$f'_{cc}$ : 圍束混凝土之極限壓應力

28/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (9/19)

### CFRP搭接長度不足補強設計 (1/2)

- 鋼筋搭接長度不足將會使混凝土與主筋接觸面發生開裂現象，降低主筋與混凝土間的接觸面積與握裹力。
- 藉由補強的設計可增加混凝土的圍束應力，進而加大鋼筋即將發生搭接破壞時之混凝土開裂面之摩擦力。



29/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (10/19)

### CFRP搭接長度不足補強設計 (2/2)

- CFRP補強之最小厚度：

$$t_f = \frac{f_1 D}{0.003 E_j} \quad (18)$$

$f_1$ ：橫向鋼筋應變  $\varepsilon_s = 0.0015$  時之圍束力

$E_j$ ：CFRP 材料之彈性模數

30/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (11/19)

### 圓形橋柱鋼板補強設計原理

- 剪力破壞鋼板補強設計
- 橋柱韌性補強設計
- 避免橋柱挫屈鋼板補強設計
- 搭接長度不足鋼板補強設計

31/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (12/19)

### 剪力破壞鋼板補強設計

- 外包鋼板視為連續性橫向鋼筋處理，圓形橋柱需補強之最小鋼板厚度  $t_f$ ：

$$t_f \geq \frac{\frac{V^0}{\phi_s} - V_n}{\frac{\pi}{2} f_{yf} D \cot \theta} \quad (19)$$

$D$ ：鋼筋混凝土圓柱直徑

$\theta$ ：剪力裂縫與縱向鋼筋的夾角（可採 $35^\circ$ ）

$f_{yf}$ ：鋼板降伏強度

$V_n$ ：橋柱剪力容量。

$\phi_s$ ：剪力強度折剪因子可取0.85

$V^0$ ：橋柱產生塑性鉸所須之柱剪力強度

32/47



## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (13/19)

### 橋柱韌性鋼板補強設計 (1/3)

- 鋼板視為連續性橫向鋼筋，增加混凝土圍束應力並改善極限強度與應變，增加柱的韌性。

- ATC-32規範

$$t_j = \frac{D}{4} \left\{ \frac{0.16f'_{cc}}{f_{je}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_{cc}A_g} \right] + 0.13(\rho_l - 0.01) \right\} \quad (20)$$

- AASHTO規範

$$t_j = 0.03D \frac{f'_c}{f_{yj}} \quad (21)$$

33/47



## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (14/19)

### 橋柱韌性鋼板補強設計 (2/3)

- Caltrans規範

$$t_j = 0.03D \frac{f'_c}{f_{yj}} \left[ 0.5 + 1.25 \frac{P}{f'_c A_g} \right] \quad (22)$$

- 圍束混凝土之理論極限應變

$$t_j = \frac{0.18 \times D (\epsilon_{cu} - 0.004) f'_{cc}}{f_{yj} \epsilon_{ju}} \quad (\text{Mander 等人}) \quad (23)$$

$$t_j = \frac{5.6 \times D (\epsilon_{cu} - \epsilon_{cc}) f_c^2}{f_{yj} f'_{cc}} \quad (\text{Hoshikuma 等人}) \quad (24)$$

34/47



## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (15/19)

### 橋柱韌性鋼板補強設計 (3/3)

$$f'_{ce} = 1.3 f'_c$$

$$f_{je} = 1.1 f_{yj}$$

$f_{yj}$  : 鋼板之降伏強度

$\rho_l = A_s / A_g$  縱向鋼筋比

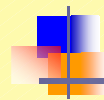
$\epsilon_{ju}$  : 鋼板之極限應變

$f'_{cc}$  : 圍束混凝土之抗壓強度

$\epsilon_{cc}$  :  $f'_{cc}$ 相對應之應變

$\epsilon_{cu}$  : 圍束混凝土之極限壓應變

35/47



## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (16/19)

### 避免橋柱挫屈鋼板補強設計 (1/2)

- 未補強圓柱橫向鋼筋比小於ATC-32規範規定之最小橫向鋼筋比之需求時，則應採取預防挫屈補強設計，可由下式得補強之最小鋼板厚度。

$$t_j = \frac{D n_b f_s^2}{8.89 E_{ds} E_t} \quad (25)$$

$$\text{式中, } E_{ds} = \frac{4 E_{su} E_t}{(\sqrt{E_{su}} + \sqrt{E_t})^2} \quad (26)$$

36/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (17/19)

### 避免橋柱挫屈鋼板補強設計 (2/2)

$n_b$ : 縱向鋼筋根數  
 $f_s$ : 縱向鋼筋挫屈時之應力  
 $E_t$ : 橫向鋼筋之彈性模數  
 $E_t$ : 縱向鋼筋之彈性模數  
 $E_{su}$ :  $f_s$  至  $f_{su}$  之割線斜率  
 $f_{su}$ : 縱向鋼筋之最高強度

37/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (18/19)

### 搭接長度不足鋼板補強設計 (1/2)

- 縱向鋼筋搭接長度不足，最小補強鋼板厚度：

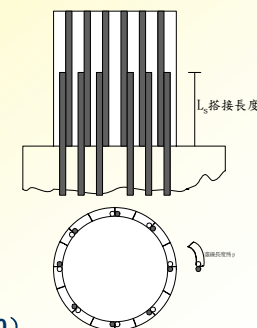
$$t_j = \frac{D(f_{l(\text{需求})} - f_{l(\text{橫向鋼筋})})}{6120} \quad (27)$$

$$f_{l(\text{橫向鋼筋})} = \frac{2A_{sh}f_{sh}}{D'} \quad (28)$$

其中，

$$f_{l(\text{需求})} \geq \frac{A_b f_s}{\mu p l_s} \quad (29)$$

$$p = \frac{\pi D'}{2n_b} + 2(d_b + cc) \leq 2\sqrt{2}(d_b + cc) \quad (30)$$



38/47

## 2-3 圍束補強 RC圓柱之設計 (19/19)

### 搭接長度不足鋼板補強設計 (2/2)

$A_b$ : 縱向鋼筋斷面積  
 $cc$ : 混凝土保護層厚度  
 $f_s$ : 取  $1.5f_y$   
 $\mu$ : 摩擦係數 (取 1.4)  
 $l_s$ : 搭接長度  
 $p$ : 搭接破壞時混凝土開裂面周長  
 $f_l$ : 橫向鋼筋應變 0.0015 時之圍束力  
 $f_{sj}$  與  $f_{sh}$ : 鋼板與橫向鋼筋在環向應變 0.0015 時之應力  
 $D$ : 柱之直徑  
 $D'$ : 圍束斷面之直徑  
 $f_{l(\text{橫向鋼筋})}$ : 橫向鋼筋提供之圍束力

39/47

## 2-4 剪力補強 RC樑之設計 (1/7)

- CFRP補強梁剪力之設計

- 梁鋼板補強之剪力分析

40/47

## 2-4 剪力補強 RC 樑之設計 (2/7)

### CFRP 補強梁剪力之設計 (1/2)

- RC 梁之剪力強度係由混凝土，剪力箍筋及 CFRP 三部分共同提供：

$$V_n = V_c + V_s + V_{cf} \quad (\text{kgf}) \quad (31)$$

$$\text{混凝土剪力強度 } V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (\text{kgf}) \quad (32)$$

$$\text{剪力鋼筋剪力強度 } V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{S} \quad (\text{kgf}) \quad (33)$$

兩側貼 CFRP 補強其剪力強度

$$V_{cf} = 2 \times d_{cf} \times f_{cf} \times t_{cf} \quad (\text{kgf}) \quad (34)$$

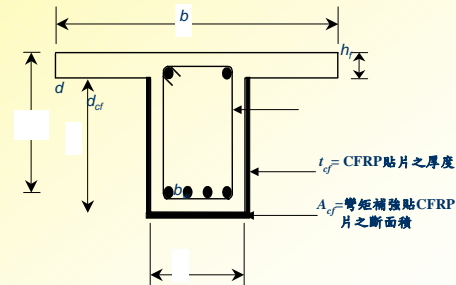
41/47

## 2-4 剪力補強 RC 樑之設計 (3/7)

### CFRP 補強梁剪力之設計 (2/2)

- CFRP 剪力補強貼片之最小厚度  $t_{cf}$ ：

$$t_{cf} \geq \frac{V_u - (V_c + V_s) \phi}{2 \times \phi_{cf} \times d \times f_{cf}} \quad (\text{cm}) \quad \phi = 0.85, \phi_{cf} = 0.75 \quad (35)$$



42/47

## 2-4 剪力補強 RC 樑之設計 (4/7)

### 梁鋼鈹補強之剪力分析 (1/2)

- 鋼筋混凝土梁鋼鈹補強模擬為層狀複合材料梁
- 垂直向層狀之複合材料梁，若介面達完全結合效果，僅須依勁度比分配承受之外力。

43/47

## 2-4 剪力補強 RC 樑之設計 (5/7)

### 梁鋼鈹補強之剪力分析 (2/2)

- 利用能量原理推導垂直向複合三明治樑之撓曲理論，可得二條四階之聯立微分方程式：

$$E_1 I_1 v_1''' - \frac{kh^3}{12} (v_1' - v_2') + kh(v_1 - v_2) = q_1 \quad (36)$$

$$E_2 I_2 v_2''' - \frac{kh^3}{12} (v_1' - v_2') - kh(v_1 - v_2) = q_2 \quad (37)$$

- 垂直向層狀之複合材料梁，若介面達完全結合效果，僅須依勁度比分配承受之外力。

$$EI_S / EI_{RC} = V_S / V_{RC} = M_S / M_{RC} \quad (38)$$

44/47



## 2-4 剪力補強 RC 樑之設計 (6/7)

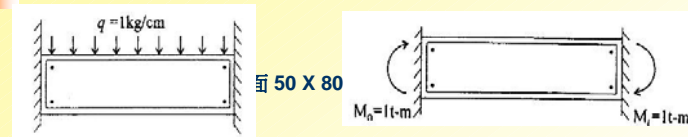
### 梁鋼鈹補強之剪力分析 (3/3)

- 補強鋼鈹端點若無特殊處理(螺栓)，不僅無法依其相對撓曲勁度分擔外力，反而會因補強鋼鈹反翹現象造成原RC樑須負擔額外的**逆向剪力**。
- 日本建築研究所報告指出，側面補強鋼鈹的剪力補強方式，僅可抑制初期剪力裂縫之發生，唯對極限剪力強度幫助不大（因局部挫屈而剝離）。

45/47

## 2-4 剪力補強 RC 樑之設計 (7/7)

### R.C.樑與兩側鋼板之剪力分擔



均佈載重	$V_s / V_{R.C.}$		
	$X=0$	$X=L/4$	$X=L/2$
$EI_s=0.2EI_{R.C.}$	-0.3069	0.2027	0.2000
$EI_s=0.2EI_{R.C.}$	-0.3409	0.4213	0.4000

端點彎矩	$V_s / V_{R.C.}$		
	$X=0$	$X=L/4$	$X=L/2$
$EI_s=0.2EI_{R.C.}$	-0.5942	0.2048	0.2000
$EI_s=0.2EI_{R.C.}$	-0.6389	0.4363	0.4000

- \* 上述資料無端點螺栓(蕭興臺)
- \* 簡支梁之有效複合度遠高於兩端固定之R.C.樑

46/47

簡報完畢  
敬請指教

交通部運輸研究所 港灣技術研究中心  
活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性  
研究教育訓練

第三單元 RPC施工補強程序

主講人：張淳勛 博士候選人  
主辦單位：交通部運輸研究所  
協辦單位：國立臺灣科技大學 營建系

中華民國九十五年十月十二日

1/25

第三單元

RPC施工補強程序

- 3-1 常用修復與補強工法簡介說明
- 3-2 RPC補強R.C.構件之施工程序與評估
- 3-3 RPC補強R.C.構件之補強方針



2/25

3-1 常用修復與補強工法簡介說明  
(傳統RC構造物服務功能)

傳統混凝土結構物設計服務之主要功能：

- 滿足服務環境的機械性能。
- 長期耐久性與結構安全性。
- 不因環境與使用服務的交互影響而有劣化的情形。



3/25

3-1 常用修復與補強工法簡介說明  
(傳統RC構造物服務功能)

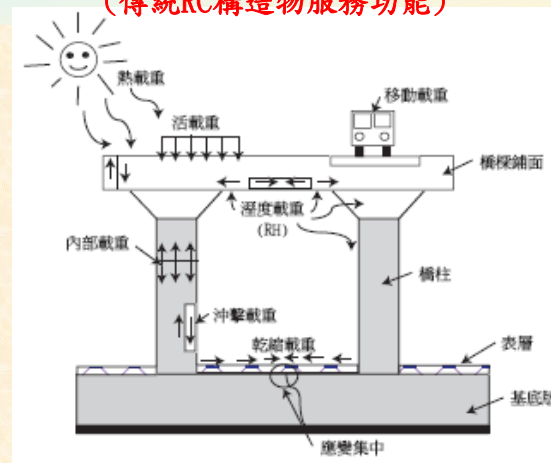


圖1 結構體修補面上可能承受載重示意圖

4/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (影響構造物耐久性之因素)

影響構造物耐久性之原因：

- 設計不當。
- 施工不良。
- 外力的作用而造成損壞。

5/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (構造物受損修補之方式)

結構物受損後之修補方式有下列兩種：

#### □ 修復(Repair)

修復旨在恢復結構物之原有設計強度

#### □ 補強(Rehabilitation)

補強與加固則是將受損之結構構件，提升至未受損前之強度或超過原有構件之原始設計強度。

6/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (構造物補強工法的考量)

結構物修復補強方法之考量如下：

- 目的：結構安全性。
- 方式：修復或補強。
- 修補材料的性能及規格。
- 結果：結構物使用年限要求。

7/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (構造物修補材料的考量因素)

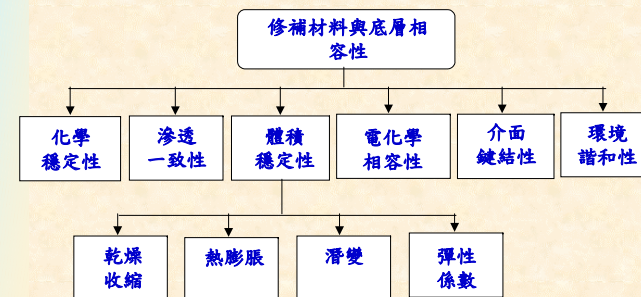


圖3-2 選擇修補材料之基本考量圖

8/25



### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (填補及補強用之材料種類)

#### 1. 填補用修補材料：

- 水泥砂漿
- 樹脂砂漿系修補材料
- 裂縫灌注修補材料

#### 2. 補強用修補材料

##### □ 粘結材料：

##### □ 貼片補強材料：

##### a. 鋼板材料

##### b. 纖維複合材料

##### □ RPC補強材料

9/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (補強工法之種類)

#### 補強工法之種類

- 裂縫環氧樹脂灌注工法
- 鋼板(樑)補強工法
- 碳纖維補強工法
- 混凝土表面破損修補工法
- 斷面擴大補強工法

10/25

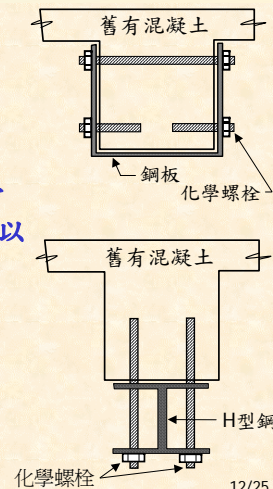
### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (裂縫環氧樹脂灌注工法)

- (1) 裂縫表面處理
- (2) 安置灌注頭基座
- (3) 封塞灌注頭基座及裂縫
- (4) 安裝持續加壓式灌注頭
- (5) 灌注修補材料
- (6) 敲除灌注頭及其基座
- (7) 表面復原處理

11/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (鋼板(樑)補強工法)

- (1) 表面處理
- (2) 鋼板(樑)裁切及鑽孔
- (3) 鋼板(樑)安裝固定
- (4) 安裝灌注孔及出氣孔
- (5) 鋼板(樑)四周及螺絲固定孔以膏狀封塞劑封塞四周使之固定，以防止灌漿時漏漿。
- (6) 高壓低速灌注膠結材
- (7) 去除灌注頭及出氣頭
- (8) 鋼板表面處理。



12/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (碳纖維補強工法)

- (1)面層處理
- (2)斷面復舊
- (3)不平整修正
- (4)底漆塗佈
- (5)單向性強化纖維的粘貼
- (6)養護
- (7)完工後面層保護漆噴塗

13/25

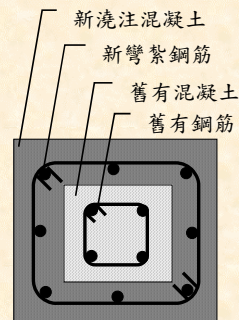
### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (混凝土表面破損修補工法)

- (1)混凝土破損處鑿除作業
- (2)鋼筋除鏽及防鏽作業
- (3)破損處保護層修復補強作業
- (4)表面復原處理

14/25

### 3-1 常用修復與補強工法簡介說明 (斷面擴大補強工法)

- (1)混凝土破損處鑿除作業
- (2)鋼筋除鏽及防鏽作業
- (3)鋼筋彎紮補強作業
- (4)模板工程
- (5)混凝土灌漿作業
- (6)養護
- (7)表面處理

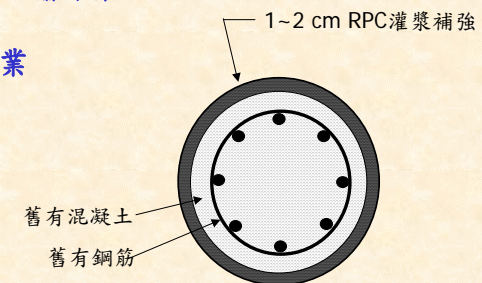


15/25

### 3-2 RPC補強R.C.構件之施工程序與評估(1/4)

#### I. 圓柱補強施工程序

- 1.混凝土破損處鑿除作業
- 2.鋼筋除鏽及防鏽作業
- 3.模板工程
- 4.RPC灌漿作業
- 5.拆模、養護
- 6.表面處理

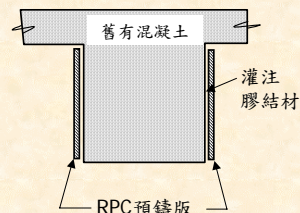


16/25

### 3-2 RPC補強R.C.構件之施工程序與評估(2/4)

#### II. 梁剪力補強施工程序(預鑄版塊補強方式)

1. 混凝土破損處鑿除作業
2. 鋼筋除鏽及防鏽作業
3. 鋼筋彎紮或點焊鋼絲網補強作業
4. RPC預鑄版固定工程
5. 安裝灌注孔及出氣孔
6. 以膏狀之封塞劑封塞四周，以防止灌漿時漏漿。
7. 高壓低速灌注膠結材
8. 拆模、養護
9. 表面處理

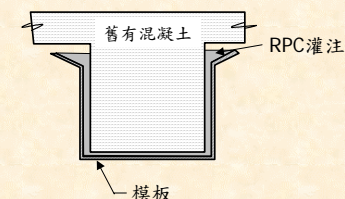


17/25

### 3-2 RPC補強R.C.構件之施工程序與評估(3/4)

#### III. 梁剪力補強施工程序(現場澆置補強方式)

1. 混凝土破損處鑿除作業
2. 鋼筋除鏽及防鏽作業
3. 鋼筋彎紮或點焊鋼絲網補強作業
4. 模板工程
5. RPC灌漿作業
6. 拆模、養護
7. 表面處理



18/25

### 3-2 RPC補強R.C.構件之施工程序與評估(4/4)

#### IV. RPC補強R.C.構件之評估

1. 界面黏結性評估
  - 1) 聲測法
  - 2) 敲擊回音法
  - 3) 超音波法
2. 膠結材料評估
  - 1) 基本材料物性、化性評估
  - 2) 硬固性質評估
3. RPC材料評估
  - 1) 基本材料物性、化性評估
  - 2) 硬固性質評估
  - 3) 結構行為評估

19/25

### 3-3 RPC補強R.C.構件之補強方針 (1/5)

#### I. RPC補強材料之優點：

1. 可配合現地構造物形狀澆置不同修補方式。
2. 具有良好的耐久性、耐候性、韌性及強度。
3. 與混凝土基材有良好的界面強度。
4. 可藉由材料組成變化調整成不同彈性係數的材料，減少修補材與基材之間的差異變形。
5. 與混凝土基材同為水泥質材料。

20/25



### 3-3 RPC補強R.C.構件之補強方針 (2/5)

#### II. RPC補強材料之缺點：

- 1.生產單價較高。
- 2.需較嚴謹的製程與品管程序，方能維持良好工作性及硬固性質。
- 3.如在現場澆置則需要模板組立作業成本及空間。
- 4.需有養護時間才能發揮強度。
- 5.不適合薄層修補。
- 6.補強功效受到基材表面濕潤度的影響。

21/25

### 3-3 RPC補強R.C.構件之補強方針 (3/5)

#### III. 結構型態適用性補強方針之考量：

- 1.港灣工程碼頭混凝土面版底層修補。
- 2.船埠邊緣損傷混凝土修補。
- 3.局部損傷的梁柱構件補強。
- 4.不規則曲面構造物損傷補強。
- 5.水工結構物受沖刷損傷面層之補強。
- 6.剛性路面防止高度磨耗損傷之補強。

22/25

### 3-3 RPC補強R.C.構件之補強方針(4/5)

#### IV. 修補方式、費用及技術補強方針之考量：

- 1.受損RC構件可進行局部修補，以節省施工費用之情況。
- 2.需使用貫穿孔方式及配合倒吊模板澆置RPC之施工情況。
- 3.RC構造物具有大面積平面狀損傷範圍之修補。
- 4.受損傷構件邊緣具有銳角面之修補。

23/25

### 3-3 RPC補強R.C.構件之補強方針(5/5)

#### V. 維修保養費用補強方針之考量：

- 1.修補構材須長期使用在潮濕或水流沖蝕環境以減低高維修費用之情況。
- 2.傳統修補工法所使用環氧樹脂黏結材因老化而喪失功能之環境。
- 3.修補材料在長期使用期間可能會發生裂縫損傷，但仍可具備某種程度之強度與韌性之修補情況。

24/25



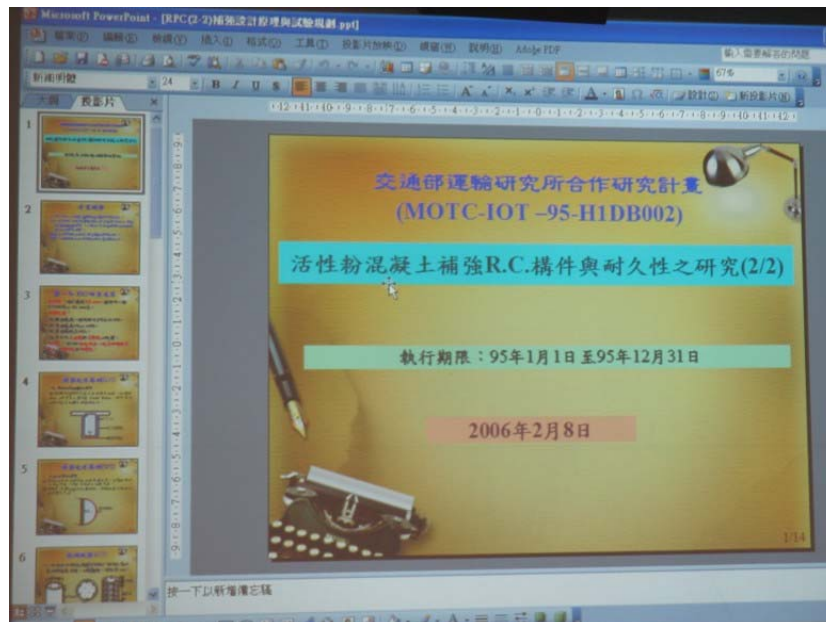
照片一 開訓典禮



照片二 訓練會場

地點：港研中心2樓視聽教室				
日期	時間	課程題目	課程內容	主講人
十月廿二日 （星期四）	09:00 ~ 09:30	報 到		
	09:30 ~ 10:20	活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 組成與行為	1. 活性粉混凝土(RPC)之組成 2. 活性粉混凝土(RPC)之工程材料 性質 3. 活性粉混凝土(RPC)之耐久性	張大鵬 教授 國立臺灣科技大學 營建系
	10:20 ~ 10:30	休 息		
	10:30 ~ 11:20	鋼筋混凝土(RC) 構件行為	1. 鋼筋混凝土(RC)圓柱承受軸力之構 件行為 2. 鋼筋混凝土(RC)樑承受剪力之構件 行為 3. RPC 圓束補強鋼筋混凝土(RC)圓柱 承受軸力之構件行為 4. RPC 剪力補強鋼筋混凝土(RC)樑承 受剪力之構件行為	張大鵬 教授 國立臺灣科技大學 營建系
	11:20 ~ 12:10	RPC 補強工程 序	1. RPC 補強 R.C. 構件之施工程序與評 估 2. RPC 補強 R.C. 構件之補強方針	張大鵬 教授 國立臺灣科技大學 營建系
	課程結束及午餐			
	主辦單位：交通部運輸研究所港研中心			
	合作單位：臺灣科技大學			

照片三 訓練課程海報



照片四 訓練課程簡報



照片五 課程進行（一）



照片六 課程進行（二）

## 附錄六：期末簡報





## 活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性之研究(2/2)

Study on Reinforced Concrete Members Retrofitted with Reactive Powder Concrete and Its Durability (2/2)

### 期末報告 簡報

計畫主持人：張大鵬教授

協同主持人：黃兆龍教授

研究人員：林秉如

研究助理：王金圳、張淳勛

陳柏存、吳崇聖、高進驊

呂冠群、展維賢、丁小真

民國九十五年十一月十七日

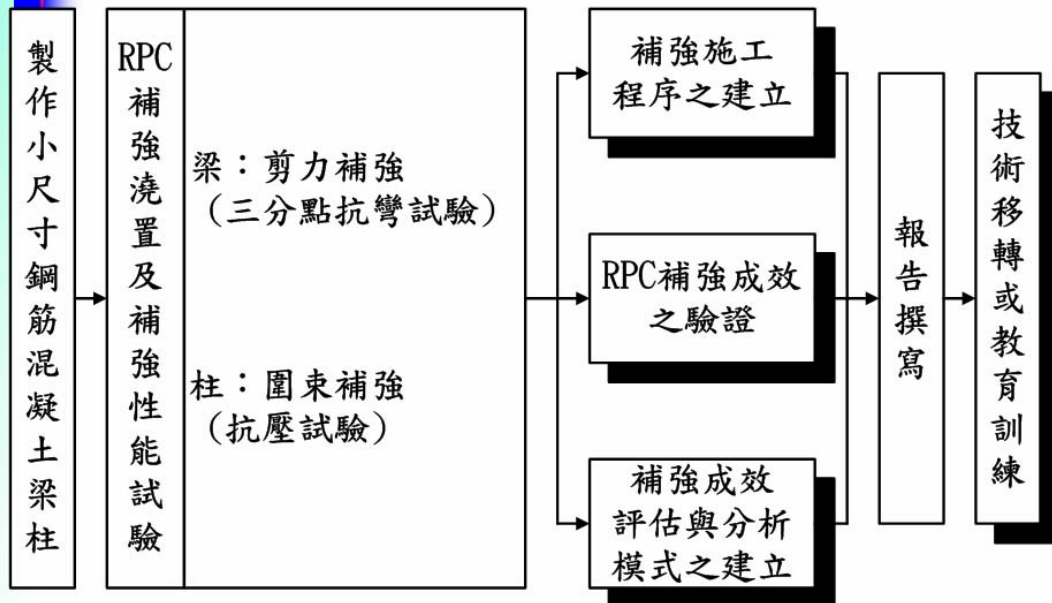


### 報告大綱

- ☐ 緒論
- ☐ 文獻回顧
- ☐ 試驗計畫
- ☐ 試驗成果與討論
- ☐ 結論與建議



## 緒論 - 第二年計畫研究流程



3/65



## 文獻回顧 - RPC 的主要特性

- 去除粗骨材以改善**均勻性**。
- 骨材級配採最佳化，以提高**密實性**。
- 添加鋼纖維以**增加韌性**。
- 使用良好的養護技術以**改善混凝土微觀結構**。
- 相較混凝土的脆性破壞，RPC屬**延性破壞**。
- 具有**良好耐久性**、環境影響最小。
- **施工方法同普通混凝土之拌和與澆置**。

4/65



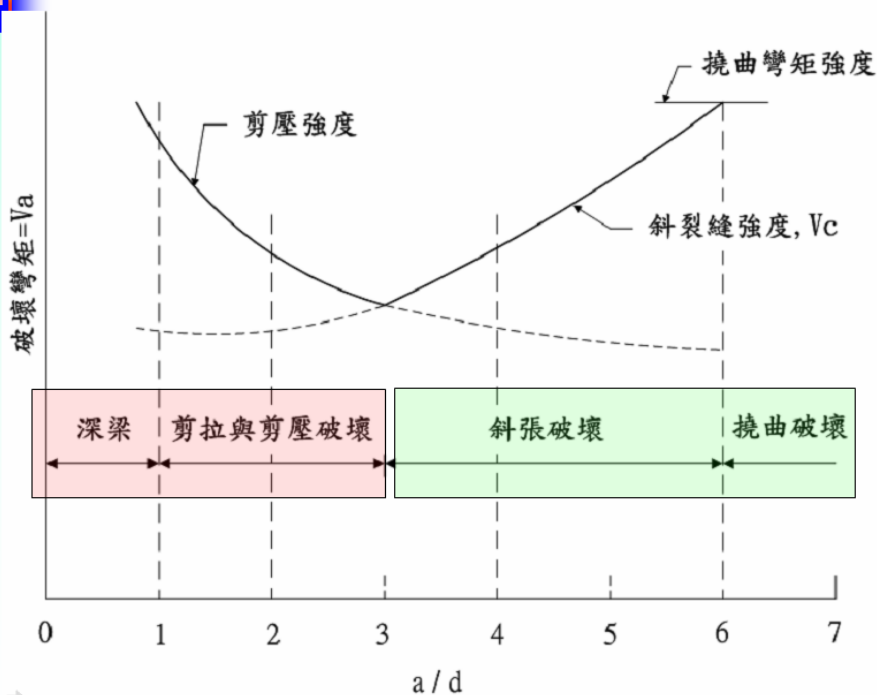
## 第一年RPC計畫成果摘要 (第15組)

- 流度達210 mm。
- 28天抗壓強度約為一般混凝土1.8~3倍。
- 劈裂強度提高1.4倍，抗彎強度提高68%，顯示高強度及高韌性材料性能。
- 低電滲量與高表面電阻值，表面與內部組構相當緻密，具優良抗蝕性。
- 表滲透率低，具有良好耐久性。
- 磨耗測試僅是一般混凝土磨耗深度1/4~1/5，抗磨損能力高。

5/65



## 文獻回顧 鋼筋混凝土梁破壞模式



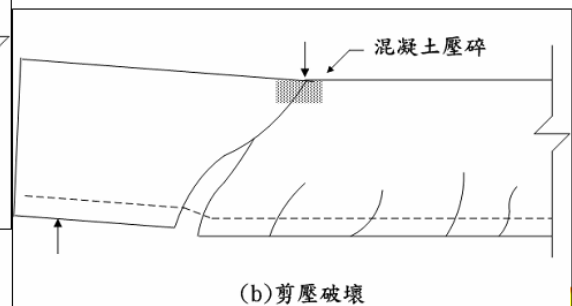
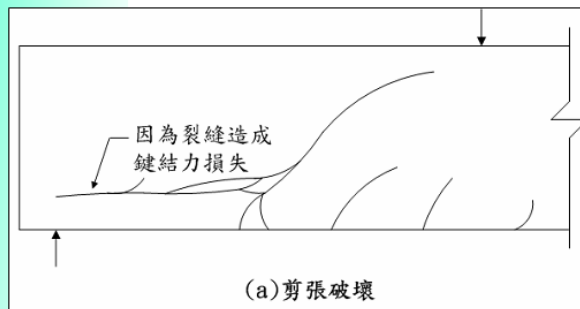
6/65



# 剪拉與剪壓破壞模式

$$1 < a/d \leq 2.5$$

- 剪拉破壞：鋼筋錨錠破壞。
- 剪壓破壞：梁上方受壓面附近混凝土壓碎。
- 本試驗採  $a/d = 30 \text{ cm}/20 \text{ cm} = 1.5$ 。



7/65



## 文獻回顧

### 無圍束鋼筋混凝土柱軸力行爲

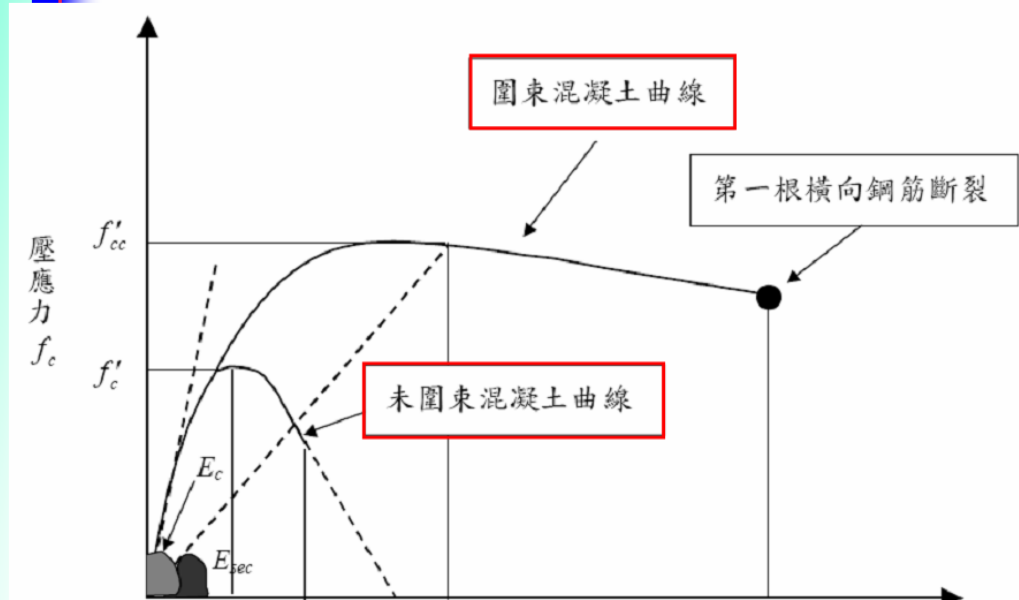
- 軸壓力作用時，卜松比效應使得軸向應變壓縮、橫向應變擴張。
- 當軸向應力增加到混凝土抗壓強度 75% ~ 80% 倍時，柱體將產生龜裂，此時橫向應變將迅速擴張，而軸向應變則是趨緩，此為無圍束作用下的基本力學性質。

8/65





## 有、無圍束作用下 混凝土應力應變曲線之差異



9/65



## 試驗計畫

- 一、**RPC之基本力學試驗。**
- 二、**縮小尺寸鋼筋混凝土梁：**區分為一般鋼筋混凝土(NC組)、以CFRP補強(CFRP組)及以RPC補強(RPC組)。
- 三、**縮小尺寸鋼筋混凝土柱：**區分為一般鋼筋混凝土(NC組)、以CFRP補強(CFRP組)及以RPC補強(RPC組)。

10/65



# RPC之基本力學試驗

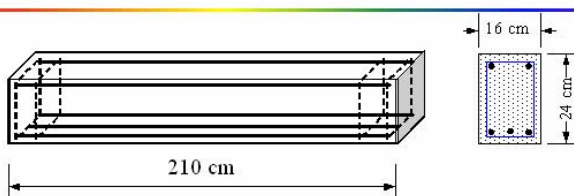
試體名稱	試體尺寸	試驗項目	試驗齡期					
			新拌	3天	7天	28天	56天	90天
活性粉混凝土 (RPC) 試體	$\phi 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	1. 流度試驗	✓	—	—	—	—	—
		2. 抗壓試驗	—	✓	✓	✓	✓	✓
		3. E、 $\nu$ 量測	—	✓	✓	✓	✓	✓
		4. 劈裂試驗	—	✓	✓	✓	✓	✓
RPC抗彎補強試體	$4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$	1. 抗彎試驗	—	✓	✓	✓	✓	✓
混凝土試體	$\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$	1. 流度試驗	✓	—	—	—	—	—
		2. 抗壓試驗	—	✓	✓	✓	✓	✓
		3. E、 $\nu$ 量測	—	✓	✓	✓	✓	✓
		4. 劈裂試驗	—	✓	✓	✓	✓	✓
RPC及CFRP補強試體	$\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$	1. 抗壓試驗	—	✓	✓	✓	✓	✓
		2. E、 $\nu$ 量測	—	✓	✓	✓	✓	✓

11/65

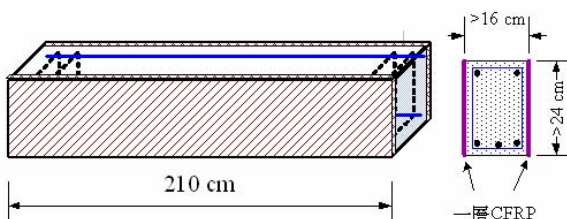


# 縮小尺寸鋼筋混凝土梁

❖ NC組

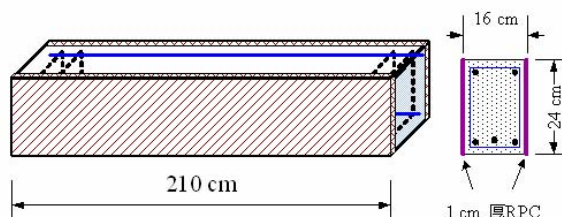


❖



CFRP組

❖ RPC組



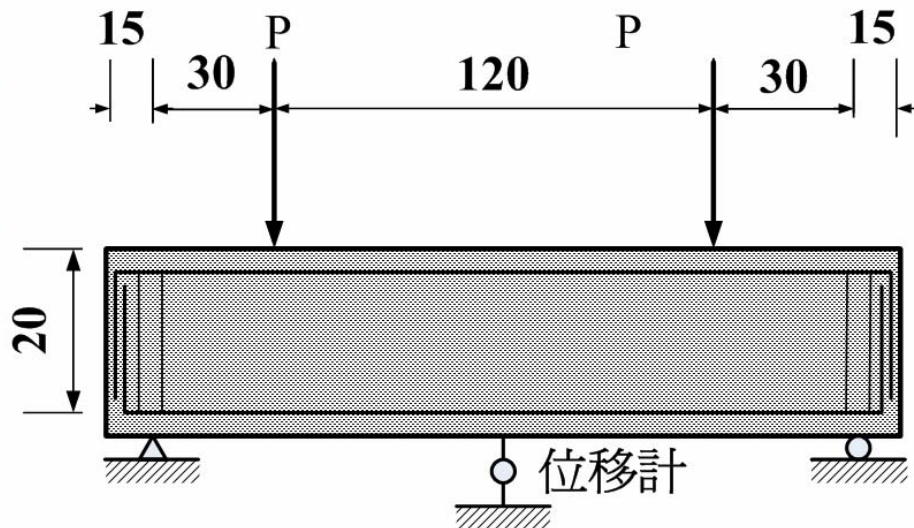
12/65



## 縮小尺寸鋼筋混凝土梁

載重方式

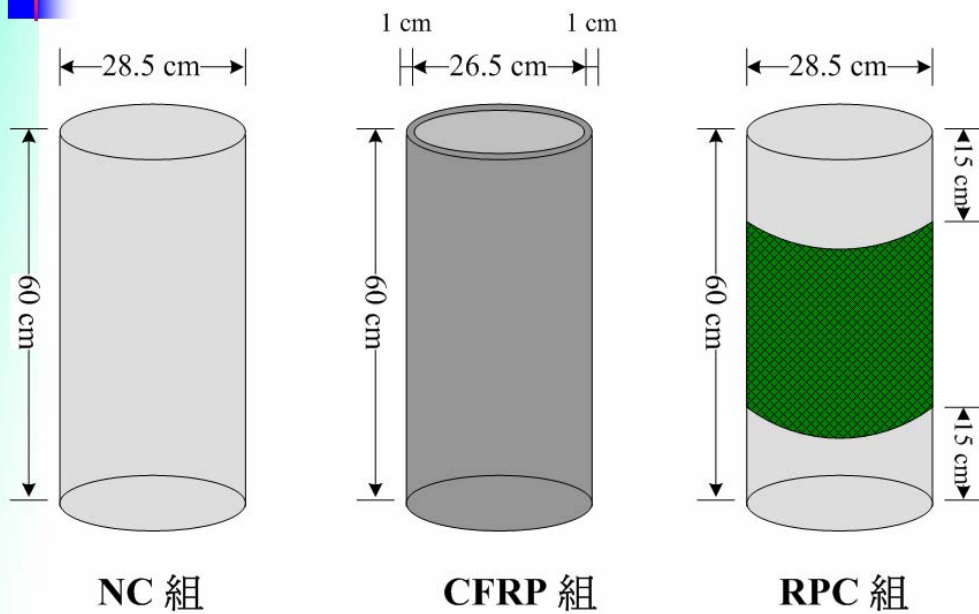
單位：cm



13/65



## 縮小尺寸鋼筋混凝土柱

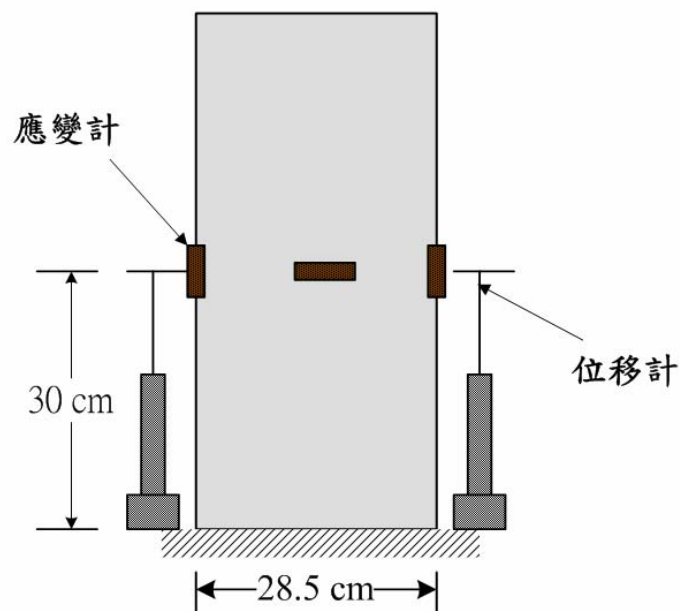


14/65





# 縮小尺寸鋼筋混凝土柱 應變計埋設位置



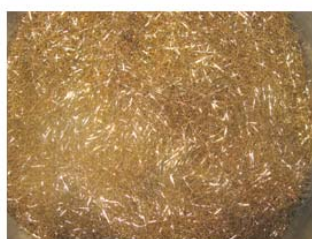
15/65



## 試驗材料 相片 (1/3)



爐石粉



鋼纖維



鋼纖維細圖



水泥



石英砂



石英砂與水泥細圖

16/65

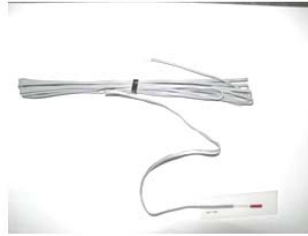




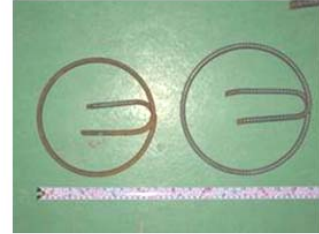
## 試驗材料 相片 (2/3)



矽灰



應變計



圓型箍筋



矩形箍筋



梁鋼筋彎鉤



梁鋼筋彎鉤細圖

17/65



## 試驗材料 相片 (3/3)



矩形梁模具

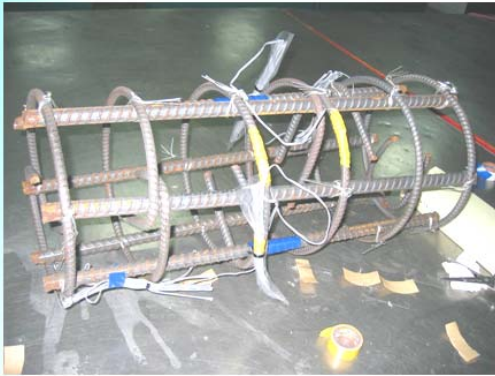


圓形柱模具

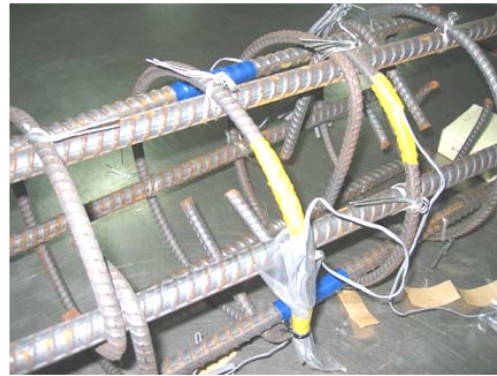
18/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (1/8)



柱鋼筋組立及應變計(1)



柱鋼筋組立及應變計細圖(1)

19/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (2/8)



柱鋼筋在模板中組立



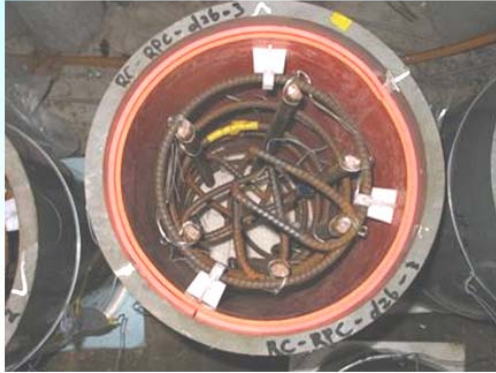
柱鋼筋在模板內組立完成

20/65





## 鋼筋混凝土試體 相片 (3/8)



柱補強組立完成之模板



柱試體兩端箍筋補強

21/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (4/8)



柱試體組立完成



柱試體應變計位置

22/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (5/8)



梁試體澆置完成



柱試體澆置完成

23/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (6/8)



拆模後之柱試體



拆模後之梁試體

24/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (7/8)



柱試體貼CFRP (一) 柱試體貼CFRP (二) 柱試體貼CFRP (三)

25/65



## 鋼筋混凝土試體 相片 (8/8)



貼應變計之柱試體



破壞後之柱試體

26/65





## 試驗成果與討論

### RPC流動性質

流度達140%，符合灌注作業之需求。



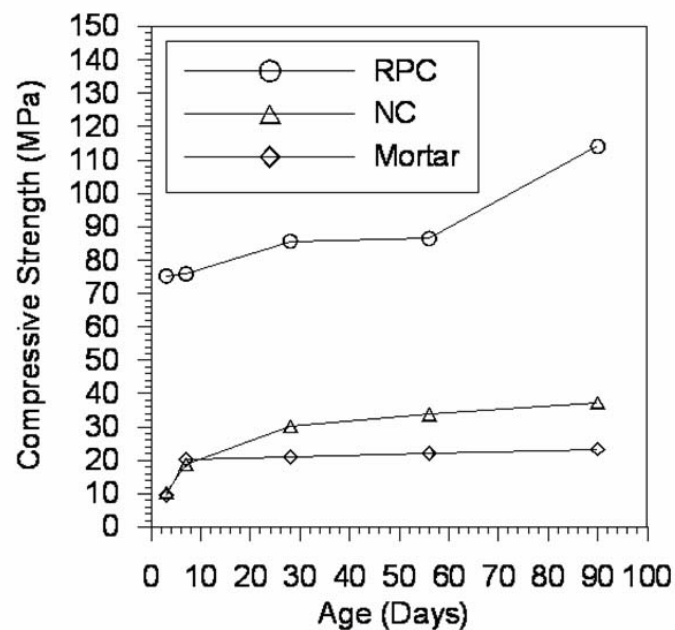
27/65



## 試驗成果與討論

### RPC基本力學性質(1/6)

抗壓強度



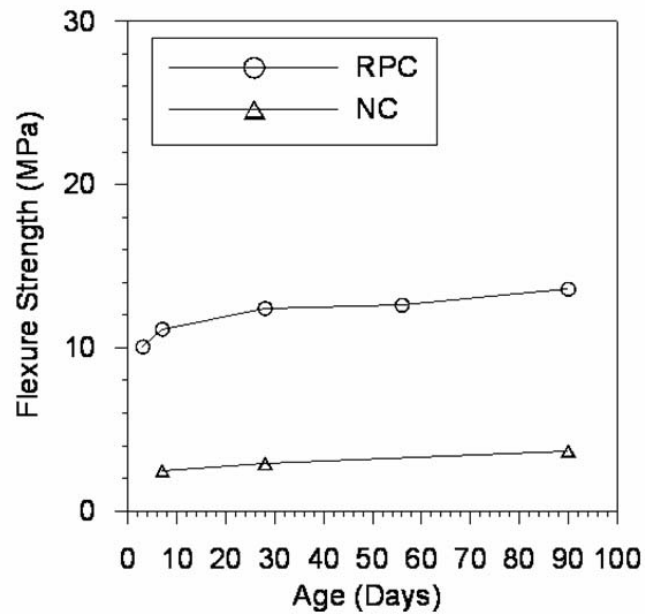
28/65



## 試驗成果與討論

### RPC基本力學性質(2/6)

劈裂強度



29/65



## 試驗成果與討論

### RPC基本力學性質(3/6)

彈性模數與卜松比量測

表 2-3 RPC、NC 與 Mortar 彈性模數與卜松比量測結果

齡期 (天)	平均彈性模數 (GPa)			$E_{RPC}/E_{NC}$	$E_{RPC}/E_{Mortar}$	平均卜松比		
	RPC	NC	Mortar			RPC	NC	Mortar
3	34.56	13.46	16.51	2.57	2.09	0.197	0.192	0.171
7	38.11	16.75	20.29	2.28	1.88	0.212	0.207	0.197
28	41.66	24.96	20.55	1.67	2.03	0.201	0.221	0.192
56	41.98	25.00	20.87	1.68	2.01	0.208	0.219	0.196
90	42.63	27.40	21.01	1.56	2.03	0.215	0.203	0.201

30/65



# 試驗成果與討論

## RPC基本力學性質(4/6)

### 小型抗彎補強成效試驗

表 2-4 RPC 補強 Mortar 抗彎試驗結果

補強 齡期 (天)	未補強 平均抗彎強度 (MPa)	RPC 補強 1cm		
		$n=E_{RPC}/E_{Mortar}$	平均抗彎強度 (MPa)	提升率 (%)
3	13.02	1.92	13.06	0.31
7	13.08	1.88	19.55	49.46
28	14.54	2.03	20.08	38.10
56	14.48	2.01	20.65	42.61
90	13.82	2.03	19.76	42.98

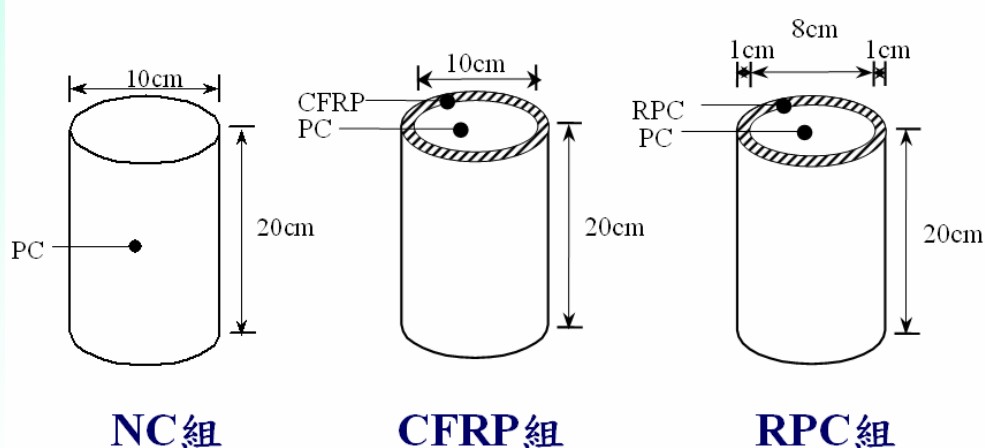
31/65



# 試驗成果與討論

## RPC基本力學性質(5/6)

### 小型抗壓補強成效試驗



32/65





# 試驗成果與討論

## RPC基本力學性質(6/6)

### 小型抗壓補強成效試驗

表 6-7 混凝土圓柱抗壓補強成效

補強齡期 (天)	未補強 NC			RPC 補強 1cm				CFRP 補強			
	平均 抗壓 強度 (MPa)	平均 彈性 模數 (GPa)	平均 卜松比	抗壓強度		材料參數		抗壓強度		材料參數	
				平均值 (MPa)	提升率 (%)	彈性 模數 (GPa)	卜松比	平均值 (MPa)	提升率 (%)	彈性 模數 (GPa)	卜松比
3	32.68	24.67	0.219	32.72	0.12	35.72	0.265	54.57	61.78	22.67	0.195
7	33.97	24.12	0.192	34.54	1.68	32.90	0.222	54.90	61.61	23.19	0.190
28	33.76	26.85	0.219	39.89	18.16	33.23	0.226	51.94	53.85	25.65	0.197
56	36.65	28.23	0.244	41.72	13.83	37.83	0.277	52.39	42.95	27.91	0.207
90	37.92	28.27	0.221	47.99	26.56	39.34	0.277	55.28	45.78	28.12	0.226

33/65



# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱 - 控制組

試體觀察：側向張力使得保護層外混凝土龜裂剝落，導致試體破壞



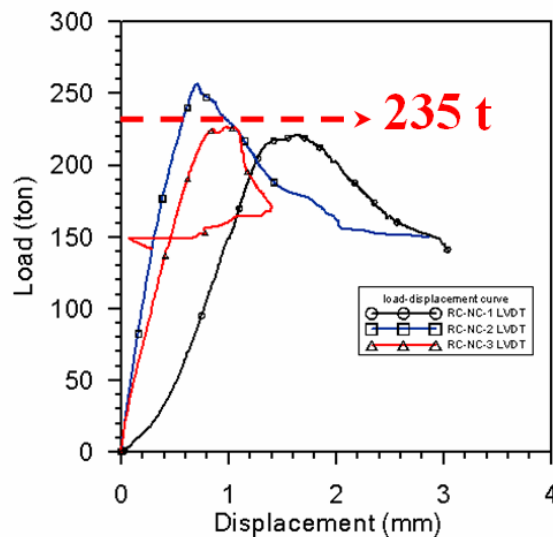
34/65

# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱 - 控制組

公式驗證：計算結果236 tf與試驗平均值235 tf相符合

$$P_n = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y = 236 t$$



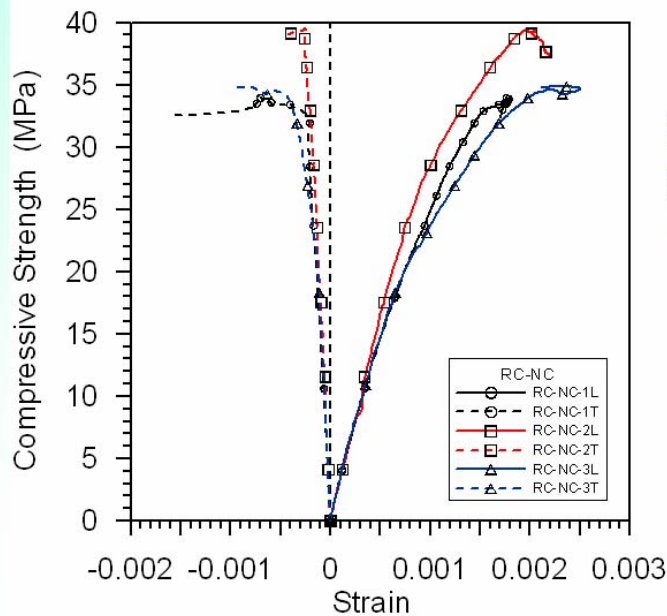
35/65



# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱 - 控制組

### 應力應變曲線



平均

強度：36.119 (MPa)

彈性模數：29.334 (GPa)

卜松比：0.181

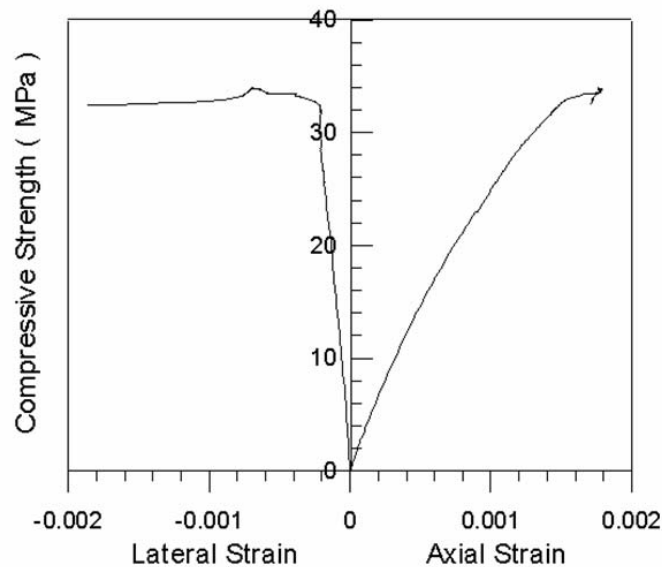
36/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - 控制組

表面應變：隨軸壓力作用，軸向應變增加，側向應變亦隨卜松比產生



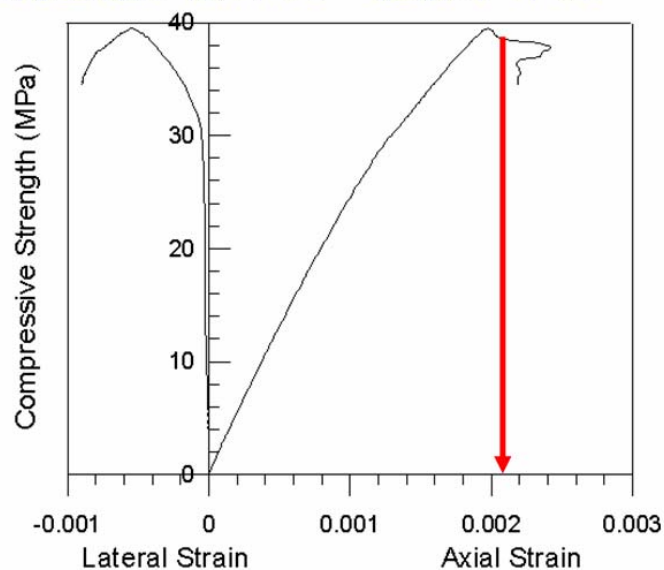
37/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - 控制組

鋼筋應變：主筋受軸力而產生應變，箍筋因圍束產生應變；極限載重後主筋降伏，箍筋未降伏



38/65

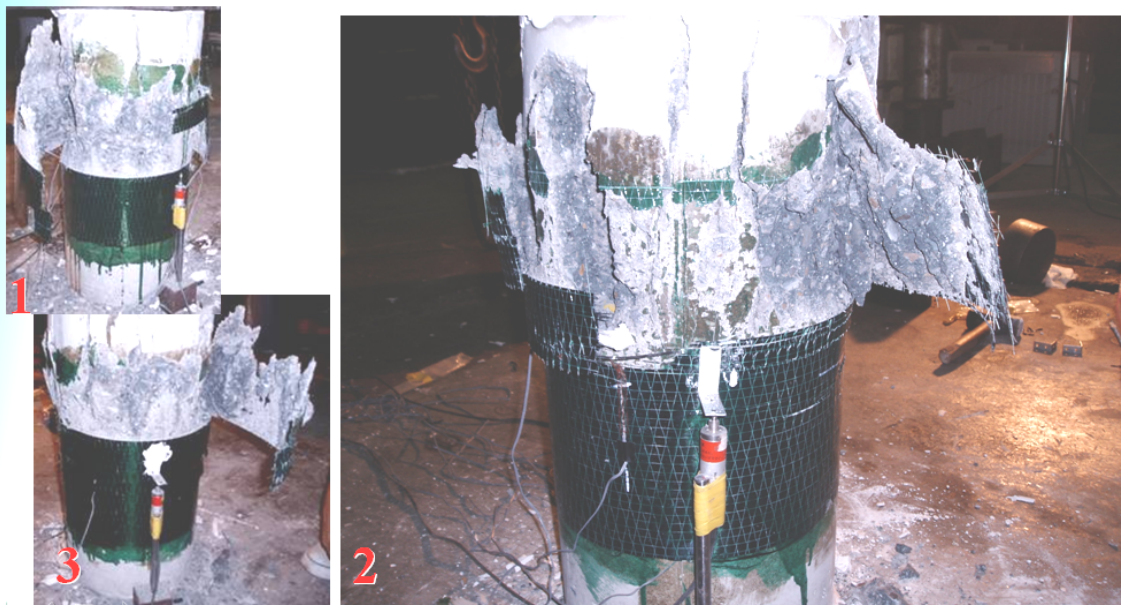




## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - CFRP組

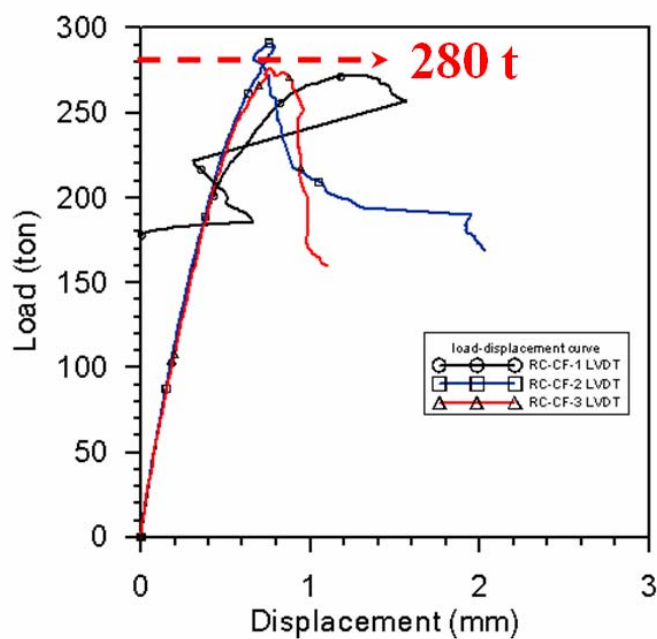
試體觀察：極限載重後CFRP瞬時斷裂，試體破壞



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - CFRP組

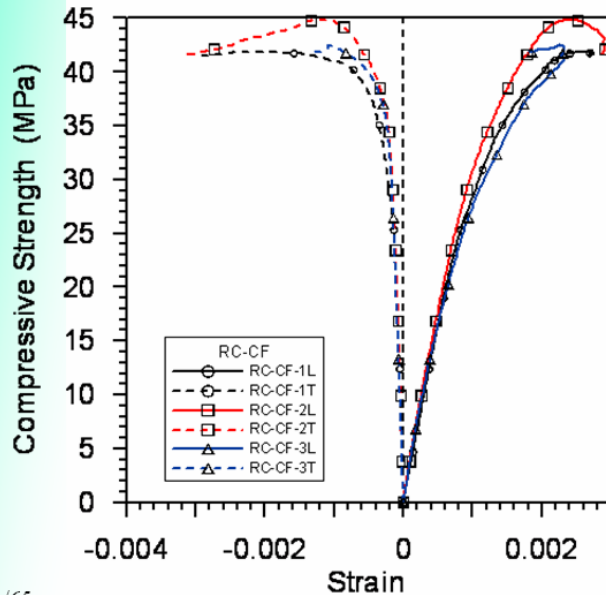
公式驗證：試驗均值280 tf優於計算結果245 tf



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - CFRP組

#### 應力應變曲線



平均

強度：43.057 (MPa)

彈性模數：33.119  
(GPa)

卜松比：0.165

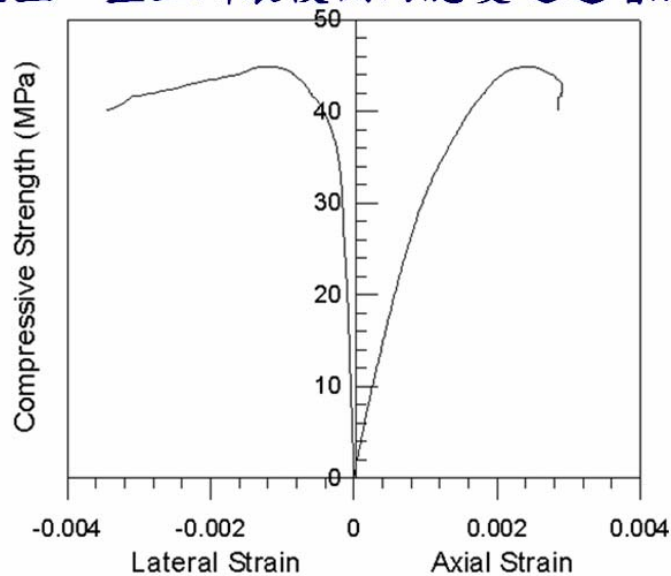
41/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - CFRP組

表面應變：CFRP隨軸壓力作用，軸向應變與側向應變同時產生，直至斷裂後側向應變迅速增加



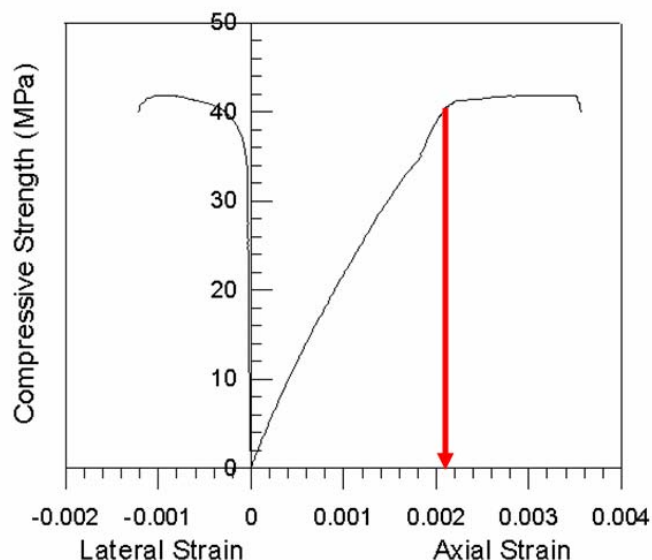
42/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - CFRP組

鋼筋應變：主筋於極限載重前降伏，箍筋受限於CFRP圍束，於CFRP斷裂前幾乎無應變



43/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - RPC組

試體觀察：RPC承擔圍束及軸向載重，裂縫依主要裂縫加大，最終圍束消失、並挫屈破壞



44/65

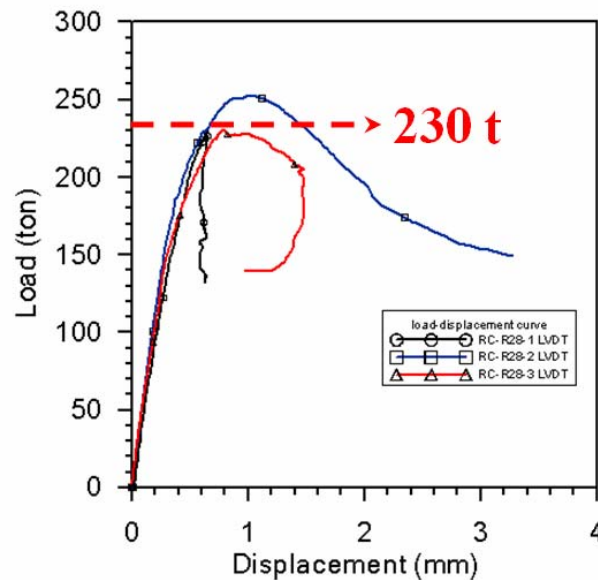




## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - RPC組

公式驗證：目前尚無分析公式，極限載重試驗結果與NC組相似



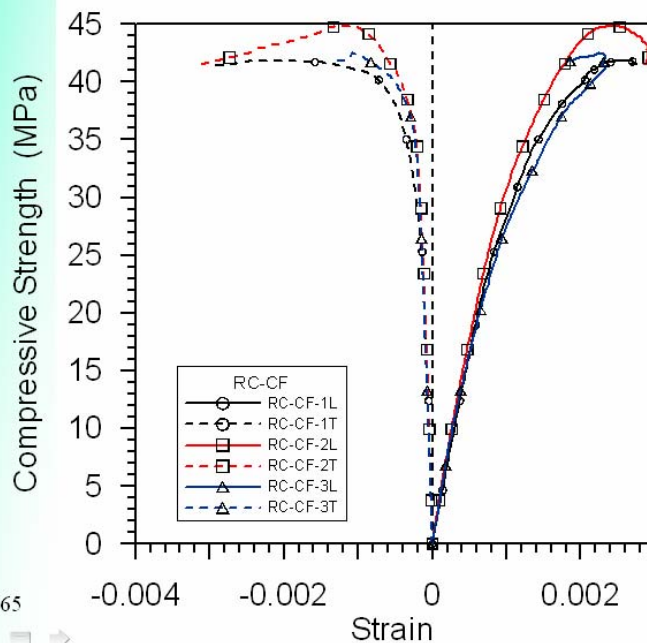
45/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - RPC組

應力應變曲線



平均

強度：43.057 (MPa)

彈性模數：33.119 (GPa)

卜松比：0.165

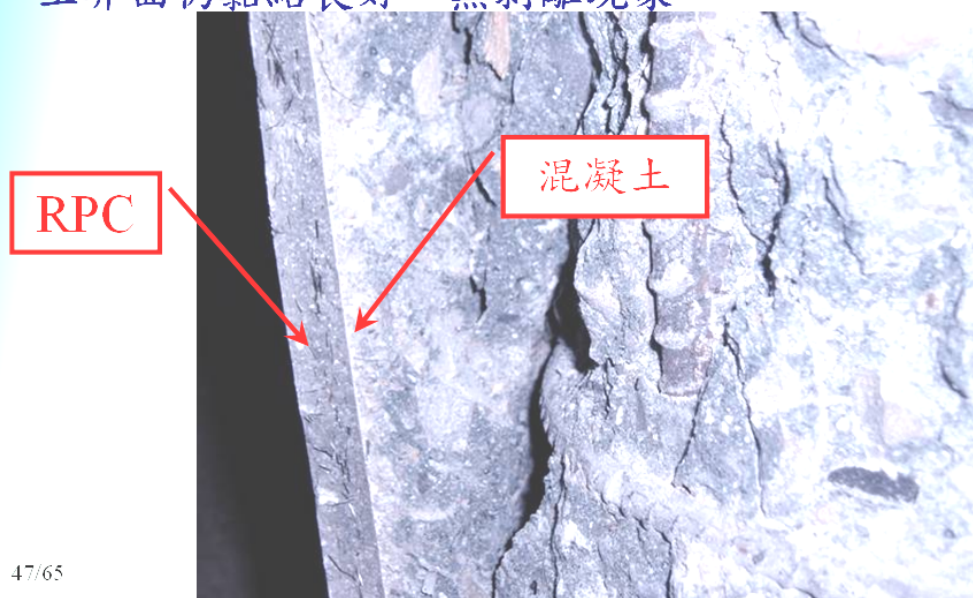
46/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - RPC組

界面行為：卜松比值相近，即使破壞後RPC與混凝土界面仍黏結良好，無剝離現象



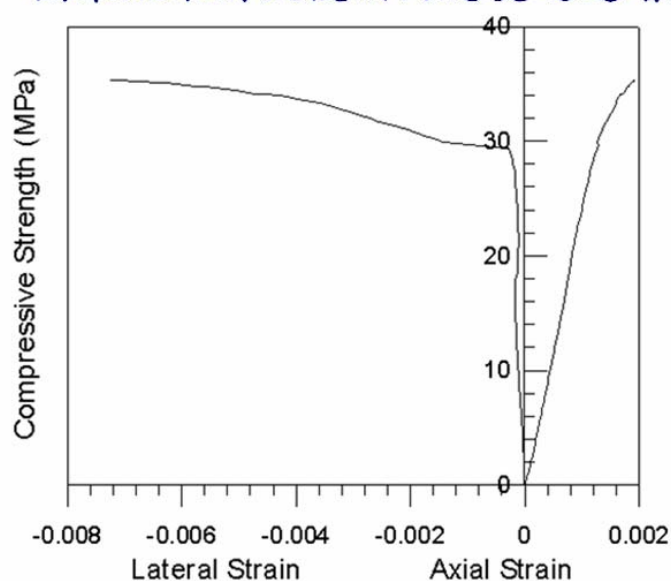
47/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC柱 - RPC組

表面應變：RPC隨軸壓力作用，軸向應變與側向應變同時產生，圍束效果消失後側向應變迅速增加



48/65

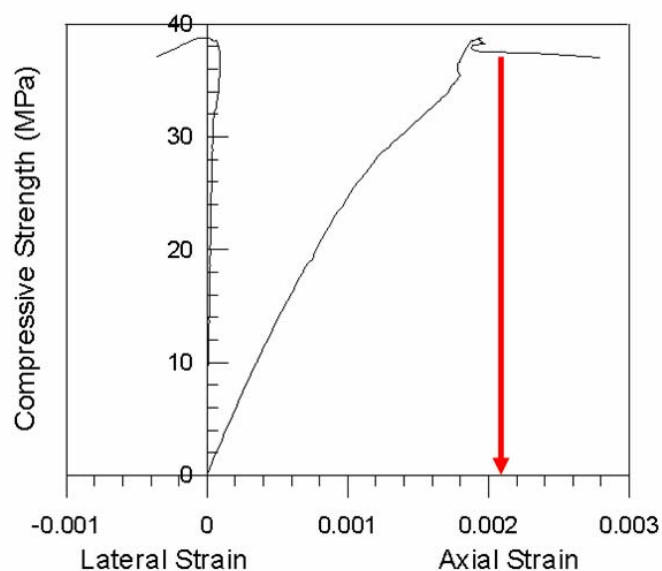




# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱 - RPC組

鋼筋應變：箍筋受限於RPC圍束作用，幾乎無應變發生，直至極限載重後才開始發揮效用



49/65



# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱

### 抗壓強度一覽

試體編號	RC-NC		RC-CFRP		RC-R28	
抗壓強度 (MPa)	33.963		41.861		35.458	
	39.499	36.119	44.823	43.057	38.752	36.516
	34.895		42.488		35.338	

50/65



# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱

### 彈性模數一覽

試體編號	RC-NC		RC-CFRP		RC-R28	
彈性模數E (GPa)	29.180	29.334	32.712	33.119	30.945	30.589
	29.370		34.835		31.281	
	29.452		31.811		29.542	

51/65



# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC柱

### ト松比一覽

試體編號	RC-NC		RC-CFRP		RC-R28	
ト松比 ン	0.180	0.181	0.163	0.165	0.174	0.171
	0.182		0.163		0.172	
	0.182		0.168		0.167	

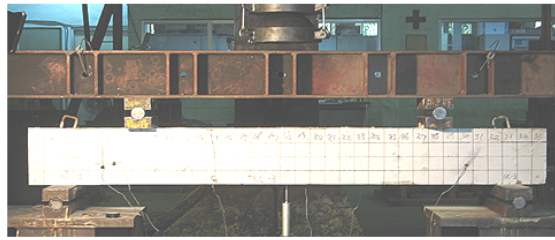
52/65



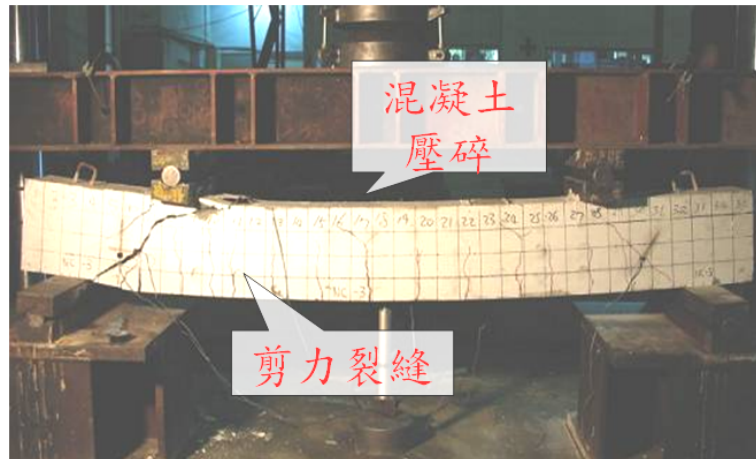
## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC梁 - 控制組

\* 加載前



\* 破壞後



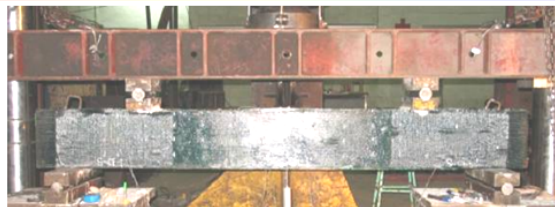
53/65



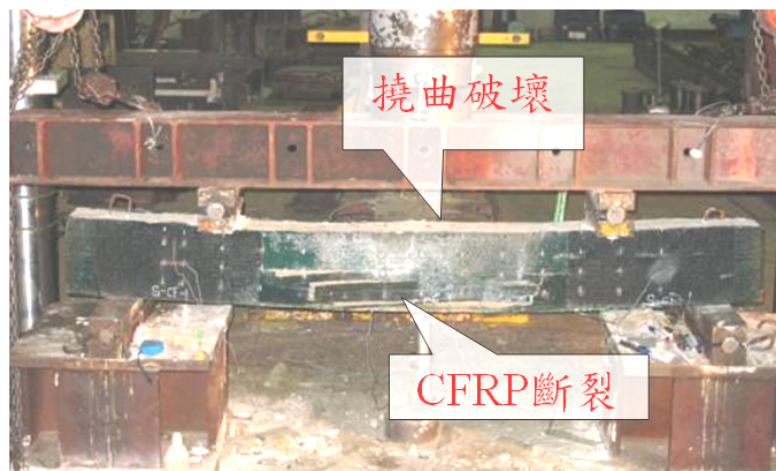
## 試驗成果與討論

### 小尺寸RC梁 - CFRP組

◆ 加載前



◆ 破壞後



54/65





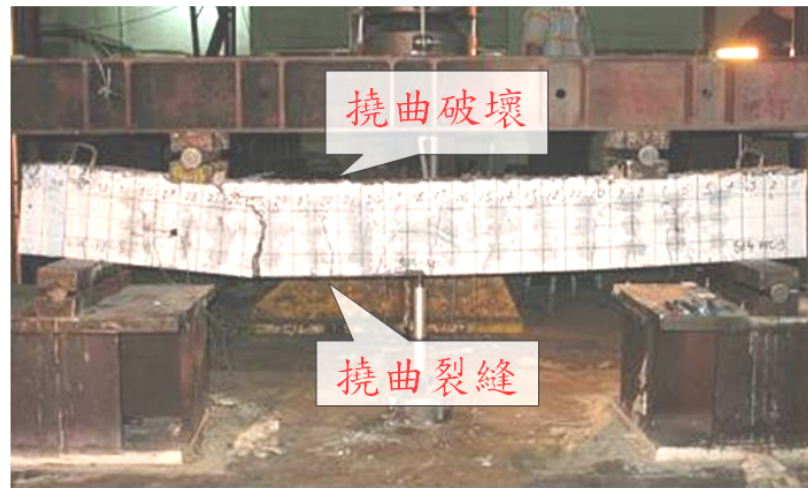
## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC梁 - RPC組

□ 加載前



□ 破壞後



55/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC梁-破壞機理

#### ○ 控制組：

支承處產生剪力裂縫，伴隨撓曲裂縫傾斜向上延伸，直至斷面無法承受載重，於頂部壓碎破壞。

#### ○ CFRP組：

兩側面CFRP阻止了剪力裂縫的產生；梁中央因撓曲產生較大裂縫使得CFRP瞬時斷裂，試體立即破壞

#### ○ RPC組：

兩側面1cm補強形同連續箍筋般，提供良好抗剪行為，使得破壞機理移轉至撓曲行為，鋼纖維提供韌性，試體破壞過程緩慢

56/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC梁-裂縫分佈

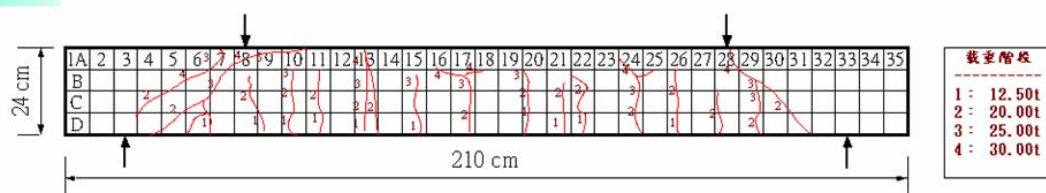


圖 2-8 典型未補強 RC 梁加載後裂縫狀況

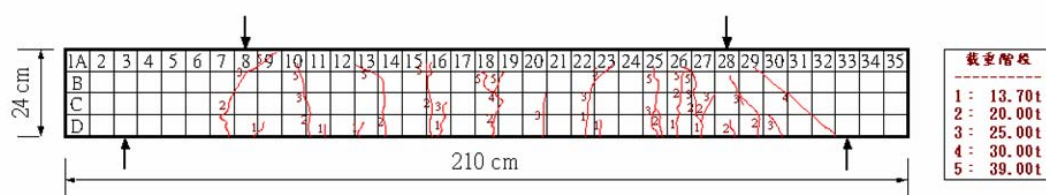


圖 2-9 典型以 RPC 進行剪力補強加載後裂縫狀況

57/65



## 試驗成果與討論

### 縮小尺寸RC梁

◆  $P_y$  : 主筋降伏時之載重

◆  $P_u$  : 極限破壞載重

表 2-8 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C. 梁降伏與極限載重表

	RC 未補強			RPC 側邊補強 1cm				CFRP 補強			
	1	2	平均值	1	2	平均值	提升率	1	2	平均值	提升率
$P_y$ (ton)	26.36	24.15	25.26	34.29	32.54	33.42	32.30 %	33.76	34.35	34.06	34.84 %
$P_u$ (ton)	30.08	29.38	29.73	39.6	35.78	37.69	26.96 %	36.28	39.21	37.75	26.77 %

58/65



# 試驗成果與討論

## 縮小尺寸RC梁

### 三種梁試體韌性指數一覽表

表 2-9 未補強與 RPC、CFRP 補強之 R.C. 梁之位移能量表

	RC 未補強			RPC 側邊補強 1cm				CFRP 補強			
	1	2	平均值	1	2	平均值	提升率	1	2	平均值	提升率
$\delta_y$ (mm)	7.40	7.00	7.20	7.32	8.07	7.70	6.94%	7.56	7.08	7.32	1.67%
$3\delta_y$ (mm)	22.20	21.00	21.60	21.96	24.21	23.09	—	22.68	21.24	21.96	—
$5.5\delta_y$ (mm)	40.70	38.50	39.60	40.26	44.39	42.33	—	41.58	38.94	40.26	—
$P-\delta_y$ (ton·mm)	113.14	96.39	104.77	151.86	163.06	157.46	50.29%	148.75	140.17	144.46	37.88%
$P-3\delta_y$ (ton·mm)	509.50	467.16	488.33	694.43	699.93	697.18	42.77%	648.90	654.34	651.62	33.44%
$P-5.5\delta_y$ (ton·mm)	1041.65	955.28	998.47	1363.14	—	1363.14	36.52%	1257.05	1202.14	1229.60	23.15%

59/65



## 結論與建議 (1/5)

### RPC基本材料性質

- ❖ RPC流度試驗平均直徑約240 mm，流度達140 %，符合現場進行補強施工所需。
- ❖ 本研究之RPC組成材料中，含有大量卜作嵐材料（矽灰、爐石及飛灰），雖未經高溫高壓催化，但均能呈現良好力學效果。
- ❖ RPC卜松比與一般混凝土接近，材料相容性佳。

60/65





## 結論與建議 (2/5)

### 縮小斷面柱

- ❖ CFRP雖比RPC提供圍束後較高的極限載重，但破壞時屬脆性破壞，補強後的RPC因鋼纖維韌性的作用，即使達到極限強度，仍能維持柱體的完整性。
- ❖ 因RPC全域性的圍束，原柱體內的箍筋於極限載種前幾乎不發生作用。
- ❖ RPC與一般混凝土破壞後界面仍保持黏結、諧和，無剝落現象。

61/65



## 結論與建議 (3/5)

### 縮小斷面柱

- ❖ 對於結構補強時，因CFRP不耐磨損、高溫、火害、衝撞等，必須另做表面處理，但RPC具高耐磨、耐蝕、耐侵害之能力，前述之情形對於RPC材料均不會造成太大影響。

62/65



## 結論與建議 (4/5)

### 縮小斷面梁

- ❖ 梁進行CFRP及RPC補強，二者提升開裂載重與極限載重值相當。
- ❖ RPC比CFRP提供較佳的變形韌性空間。
- ❖ 經二側立面1 cm的RPC補強後，原剪力破壞模式均轉變為撓曲破壞模式。

63/65



## 結論與建議 (5/5)

- ❖ 縮小斷面RC柱經RPC補強後，由於材料本身承受軸向作用力並負擔整體柱身圍束效果，因此詳細的承壓與圍束雙模分析理論仍待進一步研究。
- ❖ 實際狀況下撓曲構件往往需承受反覆承載，經RPC補強後所形成之複合撓曲構件，對於承受反覆承載能力值得進一步研究探討。

64/65







簡報完畢  
敬請指教

65/65

