

95-47-7189

MOTC-IOT-94-H1DB002

活性粉混凝土補強 R.C.構件 與耐久性之研究 (1/2)



交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

95-47-7189

MOTC-IOT-94-H1DB002

活性粉混凝土補強 R.C.構件 與耐久性之研究 (1/2)

著 者：陳桂清、柯正龍、張大鵬、黃兆龍

交通部運輸研究所

中華民國 95 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目資料

活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性之研究. (1
/2) / 陳桂清等著. -- 初版. -- 臺北市 :
交通部運研所, 民95
面 : 公分

ISBN 986-00-4830-4(平裝)

1. 混凝土

440.327

95006117

活性粉混凝土補強 R. C. 構件與耐久性之研究 (1/2)

著 者：陳桂清、柯正龍、張大鵬、黃兆龍

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 (中文版 > 中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 95 年 3 月

印 刷 者：

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臺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 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009500805

ISBN：986-00-4830-4 (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。

95
活性粉混凝土補強 R.C 構件與耐久性之研究
(1/2)

交通部運輸研究所

GPN : 1009500805
定價 300 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究 (1/2)			
國際標準書號 (或叢刊號) ISBN 986-00-4830-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1009500805	運輸研究所出版品編號 95-47-7189	計畫編號 94-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、李明君 研究人員：湛淵源、林維明、張淳勳、 陳柏存、吳崇聖、李金輝 地址：臺北市基隆路四段 43 號 營建系 聯絡電話：02-2737-6577		研究期間 自 94 年 3 月 至 94 年 12 月
關鍵詞：活性粉混凝土(RPC)、補強、耐久性、飛灰、爐石粉、碳纖維貼片(CFRP)			
摘要：			
<p>本主要探討以活性粉混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC) 作為補強材料, 對補強既有鋼筋混凝土構件相關材料行為與其耐久性之成效評估。研究全程共計兩年, 本報告為第一年研究成果, 主要項目包括：(1) RPC 補強材料之配比設計理論探討；(2) RPC 補強材料之基本材料性質、力學性質及耐久性質試驗；(3)以碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強 R.C.構件成效試驗與評估；(4)建立各項理論模式與分析法。</p> <p>本研究除說明以結合粒料包裹漿體厚度及緻密粒料堆積體等兩個主要觀念為主的「RPC 配比設計邏輯及理論」外, 也據此設計出 12 組膠結砂漿配比, 探討其基本材料特性, 並挑選出其中 2 組配比作為 2 組 RPC 的配比依據, 連同依據國內外一般 RPC 配比方法另設計一組 RPC, 總共使用 3 組 RPC 配比, 進行 (1)RPC 基本材料性質及力學性質；(2) RPC 耐久性質及(3) RPC 與 CFRP 作為修補材料的修補性能等試驗工作及試驗內容討論。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
95 年 3 月	284	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。
機密等級：			
<p>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)</p>			
■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**

TITLE: Retrofit of R.C. Members with Reactive Powder Concrete and Its Durability			
ISBN(OR ISSN) ISBN 986-00-4830-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009500805	IOT SERIAL NUMBER 95-47-7189	PROJECT NUMBER 94-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 2005 TO December 2005
RESEARCH AGENCY: National Taiwan University of Science and Technology PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ta-Peng Chang ASSISTANT INVESTIGATORS: Chao-Lung Hwang, Min-Gin Lee PROJECT STAFF: Yuan-Yuan Chen, Wei-Ming Lin, Chun-Hsin Chang, Bo-Tsun Chen, Chung-Sheng Wu, Jin-Hui Li ADDRESS: #43, Sec. 4, Keelung Rd, Dept. of Construction Eng., NTUST, Taipei 106, Taiwan, R.O.C. PHONE: (02) 2737 6577			
KEY WORDS: reactive powder concrete (RPC), retrofit, durability, fly ash, slag, carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)			
ABSTRACT: <p>The project is primarily aimed at the study on the performance evaluation and relevant material properties of the existing reinforced concrete structures retrofitted by the reactive powder concrete (RPC). Total duration of this project is two years. This report is the summary of the first-year study results. The major subjects of the present study include: (1) Theoretical study on the mix proportioning design of RPC retrofitting material; (2) Experimental investigation on the basic material, mechanical and durable properties of RPC retrofitting material; (3) Performance evaluation with experiment on the member reinforced by carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) and RPC; and (4) Establishment of theoretical models and analysis methods.</p> <p>During the progress of the current project in the first year, besides the explanation on the "Logics and Theory of Mix Proportioning Design for RPC" using the combined concepts of the coating thickness of paste around aggregate and the dense aggregate packing, mix proportions of twelve sets of cementitious mortar were constructed accordingly. After the evaluation on the basis material properties for these mortars, two sets out of twelve were selected as the base for the mix proportioning design of two sets of RPC. Combining with another set of RPC mix proportion using the normal mix proportioning approach of RPC by the published data in the literatures, in total, three sets of ROC mix proportions were used and tested in this study. The following three items of experimental work and discussion were carried out: (1) Basic material properties of RPC; (2) Durability of RPC; and (3) Effectiveness of reinforcement of RPC and CFRP as reinforcing materials.</p>			
DATE OF PUBLICATION March 2006	NUMBER OF PAGES 284	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.			

活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究(1/2)

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	
表目錄	
圖目錄	X
相片目錄	X
第一章 計劃概述	1-1
1-1 前言	1-1
1-2 研究動機及目的	1-3
1-3 研究項目與計畫流程	1-4
第二章 文獻回顧	2-1
2-1 活性粉混凝土起源與設計理念	2-1
2-2 活性粉混凝土性質	2-2
2-2-1 新拌性質	2-2
2-2-2 硬固性質	2-2
2-3 活性粉混凝土之應用	2-5
2-4 混凝土結構物之補強	2-6
2-4-1 混凝土結構之補強材料	2-6
2-4-2 混凝土結構補強工法	2-7
2-4-3 RPC 修補混凝土結構物	2-8

2-5 活性粉混凝土配比設計	2-9
2-5-1 活性粉混凝土使用之材料	2-9
2-5-2 不同混凝土使用之材料比較	2-11
2-5-3 不同混凝土配比與製程比較	2-11
2-6 活性粉混凝土與 HPC 性質比較	2-14
2-6-1 工作度	2-14
2-6-2 凝結時間	2-15
2-6-3 抗壓強度	2-15
2-6-4 體積變化	2-15
2-6-5 超音波與電滲	2-16
第三章 活性粉混凝土配比設計邏輯及理論	3-1
3-1 RPC 設計之背景資料	3-1
3-1-1 傳統鋼筋混凝土構件的性質	3-1
3-1-2 修補材料的選材原則	3-1
3-1-3 RPC 修補材的基本特性要求	3-6
3-2 RPC 配比設計方法	3-6
3-2-1 RPC 設計理論	3-6
3-2-2 Fuller' 緻密配比設計	3-7
3-3 RPC 材料粒徑分析	3-12
3-4 利用 Fuller's 理想曲線方程式推算 RPC 中不同材料之體積比率	3-12
3-4-1 添加爐石及飛灰	3-12

3-4-2 添加爐石 -----	3-13
3-4-3 不添加飛灰及爐石 -----	3-13
3-5 RPC 配比設計流程 -----	3-13
第四章 試驗計畫 -----	4-1
4-1 試驗概述 -----	4-1
4-2 試驗材料及 RPC 理論配比參數 -----	4-1
4-3 試驗項目及試體數目 -----	4-4
4-4 混凝土試體製作與規劃 -----	4-5
4-4-1 活性粉混凝土試體製作 -----	4-5
4-4-2 CFRP 貼片補強混凝土試體製作 -----	4-6
4-4-3 RPC 補強混凝土試體製作 -----	4-6
4-4-4 養護流程 -----	4-7
4-5 試驗方法與試驗儀器（材料基本性能與耐久性質） -----	4-7
4-5-1 基本性能試驗 -----	4-7
4-5-2 補強試驗 -----	4-10
4-5-3 耐久性試驗 -----	4-12
第五章 試驗結果與討論 -----	5-1
5-1 水泥砂漿及混凝土配比說明 -----	5-1
5-2 RPC 及材料力學基本性質 -----	5-2
5-2-1 工作性 -----	5-2
5-2-2 抗壓強度 -----	5-2

5-2-3 劈裂試驗	5-3
5-2-4 抗彎強度	5-4
5-2-5 拉拔試驗	5-5
5-2-6 斜剪試驗	5-5
5-3 RPC 耐久性試驗	5-6
5-3-1 氯離子電滲量量測	5-6
5-3-2 表面電阻	5-7
5-3-3 超音波試驗	5-7
5-3-4 碳化試驗	5-9
5-3-5 表面磨耗試驗	5-10
5-3-6 SEM 觀測	5-11
5-3-7 EDS 試驗	5-11
5-3-8 XRD 試驗	5-12
5-3-9 MIP 試驗	5-13
5-3-10 氣體滲透試驗	5-14
5-3-11 水份吸收試驗	5-14
5-4 RPC 補強成效試驗	5-15
5-4-1 圓柱抗壓貼片補強試驗	5-16
5-4-2 抗彎貼片補強試驗	5-16
第六章 結果與建議	6-1
6-1 基本材料性質與力學性質	6-1

6-2 耐久性質	6-2
6-3 修補性能與評估	6-3
6-4 建議	6-4
參考文獻	7-1
附錄一：貼片補強試體強度之分析與計算	附錄一-1
1-1 圓柱 RPC 貼片補強 (10mm)	附錄一-1
1-2 圓柱 RPC 貼片補強 (15mm)	附錄一-3
1-3 矩梁 CFRP 貼片補強 (1 層)	附錄一-5
1-4 矩梁 CFRP 貼片補強 (2 層)	附錄一-7
1-5 矩梁 RPC 貼片補強 (10mm)	附錄一-9
1-6 矩梁 RPC 貼片補強 (20mm)	附錄一-11
1-7 矩梁 RPC U 型貼片包裹補強 (10mm)	附錄一-13
附錄二：期中報告審查意見處理情形表	附錄二-1
附錄三：期末報告審查意見處理情形表	附錄三-1
附錄四：會議紀錄	附錄四-1
4-1 「活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究 (1/2)」期中整合 階段會議紀錄	附錄四-1
4-2 「活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究 (1/2)」期末整合 階段會議紀錄	附錄四-4
附錄五：期末簡報資料	附錄五-1

表目錄

表 2-1 活性粉混凝土與普通混凝土力學性質比較表 -----	2-16
表 2-2 活性粉混凝土力學性質 -----	2-17
表 2-3 活性粉混凝土於不同齡期之力學性值試驗結果表 -----	2-17
表 2-4 卜特蘭各型水泥之物化性質 -----	2-18
表 2-5 各型石英砂粒徑分佈與化學成分一覽表 -----	2-18
表 2-6 矽灰之物化性質 -----	2-19
表 2-7 石英砂與石英粉物化特性比較表 -----	2-19
表 2-8 RPC 常見材料及其性質與建議 -----	2-19
表 2-9 各型混凝土材料比較表 -----	2-19
表 2-10 ACI 與緻密配比設計比較表 -----	2-20
表 2-11 常見之 OPC、HPC、RPC 配比結果 -----	2-21
表 2-12 RPC 加壓與其他條件下強度變化一覽表 -----	2-21
表 2-13 RPC 坍塌一覽表 -----	2-21
表 3-1 修補材料乾縮量範圍 -----	3-14
表 3-2 粒料各篩號理想留篩百分率 -----	3-15
表 3-3 RPC 基本材料粒徑分析 -----	3-15
表 3-4 含飛灰及爐石之富勒曲線($DMAX(\mu m) = 841$)計算例 ----	3-16
表 3-5 含飛灰及爐石之富勒曲線($DMAX(\mu m) = 1180$)計算例 --	3-17
表 3-6 不含飛灰之富勒曲線($DMAX(\mu m) = 841$)計算例 -----	3-18
表 3-7 不含飛灰之富勒曲線($DMAX(\mu m) = 1180$)計算例 -----	3-19

表 3-8 不含飛灰及爐石之富勒曲線(DMAX(μm) =841)計算例 --	3-20
表 3-9 不含飛灰及爐石之富勒曲線(DMAX(μm) =1180)計算例-	3-21
表 4-1 卜特蘭第二型水泥之物理性質 -----	4-17
表 4-2 卜特蘭第二型水泥之化學性質 -----	4-17
表 4-3 矽灰基本性質試驗報告 -----	4-18
表 4-4 碳纖維貼片基本性質表 -----	4-18
表 4-5 底漆基本性質表 -----	4-18
表 4-6 積層樹脂基本性質表 -----	4-19
表 4-7 依據通過電荷量評估氯離子穿透性 -----	4-19
表 5-1 十二組膠結砂漿及三組活性粉混凝土(RPC)配比材料 ---	5-19
表 5-2 十五組配比新拌漿體流度試驗值 -----	5-19
表 5-3 膠結砂漿及 PRC 之抗壓強度 -----	5-20
表 5-4 膠結砂漿及 RPC 之劈裂強度 -----	5-20
表 5-5 膠結砂漿與 RPC 之抗彎強度 -----	5-21
表 5-6 拉拔試驗結果 -----	5-21
表 5-7 斜剪試驗結果 -----	5-22
表 5-8 膠結砂漿與 RPC 之電滲量 -----	5-22
表 5-9 膠結砂漿與 RPC 之表面電阻 -----	5-23
表 5-10 膠結砂漿與 PRC 之超音波波速 -----	5-23
表 5-11 不同材料碳化試驗結果 -----	5-24
表 5-12 本研究各類混凝土磨耗深度 -----	5-24

表 5-13 MIP 孔隙分佈試驗值(RPC) -----	5-24
表 5-14 不同材料之氣體滲透係數-----	5-24
表 5-15 不同材料之水份吸收試驗值-----	5-25
表 5-16 RPC#15 基本力學性質(7 天)(含動彈、動剪) -----	5-25
表 5-17 RPC#15 耐久性質(7 天) -----	5-26
表 5-18 RPC#14 圓柱補強-----	5-26
表 5-19 RPC#15 圓柱補強-----	5-26
表 5-20 PRC#14 貼片抗彎補強-----	5-27
表 5-21 RPC#15 貼片抗彎補強-----	5-28

圖目錄

圖 1-1 研究計畫流程圖	1-5
圖 2-1 不同鋼纖維含量與流度之關係圖	2-22
圖 2-2 RPC-200 組成相對密度、養護溫度及添加鋼纖維與抗壓 強度之關係圖	2-22
圖 2-3 RPC-200 之單軸抗壓試驗曲線	2-23
圖 2-4 RPC-800 之單軸抗壓試驗曲線	2-23
圖 2-5 RPC-200 之抗彎試驗曲線	2-24
圖 2-6 纖維混凝土之破壞型式	2-24
圖 2-7 纖維排列方向與混凝土強度之關係	2-25
圖 2-8 纖維混凝土之應力應變圖	2-25
圖 2-9 不同鋼纖維含量之 RPC 試體抗彎歷程曲線	2-25
圖 2-10 混凝土黏結試驗方法	2-26
圖 2-11 混凝土材料粒徑分佈圖	2-27
圖 2-12 ACI 配比流程圖	2-27
圖 2-13 緻密配比設計流程圖	2-28
圖 2-14 相對密度與水膠比的關係圖	2-29
圖 2-15 RPC 養護流程圖	2-29
圖 2-16 HPC 拌和與養護流程圖	2-30
圖 2-17 混凝土加壓與密實度之關係	2-30
圖 2-18 HPC & RPC 坍流度比較圖	2-31

圖 2-19 HPC 初終凝試驗結果 -----	2-31
圖 2-20 HPC 與 RPC 七天強度比較圖 -----	2-32
圖 2-21 RPC 收縮量與時間關係圖 -----	2-32
圖 2-22 不同時間下，HPC 乾縮量與 W/B 關係圖 -----	2-33
圖 2-23 HPC 與 RPC 超音波比較圖 -----	2-33
圖 2-24 HPC 與 RPC 電滲比較圖 -----	2-34
圖 3-1 混凝土結構物現況評估與耐久性修復流程 -----	3-22
圖 3-2 富勒曲線(Fuller's curve)累積粒徑通過圖 -----	3-22
圖 3-3 富勒區線粒徑比值與粒徑倒數圖 -----	3-23
圖 3-4 含飛灰及爐石之富勒曲線 (D _{MAX} (μ m) =841)圖 -----	3-23
圖 3-5 含飛灰及爐石之富勒曲線 (D _{MAX} (μ m) =1180)圖 -----	3-24
圖 3-6 不含飛灰之富勒曲線 (D _{MAX} (μ m) =841)圖 -----	3-24
圖 3-7 不含飛灰之富勒曲線 (D _{MAX} (μ m) =1180)圖 -----	3-25
圖 3-8 不含飛灰及爐石之富勒曲線 (D _{MAX} (μ m) =841)圖 -----	3-25
圖 3-9 不含飛灰及爐石之富勒曲線 (D _{MAX} (μ m) =1180)圖 -----	3-26
圖 3-10 RPC 配比設計流程圖 -----	3-27
圖 4-1 抗彎補強試體尺寸與斷面示意圖 -----	4-21
圖 4-2 圓柱抗壓補強試體尺寸與斷面示意圖 -----	4-21
圖 4-3 斜剪試驗試體示意圖 -----	4-21
圖 5-1 膠結砂漿及 RPC 新拌性質坍流度試驗值 (15 組) -----	5-30
圖 5-2 膠結砂漿在不同齡期抗壓強度發展(W/B=0.20，不含 飛灰或爐石粉) -----	5-30

圖 5-3 膠結砂漿在不同齡期抗壓強度發展(W/B=0.17, 不含 飛灰或爐石粉)-----	5-31
圖 5-4 膠結砂漿在不同齡期抗壓強度發展(W/B=0.20, 添加 飛灰與爐石粉)-----	5-31
圖 5-5 RPC 抗壓強度 (第#13 及#14 組)-----	5-32
圖 5-6 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期劈裂強度發展(W/B=0.20) -	5-32
圖 5-7 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期劈裂強度發展(W/B=0.17) -	5-33
圖 5-8 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期抗彎強度發展(W/B=0.20) -	5-33
圖 5-9 膠結砂漿在不同齡期抗彎強度發展(W/B=0.17)-----	5-34
圖 5-10 RPC 及水泥砂漿拉拔試驗結果 -----	5-34
圖 5-11 RPC 斜剪試驗結果 -----	5-35
圖 5-12 膠結砂漿及 RPC 電滲量(控制組 Mortar > 40000 庫倫) (W/C=0.20)-----	5-35
圖 5-13 膠結砂漿電滲量(控制組 Mortar > 40000 庫倫) (W/C=0.17)-----	5-36
圖 5-14 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期之表面電阻(W/C=0.20)---	5-36
圖 5-15 膠結砂漿在不同齡期之表面電阻(W/C=0.17)-----	5-37
圖 5-16 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期超音波波速發展 (W/B=0.20)-----	5-37
圖 5-17 膠結砂漿在不同齡期超音波波速發展(W/B=0.17) -----	5-38
圖 5-18 膠結砂漿添加飛灰與爐石在不同齡期超音波波速發 展(W/B=0.20)-----	5-38
圖 5-19 表面磨耗試驗結果-----	5-39

圖 5-20 EDS 圖 (RPC #13)	5-39
圖 5-21 EDS 圖 (RPC #14)	5-39
圖 5-22 EDS 圖 (RPC #15)	5-40
圖 5-23 RPC#15 配比的 XRD 分析	5-40
圖 5-24 典型#13-1 試體 MIP 孔隙隙量測結果	5-41
圖 5-25 典型#14-1 試體 MIP 孔隙隙量測結果	5-41
圖 5-26 典型#15-1 試體 MIP 孔隙隙量測結果	5-42
圖 5-27 典型#15-2 試體 MIP 孔隙隙量測結果	5-42
圖 5-28 氣體滲透試驗結果	5-43
圖 5-29 不同材料 3 天水份吸收率試驗結果	5-43
圖 5-30 RPC#14 圓柱補強抗壓試驗結果	5-44
圖 5-31 RPC#15 圓柱補強抗壓試驗結果	5-44
圖 5-32 NC 未補強 (第一次)	5-45
圖 5-33 CFRP 補強一層 (第一次)	5-45
圖 5-34 CFRP 補強兩層 (第一次)	5-46
圖 5-35 RPC#14 補強 10 mm	5-46
圖 5-36 RPC#14 補強 20 mm	5-47
圖 5-37 RPC#14 U 型補強	5-47
圖 5-38 NC 未補強 (第二次)	5-48
圖 5-39 CFRP 補強一層 (第二次)	5-48
圖 5-40 CFRP 補強兩層 (第二次)	5-49

圖 5-41 RPC#15 補強 10 mm-----	5-49
圖 5-42 RPC#15 補強 20 mm-----	5-50
圖 5-43 RPC#15 U 型補強-----	5-50

相片目錄

相片 4-1 波特蘭第二型水泥	4-22
相片 4-2 矽砂	4-22
相片 4-3 矽灰	4-22
相片 4-4 石英粉	4-23
相片 4-5 飛灰	4-23
相片 4-6 爐石粉	4-23
相片 4-7 鋼纖維	4-24
相片 4-8 強塑劑	4-24
相片 4-9 消泡劑	4-24
相片 4-10 碳纖維貼片	4-25
相片 4-11 底漆	4-25
相片 4-12 面漆	4-25
相片 4-13 李氏比重瓶	4-26
相片 4-14 比重瓶	4-26
相片 4-15 搖篩機及篩組	4-26
相片 4-16 單位重量筒	4-27
相片 4-17 200T 電腦式自動抗壓試驗機	4-27
相片 4-18 動彈性模數量測儀	4-27
相片 4-19 孔隙壓汞試驗機	4-28
相片 4-20 混凝土超音波波速量測儀	4-28

相片 4-21 混凝土電滲試驗儀-----	4-28
相片 4-22 氯離子自動電位差滴定儀-----	4-29
相片 4-23 表面碳化試驗儀-----	4-29
相片 4-24 表面磨耗試驗儀-----	4-30
相片 4-25 混凝土表面電阻量測儀-----	4-30
相片 4-26 掃描式電子顯微鏡-----	4-30
相片 5-1 典型 RPC#14 試體抗壓試驗破壞前後相片 -----	5-51
相片 5-2 典型 RPC#13 試體劈裂試驗破壞前後相片 -----	5-51
相片 5-3 典型 RPC 試體抗彎試驗破壞前後相片 -----	5-51
相片 5-4 典型 RPC 試體拉拔試驗破壞前後相片 -----	5-52
相片 5-5 典型 RPC 試體斜剪試驗破壞前後相片 -----	5-52
相片 5-6 碳化試驗(Mortar 及 NC) (尺寸：100 × 200 mm) -----	5-53
相片 5-7 碳化試驗(Mortar 及 RPC #13) (尺寸：50×100 mm) ---	5-53
相片 5-8 碳化試驗(Mortar 及 RPC #14) (尺寸：50×100 mm) ---	5-54
相片 5-9 碳化試驗(Mortar 及 RPC #15) (尺寸：50×100 mm) ---	5-54
相片 5-10 典型 RPC#15 試體磨耗試驗破壞前後相片 -----	5-55
相片 5-11 典型 RPC#15 SEM 相片 (15000 RPC angle)-----	5-55
相片 5-12 典型 RPC#15 SEM 相片 (300000 RPC polish) -----	5-56
相片 5-13 典型 RPC#15 SEM 相片 (300000 RPC polish) -----	5-56
相片 5-14 典型 RPC#15 SEM 相片(RPC 100000 polish)-----	5-57
相片 5-15 典型 RPC 試體 EDS 相片 (1) -----	5-57

相片 5-16 典型 RPC 試體 EDS 相片 (2) -----	5-58
相片 5-17 圓柱補強試驗前後 (RPC #14) (10 mm) -----	5-58
相片 5-18 圓柱補強試驗前後 (RPC #14) (15 mm) -----	5-59
相片 5-19 圓柱補強試驗前後 (RPC #15) (10 mm) -----	5-59
相片 5-20 圓柱補強試驗前後 (RPC #15) (15 mm) -----	5-59
相片 5-21 RPC 補強 10 mm 之混凝土抗彎試驗結果 (RPC #14)	5-60
相片 5-22 RPC 補強 20 mm 之混凝土抗彎試驗結果 (RPC #14)	5-60
相片 5-23 RPC#14 包裹 U 型補強之混凝土抗彎試驗結果 -----	5-60
相片 5-24 未補強之普通混凝土抗彎試驗結果-----	5-61
相片 5-25 CFRP 補強一層之混凝土抗彎試驗結果-----	5-61
相片 5-26 CFRP 補強二層之混凝土抗彎試驗結果-----	5-61
相片 5-27 RPC#15 補強 1cm 之混凝土抗彎試驗結果 -----	5-62
相片 5-28 RPC#15 補強 2cm 之混凝土抗彎試驗結果 -----	5-62
相片 5-29 RPC#15 包裹 U 型補強之混凝土抗彎試驗結果 -----	5-62
相片 5-30 未補強之普通混凝土抗彎試驗結果-----	5-63
相片 5-31 CFRP 補強一層之混凝土抗彎試驗結果-----	5-63
相片 5-32 CFRP 補強二層之混凝土抗彎試驗-----	5-63

第一章 緒 論

1.1 前言

一般而言，在良好設計及妥善施工管理條件下，結合高抗壓強度混凝土及高抗張強度鋼筋所組合而成的鋼筋混凝土構造物，應具有相當可靠的耐久性及強度，足以抵抗外在環境變化時或在原設計各種假設之不同載重作用下所造成的體積變化，維持鋼筋混凝土構造物長期性的體積穩定性，不易受到齡期老化的影響，同時，也因為鋼筋混凝土具有易塑、組成材料取得方便、耐火及費用經濟等良好特性，因此，鋼筋混凝土是世界上作為建造永久性構造物的主要及數量最多的營建材料。

然而當鋼筋混凝土構造物在設計不佳、施工不良或承受超過原設計載重的外加載重(例如超載活荷重、地震力、風力、海浪、沉陷、裸空基礎、環境侵蝕、撞擊等)等惡劣情況下，鋼筋混凝土構造物很容易產生混凝土開裂、斷裂、崩脫、碎落、鋼筋裸露、挫曲等劣化損壞現象，嚴重地影響到鋼筋混凝土構造物的耐久性、安全性及體積穩定性；另一方面，臺灣為一海島型區域，大部份鋼筋混凝土構造物除了承受較惡劣的海洋環境侵蝕外，更由於整地區處於北半球亞熱帶的太平洋海域環境，經年累月地承受許多的颱風侵襲所挾帶之強風和豪雨，同時，臺灣本土地質以花東縱谷分為兩大地質區，花東縱谷以東屬於菲律賓板塊，花東縱谷以西則皆屬於歐亞板塊，由於兩個板塊間的受力推擠作用，造成板塊交會處經常有規模不小的地震發生，也在臺灣地區形成許多的地質斷層，當斷層儲存的能量超過某一臨界值而釋放時，引發斷層相對錯移，也會引起大小不同的內陸地震，因此，臺灣地區長年承受這些例行的颱風、地震侵襲，加速了臺灣很多鋼筋混凝土構造物的劣化毀損。

早期臺灣地區的老舊鋼筋混凝土構造物，由於當初興建時，缺乏嚴謹的工程品質管理制度及大多數營造廠商的永續經營觀念不強，如

再有偷工減料情形而造成鋼筋混凝土構造物施工品質不良，將會嚴重地影響構造物的安全性，民國 88 年 9 月 21 日凌晨發生在南投芮氏規模 7.3 級的百年大地震，根據統計資料顯示，共死亡 2412 人，受傷人數約 10000 人，房屋全倒 26831 棟，半倒 24495 棟，其中鋼筋混凝土構造物佔 52% 最多，其次為磚造佔 24%，以興建年代統計，在民國 63 年以前興建者(在此以前我國建築技術規則並無建築物耐震設計特別規定)佔 42%，隨後在民國 71 年、78 年、86 年間，建築技術規則分三次陸續將新的耐震設計相關規定修正增列，於民國 64 至 86 年間建造者佔 52%，民國 86 年以後建造者佔 6%^[1, 2, 3]，可見地震力對鋼筋混凝土建築物所可能造成的嚴重損傷與破壞，至於臺灣地區屬於公共交通設施的橋樑工程、碼頭工程、捷運工程、港灣工程及隧道工程等鋼筋混凝土構造物，亦同樣地因長期性地受颱風、地震、超載、施工不良、不當使用等因素之影響而會呈現劣化損壞現象；對於這些劣化損傷程度不甚嚴重的鋼筋混凝土建築物或公共工程構造物，必須及時地以適當的材料與工法加以妥善修復、補強與維護，以延長其使用壽命，避免劣化損傷程度日趨擴大，而危及鋼筋混凝土構造物安全時，須付出打除及重新興建的巨額工程費用與社會成本。

鋼筋混凝土結構物維修補強的方法有很多種，例如：置換混凝土構材之置換工法、增加混凝土斷面之加厚工法及包覆工法、增加構材之增設縱筋工法、增加支承點之支承工法、增加補強構材之鋼板貼工法、FRP 貼付工法及鋼板捲覆工法、施加預力之施加預力工法等多種[4]，國內工程界常用的既有鋼筋混凝土結構物補強方法包括：(1)鋼板補強工法；(2)混凝土裂縫灌注工法；(3)纖維強化高分子複合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)補強工法；(4)結構系統補強工法；(5)鋼索圍束補強工法等^[5]；本研究計畫主要係以活性粉混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC) 作為補強材料，探討對於補強既有鋼筋混凝土構件相關行為與其耐久性成效評估，此種以 RPC 作為修補材料之工法不同於上述的各種修補方法，在國內工程界尚未曾被使用過；全部研究計畫期程為兩年，本研究報告為第一年研究成果。

1.2 研究動機及目的

民國六十年代初，國內經濟開始逐漸起飛，政府機構著手推動我國有史以來，規模最大、投資最多、涵蓋最廣的國家十項重大建設計劃，包括中山高速公路、西部鐵路幹線電氣化、北迴鐵路、蘇澳港、台中港、中正國際機場、中國造船廠、中國大煉鋼廠、石油化學工業，及核能發電廠等重大工程，民間團體也積極地推動高樓住宅的興建，民國 69 年間，這十項國家重大建設完成，將國家經濟朝向開發國家的行列，在此六十年代期間，國內建造了相當多重要的鋼筋混凝土構造物，如前所述，雖然鋼筋混凝土基本上為耐久性較佳之材料，但這些鋼筋混凝土構造物迄今已超過二、三十年，長期使用情況下，其功能也會隨著齡期增加而呈現老化、損傷及損壞的現象，此外，國內後期或新近建造完成的鋼筋混凝土構造物，也有可能因在建造期間或使用期間，承受額外的地震力、風力、超負載等外力，而呈現出損傷及損壞的現象，對於國內這些可能已劣化及損傷的老舊及新建鋼筋混凝土構造物，如何尋求一種適當補強與防護老劣化的材料、技術與工法，對已劣化及損傷者加以維修或補強，減低可能有潛在之危險、增加安全性及耐久性及延長其使用年限，是目前一項非常重要的時代課題。

另一方面，活性粉混凝土(RPC)在 1990 年代初期由世界第二大營造公司-法國 Bouygues 公司開始研究發展，並獲得良好的成果，在 1994 年以前，此種新型材料一直是法國軍方的機密，僅用於軍事工程，於 1994 年，該公司人員 Richard 等人在舊金山的美國混凝土學會(ACI)春季際會議上首次公開其研究成果^[6]，並於 1995 年正式在期刊發表 RPC 製作方式及材料特性後^[7]自此，此種新型超高性能混凝土材料的製作與材料特性始被公開，世界各國包括臺灣在瞭解此材料後，急起直追，相繼投入研發行列，並也都獲得相當好的研究成果^[8~14]，基本上，這種新型材料不但具有超高的抗壓強度，同時亦具有超高的韌性及耐久性，且無添加粗粒料，使結構物外型較不受限制，可應用於特殊形狀之混凝土結構物；儘管由以往的研究文獻顯示 RPC 有這些優異的材料特性^[16]，但此種 RPC 材料是否能用於作為國內既有損傷鋼筋混凝土構

件的補強用，以及其衍生的相關材料力學行為、耐久性成效評估等議題，國內外迄今鮮少有這方面的研究，也未有實際補強應用的範例，因此，瞭解 RPC 材料應用在修補時所衍生的這些尚未被探討與待瞭解之材料特性及耐久性成效，為本計畫的動機與目的。

1.3 研究項目與流程

本兩年期研究計畫第一年主要工作項目包括：(1)補強材料之配比設計與力學性質探討；(2)補強材料之基本性能及耐久性試驗；(3)碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗；(4)建立各項理論模式與分析法；針對這些預定工作項目，本研究計畫所擬定之研究計畫流程圖如圖 1-1 所示，用以執行下列的工作項目：

1. 探討 RPC 最適化配比設計。
2. 製作試體，進行了解其基本性能和耐久性能。
3. 評估用碳纖維貼片和活性粉混凝土對鋼筋混凝土之補強成效。
4. 建立配比設計理論模式與修補模式分析法。

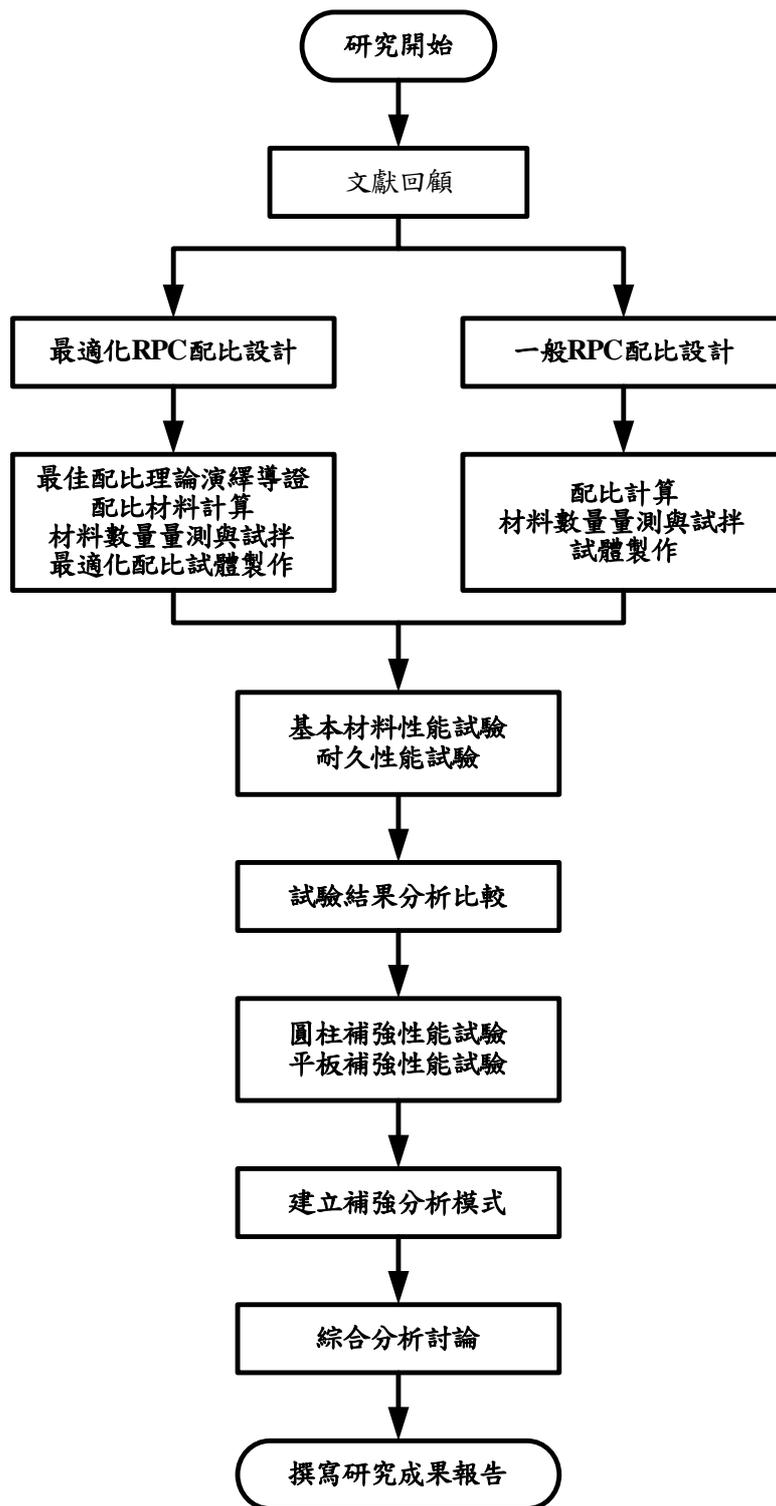


圖 1-1 研究計畫流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 活性粉混凝土源起與設計理念

過去幾十年，各國學者專家力求改善混凝土之性能，大致採取下列三種方式：(1)超細粉緻密系統 (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；(2)無巨觀缺陷砂漿 (Macro-Defect Free Motor, 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；(3)注漿鋼纖混凝土 (Slurry Infiltrated Fibered Concrete, SIFCON)：將高流動性水泥漿或砂漿注入預先埋好鋼纖的模具內，改善材料之韌性。活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 基本上採取上述三種性能改善機制^[6, 7]。

活性粉混凝土(RPC)的發展從 1990 年開始，較 1980 年代所發展出的高性能混凝土 (High Performance Concrete, HPC) 為晚，起初係由世界第二大營造公司-法國 Bouygues 公司開始投入研發，在 1994 年以前，此種材料一直是法國軍方的機密，僅用於軍事工程，於 1994 年，由 Bouygues 公司人員 Richard 等人在舊金山的美國混凝土學會(ACI)春季國際會議上首次公開其研究成果後^[6]，此種新型混凝土材料的製作與材料特性始被世界其它各國(包括臺灣)所瞭解，自此，各國急起直追、相繼投入這種 RPC 超高性能混凝土研發行例^[6, 7]。

Richard 於 1995 年提到活性粉混凝土設計理念基於五大原則^[7]：

1. 去除粗粒料以增加材料均勻性。
2. 最佳化粒狀堆積方式設計配比，並在凝結過程中施予壓力增進材料緻密性。
3. 高溫養護方式改善材料微結構。
4. 添加鋼纖維提高材料延展性。
5. 維持一貫的拌和與澆灌作業方式。

活性粉混凝土(RPC)擷取上述三種混凝土性能加強方式的優點，如減少混凝土內部之孔隙及裂縫，以提高混凝土強度、韌性、緻密性及耐久性等。

2.2 活性粉混凝土性質

2.2.1 新拌性質

新拌混凝土的工作度對於施工者而言，是非常重要的一項人性化指標，在工地現場，如採用泵送澆灌作業，則需要流動性高的混凝土，但是對於需強力振動的預鑄構件或斜坡構件而言，則不需用高流動性混凝土。

一般而言，混凝土工作性會受到粒料形狀、用水量、含氣量、添加摻料、添加纖維與水泥種類等因素影響^[17]。活性粉混凝土的工作性係採用流度試驗來進行量測，由於為求材料均勻性，在配比中除去粗粒料，RPC 混凝土本質上即是一種水泥砂漿或是水泥漿，因此為使稠度增加，通常必須藉由添加摻料來改變其工作性。

何耀宇(2000)分別以 0%、1%、2%鋼纖維含量拌製 2 kg 及 80 kg 的活性粉混凝土，發現不管拌製量的多寡，流度都會隨著鋼纖維含量增加而減少，但在大型拌和機具及較大空間條件，能使鋼纖維在足夠空間環境中可較均勻分佈^[9]。

吳建興(2003)分別以 0%、0.5%、1%、1.5%鋼纖維含量之活性粉混凝土進行流度試驗，結果如圖 2-1 所示，流度會隨著鋼纖維含量增加而減少^[10]。

2.2.2 硬固性質

Richard 等人(1995)發表 RPC-200 和 RPC-800 兩種活性粉混凝土配比與力學性質試驗結果，顯示活性粉混凝土抗壓強度高達 200 MPa (29,000 psi)，經特殊預鑄製程後更可高達 810 MPa (117, 500 psi)，另

外，其抗彎強度也相當高，約為 45 MPa (6,500 psi)，經特殊預鑄製程後更可達到 140 MPa (20,300 psi)^[6, 7]。茲將結果與傳統混凝土比較，如表 2-1 所示，可以明確得知活性粉混凝土的強度及韌性都超過一般混凝土甚多，其主要原因是添加卜作嵐材料及高溫養護會加速卜作嵐反應，增加強度，添加鋼纖維則大幅提升其韌性。

一般活性粉混凝土所添加的卜作嵐材料包括矽灰及石英粉，其中矽灰為高反應之卜作嵐材料，會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，也提高混凝土強度及增加耐久性；石英粉其粒徑大小約為 10 μm ，在高溫高壓的養護條件下，可激發其活性，當石英粉與矽灰之用量取一適當比例時，便有助於提升活性粉混凝土強度^[11, 12]。

Richard(1995)曾針對不同材料組成之相對密度、養護溫度與有無添加鋼纖的 RPC-200 試體進行抗壓試驗，結果發現抗壓強度會隨著材料組成之相對密度、養護溫度提高而增加，添加鋼纖維對於抗壓強度有些許提升但不明顯，如圖 2-2 所示^[7]。

Dugat 等人(1996)分別製作直徑 90 mm、高度 180 mm 的 RPC-200 試體，及直徑 70 mm、高度 140 mm 的 RPC-800 試體，進行基本力學試驗並量測其軸向與側向應變曲線，試驗結果如表 2-2、圖 2-3 及圖 2-4 所示，根據曲線計算得到 RPC-200 之波松比約為 0.22~0.24，RPC-800 之波松比約為 0.19~0.28，略大於一般混凝土之波松比 0.2，另外也製作了 50×40×600 mm(寬×高×長)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，試驗曲線如圖 2-5 所示，由圖中可發現 RPC 材料在達到降服抗彎強度後仍持續約 3 mm 的變位，相當具有韌性^[18]。

添加鋼纖維提升了 RPC 的韌性，最主要是因為鋼纖維在水泥質材料中成為裂縫阻抗物，使水泥質材料受應力集中所產生的裂縫，因纖維在材料內部各方向呈現不規則的分佈，有效延緩裂縫的傳播；且因

為纖維抗拉強度與混凝土界面握裹強度不同，造成纖維的破壞模式可分為三類^[19, 20]，如圖 2-6 所示：

1. 纖維拉脫破壞

由於纖維卜松比作用造成側向收縮，拉裂破壞纖維及混凝土之間的鏈結力，使纖維剝落拉脫，或因纖維所受的拉應力超過纖維與基材界面容許剪力強度，造成滑脫破壞。

2. 纖維剪力破壞

當剪應力大於纖維本身抗剪強度，造成剪斷破壞。

3. 纖維拉斷破壞

當拉應力超過纖維本身的抗拉強度，但拉應力仍小於材料界面容許剪力強度，造成拉斷破壞。

另外，添加纖維的材質、形狀、長徑比、添加量及排列方式不同，會對混凝土強度的提升及工作性造成影響，如圖 2-7 所示^[19, 21]。當纖維含量愈多將使混凝土破壞由脆性破壞轉為韌性破壞，且抗拉、抗彎強度及抗磨耗能力也隨之愈高，如圖 2-8 所示。但相對地纖維含量愈多，混凝土之工作性就變得愈差，纖維可能糾結成一團，造成纖維在混凝土內分佈不均勻，以致於混凝土破壞容易集中在纖維較少處^[22]；且纖維含量過多，也會造成混凝土內含氣量增加，即混凝土內孔隙愈多，而影響混凝土之強度。因此，添加適量的纖維於混凝土中，可使纖維分佈較均勻，減少纖維糾結成一團的情形發生，有助於混凝土強度的提升。

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，抗彎強度歷程曲線如圖 2-9 所示，可看出 1%、2%鋼纖含量的添加量能提升 RPC 材料之韌性^[9]。

吳建興(2003)添加 5%鋼纖含量製成活性粉混凝土，先經 90°C 水中

高溫養護再置於室內飽和石灰水養護，再進行抗壓及劈裂試驗，發現 9 天齡期和 28、90 天的試驗結果相近，顯示活性粉混凝土在高溫養護條件下，強度在第 9 天已達高峰。另外，再分別以 0%、0.5%、1%、1.5% 鋼纖維含量之活性粉混凝土進行中心點加載抗彎試驗，結果顯示抗彎強度會隨著鋼纖維含量增加而增加，而鋼纖維含量增加至 1.5% 時，其抗彎強度比未添加鋼纖維強度約為 2 倍，因此鋼纖維含量確實能有效提升活性粉混凝土的抗拉性及韌性^[10]；劈裂試驗的相關力學試驗結果列於表 2-3。

2.3 活性粉混凝土之應用

RPC 在加拿大之應用為位於 Sherbrooke 的世界第一座專供行人與腳踏車通行之實驗 RPC 橋^[23~25]；在美國的應用主要是耐壓水管，在法國的應用則包括水管、板材構材、核廠冷卻塔和核廢料貯藏桶等^[26~28]；其中 Matte 與 Torrenti 等人曾發表關於以 RPC 材料製造核廢料高完整性貯藏桶(High Integrity Container, HIC)適用性的測試實驗文章，是一篇較為健全的公開文獻^[27]，文中詳述各試驗的測試程序及其實驗結果，結論顯示與普通混凝土(Ordinary Portland Concrete, OPC)及 HPC 相對比，由於 RPC 的緻密性相當優異，故為適合製作 HIC 的優良材料。

國內首度將 RPC 的觀念引進及以中文「活性粉混凝土」稱呼 RPC 的濫觴，為台灣營建研究院的客座研究員苗伯霖博士，苗博士於 1996 年在國內「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」後，國內的數個產學機構即積極進行此材料之研發工作，國內目前從事 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、榮民工程公司等單位，在實用方面，國內使用超高強度混凝土包括 RPC 的應用範圍包括製作無鋼筋覆工版、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等項目，均有很好的成效表現^[8, 29~35]。

2.4 混凝土結構物之補強

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，導致結構承载力不足，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(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^[36]。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^[37]。

另外，根據 Pareek(1995)建議之評估黏結試驗方法包括斜剪試驗、直剪試驗、單軸拉力試驗及撓曲試驗等，如圖 2-10 所示^[38]。

2.4.1 混凝土結構之補強材料^[39]

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)。

2.4.2 混凝土結構補強工法^[39~53]

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：

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，以修復受損之樑、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樑構件，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、樑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。

2.4.3 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^[54]。

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 1cm 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^[10]。

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，但以 RPC 作為 RC 構件修補或補強材料的國內研究並不多見，此方面的研究成果發表很少，部份類似研究也還在進行中。

2.5 活性粉混凝土配比設計

2.5.1 活性粉混凝土使用之材料

活性粉混凝土(RPC)最常見的材料有水泥、石英砂、石英粉、矽灰、鋼纖維、水、強塑劑、消泡劑等，綜合國內外 RPC 研究常使用之材料性質與建議統整於表 2-7 及 2-8，茲將各材料介紹如下：

1. 水泥

RPC 在水泥的使用上，以卜特蘭二型水泥使用最多，其次為卜特蘭五型水泥，表 2-4 所列為常見各型水泥物化性質。二型水泥粒徑在 10~16 μm 之間，因其具有中度水化熱及中度抗硫性，由於含有較少之 C_3A ，使水化熱降低，因此流變性質有所提升，且其抗硫特性有助材料之耐久性。

2. 石英砂

在粒料的選用上，RPC 以石英砂(矽砂)替代之，增加整體材料均勻性。由於在 RPC 中水泥粒徑僅次於砂，其平均粒徑在 10~16 μm 之間，最大顆粒粒徑 80~100 μm ，因此必須避免其與砂之間互相干擾，因此石英砂最大粒徑限制在 600 μm 以下，而最小粒徑則大於 150 μm 。常見石英砂之顆粒粒徑分佈與化學成分如表 2-5 所示。

3. 矽灰

矽灰是生產矽及其合金的工業副產物，其主要成分為二氧化矽約佔 90%。在 RPC 的應用上，矽灰屬於卜作嵐材料，會和水泥的水化物產生二次水化反應—即卜作嵐反應，其可以移去水泥水化所生成的有害鹼性物質，並生成 C-S-H 膠體使混凝土的強度有進一步的成長。矽灰的比表面積約為 20,000 m^2/kg ，粒徑約為 0.1~0.2 μm ，為高反應性卜作嵐材料。表 2-6 所列為常見矽灰之物化性質。

矽灰在高強度混凝土中有助於強度的發展主要有三方面^[55]：

(1) 其粒徑極小，可填充水泥之間的孔隙增加密實性。

(2)與水泥水化產生的氫氧化鈣進行卜作嵐反應增加強度，同時也可藉著移去水泥水化物，使水泥的水化作用加速。

(3)一般漿體中的氫氧化鈣有集中於粒料顆粒周圍的傾向；矽灰的加入會在粒料表面形成矽灰鍍層，且此行為並不受粒料表面性質及水灰比之影響。此矽層並可與氫氧化鈣持續反應形成膠結物，使漿體與粒料之間的交界區發展更加緻密與均勻。

典型上 RPC 使用的矽灰-水泥比是 0.25，此含量有最好的填充效果，也接近卜作嵐反應最終的矽灰需求量。然而 RPC 中水泥的水化並不完全，所以此含量高於卜作嵐反應的需求，多餘的量則貢獻在孔隙的填充上。

4. 石英粉

石英粉是使用在高溫處理的 RPC 中，使用高溫可以激發其活性，其發生最大活性時的粒徑為 5~25 μm 。在 RPC 中使用的石英粉其平均粒徑為 10 μm ，其顆粒大小與水泥顆粒相當，屬於相同的堆積層級。石英粉與石英砂之物化性質比較如表 2-7 所示。

5. 鋼纖維

鋼纖維的添加，使得原來為脆性的混凝土材料變成韌性材料，由於混凝土與纖維間的握裹力，增加了混凝土之抗拉強度、耐衝擊性，也制止了裂縫的延伸。

6. 強塑劑

強塑劑是一種界面活性劑，利用其粒子吸附於漿體顆粒表面，使顆粒間因帶電荷而使聚簇現象消失。因此，水分在顆粒間能更自由的流動並提供潤滑效果，使漿體用水量可以減少而保持良好的工作性。由於拌合 RPC 的水灰比很低，所以要求強效的強塑劑需能使其足以拌合並提高流度。

7. 消泡劑

消泡劑一般配合強塑劑使用，建議用量為強塑劑溶液重量的 0.2%。

2.5.2 不同混凝土使用之材料比較

普通卜特蘭水泥混凝土(簡稱：OPC)所使用之材料，通常以粗、細粒料、水泥、水為主，卜作嵐材料及強塑劑為輔的組成方式，材料組成較為簡單，但通常效能有限，如強度、耐久性、工作性三種特性難達平衡。高性能混凝土(簡稱 HPC)在材料上，增添了強塑劑與卜作嵐材料(如：飛灰、爐石、矽灰等)兩項法寶，搭配了合適配比的應用(如：緻密配比)，無論在安全性、經濟性、耐久性、生態性、工作性等條件皆能同時具備，而達成優生混凝土之目標。而活性粉混凝土(RPC)的材料組成，其排除粗顆粒以增進均勻性下，以石英砂取代之，另搭配石英粉、矽灰填塞孔隙及生成卜作嵐反應，並加入小尺寸鋼纖維來增加韌性。三種混凝土材料應用整理如下表 2-9。

於前敘述三種混凝土材料之組成，不難發現三種混凝土最大之不同處在於粒料顆粒尺寸的改變，OPC 與 HPC 皆使用了 #4 篩(4.75 mm)以上的粗粒料，及 #4 篩(4.75 mm)以下、#100 篩(0.149 mm)以上之細粒料，較 RPC 石英砂(600 μm 以下)要來得大，由圖 2-11 各材料粒徑範圍比較圖即可看出其間的區別。

2.5.3 不同混凝土配比與製程比較

1. 配比

傳統混凝土配比設計的方法都是大同小異，其中以美國混凝土學會(ACI 211.1)的方法最為簡便，一般計算出來的配比，經過試拌加以修正，使其符合實際工地的需要，配比計算的主要流程如圖 2-12 所示。此外，傳統配比為了工作性可能添加大量水，而以添加水泥為手段以保持水灰比(W/C)或水膠比(W/B)之不變，以保障強度品質，如此將因水泥漿量過多，粒料量相對減少，造成體積不穩定，因此 ACI 混凝土設計使粒料級配失去最佳化。

在 HPC 方面，由台灣科技大學黃兆龍博士提出之緻密配比理論採用顆粒堆積與材料科學原理，以粒料緻密級配為主軸，求出最緻密

之粒料系統，粒料系統包括砂、石、卜作嵐材料等堆積至最大密度後，剩餘空間再由水泥及水並配合強塑劑來填充之，質地密實，混凝土健康情況佳^[17]。配比流程如圖 2-13 所示，兩配比設計法之比較列於表 2-10。

在一般 RPC 配比理論方面，主要根據 Richard 及 Cheyrezy 提出之實驗方式進行^[6]：

- (1)各種粉料依照粒徑大小分成不同類別，即分別將砂、水泥與石英粉、矽灰各歸成一類，而每個類別都必須有緊密的級配。
- (2)區隔各類別；即兩相鄰類別的平均粒徑(d_{50})比須大於13，以避免互相干擾。
- (3)SP的最佳用量以流變分析來決定，SP的種類必須配合水泥的種類。
- (4)選擇結塊最少的細粉。

主要用來評估 RPC 配比品質的參數則是需水量(即為得到流動性所需的最小用水量)，最緻密狀態的 RPC 其最小的水膠比為 0.08 (膠結料包括水泥及矽灰)，實際上，孔隙量等於需水量及氣泡的和，當選擇一個能達到最小需水量的級配後，最佳含水量再以一個更整體的參數--相對密度 d_o/d_s 來分析，其中 d_o 是拆模時的密度， d_s 是固體密度(不含空氣與水)，如圖 2-14 所示。

A 點表示最小水膠比下的相對密度，當水膠比微量上升時，多餘的水將填充 RPC 內的氣泡，此時質量增加而體積不變， d_o 及相對密度均上升，到達 B 點(理論最佳含水量)時內部已經沒有氣泡，當水量再增加的話體積亦增加，造成相對密度的下降到 C 點。另外，可以觀察到一個相對密度對應兩個拌合水量 D 與 E 分別在最佳含水量的兩邊，其中 E 的力學性質較 D 為佳，其原因為 E 含較少的空氣及較多的水，這些水在水化反應後部份將合成 RPC 固體的一部份，因此較佳的含水量位於 BE 段，另外 E 的額外優點是有較佳的流變特徵，

使澆置更為容易；在實際的狀況，B 點的氣泡含量趨近 2% 而非 0%，其鄰近區域的曲線亦趨於平滑，然而這不影響對最佳含水量的定義，相對密度表現出配比的品質，也是比較不同 RPC 配比的主要參數，見圖 2-2 所示。

三種混凝土(OPC、HPC、RPC)配比方式常因不同的情況而有不同的設計配比，如表 2-11 所示。

2. 拌和與養護

(1) RPC

台大(陳振川及詹穎雯教授指導)製作 RPC 拌和與養護的程序係依照標準配比表，計算出各種原料之重量，並以磅秤精準量測後，依照下列步驟進行拌合與養護^[56]：

- (a) 將乾料依比重一一倒入拌合桶中，其順序為石英砂、矽灰、石英粉和水泥，目的為避免將比重較輕之粉料殘留於桶底，使拌合漿體不均勻，然後便以一速乾拌至均勻。
- (b) 事先將水與強塑劑混和均勻，然後將混合液體積的 2/3 倒入乾料中攪拌，四分鐘後再將剩餘的 1/3 混合液加入拌合桶中拌合，約一至二分鐘後漿體變成泥圈狀，使加速至二速再拌合；以肉眼確定拌合桶四周死角無粉料堆積後，減至一速。
- (c) 等到流度出現後，加入鋼纖維，添加時應避免讓鋼纖維附著於桶壁及攪拌棒上。等鋼纖維沒入漿體後，加至二速攪拌。
- (d) 經過約兩分鐘之二速拌合，以肉眼確定混和均勻後，進行流度量測以及澆置試體之動作。
- (e) 待試體硬化後拆模，將試體置入盛水容器中置入恆溫恆濕櫃中 ($T=85$ ， $RH=90\%$) 進行三天養護，取出後將水拭乾放入密閉容器內 ($T=20\pm 1$ ， $RH=90\%$ 以上)，至齡期時再取出，養護之流程方式如圖 2-15 所示。

(2)HPC

拌和與養護程序如圖 2-16 所示。比較一般混凝土及 RPC 兩者差異，其中 RPC 在養護時會適當施加壓力，以達到下列目的：

(a)減低氣泡

應用壓力會在幾秒內完全消除或大量地減低 RPC 中的氣泡。

(b)去除多餘的水

施加壓力在新拌 RPC 上會使部分多餘的拌和水從模版的縫隙流出，這將對密實性以正面的影響，但要避免最小固體顆粒隨水一併滲出。當施加 50 MPa 的壓力於直徑 7 cm 的試體 30 分鐘後，會使相對密度增加超過 2%。

(c)化學收縮的補償

初期(約澆置完成後 6~12 小時)持續加壓會去除化學收縮產生的空隙。

以上三個影響加總的結果會使相對密度增加6%，混凝土在加壓與不同條件下其強度之提升情形如表2-12所示；而加壓與密實度之關係如圖2-17所示。

2.6 活性粉混凝土與 HPC 性質比較

2.6.1 工作度

傳統混凝土(OPC)以坍度為其工作度主要指標，以 W/C 來決定所需之工作度，通常坍度介於 5~18 cm 之間，為一種非流動性混凝土，活性粉混凝土(RPC)由於材料顆粒的均勻化、細緻化，再加上強塑劑的使用，通常 RPC 皆有良好的工作性。Ma1 及 Dietz1 之研究成果可看出^[57]，在不同水膠比下，RPC 之坍流度可達 690~730 mm 之間，當達 500 mm 時，其坍流時間僅需 8~11 秒。另外，在坍流度損失方面，由此文獻中，RPC 在初始時仍有 710 mm 之坍流度，在 2 小時後仍保有 675 mm

之坍流度，顯見其坍損不大，如表 2-13 所示。

高性能混凝土在卜作嵐材料與強塑劑的配合下，可輕易達到流動化情形。圖 2-18 為 HPC 與 RPC 坍流度比較圖，圖中 HPC 坍流度與 W/B 關係之分佈點為台灣科技大學營建材料研究室優生混凝土(EC)歷屆試驗所得之結果整理，由於圖中 RPC 配比與 HPC 配比(使用緻密配比)方式不同、出發點亦不同，因此分佈之情形有落差。但相同的是，兩者在不同 W/B 下皆能有不錯之工作性，其實後續的工作性可透過強塑劑量的改變而達成。

2.6.2 凝結時間

初終凝試驗為混凝土試驗中影響結構拆模與安全性的考慮項目之一。由圖 2-19 (台灣科技大學營建材料研究室 HPC 試驗所得例子，圖中標明之代號僅表示不同強塑劑類別與混合方式)HPC 之初終凝試驗，可明顯看出：

1. A30組之初凝約750分鐘、終凝約950分鐘。
2. S組之初終凝皆比A30快，初凝約600分鐘，終凝約900分鐘。
3. 前混之結果顯示初凝約500分鐘，終凝800分鐘，有速凝的現象。

2.6.3 抗壓強度

圖 2-20 在 RPC 部分為國內外 RPC 相關研究之數據統合；HPC 部分為台灣科技大學營建材料研究室歷年相關研究統整，圖中可看出在高溫蒸汽養護與材料細緻化與搭配下，RPC 在七天下擁有較佳的抗壓強度，範圍可由 180~240 MPa 不等。而一般養護之 HPC 七天則大約在 10~70 MPa 不等。

2.6.4 體積變化

圖 2-21 為 Mal 及 Dietz 在 RPC 收縮量之研究結果，可發現到在 SF/C = 20~30%、W/C = 0.268~0.337 之變化下，由於此範例水泥量多，其

收縮量可達 800~1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 之間；圖 2-22 為台灣科技大學營建材料研究室歷屆研究相關成果，圖中 HPC 之收縮量關係圖可看出，由於其以顆粒堆積之觀念，致使水泥用量不多且水量未過量，其收縮量僅約 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

2.6.5 超音波與電滲

吳建興(2003)^[10]將 RPC 試體在人工海水與 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱之乾濕循環後進行超音波與電滲量測，將其結果與台科大營建材料研究室團隊歷屆研究結果比較(經常溫養護下試驗)，結果顯示在圖 2-23、2-24。

在超音波方面，RPC 在 $W/B=0.22$ 之情況下，在未經乾濕循環時，其波速可達 4834.5 m/s，HPC 在不同齡期下，其 W/B 較低者，亦可接近 RPC 之品質，超音波在 4500 m/s 以上之混凝土品質都算良好。

在電滲方面，RPC 在 $W/B=0.22$ 下，由未經乾濕循環到經 100 次乾濕循環，因為其材料粒徑較小，形成之孔隙較小，其電滲值可達 97.5~1238.7 庫侖不等。而 HPC 則仍有 300~1500 庫侖不等之值，一般通常在 2000 庫侖下之混凝土，其品質與緻密程度均佳，也就是擁有相當好之耐久性。

表 2-1 活性粉混凝土與普通混凝土力學性質比較表^[6~7]

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 2-2 活性粉混凝土力學性質^[18]

	RPC-200	RPC-800
抗壓強度, f'_c (MPa)	194-203	422-520
初始靜彈性模數, E_0 (GPa)	—	29-36
靜彈性模數, E_c (GPa)	62-66	63-74
動彈型模數, E_{dyn} (GPa)	59-61	32-36
靜波松比, ν_{stat}	0.22-0.24	0.19-0.28
動波松比, ν_{dyn}	0.22-0.24	—
線彈性段佔極限強度比例(%)	60	—

表 2-3 活性粉混凝土於不同齡期之力學性值試驗結果表^[6]

試驗項目		齡期				
		3 天	7 天	9 天	28 天	90 天
抗壓強度(MPa)		49.2 (7.3%)	170.7 (2.8%)	192.6 (5.3%)	181.3 (4.5%)	185.5 (1.3%)
抗彎強度 (MPa)	試驗值	—	—	16.3 (8.6%)	19.7 (7.9%)	22.4 (7.2%)
	ACI 公式	—	—	8.6	8.4	8.4
劈張試驗 (MPa)	試驗值	—	—	12.3 (7.4%)	13.1 (4.5%)	12.1 (5.6%)
	ACI 公式	—	—	7.73	7.50	7.59
<p>備註：a. ()為變異係數，每個數值為三個試體之平均值。</p> <p>b. ACI 之經驗公式：</p> <p>抗彎強度：$f_r = 0.62\sqrt{f'_c}$ (MPa)</p> <p>劈張強度：$f_{ct} = 0.557\sqrt{f'_c}$ (MPa)</p>						

表 2-4 卜特蘭各型水泥之物化性質^[17]

項 目		Type I	Type II	Type III	Type V	
化學成分	二氧化矽(SiO ₂)	21.32	22.66	20.20	21.56	
	氧化鋁(Al ₂ O ₃)	6.17	4.42	5.61	4.40	
	氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	3.10	4.53	3.09	5.11	
	氧化鈣(CaO)	64.50	63.58	63.26	63.81	
	氧化鎂(MgO)	1.37	1.45	2.35	1.12	
	三氧化硫(SO ₃)	1.93	2.01	2.80	1.50	
	燒失量(LOI)	0.56	0.65	1.26	0.87	
	不溶殘渣	0.20	0.15	0.25	0.12	
熟料礦物	矽酸三鈣(C ₃ S)	45	41	51	51	
	矽酸二鈣(C ₂ S)	26	34	20	23	
	鋁酸三鈣(C ₃ A)	11.1	4.0	9.6	3.0	
	鋁鐵酸四鈣(C ₄ AF)	9.4	13.8	9.4	15.5	
物理性質	壩料空氣含量(%)	7.2	9.2	7.4	8.4	
	細 度 (m ² /kg)	330	320	4.30	332	
	健 度 (%)	0.04	0.01	0.05	0.03	
	抗壓強度 (kg/cm ²)	3 天	197	155	355	155
		7 天	296	225	337	244
		28 天	410	364	418	368
	凝結時間(hr)	初凝	2.10	3.00	3.03	2.50
		終凝	3.00	4.40	5.10	5.30
假凝結(min)	85	80	78	75		

表 2-5 各型石英砂粒徑分佈與化學成分一覽表^[9]

編號	A.S.T.M SIEVE NO.(mm) AFS Fineness NO.	20	30	40	50	70	100	140	200	270	PAN	化學成份		
		0.841	0.595	0.420	0.297	0.210	0.149	0.105	0.074	0.053		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
# 2	32-36		18.0	43.7	28.8	9.0	0.5					97.50	2.06	0.07
# 3	38-45		1.6	18.2	40.1	28.5	9.8	1.8				96.58	2.60	0.09
# 4	47-53		0.8	16.8	28.6	33.6	12.8	5.6	1.4	0.4		96.04	2.97	0.10
# 5	60-70			2.0	24.4	36.1	20.9	11.6	3.7	0.8	0.5	95.01	3.11	0.10
# 6	70-85				1.9	27.3	39.3	22.6	6.4	1.5	1.0	93.40	4.28	0.10
# 9	105-125				2.5	8.3	19.5	34.2	20.9	12.6	2.0	92.35	5.68	0.15

表 2-6 矽灰之物化性質^[9]

成份	最大含量 (%)
SiO ₂	90
Fe ₂ O ₃	1
Al ₂ O ₃	1
CaO	0.4
MgO	1
C	2
L.O.I	3

Specific surface area (m ² /g)	18~20
Specific gravity	2.2
Bulk density (kg/m ³)	250~400
Fineness (ave. dia) (μm)	0.1~0.2
Percent passing 45 μm (%)	90~100
Particle shape	Spherical
Form	Amorphous

表 2-7 石英砂與石英粉物化特性比較表

物理性質	石英砂	石英粉
比重 (OD)	2.6	2.6
吸水率 (%)	0.15	0.12
單位重 (kg/m ³)	1350	1480
SiO ₂	96.04	92.35
Al ₂ O ₃	2.97	5.68
Fe ₂ O ₃	0.1	0.15

表2-8 RPC常見材料及其性質與建議

材料	比重	粒徑	建議
水泥	3.15	16 μm	卜特蘭II或V型水泥
石英砂	2.62	325 μm (150-500 μm)	
矽灰	2.2	0.4 μm (0.1-0.7 μm)	用量約為水泥之20~30%
石英粉	2.46	8.3μm (5-20μm)	
鋼纖維	7.8	直徑約0.2-0.7 mm；長約13-20 mm之間	用量不超過3%(重量比)
水	1	-	
強塑劑	-	-	需著重減水效能
消泡劑	-	-	為強塑劑重量之0.2%

表2-9 各型混凝土材料比較表

材料	水泥	飛灰	爐石	矽灰	石英粉	石英砂	細粒料	粗粒料	鋼纖維	水	強塑劑	消泡劑
OPC	●	◎	◎	◎	○	○	●	●	○	●	○	○
HPC	●	●	●	◎	○	○	●	●	◎	●	●	○
RPC	●	○	○	●	●	●	○	○	●	●	●	◎

「●」表示：一定要用或常用；「◎」表示可用可不用；「○」表示少用或不用

表2-10 ACI與緻黃氏密配比設計比較表^[17]

	ACI配比設計法	黃氏緻密混凝土配比設計法
設計模式	半經驗模式	完整理論模式。
設計目標	強度、工作性、耐久性個別設計	耐久性、安全性、工作性、經濟性與生態性兼顧
設計觀念	水泥漿(W/C)為強度主要來源。工作性由水泥漿量調整，W/C和強度可決定耐久性	粒料堆積為混凝土主架構。降低拌和水量，卜作嵐材料填塞粒料空隙，利用摻料科技達到設計目標
設計步驟	<ol style="list-style-type: none"> 1.工作性決定拌和水量 2.強度或耐久性求出需求W/C 3.計算所需水泥量，飛灰取代部份水泥 4.由D_{max}和砂的FM決定粗粒料用量 5.由體積法或重量法求出砂的用量 6.工作性改變時，需改變砂的用量 7.試拌及調整 	<ol style="list-style-type: none"> 1.以飛灰填塞砂的空隙達到最大單位重 2.將最大單位重的砂和飛灰混合料填入石子空隙內，得到最大混合單位重 3.計算粒料的空隙V_v 4.所需水泥漿$V_p = N * V_v$ (N為放大倍數) 5.由需求強度決定水膠比(λ) 6.決定各項材料的用量 7.試拌及調整
設計特色	只要粒料基本性質(D_{max} , FM)固定，無論任何情況下，只有粗粒料用量維持不變，砂用量隨坍度和W/C調整，將失去粒料緻密性。	只要粒料基本性質(D_{max} , FM)固定，無論任何情況下，粗、細粒料和飛灰用量比例均不變，將可維持粒料緻密性。
配比條件限制	在耐久性考量時，允許以水膠比代替水灰比	<ol style="list-style-type: none"> 1.水量限制低於150 kg/m^3 2.水灰比> 0.42 3.水泥量限制低於$\frac{f'_c (psi)}{20 (psi/kg)}$ 4.強度依實測資料決定$\frac{W}{C+P}$ 5.使用卜作嵐材料與強塑劑

表 2-11 常見之 OPC、HPC、RPC 配比結果 (kg/m³)

材料	水泥	飛灰	爐石	矽灰	石英粉	石英砂	細粒料	粗粒料	鋼纖維	水	強塑劑	消泡劑
OPC	1	-	-	-	-	-	1.78	1.99	-	0.48	-	-
HPC	1	0.91	0.36	-	-	-	3.64	3.43	-	0.47	0.097	-
RPC	1	-	-	0.3	0.35	1.25	-	-	0.22	0.28	0.06	0.00042

備註:OPC 設計強度為 5000 psi ; HPC 之 α 值=1.235 ; RPC 鋼纖維用量為體積之 2%。

表 2-12 RPC 加壓與其他條件下強度變化一覽表^[56]

預壓力 (MPa)	加壓+ 高溫	加壓	高溫	一般	加壓提昇 強度		高溫提昇 強度	
10		260		177		83		
20	318	222	251	166	67	56	96	85
30		267		137		130		
40	320	268	237	195	83	73	52	42
50		269		171		98		
60		292		201		91		
70	310		250		60			
80		293		208		85		
90	352	298	250	195	102	103	54	55
100	357	299	238	198	119	101	58	40
130	419		224		195			

表 2-13 RPC 坍塌一覽表^[57]

Time after mixing	5 min	35 min	65 min	95 min	125 min
Flowing value(mm)	710	700	695	690	675
Flowing time t ₅₀₀ (sec)	8	8	9	8	9
Height difference	0	0	0	0	0

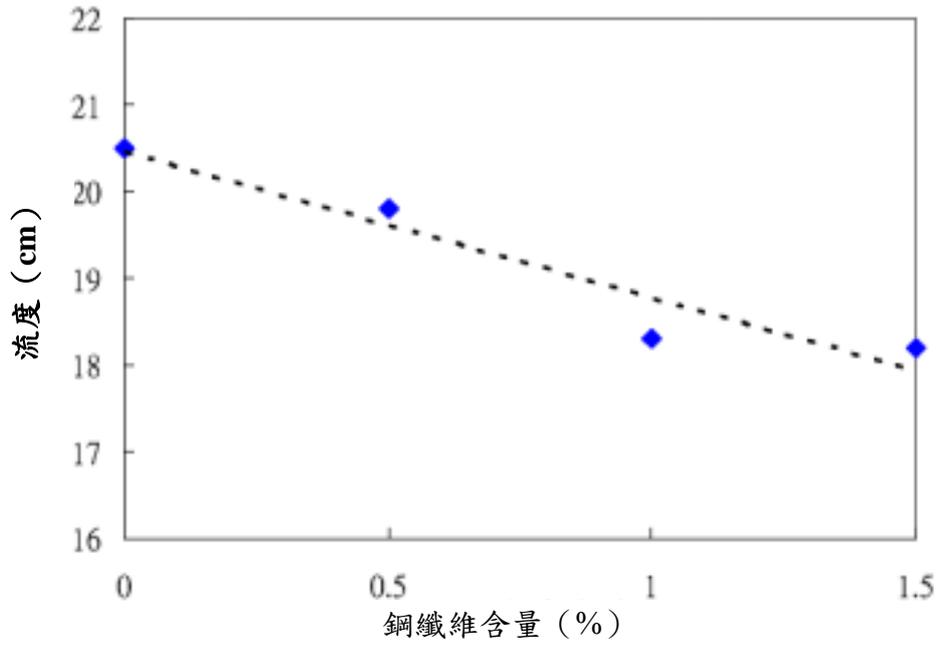


圖2-1 不同鋼纖維含量與流度之關係圖^[10]

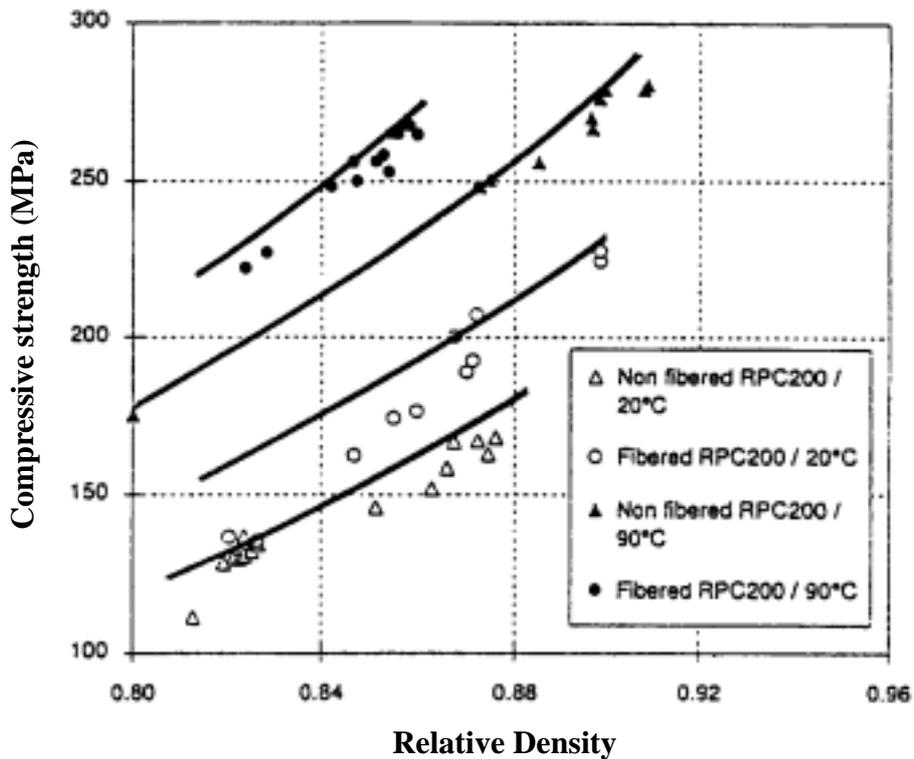


圖2-2 RPC-200組成相對密度、養護溫度及添加鋼纖維與抗壓強度之關係圖^[7]

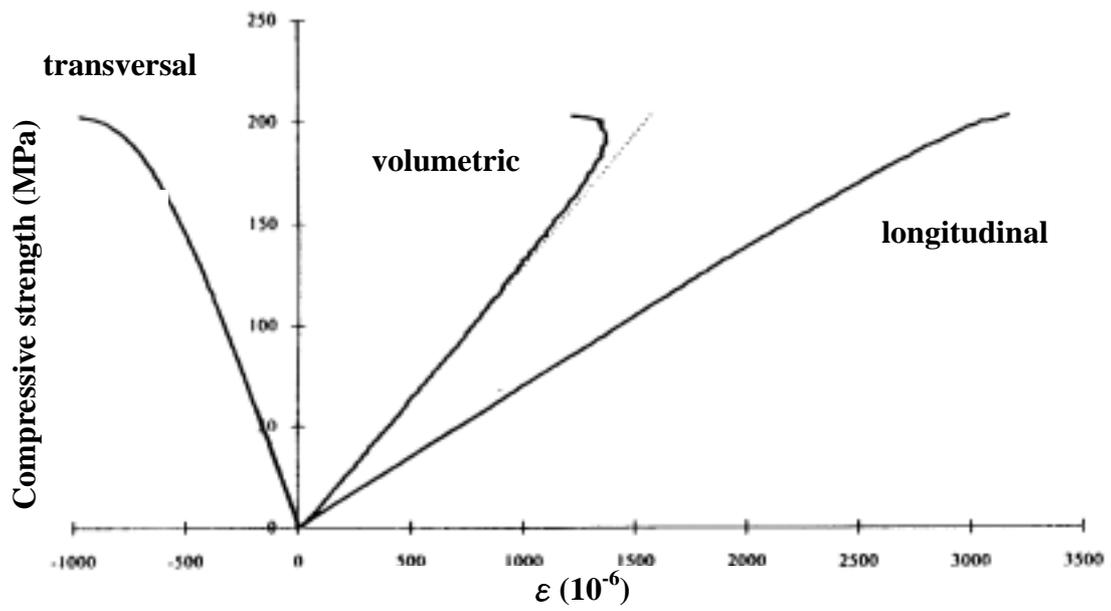


圖2-3 RPC-200之單軸抗壓試驗曲線^[18]

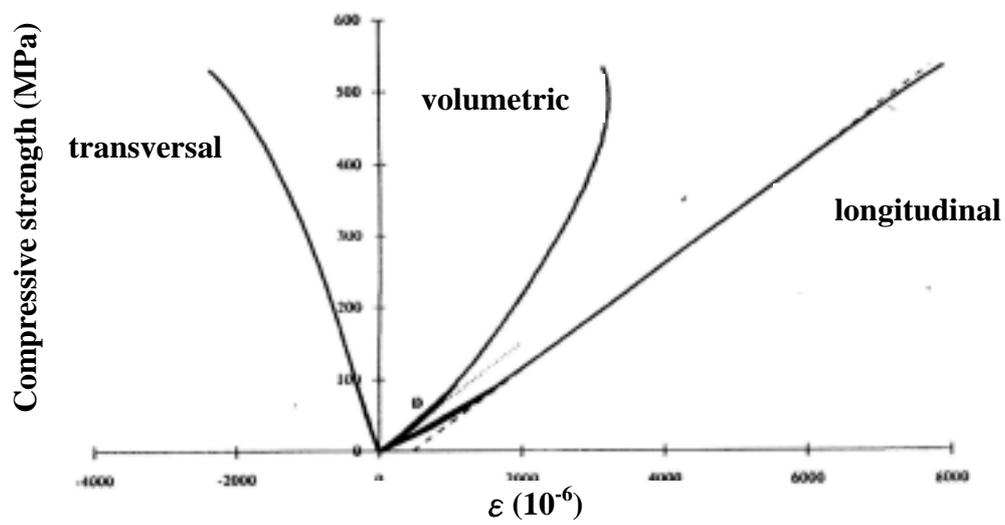


圖 2-4 RPC-800 之單軸抗壓試驗曲線^[18]

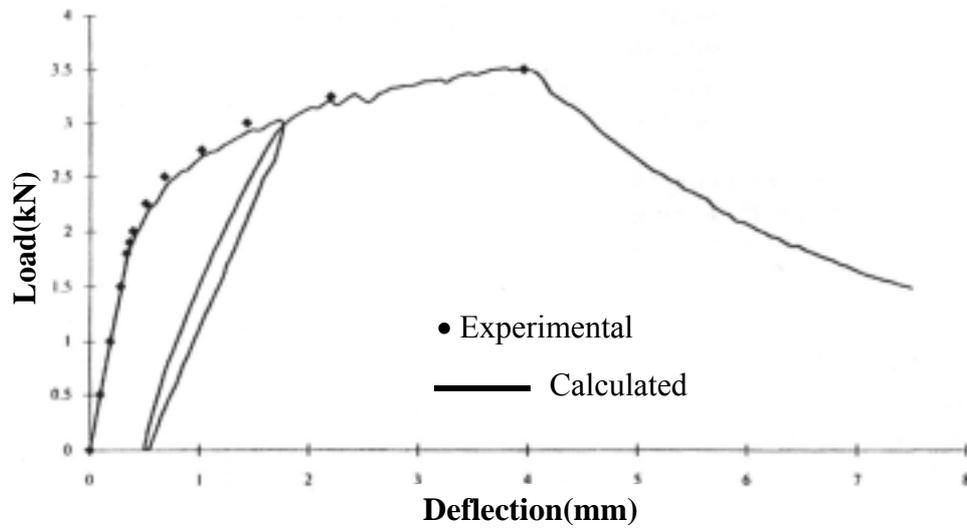


圖2-5 RPC-200之抗彎試驗曲線^[18]

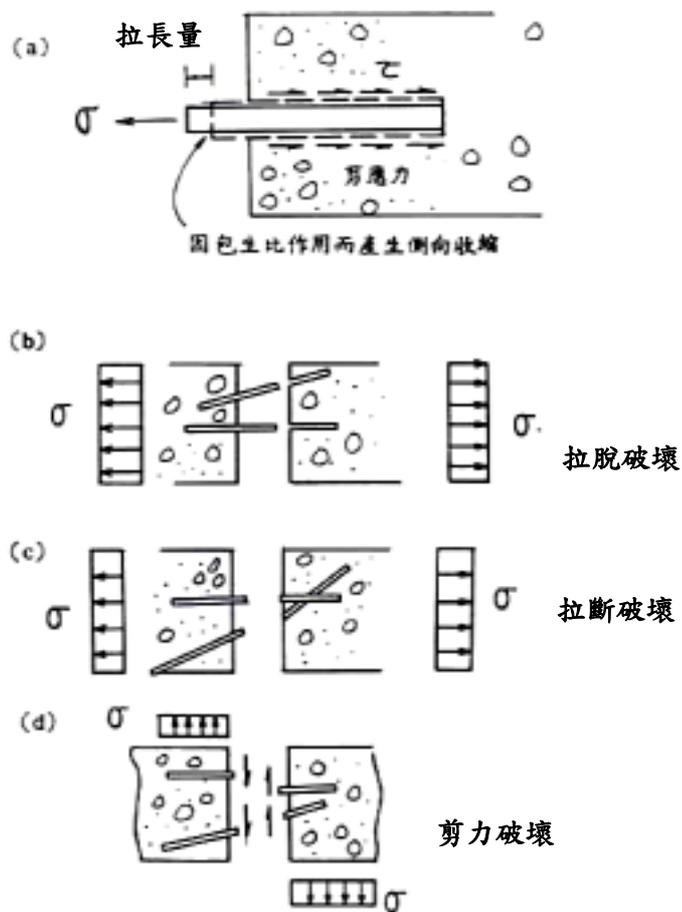


圖2-6 纖維混凝土之破壞型式^[19]

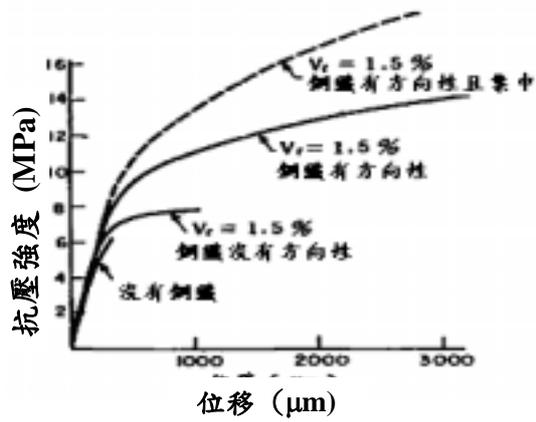


圖2-7 纖維排列方向與混凝土強度之關係^[21]

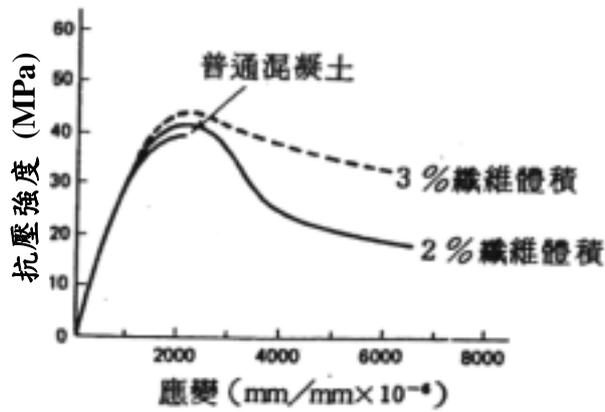


圖2-8 纖維混凝土之應力應變圖^[21]

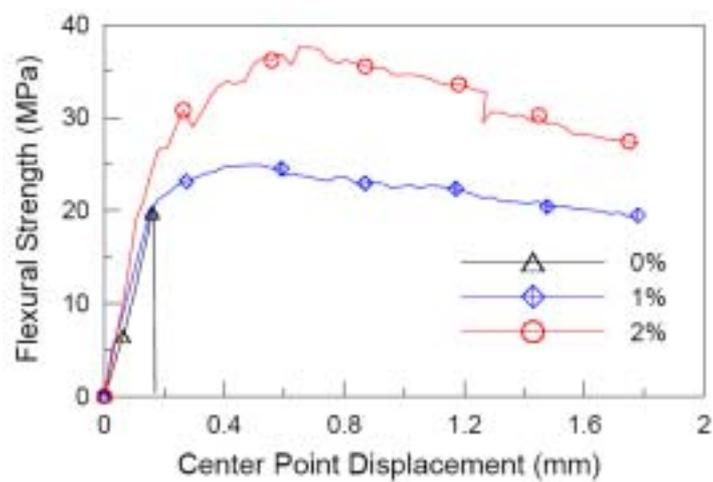
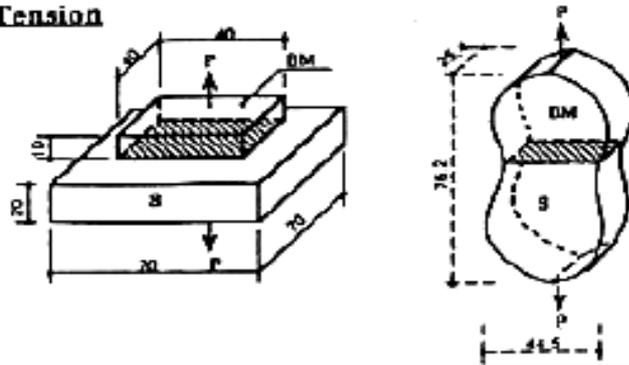
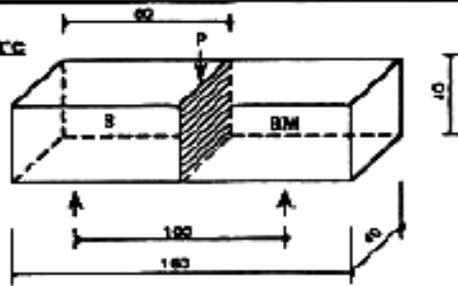


圖2-9 不同鋼纖維含量之RPC試體抗彎歷程曲線^[9]

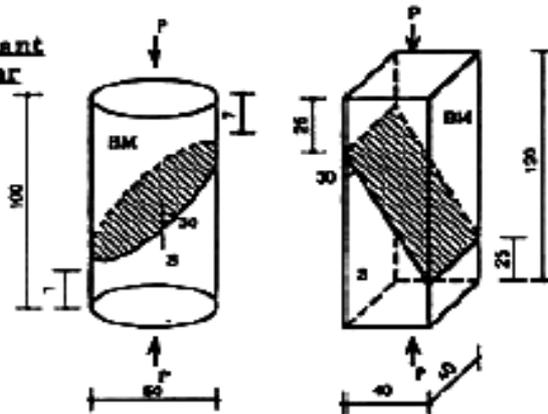
Adhesion in Tension



Adhesion in Flexure



Adhesion in Slant (Indirect) Shear



Adhesion in Direct Shear

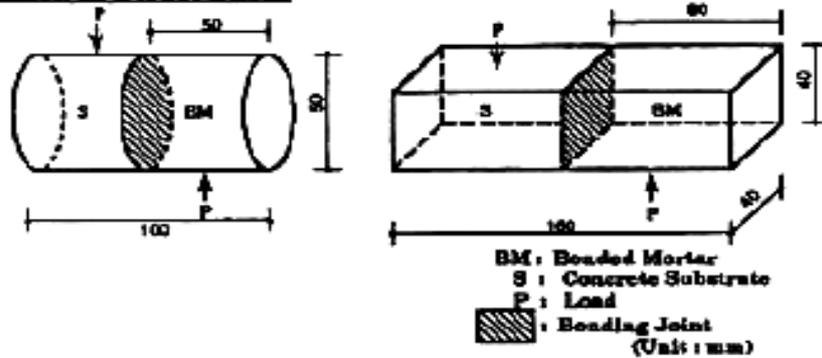


圖2-10 混凝土黏結試驗方法^[38]

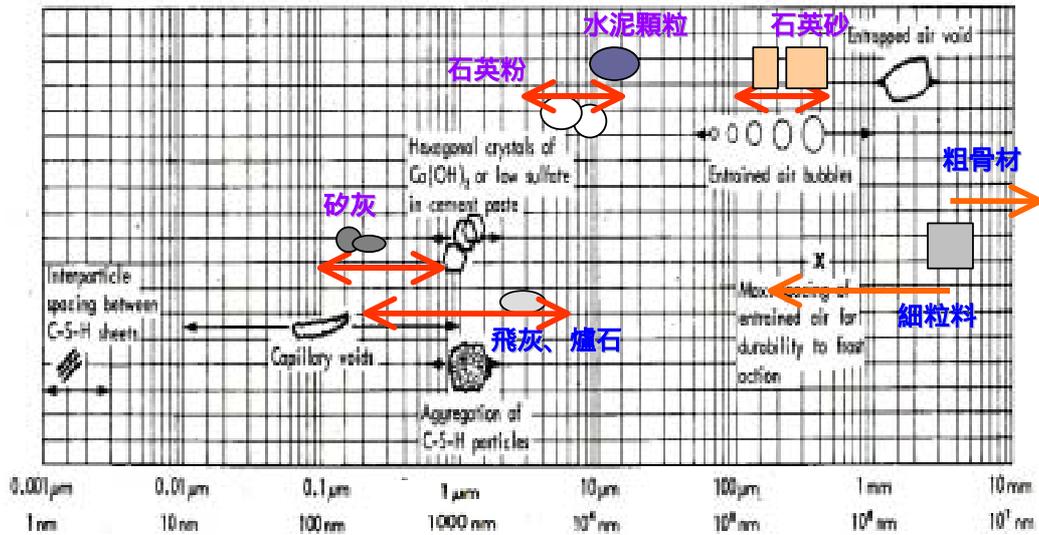


圖2-11 混凝土材料粒徑分佈圖

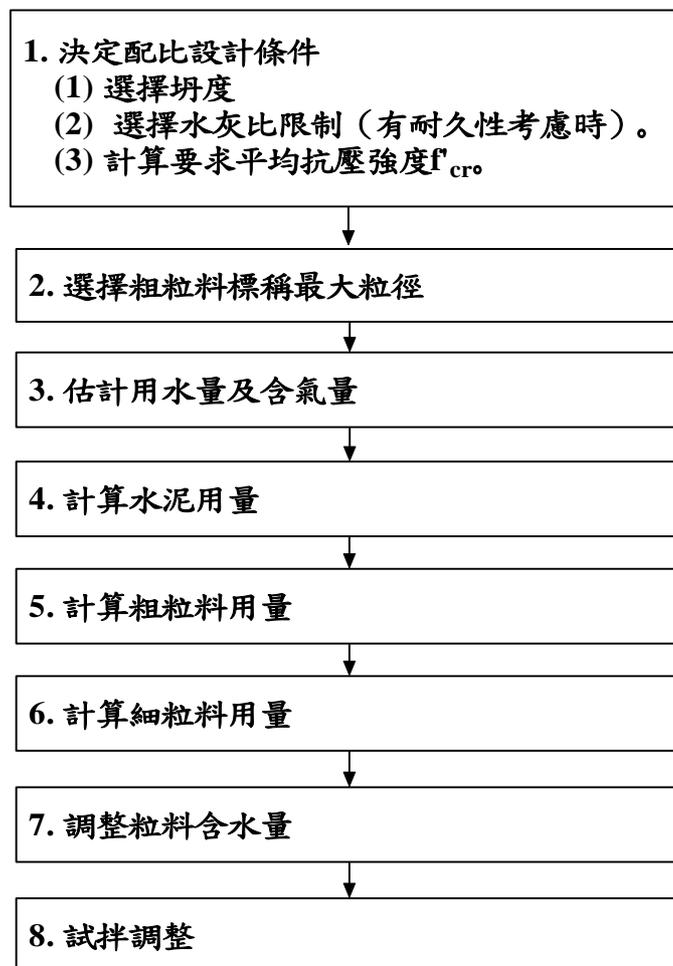


圖2-12 ACI配比流程圖^[17]

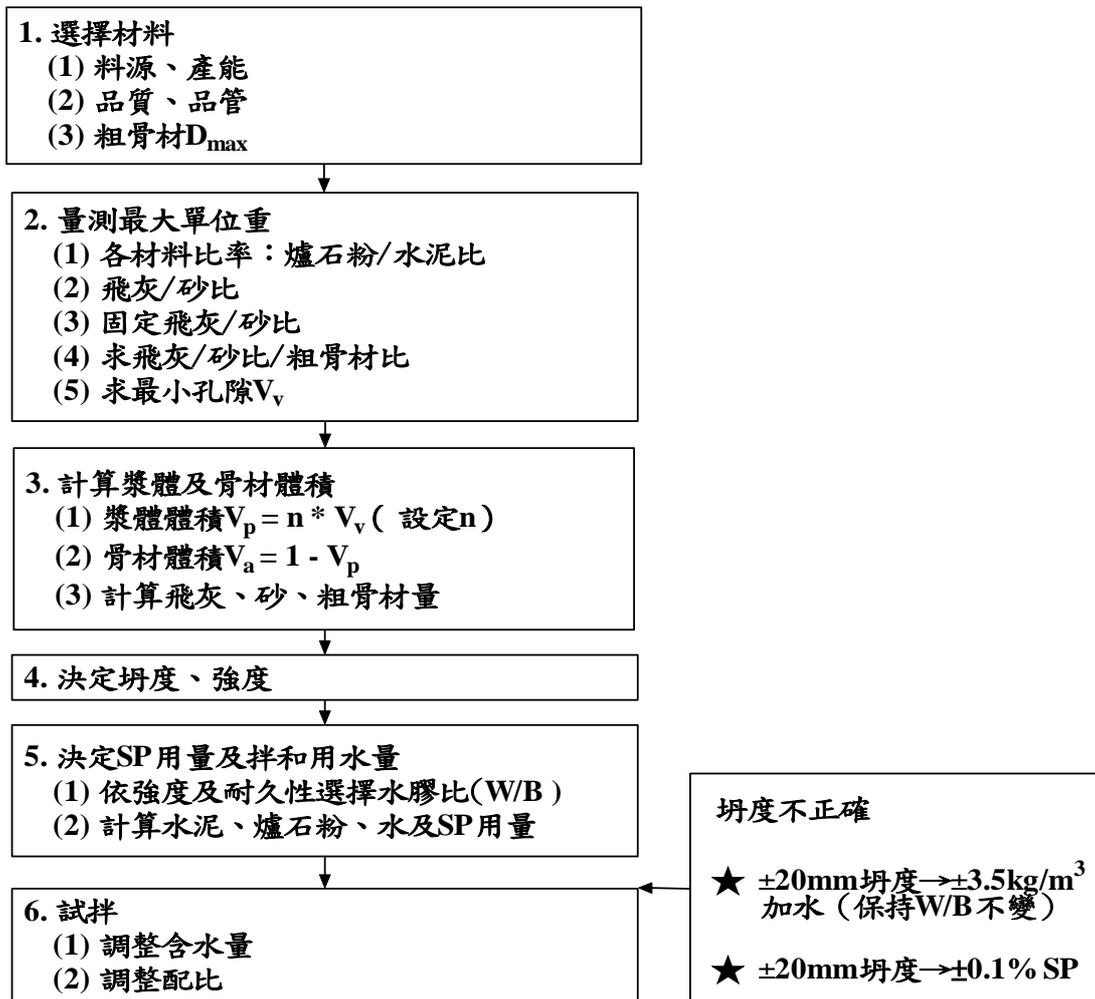


圖2-13 緻密配比設計流程圖^[17]

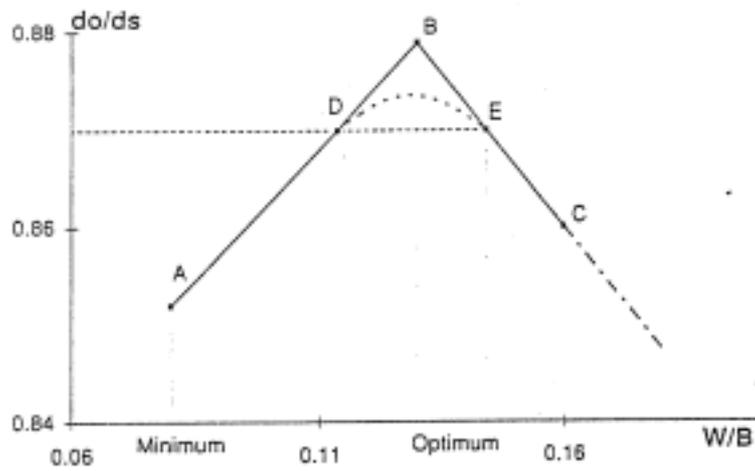


圖2-14 相對密度與水膠比的關係圖^[7]

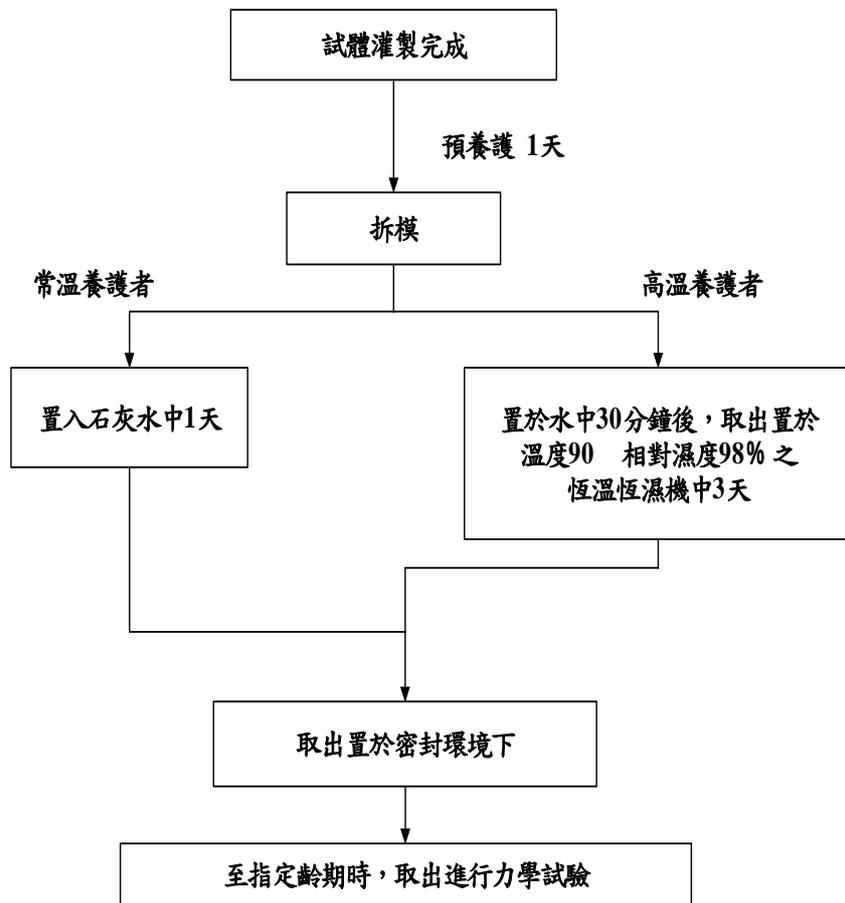


圖2-15 RPC養護流程圖^[9]

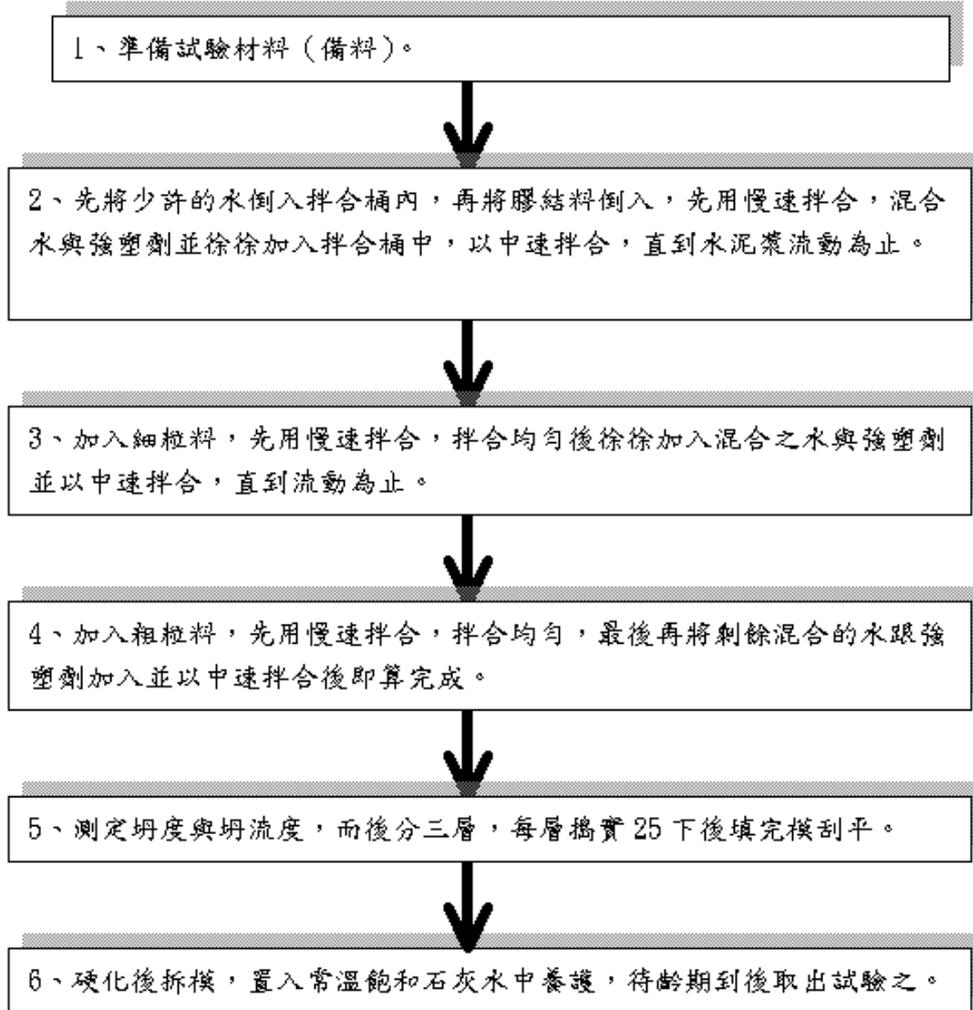


圖2-16 HPC拌和與養護流程圖

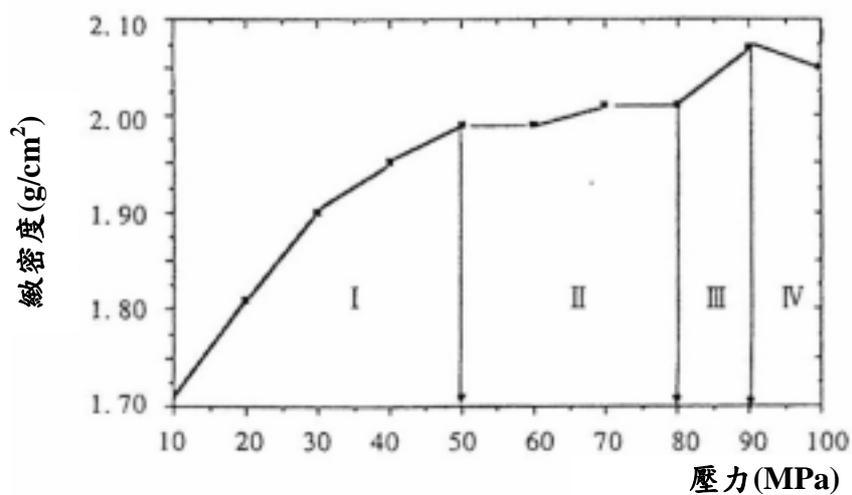


圖2-17 混凝土加壓與密實度之關係^[56]

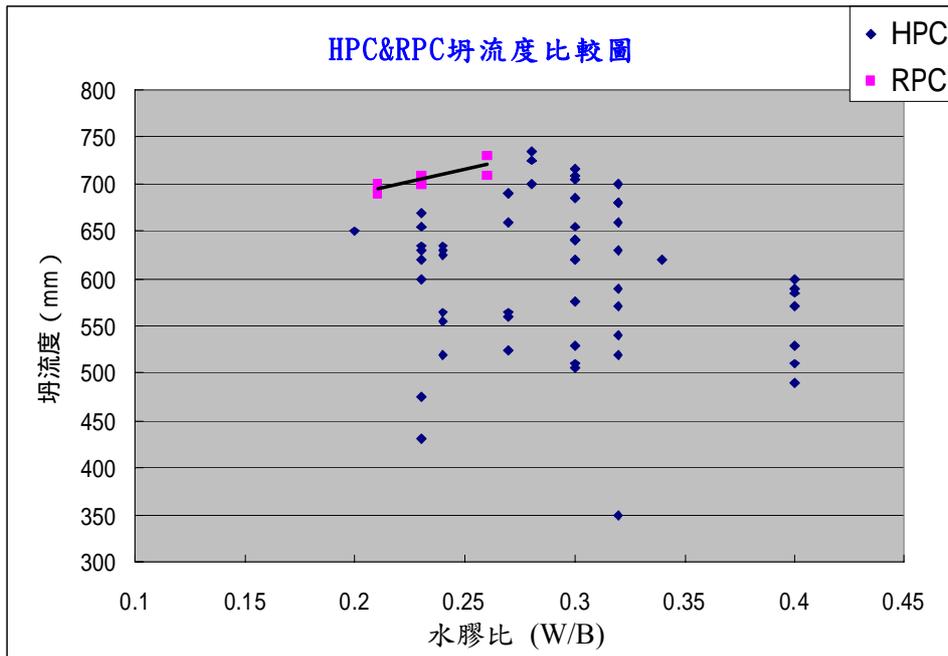


圖2-18 HPC & RPC坍流度比較圖

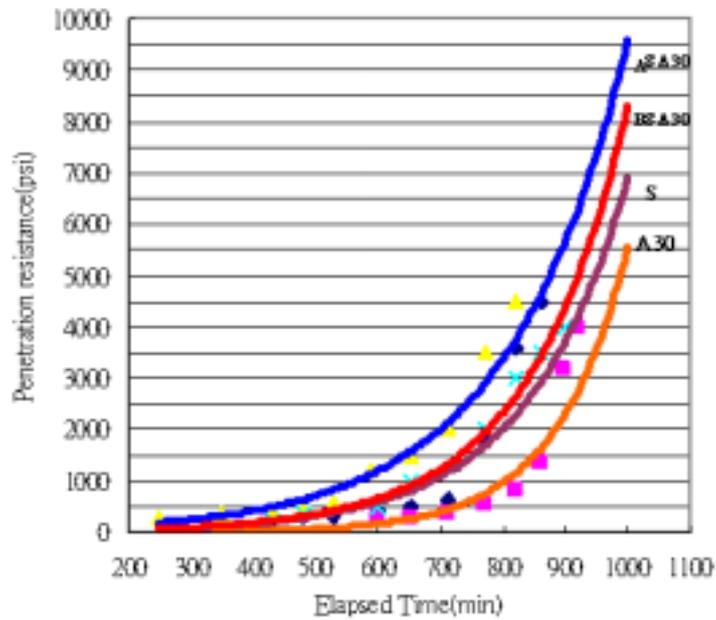


圖 2-19 HPC 初終凝試驗結果

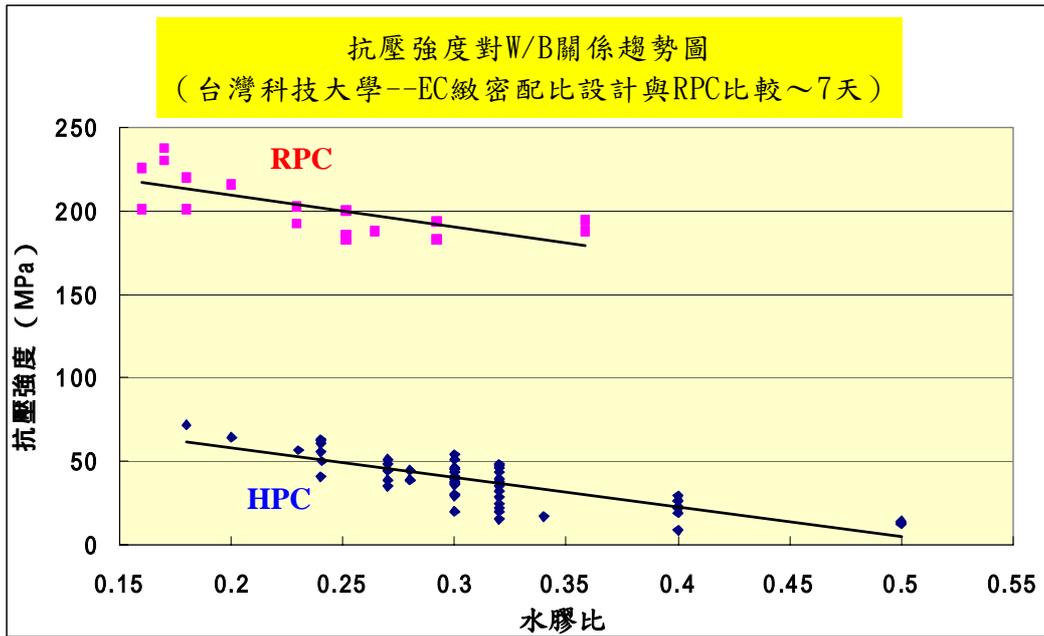


圖 2-20 HPC 與 RPC 七天強度比較圖

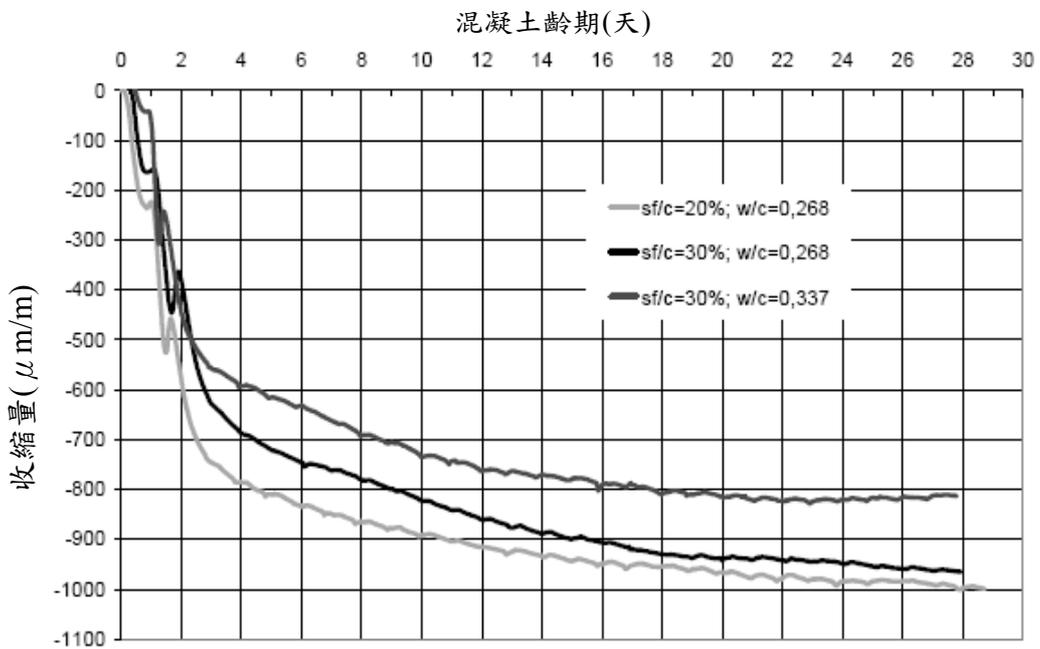


圖 2-21 RPC 收縮量與時間關係圖^[57]

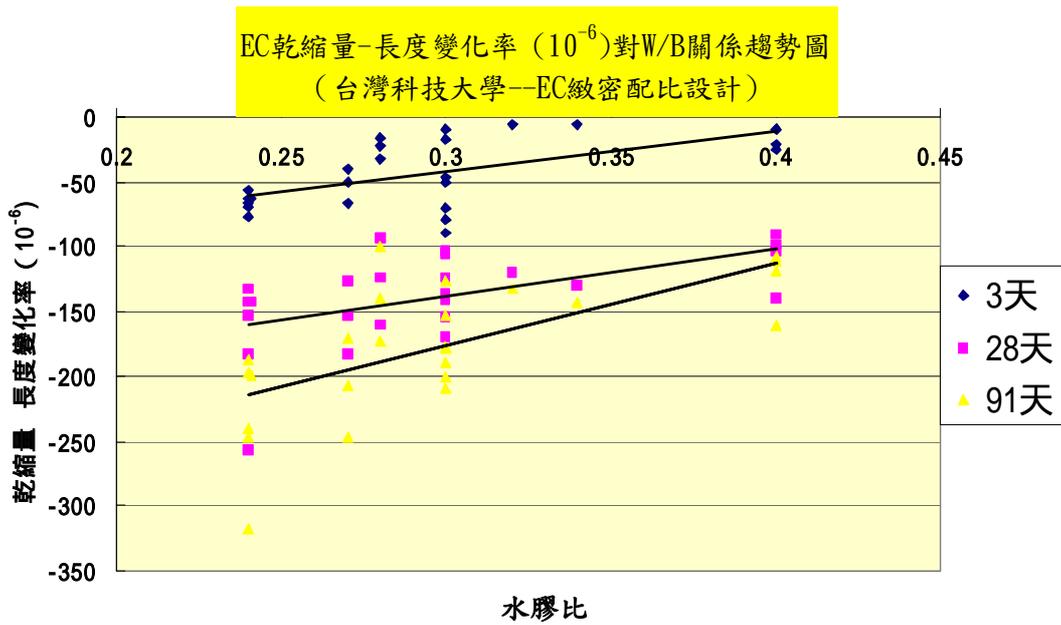


圖 2-22 不同時間下，HPC 乾縮量與 W/B 關係圖

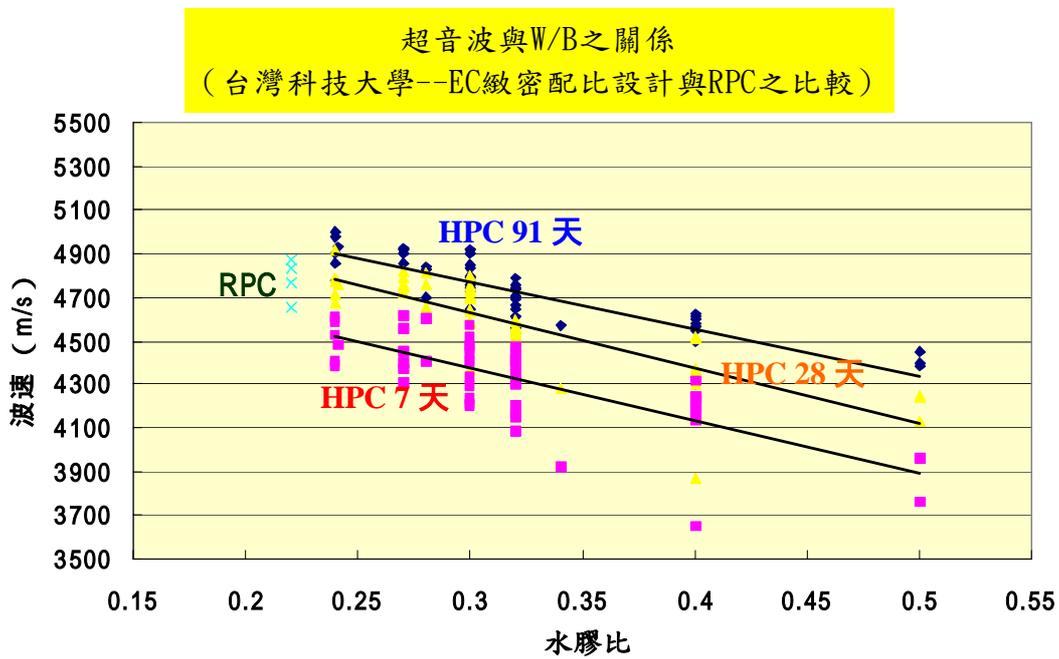
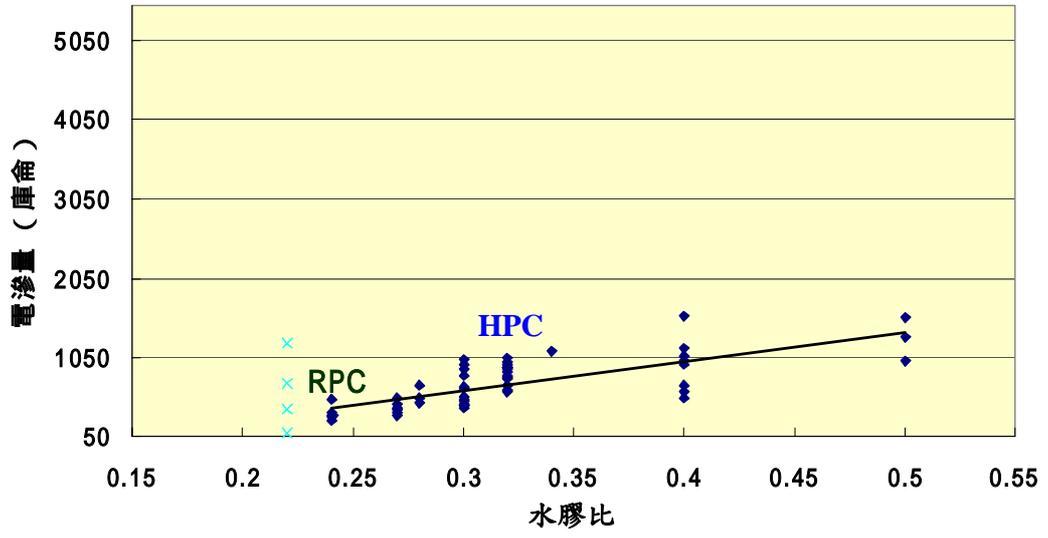


圖 2-23 HPC 與 RPC 超音波比較圖

電滲與W/B之關係
 (台灣科技大學--EC緻密配比設計與RPC之比較)



第三章 活性粉混凝土配比設計邏輯及理論

3.1 RPC 設計之背景資料

本研究計劃利用 RPC 補強傳統鋼筋混凝土(RC)構件，因此，必須考量 RPC 耐久性問題，以及瞭解被修補材料(RC)本身及修補材料(RPC)的性質，才能成功地進行耐久性的修補工作，混凝土結構物現況評估與耐久性修復流程如圖 3-1 所示^[17]，修補工作應先由確認問題、修補評估到驗證修補效果，建立標準作業程序，以保證耐久性品質，當鋼筋混凝土結構物位處在離海岸線 1 公里左右以內的港灣地區時，很容易造成相當嚴重的構造物鋼筋腐蝕問題，所以，修補材料本身也必須符合耐蝕的原則。

3.1.1 傳統鋼筋混凝土構件的性質

傳統鋼筋混凝土的設計大體依據建築技術規則，但耐久性的考量一向都被忽略，如果只依據設計者的要求強度作為基準，抗壓強度設計通常以 210 kgf/cm² ($f'_c=3,000$ psi) 為主，換言之，過去的 RC 設計往往僅重視安全性而已，所以結構體強度經過多年老化後，這些混凝土抗壓強度絕大多數情況下都會低到 210 kgf/cm² (3,000 psi) 以下，因此，所選用的修補材料性質與基材之差異性不可過高，否則容易產生脫離(Debonding)的現象。

3.1.2 修補材料的選材原則

修補材料的選擇，必須考慮其與底材間之相容性，並非一定是最強的材料。而是在一定時間內，能承受因體積改變、化學及電化學影響所產生應力改變，不致於有力量鬆弛，或劣化現象，並能保持原設計要求的物理性、化學性、電化學性及體積穩定性等，才能獲致較好的耐久性品質，此乃修補作業最主要的「材料相容性」問題。影響修補材料相容性因素相當多，其中以相對體積變化所產生的問題為最重要。

1. 體積穩定性

修補材料和底層混凝土在溫度及濕度變化下，須能產生一致的體積變化，否則會降低修補效果及耐久性。影響體積穩定性的因素包含收縮、膨脹、彈性模數及潛變。許多材料在結合時，常由於含水量及溫度改變而產生體積變化，如硬固混凝土及粘性材料之間的介面情況，如果在某一材料上產生拉應力，粘接處相對應的另一種材料上則會產生壓應力，致使介面產生剪應力，很可能會導致剪力破壞。同樣地，不同材料間過度差異的熱收縮量及過度不同的彈性係數也將導致類似之力學行為及破壞。選擇修補材料時，應能掌握其乾縮過程與行為，以使用類似底層材料乾縮量的材料為佳；乾縮一般只是水泥漿的特性，骨材與鋼筋則有束制體積變化的功能，當乾縮發生時，相對的修補材料將產生張應力，當張應力大於修補材料的張力強度時立即產生龜裂，這種現象肇因於修補介面的應力集中現象，這是造成修補工作失敗的常見情形。新修補材料的承載力，會因材料的乾縮特性而局部或全部喪失。對於「小面積」的修補工作，為能達到耐久性的目的，修補材料與週遭鋼筋和混凝土變形一致性是相當重要的，其重要性高於修補材料的承載能力。對於「大面積」或「大型構件」的修補工作，為了保持結構體勁度，修補材料不僅需能穩定的與構件結合，所新增加的承載能力也應能足以分擔部分外加载重。

修補材料的熱膨脹係數與彈性模數屬於材料性質，較容易量化，在選擇考量上也比考量材料間的乾縮問題較容易，理想修補材料乾縮值應為零，不過，修補材料之乾縮值應在何種範圍內較適宜，依據 1987 年美國「亞伯塔交通設施事業要求」，針對混凝土補修材料，以 ASTM C157 乾縮試驗規定，評估 46 種修補材料的性質，發現許多通俗修補材的乾縮值，遠超過混凝土 30 天齡期乾縮值(0.05%)甚多。大部分修補材料之張力強度介於 14 至 69 kgf/cm² (1.4 to 6.9 MPa) 之間，乾縮所導致之張應力估計於 0.025%時，即可產生 70 kgf/cm² 力量，因此，大部份修補材料過一陣子即會失敗^[42]。ASTM C928-91 對粘結性修補材料之乾縮值限制在 0.15%以下，約為正常混凝土乾縮

值的 3 倍，這種限制似乎太寬鬆，可能產生修補效果上的嚴重缺失。

雖然，大部份材料供應商均宣稱修補材料俱膨脹性，不收縮性，收縮補償性及高強度性，然而為達到耐久性修補工作目標，應要具「低乾縮性」及「適當強度」為宜，因為如為達到高強度之修補材料而採用高水泥漿量時，可能意味此種材料將具有高收縮性，長期使用之後果是剝落而失去效果。修補材料之乾縮值分類如表 3-1。

2.化學及電化學相容性

修補材料與底材的化學相容性甚重要，修補材料與水泥，或混凝土底材性質，包含離子含量、 C_3A 含量及氯離子含量等相容性必須加以重視。修補材料與鋼筋，其它金屬埋設物，被覆保護膜，及其它應用於表面修補材料之反應方式也須考慮。具有中度 pH 值，到低度 pH 值的修補材料，無法對鋼筋提供太多保護。含氯離子的修補材料，如果包覆於結構體內，應考慮結構混凝土體內氯離子的移動，可能對鋼筋所造成的侵蝕作用。另外氣候環境的作用，可能使鋪面底部結露，水份將挾帶著鹼離子移到鋪面頂端，致使修補區域含有離子，而產生惡化作用。所以鋼筋混凝土修補工作必須注意電化學相容性，混凝土底層的電化學性質，與修補材料產生腐蝕電池之潛能應謹慎評估。在混凝土或水泥砂漿內鋼筋腐蝕過程中，可能因鋼筋表面的變化，導致 pH 值、氧濃度、氯離子濃度、濕度(氣)或溫度的差異，這些都足以造成腐蝕產生。修補材料的電阻係數也可能影響耐久性，具高電阻性材料，有隔離修補區域及未損壞區域之趨勢。另外，在修補區域及其餘混凝土間，有大量滲漏或氯離子集中時，鋼筋腐蝕效應變成集中於一區域，以致加速鋼筋腐蝕速率，引起修補材料或底層混凝土過早剝離損壞。

3.滲透一致性

一般從事修復工作之工程人員往往會認為使用低滲透性修補材料之效果較佳，然而決定修補效果的滲透考量並非如此，因為存在於修補區域或失去鍵結區域的貫穿性裂縫，常因漏水而造成積水現象，

會大幅減低修補材料的功能，另一方面，如果在修補面所產生的微裂縫與基材的較大裂縫連結時，也會因兩者滲透功效不一致，而降低修補成效及耐久性。「袋狀混凝土」(即俗稱的蜂窩現象)也是修補問題之一，在美國北部，為數上千的橋柱使用低滲透材料修補時，在蜂窩處往往發生袋狀的蒸氣遮障系統，當氣溫下降時，產生結露致水分在遮障內移動，混凝土內水溶性物質亦隨之擴散，反而造成加速惡化及損壞^[17]。台灣省澎湖跨海大橋及大多數座橋樑的修復亦有類似的問題發生。修補材料與混凝土產生衝突，會有不諧和及不相容的現象，當二者存在較大差異滲透性時，將影響修補結構物的耐久性質。

4. 介面鍵結性

修補材料與底材的相容性，主要考慮修補材料及混凝土底層介面間的諧和性，介面的鍵結力是修復單元彼此相互依存的主要因素，只要有益於發展介面的鍵結力，都能改善修補複合系統的結果。修補介面上很有可能承受來自體積變化、凍融、重力、衝擊及振動等現象所產生的應力，這些力量將沿鍵結線上發展。例如，橋面版上的修補材料會承受剪力，及因乾縮或受熱影響產生的拉應力及壓應力，承載重情況下同時產生壓力及剪力。

修補材料和底層混凝土介面間必須能達到強固的鍵結性，在受拉力情況下，其值僅視鍵結力強弱而定，但在受剪應力情況時，阻抗開裂的力量不僅受鍵結機構之影響，也受到與骨材的互鎖機構影響，乾淨而粗糙的介面足以發揮「互鎖功能」。如果僅使用修補材料及底層等兩相構件系統，而無法充分表現修補結構體的性質及耐久性時，則可考慮使用加入第三種介層材料所組成的三相修復系統模式，亦即為能達到鋼筋混凝土構造物耐久性修補成效，應同時考慮「修復材料」、「混凝土底層」及「介面接著特性」等三相系統。溫度、含水量及輻射熱等環境因素，也會影響介面性質。接觸區域厚度之決定，則是考慮在各種不同力量交互作用下，在介面上能產生及維持與黏結性區域具有足夠吸附性需求的所有個別材料厚度總和。

介於修補材料和混凝土底層間的複合結構體之附著性，如同將經凝結硬化的半固體修補材料，置於已硬固的混凝土面，所以影響附著力大小因素，包含底層混凝土本身材質及表面性質、修復材料本身性質、吸水性、附著力及修補材料在養護及未養護狀況下的附著適當性，為能採用一種適當的修復方法及材料，充分了解介面上，材料間的物理及化學反應程序顯得頗重要，當介面上黏著性逐漸減低而趨向硬化時，修補材料和混凝土底層間如同由膠水聯接後硬固，在這種情況下，鍵結強度受到「互鎖力」、「附著性」、「凝聚力」及「修復材料收縮因素」的總合影響，前3項因素可增鍵結強度，第4項則降低強度。

修補介面上的機械互鎖力，受到許多因素的影響，主要影響因素為混凝土底層的粗糙度及孔隙多寡，表面突出物的形式及尺寸，也必須考慮，過度平坦的表面，要增加鍵結強度，僅能從增加接觸區域面積著手。另外，其他影響鍵結強度因素為修補材料的凝聚力，其大小受鍵結料及礦物成分而定，因此，正確使用修補材料相當重要，但也不容易達到。

5.環境諧和性

通常修補工作失敗的原因，起因於外力引發張應力大於材料或介面上所能承受的力量極限度。例如，陽光及雨水反覆作用下，引起體積熱脹冷縮，極易超過修補介面上的張力強度，而產生龜裂、剝落、或斷裂，所以進行修補工作前，應蒐集環境及載重的有關資訊，只要環境性質經調查確定後，可選擇數種可供應用的材料，促使修補材料，考慮混凝土底層及介面之性能與環境諧和，而不發生劣化現象。

修補面上所產生的應力，可能肇因於體積變化及外加载重，無論新舊材料應有足夠「抵抗力」而不致發生損壞，然而要成功地達到良好修補表面承載功能的施作，是一項十分困難的工作，構件在壓力區域在破壞時如有大量材料損失，則受損部位將產生應力重分配，為能重新建立原結構設計載重行為，外部載重可使用暫時支撐，或千斤頂

反向支撐，隨即進行修補工作，將載重適當地分佈到修補後之結構上。

3.1.3 RPC 修補材的基本特性要求

根據以上之原則及資訊，修補之 RPC 須有下列設計準則。

1. 體積穩定性

必須控制水量 $< 170 \text{ kg/m}^3$ ，控制乾縮量小於 $500\mu\text{m}$ ，水灰比 > 0.42 ，儘量愈大愈佳，以防自生乾縮 (Autogenous shrinkage)

2. 化學及電化學相容性

材料以原來水泥基為素材，可達相容性質。

3. 滲透一致性

採用 RPC 具有絕佳的阻滲功能，對滲透性將有不良影響，然而 RPC 內含大量卜作嵐材料，一旦介面結露，將刺激卜作嵐材料與 RC 構件表面之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結合成為低密度 C-S-H 膠體，有利界面穩定性。

4. 介面鍵性質

RPC 材料與 RC 同質材，只要 RC 構件表面清洗乾淨，修補之 RPC 強度不要過高，以防產生界面應力集中而弱者產生脫膠現象即可。

5. 環境諧和性

RPC 水量過多時，環境造成之侵蝕通路將增大；水泥過多，則 C_3A 在海域下的劣化將加速，所以水量及水泥量採用低量將是明智之舉。

3.2 RPC 配比設計方法

3.2.1 RPC 設計理論

在國內，傳統 RPC 的設計均參考 1990 年代法國的配方加以修改，缺乏理論依據，考諸國內 HPC 之設計主要依據日本、ACI 或台科大緻

密配比的方法，然而這些混凝土配比設計理論方法不適合於粒徑甚小的水泥漿(paste)設計，所以必須採用 Fuller's Curve 來尋求達到緻密特性的配比設計。但由於最大粒徑為 30 號篩徑 (600 μm)，RPC 本質並非混凝土及砂漿，只是一種類似義大利麵(pasta)的漿體，所以設計前必須先將不同粒徑的粒料組合成一體，再控制水量來調整工作性。但是為了使 RPC 可用範圍擴大，本研究涵蓋至 HPC 的範圍，使修補材料的適用性提高，施工者有更大的選擇性。

3.2.2 Fuller'緻密配比設計

原有緻密配比設計的精神^[17, 58, 59]，主要在縮減水泥漿量，達到混凝土工程所需特性，其主要理論發展係由飛灰、砂及石三種粒料推演而來，在求出 α 、 β 後，由空隙放大 n 倍來涵蓋 $S \cdot S_i$ 之包裹漿量，此種配比方法的缺點是不易將個別的組成材料數目延伸至 3 項以上，而且將漿量放大 n 倍，也無法看出粒料表面包裹漿體之厚度變化及相對應之影響，所以必須以試誤法尋求較佳漿量，為尋求解決方案，原先考慮最佳顆粒級配時所使用的 Fuller 曲線可提供一可能解答^[60]，使用此理論時，先由 Fuller 曲線決定各固態材料之比例，再依此比率及量測出 V_v 孔隙率及計算出各材料之累積表面積，先以三種裹漿厚度作為初步的設計考量，計算 $V_p = V_v + S \cdot S_i$ ，再以『矩陣分析』數值法反推出混凝土配比，此配比理論中，係假設顆粒粒徑為圓球形，並且刻意區隔各材料之粒徑範圍。以下將此配方法的理論與實施過程作扼要的說明：

1. 由 Fuller's 理想曲線推算不同粒徑之體積比率

採用粒料理想級配曲線，如下式^[3-5]：

$$P = \left(\frac{d}{D} \right)^h, \quad h = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \dots\dots\dots (3-1)$$

式中 P ：小於粒徑 d 之粒料含量， D ：粒料之最大粒徑， d 為欲計算之粒料粒徑；由不同之 h 值可以描繪出累積粒徑透過圖及富勒曲線粒徑比值與粒徑倒數圖，如圖 3-2 及圖 3-3 所示。

(1) 粒料分佈分析之定義與理論^[61]

假設可資使用之個別粒料種類以 i 表示，共有 n 種， $i=1\sim n$ ，每一篩號上的粒料粒徑以 j 表示，總共 m 個篩號，故 $j=1\sim m$ ，則將某批混合粒料進行篩分析時，所得的篩分析資料可以下式表示：

$$k_j^* = P_{v,i} \cdot a_{i,j} \dots\dots\dots (3-2)$$

式中 $a_{i,j}$ ：(0~1)，混合粒料中第 i 種粒料在 j 號篩之留篩率；

$P_{v,i}$ ：(0~1)，混合粒料中第 i 種粒料之體積百分率 (% vol)， $i=1\sim n$ ；

k_j^* ：(0~1)，實際篩分析時，所有粒料在第 j 號篩上的留篩率實驗值， $j=1\sim m$ 。

k_j ：(0~1)，依 Fuller's curve 計算所得，所有粒料在第 j 號篩上留篩率理論值， $j=1\sim m$ 。

(2) 混合粒料級配曲線與理論曲線離散量 M ^[61]

依最小平方法運算離散量如下：

$$\begin{aligned} M = R^2 &= \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n P_{v,i} a_{i,j} - k_j \right)^2 \\ &= \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n-1} P_{v,i} a_{i,j} + P_{v,n} a_{n,j} - k_j \right)^2 \dots\dots\dots (3-3) \end{aligned}$$

因 $\sum_{i=1}^n P_{v,i} = 100\%$ ，所以可改寫為

$$P_{v,n} = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} P_{v,i} \dots\dots\dots (3-4)$$

將(3-4)代入(3-3)式中，整理可得

$$M = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n-1} a_{i,j} P_{v,i} + \left(1 - \sum_{i=1}^{n-1} P_{v,i} \right) a_{n,j} - k_j \right)^2$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n-1} a_{i,j} P_{v,i} - \sum_{i=1}^{n-1} a_{n,j} P_{v,i} + a_{n,j} - k_j \right)^2 \\
&= \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^{n-1} (a_{i,j} - a_{n,j}) P_{v,i} + a_{n,j} - k_j \right)^2 \dots\dots\dots (3-5)
\end{aligned}$$

對(3-5)式之 M 進行偏微分，可求出 M 增加量 (dM) 與 $P_{v,i}$ 之關係式。

$$dM = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial M}{\partial P_{v,i}} dP_{v,i} \dots\dots\dots (3-6)$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \times [((a_{1,1} P_{v,1} + a_{2,1} P_{v,2} + \dots + a_{n-1,1} P_{v,n-1}) - a_{n,1} (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) + a_{n,1} - k_1) \\
&\quad \times ((a_{1,1} dP_{v,1} + a_{2,1} dP_{v,2} + \dots + a_{n-1,1} dP_{v,n-1}) - a_{n,1} (dP_{v,1} + dP_{v,2} + \dots + dP_{v,n-1})) \\
&\quad + ((a_{1,2} P_{v,1} + a_{2,2} P_{v,2} + \dots + a_{n-1,2} P_{v,n-1}) - a_{n,2} (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) + a_{n,2} - k_2) \\
&\quad \times ((a_{1,2} dP_{v,1} + a_{2,2} dP_{v,2} + \dots + a_{n-1,2} dP_{v,n-1}) - a_{n,2} (dP_{v,1} + dP_{v,2} + \dots + dP_{v,n-1})) \\
&\quad + \dots \\
&\quad + ((a_{1,m} P_{v,1} + a_{2,m} P_{v,2} + \dots + a_{n-1,m} P_{v,n-1}) - a_{n,m} (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) + a_{n,m} - k_m) \\
&\quad \times ((a_{1,m} dP_{v,1} + a_{2,m} dP_{v,2} + \dots + a_{n-1,m} dP_{v,n-1}) - a_{n,m} (dP_{v,1} + dP_{v,2} + \dots + dP_{v,n-1}))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \times \{ dP_{v,1} \times ([a_{1,1} \quad a_{1,2} \quad \dots \quad a_{1,m}] - [a_{n,1} \quad a_{n,2} \quad \dots \quad a_{n,m}]) \\
&\quad \times \left(\begin{bmatrix} P_{v,1} a_{1,1} + P_{v,2} a_{2,1} + \dots + P_{v,n-1} a_{n-1,1} \\ P_{v,1} a_{1,2} + P_{v,2} a_{2,2} + \dots + P_{v,n-1} a_{n-1,2} \\ \vdots \\ P_{v,1} a_{1,m} + P_{v,2} a_{2,m} + \dots + P_{v,n-1} a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) a_{n,1} \\ (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) a_{n,2} \\ \vdots \\ (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) a_{n,m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) \\
&\quad + dP_{v,2} \times ([a_{2,1} \quad a_{2,2} \quad \dots \quad a_{2,m}] - [a_{n,1} \quad a_{n,2} \quad \dots \quad a_{n,m}]) \\
&\quad \times \left(\begin{bmatrix} P_{v,1} a_{1,1} + P_{v,2} a_{2,1} + \dots + P_{v,n-1} a_{n-1,1} \\ P_{v,1} a_{1,2} + P_{v,2} a_{2,2} + \dots + P_{v,n-1} a_{n-1,2} \\ \vdots \\ P_{v,1} a_{1,m} + P_{v,2} a_{2,m} + \dots + P_{v,n-1} a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) a_{n,1} \\ (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) a_{n,2} \\ \vdots \\ (P_{v,1} + P_{v,2} + \dots + P_{v,n-1}) a_{n,m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) \\
&\quad + \dots \\
&\quad + dP_{v,n-1} \times ([a_{n-1,1} \quad a_{n-1,2} \quad \dots \quad a_{n-1,m}] - [a_{n,1} \quad a_{n,2} \quad \dots \quad a_{n,m}])
\end{aligned}$$

$$\times \left(\begin{bmatrix} P_{v,1} a_{1,1} + P_{v,2} a_{2,1} + \cdots + P_{v,n-1} a_{n-1,1} \\ P_{v,1} a_{1,2} + P_{v,2} a_{2,2} + \cdots + P_{v,n-1} a_{n-1,2} \\ \vdots \\ P_{v,1} a_{1,m} + P_{v,2} a_{2,m} + \cdots + P_{v,n-1} a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (P_{v,1} + P_{v,2} + \cdots + P_{v,n-1}) a_{n,1} \\ (P_{v,1} + P_{v,2} + \cdots + P_{v,n-1}) a_{n,2} \\ \vdots \\ (P_{v,1} + P_{v,2} + \cdots + P_{v,n-1}) a_{n,m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) \dots (3-7)$$

當 M 有極大或極小值時 $dM = 0$ ，為使(3-7)式在任意 $dP_{v,1}$ 、 $dP_{v,2} \dots dP_{v,n-1}$ 下均成立，則 $dP_{v,i}$ 後之乘式必為零，可得下列 $n-1$ 個條件式(3-8)~(3-10)

$$\begin{aligned} & \left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \\ & \times \left(\left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{n-1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \cdots & a_{n-1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,m} & a_{2,m} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,1} & \cdots & a_{n,1} \\ a_{n,2} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,m} & a_{n,m} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} P_{v,1} \\ P_{v,2} \\ \vdots \\ P_{v,n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) = 0 \dots (3-8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\begin{bmatrix} a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \\ & \times \left(\left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{n-1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \cdots & a_{n-1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,m} & a_{2,m} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,1} & \cdots & a_{n,1} \\ a_{n,2} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,m} & a_{n,m} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} P_{v,1} \\ P_{v,2} \\ \vdots \\ P_{v,n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) = 0 \dots (3-9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\begin{bmatrix} a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \\ & \times \left(\left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{n-1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \cdots & a_{n-1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,m} & a_{2,m} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,1} & \cdots & a_{n,1} \\ a_{n,2} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,m} & a_{n,m} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} P_{v,1} \\ P_{v,2} \\ \vdots \\ P_{v,n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) = 0 \dots (3-10) \end{aligned}$$

將上式(3-8)至(3-10)整合得下式(3-11)

$$\left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right)$$

$$\times \left(\left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{n-1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \cdots & a_{n-1,2} \\ & & \vdots & \\ a_{1,m} & a_{2,m} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,1} & \cdots & a_{n,1} \\ a_{n,2} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,2} \\ & & \vdots & \\ a_{n,m} & a_{n,m} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} P_{v,1} \\ P_{v,2} \\ \vdots \\ P_{v,n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \right) = 0 \dots\dots (3-11)$$

將上式中係數移項整理得

$$\begin{aligned} & \left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,m} \\ & & \vdots & \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \\ & & \vdots & \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \\ & \times \left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{n-1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \cdots & a_{n-1,2} \\ & & \vdots & \\ a_{1,m} & a_{2,m} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,1} & \cdots & a_{n,1} \\ a_{n,2} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,2} \\ & & \vdots & \\ a_{n,m} & a_{n,m} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} P_{v,1} \\ P_{v,2} \\ \vdots \\ P_{v,n-1} \end{bmatrix} \\ & = \left(\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,m} \\ & & \vdots & \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \\ & & \vdots & \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \times \left(\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} \right) \dots\dots (3-12) \end{aligned}$$

$$\text{令 } [A]_{i,j} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{n-1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \cdots & a_{n-1,2} \\ & & \vdots & \\ a_{1,m} & a_{2,m} & \cdots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} \text{、} [A]_{n,j} = \begin{bmatrix} a_{n,1} \\ a_{n,2} \\ \vdots \\ a_{n,m} \end{bmatrix} \text{、} [P_v]_{n-1} = \begin{bmatrix} P_{v,1} \\ P_{v,2} \\ \vdots \\ P_{v,n-1} \end{bmatrix} \text{、}$$

$$[k]_m = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \text{、} [1]_{n-1 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

因此可將(3-12)式、進一步簡化為(3-13)式

$$\left([A]_{i,j}^T - [1]_{n-1 \times 1} [A]_{n,j}^T \right) \left([A]_{i,j} - [A]_{n,j} [1]_{n-1 \times 1}^T \right) [P_v]_{n-1} = \left([A]_{i,j}^T - [1]_{n-1 \times 1} [A]_{n,j}^T \right) \left([k]_m - [A]_{n,j} \right) \dots\dots (3-13)$$

(3-13)式兩邊同乘以 $\left\{ \left([A]_{i,j}^T - [1]_{n-1 \times 1} [A]_{n,j}^T \right) \left([A]_{i,j} - [A]_{n,j} [1]_{n-1 \times 1}^T \right) \right\}^{-1}$ ，即可求得各粒料最佳用量 ($P_{v,1}$ 、 $P_{v,2}$... $P_{v,n-1}$)

$$[P_v]_{n-1} = \left[\left([A]_{i,j}^T - [1]_{n-1 \times 1} [A]_{n,j}^T \right) \left([A]_{i,j} - [A]_{n,j} [1]_{n-1 \times 1}^T \right) \right]^{-1} \times \left([A]_{i,j}^T - [1]_{n-1 \times 1} [A]_{n,j}^T \right) \left([k]_n - [A]_{n,j} \right) \dots \dots (3-14)$$

將所得結果代入(3-4)式即可求得 $P_{v,n}$ 值

經由(3-1)式至(3-14)式運算後，即可得到在所選定的 Fuller's curve 曲線下，各粒料的最佳用量。

由此可推算出粗骨材、細骨材及飛灰之比例為 $P_{v,1} : P_{v,2} : P_{v,3}$ ；粒料各篩號理想留篩百分率如表 3-2 所示。

3.3 RPC 材料粒徑分析

本研究所使用之材料如下：

1. 石英砂及石英粉：取自三義地區之石英砂礦，經過研磨處理所得，其粒徑以通過之篩號區分，共有四種，分別為#30 (600 μ m)，#50 (300 μ m)，#100 (150 μ m)，#200 (75 μ m)，石英粉粒徑在(2.41 μ m~15.02 μ m)之間。
2. 矽灰：來自澳大利亞的濃縮矽灰，粒徑範圍為 0.67 μ m~5.02 μ m。
3. 水泥：台灣水泥第 I 型水泥。
4. 爐石：中聯爐石特細爐石粉；#6,000 及#8,000 二種。
5. 飛灰：台電興達火力電廠 F 級飛灰。
6. 基本材料粒徑分析如表 3-3 所示。

3.4 利用 Fuller's 理想曲線方程式推算 RPC 中不同材料之體積比率

3.4.1 添加爐石及飛灰

添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 計算例，如表 3-4 所示。

添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 圖，如圖 3-4 所示。

添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 計算例，如表 3-5 所示。

添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 圖，如圖 3-5 所示。

3.4.2 添加爐石

添加爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 計算例，如表 3-6 所示。

添加爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 圖，如圖 3-6 所示。

添加爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 計算例，如表 3-7 所示。

添加爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 圖，如圖 3-7 所示。

3.4.3 不添加飛灰及爐石

不添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 計算例，如表 3-8 所示。

不添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 圖，如圖 3-8 所示。

不添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 計算例，如表 3-9 所示。

不添加飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 圖，如圖 3-9 所示。

3.5 RPC 配比設計流程

RPC 配比設計流程圖，如圖 3-10 所示，並敘述於下：

1. 由實驗求得材料基本性質(比重、吸水率、篩分析...)

2. 由 Fuller's curve : $P = \left(\frac{d}{D}\right)^h$, 選定最大篩號(D)與 Fuller's curve 次方數(h)後, 由骨材篩分析資料利用最小平方法, 求最趨近 Fuller's curve 理論曲線解, 得到骨材使用比率($P_{v,1}$ 、 $P_{v,2}$... $P_{v,n}$)。
3. 得到骨材使用比率後, 依比例混合不同粒徑骨材, 進行乾搗單位重試驗, 由實驗可得堆積單位並依之計算剩餘空隙率。
4. 經由步驟 2 與步驟 3 後, 選擇適宜骨材架構, 以相同裹漿厚度與水膠比進行配比試拌量測混凝土工作性, 在比較混凝土流動性質後, 選擇最佳骨材架構所對應之 Fuller's curve, 作為實驗配比使用之理論曲線。
5. 選定實驗變數進行配比試算(所選定之配比參數為: $t \leftrightarrow \mu m$ 、 W/B), 求得粗和細骨材、飛灰、爐石、矽灰、水泥、水及強塑劑用量, 依實驗性質選擇合適配比。
6. 試拌調整配比強塑劑用量。
7. 依據強塑劑用量調整混凝土拌合水量, 大量拌合澆置試驗所需試體。
8. 量測混凝土之硬固與耐久性質。
9. 進行資料分析。

表 3-1 修補材料乾縮量範圍 ^[42]

乾縮量區分	範圍(%)
低 值	<0.05
中 值	0.05~0.1
高 值	0.1~0.3

※乾縮值是以混凝土乾縮值 0.05% 為基準

表 3-2 粒料各篩號理想留篩百分率

篩號	飛灰	細粒料範圍					粗粒料範圍 D_{max}					
	小於 #100	#100	#50	#30	#16	#8	#4	3/8"	1/2"	3/4"	1"	
標稱孔徑 $d_{i,j}$ (mm)	—	0.15	0.30	0.60	1.18	2.36	4.75	9.5	12.5	19.0	25.0	
粒徑編號(j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
粒料種類 (i)	粗粒料 i=1	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$	$a_{1,6}$	$a_{1,7}$	$a_{1,8}$	$a_{1,9}$	$a_{1,10}$	$a_{1,11}$
	細粒料 i=2	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$	$a_{2,6}$	$a_{2,7}$	$a_{2,8}$	$a_{2,9}$	$a_{2,10}$	$a_{2,11}$
	飛灰 i=3	$a_{3,1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
理想留篩率 k_j	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	
D=12.5 mm $k_j, (%)$	10.95	4.53	6.42	8.82	12.73	18.19	25.53	12.82	0	0	0	
$K_{ss,j}, (1/m)$	-	28853.90	14426.95	7267.43	3667.87	1828.80	911.18	552.33	392.18	276.16	—	
範例：3"/4 篩之 $K_{ss,j}$: $K_{ss,j} = \frac{6}{(\ln d_{i,j+1} - \ln d_{i,j})} \left(\frac{1}{d_{i,j}} - \frac{1}{d_{i,j+1}} \right) = 276.16$												

表 3-3 RPC 基本材料粒徑分析

材 料	平均粒徑 (μm)	比重	粒徑分佈 (μm)
矽灰	1.5	2.2	0.67~ 5.02
石英粉	6.85	2.7	2.41~15.02
炉石 6000	7.03	2.85	2.41~15.02
炉石 8000	4.43	2.85	1.39~10.42
飛灰	23	2.168	6.02~54.02
石英砂#30	600	2.624	
石英砂#50	300	2.578	
石英砂#100	150	2.542	
石英砂#200	75	2.541	

表 3-4 含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=841$) 計算例

$D_{MAX}(\mu\text{m})=841$	h = 0.333			h = 0.4		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	89.36%	10.64%	0.1100	87.37%	12.63%	0.1312
石英砂#50	70.95%	18.42%	0.1871	66.21%	21.15%	0.2159
石英砂#100	56.32%	14.62%	0.1465	50.18%	16.03%	0.1613
石英砂#200	44.71%	11.61%	0.1162	38.03%	12.15%	0.1222
飛灰	26.16%	18.55%	0.1585	19.98%	18.05%	0.1549
石英粉	22.86%	3.30%	0.0352	16.99%	2.99%	0.0320
爐石	17.52%	5.34%	0.0599	12.34%	4.64%	0.0524
矽灰	12.15%	17.52%	0.1519	7.95%	12.34%	0.1075
$D_{MAX}(\mu\text{m})=841$	h = 0.45			h = 0.5		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	85.90%	14.10%	0.1466	84.47%	15.53%	0.1617
石英砂#50	62.88%	23.02%	0.2353	59.73%	24.74%	0.2530
石英砂#100	46.03%	16.85%	0.1698	42.23%	17.49%	0.1764
石英砂#200	33.70%	12.34%	0.1243	29.86%	12.37%	0.1247
飛灰	16.33%	17.37%	0.1493	13.36%	16.51%	0.1420
石英粉	13.61%	2.72%	0.0292	10.90%	2.45%	0.0262
爐石	9.50%	4.11%	0.0464	7.31%	3.59%	0.0406
矽灰	5.80%	9.50%	0.0829	4.22%	7.31%	0.0638

表 3-5 含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$) 計算例

$D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$	h = 0.333			h = 0.4		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	79.83%	20.17%	0.2078	76.30%	23.70%	0.2450
石英砂#50	63.38%	16.46%	0.1665	57.82%	18.47%	0.1876
石英砂#100	50.32%	13.06%	0.1304	43.82%	14.00%	0.1402
石英砂#200	39.94%	10.37%	0.1035	33.21%	10.61%	0.1062
飛灰	23.37%	16.57%	0.1411	17.45%	15.76%	0.1346
石英粉	20.42%	2.95%	0.0313	14.83%	2.61%	0.0278
爐石	15.65%	4.77%	0.0533	10.78%	4.06%	0.0455
矽灰	10.86%	15.65%	0.1352	6.95%	10.78%	0.0934
$D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$	h = 0.45			h = 0.5		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	73.76%	26.24%	0.2714	71.31%	28.69%	0.2968
石英砂#50	54.00%	19.76%	0.2009	50.42%	20.89%	0.2122
石英砂#100	39.53%	14.47%	0.1450	35.65%	14.77%	0.1480
石英砂#200	28.94%	10.59%	0.1061	25.21%	10.44%	0.1046
飛灰	14.02%	14.91%	0.1274	11.27%	13.94%	0.1191
石英粉	11.69%	2.34%	0.0249	9.21%	2.07%	0.0220
爐石	8.16%	3.53%	0.0396	6.18%	3.03%	0.0340
矽灰	4.98%	8.16%	0.0708	3.57%	6.18%	0.0536

表 3-6 不含飛灰之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=841$) 計算例

$D_{MAX}(\mu\text{m})=841$	h = 0.333			h = 0.4		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	89.36%	10.64%	0.1095	87.37%	12.63%	0.1292
石英砂#50	70.95%	18.42%	0.1863	66.21%	21.15%	0.2126
石英砂#100	56.32%	14.62%	0.1459	50.18%	16.03%	0.1589
石英砂#200	44.71%	11.61%	0.1158	38.03%	12.15%	0.1204
石英粉	22.86%	21.86%	0.2316	16.99%	21.04%	0.2215
爐石	17.52%	5.34%	0.0597	12.34%	4.64%	0.0516
矽灰	12.15%	17.52%	0.1513	7.95%	12.34%	0.1058
$D_{MAX}(\mu\text{m})=841$	h = 0.45			h = 0.5		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	85.90%	14.10%	0.1437	84.47%	15.53%	0.1580
石英砂#50	62.88%	23.02%	0.2306	59.73%	24.74%	0.2472
石英砂#100	46.03%	16.85%	0.1664	42.23%	17.49%	0.1724
石英砂#200	33.70%	12.34%	0.1218	29.86%	12.37%	0.1218
石英粉	13.61%	20.09%	0.2108	10.90%	18.96%	0.1984
爐石	9.50%	4.11%	0.0455	7.31%	3.59%	0.0397
矽灰	5.80%	9.50%	0.0812	4.22%	7.31%	0.0624

表 3-7 不含飛灰之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu m) = 1180$) 計算例

$D_{MAX}(\mu m) = 1180$	h = 0.333			h = 0.4		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	79.83%	20.17%	0.2070	76.30%	23.70%	0.2418
石英砂#50	63.38%	16.46%	0.1659	57.82%	18.47%	0.1851
石英砂#100	50.32%	13.06%	0.1299	43.82%	14.00%	0.1383
石英砂#200	39.94%	10.37%	0.1031	33.21%	10.61%	0.1048
石英粉	20.42%	19.52%	0.2062	14.83%	18.38%	0.1929
爐石	15.65%	4.77%	0.0532	10.78%	4.06%	0.0449
矽灰	10.86%	15.65%	0.1347	6.95%	10.78%	0.0922
$D_{MAX}(\mu m) = 1180$	h = 0.45			h = 0.5		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	73.76%	26.24%	0.2668	71.31%	28.69%	0.2911
石英砂#50	54.00%	19.76%	0.1974	50.42%	20.89%	0.2082
石英砂#100	39.53%	14.47%	0.1425	35.65%	14.77%	0.1451
石英砂#200	28.94%	10.59%	0.1043	25.21%	10.44%	0.1026
石英粉	11.69%	17.25%	0.1805	9.21%	16.01%	0.1671
爐石	8.16%	3.53%	0.0390	6.18%	3.03%	0.0334
矽灰	4.98%	8.16%	0.0695	3.57%	6.18%	0.0525

表 3-8 不含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu m) = 841$) 計算例

$D_{MAX}(\mu m) = 841$	h = 0.333			h = 0.4		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	89.36%	10.64%	0.1119	87.37%	12.63%	0.1317
石英砂#50	70.95%	18.42%	0.1905	66.21%	21.15%	0.2167
石英砂#100	56.32%	14.62%	0.1491	50.18%	16.03%	0.1620
石英砂#200	44.71%	11.61%	0.1183	38.03%	12.15%	0.1227
石英粉	26.17%	18.54%	0.1993	19.99%	18.04%	0.1921
矽灰	12.15%	26.17%	0.2310	7.95%	19.99%	0.1747
$D_{MAX}(\mu m) = 841$	h = 0.45			h = 0.5		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	85.90%	14.10%	0.1462	84.47%	15.53%	0.1604
石英砂#50	62.88%	23.02%	0.2346	59.73%	24.74%	0.2510
石英砂#100	46.03%	16.85%	0.1693	42.23%	17.49%	0.1750
石英砂#200	33.70%	12.34%	0.1239	29.86%	12.37%	0.1237
石英粉	16.34%	17.36%	0.1839	13.36%	16.50%	0.1740
矽灰	5.80%	16.34%	0.1421	4.22%	13.36%	0.1157

表 3-9 不含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$) 計算例

$D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$	h = 0.333			h = 0.4		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	79.83%	20.17%	0.2111	76.30%	23.70%	0.2458
石英砂#50	63.38%	16.46%	0.1692	57.82%	18.47%	0.1882
石英砂#100	50.32%	13.06%	0.1324	43.82%	14.00%	0.1407
石英砂#200	39.94%	10.37%	0.1051	33.21%	10.61%	0.1066
石英粉	23.38%	16.56%	0.1770	17.45%	15.76%	0.1669
矽灰	10.86%	23.38%	0.2052	6.95%	17.45%	0.1518
$D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$	h = 0.45			h = 0.5		
材料	過百分率	理想留篩率	重量比	過百分率	理想留篩率	重量比
石英砂#30	73.76%	26.24%	0.2707	71.31%	28.69%	0.2948
石英砂#50	54.00%	19.76%	0.2004	50.42%	20.89%	0.2109
石英砂#100	39.53%	14.47%	0.1446	35.65%	14.77%	0.1470
石英砂#200	28.94%	10.59%	0.1058	25.21%	10.44%	0.1039
石英粉	14.03%	14.90%	0.1570	11.28%	13.93%	0.1462
矽灰	4.98%	14.03%	0.1214	3.57%	11.28%	0.0972

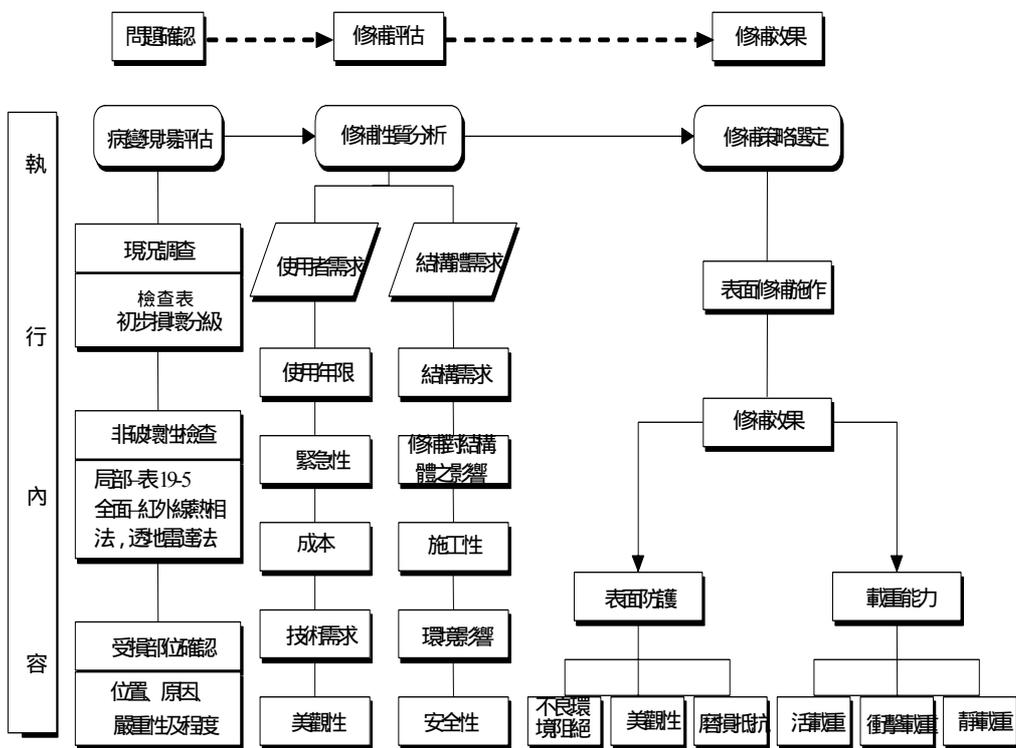


圖 3-1 混凝土結構物現況評估與耐久性修復流程^[17]

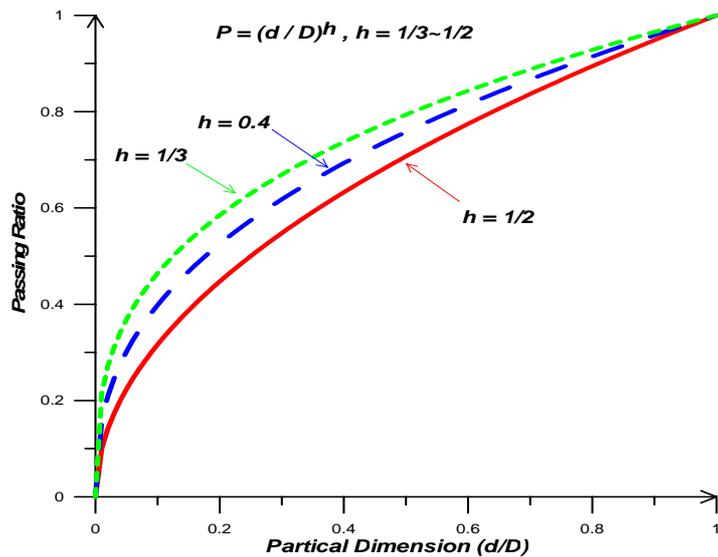


圖 3-2 富勒曲線(Fuller's curve) 累積粒徑透過圖^[17]

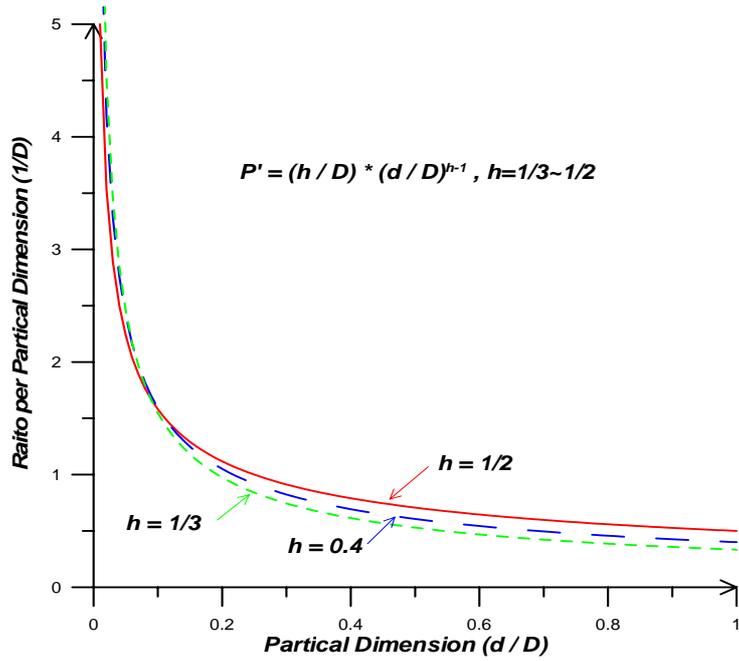


圖 3-3 富勒曲線粒徑比值與粒徑倒數圖 [17]

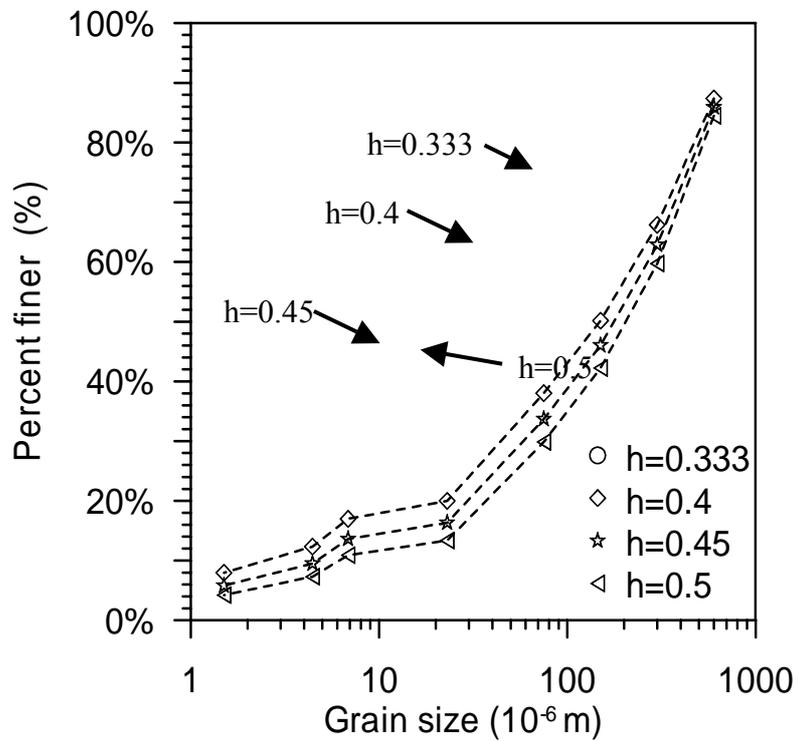


圖 3-4 含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu m) = 841$) 圖

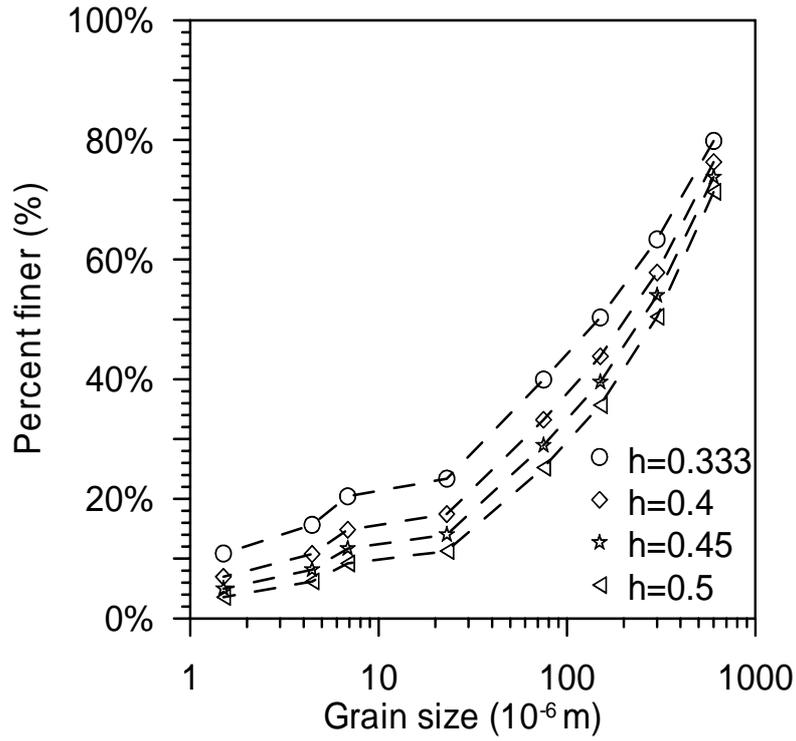


圖 3-5 含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 1180$) 圖

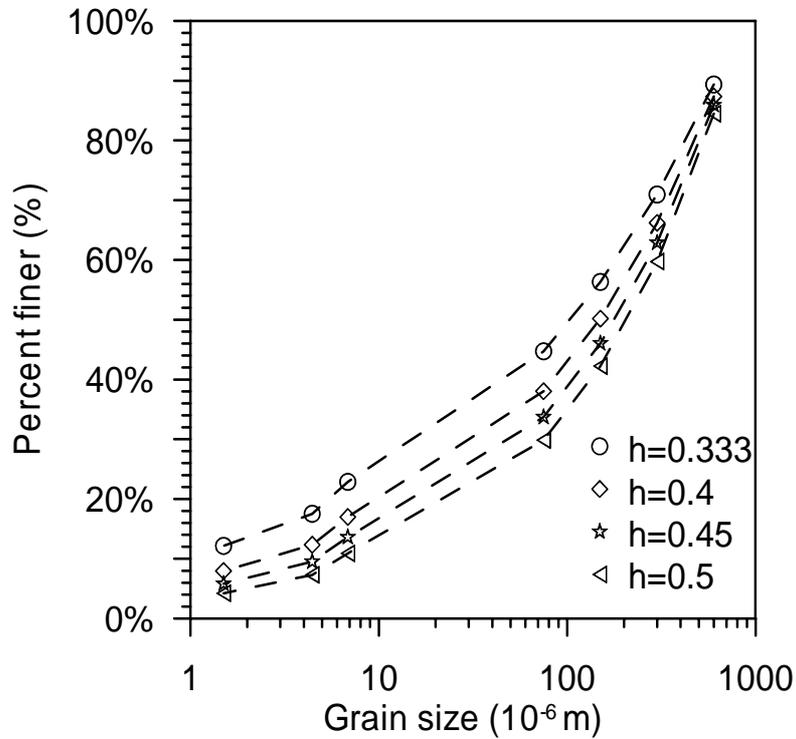


圖 3-6 不含飛灰之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m}) = 841$) 圖

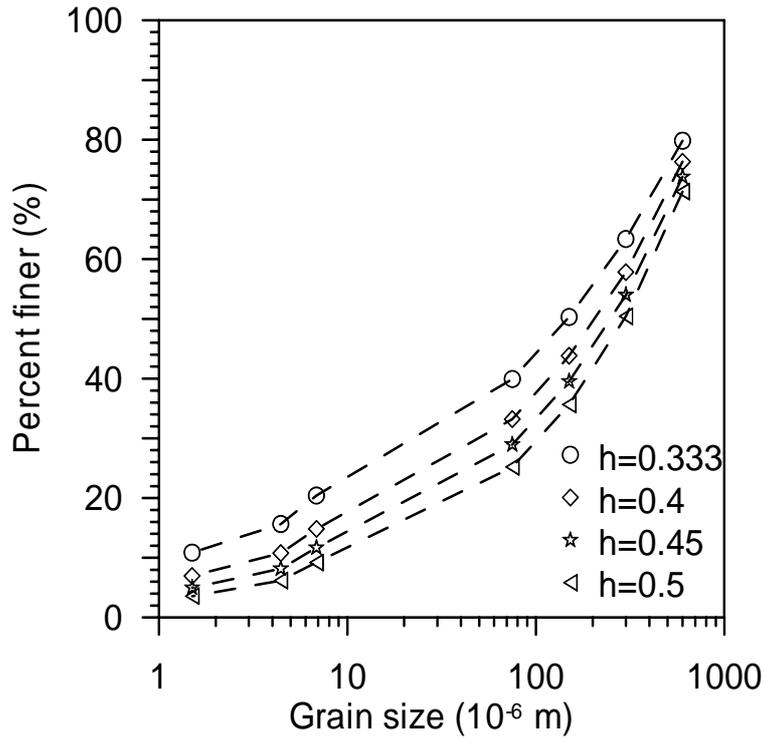


圖 3-7 不含飛灰之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$)圖

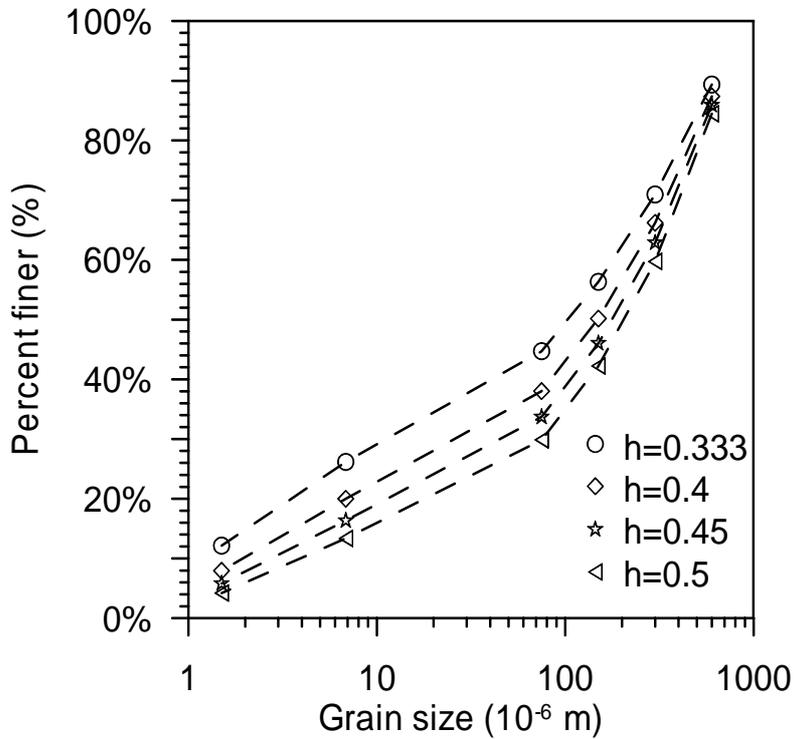


圖 3-8 不含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=841$)圖

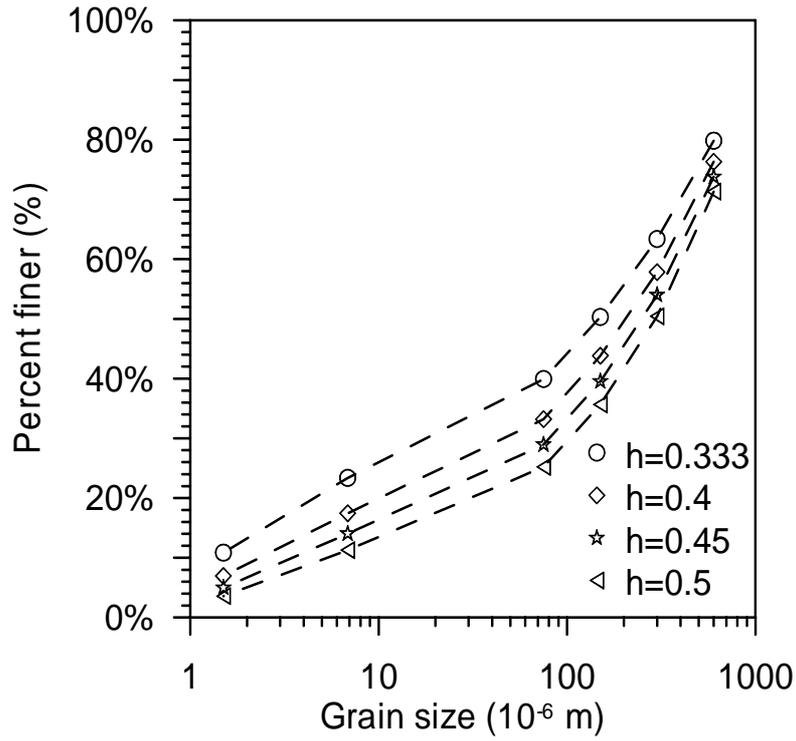


圖 3-9 不含飛灰及爐石之富勒曲線 ($D_{MAX}(\mu\text{m})=1180$)圖

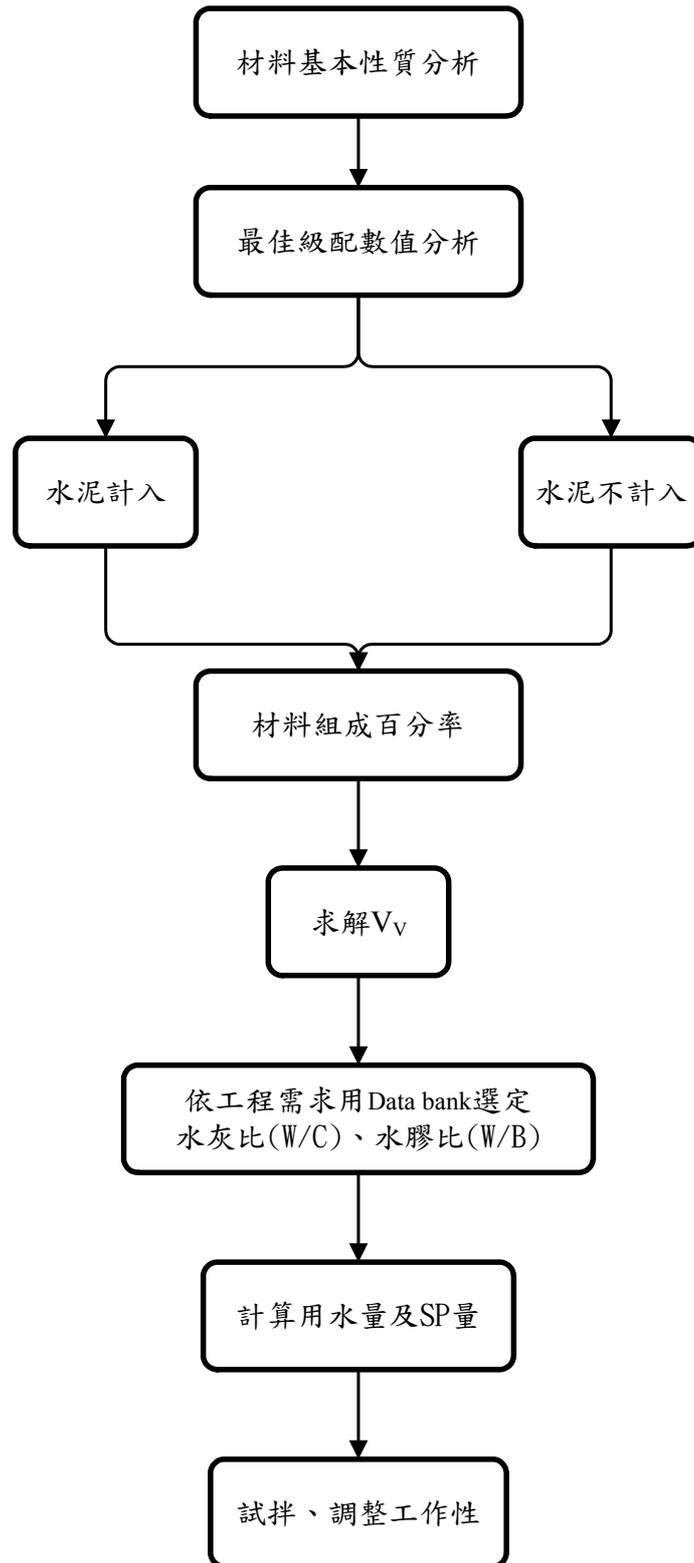


圖 3-10 RPC 配比設計流程圖

第四章 試驗計畫

4.1 試驗概述

本研究計畫試驗首先採用一般國內外之 RPC 配比設計，進行試體製作、基本性能、耐久性試驗及補強成效試驗，之後再以 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，進行相同之試體製作、基本性能、耐久性試驗及補強成效試驗，兩者成果可做綜合性討論。

另外，也將同時施作碳纖維貼片(CFRP)補強成效試驗，以了解 CFRP 與 RPC 兩種材料之補強成效特性，以作為工程實務上之參考。

4-2 試驗材料及 RPC 理論配比參數

1.水泥

RPC 在水泥的使用上，以卜特蘭二型水泥使用最多，如照片 4-1 所示，其次為卜特蘭五型水泥，。二型水泥粒徑在 10~16 μm 之間，因其具有中度水化熱及中度抗硫性，由於含有較少之 C_3A ，使水化熱降低，因此流變性質有所提升，且其抗硫特性有助材料之耐久性。本研究其化學成分與性質如表 4-1、4-2 所示。

2.石英砂

在粒料的選用上，RPC 以石英砂(矽砂)替代之，如照片 4-2 所示，增加整體材料均勻性。由於在 RPC 中水泥粒徑僅次於砂，其平均粒徑在 10~16 μm 之間，最大顆粒粒徑 80~100 μm ，因此必須避免其與砂之間互相干擾，因此最大粒徑限制在 600 μm 以下，而最小粒徑則大於 150 μm 。

3.矽灰

矽灰是生產矽及其合金的工業副產物，其主要成分為二氧化矽約

佔 90%，如照片 4-3 所示。在 RPC 的應用上，矽灰屬於卜作嵐材料，會和水泥的水化物產生二次水化反應—即卜作嵐反應，其可以移去水泥水化所生成的有害鹼性物質，並生成 C-S-H 膠體使混凝土的強度有進一步的成長。矽灰的比表面積約為 20,000 m²/kg，粒徑約為 0.67 μm~5.02 μm，為高反應性卜作嵐材料。物理及化學性質列於表 4-3。

4. 石英粉

石英粉是使用在高溫處理的 RPC 中，使用高溫可以激發其活性，而其發生最大活性時的粒徑為 5~25 μm，如照片 4-4 所示。在 RPC 中使用的石英粉其粒徑分佈為 2.41~15.02 μm，其顆粒大小與水泥顆粒相當，屬於相同的堆積層級。

5. 飛灰

採用飛灰為台電興達火力廠之 F 級飛灰(平均粒徑為 23 μm)，如照片 4-5 所示。

6. 爐石粉

採用爐石粉為中鋼生產之特細爐石粉，如照片 4-6 所示；#6000 (平均粒徑為 7.03 μm)及 #8000 (平均粒徑為 4.43 μm)二種。

7. 鋼纖維

使用丘林股份有限公司所提供之鋼纖維，如照片 4-7 所示，長為 16 mm，直徑 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，鋼纖維的添加，使得原來為脆性的混凝土材料變成韌性材料，由於混凝土與纖維間的握裹力，增加了混凝土之抗拉強度、耐衝擊性也制止了裂縫的延伸。

8. 強塑劑

本研究所使用之強塑劑為國內所生產的多元有機酸流動化第一型塑化劑，如照片 4-8 所示，成分為羧酸系強塑劑，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) 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。

9. 消泡劑

使用高正工商事業股份有限公司提供之消泡劑，型號為 S-90，如照片 4-9 所示，其具有表面消除氣泡之功用，將不必要之多餘氣泡打破，消泡劑一般配合強塑劑使用，建議用量為強塑劑溶液重量的 0.2%；本研究因使用 DMDA 配比，添加飛灰與爐石粉填充孔隙，因此消泡劑不為必需，可不使用。

10. 鋼筋

本研究中，混凝土拉拔試驗計畫採用的鋼筋為 CNS 560 所規定之 #3 竹節鋼筋，其標稱直徑為 10.1 mm，主要用來求得鋼筋與混凝土間之握裹強度；為避免鋼筋品質之差異性過大，試驗所使用的鋼筋為同一批並存放於實驗室，以隔離空氣中之水氣造成鋼筋表面鏽蝕而影響其效用。

11. 碳纖維強化複合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymers, CFRP)

採用的碳纖維貼片是由國內生產之 UCP-200 型 CFRP 貼片，如照片 4-10 所示。CFRP 貼片之物理性質及測試規範列於表 4-4。用 CFRP 貼片黏貼於混凝土圓柱試體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 4-11 所示，其物理性質與測

試規範列於表 4-5，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

硬化劑積層樹脂與底漆皆屬熱固性環氧樹脂，如照片 4-12 所示，其物理性質與測試規範列於表 4-6，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。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。

12. RPC 理論配比參數

(1)針對水泥漿的「質」：使用水膠比 0.20、0.17 進行設計，固定水泥漿的「厚度」為 0.4 μm 。

(2)最大粒徑 D：#16 與 #20。

(3)富勒曲線次方數 h：1/3、2/5 及 1/2。

4.3 試驗項目及試體數目

1. 流度試驗：每一個組別做三次取平均。
2. 抗壓、劈裂及抗彎試驗：齡期 3、7、14、28 天，每一個齡期使用三個試體。
3. 電阻試驗、超音波試驗：齡期 3、7、14、28 天，每一個齡期使用兩個試體。
4. 氣透試驗：齡期 7 與 28 天，每一個齡期使用兩個試體。
5. 快速氯離子滲透試驗：齡期 7 與 28 天，每一個齡期使用兩個試體。
6. 磨耗試驗：齡期 7 與 28 天，每一個齡期使用三個試體。

7. 碳化試驗：齡期 7、14 與 28 天，每一個齡期使用三個試體。
 8. 鋼筋拉拔試驗：齡期 7 天，每一個齡期使用三個試體。
 9. MIP 及 SEM 微觀試驗：齡期 7 天與 28 天，每一個齡期使用三個試體。
 10. 吸水試驗：齡期一個小時、1 天與 3 天，每一個齡期使用兩個試體。
 11. 圓柱補強試驗：齡期 7 天與 28 天，每一個齡期使用三個試體。
 12. 平板補強試驗：齡期 7 與 28 天，每一個齡期使用三個試體。
 13. 斜剪試驗：齡期 7 與 28 天，每一個齡期使用三個試體。
- (耐久性試驗中的氯離子滲透擴散試驗，即為快速氯離子滲透試驗)

4.4 混凝土試體製作與規劃

本研究主要將試驗分別針對活性粉混凝土之基本力學性質、耐久性、修補成效及微觀結構等四個部分，進行相關試驗，另外也會進行普通混凝土之基本力學試驗與耐久性試驗的部份，以方便比較兩種材料之優劣。

4.4.1 活性粉混凝土試體製作

活性粉混凝土在經過材料基本試驗得知其基本性質，於試拌階段完成後，將所有材料備齊，以進行各項試體製作，其步驟如下：

1. 依照配比表，秤其所需材料之重量。
2. 將水泥、砂、矽灰及石英粉同時加入攪拌鍋中，並以低速攪拌至顏色均勻。
3. 再將拌和水、強塑劑及消泡劑於拌和前混合，並全部加入乾拌均勻後的膠結料中。

4. 等待至有流動性出現後，再以分散之方式加入所需的鋼纖維。
5. 於所有材料加入拌和後，再以中速拌和 2 分鐘即拌和完成，接下來進行流度試驗。
6. 將拌和完成的活性粉混凝土分別澆灌入模子中，待其硬固後即可拆模。
7. 拆模後之試體經過高溫養護後，即放置於飽和石灰水中養護至達各齡期時，取出進行各項試驗。

4.4.2 CFRP 貼片補強混凝土試體製作

抗彎試體製作方面，先以普通混凝土灌製 $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}$ 之抗彎試體，拆模後在水中養護 28 天，養護完畢將試體置於空氣中 24 小時以上，待試體乾燥後，先上一層底漆，再靜置 24 小時，方可包覆 CFRP 貼片；抗彎試體包覆 CFRP 貼片，分為一層與二層補強，各試體斷面示意圖如圖 4-1 所示，試體測試齡期為貼覆完成後 3 天。

4.4.3 RPC 補強混凝土試體製作

RPC 補強混凝土試體分為抗彎及抗壓兩種。抗彎補強試體之普通混凝土製作與養護，與前述 CFRP 貼片補強混凝土相同，尺寸為 $150 \times 140 \times 500 \text{ mm}$ 、 $150 \times 130 \times 500 \text{ mm}$ 及 $130 \times 140 \times 500 \text{ mm}$ ，同時間也灌製 $150 \times 10 \times 500 \text{ mm}$ 、 $150 \times 20 \times 500 \text{ mm}$ 厚之 RPC 薄版，待 7 天或 28 天齡期一到，即進行 RPC 薄板之黏貼；另外，將 $130 \times 140 \times 500 \text{ mm}$ 的普通混凝土試體放置在 $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}$ 的木模中央，外圍澆灌 RPC 直到填滿模子為止，所有製作完成之試體尺寸皆為 $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}$ ，各試體斷面示意圖如圖 4-1 所示，試體測試齡期為貼覆完成後 3 天。

圓柱抗壓補強試體之普通混凝土製作，係將 $\phi 100 \times 20 \text{ mm}$ 試體模外圍分別以 5 mm、10 mm 及 15 mm 之橡膠墊填塞，再灌入普通混凝土，拆模後再放置在相同尺寸的試體模中央，外圍澆灌 RPC，直到填滿模子為止，所有製作完成之試體尺寸仍然為 $\phi 100 \times 20 \text{ mm}$ ，試體斷面示意

圖如圖 4-2 所示，試體測試齡期為製作完成後 7 天。

斜剪試體根據 ASTM C882 製作 $\phi 50 \times 100$ mm 之圓柱試體模，製作傾斜面為 60 之圓柱試體，如圖 4-3 所示。

4.4.4 養護流程

由於活性粉混凝土試體有緩凝現象，因此待灌漿後 48 小時才拆模，並送入蒸氣養護機中 72 小時($T=85^{\circ}\text{C}$ ， $\text{RH}=90\%$)，冷卻後再放置於水中養護。

4.5 試驗方法與試驗儀器(材料基本性能與耐久性質)

4.5.1 基本性能試驗

本研究所有 RPC 基本性能試驗，將依現有的相關 CNS 或 ASTM 等標準規範進行試驗，如相關標準規範不適用時，將依期刊文獻或研討會發表之試驗方式進行，所擬進行之試驗計畫項目計如下：

1. 水泥、爐石、石英粉、砂灰及飛灰比重試驗

依 ASTM C188 規定採用李氏比重瓶，如照片 4-13 所示，先稱取試樣然後倒入比重瓶內，注意不能漏失，並且置於水中，避免因煤油感溫性而影響數據，記錄試樣倒入前後液面刻劃值代入下式求比重。

$$\text{比重} = \text{試樣重} / \text{試樣體積} (\text{試樣倒入前後讀數差})$$

2. 石英砂之比重與吸水率試驗

依 ASTM C127 或 CNS 488 及 ASTM C128 或 CNS 487 規定使用比重瓶進行量測，如照片 4-14 所示。

3. 石英粉篩分析試驗

依 ASTM C33 之規定求取粒徑分佈及細度模數值，如照片 4-15 所示。

4.骨材乾搗單位重試驗

依 ASTM C29 或 CNS 1166 及 CNS 1163 之規定進行量測，如照片 4-16 所示。

5.流度試驗

依據ASTM C230M-03進行水泥砂漿流度試驗，進行流度試驗前，先以濕布將流度台及流度錐潤濕擦拭乾淨，把流度錐放置流度台中央，將水泥砂漿分二層填入，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，並計算其平均直徑增加量。

6.抗壓強度

抗壓強度是混凝土品質檢驗最重要的標的，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/cm²，每組三個圓柱試體，依據ASTM C31、C192、C617之規定，試體尺寸為φ50×100 mm，並於飽和石灰水中養護，測試時石膏蓋平試體表面，以HUNG TA INSTRUMENT CO., LTD. 200T電腦式自動抗壓試驗機測試試體，如照片4-17所示。

7.圓柱試體抗彎強度。

混凝土抗彎試驗依CNS 1233規定，採三分點載重方式進行，試體尺寸大小為 150×150×500 mm，以每分鐘8.79 ~ 12.31 kgf/cm²之加載速率加壓於試體，直至試體破壞，記錄最大破壞載重，其破裂模數計算式如下：

$$f_r' = \frac{PL}{bh^2} \text{ (當破壞面在中心點}L/3\text{之內)} \dots\dots\dots (4-1)$$

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

式中 f_r' ：破裂模數 (kgf/cm²)；

P：最大荷重 (kgf)；

L：跨距(cm)；

b：試體寬度(cm)；

h：試體高度(cm)。

8. 劈裂強度。

藉由劈張試驗可間接求取混凝土之抗拉強度，劈張試驗試體分為普通混凝土與RPC兩種，普通混凝土試體尺寸為 $\phi 100 \times 200$ mm，RPC 試體尺寸為 $\phi 50 \times 100$ mm 圓柱試體，根據 ASMT C469-96 或 CNS 3801 進行試驗，以每分鐘 7 ~ 14 kgf/cm² 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：

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi dh} \text{ (4-3)}$$

式中 f_{ct} ：材料劈張強度(kgf/cm²)；

P：最大荷重(kgf)；

d：試體直徑(cm)；

h：試體高度(cm)。

9. 動彈/剪性模數量測試驗

利用英國 C.N.S 公司所生產之 ERUDITE 共振頻率測定儀，如照片 4-18 所示。依據 CNS123 及 ASTM C215 規定進行量測混凝土試體之縱向及扭曲共振頻率。經由下列公式求出動彈性模數 E_d 、動剪性模數 G_d ：

$$Ed = 4n^2 \ell^2 \rho 10^{-15} \text{ GPa} \dots\dots\dots (4-4)$$

式中 ℓ : 試體長度(mm) ;

n : 縱向共振頻率(Hz) ;

ρ : 試體密度(kg/m^3) ;

$$Gd = 4t^2 \ell^2 \rho F 10^{-15} \text{ GPa} \dots\dots\dots (4-5)$$

式中 ℓ : 試體長度(mm) ;

t : 扭曲共振頻率(Hz) ;

ρ : 試體密度(kg/m^3) ;

F : 形狀因素 ; $F=1.0$ (圓柱試體) ;

$F=1.183$ (方形角柱狀試體)。

4.5.2 補強試驗

1. 樑試體平板抗彎補強試驗

混凝土抗彎試驗依 CNS 1233 規定，採三分點載重方式進行，試體尺寸大小為 150×150×500 mm，製作方式請參考 4-4 第 2 節及第 3 節，以每分鐘 8.79 ~ 12.31 kgf/cm^2 之加載速率加壓於試體，直至試體破壞，記錄最大破壞載重，其破裂模數計算式如下：

$$f'_r = \frac{PL}{bh^2} \quad (\text{當破壞面在中心點} L/3 \text{ 之內}) \dots\dots\dots (4.6)$$

$$f'_r = \frac{3PL}{bh^2} \quad (\text{當破壞面在中心點} L/3 \text{ 之外，不超過} 0.05L) \dots\dots (4.7)$$

式中 f'_r : 破裂模數 (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)。

2.圓柱補強抗壓試驗

補強抗壓試體尺寸大小為 $\phi 100 \times 200$ mm，首先先以普通混凝土製作 $\phi 70 \times 200$ mm、 $\phi 80 \times 200$ mm、 $\phi 90 \times 200$ mm 三種試體，再分別於外圍灌製 5 mm、10 mm 及 15 mm 厚之 RPC。試體測試齡期為 28 天，並與無補強之普通混凝土相比較。

3.鋼筋握裹強度

拉拔試驗之試體尺寸為 $100 \times 100 \times 100$ mm 之方型試體，其中埋入 #3 之竹節鋼筋，其埋入深度為 10 cm；分別灌製普通混凝土與活性粉混凝土，測試二種材料在 28 天之握裹強度。其平均握裹應力計算式如下：

$$u_c = \frac{P}{\pi d_b L} \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

式中 u_c ：平均握裹應力(kgf/cm²)；

P：最大荷重 (kgf)；

d_b ：鋼筋標稱直徑(cm)；

L：鋼筋握裹長度(cm)。

4.斜剪試驗

斜剪試驗根據 ASTM C882 製作 $\phi 50 \times 100$ mm 之圓柱試體模，製作傾斜面為 60°之混凝土半圓柱試體；底層黏結界面以砂輪機處理，使黏結界面粗糙，有助於上、底層材料之黏結。本研究計畫採用之上

層材料為水泥砂漿，底層材料則為 RPC，本試驗可作為未來混凝土結構修補之參考。其剪應力之計算如下所示：

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{2} \sigma_x \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots (4-9)$$

式中 τ_{θ} ：指定破壞面 60° 之剪應力 (kgf/cm²)；

σ_x ：最大荷重應力 (kgf/cm²)；

θ ：指定破壞面之角度。

4.5.3 耐久性試驗

水泥質材料耐久性可由有不同的材料性質加以探討，例加：孔隙結構及分佈性質、氣體滲透性性質、水份吸收散佈性質、氣離子滲透擴散性質、表面碳化性質、鋼筋腐蝕情況、表面磨耗損失情況、表面或內部材料電阻性質及其它可使用的材料性質(如以更精細化學或電學分析所得的材料性質)本研究計畫所採用的 RPC 耐久性試驗將包括下列各項：

1. 孔隙壓汞試驗(MIP)。

試體尺寸為 $\phi 10 \times 10$ mm，試驗儀器如照片 4-19 所示，在試驗前必須先放在 105 烤箱中乾燥至少 24 小時進行前處理。處理後，試體應存放在密封設備儘量避免與空氣接觸。開始進行分析前，試體再置於 150 烤箱中乾燥至少 1 小時；減少低壓槽抽真空步驟的時間。

低壓實驗是完全實驗的必要過程，若沒有進行低壓實驗，系統將不允許使用者進行高壓實驗，主要量測範圍在 25 Psi 以內，加壓方式係以泵浦抽氣加壓達成。高壓實驗指低壓壓力範圍以上(最低需大於 14.7psi)至 60000 Psi 的壓力範圍內的實驗，可量測較小的孔洞分佈情形,以油壓方式加壓達成。在樣品試管剛開始注入水銀時，水銀充滿了樣品試管。在增加壓力導致水銀壓入試體的孔隙，樣品試管管部減少的水銀體積將等於填入孔隙的體積。

2. 超音波波速量測

依據 ASTM C597 之方法。其原理是利用音波在不同物質中傳遞速度之不同以量測物體內狀況。隨著混凝土齡期越長，內部緻密性越佳，使超音波波速跟著成長，藉此瞭解活性粉混凝土緻密程度，如照片 4-20 所示。

3. 氣體滲透試驗

比照參考文獻^[62]所採用之方式進行試驗，所澆置的試體大小為 $\phi 100 \times 200$ mm，以普通混凝土與 RPC 澆置完後 24 小時拆模，放入飽和石灰水中養護至試驗齡期(7 天、14 天、28 天、56 天)取出。以砂輪切割機將試體切成厚度 10 mm 之試片，並用烘箱以 105 烘乾 24 小時。

4. 水份吸收擴散試驗(含吸水率)

一般試體吸水率試驗係採用 ASTM C642 之規定，但是考量中性化僅發生於試體之表面，為避免內部未中性化之孔隙結構影響試驗之準確性，本試驗參照 BS1881:122 之方法較為合理。將烘乾試體先行秤重，將試體完全浸入水中三十分鐘後取出，以濕布擦拭底部與側面多餘水分，紀錄試體吸水後之重量。試體所吸收的水量除以試體烘乾的重量即為吸水率。

$$S = \frac{W - D}{D} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4-10)$$

式中 S：吸水率(%)

W：試體浸水 30 分鐘後之重量(g)

D：試體烘乾之重量(g)

5. 氯離子滲透擴散性質

依據 ASTM C1202-97 利用混凝土本身電流通的難易及大小，判斷氯離子滲透的可能性，試驗儀器如照片 4-21、4-22 所示。表 4-7

為電流量與氯離子滲透性之關係，其表示為電滲量大於 4000 庫侖為高氯離子滲透性；2000~4000 為中等滲透性；1000~2000 為低滲透性；100~1000 為非常低滲透性，低電流量庫侖，可視為完全不受氯離子滲透之侵害。其試驗步驟如下：

- (1) 準備一 $\phi 102 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$ 的試體。
- (2) 將試體的側面塗滿一層保護層，再置於真空皿中，抽至至 1mm Hg (133 Pa) 低的壓力，並持續三小時。
- (3) 將分注器中打開，使水淋在試體在試體上。
- (4) 關閉分注器，並持續抽真空一小時。
- (5) 將試體置於水中 $18 \pm 2 \text{ hr}$ 。
- (6) 將試體置於測試模中，通過 60V 的直流電。而測試模於負極端填入 3% 的 NaCl 溶液，正極端填入 0.3N 的 NaOH 溶液。
- (7) 每半小時量測電流一次，持續量測六小時，以式 4.11 及式 4.12 計算電流量，再比對表 3-9，判定氯離子滲透的難易程度。

$$Q = 900(I_0 + 2 I_{30} + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{300} + I_{360}) \dots\dots\dots(4-11)$$

式中，Q = 電流量(Coulombs)

I_0 = 初始電流(Amperes)

由於 ASTM C1202 係以直為 3.75" (95.25 mm) 之圓柱試體為基準，本試驗使用 100 mm 直徑圓柱試體，因此，需以(4-12)式作為修正：

$$Q_s = Q \times \left(\frac{95.25}{100} \right)^2 = 0.9073 \times Q \dots\dots\dots(4.12)$$

式中， Q_s = 由直徑 3.75" (95.25 mm) 之電流 Q 換算為直徑為 100 mm 時的等值電流量(Coulombs)。

6.表面碳化試驗 [63]

本實驗係以水中養護 28 天後的混凝土試體進行加速試驗。所有試體均在飽和石灰水中養護至 28 天，依照實驗計畫中試驗配置試體數目放入中性化加壓筒中，如照片 4-23 所示。以加壓(15 atm)的方式，加速試體中性化，分別在 7、14 與 28 天取出試體，然後參考 RILEM CPC-18 提議之方式，在 70%的乙醇溶液中加入 1%的酚酞，噴灑於試體橫斷面上。酚酞是一種酸鹼指示劑，在 pH 值大於 9.2 以上時，會由無色轉為紅色，因此試體未中性化時將呈現紅色，以此可以瞭解中性化程度。

7.表面磨耗試驗。

依 ASTM C779-89a：「水平混凝土表面耐磨標準試驗法」利用旋轉板磨耗試驗機進行測試，如照片 4-24 所示，其試驗步驟為：

- (1)測試期間先耐磨五分鐘以利清除表面上的雜物。
- (2)測量精度至 0.025 mm。
- (3)放置測微尺架子 (micrometer bridge) 使得第二組讀數線與第一組測量交叉成直角，測試期間此架子應置於同一位置，因此在量測前必須先標定位置。
- (4)測試期間為 30 分鐘，必要時可延長至 60 分鐘。
- (5)紀錄每次表面磨耗試驗之深度。

8.表面或內部材料電阻試驗

本研究採用 C.N.S Electronics LTD 生產之 Concrete Resistivity Meter，如照片 4-25 所示。量測活性粉混凝土之表面電阻係數，作為混凝土耐久性之判斷指標。

9.顯微觀測(SEM/EDS，XRD)

- (1)SEM(Scanning Electron Microscope) 掃瞄式電子顯微鏡

如照片 4-26 所示，其機型為 Hitachi S4100，乃是利用高能量的電子聚焦光束，掃瞄試體表面。利用正偏訊號收集器將二次電子產生之低能量，轉換成可顯示於陰極管之訊號，如此便能產生影像而加以觀測。進行 SEM 觀測之前，必須先將試體表面鍍金或覆以石墨，使電子束打在試體後能導電。試體在 SEM 觀測時依下列方式進行：

- (a) 抗壓試驗破壞以甲醇取代法將試體浸泡入甲醇中，以甲醇取代試體內之水份使其終止水化，為了避免取代過速而影響試體之微結構，將試體敲碎後，先行浸入 10 倍試體體積之低濃度甲醇中。
- (b) 經過一小時更換為新鮮之高濃度甲醇。
- (c) 隔一天後再更換為高濃度之甲醇。
- (d) 進行各 SEM 試驗前再自甲醇中取出試體並置於有真空泵浦設備之真空乾燥皿中抽真空。
- (e) 將終止水化及抽真空和乾燥處理過之試樣固定在試體座上。
- (f) 將試體抽真空及鍍金。
- (g) 將試體放置於電子顯微鏡柱中並再次抽真空。
- (h) 發射電子束掃瞄試體，以便顯像觀察並照相。

(2) X 光繞射分析

是將 X 光源入射進規則排列之晶格，因入射光之波長和晶面間距有 $n\lambda = 2d \sin \theta$ 之關係，將由晶體平面產生繞射，利用不同角度收集到的繞射波強度，二者間之關係可繪成 Intensity 和 2θ 之圖，由圖形可清楚分析晶體結構之成分變化。將試體研磨成粉末，經 X 光繞射分析儀以每分鐘固定的角速度，量測二種材料內部結晶的類型與變化，由繞射光譜圖得知試體內水化之生成物。其原理為 X 光照射在晶體表面時，X 光會在某晶面以入射角等於反射角之方式射出，X 光偵測氣可接收不同角度之 X 光量，藉由繞射角度的大小及波峰之強度來分析材料之成分及含量。

表 4-1 卜特蘭第二型水泥之物理性質

物 理 性 質	細度		314 m ² /kg
	正常稠度用水量		-
	假凝結		-
	凝結時間	初凝	240 min
		終凝	360 min
	健度		0.02%
	抗壓強度	3 天	2430 psi
		7 天	3280 psi
		28 天	5260 psi
	水泥砂漿空氣含量		3.2%
	水化熱(7 天)		65 cal/g
水泥溫度		40°C	

表 4-2 卜特蘭第二型水泥之化學性質

化 學 成 分	二氧化矽 SiO ₂	22.60%
	氧化鋁 Al ₂ O ₃	3.75%
	氧化鐵 Fe ₂ O ₃	4.55%
	氧化鈣 CaO	63.15%
	氧化鎂 MgO	2.17%
	三氧化硫 SO ₃	1.88%
	游離石灰(Free Lime)	0.75%
	燒失量(L.O.I.)	0.62%
	不溶殘渣	0.13%
	矽酸三鈣 C ₃ S	45
	矽酸二鈣 C ₂ S	31
	鋁酸三鈣 C ₃ A	2.2
	鋁鐵酸四鈣 C ₄ AF	13.9
	氧化鈉 Na ₂ O	0.15
	氧化鉀 K ₂ O	0.48
	鹼含量(Na ₂ O+0.658K ₂ O)	0.46
	矽酸三鈣+鋁酸三鈣	47.2

表4-3 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 ₂)	%	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4-4 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 ²)	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 ²)	≥ 35000	—
抗拉彈性係數(kgf/cm/ply)	≥ 25800	—
設計抗拉彈性係數(kgf/cm ²)	2.35±0.35×10 ⁶	—
纖維伸長率(%)	≥ 1.5	ASTM D3039 JIS K7073

表 4-5 底漆基本性質表

		試驗規範	試驗規範	測試結果
固成份(%)		CNS 13069	CNS 13069	99.80
接著強度 (kgf/cm ²)	乾燥面	CNS 11053 JIS 5400	CNS 11053 JIS 5400	5.3
	濕潤面	CNS 11053 JIS 7113	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 4-6 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 ²)	ASTM D638 , JIS 7113	520
抗張彈性係數(kgf/cm ²)	ASTM D638 , JIS 7113	30500
彎曲強度(kgf/cm ²)	ASTM D790 , JIS 7203	920
抗張剪切強度(kgf/cm ²)	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 4-7 依據通過電荷量評估氯離子穿透性[CNS14795]

通過電荷量(庫倫)	氯離子穿透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	甚低
<100	可忽略

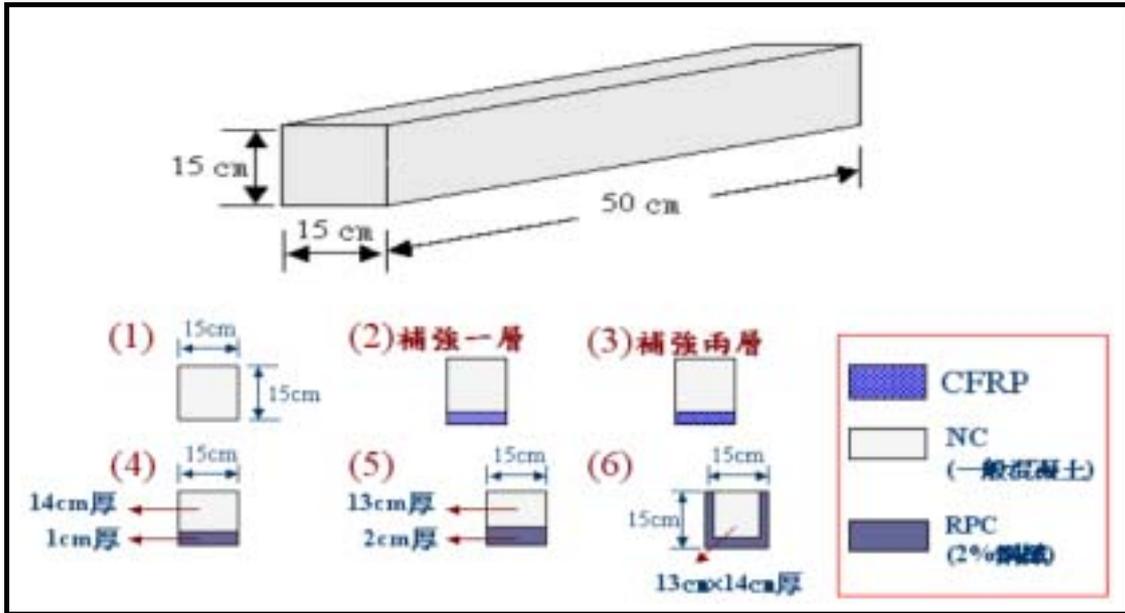


圖 4-1 抗彎補強試體尺寸與斷面示意圖

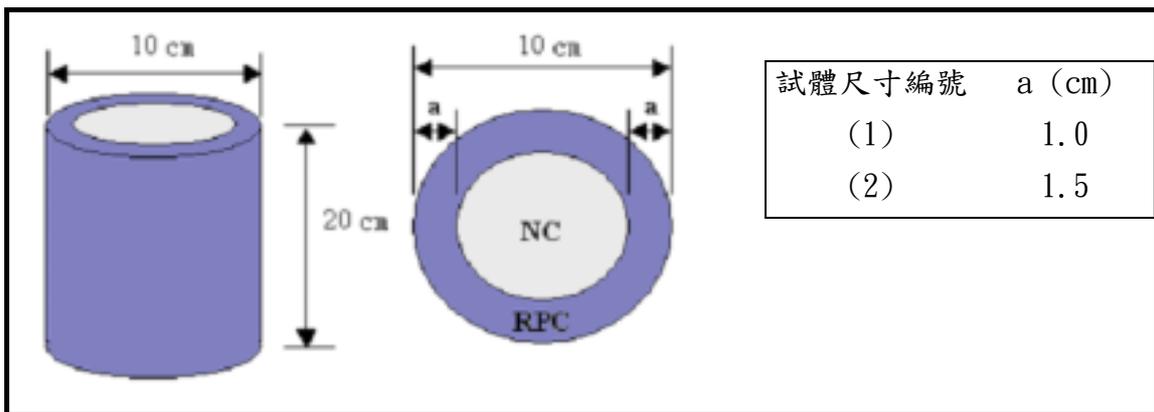


圖 4-2 圓柱抗壓補強試體尺寸與斷面示意圖

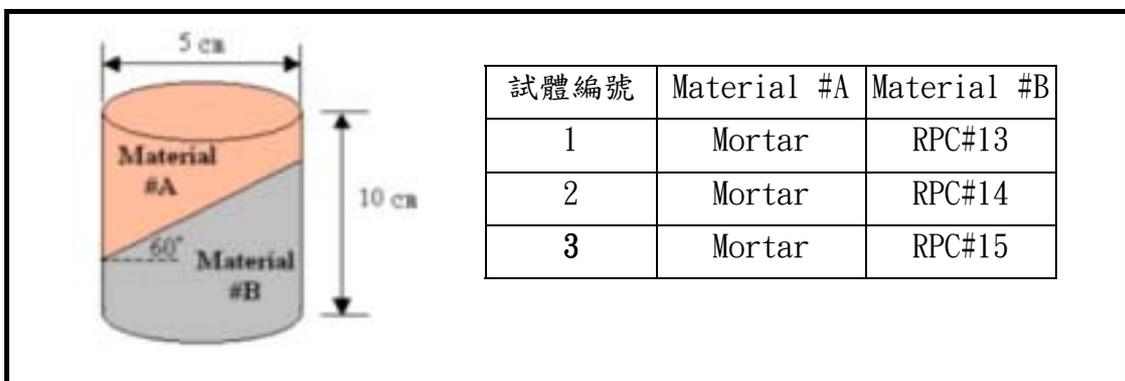


圖 4-3 斜剪試驗試體示意圖



照片 4-1 波特蘭第二型水泥



照片 4-2 砂砂



照片 4-3 砂灰



照片 4-4 石英粉



照片 4-5 飛灰



照片 4-6 爐石粉



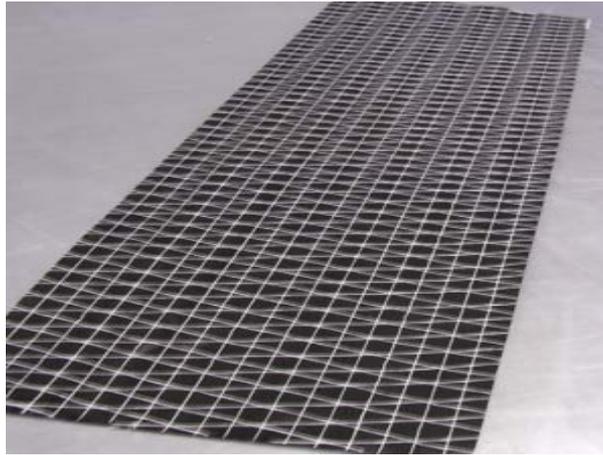
照片 4-7 鋼纖維



照片 4-8 強塑劑



照片 4-9 消泡劑



照片 4-10 碳纖維貼片



照片 4-11 底漆



照片 4-12 面漆



照片 4-13 李氏比重瓶



照片 4-14 比重瓶



照片 4-15 搖篩機及篩組



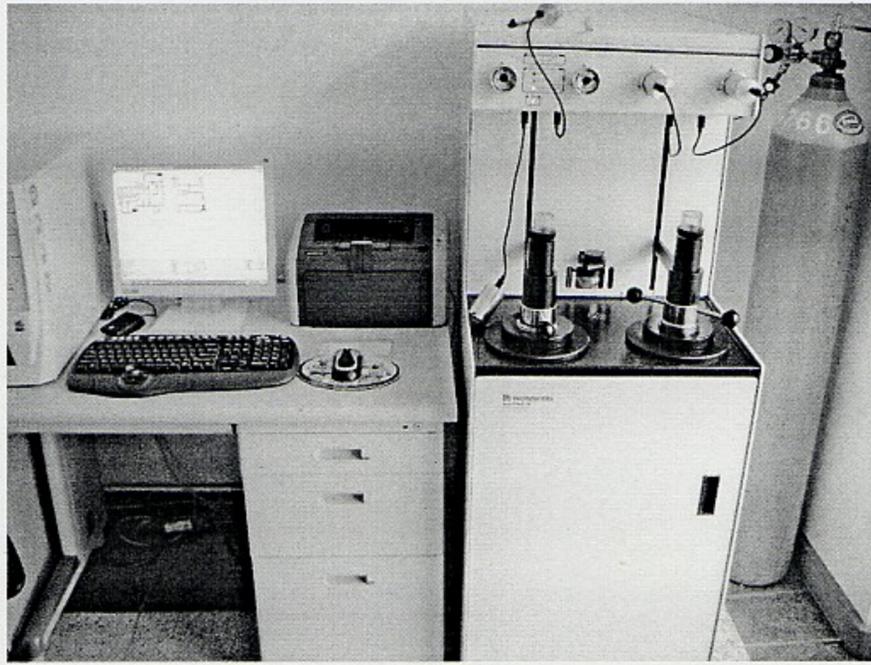
照片 4-16 單位重量筒



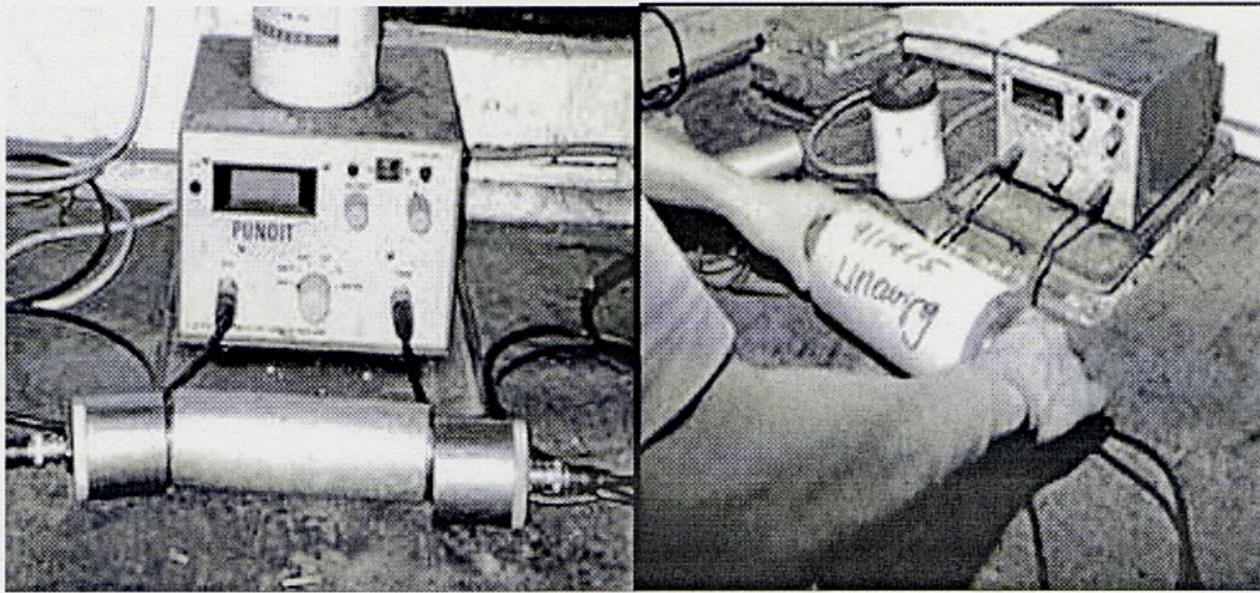
照片 4-17 200T 電腦式自動抗壓試驗機



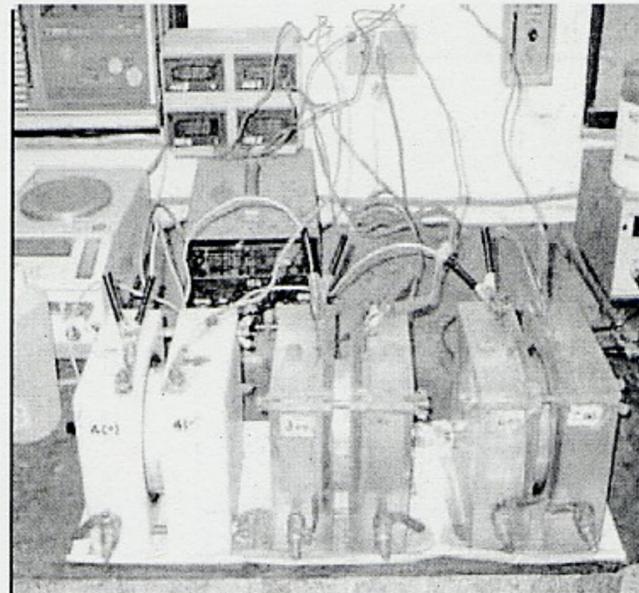
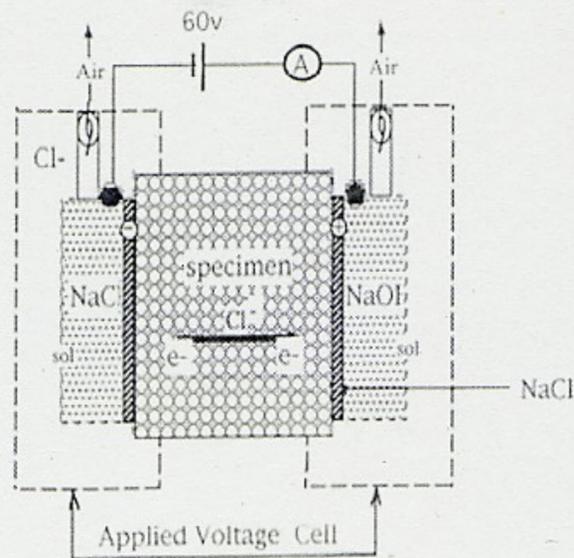
照片 4-18 動彈性模數量測儀



照片 4-19 孔隙壓汞試驗機



照片 4-20 混凝土超音波波速量測儀



照片 4-21 混凝土電滲試驗儀



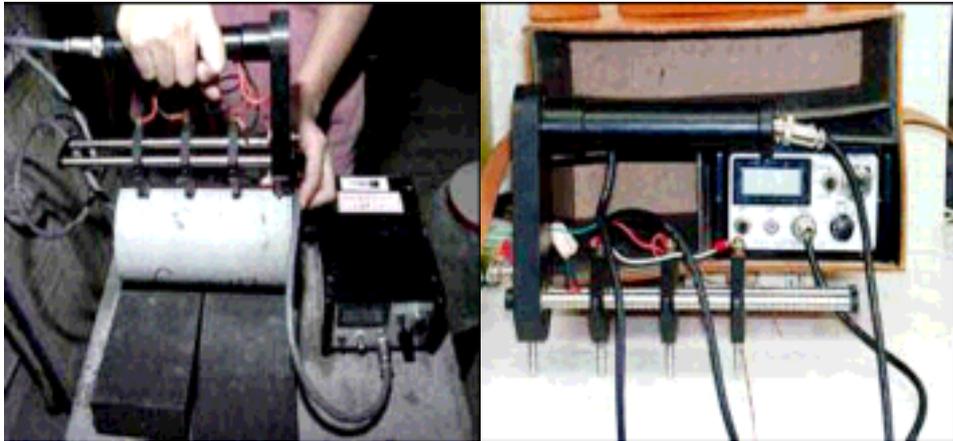
照片 4-22 氯離子自動電位差滴定儀



照片 4-23 表面碳化試驗儀



照片 4-24 表面磨耗試驗儀



照片 4-25 混凝土表面電阻量測儀



照片 4-26 掃瞄式電子顯微鏡

第五章 試驗結果與討論

5.1 水泥砂漿及混凝土配比說明

本研究依據「活性粉混凝土配比設計邏輯及理論」及「RPC 理論配比參數」，共使用十二組膠結砂漿配比(均未含鋼纖維)與三組活性粉混凝土(RPC)配比進行關的試體試驗工作，此 15 組配比之詳細配比資料如表 5-1 所示，其中組號#1 ~ #4 之水膠比(W/B)均為 0.2，組號#5 ~ #8 之水膠比(W/B)均為 0.17，此 8 組配比均未使用飛灰與爐石粉，組號#9 ~ #12 之水膠比(W/B)亦均為 0.2，但此 4 組使用飛灰與爐石粉取部份水泥，以減少水泥用量，以此 12 組膠結砂漿先進行第一階段的材料基本力學性質及耐久性質探討，完成後，選出第#1 組膠結砂漿配比再添加鋼纖維作為活性粉混凝土(RPC)第#13 組配比(未含飛灰與爐石粉)(RPC #13)，選出第#10 組膠結砂漿配比再添加鋼纖維作為活性粉混凝土(RPC)第#15 組配比(含有飛灰與爐石粉) (RPC #15)，除此而外，並參考國內一般常用的活性粉混凝土(RPC)配比後，另試拌出第#14 組活性粉混凝土(RPC) (未使用飛灰與爐石粉) (RPC #14)，15 組配比組號所對應之試體編號如表 5-2 所示。

在本研究計畫中用以作比較組用的普通混凝土(OPC)之水灰比(W/C)為 0.6，每 m^3 混凝土中使用水泥 392 kg、細粒料 592 kg、粗粒料 1,044 kg 及水 235 kg，由於工作性良好，並未使用強塑劑，比較用之水泥砂漿(MOR)水灰比亦為 0.6，每 m^3 砂漿中使用水泥 501 kg、細粒料 1,378 kg 及水 300 kg。

本章內容中之內文、表格、圖形及相片等所引述之配比組號及試體編號均以上述的編碼為依據。

5-2 RPC 及材料力學基本性質

5.2.1 工作性

RPC 配比的漿體及粉體材料較多，且未含有粗粒材，用傳統坍度試驗量測 RPC 的工作性略嫌不妥，因此，本研究以自充填混凝土(SCC)量測坍流度模式進行 RPC 工作性探討，可以有效地看出其流度值變化，做為施工修補澆置時的參考依據，圖 5-1 和表 5-2 表示 15 組 RPC 的坍流度值量測結果，圖中顯示第 13 組有 170 mm 坍流度，第 14 組 M18-2% 為參考國內一般 RPC 配比相關研究文獻所得到之配比，其坍流度值為 155 mm，第 15 組則有 210 mm 的良好坍流度，三種配比內均有添加 2% 的鋼纖維值，但坍流度均算良好，一般而言，添加鋼纖維會產生阻礙 RPC 漿體流動的阻力，纖維量愈多，流度損失愈大^[17]，其他 12 組配比也有 170~190 mm 間之坍流度，呈現良好的工作性。對於本研究所建立的修補系統，樑底的水平及 U 型的 1~2 公分 RPC 修補方式，及垂直圓柱的 1 公分環形補強方式，可有效率的施作充滿既有混凝土的表面上，只要界面系統充分處理乾淨，新拌的 RPC 可填滿修補面，即可發揮界面及 RPC 的強度。

5.2.2 抗壓強度

一般土木工程師大都認定混凝土單一最重要的性質就是抗壓強度，從傳統混凝土到 HPC 至 RPC，混凝土抗壓強度也有大幅的改善及增進，在 20 世紀末 RPC 的抗壓強度經過特殊預鑄處理為 800 MPa (116,000 psi)，比 $F_y = 413.9 \text{ MPa} (4,200 \text{ kgf/cm}^2)(60,000 \text{ psi})$ 的鋼筋，極限強度 $F_y = 1.5 F_y (= 621 \text{ MPa}) (90,000 \text{ psi})$ 還要高，因此，抗壓強度是混凝土品質及性能的一項重要指標，表 5-3 及圖 5-2 至圖 5-5 為本研究為第 14 組配比的抗壓強度的發展，其中 1~12 組為不添加細纖維的配比，分別在 3、7、14 及 28 天齡期的抗壓強度。3 天齡期時，第 5 組配比，編號 2,004~1,704 的強度最高為 74.9 MPa (10,907psi)；7 天齡期時，2,004~1,704 組抗壓強度為 87.5 MPa (12,942psi)；14 天齡期時，2,004~2,004 組為 89.5 MPa (13,033psi)；28 天齡期時，FS2,004~2,004

之第 11 組強度為 113.5 MPa (16,528psi)。因配比內沒有添加纖維及沒有高溫養護，強度發展不如 200 及 800 RPC 系列來得高，惟從表 2-3 可看出第 1 組到第 8 組，在超過 7 天至 14 天時，除了第 2、3、4 組強度有提升外，其它各組均有下滑的現象，顯示強度可能受到遲滯沒有辦法發揮晚期強度，換言之，可能受到低水灰比導致水化熱所產生的熱應力，延緩並降低強度的發展，此可從配比 7，編號 2,004~1,704 可看出，配比內水泥用量為 1,024 kg/m³，水灰比(W/C)為 0.24，即使配比內使用波特蘭第 II 型水泥，但過高的水泥量，所產生的水化熱轉換成熱應力，破壞微觀結構的完整性，參考 SEM 圖，導致 7 天強度由 87.5 MPa 降至 14 天的 58.7 MPa，使用高水泥用量的 RPC 應特別注意此項微觀方面的缺陷，常可能導致巨觀的失敗。

第 9 至第 12 配比，3 天的初始強度會低於第 1~8 組；在 14 天齡期仍然低於第 1 至第 8 組；28 天齡期時，則因有添加飛灰及爐石粉，強度發展的度至少有 12 至 20 MPa 之間，遠較 1~8 組成長幅度約只有 5 MPa，這是 28 天齡期後飛灰的卜作嵐反應和爐石粉的膠結反應造成強度成長結果。因此，本研究應用 RPC 修補既有損害混凝土結構物，在配比內添加飛灰及爐石粉，三天齡期時，即可達 50 MPa (7,281 psi) 以上；28 天齡期時，可達 82.5 MPa (11,948 psi) 以上，這些強度值是本研究拌製傳統混凝土 28 天齡期 28 MPa (4,000 psi) 的 1.8 至 3 倍，OPC 及 RPC 的差異不會相差太懸殊，也不會產生不諧和的現象。

典型 RPC 試體抗壓試驗破壞前及破壞後形狀如相片 5-1(a)及 5-1(b) 所示。

5.2.3 劈裂試驗

ACI365 建議混凝土 28 天齡期時的劈裂試驗值，可用下式表示：

$$f_{sp} = 0.59\sqrt{f'_c} \quad 21 \leq f_{sp} \leq 85 \quad (MPa) \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

劈裂強度大小之變化與混凝土內是否含纖維有極大的關連性，試體水平放置於試驗台時，對試體橫向施加垂直力，產生側向拉力，如

同試體劈開狀，類似拉力狀態拉開，此狀態和混凝土的界面鍵結力拉力強力、水灰(膠)比、水膠比、水固比、骨材強度等均有關係；文獻中顯示：在齡期 28 天時，HPC 的劈裂強度最大值為 5.32 MPa^[17]，由圖 5-6 及圖 5-7 和表 5-4 為本研究配比不同齡期的劈裂強度發展，除了第 8 組 14 天齡期時，第 6 組 (1,605-1,704) 為 7.5 MPa，屬於最大值，與 HPC 進行比較，RPC 劈裂強度均大於 HPC 的 5.32 MPa，若再加上纖維，劈裂強度一定比 HPC 更高，對於 RPC 抗裂性圍束性能有十分重要的助益。

典型 RPC 試體劈裂試驗破壞前及破壞後形狀如相片 5-2(a)及 5-2(b) 所示。

5.2.4 抗彎試驗

以水泥系修補材料如 RPC 及 HPC 等材料，對於鋪面構件、梁構件等構造物補強時，除了修補材料必須有充分的抗壓強度外，抗彎強度也極為重要。本研究試驗資料顯示：使用 RPC 修補材料對 OPC 梁底加 1 至 2 公分厚的修護層進行修補試驗時，修補後之梁抗彎強度增加率約為 140%，顯示 RPC 修補材料對於梁的修補功能有著正面的助益。圖 5-8 至圖 5-9 和表 5-5 為 10 組配不同試體編號 7 天的抗彎強度，第 1 組至第 8 組 RPC 配比內沒有添加纖維時的抗彎強度，抗彎值約接近 10 到 13 MPa 之間，變化不大。第 13 組及第 14 組在配比內添加 2%水泥重鋼纖維，7 天的抗彎強度分別為 21.4 及 16.6 MPa，特別是 1604-2004 組，有無添加纖維的抗彎值分別為 12.7 及 21.4 MPa 約為 HPC 抗彎強度 5-7 MPa 的 3-4 倍，約為一般混凝土的抗壓強度。高抗彎值是修補材料及修補系統很重要的性質之一，纖維提昇強度值為 68%，且增加變曲彎形能力是最重要的附加價值。RPC 材料性能加上細鋼纖維的組合，可充分表現出複合材料的高強度及高韌性的特殊效果。RPC 用於修補材料上，所組合而成的修補系統是屬於同一系列水泥質的材質，除了可增加同質系相容性的需求外，RPC 更可提供強度及韌性，營造修補系統受力變形的諧合性，強化修補系統的耐久性及服務壽命。

典型 RPC 試體抗彎試驗破壞前及破壞後形狀如相片 5-3(a)及 5-3(b) 所示。

5.2.5 拉拔試驗

本試驗結果如表 5-6、圖 5-10 及相片 5-4(a)及 5-4(b)所示，除了水泥砂漿試體為鋼筋拉脫情形之外，所有試體皆是鋼筋稍有拉出約 0.1~0.2 cm 不等之情形，但隨即降伏後發生頸縮拉長之後斷裂，主要係因當鋼筋拉力強度大於握裹強度時即為拉脫破壞，反之則為鋼筋拉斷，故結果顯示 RPC 之握裹強度較一般水泥砂漿高，此一現象與表 5-6 之計算結果一致。

RPC 較一般水泥砂漿具有握裹力，推測原因應為 RPC 組成材料較水泥砂漿細緻，而緻密粉體結構包裹住鋼筋，在鋼筋介面處形成良好的黏著效果，使其具有較佳的握裹性能。另外，RPC #15 的鋼筋握裹強度較其它兩組 RPC 配比 (RPC #13、RPC #14) 高，主要是因為 RPC #15 多添加了爐石和飛灰，這兩種卜作嵐材料粒徑較細，且會將內部多餘的水份進行卜作嵐反應產生 C-S-H 膠體，不但使試體組構更為緻密，也改善漿體與鋼筋介面間泌水的情形，故其鋼筋握裹強度最高。

5.2.6 斜剪試驗

斜剪試驗是最常用來評估維修材料與混凝土底材之黏結強度，其破壞型態可分為(1)上層維修材料破壞；(2)下層底材破壞；(3)黏結界面破壞。試驗所得結果，與材料之抗壓強度與黏結界面之粗糙度有很大的關係。

本試驗結果如表 5-7、圖 5-11 相片 5-5(a)及 5-5(b)所示，所有試體破壞面都很接近修補材料與底材之交介面，由相片中可清楚看到底材 (水泥砂漿) 介面上留有薄薄一層 RPC 粉體，但未有任何鋼纖維，顯示在試驗過程中，此修補介面倚靠的是兩材料粉體之黏著力，鋼纖維無任何效用。也因為如此，RPC #15 與水泥砂漿介面之間具有較高剪力強度，主要是因為 RPC #15 多添加了爐石和飛灰，這兩種卜作嵐材

料粒徑較細，且會將內部多餘的水份進行卜作嵐反應產生 C-S-H 膠體，填塞與底材之間的細微孔隙，改善介面品質，提高修補材料的黏著力。

5.3 RPC 耐久性試驗

5.3.1 氯離子電滲量量測 (ASTM C1202-97)

氯離子對鋼筋混凝土的侵蝕是直接的，氯離子的顆粒大小比水分子還更細，活性更高，對埋置於混凝土的鋼筋更具侵蝕性，鋼筋腐蝕將導致膨脹效應、混凝土龜裂甚至剝落，使惡化循環加速；ASTM C 1202 提供一種快速的氯離子滲透實驗，在 6 小時內由陰陽極分別以 3% 的氯化鈉溶液及 0.3N 的氫氧化鈉溶液，以 60V 固定的電壓通入試體及預先設置的試體兩側，每 30 分鐘量測通過的電流數，計算通過的總電量 $Q = \int I(\text{電流}) * t(\text{時間})$ ，通過電量大小與氯離子穿透能力分級如下表所示。文獻[64]建議針對混凝土有足夠抗氯離子能力之要求為 $Q < 2000$ 庫倫。

影響混凝土電滲量的因素有許多種，包含水灰比、水膠比、水固比、骨材含量、卜作嵐材料比例、是否加入纖維、齡期、養護情況、強度等等，其中最主要影響因素為配比內的用水量及卜作嵐材料用量比例，兩者均會影響巨微觀的緻密性。以往在國內測試的氯離子電滲量，在 91 天齡期時，HPC 的 Q 值約在 1000 以下(Very low)，屬於非常低的範圍^[17]。傳統 ACI 配比不加卜作嵐材料，如拌和水量為 200 kg/m³ 以上時，Q 值約在 4,000~12,000 庫倫之間，顯示混凝土的耐久性會有問題。特別是文獻 [65, 66] 指出混凝土的抗壓強度與氯離子的電滲量成正比例，但仍有些部分區塊之混凝土強度愈強，電滲量也愈高，耐久有較差的現象，這一點值得注意，在配比內降低拌和水量及添加適量卜作嵐材料，對於 Q 值降低，提昇晚期強度很有幫助。

文獻^[10]曾經過對 RPC 在不同試驗試驗條件下，測試混凝土的氯離子電滲量，其中沒有加速人工海水素劣化循環試驗的試體，測試電滲量為 97 庫倫，屬於可忽略的範圍，屬於絕佳的耐久性，100 次循環後

仍有 2,000 庫侖以下耐久值，顯示 RPC 的巨微觀在 SEM 的觀測中屬於極緻密的結果。本研究的各 RPC 配比在 28 天齡期取出試體處理，並量測 6 個小時通過的電流量如表 5-8 及圖 5-12 至圖 5-13 所示，圖中每一配比所計算得到之電滲量 Q 值顯示：其中 4 個配比的 Q 值，均低於 100 coulombs，屬於可忽略等級，另外，有 6 個的數據組小於 1,000 庫侖，但大於 100 庫侖，屬於非常低(Very Low)的範圍。所有不含鋼纖維的 RPC 電滲量都在於 1,000 庫侖以下，呈現極佳的耐久性能，用於修補系統內，只要界面處理得當，化學及電化學反應效應可避免，修補材料 RPC 的高耐久性隨著強度發展是修補系統耐久性的最佳組合。

編號 1604-2004 的試體拌和時分成兩組，一組不加纖維，另一組則加入 2% 的纖維量，在 28 天齡期時測試電滲量，見表 5-8。不加纖維者電滲量為 43.2 庫侖加入纖維者或 501.3 庫侖，顯示鋼纖維因具導電性而增加通過的電量，從可忽略提升至 Very Low，仍然是非常低範圍內，顯示加入纖維對電滲量影響輕微。#15 的本研究電滲試體電滲量 7 天為 657 庫侖，且有加入纖維處於 Very Low 的等級，顯示修補材料是合宜的。

5.3.2 表面電阻 (Surface Resistivity)

混凝土的電化學性質是產生腐蝕的重要因素，簡易的防蝕觀念是混凝土在面乾內飽和的情況下，呈高度的絕緣性，也就是如果表面電阻值非常高，表示很難導電及通電，此時的高電阻值才具有意義。加拿大的海峽大橋，設計為一百年的服務壽命，要求混凝土配比設計，水灰比小於 0.32，用水量(含 SP 劑)小於 160 kg/m^3 ，電阻值必須大於 $50 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，氯離子電滲量要小於 1,000 庫侖的高耐腐蝕性的設計，同時也強調混凝土應具有高電阻性(表面而乾飽和情況下)對防蝕的重要性，混凝土高電阻性對於補強界面的防蝕耐久性則甚有幫助^[65]。表面電阻值在面乾內飽和的情況下，其值的高低表示修補區域或結構物是否仍在因腐蝕效應引致的膨脹效應，初期形成孔洞或裂縫導致水滲透至界面或結構體內部產生腐蝕效應，電阻試驗是一種簡易而且快速的

非破壞性檢測方法。

文獻^[64]建議混凝土電阻值大於 20 kΩ-cm 時，混凝土具有耐蝕性，表面電阻值測結果如表 5-9 及圖 5-14 至圖 5-15 顯示配比編號 1 (1604-2004)至編號 10 (2004-1704)不同齡期中電阻的發展。在 3 天齡期時，編號 4 (2005-2004)的電阻值已達到 20 kΩ-cm；7 天齡期時，達到 98 kΩ-cm，到達 28 天齡期時，大於 244 kΩ-cm 的高電阻值，其它配比比第 4 組更高，配比 6 (2004-1704)及配比 15 組達 1,500 kΩ-cm，突顯 RPC 配比的高電阻性，探討原因為 RPC 在配比內加入大量的矽灰，有助提升電阻值，呈現高防蝕的特徵，比 20 kΩ-cm 高出甚多，這也是 RPC 的特徵之一。

5.3.3 超音波試驗 (ASTM C 597)

超音波試驗屬於非破壞試驗(Nondestructive test)，固定兩探頭之間的距離，一端為輸入脈波，另一端則接受波傳所需時間，推求波速 $V = \frac{L}{t}$ ，L：為試體長度(m)；t：為波傳時間 (μs)；計算波速 V (m/s)。超音波在試體內係以最短距離傳遞，依各組成介質密度而定。混凝土組成材料中，粗骨材>細骨材>水泥(膠結料)>水的波速，對於混凝土組成材料，在界面得到充分改善及強化後，波傳速度可以巨幅改善並成長，波速在 28 天或 56 天以上，大於 4,000 m/s 以上時可視為良好品質，有些混凝土波傳速度，在 150 天時，大於 5,000 m/s 顯現出高品質的結果^[67, 68]。

RPC 超音波速試驗結果如表 5-10 及圖 5-16 至圖 5-18 所示。表中 12 組 RPC 的配比，3 天齡期時，配比 1 至配比 8 的波速均在 4,200 m/s 以上；到達 28 天齡期時，第 9 至第 12 組配比已達到約 4,500 m/s 以上，呈現 RPC 是一種高品質的材料。圖 5-16 及圖 5-17 表示是將表 5-10 的資料繪圖，顯示 RPC 各配比的發展趨勢，圖中可看出在 14 天齡期時，RPC 的 12 組配比均在 4,300~4,600 m/s 間，而 28 天齡期則在 4,500 至 4,600 m/s 間，顯示波速差異性小，顯現出各組 RPC 品質變異性不大。

至於在齡期 56 天甚至 91 天時，混凝土波速可達 4,900 至 5,000 m/s 以上^[58]，此結果尚待觀察。圖 5-16 及圖 5-17 可以看出部分超音波發展曲線，如圖 5-16 的第 2 組(1,604-2,004、第 2 組 (1,605-2,004 組)及圖 5-17 (2,004-1,704)組別，28 天時，波速有微幅下降的現象，原因可能為 RPC 的配內水泥用量均在 500 kg/m³ 甚到超過 1000 kg/m³ 以上，水泥水化熱所產生的熱應力，遠較一般混凝土高。水灰比又較 0.42 低了許多，所產生的自體收縮及拌和水量大於約 200 kg/m³ 所產生的自體收縮量等引導致的微裂縫，形成波速受到遲滯而降低，是否會影響到 RPC 的品質，從電阻、電滲及抗拉強度可看出來，這些裂縫是獨立，並不影響它的力學性質及耐久性能。而 #15 組的超音波值，7 天時可大於 4500 m/s 以上顯示 RPC 品質的優良。

5.3.4 碳化試驗(Carbonation)

混凝土常期暴露於空氣中，尤其含大量二氧化碳的環境中，會侵蝕混凝土而造成收縮稱之為碳化收縮 (Carbonation Shrinkage)，化學式如式(5-2)所示，



反應結果應伴隨產生有石灰石加上表面有水，C-S-H 水化膠體亦有可能產生碳化，但是 C-S-H 為混凝土內較安定的水化產物，比較 CH 更不容易受 CO₂ 的反應作用，此議題不在本研究中討論。碳化收縮的形成機理與混凝土中的所含量表面孔隙結構及水化產物等有關，也就是水的用量愈多、孔隙結構愈開放、蜂窩或裂縫的多寡及寬度等因素均有關連性，但這是屬於混凝土材料內部的問題。另一部份則屬於外部環境二氧化碳污染的濃度，尤其是橋樑底部、地下室或通風不良的區域、污染源很大區域都可能產生碳化的病變，此情況除了會產生漏水的擾人現象，有時候是兩者相互反應，更形惡化，因此，加強通風的自然或空調措施，有助於減混凝土碳化的問題。

表 5-11 及相片 5-6 至相片 5-9 為 RPC 在碳化箱所做的結果。顯示

無論是普通混凝土(OPC)或是水泥砂漿(MOR)，在 7 天暴露於二氧化碳的環境中，都有 2 mm 的碳化深度，而 RPC 卻沒有碳化的痕跡。探究原因從本研究中氣體滲透試驗，用甲醇氣體的滲入量，RPC 比一般混凝土和水泥砂漿漿的滲透率小很多，雖然從 SEM 微觀中得知 RPC 由微細的裂縫，但是都獨立的裂縫，此可從電滲量試驗得知，試驗值為非常低至可忽略得到印證，即使使用氣體與離子滲透試驗方式並不盡相同，但兩者所代表的趨勢卻是類似的；OPC 及水泥砂漿(MOR)的拌和水量較高，孔隙量多且具有開放性，對於二氧化碳侵蝕因沒有屏障而導致有碳化現象。RPC 則品質好，強度、高滲透率低，阻礙二氧化碳侵入，自成一種屏障系統的功能，抗二氧化碳性能相對的提高，在修補系統上，須特別注意強化系統界面上，預防對既有混凝土(OPC)的侵蝕。

5.3.5 表面磨耗試驗

混凝土結構物或混凝土鋪面等經常承受人類、車輛、機具、水流、海浪等自然界力量磨損而耗損表面的質量，造成凹陷或車轍般的痕跡，為一種實質損壞的現象。混凝土抵抗磨損與混凝土的強度、粗骨材的用量與堅硬等有關，強度愈強、堅硬石頭含量愈多、黏結力強、愈緻密愈有利於抗磨損。RPC 為一種細粉及細粒料所形成的混凝土材料，與傳統混凝土的結構材料差異甚大，RPC 為求提高強度，而捨棄粗粒部分，改採細粒料，此方式有違背傳統抗磨損的精神，且使用較多的堅硬的粗粒料亦有助於抵抗磨損，惟 RPC 的特性為超高強度及緻密系統，是否能取代粗粒料的抗磨或水工磨耗效能，為本研究進行此試驗之重點。

本研究之磨損試驗是借用港灣研究所之鋼輪環繞同心圓運動試驗儀器，設定 500 圈轉動，量測其磨損深度做為判斷的依據，結果如表 5-12 及圖 5-19 所示，其中，RPC 磨損深度為 0.13 mm，OPC 的磨損深度為 0.49 mm，水泥砂漿則為 0.59 mm，如將 RPC 的磨耗量設為 1.0，則 OPC 及水泥砂漿為 RPC 的 3.77 及 4.5 倍，此結果可印證，磨損的深

度受混凝土的抗壓強度影響甚大，與混凝土的骨材緻密性和骨材強度有密切關係，如同預期，RPC 有這二種的特性，因此，磨損深度遠低於其它二種材料。

典型 RPC 試體磨耗試驗破壞前及破壞後形狀如相片 5-10 所示。

5.3.6 SEM 觀測

本研究在抗壓試驗完成後，取樣浸入甲醇中中止水化並烘乾後照相，委請國科會貴儀中心及明新科技大學貴重儀器中心照相分析 RPC 相片，如相片 5-11 至相片 5-14 所示，顯示不同放大比例的微觀特徵，從相片 5-11 放大 15000 倍 RPC 表面的構造仍然是多孔且不粗造，這種表面特徵恰可為修補界面上最重要的粗糙面，可增加鏈結力；相片 5-12 至相片 5-13 放大 30 萬倍的 SEM 圖屬微觀水化的圖形，大致為 C-S-H 膠體及存在許多的微孔隙；而相片 5-14 為放大 10 萬倍的 SEM 圖，顯示 RPC 內部存在著微裂縫，這些微裂縫可能會有長期耐久性的問題。探討可能原因為此批 RPC 的配比中水泥用量均大於 500 甚至大於 1000 kg/m^3 ，雖然本研究使用第 II 型水泥，拌和時可略為降低水化熱，但水泥用量甚高，水泥放熱量非常可觀，水化過程所產生熱應力已足以破壞微結構，這是傳統 RPC 無法避免的問題。另外一項嚴重的問題是 RPC 配比內水灰比(W/C)常小於 0.42，有時甚低到 0.2 以下時，使低水灰比所產生的自生體積收縮(Autogenous shrinkage)及高用水量均大於 200 kg/m^3 以上時所產生所乾燥收縮(Drying shrinkage)的量是不容忽視的，這種類型的收縮是產生體積不穩定性的主要因素，也是 RPC 內部微觀結構上產生裂縫的要因，SEM 觀測相片即可對熱應力及收縮現象得到印證，早期 RPC 配比製作時無法避免此一問題，未來在配比上可再考慮修正，儘量避免產生這種型態的微缺陷，或在設計配比內使用會有自癒的功能的粉料，符合修補材料及修補系統界面的耐久性。

5.3.7 EDS 試驗

將各齡期的 RPC 試體(3、7、28 天)浸泡在甲醇中，中止水化，

於觀測前打成碎片約 10 mm 寬度的試體置於玻璃瓶中，等待 EDS 觀測。試片觀測前，將其粘在膠帶上，並確認其牢靠不會脫落，再放入電鍍儀抽真空完畢鍍上 K 金 40 秒，再將此已黏有試片的圓盤放入發射掃瞄式電子顯微鏡儀器內，觀測微觀結構的變化。為能充分掌握 RPC 內部成份變化，將觀測所得顯微圖片進行 EDS 成份分析，可達到量化結果，結果如相片 5-15 至相片 5-16 所示。

從配比資料基本成份分析，矽砂性質主要成氧化成為矽 SiO_2 石英粉和矽砂成份相似，也是 SiO_2 為主；水泥主要成為 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 以其它少量成份為主；矽灰則是以 SiO_2 為主要成份，若再加上飛灰及爐石主要成份為 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 及其它少量成份；強塑劑只改良 RPC 的新拌，對硬固性質不會參與反應，因此，在 EDS 成份分析時，固體材料的主要成份是強度反應較高的物質，從圖 5-20 至圖 5-22 的 EDS 分析中可以看出，最主要的峰突顯出 Ca 及 Si 二種主要 RPC 反應成果的元素物質，這包括水泥水化產物的 C-S-H、CH、AFt 及 AFm 和卜作嵐材料水化反應生成物 C-S-H、C-A-H，這種反應是以矽灰反應最為快速，其次是爐石，最後是飛灰，從 EDS 可以得到水泥水化產物的生成物，在 RPC 內反應最為快速，其次是矽灰的卜作嵐化應，其它的成分會 28 天之後才會有反應的結果出現。不過於 90°C 以上高溫養護時，水泥的水化反應及矽灰、爐石和飛灰的卜作嵐反應，可以提供快速的 C-S-H 及轉換 CH 變 C-S-H 及 C-A-H 晶體，在 EDS 可清楚地看出來它的反應足跡。細砂及石英粉則主要為 Si 的成份，綜觀 RPC 主要反應元素及生成物種類是 Ca 及 Si 系統，主要參與反應的成份是 Ca 及 SiO_2 和水，生成物主要則是 C-S-H 及 C-A-H 等水化產物，反應成果與反應物的種類、數量、及溫度有關；生成物則是以產生穩定鈣—矽結構系統為主。

5.3.8 XRD 試驗

XRD 成份分析主要目的在觀察水泥、混凝土系統內水化生成物的化合物種類。本研究主要採用第 15 組 RPC 配比做分析，XRD 分析結

果如圖 5-23 所示，由圖形上可以看主要水化生成物裡面的主要成份分別是 SiO_2 及 C-S-H，這兩種成份反應最明顯， SiO_2 是配比內材料內所使用的石英粉等原料，佔有一半以上的比例，因此反應的尖峰強度最為明顯，而 C-S-H 的繞射峰，表示水泥水化產物和水化產物 CH 與卜作嵐材料所形成 $\text{S}+\text{CH}\rightarrow\text{C-S-H}$ 膠體，由使用高量砂灰，反應速度也會加快，形成緻密的微結構，所形成的峰勢也特別尖銳，因此，可推論 RPC 裡的主要水化生產物即以 C-S-H 為主。

5.3.9 MIP 試驗

混凝土從新拌加水開始至硬固階段，除陷入的空氣及輸氣外，水泥漿水化過程中會形成孔隙結構，是水及有害物質滲入的管道。屬於連通的毛細管孔隙系統是支配混凝土透水性質的耐久性要素，而屬於不連續的孔隙系統，則為支配混凝土乾縮及潛變的因素；此外，孔隙數量則是控制抗壓強度的主要原因之一，孔隙率大小則影響耐久性。透水性孔隙結構是主導耐久性的重要因素之一[58, 69]，按 Power 孔隙分類系統[70]，可以分成大於 500\AA 及 500\AA 至 100\AA 孔隙為毛細管孔隙系統，支配透水性及可逆乾縮的部分；介於 $100\sim 25\text{\AA}$ 及小於 25\AA 以下孔隙部分則支配乾燥收縮的因子。RPC 是屬多漿系統，漿體用量約佔整體體積的二分之一，RPC 試體的乾縮量可能會因孔隙系統的細緻化及低水灰比的影響而異於一般混凝土試體。

表 5-13 及圖 5-24 至圖 5-27 顯示 RPC 的 MIP 量測結果，無論配比內有無添加纖維，似乎較不影響毛細管孔隙及膠體孔隙的體積，以 #14 及 #15 RPC 配比而言，從圖中可得知各配比內的毛細管孔隙的量約佔有 40 至 70% 之間，可能原因是試驗齡期為 7 天時，內部微觀生成物尚未塞住孔隙，形成毛細管孔較多，待 28 天量測時，會像 #13 的結果，膠孔比毛細管孔多，因此毛細管孔隙係支配是可透水孔隙及抗壓強度的最主要因素。#13 組試體毛細管孔隙的量不多，換言之，RPC 在透水-透氣及有害物質侵蝕管道比較少，此也可從電阻、氯離子電滲、氣體滲透性、吸水性試驗等得到證實，對 RPC 的自體收縮及乾燥收縮引

致微裂縫增加的現象，可從 SEM 圖形得到證實。RPC 的孔隙系統傾向微小細緻化，較難避免對日後的乾縮及潛變可能產生較大影響性。

5.3.10 氣體滲透試驗

儲存液體及氣體的混凝土槽體，如果使用混凝土材料，必須能阻擋液體及氣體的滲透，不致發生化學反應及滲漏。影響儲存槽的安全性及耐久性。對於修補系統結構而言，可以分成修補底材、界面及修補材料，三者之間必須是緊密，不能有滲漏的問題，水氣及有害離子溶液必須被摒除在外，而且不能與系統組成材料起反應。另一項重點就是系統的氣密性，尤以 RC 的腐蝕因子中最重要者就是氧氣(O₂)，如果能隔絕 O₂ 氣體滲入修補系統內，腐蝕因子缺少氧氣而無法形成腐蝕電池而中止。本研究參考文獻[62]採用甲醇液體在 58°C 溫度會揮發為氣體的特性，置在 85°C 環境溫度下，量測重量損失，計算氣體的滲透係數 K 值(m²)。測試之試體分成 RPC 及 OPC 兩種，結果如表 5-14 及圖 5-28 所示，8 組膠結砂漿的氣體滲透係數在 1.23×10⁻¹⁷ 至 2.74 ×10⁻¹⁷ m² 之間，RPC 因添加鋼纖維增加孔隙，其氣體滲透係數在 1.71×10⁻¹⁷ 至 14 ×10⁻¹⁷ m² 之間，均屬良好的低孔隙系統，和 MIP 及氯離子電滲量測結果較一致。MIP 試驗大都屬於膠體孔隙且小孔隙居多，孔隙系統屬於不連續的孔隙結構，氣密性可相對提昇。另外，由電滲試驗量測結果顯示，通過 RPC，即使 MIP 及氯離子電滲量無法顯示氣體滲透試驗結果，但是結果都可以印證 RPC 的巨觀是緻密系統，微觀部份則為緊密結構不連續的膠體孔隙，另一方面，透氣試驗受試體的含水氣狀況影響甚大，由於 RPC 烘乾時不容易，也可能造成氣體滲透阻力較大，所得滲透係數值 K 會較低，一般而言，經各試驗結果印證顯示，RPC 較水泥砂漿更緻密。

5.3.11 水份吸收試驗

混凝土的毛細管孔隙愈多，代表外界水份及有害離子可自由進出內、外部，結構體對有害氣體(O₂、CO₂、OH 等)及有害離子(S₄²⁻、H₂O、

CI等)的防護是非常薄弱的。混凝土有緻密的巨微觀結構，可有效地阻絕有害物質侵入內部與水化產物或粒料產生化學反應而分解，致使混凝土結構物產生破壞失去的耐久性。本研究採用混凝土吸收水份試驗(參考 BS1881:122)對 RPC(7 天齡期)使用 105°C 溫度烘乾 24 hr，並且稱重為 W_1 克。將試體浸泡於水中完全沒入，分別為 0、24、72 小時，取出擦乾稱得 W_2 克各階段的吸水率 S 如下式所示：

$$S = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (5-3)$$

觀察混凝土吸水率的變化，評估各種不同水泥素材的吸水性質的系統，判斷在修補材料及修補系統內保有含水量(s)的多寡，可簡易的判斷系統的良窳。表 5-15 及圖 5-29 為 RPC、OPC 及 Mortar 的水份吸收試驗結果，顯示 RPC 的吸水能量，在 72 小時吸水率為 0.76%，較其它兩種材料之吸水率低，對於 RPC 在服務環境吸收水份非常小。由文獻^[10]所做的 RPC 浸泡海水試驗，在 100 次海水循環所做的 RPC 吸 PC 的磨損試驗，RPC 性能優於 PC。試驗結果顯示，OPC 及 Mortar，在 1 天時，吸水率達 1.5% 以上，Mortar 更高達 3.5% 以上，顯示使用做為修補材料及構成的修補系統易遭受水份及有害離子侵入而劣化或破壞，尤其是有害離子滲入界面上，造成腐蝕效應而分離，系統即宣告失敗，RPC 的吸水率只有 0.76%，一般高性能混凝土用骨材的 24 小時吸率僅 0.8~1.0%，顯現出 RPC 性質堅硬及密實程度有如天然石頭或機碎石子般堅硬。因此，RPC 的低水份吸收性，也是營造耐久性修補系統的重要方法。

5.4 RPC 補強成效試驗

本研究中用為補強用的 RPC 材料計有兩種配比：#14 與 #15 配比，其中 RPC #14 組配比的材料力學性質與耐久性質試驗結果已於 5-3 節中述明，RPC #15 組配比的材料力學性質與耐久性質試驗結果如表 5-16 及表 5-17 所示。

5.4.1 圓柱抗壓貼片補強試驗

本項試驗總計進行兩次，每次皆同時製作常重混凝土未補強試體及 RPC 圓柱補強試體，RPC 材料於第一次試驗採用#14 配比，試驗結果如表 5-18、圖 5-30 及相片 5-17、5-18 所示；第二次試驗 RPC 材料則採用#15 配比，試驗結果如表 5-19、圖 5-31 及相片 5-19、5-20 所示。

抗壓強度之計算係採轉換斷面法，常重混凝土與 RPC 之彈性模數，係量測其動彈性模數除以 1.2 倍來估算之，茲將第一次試驗之詳細計算分析於附錄 1-1 說明，第二次試驗結果則以同法計算，不再贅述。

試驗結果顯示，經 RPC 補強後能有效提升混凝土之抗壓強度，由表 5-18 及表 5-19 可得知對於設計強度 $280\sim 350\text{ kgf/cm}^2$ 之常重混凝土，當 RPC 補強厚度為 10 mm 時，能提升抗壓強度約 9~28%；當 RPC 補強厚度為 15 mm 時，則能提升抗壓強度達 40%。

抗壓強度之所以提升，主要是因為使用之補強 RPC 材料其抗壓強度與彈性模數皆高於常重混凝土，使得常重混凝土猶如被放置於圍束的容器中抗壓，試驗過程中，持續受到 RPC 給予之側向壓力作用，故提升了整體的抗壓強度。

另外，由試驗相片 5-17~5-20 可發現，經 RPC 補強 10 mm 之抗壓試體表面裂縫較補強 15 mm 者明顯，不同補強厚度之試體於破壞後皆不會有剝落的情形，主要是因為 RPC 摻有不同方向排列之鋼纖維，將已破壞之 RPC 牢繫在一起，而內部常重混凝土受到外部 RPC 圍束也未見剝落。

5.4.2 抗彎貼片補強試驗

本項試驗總共進行兩次，每次皆同時製作常重混凝土未補強試體、CFRP 補強一層、CFRP 補強兩層及 RPC 之 10 mm、20 mm 及 U 型補強試體，RPC 材料於第一次試驗採用#14 配比，試驗結果如表 5-20，未補強 RC 試驗結果如圖 5-32，CFRP 補強一及二層試驗結果如圖 5-33，圖 5-34 所示，RPC 補強 10 mm 及 20 mm 試驗結果如圖 5-35

及圖 5-36，U 型補強試體試驗結果如圖 5-37；RPC 補強 10 mm 及 20 mm 及 U 型補強試體如相片 5-21~5-23 所示，未補強 RC 及 CFRP 補強一層及補強兩層第一次試驗如相片 5-24~5-26 所示。

第二次試驗 RPC 材料則採用#15 配比，試驗結果如表 5-21，未補強 RC 試驗結果如圖 5-38，CFRP 補強一及二層試驗結果如圖 5-39，圖 5-40 所示，RPC 補強 10 mm 及 20 mm 試驗結果如圖 5-41 及圖 5-42，U 型補強試體試驗結果如圖 5-43；RPC 補強 10 mm 及 20 mm 及 U 型補強試體如相片 5-27~5-29 所示，未補強 RC 及 CFRP 補強一層及補強兩層第一次試驗如相片 5-30~5-32 所示。

抗彎強度之計算係採轉換斷面法，常重混凝土與 RPC 之彈性模數，係量測其動彈性模數除以 1.2 倍來估算，CFRP 的彈性模數則引用廠商所提供之試驗資料（表 4-4），茲將第一次試驗之詳細計算分析於附錄 1-1、1-2 說明，第二次試驗結果則以同法計算，不再贅述。

CFRP 補強結果顯示，CFRP 貼片補強能大幅提升常重混凝土的抗彎強度，綜合兩次試驗結果，如表 5-20 及表 5-21 所示，貼覆一層 CFRP 貼片可將原本抗彎強度 8.50~11.73 MPa 提升至 81.82~141.10 MPa，強度提升率高達十倍，而貼覆兩層 CFRP 貼片之抗彎強度則較貼覆一層 CFRP 略高，但提升有限。

試驗過程中也發現介面黏貼品質的確是影響補強性能之因素，在第一次施作時，受到天候較為潮濕及混凝土表面未刻意磨平處理，即進行 CFRP 黏貼及試驗，由圖 5-31 及圖 5-32 中可以看到，在試體達到抗彎降伏強度後，CFRP 開始發揮作用，使混凝土試體持續變形，裂縫循兩材料之交介面延伸，最後脫落破壞，如相片 5-25、5-26 所示。有了前次經驗，在第二次施作試體前，將常重混凝土表面做清潔磨平處理後再進行 CFRP 黏貼及試驗，由圖 5-38 及圖 5-39 中可發現，當混凝土試體發生裂縫，致使抗彎強度驟降，但 CFRP 迅速發揮其抗拉强度高之特性，不但使試體持續變形，抗彎強度亦不斷提高，最後雖仍循底部之材料交介面破壞，但抗彎降伏強度及極限變形量已較前次試驗

提升許多，故 CFRP 黏貼品質為影響其補強性能主要因素之一。

在 RPC 貼片補強方面，同樣也能增加混凝土試體之抗彎強度，由表 5-20、5-21 中發現隨著 RPC 補強厚度增加，其抗彎強度提升有限，RPC 補強 20 mm 之強度提升率僅較補強 10 mm 約 10%，而採 U 型補強之抗彎強度提升率也與補強 10 mm、20 mm 相近。

從試驗相片中可明顯看出裂縫因有鋼纖維繫牢而減緩裂縫寬度延伸，因此在試驗過程中，雖然混凝土達到抗彎降伏強度，但試體仍不會斷裂，故試驗於載重下降至 10%降伏載重時即停止施作。並同時定義 RPC 補強試體之極限抗彎載重為 10%降伏抗彎載重，其對應之變形量則為極限抗彎變形 δ_f ，而降伏抗彎載重對應之變形量為降伏抗彎變形 δ_y 。

綜合比較兩種補強抗彎材料特性，以 RPC#15 配比及 CFRP 為，例如表 5-21 所示，RPC 補強抗彎結果之 δ_f/δ_y 較 CFRP 補強高，顯示 RPC 材料在抗彎補強上具有較高的延展性，主要是因為 RPC 添有 2%的鋼纖維，能有效延緩裂縫發展。

若將載重變形曲線下方之面積視為變形能量，計算結果發現，以 CFRP 材料補強後試體變形能量較 RPC 補強者高，即以 CFRP 補強後之試體較不易變形，若欲達到與 RPC 補強試體同樣變形量，需要更大的載重。

另外，由表 5-21 中也發現 RPC 之 U 型補強試體其 δ_f/δ_y 皆較底部補強 10 mm、20 mm 高，推測原因為試體受力底部產生張力裂縫後，裂縫隨之由表面向上及向內延伸，但因試體外部為 RPC 材料包裹，其所含之鋼纖維抑止裂縫伸展速度，致使其延展性較底部補強為佳。

根據以上試驗結果與討論顯示，由於兩種材料應用於抗彎補強上具有不同之特性，於工程實務應用時，若採 CFRP 貼片進行抗彎構件補強時，建議採用一層；若欲使用 RPC 材料，則應採取 U 型補強方式，可同時提升抗彎構件之強度與延展性。

表 5-1 十二組膠結砂漿及三組活性粉混凝土(RPC)配比材料 (kg/m³)

組號	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								
#1	283	217	162	123	0	192	175	0	910	243	13	0
#2	417	298	208	147	0	207	138	0	729	204	11	0
#3	144	236	177	134	0	209	190	0	941	255	13	0
#4	192	301	210	148	0	209	139	0	886	234	12	0
#5	283	217	162	123	0	192	175	0	989	203	27	0
#6	417	298	208	147	0	207	138	0	795	171	23	0
#7	144	236	177	134	0	209	190	0	1024	214	29	0
#8	192	301	210	148	0	209	139	0	962	197	26	0
#9	314	241	180	136	173	84	125	199	597	224	12	0
#10	413	296	206	146	166	70	79	184	553	200	11	0
#11	157	258	193	146	185	90	134	212	635	239	13	0
#12	212	332	232	164	186	79	88	194	583	215	11	0
#13	278	213	159	120	0	188	171	0	892	238	13	156
#14	1143				0	222	191	0	635	146	56	160
#15	413	296	206	146	166	70	79	184	553	165	41	156

表 5-2 十五組配比新拌漿體流度試驗值

配比組號	試體編號	流度(mm)	備註
#1	1604-2004	190	利用黃氏粒料裹漿厚度緻密配比法計算而得
#2	1605-2004	180	
#3	2004-2004	180	
#4	2005-2004	180	
#5	1604-1704	190	
#6	1605-1704	180	
#7	2004-1704	180	
#8	2004-1704	180	
#9	FS-1604-2004	200	
#10	FS-1605-2004	155	
#11	FS-2004-2004	180	
#12	FS2004-2004	190	
#13	1604-2004-2% (RPC #13)	170	
#14	M18-2% (RPC #14)	155	參考國內常用 RPC 配比
#15	FS1605-2004-2% (RPC #15)	210	

表 5-3 膠結砂漿及 PRC 之抗壓強度

配比編號	試體編號	抗壓強度(MPa)			
		3 天	7 天	14 天	28 天
#1	1604-2004	65.6	89.9	81.4	75.2
#2	1605-2004	56.8	81.7	78.7	92.6
#3	2004-2004	68.4	93.9	89.5	84.8
#4	2005-2004	58.8	87.7	87.2	88.0
#5	1604-1704	79.8	83.8	78.4	78.9
#6	1605-1704	68.9	82.2	79.4	90.9
#7	2004-1704	78.9	87.6	61.2	89.4
#8	2005-1704	72.8	77.1	76.0	76.8
#9	FS1604-2004	64.0	67.0	71.5	91.5
#10	FS1605-2004	56.0	62.5	67.5	88.0
#11	FS2004-2004	52.0	55.0	65.0	113.5
#12	FS2005-2004	53.0	61.0	70.0	82.5
#13	1604-2004-2%	57.8	105.8	111.0	106.5
#14	M18-2%	77.3	124.7	130.0	124.7

表 5-4 膠結砂漿及 RPC 之劈裂強度

配比編號	試體編號	劈裂強度(MPa)			
		3 天	7 天	14 天	28 天
#1	1604-2004	5.2	5.9	6.0	5.1
#2	1605-2004	3.9	5.6	6.1	7.5
#3	2004-2004	5.0	4.8	7.3	7.2
#4	2005-2004	4.7	5.5	7.2	7.7
#5	1604-1704	4.8	5.9	7.3	6.9
#6	1605-1704	4.2	8.0	7.5	7.1
#7	2004-1704	4.8	7.1	6.5	8.2
#8	2005-1704	6.4	6.2	5.4	8.9
#13	1604-2004-2%	16.2	20.5	18.5	19.5
#14	M18-2%	13.4	21.4	18.1	20.3

表 5-5 膠結砂漿與 RPC 之抗彎強度

配比編號	試體編號	抗彎強度 (MPa)	
		7 天	28 天
#1	1604-2004	12.7	18.6
#2	1605-2004	11.1	20.0
#3	2004-2004	13.9	16.4
#4	2005-2004	11.8	17.8
#5	1604-1704	9.5	9.0
#6	1605-1704	9.6	18.6
#7	2004-1704	12.2	24.6
#8	2005-1704	12.1	22.3
#13	1604-2004-2%	21.4	24.6
#14	M18-2%	16.6	20.3

表 5-6 拉拔試驗結果

握裹材料	拉拔力量 (kg)	拉拔強度 (MPa)	平均拉拔強度 (MPa)	強度提升率 (%)
Mortar	1581	4.89	4.78	—
	1564	4.84		
	1496	4.63		
RPC #13	3445	10.65	10.08	110.75
	3129	9.67		
	3207	9.92		
RPC #14	3502	10.83	10.55	120.56
	3345	10.34		
	3389	10.48		
RPC #15	4052	12.53	11.57	141.84
	3555	10.99		
	3617	11.18		

註：本試驗採用#3 鋼筋，標稱直徑 10.1 mm，握裹深度為 10 cm
 握裹面積 = $\pi(1.01) \times 10 = 31.73\text{cm}^2$

表 5-7 斜剪試驗結果

試體種類 (維修材料/底材)	施加力量 (kg)	剪力強度 (MPa)	平均剪力強度 (MPa)
RPC #13/Mortar	840	2.10	2.88
	1175	2.94	
	1445	3.61	
RPC #14/Mortar	840	2.10	2.73
	1130	2.82	
	1305	3.26	
RPC #15/Mortar	1780	4.45	4.47
	1640	4.10	
	1950	4.87	

註：本試驗採用直徑 5 cm 圓柱試體，斜剪角度 60°，

$$\text{受剪面積} = \frac{\pi (5)^2}{4} / \cos 60^\circ = 39.27 \text{cm}^2$$

表 5-8 膠結砂漿與 RPC 之電滲量

配比編號	試體編號	電滲量(庫倫)
#1	1604-2004	43.2
#2	1605-2004	108.0
#3	2004-2004	118.8
#4	2005-2004	172.8
#5	1604-1704	70.2
#6	1605-1704	43.2
#7	2004-1704	63
#8	2005-1704	236.7
RPC #13	1604-2004-2%	501.3
RPC #14	M18-2%	378.9
控制組	Mortar	>40000

表 5-9 膠結砂漿與 RPC 之表面電阻

配比編號	試體編號	表面電阻(kΩ-cm)			
		3 天	7 天	14 天	28 天
#1	1604-2004	36	150	326	653
#2	1605-2004	24	176	444	659
#3	2004-2004	22	105	246	501
#4	2005-2004	20	98	244	491
#5	1604-1704	49	248	596	1269
#6	1605-1704	38	293	708	1621
#7	2004-1704	33	195	480	992
#8	2005-1704	49	220	519	988
RPC #13	1604-2004-2%	187	194	199	186
RPC #14	M18-2%	265	310	407	440

表 5-10 膠結砂漿與 PRC 之超音波波速

配比編號	試體編號	超音波波速(m/s)			
		3 天	7 天	14 天	28 天
#1	1604-2004	4371	4448	4485	4438
#2	1605-2004	4434	4527	4585	4543
#3	2004-2004	4287	4372	4427	4478
#4	2005-2004	4282	4390	4456	4493
#5	1604-1704	4429	4566	4549	4610
#6	1605-1704	4429	4614	4625	4597
#7	2004-1704	4360	4463	4494	4462
#8	2005-1704	4409	4508	4513	4556
#9	FS1604-2004	4371	4304	4352	4498
#10	FS1605-2004	4434	4304	4469	4543
#11	FS2004-2004	-	3787	4299	4571
#12	FS2005-2004	-	4194	4468	4563
#13	1604-2004-2%	4382	4423	4461	4465
#14	M18-2%	4479	4490	4497	4503

表 5-11 不同材料碳化試驗結果

試體	碳化深度(mm)		
	7 天齡期	14 天齡期	28 天齡期
RPC	0	0	0
Mortar	2.1	2.3	6.3
OPC	2.2	2.3	3.2

表 5-12 本研究各類混凝土磨耗深度

配比	500 轉車輪磨耗深度 mm
RPC #15	0.13 mm
OPC	0.49 mm
Mortar	0.59 mm

表 5-13 MIP 孔隙分佈試驗值 (RPC)

試體編號	<25Å	25Å~100Å	100Å~500Å	>500Å	Total Volume	膠體/孔隙比%
RPC #13	0.001	0.0437	0.0083	0.006	0.059	75.76
RPC #14	0.001	0.0204	0.0042	0.0128	0.0384	55.73
RPC #15-1	0.001	0.0200	0.027	0.012	0.060	35.00
RPC #15-2	0.001	0.0320	0.040	0.01	0.084	32.53

表 5-14 不同材料之氣體滲透係數

試片編號	$K(m^2) \times 10^{-17}$	備註
1604-2004 (#1)	1.531	
1605-2004 (#2)	1.613	
2004-2004 (#3)	1.852	
2005-2004 (#4)	2.741	
1604-1704 (#5)	1.821	
1605-1704 (#6)	2.279	
2004-1704 (#7)	2.193	
2005-1704 (#8)	1.230	
RPC #13	1.706	S/C = 0.86
RPC #14	1.824	S/C = 1.8
RPC #15	1.982	
OPC	8.289	

表 5-15 不同材料之水份吸收試驗值 (%)

試體編號	一小時(%)	一天 (%)	三天 (%)
1604-2004	0.39%	0.81%	0.90%
1605-2004	0.34%	0.57%	0.62%
2004-2004	0.42%	0.72%	0.80%
2005-2004	0.53%	0.84%	0.91%
1604-1704	0.39%	0.64%	0.69%
1605-1704	0.33%	0.47%	0.50%
2004-1704	0.44%	0.69%	0.76%
2005-1704	0.48%	0.73%	0.79%
RPC #13	0.33%	0.63%	0.76%
RPC #14	0.37%	0.72%	0.86%
RPC #15	0.47%	0.73%	0.76%
OPC	1.02%	1.60%	1.66%
Mortar	2.74%	3.88%	3.95%

表 5-16 RPC #15 基本力學性質(7 天)(含動彈、動剪)

項目	抗壓強度 (MPa)			劈裂強度 (MPa)			抗彎強度 (MPa)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
試體 編號									
試驗值	72.9	76.5	78.2	11.2	11.7	11.6	16.9	20.4	22.2
平均值	75.9			11.5			19.8		
項目	動彈性模數 (GPa)			動剛性模數 (GPa)			動卜松比		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
試體 編號									
試驗值	41.37	42.07	41.76	16.36	16.39	16.34	0.26	0.28	0.28
平均值	41.73			16.36			0.27		

表 5-17 RPC #15 耐久性質(7 天)

項目	超音波速 (m/s)			表面電阻 (kΩ)			磨耗 (mm)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
試驗值	4620	4611.46	4607.45	1561	1567	1567	0.15	0.1	0.126
平均值	4612.97			1565			0.1254		
項目	流度 (mm)			電滲 (庫倫)			碳化 (mm)		
	1			1			1	2	3
試驗值	210			643.5			0.0	0.0	0.0
平均值	—			—			0.0		

表 5-18 RPC #14 圓柱補強

	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)	強度提升率 (%)
未補強	26.75	27.47	—
	28.23		
	27.43		
補強 10 mm	36.09	35.36	28.72
	33.99		
	36.00		
補強 15 mm	40.13	38.46	40.01
	40.74		
	34.51		

表 5-19 RPC #15 組圓柱補強

	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)	強度提升率 (%)
未補強	37.27	36.09	—
	36.25		
	34.75		
補強 10 mm	38.83	39.51	9.49
	37.62		
	42.09		
補強 15 mm	51.72	49.80	38.00
	50.21		
	47.48		

表 5-20 RPC #14 貼片抗彎補強

	最大載重 (kg)	最大變形量 (mm)	抗彎強度 (MPa)	平均 抗彎強度 (MPa)	強度 提升率 (%)	平均 變形量 (mm)
未補強	2790	0.62	8.50	8.76	—	0.61
	3150	0.61	9.16			
	2970	0.60	8.63			
CFRP 補強一層	3730	1.34	81.82	83.98	858.67	1.19
	4030	1.07	88.29			
	3730	1.15	81.82			
CFRP 補強兩層	4460	1.39	92.12	91.33	942.58	1.28
	4510	1.30	93.00			
	4310	1.14	88.88			
RPC 補強 10 mm	4360	5.10	12.90	15.25	74.09	3.63
	5240	2.90	17.60			
	4380	2.90	—			
RPC 補強 20 mm	5310	3.70	16.02	17.00	94.10	5.61
	6270	4.21	18.91			
	5530	8.93	16.08			
RPC U 型 包裹補強	4750	4.80	14.20	15.27	74.32	4.67
	4900	4.00	14.66			
	5670	5.20	16.96			

表 5-21 RPC #15 貼片抗彎補強

	降伏 載重 (kgf)	降伏 變形量 δ_y (mm)	極限 變形量 δ_f (mm)	δ_f / δ_y	Energy (ton · mm)	抗彎 強度 (MPa)	平均 抗彎強度 (MPa)	強度 提升率 (%)
未補強	3928	0.40	0.43	1.08	0.92	11.73	11.24	—
	3640	0.49	0.50	1.03	0.70	11.42		
	4036	0.47	0.51	1.11	0.69	10.58		
CFRP 補強一層	6196	1.71	1.78	1.04	7.82	117.73	133.25	1085.50
	7416	1.30	1.44	1.10	6.80	140.91		
	7026	1.48	1.50	1.02	6.67	141.10		
CFRP 補強兩層	7446	3.02	3.19	1.06	14.01	134.23	139.51	1141.19
	7820	3.21	3.86	1.20	20.92	140.97		
	7956	3.12	3.18	1.02	15.27	143.32		
RPC 補強 10 mm	4254	0.64	5.50	8.66	8.41	12.44	11.85	5.43
	3622	0.62	3.40	5.48	4.60	10.59		
	4284	1.20	5.07	4.24	6.27	12.53		
RPC 補強 20 mm	5000	0.53	7.24*	13.65	15.59	17.24	14.83	31.94
	4324	0.58	3.65	6.35	6.09	14.91		
	3584	0.54	3.83	7.16	5.04	12.35		
RPC U 型 包裹補強	4996	0.585	6.05	10.34	10.09	14.16	14.82	31.85
	4870	0.4	5.23	13.24	9.30	13.80		
	5826	0.56	5.57	10.03	13.58	16.51		

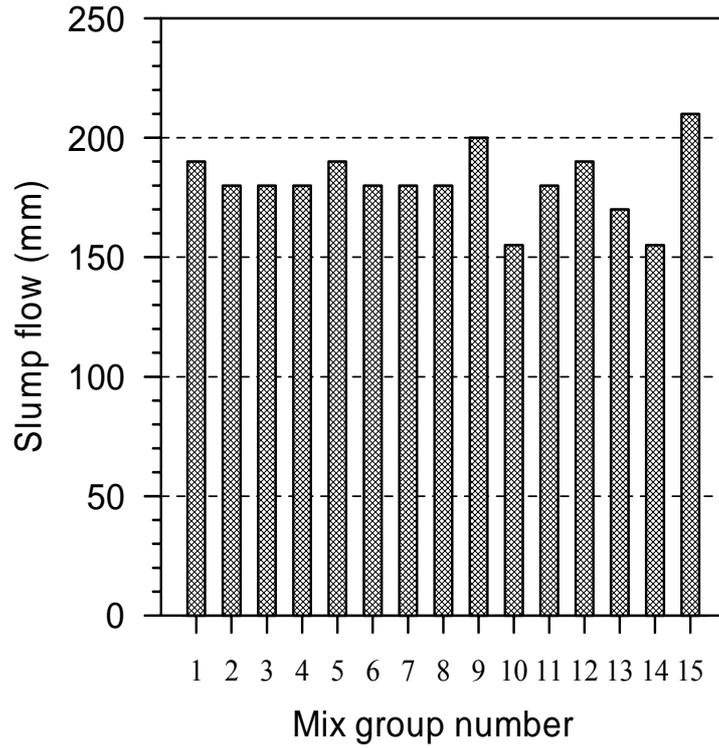


圖 5-1 膠結砂漿及 RPC 新拌性質坍流度試驗值 (15 組)

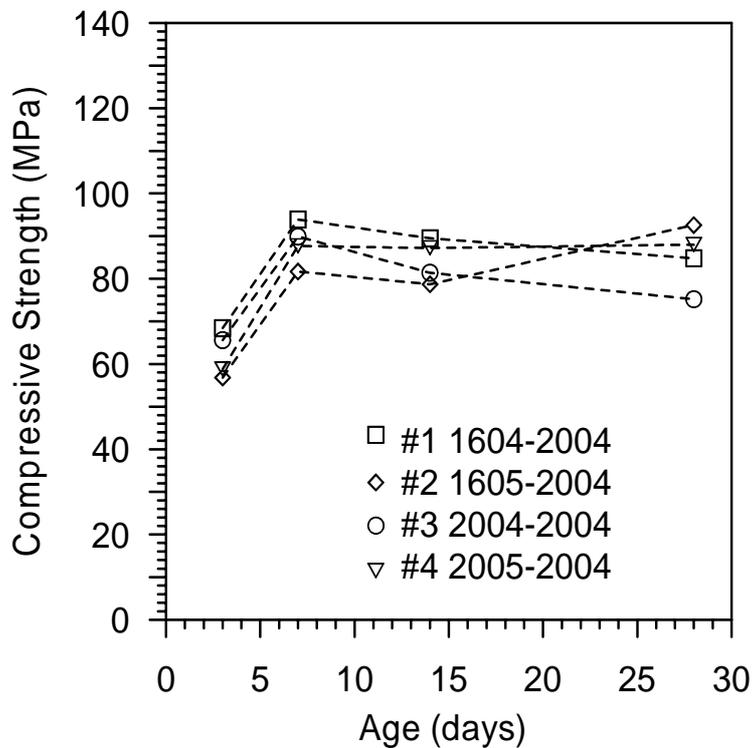


圖 5-2 膠結砂漿在不同齡期抗壓強度發展 (W/B = 0.2, 不含飛灰或爐石粉)

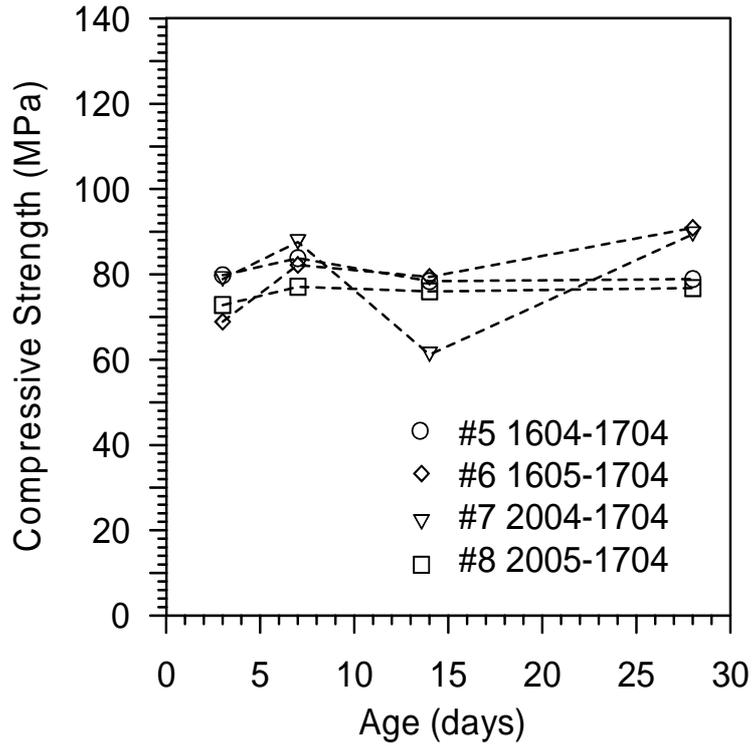


圖 5-3 膠結砂漿在不同齡期抗壓強度發展 (W/B = 0.17，不含飛灰或爐石粉)

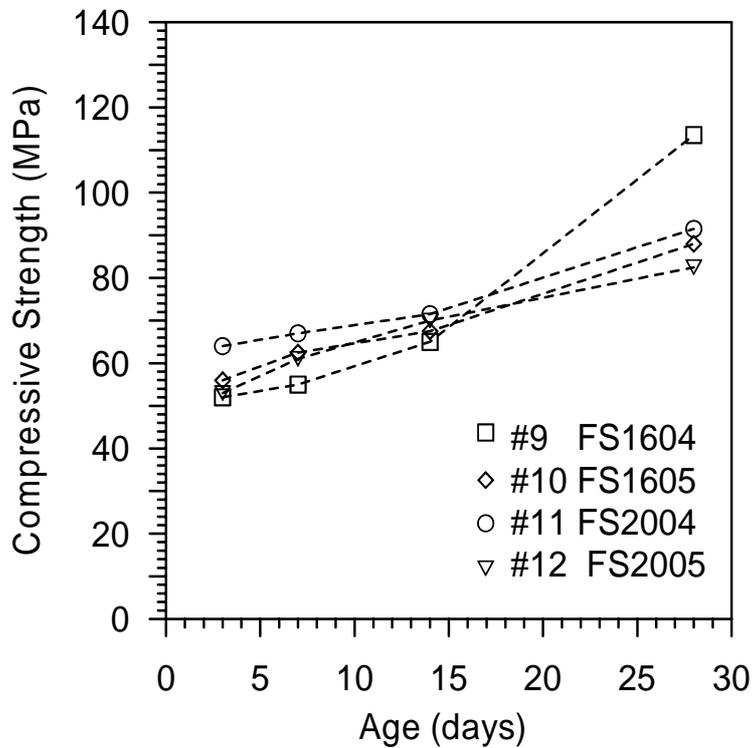


圖 5-4 膠結砂漿在不同齡期抗壓強度發展 (W/B=0.20 添加飛灰與爐石)

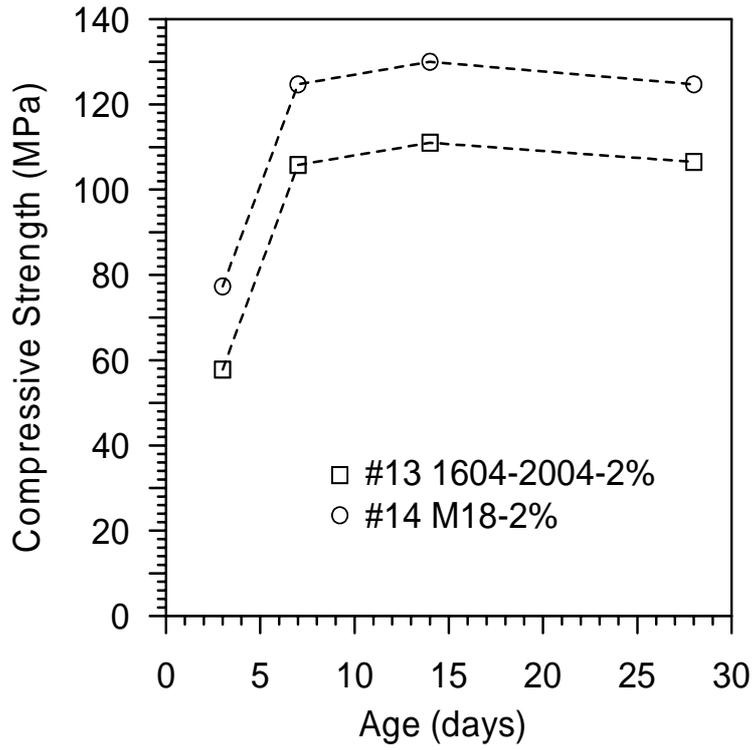


圖 5-5 RPC 抗壓強度 (第#13 及#14 組)

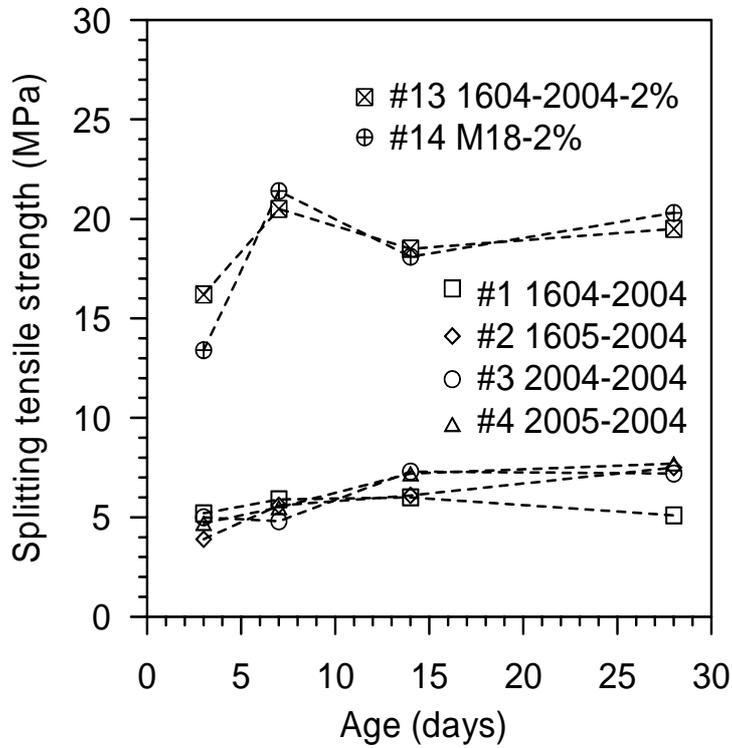


圖 5-6 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期劈裂強度發展 (W/B=0.2)

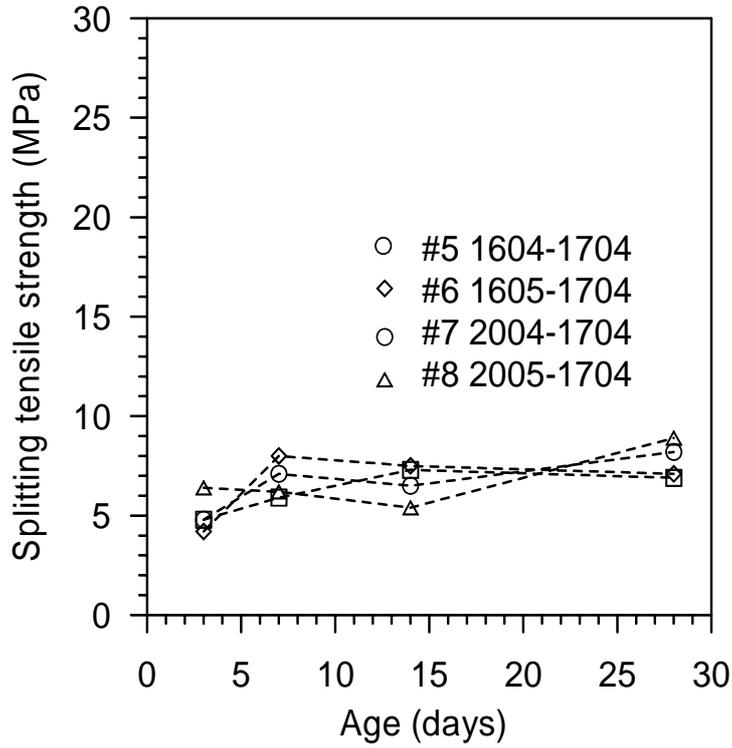


圖 5-7 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期劈裂強度發展(W/B=0.17)

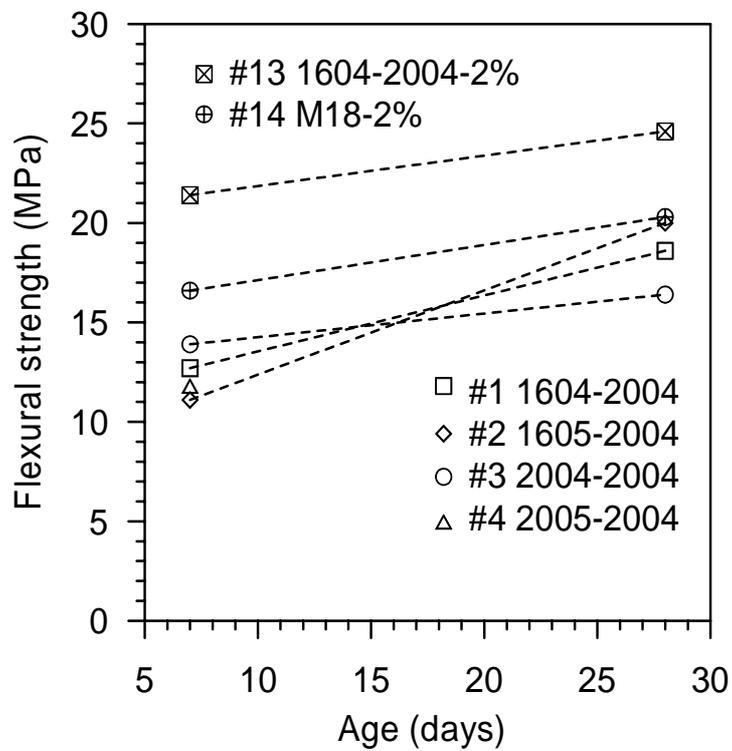


圖 5-8 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期抗彎強度發展(W/B=0.2)

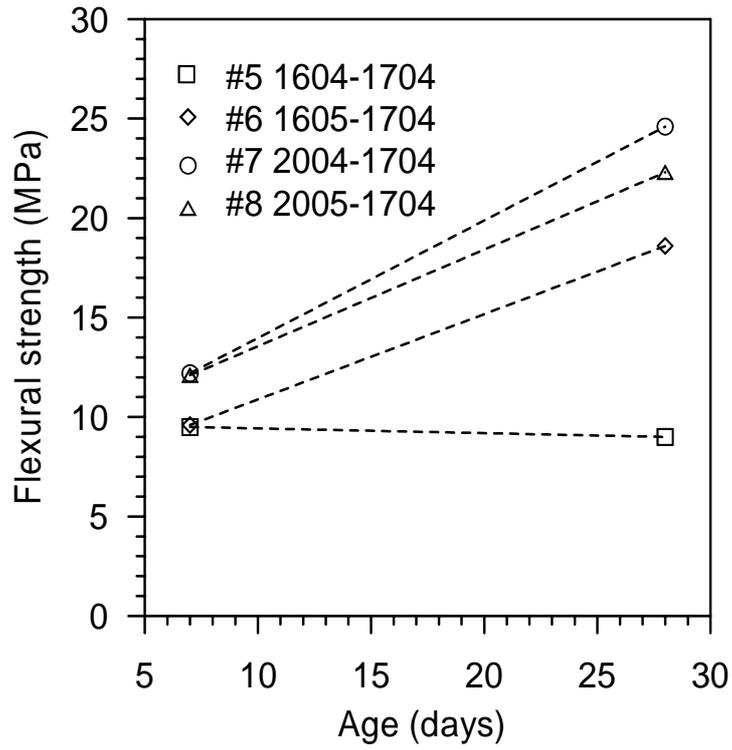


圖 5-9 膠結砂漿在不同齡期抗彎強度發展(W/B=0.17)

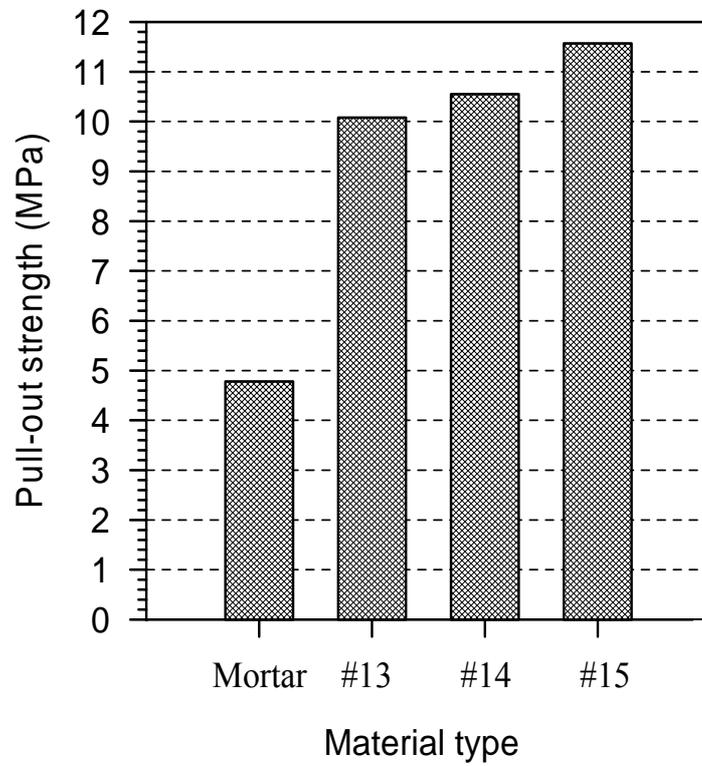


圖 5-10 RPC 及水泥砂漿拉拔試驗結果

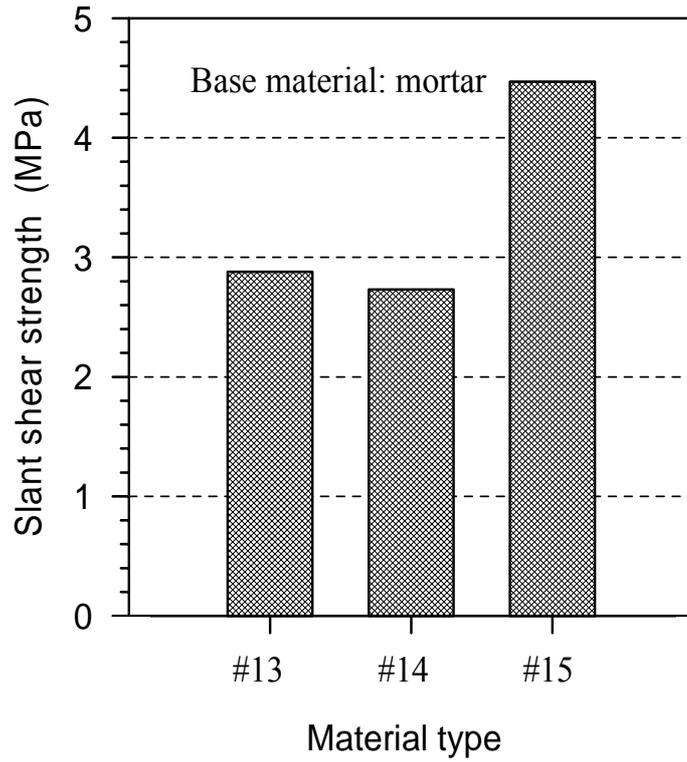


圖 5-11 RPC 斜剪試驗結果

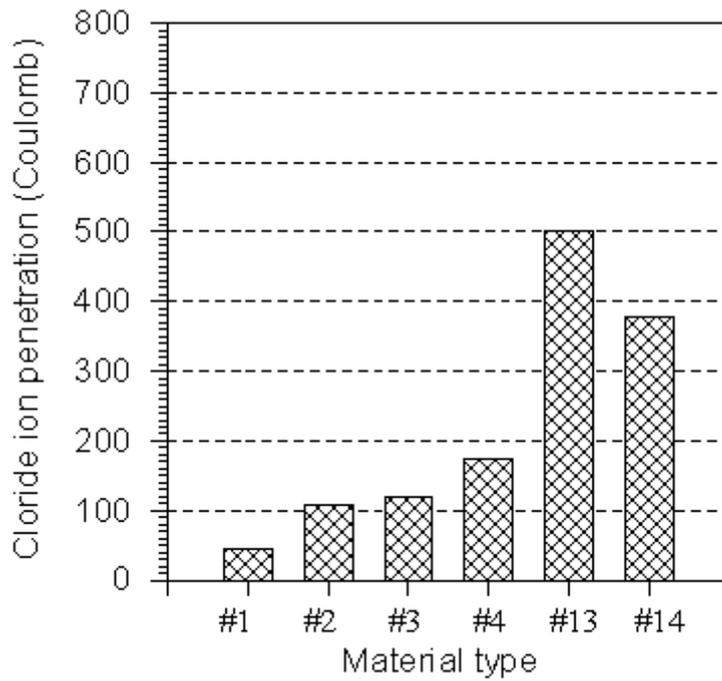


圖 5-12 膠結砂漿及 RPC 電滲量
(控制組 Mortar > 40000 庫倫) (W/C=0.20)

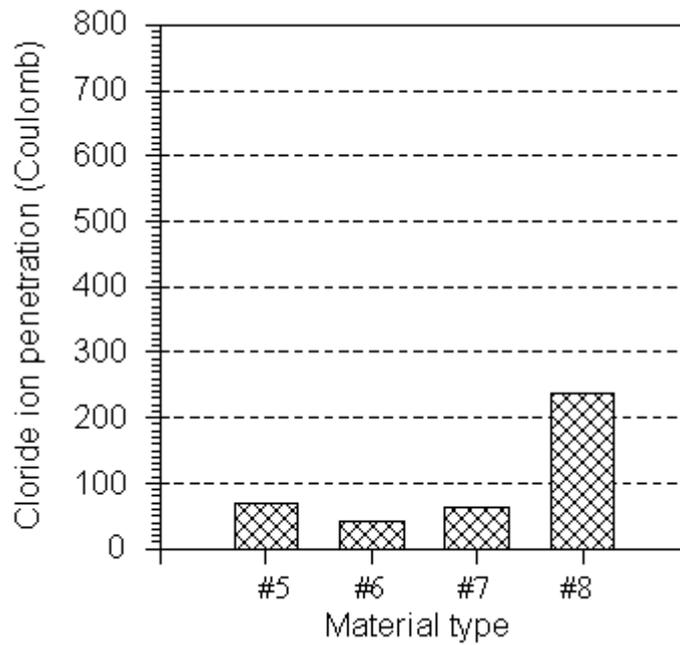


圖 5-13 膠結砂漿電滲量(控制組 Mortar > 40000 庫倫)
(W/C=0.17)

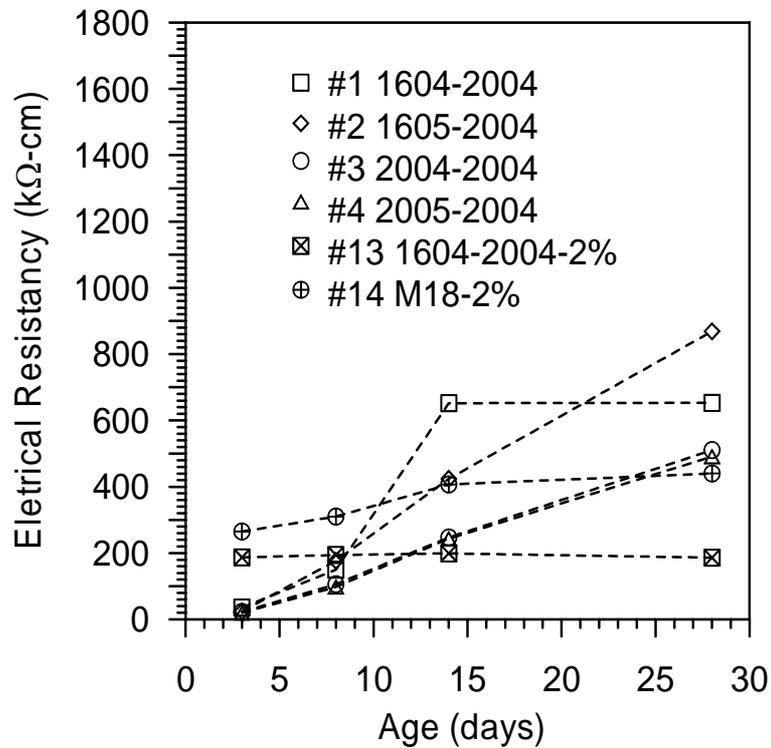


圖 5-14 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期之表面電阻(W/C=0.20)

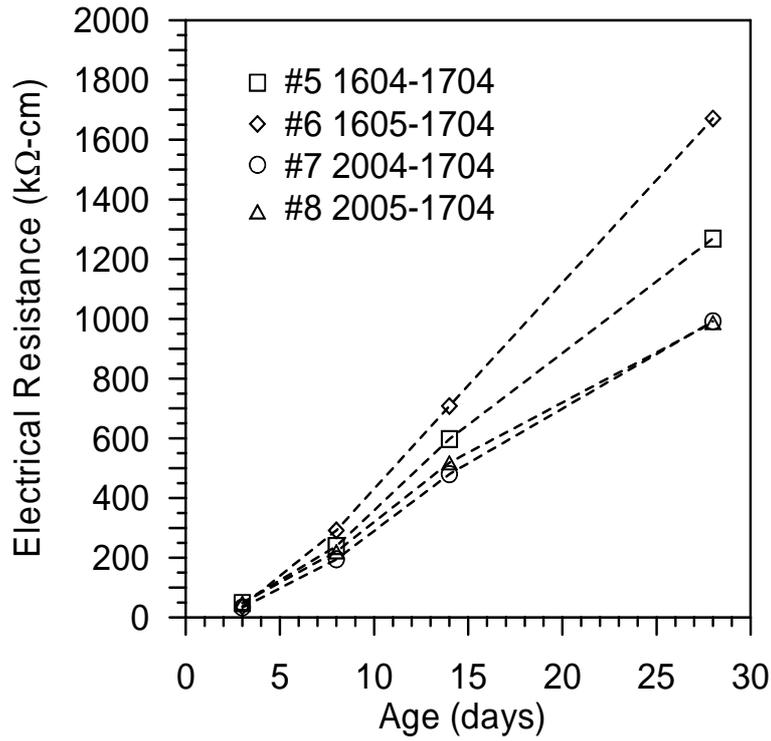


圖 5-15 膠結砂漿在不同齡期之表面電阻(W/C=0.17)

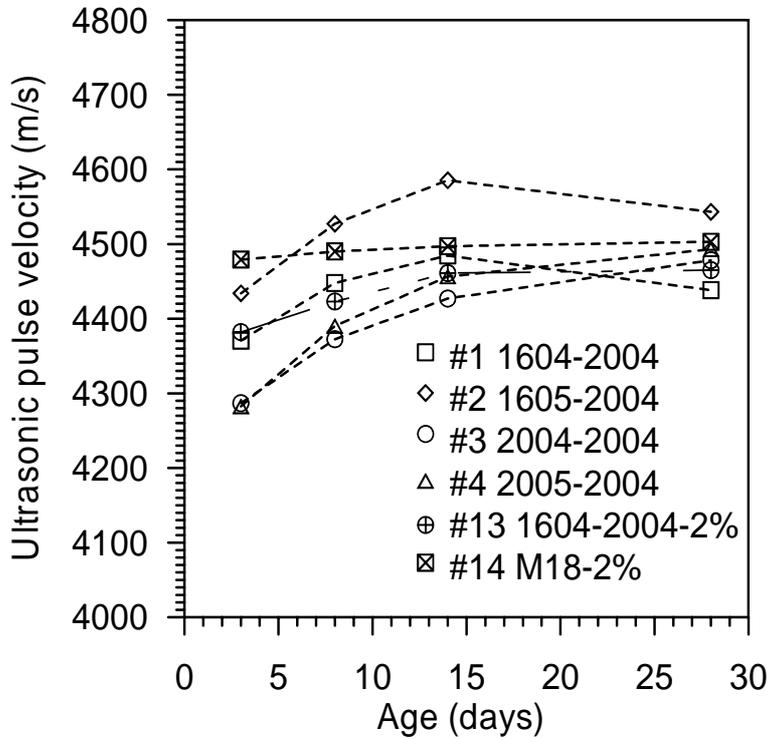


圖 5-16 膠結砂漿及 RPC 在不同齡期超音波波速發展(W/B=0.20)

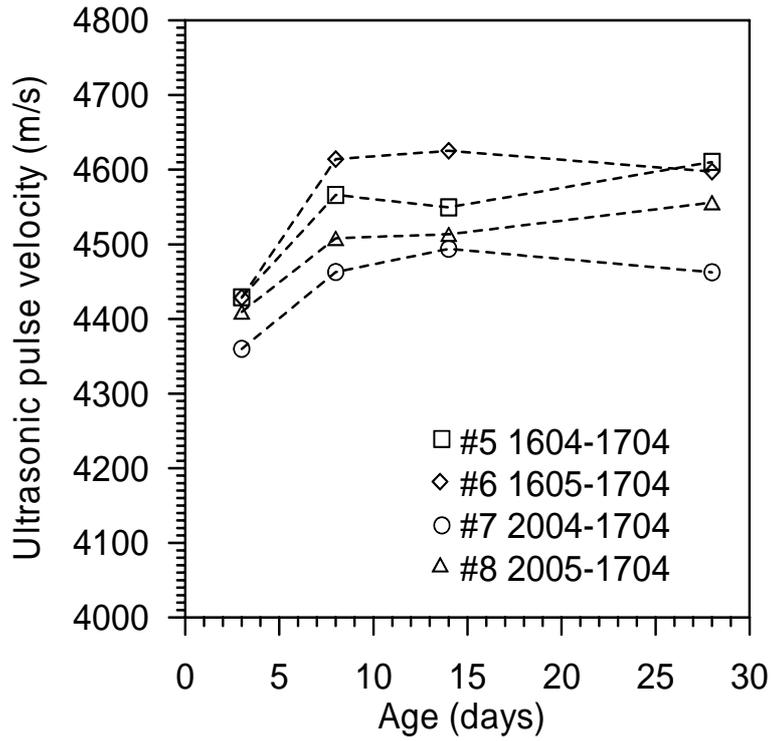


圖 5-17 膠結砂漿在不同齡期超音波波速發展(W/B=0.17)

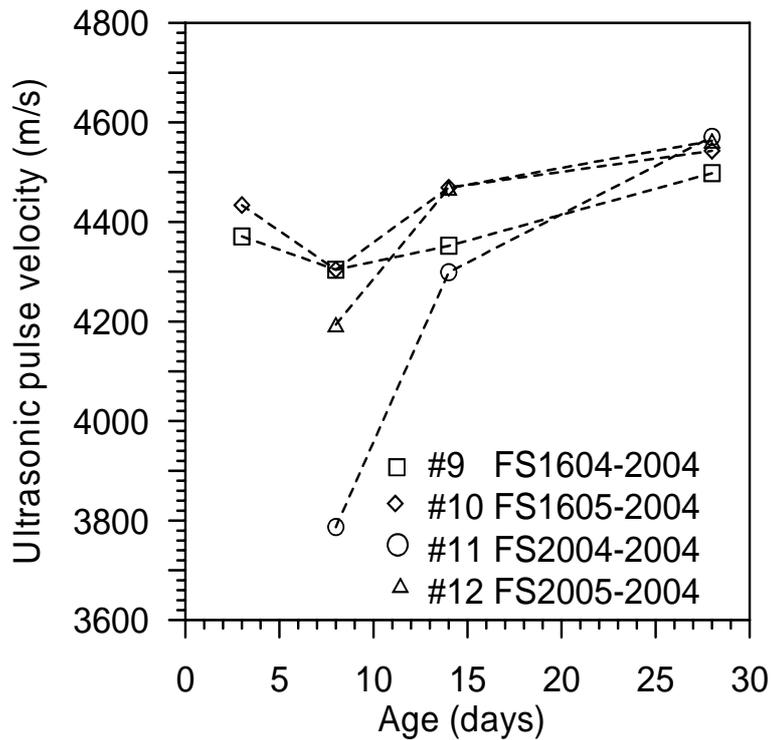


圖 5-18 膠結砂漿添加飛灰與爐石在不同齡期超音波波速發展 (W/B=0.20)

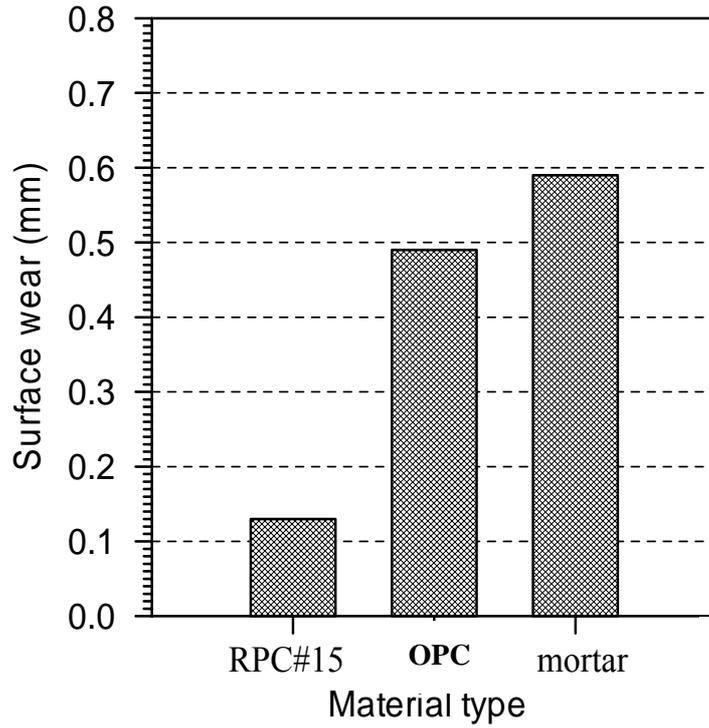


圖 5-19 表面磨耗試驗結果

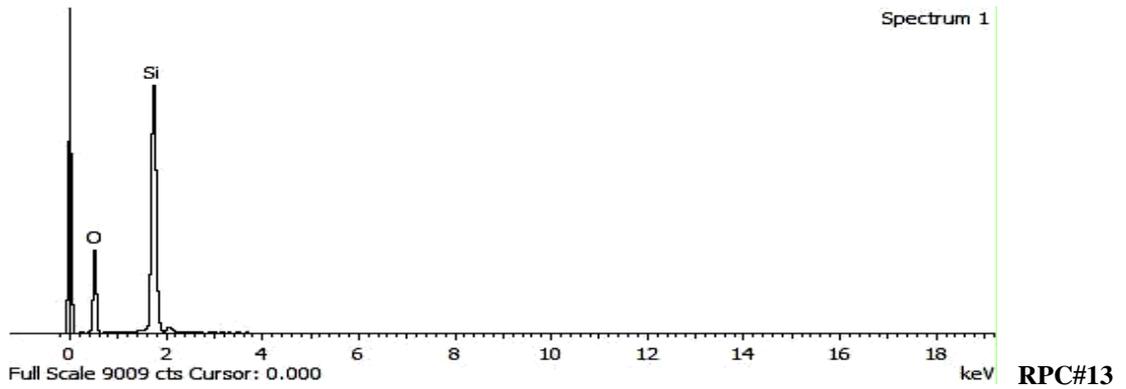


圖 5-20 EDS 圖 (RPC #13)

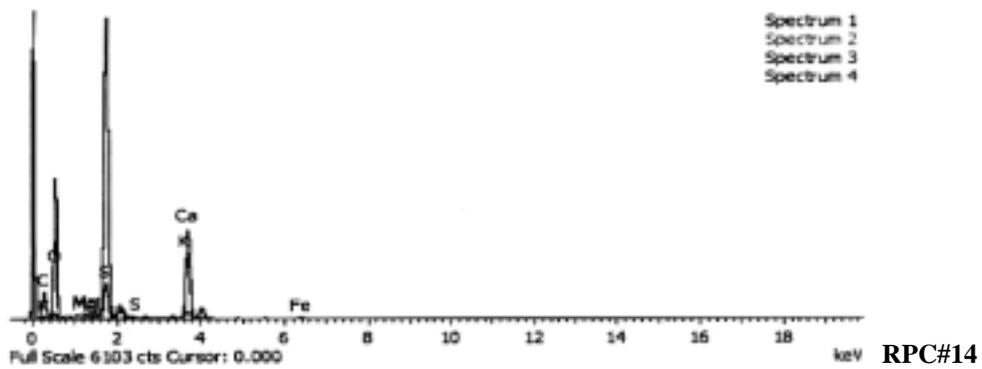


圖 5-21 EDS 圖 (RPC #14)

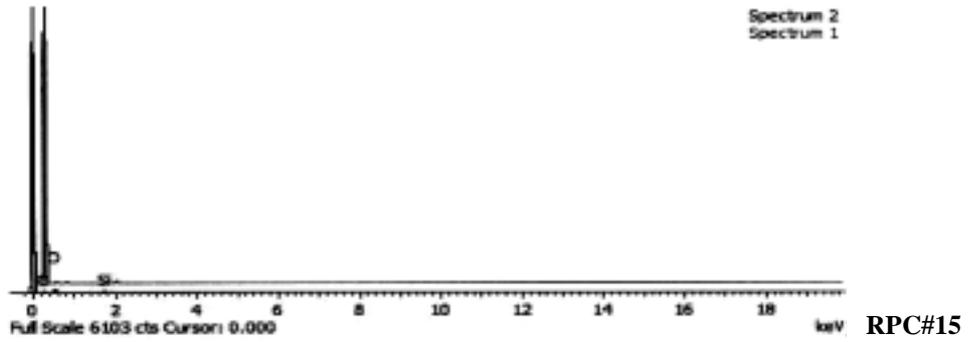


圖 5-22 EDS 圖 (RPC #15)

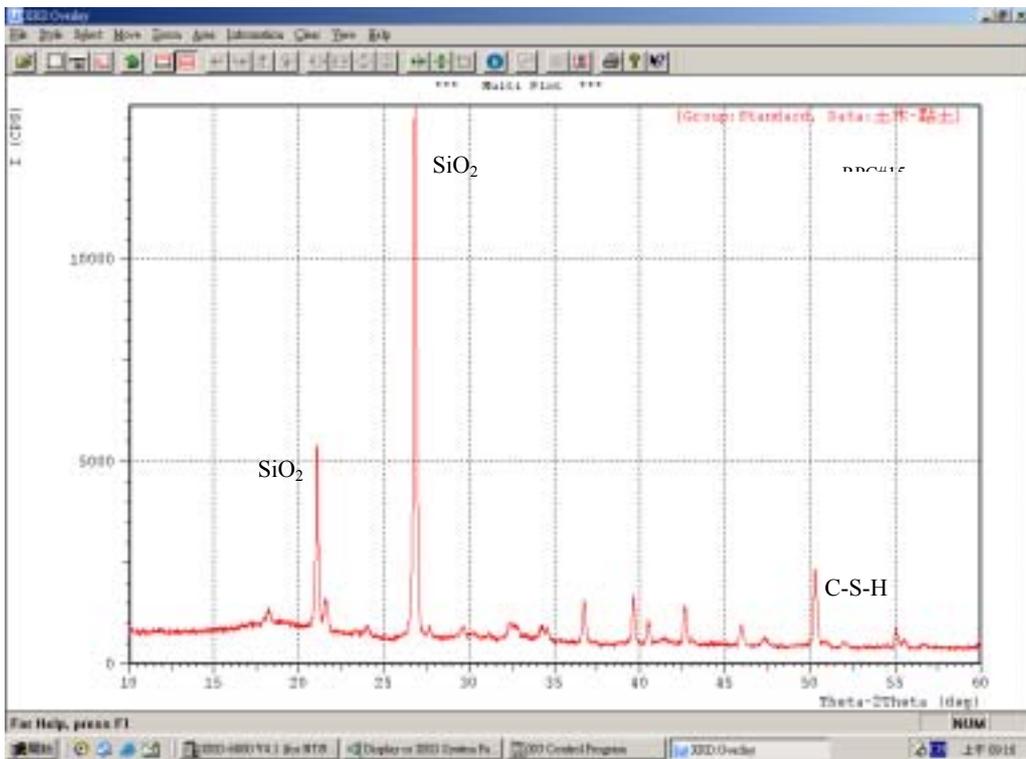


圖 5-23 RPC #15 配比的 XRD 分析

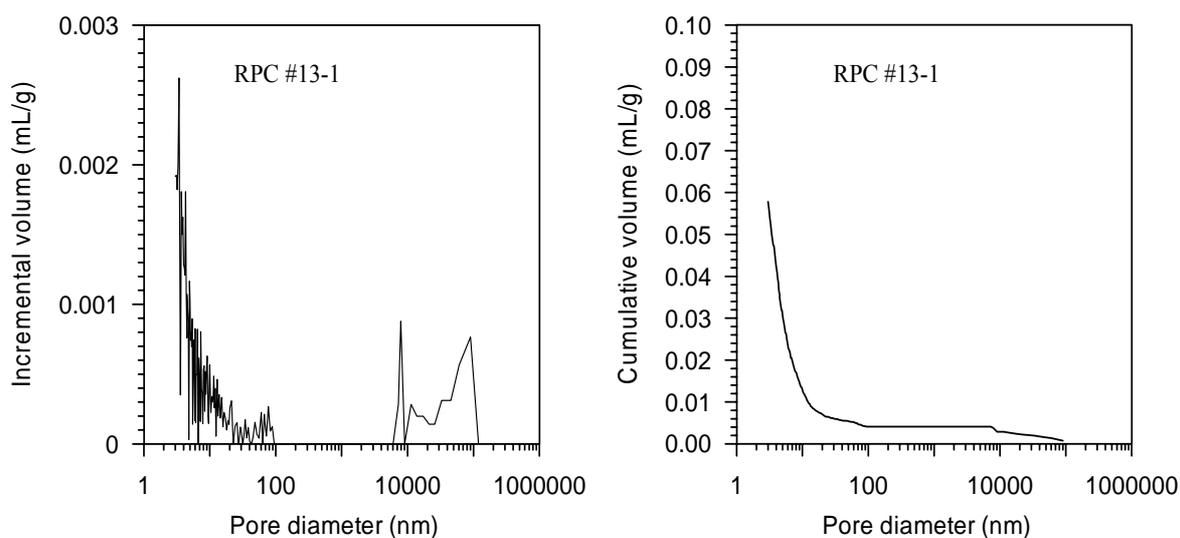


圖 5-24 典型#13-1 試體 MIP 孔隙量測結果

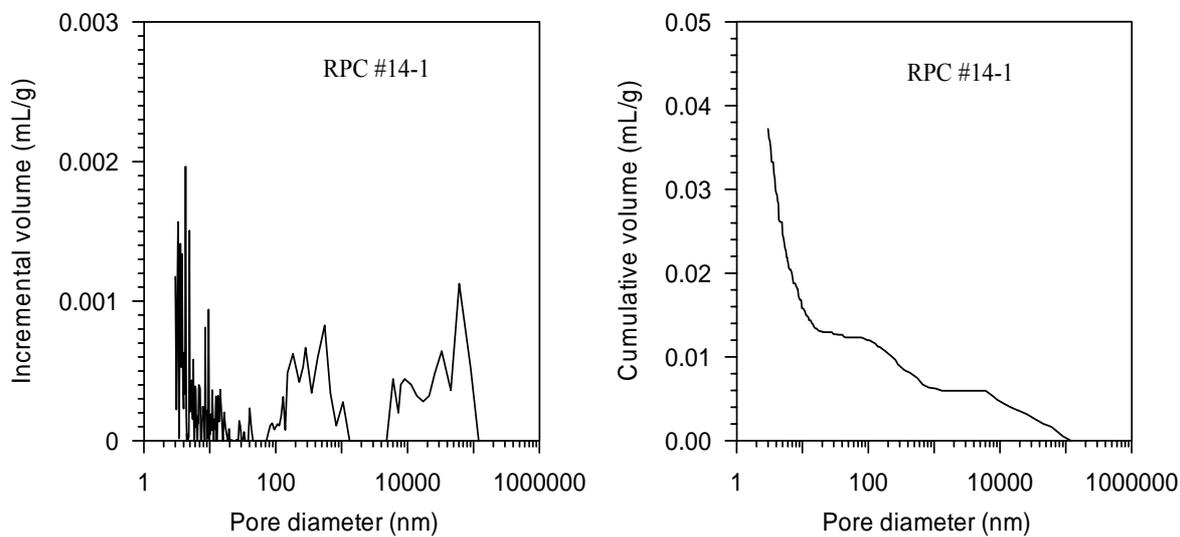


圖 5-25 典型#14-1 MIP 孔隙量測結果

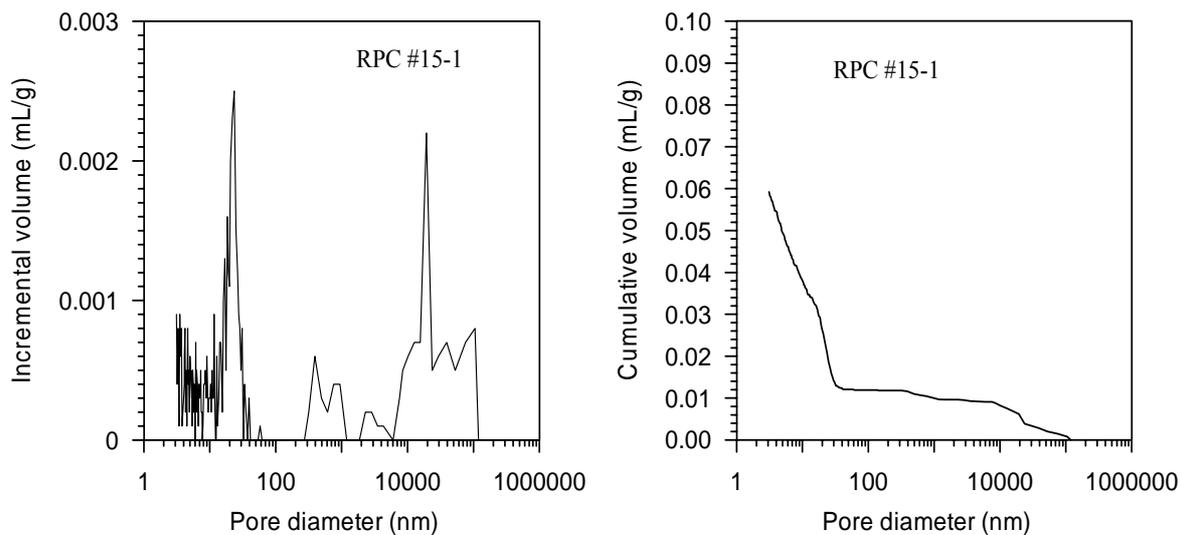


圖 5-26 典型#15-1 MIP 孔隙量測結果

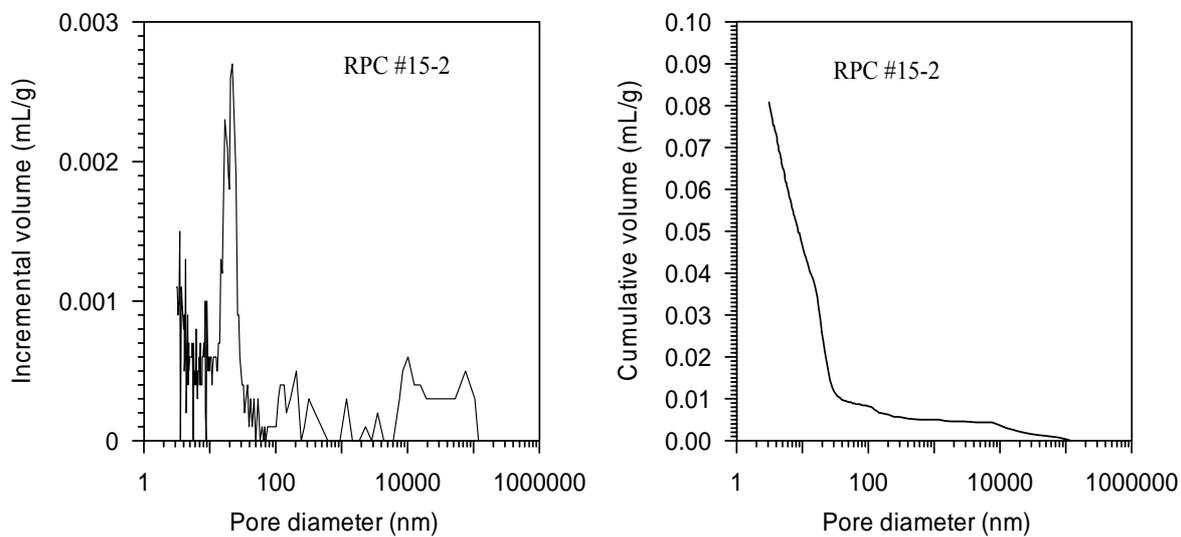


圖 5-27 典型#15-2 MIP 孔隙量測結果

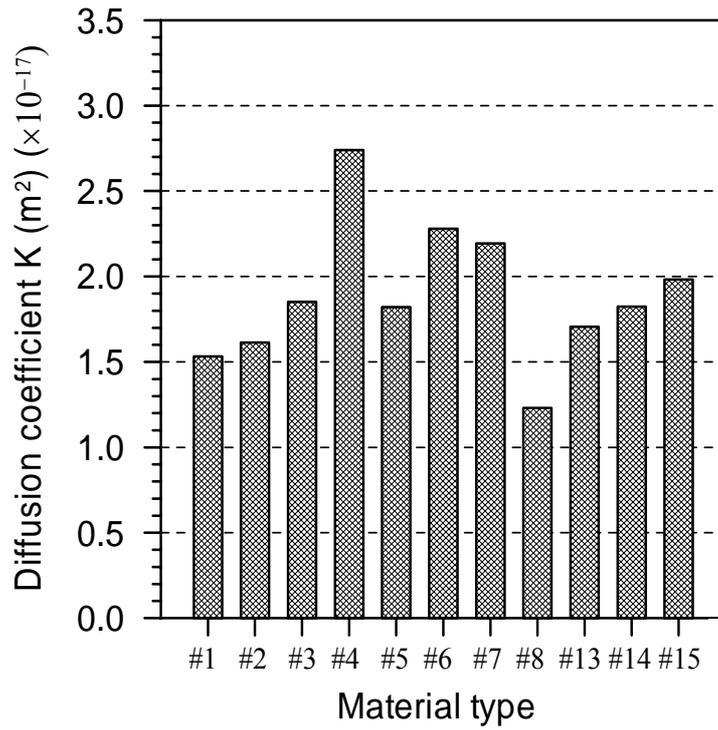


圖 5-28 氣體滲透試驗結果

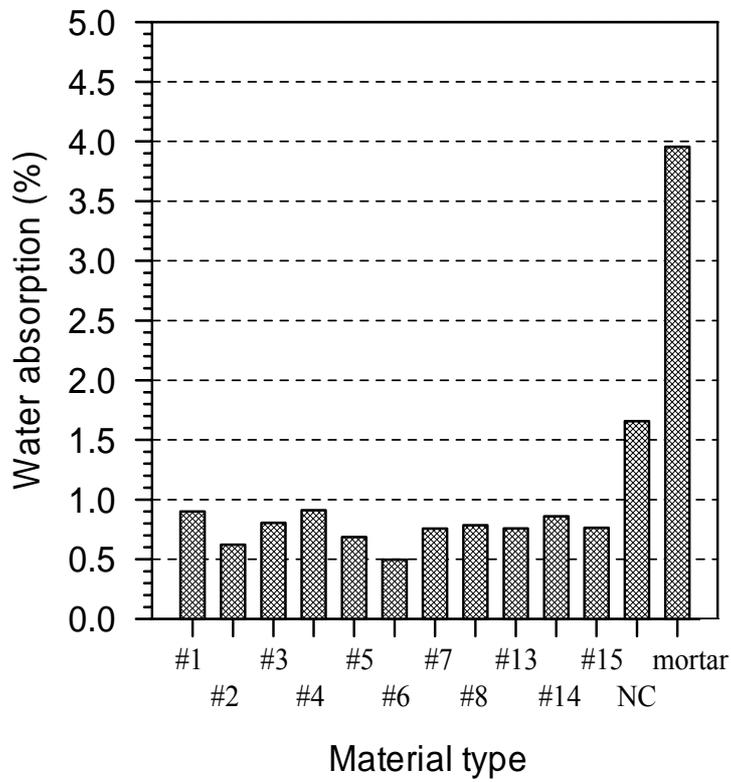


圖 5-29 不同材料 3 天水份吸收率試驗結果

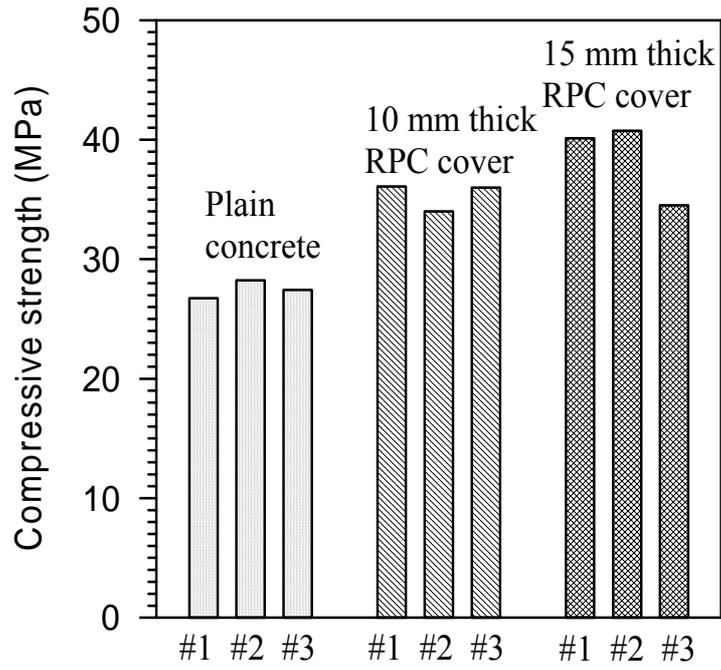


圖 5-30 RPC #14 圓柱補強抗壓試驗結果

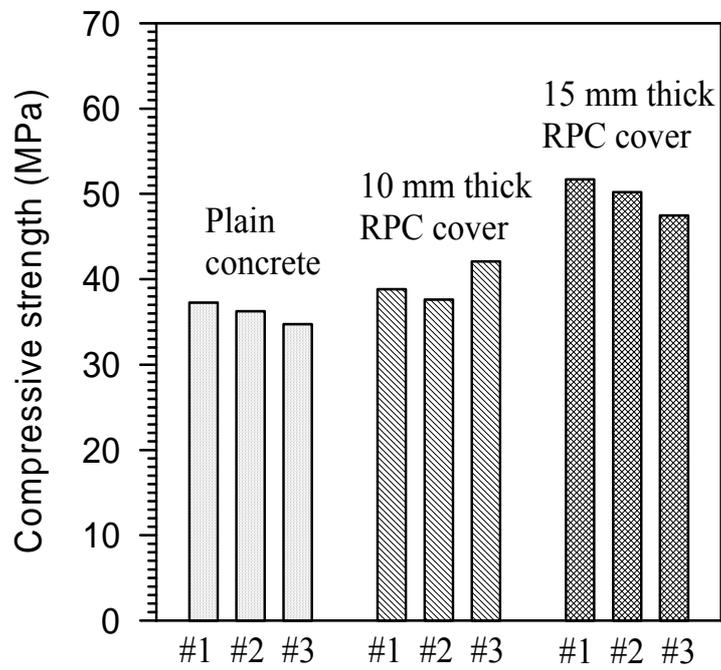


圖 5-31 RPC #15 圓柱補強抗壓試驗結果

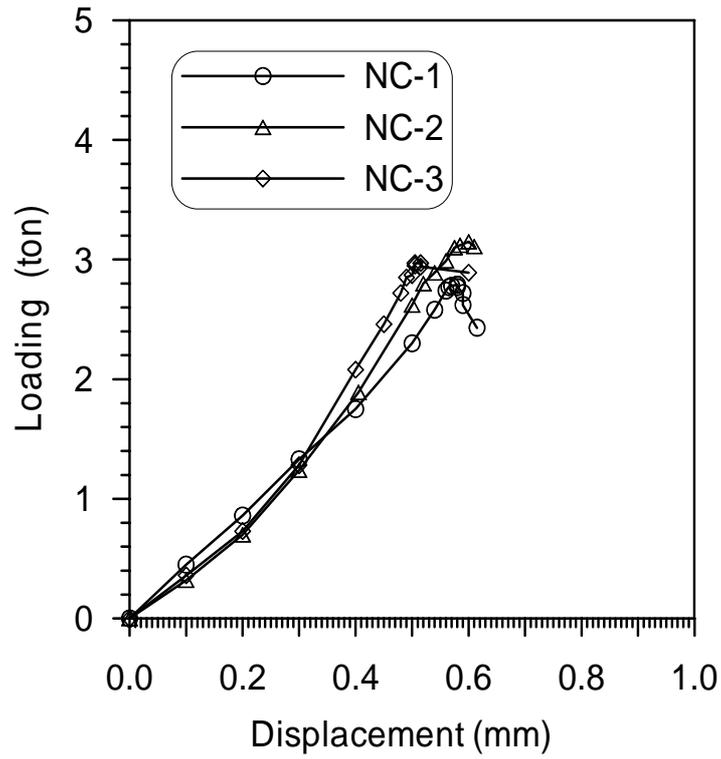


圖 5-32 OPC 未補強(第一次)

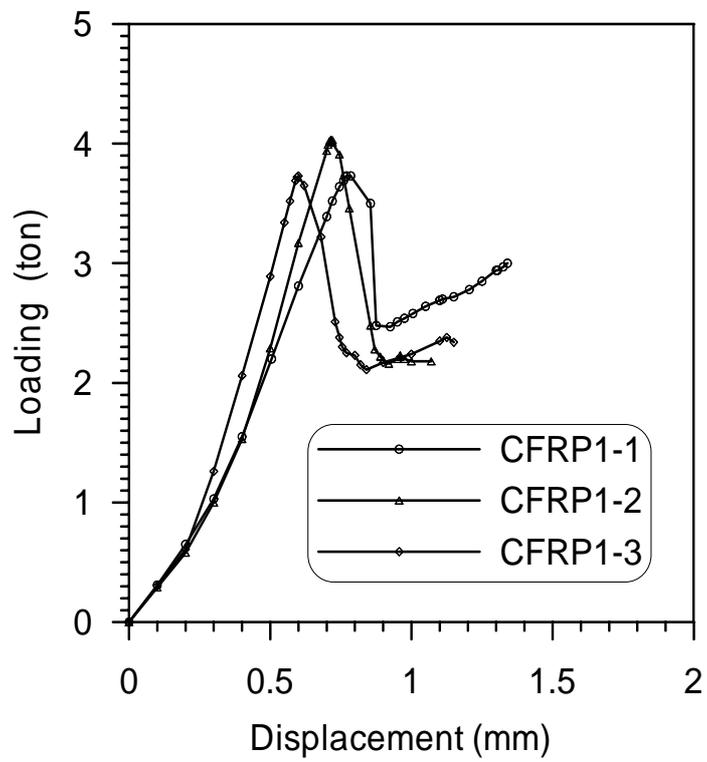


圖 5-33 CFRP 補強一層 (第一次)

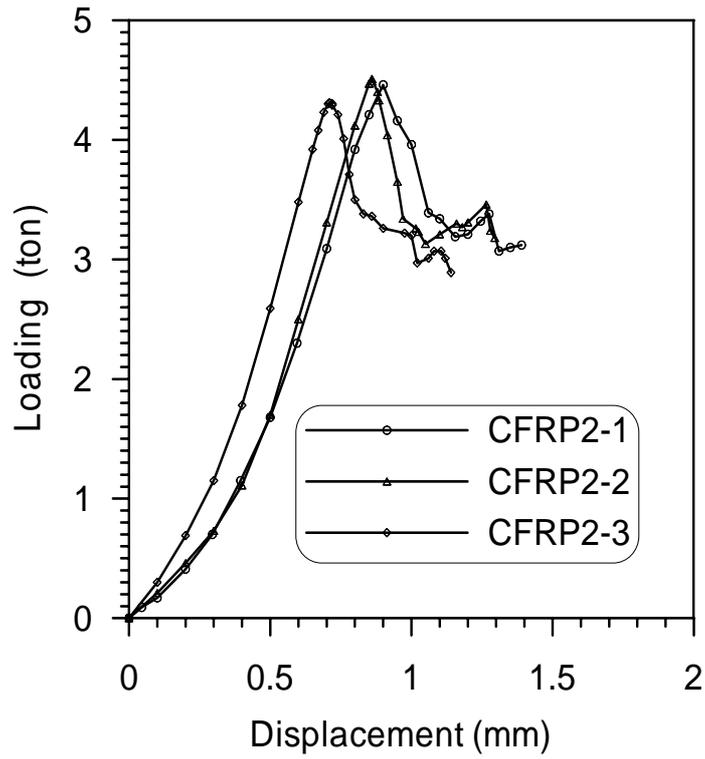


圖 5-34 CFRP 補強兩層 (第一次)

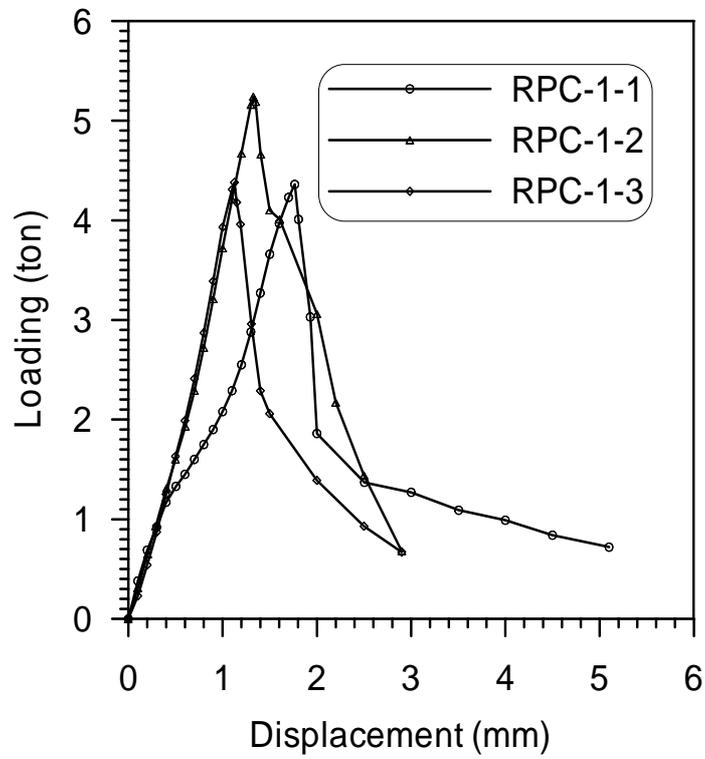


圖 5-35 RPC#14 補強 10 mm

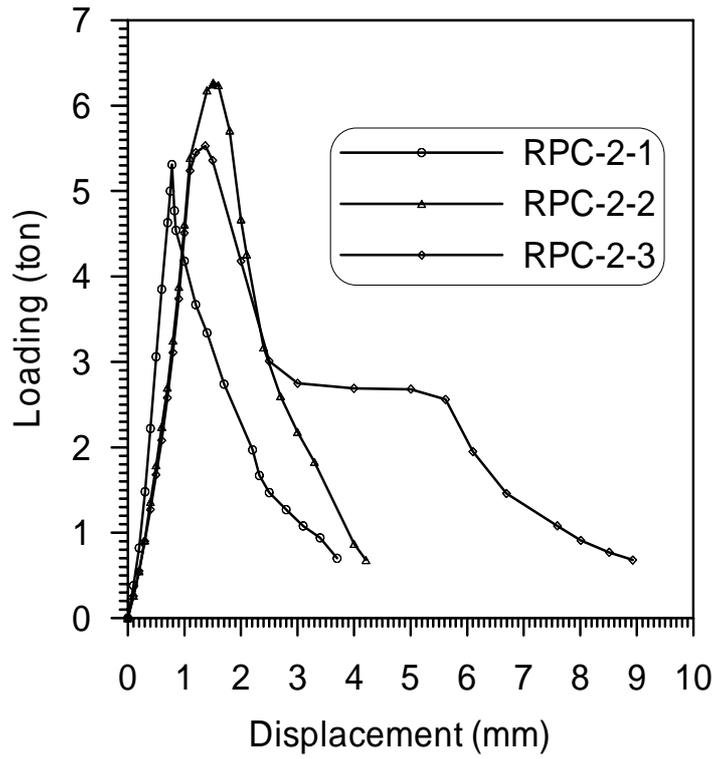


圖 5-36 RPC#14 補強 20 mm

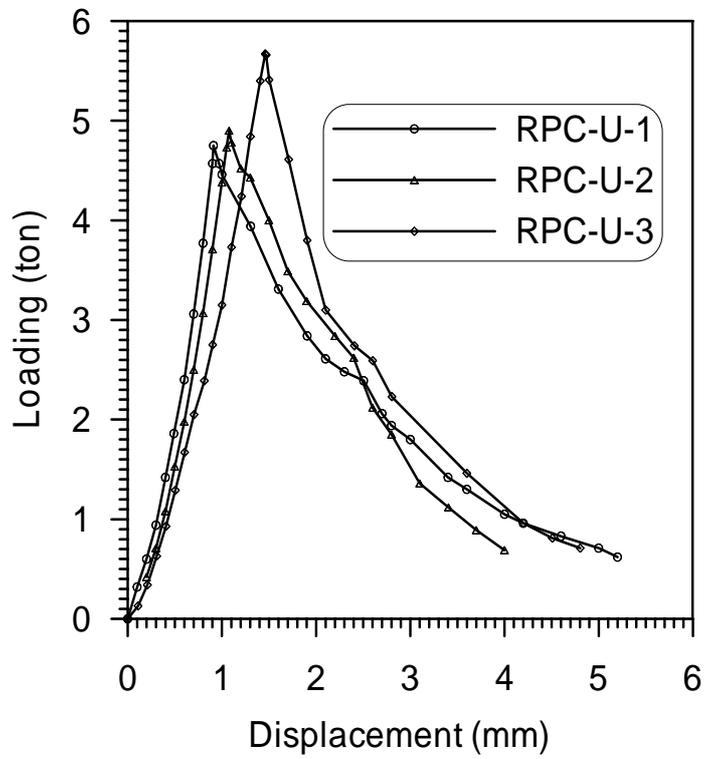


圖 5-37 RPC#14 U 型補強

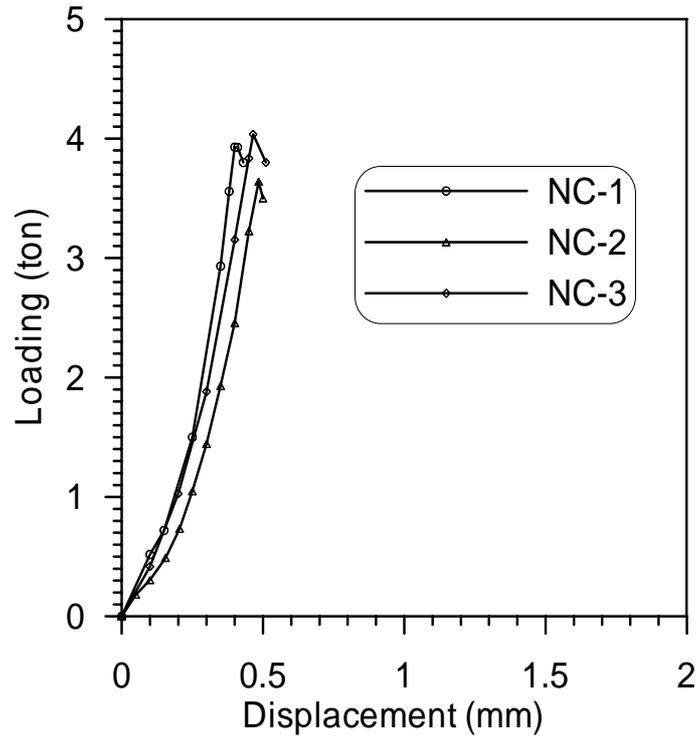


圖 5-38 OPC 未補強 (第二次)

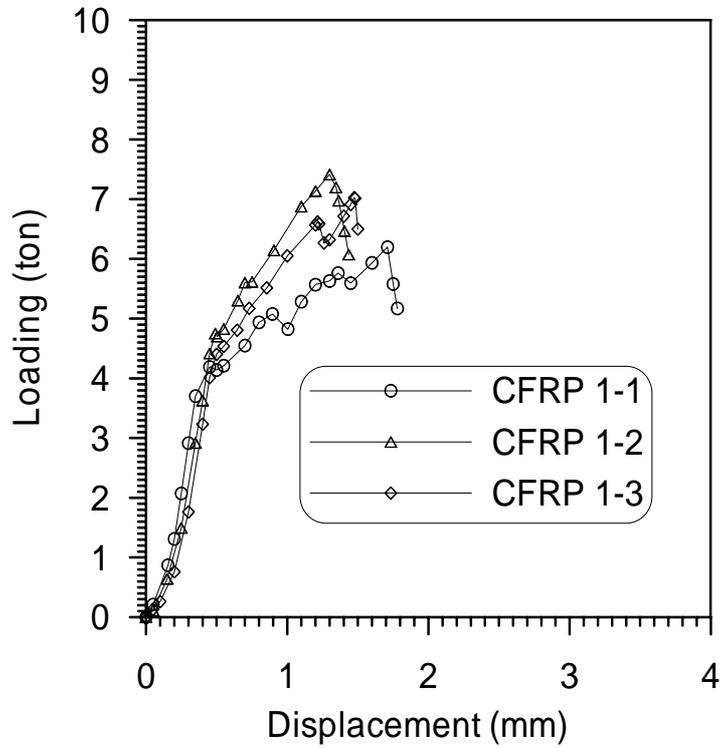


圖 5-39 CFRP 補強一層 (第二次)

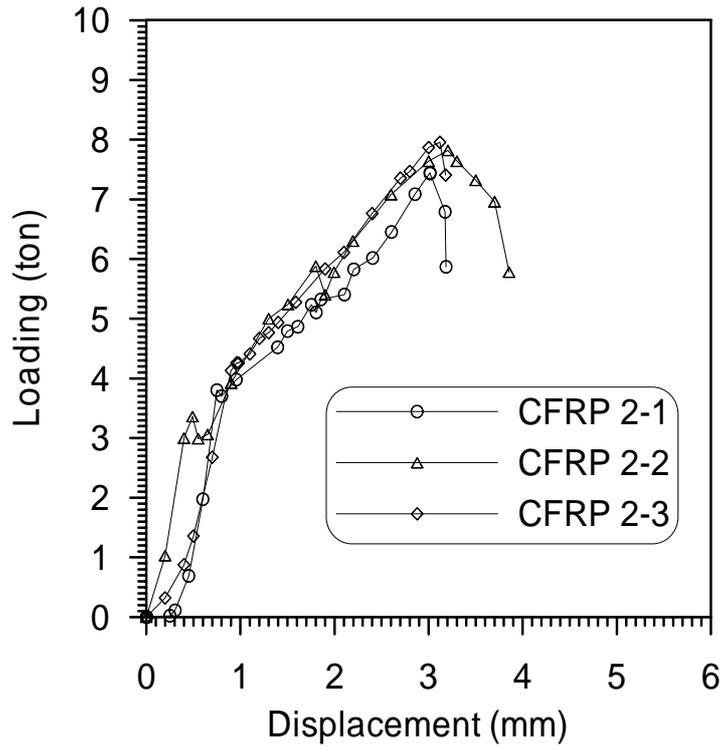


圖 5-40 CFRP 補強兩層 (第二次)

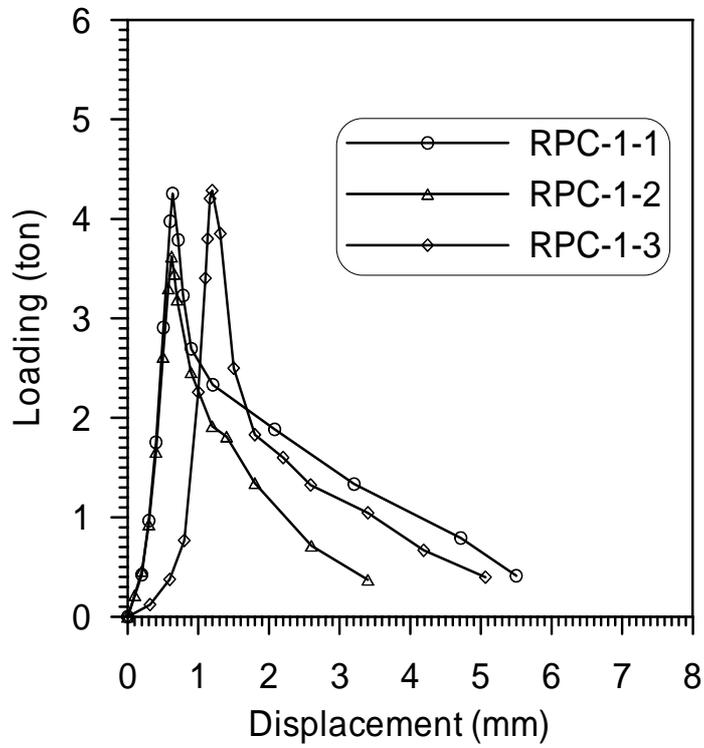


圖 5-41 RPC#15 補強 10 mm

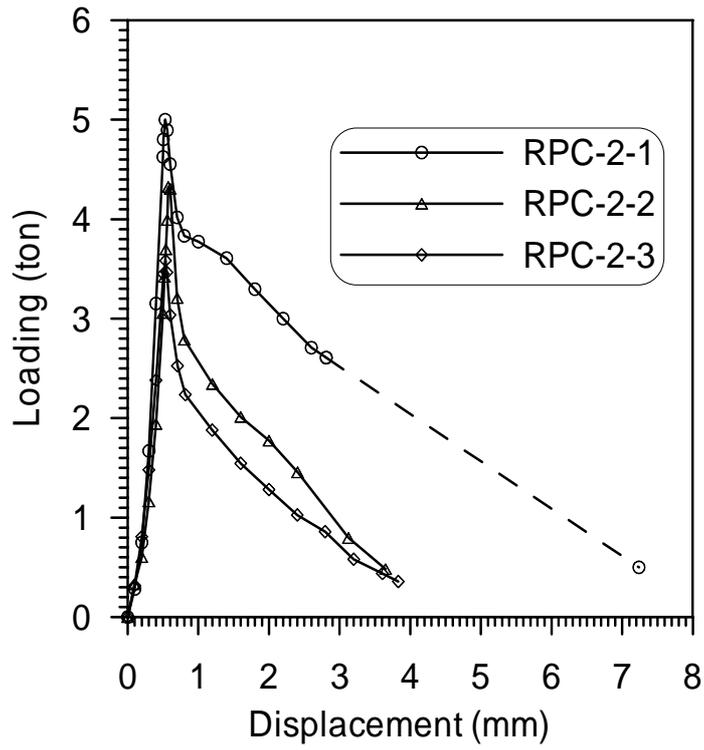


圖 5-42 RPC#15 補強 20 mm

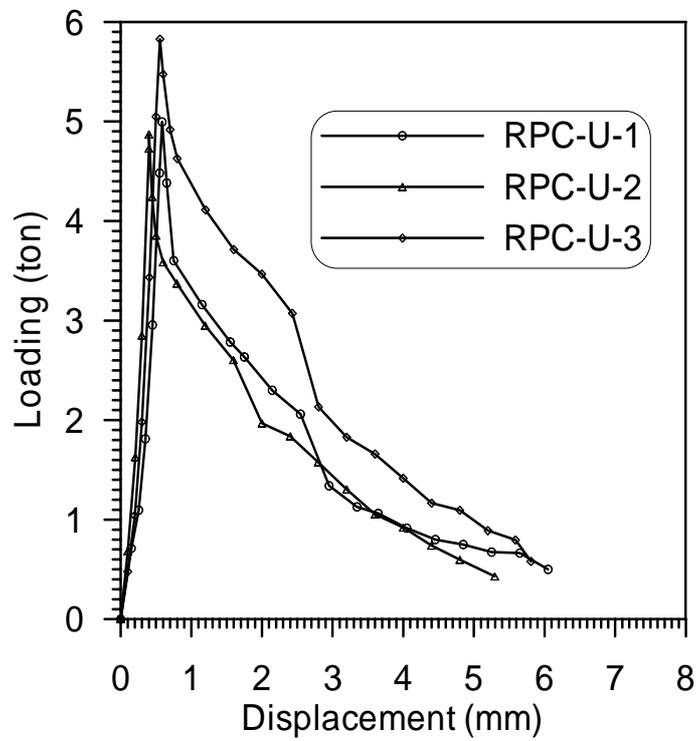


圖 5-43 RPC#15 U 型補強



相片 5-1 典型 RPC #14 試體抗壓試驗破壞前後相片



相片 5-2 典型 RPC #13 試體劈裂試驗破壞前後相片



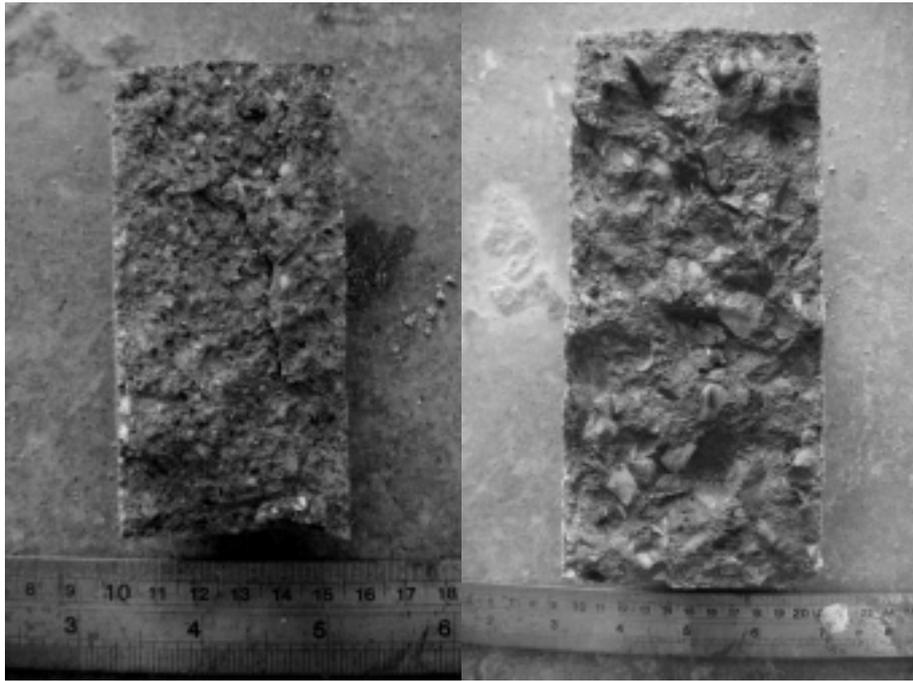
相片 5-3 典型 RPC 試體抗彎試驗破壞前後相片



相片 5-4 典型 RPC 試體拉拔試驗破壞前後相片



相片 5-5 典型 RPC 試體斜剪試驗破壞前後相片



(a) Mortar

(b) OPC

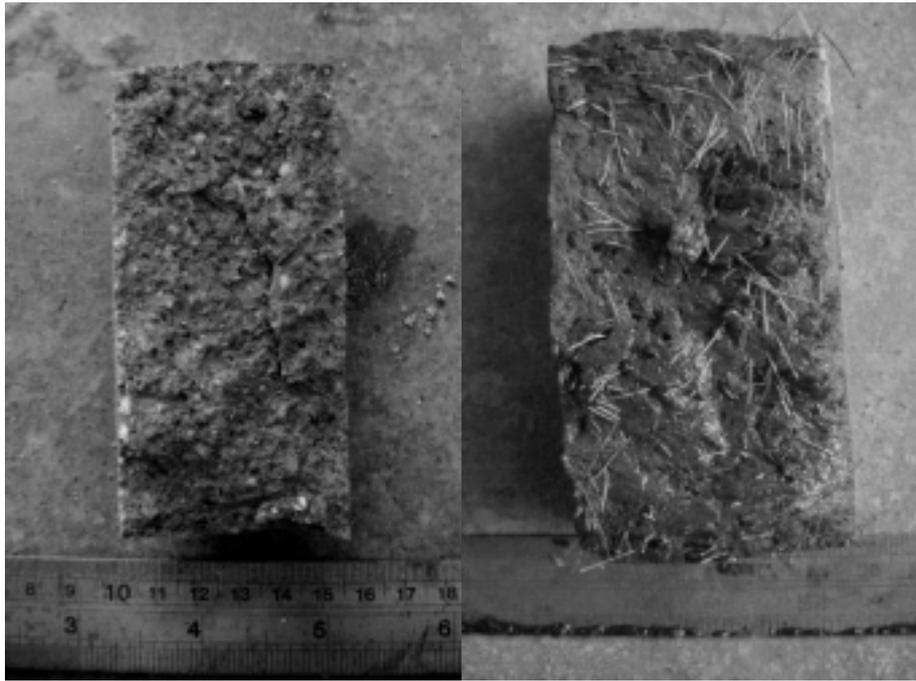
相片 5-6 碳化試驗 (Mortar 及 OPC) (尺寸：100 × 200 mm)



(a) Mortar

(b) RPC#13

相片 5-7 碳化試驗 (Mortar 及 RPC #13) (尺寸：50×100 mm)



(a) Mortar

(b) RPC#14

相片 5-8 碳化試驗 (Mortar 及 RPC #14) (尺寸：50 ×100 mm)



(a) Mortar

(b) RPC#15

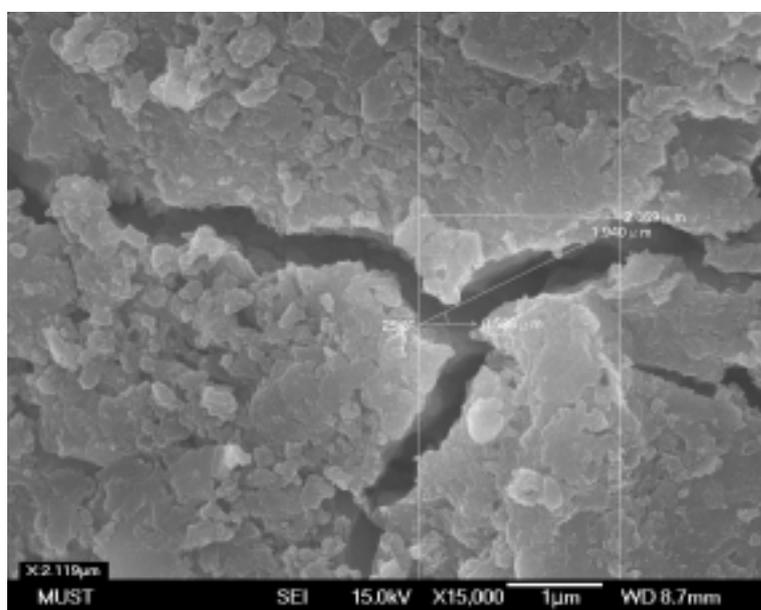
相片 5-9 碳化試驗 (Mortar 及 RPC #15) (尺寸：50 ×100 mm)



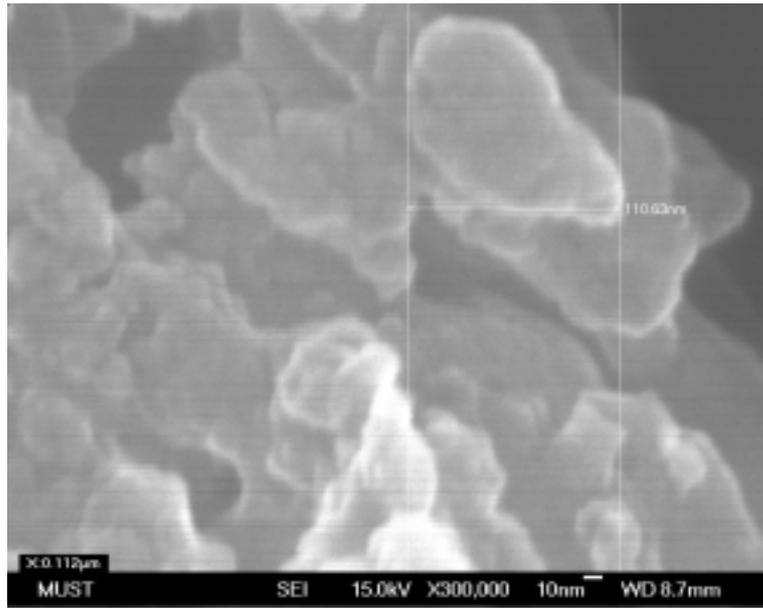
(a) 試驗前

(b) 試驗後

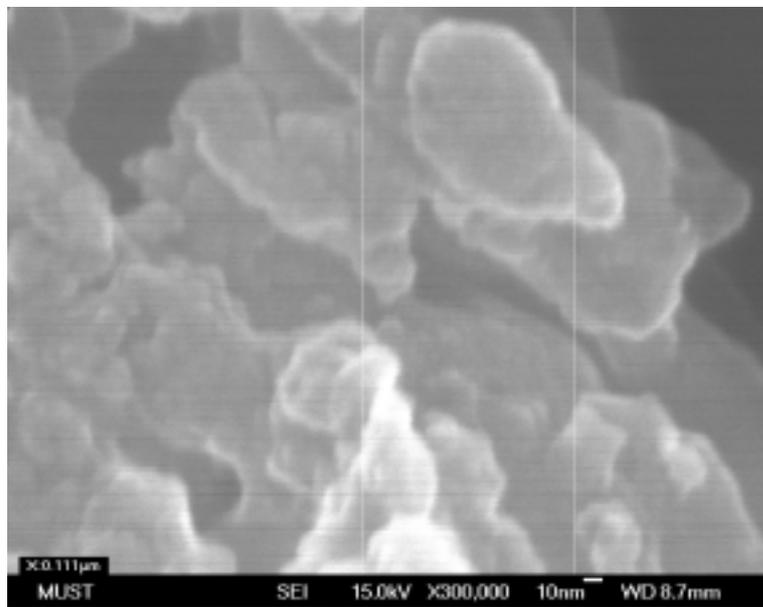
相片 5-10 典型 RPC #15 試體磨耗試驗破壞前後相片



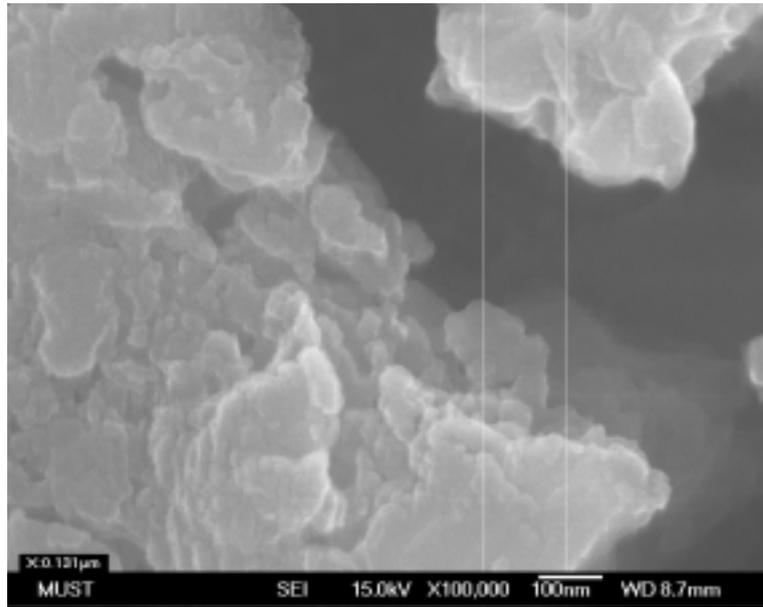
相片 5-11 典型 RPC #15 SEM 相片 (15000 RPC angle)



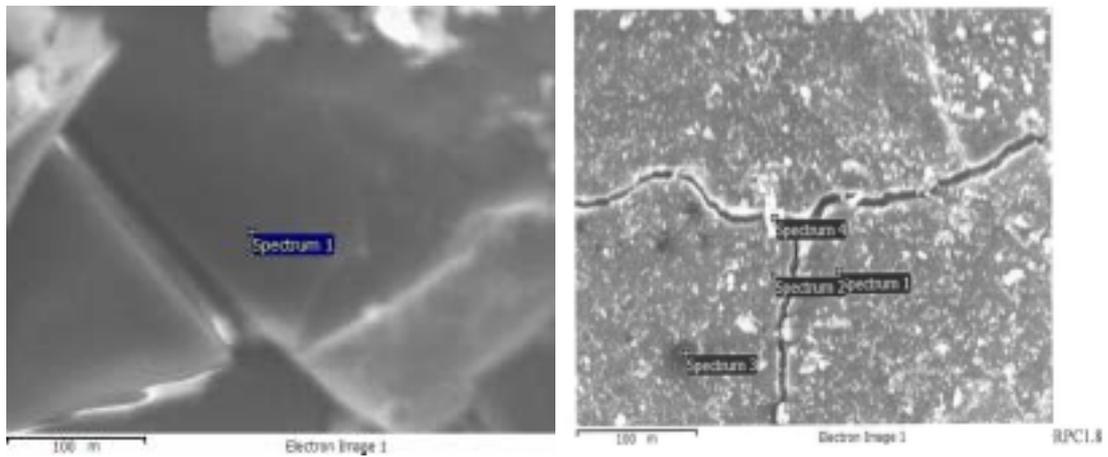
相片 5-12 典型 RPC #15 SEM 相片 (300000 RPC polish)



相片 5-13 典型 RPC #15 SEM 相片 (300000 RPC polish)



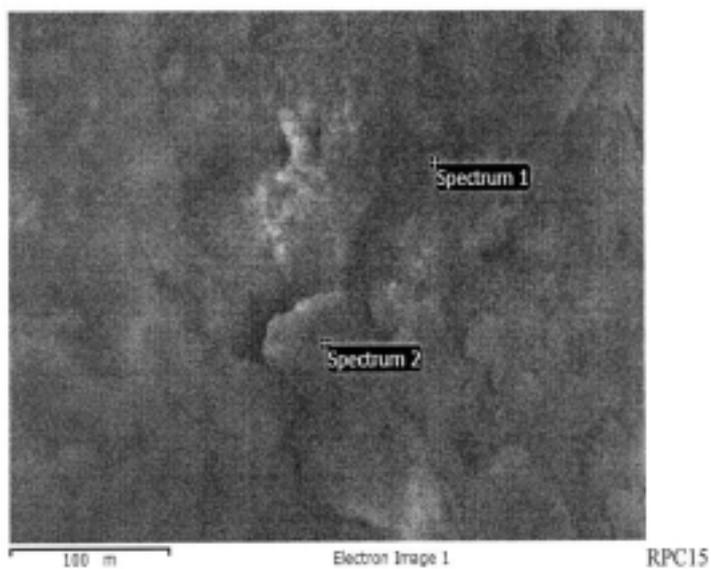
相片 5-14 典型 RPC #15 SEM 相片(RPC 100000 polish)



(a) RPC #13

(b) RPC #14

相片 5-15 典型 RPC 試體 EDS 相片 (1)



相片 5-16 典型 RPC 試體 EDS 相片 (2)

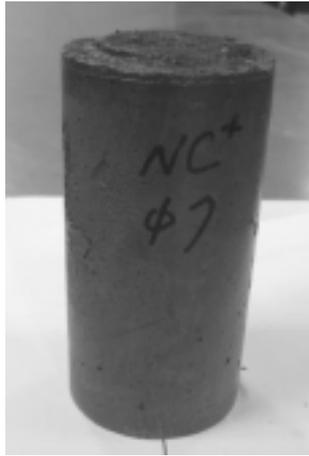


(a) 試驗前



(b) 試驗後

相片 5-17 圓柱補強試驗前後 (RPC #14) (10 mm)

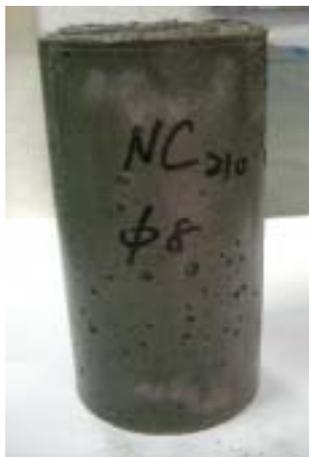


(a)試驗前



(b)試驗後

相片 5-18 圓柱補強試驗前後 (RPC #14) (15 mm)



(a)試驗前



(b)試驗後

相片 5-19 圓柱補強試驗後 (RPC #15) (10 mm)

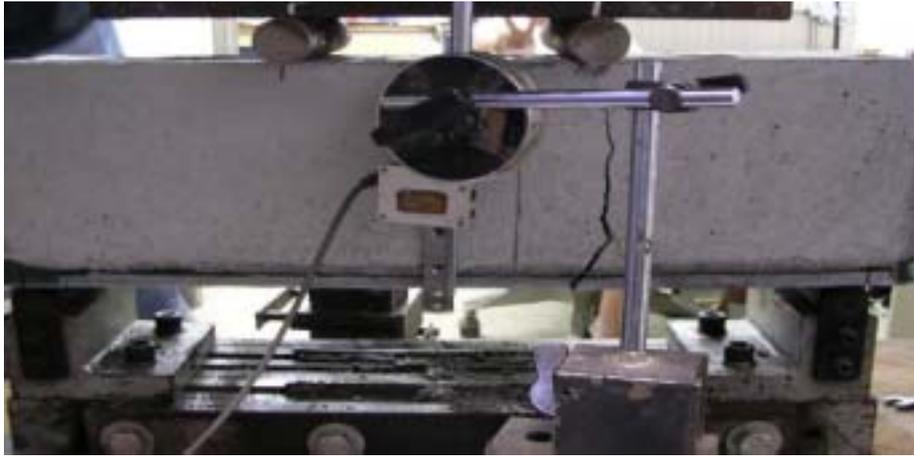


(a)試驗前



(b)試驗後

相片 5-20 圓柱補強試驗前後 (RPC #15) (15 mm)



相片 5-21 RPC 補強 10 mm 之混凝土抗彎試驗結果 (RPC #14)



相片 5-22 RPC 補強 20 mm 之混凝土抗彎試驗結果 (RPC #14)



相片 5-23 RPC 包裹 U 型補強之混凝土抗彎試驗結果 (RPC #14)



相片 5-24 未補強之普通混凝土抗彎試驗結果



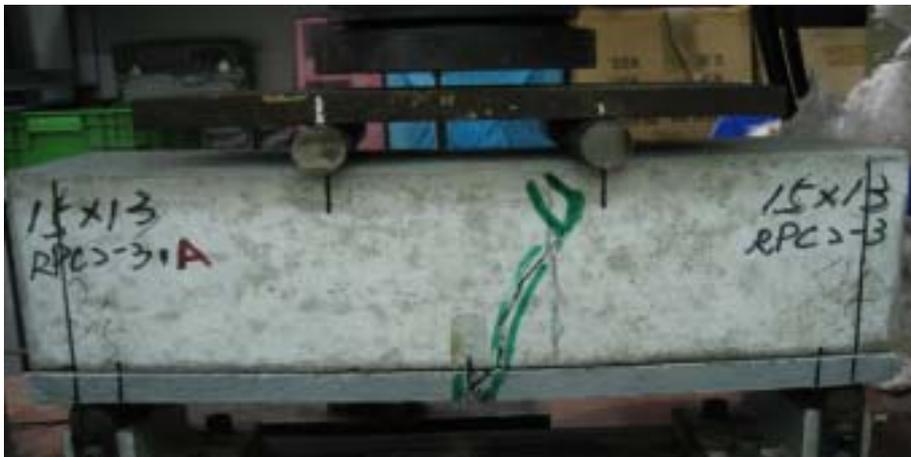
相片 5-25 CFRP 補強一層之混凝土抗彎試驗結果



相片 5-26 CFRP 補強二層之混凝土抗彎試驗結果



相片 5-27 RPC #15 補強 10 mm 之混凝土抗彎試驗結果



相片 5-28 RPC #15 補強 20 mm 之混凝土抗彎試驗結果



相片 5-29 RPC #15 包裹 U 型補強之混凝土抗彎試驗結果



相片 5-30 未補強之普通混凝土抗彎試驗結果



相片 5-31 CFRP 補強一層之混凝土抗彎試驗結果



相片 5-32 CFRP 補強二層之混凝土抗彎試驗

第六章 結論與建議

本研究計畫主要係探討以活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 作為補強材料，對於補強既有鋼筋混凝土構件相關行為與其耐久性成效評估，研究過程中，除了說明以結合粒料包裹漿體厚度及粒料緻密堆積體等兩個主要觀念為主的「RPC 配比設計邏輯及理論」外，也根據此項「RPC 配比設計邏輯及理論」設計出 12 組膠結砂漿配比，探討基本材料特性後，挑選出其中兩組配比作為 RPC 的配比依據，同時也依據國內外一般 RPC 配比方法另設一種 RPC，總共使用 3 組 RPC 配比進行試驗，所有主要的試驗工作及探討內容可大約為三大項目：(1)RPC 基本材料性質及力學性質；(2) RPC 耐久性質及(3) RPC 作為修補材料的修補性能，因此，依據本研究所完成的這些試驗項目所得數據及分析討論結果，分為以下三項主題作結論：

6.1 基本材料性質與力學性質

1. 此 12 組膠結砂漿依據坍流度測試其工作性質，顯示坍流度均可達到 155 至 210 mm，所配製的兩種添加鋼纖維後的 RPC 的坍流度也分別為 170 及 210 mm，較國內一般 RPC 配比所得之第 3 組 RPC 配比的 155 mm 坍流度高，也具有較好之工作性能，因此，此 12 組膠結砂漿配比資料可作為國內日後進行本土化 RPC 配比設計時之參考依據，有利於建立以 RPC 為修補材料之修補系統。
2. 本研究試驗數據顯示：一般 RPC 配比如使用水泥及砂灰用量過高時，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，本研究中所探討之#13 及#14 RPC 雖然工作性、強度等均良好 (7 天抗壓強度可分別達 105.8 MPa 及 127.7 MPa)，但每 m^3 混凝土中分別使用水泥 892 kg 及砂灰 171 kg，及水泥 635 kg 及砂灰 191 kg，另一方面，#15 RPC 以添加飛灰及爐

石粉作為膠結材料，僅使用水泥 553 kg 及矽灰 79 kg，由其試體所得各種材料性質試驗數據，顯示除了具有良好的基本材料性質外，7 天抗壓強度仍可達 75.9 MPa，可減低修護面上的新舊混凝土應變不諧和的現象，很適合作鋼筋混凝土構造物之修補材料。

3. #15 RPC 在添加飛灰及爐石粉取代部份水泥及矽灰用量後，仍具有良好的材料性質為本研究之一項重要新發現，雖其確實優化機制仍須進一步探討，但由學理上推論，此 RPC 優質化的主要機制可能與此些卜作嵐材料緩慢卜作嵐反應與矽灰急速反應交互作用時所產生之 C-S-H 膠體，在本研究中使用之 RPC 無粗粒料下的粒料緊密堆體中，產生一種很特殊的膠結作用與及填塞作用，填充了 RPC 內各組成材料間的細微孔隙，增加材料緻密性，因此，日後如使用於鋼筋混凝土構造物維修時，將可有效改善 RPC 與鋼筋界面泌水情形，提高鋼筋握裹強度及改善修補界面品質，增加界面黏著力。
4. 添加鋼纖維有助於提高 RPC 抗裂性及抗彎性能，劈裂強度最高可達 7.5 MPa，約為 NC 的 1.4 倍，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。

6.2 耐久性性質

1. 本研究中的 RPC 氯離子電滲測量結果皆落於規範中非常低（Very Low）範圍之下，其中五組電滲量低於 100 庫倫；表面電阻值也皆大 244 k Ω -cm，最大可達 1,500 k Ω -cm；碳化試驗結果也發現沒有碳化的痕跡，顯示其表面與內部結構相當緻密，滲透率低，具有優良的抗蝕性質。
2. 三種 RPC 之超音波速約介於 4,300~4,600 m/s，水泥用量較高的 RPC 配比試體在 28 天齡期之超音波速略有下降，但添加飛灰及爐石粉取代部份水泥用量的 RPC 配比試體則無此現象，也顯示使用卜作嵐材料有助於加強 RPC 的材料性質。

3. 三種 RPC 氣體滲透係數約為 $1.716 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，在 RPC 透水試驗中，經過 72 小時吸水率僅 0.76%，顯示其滲透率低，能有效抵抗外界有害物質入侵，具有良好的耐久性。
4. 經 500 轉同心圓車輪磨耗測試結果，RPC 磨損深度僅 0.13 mm，約是水泥砂漿與 NC 磨耗深度的 1/4~1/5，顯示 RPC 粒料組構緻密，也提高了表面抗磨損能力。
5. 從 SEM 微觀及 MIP 量測結果發現，RPC 內部存在著不連續之孔隙系統及些許微裂縫，這些微裂縫主要是因水泥用量過高產生的熱應力破壞微觀結構及低水灰比所導致自生體積收縮，故應改變 RPC 配比，添加適量飛灰及爐石粉取代部份水泥用量，可望減少微裂縫產生，並將孔隙系統微小細緻化，減少乾縮潛變量。
6. EDS 分析中發現 Ca 及 Si 為 RPC 主要反應成果之元素物質，即參與反應的是 Ca、SiO₂ 及水，生成物則以 C-S-H 及 C-A-H 等水化產物，XRD 結果也以 SiO₂ 及 C-S-H 成份反應最明顯，顯示 RPC 內部係以穩定之鈣—矽結構系統為主。

6.3 修補性能與評估

1. 在修補性能方面，以 RPC 進行圓柱補強時，因具有圍束效果，故能提高其抗壓強度，補強厚度為 10 mm 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%，因鋼纖維的作用，使試體破壞後僅出現裂紋，不會有嚴重剝落的情況。
2. 以 RPC 進行抗彎構件補強時，明顯地提升抗彎強度，但底層修補厚度對於抗彎強度提升率增加有限，若採 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，故本計畫研究結果建議若以 RPC 作為補強材料，應以 U 型補強方式為最理想。
3. 抗彎構件經 CFRP 補強後，整體構件變形較不易，能承受較大之荷重，大幅提升抗彎強度，貼覆一層 CFRP 貼片可提升抗彎強度高達

十倍，遠超過 RPC 之補強結果，但其延展性較差，脫落破壞型式近似於脆性材料，其貼覆介面處理狀況也會影響補強效果，貼覆層數增加對於抗彎強度則提升有限。

6.4 建議

1. 在高溫養護情況下的 RPC，其晚期強度有折減的情況，或許與其內部漿體結構有關，應可再做進一步的實驗確定之。
2. RPC 圓柱補強試體，於實驗中並未黏貼應變計量測其應變，只能得知其強度增加程度，無法得知其應變，可於未來研究中考慮加入。
3. 由於 RPC 仍使用不少的水泥與水，因此 RPC 的乾縮情況值得探討，本次實驗中並未量測乾縮量，有待將來進一步實驗分析。
4. 修補情況的好壞會影響到被修補材料將來的使用，因此在利用 RPC 修補完後，可以利用非破壞性檢測方式來進行實驗，以確認其補強情況。
5. 本研究並未針對兩種材料結合做驗證，以及維修完成後的混凝土進行試驗，可於未來之研究中增加此類試驗。
6. 關於 SEM、XRD 等試驗，本研究只有針對 RPC 進行試驗，並未與 OPC 結果進行比對，建議於未來研究中可考慮加入兩材料之間的對照，以了解其間之差異性。
7. 建議可在未來研究中加入本工法與其他工法之比較，以評估其之間的經濟性差異。
8. 建議日後可進行 RPC 長期貯鹽試驗相關研究、RPC 鋼纖含量或礦物摻料替代量對各種結構大單元的補強成效分析，或考量台灣地理環境進行各種氣候條件(如潮汐帶)對 RPC 補強與耐久性的影響，與本期計畫試驗研究的相關耐久性質相驗證。

9. 關於未來本材料產出機制、成本、市場誘因、供需等問題，建議可加入未來之研究來加以探討。
10. 可於未來研究中探討 RPC 對這些既有 RC 構件強度、斷面、維修成效所需要的基本條件，以利使用 RPC 來做補強。
11. 本研究中並未針對修補材料與基材之間可能受到溫度變化之影響程度或行為及兩種材料間黏結問題進行探討，應可考慮加入未來研究方向，以得到更良好的補強結果。

參考文獻

1. 何明錦，陳建忠，蔡綽芳，”從集集震災檢討現行都市防災策略之缺失與改善對策”，921 集集地震與建築物耐震技術研討會論文集，內政部建築研究所，88 年 12 月。
2. 丁育群，葉祥海，謝舜傑，”集集地震建築物損害原因分析與對策建議”，921 集集地震與建築物耐震技術研討會論文集，內政部建築研究所，88 年 12 月。
3. 內政部建築研究所，921 集集大地震建築震害調查初步報告，1999。
4. 中國土木水利工程學會，”既有混凝土結構物之維修及補強技術手冊草案”，既有混凝土結構物之維修及補強研討會，民國 92 年 11 月，台北。
5. 李有豐，”國內既有鋼筋混凝土結構物補強之現況檢討”，既有混凝土結構物之維修及補強研討會，民國 92 年 11 月，台北。
6. Richard, P. and M. Cheyrezy., “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength.”, ACI Spring Convention, San Francisco, April 1994.
7. Richard, P. and M. Cheyrezy., “Composition of Reactive Powder Concretes.”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
8. 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，162 期，第 52-60 頁，1996。
9. 何曜宇，「活性粉混凝土破壞行為之研究」，碩士論文，國立台灣大學，民國 89 年。（陳振川教授指導）
10. 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，民國 92 年。（李明君教授指導）
11. 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。

12. Matte, V. and M. Moranville, "Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, No. 1, pp.1-9, 1999.
13. Liao, Sha and Y. R. Ma, "Study on the bending performance of reactive powder concrete prestressed composite beams", *Hunan Daxue Xuebao/Journal of Hunan University Natural Sciences*, Vol 32, No. 1, p 57-62, 2005.
14. Yan, Z. G., G. P. Yan and X. Wu, "Study on optimization design of prestressed reactive powder concrete simply supported beam", *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Beijing Jiaotong University*, Vol 29, No. 1, pp.18-22, 2005.
15. A. S. Dili, "Investigations on reactive powder concrete : A developing ultra high-strength technology", *Indian Concrete Journal*, Vol. 78, No. 4, pp 33-38, 2004.
16. Yao, Z. X. and J. Zhou, "Study on fracture energy of reactive powder concrete reinforced by steel-polypropylene hybrid fiber", *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, Vol. 8, No. 4, pp 356-360, 2005.
17. 黃兆龍，*混凝土性質與行為*，第三版，詹氏書局，2002年。
18. Dugat, J., N. Roux, and G. Bernier, "Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 29, pp 233-240, May 1996.
19. 宋佩瑄，「纖維混凝土實務」，現代營建雜誌社出版，台北，1991。
20. 陳振川，「特殊混凝土—纖維加強混凝土」，*混凝土施工技術研討會論文集*，台北，第 135-161 頁，1987。
21. 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。
22. 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。

23. Adeline, R., M. Lachemi, and P. Blais, "Design and Behaviour of the Sherbrooke Footbridge," International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Canada, pp 89-97, August 16-20, 1998.
24. Dallaire, P.-C. Aitcin, and M. Lachemi, "The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge," ACI 1997 International Conference on High-Performance Concrete, Kuala Lumpur, Malaysia, December 2-5, 1997.
25. Aitcin, P.-C. and P. Richard, "The Pedestrian/Bikeway Bridge of Sherbrooke," 4th International Symposium on Utilization International Symposium on Utilization of High-Performance Concrete, pp 1399-1406, Paris, May 29-31, 1996.
26. Birelli, G., J. Dugat, and A. Bekaert, "The Use of RPC in Cross Flow Cooling Towers, International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes," Sherbrooke, Canada, pp 59-73, August 16-20, 1998.
27. Matte, V., C. Richet, and M. Moranville, "Characterization of Reactive Powder Concrete as a Candidate for the Storage of Nuclear Wastes", Internaional Symposium on High- Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Canada, pp 75-88, August 16-20, 1998.
28. Torrenti, J. M., V. Matte, V. Maret, and C. Richet, "High Integrity Containers for Interim Storage of Nuclear Wastes Using Reactive Powder Concrete," 4th International Symposium on Utilization of High-Performance Concrete, pp 1407-1413, Paris, May 29-31, 1996.
29. 超高強高性能混凝土配比及性質研究(期中報告), 臺灣營建研究院, 民國 86 年 4 月。
30. 超高強高性能混凝土配比及性質研究(期末報告), 臺灣營建研究院, 民國 86 年 6 月。
31. 超高強高性能混凝土應用於預鑄產品(地下水管或基樁)之研究(期中報告), 臺灣營建研究院, 民國 87 年 3 月。
32. 超高強高性能混凝土應用於預鑄產品(地下水管或基樁)之研究(期末

- 報告)，臺灣營建研究院，民國 87 年 6 月。
33. 李騰芳，鄭瑞濱，「超高強高流動性高性能混凝土之配比剖析與工程性質，高性能混凝土之配比設計實作」，臺灣營建研究院，pp. 205-230，民國 87 年 7 月。
 34. 譚業成，「活性粉混凝土力學行為之研究」，碩士論文，國立台灣大學，民國 88 年。(詹穎雯教授指導)
 35. 朱書賢，「鋼纖維與活性粉混凝土間界面性質研究」，碩士論文，國立台灣大學，民國 89 年。(詹穎雯教授指導)
 36. 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.
 37. 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.
 38. Pareek, S. N., Y. Ohama, and K. Demura, "Evaluation Method for Adhesion Test Results of Bonded Mortars to Concrete Substrates by Square Optimization Method," *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 4, pp 355-360, 1995.
 39. 何明錦、吳傳威、彭添富，「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。
 40. 林至聰、張寬勇、施邦築，「RC 材料以 CFRP 圍束補強後受往復力作用試驗之研究」，第四屆結構工程研討會，pp. 2149-2156，民國 87 年 9 月。
 41. 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。
 42. 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。
 43. 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)

- 44.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。
- 45.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。
- 46.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。
- 47.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。
- 48.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。
- 49.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。
- 50.王仲宇、鄭丁興、黃偉智，貼片補強 RC 梁層間應之非線性分析，中國土木水利工程學刊，91 年 9 月，第 515-522 頁。
- 51.徐耀賜，以複合材料碳纖維貼片補強鋼筋混凝土梁彎矩之設計原理，土木工程技術，民國 90 年 3 月，第 17-48 頁。
- 52.朱國棟、邱佑宗、陳玟溢、盧廷鉅、葉日翔，複合材料補強鋼筋混凝土結構物方法與實例，工業材料，民國 89 年 08 月，第 102-110 頁。
- 53.林草英、蔡耀德，鋼筋混凝土梁以碳纖維複合物作剪力補強之結構行為，中國土木水利工程學刊，民國 89 年 06 月，第 225-232 頁。
- 54.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，民國 91 年。(干裕成教授指導)
- 55.鄭瑞濱，「活性粉混凝土構件之工程性質之研究」，博士論文，國立

- 台灣大學，民國 92 年。(陳振川、詹穎雯教授指導)
56. 盧凱偉，「超高強度活性粉混凝土高壓高溫製程之研究」，碩士論文，國立台灣大學，民國 87 年。(詹穎雯教授指導)
57. Ma, J. and J. Dietz, "Ultra High Performance Self Compacting Concrete", The LEIPZIG ANNUAL CIVIL ENGINEERING REPORT, LACER No. 7 – 2002, civil engineering at the University of Leipzig, 2002, Republic of Germany, ISSN 1432-6590.
(<http://aspdin.wifa.uni-leipzig.de/institut/lacer/lacer07/>)
58. 方裕欽，「緻密混凝土工程性質之研究」，國立台灣科技大學碩士論文，2000, pp 81-88。(黃兆龍教授指導)
59. 楊偉奇，「優生混凝土耐久性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，台北，1999。(黃兆龍教授指導)
60. Mindess, S., J. F. Young and D. Darwin, "Concrete," Second Edition, Prentice-Hall, 2003.
61. 葉叔通，「以理想級配曲線估算粒料緻密混合比及飛灰水泥漿包裹厚度評混凝土性質之探討」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，台北，2005。(黃兆龍教授指導)
62. Alsfamsi, A. M. and H. D. A. Imran, "Development of a permeability apparatus for concrete and mortar," Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp 923-929, 2002.
63. 胡弘昌，「碳化及鹽害環境下混凝土性質及腐蝕行為之研究」，國立台灣海洋大學碩士論文，2005。(張建智教授指導)
64. Buenfeld, N.R., J.B. Newman and C.C. Page, "The resistivity of mortar immersed in sea-water," Cement and Concrete Research., Vol. 16, Part 1, Aug. pp 511~524, 1986.
65. Dunaszegi, L., "High Performance Concrete-a key component in the design of the Confederation Bridge," Beton Concrete, Canada, V1, No. 3, Dec., pp 1~3 1996.
66. Shap, S. P., Wang, K., and Jason, W., "Mixture proportioning for

- durable Concrete,” Concrete International, Sept., pp 13~78, 2000.
- 67.Chung H.W and K. S. Low,” Diagnosing In-Situ Concrete by Ultrasonic Pulse Technique, “Concrete International, Vol. 5, No. 10, pp 42~49, 1983.
- 68.Jones, R., “Non-Destructive Testing of Concrete,” Cambridge University Press., London, pp 164, 1962.
- 69.Young, J.E., “The Microstructure of Hardened Portland Cement Paste,” Creep and Shrinkage in Concrete Structure, Ed. by Bazant, Z.P. and Wittman, F.H., 1982.
- 70.Powers, T. C., “The physical structure and engineering properties of concrete,” Research and Development Bulletin, NO. 90, Portland Cement Association, Skokie, Il., U.S.A., 1958.
- 71.Alsfamsi, A. M. and H. D. A. Imran, “Development of a permeability apparatus for concrete and mortar,” CCR, Vol. 32, pp 923-929, 2002.

附錄一 貼片補強試體強度之分析與計算

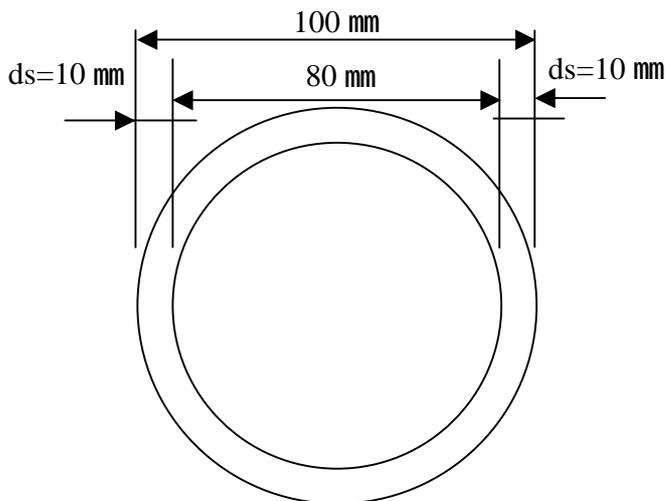
附錄一：貼片補強試體強度之分析與計算

1.1：圓柱RPC貼片補強 (10 mm)

當圓柱試體進行抗壓試驗時，計算其最大破壞應力，混凝土與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

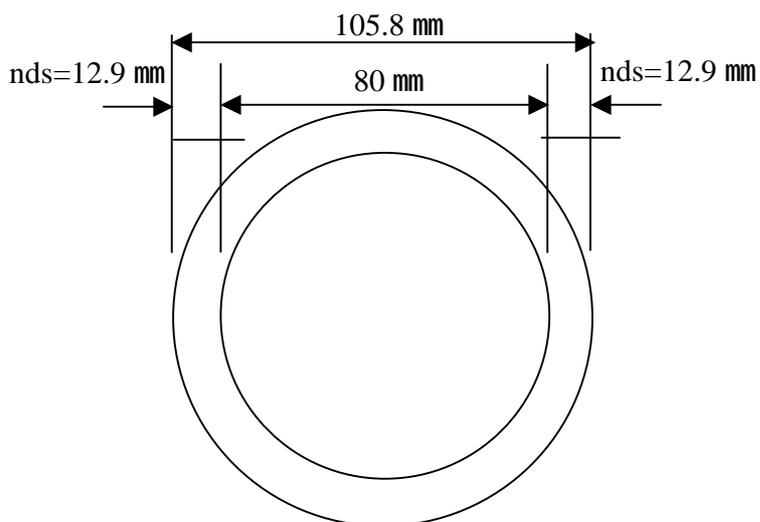
活性粉混凝土：彈性模數 $E_{RPC}=46.33 \div 1.2=38.61$ GPa



Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{38.61}{30.03} = 1.29, \quad n \times d_s = 1.29 \times 10 = 12.9 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



Step 2 : 計算轉換斷面後之受壓面積

$$A = \frac{\pi}{4}(105.8)^2 = 8790 \text{ mm}^2$$

Step 3 : 計算試體承受之壓應力

$$\text{試體 C8-1 : } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{32336.6 \times 9.81}{8790} = 36.09 \text{ MPa}$$

$$\text{試體 C8-2 : } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{30351 \times 9.81}{8790} = 33.99 \text{ MPa}$$

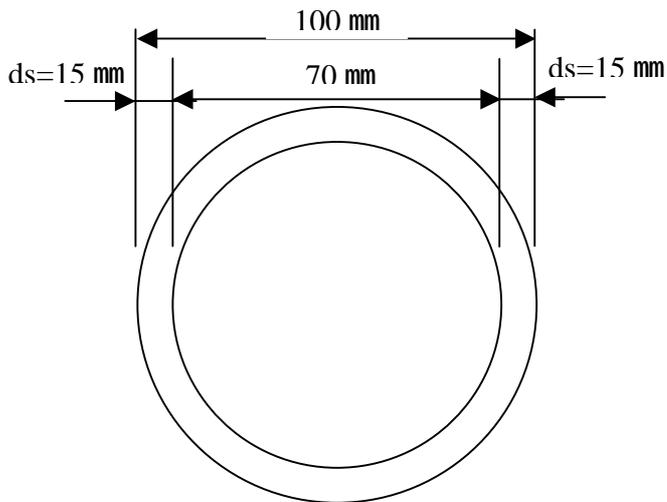
$$\text{試體 C8-3 : } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{32256.6 \times 9.81}{8790} = 36.00 \text{ MPa}$$

1.2：圓柱RPC貼片補強 (15 mm)

當圓柱試體進行抗壓試驗時，計算其最大破壞應力，混凝土與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

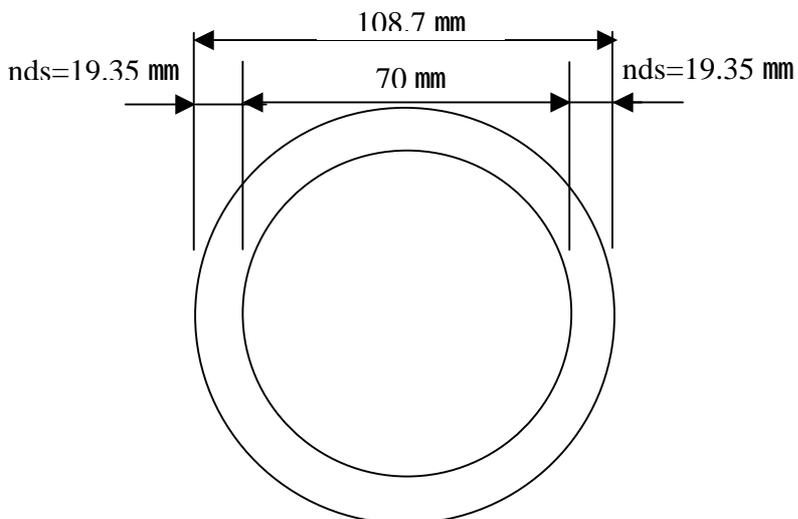
活性粉混凝土：彈性模數 $E_{RPC}=46.33 \div 1.2=38.61$ GPa



Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{38.61}{30.03} = 1.29, \quad n \times d_s = 1.29 \times 15 = 19.35 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



Step 2 : 計算轉換斷面後之受壓面積

$$A = \frac{\pi}{4}(108.7)^2 = 9280 \text{ mm}^2$$

Step 3 : 計算試體承受之壓應力

$$\text{試體C7-1 : } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{37964.9 \times 9.81}{9280} = 40.13 \text{ MPa}$$

$$\text{試體C7-2 : } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{38541.4 \times 9.81}{9280} = 40.74 \text{ MPa}$$

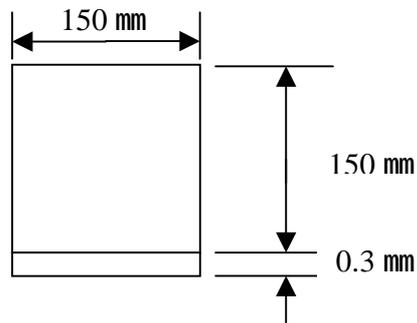
$$\text{試體C7-3 : } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{32648.8 \times 9.81}{9280} = 34.51 \text{ MPa}$$

1.3：矩樑CFRP貼片補強（一層）

當樑試體進行三點抗彎試驗時，計算其最大破壞載重P，混凝土底材與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

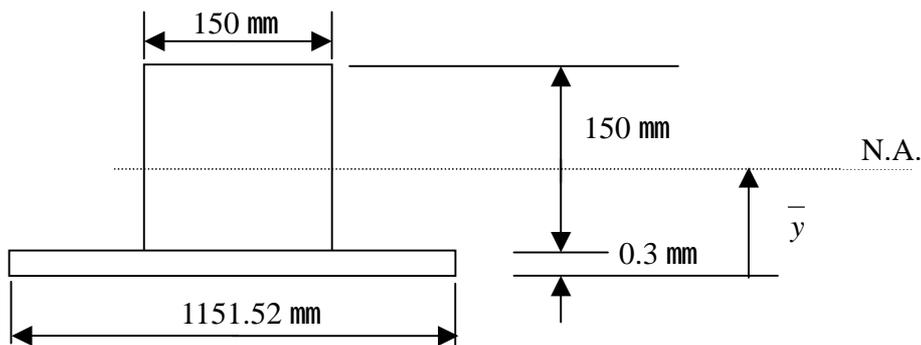
CFRP貼片：彈性模數 $E_2=230.535$ GPa



Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{230.535}{30.03} = 7.68, \quad n \times B = 7.68 \times 150 = 1151.5244 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



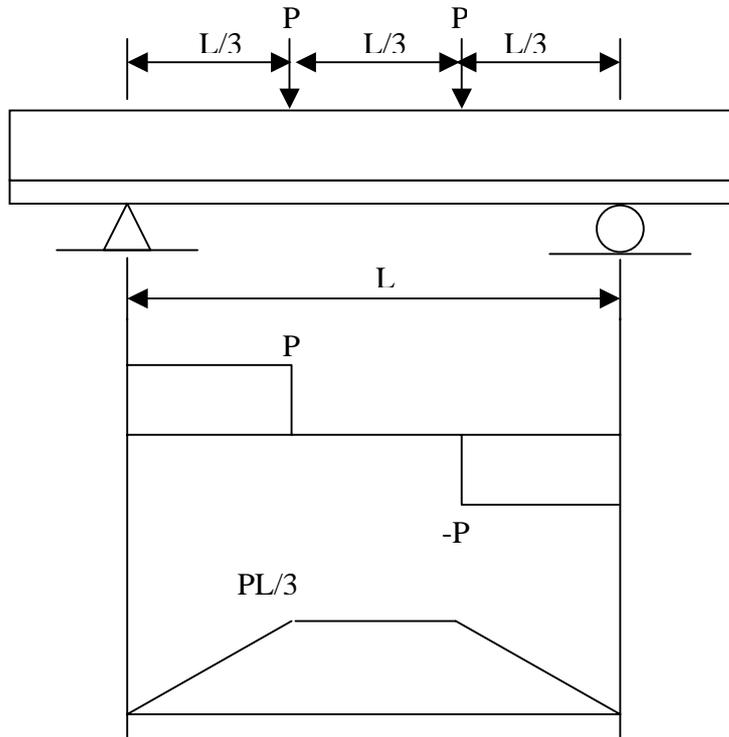
$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A} = \frac{1151.52 \times 0.3 \times 0.15 + 150 \times 150 \times 75.3}{1151.52 + 150 \times 150} = 74.16 \text{ mm}$$

Step 2 : 計算極慣性矩

$$I = \frac{1}{3} \times 150 \times (150.3 - 74.16)^3 + \frac{1}{3} \times 1151.52 \times 74.16^3 - \frac{1}{3} \times (1151.52 - 150) \times (74.16 - 0.3)^3$$

$$= 44108971.96 \text{ mm}^4$$

Step 3 : 計算CFRP承受之最大拉應力



$$\text{試體CFRP1-1 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 7.68 \times \frac{3730 \times 450}{3} \times 74.16 \div 44108971.96 = 7.22 \text{ kg/mm}^2 = 70.87 \text{ MPa}$$

$$\text{試體CFRP1-2 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 7.68 \times \frac{4030 \times 450}{3} \times 74.16 \div 44108971.96 = 7.81 \text{ kg/mm}^2 = 76.57 \text{ MPa}$$

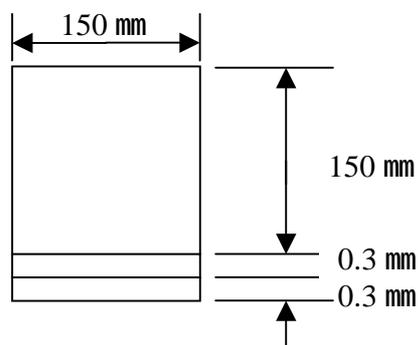
$$\text{試體CFRP1-3 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 7.68 \times \frac{3730 \times 450}{3} \times 74.16 \div 44108971.96 = 7.22 \text{ kg/mm}^2 = 70.87 \text{ MPa}$$

1.4：矩樑 CFRP 貼片補強（二層）

當樑試體進行三點抗彎試驗時，計算其最大破壞載重P，混凝土底材與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

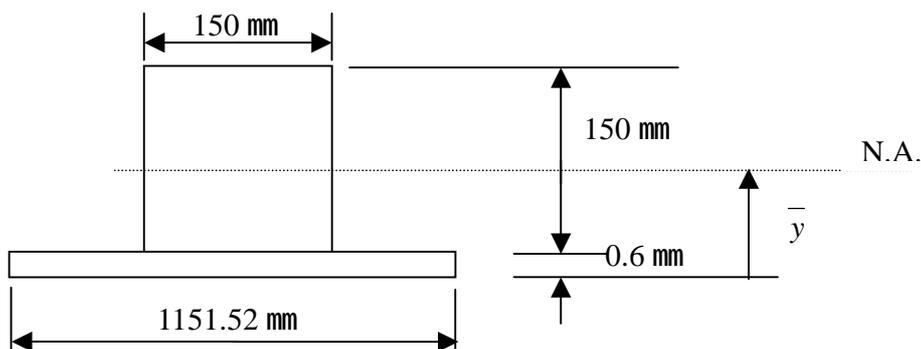
CFRP貼片：彈性模數 $E_2=230.535$ GPa



Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{230.535}{30.03} = 7.68, \quad n \times B = 7.68 \times 150 = 1151.52 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A} = \frac{1151.52 \times 0.6 \times 0.3 + 150 \times 150 \times 75.6}{1151.52 \times 0.6 + 150 \times 150} = 73.36 \text{ mm}$$

Step 2 : 計算極慣性矩

$$I = \frac{1}{3} \times 150 \times (150.6 - 73.36)^3 + \frac{1}{3} \times 1151.52 \times 73.36^3 - \frac{1}{3} \times (1151.52 - 150) \times (73.36 - 0.6)^3$$
$$= 45988341.65 \text{mm}^4$$

Step 3 : 計算CFRP承受之最大拉應力

$$\text{試體CFRP2-1 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 7.68 \times \frac{\frac{4460 \times 450}{3} \times 73.36}{45988341.65} = 8.20 \text{kg/mm}^2 = 80.44 \text{MPa}$$

$$\text{試體CFRP2-2 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 7.68 \times \frac{\frac{4510 \times 450}{3} \times 73.36}{45988341.65} = 8.30 \text{kg/mm}^2 = 81.42 \text{MPa}$$

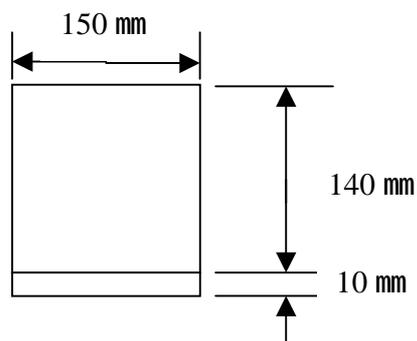
$$\text{試體CFRP2-3 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 7.68 \times \frac{\frac{4310 \times 450}{3} \times 73.36}{45988341.65} = 7.92 \text{kg/mm}^2 = 77.70 \text{MPa}$$

1.5：矩樑RPC貼片補強 (10 mm)

當樑試體進行三點抗彎試驗時，計算其最大破壞載重P，混凝土底材與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

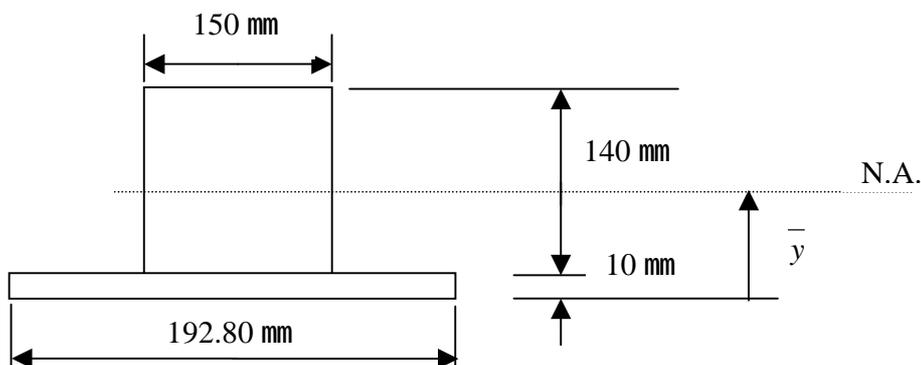
活性粉混凝土：彈性模數 $E_{RPC}=46.33 \div 1.2=38.61$ GPa



Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{38.61}{30.03} = 1.29, \quad n \times B = 1.29 \times 150 = 192.80 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



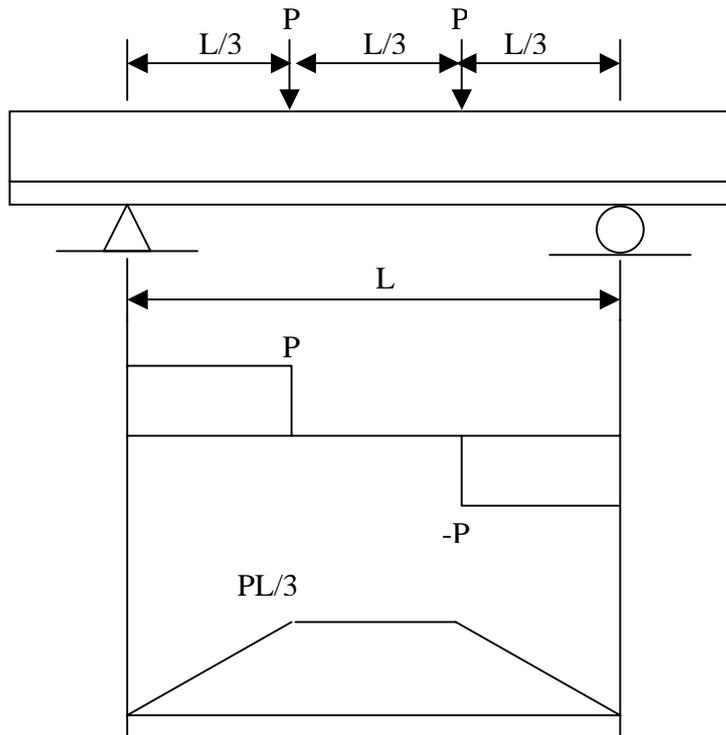
$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A} = \frac{192.8 \times 10 \times 5 + 150 \times 140 \times 80}{192.8 \times 10 + 150 \times 140} = 73.69 \text{ mm}$$

Step 2 : 計算極慣性矩

$$I = \frac{1}{3} \times 150 \times (150 - 73.69)^3 + \frac{1}{3} \times 192.8 \times 73.69^3 - \frac{1}{3} \times (192.8 - 150) \times (73.69 - 10)^3$$

$$= 44249118.21 \text{ mm}^4$$

Step 3 : 計算RPC承受之最大拉應力



裂縫位置：

試體 RPC1-2 (裂縫位於中心點 $L/3$ 之外，超出約 29 mm)：

$$\sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{575520 \times 78.33}{44249118.21} = 1.314 \text{ kg/mm}^2 = 12.897 \text{ MPa}$$

$$\text{試體 RPC1-2 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{5240 \times 450}{3} \times 78.33}{44249118.21} = 1.794 \text{ kg/mm}^2 = 17.60 \text{ MPa}$$

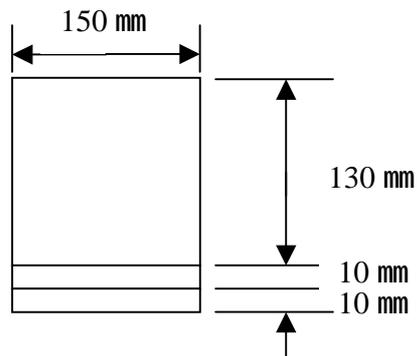
試體 RPC1-3 由於裂縫位於中心點 $L/3$ 外且超過 5%L，按規範規定，不予計算。

1.6：矩樑RPC貼片補強 (20 mm)

當樑試體進行三點抗彎試驗時，計算其最大破壞載重 P ，混凝土底材與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

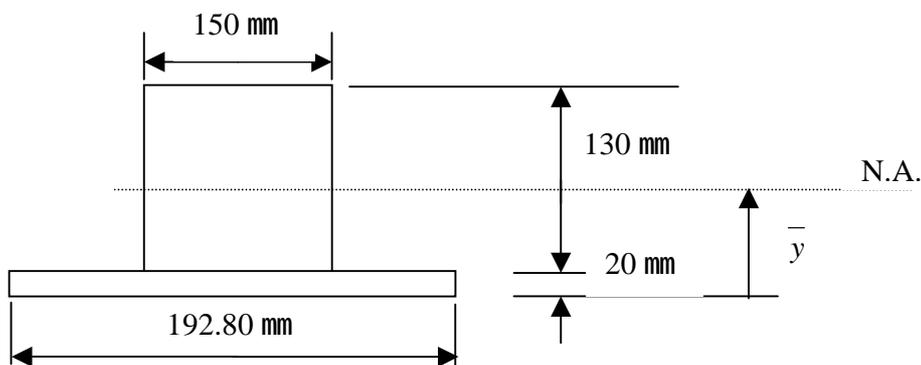
活性粉混凝土：彈性模數 $E_{RPC}=46.33 \div 1.2=38.61$ GPa



Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{38.61}{30.03} = 1.29, \quad n \times B = 1.29 \times 150 = 192.80 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A} = \frac{192.8 \times 20 \times 10 + 150 \times 130 \times 85}{192.8 \times 20 + 150 \times 130} = 72.62 \text{ mm}$$

Step 2 : 計算極慣性矩

$$I = \frac{1}{3} \times 150 \times (150 - 72.62)^3 + \frac{1}{3} \times 192.8 \times 72.62^3 - \frac{1}{3} \times (192.8 - 150) \times (72.62 - 20)^3$$
$$= 45700084.6 \text{ mm}^4$$

Step 3 : 計算RPC承受之最大拉應力

$$\text{試體RPC2-1: } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{5310 \times 450}{3} \times 72.62}{45700084.6} = 1.63 \text{ kg/mm}^2 = 16.02 \text{ MPa}$$

$$\text{試體RPC2-2: } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{6287 \times 450}{3} \times 72.62}{45700084.6} = 1.93 \text{ kg/mm}^2 = 18.91 \text{ MPa}$$

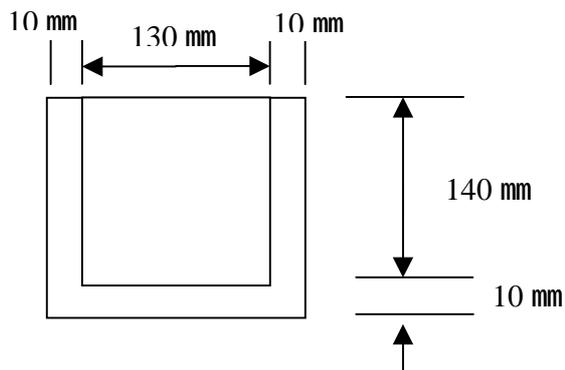
$$\text{試體RPC2-3: } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{5530 \times 450}{3} \times 72.62}{45700084.6} = 1.64 \text{ kg/mm}^2 = 16.08 \text{ MPa}$$

1.7：矩樑RPC U型貼片包裹補強 (10 mm)

當樑試體進行三點抗彎試驗時，計算其最大破壞載重P，混凝土底材與補強材料之基本性質如下：

普通混凝土：彈性模數 $E_c=36.04 \div 1.2=30.03$ GPa

活性粉混凝土：彈性模數 $E_{RPC}=46.33 \div 1.2=38.61$ GPa

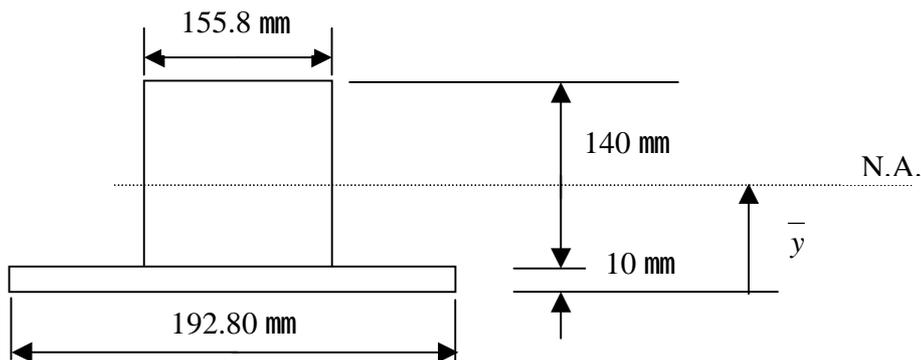


Step 1：轉換斷面

$$n = \frac{38.61}{30.03} = 1.29, \quad n \times B_1 = 1.29 \times 150 = 192.80 \text{ mm}$$

$$n \times B_2 = 1.29 \times (10+10) = 25.8 \text{ mm}$$

經轉換斷面後，重繪斷面於下：



$$\bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A} = \frac{192.8 \times 10 \times 5 + 155.8 \times 140 \times 80}{192.8 \times 10 + 155.8 \times 140} = 73.9 \text{ mm}$$

Step 2 : 計算極慣性矩

$$I = \frac{1}{3} \times 155.8 \times (150 - 73.9)^3 + \frac{1}{3} \times 192.8 \times 73.9^3 - \frac{1}{3} \times (192.8 - 155.8) \times (73.9 - 20)^3$$
$$= 46893269.77 \text{mm}^4$$

Step 3 : 計算RPC承受之最大拉應力

$$\text{試體RPCU-1 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{4750 \times 450}{3} \times 73.9}{46893269.77} = 1.448 \text{kg/mm}^2 = 14.2 \text{MPa}$$

$$\text{試體 RPCU-2 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{4900 \times 450}{3} \times 73.9}{46893269.77} = 1.494 \text{kg/mm}^2 = 14.66 \text{MPa}$$

$$\text{試體 RPCU-3 : } \sigma_t = n \frac{My}{I} = 1.29 \times \frac{\frac{5670 \times 450}{3} \times 73.9}{46893269.77} = 1.73 \text{kg/mm}^2 = 16.96 \text{MPa}$$

附錄二 期中報告審查意見處理情形表

附錄二：

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（1/2）」

執行單位：台灣科技大學

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
雲林科技大學蘇南 教授		
1. 為何用 DMDA 方法作配 比，而不用法國或加拿 大之配比邏輯，請說明。	感謝審查評語。使用 DMDA 做 為配比設計方式，其最主要考量 為耐久性因數。材料堆積緻密， 孔隙減少，減少劣化影響之材料 使用，是達成耐久性的重要主 因，亦是使用 DMDA 之原因， 亦與國外配比邏輯相似。	同意處理方式
2. RPC 中添加大量之矽灰 與石英粉，但養護溫度 溼度則僅有一種試驗方 式，建議補充之。	本研究中已使用兩種養護溫度， 部分試體採用原 RPC 所使用之 高溫養護；部分試體則配合日後 實際應用時之常溫養護。	同意處理方式
3. 如何在 f_c 、延展性、耐 久性、E 值、工作性等工 程性質間取得平衡點而 發展配比，請多闡釋之。	RPC 之 f_c 、延展性、耐久性、E 值、工作性可同時提高，但考慮 不同需求條件時，一般只能在各 項功能中，取得數項功能組合成 最有利的平衡點，發展出不同的 適用配比。	同意處理方式
4. p.78 與 p.79 之 $\sigma - \epsilon$ 曲 線，建議多解釋之（例 如：post-failure 部份）	p.78 之圖形為加 CFRP 補強後正 常 $\sigma - \epsilon$ 曲線（含 post-failure 部 份）；p.79 圖 4-10 RPC2-3 曲線 post-failure 有近似水平曲線係因 矩形梁在定載重下變形持續增加 之可能材料行為；研究文獻中顯 示，此行為可能為鋼纖維被拉脫	同意處理方式

	時所造成而非鋼纖維受張力而降伏。	
台灣海洋大學黃然 教授		
1. 本研究計畫包括活性粉混凝土及補強 R.C.構件之耐久性之研究兩大項，請補充說明本計劃執行項目與研究主題之關聯。	為了解修補材料之基本性質，本研究案所執行項目包含 RPC 相關力學試驗，實際施作抗彎補強、界面粘著等試驗，以評估其修補性能，同時也以氣體滲透、表面磨耗、超音波、電阻等試驗結果來評估其耐久性，與計畫中之 RPC 補強 R.C.構件成效與 RPC 耐久性評估有密切關係。	同意處理方式
2. 報告內容部份編輯請酌予修正錯誤部份。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已依指正處修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
3. 剪性模數試驗之目的為何，請說明之。	本試驗所求得之剪性模數可與彈性模數試驗結果進行計算材料之卜松比，以充分了解材料之基本力學性質。	同意處理方式
4. RPC 試體為何用 □ 型或 □ 型水泥？矽灰、石英砂之摻加比例及影響參數一請酌予說明之。	採用 II 型或 V 型水泥之原因，是基於耐久性之考量；有關矽灰、石英砂之摻加比例的影響因素包含 RPC 之工性性、耐久性及強度，在綜合考量下，需經由多項試驗求得最有利摻加比例。	同意處理方式
台灣海洋大學楊仲家 教授		
1. 本計劃期中報告中活性粉混凝土理論與應用之文獻回顧極詳實。	感謝審查委員的詳細閱讀。	同意處理方式

2. p.45 氣體滲透試驗步驟請詳述。	本試驗係依已發表期刊文獻之試體實驗進行（此文獻將於期末報告中列出）主要係利用氣體揮發通過切片後之混凝土試體，量測氣體損失重量以計算滲透率，以評估試體內部組構緻密性，試驗結果將於期末報告中說明。	同意處理方式
3. 請詳述 RPC 配比中鋼纖的外觀及性質。	鋼纖為圓形長條狀(直徑 0.2 mm 長 16 mm)表面光滑經鍍銅處理，比重 7.8~8.0。	同意處理方式
4. 請說明 RPC 配比是否使用消泡劑。	目前所澆置用以補強之 RPC 試體，係參考文獻上之配比設計，而採用消泡劑，劑量為水泥之 0.02%。由於 RPC 在低水膠比狀況下，傳統攪拌方式之能量不足，因此會產生大量氣泡，如果改進配比及拌和方式，消泡劑的使用機率或可能大幅降低。	同意處理方式
5. 請修正 p.65 (3. RPC 補強抗壓) “83.95Gpa”，“91.33 Gpa” 之數據。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
6. 建議抗彎補強試驗中，計算韌性指標。	感謝審查委員的建議，韌性指標計算結果將於期末報告中補充。	同意處理方式
港灣技術研究中心 陳桂清研究員		
1. 是否可如期完成 RPC 最適當之配比設計？與耐久性需求，請參酌考量。	目前 RPC 最適當之配比設計已由理論推算階段進入實做驗證階段，應可在期限內如期完成；耐久性需求是配比設計中主要考量因素。	同意處理方式
2. RPC 材料中使用之強塑劑、消泡劑，其化性成分如何？	RPC 材料中所使用之強塑劑及消泡劑之化學性質如下表所示： 強塑劑性質	同意處理方式

	<table border="1"> <tr> <td>基本化學物質</td> <td>Multiorganic copolymer acid</td> </tr> <tr> <td>固體成分</td> <td>27% min</td> </tr> <tr> <td>比重</td> <td>1.07 min</td> </tr> <tr> <td>pH 值</td> <td>5~8</td> </tr> <tr> <td>氯離子含量</td> <td>5000 ppm</td> </tr> <tr> <td>顏色</td> <td>Light Yellow Liquid</td> </tr> </table> <p>此表格將列於期末報告中。</p>	基本化學物質	Multiorganic copolymer acid	固體成分	27% min	比重	1.07 min	pH 值	5~8	氯離子含量	5000 ppm	顏色	Light Yellow Liquid	
基本化學物質	Multiorganic copolymer acid													
固體成分	27% min													
比重	1.07 min													
pH 值	5~8													
氯離子含量	5000 ppm													
顏色	Light Yellow Liquid													
3. 耐久性試驗項目，建議增加透水、界面黏著等試驗。	感謝審查委員的建議，本研究會將透水、界面黏著試驗納入，試驗結果將於期末報告中說明。	同意處理方式												
4. 本研究灌製之 RPC 試體，其抗壓及抗彎結果較國外研究結果為低，原因為何？是否製程或養護過程中有差異？	本研究為配合國內日後使用環境，未施加高溫高壓養護，因此，強度較國外研究結果為低（國外原因為何？是否製程或採用高溫高壓之養護），配合不同材質間的協合性，本研究案會考慮使用適當強度的 RPC 作為修補材料。	同意處理方式												
1. 研究報告部份內容有繕打或筆誤，請參酌修正。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式												
<p>港灣技術研究中心 饒正研究員</p>														
1. 耐久性試驗為本研究之重點，本研究試驗計劃中提出(1)氣體滲透(2)氯離子滲透(3)水份吸收(4)表面碳化(5)表面磨耗(6)表面電阻(7)超音波---等試驗，但在初步結果與討論僅提出電阻及超音波兩項試驗之結果，其餘試驗均未同步進行，是何原因？請說明。	由於試體齡期關係，部份實驗未達試驗標準，故尚未施作，原計劃並無變動，其他試驗結果完成後將在期末報告中說明。	同意處理方式												

<p>2. 當初在計畫審查時曾提出利用本所之試驗設備進行部份試驗，但在本研究計畫中均未提到，是否變更原草案。</p>	<p>有關 XRD 或螢光分析儀之使用問題，由於配比設計尚未完成，故無法進行微觀實驗，其餘如磨耗、透水等試驗，則因試體齡期尚未達到試驗標準，故尚未進行，待配比設計完成及齡期到達後，將向貴所提出申請。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>交通部科技顧問室許書王 技正（書面審查）</p>		
<p>1. 實驗室驗證活性粉混凝土之相關性質相當完備，但對於 RC 構件損壞原因的探討應加以分析研究，以免材料可用但用錯對象，例如受力構件、接合面處理的問題、原有材料與修補材料的相容性、維修斷面形狀、維修斷面處理方法及要求，以免影響維修成效。</p>	<p>受限於本研究經費與時間之影響，對於 RC 構件損壞原因無法加以分析。但是關於受力構件、接合面處理的問題、原有材料與修補材料的相容性、維修斷面形狀、維修斷面處理方法及要求等問題將在期末研究報告中說明。 (p.4-16、 p.5-17)</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>2. 實務上如何建構研究成果所要求(斷面)如前述問題，是否可行?未來應提出建議具體方案已符合實際需要。</p>	<p>在實務上需打除部份原有的構件段面，如底面 1 cm、2 cm，底面及雙側 1 cm，以能建構出本研究所需之斷面，將在期末研究報告中說明。(p.4-16、 p.5-17)</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>3. 耐久性問題探討如何與實際狀況貼近，應明述以求研究成果合乎需要。</p>	<p>RC 構件之耐久性問題須考慮所處區域的實際天候條件所造成危害 RC 耐久性的程度與速率，應有長期性觀測資料，以能夠引用本研究對於 RPC 耐久性試驗所得之試驗結果。</p>	<p>同意處理方式</p>

4. 未來本材料產出機制、成、市場誘因、供需等問題建議應加以探討。	受限於本研究時間與經費之影響，對於產出機制、成、市場誘因、供需等問題無法加以探討；但將列入期末研究報告建議事項中，作為後續研究的參考方向。	同意處理方式
5. 是否影響環境生態？	本研究中 RPC 使用飛灰與爐石粉等工業廢棄物，減少水泥用量，將可減少對環境生態的影響。	同意處理方式
6. RC 構件符合以本項材料維修的基本條件(強度、斷面、維修成效)為何？	RC 構件基於設計錯誤，施工不當，材料因素，外力影響及構件老化等因素的交互影響下，會產生各種不同的劣化情況。受限於本研究時間與經費之影響，無法探討 RPC 對這些既有 RC 構件強度、斷面、維修成效所需的基本條件，將列入期末報告建議事項中，作為後續研究的參考方向。	同意處理方式
7. RPC 補強混凝土其養護方式(高溫或蒸氣)在實務上是否可行？	RPC 補強材其高壓高溫養護方式在實務上確有其施工上之難度，如採用預鑄構件方式較為可行。本研究之配比設計亦朝向常溫常養護方式進行，以符合實務之需求。	同意處理方式

8. 請說明使用高強度的材料作為維修材料的知識經濟在哪裡？	知識經濟（ Knowledge based economy ）又稱以知識為基礎之經濟，包含知識資源的擁有、配置、產生與使用。本研究經試驗及蒐集資料掌握 RPC 高強度材料機理及性質，再經系統化之分析與歸納後，可開發知識資源及得到該材料作為修補材料的最適當效益與利弊評估，產生知識運籌的經濟價值。	同意處理方式
中華科技大學邱垂德 教授（書面審查）		
1. 第 41 頁第 12 行圖 3-1，應更正為圖 3-2。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
2. 第 45 頁第 4 行，其公式 (3.7)用 $\theta=45^\circ$ ，但試體卻用 $\theta=60^\circ$ 製作，矛盾。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
3. 第 55 頁圖 3-1 其耐久性試驗重複敘述。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
4. 第 64 頁第 17 行 2.CFRP 補強抗壓，應更正為 2.CFRP 補強抗彎。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
5. 第 65 頁第 4 行 3.RPC 補強抗壓，應更正為 3.RPC 補強抗彎。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式

6. 第 65 頁第 2 行抗彎強度 83.98 GPa、91.33 GPa 應更正為 83.98 MPa、91.33 MPa；另外，第 8 與 9 行之 83.98 GPa、91.33 GPa 應更正為 15.25 MPa 與 17.00 MPa 才對。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
7. 第 68 頁表 4-2 其 RPC 抗壓強度較國外文獻所記載之 RPC 強度為低，為何？	感謝審查委員的指正，由於材料的不同及製程的差異，使得強度較國外研究結果為低。	同意處理方式
8. 第 95 頁第 4 行 $\sigma'=38.29$ GPa，應更正為 38.29 MPa。	感謝審查委員的指正，錯誤部份已修正，並將列於期末報告中。	同意處理方式
建國科技大學陳建志 教授（書面審查）		
1. 期中報告內容著重於活性粉混凝土補強銅筋混凝土構件之研究，內容包含文獻回顧及試驗計劃，並已有初步之結論，符合期中進度。	感謝審查委員的詳細閱讀。	同意處理方式
2. 根據第五章後續研究規劃所提及"基本力學試驗與耐久性試驗仍需長時間進行量測"，建議時間的安排應更為謹慎，以期能如期完成計畫。	感謝審查委員的建議，定會謹慎安排試驗時間，以期如期完成本計畫。	同意處理方式
3. 水中結構物的補強研究在港研中心的計畫中應屬重要，建議列入第二階段之研究內容。	感謝審查委員的建議，將建議列入第二階段研究內容中。	同意處理方式

附錄三 期末報告審查意見處理情形表

附錄三：

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（1/2）」

執行單位：台灣科技大學

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
台灣海洋大學黃然 教授		
1. p68 p69 圖之字型請調整一致。	感謝審查委員的指正，已於期末研究報告書定稿中修正。 (p.3-23~p.3-24)	同意處理方式
2. p75 消泡劑是否需要，請說明。	感謝審查委員的意見，關於消泡劑的使用已在期末研究報告書完稿中說明。(p.4-3)	同意處理方式
3. 使用 型水泥 是否為 RPC 的必要條件。	國外文獻之 RPC 配比因使用較高量的水泥，故大都使用 型水泥以減低水化熱；本研究初期階段亦採用 型水泥，唯後期研究中，考量日後實用時之經濟性，已依水泥用量減少，故使用 I 型水泥，因此 型水泥並非 RPC 的必要條件。	同意處理方式
4. 本研究中之 Slump - flow 試驗方式請說明。	已於期末研究報告書定稿中說明。(已說明於 p.4-8)	同意處理方式
5. 本研究計畫成果完備詳實，結論具體正確。	感謝審查委員的詳細閱讀及意見。	同意處理方式
雲林科技大學蘇南 教授		
1. 研究報告立論嚴謹，內容豐富，值得肯定。	感謝審查委員的詳細閱讀及意見。	同意處理方式

2. 添加卜作嵐材料於 RPC 中，具創新性。	感謝審查委員的詳細閱讀及意見。	同意處理方式
3. RPC 與 CFRP 補強之力學與結構機制有何不同？	RPC 補強後之抗彎強度比 CFRP 來的低，但其延展性及韌性均高於 CFRP。(已說明於 p.5-17~p.5-18)	同意處理方式
4. Steam curing 之歷程與對材料 (Mortar、Concrete) 性質之影響？	蒸氣養護(Steam curing)之歷程已在期末研究報告書完稿中說明(p.2-14、 p.2-16、 p.4-7)，可加速 Mortar 及 Concrete 之水化而提升早期強度，但視 Mortar 及 Concrete 之組成成分不同而亦可能使後期強度折減。	同意處理方式
5. 添加飛灰 爐石粉對 RPC 之環保意義與經濟性考慮？	由於飛灰與爐石粉為工業副產品，價格低廉且容易取得，添加於 RPC 中可減少水泥與石英粉用量，降低成本、減少污染，對環保與經濟均有相當的助益。	同意處理方式
交通部科技顧問室許書王 技正		
1. 本研究課題為活性粉混凝土補強 R.C.構件與耐久性之研究，因此，修補的 R.C.構件性質之了解似相對重要，請修正。	針對修補材料與基材之間可能受溫度變化之影響程度或行為及兩種材料間黏結問題，因受限於經費及時間之影響，將列入期末報告建議事項中。	同意處理方式
2. p9 所提流度會隨著鋼纖維含量增加而減少。	感謝審查委員的指正，已於期末研究報告書定稿中修正。(p.2-2~p.2-3)	同意處理方式
3. 本審查會為期末報告所附圖表不清楚部份，請重新製作，另如 p39 字體與 p38、p40 字體是否統一為宜。	感謝審查委員的指正，已於期末研究報告書定稿中修正。(p.2-27~p.2-29)	同意處理方式
4. p.48「致致 PH 值」應改為 PH 值，p.119 跳行，請改正。	感謝審查委員的指正，已於期末研究報告書定稿中修正。(p.3-3、p.5-17)	同意處理方式

請改正。		
5. 兩種強度差異極大的材料結合在一起,請說明會產生那些損壞,本研究針對此問題進行了那些試驗來驗證,例如,耐久性試驗,另應針對維修完成之試驗進行試驗等....。	兩種材料結合會產生的損壞,其說明已放入期末研究報告書中。 (p.5-5) 關於兩種材料之結合的驗證,與維修完成後之試驗,礙於時間與研究經費不足,將列入本計畫後續研究內容建議事項之參考。	同意處理方式
建國科技大學陳建志 助理教授		
1. 根據多次的說明, RPC 所使用為 II 型或 V 型水泥,但 p.57 卻為 I 型水泥,請問是否為筆誤?若是,請更正。但若使用 I 型水泥,請問當初的考慮是什麼?	國外文獻之 RPC 配比因使用較高量的水泥,故大都使用 II 型水泥以減低水化熱;本研究初期階段亦採用 II 型水泥,唯後期研究中,考量日後實用時之經濟性,已依水泥用量減少,故使用 I 型水泥,因此 I 型水泥並非 RPC 的必要條件。	同意處理方式
2. 研究報告部分內容有筆誤,或是前後內容不一致之處,論參酌修正。	感謝審查委員的指正,已於期末研究報告書定稿中修正。	同意處理方式
3. 期中簡報中,關於許書王委員的許多提問,您們的回答都是無法涵蓋在第一年的計畫中。在完成第一年的計畫後,計劃中提到的"對於補強既有鋼筋混凝土構件相關材料行為與其耐久性之成效評估",請問您們對此的計畫為何?又有何困難?	許書王委員的期中報告書面審查意見,均已另行答覆或列入期末研究報告書中。 RPC 材料行為及耐久性之成效評估均已在期末研究報告書中 6-2 及 6-3 節中說明,並未有困難。	同意處理方式

<p>港灣技術研究中心 陳桂清研究員</p>		
<p>1. 研究項目及工作內容均符合契約內容之要求。</p>	<p>感謝審查委員的詳細閱讀及意見。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>2. p76頁之試驗項目齡期不一，請說明之。</p>	<p>感謝審查委員的指正。試驗項目之齡期為”與”，而非”或”。已期末研究報告書定稿中修正。 (p.4-4~p.4-5)</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>3. SEM、XRD 等試驗之結果，建議與 OPC 之結果比對之，以了解其間之差異性。</p>	<p>感謝審查委員的建議，本研究中並未與 OPC 結果進行比較，將列入本計畫後續研究內容建議事項之參考。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>港灣技術研究中心 饒正研究員</p>		
<p>1. 研究報告之編輯方式請依本所規定格式辦理。</p>	<p>感謝審查委員的指正，已依貴所規定格式，於期末研究報告書定稿中修正完成。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>2. 期中報告之審查意見，應提送期末報告時進行審查。</p>	<p>感謝審查委員的指正，已遵照辦理，並於期末研究報告書定稿中附上期中意見審查表。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>3. 試驗項目之試體齡期最長僅 28 天，有的僅 14 天，是否太短，請說明。</p>	<p>感謝審查委員的指正。由於本研究案著重於補強，因此較注重補強之後的立即使用，所以以早期齡期為主。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>4. 耐久性試驗之計畫項目與試驗結果之項目不符。</p>	<p>耐久性試驗中的氯離子滲透擴散試驗，即為快速氯離子滲透試驗，已於期末研究報告書中說明。 (p.4-5)</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>5. RPC 配比僅 3 組(# 13、# 14、# 15)，但配比 # 15 之耐久性相關試驗結</p>	<p>由於#15RPC 修補時之齡期為 7 天，故列出#15RPC7 天齡期的材料基本力學及耐久性試驗結果。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>港灣技術研究中心 邱永芳主任</p>		
<p>1. 未來應用方式請說明清楚。</p>	<p>未來使用的方式已於期末研究報告書完稿中說明。(p.5-18)</p>	<p>同意處理方式</p>

2. 工法申請專利之可能性。	本研究成果具有申請專利的可能性。	同意處理方式
3. 經濟性之評估應與其他工法做比較。	經濟性之評估與其他工法比較，除材料、價格因素外，仍待考慮工法的應用，唯因未列於本期計畫合約內，將列入期末報告建議事項中。	同意處理方式
4. 有無可能用於沉箱灌漿？	由本研究三組 RPC 工作性結果顯示，有可能用於沉箱灌漿，唯因本研究使用長 16mm 鋼纖維，較適用灌於 10mm 以上的空間。	同意處理方式
5. 兩個不同材料之結合性如何？請說明。	兩種材料之結合性已於期末研究報告書定稿中說明。(p.5-5)	同意處理方式
中華科技大學邱垂德 教授（書面審查）		
1. 本研究報告之文獻理論整理相當好，研究計畫完整嚴謹，試驗工作充份，且考慮工程實務面，成果具相當高的參考價值。	感謝審查委員的詳細閱讀及意見。	同意處理方式
2. 唯提出的 14 種材料配比所得 RPC 之強度明顯低於文獻所述之值，建議研究單位應針對強度明顯低於文獻所述的缺憾提出解決方式，如果認為高溫養治不實際亦應提出替代方法。	感謝審查委員的意見。RPC 當作結構構材可使用很高的強度。但如作為補強材料，考慮國內既有 RC 構件的強度大約在 210~420kgf/cm ² 之間，為配合原結構物之強度與相對變形量，本研究刻意降低強度，因此強度有所差異。高溫養護方式並不適用於補強方面，因此仍建議使用一般養護方式即可。	同意處理方式
台灣海洋大學楊仲家 教授（書面審查）		

<p>1. 本計畫對活性粉混凝土,以及修補材料與舊有混凝土之間的關係之相關文獻整理做有系統的整理,並配合相關試驗說明 RPC 性質與修補性能.成果相當豐碩詳實。</p>	<p>感謝審查委員的詳細閱讀及意見。</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>2. 第 83 頁 MIP 試驗已說明試體前處理過程.但應再詳述試驗過程,如高低壓埠分析的最高壓力為何與水銀灌入量與孔隙之間的關係。</p>	<p>感謝審查委員的指正,已於期末研究報告書定稿中說明。(p.4-12)</p>	<p>同意處理方式</p>
<p>3. 本研究於試驗結果並無貯鹽試驗(AASHTO T259)的相關數據.僅有氯離子快速滲透試驗(ASTM C1202)結果.建議將第 85 頁說明進行貯鹽試驗的文字說明修改.第 107 頁計算總電量公式應加入積分符號.第 125 頁部份配比電量值低於 100-coulomb.表示每 30 分鐘量測的電流試驗值極低.如第 1 與第 6 組配比均為 43.2 coulomb,兩組配比組成材料比例不同,但電量值相同.表示可能每 30 分鐘量測的電流值僅為 2-mA 或更低於電流錶的可量測範圍,故有必要在文內說明試驗使用之電量錶最低可量測範圍。</p>	<p>感謝審查委員的指正,已於期末研究報告書定稿中將貯鹽試驗相關文字刪除。(p.4-14)p.5-6 公式已加入積分符號.所使用之電量錶最低可量測範圍已於期末研究報告書定稿中說明。(p.4-13)</p>	<p>同意處理方式</p>

4. RPC 氣體滲透試驗結果建議應與文獻已有的傳統混凝土氣體位滲透係數相比較。	感謝審查委員的意見，已於期末研究報告書中列入。(p.5-25)	同意處理方式
5. 由第 108 頁 RCPT 結果說明 RPC 的電量受到鋼纖維的影響而有增加現象，但第 115 頁氣體滲透試驗結果也有較高結果。是否此結果也是試驗過程受到鋼纖維的干擾或是材料本身加入鋼纖維後所反應的性質。請加以說明。	感謝審查委員的意見，已於期末研究報告書中說明。(p.5-7、p.5-14)	同意處理方式
6. 建議日後可進行 PRC 長期貯鹽試驗相關研究，可與本期計畫試驗研究的相關耐久性質相驗證。	感謝審查委員的意見，將列入本計畫後續研究之參考。	同意處理方式
7. 由抗彎貼片補強試驗結果發現添加鋼纖維的 PRC 其補強效果較 CFRP 優良，此為極明確之研究成果：建議日後可進行 RPC 鋼纖維含量或礦物摻料替代量對各種結構打單元的補強成效分析，或考量台灣地理環境進行各種氣候條件(如潮汐帶)對 PRC 補強與耐久性的影響。	感謝審查委員的意見，將列入本計畫後續研究之參考。	同意處理方式
8. 文章內各試驗所採用的規範書寫方式應統一，如第 85 頁與第 107 頁有說明採用規範之年份 (ASTM C1202-00)。	感謝審查委員的指正，已於期末研究報告書定稿中修正。(p.4-13、p.5-6)	同意處理方式

附錄四 會議記錄

(3) 製作 CFRP 及 RPC 之抗彎補強試體，而被補強材料（常重混凝土, NC）

之基本性質如下表所示：

抗壓強度 (MPa)	超音波速 (m/s)	動彈性模數 (GPa)	動剪性模數 (GPa)	電阻 (KΩ)
38.29	4425	36.03	13.89	45.58

試驗採用三分點加載抗彎方式進行，結果顯示各試體裂縫皆發生於中間 1/3 處, CFRP 補強試體為脫落破壞, RPC 補強試體為具有優良之延展性。

1. 張淳勳目前進度報告內容摘要：

- (1) 以 HPC 理論驗證之相關材料資訊正在整理中。
- (2) 已完成配比設計理論與前人研究之比較。
- (3) 正進行 HPC 理論實作驗證。

七、綜合討論（略）

八、港灣研究所說明摘要：

1. 補強材料未來將列入國家型計畫，故本研究值得更深入研究發展。
2. 實驗進度宜加快，並注意期中報告繳交期限。

九、結論：

1. 尚未完成之資料整理、配比理論及試驗工作宜儘快在本週內作階段性的切割，就完成部份提早將資料整理，作為期中報告的初步成果。
2. 完整期中報告請在 6 月 10 日前完成，以利檢討與補充期中報告內容。

十、附件：出席人員簽到單。

附件：期中整合階段會議出席人員簽到單

『活性粉混凝土補強 RC 構件耐久性之研究』
期中整合階段會議

一、時間：94年5月30日(星期一)上午十點整

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：

紀錄：吳漢儒

柯正龍 柯正龍

陳桂清 陳桂清

林維明 林維明

湛淵源 湛淵源

張淳勳 張淳勳

謝素蘭 謝素蘭

李金輝 李金輝

吳漢儒 吳漢儒

陳俊村 陳俊村

陳柏存 陳柏存

吳崇聖 吳崇聖

力試驗及磨耗試驗等。試驗規劃與目前進度如附件(一)所示：

(3) 以圓柱試體模擬 RPC 的修補工作探討其適當性，利用氣透法測試修補系統之氣密性及使用二氧化碳測量碳化情況等，並輔以顯微微觀技術觀測其內部組構及介面孔隙情況，將有助於了解 RPC 補強系統耐久性及該系統與周遭環境之諧和性。試驗規劃與目前進度如附件(一)所示。

(4) 目前結果

(a) 經實際拌和及進行流度試驗之結果發現，除了第 10 組配比之外，利用裹漿厚度計算公式所得之配比皆具有不錯的工作性，流度約介於 17 ~ 19 cm。

(b) 將計算所得之各組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行抗壓試驗，初步結果顯示第 1 ~ 8 組配比所製成之 RPC 在齡期 7 天時強度最高，但是到齡期 14 天時，強度會微幅下降，其強度發展機制將待齡期 28 天之抗壓試驗完成後，再一併討論。另外，配比中添加飛灰與爐石之 RPC，雖然早期強度較弱，但至齡期 28 天時仍持續不斷成長，甚至其強度已高於未添加飛灰爐石者。

(c) 將計算所得之第 1 ~ 8 組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行劈裂試驗，初步結果顯示其劈裂強度發展趨勢與抗壓強度相同。

(d) 將計算所得之第 1 ~ 8 組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行表面電阻量測，初步結果發現至齡期 14 天為止表面電阻並無下降之趨勢。

2. 吳崇聖報告內容

(1) 以不同 RPC 及 CFRP 之補強厚度製作抗彎補強試體及圓柱補強試體，並依 CNS 規定進行抗彎及抗壓試驗，希望藉此了解不同補強材料及不

同補強厚度之特性，以作為將來應用於工程實務時之參考。試驗規劃與目前進度附件(一)所示：

(2) 目前結果

(a) 碳化試驗結果目前僅完成 7 天齡期，結果如下表所示：

試體	7 天碳化深度 (mm)
NC	2
Mortar	2
RPC	0

(b) 抗彎與抗壓補強試體已完成製作，待齡期一到即可進行試驗。

七、綜合討論（略）

八、港灣研究所說明摘要：

1. 貴研究團隊試驗項目與數量相當多，預期應有豐富的成果。
2. 目前試驗進度目並無問題，惟期末報告繳交期限為 11 月 3 日，仍敬請注意報告撰寫。

九、結論：

1. 尚未完成之試驗工作宜儘快完成並作資料整理。
2. 第 15 組 RPC 相關試驗工作請加速進行，以期在期末報告中提出成果。
2. 完整期中報告請在 10 月 20 日前完成，以利檢討與補充期末報告內容。

十、附件：

(一) 期末整合階段會議書面資料。

(二) 出席人員簽到單。

附件(一)：期末整合階段會議書面資料

計畫編號：MOTC-IOT-94-H1DB002

**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
(1/2)**

**期末整合階段會議
書面資料**



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：94年9月29日
會議地點：營建系 E2-221 室
計畫主持人：張大鵬教授
協同主持人：黃兆龍教授、李明君教授
研究助理：湛淵源、林維明、
陳柏存、李金輝、吳崇聖

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。本研究計畫研究範圍主要包括下列四個主要研究項目：

- 一、建立 RPC 補強材料配比設計。
- 二、了解 RPC 補強材料基本性能及耐久性能。
- 三、進行碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗。
- 四、建立修補模式與分析法。

本研究團隊在期中簡報後，依照計畫流程繼續針對上述研究項目，積極進行相關試驗，預計近期內完成所有試驗及分析工作，並製成期末書面報告，在合約期限（94年11月2日）前送交委託單位審查修訂。

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試體製作

- 1、目的：利用裹漿厚度計算，提出一套 RPC 配比設計方法。
- 2、試驗簡述：

以通過#16 篩之細骨材作為最大粒徑（即 $D_{\max}=1.18 \text{ mm}$ ），推算不同之裹漿厚度、漿量、用水量及鋼纖量，進行試體製作及相關試驗。另外，除了 RPC 常用材料（水泥、石英粉、矽灰及細骨材）之外，再同時添加飛灰及爐石，以期能達到改善品質及降低水泥用量之功能，茲將所進行之十四組配比試驗說明如下：

表一 試驗配比表 (單位：kg/m³)

配 比 編 號	石英砂				飛 灰	石 英 粉	矽 灰	爐 石	水 泥	水	SP	鋼 纖	試 體 編 號
	#30	#50	#100	#200									
1	283	217	162	123	0	192	175	0	910	243	13	0	1604-2004
2	417	298	208	147	0	207	138	0	729	204	11	0	1605-2004
3	144	236	177	134	0	209	190	0	941	255	13	0	2004-2004
4	192	301	210	148	0	209	139	0	886	234	12	0	2005-2004
5	283	217	162	123	0	192	175	0	989	203	27	0	1604-1704
6	417	298	208	147	0	207	138	0	795	171	23	0	1605-1704
7	144	236	177	134	0	209	190	0	1024	214	29	0	2004-1704
8	192	301	210	148	0	209	139	0	962	197	26	0	2004-1704
9	314	241	180	136	173	84	125	199	597	224	12	0	FS1604-2004
10	413	296	206	146	166	70	79	184	553	200	11	0	FS1605-2004
11	157	258	193	146	185	90	134	212	635	239	13	0	FS2004-2004
12	212	332	232	164	186	79	88	194	583	215	11	0	FS2005-2004
13	278	213	159	120	0	188	171	0	892	238	13	156	1604-2004-2%
14	1143				0	222	191	0	635	146	56	160	M18-2%

註：第 1~13 號之配比係利用黃氏粒料裹漿厚度緻密配比法計算而得，
第 14 號係參考台灣大學相關研究論文所使用之 RPC 配比。

二、RPC 補強材料基本性能試驗

- 1、目的：了解 RPC 材料之基本工程性能試驗。
- 2、試驗簡述：

依表一所列之配比，分別製作圓柱及菱柱型試體，按 CNS 或 ASTM 規範規定進行抗壓試驗、抗彎試驗、劈裂試驗、鋼筋拉拔試驗、剪力試驗及磨耗試驗等。試驗規劃與目前進度如表二所示：

表二 RPC 材料基本性能試驗規劃與目前進度表

試驗項目	使用配比 (號數)	試驗齡期 (天)	已完成齡期 (天)	未完成齡 期 (天)	預定 完成日期
1.抗壓試驗	1 14	3,7,14,28	3,7,14	28	10月06日
2.抗彎試驗	1 8 及 13 14	7,28	7	28	10月06日
3.劈裂試驗	1 8 及 13 14	3,7,14,28	3,7,14	28	10月06日
4.鋼筋拉拔試驗	13 14	28	-	28	10月25日
5.剪力試驗	13 14	28	-	28	10月25日
6.磨耗試驗	14	3,28	-	3,28	10月04日

三、RPC 補強材料耐久性試驗

- 1、目的：了解 RPC 材料之耐久性質。
- 2、試驗簡述：

以圓柱試體模擬 RPC 的修補工作探討其適當性，利用氣透法測試修補系統之氣密性及使用二氧化碳測量碳化情況等，並輔以顯微微觀技術觀測其內部組構及介面孔隙情況，將有助於了解 RPC 補強系統耐久性及其系統與周遭環境之諧和性。試驗規劃與目前進度如表三所示：

表三 RPC 材料耐久性試驗規劃與目前進度表

試驗項目	使用配比 (號數)	試驗齡期 (天)	已完成齡 期 (天)	未完成齡 期 (天)	預定 完成日期
1.孔隙壓汞試驗	13 14	28	-	28	
2.氣體滲透試驗	1 14	7,28	7	28	10月06日
3.水份吸收擴散試驗	1 14	28	-	28	10月06日
3.氯離子滲透擴散試驗	1 14	28	-	28	10月07日
4.表面碳化試驗	13 14	7,14,28	7	14,28	10月11日
5.表面電阻試驗	1 14	3,7,14,28	3,7,14	28	10月06日
6.顯微觀測 (SEM/EDS、XRD)	13 14	28	-	28	9月29日

四、進行碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗

- 1、目的：了解 RPC 材料應用於結構補強之可行性與其成效。
- 2、試驗簡述：

以不同 RPC 及 CFRP 之補強厚度製作抗彎補強試體及圓柱補強試體，並依 CNS 規定進行抗彎及抗壓試驗，希望藉此了解不同補強材料及不同補強厚度之特性，以作為將來應用於工程實務時之參考。試驗規劃與目前進度如表四及表五所示：

表四 抗彎補強成效試驗規劃與目前進度表

	使用配比 (號數)	補強型式及厚度	已完成配比 (號數)	已完成配比 (號數)	預定 完成日期
1	13 14	CFRP 補強一層	14	13	10月19日
2	13 14	CFRP 補強兩層	14	13	10月19日
3	13 14	RPC 補強 1 cm	14	13	10月19日
4	13 14	RPC 補強 2 cm	14	13	10月19日
5	13 14	RPC 補強門字型	14	13	10月19日
6	13 14	未補強	14	13	10月19日

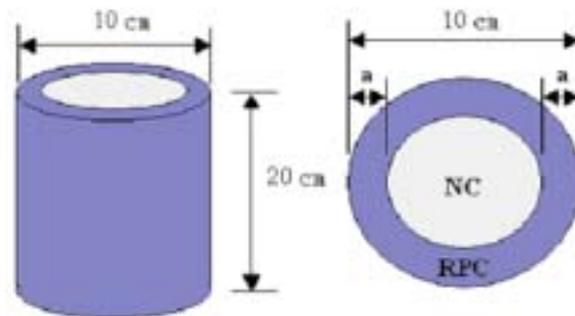
註：試體尺寸 150(寬)× 150(高)× 500(長) mm，利用三分點載重法進行試

驗。

表五 抗壓補強成效試驗規劃與目前進度表

	使用配比 (號數)	補強型式及厚度	已完成配比 (號數)	已完成配比 (號數)	預定 完成日期
1	13 14	RPC 補強厚度 a=1 cm	14	13	10月20日
2	13 14	RPC 補強厚度 a=2 cm	14	13	10月20日
3	13 14	未補強	14	13	10月20日

註：試體尺寸 100× 200 mm，進行抗壓試驗。



參、已完成研究項目之初步成果

一、RPC 補強材料配比設計與基本性質

1、新拌性質

經實際拌和及進行流度試驗之結果列於表六。由表中發現，除了第 10 組配比之外，利用裹漿厚度計算公式所得之配比皆具有不錯的工作性，流度約介於 17 ~ 19 cm。

表六 各組 RPC 材料配比拌和之流度試驗成果

配比編號	試體編號	流度 (cm)	備註
1	1604-2004	19	利用黃氏粒料裹漿厚度緻密配比法計算而得。
2	1605-2004	18	
3	2004-2004	18	
4	2005-2004	18	
5	1604-1704	19	
6	1605-1704	18	
7	2004-1704	18	
8	2004-1704	18	
9	FS1604-2004	20	
10	FS1605-2004	15.5	
11	FS2004-2004	18	
12	FS2005-2004	19	
13	1604-2004-2%	17	
14	M18-2%	15.5	參考台灣大學相關研究論文所使用之 RPC 配比。

2、硬固性質（抗壓強度）

將計算所得之各組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行抗壓試驗，試驗結果如表七所示，初步結果顯示第 1 ~ 8 組配比所製成之 RPC 在齡期 7 天時強度最高，但是到齡期 14 天時，強度會微幅下降，其強度發展機制將待齡期 28 天之抗壓試驗完成後，再一併討論。

另外，配比中有添加飛灰與爐石之 RPC，雖然早期強度較弱，但至齡期 28 天時仍持續不斷成長，甚至其強度已經高於未添加飛灰爐石者。

表七 各組 RPC 材料配比之抗壓強度

配比編號	試體編號	抗壓強度 (MPa)			
		3 天齡期	7 天齡期	14 天齡期	28 天齡期
1	1604-2004	65.6	83.6	81.4	-
2	1605-2004	60.4	74.9	79.7	-
3	2004-2004	68.4	86.3	89.5	-
4	2005-2004	66.3	82.4	87.2	-
5	1604-1704	73.6	81.0	78.3	-
6	1605-1704	63.3	82.2	79.3	-
7	2004-1704	74.9	87.5	58.7	-
8	2004-1704	72.5	77.0	74.7	-
9	FS1604-2004	64.0	67.0	71.5	91.5
10	FS1605-2004	56.0	62.5	67.5	88.0
11	FS2004-2004	52.0	55.0	65.0	113.5
12	FS2005-2004	53.0	61.0	70.0	82.5

3、硬固性質（劈裂強度）

將計算所得之第 1 ~ 8 組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行劈裂試驗，試驗結果如表八所示，初步結果顯示其劈裂強度發展趨勢與抗壓強度相同。

表八 各組 RPC 材料配比之劈裂強度

配比編號	試體編號	劈裂強度 (MPa)			
		3 天齡期	7 天齡期	14 天齡期	28 天齡期
1	1604-2004	5.2	5.9	6.8	-
2	1605-2004	4.5	5.5	6.1	-
3	2004-2004	5.0	5.3	7.1	-
4	2005-2004	4.7	5.5	7.0	-
5	1604-1704	4.7	5.9	6.7	-
6	1605-1704	4.2	7.2	7.5	-
7	2004-1704	4.5	6.0	6.5	-
8	2004-1704	5.4	5.5	5.7	-

4、硬固性質（超音波速）

將計算所得之各組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行超音波速量測，結果如表九所示，初步結果發現超音波速發展趨勢與抗壓強度相同。

表九 各組 RPC 材料配比之超音波速

配比編號	試體編號	超音波速 (m/s)			
		3 天齡期	7 天齡期	14 天齡期	28 天齡期
1	1604-2004	4371	4448	4485	-
2	1605-2004	4434	4527	4585	-
3	2004-2004	4287	4372	4427	-
4	2005-2004	4282	4390	4456	-
5	1604-1704	4429	4566	4549	-
6	1605-1704	4429	4614	4625	-
7	2004-1704	4360	4463	4494	-
8	2004-1704	4409	4508	4513	-
9	FS1604-2004	-	4304	4352	4498
10	FS1605-2004	-	4304	4469	4543
11	FS2004-2004	-	3787	4299	4571
12	FS2005-2004	-	4194	4468	4563

5、硬固性質（抗彎強度）

表十 各組 RPC 材料配比之抗彎強度

配比編號	試體編號	7 天抗彎強度 (MPa)
1	1604-2004	12.7
2	1605-2004	11.1
3	2004-2004	13.9
4	2005-2004	11.8
5	1604-1704	9.5
6	1605-1704	9.6
7	2004-1704	12.2
8	2004-1704	12.1
13	1604-2004-2%	21.4
14	M18-2%	16.6

二、RPC 補強材料之耐久性質

1、表面電阻

將計算所得之第 1 ~ 8 組配比實際拌和並澆灌圓柱試體，於不同齡期進行表面電阻量測，結果如表十所示，初步結果發現至齡期 14 天為止表面電阻並無下降之趨勢。

表十一 各組 RPC 材料配比之表面電阻

配比編號	試體編號	表面電阻 (K . cm)			
		3天齡期	7天齡期	14天齡期	28天齡期
1	1604-2004	36	150	326	-
2	1605-2004	24	176	444	-
3	2004-2004	22	105	246	-
4	2005-2004	20	98	244	-
5	1604-1704	49	248	596	-
6	1605-1704	38	293	708	-
7	2004-1704	33	195	480	-
8	2004-1704	49	220	519	-

2、碳化試驗

表十二 RPC 之碳化深度

試體	7天碳化深度 (mm)
NC	2.0
Mortar	2.0
RPC	0.0



照片一 常重混凝土(NC)



照片二 一般水泥砂漿(mortar)



照片三 活性粉混凝土(RPC)

附件(二)：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 (1/2)

期末整合階段會議

開會簽到單

一、時間：94年9月29日(星期四)下午2時30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：陳梹清

張道光 柯正都

四、計畫主持人：張大鵬教授 張文鵬

五、協同主持人：黃兆龍教授 黃明龍

李明君教授 _____

六、出席人員：

湛淵源 湛淵源

林維明 _____

張淳勛 張淳勛

陳柏存 陳柏存

李金輝 李金輝

吳崇聖 吳崇聖

附錄五 期末簡報資料

活性粉混凝土補強R.C.構件與耐久性之研究(1/2)

Study on Reinforced Concrete Members Retrofitted with Reactive Powder Concrete and Its Durability (1/2)

MOTC-IOT-94-H1DB002



期末簡報

委託單位：交通部運輸研究所（港灣研究中心）

執行單位：國立臺灣科技大學

計畫主持人：張大鵬

協同主持人：黃兆龍 李明君

研究人員：湛淵源 林維明 陳柏存 李金輝 吳崇聖

執行期限(本年度)：94年1月1日至94年12月31日

全程期限：94年1月1日至95年12月31日

民國94年11月10日

報告大綱

- 緒論
- 文獻回顧
- RPC配比設計邏輯及理論
- 試驗計畫
- 試驗結果與討論
- 結論與建議



壹、緒論

1. 臺灣地區混凝土構造物長年承受颱風、地震侵襲，加速劣化損傷，必須及時地以適當的材料與工法加以妥善修復、補強與維護，以延長其使用壽命

3. 活性粉混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 具**超高抗壓強度、韌性及耐久性**，不添加粗粒料，較不受結構物外型限制，可應用於特殊造型結構物。

2. 修補後新舊材料間**界面黏結效果**、修補時**接縫處理**及修補材料**耐久性**等，都是混凝土補強時須考量注意之處。



4. RPC 公開至今僅有十餘年，應用於實際補強結構方面，仍有許多尚待瞭解的材料特性及成效。

研究動機與目的

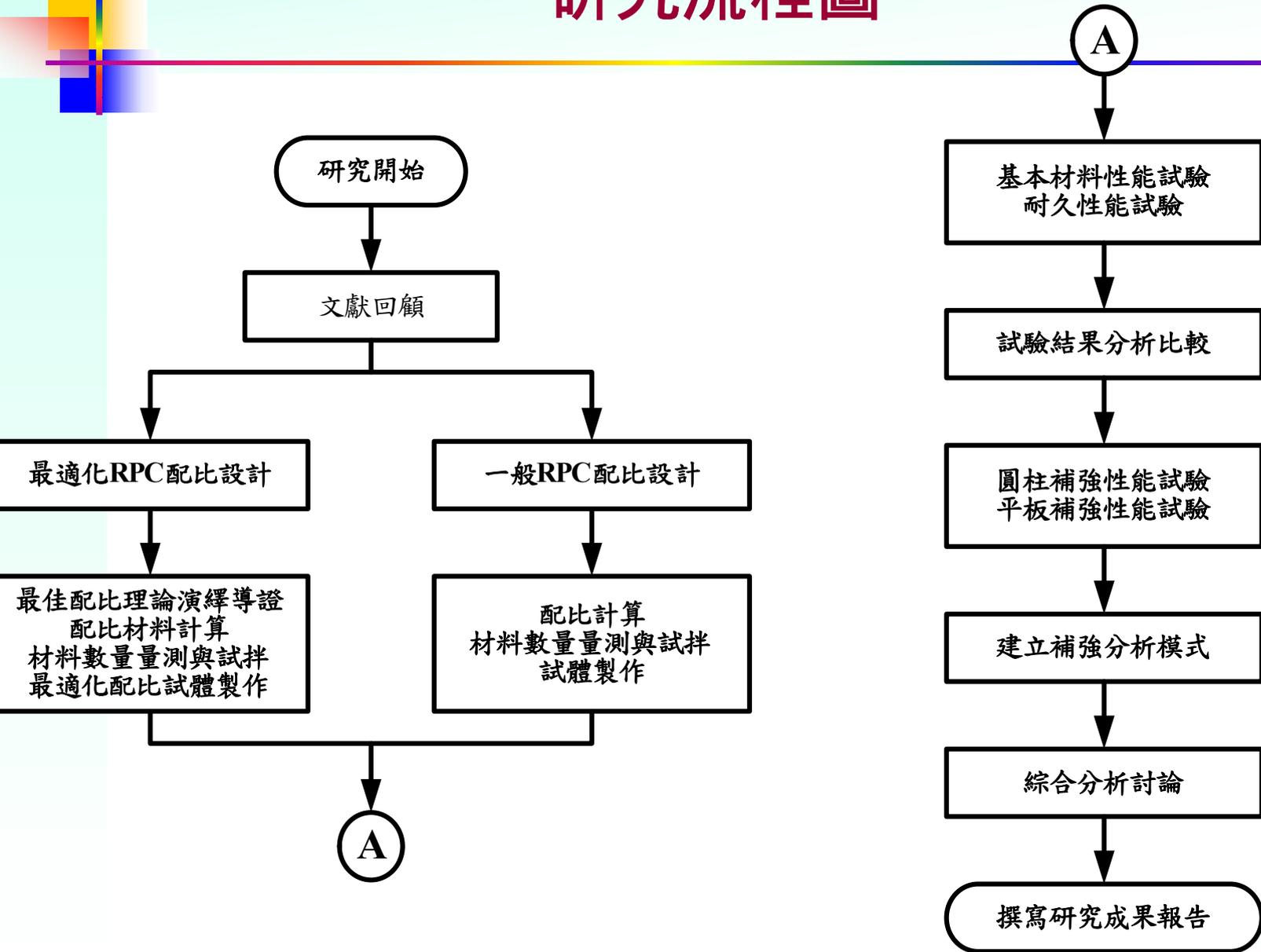
- 六十年代，國內建造很多重要鋼筋混凝土構造物，迄今已超過二、三十年，長期使用下，其功能隨著齡期增加而呈現老化、損傷及損壞現象。
- 國內後期或新近建造完成的鋼筋混凝土構造物，也可能因在建造或使用期間，承受額外地震力、風力、超負載等外力，呈現出損傷及損壞現象。
- 如何尋求一種適當補強與防護劣化的材料、技術與工法，對已劣化及損傷的鋼筋混凝土構造物，加以維修或補強，增加安全性、耐久性、延長使用年限？
- 瞭解RPC的優異材料特性是否能作為國內既有損傷鋼筋混凝土構件的補強用，探討其衍生的相關材料力學行為、耐久性成效評估等議題為本研究之目的。

研究項目

本研究計畫第一年主要工作項目包括：

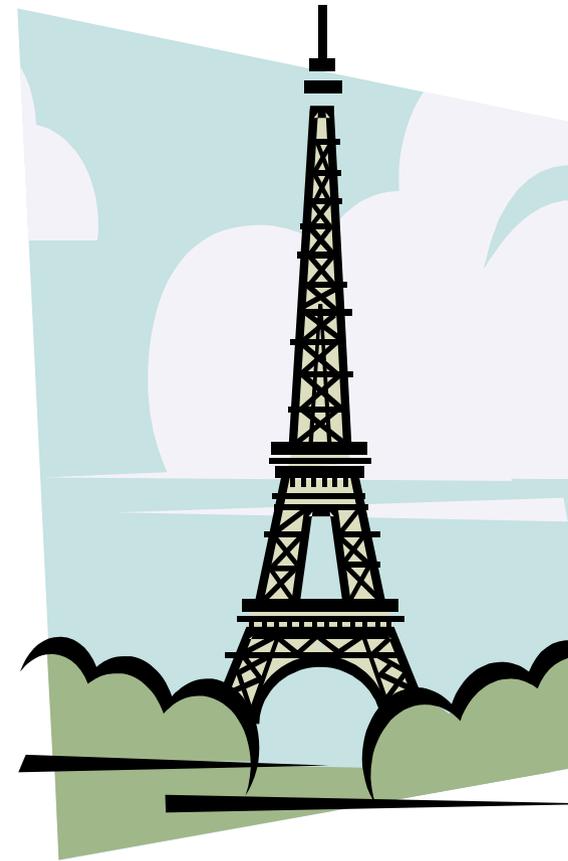
- (1) 補強材料之配比設計與力學性質探討；
- (2) 補強材料之基本性能及耐久性試驗；
- (3) 碳纖維貼片(CFRP)與活性粉混凝土(RPC)補強成效試驗；
- (4) 建立理論模式與分析法。

研究流程圖



貳、文獻回顧

- 緒論
- 文獻回顧
- RPC 配比設計邏輯及理論
- 試驗計畫
- 試驗結果與討論
- 結論與建議

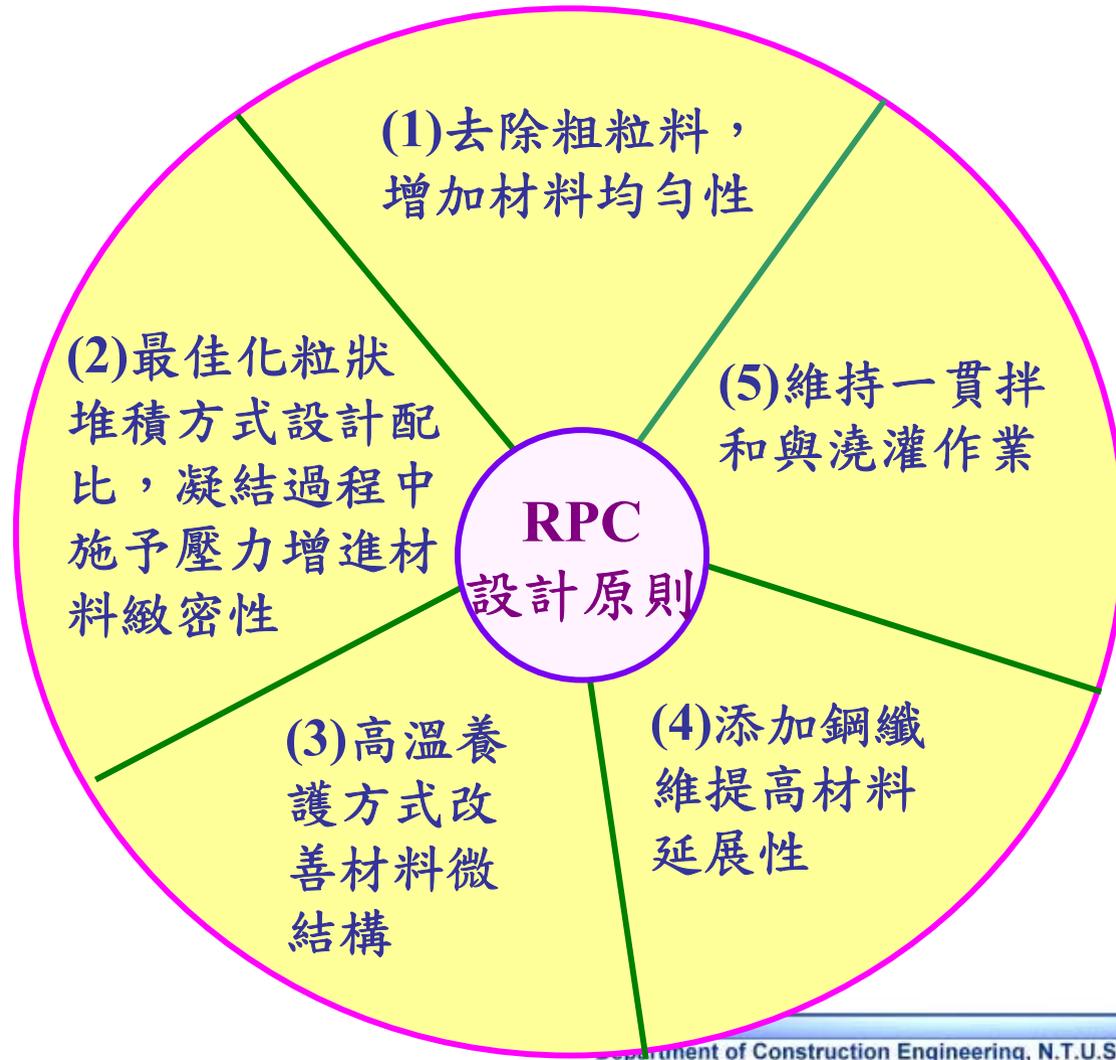


活性粉混凝土起源與發展

- ◆ 1990年開始，法國Bouygues公司即投入研發製作與瞭解材料特性。
- ◆ 1994年以前，此種材料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(ACI)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。
- ◆ 台灣營建研究院的客座研究員苗伯霖博士，於1996年在國內「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」。

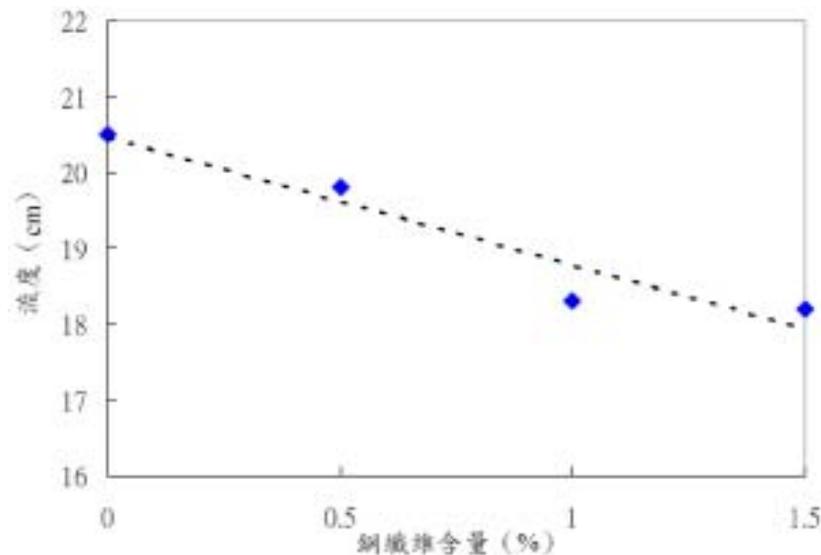
活性粉混凝土(RPC)設計理念

P. Richard and M. Cheyrezy (1995)



活性粉混凝土之新拌性質

- 何耀宇（2000）以0%、1%、2%鋼纖含量拌製2 kg及80 kg的RPC，其流度隨著鋼纖維含量而減少。大型拌和機具有足夠的空間能使鋼纖維均勻分佈。
- 吳建興（2003）：流度隨鋼纖維含量而減少



活性粉混凝土之硬固性質(一)

P. Richard and M. Cheyrezy (1995)

活性粉混凝土與其它混凝土力學性質比較表

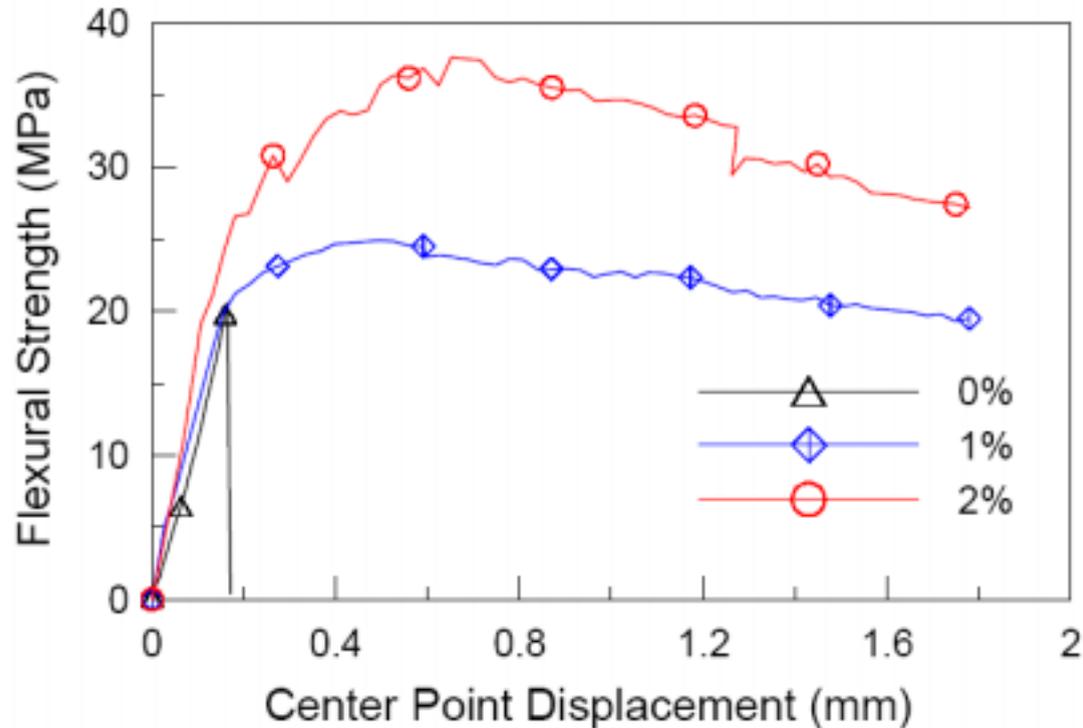
性質	普通 混凝土	高性能 混凝土	玻纖水泥 GRC	活性粉混凝 土 RPC-200	活性粉混凝 土 RPC-800
抗壓強度 (MPa)	10-40	60-100	50-80	170-230	500-810
抗彎強度 (MPa)	3-6	6-10	20-30	30-60	45-140
彈性模數 (Gpa)	30-35	35-45	10-20	50-60	65-75

RPC-200與RPC-800之力學性質表

	RPC-200	RPC-800
抗壓強度, f_c (MPa)	194-203	422-520
初始靜彈性模數, E_0 (GPa)	—	29-36
靜彈性模數, E_c (GPa)	62-66	63-74
動彈型模數, E_{dyn} (GPa)	59-61	32-36
靜波松比, ν_{stat}	0.22-0.24	0.19-0.28
動波松比, ν_{dyn}	0.22-0.24	—
線彈性段佔極限強度比例 (%)	60	—

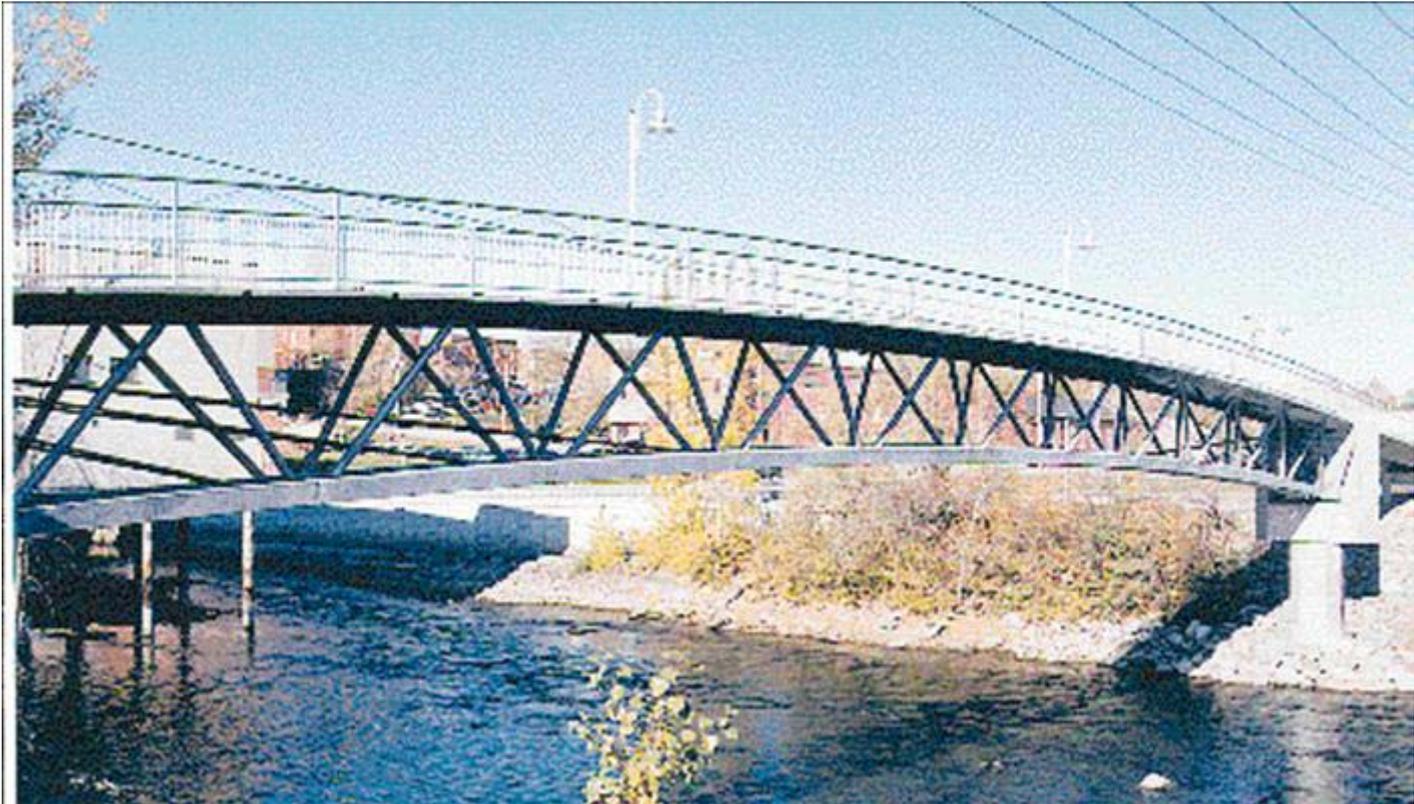
活性粉混凝土之硬固性質(二)

- 何耀宇 (2000) : 添加鋼纖能提升RPC材料之韌性。



活性粉混凝土之應用

1997年7月，加拿大於Sherbrooke (Quebec)，以RPC建造完成一座長60 m的世界第一座專供行人與腳踏車通行之RPC橋



參考文獻：Blais, P. Y. and M. Counture, “Precast, prestressed pedestrian bridge-World` s first reactive powder concrete structure, PCI, Sep/Oct, 1999.

混凝土結構物之補強材料

(1) 填補用修復補強材料

具工作性、黏結性且力學行為不輸混凝土，如環氧樹脂。

(2) 黏結用修復補強材料

將混凝土與外加補強受力構件間作有效黏結，以達成力量有效傳遞，如化學膠結劑。

(3) 主要受力用修復補強材料

分擔原有混凝土結構的受力，如型鋼、CFRP。

混凝土結構物之補強工法

(1) 裂縫灌注環氧樹脂工法

壓力注射修補寬度0.3 mm以上裂縫，但無法提升整體混凝土強度。

(2) 鋼筋混凝土補強工法

先敲除鬆動混凝土，配合植筋再灌注水泥質材料或樹脂砂漿修補。

(3) 鋼板包覆補強工法

藉由環氧樹脂黏結及螺栓固定，修補成本高。

(4) 纖維複合材料補強工法

CFRP作為混凝土構件補強具重量輕、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，主要補強方法包括柱包裹方式補強圍束力、樑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。

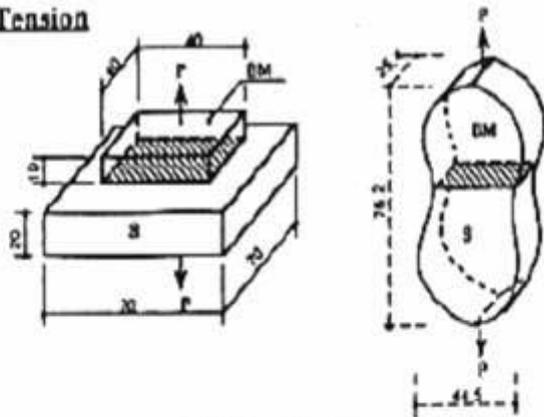
混凝土結構物之補強黏結層

- 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。
- Wall (1988) 以斜剪試驗測試新舊混凝土之黏結性，發現當修補材料與混凝土之彈性模數相近時，黏結效果最佳。
- 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。

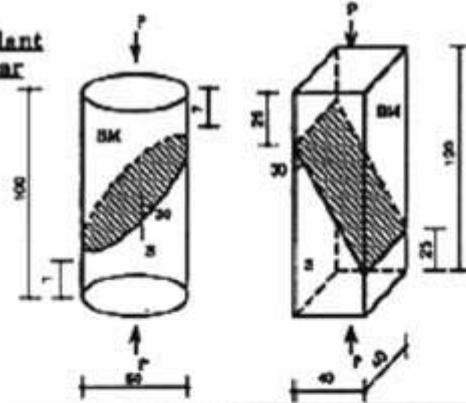
混凝土結構物之補強黏結層強度試驗法

Pareek (1995) 建議之評估材料黏結試驗方法，包括斜剪試驗、直剪試驗、單軸拉力試驗及撓曲試驗等。

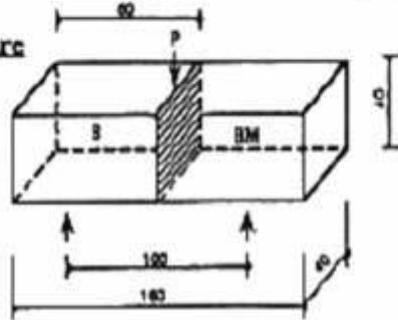
Adhesion in Tension



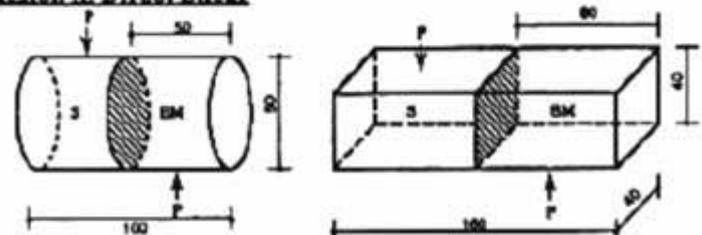
Adhesion in Slant (Indirect) Shear



Adhesion in Flexure



Adhesion in Direct Shear



BM : Bonded Mortar
S : Concrete Substrate
P : Load
Bonding Joint
(Unit : mm)

傳統活性粉混凝土配比設計理念 (一)

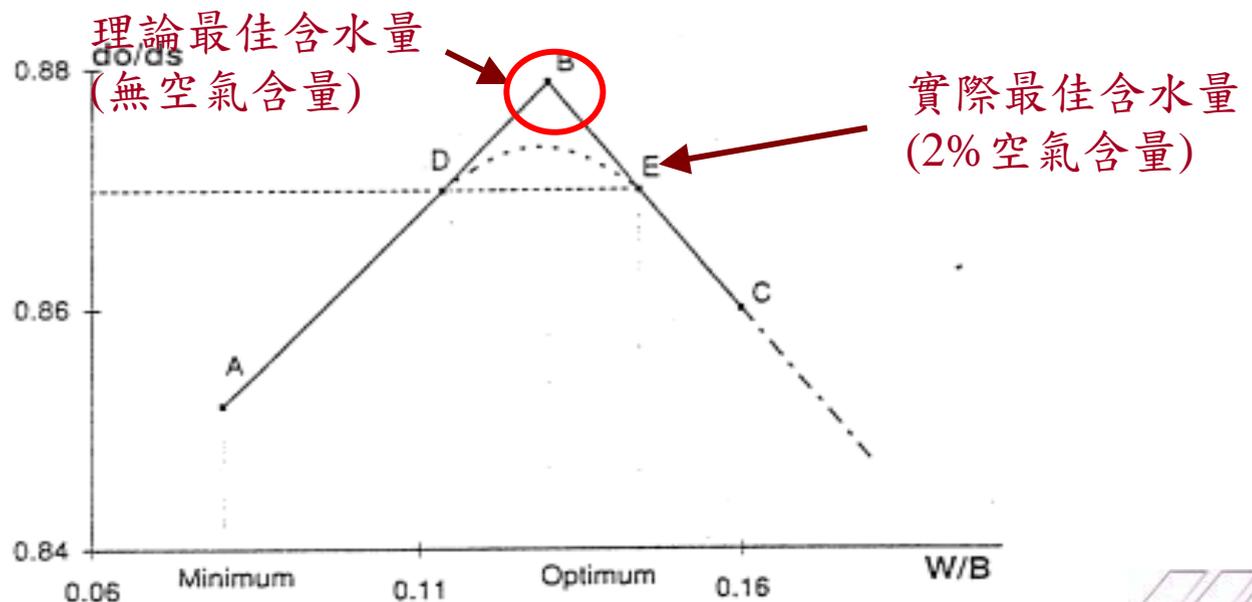
P. Richard and M. Cheyrezy (1995)

- (1) 依粒徑大小將材料分成砂、水泥與石英粉、矽灰三類。
- (2) 兩相鄰類別的平均粒徑 (d_{50}) 比值 > 13 ，以避免互相干擾。
- (3) SP最佳用量以流變分析來決定，SP種類必須配合水泥種類。
- (4) 選擇結塊最少的細粉。

傳統活性粉混凝土配比設計理念 (二)

P. Richard and M. Cheyrezy (1995)

- (5) 最緻密狀態的RPC其水膠比為0.08（膠結料包括水泥及砂灰）。最佳含水量係以相對密度 d_o/d_s 來分析，其中 d_o 是拆模時的密度， d_s 是固體密度(不含空氣與水)，



緻密混凝土配比設計理念

- 高性能混凝土(HPC)應用「緻密混凝土配比設計法 (Deified Mixture Design Algorithm, DMDA)」，融合古典體積法與近代重量法，以「物理緻密為主，化學強化為輔」思維，進行配比設計。
- 緻密混凝土配比設計法係假設配「混凝土整體密度最大，則物理性質終將最佳」，即具密度大、彈性模數大、力學強度佳及體積穩定性佳等特性。

混凝土配比設計比較

常見之OPC、HPC、RPC配比

材料	水泥	飛灰	爐石	矽灰	石英粉	石英砂	細粒料	粗粒料	鋼纖維	水	強塑劑	消泡劑	材料
OPC	1	--	--	--	--	--	1.78	1.99	--	0.48	--	--	OPC
HPC	1	0.91	0.36	--	--	--	3.64	3.43	--	0.47	0.097	--	HPC
RPC	1	--	--	0.3	0.35	1.25	--	--	0.22	0.28	0.06	4.17*10 ⁻⁴	RPC

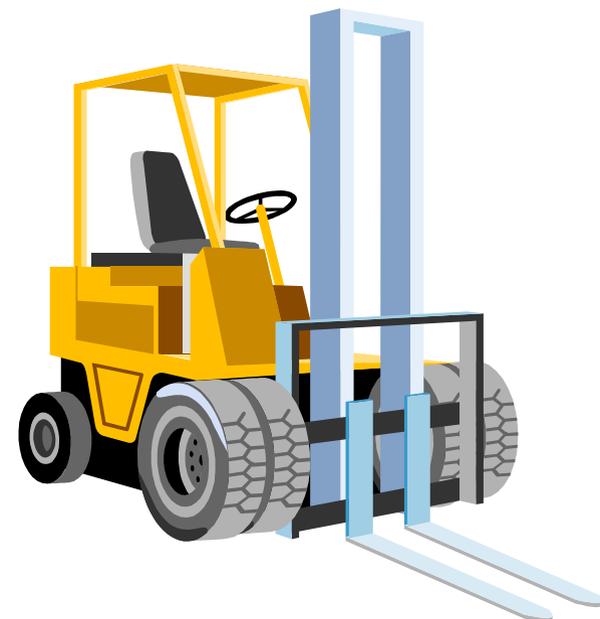
備註：OPC→設計強度為5000psi； HPC→N值=1.235； RPC→鋼纖維用量為體積之2%。

利用高性能混凝土來驗證之理由為：

- (1) RPC配比設計理論與HPC相似，差異僅在於RPC為顆粒極小化之混凝土，以HPC試做後可瞭解RPC施做時變數變化。
- (2) RPC材料成本高，先以HPC試做。

參、RPC配比設計邏輯及理論

- 緒論
- 文獻回顧
- **RPC配比設計邏輯及理論**
- 試驗計畫
- 試驗結果與討論
- 結論與建議



RPC配比設計之背景資料

(1) 傳統鋼筋混凝土構件的性質

傳統RC抗壓設計強度為 210 kgf/cm^2 ，僅重視安全性，經多年老化後，抗壓強度會更低，修補材料性質與基材之差異性不可過高，否則容易產生脫離現象。

(2) 修補材料的選材原則

選擇修補材料必須考慮與底材間之「材料相容性」，在一定時間內，能承受因體積改變、化學及電化學變化所產生之應力改變，不致有力量鬆弛、劣化現象，並能保持原設計要求的物理性、化學性、電化學性及體積穩定性等，才能獲致較好的耐久性品質。

RPC修補材的基本特性要求

(1) 體積穩定性

水量 $< 170 \text{ kg/m}^3$ ，控制乾縮量小於 $500\mu\text{m}$ ，水灰比 > 0.42 ，儘量愈大愈佳，以防自生乾縮。

(2) 化學及電化學相容性

材料以原來水泥基為素材，可達相容性質。

(3) 滲透一致性

RPC的絕佳阻滲功能不利於滲透性，惟RPC內含大量卜作嵐材料，易與RC構件表面之 Ca(OH)_2 結合成為低密度C-S-H膠體，有利界面穩定性。

(4) 介面鍵性質

如RPC與RC同質材料，當RC構件表面乾淨，修補之RPC強度不要過高，以防產生界面應力集中而弱者產生脫膠現象。

(5) 環境諧和性

RPC水量過多時，環境侵蝕通路將增大；水泥過多，則 C_3A 在海域下的劣化將加速，水量及水泥量採用低量是明智之舉。

RPC配比設計理論

(1) 一般RPC配比設計概念

在國內，一般的RPC配比設計均參考1990年代法國的配比加以修改，缺乏理論依據，其它常用的RPC配比設計方法也不適合於粒徑甚小的水泥漿(paste)設計。

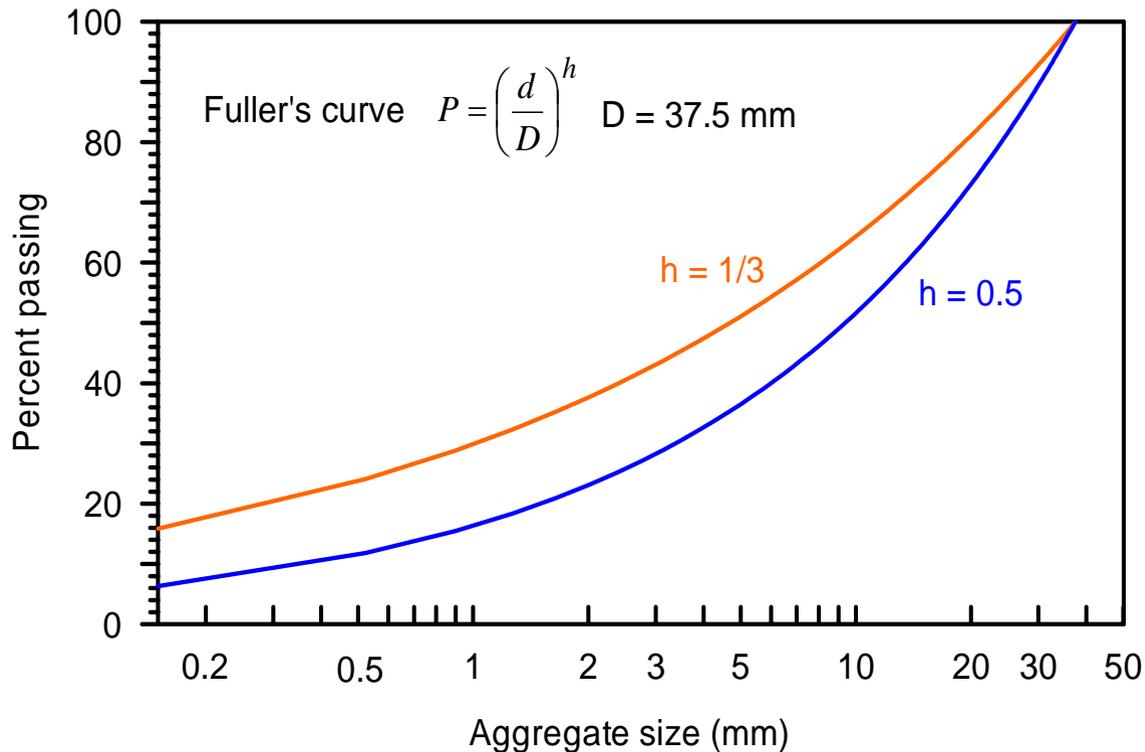
(2) 本研究RPC配比設計概念

採用Fuller's Curve 來尋求達到緻密特性的配比設計，將不同粒徑的粒料組合成一體，再控制水量來調整工作性，擴大RPC可用範圍及提高補材料的適用性。

Fuller's Curve (富勒曲線)

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^h, \quad h = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \quad \dots\dots\dots \text{Fuller's curve}$$

式中 P = 比粒徑 d 小的顆粒重量百分率；D = 顆粒堆積體中最大的顆粒粒徑。



RPC配比設計流程(一)

1. 實驗求得材料基本性質(比重、吸水率、篩分析...)。
2. 選定最大篩號(D)與Fuller's curve 次方數(h)後，由粒料材篩分析資料，利用最小平方法，求最趨近Fuller's curve理論曲線解，得到粒料配合使用比率。
3. 依比例混合不同粒徑粒料，進行乾搗單位重試驗，由實驗可得堆積單位，並依之計算剩餘空隙率。
4. 經由步驟2與步驟3後，選擇適宜粒料架構，以相同裹漿厚度與水膠比進行配比試拌，量測混凝土工作性，在比較混凝土流動性質後，選擇最佳粒料架構所對應之Fuller's curve，作為實驗配比使用之理論曲線。

RPC配比設計流程(二)

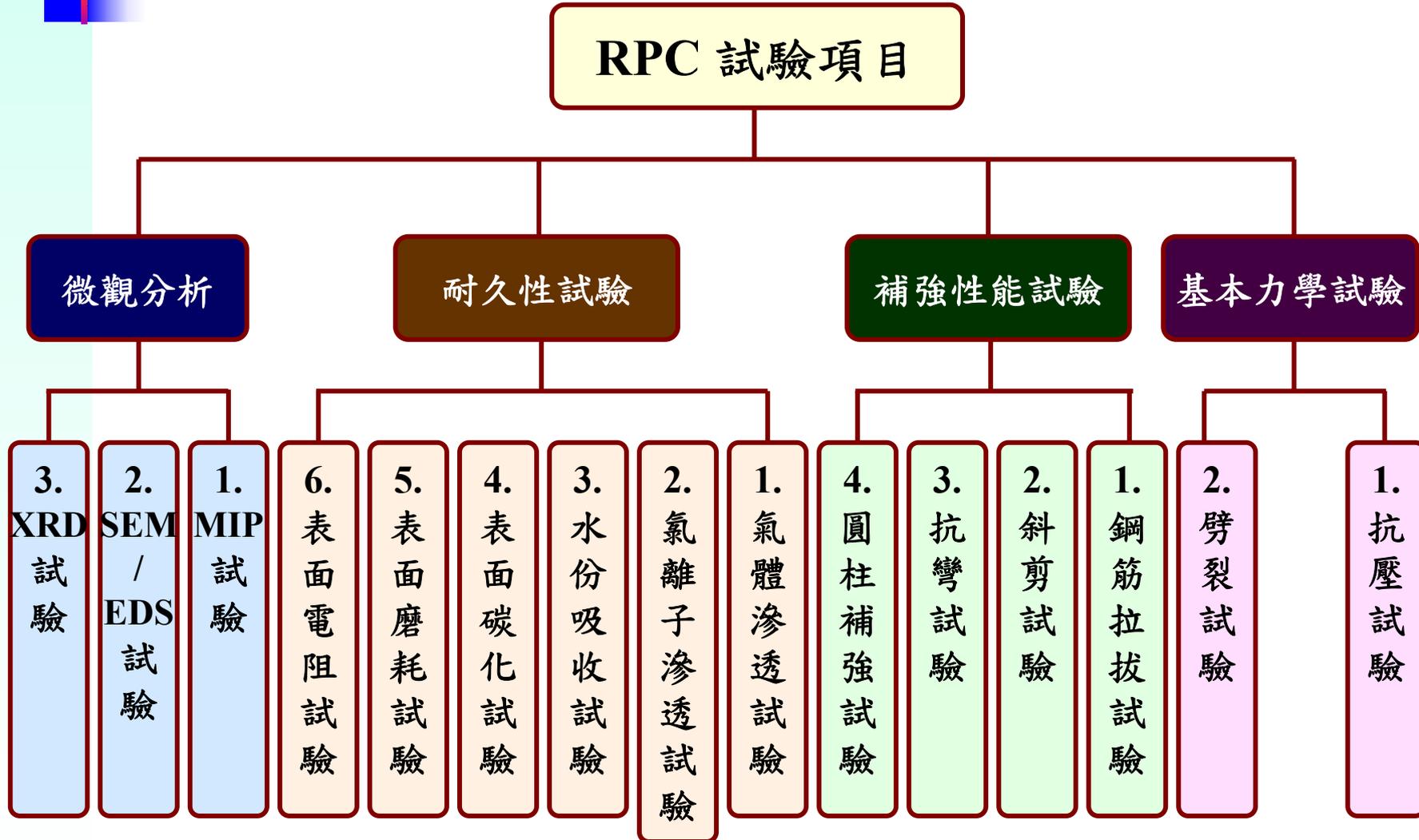
5. 選定實驗變數(漿體厚度及水膠比)進行配比試算，求得粗和細粒料、飛灰、爐石、矽灰、水泥、水及強塑劑用量，依實驗性質選擇合適配比。
6. 試拌調整配比強塑劑用量。
7. 依據強塑劑用量調整混凝土拌合水量，大量拌合澆置試驗所需試體。
8. 量測硬固混凝土材料料質與耐久性質。
9. 進行資料分析。

肆、試驗計畫

- 緒論
- 文獻回顧
- RPC 配比設計邏輯及理論
- 試驗計畫
- 試驗結果與討論
- 結論與建議



本研究RPC試驗項目



混凝土試驗材料(一)

- 普通混凝土：強度 280 kgf/cm^2 ，坍度 250 mm 。
- 活性粉混凝土：

1. 水泥



2. 矽砂



3. 矽灰



4. 石英砂



5. 飛灰



6. 爐石



混凝土試驗材料(二)

7.鋼纖維



8.強塑劑



9.消泡劑



10.水

CFRP試驗材料

1. 碳纖維貼片



2. 底漆



3. 積層樹脂



RPC配比參數及基本材料性質

α	β	ξ	UW (kg/m ³)	γ_c (kg/m ³)	γ_{sl} (kg/m ³)	γ_{fly} (kg/m ³)
0.14	0.55	0.05	2109.7	3150	2830	2150

γ_{CA} (kg/m ³)	γ_{FA} (kg/m ³)	AC _{CA}	AC _{FA}
2700	2670	0.0007	0.022

α = 飛灰填塞細粒料之比率；

β = (飛灰+細粒料)填塞粗粒料之比率；

ξ = 爐石粉取代水泥比率；

UW = (飛灰+細粒料)填塞粗粒料之單位重；

$\gamma_c, \gamma_{sl}, \gamma_{fly}, \gamma_{FA}$ 及 γ_{CA} = 水泥、爐石粉、飛灰、細粒料及粗粒料單位重；

AC_{FA}, AC_{CA} = 細粒料及粗粒料之吸水率。

膠結砂漿及RPC配比

組號	石英砂				飛灰	石英粉	矽灰	爐石粉	水泥	水	強塑劑	鋼纖維	W/B
	#30	#50	#100	#200									
#1	283	217	162	123	0	192	175	0	910	243	13	0	0.2
#2	417	298	208	147	0	207	138	0	729	204	11	0	0.2
#3	144	236	177	134	0	209	190	0	941	255	13	0	0.2
#4	192	301	210	148	0	209	139	0	886	234	12	0	0.2
#5	283	217	162	123	0	192	175	0	989	203	27	0	0.17
#6	417	298	208	147	0	207	138	0	795	171	23	0	0.17
#7	144	236	177	134	0	209	190	0	1024	214	29	0	0.17
#8	192	301	210	148	0	209	139	0	962	197	26	0	0.17
#9	314	241	180	136	173	84	125	199	597	224	12	0	0.2
#10	413	296	206	146	166	70	79	184	553	200	11	0	0.2
#11	157	258	193	146	185	90	134	212	635	239	13	0	0.2
#12	212	332	232	164	186	79	88	194	583	215	11	0	0.2
#13	278	213	159	120	0	188	171	0	892	238	13	156	0.2
#14	1143				0	222	191	0	635	146	56	160	0.193
#15	413	296	206	146	166	70	79	184	553	165	41	156	0.196

註：單位 kg/m³

控制組混凝土及水泥砂漿配比

組號	細粒料	粗粒料	水泥	水	強塑劑	W/C
混凝土	592	1044	392	235	0	0.6
水泥砂漿	1378	0	501	300	0	0.6

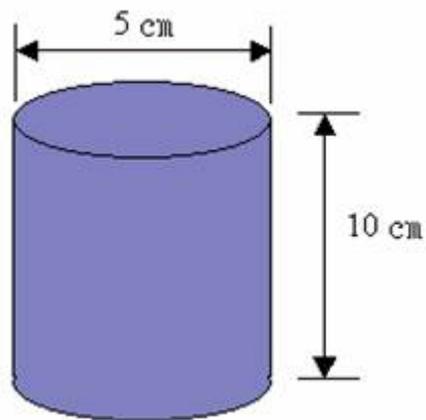
註：單位 kg/m^3

流度試驗(ASTM C230M-03)

將水泥砂漿分二層填入流度錐，每層搗實25下，刮平將流度錐提起，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，並計算其平均直徑增加量。

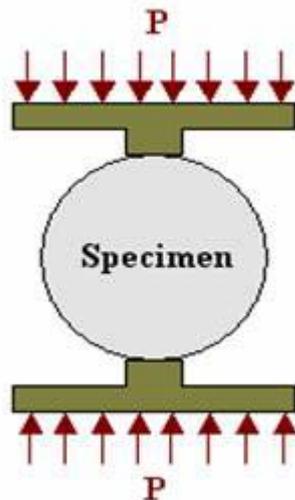


抗壓試驗



以 $4.5 \sim 7.14 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$
加載速率直至材料破壞

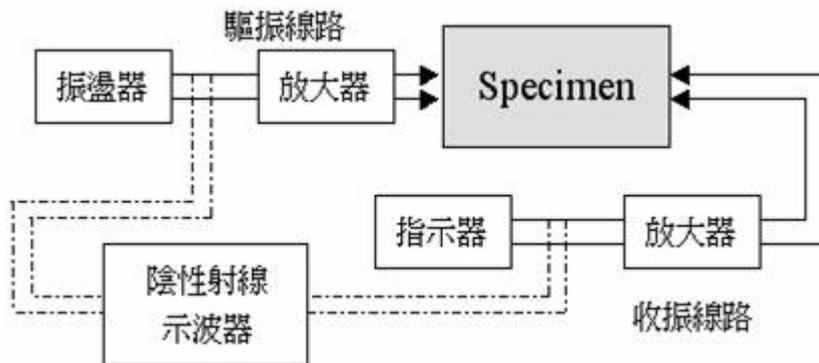
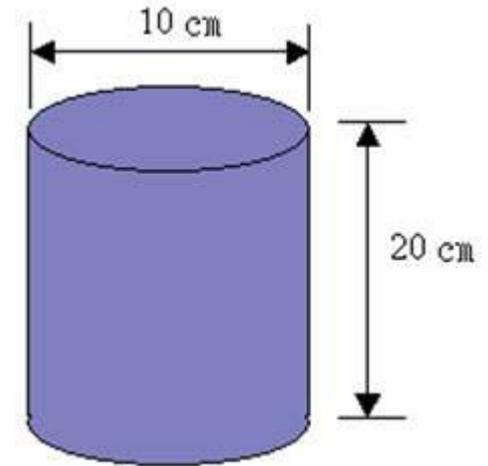
張力劈裂試驗



以7~14 kgf/cm²/sec
加載速率直至材料破壞

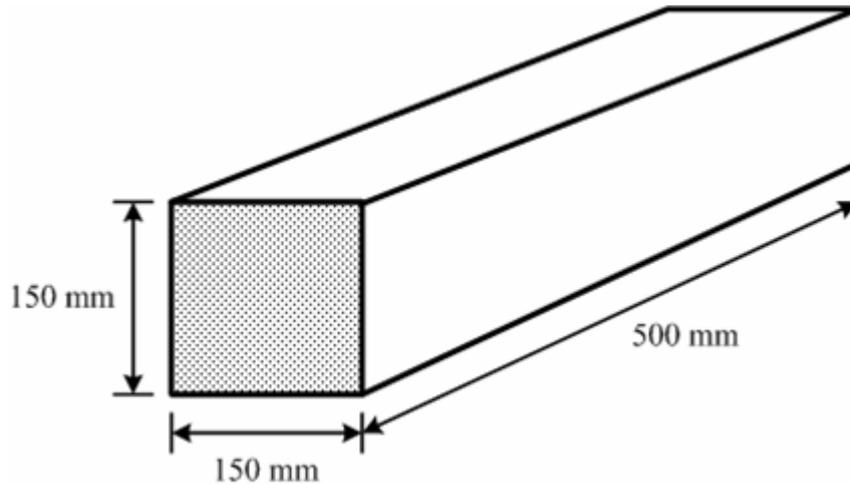
$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

動彈(剪)試驗 (CNS 1239)

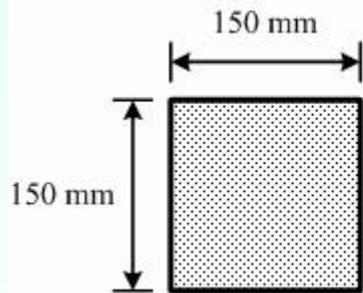


採縱向共振，可用為
長時間量測動彈性係數
的變化

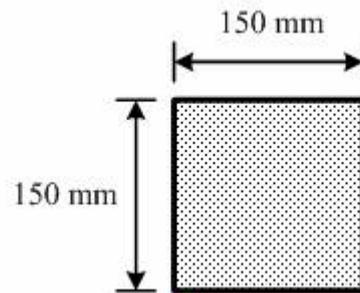
CFRP抗彎補強試驗



試體數量各3個

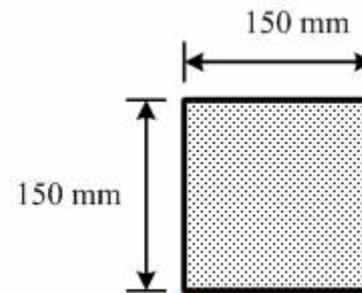


(1) 控制組



CFRP一層

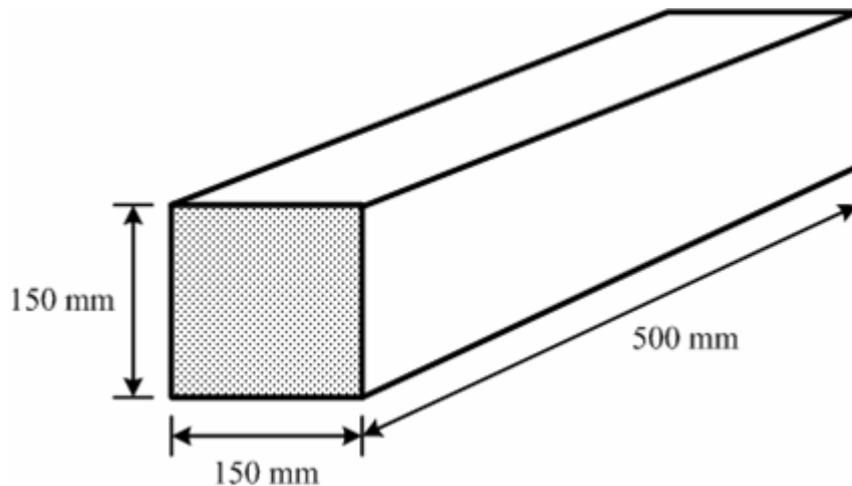
(2) CFRP補強一層



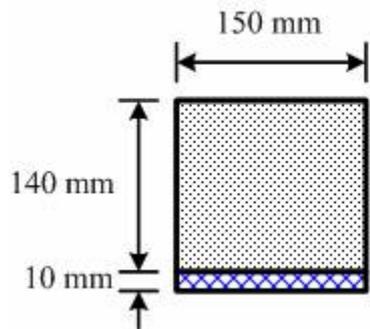
CFRP二層

(3) CFRP補強二層

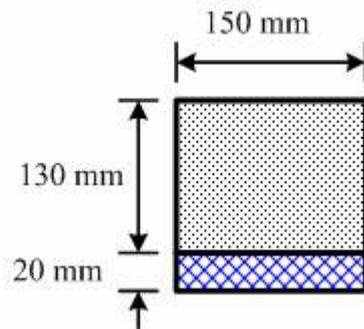
RPC平板抗彎補強試驗



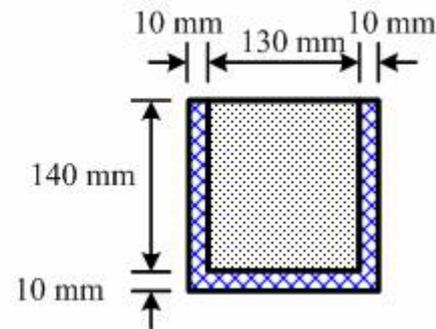
試體數量各3個



RPC 10 mm



RPC 20 mm

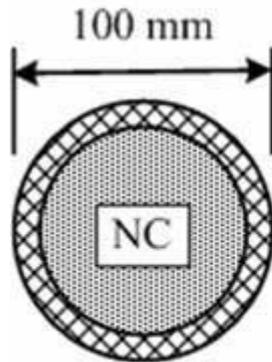


RPC U型 10 mm

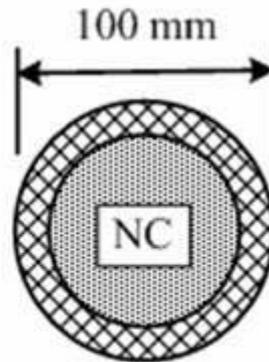
- (1) 平板10 mm補強 (2) 平板20 mm補強 (3) 平板U型10 mm補強

RPC平板圓柱補強試驗

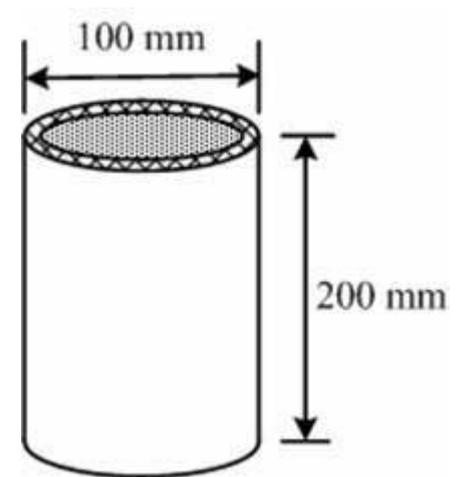
試體數量各3個



RPC 厚
10 mm

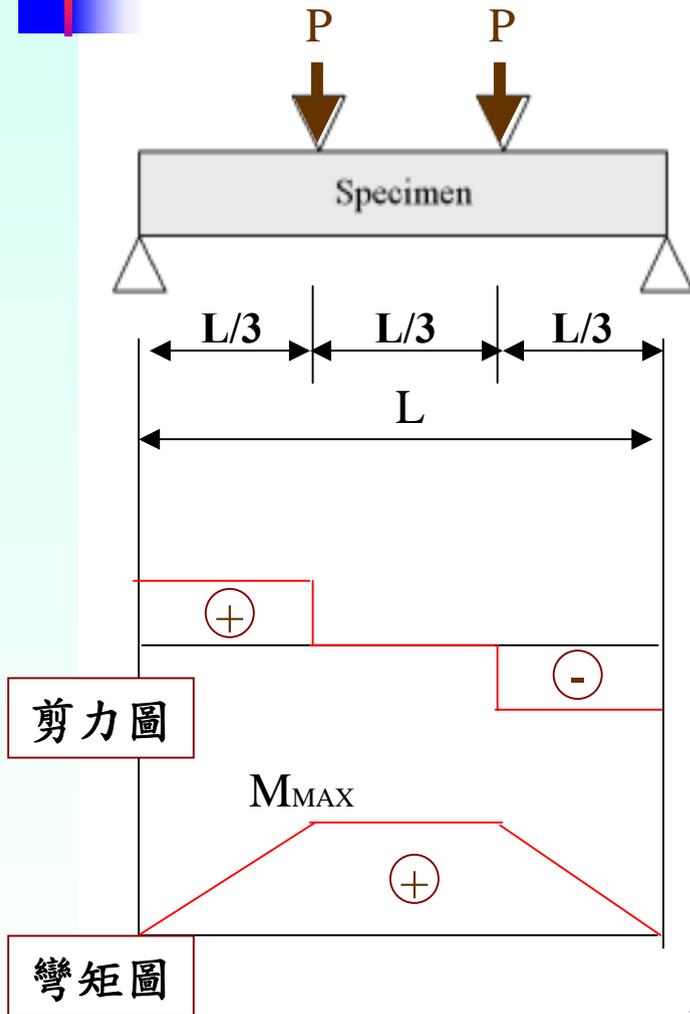


RPC 厚
15 mm



(1) 平板10 mm補強 (2) 平板15mm補強

三分點抗彎試驗



破裂面在中心點L/3處，抗彎強度

$$\sigma = \frac{M_{MAX} \bar{y}}{I}$$

破裂面在中心點L/3處外，不超過0.05L

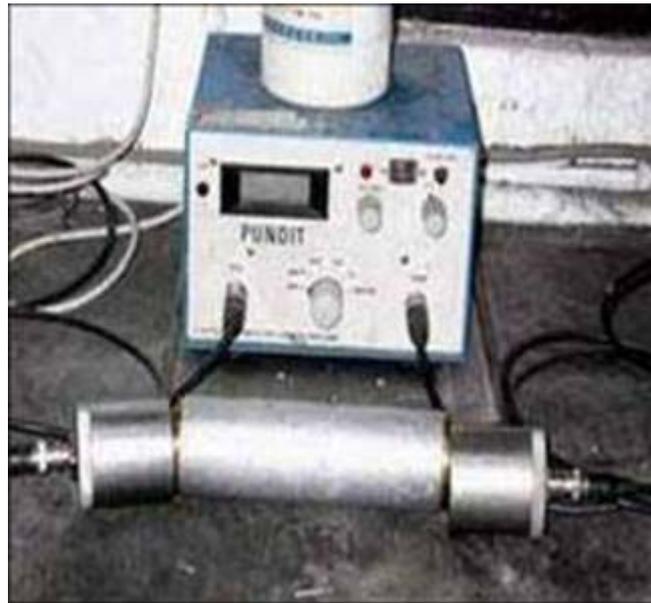
抗彎強度

$$\sigma = \frac{M \bar{y}}{I}$$

破裂面在中心點L/3處外，超過0.05L，則不計

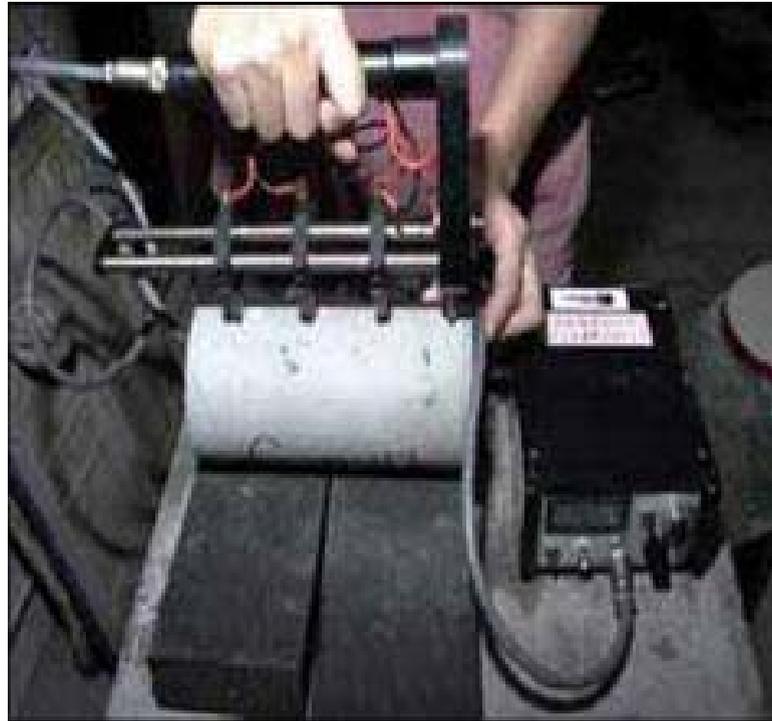
超音波速試驗(ASTM C597)

將潤滑劑均勻塗抹於探頭上，置於混凝土試體兩表面，待螢幕上之波速數值不再跳動時，記錄所量得之波速，每個試體量測兩次取平均值。



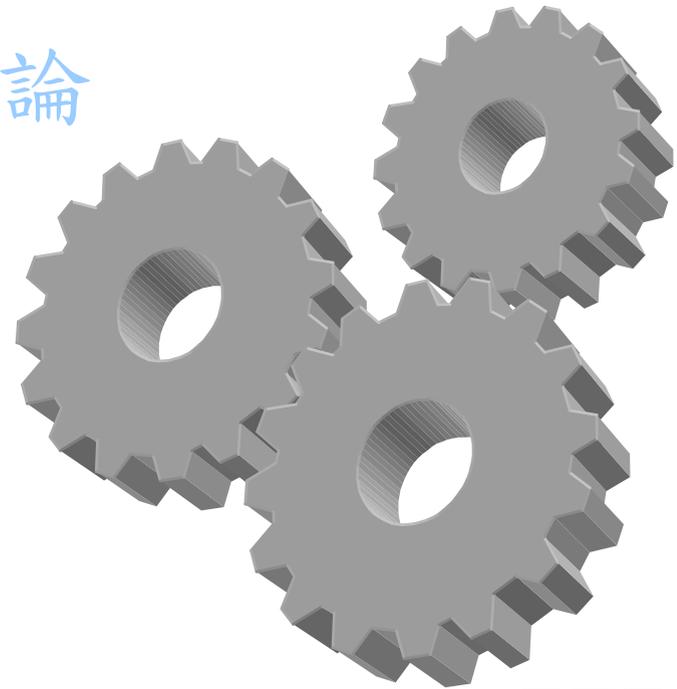
電阻試驗

量測時將試體保持面乾內飽和狀態，再將四極探針與試體接觸，量測電阻值。



伍、試驗結果與討論

- 緒論
- 文獻回顧
- RPC 配比設計邏輯及理論
- 試驗計畫
- 試驗結果與討論
- 結論與建議



十五組配比新拌漿體流度試驗值

配比組號	試體編號	流度(mm)	備註
#1	1604-2004	190	利用黃氏粒料裹漿厚度緻密配比法計算而得
#2	1605-2004	180	
#3	2004-2004	180	
#4	2005-2004	180	
#5	1604-1704	190	
#6	1605-1704	180	
#7	2004-1704	180	
#8	2004-1704	180	
#9	FS-1604-2004	200	
#10	FS-1605-2004	155	
#11	FS-2004-2004	180	
#12	FS2004-2004	190	
#13	1604-2004-2% (RPC #13)	170	
#14	M18-2% (RPC #14)	155	參考國內常用RPC配比
#15	FS1605-2004-2% (RPC #15)	210	

膠結砂漿及RPC之抗壓強度

配比編號	試體編號	抗壓強度(MPa)			
		3天	7天	14天	28天
#1	1604-2004	65.6	89.9	81.4	75.2
#2	1605-2004	56.8	81.7	78.7	92.6
#3	2004-2004	68.4	93.9	89.5	84.8
#4	2005-2004	58.8	87.7	87.2	88
#5	1604-1704	79.8	83.8	78.4	78.9
#6	1605-1704	68.9	82.2	79.4	90.9
#7	2004-1704	78.9	87.6	61.2	89.4
#8	2005-1704	72.8	77.1	76	76.8
#9	FS1604-2004	64	67	71.5	91.5
#10	FS1605-2004	56	62.5	67.5	88
#11	FS2004-2004	52	55	65	113.5
#12	FS2005-2004	53	61	70	82.5
#13	1604-2004-2%	57.8	105.8	111	106.5
#14	M18-2%	77.3	124.7	130	124.7

膠結砂漿及RPC之劈裂強度

配比編號	試體編號	劈裂強度(MPa)			
		3天	7天	14天	28天
#1	1604-2004	5.2	5.9	6	5.1
#2	1605-2004	3.9	5.6	6.1	7.5
#3	2004-2004	5	4.8	7.3	7.2
#4	2005-2004	4.7	5.5	7.2	7.7
#5	1604-1704	4.8	5.9	7.3	6.9
#6	1605-1704	4.2	8	7.5	7.1
#7	2004-1704	4.8	7.1	6.5	8.2
#8	2005-1704	6.4	6.2	5.4	8.9
#13	1604-2004-2%	16.2	20.5	18.5	19.5
#14	M18-2%	13.4	21.4	18.1	20.3

膠結砂漿與RPC之抗彎強度

配比編號	試體編號	抗彎強度 (MPa)	
		7天	28天
#1	1604-2004	12.7	18.6
#2	1605-2004	11.1	20
#3	2004-2004	13.9	16.4
#4	2005-2004	11.8	17.8
#5	1604-1704	9.5	9
#6	1605-1704	9.6	18.6
#7	2004-1704	12.2	24.6
#8	2005-1704	12.1	22.3
#13	1604-2004-2%	21.4	24.6
#14	M18-2%	16.6	20.3

RPC拉拔試驗結果

握裹材料	拉拔力量	拉拔強度	平均拉拔強度	強度提升率
	(kg)	(MPa)	(MPa)	(%)
Mortar	1581	4.89	4.78	—
	1564	4.84		
	1496	4.63		
RPC #13	3445	10.65	10.08	110.75
	3129	9.67		
	3207	9.92		
RPC #14	3502	10.83	10.55	120.56
	3345	10.34		
	3389	10.48		
RPC #15	4052	12.53	11.57	141.84
	3555	10.99		
	3617	11.18		

RPC斜剪試驗結果

試體種類 (維修材料/底材)	施加力量 (kgf)	剪力強度 (MPa)	平均剪力強度 (MPa)
RPC #13/Mortar	840	2.1	2.88
	1175	2.94	
	1445	3.61	
RPC #14/Mortar	840	2.1	2.73
	1130	2.82	
	1305	3.26	
RPC #15/Mortar	1780	4.45	4.47
	1640	4.1	
	1950	4.87	

膠結砂漿與RPC之氯離子電滲量量測

配比編號	試體編號	電滲量(庫倫)
#1	1604-2004	43.2
#2	1605-2004	108
#3	2004-2004	118.8
#4	2005-2004	172.8
#5	1604-1704	70.2
#6	1605-1704	43.2
#7	2004-1704	63
#8	2005-1704	236.7
RPC #13	1604-2004-2%	501.3
RPC #14	M18-2%	378.9
控制組	Mortar	>40000

膠結砂漿與RPC之表面電阻

配比編號	試體編號	表面電阻(kΩ-cm)			
		3天	7天	14天	28天
#1	1604-2004	36	150	326	653
#2	1605-2004	24	176	444	659
#3	2004-2004	22	105	246	501
#4	2005-2004	20	98	244	491
#5	1604-1704	49	248	596	1269
#6	1605-1704	38	293	708	1621
#7	2004-1704	33	195	480	992
#8	2005-1704	49	220	519	988
RPC #13	1604-2004-2%	187	194	199	186
RPC #14	M18-2%	265	310	407	440

膠結砂漿與RPC之超音波波速

配比編號	試體編號	超音波波速(m/s)			
		3天	7天	14天	28天
#1	1604-2004	4371	4448	4485	4438
#2	1605-2004	4434	4527	4585	4543
#3	2004-2004	4287	4372	4427	4478
#4	2005-2004	4282	4390	4456	4493
#5	1604-1704	4429	4566	4549	4610
#6	1605-1704	4429	4614	4625	4597
#7	2004-1704	4360	4463	4494	4462
#8	2005-1704	4409	4508	4513	4556
#9	FS1604-2004	4371	4304	4352	4498
#10	FS1605-2004	4434	4304	4469	4543
#11	FS2004-2004	-	3787	4299	4571
#12	FS2005-2004	-	4194	4468	4563
#13	1604-2004-2%	4382	4423	4461	4465
#14	M18-2%	4479	4490	4497	4503

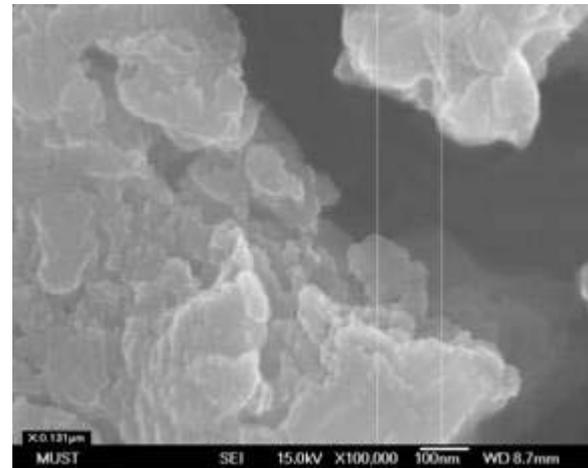
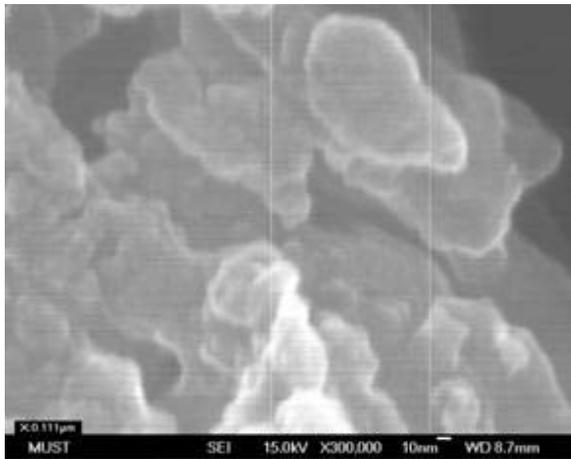
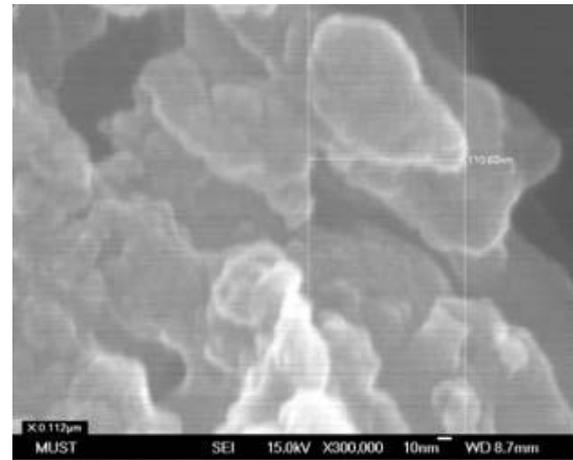
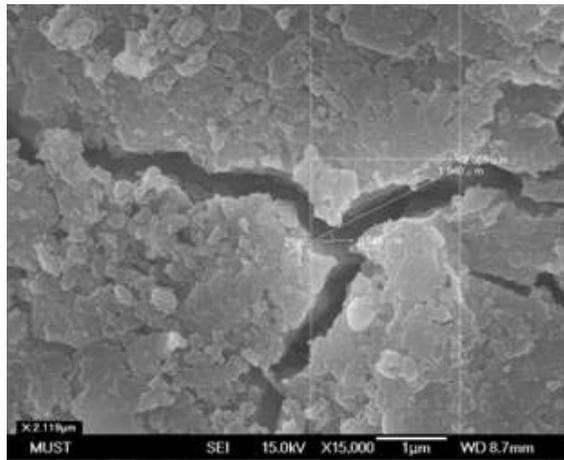
不同材料碳化試驗結果

試體	碳化深度(mm)		
	7天齡期	14天齡期	28天齡期
RPC	0	0	0
Mortar	2.1	2.3	6.3
NC	2.2	2.3	3.2

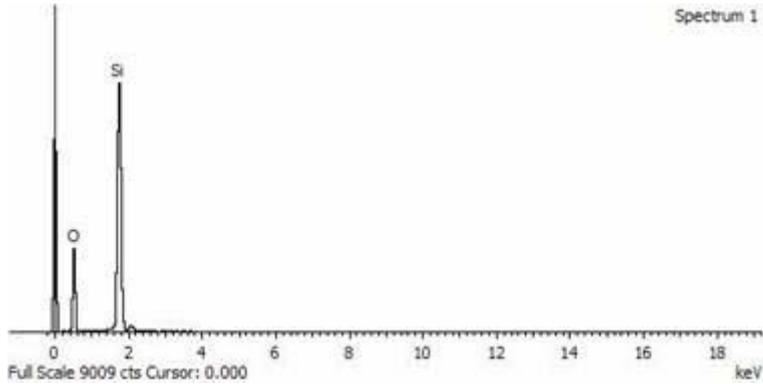
不同材料磨耗深度

配比	500轉車輪磨耗深度mm
RPC #15	0.13 mm
NC	0.49 mm
Mortar	0.59 mm

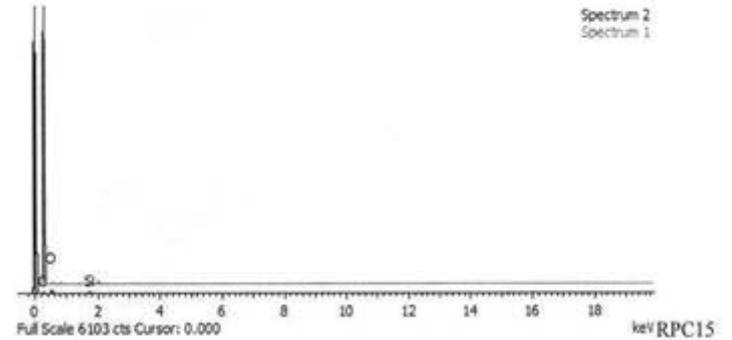
SEM試験結果



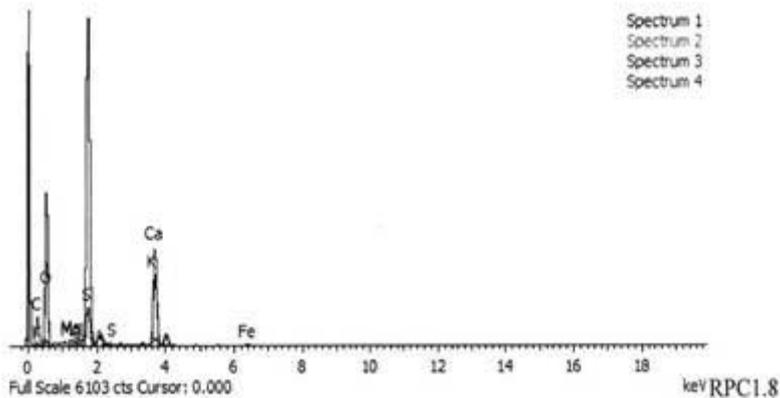
EDS 試驗



EDS 圖 (RPC #13)

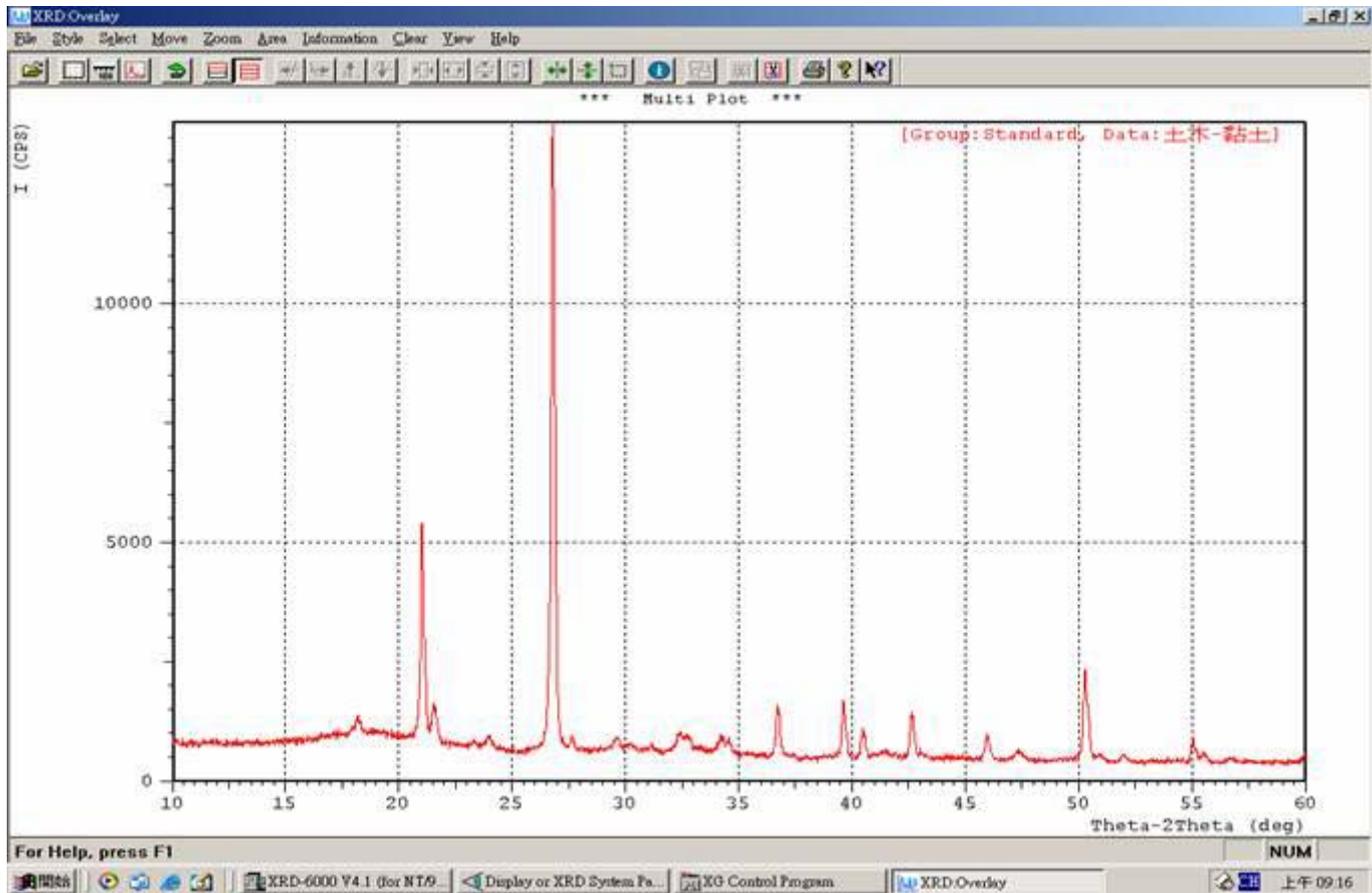


EDS 圖 (RPC #15)



EDS 圖 (RPC #14)

#15組配比之XRD分析



MIP孔隙分佈試驗值 (RPC)

試體編號	<25Å	25Å~ 100Å	100Å~ 500Å	>500Å	Total Volume	膠體/孔 隙比%
RPC #13	0.001	0.0437	0.0083	0.006	0.059	75.8
RPC #14	0.001	0.0204	0.0042	0.0128	0.0384	55.7
RPC #15-1	0.001	0.02	0.027	0.012	0.06	35.0
RPC #15-2	0.001	0.032	0.04	0.01	0.084	32.5

不同材料之氣體滲透係數

試片編號	$K(m^2) \times 10^{-17}$	備註
1604-2004 (#1)	1.531	
1605-2004 (#2)	1.613	
2004-2004 (#3)	1.852	
2005-2004 (#4)	2.741	
1604-1704 (#5)	1.821	
1605-1704 (#6)	2.279	
2004-1704 (#7)	2.193	
2005-1704 (#8)	1.23	
RPC #13	1.706	S/C = 0.86
RPC #14	1.824	S/C = 1.8
RPC #15	1.982	

不同材料之水份吸收試驗值 (%)

試體編號	一小時(%)	一天 (%)	三天 (%)
1604-2004	0.39%	0.81%	0.90%
1605-2004	0.34%	0.57%	0.62%
2004-2004	0.42%	0.72%	0.80%
2005-2004	0.53%	0.84%	0.91%
1604-1704	0.39%	0.64%	0.69%
1605-1704	0.33%	0.47%	0.50%
2004-1704	0.44%	0.69%	0.76%
2005-1704	0.48%	0.73%	0.79%
RPC #13	0.33%	0.63%	0.76%
RPC #14	0.37%	0.72%	0.86%
RPC #15	0.47%	0.73%	0.76%
NC	1.02%	1.60%	1.66%
Mortar	2.74%	3.88%	3.95%

RPC #15基本力學性質 (含動彈、動剪)

項目	抗壓強度 (MPa)			劈裂強度 (MPa)			抗彎強度 (MPa)		
試體 編號	1	2	3	1	2	3	1	2	3
試驗值	72.9	76.5	78.2	11.2	11.7	11.6	16.9	20.4	22.2
平均值	75.9			11.5			19.8		
項目	動彈性模數(GPa)			動剪力模數 (GPa)			動卜松比		
試體 編號	1	2	3	1	2	3	1	2	3
試驗值	41.37	42.07	41.76	16.36	16.39	16.34	0.26	0.28	0.28
平均值	41.73			16.36			0.27		

RPC #15耐久性質

項目	超音波速 (m/s)			表面電阻 (kΩ)			磨耗 (mm)		
試體 編號	1	2	3	1	2	3	1	2	3
試驗值	4620	4612	4608	1561	1567	1567	0.15	0.1	0.126
平均值	4612.97			1565			0.1254		
項目	流度 (mm)			電滲 (庫倫)			碳化 (mm)		
試體 編號	1			1			1	2	3
試驗值	210			643.5			0	0	0
平均值	—			—			0		

RPC #14圓柱補強

	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)	強度提升率 (%)
未補強	26.75	27.47	—
	28.23		
	27.43		
補強10 mm	36.09	35.36	28.72
	33.99		
	36		
補強15 mm	40.13	38.46	40.01
	40.74		
	34.51		

RPC #15圓柱補強

	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)	強度提升率 (%)
未補強	37.27	36.09	—
	36.25		
	34.75		
補強10 mm	38.83	39.51	9.49
	37.62		
	42.09		
補強15 mm	51.72	49.8	38
	50.21		
	47.48		

RPC #14貼片抗彎補強

	最大載重 (kgf)	最大變形量 (mm)	抗彎強度 (MPa)	平均抗彎強度 (MPa)	強度提升率 (%)	平均變形量 (mm)
未補強	2790	0.62	8.5	8.76	—	0.61
	3150	0.61	9.16			
	2970	0.6	8.63			
CFRP補強 一層	3730	1.34	81.82	83.98	858.67	1.19
	4030	1.07	88.29			
	3730	1.15	81.82			
CFRP補強 兩層	4460	1.39	92.12	91.33	942.58	1.28
	4510	1.3	93			
	4310	1.14	88.88			
RPC補強 10 mm	4360	5.1	12.9	15.25	74.09	3.63
	5240	2.9	17.6			
	4380	2.9	—			
RPC補強 20 mm	5310	3.7	16.02	17	94.1	5.61
	6270	4.21	18.91			
	5530	8.93	16.08			
RPC U型 10 mm 補強	4750	4.8	14.2	15.27	74.32	4.67
	4900	4	14.66			
	5670	5.2	16.96			

RPC #15貼片抗彎補強

	降伏載重 (kgf)	降伏變形量 (mm)	極限變形量 (mm)	能量 (ton · mm)	抗彎強度 (MPa)	平均抗彎強度 (MPa)	強度提升率 (%)
未補強	3928	0.4	0.43	0.92	11.73	11.24	—
	3640	0.49	0.5	0.7	11.42		
	4036	0.47	0.51	0.69	10.58		
CFRP 補強一層	6196	1.71	1.78	7.82	117.73	133.25	1086
	7416	1.3	1.44	6.8	140.91		
	7026	1.48	1.5	6.67	141.1		
CFRP 補強兩層	7446	3.02	3.19	14.01	134.23	139.51	1141
	7820	3.21	3.86	20.92	140.97		
	7956	3.12	3.18	15.27	143.32		
RPC 補強 10 mm	4254	0.64	5.5	8.41	12.44	11.85	5.4
	3622	0.62	3.4	4.6	10.59		
	4284	1.2	5.07	6.27	12.53		
RPC 補強 20 mm	5000	0.53	7.24 [*]	15.59	17.24	14.83	31.9
	4324	0.58	3.65	6.09	14.91		
	3584	0.54	3.83	5.04	12.35		
RPC U型包 裹補強	4996	0.585	6.05	10.09	14.16	14.82	31.9
	4870	0.4	5.23	9.3	13.8		
	5826	0.56	5.57	13.58	16.51		

CFRP補強試驗相片

NC未補強



未補強之混凝土試體受力後，脆性破壞，斷成兩節

CFRP
補強一層



經CFRP補強後之試體，皆為CFRP拉脫及混凝土斷裂脫落，脆性破壞

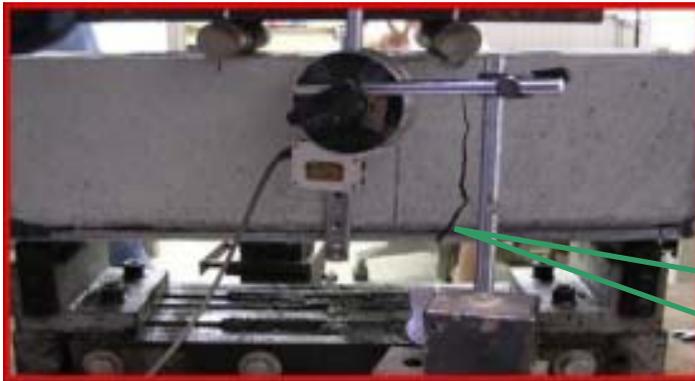
CFRP
補強兩層



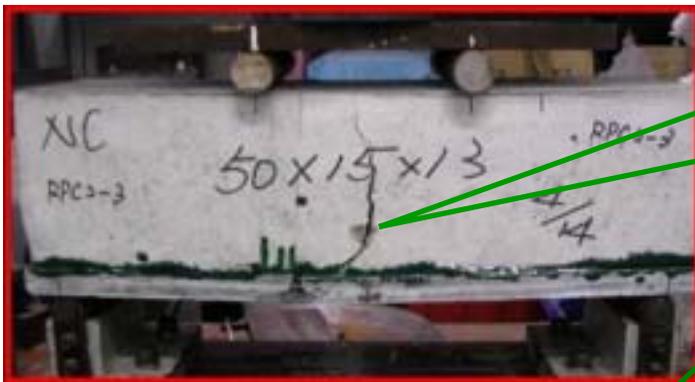
經CFRP補強後之試體，皆為CFRP拉脫及混凝土斷裂脫落，脆性破壞

RPC補強試驗相片

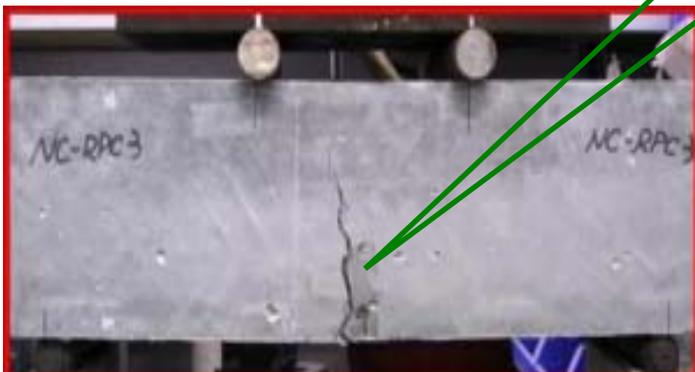
RPC補強
10 mm



RPC補強
20 mm



RPC U型
包裹補強



經RPC補強後之
混凝土試體受力
破壞後，出現裂
縫但不斷掉

陸、結論與建議

- 緒論
- 文獻回顧
- RPC 配比設計邏輯及理論
- 試驗計畫
- 試驗結果與討論
- 結論與建議



結論(基本性質)(一)

- 12組膠結砂漿坍流度達155至210 mm，具有較好工作性能，可作為國內日後進行本土化RPC配比設計時之參考依據，有利於建立以RPC為修補材料之修補系統。
- 一般RPC配比如水泥及砂灰用量過高，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；但#15 RPC以添加飛灰及爐石粉作為膠結材料，顯示除具有良好基本材料性質外，亦減低修護面上新舊混凝土應變不諧和的現象，很適合作鋼筋混凝土構造物之修補材料。

結論(基本性質)(二)

- #15 RPC在添加飛灰及爐石粉取代部份水泥及砂灰用量後，仍具有良好材料性質為本研究之一項重要新發現，日後如用於鋼筋混凝土構造物維修時，將可有效改善RPC與鋼筋界面泌水情形，提高鋼筋握裹強度及改善修補界面品質，增加界面黏著力。
- 添加鋼纖維有助於提高RPC抗裂及抗彎性能，劈裂強度最高可達7.5 MPa，約為NC的1.4倍，抗彎強度則提高原來強度之68%，顯示出其高強度及高韌性之材料性能。

結論(耐久性質)(一)

- 本研究的RPC氯離子電滲量皆落於規範中非常低（Very Low）以下範之圍；表面電阻值皆大 $244\text{k } \Omega\text{-cm}$ ，最大達 $1500\text{ k}\Omega\text{-cm}$ ；碳化試驗結果也沒有碳化痕跡，顯示表面與內部組構相當緻密，滲透率低，抗蝕性質佳。
- 三種RPC超音波速約介於 $4300\sim 4600\text{ m/s}$ ，水泥用量較高的RPC試體在28天齡期之超音波速略有下降，但添加飛灰及爐石粉取代部份水泥量的RPC試體則無此現象，顯示使用卜作嵐材料有助於加強RPC的材料性質。

結論(耐久性質)(二)

- 三種RPC氣體滲透係數約為 $1.716 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，在72小時RPC透水試驗之吸水率僅0.76%，顯示其滲透率低，能有效抵抗外界有害物質入侵，具有良好的耐久性。
- 經500轉同心圓車輪磨耗測試結果，RPC磨損深度僅0.13 mm，約是水泥砂漿與NC磨耗深度的 $1/4 \sim 1/5$ ，顯示RPC粒料組構緻密，提高表面抗磨損能力。

結論(耐久性質)(三)

- SEM微觀及MIP結果發現，RPC內部存在不連續孔隙系統及些許微裂縫，主要因水泥用量過高產生熱應力破壞微觀結構及低水灰比導致自生體積收縮，故添加適量飛灰及爐石粉取代部份水泥用量，可望減少微裂縫產生，將孔隙系統微小細緻化，減少乾縮潛變量。
- EDS分析發現Ca及Si為RPC主要反應成果之元素物質，即參與反應的是Ca、SiO₂及水，生成物則以C-S-H及C-A-H等水化產物，XRD結果也以SiO₂及C-S-H成份反應最明顯，顯示RPC內部係以穩定之鈣—矽結構系統為主。

結論(補強性能與評估)(一)

- RPC進行10 mm平板圓柱補強時，能提升抗壓強度約9~28%；修補強厚度為15 mm時，提升抗壓強度達40%，因鋼纖維使試體破壞後僅出現裂紋，不會有嚴重剝落的情況。
- RPC進行抗彎構件補強時，明顯地提升抗彎強度，但底層修補厚度對於抗彎強度提升率增加有限，採U型補強方式，不但可得到良好的抗彎強度，延展性也大幅增加，建議以U型RPC補強方式為最理想。

結論(補強性能與評估)(二)

- CFRP抗彎補強之整體構件變形不易，能承受較大荷重，大幅提升抗彎強度，貼覆一層CFRP貼片可提升抗彎強度高達十倍，遠超過RPC補強結果，但其延展性較差，脫落破壞型式近似於脆性材料，其貼覆介面處理狀況也會影響補強效果，貼覆層數增加對於抗彎強度則提升有限。

建議

- 高溫養護的RPC，晚期強度有折減情況，與其內部漿體結構有關，應可再做進一步的實驗確定之。
- 量測RPC圓柱補強試體的應力應變行為，有助於瞭解其補強通機制，可於未來研究中考慮加入。
- RPC乾縮情況值得進一步實驗分析探討。
- 可利用非破壞性檢測方式來探討補強黏層的狀況，以確認其補強功效。

簡報完畢
敬請指教

