

100-45-7530

MOTC-IOT-99-H1DB005

透水混凝土應用在港灣構造物設施 與公路路面成效評估之研究(2/2)



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

100-45-7530

MOTC-IOT-99-H1DB005

透水混凝土應用在港灣構造物設施 與公路路面成效評估之研究(2/2)

著者：張道光、李明君、顏聰、邱垂德、黃怡碩
童文志、何政翰、林岱瑋、陳靖宇、賴明志

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究(2/2)

/張道光等著.--初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，

民 100.04

面 ； 公分

ISBN 978-986-02-7375-5 (平裝)

1. 混凝土 2. 鋪面工程

440.327

100004490

透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究(2/2)

著 者：張道光、李明君、顏 聰、邱垂德、黃怡碩、童文志、何政翰
林岱瑋、陳靖宇、賴明志

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版 >中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 100 年 4 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 100 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

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25787542

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

GPN：1010000528

ISBN：978-986-02-7375-5 (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。

透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究
(2/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1010000528
定價 200 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究(2/2)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-02-7375-5 (平裝)	政府出版品統一編號 1010000528	運輸研究所出版品編號 100-45-7530	計畫編號 99-H1DB005
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：張道光 聯絡電話：04-26587119 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：朝陽科技大學 計畫主持人：李明君 研究人員：顏聰、邱垂德、黃怡碩、童文志 何政翰、林岱瑋、陳靖宇、賴明志 地址：41349 臺中縣霧峰鄉吉峰東路 168 號 聯絡電話：04-23323000 轉 4239		研究期間 自 99 年 03 月 至 99 年 12 月
關鍵詞：透水混凝土、海堤、成效評估、鋪面			
摘要： 近年來國內以打造永續臺灣與綠建築為未來努力的方向，為解決雨水資源流失、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。本研究針對國內公路路面狀況需求，擬定詳細的試鋪作業計畫，並執行試鋪作業，再對試鋪透水混凝土路面進行完整成效評估；本計畫藉由公路總局「埔里工務段辦公大樓新建工程」案設計與施工，完成透水混凝土配比試拌作業、路面試鋪透水混凝土施工作業、路面試鋪成效評估作業及研擬試鋪公路路面設計透水混凝土導則初稿。在實驗室模擬海堤方面，發現透水混凝土海堤溯升高度較低且有較佳的消能效益；在路面試鋪成效評估作業發現，鋪面表面並無裂縫產生，但浮石過多，經鋼刷處理與高壓水沖洗後，不再有浮石然而平坦度卻相對降低，現地透水試驗量測值約 1,000ml/15sec，其現地透水量超過一般透水鋪面 400 ml/15sec 之標準甚多。透水混凝土可運用於人行道、停車場與路面工程，它是一種綠混凝土鋪面材料。 本研究成果之效益，以及可提供本所或其他政府機關後續應用情形，包括(1)研擬試鋪公路路面設計透水混凝土導則初稿，能提供工程界規劃設計與施工之參考；(2)獲交通部公路總局第二區養護工程處之應用，預計於 2009 年底發包施工興建「埔里工務段辦公大樓新建工程」中，規劃部分停車場與路面採用透水混凝土；(3) 提供各港務局、公路局及相關交通單位推廣應用透水混凝土之參據。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 4 月	242	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Performance Evaluation on Highway Pavement and Harbor and Marine Utilities by Applying Pervious Concrete (2/2)			
ISBN (OR ISSN) ISBN 978-986-02-7375-5 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010000528	IOT SERIAL NUMBER 100-45-7530	PROJECT NUMBER 99-H1DB005
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chang Tao-kuang PHONE: (04) 26587119 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM March 2010 TO December 2010
RESEARCH AGENCY: Chaoyang University of Technology PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Ming-Gin PROJECT STAFF: Yan Cong, Ciou Chuei-de, Huang Yi-huo, Tung win-chih, Ko Cheng-han, Lin Di-wei, Chen Chi-yi, Lai Min-chi ADDRESS: No.168 Jifong E, Rd., Wufong Township, Taichung 41349, Taiwan (R.O.C) PHONE: 886-4-2332-3000 Ext.4239			
KEY WORDS: PERVIOUS CONCRETE, SEAWALL, PAVEMENT MATERIAL, AMOUNT OF DUST			
ABSTRACT: In recent years, the forever-lasting Taiwan and green architecture have become a major topic in our country. In order to resolve the runoff of rainwater resource, to prevent the spoliation of ecology and to reduce the effect of heat island, to search for the suitable mix design of the pervious concrete for Taiwan is not a trivial issue. The main requirement of highway condition in Taiwan is to plan a trial pervious concrete job and evaluate its complete performance for pavement engineering. Most works have been completed, including trial job on mix design and batch operation, construction execution, performance evaluation on the pervious concrete pavement which has been designed and constructed in the new Puli office building project of General Highway Bureau, and plan a design guideline for the pervious concrete pavement. By simulating a seawall in pervious concrete, using wave run-up as lab evaluation, it was concluded that a porous seawall has better high-energy dissipation capacity than the ordinary concrete one. The performance evaluation on the pervious pavement reported that it is no crack but exits a lot of loose aggregates on surface. After the steel brush treatment with high-pressure water washing, the loose aggregates disappear but the relative smoothness on pavement surface decreases. The field permeability test for the concrete pavement is about 1000ml/15sec. The water penetration of the above pervious concrete is very good and exceeding the standard 400 ml/15sec. It can be applied to sidewalks, parking lots and light vehicle roads. It is a green concrete pavement material. The results and subsequent applications of this research work could be summarized in that (1) plan a design guideline for the pervious concrete pavement. This study result of performance of pervious concrete will be valuable for construction of application practice, (2) a pervious concrete parking lot has been designed and constructed in 2010 in the new office-building project of Taiwan Highway Bureau, (3) and the result can offer harbor bureaus, Directorate General of Highways and related units the reference and application of pervious concrete.			
DATE OF PUBLICATION April 2011	NUMBER OF PAGES 242	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路 路面成效評估之研究(2/2)

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
表目錄	VIII
圖目錄	XI
照片目錄	XV
第一章 緒 論.....	1-1
1.1 計畫背景.....	1-1
1.2 研究目的與重要性	1-5
1.3 研究內容與工作項目	1-5
第二章 文獻回顧.....	2-1
2.1 透水混凝土.....	2-1
2.1.1 透水混凝土之定義	2-1
2.1.2 透水混凝土之組成.....	2-2
2.1.2.1 水泥與其它膠結材料.....	2-2
2.1.2.2 粒料.....	2-3
2.1.2.3 拌合水.....	2-4
2.1.2.4 摻劑.....	2-5
2.1.2.5 水灰比.....	2-5

2.1.3 透水混凝土之配比	2-6
2.2 透水混凝土之工程性質	2-13
2.2.1 新拌透水混凝土	2-13
2.2.2 硬固透水混凝土	2-13
2.3 透水混凝土在公路路面與港灣構造物設施之應用	2-15
2.3.1 透水混凝土應用－沿革	2-15
2.3.2 公路路面應用	2-15
2.3.3 港灣構造物設施應用	2-23
2.3.4 透水混凝土案例	2-29
2.3.5 透水混凝土研究彙編：過去、現在與未來	2-40
第三章 公路路面試鋪透水混凝土配比設計與試拌	3-1
3.1 路面透水混凝土配比設計試驗	3-1
3.1.1 使用材料與配比設計原則	3-1
3.1.2 材料配比設計	3-2
3.2 拌合廠與材料認可	3-3
3.3 執行配比設計與試拌作業	3-6
3.3.1 驗證配比	3-7
3.3.2 執行試拌作業與現地試鋪	3-8
第四章 公路路面試鋪施工作業執行	4-1
4.1 透水混凝土路面規劃設計及施工規範研擬	4-1
4.1.1 試鋪路面場址規劃	4-1
4.1.2 透水混凝土鋪面設計及施工規範研擬	4-4
4.2 施工前的準備作業	4-7

4.2.1 試鋪路面施工場址準備	4-7
4.2.2 試鋪施工前之教育訓練	4-9
4.3 施工中的製程控制作業	4-10
4.3.1 透水混凝土預拌廠的製程控制情形	4-13
4.3.2 現地施工品質管制之情形	4-14
4.4 施工後的品質檢測作業	4-22
第五章 公路路面試鋪成效評估作業	5-1
5.1 實驗室內的材料性質評估	5-1
5.1.1 透水混凝土抗壓試驗	5-1
5.1.2 透水混凝土抗彎試驗	5-3
5.2 鋪築地點的鋪面特性評估	5-6
5.2.1 現地鋪面紅外線鋪面溫度檢視	5-6
5.2.2 透水鋪面平坦度試驗	5-13
5.2.3 非破壞性反彈錘試驗	5-19
5.3 現地透水成效評估	5-21
5.3.1 現場透水量試驗	5-22
5.3.2 現地透水試驗結果	5-23
5.3.3 目視鋪面大量透水驗證試驗	5-25
5.4 小結	5-26
第六章 實驗室模擬透水混凝土應用在海堤對於波浪溯升之評估	6-1
6.1 試驗材料及配比	6-1
6.2 試驗儀器與設備	6-6
6.3 試體製作與養護	6-9

6.3.1 試體規劃.....	6-9
6.3.2 試體製作.....	6-9
6.3.3 試體養護.....	6-11
6.4 試驗方法與步驟	6-11
6.4.1 抗壓試驗.....	6-11
6.4.2 抗彎試驗.....	6-12
6.4.3 溯升試驗.....	6-12
6.5 基本力學試驗	6-16
6.5.1 混凝土單位重試驗.....	6-16
6.5.2 抗壓強度.....	6-17
6.6 溯升試驗成果	6-18
6.6.1 試驗條件.....	6-19
6.6.2 坡度 1：1 海堤溯升高比較.....	6-20
6.6.3 坡度 1：1.5 海堤溯升高比較.....	6-23
6.6.4 坡度 1：2 海堤溯升高比較.....	6-24
6.6.5 不同坡度海堤之比較.....	6-29
6.7 小結	6-31
第七章 結論與建議.....	7-1
7.1 結論	7-1
7.2 建議	7-3
參考文獻	參-1
附錄一 透水混凝土鋪面設計導則(初稿).....	附錄 1-1
附錄二 工作會議紀錄.....	附錄 2-1

附錄三 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 3-1
附錄四 期末報告審查意見答覆表.....	附錄 4-1
附錄五 期末報告簡報資料.....	附錄 5-1

表目錄

表 2-1 各國推薦或採用透水性混凝土路面之粒料級配	2-4
表 2-2 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍	2-7
表 2-3 背填透水混凝土之配合比例	2-24
表 2.4 各種粗糙度與透水性海堤堤面溯升減少率	2-28
表 2-5 SIOUX 市重交通車輛倉庫與車道 10 種透水混凝土配比 ...	2-34
表 3-1 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍	3-2
表 3-2 無細混凝土水泥之配比設計參考	3-3
表 3-3 透水混凝土配比	3-7
表 4-1 埔里工務段辦公大樓新建工程之透水混凝土規範與品質要求	4-6
表 4-2 路基土壤篩分析	4-8
表 4-3 路基土壤分類試驗結果	4-8
表 4-4 美國 AASHTO 土壤分類	4-9
表 4-5 土壤滲透係數 k 值簡易對照表	4-9
表 4-6 透水混凝土應用於鋪面工程之教育訓練課程	4-10
表 5-1 抗壓強度結果	5-2
表 5-2 抗彎試驗最大應力	5-4
表 5-3 28 天及 56 天抗彎強度	5-5
表 5-4 9 點 08 分施作前各點位溫度表	5-8
表 5-5 11 點 36 分施作後各點位溫度表	5-9
表 5-6 10 點 50 分各點位溫度表	5-12
表 5-7 11 點 20 分各點位溫度表	5-12

表 5-8 11 點 50 分各點位溫度表.....	5-13
表 5-9 平坦度標準差 D2 係數表	5-14
表 5-10 平坦度試驗數據	5-15
表 5-11 平坦度標準差	5-15
表 5-12 平坦度高低差	5-17
表 5-13 平坦度標準差	5-18
表 5-14 反彈值數據表	5-20
表 5-15 強度表	5-21
表 5-16 現地透水道路透水試驗	5-24
表 5-17 現地透水道路透水量	5-25
表 6-1 混凝土之配比	6-1
表 6-2 水泥成分與性質	6-2
表 6-3 砂灰之化學成分	6-3
表 6-4 砂灰之物理性質	6-3
表 6-5 細粒料篩分析結果	6-4
表 6-6 粗粒料篩分析結果	6-5
表 6-7 粗細粒料之基本性質	6-5
表 6-8 試驗試體規劃表	6-9
表 6-9 溯升試體模型組合表	6-13
表 6-10 混凝土單位重試驗	6-16
表 6-11 混凝土 28 天齡期抗壓強度試驗	6-17
表 6-12 溯升試驗入流量比較	6-19
表 6-13 坡度 1:1 海堤溯升高度比較	6-21

表 6-14 坡度 1:1.5 海堤溯升高度比較	6-24
表 6-15 坡度 1:2 海堤溯升高度比較	6-27

圖目錄

圖 1.1 第一年研究流程圖.....	1-7
圖 1.2 第二年研究流程圖.....	1-9
圖 2.1 透水混凝土含水量多寡是否結球行為：(A)太少，(B)適量，(C)太多水.....	2-5
圖 2.2 透水混凝土抗壓強度與孔隙率之關係.....	2-9
圖 2.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係.....	2-10
圖 2.4 透水混凝土水灰比與孔隙率之關係.....	2-10
圖 2.5 透水混凝土抗彎強度與孔隙率之關係.....	2-10
圖 2.6 透水混凝土抗彎強度與抗壓強度之關係.....	2-11
圖 2.7 透水混凝土透水速率與孔隙率之關係.....	2-11
圖 2.8 透水混凝土配比設計流程圖.....	2-12
圖 2.9 灌溉水路使用透水混凝土之工法.....	2-20
圖 2.10 透水係數與漿骨比關係圖.....	2-21
圖 2.11 孔隙率與透水係數關係圖.....	2-22
圖 2.12 高陡護坡斷面示意圖	2-25
圖 2.13 凹凸面易使珊瑚著生.....	2-27
圖 2.14 海草數量與試驗期相關性.....	2-28
圖 2.15 SUN RAY STORE-AWAY 倉儲設施透水混凝土鋪面設計圖.....	2-30
圖 2.16 STRANG COMMUNICATION OFFICE 透水混凝土停車場設計圖	2-31
圖 2.17 TALLAHASSEE 市環境保護署建築物附近載重區透水混凝土設計圖	2-32

圖 2.18 喬治亞州 EFFINGHAM 郡掩埋場透水混凝土設計圖	2-33
圖 2.19 美國南卡羅來那州 SANTEE 土石壩與堤防工程	2-36
圖 2.20 設計使用透水混凝土 10 英吋厚與碎石透層 4 英吋作為 SANTEE 土石壩或堤保護坡	2-36
圖 2.21 美國州政府投注資源於透水混凝土研究或訓練示意圖	2-41
圖 4.1 公路總局新建埔里工務段辦公大樓預定位址圖	4-2
圖 4.2 公路總局新建埔里工務段辦公大樓配置平面	4-3
圖 4.3 原規劃之辦公人員停車場設計圖	4-4
圖 4.4 埔里工務段辦公大樓新建工程之透水混凝土鋪面標準斷面 圖	4-5
圖 4.5 本工程之透水混凝土施工規範與其鋪面施工縫詳圖	4-7
圖 5.1 28 天以及 56 天抗壓強度	5-3
圖 5.2 抗彎應力曲線圖	5-4
圖 5.3 9 點 08 分熱影像圖	5-7
圖 5.4 灰階影像	5-7
圖 5.5 11 點 36 分熱影像圖	5-8
圖 5.6 灰階影像	5-8
圖 5.7 9 點 08 分熱影像點溫圖	5-9
圖 5.8 11 點 36 分熱影像點溫圖	5-10
圖 5.9 灰階影像	5-10
圖 5.10 10 點 50 分熱影像圖	5-10
圖 5.11 11 點 20 分熱影像圖	5-11

圖 5.12 11 點 50 分熱影像圖	5-11
圖 5.13 10 點 50 分	5-12
圖 5.14 11 點 20 分	5-12
圖 5.15 11 點 50 分	5-12
圖 5.16 鋪面道路圖	5-13
圖 5.17 9 月 8 日平坦度號標準差	5-18
圖 5.18 10 月 8 日平坦度標準差	5-18
圖 5.19 反彈值與強度對照圖	5-20
圖 5.20 施測點位圖	5-23
圖 6.1 試體製作流程圖	6-10
圖 6.2 透水混凝土不同含水量是否垂流行為	6-11
圖 6.3 溯升試驗流程圖	6-14
圖 6.4 溯升試驗示意圖	6-15
圖 6.5 28 天抗壓強度	6-17
圖 6.6 坡度 1:1.5 普通混凝土不同水量溯升高	6-20
圖 6.7 坡度 1:1 普通混凝土海堤溯升高	6-22
圖 6.8 坡度 1:1 透水混凝土海堤溯升高	6-22
圖 6.9 坡度 1:1 海堤溯升高比較	6-23
圖 6.10 坡度 1:1.5 普通混凝土海堤溯升高	6-25
圖 6.11 坡度 1:1.5 透水混凝土海堤溯升高	6-25
圖 6.12 坡度 1:1.5 海堤溯升高比較	6-26
圖 6.13 坡度 1:2 普通混凝土海堤溯升高	6-28
圖 6.14 坡度 1:2 透水混凝土海堤溯升高	6-28

圖 6.15 坡度 1:2 海堤溯升高比較	6-29
圖 6.16 不同坡度海堤溯升高比較.....	6-30
圖 6.17 不同坡度海堤溯升比.....	6-30

照片目錄

照片 2.1 美國透水鋪面應用於停車場.....	2-16
照片 2.2 VILLANOVA 大學透水混凝土試驗廣場	2-17
照片 2.3 日本透水鋪面應用於步道.....	2-18
照片 2.4 臺南市中華西路之排水性瀝青路面.....	2-19
照片 2.5 透水混凝土護坡施工澆置情形.....	2-25
照片 2.6 日本佐賀縣多久市石原川透水多孔混凝土護岸工程.....	2-26
照片 2.7 日本山口縣防府市佐波川多孔混凝土護岸工程.....	2-26
照片 2.8 南加州 MANHATTAN BEACH 透水混凝土停車場	2-29
照片 2.9 SUN RAY STORE-AWAY 倉儲設施透水混凝土鋪面	2-30
照片 2.10 STRANG COMMUNICATION OFFICE 透水混凝土停 車場	2-31
照片 2.11 TALLAHASSEE 市環境保護署建築物附近透水混凝土載重 區	2-32
照片 2.12 喬治亞州 EFFINGHAM 透水混凝土郡掩埋場	2-33
照片 2.13 SIOUX 重交通車輛倉庫透水混凝土鑽心試體.....	2-34
照片 2.14 北卡羅來那大學通勤停車場透水混凝土.....	2-35
照片 2.15(A) 奧勒岡州波特蘭動物園走道	2-37
照片 2.15(B) 加州美橡樹 MILLER 公園	2-37
照片 2.15(C) 田納西州 CHATTANOOGA FINLEY 體育館停車場 .	2-38
照片 2.15(D) 加州 IMPERIAL 海濱運動公園	2-38
照片 2.15(E) 奧勒岡州天使山倉儲用地	2-38

照片 2.15(F) 華盛頓州 BAINBRIDGE 島彩色透水混凝土人行道..	2-39
照片 2.15(G) 喬治亞州 BUFORD LARGE CONCRETE 停車場	2-39
照片 3.1 透水混凝土試樣(圓柱與版)扁平率過高.....	3-4
照片 3.2 粒料扁平有改善.....	3-5
照片 3.3 新拌透水混凝土卸料至卡車之情況.....	3-6
照片 3.4 試鋪時模版組立與碎石鋪設情形.....	3-6
照片 3.5 透水混凝土由卡車卸料至試鋪基地.....	3-6
照片 3.6 新拌透水混凝土無垂流之現象.....	3-7
照片 3.7 使用鏟子、耙子與推平扒攤平新拌透水混凝土.....	3-7
照片 3.8 透水混凝土滾筒壓密與完成面之施作.....	3-8
照片 3.9 鋤刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀.....	3-8
照片 3.10 透水混凝土圓柱抗壓試體之製作。.....	3-9
照片 4.1 基層不織布鋪設之進行.....	4-11
照片 4.2 基層不織布鋪設完成.....	4-11
照片 4.3 底層工地密度試驗之進行.....	4-11
照片 4.4 底層工地密度試驗完成.....	4-12
照片 4.5 底層碎石級配完成.....	4-12
照片 4.6 新廠全新拌合軟體與硬體設備.....	4-13
照片 4.7 拌合廠測量新拌透水混凝土單位重.....	4-14
照片 4.8 透水混凝土外觀.....	4-14
照片 4.9 紅外線溫度監測.....	4-16
照片 4.10 新拌透水混凝土無垂流之現象.....	4-17
照片 4.11 透水混凝土由第一回卡車卸料情形.....	4-17

照片 4.12 透水混凝土由第二回卡車卸料情形.....	4-17
照片 4.13 透水混凝土澆置與攤平之情形.....	4-18
照片 4.14 使用小山貓協助搬運與攤平之情形.....	4-18
照片 4.15 現場工程人員刮平與振動搗實之情形.....	4-18
照片 4.16 振動刮板其刮平與振動搗實之效果不良.....	4-19
照片 4.17 透水混凝土使用大滾筒滾壓情形.....	4-19
照片 4.18 透水混凝土使用小滾筒滾壓情形.....	4-19
照片 4.19 透水混凝土最終壓實之情形.....	4-20
照片 4.20 鋤刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀.....	4-20
照片 4.21 新拌透水混凝土鋪面使用滾筒刀片切縫之情形.....	4-20
照片 4.22 塑膠布覆蓋養護新拌透水混凝土鋪面.....	4-21
照片 4.23 透水混凝土試體模具與夯實用之搗棒.....	4-21
照片 4.24 搗棒夯實製作透水混凝土試體之情形.....	4-21
照片 4.25 試體部分有垂流阻塞孔隙現象.....	4-23
照片 4.26 抗彎試体外觀.....	4-23
照片 4.27 鋪設厚度符合設計厚度.....	4-24
照片 4.28 現地自來水水管透水能力測試.....	4-24
照片 5.1 28 天透水混凝土試體.....	5-2
照片 5.2 56 天透水混凝土試體.....	5-2
照片 5.3 28 天透水混凝土試體.....	5-4
照片 5.4 56 天透水混凝土試體.....	5-5
照片 5.5 TH7102 紅外線攝影機.....	5-6
照片 5.6 施作前拍攝實際畫面.....	5-8

照片 5.7 施作後實際畫面.....	5-9
照片 5.8 9 月 8 號透水道路之拍攝情形.....	5-10
照片 5.9 三公尺直規	5-14
照片 5.10 預計中震動刮板與當天實際使用之刮板.....	5-16
照片 5.11 鋪面清理	5-17
照片 5.12 反彈錘	5-19
照片 5.13 現場透水試驗儀器.....	5-22
照片 5.14 現地透水試驗水位下降前.....	5-24
照片 5.15 現地透水試驗水位下降後.....	5-24
照片 5.16 預拌車裝滿水灌水至透水混凝土鋪面之情形.....	5-26
照片 6.1 水泥	6-2
照片 6.2 矽灰	6-2
照片 6.3 細粒料	6-4
照片 6.4 粗粒料	6-4
照片 6.5 強塑劑	6-6
照片 6.6 土石流水道主體.....	6-7
照片 6.7 土石流儀堆積盤.....	6-7
照片 6.9 玻璃水道	6-7
照片 6.10 200 頓抗壓試驗機.....	6-7
照片 6.11 鼓式拌和機.....	6-8
照片 6.12 大型烘箱	6-8
照片 6.13 試體模具	6-8
照片 6.14 搖篩機	6-8

照片 6.15	溯升試驗儀器架設法.....	6-16
照片 6.16	普通混凝土海堤模型：(A)坡度 1:1，(B)坡度 1:1.5，(C)坡度 1:2	6-18
照片 6.17	透水混凝土海堤模型：(A)坡度 1:1，(B)坡度 1:1.5，(C)坡度 1:2.....	6-18
照片 6.18	混凝土海堤模型：(A)普通混凝土堤頂部分，(B)透水混凝土堤頂部分，(C) 海堤試體組合的樣式.....	6-19

第一章 緒 論

1.1 計畫背景

透水混凝土是一種特殊型式的多孔混凝土，一般多使用在平面澆置的版片構件上，允許雨水或其他來源的水穿過混凝土層，降低逕流量並提升地下水蓄存量。高透水性係經由混凝土中大量連結的孔洞來達成。一般透水混凝土幾乎不含細粒料（又稱 no-fines concrete），僅利用有限的水泥質糊體將粗粒料黏結，維持混凝土內部孔洞的連續性。過去，透水混凝土多應用於停車場、人行步道、輕承載區域及溫室區域；目前，永續發展是社會上普遍追求的目標，而透水混凝土正是永續營建的重要工程材料之一⁽¹⁾。

近年來，都市洪災頻傳，人民生命財產損失慘重，政府亟思解決之道；其中推動永續或生態的概念於國內公共工程的設計與施工上，為重要改善天然災損的政策之一，有鑑於此，內政部營建署擬修訂「市區道路條例」，規定未來人行道鋪面材料應將生態與防災功能列入考量，並建議鋪面材料使用透水混凝土⁽²⁾。

美國環保署（EPA）認為適當使用透水混凝土是控制初始急流污染（first-flush pollution）及暴雨管理（storm water management）的最佳方式，並利用訂定區域暴雨逕流量的限制條件，鼓勵使用透水混凝土做為道路面層材料；此因，倘不使用透水鋪面材料，新區域土地開發必需擴增排水系統的規模與興建費用、提高房地產開發成本，方能符合區域暴雨逕流量的法規限制條件。然而使用透水混凝土可降低鋪面區域的逕流量，減少設置暴雨集水池的需求，降低雨水排水管線的需求容量，又可發揮濾網濾清的功能，使得伴隨雨水進入河川、蓄水池的污染物數量降低；施作透水混凝土區域其功能好似一個水源貯存盆地，在此廣大區域允許雨水透水進入透水混凝土及底層土壤，可有效地補充區域性珍貴的地下水貯存量。前述使用透水混凝土的各項效益，均利於土地的有效利用。此外，使用透水混凝土尚可降低新區域

土地開發對植物生長的衝擊，透水鋪面允許水分與空氣穿過到達土壤並延伸至植物根部，使植物可以獲得滋養而成長⁽²⁾。

環保科技發達的德國，街道積水現象非常少見；在德國，人行道、自行車道及郊區道路等承受壓力不大的路面，均採用透水地磚，除磚材本身可透水外，磚與磚間採用透水性填充材料拼接；自行車存放區及停車場地面，使用多孔的混凝土磚，並在磚孔中用土填充以利綠草生長，使 40% 以上的地面可具有綠化功能；德國經驗亦顯示使用硬質低透水鋪面，會使雨水補充地下水的路徑被阻斷，雨水匯集地面，若大量集中在汽、機車道上，更將使交通堵塞引發嚴重都市問題。又因為土壤不能大量及時吸收雨水，雨水排放至河川，河水水位常會迅速升高造成洪災；而雨水直接從地面蒸發流失，亦會使城市粉塵污染加重，地面平均溫度升高，能源消耗增加。同時，不透水地面會使地面空氣交換與濕度降低，影響大地的生態系統。

過去二十年國內經濟發展快速，多數區域均呈現都市化現象，大量鋪設不透水面層，使得不透水面積逐年增加，降低區域地表保水效能，導致各都會區水災頻傳。國中、小三十五所學校校園環境調查報告顯示，國中校園地面平均不透水面積高達 69%，國小平均不透水面積達 68%。臺灣鋪面工程幾乎均採用不透水鋪面材料，主要考量耐用、美觀及保護地下工程設施等因素。而透水材料研究正方興未艾，其中包括透水瀝青路面及透水混凝土材料應用研究。透水性瀝青鋪面與排水性瀝青路面曾進行比較試驗，而為發展多孔隙瀝青混凝土，亦有工程公司鋪設試驗性多孔瀝青鋪面，其設計之目標孔隙率為 20%⁽³⁾。

製作成功的透水混凝土鋪面，必須有經驗豐富的營造廠商配合；與製作普通混凝土鋪面一樣，澆置前適當的基層施工亦非常重要。應該適當地壓密基層，以獲致均勻且穩定的底層。當透水鋪面設在土壤層或砂礫層上時，基層壓密建議達到其最大密度的 92%~96%(ASTM D1557)。若面層鋪設於砂層及黏土層上時，則壓密度取決於鋪面設計的規定，土壤層上或需鋪設開放級配粒料層，同時可置放工程不織布於細顆粒土層與石料層間。但不能過度壓密土壤，避免潛在的膨脹性

能。施作透水混凝土鋪面前，必須濕潤基層及先使用耙子耙平車輛所造成之車軌，再行壓密。濕潤基層，可以避免透水混凝土過快凝結⁽²⁾。

一般透水混凝土使用的水/膠結材的比值約在於 0.35~0.45，孔隙率約為 15%~25%。配比中使用膠結材料、粗粒料及水，使用少量或者不使用細粒料。配比材料對用水量非常敏感，現場施作時，經常需要修正配比用水量。太多用水會造成泌水現象，太少用水則會造成材料在拌合機內團簇，並使得卸料速度減緩。太少的水量也會妨礙混凝土獲得適當養護，且可能產生表面裂縫。適當的配比會使混凝土表面具有如金屬的平滑外觀⁽²⁾。

透水混凝土可以澆注在固定模板或是移動模板內。通常所使用有斜度的模板，在模板的上方，有一上升移動帶，帶動刮平裝置移動。刮平可用震動的或是手動的刮刀，一般說來震動式刮刀較為常用。刮除完多餘的混凝土以後，刮刀由模板上移除，然後使用架設在模板上的手動滾輪輾壓混凝土。滾動壓密可使漿體與粗粒料產生良好結合，形成一較為平滑的路面。應避免施加過大的壓力於滾輪上，因過大壓力會造成混凝土內部的孔洞崩塌。

混凝土鋪面接合處的要求事項與混凝土板塊在斜度下接合的要求是一致的。當用水量很少時，硬固混凝土的收縮會明顯地下降，因此接合處的收縮縫尺寸應放大。正確的養護是維持透水混凝土鋪面的結構完整性的基本需求，養護使得水泥漿體得以完成足夠的水化反應，使鋪面斷面有足夠的強度抵抗清理時的外力，養護應該從澆置後 20 分鐘內開始，並持續 7 天。為達養護之目的，通常亦有將塑膠布鋪設於透水混凝土上。

透水混凝土的抗壓強度可以達到 2.8~28 MPa，而介於 4.2~10MPa 較為常見。然而，透水混凝土的優劣主要不是以抗壓強度來規範，孔隙含量更為重要。一般多以現場透水混凝土的密度(單位重)作為驗收標準。接受的誤差準則是以設計單位重為±80 公斤/立方米為其允許變異範圍，此試驗必須要在現地進行。新拌透水混凝土的密度係參照 ASTM C29 規定的振動法量測。坍度試驗與空氣含量試驗並不適用於

透水混凝土。如果透水混凝土是使用在洪氾區工程，使用前必須以目視方法檢查其排水功能是否達到預期的效果。對於透水混凝土抵抗凍融破壞的能力，目前未有定論。在溫熱帶地區，透水混凝土已有許多成功的案例，使用在寒冷地帶，近年來才開始嘗試。當透水混凝土使用在凍融環境，應避免使之處於飽合狀態。為了避免透水混凝土處於飽合狀態，其面層厚度應介於 200~600mm。有限的試驗室資料顯示，注入空氣有助於透水混凝土抵抗凍融效應。EPA 建議透水混凝土鋪面應該定期清理，避免阻塞。清理可使用真空吸取或是高壓水沖洗。雖然透水混凝土以及底層的土壤層提供了濾淨的效果，並不是所有的污染物都可以除去⁽²⁾。

近年來國內以打造永續臺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。交通部運輸研究所為改善交通運輸行車安全和解決上述雨水資源流失、環境生態破壞及熱島效應日益擴張之問題，參考歐美各國及日本近年來所研究鋪設推廣的透水混凝土，於民國九十五年，委託國內學術單位針對透水混凝土應用於交通工程進行試驗與研究，研究內容包括(1) 國內外應用發展現況調查分析；(2) 透水混凝土基本組合材料之調查分析；(3) 試驗室配比研究及試體製作與試驗；(4) 透水混凝土技術推廣應用之可行性評估；(5) 建立透水混凝土之製程與試驗標準；(6) 驗證透水混凝土之最適配比；(7) 停車場進行現地施作，以驗證透(排)水效果；(8) 評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性；(9) 舉辦教育訓練課程。上述有關停車場現地鋪設透水混凝土施作，以驗證透(排)水效果；結果發現透水混凝土現地透水能力良好，透水混凝土試驗經由目視與現場透水量兩種試驗評估，目視鋪面透水驗證試驗是於現地六個停車格(#1 至#6)使用自來水水管將水量開到最大，分別目視每個停車格鋪面之自來水是否能完全透入鋪面中而不積水，自來水水管透水驗證時間為約 3 分鐘，結果發現六個停車格均可通過目視鋪面透水驗證，另外，藉由現地透水量試驗儀器驗證停車場透水平均超過 1000ml/15sec，其現地透水量約為日本排水性鋪裝技術指針之現場透水量試驗規範(400ml/15sec)要求之 2.5

倍。上述停車場開放車輛交通超過壹年，並無龜裂或裂紋產生，應可多加推廣⁽²⁾。

1.2 研究目的與重要性

傳統交通工程採用不透水或低透水材料鋪設道路面層，當降雨時由於面層的阻隔，雨水無法及時穿透面層材料到達土壤，使得土壤保水功能喪失，又若暴雨逕流量過大時，排水設施不良，河川排洪量不足，往往會造成都市洪災，或使水源區水質污染，影響用水安全；同時不透水道路面層亦會降低土地滋養植物的能力，使地表土壤無法發揮適當調節大氣中的溫溼度功能，導致都市區域溫度升高產生「熱島效應」。因此，如何於都市的開發建設中，妥善規劃運用具透水性的鋪面材料於港灣構造物設施與公路工程上，以恢復都市開發前之水文循環現象及降低對生態環境的衝擊，實為一重要的研究課題。

本研究即延續前期研究之成果，針對國內公路路面狀況需求，擬定詳細的試鋪作業計畫，並執行試鋪作業，再對試鋪透水混凝土路面進行完整成效評估；另外，根據最近美國 ACI 522R-06 報告證實透水混凝土可以應用在港灣工程範圍包括海濱結構、海堤(seawall)和人工漁礁等方面，因此本研究特別針對國內港灣構造設施狀況，擬定詳細的試鋪作業計畫，並執行試鋪作業前模擬試驗，即實驗室透水混凝土應用在海堤受到水槽水沖擊溯升之評估，方能深入瞭解本土化透水混凝土應用於港灣構造技術之可行性與適用性，以綠建築環境科技與打造永續臺灣為未來努力的方向。

1.3 研究內容與工作項目

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。

本研究嘗試將透水混凝土應用在公路路面及港灣之防波堤上，預期將在不降低材料的服務績效的先決條件下，在公路方面有減少表面逕流及增加保水面積，在防波堤方面則有消能及增加生物棲地，提昇環境生態的正面效果；然經由本中心二年來的研究成果，將證實透水混凝土在這方面的潛力，但因材料的變異性較高，再加上施工經驗缺乏，若沒有累積足夠經驗、擬定設計準則及施工標準作業程序、並提出施工規範，則將無法進行實務應用，本研究先以兩年為期，進行港灣構造設施與公路路面試鋪透水混凝土及其成效評估之實務研究，分年工作內容如下：

第一年(民國 98 年為第一年)：

1. 國內外文獻及試鋪顧問團意見彙整

其內容包括試鋪顧問團的組成、擴大收集國內外文獻及透水混凝土鋪面相 關資料彙整。

2. 防波堤設施試鋪透水混凝土作業規劃

其內容包括試鋪防波堤之選擇、防波堤現況調查、試鋪防波堤配置與細部規劃、試鋪材料規範的草擬及施工技術規範編定。

3. 公路試鋪透水混凝土路面作業規劃與受落塵量影響之評估

其內容包括試鋪路段之選擇、路面現況量測、試鋪路面配置與細部規劃、試鋪材料規範的草擬及施工技術規範研擬及透水混凝土路面受落塵量影響之評估。

4. 透水混凝土材料與施工技術規範研擬與試鋪規劃座談會

其內容包括試鋪防波堤配置與細部規劃之座談會、試鋪路面配置與細部規劃之座談會、材料與施工技術規範研擬專家之座談會。

5. 完成試鋪作業規劃報告。

上述工作內容項目以圖 1.1 研究流程表示：

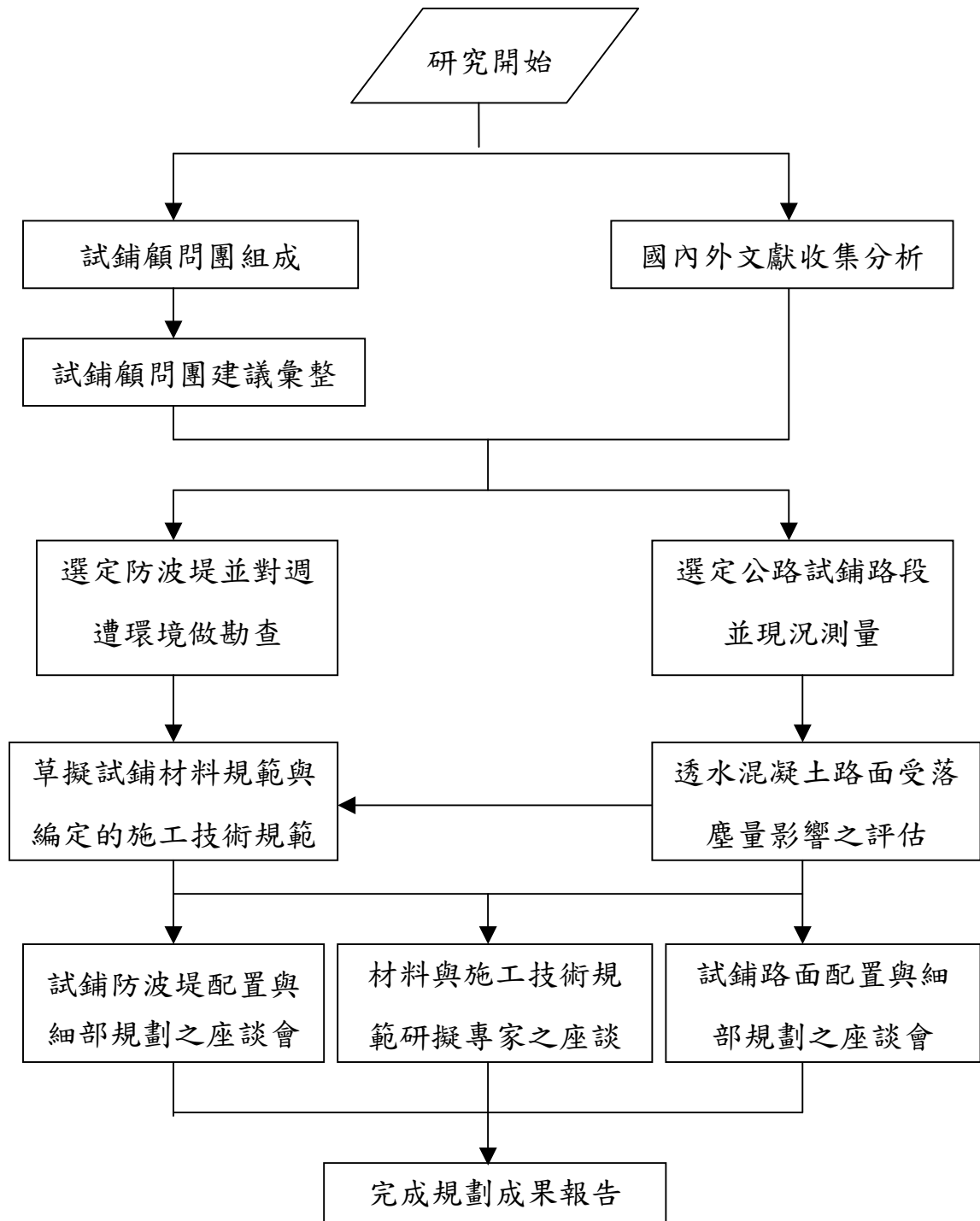


圖 1.1 第一年研究流程圖

第二年(民國 99 年為第二年)：

1. 公路路面試鋪透水混凝土配比設計與試拌作業

其內容包括公路路面透水混凝土配比設計試驗、拌合廠與材料認可、執行配比設計與試拌作業。

2. 公路路面試鋪施工作業執行

其內容包括施工前的準備作業、施工中的製程控制作業、施工後的品質檢測作業。

3. 公路路面試鋪成效評估作業

其內容包括實驗室內的材料性質評估、鋪築地點的鋪面特性評估、現地透水成效評估。

4. 實驗室模擬透水混凝土應用在港灣構造物設施(海堤)對於波浪溯升之評估

製作透水混凝土與一般混凝土兩種海堤縮小模型，於實驗室裡模擬兩種材料之海堤模型受到水槽定量水沖擊時之溯升現象。

5. 研擬試鋪公路路面設計透水混凝土導則初稿。

上述工作內容項目以圖 1.2 研究流程表示：

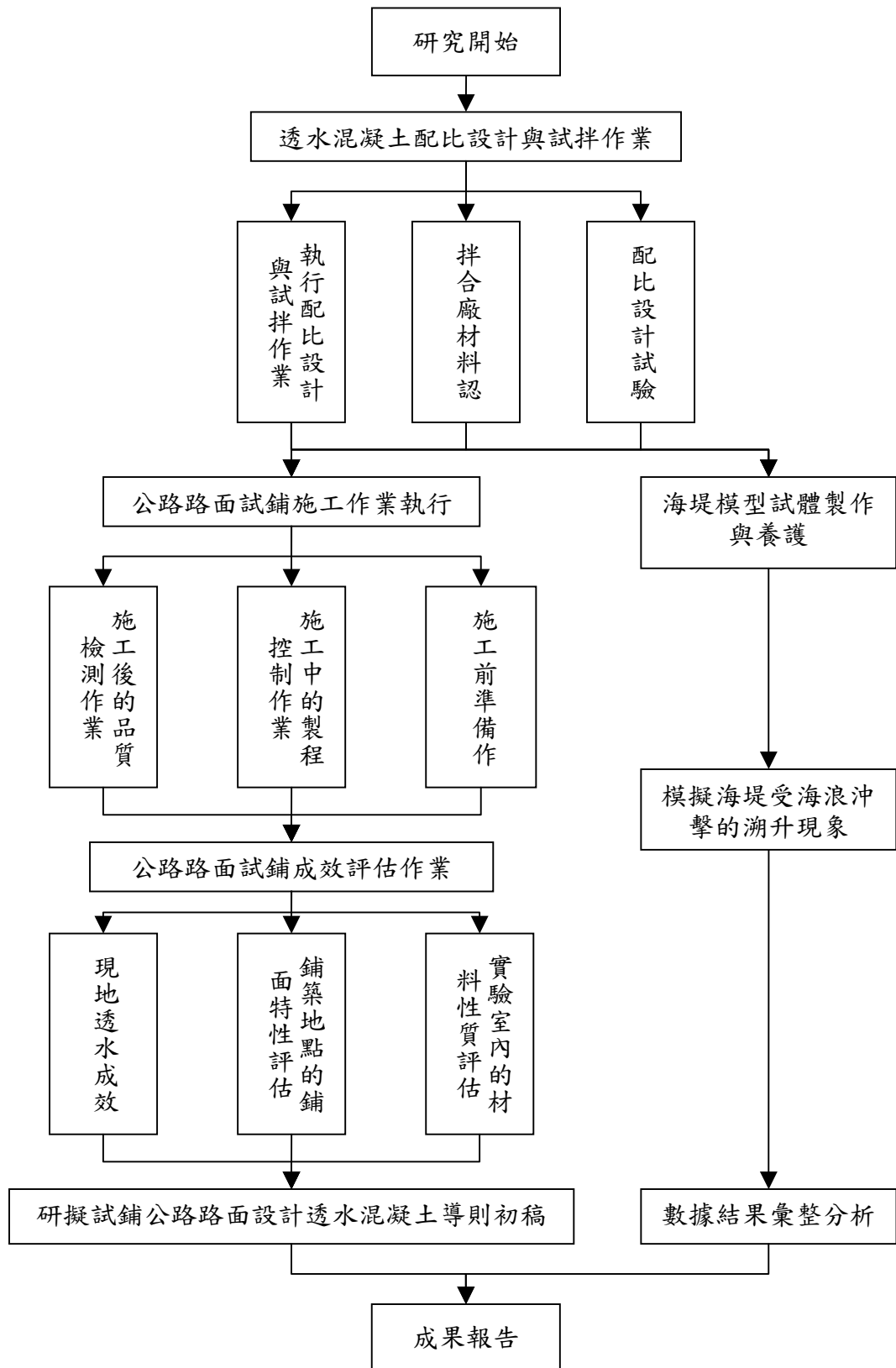


圖 1.2 第二年研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 透水混凝土

2.1.1 透水混凝土之定義

透水混凝土 (pervious concrete) 為一種多孔隙的複合材料，過去常被稱為孔隙混凝土 (porous concrete)，部分學者稱之為無細(粒料)混凝土 (no fines concrete)，可以視為一種粒料粒徑分佈在狹窄級配範圍內並且含(無)微量細粒料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量輕且多孔隙。透水混凝土的構成由裹覆在粒料顆粒外層的不足量水泥漿體與粒料顆粒之間點接觸，相互黏結形成多孔隙結構體，在這種結構之下擁有良好的透水性能($K > 10^{-3} \text{cm/sec}$)⁽¹⁾，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⁽²⁾。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⁽³⁻⁶⁾研究結果發現透水混凝土亦是有低單位重($1600 \sim 2000 \text{kg/m}^3$)、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⁽¹⁾。上述有關孔隙混凝土 (porous concrete) 與無細混凝土 (no fines concrete) 在美國混凝土協會(ACI)中並無規範可依循，最近美國 ACI 522R-06 與 ACI 522.1-08 是有關透水混凝土與透水混凝土鋪面之規定，較上述嚴謹，其說明如下：

(1)透水混凝土泛指零坍度、採用開放級配的混凝土材料。

(2)透水混凝土由水泥、粗粒料、少量或無細粒料、摻劑與水等所組成。

(3)硬固透水混凝土內部含有連續孔隙，尺寸由 0.08~0.32 吋 (0.2~8mm)；空隙含量 18~35%；抗壓強度 2.8~28MPa (400~4,000psi)。

(4)透水混凝土特性為可使水分容易滲透，其鋪面的透水速率依粒料尺寸及混凝土密度而定，一般介於 2~18 gal/min/ft² (81~730L/min/m²) 或透水係數為 $K > 0.1$ cm/sec。

2.1.2 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、粒料、摻劑。有關其組成的材料與用量說明如下：

2.1.2.1 水泥與其它膠結材料

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化作用，與粒料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。波特蘭水泥應符合 CNS 61 [波特蘭水泥]相關規範，除波特蘭水泥一般的分類外，礦物摻料的應用在國內亦有漸趨普遍的現象，使用摻有高爐石粉或飛灰的水泥，可另行參照 CNS 3654 [波特蘭高爐水泥]或 CNS 11270 [波特蘭飛灰水泥]等規範之規定，不過，國內目前高爐石粉或

飛灰的應用仍以直接摻用或取代部分水泥的方式進行。

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粒料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，進而減少粒料之間的孔隙率，因而損失透水性能⁽³⁾。

膠結漿體的設計量並不須完全充滿此單位粒料中的所有孔隙，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粒料緊密堆積之重量與單方水泥用量加上拌和水量之和，約在 1,600-2,100kg 範圍內，根據此原則可以初步確定透水混凝土的配比⁽⁶⁾。同時水泥用量亦受到粒料粒徑影響，若粒料粒徑較小，則粒料表面積較大，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 kg/m³ 範圍內^(3, 6)。

2.1.2.2 粒料

粒料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，粒料包含普通粒料(礫石、卵石、砂)或特殊粒料(輕質粒料、回收營建材料⁽⁷⁻⁸⁾等)。為了保證透水混凝土的透水性能與力學強度，且粒料顆粒級配是決定整體透水性能與力學強度的主因，粗粒料通常採用顆粒較小的單一粒徑級配，於 10~20mm 或 5~10mm⁽⁶⁾如表 2-1 所示。此外對於碎石型粒料中針片狀顆粒應盡量減少，粒料含泥量應不大於 1%⁽⁹⁾。有關粒料用量與粒徑說明如下：

1. 粒料用量

一立方公尺透水混凝土中粗粒料總量可以取最緊密堆積的粒料重量，大致在 1200-1400kg 之間，主要使用粗粒料，若需使用細粒料，則細粒料使用量控制在粗粒料之 20%之內^(3, 6)。

2. 粒料粒徑

粒料粒徑是決定透水混凝土中孔隙體積重要因素之一，粒料粒徑影響透水混凝土的力學強度甚鉅⁽³⁾。由理論推斷，若粒料形狀接近圓形的理想狀況之下，單位體積內粒料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。大粒徑的粒料堆積之下的孔隙必定大於小粒徑粒料堆積所產生的孔隙。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，粒料粒徑較小，單位體積中的粒料顆粒數量必定大於粒料粒徑大者，因此單位體積中透水混凝土內粒料接觸點數量增加的情形下，力學強度是會向上提升的⁽³⁾。因此，粒料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粒料粒徑。

表 2-1 各國推薦或採用透水性混凝土路面之粒料級配⁽⁶⁾

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	

2.1.2.3 拌合水

透水混凝土所使用的拌合水品質要求與傳統混凝土無異，不得含有油脂、酸類、氯化物、有機不純物及懸濁等對混凝土產生不良影響物質，並且符合 CNS 13961 混凝土拌合水之規定。透水混凝土配比材料對用水量非常敏感，經常需要修正配比用水量。太多用水會造成泌水或垂流現象，並填塞透水混凝土連接孔隙；太少用水則會造成材

料在拌合機內團簇，並使得卸料速度減緩。太少的水量也會妨礙混凝土獲得適當養護，且可能產生表面裂縫。適當的配比混凝土具有高黏性可結球形，表面較平滑，如圖 2.1 所示，因此，工地加水行為應嚴格管制與監督。



圖 2.1 透水混凝土含水量多寡是否結球行為：

(a)太少，(b)適量，(c)太多水⁽³²⁾

2.1.2.4 摻劑

透水混凝土除了上述粒料、水泥、水等基本材料外，通常會加入其他輔助或改善其性質的摻劑，摻劑應符合 ASTM C 494 (或 CNS 12283 A2219)相關規定。例如添加一定量的減水劑或高性能減水劑可減少拌和水用量或增加工作度，藉由降低水灰比來提升力學強度；或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劑，藉以加速透水混凝土的硬化；或為了使透水混凝土更能抵抗結冰凍融之能力，可添加輸氣劑以增加長期凍融耐久之壽命；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⁽¹⁾。

2.1.2.5 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粒料顆粒周圍，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，不易裹覆在粒料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化後，會造成透水性能喪失，粒料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(2-3)。

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合。過於黏稠的漿體會使得粒料產生團簇的現象，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。

良好的水灰比可以透過實際拌和求得，通常界於 0.25-0.45 之間，最佳水灰比通常有兩種確定方法⁽¹⁶⁾：

- (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，若水泥漿在粒料顆粒表面均勻裹覆，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。

2.1.3 透水混凝土之配比

典型透水混凝土主要是由水泥、粗粒料、少量或無細粒料、摻劑與拌合水等所組成零坍度與開放級配拌合料，硬固的透水混凝土內有連接孔隙系統，孔隙大小介於 0.08 吋至 0.32 吋(2 至 8 mm)之間，如此將使水份容易穿越其中，美國混凝土協會 ACI 522⁽³²⁾委員會提供透水混凝土之技術資訊，包括透水混凝土應用、設計方法、材料、性質、配比、製程方法、試驗與檢驗等，其中，經由配比設計實驗來達成透水混凝土重要的物理性質與力學行為，透水混凝土空隙率範圍介於

18%至 35%之間，典型抗壓強度範圍介於 400 至 4,000 psi (2.8 至 28 MPa)之間，透水混凝土鋪面排水率因粒料尺寸與其壓密度有關，但一般排水率範圍介於 2 至 18 gal./min/ft² (81 至 730 L/min/m²)之間，即典型透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec⁽³¹⁻³²⁾。

透水混凝土之配比，除力學強度之外，一般透水係數為性能的重要指標，故進行配比設計實驗，應先求出預使用粗粒料之乾搗單位重，從而求出粗粒料中之孔隙率，之後，依據需求強度，填充少於總孔隙體積但不同體積含量的水泥漿體；使用水泥漿體填充孔隙體積的量，從總孔隙體積的 30%至 70%皆可，依據需求強度而定，當然，隨填充孔隙漿體之增加，其透水能力亦隨之大幅下降。另外，一般水灰比的選取以能充份包裹粒料而不產生垂流現象為原則，良好的水灰比區間可以透過實際拌合求得，通常介於 0.25 至 0.45 之間，再依據需求透水係數而定出漿骨比，經由試誤法試拌即可完成配比的設計。有關美國波特蘭水泥協會 (PCA) 與預拌混凝土協會 (NRMCA) 出版『透水混凝土鋪面』一書，提供一典型透水混凝土配比材料範圍如表 2-2 所示⁽³¹⁾。

表 2-2 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍⁽³¹⁾

	膠結料 (C)	粒料 (A)	水灰比 (W/C，重量)	粒料膠結料 比(A/C，重量)	細粗粒料比 (F/A，重量)
材料用量 (lb/yd ³)	450 ~700	2000 ~ 2500	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5
材料用量 (kg/m ³)	270 ~ 415	1190 ~ 1480	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5

典型新拌透水混凝土是零坍度，拌合水應嚴加管控，適當的配比混凝土具有黏性可結球形，不會產生垂流現象，表面較平滑，如圖 2.1 所示，因此，工地加水行為應嚴格管制與監督。

透水混凝土在目前為止並無成熟的設計方式，美國混凝土協會 ACI 522R-06 透水混凝土並沒有提供一套配比設計方法，僅說明簡易配比基準原則，如透水混凝土有工作性其水灰比應落在 0.25 ~ 0.45 間，再使用試誤與檢驗法求得配比；然而美國波特蘭水泥協會(PCA)與預拌混凝土協會(NRMCA)出版『透水混凝土鋪面』一書，提供一典型透水混凝土配比的材料範圍如表 2-2 所示，並說明美國混凝土協會 ACI 211.3R 零坍度混凝土配比設計方法可以作為透水混凝土配比設計程序。

依據本研究第一年計畫研究成果所提供透水混凝土配比設計流程，再依照美國混凝土協會 ACI 522R-06 透水混凝土所提供資訊適度修正如下：

- Step1 選擇水灰比，依強度及透水需求尋找對應之連通孔隙率與單位重，並依水灰比及連通孔隙率尋找對應之填充孔隙體積與粒料主要粒徑。
- Step2 求出粒料之乾搗單位重，決定粒料之單方用量。
- Step3 藉由粒料乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積。
- Step4 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、拌合水之單方用量及新拌混凝土配比單位重。
- Step5 檢核新拌混凝土單位重；製作試體，檢核強度及透水需求。
- Step6 完成透水混凝土配比設計。

上述 Step 1(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粒料粒徑級配下，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；其中，美國混凝土協會 ACI 522R-06 透水混凝土所提供資訊包括圖 2.2

透水混凝土抗壓強度與孔隙率之關係，圖 2.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係，圖 2.4 透水混凝土水灰比與孔隙率之關係，圖 2.5 透水混凝土抗彎強度與孔隙率之關係，圖 2.6 透水混凝土抗彎強度與抗壓強度之關係，圖 2.7 透水混凝土透水速率與孔隙率之關係，圖 2.8 為透水混凝土配比設計流程圖。利用上述 ACI 522R-06 透水混凝土所提供資訊關係圖可以經過試拌求得最佳配比設計，如上述透水混凝土配比設計流程。由於 ACI 522R-06 規定透水混凝土其孔隙率範圍為 18%至 35%之間，本研究依據 ACI 522R-06 透水混凝土與 PCA 透水混凝土鋪面規定建議：可依據工程種類與其透水之需求不同而分為兩組，一組孔隙率為 $20\pm4\%$ ，屬於一般強度低透水混凝土；另一組孔隙率為 $30\pm5\%$ ，屬於低強度高透水混凝土；典型透水混凝土其單位重介於 100 lb/ft^3 與 125 lb/ft^3 ($1,600 \text{ kg/m}^3$ 與 2000 kg/m^3) 間，水灰比介於 0.25 與 0.45 間，抗壓強度介於 400 psi (2.8MPa) 與 4,000 psi (28MPa) 間，其水泥(膠結料)與粒料比率以不產生垂流為原則。

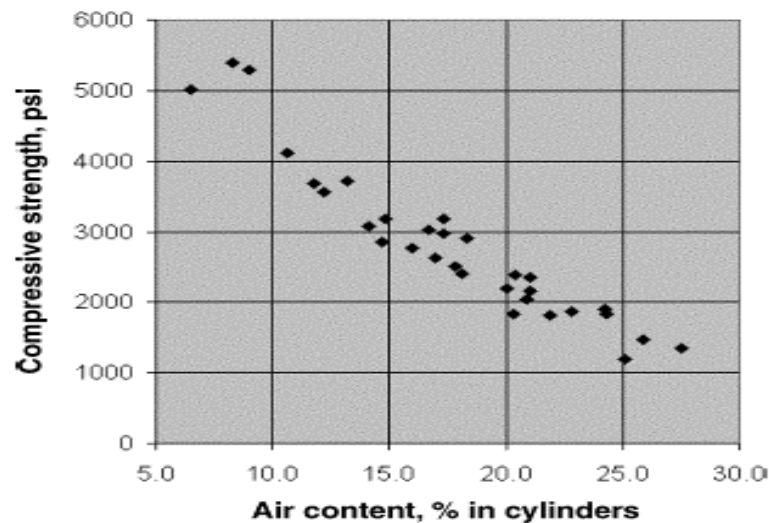


圖 2.2 透水混凝土抗壓強度與孔隙率之關係⁽³²⁾

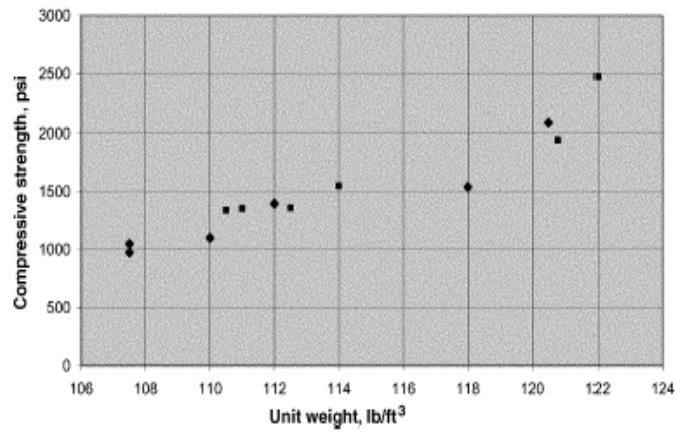


圖 2.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係⁽³²⁾

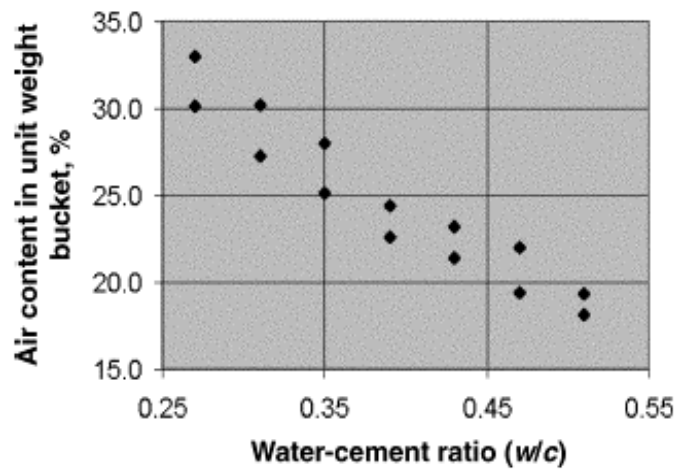


圖 2.4 透水混凝土水灰比與孔隙率之關係⁽³²⁾

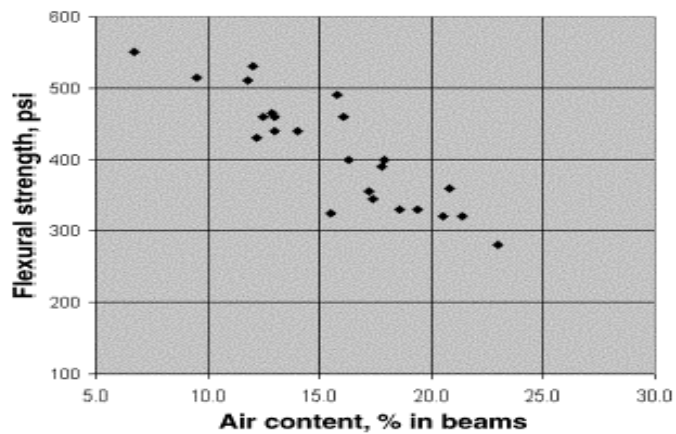


圖 2.5 透水混凝土抗彎強度與孔隙率之關係⁽³²⁾

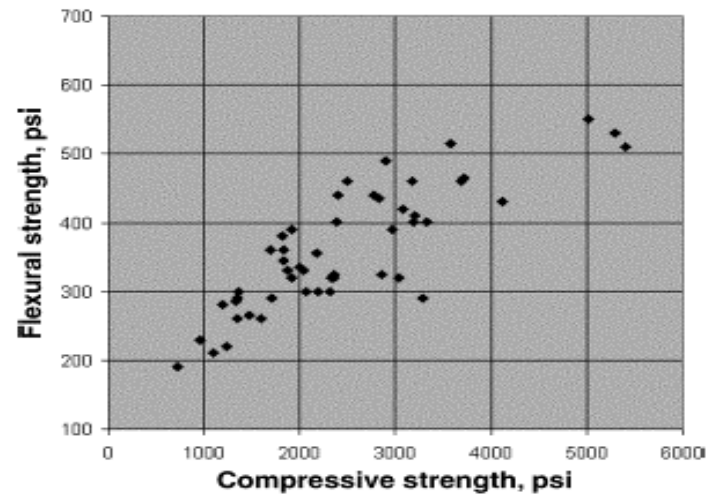


圖 2.6 透水混凝土抗彎強度與抗壓強度之關係⁽³²⁾

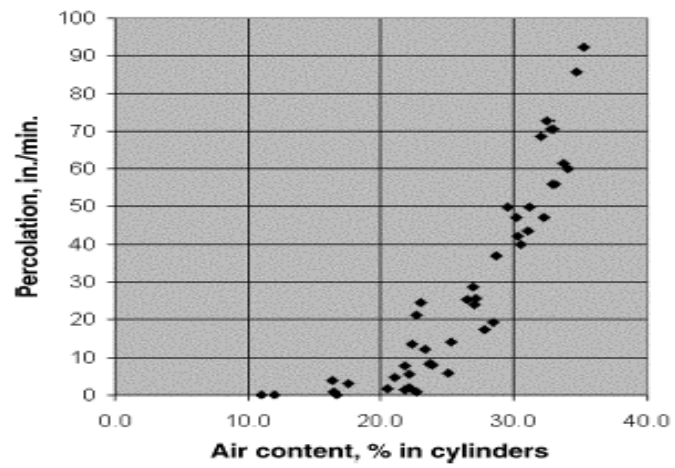


圖 2.7 透水混凝土透水速率與孔隙率之關係⁽³²⁾

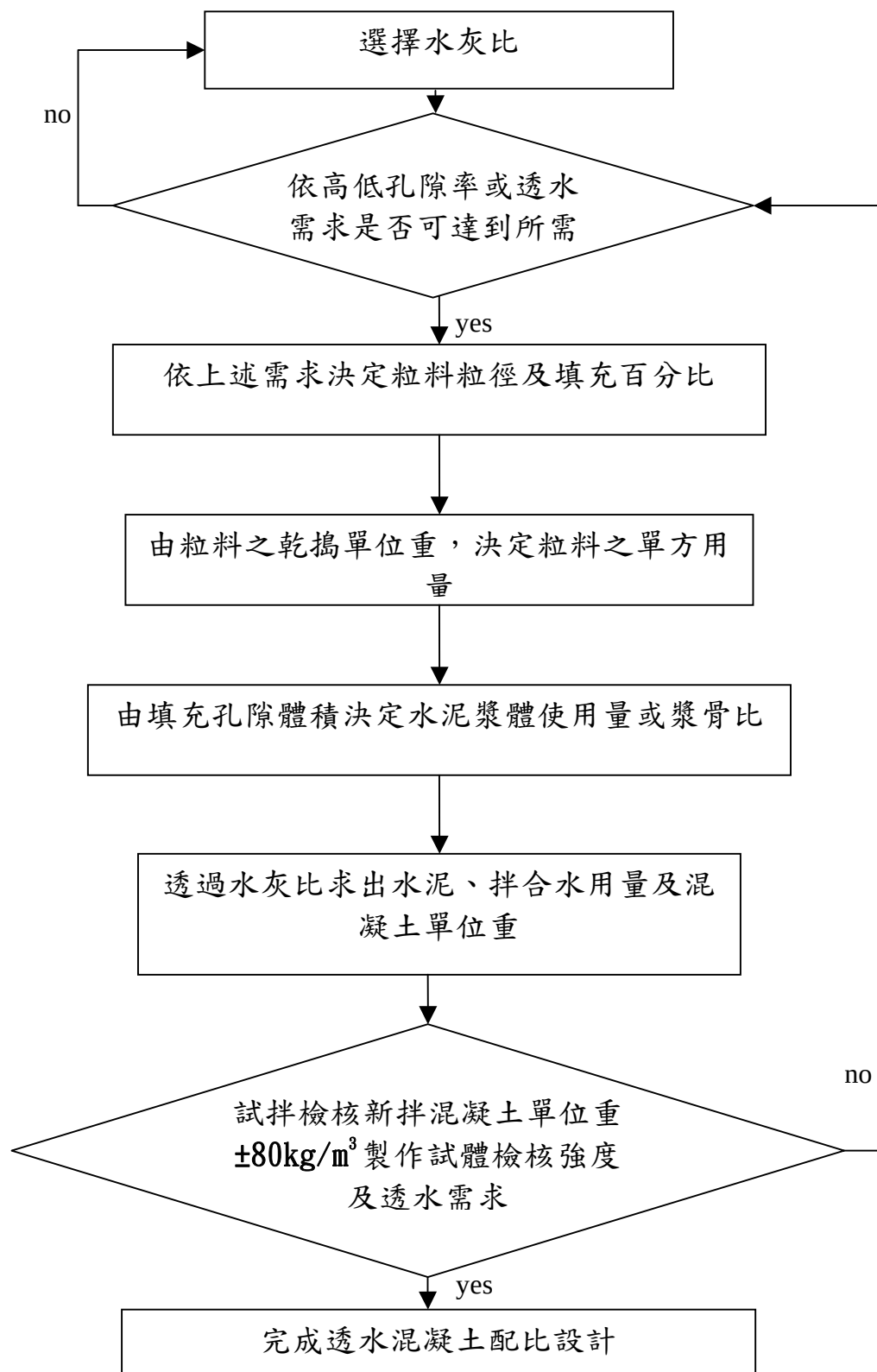


圖 2.8 透水混凝土配比設計流程圖

2.2 透水混凝土之工程性質

2.2.1 新拌透水混凝土

透水混凝土組成材料主要包含有膠結材料、拌和水、粒料、摻劑。新拌透水混凝土比普通混凝土黏稠，其坍度一般為 0 至 20mm，也有提高到 50mm 的使用實例。澆置並搗實後的透水混凝土，其粒料顆粒為相互緊密黏結，形成一種開放的材料體。對透水混凝土的品質，以單位重的量測較具參考性，坍度試驗反而不具意義。透水混凝土的單位重一般約為普通混凝土的 70%至 80%。透水混凝土施作方式與一般混凝土大同小異，因細料含量稀少工作度較低(接近零坍度)，水泥漿包覆粒料表面與空氣接觸量大，極易失去工作性，故施作要領應「迅速」進行施作，透水混凝土的可工作時間通常建議為拌和後 1 小時，若摻加緩凝劑則可延長至 1.5 小時。

2.2.2 硬固透水混凝土

透水混凝土硬固後之工程性質與普通混凝土有相當地不同，依密度、孔隙率、滲透性、抗壓強度、抗彎強度、收縮及耐久性等順序說明如下。

1. 密度、孔隙率及滲透性

透水混凝土的密度依混合材料之性質與配比以及夯實度而定。現地的混凝土密度一般為 $1600\sim 2000\text{kg/m}^3$ 。孔隙率 20% 的透水混凝土鋪面，厚度 125mm 者可蓄積 25mm 降雨量於其空隙內；若是將鋪面澆置於 150mm 厚之級配料底層上，則其蓄積量可增加至 75mm 降雨量。透水混凝土的透水率取決於所用材料和澆置作業法。典型的透水率為 $120\text{ L/m}^2/\text{min}$ (0.2 cm/s) $\sim 320\text{ L/m}^2/\text{min}$ (0.54 cm/s)，實驗室內量測的透水率可高達 $700\text{ L/m}^2/\text{min}$ 。

2. 抗壓強度

透水混凝土的抗壓強度主要受混合材料比例和夯實度的影

響，一般介於 500psi~4000psi (3.5MPa~28MPa)，常用的強度約為 2500psi (17MPa)。美國混凝土協會 ACI 522R-06 透水混凝土所提供資訊包括圖 2.2 透水混凝土抗壓強度與孔隙率之關係，圖 2.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係，圖 2.4 透水混凝土水灰比與孔隙率之關係，水灰比太大或水泥漿體過多，會使漿體流失填塞至空隙中；而水灰比太小或水泥漿體過少，則不易澆置，並不利於漿體與粒料的黏裹；適當的水灰比為 0.26~0.45。

3. 抗彎強度

透水混凝土的抗彎強度受多項因素的影響，透水混凝土的抗彎強度介於 150psi~550psi (1MPa~3.5MPa)。圖 2.5 透水混凝土抗彎強度與孔隙率之關係，圖 2.6 透水混凝土抗彎強度與抗壓強度之關係，圖 2.7 透水混凝土透水速率與孔隙率之關係。

4. 收縮與耐久性

透水混凝土的乾縮產生比普通混凝土早，約有 50~80% 的乾縮量發生在前 10 天內，相對的普通混凝土則較長。透水混凝土的乾縮量依混合材料和配比而定，約為 200×10^{-6} ，只有普通混凝土的一半，工程上可不用顧慮乾縮開裂問題。透水混凝土的耐久性可從物理作用和化學侵蝕兩方面考量。物理作用主要包括凍融抵抗和抗磨耗，可分為二：(a) 透水混凝土的凍融抵抗依空隙內積水狀況而定，冰凍時充滿水的空隙會引發凍融破壞，摻加輸氣劑可有效改善凍融抵抗能力；(b) 表面粗糙而開放的透水混凝土，其磨耗和粒料剝脫是較需考量的課題，適當的夯實和養護可降低粒料剝脫現象。至於化學侵蝕主要為硫酸鹽和酸類，對透水混凝土的侵蝕作用類似於普通混凝土。由於透水混凝土具有開放結構，使硫酸鹽侵蝕對其侵蝕較為敏感。

2.3 透水混凝土在公路路面與港灣構造物設施之應用

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⁾。本研究嘗試採用新材料(即透水混凝土)應用在公路路面及港灣之防波堤上，預期將在不降低材料的服務績效的先決條件下，在公路方面有減少表面逕流及增加保水面積，在防波堤方面則有消能及增加生物棲地，提昇環境生態的正面效果；然經由港研中心二年來的研究成果，證實透水混凝土在這方面的潛力，但因材料的變異性較高，再加上施工經驗缺乏，若沒有累積足夠經驗、擬定設計準則及施工標準作業程序、並提出施工規範，則將無法進行實務應用，本研究即以四年為期，進行港灣構造設施與公路路面試鋪透水混凝土及其成效評估之實務研究。

2.3.1 透水混凝土應用－沿革

19 世紀中葉透水混凝土已經開始應用於建築與營建上，透水混凝土傳統上又稱為無細混凝土，早期歐陸國家使用透水混凝土的方式有多種：單層或多層房屋之場鑄承重牆、高樓建築、預鑄隔間版牆及蒸氣養護混凝土磚。於西元 1852 年英國首度使用透水混凝土於房屋建造，當時混凝土只含水泥及磚石。於 1923 年愛登堡、蘇格蘭以熟料粒料建造 50 棟二層樓房屋。二次大戰（1939-1945）期間，歐洲鼓勵以透水混凝土建造臨時房屋（vast housing）；1945 年後歐洲大部分國家均持續採用透水混凝土於房屋建築上，德國更利用廢磚製造透水混凝土。1960 年加拿大首次報導透水混凝土應用於 Toronto 的一些房屋建築上；1965 年透水混凝土已容許建造十層樓房屋⁽³²⁾。

2.3.2 公路路面應用

1970 年代早期於美國開始發展，為的是要改善鋪面面層的透水

性、降低噪音和增加雨天的抗滑，而當時早就有許多歐洲國家採用，現今至少也有 7 個國家採用，他們都有所共識，鋪設厚度 45~50mm、孔隙率在 17~20% 左右，粒徑標稱 11mm 或 16mm，較大或較小的篩號則不常使用，瀝青膜厚度約在 20~40 μm ⁽³⁾。

於 1979 年的美國佛州 Sarasota 區已經使用無細粒料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。照片 2.1 為美國透水鋪面應用於停車場^(1, 2)。



照片 2.1 美國透水鋪面應用於停車場【1】

美國 CAHILL ASSOCIATES 環境工程顧問⁽¹²⁾在 Villanova 大學所做的透水混凝土雨水滯留量試驗中，以 5359 平方公尺面積土地鋪設 0.45 至 0.75 公尺厚度之透水混凝土，經過實際 24 小時降雨強度達 149mm，最大每小時降雨強度達 35.1mm 暴雨的測試，其出流量僅為 76 立方公尺，平均深度 14.2mm，即減少逕流量約達 90%，其餘雨水均流入地下，其試驗基地如照片 2.2 所示。美國 ACI 522 提供

透水混凝土鋪面相對傳統混凝土鋪面之優點如下⁽³²⁾：

- 1) 從源頭控制洪水污染，並控制其排水；
- 2) 下雨時減少積水面積，增加停車空間；
- 3) 可減少道路路面的水利設施；
- 4) 由冷卻效應可增加飛機起飛時的額外上升力；
- 5) 減少路面反光現象及輪胎噪音；
- 6) 使水與空氣得以滲入樹木根部。



照片 2.2 Villanova 大學透水混凝土試驗廣場⁽¹²⁾

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粒料加上微量細粒料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。照片 2.3 為日本透水鋪面應用於步道⁽¹⁾。



照片 2.3 日本透水鋪面應用於步道⁽¹⁾

日本透水性鋪面發展至今，依其用途可區分為 3 類，即(1)步行道路路面鋪面；(2)車行道路鋪面；(3)戶外體育、景觀設施鋪面；推廣過程是以步行道路路面鋪面、車行道路鋪面及其他（戶外體育、景觀設施鋪面）之應用次續發展，從其發展歷程，透水鋪面並無一蹴可幾，而是由試驗區開始，後得成功之案例，再局部地區推動至全國。

比利時在 1970 年代開始使用透水性鋪面，其填充料小於 0.08mm，其黏結劑採改質瀝青和橡膠瀝青，90±5%通過 No.60 篩，70±10%通過 No.200 篩，孔隙率為 19%~25%，建議不適合用多孔隙瀝青混凝土路面之處⁽³⁾：

- (1)落塵量大的道路，因粒料間之空隙很快就被堵塞。
- (2)低交通量或慢車速車道，因為車速不夠快被堵塞。
- (3)承受高載重路面（彎道，上、下坡道），因目前尚不明瞭多孔隙瀝青混凝土混合料對此荷重能否有足夠抵抗力。

目前國內透水性鋪面之發展尚處於研究與試鋪推廣階段，尤其都市化結果不透水面積逐年增加，使得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^(1, 5)。

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，如照片 2.4，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 $3.1 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ ^(1, 5)。



照片 2.4 臺南市中華西路之排水性瀝青路面⁽⁵⁾

國際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^(1, 5)。

當邊坡坡度大時，應施築擋土結構，傳統之混凝土擋土牆工法提供了邊坡穩定與保護功能，當今則利用透水性材料作為保護之素材，結合工程、生物與生態之觀念進行整治工程，成為適合整體環境之保護工法。由於透水混凝土具有良好的水份進出特性，迎水面水位升降或背填土孔隙水增加，結構本身幾乎均不承受水壓變化的影響，尤其當河川水位驟降時，一般擋土牆因牆後水位無法迅速下降，較易傾倒。

一般農田灌溉水路旁有較寬廣腹地，為使水域與陸域區之生態交會區範圍增加，營造綠色環境，何廷祥 2005⁽⁴⁾提出灌溉渠道以透水混凝土與傳統混凝土結合為複合斷面的施工方式，示意圖如圖 2.9⁽⁴⁾所示，圖中灌溉水路為避免灌溉水流失，常流水面仍使用傳統混凝土，但在上部則改以透水混凝土，以供植物生長以及地表水滲入。其中透水混凝土曼寧係數 N 值增大，必須於水裡分析時考量，以 10~20mm 粒料之透水混凝土而言，其曼寧係數 N 值約為 0.02，較傳統混凝土 0.015 為高。

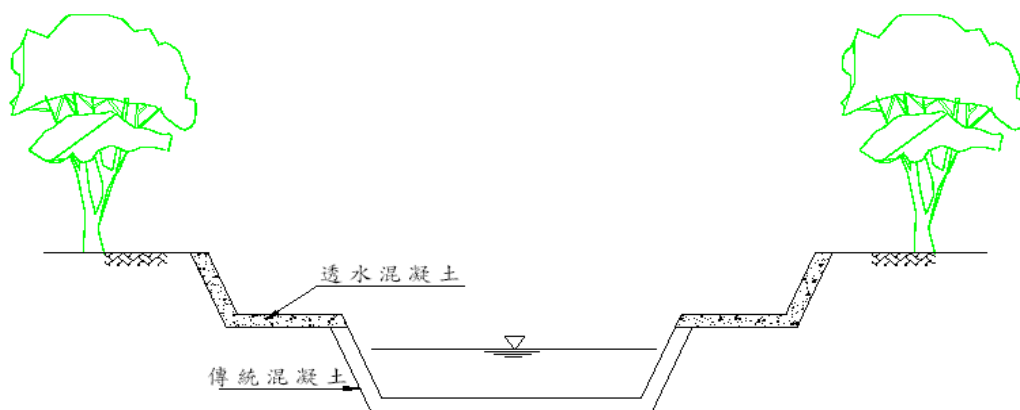


圖 2.9 灌溉水路使用透水混凝土之工法⁽⁴⁾

依據韓乃斌論文(連惠邦教授指導)，由圖 2.10⁽⁵⁾可知，當粒料粒徑愈大，其透水係數愈高，粒料粒徑愈小，其透水係數則愈低，主要原因在於粒料粒徑愈大時，所形成之孔隙孔徑較大，水通過流速較快，水份通過較容易，反之粒料粒徑愈小，因孔隙孔徑較小，阻力較

大，水份較不易通過。至於透水係數與水灰比之關係，水灰比 0.35 之透水係數小於水灰比 0.3 者，主要原因應與結構緻密度較大有關。由於透水混凝土透水能力是否良好，尚牽涉與其接觸之土壤之透水能力，一般而言，透水係數若大於所接觸之土壤或地工織物，則無阻礙水流之虞，公共工程委員會對地工織物之規範要求其透水係數為大於 10^{-2} cm/sec，依該標準不論 0.35 或 0.3 水灰比之配比均可輕易達成。

孔隙率在透水混凝土中與透水係數成正比，孔隙率愈高，透水係數愈高；孔隙率愈低，透水係數愈低。在孔隙率為 30% 情形下，透水係數約為 1.69 cm/sec，詳圖 2.11⁽⁵⁾ 所示。將本研究試驗值與文獻回顧美國混凝土協會透水係數比較，該協會以粒料級配 9.5~2.36mm 以及 19.0~4.75mm 之粒料配比進行透水係數試驗，當孔隙率為 35% 時，其透水係數為 3.75 cm/sec，而本試驗以 19~12.5mm 之粒料配比，孔隙率為 36% 時，透水係數為 5.39 cm/sec，因本試驗之粒料粒徑平均值較大，形成之孔隙較大，結構內水流阻力較少，比較結果透水係數值雖較大尚屬合理。

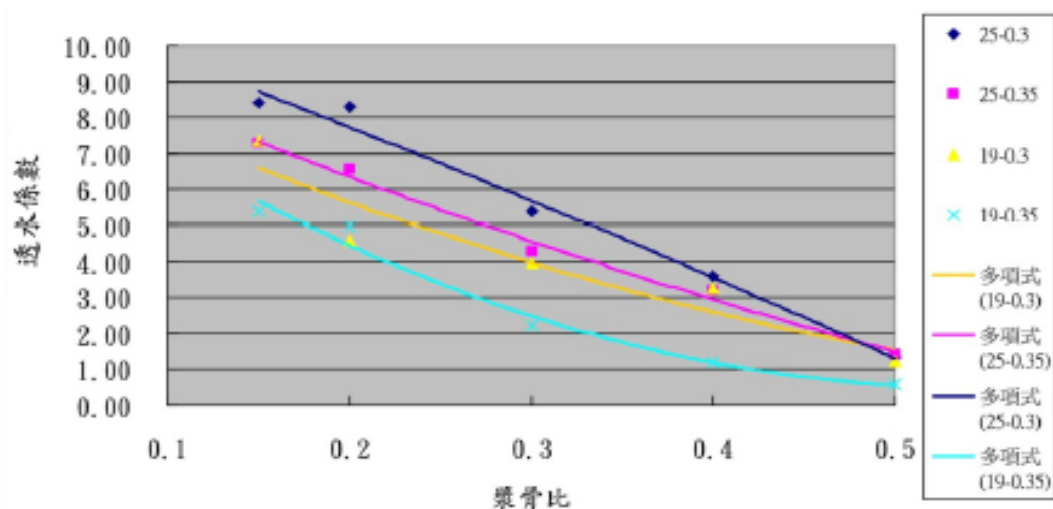


圖 2.10 透水係數與漿骨比關係圖⁽⁵⁾

(註：圖例前方數字為粒料粒徑，後方數字為水灰比，透水係數單位：cm/sec)

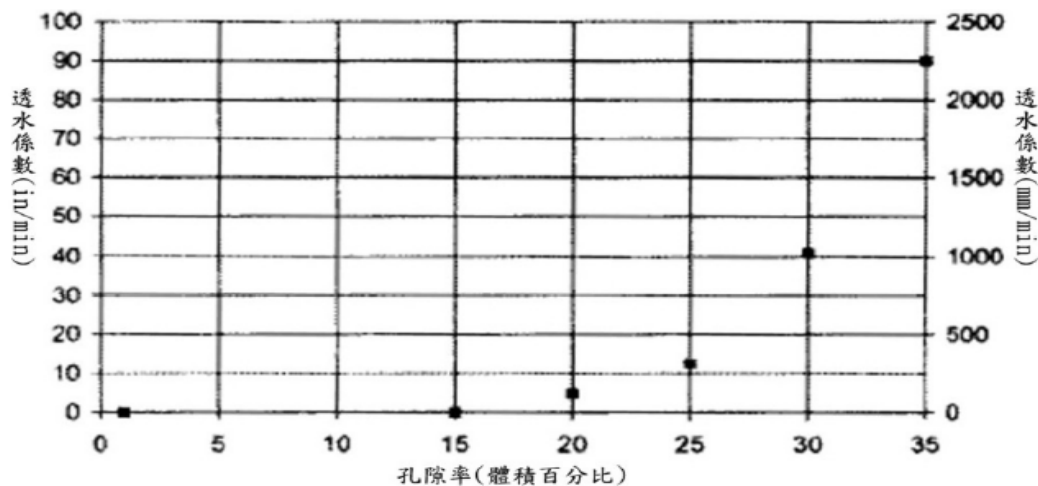


圖 2.11 孔隙率與透水係數關係圖⁽⁵⁾

透水混凝土或可稱為多孔隙混凝土 (porous concrete, PC) 具有良好排水、吸音與抗滑能力，適合鋪設於台灣多雨之環境，由於多孔隙混凝土孔隙率較高，其強度低於一般混凝土，因此要應用於高速公路面層將受到侷限。活性粉混凝土 (reactive powder concrete, RPC) 則是法國近年開發出之高度緻密化及均質化混凝土，具有超高抗壓強度與抗彎強度。劉明仁⁽³³⁾新近研究結合多孔隙混凝土與活性粉混凝土之特性，研發符合強度與孔隙特性之新型路面材料，命名為「活性粉多孔隙混凝土 (reactive powder porous concrete, RPPC)」，以符合高速公路剛性路面面層混凝土設計抗彎強度 457 MPa 之要求。此研究之活性粉多孔隙混凝土 RPPC 試體具有 15% 之孔隙率，28 天齡期抗彎強度皆超過 528 MPa，符合國內高速公路剛性路面面層水泥混凝土設計抗彎強度 457 MPa² (目標抗彎強度 528 MPa) 之要求。活性粉多孔隙混凝土抗壓強度水準已達到台灣區公路規範參考水泥用量 4060 MPa 時，一般水泥混凝土 28 天齡期設計抗壓強度 2842 MPa 之水準，顯示活性粉砂漿可有效改良多孔隙水泥混凝土之強度。此透水試驗結果顯示活性粉多孔隙混凝土 RPPC 具有良好之透水能力，整體而言，試驗組配比之滲透係數都高於 0.10cm/sec，顯示目標孔隙率在 15% 以上情況下透水績效良好⁽³³⁾。

2.3.3 港灣構造物設施應用

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，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，或許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，如人工魚礁、消波塊、護基方塊及消波覆蓋等。

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，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，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⁽³⁵⁾。由於經濟快速發展，台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⁽¹⁾，依據 ACI 522R-06 透水混凝土之應用可以使用在港灣工程範圍包括海濱結構、海堤 (seawall) 和人工魚礁等。ACI 522R-06⁽³²⁾ 透水混凝土應用範圍與適用性大致分為：(1)停車場的透水鋪面和步道，(2)大賣場室外的剛性透水鋪面，(3)溫室 (green house) 地版，用以防止積水，(4)輕量或具隔熱性能的結構牆體，(5)需具有良好吸音性能的鋪面、牆體及樓版，(6)都市道路、鄉村道路、公路及機場之底層 (base course)，(7)停車場及動物園區等之面層，(8)橋樑基座 (embankments)，(9)游泳池地版，(10)海濱結構和海堤，(11)污水處理場的污泥床，(12)太陽能儲存系統，(13)人工魚礁等，通常，上述透水混凝土都不加鋼筋補強，若應用於鋼筋混凝土，則鋼筋需要防蝕或使用鍍鋅塗裝。

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上則不多見，反而在河川護岸或坡地工程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。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⁽²⁾。另外，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⁽³⁵⁾。

日本混凝土協會 2004 年⁽¹¹⁾為因應高陡護坡常因暴雨時排水不及側壓力過大造成崩毀災害，提出以透水混凝土施築護牆之施工方式，其中背填透水混凝土為增加工作性，以加砂及加強塑劑方式拌合。透水混凝土配比如表 2-3 所示，該配比抗壓強度約 2538 MPa，高陡護坡斷面圖如圖 2.12 所示。

表 2-3 背填透水混凝土之配合比例⁽¹¹⁾

孔隙率(%)	水灰比	單位體積材料用量(kg/m ³)				
		水泥	水	細粒料	粗粒料	強塑劑*
15	0.25	355	89	153	1576	0.75%

註：強塑劑為水泥量之0.75%。

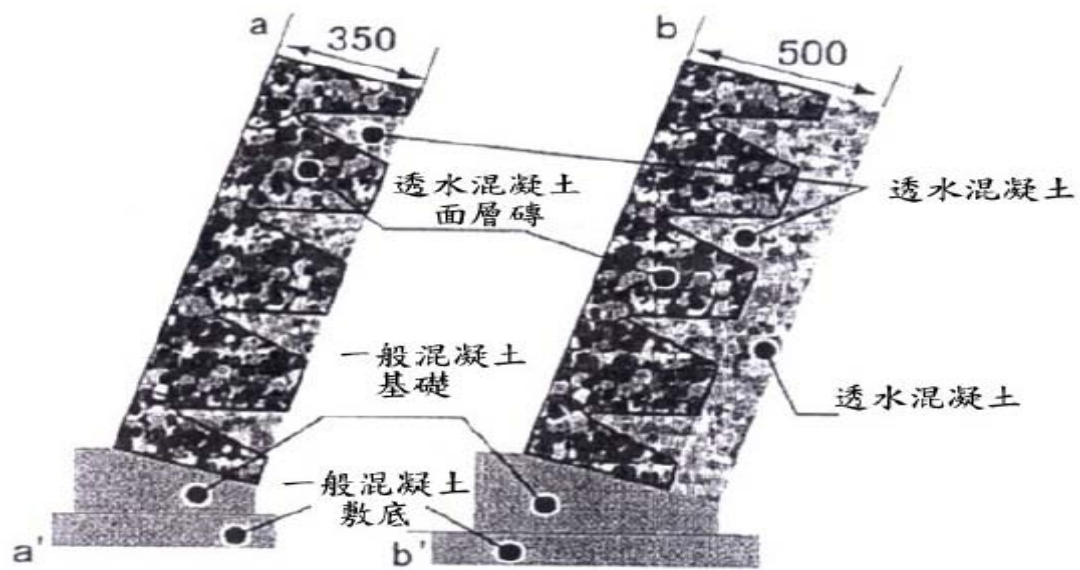


圖 2.12 高陡護坡斷面示意圖(資料來源：日本混凝土協會 2004⁽¹¹⁾)

日本 GOMACO 公司⁽¹²⁾以滑動模板進行透水混凝土護坡施工，施工河道長 64 公尺，透水混凝土澆置總面積 271 平方公尺，澆置厚度 20 公分，全部完成所花時間僅為 2 日，較傳統預鑄透水框格塊鋪設工法速度快 2-3 倍，成本節省 20%以上，詳如照片 2.5 所示。



照片 2.5 透水混凝土護坡施工澆置情形 (GOMACO 公司)⁽¹²⁾

照片 2.6 與照片 2.7 則分別為日本佐賀縣多久市石原川透水多孔混凝土護岸工程及日本山口縣防府市佐波川透水多孔混凝土護岸工程，工程結構安全性符合需求，且植生效果良好⁽³⁵⁾。



照片 2.6 日本佐賀縣多久市石原川透水多孔混凝土護岸工程

(資料來源：日本 P.E.C.協會施工事例)⁽³⁵⁾



照片 2.7 日本山口縣防府市佐波川多孔混凝土護岸工程

(資料來源：日本 P.E.C.協會施工事例)⁽³⁵⁾

日本那霸港防波堤之消波塊拋置後珊瑚礁開始自然附著，從研究中發現混凝土表面做成數公分凹凸不平時，珊瑚都沿凸出部份著生如圖2.13所示，顯示凹凸面形成水流紊流區及滯留區，成為幼虫易於著床處，同時也比較不受海膽及海星等生物掠食。槍烏賊常以岩礁凹陷處之頂部或岩石間之間隙頂部生產長紡錘形之卵囊，但適合於產卵之底床附近之岩石空隙卻意外的少，而防波堤、岸壁等混凝土垂直壁之破損處，或消波混凝土塊空隙部份卻提供槍烏賊良好之產卵場所⁽³⁸⁾；改良消波塊表面成凹凸不平之形狀顯然值得研究⁽³⁹⁾。

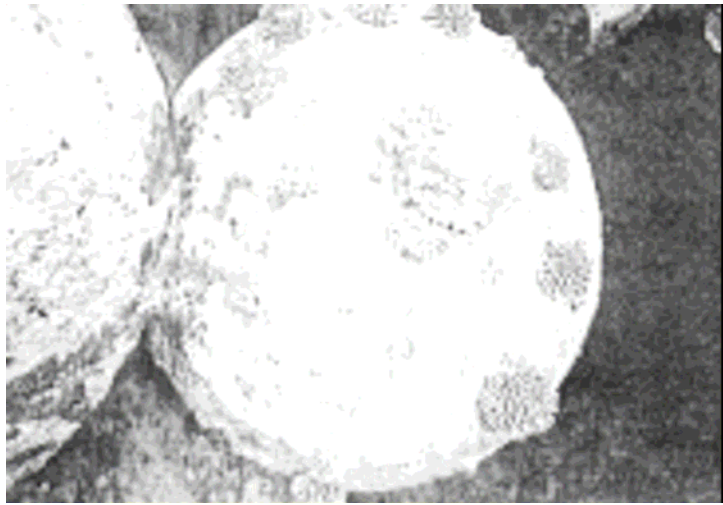


圖 2.13 凹凸面易使珊瑚著生⁽³⁹⁾

Yoshida與Tamai⁽³⁸⁻³⁹⁾有關海域海草叢林再生使用透水混凝土之研究，介紹一般混凝土版與透水混凝土版於日本SETO島海中超過兩年試驗，發現透水混凝土不但適合海藻附著與繁殖，並可形成海草叢林再現，如圖2.14所示，海草數量隨從試驗期增加而增多，透水混凝土較易海草附著與繁殖。

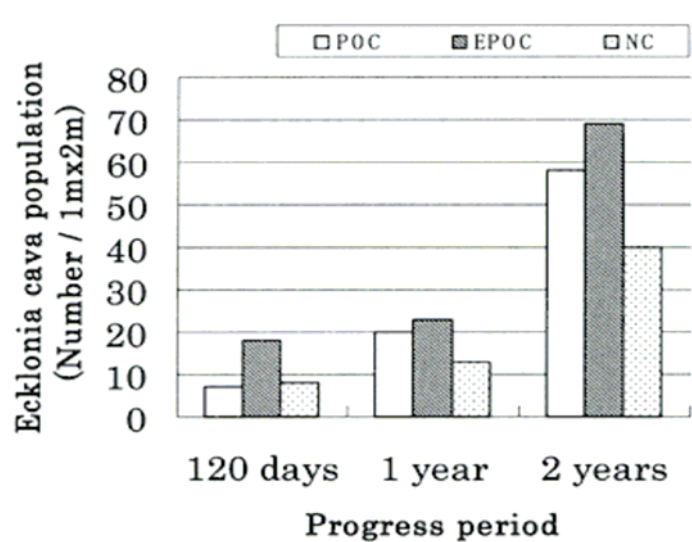


圖 2.14 海草數量與試驗期相關性⁽³⁸⁾

郭金棟於海岸生態工法中有關親水海堤堤高設計要領，要求高粗糙度、透水性良好之緩坡，配合平台有利降低堤高，表2-4為各種堤面溯升減少率，由此可知粗糙度與透水性之效果⁽³⁷⁾。

表 2-4 各種粗糙度與透水性海堤堤面溯升減少率【37】

海堤種類	溯升減少率 Kr
瀝青、光滑混凝土面	1.00
混凝土塊、纖維席	0.95
漿砌石	0.90
卵石、蛇籠	0.70
混凝土消波塊一層於不透水底層	0.80
拋塊石或消波塊二層	0.60

2.3.4 透水混凝土案例

1. 南加州 Manhattan Beach 透水混凝土停車場

南加州 Manhattan Beach 透水混凝土停車場計畫經費是90萬美元，經費來源是州政府水資源管理委員會，完工為2008年4月是 Manhattan 市居民與官員為慶祝地球日而發起，這是作為環境友好材料之示範。透水混凝土停車場共兩處是位於 Manhattan Beach 之右邊，停車場坡度設計是順應海岸下降直到邊緣碰到海砂，透水混凝土鋪設厚度為10英吋 (25公分)，如照片2.8所示⁽⁴²⁾。



照片 2.8 南加州 Manhattan Beach 透水混凝土停車場⁽⁴²⁾

2. Sun Ray Store-Away 倉儲設施

Sun Ray Store-Away 倉儲位於佛羅里達州 Mary 湖附近，共有0.7英畝，1999年建造，透水混凝土應用於823個儲存單元之車道系統和62個大型車輛之停車位，透水混凝土厚度介於5.1~6.9 英吋之間。日後發現透水混凝土系統在前面大門與垃圾卡車投擲處有損壞，裂縫聚集於前面大門歸因為所有車輛出入口交通載重大，裂縫也聚集於垃圾卡車投擲處，歸因於垃圾卡車投擲產生極大衝擊載重，如圖2.15與照片2.9所示⁽⁴³⁾。

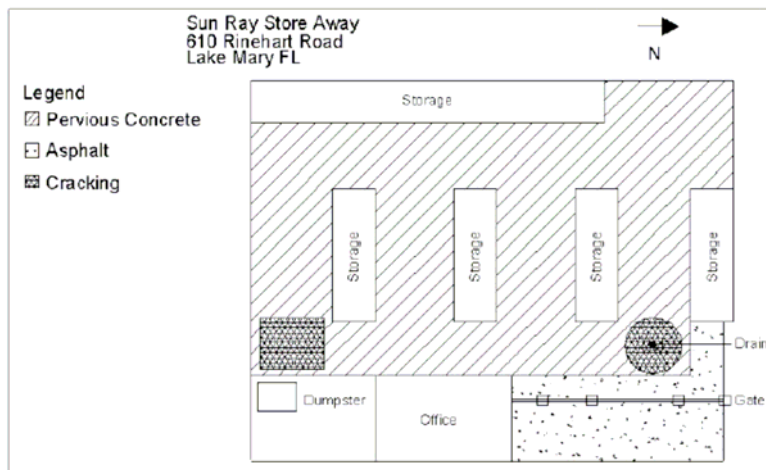


圖 2.15 Sun Ray Store-Away 倉儲設施透水混凝土鋪面設計圖⁽⁴³⁾



照片 2.9 Sun Ray Store-Away 倉儲設施透水混凝土鋪面⁽⁴³⁾

3. Strang Communication Office

Strang Communication Office位於佛羅里達州Mary湖附近，共有0.3英畝停車場，可供200位員工停車，於1992年建造，其中有71停車位是透水混凝土，其他的停車位是瀝青混凝土鋪面，透水混凝土厚度介於7.0～7.1英吋之間。日後發現透水混凝土停車場表面有小的損壞，有表面鬆散情況發生，特別是入口處附近，另外，藻類和小草也呈現於透水混凝土停車場之表面，如圖2.16與照片2.10所示⁽⁴³⁾。

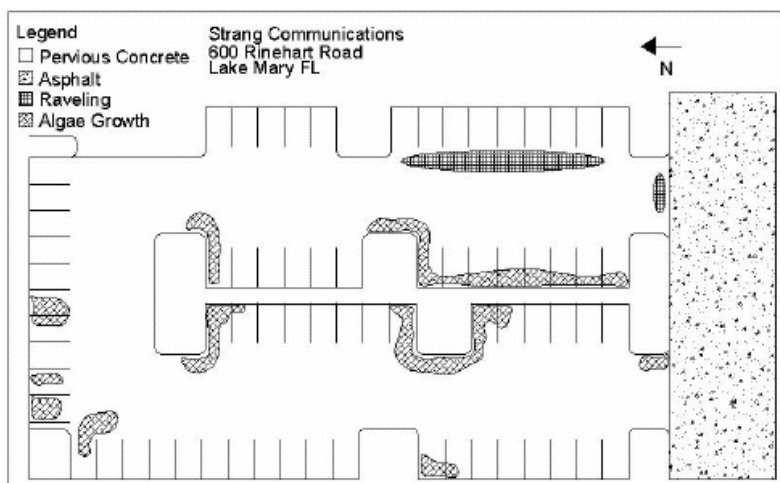


圖 2.16 Strang Communication Office 透水混凝土停車場設計圖⁽⁴³⁾



照片 2.10 Strang Communication Office 透水混凝土停車場⁽⁴³⁾

4. FDEP Office

FDEP Office為佛羅里達州政府Tallahassee市環境保護署建築物，建築物附近載重區（車道與停車場），最初於1985年建造，有一小部分經過第二次加鋪，加鋪時間為1995年，透水混凝土鋪面厚度介於5.0～8.9英吋之間，如圖2.17與照片2.11所示。目前發現透水混凝土部分有次要結構損壞，藉由肉眼觀察有一部分混凝土表面被填封，無法讓水經表面滲透，此區域主要發生在第二次加鋪處⁽⁴³⁾。

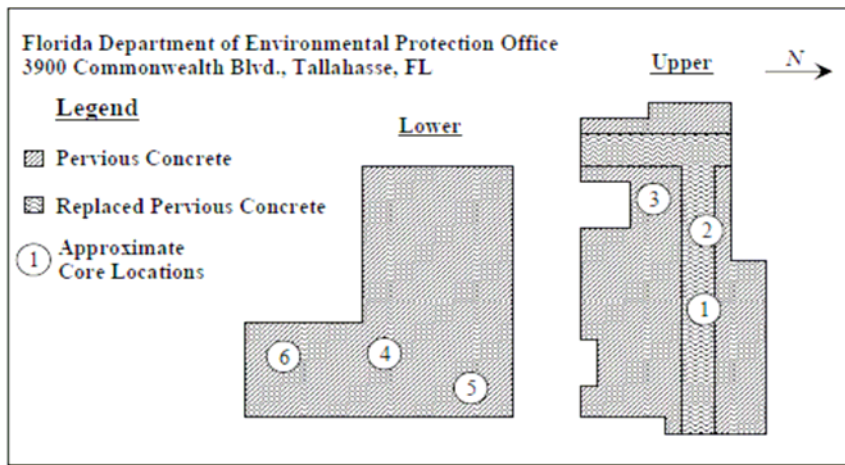


圖 2.17 Tallahassee 市環境保護署建築物附近載重區透水混凝土設計圖⁽⁴³⁾



照片 2.11 Tallahassee 市環境保護署建築物附近透水混凝土載重區⁽⁴³⁾

5. Effingham 郡掩埋場

Effingham郡掩埋場位於喬治亞州Guyton附近，大約有0.6英畝混凝土鋪面，於1999年建造完工，混凝土鋪面中間50英尺x50英尺平方是鋪設一般混凝土，其他區域屬於透水混凝土，如圖2.18與照片2.12所示，透水混凝土厚度介於5.8 ~ 6.3英尺之間，透水混凝土鋪面下有設計6英尺碎石層和砂層，其設計作為垃圾儲存與分類之處。目前發現透水混凝土鋪面結構屬於良好狀況，僅有很小的裂縫產生⁽⁴³⁾。

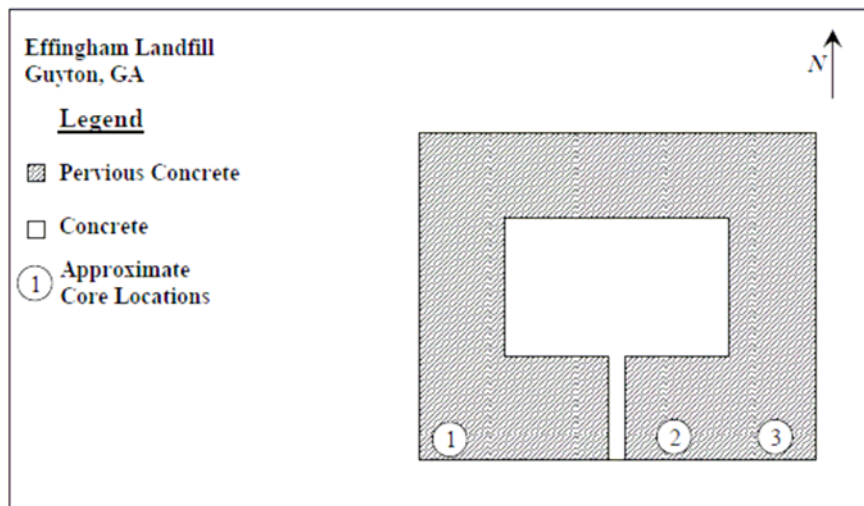


圖 2.18 喬治亞州 Effingham 郡掩埋場透水混凝土設計圖⁽⁴³⁾



照片 2.12 喬治亞州 Effingham 透水混凝土郡掩埋場⁽⁴³⁾

6. Sioux 重交通車輛倉庫

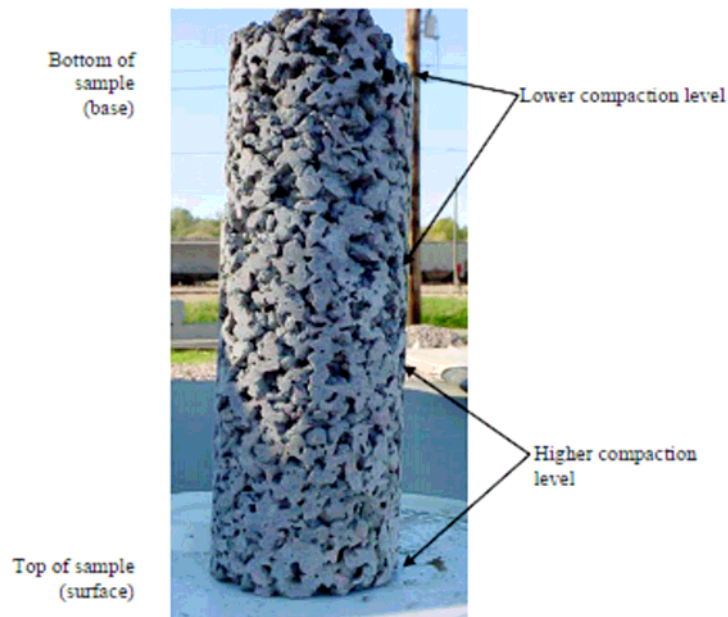
愛阿華州Sioux市一重交通車輛倉庫與車道也使用透水混凝土，混凝土鋪面下有設計18英吋碎石層，作為附近不透水區之排放水流域，於2006年建造完工，建造前曾委託愛阿華州立大學Kevern等學者進行10種透水混凝土配比設計研究，其10種配比如表2-5所示，水膠比相當低，落在0.26~0.19之間，方能承受重車載重，透水

混凝土面層厚度設計8英吋，下有18英吋碎石底層，寬度為10英呎，長度為130英呎。目前發現鋪面結構屬於良好狀況，但透水混凝土強度差異相當大，不僅上下層有差異（如照片2.13所示下層孔隙多，上層較緻密）且各鑽心試驗點有極大差距⁽⁴⁴⁾。

表 2-5 Sioux 市重交通車輛倉庫與車道 10 種透水混凝土配比⁽⁴⁴⁾

Mix ID	Coarse Aggregate	Sand	Binder				w/b
	(PCY)	(PCY)	PC (PCY)	GGBFS (PCY)	FA (PCY)	H ₂ O (lb)	
1/2PG ^A -B21-SL19-FA7	2600	-	400	100	40	117	0.22
1/2PG-B21-SL19-FA7	2600	-	400	100	40	117	0.22
P1/2QTZ ^A -B22-SL29-FA7-S5	2470	120	411	113	40	125	0.22
P1/2QTZ-B22-SL-29-FA7-S5	2470	120	411	113	40	108	0.19
3/8PG ^A -B21-SL19-FA7-S7	2500	168	425	106	40	133	0.23
3/8PG-B21-SL19-FA7-S7	2500	168	425	106	40	125	0.22
3/8PG ^A -B21-FA7-S7	2500	168	531	-	40	150	0.26
3/8PG-B21-FA7-S7	2500	168	531	-	40	150	0.26
#4PG ^A -B21-FA7-S7	2500	168	531	-	40	125	0.22
#4PG-B21-FA7-S7	2500	168	531	-	40	125	0.22

Notes: Slag (SL), Fly Ash (FA), Quartzite (QTZ), air-entrainment (^A)



照片 2.13 Sioux 重交通車輛倉庫透水混凝土鑽心試體⁽⁴³⁾

7. 北卡羅來那大學通勤停車場

北卡羅來那大學Estes Drive通勤停車場和星期五中心通勤停車場於2002年完成，星期五中心有150個停車位，Estes Drive通勤停車場有75個停車位，透水混凝土面層厚度設計5英吋，使用水洗過碎石做底層，共1,500立方碼之透水混凝土，並獲得美國工程公司委員會Grand Conceptor Award，工程位置落在每年會有多次冰凍融化之地(平均每年有90次凍融)，目前狀況良好，本停車場另有透水瀝青混凝土鋪面，以進行相關研究與比較評估，如照片2.14所示⁽⁴⁵⁾。



照片 2.14 北卡羅來那大學通勤停車場透水混凝土⁽⁴⁵⁾

8. 南卡羅來那州Santee-Cooper 計畫堤防工程

1942 年美國南卡羅來那州 Santee-Cooper 計畫⁽³⁶⁾之 Santee 土石壩與堤防工程竣工，設計使用透水混凝土 10 英吋厚與碎石透層 4 英吋作為壩或堤保護坡，保護坡最大寬度 103 英呎，有 41 英呎會受到波浪的衝擊，保護坡全長共計 15.6 英哩，如圖 2.19 與 2.20 所示；規劃設計前二年 (1940 年) 曾經在 Vicksburg 美國水道實驗中心進行全尺寸模型試驗，模擬透水混凝土版 (10 英吋厚) 作為壩或堤保護坡受到波浪快速上下的衝擊力與冰凍融解循環試驗，試驗結果得知：(1) 透水混凝土版較其它保護坡材料之單價為低，(2) 全

尺寸模型試驗透水混凝土版受到波浪衝擊並無明顯上舉壓力產生，(3) 試驗顯示有充足的抗壓強度，(4) 透水混凝土版可以承受 50 回冰凍融解循環試驗，(5) 大波浪衝擊若有漂流物如大樹幹或圓木將對混凝土護坡造成損傷。Santee 土石壩與堤防工程竣工數年後，發現透水混凝土保護坡有大龜裂與破壞問題產生，經過現地與室內試驗得知部分透水混凝土有嚴重中性化，透水混凝土鑽心強度變異太大，範圍介於 595 至 2915psi 之間；最後，於 1946 年決定將透水混凝土保護坡打除再以鋼筋混凝土（低水位區之上）與大石堆成的石基(低水位區之下)兩者作為 Santee 土石壩與堤防保護坡⁽³⁶⁾。



圖 2.19 美國南卡羅來那州 Santee 土石壩與堤防工程⁽³⁶⁾

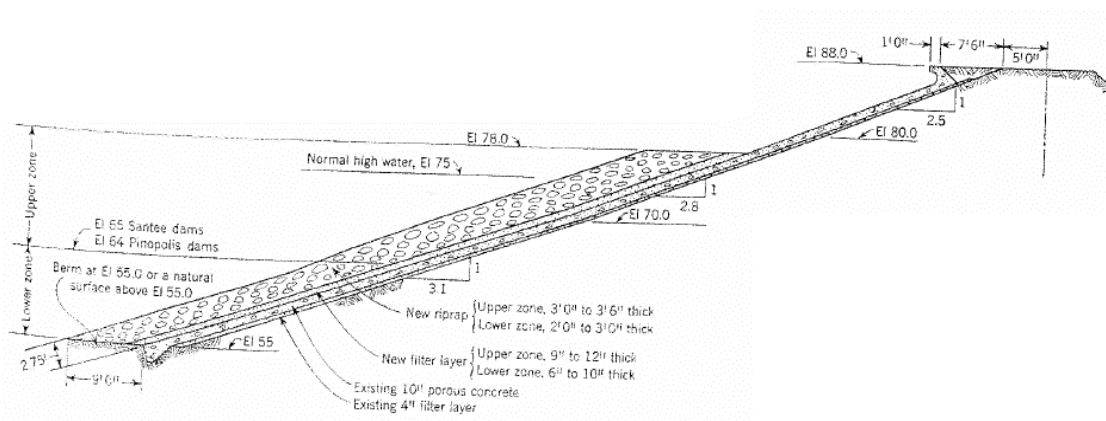


圖 2.20 設計使用透水混凝土 10 英吋厚與碎石透層 4 英吋作為 Santee 土石壩或堤保護坡⁽³⁶⁾

9. PCA 透水混凝土鋪面 (2004) 應用案例

PCA 透水混凝土鋪面應用【31】案例說明包括：(A)奧勒岡州波特蘭動物園走道；(B)加州美橡樹 Miller 公園；(C)田納西州 Chattanooga Finley體育館停車場；(D)加州Imperial海濱運動公園；(E)奧勒岡州天使山倉儲用地；(F)華盛頓州Bainbridge島彩色透水混凝土人行道；(G)喬治亞州Buford Large concrete停車場，如照片 2.15(A)至(G)所示。



照片 2.15 (A) 奧勒岡州波特蘭動物園走道



照片 2.15 (B) 加州美橡樹 Miller 公園



照片 2.15 (C) 田納西州 Chattanooga Finley 體育館停車場



照片 2.15 (D) 加州 Imperial 海濱運動公園



照片 2.15 (E) 奧勒岡州天使山倉儲用地



照片 2.15 (F) 華盛頓州 Bainbridge 島彩色透水混凝土人行道



照片 2.15 (G) 喬治亞州 Buford Large concrete 停車場

10. ACI 透水混凝土 (2006) 應用案例

ACI 522R-06⁽³²⁾ 透水混凝土應用範圍與適用性大致分為：(1) 停車場的透水鋪面和步道，(2) 大賣場室外的剛性透水鋪面，(3) 溫室 (green house) 地版，用以防止積水，(4) 輕量或具隔熱性能的結構牆體，(5) 需具有良好吸音性能的鋪面、牆體及樓版，(6) 都市道路、鄉村道路、公路及機場之底層 (base course)，(7) 停車場及動物園區等之面層，(8) 橋樑基座 (embankments)，(9) 游泳池地版，

(10)海濱結構和海堤，(11)污水處理場的污泥床，(12)太陽能儲存系統，(13)人工漁礁等，通常，上述透水混凝土都不加鋼筋補強。

2.3.5 透水混凝土研究彙編：過去、現在與未來

1. 案例研討與應用

過去數年來，美國一直不斷的投注資源與經費於透水混凝土研究上，如圖 2.21 所示，有超過 2/3 的州政府進行此項研究或人員訓練，至少有 17 所美國大學拿到政府透水混凝土研究經費，透水混凝土應用於停車場與行人道鋪面已經成為焦點與喜好，未來應該投入更多的資源與研究於都市道路、公路及機場之底層（base course）、高速公路路肩、橋樑基座（embankments）、海濱結構、人工漁礁和海堤等⁽⁴²⁾。

2. 營建技術

透水混凝土澆置技術有使用滾筒、高密度鋪裝機、振動刮板與金屬板壓密機等，不同夯實與壓密程度會影響透水混凝土很多性質，應重視標準化壓密設備機具以達成品質控制與保證之目的；目前無此方面之研究。

3. 維護與耐久性

透水混凝土冰凍融解循環試驗研究已經被驗證多次，唯試驗研究方法需適當修正，在凍融循環下，透水混凝土試體不應有水存在其中；透水混凝土表面或裡面阻塞與表面顆粒鬆散需要維護，此方面也應進行相關研究。

4. 水文與環境設計

水文與環境設計應考慮(a) 油脂被吸附於透水混凝土孔隙中與其長期衝擊，(b) 比較水流經過透水混凝土和透水瀝青混凝土兩者滲透與淨化之影響，(c) 透水系統中生物質量與有氧消化的分解

與成長，(d)混凝土材料分解析出進入地下水與土壤中。

5. 試驗方法與規範

透水混凝土鋪面工程可引用並符合 ACI 522R-06 與 ACI 522.1-08⁽⁴¹⁾新規範與試驗方法，未來應該投入的研究有現地透水試驗方法、非破壞試驗方法與觀測井對水質試驗之發展⁽⁴²⁾。

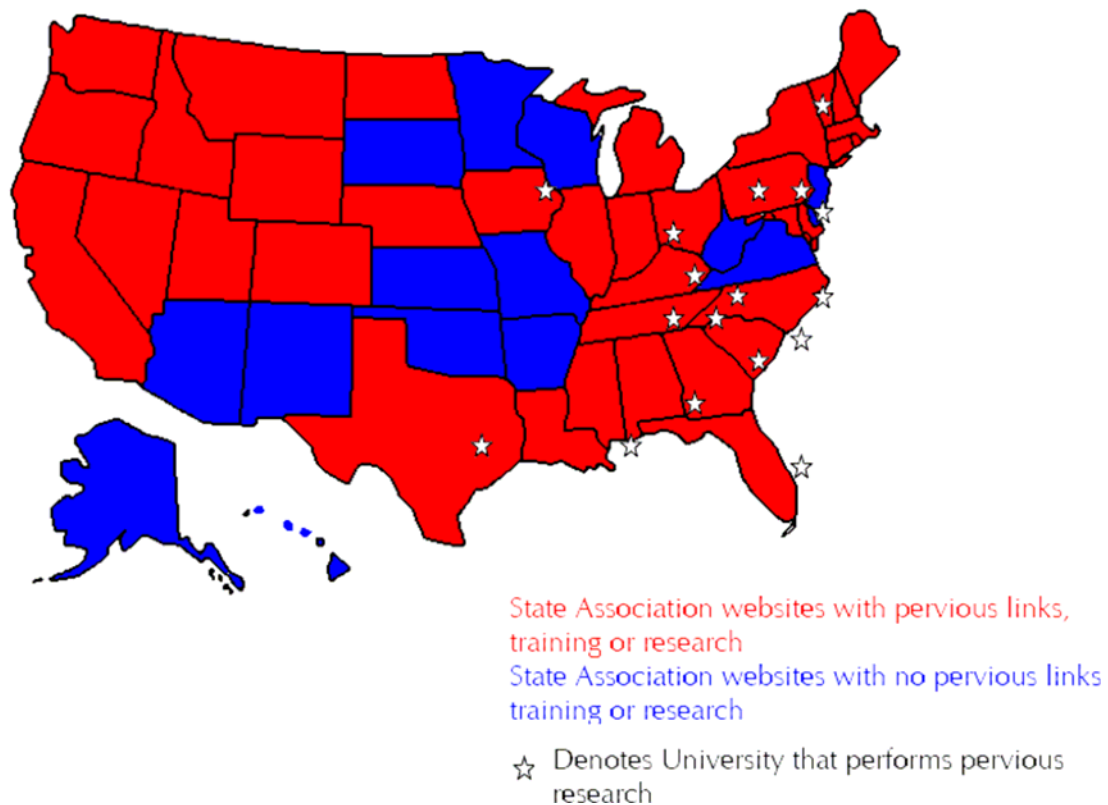


圖 2.21 美國州政府投注資源於透水混凝土研究或訓練示意圖⁽⁴²⁾

第三章 公路路面試鋪透水混凝土配比設計與試拌

本章內容包括路面透水混凝土配比設計試驗、拌合廠與材料認可、執行配比設計與試拌作業。

3.1 路面透水混凝土配比設計試驗

3.1.1 使用材料與配比設計原則

一般透水混凝土使用的材料是可由水泥、粗粒料和水拌合而成，有時也會加入少量的砂與摻料(如強塑劑或纖維)。粗粒料可以是碎石、卵石，也可以是人工輕粒料或再生粒料及工業的副產品如爐石等。藉由粗粒料表面與水泥漿體，使之粒料表面接觸互相固結，形成多孔隙的結構體，因此具有相當大的透水性。透水混凝土之配比，除力學強度之外，一般透水係數為性能的指標；配比設計時，先求出粗粒料之乾搗單位重，從而求取粒料中存在的孔隙。之後，依據需要強度，填充少於總孔隙體積但不同體積含量的水泥漿體，即可完成配比的設計。

上述之配比設計中，使用漿體量或水灰比為強度與透水性能的最大變數，其扮演粒料與粒料接觸點間之黏結與透水能力。一般水灰比的選取以能充分黏結粒料、不產生垂流為原則，約在0.25至0.35間較適宜。使用漿體充填孔隙體積的量，可依據需求強度與透水能力而定；當然，透過上述的設計原則，隨著填充孔隙漿體的增加，其透水能力亦隨之遞減，相對地其強度將大幅增加。

透水混凝土為一種多孔隙的複合材料，過去常被稱為孔隙混凝土(porous concrete)，國內部分學者稱之為：無細混凝土(no fine concrete)，可以視為一種粒料粒徑分佈在狹窄級配範圍內並且含(無)微量細粒料加上不足量膠結漿體所構成的混凝土，透水混凝土有明顯的特性是質輕且多孔隙。透水混凝土的構成由裹覆在粒料顆粒外層的不足量水泥漿體與粒料顆粒之間點接觸，相互黏結形成多孔隙結構

體，在這種結構之下擁有良好的透水性能 ($K > 10^{-3} \text{cm/sec}$)，也因為多孔隙的特性而使得力學強度會受到限制，過去學者專家對無細混凝土之探討或研究，所得抗壓強度約在 1.5MPa 至 14MPa 之間。新近，美國波特蘭水泥協會 (PCA) 與預拌混凝土協會 (NRMCA) 出版『透水混凝土鋪面』，其抗壓強度與範圍再被擴大約在 2.8MPa 至 28MPa 之間。新近，另外，美國混凝土協會 ACI 522 委員會提供透水混凝土之技術與規範資訊，包括透水混凝土定義、材料性質、配比與設計方法、製程與施工、試驗與檢驗、應用等。

3.1.2 材料配比設計

透水混凝土在目前為止並無成熟的設計方式，美國混凝土協會 ACI 522R-06 透水混凝土並沒有提供一套配比設計方法，僅說明簡易配比基準原則，例如透水混凝土要有可工作性，其水灰比應落在 0.25 ~ 0.45 之間，再使用試誤與檢驗法求得配比；然而美國波特蘭水泥協會 (PCA) 與預拌混凝土協會 (NRMCA) 出版透『水混凝土鋪面』一書，提供一典型透水混凝土配比的材料範圍，如表 3-1 所示，並說明美國混凝土協會 ACI 211.3R 零坍度混凝土配比設計方法，可以作為透水混凝土配比設計程序；表 3-1 典型透水混凝土配比與無細粒料混凝土配比仍有部份差異，如表 3-2 無細混凝土配比所示，無細混凝土之粒料膠結比(粒料/膠結料)較大，可稱為貧配比，其水泥用量偏低。本研究依照美國混凝土協會 ACI 522R-06 透水混凝土所提供資訊，適度修正提出透水混凝土的配比設計流程，說明如第二章之圖 2.8 透水混凝土配比設計流程。

表 3-1 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍⁽³¹⁾

	膠結料 (B)	粒料(A)	水膠比 (W/B, 重量)	粒料膠結比 (A/B, 重量)	細粗粒料比 (F/A, 重量)
材料用量 (lb/yd ³)	450 ~ 700	2000 ~ 2500	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5
材料用量 (kg/m ³)	270 ~ 415	1190 ~ 1480	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5

表 3-2 無細混凝土水泥之配比設計參考

水泥：粒料	水灰比	水泥kg/m ³	用水量kg/m ³	碎石kg/m ³
1：10	0.364	157	57	1570
1：10	0.582	152	88	1520
1:12	0.408	133	54	1597
1:15	0.41	107	44	1598
1:8	0.35	201	70	1608
1:10	0.36	158	57.5	1580

資料來源：可滲透式人行鋪面材料及施工方法

透水混凝土強度與其內部鬆密有極大關係，ACI 522R-06 正提供透水混凝土抗壓強度與孔隙率之資訊(圖 2.2)，例如 2006 年愛阿華州 Sioux 市一重交通車輛倉庫與車道使用透水混凝土之案例，混凝土鋪面進行 10 種透水混凝土配比設計研究，其配比如表 2.5 所示，水膠比相當低，落在 0.26~0.19 之間，方能承受重車載重，透水混凝土面層厚度設計 8 英吋，下有 18 英吋碎石底層。目前發現鋪面結構屬於良好狀況，雖然，10 種透水混凝土配比其水膠比相當接近，但是，其透水混凝土強度、孔隙比、單位重與透水能力差異相當大，不僅上下層有差異且各鑽心試驗點有極大差距。

3.2 拌合廠與材料認可

對試鋪作業配合的拌合廠與其所使用材料會進行確認與檢核，並進行配比設計與試拌作業，依試拌的情形再進行配比的調整，使其達到試鋪所需的條件。

3.3 執行配比設計與試拌作業

3.3.1 驗證配比

九十九年五月於預拌混凝土廠廠方正式試拌透水混凝土，其配比

如表 3-3 所示，設計水灰比為 0.29，水泥量為 340 kg/m^3 ，粒料膠結比為 4.5，配比單位重為 $1,972 \text{ kg/m}^3$ ，以上四項均符合典型透水混凝土比例，但是，粗粒料量為 $1,530 \text{ kg/m}^3$ 較典型透水混凝土用量為多；當檢視透水混凝土硬固試體如照片 3.1 所示，結果發現預拌混凝土廠製作透水混凝土能力有進步，已無第一次透水混凝土試拌所發生之垂流現象，其粒料粒徑（4.8mm）大小亦符合要求，但其粒料之扁平率超過 15% 以上，可能造成強度不足現象，要求預拌廠改善扁平率或選擇較佳（圓形）之粒料；當天研究團隊並要求配合現地施作試鋪工程，透水混凝土試拌量至少需達一立方公尺，現地施作試鋪面積暫定為兩公尺見方，厚度為 20 公分。

表 3-3 透水混凝土配比

設計 水灰比	粒料粒徑 (mm)	粗粒料 (kg/m^3)	水泥 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	強塑劑 (kg/m^3)	單位重 (kg/m^3)
0.29	4.8	1530	340	100	2	1972



照片 3.1 透水混凝土試樣(圓柱與版)扁平率過高

3.3.2 執行試拌作業與現地試鋪

今年六月十日執行透水混凝土試拌作業與現地試鋪工程，透水混凝土試拌量 1 立方公尺，現地施作試鋪面積為兩公尺見方，厚度為 20 公分。試鋪前檢視確認粒料之扁平率是否合乎規範，發現粒料扁平有改善如照片 3.2 所示，而其配比同表 3-3 所示不變。拌合時，大

型拌合機拌合時間應增加，混凝土材料方能拌合均勻，加上一般透水混凝土為零坍度無法流動，不容易卸料；若使用預拌車裝料，屆時，藉由預拌車尾端卸料澆置，不但澆置速度慢，而且會黏著預拌車拌合鼓內壁；研究團隊建議使用卡車裝料，照片 3.3 所示為新拌透水混凝土由拌合機卸料至卡車之情況，卡車裝料後運輸至工地約 5 分鐘，試拌料試鋪前，進行現地模版組立，鋪築範圍為 2 公尺長x2 公尺寬x25 公分深之正方格，施作前於先鋪上一層厚約 5 公分碎石級配底層，照片 3.4 所示為試鋪模版組立與碎石鋪設情形，鋪築基地於澆置新拌透水混凝土前先噴灑水溼治，避免新拌透水混凝土的水份被碎石級配底層或土壤吸收，再於碎石級配上鋪築透水混凝土厚約 20 公分，當新拌透水混凝土藉由耙子攤平混凝土後，利用小滾筒(長 0.8 公尺，重約 100kg)壓密透水混凝土，現地試鋪工程相當順利；有關透水混凝土試鋪工程之施作照片如下，照片 3.5 為新拌透水混凝土由卡車卸料至試鋪模版內之情況，照片 3.6 為新拌透水混凝土無垂流之現象，照片 3.7 為施工人員使用鏟子、耙子與推平扒攤平新拌透水混凝土，照片 3.8 為透水混凝土滾筒壓密與完成面之施作，照片 3.9 為利用鋤刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀，照片 3.10 為透水混凝土圓柱抗壓試體製作。



照片 3.2 粒料扁平有改善



照片 3.3 新拌透水混凝土卸料至卡車之情況



照片 3.4 試鋪時模版組立與碎石鋪設情形



照片 3.5 透水混凝土由卡車卸料至試鋪基地



照片 3.6 新拌透水混凝土無垂流之現象



照片 3.7 使用鏟子、耙子與推平扒攤平新拌透水混凝土



照片 3.8 透水混凝土滾筒壓密與完成面之施作



照片 3.9 鏟刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀



照片 3.10 透水混凝土圓柱抗壓試體之製作。

第四章 公路路面試鋪施工作業執行

本章說明本研究即將進行的透水混凝土路面試鋪施工作業執行，內容涵蓋透水混凝土路面規劃設計及施工規範研擬、施工前的準備作業、施工中的製程控制作業、施工後的品質檢測作業共四節，目前工作進度僅至前兩節，預定七月底前將完成透水混凝土道路試鋪施工作業，前兩節分述如下。

4.1 透水混凝土路面規劃設計及施工規範研擬

4.1.1 試鋪路面場址規劃

本研究獲交通部公路總局第二區養護工程處之支持，在 2010 年興建之「埔里工務段辦公大樓新建工程」中，規劃設計透水混凝土鋪面。依據 2009 年 5 月提供的規劃設計圖，該新建辦公大樓位於南投縣埔里鎮南方，南安路、水頭路、南環路、及隆生路之間，緊鄰屬於烏溪上游南港溪堤防之南環路上，如圖 4.1 所示。該處土層主要由砂礫與黏土為主的沖積土，土層深度約一公尺，依據土質判斷滲透係數應可超過透水鋪面需求之 $2 \times 10^{-2} \text{cm/min}$ 。雨量分佈方面，全年平均雨量為 2,120 公釐，降雨日數約 149 日，具有乾濕雨季分明的氣候特徵，雨季集中於夏季，以六月份降雨最多，月平均雨量達 437 公釐，冬季為乾季，十一月降雨量最少，平均雨量僅 16 公釐。

該場址基地面積 9,373 平方公尺，法定空地 (40%) 面積 3,749 平方公尺，基地內海拔高程最高約 448 公尺，最低約 445 公尺，周邊為皎白筍田，預計興建辦公大樓 (A 棟)、機械車輛保養場 (B 棟) 及車庫廠房 (C 棟) 三棟建築物，平面配置圖如圖 4.2 所示。由圖 4.2 的平面配置圖，亦可知該基地整平後的排水設計乃沿建物四週佈設排水溝，併入基地四周沿圍牆的排水溝，最後導入原有排水管路，穿過堤防排出。其中，機械車輛保養場及車庫廠房間之道路，其長度約三十米，

寬度約三米，設計為透水混凝土鋪面。

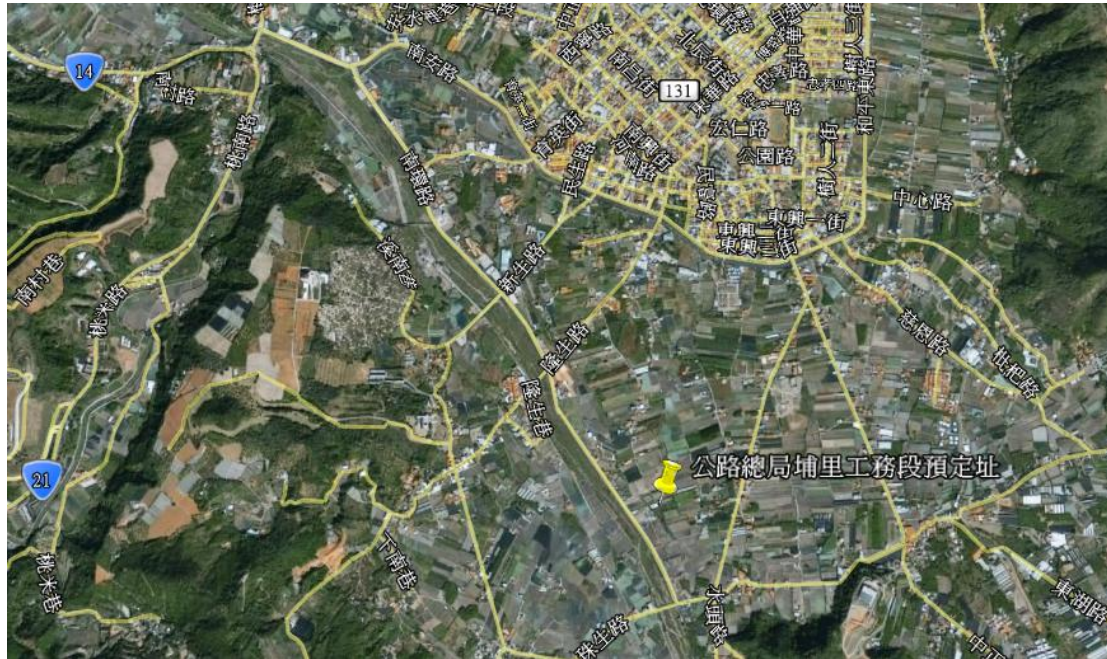


圖 4.1 公路總局新建埔里工務段辦公大樓預定位址圖

試鋪透水混凝土鋪面的初步共識，為將辦公人員停車場，由原植草磚改為透水混凝土，該處停車場位於辦公大樓後方呈三角形，面積約為 800 平方公尺，原規劃為連接瀝青混凝土地坪車道，進入停車區塊後改採植草磚鋪面。原設計圖如圖 4.3 所示。斷面厚度部份則在夯實基層土壤以上，分別為 10 公分夯實級配料、3 公分細碎石、及 8 公分厚的高壓彩晶植草磚。至於連接之瀝青混凝土車道及地坪，則應在夯實基層土壤以上，至少有 10 公分夯實級配料及 5 至 10 公分厚瀝青混凝土面層。

今(2010)年三月十七日並於埔里工務段辦公廳召開本計畫公路路面試鋪一透水混凝土工程協調會，經協調討論初步達成重要決議：即本工程透水混凝土鋪面可分為停車場與道路兩部分，道路可配合本研究計畫先試鋪，停車場要等到明年主體結構完成後再進行施作。

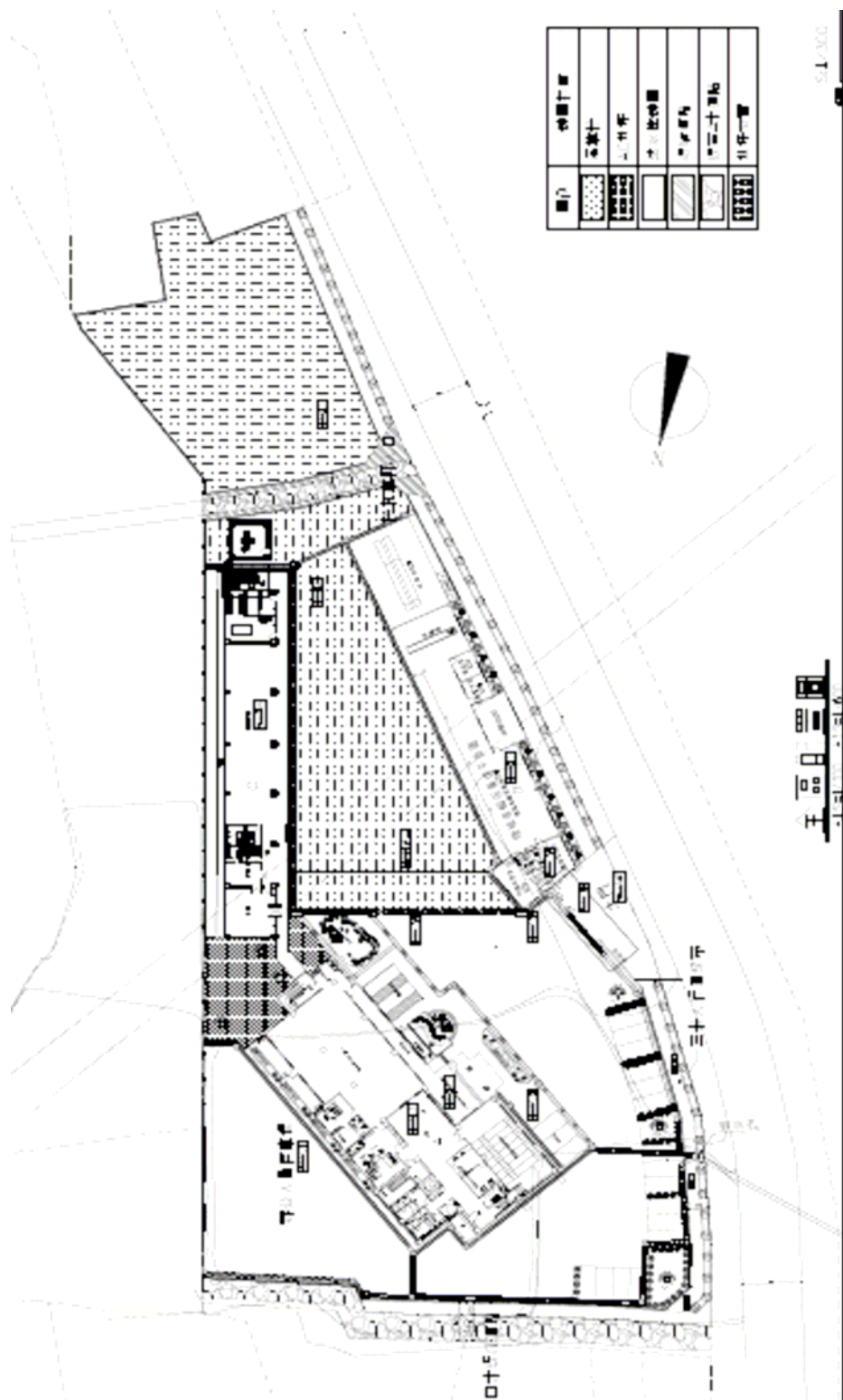


圖 4.2 公路總局新建埔里工務段辦公大樓配置平面圖

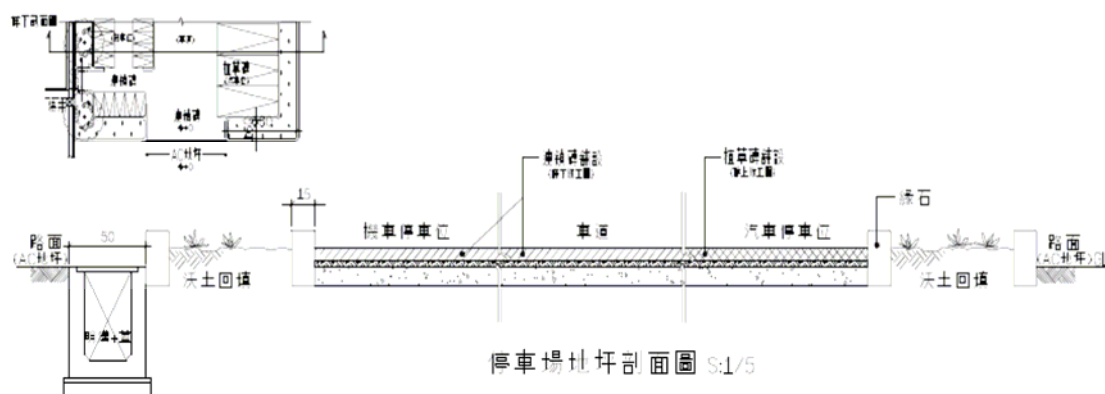


圖 4.3 原規劃之辦公人員停車場設計圖

4.1.2 透水混凝土鋪面設計及施工規範研擬

透水鋪面結構不緻密且底下土壤常處於飽和狀態，不能承受大的荷重，另像動植物批發場、汽機車回收場、加油場站、倉庫、工業場站、船埠、保養場、洗車場、油槽附近場站等，鋪面上可能有較多污染物，若經沖入孔隙造成阻塞，而使透水鋪面失去功能；故依據國外透水鋪面選址的原則，主要有兩大顧慮，即交通荷重大不宜，及有過多污染活動的地方不宜。本案選擇新建辦公大樓的辦公人員停車場，並與機械車輛保養場和庫房區隔之三米寬道路，應為適當的場址。

圖 4.4 為透水混凝土鋪面標準斷面圖，該基地的路基土壤以砂礫石佔大部份，含少量黏土，載重支撐中等，交通量部份則因為辦公人員停車場與三米寬道路，以一般混凝土版停車場厚度為 10~15cm，改用透水混凝土增厚 50%，故用 20cm 厚度為設計版厚。若以較保守的鋪面有效孔隙比，透水混凝土為 15%，碎石級配層為 20%來估算，則該鋪面的貯水量為 52.5mm，已經超過交通部中央氣象局「大雨」定義之雨量 (>50mm)，可以有效地降低逕流量。若透水混凝土鋪面遇到超豪大雨，雨量來不及垂直(縱向)滲透入路基土壤，雨水亦可由 2 英吋直徑 PVC 透水管水平(橫向)排入排水溝。

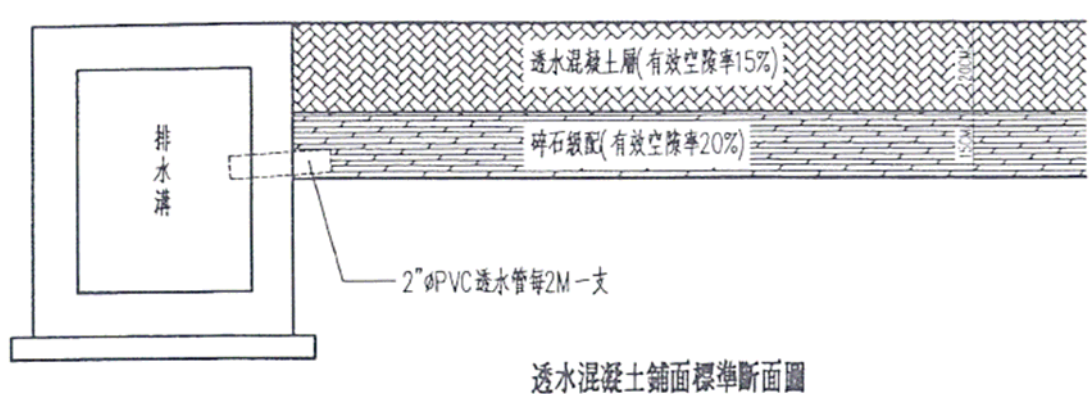


圖 4.4 埔里工務段辦公大樓新建工程之透水混凝土鋪面標準斷面圖

表 4-1 為埔里工務段辦公大樓新建工程之透水混凝土材料規範與品質要求，本表提供透水混凝土材料規範、典型透水混凝土材料範圍與透水混凝土品質要求共三項，典型透水混凝土主要是由水泥、粗粒料、少量細粒料、摻料與拌合水等所組成之拌合料，典型透水混凝土其單位重範圍介於 100 與 125 lb/ft³ (1,600 與 2000 kg/m³) 間，水膠比範圍介於 0.25 至 0.35 間，通常水灰比或水膠比的選取，除了考量強度因素外，以能充份包裹粒料而不產生垂流現象為原則，當透水混凝土空隙率範圍介於 18 至 35% 之間，28 天抗壓強度範圍介於 400 至 4,000 psi (2.8 至 28 MPa) 之間，典型透水混凝土透水係數範圍介於 0.1 至 1.22 cm/sec。依據本表提供透水混凝土材料規範與參考典型透水混凝土材料範圍為原則，透水混凝土品質應可達成 (1)28 天抗壓強度 1500 psi 以上， (2)工地透水試驗應達 400ml/15sec 以上之要求。

圖 4.5 為本工程之透水混凝土施工規範與其鋪面施工縫詳圖，透水混凝土鋪面之施工類同一般剛性混凝土鋪面工程之施工，因幾乎無細粒料且漿體量較少，工作性差(接近零坍度)，水泥漿包覆粒料表面與空氣接觸面大，故施工時應「迅速」施作；包括模板組立、混凝土澆置、攤平搗實壓密、養護與工作縫等施工要領有簡易解說，另可參考本研究去(2009)年所研擬之透水混凝土鋪面材料及施工規範或 ACI 522.1-08 透水混凝土鋪面規範說明。

表 4-1 埔里工務段辦公大樓新建工程之透水混凝土規範與品質要求

1. 透水混凝土材料規範要求					
原料名稱		規範要求			
水泥		1. 水泥應滿足CNS 61 卜特蘭水泥規範要求。 2. 使用的粒徑越小，水泥顆粒亦應相應變小。			
粒料		1. 粗粒料應為單一級配。如5mm~10mm、10mm ~20mm等不宜小於3mm 或大於40mm。 2. 以卵石較好，碎石次之；碎石型粗粒料之針、片狀總量最好小於15%，粒料含泥量不宜大於1%。 3. 亦可使用再生粒料、人造粒料等。			
摻料		1. 透水混凝土除了上述粒料、水泥、水等材料外，通常會加入其他改善其性質的摻劑，摻劑應符合CNS 12283相關規定。 2. 使用礦物摻料如矽灰、高爐石粉或飛灰等應符合CNS相關規範。			
2. 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍					
配比	膠結料(C)	粒料(A)	水膠比 (W/B，重量)	粒料水泥比 (A/C，重量)	細粗粒料比 (F/A，重量)
材料用量 (kg/m ³)	270 ~ 415	1190 ~ 1480	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5
3. 品質要求					
NO	品質要求項目	標準			抽驗數量
A	新拌透水混凝土	1. 不產生垂流為原則，可以目視判識。 2. 單位重允收標準為設計單位重之±80 kg/m ³ 間。			隨時。
B	硬固透水混凝土	1. 典型抗壓強度範圍介於 400 至 4000 psi 之間。 2. 透水混凝土透水係數應達 10 ⁻² cm/sec 以上或工地滲透試驗應達 400ml/15sec 以上。 3. 厚度驗收標準為平均厚度不小於設計厚度，且無任一鑽心試體厚度較設計厚度小 0.5 英吋。			每隔 1000m ² 抽驗 1~2 次。
透水混凝土之施工規範：					
1. 路基與級配層：壓實後之高程必須與設計圖面相符。					
NO	品質要求項目	標準			抽驗數量
A	路基	透水係數應達 2×10 ⁻² cm/min.以上。			每隔 200m ² 抽驗 1~2 次。
B	級配層	壓實度應達 95%以上。			

2. 鋪設透水混凝土面層：透水混凝土鋪面施工方式與一般剛性混凝土鋪面施工大同小異，因細料含量稀少且坍度很小，極易失去工作性，故施工應「迅速」施作，包括澆置(藉由卡車或輸送帶或預拌車尾端卸料澆置透水混凝土)、攤平(耙子和刮板攤平)、壓實(最初使用振動刮板進行搗實之後，再以滾筒重力方式壓實)、施工縫(切縫工具附有刀鋒約為 1/3 版厚)、養護(使用塑膠布覆蓋養護且至少養護 7 天後，方能對外開放交通)等施工要領可參照 ACI 522 透水混凝土鋪面規範辦理。

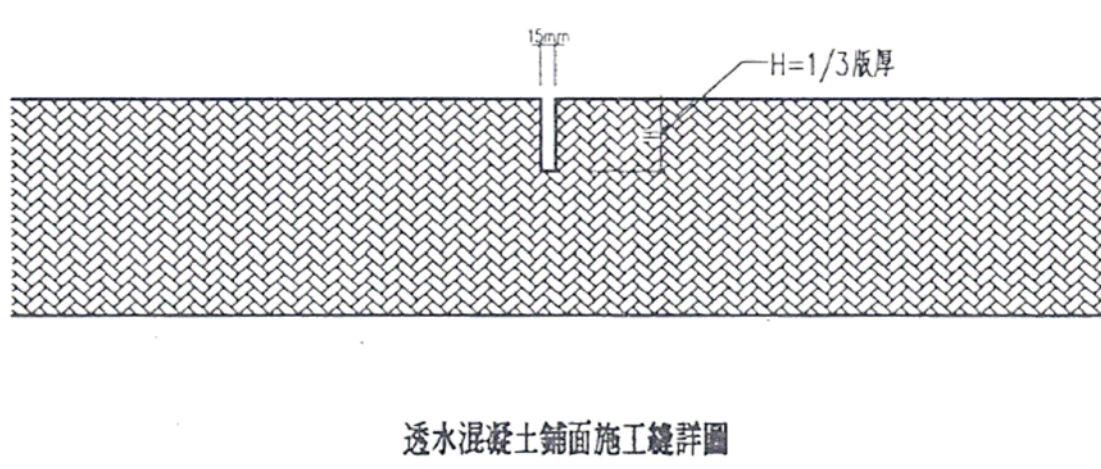


圖 4.5 本工程之透水混凝土施工規範與其鋪面施工縫詳圖

4.2 施工前的準備作業

4.2.1 試鋪路面施工場址準備

試鋪路面路基應予整平，緩坡度傾斜不超過 5%以提供平坦的施工場址；整平後，土壤應夯實至最大乾密度 92%依據 AASHTO T191 或 AASHTO T180 規範，如須回填將路基提高至設計高程，回填料應採用乾淨的含砂土壤，每層回填深度 8 英寸，並且，夯實至最大乾密度 92%依據上述 AASHTO 規範。

有關土壤分析與路基透水性質對透水混凝土影響特別重要，如同驗證透水混凝土鋪面的品質是重要影響因子，首先土壤基層有很多

ASTM 與 AASHTO 試驗方法，但並非所有一般混凝土鋪面的試驗可適用於透水混凝土。基本上，路基性質的試驗有粒徑大小分析 (ASTM D422 或 CNS 11776)、土壤分類 (ASTM D2487 或 CNS 12387 A3285) 與土壤夯實試驗 (ASTM D698 或 CNS 11777 A3252) 等，藉由上述試驗資料可提供設計者必要的資訊，亦為品質管制的一部分。表 4-2 為本案路基土壤篩分析結果，表 4-3 為本案路基土壤分類試驗結果，由二表得知，路基土壤在液性限度和塑性限度均屬於零，塑性指數值亦等於零，再由路基土壤篩分析來判斷，通過 #10 的粒料達 16.3%，#40 的粒料達 7.1%，#200 的粒料僅有 1%，因此，由美國 AASHTO 土壤分類表(表 4-4)查知屬於 A-1-a，表示是由石片、礫石、砂土等組成，為優良路基土壤材料，再由表 4-5 土壤滲透係數 k 值簡易對照表可查知該土壤滲透係數 K 值應大於 10^{-5} m/sec 以上，滲透性良好。

表 4-2 路基土壤篩分析

篩號	個別停留篩號重量 (g)	停留篩號百分比		通過篩號百分比
		個別	累積	
# 4	2411	79.3	79.3	20.7
# 10	135	4.4	83.7	16.3
# 20	157	5.2	88.9	11.1
# 40	122	4.0	92.9	7.1
# 60	55	1.8	94.7	5.3
# 100	72	2.4	97.1	2.9
# 200	57	1.9	99.0	1.0
底盤	33	1.0	100.0	

表 4-3 路基土壤分類試驗結果

通過 # 10	通過 # 40	通過 # 200	液性限 度	塑性限 度	塑性指 數	土壤分 類
16.3%	7.1%	1%	N.P.	N.P.	0	A-1-a

表 4-4 美國 AASHTO 土壤分類

大分類	粗粒土(No.200 篩通過量 35% 以下)							粉質土，粘質土 (No.200 篩通過量 35% 以上)			
群分類	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5* A-7-6
篩分析 (通過量%)											
No.10 (2.00mm)	50 以下	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No.40 (425 μ m)	30 以下	50 以下	51 以上	-	-	-	-	-	-	-	-
No.200 (75 μ m)	15 以下	25 以下	10 以下	35 以下	35 以下	35 以下	35 以下	36 以上	36 以上	36 以上	36 以上
通過 40 號篩部分土料之											
液性界限	-		-	40 以下	41 以上	40 以下	41 以上	40 以下	41 以上	40 以下	41 以上
塑性指數	6 以下		N. P.	10 以下	10 以下	11 以上	11 以上	10 以下	10 以下	11 以上	11 以上
一般主要構成物	石片，礫，砂		細砂	粉土質或黏土質之礫石及砂				粉質土		黏質土	
當做路基填土材料之優劣	優～良					可～不良					

* (A-7-5 之 PI) $\leq$ LL-30, (A-7-6 之 PI) $>$ LL-30

表 4-5 土壤滲透係數 k 值簡易對照表

土 質	砂土	粉土	黏土	高塑性黏土
土壤滲透係數 K(m/s)	10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}	10^{-11}

4.2.2 試鋪施工前之教育訓練

今(2010)年三月十七日並於埔里工務段辦公廳召開本計畫公路路面試鋪一透水混凝土工程協調會經協調討論決定透水混凝土道路試鋪施工前，應辦理透水混凝土鋪面材料、施工與監造之教育訓練；地點為公路總局第二區養護工程處埔里工務段3樓簡報室，教育訓練課程詳表4-6所示，日期為七月五日星期一上午。

表 4-6 透水混凝土應用於鋪面工程之教育訓練課程

(上課地點：交通部公路總局第二區養護工程處埔里工務段3樓簡報室)

日期	時間	課程題目	講員/主持人
九十九年七月五日(星期二)	08:45~09:05	報 到	
	09:05~09:15	致 詞	◎公路總局第二區養護工程處長官 ◎交通部運研所港研中心長官
	09:15~10:05	透水混凝土特性與應用	顏聰 講座教授 (朝陽科技大學營建工程系)
	10:05~10:55	透水混凝土在鋪面工程之應用	邱垂德 教授 (中華大學營建管理研究所)
	10:55~11:10	休 息	
	11:10~12:00	透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之初步成果	李明君 教授 (朝陽科技大學營建工程系)
	12:00~12:50	綜合座談會暨午餐時間	◎公路總局第二區養護工程處長官 ◎交通部運研所港研中心長官 ◎以上講員教授

註：主辦單位包括交通部運輸研究所、朝陽科技大學、公路總局第二區養護工程處。

4.3 施工中的製程控制作業

施工路面路基土壤經過夯實與整平後，鋪設不織布(不透水膜)如照片 4.1 與 4.2 所示，不織布鋪設完成之後，隨即有怪手進場進行碎石級配底層施作，碎石級配回填將底層提高至設計高程，回填深度 20 公分，並且，應夯實至壓實度 95%以上，照片 4.3 與 4.4 為試鋪路面路基基層工地密度現場試驗進行與完成之情形，其最大乾密度為 2017kg/m^3 ，最佳含水量為 9.5%，壓實度為 96.5%(大於 AASHTO T191 或 AASHTO T180 規範規定 95%)；而照片 4.5 為試鋪路面底層碎石級配完成之情形，以預備碎石級配底層上方鋪設透水混凝土面層。



照片 4.1 基層不織布鋪設之進行



照片 4.2 基層不織布鋪設完成



照片 4.3 底層工地密度試驗之進行



照片 4.4 底層工地密度試驗完成



照片 4.5 底層碎石級配完成

4.3.1 透水混凝土預拌廠的製程控制情形

路面面層施作之當天早上，研究團隊會同至混凝土預拌廠驗料，上回試拌與試鋪壹立方透水混凝土是在舊廠拌合施作，該廠供應外地量很大，本次進行拌合之預拌廠是最近使用全新軟體與硬體組裝完畢之新廠如照片 4.6 所示，甚至拌合設備仍未進行下料、拌合與試俾作業，預拌廠品管人員宣稱利用全新拌合設備(新廠)，應可更精準生產透水混凝土材料；然而第一盤(兩立方公尺)拌合後逕行下料，發現透水混凝土之漿體量不足，造成材料黏著能力缺乏，推斷其原因為全新拌合設備(新廠)會吸附部分水泥漿體，因此，透水混凝土材料太乾且無法結球狀。研究團隊要求再拌第二盤(兩立方公尺)，配比中增加強塑劑用量，其它拌合料維持不變，拌合後下料檢查發現透水混凝土之漿體量較佳且可結成球狀，表示透水混凝土目視檢測通過，可以進行下一階段新拌透水混凝土單位重檢驗，照片 4.7 為拌合廠內測量新拌透水混凝土單位重之情形，測知其單位重為 $1,836\text{kg/m}^3$ ，符合一般透水混凝土 $1,600\text{kg/m}^3$ 至 $2,000\text{kg/m}^3$ 單位重之範圍，但是與本工程所設計 $1972\text{kg/m}^3 \pm 80\text{kg/m}^3$ 之單位重範圍，僅有少許落差，本次拌合廠出料之新拌透水混凝土共計 18 立方公尺，透水混凝土外觀如照片 4.8 所示。



照片 4.6 新廠全新拌合軟體與硬體設備



照片 4.7 拌合廠測量新拌透水混凝土單位重($1,836 \text{ kg/m}^3$)



照片 4.8 透水混凝土外觀

4.3.2 現地施工品質管制之情形

新拌透水混凝土施工中可以目視判斷是否有垂流現象產生，並應進行新拌混凝土單位重之試驗，每天澆置混凝土至少應進行一次以上單位重之驗證，所以，目視判斷是否垂流產生與其單位重試驗為透水混凝土現場品質管制的首要關卡。若混凝土有垂流現象產生或其單位重不符合典型透水混凝土單位重，應立即要求退料；本工程透水混凝土鋪面可分為停車場(呈三角形，面積約為 800 平方公尺)與道路(4 公尺寬與 20 公尺長)兩部分，道路可配合本研究計畫先試鋪，停車場要

等到明年主體結構完成後再進行施作，透水混凝土道路面積僅佔停車場的十分之一；因此，本次透水混凝土道路部分施工是研究團隊要求廠商協助先行施作，一般慣例是主體結構建造與裝修完成後，才會進行有關停車場與道路之工項。

透水混凝土面層設計為 20 公分厚，本次道路部分預拌廠出料之新拌透水混凝土共計 18 立方公尺，原預定利用上午一個半小時要鋪築完工，卻花費兩倍時間約三小時半，鋪築完已經超過中午十二點半，落後主要原因是施工未能掌握「迅速」施作之要訣，加上工區待料時間過長。當天(八月十三日)天氣炎熱使用紅外線溫度監測如照片 4.9 所示，由於工區至拌合廠僅一河之隔，距離約 6 百公尺，運送透水混凝土僅用壹輛卡車，第一回卡車裝載 4.5 立方公尺的透水混凝土，第二回與第三回卡車分別裝載 9 與 4.5 立方公尺的透水混凝土，新拌透水混凝土材料並無垂流之現象如照片 4.10 所示，其中，照片 4.11 為透水混凝土第一回卡車尾端傾倒卸料方式進行澆置，當天中午天氣炎熱，透水混凝土表面漿體經烈日照射很快就乾掉，因此，第二回卡車裝載 9 立方公尺的透水混凝土如照片 4.12 所示，當時現場負責透水混凝土澆置與攤平之工程人員僅三位如照片 4.13 所示，直呼此項工作吃不消，混凝土工作性太差造成攤平太吃力，經研究團隊會商立即決定使用小型搬運機(小山貓)協助搬運與攤平透水混凝土，照片 4.14 使用小山貓協助搬運與攤平之情形，也讓三位負責攤平之工程人員可以稍微休息一下，由於負責刮平與振動搗實之工程人員仍未到現場，因此，幾乎直到整體(面積)都攤平後，才進行刮平與振動搗實之工作，照片 4.15 為現場工程人員刮平與振動搗實之情形，然而發現此種振動刮板沒什麼效果，好像僅是拍打鋪面表面(拍打振動能量不足)而無法深入振動搗實，另一原因是透水混凝土表層暴露於炎熱的空氣中太久，已失去工作性與水份，照片 4.16 顯示振動刮板其刮平與振動搗實之效果不良；由於壓實有兩階段，最初使用振動刮板進行搗實之後，再以滾筒重力方式壓實，照片 4.17 與 4.18 分別為透水混凝土使用大小滾筒滾壓

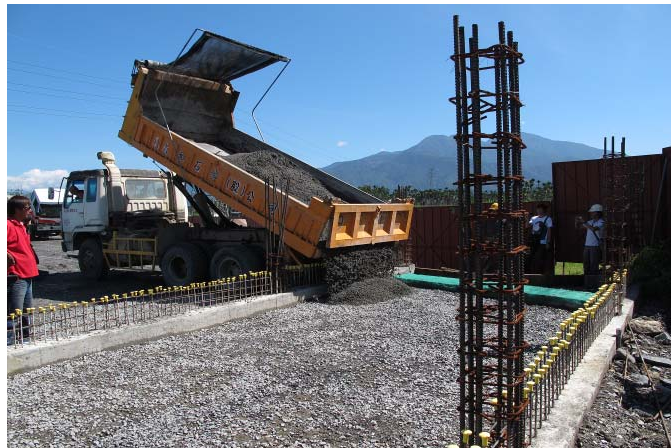
之情形，其中，小滾筒(0.8 公尺寬且重約 100kg)、大滾筒(3.7 公尺寬且重約 270kg)，正如上述一般，透水混凝土表層暴露於炎熱的空氣中太久，已失去工作性與水份，使用滾筒滾壓壓實效果實在有限。照片 4.19 為透水混凝土最終壓實之情形，其表面呈現過乾且不易黏著現象，至於滾筒滾壓無法達到之角落邊緣輔佐以鋤刀修飾，照片 4.20 為鋤刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀，透水混凝土鋪面施工縫依據施工規範可使用切縫工具附有刀鋒(刀鋒深度 6 公分約三分之一版厚)，於透水混凝土最終壓實後即進行施工縫切縫，照片 4.21 顯示透水混凝土鋪面滾筒刀片切縫之情形，如上述說明透水混凝土表層暴露於炎熱的空氣中太久，已失去工作性與塑性，使用滾筒刀片進行切縫，效果不好不美觀。最後，進行塑膠布覆蓋養護與透水混凝土試體製作，照片 4.22 為塑膠布覆蓋養護新拌透水混凝土鋪面，照片 4.23 與 4.24 分別為現地製作透水混凝土試體模具、搗棒與當時搗棒夯實試體之情況。



照片 4.9 紅外線溫度監測



照片 4.10 新拌透水混凝土無垂流之現象



照片 4.11 透水混凝土由第一回卡車卸料情形



照片 4.12 透水混凝土由第二回卡車卸料情形



照片 4.13 透水混凝土澆置與攤平之情形



照片 4.14 使用小山貓協助搬運與攤平之情形



照片 4.15 現場工程人員刮平與振動搗實之情形



照片 4.16 振動刮板其刮平與振動搗實之效果不良



照片 4.17 透水混凝土使用大滾筒滾壓情形



照片 4.18 透水混凝土使用小滾筒滾壓情形



照片 4.19 透水混凝土最終壓實之情形



照片 4.20 鋤刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀



照片 4.21 新拌透水混凝土鋪面使用滾筒刀片切縫之情形



照片 4.22 塑膠布覆蓋養護新拌透水混凝土鋪面



照片 4.23 透水混凝土試體模具與夯實用之搗棒



照片 4.24 搗棒夯實製作透水混凝土試體之情形

4.4 施工後的品質檢測作業

透水混凝土施工完成後檢試驗以鋪面混凝土為例，混凝土澆置至少七天後方能進行抽驗，抽驗數量以每 75 m^3 取一組，鑽心試驗一組至少三個試體，試驗項目包含單位重、厚度與抗壓強度(目前 ACI 522R-06 並無抗壓強度驗收規定)，單位重驗收標準為設計單位重之 $\pm 5 \text{ lb/ft}^3$ (80 kg/m^3)間，厚度驗收標準為平均厚度不小於設計厚度，且無任一鑽心試體厚度較設計厚度小 0.5 英吋(13 mm)；其他試驗包含抗彎強度與透水率等，有關透水率目前室內用定水頭試驗法，可計算出透水係數，而本研究發現新發展瀝青混凝土鋪面現地透水試驗也可適用透水混凝土現地試驗。

本研究針對透水混凝土施工後的品質檢測作業包括單位重、厚度、抗壓強度、抗彎強度與現地透水試驗，由於本工程尚未完工，營造廠商希望驗收時再進行抽驗--鑽心試驗，因此，品質檢測作業以非破壞性試驗進行，其中，包含厚度與透水試驗可在現地測試，其它試驗包括單位重、抗壓強度與抗彎強度則在試驗室測試，混凝土試體其齡期是七天，當預拌廠將混凝土抗壓強度試體送到本研究單位時，發現預拌廠所製作之 15 只抗壓試體(7 天、28 天與 56 天三齡期各有 5 只試體)有垂流阻塞孔隙現象，如照片 4-25 所示；因此，拒絕試驗有問題之抗壓試體。本檢測所用試體為研究單位於透水混凝土施工當天所製作，如照片 4-26 所示之抗彎強度試體(尺寸為 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 53\text{cm}$)，並測得其氣乾單位重為 1761kg/m^3 較其新拌混凝土(1836kg/m^3)為小，但仍符合一般透水混凝土 1600kg/m^3 至 2000kg/m^3 單位重之範圍。抗壓試體是由抗彎試體($15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 53\text{cm}$)鋸切為三個正立方體(尺寸為 15 立方公分)，其混凝土七天抗壓強度分別為 851、903 與 1226 MPa，平均抗壓強度約為 993 MPa；抗彎試體有兩個 ($15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 53\text{cm}$)，其混凝土七天抗彎強度分別為 26 與 25 MPa，平均抗彎強度是 25.5 MPa 約為抗壓強度的四十分之一，明顯較一般混凝土為低，主要原因可能是多孔隙結構無砂漿填充孔隙，造

成其抵抗破裂與彎曲應力之能力特別差。

現地非破壞性試驗進行厚度與透水能力測試，如照片 4-27 所示，其厚度約 20.1cm 與設計厚度相符；現地自來水管透水能力測試，如照片 4-28 所示，將水龍頭轉向最大流量，每分鐘最大水流量約為 20 公升，自來水管透水驗證時間為 3 分鐘；現地透水混凝土鋪面透水能力優良。



照片 4.25 試体部分有垂流阻塞孔隙現象



照片 4.26 抗彎試体外觀



照片 4.27 鋪設厚度符合設計厚度



照片 4.28 現地自來水管透水能力測試

第五章 公路路面試鋪成效評估作業

本章說明將試鋪所用之材料於實驗室裡進行材料的性質評估，以利控管品質，並根據試鋪地點針對其特性進行鋪面的特性評估，且於試鋪地點試鋪透水混凝土鋪面養護完成後進行現地的透水性試驗，用以評估試鋪成效。

5.1 實驗室內的材料性質評估

5.1.1 透水混凝土抗壓試驗

混凝土結構設計中，抗壓強度是檢驗混凝土品質優劣最重要之依據。抗壓試驗機加載的速率及時間與試體的含水率皆會影響混凝土抗壓強度。若加載速率過快且時間過短，所測得的強度會比正常高出約 15 %；若加載時間過長，所測得的強度則會比正常低約 30 %。由於活性粉混凝土之抗壓強度，遠高於高性能混凝土，因此為避免加載時間過長，所以本研究抗壓試驗之加載速率為每秒 $4.5\sim 7.14\text{ kgf/cm}^2$ ，測試時用石膏蓋平試體表面，以保持試體表面的平整，避免受力不平均。試體製作之模具為 $45\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$ ，一共製作 3 個試體以供 7 天、28 天、56 天抗壓試驗使用，搗實之夯錘重為 4.5kg，落錘高度為 45cm，分為兩層夯實每層夯實次數為 26 下，最後再以鏟刀刮平，進行養護直至 28 天及 56 天將試體取出，將試體裁切 3 塊大小為 $15\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 。將裁切後 28 天之抗壓試體編號為 B1、B2、B3，56 天之抗壓試體 C1、C2、C3，試體照片如 5.1、5.2 所示。



照片 5.1 28 天透水混凝土試體



照片 5.2 56 天透水混凝土試體

試齡期分別為 28 天、56 天，試驗抗壓強度發展情形，如表 5-1 所示。

表 5-1 抗壓強度結果 (kg/cm^2)

試體編號	28 天抗壓強度	試體編號	56 天抗壓強度
B1	95.26	C1	102.07
B2	99.76	C2	103.76
B3	64.53	C3	90.51

此結果發現到在 28 天以及 56 天強度數據中都有一個比較弱的強度，除了透水混凝土強度的差異度有些大之外，在製作試體時下料時間過長，於搗實方面控制不易，造成混凝土強度方面有所誤差。下圖 5.1 為 28 天及 56 天透水混凝土抗壓強度。

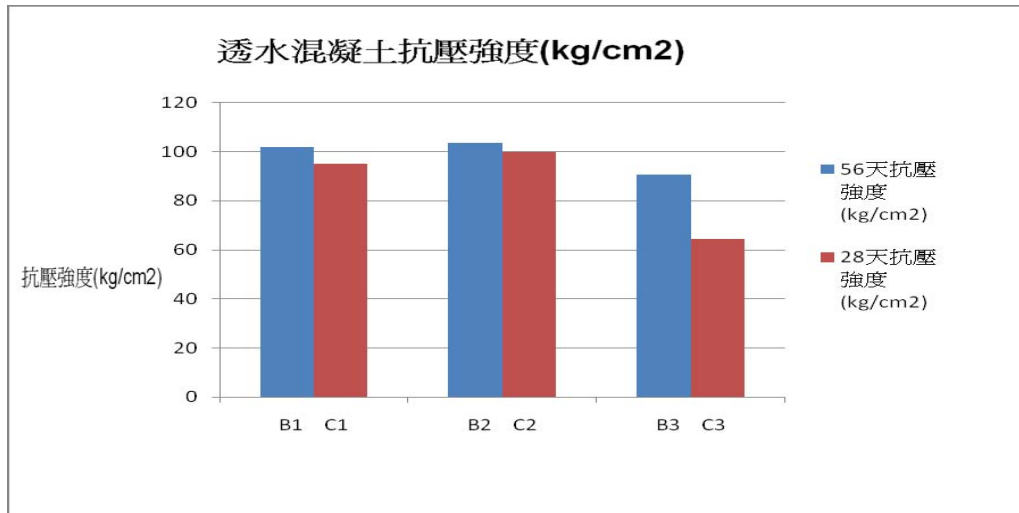


圖 5.1 28 天以及 56 天抗壓強度

5.1.2 透水混凝土抗彎試驗

混凝土抗彎試驗為評估混凝土抵抗拉力強度的另一種方法，試體製作之模具 53cm*15cm*15cm，共製作 6 個試體以供 7 天、28 天、56 天之抗彎試驗使用，試體製作搗實之使用夯錘錘重為 4.5kg 落錘高度為 45cm，分兩層夯實每層夯實 26 下灌置在抗彎模中，最後再以鏟刀刮平，進行養護直至 28 天及 56 天，將 28 天之試體編號為 B1、B2，56 天之試體編號為 C1、C2。抗彎試體大小為 53cm*15cm*15cm，如照片 5-3、5-4 所示。並於預定 28 天與 56 天齡期時，將試體取出至面乾，在根據 ASTM C293 中心點載重法進行抗彎試驗，以每分鐘 8.75~12.25 kgf/cm² 之加載速率加壓於試體，直至試體破壞，記錄最大破壞載重，進而求出試體抗彎強度，試驗抗彎發展情形，如表 5-2、圖 5.2 所示。

表 5-2 抗彎試驗最大應力 (KN)

試體編號	28 天最大壓應力	試體編號	56 天最大壓應力
B1	16.35	C1	9.46
B2	11.94	C2	12.07

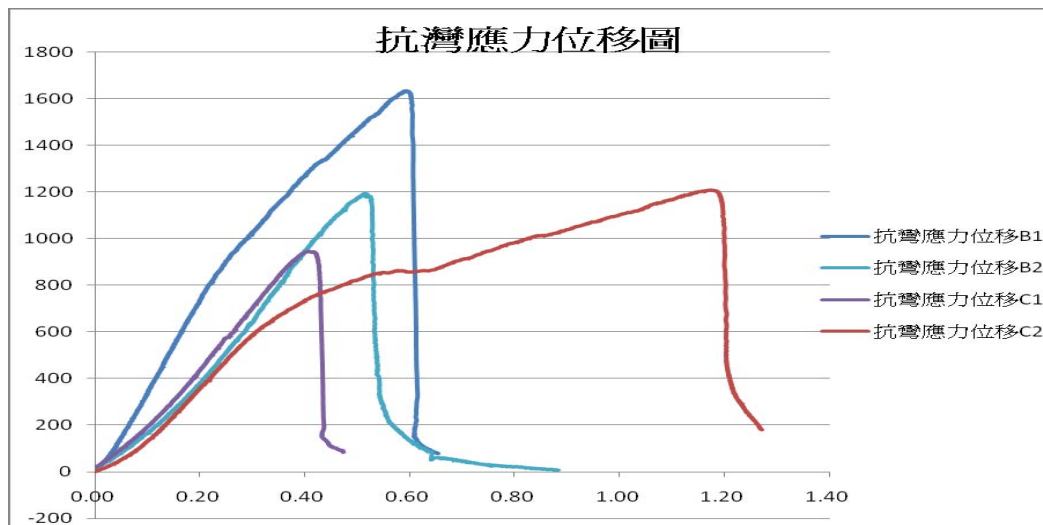
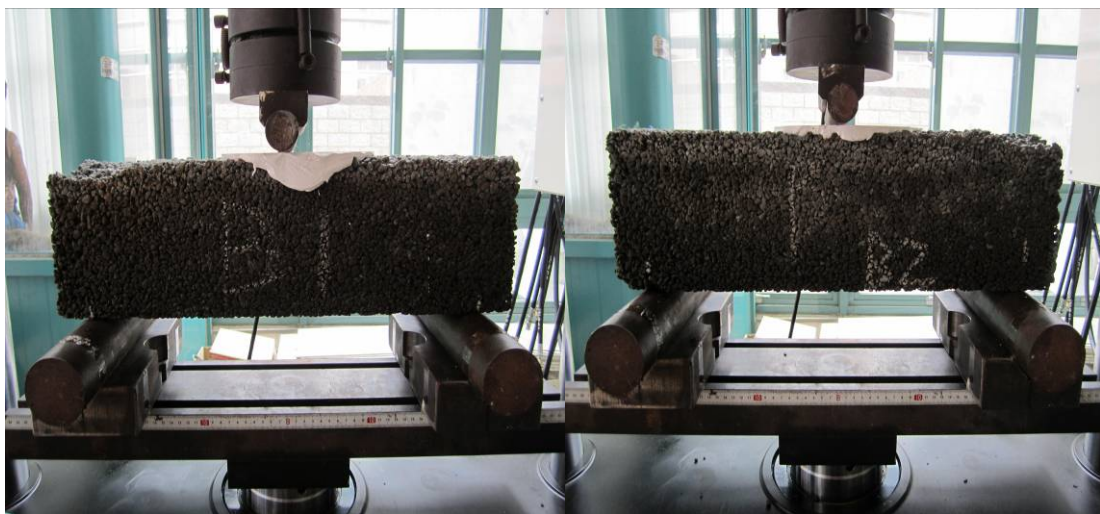
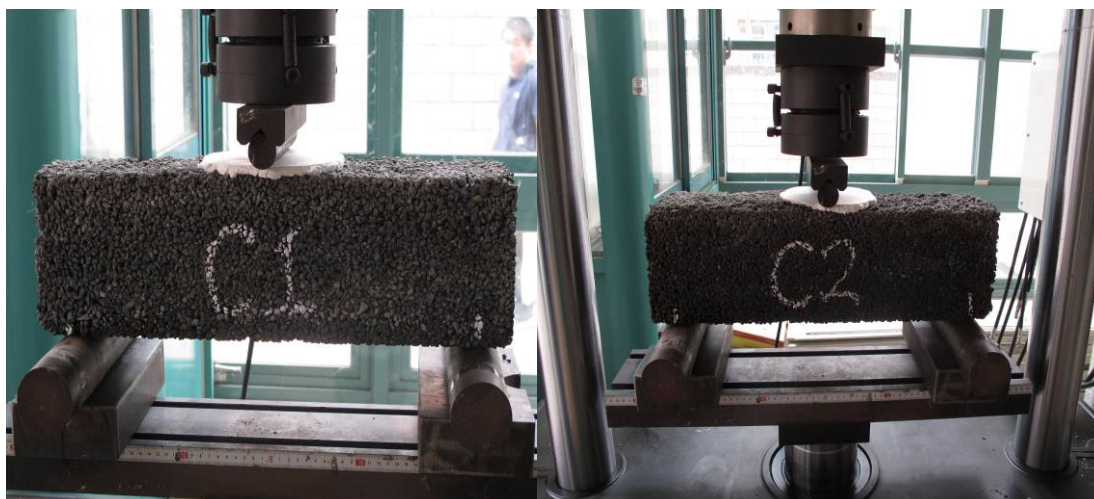


圖 5.2 抗彎應力曲線圖



照片 5.3 28 天透水混凝土試體



照片 5.4 56 天透水混凝土試體

其抗彎強度計算式與結果(表 6.3)如下：

$$\text{抗彎強度 (kgf/cm}^2\text{): } f_r' = \frac{3 PL}{2 bh^2}$$

P: 最大荷重(kgf), L: 跨距(cm), b: 試體寬度(cm),
h: 試體高度 (cm)

表 5-3 28 天及 56 天抗彎強度 (kg/cm²)

試體編號	28 天抗彎強度	試體編號	56 天抗彎強度
B1	55.3	C1	32.0
B2	40.4	C2	40.8

在 28 天之抗彎強度 B1 明顯比 B2 高上許多，而 28 天抗彎強度又比上 56 天抗彎高。由於抗彎試驗試體之強度受到試體之製作、處理、養護、及試驗時之載重方式的影響很大，要完全符合試驗要求非常不易，初步研判可能在製作試體時，所要澆置的透水混凝土有些部分擱置比較久，漿體稍許蒸發，可能造成在其中幾個試體強度出現差異。

5.2 鋪築地點的鋪面特性評估

根據試鋪地點進行鋪面的特性評估，對施作後之鋪面使用紅外線攝影機拍攝其鋪面檢視熱影像圖之溫度變化，以及鋪築透水鋪面之平坦度試驗與反彈錘試驗了解鋪面情況。

5.2.1 現地鋪面紅外線鋪面溫度檢視

本試驗使用的紅外線攝影機為NEC所製造的，型號為TH710如照片5.5所示。其為一非接觸式及高敏感度之紅外線放射溫度計。被測物所放射的紅外線射線被接收，並且以二為非冷卻平面陣列感測器轉換成為一電氣訊號，此類比訊號被放大後再轉換成為數位訊號。最後此數為訊號以彩色或黑白芳是被顯示在螢幕上，此儀器功能在結構設計上非常輕巧，在偵測器、顯示及記憶部分結合為一單元，現場的溫度量測及設備分析測試可以加速進行。



照片 5.5 TH7102 紅外線攝影機

此試驗我們將檢視現地道路試鋪前與施作後，以及施作後 28 天之混凝土溫度情形，我們將紅外線攝影機所拍攝紀錄之熱影像圖使用 MATLAB 程式繪出溫度之等高線，下圖為 9 點 08 分之熱影像圖。

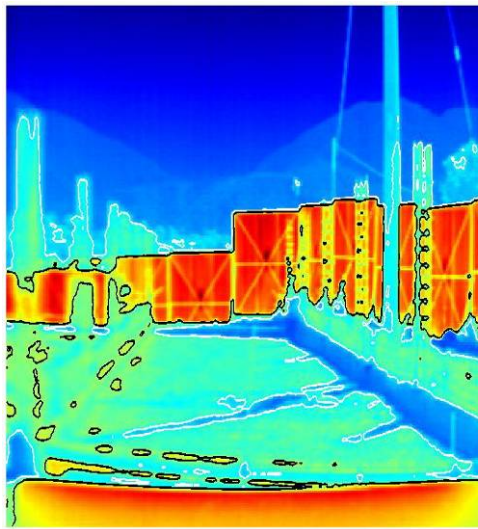


圖 5.3 9 點 08 分熱影像圖

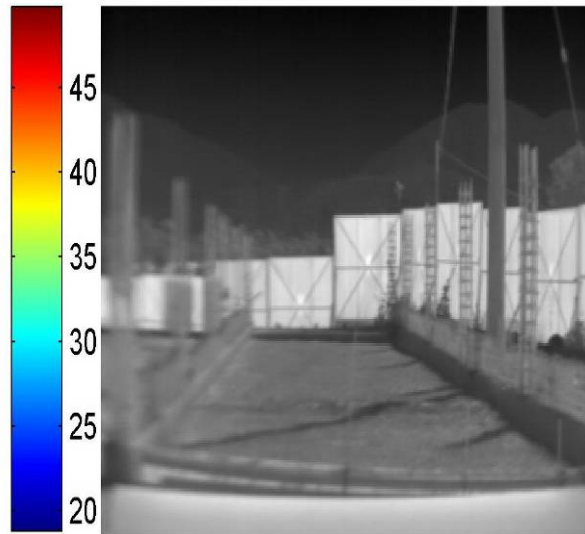


圖 5.4 灰階影像

圖中 5.3 以 MATLAB 繪出之白線範圍溫度為 30°C ，黑線部分為 35°C 。下圖為 11 點 36 分混凝土施作鋪築完成後將紅外線攝影機所拍攝紀錄之熱影像圖使用 MATLAB 程式繪出之等高線。

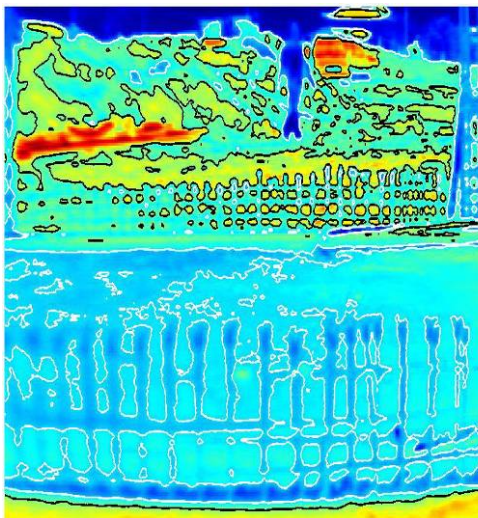


圖 5.5 11 點 36 分熱影像圖

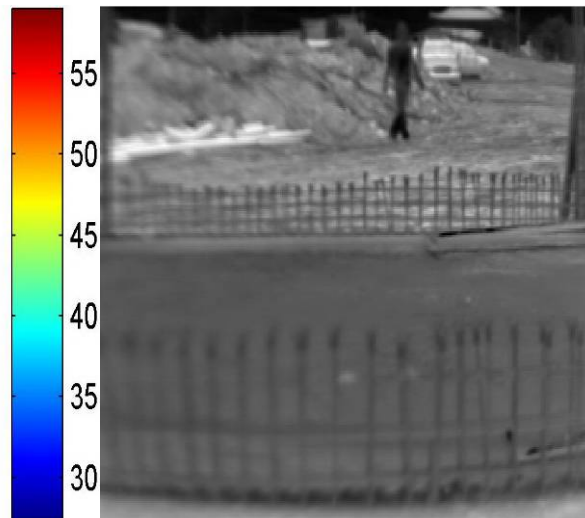


圖 5.6 灰階影像

由程式繪出之結果可以知道在圖中 5.5 白線選取部份之溫度為 38°C ，黑線部分為 43°C 。

我們在從熱影像圖中將施作鋪面之範圍選取 12 個點位觀察範圍內各點之溫度如下圖 5.7、照片 5.6 所示。

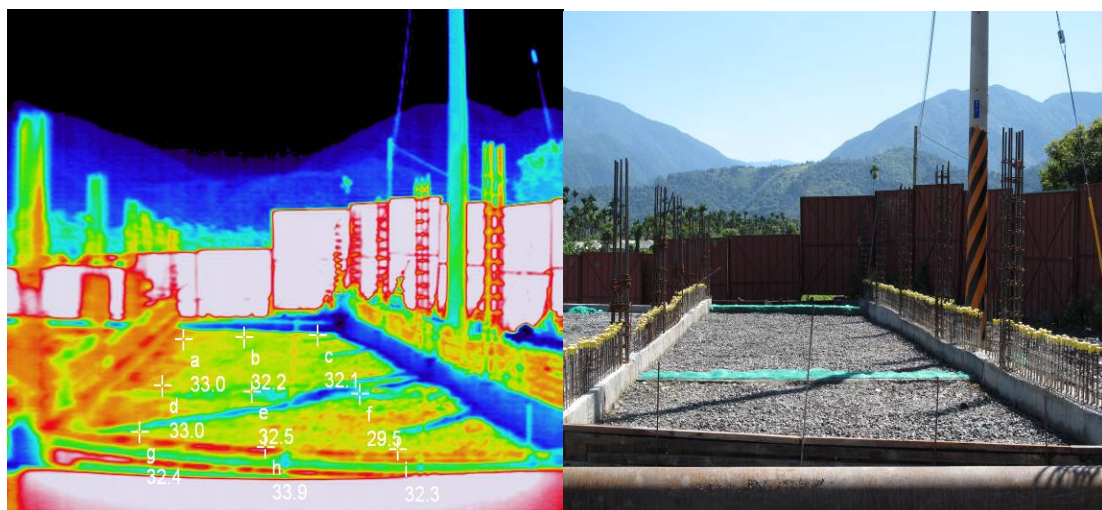


圖 5.7 9 點 08 分熱影像點溫圖 照片 5.6 施作前拍攝實際畫面

下表為各點之溫度：

表 5-4 9 點 08 分施作前各點位溫度表 (°C)

9 點 08 分之溫度點位			
點位	A 點	B 點	C 點
座標	101,156	136,155	178,154
溫度	33.0	32.2	32.1
點位	D 點	E 點	F 點
座標	89,178	140,181	202,182
溫度	33.0	32.5	29.5
點位	G 點	H 點	I 點
座標	76,200	148,207	224,208
溫度	32.4	33.9	32.3

由上表可以看出施作前地表溫度平均 32°C 左右。在透水混凝土施作鋪築完畢之影像中選取 a~e 點位為一般地表之溫度，f 點~o 點為透水鋪面範圍之點位溫度，來檢視其溫度以下圖及照片表示。

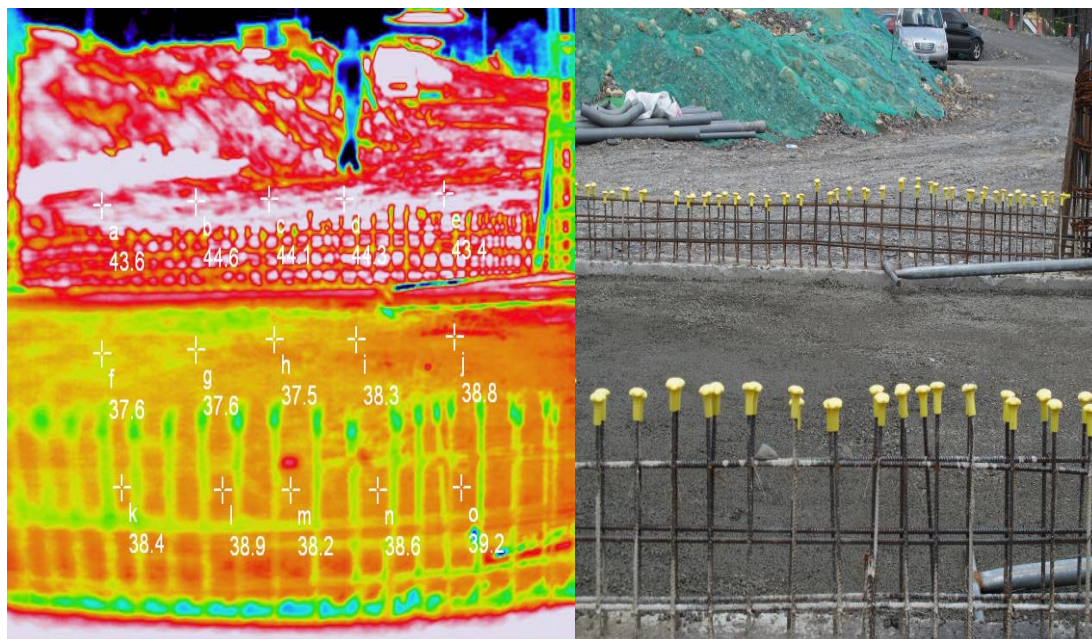


圖 5.8 11 點 36 分熱影像點溫圖 照片 5.7 施作後實際畫面

下表為 11 點 36 分各點位之溫度：

表 5-5 11 點 36 分施作後各點位溫度表 (°C)

11 點 36 分之溫度點位					
點位	A 點	B 點	C 點	D 點	E 點
座標	53,74	106,73	147,72	189,72	245,70
溫度	43.6	44.6	44.1	44.3	43.4
點位	F 點	G 點	H 點	I 點	J 點
座標	53,130	106,129	150,125	196,125	251,124
溫度	37.6	37.6	37.5	38.3	38.8
點位	K 點	L 點	M 點	N 點	O 點
座標	64,181	121,182	159,182	208,182	255,181
溫度	38.4	38.9	38.2	38.6	39.2

透水混凝土在鋪築後，時間已經為 11 點 30 分左右當時正值中午炎熱之氣溫，由拍攝之熱影像圖可以看出週圍地面環境有高達 44 度之高溫，而透水混凝土則施作完畢不久，混凝土還保水份因此溫度並無週圍環境高，與施作前表地溫度相比平均溫度只大概高出 6~8 度

左右。在施作 28 天後，再次拍攝紅外線熱影像圖以了解透水混凝土在齡期 28 天溫度有何變化，以下為 9 月 8 號透水道路拍攝照片。



照片 5.8 9 月 8 號透水道路之拍攝情形

在 10 點 50 分拍攝第一張紅外線熱影像圖，接著每隔 30 分鐘拍攝一次，共取得的了 3 幅熱影像圖。分別為 10 點 50 分、11 點 20 分以及 11 點 50 分，再將這三幅熱影像圖使用 MATLAB 進行影像分析得到以下各圖。



圖 5.9 灰階影像

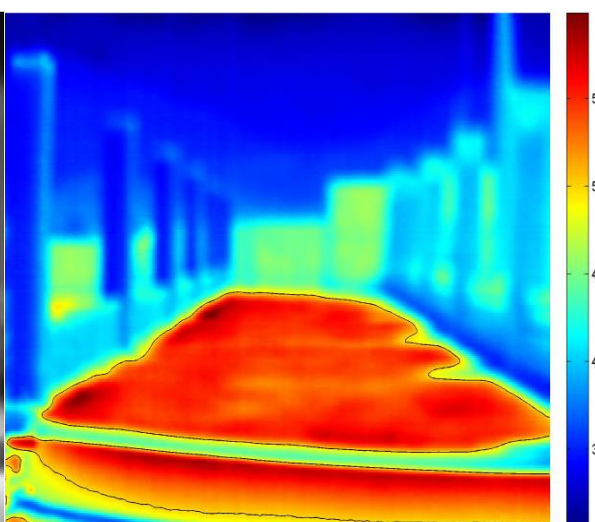


圖 5.10 10 點 50 分熱影像圖

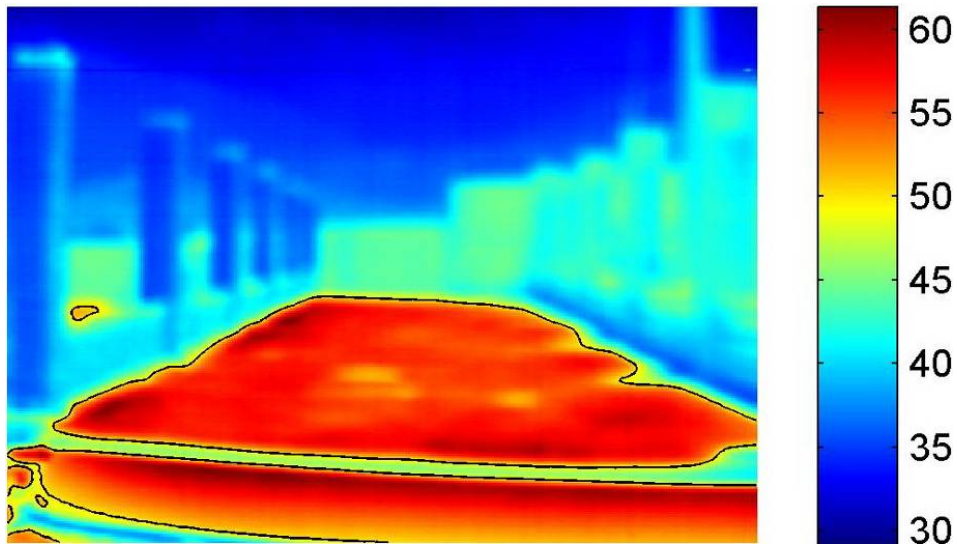


圖 5.11 11 點 20 分熱影像圖

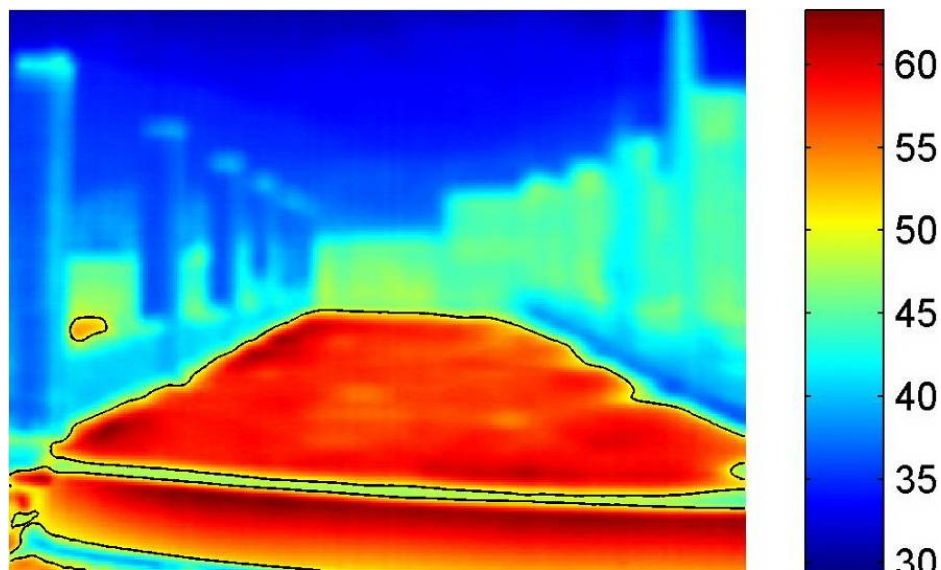


圖 5.12 11 點 50 分熱影像圖

由程式繪出之溫度等高線發現到在這三個相隔 30 分的熱影像圖在黑線部份之範圍溫度為 50 度。

我們在從紅外線攝影機所拍攝之 3 幅熱影像圖選取在透水鋪面範圍內 12 個點位，觀察其各點位之溫度，為下圖所示。

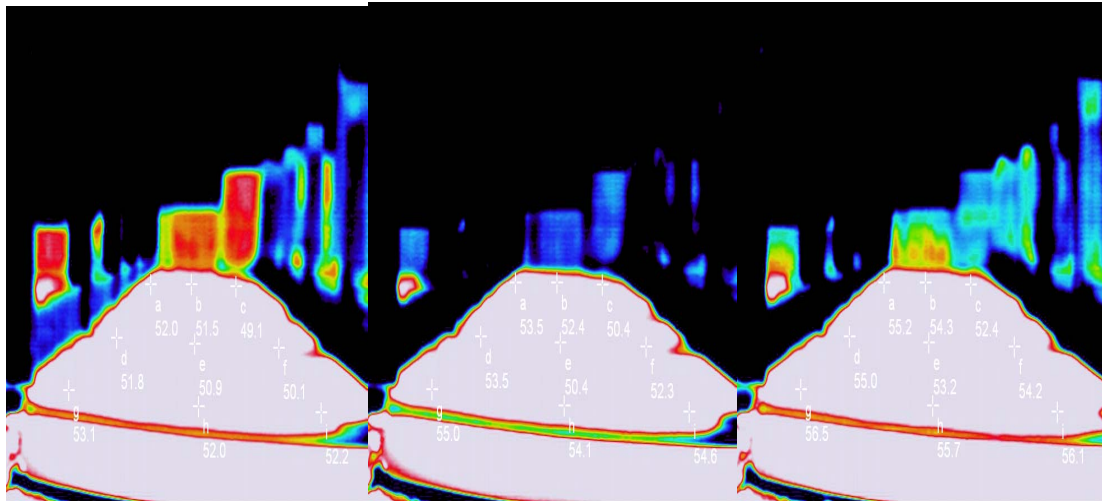


圖 5.13 10 點 50 分 圖 5.14 11 點 20 分 圖 5.15 11 點 50 分

以下表為顯示各點位之溫度：

表 5-6 10 點 50 分各點位溫度表 (°C)

點位	A 點	B 點	C 點
座標	127,134	163,134	202,135
溫度	52.0	51.5	49.1
點位	D 點	E 點	F 點
座標	97,160	166,163	240,165
溫度	51.8	50.9	50.1
點位	G 點	H 點	I 點
座標	55,185	169,193	277,196
溫度	53.1	52.0	52.2

表 5-7 11 點 20 分各點位溫度表(°C)

點位	A 點	B 點	C 點
座標	127,134	163,134	202,135
溫度	53.5	52.4	50.4
點位	D 點	E 點	F 點
座標	97,160	166,163	240,165
溫度	53.5	50.4	52.3
點位	G 點	H 點	I 點
座標	55,185	169,193	277,196
溫度	55.0	54.1	54.6

表 5-8 11 點 50 分各點位溫度表(°C)

點位	A 點	B 點	C 點
座標	127,134	163,134	202,135
溫度	55.2	54.3	52.4
點位	D 點	E 點	F 點
座標	97,160	166,163	240,165
溫度	55.0	53.2	54.2
點位	G 點	H 點	I 點
座標	55,185	169,193	277,196
溫度	56.5	55.7	56.1

從這可以看出在鋪築後 28 天之透水混凝土，溫度明顯的高出剛鋪築時之溫度，溫度約達到 50~55°C。

5.2.2 透水鋪面平坦度試驗

此試驗我們在混凝土試鋪後 28 天之路面以三公尺直規將鋪面道路左、中、右三段以路面寬 4 公尺取中央值為中部段，左右各拉一公尺分為左段及右段如圖 5.16 所示，每段間隔 1.5 公尺取一點高低差值，各取 12 點。

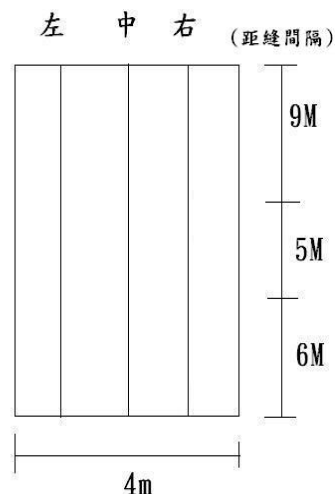


圖 5.16 鋪面道路圖

平坦度之試驗其量測與計算方式如下：

1. 以三公尺直規，沿車道線內80~100公分附近推進。直規照片如5-9所示。



照片 5.9 三公尺直規

2. 每1.5 公尺取一點高低差之值。
 3. 每6~10 點高低差值為一組，分別計算各組高低差值之全距。
 4. 以各組全距計算出一個各組之平均全距（R）。
 5. 以平均全距（R）除以統計係數（d2），即可得平坦度標準差（ σ ）。
- 即 $\sigma = R / d2$ ，其中，統計係數 d2 如所表所示：

表 5-9 平坦度標準差 d2 係數表

每組之點數	d2 之係數值
6	2.53
7	2.70
8	2.85
9	2.94
10	3.08

試驗數據如下表所示：

表 5-10 平坦度試驗數據 (mm)

左		中央		右	
間隔位置	高低差值	間隔位置	高低差值	間隔位置	高低差值
1.5m	-13	1.5m	0	1.5m	3
3m	10	3m	-5	3m	-3
4.5m	1	4.5m	0	4.5m	-7
6m	1	6m	14	6m	5
7.5m	9	7.5m	-4	7.5m	9
9m	-20	9m	-12	9m	-18
10.5m	5	10.5m	5	10.5m	13
12m	-3	12m	5	12m	4
13.5m	3	13.5m	3	13.5m	-8
15m	3	15m	4	15m	-8
16.5m	-1	16.5m	1	16.5m	6
18m	-4	18m	-8	18m	-10

以此數據我們將每段分為兩組共 6 組，每組 6 點，以此計算平坦度標準差如下表：

表 5-11 平坦度標準差 (mm)

左		中央		右	
組數	標準差	組數	標準差	組數	標準差
第一組	-4.74	第一組	-2.77	第一組	-4.35
第二組	1.19	第二組	3.95	第二組	-1.19

依交通部頒佈之公路工程施工規範第三章第六節規定如下：

平整度方面在完成後之路面應具平順、緊密及均勻之表面，以三公尺直規沿平行或垂直於路中心線之方向檢測時，其任何一點高低差，底層或結合層不得超過 ± 0.6 公分，一般公路之面層不得超過 ± 0.6 公分。

交通部公路總局之瀝青混凝土路面施工說明書規定如下：

平坦度檢驗方面瀝青混凝土路面鋪設總厚度達10cm 及以上者，應作平坦度檢驗。完成之瀝青路面，以約200m 為一檢驗單位，用三公尺直規或高低平坦儀按本局公路工程材料手冊規定方法，就平行於路線方向檢驗其平坦度，平坦度標準差不得大於6mm。

目前透水混凝土方面並無相關法規之規定平坦度標準須達到多少，我們就一般公路面層級及瀝青混凝土規範來看，透水混凝土在平坦度方面不如其一般公路與瀝青混凝土鋪面來的容易控制掌握，且透水鋪面在粗糙度方面本就比一般鋪面來的大。透水混凝土在澆置、刮板攤平、滾筒壓密、修飾與工作縫處理應於透水混凝土混合料加水拌合開始計時至一小時內完成，但施作當天在混凝土送料過程中有些延遲，使用之刮板與預計的震動刮板有些出入，因此在攤平方面造成不小的難度。下圖為預計之震動刮板及實際使用之刮板有所不同，使用之刮板似乎無搗實與刮平能力：



照片 5.10 預計中震動刮板與當天實際使用之刮板

在 9 月 08 號施作平坦度試驗後發面表面尚有許多剝落之粒料尚未清理，因此在 10 月 19 號時營造廠商使用山貓裝置鋼刷進行表面的清理，此機器能使用前置鋼刷裝置，將表面粒料脫離之棄料刷除，施作情況如照面 5.11。



照片 5.11 鋪面清理

因此我們在 10 月 26 在一次進行平坦度之試驗來檢視整理過後之鋪面平坦度與未整理是否有太大差異，如下表所示。

表 5-12 平坦度高低差 (mm)

左		中央		右	
間隔位置	高低差值	間隔位置	高低差值	間隔位置	高低差值
1.5m	-5	1.5m	-8	1.5m	-5
3m	1	3m	5	3m	10
4.5m	-4	4.5m	4	4.5m	-3
6m	1	6m	-3	6m	-3
7.5m	4	7.5m	3	7.5m	9
9m	-7	9m	-12	9m	-14
10.5m	13	10.5m	3	10.5m	-7
12m	-14	12m	8	12m	5
13.5m	-5	13.5m	3	13.5m	-1
15m	10	15m	3	15m	-1
16.5m	-7	16.5m	-14	16.5m	-9
18m	-1	18m	3	18m	-1

以此數據我們將每段分為兩組共 6 組，每組 6 點，以此計算平坦度標準差如下表：

表 5-13 平坦度標準差 (mm)

左		中央		右	
組數	標準差	組數	標準差	組數	標準差
第一組	-3.95	第一組	-4.34	第一組	-2.37
第二組	-1.58	第二組	2.37	第二組	-5.53

下圖 5.17 、5.18 為 9 月 8 號及 10 月 26 號之標準差比較。

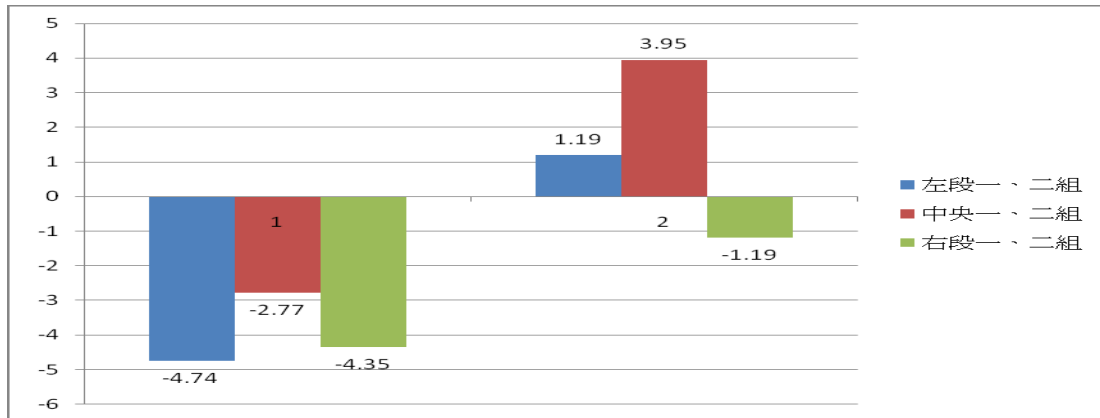


圖 5.17 9 月 8 日平坦度標準差 (mm)

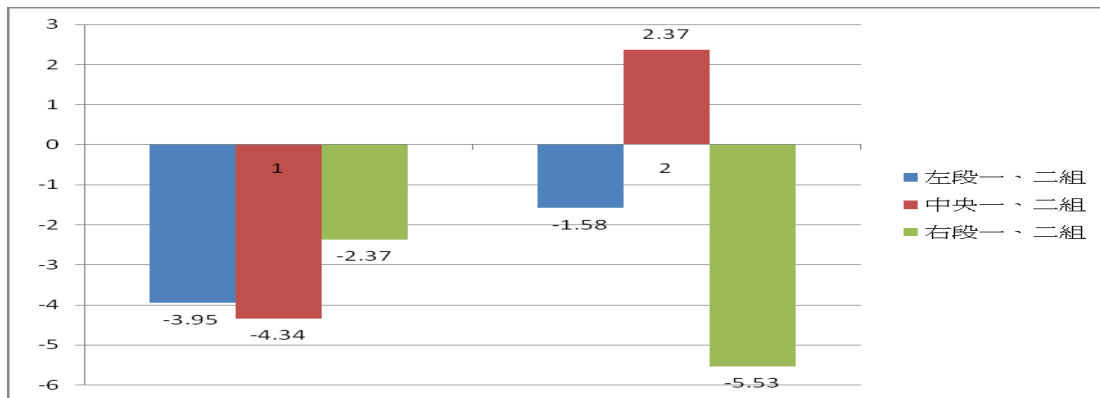


圖 5.18 10 月 8 日平坦度標準差 (mm)

由此我們可以發現到雖然鋪面經過了整理刷除粒料，但是在差異度方面變化依然不大。

5.2.3 非破壞性反彈錘試驗

非破壞性檢測(Nondestructive Testing, NDT)顧名思義是以不會破壞結構體之方式來檢測結構物內部之劣化現象及程度之一種檢測方式，其原理是藉著某種媒介物(Medium)，例如聲、光、電、磁等媒介進行間接之檢測，較其他一般直接檢測方式，例如機械量規、敲擊探傷等更具靈敏與快速的特性。其試驗方法說明如下：

衝錘法：衝錘法(Rebound Hammer Method)又稱為反彈錘法，此法係由瑞士工程師Schmidt於1948年所研發出來的，為目前較常用於測定混凝土強度的表面硬度法，且此法已被列入CNS國家標準中。如照片所示，衝錘本身主要是由圓形外管、活栓、衝錘、衝擊棒、主彈簧與反彈指示器等六部份所組成。



照片 5.12 反彈錘

衝錘法主要是利用衝錘帶動衝擊棒以撞擊混凝土表面，然後利用衝錘的反彈數來求得混凝土表面的硬度，並來推測其抗壓強度。原理是一質量以定速率敲擊混凝土之表面，由此質量回彈之高度決定混凝土表面附近之硬度，進而推測其整體強度與均勻性。

試驗步驟：

(1)選定打擊點位為上章節所施作之平坦度之各點位。

(2)衝錘和打擊面保持垂直施作錘擊。

以下表5-14為反彈錘施作之反彈值：

表 5-14 反彈值數據表

反彈錘試驗					
左		中		右	
點位間隔	反彈值	點位間隔	反彈值	點位間隔	反彈值
0.5m	18	0.5m	14	0.5m	14
1.5m	12	1.5m	14	1.5m	10
3m	12	3m	14	3m	14
4.5m	16	4.5m	16	4.5m	10
6m	10	6m	24	6m	18
7.5m	10	7.5m	26	7.5m	12
9m	12	9m	18	9m	10
10.5m	14	10.5m	10	10.5m	18
12m	16	12m	10	12m	10
13.5m	10	13.5m	16	13.5m	18
15m	12	15m	10	15m	12
16.5m	14	16.5m	12	16.5m	26
18m	10	18m	10	18m	20

以下圖5.19為反彈值與強度對照圖，表5-15為反彈值換算之強度表。

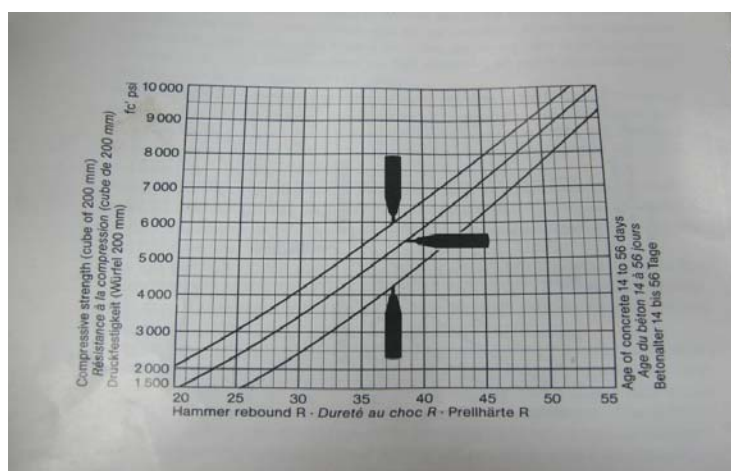


圖 5.19 反彈值與強度對照圖

表 5-15 強度表

反彈錘試驗					
左		中		右	
間隔位置	強度(psi)	間隔位置	強度(psi)	間隔位置	強度(psi)
0.5m	1700	0.5m	900	0.5m	900
1.5m	500	1.5m	900	1.5m	500
3m	500	3m	900	3m	900
4.5m	1300	4.5m	1300	4.5m	500
6m	100	6m	2900	6m	1700
7.5m	100	7.5m	3300	7.5m	500
9m	500	9m	1700	9m	100
10.5m	900	10.5m	100	10.5m	1700
12m	1300	12m	100	12m	100
13.5m	100	13.5m	16	13.5m	1700
15m	500	15m	100	15m	500
16.5m	900	16.5m	500	16.5m	3300
18m	100	18m	100	18m	2100

此試驗結果發現到有些區域在的數值來看，明顯是偏低的，會造成這樣的情結果應該是在試驗表面光滑度，對試驗結果的正確性有很大的影響，當在透水混凝土這種粗糙的表面進行試驗時，衝擊棒端會對混凝土表面產生過多的擊碎作用，導致反彈係數變小。

衝錘與試體表面間之夾角會導致估算混凝土強度時的誤差，正確的試驗方法是衝錘與試體表面應為垂直，但實際執行時，或多或少會有點偏差，而導致誤差。此檢測結果僅可作為相對強度的均勻性參考，是大面積混凝土快速初步判斷其品質之方法。

5.3 現地透水成效評估

在施作地點試鋪透水混凝土鋪面養護完成後，進行現地的透水性試驗。

5.3.1 現場透水量試驗

現場透水量試驗方法原使用於柔性鋪面透水瀝青混凝土現地透水性能力評估，如今首次使用於剛性鋪面透水混凝土現地透水性能力評估，其試驗目的、說明、設備與方法如下：

- (1)目的：主要作為排水性鋪裝之透水性能力評估。
- (2)適用範圍：主要作為排水性鋪裝之透水性能力評估實施，適用於現場。
- (3)試驗器具：
 - (a)現場透水試驗器如照片 5.13 所示。



照片 5.13 現場透水試驗儀器

- (b)油性黏土、碼錶(可測量到 0.1 秒單位)、裝水容器、抹布、水。
- (4)試驗方法：
 - (a)清除鋪裝路面的垃圾等。
 - (b)將現場透水試驗器底版外周的底面附著上長直徑約 1cm 繩狀(長度 50cm 左右)的油性黏土。接著將試器壓著在路面上，避免油性黏土部份會漏水後，在底版上放上圈型金屬環的重量。此時黏土多的話，黏土會跑到內側部，使透水面積變小，請注意。

(c)現場透水試驗器玻璃圓筒部上端 100 的位置打上 X1 的記號，從 X1 至 500ml 的位置打上 X2 記號。

(d)關掉閥門，將水注入到圓筒部上端。

(e)一次將閥門全打開，用碼錶計算圓筒部內水位從 X1 降到 X2 的經過時間(秒)，記錄下來。

(f)合計(d)，(e)的作業，重覆進行 3 次。另各測定隔 1 分鐘測定之。

(5)計算方法：

(a)以秒單位算出 3 次的平均時間。此平均時間為讓水 400ml 流下的時間。

(b)由算出的平均時間算出每 15 秒的流下水量，此稱為透水量 (ml/15 秒)。

5.3.2 現地透水試驗結果

此試驗我們將現地鋪面以距縫來分為 3 段，分別為第一段 9 公尺為 A 段，第二段 5 公尺為 B 段，第三段 6 公尺處為 C 段，每段取 4 個點來施作現地透水試驗如下圖所示。

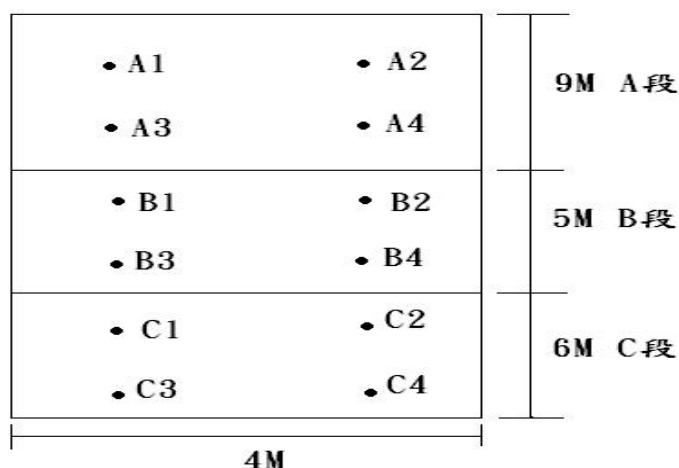


圖 5.20 施測點位圖

以下照片為現地透水試驗情形：



照片 5.14 現地透水試驗水位下降前



照片 5.15 現地透水試驗水位下降後

試驗結果如下表所示。

表 5-16 現地透水道路透水試驗 (sec)

段位	段位編號	秒數 (400ml/sec)	段位編號	秒數 (400ml/sec)
A 段	A1 點	6.2s	A2 點	7.4s
	A3 點	5.8s	A4 點	5.4s
B 段	B1 點	5.6s	B2 點	5.6s
	B3 點	6.4s	B4 點	5.7s
C 段	C1 點	5.7s	C2 點	5.9s
	C3 點	5.7s	C4 點	5.9s

以日本排水性鋪裝技術指針之現場透水量試驗規範(400ml/15sec)來看，此次試鋪之透水混凝土道路皆在 15 秒以內，透水效果相當良好。現地透水量結果如下表所示。

表 5-17 現地透水道路透水量

段位	段位編號	透水量 (ml/15sec)	段位編號	透水量 (ml/15sec)
A 段	A1 點	968	A2 點	811
	A3 點	1034	A4 點	1111
B 段	B1 點	1071	B2 點	1071
	B3 點	938	B4 點	1053
C 段	C1 點	1053	C2 點	1017
	C3 點	1053	C4 點	1017

混凝土的齡期已達 28 天，其中在 A 段有一測點現場透水量 811ml/15sec 最低，其他現場透水量數據都很集中與平均接近 1,000ml/15sec 或超過上值，藉由現地透水量試驗驗證試鋪道路透水平均超過 1,000ml/15sec 試鋪透水混凝土其滲透性相當良好，均可滿足工地透水試驗標準 400ml/15sec 以上範圍要求。

5.3.3 目視鋪面大量透水驗證試驗

目視鋪面大量透水驗證試驗是於現地道路鋪面上，使用混凝土預拌車之預拌桶裝滿水，水裝運容量約 9 立方公尺，再灌水至透水混凝土鋪面上，透水驗證時間約 6 分鐘；即其灌水流量約每分鐘 1.5 立方公尺，不停地澆置在透水鋪面上，目視大量水是否能夠在短時間內完全滲透進透水混凝土鋪面，上次現地自來水水管透水能力試驗其最大水流量約為每分鐘 20 公升，本次現地大量透水驗證試驗其用水量與流量約為上次現地自來水水管透水能力試驗之 75 倍；預拌車裝滿水灌水至透水混凝土鋪面之情形如照片 5.16 所示，結果發現 9 立方公尺的水幾乎完全可以滲入鋪面之中，在場所有人員均讚嘆此鋪面透水

效果優異，值得推廣與觀摩，此結果顯示本道路鋪面可以通過短時間內累積極大的暴雨,或豪雨,或暴風雨之透水驗證。



照片 5.16 預拌車裝滿水灌水至透水混凝土鋪面之情形

5.4 小結

這章節中可以了解到在室驗室內材料評估中，可以得到在抗壓強度方面強度稍嫌不足，而抗彎強度方面差異性稍大。

而在鋪面特性方面來看可以了解到透水混凝土在受熱方面之情形，在平坦度方面透水混凝土表面較為粗糙，一般法規可能不太適用於透水性鋪面，而在反彈值試驗可以看出在鋪面強度方面有些部分較為高，部分較低。最後以現地透水性試驗來看，不管是現場透水試驗或是目視透水試驗，都顯現出非常良好的透水性。

第六章 實驗室模擬透水混凝土應用在海堤對於波浪溯升之評估

本試驗主要研究針對透水混凝土與普通（不透水）混凝土製成的兩種混凝土海堤進行實驗室內的溯升模擬試驗，比較相互的溯升現象。本試驗試體坡度是根據台中港海堤坡度比例製作，尺寸為長 40 cm×底 30 cm×高 20 cm 三角形（坡度比例 高=1：底=1.5）的海堤試體；混凝土試體灌置完成 24 小時後拆模，接著以一天澆三次水，並以塑膠桶倒蓋以防水份蒸發，當養護至 28 天齡期後才進行溯升試驗。

6.1 試驗材料及配比

本研究試驗之試體材料有兩種，分別為一般的混凝土與透水混凝土，經由實驗測試，比較溯升在不同材料是否有差異。混凝土配比如表 5.1 所示，混凝土成份如下所示：

表 6-1 混凝土之配比

Kg/m ³	普通混凝土	透水混凝土
水泥(Kg)	342	432
矽灰(Kg)	0	48
細粒料(Kg)	785	0
粗粒料(Kg)	926	1440
水(Kg)	222	106
強塑劑	1%	1%

1. 水泥

本試驗採用台灣水泥公司所生產的第Ⅱ型波特蘭水泥（中度抗硫酸鹽水泥），如照片 6.1 所示，其具有抵抗中等中度抗硫酸鹽

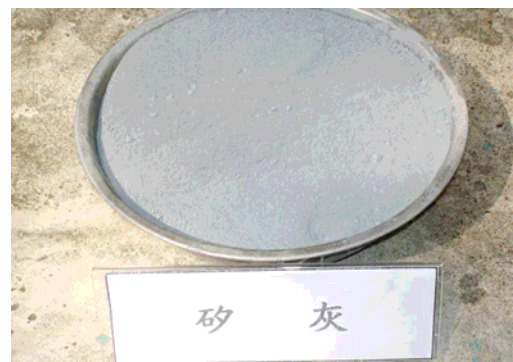
之侵蝕，適合於巨積混凝土構造物；其化學成分與性質如表 6-2 所示。

表 6-2 水泥成分與性質

化學成分	I 型普通水泥	II 型中度抗硫水泥
矽酸三鈣 (C_3S)	55	50
矽酸二鈣 (C_2S)	19	24
鋁酸三鈣 (C_3A)	10	4.9
鋁鐵酸四鈣 (C_4AF)	7	12.2
石膏 (CSH_2)	5	5
細度 (Blaine m^2/kg)	370	330
抗壓強度 (1 天之 kgf/cm^2)	70	60
水化熱 (7 天之 J/G)	370	250
用途	無需具特殊性質之一般建築用	暴露於中等程度之硫化作用或需要中度水化熱之結構物



照片 6.1 水泥



照片 6.2 矽灰

2. 矽灰

採用三林貿易公司所生產之矽灰，照片 6-2 所示，粒徑大小為 $0.1 \sim 1 \mu m$ ，其化學成分與物理性質如表 6-3 與表 6-4 所示，主要成分為二氧化矽 (SiO_2)，約佔 90 %。

表 6-3 矽灰之化學成分

化學成分	最大含量 (%)
SiO ₂	90
Fe ₂ O ₃	1
Al ₂ O ₃	1
CaO	0.4
MgO	1
C	2
L.O.I	3
其他	1.6

表 6-4 矽灰之物理性質

比表面積 (m ² /g)	18~20
比重(Specific gravity)	2.2
單位重 (kg/m ³)	250~400
細度 (ave. dia) (μm)	0.1~0.2
過篩百分比, 45 μm (%)	90~100
顆粒狀	球狀
形狀	非定型的

3. 細粒料

本實驗所使用之細粒料細度模數 FM=2.67，照片 6-3 所示，依據 CNS486 粒料之篩分析試驗，細粒料之篩分析結果如表 6-5，粗細粒料之基本性質如表 6-7 所示。

表 6-5 細粒料篩分析結果

篩號	(1)留篩量 (g)	(2)=(1)/W 留篩率(%)	(3)=(2) 累積留篩率(%)	(4)=100-(3) 累積通過率(%)
NO.4 (4.75mm)	0	0	0	100
NO.8 (2.36mm)	280	14	14	86
NO.16 (1.18mm)	337	16.85	30.85	69.15
NO.30 (0.6mm)	344	17.2	48.05	51.95
NO.50 (0.3mm)	559	27.95	76	24
NO.100 (0.15mm)	432	21.6	97.6	2.4
底盤	48	2.4	100	0
試樣重 (W) = 2000g				
FM=2.67				



照片 6.3 細粒料



照片 6.4 粗粒料

表 6-6 粗粒料篩分析結果

篩號	(1)留篩量 (g)	(2)=(1)/W 留篩率(%)	(3)=(2) 累積留篩率(%)	(4)=100-(3) 累積通過率(%)
3/2" (37.5mm)	0	0	0	100
3/4" (19mm)	0	0	0	100
3/8" (9.5mm)	0	0	0	100
NO.4 (4.75mm)	1820	91	91	9
NO.8 (2.36mm)	120	6	97	3
NO.16 (1.18mm)	40	2	99	1
底盤	20	1	100	0
試樣重 (W) = 2000g				
NO.32 至 NO.100 細篩部份共 3 個				
FM=5.87				

4. 粗粒料

本實驗所使用之粗粒料最大粒徑為 $D_{max}=4.75\text{mm}$ ，照片 6-4 所示，依據 CNS486 粒料之篩分析試驗，粗粒料之篩分析結果如表 6-6，粗細粒料之基本性質如表 6-7 所示。

表 6-7 粗細粒料之基本性質

種類	粗粒料	細粒料
最大粒徑 (mm)	4.75	2.36
SSD 比重	2.64	2.35
SSD 吸水率 (%)	0.81	1.93
細度模數	5.87	2.67

5. 水

本試驗所使用之拌和水為一般的自來水。

6. 強塑劑

採用日本 TAKEMOTO 竹本油脂進口之強塑劑，其型號為 CHUPOL50SSP104，固體成分為 30 %，具有減水之效能，主要化學成分為丙烯酸接枝聚合陰離子型高分子介面活性劑，比重為 1.07~1.13，如照片 6-5 所示。



照片 6.5 強塑劑

6.2 試驗儀器與設備

本試驗所採用的儀器及設備如下：

1. 土石流水槽儀

水槽之裝置主要可分為水槽主體及堆積盤等二部分，各部分之組成與功用說明如下：

(1) 水槽主體：

水槽寬 40 cm，高 40 cm，長 600 cm，實際流動長度約為 420 cm，以不鏽鋼板為底部，兩側為透明玻璃板；水槽之傾角可自由調整，動力由電動馬達供給，角度變化為 0~32 度，水槽主體如照片 6-6 所示。



照片 6.6 土石流水道主體



照片 6.7 土石流儀堆積盤

(b)堆積盤：

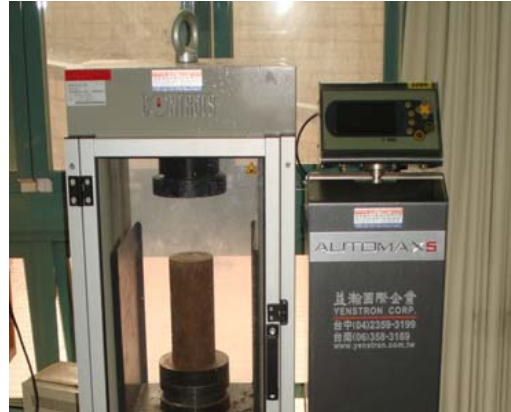
以長320 cm×寬200 cm×深10 cm 之不鏽鋼製成，堆積盤尾端有一直徑15 cm 之開口，如照片6-7 所示。

2. 玻璃水道

本試驗器材委託久碇有限公司製造，利用強化玻璃製作尺寸為30cm×40cm×45cm 之空心玻璃水道，如照片 6-9 所示。



照片 6.9 玻璃水道



照片 6.10 200 頓抗壓試驗機

3. 200 頓抗壓試驗機

用來測試混凝土的抗壓強度，如照片 6-10 所示。

4. 鼓式拌和機

拌和容量為 0.1 m^3 ，用於拌和混凝土如照片 5-11 所示。



照片 6.11 鼓式拌和機



照片 6.12 大型烘箱

5. 烘箱

本試驗採用大型烘箱進行熱養護超高性能混凝土試體，如照片 6-12 所示。

6. 試體模具

本試驗模具委託晉易營造有限公司製造，利用防水甲板製作尺寸為 $100\text{cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 之三角形的海堤模形模具、 $100\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 之三角形的海堤模形模具、 $100\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 之三角形的海堤模形模具與 $100\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 之矩形的海堤堤頂模形模具，如照片 6-13 所示。



照片 6.13 試體模具



照片 6.14 搖篩機

7. 其他設備

電子磅秤、搖篩機、…等，搖篩機如照片 6-14 所示。

6.3 試體製作與養護

6.3.1 試體規劃

本研究試體澆置的材料分別為普通混凝土（對照組）與透水混凝土兩種。試驗試體之規劃如表 6-8 所示。

表 6-8 試驗試體規劃表

試驗項目		試體尺寸(cm)	製作數目(個)
普通 混凝土	抗壓試驗	$\Phi 10 \times 20$	3
	抗彎試驗	$10 \times 10 \times 35$	3
	溯升試驗	高 20×底 20×長 40 三角體	2
		高 20×底 30×長 40 三角體	2
		高 20×底 40×長 40 三角體	2
		高 20×底 10×長 40	2
透水 混凝土	抗壓試驗	$\Phi 10 \times 20$	3
	抗彎試驗	$10 \times 10 \times 35$	3
	溯升試驗	高 20×底 20×長 40 三角體	2
		高 20×底 30×長 40 三角體	2
		高 20×底 40×長 40 三角體	2
		高 20×底 10×長 40	2

6.3.2 試體製作

透水混凝土是由漿體將粗粒料包裹組成，其配比中沒有添加細粒料且及具有低水膠比之特性；因此，在拌合時應特別注意材料是否均勻攪拌，且須特別注意強塑劑加入的順序。本試驗混凝土之拌合流程如下（如圖 6.1 所示）：

- Step1. 將所有拌合材料加入（水與強塑劑除外）拌合機內乾拌約1 分鐘，待拌合材料混合後，其顏色呈均勻分佈。
- Step2. 加入各1/2 的水及強塑劑拌和，拌和時間約1分30 秒。
- Step3. 加入另一半的水、強塑劑及消泡劑拌和，拌和時間約2分鐘。
- Step4. 當拌和完畢，混凝土隨即分二層裝入試體模，並以搗棒充分夯實（透水混凝土不適用搗棒夯實，本研究是採用表面滾壓的方式壓實），灌注完成後在試體表面以塑膠帆布覆蓋，以避免表面水份蒸散而產生裂縫。

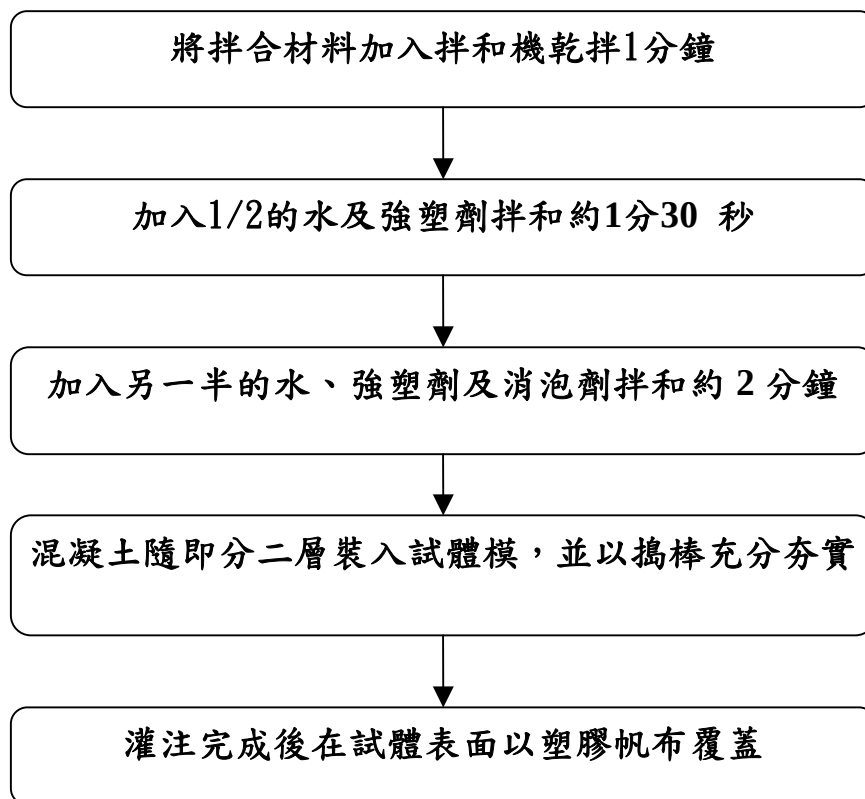


圖 6.1 試體製作流程圖

其中圖6.2 所示為透水混凝土不同含量是否垂流行為：(a)太少水，(b)適量水，(c)太多水，以上為美國國家透水混凝土標準規範。



(a)太少水

(b)適量水

(c)太多水

圖 6.2 透水混凝土不同含水量是否垂流行為【32】

6.3.3 試體養護

本實驗混凝土試體灌置完成 24 小時後拆模，接著以一天澆三次水，再以大型膠桶倒蓋防止陽光直曬，造成水份快速蒸發。

6.4 試驗方法與步驟

6.4.1 抗壓試驗

混凝土結構設計中，抗壓強度是檢驗混凝土品質優劣最重要之依據。抗壓試驗機加載的速率及時間與試體的含水率皆會影響混凝土抗壓強度。若加載速率過快且時間過短，所測得的強度會比正常高出約 15 %；若加載時間過長，所測得的強度則會比正常低約 30 %。因此為避免加載時間過長，所以本研究抗壓試驗之加載速率為每秒 46~72 MPa，抗壓試體大小為 $\Phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ，測試時用石膏蓋平試體表面，以保持試體表面的平整，避免受力不平均。透水混凝土之抗壓試驗，其計算式如下：

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2} \dots\dots\dots(7-1)$$

其中 σ ：材料抗壓強度（MPa）

P：最大荷重（kgf）

r：試體半徑（cm）

6.4.2 抗彎試驗

混凝土抗彎試驗為評估混凝土抵抗拉力強度的另一種方法，抗彎試體大小為 10cm×10cm×35cm，試體在拌合後分三層灌置在抗彎模中，經 24 小時拆模養護，於預定 7 與 28 天齡期時，將試體取出至面乾，在根據 ASTM C293-79 或 CNS 1234 中心點載重法進行抗彎試驗，以每分鐘 8.75~12.25 kgf/cm² 之加載速率加壓於試體，直至試體破壞，記錄最大破壞載重，其破裂模數計算式如下：

$$f_r' = \frac{3PL}{2bh^2} \dots\dots\dots(7-2)$$

其中 f_r' ：破裂模數 (MPa)

P：最大荷重 (kgf)

L：跨距 (cm)

b：試體寬度 (cm)

h：試體高度 (cm)

6.4.3 溯升試驗

試驗開始前，先將訂製的強化玻璃水道裝置於土石流水槽試驗儀前，藉此延伸水道長度，並架設攝影機以輔助紀錄溯升高。固定土石流水槽傾斜角度為 20°，藉由重力來產生波浪，水量固定 25 公升，流速為 3m/sec；變數為使用 2 種材料（透水與普通混凝土）分別製作三種坡度（1：1，1：1.5，1：2 三種坡度）的海堤，其所有組合的條件如表 6-9 所示。其試驗方法與步驟簡述如下（如圖 6.3、圖 6.4 與照片 6-15 所示）：

Step1. 將海堤試體放置於距離玻璃水道起點（土石流水槽與玻璃水道接點處）60cm 處（以試體前端為基準）。

Step2. 在水道內進水至試體前端水位 4.3 cm 處。

Step3. 於土石流水槽儀上方的拌合鼓內注入 25 公升的清水。

Step4. 以固定的速度將拌合鼓內的水倒入土石流水槽儀的水道內。

Step5. 觀察玻璃水道內的波浪沖擊到試體時所產生的溯升高。

Step6. 重複 Step2.至 Step5.的作業即可取得一組數據，進行 3 次。

量測方式採用攝影機架設於側方拍攝試體溯升情形，以等比例網格圖貼於玻璃水道側邊當拍攝之背景，再以電腦將拍攝之影像以 1/30sec 的影像圖片量測溯升的高度。

表 6-9 溯升試體模型組合表

編號	試體材質	試體尺寸（三角體）（cm）			
		長	寬	高	坡度
1	透水混凝土	40	20	20	1：1
2	普通混凝土	40	20	20	1：1
3	透水混凝土	40	30	20	1：1.5
4	普通混凝土	40	30	20	1：1.5
5	透水混凝土	40	40	20	1：2
6	普通混凝土	40	40	20	1：2
7	透水混凝土	40	10	20	1：0
8	普通混凝土	40	10	20	1：0

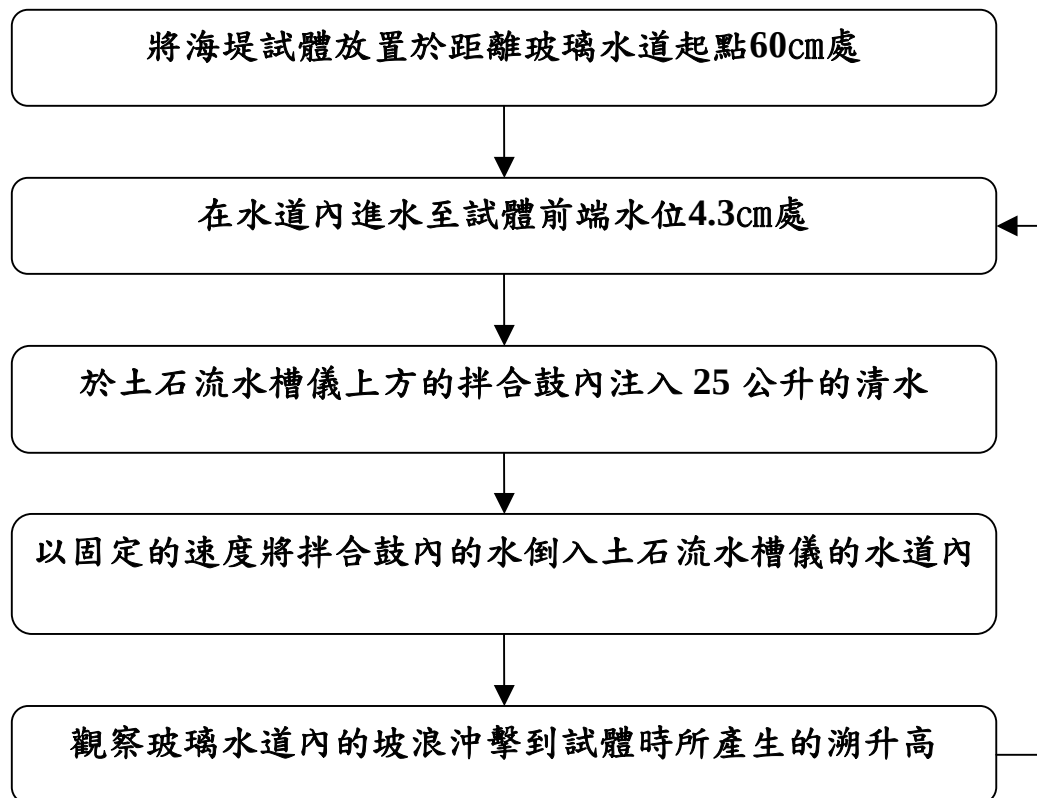


圖 6.3 溯升試驗流程圖

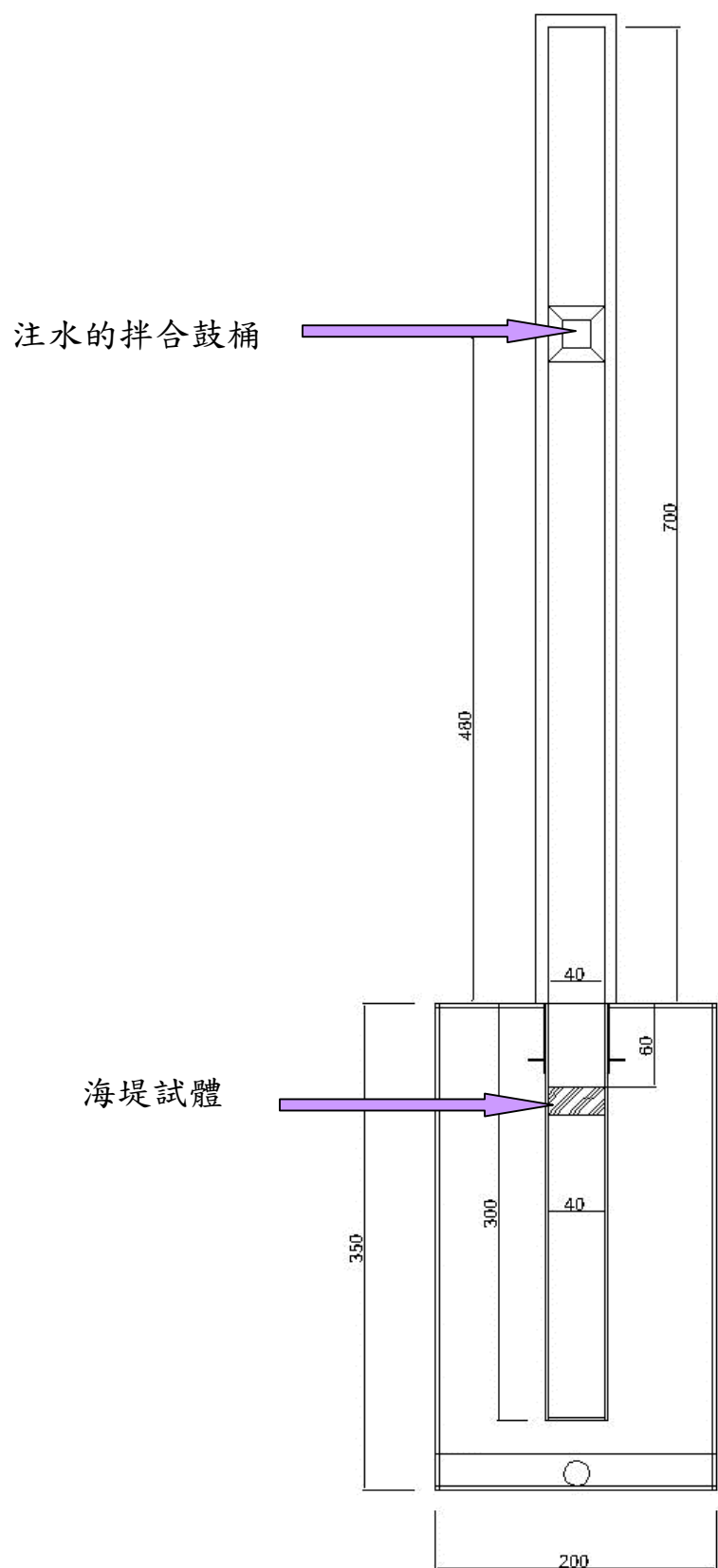


圖 6.4 溯升試驗示意圖



照片 6.15 溯升試驗儀器架設法

6.5 基本力學試驗

灌置完成拆模後，試體置於飽和石灰水中養護等待齡期達到再進行測試，分別有單位重與 28 天抗壓強度二種，藉此比較不同混凝土之差異。

6.5.1 混凝土單位重試驗

混凝土單位重試驗於拌合二種配比混凝土時，進行單位重試驗，試驗數據如表 5-10 所示，由表可以看出透水混凝土單位重未超過 2000 kg/m^3 ，每立方較普通混凝土少 381 kg 以上。

表 6-10 混凝土單位重試驗

混凝土	普通混凝土	透水混凝土
單位重(kg/m^3)	2276	1895

6.5.2 抗壓強度

混凝土試體灌置完成24小時後拆模，接著以一天澆三次水，以塑膠桶倒蓋以防水份蒸發，表6-2 為28天齡期混凝土抗壓強度與其變異係數情形，由二種配比各有3個試體來看，透水混凝土抗壓強度變異係數偏高，試體個別值變異大，且透水混凝土平均強度達到90.4 kgf/cm²，普通混凝土平均強度達356.6 kgf/cm²與馮乃謙⁽⁴⁷⁾文中提到的防波堤混凝土強度相近，如圖6.4 所示。

表 6-11 混凝土 28 天齡期抗壓強度試驗(MPa)

配比	抗壓強度			平均值	變異係數
普通混凝土	3524	3695	3638	3619	2%
透水混凝土	1356	718	678	918	34%

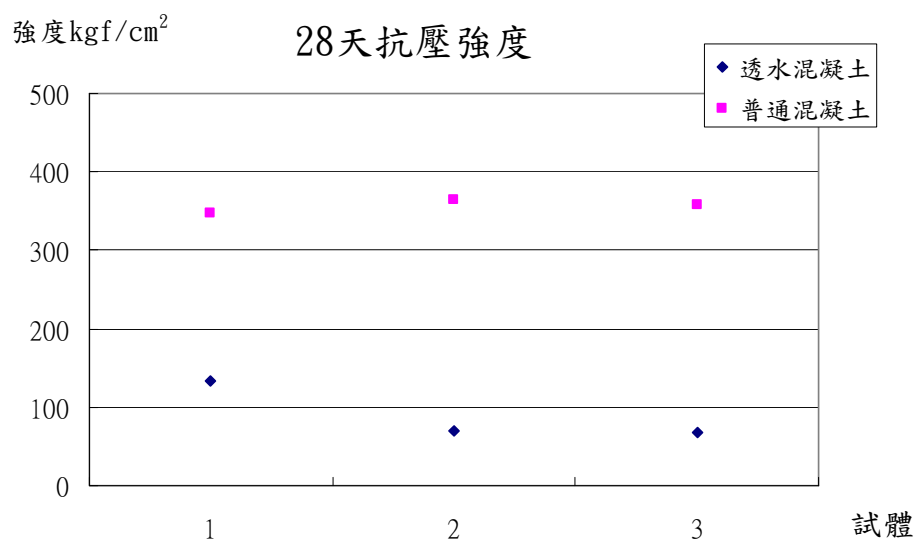
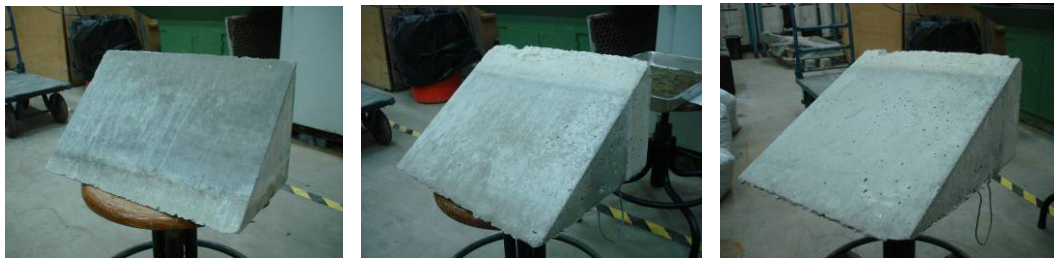


圖 6.5 28 天抗壓強度

6.6 溯升試驗成果

本試驗試體坡度是根據台中港海堤坡度比例為例，製作三種不同坡度比例，尺寸為長 40cm×底 20 cm×高 20 cm 三角體（坡度比例 高=1：底=1）、長 40 cm×底 30 cm×高 20 cm 三角體（坡度比例 高=1：底=1.5）與長 40 cm×底 40 cm×高 20 cm 三角體（坡度比例 高=1：底=2）的三種坡度海堤試體進行溯升的試驗，如照片 6-16 ~照片 6-18 所示，材料分別採用普通混凝土與透水混凝土二種灌置試體，混凝土試體灌置完成 24 小時後拆模，接著以一天澆三次水，並以塑膠桶倒蓋以防水份蒸發，當養護至 28 天齡期後才進行溯升試驗，其試驗結果如表 6-5 至表 6-8 所示。。



照片 6.16 普通混凝土海堤模型：(a)坡度 1:1，(b)坡度 1:1.5，
(c) 坡度 1:2



照片 6.17 透水混凝土海堤模型：(a)坡度 1:1，(b)坡度 1:1.5，
(c) 坡度 1:2



照片 6.18 混凝土海堤模型：(a)普通混凝土堤頂部分，
(b)透水混凝土堤頂部分，(c)海堤試體組合的樣式

6.6.1 試驗條件

溯升試驗所設定之不同流量所產生之溯升高度試驗結果如表 6-12 所顯示，最高為流量 8.3 L/sec(水量 25L)其溯升高度為 25.7 cm，第二為流量 6.7 L/sec(水量 20L)其溯升高度為 19.5cm，最後為流量 5.0 L/sec(水量 15L)其溯升高度為 16.7 cm，如圖 6.5 所示，可看出流量越大對溯升高度的影響越大，為了使兩種混凝土的溯升高度差異表現較為明顯，因此試驗流量條件採用較大之流量 8.3 L/sec，使透水混凝土與普通混凝土的溯升高度差異能更加的明顯。

表 6-12 溯升試驗入流量比較

平均流量(L/sec)	平均溯升高(cm)
5.0	16.7
6.7	19.5
8.3	26.9

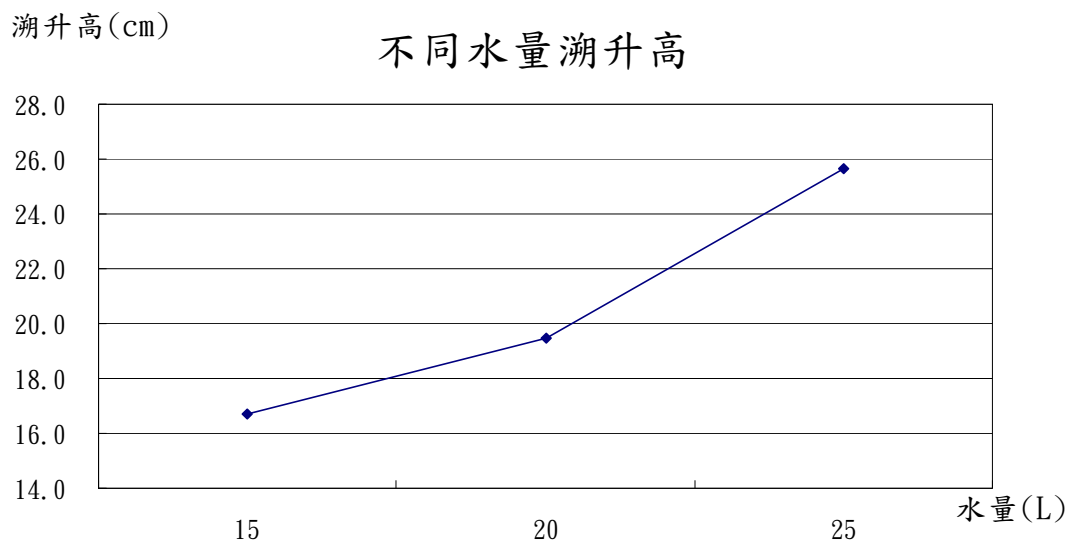


圖 6.6 坡度 1:1.5 普通混凝土不同水量溯升高

在試驗期間內因為土石流水槽儀同時也有其他團隊進行研究，由於本研究對於土石流儀水槽角度並無特別要求，因此水槽角度就依照另一團隊之設定角度 20° 進行研究；本研究在正式進行溯升試驗之前，有先進行波浪的模擬前置試驗，模擬的波浪型式為湧波型波浪⁽²⁾；在前置試驗中發現，當水流由土石流滑道進入延伸的玻璃水道時，立即會產生亂流波，約到達距離玻璃水道起點 40cm 處時，才會型成穩定的湧波型式波浪，因此設定試體擺放的位置在距離玻璃水道起點 60cm 處；當水量使用 25L 時，產生的湧波型波浪高度大都落在 9~11 cm 之間，且由於本研究是採用攝影機拍攝影像觀察高度，有效判讀的位數為 1cm，因此訂定波浪高度有效區間為 10 ± 1 cm。

6.6.2 坡度 1：1 海堤溯升高比較

試驗條件為土石流儀水槽角度為 20° 、水量 25L、試體前端水位高 4.3cm，藉由重力的方式產生湧波型的波浪⁽²⁾，其波浪高度為 10 ± 1 cm，以坡度 1:1 的海堤比較，溯升試驗結果如表 6-13 所示。當使用普通混凝土製作海堤時，如圖 6.6 所示，其溯升平均高度為 26.2 cm；材料為透水混凝土製作的海堤時，如圖 6.7 所示，其溯升平均高度為 15.7cm。

透水混凝土平均溯升高度明顯比普通混凝土降低了 10.5 cm，溯升減少率 k_r 約為 0.60，如圖 6.8 所示，顯示出在海堤堤面坡度為 1:1 時，透水混凝土比普通混凝土具有較佳的消能能力。表 6-13 中有標記”*”之數據由於與設定之波浪高度 $10\pm 1\text{cm}$ 不符，因此不列入平均值內。

表 6-13 坡度 1:1 海堤溯升高度比較

水量 25L	溯升高 cm	
坡度 1:1	普通混凝土	透水混凝土
1	25.2	14.7
2	24.7	13.7
3	24.7	15.2
4	28.7	15.7
5	29.7	17.7
6	25.7	12.7 *
7	25.7 *	17.7
8	25.7	15.7
9	29.7 *	15.7
10	28.7	13.7
11	26.2	16.2
12	26.7	15.7
13	30.7 *	15.7
14	23.7	15.7
15	23.7	15.7
16	27.7	15.7
17	24.7	12.7 *
18	26.7	15.2
19	25.7	15.7
20	26.7	17.7
平均	26.2	15.7
標準差	1.69	1.10
附注：		
標記”*”之數據由於波浪高度超出設定之範圍，因此不列入平均值。		

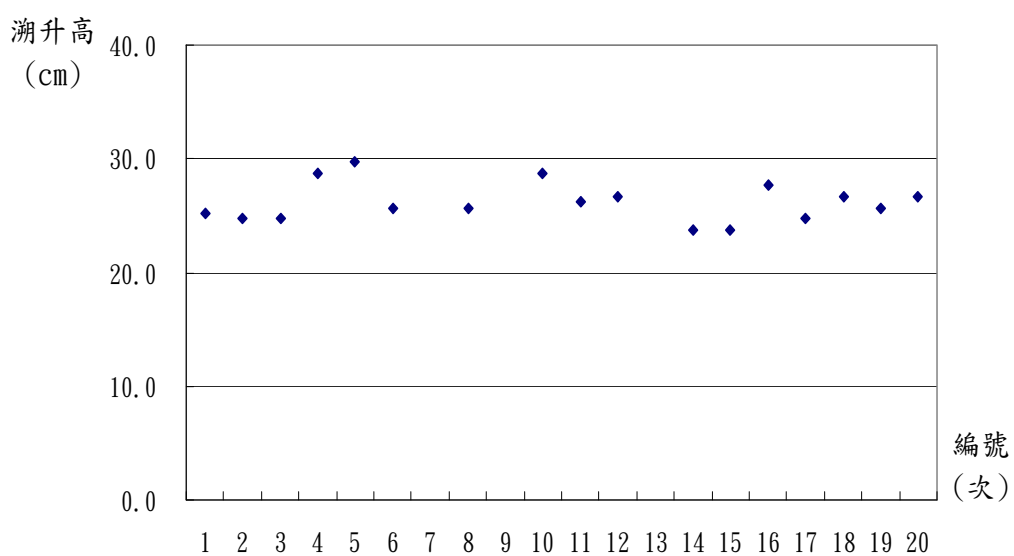


圖 6.7 坡度 1:1 普通混凝土海堤溯升高

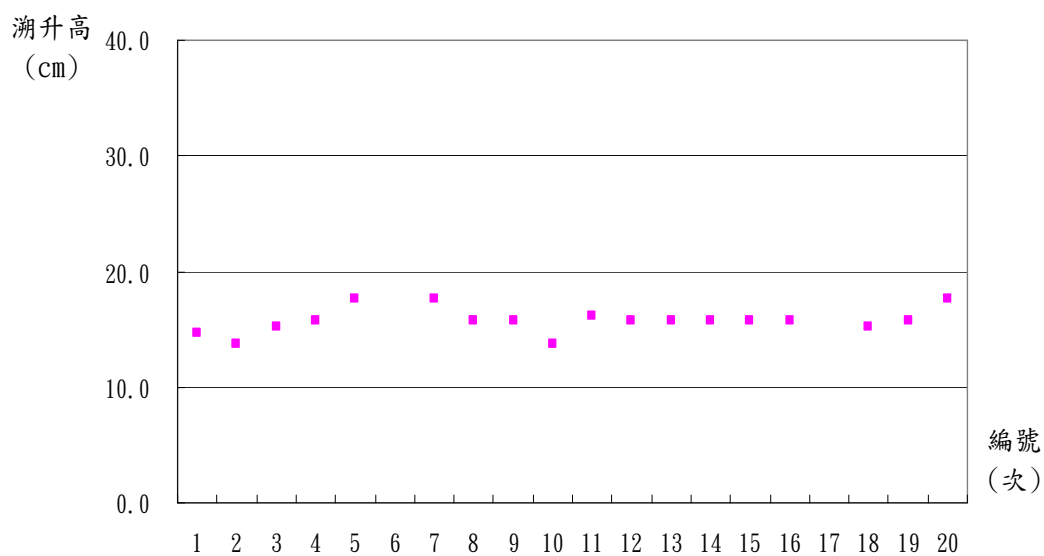


圖 6.8 坡度 1:1 透水混凝土海堤溯升高

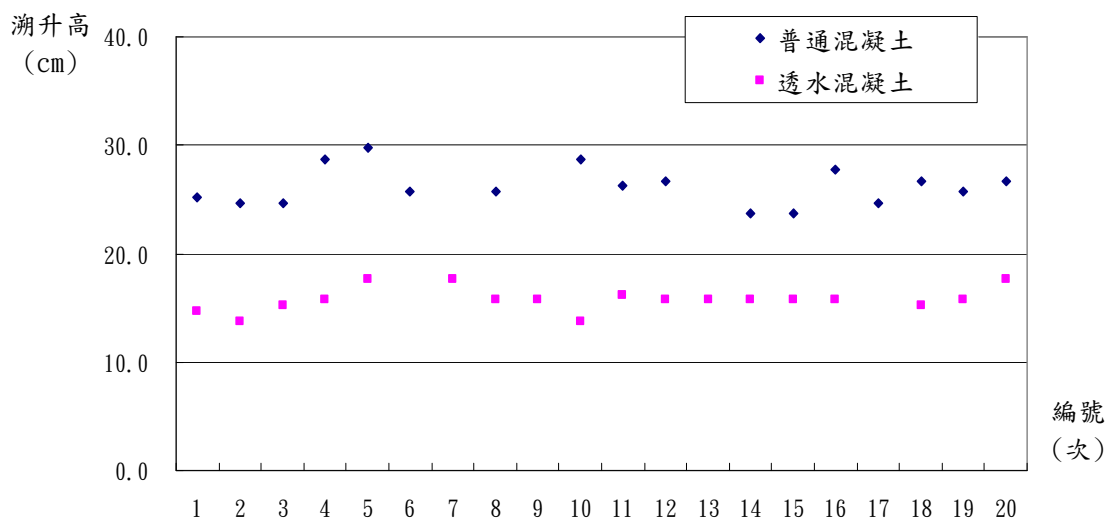


圖 6.9 坡度 1:1 海堤溯升高比較

6.6.3 坡度1：1.5海堤溯升高比較

試驗條件為土石流儀水槽角度為 20° 、水量 25L、試體前端水位高 4.3cm，藉由重力的方式產生湧波型的波浪⁽²⁾，其波浪高度為 $10 \pm 1\text{cm}$ ，以坡度 1:1.5 的海堤比較，溯升試驗結果如表 5-14 所示，當使用普通混凝土製作海堤時，如圖 6.9 所示，溯升平均高度為 25.7 cm；材料為透水混凝土製作的海堤時，如圖 6.10 所示，溯升平均高度為 18.6 cm。透水混凝土平均溯升高度明顯比普通混凝土降低了 7.1 cm，溯升減少率 k_r 約為 0.72，如圖 6.11 所示，顯示出在海堤堤面坡度為 1:1.5 時，透水混凝土比普通混凝土具有較佳的消能能力。表 6-14 中有標記“*”之數據由於與設定之波浪高度 $10 \pm 1\text{cm}$ 不符、產生多重波浪或亂波形式的波浪，因此不列入平均值內。

表 6-14 坡度 1:1.5 海堤溯升高度比較

水量 25L	溯升高 cm	
坡度 1:1.5	普通混凝土	透水混凝土
1	29.2 *	20.7
2	29.7	17.2
3	27.7 *	21.7 *
4	26.7	20.7 *
5	24.2	19.7
6	24.2	17.7
7	26.7	16.7
8	28.7	21.7
9	33.7 *	20.7
10	32.2 *	25.7 *
11	25.7	15.7
12	23.7	17.7
13	30.7 *	21.7
14	24.7	16.7
15	23.7	17.7
16	27.2	17.7
17	24.7	22.7 *
18	24.7	14.7 *
19	25.7	15.7
20	24.7	21.7
平均	25.7	18.6
標準差	1.75	2.13
附注： 標記”*”之數據由於波浪高度超出設定之範圍，因此不列入平均值。		

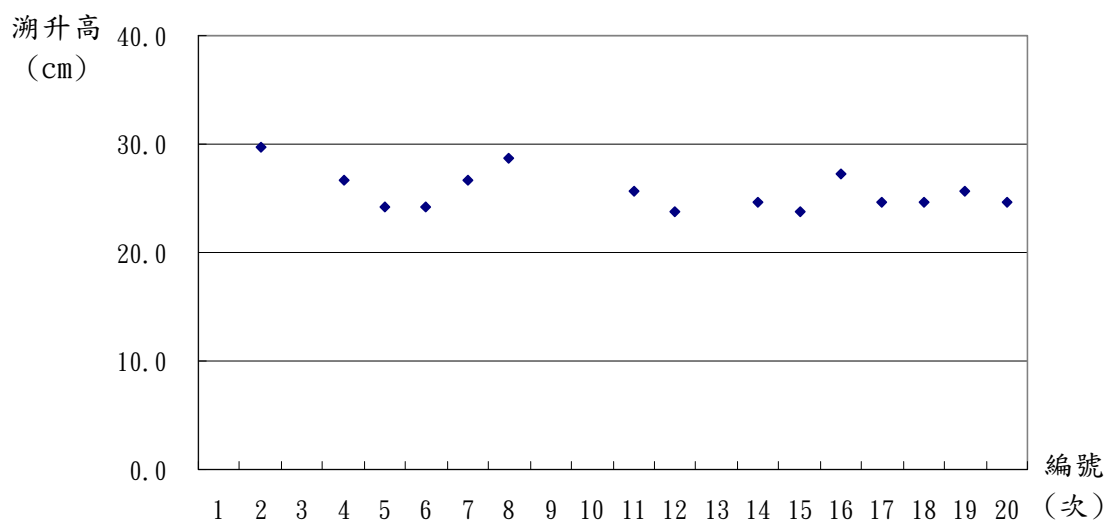


圖 6.10 坡度 1:1.5 普通混凝土海堤溯升高

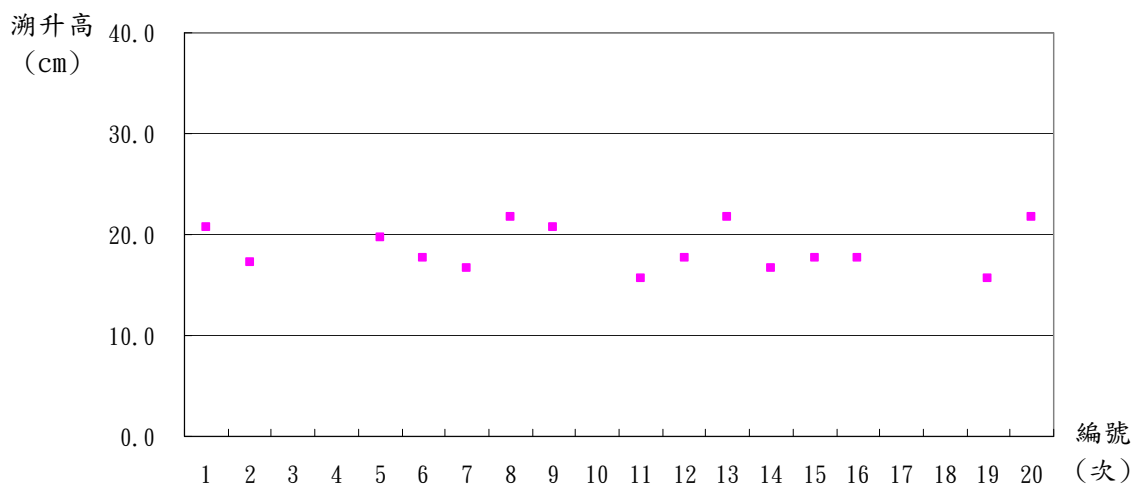


圖 6.11 坡度 1:1.5 透水混凝土海堤溯升高

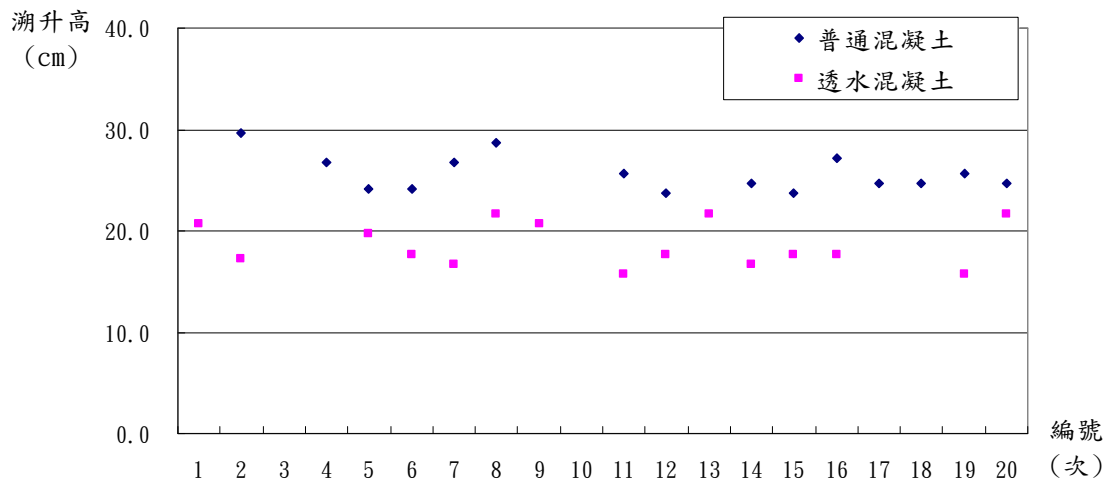


圖 6.12 坡度 1:1.5 海堤溯升高比較

6.6.4 坡度1：2海堤溯升高比較

試驗條件為土石流儀水槽角度為 20° 、水量 25L、試體前端水位高 4.3cm，藉由重力的方式產生湧波型的波浪⁽²⁾，其波浪高度為 10 ± 1 cm，以坡度 1:2 的海堤比較，溯升試驗結果如表 5-15 所示，當使用普通混凝土製作海堤時，如圖 5-12 所示，溯升高度平均為 19.2 cm；材料為透水混凝土製作的海堤時，如圖 5-13 所示，溯升高度平均為 16.0 cm。透水混凝土平均溯升高度明顯比普通混凝土降低了 3.2 cm，溯升減少率 k_r 約為 0.83，如圖 6.14 所示，顯示出在海堤堤面坡度為 1:2 時，透水混凝土比普通混凝土具有較佳的消能能力，但二種海堤的溯升高度已較為接近。表 5-15 中有標記“*”之數據由於與設定之波浪高度 10 ± 1 cm 不符，因此不列入平均值內。

表 6-15 坡度 1:2 海堤溯升高度比較

水量 25L	溯升高 cm	
坡度 1:2	普通混凝土	透水混凝土
1	19.7	17.2
2	19.7	18.7
3	16.2	14.7
4	21.7	15.7
5	17.7	17.7
6	17.7	15.7
7	23.7	18.7
8	17.2	16.7
9	21.7	13.7
10	15.7 *	17.7
11	16.2	16.7
12	16.7	15.7
13	16.7	14.7
14	21.7	15.7
15	20.2	13.7
16	17.7	15.7
17	17.7	13.7 *
18	20.7	15.7
19	23.7	14.7
20	17.7	15.7
平均	19.2	16.0
標準差	2.39	1.43
附注： 標記”*”之數據由於波浪高度超出設定之範圍，因此不列入平均值。		

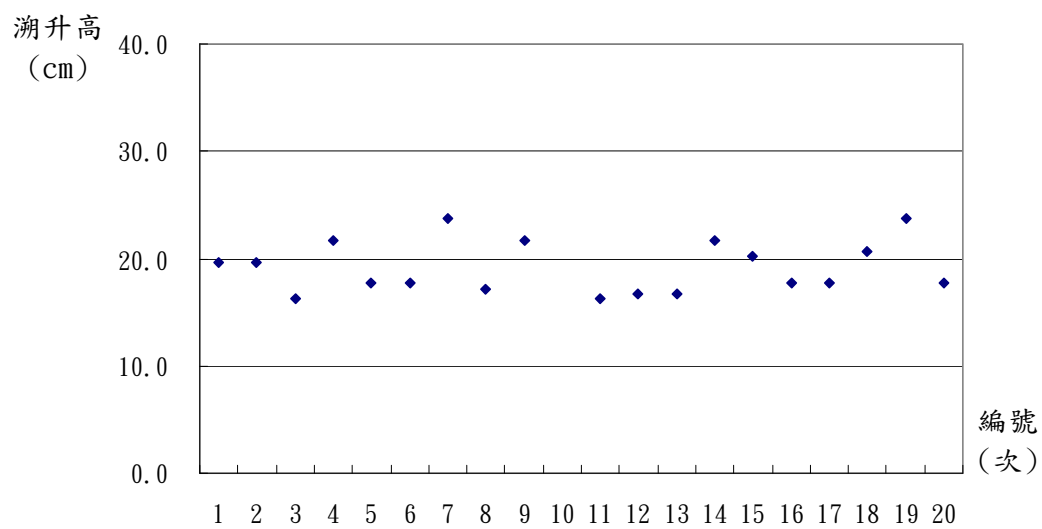


圖 6.13 坡度 1:2 普通混凝土海堤溯升高

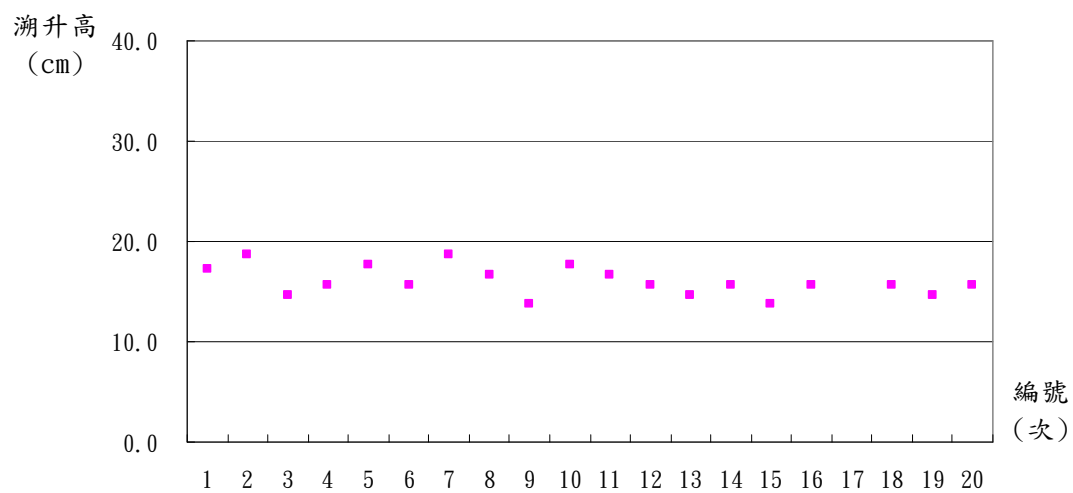


圖 6.14 坡度 1:2 透水混凝土海堤溯升高

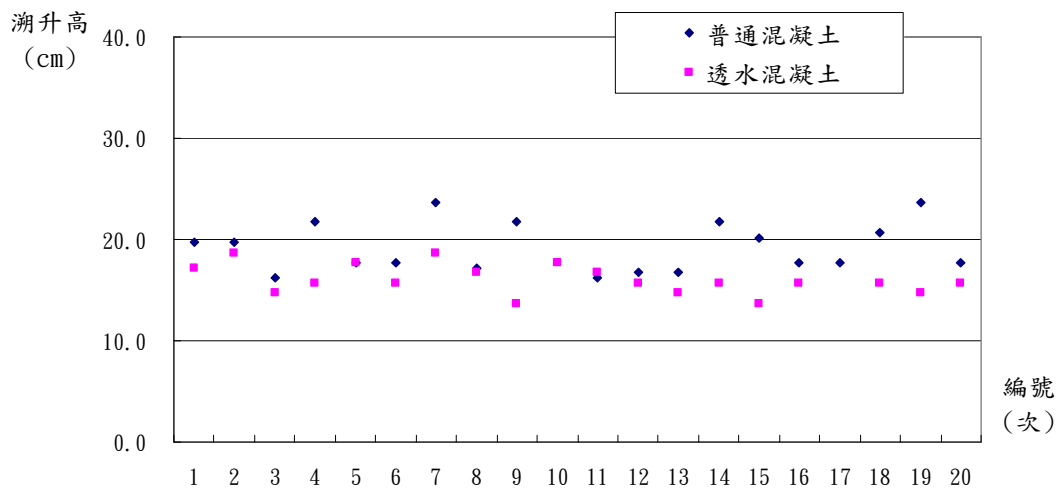


圖 6.15 坡度 1:2 海堤溯升高比較

6.6.5 不同坡度海堤之比較

由上述可看出，在坡度 1:1、坡度 1:1.5 與坡度 1:2 三種不同坡度的海堤，透水混凝土海堤與普通混凝土海堤的溯升高度比較，結果顯示出普通混凝土海堤消殺波能的能力最高為坡度 1:2 的海堤，其溯升高度為 19.2cm，其次為坡度 1:1.5 的海堤溯升高度為 25.7cm，消殺波能最低為坡度 1:1 的海堤溯升高度為 26.2cm；而透水混凝土海堤消殺波能能力最高為坡度 1:1 的海堤，其溯升高度為 15.7cm，其次為坡度 1:2 的海堤溯升高度為 16.0cm，消殺波能最低為坡度 1:1.5 的海堤溯升高度為 18.6cm，如圖 6.15 所示；而透水混凝土在三種海堤坡度的溯升比 kr 分別約為，海堤 1:1 的 $kr = 0.60$ ，海堤 1:1.5 的 $kr = 0.72$ ，海堤 1:2 的 $kr = 0.83$ ，如圖 6.16，顯示出，坡度較陡峭時，透水混凝土海堤的溯升減少率 kr 越小。

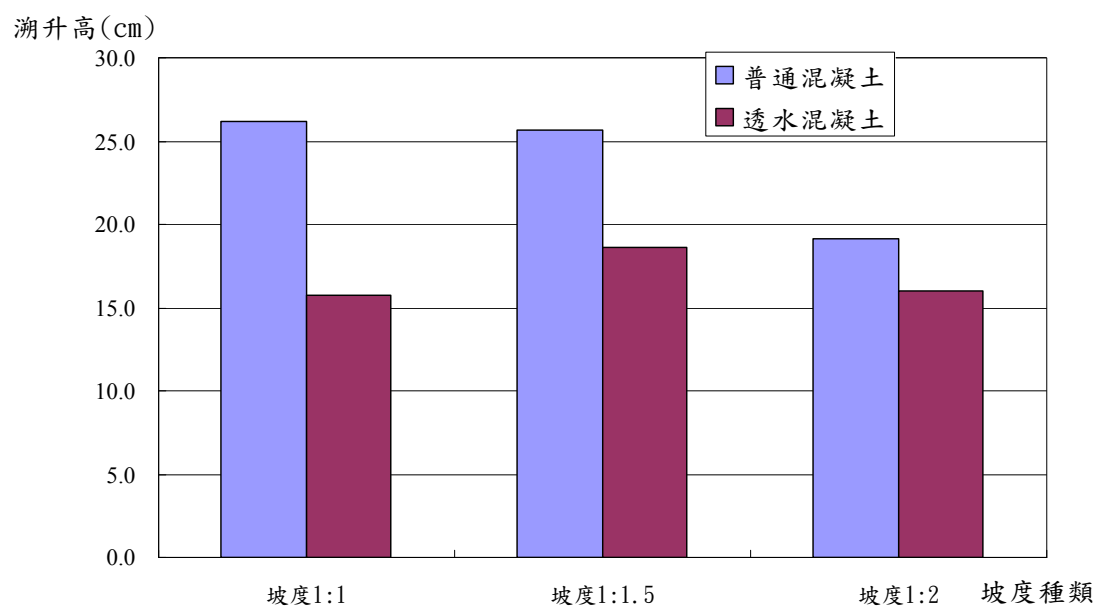


圖 6.16 不同坡度海堤溯升高比較

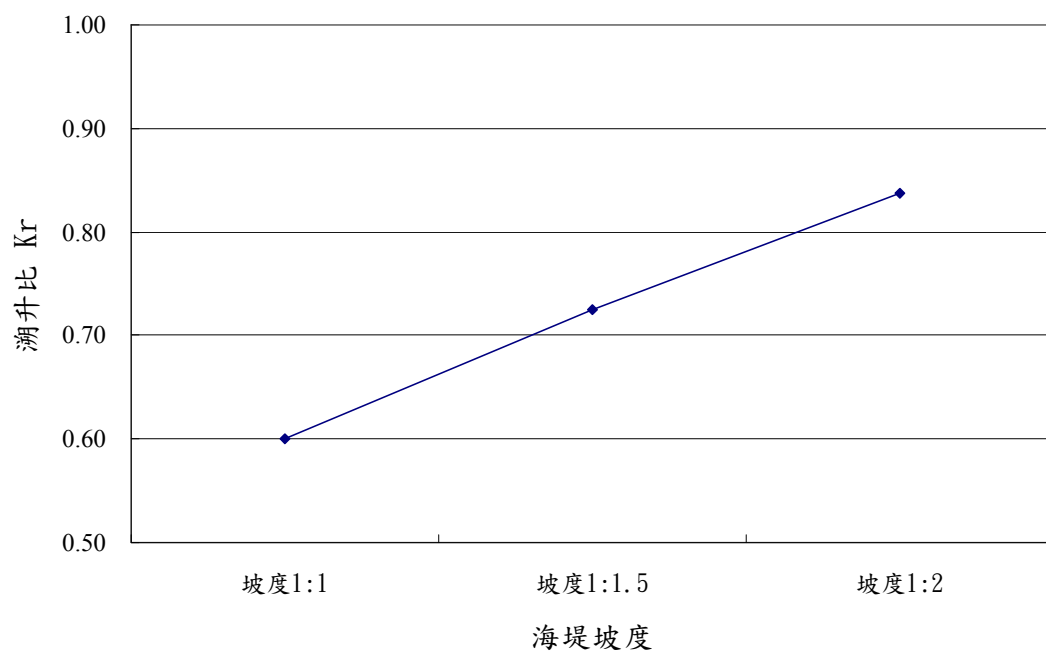


圖 6.17 不同坡度海堤溯升比

6.7 小結

根據本研究之試驗結果大致可歸納出以下幾點結論：

1. 在試驗中發現普通混凝土海堤坡度越平緩時，消能的能力越佳；而透水混凝土海堤坡度與溯升高度的關係，並未與普通混凝土海堤一致。
2. 當海堤坡度 1:1 時，溯升比 $k_r=0.60$ ；海堤坡度 1:1.5 時， $k_r=0.72$ ；海堤坡度 1:2 時， $k_r=0.83$ ，顯示出，坡度較陡峭時，透水混凝土海堤的溯升減少率越小；而透水混凝土海堤的溯升比 k_r 約為普通混凝土海堤的 0.60~0.83。
3. 不論海堤堤面坡度的陡峭或平緩，透水混凝土海堤的溯升高度皆明顯低於普通混凝土海堤的溯升高度。

根據以上幾點，顯示出透水混凝土海堤與普通混凝土海堤相比，具有較佳的消能的能力。

第七章 結論與建議

近年來國內以打造永續臺灣與綠建築為未來努力的方向，為解決雨水資源流失、環境生態破壞及降低熱島效應等問題，進行研究與探討透水混凝土應用在港灣構造設施與公路路面，實有其必要性。本研究第二年針對國內公路路面狀況需求與港灣構造設施狀況，分別執行路面試鋪作業與實驗室模擬海堤對於波浪溯升之評估，對透水混凝土進行初步成效評估。

7.1 結論

1. 第二章收集 10 個透水混凝土應用案例，極具參考價值，其中，應用於停車場與行人道鋪面已經成為焦點與喜好，未來應該投入更多的資源與研究於都市道路、公路及機場之底層、高速公路路肩、海濱結構、人工潛(漁)礁和海堤等。
2. 獲交通部公路總局第二區養護工程處之應用，已於 2010 年三月開工興建「埔里工務段辦公大樓新建工程」，設計辦公人員停車場與四米寬道路為透水混凝土鋪面，詳第四章說明。
3. 公路路面試鋪透水混凝土配比設計與試拌之工作項目，已完成相關作業，經過多次配比調整與試拌，透水混凝土不再有垂流現象，並進行現地試鋪施作，此為教育訓練與現地觀摩之絕佳方式，透水混凝土試鋪面積為兩公尺見方，厚度為 20 公分。
4. 本案四米寬道路路基土壤依 AASHTO 土壤分類屬於 A-1-a，為優良路基土壤材料，該土壤滲透係數 K 值應大於 10^{-5} m/sec 以上，滲透性良好；現地施作透水混凝土鋪面至今已超過三個月，切縫最大間距為 9 公尺，厚度 20 公分，並無裂縫產生。

5. 實驗室模擬波浪溯升試驗訂製強化玻璃水道裝置於土石流水槽試驗儀以延伸水道長度，固定水槽傾斜角度，藉由重力來產生波浪，並架設高速攝影機可以捕捉紀錄海堤溯升高度。
6. 實驗室模擬波浪對於海堤之波浪溯升試驗發現透水混凝土平均溯升高度明顯比普通混凝土降低許多，當海堤坡度 1:1 時，溯升比 $kr=0.60$ ；海堤坡度 1:1.5 時， $kr=0.72$ ；海堤坡度 1:2 時， $kr=0.83$ ，顯示出，坡度較陡峭時，透水混凝土海堤的溯升減少率越小；顯示出透水混凝土具有較佳的消能能力，此驗證 ACI 522R-06 中提到的透水混凝土可應用於海堤港灣結構物。
7. 有關透水混凝土工區表面浮石太多，主要原因是天氣炎熱，新拌透水混凝土施工未能「迅速」施作，加上工區待料時間過長，使得水泥漿包覆粒料表面與空氣接觸太久而乾燥，造成透水混凝土表面無法黏結有浮石現象，但透水混凝土內部黏結尚稱完整，因此，使用動力鋼刷施工機械刷除鋪面表面之浮石，並以高壓水沖洗保養，以維護其透水能力。
8. 目視鋪面大量透水結果發現 9 立方公尺的水幾乎完全可以滲入鋪面之中，灌水流量約 1.5 立方公尺/分，透水效果優異，值得推廣與觀摩，此結果顯示本道路鋪面可以通過短時間內累積極大的暴雨之透水驗證。
9. 計畫執行成果研擬出透水混凝土鋪面設計導則草案，設計導則詳附錄一說明，以期作為將來規劃設計與施工之參考準則。
10. 提供交通部相關單位推廣應用透水混凝土之參據，達成推動永續與生態概念於國內公共工程的設計與施工上之效益，目前除了公路總局第二區養護工程處「埔里工務段辦公大樓新建工程」正應用之外，臺中市環保局「環保生態教育園區第三期」自行車道也納入設計中。

7.2 建議

1. 透水混凝土鋪面工程可引用並符合 ACI 522R-06 與 ACI 522.1-08 新規範與試驗方法，未來投入的研究有現地試驗方法、非破壞試驗方法與觀測井對水質試驗之發展。
2. 過去數年來，美國一直不斷的投注資源與經費於透水混凝土研究上，有超過 2/3 的州政府進行此項研究或推廣，至少有 17 所美國大學拿到政府透水混凝土研究經費，建議國內也應該投入更多的資源與研究，以解決雨水資源流失、環境生態破壞及熱島效應擴張。
3. 透水混凝土應用於停車場與行人道鋪面已經成為焦點與喜好，未來應針對高強度透水混凝土之透水性、工作性、強度、耐久性、減少噪音特性深入探討，以找尋最佳之材料配比，方可運用於重交通量或高速公路等公路工程，以利多方面推廣應用。
4. 有關工區透水混凝土表面浮石問題，未來研究可針對透水混凝土表面磨耗與粒料剝脫、堵塞、老化及維護方法做進一步的調查與評估。
5. 本研究在現地鋪設的過程上一些缺失，明年主體工程完工後，也要鋪設較大面積的透水混凝土停車場，建議廠商針對這次的缺失及明年的需求，擬出最佳製程控制建議，包含鋪設工人的教育訓練，行前的充份溝通等，可參照本研究上期之透水混凝土的材料與施工技術規範草案。

本研究成果之效益包括：1. 計畫執行成果研擬出透水混凝土鋪面設計導則草案，以期作為將來規劃設計與施工之參考準則。2. 獲交通部公路總局第二區養護工程處之應用於「埔里工務段辦公大樓新建工程」中，規劃部分停車場與路面採用透水混凝土。3. 本研究可提供給各港務局、公路局及相關交通單位推廣應用透水混凝土之參據。

參考文獻

1. 邱永芳、朱金元、張道光、黃然、張建智、葉為忠，「透水混凝土應用於交通工程之研究(1/2)」，交通部運輸研究所研究計畫成果報告(計畫主持人黃然教授)，MOTC-IOT-95-H1DB007，2006。
2. 鄭瑞濱、潘昌林，「透水性鋪面介紹」，WERC 水環研究中心，2001。
3. 邱永芳、張道光、李明君、顏聰、邱垂德，「透水混凝土應用於交通工程之研究(2/2)」，交通部運輸研究所研究計畫成果報告(計畫主持人李明君)，MOTC-IOT-96-H1DB004，2007。
4. 林志棟，「透水性鋪面」，台灣鋪面(Taipave)之設計與應用實務(六)，中華鋪面工程學會，2007。
5. 何廷祥，透水混凝土應用在灌排水路之初步研究，逢甲大學水利工程學系碩專班碩士論文(連惠邦教授指導)，2005。
6. 韓乃斌，透水混凝土配比試驗及應用之研究，逢甲大學水利工程學系碩士論文(連惠邦教授指導)，2006。
7. 「可透水式人行道鋪面材料(無細粒料混凝土)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. 楊雅雲，「輕質粒料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。
9. 林志棟，「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」，內政部建築研究所。
10. 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。
11. Japan Concrete Institute，Proceedings of the JCI Symposium on

Design ,Construction and Recent Applications of Porous Concrete, 2004.

12. GOMACO Corporation, A Green and Easy Solution for Flood Control
13. Problems. Retrieved from 2004,
14. http://www.gomaco.com/Resources/worldstories/world32_1/satoroad.html
15. 周樺，<http://www.linlins.com/jenniferchou/20040222175500.shtml>
16. 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。
17. 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。
18. 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。
19. Construction of pervious concrete pavements, Mtt Offenber, PE.
20. 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。
21. 內政部營建署，「市區人行道施工規範」，中華民國 92 年。
22. 「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。
23. 行政院公共工程委員會公共工程施工網要規範第 02794 章透水性鋪面。
24. 行政院公共工程委員會，透水性鋪面之研究，第 44 至第 63 頁，2003。

25. 行政院公共工程委員會重力式擋土牆標準圖。
26. 內政部營建署，市區道路人行道設計手冊第 4.6.4 節透水鋪面材，2003。
27. 經濟部水資源局，生態工法技術參考手冊第 5-4-2 節，2001。
28. 中國土木水利工程學會，混凝土工程設計規範第 1.7 節，1998。
29. 林志棟，建築基地保水滲透技術設計規範與法制化之研究-子計畫二：透水鋪面工法性能實驗解析，內政部建築研究所研究委託研究報告第 57 頁至第 58 頁，2002。
30. 潘昌林、鄭瑞濱，透水混凝土與工程應用介紹，台灣營建研究院研發資訊，2001。
31. 雷揚中，焚化爐底渣應用於道路工程之研究，中央大學土木工程研究所碩士論文，2004。
32. 交通部台灣區國道新建工程局，北二高剛性路面建造講習，1990。
33. Portland Cement Association, Pervious Concrete Pavements, 2004.
34. ACI Committee 522 (ACI 522R-06), Pervious Concrete, 2006.
35. 劉明仁、吳建璋、黃裔炎，”活性粉多孔隙混凝土應用於道路面層之工程性質研究”，中華民國第十三屆鋪面工程研討會，2007。
36. 陳豪吉、林建國，「輕質磚之配比及工程性質研究」，興大工程學刊，第 13 卷，第 3 期，11 月，2002。
37. 陳豪吉、陳榮松、方富民、李明君，「多孔混凝土應用於河川工程之研究(1/2)」委託計畫服務建議書，經濟部水利署，2009。
38. Henry H. Jewell, Rock Riprap Replaces Porous Concrete Slope Protection at Santee-Cooper Project, ASCE, Civil Engineering, 1948.

39. 郭金棟,海岸整治與生態工法應用之案例介紹,2003 年生態工法人
才培訓講習會講義。
40. Tamai, M. and Y. Nishiwaki, Studies on marine epilithic organisms to
no-fine concrete using slag cement and portland cement with silica
fume. ACI Journals. SP-132-87, Vol.2:1621-1635, 1992.
41. [http://nippon.zaidan.info/library/seikabutsu_print_view.do?url=http://
nippon.zaidan.info/seika...](http://nippon.zaidan.info/library/seikabutsu_print_view.do?url=http://nippon.zaidan.info/seika...) 2009/3/8 Tamai, M. and Y. Nishiwaki.
2003. A STUDY ON KELP FOREST REGENERATION USING
POROUS CONCRETE.
42. 「生態工法觀摩與研習」,農田水利聯合會研究報告,2004。
43. ACI 522.1-08, Specification for Pervious Concrete Pavement, 2008.
44. <http://www.ConstructionPros.com>, “City of Manhattan Beach Goes
Green with Pervious Concrete”.
45. Manoj Chopra, Marty Wanielista, Craig Ballock, and Josh Spence,
“Construction and Maintenance Assessment of Pervious Concrete
Pavements”, Final Report, Florida Department of Transportation,
2007.
46. John Kevern, “Mix design development for Portland cement pervious
concrete in cold weather climates”, Master Thesis, Iowa State
University, 2006.
47. National Ready Mixed Concrete Association, Freeze Thaw Resistance
of Pervious Concrete, 2004.
48. Heather J. Brown, “Pervious Concrete Research Compilation Past,
Present and Future”, RMC Research Foundation.
49. 馮乃謙,「在港灣、海洋結構物中水泥混凝土的長期性能」,混凝

土與水泥製品，2002。

50. 郭金棟，「海岸保護」，海岸環境創造序論，2004。

附錄一

透水混凝土鋪面設計導則(初稿)

整理自 PCA, NRMCA

透水混凝土鋪面設計導則(初稿)

整理自PCA, NRMCA

透水混凝土是具有特殊性能的材料，與一般水泥混凝土或其它鋪面材料不太相同。透水混凝土的特性在近幾年才開始進行大規模的實驗與研究，其性質大致上容易量測與掌控。過去的一些實務經驗顯示，在合宜的路基土壤、適當的材料，搭配正確的施工方法而完成的透水混凝土鋪面，有不少服務達20至30年的案例。透水混凝土鋪面的設計原則與一般混凝土鋪面相同，需考慮路基土壤的承載力、預計承載的交通荷重、採用材料的性質、及服務性能與年限，從而求出需要的混凝土版厚及可能的基層材料。設計上，較為特別的是，除前述結構性能考量外，還要額外考慮透水混凝土鋪面的水力特性(hydraulic consideration)，也就是該鋪面結構材料是否能符合設計者對暴雨侵襲時，期望能發揮「降低地表逕流」的效果。

資料顯示透水鋪面的失敗率較高，75%在二年內就失去作用；最近的資料則顯示，若以水混凝土做為透水鋪面的材料，則成功率較高。

0-1 不宜設計透水鋪面的兩種場合：

1. 交通荷重大之部位：透水鋪面之結構不緻密，且底下土壤常處於飽和狀態，無法承受大荷重。
2. 有過多污染活動之地點(Storm water Hot Spots)，如動植物批發場、汽機車回收場、加油場站、倉庫、工業場站、船埠、保養場、洗車場、油槽附近場站等，由於污染物可能沖入孔隙內造成阻塞，而使透水鋪面失去功能。

0-2 透水鋪面的選址原則：

1. 基地土壤的透水率需達1.3cm/hr。
2. 暫貯水碎石級配層的底面應為水平面，以使貯水可由整個面上滲入土壤中。

3. 基地位於工業區附近時，至少應距飲用井33公尺，比最高地下水位高0.6至1.5公尺。

4. 交通量為低至中等，住宅區內之小道或停車場較佳。

0-3 被動與主動降低逕流量：被動降低逕流的透水鋪面，係指單純用透水混凝土取代原不透水面；而主動降低逕流的透水鋪面，則為除此之外，還期待以所設計的透水鋪面，協助處理周遭不透水面排入的雨水。

一、透水混凝土鋪面的結構設計

透水混凝土鋪面的結構設計，可採用傳統的剛性路面設計法，例如工程界常引用的AASHTO法及PCA法，這些方法的主要考量因子相同，包括路基土壤性質、基底層材料性質、水泥混凝土的性質、及交通荷重等。

1-1 路基與基底層材料性質：依照路基土壤的狀況不同，一般透水混凝土鋪面都會設計約15至30公分厚的透水性基底層。傳統剛性鋪面設計的路基與基底層材料，其強度參數是「路基土壤反力值 (Modulus of Subgrade Reaction, k 值)」；路基土壤之簡易類別與其概估的 k 值，如表1所示。除了路基土壤判定為黏土質時需另行考量外，基底層材料的最大粒徑為1英吋。按表1中土壤承載力之估算，基底層與路基土壤組合後的複合路基土壤反力值要求，一般建議150pci至175pci之間，且不必超過200pci。當路基土壤的承載力較高，例如表1中之「以砂質及礫石為主且沒有塑性」土壤，則可不必設計基底層，直接在其上設計透水混凝土版即可。

表1 簡易路基土壤分類及其概估承載值

路基土壤類別	支撐力	k 值(pci)	CBR值	R值
沉泥、粉土、黏土組成之細粒土壤	弱	75~120	2.5~3.5	10~22
砂、砂礫石佔大部份，少量黏土	中等	130~170	4.5~7.5	29~41
砂及礫石為主，沒有塑性成份	強	180~220	8.5~12	45~52

1-2 黏土質高膨脹性路基土壤：遇到黏土質高膨脹性路基土壤時，應挖除改用粒徑較粗的砂質土壤，而且最好在其上再設計砂及開放級配粒料層，以提高承載力及基底層蓄水能力；另視土壤狀況，有時還需以工程織布阻絕碎石層與細質土壤。圖1為標準的透水混凝土鋪面斷面示意圖。

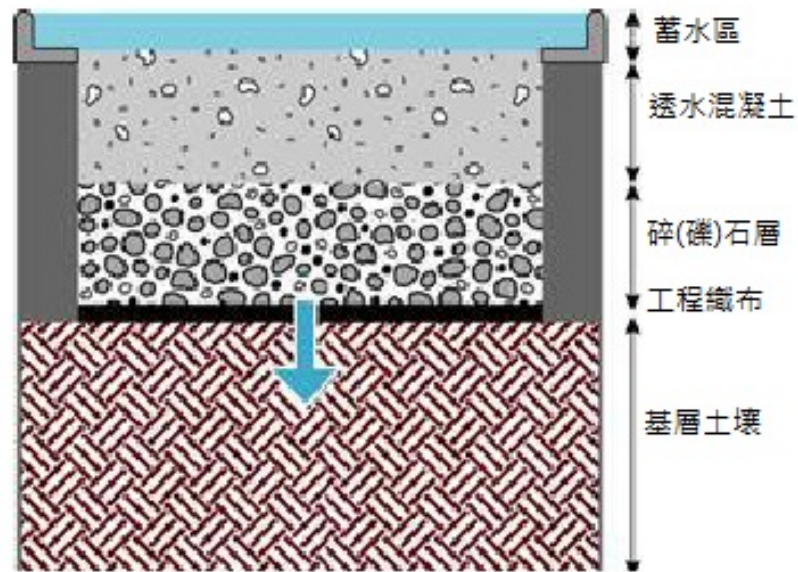


圖1 一般透水混凝土鋪面之斷面示意圖

1-3 水泥混凝土的性能：主要指混凝土的抗彎強度。理論上，採用透水混凝土時可以比照引用，但因透水混凝土抗彎強度的試驗變異性大於一般水泥混凝土者，直接量測透水混凝土的抗彎強度做為設計依據，較難以代表工地實際狀況，建議引用混凝土抗壓強度與抗彎強度的關係，由量測所得透水混凝土抗壓強度，換算成抗彎強度(破裂模數)做為透水混凝土材料的強度代表值。不同配比的透水混凝土，在抗壓強度、破裂模數、單位重、空隙率等性質的差異可能很大，應對預定採用的透水混凝土特性有所瞭解，這些性質方可採用於鋪面結構設計上。

1-4 交通荷重：預計承載的交通荷重，可用標準軸重當量(ESAL)、平均日交通量 (ADT)、或是平均日重車量(ADTT)表示。由於重車對

透水鋪面的破壞性較大，估算預計承載的重車量相當重要；一般重要且交通頻繁的地區，不建議採用透水鋪面設計。

- 1-5 服務性(Serviceability)、路肩、路緣石及綴縫筋：若採用AASHTO剛性路面設計法，其服務性的選用，可以比照一般混凝土鋪面；若設計有路肩或路緣石時，也可比照傳統方法，計入側向支撐的效果；至於溫縮縫的荷重傳遞效能，透水混凝土只依賴鋸縫後的粒料間契合力，而不使用綴縫筋，因此，不會有綴縫筋的效能。
- 1-6 最常採用的透水混凝土鋪面結構：一般透水混凝土鋪面只使用在輕交通量處，按AASHTO法設計之低交通量混凝土版，大都在5英吋至7英吋之間，而一般混凝土版停車場之厚度設計則以4英吋居多。有鑑於透水混凝土之強度較低，一般建議增厚50%，故一般透水混凝土停車場之版厚為6英吋(15公分)。若路基土壤為透水性高的砂質土壤，也可不設計碎石基底層，但因透水混凝土下的土壤常處於水飽和的狀態，碎石基底層將有提高承載力，減少凍融侵蝕的效果。最常用的基底層厚度為15至20公分。如圖2所示。

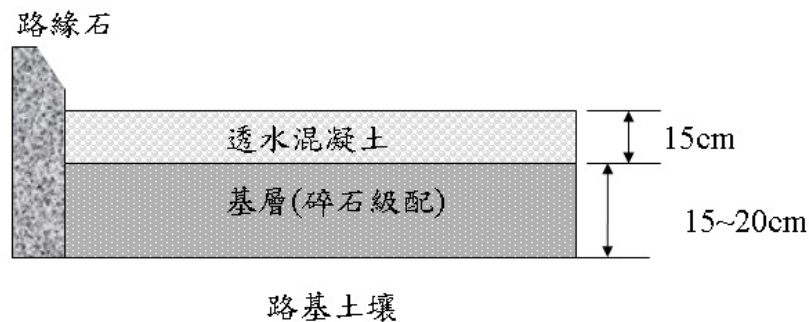


圖2 最常採用的透水混凝土斷面結構

二、透水混凝土鋪面的水力特性設計

- 2-1 設計透水鋪面時，大都只考慮局部區域而不考慮整個流域，也不必進行複雜的水文水理計算。透水鋪面的水力特性設計，主要是考量設計雨型發生時，不可因透水混凝土的透水性不足，或是透

水鋪面整體的蓄儲水量不足，而使表面逕流量高於設計值。

2-2 由於透水混凝土的透水率至少有0.2cm/s，即每小時可流過3600mm的雨量(已超過平均年雨量2500mm)，因此，基底層或路基的透水性，很可能是透水鋪面能否具有需求透水性的關鍵。一般滲透係數超過1.3cm/hr (只要是砂質土壤皆可符合)者，都可符合使貯留在透水鋪面中的水滲入土壤中的目的，但透水性較低者，將使貯留時間較長，在設計上則要求透水鋪面設計之貯水量能在5天內滲入土中。

2-3 土壤依水力特性分類(Hydrologic Soil Group, HSG)時，可區分為HSG A(砂土、壤土質砂、砂質壤土)、HSG B(粉質壤土、壤土)、HSG C(砂質黏壤土)、及HSG D(黏土質壤土、粉質黏壤土、砂質黏土、粉質黏土、黏土)等四類，透水率最高者為HSG A，透水率最低者為HSG D，如表2所示。若要作初步計算評估，可以參考表3數值。

表2 土壤的水力特性分類及其透水率範圍

HSG	土壤紋理	透水率(cm/hr)
A	砂土、壤土質砂、砂質壤土	>0.75
B	粉質壤土、壤土	0.38~0.75
C	砂質黏壤土	0.013~0.38
D	黏土質壤土、粉質黏壤土、砂質黏土、粉質黏土、黏土	<0.013

表3 進行初步計算評估採用的土壤透水率

一般土壤分類	透水率(cm/hr)
砂質土壤	1.3~2.5
粉土質土壤	0.3
黏土質土壤	0.03

2-4 透水混凝土鋪面的透儲水能力：貯水量會受到透水鋪面有效孔隙比(effective porosity) 的控制，設若孔隙比為15%，每1cm厚可

貯水0.15cm；基層部分，若採用細料很少的碎礫石基層，有效孔隙比可高達40%，而傳統的碎石級配料則可能只有20%。如圖2所示。

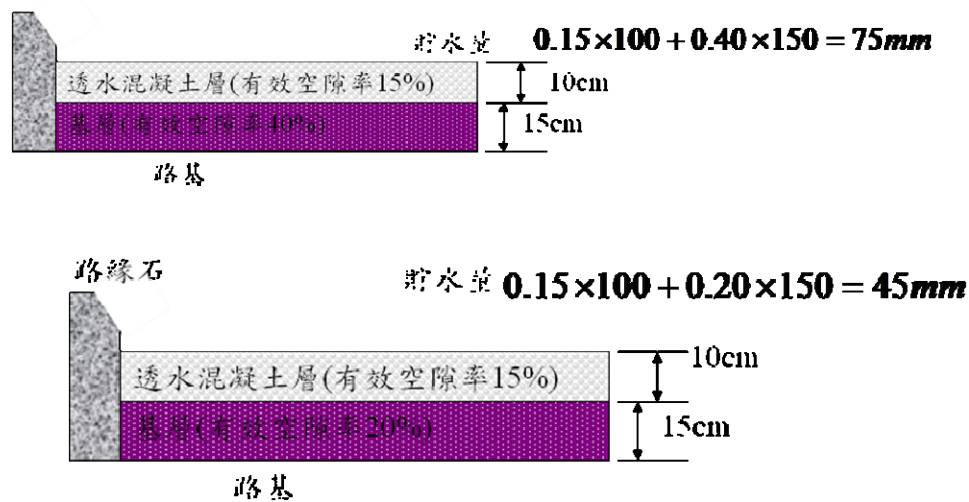


圖2、不同孔隙比基層對透水鋪面儲水量之影響示意圖

2-5 縱向坡度對儲水能力的影響：縱向坡度對儲水量的影響相當大，如圖3，以300公尺長的道路簡單計算，縱坡1%時，代表兩端高差為30公分，若透水層的厚度為15公分，則與縱坡為0%的狀況相比，透水層的儲水能力驟降為水平狀態的25%。因此，在有坡度的路面適當長度，應設置底層排水，且為降低高速流動的水對底層的沖刷，應增加地工織物層保護。

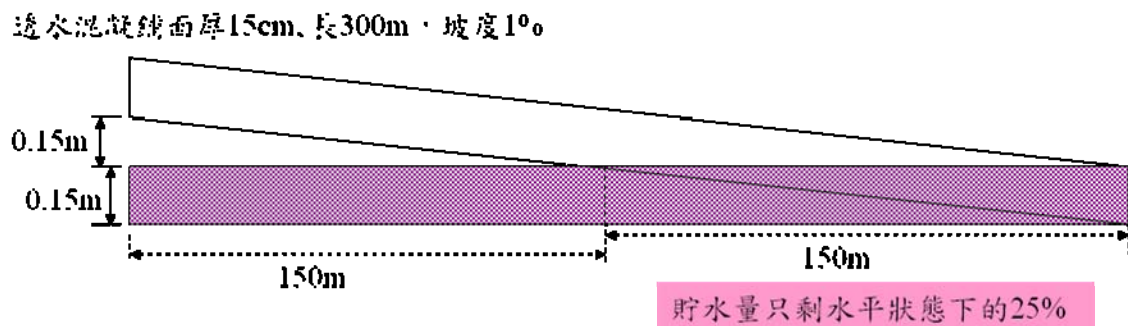


圖3 道路縱向坡度對透水層的儲水量之影響示意圖

2-6 縱坡提高儲水量的方法：透水鋪面不必設計路拱坡度，且最好擺設在平坦的地區，若有縱向坡度設計時，應以基底層級配墊出坡度或設置透水井、阻水溝等方式來提高儲水量，如圖4所示。

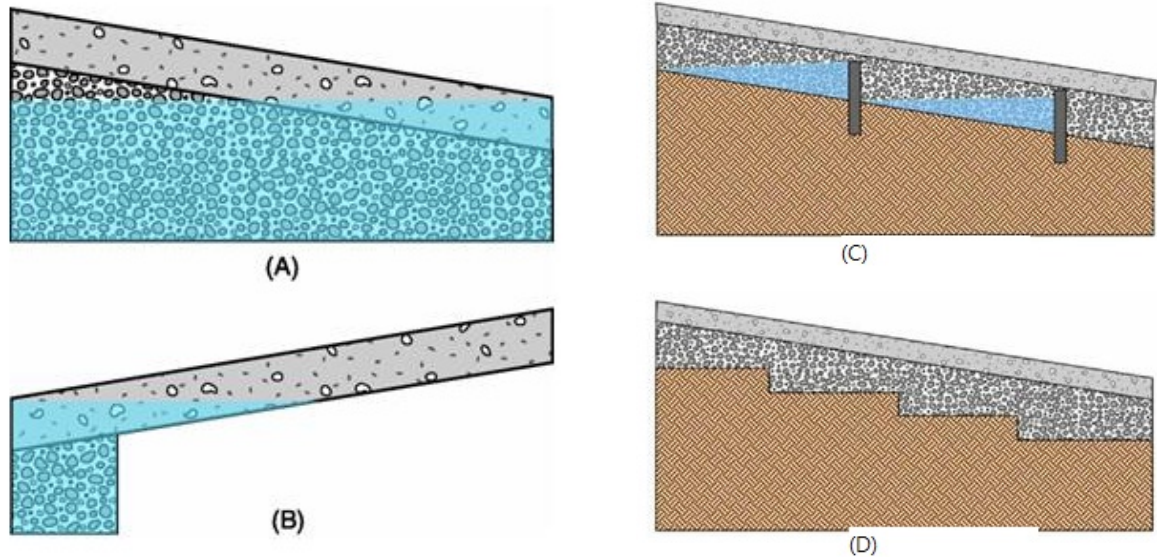


圖4 縱坡提高儲水量的方法示意圖(A:碎石級配層墊高、B:設置集水井、C：設置阻水堤、及D：梯形級配)

2-7 路基土壤的入滲能力可以提高透水鋪面的儲水能力：暴雨期間降雨及附近的逕流會進入透水鋪面，而進入鋪面系統中的水，也同時經由路基土壤的入滲而流失。如圖5所示，若透水混凝土厚150mm，孔隙比為15%，約可儲存23mm的降雨，假設在某一時間點，該鋪面系統已經累積儲存了5mm的水量，而在未來1小時內將有20mm的水透入，則如圖5(A)所示，若沒有任何水滲入路基土壤中，則會在表面上出現2mm的逕流；若是路基土壤的入滲率為每小時13mm，則如圖5(B)所示，只會有7mm的水透入，低於該鋪面系統的儲水量，不會產生表面逕流。雖然蒸發也有助於提高儲水量，並有適當的計算方法，但一般基於方便計算及不計蒸發較為保守，而將蒸發忽略。

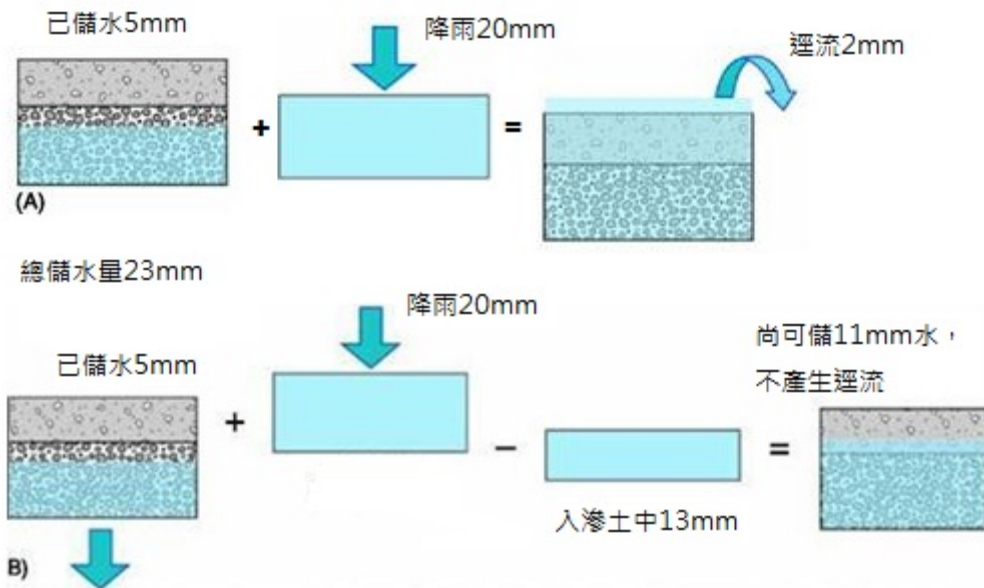


圖5、路基土壤的入滲能力可以提高透水鋪面的儲水能力示意圖

2-8 以「2年暴雨」為設計暴雨：雨愈大會產生愈大的表面逕流，暴雨本身也是一種動態的分佈，有不同的雨型、降雨強度、及不同的降雨持續時間。愈大的暴雨出現的頻率愈低，一般以暴雨的再現期表示暴雨量的大小。例如平均20年會出現一次的暴雨，稱為「20年暴雨」，「20年暴雨」一定大於「10年暴雨」。在暴雨排水系統設計時，常引用「10年暴雨」做為設計的依據。由於透水鋪面不是用來控制水患，一般用「2年暴雨」設計即可，不必以「10年暴雨」來設計。圖6為地區降雨資料整理所得的降雨強度-延時-頻率(Intensity-Duration-Frequency, IDF)曲線例，由2年頻率的曲線，即可查得設計透水鋪面所需的降雨強度(時雨量)及延時的數據。

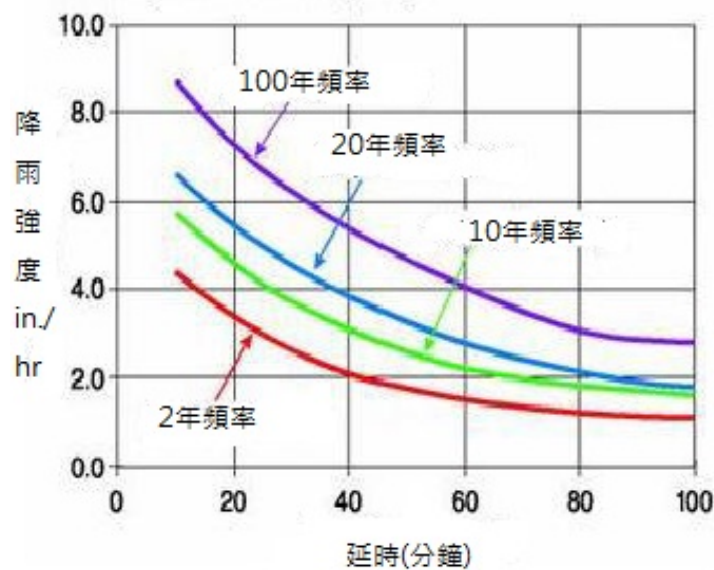


圖6 降雨強度-延時-頻率(IDF)曲線

2-9 估算表面逕流量的「曲線數法(Curve Number Method)」：此法為自然資源保護服務(Natural Resource Conservation Service, NRCS)建議，以降雨量及滯洪面積的曲線數(Curve Number, CN)估算設計暴雨之24小時總逕流量 Q^* ，採用公式如下。

$$Q^* = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \dots\dots\dots (\text{附錄3-1})$$

其中

Q^* 為總逕流量(mm)

P 為預估的總降雨量(mm)

S 為土壤滯留水量(mm)，計算方式為

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4 \dots\dots\dots (\text{附錄 3-2})$$

CN 為基地的曲線數

2-10 採用NRCS的CN法時，一般以2年暴雨之24小時降雨量，做為主動式透水混凝土鋪面的儲水能力計算。由於流域滯洪池的設計是以10年暴雨的24小時降雨量做設計，2年暴雨的24小時降雨量代表滯洪池的一般服務雨量，以此種雨量設計的透水混凝土鋪面，大都要再整合入較大的流域系統，以10年暴雨的24小時降雨量做成效檢查。

2-11 雨型(時雨量分佈)的考量：設計2年暴雨的24小時雨量，為了考慮入滲土壤的水量，時雨量的分佈也很重要，有時可以依據地區降雨特性，分別考慮設計暴雨的最大時雨量、2小時最大雨量及6小時最大雨量等。

2-12 NRCS提供有不同土壤(例如HSG A至HSG D)上，不同被覆狀態下的CN值表供選用，如表3所示。CN為100時，代表降下來的雨全部都成為逕流，由於再不透水的表面都會多少吸附一些水量，故一般CN最大不要超過98。依土質之不同，一般沒有覆蓋面(75%以上長草)的CN值在39至80之間。

表3 NRCS提供的CN選用表

覆蓋狀況		不同HSG土壤的CN值			
覆蓋類別及水力狀況	不透水面積%	A	B	C	D
密集的都會區的露土面					
狀況較差	草覆蓋面< 50%	68	79	86	89
狀況普通	50%<草覆蓋面<75%	49	69	79	84
狀況良好	草覆蓋面>75%	39	61	74	80
不透水區域					
屋頂、街道、停車場等		98	98	98	98
礫石鋪築之路權範圍		76	85	89	91
土質路權範圍		72	82	87	89
一般都會區					
商業區	85%	89	92	94	95
工業區	72%	81	88	91	93

覆蓋狀況		不同HSG土壤的CN值			
一般住宅區					
小於500平方公尺	65%	77	85	90	92
1000平方公尺	48%	61	75	83	87
2000平方公尺	25%	54	70	80	85
4000平方公尺	20%	51	68	79	84
8000平方公尺	12%	46	65	77	82
農業區土地					
草原放牧區		30	58	71	78
較差的林地果園	草覆蓋面< 50%	57	73	82	86
一般的林地果園	50%<草覆蓋面<75%	43	65	76	82
較好的林地果園	草覆蓋面>75%	32	58	72	79

2-13 分析的面積依主動式透水鋪面設計或被動式透水鋪面設計而不同：主動式設計應該涵蓋建築物的覆蓋面、不透水面、不透水重車道、鄰近的自然覆蓋面如安全島及其它植栽面積等；被動式透水鋪面設計，只要考慮透水鋪面本身的面積，預多加入週緣的路鏈石及裝飾面。

2-14 設計暴雨每一小時的降雨量及由鄰近不透水面流入的逕流量，扣除滲入透水鋪面下土壤的水量後，必需儲存在透水鋪面系統中。以設計兩型連續計算24小時，若累積的水量超出透水鋪面的儲水量，則產生逕流。透水鋪面底下土壤之入滲對逕流量的影響也是分析的重點，只要透水鋪面中儲有水，就會有水繼續滲入底下的土壤中，直到透水鋪面的水都滲出，也就是回復到透水鋪面該有的100%儲水能力；此一回復時間，為代表透水鋪面成效的重要指標。尤其是在基地土壤較差時，回復時間過長，是主動式透水鋪面的成效致命傷，一般希望回復時間少於5天。如果回復時間超過5天，就應該設計暴雨排水設施，在這種情形下，考量降雨初期水質的淨化效果，設計透水鋪面還是很重要。

2-15 採用CN法分析，至少要輸出兩項數據，亦即以mm為單位的總逕流量及以天為單位的回復時間。用分析的總面積，可以將總逕流計算為立方公尺

2-16 估算表面逕流的「合理化公式法(Rational Method)」：此法估算設計暴雨在延時15或30分鐘時的最大逕流量，採用公式為：

$$Q=CIA$$

Q：最大逕流量(每秒多少立方公尺)

A：考慮的流域面積(平方公尺)

I：關鍵時間點的降雨強度(mm/hr)

C：逕流係數(依表面透水情形而變的0至1的小數)，一般鋪面的C值為0.98。

2-17 逕流係數是流域內各類表面逕流係數的加權平均值：例如某一流域中，若45%面積的C值為0.60，15%面積的C值為0.95，40%面積的C值為0.75，該流域的平均C值為：
 $0.45*0.60+0.15*0.95+0.40*0.75=0.71$

2-18 以「合理法」估算表面逕流時，透水混凝土依照其透水性質之差異，C值在0.05至0.35之間，建議可用表4選用。

表4 透水混凝土之逕流係數選用表

透水率(cm/hr)	逕流係數C
≥ 2.5	0.05~0.10
1.3~2.5	0.10~0.20
0.3~1.3	0.20~0.35

三、設計例

本設計例考慮之打算開發基地，其不透水面包括建築面積及不透水路面共14,000平方公尺，其中，不透水路面主要是進出貨區、彎道、及聯外道路等重載鋪面區，打算以基地中開闢28,000平方公尺的透水混凝土停車場，來容納主建築之排水量，及基地區內安全島、植生坡地、及其它未開發區共19,000平方公尺的逕流量。預計採用的透水混凝土鋪面厚150mm，孔隙率為15%，基底層採用200mm厚的清碎石，夯實後的孔隙率有40%。設計的2年暴雨為100mm，10年暴雨則為150mm。

由於納入分析的總基地面積為61,000平方公尺，區內用可能的四種土質先用式1及式2計算開發前的逕流狀況如表5所示。

表5設計例開發前的逕流狀況

狀況	HSG	CN	設計2年暴雨量 100mm	設計10年暴雨量 150mm
1	A	39	1.0	12
2	A	39	1.0	12
3	B	61	21	51.0
4	D	80	52	96.0

先假設所有停車場都是不透水面，依據開發基地內的土質狀況及開發的面積，先計算開發後的基地CN值，用不同土質開發面之面積加權平均求得，如表6所示。表6亦將這四種狀況的CN值，用式1及式2計算開發後的逕流量。由表6可知若沒有採用透水混凝土停車場，則逕流量會有相當明顯的增加。

表6 設計例開發後未設透水混凝土停車場之逕流量計算

狀況	HSG	CN	設計2年暴雨量 100mm	設計10年暴雨量 150mm
1	A	80	51	97
2	A	80	51	97
3	B	87	66	114
4	D	93	81	132

表7是依據不同的土壤狀況，用表3估算的土壤入滲率，將滲入土壤中的水量加以計算，配以表8初估的鄰近區域的CN值，可以綜合計算得開發後且加入透水混凝土停車場後之逕流量如表9所示。對照表5及表9可知，無論是以2年或是10年暴雨為設計基準，採用15公分透水混凝土，搭配20公分碎石底層的透水鋪面設計時，可有效地將開發的逕流量降回開發前的狀況，不會因開發案而增加逕流量。

表7 設計例之土壤入滲量估計

狀況	土壤類別	HSG	土壤入滲率(cm/hr)
1	砂質、排水良好	A	2.5
2	粉質砂土	A	1.3
3	砂質粉土	B	0.3
4	砂質黏土	D	0.03

表8 設計例中鄰近區域的CN值估算

狀況	HSG	開發後鄰近景觀區之CN
1	A	49
2	A	49
3	B	69
4	D	84

表9 設計例中開發後且加入透水混凝土停車場後之逕流量計算

		逕流量(mm)			
		2年暴雨量100mm		10年暴雨量150mm	
狀況	土壤入滲率	未設底層	200mm底層	未設底層	200mm底層
1	2.5cm/hr	8	0	28	0
2	1.3cm/hr	18	0	38	2.5
3	0.3cm/hr	43	5	89	51
4	0.03cm/hr	76	38	124	66

附錄二

工作會議紀錄

工作會議紀錄

工作會議紀錄

編號:002

採購案編號: MOTC-IOT-99-HIDB005

採購案名稱: 透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研(2/2)

時間: 99 年 09 月 06 日 上午: 10 時

主席: 謝明志 科長

記錄: 江佳良

出席者: 港研中心謝明志科長、陳桂清研究員、柯正龍研究員、張道光副研究員
朝陽科技大學李明君教授

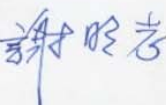
討論議題:

1. 有關試鋪成效評估作業與數據結果彙整分析會落後之原因，如何趕上？
2. 有關透水混凝土鋪面耐久性之討論？
3. 有關拌合廠進行透水混凝土試體製作試驗評估？
4. 有關工務段試鋪施工過程效率缺失之檢討。

結論:

1. 有關8月份計畫預定與實際工作內容比較，試鋪成效評估作業與數據結果彙整分析兩項有些落後，其原因為公路路面試鋪施工作業執行較慢，於今年八月十三日(星期五)才進場施工完成，未來公路路面現地試鋪成效評估作業將分三階段7、28 與56 天(不同齡期)進行，將於九月十日(星期五)至現地進行28天齡期鋪面試鋪成效評估作業，以期完成試鋪成效評估作業與數據結果彙整分析兩項。
2. 國外期刊並具體提到透水混凝土鋪面耐久性的評估是抵抗冰凍融解能力，透水混凝土鋪面抵抗冰凍融解可超過15年以上，國外部分透水混凝土鋪面壽命超過20年現今仍然存在，然而其透水混凝土孔隙容易被堵塞，國外常見的維護方法是真空清掃或高壓沖洗，以維護滲透率。
3. 當天工務段實鋪作業時，以學術單位製作試體比較適合做試驗評估，因為當天拌合廠出料時，因餘料不足無法製作足夠數量的試體，所以，拌合廠提出隔天比照配比設計製作 15 顆圓柱試體，但試體有垂流現象，無法通過試驗，目前進度是 7 天與 28 天齡期抗壓和抗彎試驗均完成。
4. 工務段試鋪施工當天，拌合廠出料速度有點過慢，導致施工上的效率不好，加上天氣炎熱水分蒸發速度有點過快，施工機具遲遲未到，不過還是順利完成工務段透水混凝土鋪面(道路)的施工，目前進行試鋪成效評估作業與數據結果彙整分析。

紀錄: 朝陽科技大學研究生江佳良

主席: 

附錄三

期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究(2/2)

合作研究單位：朝陽科技大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形
中央大學土木工程學系 李釗 教授 (共 6 項)	
1. 依報告內容初步觀察，本計畫似已依預定進度和內容執行，應予肯定。	1. 感謝肯定。
2. 報告內容詳細紀錄教育訓練和預拌場檢驗過程，對本計畫後續執行有正面幫助。	2. 感謝肯定。
3. 在可預見的未來，透水之水泥混凝土直接應用在公路路面的機會不大，故建議日後擬定計劃題目時，避免定在不易達成的目標上，並建議將來在期末報告中，說明計畫未實際直接用於公路路面的原因。	3. 期末報告將說明透水混凝土應用在公路路面可行性。
4. 透水混凝土的最大粒徑為 4.8mm。粒料會不會太小？會不會易造表面孔隙阻塞？	4. 透水混凝土的最大粒徑為 5mm (4.8mm) 不會造表面孔隙阻塞，透水能力良好。
5. 將來透水混凝土鋪面，擬每 6m 鋸一縫。混凝土板塊的尺寸愈大，其內部的應力亦愈大，板塊愈易裂縫，一般剛性鋪面的鋸縫間距為 4~6m，本計畫的鋸間距接近上限，請考量。本計畫既為研究計劃，建議不仿擬定不同鋸縫間距，以觀察鋸縫間距對日後板塊的裂縫有何影響。	5. 感謝建議！透水混凝土鋪面鋸縫間距可以再考量。有關鋸縫間距對日後板塊的裂縫有何影響，可於明年鋪設透水混凝土停車場擁有較大面積時，可擬定不同鋸縫間距。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形
6. 第五章，波浪溯升試驗，讀到後面才懂，建議在一開始先摘要說明此試驗的內容，並加試驗設備的示意圖，以增加易讀性。	6. 第五章波浪溯升試驗內容並未完成，期末報告將增加相關內容，以增加易讀性。
臺灣海洋大學材料工程研究所 楊仲家 教授 (共 4 項)	
1. 請刪除 p.2-14，第 10~11 行「大約 50~80%...，20~30%」之文字。	1. 接受建議刪除多餘文字。
2. 請提供現地試驗試鋪混凝土新拌與硬固之材料性質。	2. 接受建議期末報告將增加相關內容。
3. 請確認公路路面試鋪之日期及配合施工之相關事宜。	3. 正積極協調路面試鋪之日期及配合施工之相關事宜。
4. 請將溯升試驗溯升高度與混凝土強度合併評估海堤之安全性。	4. 接受建議期末報告將增加相關內容。
臺灣海洋大學河海工程學系 張建智 教授 (共 4 項)	
1. 文獻回顧內容豐富，為索引時請依參考文獻順序。	1. 接受建議期末報告將調整。
2. p.3-4 有關元太和預拌混凝土場的介紹內容，建議能夠再精簡，以避免於報告中為預拌廠宣傳。	2. 接受建議期末報告將調整。
3. 表 5-1 混凝土之配比中，普通混凝土之水灰比已超過 0.6，其中 28 天抗壓強度即為 476 kgf/cm^2 ，是否有誤？請檢核。	3. 接受建議將檢核表 5-1 混凝土之配比與強度。
4. 未來透水混凝土擬應用於海堤結構物上，基於安全與實用之考量，理應將強度再予提昇。	4. 接受建議強度應再予提昇。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形
本所港研中心 謝明志 科長 (共 3 項)	
1. 報告提到透水混凝土有到現地試做現地試鋪，並施作透水試驗，此試驗成果宜在報告內呈現。	1. 接受建議期末報告將增加透水試驗相關內容。
2. 試鋪過程中，照片上有看到卡車載料傾倒，因透水混凝土水量控制極為重要，整個載運過程，是否在水量控制保存方面有否特別措施。	2. 預拌廠至工地很近(約 500 公尺)，載運過程影響不大。
3. 簡報 38 頁，透水混凝土抗壓強度，3 種試體的變異指數高達 34%，表示品質不易控制，若要應用到現地，可能會有疑慮，是否在品質控制方面，多思考一些改進方法。	3. 透水混凝土搗實程度與抗壓強度有很大影響，未來應用到現地，將規定兩種搗實程度與方法。
本所港研中心 柯正龍 研究員 (共 7 項)	
1. 報告格式請參照本所出版品規定辦理。	1. 接受建議期末報告將調整。
2. 粒料請修正為粒料。	2. 接受建議期末報告將調整。
3. p.1-4 倒數第 4 行，「設計密度為準正負 80 kg/立方公尺」，建議修正為「設計單位重為 $\pm 80 \text{ kg/m}^3$ 」	3. 接受建議「設計密度」修正為「設計單位重」。
4. p.1-9 及 p.1-11 之流程圖，建議與 p.1-8 及 p.1-10 之第一年與第二年工作內容稍作調整。	4. 接受建議期末報告將調整。
5. p.2-1 第 2.1.1 章節中述及學者鄭與潘部份，與引述參考文獻〔2-3〕之關聯性是否有誤，請說明。	5. 感謝指正應為參考文獻〔7〕。

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形
6. 表 4-1 建議重新整理及繕打。	6. 接受建議期末報告將表 4-1 重新整理及繕打。
7. 表 4-2 第 3 欄，停留節號%，是否應改為停留百分比？	7. 接受建議期末報告將調整。

附錄四

期末報告審查意見答覆表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究(2/2)

合作研究單位：朝陽科技大學

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
中央大學土木工程學系 李釗 教授 (共 6 項)		
1. 既有章節討論預拌廠與材料認可，建立說明認可項目和標準。	1. 相關認可項目和標準詳 3.2.2 拌合廠教育訓練與材料認可。	同意辦理
2. 表 3-3，建議加註粒料級配。	2. 感謝建議！粒料級配詳表 5-6 粗粒料篩分析。	同意辦理
3. 圖 4-4，照片 4-1，在透水混凝土下的碎石級配層底部設置側向排水管，並鋪設不透水的織布，將已向下滲透的雨水排入排水溝，似失去透水混凝土可使雨水向下滲透進入底層的精神，請說明此作法的考量依據。	3. 圖 4-4 與照片 4-1 其設計考量為瞬間暴雨發生，當碎石級配層底部已無法繼續向下排水時，則可進行水平逕流至排水溝，至於不透水的織布是可透水的，乃是防止基層砂土流失。	同意辦理
4. 圖 4-5，應非施工縫，請另尋適當名詞。	4. 接受建議！施工縫改為施工切縫。	同意辦理
5. 表 4-6，不宜分頁。	5. 接受建議！已合為壹頁。	同意辦理

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
6. 第 4-23 頁，抽驗數量以每 75m^3 取一組。可能過大，若施工厚度為 20cm，則面積相當於 375m^2 。若車道為 6m，則每 60m 抽驗一次。	6. 當初與設計建築師討論過，一般混凝土抽驗數量以每 100m^3 取一組，而透水混凝土抽驗以每 75m^3 取一組應是合理。	同意辦理
臺灣海洋大學材料工程研究所 楊仲家 教授 (共 7 項)		
1. 文獻之整理完整，極具參考價值。	1. 感謝肯定。	同意辦理
2. P3-3 表 3.1，用量單位建議置於膠結料及骨材欄位。	2. 因有兩種用量單位，故無法將單位置於膠結料及骨材欄位。	同意辦理
3. 試鋪配比設計及試拌相關工作嚴謹完整。	3. 感謝肯定。	同意辦理
4. P5-1 表 5.1 強塑劑百分比，建議加入何種材料之百分比。	4. 採用日本 TAKEMOTO 竹本油脂進口之強塑劑，於 P5-6 已針對強塑劑作說明。	同意辦理
5. 溯升試驗設計、方法、步驟及成果極佳，值得肯定。	5. 感謝肯定。	同意辦理
6. P6-4 圖 6.2 抗”灣”字請修正。	6. 已修正。	同意辦理
7. P6-5 之公式請重新打字。	7. 抗彎強度計算式已修正。	同意辦理
臺灣海洋大學河海工程學系 張建智 教授 (共 6 項)		
1. 研究內容符合計畫工作目標，研究成果亦具實用性。	1. 感謝肯定。	同意辦理

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
2. 透水混凝土品質變異大，未來應如何加強品管作業或有何改善對策可列為日後之研究重點。	2. 透水混凝土品質變異大，混凝土預拌廠的製程控制管理相對重要，未來應特別加強新拌混凝土單位重檢驗與是否垂流判視。	同意辦理
3. 報告內容為求其連貫性，建議 chapter 5 及 chapter 6 加以互換。	3. 接受建議已將 chapter 5 及 chapter 6 互換。	同意辦理
4. 本研究的配比設計理念及依據為何？請補充說明。	4. 本配比其設計理念及依據為參考本研究案前期的配比資料，由元太和預拌混凝土廠進行配比設計與試拌，再經監造與業主審查，確認以符合典型透水混凝土鋪面配比的範圍。	同意辦理
5. 有關結論 9 之敘述，建議加以刪除。	5. 接受建議刪除原有結論 9，並增列成果是有關透水混凝土鋪面設計導則草案。	同意辦理
6. 現地鋪面紅外線鋪面溫度量測，其意義為何？請補充說明。	6. 現地鋪面紅外線溫度量測其意義為瞭解試鋪地點試鋪前中後拍攝其鋪面檢視熱影像圖之溫度變化，以利鋪面的特性評估與成效評估之判斷。	同意辦理
本所港研中心 謝明志 科長 (共 2 項)		
1. 透水混凝土的研究，配比和製程控制應是重點，本研究在現地鋪設的過程上也呈現一些缺失。因明年主體工	1. 接受建議，增加相關內容於第七章建議和附錄四透水混凝土鋪	同意辦理

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
程完工後，也要鋪設較大面積的停車場，建議針對這次的缺失及明年的需求，擬出最佳製程控制建議，包含鋪設工人的教育訓練，行前的充份溝通等，並將此建議放入第七章。	面設計導則修正，可參照本研究上期之透水混凝土的材料與施工技術規範草案。	
2. 本研究所得透水混凝土的透水值到達1000ml/15sec，遠高於日本所訂的400ml/15sec的要求，建議在材料配比上可做調整，使透水可符合日本的規定。且可提高強度。	2. 明年停車場透水混凝土配比可做調整，以提高鋪面強度。	同意辦理
本所港研中心 柯正龍 研究員 (共 7 項)		
1. 期中報告審查意見處理情形表，對照合作單位處理情形與本報告初稿內容部份尚未更正，建議再行查核訂正。	1. 接受建議期末報告已將「骨材」修正為「粒料」。	同意辦理
2. 附錄四透水混凝土鋪面設計導則（初稿）內容，針對混凝土材料選用、配比設計、施工方法等均無著墨，在實際應用上可能無法發揮效益，建議應予補充或請說明。	2. 接受建議詳附錄四。	同意辦理
3. 表 5-1 中，透水混凝土設計配比添加矽灰，其經濟效益是否可行？（可否用爐石粉、飛灰）	3. 矽灰效果好但單價較高，或可用爐石粉或飛灰替代，其經濟效益也許較可行。	同意辦理
4. P2-12，圖 28 流程圖中，遇 yes/no 選項時，該項目外框建議以菱形顯示。	4. 接受建議。	同意辦理

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
5. 報告內容使用單位，建議應儘量以公制表示。	5.接受建議。	同意辦理
6. 表 5-4 建議中文化。	6.接受建議表 5-4 中文化。	同意辦理
7. P1-3 透水 W/C 0.35~ 0.45，P2-8 但表 2.2 為 0.25~ 0.35，P2-6 0.25~0.45？	7.P1-3 為一般透水混凝土的水膠比，表 2.2 為典型透水混凝土鋪面的水灰比，P2-6 為良好的水灰比，此三者些差異，文獻資料來源有所不同之故。	同意辦理

附錄五

期末報告簡報資料



透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之研究(2/2)期末簡報



計畫主持人： 李明君 教授
協同主持人： 顏聰 講座教授、邱垂德 教授
、黃怡碩 助理教授
執行單位： 朝陽科技大學營建工程系
中華民國 九十九年 十一月 十八日

1

報告大綱



- 第一章 緒論：背景、研究內容與工作項目
- 第二章 文獻回顧
- 第三章 公路路面試鋪透水混凝土配比設計與試拌
- 第四章 公路路面試鋪施工作業執行
- 第五章 實驗室模擬透水混凝土應用在海堤對於波浪溯升之評估
- 第六章 公路路面試鋪成效評估作業
- 第七章 結論與建議

2

第一章 緒論 台灣現況

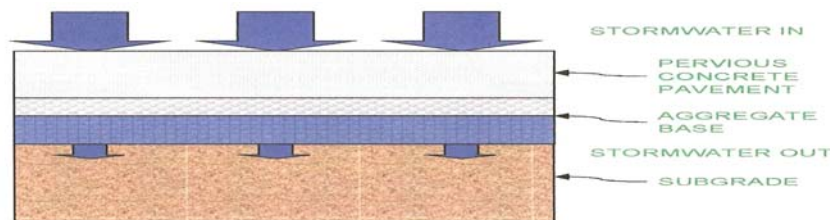
- 過去二十年國內經濟發展快速，多數區域均呈現都市化現象，大量鋪設不透水面層，使得不透水面積逐年增加，降低區域地表保水效能，導致各都會區水災頻傳。
- 台灣鋪面工程幾乎均採用不透水鋪面材料，主要考量耐用、美觀及保護地下工程設施等因素。



3

第一章 緒論 國外現況

- 美國環保署（EPA）認為適當使用透水混凝土是控制初始急流污染（first-flush pollution）及暴雨管理（storm water management）的最佳方式，並利用訂定區域暴雨逕流量的限制條件，鼓勵使用透水混凝土做為道路面層材料。



4

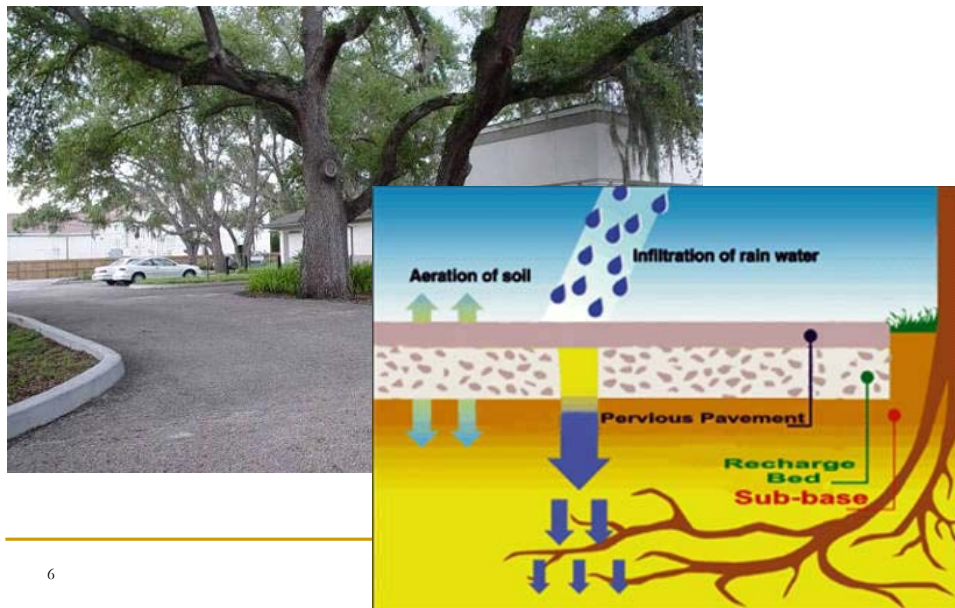
Environmental Benefits

- Storm water is polluted
 - Oils and greases
 - Metals
 - Sediments
 - Fertilizers
- About 90% of the surface pollutants are carried off by the first ½-inch to 1-inch of rainfall (first flush)



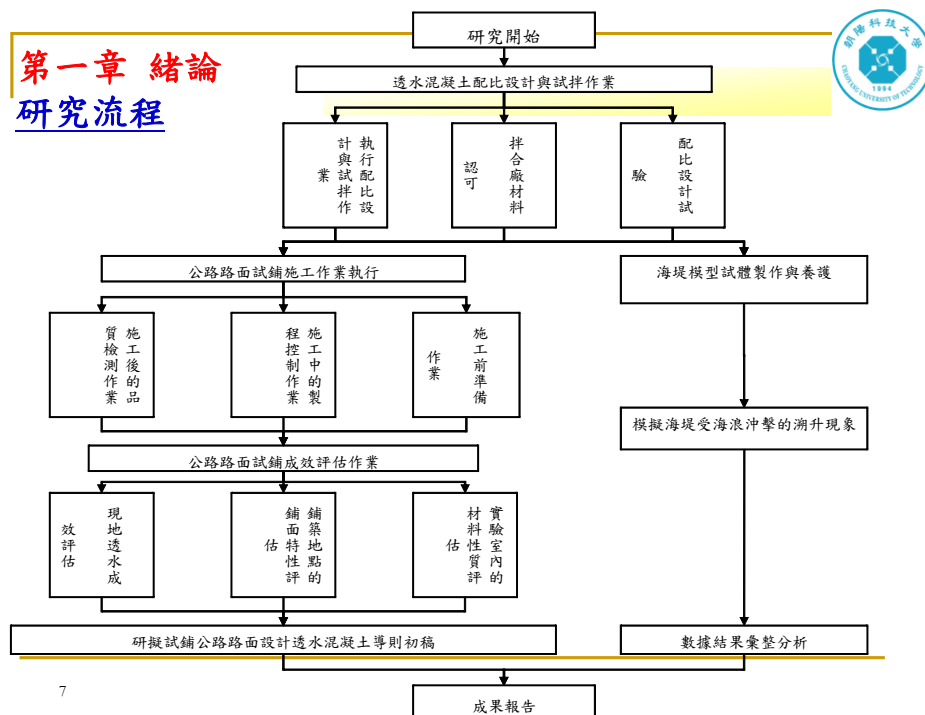
5

Reduce Irrigation



6

第一章 緒論 研究流程



第二章 文獻回顧 ACI 522R-06 透水混凝土配比



W/C
too low?

Pavement
Raveling

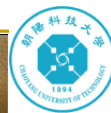
W/C too high?



Pavement
Sealing

9

W/C just right!



10

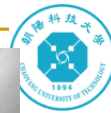


透水混凝土之施工

透水混凝土施工方式與一般混凝土大同小異，因細料含量稀少工作度較低(接近零坍度)，水泥漿包覆骨材表面與空氣接觸量大，極易失去工作性，故施工要領應「迅速」進行施作，由於目前透水混凝土在鋪面工程上已使用甚廣，茲以鋪面工程作為施工主要流程說明，詳如以下照片(ACI 522R-06)



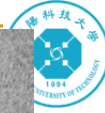
11



透水混凝土卸料、澆置、攤平施工



12



透水混凝土壓密、切縫、養護施工



13

第二章 文獻回顧

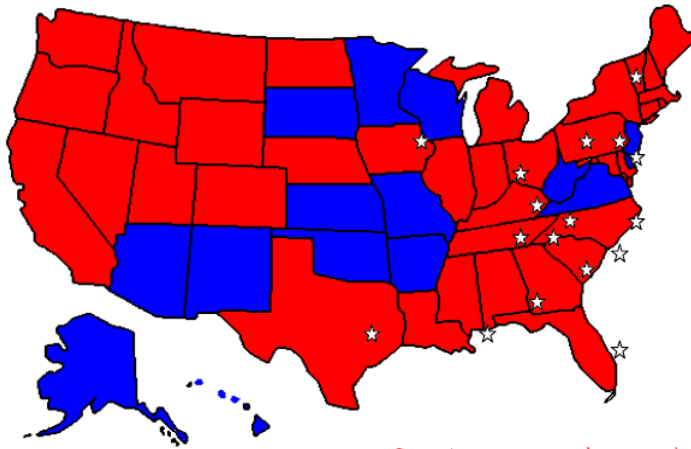


■ 透水混凝土研究彙編：過去、現在與未來

過去數年來，美國一直不斷的投注資源與經費於透水混凝土研究上，如下圖所示，有超過2/3的州政府進行此項研究或人員訓練，至少有17所美國大學拿到政府透水混凝土研究經費，透水混凝土應用於停車場與行人道鋪面已經成為焦點與喜好，未來應該投入更多的資源與研究於都市道路、公路及機場之底層、高速公路路肩、橋樑基座、海濱結構、人工漁礁和海堤等。

14

美國透水混凝土研究



State Association websites with pervious links,
training or research

State Association websites with no pervious links,
training or research

☆ Denotes University that performs pervious
research

15

第三章公路路面試鋪透水混凝土配比設計與試拌

- 3.1路面透水混凝土配比設計試驗：1使用材料與配比設計原則 2 材料配比設計
- 3.2拌合廠與材料認可：
 - 1 拌合廠管理狀況.
 - 2 拌合廠教育訓練與材料認可
- 3.3執行配比設計與試拌作業：
 - 1 驗證配比 2 執行試拌作業與現地試鋪

16

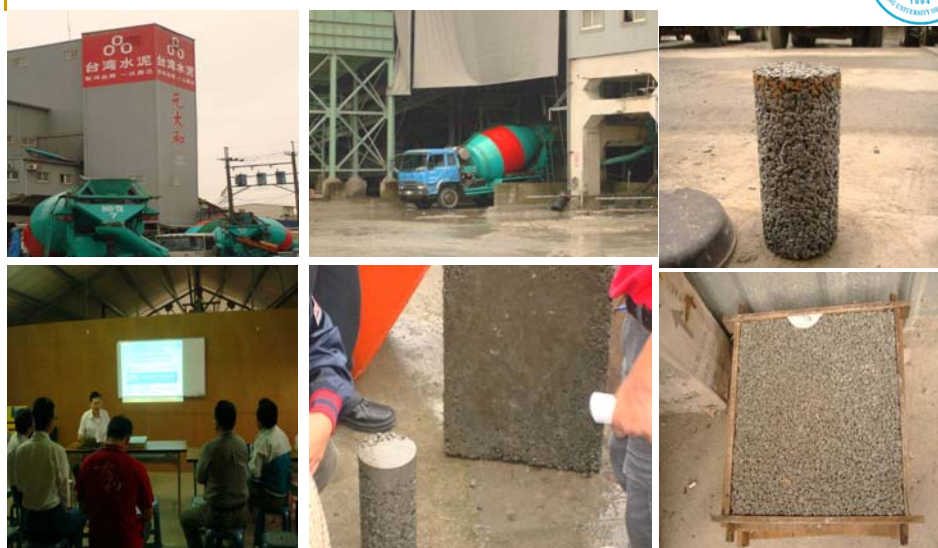
3.1 路面透水混凝土配比設計

表3.1 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍【31】

	膠結料(B)	骨材(A&F)	水膠比(W/B)	骨材膠結比(A/B)	細粗骨材比(F/A)
材料用量(lb/yd ³)	450 ~ 700	2000 ~ 2500	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5
材料用量(kg/m ³)	270 ~ 415	1190 ~ 1480	0.25 ~ 0.35	4 ~ 4.5	0 ~ 0.5

17

3.2 拌合廠舉行教育訓練與材料認可



預拌廠教育訓練照片

透水混凝土垂流與孔隙堵塞照片

透水混凝土試樣(圓柱與版)扁平率過高

18

3.3 執行配比設計與試拌作業： 驗證配比 & 執行試拌作業與現地試鋪

設計 水灰比	骨材粒徑 (mm)	粗骨材 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	強塑劑 (kg/m ³)	單位重 (kg/m ³)
0.29	4.8	1530	340	100	2	1972

承包商與預拌廠配合現地施作試鋪工程，透水混凝土試拌量至少需達一立方公尺，現地施作試鋪面積暫定為兩公尺見方，厚度為20公分。

19

3.3.2 執行試拌作業與現地試鋪



照片3.6骨材扁平有改善



照片3.8試鋪時模版組立與碎石鋪設情形



照片3.7新拌透水混凝土卸料至卡車之情況



照片3.9透水混凝土由卡車卸料至試鋪基地

20

3.3.2 執行試拌作業與現地試鋪



照片3.11使用鏟子與推平扒攤平新拌透水混凝土



照片3.12透水混凝土滾筒壓密與完成面之施作



照片3.13鏟刀邊飾透水混凝土以改善角落邊緣外觀



透水混凝土鋪面透水試驗

21

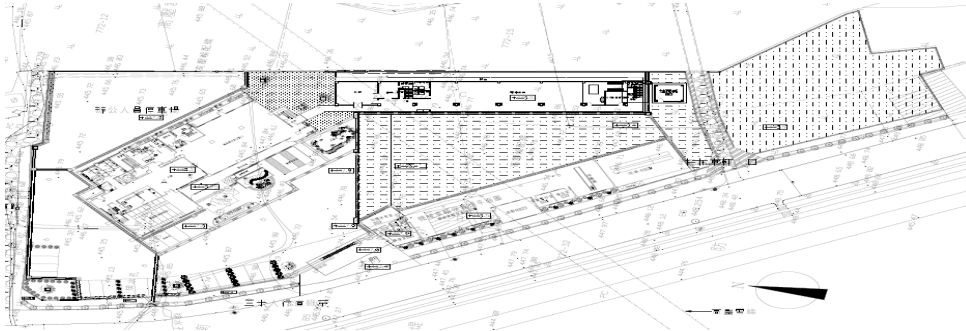
第四章公路路面試鋪施工作業執行

- 4.1 透水混凝土路面規劃設計
- 4.2 施工前的準備作業
- 4.3 施工中的製程控制作業
- 4.4 施工後的品質檢測作業

22

4.1 透水混凝土路面規劃設計

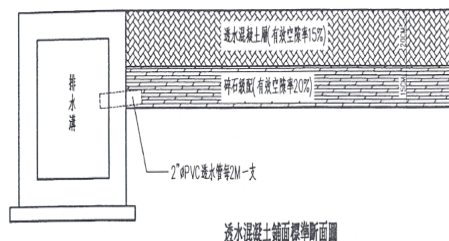
公路總局第二區養護工程處「埔里工務段辦公大樓新建工程」本工程透水混凝土鋪面分為停車場與道路部分，道路可配合本研究計畫試鋪，停車場要等到明年主體結構完成後再進行施作。



23



本工程透水混凝土鋪面道路部分



24

4.2 施工前的準備作業

4.2.1 試鋪路面施工場址準備

施工場址路基土壤試驗結果由美國AASHTO土壤分類表查知屬於A-1-a，表示是由石片、礫石、砂土等組成，為優良路基土壤材料，再由表4.5土壤滲透係數k值簡易對照表可查知該土壤滲透係數K值應大於 10^{-5} m/sec以上，滲透性良好。

表4.3 路基土壤分類試驗結果

通過 #10	通過 #40	通過 #200	液性 限度	塑性 限度	塑性 指數	土壤 分類
16.3%	7.1%	1%	N.P.	N.P.	0	A-1-a
土質			砂土	粉土	黏土	高塑性 黏土
土壤滲透係數 K(m/s)			10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}	10^{-11}



25

4.2.2 試鋪施工前之教育訓練

日期	時間	課程題目	講員/主持人
民國九十九年七月五日 (星期一)	08:45~09:05	報到	
	09:05~09:15	致詞	◎公路總局第二區養護工程處長官 ◎交通部運研所港研中心長官
	09:15~10:05	透水混凝土特性與應用	顏聰 講座教授 (朝陽科技大學營建工程系)
	10:05~10:55	透水混凝土在鋪面工程之應用	邱垂德 教授 (中華大學營建管理研究所)
	10:55~11:10	休息	
	11:10~12:00	透水混凝土應用在港灣構造物設施與公路路面成效評估之初步成果	李明君 教授 (朝陽科技大學營建工程系)
	12:00~12:50	綜合座談會暨午餐時間	◎公路總局第二區養護工程處長官 ◎交通部運研所港研中心長官 ◎以上講員教授

與會人士包括第二區養護工程處各工務段相關人員、設計監造人員與承包商(含協力廠商)約三十人。

26

4.3 施工中的製程控制作業



照片4.2 基層不織布鋪設完成



照片4.3 底層工地密度試驗之進行



照片4.5 底層碎石級配完成



照片4.8 透水混凝土外觀

27

4.3 施工中的製程控制作業



照片4.11 透水混凝土由卡車卸料



新拌透水混凝土無垂流現象



透水混凝土澆置與攤平



照片4.14 使用小山貓協助搬運與攤平

28

4.3 施工中的製程控制作業



照片4.15 刮平與振動搗實情形



照片4.16 此振動刮板效果不良



照片4.17 使用大滾筒滾壓情形



照片4.18 使用小滾筒滾壓情形

29

4.3 施工中的製程控制作業



照片4.19 透水混凝土最終壓實情形



照片4.21 使用滾筒刀片切縫情形



照片4.22 塑膠布覆蓋養護情形



製作透水混凝土試體與測量單位重(1836kg/m^3)

30

4.4 施工後的品質檢測作業

預拌廠所製作之抗壓圓柱試體有垂流阻塞孔隙現象，本檢測所用試體為研究單位於透水混凝土施工當天所製作之抗彎強度試體(尺寸為**15cm×15cm×53cm**)，並測得其氣乾單位重為**1761kg/m³**較其新拌混凝土(**1836kg/m³**)為小，但仍符合一般透水混凝土單位重之範圍。抗壓試體是由抗彎試體鋸切為三個正立方體(尺寸為**15立方公分**)，其混凝土七天抗壓強度分別為**83.81**、**88.98**與**120.76 kg/cm²**；抗彎試體有兩個(**15cm×15cm×53cm**)，其混凝土七天抗彎強度分別為**2.56**與**2.46 kg/cm²**，現地厚度與現地透水能力亦符合規定。

31

4.4 施工後的品質檢測作業



照片4-25 試體有垂流阻塞孔隙現象



照片4-26 抗彎試體外觀



鋪設厚度符合設計厚度20cm



照片4-28 現地自來水水管透水能力測試

32



第五章 實驗室模擬透水混凝土應用在海堤對於波浪溯升之評估

- 5.1 試驗材料及配比
- 5.2 試驗儀器與設備
- 5.3 試體製作與養護
- 5.4 試驗方法與步驟:單位重, 抗壓試驗, 溯升試驗
- 5.5 基本力學試驗
- 5.6 溯升試驗成果:1. 溯升試驗入流量比較, 2. 不同混凝土材料海堤溯升高比較

33



第五章 實驗室模擬透水混凝土應用在海堤對於波浪溯升之評估

- 本試驗主要研究針對**透水混凝土**與普通混凝土製成的兩種混凝土海堤進行實驗室內溯升模擬試驗，比較相互的溯升現象。



- 本試驗試體坡度是根據台中港海堤坡度比例製作，尺寸為長40cm×底30cm×高20cm 三角形（坡度比例 高=1：底=1.5）的海堤試體進行溯升試驗。

34



試驗配比

Kg/m ³	普通混凝土	透水混凝土
水泥(Kg)	342	432
砂灰(Kg)	0	48
細骨材(Kg)	785	0
粗骨材(Kg)	926	1440
水(Kg)	222	106
強塑劑	1%	1%

35



混凝土單位重

- 混凝土單位重試驗於拌合二種配比混凝土時，進行單位重試驗，試驗數據如下表所示，由表可以看出透水混凝土單位重未超過2000 kg/m³，每立方較普通混凝土少381kg以上。

混凝土	普通混凝土	透水混凝土
單位重(kg/m ³)	2276	1895

36

混凝土單位重

- 混凝土單位重試驗於拌合二種配比混凝土時，進行單位重試驗，試驗數據如下表所示，由表可以看出透水混凝土單位重未超過 2000 kg/m^3 ，每立方較普通混凝土少 381kg 以上。

混凝土	普通混凝土	透水混凝土
單位重(kg/m^3)	2276	1895

36

抗壓強度

- 混凝土試體灌置完成24 小時後拆模，接著以一天澆三次水，以塑膠桶倒蓋以防水份蒸發，下表為28天齡期混凝土抗壓強度與其變異係數情形。透水混凝土平均強度達到 90.4 kgf/cm^2 ，普通混凝土平均強度達 356.6 kgf/cm^2 與馮乃謙[47]文中提到的防波堤混凝土強度相近。

配比	抗壓強度			平均值	變異係數
普通混凝土	347.2	364.0	358.4	356.6	2%
透水混凝土	133.6	70.76	66.79	90.4	34%

37

波浪溯升試驗儀器(1)

1. 土石流水槽儀

水槽之裝置主要可分為水槽主體及堆積盤等二部分，各部分之組成與功用說明如下：

a. 水槽主體：

水槽寬40 cm，高40 cm，長600 cm，實際流動長度約為420 cm，以不鏽鋼板為底部，兩側為透明玻璃板；水槽之傾角可自由調整，動力由電動馬達供給，角度變化為0~32 度，水槽主體如照片所示。



38

波浪溯升試驗儀器(2)

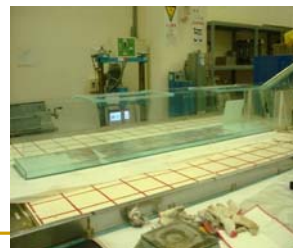
b. 堆積盤：

以長320 cm×寬200 cm×深10 cm 之不鏽鋼製成，堆積盤尾端有一直徑15 cm 之開口，如照片所示。



2. 玻璃水道

本試驗器材委託久碇有限公司製造，利用強化玻璃製作尺寸為 300cm×40 cm×45cm之空心玻璃水道，如照片所示。



39

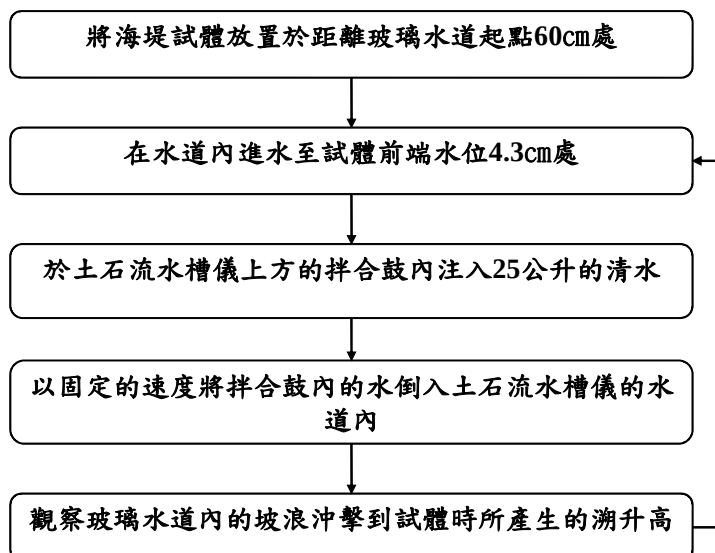
試驗方法

- 驗開始前，先將訂製的強化玻璃水道裝置於土石流水槽試驗儀前，藉此延伸水道長度，並架設攝影機以輔助紀錄溯升高。



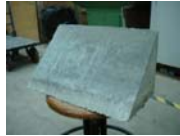
40

試驗步驟

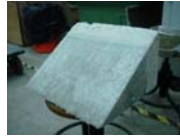


41

不同坡度之海堤



海堤坡度1:1



海堤坡度1:1.5



海堤坡度1:2



海堤坡度1:1



海堤坡度1:1.5



海堤坡度1:2

42

溯升試驗入流量比較

- 溯升試驗所設定之不同流量所產生之溯升高度試驗結果如下表所顯示，最高為流量8.3 L/sec其溯升高度為26.9cm，第二為流量6.7 L/sec其溯升高度為19.5cm，最後為流量5.0 L/sec其溯升高度為16.7cm。

平均流量(L/sec)	平均溯升高(cm)
5.0	16.7
6.7	19.5
8.3	26.9

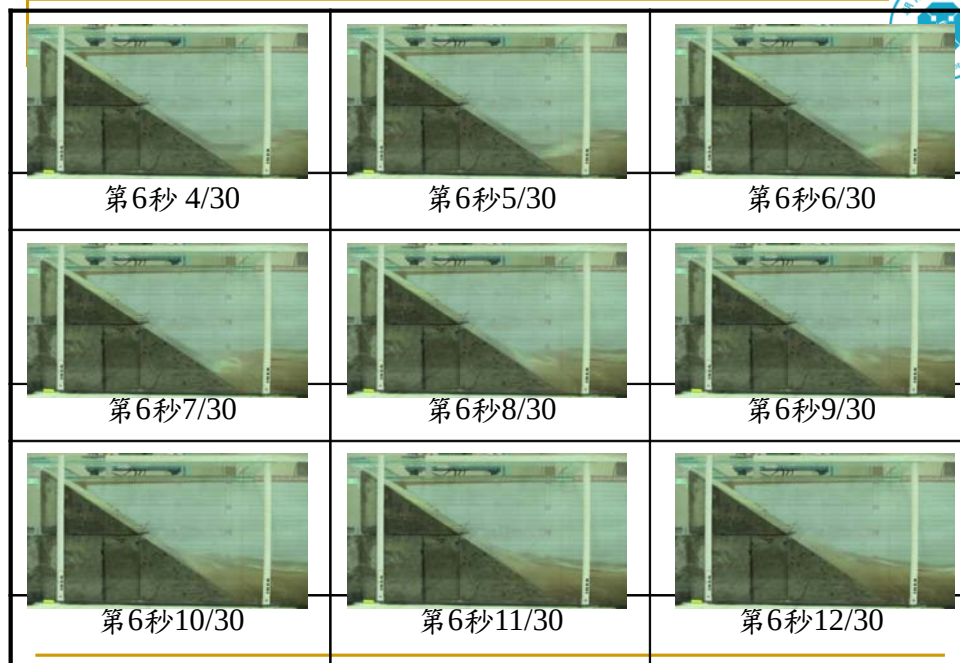
43

不同混凝土材料海堤溯升高比較

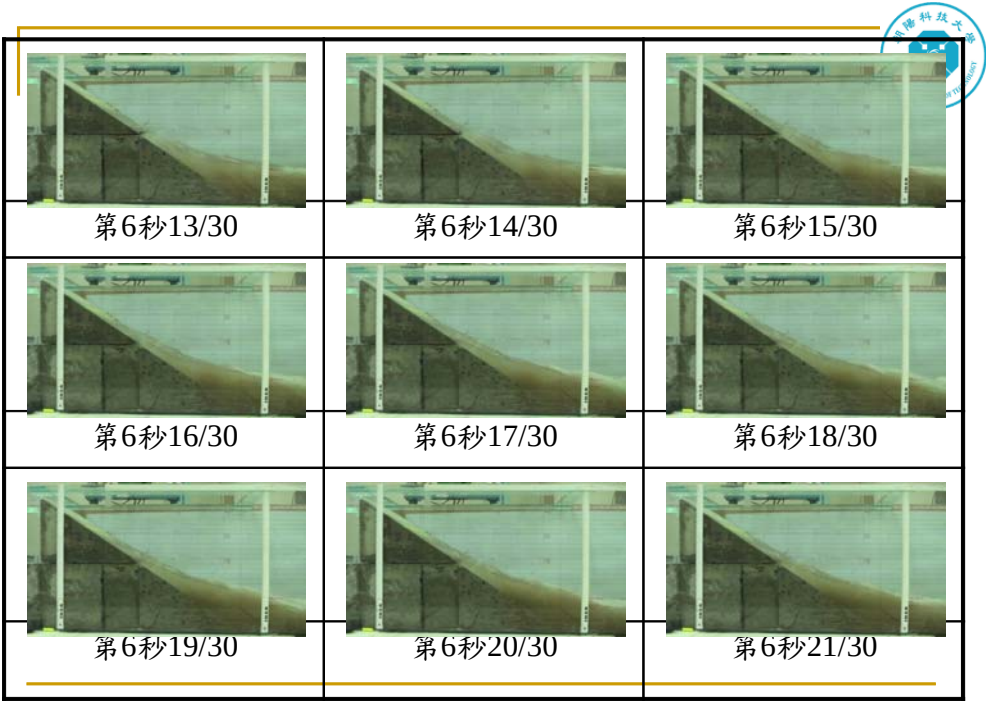
- 試驗條件為土石流儀水槽角度為 20° 、水量25L及試體前端水位高4.3cm，藉由重力的方式產生湧波型的波浪溯升試驗結果如表所示。

水量25L 坡度1:1.5	溯升高 cm	
	普通混凝土	透水混凝土
1	29.2	20.7
2	29.7	17.2
3	27.7	21.7
4	26.7	20.7
5	24.2	19.7
6	24.2	17.7
7	26.7	16.7
8	28.7	21.7
9	33.7	20.7
10	32.2	25.7
11	25.7	15.7
12	23.7	17.7
13	30.7	21.7
14	24.7	16.7
15	23.7	17.7
16	27.2	17.7
17	24.7	22.7
18	24.7	14.7
19	25.7	15.7
20	24.7	21.7
平均	25.7	18.6
變異係數	10.61%	14.56%

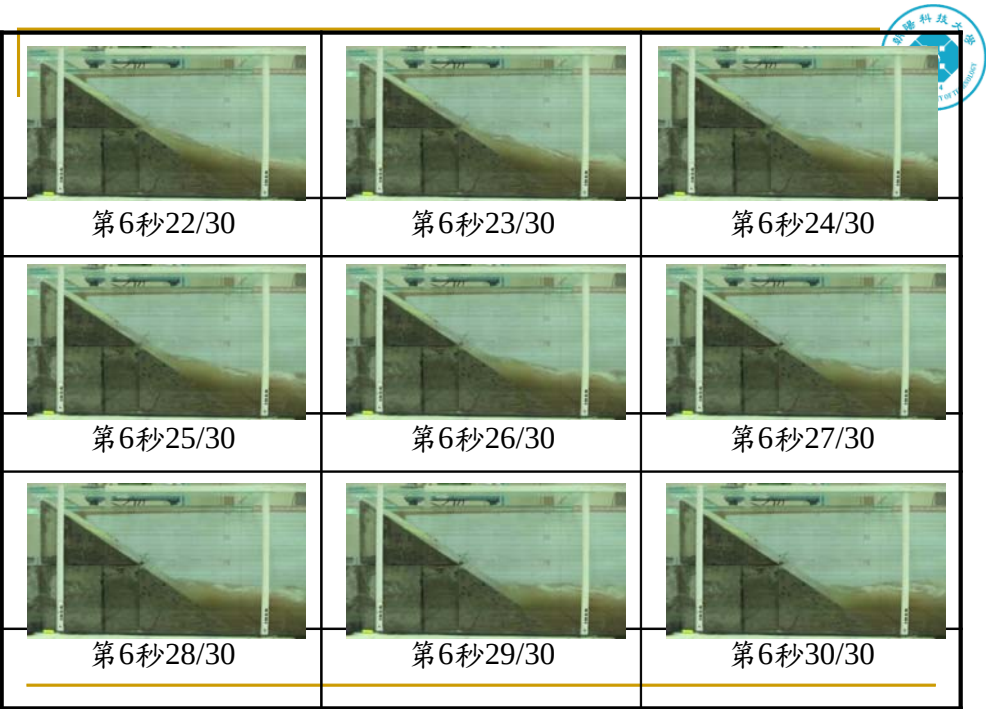
44



45



46



47

不同坡度海堤溯升高比較

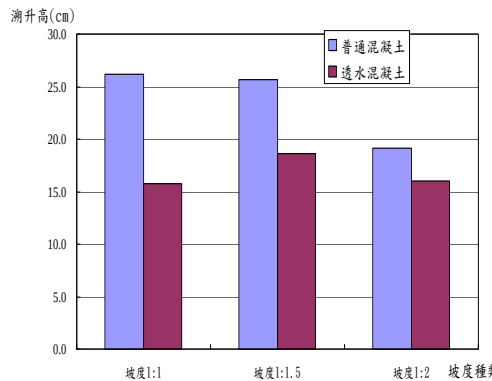


圖5-15 不同坡度海堤溯升高比較

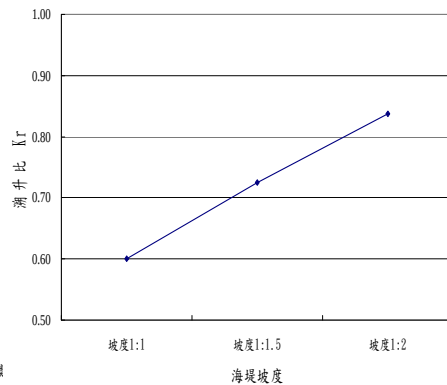


圖5-16 不同坡度海堤溯升比

當海堤坡度1:1時，溯升比 $k_r = 0.60$ ；海堤坡度1:1.5時， $k_r = 0.72$ ；海堤坡度1:2時， $k_r = 0.83$ ，顯示出，坡度較陡峭時，透水混凝土海堤的溯升減少率越小；而透水混凝土海堤的溯升比 k_r 約為普通混凝土海堤的0.60~0.83。

第六章 公路路面試鋪成效評估

- 埔里工務段辦公大樓新建工程
 - 地點
 - 位於南投縣埔里鎮南方，南安路、水頭路、南環路、及隆生路之間，緊鄰屬於烏溪上游南港溪堤防之南環路上
 - 實驗
 - 透水混凝土抗壓試驗
 - 透水混凝土抗彎試驗
 - 現場透水量試驗
 - 透水鋪面平坦度試驗
 - 非破壞性反彈錘試驗
 - 現地鋪面紅外線鋪面溫度檢視

透水混凝土抗壓試驗

- 測試時用石膏蓋平試體表面，以保持試體表面的平整，避免受力不平均
- 抗壓試體大小為15cm×15cm×15cm試體
- 試體齡期分別為28天、56天
- 試體在拌合後，分兩層由4.5公斤之夯錘分層夯實26下，灌置在抗彎模中



50

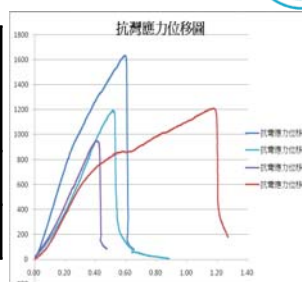
抗壓強度結果

試體編號	28天抗壓強度(kg/cm ²)	試體編號	56天抗壓強度(kg/cm ²)
B1	95.26	C1	102.07
B2	99.76	C2	103.76
B3	64.53	C3	90.51

51

抗彎試驗 (試體大小為53cm×15cm×15cm)

試體編號	28天最大 壓應力(kN)	試體編號	56天最大 壓應力(kN)
B1	16.35	C1	9.46
B2	11.94	C2	12.07



試體編號	28天抗彎強度 (kg/cm ²)	試體編號	56天抗彎強度 (kg/cm ²)
B1	5.45	C1	3.15
B2	3.98	C2	4.02

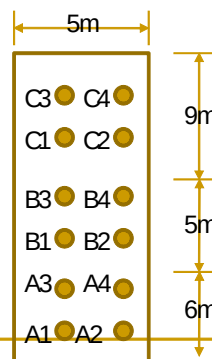
52

現地透水試驗

目的:主要作為排水性鋪裝之透水性能力評估

■ 現地規劃

- 現地鋪面以距縫來分為3段，分別為第一段9公尺為A段，第二段5公尺為B段，第三段6公尺處為C段
- 每段取4個點來施作現地透水試驗



53

現地透水量結果

單位(現場透水量): ml/15sec



段位	段位編號	秒數	段位編號	秒數
A段	A1點	6.2s	A2點	7.4s
	A3點	5.8s	A4點	5.4s
B段	B1點	5.6s	B2點	5.6s
	B3點	6.4s	B4點	5.7s
C段	C1點	5.7s	C2點	5.9s
	C3點	5.7s	C4點	5.9s
段位	段位編號	透水量	段位編號	透水量
A段	A1點	968	A2點	811
	A3點	1034	A4點	1111
B段	B1點	1071	B2點	1071
	B3點	938	B4點	1053
C段	C1點	1053	C2點	1017
	C3點	1053	C4點	1017

54 日本排水性鋪裝技術指針之現場透水量試驗規範(400ml/15sec)

目視鋪面透水驗證試驗



- 現地自來水水管透水能力試驗其最大水流量約為每分鐘**20**公升，另有混凝土預拌車裝滿水，其灌水流量約每分鐘**3**立方公尺，透水驗證時間各約**3**分鐘；不停的澆置在透水鋪面中，目視水是否能夠完全滲透進透水混凝土鋪面。

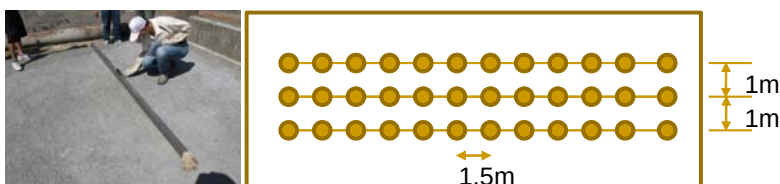


55

透水鋪面平坦度試驗(三公尺直規)

■ 現地規劃

- 左、中、右三段以路面寬5公尺取中央值為中部段，左右各拉一公尺
- 每段間隔1.5公尺取一點高低差值，各取12點



56

透水鋪面平坦度試驗結果(9月8日)

左		中央		右	
間隔	高低差值	間隔	高低差值	間隔	高低差值
1.5m	-13	1.5m	0	1.5m	3
3m	10	3m	-5	3m	-3
4.5m	1	4.5m	0	4.5m	-7
6m	1	6m	14	6m	5
7.5m	9	7.5m	-4	7.5m	9
9m	-20	9m	-12	9m	-18
10.5m	5	10.5m	5	10.5m	13
12m	-3	12m	5	12m	4
13.5m	3	13.5m	3	13.5m	-8
15m	3	15m	4	15m	-8
16.5m	-1	16.5m	1	16.5m	6
18m	-4	18m	-8	18m	-10

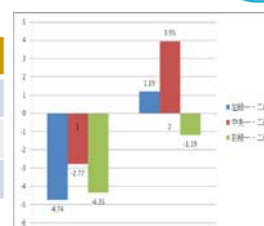
透水鋪面平坦度試驗結果(10月26日)

左		中央		右	
間隔	高低差值	間隔	高低差值	間隔	高低差值
1.5m	-5	1.5m	-8	1.5m	-5
3m	1	3m	5	3m	10
4.5m	-4	4.5m	4	4.5m	-3
6m	1	6m	-3	6m	-3
7.5m	4	7.5m	3	7.5m	9
9m	-7	9m	-12	9m	-14
10.5m	13	10.5m	3	10.5m	-7
12m	-14	12m	8	12m	5
13.5m	-5	13.5m	3	13.5m	-1
15m	10	15m	3	15m	-1
16.5m	-7	16.5m	-14	16.5m	-9
18m	-1	18m	3	18m	-1

平坦度標準差

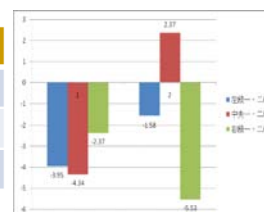
平坦度標準差(9月8日)

左		中央		右	
組數	標準差	組數	標準差	組數	標準差
第一組	-4.74	第一組	-2.77	第一組	-4.35
第二組	1.19	第二組	3.95	第二組	-1.19



平坦度標準差(10月26日)

左		中央		右	
組數	標準差	組數	標準差	組數	標準差
第一組	-3.95	第一組	-4.34	第一組	-2.37
第二組	-1.58	第二組	2.37	第二組	-5.53

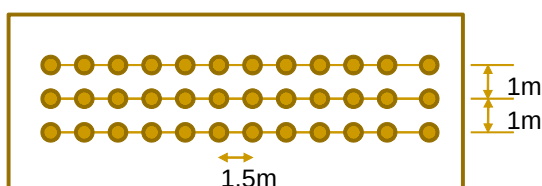


非破壞性反彈錘試驗



■ 現地規劃

- 左、中、右三段以路面寬5公尺取中央值為中部段，左右各拉一公尺
- 每段間隔1.5公尺取一點高低差值，各取12點



60

非破壞性反彈錘試驗結果

反彈錘試驗					
左		中		右	
點位間隔	反彈值	點位間隔	反彈值	點位間隔	反彈值
0	18	0	14	0	14
1.5m	12	1.5m	14	1.5m	10
3m	12	3m	14	3m	14
4.5m	16	4.5m	16	4.5m	10
6m	10	6m	24	6m	18
7.5m	10	7.5m	26	7.5m	12
9m	12	9m	18	9m	10
10.5m	14	10.5m	10	10.5m	18
12m	16	12m	10	12m	10
13.5m	10	13.5m	16	13.5m	18
15m	12	15m	10	15m	12
16.5m	14	16.5m	12	16.5m	26
18m	10	18m	10	18m	20

61

非破壞性反彈錘反彈值之強度

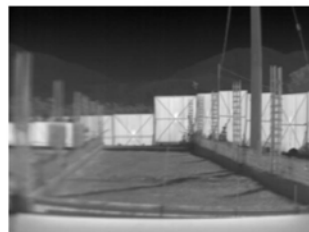
反彈錘強度					
左		中		右	
點位間隔	強度(psi)	點位間隔	強度(psi)	點位間隔	強度(psi)
0	1700	0	900	0	900
1.5m	500	1.5m	900	1.5m	500
3m	300	3m	900	3m	900
4.5m	1300	4.5m	1300	4.5m	500
6m	100	6m	2900	6m	1700
7.5m	100	7.5m	3300	7.5m	500
9m	500	9m	1700	9m	100
10.5m	900	10.5m	100	10.5m	1700
12m	1300	12m	100	12m	100
13.5m	100	13.5m	1300	13.5m	1700
15m	500	15m	100	15m	500
16.5m	900	16.5m	500	16.5m	3300
18m	100	18m	100	18m	2100

62

現地鋪面紅外線鋪面溫度檢視

■ 目的

- 檢視透水混凝土溫度變化的情形
- 探討透水混凝土降溫的速率

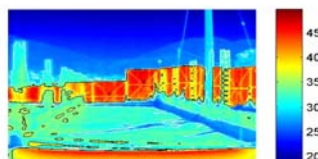


澆置前路基的影像

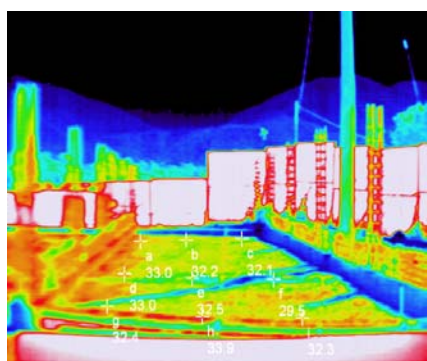
澆置前路基的紅外線熱影像

63

紅外線熱影像溫度量測



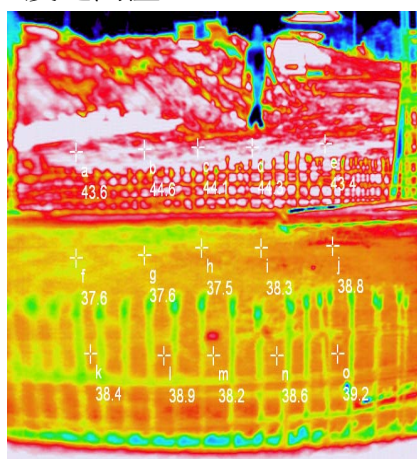
白線範圍溫度為30度，
黑線範圍溫度為35度



9點08分之溫度點位			
點位	A點	B點	C點
座標	(101,156)	(136,155)	(178,154)
溫度	33.0℃	32.2℃	32.1℃
點位	D點	E點	F點
座標	(89,178)	(140,181)	(202,182)
溫度	33.0℃	32.5℃	29.5℃
點位	G點	H點	I點
座標	(76,200)	(148,207)	(224,208)
溫度	32.4℃	33.9℃	32.3℃

64

紅外線熱影像溫度量測：透水混凝土在鋪築完成後，時間已經超過11點30分，正值中午炎熱之氣溫，由拍攝之熱影像圖可以看出週圍地面環境有高達44度之高溫。



11點36分之溫度點位					
點位	A點	B點	C點	D點	E點
溫度	43.6	44.6	44.1	44.3	43.4
點位	F點	G點	H點	I點	J點
溫度	37.6	37.6	37.5	38.3	38.8
點位	K點	L點	M點	N點	O點
溫度	38.4	38.9	38.2	38.6	39.2

註解：a~e點位為一般地表之溫度，
f點~o點為透水鋪面範圍之點位溫度。

65

第七章 結論建議



1. 獲交通部公路總局第二區養護工程處之應用，已於2010年三月開工興建「埔里工務段辦公大樓新建工程」，設計辦公人員停車場與4米寬道路為透水混凝土鋪面。

2. 透水混凝土配比試拌與路面現地試鋪施作，為教育訓練與現地觀摩之絕佳方式，本次透水混凝土試鋪面積為兩公尺見方，厚度為20公分。

66

陸、結論建議



3. 本案四米寬道路路基土壤依AASHTO土壤分類屬於A-1-a，為優良路基土壤材料，該土壤滲透係數K值應大於 10^{-5} m/sec以上，滲透性良好。

4. 實驗室模擬波浪溯升試驗訂製強化玻璃水道裝置於土石流水槽試驗儀以延伸水道長度，固定水槽傾斜角度，藉由重力來產生波浪，並架設高速攝影機可以捕捉紀錄海堤溯升高度。

67



陸、結論建議

5. 實驗室模擬波浪對於海堤之波浪溯升試驗發現水混凝土平均溯升高度明顯比普通混凝土降低許多，顯示出透水混凝土比普通混凝土具有較佳的消能能力，此驗證ACI 522R-06中提到的透水混凝土可應用於海堤港灣結構物。
6. 透水混凝土工區表面有浮石，其原因是天氣炎熱，新拌透水混凝土施工未能「迅速」施作，使得水泥漿包覆骨材表面與空氣接觸太久而乾燥，造成混凝土表面無法黏結而有浮石現象，經動力鋼刷機械刷除鋪面表面之浮石和以高壓水沖洗保養後，其透水能力不減。

68



陸、結論建議

7. 目視鋪面大量透水試驗結果發現9立方公尺的水幾乎完全可以滲入鋪面之中，在場所有人員均讚嘆此鋪面透水效果優異，值得推廣與觀摩，顯示本道路鋪面可通過短時間內累積極大的暴雨之透水驗證。
8. 過去數年來，美國一直不斷的投注資源與經費於透水混凝土研究上，有超過2/3的州政府進行此項研究或推廣，至少有17所美國大學拿到政府透水混凝土研究經費，建議國內也應該投入更多的資源與研究，以解決雨水資源流失、環境生態破壞及熱島效應擴張。

69



照片6.10 預計中震動刮板與當天實際使用之刮板

簡報完畢敬請指導

