

100-156-7574

MOTC-IOT-98-H1EB010

研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性 橋墩材料之研究



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 12 月

100-156-7574

MOTC-IOT-98-H1EB010

研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性 橋墩材料之研究

著 者：邱永芳、謝明志、張道光、林雅雯、楊仲家
詹穎雯、劉玉雯、卓世偉、陳育聖、黃進國
汪書瑜、袁瑜鎡、羅冠顯

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 12 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究
邱永芳/等著. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，
民 100.12
面 ； 公分
ISBN 978-986-03-1273-7 (平裝)

1. 橋樑工程 2. 混凝土

441.816

100027856

研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

著 者：邱永芳、謝明志、張道光、林雅雯、楊仲家、詹穎雯、劉玉雯、
卓世偉、陳育聖、黃進國、汪書瑜、袁瑜鏐、羅冠顯

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 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)26586789

出版年月：中華民國 100 年 12 月

印 刷 者：彩霖股份有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 150 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：350 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1・電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010004965

ISBN：978-986-03-1273-7 (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。

100

研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010004965

定價 350 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：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-03-1273-7 (平裝)	政府出版品統一編號 1010004965	運輸研究所出版品編號 100-156-7574	計畫編號 98-H1EB010
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：謝明志 研究人員：張道光、林雅雯 聯絡電話：04-26587174 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立臺灣海洋大學 計畫主持人：楊仲家 研究人員：詹穎雯、劉玉雯、卓世偉、陳育聖、黃進國、汪書瑜、袁瑜鎂、羅冠顯 地址：20224 基隆市中正區北寧路 2 號 聯絡電話：02-24622192 轉 6406		研究期間 自 98 年 10 月 至 100 年 12 月
關鍵詞：磨耗、衝擊、橋墩、混凝土			
摘要： 臺灣河川短而急促，水流夾雜極高的砂石量。橋墩在砂石撞擊與磨損下，常須進行修復，甚至有危害橋梁安全的問題，因此本計畫針對抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料進行研發工作。除完成探討橋梁基礎混凝土受河川砂石衝擊磨耗之機理及其抗衝擊與磨耗之能力外，並探討橋梁基礎混凝土耐久性之變化，以建立混凝土材料參數與環境影響因子對橋梁基礎混凝土抗衝擊磨耗行為之影響。亦完成受損混凝土材料修復補強材料、工法以及抗衝擊磨耗性能研究。 由研究發現混凝土在磨耗衝擊量會隨著水膠比增加而有增大趨勢，與力學性質趨勢相同。而當粗骨材與爐石用量較高時，磨耗量亦有下降之趨勢。對耐久性試驗結果而言，水膠比 0.3 與 0.35 氯離子傳輸係數會隨著骨材用量的增加而有下降之趨勢。但水膠比 0.4 與 0.45 粗骨材用量的增加會造成負面影響。因此當考量橋墩混凝土耐磨損與耐衝擊特性時，依本研究研究之結果粗骨材用量提升至 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 時可達到最好的效果，並建議可由本研究 A3Z 配比做為高抗磨耗衝擊混凝土建議配比。在修補材料研究方面，添加鋼纖維對於混凝土的力學性質、耐衝擊性、與耐磨損性都有提昇，且可以有效提升混凝土的韌性。添加纖維混凝土的乾縮應變值幾乎與未添加纖維的應變值相同，可見纖維對於混凝土乾縮的影響並不顯著。對耐久性方面，以鋼纖維影響較大，加入纖維有可能會導致與水泥漿體的界面增加，導致耐久性的負面效益，但其負面影響有限，整體氯離子擴散係數仍低於 $3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$。因此建議可適量添加鋼纖維於橋梁墩柱混凝土維修補強材料中。 在本研究成果效益方面，本研究建議之抗衝擊與磨損混凝土配比可供橋梁墩柱混凝土新建與維修設計參考，在本所或其他政府機關後續應用情形方面，本計畫所完成之「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案」建議未來可考量於工地現場實際操作後，進行可行行驗證與修正。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 12 月	398	350	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： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 （解密條件：☐ 年 月 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密， ☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Development the abrasion-erosion resistance, impact resistance, and durability materials for bridge piers			
ISBN (OR ISSN) ISBN 978-986-03-1273-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010004965	IOT SERIAL NUMBER 100-156-7574	PROJECT NUMBER 98-H1EB010
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsieh Ming-chih PROJECT STAFF: Chang Tao-Kuang, Lin Ya-wen PHONE: (04) 26587174 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM October 2009 TO December 2011
RESEARCH AGENCY: National Taiwan Ocean University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yang Chung-Chia PROJECT STAFF: Chan Yin-Wen, Liu Yu-Wen, Cho Shih-Wei, Chen Yu-sheng, Huang Chin-Kuo, Wang Shu-Yu, Yuan Yu-Mei, Luo Guan-Suan ADDRESS: No. 2, Pei-Ning Road, Keelung 20224, Taiwan, R.O.C. PHONE: 886-2-2462-2192Ext.6406			
KEY WORDS: ABRASION-EROSION IMPACT, BRIDGE PIER, CONCRETE			
ABSTRACT: Taiwan's rivers are short and rapid, the flow often mixed with high sands and gravels. Therefore, the bridge pier are often injured by flow impacting and wearing, and often have to be repaired. This plan in view of the abrasion-erosion resistance, impact resistance, and durability materials for bridge pier carries on the research and development work. The study was a two-year scheme. For the first year, the mechanism of the stone impact abrasion and the resistance of abrasion-erosion and impact on bridge foundation concrete was not only discussed, but also focus on the change of bridge foundation concrete durability by weather deterioration, to build up the effect of concrete mixture parameters and environmental factors on the bridge foundation concrete resistance of abrasion-erosion and impact. For the second year, the research of repair materials and rehabilitation methods on damaged concrete were studied. And high impact and abrasion-erosion resistance concrete were developed by research results. From results, suggestions A3Z as high impact-abrasion resistance concrete mixture. If consider ready mix plant production capacity, to enhance the design strength and the amount of coarse aggregate of concrete were major roles to raise the concrete impact resistance, wear resistance, and durability. The minimum recommended coarse aggregate amount of mixture can be set to 0.4 m³/m³. Concrete repair materials with fibers had better mechanics properties and durability than the traditional concrete, of which the best performance of steel fiber. Effectiveness in this research, this study suggests that the high impact and abrasion-erosion resistance concrete for the concrete bridge piers maintenance and new concrete design reference. In subsequent applications, the completion of this project, "Bridge Pier Design and maintenance of concrete reinforced impact wear draft standard" recommended practice can be at the site to verification and correction.			
DATE OF PUBLICATION December 2011	NUMBER OF PAGES 398	PRICE 350	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖目錄	VII
表目錄	XXI
第一章 緒論.....	1-1
1.1 計畫背景與目的	1-1
1.2 研究內容	1-4
1.3 研究進度	1-8
1.4 工作內容與報告對應說明	1-9
第二章 文獻蒐集與分析	2-1
2.1 流水特性與磨損及衝擊之關係	2-1
2.2 橋梁墩柱之磨耗與衝擊現象與原因	2-4
2.3 混凝土性質對耐磨與耐衝擊之影響	2-6
2.4 混凝土性質對耐久性之影響	2-16
2.5 混凝土耐久性與耐磨及耐衝擊之關聯性	2-21
2.6 國內外橋梁墩柱修補材料	2-22
2.7 維修補強材料與注意事項	2-26
2.8 臺灣地區橋梁墩柱混凝土設計資料	2-27
第三章 混凝土抗衝擊、抗磨耗、耐久性研究試驗計畫	3-1

3.1 試驗參數	3-1
3.2 試驗材料	3-2
3.3 試驗方法	3-11
3.3.1 新拌性質試驗	3-11
3.3.2 基本力學性質試驗	3-13
3.3.3 水中磨損及含砂水流沖擊試驗	3-15
3.3.4 抗衝擊試驗	3-20
3.3.5 耐久性試驗	3-21
3.4 配比設計與試體製作	3-38
第四章 混凝土抗衝擊、抗磨耗、耐久性研究試驗結果與分析	4-1
4.1 混凝土新拌性質試驗與結果分析	4-1
4.1.1 水膠比對工作性之影響分析	4-11
4.1.2 粗骨材用量對工作性之影響分析	4-12
4.1.3 爐灰取代量對工作性之影響分析	4-14
4.2 力學性質試驗與結果分析	4-15
4.2.1 水膠比對力學性質之影響分析	4-20
4.2.2 粗骨材用量對力學性質之影響分析	4-26
4.2.3 爐灰取代量對力學性質之影響分析	4-30
4.3 水中磨耗試驗與結果分析	4-33
4.3.1 水膠比對磨耗量之影響分析	4-38
4.3.2 粗骨材用量對磨耗量之影響分析	4-43
4.3.3 礦物摻料取代量磨耗量之影響分析	4-49
4.4 含砂水流沖擊磨耗試驗與結果分析	4-53

4.4.1 水膠比對沖磨量之影響	4-59
4.4.2 粗骨材含量對沖磨量之影響	4-63
4.4.3 礦物摻料取代量對沖磨量之影響	4-66
4.5 衝擊試驗與結果分析	4-69
4.6 耐久性試驗與結果分析	4-72
4.6.1 RCPT 試驗結果	4-72
4.6.2 ACMT 試驗結果	4-76
4.6.3 貯鹽試驗結果	4-87
4.7 小結	4-96
第五章 高抗磨耗衝擊混凝土建議配比	5-1
5.1 耐久性與抗磨損能力之關係	5-1
5.2 耐久性與抗衝擊能力之關係	5-1
5.3 最適橋樑墩柱混凝土配比參數分析	5-4
5.4 高抗磨耗衝擊混凝土配比設計	5-5
第六章 維修補強建議配比	6-1
6.1 配比參數設計	6-1
6.2 試驗材料	6-2
6.3 試驗方法	6-3
6.3.1 乾縮試驗	6-4
6.3.2 拉拔試驗法(Pull-off test method)	6-5
6.3.3 傾斜剪力試驗	6-8
6.4 維修補強材料配比設計	6-10
第七章 維修補強材料試驗結果與討論	7-1

7.1 維修補強材料新拌性質試驗結果分析	7-1
7.2 維修補強材料力學性質試驗結果分析	7-5
7.3 維修補強材料水中磨耗試驗結果分析	7-8
7.4 維修補強材料含砂水流沖擊磨耗試驗結果分析	7-13
7.5 維修補強材料衝擊試驗結果分析	7-18
7.6 維修補強材料乾縮試驗結果分析	7-20
7.7 維修補強材料界面拉拔試驗結果分析	7-22
7.8 維修補強材料傾斜剪力試驗結果分析	7-24
7.9 維修補強材料耐久性試驗結果分析	7-25
7.10 維修補強材料強度與衝擊磨耗性能之關係	7-29
7.11 維修補強材料建議配比	7-31
第八章 橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案編定	8-1
第九章 教育訓練研討會	9-1
第十章 結論與建議	10-1
10.1 結論	10-1
10.2 建議	10-3
參考文獻	參-1
附錄一 專家座談會議記錄	附錄 1-1
附錄二 工作會議	附錄 2-1
附錄三 期中期末報告審查意見處理情形表	附錄 3-1
附錄四 期末報告簡報資料	附錄 4-1

圖目錄

圖 1.1 橋墩周圍水流結構示意圖 ^[2]	1-2
圖 1.2 橋墩衝擊磨耗破壞之情形 ^[3]	1-2
圖 1.3 計畫工作流程圖	1-7
圖 1.4 團隊專長分工組織	1-8
圖 2.1 泥砂移運方式示意圖 ^[5]	2-3
圖 2.2 泥沙移運方式分類圖 ^[5]	2-3
圖 2.3 水流夾帶砂石對混凝土表面之作用力 ^[8]	2-5
圖 2.4 水工混凝土受沖擊之過程 ^[10]	2-6
圖 2.5 混凝土水膠比與磨耗量之關係 ^[11]	2-7
圖 2.6 混凝土抗壓強度與耐磨性之關係 ^[12]	2-7
圖 2.7 粗骨材對混凝土耐磨性之影響 ^[11]	2-8
圖 2.8 不同粗骨材混凝土之耐磨性 ^[13]	2-9
圖 2.9 不同粗骨材混凝土與水泥石之耐磨性 ^[13]	2-9
圖 2.10 不同飛灰含量混凝土之耐磨性 ^[15]	2-10
圖 2.11 混凝土中爐石含量對耐磨性之影響 ^[16-17]	2-11
圖 2.12 矽灰含量對混凝土耐磨性之影響 ^[19]	2-12
圖 2.13 矽灰含量 7.5%,混凝土與水石之耐磨性 ^[20]	2-12
圖 2.14 混凝土孔隙率與磨耗深度之關係 ^[27]	2-15
圖 2.15 混凝土孔隙與磨耗性質之關係 ^[28]	2-15
圖 2.16 耐久性因子與混凝土相對濕度及腐蝕關係圖 ^[34]	2-17
圖 2.17 世界第一座RPC材料構造物-Sherbrooke試驗橋 ^[57]	2-23

圖 3.1	三分碎石之級配級配分布圖	3-6
圖 3.2	六分碎石之級配級配分布圖	3-7
圖 3.3	粗砂之級配級配分布圖	3-9
圖 3.4	細砂之級配級配分布圖	3-10
圖 3.5	新拌混凝土坍度試驗	3-12
圖 3.6	含氣量測筒	3-13
圖 3.7	MTS 萬能材料試驗機	3-14
圖 3.8	彈性模數試驗架設	3-14
圖 3.9	ASTM C1138 水中磨損試驗測儀	3-16
圖 3.10	含砂水沖擊試驗儀	3-19
圖 3.11	含砂水流沖擊試驗儀內部示意圖	3-19
圖 3.12	開裂撞擊儀器	3-21
圖 3.13	試體切割機內部構造及切割情形	3-22
圖 3.14	RCPT 試體前處理抽真空設備	3-23
圖 3.15	RCPT 相片圖	3-24
圖 3.16	RCPT 示意圖	3-24
圖 3.17	時間與電流變化關係曲線圖	3-25
圖 3.18	加速氯離子傳輸試驗 (ACMT) 試驗設備示意圖	3-28
圖 3.19	加速氯離子傳輸試驗 (ACMT) 儀器照片	3-28
圖 3.20	Metrohm 702 SM 型電位滴定儀	3-29
圖 3.21	離子層析儀 Metrohm 792 型	3-30
圖 3.22	典型的氯離子傳輸歷程圖	3-31
圖 3.23	過渡時期階段之累積氯離子濃度曲線圖	3-34

圖 3.24 穩態階段之氯離子與時間關係圖	3-34
圖 3.25 貯鹽試驗照片	3-36
圖 3.26 典型氯離子含量與侵入深度關係圖	3-37
圖 3.27 強制式雙軸拌合機	3-40
圖 3.28 各組試體製作情形	3-40
圖 3.29 濕室養護室	3-42
圖 4.1 A3X配比之坍流度情形.....	4-3
圖 4.2 B3X配比之坍流度情形.....	4-3
圖 4.3 C3X配比之坍流度情形.....	4-4
圖 4.4 D3X配比之坍流度情形.....	4-4
圖 4.5 A3Y配比之坍流度情形.....	4-5
圖 4.6 B3Y配比之坍流度情形.....	4-5
圖 4.7 C3Y配比之坍流度情形.....	4-6
圖 4.8 D3Y配比之坍流度情形.....	4-6
圖 4.9 A3Z配比之坍流度情形	4-7
圖 4.10 B3Z配比之坍流度情形	4-7
圖 4.11 C3Z配比之坍流度情形	4-8
圖 4.12 D3Z配比之坍流度情形	4-8
圖 4.13 A5Y配比之坍流度情形.....	4-9
圖 4.14 B5Y配比之坍流度情形.....	4-9
圖 4.15 C5Y配比之坍流度情形.....	4-10
圖 4.16 D5Y配比之坍流度情形.....	4-10
圖 4.17 混凝土坍流度與水膠比關係	4-11

圖 4.18 混凝土坍流 50 公分時間與水膠比關係	4-12
圖 4.19 配比A3X~D3X之水膠比與坍流度關係 (爐灰 30%、粗骨材 0.3m ³ /m ³).....	4-13
圖 4.20 配比A3X~D3X之水膠比與坍流 50 公分時間關係 (爐灰 30%、粗骨材 0.3m ³ /m ³)	4-14
圖 4.21 配比A3X~D3X之水膠比與抗壓強度與彈性模數關係 (爐灰 30%、粗骨材 0.3m ³ /m ³).....	4-15
圖 4.22 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係(爐灰 30%、粗骨材 0.3m ³ /m ³)	4-21
圖 4.23 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係(礦物摻料 30%、粗骨材 0.35m ³ /m ³).....	4-21
圖 4.24 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係(礦物摻料 30%、粗骨材 0.40m ³ /m ³)	4-22
圖 4.25 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係(礦物摻料 35%、粗骨材 0.35m ³ /m ³)	4-22
圖 4.26 水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係(礦物摻料 30%、粗骨材 0.3m ³ /m ³).....	4-23
圖 4.27 水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係(礦物摻料 30%、粗骨材 0.35m ³ /m ³)	4-24
圖 4.28 水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係(礦物摻料 30%、粗骨材 0.40m ³ /m ³)	4-24
圖 4.29 配比A5Y~D5Y之水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係 (礦物摻 料 35%、粗骨材 0.35m ³ /m ³).....	4-25
圖 4.30 抗壓強度與劈裂強度關係	4-25
圖 4.31 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係(水膠比=0.30、礦物摻 料 30%).....	4-26
圖 4.32 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係(水膠比=0.35、礦物摻	

料 30%).....	4-27
圖 4.33 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係(水膠比=0.40、礦物摻料 30%).....	4-27
圖 4.34 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係(水膠比=0.45、礦物摻料 30%).....	4-28
圖 4.35 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係(水膠比=0.30、礦物摻料 30%).....	4-28
圖 4.36 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係(水膠比=0.35、礦物摻料 30%).....	4-29
圖 4.37 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係(水膠比=0.40、礦物摻料 30%).....	4-29
圖 4.38 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係(水膠比=0.45、礦物摻料 30%).....	4-30
圖 4.39 爐灰用量對抗壓強度與彈性模數之影響(粗骨材 35%)-28 天齡期.....	4-31
圖 4.40 爐灰用量對抗壓強度與彈性模數之影響(粗骨材 35%)-56 天齡期.....	4-31
圖 4.41 爐灰用量對抗壓強度與劈裂強度之影響(粗骨材 35%)-28 天齡期.....	4-32
圖 4.42 爐灰用量對抗壓強度與劈裂強度之影響(粗骨材 35%)-56 天齡期.....	4-32
圖 4.43 A3X磨耗試驗結果.....	4-33
圖 4.44 B3X磨耗試驗結果.....	4-33
圖 4.45 C3X磨耗試驗結果.....	4-34

圖 4.46 D3X磨耗試驗結果.....	4-34
圖 4.47 A3Y磨耗試驗結果.....	4-34
圖 4.48 B3Y磨耗試驗結果.....	4-35
圖 4.49 C3Y磨耗試驗結果.....	4-35
圖 4.50 D3Y磨耗試驗結果.....	4-35
圖 4.51 A3Z磨耗試驗結果	4-36
圖 4.52 B3Z磨耗試驗結果	4-36
圖 4.53 C3Z磨耗試驗結果	4-36
圖 4.54 D3Z磨耗試驗結果	4-37
圖 4.55 A5Y磨耗試驗結果.....	4-37
圖 4.56 B5Y磨耗試驗結果.....	4-37
圖 4.57 C5Y磨耗試驗結果.....	4-38
圖 4.58 D5Y磨耗試驗結果.....	4-38
圖 4.59 水膠比對磨耗損失影響(粗骨材用量 $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 30%，2 試體平均值).....	4-40
圖 4.60 水膠比對磨耗損失影響(2 試體平均值)(粗骨材用量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、礦物摻料 30%，2 試體平均值)	4-41
圖 4.61 水膠比對磨耗損失影響(粗骨材用量 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 、礦物摻料 30%，2 試體平均值).....	4-42
圖 4.62 配比A5Y、B5Y、C5Y及D5Y之水膠比對磨耗損失影響(粗骨 材用量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、礦物摻料 35%，2 試體平均值)	4-43
圖 4.63 配比A3X、A3Y及A3Z之粗骨材用量對磨耗損失影響(2 試體 平均值) (水膠比=0.30、礦物摻料 30%)	4-45
圖 4.64 配比B3X、B3Y及B3Z之粗骨材用量對磨耗損失影響(2 試體平	

均值)(水膠比=0.35、礦物摻料 30%)	4-46
圖 4.65 配比C3X、C3Y及C3Z之粗骨材用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)(水膠比=0.40、礦物摻料 30%).....	4-47
圖 4.66 配比D3X、D3Y及D3Z之粗骨材用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)(水膠比=0.45、礦物摻料 30%).....	4-48
圖 4.67 配比A3Y及A5Y之爐灰用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)(水膠比=0.30、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$).....	4-50
圖 4.68 配比B3Y及B5Y之爐灰用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)(水膠比=0.35、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$).....	4-51
圖 4.69 配比C3Y及C5Y之爐灰用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)(水膠比=0.40、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$).....	4-52
圖 4.70 配比D3Y及D5Y之爐灰用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)(水膠比=0.45、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$).....	4-53
圖 4.71 A3X沖磨試驗結果.....	4-54
圖 4.72 A3Y沖磨試驗結果.....	4-54
圖 4.73 A3Z沖磨試驗結果	4-54
圖 4.74 A5Y沖磨試驗結果.....	4-55
圖 4.75 B3X沖磨試驗結果.....	4-55
圖 4.76 B3Y沖磨試驗結果.....	4-55
圖 4.77 B3Z沖磨試驗結果	4-56
圖 4.78 B5Y沖磨試驗結果.....	4-56
圖 4.79 C3X沖磨試驗結果.....	4-56
圖 4.80 C3Y沖磨試驗結果.....	4-57
圖 4.81 C3Z沖磨試驗結果	4-57

圖 4.82	C5Y沖磨試驗結果.....	4-57
圖 4.83	D3X沖磨試驗結果.....	4-58
圖 4.84	D3Y沖磨試驗結果.....	4-58
圖 4.85	D3Z沖磨試驗結果.....	4-58
圖 4.86	D5Y沖磨試驗結果.....	4-59
圖 4.87	水膠比對沖磨量影響(粗骨材用量 $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 30%，2 試體平均值)	4-60
圖 4.88	水膠比對沖磨量之影響(粗骨材用量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 30%， 2 試體平均值)	4-61
圖 4.89	配比A3Z、B3Z、C3Z及D3Z之水膠比對沖磨量之影響(粗骨材 用量 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 30%，2 試體平均值).....	4-61
圖 4.90	水膠比對沖磨量之影響(粗骨材用量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 50%，2 試體平均值).....	4-62
圖 4.91	配比A3X、A3Y及A3Z之粗骨材用量對沖磨量影響(水膠比 =0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值).....	4-63
圖 4.92	配比B3X、B3Y及B3Z之粗骨材用量對沖磨量影響(水膠比 =0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值).....	4-64
圖 4.93	配比C3X、C3Y及C3Z之粗骨材用量對沖磨量影響(水膠比 =0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值)	4-65
圖 4.94	配比D3X、D3Y及D3Z之粗骨材用量對沖磨量影響(水膠比 =0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值).....	4-65
圖 4.95	配比A3Y及A5Y之爐灰用量對沖磨量影響(水膠比=0.30、粗骨 材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ ，2 試體平均值).....	4-66
圖 4.96	配比B3Y及B5Y之爐灰用量對沖磨量影響(水膠比=0.35、粗骨 材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ ，2 試體平均值).....	4-67

圖 4.97 配比C3Y及C5Y之爐灰用量對沖磨量影響(水膠比=0.40、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ ，2 試體平均值)	4-68
圖 4.98 配比D3Y及D5Y之爐灰用量對磨耗損失沖磨量影響(水膠比=0.30、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ ，2 試體平均值)	4-68
圖 4.99 各組混凝土衝擊破壞次數分佈情形	4-70
圖 4.100 爐灰含量 30%之各組混凝土衝擊破壞次數	4-71
圖 4.101 粗骨材為 35%之各組混凝土衝擊試驗結果	4-71
圖 4.102 配比A3X、A3Y、A3Z、A5Y電流試驗結果 (RCPT)	4-73
圖 4.103 配比B3X、B3Y、B3Z、B5Y電流試驗結果 (RCPT)	4-73
圖 4.104 配比C3X、C3Y、C3Z、C5Y電流試驗結果 (RCPT)	4-74
圖 4.105 配比D3X、D3Y、D3Z、D5Y電流試驗結果 (RCPT)	4-74
圖 4.106 RCPT通過電荷量與粗骨材用量關係圖	4-75
圖 4.107 不同爐灰含量對RCPT通過電荷量影響	4-76
圖 4.108 配比A3X、B3X、C3X、D3X氯離子濃度變化歷程(ACMT)	4-77
圖 4.109 配比 4-A3X、B3X、C3X、D3X非穩態與過渡階段氯離子濃度變化歷程	4-77
圖 4.110 配比A3X、4-B3X、C3X、D3X穩態階段氯離子濃度變化歷程	4-78
圖 4.111 配比A3Y、B3Y、C3Y、D3Y氯離子濃度變化歷程 (ACMT)	4-78
圖 4.112 配比A3Y、B3Y、C3Y、D3Y非穩態與過渡階段氯離子濃度變化歷程	4-79
圖 4.113 配比A3Y、B3Y、C3Y、D3Y穩態階段氯離子濃度變化歷程	4-79

圖 4.114 配比A3Z、B3Z、C3Z、D3Z氯離子濃度變化歷程(ACMT)	4-80
圖 4.115 配比A3Z、B3Z、C3Z、D3Z非穩態與過渡階段氯離子濃度 變化歷程	4-80
圖 4.116 配比A3Z、B3Z、C3Z、D3Z穩態階段氯離子濃度變化歷程	4-81
圖 4.117 配比A5Y、B5Y、C5Y、D5Y氯離子濃度變化歷程(ACMT)	4-81
圖 4.118 配比A5Y、B5Y、C5Y、D5Y非穩態與過渡階段氯離子濃度 變化歷程	4-82
圖 4.119 配比A5Y、B5Y、C5Y、D5Y穩態階段氯離子濃度變化歷 程	4-82
圖 4.120 非穩態氯離子傳輸係數與粗骨材用量關係圖	4-85
圖 4.121 穩態氯離子傳輸係數與粗骨材用量關係圖	4-85
圖 4.122 不同爐灰含量對非穩態氯離子傳輸係數影響	4-86
圖 4.123 不同爐灰含量對穩態氯離子傳輸係數影響	4-86
圖 4.124 RCPT總電荷量與非穩態氯離子傳輸係數關係圖	4-87
圖 4.125 RCPT總電荷量與穩態氯離子傳輸係數關係圖	4-88
圖 4.126 非穩態與穩態氯離子傳輸係數關係圖 (ACMT)	4-88
圖 4.127 A3X、B3X、C3X、D3X氯離子濃度與試體深度關係圖 (貯 鹽試驗)	4-89
圖 4.128 A3Y、B3Y、C3Y、D3Y氯離子濃度與試體深度關係圖 (貯 鹽試驗)	4-90
圖 4.129 A3Z、B3Z、C3Z、D3Z氯離子濃度與試體深度關係圖 (貯鹽	

試驗)	4-90
圖 4.130 A5Y、B5Y、C5Y、D5Y 氯離子濃度與試體深度關係圖 (貯鹽試驗)	4-91
圖 4.131 貯鹽試驗氯離子擴散係數與粗骨材用量關係圖	4-93
圖 4.132 不同爐灰含量對貯鹽試驗氯離子擴散係數影響	4-93
圖 4.133 貯鹽試驗氯離子擴散係數與RCPT通過電荷量關圖	4-94
圖 4.134 貯鹽試驗氯離子擴散係數與ACMT非穩態傳輸係數關係圖	4-95
圖 4.135 貯鹽試驗氯離子擴散係數與ACMT 穩態傳輸係數關係圖	4-95
圖 5.1 不同粗骨材用量ACMT非穩態傳輸係數與磨損量試驗比較圖	5-2
圖 5.2 不同爐灰含量ACMT非穩態傳輸係數與磨損量試驗比較圖	5-2
圖 5.3 不同粗骨材用量ACMT非穩態傳輸係數與衝擊試驗關係圖	5-3
圖 5.4 不同爐灰含量ACMT非穩態傳輸係數與衝擊試驗結果比較圖	5-3
圖 6.1 本研究使用之鋼纖維	6-2
圖 6.2 本研究使用之碳纖維	6-3
圖 6.3 機械應變計ELE Demec	6-4
圖 6.4 收縮試驗之試體模具裝置	6-4
圖 6.5 乾燥收縮試體	6-5
圖 6.6 拉拔試驗原理之示意圖 ^[25]	6-6
圖 6.7 鐵盤黏附於鑽心圓柱	6-6
圖 6.8 拉拔試驗儀器	6-7
圖 6.9 拉拔試驗情形	6-7

圖 6.10 傾斜剪力水泥砂漿試驗部分放入模具情形	6-8
圖 6.11 維修補強材料灌入模具與另一側試體接合情形	6-9
圖 6.12 傾斜剪力試驗試體抗壓情形	6-9
圖 7.1 配比A3Za之坍流度情形	7-2
圖 7.2 配比A3Zb之坍流度情形	7-2
圖 7.3 配比A3Zc之坍流度情形	7-3
圖 7.4 配比A3Zd之坍流度情形	7-3
圖 7.5 配比A3Ze之坍流度情形	7-4
圖 7.6 添加纖維與坍流度之關係	7-4
圖 7.7 添加纖維對於混凝土抗壓及劈裂強度之影響	7-7
圖 7.8 添加纖維對於混凝土抗壓強度及彈性模數之影響	7-8
圖 7.9 配比A3Z磨耗試驗結果	7-8
圖 7.10 配比A3Za磨耗試驗結果	7-9
圖 7.11 配比A3Zb磨耗試驗結果	7-9
圖 7.12 配比A3Zc磨耗試驗結果	7-9
圖 7.13 配比A3Zd磨耗試驗結果	7-10
圖 7.14 配比A3Ze磨耗試驗結果	7-10
圖 7.15 添加鋼纖維對磨耗損失影響(2 試體平均值)	7-11
圖 7.16 添加碳纖維對磨耗損失影響(2 試體平均值)	7-12
圖 7.17 配比A3Z沖磨試驗結果	7-13
圖 7.18 配比A3Za沖磨試驗結果	7-14
圖 7.19 配比A3Zb沖磨試驗結果	7-14
圖 7.20 配比A3Zc沖磨試驗結果	7-14

圖 7.21 配比A3Zd沖磨試驗結果	7-15
圖 7.22 配比A3Ze沖磨試驗結果	7-15
圖 7.23 配比A3Za、A3Zb、A3Zc之鋼纖維用量對沖磨量之影響(2 試 體平均值).....	7-17
圖 7.24 配比A3Za、A3Zd、A3Ze之碳纖維用量對沖磨量之影響(2 試 體平均值).....	7-17
圖 7.25 各組混凝土衝擊破壞次數分佈情形	7-18
圖 7.26 添加鋼纖維對混凝土衝擊破壞之影響(試體平均值)	7-19
圖 7.27 添加碳纖維對混凝土衝擊破壞之影響(試體平均值)	7-19
圖 7.28 添加鋼纖維對乾燥收縮之影響(2 試體平均值)	7-21
圖 7.29 添加碳纖維對乾燥收縮之影響(2 試體平均值)	7-22
圖 7.30 添加鋼纖維對界面拉拔力之影響(試體平均值)	7-23
圖 7.31 添加碳纖維對界面拉拔力之影響(試體平均值)	7-24
圖 7.32 A3Zd配比試體抗壓後照片	7-25
圖 7.33 A3Za配比貯鹽試驗結果	7-26
圖 7.34 A3Zb配比貯鹽試驗結果	7-26
圖 7.35 A3Zc配比貯鹽試驗結果	7-27
圖 7.36 A3Zd配比貯鹽試驗結果	7-27
圖 7.37 A3Ze配比貯鹽試驗結果	7-28
圖 7.38 維修補強材料氯離子擴散係數比較圖	7-29
圖 7.39 56 天抗壓強度與水中磨耗體積損失之關係(無纖維添加)	7-30
圖 7.40 56 天抗壓強度與水中磨耗體積損失之關係(有纖維添加)	7-31
圖 9.1 教育訓練暨成果研討會議程海報	9-1

圖 9.2 本研究團隊成員劉玉雯教授研討會專題演講情形	9-2
-----------------------------------	-----

表目錄

表 1-1 執行工作內容與期末報告對照表與完成率	1-10
表 2-1 懸移質與推移質對水工結構物之影響	2-4
表 2-2 各種混凝土複合材料特性	2-26
表 2-3 臺灣地區橋梁墩柱混凝土設計強度	2-28
表 2-4 混凝土參考配比(使用飛灰爐石，28 天設計強度)	2-29
表 3-1 試驗規劃與試體編號	3-2
表 3-2 拌合水試驗結果(ppm)	3-3
表 3-3 本研究使用水泥物理性質	3-3
表 3-4 水泥之物理與化學性質	3-4
表 3-5 飛灰主要化學成分	3-4
表 3-6 爐石粉主要化學成分	3-5
表 3-7 三分碎石之篩分析試驗結果	3-6
表 3-8 六分碎石之篩分析試驗結果	3-7
表 3-9 粗骨材洛杉磯磨損試驗結果	3-7
表 3-10 粗骨材混合後級配結果	3-8
表 3-11 粗砂之篩分析試驗結果	3-8
表 3-12 細砂之篩分析試驗結果	3-9
表 3-13 細骨材混合後級配結果	3-10
表 3-14 氯離子穿透性與 RCPT 總累積電量關係	3-25
表 3-15 混凝土之配比設計 (kg/m ³)	3-39
表 3-16 混凝土抗磨耗、衝擊、與耐久性能力評估試體數量表	3-41

表 4-1 混凝土新拌性質	4-2
表 4-2 混凝土 28 天抗壓強度試驗結果	4-16
表 4-3 混凝土 28 天彈性模數試驗結果	4-16
表 4-4 混凝土 28 天劈裂強度試驗結果	4-17
表 4-5 混凝土 56 天抗壓強度試驗結果	4-18
表 4-6 混凝土 56 天彈性模數試驗結果	4-18
表 4-7 混凝土 56 天劈裂強度試驗結果	4-19
表 4-8 配比 A3X、B3X、C3X 及 D3X 水中磨耗試驗結果 (cm ³) ..	4-39
表 4-9 配比 A3Y、B3Y、C3Y 及 D3Y 水中磨耗試驗結果 (cm ³) ..	4-40
表 4-10 配比 A3Z、B3Z、C3Z 及 D3Z 水中磨耗試驗結果 (cm ³) ..	4-41
表 4-11 配比 A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 水中磨耗試驗結果(cm ³)...	4-42
表 4-12 配比 A3X、A3Y 及 A3Z 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-44
表 4-13 配比 B3X、B3Y 及 B3Z 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-45
表 4-14 配比 C3X、C3Y 及 C3Z 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-47
表 4-15 配比 D3X、D3Y 及 D3Z 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-48
表 4-16 配比 A3Y 及 A5Y 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-49
表 4-17 配比 B3Y 及 B5Y 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-50
表 4-18 配比 C3Y 及 C5Y 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-51
表 4-19 配比 D3Y 及 D5Y 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	4-52
表 4-20 配比 A3X、B3X、C3X 及 D3X 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³)	4-60
表 4-21 配比 A3Y、B3Y、C3Y 及 D3Y 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³)	4-60

表 4-22 配比 A3Z、B3Z、C3Z 及 D3Z 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³).....	4-61
表 4-23 配比 A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³).....	4-62
表 4-24 配比 A3X、A3Y 及 A3Z 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³)....	4-63
表 4-25 配比 B3X、B3Y 及 B 3Z 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³)...	4-64
表 4-26 配比 C3X、C3Y 及 C3Z 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³)....	4-64
表 4-27 配比 D3X、D3Y 及 D3Z 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³)....	4-65
表 4-28 配比 A3Y 及 A5Y 砂水流沖擊試驗結果 (cm ³).....	4-66
表 4-29 配比 B3Y 及 B5Y 砂水流沖擊試驗結果 (cm ³).....	4-67
表 4-30 配比 C3Y 及 C5Y 砂水流沖擊試驗結果 (cm ³).....	4-67
表 4-31 配比 D3Y 及 D5Y 砂水流沖擊試驗結果 (cm ³).....	4-68
表 4-32 混凝土衝擊試驗結果 (次數)	4-69
表 4-33 混凝土 RCPT 通過電荷量試驗結果 (庫倫)	4-75
表 4-34 混凝土 ACMT 非穩態傳輸係數試驗結果 (×10 ⁻¹² m ² /sec)	4-83
表 4-35 混凝土 ACMT 穩態傳輸係數試驗結果	4-83
表 4-36 混凝土貯鹽試驗氯離子擴散係數計算結果.....	4-92
表 5-1 粗骨材 0.4 m ³ /m ³ 與爐灰用量對混凝土各項性質的效益 比較	5-5
表 5-2 高抗磨耗衝擊混凝土建議配比 (kg/m ³)	5-6
表 6-1 本研究使用之碳纖維規格表.....	6-3
表 6-2 維修補強材料配比設計 (kg/m ³)	6-10

表 7-1 維修補強材料新拌性質	7-1
表 7-2 維修補強材料 28 天抗壓強度試驗結果	7-5
表 7-3 維修補強材料 28 天彈性模數試驗結果	7-5
表 7-4 維修補強材料 28 天劈裂強度試驗結果	7-6
表 7-5 維修補強材料 56 天抗壓強度試驗結果	7-6
表 7-6 維修補強材料 56 天彈性模數試驗結果	7-6
表 7-7 維修補強材料 56 天劈裂強度試驗結果	7-7
表 7-8 配比 A3Za、A3Zb 及 A3Zc 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	7-11
表 7-9 配比 A3Za、A3Zd 及 A3Ze 水中磨耗試驗結果 (cm ³)	7-12
表 7-10 配比 A3Za、A3Zb、A3Zc 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³) ..	7-16
表 7-11 配比 A3Za、A3Zd、A3Ze 含砂水流沖擊試驗結果 (cm ³) ..	7-16
表 7-12 混凝土衝擊試驗結果 (次數)	7-18
表 7-13 乾燥收縮試驗結果(μm/m)	7-20
表 7-14 界面拉拔試驗結果	7-22
表 7-15 維修補強試體傾斜剪力試驗結果 (ton)	7-24
表 7-16 維修補強材料貯鹽試驗氯離子擴散係數計算結果	7-28
表 7-17 維修補強材料性質相對於 A3Z 配比成效	7-32
表 7-18 水泥質維修補強材料建議配比 (kg/m ³)	7-32

第一章 緒論

1.1 計畫背景與目的

臺灣的水文問題深受自然環境所影響，其中南北狹長而東西陡短的特殊地勢，使得東西向河流通常短而急促、高差大，且降雨集中於春夏兩季，河流豐水期與枯水期十分明顯^[1]。此外，再加上臺灣地質脆弱，土石易遭沖刷而崩落，導致大雨時河流常含有極高的含砂石量，在這些自然環境的影響下，使得河川在雨季時，常有高流速、大流量並挾帶大量泥砂的情形出現。這些情形，除了會對河川的穩定與安全造成威脅外，另一個嚴重的問題則是對橋梁基礎等水工結構物產生衝擊磨耗破壞作用。

橋梁下部結構為一個阻水構造，其周圍的水流結構主要包括墩前向下水流、墩前水面湧波與大面積的漩渦(如橋墩兩側馬蹄形漩渦與尾水漩渦)，如圖 1.1 所示^[2]。當河川水流中挾帶大量砂石流經橋墩時，迎水面直接受到砂石的撞擊作用，而墩柱四週亦遭受水流與砂石之衝擊磨耗作用。由於大多的橋樑結構均以混凝土為主要構造材料，且因考量水化熱問題，通常以巨積混凝土方式施工，其強度要求不高，加上夏季高溫之影響及橋梁基礎長期處於乾濕交替之環境，混凝土極易產生劣化之現象，往往無法承受暴雨或颱風時洪水所挾帶之砂石、浮木等對結構物造成的磨耗與衝擊作用，使得混凝土結構物表面混凝土受損，甚至鋼筋外露，如圖 1.2 所示^[3]，進而嚴重地影響橋梁整體之安全。

由於國內對於衝擊磨耗之研究大多局限於壩體結構物，對於橋梁基礎混凝土受河川砂石衝擊磨耗之作用影響尚未有深入之研究。因此，為了橋梁結構物之安全，減少其營運維修之成本，降低衝擊磨耗對其下部結構造成的傷害與影響，且掌握其使用年限，本研究是相當實際而刻不容緩的研究議題。鑒於大部分的研究單位均各有專精，本計畫期望整合混凝土材料磨耗、衝擊、耐久性三方面的研究團隊加以整合，以工程材料之觀點執行工作，以便達成橋梁基礎混凝土材料全面性之研究。此外，臺灣的橋梁已逐漸進入維護補強的高峰期，未來橋梁維護數量與費

用亦將逐年提高，因此藉由本計畫完成之橋梁基礎混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強手冊，將提供工程界一參考之依據。

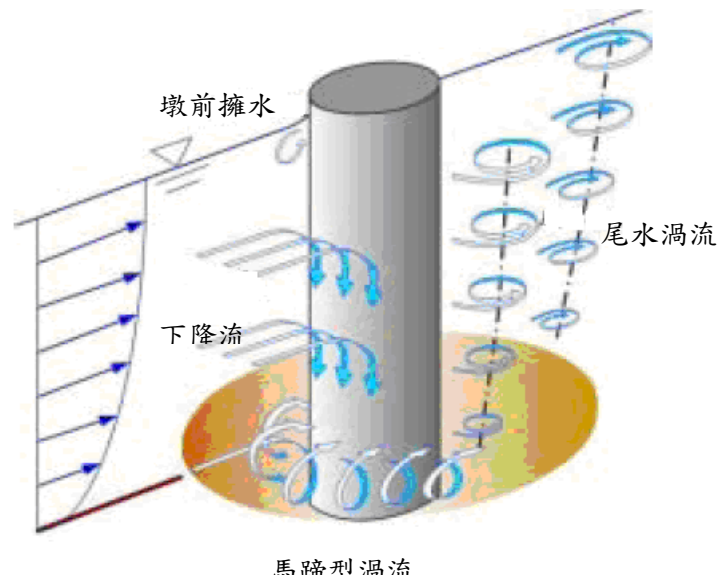


圖 1.1 橋墩周圍水流結構示意圖^[2]



圖 1.2 橋墩衝擊磨耗破壞之情形^[3]

由於國內對於衝擊磨耗之研究大多局限於壩體結構物，對於橋梁基礎混凝土受河川砂石衝擊磨耗之作用影響尚未有深入之研究。因此，為了橋梁結構物之安全，減少其營運維修之成本，降低衝擊磨耗對其下部結構造成的傷害與影響，且掌握其使用年限，本研究是相當實際而刻不容緩的研究議題。鑒於大部分的研究單位均各有專精，本計畫期望整合混凝土材料磨耗、衝擊、耐久性三方面的研究團隊加以整合，以工程材料之觀點執行工作，以便達成橋梁基礎混凝土材料全面性之研究。此外，臺灣的橋梁已逐漸進入維護補強的高峰期，未來橋梁維護數量與費用亦將逐年提高，因此藉由本計畫完成之橋梁基礎混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強手冊，將提供工程界一參考之依據。

本計畫之目的除探討橋梁基礎水中混凝土受河川砂石衝擊磨耗之機理及其抗衝擊與磨耗之能力外，並進一步分析橋梁基礎混凝土受大氣因素劣化後耐久性之變化；此外亦將探討對受損混凝土材料進行修復補強材料與工法與超高抗衝擊磨耗材料，同時搭配混凝土材料參數與環境影響因子進行橋梁基礎混凝土材料生命週期成本評估，期望可以國內橋梁現有之有限維護資源，以最適切之因應對策與有效材料技術，提升橋梁基礎混凝土之效能，延展其服務年限，並達到維護公共工程與國家資源永續利用之目標。計畫具體目標如下：

1. 橋梁墩柱混凝土材料受損機制之研究
2. 混凝土抗磨耗能力之研究
3. 混凝土抗衝擊能力之研究
4. 橋梁墩柱混凝土耐久性之研究
5. 橋梁墩柱混凝土材料修復補強之研究
6. 高抗磨耗衝擊混凝土之研發
7. 橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議手冊
8. 辦理橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗研究成果研討會

1.2 研究內容

1. 計畫與相關科技之關聯性

本計畫與施政及相關科技之關聯性、配合性與前後連貫的整體性包括：

- (1)本計畫為配合交通部所規劃一系列系統性的「橋梁安全保護中長期計畫」相關領域之研究，並以提昇橋梁安全保護科技研究，培育專業技術人才為主要目標。
- (2)執行交通部公路建設「永續經營」之政策。
- (3)發展修復補強與高抗衝擊磨耗材料，有效提升橋梁基礎混凝土使用年限，達到永續利用之目的。

2. 研究內容

橋梁為國家經濟動脈的重要環節，一旦發現損壞或服務性能不佳之現象時，亦不便進行拆除重建或長時間封橋維修。因此若能預測現階段橋梁的使用服務年限，及早進行相關因應措施，可減少橋梁受損造成人員與財產之損失，亦可延展其服務年限，並期能達到維護公共工程與國家資源永續利用之目標。然而，由於臺灣特殊的自然環境，雨量大而集中，河川短而水急砂多，橋墩構造因衝擊磨耗而產生的破壞現象是無可避免的。且目前亦沒有任何材料可以完全避免各種磨損的破壞，即使採用較佳的耐磨面層也只能延長使用壽命及降低修補頻率，並無法達到不磨損的境界。因此，如何延長水工結構物的使用壽命與降低修補的次數，成為水工結構物設計者考量的主要重點。此外，由於橋墩混凝土構造的磨損型態與其座落之地理環境密切相關，且所遭受之磨耗作用不同，如石塊與浮木撞擊、流水夾帶泥砂沖擊、與砂石的摩擦作用等，將造成不同型態的磨耗損壞。所以不同的損壞型態應相對應有不同的修補方式。因此，研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料，除採用較具抵抗性的材料以減緩各種磨損作用外，還需搭配依水工結構物特性的修補工法，才能達到預期修補目標。

由於過去橋墩構造混凝土的抗壓強度普遍不高(約 210-280 kgf/cm²)，使得其長期在水流挾帶砂石之衝擊磨耗作用下，混凝土表面經常受損，甚至鋼筋裸露、鏽蝕。在此情況下，以鋼鈹包護部份迎水面混凝土為目前較常採用之維護方法。然而，以鋼鈹作為補強材料具有以下幾項不便和缺點：

- (1)鋼鈹易腐蝕而使得粘接介面強度衰減；
- (2)由於重量及尺寸之龐大造成輸送及施工上之不便，必須付出較多之人力和施工支撐；
- (3)在補強結構上存在許多額外的接頭和焊接位置之殘餘應力與應力集中現象；
- (4)鋼鈹與混凝土間多只形成不完全之複合作用(Composite Action)；
- (5)鋼材和混凝土間熱膨脹效應不協調，以及彈性模數之差異形成變形不協和，將造成應力集中而易剝離。

由以上之分析可知，抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研發必須面對的主要課題有：一是如何由混凝土之材料組成與硬固性質評估其抗磨耗、抗衝擊及耐久性；二是橋墩修復補強材料之應用技術。因此，本計畫之主要研究內容為：

- (1)抗磨耗、抗衝擊及耐久性混凝土的最佳配比設計

具有高抗磨耗、抗衝擊及耐久性混凝土的材料組成中，水膠比(w/b)、卜作嵐材料、粗骨材與纖維材料，以及老劣化現象對其抗磨耗性、抗衝擊性及耐久性均具有一定程度之影響，因此應深入探討各材料參數變異所造成的混凝土性質，具體實現其對混凝土性能各項指標之影響。

- (2)抗衝擊磨耗材料參數與環境影響因子分析

橋墩材料的損害情形與其所在位置，水流挾帶之砂石條件有密切關係，進而又與耐久性相互影響。因此須建立混凝土性質與水

流中砂石量、尺寸、劣化情形及耐久性間之關係，以利發展出橋梁基礎混凝土抗衝擊磨耗老劣化模式。

(3) 橋梁基礎混凝土修復補強材料試驗與性能分析

橋墩修復補強材料之基本性質、抗衝擊性、抗磨耗性、耐久性，以及新舊材料界面問題是工程應用上進行產製、設計與施工時重要的參考依據。因此，完備且合宜的試驗項目、試驗方法、執行計畫、流程控管與數據分析，將是獲致完整合理數據的重要關鍵。

(4) 抗磨耗、抗衝擊及耐久性混凝土的品質與施工規範

具有高抗磨耗、抗衝擊及耐久性混凝土的新拌品質將直接影響澆置、搗實與養護等施工作業；而施工作業之成效，對混凝土硬固性能影響甚鉅。因此，必須對高抗磨耗、抗衝擊及耐久性混凝土的性能進行系統化、科學性的試驗研究，並在此研究成果基礎上，制定其品質標準、設計規範和施工作業規範，有效並完整地將高抗磨耗、抗衝擊及耐久性混凝土的技術應用和發展納入工程契約與規範系統，俾利於設計監造單位、產製廠商與施工廠商於設計監造、產製與施工時之遵循。

3. 研究流程

本計畫針對抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料進行研發工作，相關流程如圖 1.3 所示。其中第一年除進行所需的文獻蒐集與磨耗衝擊水理探討外，亦將針對橋墩混凝土材料基本組成與抗磨耗及抗衝擊之間的關係進行研究，並藉由實驗數據的分析回饋，建立混凝土性質與水流中砂石量、尺寸、劣化情形及耐久性間之關係資料庫，以供橋樑維護單位老劣化與修復時機評估使用，亦可對未來品質標準、設計規範和施工作業規範的訂定提供參考資訊。

第二年工作首先分成兩大部分進行，分別探討修補材料的磨耗衝擊與耐久性質，以及高抗磨耗衝擊混凝土研發工作。於修補材料性質評估方面，將就目前常見的修補工法與材料相關文獻進行搜集

整理，並就其基本性質與水流中砂石量、尺寸、劣化情形及耐久性間之關係進行實驗研究，並就新舊界面的影響進行說明，以對舊有橋墩進行修復工法選擇時可有所依循。於高抗磨耗衝擊混凝土研發工作方面，將整合第一年研究成果，探討最佳混凝土配比設計與相關品質標準的訂立。

另一方面，針對 2 年期程的研究成果，配合座談整合產官學意見，撰寫橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議手冊。最後並辦理橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗研究成果研討會，將相關研發成果進行推廣。

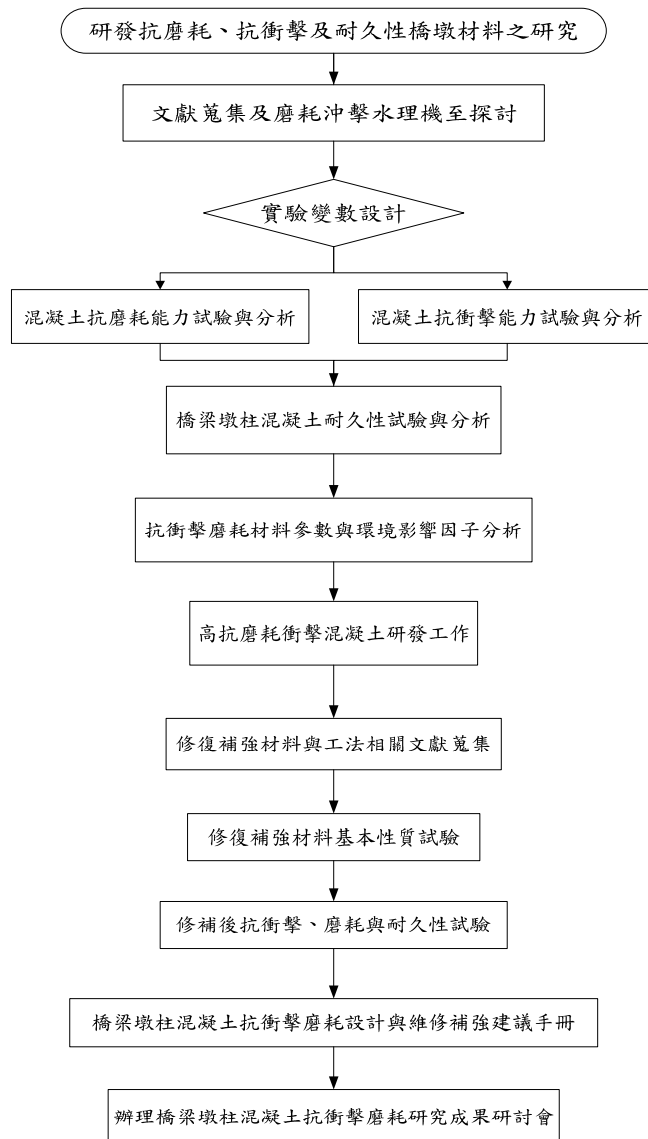


圖 1.3 計畫工作流程圖

1.3 研究進度

1. 團隊分工

本研究計畫試驗項目與作業量繁多，且涉及混凝土衝擊與磨耗性質，以及耐久性能之測試工作。為求標準控制各試驗項目、試體數量、養護齡期與試驗日期、提高試驗精度與如期完成研究計畫。本團隊特依團隊研究人力專長領域配合預定進度、試驗項目、齡期與所須儀器設備。成立專案項目研究小組，由各學有專精的教授擔任協同主持人負責該專案項目之執行監督與管控，並由計畫主持人整合各小組執行進度與研究成果。如圖 1.4 所示。

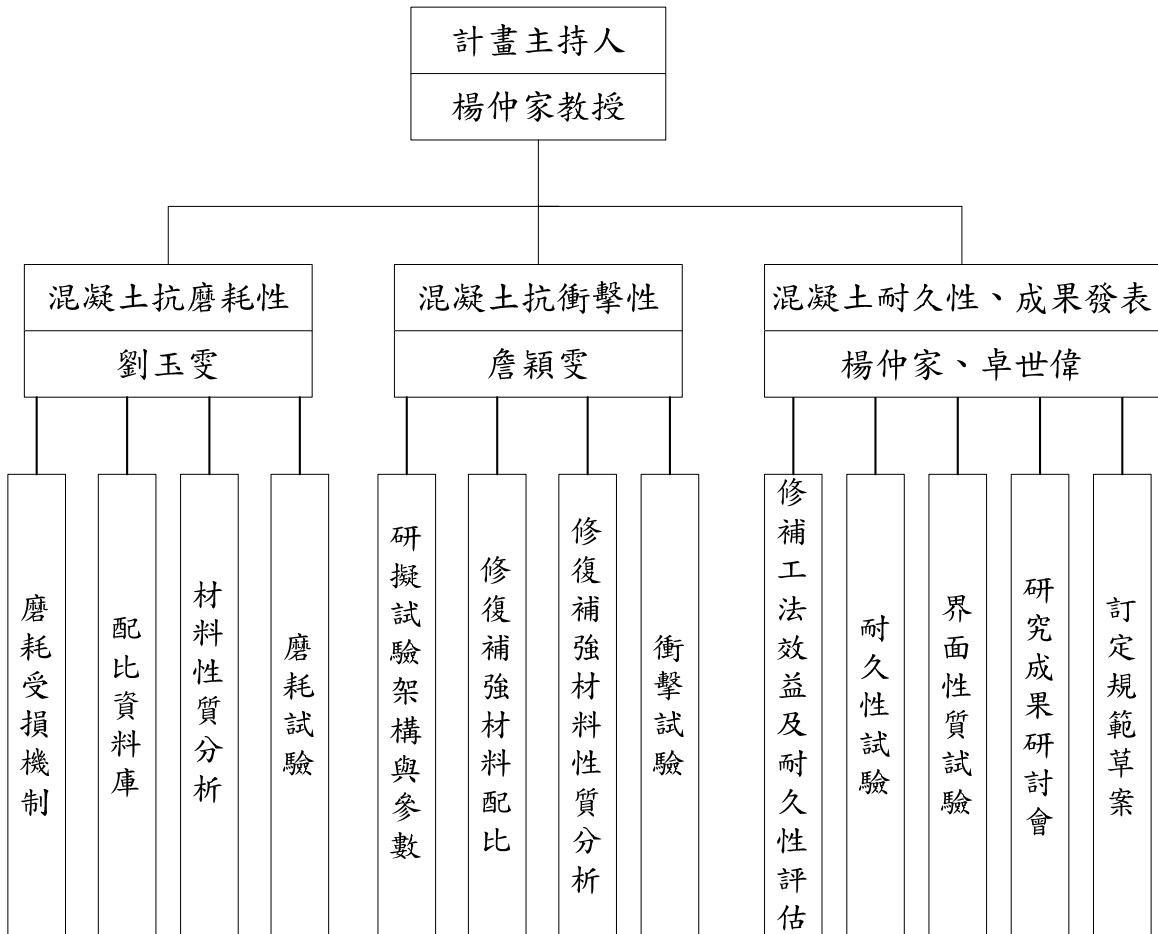


圖 1.4 團隊專長分工組織

2. 進度管控

本計畫之試驗成果影響本研究計畫之品質與整體效能甚鉅。因此，除配合港灣技術研究中心要求，在預訂時程完成各檢核點工作項目外，本團隊更注重執行過程與各試驗項目的品質，研擬研究整合管控計畫，據以落實執行。

1.4 工作內容與報告對應說明

本計畫目前已完成所規劃的工作內容，相關工作內容與期末報告相對位置如表 1-1 所示。其中期末報告第一章前言部分說明本研究背景、內容與流程圖。第二章參考文獻整理影響橋梁墩柱混凝土磨損、衝擊、與耐久性的因素，並就修復補強材料之相關文獻進行說明。第三章說明橋梁墩柱混凝土抗磨損、抗衝擊、與耐久性的試驗變數，在就本研究混凝土組成材料基本性質試驗結果進行說明，並就各種試驗方法進行說明，最後說明配比設計內容。第四章就第三章所設計的混凝土進行試驗後的結果，探討各種組成材料變數對混凝土新拌工作性質、硬固力學性質、硬固抗磨損性質、硬固抗衝擊性質、與硬固耐久性質。第五章由第四章試驗結果建議抗衝擊磨損混凝土配比設計限制，且建議高抗磨耗衝擊混凝土的配比設計。第六章就橋梁墩柱混凝土維修補強材料配比研發之變數設計、組成材料基本性質、與試驗方法進行說明。第七章就維修補強材料所設計之配比進行各種試驗所得到的試驗結果進行說明。第八章由研究試驗結果訂定橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案。第九章說明辦理橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗研究成果研討會及訓練班情形。第十章為本研究結論與建議。

表 1-1 執行工作內容與期末報告對照表與完成率

工作分項	計畫執行迄今之工作內容	期中報告位置	完成率
研究背景與目的	計畫研究流程與相關背景說明和目的確認	第一章	100%
文獻蒐集	橋梁墩柱混凝土材料受損機制之研究	第二章	100%
試驗研究	橋梁墩柱混凝土變數設計、材料性質、實驗方法介紹、與配比設計	第四章	100%
試驗研究	由試驗結果探討橋梁墩柱混凝土各種組成材料變數對混凝土性質之影響	第五章	100%
試驗研究	橋梁墩柱維修補強材料變數設計、組成材料性質、實驗方法介紹、與配比設計	第六章	100%
試驗研究	由試驗結果探討橋梁墩柱維修補強材料各項性質。	第七章	100%
規範建立	訂定橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案	第八章	100%
教育訓練研討會	研究成果研討會及訓練班辦理情形	第九章	100%
結論	研究結論與建議	第十章	100%

第二章 文獻蒐集與分析

2.1 流水特性與磨損及衝擊之關係

橋梁墩柱在過流部位經常發生衝擊磨損破壞，而衝擊磨損破壞是一種單純的機械作用，既有水流作用下固體材料間的相互摩擦，又有相互間的衝擊碰撞。當不同粒徑的固體介質，其硬度大於混凝土時，在水流作用下將形成對混凝土表面的磨損，而此作用是連續且不規則，最後將造成混凝土表面破壞。一般而言，影響構造物衝擊磨損行為的因素主要可分為三大類^[4]，分別為：

1. 結構物的材質：包括硬度與強度。
2. 水中懸浮物的物理特性：包括顆粒大小、硬度、幾何形狀、比重及濃度。
3. 流體特性：包括流速、流向及其與結構物形成之交角。

圖 2.1 為泥砂運動形式之示意圖。一般泥砂、砂礫由於外在條件如粒徑、形狀的不同，當受到水流挾帶移動會有不同的運動方式。依運動形式的不同，可以分為懸移質(Suspended load) 與推移質(Bed load) 兩大類。在推移質中，又可以細分為接觸質(Contact Load)、躍移質(或稱雀躍質，Saltation load) 與層移質，如圖 2.2 所示。各質載的說明如下：

1. 接觸質

接觸質的運動是以滑動(Sliding)與滾動(Rolling)為主，如圖 2.1(b) 所示。原靜止於河床之泥砂，因水流流速增加使其上舉力隨之變大；當所受到的上舉力大於重力與磨擦力時，泥砂便離開原來所在位置並開始向前移動。

2. 躍移質

躍移質之運動是屬於規律的躍移(Saltation)，如圖 2.1(c)所示。

流速的繼續增加使上舉力持續加大，有時亦會使泥砂顆粒在河床上突然有跳躍的情形發生，這就是躍移質，或稱雀躍質。

3. 層移質

當水流流速加大，引起水流拖曳力增大後，不但表層的泥砂不能保持靜止，連第二層的泥砂也開始運動。而該層的泥砂，由於四周全與其他砂粒接觸，只能整層地移動或滾動，速度由上而下遞減，所以被稱做層移質，這種形式的運動即被稱為「層移」(surface of mobile bed)。

4. 懸移質

懸移質的運動方式如圖 2.1(d)，微小的泥砂顆粒隨水流浮沉，速度與水流相近，在運行的過程中，並不和河床接觸。懸移質運動的能量來源是水中的紊流，且必須要有相當的水深。由此可以瞭解，懸移質多半隨洪水發生且大量增加。

由於推移質與懸移質的移動原理並不相同，兩者間的差異可歸納為表 2-1^[5]。說明如下：

1. 能量來源：懸移質的運動機理為被紊流所挾帶並離開河床隨水流移動，因此懸移質所屬的粒徑較小；相對地，推移質的粒徑分佈則較大。
2. 從運動速度來看：懸移質被紊流挾起後，運動速度快(接近水流速度)，其速度快但質輕粒徑小，所以運動軌跡較不規則，全視當時所在位置的水流情形而定。而推移質運動速度較慢，但運動方式較為明確，且因粒徑大小分別以滾動、轉動、雀躍與層移等形式運動。
3. 發生時機：懸移質主要發生在颱風侵襲時水流量較平時大的期間。而推移質除發生於洪水期，其實全年都在進行。
4. 對河床的影響：懸移質對河床影響多以水庫淤積與河口壅塞為主，而推移質則會改變河道的表層形狀。

再將不同的河床質載對水工結構物的影響，歸納為表 2-1^[5]。整體而言，泥砂與砂礫在水中所造成之磨耗行為，主要可分為磨擦、衝擊兩大部分，兩種形式對混凝土表面的破壞不盡相同。

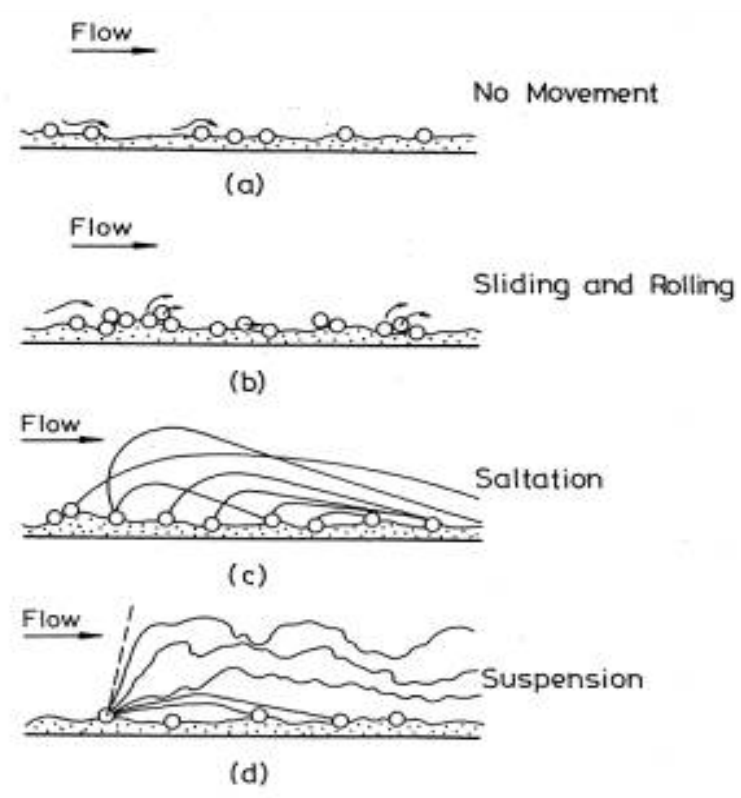


圖 2.1 泥砂移運方式示意圖^[5]

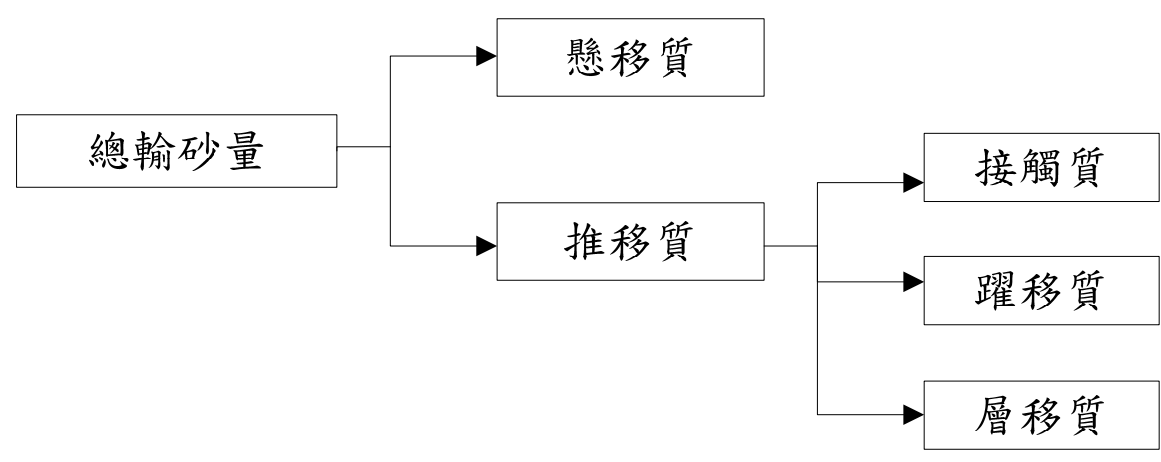


圖 2.2 泥沙移運方式分類圖^[5]

表 2-1 懸移質與推移質對水工結構物之影響^[5]

泥砂分類	運動形式	對水工結構物之影響
懸移質	不一定，依紊流狀況	磨耗作用
接觸質	滑動、滾動	磨耗作用為主
躍移質	雀躍	撞擊作用為主
層移質	整層滑移	磨耗作用

2.2 橋梁墩柱之磨耗與衝擊現象與原因

磨耗破壞可分為推移質衝擊磨耗與懸移質沖擊磨耗兩種^[6-8]。攜帶泥、砂、石的高速水流，對混凝土表面的衝磨是一種單純的機械作用破壞。懸移質泥砂顆粒較小，在高速水流的紊動作用下能充分與水混合，非常均勻地與水流一起運動，形成近乎水體質點的兩相流。高速水流攜帶的懸浮質在移動過程中觸及結構物過流面時的作用，即表現成磨損、切削和衝撞。由現地觀測發現，懸移質對混凝土的沖磨破壞在開始的一段時間內乃先從表面產生均勻的磨損剝離。隨著剝離程度增加，將因混凝土(砂漿)的非均質性，使過流表面出現凹凸不平的磨損坑。這時水流會受到擾動，而在過流表面形成各種類型的漩渦流，這些漩渦流的強度會隨著流速的增大而加劇。水流條件的惡化會加速沖擊破壞的進程，而磨蝕坑加深又會進一步惡化水流條件，形成惡性循環。這時破壞作用已不是單純的衝擊破壞，隨著漩渦的出現便產生了穴蝕破壞。由室內試驗和現地觀測結果顯示，含懸移質的高速水流對泄水結構物過流表面所形成的沖擊破壞作用力，與水流速度、水流形態、懸移質含量、懸移質顆粒粒徑、形狀和硬度，以及混凝土的抗沖擊強度等因素有關。

推移質對洩水結構物過流面的破壞作用機理，與懸移質不完全相同。在高速水流的作用下，推移質以滑動、滾動及跳動等方式在過流

面上運動，除了滑動摩擦作用外，還有沖擊砸撞作用。臺灣地區每於颱風或汛期時，洪水所挾帶的推移質，粒徑大者可達 1m 以上，平均粒徑約為 6~40 cm。由於推移質帶有很大的動能，當其衝撞擊在脆質的混凝土上時，接觸區將形成很高的局部應力，而當此應力超過混凝土內聚力時，則將發生局部破壞。此時，若加上滑動磨損和水流的淘刷，攜帶推移質的高速水流對過流邊壁、表面的破壞力很強。推移質在輸移過程中其有本身的輸移帶，輸移帶的位置和方向隨著水流主流的變化而變化，具有強烈的脈動性。在輸移帶內推移質的沖擊作用也不均勻，一般還存在有一定寬度的強烈輸移帶。由推移質的沖擊破壞所形成的沖坑和沖溝，常出現在強烈輸移帶內。推移質沖擊破壞作用的大小，決定於水流速度、流態、推移質的數量、粒徑及其運動方式。對結構物而言，其受損程度又與材料的抗沖擊磨損性能、過流時間等因素相關^[6-9]。

當泥砂流水沖擊混凝土表面時，混凝土表層所受之作用力，分別有(1)水分子的剝蝕作用，如圖 2.3(a)所示，主要為水流速度及壓力的作用。(2)砂礫的撬蝕作用，如圖 2.3(b)所示，其主要與材料顆粒尺寸及界面裂縫有關。(3)砂礫的磨損作用，如圖 2.3(c)所示，主要受水流速度、砂礫的硬度及界面黏結力影響^[8]。

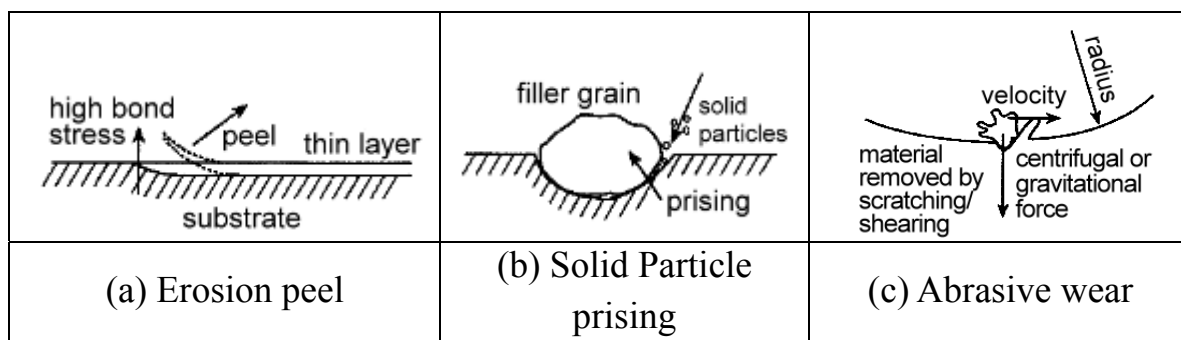


圖 2.3 水流夾帶砂石對混凝土表面之作用力 ^[8]

由以上之分析可知，泥砂水流的沖擊作用不能以單獨的固體滾動磨擦或沖擊作用來表示。當水工結構物混凝土長期受到泥砂水流的沖擊與摩擦作用時，其表面磨損的發展狀況可由圖 2.4 表示^[10]。首先混凝

土表層砂漿部分被磨損，粗骨料顯露出；接著由於沖擊力作用，粗骨料破壞或被拔出，形成空穴；進一步砂漿被沖擊流失，又露出粗骨料，如此反覆進行。而實際上由於露出的粗骨料大小不同，被沖走後將留下大小不同的空穴。此時若砂礫進入空穴裡面，加上高速水流的轉動，孔隙將向混凝土內部擴大，再經年長月久地進行，即使在混凝土表面只看到一條裂縫，但其內部已形成很大空洞，進而嚴重影響其抗沖擊能力。由此可知，要提高混凝土的抗衝擊能力必須具備：

- (1)提高水泥砂漿的強度，使混凝土面均勻地受到衝擊作用。
- (2)增加水泥砂漿與粗骨材之握裹鍵結。
- (3)粗骨材的粒徑大小須適宜，避免被水流沖出後形成大孔洞。
- (4)水泥砂漿的黏結力及緻密性須提高。
- (5)耐磨性高的粗骨材面積要大。

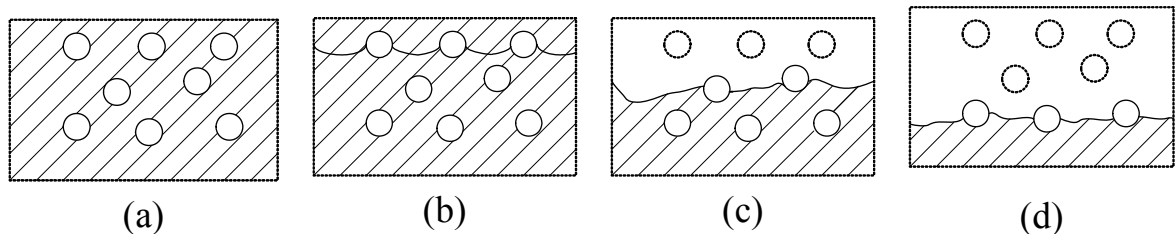


圖 2.4 水工混凝土受沖擊之過程^[10]

2.3 混凝土性質對耐磨與耐衝擊之影響

1. 混凝土強度對耐磨、耐衝擊性之影響

- (1)水膠比 (W/C)：混凝土之耐磨性隨水膠比之降低而增加，如圖 2.5 所示^[11]。當水膠比由 0.72 減少為 0.40 時，混凝土之耐磨性可提高 43%。
- (2)抗壓強度：混凝土之強度與耐磨性有密切關係，如圖 2.6 所示，混凝土的磨損量隨抗壓強度之增加而降低^[12]。此外許多文獻顯

示，混凝土的強度與抗磨損能力有密切之關係，強度的提升有助於抗磨損能力之增加，但二者之相關缺乏無完整之資料。目前評估混凝土抗磨損能力之高低，仍然是以抗壓強度作為指標，若欲得到較佳之抗磨損能力通常是以提高其設計強度來達成。水中結構物常需設計一耐磨保護層以抵抗結構物表面受水流之衝擊磨損作用，避免結構物本體受損，因此表面層之耐磨性質格外重要。由此可知，若要提高磨損作用的抵抗能力，試驗設計的目標應為提高混凝土之設計強度。

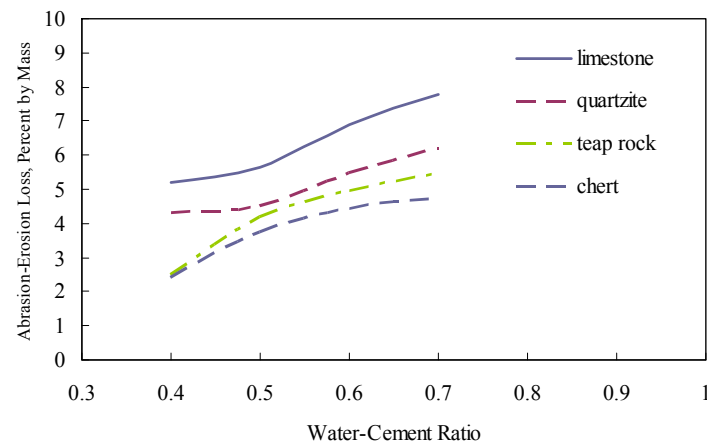


圖 2.5 混凝土水膠比與磨耗量之關係 [11]

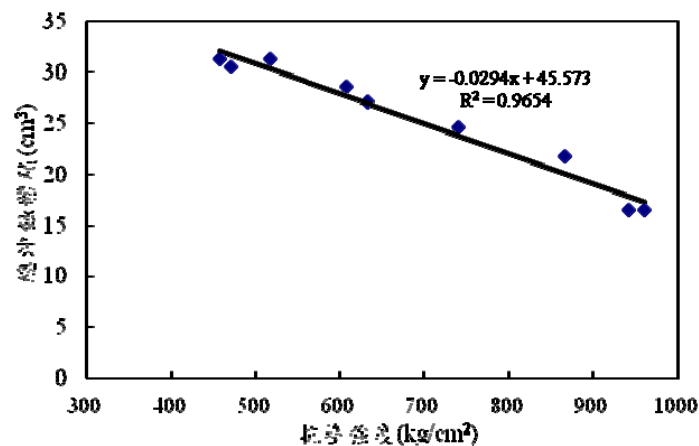


圖 2.6 混凝土抗壓強度與耐磨性之關係 [12]

2. 粗骨材性質與混凝土耐磨、耐衝擊性

由不同骨材混凝土之磨損試驗結果可知，以石灰石為骨材者之磨損量約為角岩者之 2 倍，如圖 2.7 所示。由此顯示，粗骨材硬度與磨損量有反比之關係，使用硬度較大之骨材，其混凝土可獲得較佳之耐磨性，此乃因品質優良且硬度大之骨材，可形成強度較高之漿體結構，而使耐磨性佳，並可減低混凝土表面之受磨損程度，從而提升混凝土之整體抗磨損能力。

圖 2.8^[13]為在相同W/C (0.72) 下，使用不同粗骨材之混凝土磨損試驗結果，顯然黑色火成岩與花崗岩均有較小之磨耗深度，而白雲石亦有不錯之耐磨性。若再分別比較使用各種粗骨材之混凝土與水泥石之耐磨性，如圖 2.9^[13]所示，則其中以石灰石的耐磨性比水泥石差，而花崗岩之耐磨性則優於水泥石，二者之混凝土耐磨性均介於岩石與水泥石之間。此外，白雲石與水泥石之耐磨性均佳且相當接近，而其混凝土磨損深度在試驗時間 8 分鐘後，更為三者之中最小者，此現象顯示，粗骨材與水泥石的耐磨性質相近，可提升混凝土的耐磨損能力。

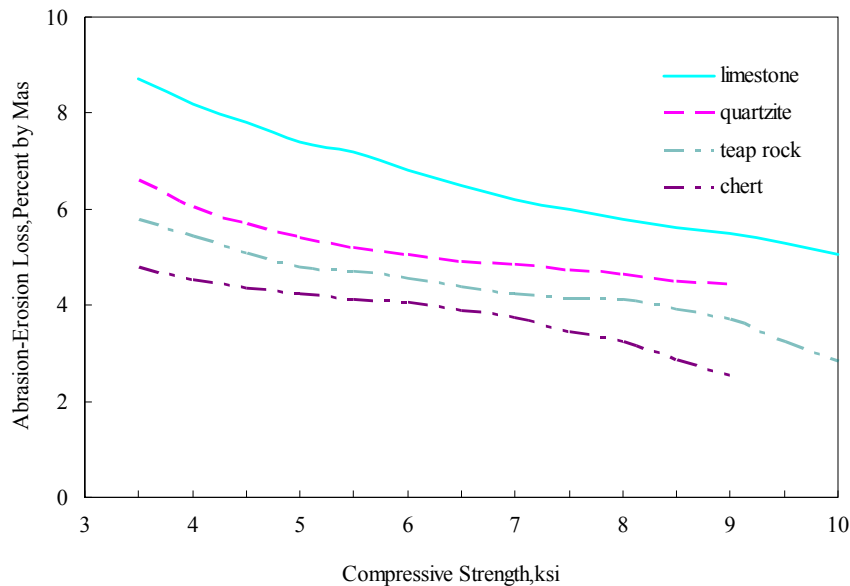


圖 2.7 粗骨材對混凝土耐磨性之影響^[11]

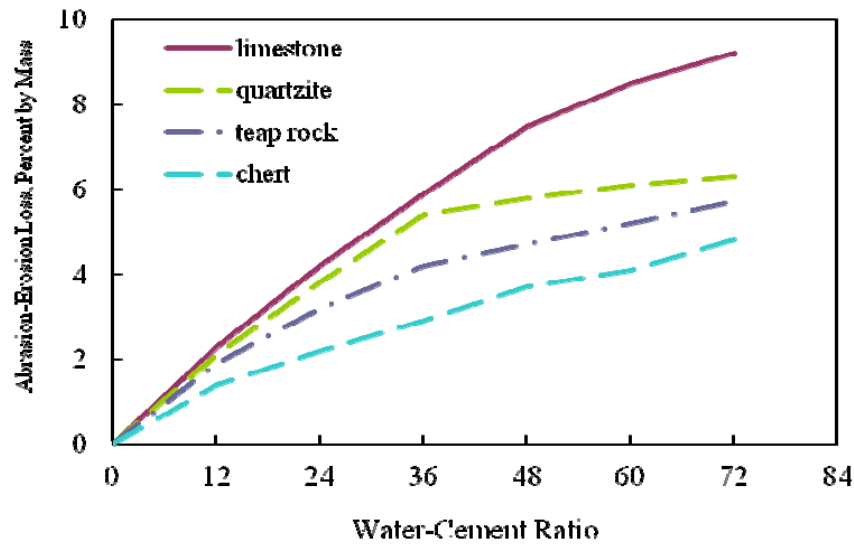


圖 2.8 不同粗骨材混凝土之耐磨性 [13]

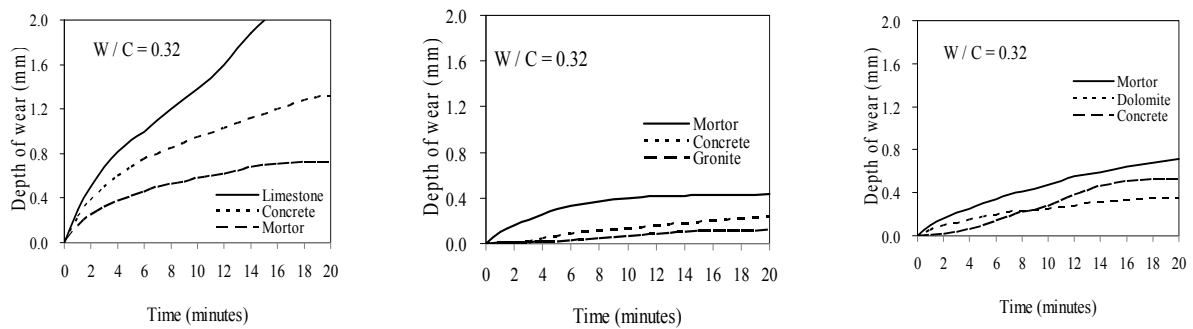


圖 2.9 不同粗骨材混凝土與水泥石之耐磨性 [13]

3. 卜作嵐材料與化學摻料對混凝土耐磨、耐衝擊性之影響

(1) 飛灰

近代混凝土中常加入卜作嵐材料，不僅可降低混凝土成本，還能減少用水量，且因其與氫氧化鈣進行之反應（又稱為卜作嵐反應），會生成性質穩定之膠結物（C-S-H膠體），除使硬化混凝

土中之毛細管孔隙相對減少，從而改善硬固混凝土之整體孔隙結構，提高混凝土的水密性、強度及耐久性，降低鹼骨材反應。文獻指出，混凝土中添加飛灰，會因其卜作嵐反應較慢，而使其早期抗磨損性較差，但若添加適量的飛灰，在長齡期後則可有良好之抗磨損性^[14, 15]，如圖 2.10 所示。

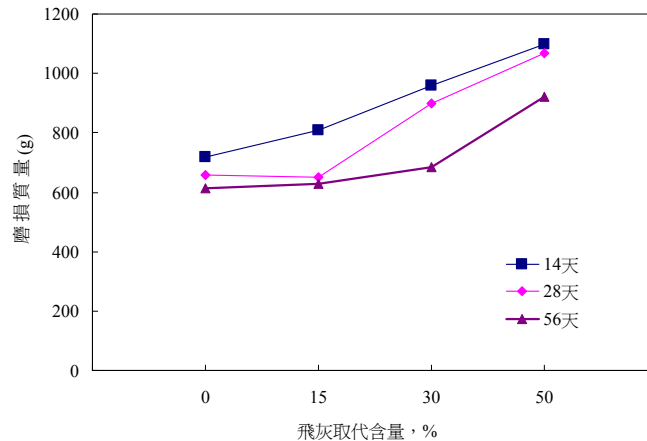


圖 2.10 不同飛灰含量混凝土之耐磨性 ^[15]

(2) 爐石粉

混凝土中以適量的爐石粉取代水泥時，由於爐石粉與水泥水化作用產物所進行的卜作嵐反應，不僅可填充孔隙，更可改善骨材與水泥漿體間界面性質，使得混凝土結構更為緻密，進而有效提升其抗衝擊磨耗之能力。當以爐石粉取代水泥量為 45% 時，約可降低磨耗損失量 30~40%，如圖 2.11 所示^[16-17]。但值得注意的是，添加高爐石量時(如 75%)，於 28 天齡期前，由於水泥量減少，水化產物較少，影響爐石之卜作嵐反應，使得混凝土無法達到降低孔隙量，以及改善骨材與漿體界面性質之效果，因此抗衝擊磨耗能力反而降低。

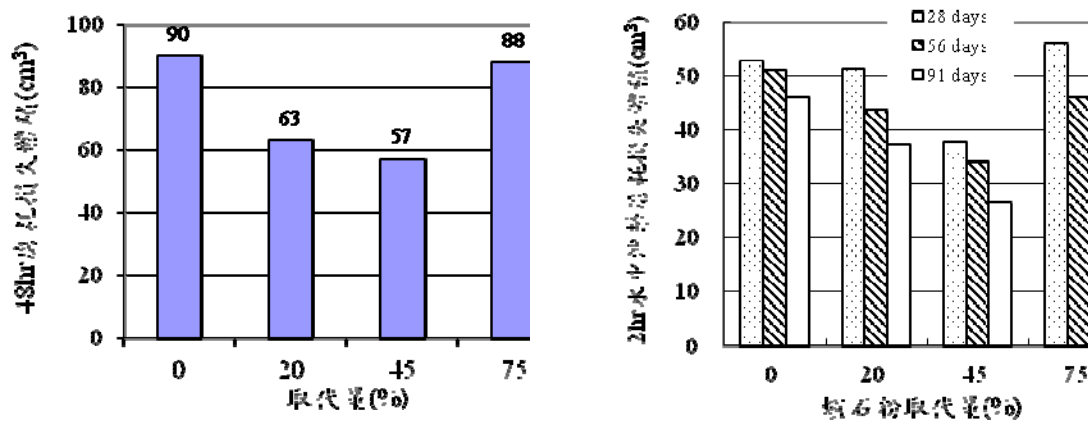


圖 2.11 混凝土中爐石含量對耐磨性之影響 [16-17]

(3) 矽灰

以現階段混凝土科技而言，絕大多數高強度(如 560 kg/cm² 以上)混凝土都是以添加矽灰、採用低水膠比，並摻用減水劑為主之配比。其中，採用低水膠比之設計，固然可提高混凝土強度，但唯有將材料中的孔隙以矽灰加以填充後，才能使其抗壓強度大幅提昇。矽灰也是卜作嵐材料之一，是一種鐵矽類合金冶煉過程中所產生的副產物，需經由靜電集塵方式收集，而因其顆粒粒徑極小僅有約 0.15μm，約為水泥顆粒的 1/100，可分散於水泥與骨材之間，充填小孔隙減少混凝土內孔隙，增加其緻密度，故能大幅提高混凝土強度與不透水性^[18]，也對耐磨性有所助益。此外，因其成分以氧化矽(SiO₂)為主，可與水泥水化作用產物之一的氫氧化鈣，進行卜作嵐反應 (Pozzolanic Reaction)，亦有助於增加混凝土之抗壓強度與微結構之緻密化。因此，就矽灰之應用於混凝土配比而言，在物理性質上，係藉由矽灰之微小顆粒尺寸來充填混凝土孔隙，達到消除材料瑕疵 (Defects or Intrinsic Voids) 之目的。若再輔以化學性質上矽灰所進行的卜作嵐反應，直接提升水泥膠結效果，則於雙重效應下，配合適當之水膠比、骨材含量等配比參數，可將混凝土強度提高至普通強度混凝土之 3~5 倍。

當然，混凝土中水膠比降低、顆粒細緻化的結果，將使其工作度大幅降低，將影響其施工品質。故絕大部分情形之下，矽灰混凝土的配比中均需添加適量之減水劑或強塑劑，以達到合理之工作度與施工性。許多文獻也同時指出，矽灰混凝土具有較佳之耐磨能力，如圖 2.12 所示^[19]。此外，由圖 2.13 顯示，添加 7.5%的矽灰(取代水泥量)時，混凝土與水泥石之磨損深度亦可因添加矽灰而減小^[20]。

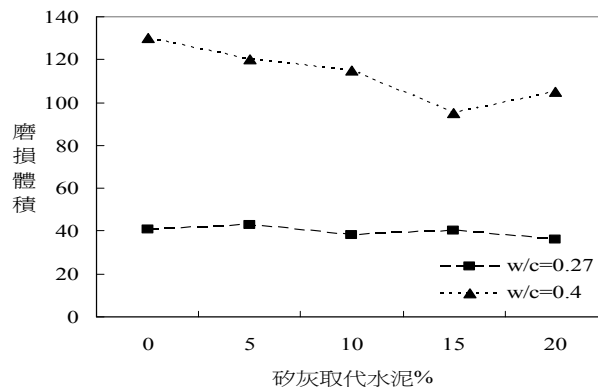


圖 2.12 矽灰含量對混凝土耐磨性之影響 ^[19]

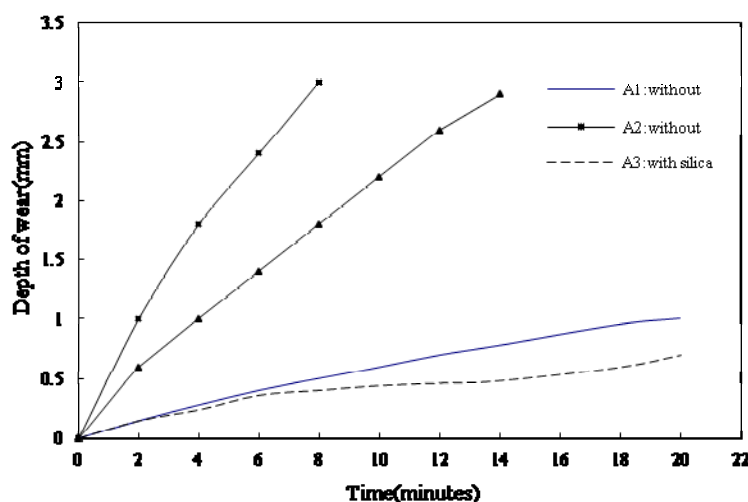


圖 2.13 矽灰含量 7.5%,混凝土與水石之耐磨性 ^[20]

(4)纖維

纖維加強混凝土 (Fiber reinforced concrete, FRC) 或簡稱纖維混凝土，乃是一種將纖維均勻分佈於混凝土內之複合材料，其功能可增加混凝土之強度、抗裂性、剪力強度、體積穩定性及震動抵抗能力。由於纖維添加的種類不同，因此纖維混凝土也分為：鋼纖維混凝土 (Steel Fiber Reinforced Concrete, 簡稱SFRC)、聚丙烯纖維混凝土 (Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, 簡稱PFRC; 又稱PP纖維混凝土)、玻璃纖維強化混凝土 (Glass Fiber Reinforced Concrete, 簡稱 GFRC) 及碳纖維混凝土 (Carbon Fiber Reinforced Concrete, 簡稱CFRC) 等^[21-23]，其中以鋼纖維混凝土之應用最多。

鋼纖維尺寸大多為長約20~60mm，直徑約0.3~1.0mm，如此大尺寸纖維雖然對混凝土韌性有顯著的助益，但對混凝土抗拉能力的提升，則相當有限。由於拉力破壞係肇因於微裂縫的延伸，而大尺寸纖維因距離太遠，無法有效的鈍化與再阻止微裂縫的延伸，因此常需添加微細纖維 (直徑小於 $<25\mu\text{m}$)，以減少纖維間距而增加抗拉強度，而碳纖維就是最常使用的微細纖維之一^[21]。碳纖維混凝土除了較一般混凝土有較佳的機械性能外，相較於鋼纖維混凝土、聚丙烯纖維混凝土及玻璃纖維混凝土，碳纖維混凝土具有較佳的可修飾性、耐候性及長期化學抵抗能力 (尤其是強鹼環境)，另外亦有結構以碳纖維取代鋼筋，除可避免因鋼筋腐蝕造成之耐久性問題外，亦可使結構物重量減輕，安裝施工方便，縮短工期。

碳纖維、玻璃纖維與鋼纖維三種混凝土之耐磨性以鋼纖維混凝土最佳，而碳纖維者與玻璃纖維者相差不大，且均較未添加纖維混凝土提高約20 %-50 %^[24]。由於在隨水流滾動的鋼球磨耗作用下，混凝土表面的摩擦磨損量將受其硬度與強度之影響，當混凝土複合材料之硬度愈大時，對其耐磨性愈有利。此時鋼纖維於混凝土中所扮演之角色，如同堅硬之骨材，因此鋼纖維含量多

之混凝土其耐磨性較佳。碳纖維與玻璃纖維較為細小，其功能主要為增加混凝土之抗拉能力，以及抑制裂縫之成長。另一方面，在水中鋼球之磨耗作用下，此兩種纖維對混凝土耐磨性之助益，就沒有鋼纖維來得直接，從而使得其增加混凝土耐磨性之表現不如鋼纖維者。

(5)化學摻劑

理論上，水泥完全水化之耗水量僅為水泥重量的 26~28 %^[25]，如此低的水含量應可使混凝土達很高之強度。實務上低水膠比之混凝土生產及澆置，為獲得適當之工作性，須考慮加入適當的減水劑，如強塑劑等。強塑劑 (Superplasticizer) 早期稱為高性能減水劑 (High-range Water-reducing Admixture)，在 ASTM C494 分類中屬於 TYPE F。另一種高性能減水緩凝劑 (High-range Water-reducing Retarding Admixture)，在 ASTM C494 分類中屬於 TYPE G。由於強塑劑具有介面活性作用，可吸附在水泥顆粒表面，產生負電荷於水泥顆粒四周形成包封，中和水泥表面電荷或使其表面帶相同電荷，致使水泥顆粒互相排斥而成為分散狀態，並將其中多餘水分釋出，增加骨材之均勻性，進而提高緻密性與耐磨性。添加飛灰與爐石等卜作嵐材料之混凝土，其早期強度發展較慢，可利用降低水膠比及使用強塑劑等方法來達到兼顧工作性與提升混凝土耐磨性之目的。

4. 孔隙結構對混凝土耐磨、耐衝擊性之影響

一般水泥漿體中的孔隙可依尺寸大小分為C-S-H層間孔隙、毛細孔隙(Capillary pores)、氣泡(Air voids)等三類^[26]。其中C-S-H層間孔隙對乾縮與潛變影響較大，對強度與滲透性不造成影響。而毛細孔隙與氣泡對強度與滲透性均有不利之影響。因此，磨耗行為與混凝土表面條件有絕對關係，若混凝土施工階段加以適當的整平、養護等，必然有助於其抗磨損性質的提升，尤其應防止泌水的發生，以避免混凝土表面形成弱面，降低其耐磨能力。一般而言，混凝土表

面的抗磨耗性質，取決於最外層幾公釐厚的水泥砂漿之孔隙結構，當混凝土表面越緻密且孔隙越細小時，其抗磨耗能力越佳，如圖 2.14^[27]與圖 2.15^[28]所示。

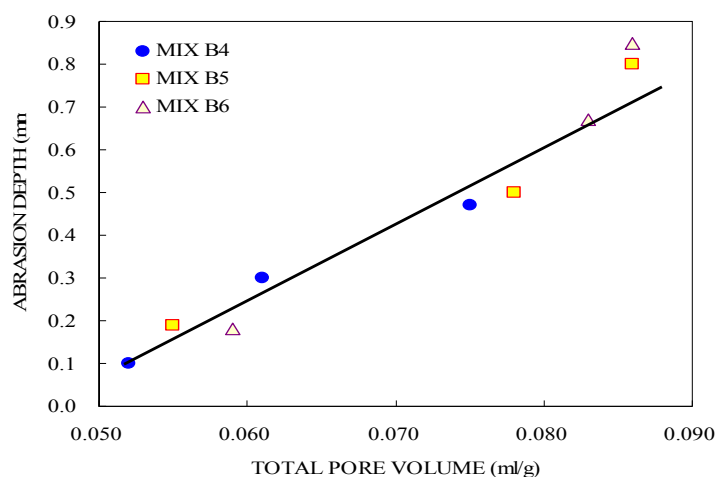


圖 2.14 混凝土孔隙率與磨耗深度之關係^[27]

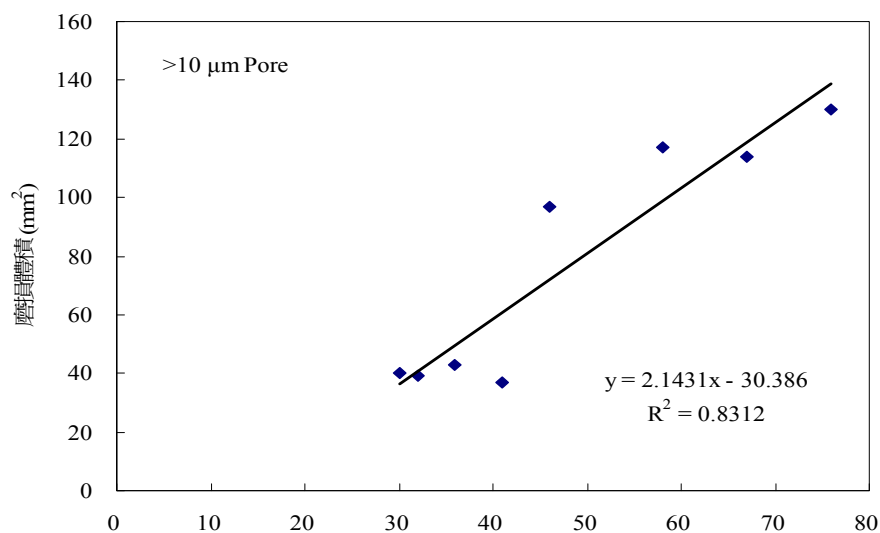


圖 2.15 混凝土孔隙與磨耗性質之關係^[28]

2.4 混凝土性質對耐久性之影響

混凝土是由流體變化成固態的複合材料。由於組成材料水化後的體積無法完全取代未水化前水與水泥的總合體積，且由於流體固化時由外界引入的空氣與泌水現象，使得混凝土為多孔性複合材料。而這些孔隙互相連結的通路，便是外在環境惡劣因子入侵混凝土內部的路徑，也是造成混凝土耐久性問題的主要成因。根據相關文獻的研究，一般而言混凝土中水泥漿體的孔隙依其尺寸可分成四大類^[29]，分別為膠體孔隙（Gel pores；尺寸範圍約為 0.5~10 nm）、毛細孔隙（Capillary pores；尺寸範圍約為 10~10000 nm）、輸氣孔隙（Entrained air pores；尺寸範圍約為 0.05~1.25 nm）、與搗實孔隙（Entrapped air pores；尺寸大於毛細孔隙，且較無一致性）。上述中，文獻^[30]指出膠體孔隙存在於 C-S-H 之間的夾層空間，並非為影響混凝土抗壓強度主要因素，但對於乾縮潛變影響甚巨，另一方面由於其間並不連通，因此並非離子傳輸的主要路徑。毛細孔隙為參與水化反應之多餘游離水所產生。因此各毛細孔隙間大多互相連通，進而形成網絡，造成外在水氣侵入的主要路徑。而輸氣孔隙與搗實孔隙為拌合或施工時由外部所引入，雖然尺寸較大，但大多獨立。另一與骨材有關的孔隙為界面過渡區，其生成的主因係由於骨材表面的緻密性，當混凝土為新拌狀態時，拌合水會堆積在骨材表面上，使得與骨材接觸的漿體水膠比增加，形成界面過渡區（interface transition zone, ITZ）。界面過渡區依文獻的定義約為 10 μ m~50 μ m 厚度^[31-32]，此區域內水膠比遠比基材水膠比高，因此其內部水化生成物所構築的孔隙尺寸與數量也遠大於基材^[33]，形成水氣可快速擴散的路徑。

Leeming^[34]曾將氧氣擴散（oxygen diffusion）、碳化（carbonation）、氯離子侵入（chloride ingress）、與含水量（water content）對混凝土內部相對濕度和鋼筋腐蝕之間的關係繪製成關係曲線，如圖 2.16 所示，由圖中可以明顯知道含水量與氯離子侵入會隨著混凝土相對濕度的增加而上升。因此對改善混凝土耐久性而言，可利用改變混凝土組成材料（如添加礦物摻料）來改變孔隙尺寸與增長連通孔隙路徑（tortuous）。

下述就混凝土組成材料與性質對耐久性影響相關研究文獻進行整理說明。

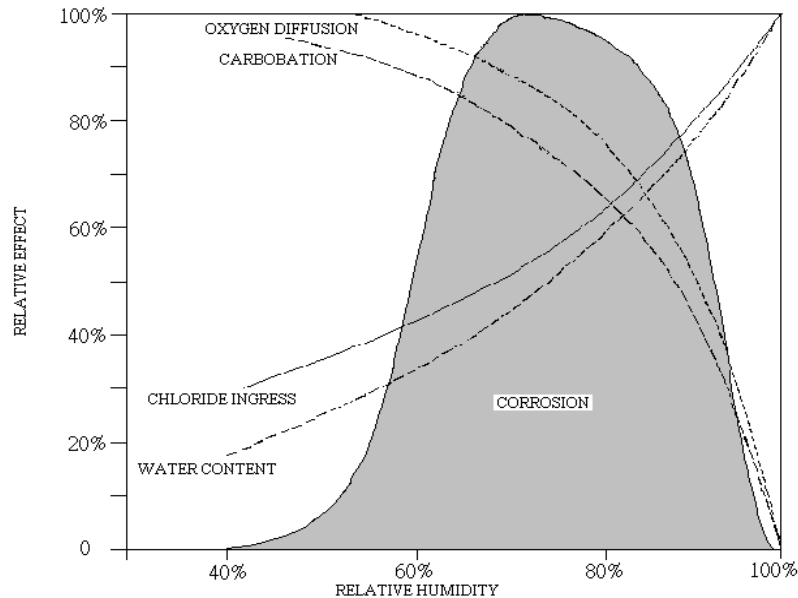


圖 2.16 耐久性因子與混凝土相對濕度及腐蝕關係圖 ^[34]

1. 水膠比與水化時間對孔隙結構的影響

最基本的水泥質材料組成為波特蘭水泥漿體。水膠比則代表水與水泥的重量比例，由前述水泥水化反應與毛細孔隙結構生成之關係，相關研究曾指出，當混凝土水膠比介於 0.35 到 0.4 之間時，水泥就可以被水完全水化，因此當水膠比大於 0.4 時，對水泥水化而言，其用水量已過多，會造成水泥顆粒間的距離加大，毛細孔隙會開始增加 ^[35]。當水膠比大於 0.7 時，即使水泥完全水化，由於所產生的毛細孔隙過大，造成孔隙之間互相重疊，形成大到足夠氯離子傳輸的連通網路。Mehta ^[35] 亦利用壓汞計量測不同水膠比的水泥漿體內部孔隙分佈情形，發現在完全水化狀態下，低水膠比（水膠比小於 0.4）毛細孔隙的寬度為 10 到 50nm，依上述孔隙結構分類，仍屬於微型孔隙範圍；然而當水膠比高時，其寬度便會驟增為 3 到 10 μ m；以孔隙率來看，毛細孔隙於水膠比 0.4 時約可佔漿體總體積

的 11%，但在水膠比 0.7 時則會增加至 37%。Powers^[36]亦曾以水滲透試驗不同水膠比的漿體，其中發現卜管任何水膠比或水化程度的漿體，當其毛細孔隙率大於 20% 以上時，水滲透係數會突然的增加。對水泥水化程度而言，Mindess與Young^[37]亦由水膠比 0.51 水泥漿體水滲透試驗發現，當水泥漿體剛硬固時，其滲透係數為 10^{-5} m/s；當齡期到達 1 天時，滲透係數降為 10^{-8} m/s；齡期為 7 天時，滲透係數為 10^{-11} m/s；28 天則為 10^{-13} m/s，100 天則再降為 10^{-16} m/s，最後 240 天則降為 10^{-18} m/s。其中並認為水滲透係數大於 10^{-13} m/s，毛細孔隙屬於連通的情形，由此Mindess與Young說明各種水膠比漿體達到毛細孔隙無法連通所需的養護齡期，其中水膠比 0.4 為 3 天；水膠比 0.5 則為 28 天；水膠比 0.6 為 6 個月；水膠比 0.7 則為 1 年；水膠比大於 0.7，則認為水滲透係數無法小於 10^{-13} m/s。

2. 飛灰

飛灰為煤燃燒廢氣經由過濾與靜電集塵器收集所得之無機物質^[38]。直徑大約分佈於 1 μm 至 100 μm 之間^[39]。在有水份存在之條件下可與水泥水化生成物中的氫氧化鈣產生波索嵐反應（pozzolanic reaction），因此被稱為波索嵐材料^[40]。其主要反應方程式如下：



式中 CH 為氫氧化鈣， S 為二氧化矽， H 為水。由於卜作嵐材料含有數量頗多的非晶質矽氧化物（amorphous silica），因此在水泥水化過程中會與水化生成物中的 CH 晶體再反應形成緻密的 $C - S - H$ 膠體。對水泥漿體孔隙而言，毛細孔隙尺寸會縮小，孔隙率也因而降低^[41]。

又礦物摻料亦含有相當數量的鋁化合物，鋁化合物與氫氧化鈣（ CH ）晶體反應生成 $C - A - H$ （calcium aluminate hydrates）反應物，如下式所述^[42]：



式中 A 為鋁化合物。反應物 $C-A-H$ 可與硫化物再反應生成鈣釩石。由於此種鈣釩石是在水泥基複合材料硬固之後由硫化物侵入與 $C-A-H$ 反應之生成物，屬於DEF (delay ettringite formation, 遲滯形成的鈣釩石) 的一種，而DEF是在具穩定體積之硬固水泥基複合材料中形成，所以膨脹所產生的應力會造成水泥基複合材料裂縫的產生。因此當有硫化物侵蝕的疑慮時，必需考量礦物摻料鋁含量的最低限制^[43]。

鋁含量雖對水泥基複合材料抗硫化物侵蝕有不力的影響，但對氯離子傳輸而言，當孔隙水中氯離子與鋁化合物進行反應時，會形成穩定的法拉第鹽類 (Friedel's salt)，填充孔隙，減少氯離子擴散路徑^[44-46]。

飛灰的卜作嵐反應與混凝土孔隙水之酸鹼環境有關，相關文獻指出，F級飛灰的卜作嵐反應需在混凝土孔隙水pH大於 13.2 時才會發生^[47-48]。所以飛灰的卜作嵐反應須在水泥水化反應數星期之後有足夠的鹼性氫氧化鈣生成時才會開始，因此飛灰加入混凝土後可以因延後反應而降低水化熱，可大量改善熱裂縫的產生。1993 年Mehta^[47]曾針對F級飛灰替代水泥量多寡進行研究，指出飛灰對混凝土氯離子滲透率有正面之影響。Thomas等^[48]針對養護齡期進行研究發現添加飛灰之混凝土在 28 天或早期齡期時的氯離子擴散改善不大，但在齡期 91 天之後的長期齡期卻有顯著的改善。此與卜作嵐反應較慢有關。亦有研究指出使用適量飛灰可以抑制混凝土因鹼骨材反應所造成的膨脹裂縫，減少氯離子傳輸途徑^[47]。對飛灰使用量而言，雖然對混凝土耐久性有相當助益，但替代水泥量過高會導致力學行為折減，因此一般均會考慮最大替代量。

3. 爐石

高爐爐石為煉鐵高爐爐渣研磨所得，簡稱爐石粉或爐石。依冷卻方式分為水淬爐石及氣冷爐石，爐石主要成分為 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、與 MgO 等和水泥相似，其中以 CaO 含量較高，約為 40% 以上，在適當熱量、濕度與鹼性環境下，可與水產生水化反應，具潛在膠

結能力，因此被視為水泥質材料^[49]。爐石取代水泥時，須仰賴水泥釋放鹼性離子溶液來提供相當之活化能，才能激發其潛在的膠結功能，當水泥水化作用產生出C-S-H膠體及Ca(OH)₂時，爐石便會與Ca(OH)₂反應生成類似卜特蘭水泥之水合物C-(S/A)-H膠體，填充原本Ca(OH)₂所佔之空間，使得毛細孔隙直徑變得更小，使混凝土中孔隙減少，水密性較佳，外界有害性物質如氯離子、硫酸鹽類不易滲入，有助於抗海水及硫鹽侵蝕，並防止鋼筋腐蝕^[49]。

Price^[50]指出，當混凝土的孔隙溶液中含有較少的氫氧根離子時，會導致外加電場電解池所量測到的電流較低；而爐石的化學反應行為會消耗掉孔隙溶液中的氫氧根離子，以致爐石取代部份水泥的混凝土量測到的電流值會較低。

由於爐石之顆粒較水泥顆粒細小，故將爐石適量摻用於混凝土中，可使其原有的顆粒堆積程度更加緻密化。一般水泥之細度約在2800 cm²/g左右，而爐石依需要可提高研磨細度達5000 m²/g或更高，因此添加爐石後之混凝土可以使混凝土孔隙尺寸變小，降低氯離子滲透性，提高抵抗硫化物侵蝕之能力^[51]。

爐石之比重略小於水泥(水泥比重約為3.15；爐石約為2.90；飛灰約為2.10)，且無飛灰燒失量之問題，故爐石以相等重量替代部份水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有之體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，改善了新拌混凝土工作性，又因爐石替代了部份水泥對混凝土的縮變行為亦有相當的改善^[52-53]。

混凝土中以爐石適量替代部分水泥後，因漿體微觀結構較緻密，增加了抵抗有害物質侵蝕、鹼骨材反應及鋼筋之銹蝕能力，使混凝土之耐久性提高。Hogan^[53]研究指出在第一型水泥中加入50% (Al₂O₃的含量約12%) 爐石，與使用第五型水泥所產生的抗硫酸鹽侵蝕能力相當。以同樣百分比的爐石替代第II型水泥，則效果更佳，這是因為用了爐石替代部分水泥使混凝土中C₃A及C₃S之含量降低，又因化學反應使C-(S/A)-H之膠體量增多所致。爐石之反應使混凝土中水泥漿體內之毛細孔隙直徑變小，微觀結構較緻密，因此增

加混凝土之水密性，有效減少鹼骨反應所引起的膨脹及抑制氯離子之滲入，減少鋼筋之銹蝕。又爐石取代的混凝土中，漿體內的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 AlOH^{2+} 、 Si^{4+} 之總量比純水泥漿多，且濃度較高，而這些離子有較低的擴散能力，可以約束氯離子之移動^[54]且 C_3A ，可與氯離子反應生成法拉第鹽，來填充孔隙，減少擴散路徑。

4. 骨材

骨材本身對混凝土耐久性行為的影響，原因在於其雖屬於多孔性材料，但相較於水泥漿體，具有均質與極小孔隙（孔徑大多低於 $0.01\mu\text{m}$ ）之特性，其緻密性遠高於水泥漿體部分。所以骨材本身對氯離子的傳輸而言可視為極低或無法穿透之材料。因此對屬於置入物的骨材而言，對混凝土材料而言，骨材僅能在表面部分與水泥或水產生化學反應，且在骨材與基材之間會有不連續相產生，而這不連續相的稀疏區域沿著骨材表面積圍繞，形成離子快速傳輸路徑，便是所謂界面過渡區。所以混凝土的耐久性亦受到骨材體積量以及與漿體界面之關係所影響。當骨材體積量過大時，骨材顆粒在母體間的距離縮小，導致原本披覆在骨材表面的界面過渡區互相重疊造成連通，並提供離子快速通過的路徑。Winslow等^[55]由水泥砂漿試驗中發現，當骨材單位體積用量大於 $0.5\text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上時，會發現氯離子傳輸係數有突然增加的影響。

2.5 混凝土耐久性與耐磨及耐衝擊之關聯性

當橋墩混凝土表面經含砂水流衝擊後，由於衝擊力與水流中砂石彈性模數均高於混凝土本身，混凝土表面無可避免會產生相當程度的損壞，內部亦會有微裂縫的產生。當微裂縫成長至鋼筋表面時，高速水流中的硫酸鹽或氯離子可能會造成鋼筋腐蝕的產生，使得混凝土失去保護層的作用。

因此本計畫擬將前述各變數含砂水流沖擊試驗後的試體進行加速氯離子試驗，藉以探討混凝土耐久性與抗衝擊能力之關係。一般而言，

利用外加電場加速氯離子擴散是主要評估混凝土耐久性的一種方法。例如 ASTM C1202 的 RCPT 方法，為目前廣泛使用之試驗方法，我國 CNS 亦在去年將其列為試驗規範（CNS 14795），但因其運用於混凝土礦物摻料（飛灰或爐石）的影響可能會導致試驗結果的誤判，因此歐洲地區已有部份國家不使用此方法進行混凝土耐久性的評估。由於橋墩混凝土大多為巨積混凝土，大量礦物摻料使用以成為降低水化熱的方法，所以並不能單以 RCPT 法進行耐久性評估。故本研究團隊於使用 RCPT 電流評估法時，亦使用比色法輔助試驗進行性能說明。除此之外使用自行研發的加速氯離子傳輸試驗（accelerated chloride migration test, ACMT）進行交互比對驗證，以確認混凝土耐久性與抗衝擊能力之關係。ACMT 係直接量測氯離子通過試體的濃度，因此相對於 RCPT 更可反應試體內部孔隙分布情形。

2.6 國內外橋梁墩柱修補材料

1. 混凝土系列

橋墩面層混凝土受限於巨積混凝土水化熱的問題，與國內混凝土工業產製技術，導致其品質會有較橋梁上部結構不佳的情形。然而近年來混凝土產製技術與化學摻劑的發展，使得低水膠比高強度混凝土量產可行性增加。因此混凝土科技也從只考量強度的高強度混凝土（High Strength Concrete, HSC）進步到兼具考量工作性質的高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC），近年來也有超高強度的 New RC 研發工作。然而這些新型態混凝土工藝仍停留在以強度決定材料品質好壞的範疇內，對橋梁下部水工構造物而言，混凝土抗磨耗衝擊的特性要比其他物理性質更為重要。如國內員山子分洪隧道，於混凝土強度要求為 450 kgf/cm^2 以上，在流速 20 m/s 含砂水流水理計算下，每次排洪仍會產生 4.72 cm 厚度的磨耗。而我國橋梁於颱風暴雨後，所面臨的土石流衝擊與高速含砂水流更勝於前者，因此高抗磨耗衝擊混凝土（High Impact and Abrasion-Erosion Resistance Concrete, HIARC）配比設計除了高強度外，仍需有高抗磨

耗衝擊特性的考量^[56]。

於混凝土中加入鋼纖維，可以提高韌性，實驗顯示加入鋼纖維後抗衝擊效果較一般混凝土大為提昇。但施工複雜，難度較高。RPC屬於超高強度混凝土配比設計，其抗壓強度約為2000 kgf/cm²，為法國1990年代因國防需求所開始研發，發展至今亦有許多營建工程應用，如加拿大1992年建立了世界第一座Sherbrooke試驗橋（如下圖2.17）、Gerard Birelli等人使用於軟弱基礎上的冷卻塔（Cooling Towers）之修補，以解決因耐久性而導致之結構問題 [57-58]；日本則有二座以活性粉混凝土建造之人行步道橋Sunyudo Bridge(仙遊橋)與Sakata Mirai Bridge分別預計於2002年4月與10月完工。因此除可運用於結構主體建材外，亦適合當作修補材使用。



圖 2.17 世界第一座RPC材料構造物-Sherbrooke試驗橋^[57]

鑄石混凝土即是以鑄石作為骨材製成的混凝土。既保留了鑄石材料耐磨之特性，又克服了鑄石材料與基礎混凝土黏結不牢亦被卵石擊碎之缺點。四川石棉二級電廠沖沙閘試驗結果，採用鑄石為骨材之混凝土其抗衝磨強度為使用當地骨材之3.3倍。且施工方法與普通混凝土相同，材料費僅為環氧砂漿之1/9，施工速度可提高20倍，因此是一種極有發展潛力之材料，如Kılıç等的研究^[59]。

此外，在混凝土中加入顆粒微小、化學活性高的矽灰，利用其填充性質與波索蘭反應，能夠增加混凝土強度、改善介面結構，從而提昇抗衝磨強度、抗空蝕強度與耐久性。在美國、歐洲、臺灣，已有許多使用矽灰混凝土為抗衝磨材料的工程實例。如Yazıcı Ş., İnan G.u 說明添加30%矽灰的高強度混凝土具有較佳的抗衝磨性^[60]。Horszcz 亦以ASTM C1138試驗與數值模擬說明使用矽灰的高強度混凝土抗衝磨性^[61,62]。國內亦有本團隊劉玉雯教授的相關研究成果^[63]。

2. 高分子有機系列與聚合物系列

在聚合物有機系列材料中，常見的抗衝磨材料有環氧砂漿（混凝土）與不飽和聚脂樹脂砂漿。這些材料的共同特點是強度高、韌性好，具有佳的抗衝擊能力。然而價錢高、有毒性、施工工法複雜、耐久性差為其缺點。聚合物系列中常見的材料有氯-偏水泥砂漿與丙烯酸脂共聚乳液水泥砂漿。這些材料一般較水泥砂漿具有高的抗衝磨性質，然而無毒性、施工較簡易，具有良好的發展潛力，國內外亦有相關之研究。如Moetaz and Ali 探討環氧砂漿的耐磨性^[64]。Sebök and Stránel 探討聚脂樹脂砂漿運用於水利結構物的修補性能^[65]。

不同的抗衝磨材料，具有不同之特性與適用狀況。在選用抗衝磨材料時，需針對該水工結構物之幾何設計、流場狀況與水中懸浮物特性進行分析與評估，俾能決定最適當的材料。若不考慮個案差異，純粹以施工性、經濟性與使用效能來考量，混凝土材料具有相當大的競爭優勢。在材料成本與施工性兩方面，混凝土皆優於其他材料；在使用效能方面，可以從許多成功的工程案例中獲得肯定的答案。且使用者可藉由改變配比與添加摻料等方法來獲得所需的工程性質，這使得混凝土材料更具多變性，相較於其他材料更能面對多元的挑戰。因此，以混凝土為抗衝磨材料，成為國內外學界與工程單位一致的趨勢。

3. 強化纖維修補材料

強化纖維補強材料統稱為FRP（Fiber Reinforced Plastics），其具高拉力強度及彈性係數，可使補強後之結構體承受應力時不致彎曲

或破壞。FRP功能有：(1)承受主要載重；(2)限制微裂紋延伸；(3)提高材料強度與剛性；(4)改善材料抗疲勞、抗潛變性能；(5)提高材料使用壽命與可靠性，FRP材料如圖 2.18 所示^[66]。目前常用之複合材料有GFRC、CFRC等，各種混凝土複合材料特性如表2-2 所示^[67]。

4. 鋼板修補

運用於橋梁墩柱鋼板修補方式依工法選擇有兩種不同型式，分別為貼片工法與捲覆工法，其中貼片工法係在RC墩柱貼附鋼板，並於與混凝土交接面填充Epoxy樹脂，以使與既有構材複合呈一體化結構。捲覆工法則於墩柱四周連續配置鋼板捲，除與既有構材複合呈一體化結構，亦有圍束加勁橋樑墩柱的效果。所使用的鋼板依我國土木水利工程學會「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊」建議材質以SS400 一般結構用鋼規定為原則，若鋼板接頭採用焊接結合時，需確保焊接處達到要求強度。採用貼附工法時，需注意接著劑要達到黏結強度^[68]。

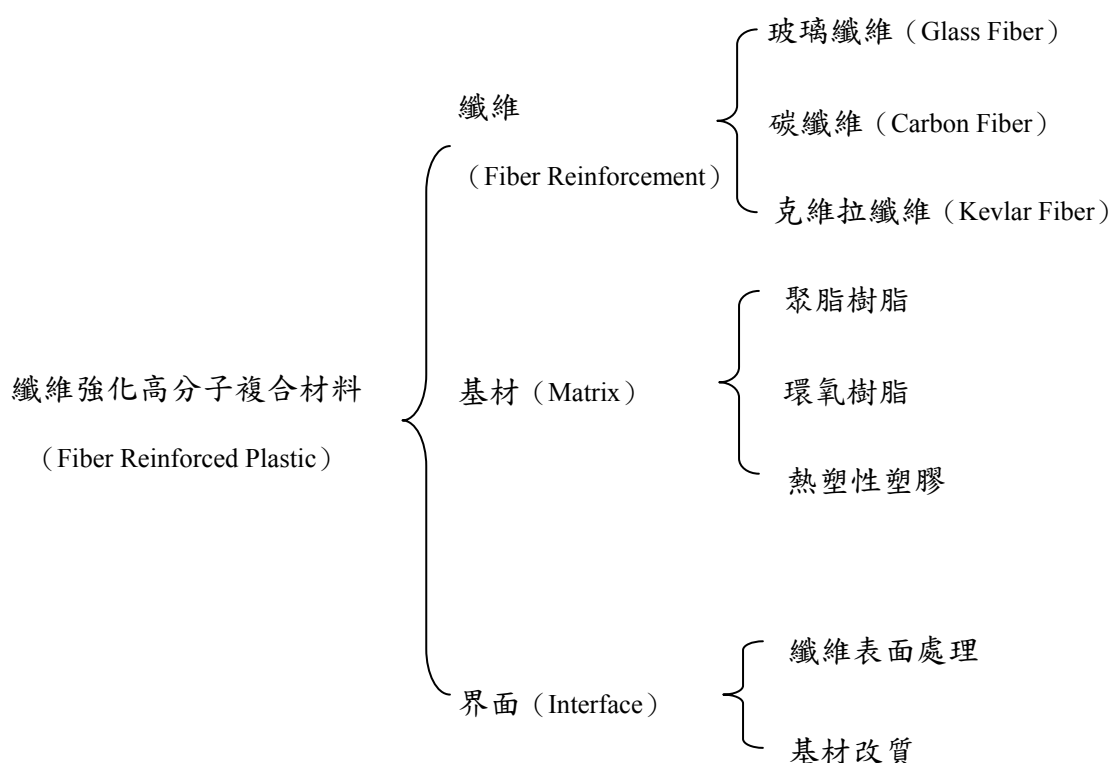


圖 2.18 FRP材料之三種成份^[66]

表 2-2 各種混凝土複合材料特性^[67]

材料名稱 項目	高分子混凝土 (Polymar)	鋼纖維 SFRC	玻璃纖維 GFRC	碳纖維 CFRC
重量	△	○ (輕)	○ (輕)	○ (輕)
強度	△ 1.5~2.0 倍*	◎	○	◎
韌性	△ 40~200 倍*	◎	◎	◎
耐衝擊性	○ 5~10 倍*	◎	◎	◎
接著性	○	○	○	○
防水性	○	○	○	○
耐蝕性	△	○	○	◎
開裂拘束能力	○	◎	◎	◎
收縮性	○	◎ (小)	◎ (小)	◎ (小)
耐火性	△	◎	○	◎
耐熱性	△	◎	○	◎
註：◎優 ○良 △可 *與一般混凝土 (plain concrete) 比較				

2.7 維修補強材料與注意事項

維修補強材料的選擇，並非選擇最強的材料，而是須考量其與基材間的相容性。修補後的結構體在一定的時間內，須能承受因體積改變、化學及電化學影響所產生的應力改變，而不致於有力量鬆弛或劣化現象，且能保持原設計的要求，才能得更佳的耐久性^[68]。維修補強材料與基材間的相容性包括：

1. 體積穩定性

維修補強材料與底層混凝土在溫度及溼度變化下，須能產生一致的體積變化，否則將降低維修補強效果及耐久性。而影響體積穩

定性的因素包含收縮、膨脹、彈性模數及潛變。因此選擇維修補強材料，應以具類似底層材料之乾縮性質為佳。

2. 化學及電化學相容性

修補材料與水泥，或混凝土基材性質，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。另外氣候環境的作用，可能使鋪面底部結露，水份將挾帶著氯離子移動到鋪面頂端，致使修補區域含有氯離子，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，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。

3. 滲透一致性

位於維修補強區域或失去鍵結部位的貫穿性裂縫，將大幅減低維修補強材料的功能，且從維修補強面上以微裂縫連結較大裂縫情況下，將降低維修補強成效及耐久性。

4. 介面鍵結性

介面鍵結力是修復單元彼此相互依存的主要因素，良好的介面鍵結力，可改善修補復合系統結構。當修補混凝土結構物時，在修補材料澆置前，黏結面須先經過一些處理，藉以清除表面毀損的混凝土並增加粗糙度以利黏結。黏結面的處理方法，主要分為物理方法與化學方法，物理方法分為噴射處理與機械處理兩類；而化學方法常用的是酸浸蝕法。

2.8 臺灣地區橋梁墩柱混凝土設計資料

依據交通部 98 年發布公路橋梁設計規範第 12 章對混凝土設計強度說明，於一般區域橋樑混凝土設計抗壓強度需於 245 kgf/cm^2 以上；若為極嚴重鹽害區，則設計抗壓強度為 350 kgf/cm^2 以上^[69]。而農委會 94 年發布農田水利施工規範第 03053 章對橋梁下部結構的規定要求為 245 kgf/cm^2 。若用於溢洪道耐磨層則為 280 kgf/cm^2 ^[70]。臺灣地區橋

梁墩柱混凝土設計大致與預拌混凝土廠的產製品管能力有關，在 1990 年以前的橋梁，設計強度大多為 210 kgf/cm^2 ，然而此設計強度所提供的耐磨與耐久性，已不符我國河川的水文條件下的要求，因此在 1990 至 2000 年設計強度提升至 245 kgf/cm^2 。而 2000 年後高性能混凝土(high performance concrete)產製能力成熟，因此設計強度均以提升至 350 kgf/cm^2 。表 2-3 為本研究所蒐集之混凝土設計強度資料。

工作性設計上，交通部公路橋梁設計規範對混凝土工作性僅說明為維持混凝土之施工性，於低水膠比混凝土澆置時，可添加適度之強塑劑。而交通部公路工程施工規範第 6 章規定混凝土之工作性或坍度，按工程圖說規定或經工程司按構造物之尺寸及施工情況核定之。但其下說明又指出水中澆置混凝土或流動化混凝土的坍度應介於 15 至 27 公分^[69]。若以農田水利施工規範第 03053 章，坍度設計為 10 至 15 公分，但其條文亦說明若圖說另有標示或監造單位指示，則可改變坍度設計值^[70]。表 2-4 亦將 2005 年經濟部水利署發布的施工規範第 03310 章「結構用混凝土」中對混凝土參考建議配比詳列於上。表中並已將設計強度提升至 420 kgf/cm^2 ^[71]。

表 2-3 臺灣地區橋梁墩柱混凝土設計強度

橋梁名稱	橋墩混凝土設計強度		竣工年度
	(kgf/cm^2)	MPa	
臺 3 線舊烏溪橋	210	20.6	1983
宜專一線公路多望橋	210	20.6	1983
台 11 線黑髮橋	210	20.6	1993
台 13 線義理橋	210	20.6	---
台 3 線武嶺橋	240	23.5	1994
台 13 線舊后豐大橋	210	20.6	1998
台 11 線中華大橋	245	24.0	1999
台 61 線朴子溪橋	240	23.5	1999
台 27 甲線六龜大橋下部結構修復工程	350	34.3	2005

橋梁名稱	橋墩混凝土設計強度		竣工年度
	(kgf/cm ²)	MPa	
國道 6 號南投國姓高架橋	350	34.3	2008
西濱快速公路七股溪側車道景觀拱橋	280	27.4	2008
中山高二仁溪河川橋補強	350	34.3	2009
古蹟北港溪石橋災害復建	350	34.3	2009

表 2-4 混凝土參考配比(使用飛灰爐石，28 天設計強度)^[71]

設計強度	目標強度	坍度	D _{max}	水膠比	單位水量	水泥	飛灰	爐石	粗骨材	細骨材	強塑劑
(kgf/cm ²)		(mm)	(mm)	(W/B)	(kg/m ³)						
140	161	150	25	0.750	180	168	36	36	1040	842	3.960
				0.712	175	172	74	0	1040	841	4.178
175	201	150	25	0.704	175	174	37	37	1040	848	3.729
				0.651	175	188	81	0	1040	819	4.570
175	201	75	40	0.735	175	167	36	36	1100	801	3.480
				0.688	175	178	76	0	1100	774	3.226
210	242	150	25	0.649	170	183	39	39	1040	847	4.453
				0.594	170	200	86	0	1040	815	5.008
210	242	75	40	0.649	170	183	39	39	1100	801	4.060
				0.594	170	200	86	0	1100	770	3.864
280	322	150	25	0.546	170	218	47	47	1040	802	5.449
				0.505	170	236	101	0	1040	769	4.713
350	403	150	25	0.472	171	254	54	54	1040	755	5.072
				0.442	171	271	116	0	1040	720	5.029
420	483	150	25	0.419	170	284	61	61	1040	718	5.680
				0.395	170	301	129	0	1040	681	5.595

第三章 混凝土抗衝擊、抗磨耗、耐久性研究試驗計畫

3.1 試驗參數

本研究第一年主要工作利用試驗研究探討混凝土基本組成材料與抗磨耗、抗衝擊及耐久性之間的關係，並藉由實驗數據的分析回饋，建立混凝土性質與水流衝擊、磨損劣化情形及耐久性間之關係資料庫。因此試驗參數分別為水膠比、粗骨材體積含量、以及爐灰替代量。各組試體參數配置與編號，如表 3-1 所示。其中在變數設定上，本研究經過相關文獻整理後發現提升抗壓強度會使混凝土抗磨耗與抗衝擊性增加，因此本研究將混凝土水膠比變數設定為強度較高的 0.30 至 0.45。而粗骨材性質亦影響混凝土耐磨損衝擊性質，考量工程實務可行性，因此本研究變動粗骨材的體積用量來探討對性質的影響。而以礦物摻料替代部分水泥除了有節能省碳作用外，適當的替代量亦對混凝土強度與耐久性有提升的作用，所以本研究以工程常用的 30%高爐石粉與 70%飛灰混合的爐灰做為研究對象。下述為變數範圍。

1. 水膠比：0.30、0.35、0.40、與 0.45 共 4 種。
2. 粗骨材體積含量： $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、與 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 共 3 種。
3. 爐灰替代量：30%與 50%共 2 種。

試體編號說明如下：第一個英文字母A、B、C與D分別為水膠比 0.30、0.35、0.40 與 0.45；第二個數字 3 與 5 分別為爐灰替代量 30%與 50%；第三個英文字母X、Y與Z分別為每單位混凝土粗骨材體積用量 $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、與 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

表 3-1 試驗規劃與試體編號

試驗參數 試體編號	水膠比	粗骨材體積含量 (m^3/m^3)	爐灰替代量 (%)
A3X	0.30	0.30	30
B3X	0.35	0.30	30
C3X	0.40	0.30	30
D3X	0.45	0.30	30
A3Y	0.30	0.35	30
B3Y	0.35	0.35	30
C3Y	0.40	0.35	30
D3Y	0.45	0.35	30
A3Z	0.30	0.40	30
B3Z	0.35	0.40	30
C3Z	0.40	0.40	30
D3Z	0.45	0.40	30
A5Y	0.30	0.35	50
B5Y	0.35	0.35	50
C5Y	0.40	0.35	50
D5Y	0.45	0.35	50

3.2 試驗材料

本計畫混凝土組成材料包含水、摻劑、水泥、飛灰、爐石、粗骨材、與細骨材等，下述為其基本物理性質。

1. 水

混凝土試體拌合所用的水為符合 CNS 13961 與 ASTM C94-00 規範所規定的混凝土拌合用水，一般常使用自來水，其相關性質如表 3-2 所示。

表 3-2 拌合水試驗結果(ppm)

試驗項目	含量	試驗標準 (CNS 13961)
氯離子	0.35	250 ppm 以下
硫酸根離子	0.20	3,000 ppm 以下
鹼性物質 ($\text{Na}_2\text{O} + 0.66\text{K}_2\text{O}$)	0.31	600 ppm 以下
總固體含量	0.01	---

2. 摻劑

本計畫所使用的化學摻劑為 PCA 系統（羧酸系強塑劑），比重 1.1。

3. 水泥

本計畫試驗採用臺灣水泥公司所生產的卜特蘭第一型水泥，比重為 3.15，表 3-3 與表 3-4 為其物理性質與化學成分。

表 3-3 本研究使用水泥物理性質

試驗項目	試驗標準 (CNS 61)	試驗值
細度：Fineness (cm^2/g)	Min: 2800	3520
健度：Soundness (%)	Max: 0.80	0.05
7 天抗壓強度(kgf/cm^2)	Min: 197	312
28 天抗壓強度(kgf/cm^2)	Min: 281	412
初凝：Initial set (hr: min)	Min: 0:45	3:10
終凝：Final set (hr: min)	Max: 8:00	5:30

資料來源：臺灣水泥公司

表 3-4 水泥之物理與化學性質

試驗項目	試驗標準 (CNS 61)	試驗值
二氧化矽(SiO_2)	---	20.89
氧化鋁(Al_2O_3)	---	5.61
氧化鐵(Fe_2O_3)	---	3.13
氧化鈣(CaO)	---	63.87
氧化鎂(MgO)	Max: 6.00	2.93
燒失量(L.O.I)	Max: 3.00	0.73
不溶殘渣(Ins. Res)	Max: 0.75	---
矽酸三鈣(C_3S)	---	50.40
矽酸二鈣(C_2S)	---	22.20
鋁酸三鈣(C_3A)	---	9.57
鋁鐵酸四鈣(C_4AF)	---	9.51

資料來源：臺灣水泥公司

4. 飛灰

本研究所採用之飛灰取自臺灣電力公司，依 CNS 3036 分類為 Class-F 等級的飛灰，比重為 2.26，其化學成分組成如表 3-5。

表 3-5 飛灰主要化學成分

化學組成	平均值(%)	試驗標準 (CNS 3036)
SiO_2	50.00	三者合計大於 70%
Al_2O_3	28.41	
Fe_2O_3	6.98	
CaO	5.99	---
MgO	1.39	---
K_2O	0.13	---
Na_2O	0.09	---

化學組成	平均值(%)	試驗標準 (CNS 3036)
SO ₃	0.47	小於 3%
燒失量	4.62	小於 6%
卜特嵐活性指數(7 天)	86.8	大於 75%
卜特嵐活性指數(28 天)	97.8	大於 75%

資料來源：臺灣電力公司

5. 爐石

本計畫使用之爐石粉為中聯爐石股份有限公司所生產 4000 型，比重為 2.82，其化學成分組成如表 3-6。

表 3-6 爐石粉主要化學成分

化學組成	平均值(%)	試驗標準 (CNS 12223)
SiO ₂	34.28	38%以下
Al ₂ O ₃	13.52	16%以下
Fe ₂ O ₃	0.39	1%以下
CaO	42.39	37%以上
MgO	5.95	10%以下
SO ₃	0.52	3%以下
比表面積(cm ² /g)	4390	---
卜特嵐活性指數(7 天)	84.8	---
卜特嵐活性指數(28 天)	116.5	---

資料來源：中聯爐石股份有限公司

6. 粗骨材

本計畫混凝土所使用之粗骨材有兩種分別為三分碎石與六分碎石，其產地均為我國宜蘭河域。其中三分碎石比重(SSD)=2.73，吸水率=0.69%，篩分析試驗結果如表 3-7 所示，其粒徑級配分布圖如

圖 3.1 所示。六分碎石比重(SSD)=2.65，吸水率=0.51%，篩分析試驗結果如表 3-8 所示，粒徑級配分布圖如圖 3.2 所示，三分石與六分石的洛杉磯磨損試驗如表 3-9 所示。

表 3-7 三分碎石之篩分析試驗結果

篩 號	遺留重量 百分比 (%)	累積重量 百分比 (%)	通過重量 百分比 (%)	ASTM C33 試驗標準 (%)
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	100.00	----
3/4" (19.05 mm)	0.00	0.00	100.00	----
1/2" (12.7 mm)	32.33	32.33	67.67	100
3/8" (9.5 mm)	34.34	66.67	33.33	85-100
NO.4 (4.75 mm)	31.83	98.49	1.51	10-30
底 盤	1.51	100.00	0.00	----

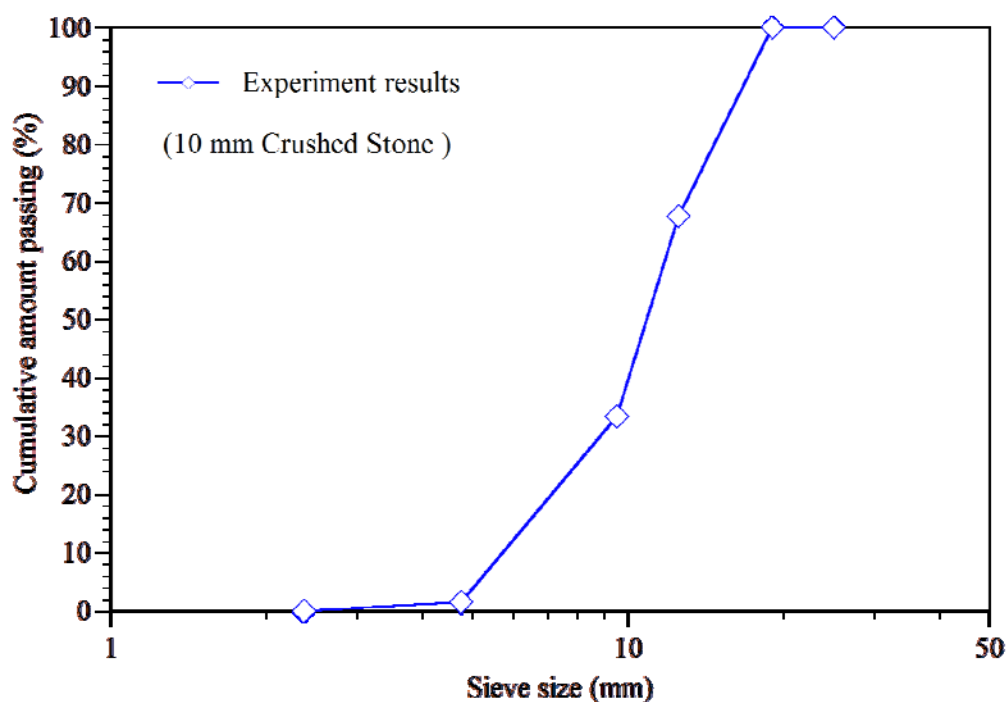


圖 3.1 三分碎石之級配級配分布圖

表 3-8 六分碎石之篩分析試驗結果

篩 號	遺留重量 百分比 (%)	累積重量 百分比 (%)	通過重量 百分比 (%)	ASTM C33 試驗標準 (%)
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	100.00	100
3/4" (19.05 mm)	32.06	32.06	67.94	90-100
1/2" (12.7 mm)	67.23	99.30	0.70	----
3/8" (9.5 mm)	0.50	99.80	0.20	20-55
NO.4 (4.75 mm)	0.00	99.80	0.20	0-15
底 盤	0.20	100.00	0.00	----

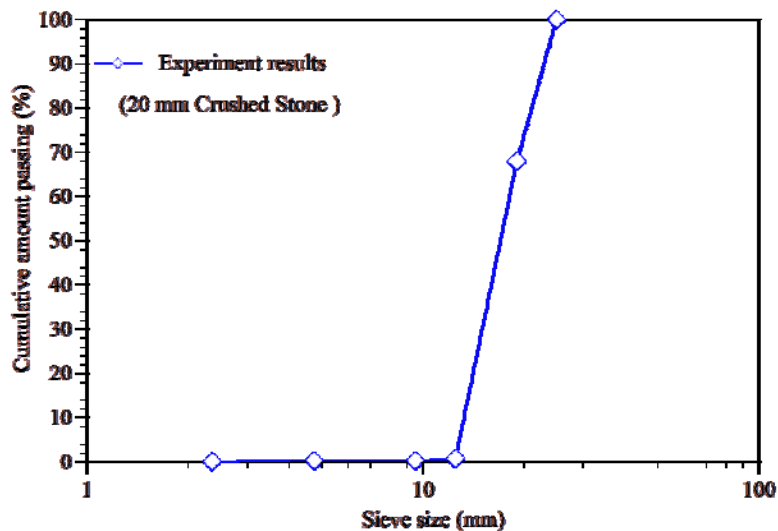


圖 3.2 六分碎石之級配級配分布圖

表 3-9 粗骨材洛杉磯磨損試驗結果

磨損率	三分石	六分石	ASTM C131 試驗標準
(%)	19.42	16.98	50 以下

本研究為使粗骨材符合 ASTM C33 級配要求，因此採用 70%六分石與 30%三分石重量比的混合方式。表 3-10 為混合後粗骨材級配表。

表 3-10 粗骨材混合後級配結果

篩 號	三分石通過 重量百分比 (%)	六分石通過 重量百分比 (%)	混合後通過 重量百分比 (%)	ASTM C33 試驗標準 (%)
1" (25.4 mm)	100.00	100.00	100.00	100
3/4" (19.05 mm)	100.00	67.94	90.38	90-100
1/2" (12.7 mm)	67.67	0.70	47.58	----
3/8" (9.5 mm)	33.33	0.20	23.39	20-55
NO.4 (4.75 mm)	1.51	0.20	1.11	0-15
底 盤	0.00	0.00	0.00	----

7. 細骨材

本計畫所使用之細骨材有兩種分別為粗砂與細砂，其中粗砂產地為我國宜蘭河域，細砂為中國福建河域。粗砂比重(SSD)=2.68，吸水率=1.28%，篩分析試驗結果如表 3-11 所示，其粒徑級配分布圖如圖 3.3 所示。細砂比重(SSD)=2.60，吸水率=1.12%，篩分析試驗結果如表 3-12 所示，粒徑級配分布圖如圖 3.4 所示。

表 3-11 粗砂之篩分析試驗結果

篩 號	遺留重量 百分比 (%)	累積重量 百分比 (%)	通過重量 百分比 (%)	ASTM C33 試驗標準 (%)
3/8" (9.5mm)	0.00	0.00	100.00	100
NO.4 (4.75mm)	2.65	2.65	98.35	95-100
NO.8 (2.36mm)	28.19	30.83	81.34	80-100
NO.16 (1.18mm)	24.16	54.99	66.25	50-85
NO.30 (600μm)	18.92	73.91	44.26	25-60
NO.50 (300μm)	13.37	87.28	14.21	10-30
NO.100(150μm)	7.15	94.42	4.06	2-10
底 盤	5.58	100.00	0.00	----

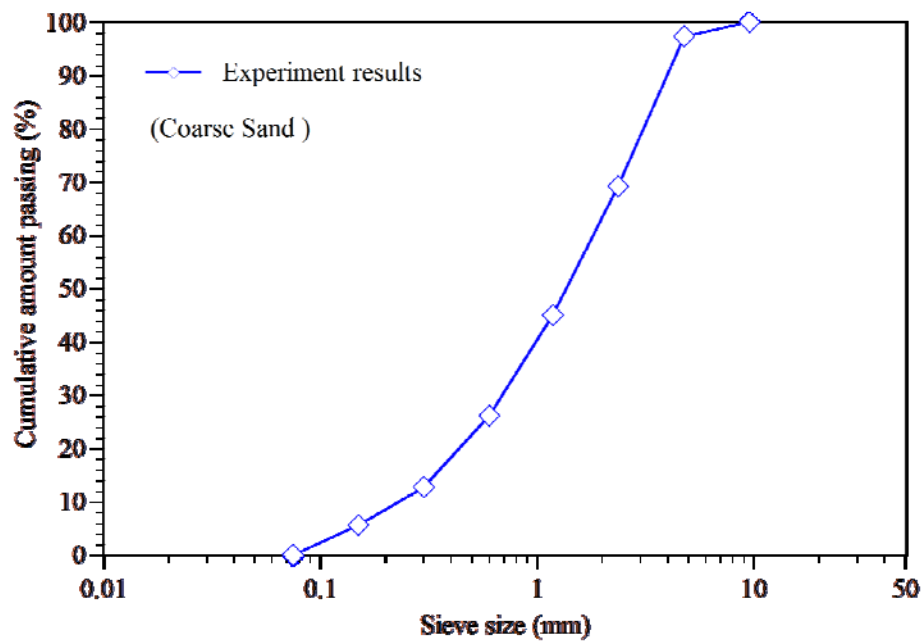


圖 3.3 粗砂之級配級配分布圖

表 3-12 細砂之篩分析試驗結果

篩 號	遺留重量 百分比 (%)	累積重量 百分比 (%)	通過重量 百分比 (%)	ASTM C33 試驗標準 (%)
3/8" (9.5mm)	0.00	0	100.00	100
NO.4 (4.75mm)	0.14	0.14	99.86	95-100
NO.8 (2.36mm)	0.27	0.41	99.59	80-100
NO.16 (1.18mm)	1.61	1.88	98.12	50-85
NO.30 (600μm)	26.60	28.48	71.52	25-60
NO.50 (300μm)	55.08	83.56	16.44	10-30
NO.100(150μm)	86.8	98.21	1.79	2-10
底盤	1.79	100.00	0.00	----

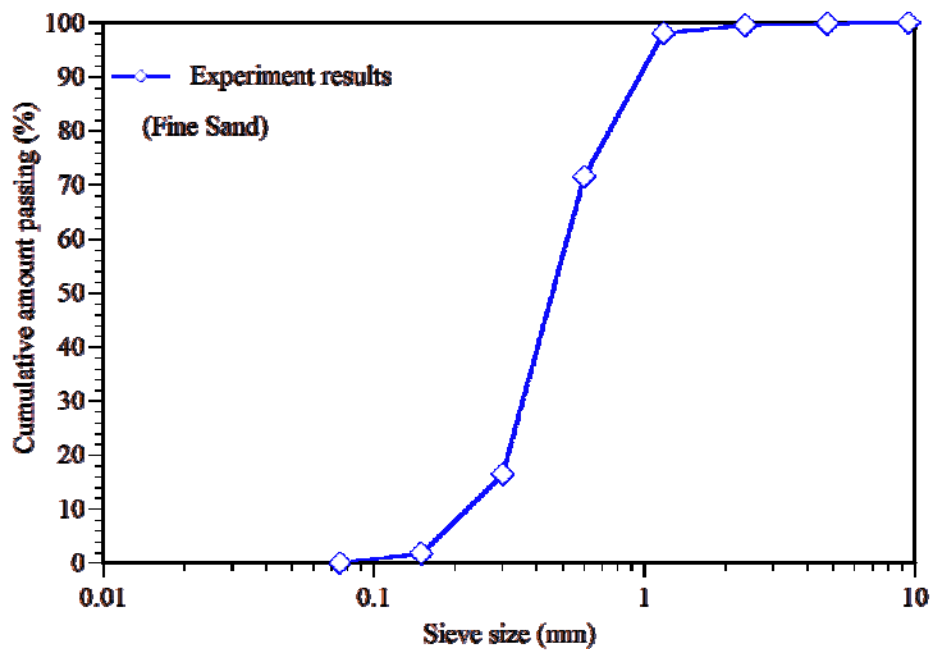


圖 3.4 細砂之級配級配分布圖

本研究為使細骨材符合 ASTM C33 級配要求，因此採用 60%砂與 40%砂重量比的混合方式。表 3-13 為混合後細骨材級配表。

表 3-13 細骨材混合後級配結果

篩 號	粗砂通過 重量百分比 (%)	細砂通過 重量百分比 (%)	混合後通過 重量百分比 (%)	ASTM C33 試驗標準 (%)
3/8" (9.5mm)	100.00	100.00	100.00	100
NO.4 (4.75mm)	97.35	99.86	98.25	95-100
NO.8 (2.36mm)	69.17	99.59	80.12	80-100
NO.16 (1.18mm)	45.01	98.12	64.13	50-85
NO.30 (600μm)	26.09	71.52	42.44	25-60
NO.50 (300μm)	12.72	16.44	14.06	10-30
NO.100(150μm)	5.58	1.79	4.22	2-10
底盤	0.00	0.00	0.00	----

3.3 試驗方法

3.3.1 新拌性質試驗

1. 坍流度試驗及坍流度 50cm時間(T_{50})試驗

高流動性混凝土是一種流動性顯著較高，且於新拌塑性期間不致析離的混凝土。本計畫於混凝土拌合後，依 CNS 14842 進行坍流度試驗(圖 3.5)，其試驗步驟如下：

- (1)坍度錐內側及表面用濕布擦拭後置於水平平板上，平板表面亦須先用濕布擦拭。
- (2)將混凝土分 3 層填充入模，每層以搗棒均勻搗實 25 下，
- (3)將充滿混凝土的坍度錐上面用刮刀刮平後，清理錐外及平板，將坍度錐垂直向上拉起，拉上 300mm 的時間約 2~3 秒，待混凝土停止流動後，量測擴散圓形的最大直徑及與其垂直的另一直徑，兩者之平均及即為坍流度值（混凝土的坍流度如偏離圓形，當兩直徑相差 50mm 以上時，則須以同一盤試料在做一次試驗），而混凝土中央部分的坍下量即為坍度值，並用目視觀察混凝土有無材料分離的現象。
- (4)同時記錄自拉起坍度錐開始至混凝土流到 500mm 的時間，並用碼表測量到 0.1 秒精度。

坍流度試驗需注意之處為，在量測混凝土自由擴張直徑及混凝土擴散直徑 50cm 所經歷的時間時，應同時檢視粗骨材是否被漿體帶至最外緣，如有骨材下沉、堆積、或漿體析離的現象，則為無效試驗，應逕行調整配比，重新試驗；若有效坍流度值如超出參考值範圍，表示應就配比之漿量、水膠比進行調整，以獲得合理之混凝土流動性。



圖 3.5 新拌混凝土坍度試驗

2. 含氣量與單位重試驗

含氣量依 CNS 9661 進行試驗，試驗步驟如下：

- (1)將混凝土以等層澆注於測筒內(圖 3.6)，以搗插或振動之方法搗實每一層混凝土，刮平最後一搗實層，並清理測筒表面，使其能密合，並加以秤重，並除以測桶體積 (0.006 m^3) 以求得單位重。
- (2)儀器裝妥後，關閉空氣室與測筒之通氣閥，並打開通往上蓋之兩個小龍頭。用橡膠注射器從一個小龍頭注水至另一小龍頭溢出水為止，輕輕振動氣量計直至所有空氣由同一小龍頭溢出為止，之後將其關閉。
- (3)關閉空氣室上之洩氣閥，並泵送空氣進入直到壓力表指針在開始之壓力線上，暫停一會，讓壓縮之空氣冷卻至正常溫度，視需要打進或洩出空氣，讓壓力計指針穩定在開始之壓力線面，輕拍壓力計關閉通往蓋子上之兩個小龍頭，打開空氣室與測筒間之通氣閥。利用橡膠槌拍擊測筒之側面，以減少局部約束。輕拍壓力計使指針穩定，並測讀壓力計度盤上之空氣百分率，打開蓋子前先打開兩個小龍頭，以解除壓力，避免清水噴出。此空氣含量即為混凝土試樣視空氣含量。



圖 3.6 含氣量測筒

3.3.2 基本力學性質試驗

1. 抗壓強度量測

抗壓強度試驗依據 ASTM C39 (CNS 1232)進行。實驗儀器主要為 MTS 100 噸萬能材料試驗機(圖 3.7)，此儀器為美國 MTS 公司製造，自動封閉回路循環伺服油壓控制系統 (Servo-control closed-loop system)，該系統由油壓機、驅動軸(Actuator)、100 噸荷重計(Load cell)、測位移的 LVDT 及可外接電腦或手動調整下達命令的主控制箱(Microconsole)所組成，控制箱可以控制荷重(Load control)、位移(Displacement control)、或應變(Strain control)之任一形式進行試驗。儀器精度為每 10 伏特之電壓可精確到 0.001 伏特，載重之範圍控制匣量測範圍為 100 kN ~ 1 MN、位移範圍控制匣量測範圍為 10 mm ~ 100 mm。抗壓強度計算如下：

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2} \quad \text{.....} \quad (3-1)$$

式中， σ ：為材料抗壓強度

P ：為試驗機所示最大載重

r ：為試體半徑



圖 3.7 MTS 萬能材料試驗機

2. 彈性模數量測

以 MTS 萬能材料試驗機進行單軸抗壓試驗時，在試體上接上環型應變架與兩個高感度電阻式變位計(LVDT)，架設如圖 3.8 所示，並與多功能資料收集器連接，在抗壓實驗進行的同時，便可由多功能資料收集器將混凝土試體受載的變形歷程記錄下來，由載重及應變的關係可求得應力-應變曲線。



圖 3.8 彈性模數試驗架設

3. 劈裂試驗

劈裂試驗(採 CNS 3801 之規定)之目的在於間接測試試體抗拉能力。試驗方法為製作 $\Phi 10 \times 20$ cm 之標準圓柱試體，待硬固後拆模(約 1 天)，隨即放入養護室在相對溼度 R.H. 100%，溫度 23°C 下進行養護，再於達到試驗齡期時將試體取出，置於 MTS 萬能材料試驗機上，直接於圓柱體側邊施以逕向壓力，加載速率為 0.002 mm/sec，以計算試體抗張應力強度。

計算試體之抗張應力強度如下：

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3-2)$$

式中， T ： 抗張應力強度 (kgf/cm²)

P ： 試驗機所示之最大載重 (kgf)

L ： 圓柱體長度 (cm)

D ： 圓柱體直徑 (cm)

3.3.3 水中磨損及含砂水流沖擊試驗

1. 水中磨耗試驗

磨耗實驗採用 ASTM C1138 水中磨耗試驗法來模擬水工結構混凝土遭受之水中磨擦磨耗行為。試驗的原理為將試體置於水槽中，利用轉速 1200±100 rpm 之攪拌葉片旋轉以產生水流，帶動大小數目不一的鋼珠運動，由轉動之水流模擬實際之流水作用，而以鋼珠運動時對試體造成的摩擦損耗來模擬水中挾帶物對混凝土表面的磨損作用。

(1) 磨耗試驗機

試驗機之裝置與尺寸如圖 3.9 所示。鋼珠尺寸與數目分別是：直徑 1 in. 之鋼珠 10 顆、直徑 3/4 in. 之鋼珠 35 顆、直徑 1/2 in. 之鋼珠 25 顆，鋼珠的總重量(1,530 ~ 1,900 g)與允許損失重量，規範

皆有詳細規定。本試驗所使用鋼珠之總重約 1,865g，為維持試驗之精確，避免初始條件不一的狀況，當鋼珠總重減少約 50 g 時，即更換新鋼珠以保持鋼珠總重的固定。此外，採用精度為 1 g 之電子秤。以量測試體之空器中重與水中重。

(2)試驗方法

- 澆製直徑 30 cm，厚 10 cm 之圓盤狀試體，拆模後置於相對溼度 R.H.100%、溫度 23°C 之養護室內。至試驗齡期達到的前一天，將試體取出浸泡於水中，使其達到飽和狀態。
- 試驗前先秤試體空氣中與水中的重量，以計算初始體積。
- 以試體底面，即較為光滑之表面為被磨耗面，將試體放入試驗機中，加水至攪拌葉頂部，並放入固定鋼珠數量。
- 啟動馬達使攪拌葉片旋轉。並於每運轉 12 小時後取出試體，量測磨耗後試體空氣中與水中的重量；重複進行試驗至 48 小時。(規範規定實驗時間為 72 小時，而大部分試體於磨耗 48 小時候已可看出線性之磨耗趨勢；若有趨勢不為線性者，則再延長時間至 72 小時)。

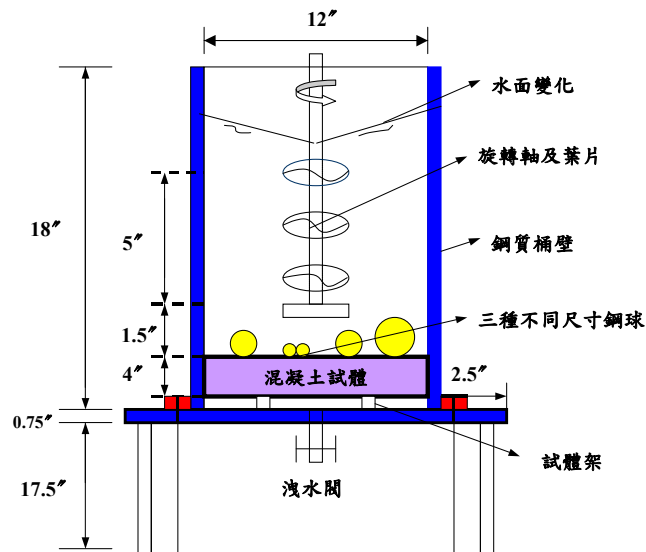


圖 3.9 ASTM C1138 水中磨損試驗測儀

(3)分析方法

a.計算磨耗後之試體體積

$$V_t = \frac{W_{air} - W_{water}}{G_w} \dots\dots\dots (3-3)$$

式中， V_t ：試體磨耗後之體積 (cm^3)

W_{air} ：試體在空氣中重量 (g)

W_{water} ：試體在水中重量 (g)

G_w ：水的比重

b. 求磨耗後試體損失之體積 V_{loss} (Abrasion loss)

$$V_{loss} = V_i - V_t \dots\dots\dots (3-4)$$

式中， V_{loss} ：t時間後的磨損體積量 (cm^3)

V_i ：試體最初體積 (cm^3)

V_t ：試體磨耗後之體積 (cm^3)

混凝土試體之抗磨耗力以磨耗損失體積為指標，即抗磨耗力愈大其損失體積愈少。在此試驗架構下，模擬的狀況為水中挾帶物強度大於混凝土材料的情況，而試驗的結果為一相對關係而非絕對關係。

2. 含砂水流沖擊試驗

混凝土表層因水與砂的共同作用，所造成的沖擊損壞是水工結構物磨耗破壞的主要因素之一。但由於現行之標準試驗方法均無法模擬臺灣河川陡短水急，且含大量泥、砂及礫石對水工混凝土造成衝擊破壞的特殊情形。因此，本研究團隊以自行開發之含砂水流沖擊試驗儀來模擬水工混凝土之磨耗行為。

(1)儀器設計

本設備之設計構想為藉由馬達與葉片，將一定比例之砂混和水流均勻混合，使砂混合水流以高速衝擊混凝土試體，再觀察與量測混凝土受沖擊情形。儀器設計構想相當簡單，但由於砂石比重約在 2.5 以上，因此需要相當大的能量與速度才能將水中砂帶起而不下沉，並以高速沖擊混凝土試體。水中砂石沖擊試驗儀器之外觀與內部情況如圖 3.10 所示；儀器主體構造及尺寸示意圖則如圖 3.11 所示。水槽四個角落配置有四個馬達與四支葉片，可調整角度之試體置放台，與抽水馬達等，水流沖擊速度約為 12m/s。

(2)試驗方法

將 20cm×20cm×20cm 試體置於含砂水流沖擊試體平台上。試驗前先將 200kg 的砂倒入沖擊機內，再注入約 0.87m³ 的水，使水中含砂量為 230kg/ m³。開啟沖擊機前後之四個轉動馬達，利用轉動馬達帶動沖擊機內的四個葉片，攪拌沖擊機內的水與砂。待沖擊機內部之水與砂混合均勻後，即可進行試驗。試驗進行間，由於馬達不斷運轉使葉片攪拌含砂水流，將使水槽中之水溫增加 3~5℃，但增加之水溫不多，可忽略其對混凝土沖擊行為之影響。此外，由於含砂水流高速的沖擊混凝土試體，砂礫持續與混凝土試體碰撞，將使得砂礫產生顆粒磨損之現象。因此，為避免影響含砂沖擊水流之能量，於每次試驗結束後，將沖擊機內的砂清洗乾淨，並於下次試驗時注入具有相同性質之砂礫。每個試體之試驗總時間為二小時。試驗後利用排水體積法量測試體沖擊前後之體積變化，從而計算試體單位時間之體積損耗量 $V(\text{cm}^3)/H(\text{hr})$ 。試驗過程中，同時觀察混凝土表面變化情形並以照片記錄之。



圖 3.10 含砂水沖擊試驗儀

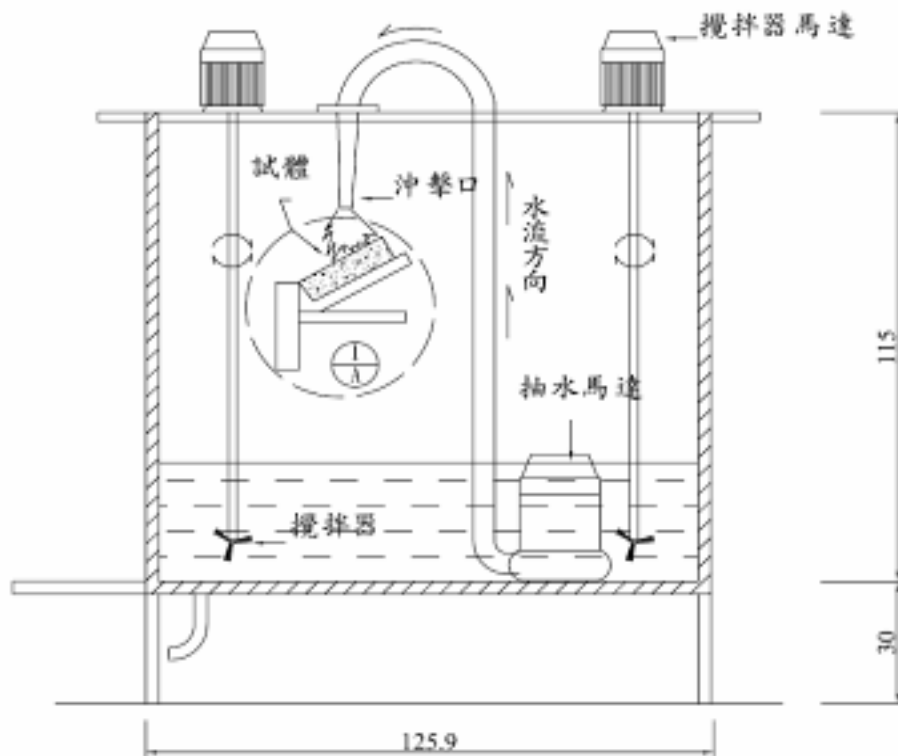


圖 3.11 含砂水流沖擊試驗儀內部示意圖

(3)分析方法

衝擊磨耗試驗之分析方法與前節之方法相同，亦即以磨耗損失體積為評估混凝土抗衝擊之指標。

3.3.4 抗衝擊試驗

依據 ACI 544 之試驗方法進行抗衝擊試驗，試驗原理為利用鋼球落下之位能，進行混凝土之撞擊試驗；開裂模儀器如圖 3.12 所示。衝擊試驗方法為將試驗儀器放置於堅硬且平整之地面上，避免在試驗時儀器因衝擊力作用而下陷。試體直徑為 15cm，試體高度為 5 ± 0.25 cm。試體表面中心需平整使圓球在傳遞衝擊能量時能均勻分散。而整隻夯錘固定在開裂模儀器上即可，且需預留一些動線空間。撞擊時使夯錘提高至落距高 45cm，再自由落體落下。每撞擊 10~50 次，觀察試體有無產生開裂，並紀錄混凝土試體破裂時之撞擊次數。

試體每一次所承受之撞擊能量(焦耳)以公式 3-5 表示之。經計算後可得每次試體所承受的撞擊能量為 20J。

每一次撞擊能量(焦耳)為：

$$1\text{Joule(焦耳)} = 1\text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}^2$$

$$E = m \times g \times h \dots\dots\dots (3-5)$$

E：位能(焦耳) g:重力加速度(m/sec^2)

m:質量(kg) h:高度(m)

代入(式 3-5)得

$$4.542\text{kg} \cdot 9.81\text{m}/\text{sec}^2 \cdot 0.450\text{m} \doteq 20\text{ Joule}$$

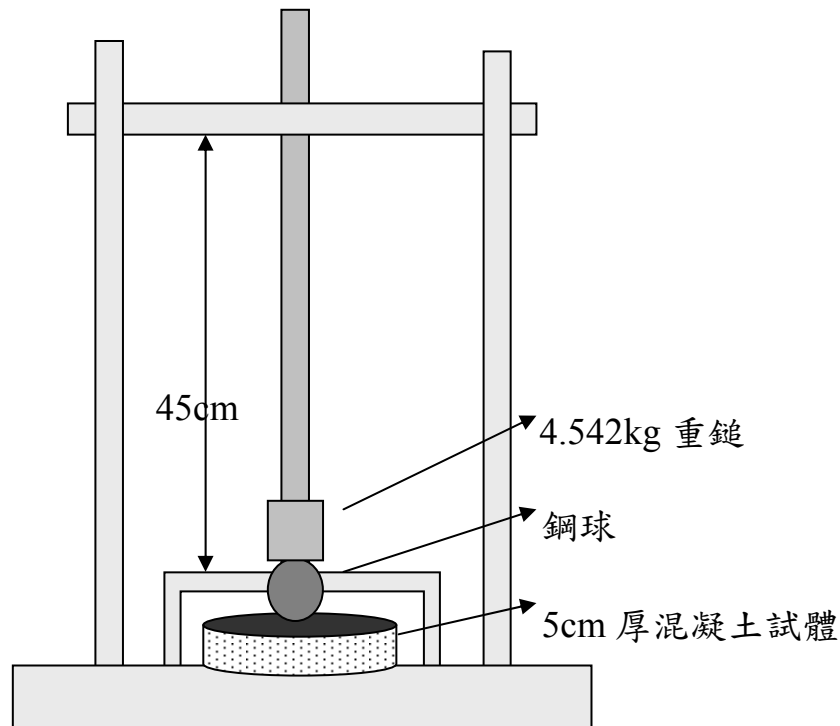


圖 3.12 開裂撞擊儀器

3.3.5 耐久性試驗

耐久性試驗部分所採用之混凝土試體，將與抗磨耗、抗衝擊試驗之試體相同並同時拌製。為探討混凝土耐久性，擬訂於試體 91 天齡期後進行各項耐久性試驗。本計畫中混凝土耐久性試驗主要含：(1)快速氯離子滲透試驗、(2)加速氯離子傳輸試驗兩大項，其試驗方法與步驟及分析方法分述於下。

1. 快速氯離子滲透試驗

CNS 14795 之 RCPT 試驗方法主要分為試體之前處理與 RCPT 試驗兩部分，本計畫將增加氯離子含量量測之輔助試驗。試驗方法詳述如下。

(1) 試體前處理

使用水冷式鑽石鋸將混凝土試體由中心部份切取 $\phi 10\text{ cm} \times 5$

cm試樣，圖3.13為試體切割機內部構造及切割情形。將該試樣放置空氣中至少1 h，待表面乾燥後以環氧樹脂塗封其側面。圖3.14為真空設備圖。為使各試樣孔隙中的含水達飽和狀態，將試體放入真空系統設備的真空容器內進行如下真空處理：

- a. 啟動真空泵浦，使泵浦抽至 1 mmHg (133 pa) 以下，打開抽真空之閥門，維持數分鐘，讓真空度量儀表維持在 1 mmHg (133 pa) 以下，且呈穩定狀態。關閉抽真空之閥門與泵浦，維持真空度 3 hr。
- b. 打開止水閥門讓預先煮沸且冷卻的去離子水淹沒試體高度，當其水面完全蓋過試體，關閉入水閥門，持續抽真空 1 hr。
- c. 1 hr 後，關閉所有閥門與真空泵浦，將試體移至水中靜置 18 ± 2 小時。



圖 3.13 試體切割機內部構造及切割情形

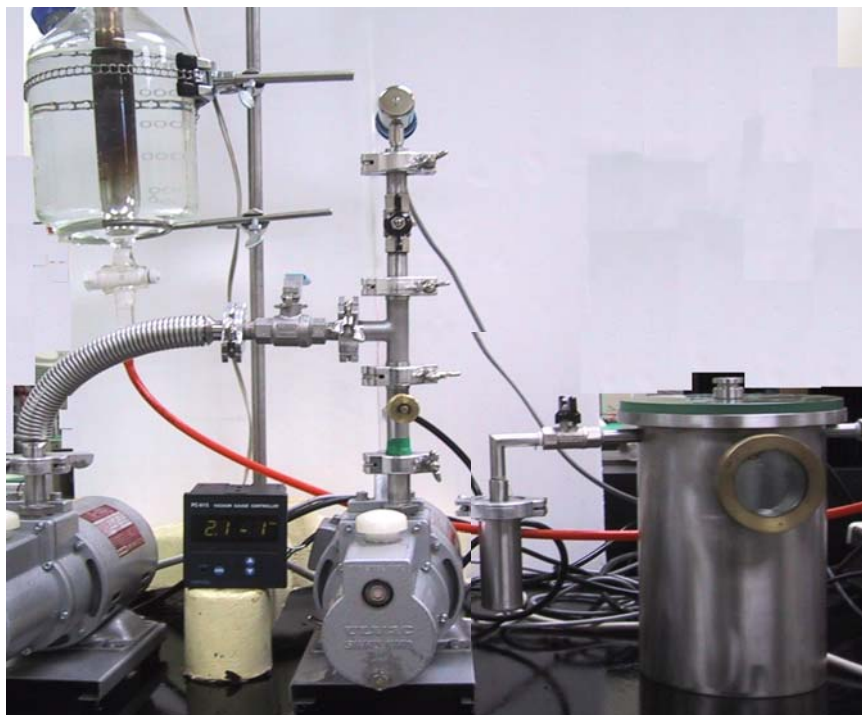


圖 3.14 RCPT 試體前處理抽真空設備

(2) RCPT 試驗

將前處理後之試體依 AASHTO T277 之試驗設備（如圖 3.15 與圖 3.16 示意圖）置於 2 個約 250ml 的 PVC 槽之間，每槽內置一片 20 號銅網作為電極。其中一槽內放入 3% 濃度氯化鈉溶液並與電源供應器陰極相接，另一槽內放入 0.3N 濃度氫氧化鈉溶液並與電源供應器陽極相接。並在兩電極間通上 60Volts 直流電，以數據擷取器記錄 6 小時內電流之變化，量測時間與電流變化關係曲線圖(圖 3.17)，曲線下之面積即為 6 小時試驗期間所通過之總電荷量(Total charged passed)，其單位為庫倫(coulombs, 安培-秒)；或每隔 30 分鐘記錄 1 次電流值，直到 6 小時為止，再將所記錄的電流值代入下式(3-6)，可獲得累積之總電荷量。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \cdots + I_{360}) \quad (3-6)$$

Q ：總電荷量(庫倫)； I_0 ：初始電流(安培)； I_t ：在時間 t (分) 的電流(安培) RCPT 之結果以電荷量依據表 3-14 評估混凝土抵抗氯離子之能力。

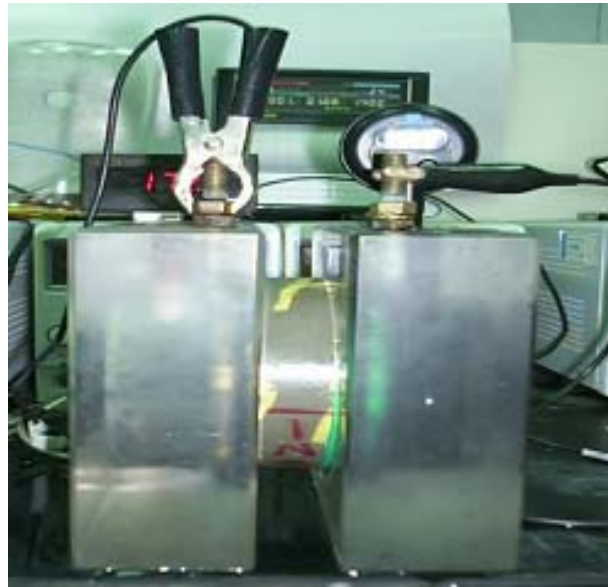


圖 3.15 RCPT 相片圖

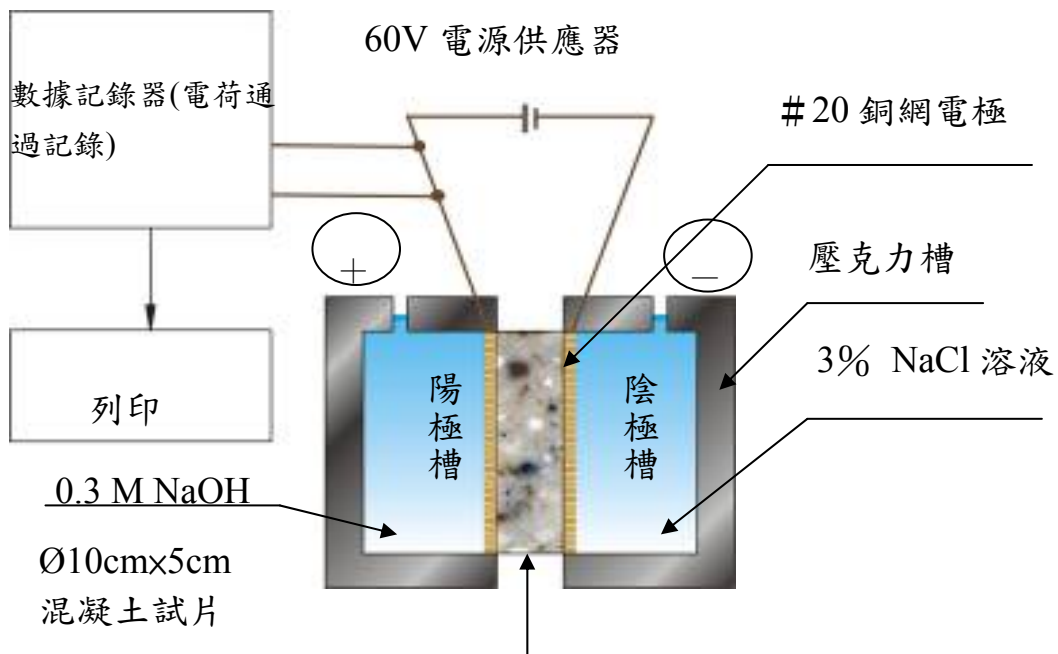


圖 3.16 RCPT 示意圖

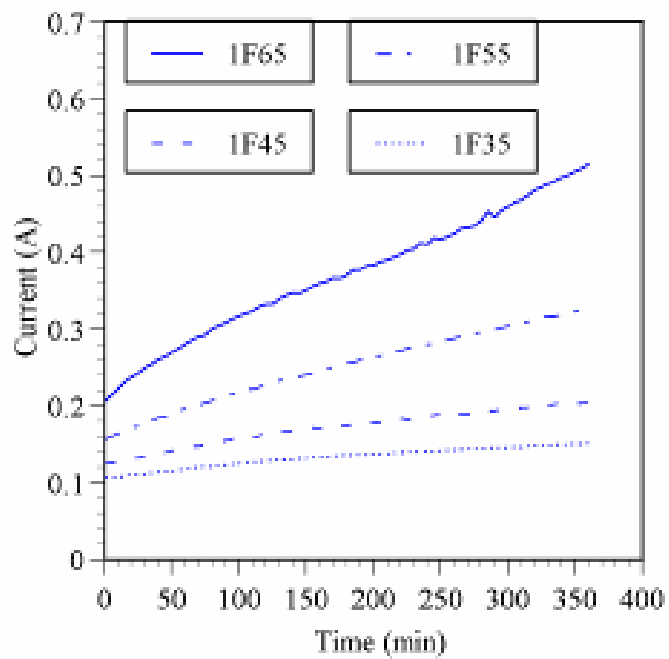


圖 3.17 時間與電流變化關係曲線圖

表 3-14 氯離子穿透性與RCPT總累積電量關係

RCPT 總累積電量 (coulombs)	氯離子穿透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	極低
<100	可視為無

(3)試驗結果研析

本研究利用比色法所量取之氯離子滲透深度，陰極槽 3% (莫

耳濃度=0.52N) 氯離子濃度 (C_o)，以及NT Building 492 規範指出混凝土產生變色之氯離子濃度 0.07 N^[66]，代入式 (3-2)，可求出RCPT利用比色法所得的氯離子傳輸係數 (M_{Rc})：

$$M_{Rc} = \left(x_d / \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - C / C_o \right) \right)^2 / 4t \quad (3-7)$$

C ：變色之氯離子濃度 0.07 N； x_d ：比色法量得之氯離子滲透深度 (cm)； C_o ：陰極槽氯離子濃度 (0.52N)； erf^{-1} ：inverse error function

比色法的氯離子傳輸係數 (M_{Rc}) 由氯離子滲透深度所求得，對混凝土中添加飛灰導致反應電流過分下降之影響較小。RCPT 所得之傳輸係數 (M_R) 和電量將與孔孔隙率比較，以確認使用 RCPT 電量評估混凝土的適用性，提出評估混凝土耐久性較適宜之試驗法。

2. 加速氯離子傳輸試驗(Accelerated Chloride Migration Test; ACMT)

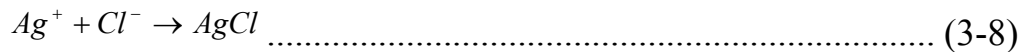
加速氯離子傳輸試驗(ACMT)之試驗過程分為，試體前處理與試驗過程兩部分。試體前處理部分與 RCPT 相同(請參閱前項之試體前處理部份)，下述說明試驗過程與分析部分。

(1)試驗方法與步驟

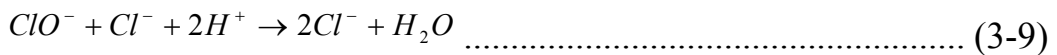
經前處理後之試體置在兩個壓克力槽之間，每個槽內均放置一片 20 號篩徑的銅網做為電極。陽極的試驗槽內置入 0.3N 氫氧化鈉溶液，另一側試驗槽為 3%氯化鈉溶液做為負極。與 RCPT 不同處在於試驗槽容積與外加電壓伏特數。其中試驗槽溶液由 250 mL 放大為 4500 mL，試驗槽容積的增大可避免試驗期間溫度所引起的熱焦耳效應，並可同時量測氯離子穿過混凝土到陽極試驗槽中的氯離子濃度，以計算氯離子擴散係數。而為避免長期施加高伏特電壓下對試體孔隙結構破壞與改變，將 RCPT 之外加電壓由 60 V 降至 ACMT 使用之外加電壓 24 V。其試驗設備示意圖

與照片，如圖 3.18 與圖 3.19 所示。所需試驗時間依混凝土之緻密性而定，約為 7~15 天。試驗期間於每五分鐘以數據擷取器記錄通過試體之間的電流與氫氧化鈉溶液的溫度。陽極試驗槽中的氯離子濃度約每 8 小時量測 1 次，並利用電位滴定法以 0.01N 標準硝酸銀溶液進行濃度滴定。

ACMT 試驗過程中氯離子是以次氯酸根狀態存在氫氧化鈉溶液中，因此滴定前必須將次氯酸根還原成氯離子以供量測。採用的方式參考 AASHTO T260-97 規範中所規定之硝酸銀電位滴定法進行。電位滴定法主要利用 0.01 N 標準硝酸銀溶液滴定含有氯離子的溶液使其產生白色氯化銀沉澱，其方程式如下所示：



滴定進行時，首先需利用硝酸將樣本酸化。溶液酸化的原因有兩個，第一個原因會把氫氧化鈉溶液中的次氯酸根還原成溶於水的氯離子，其方程式如下：



另一原因則由於氫氧化鈉溶液屬於高鹼性，為避免硝酸銀與溶液中氫氧根結合產生 AgOH 造成誤判，因此需將存在於氫氧化鈉中的氯離子溶液酸化。

圖 3.20 為本研究擬使用的 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀，此儀器之量測精度可達 10 ppm，且可由電腦連線記錄試驗資料。參考電極為銀/氯化銀複合電極。主要藉由電極量測滴定過程中氯離子的氧化電位，當電位突然巨幅變化時，視為滴定終點 (equivalence point, EP)。

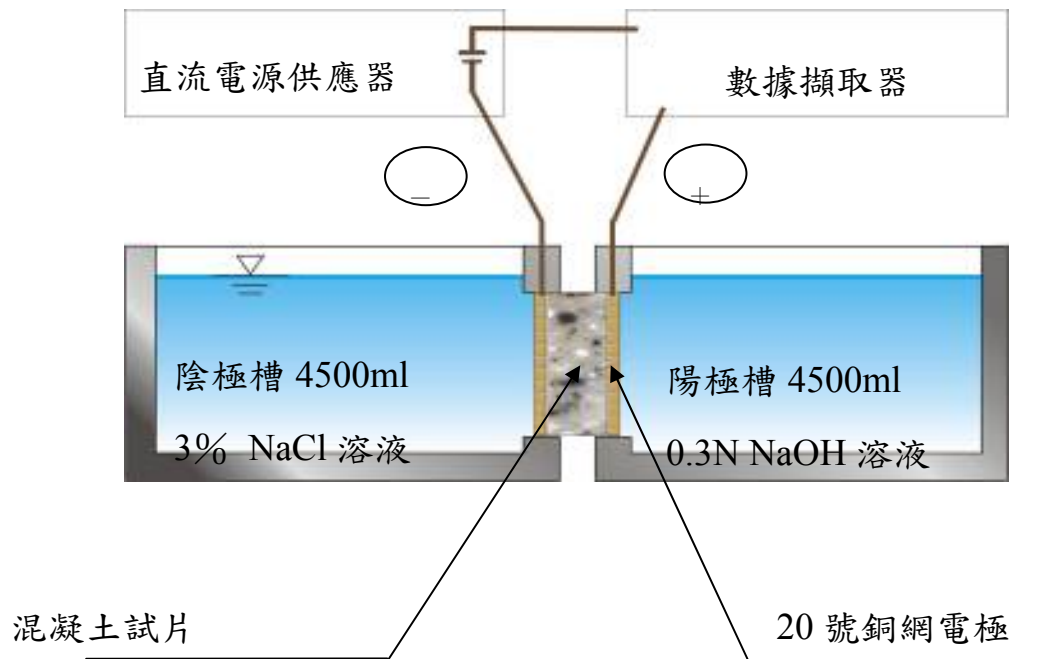


圖 3.18 加速氯離子傳輸試驗 (ACMT) 試驗設備示意圖

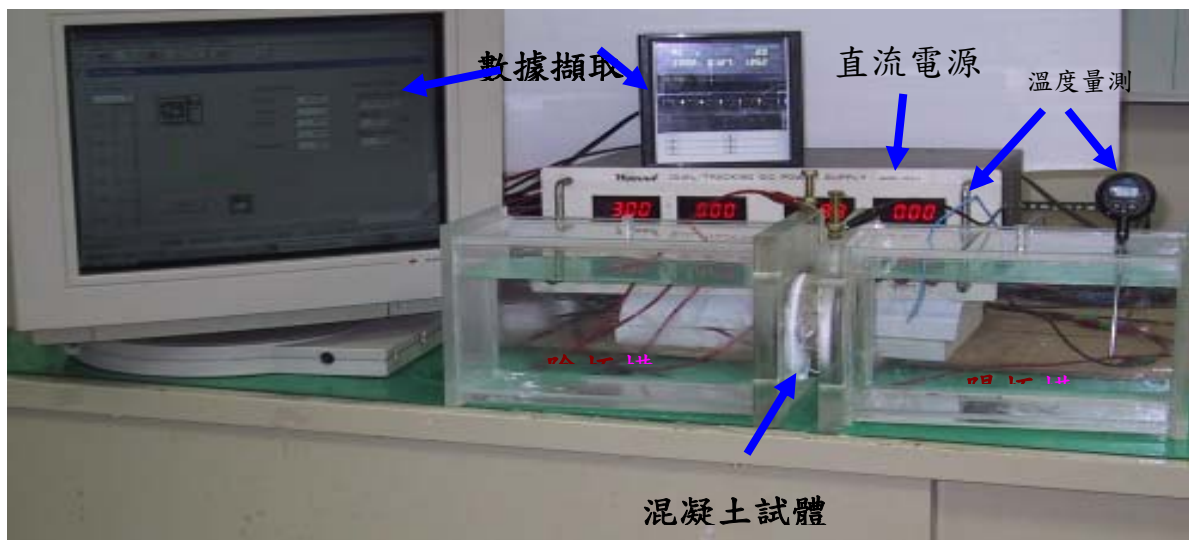


圖 3.19 加速氯離子傳輸試驗 (ACMT) 儀器照片

藉由滴定終點所得之硝酸銀溶液滴定量 EP 值與已知濃度，可以計算滴定溶液中氯離子含量，其計算式如式 3-10：

$$N_{Nacl} = \frac{(N_{AgNO_3})(V_{AgNO_3})}{V_{Nacl}} \dots\dots\dots (3-10)$$

式中 N_{Nacl} 為氯離子濃度 (mole/L); N_{AgNO_3} 則為 0.01 N 標準硝酸銀溶液，由於硝酸銀溶液極易受光線干擾，進行滴定試驗前需以標準 0.1 N 標準氯化鈉溶液標定其 EP 值才是真 N_{AgNO_3} 。 V_{AgNO_3} 滴定終點硝酸銀溶液滴定量 (ml); V_{Nacl} 則為氯離子溶液滴定樣本數 (ml)。



圖 3.20 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀

當陽極試驗槽中的氯離子濃度極低時，擬採離子層析法量測其氯離子濃度。離子層析法係將含有氯離子溶液流入離子交換樹脂，由於離子交換樹脂帶有與氯離子相同電性的陰離子，因此當氯離子溶液與離子交換樹脂接觸時，氯離子會與樹脂內離子相混而交換。其後則藉由流洗溶液 (eluent solution) 將氯離子由離子交換樹脂洗出，因電導度會隨著流洗液中氯離子濃度高低而有所變化，此時量測流洗溶液電導度，再比對空白組之流洗液，便可得知氯離子於何時被洗出。不同濃度氯離子由樹脂洗出的時間有所不同，因此藉由各標準氯離子濃度與完全洗出所費時間的關係檢量線，即可對待測氯離子溶液進行定量。由於離子層析法於氯離子濃度高時，電導度量測值會與溶液中其他離子的電導度相近，因此待測氯離子溶液濃度必須維持在 100 ppm 以下，所以本研究於試驗前待測氯離子溶液樣本以去離子水 (deionized water) 稀釋 10 倍後進行量測。

圖 3.21 為本研究使用之離子層析儀為 Metrohm 792 型，此儀器能量測到的精度可達 1 ppm 以下，且可與電腦連線記錄試驗資料。主要架構由電導度偵檢器、高壓與蠕動泵浦(peristaltic pump)、待測溶液注入管路 (injection loop)、抑制模組 (suppressor module)、與離子交換樹脂 (ion-exchange column) 所組成。其中離子交換樹脂為陰離子交換樹脂 (Metrohm A SUPP4)，尺寸為直徑 4 mm 長度 250 mm。使用流洗溶液為 1.7 mmol/L 的 NaHCO_3 與 1.8 mmol/L 的 Na_2CO_3 溶液所組成，流洗速度為 2 ml/min。而抑制模組包含放大溶劑 (rising solution) 與清洗溶劑 (regeneration solution)，放大溶劑主要將離子電導度訊號放大，使其與流洗溶液電導度有所區別，且其具再生功能，可將抑制模組中的離子交換樹脂再生，通常由 10 mmole/L 的 H_2SO_4 溶液所組成。清洗溶劑則將抑制模組內殘留液體清除，通常為去離子水。



圖 3.21 離子層析儀 Metrohm 792 型

(2)試驗結果研析

ACMT 於試驗期間由於電場作用的影響，氯離子由陰極槽傳輸至陽極槽，而陽極槽內氯離子濃度與時間的變化為主要量測數據。本研究擬藉由實驗結果，探討氯離子於混凝土中之傳輸行為。

圖 3.22 為典型的氯離子傳輸歷程圖，試驗時間為X軸，Y軸

為陽極槽累積氯離子濃度。氯離子傳輸歷程依序分成四個階段，分別是非穩態階段(non-steady-state)、過渡時期階段(transition period)、穩態階段(steady-state)、衰退階段(attenuate)^[72]。

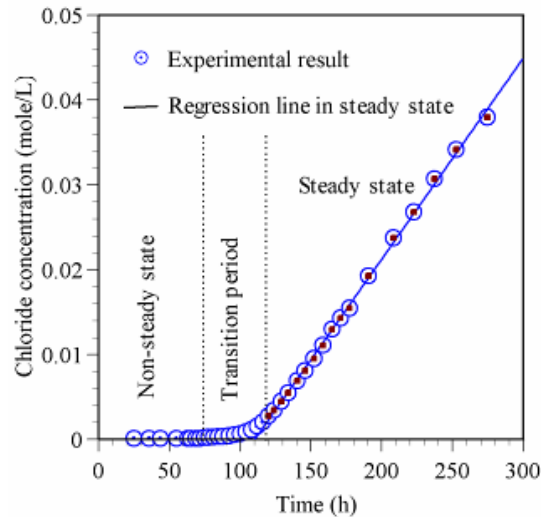


圖 3.22 典型的氯離子傳輸歷程圖

ACMT 之分析將採(a)非穩態傳輸係數及(b)穩態傳輸係數兩種方式分別探討混凝土之耐久性，分別敘述如下：

(a)非穩態傳輸係數 M_{nc}

離子在電位作用下，穿透混凝土表面進入混凝土內部，此藉著電位作用使離子遷移之性質稱為傳輸(migration)，由電位所產生的梯度(gradient)，當做在單位體積溶液下推動離子前進的一個力量，假如在一電場(electrical field)作用下，推動離子前進之力的表示方式如下所示：

$$f = -RT \frac{dc}{dx} + zFE \cdot c \quad (3-11)$$

R ：氣體常數 ($R=8.314 \text{ J/m} \times \text{s}^{-1}$); T ：絕對溫度 (K); c ：於 x 距離時之離子濃度 (mole/L); z ：離子價數; F ：法拉第常數 ($F=96500 \text{ J/V} \times \text{mole}^{-1}$)

根據文獻^[71]假設離子的流通量 J (flux) 與推動離子前進之力量(force)是相對稱，流通量 J (flux) 可用下式表示：

$$J = \frac{M_{nc}}{RT} \left(-RT \frac{dc}{dx} + zFE \cdot c \right) \quad (3-12)$$

和

$$J = -M_{nc} \left(\frac{dc}{dx} - \frac{zFE}{RT} \cdot c \right) \quad (3-13)$$

M_{nc} 為非穩態傳輸係數。

由式(3-13)得到 modified Fick's second law，如下所示：

$$\frac{dc}{dt} = \frac{dJ}{dx} = M_{nc} \left(\frac{d^2c}{dx^2} - \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{dc}{dx} \right) \quad (3-14)$$

假設於一半無窮域區間(semi-infinite)

邊界條件： $c = c_0, x = 0, t > 0$ ；起始條件： $c = 0, x > 0, t = 0$ ；無窮點(infinite-point)條件： $c = 0, x \rightarrow \infty, t = t_M$

式中 c_0 為混凝土試體表面氯離子濃度， t_M 為氯離子到達無窮域的時間，式(3-14)之解如下式^[73]：

$$c = \frac{c_0}{2} \left[e^{\alpha x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \alpha M_{nc} t}{2\sqrt{M_{nc} t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \alpha M_{nc} t}{2\sqrt{M_{nc} t}} \right) \right] \quad (3-15)$$

$\alpha = \frac{zFE}{RT}$ ； $\operatorname{erfc} = (1 - \operatorname{erf})$ ； c_0 = 陰極槽初始氯離子濃度 (mole/L)

當電場強度 E 增加時，穿透深度 x_d 也隨增加($x_d > \alpha M_{nc} t$)，則(3-15)式中 $e^{\alpha x_d} \cdot \operatorname{erfc}(x_d + \alpha M_{nc} t) / 2\sqrt{M_{nc} t} \rightarrow 0$ ，式子改成：

$$\frac{x_d - \alpha M_{nc} t}{2\sqrt{M_{nc} t}} = \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3-16)$$

c_d = 氯離子剛穿過混凝土試片到達陽極槽之微量濃度 (mole/L)

erf^{-1} = inverse error function

令 $\xi = erf^{-1}(1 - (2c_d / c_0))$ ，則式(3-16)修改成下式：

$$M_{nc} = \frac{1}{\alpha t} \left[\frac{2\xi^2}{\alpha} + x_d - \frac{2\xi}{\sqrt{\alpha}} \sqrt{\frac{\xi^2}{\alpha} + x_d} \right] \quad (3-17)$$

將式(3-17)簡化，非穩態傳輸係數之計算採用下式：

$$M_{nc} = \frac{RTL}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (3-18)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFE}} \cdot erf^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

過渡時期階段之累積氯離子濃度極微量，而且不是連續性取樣，因此必須以濃度與時間之關係，使用式(3-19)作回歸分析求出氯離子穿透 0.03 m 厚混凝土試片的穿透時間(breakthrough time)。

$$C = a \times t^b \quad (3-19)$$

C = 陽極槽累積氯離子濃度 (mole/L); t = 時間 (s); a, b = 試驗常數

將取樣所得之陽極槽氯離子溶液進行分析，得到累積氯離子濃度與時間的點位，由於不連續的取樣，利用 3-19 式進行回歸如圖 3.23。ACMT 試驗累積氯離子濃度在過渡時期階段之傳輸速率並非定值，本研究將採氯離子通過混凝土試片到達陽極槽之累積氯離子濃度 0.000261 mole/L ($C/C_0 = 0.05\%$) 至氯離子穿透速率與時間呈非線性速率傳輸之階段為氯離子的過渡時期階段，其中 C 為氯離子剛通過混凝土試片到達陽極槽時之濃度， C_0 為陰極槽之氯離子濃度，根據回歸結果，求得氯離子穿透混凝土試片的穿透時間(breakthrough time)。求得穿透時間後，代入 Modified Fick's second law (式 3-18)求得非穩態傳輸係數。

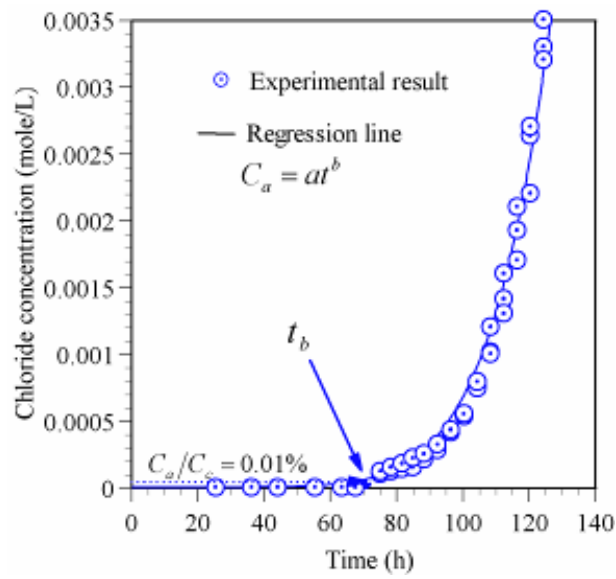


圖 3.23 過渡時期階段之累積氯離子濃度曲線圖

(b) 穩態傳輸係數 M_s

離子受外加電場作用下，離子於水泥基複合材料內部充滿孔隙水的狀況下移動，影響整體材料的傳輸機制有濃度梯度、電位梯度、與對流效應。圖 3.24 為穩態階段之累積氯離子濃度與時間之關係曲線圖，累積氯離子濃度到達穩態階段，濃度與時間呈線性關係。

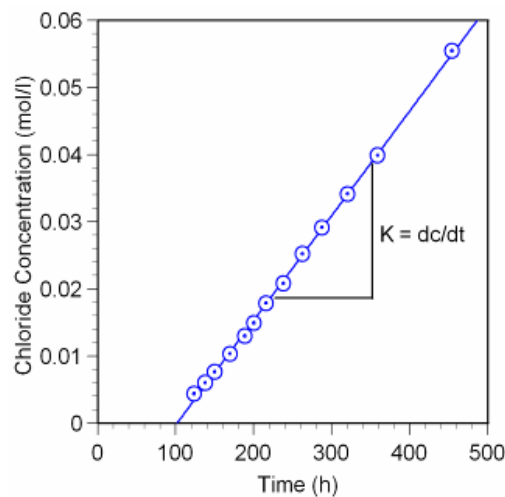


圖 3.24 穩態階段之氯離子與時間關係圖

將穩態階段累積氯離子濃度與時間之關係做線性回歸，可求得氯離子的穿透速率(K)，其穩態階段回歸式以下式表示：

$$C = Kt + b \quad \text{..... (3-20)}$$

C = 累積氯離子濃度 (mole/L); K = 穿透速率 (mole/L $\times$ h⁻¹); t = 時間 (h)

若藉由傳統熱力學與化學位能觀念可以由離子通量(flux)計算離子本身的移動速率其方程式如下所示：

$$J(x) = -D_i \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{zF}{RT} \cdot D_i \cdot C_i \cdot \frac{\partial E}{\partial x} - C_i \cdot V \quad \text{..... (3-21)}$$

J = 離子流通量 (mole/m² $\times$ s⁻¹); D_i = 傳輸係數 (m²/s); C_i = x 距離時之離子濃度 (mole/L); x = 距離 (m); z = 離子價數; F = 法拉第常數 ($F=96500 \text{ J/V} \times \text{mole}^{-1}$); R = 氣體常數 ($R=8.314 \text{ J/K} \times \text{mole}^{-1}$); T = 絕對溫度 (K); E = 電位差 (V); V = 攪動速度梯度

因通電後離子移動數率遠大於自然擴散之離子移動速率，所以不考慮式(3-21)式中第一及第三項，簡化成下式：

$$J = -\frac{zF}{RT} D_i \cdot C_i \frac{\partial E}{\partial x} \quad \text{..... (3-22)}$$

本研究將 D_i 定義為穩態傳輸係數(M_s)，將式(3-22)改成下式：

$$J = -\frac{zF}{RT} M_s \cdot C_i \frac{\partial E}{\partial x} \quad \text{..... (3-23)}$$

由上式可計算穩態傳輸係數(M_s)，其方程式如下式：

$$M_s = \frac{RTL}{zFE_{C_0}} J \quad \text{..... (3-24)}$$

M_s = 穩態傳輸係數 (m²/s); E = 外加電壓 (24 V); L = 試片厚度 (m); c_0 = 陰極槽初始氯離子濃度 (mole/L)

將氯離子的穿透速率(K)轉換成氯離子的流通量(J)，如下示：

$$J = \frac{K \times V}{A} \quad (3-25)$$

V = 擴散槽之體積 (m^3); A = 試體的表面積 (m^2)

將取樣所得之陽極槽氯離子溶液進行分析，得到累積氯離子濃度與時間的點位，利用式(3-20)進行回歸，回歸後如圖 3.25 之穩態階段累積氯離子濃度曲線圖。累積氯離子濃度與時間成一線性關係，斜率 K 為常數。利用式(3-25)計算流通量(J)，再將流通量(J)代入式(3-24)求得穩態傳輸係數(M_s)。

3. 貯鹽試驗 (Ponding test)

ASTM C1543 貯鹽試驗，係將達齡期之直徑 10 cm 圓柱試體側邊使用環氧樹脂塗封(頂部與底部除外)，頂部上方並以壓克力環形成圍堰，於圍堰中加入 3% 氯化鈉溶液，為使液面不受蒸發影響，以 PE 膜將圍堰開口密封，如圖 3.25 所示。

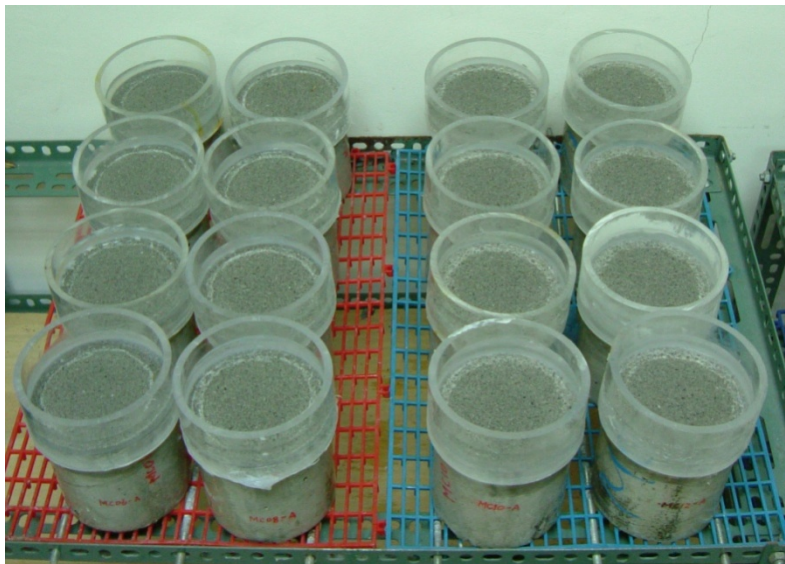


圖 3.25 貯鹽試驗照片

並於每二個月將氯化鈉溶液更換。在貯鹽 90 天後，將試體上方的圍堰與貯鹽溶液移除，並刮除試體頂部鹽結晶物。以沖孔機在其垂直面鑽出直徑 2 cm 的圓柱體。再使用鑽石鋸片以乾切方式將 2 cm 直徑的圓柱體由浸漬面至底部每隔 0.5 cm 厚度切成薄片，最後利用研磨鉢將薄片磨碎，使其通過 50 號篩得到 3g 之混凝土粉末樣本。並參照 AASHTO T260 規範量測樣本中酸溶性氯離子含量。由氯離子含量與各薄片的相對位置，可以了解 90 天貯鹽試驗後混凝土內部氯離子含量變化情形。下圖 3.26 為典型貯鹽試驗結果。

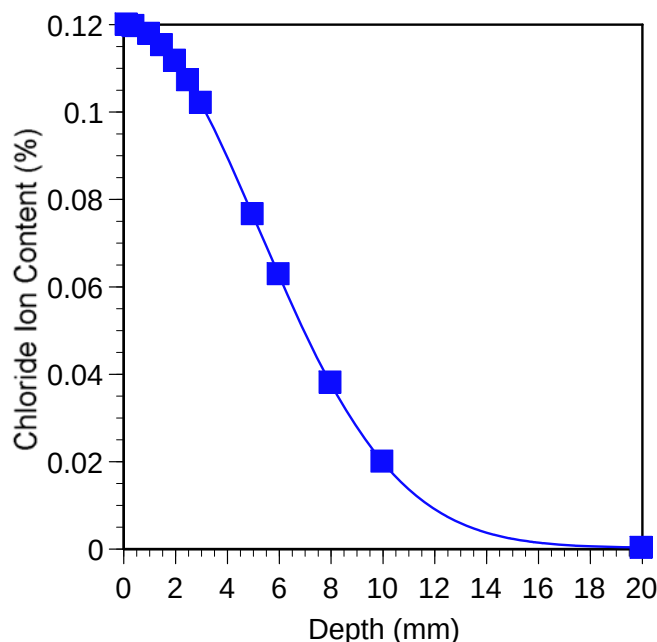


圖 3.26 典型氯離子含量與侵入深度關係圖

由於貯鹽試驗為典型非穩態擴散機制的氯離子擴散試驗，主要利用氯離子濃度梯度差，使氯離子侵入混凝土內部。因此試驗後混凝土內部所量測到的各深度氯離子含量變化，可藉由 Fick 第二定律計算氯離子於混凝土內的擴散係數（diffusion coefficient）。Fick 第二定律對單一方向的擴散行為可由下列方程式表示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3-26)$$

式中 D_p (m^2/sec) 為貯鹽試驗計算之擴散係數， C 為氯離子之濃度， x 為擴散所到達之距離 (m)， t 為擴散所使用之時間 (sec)。若假定擴散方程式是單方向的擴散趨動方式，利用一個半無限積分，並設定 m 為總體氯離子擴散量；擴散過程中沒有任何物質來提供擴散之來源，在由邊界條件： $C_{(x=0, t>0)} = C_o$ ；初始條件： $C_{(x>0, t=0)} = 0$ ；無窮遠處條件： $C_{(x=\infty, t=0)} = 0$ 之條件。與式(3-26)可求得下列方程式。

$$C = \frac{m}{\sqrt{\pi D_p T}} \exp\left(\frac{-x^2}{4 D_p t}\right) \dots\dots\dots (3-27)$$

式中 m 為總體氯離子擴散量，以下式 (3-28) 計算

$$m = \int_0^\infty C dx ; t \geq 0 \dots\dots\dots (3-28)$$

3.4 配比設計與試體製作

各組試體之新拌性質以達到高流動性混凝土為目的，設計坍流度為 50 cm 以上，細骨材採用粗砂:細砂以 6:4 混合。各組配比如表 3-15 所示，各種材料經含水量測試並秤重後，以強制式雙軸拌合機(圖 3.27)進行混凝土拌合，程序如下：

1. 配比拌前，先以適量細骨材、水泥及水進行拌合機潤漿，以提高混凝土拌和的穩定性與準確性；
2. 將粗、細骨材乾拌約 1 分鐘後；
3. 加入膠結粉體(水泥、爐石、飛灰)乾拌約 1 分鐘；
4. 將部分強塑劑加入拌和水中攪拌均勻，並慢慢倒入拌合機中；
5. 剩下的強塑劑事情酌量加入；
6. 拌合 3 分鐘後，下料進行新拌性質試驗與試體製作。

各組混凝土拌合完成後，分別進行坍流度、坍流 50 公分時間、單位重及含氣量等新拌性質試驗。混凝土抗磨耗、衝擊與耐久性能力評估試體數量，如表 3-16 所示。各組試體澆置後(圖 3.28)，於 1 天後拆模，並置於濕室進行養護，如圖 3.29 所示。

表 3-15 混凝土之配比設計 (kg/m³)

編號	W/B	水泥	飛灰	爐石	水	SP	三分石	六分石	細骨材
A3X	0.30	386	116	50	160	6	568	243	865
B3X	0.35	329	99	42	160	5	568	243	943
C3X	0.40	287	86	37	160	4	568	243	1000
D3X	0.45	255	76	33	160	4	568	243	1045
A3Y	0.30	386	116	50	160	6	663	284	732
B3Y	0.35	329	99	42	160	5	663	284	809
C3Y	0.40	287	86	37	160	4	663	284	866
D3Y	0.45	255	76	33	160	4	663	284	911
A3Z	0.30	386	116	50	160	6	758	325	598
B3Z	0.35	329	99	42	160	5	758	325	675
C3Z	0.40	287	86	37	160	4	758	325	733
D3Z	0.45	255	76	33	160	4	758	325	777
A5Y	0.30	276	193	83	160	6	663	284	703
B5Y	0.35	235	165	71	160	5	663	284	784
C5Y	0.40	205	144	62	160	4	663	284	845
D5Y	0.45	182	127	55	160	4	663	284	892



圖 3.27 強制式雙軸拌合機



圖 3.28 各組試體製作情形

表 3-16 混凝土抗磨耗、衝擊、與耐久性能力評估試體數量表

編號	抗壓 強度	彈性 模數	劈裂 試驗	磨耗 試驗	含砂水流 沖擊試驗	衝擊 試驗	RCPT 試驗	ACMT 試驗
A3X	3	3	3	2	2	3	2	2
B3X	3	3	3	2	2	3	2	2
C3X	3	3	3	2	2	3	2	2
D3X	3	3	3	2	2	3	2	2
A3Y	3	3	3	2	2	3	2	2
B3Y	3	3	3	2	2	3	2	2
C3Y	3	3	3	2	2	3	2	2
D3Y	3	3	3	2	2	3	2	2
A3Z	3	3	3	2	2	3	2	2
B3Z	3	3	3	2	2	3	2	2
C3Z	3	3	3	2	2	3	2	2
D3Z	3	3	3	2	2	3	2	2
A5Y	3	3	3	2	2	3	2	2
B5Y	3	3	3	2	2	3	2	2
C5Y	3	3	3	2	2	3	2	2
D5Y	3	3	3	2	2	3	2	2
尺寸概述 (單位：cm)	ψ10H20	ψ10H20	ψ10H20	ψ30H10	20 cubic	ψ15H 5	ψ10H 5	ψ10H 5
參考標準	ASTM C39	ASTM C469	CNS 3801	ASTM C1138	---	ACI 544 或 ASTM E23	ASTM C1202	---



圖 3.29 濕室養護室

第四章 混凝土抗衝擊、抗磨耗、耐久性研究試驗結果與分析

本章將第三章所製作的混凝土配比進行新拌性質試驗、硬固混凝土抗壓強度試驗、混凝土磨損試驗、混凝土含砂水流試驗、混凝土衝擊試驗、與混凝土耐久性試驗。下述就其試驗結果進行討論分析。

4.1 混凝土新拌性質試驗與結果分析

本研究分別以水膠比(0.30、0.35、0.40 與 0.45)、爐灰取代量(30%與 50%)與粗骨材體積含量(30%、35%與 40%)為試驗參數，共設計 16 組配比。在新拌混凝土的試驗方面，進行混凝土坍流度、坍度、坍流 50 公分時間、含氣量及單位重等，試驗結果如表 4-1 所示。

由於橋墩混凝土的工程地點較為偏僻，因此若產製的混凝土工作性過差，則很容易由於泵送設備不足或搗實工作不落實使混凝土產生人為的缺陷。因此在設計上，每組配比的工作性均希望可以像自充填混凝土 (self-compact concrete, SCC) 一樣，在不會析離狀況下，擁有良好的流動性，以方便施工。因此各配比採用添加強塑劑之方式，以控制混凝土之工作性；各組混凝土之強塑劑用量約為膠結材料的 1%。

各組混凝土坍流度試驗結果，如下圖 4.1 至圖 4.16 所示。由圖中可看出，各組混凝土均未發生析離與泌水之情形，坍流度約介於 50-72cm 之間，坍度約為 24-28.5cm，與 SCC 的工作性接近，結果完全符合配比設計之要求。各組新拌混凝土之含氣量與單位重約介於 1.9%-3.4%，以及 2350-2400 kg/m³ 之間，如表 4-1 所示。

表 4-1 混凝土新拌性質

配比	坍流度	坍度(公分)	T ₅₀ (秒)	含氣量(%)	單位重
A3X	65.0	27.0	11.88	1.9	2396
B3X	72.0	27.5	5.91	2.6	2356
C3X	63.5	27.0	12.33	3.4	2364
D3X	53.5	26.0	27	2.3	2378
A3Y	71.0	28.5	11.62	2	2390
B3Y	66.0	27.0	11.25	2.9	2388
C3Y	50.5	24.0	9.97	2.4	2411
D3Y	56.0	24.5	33.5	3	2390
A3Z	63.0	26.0	10.1	2	2420
B3Z	63.0	27.0	13.4	2.2	2436
C3Z	50.5	24.0	14.9	1.9	2418
D3Z	62.0	24.5	9.6	2.5	2404
A5Y	67.5	27.0	22.3	2.4	2426
B5Y	65.5	27.5	12.7	2.6	2426
C5Y	64.0	27.0	9.6	2.8	2398
D5Y	54.5	25.0	10.9	2.7	2405

註：T₅₀為坍流度達 50 公分之時間

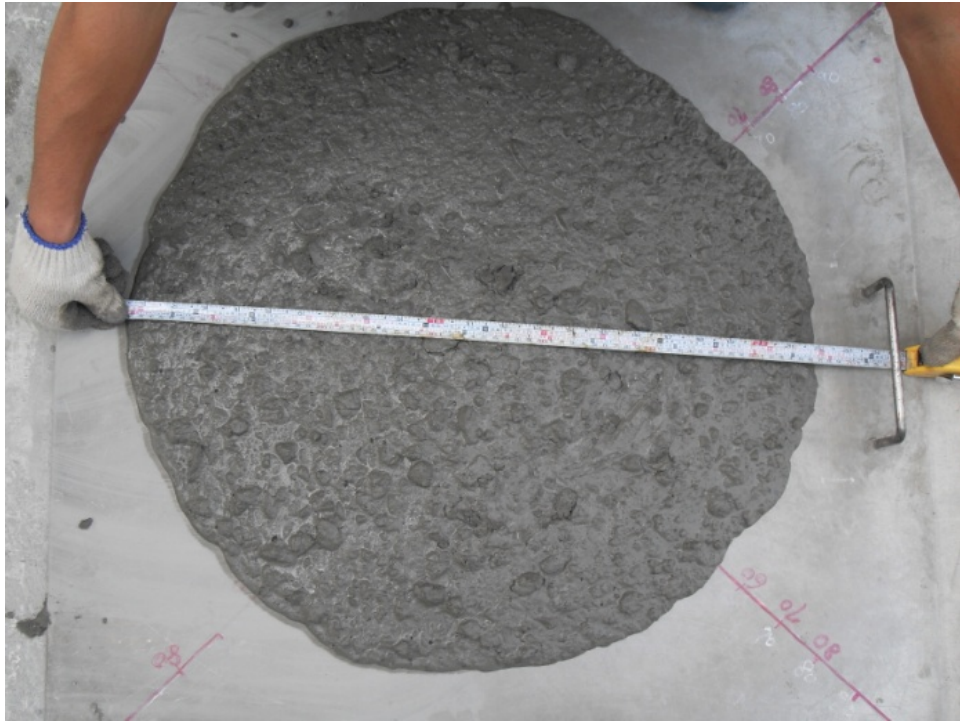


圖 4.1 A3X 配比之坍流度情形



圖 4.2 B3X 配比之坍流度情形



圖 4.3 C3X 配比之坍流度情形

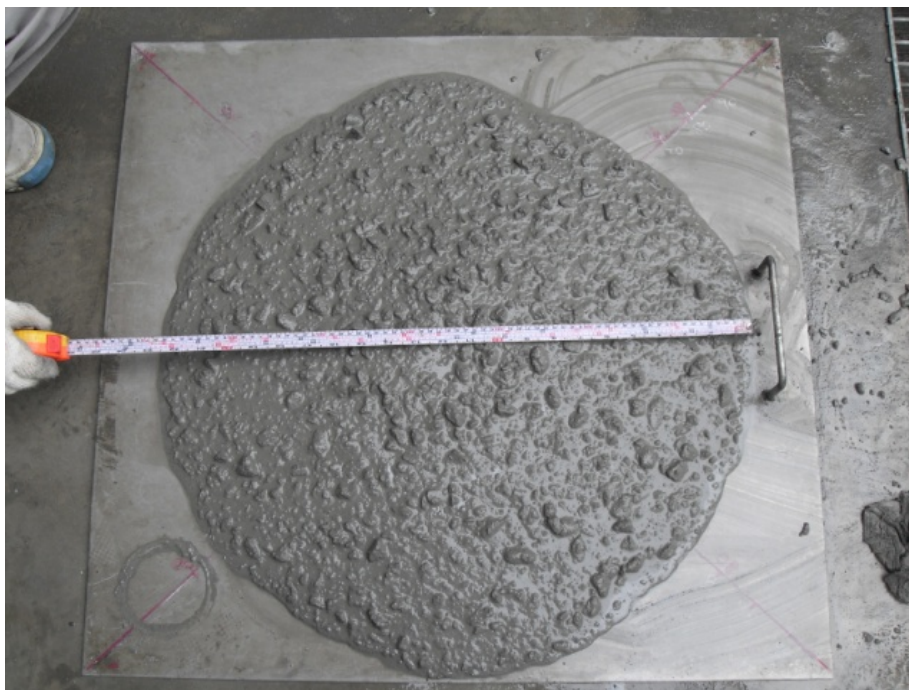


圖 4.4 D3X 配比之坍流度情形



圖 4.5 A3Y 配比之坍流度情形



圖 4.6 B3Y 配比之坍流度情形



圖 4.7 C3Y 配比之坍流度情形



圖 4.8 D3Y 配比之坍流度情形



圖 4.9 A3Z 配比之坍流度情形



圖 4.10 B3Z 配比之坍流度情形



圖 4.11 C3Z 配比之坍流度情形



圖 4.12 D3Z 配比之坍流度情形



圖 4.13 A5Y 配比之坍流度情形



圖 4.14 B5Y 配比之坍流度情形



圖 4.15 C5Y 配比之坍流度情形



圖 4.16 D5Y 配比之坍流度情形

4.1.1 水膠比對工作性之影響分析

16 組混凝土配比的新拌性質之坍流動與坍流 50 公分時間(T50)試驗結果如圖 4.17 與圖 4.18 所示，此 2 圖呈現在不同水膠比下，不同粗骨材含量($0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$)，不同爐灰取代量(30%及 50%)的坍流度與坍流 50 公分時間，其中坍流度代表混凝土的流動能力，坍流 50 公分時間代表混凝土黏稠性。由坍流度的試驗結果可觀察到，16 組配比的坍流度都可達到目標坍流度 50cm，同時整體的趨勢呈現隨著水膠比的增加而下降，此與一般的認知不同，主要是本研究中的配比中固定用水量為 $160\text{kg}/\text{m}^3$ ，因此 $W/B=0.30$ 、 $W/B=0.35$ 、 $W/B=0.40$ 、 $W/B=0.45$ 所對應的粉體量會隨著水膠比增加而降低，一般高粉體量的混凝土配比其工作性會較低粉體量佳。因此本研中坍流度的試驗結果呈現坍流度隨水膠比增加而降低，這隱含坍流度隨粉體量降低而下降，如圖 4.17 所示。另一方面，由圖 4.17 中可觀察到，整體而言以水膠比 0.30 及 0.35 的坍流度最佳；水膠比 0.45 坍流度較差。

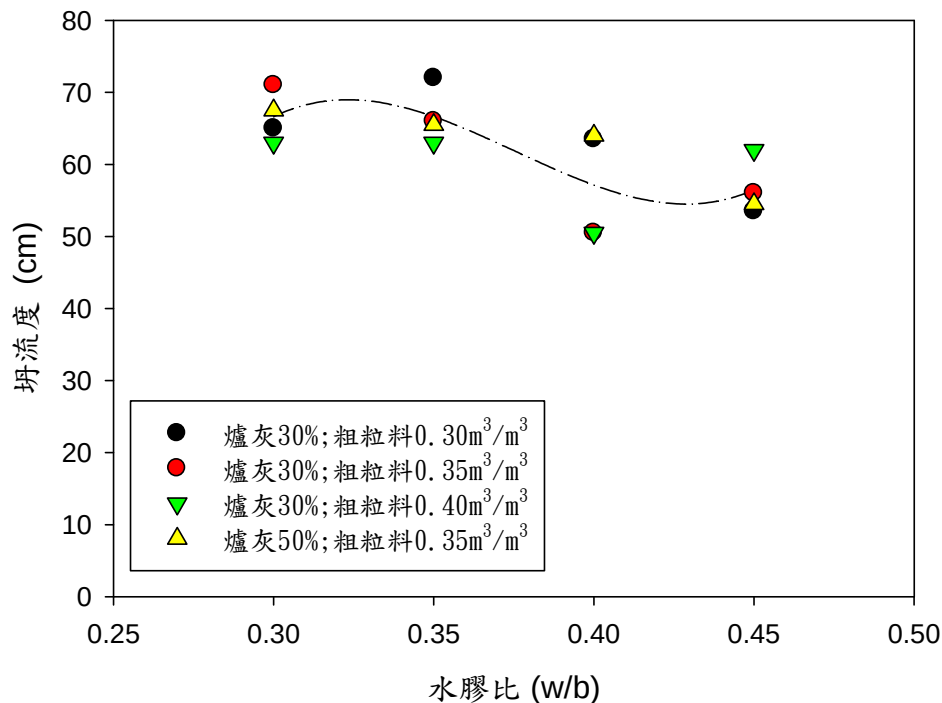


圖 4.17 混凝土坍流度與水膠比關係

在新拌混凝土的坍流 50 公分時間方面，試驗結果如圖 4.18，由圖中可觀察到，所有配比的坍流 50 公分時間都大都介於 5~15 秒之間，僅有 3 組配比的坍流 50 公分時間在 20 秒以上。整體而言，坍流 50 公分時間會隨著水膠比增加而下降，即隨粉體量下降而增加，這肇因於粉體量較高時，在骨材間會有較佳的潤滑作用，可加速混凝土流動的速率，而粉體量較少時，則混凝土中的粗細骨材會因為潤滑作用的不足，而使混凝土的黏稠性增加，進而增加流的時間。

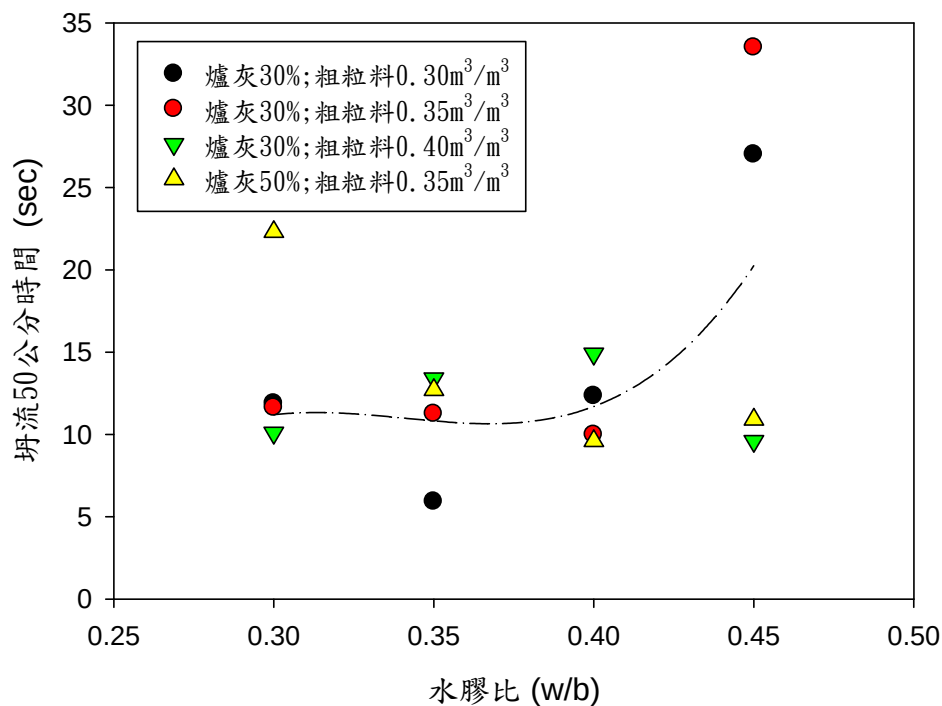


圖 4.18 混凝土坍流 50 公分時間與水膠比關係

4.1.2 粗骨材用量對工作性之影響分析

在粗骨材用量對於混凝土新拌工作性的影響方面，圖 4.19 呈現粗骨材用量對混凝土坍流度的影響，由圖中可觀察到在 W/B=0.30 及爐灰 30% 取代量下，以粗骨材用量在 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 時有最佳的坍流度；而在

W/B=0.35 及爐灰 30%取代量下，坍流度則隨著粗骨材用量的增加而下降；在W/B=0.40 及爐灰 30%取代量下，坍流度亦隨著粗骨材用量的增加而下降；而在而在W/B=0.35 及爐灰 30%取代量下，坍流度則是呈現隨粗骨材用量的增加而上升，此結果可能是因為在卜作嵐摻料用量較高時，可協助粗料的流動，因而產生這樣的結果。

而在坍流 50 公分時間方面，不考慮W/B=0.45，爐灰取代量 30%下，粗骨材 $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 等 2 個配比，可由圖 4.20 觀察到坍流 50 公分時間會隨著粗骨材用量增加而使時間加長，意即使混凝土的流動速率下降。應是當粗骨材用量增加時，粗骨材的堆積作用會導致混凝土流動不易，進而使流動的時間增加。因此若考量流動性與工作性時，粗骨材以 $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 是較適合的。

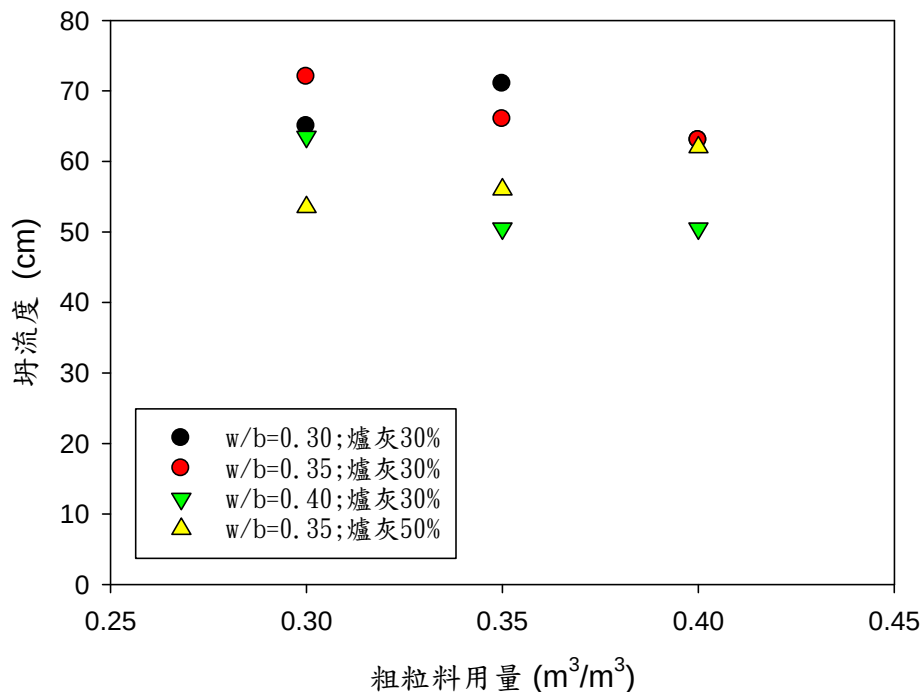


圖 4.19 配比A3X~D3X之水膠比與坍流度關係
(爐灰 30%、粗骨材 $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$)

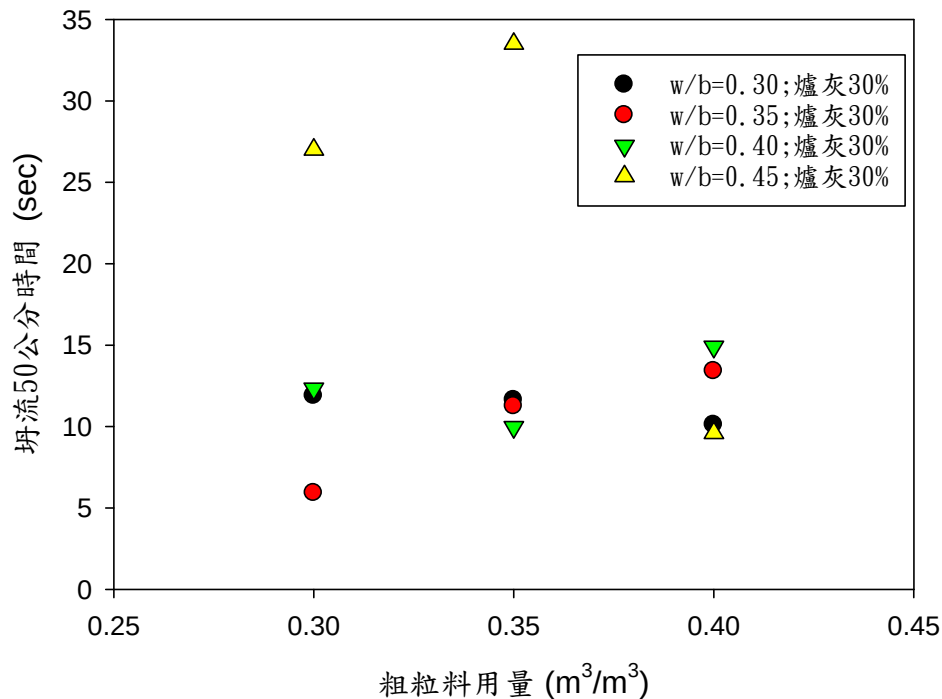


圖 4.20 配比A3X~D3X之水膠比與坍流 50 公分時間關係
(爐灰 30%、粗骨材 $0.3m^3/m^3$)

4.1.3 爐灰取代量對工作性之影響分析

對於爐灰取代量對混凝土工作性影響方面，於本研究中有進行 2 種爐灰取代量的試驗分別為 30%及 50%，每一種添加量中共進行 4 組配比試驗，4 個配比的差別在於水膠比為 0.30、0.35、0.40 及 0.45。試驗結果如圖 4.21 所示，由圖可觀察到在坍流度方面，2 種爐灰取代量對坍流度的影響不大，僅在水膠比 0.40、爐灰取代量 30%的配比坍流度僅 50.5cm，可能為試驗上的誤差。而在坍流 50 公分時間方面，可發現比較 2 種爐灰取代量，相對來說以及取代 50%的組別坍流 50 公分時間變異性較穩定，且在水膠比 0.45 時，時間仍可控制於 10 秒左右，而取代 30%爐灰的配比坍流 50 公分時間則達到 30 秒以上，在施工上是較困難的。因此，整體上爐灰取代量以 50%較 30%有效益。

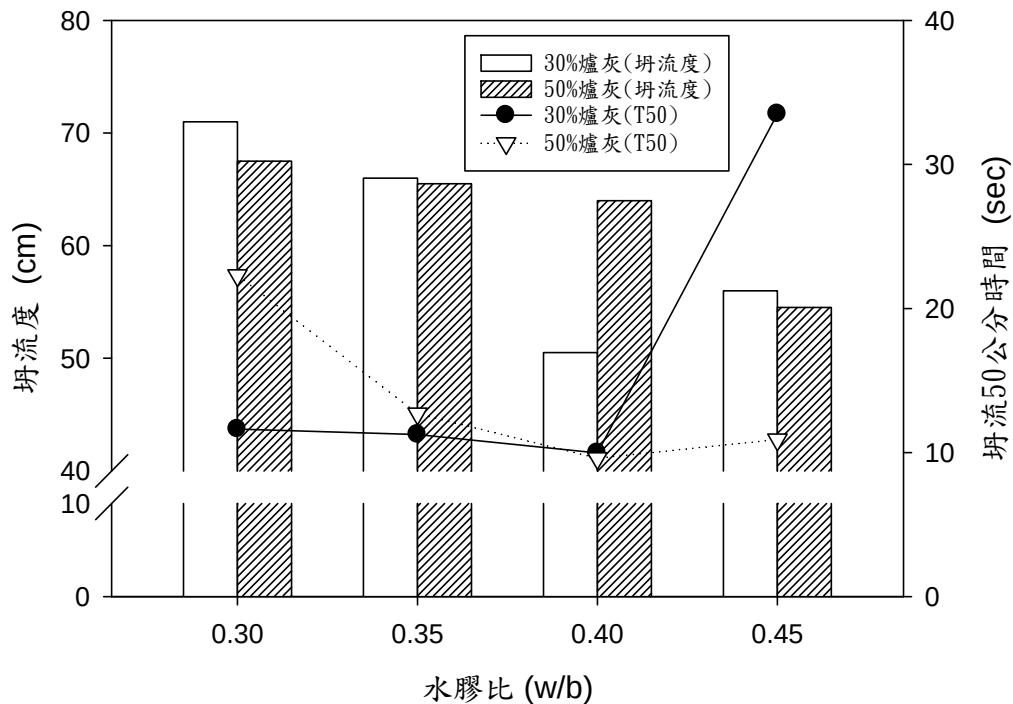


圖 4.21 配比A3X~D3X之水膠比與抗壓強度與彈性模數關係
(爐灰 30%、粗骨材 $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$)

4.2 力學性質試驗與結果分析

本研究中在力學性質方面進行 28 天與 56 天的抗壓強度試驗、彈性模數及劈裂強度試驗，16 組的配比變數包含水膠比、粗骨材用量及礦物摻料用量等，其中水膠比為 0.30、0.35、0.40 及 0.45 等 4 種；粗骨材用量則為 $0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35\text{ m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.40\text{ m}^3/\text{m}^3$ ；礦物摻料則有取代水泥量 30% 及 50% 等 2 種。力學性質試驗結果如表 4-2~表 4-7 所示，其中 28 天抗壓強度介於 52.8~79.0 MPa，彈性模數介於 27.4~36.4 GPa，劈裂強度介於 3.5~6.1 MPa；而 56 天力學性質中，抗壓強度則介於 57.4~80.3 MPa，彈性模數介於 29.4~34.6 GPa，劈裂強度介於 3.8~6.8 MPa，而抗壓強度、彈性模數及劈裂強度皆受水膠比、粗骨材用量及礦物摻料用量等影響，影響分析分述如下。

表 4-2 混凝土 28 天抗壓強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均	
				(MPa)	(Kgf/cm ²)
A3X	73.28	76.42	78.28	76	776
B3X	65.33	64.06	65.14	65	662
C3X	59.35	59.55	61.12	60	613
D3X	54.64	58.27	56.60	57	577
A3Y	76.62	77.79	76.91	77	787
B3Y	73.67	67.49	64.55	69	700
C3Y	59.45	66.22	63.08	63	643
D3Y	58.86	62.29	64.06	62	630
A3Z	80.54	77.20	79.07	79	806
B3Z	74.46	62.10	71.81	69	709
C3Z	62.29	64.94	66.12	64	658
D3Z	58.86	63.67	50.42	58	589
A5Y	74.75	75.14	80.93	77	785
B5Y	66.61	69.36	70.93	69	704
C5Y	62.49	65.92	70.73	66	678
D5Y	52.39	52.29	52.78	52	536

表 4-3 混凝土 28 天彈性模數試驗結果

配比編號	試體 1 (GPa)	試體 2 (GPa)	試體 3 (GPa)	平均 (GPa)
A3X	34.32	33.20	34.55	34.02
B3X	31.01	32.87	30.51	31.46
C3X	35.03	37.27	33.21	35.17
D3X	31.33	32.09	31.38	31.60
A3Y	36.12	39.80	35.55	37.15
B3Y	33.19	32.51	33.10	32.94
C3Y	29.23	31.28	28.52	29.68
D3Y	26.26	29.29	26.56	27.37

配比編號	試體 1 (GPa)	試體 2 (GPa)	試體 3 (GPa)	平均 (GPa)
A3Z	36.02	36.51	36.74	36.42
B3Z	33.88	32.58	33.49	33.32
C3Z	30.68	33.73	33.92	32.78
D3Z	33.03	32.31	33.19	32.85
A5Y	33.30	36.67	31.78	33.91
B5Y	31.66	31.94	32.58	32.06
C5Y	31.25	30.67	30.55	30.82
D5Y	28.83	28.55	29.48	28.95

表 4-4 混凝土 28 天劈裂強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均 (MPa)
A3X	4.34	5.65	5.64	5.21
B3X	4.52	4.48	4.31	4.43
C3X	4.21	4.31	4.23	4.25
D3X	3.74	3.56	3.65	3.65
A3Y	5.83	5.20	5.16	5.40
B3Y	4.76	4.53	4.65	4.65
C3Y	4.38	4.57	4.47	4.47
D3Y	4.09	4.07	4.00	4.05
A3Z	5.79	6.58	5.92	6.09
B3Z	4.97	4.71	4.77	4.82
C3Z	4.40	4.71	5.14	4.75
D3Z	4.21	4.25	3.95	4.14
A5Y	5.90	5.43	6.06	5.80
B5Y	4.41	4.79	4.51	4.57
C5Y	4.39	4.41	3.55	4.12
D5Y	3.50	3.43	3.60	3.51

表 4-5 混凝土 56 天抗壓強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均	
				(MPa)	(Kgf/cm ²)
A3X	77.11	76.22	78.68	77	789
B3X	66.61	66.12	67.10	67	680
C3X	61.70	60.33	62.00	61	627
D3X	55.13	58.37	58.57	57	586
A3Y	81.23	75.14	75.34	77	788
B3Y	75.83	71.42	72.79	73	749
C3Y	71.32	69.75	72.01	71	725
D3Y	61.12	66.22	60.92	63	641
A3Z	76.52	84.66	75.54	79	805
B3Z	67.39	74.85	81.32	74	760
C3Z	62.98	71.32	72.10	69	702
D3Z	64.75	63.67	60.53	63	643
A5Y	75.93	67.98	84.86	80	820
B5Y	66.71	69.75	72.79	70	712
C5Y	70.93	42.28	68.28	61	618
D5Y	58.86	31.39	55.92	57	586

表 4-6 混凝土 56 天彈性模數試驗結果

配比編號	試體 1 (GPa)	試體 2 (GPa)	試體 3 (GPa)	平均 (GPa)
A3X	32.21	36.12	34.60	34.31
B3X	32.60	33.60	33.82	33.34
C3X	32.91	33.66	32.52	33.03
D3X	31.74	32.59	32.78	32.37
A3Y	32.41	34.84	36.58	34.61
B3Y	33.96	33.36	34.74	34.02
C3Y	35.16	33.88	33.70	34.25

配比編號	試體 1 (GPa)	試體 2 (GPa)	試體 3 (GPa)	平均 (GPa)
D3Y	30.52	32.38	29.04	30.65
A3Z	36.08	32.75	35.16	34.66
B3Z	33.27	35.95	32.89	34.04
C3Z	33.80	32.49	31.05	32.45
D3Z	28.83	32.58	33.53	31.65
A5Y	33.02	30.96	32.82	32.92
B5Y	37.09	28.05	29.04	31.39
C5Y	31.37	26.60	30.51	30.94
D5Y	28.75	25.05	30.10	29.42

表 4-7 混凝土 56 天劈裂強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均 (MPa)
A3X	6.37	6.01	5.53	5.97
B3X	5.94	4.78	5.33	5.35
C3X	4.16	4.48	4.58	4.41
D3X	3.62	3.96	3.76	3.78
A3Y	6.05	5.14	5.60	5.60
B3Y	5.01	5.62	5.57	5.41
C3Y	5.16	4.91	5.07	5.05
D3Y	4.01	3.84	4.52	4.12
A3Z	6.05	7.32	7.00	6.80
B3Z	4.88	5.68	5.95	5.50
C3Z	4.95	5.66	4.63	5.08
D3Z	4.25	4.84	4.69	4.59
A5Y	5.94	6.28	6.85	6.36
B5Y	6.05	5.69	5.36	5.70
C5Y	5.58	5.00	4.12	4.91
D5Y	3.23	3.94	4.43	3.87

4.2.1 水膠比對力學性質之影響分析

在水膠比對力學性質的影響分析方面，將 16 組配比 28 天及 56 天的抗壓強度與彈性模數試驗結果與水膠比進行分析比較，如圖 4.22~圖 4.25 所示。其中圖 4.22 為在爐灰 30%及粗骨材用量 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 下(配比 A3X、B3X、C3X、D3X)水膠比對高流動性混凝土的抗壓強度與彈性模數關係圖，由圖中可觀察到 28 天及 56 天齡期的抗壓強度皆隨水膠比增加而下降，28 天抗壓強度由 76.0MPa降低至 56.5MPa，56 天抗壓強度由 77.3MPa降低至 57.4MPa，28 天的抗壓強度已達 56 天抗壓強度 9 成以上。而在彈性模數方面，可觀察到 28 天及 56 天彈性模數亦隨著水膠比升而而降低，與抗壓強度有相同的趨勢。

相同的在爐灰 30%及粗骨材用量 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (配比 A3Y、B3Y、C3Y、D3Y)及爐灰 30%及粗骨材用量 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (配比 A3Z、B3Z、C3Z、D3Z)的 8 個配比與 A3X、B3X、C3X、D3X 等 4 個配比的差異在粗骨材用量。由試驗結果可發現，抗壓強度與彈性模數皆隨著水膠比升高而下降，並且在 28 天及 56 天齡期皆有相同趨勢，如圖 4.23 及圖 4.24 所示，顯示水膠比對混凝土抗壓強度及彈性模數的影響性，並不會因為粗骨材用量的多寡而有差別。圖 4.25 為爐灰取代水泥 50%及粗骨材用量 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 下(配比 A5Y、B5Y、C5Y、D5Y)，水膠比對混凝土 28 天及 56 天抗壓強度及彈性模數的影響，由圖中可觀察到在 28 天齡期時，當水膠比由 0.3 增加至 0.45 時，混凝土抗壓強度由 76.9MPa降低 52.5MPa，56 天抗壓強度則由 80.3MPa降低至 57.4MPa。

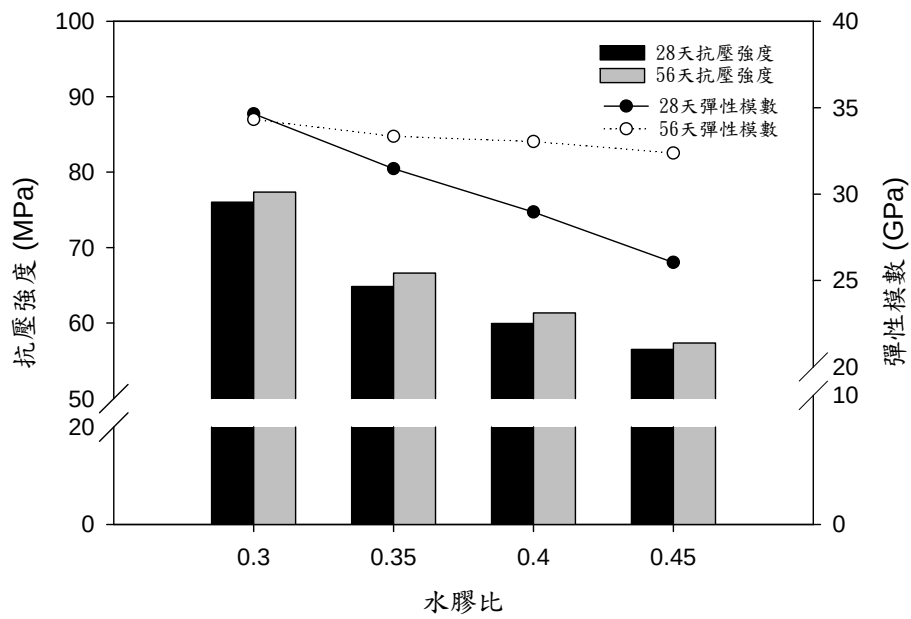


圖 4.22 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係
(爐灰 30%、粗骨材 0.3m³/m³)

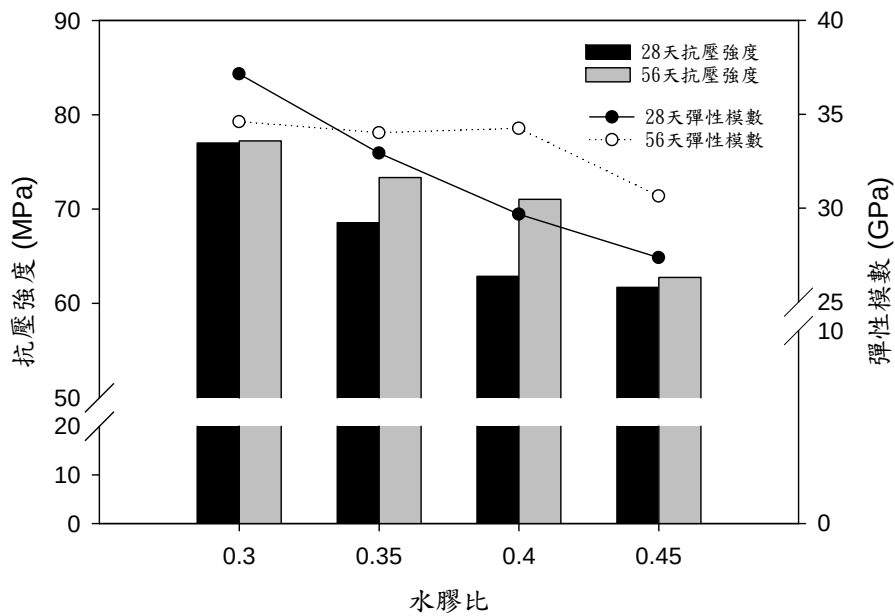


圖 4.23 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係
(礦物摻料 30%、粗骨材 0.35m³/m³)

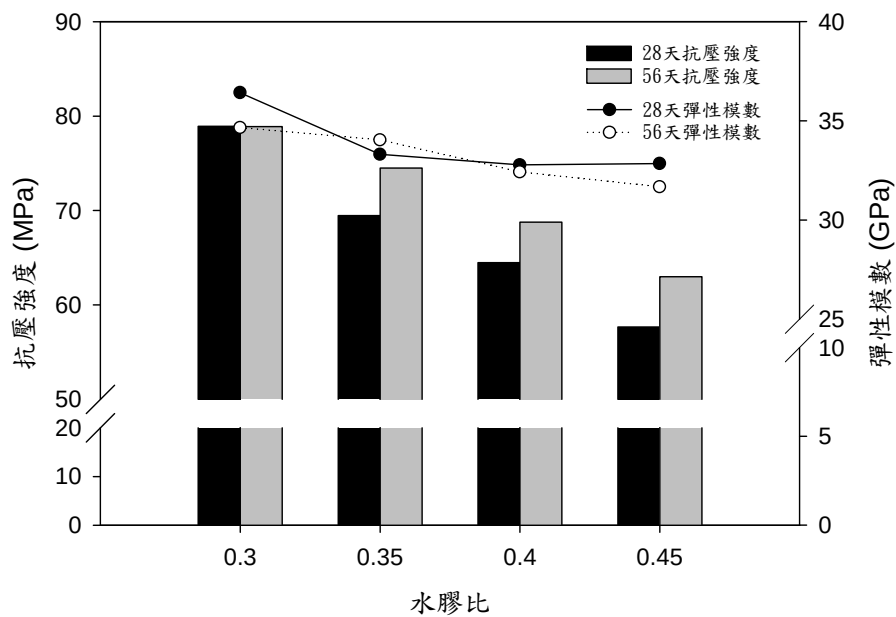


圖 4.24 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係
(礦物摻料 30%、粗骨材 0.40m³/m³)

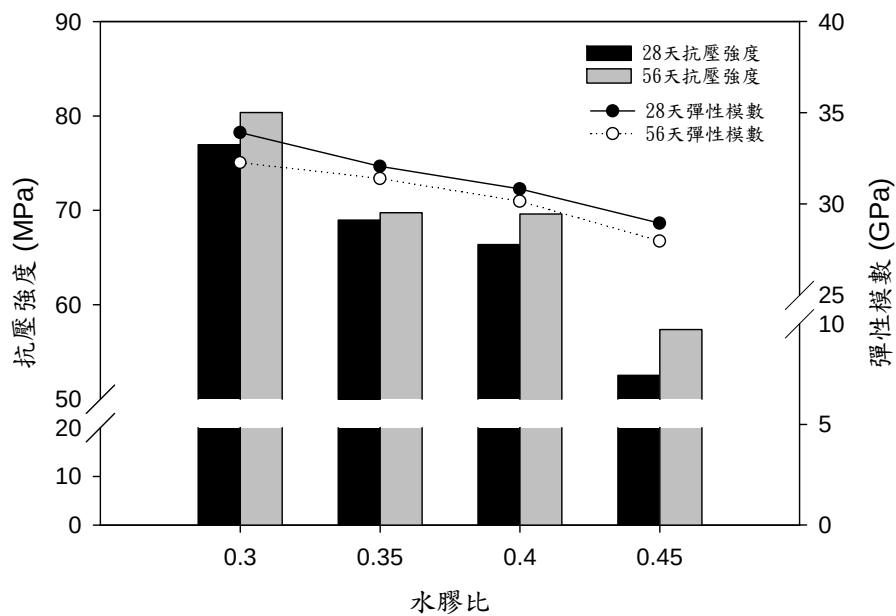


圖 4.25 水膠比與抗壓強度與彈性模數關係
(礦物摻料 35%、粗骨材 0.35m³/m³)

混凝土的張力強度一般可依拉伸試驗、劈裂試驗及 3 分點抗彎進行量測，本研究中則以劈裂試驗進行混凝土的張力強度量測，試驗結果如圖 4.26~圖 4.29 所示，其中圖 4.26 為在爐灰 30%及粗骨材用量 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 下(配比A3X、B3X、C3X、D3X)水膠比對高流動性混凝土的抗壓強度與劈裂強度關係圖，由圖中可觀察到，混凝土的劈裂強度隨水膠比增加而降低，與混凝土抗壓強度有相同的趨勢。同時圖 4.27、圖 4.28、圖 4.29 亦都呈現相同的趨勢，28 天及 56 天劈裂強度皆隨水膠比增加而下降，以圖 4.29 為例，在水膠比由 0.3 增加至 0.45 時，劈裂強度則由 59 kgf/cm^2 下降至 36 kgf/cm^2 ，同時可觀察到劈裂強度約為抗壓強度的 1/12~1/15。將 28 天及 56 天的抗壓強度與劈裂強度進行模型分析，如式 4-1 及式 4-2 所示，28 天模型的 $R^2=0.8929$ ，56 天模型的 $R^2=0.8444$ ，如圖 4.30 所示。

$$f_{t_{28}} = 1.3642e^{0.0182f_{c'28}} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$f_{t_{56}} = 1.2636e^{0.0203f_{c'56}} \dots\dots\dots (4-2)$$

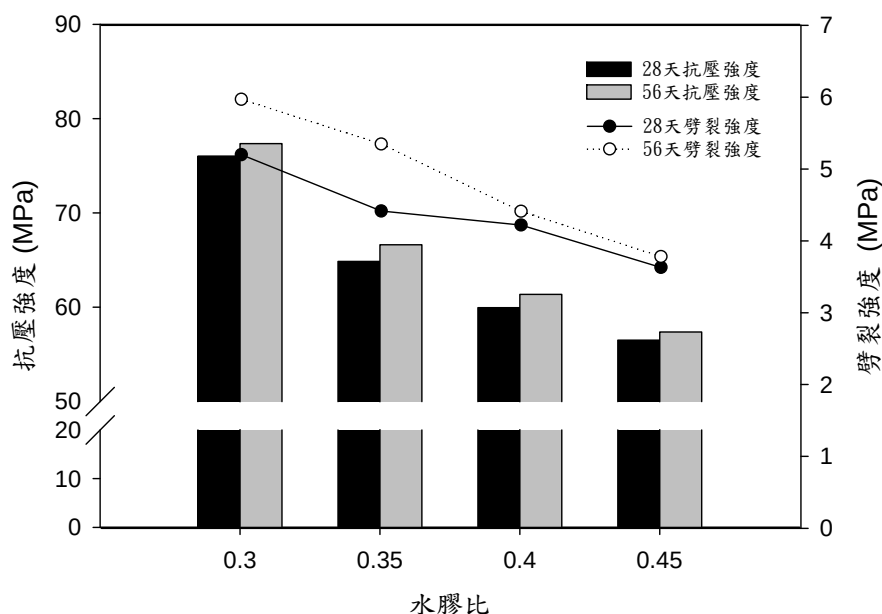


圖 4.26 水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係
(礦物摻料 30%、粗骨材 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$)

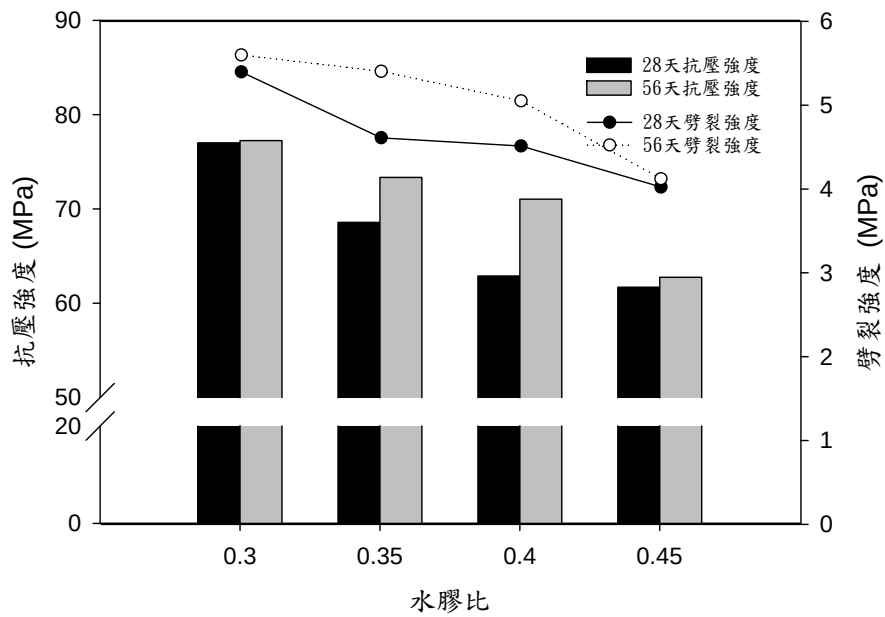


圖 4.27 水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係
(礦物摻料 30%、粗骨材 0.35m³/m³)

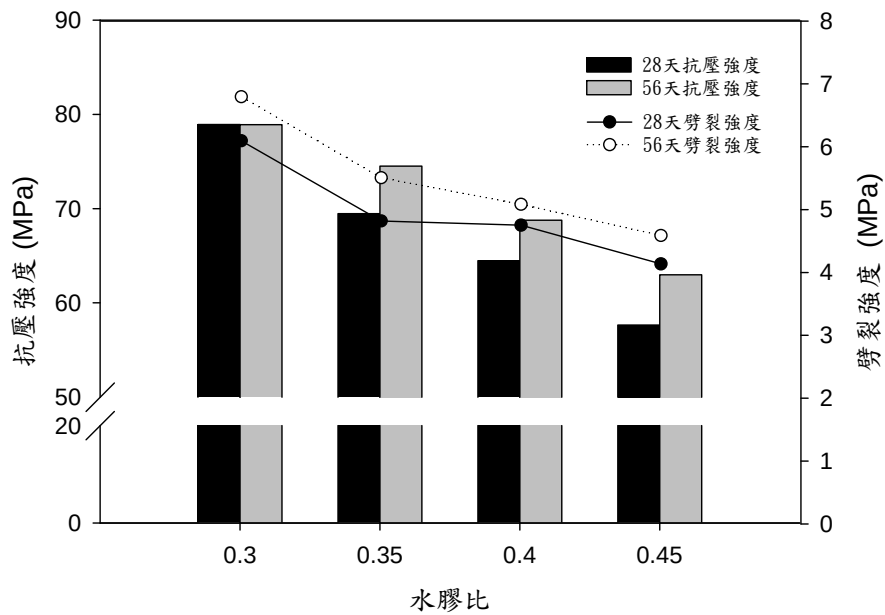


圖 4.28 水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係
(礦物摻料 30%、粗骨材 0.40m³/m³)

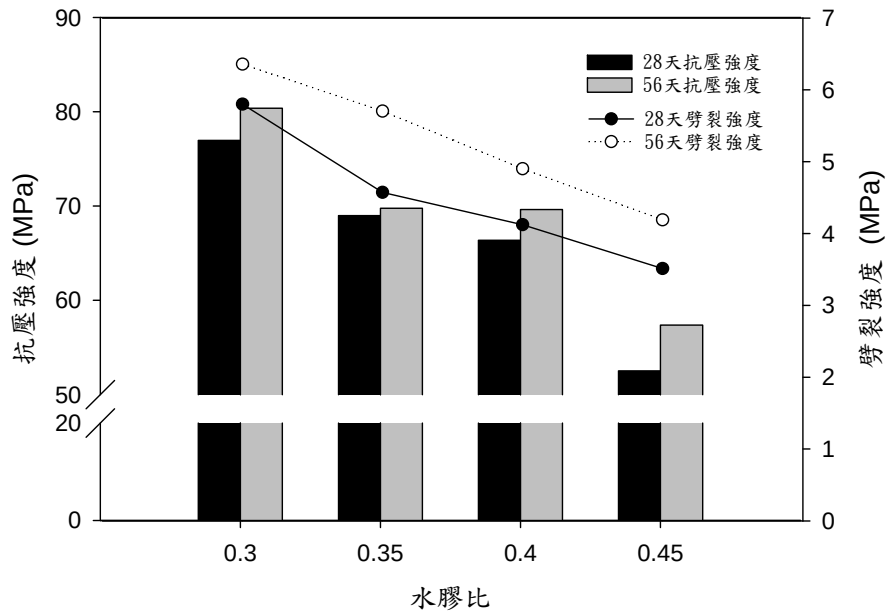


圖 4.29 配比A5Y~D5Y之水膠比與抗壓強度與劈裂強度關係
(礦物摻料 35%、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$)

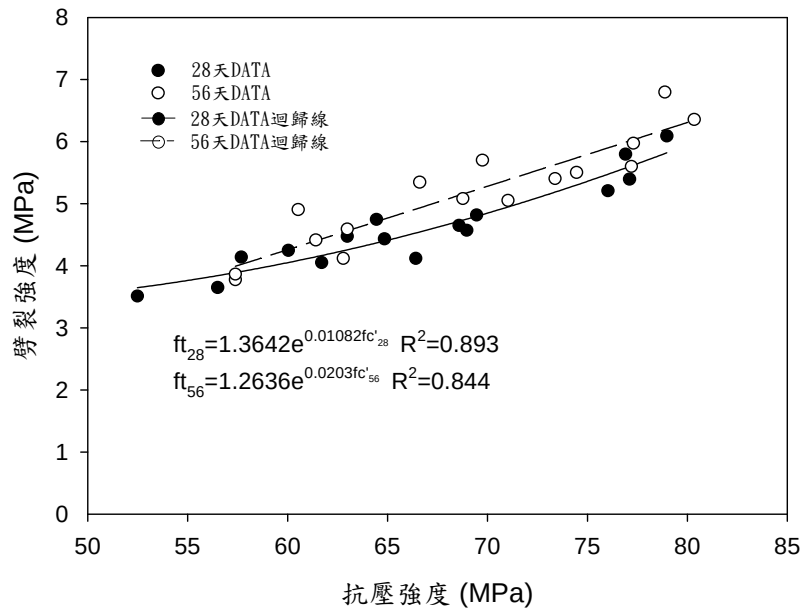


圖 4.30 抗壓強度與劈裂強度關係

4.2.2 粗骨材用量對力學性質之影響分析

在粗骨材用量對混凝土抗壓強度、彈性模數及劈裂強度的影響方面，試驗結果如圖 4.31~圖 4.38 所示，其中圖 4.31~圖 4.34 為粗骨材對混凝土 28 天及 56 天抗壓強度及彈性模數的影響趨勢，其中圖 4.31 控制的參數為水膠比 0.3 及爐灰取代水泥 30%；圖 4.32 控制的參數為水膠比 0.35 及爐灰取代水泥 30%；圖 4.33 控制的參數為水膠比 0.40 及爐灰取代水泥 30%；圖 4.34 控制的參數為水膠比 0.45 及爐灰取代水泥 30%。由以上各圖都可觀察到相似的趨勢，即隨著粗骨材用量的增加，混凝土的抗壓強度及彈性模數皆會隨之增加，僅少數組別呈現粗骨材在 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 時之抗壓強度與彈性模數高於 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 粗骨材含量的配比，此象現應是肇因於 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 的粗骨材用量高達 $1083\text{kg}/\text{m}^3$ ，製作試體時可能因搗實不易而產生缺陷，進而使其強度與彈性模數反而較 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 粗骨材的配比低。

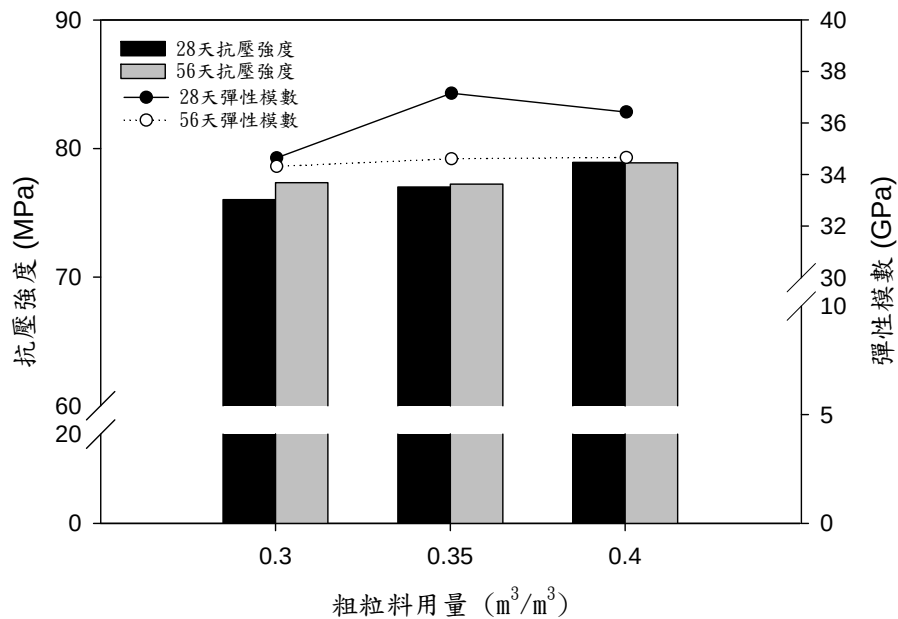


圖 4.31 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%)

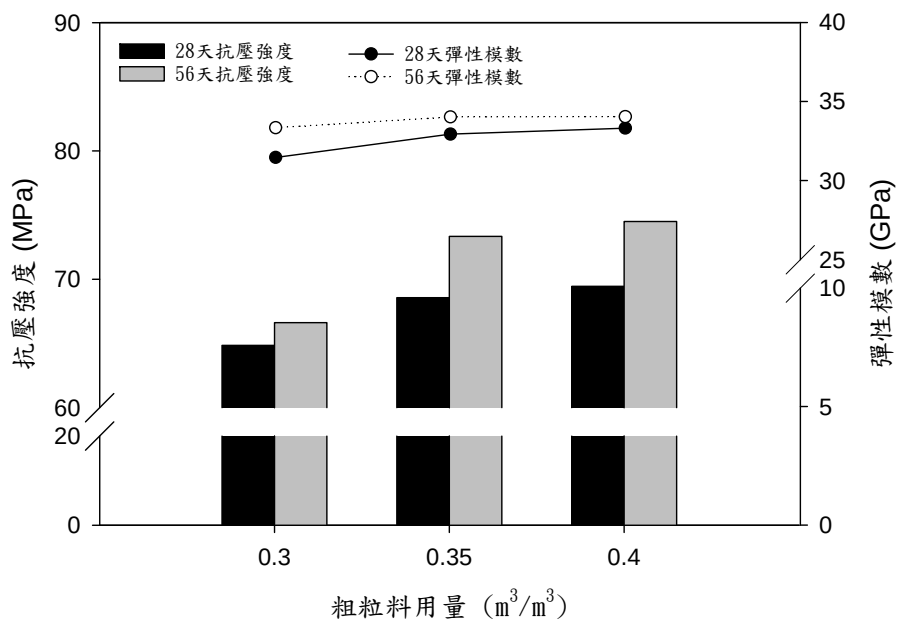


圖 4.32 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係
(水膠比=0.35、礦物摻料 30%)

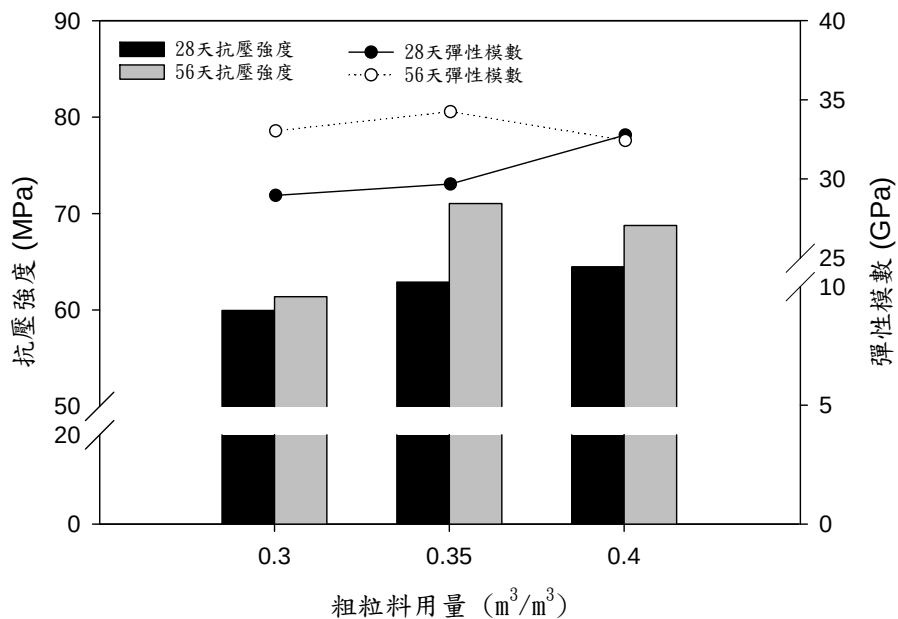


圖 4.33 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係
(水膠比=0.40、礦物摻料 30%)

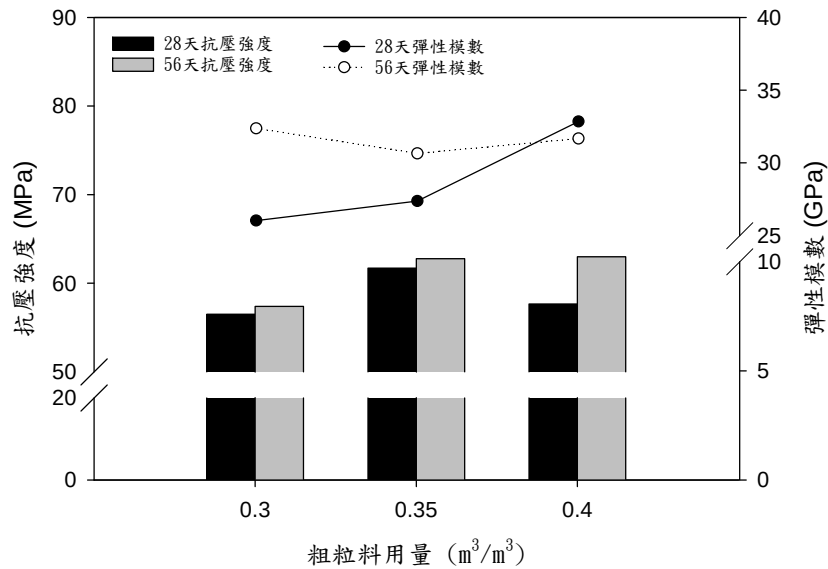


圖 4.34 粗骨材用量與抗壓強度與彈性模數關係
(水膠比=0.45、礦物摻料 30%)

而在混凝土劈裂強度方面，由圖 4.35~圖 4.38 可觀察到在不同水膠比及爐灰取代量下，混凝土劈裂強度皆呈現隨粗骨材用量增加而增加，因現象肇因於當粗骨材用量增加時，混凝土中的界面隨之減少，在相同的漿體量下，可增加漿體與粗骨材的黏結力，進而可避免混凝土破壞於界面區。

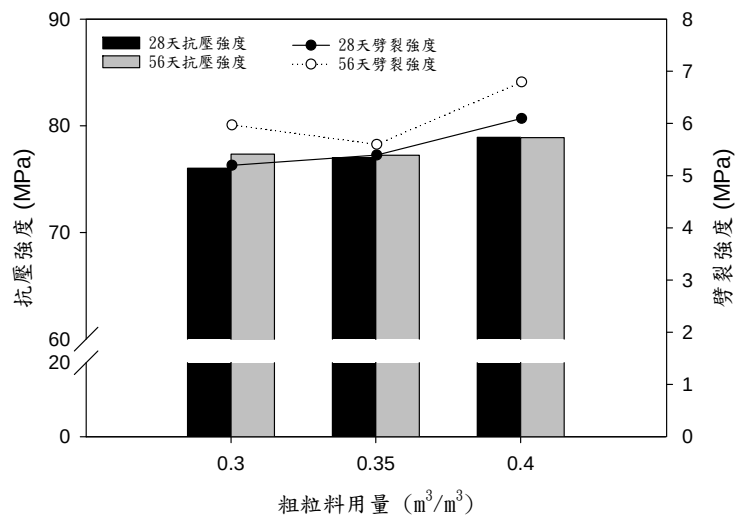


圖 4.35 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%)

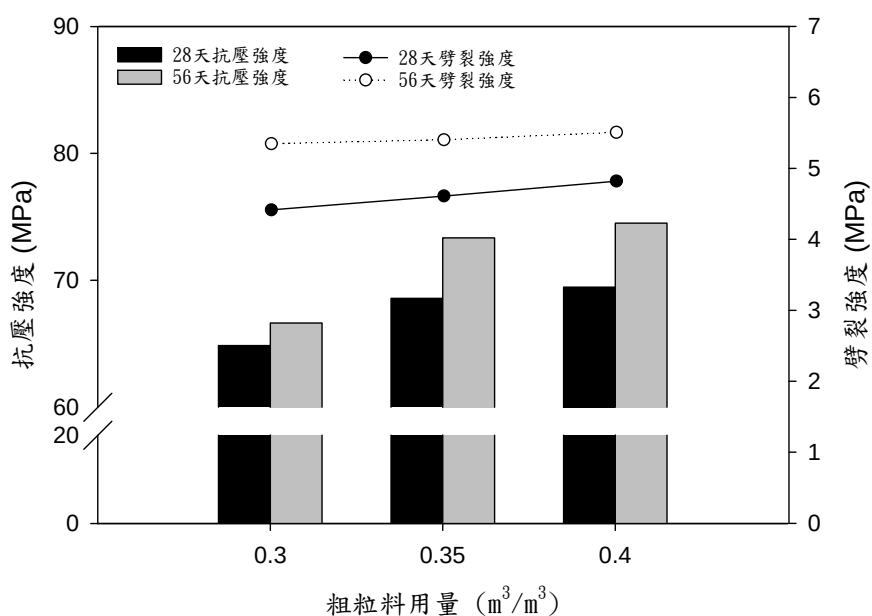


圖 4.36 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係
(水膠比=0.35、礦物摻料 30%)

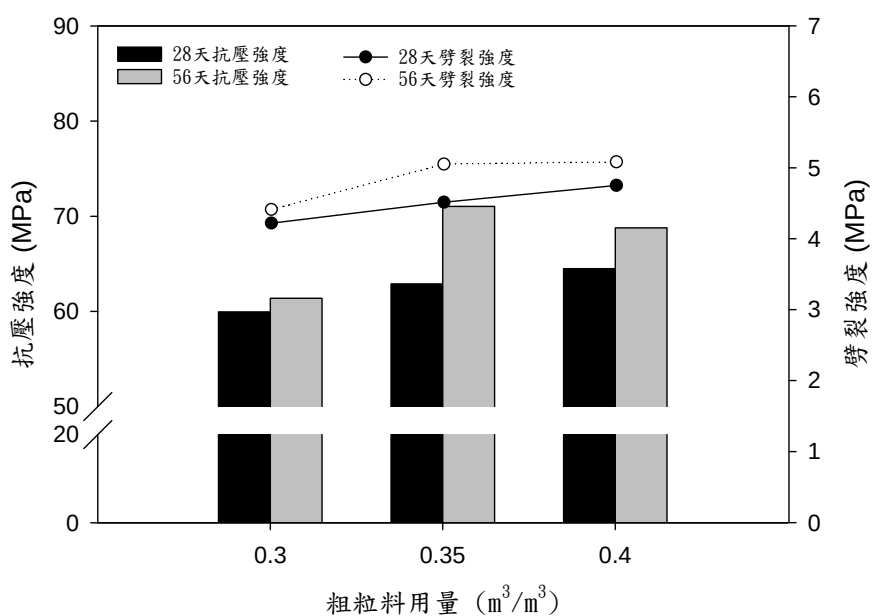


圖 4.37 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係
(水膠比=0.40、礦物摻料 30%)

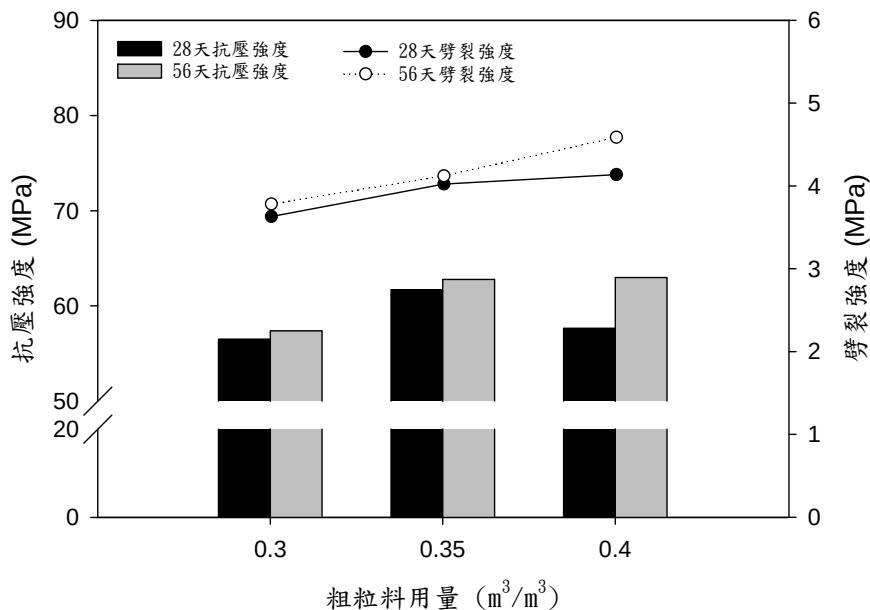


圖 4.38 粗骨材用量與抗壓強度與劈裂強度關係
(水膠比=0.45、礦物摻料 30%)

4.2.3 爐灰取代量對力學性質之影響分析

本研究中所使用之爐灰的爐石粉與飛灰比例為 7：3，為探討不同爐灰添加量對於混凝土力學性質的影響性，因此於本研究中進行 2 種爐灰添加量的研究，分別添加 30%及 50%，每一組別中包含 4 組配比，水膠比分別為 0.30、0.35、0.40 及 0.45。試驗結果如圖 4.39~圖 4.42，其中圖 4.39 為 2 個組別共 8 個配比之 28 天抗壓強度與彈性模數試驗結果，圖中 A3Y、B3Y、C3Y 及 D3Y 為添加 30%爐灰的配比；A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 為添加 50%爐灰的配比，由圖中可觀察到添加 30%與 50%的配比在不同水膠比下，抗壓強度與爐灰添加量的關係並不顯著，有時添加 30%的配比較高，有時添加 50%的配比較高，顯見 2 種添加量的配比其力學性質差異很小，此一現象在抗壓強度、彈性模數與劈裂強度都可觀察到，如圖 4.40、圖 4.41 及圖 4.42。造成添加 30%與 50%爐灰的配比 28 天及 56 天的力學性質差異不大的原因，應該來自於本研究中所使用的爐石粉為 100 級，28 天的活性指數達 106%；飛灰的

28 天活性指數則達 95%，顯示具有良好的活性，因而導致添加 30%與 50%爐灰的配比在力學性質上差異性較小。

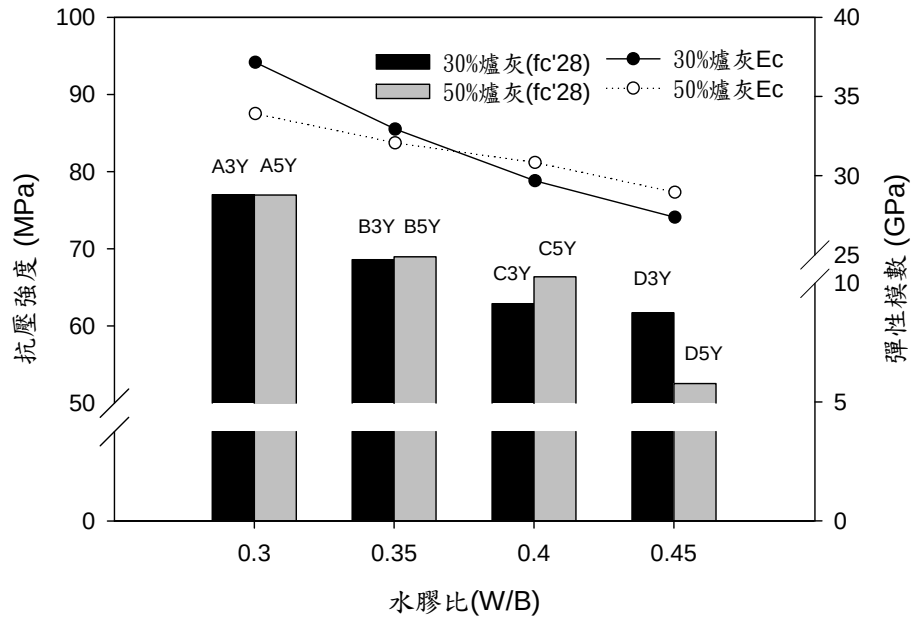


圖 4.39 爐灰用量對抗壓強度與彈性模數之影響(粗骨材 35%)-28 天齡期

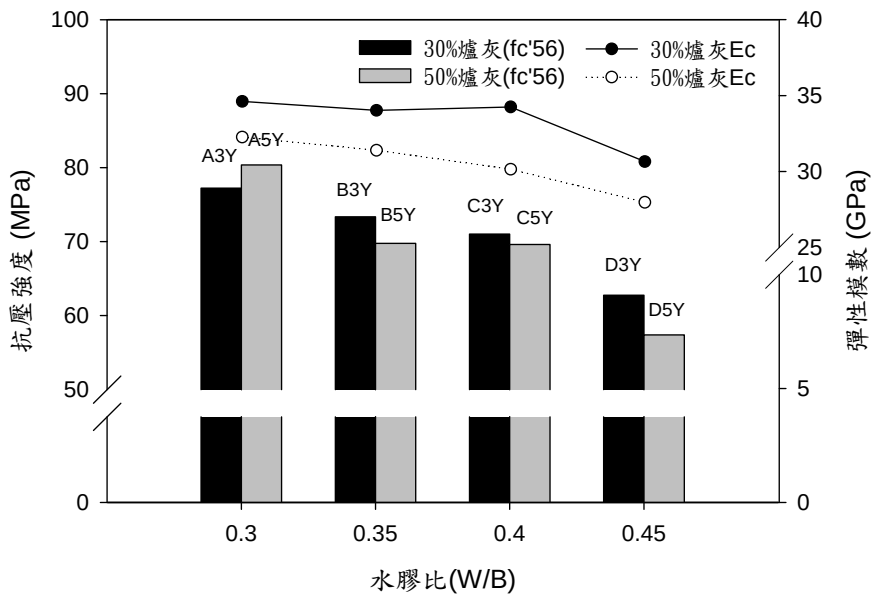


圖 4.40 爐灰用量對抗壓強度與彈性模數之影響(粗骨材 35%)-56 天齡期

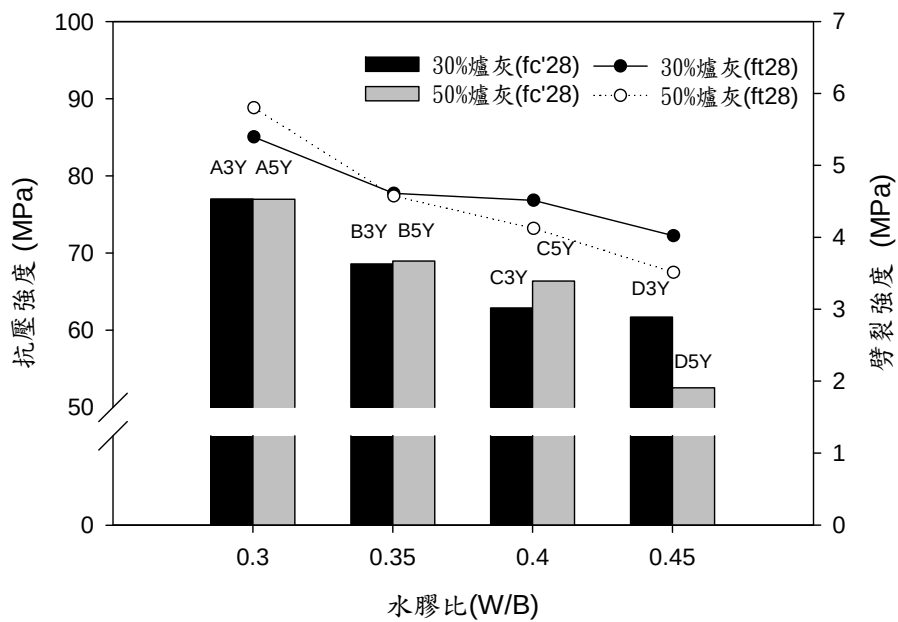


圖 4.41 爐灰用量對抗壓強度與劈裂強度之影響(粗骨材 35%)-28 天齡期

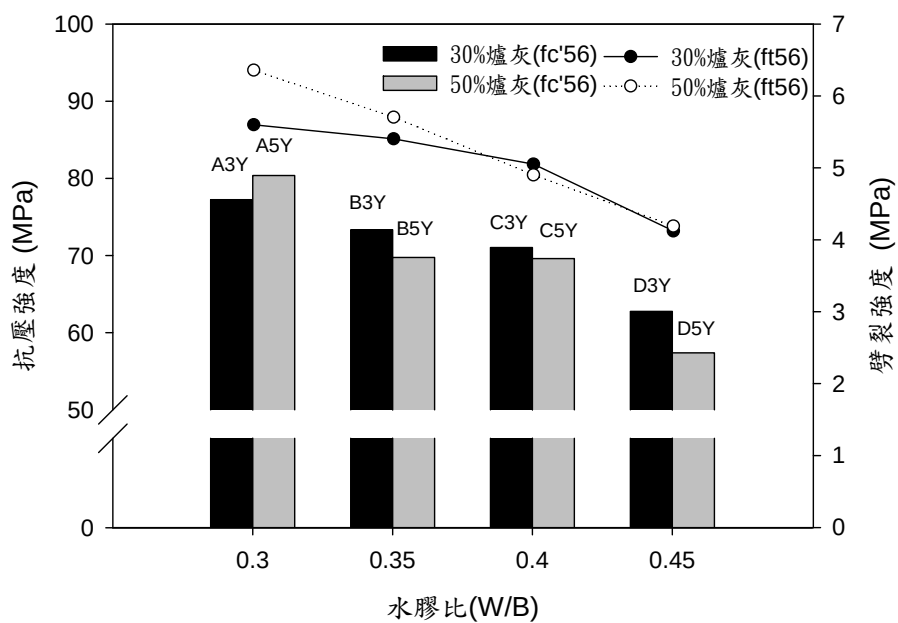


圖 4.42 爐灰用量對抗壓強度與劈裂強度之影響(粗骨材 35%)-56 天齡期

4.3 水中磨耗試驗與結果分析

本研究中之水中磨耗試驗依據 ASTM C1138 進行，試驗總共進行 16 組配比，每一組配比以 2 個試體進行磨耗試驗，16 個配比共 32 個試驗的磨耗試驗結果如圖 4.43~圖 4.58 所示。



試體 1



試體 2

圖 4.43 A3X 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.44 B3X 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.45 C3X 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.46 D3X 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.47 A3Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.48 B3Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.49 C3Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.50 D3Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.51 A3Z 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.52 B3Z 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.53 C3Z 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.54 D3Z 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.55 A5Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.56 B5Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.57 C5Y 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 4.58 D5Y 磨耗試驗結果

4.3.1 水膠比對磨耗量之影響分析

在水膠比對於磨耗量的影響方面，其 56 天材齡試驗結果如表 4-8~表 4-11，圖 4.59~圖 4.62 所示，其中表 4-8 為爐灰添加量 30%及粗骨材 $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 下，水膠比對磨耗量的影響，可發現隨著水膠比的增加水中磨耗量會隨之增加，如圖 4.59 所示。這隱含著水中磨耗量受混凝土抗壓強度的影響，因混凝土抗壓強度隨度亦隨水膠比增加而降低，由此間接說明了在粗骨材用量及爐灰相同用量時，混凝土水中磨耗量會隨著混凝土抗壓強度的增加而降低其磨耗量，顯示抗壓強度越高的混凝土具有越高的硬固，從而在單位時間內其磨耗損失率較低。對於水膠

比對混凝土水膠比的影響，表 4-9、表 4-10 及圖 4.60、圖 4.61 亦顯示在粗骨材 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 時，混凝土的水中磨耗量與水膠比關係是顯著的，並且呈現隨水膠比增加，水中磨耗量增加的趨勢。

另一方面，在粗骨材 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 及 50% 的爐灰下，不同水膠比對水中磨耗的影響如表 4-11 及圖 4.62 示。由圖 4.62 可觀察到 $W/B=0.3$ 的配比磨耗量較小， $W/B=0.45$ 的配比磨耗量最多，但 $W/B=0.35$ 及 $W/B=0.40$ 二個配比的磨耗量則呈現 $W/B=0.35$ (B5Y) 配比的磨耗量大於 $W/B=0.40$ (C5Y) 的磨耗量，此結果並不合理，觀察表 4-11 的 12 小時磨耗量，可發現配比 B5Y 的磨耗量達 20 cm^3 及 30 cm^3 ，但配比 C5Y 僅 10 cm^3 及 10 cm^3 ，推測可能為配比 B5Y 的試體於製作時，因人為因素導致表層漿體較多，進而使前 12 小時的磨耗量較配比 C5Y 高，而導致配比 B5Y 的 60 小時磨耗量高於配比 C5Y。

表 4-8 配比 A3X、B3X、C3X 及 D3X 水中磨耗試驗結果

單位： cm^3

時間 (小時)	A3X		B3X		C3X		D3X	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	10	20	10	10	10	10	10	20
24	20	30	30	20	30	30	50	50
36	20	40	70	50	60	70	90	80
48	40	50	70	60	80	90	100	110
60	50	60	110	70	80	100	110	130

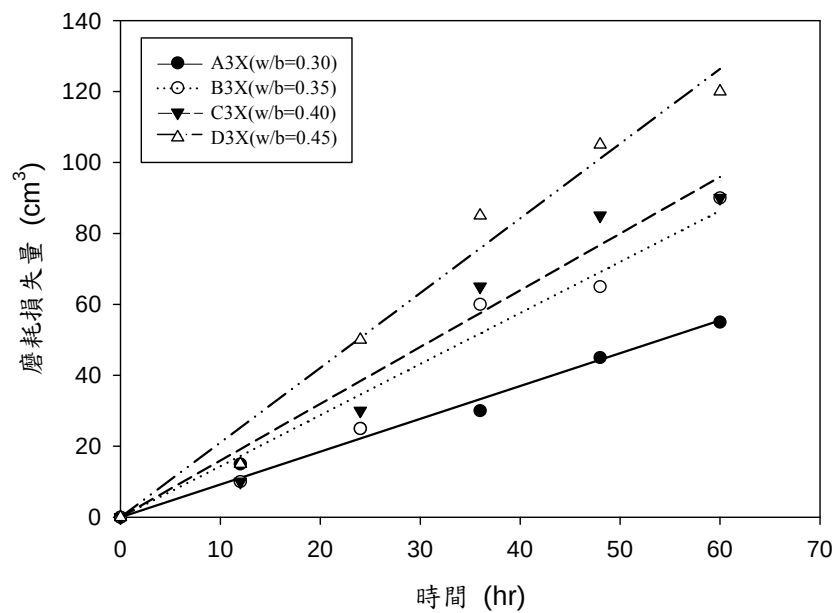


圖 4.59 水膠比對磨耗損失影響

(粗骨材用量 $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 30%，2 試體平均值)

表 4-9 配比 A3Y、B3Y、C3Y 及 D3Y 水中磨耗試驗結果

單位： cm^3

時間 (小時)	A3Y		B3Y		C3Y		D3Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	10	20	10	10	10	10	20	10
24	20	30	10	20	30	50	50	40
36	30	40	20	40	50	70	60	60
48	40	50	30	50	80	110	90	90
60	40	50	40	60	120	140	110	110

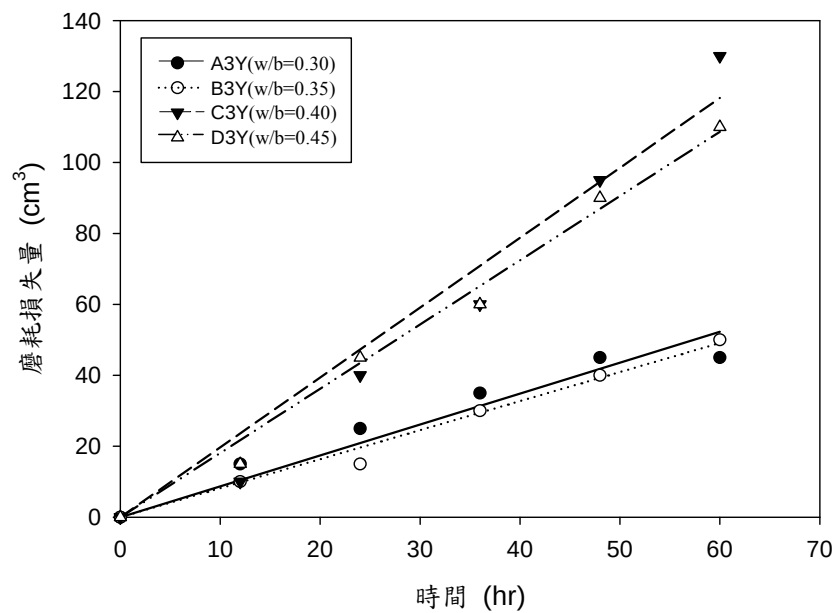


圖 4.60 水膠比對磨耗損失影響(2 試體平均值)
(粗骨材用量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、礦物摻料 30%，2 試體平均值)

表 4-10 配比 A3Z、B3Z、C3Z 及 D3Z 水中磨耗試驗結果

單位： cm^3

時間 (小時)	A3Z		B3Z		C3Z		D3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	10	10	20	20	20	20	20	20
24	20	30	30	30	30	30	40	40
36	30	40	40	40	50	50	60	60
48	40	50	50	50	70	70	80	80
60	40	50	70	70	80	80	100	90

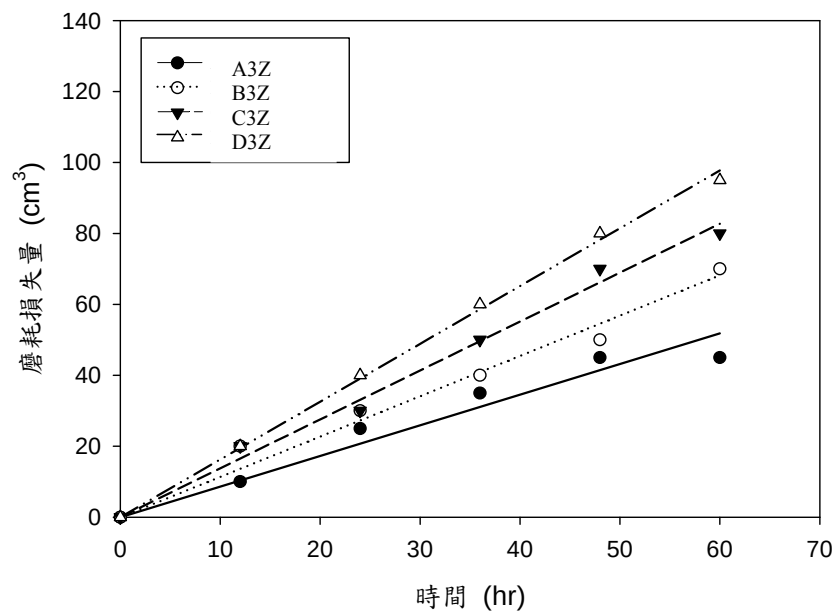


圖 4.61 水膠比對磨耗損失影響
(粗骨材用量 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 、礦物摻料 30%，2 試體平均值)

表 4-11 配比 A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 水中磨耗試驗結果

單位： cm^3

時間 (小時)	A5Y		B5Y		C5Y		D5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	10	10	20	30	10	10	20	20
24	20	20	30	30	20	20	40	50
36	30	30	40	50	40	40	50	70
48	40	40	60	80	50	50	60	100
60	50	40	80	100	70	70	80	120

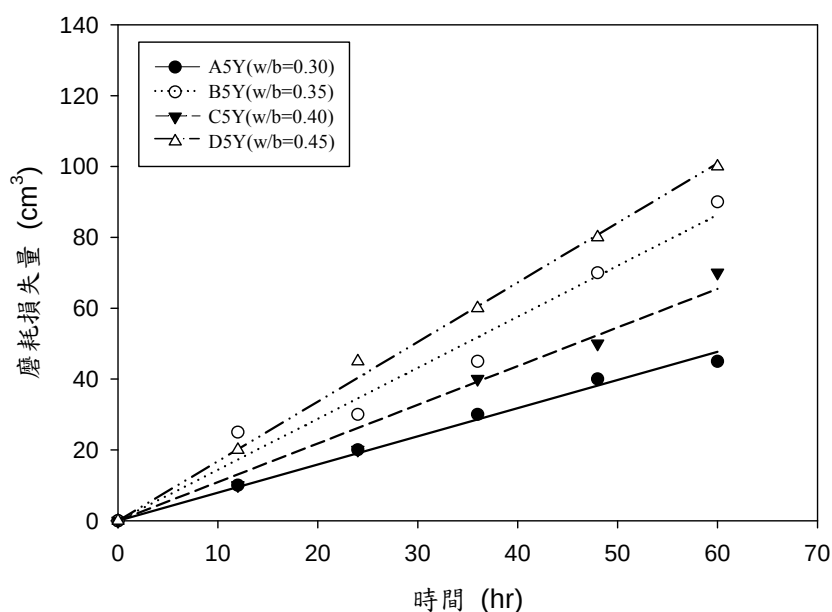


圖 4.62 配比 A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 之水膠比對磨耗損失影響
(粗骨材用量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、礦物摻料 35%，2 試體平均值)

4.3.2 粗骨材用量對磨耗量之影響分析

水中磨耗試驗在試驗過程中，首先於前 12 小時或 24 小時會先將表面砂漿部分磨掉，一般來說此時的磨耗量會較高，尤其是混凝土強度較低時，此一現象更為明顯。當表面砂漿磨損掉後，更深一層的部份因含有粗骨材，單位時間的磨損量將會略微下降，此時的磨耗量取決於砂漿強度及粗骨材強度，此 2 種材料的複合強度將決定混凝土抵抗磨耗的能力，砂漿及粗骨材所複合的強度包含砂漿強度、砂漿黏裹粗骨材的鍵結強度及粗骨材強度等。由以上知，當砂漿強度越接近粗骨材強度時，則磨損量受粗骨材含量的影響越小；另一方面，當砂漿強度越強時，則在不同粗骨材含量時，粗骨材含量對磨耗量的影響變異較小，但在砂漿強度較低時，則可能發生粗骨材含量高的配比磨耗量較粗骨材含量低的配比较高，也可能發生粗骨材含量低的配比磨耗量較粗骨材含量高的配比较高。造成這樣的現象來自於當粗骨材用量過多時，混凝土工作性將變差，粗骨材顆骨材容易堆積，當砂漿強度不夠

時，則可能發生粗骨材的界面黏裹強度不夠的現象。

在本研究中，粗骨材與磨耗量的關係如表 4-12~表 4-15 及圖 4.63~圖 4.65 所示，其中表 4-12 及圖 4.63 為水膠比 0.30 及 30% 爐灰添加量下，不同粗骨材含量的水中磨耗試驗結果。由圖中可觀察到，粗骨材含量 $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 等 3 個配比的 56 天抗壓強度分別為 66.6MPa、73.4MPa 及 74.2MPa，很明顯的配比 B3X 抗壓強度較其餘 2 配比低，而由磨耗試驗結果亦呈現配比 B3X 的磨耗量最高。另一方面，配比 B3Y 及配比 B3Z 的強度相近，而磨耗試驗結果呈現粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 的配比磨耗量較 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 的配比小，由試驗結果可推估可能粗骨材含量 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 的混凝土試體在試體製作上較為均勻，而導致配比 B3Y 的磨耗量優於配比 B3Z。

表 4-12 配比 A3X、A3Y 及 A3Z 水中磨耗試驗結果

單位： cm^3

時間 (小時)	A3X		A3Y		A3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
12	10	20	10	20	10	10
24	20	30	20	30	20	30
36	20	40	30	40	30	40
48	40	50	40	50	40	50
60	50	60	40	50	40	50

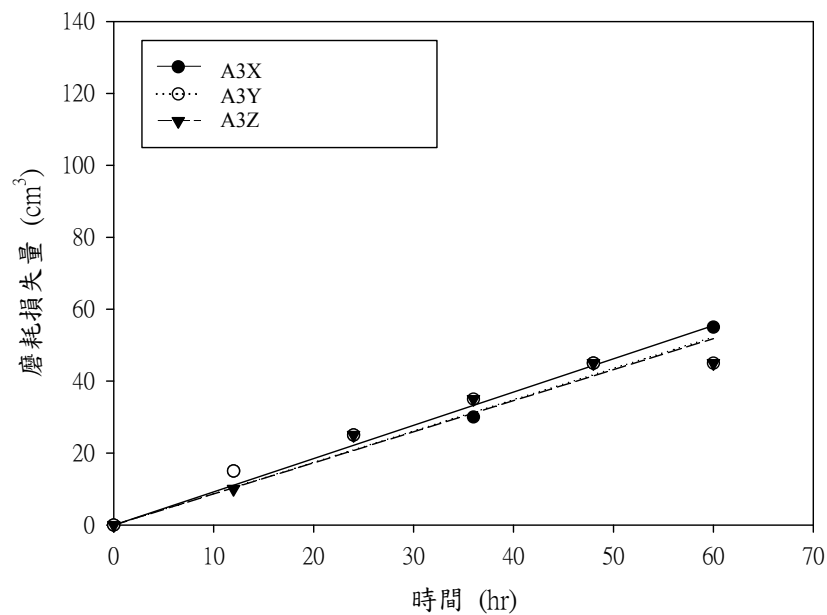


圖 4.63 配比 A3X、A3Y 及 A3Z 之粗骨材用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%)

表 4-13 配比B3X、B3Y及B3Z水中磨耗試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	B3X		B3Y		B3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
12	10	10	10	10	20	20
24	30	20	10	20	30	30
36	70	60	20	40	40	40
48	70	50	30	50	50	50
60	110	70	40	60	70	70

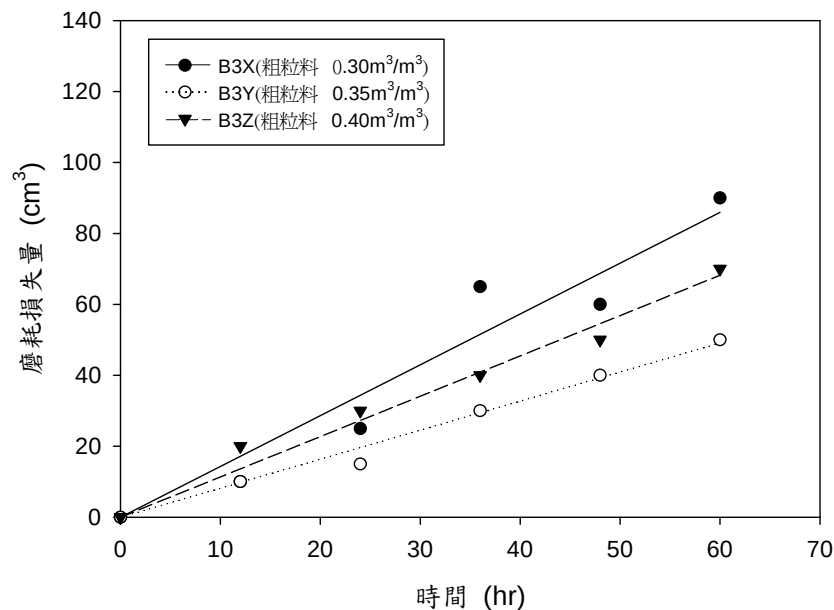


圖 4.64 配比 B3X、B3Y 及 B3Z 之粗骨材用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)
(水膠比=0.35、礦物摻料 30%)

表 4-14 及圖 4.65 為水膠比 0.40 及 30% 爐灰添加量下， $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 等 3 種粗骨材配比的磨耗試驗結果，由試驗結果可知，配比 C3Z 的磨耗量最小、配比 C3X 次之而配比 C3Y 最大。在抗壓強度方面，配比 C3X 為 61.4MPa、配比 C3Y 為 71.1MPa 及配比 C3Z 為 68.8MPa。由抗壓強度與磨耗試驗的結果可發現，C3Y 的抗壓強度最高，但其磨耗量卻最大，同時粗骨材用量為 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 介於其餘 2 配比之間，因此說明了配比 C3Y 的試驗結果可能有誤，可能來自於試體製作或者是試驗上的量測問題。而在僅比較配比 C3X 及 C3Z 時，可推估粗骨材用量較高的 C3Z 的配比有較佳的抗磨能力。

表 4-14 配比 C3X、C3Y 及 C3Z 水中磨耗試驗結果

單位：cm³

時間 (小時)	C3X		C3Y		C3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
12	10	10	10	10	20	20
24	30	30	30	50	30	30
36	60	70	50	70	50	50
48	80	90	80	110	70	70
60	80	100	120	140	80	80

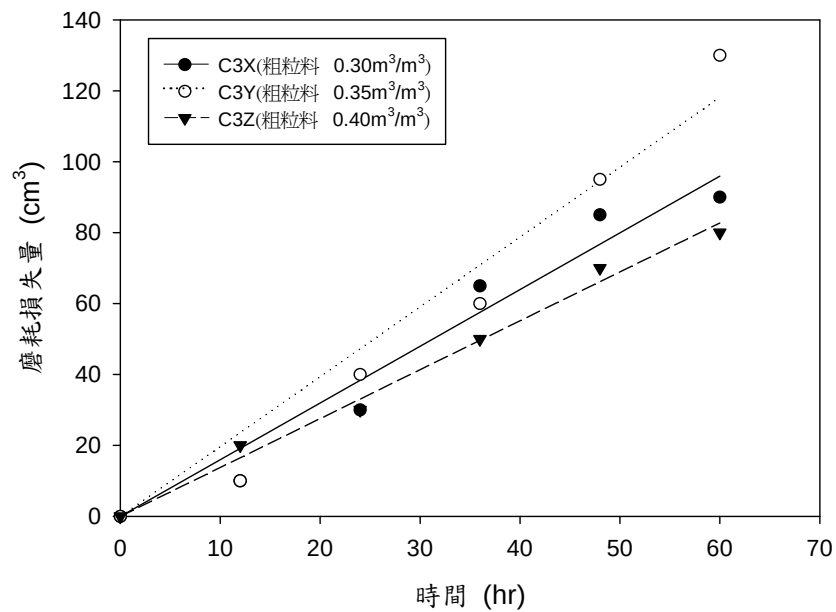


圖 4.65 配比 C3X、C3Y 及 C3Z 之粗骨材用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)
(水膠比=0.40、礦物摻料 30%)

表 4-15 及圖 4.66 為水膠比 0.45 及 30% 爐灰添加量下， $0.30\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ 及 $0.40\text{m}^3/\text{m}^3$ 等 3 種粗骨材配比的磨耗試驗結果，由試驗結果可觀察到 3 個配比的磨耗量差異不大，但呈現磨耗量隨粗骨材用量增加而減少的趨勢。由以上 4 個組別的試驗結果可粗估，磨耗量與粗骨材用量仍是存在相關性，同時在粗骨材用量較高的情形下，一般會有較好的抗磨耗能力。

表 4-15 配比 D3X、D3Y 及 D3Z 水中磨耗試驗結果

單位： cm^3

時間 (小時)	D3X		D3Y		D3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
12	10	20	20	10	20	20
24	50	50	50	40	40	40
36	90	80	60	60	60	60
48	100	110	90	90	80	80
60	110	130	110	110	100	90

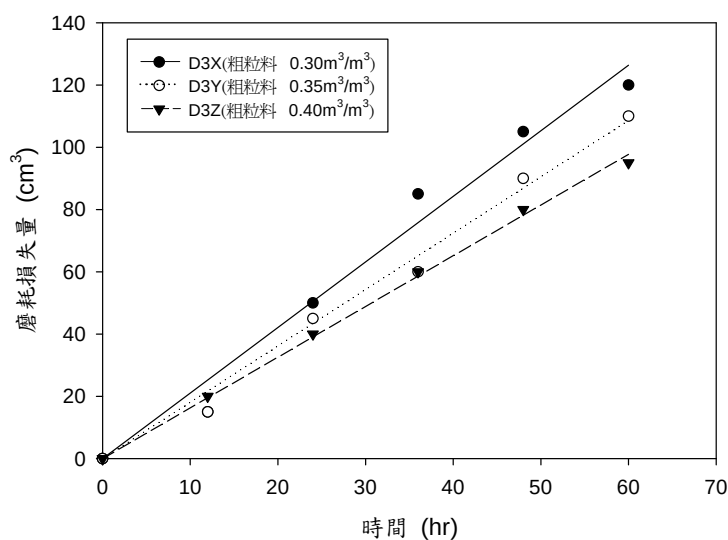


圖 4.66 配比 D3X、D3Y 及 D3Z 之粗骨材用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)(水膠比=0.45、礦物摻料 30%)

4.3.3 礦物摻料取代量磨耗量之影響分析

卜作嵐摻料以取代部份粉體的角色添加於混凝土中，除可提高混凝土的工作性外，對於混凝土的強度、耐久性及緻密度都有提升的作用。較常使用的卜作嵐材料為爐石粉與飛灰，此 2 種材料中以爐石粉的活性較佳，一般 100 級的爐石粉於 28 天時，活性可達到 100 以上，同時於長齡期時亦可與水泥中的 Ca(OH)_2 產生卜作嵐反應，除提供強度外亦可增加混凝土的緻密性；而飛灰的反應主要來自於卜作嵐反應，於長齡期時會較為顯著。本研究中，有添加 30% 爐灰及 50% 爐灰 2 個系列的實驗，其中爐灰的爐灰粉與飛灰的比例為 7：3，水中磨耗的試驗結果如表 4-16~表 4-19 及圖 4.67~圖 4.70 所示。由試驗結果可觀察到，配比 A5Y 的磨耗量小於配比 A3Y；配比 B5Y 的磨耗量大於配比 B3Y；配比 C5Y 的磨耗量小於 C3Y；配比 D5Y 的磨耗量小於 D3Y，其中配比 A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 的爐灰添加量為 50%，配比 A3Y、B3Y、C3Y 及 D3Y 的爐灰添加量為 30%，由試驗的結果發現，配比 B5Y 外，其餘添加爐灰 50% 的配比其磨耗量皆低於添加 30% 爐灰的配比，如圖圖 4.67~圖 4.70 所示。由以上的結果可初步推論，在抗水中磨耗能力方面，添加 50% 爐灰的混凝土的抗磨耗能力會優於添加 30% 爐灰混凝土。

表 4-16 配比 A3Y 及 A5Y 水中磨耗試驗結果 (cm^3)

時間 (小時)	A3Y		A5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
12	10	20	10	10
24	20	30	20	20
36	30	40	30	30
48	40	50	40	40
60	40	50	50	40

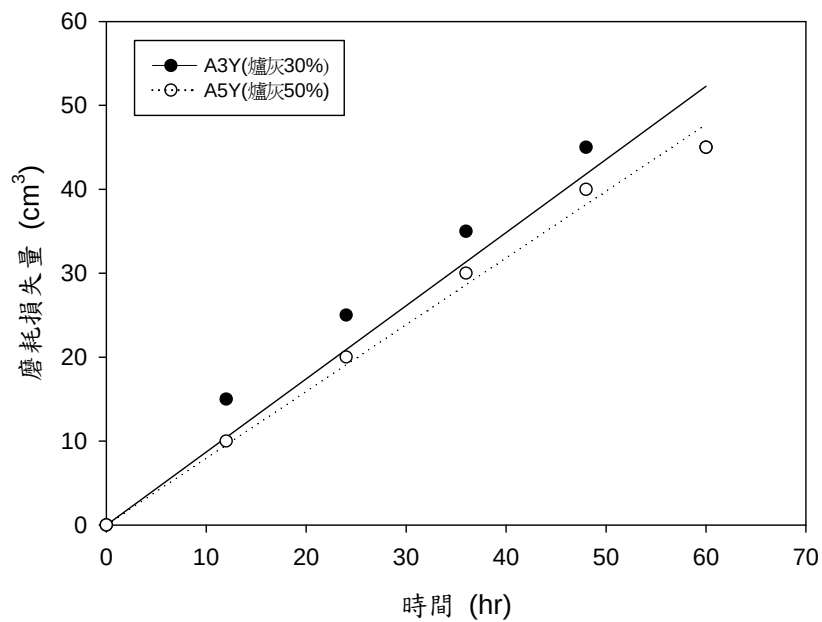


圖 4.67 配比 A3Y 及 A5Y 之爐灰用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)
(水膠比=0.30、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$)

表 4-17 配比 B3Y 及 B5Y 水中磨耗試驗結果 (cm^3)

時間 (小時)	B3Y		B5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
12	10	10	20	30
24	10	20	30	30
36	20	40	40	50
48	30	50	60	80
60	40	60	80	100

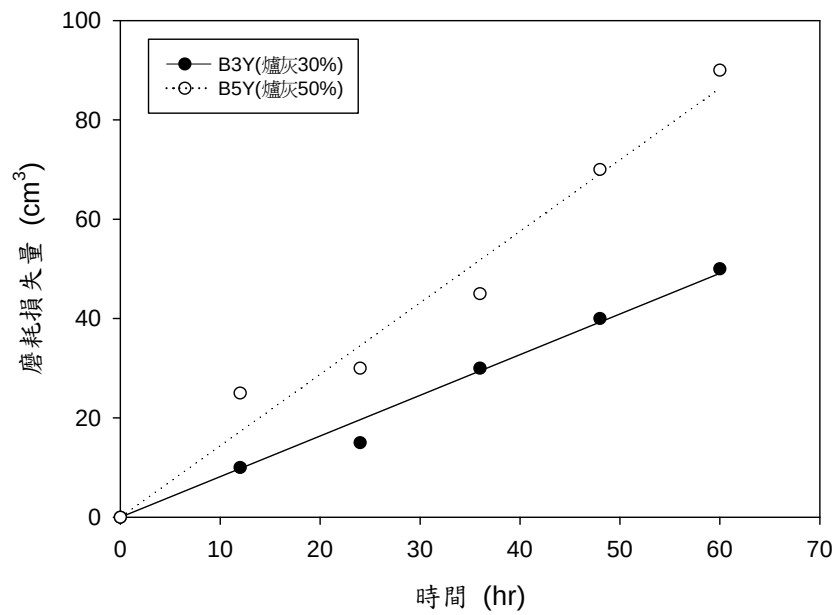


圖 4.68 配比 B3Y 及 B5Y 之爐灰用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)
(水膠比=0.35、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$)

表 4-18 配比 C3Y 及 C5Y 水中磨耗試驗結果 (cm^3)

時間 (小時)	C3Y		C5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
12	10	10	10	10
24	30	50	20	20
36	50	70	40	40
48	80	110	50	50
60	120	140	70	70

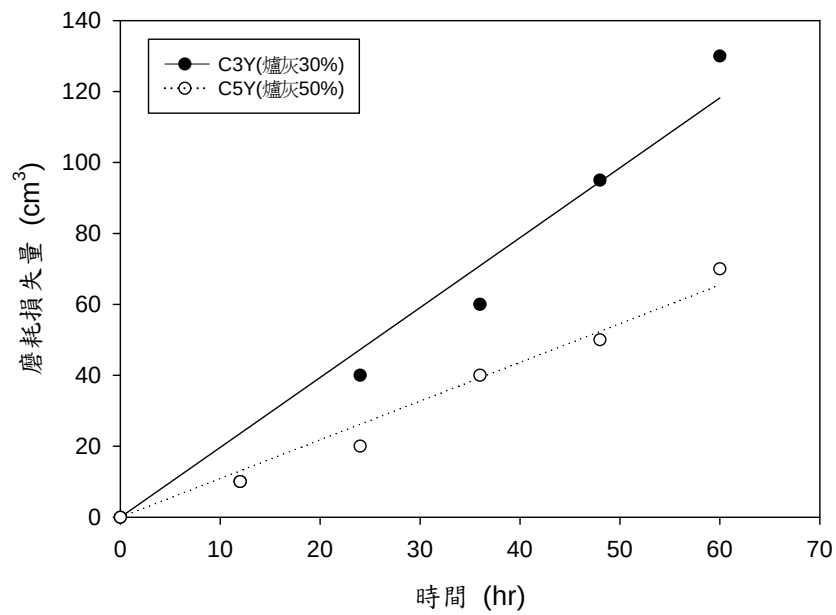


圖 4.69 配比 C3Y 及 C5Y 之爐灰用量對磨耗損失影響
(2 試體平均值)
(水膠比=0.40、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$)

表 4-19 配比 D3Y 及 D5Y 水中磨耗試驗結果 (cm^3)

時間 (小時)	D3Y		D5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
12	20	10	20	20
24	50	40	40	50
36	60	60	50	70
48	90	120	60	100
60	110	140	80	120

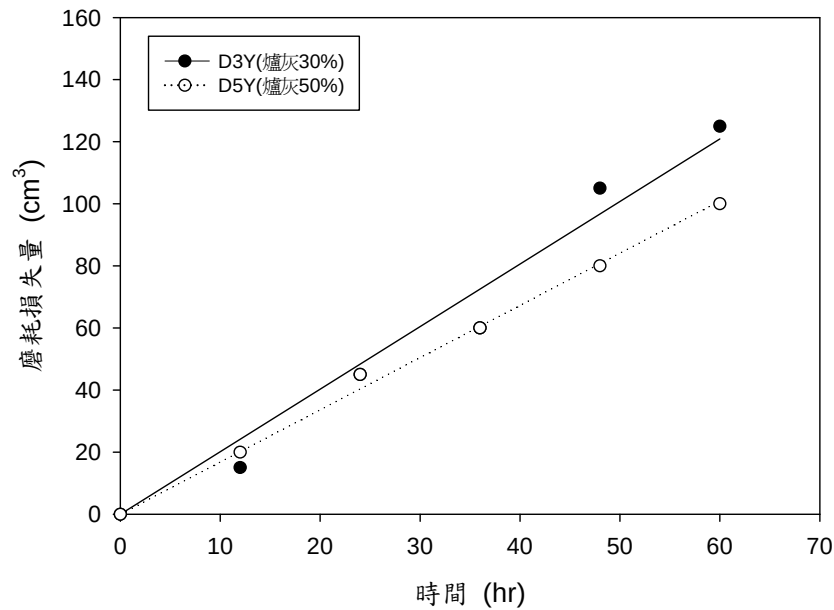


圖 4.70 配比D3Y及D5Y之爐灰用量對磨耗損失影響(2 試體平均值)
(水膠比=0.45、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$)

4.4 含砂水流沖擊磨耗試驗與結果分析

含泥砂之高速流水通過水工結構物時，會對其混凝土表面進行沖磨作用，其破壞行為包括顆粒摩擦，以及水流與顆粒沖擊兩種，後者的破壞能量十分重大，若持續作用之時間長久，產生之破壞速度將十分可觀。高速泥砂流水之磨損破壞速度與泥砂運動狀態、水流流速、含砂量、泥沙顆粒形狀及粒徑、硬度等相關。而摩擦作用則會在經過的混凝土表面留下溝槽與擦痕，亦是造成結構物破壞的主要作用。本研究以固定含砂量與流速水流之沖擊試驗，以模擬橋樑構造在遭受含砂合流衝擊作用下之耐磨性。含砂水流沖擊試驗共進行 16 組配比，每組配比均取兩個試體之測試平均值為試驗值，並進行相關之分析，試驗結果如圖 4.71~圖 4.86 所示。

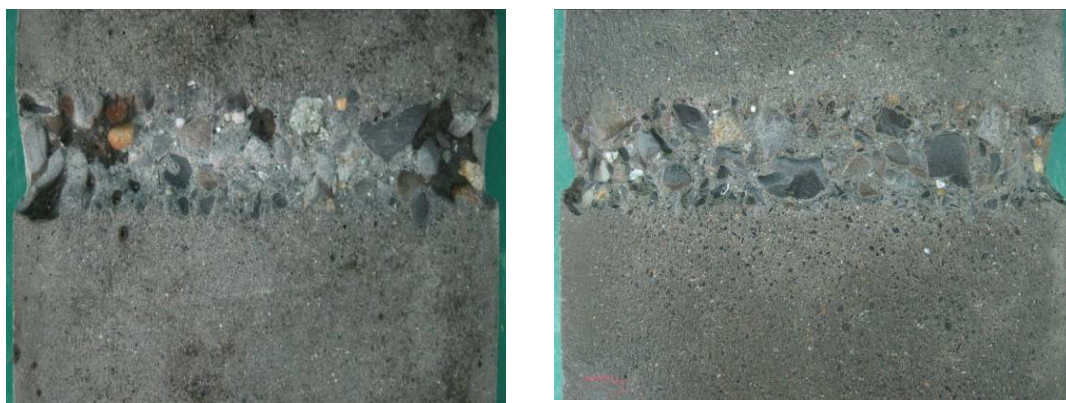


圖 4.71 A3X 沖磨試驗結果

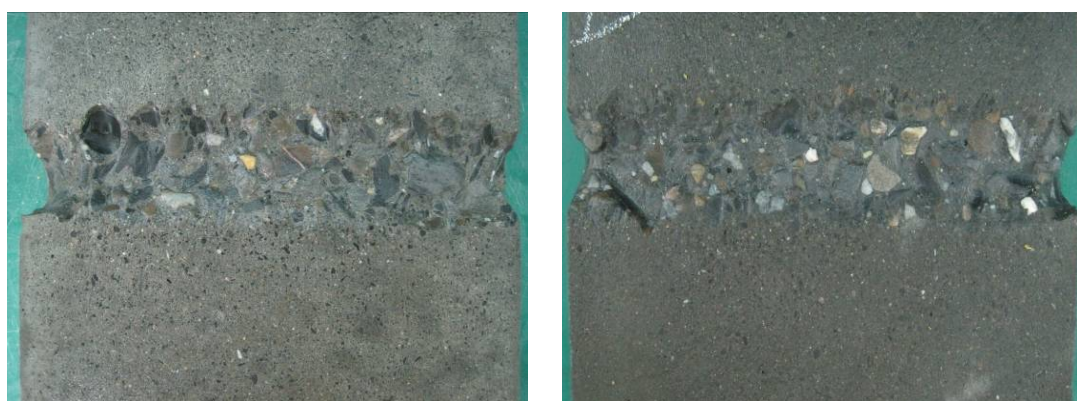


圖 4.72 A3Y 沖磨試驗結果

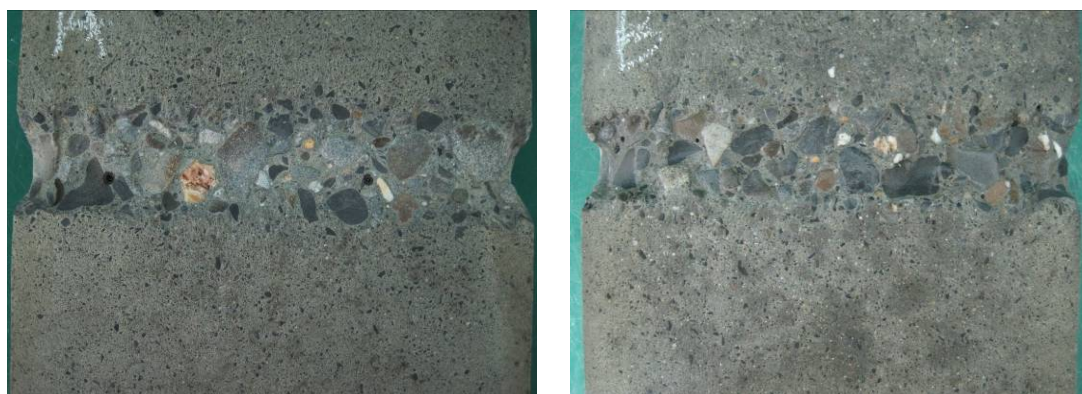


圖 4.73 A3Z 沖磨試驗結果

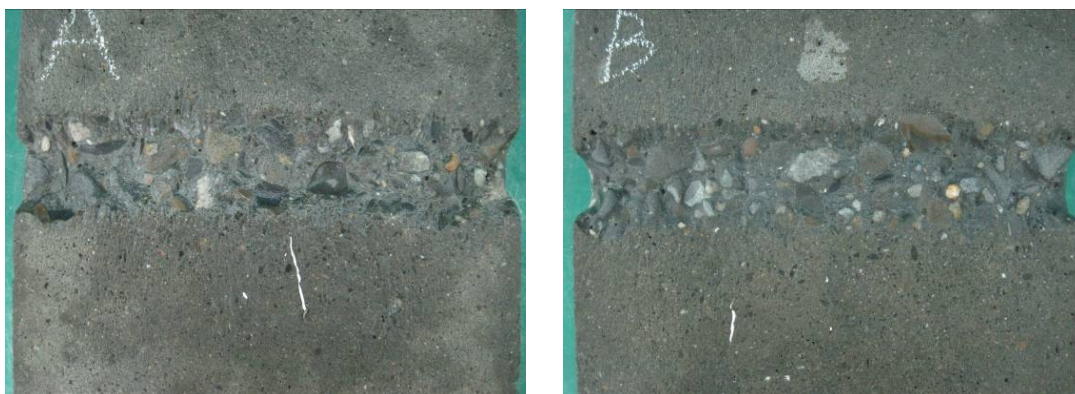


圖 4.74 A5Y 沖磨試驗結果



圖 4.75 B3X 沖磨試驗結果

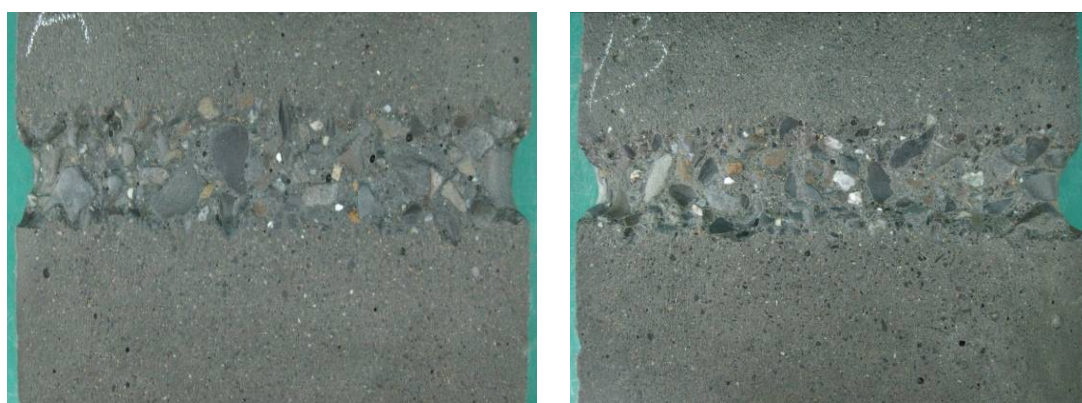


圖 4.76 B3Y 沖磨試驗結果



圖 4.77 B3Z 沖磨試驗結果



圖 4.78 B5Y 沖磨試驗結果



圖 4.79 C3X 沖磨試驗結果

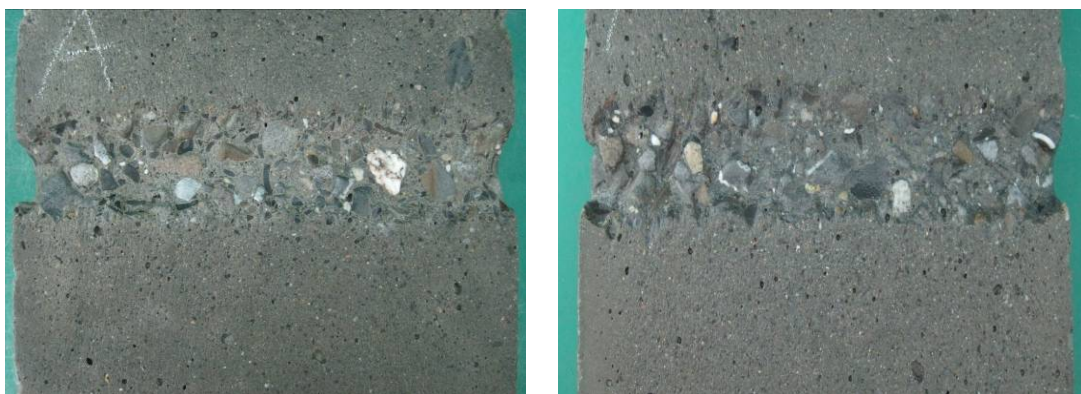


圖 4.80 C3Y 沖磨試驗結果



圖 4.81 C3Z 沖磨試驗結果



圖 4.82 C5Y 沖磨試驗結果

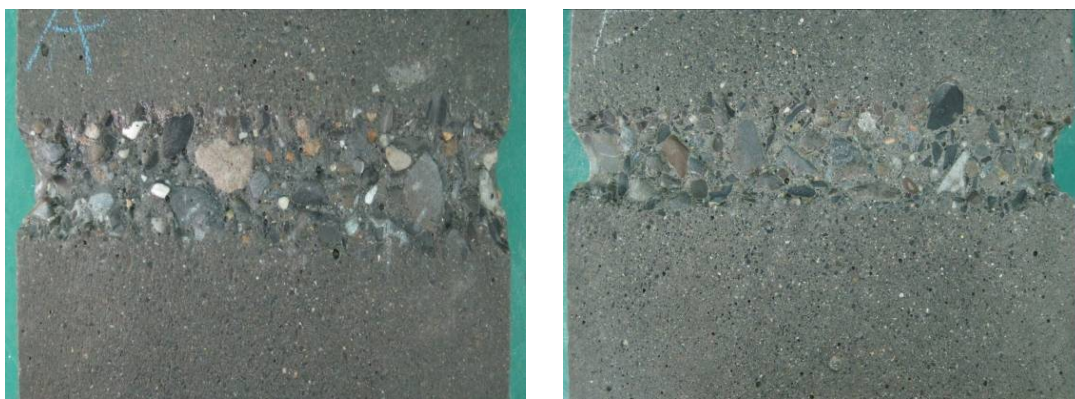


圖 4.83 D3X 沖磨試驗結果



圖 4.84 D3Y 沖磨試驗結果



圖 4.85 D3Z 沖磨試驗結果

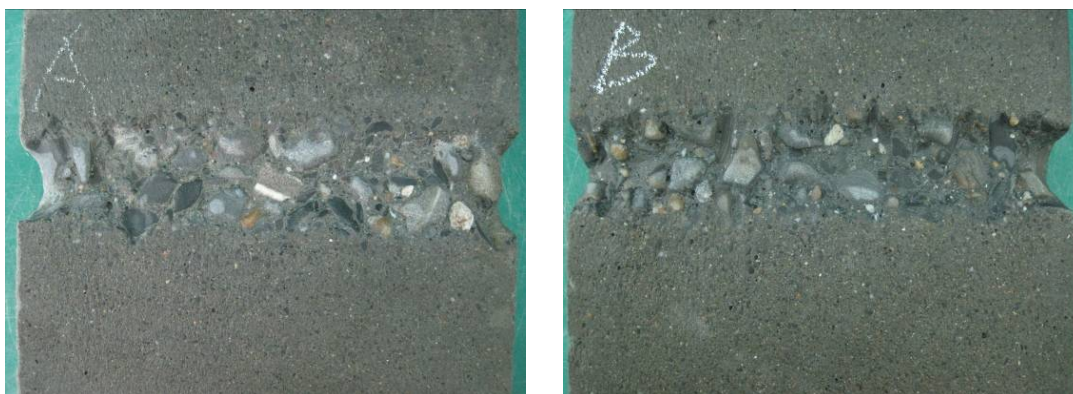


圖 4.86 D5Y 沖磨試驗結果

4.4.1 水膠比對沖磨量之影響

當爐取代量為 30 % 時，不同粗骨材含量(30 %、35%、40%)，且水膠比分別為 0.3、0.35、0.4 與 0.45 之沖磨量與沖磨歷時曲線，如表 4-20-表 4-22 以及圖 4.87-圖 4.89 所示。由圖 4.87-圖 4.89 可看出，混凝土之沖磨量隨水膠比的增加而增加；粗骨材含量為 30%、35%與 40%，當水膠比由 0.3 增至 0.45 時，混凝土之沖磨量分別增加 57%、32%與 33%。此結果配合試體沖磨照片可知，當試驗時間為 1 小時，由於試驗早期之試體沖磨量主要為表面的砂漿層，此時較緻密的漿體將有利於抵抗含砂水流之沖擊作用，進而使得水膠比較小的混凝土可獲得較小之沖磨量。隨後，當試驗時間達 2 小時，混凝土表面已出現粗骨材磨損，以及骨材顆粒剝落之情形。由此結果顯示，混凝土中水泥石的孔隙結構大或較多時，由於水流沖擊力與泥砂磨耗力，使得沖磨面積由孔隙處逐漸擴大。此外，粗骨材的抗沖擊能力與其硬度相關，硬度較差者，受沖擊作用時之沖磨體積較大。因此對粗骨材條件相同的混凝土而言，水泥漿的緻密性及其與粗骨材界面間的粘結性將為混凝土抵抗含砂水流沖擊的主要影響因素。

表 4-20 配比A3X、B3X、C3X及D3X含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3X		B3X		C3X		D3X	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	18	24	22	30	28	28	36	32
2	34	36	38	40	48	46	54	56

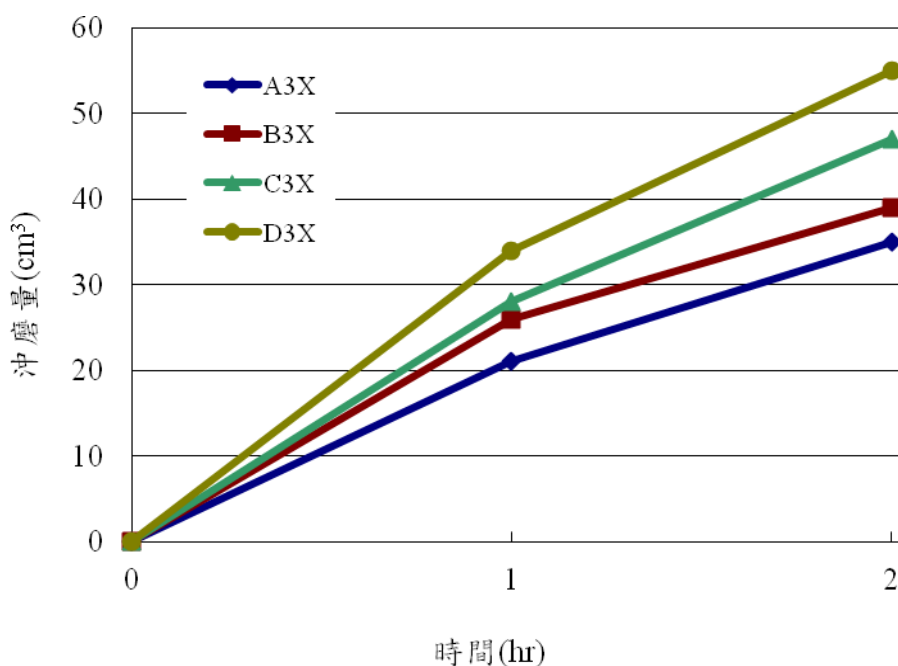


圖 4.87 水膠比對沖磨量影響

(粗骨材用量 0.30m³/m³、爐灰 30%，2 試體平均值)

表 4-21 配比A3Y、B3Y、C3Y及D3Y含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Y		B3Y		C3Y		D3Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	24	20	22	30	28	30	34	32
2	38	36	38	42	42	44	50	48

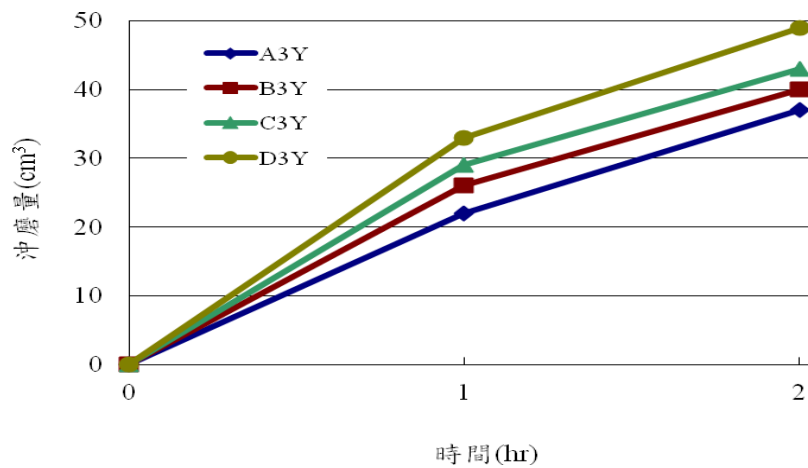


圖 4.88 水膠比對沖磨量之影響
(粗骨材用量 0.35m³/m³、爐灰 30%，2 試體平均值)

表 4-22 配比A3Z、B3Z、C3Z及D3Z含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Z		B3Z		C3Z		D3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	22	20	24	24	26	26	24	28
2	34	32	38	40	40	42	42	46

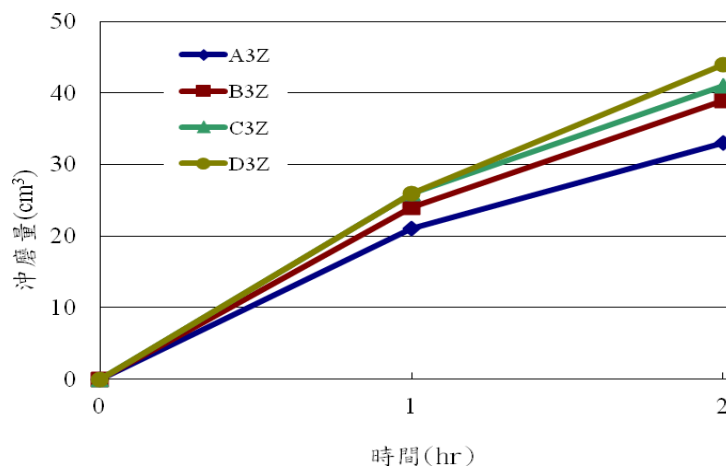


圖 4.89 配比 A3Z、B3Z、C3Z 及 D3Z 之水膠比對沖磨量之影響
(粗骨材用量 0.40m³/m³、爐灰 30%，2 試體平均值)

另一方面，當粗骨材 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 及爐灰取代水泥量為 50% 時，不同水膠比對含砂水流沖擊磨耗的影響，如表 4-23 與圖 4.90 所示。由圖 4.90 可看出，混凝土的沖磨量隨水膠比增大而增加；其中水膠比為 0.30 與 0.35 者，混凝土試體的沖磨量相當接近；而水膠比 0.40 與 0.45 者則較水膠比 0.30 者增加 34% 與 28%。

表 4-23 配比 A5Y、B5Y、C5Y 及 D5Y 含砂水流沖擊試驗結果 (cm^3)

時間 (小時)	A5Y		B5Y		C5Y		D5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	20	20	22	20	26	28	30	26
2	32	32	34	34	40	42	46	40

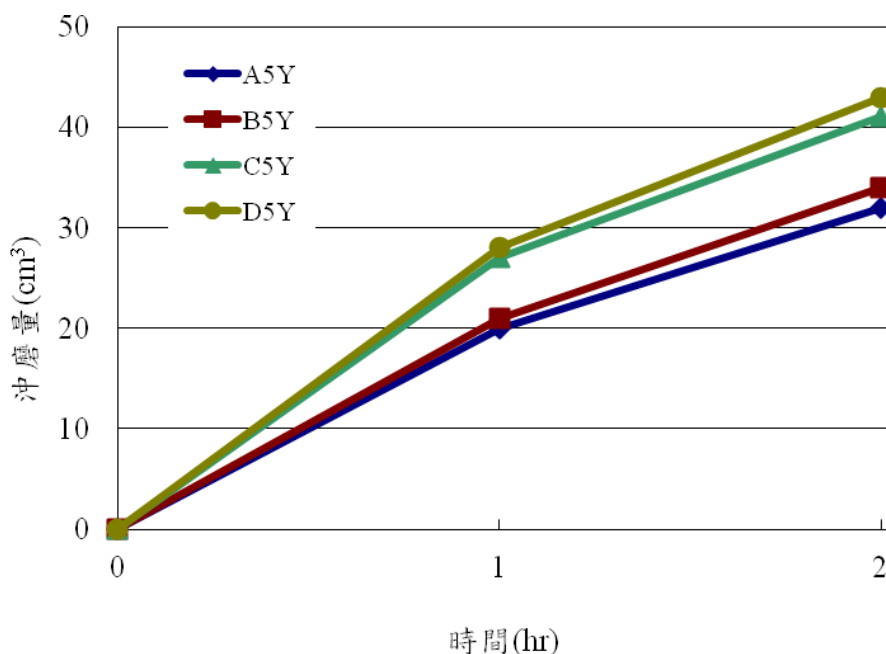


圖 4.90 水膠比對沖磨量之影響

(粗骨材用量 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、爐灰 50%，2 試體平均值)

4.4.2 粗骨材含量對沖磨量之影響

混凝土中粗骨材含量對沖磨量影響之試驗結果，如表 4-24 – 表 4-27 以及圖 4.91 –圖 4.94 所示。由以上四圖均顯示，混凝土粗骨材含量多者，其沖磨量較小；其中水膠比 0.35 與 0.40 者之沖磨量受粗骨材含量的影響較小，而水膠比 0.45 者，其粗骨材含量 40%之沖磨量較 30%者減少約 25%，如圖 4.94 所示。由於混凝土受含砂水流沖擊作用時，其抵抗沖磨性能深受漿體緻密性，以及骨材與漿體界面得黏結力的影響。雖然此破壞機理與抗壓強度者相似，使得混凝土材料的抗壓強度一般亦可反應在抗沖磨性上。然而，混凝土受水流沖擊後骨材剝落的現象，使得沖磨破壞變得更複雜，進而無法完全由抗壓強度來解釋。基本上，當水膠比相同時，混凝土中的漿體性質相近，而粗骨材含量多時，則細骨材相對減少，同時粗細骨材的總表面積亦變小。因此，在骨材總體積不變，但數量與界面均變少的情形下，骨材受沖擊剝落的機率相對減少，進而造成混凝土沖磨量的降低。

表 4-24 配比A3X、A3Y及A3Z含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3X		A3Y		A3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
1	18	24	24	20	22	20
2	34	36	38	36	34	32

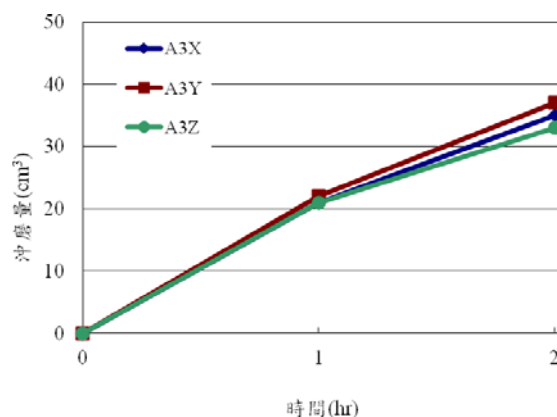


圖 4.91 配比 A3X、A3Y 及 A3Z 之粗骨材用量對沖磨量影響
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值)

表 4-25 配比B3X、B3Y及 B 3Z含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	B3X		B3Y		B3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
1	22	30	22	36	24	24
2	38	40	38	42	38	40

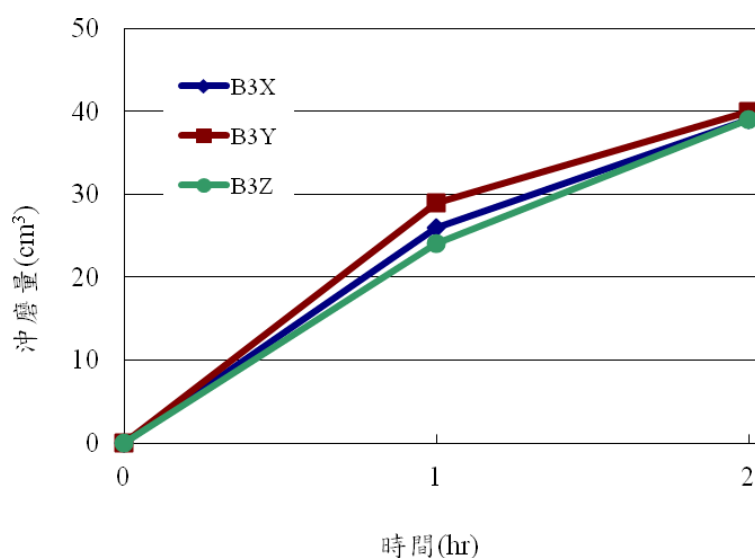


圖 4.92 配比 B3X、B3Y 及 B3Z 之粗骨材用量對沖磨量影響
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值)

表 4-26 配比C3X、C3Y及C3Z含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	C3X		C3Y		C3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
1	28	28	28	30	26	26
2	48	46	42	44	40	42

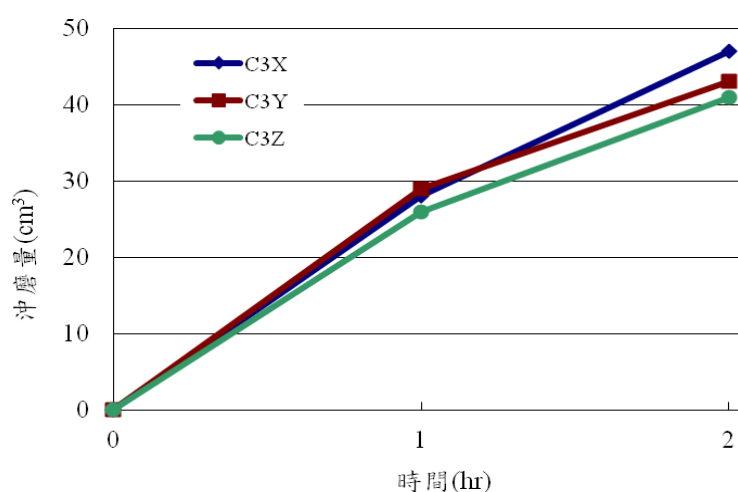


圖 4.93 配比 C3X、C3Y 及 C3Z 之粗骨材用量對沖磨量影響
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值)

表 4-27 配比D3X、D3Y及D3Z含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	D3X		D3Y		D3Z	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
1	36	32	34	32	24	28
2	54	56	50	48	42	46

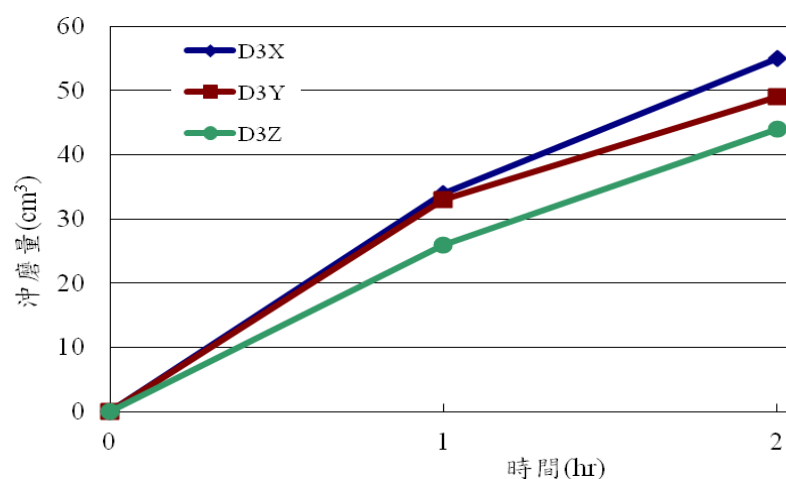


圖 4.94 配比 D3X、D3Y 及 D3Z 之粗骨材用量對沖磨量影響
(水膠比=0.30、礦物摻料 30%，2 試體平均值)

4.4.3 礦物摻料取代量對沖磨量之影響

如 4.3.3 節所述，混凝土中添加卜作嵐材料可使其毛細管孔隙相對減少，從而提高混凝土之緻密性，以及增加漿體與界面的黏結性。本研究分別以爐灰 30%與 50%取代水泥量，其中爐灰為爐石粉與飛灰以比例 7：3 之混合體，混凝土受含砂水流沖擊試驗結果，如表 4-28~表 4-31 及圖 4.95~圖 4.98 所示。由試驗結果可知，添加 50%爐灰的混凝土，其抗沖磨能力優於添加 30%爐灰者。水膠比為 0.3、0.35、0.4 與 0.45 之混凝土，添加 50%爐灰之沖磨量分別較 30%爐灰者減少 16%、21%、5%與 14%。

表 4-28 配比A3Y及A5Y砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Y		A5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
1	24	20	20	20
2	38	36	32	32

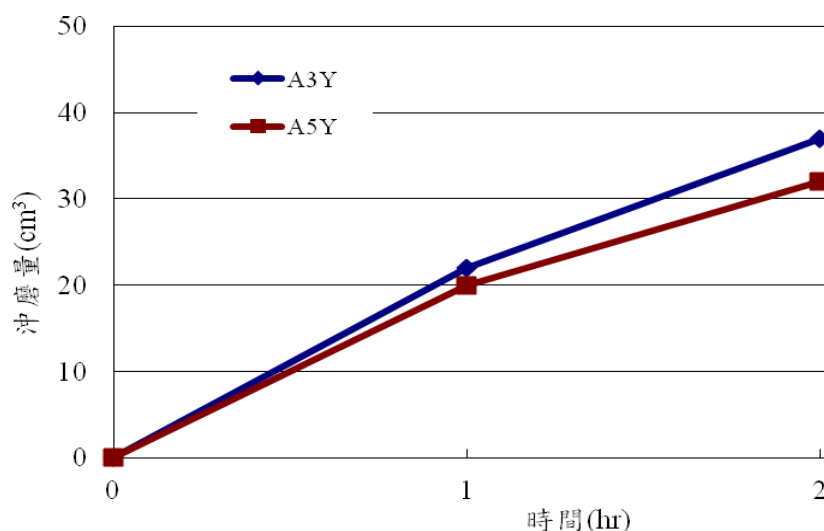


圖 4.95 配比 A3Y 及 A5Y 之爐灰用量對沖磨量影響
(水膠比=0.30、粗骨材 0.35m³/m³，2 試體平均值)

表 4-29 配比B3Y及B5Y砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	B3Y		B5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
1	22	30	22	20
2	38	42	34	34

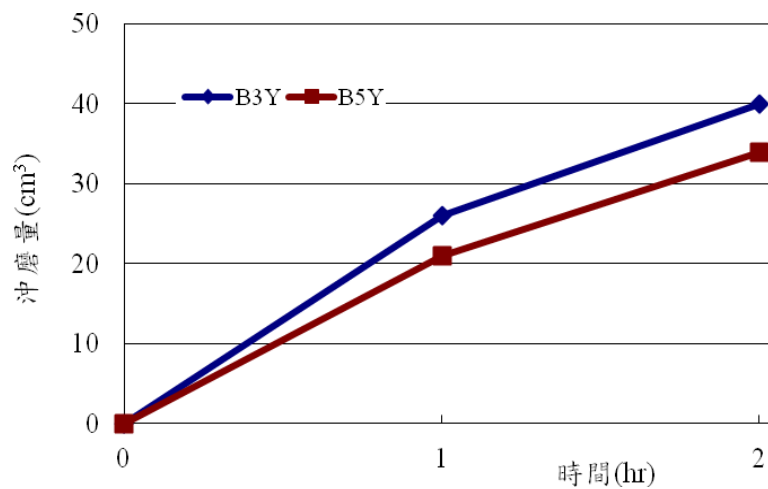


圖 4.96 配比 B3Y 及 B5Y 之爐灰用量對沖磨量影響
(水膠比=0.35、粗骨材 0.35m³/m³，2 試體平均值)

表 4-30 配比C3Y及C5Y砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	C3Y		C5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
1	28	30	26	28
2	42	44	40	42

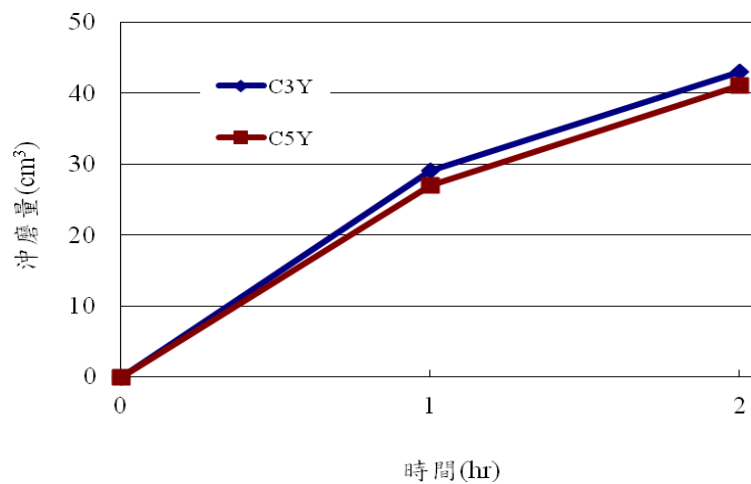


圖 4.97 配比 C3Y 及 C5Y 之爐灰用量對沖磨量影響
(水膠比=0.40、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ ，2 試體平均值)

表 4-31 配比D3Y及D5Y砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	D3Y		D5Y	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0
1	34	32	30	26
2	50	48	46	40

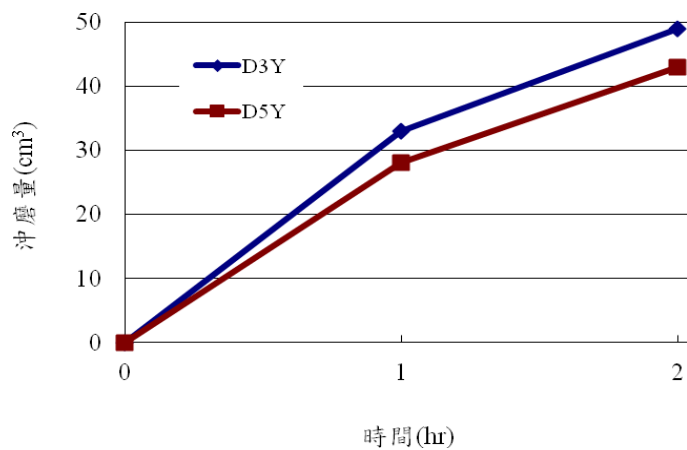


圖 4.98 配比 D3Y 及 D5Y 之爐灰用量對磨耗損失沖磨量影響
(水膠比=0.30、粗骨材 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ ，2 試體平均值)

4.5 衝擊試驗與結果分析

各組混凝土衝擊試驗之試體，分別裁切自 15 ψ ×30 cm 圓柱試體的中與下部分，其試驗結果如表 4-32 所示。由表 4-32 可發現，混凝土衝擊試驗結果出現變異性較大之情形，且部分試體的衝擊破壞次數值偏差甚大。各組配比 3 個試體中，將偏差較大者刪除後，其試驗值分佈情形，如圖 4.99 所示，其中全距較大於 40 者分別為編號 A3Y、C3Z、C5Y 與 D5Y。

表 4-32 混凝土衝擊試驗結果（次數）

配比編號	試體 1	試體 2	試體 3	平均
A3X	8	14	58*	11.0
B3X	17	10	7	11.3
C3X	17	10	14	13.7
D3X	14	16	31	15.0
A3Y	82	68	48	66.0
B3Y	73	64	72	69.7
C3Y	57	51	7*	54.0
D3Y	28	21	36	28.3
A3Z	112	138	182*	125.0
B3Z	115	75*	124	119.5
C3Z	102	141	264*	121.5
D3Z	136	112	262*	124.0
A5Y	121	116	127	121.3
B5Y	63*	153	158	155.5
C5Y	117	158	112	129.0
D5Y	105	108	140	117.7

註：*為偏差過大值不納入平均

圖 4.100 為爐灰含量 30% 之各組混凝土衝擊平均破壞次數。由圖可發現，在相同水膠比下，以粗骨材含量 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 衝擊之破壞次數較多。當粗骨材含量由 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 增至 0.35 與 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 時，混凝土水膠比為 0.3 、 0.35 、 0.4 與 0.45 之衝擊破壞次數分別增加約 2-2.8 倍、6.2-6.1 倍、2.9-4.9 倍與 0.9-4.5 倍。此結果顯示，在衝擊力作用下，混凝土中粗骨材含量較多時可提升其抗衝擊性。而當粗骨材含量相同時，混凝土之衝擊破壞次數則以水膠比大者較少。另一方面，不同水膠比混凝土之衝擊破壞次數，以爐灰含量為 50% 大於爐灰 30% 者。水膠比為 0.3 、 0.35 、 0.4 與 0.45 ，混凝土爐灰含量為 50% 之衝擊破壞次數，分別較爐灰 30% 者增加 0.84、1.23、1.39 與 3.16 倍，如圖 4.101 所示。

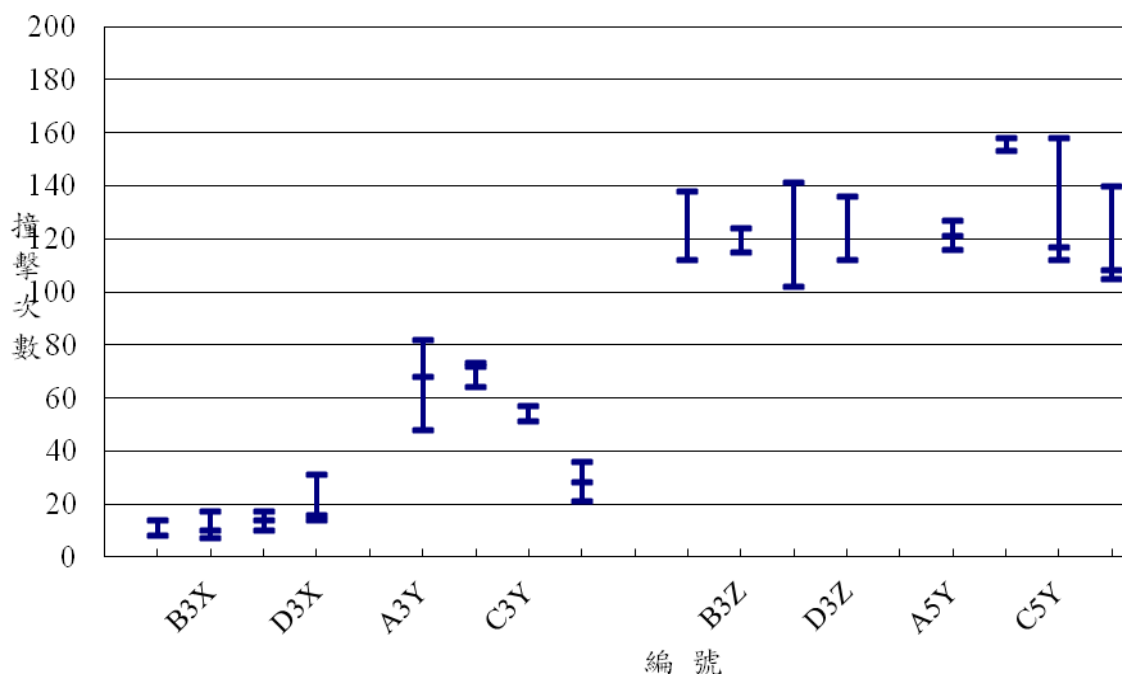


圖 4.99 各組混凝土衝擊破壞次數分佈情形

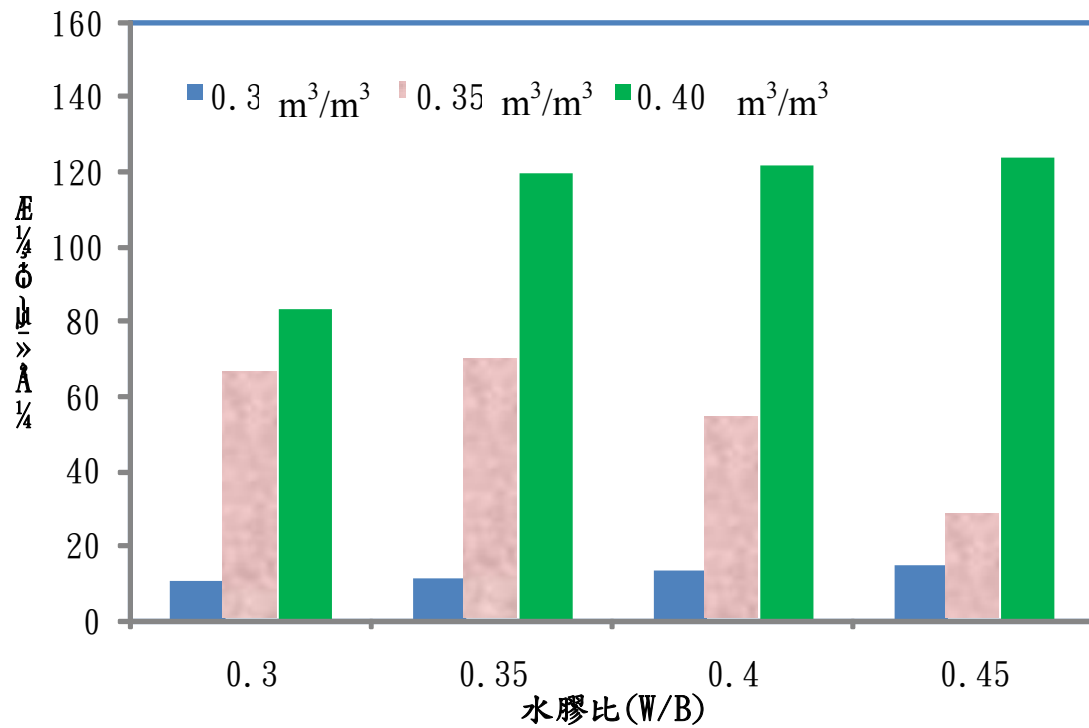


圖 4.100 爐灰含量 30% 之各組混凝土衝擊破壞次數

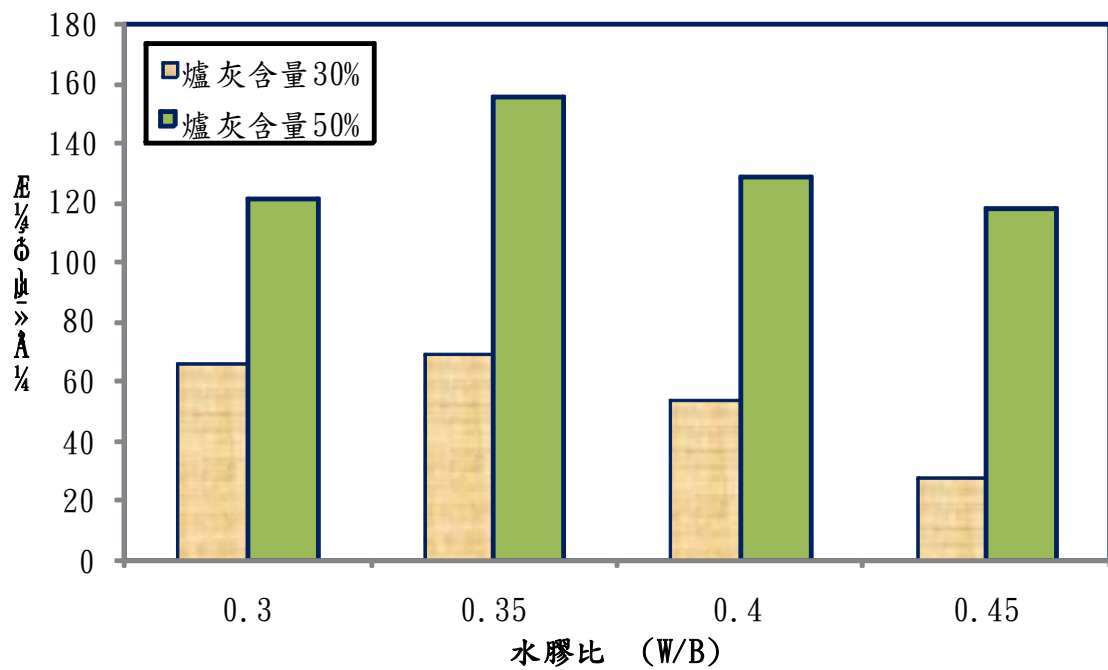


圖 4.101 粗骨材為 35% 之各組混凝土衝擊試驗結果

4.6 耐久性試驗與結果分析

混凝土耐久性主要受到期內部連通孔隙的影響，因此本計畫以藉由連通孔隙為傳輸路徑的氯離子來評估混凝土耐久性。相關試驗包含快速氯離子滲透試驗（RCPT）與加速氯離子傳輸試驗（ACMT），上述試驗方式均以電流加速驅動氯離子進入混凝土內部連通孔隙。為避免電流加速的可能影響，本團隊亦額外進行傳統貯鹽試驗（Ponding test），期以達全面性的耐久性評估工作。目前已將 91 齡期耐久性試驗進行完畢，下述為其試驗結果。

4.6.1 RCPT試驗結果

圖 4.102 至圖 4.105 為本研究各組配比RCPT試驗所得之電流與時間關係圖。由圖中可以發現當相同水膠比與爐灰含量時，起始電流會隨著粗骨材含量增加而變小，當相同水膠比與粗骨材含量時，起始電流會隨著爐灰含量增加而有下降之趨勢。各試驗結果依據式(3-6)，將 6 小時內通過電流轉換為總電荷量（Q），如表 4-33 所示。若依表 3-13 對抗氯離子能力的分類方式，本研究所有配比均少於 1000 庫倫，屬於極低的氯離子穿透特性。若比較粗骨材對RCPT通過電荷量的影響，則如圖 4.106 所示，可以發現與初使電流有相同的趨勢，無論任何水膠比，通過電荷量均會隨著粗骨材含量增加而有下降之趨勢。水膠比 0.3 與 0.35 時粗骨材 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 均較 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 低了 37%；而水膠比 0.4 時粗骨材 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 均較 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 低 25%；水膠比 0.45 時粗骨材 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 均較 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 低 30%。圖 4.107 探討爐灰含量增加對通過電荷量的影響，由圖中亦可以發現爐灰的添加量增加亦會明顯降低RCPT電荷量，添加量 50%約可較 30%減少 72%至 85%，若與粗骨材 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 比較，則可減少約 60%~63%。

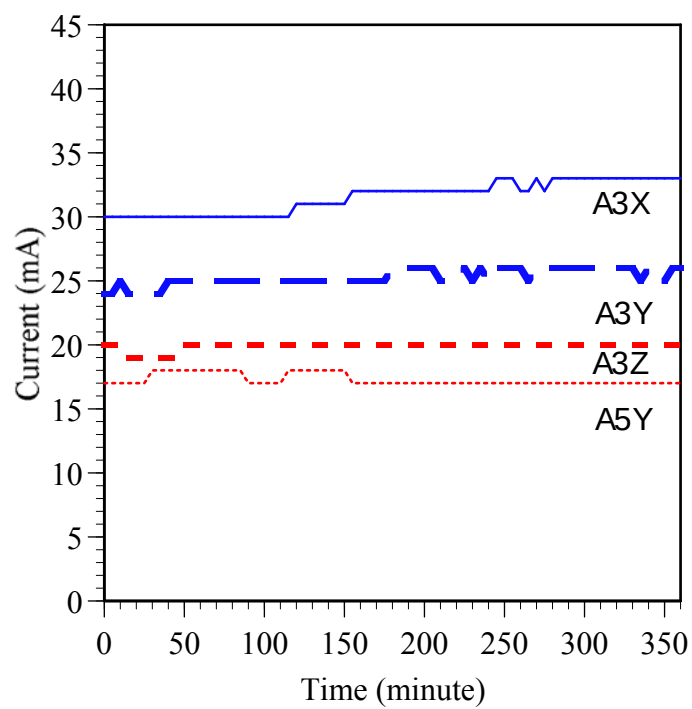


圖 4.102 配比 A3X、A3Y、A3Z、A5Y 電流試驗結果 (RCPT)

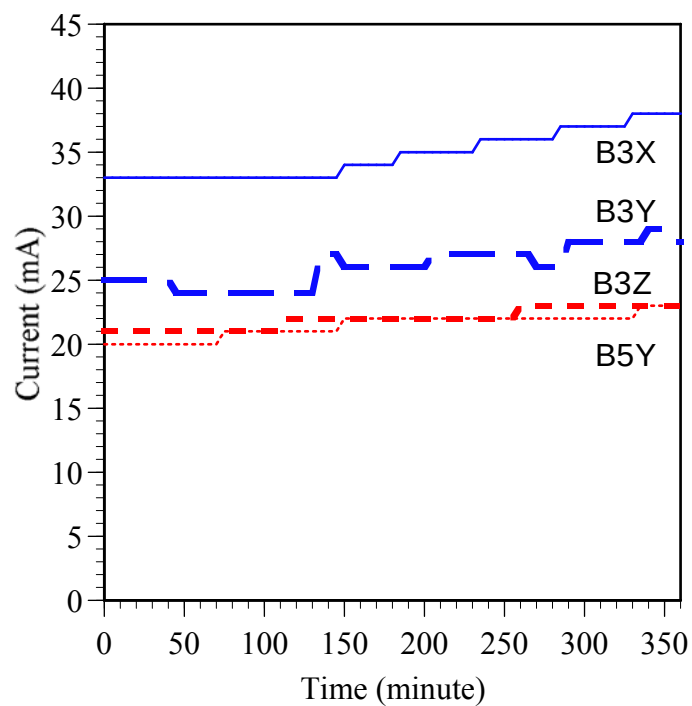


圖 4.103 配比 B3X、B3Y、B3Z、B5Y 電流試驗結果 (RCPT)

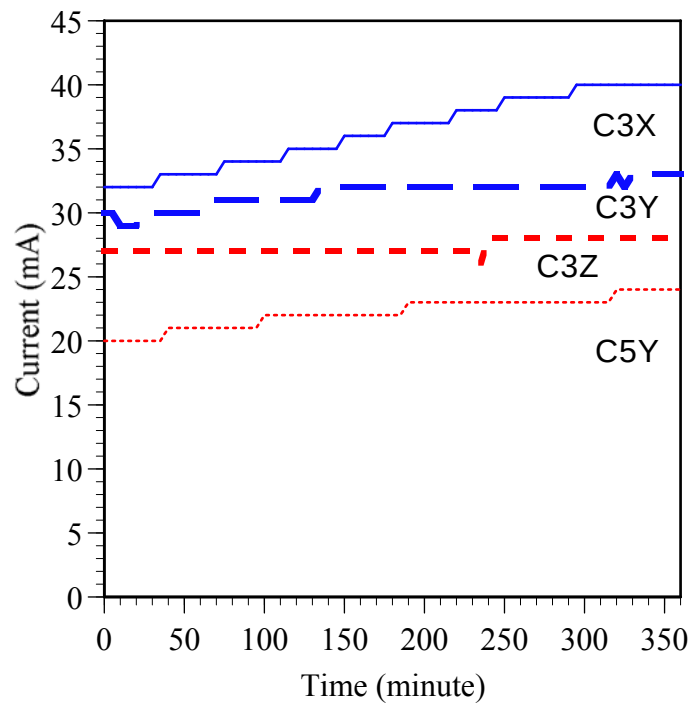


圖 4.104 配比 C3X、C3Y、C3Z、C5Y 電流試驗結果 (RCPT)

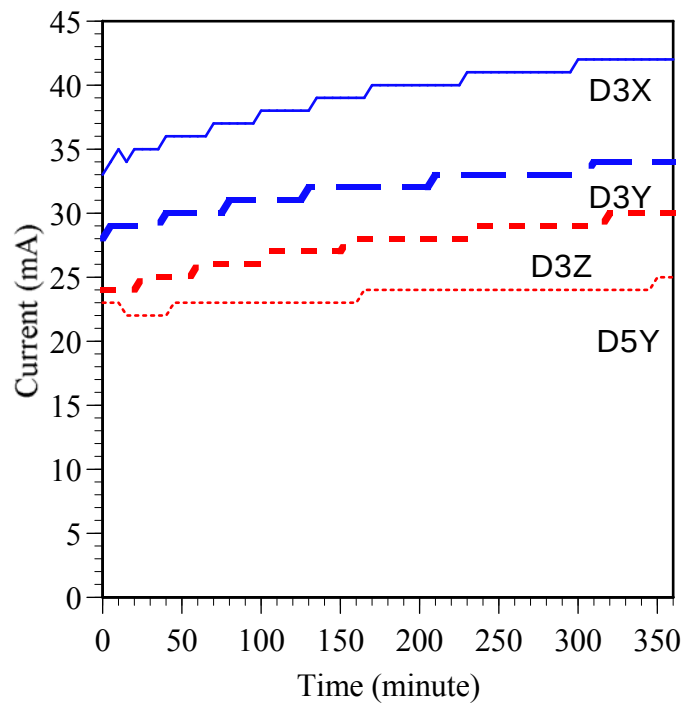


圖 4.105 配比 D3X、D3Y、D3Z、D5Y 電流試驗結果 (RCPT)

表 4-33 混凝土 RCPT 通過電荷量試驗結果（庫倫）

配比編號	試體 1	試體 2	平均
A3X	672	690	681
B3X	762	738	750
C3X	805	767	786
D3X	834	856	845
A3Y	536	558	547
B3Y	577	549	563
C3Y	688	672	680
D3Y	679	699	689
A3Z	432	428	430
B3Z	462	488	475
C3Z	586	594	590
D3Z	589	601	595
A5Y	430	426	428
B5Y	453	475	464
C5Y	469	491	480
D5Y	672	690	508

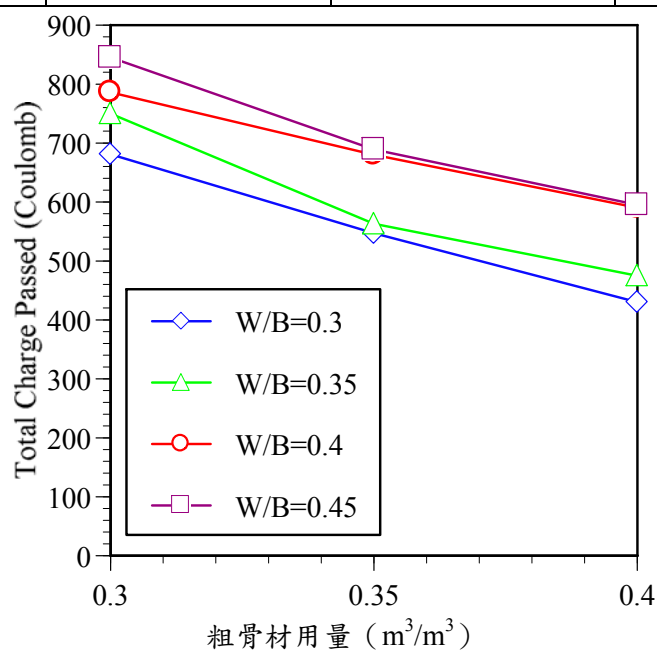


圖 4.106 RCPT 通過電荷量與粗骨材用量關係圖

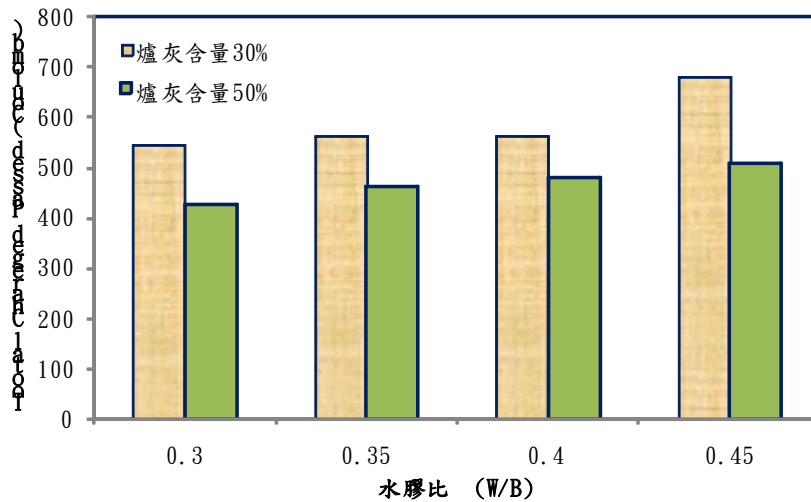


圖 4.107 不同爐灰含量對 RCPT 通過電荷量影響

4.6.2 ACMT試驗結果

圖 4.108 為爐灰添加量 30%及粗骨材用量 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 配比 (A3X、B3X、C3X、D3X) 於 ACMT 試驗過程中各配比氯離子濃度變化歷程。由圖中可以明顯的將歷程區線區分成兩部分，分別為氯離子即將通過試體的非穩態與過渡階段 (如圖 4.109) 與通過試體開始於陽極槽累積的穩態階段 (如圖 4.110)。在非穩態與過渡階段可以先由離子通過混凝土試片到達陽極槽之累積氯離子濃度 0.000261 mole/L ($C/C_0 = 0.05\%$) 至氯離子穿透速率與時間呈非線性速率傳輸之階段，並根據圖 4.109 迴歸結果來界定氯離子穿透混凝土試片的穿透時間，最後由式(3-18)計算求得非穩態傳輸係數(M_{nc})。而在穩態階段可以由圖 4.100 發現氯離子與時間呈現良好的線性關係，因此由線性迴歸所得的斜率K，利用式(3-25)計算流通量(J)，再將流通量(J)代入式(3-24)求得穩態傳輸係數(M_s)。圖 4.111 至圖 4.113 為爐灰添加量 30%及粗骨材用量 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 配比 (A3Y、B3Y、C3Y、D3Y) 試驗結果；圖 4.114 至圖 4.116 為為爐灰添加量 30%及粗骨材用量 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 配比 (A3Z、B3Z、C3Z、D3Z) 試驗結果；圖 4.117 至圖 4.119 為爐灰添加量 50%及粗骨材用量 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 配比 (A5Y、B5Y、C5Y、D5Y) 試驗結果。上述各圖均依爐灰添加量與粗骨材用量的配比進行分類，由圖中可以發現無論何種時

期，氯離子累積濃度均會隨著水將比增加而有變大之趨勢，氯離子穿透時間也隨著水膠比增加而有縮短現象，相關穿透時間如表 4-34 所示。表 4-34 亦列出計算後之非穩態傳輸係數(M_{nc})。表 4-35 則為計算後之穩態傳輸係數(M_{nc})。

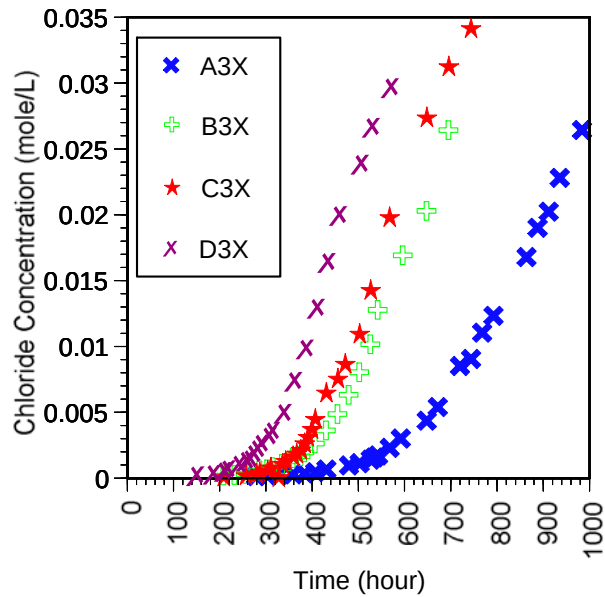


圖 4.108 配比 A3X、B3X、C3X、D3X 氯離子濃度變化歷程 (ACMT)

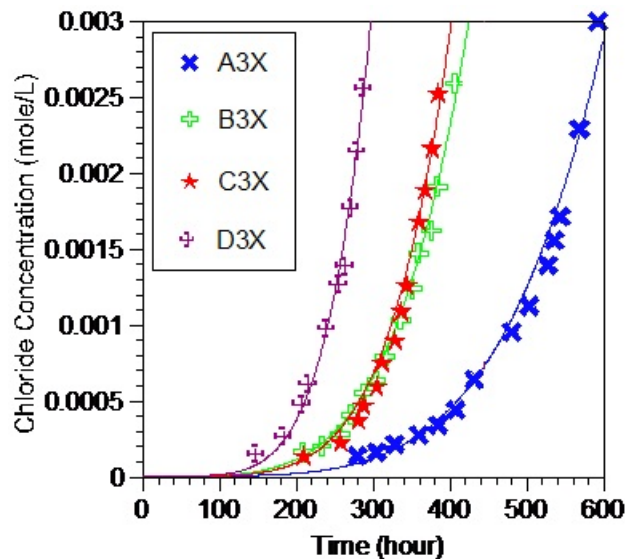


圖 4.109 配比 A3X、B3X、C3X、D3X 非穩態與過渡階段氯離子濃度變化歷程

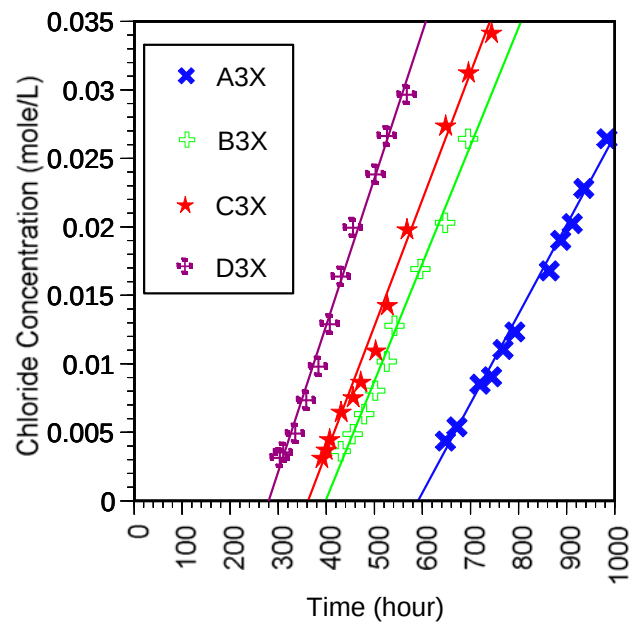


圖 4.110 配比 A3X、B3X、C3X、D3X 穩態階段氯離子濃度變化歷程

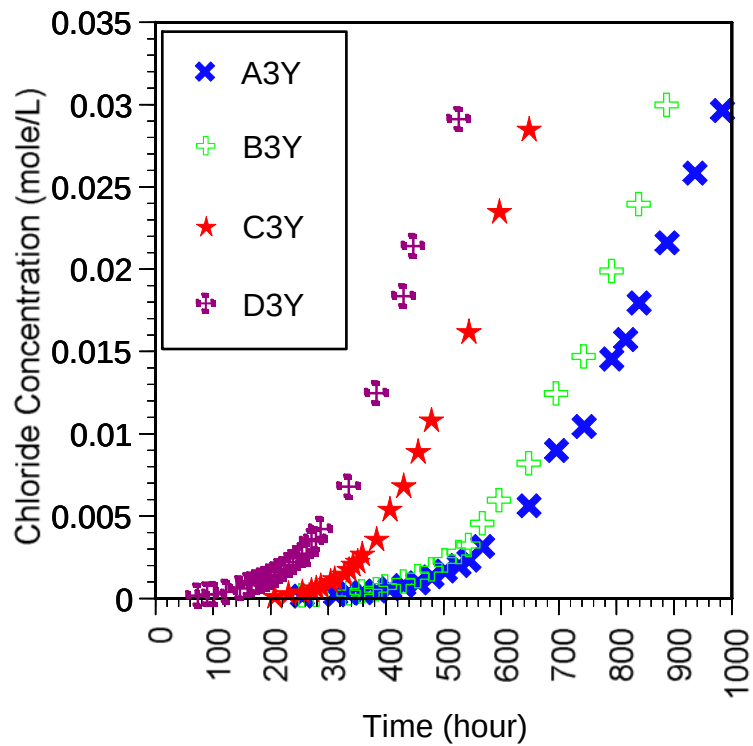


圖 4.111 配比 A3Y、B3Y、C3Y、D3Y 氯離子濃度變化歷程 (ACMT)

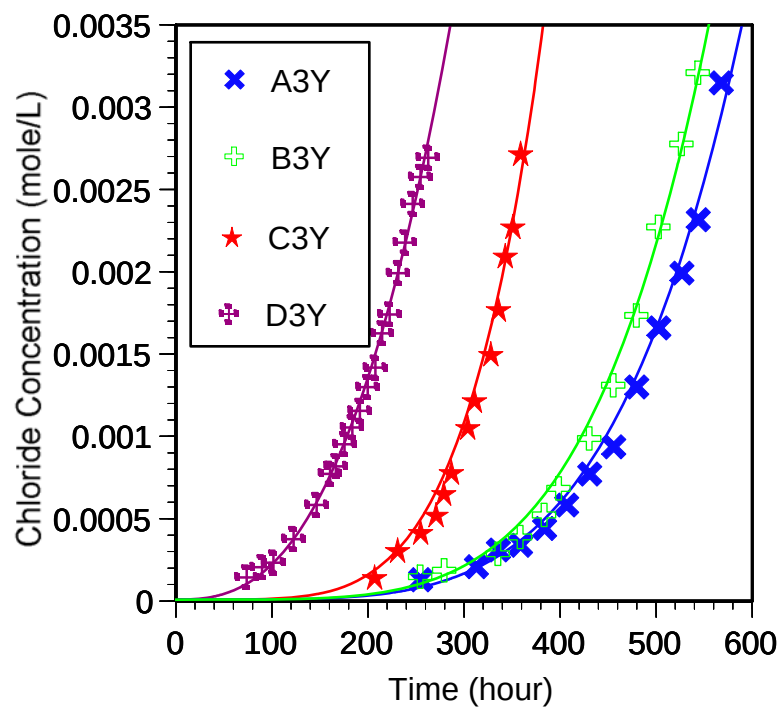


圖 4.112 配比 A3Y、B3Y、C3Y、D3Y 非穩態與過渡階段氯離子濃度變化歷程

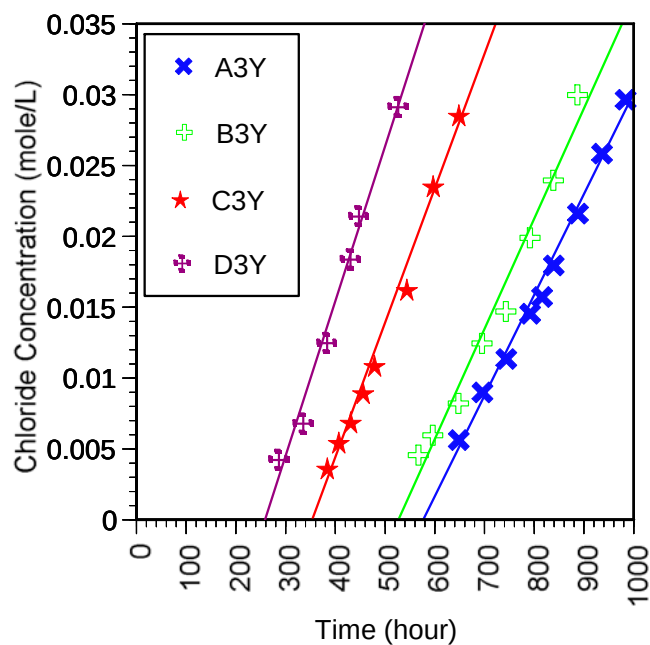


圖 4.113 配比 A3Y、B3Y、C3Y、D3Y 穩態階段氯離子濃度變化歷程

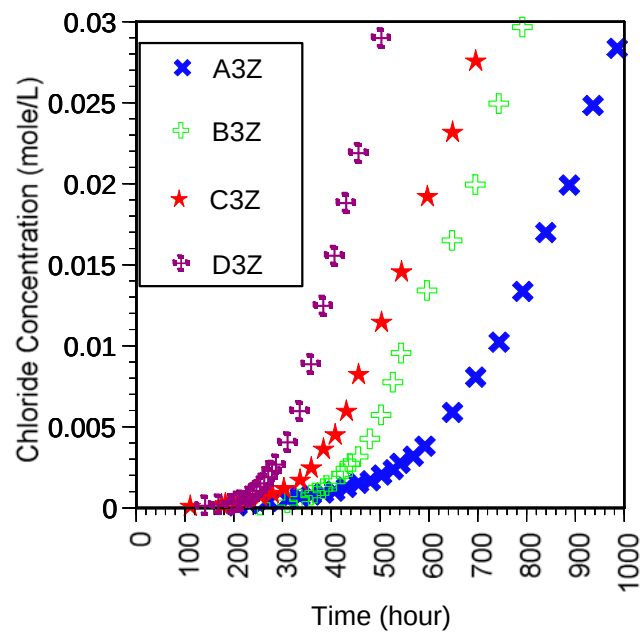


圖 4.114 配比 A3Z、B3Z、C3Z、D3Z 氯離子濃度變化歷程 (ACMT)

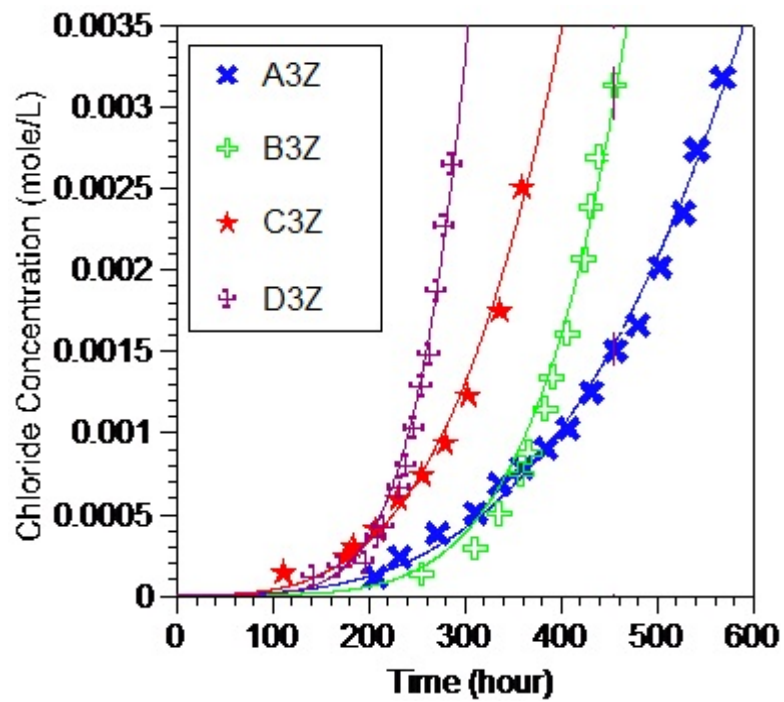


圖 4.115 配比 A3Z、B3Z、C3Z、D3Z 非穩態與過渡階段氯離子濃度變化歷程

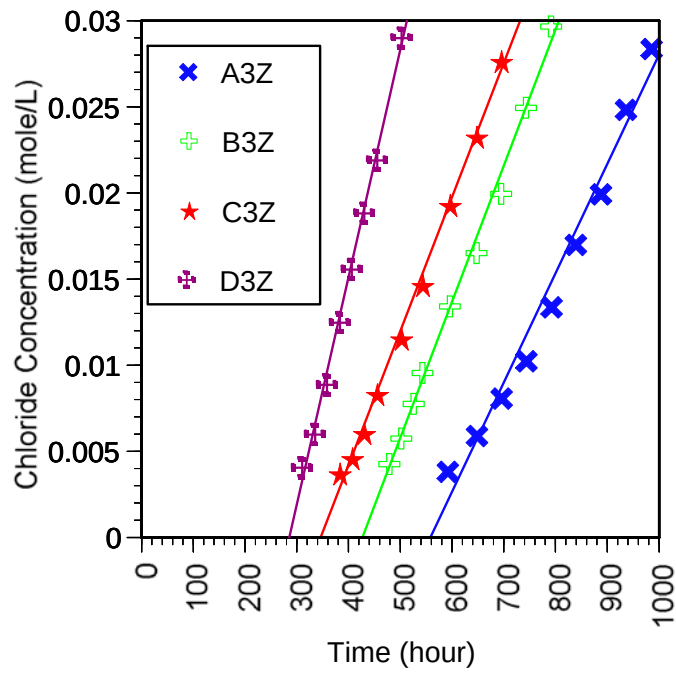


圖 4.116 配比 A3Z、B3Z、C3Z、D3Z 穩態階段氯離子濃度變化歷程

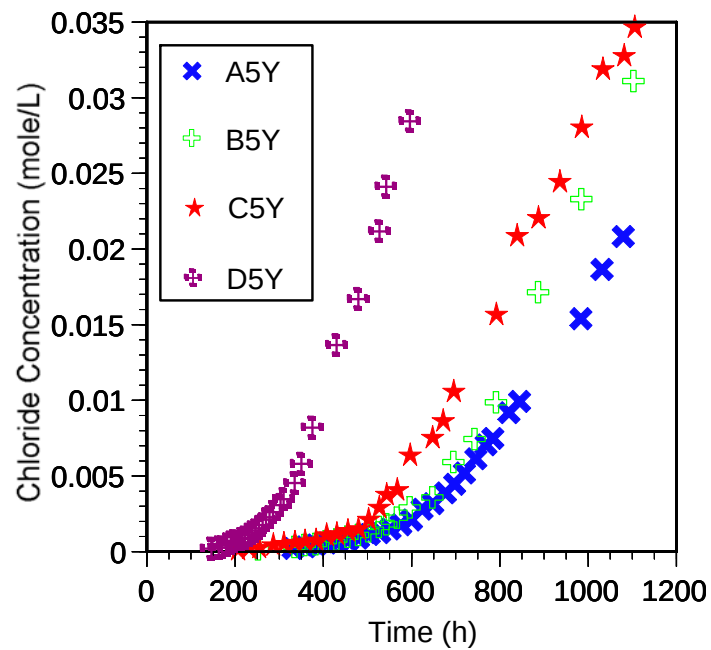


圖 4.117 配比 A5Y、B5Y、C5Y、D5Y 氯離子濃度變化歷程 (ACMT)

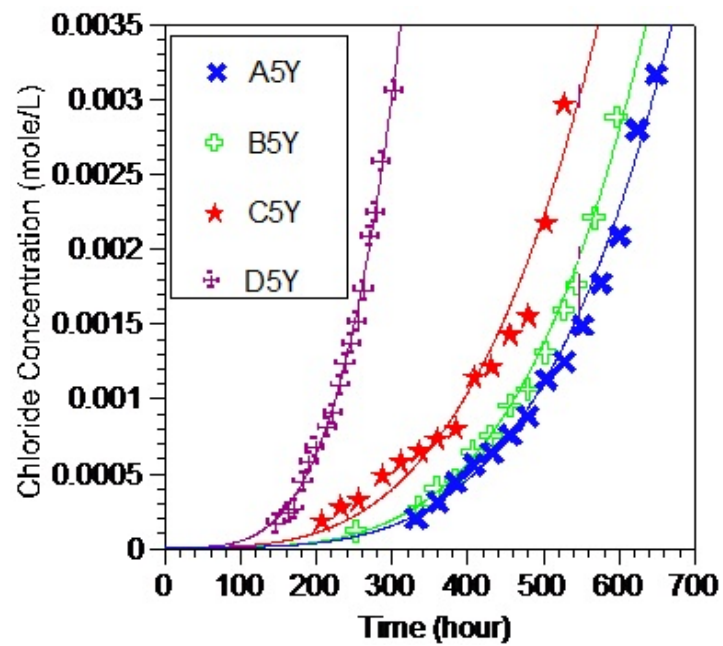


圖 4.118 配比 A5Y、B5Y、C5Y、D5Y 非穩態與過渡階段氯離子濃度變化歷程

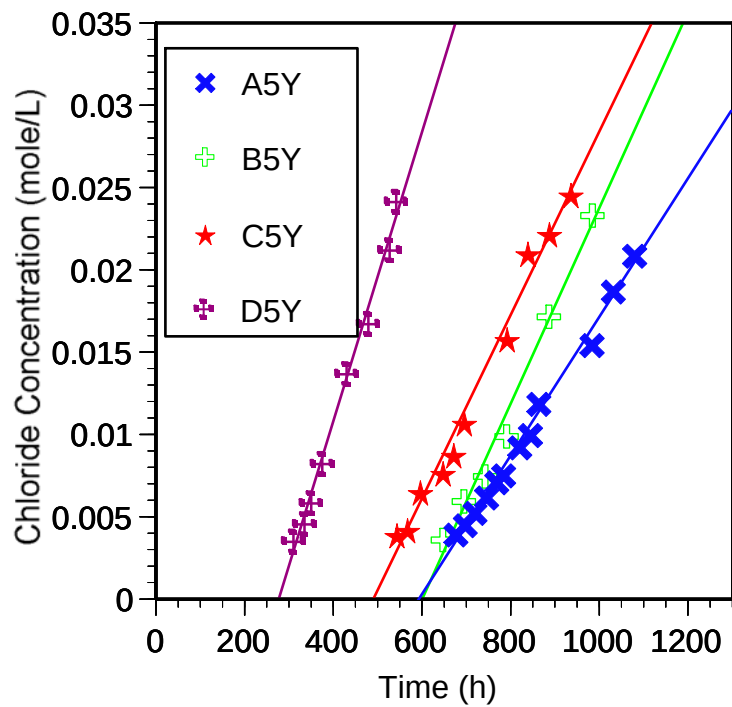


圖 4.119 配比 A5Y、B5Y、C5Y、D5Y 穩態階段氯離子濃度變化歷程

表 4-34 混凝土ACMT非穩態傳輸係數試驗結果 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)

配比編號	試體 1		試體 2		非穩態傳輸係數 平均值 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)
	穿透時間 (小時)	非穩態 傳輸係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	穿透時間 (小時)	非穩態 傳輸係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	
A3X	351.3	2.64	362.2	2.72	2.68
B3X	243.0	2.79	244.7	2.91	2.85
C3X	250.4	2.95	247.5	2.89	2.92
D3X	176.7	3.94	180.0	3.86	3.90
A3Y	337.3	2.15	333.7	2.21	2.18
B3Y	316.7	2.41	317.3	2.57	2.49
C3Y	232.2	2.98	235.8	3.26	3.12
D3Y	159.0	3.70	162.0	3.82	3.76
A3Z	262.9	1.89	258.6	2.01	1.95
B3Z	276.2	2.25	281.7	2.41	2.33
C3Z	186.5	3.33	188.7	3.17	3.25
D3Z	187.4	4.39	192.4	4.53	4.46
A5Y	347.5	1.91	349.6	2.09	2.00
B5Y	329.3	2.21	330.2	2.35	2.28
C5Y	223.4	3.05	226.5	2.73	2.89
D5Y	109.6	3.79	108.0	3.55	3.67

表 4-35 混凝土 ACMT 穩態傳輸係數試驗結果

配比編號	試體 1		試體 2		穩態傳輸係數 平均值 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)
	流通量 ($\times 10^{-5} \text{ mole/m}^2/\text{sec}$)	穩態 傳輸係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	流通量 ($\times 10^{-5} \text{ mole/m}^2/\text{sec}$)	穩態 傳輸係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	
A3X	3.75	1.13	4.35	1.31	1.22
B3X	4.78	1.43	5.11	1.53	1.48
C3X	5.57	1.68	5.24	1.58	1.63
D3X	6.29	1.89	5.96	1.79	1.84
A3Y	3.54	1.06	3.94	1.18	1.12
B3Y	4.72	1.41	4.38	1.31	1.36
C3Y	5.08	1.52	5.41	1.62	1.57
D3Y	6.15	1.84	6.41	1.92	1.88
A3Z	3.43	1.03	3.83	1.15	1.09

配比編號	試體 1		試體 2		穩態傳輸係數
	流通量 ($\times 10^{-5}$ mole/m ² /sec)	穩態 傳輸係數 ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)	流通量 ($\times 10^{-5}$ mole/m ² /sec)	穩態 傳輸係數 ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)	平均值 ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)
B3Z	4.06	1.22	4.86	1.46	1.34
C3Z	5.43	1.63	5.83	1.75	1.69
D3Z	6.87	2.06	6.27	1.88	1.97
A5Y	2.07	0.62	2.74	0.82	0.72
B5Y	3.10	0.93	3.70	1.11	1.02
C5Y	3.81	1.15	4.34	1.31	1.23
D5Y	4.84	1.45	5.38	1.61	1.53

若比較粗骨材對ACMT非穩態與穩態氯離子傳輸係數的影響，則如圖 4.120 與圖 4.121 所示。由圖可以發現非穩態與穩態氯離子傳輸係數在水膠比 0.3 與 0.35 時均會隨著粗骨材用量的增加而有下降之趨勢，此與RCPT結果趨勢相同。但在水膠比 0.4 與 0.45 時，粗骨材用量 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 與 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的氯離子傳輸係數大略接近，但在 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 時，無論非穩態或穩態氯離子傳輸係數均有增加之現象，此與RCPT結果有所差異。推估其原因在於界面過渡區的影響。界面過渡區 (interface transition zone, itz) 是漿體與骨材間的弱面，根據文獻為一道環繞骨材表面約 $20 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 寬度的稀疏區域，而ITZ區域寬度大小與膠結漿體水膠比有關^[74, 75]。另一方面當粗骨材用量增加時，亦可能發生ITZ重疊的現象，即所謂Percolation效應，Winslow等^[76]與Shane^[77]等均指出當骨材單位總體積用量大於 $0.45 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上時，會發現水泥質材料的離子滲透率會遠大於漿體基材。因此低水膠比時，由於ITZ寬度較小，所以粗骨材極低滲透率，對整體氯離子傳輸行為影響的正面效益將高於ITZ負面效益，但隨著水膠比增加而有相反的結果。圖 4.122 為不同爐灰替代量下，非穩態氯離子傳輸係數變化情形，圖 4.123 則為穩態氯離子傳輸係數變化情形。由圖中可以發現爐灰替代量無論任何水膠比都可以有效降低氯離子傳輸係數。於非穩態部分會隨著水膠比不同由 $W/B=0.3$ 下降約 8%至 $W/B=0.45$ 約 2%。穩態則下降較大，由 $W/B=0.3$ 下降約 36%至 $W/B=0.45$ 約 19%。

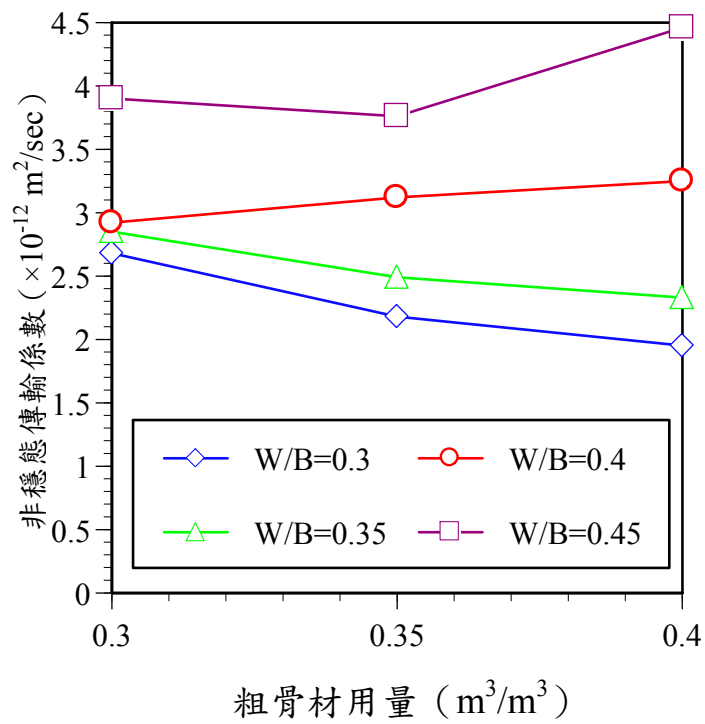


圖 4.120 非穩態氯離子傳輸係數與粗骨材用量關係圖

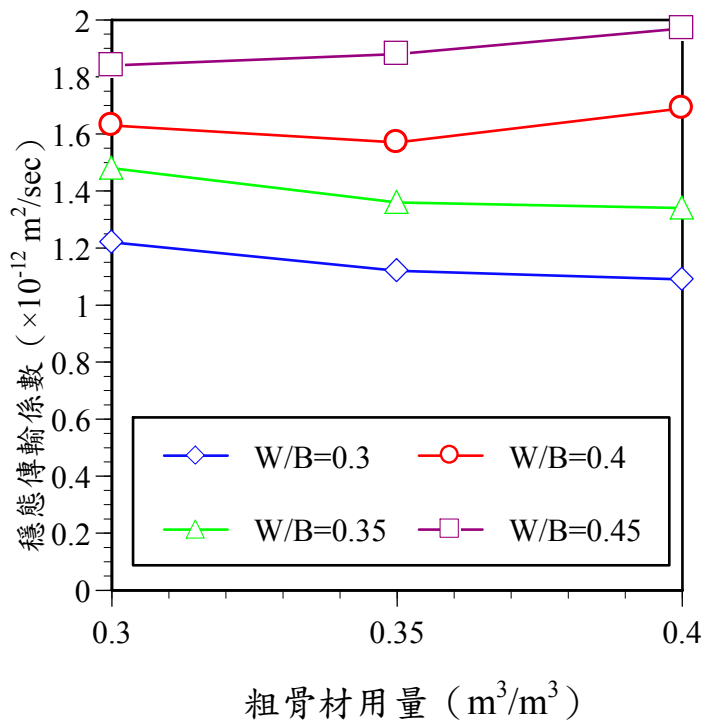


圖 4.121 穩態氯離子傳輸係數與粗骨材用量關係圖

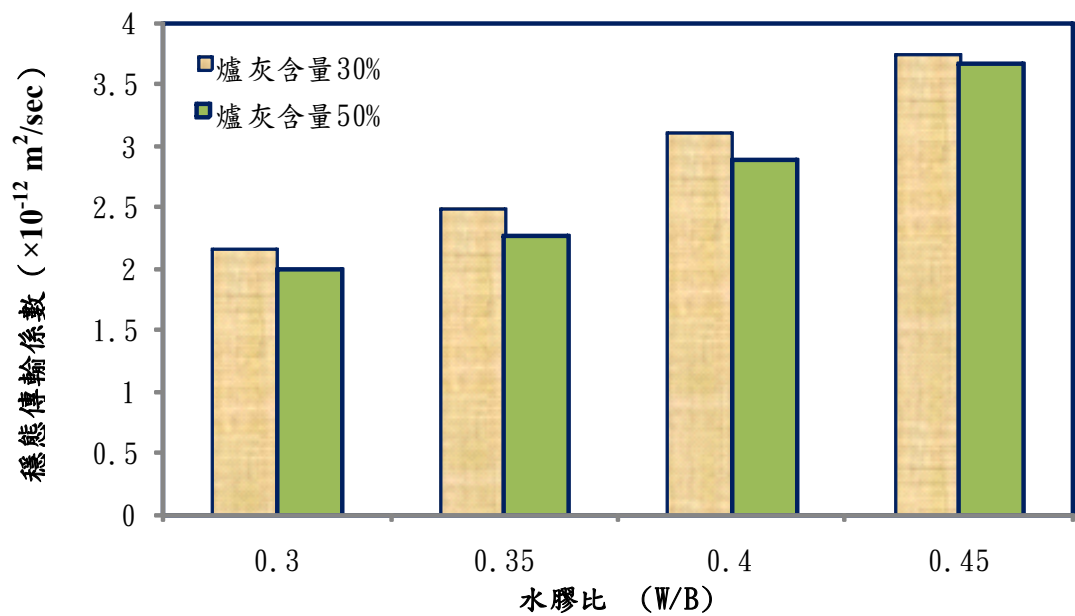


圖 4.122 不同爐灰含量對非穩態氣離子傳輸係數影響

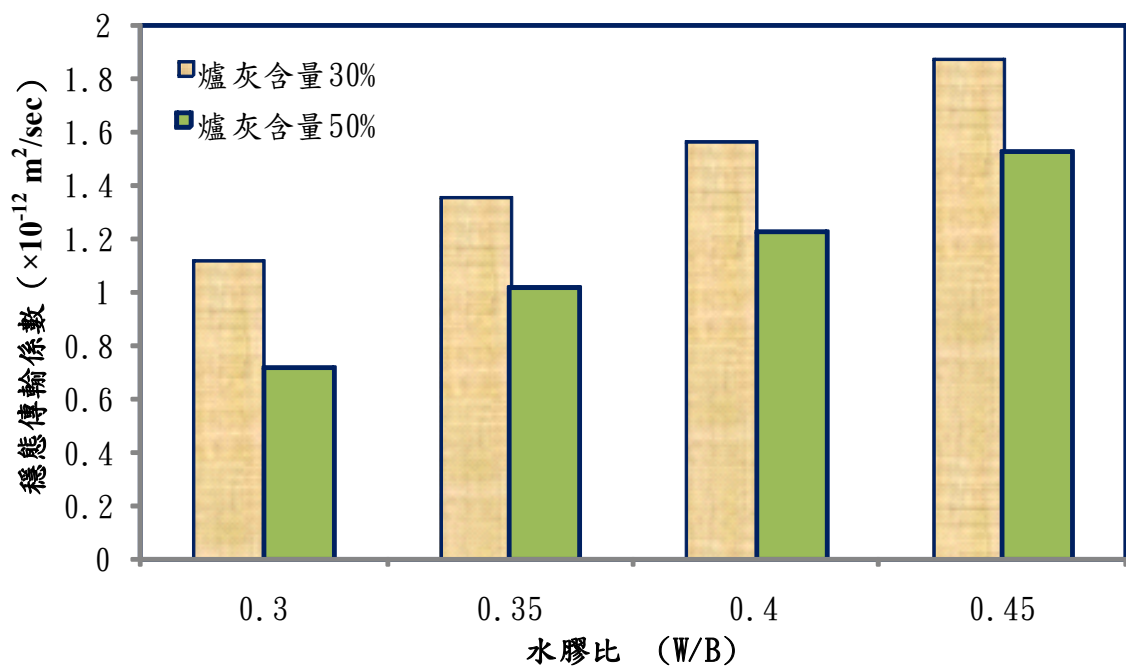


圖 4.123 不同爐灰含量對穩態氣離子傳輸係數影響

4.6.3 貯鹽試驗結果

由上述加速試驗可以發現，ACMT 與 RCPT 在數據上會有不同的情形產生。圖 4.124 為 RCPT 試驗結果與 ACMT 非穩態傳輸係數的關係圖，圖 4.125 為 RCPT 試驗結果與穩態傳輸係數關係圖。由圖中均可以發現 RCPT 與 ACMT 兩者之間的關聯性不佳，對於 RCPT 結果而言，由於 6 小時極短期量測電流結果進行評估，有可能受到系統熱與礦物摻料的影響。然而圖 4.126 卻可以發現 ACMT 非穩態與穩態傳輸係數大略呈現線性的關係，因此在氯離子評估的方法選擇上會有所疑慮。故參考 ASTM C1202 規範的建議，但有試驗誤解之疑慮時，可以使用 ASTM C1543 貯鹽試驗來進行最後驗證，因此本研究除服務建議書規劃的 RCPT 與 ACMT 試驗外，亦進行 ASTM C1543 貯鹽試驗。

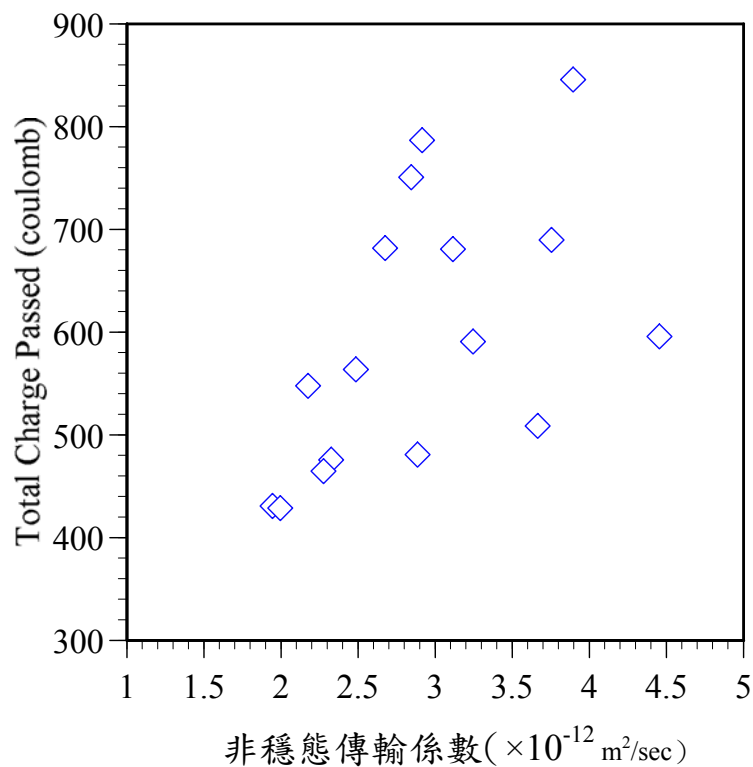


圖 4.124 RCPT 總電荷量與非穩態氯離子傳輸係數關係圖

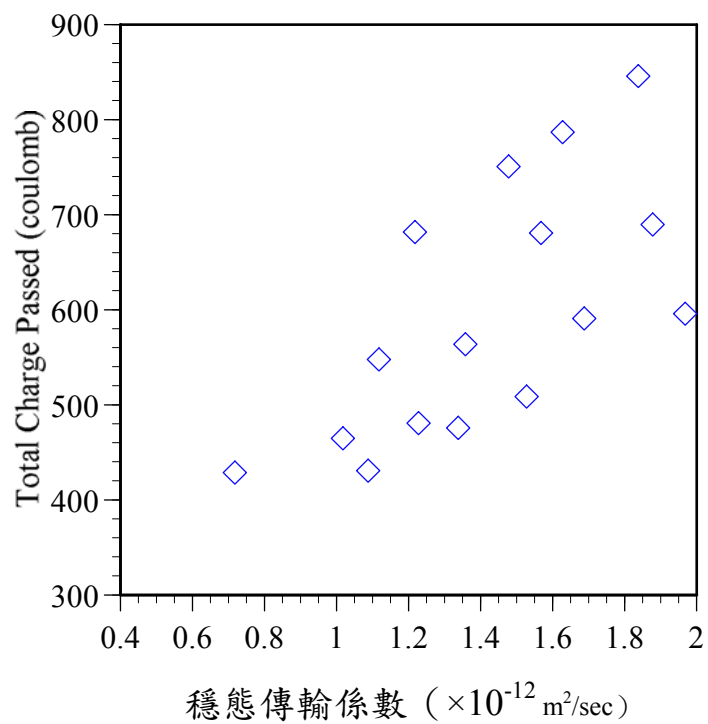


圖 4.125 RCPT 總電荷量與穩態氯離子傳輸係數關係圖

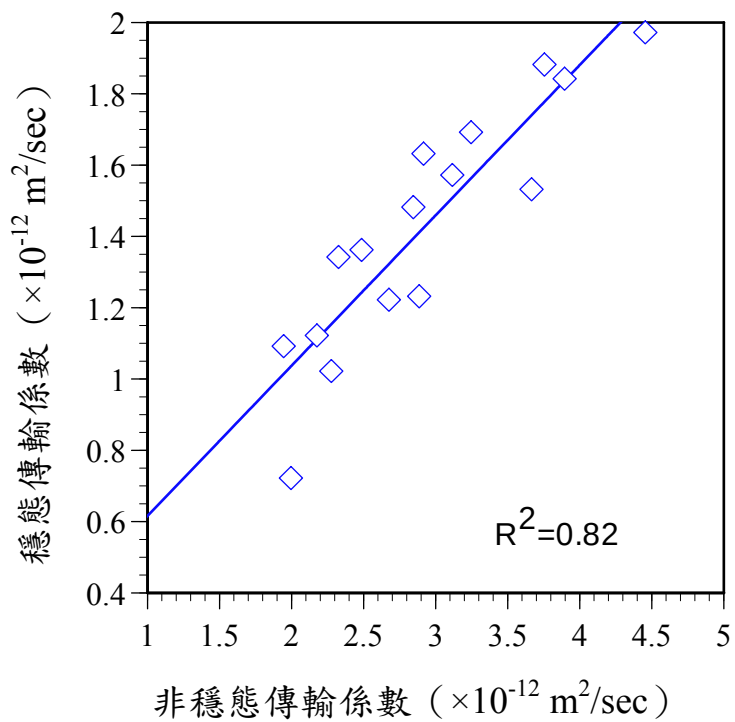


圖 4.126 非穩態與穩態氯離子傳輸係數關係圖 (ACMT)

貯鹽試驗係將達齡期之直徑 10 cm 圓柱試體側邊使用環氧樹脂塗封（頂部與底部除外），頂部上方並以壓克力環形成圍堰，於圍堰中加入 0.3% 氯化鈉溶液，為使液面不受蒸發影響，以 PE 膜將圍堰開口密封。並於每二個月將氯化鈉溶液更換。在貯鹽 90 天後，將試體上方的圍堰與貯鹽溶液移除，並刮除試體頂部鹽結晶物。以沖孔機在其垂直面鑽出直徑 2 cm 的圓柱體。再使用鑽石鋸片以乾切方式將 2 cm 直徑的圓柱體由浸漬面至底部每隔 0.5 cm 厚度切成薄片，最後利用研磨鉢將薄片磨碎，使其通過 50 號篩得到 3g 之混凝土粉末樣本。並參照 AASHTO T260 規範量測樣本中酸溶性氯離子含量。由氯離子含量與各薄片的相對位置，可以了解 90 天貯鹽試驗後混凝土內部氯離子含量變化情形。圖 4.127 至圖 4.130 為各配比試體貯鹽試驗之結果。

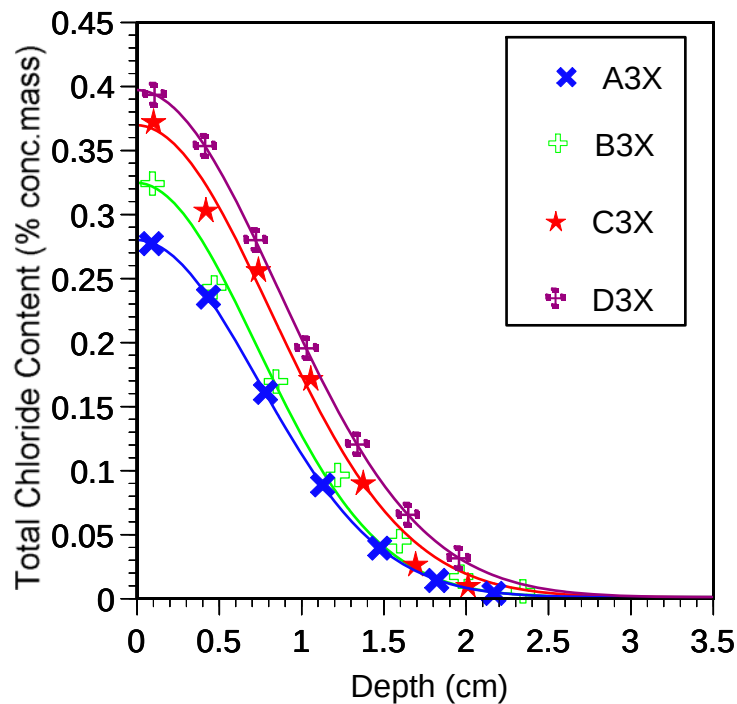


圖 4.127 A3X、B3X、C3X、D3X 氯離子濃度與試體深度關係圖
(貯鹽試驗)

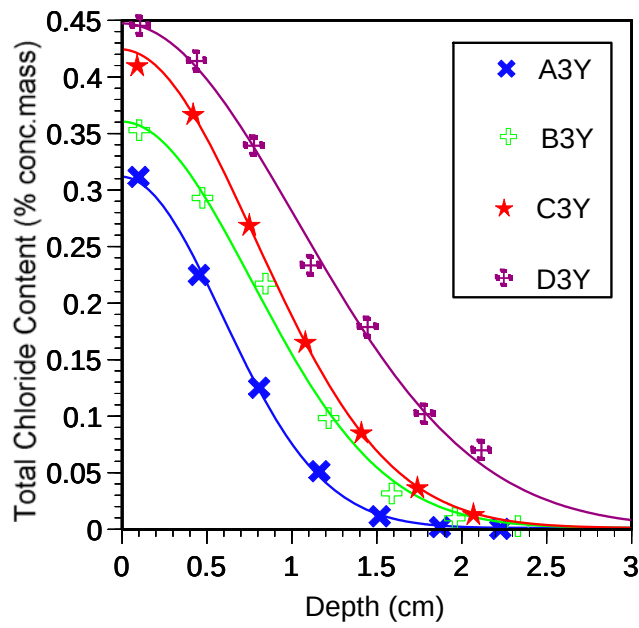


圖 4.128 A3Y、B3Y、C3Y、D3Y 氯離子濃度與試體深度關係圖
(貯鹽試驗)

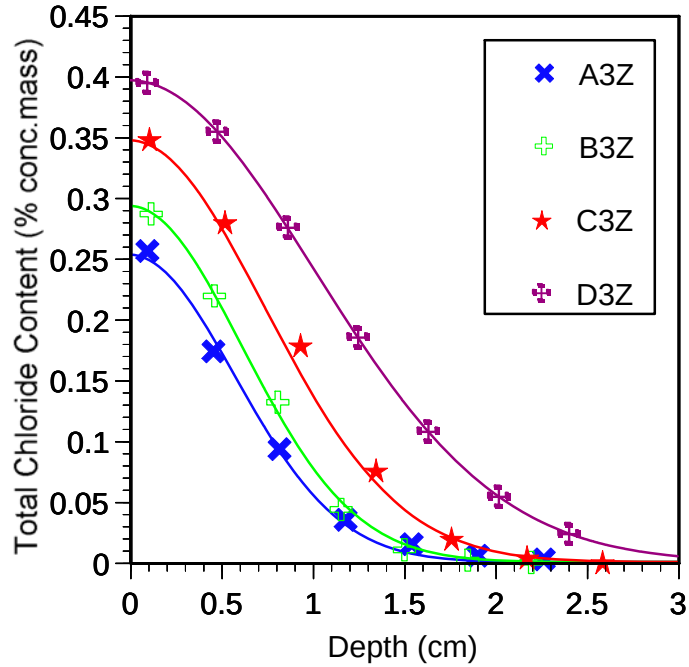


圖 4.129 A3Z、B3Z、C3Z、D3Z 氯離子濃度與試體深度關係圖
(貯鹽試驗)

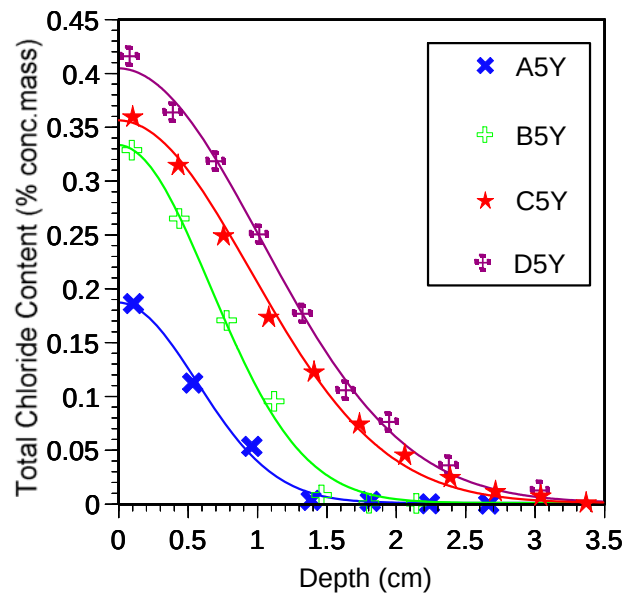


圖 4.130 A5Y、B5Y、C5Y、D5Y 氯離子濃度與試體深度關係圖
(貯鹽試驗)

由上述各圖混凝土內部所量測到的各深度氯離子含量變化，可藉由 Fick 第二定律計算氯離子於混凝土內的擴散係數 (diffusion coefficient)。Fick 第二定律對單一方向的擴散行為可由下列方程式表示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4-1)$$

式中 D_p (m^2/sec) 為貯鹽試驗擴散係數， C 為氯離子之濃度， x 為擴散所到達之距離 (m)， t 為擴散所使用之時間 (sec)。若假定擴散方程式是單一方向的擴散趨動方式，利用一個半無限積分，並設定 m 為總體氯離子擴散量；擴散過程中沒有任何物質來提供擴散之來源，在由邊界條件： $C_{(x=0, t>0)} = C_o$ ；初始條件： $C_{(x>0, t=0)} = 0$ ；無窮遠處條件： $C_{(x=\infty, t=0)} = 0$ 之條件。與式 (4-1) 可求得下列方程式

$$C = \frac{m}{\sqrt{\pi D_p T}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_p t}\right) \dots\dots\dots (4-2)$$

式中 m 為總體氯離子擴散量，以下式(4-3)計算

$$m = \int_0^{\infty} C dx ; t \geq 0 \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

表 4-36 為貯鹽試驗後各試體氯離子擴散係數計算結果。由表中可以發現計算結果高於 ACMT 的穩態傳輸係數，且與非穩態傳輸係數略為相等。圖 4.131 為貯鹽試驗氯離子擴散係數與粗骨材用量之關係圖。由圖中可以發現與 ACMT 相同趨勢，於水膠比 0.3 與 0.35 時氯離子擴散係數會隨著粗骨材用量增加而下降，但水膠比 0.4 與 0.45 在粗骨材用量增加氯離子擴散係數有隨著上升的現象。圖 4.132 為不同爐灰替代量下，氯離子擴散係數變化情形。由圖中可以發現爐灰替代量無論任何水膠比都可以有效降低氯離子擴散係數。於 W/B=0.3、0.35、與 0.4 下降幅度可達 29%至 20%，W/B=0.45 下降則約 8%。

表 4-36 混凝土貯鹽試驗氯離子擴散係數計算結果

配比編號	試體 1 氯離子擴散係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	試體 2 氯離子擴散係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	平均值 氯離子擴散係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)
A3X	3.66	3.48	3.57
B3X	4.29	4.53	4.41
C3X	3.98	4.12	4.05
D3X	4.80	4.95	4.87
A3Y	2.56	2.50	2.53
B3Y	3.56	3.39	3.48
C3Y	4.03	3.98	4.00
D3Y	5.65	5.37	5.51
A3Z	1.72	2.08	1.90
B3Z	2.34	2.29	2.32
C3Z	4.51	4.38	4.45
D3Z	5.73	5.43	5.58
A5Y	1.71	1.99	1.85
B5Y	2.60	2.36	2.48
C5Y	3.27	3.08	3.17
D5Y	5.19	4.95	5.07

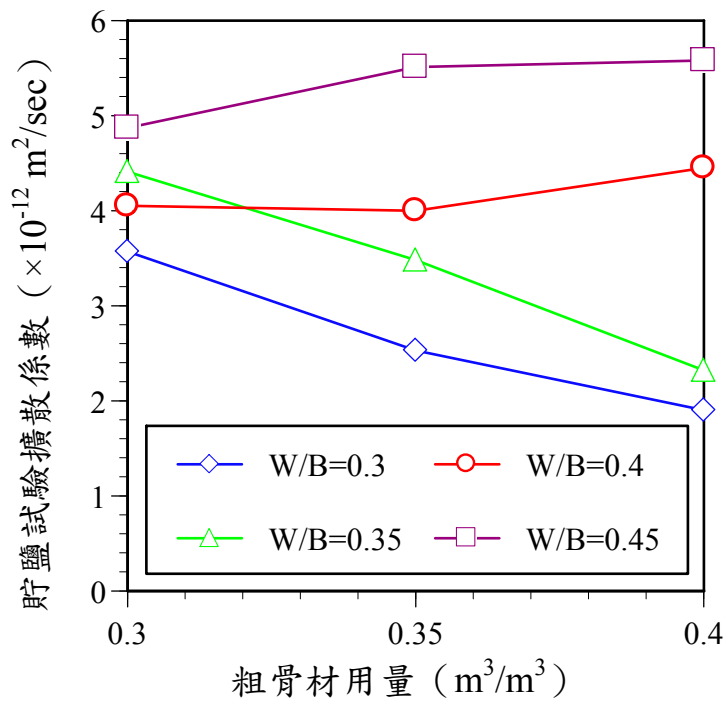


圖 4.131 貯鹽試驗氯離子擴散係數與粗骨材用量關係圖

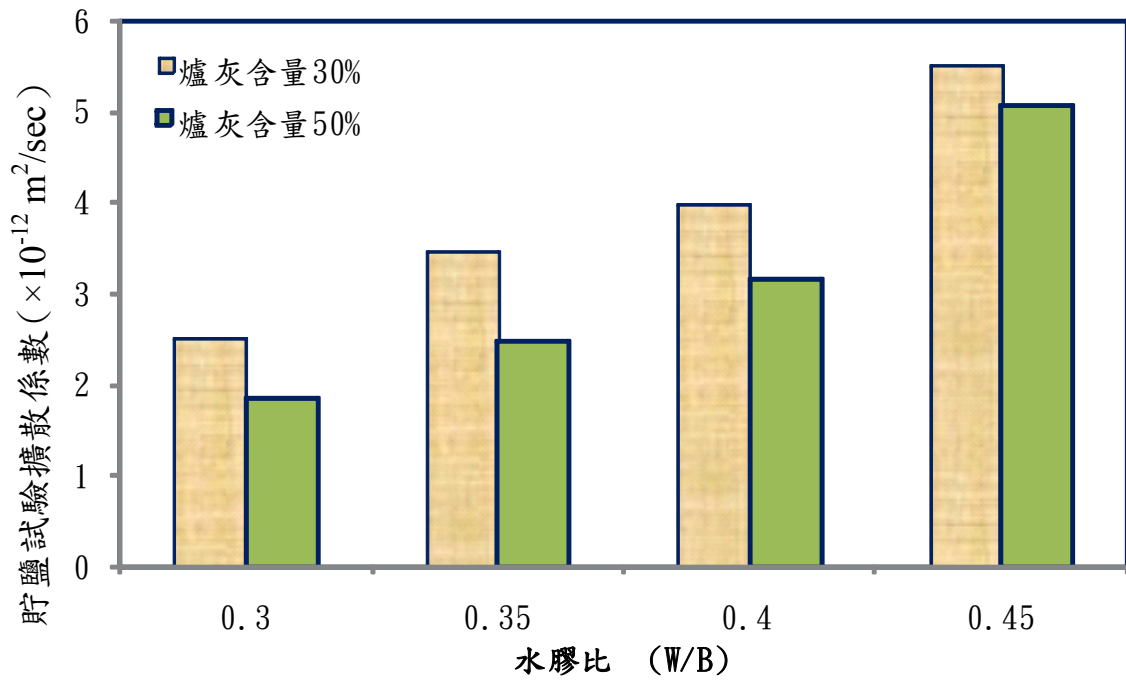


圖 4.132 不同爐灰含量對貯鹽試驗氯離子擴散係數影響

若比較貯鹽試驗氯離子擴散係數與RCPT電荷量關係，則如圖 4.133 所示，由圖中可以發現兩者較無一定關係存在，推測可能受到礦物摻料的影響。圖 4.134 與圖 4.135 分別與ACMT非穩態傳輸係數和穩態傳輸係數進行比較。由圖中可以發現與貯鹽試驗氯離子擴散係數略為呈現線性關係(R^2 分別為 0.89 與 0.83)。顯現當試體添加礦物摻料時，同樣以電壓做為加速機制的試驗以ACMT較具可行性。

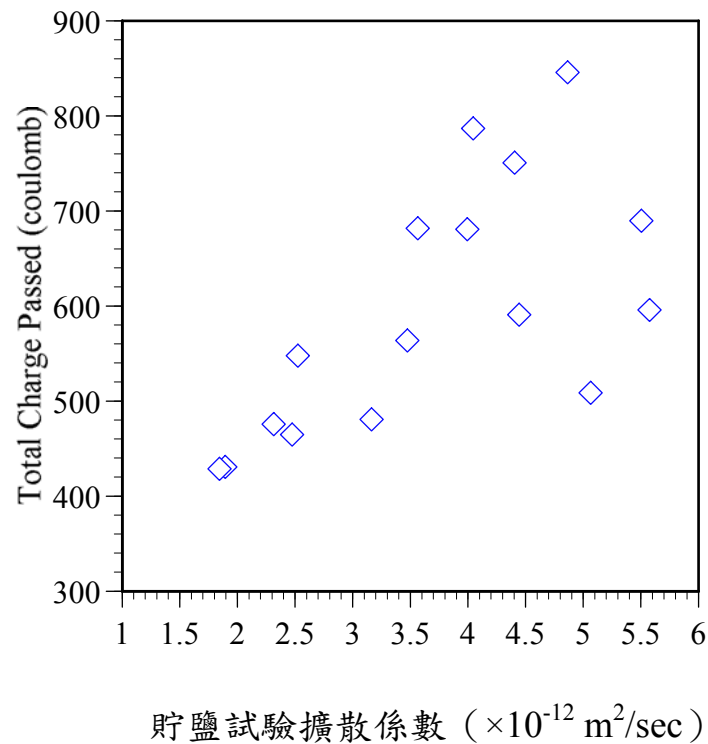


圖 4.133 貯鹽試驗氯離子擴散係數與 RCPT 通過電荷量關圖

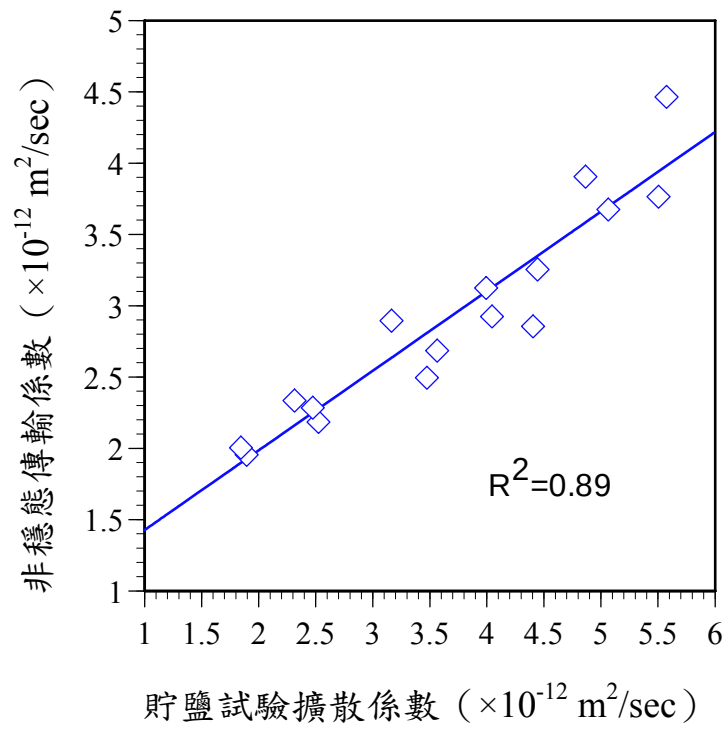


圖 4.134 貯鹽試驗氣離子擴散係數與 ACMT 非穩態傳輸係數關係圖

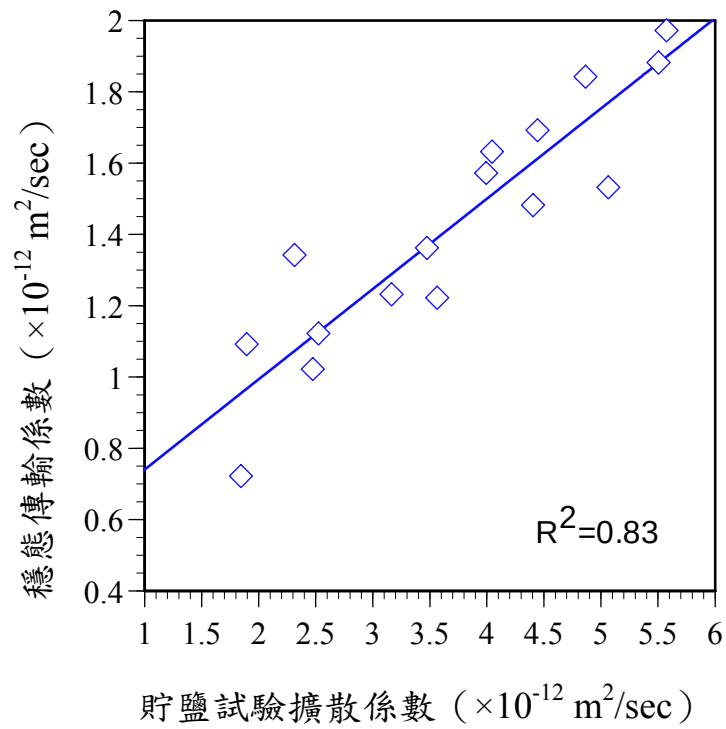


圖 4.135 貯鹽試驗氣離子擴散係數與 ACMT 穩態傳輸係數關係圖

4.7 小結

由 16 組不同變數配比試驗後的結果分析可以獲得下列結論。

- (1) 由工作性試驗，本研究所設計之配比均可符合試驗設計要求，其坍流度介於 50~72 cm，坍度為 24~28 cm。
- (2) 於力學試驗結果，28 天抗壓強度介於 52.8~79.0MPa，彈性模數介於 27.4~36.4GPa，劈裂強度介於 3.5~6.1MPa；而 56 天力學性質中，抗壓強度則介於 57.4~80.3MPa，彈性模數介於 29.4~34.6GPa，劈裂強度介於 3.8~6.8MPa。尤其中可以發現，力學性質除會隨著水膠比下降外，亦會隨著粗骨材用量的增加而增加。而添加爐灰配比的力學性質均較未添加配比佳，但添加 30%與 50%差異並不大。
- (3) 對磨耗試驗結果而言，磨耗量會隨著水膠比增加而有增大趨勢，與力學性質趨勢相同。而當粗骨材用量較高時，磨耗量亦有下降之趨勢。對添加爐灰而言，添加 50%爐灰配比之抗磨耗性質大於 30%。
- (4) 對含砂水流沖擊磨耗試驗結果而言，混凝土沖磨量隨水膠比增加而增加，且粗骨材用量較高時，沖磨量隨之減少。此外，混凝土中以添加 50%爐灰取代水泥時，其沖磨量小於 30%者，約 16%、21%、5%與 14%。
- (5) 對衝擊試驗結果而言，混凝土中粗骨材含量較多時可提升其抗衝擊性。而當粗骨材含量相同時，混凝土之衝擊破壞次數則以水膠比大者較少。此外，不同水膠比混凝土之衝擊破壞次數，以爐灰含量為 50%大於爐灰 30%者。
- (6) 對耐久性試驗結果而言，水膠比 0.3 與 0.35 氯離子傳輸係數會隨著骨材用量的增加而有下降之趨勢。但水膠比 0.4 與 0.45 粗骨材用量的增加會造成負面影響，如粗骨材用量 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 時，氯離子傳輸係數會較 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 減少約 14%。

第五章 高抗磨耗衝擊混凝土建議配比

由前述第四章混凝土試驗結果與分析，可以發現混凝土各組成材料變數對耐磨損、耐衝擊、與耐久性的關係性。若交叉比對則可建議高抗磨耗衝擊混凝土的配比設計方式。

5.1 耐久性與抗磨損能力之關係

本研究由 4.6.3 節驗證了加速氯離子傳輸試驗（ACMT）較快速氯離子滲透試驗（RCPT）適用於本研究混凝土耐久性研究。圖 5.1 將水中磨耗試驗結果 60 小時後之試體磨耗量平均值與 ACMT 非穩態傳輸係數進行比較。圖中以折線表示磨損試驗 60 小時後之平均試驗結果，長條圖為非穩態傳輸係數。由圖中可以發現除了粗骨材用量 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 部分水膠比衝擊試驗結果異常外，其餘大致會隨著粗骨材量增加而有下降之趨勢。而耐久性方面，水膠比 0.3 與 0.35 會與衝擊試驗結果正向趨勢相同，但在水膠比 0.4 與 0.45 卻有不同之結果，隨著粗骨材量增加有氯離子傳輸係數上升之趨勢。圖 5.2 為不同爐灰含量 ACMT 非穩態傳輸係數與磨損量試驗結果比較圖。除了受到前述 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 部分水膠比衝擊試驗結果異常影響外，其餘與耐久性試驗結果相同，隨著爐灰用量增加有下降趨勢。

5.2 耐久性與抗衝擊能力之關係

圖 5.3 將水中抗衝擊試驗結果與 ACMT 非穩態傳輸係數進行比較。圖中以折線表示抗衝擊試驗撞擊破裂次數，長條圖為非穩態傳輸係數。由圖中可以發現撞擊破裂次數會隨著粗骨材量增加而有上升之趨勢。而耐久性方面，水膠比 0.3 與 0.35 會與衝擊試驗結果趨勢相反，呈現氯離子傳輸係數下降之趨勢，但在水膠比 0.4 與 0.45 卻有不同之結果。圖 5.4 為不同爐灰含量比較結果，由圖中可以發現爐灰量增加時抗衝擊試驗撞擊破裂次數會增加，而氯離子傳輸係數也有下降之趨勢。

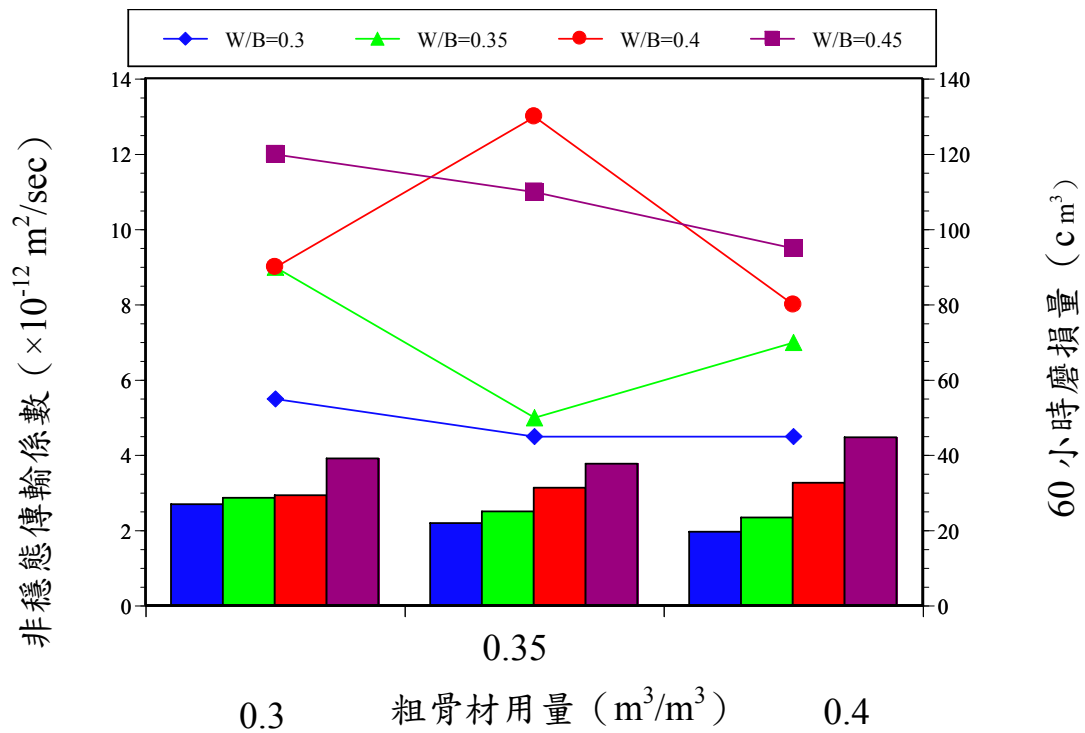


圖 5.1 不同粗骨材用量 ACMT 非穩態傳輸係數與磨損量試驗比較圖

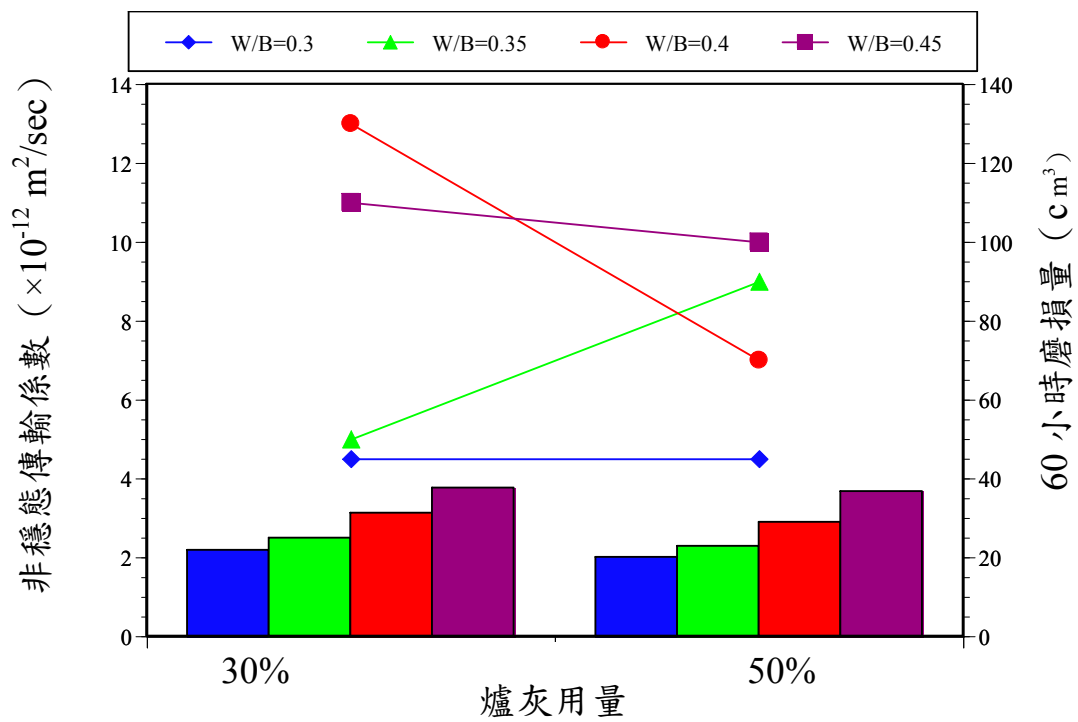


圖 5.2 不同爐灰含量 ACMT 非穩態傳輸係數與磨損量試驗比較圖

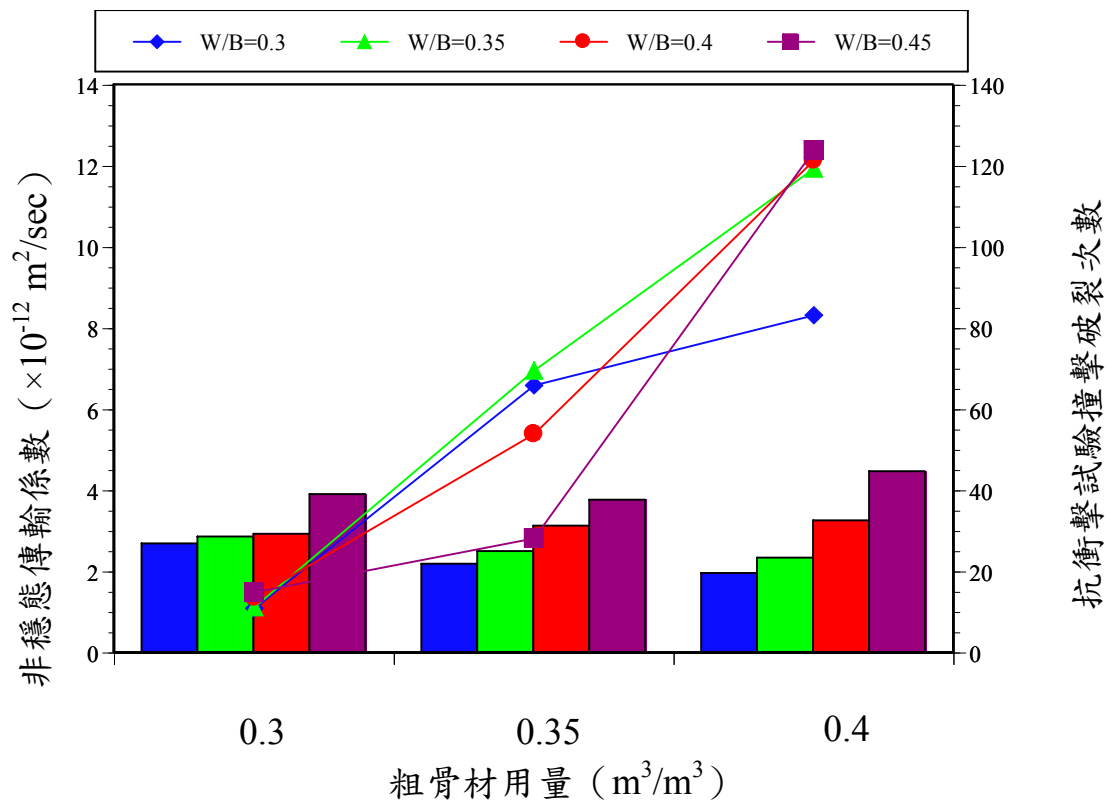


圖 5.3 不同粗骨材用量 ACMT 非穩態傳輸係數與衝擊試驗關係圖

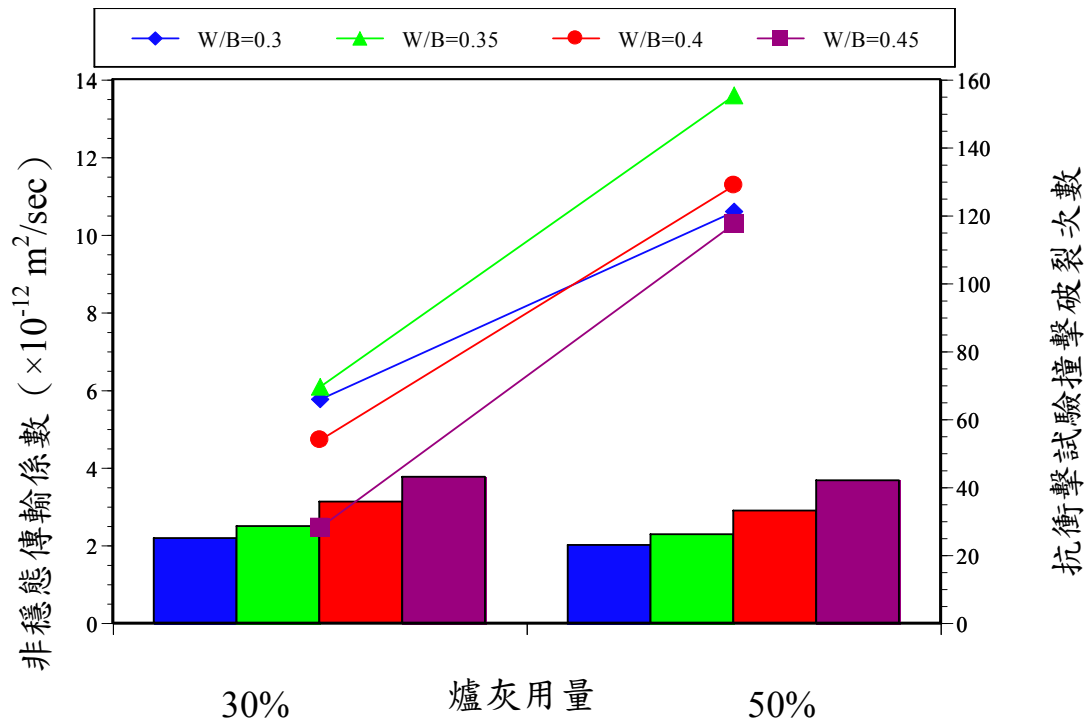


圖 5.4 不同爐灰含量 ACMT 非穩態傳輸係數與衝擊試驗結果比較圖

5.3 最適橋樑墩柱混凝土配比參數分析

本研究在各種不同變數下進行混凝土耐磨、耐衝擊、及耐久性質分析工作。由文獻^[11]上發現當混凝土水膠比由 0.72 減少為 0.4 時，混凝土耐磨性可提高 43%。因此本研究於實驗設計時便以此為考量並配合目前國內混凝土產製技術的極限將水膠比研究範圍設定於 0.3 至 0.45。而新拌工作度上考慮現場施工可行性，在配比設計時便希望具有坍度 20 公分以上，坍流度 50 公分以上之情形。而由前述試驗結果可以發現均可達到工作性要求。

表 5-1 將各項性質試驗結果進行整理，在相同水膠比下，比較粗骨材用量 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 與 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 兩者差異，並以 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 為分母，探討增加粗骨材用量對各項性質的效益，在爐石替代量方面則比較相同粗骨材時 50% 與 30% 的差異性。力學性質比較 56 天抗壓強度差異；耐磨性以 ASTM C1138 規範 60 小時磨損量為評估方式；耐衝擊性以抗衝擊試驗撞擊破裂次數進行評估；耐久性則以 ACMT 非穩態氯離子擴散細數進行比較。由於各種試驗數據所反應的正負向品質差異表示不一，因此於表中統一以“+”代表對性質的正面效益影響，“-”代表負面的影響。由表中可以發現粗骨材用量的增加對力學性質、耐磨性、與耐衝擊性均有正面效益，其中以耐衝擊性效益最高可以高達約 6.6 至 9.6 倍（657%~958%）。對力學性質的影響則較小，在 12% 以內。而耐久性方面，在水膠比 0.4 與 0.45 出現負面的影響，但影響程度在 15% 以內。而爐灰用量的增加對本研究各項性質均有正面的效益，其中亦以耐衝擊性正面效益最大約為 84%。而由相關指標均可以發現，粗骨材用量增加的影響會大於漿體爐灰用量。綜合上述當混凝土用於橋樑墩柱時，配比粗骨材用量增加至 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 確實可以有效增加耐磨與衝擊性，即便水膠比 0.4 與 0.45 出現耐久性負面影響，但負面影響程度會小於耐磨與衝擊性的正面效益。

表 5-1 粗骨材 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 與爐灰用量對混凝土各項性質的效益比較

試驗性質	W/B=0.3	W/B=0.35	W/B=0.4	W/B=0.45	爐灰用量 50%
力學性質	+2.0%	+11.8%	+12.0%	+9.7%	+4.1%
耐磨性	+18.2%	+22.2%	+11.1%	+20.8%	+0.0%
耐衝擊性	+657.3%	+957.5%	+786.9%	+726.7%	+83.8%
耐久性	+27.2%	+18.2%	-11.3%	-14.4%	+8.3%

5.4 高抗磨耗衝擊混凝土配比設計

綜合上述以A3Z配比的整體表現最佳，因此建議可做為本研究高抗磨耗衝擊混凝土的配比，下表 5-2 為建議配比資料。由於A3Z配比強度高達 800 kgf/cm^2 ，實務上產製成本可能偏高。若考量經濟性與預拌廠產製能力，後續規範訂定時雖會將目前常用的混凝土設計強度由 350 kgf/cm^2 提升至 420 kgf/cm^2 以上。但仍無法確保耐磨性與耐衝擊性提高，須有另外的配比控制條件，由上述表 5-1 可以發現粗骨材 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 在不同水膠比下耐衝擊性的表現最佳，圖 4.99 可以發現均會到達衝擊次數 100 次以上；2 小時高速含砂水流的磨損也低於 45 cm^3 ；60 小時 ASTM C1138 磨損試驗亦低於 100 cm^3 ，因此基本上粗骨材用量 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 便可做為高抗磨耗衝擊混凝土配比的主要限制。但若考量耐久性，D3Z的貯鹽試驗擴散係數約為 $5.6 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ，與 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 比較少了 14.4%。與水膠比 0.30 比較大了 2.93 倍，若是沿海會有氯鹽侵蝕的虞慮，建議須把擴散係數考量小於 $3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ，主要原因在於假設一般結構物保護層 5cm，擴散係數 $3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 的混凝土若於海邊潮汐帶區域，經Fick第二定律計算，約 35 年後會抵達鋼筋表面。

表 5-2 高抗磨耗衝擊混凝土建議配比

單位：kg/m³

水泥	飛灰	爐石	水	SP	三分石	六分石	細骨材
386	116	50	160	6	758	325	598

第六章 維修補強建議配比

本研究第二年進行橋梁墩柱混凝土材料修復補強之研究，經過第二章維修補強文獻蒐集與整理後，本計畫決定以較不會發生黏結界面問題與符合實務施工需求的水泥系維修補強材料為主。

6.1 配比參數設計

一般而言水泥系維修補強材料會以高分子聚合物或纖維來做為補強的功能。但高分子聚合物混凝土需要在特殊環境聚合，較無法於工地現場或水中施作，因此擬以常用補強材鋼纖維與碳纖維加入混凝土中成為劣化混凝土維修補強的水泥質材料。在混凝土基材方面，由於第一年的試驗結果發現粗粒料用量增加至 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 確實可以有效增加耐磨與衝擊性，且水膠比 0.3 其力學強度與耐久性質亦較佳，因此以去年度 A3Z 配比為參考配比，並考量文獻指出矽灰添加可大幅改善耐磨性質，因此在混凝土基材上除加入爐石與飛灰礦物摻料外，亦加入 A3X 配比水泥量 10% 的矽灰做為漿體的一部分。而纖維加強材部分，由於纖維加入混凝土內會影響施工性質，因此添加量並不高，本研究亦考量施工性與實務產製的可行性，在補強材的添加量限制於 0.5% 與 1%。

相關參數設計如下：

1. 水膠比：0.30。
2. 礦物摻料：爐灰 30%、矽灰 10%。
3. 粗粒料用量： $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。
4. 補強材：鋼纖維（0.5%、1.0%）、碳纖維（0.5%、1.0%）

6.2 試驗材料

本研究所設計的維修補強材料為水泥系維修補強材料，相關組成材料包含水、摻劑、水泥、飛灰、爐石、粗粒料、細粒料、與補強材等，其中除加強材外，其餘組成基本性質與第 3 章相同，本部份介紹加強材部分。補強材本計畫採用鋼纖維與碳纖維 2 種，相關基本性質如下。

1. 鋼纖維

採用比利時進口之 Dramix OL 13/20 HC 圓形斷面直線型鋼纖維，詳圖 6.1。長為 13 mm，直徑為 0.2 mm，長徑比(aspect ratio)為 65，極限拉力強度達 379.2 KSI，其表面經過鍍銅處理以防腐蝕。



圖 6.1 本研究使用之鋼纖維

2. 碳纖維

本計畫所採用之碳纖維其單位長度重為 0.202 g/m，每根纖維直徑為 7 μ m，纖維長度為 10~20mm，張力強度為 579.6 KSI，其他規格詳表 6-1，實際纖維照片詳圖 6.2。

表 6-1 本研究使用之碳纖維規格表

規格	TC35-3K
張力強度	579.6 KSI
張力模數	35.4 MSI
單位重量	0.202 g/m
密度	1.8 g/cm ³
含漿率	1.40%



圖 6.2 本研究使用之碳纖維

6.3 試驗方法

維修補強材料的試驗均需進行第三章新拌工作性質試驗、硬固抗壓強度試驗、耐磨性試驗、耐衝擊性試驗、與耐久性試驗。除此之外亦進行乾縮試驗、拉拔試驗、與傾斜剪力試驗試驗。下述就其試驗方法進行介紹。

6.3.1 乾縮試驗

所謂乾燥收縮是指混凝土在常溫及試體內部與外界環境有溫濕度交換的情況下，混凝土本身隨著時間因水化作用所產生的體積變形。本實驗以試體拆模後隨即將試體移置於 ASTM 標準乾燥室(23℃，R.H.50%)內，來模擬試體內部與外部環境有溫溼度交換的情況，並以機械式應變計(詳圖 6.3)依照時間表按時量測試體之變形量。

為了量測試體的收縮行為，本實驗使用 ELE 機械式應變計以及預先埋設的圓形金屬測片(詳圖 6.4、圖 6.5)，來進行實驗。

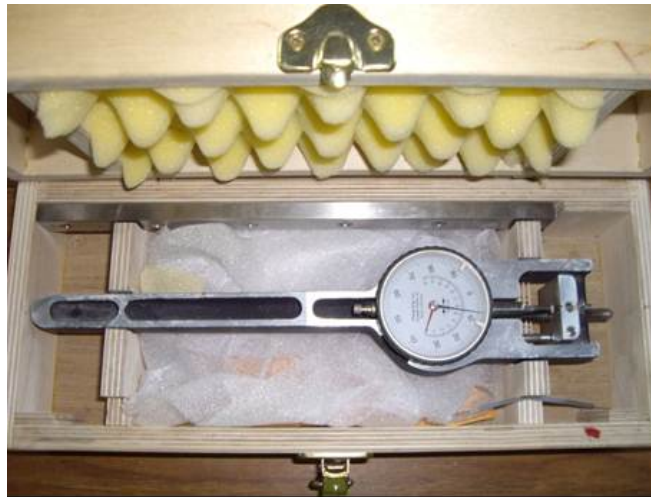


圖 6.3 機械應變計 ELE Demec



圖 6.4 收縮試驗之試體模具裝置



圖 6.5 乾燥收縮試體

6.3.2 拉拔試驗法(Pull-off test method)

拉拔試驗之原理乃利用反作用力的效果將混凝土柱拉起，來測得既存混凝土與覆蓋材料之間的粘結強度。在欲測試的區域內，先以鑽心機器鑽一個直徑 0.075m 的孔，為了能夠測得該粘結面的粘結強度，鑽心的深度必須穿越過粘結面到達下層混凝土(既存混凝土)，如圖 6.6 所示^[24]，之後以砂輪機將測試孔表面予以磨平，主要目的是為了去除原始表面上的不平整及粉質層，以便讓一個直徑 0.075m 厚 0.03m 的鐵盤(詳圖 6.7)，藉由快乾型環氧樹脂完全接著於該鑽心圓柱表面，且緊緊地抓住混凝土柱，待樹脂完全凝固硬化後，組裝拉拔試驗機，並藉由儀器的操作、轉動，將混凝土柱慢慢拉起，直到抗拉破壞發生。將抗拉破壞所需之力量除於鑽心圓柱面積可得抗拉強度，其拉拔試驗儀器及試驗情形詳圖 6.8、圖 6.9。

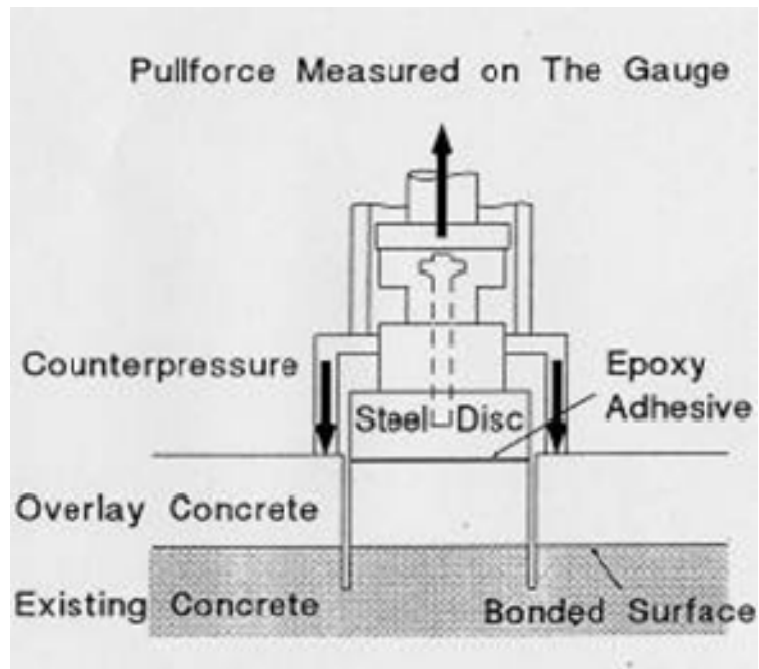


圖 6.6 拉拔試驗原理之示意圖^[25]



圖 6.7 鐵盤黏附於鑽心圓柱



圖 6.8 拉拔試驗儀器



圖 6.9 拉拔試驗情形

6.3.3 傾斜剪力試驗

運用於舊有橋墩面層修復補強時，新舊混凝土界面是否會影響修復成效試值得關心的問題，傾斜剪力試驗依 BS EN 12615 試驗方法（Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of slant shear strength）進行。此試驗方法主要用於評估修補材料與基材之間黏著強度，將修補材以 30 度傾斜角與半菱形狀基材試體結合後，進行抗壓試驗，藉以評估修補材與基材界面的黏結程度。試驗方法如下所述。

1. 製作高強度水泥砂漿試體，拌製成水平面夾 30 度角對角線的半菱形柱試體，並進行養護，如圖 6.10 所示。。
2. 養護後將放置於模具中，如圖 6.10 將本研究之修補材料填入另一側缺口，使其成為 55 mm×50mm×50mm 之試片，如圖 6.11 所示。
3. 於養護 28 天後，將此試體進行抗壓試驗，求取試片之抗壓強度值，藉由此以了解其黏結強度，如圖 6.12 所示。。



圖 6.10 傾斜剪力水泥砂漿試驗部分放入模具情形



圖 6.11 維修補強材料灌入模具與另一側試體接合情形



圖 6.12 傾斜剪力試驗試體抗壓情形

6.4 維修補強材料配比設計

各組配比設計如表 6-2 所示。表中為方便比較，延續 A3Z 編號，於 A3Z 分別加上 a、b、c、d、e，以代表添加矽灰、添加鋼纖 0.5%、添加鋼纖 1.0%、添加碳纖 0.5%、添加碳纖 1.0% 配比。

表 6-2 維修補強材料配比設計 (kg/m³)

編號	水泥	飛灰	爐石	矽灰	水	SP	三分石	六分石	細粒料	鋼纖維	碳纖維
A3Za	347	116	50	39	160	6	758	325	598	--	--
A3Zb	346	115	50	38	159	6	754	323	595	39	--
A3Zc	344	115	50	38	158	6	750	322	592	78	--
A3Zd	346	115	50	38	159	6	754	323	595	--	9
A3Ze	344	115	50	38	158	6	750	322	592	--	18

第七章 維修補強材料試驗結果與討論

7.1 維修補強材料新拌性質試驗結果分析

表 7-1 為混凝土坍流度、坍度、坍流 50 公分時間、含氣量及單位重等試驗結果。本計畫採用添加強塑劑之方式，以控制混凝土之工作性；各組混凝土之強塑劑用量約為膠結材料的 1%。各組混凝土之坍流度試驗結果，如圖 7.1 至圖 7.5 所示。由圖中可看出，各組混凝土均未發生析離與泌水之情形，除了 A3Zc 因加入 1% 的鋼纖維使得坍流度有損失之外，其餘各組試體坍流度約介於 50-72cm 之間，坍度約為 24-28.5cm，此結果完全符合配比設計之要求。各組新拌混凝土之含氣量與單位重約介於 1.9%-3.4%，以及 2350-2500 kg/m³ 之間，主要的差異來自於碳纖維及鋼纖維的添加所致，因碳纖維的單位重為 1.8 kg/m³，而鋼纖維的單位重為 7.8 kg/m³，所以隨著碳纖維的取代混凝土體積的取代率增加，會使的混凝土的單位重降低，而鋼纖維則隨著取代率增加，混凝土的單位重會有增加的趨勢如表 7-1 所示。

表 7-1 維修補強材料新拌性質

配比	坍流度 (cm)	坍度 (cm)	T ₅₀ (sec)	含氣量 (%)	單位重 (kg/m ³)
A3Z	63.0	26.0	10.1	2.0	2420
A3Za	68.0	25.0	10.3	2.1	2469
A3Zb	68.0	26.5	8.4	2.1	2483
A3Zc	37.5	17.0	-	2.3	2496
A3Zd	68.5	27.0	9.3	2.2	2394
A3Ze	67.0	25.5	13.5	2.0	2373

註：T₅₀ 為坍流度達 50 公分之時間



圖 7.1 配比 A3Za 之坍流度情形



圖 7.2 配比 A3Zb 之坍流度情形



圖 7.3 配比 A3Zc 之坍流度情形



圖 7.4 配比 A3Zd 之坍流度情形



圖 7.5 配比 A3Ze 之坍流度情形

本研究主要添加的纖維為碳纖維與鋼纖維，由圖 7.6 之可得添加纖維對於混凝土工作度的影響，A3Z 及 A3Za 為未添加纖維的配比，其坍流度約 62~65cm，T50 的時間約 10 秒左右，而 A3Zd 及 A3Ze 分別為添加 0.5%及 1.0%的碳纖維，其坍流度幾乎與未添加纖維前的配比相同，而 T50 的時間也差異不大，可知添加碳纖維對於工作度的影響不大，而鋼纖維就有比較大的影響，A3Zb 為添加 0.5%的鋼纖維，其坍流度與 T50 與未添加纖維的配比很接近，但當鋼纖維添加量增加至 1.0%時，對於工作度就會有坍流度損失的情況發生，坍流度減為 37cm，損失了近 25cm，由比較可得添加過多的鋼纖維對於混凝土工作度有不利的影響。

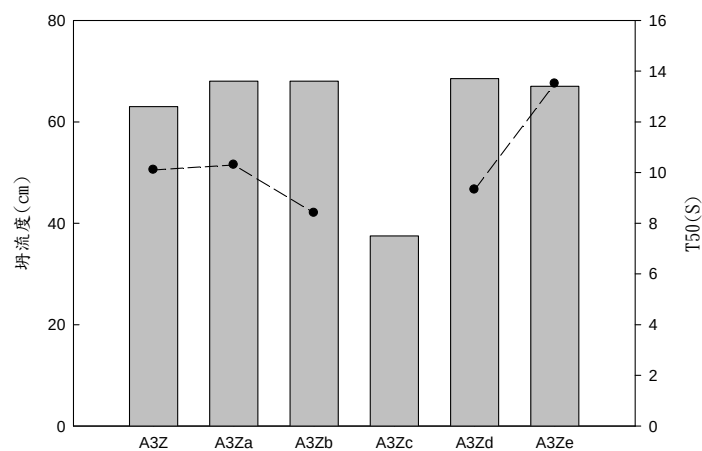


圖 7.6 添加纖維與坍流度之關係

7.2 維修補強材料力學性質試驗結果分析

本研究中在力學性質方面進行 28 天與 56 天的抗壓強度試驗、彈性模數及劈裂強度試驗其試驗結果如表 7-2~表 7-7 所示，其中 28 天抗壓強度介於 71~95 MPa，彈性模數介於 36.4~38.1 GPa，劈裂強度介於 5.3~8.1 MPa；而 56 天力學性質中，抗壓強度則介於 74~104 MPa，彈性模數介於 34.6~38.2 GPa，劈裂強度介於 5.4~8.1 MPa，而抗壓強度、彈性模數及劈裂強度皆受水膠比、粗粒料用量及礦物摻料用量及纖維添加等影響，影響分析分述如下。

表 7-2 維修補強材料 28 天抗壓強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均	
				(MPa)	(Kgf/cm ²)
A3Z	80.54	77.20	79.07	79	806
A3Za	84.28	88.20	76.22	83	845
A3Zb	88.01	92.98	96.06	92	941
A3Zc	91.04	98.22	95.00	95	966
A3Zd	74.42	67.41	69.93	71	720
A3Ze	81.70	78.37	78.53	80	811

表 7-3 維修補強材料 28 天彈性模數試驗結果

配比編號	試體 1 (GPa)	試體 2 (GPa)	試體 3 (GPa)	平均 (GPa)
A3Z	36.02	36.51	36.74	36.42
A3Za	36.94	36.66	36.67	36.76
A3Zb	37.71	36.88	38.94	37.84
A3Zc	36.25	39.57	38.48	38.10
A3Zd	36.18	35.96	33.96	35.37
A3Ze	36.08	36.52	34.97	35.86

表 7-4 維修補強材料 28 天劈裂強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均 (MPa)
A3Z	5.79	6.58	5.92	6.09
A3Za	4.81	6.21	4.96	5.33
A3Zb	6.47	6.24	5.39	6.03
A3Zc	7.98	7.78	8.45	8.07
A3Zd	5.36	5.22	5.65	5.41
A3Ze	6.05	6.46	6.22	6.25

表 7-5 維修補強材料 56 天抗壓強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均	
				(MPa)	(Kgf/cm ²)
A3Z	76.52	84.66	75.54	79	805
A3Za	82.53	86.82	85.35	85	865
A3Zb	100.23	101.85	104.99	102	1,043
A3Zc	106.19	104.30	101.67	104	1,060
A3Zd	74.66	74.05	74.41	74	758
A3Ze	85.00	88.56	84.22	86	876

表 7-6 維修補強材料 56 天彈性模數試驗結果

配比編號	試體 1 (GPa)	試體 2 (GPa)	試體 3 (GPa)	平均 (GPa)
A3Z	36.08	32.75	35.16	34.66
A3Za	37.56	36.60	36.45	36.87
A3Zb	36.28	37.00	40.32	37.86
A3Zc	38.51	36.24	39.85	38.20
A3Zd	35.76	35.95	35.32	35.68
A3Ze	35.05	36.78	35.75	35.86

表 7-7 維修補強材料 56 天劈裂強度試驗結果

配比編號	試體 1 (MPa)	試體 2 (MPa)	試體 3 (MPa)	平均 (MPa)
A3Z	6.05	7.32	7.00	6.80
A3Za	4.59	6.11	5.68	5.46
A3Zb	6.34	6.41	5.45	6.07
A3Zc	8.42	7.91	8.02	8.12
A3Zd	5.95	5.83	5.02	5.60
A3Ze	6.36	6.65	6.86	6.62

本研究中主要使用的纖維為鋼纖維及碳纖維，圖 7.7 為比較添加纖維對於混凝土抗壓強度及劈裂強度的影響，由圖中可明顯看出隨著鋼纖維(A3Zb-0.5%及 A3Zc-1.0%)的添加量增加，混凝土的抗壓強度及劈裂強度都有明顯的提升，而碳纖維的添加(A3Zd-0.5%及 A3Ze-1.0%)僅有助於混凝土劈裂強度的提升，對於抗壓強度的貢獻並不明顯，最主要的原因乃是於添加纖維於混凝土中，可以有效抑制混凝土中微裂縫的發展，就是所謂的綴縫作用，因微裂縫受到抑制，所以可以有效提升混凝土的抗拉強度，亦即本研究中的劈裂強度。另外添加鋼纖維還可以有效提升混凝土的韌性，即混凝土在進行抗壓試驗時，達到抗壓強度的極值後並不會類似一般混凝土隨即發生脆性破壞，而是會有一段強度延展期，慢慢的強度逐漸遞減，最終發生破壞。

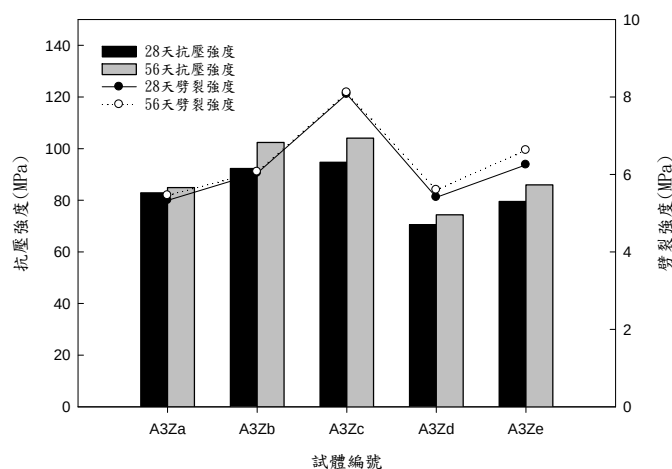


圖 7.7 添加纖維對於混凝土抗壓及劈裂強度之影響

圖 7.8 為添加纖維對於混凝土抗壓強度與彈性模數的影響比較圖，可由圖中觀察出彈性模數與抗壓強度有明顯的正相關，與未添加纖維的混凝土結果一致，即強度越高的混凝土有越大的彈性模數，有添加纖維之混凝土彈性模數約在 35.86~37.86 GPa 之間。

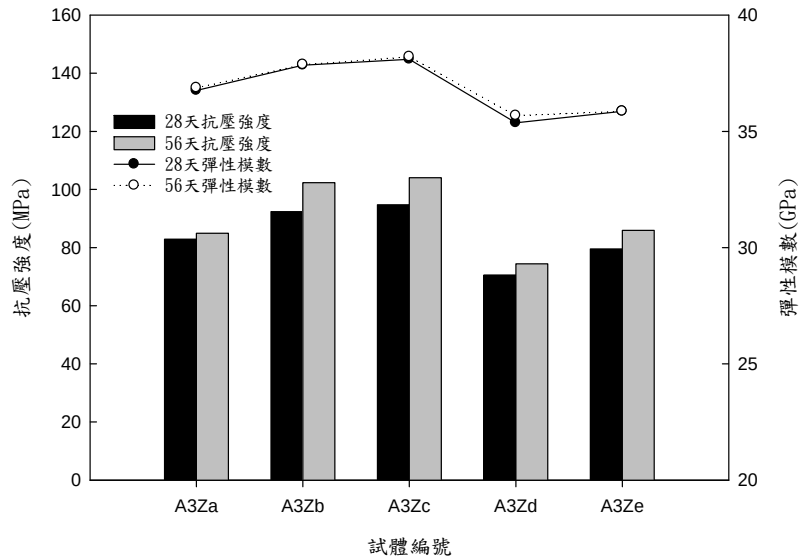


圖 7.8 添加纖維對於混凝土抗壓強度及彈性模數之影響

7.3 維修補強材料水中磨耗試驗結果分析

本研究中之水中磨耗試驗依據 ASTM C1138 進行，配比 56 天材齡試驗的磨耗試驗結果如圖 7.9~圖 7.14 所示。由圖中可以發現添加砂灰與纖維後的混凝土明顯較 A3Z 配比磨損量來的小。



試體 1



試體 2

圖 7.9 配比 A3Z 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 7.10 配比 A3Za 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 7.11 配比 A3Zb 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 7.12 配比 A3Zc 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 7.13 配比 A3Zd 磨耗試驗結果



試體 1



試體 2

圖 7.14 配比 A3Ze 磨耗試驗結果

本研究計畫中為探討添加纖維對於混凝土抵抗磨能力的表現，分別添加鋼、碳纖維 0.5% 及 1.0%，表 7-8 及圖 7.15 為比較添加鋼纖維於水中磨耗的表現，可以明顯的看出隨著鋼纖維的添加量增加，混凝土於水中磨耗所減少的體積會遞減，添加 0.5% 鋼纖維(A3Zb)於水中磨耗所損失的體積約只有未添加鋼纖維(A3Za)的 3/4，有效提升混凝土抵抗磨耗的能力 25%，而添加 1.0% 的鋼纖維(A3Zc)於水中磨耗所損失的體積僅為未添加鋼纖維的 1/2，提升混凝土抵抗磨耗能力 50%，由圖 7.15 可以看出這明顯的趨勢，故添加鋼纖維可以有效提升混凝土抵抗磨耗的能力。

表 7-8 配比A3Za、A3Zb及A3Zc水中磨耗試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Za		A3Zb		A3Zc	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
12	9	14	4	9	5	6
24	12	25	8	19	11	11
36	24	35	14	25	17	17
48	35	45	22	35	22	25
60	46	53	28	45	26	33
72	53	71	30	48	28	38

註：水膠比=0.30、爐灰 30%、粗粒料 0.40m³/m³

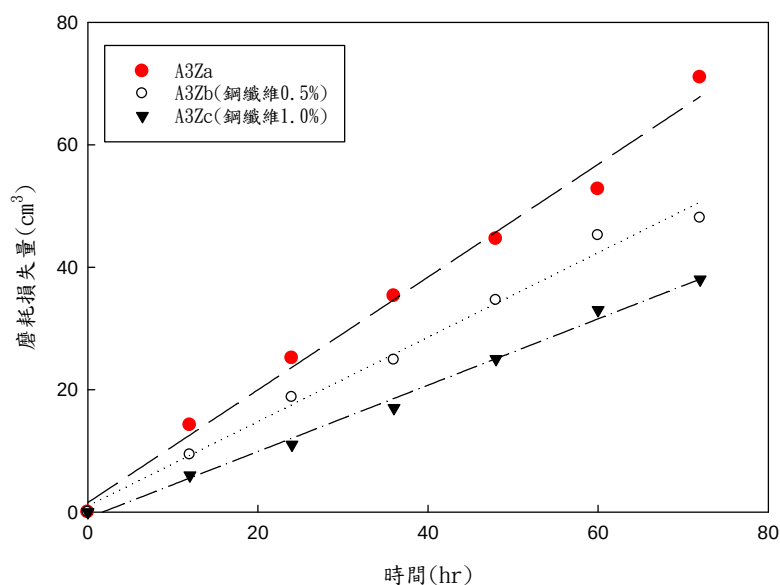


圖 7.15 添加鋼纖維對磨耗損失影響(2 試體平均值)

表 7-9 及圖 7.16 為比較添加碳纖維對於混凝土水中磨耗的影響，由表 7-9 可看出添加 0.5%(A3Zd)及 1.0%(A3Ze)碳纖維的混凝土於水中磨耗減少的體積約為未添加纖維前之混凝土的 4/5，可以提升混凝土抵抗水中磨耗能力約 20%，但碳纖維添加量的增加對於抵抗水中磨耗能力的提升並沒有明顯的正相關，添加 0.5%及添加 1.0%碳纖維的配比兩者水中磨耗損失體積的差值甚小；依據Shigeyuki等的研究^[21]指出添加

纖維可以有效提升混凝土抵抗水中磨耗的能力約 20~50%，與本實驗的結果相符。

表 7-9 配比A3Za、A3Zd及A3Ze水中磨耗試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Za		A3Zd		A3Ze	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
12	9	14	10	9	8	12
24	12	25	19	21	15	21
36	24	35	27	30	23	30
48	35	45	35	38	30	38
60	46	53	42	46	38	47
72	53	71	52	53	46	52

註：水膠比=0.30、爐灰 30%、粗粒料 0.40m³/m³

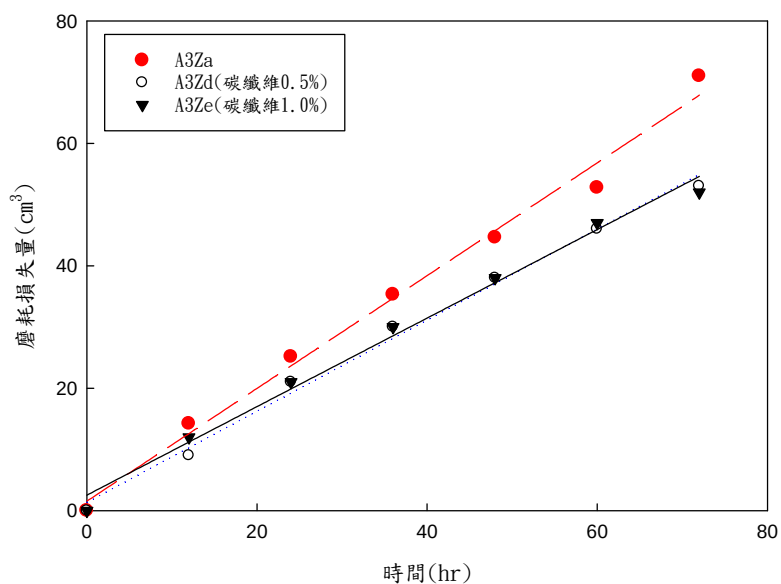


圖 7.16 添加碳纖維對磨耗損失影響(2 試體平均值)

7.4 維修補強材料含砂水流沖擊磨耗試驗結果分析

含泥砂之高速流水通過水工結構物時，會對其混凝土表面進行沖磨作用，其破壞行為包括顆粒摩擦，以及水流與顆粒沖擊兩種，後者的破壞能量十分重大，若持續作用之時間長久，產生之破壞速度將十分可觀。高速泥砂流水之磨損破壞速度與泥砂運動狀態、水流流速、含砂量、泥沙顆粒形狀及粒徑、硬度等相關。而摩擦作用則會在經過的混凝土表面留下溝槽與擦痕，亦是造成結構物破壞的主要作用。本研究以固定含砂量與流速水流之沖擊試驗，以模擬橋樑構造在遭受含砂水流衝擊作用下之耐磨性。配比 56 天材齡試驗結果如圖 7.17~圖 7.22 所示。由圖中可以發現添加矽灰與纖維後的混凝土明顯較 A3Z 配比磨損量來的小。



圖 7.17 配比 A3Z 沖磨試驗結果



圖 7.18 配比 A3Za 沖磨試驗結果



圖 7.19 配比 A3Zb 沖磨試驗結果



圖 7.20 配比 A3Zc 沖磨試驗結果

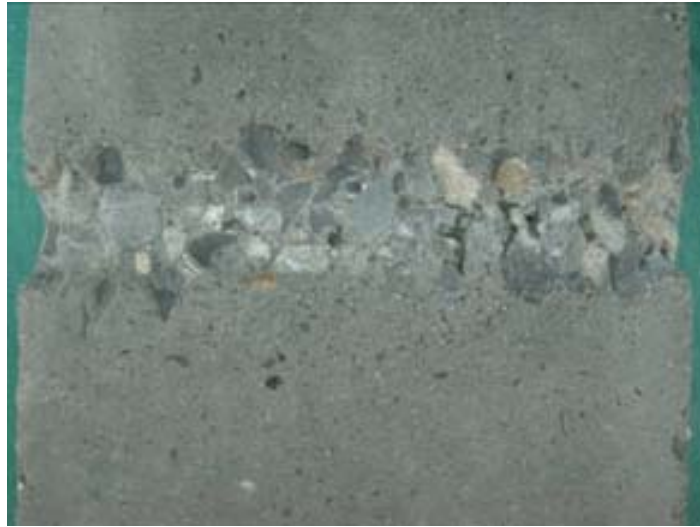


圖 7.21 配比 A3Zd 沖磨試驗結果



圖 7.22 配比 A3Ze 沖磨試驗結果

比較添加鋼纖維對於沖磨量的影響，詳表 7-10 及圖 7.23 可看出一趨勢，隨著鋼纖維的取代量增加，混凝土於水中沖磨的體積有稍微降低的情形，但效果並不如水中磨耗試驗明顯，主要是因為 A3Za、A3Zb、A3Zc 等各組試體的強度均超過 865kg/cm^2 ，有添加鋼纖維的試體強度甚至超過 1000 kg/cm^2 ，將如此高強度的試體進行沖磨試驗損失體積本來就不大，加上沖磨試驗的時間僅兩小時，因此添加鋼纖維對提升混凝土抵抗沖磨能力的效果並不如水中磨耗試驗來的顯著，但仍可得知添

加鋼纖維對於抵抗沖磨有正面效果。而添加碳纖維對於沖磨量的影響可由表 7-11 及圖 7.24 研判，可知添加碳纖維對於提升混凝土沖磨抵抗能力的效果亦同樣不如水中磨耗試驗來的明顯，僅稍微降低沖磨的體積損失量，理由與添加鋼纖維相同，還是因試驗時間與試體強度之故。

表 7-10 配比A3Za、A3Zb、A3Zc含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Za		A3Zb		A3Zc	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
1	19	20	19	17	17	19
2	31	32	29	30	29	28

註：水膠比=0.30、爐灰 30%

表 7-11 配比A3Za、A3Zd、A3Ze含砂水流沖擊試驗結果 (cm³)

時間 (小時)	A3Za		A3Zd		A3Ze	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0	0	0	0	0	0	0
1	19	20	19	20	19	21
2	31	32	30	30	29	29

註：水膠比=0.30、爐灰 30%

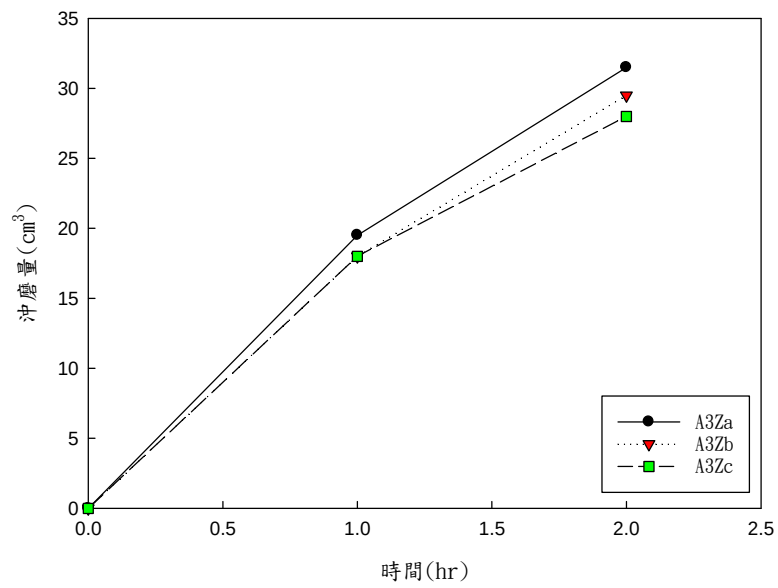


圖 7.23 配比 A3Za、A3Zb、A3Zc 之鋼纖維用量對沖磨量之影響
(2 試體平均值)

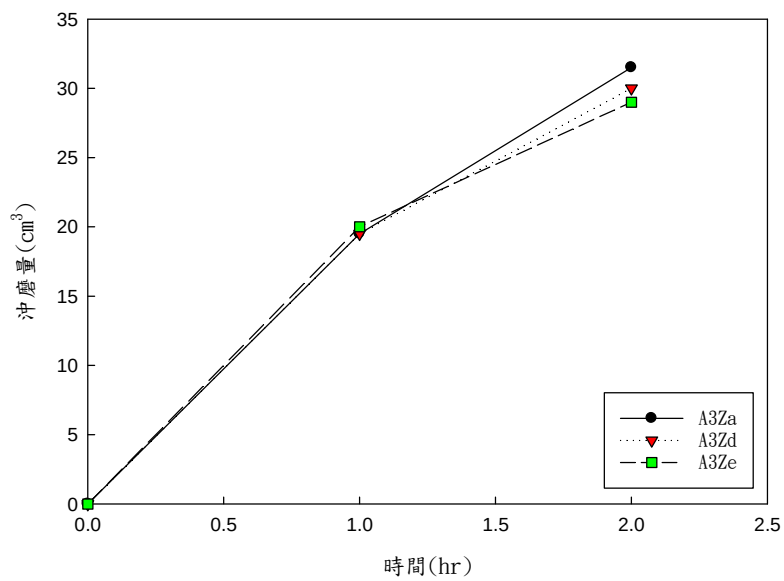


圖 7.24 配比 A3Za、A3Zd、A3Ze 之碳纖維用量對沖磨量之影響
(2 試體平均值)

7.5 維修補強材料衝擊試驗結果分析

各組混凝土衝擊試驗之試體，分別裁切自 56 天材齡 $15\psi \times 30$ cm 圓柱試體的中與下部分，其試驗結果如表 7-12 所示。由表 7-12 可發現，混凝土衝擊試驗結果出現變異性較大之情形，且部分試體的衝擊破壞次數值偏差甚大。各組配比 3 個試體中，將偏差較大者刪除後，其試驗值分佈情形，如圖 7.25 所示，圖中亦將去年度試體之衝擊試驗結果名列於上以供比較，其中全距較大於 40 者分別為編號 A3Y、C3Z、C5Y 與 D5Y。由圖中可以發現無論添加矽灰或纖維均可有效增加衝擊次數。甚至抗壓強度低於 A3Z 的 A3Zd 配比亦有相同結果。

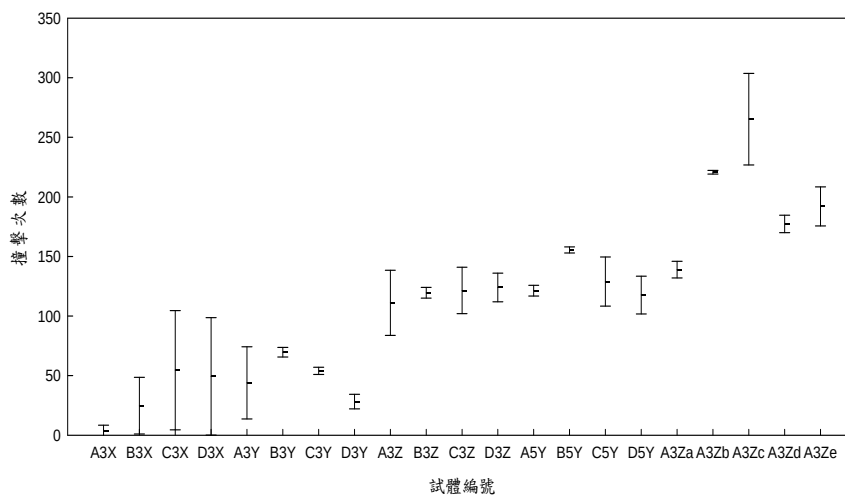


圖 7.25 各組混凝土衝擊破壞次數分佈情形

表 7-12 混凝土衝擊試驗結果（次數）

配比編號	試體 1	試體 2	試體 3	平均
A3Z	112	138	182*	125
A3Za	132	75*	146	139
A3Zb	222	219	160*	221
A3Zc	219	313	264	265
A3Zd	183	167	182	177
A3Ze	190	213	173	192

註：*為偏差過大值不納入平均

由圖 7.26 及圖 7.27 可得知於混凝土中添加纖維有可有效提升混凝土抵抗衝擊的能力，由圖 7.26 可知添加 0.5% 的鋼纖維可提升抵抗撞擊能力約 60%，而添加 1.0% 的鋼纖維可提升約 90%，另外由圖 7.27 可添加 0.5% 的碳纖維，可提升抵抗撞擊能力約 27%，而添加 1.0% 的碳纖維可提升約 38%，均隨著纖維的添加量增加而有抵抗撞擊能的提升的趨勢，主要原因乃是混凝土受撞擊時，撞擊能量傳遞至混凝土內部，使得混凝土內部產生微裂縫，當微裂縫連貫時就會發生撞擊開裂的情況，而添加入纖維可以有效抑制混凝土中微裂縫的產生，有綴縫作用的效果，因此會隨著纖維的添加量增加而使得混凝土抵抗撞擊的能力提升。

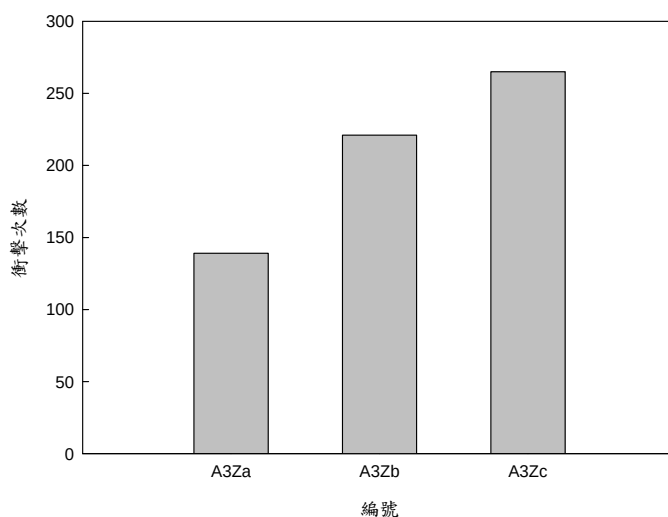


圖 7.26 添加鋼纖維對混凝土衝擊破壞之影響(試體平均值)

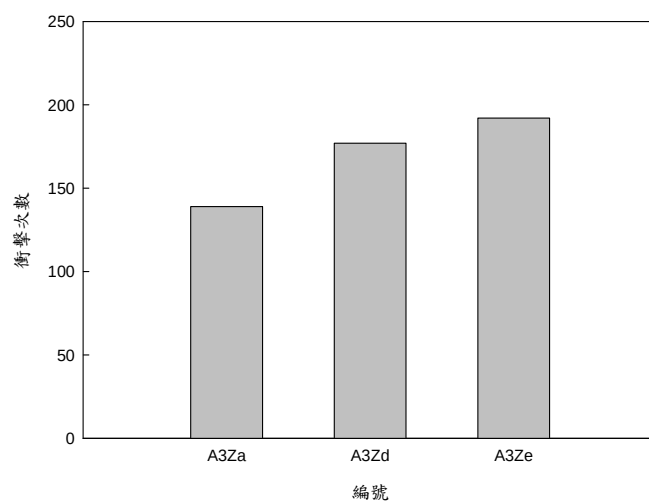


圖 7.27 添加碳纖維對混凝土衝擊破壞之影響(試體平均值)

7.6 維修補強材料乾縮試驗結果分析

本研究中主要探討添加纖維對於乾燥收縮的影響，表 7-13 為各組配比進行 91 天乾燥收縮的應變值，又主要影響乾燥收縮的因子為養護的溫度、濕度，混凝土中的水灰比、粒料體積含量、用水量及摻料，本研究固定各種變異因子，僅比較添加纖維對乾燥收縮的影響。

表 7-13 乾燥收縮試驗結果($\mu\text{m}/\text{m}$)

時間 (天)	A3Z		A3Za		A3Zb		A3Zc		A3Zd		A3Ze	
	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2	試體 1	試體 2
0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	20	30	38	38	25	43	23	30	63	65	35	40
1	55	95	88	80	53	103	48	70	138	145	90	95
2	90	135	123	118	95	133	98	120	158	170	110	110
3	125	175	158	153	140	163	148	170	178	195	130	130
4	160	215	193	188	185	193	198	220	198	220	150	150
5	195	255	228	223	230	223	248	270	218	245	170	170
6	230	295	263	258	275	253	298	320	238	270	190	190
7	265	320	303	308	310	278	350	380	268	270	205	200
14	310	360	383	343	360	338	413	420	353	345	305	270
28	400	465	443	418	430	403	473	480	443	445	400	360
56	420	505	493	448	470	428	548	570	488	510	425	390
91	500	580	568	553	555	538	638	660	583	605	535	480

在添加鋼纖維的部分，詳圖 7.28 可以得知各組配比的乾燥收縮差異值並不明顯，幾乎都是在 $540\sim 560\mu\text{m}/\text{m}$ ，僅配比 A3Zc(1.0%鋼纖維)有較大的乾縮值，約 $650\mu\text{m}/\text{m}$ ，說明了添加鋼纖維對於混凝土乾燥收縮並無明顯的抑制效果，主要因為鋼纖維直徑較大，對於束制混凝土體積變形的能力有限，而在添加 1.0%鋼纖維的配比有較大的乾縮應變值，可能是因為製作試體上的誤差，有較多的漿體澆置入乾縮模具中，而使得試體中有更多的游離水存在，產生較大的乾縮變形量。

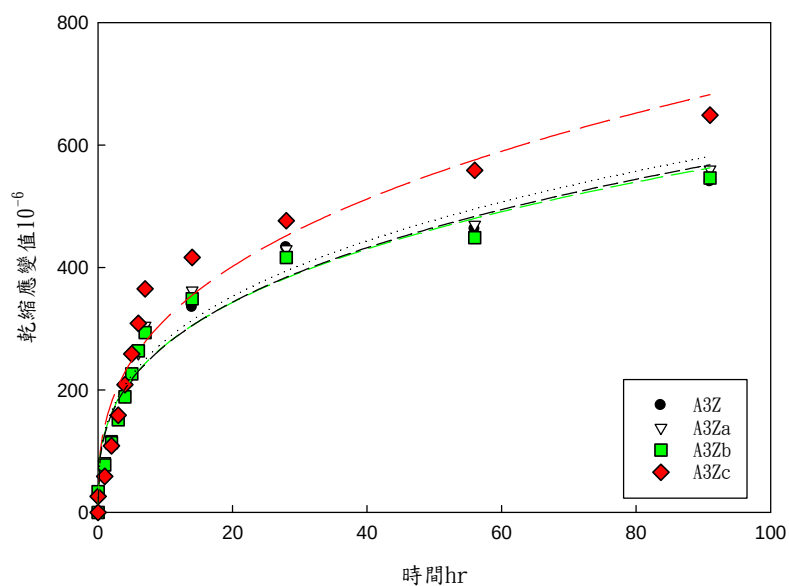


圖 7.28 添加鋼纖維對乾燥收縮之影響(2 試體平均值)

而添加碳纖維對混凝土乾燥收縮的影響，其趨勢就較為明顯，詳表 7-13 可以看到除了 A3Ze(1.0%碳纖維)的乾燥收縮應變值較小外，其餘各組配比的乾燥收縮應變值也非常接近，約落在 $540\sim 580\mu\text{m}/\text{m}$ 之間，而 A3Ze 的乾縮應變值為 $500\mu\text{m}/\text{m}$ ，減少了約 10%，說明添加碳纖維可以稍微抑制混凝土的乾燥收縮，與鋼纖維的差異主要原因是因為碳纖維的直徑小的多，僅鋼纖維直徑的 $1/30$ ，因此對於混凝土收縮變形的束制效果較佳，有稍微抑制混凝土的乾燥收縮。

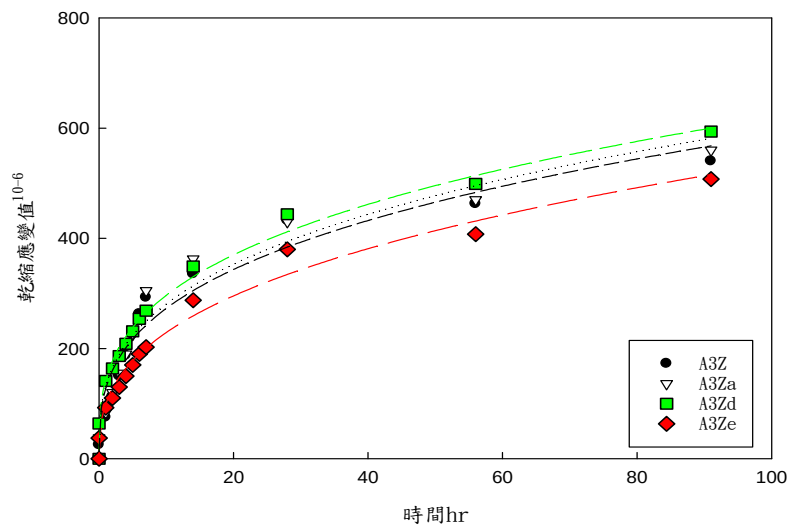


圖 7.29 添加碳纖維對乾燥收縮之影響(2 試體平均值)

7.7 維修補強材料界面拉拔試驗結果分析

因界面拉拔試驗主要探討混凝土作為修補材料時新舊混凝土間的結合力，因此本論文之界面拉拔試驗僅針對有添加纖維的配比進行比較，0為各組 56 天材齡配比試驗結果。

表 7-14 界面拉拔試驗結果

組別	1	2	3	平均(KN)
A3Za	4.9	4.9	4.1	4.6
A3Zb	5.4	5.4	5.7	5.5
A3Zc	5.6	5.5	5.5	5.5
A3Zd	6.4	6.5	5.9	6.3
A3Ze	5.3	6.0	5.1	5.5

首先討論添加鋼纖維對於界面拉拔力的影響，可由07-30 看出隨著鋼纖維的添加量增加，混凝土的新舊界面結合力有提升的情況，添加 0.5%的鋼纖維配比較未添加鋼纖維前的配比結合力提升了 18.8%，而添加 1.0%的鋼纖維其結合力則提升了 19.4%，而添加碳纖維對於界面拉拔力的提升亦有貢獻，如圖 7.31，添加 0.5%的碳纖維配比較未添加鋼纖維前的配比結合力提升了 35.2%，而添加 1.0%的碳纖維其結合力則提升了 18.0%；影響界面黏結力主要原因有三種，為機械結合力、凡德瓦力及化學作用力，本試驗中因無塗抹界面接合劑，因此主要影響拉拔力的因素為機械接合力，利用新混凝土的水化產物在舊混凝土中生長或伸入到舊混凝土的空隙中形成緻密結構，因此若新混凝土的抗拉強度越高，於界面孔隙中形成的緻密結構受拉時亦會有越大的界面拉拔力，而纖維的添加可有效提升混凝土的抗拉強度，因此添加纖維的混凝土其界面黏結力較未添加纖維之混凝土為佳；而配比A3Zd之界面拉拔力特別大可能是因為既有混凝土的表面粗糙度略有不同所致。

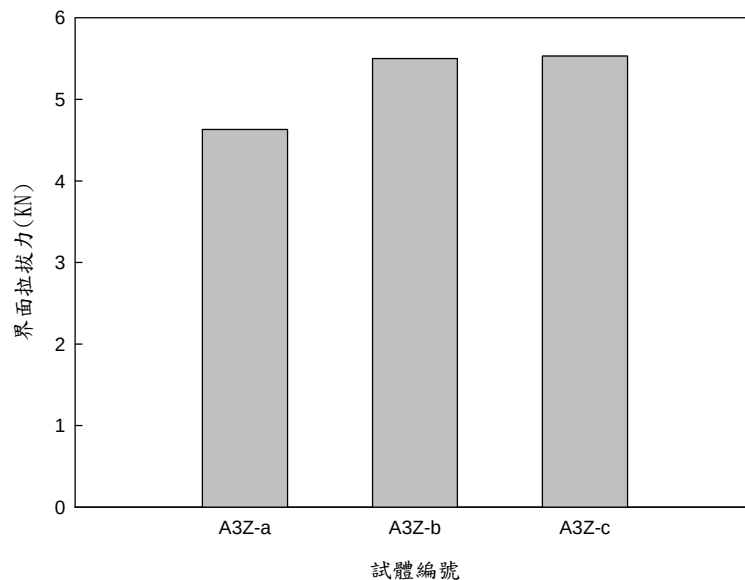


圖 7.30 添加鋼纖維對界面拉拔力之影響(試體平均值)

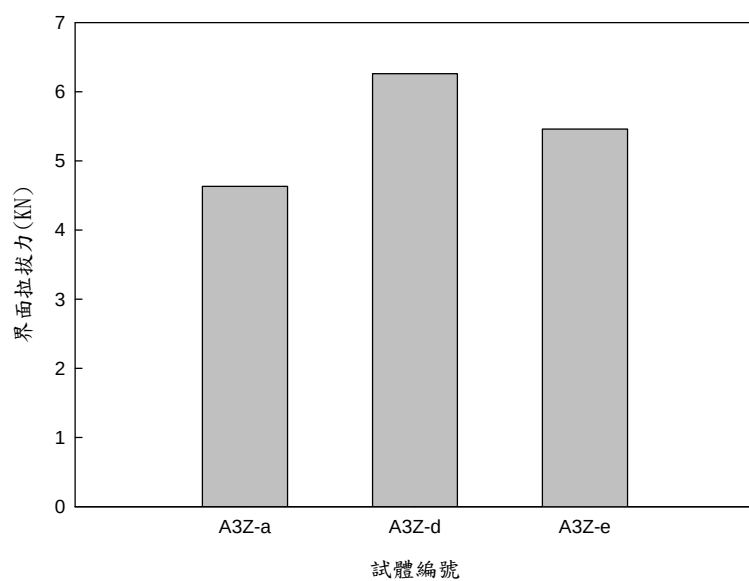


圖 7.31 添加碳纖維對界面拉拔力之影響(試體平均值)

7.8 維修補強材料傾斜剪力試驗結果分析

本研究將與水泥砂漿所結合的傾斜剪力試驗試體進行抗壓強度試驗，表 7-15 為試驗結果。

表 7-15 維修補強試體傾斜剪力試驗結果 (ton)

配比編號	試體 1	試體 2	平均
A3Za	28.10	28.20	28.15
A3Zb	28.10	28.35	28.23
A3Zc	28.35	28.25	28.30
A3Zd	27.95	28.40	28.18
A3Ze	28.15	28.00	28.08

由表中可以發現各維修補強材料的試驗結果均接近一致。由試驗過程中發現，每個試體的破壞型式並非由黏結界面開始破壞，而是接合的水泥砂漿先產生裂紋後，導致整個試體破壞，因此可以推測強度所反應的是水泥砂漿破壞的情形，圖 7.32 為 A3Zd 配比試體抗壓後的照片。



圖 7.32 A3Zd 配比試體抗壓後照片

7.9 維修補強材料耐久性試驗結果分析

本研究所使用的維修補強材添加纖維材為補強材，由於纖維有導電的疑慮，因此較不適用於加速試驗法，所以本研究直接依ASTM C1532 進行 90 天貯鹽試驗。圖 7.33 至圖 7.37 分別為各配比 90 天試驗後試體各深度氯離子分佈情形。表 7-16 為計算後的氯離子擴散係數，圖 7.38 為氯離子擴散係數比較圖，圖中虛線代表A3Z配比之試驗結果，由圖中可以發現A3Za會略高於A3Z配比。而添加纖維方面，鋼纖維的氯離子擴散係數會高於碳纖維與A3Z配比。在添加纖維量方面，無論鋼纖維與碳纖維，1.0%添加量均高於 0.5%，由此可說明加入纖維有可能會導致與水泥漿體的界面增加，導致耐久性的負面效益。為各配比的氯離子擴散係數均小於 $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 。

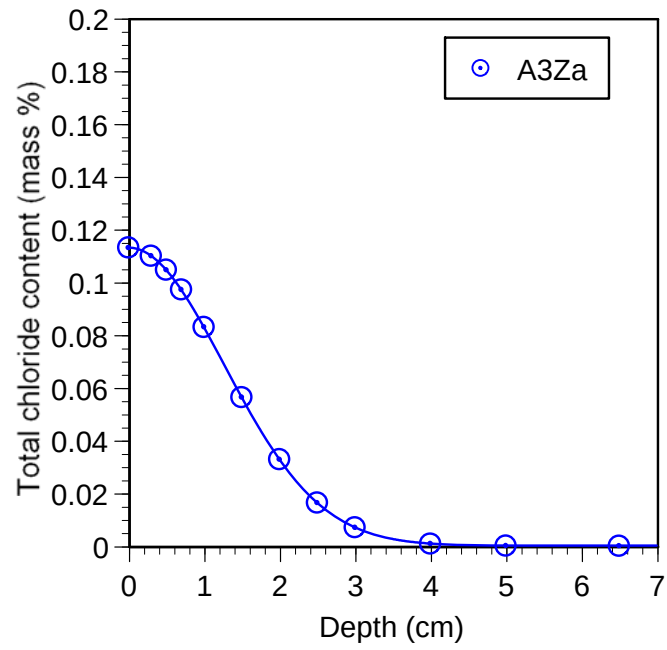


圖 7.33 A3Za 配比貯鹽試驗結果

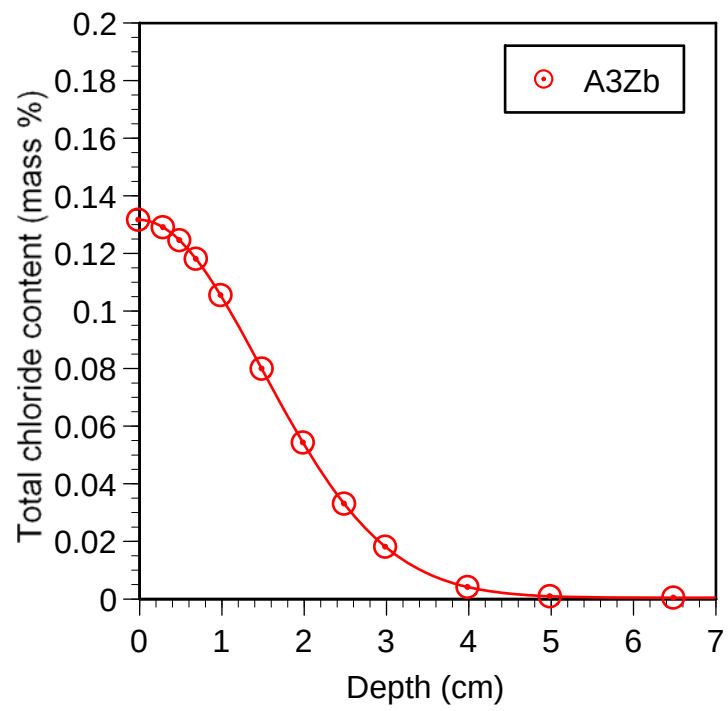


圖 7.34 A3Zb 配比貯鹽試驗結果

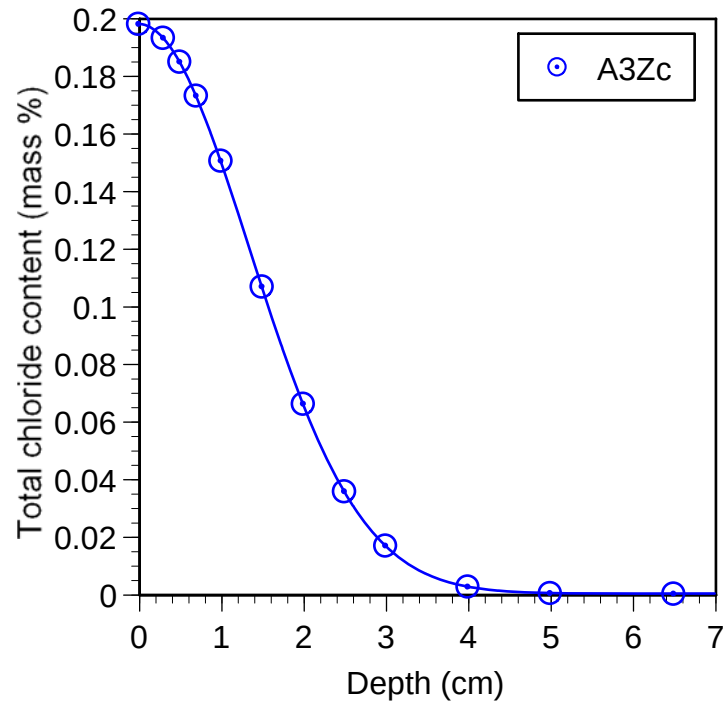


圖 7.35 A3Zc 配比貯鹽試驗結果

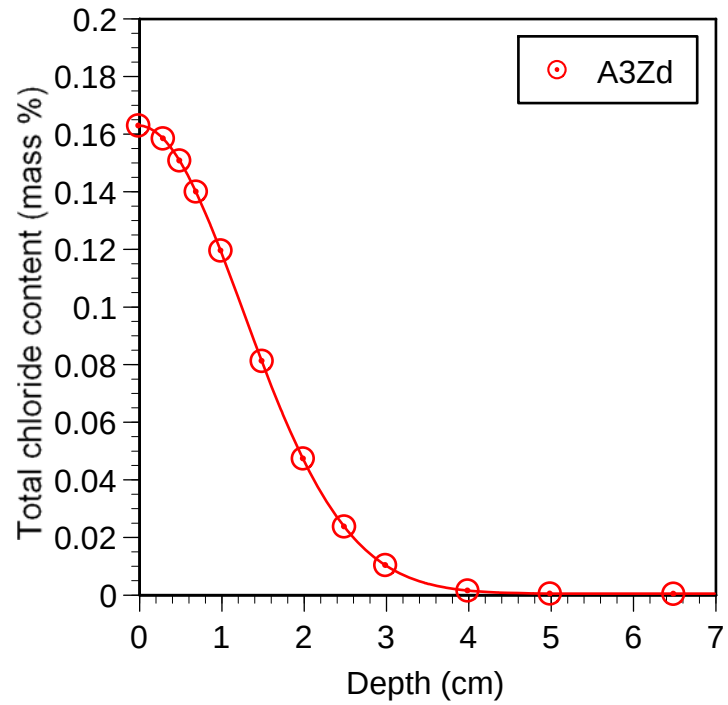


圖 7.36 A3Zd 配比貯鹽試驗結果

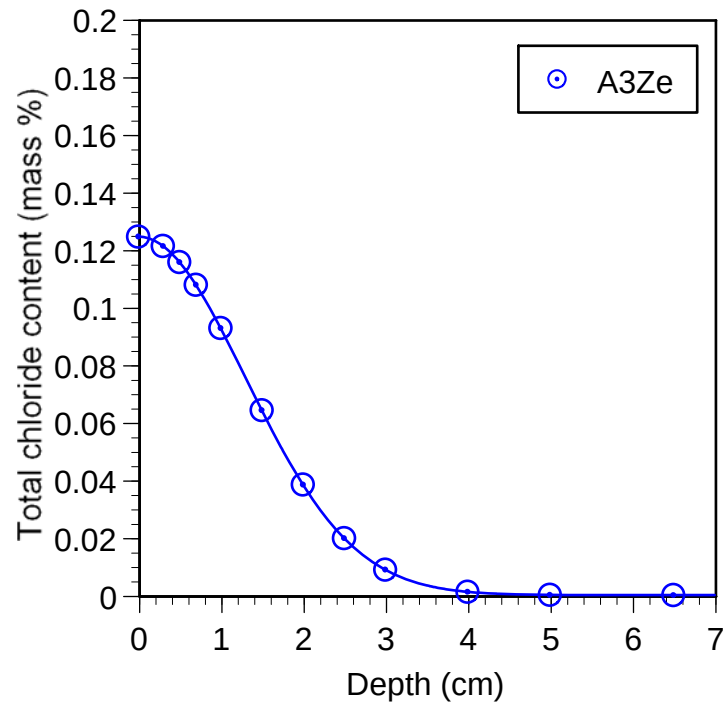


圖 7.37 A3Ze 配比貯鹽試驗結果

表 7-16 維修補強材料貯鹽試驗氯離子擴散係數計算結果

配比編號	試體 1 氯離子擴散係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	試體 2 氯離子擴散係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)	平均值 氯離子擴散係數 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$)
A3Z	1.72	2.08	1.90
A3Za	2.07	1.85	1.96
A3Zb	2.38	2.89	2.64
A3Zc	2.34	2.96	2.65
A3Zd	2.15	2.07	2.11
A3Ze	2.19	2.31	2.25

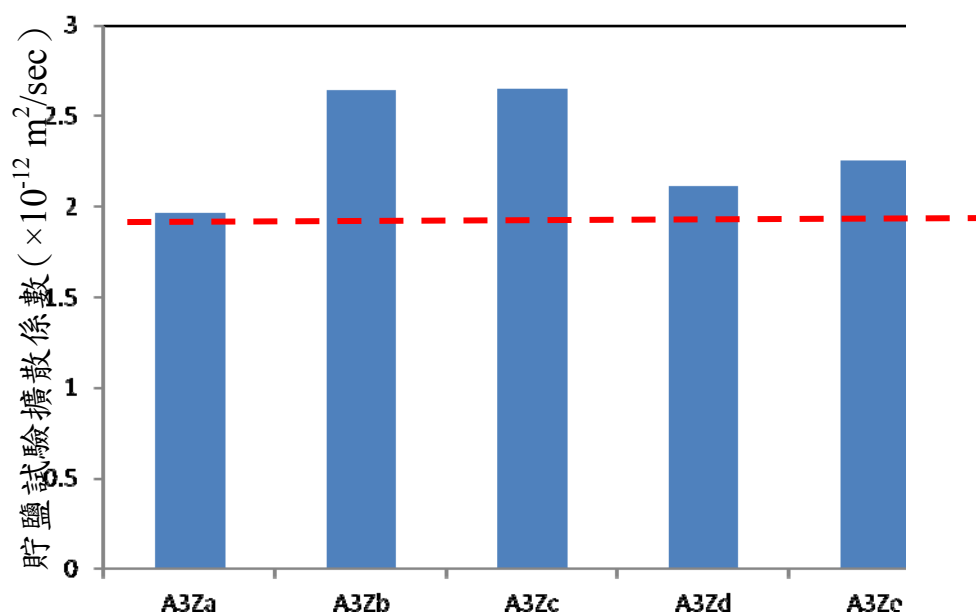


圖 7.38 維修補強材料氯離子擴散係數比較圖

7.10 維修補強材料強度與衝擊磨耗性能之關係

為探討混凝土水中磨耗試驗與強度之關係，將各組配比之 60 小時水中磨耗體積損失量與 56 天抗壓強度進行整理，因考量有纖維的添加可能使的趨勢不明顯，故將比較圖表分為無纖維添加(十六組配比)及有纖維添加(五組配比)，又因考量水中兩台水中磨耗儀器的轉速、性能不一致，故分為試體一及試體二兩者分別比較，由圖 7.39 及圖 7.40 可明顯看出，試體一(黑色原點)的體積損失量幾乎都比試體二(紅色三角點)來的低，可見二號機的磨損效率較高，將各強度與水中磨耗體積進行整理後可得下列公式：

無纖維添加部分：

$$\text{試體 1 : } V_{Loss} = 239.6642 - 0.2319fc'_{56}, \quad R^2 = 0.6640 \quad \dots\dots\dots (7-1)$$

$$\text{試體 2 : } V_{Loss} = 275.2506 - 0.2728fc'_{56}, \quad R^2 = 0.7088 \quad \dots\dots\dots (7-2)$$

有纖維添加部分：

$$\text{試體 1 : } V_{Loss} = 91.7546 - 0.0606 f'_{56}, R^2 = 0.8921 \dots\dots\dots (7-3)$$

$$\text{試體 2 : } V_{Loss} = 77.8786 - 0.0359 f'_{56}, R^2 = 0.6326 \dots\dots\dots (7-4)$$

其中，

V_{Loss} ：水中磨耗 60 小時損失體積(cm^3)

f'_{56} ：混凝土 56 天抗壓強度(kgf/cm^2)

可得知混凝土的水中磨耗體積損失量與抗壓強度呈現逆相關，強度越高的混凝土在水中磨耗所損失的體積量越少，也與顏聰教授等人的研究成果^[10]相呼應。

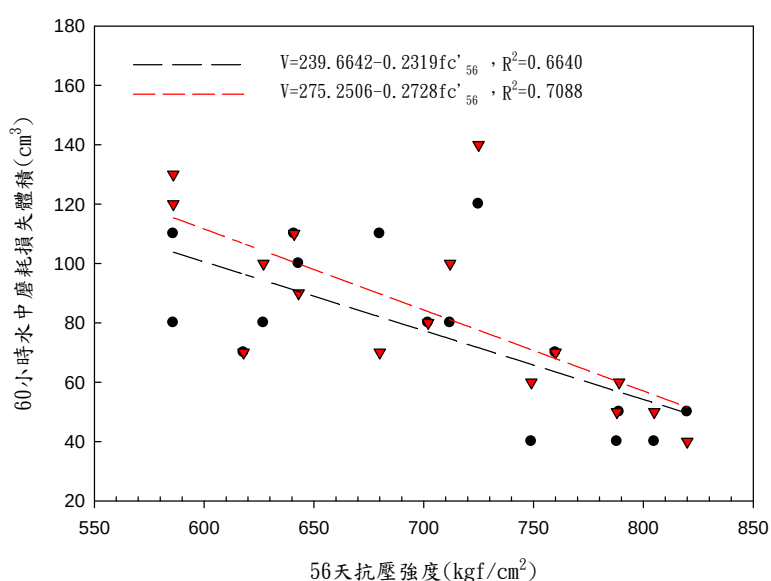


圖 7.39 56 天抗壓強度與水中磨耗體積損失之關係(無纖維添加)

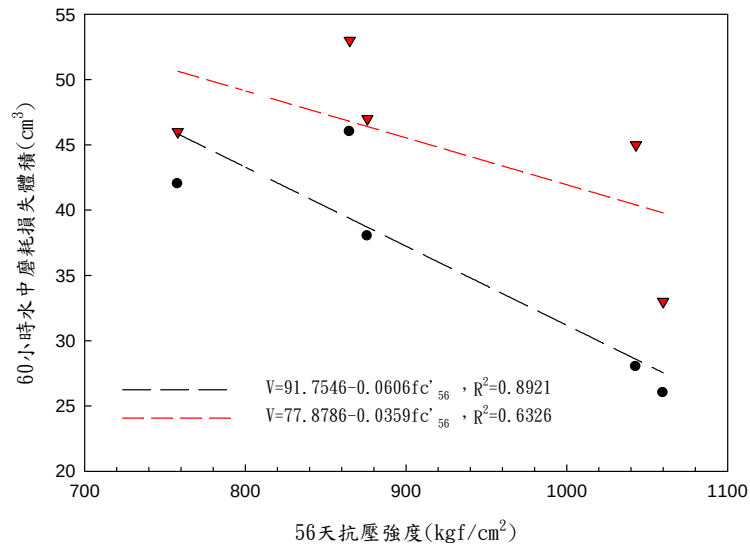


圖 7.40 56 天抗壓強度與水中磨耗體積損失之關係(有纖維添加)

7.11 維修補強材料建議配比

由於橋梁墩柱長時間處於溫濕條件變化較大的戶外環境，須確保溫度所導致的材料變形與既有混凝土一致性，所以本研究維修補強材料以水泥系修補材為主。由上述試驗研究若以A3Z配比性質作為基準，則各維修補強材料配比性質相對於A3Z結果之比值如表 7-17 所示，表中以正值代表維修補強材料的正面效益百分比，負值代表維修補強材料的負面效益百分比。由抗壓強度可以發現除了添加碳纖維 0.5%A3Zd 配比外，其餘均有正面效益，但其負面效益影響不大為-5.8%。比較磨損試驗，添加碳纖維的配比有負面影響。在含砂水流與衝擊試驗均有正面影響，其中以添加鋼纖維的表現最好。在耐久性方面，添加纖維的配比均是負面的影響。但實際比較數據，其氯離子擴散係數均低與 $3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ，還是在可以接受的範圍。當比對長度變化時，添加鋼纖維的 28 天試驗值為 403×10^{-6} 至 430×10^{-6} ，為添加纖維中變化最小的配比，若比較一般規範所要求的 600×10^{-6} 也可符合需求^[78]。界面強度與傾斜剪力試驗均發現破壞面並不會發生在補修材料上，且黏結力亦大於砂灰混凝土A3Za。經由上述說明建議可採用鋼纖維進行橋梁墩柱維修補強工作，其中又以A3Zc為最佳建議的配比。表 7-18 為維修補強材料建議配比。

表 7-17 維修補強材料性質相對於 A3Z 配比成效

配比編號	抗壓強度	ASTM C1138 磨損試驗	含砂水流試 驗	衝擊試驗	耐久性
A3Za	+7.5%	-37.8%	+9.1%	+11.2%	-3.2%
A3Zb	+29.6%	+13.3%	+10.6%	+76.8%	-38.9%
A3Zc	+31.7%	+26.7%	+13.6%	+112.0%	-39.5%
A3Zd	-5.8%	-16.7%	+9.1%	+41.6%	-11.1%
A3Ze	+8.8%	-8.9%	+12.1%	+53.6%	-31.6%

表 7-18 水泥質維修補強材料建議配比 (kg/m³)

水泥	飛灰	爐石	矽灰	水	SP	三分石	六分石	細粒料	鋼纖維
344	115	50	38	158	6	750	322	592	78

第八章 橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強 規範草案編定

本研究由二年期研究所獲得的成果進行進行「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案」撰寫，以提供未來新橋梁設計與舊有橋墩維修補強之參考。

規範經由專家會議諮詢後，建議朝向未來可成為中國土木學會「混凝土工程施工規範與解說」(土木 402) 其中的一個專章方向努力，所以將規範寫法修正如土木 402 的格式。規範草案架構分成三大部分進行，分別為一般說明、橋梁墩柱混凝土設計、與橋梁墩柱混凝土維修補強。在一般說明主要對規範的適用範圍加以定義。橋梁墩柱混凝土設計就新設混凝土工程所需的耐磨損、耐衝擊、與耐久性品質進行說明，並依第五章的高抗衝擊磨損混凝土研發成果，說明配比設計的限制。橋梁墩柱混凝土維修補強就橋梁墩柱保護層或耐磨層維修所需的材料性質與設計進行說明。

相關規範草案於內部討論後，於 10 月 13 日於臺灣大學土木系召開專家座談，邀請中央大學李朝教授、臺灣大學劉楨業教授、交通部科技顧問司許書王技正、中興工程顧問股份有限公司梁智信計畫經理等產官學專家參與討論規範草案內容。相關規範草案內容如下所述。專家學者專家會議紀錄與簽到表如附錄一所示。

橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議規範草案

1.一般規定

- 1.1 本規範規定之橋梁墩柱混凝土係指具有抗衝擊、磨耗、與耐久性能之混凝土。可用於橋梁下部結構之混凝土設計或實施維修補強工作所需之水泥質修補材料。

解說：

本規範之名稱為「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議規範」，重點在於規範與橋梁墩柱混凝土抗磨耗設計與實施維修或補強相關之工作。橋梁墩柱混凝土除提供橋梁原設計功能需求之承載力外，亦需具備抗衝擊磨耗與耐久性能力。本規範中抗衝擊磨耗設計以興建中或未來將興建橋梁混凝土為主要設計對象。維修補強建議以既有橋梁墩柱混凝土修復設計為主。

- 1.2 橋梁墩柱混凝土之施工與維修補強工作除應依中國土木工程學會「混凝土工程施工規範與解說」(下述簡稱土木 402)之規定外，其亦須符合本規範其他章節規定。

解說：

橋梁墩柱維修補強若使用國內無現行國家標準或規範可依循的新材料、新技術及新工法時，可依據公共工程委員會 100 年 3 月 31 日 工程技字第 10000120021 號函頒「各機關對新材料、新技術及新工法使用試辦作業要點」辦理^[1]。

1.3 維修或補強施工時，廠商應遵照設計圖說、施工規範等契約文件之規定辦理。

解說：

工程契約條款，不一定均與本施工規範之細節相符，如發現有不能一致之情形時，在不影響工程品質之條件下，廠商可檢具事實並研擬處理原則，請監造者核定或指示。

1.4 本規範所引用標準如下

- (1) 混凝土工程施工規範與解說：土木 402 「混凝土工程施工規範與解說」。
- (2) 混凝土粒料：CNS 1240 [混凝土粒料]
- (3) 預拌混凝土：CNS 3090 [預拌混凝土]
- (4) 混凝土抗壓強度檢驗法：CNS 1232 [混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法]
- (5) 硬固混凝土酸溶性氯離子含量試驗法：CNS 14702 [硬固水泥砂漿及混凝土中酸溶性氯離子含量試驗法]
- (6) 水中磨損試驗法：ASTM C1138 [Standard Test Method for Abrasion resistance of Concrete (Underwater Method)]
- (7) 衝擊試驗法：ACI 544 [Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete]
- (8) 土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法：CNS 14795 混凝土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法]
- (9) 貯鹽試驗法：ASTM C1543 [Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding]

解說：

水中磨損試驗法與貯鹽試驗法因國內無對應 CNS 標準，因此採用 ASTM 規範；衝擊試驗法因國內無對應 CNS 標準，因此採用 ACI 規範。

2. 橋梁墩柱混凝土設計

2.1 橋梁墩柱混凝土各項組成材料與普通混凝土相同，惟應加強各項材料之來源與品質之管制，以確保抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性。

解說：

橋梁墩柱混凝土與普通混凝土相同，但為確保抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性。混凝土設計強度須加以提升。粗粒料性質與其於配比中設計用量須加強管制。其餘組成材料性質仍需符合土木 402 第二章「混凝土材料」規定。

2.1.1 橋梁墩柱混凝土粒料除須符合 CNS 1240 之規定。為考量抗衝擊性與抗磨耗性，其洛杉磯試驗磨損率需小於 40%。

解說：

根據相關文獻研究指出使用表面硬度性質較高的粗粒料，混凝土耐磨性亦會變佳。因此本規範除規定粗粒料除須符合 CNS 1240 規定外，並參考公共工程委員會施工綱要第 02741 章對同樣遭受磨損狀況的瀝青混凝土面層規定^[2]，將洛杉磯試驗磨損率合格標準由 50% 修改為 40%。

2.1.2 橋梁墩柱混凝土配比設計為確保抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性，其規定強度 (f_c') 不得小於 420 kgf/cm²。粗粒料單位混凝土體積設計量不得低於 0.35 m³/m³。

根據相關文獻研究指出混凝土強度增加與提昇粗粒料用量，均會使混凝土抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性變佳^[3]。本規範考量現有預拌廠混凝土產製能力，並參考交通部運輸研究所 100 年度「研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究」計畫報告^[4]，將混凝土 28 天規定強度提升至 420 kgf/cm^2 ，其目標強度 (f_{cr}') 依土木 402 第 3.7 節規定辦理。粗粒料用量最小限制為 $0.40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

2.1.3 橋梁墩柱混凝土配比設計使用礦物摻料如高爐石粉、飛灰、與矽灰時，其佔總膠結料重量百分比上限參考土木 402 第 3.2.2 節有關在凍融環境及有海水鹽份侵蝕混凝土之規定辦理。

解說：

根據相關文獻研究指出混凝土以適當礦物摻料替代水泥用量，可增加混凝土抗壓強度、保抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性。常用礦物摻料包含飛灰、高爐石粉、與矽灰等。相關材料性質需符合土木 402 第二章「混凝土材料」規定。

2.2 廠商應提出混凝土配比設計資料供監造單位審核通過。由配比所產製混凝土性能須符合檢驗標準要求。

解說：

混凝土應經配比設計，已選定適當材料與組成比例，並使混凝土易於產製、輸送、與澆置。硬固後混凝土需具有抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性的預期品質。

2.2.1 除合約另有規定外，配比設計資料內容應說明材料組成比例與來源、材料基本性質試驗、抗壓強度試驗、硬固混凝土氯離子含量試驗、磨損試驗、衝擊試驗、耐久性試驗結果。其中除磨損試驗、衝擊試驗、與耐久性試驗外，現場施工須至少進行硬固混凝土抗壓強度試驗與硬固混凝土氯離子含量試驗。相關混凝土性質除合約另有規定外，均以 28 天為試驗材齡基準。

政府機關、大專院校設置之試驗室，或通過 TAF 認可之試驗機構辦理檢驗。同一配比混凝土須使用相同來源之材料以確保其混凝土產製品質，若有變更材料來源或品牌，應提出相關抗衝擊性、抗磨耗性、與抗耐久性試驗報告以證明對混凝土性質不會產生負面的影響。

2.2.2 橋梁墩柱混凝土之混凝土抗壓強度參照 CNS 1232 規定與標準辦理。硬固混凝土氯離子含量參照 CNS 14702 硬固水泥砂漿及混凝土中酸溶性氯離子含量試驗法辦理，每立方硬固混凝土酸溶性氯離子含量不得超過 0.40 kg。

解說：

因我國CNS並無硬固混凝土氯離子含量限制標準，本規範參考美國FDOT標準對道路橋梁結構硬固混凝土氯離子規定^[5]與內政部建築研究所100年度「本土性硬固混凝土氯離子含量標準與檢測方法之研究」協辦案研究報告^[6]，將硬固混凝土氯離子含量限制定為以酸溶法進行試驗之結果需小於 0.40 kg/m³。

2.2.3 橋梁墩柱混凝土耐磨損性能須於混凝土配比設計時提出相關試驗報告。混凝土耐磨損性能須進行 28 天材齡ASTM C1138 磨損試驗。通過標準為 60 小時試驗磨損量結果小於 100 cm³。

解說：

配比設計資料須包含混凝土抗磨損試驗結果，磨損試驗依ASTM C1138 或附篇 1 規定辦理。並參考交通部運輸研究所100年度「研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究」計畫報告^[4]，將標準定為 60 小時試驗磨損量結果小於 100 cm³。

2.2.4 橋梁墩柱混凝土耐磨損性能須於混凝土配比設計時提出相關試驗報告。混凝土耐衝擊性能須進行 28 天材齡 ACI 544 衝擊試驗。通過標準為撞擊至破壞次數須大於 100 次。

解說：

配比設計資料須包含混凝土抗衝擊試驗結果，衝擊試驗依ACI 544 或附篇 2 規定辦理。並參考交通部運輸研究所 100 年度「研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究」計畫報告^[4]，將標準定為撞擊至破壞次數須大於 100 次。

2.2.5 橋梁墩柱混凝土耐久性能須於混凝土配比設計時提出相關試驗報告。混凝土耐久性須依CNS 14795 進行 28 天材齡抗氯離子能力量測。其電量試驗值須小於 2000 庫倫。若混凝土組成含有腐蝕抑制劑與早強劑等對耐久性可能會造成影響與疑慮之成分時，或含有易導電成分（如金屬纖維）會影響電量試驗結果時，監造單位得要求進行ASTM C1543 之 90 天貯鹽試驗，其氯離子擴散係數不得高於 $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 。

解說：

配比設計資料須包含混凝土耐久性試驗結果，由於混凝土為多孔性複合材料，所以孔隙結構與混凝土耐久性有直接關係，但孔隙結構不易量測，因此直接以CNS 14795 混凝土抗氯離子穿透特性進行評估。並參考規範建議將標準定為電量試驗值須小於 2000 庫倫（即低氯離子穿透特性混凝土）。若混凝土組成含有腐蝕抑制劑與早強劑等對耐久性可能會造成影響與疑慮之成分時，或含有易導電成分（如金屬纖維）會影響電量試驗結果時，監造單位得要求進行ASTM C1543 之 90 天貯鹽試驗，並依附篇 3 方法計算氯離子擴散係數。相關標準為擴散係數不得高於 $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ ，係參考交通部運輸研究所 100 年度「研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究」計畫報告訂定^[4]。

2.3 橋梁墩柱混凝土應於拌合廠產製，並輸送至指定地點。

解說：

為確保混凝土之穩定與均質性，應於合格的混凝土拌合廠（含工地型具有貯料倉筒與自動計量輸送設備的自設拌合廠）中生產，不得於工地現場以小型拌合機或人工進行拌合。生產之拌合廠須具備達到一定標準之拌合生產設備、操作品管人員與管理制度。

2.3.1 混凝土產製與輸送應依土木 402 第七章相關規定辦理。

解說：

土木 402 第七章有關混凝土產製與輸送為本規範規定拌合廠產製與產品輸送應具備的基本條件，監造與設計單位可視工程需求於合約另定管理辦法。

2.3.2 混凝土澆置工作應依土木 402 第八章相關規定辦理。

解說：

土木 402 第八章有關混凝土澆置工作為本規範規定廠商施工應具備的基本條件，監造與設計單位可視工程需求於合約另定管理辦法。

2.3.3 混凝土養護與保護工作應依土木 402 第十章相關規定辦理。

解說：

土木 402 第十章有關混凝土養護與保護工作為本規範規定廠商施工應具備的基本條件，監造與設計單位可視工程需求於合約另定管理辦法。

3. 橋梁墩柱混凝土維修補強

3.1 本規範所指維修補強為橋梁墩柱混凝土結構物既有耐磨與保護層實施維修及補強工作使用。

解說：

本規範所指維修補強，係指既有橋梁墩柱混凝土結構物耐磨層與保護層受到水流衝擊或磨損後的修復工作。橋梁結構補強不在本規範規定範圍內，可參照中國土木水工程學會「既有混凝土結構物維修及補強技術手冊」（簡稱土木 405）辦理^[7]。

3.1.1 對既有橋梁墩柱混凝土進行補強評估設計時，應針對原始設計資料進行檢視與現況檢查，以搜集各種必要資料。

解說：

既有橋梁墩柱混凝土是否需要補強之判斷，須根據該橋梁墩柱現有混凝土性能是否可再承受水流衝擊與磨損。為評估其現有性能，需進行調查作業與蒐集必要之資料。調查作業以目視檢查為主，目視檢查可配合打鑿方式進行，須至少包含保護層混凝土外觀剝離範圍、龜裂狀況、銹斑、中性化、及游離石灰等現象調查工作。必要時需進行非破壞檢測，以調查混凝土內部之瑕疵(空洞等)、剝離、保護層厚度、鋼筋位置、灌漿充填狀況等。或於橋梁主管機關同意下於結構安全無虞處進行鑽心檢測，相關鑽心檢測可參考 CNS 1238 辦理。

除合約另有規定，原始工程資料蒐集必須包含橋梁墩柱結構原設計圖說、混凝土配比設計資料、歷年維修情形與相關書圖、周邊條件、與所處位置水理環境等足夠之資料以供診斷、評估使用。

3.1.2 既有橋梁墩柱混凝土結構物實施維修及補強材料以水泥系補強材為主。材料之品質，應以補強後結構物較原先材料耐衝擊磨損性能提升為主。補強材料需具備較佳抗壓強度、彈性模數、熱膨脹係數、乾縮量、耐衝擊性、耐磨損性質、與耐久性。

解說：

既有耐磨與保護層實施維修補強為考量橋梁墩柱長時間處於溫濕條件變化較大的戶外環境，須確保溫度所導致的材料變形與既有混凝土一致性，因此本規範維修補強材料以水泥系修補材為主。其維修補強材料性質須提出性能報告供監造單位審核。除須符合本規範 2.2 節對混凝土抗衝擊、抗磨損、與耐久性相關試驗標準要求外，亦需針對熱膨脹係數、乾縮量進行試驗。相關標準參考美國陸軍兵工署研究報告^[8]，如下表 1 所示。相關材料檢驗須為監造單位同意之政府機關、大專院校設置之試驗室或通過TAF認可之試驗機構辦理。

表 1 水泥系修補材彈性模數、熱膨脹係數、與乾縮量性能要求^[8]

性能項目	測試方法	性能要求
熱膨脹係數	CRD-C 39	不得大於 12 $\mu/^{\circ}\text{C}$
28 天乾縮量 (RH 50%環境)	CNS 14603	不得大於 400 μ

3.2 橋梁墩柱混凝土結構復原目標之水準應考量性能恢復急迫性、耐衝擊磨損性能、與耐久性，因此可分為延壽性及短期性等二種水準設計方式。

解說：

維修補強設計之復原目標分為延壽性及短期性等二個水準。

- 1.延壽性之修補除將顯現之損傷部分進行修復外，同時將造成損傷之內在要因，施以損傷抑制工法，以達到預期之延長使用壽命效果。
- 2.短期性之修補係僅將顯現之損傷部分進行修補，其他部分則在損傷再顯現時，才再作處理。

3.2.1 為達維修補強目的，必須設計使既有混凝土表面與修補材料結成一體，以確保其對原結構的保護性。

解說：

維修補強工程必須考量影響修補系統設計與選擇材料及工法的因素，維修補強材料的選擇必須與既有的混凝土基底相容。相容性係指在修補材料與混凝土基底間之物理（體積變化）、化學和電化學性質以及尺度的平衡。相容性不佳會加劇溫度變化、震動、收縮與潛變所引起的不利影響，使維修補強材料尚未承受水流衝擊與磨損便以脫離既有混凝土基底，失去保護效果。

3.2.2 維修及補強設計完成後，應製作施工所需設計圖。

解說：

設計圖說須包至少含維修補強目標水準設定、施工範圍、適用工法、劣化混凝土移除與表面處理方式、使用材料特性與注意事項。其中劣化混凝土移除與表面處理應規定混凝土移除的需求及應達到的目標，允許廠商在監造單位認可範圍內選用最經濟且最適宜的移除工法；特殊情況下，監造單位亦可規定採用及不可採用的工法。在維修金額估算方面，為避免實際維修補強數量與預估值之差異，建議可於合約訂立以監造單位認可的實作數量為準。

3.3 維修及補強施工前，應詳查設計圖說之內容，並擬訂施工計畫書。
並依據施工計畫書所載步驟與措施進行。

解說：

施工計畫書中應包括有關用以顯示工程施工體制之圖說，以表示整體之指示系統，易於理解即可。另在施工前，先行之各種試驗、調查、確認事項等，均應整理記載之。施工計畫書應經設計監造者事先認可，並應擬訂有關施工必要之假設工程計畫，不可疏漏。對於使用之材料，則應將商品名、一般名稱、規格、種類、等級、形狀、尺寸、粒度、數量、搬入方法等，以簡潔扼要、一目了然的一覽表為之。並應檢討其由工廠或材料商搬運至現場及在現場內之小搬運方法，藉資擬定材料之包裝、個體之大小、全體之數量、使用預定時間、重量等之詳細搬運計畫。對於化學性材料之危險性、存放場所之條件、防火規定、防潮規定等詳細註明，如此才能縮短工期與維護施工安全。

3.4 維修補強完工時，應將所有試驗結果報告、檢查記錄、工程變更記錄、協調會議記錄、施工記錄照片等，依序妥予整理，存檔備查。

解說：

為確保水工混凝土構造物修補工程品質及能符合設計要求，工程進行中監造者必須負責對材料及施工成品之檢驗。承包商亦應對工程品質負責。維修補強完工時，應將所有試驗結果報告、檢查記錄、工程變更記錄、協調會議記錄、施工記錄照片等，依序妥予整理，存檔備查。

規範草案參考文獻：

[1] 公共工程委員會，”各機關對新材料、新技術及新工法使用試辦作業要點”，<http://pcces.archknowledge.com/csnew>，2011.

- [2] 公共工程委員會，”施工綱要第 02741 章瀝青混凝土之一般要求”，
<http://pcces.archknowledge.com/csinew>，2007 年第五版。
- [3] 顏聰、劉玉雯等人，”高強度混凝土耐磨性及工程力學特性之研究”，
台電公司專題研究成果報告，2000。
- [4] 楊仲家、詹穎雯、劉玉雯、卓世偉，”研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究”，交通部運輸研究所研究計畫成果報告，2011。
- [5] FDOT Standard, “FDOT Standard Specifications for Road and Bridge Construction”, Florida Department of Transportation, 2010.
- [6] 何明錦、楊仲家、卓世偉，”本土性硬固混凝土氯離子含量標準與檢測方法之研究”內政部建築研究所協辦案研究報告，2011。
- [7] 中國土木水工程學會，”既有混凝土結構物維修及補強技術手冊”，
土木 405，2005。
- [8] 劉楨業，“混凝土維修材料性能準則研發案例”，2010 臺灣地區混凝土應用與技術研討會論文集，財團法人臺灣營建研究院、社團法人臺灣混凝土學會，pp.57-89，2010。

附錄 A：ASTM C1138 磨損試驗方法同本報告 3.3.3 節

附錄 B：ASTM C1543 貯鹽試驗方法同本報告 3.3.5 節

第九章 教育訓練研討會

本研究工作內容須舉辦 1 場 4 小時以上的教育訓練研討會。因此於民國 100 年 10 月 28 日於國立臺灣大學土木研究大樓辦理「橋梁墩柱混凝土抗磨耗、抗衝擊及耐久性研究」教育訓練暨成果研討會。會中安排 4 個小時有關本研究耐衝擊、耐磨損、與耐久性混凝土設計及維修補強材料課程內容，將本研究研發成果加以介紹，並實際安排與會來賓參觀暨解說耐久性與耐磨損試驗設備，無論是從學理說明、實務操作及試驗說明均充分講解以達到本次教育訓練與成果發表之目的。相關研討會亦成海報如圖 9.1 所示。

時間	講題	主講人	主持人
09:30-09:40	報到		
09:40-10:00	主持人及貴賓致詞		
10:00-11:00	橋梁墩柱混凝土之耐久性	楊仲家教授 臺灣海洋大學材料工程研究所	林信得副所長 交通部運輸研究所
11:00-12:00	橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計	劉玉雯教授 嘉義大學土木及水資源工程學系	邱永芳主任 交通部運輸研究所港灣技術研究中心
12:00-13:00	午餐與休息		
13:00-14:00	橋梁墩柱混凝土維修補強對策	梁智信經理 中興工程顧問股份有限公司結構部	劉玉雯教授 嘉義大學土木及水資源工程學系
14:00-15:00	混凝土衝擊、磨耗、耐久性相關試驗介紹與參觀	卓世偉 助理教授 中華科技大學建築系 陳育聖副工程師 財團法人台灣營建研究院	楊仲家教授 臺灣海洋大學材料工程研究所
15:00-16:00	綜合討論		邱永芳主任 交通部運輸研究所港灣技術研究中心

圖 9.1 教育訓練暨成果研討會議程海報

本次研討會吸引產官學界先進超過 60 人參加，開幕由交通部運輸研究所林得信副所長致詞。致詞中林副所長除介紹交通部運輸研究所業務外，亦說明此次研討會舉辦目的。在講師方面除本研究團隊成員擔任外，亦邀請具橋梁維修補強 10 餘年經驗的中興工程顧問股份有限公司梁智信計畫經理講述橋梁墩柱混凝土維修補強對策課程。圖 9.2 為本研究共同主持人劉玉雯教授研討會專題演講情形。

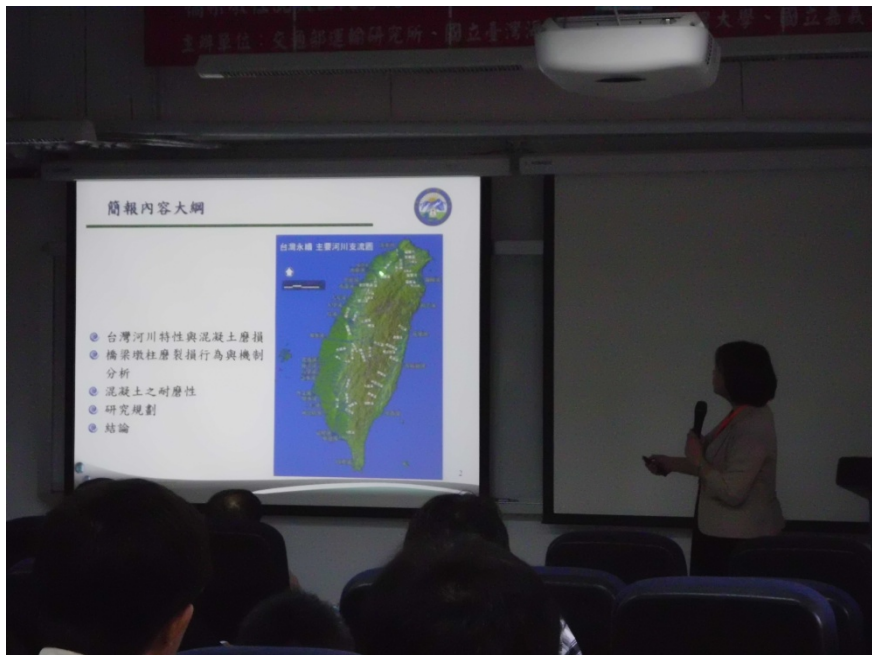


圖 9.2 本研究團隊成員劉玉雯教授研討會專題演講情形

教育訓練暨成果研討會於課程結束後，由林得信副所長與邱永芳主任共同主持綜合討論。於綜合討論亦有參與學員詢問 3 個有關混凝土耐久性相關課題，並由本研究團隊楊仲家教授回覆。與會人員對本次活動的舉辦均有高度肯定之意。

第十章 結論與建議

本研究依期程以完成所有工作內容。由試驗研究的成果也訂定橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案，並將研究成果藉由教育訓練研討會進行推廣。下述為本研究試驗所得到的結論與建議。

10.1 結論

1. 橋梁墩柱混凝土研究部分

- (1) 由工作性試驗，本研究所設計之配比均可符合試驗設計要求，其坍流度介於 50~72 cm，坍度為 24~28 cm。
- (2) 於力學試驗結果，28 天抗壓強度介於 52.8~79.0MPa，彈性模數介於 27.4~36.4GPa，劈裂強度介於 3.5~6.1MPa；而 56 天力學性質中，抗壓強度則介於 57.4~80.3MPa，彈性模數介於 29.4~34.6GPa，劈裂強度介於 3.8~6.8MPa。尤其中可以發現，力學性質除會隨著水膠比下降外，亦會隨著粗骨材用量的增加而增加。而添加爐灰配比的力學性質均較未添加配比佳，但添加 30% 與 50% 差異並不大。
- (3) 對磨耗試驗結果而言，磨耗量會隨著水膠比增加而有增大趨勢，與力學性質趨勢相同。而當粗骨材用量較高時，磨耗量亦有下降之趨勢。對添加爐灰而言，添加 50% 爐灰配比之抗磨耗性質大於 30%。
- (4) 對含砂水流衝擊磨耗試驗結果而言，混凝土沖磨量隨水膠比增加而增加，且粗骨材用量較高時，沖磨量隨之減少。此外，混凝土中以添加 50% 爐灰取代水泥時，其沖磨量小於 30% 者，約 16%、21%、5% 與 14%。
- (5) 對衝擊試驗結果而言，混凝土中粗骨材含量較多時可提升其抗衝擊性。而當粗骨材含量相同時，混凝土之衝擊破壞次數則以水膠

比大者較少。此外，不同水膠比混凝土之衝擊破壞次數，以爐灰含量為 50%大於爐灰 30%者。

- (6)對耐久性試驗結果而言，水膠比 0.3 與 0.35 氯離子傳輸係數會隨著骨材用量的增加而有下降之趨勢。但水膠比 0.4 與 0.45 粗骨材用量的增加會造成負面影響，如粗骨材用量 0.4 m³/m³ 時，氯離子傳輸係數會較 0.3 m³/m³ 減少約 14%。
- (7)當考量橋墩混凝土耐磨損與耐衝擊特性時，依本研究研究之結果粗骨材用量提升至 0.4 m³/m³ 時，依不同水灰比而言可有效增加耐磨性 11%~21%與耐衝擊 672%至 958%。相對於水膠比 0.4 與 0.45 耐久性有可能折減的 11%~14%。耐磨損與耐衝擊正面所獲得的效益可抵消耐久性所受到的折減。而爐灰用量提升可有效增加耐久性。

2. 橋梁墩柱維修補強材料研究部分

- (1)由工作性試驗，本研究所設計之配比大部分均可符合試驗設計要求，添加鋼纖維會使得混凝土的坍流度損失，但添加碳纖維對坍流度則幾乎沒有影響。
- (2)於力學試驗結果，添加鋼纖維對於混凝土的抗壓強度及劈裂強度都有提昇，且可以有效提升混凝土的韌性，當混凝土達極限抗壓強度時，不至於立即發生脆性破壞，而會有一段強度延展段，強度慢慢遞減後最後才發生破壞，可見鋼纖維可有效束制混凝土使其韌性增加，而碳纖維就無此這點，添加碳纖維對於混凝土的抗壓強度的增長幾乎沒有任何貢獻，主要是對混凝土的抗拉強度的提升有幫助，因纖維可深入混凝土中，使混凝土的微裂縫不易延展，即所謂的綴縫作用，可有效提混凝土的抗拉、劈裂強度。
- (3)對磨耗試驗結果而言，無論 ASTM C1138 或含砂水流磨損試驗均顯示添加纖維對於混凝土抵抗水中磨耗及沖磨的能力都有所提升，鋼纖維約可以提升 25~50%左右，而碳纖維則約可提升 20%。
- (4)對衝擊試驗結果而言，添加纖維的混凝土維修補強複合材料，可

使的混凝土中的微裂縫受到抑制，亦可有效提升混凝土抵抗衝擊的能力，由以鋼纖維。

(5)添加鋼纖維對於束制混凝土的乾燥收縮的效果並不明顯，添加 0.5%鋼纖維的乾縮應變值幾乎與未添加纖維的應變值相同，而碳纖維則稍微有抑制混凝土乾燥收縮的效果，添加 1.0%碳纖維的乾縮應變值可較未添加纖維的應變值減少約 10%，可見纖維對於混凝土乾縮的影響並不顯著。

(6)添加纖維的混凝土因其抗拉強度較佳，利用纖維混凝土的水化產物在舊混凝土中生長或伸入到舊混凝土的空隙中形成緻密結構，可有效提升界面拉拔力約 18~35%。

(7)對耐久性方面，無論鋼纖維與碳纖維，1.0%添加量的氯離子擴散係數均高於 0.5%，其中以鋼纖維影響較大，由此可說明加入纖維有可能會導致與水泥漿體的界面增加，導致耐久性的負面效益，但其負面影響有限，整體氯離子擴散係數仍低於 $3 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{sec}$ 。

10.2 建議

1. 由試驗結果可以發現高粗骨材用量與使用適量的爐灰等礦物摻料可增加混凝土耐衝擊、耐磨損、與耐久性。
2. 建議可已由本研究A3Z配比做為高抗磨耗衝擊混凝土建議配比。若考量經濟性與預拌廠產製能力，提昇強度與限制粗骨材用量是提升混凝土耐衝擊、耐磨損、與耐久性的主要考量，建議可將粗骨材最小用量設為 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。其適用範圍已橋梁墩柱為主要對象。
3. 添加纖維的混凝土維修補強材料均可較混凝土基材本身有較好的力學性質、耐磨損性質、耐衝擊性質、與提升界面拉拔力，其中以鋼纖維表現最佳。因此建議可適量添加鋼纖維於橋梁墩柱混凝土維修補強材料中。其適用範圍已橋梁墩柱為主要對象。
4. 本研究成果效益方面，本研究建議之抗衝擊與磨損混凝土配比可供

橋梁墩柱混凝土新建與維修設計參考。

5. 在本所或其他政府機關後續應用情形方面，所完成之「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案」建議未來可考量於工地現場實際操作後，進行可行行驗證與修正。並可與未來納入「混凝土工程施工規範與解說」（土木 402）的一部分。

參考文獻

1. <http://www.wra.gov.tw/>經濟部水利署網頁，2010。
2. Melville, B., and Coleman S., "Bridge scour", Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 2000.
3. 林呈等，"河川橋梁之橋墩(台)冲刷保護工法之研究"，交通部公路總局專案研究計畫，2005。
4. Truscott, G. F., "A Literature Survey on Abrasive Wear in Hydraulic Machinery," Wear, 20, 1972.
5. 錢寧、萬兆惠，"泥沙運動力學"，科學出版社，北京，1983。
6. "Guide to Durable Concrete", Reported by ACI Committee 201, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1988.
7. David P., Fang X., "A rock and a hard place", International Water Power & construction, July 1996, pp.30-33.
8. Laplante, P., Aitcin P.C. and Vezina D., "Abrasion Resistance of High Performance Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 3, No. 1, 1991, pp.19-28.
9. 曾凱琦，劉玉雯，潘坤勝，朱孝宗，水流中含砂特性對混凝土抗沖擊性之影響，臺灣混凝土學會 2007 年混凝土工程研討會，2007/11。
10. Liu Y. W., Yen T., Hsu T. H., "Abrasion Erosion of Concrete by Waterborne Sand", Cement and Concrete Research vol.36, pp1814-1820, 2006.
11. Liu, T. C., "Abrasion Resistance Of Concrete", ACI Journal, Vol.78, No.5, pp341-350, 1981.
12. 顏聰、劉玉雯等人，"高強度混凝土耐磨性及工程力學特性之研究"，臺電公司專題研究成果報告，2000。

13. Laplante, P., Aifcin, P. C., and Vezina, D., "Abrasion Resistance of Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.3, No.1, pp.19-30, Feb. 1991.
14. Naik T. R., Singh S. S., and Hossain M. M., "Abrasion resistance of concrete as influenced by inclusion of fly ash", Vol.24, No.2, pp.303-312, 1994.
15. 賴正義，"水工混凝土結構物耐磨性研究"，臺電工程月刊，第 560 期，1995。
16. 林建宏(詹穎雯指導)，"爐石混凝土水中磨耗性質研究"，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，1994。
17. Wu C.H., Yen T., Liu Y. W., Hsu T. H., "The Abrasion Erosion Resistance of Concrete Containing Blast Furnace Slag", International Conference on Concrete and Reinforced Concrete Development Trends, Moscow Russian, pp.566-570, 2005.
18. Mehta, P.K., "Concrete Structure, Properties and Materials", 1986.
19. 詹穎雯，"混凝土之水中磨耗性質"，中興工程顧問社，1997。
20. Mehta, P.K., and Gjorv, O.E., "Properties of Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume", Cement and Concrete Research, Vol.12, 1982, pp.587-596.
21. Shigeyuki A., Tatsuo S., and Hiroaki N., "Carbon Fiber Reinforced Concrete", Concrete International, January, pp.40-47, 1988.
22. Yoshihko O., Mikio A., and Mitshuhiro E., "Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement with Silica Fume", Concrete International March, pp.58-62, 1985.
23. 賴森榮，"纖維混凝土之發展與應用"，臺灣營建研究中心，臺北，1983。
24. 顏聰，劉玉雯等，"耐撞擊磨耗之水工構造物表層材料研發"，臺灣電力公司研究計畫成果報告，2003。

25. Neville A.M., "Properties of Concrete", 1997.
26. Mindess S., and Young J. F., "Concrete," Prentice Hall, N. J., 2001.
27. Sadegzadeh M., Page C.L., and Kettle, R.J., "Surface Microstructure and Abrasion Resistance of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.17, pp.581-590, 1987.
28. 李修齊(詹穎雯指導), "高強度混凝土水中磨耗性質之機理探討", 臺灣大學碩士論文, 1997。
29. Arsenault J., Bigas J. P., and Ollivier J. P. "Determination of chloride diffusion coefficient using two different steady-state methods: influence of concentration gradient", Chloride Penetration into Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, pp.150-160, 1995.
30. Page C. L., Short N. R., and Tarras A. E., "Diffusion of Chloride ions in hardened cement paste", Cement and Concrete Research, Vol. 11, pp.395-406, 1981.
31. Mehta P. K., and Monteiro P. J. M., "Concrete-structure, properties, and materials", Prentice Hall, pp.17-29, 1993.
32. Simeonov P., and Ahmad S., "Effect of Transition Zone on the Elastic Behavior of Cement-based Composites", Cement and Concrete Research, Vol.25, No.1, pp.165-176, 1995.
33. Yang C. C. and Cho S. W., "Approximate migration coefficient of percolated interfacial transition zone by using the accelerated chloride migration test", Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.344-350, 2005.
34. Leeming M., Surface treatments for the protection of concrete, Protection of concrete, E. & F. N. Spon, 135-148, 1990.
35. Mehta P. K., and Monteiro, P.J.M., "Concrete-structure, properties, and materials", Prentice Hall, pp.30-32, 1993.

36. Power T. C., "Permeability of Portland cement paste", Journal of the American Concrete Institute, Vol.26, pp.285-298, 1954.
37. Young J. F., and Mindness, S., "Concrete", Prentice Hall, pp546-547. 101-118, 1981.
38. ASTM C618-99, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete," American Society for Testing and Materials, 1999.
39. Yan F. D., Ding J., and Beaudoin J. J., "Effect of different calcium aluminate hydrates on ettringite formation and expansion of high alumina cement-based expansive cement pastes," Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 417-426, 1996.
40. Mehta P. K., and Monteiro P. J. M., "Concrete-Structure, Properties, and Materials," Prentice Hall, pp. 283, 1993.
41. Collepardi M., Monosi S., and Piccioli P., "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of cement," Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 961-968, 1995.
42. Suryavanshi A. K., Scantlebury J. D., and Lyon S. B., "Mechanism of Friedel's salt formation in cement rich in tri-calcium aluminate," Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1673-1680, 1996.
43. Dhir R.K., El-Mohr M. A. K., and Dyer T. D., "Chloride binding in GGBS concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1767-1773, 1996.
44. Princed W., Perami R., and Espagne M., "Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability," Cement and Concrete Research, Vol. 29, No.2, pp.687-694, 1999.
45. Zhang Y. M., Sun W. Y. and Han D., "Hydration of high-volume fly ash cement pastes," Cement and Concrete Composites, Vol. 22, pp. 445-452, 2000.
46. Nixon P. J., "The effect of pfa with a high total alkali content on pore

- solution composition and alkali-silica reaction,” Magazine of Concrete Research, Vol. 38, pp. 30-35, 1986.
47. Mehta P.K., and Monteiro, P.J.M., “Concrete-Structure, Properties, and Materials,” Prentice Hall, pp. 281-282, 1993.
 48. Thomas M.D.A., and Bamforth, P.B., “Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag,” Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 487-495, 1999.
 49. Osborne G.J., “Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete,” Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp. 11-21, 1999.
 50. Prince W. and Gagne, R., “The effects of types of solutions used in accelerated chloride migration tests for concrete,” Cement and Concrete Research, Vol. 31, No.4 pp.775-780, 2001.
 51. Hooton R.D., and Emery J.J., “Sulfate resistance of a Canadian slag cement”, ACI Materials Journal, Vol. 87, pp. 547-555, 1990.
 52. 沈進發等， “公共工程高爐石混凝土使用手冊”，行政院公共工程委員會專案研究計劃， 2003.
 53. Hogan F.J., and Meusel J.W., “Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag,” Cement, Concrete, and Aggregates, V.3, No1, pp.40~52, summer, 1981.
 54. Princd W., Perami R., and Espagne M., “Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability,” Cement and Concrete Research, Vol. 29, No.2, pp.687-694, 1999.
 55. Winslow D. N., Cohen M. D., Bentz D. P. and Garboczi E. J., “Percolation and pore structure in mortars and concrete”, Cement and Concrete Research, Vol.24, pp.25-37 1994.
 56. 劉駿明， 張吉佐， 李民政， 唐孟瑜， ” 高流速水利隧道之耐磨耗設計及案例分析”， 第五屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會， J37， 2006.

57. 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，pp52-60，1996。
58. Adeline R., Lachemi M. and Blais P.,”Design and Behaviour of the Sherbrooke Footbridge”, Int. Symposium on High-Performance And Reactive-Powder Concretes, Que’bec, Vol.3, pp.89-97, 1997.
59. Kılıç A., Atış C. D., Teymen A., Karahan O., Özcan F., Bilim C., Özdemir M., “The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete”, Cement and Concrete Composites, Vol 30, pp. 290-296, 2008.
60. Yazıcı Ş., İnan G., “An investigation on the wear resistance of high strength concretes”, Wear, Vol 260, pp. 615-618, 2006.
61. Horszcz E., “Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures”, Wear, Vol 259, pp. 62-69, 2005.
62. Horszcz E., “Mathematical model of abrasive wear of high performance concrete”, Wear, Vol264, pp. 113-118, 2008.
63. Liu Y. W., “Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume”, Construction and Building Materials, Vol 21, pp. 972-977, 2007.
64. Moetaz M. El-Hawary, Ali Abdul-Jaleel, ” Durability assessment of epoxy modified concrete”, Construction and Building Materials, Vol 24, pp. 1523-1528, 2010.
65. Sebök T., Stránel O., “Wear resistance of polymer-impregnated mortars and concrete”, Cement and Concrete Research, Vol 34, pp. 1853-1858, 2004.
66. 張嘉峰、葉啟章，”運輸設施快速建造與修復技術之研究—公路設施快速重建及修復技術之研究”，交通部運輸研究院，2007。
67. 交通部公路總局第二區養護工程處，”921 集集大地震公路重要橋樑復建設計與施工”，交通部公路總局第二區養護工程處，臺中市，

2002。

68. 中國土木水利學會混凝土工程委員會，”既有混凝土結構物維修及補強技術手冊 (土木 405-94)” ， 中國土木水利學會，2005。
69. 交通部，”公路橋梁設計規範”，行政院交通部，2009。
70. 農委會，”農田水利施工規範第 0305 章”，行政院農業委員會，2005。
71. 水利署，” 施工規範第 03310 章結構用混凝土”， 經濟部水利署，2005。
72. Yang C. C., “On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials”, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.7, pp.1304-1311, 2006.
73. Lizarazo-Marriaga J., Claisse P., “Determination of the concrete chloride diffusion coefficient based on an electrochemical test and an optimization model”, Materials Chemistry and Physics, Vol.116, No.2-3, pp.536-543, 2009.
74. McCarter W. J., Emerson M., and Ezirim H., “Properties of concrete in the cover zone: water penetration, sorptivity and ionic ingress”, Magazine of Concrete Research Vol. 48, pp 149-156, 1996.
75. Yang C. C., Cho S. W., “Approximate migration coefficient of percolated interfacial transition zone by using the accelerated chloride migration test”, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp344–350, 2005.
76. Winslow D. N., Cohen M. D., Bentz D.P., Snyder K. A., Garboczi E. J., “Percolation and pore structure in mortars and concrete”, Cement Concrete Research, Vol.24 pp25– 37, 1994.
77. Shane J. D., Mason T. O., Jennings H. M., Garboczi E. J., Bentz D. P., “Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of Portland cement mortars”, Journal of the American Ceramic Society, Vol.83

pp.1137-1144, 1995.

78. 劉楨業，“混凝土維修材料性能準則研發案例”，2010 臺灣地區混凝土應用與技術研討會論文集，財團法人臺灣營建研究院、社團法人臺灣混凝土學會，pp.57-89，2010

附錄一

專家座談會議紀錄

「研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究」

專家座談會議

簽到表

開會時間：100 年 10 月 13 日 10 時 00 分

開會地點：國立台灣大學土木工程系 319 會議室

主 持 人：楊仲榮

記 錄：吳世偉

出席人員：

單 位	簽 名	
專家委員		
	劉振華	吳世偉
	李國卿	許世三
交通部運輸研究所港灣技術研究中心	張道光	
國立臺灣海洋大學	楊仲榮	
	劉振華	劉振華
	吳世偉	
	陳育聖	

專家座談會議記錄

採購案編號：MOTC-IOT-98- H1EB010

採購案名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

時間：100 年 10 月 13 日

上 午：10 時 00 分

主席：楊教授仲家

記錄：卓世偉

出席者：

專家委員：劉楨業、李釗、梁智信、許書王

港研中心：張道光

臺灣海洋大學：楊仲家、詹穎雯、劉玉雯、卓世偉、陳育聖

討論議題：

1.橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議規範草案討論。

2.研討會籌備工作討論。

3.臨時動議

結論：

1. 規範草案內容中有關準則或手冊之文字應修正為「規範」。

2. 規範草案建議應以未來可整合成為「混凝土工程施工規範與解說」(土木 402) 的其中一章來考量，因此建議撰寫方式可參考土木 402 方式撰寫。

3. 規範草案有關新工法與新材料使用可直接引用公共工程委員會相關規定辦理。

4. 規範草案有關維修補強方面應著重既有混凝土保護層與耐磨層的維修補強方面，有關結構補強可參照土木 405 辦理。

5. 材料性質標準應以已有規範為主，並以國內 CNS 現有規範優先。國內不常使用之試驗方法應於附錄加以說明。
6. 規範草案內容應加列引用國內規範與標準。並列出解說所引用的參考文獻。
7. 規範文字內容須潤飾修改部分參照委員意見辦理。

附錄二

工作會議紀錄

第一次工作會議

採購案編號：MOTC-IOT-98-H1EB010

採購案名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

時間：民國98年12月04日10時30分

地點：國立台灣大學土木工程系

主持人：楊教授仲家

出席者：

主持人：楊教授仲家

協同主持人：詹教授穎雯、劉教授玉雯

研究員：卓助理教授世偉

記錄：卓世偉

討論議題

- 一、第一年混凝土抗磨耗、衝擊、與耐久性能力評估試驗
- 二、第二年修復補強材料評估
- 三、第二年高抗磨耗衝擊混凝土之研發
- 四、期中與期末報告負責單位討論
- 五、經費運用
- 六、臨時動議

主要結論

- 一、第一年混凝土抗磨耗、衝擊、與耐久性能力評估試驗
 - 1.於第一年配比設計方面，規劃進行變數為水膠比、粗骨材體積含量、與爐灰（3:7）替代量。爐灰替代量 30%部分，水膠比變數設定為 0.30、0.35、0.40、與 0.45 共 4 種。粗骨材體積含量為 30%、35%、與 40%共 3 種，此部分配比共 12 組；爐灰替代量 50%部分，水膠比變數設定為 0.30、0.35、0.40、與 0.45 共 4 種，粗骨材體積含量固定為 35%，此部分配比共 4 組。各組配比新拌性質設計為坍流度 50 ± 5 cm。相關初步試拌工作請海洋大學團隊進行，台灣大學團隊支援拌合材料。
 - 2.試體齡期因加入爐灰，因此以 56 天為主要試驗齡期，但考量工程單位仍以 28 天抗壓強度為設計參數，因此每個配比增加 1 組試體（3 個試體）進行 28 天抗壓強度與彈性模數試驗。

3.所有 16 組配比拌合與試體製作均於台灣大學土木系進行，相關工作預計於三月中旬完成。相關時程、模具、與人力聯繫由台灣大學團隊規劃調配。試體於台灣大學養護 2 週後再運送至各單位。

4.各項試驗分配如下：力學性質（抗壓強度、彈性模數、劈裂強度、與磨耗試驗）由台大進行；磨耗試驗由台大進行；含砂水流沖擊試驗由嘉大進行；沖擊試驗由嘉大進行；RCPT 與 ACMT 由海大進行。

二、第二年修復補強材料評估

決議委請詹教授穎雯研擬於下次工作會議討論。

三、第二年高抗磨耗衝擊混凝土之研發

決議委請詹教授穎雯研擬於下次工作會議討論。

四、期中與期末報告負責單位討論

決議第一次期中報告由劉教授玉雯主導，第二次與第三次期中報告由詹教授穎雯主導，第四次與第五次期中報告由楊教授仲家主導，研討會工作由劉教授玉雯籌備相關事宜。

五、經費運用

第一期款已於 11 月底入帳，可開始進行核銷工作，請各位協同主持人與研究員填寫帳戶名稱與聯絡資料以俾辦理研究費請領工作。

六、臨時動議

無

第二次工作會議記錄

採購案編號：MOTC-IOT-98-H1EB010

採購案名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

時間：民國99年5月27日11時0分

地點：國立台灣大學土木工程系

主持人：楊教授仲家

出席者：

主持人：楊教授仲家

協同主持人：詹教授穎雯、劉教授玉雯

研究員：卓助理教授世偉

記錄：卓世偉

討論議題

- 一、第一次期中報告審查意見處理
- 二、第二次期中報告撰寫事宜
- 三、初步試驗結果討論
- 四、臨時動議

結論

六、第一次期中報告審查意見處理

1. 第一次期中報告審查意見中有關 2-7 節文獻回顧內容需修正與修補材料相呼應。決議委由詹教授穎雯進行修正，並增加 RPC、高分子材、鋼板等修補材料應用實例。
2. 決議委請劉教授玉雯將文獻回顧新增數篇 2000 年以後之研究文獻。
3. 其餘需修正事宜由海洋大學團隊進行綜合修改。

七、第二次期中報告撰寫事宜

1. 第二次期中報告由詹教授穎雯領導之台灣大學團隊主導。
2. 報告架構討論決議將第一次期中報告中 4-1 節與 4-2 節於第二次期中報告放入 3-2 節與 3-4 節。第四章初步成果將分別為 4-1 節分析混凝土新拌工作性質結果、4-2 節分析力學性質結果、4-3 分析水中磨損及含砂水流衝擊試驗結果。分析方式分別就水膠比、粗骨材料用量、爐灰取代量的影響依序探討。

八、初步試驗結果討論

1. 新拌性質、力學性質與水中磨損及含砂水流沖擊試驗結果試驗結果大致良好。
2. ACI 544 的抗衝擊試驗結果變異度較高，近年國內外亦有文獻提及此現象，請詹教授穎雯彙整相關文獻內容以利說明。
3. CNS 9961 的抗衝擊試驗結果因說明係應用於明年修補材料的試驗背景值。

四、臨時動議

無

第三次工作會議記錄

採購案編號：MOTC-IOT-98- H1EB010

採購案名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

時間：99年09月09日 上 午：8時30分

主席：邱主任永芳

記錄：卓世偉

出席者：港研中心：邱主任永芳、謝科長明志、張道光、林雅雯、黃進國、汪書瑜

臺灣海洋大學：楊仲家、詹穎雯、劉玉雯、卓世偉

討論議題：

- 1.第二次期中報告委員審查意見回覆情形檢視。
- 2.明年度計畫工作討論。
- 3.明年度港灣技術研究中心成果展示會計畫成果發表規畫討論。

結論：

1. 通過第二次期中報告委員審查意見回覆。請計畫海洋大學團隊將意見回覆表函覆本所，並於下次期中報告依委員審查意見處理。
2. 計畫目前執行進度符合甘梯圖規劃，請海洋大學團隊持續完成耐久性工作並於 12 月提出第三次期中報告。
3. 明年度計畫工作以探討補修材料的抗磨、耐衝擊、與耐久性為主。於材料選擇上將於水泥系與樹脂系挑選具代表性的補修材料進行相關性質試驗。其中水泥系以活化粉為基礎發展適用於橋墩補修材料的高抗衝擊磨耗混凝土。
4. 相關試驗試體為使明年度港灣技術研究中心成果展示會可有較具體成果，提前至 10 月份於台灣大學土木系進行製作與養護，請計畫執行單位著手進行相關準備工作。
5. 成果展示會所發表之計畫成果配合所上發表型式與主軸，以簡報與實物成果展示進行。並預計於成果展示會前將「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案」初稿完成。

第四次工作會議記錄

採購案編號：MOTC-IOT-98- H1EB010

採購案名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

時間：100年5月6日 下 午：13時30分

主席：邱主任永芳

記錄：卓世偉

出席者：港研中心：邱主任永芳、謝科長明志、張道光、林雅雯、黃進國、袁瑜鎡

臺灣海洋大學：楊仲家、詹穎雯、劉玉雯、卓世偉

討論議題：

1. 橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案撰寫情形。
2. 未來研究課題或延續研究方向討論。

結論：

1. 目前所擬定的橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範應為建議草案。今年度工作應將規範基本架構完成，並召開專家會議討論。未來下階段研究工作再藉由實際工程進行檢驗項目驗證工作，確定檢驗標準後再著手進行規範初審工作。
2. 預計於9月底前進行1次以上之專家會議，討論所訂定之規範草案架構。10月底辦理橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗研究成果研討會，地點預計於港灣研究中心。11月底於台灣大學進行教育訓練工作。

附錄三

期中期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
國立中興大學土木工程學系 顏聰 教授		
1.2.7 節之文獻回顧與本計畫研究課題之相關性似不高。	1.謹遵顏教授之建議，將於下次期中報告中修正文獻回顧相關內容。	同意。
2.研究之抗磨混凝土是否以 SCC 為準?配比中粗骨材體積宜選用較高比例；另所用之爐灰材料取 3:7 之依據為何?試驗之飛灰取自何處應宜列明。	2.考量抗磨混凝土之施工性，因此在新拌性質設計上參考 SCC 對坍流度的要求；粗骨材體積的選用範圍，原則上須符合混凝土須具有良好工作性的條件。本計畫經試拌後，選用粗骨材體積含量為 30%、35%、與 40%，作為抗衝磨混凝土之配比條件；爐灰材料所採用之 3:7 比例，主要係參考目前業界常用的比例。另試驗用之飛灰取自台灣電力公司台中火力發電廠生產之 F 級飛灰。	同意。
3.細骨材之試驗結果(表 4-7、4-8)，請加註 F.M.，又細砂是否宜取自臺灣地區而不來自中國。	3.感謝顏教授建議，將於下次報告加註 F.M.，以供使用單位參考；因台灣地區所產細砂級配較少，且本計畫細砂僅為調整細骨材級配用，其用量僅約 5%。	同意。
4.纖維混凝土可具較佳之耐衝擊性，本研究何以未考慮纖維混凝土?	4.本計畫規劃將纖維混凝土做為補修材料，第二年工作將對纖維混凝土進行一系列相關研究。	同意。
5.規劃之混凝土配比為供工程製作用或供修補用?	5.本研究第一年規劃之混凝土配比主要為提供橋墩新建工程應用。而第二年則以修補材料之耐衝擊抗磨研究為主。	同意。
國立雲林科技大學營建工程系 蔡佐良 教授		
1.目前研究方向正確。	1.感謝蔡教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
2.目前研究結果合理。	2.感謝蔡教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
朝陽科技大學營建工程系 李明君 教授		
1.本計畫包括：(1)橋梁墩柱混凝土材料受損機制之研究，(2)混凝土抗磨耗能力之研究，(3)混凝土抗衝擊能力之研究，(4)橋梁墩柱混凝土耐久性之研究，(5)橋梁墩柱混凝土之材料修復補強之研究，(6)高抗磨耗衝擊混凝土之研發等六項研究，計畫任務重大，研究團隊能力強，盼望有良好的研發成果。	1.感謝李教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
2.第五部份(第 87 項)說明已完成文獻蒐集與分析，衝擊磨耗機理探討等，但是從本期中報告並未見「衝擊磨耗機理探討」之章節，請說明。	2.相關機理探討已藉由 2.1 節流水特性與磨損及衝擊之關係與 2.2 節橋梁墩柱之磨耗與衝擊現象與原因進行文獻蒐集與分析。	同意。
3.文獻回顧說明矽灰混凝土具有較佳之耐磨能力，另外鋼纖維含量多之混凝土其耐磨性較佳等，為何本期混凝土配比設計未將矽灰與鋼纖維沒有規劃設計在內。	3.本研究第一年規劃之混凝土配比主要為提供橋墩新建工程應用。而第二年則以修補材料之耐衝擊抗磨研究為主。第二年研究將進行矽灰與纖維混凝土抗衝擊磨耗性質之探討。	同意。
國立高雄應用科技大學土木工程系 王和源 教授		
1.計畫具體目標明確，且進度超前，研究團隊經驗豐富。	1.感謝王教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
2.試驗項目完整應能對抗磨耗等研究預期有豐富的研究結果及貢獻。	2.感謝王教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
3.基本材料宜與標準作比較(ex：骨材之上下限標準值)	3.感謝王教授建議，本計畫將於下次期中報告增列相關標準值，以方便使用單位閱讀與判斷。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
4.進度期程之計算方式？文獻之圖較不清楚(圖 2-4、2-5、2-7~2-15、2-23)。	4. (1)進度期程係依實驗變數設計，配合試體製作、養護、與試驗所需時間進行估算。 (2)報告中較不清楚之圖，如圖 2-4、2-5、2-7~2-15、2-23 等，將於下次期中報告重新繪製。	同意。
5.水化產物、參考文獻等之字體寫法建議一致性。	5.下次期中報告中將修正專有名詞中英文字體寫法，以達一致性。	同意。
6.參考文獻多，惟可再增加較近年之文獻（2000 年以後 19 篇文獻偏舊）。	6.較近年之相關文獻，將增列於下次期中報告。	同意。
7.考慮加纖維？因 SCC 已可克服工作性。	7.本研究第一年規劃之混凝土配比主要為提供橋墩新建工程應用。而第二年則以修補材料之耐衝擊抗磨研究為主。第二年研究將進行纖維混凝土抗衝擊磨耗性質之探討。	同意。
交通部公路總局		
1.材料研發除安全性、耐久性外，更應考慮經濟性，材料取得方便性，建議研究成果能予呈現，另成果報告對於施工品管性如何控制能論述。	1. (1)材料取得之方便性，已於配比設計時將現地或預拌廠之條件納入考量。 (2)混凝土新拌性質之品控，已於配比設計中說明。而其他性質之品控，將依據後續之試驗結果，說明施工後品管控制驗證項目與基準。	同意。
2.考慮耐震設計、鋼筋間距小，對於工作性如採用自充填混凝土之效果建議後續報告能呈現。	2.本計畫考量抗磨混凝土之施工性，因此在新拌性質設計上參考 SCC 對坍流度的要求。且對鋼筋間距較小的構件應可符合其工作性	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 1 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
	之須求。	
3.簡報 P.29，材料選用，考慮多數橋梁屬近海結構，建議耐久性試驗因子考慮海水成份	3.本研究以 RCPT 與 ACMT 試驗評估混凝土材料之耐久性。且相關試驗均以抗氯離子傳輸能力作為評估指標，因此已包含海水對試體耐久性的影響。	同意。
本所港研中心 謝明志 科長		
1.本期初步成果呈現在第四章，主要為坍度、坍流度，簡報內也補充了力學性質。在 P.43 表 3-1 及 P.78 表 4-9，都列出 16 組配比，但 P.71、P.81 只描述有 12 組，設計數量為多少，請確定。	1.相關內容係屬筆誤，本研究共製作 16 組配比，將於下次期中報告進行修正。	同意。
2.目前混凝土應用在橋墩的坍度、坍流度、強度標準(上下限)請收集納入第二章。	2.相關資料將增列於下次期中報告中。	同意。
3.爐石：飛灰比例取 3:7，也請把參考文獻加入。	3.相關資料將增列於下次期中報告中。	同意。
4.試驗齡期，在報告中未詳細述明，是否都採用同一齡期，或在試驗設計上會有長短齡期，請確定。	4.本計畫因使用爐灰材料，故以 56 天為主要試驗齡期。但考量工程單位普遍以 28 天抗壓強度為設計參數，因此每個配比均增加 1 組 28 天抗壓強度與彈性模數試驗。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
國立雲林科技大學營建工程系 蔡佐良 教授		
1.試驗程序有照原設計執行，成果合理。	1.感謝蔡教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
朝陽科技大學營建工程系 李明君 教授		
1.混凝土配比共計 16 種；第一年混凝土抗磨耗、衝擊與耐久性能力評估試體規劃數量約 400 個試體，試驗數量很多也很辛苦；新拌混凝土坍度和坍流度均很大，應是自充填免搗實混凝土(SCC)的配比設計，但是，為何沒有箱型 BOX Test(有關鋼筋通過性能之測試)?	1.本研究所設計混凝土配比為配合未來各地材料性質不同的可能性，因此新拌性質採高坍度和高坍流度設計。並非完全等同自充填混凝土，故未進行 BOX Test。	同意。
2.交通部 98 年發布公路橋梁設計規範(P39)，目前設計橋梁墩柱混凝土為 $245\text{kg}/\text{cm}^2$ (24MPa)以上，極嚴重鹽害區為 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ (34.3MPa)；相較本研究規劃所得混凝土 28 天抗壓強度約在 52 至 79MPa 之間，是橋梁設計規範強度二至三倍，是否要再修正設計規範方能符合抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料?	2.相關規範的設計強度雖為 $245\text{kg}/\text{cm}^2$ 或 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上，但並非就橋墩混凝土進行規定。因此導致目前許多橋梁墩柱未達服務年限，便因磨耗與衝擊需進行維修補強。所以本研究嘗試提高抗壓強度設計，以探討混凝土抗磨耗、抗衝擊及耐久性是否提升。	同意。
3.第 158 頁表 4-32 數據與平均值可能有誤，請修正。	3.感謝李教授指正，平均值疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
4.第 158 頁第 1 與 2 行有關 $40\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $30\text{ m}^3/\text{m}^3$ 與 $35\text{ m}^3/\text{m}^3$ 應修正為 $0.4\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.35\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。	4.感謝李教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
5.第 159 頁圖 4-100 有關 $30\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $35\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $40\text{ m}^3/\text{m}^3$ 請修正。	5.感謝李教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
6.圖 4-19(P94)、圖 4-20(P95)、圖 4-21(P96)標題有誤，並無彈	6.感謝李教授指正，疏漏之處將於第三次	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
性模數與抗壓強度，請修正。	期中報告修正。	
7.表 4-6(P101)彈性模數 MPa，應修正為 GPa。	7.感謝李教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
國立高雄應用科技大學土木工程系 王和源 教授		
1.主要意見多數已改善，初步研究成果頗值得肯定。	1.感謝王教授建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
2.中英文摘要建議補強已有部分成果。	2.感謝王教授建議，中英文摘要將於第三次期中報告加強部分研究成果之敘述。	同意。
3.圖目錄部份誤植文字或補漏請更正，圖 2-9、2-11、2-13、3-1、3-2、3-3、3-4、3-10、3-13、3-14。	3.感謝王教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
4.齡期或齡期宜一致(ex:31 頁)。	4.感謝王教授指正，下次期中報告將統一相關專有名詞。	同意。
5.圖 2-18(37 頁)請字重打、表 3-1(%)、表 3-5(16%以下)居中。	5.感謝王教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
6.表 3-9、3-10、3-11、3-12(%)。	6.感謝王教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
7.表 4-1，坍流（公分），應該為坍度（公分）。	7.感謝王教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
8.表 4-2、4-4、4-5、4-7 差異較大之說明？	8.感謝王教授指正，表中差異較大的異常數據，於第三次期中報告加以註記並說明。	同意。
9.(103 頁)抗壓強度？	9.感謝王教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
10.初步結論第一行.....10 月研究？	10.感謝王教授指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
11.最佳配比？	11.感謝王教授建議，最佳配比將藉由抗磨耗、抗衝擊、及耐久性相關試驗結果分析後，於第三次期中報告說明。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
交通部科技顧問室 許書王 技正		
1.橋梁通常會有複合式的損壞情形，研究單位對於單一破壞試驗考量後，是否亦應考量不同破壞因子，合成發生的情形。	1.感謝許技正建議，本研究除進行磨損與衝擊的單一破壞試驗考量，亦進行含砂水流試驗，此試驗已將磨損與衝擊合成發生的狀況考量在內。	同意。
2.對於橋墩材料之相關物理性質研究外，對於橋墩形狀的影響，建議在文獻回顧中加以表述，以利使用者參考應用。	2.感謝許技正建議，將於第四次期中報告中納入橋墩形狀影響的文獻蒐集與整理。	同意。
3.橋墩材料是否非以水泥系做考量，是否有其他方案，請參考國外先進國家之案例或文獻卓參。	3.感謝許技正建議，將加入明年度修補材料的研究課題中。	同意。
交通部臺灣區國道高速公路局 饒書安 工程師		
1.P37 圖 2-18，FRP 材料之三種成分，圖之文字不清，建議修正。	1.感謝饒工程師指正，疏漏之處將於第三次期中報告修正。	同意。
2.於研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩橋料中，在補強時建議考量施工實務面，如：修補材料之黏結(膠結)性，即複合材料介面之耐衝擊影響。	2.感謝饒工程師建議，將加入明年度修補材料的研究課題中。	同意。
本所港研中心 朱金元 副主任		
1.水灰比、水膠比是否指的是同樣的東西?如果相同，請統一。	1.感謝朱副主任指正，文中以水灰比表示係指未添加礦物摻料（飛灰、爐石）混凝土的水與水泥比例。水膠比為添加礦物摻料混凝土的水與膠結材料比例。相關定義會於第三次期中報告加以說明。	同意。
2.是否能先定義必須滿足抗磨耗、抗衝擊、耐久性之條件?再考量材料取得、成本、現場施工等條件，以找出最適之配比及材料。	2.感謝朱副主任建議，由於影響抗磨耗、抗衝擊、及耐久性的因素甚多，且亦受到河川水文條件的影響，目前並沒有規範進行定義。因此本研究進行試驗研究時便依標準方法所規定的劣化設定條	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 2 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
	件進行各種變數配比的性值評估。	
本所港研中心 謝明志 科長		
1. 報告中強度單位多用MPa，是否改為較常用的公制kgf/cm ² 或英制psi。	1. 感謝謝科長建議，由於國際化的趨勢，ISO組織相關文件大多以MPa表示。相關強度表示將於第三次期中報告將表格以MPa與kgf/cm ² 並列方式表現。	同意。
2. P40 所列目前橋墩混凝土設計強度，換算英制後介於3000~5000psi，而 P97 混凝土28 天抗壓強度都超過7000psi，最高超過10000psi，是否這些配比適合應用在橋梁上。	2. 相關規範的設計強度雖為 3500 psi 或 5000 psi 以上，但並非就橋墩混凝土進行規定。因此導致目前許多橋梁墩柱未達服務年限，便因磨耗與衝擊需進行維修補強。所以本研究嘗試提高抗壓強度設計，以探討混凝土抗磨耗、抗衝擊及耐久性是否提升。	同意。
3. 水膠比越低，強度越高，但相對水化熱也越高，對早期混凝土發生裂縫的機率也越高，會影響材料的抗外力能力，是否研究上所採用的這些配比，有考慮水化熱的影響。	3. 由於本研究的配比有使用礦物摻料（飛灰、爐石）替代部分水泥用量，因此可以降低水化熱的影響。	同意。
4. 目前報告內有列出臺灣地區橋墩混凝土的設計強度，建議增列當前業界常用在橋梁上的相關配比、新拌試驗、物理性試驗等相關規定與下上限值，以供參考。	4. 相關業界常用在橋梁上的配比將嘗試蒐集，並列於第三次期中報告文獻回顧。	同意。
本所港研中心 林雅雯 副研究員		
1. 請說明現行橋墩材料配比大致為何？與本研究之差異性。	1. 相關業界常用在橋梁上的配比將嘗試蒐集，並列於第三次期中報告文獻回顧。	同意。
2. 請說明本研究採用水膠比、摻料、粗骨材變化等配比，在業界及未來橋墩新建及修復應用之實用性為何。	2. 感謝林副研究員建議，相關水膠比、摻料、粗骨材變化對業界及未來橋墩新建及修復應用之實用性	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫
第 3 次期中報告審查意見處理情形表
計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究
合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
國立雲林科技大學營建工程系 蔡佐良 教授		

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 3 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
1. 以混凝土配比設計來編試體之組別，建議增加對照組(無爐石、飛灰)。	1. 感謝委員建議，相關無爐石、飛灰的配比於本研究團隊過去研究已有相似配比性質可供參考。	同意。
2. Ponding Test 分析擴散係數所引用解析解為傳統理論所導出之解，建議採用 Advancing Model 所導出之解析解，可用以計算正確的滲透深度	2. 感謝委員建議，由於 Ponding Test 並非本研究所進行範圍，僅作為 ACMT 與 RCPT 試驗的輔助參考。因此採用 ASTM 規範建議的傳統理論計算擴散係數。	同意。
朝陽科技大學營建工程系 李明君 教授		
1. 本研究實驗嚴謹，工作進度約 55%，超過預定進度。	1. 感謝委員指教，未來將持續朝預定進度進行研究工作。	同意。
2. 綜合本次報告結論，選用水膠比 0.3、粗粒料用量 0.4 之混凝土(強度約 10000psi)為最適宜抗磨耗、抗衝擊及耐久性之橋墩材料，請補充單價分析以利工程之參考。	2. 感謝委員建議，將於下次期中報告補充單價分析以利工程之參考。	同意。
3. 表 4-37 粗粒料與爐灰用量對混凝土各項性質的效益比較，可看出水膠比 (W/B=0.35) 0.35 其耐衝擊性最優 (+957.5%) 且耐磨性也最優 (+22.2%)，其他耐久性(+18.2%)和力學性(11.8%)也是排第二位；然而，本研究結論綜合抗磨耗、抗衝擊及耐久性等評估，擇水膠比 0.3 最適宜橋墩材料，何故？	3. 感謝委員指正，因報告撰寫疏失，將於下次期中報告補充修正。	同意。
4. 圖 4-136 至 4-139 等四個圖自我說明不足，其 Bar Chart 部分也未說明。	4. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 3 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
國立高雄應用科技大學土木工程系 王和源 教授		
1. 內容完整，試驗進度及研究量與品質良好，頗值肯定。	1. 感謝委員指教，未來將持續朝預定進度進行研究工作。	同意。
2. 請說明水中磨耗及含砂水流沖擊試驗之單位 cm^3 及數據取得方式。	2. 水中磨耗及含砂水流沖擊係以試驗後重量減去試驗前水中重除以水比重求得體積。相關計算方式於 3.3.3 節和 3.3.4 節有詳加說明。	同意。
3. 表 4-36 目錄誤植？	3. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
4. 圖 2-11 爐石粉，誤植？圖 4-88、4-89 單位？	4. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
5. 圖 2-15 無橫坐標單位及名稱？	5. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
6. 表第 95 頁，說明 $W/B=0.35$ 、爐灰 30%，與圖 4-19 不符？	6. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
7. 沖磨量圖縱座標一致？ 60 cm^3 (圖 4-87~4-96)。	7. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
8. 水灰比或水膠比？	8. 感謝委員指正，已於報告統一稱呼為水膠比，部分內容誤植，將於下次期中報告補充修正。	同意。
9. 圖 4-136、 $W/B=0.4$ ，粗粒料用量 $0.35 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ 結果異常為何？	9. 其異常原因推估為試體製作人為搗實因素所造成。相關說明於 4.3.1 節第 126 頁中有所說明。	同意。
10. 後期橋墩補強之變數？砂灰含量？或工作性考慮？	10. 後期橋墩補強之變數主要為補強材料種類，將探討常用之材料對劣化後混凝土補強	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫
第3次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
	效果之影響。	
11.P162 4.6...91「天」齡期？	11. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
國立中興大學土木工程學系 顏聰 教授		
1. 本研究混凝土試樣之粗粒料含量變化，最大者為 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，就一般混凝土而言似乎偏低。應用為橋樑混凝土時是否適合，請考量。	1. 因本研究混凝土試樣係以提伸混凝土強度與耐久性質來考量其耐磨與衝擊性提升，因此維持適當漿量有其必要性。	同意。
2. 各項抗磨耗及抗衝擊試驗結果，宜與以往之報告資料比較，特別是如 P. 130～136 中，結果有不合理情形者，俾從而綜合出正常之相關性。	2. 感謝委員建議，將於下次期中報告補充修正與以往之報告資料比較，並綜合出正常之相關性。	同意。
3. 混凝土之爐灰含量較大者（A5Y，B5Y）比含量較小者（A3Y，B3Y）有較小之沖磨量及較大之衝擊破壞次數，其機理為何宜加強討論，並評估是否含量愈大，抗磨耗衝擊能力愈佳，有無上限值？	3. 其機理係爐灰添加改善了漿體與界面之關係因此有較小之沖磨量，而 A5Y 爐灰含量於長期養護後，其表面硬度亦有所改善，因此具較大之衝擊破壞次數。抗磨耗衝擊能力上限值將蒐集相關文獻後於下次期中報告說明。	同意。
交通部臺灣區國道高速公路局		
1. 在現場之使用橋墩材料都是巨積混凝土，以研究團隊建議水膠比為 0.3，在現場的狀況低水膠比之混凝土都有龜裂之狀況，請問往後的評估有針對這部分之考慮或有其他之評估方式。	1. 因考量會有龜裂情形，因此每個配比均具一定之礦物摻料添加比例，以降低水化熱的影響。	同意。
本所港研中心 謝明志 科長		

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 3 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
1. 有否需要補充新拌混凝土均勻性試驗，除原有的坍度、坍流度試驗外，是否單位重、含氣量試驗也有需要，以滿足預拌混凝土廠之試驗標準。	1. 新拌混凝土均勻性為檢測預拌場的生產品質使用，建議若後續有廠拌之生產與品質研究時可納入考量	同意。
2. 請考慮在後續的設計與維修補強建議手冊中，針對目前橋梁墩柱在抗衝擊磨耗設計上的缺失與本研究配比做詳細的比對以凸顯本計畫的重要性。	2. 感謝委員建議，將於下次期中報告補充。	同意。
本所港研中心 柯正龍 研究員		
1. P1 圖 1.1 墩前“擁”應修正為墩前“湧”。	1. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
2. 本報告內文中，多處橋梁“基礎”，應否更正為橋梁“墩柱”較為妥當，請查明修正。EX P1 第二段第 6 行，P5 第 3 項等。	2. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
3. 圖 1.3 流程圖“水理機至”應修正為“水理機制”。	3. 感謝委員指正，將於下次期中報告補充修正。	同意。
4. 本報告圖表格式，建議內容及文字格式應予統一，部分圖文建議原文應儘量譯為中文，以利閱讀。	4. 感謝委員指正，於下次期中報告將圖文原文儘量譯為中文。	同意。
5. 報告內文部分骨材、粗砂、細砂等，建議依據 CNS 規範改為粒料、粗粒料、細粒料等。	5. 感謝委員指正，已於報告統一稱呼為粒料、粗粒料、細粒料，部分內容誤植，將於下次期中報告補充修正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 4 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
朝陽科技大學 李明君 教授		
1. 修補材料基本要求之一是經濟性(價錢成本)考量，為何使用直徑 0.2mm 長 13mm 之鋼纖維？此種鋼纖維又稱髮纖，不常被工程界使用，不但價錢超高，是一般工程用鋼纖維價格的五倍，而且，使用時很容易刺傷手，請說明原委。	1. 由於此種鋼纖維耐衝擊性較佳，因此採用。且修補材料使用量較低，鋼纖維僅加入體積量 1%，用量極小，所增加成本有限。	同意。
2. 文獻回顧(第二章) P. 2-2、P. 2-3、P. 2-4、P4-32 等頁有〔錯誤！找不到參照來源〕請確認文獻出處。	2. 感謝委員指正，此為編輯格式之錯誤，會於下次報告中修正。	同意。
3. 第二章 2-4 頁說明混凝土修補分為 6 個原則，其定義及修補方法整理如下表，表格說明未附帶。	3. 感謝委員指正，表格說明為編排時漏列，會於下次報告中修正。	同意。
4. 第四章 4-15 頁碳纖維單位(長度)重有 0.8g/m 與表 4-14 為 0.202g/m 請確認！其他規格詳 04，實際纖維照片詳 0；以上語焉不詳！	4. 感謝委員指正，此為編輯格式之錯誤，會於下次報告中修正。	同意。
5. 配比 A3Zc 其設計坍流度為 50cm 以上，為何實際其坍流度僅 37.5cm；比較其他 A3Za、b、d、e 坍流度達 63cm 以上。	5. 因其鋼纖使用量為所有配比最大的情形(1%)，產生對坍流度負面的影響，唯 37.5cm 仍為可現場施工之情形。	同意。
6. 工作進度約 75%，小幅超過預定進度，可喜可賀！	6. 感謝委員建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。
7. 附錄 1-2 第 3 次期中報告審查意見，有關委員之之意見項目數有誤，請注意修正。	7. 感謝委員指正，委員之之意見項目數為 4 項非報告所載之 7 項。	同意。
國立中興大學 顏聰教授(共 3 項)		

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 4 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
1. 上年度計畫報告有下列意見： (1)磨耗試驗及衝擊試驗之混凝土齡期宜補述。 (2)沖磨量部分，宜增加粗粒料含量與抗磨耗性能關係之結果與討論。 (3)衝擊試驗之結果較簡略，只有定性關係，缺少齡期變化及不同爐灰含量之結果。	1. (1)磨耗試驗及衝擊試驗之混凝土齡期均為 56 天，將於下次報告補述。 (2)感謝委員建議，粗粒料含量亦與抗磨耗性能有一定關係，本研究將於下次報告補述。 (3)感謝委員建議，由於衝擊試驗僅有 1 種，因此於下次報告將討論 30%與 50%爐灰含量之結果差異。	同意。
2. 添加碳纖(0.5%、1.0%)之混凝土抗壓強度及劈裂強度，不大於純水泥混凝土者，但水中磨耗效果及抗衝擊能力卻較好，宜討論之，並檢討添加碳纖之意義與價值。	2. 由本研究結果雖發現添加碳纖(0.5%、1.0%)之混凝土抗壓強度及劈裂強度，不大於純水泥混凝土。但其水中磨耗效果及抗衝擊能力確實改善混凝土表面性質，且碳纖維具有價格較便宜、不影響工作性、不腐蝕、可存在鹼性環境的優點，因此添加碳纖之研究有其意義與價值。	同意。
3. 修補混凝土添加鋼纖及碳纖時宜利於界面拉拔力之結果，恐有待商榷，宜討論其機制。	3. 添加鋼纖及碳纖確會改善界面拉拔力之結果，因其改善界面黏著力，相關機制於下次報告討論。	同意。
本所港研中心 謝明志 委員		
1. 研究團隊對混凝土材料設計了不同的配比，也針對抗磨耗、抗衝擊等問題設計了試驗方法，探討不同材質的能力表現，以及增添鋼碳纖維的結果，研究用心值得肯定。	1. 感謝委員建議，本計畫將持續朝預計方向與期程進行。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫
第 4 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
2. 這些配比，在物理力學上的表現，效果顯著，但在化學方面，是否有所影響？以致於這些配比和添加物，反而容易引起化學上的質變。	2. 相關化學質變就文獻與本研究之成果，並不會產生負面上的化學質變。且各材料使用前，所有不潔物與化學組成均須符合國家標準，才可被用於配比中。	同意。
3. 添加鋼纖，在現場施工上，是否會增加困難度，應如何來克服，請思考或提供建議。	3. 由本研究發現添加鋼纖會使的坍落度降，但仍屬可施工範圍，建議未來可增加高流動劑使用或改變拌和順序來克服工作性的負面效應。	同意。
本所港研中心 柯正龍委員		
1. 附錄第三次期中報告審查意見情形表中合作研究單位處理情形，經檢視本次報告仍有部分未修正，建議應重新確認。	1. 相關未修正情形，將於下次報告再次提出處理情形。	同意。
2. 緒論提及橋梁結構混凝土材料因考量水化熱問題，通常以巨積混凝土方式施工，其強度要求不高，與實際情形應有出入，建議重新檢視。	2. 相關文字係說明強度要求為一般 4000 psi 情形，對抗耐衝擊磨損之要求並不高，將於下次報告修改說明。	同意。
3. 各式修補措施產生之失敗現象，建議於圖上加註可能原因或增加文字說明。	3. 相關資料將增列於下次報告中。	同意。
4. 表 5-12 計算數據，請重新檢查。	4. 表 5-12 平均值計算錯誤，係報告誤列，將於下次報告中修正。	同意。
5. 表 3-5 所列各項性質的效益比較，建議加列詳細數據或說明計算依據。	5. 相關資料將增列於下次報告中。	同意。
6. P. 4-15，10. 碳纖維中單位長度重	6. 兩個張力強度為單位不一致狀	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 4 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
(0.8g/m)，張力強度(400kg/mm ²) 與表 4-14 單位重量(0.202g/m)， 張力強度 579.6KSI 不同，請檢視修 正。	況，將於下次報告中改為公制表 示。	
本所港研中心 朱金元副主任		
1. 以往的經驗中，橋梁裂化情形為 何？是因為抗磨耗、抗衝擊或是耐 久性能力不夠？而河川上、中、下 游對於材料裂化又有何不同？	1. 感謝委員建議，橋梁裂化情形在 河川上、中、下均有不同的現象， 取決於河川的水理條件（如流 量、斷面尺寸、坡度、含砂石量、 流速等）。相關說明將於下次報告 蒐集相關文獻整理說明。	同意。
2. 從去年的試驗配比及結果和現在 的規範有何不同？是否能做比較？ 而做出抗磨耗及抗衝擊的最佳試驗 在實際應用上，是否有分地區或是 地段？	2. 去年的試驗配比係以目前市面上 可能使用的混凝土水灰比、粒料 體積範圍進行試驗研究，探討最 佳抗衝擊耐磨配比之可行性。而 今年度配比以去年表現最佳之配 比添加矽灰、鋼纖、與碳纖，探 討較佳混凝土系修補材料之情 形。在實際應用上，並無地區或 是地段區別。	同意。
3. 修補材料方面在做結論時，有探討 加入鋼纖維和碳纖維的結論，但對 其他基本材料並沒有探討，這樣是 否合適？	3. 其他基本材料探討已於去年度計 畫進行，因此並未列入於此次期 中報告中，將於期末報告時進一 度加以說明。	同意。
4. 在報告中有談到修補材料的時 候，會使用到鋼板圍束補強，不知 道幫助有多大？而是否有必要？增 加說少效益？請說明。	4. 感謝委員建議，鋼板圍束補強可 做為第一線緊急補強使用，但鋼 板與舊有橋墩混凝土界面接合與 熱膨脹係數不同之影響應加以考 量，相關說明將於下次報告蒐集 相關文獻整理說明。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫
第 4 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
本所港研中心 陳桂清研究員		
1. 題目為有關耐久性的試驗，整個報告中都以 RPC 或 ACMT 的方式來設定一個氯離子的傳輸或是擴散來做材料或是建物的耐久性評估，不知研究團隊對於這個是否具有遠景性？	1. 混凝土的耐久性與內部連通孔隙結構有密切的關係，使用 ACMT 或 Ponding 試驗原因在於利用氯離子可在混凝土中主要連通結構毛細孔隙移動之性質進行評估。	同意。
2. 對於材料的物性或是化性，尤其是化性方面非常重要，如果說橋墩在一個行水區或是河川附近，材料具有活性的骨材，將來容易發生 AAR 的問題將會相當嚴重，及後續處理	2. 有關鹼骨材效應確實對混凝土耐久性與孔隙結構產生影響，故本計畫於相關規範草案撰寫時，會要求配比與一般預拌混凝土配比標準相同，均不得使用具活性骨材。	同意。
3. 報告中有很多試體的試驗，混凝土的材質並不是一個經驗的材質，而試體有的用兩個有的用三個，請說明一下原理。	3. 使用兩個試體的試驗為耐磨性質相關試驗，因耐磨試驗每個試體至少須進行 72 小時，考量試驗容量，先進行 2 個試體試驗，若試驗結果差異較大，則再進行第 3 個試體進行確認。	同意。
本所港研中心 林雅雯研究員		
1. 簡報 P. 17，A5Y-D5Y 爐灰 50%抗衝擊能力似乎較 A3Z-D3Z 佳，請說明為何採 A3Z-的 Z 為佳。	1. 雖試驗結果顯示 A5Y-D5Y 爐灰 50%抗衝擊能力似乎較 A3Z-D3Z 佳，但爐灰用量目前相關法令仍有限制，因此採用次佳的 A3Z。	同意。
2. 簡報 P. 33 應是混凝土含纖維的試體試驗，非原混凝土缺陷處加補強鋼纖維混凝土情形。是否能針對新舊界面做試驗，得知新舊界面抗剪強度、界面抗衝擊能力等。	2. 因相關磨損與抗衝擊試驗均針對表面進行，所以採用的是混凝土含纖維試體進行試驗。相關新舊界面抗剪強度、界面抗衝擊能力則有界面拉拔性質成果進行說	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

第 4 次期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
	明。	
本所港研中心 張道光研究員		
1. 本研究之工作項目為編定橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案非建議手冊，報告內容請修正。	1. 感謝委員建議，報告中部分內容誤植為"建議手冊"，會於下次報告中加以修正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
朝陽科技大學 李明君 教授		
1. 計畫內容構架完整，包含訂定橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案，富參考與教育價值。	1. 感謝委員鼓勵，將持續依據期程完成報告。	同意。
2. 結論與建議A3Z配比做為高抗磨耗衝擊混凝土建議配比，其結果(試驗)與第八章抗衝擊磨耗設計維修補強規範草案配比規定相符；是否砂灰與鋼纖在維修補強規範中無用武之地。	2. A3Z 配比為橋墩新建時建益的配比設計。而由 A3Z 配比为基礎的鋼纖配比是用於維修補強建議使用。	同意。
3. 內文中有維修補強建議手冊應修正為規範草案。	3. 將統一修正為規範草案。	同意。
4. 結論與建議可將粗骨材最小量設為 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，但是在第八章(8-6)2.1.2 規範建議粗骨材最小用量不得低於 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，二者有出入。	4. 感謝委員指正，此為撰寫中的錯誤，實際為 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。	同意。
國立雲林科技大學 蔡佐良教授		
1. 實驗數據分析方法正確，結果合理，已達預期結果，各種摻料之效益皆有探討，成果務實。	1. 感謝委員鼓勵，將持續依據期程完成報告。	同意。
中興工程顧問股份有限公司 葉啟章 經理		
1. P. 1-5 倒數第 9 行”水膠比(水膠比)” → 水膠比(w/c)	1. 將修正為水膠比(w/b)	同意。
2. P. 2-4 倒數第 2 行”泄水結構物” → 本研究應無該項結構是否筆誤。	2. 感謝委員指正，將修正為洩水結構物	同意。
3. 各種配比及添加物各有特性能否於結論中建議適用範圍及條件。	3. 將於成果報告結論中加入適用範圍及條件。	同意。
4. 本計畫是否考慮修補材料厚度影響性及適用性。	4. 本計畫主要探討防磨層或保護層修補材料，因此厚度影	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
	響不在本研究範圍。	
5. P. 8-16” 水工混凝土構造物” 同 2 點。	5. 感謝委員指正，將予以修正。	同意。
國立臺灣科技大學 邱建國 教授		
1. P. 1-3 上段有所重覆。	1. 將重覆部分予以移除。	同意。
2. P. 1-6 劣化環境之定量分析等，並無相關資料說明。	2. 本計畫利用加速劣化方式來進行定量分析，如含砂水流試驗模擬台灣高速含砂水流環境。	同意。
3. P. 4-1 修補材之坍流度均小於 50cm，是否說明採用之原因。	3. 鋼鐵修補材之坍流度雖小於 50cm，但相對於傳統混凝土仍具較好之工作性。此為本研究採用之原因。	同意。
4. 文中有多誤字請再確認。	4. 感謝委員指正，將予以修正。	同意。
5. P. 6-6 拉拔試驗之基材為何？	5. 基材為設計強度 5000psi 傳統混凝土。	同意。
6. 最佳配比之 f_c' 為 80MPa，和建議規範中之描述不符。	6. 最佳配比 f_c' 雖為 80 MPa，但考量國內生產預拌混凝土廠商產製能力，因此規範僅提升為 420 kgf/cm ² 。	同意。
本所港研中心 謝明志科長		
1. 本研究獲至顯著結果，無論在抗衝擊磨耗，耐久性或修補材料，皆獲得具體的結論，這些成果值得肯定。	1. 感謝委員鼓勵，將持續依據期程完成報告。	同意。
2. 4-46 圖 4-61 圖例說明內，AZ3...DZ3 應改為 A3Z...D3Z，P. 4-49 圖 4-63 圖例說明第三行 A3Y 應改為 A3Z。	2. 感謝委員指正，此為撰寫中的錯誤，將於期末報告修正。	同意。
3. 水中磨耗試驗，ASTM 規定施作 72 小時，而所有的試驗成果表都只做 60 小	3. 由於 48 小時候所有試體均以呈現線性關係，為配合試驗	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
時，宜請說明。	期程，將期縮短為 60 小時。	
4. 修補材料試驗結果，得到 A3Zc 為最佳 配比，其在力學性質試驗，抗衝擊磨耗 能力皆為最佳，只是拉拔、縮變等性質 表現不佳，是否這些相容性的試驗結 果，是在修補材料的容許範圍內。	4. A3Zc 配比雖在五個修補材料 配比中拉拔、縮變等性質表 現不是最佳，但其耐磨損與 衝擊性質極佳。且拉拔與縮 變性質相對於傳統混凝土仍 屬較佳之性質。	同意。
本所港研中心 柯正龍研究員		
1. 本研究成果豐碩，建議應於中英文加入 研究成果與效益說明，以彰研究效益。	1. 將於期末報告中英文摘要補 充說明。	同意。
2. 研究報告內容骨材請修正為粒料。	2. 將依 CNS 規定統一修正為粒 料。	同意。
3. 橋梁混凝土所屬環境均為高濕區域，建 議材料基本性質應檢討是否可能產生 鹼質與粒料反應之疑慮。	3. 由於具鹼質與粒料反應之材 料已於最初的基本性質中限 制，因此已排除於本研究混 凝土配比中使用。	同意。
4. 第 8-1 頁，中央大學李朝亮教授應更正 為李釗教授。	4. 感謝委員指正，此為撰寫中 的錯誤，將於期末報告修 正。	同意。
本所港研中心 張道光研究員		
1. 本研究已有四次的期中審查，請於期末 報告將 4 次之期中審查意見處理情形表 附上，以便委員的查核。因為上次委員 有建議報告內容之骨材需依 CNS 規範改 為粒料。	1. 期末報告把 4 次之期中審查 意見處理情形表列於附錄。 並依 CNS 規定統一修正為粒 料。	同意。
2. P. 4-32 本研究中所使用之爐灰的爐石 粉與飛灰比例為 6:4，應該修正為 3:7。	2. 委員指正，將於期末報告修 正為 3:7。	同意。
3. P. 7-23，其試驗結果如表 0 所示，由表 0 可發現，請檢核修正。	3. 表 7-25，將於期末報告修正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

合作研究單位：國立臺灣海洋大學

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
本所港研中心 林雅雯研究員		
1. 修補材料以 A3Zc 為建議配比，但由簡報 P. 49 A3Zc 相對其他配比其強度及抗磨損能力較佳，但新舊界面相容性及耐久性相較差，建議報告針對修補材料其應著重之性能再補充說明選 A3Zc 之原因	1. A3Zc 配比雖在五個修補材料配比中拉拔、縮變等性質表現不是最佳，但其耐磨損與衝擊性質極佳。且拉拔與縮變性質相對於傳統混凝土仍屬較佳之性質。會在期末報告再補充說明。	同意。

附錄四

期末報告簡報資料



交通部運研所港研中心



國立台灣海洋大學

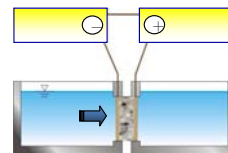
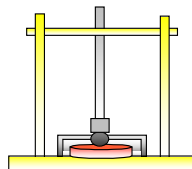
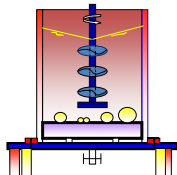
研發抗磨耗、抗衝擊及耐久性橋墩材料之研究

研究報告簡報

計畫主持人：楊仲家 教授

協同主持人：詹穎雯 教授、劉玉雯 教授

研究人員：卓世偉 助理教授



中華民國一〇〇年十二月

簡報內容大綱

- 計畫目的與內容
- 上年度實驗規劃與結果
- 高抗衝擊磨損混凝土性質與建議配比
- 本年度實驗規劃與結果
- 修補材料綜合分析與建議配比
- 規範草案撰寫
- 教育訓練暨研討會辦理情形
- 結論與建議

(2)

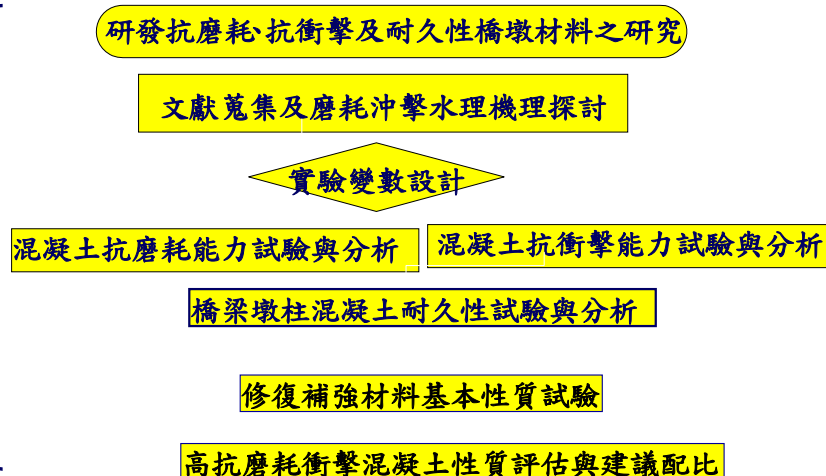
計畫目的與內容—目標
交通部—「橋梁安全保護中長期計畫」

- 橋梁墩柱混凝土材料受損機制之研究
- 混凝土抗磨耗能力之研究
- 混凝土抗衝擊能力之研究
- 橋梁墩柱混凝土耐久性之研究
- 橋梁墩柱混凝土材料修復補強之研究
- 高抗磨耗衝擊混凝土之研發
- 橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議手冊
- 辦理橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗研究成果研討會

(3)

計畫目的與內容—研究流程(1)

前
四
次
期
中
報
告



(4)

計畫目的與內容—研究流程(2)

本次報告工作

橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議手冊

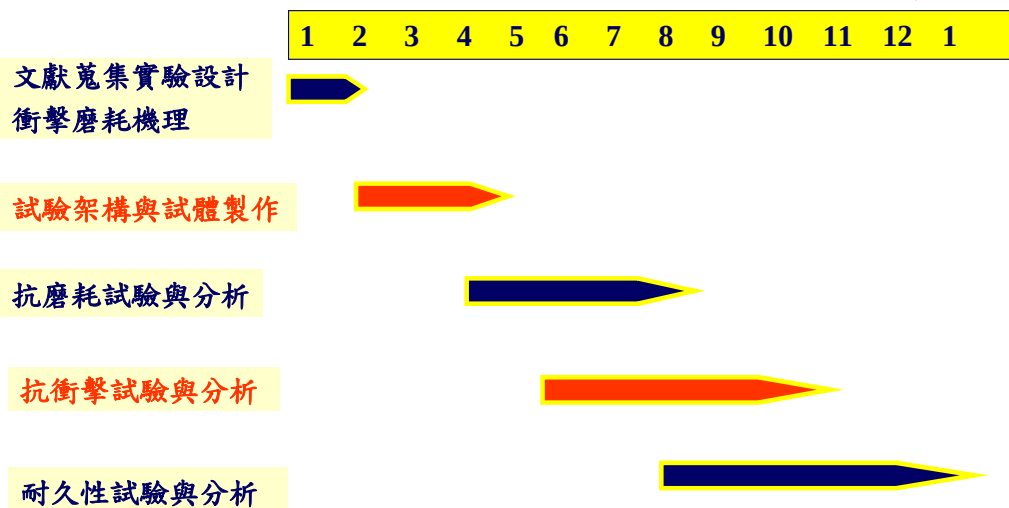
辦理橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗研究成果研討會

(5)

計畫目的與內容—進度

計畫時程：98年11月-100年12月

99年



(6)

計畫目的與內容—進度

計畫時程：98年11月-100年12月

100年

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

修復補強材料
基本性質試驗



高抗磨耗衝擊混凝土
性質評估試驗



設計與維修補
強建議手冊



研究成果研討會



(7)

上年度實驗
規劃與結果

試驗參數

- 水膠比：0.30(A)、0.35(B)、0.40(C) 與 0.45(D)
- 爐灰替代量：30% 與 50%
- 粗骨材體積含量：30%(X)、35%(Y) 與 40%(Z)
- 試體編號說明：
 - 第一英文字A、B、C與D為水膠比0.30、0.35、0.40與0.45
 - 第二個數字3與5分別為爐灰替代量30%與50%
 - 第三英文字X、Y與Z分別為粗骨材體積含量30%、35%與40%

(8)

上年度實驗
規劃與結果

混凝土配比總表

NO.	W/B	粉體	水泥	爐石	飛灰	SP%	粗骨材含量	S/A
A3X	0.3	552	0.7	0.21	0.09	6	30%	0.52
B3X	0.35	470	0.7	0.21	0.09	5	30%	0.54
C3X	0.4	410	0.7	0.21	0.09	4	30%	0.55
D3X	0.45	364	0.7	0.21	0.09	4	30%	0.56
A3Y	0.3	552	0.7	0.21	0.09	6	35%	0.44
B3Y	0.35	470	0.7	0.21	0.09	5	35%	0.46
C3Y	0.4	410	0.7	0.21	0.09	4	35%	0.48
D3Y	0.45	364	0.7	0.21	0.09	4	35%	0.49
A3Z	0.3	552	0.7	0.21	0.09	6	40%	0.36
B3Z	0.35	470	0.7	0.21	0.09	5	40%	0.38
C3Z	0.4	410	0.7	0.21	0.09	4	40%	0.40
D3Z	0.45	364	0.7	0.21	0.09	4	40%	0.42
A5Y	0.3	552	0.5	0.35	0.15	6	35%	0.43
B5Y	0.35	470	0.5	0.35	0.15	5	35%	0.45
C5Y	0.4	410	0.5	0.35	0.15	4	35%	0.47
D5Y	0.45	364	0.5	0.35	0.15	4	35%	0.49

(9)

上年度實驗
規劃與結果

試驗方法

1. 基本力學性質試驗

- － 抗壓強度量測
- － 彈性模數量測
- － 劈裂試驗



(10)

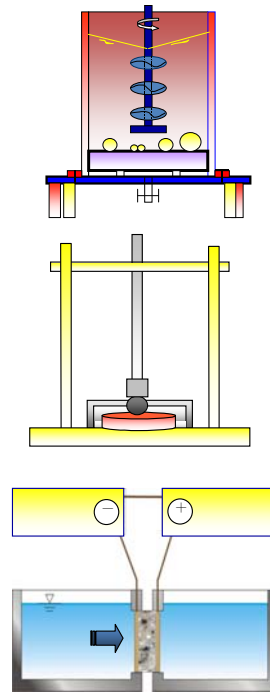
上年度實驗
規劃與結果

試驗方法

2. 混凝土抗磨耗能？之研究

3. 混凝土抗衝擊能？之研究

4. 混凝土耐久性之研究

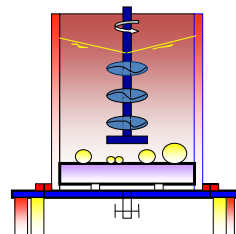


(11)

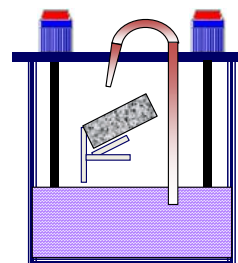
上年度實驗
規劃與結果

混凝土抗磨耗能？之研究

水中磨損試驗



含砂水？沖擊試驗



(12)

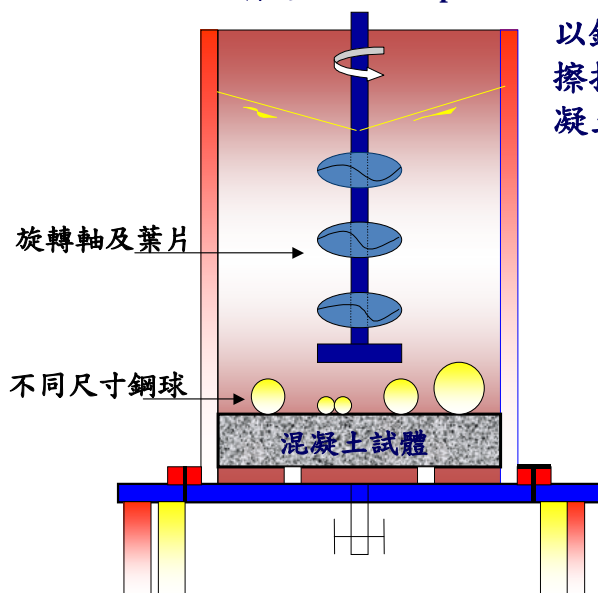
上年度實驗
規劃與結果

水中磨損試驗

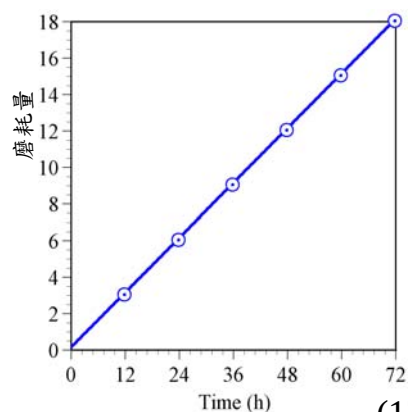
ASTM C1138水中磨耗試驗法

模擬水工結構混凝土遭受水中磨擦磨耗行為

轉速 1200 ± 100 rpm



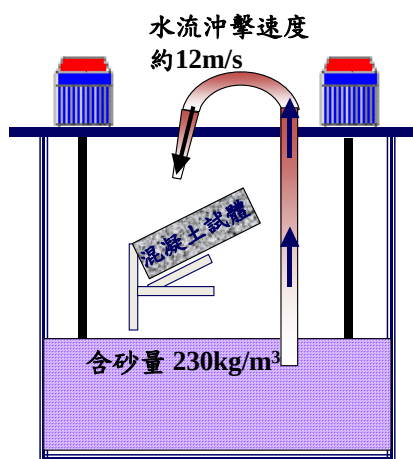
以鋼珠運動時對試體造成的摩擦損耗來模擬水中挾帶物對混凝土表面的磨損作用。



(13)

上年度實驗
規劃與結果

含砂水？沖擊試驗



以含砂水流對試體造成的摩擦損耗來模擬水中挾帶物對混凝土表面的磨損作用。

試驗後量測試體沖擊前後之體積變化，計算試體單位時間之體積損耗量。

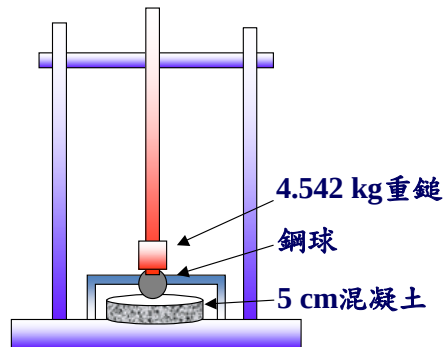
(14)

上年度實驗
規劃與結果

混凝土抗衝擊能？之研究

抗衝擊試驗

ACI 544之試驗方法進行抗衝擊試驗



每次試體所承受的撞擊能量為20J

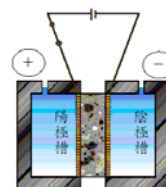
觀察試體有無產生開裂，並紀錄混凝土試
體破裂時之撞擊次數。

(15)

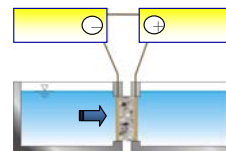
上年度實驗
規劃與結果

混凝土耐久性之研究

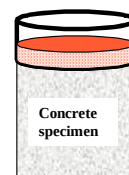
快速氯離子滲透試驗(RCPT)



加速氯離子傳輸試驗(ACMT)



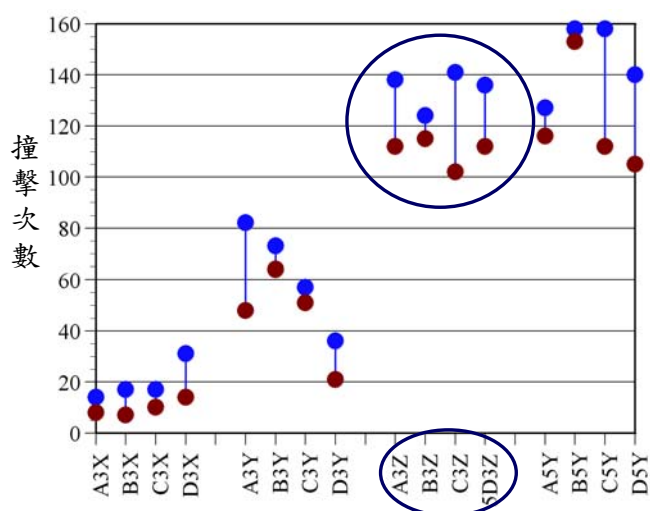
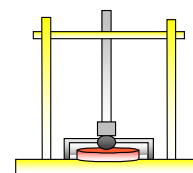
貯鹽試驗 (Ponding test)



(16)

上年度實驗
規劃與結果
抗衝擊

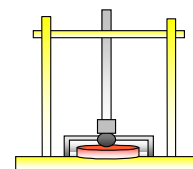
綜合評估



(17)

上年度實驗
規劃與結果
抗衝擊

綜合評估



混凝土配比設計 (kg/m³)

編號	W/B	水泥	飛灰	爐石	水	SP	三分石	六分石	細骨材
A3X	0.30	386	116	50	160	6	568	243	865
B3X	0.35	329	99	42	160	5	568	243	943
C3X	0.40	287	86	37	160	4	568	243	1000
D3X	0.45	255	76	33	160	4	568	243	1045
A3Z	0.30	386	116	50	160	6	758	325	598
B3Z	0.35	329	99	42	160	5	758	325	675
C3Z	0.40	287	86	37	160	4	758	325	733
D3Z	0.45	255	76	33	160	4	758	325	777

(18)

上年度實驗
規劃與結果
抗衝擊

綜合評估

依據抗衝擊結果

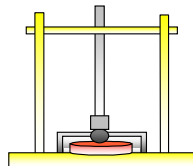
Z: CA=0.4

D: w/c=0.45

C: w/c=0.4

B: w/c=0.35

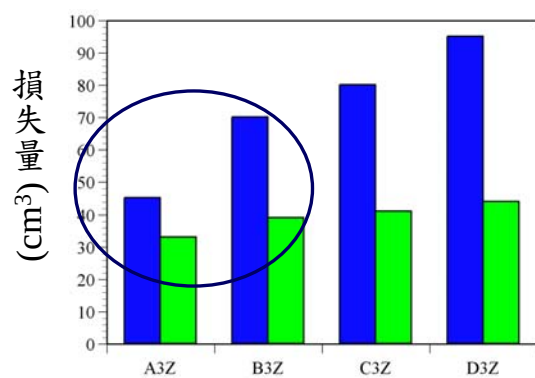
A: w/c=0.3



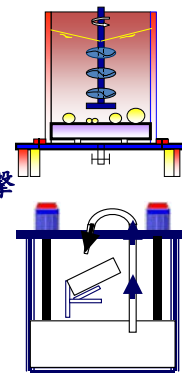
(19)

上年度實驗
規劃與結果
抗磨耗

綜合評估



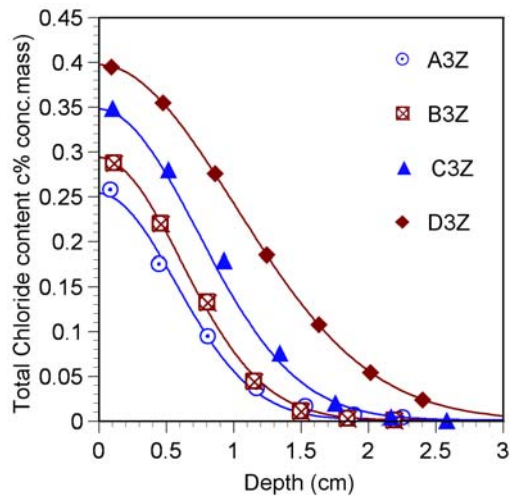
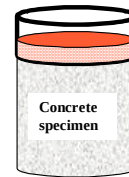
■ 60h 水中磨損
■ 2h 含砂水? 沖擊



(20)

上年度實驗
規劃與結果
耐久性

綜合評估



貯鹽試驗: 氯離子擴散係數

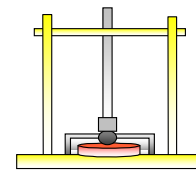
編號	D ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
A3Z	1.90
B3Z	2.32
C3Z	4.45
D3Z	5.58

(21)

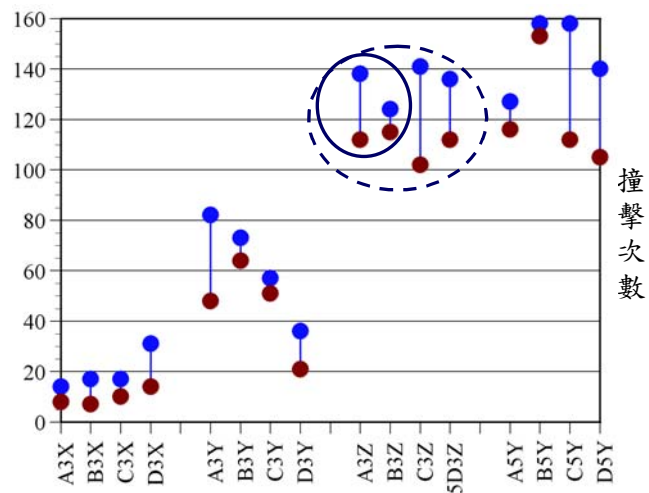
上年度實驗
規劃與結果

抗衝擊與耐久性

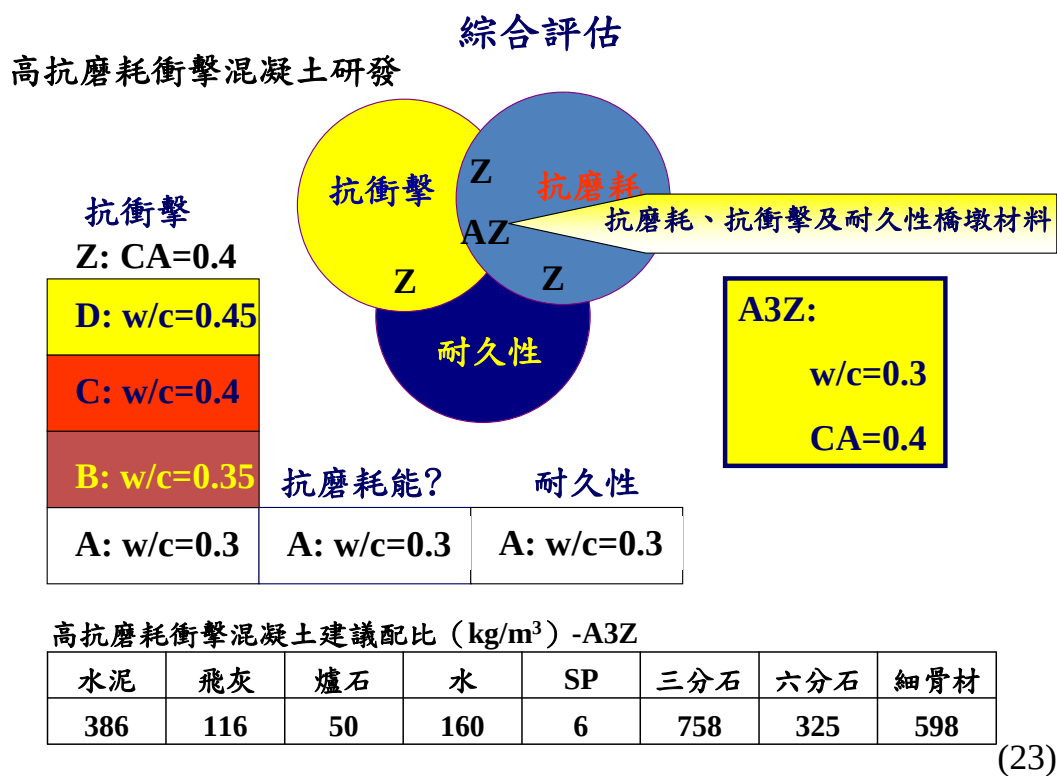
綜合評估



編號	抗壓強度 (Kgf/cm ²)	D ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
A3Z	806	1.90
B3Z	709	2.32
C3Z	658	4.45
D3Z	589	5.58



(22)



資料蒐集與彙整

- 現行修補工程相關規範彙整與檢討
 - 混凝土結構物修補技術指引--中興工程顧問社
 - 既有混凝土結構物維修及補強技術手冊(土木405-94)--土木水利工程學會
 - 美國--ACI 546 Concrete Repair Guide , ACI 515.1R Guide to the Use of Waterproofing Damproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete, ACI 210 R Erosion of Concrete in Hydraulic Structures
 - 歐洲--EN 1504 The new approach to concrete protection and repair

(24)

橋梁墩柱混凝土構造物之修補工法與材料

- 墩柱混凝土主要損壞--含砂石水流的衝擊磨損，及保護層的龜裂剝落
- 修補材料基本要求
 - － 性能：耐磨性、耐撞擊性、耐久性
 - － 經濟性：價錢成本、維修頻率
 - － 耐候性：熱變形、老化
 - － 相容性：新舊材料間之結合性
 - － 施工性：工作性、施工條件與機具

(25)

橋梁墩柱混凝土構造物之修補工法與材料

目前維修常用的工法：鋼板圍束補強



- 耐候性** - 表面衝磨後，鋼板銹蝕速率大增
- 相容性** - 在溫度變化下，鋼板與混凝土之熱脹冷縮，變形不一致
- 施工性** - 需進行特殊錨釘、不利於大範圍施工、且多為特殊規格，易有專利之困擾

(26)

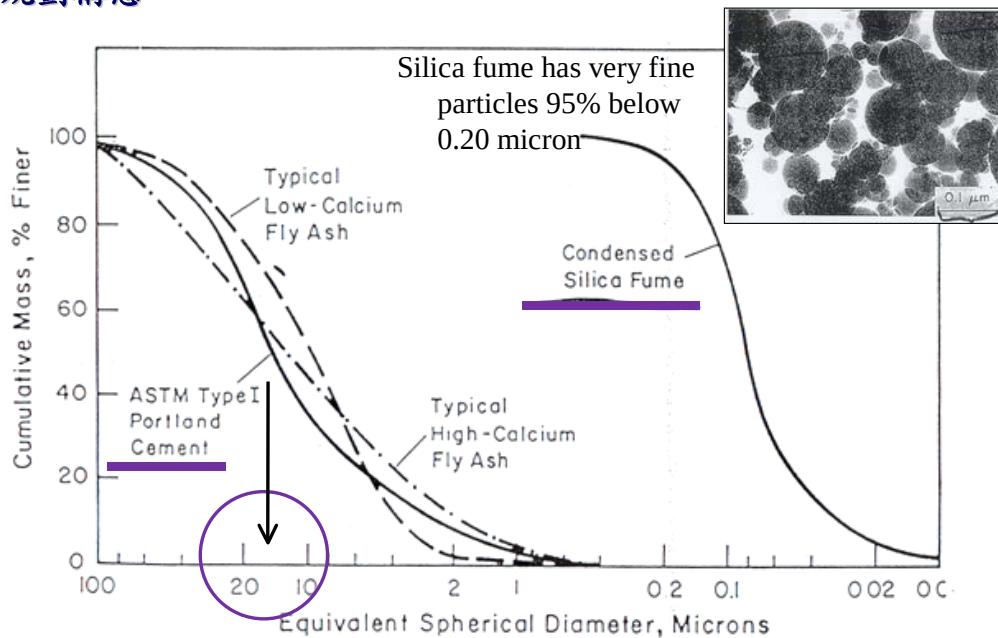
橋梁墩柱混凝土材料修復補強實驗計畫

1. 配合鋼板補強，在修補材料選擇混凝土系修補材料。
2. 以第一年度所研究的高抗磨耗衝擊混凝土配比為基礎。
3. 以添加矽灰考量修復補強。
4. 以添加鋼纖維與碳纖維考量修復補強。

(27)

本年度
規劃構想

橋梁墩柱混凝土材料修復補強實驗計畫



(28)

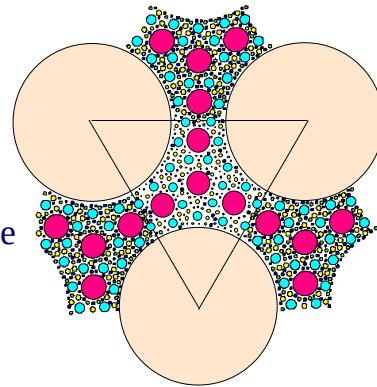
本年度
規劃構想

矽灰效應

- Physical: 填塞 (packing)

Cement particle size: average
 $20\ \mu\text{m}$

Silica fume microsilica size:
average $0.1\ \mu\text{m}$



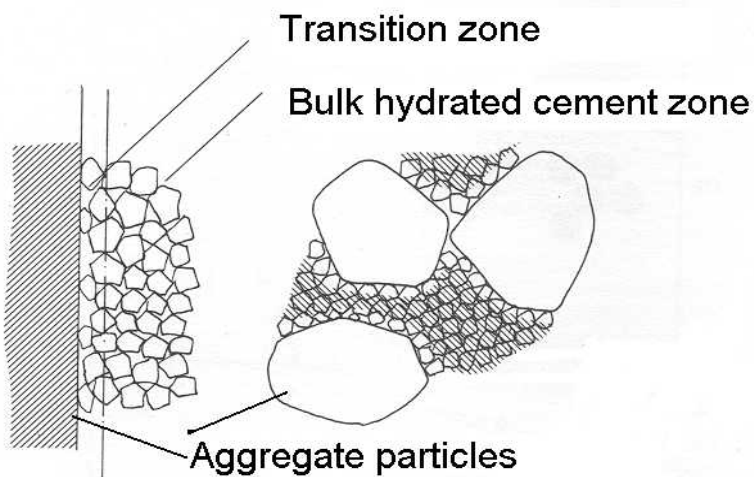
- Chemical: 卜作嵐反應 (Pozzolanic reaction)

(29)

本年度
規劃構想

矽灰效應

- Physical: 填塞 (packing)



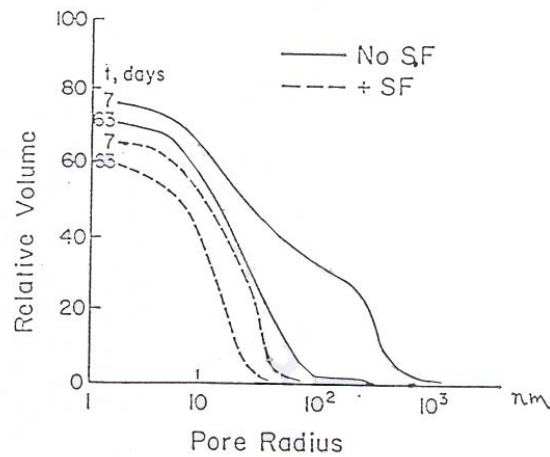
(30)

本年度
規劃構想

矽灰效應

- Physical: 填塞(packing)

Pore size distributions in pastes with and without microsilica

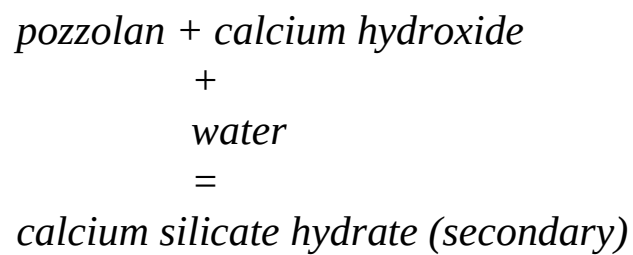


(31)

本年度
規劃構想

矽灰效應

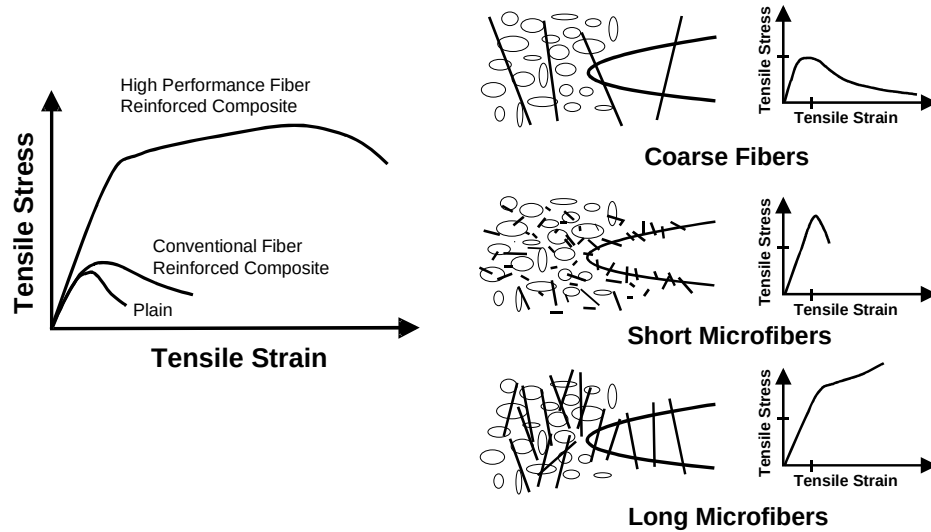
Chemical: 卜作嵐反應(Pozzolanic reaction)



(32)

本年度
規劃構想

纖維效應



(33)

本年度
實驗規劃

混凝土配比總表

編號	W/B	水泥	飛灰	爐石	砂灰	水	SP	三分石	六分石	細骨材	鋼纖維	碳纖維
A3Z	0.30	386	116	50	0	160	6	758	325	598	0	0
A3Za	0.30	347	116	50	39	160	6	758	325	598	--	--
A3Zb	0.30	346	115	50	38	159	6	754	323	595	39	--
A3Zc	0.30	344	115	50	38	158	6	750	322	592	78	--
A3Zd	0.30	346	115	50	38	159	6	754	323	595	--	9
A3Ze	0.30	344	115	50	38	158	6	750	322	592	--	18



鋼纖維長13 mm，直徑0.2 mm，
長徑比(aspect ratio)為65。

碳纖維長度10~20mm，直徑7 μ m。



(34)

本年度
實驗規劃

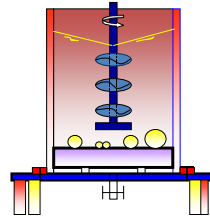
試驗方法

1. 基本力學性質試驗

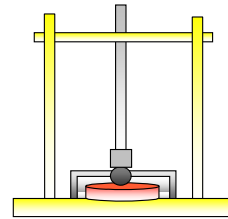
- 抗壓強度量測
- 彈性模數量測
- 劈裂試驗



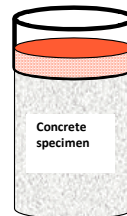
2. 混凝土抗磨耗能？之研究



3. 混凝土抗衝擊能？之研究



4. 混凝土耐久性之研究



(35)

本年度
實驗規劃

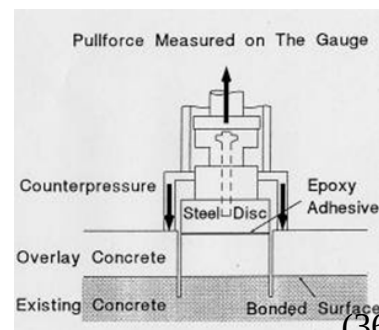
試驗方法

5. 乾縮試驗



6. 拉拔試驗法

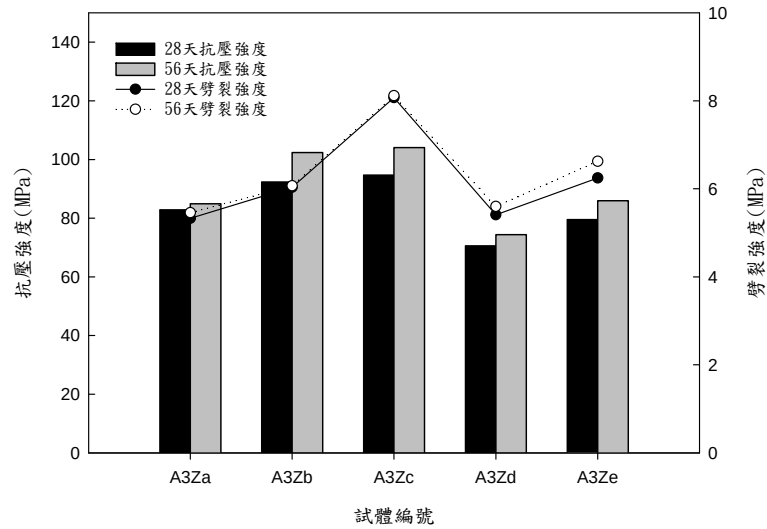
(Pull-off test method)



(36)

實驗成果討論與綜合分析

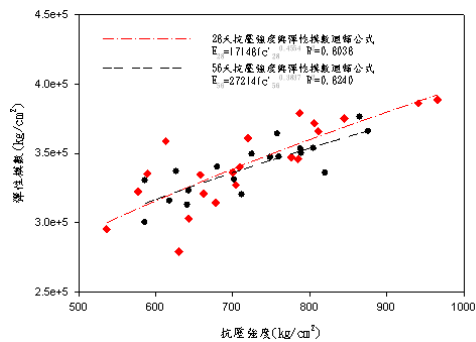
混凝土強度之研究



(37)

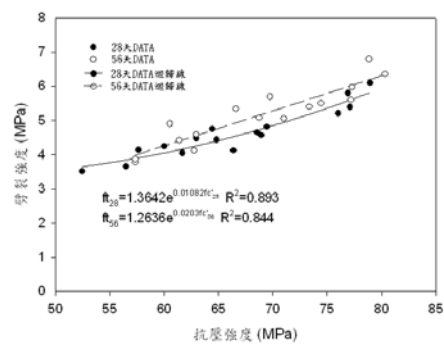
實驗成果討論與綜合分析

混凝土強度之研究



$$E_{28} = 17148 f_{c'28}^{0.4554}$$

$$E_{56} = 27214 f_{c'56}^{0.3637}$$



$$f_{t28} = 1.3642e^{0.01082 f_{c'28}}$$

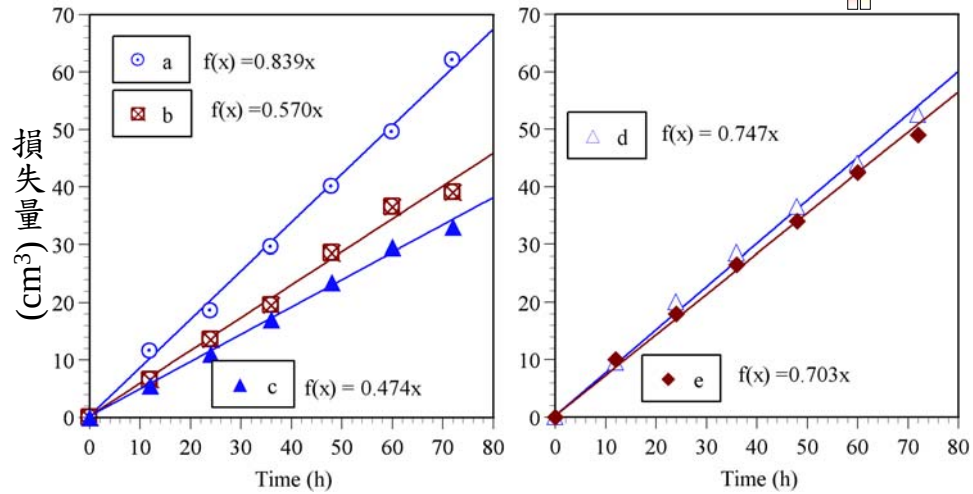
$$f_{t56} = 1.2636e^{0.0203 f_{c'56}}$$

(38)

抗磨耗

實驗成果討論與綜合分析

ASTM C1138磨耗試驗結果

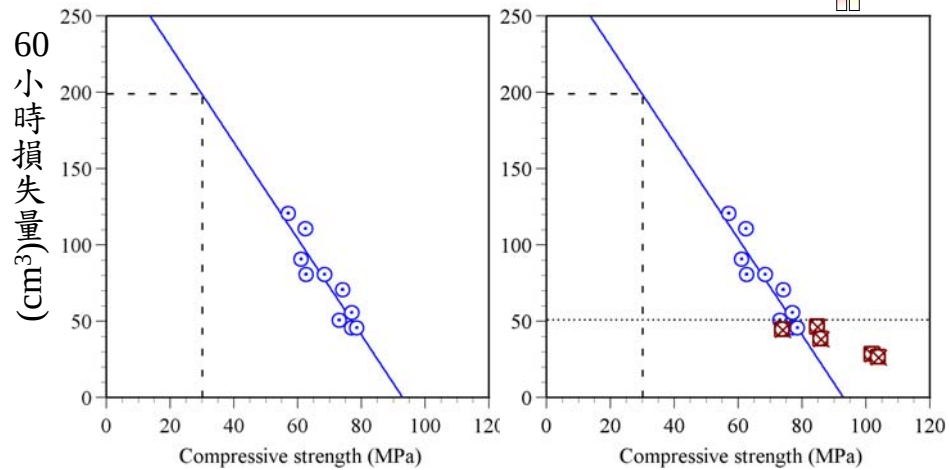


(39)

抗磨耗

實驗成果討論與綜合分析

ASTM C1138磨耗試驗結果



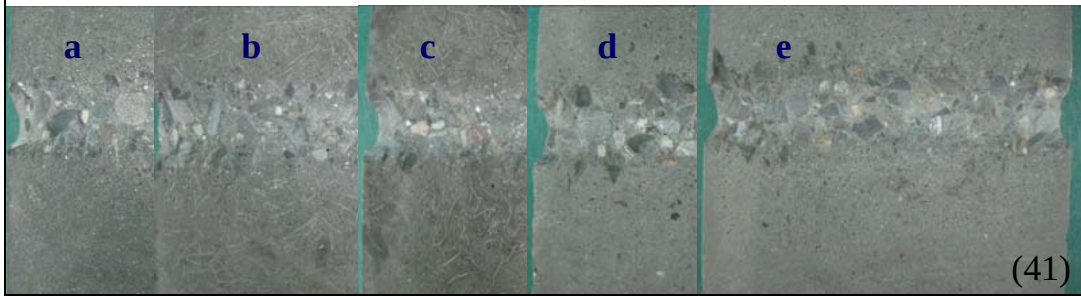
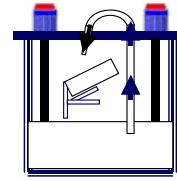
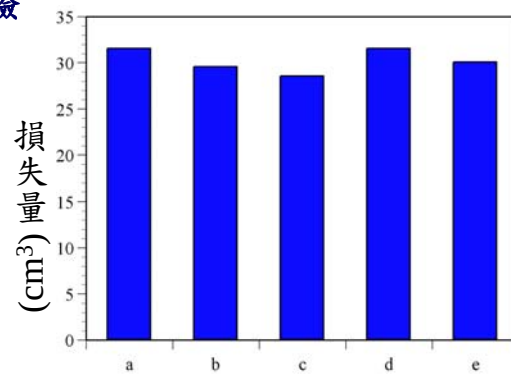
(40)

抗磨耗

含砂水? 試驗

實驗成果討論與綜合分析

2h含砂水? 沖擊

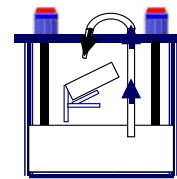
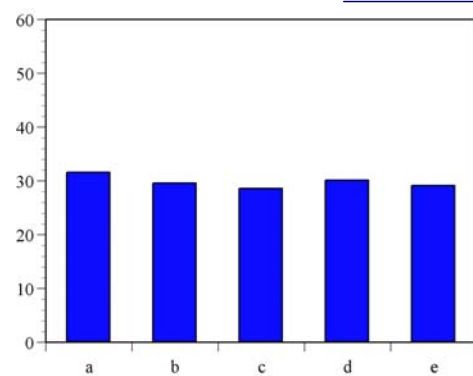
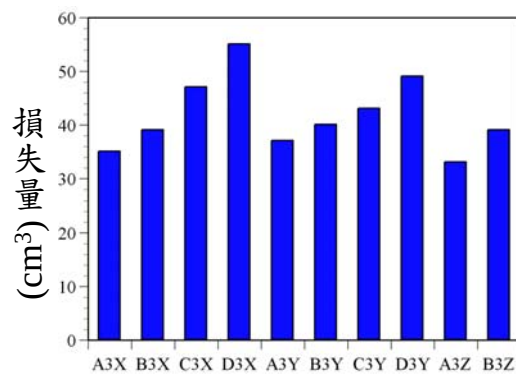


抗磨耗

含砂水? 試驗

實驗成果討論與綜合分析

2h含砂水? 沖擊

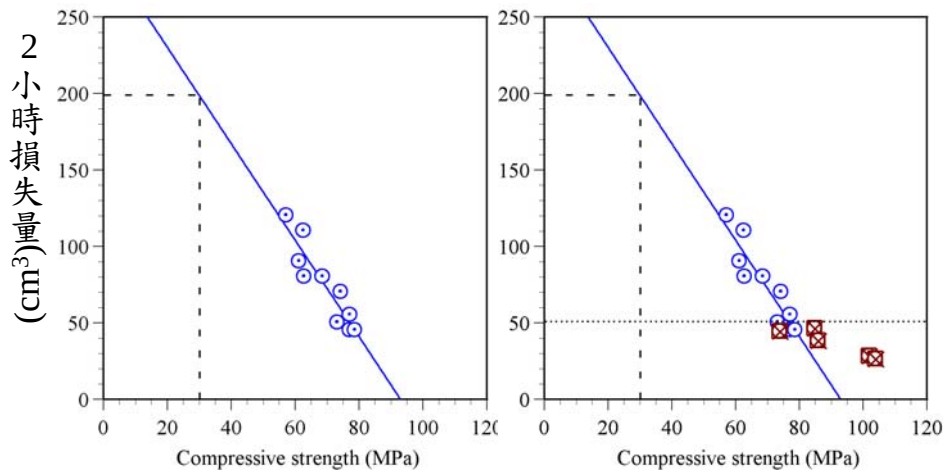
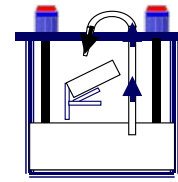


(42)

抗磨耗

實驗成果討論與綜合分析

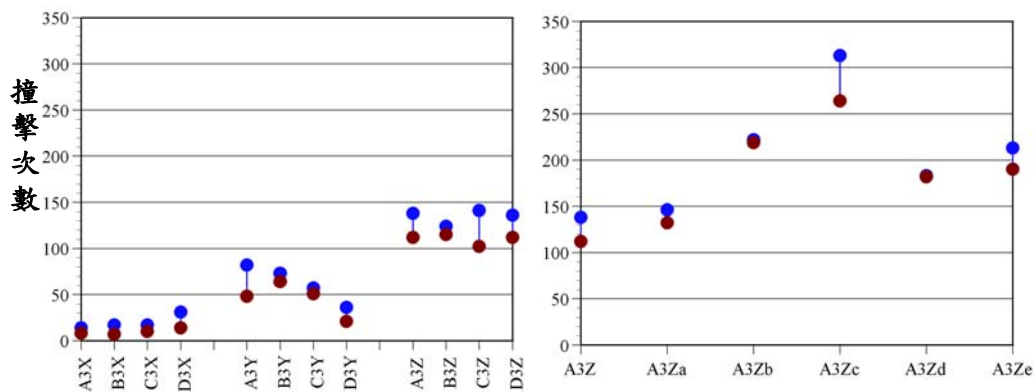
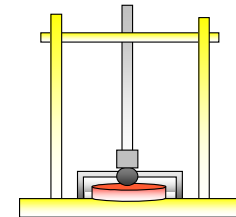
含砂水？試驗



藍色標記為第一年期混凝土材料試驗結果
紅色標記為本年度補修材料試驗結果

抗衝擊

實驗成果討論與綜合分析



(44)

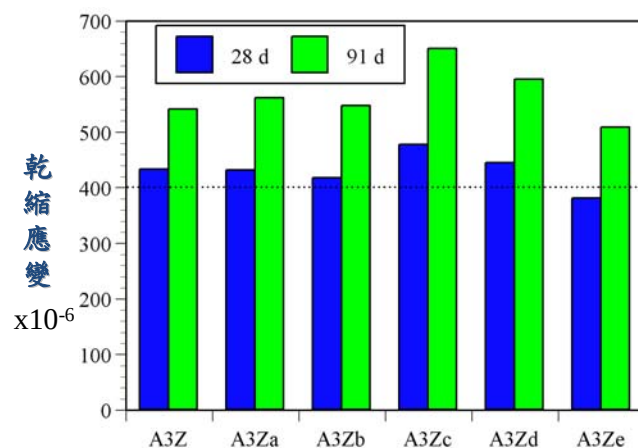
縮變性質

實驗成果討論與綜合分析

ASTM C 157

28 d 400×10^{-6}

1 yr 1000×10^{-6}



(45)

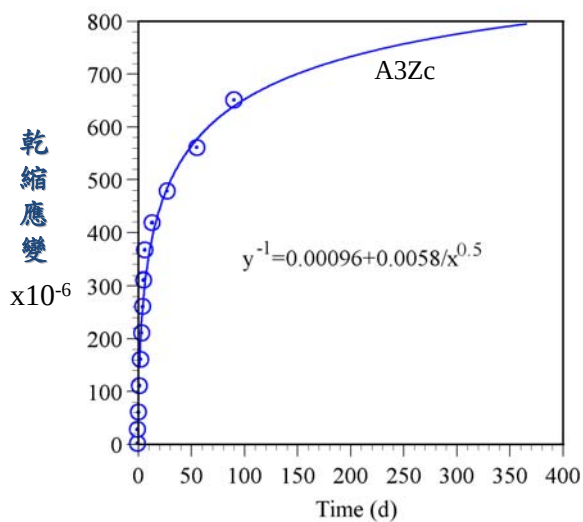
縮變性質

實驗成果討論與綜合分析

ASTM C 157

28 d 400×10^{-6}

1 yr 1000×10^{-6}

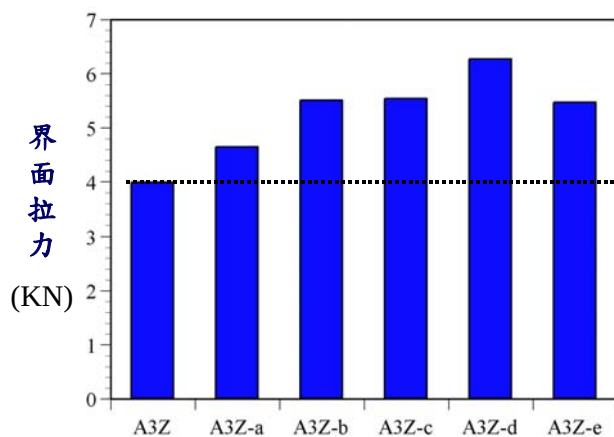


補修材料試驗結果以A3Zc最大，其28天乾縮試驗結果略高於 400×10^{-6} ，但1年期預測值則可小於 $1,000 \times 10^{-6}$

(46)

黏結界面

實驗成果討論與綜合分析



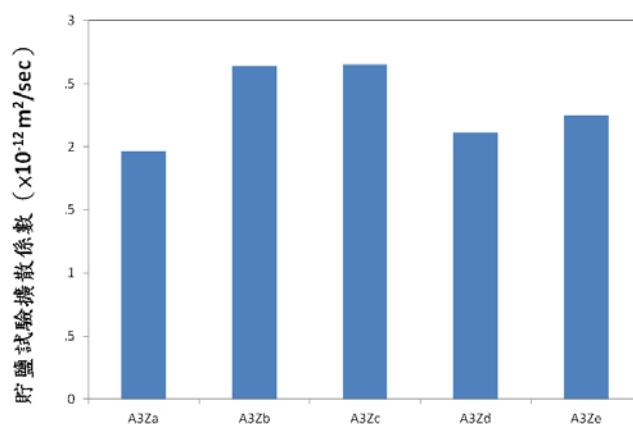
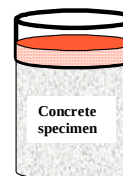
(47)

耐久性質

實驗成果討論與綜合分析

貯鹽試驗結果

ASTM C 1523



各組材料貯鹽試驗結果以 A3Zc 之擴散係數最高，但其值仍小於 3×10^{-12}

(48)

修補材料評估 實驗成果討論與綜合分析

相對A3Z配比的性能成長百分比

配比編號	壓力強度	彈性模數	劈裂強度	磨損試驗	含砂水流試驗	衝擊試驗	拉拔試驗	縮變試驗	耐久性
A3Za	7.6%	6.4%	-19.7%	-11.1%	9.1%	11.2%	38.2%	-3.8%	-3.2%★
A3Zb	29.1%	9.2%	-10.7%	0.0%	10.6%	76.8%	38.9%	-1.2%	-38.9%
A3Zc	31.6%★	10.2%★	19.4%★	26.7%★	13.6%★	112.0%★	16.3%	-20.2%	-39.5%
A3Zd	-6.3%	2.9%	-17.6%	0.0%	9.1%	41.6%	57.3%★	-10.0%	-11.1%
A3Ze	8.9%	3.5%	-2.6%	4.4%	12.1%	53.6%	37.2%	6.0%★	-31.6%
表現最佳配比	A3Zc	A3Zc	A3Zc	A3Zc	A3Zc	A3Zc	A3Zd	A3Ze	A3Za
表現次佳配比	A3Zb	A3Zb	A3Ze	A3Ze	A3Ze	A3Zb	A3Zb	A3Zb	A3Zd

力學性

耐衝擊磨損性

相容性

耐久性

水泥質維修補強材料建議配比-A3Zc (kg/m³)

水泥	飛灰	爐石	矽灰	水	SP	三分石	六分石	細粒料	鋼纖維
344	115	50	38	158	6	750	322	592	78

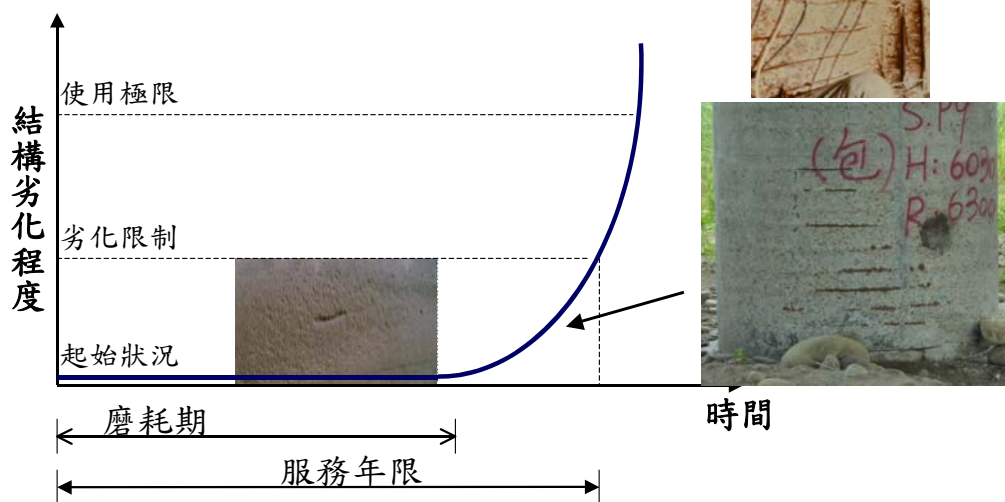
(49)

實驗成果討論與綜合分析



(50)

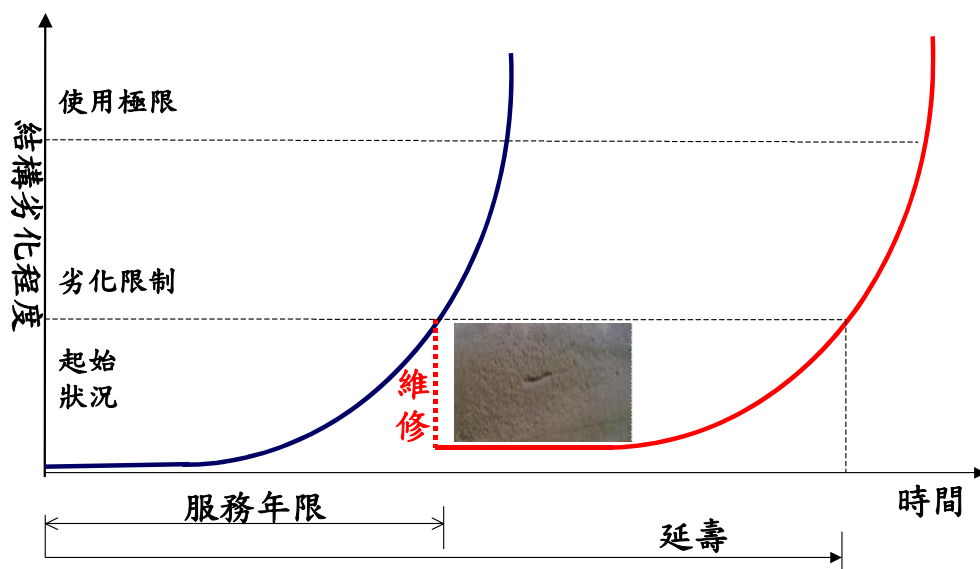
實驗成果討論與綜合分析



(51)

抗磨耗

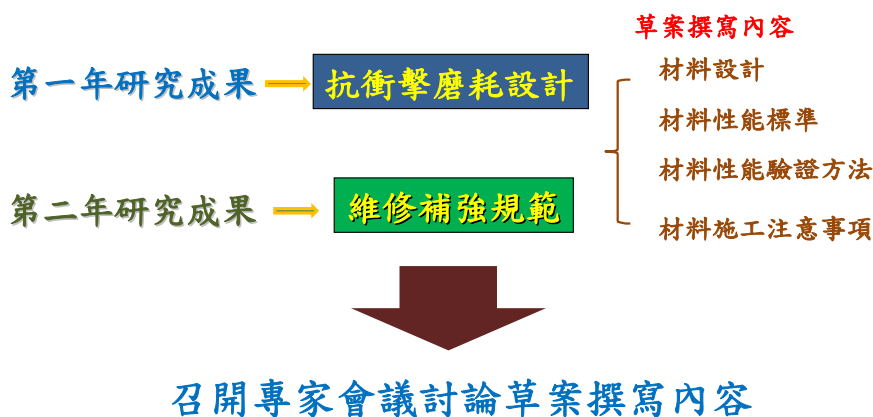
實驗成果討論與綜合分析



(52)

規範草案撰寫

編定橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案



(53)

專家會議討論情形

時間：100年10月13日上午10時

地點：國立台灣大學土木工程學系

參與專家：

國立中央大學李釗教授、國立台灣大學劉楨業教授、前交通部科技顧問司許書王技正、中興工程顧問股份有限公司梁智信計畫經理

建議規範草案修正內容：

1. 規範草案內容中有關準則或手冊之文字應修正為「規範」。
2. 規範草案建議應以未來可整合成為「混凝土工程施工規範與解說」（土木402）的其中一章來考量，因此建議撰寫方式可參考土木402方式撰寫。
3. 有關新工法與新材料使用可直接引用公共工程委員會相關規定辦理。
4. 規範草案有關維修補強方面應著重既有混凝土保護層與耐磨層的維修補強方面，有關結構補強可參照土木405辦理。
5. 材料性質標準應以已有規範為主，並以國內CNS現有規範優先。國內不常使用之試驗方法應於附錄加以說明。
6. 規範草案內容應加列引用國內規範與標準。並列出解說所引用的參考文獻。
7. 規範文字內容須潤飾修改部分參照委員意見辦理。

(54)

橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議規範草案內容範例 (相關內容請參閱研究報告第八章)

1.一般規定

1.1本規範規定之橋梁墩柱混凝土係指具有抗衝擊、磨耗、與耐久性能之混凝土。可用於橋梁下部結構之混凝土設計或實施維修補強工作所需之水泥質修補材料。

解說：

本規範之名稱為「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強建議規範」，重點在於規範與橋梁墩柱混凝土抗磨耗設計與實施維修或補強相關之工作。橋梁墩柱混凝土除提供橋梁原設計功能需求之承載力外，亦需具備抗衝擊磨耗與耐久性能力。本規範中抗衝擊磨耗設計以興建中或未來將興建橋梁混凝土為主要設計對象。維修補強建議以既有橋梁墩柱混凝土修復設計為主。

1.2 橋梁墩柱混凝土之施工與維修補強工作除應依中國土木工程學會「混凝土工程施工規範與解說」(下述簡稱土木402)之規定外，其餘事項亦須符合本規範其他章節規定。

解說：

橋梁墩柱維修補強若使用國內無現行國家標準或規範可依循的新材料、新技術及新工法時，可依據公共工程委員會100年3月31日工程技字第10000120021號函頒「各機關對新材料、新技術及新工法使用試辦作業要點」辦理^[1]。

(55)

教育訓練研討會辦理情形

「橋梁墩柱混凝土抗磨耗、抗衝擊及耐久性研究」教育訓練暨成果研討會

辦理時間：100年10月28日上午10時

辦理地點：國立台灣大學土木研究大樓

過程：

研討會開幕由交通部運輸研究所林得信副所長致詞，並安排4個小時有關本研究耐衝擊、耐磨損、與耐久性混凝土設計及維修補強材料課程內容，將本研究研發成果加以介紹，並實際安排與會來賓參觀暨解說耐久性與耐磨損試驗設備。



(56)

結 論

橋梁墩柱維修補強材料研究部分

1. 本年度測試之各組修補材料，顯示添加纖維對於混凝土水中抗磨耗及抗沖磨的能力，都有提升的效果，其中，鋼纖維可以提升約25~50%，碳纖維則約可提升20%。
2. 添加鋼纖維對於束制混凝土的乾燥收縮的效果並不明顯，添加0.5%鋼纖維的乾縮應變值幾乎與未添加纖維的應變值相同，而碳纖維則稍微有抑制混凝土乾燥收縮的效果，添加1%碳纖維的乾縮應變值可較未添加纖維的應變值減少約10%。
3. 添加纖維的混凝土，可有效提升界面拉拔力約18~35%。
4. 對耐久性方面，無論鋼纖維與碳纖維，1.0%添加量的氯離子擴散係數均高於0.5%，其中以鋼纖維影響較大，由此可說明加入纖維有可能會導致與水泥漿體的界面增加，導致耐久性的負面效益，但其負面影響有限，整體氯離子擴散係數仍低於 $3 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{sec}$ 。

(57)

建議

1. 由試驗結果可以發現高粗骨材用量與使用適量的爐灰等礦物摻料可增加混凝土耐衝擊、耐磨損、與耐久性。
2. 建議可已由本研究A3Z配比做為高抗磨耗衝擊混凝土建議配比。若考量經濟性與預拌廠產製能力，提昇強度與限制粗骨材用量是提升混凝土耐衝擊、耐磨損、與耐久性的主要考量，建議可將粗骨材最小用量設為 $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。其適用範圍已橋梁墩柱為主要對象。
3. 添加纖維的混凝土維修補強材料均可較混凝土基材本身有較好的力學性質、耐磨損性質、耐衝擊性質、與提升界面拉拔力，其中以鋼纖維表現最佳。因此建議可適量添加鋼纖維於橋梁墩柱混凝土維修補強材料中。其適用範圍已橋梁墩柱為主要對象。
4. 本研究成果效益方面，本研究建議之抗衝擊與磨損混凝土配比可供橋梁墩柱混凝土新建與維修設計參考。
5. 在本所或其他政府機關後續應用情形方面，所完成之「橋梁墩柱混凝土抗衝擊磨耗設計與維修補強規範草案」建議未來可考量於工地現場實際操作後，進行可行行驗證與修正。並可與未來納入「混凝土工程施工規範與解說」（土木402）的一部分。

(58)

敬請指教

