

96-65-7279
MOTC-IOT-95-H1DA006

高性能混凝土應用於交通工程之 研究 透水混凝土(2/3)



交通部運輸研究所
中華民國 96 年 4 月

96-65-7279
MOTC-IOT-95-H1DA006

高性能混凝土應用於交通工程之 研究 透水混凝土(2/3)

著者：張道光、黃然、張建智、葉為忠

交通部運輸研究所
中華民國 96 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

高性能混凝土應用於交通工程之研究：透水混凝土. (2/3) / 張道光等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，民96
面：公分
參考書目：面
ISBN 978-986-00-9568-5(平裝)

1. 混凝土

441.555

96008020

高性能混凝土應用於交通工程之研究—透水混凝土(2/3)

著 者：張道光、黃然、張建智、葉為忠
出版機關：交通部運輸研究所
地 址：臺北市敦化北路 240 號
網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)
電 話：(04)26587176
出版年月：中華民國 96 年 4 月
印 刷 者：承亞興企業有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 120 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定 價：200 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書坊臺視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515
五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN : 1009601080 ISBN : 978-986-00-9568-5 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

96

高性能混凝土應用於交通工程之研究

透水混凝土
(2/3)

交通部運輸研究所

GPN : 1009601080

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：高性能混凝土應用於交通工程之研究 透水混凝土(2/3)			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-00-9568-5 (平裝)	政府出版品統一編號 1009601080	運輸研究所出版品編號 96-65-7279	計畫編號 95-H1DA006
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：張道光 研究人員：張道光、黃然、張建智、葉為忠 聯絡電話： 04-26587119 傳真號碼： 04-265713297 & 04-26564418			研究期間 自 95 年 01 月 至 95 年 12 月
關鍵詞：透水混凝土、高性能混凝土、生態工法、交通工程			
摘要： <p>臺灣多年來因為經濟發展的需要，進行各項交通工程建設，土地開發面積廣闊，使用不透水材料常發生暴雨積水災害，另港灣岸壁易造成反射而危害船隻停泊及安全，又或因地形狹長，無法保存珍貴的水資源，其影響程度非常巨大，為解決前述問題，參照國外經驗，實有針對國內交通建設工程類別探討採用透水混凝土條件、類別、施工法及效益之必要性。</p> <p>研究結果顯示由現地調查資料發現，國內目前使用透水混凝土案例仍是有限。主要應用仍集中在透水性鋪面，其中又多半是使用透水磚、透水瀝青混凝土或是透水樹脂混凝土。對透水水泥混凝土而言，其力學強度與透水性能成反比關係，使用高漿量可提昇力學強度，但會因孔隙填充比例升高而造成透水性能下降。就經濟性、強度及透水性為未來應用之考量，最適配比的建議為水灰比0.35、骨材粒徑0.48cm、填充孔隙百分比80%，其透水係數0.1cm/sec、28天抗壓強度可達到21Mpa。</p>			
出版日期 96 年 4 月	頁數 168	定價 200	本出版品取得方式 凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <p>密 機密 極機密 絶對機密 (解密【限】條件： 年 月 日解密， 公布後解密， 附件抽存後解密， 工作完成或會議終了時解密， 另行檢討後辦理解密)</p> <p>普通</p>			
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: Application of High Performance Concrete to Transportation Engineering
 Pervious Concrete (2/3)**

ISBN (OR ISSN) 978-986-00-9568-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009601080	IOT SERIAL NUMBER 96-65-7279	PROJECT NUMBER 95- H1DA006
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chang Tao-kuang PROJECT STAFF: Ran Huang, Chang jiang-jhy, Yeih Wei-chung PHONE: 04-26587119 FAX: 04-26571329 & 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM January 2006 TO December 2006

KEY WORDS: Pervious concrete, High performance concrete, Eco-technology, transportation engineering

ABSTRACT:

Being in need of Taiwan economic development in recent years, many transportation-related projects are under construction. Vast land exploitation and the use of impermeable materials have caused flood disasters ensuing tropical storms, reflection waves from harbor's walls and influence the safety of ships berthed at harbor, and the whole land's slopes are so steep that can't reserve water resource. In order to solve the above problems, we collect relevant references and conduct research about pervious concrete using conditions, categories, practices and benefits.

The results show that the application of pervious concrete in Taiwan is limited from in-situ investigation, and most of them are pervious pavement where the pervious brick, pervious asphalt concrete and pervious polymer concrete dominate the major part of applications. For the pervious concrete, the mechanical strength decreases as the permeability increases. Increasing the amount of cement paste can enhance the mechanical strength; however, it reduces the permeability as well. From the viewpoints of economics, strength and permeability, the suggestion for the most suitable mix design of pervious concrete is: w/c=0.35, nominal diameter for the aggregate is 0.48 cm, the replacement percentage of voids by paste is 80%. The permeability coefficient for the designed concrete is 0.1 cm/sec and the 28-day compressive strength can reach 21 MPa.

DATE OF PUBLICATION April 2007	NUMBER OF PAGES 168	PRICE 200	CLASSIFICATION		
			RESTRICTED SECRET	CONFIDENTIAL TOP SECRET	UNCLASSIFIED

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

高性能混凝土應用於交通工程之研究_透 水混凝土(2/3)

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
表目錄	VII
圖目錄	X
第一章 前 言	1-1
1.1 計畫源起	1-1
1.2 研究目的	1-1
1.3 研究範圍與對象	1-2
1.4 研究內容	1-2
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 高性能混凝土	2-1
2.2 生態工法	2-2
2.3 國內外透水混凝土的應用	2-4
2.3.1 國外應用	2-4
2.3.2 國內應用	2-6
2.4 透水混凝土之定義	2-7
2.5 透水混凝土之組成	2-8
2.5.1 水泥	2-8
2.5.2 骨材	2-11
2.5.3 摻劑	2-11

2.6 透水混凝土膠結材料的組合	2-11
2.6.1 添加卜作嵐材料之水泥漿體	2-12
2.6.1.1 卜作嵐反應	2-12
2.6.1.2 砂灰特性與應用	2-13
2.6.1.3 砂灰之反應機理	2-14
2.6.2 鹼活化爐石粉漿體	2-15
2.6.2.1 爐石性質	2-15
2.6.2.2 鹼活化爐石粉水化歷程	2-18
2.6.2.3 鹼活化爐石粉混凝土配比設計	2-20
2.6.2.4 鹼活化爐石粉混凝土之速凝問題	2-20
2.7 透水混凝土之設計方法	2-24
第三章 國內應用發展現況調查分析	3-1
3.1 現地調查-鋪面工程	3-1
3.1.1 國內常見透水鋪面種類	3-1
3.1.2 透水鋪面案例	3-2
3.1.3 綜合比較	3-13
3.2 現況調查-港灣及河川護岸工程	3-15
3.3 現況調查-坡地工程	3-21
3.4 透水混凝土基本組合材料之調查分析	3-23
第四章 試驗計畫	4-1
4.1 試驗變數	4-1
4.2 試驗材料	4-7
4.3 配比設計	4-12
4.3.1 膠結材料為水泥漿體之配比	4-12
4.3.2 膠結材料為鹼活化爐石粉漿體之配比	4-13

4.3.3 膠結材料為水泥漿體添加矽灰之配比	4-14
4.3.4 配比編號.....	4-15
4.4 試驗方法.....	4-19
4.4.1 試體製作.....	4-19
4.4.2 孔隙率測定.....	4-22
4.4.3 單位重測定.....	4-22
4.4.4 抗壓強度試驗.....	4-22
4.4.5 抗彎強度試驗.....	4-23
4.4.6 剔裂強度試驗.....	4-24
4.4.7 透水係數試驗.....	4-25
4.4.8 健性試驗.....	4-26
4.4.9 濾清試驗.....	4-26
4.4.10 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀測	4-27
第五章 試驗結果與分析	5-1
5.1 目視檢查.....	5-1
5.2 單位重試驗	5-2
5.3 透水試驗.....	5-6
5.4 孔隙率測定	5-13
5.5 抗壓強度試驗	5-16
5.6 剔裂強度試驗	5-23
5.7 抗彎強度試驗	5-29
5.8 健性試驗.....	5-34
5.9 濾清試驗.....	5-40
5.10 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀測	5-42
5.11 透水係數交叉比較.....	5-46

5.11.1 透水係數與連通孔隙率之關係	5-46
5.11.2 透水係數與力學強度之關係	5-48
5.12 透水混凝土配比設計檢討	5-48
5.12.1 透水混凝土配比設計修正	5-48
5.12.2 案例一：透水係數 10^{-3} cm/sec，抗壓強度 17.5MPa ...	5-52
5.12.3 案例二：透水係數 10^{-1} cm/sec，抗壓強度 15MPa	5-53
5.13 透水混凝土技術推廣應用可行性評估	5-54
5.13.1 確認透水混凝土之類別	5-54
5.13.2 確定透水混凝土之配比與特性	5-54
5.13.3 交通建設適用透水混凝土之項目	5-55
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論	6-1
6.2 建議	6-2
參考文獻	參-1

表 目 錄

表 2.1 水泥主要成份特性表	2-9
表 2.2 水泥水化時之行為與特徵	2-10
表 2.3 各個國家推薦或採用透水性混凝土路面之骨材級配.....	2-11
表 2.4 卜作嵐材料分類	2-12
表 2.5 鹼活化膠結材發展歷程	2-16
表 2.6 爐石與波特蘭水泥之典型化學成分比較.....	2-16
表 2.7 鹼活化爐石水化產物與水泥水化產物	2-19
表 2.8 CNS 12549 對爐石粉的化學成份標準規定	2-20
表 2.9 CNS 12549 對爐石物理性質的標準規定	2-21
表 3.1 現地簡易透水測試	3-15
表 3.2 多孔隙瀝青混凝土設計準則	3-16
表 3.3 多孔隙瀝青混凝土配合比例	3-16
表 3.4 坡面保護工之種類及適用性	3-21
表 3.5 檔土護坡之種類及適用性	3-22
表 3.6 透水水泥混凝土之基本組合材料	3-25
表 4.1 研究使用之骨材粒徑	4-3
表 4.2 第一部份試驗變數表	4-5
表 4.3 第二部份試驗變數表	4-7
表 4.4 水泥化學成份	4-7
表 4.5 水泥物理性質	4-8
表 4.6 粗骨材物理性質	4-8

表 4.7 爐石粉性質	4-9
表 4.8 砂灰性質	4-10
表 4.9 砂酸鈉之化學成份	4-10
表 4.10 氢氧化鈉之化學成份	4-11
表 4.11 磷酸之化學成份	4-11
表 4.12 水泥漿體作為膠結材料試驗配比	4-12
表 4.13 鹼活化爐石粉漿體之配比	4-14
表 4.14 砂灰替代水泥之漿體配比	4-14
表 4.15 第一部份試驗配比編號表	4-17
表 4.16 鹼活化爐石粉膠結材配比編號表	4-18
表 4.17 鹼活化爐石粉膠結材配比編號表	4-18
表 4.18 第二部份試驗配比編號表	4-19
表 5.1 目視檢查垂流現象結果	5-2
表 5.2 單位重試驗結果	5-3
表 5.3 各配比透水係數	5-7
表 5.4 孔隙率試驗結果	5-13
表 5.5 抗壓強度試驗結果	5-17
表 5.6 劈裂強度試驗結果	5-23
表 5.7 抗彎強度試驗結果	5-29
表 5.8 健性試驗結果	5-34
表 5.9 鋪面透水係數相關數據	5-42
表 5.10 阻塞後鋪面透水係數相關數據	5-42
表 5.11 混合砂土之施加總量、收集量及鋪面之去除率	5-42

表 5.12 鋪面材料定量特性分析表 5-58

表 5.13 混凝土之配合條件及設計標準強度之參考表 5-59

圖 目 錄

圖 2.1 美國透水鋪面應用於停車場	2-5
圖 2.2 日本透水鋪面應用於步道	2-5
圖 2.3 臺南市中華西路之排水性瀝青路面	2-7
圖 2.4 多孔隙結構體圖	2-8
圖 2.5 水泥及卜作嵐材料在 C-S-A 系統之相位圖	2-17
圖 2.6 鹼活化爐石粉漿體水化歷程	2-19
圖 2.7 P_2O_5 含量對鹼活化爐石粉漿體凝結時間之影響	2-22
圖 2.8 鹼活化爐石粉漿體之 X 光繞射結果	2-23
圖 2.9 鹼活化爐石粉漿體的 SEM 結果	2-23
圖 3.1 臺北燦坤 3C	3-6
圖 3.2 臺北新生公園	3-6
圖 3.3 臺北淡海新市鎮	3-7
圖 3.4 臺北石牌國中	3-7
圖 3.5 臺北北安路	3-8
圖 3.6 臺北陽明山	3-8
圖 3.7 臺北臺北科技大學	3-9
圖 3.8 臺北新店試驗區	3-9
圖 3.9 臺北萬板橋下	3-10
圖 3.10 臺北文山區行政中心 (一)	3-10
圖 3.11 臺北文山區行政中心 (二)	3-11
圖 3.12 桃園兒童公園	3-11

圖 3.13 桃園龜山國中 (一)	3-12
圖 3.14 桃園龜山國中 (二)	3-12
圖 3.15 桃園觀音國小	3-13
圖 3.16 國內透水性河川護岸	3-18
圖 3.17 日本透水性河川護岸	3-19
圖 3.18 日本透水性人工魚礁	3-20
圖 3.19 日本透水性擋土護坡	3-20
圖 4.1 較大粒徑骨材與孔隙示意	4-2
圖 4.2 較小粒徑骨材與孔隙示意	4-2
圖 4.3 骨材外觀	4-3
圖 4.7 鼓式拌和機	4-20
圖 4.8 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 圓柱試體模	4-20
圖 4.9 抗彎試體模	4-21
圖 4.10 抗彎試體模	4-21
圖 4.11 試驗研磨機	4-23
圖 4.12 100 聲萬能材料試驗機	4-23
圖 4.13 抗彎座	4-24
圖 4.14 定水頭透水係數測定儀	4-25
圖 5.1 A 粒徑下單位重比較圖	5-4
圖 5.2 B 粒徑下單位重比較圖	5-4
圖 5.3 C 粒徑下單位重比較圖	5-5
圖 5.4 D 粒徑下單位重比較圖	5-5
圖 5.5 變換不同膠結漿體之單位重比較圖	5-6

圖 5.6 A 粒徑下透水係數比較圖	5-7
圖 5.7 B 粒徑下透水係數比較圖	5-8
圖 5.8 C 粒徑下透水係數比較圖	5-8
圖 5.9 D 粒徑下透水係數比較圖	5-9
圖 5.10 $w/c=0.25$ 下透水係數比較圖	5-10
圖 5.11 $w/c=0.35$ 下透水係數比較圖	5-10
圖 5.12 $w/c=0.45$ 下透水係數比較圖	5-11
圖 5.13 變換不同膠結漿體透水係數比較圖	5-12
圖 5.14 A 粒徑下連通孔隙率比較	5-14
圖 5.15 B 粒徑下連通孔隙率比較	5-14
圖 5.16 C 粒徑下連通孔隙率比較	5-15
圖 5.17 D 粒徑下連通孔隙率比較	5-15
圖 5.18 變換不同膠結將體連通孔隙率比較	5-16
圖 5.19 A 粒徑下抗壓強度比較	5-18
圖 5.20 B 粒徑下抗壓強度比較	5-18
圖 5.21 C 粒徑下抗壓強度比較	5-19
圖 5.22 D 粒徑下抗壓強度比較	5-19
圖 5.23 $w/c=0.25$ 下抗壓強度比較	5-20
圖 5.24 $w/c=0.35$ 下抗壓強度比較	5-21
圖 5.25 $w/c=0.45$ 下抗壓強度比較	5-21
圖 5.26 使用不同漿體之抗壓強度比較	5-22
圖 5.27 A 粒徑下劈裂強度比較	5-24
圖 5.28 B 粒徑下劈裂強度比較	5-24

圖 5.29 C 粒徑下劈裂強度比較	5-25
圖 5.30 D 粒徑下劈裂強度比較	5-25
圖 5.31 w/c=0.25 下劈裂強度比較	5-26
圖 5.32 w/c=0.35 下劈裂強度比較	5-27
圖 5.33 w/c=0.45 下劈裂強度比較	5-27
圖 5.34 使用不同漿體之劈裂強度比較	5-28
圖 5.35 A 粒徑下抗彎強度比較	5-30
圖 5.36 B 粒徑下抗彎強度比較	5-30
圖 5.37 C 粒徑下抗彎強度比較	5-31
圖 5.38 D 粒徑下抗彎強度比較	5-31
圖 5.39 w/c=0.25 下抗彎強度比較	5-32
圖 5.40 w/c=0.35 下抗彎強度比較	5-33
圖 5.41 w/c=0.45 下抗彎強度比較	5-33
圖 5.42 A 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-35
圖 5.43 B 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-36
圖 5.44 C 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-36
圖 5.45 D 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-37
圖 5.46 w/c=0.25 下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-38
圖 5.47 w/c=0.35 下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-38
圖 5.48 w/c=0.45 下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-39
圖 5.49 不同漿體受硫酸鹽攻擊重量損失率比較	5-40
圖 5.50 W/C=0.35 水泥漿體 300 倍微觀結構圖	5-43
圖 5.51 W/C=0.35 水泥漿體 1000 倍微觀結構圖	5-43

圖 5.52 W/C=0.35 水泥漿體添加 10% 砂灰 300 倍微觀結構圖	5-44
圖 5.53 W/C=0.35 水泥漿體添加 10% 砂灰 1,000 倍微觀結構圖	5-44
圖 5.54 L/Sg=0.35 鹼活化爐石粉漿體 300 倍微觀結構圖	5-45
圖 5.55 L/Sg=0.35 鹼活化爐石粉漿體 1,000 倍微觀結構圖	5-45
圖 5.56 孔隙率與透水係數之關係	5-47
圖 5.57 力學強度與透水係數之關係	5-48
圖 5.59 透水混凝土之施工過程	5-55
圖 5.60 各種鋪面示意圖	5-56

第一章 前言

1.1 計畫源起

今日規劃興建混凝土構造物時，考量生命週期成本已為一必然之發展趨勢，輕質、高強度材料的研發係為因應此項需求；另外於興建交通工程結構物，必須考量對生態環境的影響；使用與環境親和的營建材料已成為目前交通建設重要的發展趨勢。台灣多年來因為經濟發展的需要，進行各項交通工程建設，土地開發面積廣闊，使用不透水材料常發生暴雨積水災害，另港灣岸壁易造成反射而危害船隻停泊及安全，又或因地形狹長，無法保存珍貴的水資源，其影響程度非常巨大，為解決前述問題，參照國外經驗，實有針對國內交通建設工程類別探討採用透水混凝土條件、類別、施工法及效益之必要性。

國內目前主要道路鋪面材料多為普通瀝青混凝土，停車場鋪面多為卜特蘭水泥混凝土，二者皆屬不透水材料，排水不良及鋪面積水為普遍發生的問題。又因國內城市人口密集，夏季高溫多雨，鋪面積水會放熱提高周圍空氣溫度。對於都市生態環境有不利影響，且若積水面積甚大將嚴重影響城市用水的品質雨水量。

公共工程採用生態工法及生態材料為政府近年來大力推行之政策；台灣土地資源有限，為能使國家永續發展，建立生態城市是必須努力達到的目標，新建交通工程廣泛使用透水材料是建立生態城市的第一步。本研究計畫可配合行政院工程會、國科會等整體策略確定透水混凝土適用性及應用範圍。

1.2 研究目的

近年來國內以打造永續台灣為未來努力的目標，為解決水資源流失、環境生態破壞及熱島效應擴張，研發本土透水混凝土實有其重要性

及迫切性。本計畫之目的乃針對交通建設，進行研發透水混凝土。研發透水混凝土除可參照國外經驗，依其應用類別，進行不同配比設計，製作透水混凝土面層。經由實驗室試驗及現場試驗以確認各配比之可行性及效益性。另外針對港灣工程相關構件如消波塊、碼頭、及港區設施是否可使用透水混凝土，降低波浪反射，減少對船隻安全產生不利影響亦應進行試驗探討，同時評估透水混凝土強度，耐衝擊性及消能效益是否可符合港灣工程設計需求。本計畫並將利用試驗結果，國內外相關文獻資料蒐集分析，配合水資源管理、生態工法及水泥質材料需求，建立國內透水混凝土的產製技術，並將之應用於示範性工程驗證其排水效能，以為工程界參考使用。

1.3 研究範圍與對象

本計畫研究範圍主要為國內交通建設使用透水混凝土的項目、方法與施工技術。探討對象以透水波特蘭水泥混凝土研發為主，並分為兩階段執行，第一階段著重於水灰比與骨材粒徑對透水混凝土之影響；第二階段著重於不同膠結材料對強度與透水性之影響，其中包括矽灰的使用與鹼活化爐石漿體的應用等，並與普通波特蘭水泥作一比較。本計畫將利用國內外相關文獻資料蒐集分析，特別著重於案例分析，以確認永續水資源管理、生態工法的具體內涵，同時運用水泥質材料配比技術或知識，進行配比設計、試拌及試驗，獲致透水混凝土的基本設計參數及技術需求，研究成果可做為訂定透水混凝土設計、施工規範草案的參考依據。

1.4 研究內容

公共工程採用生態工法及生態材料為政府近年來大力推行之政策；臺灣土地資源有限，為能使國家永續發展，建立生態城市是必須努力達到的目標，新建交通工程廣泛使用透水材料是建立生態城市的第一

步。本計畫著重於透水混凝土組合材料特性、配比設計參數、驗證試驗技術及適用項目的探討，經由試拌、試體試驗、及案例分析達到研究目的。本研究乃與國立臺灣海洋大學採合作研究計畫，預計分兩期進行，其研究工作項目如下所示：

第一年工作項目如下：

1. 國內應用發展現況調查分析

包括鋪面工程、港灣工程以及坡地等應用發展狀況

2. 透水混凝土基本組合材料之調查分析

包括現有已使用或待發展之材料、配比、製程、透水及強度等資料。

3. 試驗室配比研究及試體製作與試驗

(1)建立本土透水性水泥混凝土配比設計法則（適用不同的透水組合）

(2)透水係數試驗

(3)強度試驗：抗壓強度、抗彎強度

(4)耐久性及健性試驗：硫酸鹽浸泡試驗

(5)掃瞄式電子顯微鏡（SEM）觀測

4. 透水混凝土技術推廣應用之可行性評估

第二年工作項目如下：

1. 建立透水混凝土之製程與試驗標準。

2. 驗證透水混凝土之最適配比。

3. 路面、擋土牆或邊坡等相關交通工程，擇一種進行現地施作，以驗證透(排)水效果為何。

4. 評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性。

5. 舉辦教育訓練課程。

第二章 文獻回顧

2.1 高性能混凝土

高性能混凝土名稱為世界各國所共用，並為最重要之研究領域與課題，惟其名稱之定義在世界各地均稍有不同，惟一相似者，即各國之定義均著重耐久性。在歐美國家，以強調高強度與高坍度，並達到耐久使用之目標來發展高性能混凝土。在日本，經過多年之整合，終於達成將高性能混凝土區分為三類，即(1)高強度高性能混凝土(2)高流動高性能混凝土與(3)特殊功能高性能混凝土。其中之第(2)項即自填充高性能混凝土，不須搗實即可達到均勻填充之混凝土，第(3)項即包括耐磨低熱、早強等特殊功能之混凝土^[1]。

在國內國科會對高性能混凝土之工作計劃要求為具高工作性、高流動性(坍度>250 mm)之高強度混凝土($fc' > 8000 \text{ psi}$)，並且在混凝土澆置 45 分鐘後仍具坍度 235 mm 之性質。然而，侷限於設計規範之強度限制，國內工程建設仍偏重使用一般強度(中低強度)之混凝土，為達從普及化觀點來全面提升國內混凝土材料品質與施工技術，國科會 HPC 研究群於民國 85 年 12 月 8 日開會討論，提出研發推動本土化中強度高流動高性能混凝土之決議。其規劃 HPC 之特性為 $fc' = 4000\text{--}5000 \text{ psi}$ ，並具有以下之性質，水泥應有每公斤 15 psi 強度以上之效益，水泥用量低於 300 kg/cm^2 ，初期坍度為 $220\pm20 \text{ mm}$ ，坍流度為 $500\pm100 \text{ mm}$ ，45 分鐘後坍度應大於 200 mm ，坍流度在 400 mm 以上，水灰比 ≥ 0.42 ，波索蘭材料 $\leq 30\%$ 為原則之免搗實混凝土^[1]。

另外中華民國結構工程學會之『高性能混凝土特別條款^[2]』，定義高性能混凝土係混凝土經過品質保證技術，確保品質一致性及穩定性，滿足營建工程優良品質之需求。其特別條款乃依據美國混凝土學

會 ACI 318 -95 「結構混凝土」精神及內涵所補充，在使混凝土由規劃設計及配比時能考量有耐久性及能確保最終結構體混凝土品質。目的在確保 HPC 澆鑄之結構物品質，免除蜂窩，泌水及析離等問題，使達到「安全性、耐久性、經濟性、工作性及生態性」之準則。

又依據美國混凝土學會 (ACI-American Concrete Institute) 對「高性能混凝土」之定義，指稱「高性能混凝土」(HPC-High Performance Concrete) 為性質優於傳統混凝土。為其「性質」所指為何未詳述，應可包含強度、彈性模數、工作度、流動性、體積穩定性、耐久性、耐磨性、水密性、完整性及其他特殊功能（如低水化熱）經濟性等。因此所謂高性能乃是針對一般傳統混凝土的施工方式仍無法滿足工程需求的情況下，所開發出來的混凝土，高性能混凝土可能具有一種甚至數種的「高性能」以符合工程的需求。其實可將「高性能混凝土」視為是一個較廣義的工程材料名稱^[3]，而透水混凝土所要求的「高性能」便是「透水」，更明確來說透水混凝土應該是 HPC 的一種。

2.2 生態工法

為保持生態環境之完整，以維持多樣化生物之生存權，需避免棲息地及遷徙路徑等之破壞，則在尊重當地天然條件，及人為設施與環境不相衝圖前提下，妥適導入人類在環境生活中為提供安全所利用的土木工程構造，均可謂「生態工法」。而公共工程委員會生態工法諮詢小組針對生態工法(Ecotechnology)所研擬的定義「基於對生態系統之深切認知與落實生物多樣性保育及永續發展，而採取以生態為基礎、安全為導向的工程方法，以減輕對自然環境造成傷害」。

生態工法包含了「生態」和「工法」兩個部分。生態是指生物和牠們生存的環境之間的互動關係；至於工法則是人類為了生活的安全，在環境中建造土木工程的方法。

生態工法規劃設計時，有 5 個原則要注意^[4]：

1.表面孔隙化

傳統的工程常利用看似穩固的鋼筋水泥作為原料，構成表面光滑建造物，使得動植物沒有附著生長的地方，造成生態嚴重的破壞。若改為使用表面孔隙化的砌石護岸等工程，就能增加生物的棲地，恢復自然生態。

2.構造物最小化

當施行工程時，幾乎所有的構造物都要造成環境的破壞，因此減少人為干擾，也就是減少對環境的衝擊，而同時也能節省經費及能源的消耗。

3.坡度緩坡化

在工程中，太大的坡度會讓生物難以遷移，也容易受到水土的沖刷，所以降低水壩的高度，並以踏步式的固床工來減緩坡度，不僅能保持功能，還能增加親近水的機會。

4.材質自然化

自然的砌石、植被是進行工法時最好的材料，例如利用植草來當作穩定山坡地的材料等方法。自然的材質不僅取得容易，也能提供生物棲息的空間，讓景觀更自然、美觀。

5.界面透水化

水的循環是自然生態最重要的一環。讓水能夠滲入土地，而不直接流入河川、海洋，對水土保持也很重要，因此透水的路面、溝渠、堤岸等，都是生態工程設計的重點。

2.3 國內外透水混凝土的應用

混凝土材料在台灣以及國際間被應用在土木工程上已經有很長的時間，學者和工程師們對於土木工程實務上各項構造物其用途的不同也開發或改良許多新型混凝土，隨著環保意識抬頭，混凝土材料除了考慮耐久性、經濟性、施工性之外，對於環境生態衝擊的因素也漸漸納入研發新材料的考慮重點。

2.3.1 國外應用

美國於 1970 年代開始發展，很多州立的公路行政機構就已經開始採用多孔隙瀝青混凝土路面，其主要目的是為降低噪音和增加因下雨所造成的抗滑，美國公路局在此年代開始，為了摩擦層的功能維持及減少粒料的流失，故在熱拌廠拌合時，於瀝青膠泥中拌入大量的碎石粒料，其直徑為 9.5~12mm，並使用傳統鋪築機鋪設 19mm 厚，這種鋪面的優點是表面有孔隙及增加摩擦力，但因為鋪設的厚度較薄，孔隙較少，所以透水及降低輪胎噪音的效果較小。1979 年的美國佛州 Sarasota 區已經使用無細骨材的多孔隙混凝土建造具有透水性路面的停車場，並且取得透水混凝土專利。此後，透水混凝土在美國開始被推廣應用，例如在 Sarasota 大學附近構築了一條 4 線車道長 1.6 公里的透水路面道路，之後在新墨西哥以及佛州西部地區共修建 53 座透水混凝土停車場。從 80 年代開始，美國開始有透水混凝土預拌廠，佛州於 1991 年成立了『透水性波特蘭水泥混凝土協會』，對於透水混凝土的應用提供技術指導。圖 2.1 為美國透水鋪面應用於停車場之照片 [5] 。



圖 2.1 美國透水鋪面應用於停車場^[5]

日本於 1987 年開始有學者申請透水混凝土鋪築材料的專利，專利內容是使用單一粒徑粗骨材加上微量細骨材配合有機高分子樹脂作為膠結材料，主要應用在公園人行步道和停車場。日本自 1973 年起採用多孔隙瀝青混凝土鋪面，東京都建設局當時為改善行道樹之生長環境，因而開始對人行道透水性鋪面之規劃、設計、施工及後續追蹤調查進行研究；於 20 多年間，共鋪設了透水鋪面 220 萬平方公尺，並以階段性的方式配合政策的推行，於 1986~1995 年間，以每年增加 10~20 萬平方公尺之速度成長，東京都透水性鋪面之推動成果，在日本具有指標性意義，促使日本全國進行透水性鋪面之鋪設，至 1999 年，全國已累積了 1000 萬平方公尺以上的施工實績。圖 2.2 為日本透水鋪面應用於步道之照片^[5]。



圖 2.2 日本透水鋪面應用於步道^[1]

法國使用之多孔隙瀝青混凝土面層，粒料最大尺寸為 10mm 或 14mm 的粒料，其中粗粒料 (2mm 以上) 佔總粒料的 85%，其孔隙率約為 22%，其黏合劑組成範圍很廣，包括瀝青、改質瀝青、橡膠瀝青和添加纖維的瀝青。主要用在恢復人行道鋪面及公路路面，以降低噪音和增加滲漏，並減少路面逕流。法國認為多孔隙瀝青混凝土光使用瀝青，無法抵抗重交通所需的凝聚力及柔性，所以自 1982 年開始採用橡膠瀝青，透水性底部基礎，則使用粒料最大尺寸有 14 mm 和粘結劑如瀝青。跳躍 (gap-graded) 級配的粒料，大多在 10mm 到 14 mm，但是只有很少的礦物填充，一年後，這個高交通流量的城市道路面外表上還是沒有顯示出任何的損壞^[6]。

德國使用之多孔隙瀝青混凝土面層，大多含有 0.5% (重量) 的纖維素纖維 (cellulose fibers)，使用最大尺寸為 11mm 的粗粒料，其中 85% 的粗粒料，保留在 2mm 篩子上，而其厚度大多為 40 mm。目前多孔隙瀝青混凝土在德國，還沒有標準的規格，如同瑞典一樣，多孔隙瀝青混凝土，主要用來減少交通噪音和排水。其多孔隙瀝青混凝土之設計，有 8 mm 和 11 mm 兩種粒料尺寸，其孔隙率約 15%~25%，混合物的瀝青含量 (重量) 大約 5%。此外，其多孔隙瀝青混凝土鋪面層之費用，較傳統路面大約多 100%，而這個費用，主要是用來減少高速行駛在住宅地區附近或其中的公路上所產生的噪音^[6]。

2.3.2 國內應用

目前國內透水性鋪面之發展尚處於研究發展階段，尤其都市化結果不透水面積逐年增加，使的地表保水之效能降低。根據國中小學校園環境調查報告顯示，國內三十五所國中小學校園的地面平均不透水面積，在國中校園高達 69%，國小達 68%，保水現況十分不良，此一趨勢已令相關管理單位正視鋪面透水議題^[6]。

臺南市中華路有試鋪與透水性鋪面面層相同之排水性瀝青路面，

照片如圖 2.3，其添加木質纖維材料，使其有較高黏度，強化路面結構強度，屬於中低承載之路面。另外總面積達一百廿九公頃，位於彰濱工業區，主要設施包括了綜合性能測試道、煞車性能測試道、噪音測試道、綜合耐久測試道、標準不良路、斜坡測試道、滑行暨振動噪音測試道、實驗室等的彰濱試車場暨實驗室，建中工程公司為發展多孔隙瀝青混凝土，在該廠鋪設多孔隙瀝青混凝土鋪面，設計之孔隙率目標值為 20%，並測試各項功能，經測試透水效能達 100ml/sec，透水係數 $3.1 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ ^[6]。



圖 2.3 臺南市中華西路之排水性瀝青路面^[1]

國際間應用透水混凝土作為路面材料，可預見的這種材料也將被應用的更廣泛，但在國內仍未有相關規範，因此大量的研究工作以及分析數據的產出對於國內透水混凝土技術的提升是首要的課題^[6]。

2.4 透水混凝土之定義

透水混凝土為一種多孔隙的複合材料，亦可稱為無細混凝土，可以視為一種骨材粒徑分布在狹窄級配範圍內並且含(無)微量細骨材加上不足量膠結漿體所構成的混凝土，透水混凝土最明顯的特性即質輕且多孔隙。

透水混凝土的構成由裹覆在骨材顆粒外層的不足量水泥漿體與骨材顆粒之間點接觸，相互黏結形成多孔隙結構體，如圖 2.4 所示，在

這種結構之下擁有良好的透水性能($K>10^{-3}\text{cm/sec}$)^[7]，也因為多孔隙的特性而使得力學強度會受到限制，學者鄭與潘曾在2001年對無細混凝土進行抗壓試驗，所得抗壓強度約在1.5MPa至14MPa之間^[8]。增加透水性則犧牲力學強度，兩者往往顧此失彼，但可以依照使用的需求，在透水性能與力學強度上作為取捨以及採取不同的設計。

除上述透水性能以及力學強度特性之外，透水混凝土特性仍有許多由學者^[9,10]研究結果發現透水混凝土亦是有低單位重($1600\sim2000\text{kg/m}^3$)、低成本、低乾縮量(水泥使用量減少)、低熱傳導係數($0.7\text{kcal/m}\times\text{hr}\times^\circ\text{C}$)、無析離現象及透水混凝土中的孔隙直徑平均大於1mm，因此無毛細水現象之特性。

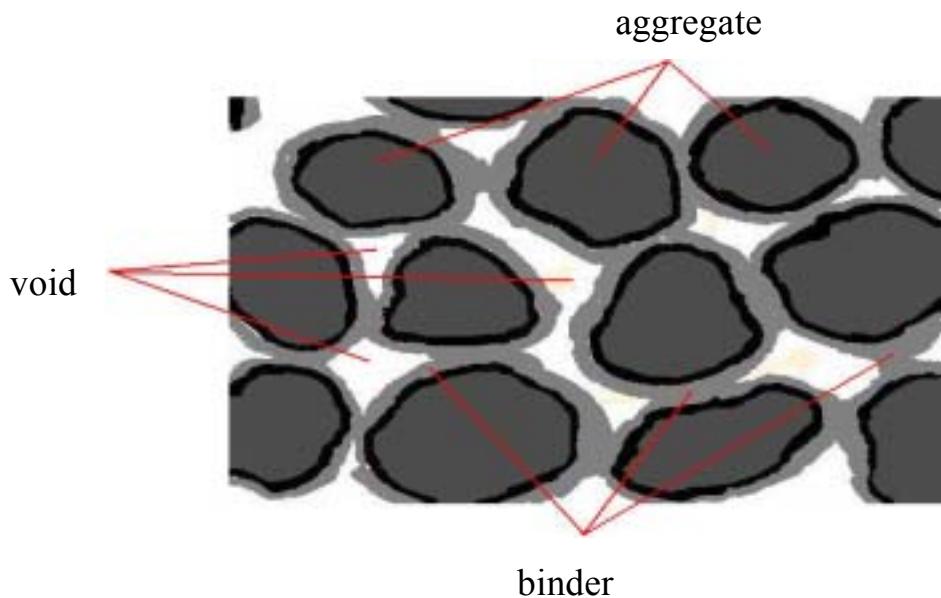


圖 2.4 多孔隙結構體圖

2.5 透水混凝土之組成

透水混凝土組成的材料一般包含有水泥、拌和水、骨材、摻劑。

2.5.1 水泥

波特蘭水泥是一種水硬性水泥，主要由矽酸鈣鹽類所組成。加水後產生化學反應而有凝結與硬固作用，與骨材膠結一起拌合形成一種人造

石材，是土木工程界普遍使用的營建材料。水泥的產製是以石灰質材料與黏土材料（或頁岩）為主，輔以適當的配比而組成，生料再經過研磨、煅燒、急速冷卻等步驟後形成熟料，加石膏研磨後便成水泥。

水泥主要的成份為矽酸三鈣 (C_3S)、矽酸二鈣 (C_2S)、鋁酸三鈣 (C_3A)、鋁鐵酸四鈣 (C_4AF) 等四種主要礦物熟料 (Clinker)。其與原礦物含有之雜質和研磨時加入之石膏共同組成波特蘭水泥。故水泥之成份除含有少量之 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SO_3 及未經水化之 CaO (即游離石灰) 外，主要者為 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等四種，而此四種主要成份隨著煅燒的時間與溫度之變化組成 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 等四種主要化合物 (或稱單礦物)；這四種成份息息相關。這四種成份與混凝土性質相關，此四種化合物在水化過程中之特性如表 2.1 所示。

1. 水泥水化機制

水泥與水接觸後，其主要成份間之水化速率以 C_3A 最快、 C_3S 次之，再者為 C_4AF ，而 C_2S 最慢。水泥在水化時，大致上可粗分為五個階段，其各階段間的反應過程行為與特徵如下表 2.2 所示^[11]。

表 2.1 水泥主要成份特性表

成份	含量 %	特性	ASTM C150 規定
C_3S	25~60	是混凝土產生強度主要的因素，對於早期強度貢獻大，但水化過程中會產生高水化熱	於低熱水泥中含量需小於 35%
C_2S	15~50	提供混凝土晚期強度，含量較多時會影響混凝土早期強度，水化熱低，對於混凝土體積穩定性有幫助	於低熱水泥中含量需大於 40%
C_3A	4~12	活性大且水化速度快，加速水化早期的凝固，易因瞬凝而降低工作性；水化熱高，對於混凝土體積穩定性影響大	含量不宜過多，除早強水泥外，其餘皆小於 8% 以下
C_4AF	5~12	水化反應最慢，故水化熱低，早期強度亦低；抗硫性也差	抗硫水泥應小於 20 %

表 2.2 水泥水化時之行為與特徵

階段名稱	反應行為
初期階段	<ol style="list-style-type: none"> Ca²⁺與OH⁻等離子不斷釋出及液相逐漸改變，並大量放熱 C₃S 進行初期水化 液相組成之改變影響此階段之凝結狀態 C₃A 與石膏形成六角形針刺狀鈣鈦石 (AFt) 及C₃A 雜相水化物 鋁酸鹽類與石膏於初期迅速溶解並反應
潛伏期	<ol style="list-style-type: none"> 鈣鈦石 (AFt) 及AFm 繼續形成，並影響凝結時間及工作性 CH 晶體及C-S-H 膠體早期水化物形成 放熱速率降低而黏滯性繼續增加 此階段末期由矽酸鈣水化狀況決定初凝時間 Ca²⁺離子增加，矽酸鹽減少，Ca²⁺集中並達到飽和狀態
加速期	<ol style="list-style-type: none"> 放熱速率升高 過飽和Ca²⁺離子濃度降低 水泥漿體從塑性 (Plastic) 逐漸達剛性 (Rigid) 早期強度開始形成 終凝發生於過程開始後約1至2小時 水化產物之快速形成導致水泥漿體固化及孔隙減少 C₃S快速化學反應，形成C-S-H 膠體及CH 晶體 鈣鈦石繼續緩慢形成而且依A/S 比例開始轉換成AFm

表2.2 水泥水化時之行為與特徵(續)

階段名稱	反應行為
減速期	<ol style="list-style-type: none"> 漿體孔隙繼續減少，而水化物之顆粒與顆粒之間逐形成鍵結而具有早期強度 放熱速率降低 C₂S 水化作用變為較明顯 C-S-H 及CH 之形成由化學控制改為擴散控制 鈣鈦石完全轉換成AFm
穩定狀態	<ol style="list-style-type: none"> 漿體孔隙繼續減少，強度繼續增加 體積穩定性及耐久性逐漸增加 抗潛變 (Creep) 能力依齡期增加而遞增 水化作用為擴散控制，強度發展趨勢漸緩形成穩定狀態 由漿體孔隙及水化物鍵結形態來決定極限強度 水化產物緩慢形成

2.5.2 骨材

骨材是透水混凝土主要的骨架構，亦是提供主要強度的相位之一，骨材包含普通骨材(礫石、卵石、砂)或特殊骨材(輕質骨材、回收營建材料^[12]等等)。為了保證透水混凝土的透水性能與力學強度，且骨材顆粒級配是決定整體透水性能與力學強度的主因，粗骨材通常採用顆粒較小的單一粒徑級配，於 10~20mm 或 5~10mm^[13]如表 2.3 所示。此外對於碎石型骨材中針片狀顆粒應盡量減少，骨材含泥量應不大於 1%。

表 2.3 各個國家推薦或採用透水性混凝土路面之骨材級配^[13]

英國	篩孔/mm		14	10	6.3	3.3	0.075
	過篩率/%		100	90-100	45-95	10-20	2-5
法國	篩孔/mm	25	19	12.5	6.3	3	0.075
	過篩率/%	100	90	40	25	20	4
南非	篩孔/mm		13	10	6.73	3.36	0.074
	過篩率/%		100	90-100	40-45	22-28	3-5
日本	篩孔/mm		13	5	2.5	1.25	
	過篩率/%		100	50-100	8-25	0-6	

2.5.3 摻劑

透水混凝土除了骨材、水泥、水這些基本材料外，通常會加入其他輔助或改善其性質的摻劑。例如添加一定量的增強劑，有助於提高水泥漿與骨材之間介面強度；添加一定量的減水劑可減少拌和水用量，降低水灰比來提升力學強度；添加增黏劑來增加水泥漿體的黏稠度，藉以提高施工面表層的平整；低氣溫狀況下可添加早強藉以加速透水混凝土的硬化；或為了使透水混凝土更加美觀，添加著色劑增加色彩獲得視覺享受。

2.6 透水混凝土膠結材料的組合

透水混凝土中提供力學強度者除了骨材外，膠結材料亦是另一重

要相位，若是膠結漿體的力學強度有所提升，對於整體強度是有正面助益。一般而言，透水混凝土膠結骨材的膠結材料通常為水泥漿體，若以卜作嵐材料取代部分水泥，不僅可以增加漿體之黏稠性達到良好包裹骨材之效果，防止垂流增加透水能力，更可藉由卜作嵐反應提升膠結材料之強度，進而提供透水混凝土更高之力學特性，因此膠結材料之組合亦為透水混凝土提升透水能力與力學特性要素之一。

2.6.1 添加卜作嵐材料之水泥漿體

2.6.1.1 卜作嵐反應

卜作嵐材料係指可以發生卜作嵐反應的材料，如火山灰、煉鋼廠產生的爐石、稻殼灰、飛灰、矽灰以及偏高嶺土等等，分類如表 2.4 所示。

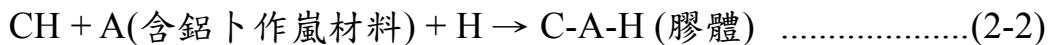
表 2.4 卜作嵐材料分類^[14]

來源	SiO ₂ 之形狀	類型	石礦	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)
天然 卜作 嵐材 料	玻璃狀顆粒	火山灰類		65	13	4
			火山灰 (Pozzolana)	45~60	20	2~10
		火山土 (Rock)	55	10~20	2~5	
	玻璃質混合	熔岩	凝灰岩 (Tuffs)	-	-	-
			火山岩 (Rhyolites)	-	-	-
		泥土	矽藻土	85	5	少量
人造 卜作 嵐材 料		煅燒土壤	偏高嶺土 (Meta-Kaolin)	50~90	5~25	0~5
	玻璃質顆粒	飛灰	C 級	50	20	0~5
			F 級	50	25	10~15
	非結晶	矽灰	微小矽質	85~98	0~5	少量
		稻殼灰		85~98	-	少量

卜作嵐材料含有活性的矽、鋁質，本身不具有膠結能力，但會與水泥水化反應所產生的氫氧化鈣 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 產生反應，生成具有膠結性的 C-S-H 膠體。當卜作嵐材料混合水泥參與拌和之後，消耗水泥水化時所產生強度較低的氫氧化鈣晶體，生成可增加膠結強度的 C-S-H 膠體(式 2-1)，因此提升水泥硬固後的力學強度，此反應稱為卜作嵐反應。



不同的卜作嵐材料組成之中亦有鋁酸鹽類的存在，則產生類卜作嵐反應(2-2 式)：



C-A-H 膠體特性會隨著鋁酸鹽類的含量而有所不同，該膠體亦有可能與硫酸鹽類反應產生鈣釤石，因此卜作嵐材料若使用在高硫化物環境之下，則鋁酸鹽的含量應加以限制^[15]。

以 2-1 式而言，式中主要是由活性的矽酸鹽與水泥水化產生之 CH 緩慢作用而產生 C-S-H 膠體，該膠體與波特蘭水泥中矽酸鈣生成反應相似，也會凝結並且提供強度。因此卜特嵐材料替代混凝土中部分的水泥除提升強度之外，亦有下列優點：

1. 加速矽酸鈣等礦物水化^[16,17]。
 2. 較細顆粒之卜作嵐材料可以提供較佳的工作性與塑性。
 3. 減少因高水泥使用量產生的水化熱以及體積乾縮量。
 4. 增加介面區的膠結力^[18,19]。
 5. 降低或減少由於鹼骨材反應所造成的膨脹效應^[15]。

2.6.1.2 砂灰特性與應用

矽灰屬於諸多卜作嵐材料中的一種，研究^[20,21]指出矽灰是一種細度極大的卜作嵐材料，其成份為高含量活性或細球型顆粒的二氧化矽，約佔總重量的 85%~98%，其餘為少量的金屬化合物。典型的矽

灰比重約在 2~2.5 之間，遠小於波特蘭水泥的 3.15 平均粒徑約為 $0.1\mu\text{m}$ ，約為波特蘭水泥顆粒的 1/100 倍，粒徑分佈相當分散。矽灰可與氫氧化鈣起化學反應，反應式如下：



矽灰是生產矽金屬或鐵矽合金過程中，從排氣煙道的鍋爐表面燃燒區歷經 2000°C 的高溫電爐中冶煉矽石、焦炭和生鐵時，部分矽與空氣中的氧生成一氧化矽氣體，再進一步氧化成二氧化矽，所產生的二氧化矽蒸氣經凝結冷卻收集後，即可得到白灰色、圓球狀的矽灰，比表面積約為 $20,000\text{m}^2/\text{kg}$ (以氮吸附方式量測)。主要生產國家有中國、美國、加拿大、西班牙、澳洲、挪威及南非等國。添加矽灰會增加收縮裂縫，因此，在添加矽灰的新拌混凝土中，需將混凝土表面快速覆蓋，以阻止水份散失，同時矽灰有極大的表面積，對水有很大的親和力，因此添加之矽灰量和需水量之間有密切的關聯性，在固定坍度下需水量會隨矽灰用量增加而增加。例如，混凝土以水膠比 0.6、0.4 拌製時，其需水量幾乎正比於矽灰量的增加。在混凝土中用矽灰來取代部份水泥時，可以大量減少泌水。而矽灰取代量增加也會使坍度損失增加，在水泥砂漿中以矽灰取代水泥時，水泥砂漿界面區的微觀結構有重大的改變，整體結構變得較均勻且緻密，沒有大量的 CH 或孔隙出現，這種現象是由於矽灰與氫氧化鈣反應所致。矽灰混凝土中矽灰的含量愈高，其水泥砂漿和水泥漿的抗壓強度比一般混凝土為高，此乃因矽灰可改善矽與膠體間的黏結力所致。

2.6.1.3 矽灰之反應機理

矽灰在混凝土中，有助於強度的發展主要有三方面：

- 1.其粒徑極小，可填充水泥之間的孔隙增加緻密性，矽灰混凝土在骨材-漿體界面處有良好結合。
- 2.與水泥水化產生的氫氧化鈣進行卜作嵐反應，增進強度同時也可藉著移去水泥水化物加速水泥的水化作用。

3. 膠結漿體中的氫氧化鈣有集中於骨材顆粒周圍的傾向；矽灰的加入會在骨材表面形成矽灰鍍層(Silica Fume Coatings)，且此行為並不受骨材表面性質及水灰比的影響。此矽層並可與氫氧化鈣持續反應形成膠結物，使漿體與骨材之間的交界區發展成更加緻密且均勻。

在高水膠比時，矽灰具有圓球狀的基本粒子，因而產生潤滑效應，有助漿體工作度的增加；但在低水膠比時由於其比表面積大，需要更多水的包覆，反而不利其工作度。卜作嵐反應係 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在矽群(silica groups)的表面產生化學吸附的作用，這是因為溶液 pH 值較高，使二氧化矽溶解與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反應，而在二氧化矽的表面形成 C-S-H 水化物層。

由研究指出^[22,23]，卜作嵐反應會隨著時間的增加而緩慢、持續的進行，它是藉著不斷消耗易溶之 CH 生成穩定的 C-S-H 膠體，可填充混凝土之孔隙使微結構緻密化，增加耐久性。雖然部份卜作嵐材料對早期強度有負面影響，但對長期強度及耐久性而言卻有很大的貢獻。

2.6.2 鹼活化爐石粉漿體

鹼活化膠結材料最早是在俄國開發的，因為這種材料具有不可思議的硬化特性以及非常緻密的結構，所以被稱為是人造岩石。在 1960 年代，這種材料的研發大約僅是在東歐、中國大陸等共產國家；然而，在 1980 年代以後，西歐、美國等先進國家也漸漸地注意到這種新的膠結材料，而開始進行研究。1990 年以後，特別是在接近 2000 年的最近這些年，大量的文獻才開始出現在國際知名的期刊。表 2.5 簡要說明在各階段發展的重要文獻資料^[24]。

2.6.2.1 爐石性質

爐石主要是在煉鋼過程中，高爐所併同產出的工業副產品—「高爐渣」，再以兩種不同的方式將高爐渣由高溫狀態降至室溫：一為置於空氣中，令其自然冷卻，稱為「氣冷爐石」；另一方式，則是自高爐移

出後，立即灑水使其急速冷卻，稱為「水淬爐石」，再經研磨篩析處理後，即為水淬爐石粉。水淬爐石粉含有一些典型的化學氧化物，如表 2.6 所示，其中主要成份為 SiO_2 及 CaO ，在圖 2.5 中 C-S-A 系統相位圖可發現爐石與水泥成份非常接近，所以同時具有膠結性及波索蘭反應二種特性。

表 2.5 鹼活化膠結材發展歷程

Author(s)	Year	Significance
Feret	1939	slags used for cement
Purdon	1940	alkali-slag combinations
Glukhovsky	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements
Glukhovsky	1965	first called "alkaline cements" because natural substances used as components
Davidovits	1979	"Geopolymer" term-emphasizes greater polymerization
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized
Forss	1983	F-cement(slag-alkali-superplasticizer)
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized (Roman,Greek,Cyprus)
Davidovits and Sawyer	1985	Patent leading to "pyrament"
Krivenko	1986	D.Sc. Thesis , $\text{R}_2\text{O-RO-R}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$
Malolepsy and Petri	1986	Activation of syntheric melilite slags
Malek et al.	1986	Slag cement-low level radioactive waster forms
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared

表 2.6 爐石與波特蘭水泥之典型化學成分比較^[25]

氧化物 種類	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	氧化鹼 (%)	燒失量 (%)
爐石粉	28~38	8~24	1~3	30~50	1~18	—	—
波特蘭水泥	21	6	3.3	64	2.0	—	1.1

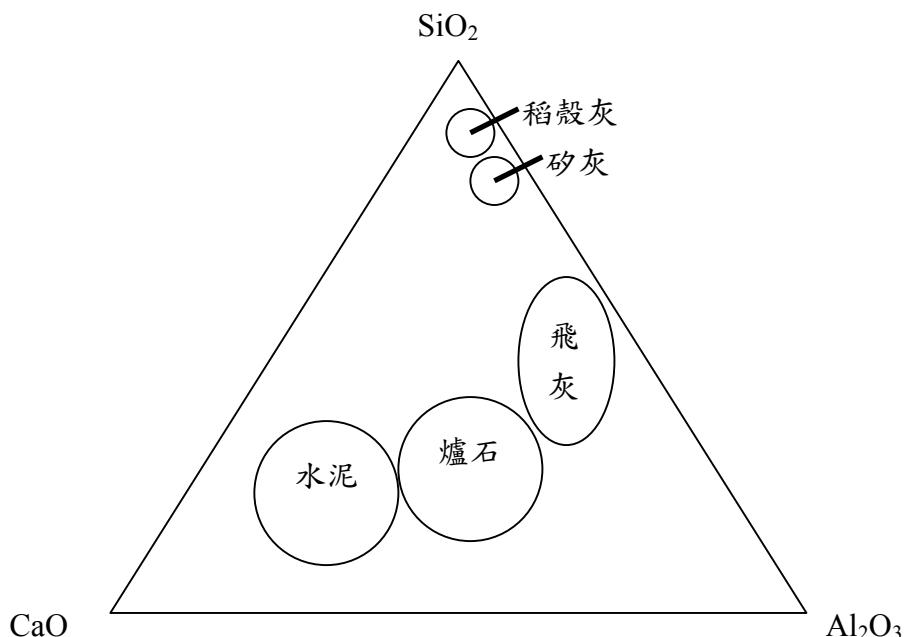


圖 2.5 水泥及卜作嵐材料在 C-S-A 系統之相位圖^[25]

針對激發爐石粉本身潛在的膠結性，Palomo^[26]等學者指出有兩種方式，第一種方式是與波特蘭水泥混合使用，藉由普通波特蘭水泥水化反應後所產生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 與爐石粉中的 SiO_2 生成 C-S-H 膠體，即為波索蘭反應，其反應方程式如下：

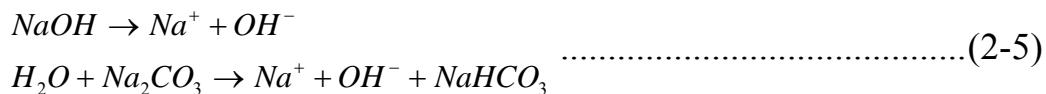


這也是目前營建業使用爐石的主要方式。許多文獻顯示正確適量的使用爐石粉有助於改善新拌混凝土工作度、降低水化熱及增加晚期的強度^[27,28]；Osborne 進行波特蘭爐石水泥混凝土耐久性試驗，結果顯示混凝土中添加爐石粉可降低氣體滲透與氯離子滲透係數，並增加對硫酸鹽侵蝕與增加鹼質與粒料反應的抵抗力等^[29]。

第二種方式，乃是直接使用純爐石作為主要的膠結材料，但是由於純爐石的顆粒結構穩定，單以水之極性不足以打散爐石的化學鍵結構，須加入以更強極性之離子才足以促使爐石發生水化反應，目前的做法乃是加入鹼性溶液，來激發水化反應進行，由文獻中前人的研究可以發現此一方式所製作的試體，在各項性質^[30]上均比前者要優良許多。

2.6.2.2 鹼活化爐石粉水化歷程

爐石中含有鹼土金屬氧化物、中性氧化物和酸性氧化物，其體系為 $RO-R_2O_3-SiO_2$ 系，其中 RO 為 CaO 、 MgO 等鹼土金屬氧化物， R_2O_3 為 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 等中性氧化物，根據氧化物的含量，爐石可以簡化為 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 系的玻璃質，和波特蘭水泥相比，爐石的水化有著顯著不同，這是由於爐石的結構聚合度高，離子化程度低，水的極性不足以將爐石的結構破壞，形成更穩定的結構單位。因此，純水並不能使爐石產生水化，不過在鹼性溶液中(特別是鹼金屬化合物溶液)，因溶解度高，這些化合物將解離出大量的 OH^- 離子，成含鹼金屬正離子和 OH^- 的溶液，以 Na 的化合物為例有：



這些具有強大離子力，足以破壞 $Si-O-Si$ 、 $Si-O-Al$ 、 $Al-O-Al$ 等共價產生斷裂的 OH^- 離子，數量愈多，它們對爐石中的玻璃體和礦物產生強烈的破壞作用，使其結構解體，產生 SiO_4^{4-} 和 AlO_4^{5-} 離子和 Ca^{2+} 、 $Ca(H_2O)^{2+}$ 或 $Ca(H_2O)(OH)^+$ 離子。根據 Zhon^[27] 對爐石水化過程與波特蘭水泥水化過程所做的研究發現，兩者在水化過程極為相似，但其水化產物卻大不相同，如表 2.7 所示。

爐石水化放熱歷程，則如圖 2.6 所示，可看到兩個高點，第一個點發生在數分鐘內，表第一階段，為水玻璃中之矽酸根離子與從爐石粉中解離的鈣離子反應，產生 C-S-H 膠體。當爐石顆粒被新的 C-S-H 膠體包圍時，水化反應被抑制，進入第二階段。鹼活化劑 pH 值降低時，第二高點發生在數小時後，但 pH 值增加時，第二高點的時間將縮減，幾乎與第一高點重疊，這階段主要為鋁酸根及矽酸根離子與一價或兩價之金屬根離子反應，產生另一種水化膠體，接著，由於鈣離子與矽離子從爐石中溶解，它們在溶液的濃度可能超過矽酸鈣水化物的濃度，進而進入減速階段，當水化產物厚度越來越厚、自由水量減少，使反應速率持續減緩，進入衰退階段。

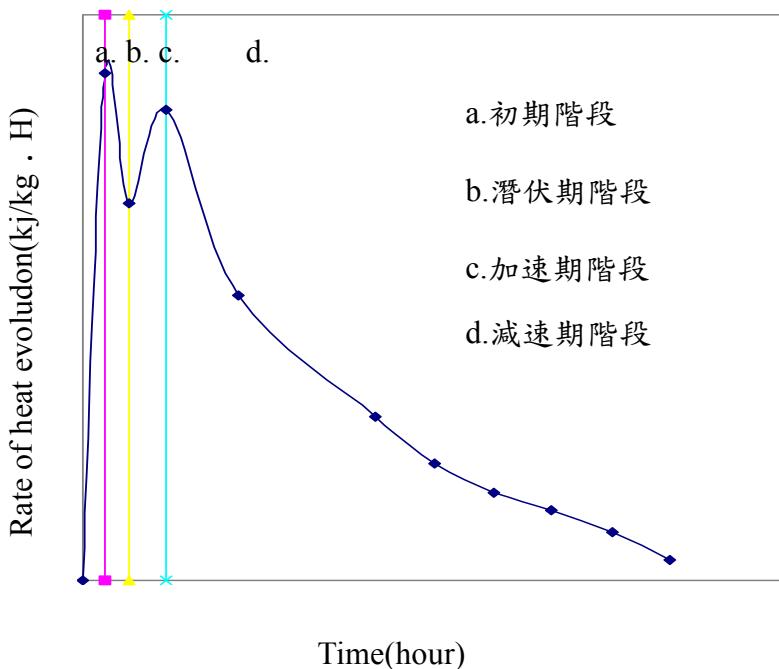


圖 2.6 鹼活化爐石粉漿體水化歷程^[18]

表 2.7 鹼活化爐石水化產物與水泥水化產物^[32]

膠結材種類	水化物名稱	結晶化學式	化學式	溶解度(Kg/m^3)
鹼活化爐石	C-S-H(I)		$5\text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	0.05
	硬矽鈣石	$\text{Ca}(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2$	$6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	0.04
	白鈣沸石	$\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$	0.05
	水石榴石		$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	0.02
	杆沸石	$\text{NaCa}_2(\text{Al}_5\text{Si}_6\text{O}_{20}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaO}_2 \cdot 4\text{CaO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	<<0.05
	水霞石		$\text{NaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02
	鈉沸石	$\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02
	方沸石	$\text{Na}_2(\text{AlSi}_2\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{NaO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.02
波特蘭水泥	氫氧化鈣		$\text{Ca}(\text{OH})_2$	1.3
	C_2SH_2		$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	1.4
	C-S-H(I)		$5\text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	0.05
	鋁酸四鈣		$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	1.08
	水化鋁酸三鈣		$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.56
	水化硫鋁酸鈣		$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$	極高

2.6.2.3 鹼活化爐石粉混凝土配比設計

由於鹼活化爐石粉混凝土並無配比設計規範，必須模仿普通混凝土配比設計的方法計算配比。在傳統的混凝土的配比設計觀念中，三個無因次參數 Sand/Aggregate 比、Water/Cement 比與 Binder/Aggregate 比，決定普通混凝土的性質，對應於鹼活化爐石粉混凝土，則為 S/A 比（細骨材/骨材）、L/Sg 比（鹼活化液體/爐石粉）與 B/A 比（膠結材/骨材）。

本研究第二部份變換透水混凝土中之漿體，係採用鹼活化液體與爐石粉拌製之鹼活化爐石漿體，因此僅採用上述三個無因次參數中的 L/Sg（鹼活化液體/爐石粉）比來作為漿體參數設計的依據。

2.6.2.4 鹼活化爐石粉混凝土之速凝問題

目前鹼活化爐石粉混凝土尚無法應用於工程建築上的主要原因為：速凝與工作度問題。鹼活化爐石粉為一優良之水硬性材料，可用來製作高強度耐久性混凝土，但這種優點往往帶來凝結時間過快的問題。目前，這問題尚無法很有效的解決。速凝的原因^[29]主要為鹼活化劑中的化學成份在爐石漿體中迅速解離出來，形成具有強大離子力的 OH⁻離子，對爐石中的玻璃質成份造成強烈的破壞作用，使爐石迅速水化，在短時間內形成大量的 C-S-H 膠體，造成速凝現象。

影響鹼活化爐石粉混凝土性質的因素大致上與爐石活性、鹼活化劑種類與濃度有關。就爐石活性而言，酸性爐石（含磷成分的爐石）凝結時間較慢且激發的強度較低，因此強度發展亦較差。為了有效控制爐石的品質，CNS 12549「混凝土及水泥墁料用水淬高爐渣料」對爐石粉之成份標準規定如表 2.8 所示。

表 2.8 CNS 12549 對爐石粉的化學成份標準規定

化學成份	要求
硫化物硫(S)最大值，，%	2.5
硫酸鹽離子(以 SO ₄ ²⁻ 表示)，%	4.0

限制爐石中 S 與 SO_4^{2-} 含量的主要目的，是在避免混凝土中使用爐石時，過多的硫化物與硫酸根會與水泥中的鋁酸三鈣(C_3A)或單硫型鋁酸鈣，共同水化或結合生成鈣礬石，因而降低混凝土的強度和影響混凝土體積的穩定性等。CNS 12549 針對爐石粉的物理性質作更進一步的規定，如表 2.9 所示，水淬爐石品質的優劣，亦可依 CNS 12223 或 JISR 5211 規範，從水化模數判定，公式如下：

$$\text{水化模數} = \frac{CaO + MgO}{S_iO_2} = Al_2O_3 \geq 1.4 \quad \dots \dots \dots \quad (2-6)$$

水化模數可由水淬爐石研磨成粉，以化學分析計算得之，依據工程經驗水化模數最好能達到 1.85 以上較為理想，其主要原因是水化模數越高，玻璃質亦高，未來強度成長也就越高。

表 2.9 CNS 12549 對爐石物理性質的標準規定

試驗項目	要求	
以試驗篩 0.045mm, CNS 386 最大值%	20	
比表面積 CNS 2924 最小值(m^2/kg)	380	
爐石墁料之空氣含量最大值%	12	
爐石活性指數： 7 天指數最小值, %	最近連續五個試樣平均值	任一個別試樣
80 級	—	—
100 級	75	70
120 級	95	90
28 天指數最小值%		
80 級	75	70
100 級	95	70
120 級	115	110

就鹼活化劑種類而言，目前常用的鹼活化劑種類有三種：矽酸鈉、碳酸鈉與氫氧化鈉。其中碳酸鈉可獲得較佳的凝結時間，因為其本身pH值偏低，造成反應速率低與強度成長慢，然而，在晚期強度上可比以氫氧化鈉為鹼活化劑的試體要來的高，這是受到 CO_3^{2-} 離子的影響，

因為 CO_3^{2-} 離子會與爐石粉生成 $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 化合物，使試體的結構強度提高。

就鹼活化劑濃度而言，文獻^[34]指出，鹼活化劑濃度對爐石水化歷程與結構強度發展是第二重要的因素，當鹼活化劑濃度增加，其結構強度亦有範圍的增加，低濃度的鹼活化劑，結構強度將會偏低並且水化速率不快，而高濃度的活化劑卻可以增加結構強度與加速凝結時間。

針對速凝這問題，蘇聯學者^[33]在 70 年代開始就進行一連串的研究，並得出結論：常用的波特蘭水泥緩凝劑對於鹼活化爐石粉的緩凝作用可說是甚微或完全無作用。蘇聯學者又採用有機矽表面活化劑作為緩凝劑，試圖在爐石粒子與鹼活化劑之間建立起有機矽物質薄膜，以阻止爐石粒子與鹼活化劑之間的反應，它們的摻入雖對凝結時間有所延緩，但始終未能達到 ASTM C191 對凝結時間的要求。Talling、Brandstetr^[35]與 Davidovits^[36]嘗試在鹼活化劑中加入硼酸鹽類與磷酸鹽類，結果大幅延長鹼活化爐石粉試體的凝結時間，但他們並無解釋內部之水化機理。Gong 和 Yang^[37]根據 Talling、Brandstetr 與 Davidovits 的想法，於鹼活化劑中加入磷酸鈉，結果如圖 2.7 所示，圖中可以發現只須添加少量的磷酸鈉即可大幅延長凝結時間，甚至已達到 ASTM C191 規定。

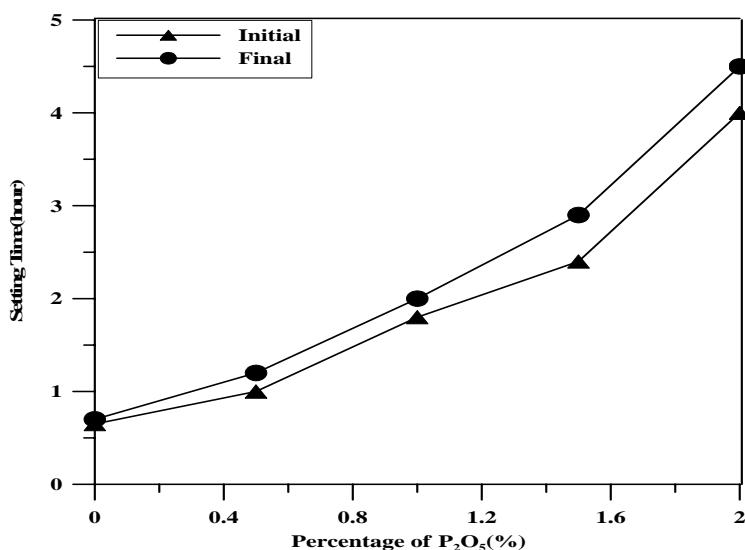


圖 2.7 P_2O_5 含量對鹼活化爐石粉漿體凝結時間之影響

Gong 和 Yang 更進一步利用 X 光繞射分析各齡期的水化產物，如圖 2.8 所示。比較圖 a 與圖 b 可以發現一些不同的尖峰值，再利用 SEM 與 EDS^[38]分析這些尖峰值的水化產物，在 SEM 中可以看到一些纖維狀的水化產物($(\text{Ca; Na})\text{O} \cdot (\text{Si; Al})\text{O}_2 \cdot \text{Y}(\text{Ca; Na})\text{SO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)，這些產物將爐石顆粒包覆，使爐石顆粒與鹼活化劑短時間隔離，達到緩凝效果，如圖 2.9 所示。事實上，也有人利用果酸、鹽酸等弱酸^[39]來降低鹼活化劑中的 OH^- 離子來達到緩凝效果。

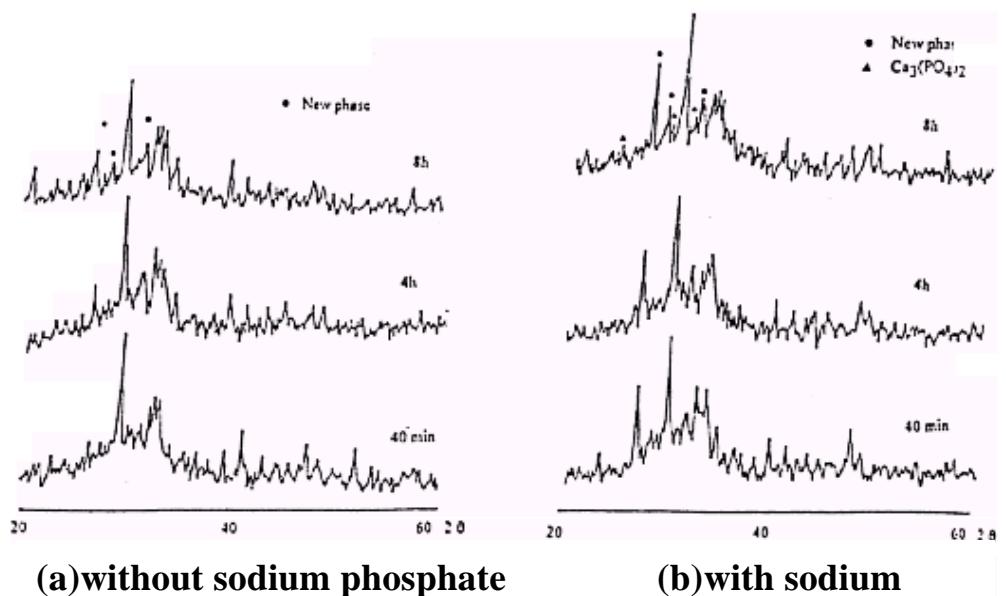


圖 2.8 鹼活化爐石粉漿體之 X 光繞射結果

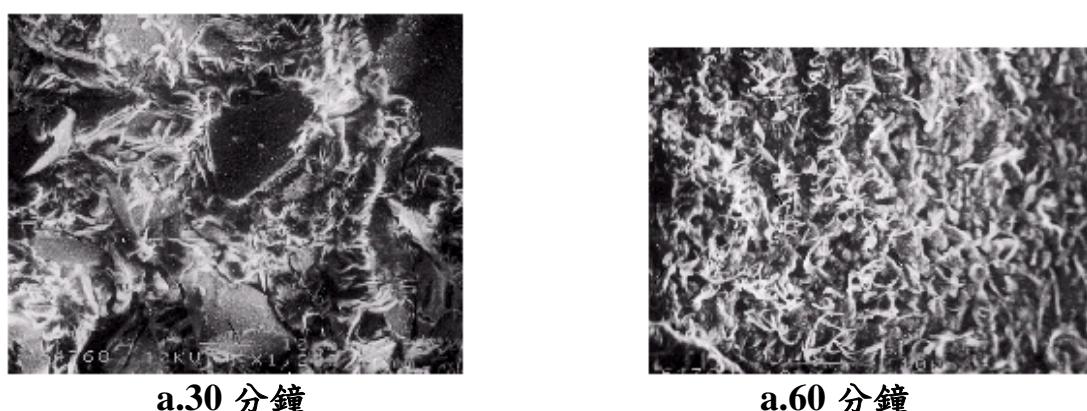


圖 2.9 鹼活化爐石粉漿體的 SEM 結果^[33]

2.7 透水混凝土之設計方法

透水性混凝土在目前為止並無成熟的設計方式，但依照透水混凝土所使用的目的，可以由透水混凝土內的孔隙結構著手。首先，透水混凝土是骨材堆積在一單位體積之中，由骨材的點對點所堆積的特殊結構，並存在許多孔隙，設計的原則即為將骨材顆粒表面由黏結的漿體包裹，並且將骨材顆粒相互黏結，形成一個保有孔隙且具有力學強度的混凝土。膠結漿體的設計量並不須完全充滿此單位骨材中的所有孔隙，而漿體的使用量是可以依據所需的透水性能和力學強度做權衡設計的。

由學者楊靜所建議，一立方公尺透水混凝土的重量應為骨材緊密堆積之重量與單方水泥用量加上拌和水量之和，約在 1600-2100kg 範圍內，根據此原則可以初步確定透水混凝土的配比。

1. 骨材用量

一立方公尺透水混凝土中粗骨材總量可以取最緊密堆積的骨材重量，大致在 1200-1400kg 之間，主要使用粗骨材，若需使用細骨材，則細骨材使用量控制在粗骨材之 20% 之內。

2. 骨材粒徑

骨材粒徑是決定透水混凝土中孔隙體積重要因素之一。骨材粒徑亦影響透水混凝土的力學強度甚鉅。

由理論推斷，若骨材形狀接近圓形的理想狀況之下，單位體積內骨材堆疊所產生的孔隙體積是相同的，不同之處在於孔隙的大小。大粒徑的骨材堆積之下的孔隙必定大於小粒徑骨材堆積所產生的孔隙。主導透水性能的連通孔隙直徑越大則透水性能會較佳，反之則較差。以力學強度觀點，骨材粒徑較小，單位體積中的骨材顆粒數量必定大於骨材粒徑大者，因此單位體積中透水混凝土內骨材接觸點數量增加的情形下，力學強度是會向上提升的。

因此，骨材粒徑的選用關係到透水混凝土的透水性能以及力學強度，故可以依照透水混凝土使用的目的來設計選用骨材粒徑。

3. 膠結材料用量

透水混凝土之膠結材料通常使用波特蘭水泥，但為了整體強度的考量，會有添加礦物摻料亦或者使用其他漿體來取代水泥漿體。以水泥漿體而言，若保證在最佳用水量的狀況之下，增加水泥用量是可以提升水泥漿體的稠度和增加裹覆在骨材顆粒周圍的漿體厚度，此舉可以有效地提升透水混凝土的力學強度。但若水泥使用量過大，會使得漿體體積增加，進而減少骨材之間的孔隙率，因而損失透水性能。

同時水泥用量亦受到骨材粒徑影響，若骨材粒徑較小，則骨材表面積較大，此時可適當增加水泥用量。通常透水混凝土水泥用量在 $250-350 \text{ kg/m}^3$ 範圍內。

4. 水灰比

水灰比在水泥漿體性質中扮演相當重要的角色，水灰比關乎水泥漿體硬固後的力學強度，也關係著水泥漿體的工作性。

良好的水灰比設計，使得工作性良好，可以使得水泥漿體充分裹覆在骨材顆粒周圍，在透水混凝土硬固後展現優良的力學強度。倘若水灰比過高，透水混凝土較不容易有高力學強度，此外漿體流動性過高的狀況下，不易裹覆在骨材周圍而因重力影響向下流動，產生垂流現象。漿體垂流至透水混凝土底部硬固後，會造成透水性能喪失，骨材顆粒因漿體垂流而無法被漿體均勻裹覆，力學強度也會受到折減。

此外，為了提升力學性能而使用過低水灰比的漿體，會造成漿體過於黏稠，工作性差且不易於拌和。過於黏稠的漿體會使得骨材產生團簇的現象，使漿體在透水混凝土之中分佈不均，極有可能阻斷透水路徑，分佈不均的漿體也會讓透水混凝土內部形成許多缺漿的弱面，而使力學強度大為折減。

良好的水灰比區間可以透過實際拌和求得，通常界於 $0.25-0.35$ 之間，最佳水灰比通常有兩種確定方法：

- (1)在骨料與水泥用量一定的狀況下，從小至大選定數組不同水灰比分別拌製混凝土，再以試驗測定其抗壓強度，繪製 $W/C-f$ 曲線，求出最大抗壓強度所對應的水灰比即為最佳水灰比。
- (2)實際工作中常依據經驗判定水灰比是否合適，取一些拌和良好的新拌透水混凝土進行觀察，若水泥漿在骨材顆粒表面均勻裹覆，沒有水泥漿體下滴的情形，而且顆粒有類似金屬光澤，則說明此水灰比較為合適。

5.工作性檢驗

透水混凝土拌合物因為水灰比限制，通常顯得乾硬，一般建議使用 VB 稠度指標來衡量，建議 VB 值在 10-20s 較為合適。在初步配比計算之後，試拌並且測定拌合物的工作度，即可驗證配比設計是否合理。

第三章 國內應用發展現況調查分析

3.1 現地調查-鋪面工程

3.1.1 國內常見透水鋪面種類

國內常見的透水鋪面有：(1)透水磚(2)植草磚(3)透水樹脂混凝土(4)JW 工法(5)透水瀝青混凝土等，這些鋪面大部份應用於人行道、自行車道、車道、停車場等。茲針對上述的透水鋪面作簡單的介紹：

1.透水磚^[40]

目前市面大部分為環保透水磚，其材料可利用廢棄的陶瓷、長石、高嶺土、黏土等礦物的粒狀物和漿體拌合，壓製成塊體，經高溫煅燒而成。這些廢次品來製造，一方面可以降低其製造成本，另一方面又可再利用這些廢次品，使廢次品轉變成另一種具有經濟性的產品，透水磚本身具有連通的小孔隙，藉此使雨水能向下透水。

2.植草磚^[41]

植草磚是穿洞的混凝土，主要有兩種設計類型(1)網狀型(2)城堡型。植草磚之規格需依照規範 ASTM C 1319-95 (格子地磚特殊規格)。植草磚本身並不透水，是藉由中間穿洞 (植草部分) 以及磚與磚之間的接縫使雨水能快速滲進土壤內，已達到透水效果。

3.透水樹脂混凝土

透水樹脂混凝土是以樹脂取代傳統混凝土中的水泥及水，是一種特殊型式的多孔混凝土，去除混凝土中的細粒料，僅利用有限的樹脂將粗粒料黏結，維持混凝土內部孔洞的連續性。目前，透水樹脂混凝土多應用於公園廣場、慢跑步道等輕承載區域。

4.JW 工法

JW 工法為國內『品岱股份有限公司』董事長陳瑞文(Chen, Jui-Wen)所研發的一種新工法。主要是利用在鋪面設計排水孔，經由排水孔連接面層底下的排水管，藉此快速的將鋪面上的水向下排除。

5.透水瀝青混凝土^[42]

透水瀝青鋪面是一種具有環保性、經濟性與生態性的新鋪面技術，與傳統瀝青相同，適用於道路、停車場、橋樑等。與傳統瀝青不同的在於透水瀝青去除較小粒徑的骨材，藉此增加其孔隙，進而達到透水效果。

3.1.2 透水鋪面案例

1.燦坤 3C

如圖 3.1 所示，位於台北市內湖區提頂大道 1 段 331 號。圖中壹圓硬幣直徑約為 2 公分，用來量測骨材粒徑。燦坤 3C 應用透水鋪面於廣場，透水鋪面有兩種顏色變化，是人工施加非骨材原始顏色，從圖中可看出骨材是卵石，粒徑約為 1 公分單一粒徑，骨材間的膠結材為樹脂，經簡單的測試，可發現水能及時的滲入。

2.新生公園

如圖 3.2 所示，位於臺北市中山區新生北路三段 105 號。新生公園應用透水鋪面於公園內的慢跑跑道，其顏色只有一種，是人工施加非骨材原始顏色，圖中可看出骨材是礫石，粒徑約為 0.5 公分至 2 公分不等，骨材間的膠結材為樹脂，經簡單的測試，可發現水能及時的滲入。

3.淡海新市鎮

如圖 3.3 所示，位於臺北縣淡水鎮新民街 1 段。淡海新市鎮應用透水鋪面於社區四周的人行走道，其顏色只有一種，是人工施加非骨材原始顏色，圖中可看出骨材是礫石，粒徑約為 0.5 公分至 1 公分不等，骨材間的膠結材為樹脂，經簡單的測試，可發現水能

及時的滲入。

4.石牌國中

如圖 3.4 所示，位於臺北市北投區吉利里石牌路 1 段 139 號。石牌國中應用透水鋪面於學校四周的人行走道，其顏色只有一種，是人工施加非骨材原始顏色，圖中可看出骨材是礫石，粒徑約為 0.3 公分，骨材間的膠結材為樹脂，經簡單的測試，可發現有的地方水能及時的滲入，有的地方則否，推斷與當時的施工品質及孔隙被行道樹果實阻塞有關。

5.北安路

如圖 3.5，位於臺北市中山區北安路。北安路應用透水鋪面於道路兩側的人行走道，使用的是透水磚，經簡單的試驗，水僅能由磚與磚之間的接縫滲入，磚本身的透水能力很低。

6.陽明山

如圖 3.6 所示，位於臺北市士林區陽明山夢幻湖停車場。陽明山應用透水鋪面於夢幻湖的遊客停車場，使用的是透水磚，經簡單的試驗，水僅能由磚與磚之間的接縫滲入，磚本身的透水能力很低。

7.臺北科技大學

如圖 3.7 所示，位於臺北市大安區忠孝東路 3 段 1 號。臺北科技大學應用透水鋪面於校園內的人行走道、廣場與停車場，使用的有透水樹脂混凝土、透水磚、JW 工法。透水樹脂混凝土由目視可發現孔隙大部分已經阻塞，圖中可看出骨材是礫石，粒徑約為 1.5 公分以下不等，骨材間的膠結材為樹脂，經簡單的測試，發現水並不能即時滲入，需等待一些時間。透水磚，經簡單的試驗，水僅能由磚與磚之間的接縫滲入，磚本身的透水能力很低。JW 工法是利用接縫間的孔洞與排水管來排水，孔洞直徑約為 1 公分，

經簡單測試，發現有些孔洞排水良好，不過，也有些孔洞可能因為底下的排水管已經阻塞，所以並沒有排水的效果。

8.新店試驗區

如圖 3.8 所示，位於臺北縣新店市安和路三段。新店試驗區內在人工雨場下鋪設 4 個透水鋪面來試驗，分別是：(1)透水瀝青(2)植草磚(3)透水磚(4)JW 工法。透水瀝青部份，由圖中可見其骨材粒徑在 1.5 公分以下不等，經簡單的測試，發現透水性不佳。植草磚部份，磚本身不透水，不過水可以經由植草磚間的接縫滲入，所以整體排水性普通。透水磚部份，磚本身透水性並不佳，不過磚與磚之間並沒有用其他的膠結材料，所以經簡單的測試，水大部分可由接縫中滲入，所以整體排水性普通。JW 工法部分，與北科的現地一樣，發現有些孔洞排水良好，不過，也有些孔洞可能因為底下的排水管已經阻塞，所以並沒有排水的效果。

9.萬板橋下

如圖 3.9 所示，位於臺北市雙十路人行道(萬板橋與華翠大橋間)。萬板橋下的人行道使用的是 JW 工法，其排水孔洞直徑約 1 公分，其他鋪面為一般的人行磚，經簡單的測試，狀況與上述的 JW 工法相同，即有些排水良好，有些則否。

10.文山區行政中心

如圖 3.10、3.11 所示，位於臺北市文山區木柵路三段 220 號。文山區行政中心應用透水鋪面於四周的人行道，其基底層使用透水混凝土，面層則鋪設透水混凝土磚。基地層部分，骨材為礫石，粒徑約在 2.5 公分以下，沒有經過整平的動作，經簡單測試，透水性良好，可即時將水向下排走。在透水混凝土磚部分，其骨材粒徑約在 1 公分以下，表面平整，經簡單測試，透水性良好，雖無法像基底層及時將水向下排走，不過也能在短時間內讓水向下透水。

11. 兒童公園

如圖 3.12 所示，近觀音國小。兒童公園應用透水鋪面於園內大部分的地方，骨材為卵石，粒徑約為 1.5 公分以下，其膠結材為樹脂，不過膠結能力沒有如上述的燦坤 3C 與新生公園那樣的良好，表面有些骨材已經脫落。經簡單測試，透水性良好，可及時的將水向下排走。

12. 龜山國中

如圖 3.13、3.14 所示，位於桃園縣龜山鄉自強西路 66 號。龜山國中應用透水鋪面於國小旁的人行走道，使用的是透水樹脂混凝土，也有分基底層與面層兩部份，基底層為一般的透水混凝土，骨材粒徑約 2.5 公分以下。而面層部分，骨材為礫石，粒徑約 0.5 公分以下不等，透水鋪面有分上色與未上色兩部分，經簡單測試，鋪面能即時將水向下排出，排水效果佳。

13. 觀音國小

如圖 3.15 所示，位於桃園縣觀音鄉文化路 2 號。觀音國小應用透水鋪面於國小旁的人行走道，使用的是環保透水磚，經簡單的試驗，水僅能由磚與磚之間的接縫滲入，磚本身的透水能力不佳。



圖 3.1 臺北燦坤 3C



圖 3.2 臺北新生公園

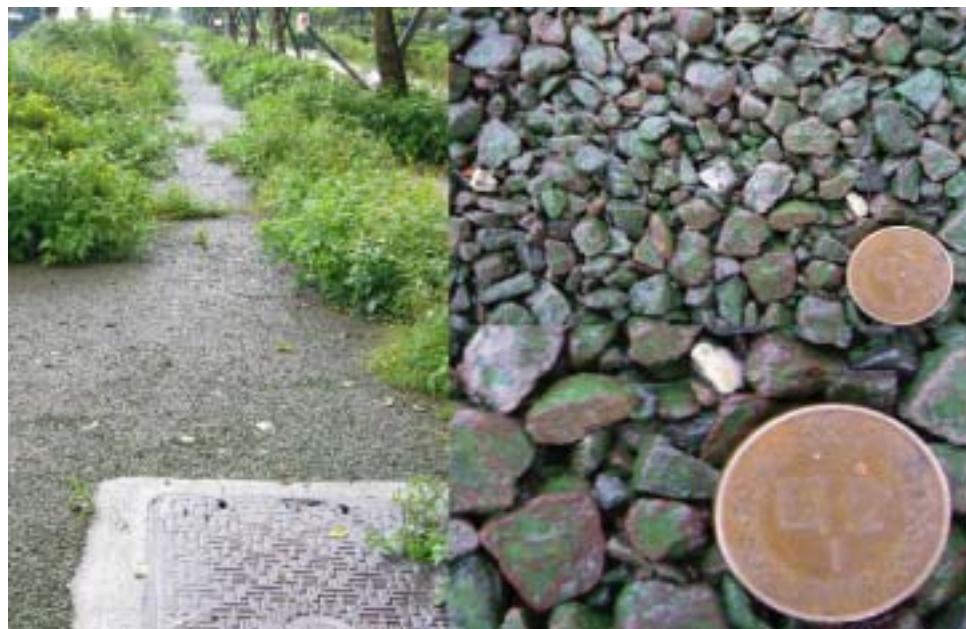


圖 3.3 臺北淡海新市鎮



圖 3.4 臺北石牌國中

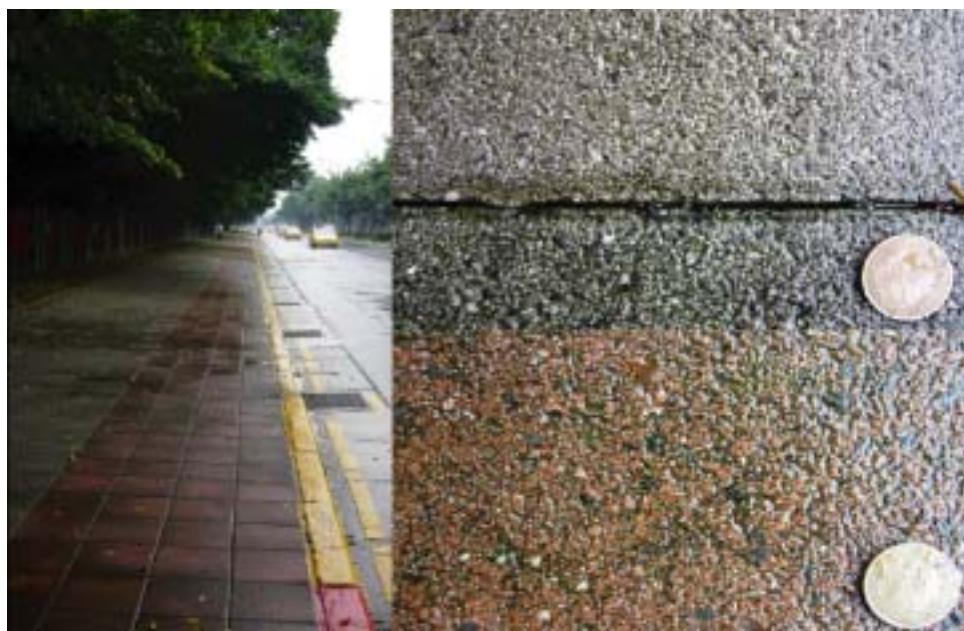


圖 3.5 臺北北安路



圖 3.6 臺北陽明山



圖 3.7 臺北臺北科技大學



圖 3.8 臺北新店試驗區



圖 3.9 臺北萬板橋下



圖 3.10 臺北文山區行政中心 (一)



圖 3.11 臺北文山區行政中心 (二)

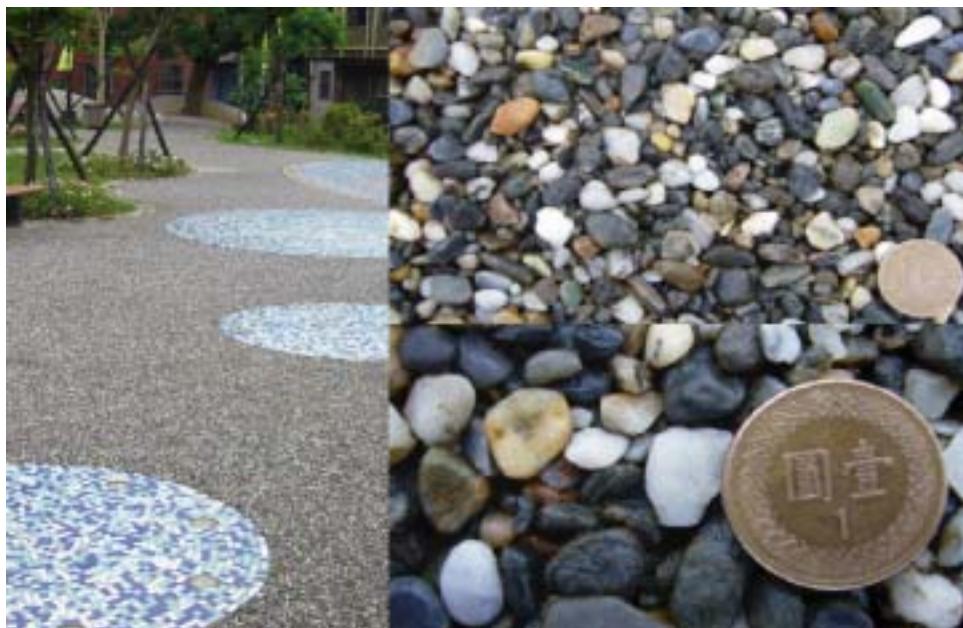


圖 3.12 桃園兒童公園



圖 3.13 桃園龜山國中 (一)



圖 3.14 桃園龜山國中 (二)



圖 3.15 桃園觀音國小

3.1.3 綜合比較

在所有透水現地做簡單的透水測試，直接於透水現地倒水，並用肉眼判斷其透水狀況分為三種等級，做為現地透水定性狀況，試驗結果如表 3.1 所示，可發現上述五項常見的透水鋪面有以下的優缺點：

1.透水磚

磚本身具有較小的孔隙，藉此使鋪面具有透水能力。不過由於孔隙較小，容易被砂石或果實阻塞，故經過時間的累積，孔隙很快地被異物堵塞而失去透水能力，但是透水磚發展較為成熟，是目前最常見的鋪面。

2.植草磚

鋪面本身並不具透水性，不過可藉由磚與磚之間的接縫來透水，中間也是中空部份，更可使雨水直接進入土壤，達到透水的目的，不過植草磚本身僅能應用於停車場等車流量少且低載重的地方。

3.透水樹脂混凝土

其透水性為上述五項鋪面中最優良的，骨材間的孔隙大，尤其是鋪面的基底層的透水混凝土最為優良，面層目前大部分為透水樹脂混凝土，可在施工過程加入顏料，或者是後上色，使鋪面更具顏色上的變化。由於施作具整體性，且結構較為完整，故可承受較大的載重，改變其膠結材料，有潛力應用於一般路面上。

4.JW 工法

此工法主要是利用路面的排水孔連接面層底下的排水管，以達到排水的功能，剛施作完成應有優良的效果，且面層可用具有較高強度的人行磚來達到較高的承載能力，不過經過時間的累積，污泥可能隨著雨水流入排水管，進而阻塞而失去排水功能。

5.透水瀝青混凝土

與傳統瀝青比起來，透水瀝青去除使用較小的骨材，藉此提高其間的孔隙，達到排水效果，並可降低車子行走的噪音，不過經過長時間車子來往的壓密，會使孔隙變小甚至消失，因而失去其透水能力。

表 3.1 現地簡易透水測試

地 點	透水鋪面形式	現地透水狀況
臺北	燦坤 3C	★★★
	新生公園	★★★
	淡海新市鎮	★★★
	石牌國中	★★
	北安路	★
	陽明山	★
	臺北科技大學	★★
		★
		★★
	萬板橋下	★★

表 3.1 現地簡易透水測試(續)

地 點	透水鋪面形式	現地透水狀況
台北	透水瀝青	★
	植草磚	★★
	透水磚	★★
	JW 工法	★★
兒童公園	透水混凝土	★★★
文山區行政 中心	透水混凝土磚	★★★
	透水混凝土	★★★
桃園	龜山國中	★★★
	觀音國小	★
備註	★：不佳 ★★：普通 ★★★：優良	

3.2 現況調查-港灣及河川護岸工程

透水混凝土在港灣工程之應用，於國內尚未發現有直接相關之案例，僅基隆港務局臺北港第一期聯外道路曾使用多孔隙瀝青混凝土，目前使用情形依現場訪談結果得知該道路完工後約 1~2 年排水效果相當良好，但因聯外道路本身重型車輛通行頻繁，損壞率較高，目前修補方式係採用瀝青混凝土。

有關臺北港第一期聯外道路所使用的多孔隙瀝青混凝土相關作業細則如下：

1. 所考量的配合設計準則如表 3.2 所示，空隙率的目標值為 15~25%，透水係數需大於 10^{-2} cm/sec 以上。
2. 多孔隙瀝青混凝土的配合比例為級配料：瀝青：礦物纖維=17.1:1:0.072，詳見表 3.3 所示。
3. 其拌合方式為首先將粒料與整包礦物纖維添加物應先拌合約 15 秒，再將瀝青加入，維持拌合溫度在 160~170°C 之間，拌合 30~45 秒。

表 3.2 多孔隙瀝青混凝土設計準則

項目	目標值
空隙率(%)	15-25
透水係數(cm/sec)	10^{-2} 以上
Cantabria 磨耗量(%)	20 以下
穩定值(kgf)	350 以上
流度(0.25mm)	40 以下

表 3.3 多孔隙瀝青混凝土配合比例

每 1000 公斤混合料		備註(粒料)
級配料	941 kg	粗細粒料混合級配以粗粒料為主，最大粒徑為 12.5mm
瀝青	55 kg	使用地膠泥瀝青
礦物纖維	4 kg	以瀝青混合料百分之零點四添加
級配料：瀝青：礦物纖維=17.1:1:0.072		

另外蒐集到的間接相關應用計有國內的透水性護岸、日本的透水性護岸(河川)及人工魚礁(海洋資源)。

1. 國內透水性護岸

基於河川建設與環境生態共生的考量，圖 3.16 為位於臺中縣霧峰鄉境內的野溪護岸試驗工程^[43]。護岸設計標準斷面坡度為 2:1，該工程係利用再生粒料為骨材製作成中空透水性混凝土成品，再以堆疊的形式置於兩側基礎台間，且堆疊的透水塊狀成品與土壤間，為防止土壤中的細粒料直接阻塞透水混凝土塊，係以天然碎石級配料加以區隔，最後於混凝土塊之孔洞中填滿土壤，進行植生綠化工程。

2. 日本透水性護岸

一般而言，在天然塊石不易取得，傳統混凝土河川護岸工程無法進行植生效果下，此種透水性混凝土製品的應用除可滿足護岸工程的需求，又可兼具生態工程之效益。若適當擺置於河道中，可增加水流蜿蜒的路徑，降低流速，以利魚類迴游，類似魚梯效果，又可增加魚類棲息的空間，如圖 3.17^[44]。



圖 3.16 國內透水性河川護岸^[43]



圖 3.17 日本透水性河川護岸^[44]

3.日本人工魚礁

人工魚礁是將天然或人造的物體投放於海洋中，改變海洋環境，供給動植物良好棲息場地，已達到培育資源與增加漁獲之目的。而利用多孔混凝土礁石投放於海中，其附著在表面的海藻類數量往往較傳統普通混凝土高出許多，因此其集魚的效果也較佳。圖 3.18^[44]為日本應用球型透水樹脂混凝土製品，以耐蝕材料將其串聯成結構單元體後，作為人工魚礁，再拋置於海洋中的情形。



圖 3.18 日本透水性人工魚礁^[44]



圖 3.19 日本透水性擋土護坡^[44]

3.3 現況調查-坡地工程

廣義而言，山坡地護坡工程依其功能需求可概分為二類，一類是為了抗風化及抗沖蝕的地面保護工，常見如格梁護坡、植生護坡及噴漿護坡等；另一類則是可提供抗滑及穩定功能之擋土護坡工，常見如砌石擋土牆、RC 擋土牆、蛇籠擋土牆、加勁擋土牆及錨拉式擋土牆等，上述二種護坡的種類及適用性如表 3.4 與表 3.5 所示^[45]。設計時可依工程的重要性、地質條件、水文條件、地形條件及外來荷重條件加以考量，並藉助合理的分析模式，來選擇適當的擋土護坡。

就透水混凝土而言，目前在國內的應用幾乎無常例可尋，連同國外在此方面的應用亦非常少見，在日本宮崎縣曾利用組合式的球型樹脂混凝土單元體，以防止較低矮之邊坡的土砂流失，如圖 3.19。

表 3.4 坡面保護工之種類及適用性^[45]

	工法種類	分類	適用範圍
植生方法	噴植法	1. 薄層噴植法	適用土質坡面
		2. 中層噴植法	適用軟岩坡面
		3. 厚層噴植法	適用硬岩坡面
	植生帶法	1. 稻草植生帶法	坡度小於 45 度之土質邊坡
		2. 纖維植生帶法	
	草苗植生法	1. 等高現植草苗法	坡度小於 35 度之土質邊坡
		2. 育苗袋育苗穴植法	
工程方法	草皮鋪植法		坡度小於 45 度之挖方邊坡 需快速覆蓋之填方邊坡
	打樁編柵法	1. 萌芽樁法	坡度小於 45 度之邊坡
		2. 不萌芽樁法	崩積土或淺層崩塌坡面
	固定框法	1. 預鑄式水泥框法	坡度小於 45~60 度之邊坡 表層呈風化或崩落之邊坡
		2. 鐵製框法	
		3. 自由格梁法	
	噴漿護坡		坡度無限制 不適合地下水豐富之土坡 適合岩石坡面
	景觀式擋土護坡		適用於穩定之挖方邊坡

* 景觀式擋土護坡可配合加勁材或土釘，提供擋土的功能；但由於本身可提供之擋土功能甚小，故將其歸納為坡面保護工。

表 3.5 檔土護坡之種類及適用性^[45]

護坡種類	較佳使用坡高 (m)	依剛性分類	優點	缺點	建議使用時機
砌石擋土牆或重力式擋土牆	5m 以下	剛性	◎施工方便簡單	◎體積龐大，需較多材料 ◎耐震能力較差	◎適合較低矮之邊坡 ◎缺乏技術工時 ◎較適合挖方邊坡
懸臂式 RC 擋土牆	3~8m	剛性	◎施工簡單，不需太多砂石級配料	◎容易受基礎不均勻沉陷	◎適用一般邊坡
扶臂式 RC 擋土牆	5~15m	剛性	◎在坡高較高處，可有效減少擋土牆之斷面	◎施工略為複雜 ◎施工中臨時開挖面較大	◎適用較高邊坡，坡高超過 10m，則較懸臂式擋土牆經濟
蛇籠	2~8m	柔性	◎不易受基礎不均勻沉陷影響 ◎透水性佳	◎耐久性略差	◎適用於基礎土壤較為軟弱時 ◎適合挖方或填方邊坡
格床式擋土牆	2~12m	半剛性	◎對不均勻沉陷之忍受度，較一般剛性擋土牆為大 ◎透水性佳	◎施工複雜 ◎工資成本偏高	◎需規則美之護坡 ◎適用於挖方或填方邊坡
加勁擋土牆	3~20m	柔性	◎施工快速 ◎可忍受較大不均勻沉陷	◎變型偏大 ◎需注意坡面失火或撞擊之破壞	◎適合填方邊坡 ◎坡面可植生綠化
錨拉式擋土牆	不受限制	半剛性	◎可提供較大之下滑阻抗力	◎成本較高	◎已發生災害之邊坡 ◎高挖方邊坡
抗滑樁	10m 以上	剛性	◎對於深層滑動提供組抗力	◎陡坡上不易施工 ◎成本偏高	◎深層滑動時須採大口徑或配合岩錨工法
土釘工法	3~12m	半剛性	◎由上而下施工，施工中安全性高	◎當坡高太大，其造價偏高	◎適用於挖方邊坡
輕量回填土工法	不受限制	半剛性	◎回填土之單位重有效減少，土壓力亦同填時減輕	◎揮發性溶劑可能對某些發泡劑有不利影響 ◎重量輕須考慮上浮破壞	◎用於軟弱地盤或急斜地之填方邊坡

3.4 透水混凝土基本組合材料之調查分析

透水水泥混凝土之基本組合材料如表 3.6 所示，依製程可簡單區分成一般製程及高壓製成，其中又可依骨材之不同區分為一般骨材及再生骨材。

李^[46]之高壓透水磚使用膠結材料為水泥漿體，其中又以卜作嵐材料取代部分水泥，骨材為石門水庫淤泥燒製之 7mm 輕質骨材，高壓輕質透水磚在自動拌合壓模機製程中可加敷面層（磨耗層）與不加敷面層，製作時採用工業自動生產線之模式，於填料震動夯實後立即脫模成型，依需求可達市售透水磚規範透水係數 2×10^{-3} cm/sec 且抗壓強度 175~210 kg/cm² 之標準以上，加敷面層之輕質透水磚抗壓強度較高可以鋪設於一般人行步道停車場等平面鋪設；而未加敷面層之輕質透水磚抗壓強度較低可適用於矮牆磚、斜坡植草等造景用途。

楊^[10]之輕質骨材抗壓磚以不同比例之水泥、石英粉及細砂製程之水泥砂漿，填充輕質骨材間之骨材孔隙並提供強度，其中輕質骨材是由水庫淤泥固化後再經燒結而成。

蔡^[47]之再生粒料混凝土塊使用之再生粒料其料源乃中部地區拆除所得之營建廢棄物，經碎化、風選、磁選及篩析等處理而成，成份包括有廢棄混凝土塊、碎磁磚及碎紅磚與雜質，再生粒料混凝土塊之量產係以高壓地磚廠之生產線生產，該機具為全自動式，材料經強制試拌和機拌和後裝入料槽中，進行自動化填料、壓模、夯實及脫膜等程序。抗壓強度視級配與孔隙率而定，其值約介於 140~210 kgf/cm²，視孔隙率值則介於 20%~25% 間。

內政部建研所^[5]之無細骨材混凝土使用水泥砂漿及純水泥漿作為膠結材料，使用之骨材分別有一般骨材及再生骨材，其中再生骨材之原料為九二一震後建築廢棄物，經機械處理，並經破裂成粒徑通過 3/4" 篩號之骨材，以一般骨材所製成之透水混凝土，依透水係數不同其抗壓強度介於 5~12 MPa，再生骨材之透水混凝土其抗壓強

度介於 2~6MPa。

潘與鄭^[4]之透水混凝土使用純水泥漿體作為膠結材料，骨材為一般骨材，標稱粒徑 20mm，水灰比 0.35，填充總孔隙體積含量 70%，抗壓強度可達 14.3 MPa，透水係數 0.045 cm/sec。

表 3.6 透水水泥混凝土之基本組合材料

類別	材料	配比	製程	抗壓強度 (MPa)	透水係數 (cm/sec)	其他	參考文獻
高壓輕質 混凝土透 水磚	水泥 飛灰 爐石 輕質骨材	體積比水泥:飛灰:爐石 70:15:15 填充孔隙比 0.3	壓模試 驗機加 壓製程	13.3	0.83	86.3 元 /m ²	高壓透水 磚產製技 術之研究 (論文)
		體積比水泥:飛灰:爐石 70:15:15 填充孔隙比 0.7		27.3	0.736	102.7 元 /m ²	
		體積比水泥:飛灰:爐石 70:15:15 填充孔隙比 0.3 加敷面層		13.8	0.553	95.6 元 /m ²	
		水泥:卜作嵐材料 7:3 填充孔隙比 0.7 加敷面層		27.7	0.450	112.8 元 /m ²	
輕質骨材 抗壓磚	水泥 石英粉 細砂 輕質骨材	A/C=6 W/C=0.6 #100 細砂 SP=0%		0.9	0.115		輕質骨材 抗壓磚之 透水性研 究 (論文)
		A/C=6 W/C=0.6 #100 細砂 SP=5% 水泥:石英粉:細砂 1:1.25:0.25		7.2	0.104		
		A/C=12 W/C=0.5 SP=5% 水泥:石英粉:細砂 1:1.1:0.4		4.0	0.103		
無細骨材 混凝土	水泥 一般骨材	骨材:砂:水泥 15:0:1 水灰比 0.972		4.9	0.051		內政部建 研所 無細 骨材
		骨材:砂:水泥 10:0:1 水灰比 0.708		3.4	0.047		
		骨材:砂:水泥 6:0:1 水灰比 0.514		11.8	0.045		
	水泥 再生骨材	骨材:砂:水泥 15:0:1 水灰比 0.972		2.1	0.069		
		骨材:砂:水泥 10:0:1 水灰比 0.708		3	0.054		
		骨材:砂:水泥 6:0:1 水灰比 0.514		6	0.051		
透水混凝 土	水泥 一般骨材	標稱骨材粒徑 20mm 水灰比 0.35 填充總孔隙體積含量 70%		14.3	0.045		透水混凝 土與工程 應用介紹
再生粒料 混凝土塊	水泥 再生骨材	再生粒料 1200 kg/m ³ 水灰比 0.347	高壓地 磚機加 壓製成	14.3-21. 4		孔隙率 20-25%	再生粒料 混凝土塊 之產製技 術與應用

第四章 試驗計畫

4.1 試驗變數

透水混凝土主要由骨材與膠結材料二種相位所組成，由膠結材料黏結骨材顆粒，並且填充骨材顆粒之間的孔隙而構成具有多孔隙、可透水並具有力學強度的混凝土材料。在工程應用上，透水混凝土應該先具有一定的透水性能而後再要求力學強度的提升，因此，從透水混凝土內部的孔隙進行設計，應是影響整體性質的關鍵。

以透水混凝土內部的孔隙而言，高孔隙率代表著透水混凝土具有良好的透水性能，但可能因此緻密度不足而無法具備較高的力學強度。反之，低孔隙率有助於力學強度的提升卻可能使透水性能下降。雖然，在一般的物理觀念之下可做如此初步判斷，但若加入膠結漿體特性、骨材顆粒粒徑等變數，則孔隙率影響透水混凝土性質程度是否仍符合常理判斷，則須經由透水混凝土中組成的各項參數相互比較得知。

1.各項參數設計概念：

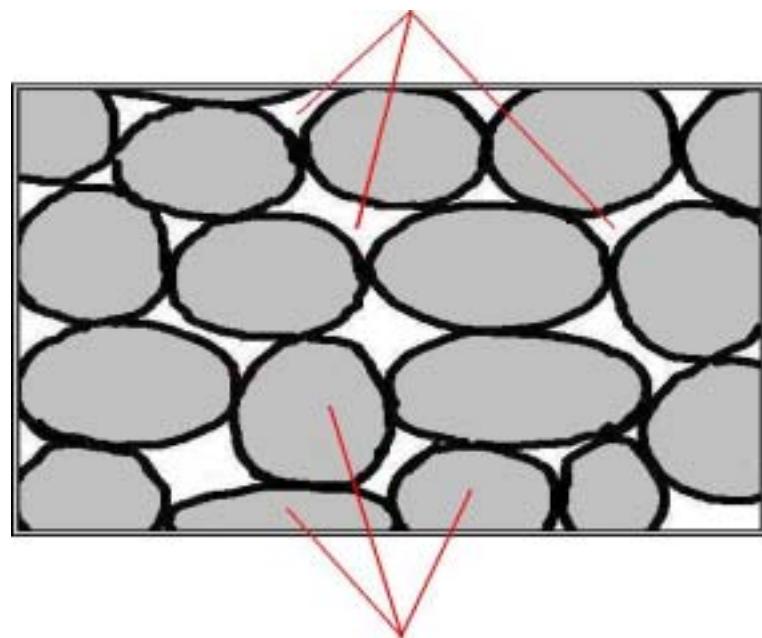
(1)骨材粒徑

本試驗所使用的骨材顆粒粒徑落於狹窄的級配範圍內，可視為單一粒徑骨材顆粒且骨材顆粒粒徑大小關係著透水混凝土的透水性能與力學強度。

(a)骨材顆粒徑對透水性能之影響

以物理角度而論，骨材顆粒粒徑較大者，在單位體積之中堆疊所產生的總孔隙體積與骨材顆粒較小者相比較其差異不大，此點可以由骨材形狀皆為真圓的理想狀況推導得知，但是在骨材點對點堆積之下所產生的孔隙徑大小卻是正比於骨材顆粒粒徑的，如圖 4.1、圖 4.2 所示。透過變換骨材顆粒粒徑期望能得知在各種孔隙狀況時，其透水性能良窳與否的影響。

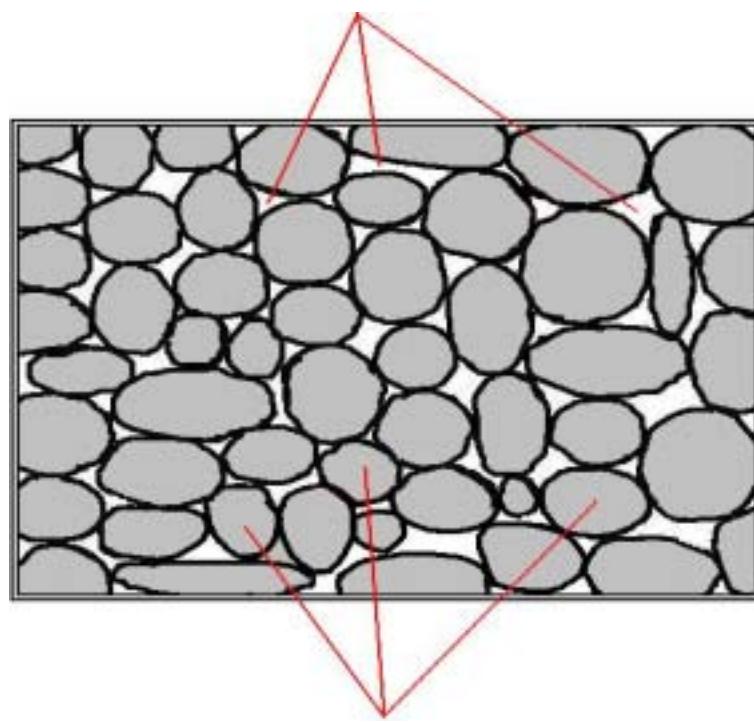
The Bigger Void



The Bigger Particle

圖 4.1 較大粒徑骨材與孔隙示意

The Smaller



The Smaller Particle

圖 4.2 較小粒徑骨材與孔隙示意

(b) 骨材顆粒徑對力學強度之影響

在相同孔隙率的設計前提下，單位體積中，骨材顆粒粒徑較大者所佔有的顆粒數量是少於粒徑較小者，此狀況也意味著骨材顆粒之間接觸點數量有差異，因此藉由變換骨材顆粒粒徑期望能得接觸點多寡對於力學強度的影響。

綜合所述，本試驗使用四種不同顆粒粒徑之骨材，如表 4.1、圖 4.3 所示：

表 4.1 研究使用之骨材粒徑

骨材代號	A	B	C	D
主要粒徑	0.32cm	0.48cm	0.64cm	0.95cm
粒徑分佈範圍	0.4cm-0.24cm	0.48cm-0.4cm	0.95mm-0.48cm	1.27cm-0.95cm

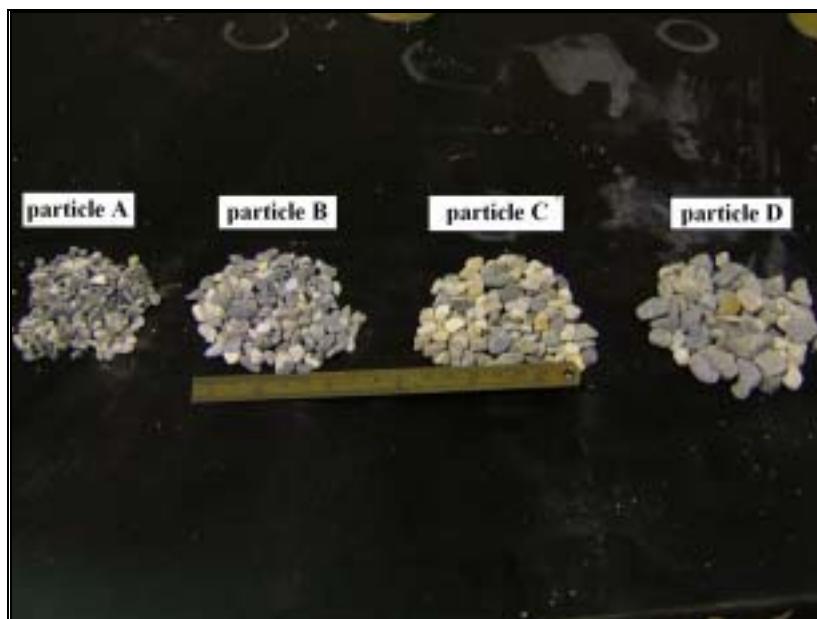


圖 4.3 骨材外觀

(2) 水灰比

在透水混凝土中，水泥漿體水灰比的設計主要應該考慮工作性、透水性能與力學強度三項特性，水泥漿體工作性良窳關

係著透水混凝土整體的表現，水灰比過低易造成骨材團簇現象，使漿體在混凝土內分布不均而造成透水孔隙路徑被阻斷而損失透水性能或因此產生缺漿的弱面，因而折減了力學強度，水灰比過低也會使得透水混凝土拌合時過於乾硬，增加澆置困難度。相反的，水灰比過高情形下，漿體流動性過於良好，導致漿體黏滯力小於本身自重而向下流動產生垂流現象，使得漿體大多流動至混凝土底層，使底層孔隙完全被漿體所填滿而喪失透水性能，而混凝土中上層為缺漿弱面，力學強度因而折減。

根據透水混凝土特性，可供設計選擇的水灰比區間顯得狹隘許多，根據本試驗對水泥漿體流動性施作試驗，選定水灰比區間在 0.25-0.45 之間，並在此區間內插一組水灰比 0.35，得到水灰比參數為 0.25、0.35、0.45 三組。

(3) 漿體填充骨材孔隙體積百分比

漿體填充骨材孔隙體積百分比本質即為透水混凝土中漿體使用量。漿體使用量亦會影響透水混凝土的透水性能與力學強度：

(a) 漿體使用量對透水性能之影響

漿體在透水混凝土中使用量越多，則骨材之間的孔隙被漿體取代的程度越高，造成孔隙可供給透水的孔隙路徑減少，使得透水性能下降。

(b) 漿體使用量對力學強度之影響

漿體體積取代了孔隙體積，使得混凝土內部結構更顯緻密，加上較高的漿體使用，若能充分有效的裹覆在骨材顆粒周圍後完成水化硬固，對於力學強度的提昇將有正面助益。

漿體填充骨材間孔隙的程度多寡可以量化。本試驗所設計的漿體使用量根據測定各骨材孔隙總體積後，以漿體分別

填充所測得之骨材總孔隙體為原則，設計填充 50%、60%、70%、80%，如圖 4.4、圖 4.5、圖 4.6 所示。

(4)漿體

根據試驗流程圖，本試驗之試驗規劃為在第一部份試驗，其能對於透水混凝土的性質獲得基本資料。第二部份試驗，即選定一組配比在保有該透水性能的情況下，以改變膠結漿體的方式期望藉以提昇力學強度，並期望在第二部份試驗中可得知不同漿體對透水混凝土各種性質的影響。

第一部份試驗所使用的漿體為水泥加入拌和水之水泥漿體，對於低水灰比($w/c=0.25$)的配比加入強塑劑提昇漿體流動性，第二部份試驗所使用的漿體為水泥漿體加入矽灰以及鹼活化爐石粉漿體兩種，並以第一部份驗中 B 粒徑、 $w/c=0.35$ 且填充骨材孔隙 80% 的漿體使用量此配比為對照組，進行與變換膠結漿體配比的比對試驗。

2.試驗變數列表

第一、二部份試驗變數如下表 4.2、表 4.3 所示：

表 4.2 第一部份試驗變數表

骨材代號/粒徑	A 0.32cm	B 0.48cm	C 0.64cm	D 0.95cm
漿體	水泥漿體			
水灰比	0.25	0.35	0.45	
漿體填充骨材 總孔隙體積百分比	50%	60%	70%	80%

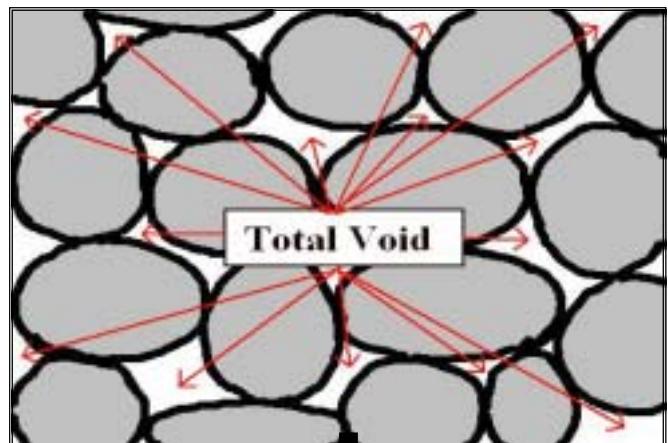


圖 4.4 總孔隙圖

Total Void Volume

圖 4.5 總孔隙體積示意圖

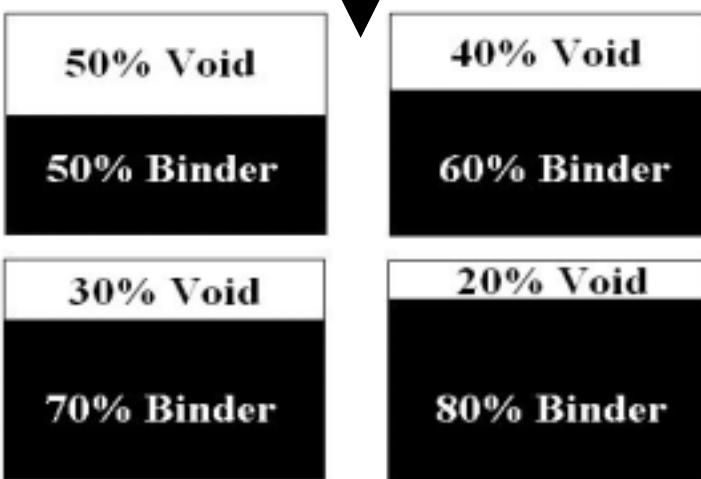


圖 4.6 漿體填充總孔隙示意圖

表 4.3 第二部份試驗變數表

骨材代號/粒徑	B (0.48cm)	
漿體	鹼活化爐石粉漿體	水泥漿添加矽灰
漿量填充 總孔隙體積百分比	80%	
L/Sg 水灰比	0.35 0.4 0.45	0.35
替代比例	--	10% 20% 30%

4.2 試驗材料

1.水泥

本試驗所使用的水泥為臺灣水泥公司所生產的波特蘭 I 型水泥，其化學成份以及物理性質如表 4.4 及表 4.5 所示。

表 4.4 水泥化學成份

項目	中國國家標準 CNS61-R2001	試驗值
二氧化矽(SiO_2)%		20.7
氧化鋁(Al_2O_3)%		5.4
氧化鐵(Fe_2O_3)%		3.2
氧化鈣(CaO)%		63.9
氧化鎂(MgO)%	max: 6.0	2.0
三氧化硫(SO_3)%	max: 3.5	
燒失量(L.O.I)%	max: 0.3	1.0
不溶殘渣(Ins.Res)%	max: 0.75	0.1
矽酸三鈣(C_3S)%		51.0
矽酸二鈣(C_2S)%		21.0
鋁酸三鈣(C_3A)%		8.9
鋁鐵酸四鈣(C_4AF)%		9.8

資料提供：臺灣水泥公司

表 4.5 水泥物理性質

水泥型號	第一型水泥 (Type I Cement)	
項目	中國國家標準 CNS61-R2001	試驗值
熒料空氣含量 (%) Air Content of Motar (%)	max. 12.0	7.2
細度:Fineness (cm ² /g)	max. 2800	3310
健度:Soundness (%)	max. 0.80	0.05
抗壓強度 Compressive Strength , kgf/cm ² (MPa)		
3 (days)	min.126 (12.35)	210 (20.60)
7 (days)	min.197 (19.31)	282 (27.66)
28 (days)	min.281 (27.54)	384 (37.67)
凝結時間 : Time of Setting (Vicat test)		
初凝:Initial setting(hr:min)	min. 0:45	2:30
終凝:Final setting(hr:min)	max.8:00	3:50

資料提供：臺灣水泥公司

2.粗骨材

本試驗使用四種不同顆粒粒徑骨材作為試驗變數，購於長宏股份有限公司。骨材來源為宜蘭地區河川下游之卵石，骨材物理性質如表 4.6 所示。

表 4.6 粗骨材物理性質

骨材代稱	A	B	C	D
市售粒徑	一分石	一分半石	二分石	三分石
最大粒徑	0.4cm	0.48cm	0.95cm	1.27cm
粒徑分佈區間	0.4-0.24cm	0.48-0.4cm	0.95-0.48cm	1.27-0.95cm
比重	2.65	2.69	2.66	2.72
單位體積孔隙率	37.3%	37.5%	36.8%	38.3%

3. 爐石粉

本研究所使用之爐石粉由中聯爐石處理資源化股份有限公司購入，爐石粉性質如表 4.7 所示。

4. 砂灰

本試驗所使用之砂灰由中聯爐石處理資源化股份有限公司購入，砂灰性質如表 4.8 所示。

5. 減水劑

本試驗所用之強塑劑乃為松江實業有限公司所提供之產品代號為 F-100，屬於羧酸系列之高性能減水劑。

表 4.7 爐石粉性質

檢驗項目 (Inspection Item)		檢驗結果 (Test Result)
物理 試驗 (Physical Test)	比表面積(Fineness by Air Permeability) (m ² /kg)	405
	#325 篩餘(Amount Retained on #325 Sieve)(%)	7.0
	比重(specific gravity)	2.67
	活性指數 (Activity Index)	76.6
	7 天(7 day)	(%)
	28 天(28 day)	(%)
化學 分析 (Chemical Analysis)	燒失量 LOI (Loss on Ignition)	(%)
	二氧化矽 SiO ₂ (Silicon Dioxide)	(%)
	三氧化二鋁 Al ₂ O ₃ (Aluminum Oxide)	(%)
	三氧化二鐵 Fe ₂ O ₃ (Ferrie Oxide)	(%)
	氧化鈣 CaO (Calcium Oxide)	(%)
	氧化鎂 MgO (Magnesium Oxide)	(%)
	三氧化硫 SO ₃ (Surfur Trioxide)	(%)
	鹽基度 (Basicity)	--
	硫化物硫 (Sulfide Sulfur)	(%)

表 4.8 砂灰性質

檢驗項目 (Inspection Item)		檢驗結果 (Test Result)
物理 試驗 (Physical Test)	比表面積(Fineness by Air Permeability) (m ² /kg)	425
	#325 篩餘(Amount Retained on #325 Sieve)(%)	5.7
	比重(specific gravity)	2.74
	活性指數 (Activity Index)	7 天(7 day)(%) 28 天(28 day)(%)
	7 天(7 day)(%)	77.9 110.6
化學 分析 (Chemical Analysis)	燒失量 LOI (Loss on Ignition) (%)	1.51
	二氧化矽 SiO ₂ (Silicon Dioxide) (%)	36.93
	三氧化二鋁 Al ₂ O ₃ (Aluminum Oxide) (%)	15.89
	三氧化二鐵 Fe ₂ O ₃ (Ferrie Oxide) (%)	1.75
	氧化鈣 CaO (Calcium Oxide) (%)	36.09
	氧化鎂 MgO (Magnesium Oxide) (%)	6.15
	三氧化硫 SO ₃ (Surfur Trioxide) (%)	0.71
	鹽基度 (Basicity)	--
	硫化物硫 (Sulfide Sulfur) (%)	--

資料提供：中聯爐石公司 水泥及混凝土實驗室

6.化學藥品

配置鹼活化爐石粉漿體所使用之矽酸鈉、氫氧化鈉、磷酸，其成份如表 4.9、表 4.10、表 4.11 所示。

表 4.9 矽酸鈉之化學成份

品 名	矽酸鈉(Sodium Silicate)
試驗項目	試驗結果
不溶殘渣 (Ins.Res)	Max. 0.01 %
二氧化矽 SiO ₂ (%)	37.0 %
氧化鈉 Na ₂ O (%)	17.7 %
Mole ratio	2.16
Iron(Fe)	Max.0.02 %

資料來源：德信化工

表 4.10 氢氧化鈉之化學成份

品 名	氫氧化鈉(Sodium Hydroxide)
試驗項目	試驗結果
Chloride(Cl)	Max. 0.005 %
Sulfate(SO ₄)	Max. 0.003 %
Silicate(SiO ₂)	Max. 0.01 %
Phosphate(PO ₄)	Max. 0.001%
Heavy metal (as.Pb)	Max. 0.001%
Iron(Fe)	Max. 0.0007%
Aluminum(Al)	Max. 0.003%
Calcium (Ca)	Max. 0.001%
Magnesium(Mg)	Max. 0.0005%
Potassium(K)	Max. 0.1%
Total Nitrogen(N)	Max. 0.001%
Arsenic(As)	Max. 0.0002%
Sodium	Max. 2.0
Assay (NaOH)	Max. 95.0

資料來源：德信化工

表 4.11 磷酸之化學成份

品 名	磷酸(Phosphoric Acid)
試驗項目	試驗結果
Chloride(Cl)	Max. 0.001 %
Nitrate (NO ₃)	To pass test
Sulfate (SO ₄)	Max. 0.006 %
Alkali and other phosphates (sulfate)	To pass test
Substances Reducing KMnO ₄	To pass test
Heavy Metals (as Pb)	Max. 0.001%
Iron (Fe)	Max. 0.005%
Arsenic (As)	Max. 0.0003%
Specific Gravity	1.700-1.710
Assay	Max. 85.0%

資料來源：德信化工

4.3 配比設計

4.3.1 膠結材料為水泥漿體之配比

此部份試驗首要工作重點在找出 A、B、C、D 四種粒徑骨材在單位體積中的孔隙率，求得各粒徑下之骨材孔隙率後可換算成孔隙體積，針對孔隙體積分別以水泥漿體來填充取代 50%、60%、70%、80% 孔隙體積。針對水灰比為 0.25 之水泥漿體，因流動性過低，故添加 5% 強塑劑以改善流動性。以水泥漿體作為膠結材料試驗配比如表 4.12 所示。

表 4.12 水泥漿體作為膠結材料試驗配比

漿體	粒徑	水灰比 (w/c)	漿體填充骨材孔隙百分比	骨材用量 (kg/m ³)	水泥用量 (kg/m ³)	拌和水用量 (kg/m ³)	減水劑用量 (kg/m ³)
水泥漿體	A	0.25	50%	1665	328	66	17
			60%	1665	394	79	20
			70%	1665	460	92	23
			80%	1665	525	105	26
		0.35	50%	1665	279	96	--
			60%	1665	335	115	--
			70%	1665	391	134	--
			80%	1665	447	154	--
		0.45	50%	1665	243	109	--
			60%	1665	291	131	--
			70%	1665	340	153	--
			80%	1665	389	175	--
	B	0.25	50%	1684	330	66	17
			60%	1684	396	79	20
			70%	1684	462	92	23
			80%	1684	568	106	26
		0.35	50%	1684	281	98	--
			60%	1684	337	118	--
			70%	1684	393	138	--
			80%	1684	449	157	--
		0.45	50%	1684	244	110	--
			60%	1684	293	132	--
			70%	1684	342	154	--
			80%	1684	391	176	--

表 4.12 水泥漿體作為膠結材料試驗配比(續)

漿體	粒徑	水灰比 (w/c)	漿體填充 骨材孔隙 百分比	骨材用量 (kg/m ³)	水泥用量 (kg/m ³)	拌和水用量 (kg/m ³)	減水劑用量 (kg/m ³)
水泥 漿體	C	0.25	50%	1683	324	65	16
			60%	1683	389	78	19
			70%	1683	454	91	23
			80%	1683	518	104	26
		0.35	50%	1683	276	96	--
			60%	1683	331	116	--
			70%	1683	386	135	--
			80%	1683	441	154	--
		0.45	50%	1683	240	108	--
			60%	1683	288	129	--
			70%	1683	336	151	--
			80%	1683	384	173	--
	D	0.25	50%	1682	337	67	17
			60%	1682	404	81	20
			70%	1682	471	94	24
			80%	1682	530	108	27
		0.35	50%	1682	286	100	--
			60%	1682	343	120	--
			70%	1682	401	140	--
			80%	1682	458	160	--
		0.45	50%	1682	249	112	--
			60%	1682	299	134	--
			70%	1682	349	157	--
			80%	1682	398	179	--

4.3.2 膠結材料為鹼活化爐石粉漿體之配比

此部份試驗主軸是鹼活化爐石粉漿體替換 4.3.1 節中所使用的水泥漿體。鹼活化爐石粉漿體配比如表 4.13 所示。

鹼活化劑之配製

本試驗所使用之鹼活化劑為氫氧化鈉與矽酸鈉混合而成，緩凝劑為磷酸。首先，把矽酸鈉加入蒸餾水中攪拌均勻，再加入氫氧化鈉，最後，加入磷酸，此時，磷酸將與之前的溶液產生酸鹼中和反應，必須使用攪拌子，使酸鹼中和產物溶解於溶液中。

表 4.13 鹼活化爐石粉漿體之配比

Liquid / Slag	0.35	0.40	0.45
骨材粒徑	B		
漿體填充骨材孔隙體積百分比	80%		
水(kg/m ³)	288	307	323
矽酸鈉溶液(kg/m ³)	144	154	162
氫氧化鈉(kg/m ³)	35	38	40
磷酸(kg/m ³)	37	39	41
鹼活化液(kg/m ³)	504	537	566
爐石粉(kg/m ³)	1439	1343	1258
骨材用量(kg/m ³)	1684	1684	1684

鹼活化劑濃度 $\text{SiO}_2=106 \text{ g/l}$, $\text{Na}_2\text{O}=105 \text{ g/l}$, 磷酸濃度 0.74 M 。

4.3.3 膠結材料為水泥漿體添加矽灰之配比

於水泥漿體中添加不同取代比例之卜作嵐材料-矽灰，替代比例為水泥體積的 10% 、 20% 、 30% ，配比如表 4.14 所示 。

表 4.14 矽灰替代水泥之漿體配比

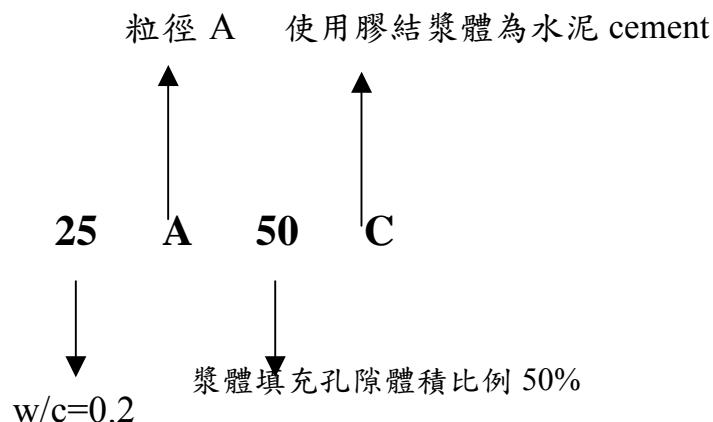
矽灰替代水泥比例	10%	20%	30%
骨材粒徑	B		
漿體填充骨材孔隙體積百分比	80%		
水泥(kg/m ³)	404	359	314
矽灰(kg/m ³)	39	78	118
拌和水(kg/m ³)	155	153	151
骨材用量(kg/m ³)	1684		

4.3.4 配比編號

針對 4.3.1、4.3.2、4.3.3 節中三種不同的膠結漿體與變換其他試驗參數可得 54 組配比。對於各配比製作編號的原則於後加以簡述：

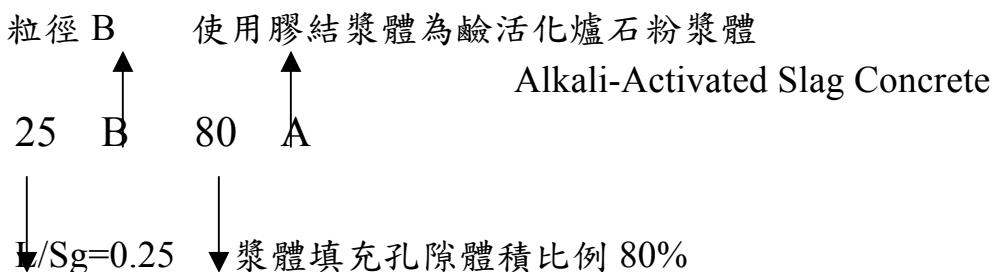
1.水泥漿體膠結材編號原則

以水泥漿體 $w/c=0.25$ ，骨材粒徑 A，漿體填充總孔隙百分比 50%為例，給定編號為：



2.鹼活化爐石粉漿體膠結材編號原則

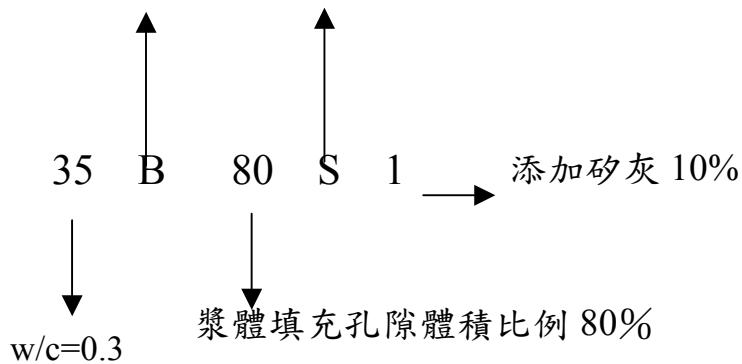
以鹼活化爐石粉漿體 $L/Sg=0.35$ ，骨材粒徑 B，漿體填充總孔隙百分比 80%為例，給定編號為：



3.水泥漿體添加矽灰漿體膠結材編號原則

以水泥漿體添加矽灰漿體 $w/c=0.35$ ，骨材粒徑 B，漿體填充總孔隙百分比 80%為例，添加矽灰 10%，給定編號為：

粒徑 B 使用膠結漿體水泥漿體添加砂灰漿體



4.配比編號表

將所有配比給定編號後，整理如表 4.15、4.16 及 4.17 所示。
第二部份變換漿體試驗配比如表 4.18 所示。

表 4.15 第一部份試驗配比編號表

漿體	粒徑	水灰比(w/c)	漿體填充骨材孔隙百分比	編號	備註
水泥漿體	A	0.25	50%	25A50C	
			60%	25A60C	
			70%	25A70C	
			80%	25A80C	
		0.35	50%	35A50C	
			60%	35A60C	
			70%	35A70C	
			80%	35A80C	
		0.45	50%	45A50C	
			60%	45A60C	
			70%	45A70C	
			80%	45A80C	
	B	0.25	50%	25B50C	
			60%	25B60C	
			70%	25B70C	
			80%	25B80C	
		0.35	50%	35B50C	
			60%	35B60C	
			70%	35B70C	
			80%	35B80C	第二部份 試驗 對照組
	C	0.25	50%	45B50C	
			60%	45B60C	
			70%	45B70C	
			80%	45B80C	
		0.35	50%	25C50C	
			60%	25C60C	
			70%	25C70C	
			80%	25C80C	
			50%	35C50C	
			60%	35C60C	
			70%	35C70C	
			80%	35C80C	

表 4.15 第一部份配比編號表(續)

漿體	粒徑	水灰比(w/c)	漿體填充骨材孔隙百分比	編號	
水泥漿體	C	0.45	50%	45C50C	
			60%	45C60C	
			70%	45C70C	
			80%	45C80C	
	D	0.25	50%	25D50C	
			60%	25D60C	
			70%	25D70C	
			80%	25D80C	
	D	0.35	50%	35D50C	
			60%	35D60C	
			70%	35D70C	
			80%	35D80C	
	D	0.45	50%	45D50C	
			60%	45D60C	
			70%	45D70C	
			80%	45D80C	

表 4.16 鹼活化爐石粉膠結材配比編號表

漿體	粒徑	L/Sg	漿體填充骨材孔隙百分比	編號
鹼活化 爐石粉	B	0.35	80%	35B80A
		0.4		40B80A
		0.45		45B80A

表 4.17 鹼活化爐石粉膠結材配比編號表

漿體	粒徑	w/c	漿體填充骨材孔隙百分比	矽灰添加量	編號
水泥漿體 添加矽灰	B	0.35	80%	10%	35B80S1
				20%	35B80S2
				30%	35B80S3

表 4.18 第二部份試驗配比編號表

漿體	粒徑	W/C	L/Sg	砂灰 添加比例	漿體填充骨 材孔隙 百分比	編號	備註		
水泥	B	0.35	-	-	80%	35B80C	對照組		
鹼活化爐石粉		-	0.35	-		35B80A	實驗組		
			0.40			40B80A			
			0.45			45B80A			
水泥添加砂灰		0.35	-	10%		35B80S1	實驗組		
				20%		35B80S2			
				30%		35B80S3			

4.4 試驗方法

4.4.1 試體製作

對於製作透水混凝土的試體配比與材料準備完備之後，以鼓式拌和機進行拌和作業。拌和方式如下：

1. 將骨材加入鼓式拌和機中，鼓式拌和機如圖 4.7 所示。
2. 加入水泥。
3. 啟動拌和機，預先攪拌乾料，使其充分混合。
4. 加入拌和水。若配比中有含減水劑者，得預先將減水劑與拌和水混合。
5. 拌和完成後下料至 PVC 桶中，進行灌製 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 圓柱試體、抗彎試驗樑試體。圓柱試體模與抗彎試體模如圖 4.8、圖 4.9 所示。
6. 灌製完成後，依 CNS 1230 規範於 24 小時後拆模，並將試體置於室內環境的飽合石灰水中，養護至試驗齡期。如圖 4.10。



圖 4.7 鼓式拌和機



圖 4.8 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 圓柱試體模



圖 4.9 抗彎試體模



圖 4.10 抗彎試體模

4.4.2 孔隙率測定

主要原理採用排水體積法，依據日本混凝土協會下屬的『環保型混凝土研究委員會』於 1998 年提出的『多孔混凝土性能試驗方法草案』規定的試驗法作孔隙率測定。

透水混凝土內部總孔隙率其中包含”連通孔隙率”，連通孔隙主導透水混凝土的透水性能，測定法首先以卡尺測量並計算試體體積 V_1 ，將試體浸入水中待試體飽水後秤取水中重量 W_1 ；將試體從水中取出並擦去試體表面多餘水分待重量恆定之後秤取空氣中重量 W_2 ，則連通孔隙率 P_1 計算如 4-1 式。

$$P_1 = [1 - (W_2 - W_1) / V_1] \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (4-1)$$

4.4.3 單位重測定

透水混凝土試體硬固並脫模之後放置入烘箱以 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 烘至恆重並秤取重量，並以卡尺測量試體使並計算其體積，並由重量除以體積則可得到混凝土之單位重。

4.4.4 抗壓強度試驗

本試驗係依據 CNS1232 圓柱試體法規範之規定進行圓柱試體抗壓強度試驗。當試體養護至 28 天齡期到達後，以磨平機（如圖 4.11）將試體上下兩側磨平並陰乾，隨後置於萬能材料試驗（圖 4.12）上，以每秒 $1.4 \sim 3.4 \text{ kgf/cm}^2$ 之加壓速度進行單軸載重試驗。待試體破壞後，紀錄其最大值，將此最大荷重除以受力面積即可得試體抗壓強度。



圖 4.11 試驗研磨機



圖 4.12 100頓萬能材料試驗機

4.4.5 抗彎強度試驗

本試驗依照 CNS1234 三分點載重法進行抗彎強度試驗，試體在拌合後分三層灌置在抗彎模中，經 24 小時拆模，並置試體於飽和石灰水中，於預定 28 天齡期時，將試體取出至面乾，藉由抗彎座（如圖 4.13）於萬能材料試驗機上進行抗彎試驗，由所讀得之最大破壞荷重代入式 4-2 即可計算出抗彎強度 (kgf/cm^2)。

$$\text{抗彎強度} (\text{kgf/cm}^2) = \frac{PL}{bH^2} \quad \dots \dots \dots \quad (4-2)$$

其中 P = 最大荷重 (kgf)

L = 試體支點間距 (cm)

b = 試體寬度 (cm),

H = 試體高度 (cm)



圖 4.13 抗彎座

4.4.6 剥裂強度試驗

本試驗依照 CNS3801 圓柱試體分裂抗張強度法進行試驗，試驗前先繪出試體的直徑及側面的高度，並記錄其試體直徑與高度，試驗過程中試體的上下端需墊以約 3.2 mm 厚之木條 (plywood)。若球座的承載面長度小於試體的長度，則必須在試體的上下加入承載塊 (supplementary bearing bar)。以每分鐘 7~14 kgf/cm² 的承載速度進行劈裂試驗，直至試體破壞，然後由式 4-3 求得劈裂強度值。

$$T = \frac{2P}{\pi Ld} \quad \dots \dots \dots \quad (4-3)$$

其中 T ：劈裂強度 (kN/m^2)

P ：最大加載荷重 (kN)

L ：試體長度 (m)

d ：試體直徑 (m)

4.4.7 透水係數試驗

本試驗透水係數測定採定水頭測定法，試驗方法為參照日本道路協會「鋪裝試驗法便覽」規定。本儀器(圖 4.14)為測定 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體之軸向透水係數測定。



圖 4.14 定水頭透水係數測定儀

首先以卡尺量測試體透水軸向厚度 L 與透水面面積 A 後將待測試體四周綑以不透水膠布，將試體置入透水儀器空腔內，並在試體頂部與儀器管壁之間塗上凡士林，防止多餘的水進入試體與管壁之間造成試驗誤差。開啟水源並導入透水儀器，儀器上部有溢流口排除多餘的進水以保持一恆定水頭 H ，經過一段時間 Δt 後，下部有透水水出水口利於蒐集透水經過待測試體的透水水 Q 體積，透水係數

K 即可以式 4-4 計算。

$$K = \frac{QL}{AH\Delta t} \quad \dots \dots \dots \quad (4-4)$$

式中 K ：透水係數(cm/sec)

Q ：透水水體積(ml)

L ：試體厚度(cm)

A ：試體透水面面積(cm²)

H ：水頭高(cm)

$\Delta t = t_1 - t_0$ ：測定時間(sec)；

4.4.8 健性試驗

本試驗參考 CNS1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健度試驗法。本試驗採用硫酸鎂作為試驗藥劑，將試體置入烘箱中 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 烘乾至恆重 W_1 後取出冷卻至恆溫，浸泡入依照規範規定調配之過飽和硫酸鎂溶液，液面至蓋沒試體頂部 13mm，浸泡時間不得少於 16 小時，亦不得多於 18 小時。浸泡時間經過之後取出試體以清水洗淨後烘乾至恆重 W_2 ，由式 4-5 計算試體重量損失率。

$$\text{重量損失率\%} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (4-5)$$

4.4.9 濾清試驗

本試驗係參考文獻^[43]，其試驗儀器由水資源實驗室提供，試驗方法參考國外 William James (2004) 相關文獻之試驗數據，採用其污染物之粒徑分佈及於鋪面上之分佈情形，以砂土均勻灑落於本試驗之透水鋪面上，進行懸浮固體去除試驗，觀察其於透水鋪面攔阻懸浮固體之變化情形。於懸浮固體去除試驗後，再以鋪面透水試驗系統對阻塞後之鋪面進行定水頭試驗，觀測本試驗之透水混凝土鋪面於阻塞後之最終入滲率(K_a)，最後與未受阻塞之透水混凝土鋪面之

最終入滲率(K_b)進行比較，以了解懸浮固體經降雨後造成鋪面阻塞之情形。

定水頭試驗時之透水係數的求取，可依據 Darcy 公式，量測試體長度 L 、截面積 A 並量取單位時間內之後，則可計算透水係數計算公式如式 4-6 所示。

$$K = \frac{\rho \times L \times Q}{A \times H} \quad \dots \dots \dots \quad (4-6)$$

式中 K 為透水係數； ρ 為水的密度； L 為鋪面厚度； Q 為單位時間所收集的水體積； A 為鋪面面積； H 為水頭高。

4.4.10 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀測

本試驗利用 SEM-EDAX 最主要的目地是在觀察各個不同配比膠結材間的微結構變化。SEM(Scanning Electron Microscope)即掃瞄式電子顯微鏡，係將高能聚焦電子光束在試體表面掃瞄，由於試體表面鍍上一層薄金膜，電子束接觸後便會導電產生訊號，而由接收器接收顯像於陰極射線管(CRT)上。其試驗步驟如下：

- (1) 將欲作觀測之試體用丙酮終止水化後，用烘箱烘乾。
- (2) 將試體粘固於一直徑 4cm 之不導磁圓盤上，並用空氣噴槍清除其上的粉屑，以確保受電子束打擊時，不會污染電子顯微鏡之真空管。
- (3) 將試體抽真空後，並在其上鍍一層厚約 200Å 的金膜。
- (4) 鍍好金膜的試體放入電子顯微鏡中，再一次抽真空，發射電子束掃瞄試體，觀察漿體微結構與水化反應物之形成與變化狀況，進行照相及利用 SEM-EDAX 進行半定量分析觀察。

第五章 試驗結果與分析

5.1 目視檢查

透水性能與力學強度是透水混凝土最重要的兩項性質，尤其以透水性能最為重要。力學強度良窳關係到透水混凝土的應用層級，強者可作為副結構、行車道路鋪面、消波消能構造等等，弱者可作為人行道路鋪面等等。透水性能方面，透水性能低弱者，在透水需求的應用上將被大為限制。

有鑑於此，透水性能為本研究主要考量，因此在確定試體配比後所拌製之試體，首要先以目測方式檢視試體有無漿體垂流現象，將發生垂流現象亦即喪失透水性能之試體配比予以剔除，此舉將可確定後續進行之試驗是在保有一定透水性能前提之下進行。

目視判斷結果發現，以水泥漿體為膠結材料， $w/c=0.45$ ，填充孔隙百分比 70% 與 80% 此二組配比在各粒徑之下皆發生垂流現象，即配比編號 45A70C、45A80C、45B70C、45B80C、45C70C、45C80C、45D70C、45D80C 此 8 組配比發生垂流現象，原因為 $w/c=0.45$ 之漿體流動性能較高，並且在上列配比中，漿量的使用也較高(分別填充孔隙 70%、80%)，此狀態之下，漿體自重已超出所能裹覆在骨材顆粒周圍的黏結力而受重力牽引向下流淌發生垂流。

垂流現象發生，使得試體完全喪失透水性能，因此發生垂流現象之試體配比將予以剔除，目視檢查垂流與否之結果如表 5.1 所示。

表 5.1 目視檢查垂流現象結果

編號	外觀	編號	外觀	編號	外觀	編號	外觀
25A50C	無異	35A50C	無異	45A50C	無異	35B80S1	無異
25A60C	無異	35A60C	無異	45A60C	無異	35B80S2	無異
25A70C	無異	35A70C	無異	45A70C	垂流現象	35B80S3	無異
25A80C	無異	35A80C	無異	45A80C	垂流現象		
25B50C	無異	35B50C	無異	45B50C	無異		
25B60C	無異	35B60C	無異	45B60C	無異		
25B70C	無異	35B70C	無異	45B70C	垂流現象		
25B80C	無異	35B80C	無異	45B80C	垂流現象		
25C50C	無異	35C50C	無異	45C50C	無異		
25C60C	無異	35C60C	無異	45C60C	無異		
25C70C	無異	35C70C	無異	45C70C	垂流現象		
25C80C	無異	35C80C	無異	45C80C	垂流現象		
25D50C	無異	35D50C	無異	45D50C	無異		
25D60C	無異	35D60C	無異	45D60C	無異		
25D70C	無異	35D70C	無異	45D70C	垂流現象		
25D80C	無異	35D80C	無異	45D80C	垂流現象		

5.2 單位重試驗

透水混凝土中含有較多孔隙，因此單位重相較於一般混凝土顯得略小，各配比單位重試驗結果如表 5.2 所示。

表 5.2 單位重試驗結果

編號	單位重 (kg/m^3)	編號	單位重 (kg/m^3)	編號	單位重 (kg/m^3)	編號	單位重 (kg/m^3)
25A50C	1981	35A50C	1940	45A50C	1930	35B80A	2216
25A60C	2038	35A60C	2033	45A60C	2018	40B80A	2184
25A70C	2075	35A70C	2066	45A70C	-	45B80A	2171
25A80C	2229	35A80C	2164	45A80C	-	35B80S1	2096
25B50C	1988	35B50C	1970	45B50C	1944	35B80S2	1994
25B60C	2041	35B60C	2028	45B60C	2018	35B80S3	1864
25B70C	2051	35B70C	2044	45B70C	-		
25B80C	2215	35B80C	2143	45B80C	-		
25C50C	1987	35C50C	1978	45C50C	1953		
25C60C	2047	35C60C	2030	45C60C	2011		
25C70C	2131	35C70C	2067	45C70C	-		
25C80C	2201	35C80C	2165	45C80C	-		
25D50C	1984	35D50C	1964	45D50C	1951		
25D60C	2033	35D60C	2018	45D60C	2002		
25D70C	2109	35D70C	2098	45D70C	-		
25D80C	2173	35D80C	2152	45D80C	-		

在水泥漿體為膠結材料之配比部份，以固定粒徑來觀察單位重變化趨勢，單位重增加是隨漿體的使用量增加而上升，卻也隨著水灰比的上升而減少，如圖 5.1、圖 5.2、圖 5.3、圖 5.4 所示。

比較變換漿體對單位重之影響，由圖 5.5 所示，使用鹼活化爐石粉漿體之配比其單位重皆大於對照組 35B80C，水泥漿體添加矽灰之配比單位重皆小於對照組 35B80C，並且則單位重趨勢隨著添加矽灰量越多而減低。

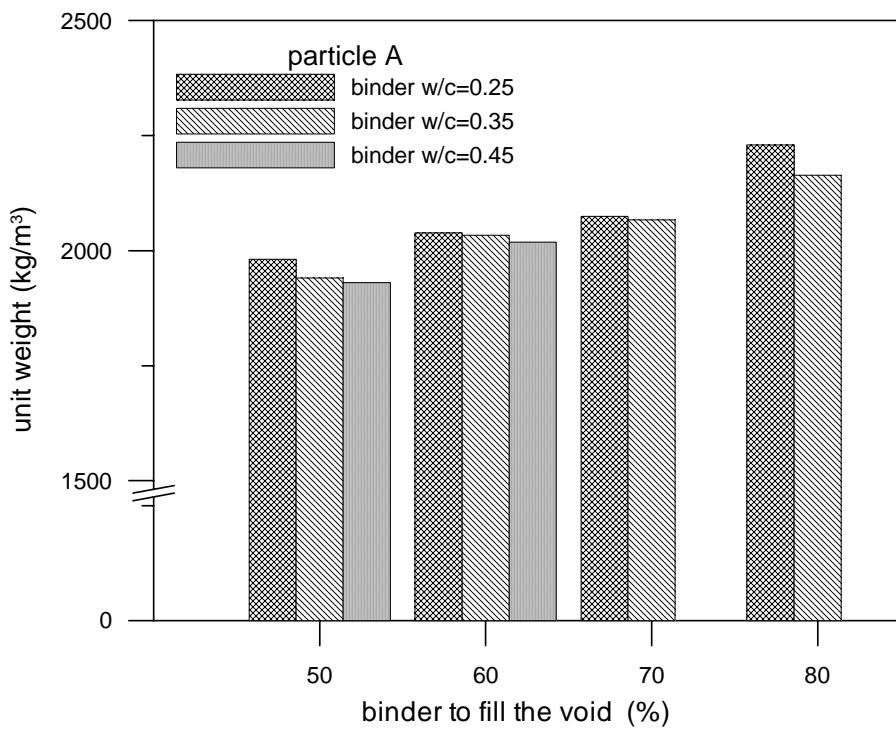


圖 5.1 A 粒徑下單位重比較圖

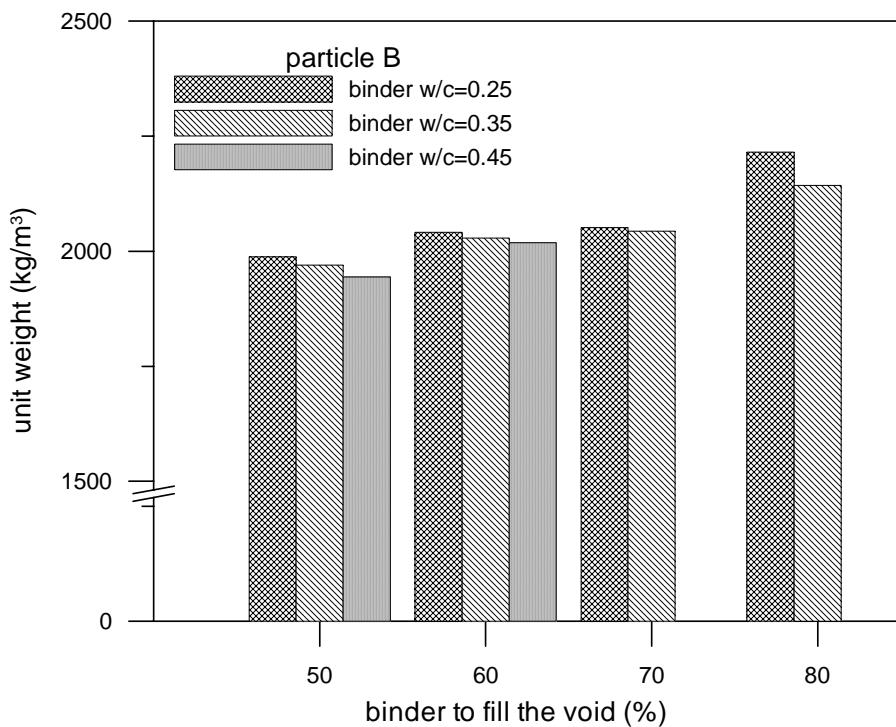


圖 5.2 B 粒徑下單位重比較圖

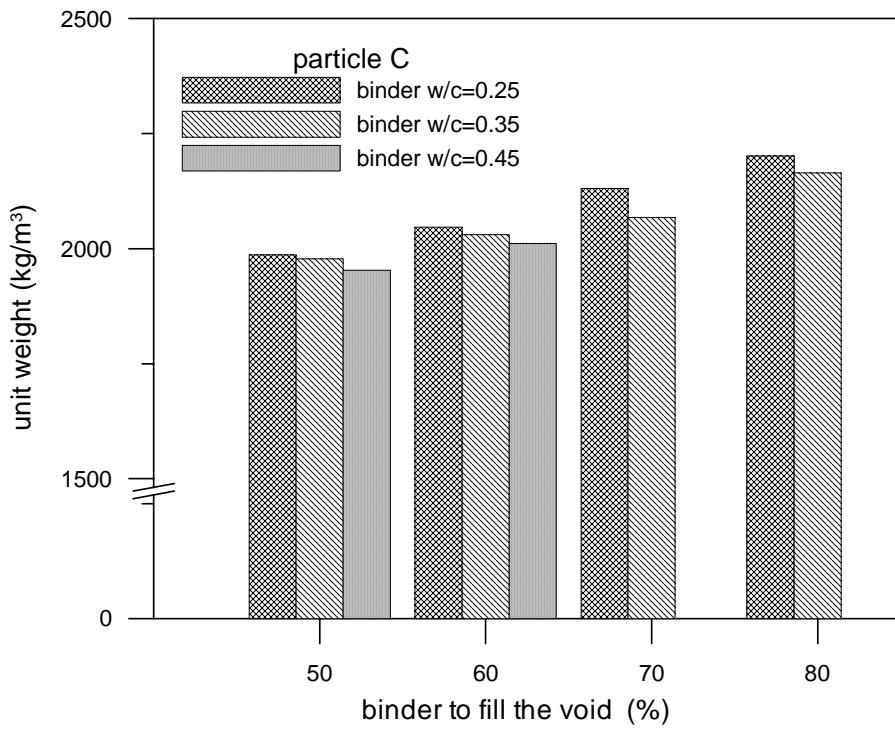


圖 5.3 C 粒徑下單位重比較圖

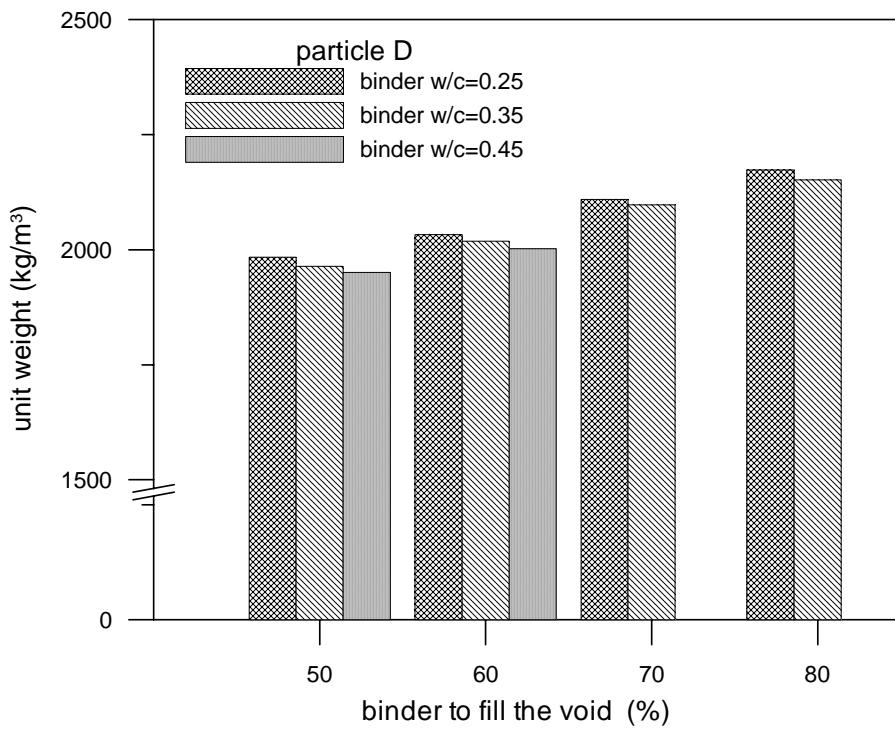


圖 5.4 D 粒徑下單位重比較圖

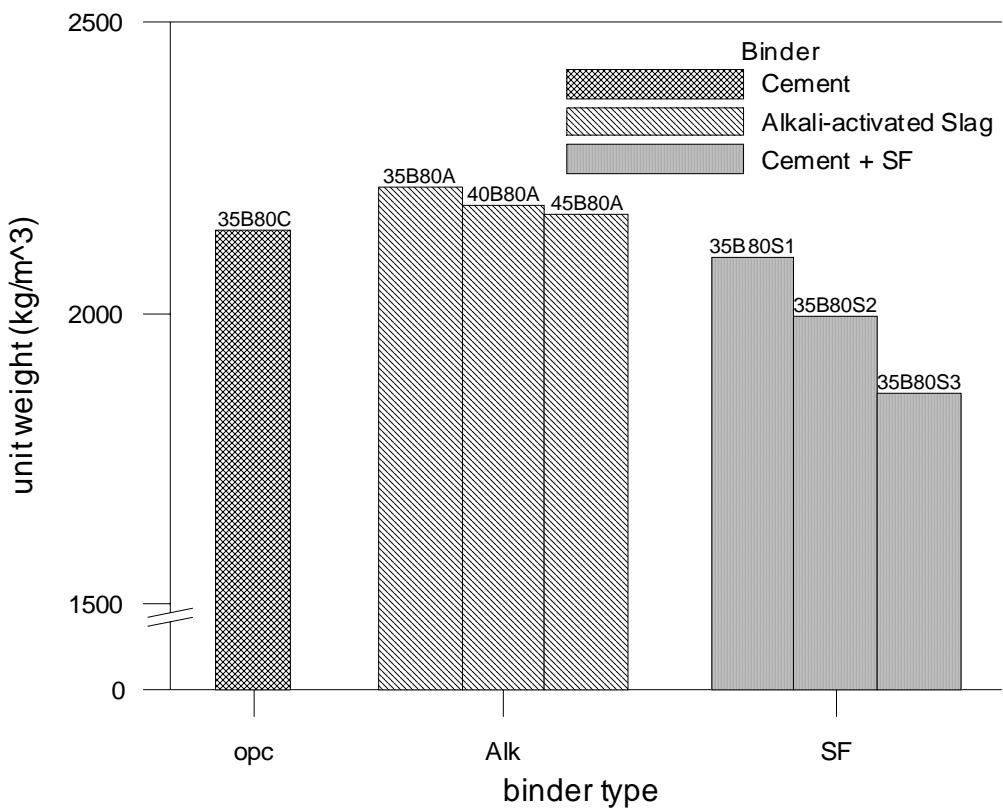


圖 5.5 變換不同膠結漿體之單位重比較圖

5.3 透水試驗

各配比之透水係數試驗數據如表 5.3 所示，由表中可知透水係數 K ，在 D 粒徑配比下表現最優異，尤以 D 粒徑下 $w/c=0.25$ ，漿體填充孔隙百分比 50% 即配比編號 25D50C 組，透水係數 $K=0.1440\text{ cm/sec}$ 為全配比中最大者。而 A 粒徑下 $w/c=0.35$ ，漿體填充孔隙百分比 80% 即配比編號 35A80C 組，透水係數 $K=0.0304\text{ cm/sec}$ 為全配比中最小者。對表 5.3 之數據，固定粒徑變數製作分析圖進行比較如圖 5.6、圖 5.7、圖 5.8、圖 5.9 所示。

表 5.3 各配比透水係數

編號	透水 係數 K (cm/sec)	編號	透水 係數 K (cm/sec)	編號	透水 係數 K (cm/sec)	編號	透水 係數 K (cm/sec)
25A50C	0.1140	35A50C	0.0997	45A50C	0.0881	35B80S1	0.0454
25A60C	0.1052	35A60C	0.0555	45A60C	0.0464	35B80S2	0.0441
25A70C	0.0852	35A70C	0.0323	45A70C	-	35B80S3	0.0444
25A80C	0.0436	35A80C	0.0304	45A80C	-		
25B50C	0.1259	35B50C	0.1192	45B50C	0.1176		
25B60C	0.1163	35B60C	0.1044	45B60C	0.0925		
25B70C	0.0864	35B70C	0.0585	45B70C	-		
25B80C	0.0857	35B80C	0.0439	45B80C	-		
25C50C	0.1423	35C50C	0.1273	45C50C	0.1210		
25C60C	0.1283	35C60C	0.1199	45C60C	0.1097		
25C70C	0.1185	35C70C	0.1000	45C70C	-		
25C80C	0.1126	35C80C	0.0905	45C80C	-		
25D50C	0.1440	35D50C	0.1355	45D50C	0.1331		
25D60C	0.1350	35D60C	0.1292	45D60C	0.1283		
25D70C	0.1284	35D70C	0.1131	45D70C	-		
25D80C	0.1149	35D80C	0.1105	45D80C	-		

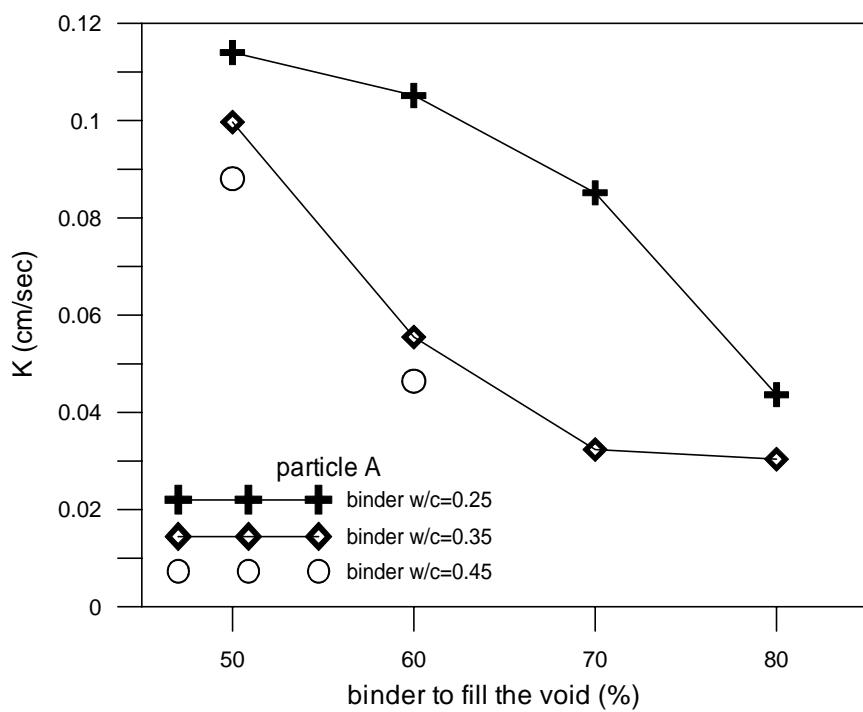


圖 5.6 A 粒徑下透水係數比較圖

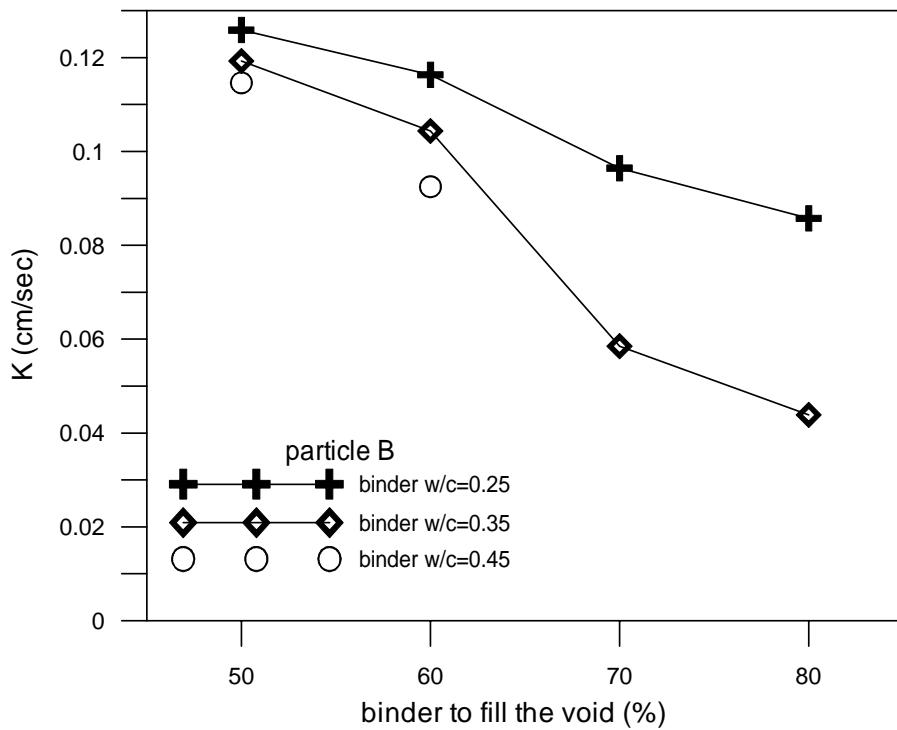


圖 5.7 B 粒徑下透水係數比較圖

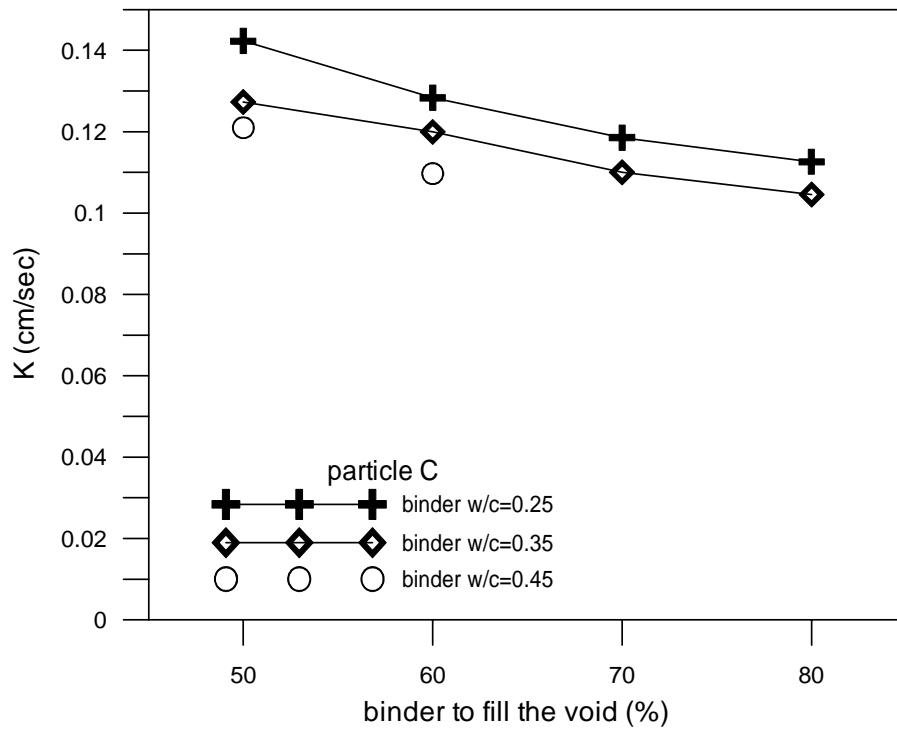


圖 5.8 C 粒徑下透水係數比較圖

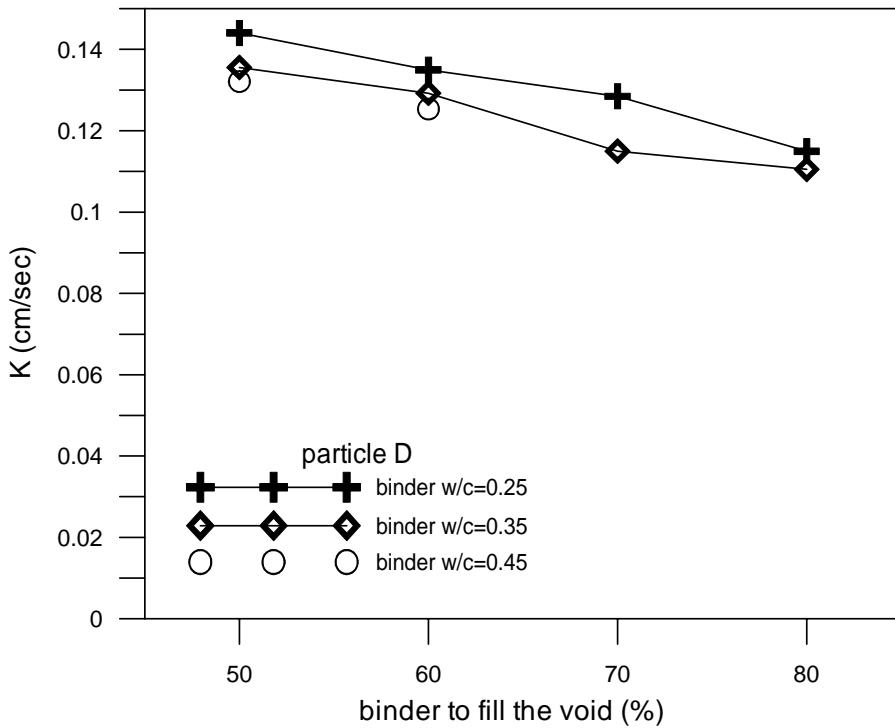


圖 5.9 D 粒徑下透水係數比較圖

由圖 5.6~圖 5.9 所示，在各粒徑之下的透水係數 K 之趨勢是隨著漿體使用量增加而減少，代表漿體使用量增加，填塞試體內透水路徑的比例會增加，而造成透水性的減少。

在圖中亦可發現在各粒徑之下，使用漿體的 w/c 比亦會影響透水係數，透水係數的趨勢是隨著漿體 w/c 比增加而遞減，原因為漿體在低 w/c 比狀態下擁有較高的黏稠度，可以完整的裹覆在骨材顆粒周圍，試體硬固後裹覆的漿體與骨材形成完整顆粒，顆粒之間依舊呈現點對點接觸結構，此結構狀態下之孔隙即形成透水路徑。反觀高 w/c 比漿體試體，漿體除了裹覆在骨材顆粒周圍之外，漿體流動性較高的因素下，會有無法附著於骨材顆粒餘漿產生阻斷透水路徑的可能，造成透水性的損失。

對於表 5.3 之數據，採固定 w/c 比進行其他參數的比較，繪製如圖 5.10、圖 5.11、圖 5.12 所示。

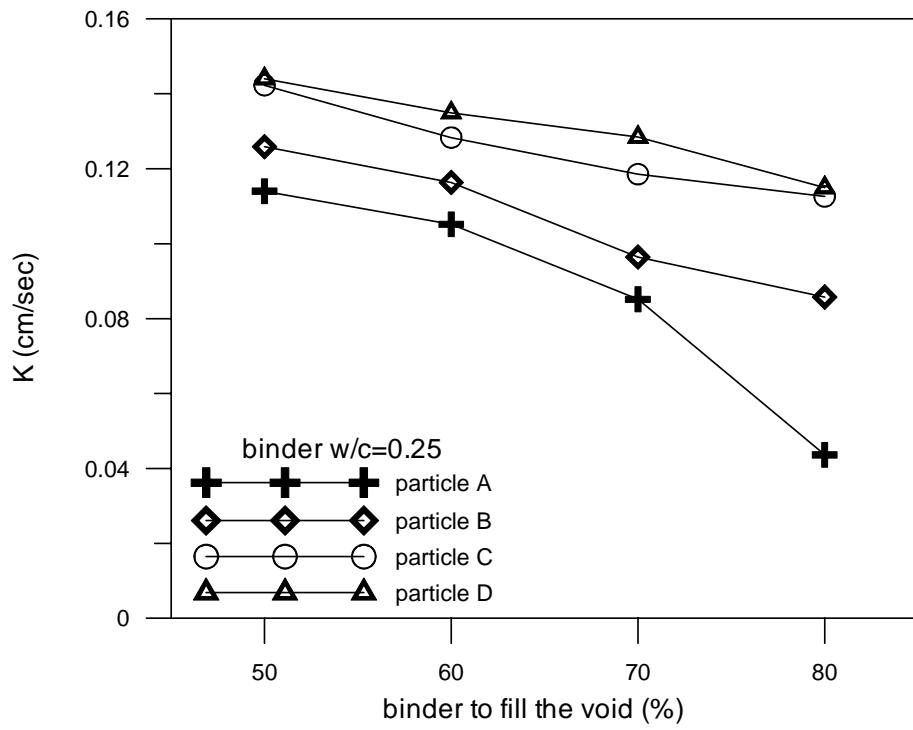


圖 5.10 $w/c=0.25$ 下透水係數比較圖

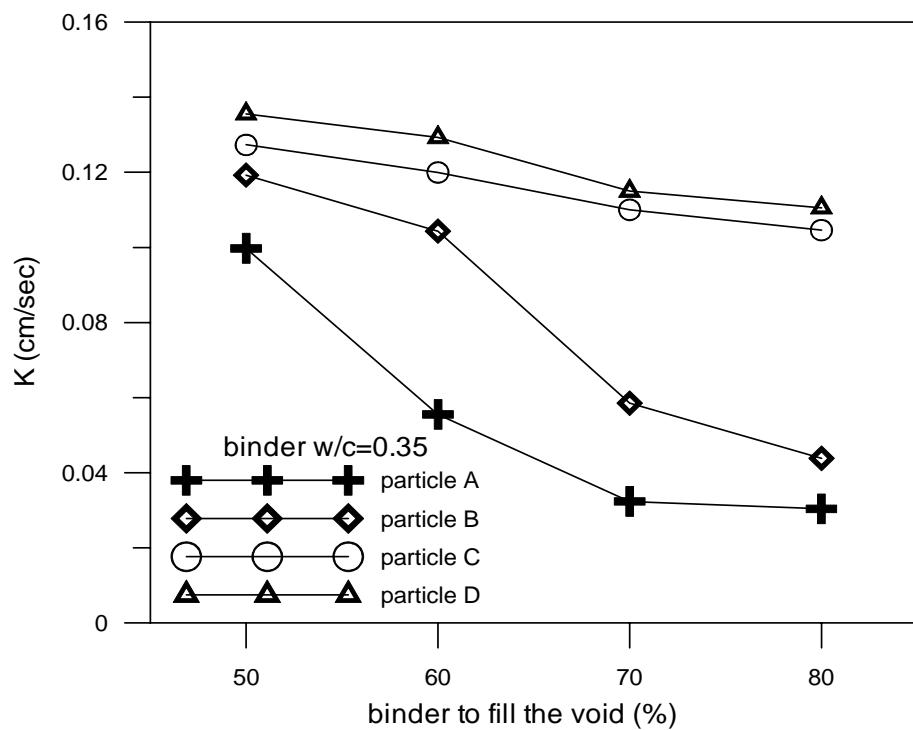


圖 5.11 $w/c=0.35$ 下透水係數比較圖

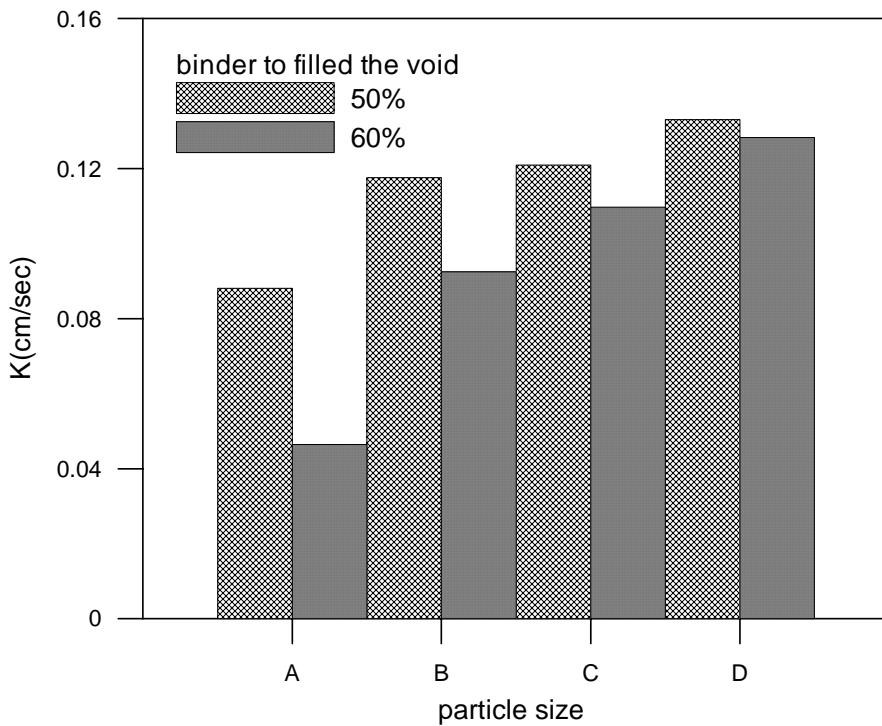


圖 5.12 $w/c=0.45$ 下透水係數比較圖

由圖 5.10~圖 5.12 可知，使用較大粒徑骨材之配比其透水性明顯大於小粒徑配比者，此現象由於較大顆粒粒徑骨材在堆疊狀況下所產生的孔隙較大於小顆粒粒徑骨材，因此大粒徑者擁有較大的孔隙，在相同的使用填充漿體量的條件之下，小顆粒粒徑骨材堆疊產生的孔隙較有可能會被漿體所完全填充，使得透水路徑被填塞而造成透水性的折減。大粒徑骨材堆疊產生的空隙較大，雖然漿體填充後透水性會下降，但大孔隙受到漿體填充後產生透水路徑被阻斷的敏感度仍舊小於小粒徑骨材者，因此相較之下大顆粒配比透水性之表現仍優於小顆粒配比。

比較變換膠結漿體對於透水性的影響如圖 5.13 所示。

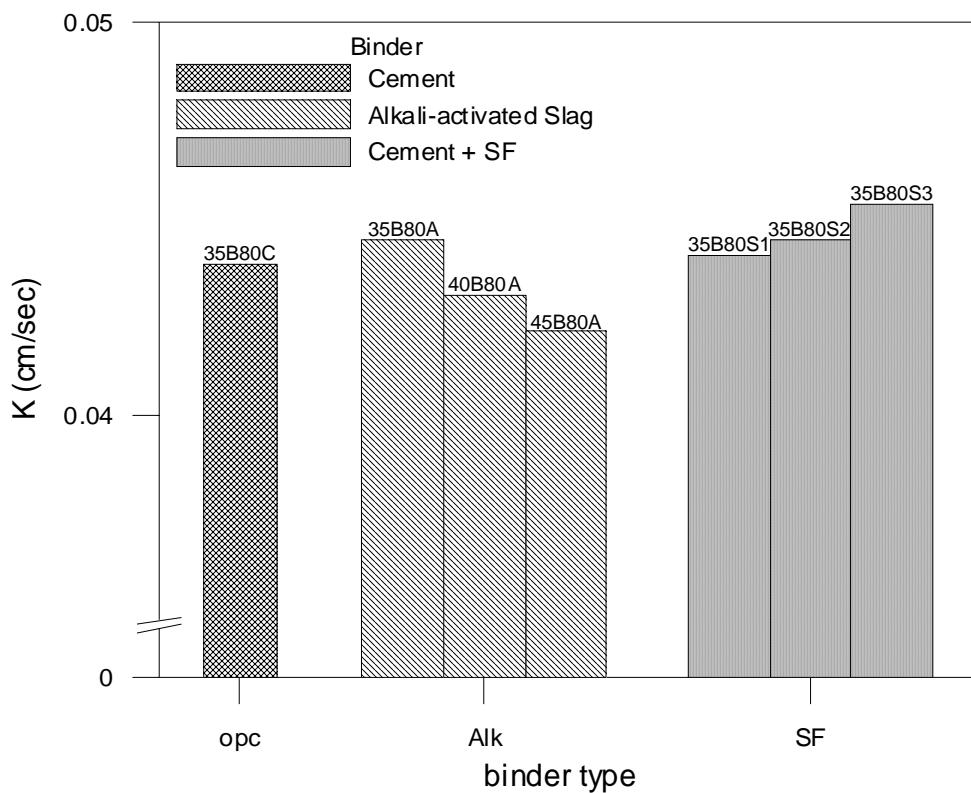


圖 5.13 變換不同膠結漿體透水係數比較圖

不同的漿體作用在相同粒徑骨材，並使用相同的漿體量，由圖 5.3 比較經計算後三種膠結漿體之透水係數差異在 5% 之內，可知透水性相近。擇其中 Alk 組與 SF 組各自微小透水差異亦可由漿體流動性解釋之，使用鹼活化爐石粉漿體之 Alk 組中，35B80A 配比所使用的漿體其 $L/Sg=0.35$ ，黏稠性較高，以漿體流動性對骨材顆粒裹覆能力的觀點解釋之，此配比之滲透係數是高於 40B80A 與 45B80A 的。

使用水泥添加矽灰之 SF 組之透水趨勢亦可由漿體黏稠性來解釋，添加矽灰比例最高配比 35B80S3 其黏稠度最高，因此透水係數是 SF 組中最大者。

5.4 孔隙率測定

透水混凝土內部結構特性較不緻密，因為使用不足量的漿體會產生許多孔隙，主導透水性能的連通孔隙率可以透過試驗測定，結果如表 5.4 所示。

表 5.4 孔隙率試驗結果

編號	連通孔隙率%	編號	連通孔隙率%	編號	連通孔隙率%	編號	連通孔隙率%
25A50C	17.5	35A50C	14.5	45A50C	10.7	35B80A	4.3
25A60C	15.1	35A60C	6.2	45A60C	4.8	40B80A	4.3
25A70C	10.8	35A70C	3.2	45A70C	-	45B80A	4.1
25A80C	4.5	35A80C	3.0	45A80C	-	35B80S1	4.6
25B50C	19.9	35B50C	17.3	45B50C	16.3	35B80S2	4.5
25B60C	14.8	35B60C	12.2	45B60C	10.1	35B80S3	4.2
25B70C	9.8	35B70C	6.2	45B70C	-		
25B80C	9.1	35B80C	4.4	45B80C	-		
25C50C	23.4	35C50C	17.2	45C50C	14.4		
25C60C	17.5	35C60C	16.5	45C60C	10.8		
25C70C	14.3	35C70C	12.2	45C70C	-		
25C80C	13.6	35C80C	11.4	45C80C	-		
25D50C	22.2	35D50C	20.1	45D50C	17.8		
25D60C	18.1	35D60C	14.3	45D60C	14.0		
25D70C	13.4	35D70C	11.5	45D70C	-		
25D80C	11.1	35D80C	9.9	45D80C	-		

針對表 5.4 孔隙率試驗數據，固定粒徑此參數而比較其餘參數可繪製圖 5.14、圖 5.15、圖 5.16、圖 5.17。

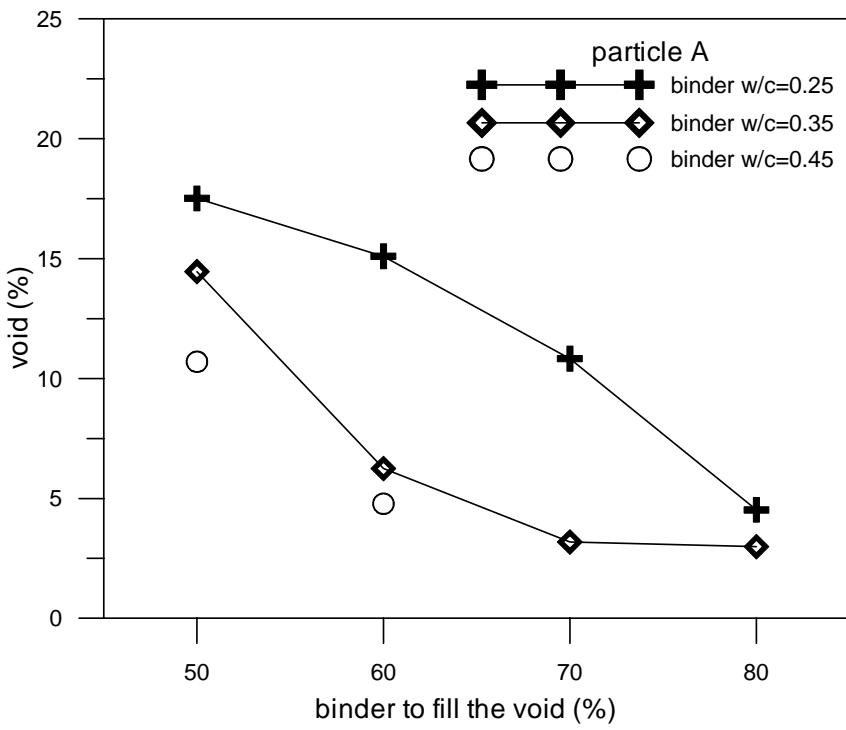


圖 5.14 A 粒徑下連通孔隙率比較

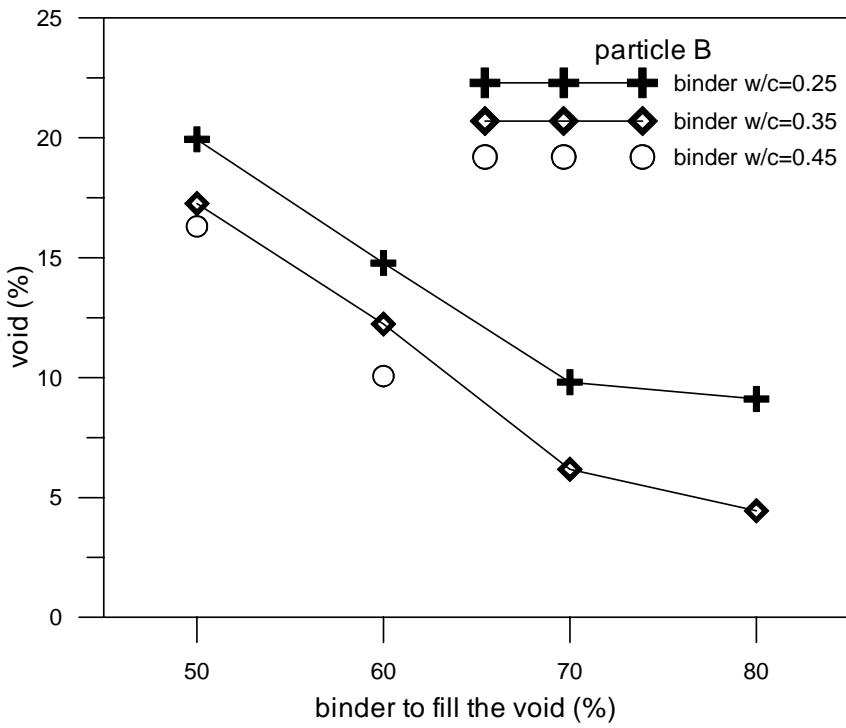


圖 5.15 B 粒徑下連通孔隙率比較

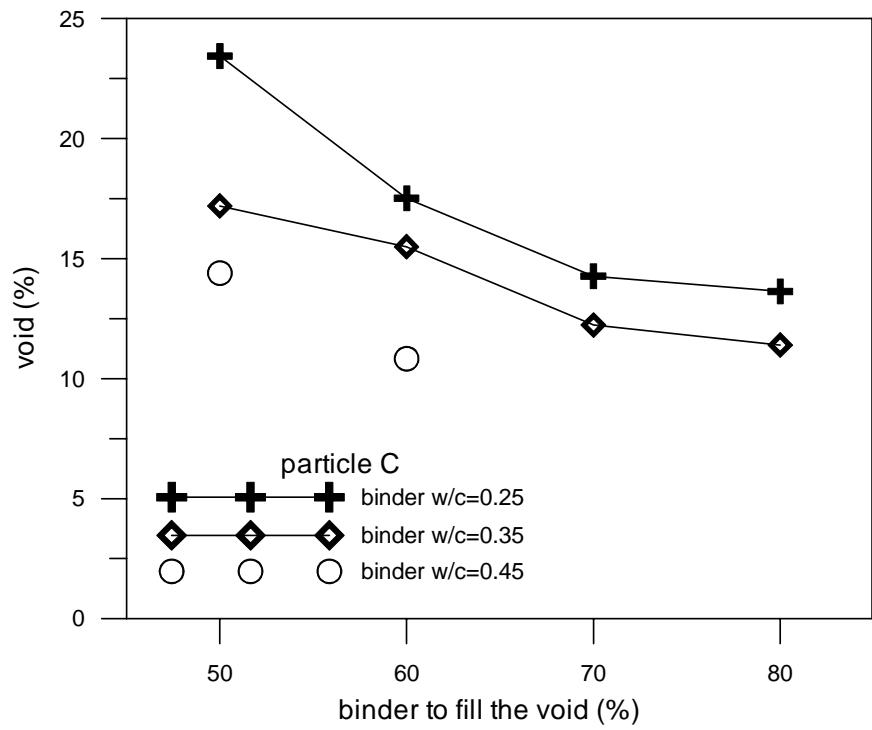


圖 5.16 C 粒徑下連通孔隙率比較

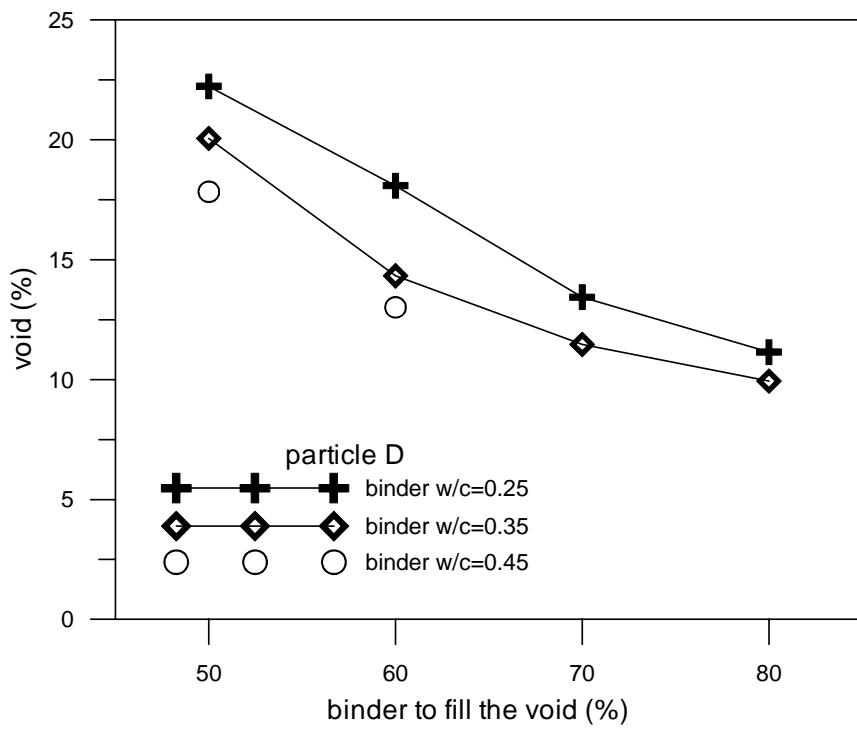


圖 5.17 D 粒徑下連通孔隙率比較

由圖 5.14~圖 5.17 顯示在各粒徑配比之下比較其他參數可得固定趨勢，透水混凝土中孔隙率通常與漿體使用量之間存在著相反之趨勢關係。變更膠結漿體試驗結果如圖 5.18 所示。

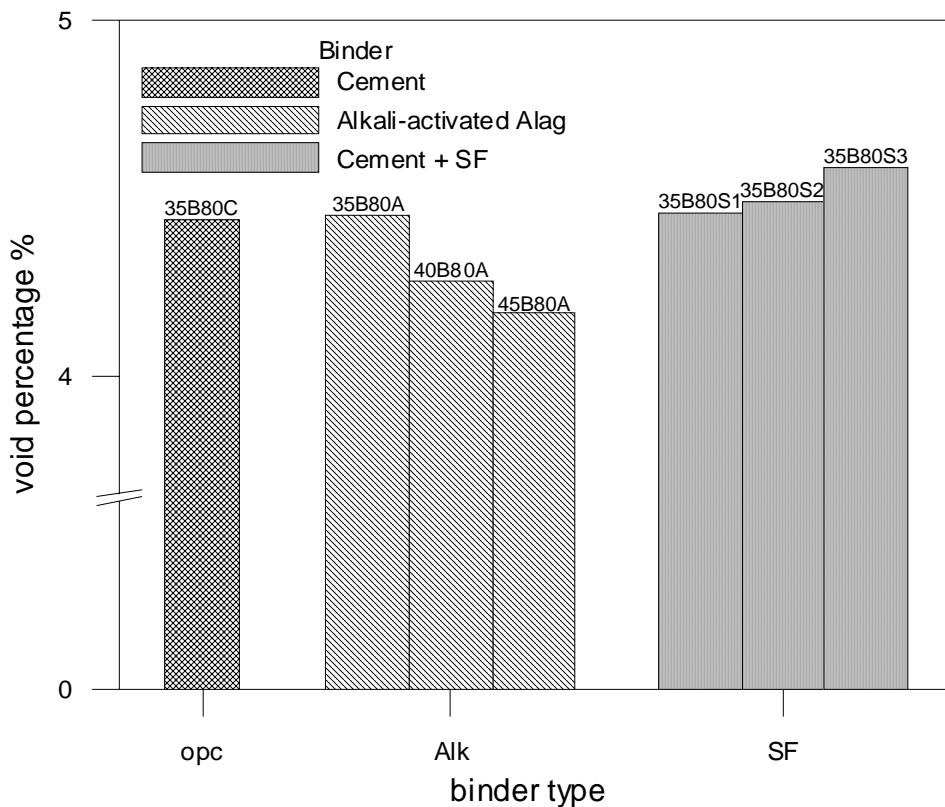


圖 5.18 變換不同膠結漿體連通孔隙率比較

由圖 5.18 得知，不同膠結漿體應用相同漿體使用量使用在相同粒徑骨材上，其連通孔隙率差異經計算後在 4.3% 以內，並無太大差異。

5.5 抗壓強度試驗

本試驗全配比抗壓強度試驗數據整理如表 5.5 所示。在全部配比中抗壓強度最高者為使用鹼活化爐石粉漿體之配比，配比編號為 35B80A，其抗壓強度值為 28.73MPa，抗壓強度最低者為使用水泥漿體，配比編號為 45D50C，抗壓強度為 5.62MPa。將表 5.5 數據整理，固定粒徑方式進行比較其他參數可繪製成圖 5.19、圖 5.20、圖 5.21、圖 5.22。

表 5.5 抗壓強度試驗結果

編號	抗壓強度 (MPa)	編號	抗壓強度 (MPa)	編號	抗壓強度 (MPa)	編號	抗壓強度 (MPa)
25A50C	17.49	35A50C	12.30	45A50C	10.62	35B80A	28.73
25A60C	19.01	35A60C	16.01	45A60C	14.83	40B80A	24.98
25A70C	22.61	35A70C	20.95	45A70C	-	45B80A	17.49
25A80C	25.67	35A80C	24.94	45A80C	-	35B80S1	21.98
25B50C	17.07	35B50C	11.87	45B50C	8.74	35B80S2	15.43
25B60C	17.45	35B60C	14.49	45B60C	11.62	35B80S3	7.68
25B70C	20.36	35B70C	18.81	45B70C	-		
25B80C	21.95	35B80C	20.86	45B80C	-		
25C50C	16.26	35C50C	11.24	45C50C	7.49		
25C60C	16.86	35C60C	13.18	45C60C	9.49		
25C70C	20.01	35C70C	15.51	45C70C	-		
25C80C	21.38	35C80C	16.49	45C80C	-		
25D50C	13.45	35D50C	10.34	45D50C	5.62		
25D60C	13.68	35D60C	11.87	45D60C	7.93		
25D70C	17.32	35D70C	14.86	45D70C	-		
25D80C	19.20	35D80C	15.61	45D80C	-		

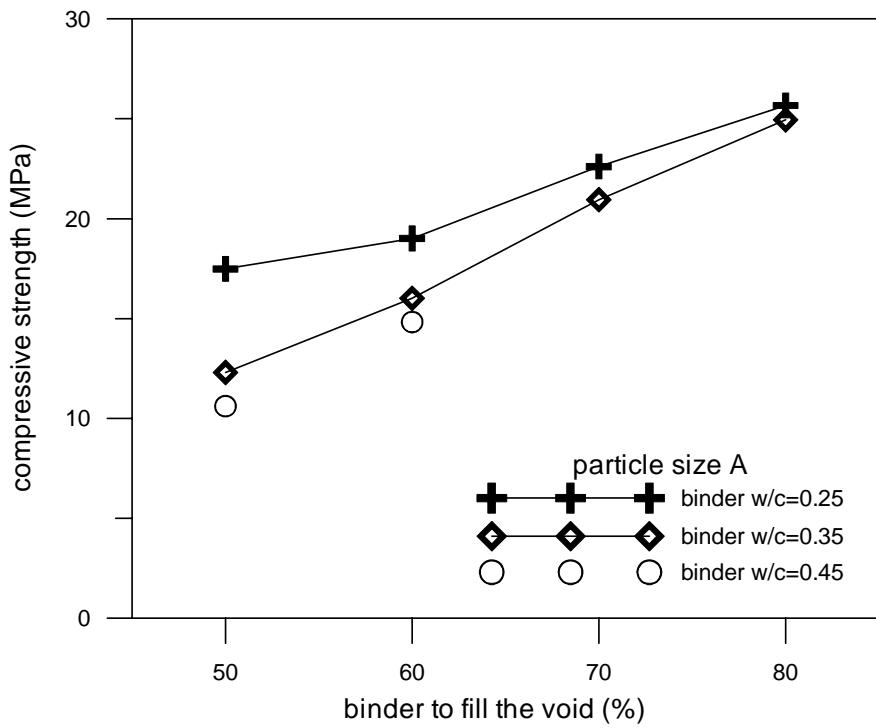


圖 5.19 A 粒徑下抗壓強度比較

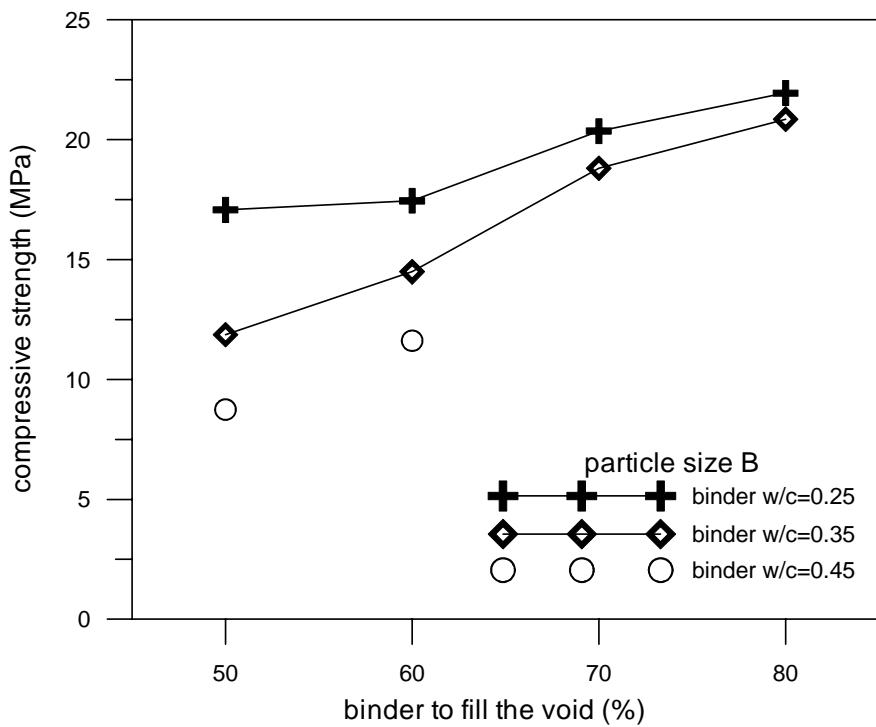


圖 5.20 B 粒徑下抗壓強度比較

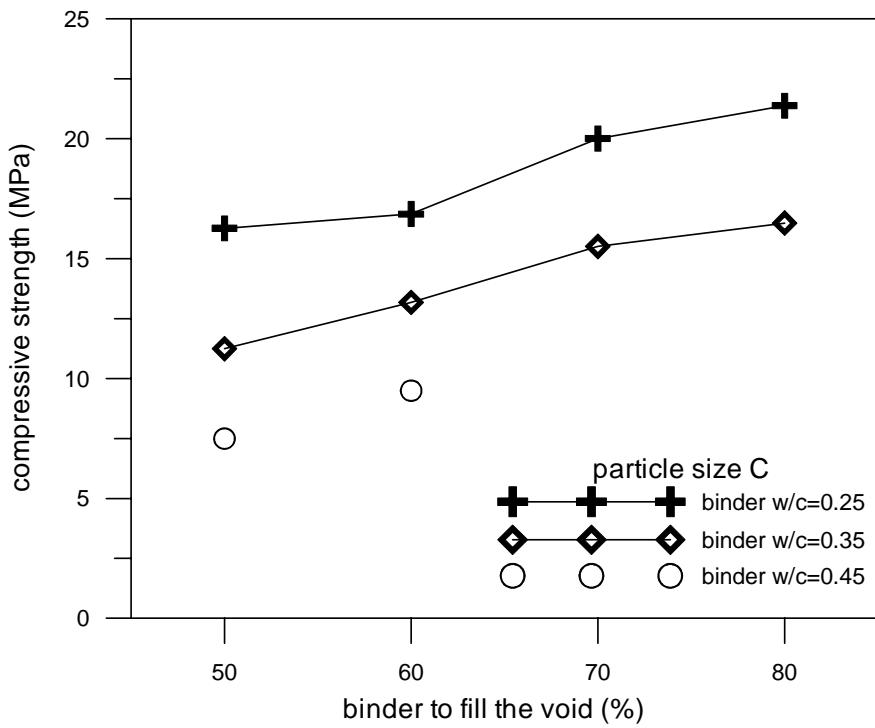


圖 5.21 C 粒徑下抗壓強度比較

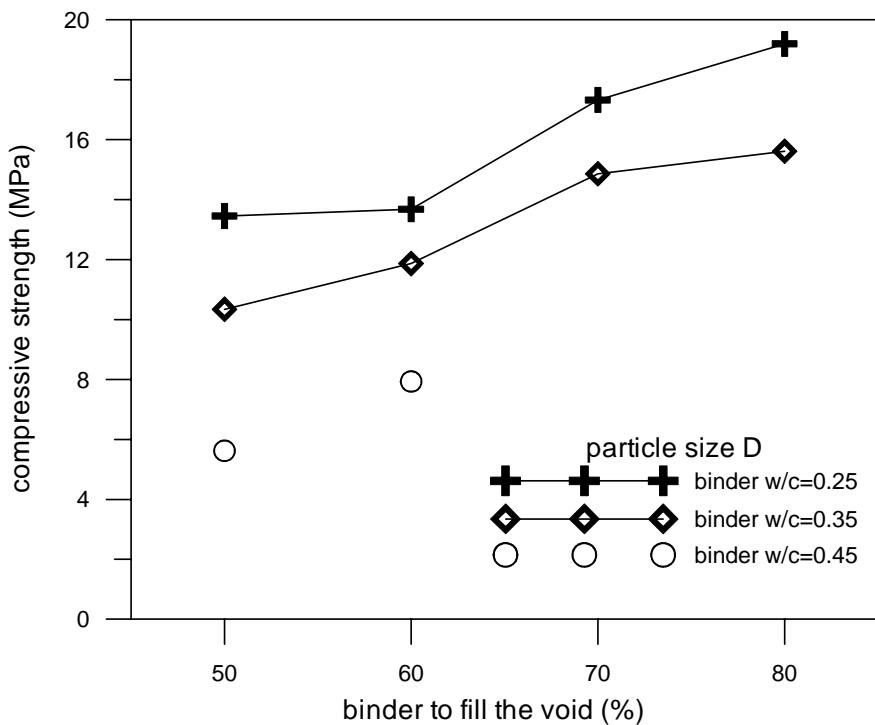


圖 5.22 D 粒徑下抗壓強度比較

試體抗壓強度由圖 5.23~圖 5.25 可得知，抗壓強度的提昇與膠結漿體 w/c 比有關，此點與一般混凝土之設計概念相同。漿體 w/c 比越低則整體抗壓強度會有提高的現象。此外，透水混凝土強度來源除了骨材顆粒之間接觸點堆積之外，膠結漿體硬固之後亦可產生強度，因此漿體的使用量越高，亦有助於整體強度的提昇。

為探討其他參數對整體抗壓強度之影響，以固定水灰比的方式進行比較，由表 5.5 可繪製圖 5.23、圖 5.24、圖 5.25。

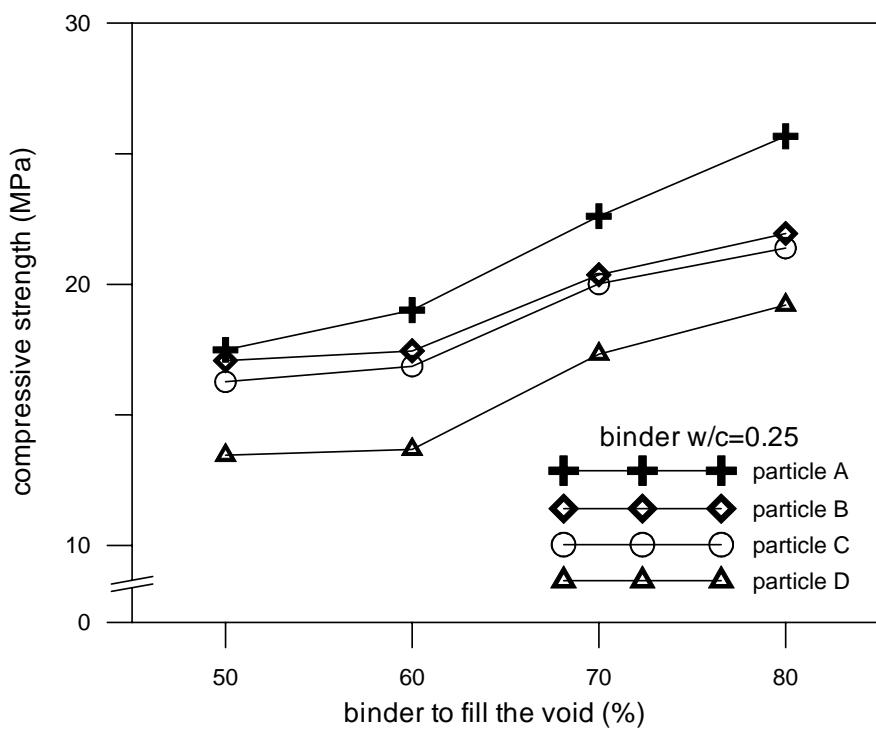


圖 5.23 $w/c=0.25$ 下抗壓強度比較

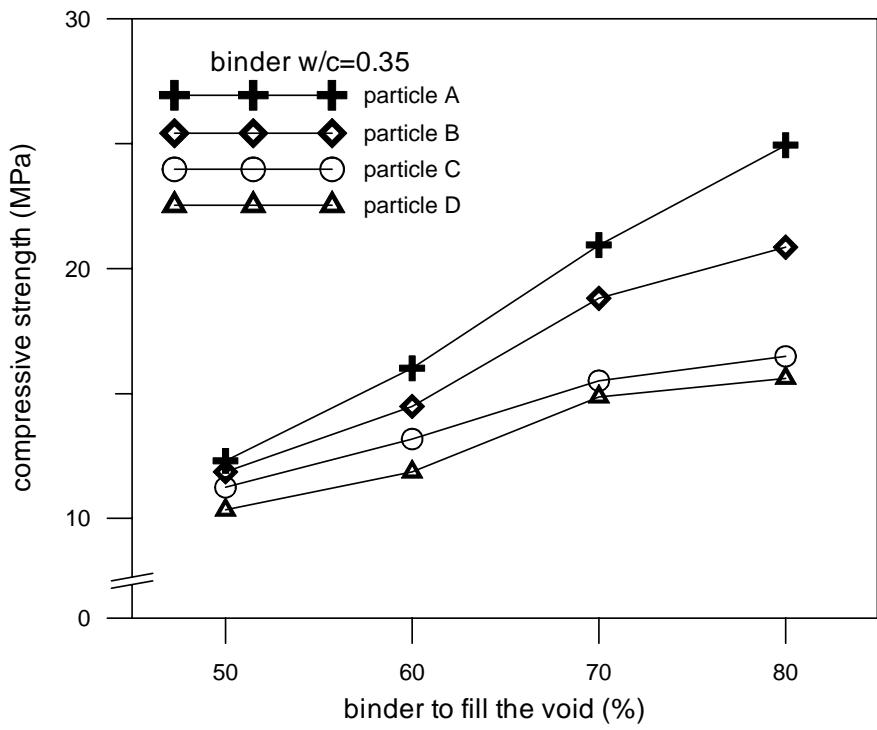


圖 5.24 w/c=0.35 下抗壓強度比較

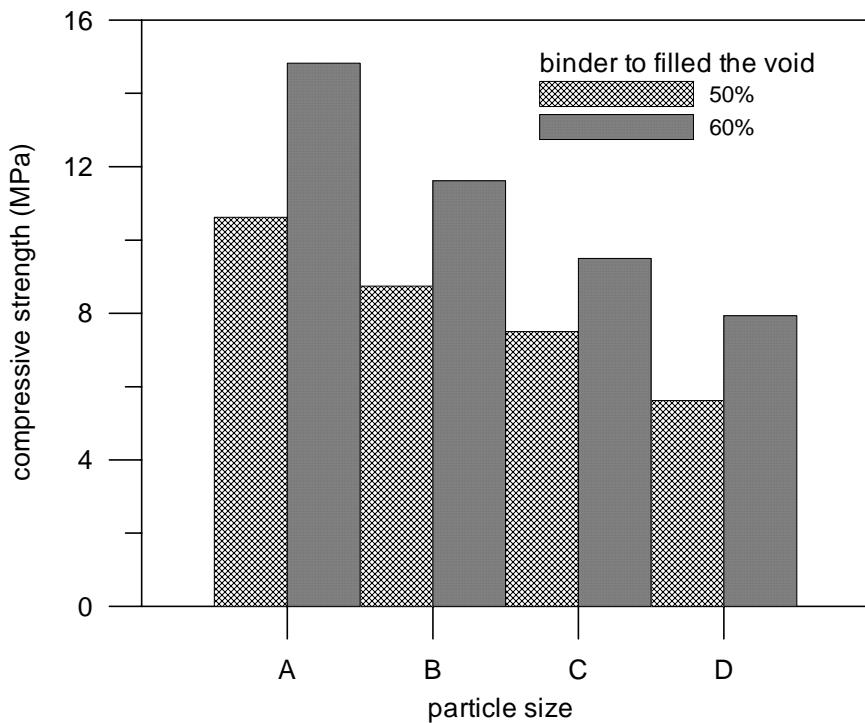


圖 5.25 w/c=0.45 下抗壓強度比較

固定 w/c 比進行其他參數之比較由圖 5.23~圖 5.25 得知，抗壓強度之提昇除了與膠結漿體使用量成正比關係之外，亦與骨材顆粒粒徑成相反趨勢。骨材堆積而產生之強度為透水混凝土強度來源之一，因此骨材之間接觸點越多，則整體抗壓強度越強，而骨材粒徑大小與骨材間接觸點多寡有密不可分的關係，因此可推論並且由試驗印證骨材粒徑大小與抗壓強度成相反趨勢。

接著比較變換膠結漿體對抗壓強度之影響，可由表 5.6 之數據繪製圖 5.26。

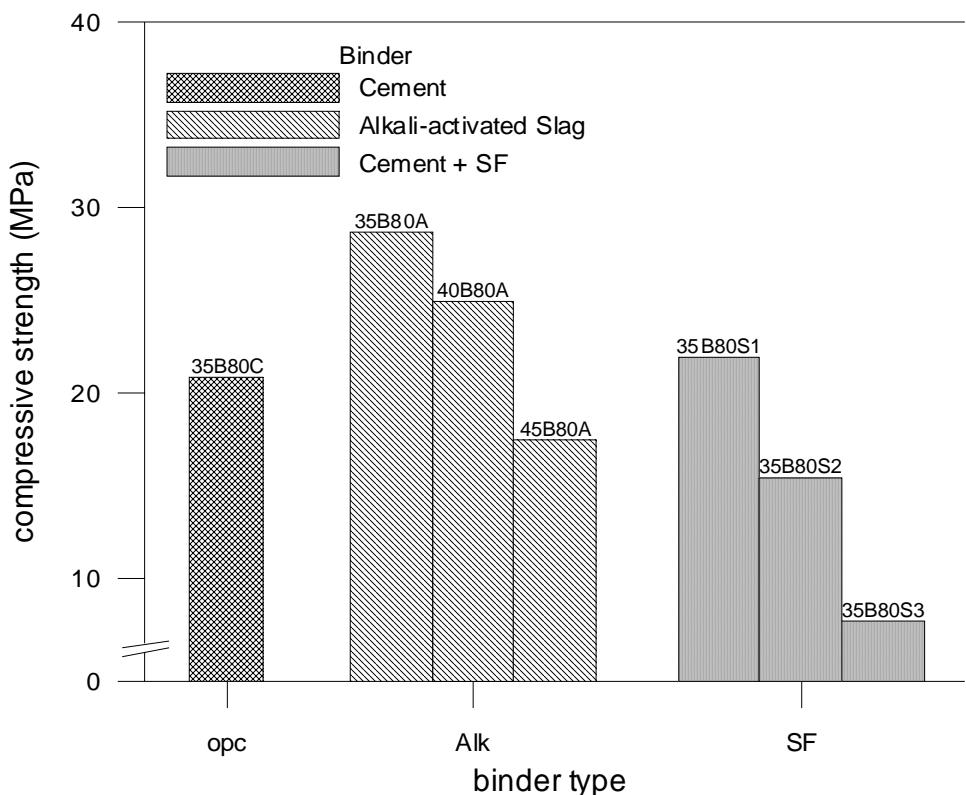


圖 5.26 使用不同漿體之抗壓強度比較

由圖 5.26 可得知，使用鹼活化爐石粉漿體中 $L/Sg=0.35$ 與 $L/Sg=0.45$ 之 35B80A 與 40B80A 配比，抗壓強度超越對照組 35B80C 達 5MPa 以上，強度為 25MPa 與 27MPa，而 45B80A 組配比因為 L/Sg 比過高而影響強度，造成強度下降，未能超越 35B80C 組。使用水泥漿體添加矽灰 10% 之漿體 35B80S1 組，該配比強度亦超越對照組

35B80C，而添加矽灰 20%與 30%之 35B80S2 與 35B80S3 配比應為矽灰添加比例過高造成強度折減。

5.6 剥裂強度試驗

本試驗全配比剝裂強度試驗數據整理如表 5.6 所示。全部配比中剝裂強度最高者為使用鹼活化爐石粉漿體之配比，配比編號為 35B80A，其剝裂強度值為 3.19MPa。剝裂強度最低者為使用水泥漿體，配比編號為 45D50C，剝裂強度為 1.21MPa。將表 5.6 數據以固定粒徑方式進行比較其他參數，可繪製成圖 5.27、圖 5.28、圖 5.29、圖 5.30。

表 5.6 剝裂強度試驗結果

編號	剝裂強度 (MPa)	編號	剝裂強度 (MPa)	編號	剝裂強度 (MPa)	編號	剝裂強度 (MPa)
25A50C	2.74	35A50C	2.19	45A50C	2.01	35B80A	3.19
25A60C	3.33	35A60C	2.57	45A60C	2.50	40B80A	3.00
25A70C	3.68	35A70C	2.72	45A70C	-	45B80A	2.59
25A80C	4.08	35A80C	2.98	45A80C	-	35B80S1	2.94
25B50C	2.09	35B50C	1.95	45B50C	1.87	35B80S2	2.20
25B60C	2.49	35B60C	2.41	45B60C	2.35	35B80S3	1.44
25B70C	2.92	35B70C	2.65	45B70C	-		
25B80C	3.55	35B80C	2.91	45B80C	-		
25C50C	1.86	35C50C	1.84	45C50C	1.30		
25C60C	2.44	35C60C	2.15	45C60C	2.03		
25C70C	2.63	35C70C	2.48	45C70C	-		
25C80C	3.08	35C80C	2.81	45C80C	-		
25D50C	1.83	35D50C	1.78	45D50C	1.21		
25D60C	2.11	35D60C	1.87	45D60C	1.73		
25D70C	2.44	35D70C	2.40	45D70C	-		
25D80C	2.59	35D80C	2.55	45D80C	-		

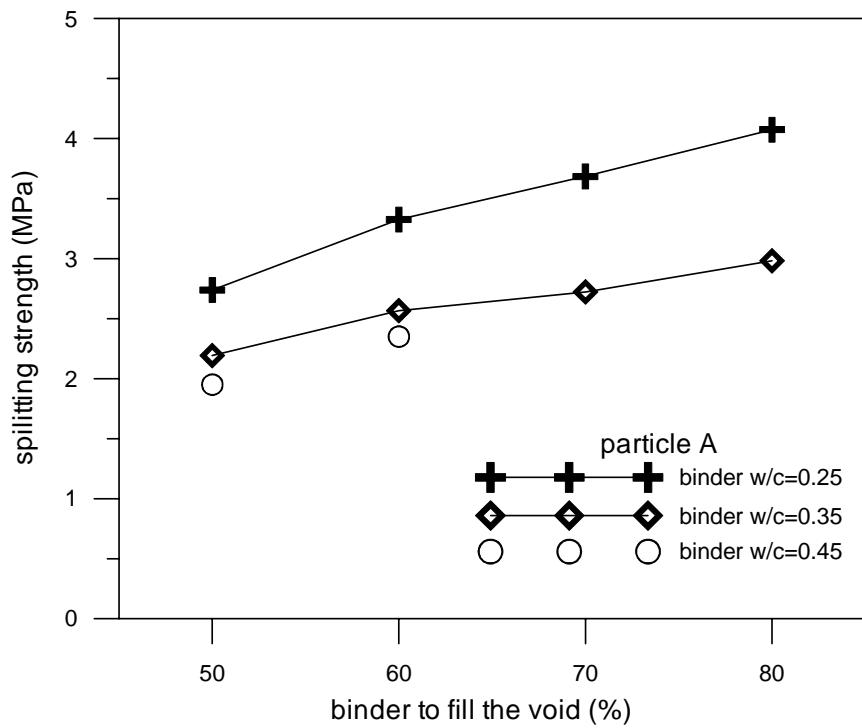


圖 5.27 A 粒徑下劈裂強度比較

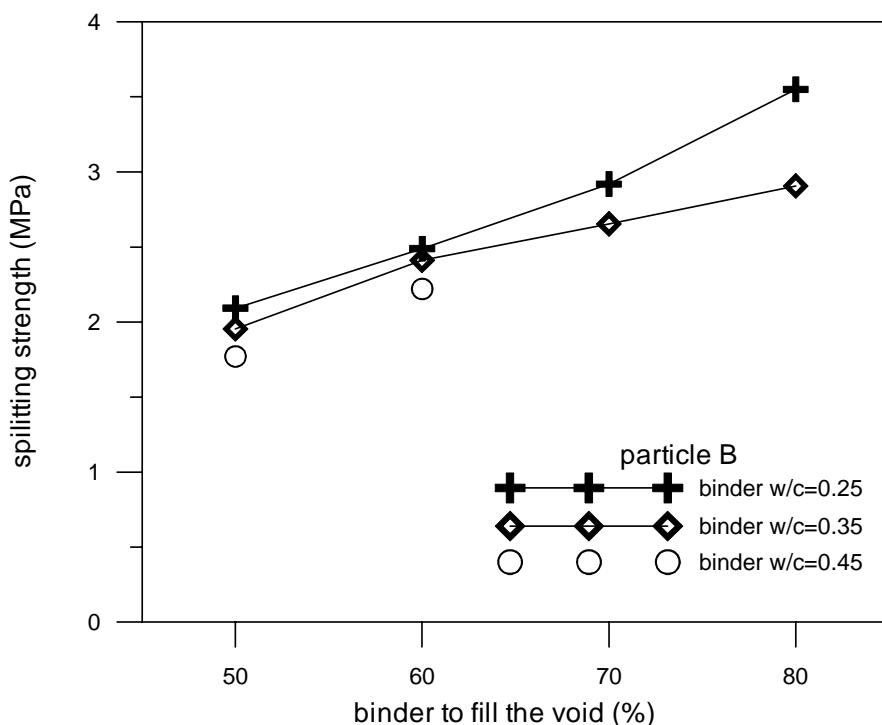


圖 5.28 B 粒徑下劈裂強度比較

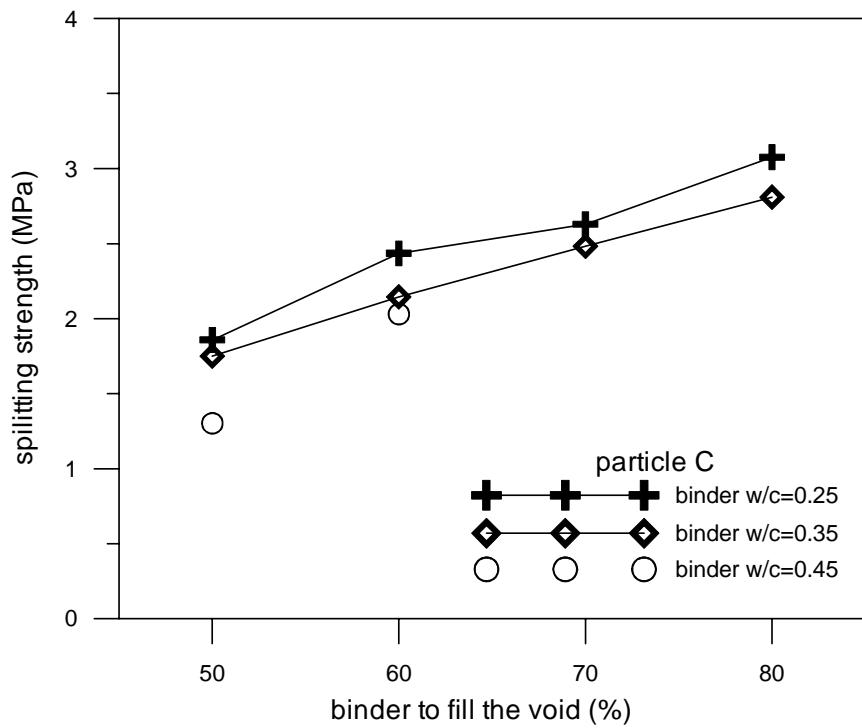


圖 5.29 C 粒徑下劈裂強度比較

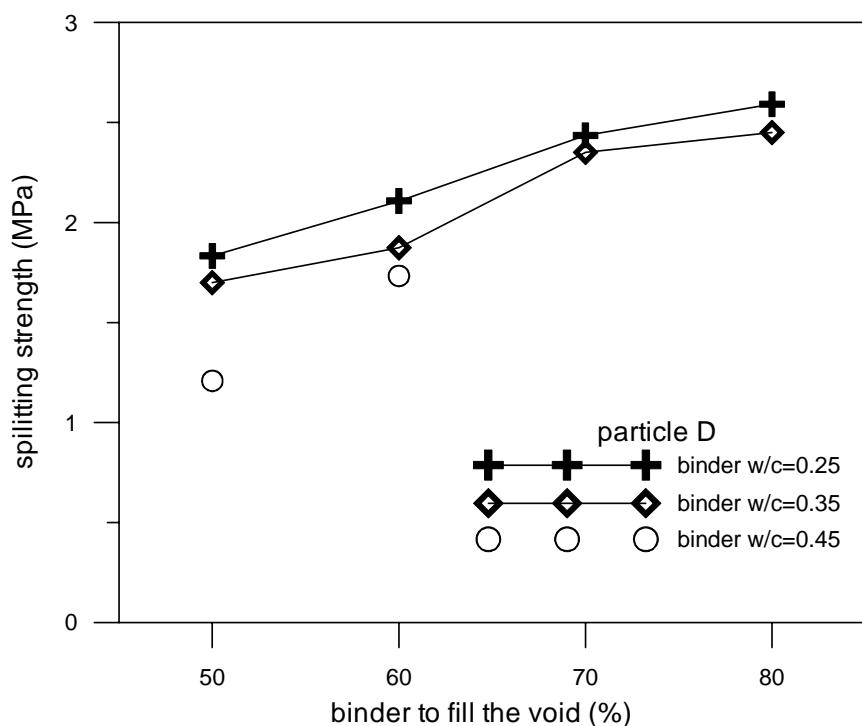


圖 5.30 D 粒徑下劈裂強度比較

由圖 5.27~圖 5.30 可印證，在固定粒徑參數之劈裂強度比較中，使用 $w/c=0.25$ 之漿體劈裂強度為最高的，使用 $w/c=0.45$ 之漿體劈裂強度則為最低。漿體 w/c 比對於劈裂強度是有所影響。此外，漿體的使用量越高對於劈裂強度的發展助益越大，各粒徑之下，使用 80% 漿體填充孔隙比例之漿量者，劈裂強度皆是最高者。

以固定水灰比的方式進行比較骨材粒徑對劈裂強度之影響，由表 5.5 之數據可繪製圖 5.31、圖 5.32、圖 5.33。

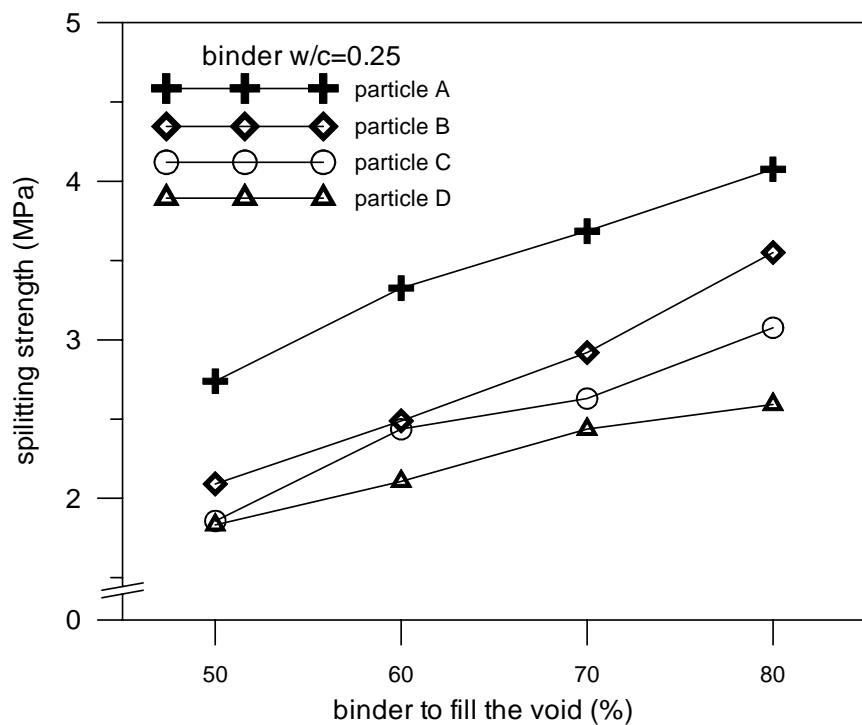


圖 5.31 $w/c=0.25$ 下劈裂強度比較

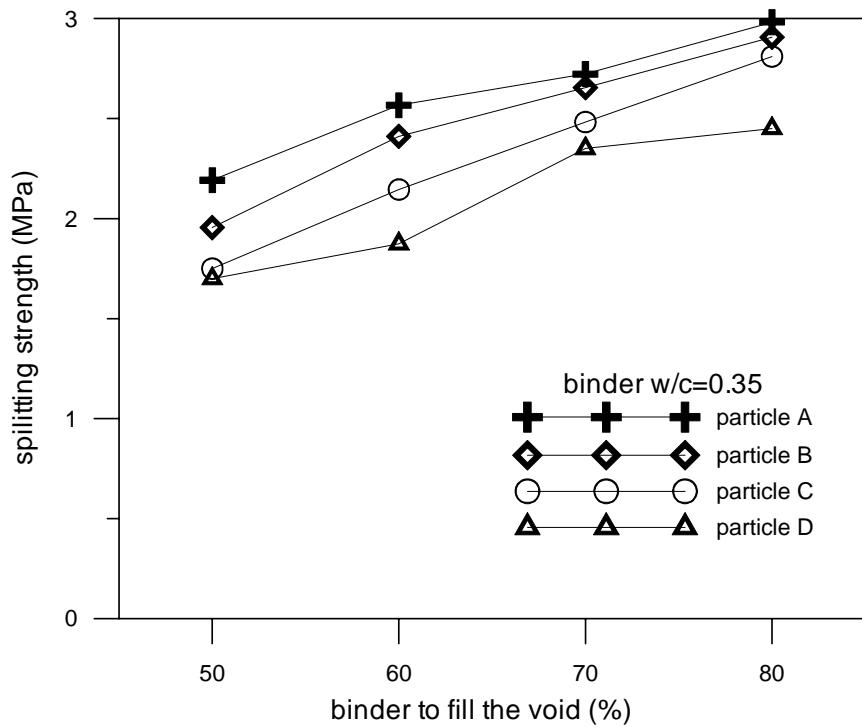


圖 5.32 w/c=0.35 下劈裂強度比較

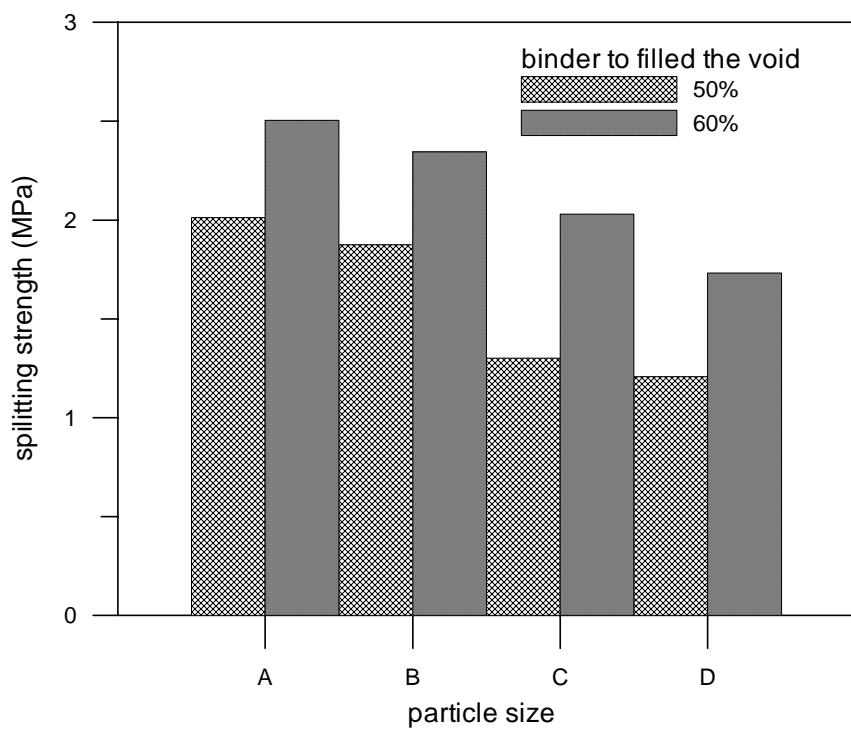


圖 5.33 w/c=0.45 下劈裂強度比較

固定 w/c 比，比較其他參數對劈裂強度之影響，可由圖 5.31~圖 5.33 所示。三組不同漿體 w/c 比之配比其共同特皆為最大劈裂強度與最小劈裂強度分別落於漿體使用量最高與最低之處。由此，漿體使用量與劈裂強度是相同趨勢。此外，劈裂強度最大與最小值亦發生在所適用之骨材粒徑為最小與最大之座標上，由此可見劈裂強度的發展與粒徑大小是相反趨勢。

比較不同膠結漿體對劈裂強度的影響可由表 5.5 之數據繪製成圖 5.34。

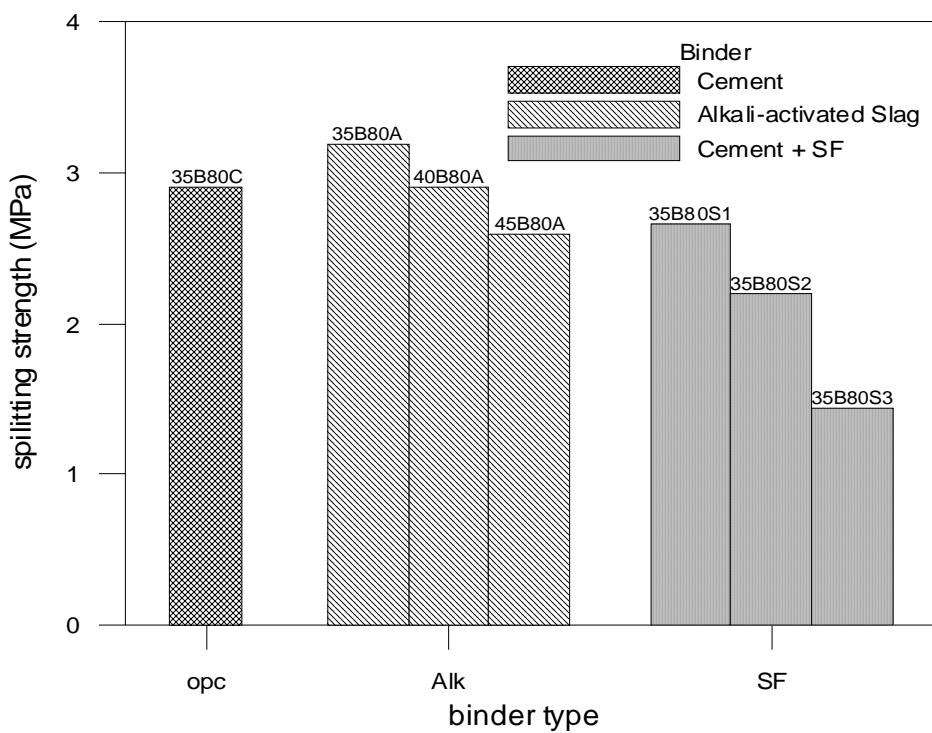


圖 5.34 使用不同漿體之劈裂強度比較

由圖 5.34 得知，使用鹼活化爐石粉漿體中 $L/Sg=0.35$ 與 $L/Sg=0.45$ 之 35B80A 與 40B80A 配比，劈裂強度超越對照組 35B80C，強度為 3.19MPa 與 3.0MPa，而 45B80A 組配比因為 L/Sg 比過高而影響強度，造成強度下降，未能超越對照組 35B80C。水泥漿體添加矽灰 10% 之漿體 35B80S1 組，該配比強度亦超越 35B80C 組，劈裂強度為 2.94MPa，而添加矽灰 20% 與 30% 之 35B80S2 與 35B80S3 組因矽灰添加比例過高造成強度下降。

5.7 抗彎強度試驗

本試驗全配比劈裂強度試驗數據整理如表 5.7 所示。全部配比中抗彎強度最高者為配比編號 35B80C 組，其抗彎強度值為 4.76MPa，抗彎強度最低者為配比編號為 45D50C，抗彎強度為 2.18MPa。將表 5.7 數據以固定粒徑方式進行比較其他參數，可繪製成圖 5.35、圖 5.36、圖 5.37、圖 5.38。

表 5.7 抗彎強度試驗結果

編號	抗彎強度 (MPa)	編號	抗彎強度 (MPa)	編號	抗彎強度 (MPa)
25A50C	3.54	35A50C	3.48	45A50C	3.02
25A60C	3.61	35A60C	3.54	45A60C	3.43
25A70C	4.08	35A70C	3.70	45A70C	-
25A80C	4.76	35A80C	4.52	45A80C	-
25B50C	2.75	35B50C	2.65	45B50C	2.45
25B60C	3.13	35B60C	3.06	45B60C	2.57
25B70C	3.61	35B70C	3.27	45B70C	-
25B80C	3.74	35B80C	3.61	45B80C	-
25C50C	2.67	35C50C	2.52	45C50C	2.24
25C60C	2.95	35C60C	2.90	45C60C	2.48
25C70C	3.41	35C70C	3.20	45C70C	-
25C80C	3.63	35C80C	3.43	45C80C	-
25D50C	2.54	35D50C	2.31	45D50C	2.18
25D60C	2.68	35D60C	2.54	45D60C	2.38
25D70C	2.95	35D70C	2.93	45D70C	-
25D80C	3.20	35D80C	3.02	45D80C	-

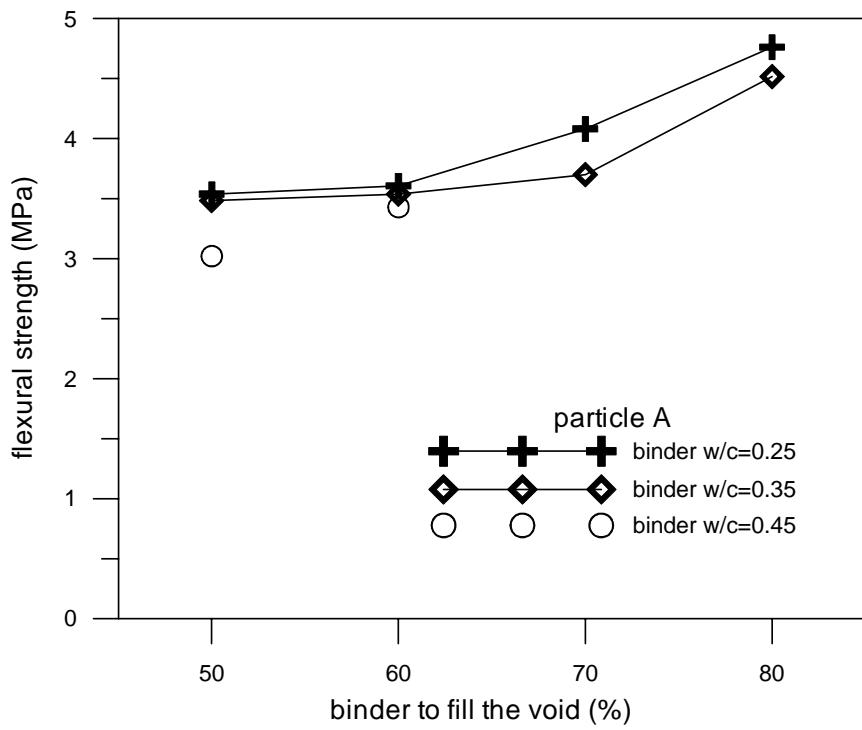


圖 5.35 A 粒徑下抗彎強度比較

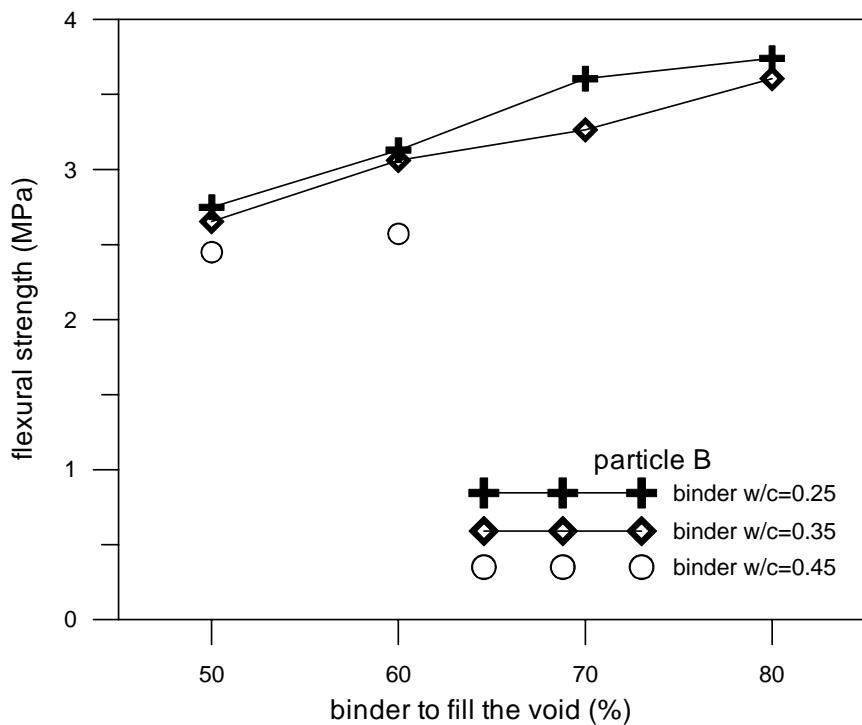


圖 5.36 B 粒徑下抗彎強度比較

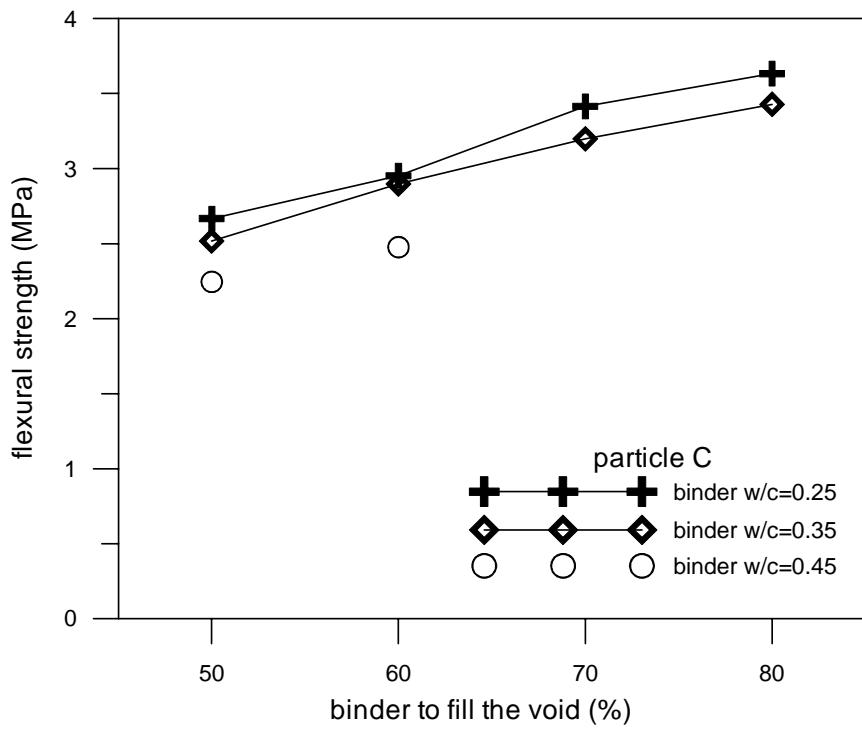


圖 5.37 C 粒徑下抗彎強度比較

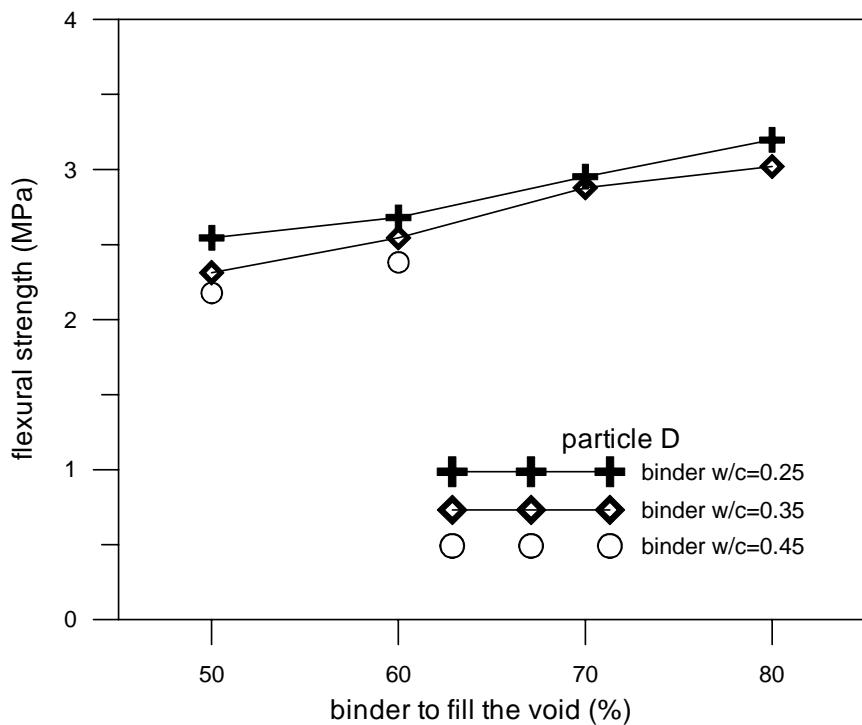


圖 5.38 D 粒徑下抗彎強度比較

由圖 5.35~圖 5.38 得知，抗彎強度隨膠結漿體使用量增加而上升。此外，漿體 w/c 比較低之配比，其抗彎強度值會高於 w/c 比較高之配比。因此最高抗彎強度之配比均座落在各粒徑之 $w/c=0.25$ 中 80% 漿體填充孔隙比例處；最低抗彎強度之配比座落在各粒徑之 $w/c=0.45$ 中 50% 漿體填充孔隙比例處。

再經由固定 w/c 比，比較粒徑對於抗彎強度之影響，由表 5.7 之數據繪製圖 5.39、圖 5.40、圖 5.41。

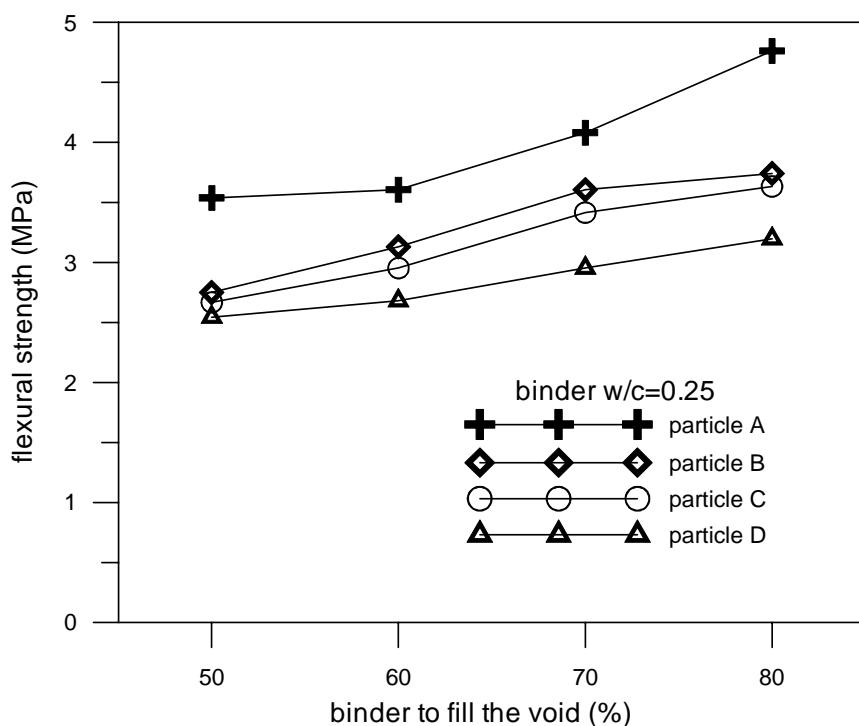


圖 5.39 $w/c=0.25$ 下抗彎強度比較

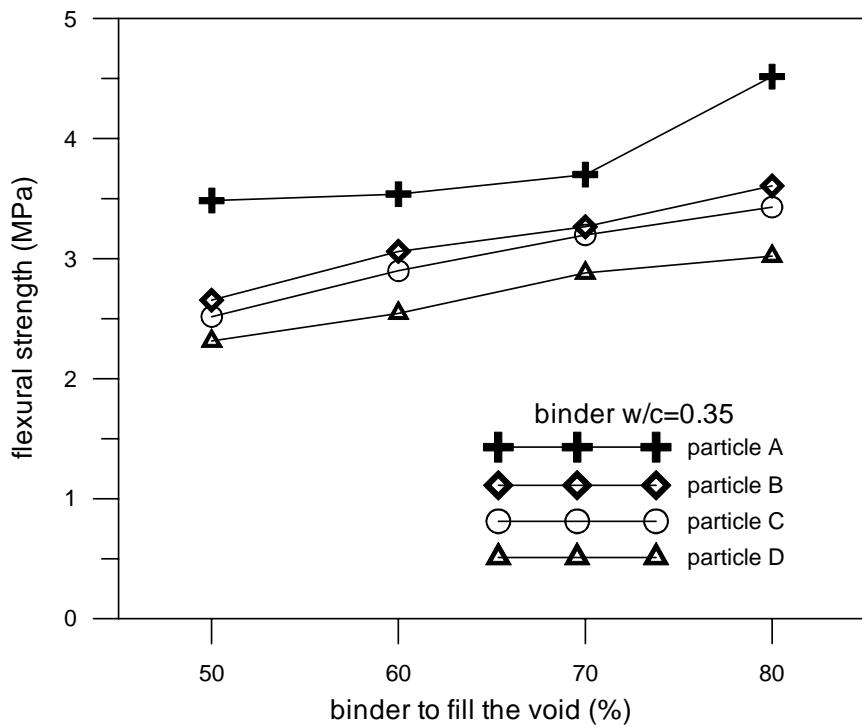


圖 5.40 w/c=0.35 下抗彎強度比較

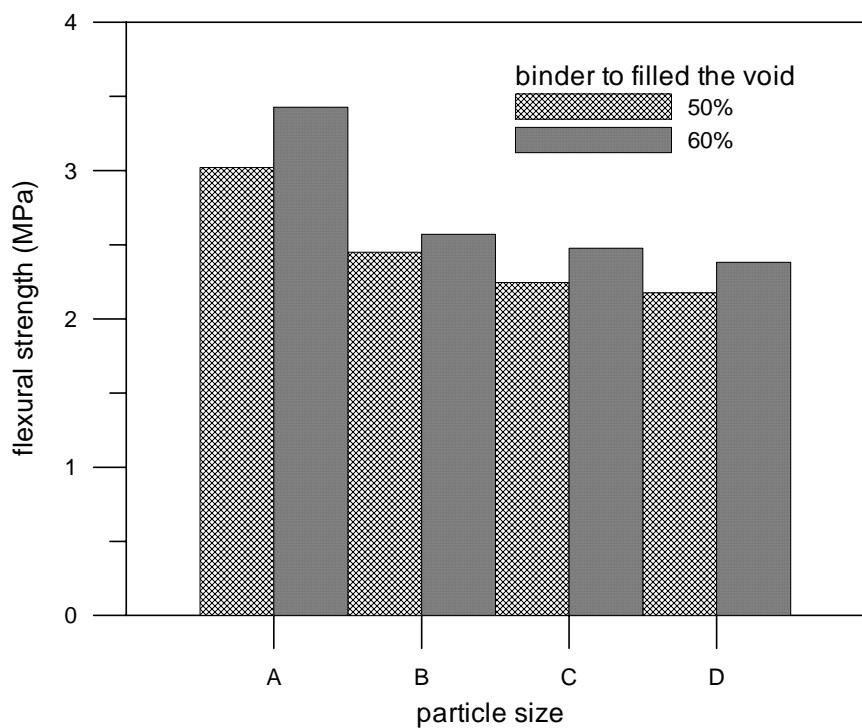


圖 5.41 w/c=0.45 下抗彎強度比較

由圖 5.39~圖 5.41，抗彎強度最高之配比均落於各 w/c 比中 A 粒徑處，反之抗彎強度最小之配比均落於 w/c 比中 D 粒徑處，由此結果可發現粒徑大小於與抗彎強度有相反之趨勢。

5.8 健性試驗

健性試驗可以模擬透水混凝土試體遭受硫酸鹽類攻擊時之抵抗能力，將試體浸置於飽和硫酸鎂溶液後，量測其重量損失率即可推論試體抵抗硫酸鹽攻擊之能力。試驗結果如表 5.8 所示。

表 5.8 健性試驗結果

編號	重量 損失率%	編號	重量 損失率%	編號	重量 損失率%	編號	重量 損失率%
25A50C	0.94	35A50C	1.10	45A50C	1.31	35B80A	0.57
25A60C	0.93	35A60C	1.05	45A60C	1.07	40B80A	0.90
25A70C	0.88	35A70C	1.04	45A70C	-	45B80A	1.17
25A80C	0.64	35A80C	0.96	45A80C	-	35B80S1	1.91
25B50C	1.16	35B50C	1.48	45B50C	1.49	35B80S2	2.64
25B60C	1.05	35B60C	1.24	45B60C	1.38	35B80S3	3.00
25B70C	1.01	35B70C	1.17	45B70C	-		
25B80C	0.92	35B80C	1.13	45B80C	-		
25C50C	1.52	35C50C	1.98	45C50C	2.14		
25C60C	1.22	35C60C	1.83	45C60C	1.88		
25C70C	1.13	35C70C	1.75	45C70C	-		
25C80C	1.04	35C80C	1.67	45C80C	-		
25D50C	1.67	35D50C	2.06	45D50C	2.45		
25D60C	1.65	35D60C	2.02	45D60C	2.14		
25D70C	1.55	35D70C	1.91	45D70C	-		
25D80C	1.42	35D80C	1.74	45D80C	-		

重量損失率最大者為使用水泥漿體添加 30% 砂灰之 35B80S3 組，損失率為 3%，重量損失率最低者為使用水泥漿體 25A80C 組，損失率為 0.57%。為利於比較試體抵抗硫酸鹽攻擊之程度，採固定顆粒粒徑，繪製圖 5.42、圖 5.43、圖 5.44、圖 5.45。

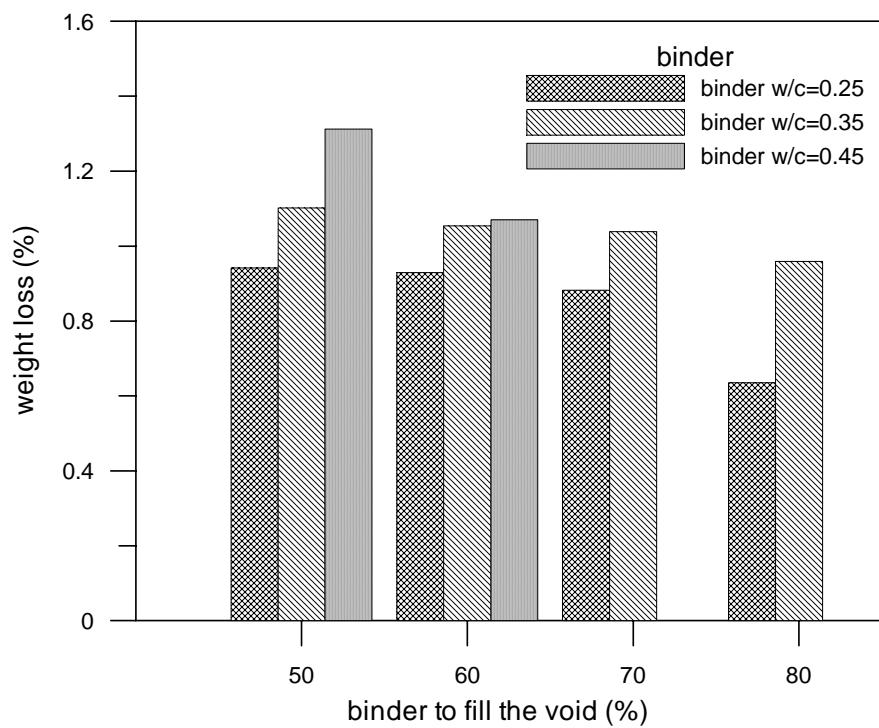


圖 5.42 A 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

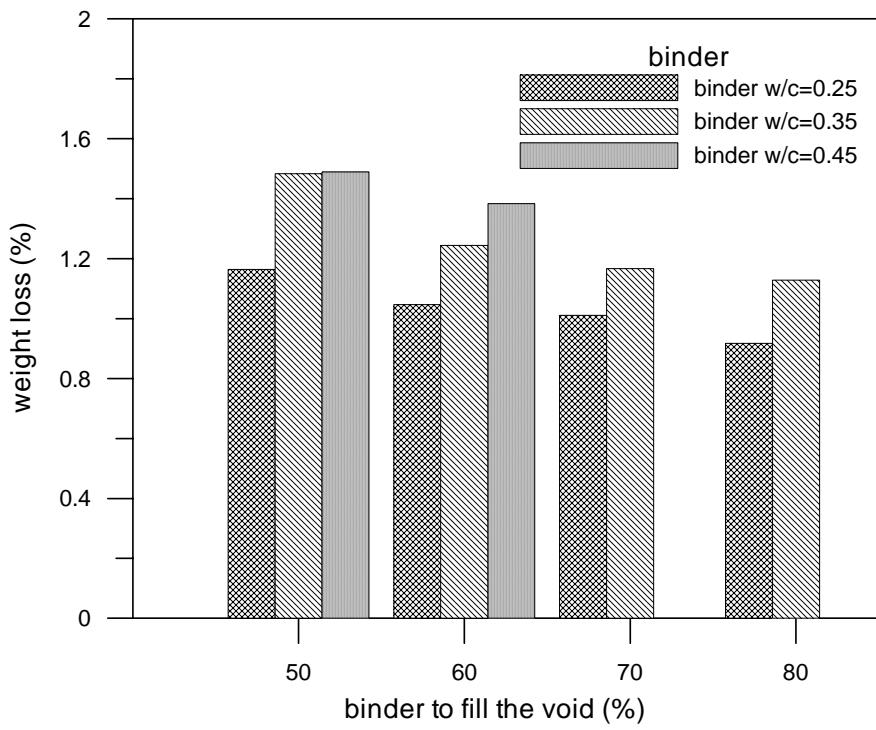


圖 5.43 B 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

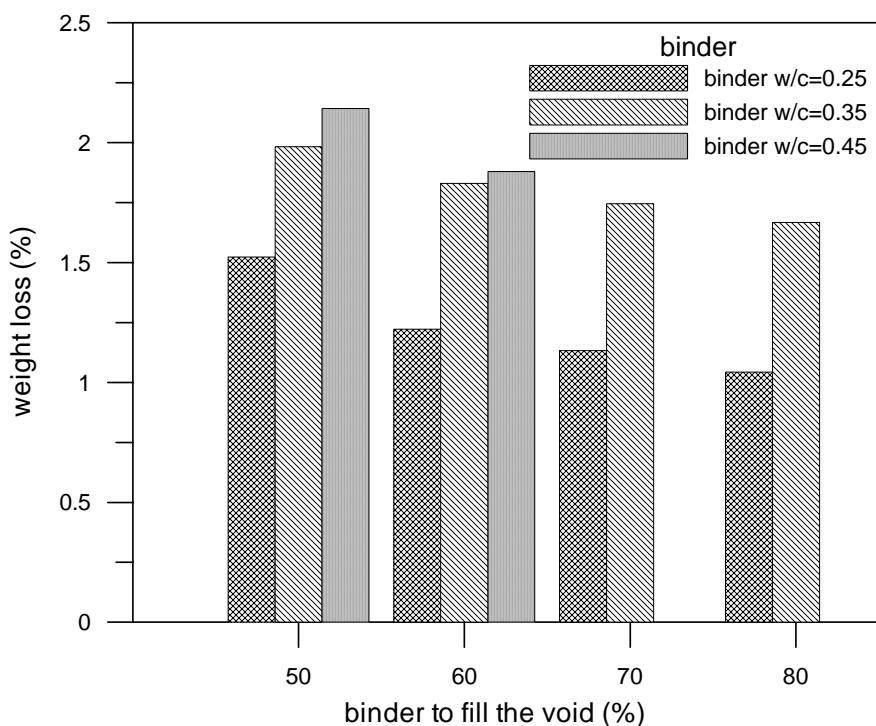


圖 5.44 C 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

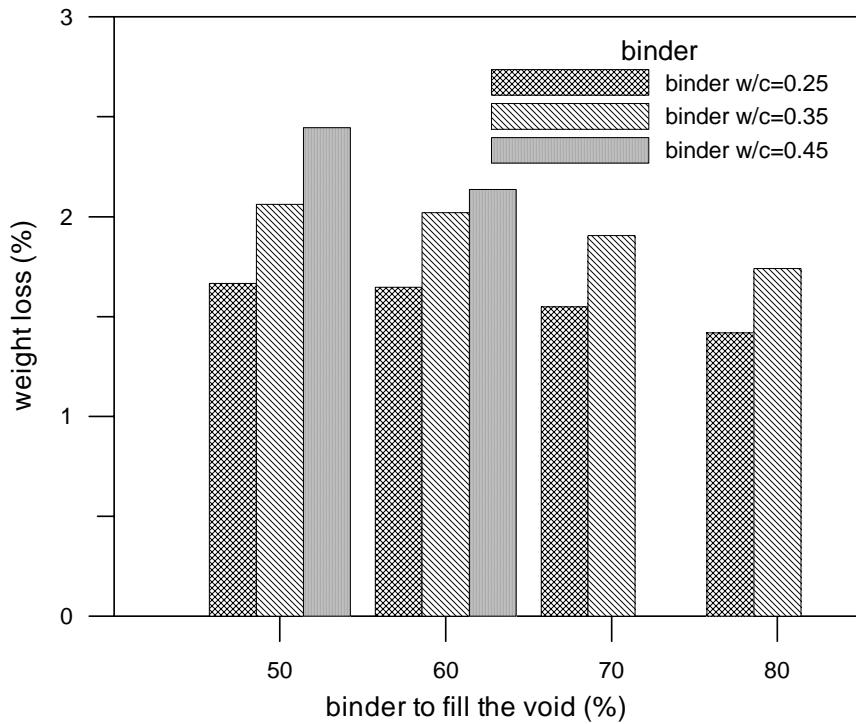


圖 5.45 D 粒徑下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

由圖 5.42~圖 5.45 得知，各個粒徑在漿體使用量為 50% 時，有較大的重量損失率，重量損失率會隨著漿體使用量增多而減少。著眼於漿體性質部份，重量損失率在漿體 $w/c=0.25$ 時較小，隨著 w/c 比上升重量損失率會增加。原因在於試體整體的緻密性，當漿體使用量較少時，亦即試體內部有較多空隙可提供硫酸鹽侵入與水泥或骨材發生反應， w/c 造成之效應亦同，當水灰比較高之漿體硬固後，水分散失或水化作用後留下之微小孔隙含量比低 w/c 比之漿體者多，此為小孔隙亦成為硫酸鹽類攻擊之路徑。因而造成在低漿量高水灰比配比之透水混凝土抵抗硫酸鹽類攻擊之能力較差。

比較不同骨材顆粒粒徑對抵抗硫酸鹽類攻擊能力，以表 5.8 之數據固定水灰比進行比較，繪製圖 5.46、圖 5.47、圖 5.48。

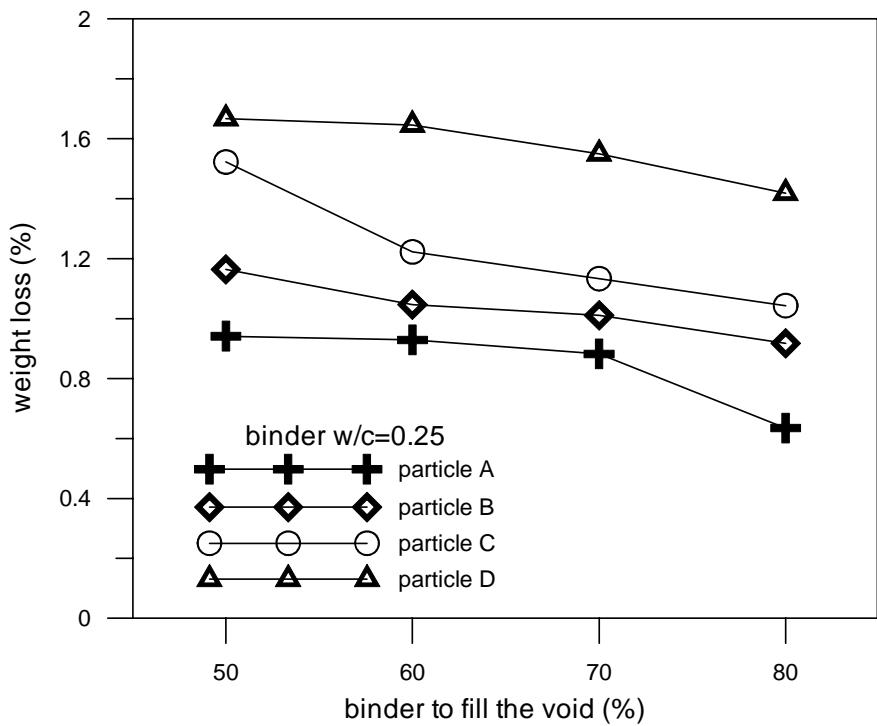


圖 5.46 w/c=0.25 下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

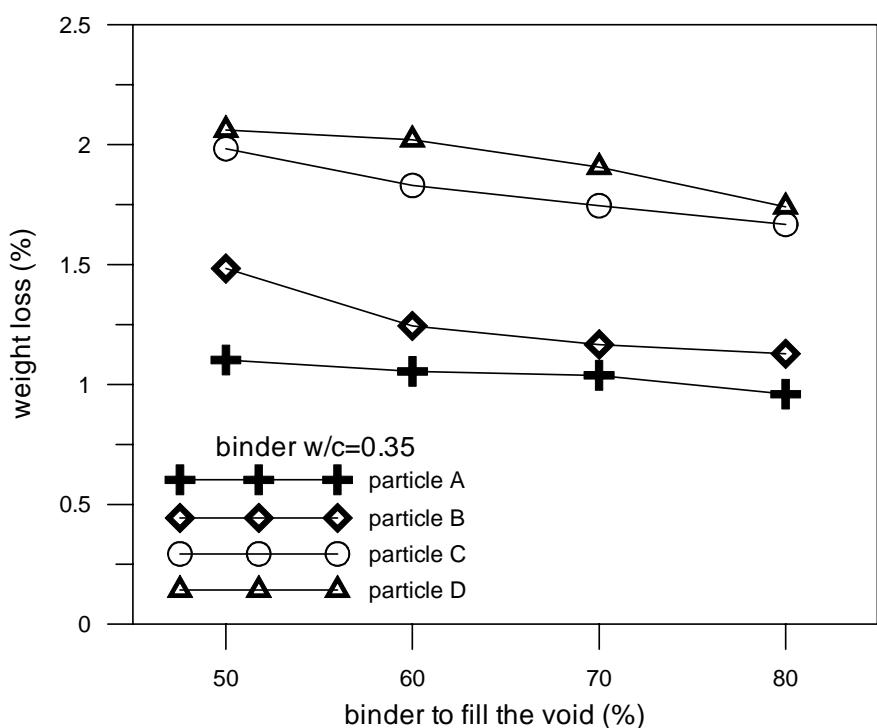


圖 5.47 w/c=0.35 下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

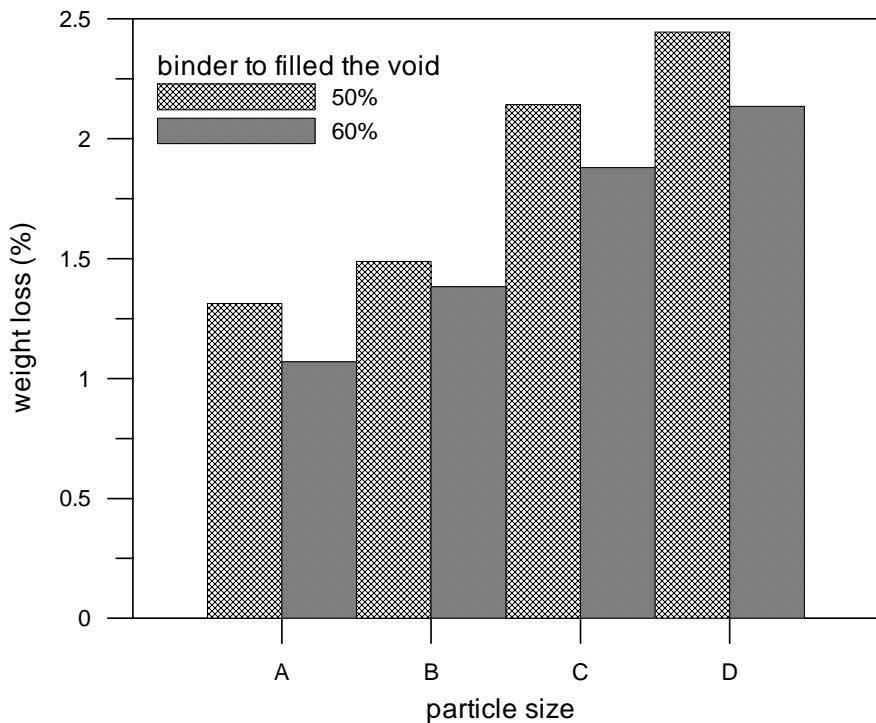


圖 5.48 $w/c=0.45$ 下受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

由圖 5.46~圖 5.48 得知，大粒徑骨材配比遭受硫酸鹽攻擊造成的重量損失皆大於小粒徑骨材配比者，原因為大粒徑顆粒在堆疊時，產生之孔隙較大於小粒徑顆粒產生之孔隙，在填入相同比例之膠結漿體之後，因顆粒幾何形狀之關係，小粒徑顆粒堆疊所產生之空隙較細小，容易被漿體所完全填充，反觀大粒徑顆粒者不易被完全填充。此情況造成兩者緻密性的差異，硫酸鹽入侵試體內部的機率也隨試體緻密改變，造就大粒徑顆粒配比抵抗硫酸鹽攻擊能力較差的現象。

比較不同膠結漿體對抵抗硫酸鹽攻擊能力，由表 5.8 數據繪製成圖 5.49。

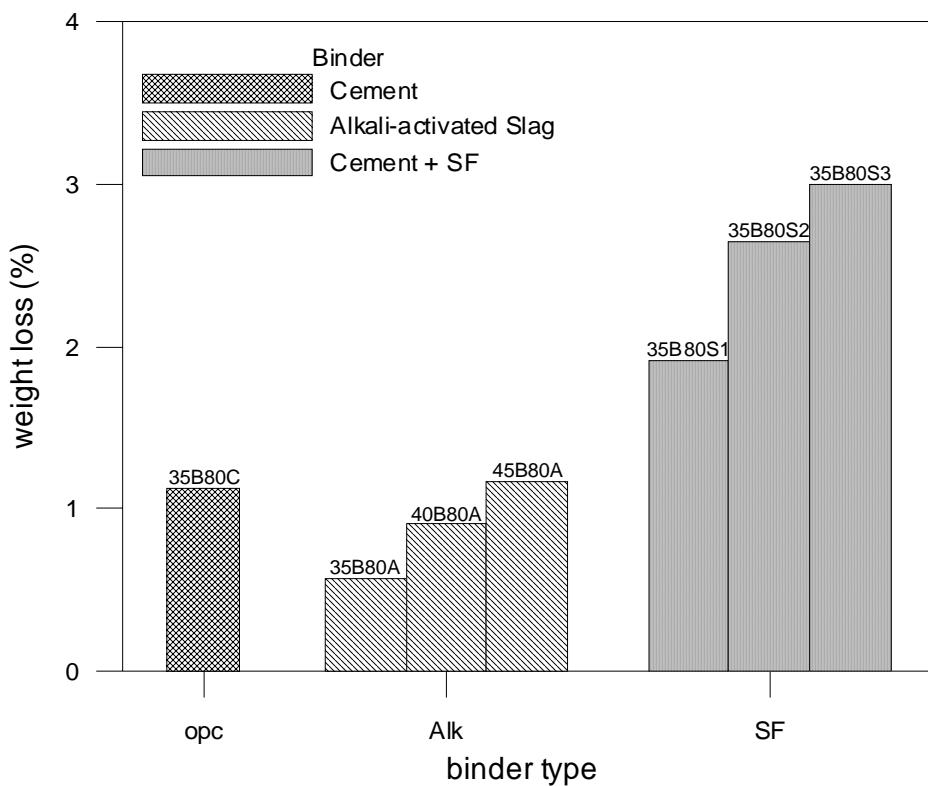


圖 5.49 不同漿體受硫酸鹽攻擊重量損失率比較

由圖 5.49 得知，使用鹼活化爐石粉漿體之配比其漿體 $L/Sg=0.35$ 與 0.4 這二組對於抵抗硫酸鹽類攻擊能力較對照組 35B80C 卓越，鹼活化漿體 $L/Sg=0.45$ 因漿體配比關係，以致抗攻擊能力略差於對照組 35B80C。使用水泥添加矽灰之漿體配比 35B80S1、35B80S2、35B80S3 組，對於抵抗硫酸鹽攻擊能力欠佳，重量損失率高出對照組 35B80C 有 $0.78\% \sim 1.87\%$ ，原因為添加矽灰之水泥漿體，其矽灰較容易與硫酸鹽類發生反應，因此漿體矽灰添加比例越高，受攻擊之後重量損失率越大。

5.9 濾清試驗

本試驗儀器可放置長、寬各為 60cm 之鋪面，雖本研究之鋪面為整體性之鋪面，但若製做長、寬各為 60cm 、厚度為 15cm 之鋪面則其重量將重達 116 公斤，不利試驗時之搬運，故在此製作長、寬各為

30cm、厚度為 15cm 之單元鋪面共 4 塊進行拼接，各單元鋪面間之縫隙以油性黏土結合。試驗中透水混凝土之配比為水灰比 0.35、骨材粒徑 0.48cm、填充孔隙百分比 80%，定水頭試驗共進行 2 次，水頭水位皆定為 30cm，每次水頭穩定後以流量計量測 5 分鐘之流量以計算其流速，經式 4-6 計算出此 2 次試驗之鋪面透水係數，其平均透水係數為 $3.376 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ ，由此結果可知本鋪面具有相當高之透水性，其他相關數據與過程如表 5.9 所示。

本試驗對前述已做懸浮固體物(SS)之鋪面進行定水頭試驗，以了解阻塞後之透水鋪面之最終入滲率(K_a)，再與未受阻塞之透水鋪面之最終入滲率(K_b)進行比較，觀察本試驗之透水鋪面之孔隙率阻塞情形。本次定水頭試驗其方法比照 4.4.9 節鋪面之定水頭試驗進行，一種漿體共進行 2 次試驗，水頭水位皆定為 30.0cm，每次水頭穩定後以流量計量測 5 分鐘之流量以計算其流速，經式 4-6 計算出鋪面透水係數，其平均透水係數為 $7.118 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ ，相關數據與過程如表 5.10 所示。

由表 5.10 可知，經過降雨且連續施加污染物而阻塞之透水鋪面，其最終入滲率 K_a 為 $7.118 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ ，另外由表 5.9 可知未受阻塞之鋪面其最終入滲率 K_b 為 $3.376 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ ，計算可知其滲透係數衰減率 R (%) 為 78.9%，由此結果可知鋪面孔隙間經污染物阻塞後，雖其滲透係數衰減頗大，但仍具有相當高之透水性。由此證明底層之孔隙相當大。

另外將鋪面上之混合砂土進行蒐集，並將其烘乾秤重，如表 5.11 所示，可知收集之混合砂土為 59.7(g)，將其與所施加之混合砂土總量進行比較，可得混合砂土去除率為 44.7%，由此可知本鋪面之混合砂土去除率相當高。顯示大部分之混合砂土攔阻於鋪面孔隙中，將可降低非點源污染擴散之可能性。

表 5.9 鋪面透水係數相關數據

試驗次數	五分鐘總流量 (Q)	定水頭水位 (H)	試體厚度 (L)	經過時間 (t)	斷面面積 (A)	透水係數 (K _b)
	L	cm	cm	sec	cm ²	cm/s
1	73.16	30	15	300	3600	3.387×10^{-2}
2	72.69	30	15	300	3600	3.365×10^{-2}
平均 K _b 值 3.376×10^{-2} cm/sec						

表 5.10 阻塞後鋪面透水係數相關數據

試驗次數	五分鐘總流量 (Q)	定水頭水位 (H)	試體厚度 (L)	經過時間 (t)	斷面面積 (A)	透水係數 (K _a)
	L	cm	cm	sec	cm ²	cm/s
1	15.52	30	15	300	3600	7.185×10^{-3}
2	15.23	30	15	300	3600	7.051×10^{-3}
平均 K _a 值 7.118×10^{-3} cm/sec						

表 5.11 混合砂土之施加總量、收集量及鋪面之去除率

混合砂土施加總量(g)	108
混合砂土收集量(g)	59.724
進入鋪面之混合砂土重(g)	48.276
鋪面之混合砂土去除率(%)	44.7

5.10 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀測

圖 5.50~5.55 分別為使用純水泥漿體、矽灰取代水泥 10% 漿體及鹼活化爐石漿體作為膠結材料之掃描式電子顯微鏡圖，放大的倍率分別為 300 倍及 1000 倍。由微觀結構上可知鹼活化爐石粉漿體結構最緻密，矽灰取代水泥 10% 漿體次之，純水泥漿體最差。理論上漿體的結構越緻密，所存在的弱面區越少，此部分結果與前述抗壓強度的行為有相同的趨勢。

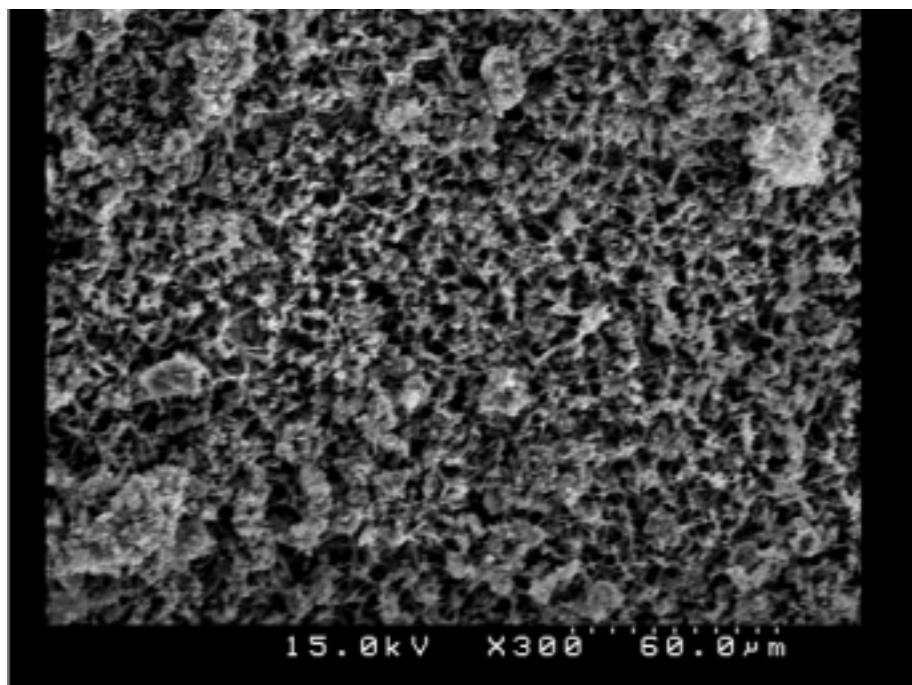


圖 5.50 W/C=0.35 水泥漿體 300 倍微觀結構圖

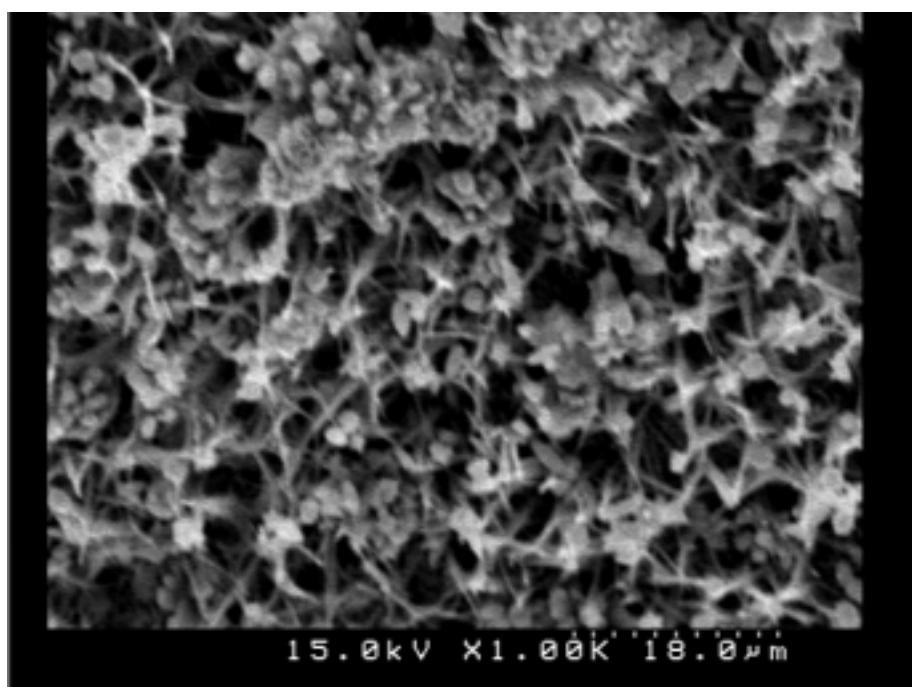


圖 5.51 W/C=0.35 水泥漿體 1000 倍微觀結構圖

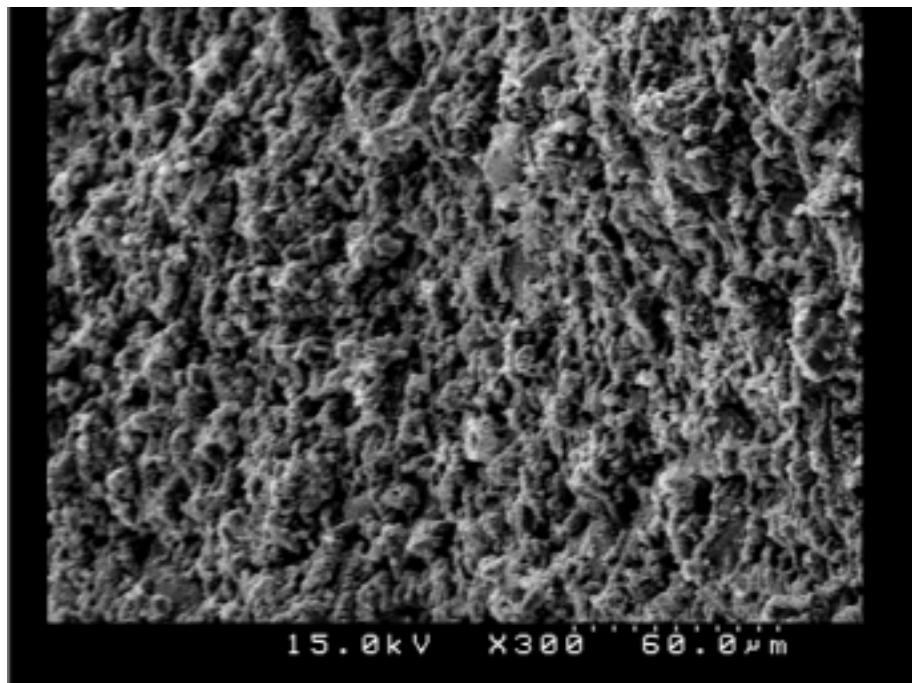


圖 5.52 W/C=0.35 水泥漿體添加 10% 砂灰 300 倍微觀結構圖

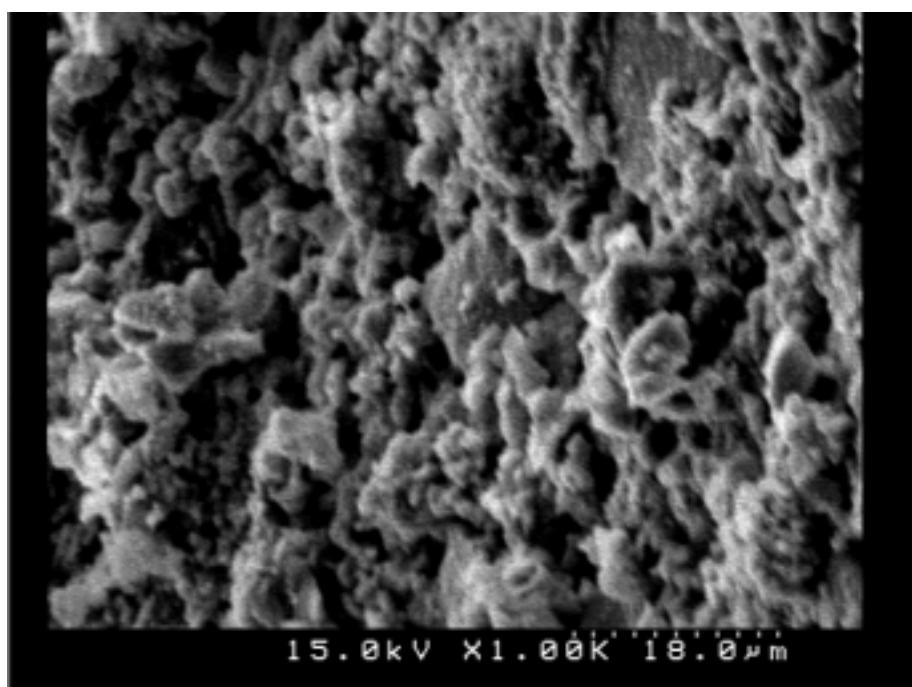


圖 5.53 W/C=0.35 水泥漿體添加 10% 砂灰 1,000 倍微觀結構圖

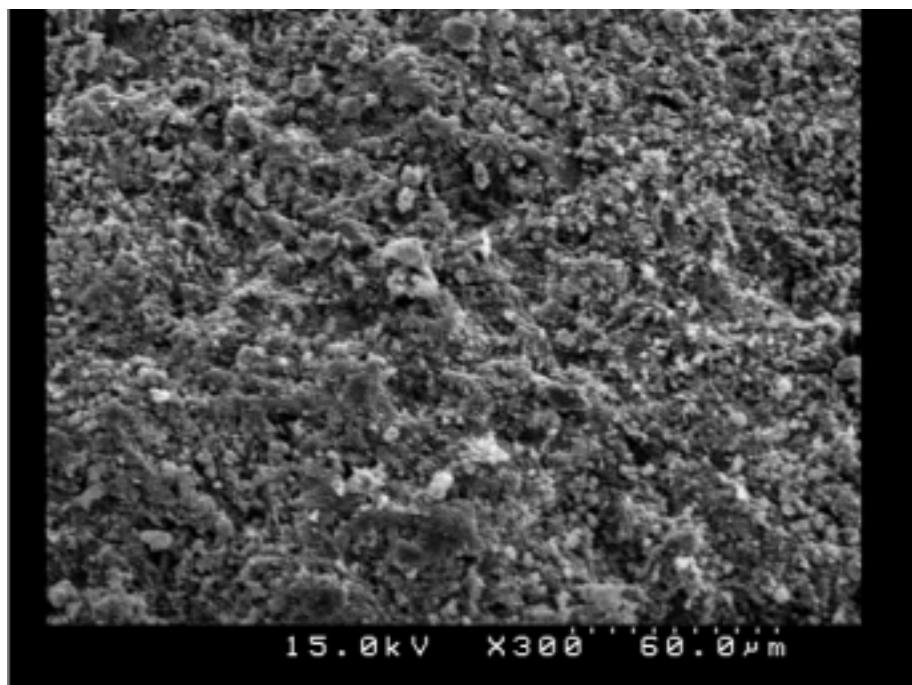


圖 5.54 $L/Sg=0.35$ 鹼活化爐石粉漿體 300 倍微觀結構圖

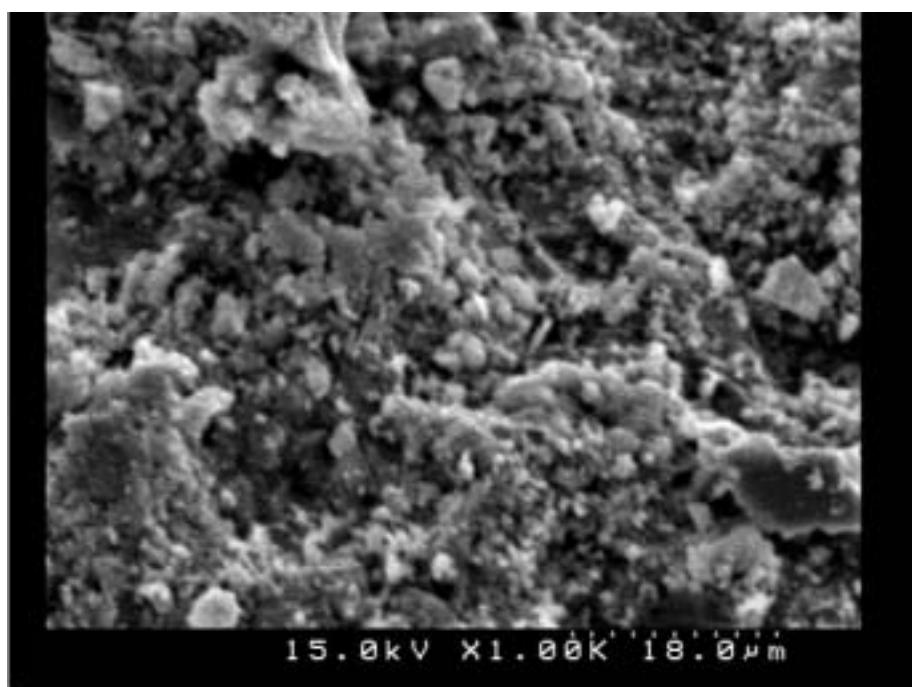


圖 5.55 $L/Sg=0.35$ 鹼活化爐石粉漿體 1,000 倍微觀結構圖

5.11 透水係數交叉比較

5.11.1 透水係數與連通孔隙率之關係

由骨材與骨材堆疊所造成之孔隙體積，用水泥漿體以同一填充孔隙百分比填充孔隙之情況下，所產生之孔隙率應為相同，但在研究中發現以孔隙率試驗所求出之連通孔隙率卻與設計之孔隙率不同，原�除了拌合過程中漿體挾帶空氣所產生之空氣含量，主要原因還是歸咎於漿體本身之黏滯性。流動性過佳之漿體將造成漿體垂流之現象，嚴重時直接以肉眼便可判別是否發生垂流，但在肉眼無法判別時，垂流將會造成上部試體漿體不足且底部試體漿體過量之現象，底部試體漿體過量容易使孔隙阻塞，增加不連通之孔隙，造成連通孔隙率下降，單向透水試驗之透水係數下降；流動性差之漿體雖不會造成垂流，但由於本身流動性不佳導致過於黏稠，漿體在透水混凝土內易分部不均，極有可能阻斷透水路徑，亦會使連通孔隙率下降，單向透水試驗之透水係數下降。因此在進行比較透水係數與連通孔隙率之前，選擇單一水灰比進行透水係數與連通孔隙率之比較，避免漿體流動性不同造成影響。

由試驗結果可發現水灰比 0.45 之流動性過佳易造成垂流，而水灰比 0.25 雖添加強塑劑改善流動性，但為分析之準確性避免強塑劑之影響，因此選擇水灰比 0.35 之透水混凝土，控制漿體之流動性一致且不添加任何藥劑，在不同之填充孔隙百分比及不同骨材粒徑下，進行透水係數與連通孔隙率之比較。

透水係數 K 可判斷水於試體內部流動的能力，在 5.3 節透水係數試驗結果可得知，透水係數與骨材顆粒粒徑存在正比的關係。在本試驗所使用之四種顆粒粒徑下的各配比進行透水係數測定與連通孔隙率測定後，對四組數據進行 X-Y 分佈繪圖，最終對四組分佈圖加上趨勢線可繪製圖 5.56。

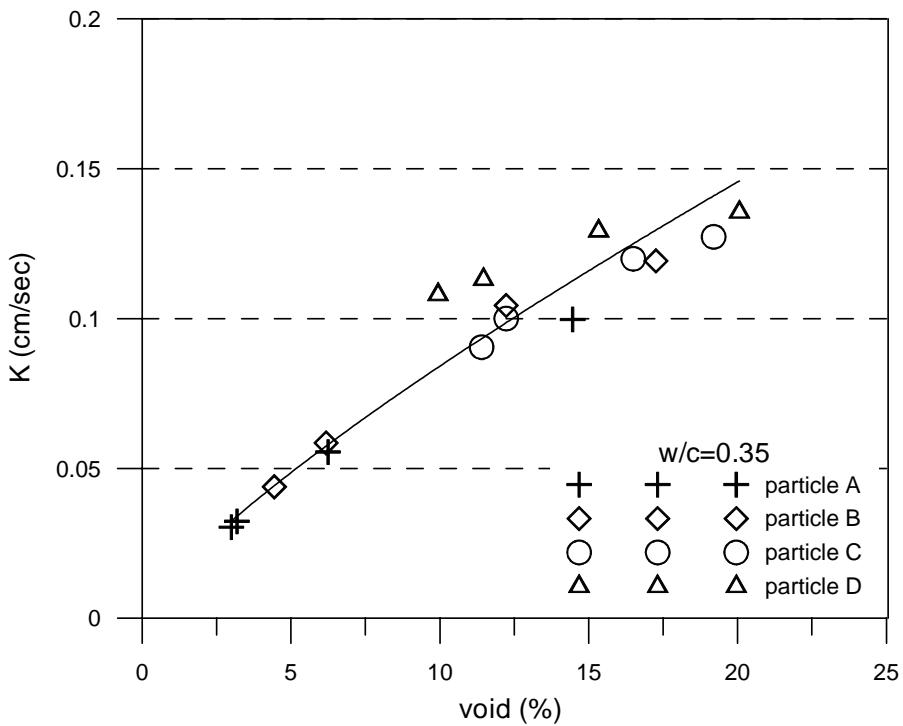


圖 5.56 孔隙率與透水係數之關係

由圖所示，四種粒徑下，透水係數 K 隨連通孔隙率增加而上升。接著固定某一孔隙率進行透水係數分析，可發現透水係數隨顆粒粒徑變大而上升。

針對此一現象，依一般物理觀點檢視之，在一固定的孔隙率條件只應對應單一透水係數，明顯與本試驗結果：即對應有多組透水係數矛盾。原因在於某特定情況下孔隙率相同，但孔隙大小卻是不會相同，孔隙大小仍依照骨材顆粒粒徑大小決定。

連通孔隙率相同的條件之下，顆粒粒徑小者連通孔隙截面積較小且在試體內部的透水路徑較蜿蜒曲折；顆粒粒徑較大者其連通孔隙節面積大，在試體內部的透水路徑較直通。此差異之下，造成入滲水在試體內部流速(V)不同造成流出水之流量(Q)有所差異如式 5.1 所示。

$$Q = V \times A \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

5.11.2 透水係數與力學強度之關係

根據 5.5 節、5.6 節、5.7 節之結果，本節以抗壓強度代表試體之力學性質，為得知抗壓強度與透水性能之間的關係，分別取各粒徑經試驗測得之抗壓強度與透水係數繪製 X-Y 分佈圖，再對各粒徑之分佈圖加上趨勢線以利瞭解抗壓強度與透水係數之關係。如圖 5.57，力學強度的發展是與透水係數是相反趨勢，於各粒徑骨材顆粒之下皆適用此關係。

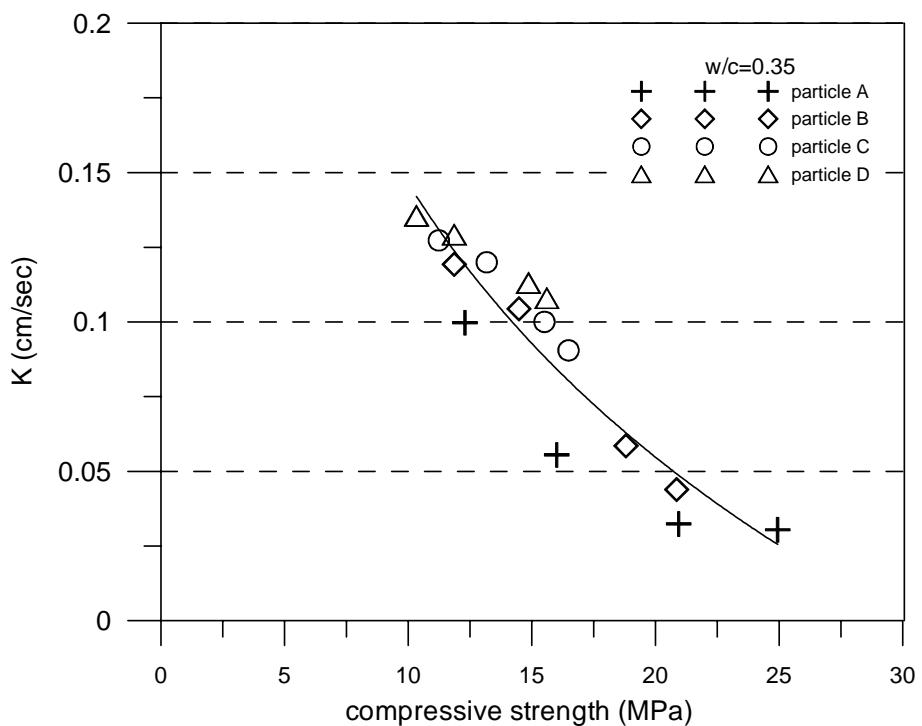


圖 5.57 力學強度與透水係數之關係

5.12 透水混凝土配比設計檢討

5.12.1 透水混凝土配比設計修正

研究中之初始透水混凝土配比設計流程如下：

step 1. 求出骨材之乾搗單位重，決定骨材之單方用量。

step 2. 藉由骨材乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積。

step 3. 依透水需求，決定填充孔隙體積。依強度需求，對應填充孔隙體積及骨材粒徑級配決定水灰比。

step 4. 由填充孔隙體積決定水泥漿體使用量，透過水灰比求出水泥之單方用量及拌合水之單方用量。

step 5. 製作試體，檢核強度及透水需求。

step 6. 完成透水混凝土配比設計。

其中試驗流程之步驟 3 是基於水灰比並不影響透水係數，可直接依透水係數需求決定填充孔隙體積，此外，影響透水混凝土強度之主要原因為漿體強度與填充量，其次為骨材粒徑級配，因此依強度需求，對應填充孔隙體積及骨材粒徑級配決定水灰比。步驟 3 之水灰比及填充孔隙體積對應強度及透水係數之交互關係，需藉由此計畫建立本土材料實際試驗所得出之經驗關係，然而 5.11 節透水係數交叉比較可發現，直接影響透水係數之主因並非填充孔隙體積，而是連通孔隙率，連通孔隙率與填充孔隙體積之關係需由漿體流動性決定，水灰比亦為影響流動性之主因，因此試驗流程之步驟 3 基於水灰比並不影響透水係數之條件不成立，此外，因流動性造成之試體穩定性變異過大，在不同流動性下亦不宜直接進行透水係數交叉分析。

圖 5.56 孔隙率與透水係數可得到更高之相關性 $R\text{-squared} = 0.96$ ，意指只要其連通孔隙率相同，即使因不同骨材粒徑級配造成大小孔隙不同，其所影響之透水係數並不大，此外，若孔隙率與透水係數偏差過大，間接得知試體之連通孔隙分布不均，可能是漿體流動性不適當或施工不當所造成，有數據可靠度之指標意義；而圖 5.57 力學強度與透水係數之關係可發現只要固定水灰比，使其流動性不過佳或過差，其力學強度與透水係數之相關性 $R\text{-squared} = 0.85$ ，意指固定水灰比，即可依據透水係數找出對應之力學強度。因此，可依據透水係數之需求，由圖 5.57 檢核強度是否達到所需標準，再由透水係數找出對應漿體填充孔隙百分比。

試驗修正後透水混凝土配比設計流程如下：

- step 1. 選擇水灰比，依強度及透水需求尋找對應之連通孔隙率，並依水灰比及連通孔隙率尋找對應之填充孔隙體積與骨材主要粒徑。
- step 2. 求出骨材之乾搗單位重，決定骨材之單方用量。
- step 3. 藉由骨材乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積。
- step 4. 由填充孔隙體積決定水泥漿體使用量，透過水灰比求出水泥之單方用量及拌合水之單方用量。
- step 5. 製作試體，檢核強度及透水需求。
- step 6. 完成透水混凝土配比設計。

步驟 1 所需之經驗關係，需更大量之數據資料，以適合之流動性，建立漿體水灰比及填充孔隙體積在不同骨材粒徑級配下對應之孔隙率與強度關係，進而達到強度及透水係數之需求。圖 5.58 為試驗修正後透水混凝土配比設計流程圖。

由於本計畫研究時間有所限制，以現有數據無法完整建立漿體水灰比及填充孔隙體積在不同骨材粒徑級配下對應之孔隙率與強度關係，緣此，僅能用現有數據進行配比設計。以下為兩個透水混凝土配比設計案例。

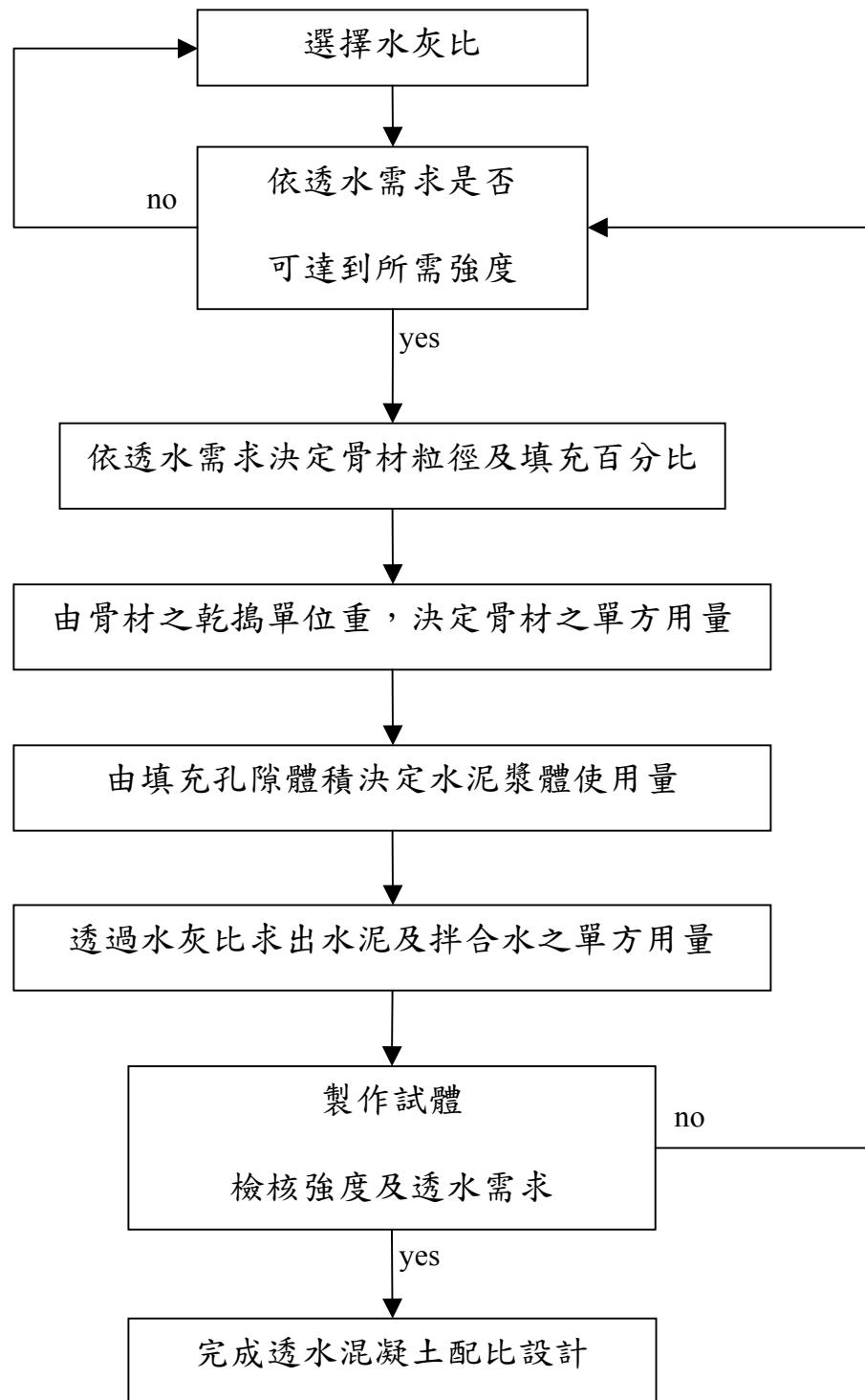


圖 5.58 試驗修正後透水混凝土配比設計流程圖

5.12.2 案例一：透水係數 10^{-3} cm/sec，抗壓強度 17.5MPa

step 1. 選擇水灰比，依強度及透水需求尋找對應之連通孔隙率，並依水灰比及連通孔隙率尋找對應之填充孔隙體積。

水灰比 0.35(目前僅有之數據)，由圖 5.57 可知透水係數介於 $5*10^{-2}$ cm/sec 以下 10^{-3} cm/sec 以上，其抗壓強度必定大於 17.5MPa，水灰比 0.35 符合要求。由圖 5.11 可找出三種配比符合水係數介於 $5*10^{-2}$ cm/sec 以下 10^{-3} cm/sec 以上，選擇 particle A，填充孔隙百分比 70%。

step 2. 求出骨材之乾搗單位重，決定骨材之單方用量。

骨材選用 particle A 主要粒徑為 0.32cm，乾搗單位重為 $1,665\text{kg/m}^3$ ，骨材之單方用量為 1665kg/m^3 。

step 3. 藉由骨材乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積。

單位體積孔隙率 37.3%，總孔隙體積為 $0.373\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

step 4. 由填充孔隙體積決定水泥漿體使用量，透過水灰比求出水泥之單方用量及拌合水之單方用量。

計算可得水泥用量為 391kg/m^3 ，拌和水用量為 134kg/m^3 。

step 5. 製作試體，檢核強度及透水需求。

強度為 20.95MPa，透水係數 0.323cm/sec ，符合需求。

step 6. 完成透水混凝土配比設計。

漿體	粒徑 (cm)	水灰比 (w/c)	漿體填充骨材孔隙百分比	骨材用量 (kg/m^3)	水泥用量 (kg/m^3)	拌和水用量 (kg/m^3)
水泥	0.32	0.35	70%	1665	391	134

5.12.3 案例二：透水係數 10^{-1} cm/sec，抗壓強度 15MPa

step 1. 選擇水灰比，依強度及透水需求尋找對應之連通孔隙率，並依水灰比及連通孔隙率尋找對應之填充孔隙體積。

水灰比 0.35(目前僅有之數據)，由圖 5.57 可知僅有四組可能符合要求，粒徑分別為 particleB、particleC、particleD，透水係數介於 0.115cm/sec 以下 0.1cm/sec 以上。由圖 5.11，選擇 particle D，填充孔隙百分比 70%。

step 2. 求出骨材之乾搗單位重，決定骨材之單方用量。

骨材選用 particle D 主要粒徑為 0.95cm，乾搗單位重為 1682kg/m^3 ，骨材之單方用量為 1682kg/m^3 。

step 3. 藉由骨材乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積。

單位體積孔隙率 38.3%，總孔隙體積為 $0.383\text{m}^3/\text{m}^3$

step 4. 由填充孔隙體積決定水泥漿體使用量，透過水灰比求出水泥之單方用量及拌合水之單方用量。

計算可得水泥用量為 401kg/m^3 ，拌和水用量為 140kg/m^3 。

step 5. 製作試體，檢核強度及透水需求。

強度為 14.86MPa ，透水係數 0.1131cm/sec ，不符合需求。

返回步驟 1，選擇 particle D，填充孔隙百分比 80%。強度為 15.61MPa ，透水係數 0.1105cm/sec ，符合需求。

step 6. 完成透水混凝土配比設計。

漿體	粒徑 (cm)	水灰比 (w/c)	漿體填充骨材孔隙百分比	骨材用量 (kg/m^3)	水泥用量 (kg/m^3)	拌和水用量 (kg/m^3)
水泥	0.95	0.35	80%	1682	458	160

5.13 透水混凝土技術推廣應用可行性評估

5.13.1 確認透水混凝土之類別

目前為止，透水混凝土在道路鋪面或停車場鋪面的應用較為廣泛，主要的類別可分為透水性水泥混凝土、透水性高分子混凝土及透水性燒結製品三大類。相對地使用在港灣工程或坡地工程上則不多見，反而在河川護岸上的應用卻是有一些國內外案例，主要均以透水方塊或球型透水製品於現地加以組合成結構單元體的型式。計畫中所研發之透水混凝土為透水性水泥混凝土，其製程及適用範圍與透水瀝青混凝土及透水樹酯混凝土較為相似，僅黏結骨材的膠結劑不同，但有別於透水磚。一般而言，普通混凝土為公共工程最常使用之材料，如 RC 結構物、剛性鋪面、基樁、消波塊、擋土牆、堤防、護岸等，一般在強度要求下，透水混凝土可以取代普通混凝土，由於透水混凝土其具有高孔隙率，可提供與普通混凝土不同之特性，如透水混凝土應用於剛性鋪面可以減少噪音與積水，增加安全性；應用於堤防護岸，透水混凝土易於植生植物並豐富堤防護岸之生態。

5.13.2 確定透水混凝土之配比與特性

計畫中所研發之透水混凝土，以純水泥漿體，水灰比可分為 0.25、0.35、0.45，連通孔隙率範圍為 3~23%，透水係數介於 0.03~0.14cm/sec 之間，28 天抗壓強度最高可達到 26MPa，但就經濟性、強度及透水性為未來應用之考量，最適配比的建議為水灰比 0.35、骨材粒徑 0.48cm、填充孔隙百分比 80%，其透水係數 0.1cm/sec、28 天抗壓強度可達到 21MPa。

透水混凝土亦可稱為無細骨材混凝土，可以視為一種骨材粒徑分佈在狹窄級配範圍內並且含(無)微量細骨材加上不足量膠結漿體所構成的混凝土，透水混凝土最明顯的特性即質輕多孔隙且工作性不佳坍度為零，一般施工，如鋪面工程大多以人力使其均勻分布於施工面積上，再用滾壓筒使透水混凝土結構更為緊密。如圖 5.59 所示^[48]，此為

國外進行透水鋪面工程施工過程，大致可分為透水混凝土洩料、整平、滾壓及伸縮縫之製作。



圖 5.59 透水混凝土之施工過程^[48]

5.13.3 交通建設適用透水混凝土之項目

透水混凝土配比設計與製程控制其特性，以達合適強度、高透水性及無析離等工程需求，主要仍以強度要求不高的結構物應用為主。在配比上水灰比約採 0.3~0.35 的範圍，骨膠比為 3.0~4.0，硬固後的混凝土內部通常含有 15~25% 的連通孔隙率，抗壓強度可達 15~35MPa，抗彎強度為 3~5MPa，透水係數為 1~15mm/sec 的範圍，單位重為 $1700\sim2200\text{kg/m}^3$ ，且因多孔隙的存在相較於普通混凝土，水的毛細現象不顯著及成型時側壓力小等特點，就透水混凝土特性而言，其主要功能大致如下：

1. 排水或保水功能

將其應用於鋪面面層時可迅速地排水，減少路面的積水現象，若面層與底層形成一連續的通路，則水份可直接滲透進入土壤，具有保水的效能，如圖 5.60 所示。

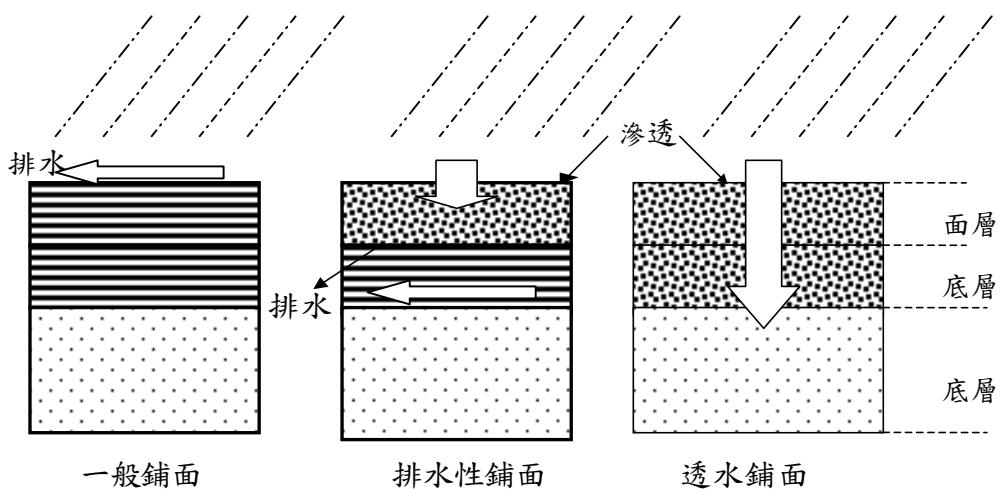


圖 5.60 各種鋪面示意圖^[2]

2. 水質淨化功能

多孔混凝土可用於河川、封閉水域或港灣的海水淨化，其原理是應用塊石表面上易附著微生物，形成所謂的生物膜，消耗氧氣而分解水中的懸浮物質和已溶解的有機性污濁物，使水質達到淨化的目的。

3. 增加生物的棲息空間

因表面有許多微小的連續孔隙，作為海洋復育的魚礁或藻礁石，可增加甲殼類或體型較小之魚種、魚苗之棲息場所，站在生態效果的觀點上，多孔性混凝土而表面凹凸的混凝土，都優於普通混凝土^[49]。

4. 植栽綠化功能

多半利用體積較小的透水混凝土製品，再以組合的形式組織成

結構單元體，除了材料本身具有為小孔隙可提供植物生長時根部的附著外，各材料間仍留有部分的較大組合間隙，可作為植物成長的空間。

5.吸音功能

多孔性混凝土直接暴露面對噪音源時，入射的聲波一部分被反射，一部分被材料吸收，另一部分則藉連通孔隙穿透，不若普通混凝土被反射的聲波較多，因此具有吸音的效能。若將其應用於交通工程上可降低交通噪音，如應用於道路鋪面或作為高速公路兩側的吸音板。

本計畫針對不同的水灰比、膠結材料種類及骨材粒徑大小，並變化漿體填充孔隙體積百分比，分別進行配比設計，共設計 54 種配比組合，對其進行各項力學及物理性質試驗，由結果可知計畫中所研發之透水混凝土，水灰比 0.35 之水泥漿體，依不同填充孔隙百分比其抗壓強度介於 17.5~25MPa 之間，透水係數皆在 0.03cm/sec 以上。表 5.12 為鋪面材料定量特性分析表，由上述結果對照此表顯示本計畫所研發之配比，可滿足內政部營建署「市區人行道施工規範」中對混凝土鋪面分類之抗壓強度要求，無論是採整體澆置或製成預鑄版式、連鎖磚式均可達到要求，且止滑性透水混凝土鋪面或預鑄版磚因表面粗糙度較普通混凝土高，止滑效能較佳。

在港灣工程應用上混凝土的品質因應結構物之種類、位置及環境條件而有不同的設計標準強度(如表 5.13 所示)，基本上須滿足強度與耐久性的要求。由於波浪的反覆衝擊作用，對於僅屬於點狀接觸黏結的透水性混凝土而言，或不宜將其應用於主體結構物上，且基於腐蝕的考量，亦不可將其應用於鋼筋混凝土中，較可能的應用方式僅止於次要結構物之應用，如護基方塊及消波覆蓋。

人工魚礁是將天然或人造的物體投放於海洋中，改變海洋環境，供給動植物良好棲息場地，已達到培育資源與增加漁獲之目的。而利用多孔混凝土礁石投放於海中，其附著在表面的海藻類數量較

傳統普通混凝土高，因此其集魚的效果會較佳。

由於經濟快速發展，臺灣都市車輛數目快速成長，車行噪音問題儼然已成為現代社會的一種公害，特別是在交通流量大車速快的快速道路周邊居民構成極大的困擾，利用多孔混凝土製成吸音板，可有效減低交通噪音影響，未來可朝此方面進行研發。

表 5.12 鋪面材料定量特性分析表^[50]

分類	鋪面材料	抗壓力	抗彎力	吸水率	止滑性	價格
混凝土鋪面	整體澆置	210 kgf/cm ² 以上	視有無配置鋼筋補強而定	7%	視表面處理可達良好效果	適中
	預鑄版式	140 kgf/cm ² ~560 kgf/cm ²	視有無配置鋼筋補強而定	6%	視表面處理可達良好效果	適中
	連鎖磚式	140 kgf/cm ² ~560 kgf/cm ²	60kg /cm ² 以上	6%以下	視表面處理可達良好效果	適中
磚材鋪面	燒陶磚	560 kgf/cm ²	50kg /cm ² 以上	特級2%以下	良好	偏高
	紅磚	140 kgf/cm ² 以上	40kg /cm ² 以上 (厚度 4 公分)	7%以下	良好	適中
瀝青鋪面	多孔隙瀝青混凝土	350 kgf/cm ² 以上	—	—	佳	適中
天然石材鋪面	大理石	2100 kgf/cm ²	70kg/cm ² 以上	0.45%以下	視表面處理而定可達良好效果	高
	花崗石	1750 kgf/cm ² ~2100 kgf/cm ²	40kg/cm ² 以上	0.3%以下	視表面處理而定可達良好效果	高
人造鋪面	石質面磚	350 kgf/cm ² 以上	300kg/cm ² 以上	一級3%以下 二級6%以下	良好	偏高
	陶質面磚	350kgf/cm ² 以上	50kg/cm ² 以上	16%以下	普通	適中
	瓷質面磚	350kgf/cm ² 以上	50kg/cm ² 以上	0.5%以下	稍差	適中
人行道設計建議標準		汽機車使用 500kgf/cm ² 以上 人行使用 350kgf/cm ² 以上	50kg/cm ² 以上	滲流5%以上 逕流3%以下	粗糙	視工程 經費而定

表 5.13 混凝土之配合條件及設計標準強度之參考表^[51]

種類	構造各部材料之種類	配合條件				設計標準強度 (kg/cm ²)	
		最大水灰比(%)		坍度 (cm)	粗骨材 之最大 尺寸 (mm)		
		總是結冰 解凍反覆 之地區	很少在冰 點以下之 地區				
無筋混凝土	填充混凝土塊	-	-	15	40	135	
	防波堤上部工程、沉箱 之覆面混凝土	65	70	8,12	40	160	
	主體塊 異形塊(消波、覆蓋)	65	65	8,12	40	180 (210)	
	護基塊 袋裝混凝土	70	70	8,12	40	160	
	碼頭上部工程、胸牆、 繫船柱基礎(重力式)	60	65	8,12	40	180	
鋼筋混凝土	碼頭上部工程、胸牆、 繫船柱基礎(樁式)	60	65	8,12,15	20,25,40	240	
	棧橋上部工程	55	55	8,12,15	20,25,40	240	
	沉箱、豎井坑、側牆、L 型塊、消波塊	55	55	8,12,15	20,25,40	240	
	錨錠版、錨錠樁上部工程	60	60	8,12,15	20,25,40	240	
護床鋪設		-	-	2.5	25,40	彎曲 45	

第六章 結論與建議

6.1 結論

1. 國內目前使用透水混凝土案例仍是有限，主要應用仍集中在透水性鋪面，其中又多半是使用透水磚、透水瀝青混凝土或是透水樹脂混凝土。真正使用透水波特蘭水泥混凝土的案例，並不多見。有關於透水混凝土應用於港灣工程以及公路護坡等工程應用，目前尚未發現有相關之案例。
2. 透水混凝土所使用之膠結漿體 w/c 比低，則黏稠度越高，則越容易緊密的裹覆在骨材顆粒周圍，使顆粒之間有足夠的漿體膠結並且能有效減少游離的漿體造成透水路徑的阻塞，而影響透水性能。
3. 透水係數隨連通孔隙率增加與填充漿量增加而下降，與骨材顆粒粒徑增加而上升之關係。
4. 連通孔隙率相同的條件之下，顆粒粒徑小者連通孔隙截面積較小且在試體內部的透水路徑較蜿蜒曲折；顆粒粒徑較大者其連通孔隙節面積大，在試體內部的透水路徑較直通。此差異之下，造成入滲水在試體內部流速不同造成流出水之流量有所差異。
5. 膠結漿體使用量增加，則力學強度上升；骨材顆粒粒徑增加，則力學強度下降。
6. 水泥漿體 w/c 上升，則力學強度下降。並且 w/c 過高情形下漿體在試體底部形成垂流現象，造成試體上層缺乏漿體而形成弱面，導致強度折減，透水性能完全喪失。
7. 三種不同膠結材料對力學強度之影響，其中以鹼活化爐石漿體表現最佳，抗壓強度最高可達 28.7 MPa 。而膠結漿體中適量添加矽灰，亦可提昇透水混凝土整體力學強度。

8. 遭受硫酸鹽攻擊之透水混凝土重量損失率與水泥漿體膠結材料 w/c 成正比。重量損失率與粒徑成正比，骨材顆粒粒徑越大則堆疊產生之空隙越大，使硫酸鹽較容易循大孔隙進入試體內部引起反應。
9. 經過降雨且連續施加污染物而阻塞之透水鋪面，其最終入滲率 K_a 為 7.118×10^{-3} cm/sec，雖然鋪面孔隙間經污染物阻塞後，但仍具有相當高之透水性。
10. 就經濟性、強度及透水性為未來應用之考量，最適配比的建議為水灰比 0.35、骨材粒徑 0.48cm、填充孔隙百分比 80%，其透水係數 0.1cm/sec、28 天抗壓強度可達到 21MPa。
11. 本計畫所研發之配比，可滿足內政部營建署「市區人行道施工規範」中對混凝土鋪面分類之抗壓強度要求，無論是採整體澆置或製成預鑄版式、連鎖磚式均可達到要求，故可應用於一般人行道鋪面上。

6.2 建議

1. 一般而言，在天然塊石不易取得，傳統混凝土河川護岸工程無法進行植生效果下，此種透水性混凝土製品的應用除可滿足護岸工程的需求，又可兼具生態工程之效益。
2. 利用多孔混凝土礁石投放於海中，其附著在表面的海藻類數量較傳統普通混凝土高出許多，因此其集魚的效果也較佳。
3. 由於經濟快速發展，臺灣都市車輛數目快速成長，車行噪音問題儼然已成為現代社會的一種公害，特別是在交通流量大車速快的快速道路周邊居民構成極大的困擾，利用多孔混凝土製成吸音板，可有效減低交通噪音影響，未來可朝此方面進行研發。

參考文獻

- [1] 陳振川，「高性能混凝土研發及推廣研討論會文輯，台北市台灣工業技術學院」，P.2，民國 86 年 6 月。
- [2] 高性能混凝土施工規範(草案)，中華民國結構工程學會(1994)。
- [3] 陳松堂、林建宏，「自充填混凝土之適用介紹」，台灣公路工程，第三十卷第五期，2003。
- [4] 生態工法[學生版]---認識生態工法
http://eem.pcc.gov.tw/natural/students/main_1.htm#into1
- [5] 照片來源：內政部建築研究所提供，2004。
- [6] 廖朝軒、梁明德，「環保再生透水鋪面」，行政院環境保護署環保育成中心，2004。
- [7] 「可透水式人型鋪面材料(無細骨材混凝土)及施工方法研究」，內政部建築研究所研究計畫成果報告，MOIS 891005，10 月 23 日，2000。
- [8] 鄭瑞濱、潘昌林，「透水性鋪面介紹」，WERC 水環研究中心，2001。
- [9] 陳豪吉、林建國，「輕質磚之配比及工程性質研究」，國立中興大工程學刊，第 13 卷，第 3 期，11 月，2002。
- [10] 楊雅雲，「輕質骨材抗壓磚之透水性研究」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，2004。
- [11] 謝素蘭，「土木工程材料科學與應用」，五南圖書出版公司，pp.271-316，10 月，2000。
- [12] 「建築基地保水透水技術設計規範與法制化之研究子計畫二透水鋪面性能工法試驗解析」，內政部建研所。

- [13] 楊靜，「建築材料與人居環境施普林格出版社」，清華大學出版社。
- [14] 謝素蘭，「以高壓及高溫燒結技術鑄造水泥、粘土及飛灰混合料組件之研究」，國立臺灣科技大學工程技術研究所碩士論文，1990。
- [15] S. Mindess, J. F. Young, “Concrete”, 2nd Edition , Pearson Education , Inc. , Upper Saddle River , N. J., 1981.
- [16] A.R, Brough, C.M, Dobson, I.G, Richardson, and G.W, Groves, “A study of pozzolanic reaction by solid-state ^{29}Si nuclear magnetic resonance using selective isotopic enrichment”, J. Materials Science, Vol.30, pp.1671-1678, 1995.
- [17] P.K. Mehta, and J.M Monteior , “Concrete Structures , Properties and Materials”, 2nd Edion , Prentice Hall Inc.New Jersey, 1993.
- [18] D. Bonen , K.H. Khayat , “Characterization and pozzolanic properties of silica fume stored in an open pond” , Cement and Concrete Research , Vol.25 , No.2 , pp.395-407 , 1995.
- [19] Antonio Princigallo, Klaas van Breugel ,Giovanni Levita “Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes”,Cement and Concrete Research,Vol.33,pp.1755-1763, 2003.
- [20] S. Chatterji , N. Thaulow , P. Christensen ,“ Pozzolanic activity of byproduct silica fume from ferro-silicon production” , Cement and Concrete Research , Vol.12 , pp.781-784 , 1982.
- [21] 林炳炎，「矽灰在混凝土中概論」，現代營建，pp.59-66，1988。
- [22] D.R.G. Mitchell , I. Hinczak , R.A. Day , “ Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes”, Cement Concrete Research , Vol.28 , No.11 , pp.1571-1584 , 1998.

- [23] H.A.Toutanji , T. El-Korchi , “The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar” , Cement and Concrete Research , Vol.25 , No.7 , pp.1591-1602 , 1995.
- [24] Roy,D.M., “Alkali-activated Cements: Opportunities and Challenges” , Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254, 1999.
- [25] 黃兆龍 , 「混凝土性質與行為」 , 詹氏書局 , 1999 。
- [26] Palomo, Grutzeck, M. W., Blanco, M. T. “Alkali-Activated Fly Ash a Cement for the Future”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.1323-1329,1999.
- [27] Roy, D. M. and G. M. Idorn, “Hydration,Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cement, Mortars, and Concrete” , ACI Journal, Vol. 26, Mar., pp.444-457, 1982.
- [28] Sivasundaram, V. and V. M. Malhotra, “Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Ground Granulated Slag” , ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 6, pp.554-563, 1992.
- [29] Osborne,G. J. , “Durability of Portland Blast-Furnace Slag Cement”, Cement and Concrete Composites , Vol. 21, pp.21-29 , 1999.
- [30] 蒲心誠、甘昌成、何桂、白光、吳禮賢、陳明珠 , 「鹼爐石混凝土耐久性研究」 , pp.13~20 。
- [31] Huanhai, Z., Xuequan, W. and Zhongzi, X., “Kinetic Study on Hydration of Alkali-Activated Slag”, Cement and Concrete Research , Vol. 23 , pp.1253-1258 , 1993.
- [32] 蒲心誠 , 「高強混凝土與高強鹼爐石混凝土」 , 混凝土 , 4 月 , 1994.
- [33] 蒲心誠、楊長輝 , 「高強鹼爐渣(JK)流態混凝土研究」 , 混凝土 , pp.18-30 , 1994 。

- [34] Wang, S. D., Scrinener, K. L. and Pratt, P. L., "Factors Affecting the Strength of Alkali-Activated Slag", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, pp.1033–1043, 1994
- [35] Talling, B. and Brandstetr, J., "Present State and Future of Alkali-Activated Slag Concretes", *Trondheim Conference, American Concrete Institute SP- 114*, pp.1512-1540, 1989.
- [36] Davidovits, J., "What Future for Portland Cement" *Symposium on Cement and Concrete in Global Environment*, Chicago, Illinois, USA, pp.10-11, Mar. 1993.
- [37] Gong, C., and Yang, N., "Effect of Phosphate on The Hydration of Alkali-Activated Red Mud-Slag Cementitious Material", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp.1013-1016, 2000.
- [38] Taylor, H. F. W., "Cement Chemistry", Academic Press, London, 1990.
- [39] Brough, A. R., Holloway, M., Sykes, J. and Atkinson, A., "Sodium Silicate-Based Alkali-Activated Slay Mortars Part II. The Retarding Effect of Additions of Sodium Chloride or Malic Acid", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp.1375-1379, 2000.1
- [40] <http://www.ccisn.com.cn/indexb/reads.asp?MsgID=455>
- [41] <http://www.teamjoy.com.tw/INFORMAT.HTM>
- [42] 周 樞, <http://www.linlins.com/jenniferchou/20040222175500.shtml>
- [43] 蔡文博、陳豪吉、林政毅、彭獻生, 「再生粒料混凝土塊之產製技術與應用」, 中華民國第八屆結構工程研討會。
- [44] <http://www.wakocon.co.jp>
- [45] 廖瑞堂, 「山坡地護坡工程設計」, 臺北市, 科技圖書, 2001。
- [46] 李培文, 「高壓透水磚產製技術之研究」, 國立中興大學土木工程學系碩士論文, 2004。

- [47] 涂允捷，「營建廢棄物混凝土與磁磚應用於透水鋪面之性能實驗評估」，國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2004。
- [48] Construction of pervious concrete pavements, Mtt Offenberg, PE.
- [49] 郭一羽、李麗雪，「海岸景觀與生態設計」，田園城市文化事業有限公司，第一版，2005。
- [50] 內政部營建署，「市區人行道施工規範」，中華民國 92 年。
- [51] 「港灣及海岸結構物設計基準」，港灣技術研究所，專刊第 123 號，1987。