97-32-7319
MOTC-IOT-96-H1DB004

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

中華民國 97 年 3 月

97-32-7319
MOTC-IOT-96-H1DB004

透水混凝土應用於交通工程之研究(2/2)

著者：張道光、李明君、顏　聰、邱垂德

交通部運輸研究所

中華民國 97 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目資料

透水混凝土應用於交通工程之研究. (2/2) / 張道光等著. -- 初版. -- 臺中市：交通部運研所, 民97.03
面 ； 公分
參考書目:面
ISBN 978-986-01-3823-8(平裝)

1. 混凝土 2. 鋪面工程

440.327 97006240

透水混凝土應用於交通工程之研究(2/2)

著　　者：張道光、李明君、顏　聰、邱垂德
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)
電　　話：(04)26587176
出版年月：中華民國 97 年 3 月
印 刷 者：承亞興企業有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 130 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定　　價：300 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
五南文化廣場：臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1009700786　　ISBN：978-986-01-3823-8 (平裝)

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="5">出版品名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究(2/2)</td></tr>
<tr><td colspan="2">國際標準書號（或叢刊號）
ISBN 978-986-01-3823-8 (平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1009700786</td><td>運輸研究所出版品編號
97-32-7319</td><td>計畫編號
96-H1DB004</td></tr>
<tr><td colspan="2">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</td><td colspan="2">合作研究單位：朝陽科技大學營建工程系
計畫主持人：李明君
研究人員：顏　聰、邱垂德
地址：臺中縣霧峰鄉吉峰東路 168 號
聯絡電話：04-23323000 轉 4239</td><td>研究期間
自 96 年 3 月
至 96 年 10 月</td></tr>
<tr><td colspan="5">關鍵詞：透水混凝土、交通工程、鋪面材料</td></tr>
<tr><td colspan="5">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。本計畫之目的乃針對交通建設，進行研發透水混凝土應用於交通工程，本年研究內容包括：(1) 建立透水混凝土之製程與試驗標準，(2) 驗證透水混凝土之最適配比，(3) 路面、擋土牆或邊坡等相關交通工程，擇一種進行現地施作，以驗證透(排)水效果為何，(4) 評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性，(5) 舉辦教育訓練課程。希望藉由透水混凝土之研究結果，能提供工程界規劃設計與施工之參考。

由研究結果建立透水混凝土之製程與試驗標準以應用於交通之建設工程，現地停車場施作以驗證透水混凝土發現試體抗壓強度已經超過一般混凝土結構物規範要求(175 kg/cm^2)。藉由現地透水試驗驗證停車場透水約1000ml/15sec，停車場透水效果不但良好，而且表面無裂縫產生，因此透水混凝土可運用於人行道、停車場與道路工程，它是綠環保鋪面材料。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td colspan="2">本　出　版　品　取　得　方　式</td></tr>
<tr><td>97 年 3 月</td><td>240</td><td>300</td><td colspan="2">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。</td></tr>
<tr><td colspan="5">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</td></tr>
<tr><td colspan="5">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

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

TITLE: Application of Pervious Concrete on Transportation Engineering (2/2)

ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN978-986-01-3823-8 (pbk)	1009700786	97-32-7319	96-H1DB004

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chang Tao-kuang, Huang Hsin-feng
PHONE: 04-26587115
FAX: 04-26564418

PROJECT PERIOD
FROM March 2007
TO October 2007

RESEARCH AGENCY: Chaoyang University of Technology
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Ming-Gin
PROJECT STAFF: Yan Cong, Ciou Chuei-De
ADDRESS: No.168 Jifong E .Rd.,Wufong Township Taichung County ,Taiwan (R.O.C)
PHONE: 886-4-2332-3000Ext. 4239

KEY WORDS: PERVIOUS CONCRETE, TRANSPORTATION ENGINEERING, PAVEMENT MATERIAL

ABSTRACT:

In recent years, 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 a heated island, to search for a suitable mix design of pervious concrete for Taiwan is not a trivial issue. The main purpose of this project is to find suitable pervious concrete for transportation engineering. The categories included in the second year projects are as follows: (1) Manufacture procedure and test standard in pervious concrete buildup; (2) Test certification of the most suitable mix design of pervious concrete; (3) Test certification of the field construction of pervious concrete for pavement, retaining wall, or side-slope; (4) Evaluation of transportation engineering for the application of pervious concrete; (5) Hold a series of educational training courses. This performance of pervious concrete study result will be valuable for construction, and application practice.

It is found from this study that the manufacture procedure and test standard in pervious concrete are buildup for the applications of pervious concrete in Taiwan. The compression strength of one pervious concrete core specimen from test certification in the field construction (parking lot) exceeds the ordinary concrete structure specification (175 kg/cm^2). The field permeability test for the parking lot is about 1000ml/15sec. The water penetration of the above pervious concrete is very good with no cracks on surface. It can be applied to footpaths, parking lots, and vehicle roads. It is an environmentally friendly pavement material.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
March 2008	240	300	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

透水混凝土應用於交通工程之研究(2/2)

目　錄

表 目 錄

圖 目 錄

照片目錄

第一章　緒　論

1.1 計畫背景

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[1-3]。

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、蓄水池的汙染物數量降低；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[1]。

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%~35%。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[1]。

透水混凝土可以澆置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[1]。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 天養護之目的，通常亦有將塑膠片鋪設於透水混凝土上[1]。

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密度為準，正負 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汎區工程，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，應避免使之處於飽和狀態。為了避免透水混凝土處於飽和狀態，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[1]。

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。本計畫之目的乃針對交通建設，進行研發透水混凝土。研發透

水混凝土除可參照國外經驗，依其應用類別，進行不同配比設計，製作透水混凝土面層。經由實驗室試驗及現場試驗以確認各配比之可行性及效益性。另外針對港灣工程相關構件如消波塊、碼頭、及港區設施是否可使用透水混凝土，降低波浪反射，減少對船隻安全產生不利影響亦應進行試驗探討，同時評估透水混凝土強度，耐衝擊性及消能效益是否可符合港灣工程設計需求。本計畫並將利用試驗結果，國內外相關文獻資料蒐集分析，配合水資源管理、生態工法及水泥質材料需求，建立國內透水混凝土的產製技術，並將之應用於示範性工程驗證其排水效能，以為工程界參考使用[1]。

1.2 研究範圍與對象

本計畫研究範圍主要為國內交通建設使用透水混凝土的項目、方法與施工技術。探討對象以透水波特蘭水泥混凝土研發為主，第一年(已完成部分)分為兩階段執行，第一階段著重於水灰比與骨材粒徑對透水混凝土之影響；第二階段著重於不同膠結材料對強度與透水性之影響，其中包括矽灰的使用與鹼活化爐石漿體的應用等，並與普通波特蘭水泥作一比較。利用國內外相關文獻資料蒐集分析，特別著重於案例分析，以確認永續水資源管理、生態工法的具體內涵，同時運用水泥質材料配比技術或知識，進行配比設計、試拌及試驗，獲致透水混凝土的基本設計參數及技術需求，研究成果可做為訂定透水混凝土設計的參考。第二年計畫研究範圍主要分為兩階段執行，第一階段著重於建立透水混凝土之製程與試驗標準及驗證透水混凝土之最適配比；第二階段著重於路面、擋土牆或邊坡等相關交通工程，擇一種進行現地施作，以驗證透(排)水效果為何。本計畫將利用國內外相關文獻資料蒐集分析，特別著重於案例分析與透水混凝土之最適配比，進行配比試驗、試拌及驗證、現地施作等，以驗證透(排)水效果，研究成果可做為訂定透水混凝土設計、教育訓練課程、施工規範草案的參考依據。

1.3 研究內容與工作項目

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。有關第一年工作項目已完成(計畫主持人黃然教授)如下：

(1) 國內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。

第二年工作項目如下：

(1) 建立透水混凝土之製程與試驗標準。

(2) 驗證透水混凝土之最適配比。

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

(4) 評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性。

(5) 舉辦教育訓練課程。

第二章　文獻回顧

2.1 透水鋪面與排水鋪面

對於透水鋪面與排水鋪面往往會混淆了許多人,認為此兩種鋪面是屬於同一種鋪面,然而此兩種鋪面因為結構不同,所以會造成水在鋪面下流動的效果造成很大的差異,以下將對此兩種鋪面結構利用圖文的方式作說明[2]。

2.1.1 排水性路面

傳統的瀝青混凝土面層，不論採用密級配或粗級配，原則上是不允許水分滲透的；惟於 1987 年時，日本為改進賽車競賽場鋪面天雨濕滑之缺失、增加安全等緣由，乃於「東京都」率先使用所謂的「多孔隙瀝青混凝土鋪面」,由於功效卓越、至 1999 年 12 月止,全國已累積了 1000 萬平方公尺以上的施工實績，且日本道路學會自 1992 年起，積極收集資料、召開審查、編定等會議，已於 1996 年 11 月制定完成「排水鋪裝技術指針（案）」乙書，作為此類工程頗具權威之指導原則[2]。

排水性鋪面為發揮良好之排水功能,且雨水不致滲透而軟弱路基,排水層下應有一不透水層（一般採用密級配瀝青混合料）, 並應有良好坡度及平整度以利迅速排水，圖 2.1 為排水性鋪面排水路徑設計例，惟空隙率及排水能力會隨時間車輛碾壓及灰塵或石屑堵塞而降低,若黏層設計及施工不當，也可能造成排水層與不透水層之結合面剝落及鬆散[2]。

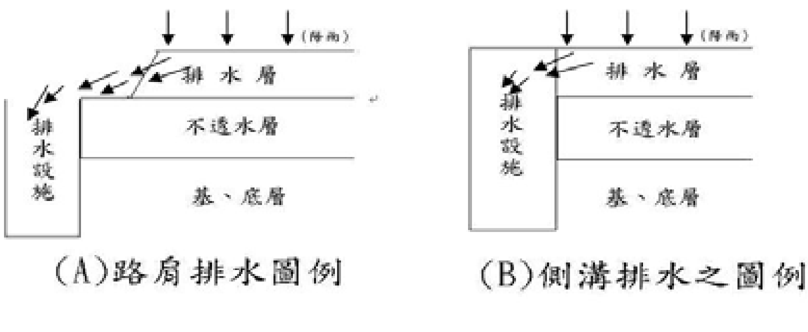


圖 2.1 排水性鋪面排水路徑[2]

2.1.2 透水性路面

透水性鋪面其在透水級配層上鋪設多孔隙瀝青混凝土，使落在鋪面上之雨水能完全滲入土壤，所以在多孔隙瀝青混凝土下設置透水層，避免採用不透水的黏層。因雨水通過路面直接滲入路基，會使路基含水量大增而變軟。但據日本東京市建設局追蹤調查發現，路基土壤並沒有因為含水量大增高而有變軟的傾向，主要係此路面均鋪築於人行道停車場及輕交通量車道，相當於國內五、六級路之鄉縣專用道路及社區道路，集水區內之道路一般車流量不高，故採用透水性鋪面，應可承受交通荷重[2]。

2.1.3 排水路面與透水性路面比較

排水性鋪面與透水性鋪面均各自適用的特性其共同特點如下[2]：

(1)排水性鋪面與透水性鋪面，其面層均使用有較大的孔隙率的多孔隙瀝青混凝土，所以具有良好的滲透性能。

(2)使落在鋪面上之雨水能迅速排除，可防止車輛雨中打滑，並降低水珠飛濺及起霧。

(3)降低熱島效應，減少能源消耗。

(4)減輕排水設施的負擔，進而減少排水設施建造費用。

相異點：

(1)排水性鋪面面層之下使用透層或黏層形成一不透水層，避免水分滲入路基土壤中，透過路面坡度將雨水排至排水溝，因此可使路基維持一定的強度，此路面才可適用於交通量較多的道路上。

(2)透水性鋪面不使用透層或黏層，使雨水能滲入路基土壤中，因此達到涵養水源的目的，但由於雨水儲存於土壤中，其強度將不較一般道路或排水性路面高，故此路面大部分適用於低交通量路面、人行道、停車場等。

(3)透水性鋪面對於滲透性能特別講求，因此基底層、路基須特別考慮此條件。下圖 2.2、圖 2.3 為一般鋪面、排水性、透水性鋪面之比較圖。

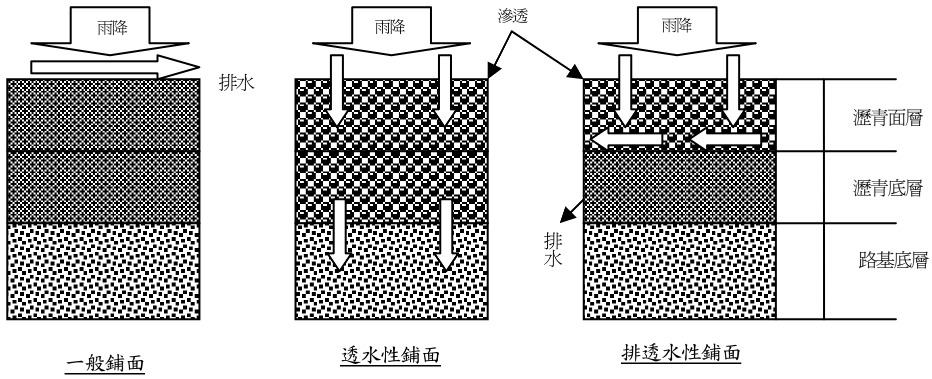


圖 2.2 一般鋪面、排水性、透水性鋪面之比較[1]

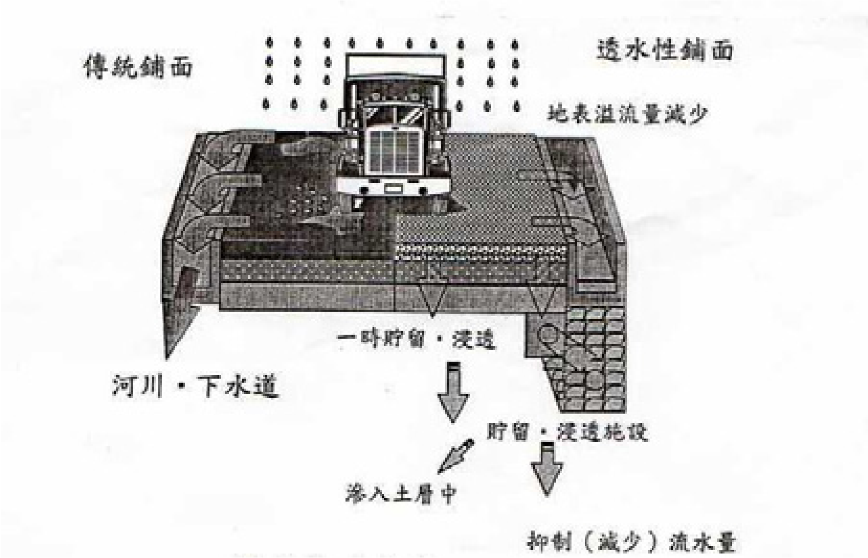


圖 2.3 透水鋪面預期成效[2]

2.2 透水混凝土

2.2.1 透水混凝土之定義

透水混凝土為一種多孔隙的複合材料，亦可稱為無細骨材混凝土，可以視為一種骨材粒徑分佈在狹窄級配範圍內並且含(無)微量細骨材加上不足量膠結漿體所構成的混凝土，透水混凝土最明顯的特性即質輕且多孔隙。透水混凝土的構成由裹覆在骨材顆粒外層的不足量水泥漿體與骨材顆

粒之間點接觸，相互黏結形成多孔隙結構體，在這種結構之下擁有良好的透水性能 (K>10-3cm/sec)[6]，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[7]。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[5][6]研究結果發現透水混凝土亦是有低單位重(1600~2000kg/m^3)、低成本、低乾縮量(水泥使用量減少)、低熱傳導係數(0.7kcal/m × hr ×℃)、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]。

2.2.2 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、骨材、摻劑。有關其組成的材料說明如下：

2.2.2.1 水泥

波特蘭水泥是一種水硬性水泥，主要由矽酸鈣鹽類所組成。加水後產生化學反應而有凝結與硬固作用，與骨材膠結一起拌合形成一種人造石材，是土木工程界普遍使用的營建材料。水泥的產製是以石灰質材料與黏土材料（或頁岩）為主，輔以適當的配比而組成，生料再經過研磨、煅燒、急速冷卻等步驟後形成熟料，加石膏研磨後便成水泥。

水泥主要的成份為矽酸三鈣（C_3S）、矽酸二鈣（C_2S）、鋁酸三鈣（C_3A）、鋁鐵酸四鈣（C_4AF）等四種主要礦物熟料（Clinker）。其與原礦物含有之雜質和研磨時加入之石膏共同組成波特蘭水泥。故水泥之成份除含有少量之 MgO、Na_2O、K_2O、SO_3 及未經水化之 CaO（即游離石灰）外，主要者為 CaO、SiO_2、Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等四種，而此四種主要成份隨著煅燒的時間與溫度之變化組成 C_3S、C_2S、C_3A 及 C_4AF 等四種主要化合物（或稱單礦物）；這四種成份息息相關。這四種成份與混凝土性質相關，此四種化合物在水化過程中之特性如表 2.1 所示[1]。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。

表 2.1 水泥主要成份特性表[1]

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

水泥水化機制說明：水泥與水接觸後，其主要成份間之水化速率以 C_3A 最快、C_3S 次之，再者為 C_4AF，而 C_2S 最慢。水泥在水化時，大致上可粗分為五個階段，其各階段間的反應過程行為與特徵如下表 2.2 所示[10]。

表 2.2 水泥水化時之行為與特徵[10]

階段名稱	反應行為
初期階段	Ca^{2+}與 OH^-等離子不斷釋出及液相逐漸改變，並大量放熱 C_3S 進行初期水化液相組成之改變影響此階段之凝結狀態 C_3A 與石膏形成六角形針刺狀鈣釩石（AFt）及 C_3A 雜項水化物鋁酸鹽類與石膏於初期迅速溶解並反應
潛伏期	鈣釩石 （AFt）及 AFm 繼續形成，並影響凝結時間及工作性 CH 晶體及 C-S-H 膠體早期水化物形成放熱速率降低而黏滯性繼續增加此階段末期由矽酸鈣水化物水化狀況決定初凝時間 Ca^{2+}離子增加，矽酸鹽減少，Ca^{2+}集中並達到飽和狀態
加速期	放熱速率升高過飽和 Ca^{2+}離子濃度降低水泥漿體從塑性（Plastic）逐漸達剛性（Rigid）早期強度開始形成終凝發生於過程開始後約 1 至 2 小時水化產物之快速形成導致水泥漿體固化及孔隙減少 C3S 快速化學反應,形成 C-S-H 膠體及 CH 晶體鈣釩石繼續緩慢形成而且依 A/S 比例開始轉換成 AFm
減速期	1.漿體孔隙繼續減少，而水化物之顆粒與顆粒之間逐形成鍵結而具有早期強度 2.放熱速率降低 3.C_2S 水化作用變為較明顯 4.C-S-H 及 CH 之形成由化學控制改為擴散控制 5.鈣釩石完全轉換成 AFm
穩定狀態	1.漿體孔隙繼續減少，強度繼續增加 2.體積穩定性及耐久性逐漸增加 3.抗潛變（Creep）能力依齡期增加而遞增 4.水化作用為擴散控制，強度發展趨勢漸緩形成穩定狀態 5.由漿體孔隙及水化物鍵結形態來決定極限強度 6.水化產物緩慢形成

2.2.2.2 骨材

骨材是透水混凝土主要的骨架構，亦是提供主要強度的相位之一，骨材包含普通骨材(礫石、卵石、砂)或特殊骨材(輕質骨材、回收營建材料[8]等等)。為了保證透水混凝土的透水性能與力學強度，且骨材顆粒級配是決定整體透水性能與力學強度的主因，粗骨材通常採用顆粒較小的單一粒徑級配，於 10~20mm 或 5~10mm[12]如表 2.3 所示。此外對於碎石型骨材中針片狀顆粒應盡量減少，骨材含泥量應不大於 1% [1]。

表 2.3 各個國家推薦或採用透水性混凝土路面之骨材級配[12]

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	

2.2.2.3 摻劑

透水混凝土除了骨材、水泥、水此些基本材料外，通常會加入其他輔助或改善其性質的摻劑。透過其在水泥漿體中所發生的化學反應，來達到改變混凝土性質的成效，大多數化學摻料是高分子聚合物。目前在工程上應用最多的化學摻料，以減水、緩凝、輸氣等。例如添加一定量的增強劑，有助於提高水泥漿與骨材之間介面強度；添加一定量的減水劑可減少拌和水用量，降低水灰比來提升力學強度；添加增黏劑來增加水泥漿體的黏稠度，藉以提高施工面表層的平整；低氣溫狀況下可添加早強劑藉以加速

透水混凝土的硬化；或為了使透水混凝土更加美觀，添加著色劑增加色彩獲得視覺享受[1]。

2.2.3 透水混凝土之設計方法

本年度研究有關第一工作項目應先考慮透水混凝土配比設計，目前透水混凝土配比設計有三種方法，分別是重量比例法(行政院公共工程委員會)、體積法(美國混凝土協會)與比表面積法(雷揚中)。一般混凝土在配比設計時，首先考量的是混凝土強度(水灰比)，重量比例法也是先考量的是混凝土強度(水灰比)，次之再考量孔隙率(填漿量)；但在透水混凝土配比設計時，首先考量的則是孔隙率(填漿量)，尤其對於需提供植生功能的護坡及護岸等工程，填漿量控制更是植生成敗之關鍵。希望藉由召集透水混凝土專家學者方式，討論上述透水混凝土配比設計三種方法之優缺點，建立透水混凝土之製程與試驗標準；一般而言骨材以漿體包覆，以無較多水泥漿流出為恰當，各文獻均記載許多計算漿量的方法，分述如下[2-3]：

1.配比設計ー重量比例法

重量比例法係利用經驗圖表，迅速計算出各材料用量，可簡化配比設計計算，易於現場拌合施工。

2.配比設計—體積法

體積法係以原有粗骨材孔隙率為基礎，依目標孔隙率經過詳細計算，以控制填漿體積，利於掌握拌合完成後之孔隙率特性。美國混凝土協會[23]以體積法進行透水混凝土配比設計，步驟整理簡化後如下圖所示，水灰比決定水泥漿體黏結性與混凝土強度，美國混凝土協會 2002[23]規範 A6.3 建議水灰比值介於 0.35 至 0.45。由於乾搗形態之粗骨材在拌合成混凝土後，體積有膨脹現象，粗骨材含量相對減少，不加砂情形下，比例為 0.99[2-3]。

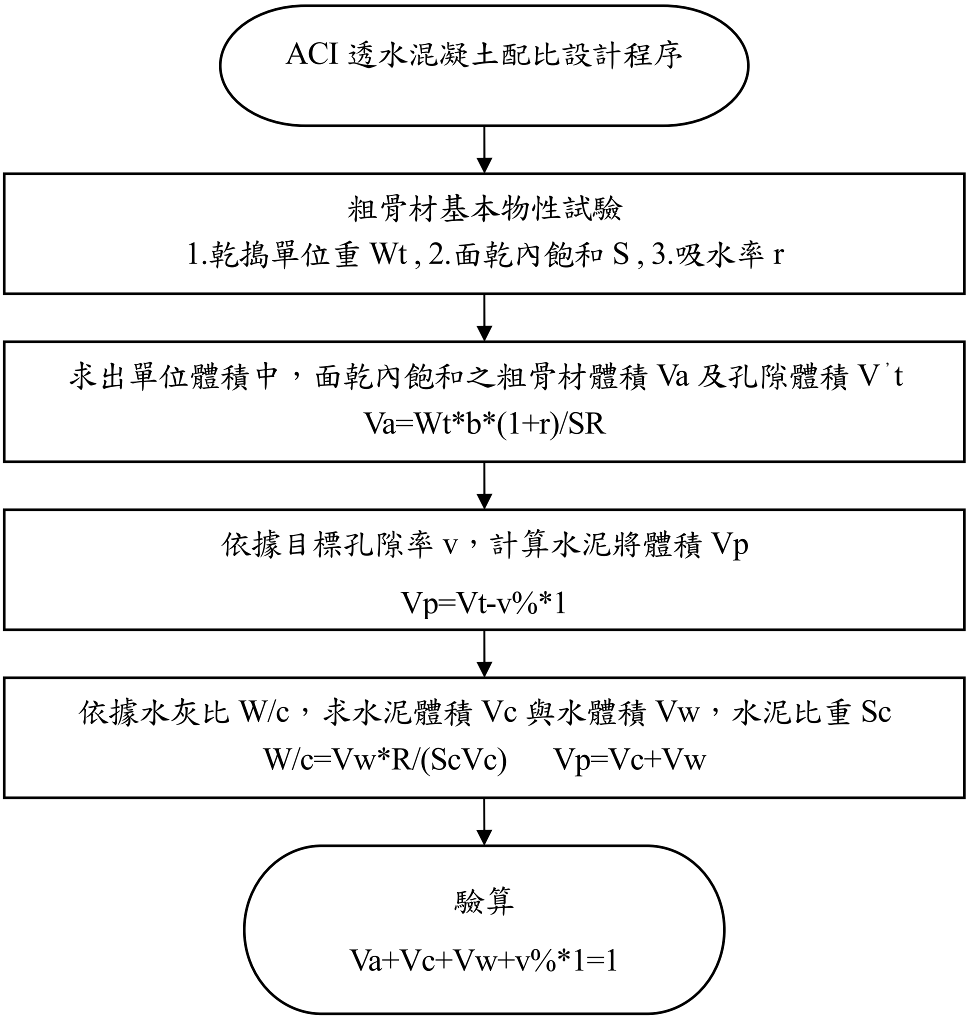


圖 2.4　ACI 混凝土配比設計流程圖[3]

符號說明：(1) S：面乾內飽和粗骨材容積比重，(2) Wt：1立方公尺骨材粒料單位重(乾搗單位重)，(3) r：吸水率，(4) Va：面乾內飽和之粗骨材體積，(5) Vc：水泥體積，(6) Vp：水泥漿體積，(7) v：孔隙百分率，(8) Vw：水體積，(9) R：水泥漿與骨材重量比例，簡稱漿骨比，(10) W/c：水灰比，(11) Vt：試體體積。

3.配比設計—比表面積法

比表面積法主要係以骨材之表面積乘以漿體厚度，得出填漿量，雷揚中 2004[41]提出理論概述如下：假設理想的骨材顆粒接近球形，若骨材之直徑為 d，Ss 為比表面積，以「球體表面積」與「球體體積」之比例

可求得比表面積值，公式如下：

$$Ss = \frac{4\pi(d/2)^2}{\frac{4}{3}\pi(d/2)^3} = \frac{6}{d}$$

由上式可以推導出各粒徑的標稱直徑及單位體積比表面積如表 2.4 所示。

表 2.4 骨材之比表面積[41]

骨材粒徑群(mm)	平均粒徑(mm)	$S(m^2/m^3)$
25.0~19.0	22.2	278
19.0~12.5	15.9	378
12.5~9.5	11.10	540
9.5~4.75	7.10	840
4.75~2.36	2.56	1686

雷揚中 2004[41]，在水泥漿包裹厚度部分，初開始設定為 1mm，由於漿體垂流量太大，而後逐漸調降至 0.5mm，並以 0.5mm、0.4mm 以及 0.3mm 進行各項試驗，以求得最佳水泥用量，其中在膜厚 0.4mm 時，骨材粒徑為篩號#4 及#8 雙粒徑搭配，水灰比 0.3 情形下，試體抗壓強度已可達 200kg/cm^2，透水係數則為 0.056cm/sec。其抗壓強度已超過一般結構混凝土設計要求 175 kg/cm^2。

國內外目前所使用的配比設計方法，在填漿量的計算上，計有重量比例法、體積法及比表面積法等。重量比例法為公共工程委員會施工綱要規範使用之方法，其配比計算極為簡易，於粗骨材稱重後，即可迅速計算出水泥用量，利於現場拌合施工，若能掌握配比之物理及工程特性，材料控管極為方便。體積法為美國混凝土協會採用的方法，計算上較為複雜，但易於理解填漿量與孔隙的關係，於植生工程重視孔隙率甚於強度的情形下，使用此法較易預測孔隙率的數值。比表面積法源自傳統混凝土水泥漿包覆骨材的理論，一般工程師容易接受，但需先了解各骨材之比表面積。由於各配比試拌法對漿體垂流量的問題尚無良好的解決方案，在垂流量控制

方面，大多僅能以試誤法進行。各種配比設計法各有其優缺點，若能針對漿體垂流量的問題找尋良好的解決方案，而瀝青垂流試驗是採用美國 AASHTO T305-97 的網籠法進行垂流試驗，是用於透水瀝青混凝土在高溫狀態下保持靜態的最大瀝青量測定，適用於垂流量控制方面[3]。

透水混凝土中提供力學強度者除了骨材外，膠結材料亦是另一重要相位，若是膠結漿體的力學強度有所提升，對於整體強度是有正面助益。一般而言，透水混凝土膠結骨材的膠結材料通常為水泥漿體，若以卜作嵐材料取代部分水泥，不僅可以增加漿體之黏稠性達到良好包裹骨材之效果，防止垂流增加透水能力，更可藉由卜作嵐反應提升膠結材料之強度，進而提供透水混凝土更高之力學特性，因此膠結材料之組合亦為透水混凝土提升透水能力與力學特性要素之一。透水性混凝土在目前為止並無成熟的設計方式，但依照透水混凝土所使用的目的，可以由透水混凝土內的孔隙結構著手。首先，透水混凝土是骨材堆積在一單位體積之中，由骨材的點對點所堆積的特殊結構，並存在許多孔隙，設計的原則即為將骨材顆粒表面由黏結的漿體包裹，並且將骨材顆粒相互黏結，形成一個保有孔隙且具有力學強度的混凝土。

膠結漿體的設計量並不須完全充滿此單位骨材中的所有孔隙，而漿體的使用量是可以依據所需的透水性能和力學強度做權衡設計的。由學者楊靜所建議，一立方公尺透水混凝土的重量應為骨材緊密堆積之重量與單方水泥用量加上拌和水量之和，約在 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[12]。

1.骨材用量

一立方公尺透水混凝土中粗骨材總量可以取最緊密堆積的骨材重量，大致在 1,200-1,400kg 之間，主要使用粗骨材，若需使用細骨材，則細骨材使用量控制在粗骨材之 20%之內[3，12]。

2.骨材粒徑

骨材粒徑是決定透水混凝土中孔隙體積重要因素之一。骨材粒徑亦

影響透水混凝土的力學強度甚鉅[3]。

由理論推斷，若骨材形狀接近圓形的理想狀況之下，單位體積內骨材堆疊所產生的孔隙體積是相同的，不同之處在於孔隙的大小。大粒徑的骨材堆積之下的孔隙必定大於小粒徑骨材堆積所產生的孔隙。主導透水性能的連通孔隙直徑越大則透水性能會較佳，反之則較差。以力學強度觀點，骨材粒徑較小，單位體積中的骨材顆粒數量必定大於骨材粒徑大者，因此單位體積中透水混凝土內骨材接觸點數量增加的情形下，力學強度是會向上提升的[3，12]。

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

3.膠結材料用量

透水混凝土之膠結材料通常使用波特蘭水泥，但為了整體強度的考量，會有添加礦物摻料亦或者使用其他漿體來取代水泥漿體。以水泥漿體而言，若保證在最佳用水量的狀況之下，增加水泥用量是可以提升水泥漿體的稠度和增加裹覆在骨材顆粒周圍的漿體厚度，此舉可以有效地提升透水混凝土的力學強度。但若水泥使用量過大，會使得漿體體積增加，進而減少骨材之間的孔隙率，因而損失透水性能[3]。

同時水泥用量亦受到骨材粒徑影響，若骨材粒徑較小，則骨材表面積較大，此時可適當增加水泥用量。通常透水混凝土水泥用量在 250-350 kg/m^3 範圍內[3，12]。

4.水灰比

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

良好的水灰比設計，使得工作性良好，可以使得水泥漿體充分裹覆在骨材顆粒周圍，在透水混凝土硬固後展現優良的力學強度。倘若水灰比過高，透水混凝土較不容易有高力學強度，此外漿體流動性過高的狀況下，不易裹覆在骨材周圍而因重力影響向下流動，產生垂流現象。漿

體垂流至透水混凝土底部硬固後，會造成透水性能喪失，骨材顆粒因漿體垂流而無法被漿體均勻裹覆，力學強度也會受到折減[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骨材產生團簇的現象，使漿體在透水混凝土之中分佈不均，極有可能阻斷透水路徑，分佈不均的漿體也會讓透水混凝土內部形成許多缺漿的弱面，而使力學強度大為折減。

良好的水灰比可以透過實際拌和求得，通常界於 0.25-0.35 之間，最佳水灰比通常有兩種確定方法[2-3]：

(1) 在骨料與水泥用量一定的狀況下，從小至大選定數組不同水灰比分別拌製混凝土，再以試驗測定其抗壓強度，繪製 W/C-f 曲線，求出最大抗壓強度所對應的水灰比即為最佳水灰比。

(2) 實際工作中常依據經驗判定水灰比是否合適，取一些拌和良好的新拌透水混凝土進行觀察，若水泥漿在骨材顆粒表面均勻裹覆，沒有水泥漿體下滴的情形，而且顆粒有類似金屬光澤，則說明此水灰比較為合適。

5.工作性檢驗

透水混凝土拌合物因為水灰比限制，通常顯得乾硬，一般建議使用 VB 稠度指標來衡量，建議 VB 值在 10-20 較為合適。在初步配比計算之後，試拌並且測定拌合物的工作度，即可驗證配比設計是否合理[2-3]。

2.2.4 透水混凝土在國內外的應用

混凝土材料在臺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[1]。

2.2.4.1 國外應用

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 20~40μm[2]。

在 1970 年代中期，很多州立的公路行政機構就已經開始採用多孔隙瀝青混凝土路面，目前美國已有 15 州廣泛的使用，且還有數個州也正在考慮跟進。在美國，多孔隙瀝青混凝土是從廠拌封層試驗中發展出來的，封層處理是先鋪上一層瀝青，隨後再散佈蓋面粒料，並將粒料夯實置進瀝青膠泥中，如此可增強磨擦層，但相對地在高速極高程載的情形下會減低壽命[2]。

為了維持摩擦層的功能及減少粒料的流失，美國公路局在 1970 年代開始研究在熱拌合時，於瀝青膠泥中拌入大量的碎石粒料，其直徑為 9.5~12mm，並使用傳統鋪築機鋪設 19mm 厚，這種鋪面的優點是表面有孔隙及增加摩擦力，但因為鋪設的厚度較薄，孔隙較少，所以透水及降低輪胎噪音的效果較小[2]。

有關於多孔隙瀝青混凝土較常見問題不外乎，粒料過早剝落、黏結劑的流失及下層的瀝青混凝土惡化等問題。大部分公路單位所使用的標稱最大粒徑為 9.5mm。此級配最大不同點在於通過 2.36mm 和 200 篩的百分率，當其他地方著重在孔隙率已改善內部排水問題時，有一些州確較偏愛使用細粒料以增加混合料的穩定性。然而，在美國所規範的孔隙和歐洲大部分的國家不同[2]。

於 1979 年的美國佛州 Sarasota 區已經使用無細骨材的多孔隙混凝土建造具有透水性路面的停車場，並且取得透水混凝土專利。此後，透水混凝土在美國開始被推廣應用，例如在 Sarasota 大學附近構築了一條 4 線車道長 1.6 公里的透水路面道路，之後在新墨西哥以及佛州西部地區共修建 53 座透水混凝土停車場。從 80 年代開始，美國開始有透水混凝土預拌廠

，佛州於 1991 年成立了『透水性波特蘭水泥混凝土協會』，對於透水混凝土的應用提供技術指導。照片 2.1 為美國透水鋪面應用於停車場[1，4]。

照片 2.1 美國透水鋪面應用於停車場[4]

美國 CAHILL ASSOCIATES 環境工程顧問[25]在 Villanova 大學所做的透水混凝土雨水滯留量試驗中，以 5,359 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。

照片 2.2　Villanova 大學透水混凝土試驗廣場[25]

日本於 1987 年開始有學者申請透水混凝土鋪築材料的專利，專利內容是使用單一粒徑粗骨材加上微量細骨材配合有機高分子樹脂作為膠結材料，主要應用在公園人行步道和停車場。日本自 1973 年起採用多孔隙瀝青混凝土鋪面，東京都建設局當時為改善行道樹之生長環境，因而開始對人行道透水性鋪面之規劃、設計、施工及後續追蹤調查進行研究；於 20 多年間，共鋪設了透水鋪面 220 萬平方公尺，並以階段性的方式配合政策的推行，於 1986~1995 年間，以每年增加 10~20 萬平方公尺之速度成長，東京都透水性鋪面之推動成果，在日本具有指標性意義，促使日本全國進行透水性鋪面之鋪設，至 1999 年，全國已累積了 1000 萬平方公尺以上的施工實績。照片 2.3 為日本透水鋪面應用於步道[1，4]。

照片 2.3 日本透水鋪面應用於步道[4]

自 1973 年，日本採用多孔隙瀝青混凝土鋪面至今已近 30 年。當時東京都建設局為改善行道樹之生長環境,於 1973 至 1995 年共築 200 萬平方公尺，並以政策性及階段性的推行，於 1986~1995 年 10~20 萬平方公尺/年速度成長，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 1,000 萬平方公尺以上工作實績。

其壓碎石灰岩所的之石粉，其含水量在 10%以下，且為了抵抗粒料飛散性、耐候性、耐水性、耐流動性等功能，但實際上則是為了考慮耐久

性、排水機能之持續性，則多採用高黏度改質瀝青。其混合料的配比設計中，在由試誤法決定粒料配比的混合料垂流試驗中取得最佳瀝青含量，接著由密度試驗、馬歇爾穩定值試驗、透水試驗及 Cantabro 磨耗試驗決定設計瀝青量，製作馬歇爾試體的夯實次數為每面各 50 下。

日本在多孔隙瀝青混凝土之材料發展、規範研擬、配比設計、現場施工、機要評估方面，累積多年實務經驗，臺灣與日本地理位置接近，工程技術交流頻繁且施工機具類似，日本推行經驗頗值臺灣借鏡。以下為日本透水性鋪面之發展歷程[2]：

1973 年東京建設局建立三個人型到透水鋪面試驗區。

1975 年日本道路建設協會成立「透水性路面研究委員會」。

1978 年將透水性路面列入「瀝青路面綱要」。

1982 年技術成熟，應用於全國人行道。

1983 年在「都市防洪政策」中納入雨水儲留、滲透設施設置，其

中透水性道路鋪面逐步被採用，於 1999 年全國已累積 1000 萬平方公尺以上工作實績。日本在發展透水性試驗路面時，特別重視下列課題：

(1)瀝青混合料最大粒徑之研究。

(2)路盤級配（碎石或礫石）及其厚度之研究。

(3)試驗路面所處地點土質、地勢等環境條件。

(4)用消石灰加入瀝青混合料所產生之效果。

日本透水性鋪面發展至今，依其用途可區分為 3 類

(1)步行道路面鋪面；(2)車行道路鋪面；(3)戶外體育、景觀設施鋪面；日本常用之透水性鋪面型式如表 2.5 所示。

推廣過程是以步行道路面鋪面、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。

日本混凝土協會 2004 年[19]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 2.6 所示，該配比抗壓強度約 250kg/cm^2，高陡護坡斷面圖如圖 2.5 所示。

表 2.5 日本常用之透水性鋪面型式[2]

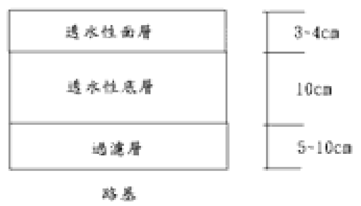
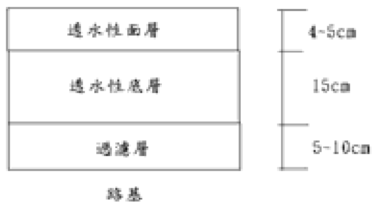
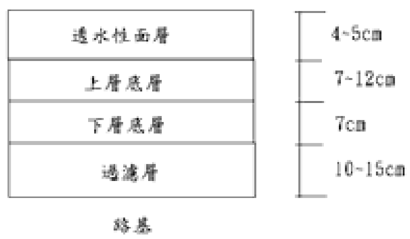
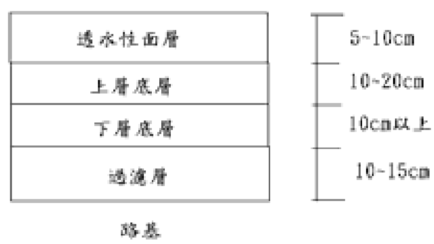
設計區別		使用場所	適用條件	鋪設剖面圖	
				面層材料	標準剖面
人行道路鋪面	步道 I	步道、廣場、徒步區、慢跑步道、腳踏車道	提供行人、腳踏車通行的步道，腳踏車的專用道	多孔隙瀝青混凝土 連鎖磚 天然砂礫 橡膠屑	
	步道 II	步道入口處、廣場、停車場	輕型車輛、管理用車輛		
車行道路鋪面	車道 I	車道、步車共存道路、停車場、商店街、廣場、徒步區	大型車輛通行量小於 10 輛	多孔隙瀝青混凝土 連鎖磚	
	車道 II		大型車輛通行量小於 10~55 輛		
	車道 III		重交通程度		

表 2.6 背填透水混凝土之配合比例[19]

孔隙率(%)	水灰比	單位體積材料用量(kg/m³)				
		水泥	水	細骨材	粗骨材	強塑劑*
15	0.25	355	89	153	1576	0.75%

註：強塑劑為水泥量之 0.75%。

日本 GOMACO 公司[20]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舖設工法速度快 2-3 倍，成本節省 20%以上，詳如照片 2.4 所示。

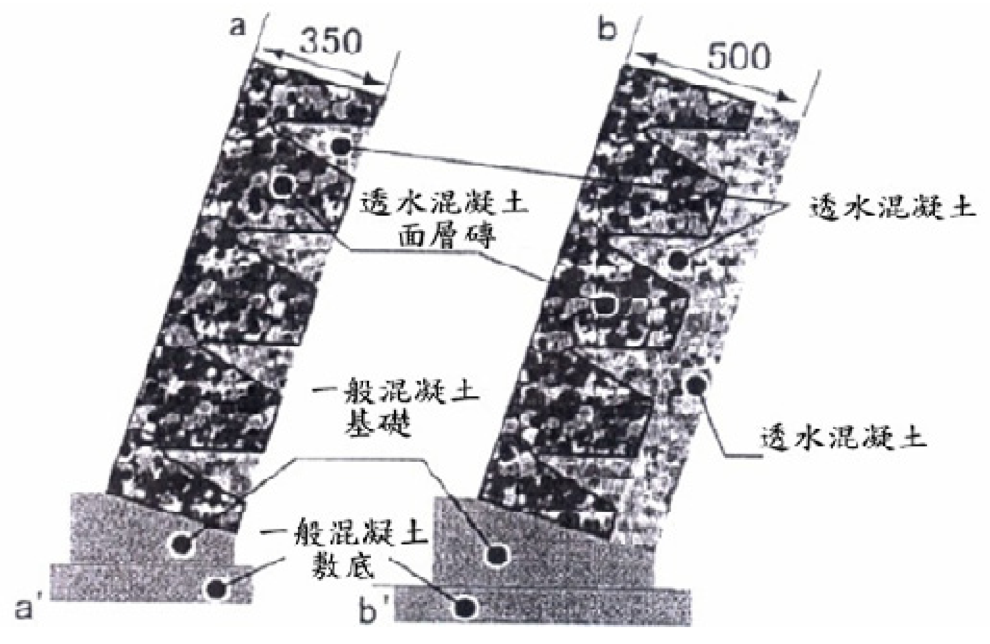


圖 2.5 高陡護坡斷面示意圖(資料來源：日本混凝土協會 2004[19])

照片 2.4 透水混凝土護坡施工澆置情形(GOMACO 公司[20]

歐洲之透水性鋪面發展情形簡述如下：

1.瑞典

瑞典國家公路管理局 SNRA（Swedish National Road Administration）表明多孔隙地瀝青混凝土的耐久性比一般密級配瀝青混凝土來的好。的確，在許多情況中多孔隙瀝青混凝土對大頭釘胎環的損害，比對一般密級配瀝青的更具有較低的抵抗力，因此多孔隙瀝青混凝土的使用多半是基於對噪音的減少和水的排除[2]。

多孔隙瀝青混凝土混合的 5.0%的瀝青，並用 0.8%的礦物纖維，用來增加連結劑的耐久性及風化強度。施工期之瀝青混凝土之孔隙率大於 15%[2]。

哥德堡（Goteborg）和郝爾辛堡（Helsingborg）之間之 E-6 高速公路上，幾個多孔隙瀝青混凝土的表面也被調查過。城市道路當局選擇新的多孔瀝青混凝土表面道路主要用於減少交通噪音；在城市，排水是次重要的。在中等的降雨量以後，可見到只有較少的水留在多孔隙瀝青混凝土表面上。

1980年代早期，在哥德堡（Goteborg）測量到多孔隙瀝青混凝土的噪音量在2年之中，由初始的6.0分貝降到4.8分貝。同樣地，道路的排水容量在了 50％這些減少的空間主要源自於道路上的灰塵的堆積和大頭釘胎環（studded tire）的損害。但哥德堡道路當局還是認為這些現象足以證明多孔隙瀝青混凝土的使用是正確的。

2.德國

在德國多孔隙瀝青混凝土（德國術語為 Larmmindemde 瀝青）還沒有標準規格，由於民眾的壓力漸增，為的是使用它來減少交通的噪音。如同在瑞典，多孔隙瀝青混凝土是用來減少交通噪音和排水。多孔隙瀝青混凝土設計有8和11mm兩種粒料尺寸，有15到25%孔隙含量，其瀝青含量大約5%混合物重。

應用40mm厚的多孔隙瀝青混凝土面層,使用最大尺寸為11mm的粗粒料，85％的粗粒料保留在2mm的篩子上，含有0.5%（混合物的重量）的纖維素纖維（cellulose fibers）。

德國多孔隙瀝青混凝土的鋪面比傳統路面大約多100%費用。支付這個費用主要是用來減少因高速行駛在住宅區或附近其中的公路上時所產生的噪音[2]。

3.法國

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

是沒有顯示出任何的損壞[5]。目前多孔隙瀝青混凝土在德國，還沒有標準的規格，如同瑞典一樣，多孔隙瀝青混凝土，主要用來減少交通噪音和排水[1，5]。

4.比利時

比利時在 1970 年代開始使用，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[2]：

(1)落塵量大的道路，因粒料間之空隙很快就被堵塞。

(2)低交通亮或慢車速車道，因為車速不夠快被堵塞。

(3)承受高減麗赫重路面（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。

2.2.4.2 國內應用

目前國內透水性鋪面之發展尚處於研究發展階段，尤其都市化結果不透水面積逐年增加，使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，照片如圖 2.6，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 3.1×10-1cm/sec [1,5]。

圖 2.6 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[1,15]。

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[3]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 2.7[3]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 骨材之透水混凝土而言，其曼寧係數 N 值約為 0.02，較傳統混凝土 0.015 為高。

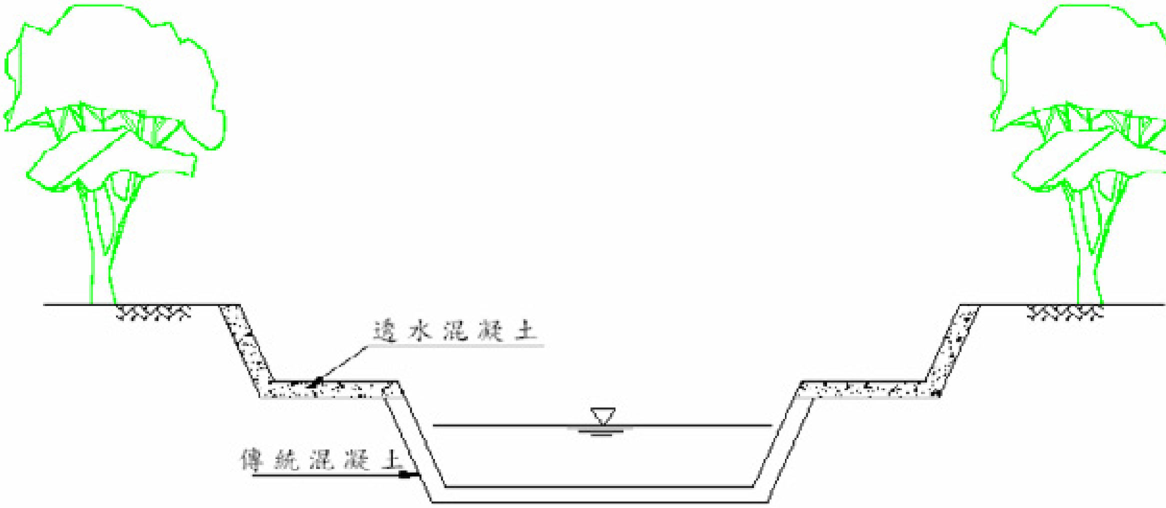


圖 2.7 灌溉水路使用透水混凝土之工法[3]

依據韓乃斌論文(連惠邦教授指導)，由圖 2.8[4]可知，當骨材粒徑愈大，其透水係數愈高，骨材粒徑愈小，其透水係數則愈低，主要原因在於骨材粒徑愈大時，所形成之孔隙孔徑較大，水通過流速較快，水份通過較容易，反之骨材粒徑愈小，因孔隙孔徑較小，阻力較大，水份較不易通過。致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 10-2cm/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 1.69cm/sec，詳圖 2.9 [4]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，該協會以骨材級配 9.5~2.36mm 以及 19.0~4.75mm 之骨材配比進行透水係數試驗，當孔隙率為 35%時，其透水係數為 3.75cm/sec，而本試驗以 19~12.5 mm 之骨材配比，孔隙率為 36%時，透水係數為 5.39 cm/sec，因本試驗之骨材粒徑平均值較大，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。

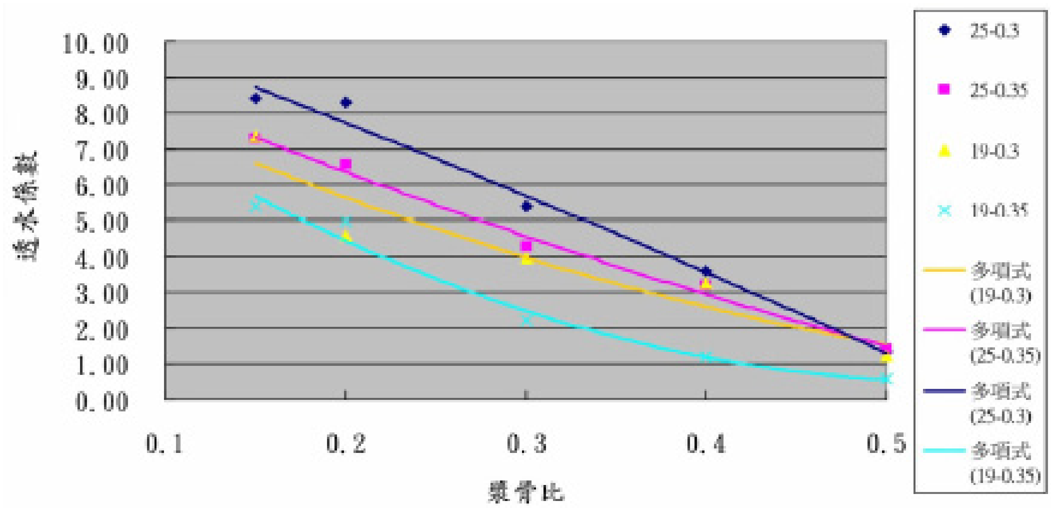


圖 2.8 透水係數與漿骨比關係圖[4]

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

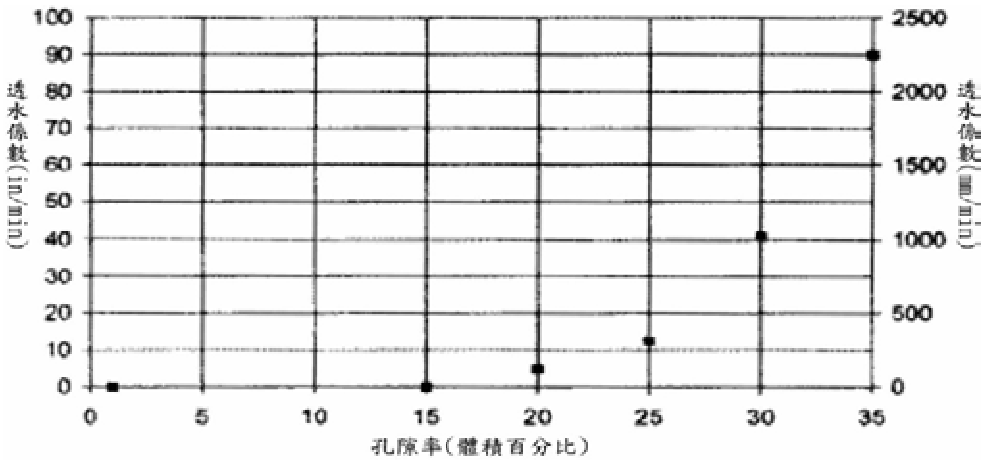


圖 2.9 孔隙率與透水係數關係圖[4]

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，適合鋪設於臺灣多雨之環境，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[45]新近研究結合多孔隙混凝土（PC）與活性粉混凝土（RPC）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 45 kg/cm^2 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 52kg/cm^2，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 45 kg/cm^2（目標抗彎強度 52 kg/cm^2）之要求。活性粉多孔隙混凝土抗壓強度水準已達到臺灣區公路規範參考水泥用量 400 kg/cm^2 時，一般水泥混凝土 28 天齡期設計抗壓強度 280 kg/cm^2 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。此研究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[45]。

第三章　建立透水混凝土之製程與試驗標準

3.1 建立透水混凝土之製程

3.1.1 透水混凝土之組成材料

透水混凝土組成材料主要包含有膠結材料、拌和水、骨材、摻劑。

3.1.1.1 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固作用，與骨材膠結一起拌合形成混凝土，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。一般傳統波特蘭水泥(符合 ASTM C150 或 CNS 61 規定)或混合水泥(符合 ASTM C595 或 CNS 3654 規定)是主要膠結料可以使用於透水混凝土；除此之外，經常使用卜作嵐材料如飛灰、爐石粉與矽灰亦應符合 ASTM C618、C989 與 C1240 (或 CNS 3036) 相關規定。

3.1.1.2 骨材

骨材是透水混凝土主要的骨架構，亦是提供主要強度的因子之一，骨材包含普通骨材(礫石、卵石)或特殊骨材(輕質骨材等)。為了保證透水混凝土的透水性能與力學強度，且骨材顆粒級配是決定整體透水性能與力學強度的主因，粗骨材通常採用單一粒徑骨材或級配顆粒介於 3/4 至 3/8 英吋 (19 mm 至 9.5 mm) 之間，骨材應符合 CNS 468 與 1163 相關規定。一般而言，細骨材(砂)儘可能不要被使用於透水混凝土，它趨向填塞透水混凝土連接孔隙系統，另外，骨材含泥量應受到限制。

3.1.1.3 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飲響物質，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 3.1 所示，因此，工地加水行為應嚴格管制與監督。

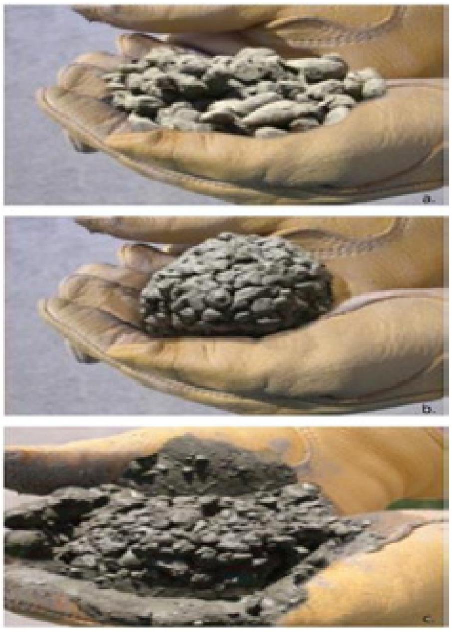


圖 3.1 透水混凝土不同含水量是否結球行為：

(a)太少水，(b)適量水，(c)太多水 [43]

3.1.1.4 摻劑

透水混凝土除了上述骨材、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。

3.1.2 透水混凝土之配比

典型透水混凝土主要是由水泥、粗骨材、一點或無細骨材、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[44]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 4000 psi (2.8 至 28 MPa) 之間，透水混凝土鋪面排水率因骨材尺寸與其壓密度有關，但一般排水率範圍介於 2 至 18 gal./min/ft^2 (81 至 730 L/min/m^2) 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 [43-44]。

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，應先求出預使用粗骨材之乾搗單位重，從而求出粗骨材中之孔隙率，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骨材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『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 3.1 所示[43]。

表 3.1 典型透水混凝土鋪面配比的材料範圍[43]

	膠結料(C)	骨材(A)	水灰比(W/C，重量)	骨材水泥比 (A/C，重量)	細粗骨材比 (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 3.1 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 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。

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：

Step.1

選擇水灰比，依強度及透水需求尋找對應之連通孔隙率與單位重，並依水灰比及連通孔隙率尋找對應之填充孔隙體積與骨材主要粒徑。

Step.2

求出骨材之乾搗單位重，決定骨材之單方用量。

Step.3

藉由骨材乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積。

Step.4

由填充孔隙體積決定水泥漿體使用量，透過水灰比求出水泥之單方用量、拌合水之單方用量及新拌混凝土配比單位重。

Step.5

檢核新拌混凝土單位重；製作試體，檢核強度及透水需求。

Step.6

完成透水混凝土配比設計。

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骨材粒徑級配下，對應之孔隙率與強度關係，進而達到強度及透水係數之需求；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 3.2 透水混凝土抗壓強度與孔隙率之關係，圖 3.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係，圖 3.4 透水混凝土水灰比與孔隙率之關係，圖 3.5 透水混凝土抗彎強度與孔隙率之關係，圖 3.6 透水混凝土抗彎強度與抗壓強度之關係，圖 3.7 透水混凝土透水速率與孔隙率之關係。利用上述 ACI 522R-06 透水混凝所提供資訊關係圖可以經過試拌求得最佳配比設計，圖 3.8 為透水混凝土配比設計流程圖。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±4%，屬於一般強度低透水混凝土；另一組孔隙率為 30±5%，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 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)之間，水灰比介於 0.25 與 0.45 之間，抗壓強度介於 400 psi (2.8MPa)與 4,000 psi (28MPa)之間，其水泥(膠結料)與骨材比率以不產生垂流為原則。

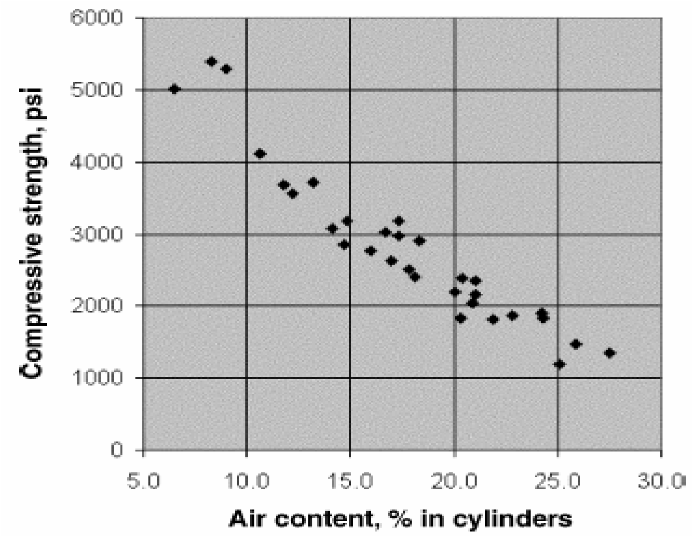


圖 3.2 透水混凝土抗壓強度與孔隙率之關係[44]

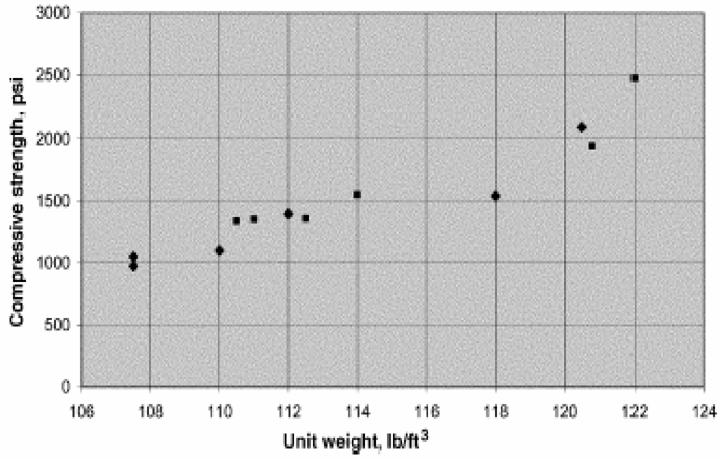


圖 3.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係[44]

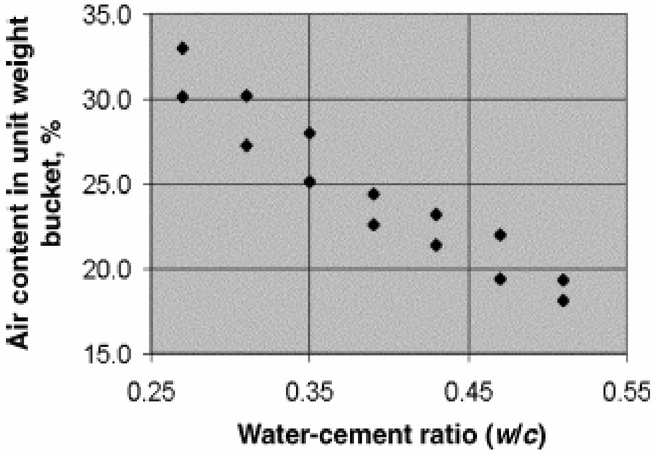


圖 3.4 透水混凝土水灰比與孔隙率之關係[32]

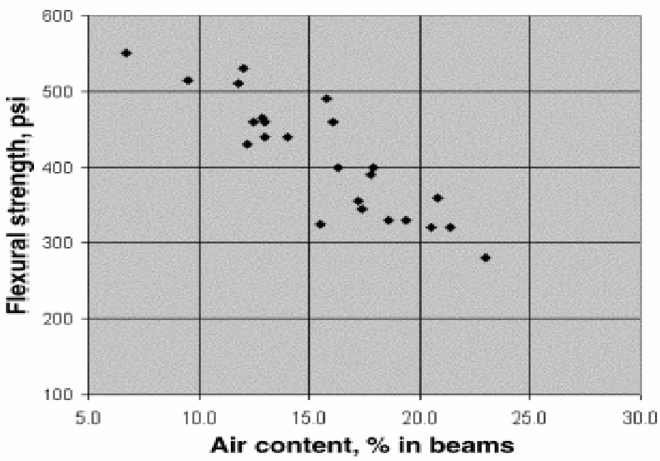


圖 3.5 透水混凝土抗彎強度與孔隙率之關係[44]

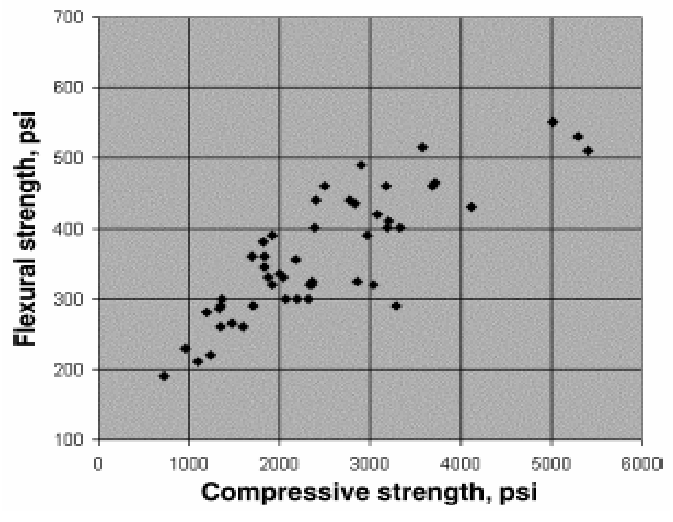


圖 3.6 透水混凝土抗彎強度與抗壓強度之關係[44]

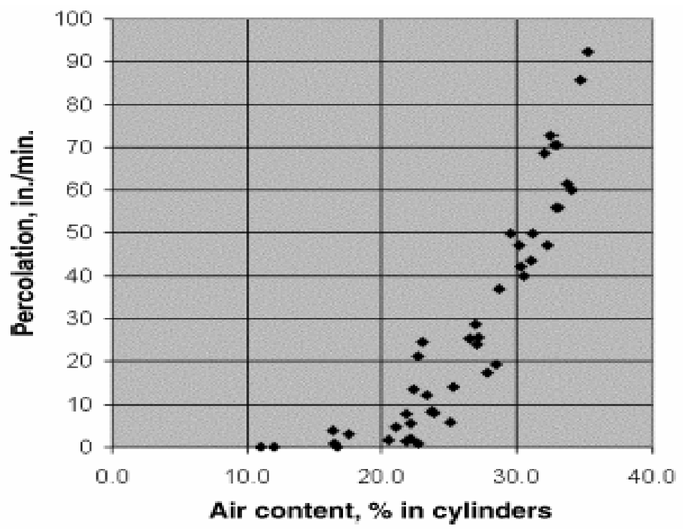


圖 3.7 透水混凝土透水速率與孔隙率之關係[44]

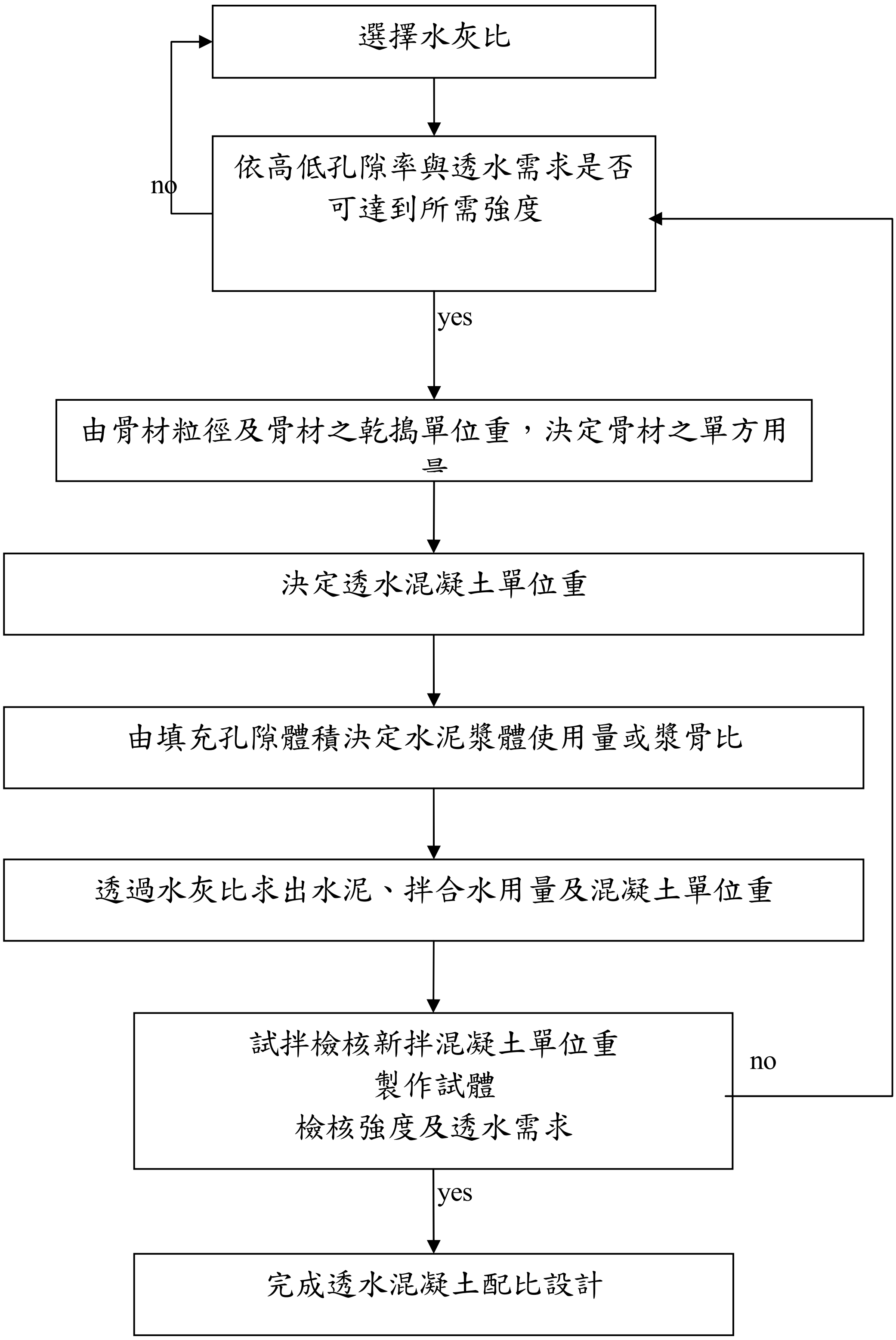


圖 3.8 透水混凝土配比設計流程圖

3.1.2.1 透水混凝土配比之案例說明(透水係數 10^{-1}cm/sec，抗壓強度 2000psi)

step 1. 選擇水灰比，依強度及透水需求尋找對應之連通孔隙率，並依連通孔隙率尋找對應之透水係數。

水灰比 0.45(ACI 之圖表)，由圖 3.2 可知抗壓強度 2000psi 其孔隙率約 25%可符合要求，又由圖 3.4 可知抗壓強度 2000psi 其水灰比約為 0.35 可符合要求，並由圖 3.7 可知連通孔隙率尋找對應之透水係數為 0.21cm/sec 高於 10^{-1}cm/sec。

step 2. 由骨材之乾搗單位重，決定骨材之單方用量。

藉由選用骨材粒徑試驗可得骨材之乾搗單位重，再由骨材填充百分比，決定骨材之單方用量。若骨材主要粒徑為 0.48cm，其乾搗單位重為 1680kg/m^3，設計骨材填充百分比為 75%，骨材之單方用量為 1344kg/m^3。

step 3. 決定透水混凝土單位重

典型透水混凝土其單位重介於 100 lb/ft^3 與 125 lb/ft^3 (1600 kg/m^3 與 2000 kg/m^3)之間，由圖 3.3 透水混凝土抗壓強度與單位重之關係可知抗壓強度 2000psi 其混凝土單位重約為 120lb/ft^3，約 1900 kg/m^3。

step 4. 決定漿骨比或漿體填充骨材孔隙百分比

藉由骨材乾搗單位重求出在單位體積中的孔隙率及孔隙體積，單位體積孔隙率約 38%，即總孔隙體積為 0.38m^3/m^3。

step 5. 由填充孔隙體積決定水泥漿體使用量，透過水灰比 0.35 求出水泥之單方用量及拌合水之單方用量。

計算可得水泥用量為 384kg/m^3，拌和水用量為 134kg/m^3。

step 6. 製作試體，檢核混凝土單位重、強度及透水需求。

step 7. 完成透水混凝土配比設計。

漿體	粒徑 (cm)	水灰比 (w/c)	漿體填充骨材孔隙百分比	骨材用量 (kg/m^3)	水泥用量 (kg/m^3)	拌和水用量 (kg/m^3)
水泥	0.48	0.35	80%	1344	384	134

3.1.3 透水混凝土之施工輸送澆置養護

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，詳如照片 3.1 至照片 3.11，其資料來源：ACI 522R-06 Pervious Concrete[44]。

1.澆置施工要領

(1)運輸時間不宜過長預拌車至現場後需迅速澆置，透水混凝土工作度較低(接近零坍度)，不適合泵送方式施工，為避免工作性喪失，如照片 3.1 所示可藉由預拌車尾端直接卸料澆置透水混凝土，照片 3.2 所示藉由輸送帶澆置透水混凝土。

(2)若天氣太熱，則預拌車可至工地再加強塑劑拌合。

照片 3.1 藉由預拌車尾端卸料澆置透水混凝土[44]

照片 **3.2** 藉由輸送帶澆置透水混凝土[44]

照片 **3.3** 藉由耙子攤平透水混凝土[44]

2.攤平施工要領

(1)預拌車需到達定位後再行下料，避免長距離移動拌合料。

(2)在攤平階段，如照片 3.3 所示藉由耙子攤平透水混凝土，使完成面整平，以利壓實後表面美觀及方便使用。

照片 3.4 藉由振動刮板進行搗實透水混凝土[44]

3.壓實施工要領

(1)不得使用高能量振動棒,最初可使用振動刮板進行搗實透水混凝土如照片 3.4 所示，再以滾筒採重力壓實方式進行，滾筒最小垂直壓力為 10 psi (0.07MPa)。

(2)滾筒之寬度應大於施工面寬度,一般 3.7m (12 ft)道面寬所使用大滾筒之重量約是 270kg 至 320kg (600 至 700lb)如照片 3.5 所示；小區域鋪面可使用較小滾筒之重量大約是 90kg 至 140kg (200 至 300lb)如照片 3.6 所示，縱向滾壓之後，可再進行二次橫向滾筒壓密透水混凝土，以改善鋪面騎乘品質如照片 3.7 所示。

(3)角落外觀修飾必須在尚有工作度時迅速進行,如照片 3.8 以鏝刀邊飾透水混凝土以改善角落外觀。

(4)上述澆置、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,若有使用緩凝劑或天氣濕冷許可條件下，可延長至 90 分鐘內完成。

照片 3.5 藉由滾筒壓密透水混凝土[44]

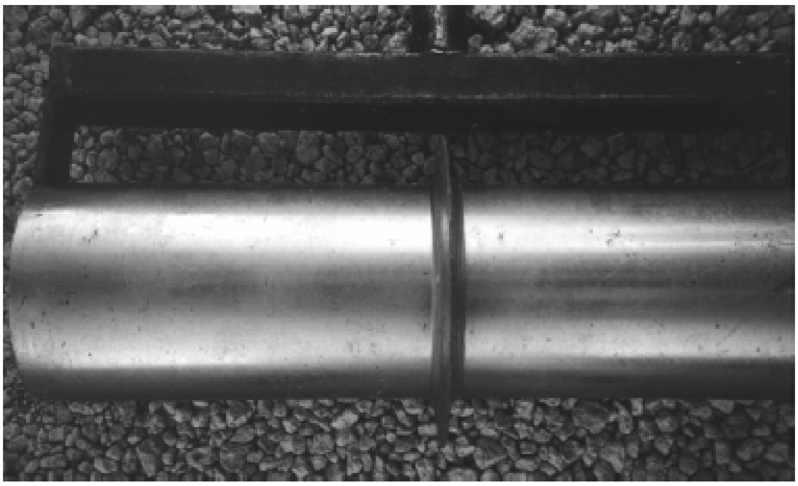
照片 3.6 藉由小滾筒壓密小區域透水混凝土[44]

照片 3.7 二次橫向滾筒壓密透水混凝土以改善鋪面騎乘品質[44]

照片 3.8 鏝刀邊飾透水混凝土以改善角落外觀[44]

4.切縫施工要領

透水混凝土伸縮縫可依一般混凝土施工方式事先留置，在施工完成後應於施工鋪面以 3 至 6 公尺距離切一道伸縮縫以防止熱脹冷縮，或於壓實完成後在未完全硬固前進行切縫，傳統混凝土鋪面鋸縫工具不能用於透水混凝土，一種特別設計滾筒切縫附有刀鋒，刀鋒約為 1/4 至 1/3 版厚如照片 3-9 所示，照片 3-10 所示為透水混凝土鋪面縱向切縫施作使用滾筒附有刀鋒。



照片 3.9 切縫工具附有刀鋒約為 1/3 版厚度[44]

照片 **3.10** 滾筒附有刀鋒可以縱向切縫透水混凝土鋪面[44]

照片 **3.11** 壓密透水混凝土後應迅速使用塑膠紙覆蓋養護鋪面[44]

5.養護施工要領

當透水混凝土鋪面鋸縫施作完成後，應迅速進行養護，一般混凝土的養護常使用漫淹方式澆水在表面，透水混凝土之養護因孔隙率關係，水份無法保持在表面，故常以塑膠布覆蓋避免水份散失，初期淋水時水柱不得過強，一般要求透水混凝土鋪面滾壓夯實施作完成後，應於二十分鐘內進行養護，照片 3.11 所示為透水混凝土滾壓後使用塑膠布覆蓋養護鋪面，避免泥土、砂、鋸屑與細料污染或堵塞透水混凝土孔隙；一般要求透水混凝土鋪面應全程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。

3.2 建立透水混凝土之試驗標準

3.2.1 透水混凝土施工前檢試驗

有關土壤分析與路基透水性質對透水混凝土計畫影響特別重要,如同一般營建材料驗證透水混凝土鋪面的品質是非常重要的,首先對基層條件的測試，包括足夠的密度、承載值與透水性，方能有效的針對新拌混凝土與硬固混凝土兩者性質進行品質保證的試驗(試驗項目包含單位重、厚度、透水係數與孔隙率等)，有關土壤基層有很多 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 Proctor 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，在透水混凝土澆置前，依據 ASTM 標準試驗有關壓密度程序方法應進行正常施作而不需要修正，此為正常品質管制的一部分。

3.2.2 透水混凝土施工中檢試驗

一般混凝土標準試驗項目包含單位重(密度)、坍度、含氣量、強度、透水率與其他性質等,並非所有的試驗可適用於透水混凝土直到新試驗標準發展完全。典型透水混凝土配比規定為最少水泥(膠結料)用量、骨材体積與級配(或漿骨比)、藥劑及水膠比限制，如表 3.1 所示提供一典型透水混凝土配比材料範圍。

有很多 ASTM 與 AASHTO 試驗方法可以應用於透水混凝土鋪面,但並非所有一般混凝土的試驗可適用於透水混凝土。

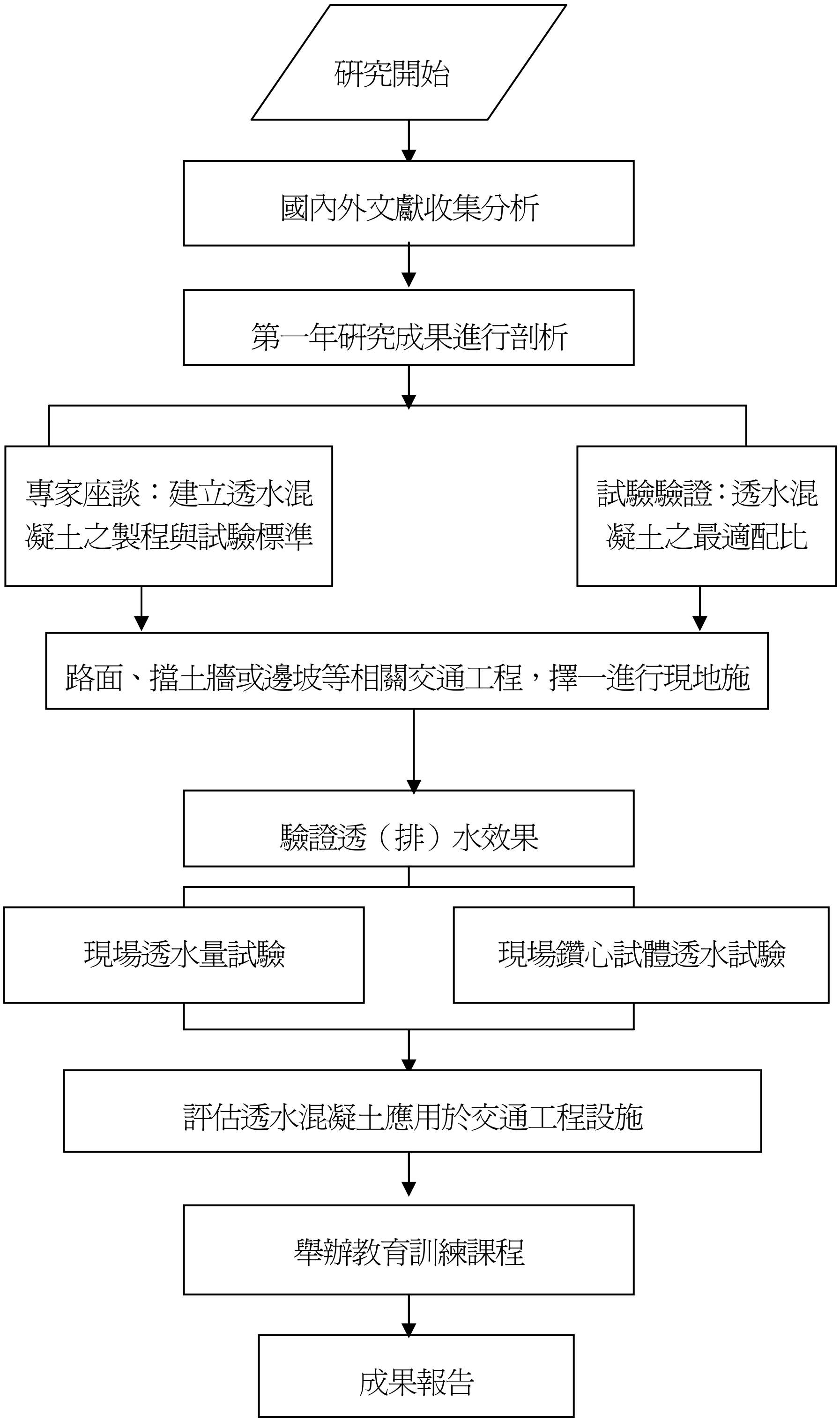
典型透水混凝土其單位重介於 1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3 之間，水灰比介於 0.25 與 0.45 之間，抗壓強度介於 400 psi (2.8MPa)與 4,000 psi (28MPa)之間，其水泥(膠結料)與骨材比率以不產生垂流為原則。其施工中可以目視判斷是否垂流產生，並應進行新拌透水混凝土單位重之試驗，每天澆置混凝土至少應進行一次以上單位重之驗證，單位重試驗係依據 ASTM C172 與 C29 規範(CNS1174 與 1163)之規定進行，允收標準為設計單位重之±80 kg/m^3 (5 lb/ft^3)之間。

3.2.3 透水混凝土施工完成後檢試驗

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±80 kg/m^3 (5 lb/ft^3)間，厚度驗收標準為平均厚度不小於設計厚度，且無任一鑽心試体厚度較設計厚度小 0.5 英吋 (13 mm)。其他試驗包含抗彎強度與透水率等，而抗壓強度與抗彎強度試驗方法依據準則分別為 CNS 1232 與 CNS 1233 規範；，有關透水率目前室內用定水頭試驗法，使用 Darcy 公式，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，上述兩種透水試驗規範是依據日本道路協會「鋪裝試驗法便覽」與中華鋪面工程學會「透水性鋪面」。

第四章　試驗計畫

4.1 研究流程



4.2 試驗材料

4.2.1 水泥

本試驗所使用的水泥為臺灣水泥公司所生產的波特蘭 I 型水泥，其化學成份以及物理性質如表 4.1 及表 4.2 所示。

表 4.1 水泥化學成份

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

資料提供：臺灣水泥公司

表 4.2 水泥物理性質

水泥型號	第一型水泥（Type I Cement）	
項目	中國國家標準 CNS61-R2001	試驗值
墁料空氣含量（%） Air Content of Motar (%)	max. 12.0	7.2
細度:Fineness (cm2/g)	max. 2800	3310
健度:Soundness (%)	max. 0.80	0.05
抗壓強度 Compressive Strength，kgf/cm2 (MPa)		
3（days）	min.126 (12.35)	210 (20.60)
7（days）	min.197 (19.31)	282 (27.66)
28（days）	min.281 (27.54)	384 (37.67)
凝結時間：Time of Setting (Vicat test)		
初凝:Initial setting(hr:min)	min. 0:45	2:30
終凝:Final setting(hr:min)	max.8:00	3:50

資料提供：臺灣水泥公司

4.2.2 粗骨材

本試驗使用兩種不同顆粒粒徑骨材作為試驗變數，來至於興農股份有限公司，分別為 19mm 與 4.8mm 之粒徑骨材，當進行透水混凝土試拌時，興農股份有限公司不能適時配合透水混凝土試拌與試鋪，因此，尋求長生預拌廠股份有限公司協助配合透水混凝土試拌與試鋪，故透水混凝土試拌與試鋪與先前所使用之骨材有所不同。

4.3 試驗變數

本試驗使用兩種漿骨比和兩種顆粒粒徑骨材，分別為 19mm 與 4.8mm 之粒徑骨材，與以搗實方法的不同，分為輕搗實與重搗實作為試驗變數。

輕搗實係在插入時放鬆握棒改為空握搗棒的方式，藉由輕微振動攤平拌合料；重搗實則以實握搗棒的方式，以製作傳統混凝土試體方式大力插入超過約二分之一深度。

4.4 材料配比

本實驗採用的透水混凝土之配比包含波特蘭第 I 型水泥、粗骨材、水等材料，主要以粗骨材、漿骨比與搗實方法為變數，如表 4.3 所示。

4.4.1 配比編號

以水灰比 W/C=0.35，粗骨材分為 A=19mm、B=4.8mm，漿骨比分為 1：4 與 1:4.5(水泥:粗骨材)，搗實分為 X=重搗實、Y=輕搗實，給定之編號：

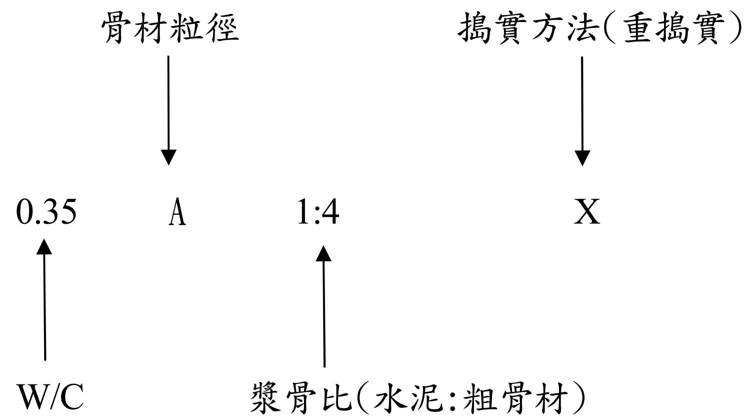


表 4.3 透水混凝土之配比

配比	水灰比	骨材粒徑 (mm)	粗骨材 (kg/m³)	水泥 (kg/m³)	水 (kg/m³)
0.35-A-1:4-X(Y)	0.35	19	1524	381	133.35
0.35-A-1:4.5-X(Y)	0.35	19	1524	338.67	118.53
0.35-B-1:4- X(Y)	0.35	4.8	1311	327.75	114.71
0.35-B-1:4.5- X(Y)	0.35	4.8	1311	291.33	110.97

註：每一配比又分為 X=重搗實與 Y=輕搗實。

4.5 試驗方法

4.5.1 試體製作

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

1.將骨材加入鼓式拌和機中，鼓式拌和機如照片 4.1 所示。

2.加入水泥。

3.啟動拌合機，預先攪拌乾料，使其充分混合。

4.加入拌合水。

5.拌合完成後下料至 PVC 桶中，進行灌製 Φ10cm*20cm 圓柱試體、53cm*15cm*15cm 抗彎試驗樑試體。圓柱試體模與抗彎試體模如照片 4.2、照片 4.3 所示。

6.灌製完成後， 依 CNS 1230 規範於 24 小時後拆模，並將試體置於室內環境的飽和石灰水中，養護至試驗齡期。

照片 4.1 鼓式拌合機

照片 4.2 Φ10cm*20cm 圓柱試體模

照片 **4.3 53cm*15cm*15cm** 抗彎試體模

4.5.2 單位重測定

單位重試驗可依據 ASTM C172 與 C29 規範(CNS 1174 與 1163)進行，本次試驗簡述之，透水混凝土試體硬固並脫模之後放置入烘箱以 105±5℃烘至恆重並秤取重量，並以卡尺測量試體使並計算其體積，並由重量除以體積則可得到混凝土之單位重。

4.5.3 孔隙率測定

透水混凝土之孔隙率：

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

透水混凝土內部總孔隙率其中包含”連通孔隙率”，連通孔隙主導透水混凝土的透水性能，測定法首先以卡尺測量並計算試體體積 V1，將試體浸入水中待試體飽水後秤取水中重量 W1；將試體從水中取出並擦去試體表面多餘水分待重量恆定之後秤取空氣中重量 W2，則連通孔隙率 P1 計算如下。

$$P1=[1-(W2-W1)/V1]\times 100\%$$

4.5.4 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%[42]。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 4.5~7.14 kgf/cm^2，抗壓試體大小為 Φ10cm*20cm，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：

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2}$$

其中 σ：材料抗壓強度（kgf/cm^2）

P：最大荷重（kgf）

r：試體半徑（cm）

4.5.5 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 53cm*15cm*15cm，試體在拌合後分三層灌置在抗彎模中，經 24 小時拆模，並置試體於飽和石灰水中，於預定 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/cm^2 之加載速率加壓於試體，直至試體破壞，記錄最大破壞載重，其破裂模數計算式如下：

$$f_r' = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中 f_r'：破裂模數（kgf/cm^2）

P：最大荷重（kgf）

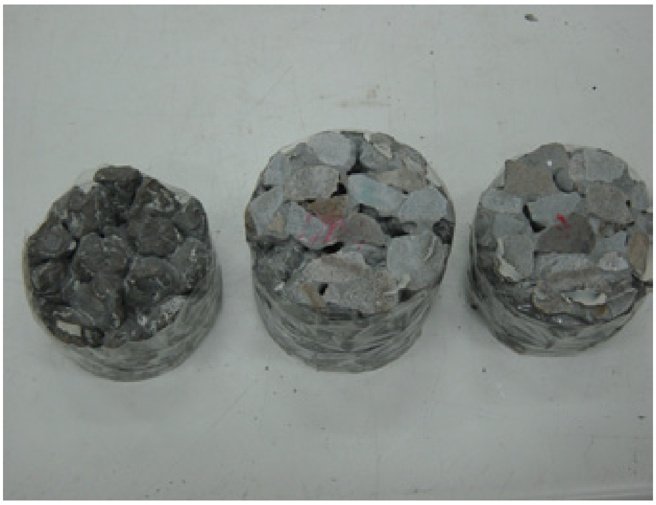
L：跨距（cm）

b：試體寬度（cm）

h：試體高度（cm）

4.5.6 室內透水試驗

先將灌製好的 Φ10cm*20cm 圓柱試體用切割機切割成三層，分別為上、中、下後，再去施作透水試驗如照片 4.4 所示。



照片 4.4 透水混凝土分三層

本實驗採用室內透水試驗，其試驗目的、說明、設備與方法如下：

(1)試驗目的：進行此試驗之目的，在評估透水混凝土之透水性。

(2)試驗說明：測定透水混凝土之透水係數。

(3)試驗儀器：

(a)鐵盆

(b)附腳之有孔板：為裝載於透水圓筒的附腳，此黃銅版的厚度約 5mm 並開有小孔。

(c)水槽：具備適當的大小，以容納試料容器。為了保持水位，在有孔

板上方約 1cm 處設有排水口，水槽為塑膠製或金屬製。

(d)其他設備：游標尺、電子秤、捲尺、碼錶、油性黏土、膠帶、切割機。

(4)試驗方法：

(a)以游標尺量測 10cm 混凝土圓柱試體之直徑與厚度至精度 0.1mm。

(b)以膠帶固定及側面塗佈油性黏土之試體，放置於透水圓筒內，惟試體至透水圓筒間不可有空隙存在。

(c)將裝有試體之透水圓筒放置於有附腳之有孔黃銅版上。

(d)由透水圓筒的上端徐徐注水，並使用自透水圓筒上端的溢流口流出，保持一定的水位並由水槽的排水口排水。

(e)等待由水槽排水口的溢流量達到約一定量，此時以鐵盆測得一定時間內溢流的水量(Q)，如照片 4.5、圖 4.1 所示。以游標尺量測水頭高(H)。

照片 4.5 定水頭透水係數測定儀

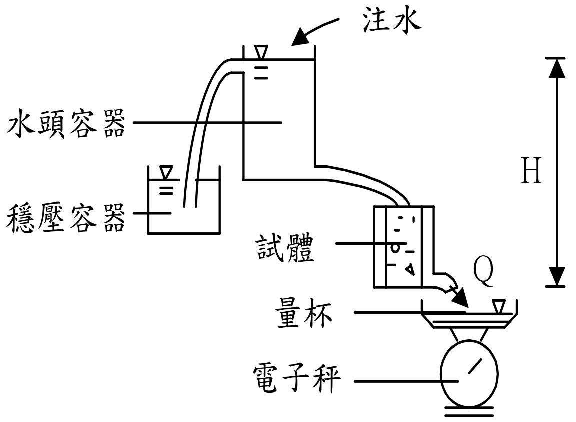


圖 4.1 定水頭透水係數測定儀示意圖

(5)計算方法：

透水係數 KT(cm/s)，可以公式如下計算。

$$K_T = \frac{L / H * Q}{A(t_2 - t_1)}$$

式中 K_T：透水係數 (cm/s)

L：試體高度(cm)

A：試體截面積(cm^2)

H：水頭高(cm)

t_1：測定開始時間(s)

t_2：測定結束時間(s)

Q：由 t_1 至 t_2 的溢流水量(cm^3)

4.5.7 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，詳附錄-2 現場透水量試驗方法，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：主要作為排水性鋪面之透水性能力評估。

(2)適用範圍：主要作為排水性鋪面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 4.6 所示，其示意圖詳附錄-2。

照片 4.6 現場透水試驗儀器

(b)油性黏土(橡膠黏土)、碼錶(可測量到 0.1 秒單位)、裝水容器、抹布、水。

(4)試驗方法：

(a)清除鋪築路面的垃圾等。

(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 400ml 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。

(d)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)。

第五章　試驗結果與分析

5.1 新拌混凝土單位重試驗

透水混凝土中含有較多連通孔隙，因此，新拌混凝土之單位重相較於一般混凝土顯得略小，各配比單位重試驗結果如表 5.1 所示。

表 5.1 新拌混凝土單位重試驗結果

試體編號	單位重(kg/m^3)	試體編號	單位重(kg/m^3)
0.35-A-1:4-X	1805	0.35-A-1:4-Y	1693
0.35-A-1:4.5-X	1762	0.35-A-1:4.5-Y	1565
0.35-B-1:4-X	1701	0.35-B-1:4-Y	1557
0.35-B-1:4.5-X	1652	0.35-B-1:4.5-Y	1602

在混凝土配比中，以固定水灰比、骨材粒徑不同、漿骨比的不同與搗實方法的不同來觀察新拌混凝土單位重之變化趨勢，單位重隨著骨材粒徑愈大而增加、漿骨比愈大而增加，且單位重隨著搗實或壓密能量愈大而增加，即試體編號 0.35-A-1:4-X 其單位重較高，如圖 5.1 所示。其中，輕搗實試體之單位重介於 1,550 至 1,700 kg/m^3 間，部分輕搗實試體低於典型透水混凝土單位重(1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)之間。重搗實試體之單位重介於 1,650 至 1,805 kg/m^3 間，試體合乎典型透水混凝土單位重之間。重搗實試體與輕搗實試體之單位重相差介於 50 至 200 kg/m^3 之間，可能與混凝土配比和真正搗實或壓密能量有關。

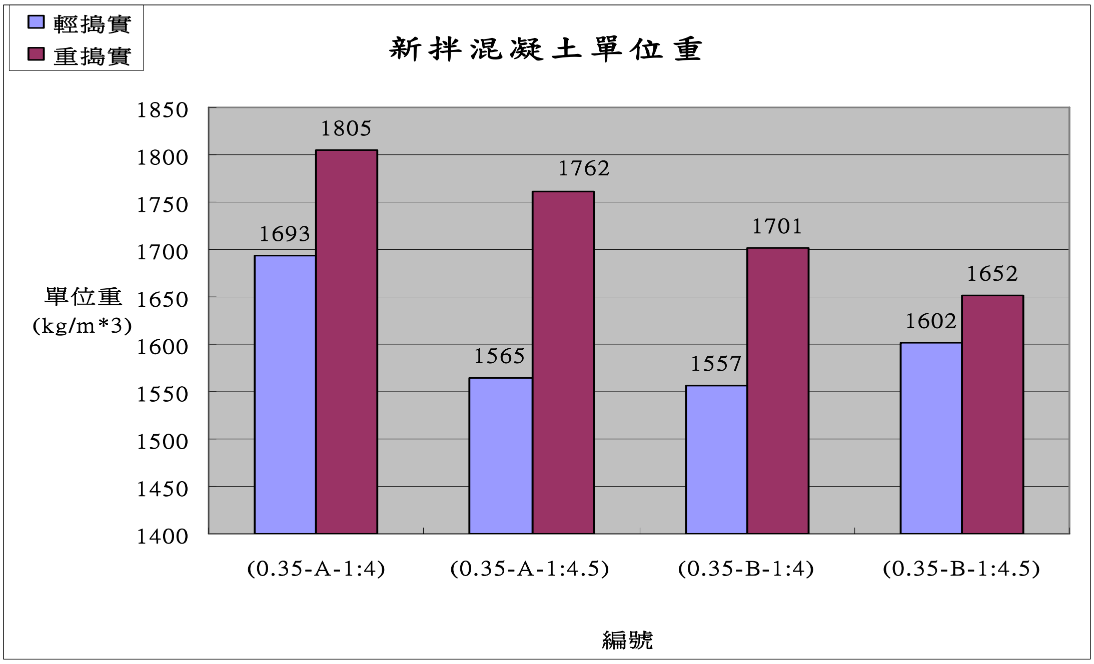


圖 5.1 新拌混凝土單位重

5.2 透水混凝土硬固後單位重試驗

混凝土透水性能為本研究主要考量，因此，在確定試體配比後所拌製之試體，首要先以目測方式檢視試體有無過多漿體，可能會產生垂流現象，當發生垂流現象亦即喪失透水性能之試體配比予以剔除，將可確定後續進行之試驗是在保有一定透水性能前提之下進行。本研究所選定之八種混凝土配比(水灰比=0.35)其漿骨比介於 1:4 至 1:4.5 間，上述輕重搗實之混凝土試體硬固後經目測檢視均無垂流現象，如照片 4.4 透水混凝土試體所示。

透水混凝土硬固後其內含有較多連通孔隙，因此，單位重相較於一般混凝土顯得略小，各配比單位重試驗結果如表 5.2 所示。混凝土硬固後與先前新拌混凝土之單位重相較差異不大，其單位重隨著骨材粒徑愈大而增加、漿骨比愈大而增加，且單位重隨著搗實或壓密能量愈大而增加，即試體編號 0.35-A-1:4-X 其單位重較高，如圖 5.2 所示。

表 5.2 透水混凝土硬固後單位重試驗結果

試體編號	單位重(kg/m^3)	試體編號	單位重(kg/m3)
0.35-A-1:4-X	1804	0.35-A-1:4-Y	1700
0.35-A-1:4.5-X	1721	0.35-A-1:4.5-Y	1678
0.35-B-1:4-X	1663	0.35-B-1:4-Y	1641
0.35-B-1:4.5-X	1635	0.35-B-1:4.5-Y	1663

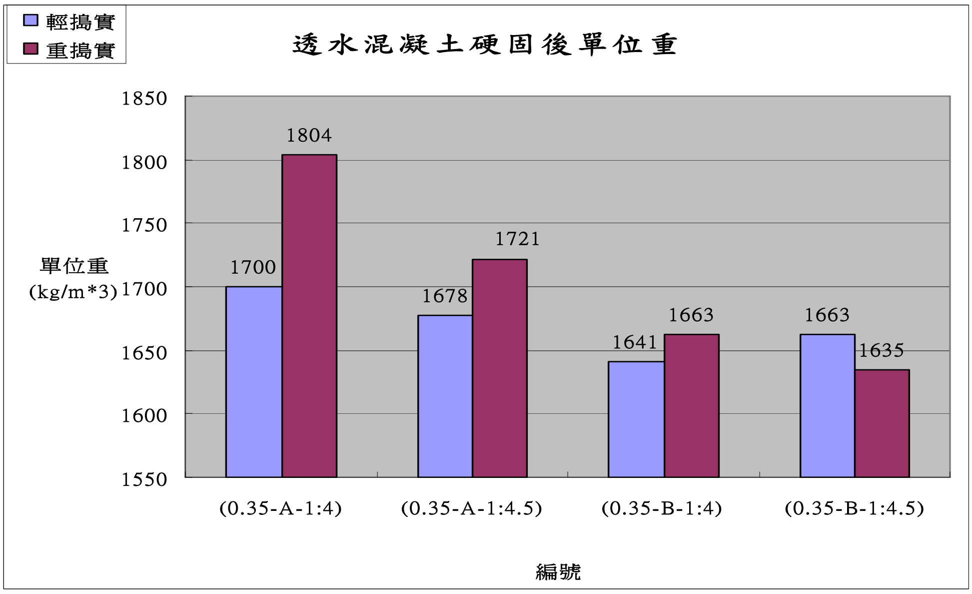


圖 5.2 透水混凝土硬固後單位重

其中，輕搗實試體之單位重介於 1,650 至 1,700 kg/m^3 間，輕搗實試體已合乎典型透水混凝土單位重(1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)之間。重搗實試體之單位重介於 1,630 至 1,805 kg/m^3 間，試體合乎典型透水混凝土單位重之間。重搗實試體與輕搗實試體之單位重相差介於 22 至 104 kg/m^3 之間，相較於新拌混凝土之差異變化為小，其單位重差異約減為一半。

5.3 透水混凝土孔隙率測試

透水混凝土內部結構特性較不緻密，因為使用單一粒徑粗骨材或因無細骨材的影響會產生許多孔隙，主導透水性能的連通孔隙率可以透過試驗測定，主要原理採用排水體積法的試驗作孔隙率測定。結果如表 5.3 所示。

表 5.3 透水混凝土連通孔隙率試驗結果

試體編號	連通孔隙率(%)	試體編號	連通孔隙率(%)
0.35-A-1:4-X	25.9	0.35-A-1:4-Y	30.29
0.35-A-1:4.5-X	31.37	0.35-A-1:4.5-Y	31.95
0.35-B-1:4-X	30.68	0.35-B-1:4-Y	27.56
0.35-B-1:4.5-X	25.89	0.35-B-1:4.5-Y	30.1

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±4%，屬於一般強度低透水混凝土；另一組孔隙率為 30±5%，屬於低強度高透水混凝土；而表 5.3 透水混凝土孔隙率試驗結果發現孔隙率範圍約為 25%至 32%之間，均屬於上述低強度高透水混凝土；其孔隙率與骨材粒徑或漿骨比似乎無關，而隨著搗實或壓密能量愈大而減少，然而試體編號 0.35-B-1:4 其孔隙率卻隨著搗實能量愈大而增加，有不合理現象，很可能數據顛倒需要再確定，如圖 5.3 所示。

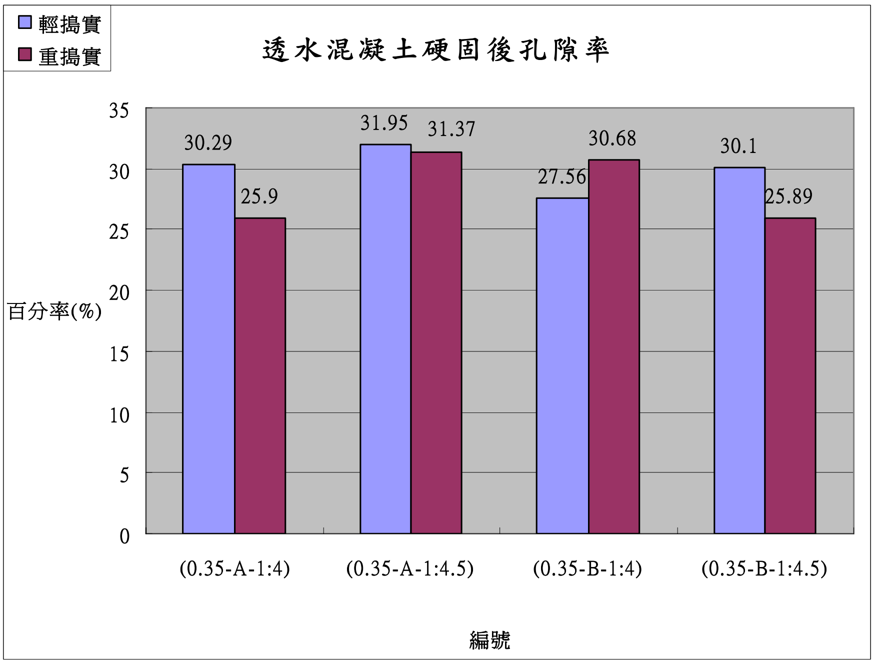


圖 5.3 透水混凝土孔隙率

5.4 抗壓試驗

本試驗分別以骨材粒徑、漿骨比、齡期與搗實方法探討其抗壓強度變化之影響，兩種骨材粒徑分別為 19mm 與 4.8mm，而測試齡期分別為 7 天與 28 天，搗實方法分別為重搗實與輕搗實，漿骨比介於 1：4 至 1：4.5 間，試驗抗壓強度發展情形，如表 5.4 所示。

在混凝土配比中，以固定水灰比 (W/C=0.35)、骨材粒徑不同、漿骨比的不同、齡期不同與搗實方法的不同來觀察抗壓強度變化趨勢，抗壓強度在重搗實方法下骨材粒徑愈大而上升，隨著齡期增加而上升，特別是骨材粒徑愈大抗壓強度上升愈大，即試體編號 0.35-A-1：4-X 其強度最大達 150 kg/cm^2，並與前一節有關單位重最高或孔隙率較低相互呼應，但是部分在輕搗實方法下則相對下降，從數據的差異可發現到輕搗實較不容易掌控，而以漿骨 比(水泥：粗骨材) 來探討其比值落於 1：4 與 1：4.5 間對抗壓強度影響並不大，綜合上述影響抗壓強度因子主要為搗實方法、齡期與骨材粒徑等，如圖 5.4 所示。

表 5.4 抗壓強度試驗結果

試體編號	7 天抗壓強度 (kg/cm^2)	試體編號	28 天抗壓強度 (kg/cm^2)
0.35-A-1:4-X	114.1	0.35-A-1:4-X	150.83
0.35-A-1:4.5-X	116.38	0.35-A-1:4.5-X	126.3
0.35-B-1:4-X	83.3	0.35-B-1:4-X	93.04
0.35-B-1:4.5-X	83.08	0.35-B-1:4.5-X	93.88
0.35-A-1:4-Y	44.84	0.35-A-1:4-Y	67.21
0.35-A-1:4.5-Y	72.18	0.35-A-1:4.5-Y	80.29
0.35-B-1:4-Y	57.66	0.35-B-1:4-Y	69.3
0.35-B-1:4.5-Y	62.2	0.35-B-1:4.5-Y	89.23

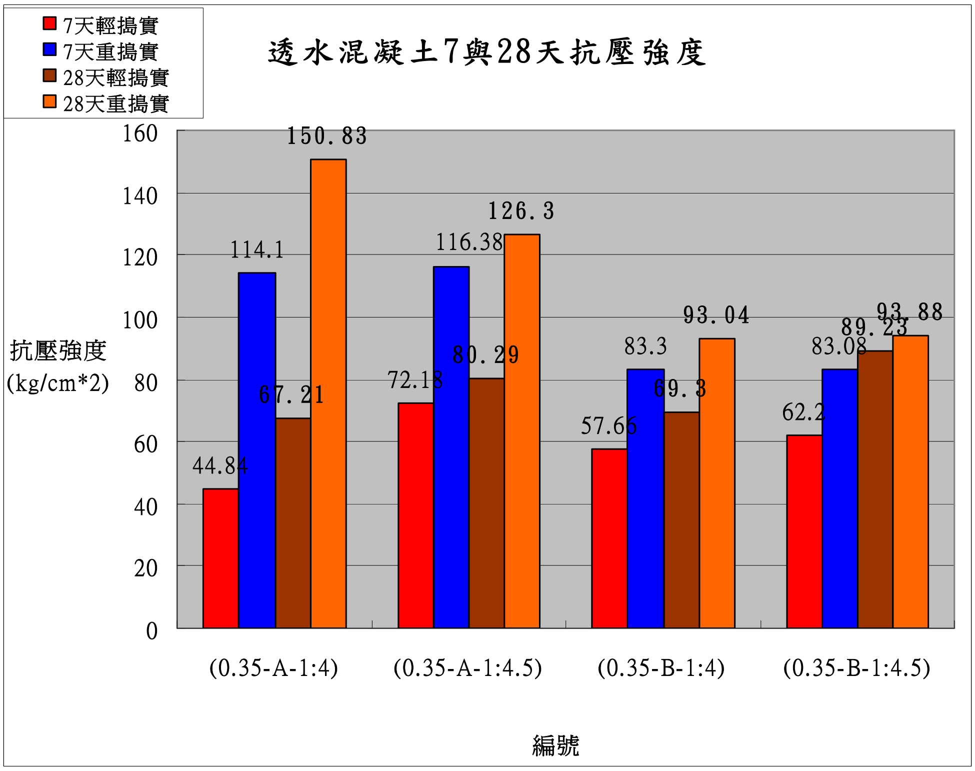


圖 5.4 透水混凝土 7 天與 28 天抗壓強度

5.5 抗彎試驗

本試驗分別以骨材粒徑、齡期與搗實方法探討其抗彎強度變化之影響，骨材粒徑分別為 19mm 與 4.8mm，其測試齡期分別為 7 天與 28 天，而搗實方法分別為重搗實與輕搗實，試驗抗彎強度發展情形，如表 5.5 所示。

表 5.5 抗彎強度試驗結果

試體編號	7 天抗彎強度 (kg/cm^2)	試體編號	28 天抗彎強度 (kg/cm^2)
0.35-A-1:4-X	11.88	0.35-A-1:4-X	14.1
0.35-A-1:4.5-X	11.43	0.35-A-1:4.5-X	14.1
0.35-B-1:4-X	15.06	0.35-B-1:4-X	18.1
0.35-B-1:4.5-X	13.72	0.35-B-1:4.5-X	14.1
0.35-A-1:4-Y	9.53	0.35-A-1:4-Y	9.15
0.35-A-1:4.5-Y	11.24	0.35-A-1:4.5-Y	9.15
0.35-B-1:4-Y	12.01	0.35-B-1:4-Y	17.33
0.35-B-1:4.5-Y	12.01	0.35-B-1:4.5-Y	13.33

在混凝土配比中，以固定水灰比 (W/C=0.35)、骨材粒徑不同、漿骨比的不同、齡期不同與搗實方法的不同來觀察抗彎強度變化趨勢，抗彎強度隨著骨材粒徑愈小而上升，即試體編號 0.35-B-1：4-X 其強度最大達 18.1 kg/cm^2，其變化趨勢與前一節有關抗壓強度隨著骨材粒徑愈大而增加正好相反，漿骨比對抗彎強度影響不大，且重搗實比輕搗實為高，如圖 5.5 所示。

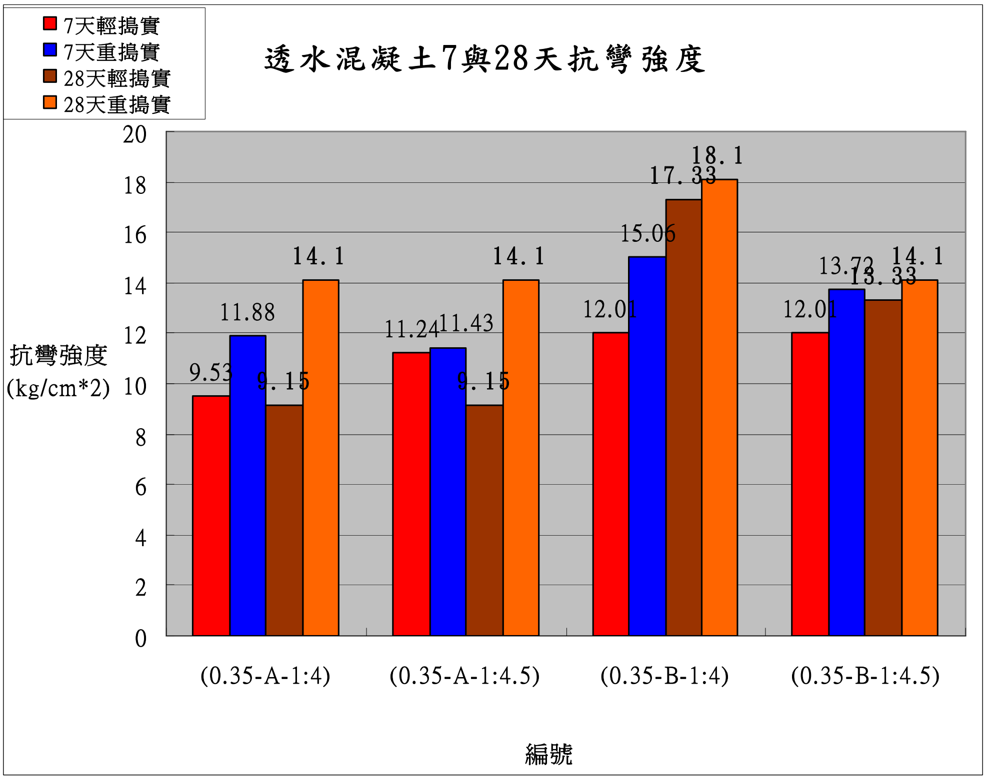


圖 5.5 透水混凝土 7 天與 28 天抗彎強度

5.6 透水試驗

本試驗所提供八種配比之透水係數試驗數據如表 5.6 所示，由表中可知圓柱試體切割成三層(上層、中層與下層)之透水係數 K 有明顯不同，其透水係數排序以中層(0.93～0.49 cm/sec)較高、上層(0.45～0.59 cm/sec)次之後、下層(0.33～0.65 cm/sec)較低，三層試體透水係數落於典型透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間[43、44]。

在混凝土配比中，以固定水灰比(W/C=0.35)、骨材粒徑不同、漿骨比的不同、齡期不同與搗實方法的不同來觀察透水係數 K 變化趨勢，透水

係數對搗實能量呈現反比，似乎隨著骨材粒徑愈小而降低，漿骨比對透水影響不大，可能是因為試體三層之透水係數 K 有明顯差異造成漿骨比與骨材粒徑因子影響大幅減少，前一節有關抗壓與抗彎強度最佳的試體編號分別是 0.35-A-1：4-X 與 0.35-B-1：4-X，其三層平均透水係數分別是 0.48 與 0.43 cm/sec 表現相當優異，如圖 5.6 與圖 5.7 所示。

表 5.6 透水係數試驗結果

試體編號	透水係數-上 (cm/sec)	透水係數-中 (cm/sec)	透水係數-下 (cm/sec)
0.35-A-1:4-X	0.45	0.59	0.41
0.35-A-1:4.5-X	0.54	0.6	0.36
0.35-B-1:4-X	0.48	0.49	0.33
0.35-B-1:4.5-X	0.45	0.6	0.35
0.35-A-1:4-Y	0.59	0.76	0.54
0.35-A-1:4.5-Y	0.59	0.93	0.65
0.35-B-1:4-Y	0.49	0.64	0.64
0.35-B-1:4.5-Y	0.48	0.52	0.45

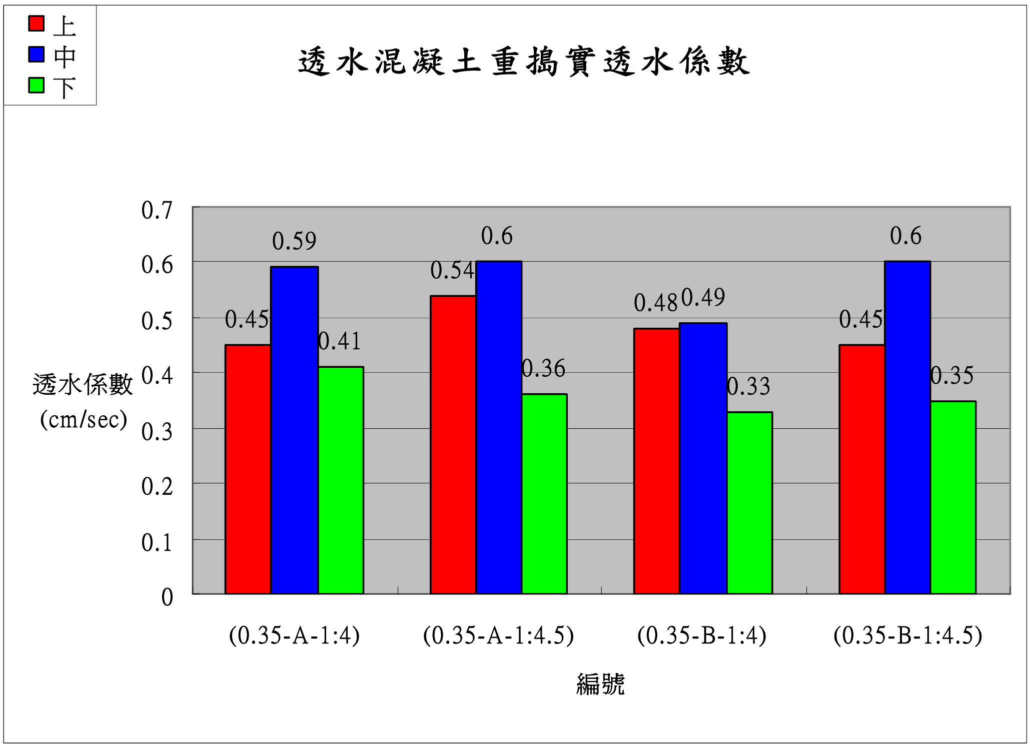


圖 5.6 透水混凝土重搗實之透水係數

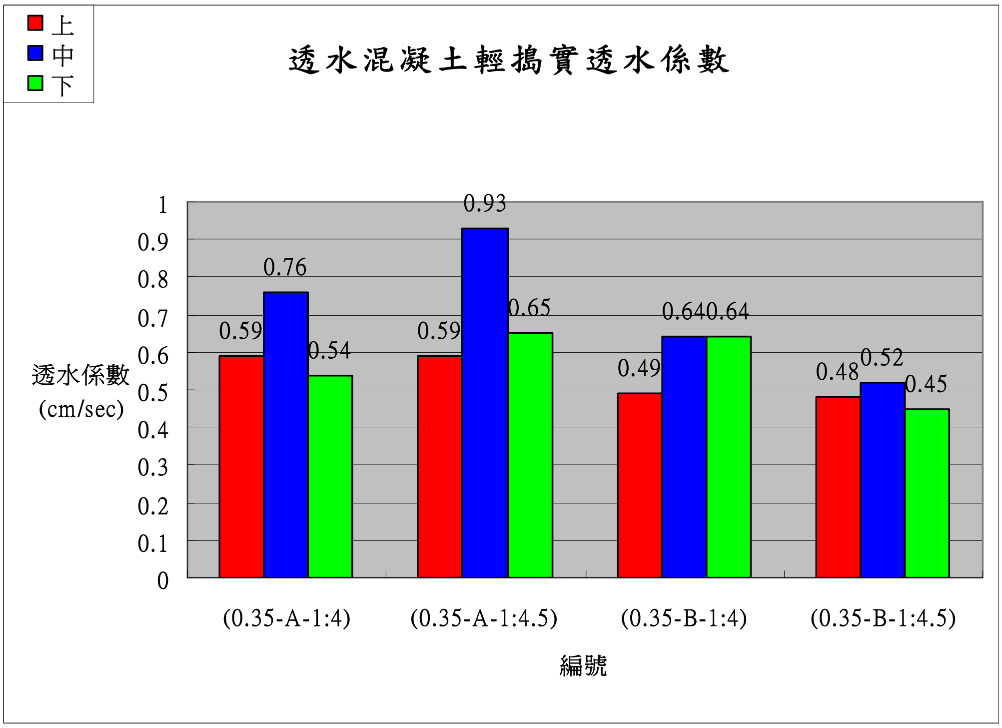


圖 5.7 透水混凝土輕搗實之透水係數

5.7 驗證最適配比

有關本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體(水灰比 0.35)屬於低強度高透水混凝土，其抗壓與抗彎強度均較低，28 天抗壓強度約為 67 至 151 kg/cm^2 (957psi 至 2157psi) 之間，上述配比與第一期研究之最適配比(水灰比 0.35、骨材粒徑 0.48cm、填充孔隙百分比 80%，其透水係數 0.1cm/sec、28 天抗壓強度可達到 21MPa) 有兩大差異，首先是第一期研究之最適配比並未符合 ACI 522R-06 建議透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間；其次是第一期研究之最適配比之單位重約為 2,044 kg/m^3 間較本研究之試體高甚多，因此相對本研究之試體強度較低，固此，本研究為要提升試體強度又要使其透水係數符合 ACI 522R-06 建議範圍，遂行大幅降低配比之水灰比至 0.25。

5.7.1 配比

混凝土配比之水灰比(W/C)=0.25，粗骨材粒徑 B=4.8mm，漿骨比(水

泥：粗骨材)分為 1：4，搗實分為 X=重搗實與 Y=輕搗實，添加水泥用量之 1%之強塑劑，配比如表 5.7 所示。

表 5.7 試拌配比

編號	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)
0.25-B-1:4-X(Y)	0.25	4.8	1311	327.75	81.94	3.28

註：每一配比又分為 X=重搗實與 Y=輕搗實，單位=kg/m^3

5.7.1.1 強塑劑(H-55)

(1)說明：

H-55 為羧酸高分子之新一代高級強塑劑，係針對臺灣氣候及施工環境，所開發的新產品，具有良好的坍流度維持功能，更能提高強度、高耐久性已符合現代營建的須求。

(2)特性：

H-55 除具有傳統減水劑(奈磺酸、美奈皿、MELAMIE)的電子互斥的作用外，更提供水泥粒子間之阻隔效果，由此成效，使得 H-55 具有良好的坍流度持續性及減水效果。

(3)優點：

(a)可應用於自充填混凝土(SSC)。

(b)坍流度損失低，工作時間長，具有高度的混凝土抗析離。

(c)低泌水性。

(d) 低水化熱。

(e) 體積穩定性高(乾縮龜裂少)。

(f)高耐久性。

(4)使用方法：低工程特性配比調整，已獲取最佳之品質及經濟效益。

(5)添加量：通常 1%~2%約可減 20~30%之用水量，請依使用目的以供料廠商建議。

(6)基本物理性質：(如表 5.8)

表 5.8 強塑劑基本物理性質

摻料類型(ADMIXTURE TYPE)	強塑劑(MODIFIEDUPEPR PLASTICIZER)
外觀顏色(APPEARANCE)	黃褐色(YELLOW BROWN)
酸鹼值(PH VALUE)	5±2
比重(SPECIFIC GRAVITY)	1.08±0.07
固體含量	20%±5%
減水劑	22%以上
氯含量(CHLORIE CONTENT)	<5000PPM

5.7.2 抗壓強度

在驗證配比中，以固定水灰比 (W/C=0.25) 與搗實方法的不同來觀察抗壓強度變化趨勢，發現抗壓強度隨著搗實的能量與齡期增加而上升，即試體編號 0.25-B-1：4-X 其 7 天強度達 126.61 kg/cm^2，而於 28 天時強度最大達 165.68 kg/cm^2，並與先前水灰比為 0.35 對抗壓強度影響大，當配比降低水灰比至 W/C=0.25 與先前最佳抗彎強度的試體編號 0.35-B-1：4-X 有很大差異，28 天抗壓強度由 93 kg/cm^2 (9.1MPa) 提高到 166 kg/cm^2 (16.3MPa)，如表 5.9 所示。

表 5.9 抗壓強度試驗結果

編號	7 天抗壓強度 (kg/cm^2)	編號	28 天抗壓強度 (kg/cm^2)
0.25-B-1:4-X	126.61	0.25-B-1:4-X	165.68
0.25-B-1:4-Y	78.27	0.25-B-1:4-Y	84.21

註： B=4.8mm，X=重搗實，Y=輕搗實，水灰比=0.25，
1:4=水泥:粗骨材

5.7.3 透水係數

在驗證配比中，以固定水灰比 (W/C=0.25) 與搗實方法的不同來觀察透水係數 K 變化趨勢，發現透水係數對搗實能量呈現反比，而且試體三層之透水係數 K 有明顯差異，當配比降低水灰比至 W/C=0.25 與先前最佳抗彎強度的試體編號 0.35-B-1：4-X 有很大差異，其 28 天三層平均透水係數由 0.43 cm/sec 降低至 0.29 cm/sec，如表 5.10 所示。

表 5.10 透水係數試驗結果

編號	透水係數-上 K(cm/sec)	透水係數-中 K(cm/sec)	透水係數-下 K(cm/sec)
0.25-B-1:4-X	0.32	0.34	0.22
0.25-B-1:4-Y	0.33	0.58	0.34

註： B=4.8mm，X=重搗實，Y=輕搗實，水灰比=0.25，
1:4=水泥:粗骨材

5.7.4 比較最適配比

第一期研究之最適配比(水灰比 0.35、骨材粒徑 0.48cm、填充孔隙百分比 80%，其透水係數 0.1cm/sec、28 天抗壓強度可達到 21MPa)有兩大差異，首先是第一期研究之最適配比並未符合 ACI 522R-06 建議透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間；其次是第一期研究之最適配比之單位重約為 2,044 kg/m^3 間較本研究之試體高甚多，因此相對本研究之試體強度會較低。下表 5.11 為比較最適配比綜合結果，似乎說明抗壓強度與單位重對於透水係數呈反比，若要達到第一期研究之最適配比強度其透水係數與單位重將會超出 ACI 522R-06 典型透水混凝土範圍建議。

表 5.11 比較最適配比綜合試驗結果

配比編號	W/C	骨材粒徑 (mm)	28 天抗壓強度(MPa)	單位重 (kg/m^3)	透水係數 K(cm/sec)
0.25-B-1:4-X	0.25	4.8	16.3	1743	0.29
0.35-B-1:4-X	0.35	4.8	9.1	1663	0.43
先期研究配比	0.35	4.8	21.0	2044	0.10
典型透水混凝土配比	0.25~ 0.45	19.0 ~ 1.2	2.8 ~ 28.0	1600 ~ 2000	0.16 ~ 1.22

第六章 現地試鋪結果與討論

6.1 預拌混凝土廠試拌透水混凝土

現地透水混凝土試鋪之前，先於長生預拌混凝土廠進行試拌，透水混凝土配比試拌數量為 1 立方公尺，由於試拌數量僅 1 立方公尺，加上透水混凝土為零坍度無法流動，大型拌合機非常不容易卸料，試拌合格後並於預拌混凝土廠內進行試拌料試鋪，廠內拌合機試拌合格透水混凝土之配比如表 6.1 所示，預定鋪築範圍為 2.4 公尺長*1.5 公尺寬*0.15 公尺深之長方格，施作前鋪築範圍利用 15 公分直徑抗壓試體 26 顆排列而成，並使用快凝蓋平石膏黏結 26 顆試體凝固後，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乾旱土壤吸收，當新拌透水混凝土藉由耙子攤平混凝土後，利用滾筒(長 1.4 公尺，重 120kg)壓密透水混凝土，有關預拌混凝土廠內試拌試鋪之施作照片如下，照片 6.1 為試拌料碎石約 5mm 骨材粒徑，照片 6.2 為預拌廠操作台透水混凝土配比資訊，照片 6.3 為預拌廠試鋪透水混凝土滾筒壓密之施作，照片 6.4 為預拌廠試鋪透水混凝土完成面，照片 6.5 為預拌廠試鋪透水混凝土現場透水量試驗。

表 6.1 試拌合格透水混凝土之配比

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）
0.31	4.8	1498	344	105	2.3

照片 6.1 試拌料碎石約 5mm 骨材粒徑

照片 6.2 預拌廠操作台透水混凝土配比資訊

照片 6.3 預拌廠試鋪透水混凝土滾筒壓密之施作

照片 6.4 為預拌廠試鋪透水混凝土完成面

照片 6.5 預拌廠試鋪透水混凝土現場透水量試驗

有關預拌廠透水混凝土的配比：水泥 344kg、粗骨材 1,498kg、水 105kg 與強塑劑 2.3kg，如照片 6.2 預拌廠操作台透水混凝土配比資訊所示，水灰比為 0.31。其 7 天抗壓強度約為 180kg/cm^2 (17.7MPa)，試鋪透水混凝土其滲透性相當良好，其平均約為 666.7ml/15sec，均可滿足工地透水試驗標準 400ml/15sec 以上範圍要求。

6.2 現地透水混凝土鋪面實驗區介紹─本校第二停車場

本研究現地透水混凝土鋪面實驗區位置在本校操場後面之第二停車場如照片 6.6 所示，此停車場位於本校較偏遠區域，一般會停車於此者為

本校進修部在職學生，於停車場中間選取 5.5 公尺長*2.4 公尺寬*0.3 公尺深之停車格共計六格進行試鋪，如圖 6.1 所示，透水混凝土鋪面面積為 14.4 公尺長*5.5 公尺寬，施作前先開挖土壤到適當的長寬高，利用鏟子、破碎機手工具、鏟土機及卡車進行開挖鋪面實驗區，並使用模版組立六個 5.5 公尺長*2.4 公尺的停車格，於最底層先鋪上一層厚約 5 公分碎石級配，再於碎石級配上鋪築透水混凝土，有關透水混凝土的配比如 6.1 節所說明。

照片 6.6 朝陽科技大學操場後面之第二停車場

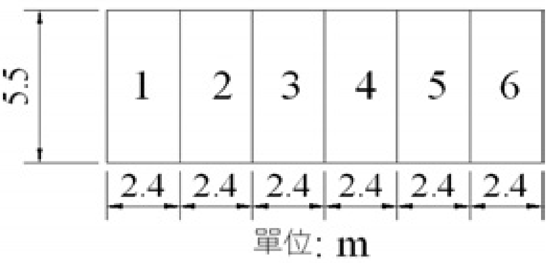


圖 6.1 現地停車格之示意圖

6.3 實驗區透水混凝土鋪面規劃設計與施作過程

本實驗區透水混凝土鋪面規劃設計為使用 1 種透水混凝土配比與 3 種不同搗實方式，其中，震動搗實編號#1 與#2 兩個停車格，大滾筒(3.7m 寬大滾筒約 270kg)重量滾壓編號#3 與#4 兩個停車格，小滾筒(0.8m 寬小滾筒約 100kg)重量滾壓編號#5 與#6 兩個停車格，藉由 3 種不同搗實方式

來瞭解其強度、透水係數、單位重、孔隙率等關係；圖 6-1 為實驗區透水混凝土鋪面六個停車格之示意圖，透水混凝土鋪面設計為 30 公分厚，於底層先鋪上一層厚約 5 公分碎石級配，再於碎石級配上鋪築透水混凝土厚約 25 公分，原預定利用一個下午的時間鋪築完工，卻花費兩個下午的時間鋪築完畢，現地試驗當時的條件為典型臺灣七月天天候炎熱，透水混凝土現地施作時間控制約在下午 3:30Pm 至 6:30Pm 間，其溫度約在 33℃至 28℃間，其中第二天傍晚幾乎要下雨溼度較高，在人力支援方面，預拌廠有三位，研究生有七位，共十位人員協助。第一天下午動用三輛預拌車，每輛預拌車裝載 4 立方公尺的透水混凝土，嘗試藉由預拌車尾端卸料澆置透水混凝土，尾端卸料澆置速度非常地慢，可能是運輸時間超過半小時及零坍度的影響，招致有接近一半(2 立方公尺)的透水混凝土凝結於預拌車圓筒內，此時已經天暗無法施工；第二天下午動用兩輛卡車，每輛卡車裝載 6 立方公尺的透水混凝土，其中，第一輛卡車尾端傾倒卸料澆置，才發現部分透水混凝土太乾，可能是透水混凝土水份被卡車烈日照射之平台鋼板吸收的影響，第貳輛卡車尾端傾倒卸料澆置，發現部分透水混凝土較濕，現場透水混凝土品質非常不容易控制，加上透水混凝土為零坍度無法流動，大型拌合機非常不容易卸料而會黏著於拌合機內壁，本次鋪築六個停車格合計使用透水混凝土約 24 立方公尺。當實驗區透水混凝土進行鋪築時，預定於編號#1 與#2 兩個停車格使用震動搗實，然而發現震動搗實方式完全無效果，只好臨時更改為不同滾筒滾壓方式進行來回滾壓，編號#1 與#2 兩個停車格使用小滾筒(0.8m 寬小滾筒約 100kg)重量滾壓，發現此為小面積鋪築滾壓，較大面積鋪築應使用大滾筒滾壓，編號#3、#4 與#5 三個停車格使用兩種滾壓包括小滾筒(0.8m 寬小滾筒約 100kg)和大滾筒(3.7m 寬大滾筒約 270kg)，其中，第一輛卡車尾端傾倒卸料澆置在編號#4 與#5 兩個停車格中，部分透水混凝土太乾，編號#6 停車格使用三種滾壓包括小滾筒(0.8m 寬小滾筒約 100kg)、大滾筒(3.7m 寬大滾筒約 270kg)和中滾筒(1.4m 寬中滾筒約 120kg)。實驗區透水混凝土鋪面施作之過程包括停車格開挖、現地模版組立、底層鋪設礫石、透水混凝土澆置與刮平、滾筒壓密、塑膠布覆蓋養護、現地透水混凝土試體製作等，如照片 6.7 至照片 6.17 所示。

照片 6.7 現地停車格開挖情形

照片 6.8 六個 5.5 公尺長*2.4 公尺的停車格現地模版組立

照片 6.9 停車格底層鋪設約 5 公分礫石

照片 6.10 透水混凝土使用預拌車尾端卸料澆置停車格

照片 6.11 透水混凝土使用卡車尾端傾倒卸料澆置停車格

照片 6.12 透水混凝土拌合料刮平情形

照片 **6.13** 透水混凝土使用大滾筒滾壓情形

照片 **6.14** 透水混凝土使用小滾筒滾壓情形

照片 **6.15** 新拌透水混凝土滾壓完成面

照片 6.16 塑膠布覆蓋養護新拌透水混凝土鋪面

照片 6.17 現地透水混凝土試體

6.4 實驗區透水混凝土鋪面結果分析

6.4.1 新拌混凝土目視檢測與單位重試驗

新拌混凝土施工中可以目視判斷是否垂流現象產生，並應進行新拌透水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；透水混凝土中含有較多連通孔隙，因此，新拌透水混凝土之單位重相較於一般混凝土顯得略小，本次實驗鋪築六個

停車格合計使用透水混凝土約 24 立方公尺，由於人手不足僅於第一車(預拌車)取樣壹次進行新拌混凝土之單位重試驗，但若依據一般混凝土施工規範取樣頻率為新拌混凝土 75 立方公尺僅取樣壹次，還算合理。目視檢測實驗區新拌透水混凝土並無垂流現象產生，有關新拌透水混凝土單位重試驗結果如表 6.2 所示，新拌透水混凝土之單位重分為重搗實與輕搗實兩種，其中，重搗實試體單位重合乎允收標準為設計單位重(1,949 kg/m^3)±80 kg/m^3 之間，另外，重搗實試體與輕搗實試體單位重均合乎典型透水混凝土單位重(1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)。

表 6.2 新拌混凝土之單位重試驗結果

重搗實試體	單位重(kg/m^3)	輕搗實試體	單位重(kg/m^3)
#1-1	1852	#1-2	1762

6.4.2 實驗區硬固透水混凝土試體試驗

本次實驗鋪築合計使用透水混凝土約 24 立方公尺，鋪築透水混凝土時，分別於四輛車(預拌車或卡車)中取樣，透水混凝土取樣頻率為新拌混凝土每 6 立方公尺取樣壹次，取樣頻率超過一般混凝土施工規範取樣頻率為新拌混凝土 75 立方公尺僅取樣壹次，藉由四輛車中取樣的混凝土製作四組試體，進行硬固混凝土之單位重試驗、孔隙率試驗、抗壓試驗與透水試驗，各項試驗結果說明如下所述。

6.4.2.1 透水混凝土單位重試驗

透水混凝土之單位重試驗為透水混凝土品質檢測要項之一，若混凝土之單位重不符合典型透水混凝土單位重，應立即要求退料；本次實驗鋪築六個停車格，分別於四輛預拌車或卡車(編號#1、#2、#3 與#4)中取樣，透水混凝土取樣頻率為新拌混凝土每 6 立方公尺取樣壹次，四輛車的混凝土分別製作四組試體，進行硬固混凝土之單位重試驗。實驗區硬固透水混凝土之單位重試驗結果如表 6.3 所示，其中，混凝土的齡期為 28 天，透水混凝土之單位重可分為重搗實與輕搗實兩種，四組輕搗實試體單位重均合

乎典型透水混凝土單位重(1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)之間。其中，有兩組重搗實試體(編號#3 與#4)有些微超越典型透水混凝土之單位重；若以設計單位重(1,949 kg/m^3)±80 kg/m^3 之間而言，四組重搗實試體單位重均合乎設計要求。

表 6.3 硬固透水混凝土之單位重試驗結果

重搗實試體	單位重(kg/m^3)	輕搗實試體	單位重(kg/m^3)
#1-1	1870	#1-2	1781
#2-1	1913	#2-2	1791
#3-1	2035	#3-2	1860
#4-1	2017	#4-2	1853
重-平均值(變異數)	1958 (4.0%)	輕-平均值(變異數)	1821 (2.2%)

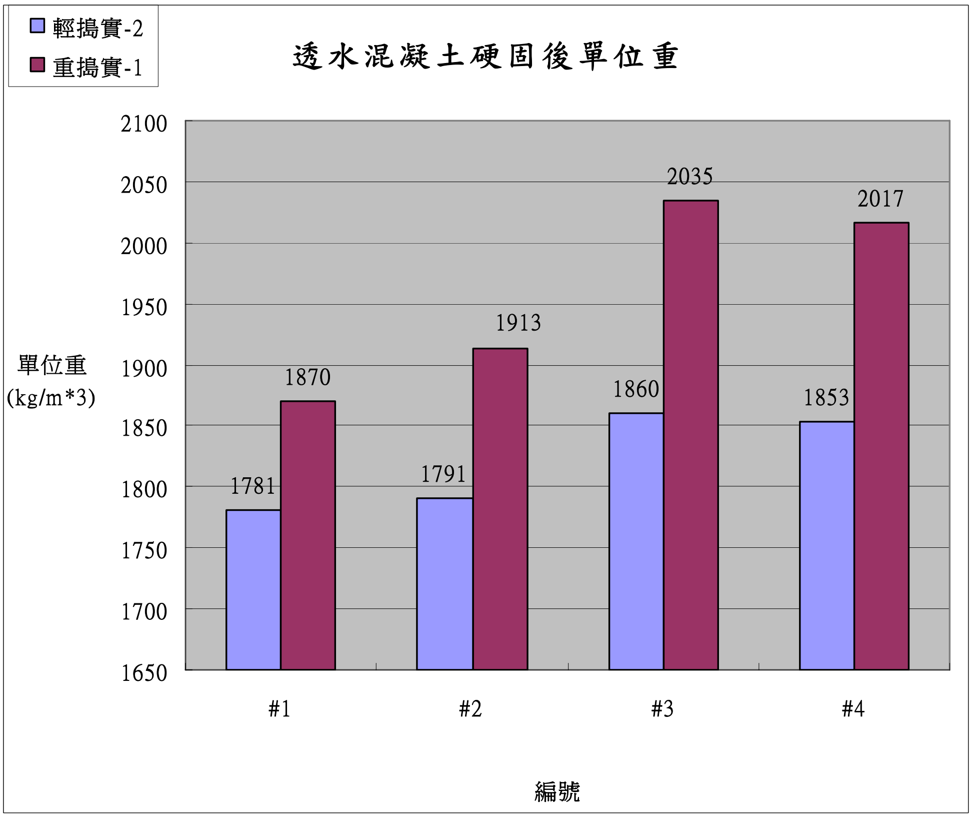


圖 6.2 透水混凝土硬固之單位重

6.4.2.2 透水混凝土孔隙率試驗

透水混凝土之孔隙率試驗為透水混凝土品質檢測要項之一， ACI 522R-06 規定透水混凝土其孔隙率範圍為 18%至 35%之間，若混凝土之孔隙率不符合上述透水混凝土孔隙率範圍，其透水能力將大幅降低；本次實驗鋪築六個停車格，分別於四輛預拌車或卡車(編號#1、#2、#3 與#4)中取樣製作四組試體，進行硬固混凝土之孔隙率試驗。實驗區硬固透水混凝土之孔隙率試驗結果如表 6.4 所示，其中，**混凝土的齡期為 28 天**，透水混凝土之孔隙率可分為重搗實與輕搗實兩種，四組輕搗實試體孔隙率均大於 18%合乎典型透水混凝土要求；然而卻有三組重搗實試體(編號#2、#3 與#4)孔隙率小於 18%要求。

表 6.4 透水混凝土連通孔隙率試驗結果

重搗實試體	孔隙率(%)	輕搗實試體	孔隙率(%)
#1-1	19.5	#1-2	24.1
#2-1	16.9	#2-2	23.7
#3-1	11.9	#3-2	18.9
#4-1	12.6	#4-2	19.2
重-平均值(變異數)	15.2 (23.6%)	輕-平均值(變異數)	21.4 (13.0%)

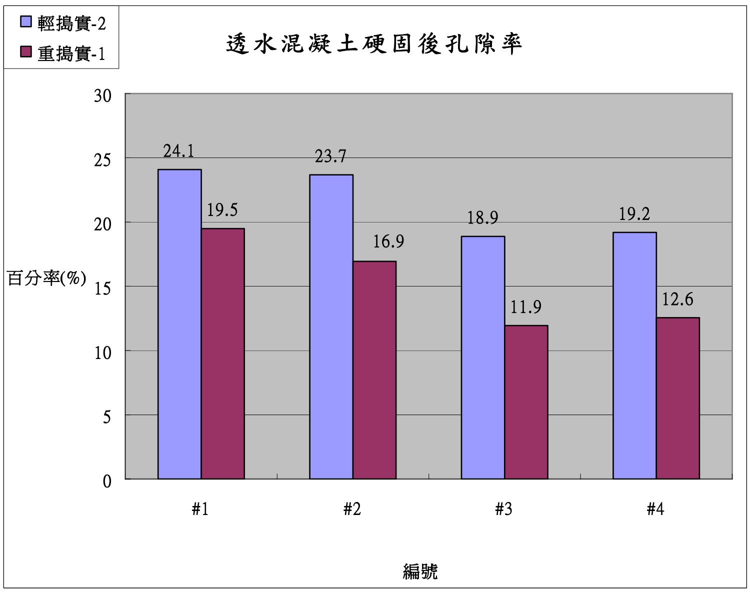


圖 6.3 透水混凝土硬固之孔隙率

6.4.2.3 透水混凝土抗壓強度試驗

透水混凝土之抗壓強度試驗為透水混凝土品質檢測要項之一， ACI 522R-06規定透水混凝土其抗壓強度範圍介於400 psi (2.8MPa)與4,000 psi (28MPa)之間，實驗鋪築六個停車格合計使用透水混凝土約 24 立方公尺，由於人手不足僅於第一車(預拌車)取樣壹次，進行混凝土之抗壓強度試驗，但若依據一般混凝土施工規範取樣頻率為新拌混凝土 75 立方公尺僅取樣壹次，還算合理。取樣製作直徑 Φ15cm*30cm 試體四組，分為重搗實與輕搗實兩種，每組有三個試體，混凝土的齡期為 7 天與 28 天兩者，進行混凝土之抗壓強度試驗。抗壓強度試驗結果如表 6.5 所示，其抗壓強度較預拌廠試拌配比(7 天抗壓強度約為 180kg/cm^2)還低，其一可能是因預拌廠骨材無法事先清倉，導致生產製程無法自動計量，改為手動操作，而產生拌和配比有誤差。其二可能是因尺寸效應有關，在預拌廠試拌製作直徑 Φ10cm*20cm 試體較小，試體內部缺陷較少，相對其抗壓強度較高。

表 6.5 透水混凝土抗壓強度試驗結果(kg/cm^2)

試體編號	7 天平均抗壓強度	28 天平均抗壓強度
重搗實試體	121.5 (21.4%) (108.9, 151.4, 104.2)	132 (12.7%) (150.3, 128.8, 117.0)
輕搗實試體	83.3 (11.1%) (90.5, 72.8, 86.7)	92 (3.2%) (95.4, 90.0, 90.6)

6.4.2.4 透水混凝土透水試驗

典型透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間，本次實驗鋪築透水混凝土其主要目標在於符合透水係數範圍，現地實驗鋪築六個停車格，分別於四輛預拌車或卡車(編號#1、#2、#3 與#4)中取樣製作四組試體，製作直徑 Φ10cm*20cm 試體，並分為重搗實與輕搗實兩種，進行混凝土之透水試驗，試驗前將直徑 Φ10cm*20cm 試體將切割成上中下三層，以利進行觀測三層混凝土透水程度。透水試驗結果如表 6.6 所示，其中，混凝土的齡期為 28 天，結果發現上層混凝土透水程度最佳，而下層

混凝土透水程度最差，四組輕搗實試體中下二層透水程度還算可以，但四組重搗實試體中下二層透水程度相當不良，此外，各組試體(不同車)透水程度也有明顯差別；其上中下三層透水係數 (K 在 0 ~ 0.68 cm/sec 間) 變化差異相當大，透水係數由上層往中下層遞減，下層混凝土有些垂流現象產生，三層平均透水係數較第五章各配比試體還低，其可能是因預拌廠骨材無法事先清倉，導致生產製程無法自動計量，改為手動操作後，而產生拌和配比有誤差。

表 6.6 透水混凝土透水係數試驗結果

試體編號	透水係數-上層 (cm/sec)	透水係數-中層 (cm/sec)	透水係數-下層 (cm/sec)
重搗實試體#1	0.30	0.05	0.04
重搗實試體#2	0.57	0.06	0
重搗實試體#3	0.19	0.01	0.01
重搗實試體#4	0.08	0.02	0.01
重-平均值(變異數)	0.29 (74%)	0.04 (68%)	0.02 (115%)
輕搗實試體#1	0.68	0.21	0.10
輕搗實試體#2	0.42	0.18	0.07
輕搗實試體#3	0.20	0.10	0.08
輕搗實試體#4	0.20	0.14	0.05
輕-平均值(變異數)	0.375 (61%)	0.16 (30%)	0.075 (27%)

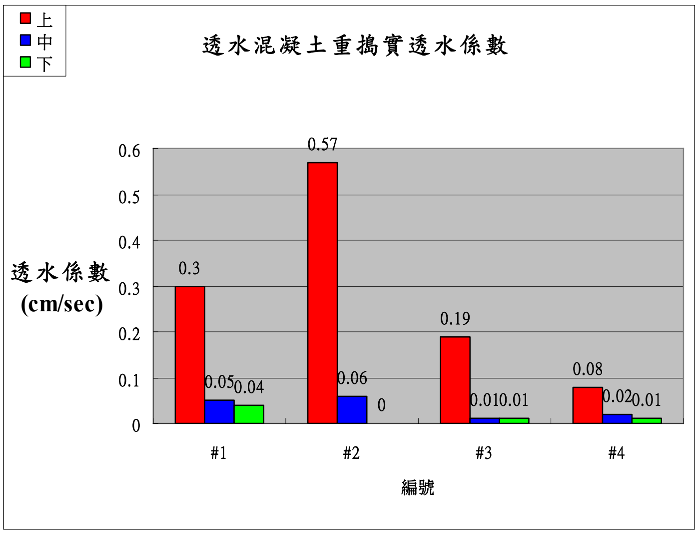


圖 6.4 透水混凝土重搗實之透水係數

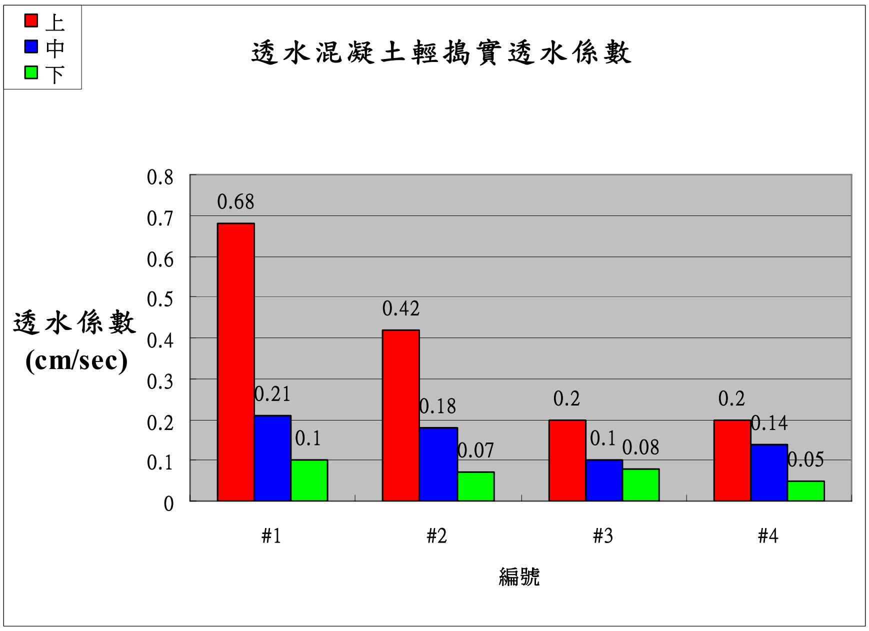


圖 6.5 透水混凝土輕搗實之透水係數

6.4.3 現地透水混凝土鋪面試驗

現地透水混凝土鋪面之施作包括停車格 (編號#1、#2、#3、#4、#5與#6 共六個停車格) 開挖、現地模版組立、底層鋪設礫石、透水混凝土澆置與刮平、大小滾筒壓密、塑膠布覆蓋養護、現地透水混凝土試體製作等，當養護齡期達 7 天與 28 天時，即進行現地檢測與混凝土鋪面鑽心試驗，現地檢測包括現地透水量試驗與目視鋪面透水驗證試驗，來瞭解六個停車格上中下三層壓密程度、強度、單位重、孔隙率、透水係數等，各項試驗結果說明如下所述。

6.4.3.1 現地透水量試驗與目視鋪面透水驗證試驗

日本規範排水性鋪裝技術指針之現場透水量試驗方法為柔性鋪面透水瀝青混凝土現地透水性能力評估，首次被使用於剛性鋪面透水混凝土現地透水性能力評估與驗證。現地透水量試驗目的是測定現地透水鋪面的透水量，可做為現場品質管制或做為驗收之依據。經本次研究發現，現地透水量試驗確實可用於剛性鋪面透水混凝土現地透水性能力評估與驗證。

現地透水量試驗結果如表 6.7 所示，其中，混凝土的齡期已達 28 天，結果發現停車場#1 停車格有一測點現場透水量 796.8ml/15sec 最低，其他五個停車格(#2 至#6)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停車場透水平均超過 1,000ml/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。

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，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，現地透水計算鋪面透水率是使用 130 公升水桶裝滿水，將裝滿水水桶之水倒在停車格鋪面上，目視鋪面透水情形，如照片 6.18 所示；結果發現停車格透水面積約 6 平方公尺，130 公升水完全透入鋪面中之時間約 6 秒，則可以計算出透水率約 216.7 $L/m^2/min$，上述符合典型透水混凝土的透水率介於 120 $L/m^2/min$ 至 320 $L/m^2/min$ 間，停車場現地透水效果不但良好，而且表面無裂縫產生，因此透水混凝土可運用於人行道、停車場與道路工程，它是一種綠環保鋪面材料。

照片 6.18 滿水水桶之水倒在停車格鋪面透水情形

表 6.7 停車場停車格現場透水量試驗結果

車格編號	透水量	車格編號	透水量	車格編號	透水量
#1	796.8	#3	1147.2	#5	1153.9
	967.7		1096.9		1071.4
	1071.4		967.7		1132.1
	1043.4		1081.1		1081.1
#1 平均值 (變異數)	969.8 (12.7%)	#3 平均值 (變異數)	1073.2 (7.0%)	#5 平均值 (變異數)	1109.6 (3.5%)
#2	1176.4	#4	1153.8	#6	1098.9
	1094.9		1176.5		1140.7
	1121.5		1153.9		1062.0
	1125.7		1071.4		1162.0
#2 平均值 (變異數)	1129.6 (3.0%)	#4 平均值 (變異數)	1138.9 (4.0%)	#6 平均值 (變異數)	1115.9 (4.0%)

單位(現場透水量): ml/15sec

6.4.3.2 現地透水混凝土鋪面鑽心試驗

現地透水混凝土鋪面鑽心試驗包括鑽心試體單位重、抗壓強度、孔隙率、透水係數等，其中，混凝土試驗的齡期為 7 天與 28 天，鑽心試体尺寸大小為直徑 Φ10cm*20cm，進行混凝土之透水試驗之前，將直徑 Φ10cm*20cm 試體將切割成上中下三層，各層厚度約 5 公分，以利進行觀測三層混凝土透水程度。各項試驗結果如表 6.8 與表 6.9 所示，其中，#4 與#5 停車格之鑽心試體呈現中間黏著失敗斷裂為兩段，因此，#4 與#5 試体抗壓強度、單位重、孔隙率、透水係數等，不列入試驗考慮範疇。

表 6.8 現地混凝土 7 天齡期鑽心試驗結果

車格鑽心試體編號	單位重 (kg/m^3)	孔隙率(%)	抗壓強度(kg/cm^2)
#1-1 上	1989	12.4	—
#1-1 下	2020	11.9	—
#1-2	2027	12.5	165.7
#1 平均值 (變異數)	2004.5 (1.0%)	12.2 (2.6%)	—
#2-1	1954	14.8	113.1
#2-2 上	1888	21.9	—
#2-2 下	1816	25.4	—
#2 平均值 (變異數)	1921.0 (3.6%)	18.4 (29%)	—
#3-1	1725	27.8	—
#3-2	1845	21.5	—
#3 平均值 (變異數)	1785.0 (4.7%)	24.6 (18%)	—
#6-1	1870	26.3	55.6
#6-2 上	1779	25.2	—
#6-2 下	1845	22.7	—
#6 平均值 (變異數)	1831.3 (2.5%)	24.7 (7.4%)	—

1. 7 天齡期現地混凝土鋪面鑽心試驗結果

一般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)，本次 7 天齡期現地混凝土鋪面鑽心取樣試体共 8 顆，分別於編號#1、#2、#3 與#6 停車格取樣兩顆(#4 與#5 停車格之鑽心試体呈現中間黏著失敗斷裂為兩段，不列入試驗考慮範疇)，進行單位重與孔隙率試驗，其中，有 3 顆鑽心試体進行抗壓試驗，單位重、孔隙率與抗壓強度試驗結果如表 6.8 所示，不同停車格抗壓強度試体一組三個強度差異相當大，#1 停車格最高達 165.7kg/cm^2；不同停車格單位重差異相當大，約可分為兩群，其分佈介於 2,027kg/m^3

至 1,725kg/m^3 間，部分單位重超過 ACI 522R-06 驗收標準為設計單位重之±5 lb/ft^3 (80 kg/m^3) 間，#1 停車格平均最高；然而大部分試體單位重合乎典型透水混凝土單位重 (1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)。孔隙率與單位重成反比例其差異亦相當大，約可分為兩群，其分佈介於 11.9%至27.8%間，孔隙率最小也是#1 停車格，其中除#1 停車格之外，其餘#2、#3 與#6 停車格可合乎典型透水混凝土孔隙率範圍 18%至 35%間。

2. 28 天齡期現地混凝土鋪面鑽心試驗結果

本次 28 天齡期現地混凝土鋪面鑽心取樣試體共 16 顆，是 7 天齡期現地混凝土鋪面鑽心取樣的兩倍，分別於編號#1、#2、#3 與#6 停車格取樣 4 顆(#4 與#5 停車格之鑽心試体呈現中間黏著失敗斷裂為兩段，不列入試驗考慮範疇)，每一停車格有 4 顆鑽心試體，每顆試體均量測單位重與孔隙率，其中，分別各有 2 顆鑽心試体進行透水試驗與抗壓試驗，如表 6.9 所示，鑽心試体抗壓強度差異相當大，不僅不同停車格有差異，相同停車格鑽心試体強度也有差異，#1 停車格有一試体最高達 192 kg/cm^2；不同停車格單位重差異相當大，約可分為兩群，其分佈介於 1,661kg/m^3 至 2,208kg/m^3 間，部分單位重超過 ACI 522R-06 驗收標準為設計單位重之±5 lb/ft^3 (80 kg/m^3)間，如圖 6.6 現地 28 天鑽心平均單位重所示，#3 停車格平均最高；然而仍有部分試體單位重合乎典型透水混凝土單位重(1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)。孔隙率與單位重成反比例其差異亦相當大，約可分為兩群，其分佈介於 1%至 28.6%間，平均孔隙率最小是#1 停車格，如圖 6.7 現地 28 天鑽心平均孔隙率所示，本次 28 天齡期停車格平均孔隙率較 7 天齡期停車格低很多，令人不解，而且#1、#2、#3 與#6 停車格平均孔隙率均無法滿足典型透水混凝土孔隙率範圍 18%至 35%間要求。

有關 28 天齡期停車格透水試驗結果發現透水係數在 0.0~ 0.22 cm/sec 間，變化差異相當大，即使同一鑽心試體其上層、中層與下層混凝土透水程度也有所不同，尤其是#6 停車格之試體(#6-4)很明顯，上層混凝土透水係數較高，而中層與下層混凝土透水係數很低，應有會有垂流現象產生，整體停車格透水係數平均值無法滿足典型透水混凝

土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間，如圖 6-8 現地 28 天鑽心平均透水係數所示，本次 28 天齡期停車格平均透水係數較 7 天齡期停車格低很多，實在令人不解。是否因為 28 天齡期現地混凝土鋪面鑽心試驗時，天候下雨而造成鑽心試體受污染，砂土堵塞部分透水孔隙所致而有誤差。然而現地 28 天停車格透水量試驗結果如圖 6-9 所示，發現停車場#1 停車格現場透水量平均 968.9ml/15sec 最低，其他五個停車格(#2 至#6)現場透水量數據都很集中與平均接近 1,000ml/15sec 或超過上值，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。

表 6.9 28 天現地鑽心各項試驗結果(1)

車格鑽心試體編號	單位重 (kg/m^3)	孔隙率 (%)	抗壓強度 (kg/cm^2)	透水係數 (cm/sec)
#1.1 上	2042	7.1	/	0
#1.1 中	2140	3.5	/	0
#1.1 下	2208	1.8	/	0.01
#1.2	2136	4.3	192	0.05
#1.3	1955	9.8	106	0.05
#1.4 上	1983	12.1	/	0.01
#1.4 中	2013	9.5	/	0.04
#1.4 下	1856	19.7	/	0.22
#1 平均值 (變異數)	2042 (5.6%)	8.5 (67%)	149 (40%)	0.05 (145%)
#2.1 上	2083	11.2	/	0.13
#2.1 中	1893	20.6	/	0.21
#2.1 下	2089	9.8	/	0.02
#2.2 上	1982	15.2	/	0.10
#2.2 中	1977	15.6	/	0.18
#2.2 下	2055	11.1	/	0.05
#2.3	2079	9.8	146.1	0.05
#2.4	1984	13.3	180.5	0.13
#2 平均值 (變異數)	2017 (3.5%)	13.3 (28%)	163.3 (14%)	0.11 (60%)

表 6.9　28 天現地鑽心各項試驗結果(2)

車格鑽心試體編號	單位重 (kg/m^3)	孔隙率 (%)	抗壓強度 (kg/cm^2)	透水係數 (cm/sec)
#3.1 上	2039	13.3	/	0.04
#3.1 中	1973	17.5	/	0.17
#3.1 下	2089	10.3	/	0.02
#3.2 上	2277	3.3	/	0.003
#3.2 中	1957	18.1	/	0.12
#3.2 下	2052	12.2	/	0.05
#3.3	2081	10.8	105.5	0.12
#3.4	1994	14.8	82.4	0.10
#3 平均值 (變異數)	2058 (4.9%)	12.6 (37%)	94 (17%)	0.08 (72%)
#6.1	2101	1	117.5	0.08
#6.2	1890	17.8	76.3	0.11
#6.3 上	2168	5	/	0.01
#6.3 中	2062	7.5	/	0.01
#6.3 下	1661	28.6	/	0.15
#6.4 上	1980	14.1	/	0.12
#6.4 中	2105	5.3	/	0.01
#6.4 下	1985	10.9	/	0.01
#6 平均值 (變異數)	1994 (8.0%)	11.2 (78%)	96.9 (30%)	0.06 (98%)

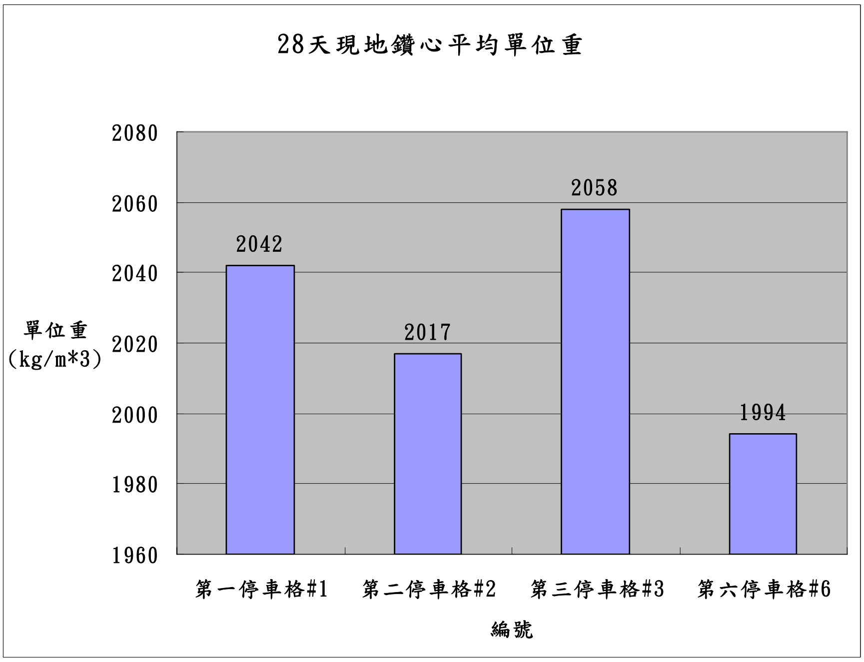


圖 6.6 現地 28 天鑽心平均單位重

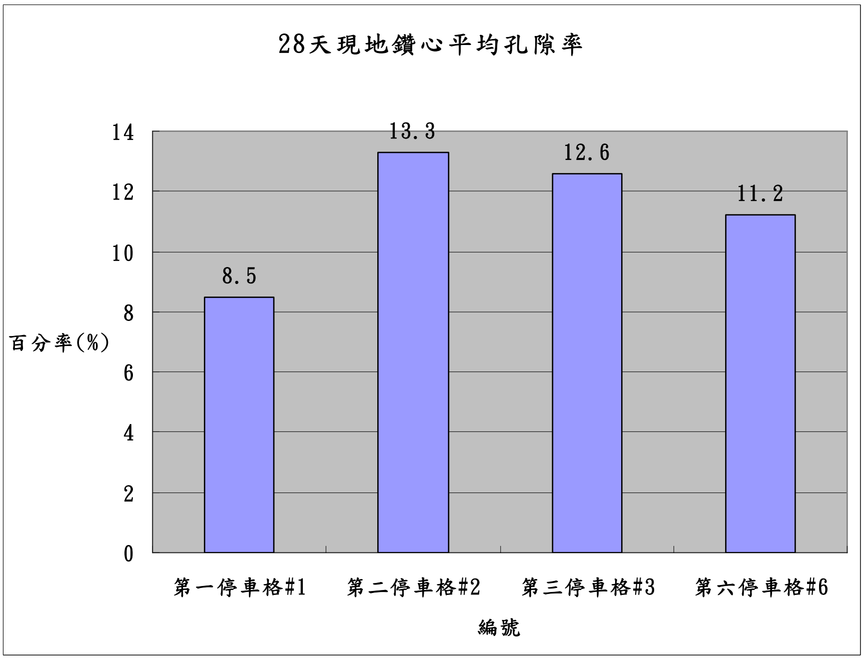


圖 6.7 現地 28 天鑽心平均孔隙率

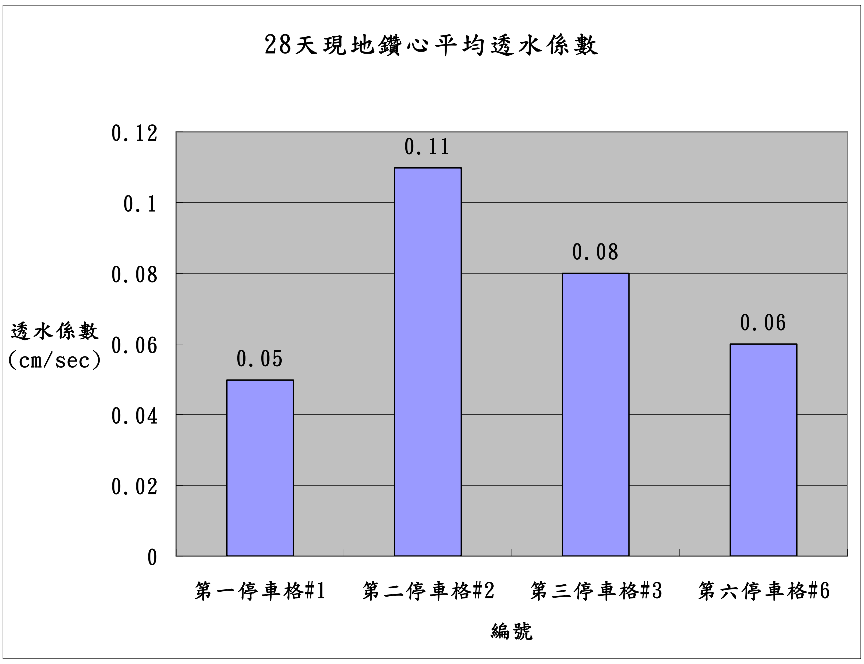


圖 6.8 現地 28 天鑽心平均透水係數

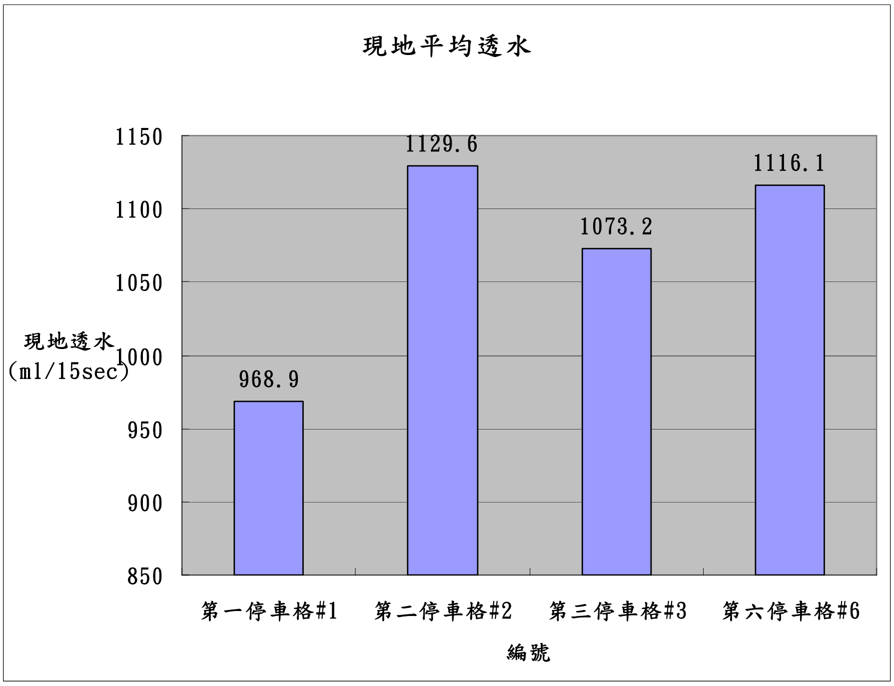


圖 6.9 現地 28 天停車格平均透水量

3.現地混凝土鋪面試驗問題檢討與未來對策相關問題探討如下：

(1)本次透水混凝土試鋪，因預拌廠骨材無法事先清倉，導致生產製程無法自動計量，改為手動操作，而產生拌和誤差 (無此種透水混凝土程序書管制之)。

(2)第一次供貨時使用攪拌車搬運，結果造成卸出困難之問題。第二次供貨時使用傾卸卡車搬運，則無卸出困難之問題。

(3)透水混凝土單價如何？

上述問題對策如下：

1.經由此次經驗，可知需事先將骨材進料倉，讓生產自動計量拌和，若需改為手動操作時，應制定程序書管制之。拌和機操作人員對於混凝土坍度之目視判斷及掌控能力應在±1.5 公分內。

2.若透水混凝土使用攪拌車搬運時，應考慮運輸時間與氣溫所造成　新拌混凝土坍度損失之問題，必要時應摻用緩凝劑以延長有效時限；若仍有卸出困難之問題，則應使用配有攪拌器(Agitator)之卡車或車載式拌和機運送。

3.低坍度透水混凝土使用傾卸卡車搬運，但新拌混凝土易因水份蒸　發而乾燥，故搬運中應以聚乙烯(PE)布將混凝土表面蓋住，以防止混凝土水份蒸發流失。

4.將來量產時，現今拌合廠若有足夠料倉，按照規範程序執行，應都可以生產出品質穩定之透水混凝土。

5.透水混凝土可以不使用細骨材，粗骨材使用單一粒徑越級配用量較大，依據預拌廠計算本次透水混凝土配比之單價約與一般 3,000 psi 混凝土相當，如表 6.10 所示。

表 6.10 透水混凝土與一般混凝土材料單價比較

	水泥	粗骨材	細骨材	水	強塑劑	單價
	kg/m^3					元/m^3
透水混凝土 (w/c=0.31)	344	1498	0	105	2.3	1950
普通混凝土 (3,000Psi)	308	770	1100	200	2.0	1800

第七章　評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性

7.1 確認透水混凝土之類別

國內外已應用透水混凝土之工程，主要為構造本身具透水需求，或因應生態保護需要而需具備孔隙結構者，常見者有舖面工程、結構回填工程以及擋土護坡工程等，舖面工程方面用於道路、人行道、停車場等，常用工法為塊狀舖面拼接、鏤空舖面及透水磚舖面等，以結構之空隙提供水份進出。結構回填工程方面用於橋台、擋土牆及護岸等之背填，常用工法為土石級配加人造透水管，以回填材料之孔隙提供排水功能，降低結構體背面水壓[4]。

目前為止，透水混凝土在道路鋪面或停車場鋪面的應用較為廣泛，主要的類別可分為透水性水泥混凝土、透水性高分子混凝土及透水性燒結製品三大類。相對地使用在港灣工程或坡地工程上則不多見，反而在河川護岸上的應用卻是有一些國內外案例，主要均以透水方塊或球型透水製品於現地加以組合成結構單元體的型式。計畫中所研發之透水混凝土為透水性水泥混凝土，其製程及適用範圍與透水瀝青混凝土及透水樹酯混凝土較為相似，僅黏結骨材的膠結劑不同，但有別於透水磚。一般而言，普通混凝土為公共工程最常使用之材料，如 RC 結構物、剛性鋪面、基樁、消波塊、擋土牆、堤防、護岸等，一般在強度要求下，透水混凝土可以取代普通混凝土，由於透水混凝土其具有高孔隙率，可提供與普通混凝土不同之特性，如透水混凝土應用於剛性鋪面可以減少噪音與積水，增加安全性；應用於堤防護岸，透水混凝土易於植生植物並豐富堤防護岸之生態[1]。

工程師在看到透水混凝土時，通常會問的第一個問題就是「抗壓強度有多少？」由本試驗結果，透水混凝土的抗壓強度，依據透水混凝土現地施作之結果，最低者為 50 kg/cm^2，最高者達 192 kg/cm^2，依據相關規範

，透水鋪面工程設計抗壓強度為 140kg/cm^2，結構回填工程設計抗壓強度至少為 25 kg/cm^2，土木結構之最低設計抗壓強度為 175kg/cm^2，均在本現地施作試驗強度範圍內。河道旁護岸及護坡工程採透水混凝土一體成型方式施工者，因兼具擋土及抗水流沖刷功能，建議抗壓強度在 210 kg/cm^{2}以上，由於非在本次試驗強度範圍，建議參照表 2.6 所示，該配比抗壓強度約 250kg/cm^2，此為日本混凝土協會有關高陡護坡斷面配比資料調整配比試拌後使用。植生工程部分，主要考量植物生長需求，以孔隙率在 26%以上配比為佳。設計若採格框方式植生，因格框結構以一般混凝土施工強度無虞，透水混凝土主要作填充格框避免下方土壤遭沖刷，強度要求較低，建議比照結構回填工程採 25 kg/cm^2 以上；設計若採透水混凝土一體成型方式施工，用於一般護坡保護部分，強度要求建議比照鋪面工程採 140 kg/cm^2 以上，本次配比可使用[4]。

7.2 交通建設適用透水混凝土之項目

透水混凝土配比設計與製程控制其特性，以達合適強度、高透水性及無析離等工程需求，主要仍以強度要求不高的結構物應用為主。在配比上水灰比約採 0.3~0.35 的範圍，骨膠比為 3.0~4.0，硬固後的混凝土內部通常含有 15~25%的連通孔隙率，抗壓強度可達 15~35MPa，抗彎強度為 3~5MPa，透水係數為 1~15mm/sec 的範圍，單位重為 1,700~2,200kg/m^3，且因多孔隙的存在相較於普通混凝土，水的毛細現象不顯著及成型時側壓力小等特點，就透水混凝土特性而言，其主要功能大致如下：

1.排水或保水功能

將其應用於鋪面面層時可迅速地排水，減少路面的積水現象，若面層與底層形成一連續的通路，則水份可直接滲透進入土壤，具有保水的效能，如圖 7.1 所示。

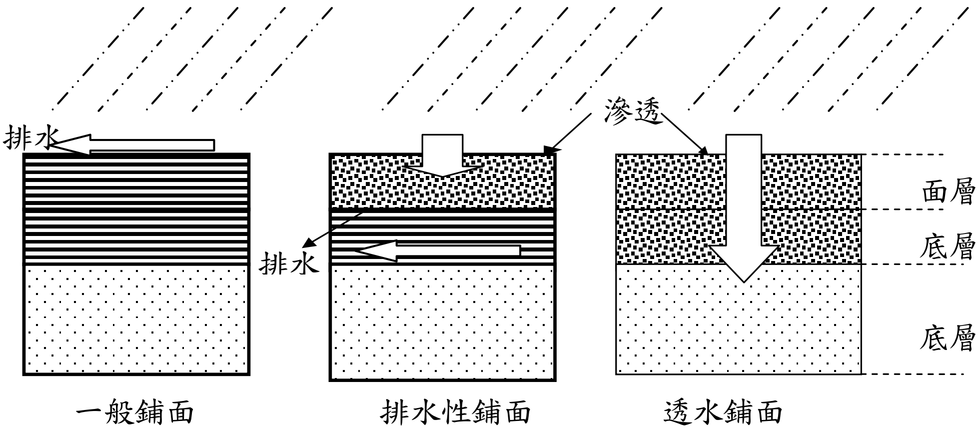


圖 7.1 各種鋪面示意圖[1,5]

2.水質淨化功能

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

3.增加生物的棲息空間

因表面有許多微小的連續孔隙，作為海洋復育的魚礁或藻礁石，可增加甲殼類或體型較小之魚種、魚苗之棲息場所，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[45]。

4.植栽綠化功能

多半利用體積較小的透水混凝土製品，再以組合的形式組織成結構單元體，除了材料本身具有為小孔隙可提供植物生長時根部的附著外，各材料間仍留有部分的較大組合間隙，可作為植物成長的空間。

5.吸音功能

多孔性混凝土直接暴露面對噪音源時，入射的聲波一部分被反射，一部分被材料吸收，另一部分則藉連通孔隙穿透，不若普通混凝土被反射的聲波較多，因此具有吸音的效能。若將其應用於交通工程上可降低

交通噪音，如應用於道路鋪面或作為高速道路兩側的吸音板。

本計畫針對不同的水灰比、膠結材料種類及骨材粒徑大小，並變化漿體填充孔隙體積百分比，分別進行配比設計，共設計 54 種配比組合，對其進行各項力學及物理性質試驗，由結果可知計畫中所研發之透水混凝土，水灰比 0.35 之水泥漿體，依不同填充孔隙百分比其抗壓強度介於 17.5~25MPa 之間，透水係數皆在 0.03cm/sec 以上。表 7.1 為鋪面材料定量特性分析表，由上述結果對照此表顯示本計畫所研發之配比，可滿足內政部營建署「市區人行道施工規範」中對混凝土鋪面分類之抗壓強度要求，無論是採整體澆置或製成預鑄版式、連鎖磚式均可達到要求，且止滑性透水混凝土鋪面或預鑄版磚因表面粗糙度較普通混凝土高，止滑效能較佳。

在港灣工程應用上混凝土的品質因應結構物之種類、位置及環境條件而有不同的設計標準強度(如表 7.2 所示)，基本上須滿足強度與耐久性的要求。由於波浪的反覆衝擊作用，對於僅屬於點狀接觸黏結的透水性混凝土而言，或不宜將其應用於主體結構物上，且基於腐蝕的考量，亦不可將其應用於鋼筋混凝土中，較可能的應用方式僅止於次要結構物之應用，如護基方塊及消波覆蓋。

人工魚礁是將天然或人造的物體投放於海洋中，改變海洋環境，供給動植物良好棲息場地，已達到培育資源與增加漁獲之目的。而利用多孔混凝土礁石投放於海中，其附著在表面的海藻類數量較傳統普通混凝土高，因此其集魚的效果會較佳[1]。由於經濟快速發展，臺灣都市車輛數目快速成長，車行噪音問題儼然已成為現代社會的一種公害，特別是在交通流量大車速快的快速道路周邊居民構成極大的困擾，利用多孔混凝土製成吸音板，可有效減低交通噪音影響，未來可朝此方面進行研發[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、防波堤(seawall)和人工漁礁等。ACI 522R-06[44]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、網球場及動物園區等之面層，(8)橋樑基座（embankments），(9)游泳池地版，(10)海濱結構和防波堤，(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。

表 7.1 鋪面材料定量特性分析表[1,31]

分類	鋪面材料	抗壓力	抗彎力	吸水率	止滑性	價格
混凝土鋪面	整體澆置	210 kgf/cm^2 以上	視有無配置鋼筋補強而定	7%	視表面處理 可達良好效果	適中
	預鑄版式	140 kgf/cm^2 ～560 kgf/cm^2	視有無配置鋼筋補強而定	6%	視表面處理可達良好效果	適中
	連鎖磚式	140 kgf/cm^2 ～560 kgf/cm^2	60kg /cm^2 以上	6%以下	視表面處理可達良好效果	適中
磚材鋪面	燒陶磚	560 kgf/cm^2	50kg /cm^2 以上	特級 2%以下	良好	偏高
	紅磚	140 kgf/cm^2 以上	40kg /cm^2 以上（厚度 4 公分）	7%以下	良好	適中
瀝青鋪面	多孔隙瀝青混凝土	350 kgf/cm^2 以上	—	—	佳	適中
天然石材鋪面	大理石	210 kgf/cm^2	70kg/cm^2 以上	0.45%以下	視表面處理而定可達良好效果	高
	花崗石	175 kgf/cm^2 ～210 kgf/cm^2	40kg/cm^2 以上	0.3%以下	視表面處理而定可達良好效果	高
人造鋪面	石質面磚	350 kgf/cm^2 以上	30kg/cm^2 以上	一級 3%以下 二級 6%以下	良好	偏高
	陶質面磚	350kgf/cm^2 以上	50kg/cm^2 以上	16%以下	普通	適中
	瓷質面磚	350kgf/cm^2 以上	50kg/cm^2 以上	0.5%以下	稍差	適中
人行道設計建議標準		汽機車使用 140kgf/cm^2 以上 人行使用 140kgf/cm^2 以上	30kg/cm^2 以上	滲流 5%以上 逕流 3%以下	粗糙	視工程經費而定

表 7.2 混凝土之配合條件及設計標準強度之參考表[1,32]

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

第八章　結論與建議

8.1 結論

1.典型透水混凝土其單位重介於 100 lb/ft^3 與 125 lb/ft^3 (1,600 kg/m^3 與 2,000 kg/m^3)之間；本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體之單位重介於 1,630 至 1,805 kg/m^3 間，試體合乎典型透水混凝土單位重之間。

2.典型透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間；本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體之透水係數(試體切割成上、中與下三層進行測試)介於 0.33 至~ 0.93 cm/sec 之間符合上述典型透水混凝土透水係數範圍。

3.典型透水混凝土其孔隙率範圍為 18%至 35%之間，可依據工程種與其透水之需求不同而分為兩組，一組孔隙率為 20±4%，屬於低透水混凝土；另一組孔隙率為 30±5%，屬於高透水混凝土；而本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體之孔隙率範圍約為 25%至 32%之間，均屬於高透水混凝土。

4.有關本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體 (水灰比 0.35) 屬於低強度高透水混凝土，其抗壓與抗彎強度均較低，28 天抗壓強度約為 67 至 151 kg/cm^2 (957psi 至 2,157psi) 之間，上述與第一期研究之最適配比 (水灰比 0.35、骨材粒徑 0.48cm、填充孔隙百分比 80%，其透水係數 0.1cm/sec、28 天抗壓強度可達到 21MPa) 有兩大差異，首先是第一期研究之最適配比並未符合 ACI 522R-06 建議透水混凝土透水係數範圍介於 0.16 至 1.22 cm/sec 之間；其次是第一期研究之最適配比之單位重約為 2,044 kg/m^3 間較本研究之試體高甚多，因此相對本研究之試體強度會較低。

5.本計畫所試拌之配比如 0.35-A-1：4-X、0.31-B-1：4-X 與 0.25-B-1：4-X，除了可符合 ACI 522R-06 規範建議之外，尚可滿足內政部營建署「市區人行道施工規範」中對混凝土鋪面分類之抗壓強度要求，故可應用於

一般人行道鋪面或停車場上。

6.有關第三章建立透水混凝土之製程與試驗標準已經過部份專家學者審查，對規劃設計與施工監造有其參考價值。

7.日本規範排水性鋪裝技術指針之現場透水量試驗方法為柔性鋪面透水瀝青混凝土現地透水性能力評估，首次發現可用於剛性鋪面透水混凝土現地透水性能力評估與驗證。有關現地施作透水混凝土汽車停車格透水性良好，其現場透水量平均約為 1000ml/15sec，均可滿足工地透水試驗規範標準 400ml/15sec 以上要求。

8.現地透水計算鋪面透水率約 216.7 L/m2/min，上述符合典型透水混凝土的透水率介於 120 L/m2/min 至 320 L/m2/min 間。

9.停車場現地透水混凝土試驗經由目視與現場透水量兩種試驗評估，結果發現透水混凝土現地透水性能力良好，停車場開放車輛交通至今兩個月，並無龜裂或裂紋產生。

10.新拌透水混凝土施工時，目視判斷是否垂流現象產生與其單位重試驗為透水混凝土現場品質管制首要的關卡。

8.2 建議

1.停車場現地透水混凝土施作評估與驗證，確實可運用於人行道、停車場與低交通量道路工程，應可多加推廣。

2.本次透水混凝土試鋪，因預拌廠骨材料斗倉未清倉，產製時使用手動操作，各盤混凝土配比誤差機率增加，以致各組試體(不同車)或鑽心試體有明顯差異，爾後產製拌和應改為自動計量以減少誤差。

3.新拌透水混凝土停車格鋪築現地施作，原設計使用震棒搗實，結果不彰無搗實效果，鋪面經滾壓後混凝土各層夯實度(孔隙率)與抗壓強度各不相同，建議透水混凝土鋪面需要適度分層(滾筒或振動刮板)搗實。

4.後續可加做現地透水試驗以判斷施工均勻性，並可與鑽心試體的各項性

質建立關係。針對高強度透水混凝土之透水性、工作性、強度、耐久性、減噪音、消波、消能等特性深入探討，以找尋最適合之材料配比如加入纖維等。

5.未來應針對重交通量或港灣設施等交通工程探討研究，以利多方面推廣應用。

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.林志棟,「透水性鋪面」,臺灣鋪面(Taipave)之設計與應用實務(六),中華鋪面工程學會,2007。

3.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。

4.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。

5.照片來源:內政部建築研究所提供,2004。

6.廖朝軒、梁明德,「環保再生透水鋪面」,行政院環境保護署環保育成中心,2004。

7.「可透水式人型鋪面材料(無細骨材混凝土)及施工方法研究」,內政部建築研究所研究計畫成果報告,MOIS 891005,10 月 23 日,2000。

8.鄭瑞濱、潘昌林,「透水性鋪面介紹」,WERC 水環研究中心,2001。

9.陳豪吉、林建國,「輕質磚之配比及工程性質研究」,興大工程學刊,第 13 卷,第 3 期,11 月,2002。

10.楊雅雲,「輕質骨材抗壓磚之透水性研究」,國立成功大學土木工程學系碩士論文,2004。

11.謝素蘭,「以高壓及高溫燒結技術鑄造水泥、粘土及飛灰混合料組件之研究」,國立臺灣科技大學工程技術研究所碩士論文,1990。

12.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。

13.楊靜，「建築材料與人居環境施普林格出版社」，清華大學出版社。

14.謝素蘭，「以高壓及高溫燒結技術鑄造水泥、粘土及飛灰混合料組件之研究」，國立台灣科技大學工程技術研究所碩士論文，1990。

15.S. Mindess, J. F. Young, “Concrete”, 2nd Edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River , N. J., 1981.

16.R, Brough, C.M, Dobson, I.G, Richardson, and G.W, Groves, “A Study of Pozzolanic Reaction by Solid-state 29Si Nuclear Magnetic Reasonance Using Selective Isotopic Enrichment”, J. Materials Science, Vol.30, pp.1671-1678, 1995.

17.P.K. Mehta, and J.M Monteior, “Concrete Structures, Properties and Materials”, 2nd Edion, Prentice Hall Inc.New Jersey, 1993.

18.D. Bonen, K.H. Khayat, “Characterization and Pozzolanic Properties of Silica Fume Stored in an Open Pond”, Cement and Concrete Research , Vol.25 , No.2 , pp.395-407 , 1995.

19.Antonio Principallo, Klaas van Breugel ,Giovanni Levita “Influence of the Aggregate on the Electrical Conductivity of Portland Cement Concretes”,Cement and Concrete Research,Vol.33,pp.1755-1763, 2003.

20.Japan Concrete Institute，Proceedings of the JCI Symposium on Design ,Construction and Recent Applications of Porous Concrete, 2004.

21.GOMACO Corporation, A Green and Easy Solution for Flood Control Problems. Retrieved from http://www.gomaco.com/Resources/worldstories/world32_1/satoroad.html, 2004.

22.林炳炎，「矽灰在混凝土中概論」，現代營建，pp.59-66，1988。

23.黃兆龍，「混凝土性質與行為」， 詹氏書局，1999。

24.周樺，http://www.linlins.com/jenniferchou/20040222175500.shtml

25.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。

26.http:// www.wakocon.co.jp

27.廖瑞堂，「山坡地護坡工程設計」，臺北市，科技圖書，2001。

28.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。

29.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」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2004。

30.Construction of pervious concrete pavements, Mtt Offenberg, PE.

31.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。

32.內政部營建署，「市區人行道施工規範」，中華民國 92 年。

33.「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。

34.行政院公共工程委員會公共工程施工綱要規範第 02794 章透水性鋪面。

35.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。

36.行政院公共工程委員會重力式擋土牆標準圖。

37.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。

38.經濟部水資源局，生態工法技術參考手冊第 5-4-2 節，2001。

39.中國土木水利工程學會，混凝土工程設計規範第 1.7 節，1998。

40.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。

41.潘昌林、鄭瑞濱，透水混凝土與工程應用介紹，臺灣營建研究院研發資訊， 2001。

42.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。

43.交通部臺灣區國道新建工程局，北二高剛性路面建造講習，1990。

44.Portland Cement Association，Pervious Concrete Pavements，2004.

45.ACI Committee 522 (ACI 522R-06)，Pervious Concrete，2006.

46.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。

附錄 1

期末報告會議審查意見答覆書

期末報告會議審查意見答覆書

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

計畫編號：MOTC-IOT-96-H1-DB004

計畫名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究（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
一、李釗 教授審查意見		
1.在時間與人力物力限制之下，本計畫能執行至此程度值得肯定。	感謝給予肯定。	
2. p.52 滾筒之寬度應大於施工面寬度，但現地施工時似未達此要求（p.91）。	施作確實有改進空間。	同意
3. p.42 照片勿改變長寬比例。	遵照辦理。	同意
4. p.45 最後三行宜靠左。	遵照辦理。	同意
5. p.55 切縫的目的應為控制裂縫。	正確。	同意
6. p.67 抗壓試驗似用錯內容。	謝謝指正，已修正。	同意
7. p.69 砂輪機無法切割試體。	謝謝指正，已修正。	同意
8. p.70~p.71 (f)(g) 應合併，並另加示意圖。	謝謝指正，已修正另加示意圖 4.1。	同意
9. p.72 加示意圖。	請詳附錄-2。	同意
10. 試驗結果變異性較大。	第六章現地試驗變異性較大。	同意
11. 工作人員未戴安全帽且穿拖鞋。	謝謝指正，後續施作加強要求。	同意
12. p.112~p.113 表 6-7&6-8 是否可建立關係，試體切上中下三層但表 6-8 為何	表 6-7 為現場 28 天透水量試驗結果，而表 6-8 為現地混凝土 7 天齡期鑽心試驗結	同意

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-96-H1-DB004

計畫名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究（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
只有上下兩層結果。	果，二者齡期不同建立關係較無意義，表 6-8 為 7 天齡期結果僅提供參考。	
13. p.133 結論 11 可改寫。	謝謝指正，結論中第 11 點已移除。	同意
14. 後續可加做現地透水試驗以判斷施工均勻性，並可與鑽心試體的各項性質建立關係。	謝謝建議。	同意
15. 後續可再研究加 fiber。	謝謝建議。	同意
二、蔡佐良教授審查意見		
1. 統計技術可用於數據分析。	謝謝提供寶貴意見，已於期末報告第六章中增加統計分析如平均值與變異係數。	同意合作研究單位之說明
2. 透水混凝土之優點可再議。	謝謝提供意見，也需要更多研究確認。	同意
3. 透水混凝土表面之平整度可列入以後研究之項目。	在攤平階段，僅藉由耙子攤平透水混凝土，表面平整度不佳，應使用振動刮板加強表面平整度。	同意
三、王和源教授審查意見		
1.研究內容與架構，成果甚具有參考價值及推廣。	感謝給予肯定。	
2.教育訓練於期末報告宜作說明。	謝謝建議指正，已於期末報告加入教育訓練的資料與光碟。	同意合作研究單位之說明
3.透水混凝土最適配比之相關條件之說明。	請詳期末報告 2-2 透水混凝土與 3-1 透水混凝土之製程。	同意

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-96-H1-DB004

計畫名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究（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
4.增加單價分析之基本單價（時價）？	謝謝提供寶貴意見，請詳表6-10 透水混凝土與一般混凝土材料單價比較與說明。	同意
5.輕搗實與重搗實之標準說明之。	請詳期末報告 4-3 試驗變數，分為輕搗實與重搗實作為試驗變數之說明。	同意
6. 現地試驗試作過程相當辛苦，當時的條件（天候、溫溼度、人力…）作說明。	遵照辦理，詳 6-5 頁。	同意
7.透水混凝土硬固後單位重結果（p.77）之0.35-B-1:4.5 之輕搗實略高於重搗實？	試體編號 0.35-B-1:4 其孔隙率卻隨著搗實能量愈大而增加，有不合理現象，透水混凝土數據變異大。	同意
四、陳桂清研究員審查意見 1.文中有許多數據，請盡量統一單位表示。	謝謝審查意見。	同意
2. 透水混凝土製程中，如何有效管控以增加現在施工之工作性？如何進行養護及後續維護管理？	透水混凝土接近零坍度，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，有關透水混凝土製程及維護請詳 3.1.3 透水混凝土之施工輸送澆置養護。	同意
3. p.108 表 6-6 與 p.117 表6-9 之透水係數趨勢為何？變異很大？	表 6-6 為室內試驗之透水係數與表 6-9 現地鑽心試驗之透水係數有所不同變異很大，但是現地透水量試驗之	同意

交通部運輸研究所合作研究計畫
期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-96-H1-DB004

計畫名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究（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
	透水表現優良。	
4.試驗規劃（W/C=0.35）與現地鋪設（W/C=0.31）之配比不一致，如何比對相關試驗數據。	實驗室試驗規劃透水混凝土水灰比一開始為 0.35 進行試驗，因強度過低，不適合應用於現地停車場試鋪，故降低水灰比至 0.28 以提升強度，再經由預拌廠試拌與試鋪合格後，選定水灰比 0.31，造成比對相關試驗數據確實較困難。	同意
5. 報告內容及文獻很多筆誤、重覆或排版等問題，請修正之。	謝謝指正，已依據您的修正意見辦理。	同意
6. 結論內容請精簡扼要，未來研究方向為何？應用於港灣工程層面如何？	未來應針對重交通量或港灣設施等交通工程探討研究，以利多方面推廣應用。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、防波堤(seawall)和人工漁礁等。	同意合作研究單位之說明
五、主席朱金元科長審查意見 1.第八章參考文獻之編排應符合本所出版品規定，報告內文對照文獻引用方式亦須符合規定。	謝謝指正，遵照辦理。	同意合作研究單位之說明

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

計畫編號：MOTC-IOT-96-H1-DB004

計畫名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究（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
2. 對於未來繼續之研究方向請具體明確（朝向規範的目標）。	港灣構造設施與公路路面試鋪透水混凝土成效評估之研究，規範的目標朝向公路路面與防波堤設施設計透水混凝土導則。	同意
3. 報告文字可能用”注音方式”輸入，音同字不同之地方很多，請查核。	謝謝指正，遵照辦理。	同意
4. 中英文摘要及章節表示請依本所出版品規定。	謝謝指正，遵照辦理。	同意
5. 請將文中之數學式編號，圖亦全部編號，文中引用直接用圖號、表號，避免使用如附圖、如下圖、如下表字眼。	謝謝指正，遵照辦理。	同意
6. p36-37 從圖 2-5，2-6 看不出文中敘述內容，骨材級配範圍請由小~大。	謝謝指正，已加註明圖例前方數字為骨材粒徑，後方數字為水灰比，透水係數單位：cm/sec。	同意
7. 文獻回顧後應有一小結敘述比較各文獻對於透水混凝土在膠結材料、骨材、強度、單位重量…之異同，最好能製表來表示。	謝謝審查意見，未來文獻回顧將嘗試有小結敘述。	同意
8. p.45 相對應配比設計之圖最好能按設計步驟順序	相對應配比設計之圖如圖 3-2 至圖 3-7 等是屬於參考	同意

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫編號：MOTC-IOT-96-H1-DB004

計畫名稱：透水混凝土應用於交通工程之研究（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
編排。	性質，若直接用於對應配比設計可能不妥。	
9. 請依 p.49 設計流程圖提供設計範例。	已依據規定辦理，請詳 3.1.2.1 透水混凝土配比之案例說明。	同意
10. p.60 之流程圖應該不是試驗流程圖，請修改。	謝謝指正，已修正為研究流程圖。	同意
11. p.16 圖 2-4 圖名應為 ACI 透水混凝土配比設計流程。Pw 是什麼？b(註)寫在何處？	謝謝指正，已修正共有 11 個符號註解，其中 Pw 已改為 R 為水泥漿與骨材重量比例。	同意

附錄 2

現場透水量試驗方法

附錄-2 現場透水量試驗方法

Method of On-site Test for Water Permeability of Porous Asphalt Mixture

1.目的

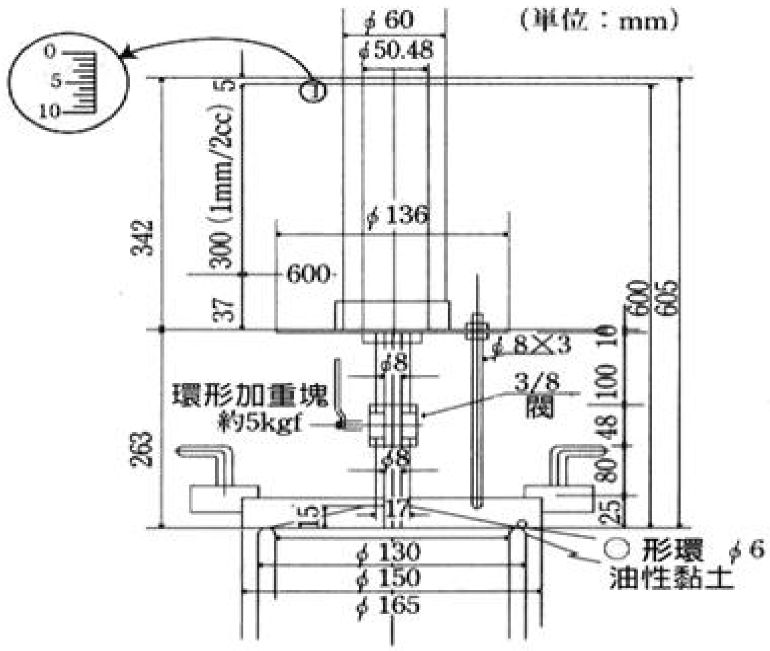
主要作為排水性鋪裝之透水性能力評估。

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

(1)現場透水試驗器：如下圖所示，具備附屬品一式。



(2) 油性黏土(橡膠黏土)

(3)碼錶：可測量到 0.1 秒單位。

(4)水：乾淨的水。

(5)其他：水容器、抹布

4.試驗方法

(1) 除掉鋪裝路面的垃圾等。

(2) 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，在底版上放上甜甜圈型的重量。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。

(3) 如附圖所示，從圓筒部上端 100 的位置打上 X1 的記號，從 X1 至 400ml 的位置打上 X2 記號。

(4) 關掉閥門，將水注入到圓筒部上端。

(5) 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。

(6) 合計(4)，(5)的作業，重覆進行 3 次。另各測定隔 1 分鐘測定之。

5.整理結果

(1) 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。

(2) 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)。

註：

1. 在機能已下降的排水性鋪裝地方所做的現場透水量試驗時，如附圖所示，恐由現場透水量試驗器的底板周邊會漏水。此時將閥全開，繼續試驗。試驗者若為防止漏水而自己判斷調整閥的開度的話，會使試驗的結果零亂，故請勿如此做。
2. 為防止底板周邊的漏水而使用油性黏土，但有時也會跑到排水性鋪裝的空隙中。若怕因油性黏土弄髒鋪裝路面或油性黏土阻塞在空隙時，可使用適合尺寸的橡膠。
3. 同一個地方每隔 1 分鐘反覆測定 3 次時，上次的水會殘留在鋪裝體內，影響到試驗結果。若怕第 2 次.第 3 次慢慢測定的時間很長會影響時，可將測定位置挪動 20cm 也可以。此時測定間隔比 1 分鐘更短也沒用，但為使傾斜低的試驗中使用的水流下，從傾斜高的地方做試驗也可。

【解說】

1.現場透水試驗可利用、應用於以下之事項。

1) 新設的透水性鋪裝.排水性鋪裝的品質管理
2) 試驗用中的透水性鋪裝、排水性鋪裝的透水性能評估
3) 進行機能回復作業或修繕工事等時的評估指標

4) 具有透水性混凝土鋪裝等.其他透水性之鋪裝透水性評估

2.現場透水量試驗的實用上有下列留意點

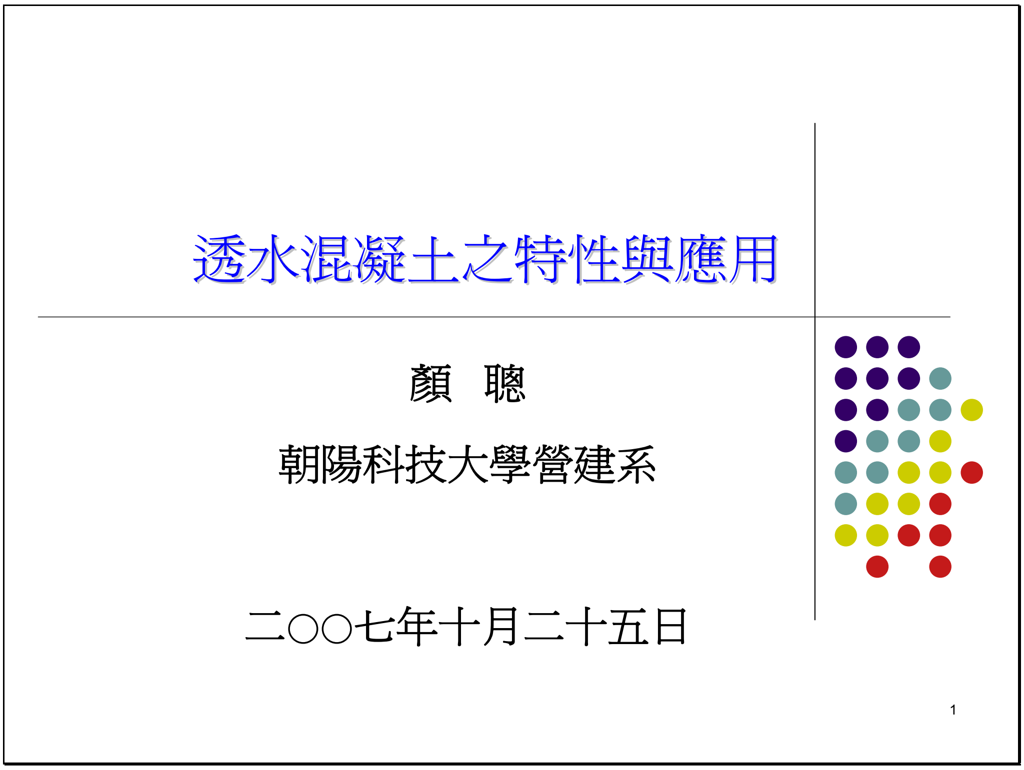
1) 有種測定水流下一定的量時間的試驗，但這不是在求嚴密的透水係數的試驗。要求排水性混合物的透水係數，可用在室內製作的供試體或從現場鑽取的鑽心等的室內透水試驗。

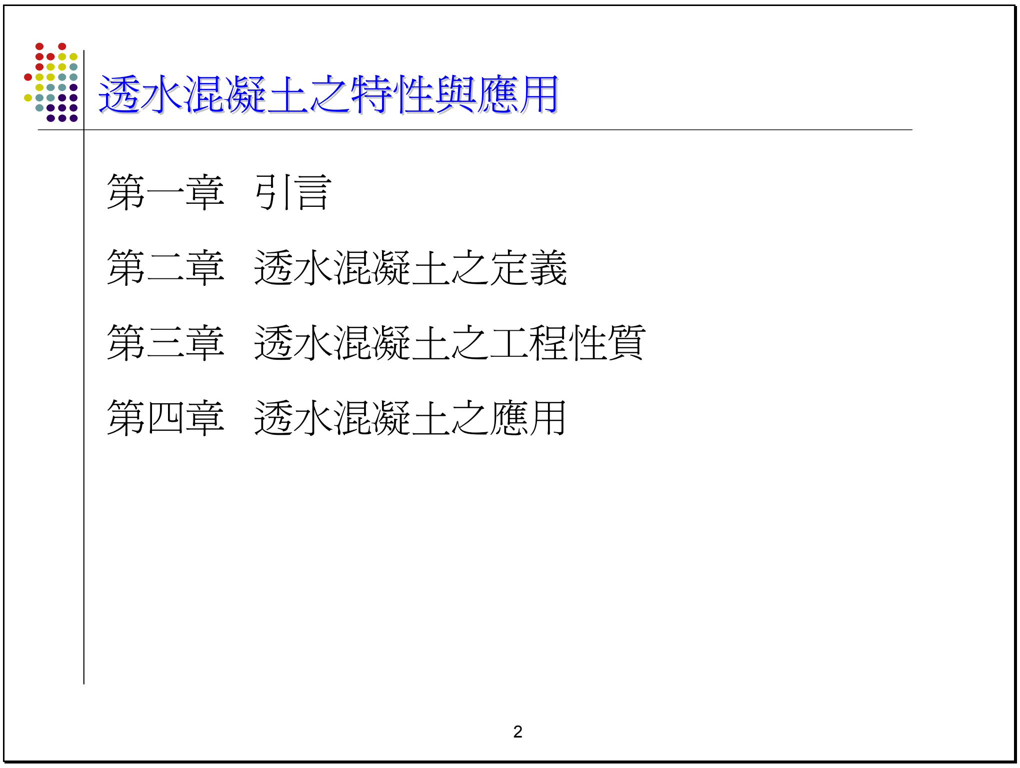
2) 在此主要是評估排水性鋪裝施工後的透水性能，為避免數據零亂，以 8mm 的閥徑為標準。但是為在供用後排水性能降低的排水性鋪裝的地方進行追蹤調查的試驗或考慮到比現在排水性鋪裝高透水性能時，在 7mm 以上的範圍內使用適當的閥徑之現場透水試驗器也可以。

附錄 3

教育訓練簡報與剪影

附錄-3 教育訓練簡報


透水混凝土之特性與應用
顏　聰
朝陽科技大學營建系
二○○七年十月二十五日
1


透水混凝土之特性與應用
第一章　引言
第二章　透水混凝土之定義
第三章　透水混凝土之工程性質
第四章　透水混凝土之應用
2

第一章 引言

- 台灣地區資源有限，為使國家能永續發展，建立生態都市是必須達成的目標。
- 公共工程採用生態工法為近年來政府大力推行的綠建築政策。
- 綠建築九大指標－(三)基地保水指標（表一）

3

第一章 引言

- 舖面性質與保水效率
  - Δ 舖面保水模式（圖1）
  - Δ 都市化前後之河川逕流量（圖2）
  - Δ 在台北市，降雨強度大於50 mm/h的年降雨次數為45次時，市內每增加1%之透水舖面，完全滲入時之保水量約為3.50×10^6 m^3/y，這相當於翡翠水庫滿水位有效蓄水量(3.40×10^8 m^3)之約1%。
- 舖面性質與熱島效應（圖3）

4

第二章 透水混凝土之定義

- 透水混凝土（pervious concrete）泛指零坍度、採用開放級配的混凝土材料。
- 透水混凝土由水泥、粗骨材、少量或無細骨材、摻劑與水等所組成。
- 硬固透水混凝土內部含有連續孔隙，如圖4，尺寸由0.08～0.32吋（2-8mm）；空隙含量18～35%；抗壓強度2.8～28MPa（400～4000psi）。
- 透水混凝土特性為可使水分容易滲透，其舖面的透水速率依骨材尺寸及混凝土密度而定，一般介於2～18 $^{gal/min}/ft^2$（81～730$^{L/min}/m^2$）或透水係數為K＞0.1 cm/sec。

5

第三章 透水混凝土之工程性質

3.1 新拌混凝土

- 新拌透水混凝土比普通混凝土黏稠，其坍度一般低於20mm，也有提高到50mm的使用實例。
- 澆置並搗實後的透水混凝土，其骨材顆粒為相互緊密黏結，形成一種開放的材料體。
- 對透水混凝土的品管，以單位重的量測較具參考性，坍度測驗反而不具意義。透水混凝土的單位重一般約為普通混凝土的70%。
- 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。

6

第三章 透水混凝土之工程性質

3.2 硬固混凝土

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爲1600～2000kg/m^3。
- 孔隙率20％的透水混凝土舖面，厚度125mm者可蓄積25mm降雨量於其空隙內；若是將舖面澆置於150mm厚之級配料底層上，如圖5所示，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。典型的透水率爲120 L/m^2/min（0.2 cm/s)～320 L/m^2/min（0.54 cm/s），實驗室內量測的透水率可高達700 L/m^2/min。

7

第三章 透水混凝土之工程性質

3.2 硬固混凝土

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），常用的強度約爲2500psi （17MPa）。
- 透水混凝土的抗壓強度與空隙含量的關係如圖6。
- 透水混凝土的抗壓強度與單位重的關係如圖7。
- 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，並不利於漿體與骨材的黏裹（圖8）；適當的水灰比爲0.26～0.45。

8

3.2 硬固混凝土

3.抗彎強度

- 透水混凝土的抗彎強度受多項因素的影響，主要如夯實度、孔隙率、及骨材/水泥等。
- 透水混凝土的抗彎強度介於150psi～550psi（1MPa～3.5MPa）。
- 圖9表示透水混凝土抗壓強度與抗彎強度的關係。

3.2 硬固混凝土

4.收縮（shrinkage）

- 透水混凝土的乾縮產生比普通混凝土早，大約50～80%的乾縮量發生在前10天內，相對的普通混凝土則只有約20～30%。
- 透水混凝土的乾縮量依混合材料和配比而定，約爲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。

第三章 透水混凝土之工程性質

3.2 硬固混凝土

5.耐久性（durability）

- 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，分述如下：
  1) 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。
  2) 表面粗糙而開放的透水混凝土，其磨耗和骨材剝脫是較需考量的課題。適當的夯實和養護可降低骨材剝脫現象。
- 化學侵蝕主要爲硫酸鹽和酸類，其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，使硫酸鹽的侵蝕較爲敏感。

11

第四章 透水混凝土之應用

4.1 透水混凝土之應用範圍

- 透水混凝土應用於多面向的工程實務上，包括：
  1) 停車場的透水舖面（圖10）和步道（圖11）
  2) 大賣場室外的剛性透水舖面
  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舖面、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、網球場及動物園區等之面層
  8) 橋樑基座（embankments）
  9) 游泳池地版
  10) 污水處理場的污泥床
  11) 太陽能儲存系統
  12) 人工漁礁
- 通常，上述透水混凝土都不加鋼筋補強

12

第四章 透水混凝土之應用

4.2 建築上應用－沿革

- 19世紀中葉透水混凝土開始應用於建築、營建上。
- 透水混凝土傳統上又稱爲無細混凝土（no-fines concrete）或不連續級配（gap graded）混凝土。
- 歐陸國家使用透水混凝土的方式有多種：
  - Δ 單層或多層房屋之場鑄承重牆
  - Δ 高樓建築
  - Δ 預鑄隔間版牆及蒸氣養護混凝土磚

13

第四章 透水混凝土之應用

4.2 建築上應用－沿革

- 1852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礫石。
- 1923愛登堡、蘇格蘭以熟料骨材（clinker aggregate）建造50棟二層樓房屋。
- 1939-1945（二次大戰）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。
- 1965透水混凝土已容許建造十層樓房屋。
- 1960加拿大首次報導透水混凝土應用於Toronto的一些房屋建築上。

14

第四章 透水混凝土之應用

4.3 鋪面應用

- 透水混凝土鋪面相對傳統混凝土鋪面之優點：
  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（圖12）

15

第四章 透水混凝土之應用

4.3 鋪面應用

- 工程師已指定透水混凝土應用在鋪面上：
  1) 面層
  2) 透水底層及邊緣排水
  3) 路肩

16

第四章 透水混凝土之應用

4.3 舖面應用

- 透水混凝土之成功施作法：
  - 土壤透水性須加驗證，一般建議透水率（percolation rate）0.5in/hr（13mm/hr），土層厚4′（1.2m）以上。
  - 應防止工地排水及重機具進入透水舖面區。要等到排水點之擾動土壤植生穩定後方啓用透水混凝土舖面。須嚴防營建過程或造園工事造成沖涮或泥土沈積。
  - 營建過程的施工交通載重不得駛入透水舖面。

17

一、面層

- 透水混凝土可使用為停車場及次要道路的面層。（圖13）
- 美國的Florida、Utah、New Mexico等州已大量應用透水混凝土於面層上。
- Florida州的使用乃基於三個原因；一是Florida經常有大水災，會引發洪水，使用透水混凝土可減少逕流量。其次，工程設計人員要保留洪水以注水於地下水系統。第三，使用透水混凝土可減少設置洪水排水溝，從而提升其成本效益。

18

1.停車場

- Florida州中部地區早在1970年即考慮採用透水混凝土爲停車場舖面材料，想法是洪患時讓大量洪水排離停車場流入地下。
- 透水混凝土停車場也被選爲鄉村涼化計畫中解決熱舖面問題的一個方案。
- 實用上透水混凝土舖面的設計厚度爲5～10吋（125～250mm）。

19

2.道路（Road way）

- 透水混凝土在道路方面的用途有二，一爲當做排水底層（base）或基層材料（sub-base），二爲當做道路表層或摩擦層。
- 透水混凝土之實用設計厚度爲6-10吋（150～250mm）。

20

二、滲水底層及邊緣排水

- 透水混凝土底層會排水，使匯集於舖面下方。此建造模式可有助於減少路基（subgrade）材料發生唧水（pumping）現象，而引起舖面破壞。
- 舖造可滲水底層及邊緣排水所用之透水混凝土通常只具有較低的強度（1000psi以下），並常與地工織物合用。

21

三、路肩

- 法國曾使用透水混凝土路肩以降低混凝土舖面形成唧水現象。
- 透水混凝土的28天抗壓強度通常低於2000psi（14MPa）

22

四、其他應用

1.排水設施

- 水源和電力設施曾採用透水混凝土於排水磁磚的工程建築以及水工結構下方的排水。該排水設施可疏解上舉壓力並使地下水得以從地下排水管排出。

2.溫室（greenhouses）

- 以透水混凝土建造的溫室地版可作為儲熱系統，並可防止積水。

23

四、其他應用

3.網球場

- 歐洲地區甚多以透水混凝土建造網球場，因它可使水分滲入並由礫石層排水至球場邊緣上。

4.噪音遮板及建築牆體

- 以透水混凝土打造為噪音遮板和房屋內牆，可降低交通或居家噪音，因為其開放式結構可吸入並消除音波於材料中而不會反射回去。

24

五、國內應用現況

- 彰濱工業區彰濱試車場暨實驗室舖設多孔隙瀝青混凝土舖面作爲各項性能測試道，由建中工程公司施作，設計之孔隙率20%，透水效能達100ml/s，透水係數3.1×10^{-1}cm/s。
- 台南市中華西路舖造排水性瀝青路面，有填加木質纖維材料，爲中低承載路面（圖14）。

25

表一 綠建築九大指標

生態	一、生物多樣性指標	
	二、綠化量指標	
	三、基地保水指標	
節能	四、	建築外殼節能EEV
		空調節能EAC
		照明節能EL
減廢	五、CO_2減量指標	
	六、廢棄物減量指標	
健康	七、室內環境指標	
	八、水資源指標	
	九、污水垃圾改善指標	

26

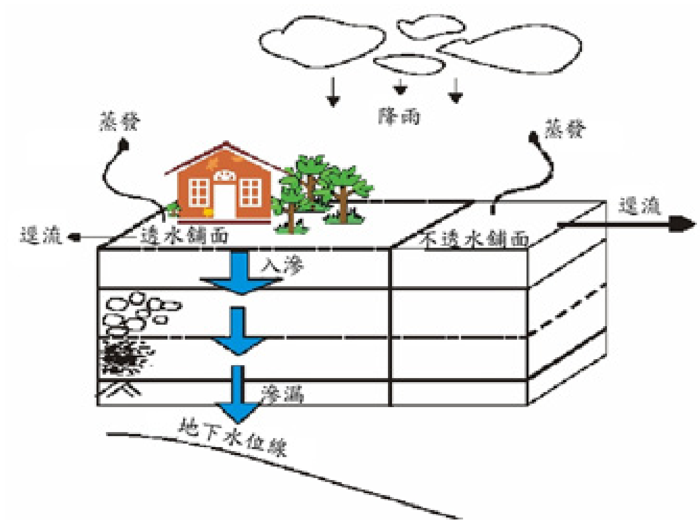


圖1 不同鋪面之保水性能

27

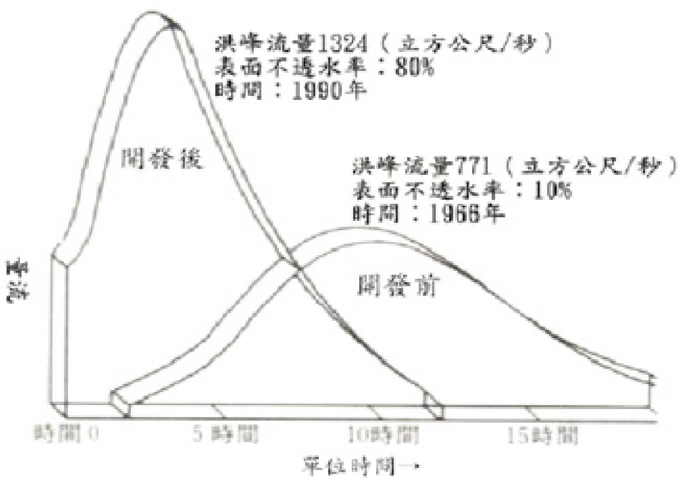


圖2 東京都鶴見川流域都市化前後逕流量變化

28

圖3 不同舖面之熱島效應示意圖

29

圖4 透水混凝土舖面（正下雨，舖面無積水）

30

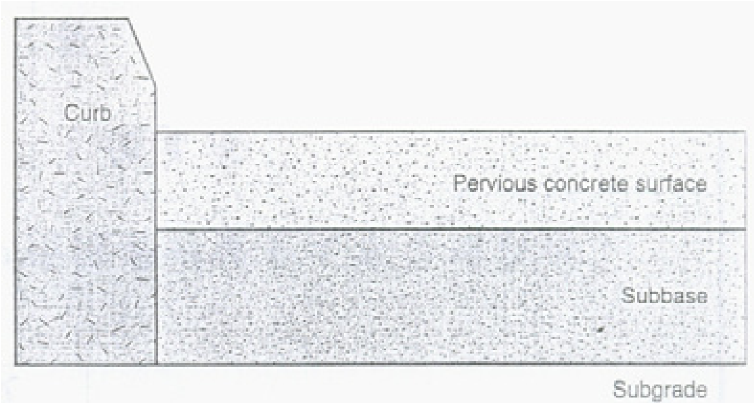


圖5 典型之透水混凝土鋪面

31

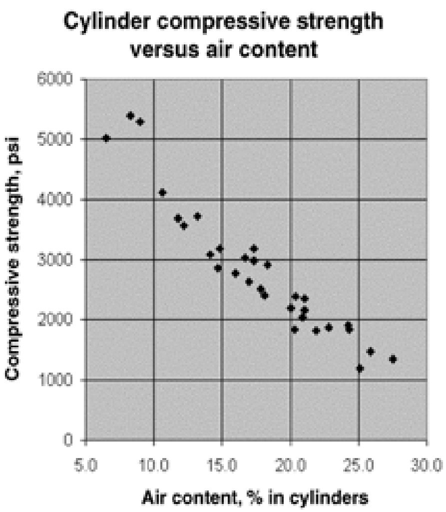


圖6 透水混凝土之空隙含量與抗壓強度關係

32

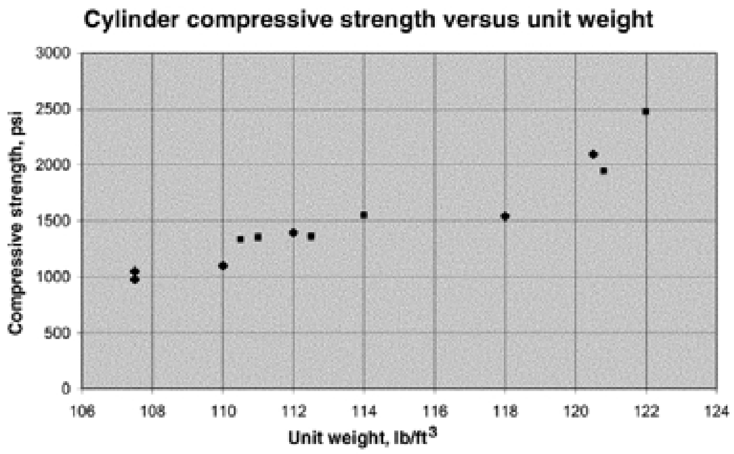


圖7 透水混凝土之單位重與抗壓強度關係

33

(a)
(b)
(c)

圖8 不同漿量之透水混凝土：
(a)太少
(b)適量
(c)太多

34

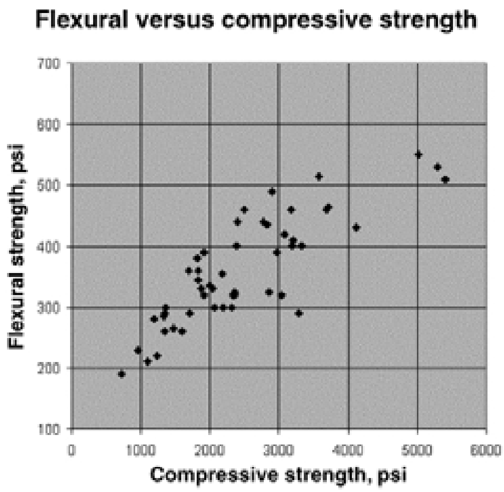


圖9 透水混凝土抗壓強度與抗彎強度之關係

35

圖10 透水鋪面應用於停車場

36

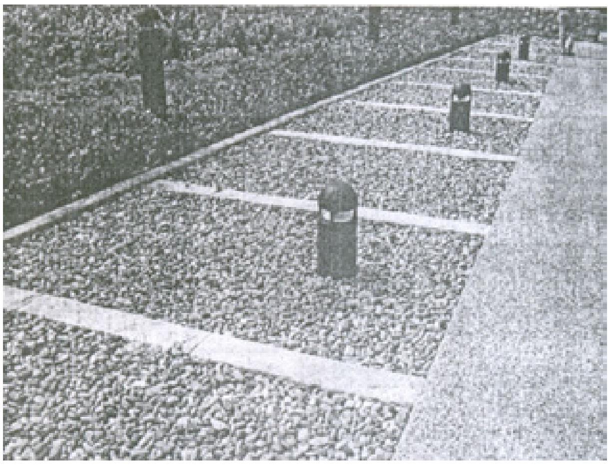


圖11 透水鋪面應用於步道

37

圖12 透水混凝土舖面鋪設於樹木滴水區

38

圖13 透水混凝土建造的停車場

39

圖14 台南市中華西路之排水性瀝青路面

40

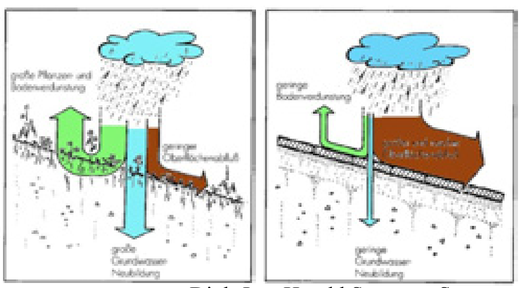
交通部運輸研究所
「透水混凝土應用於交通工程之研究」教育訓練

透水混凝土在鋪面工程之應用

講員: 邱垂德
中華大學土木與工程資訊學系副教授
中華民國九十六年10月25日

土地開發造成的不透水面

封住地表使雨水無法透入土中而截斷地下水補注，乾季時缺水嚴重、暴雨直接跨過不透水面快速入河，提高洪峰量並沖刷河道造成水災。



Dipl.-Ing. Harald Sommer, Storm Water Management in Germany

緻密材料易吸收太陽輻射，釋出空氣中提高氣溫造成「熱島效應」，間接提高建物耗能量。

北科大林鎮洋教授資料

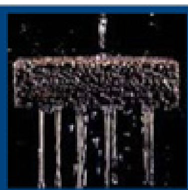
鋪面研究室

美國經驗：不透水覆蓋率(%)

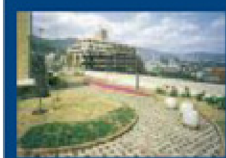
- 郊區：1%~2%
- 住宅區：低密度10%、高密度>50%
- 工業區及商業區：>70%
- 購物中心及市中心區：>90%

因土地開發改變的不透水地表面，主要區分為鋪面及建築物(屋頂)兩大類，其中鋪面佔2/3。

因此透水鋪面推廣及屋頂綠化，為暴雨管理的兩項最佳管理實務(Best Management Practice, BMP) 。



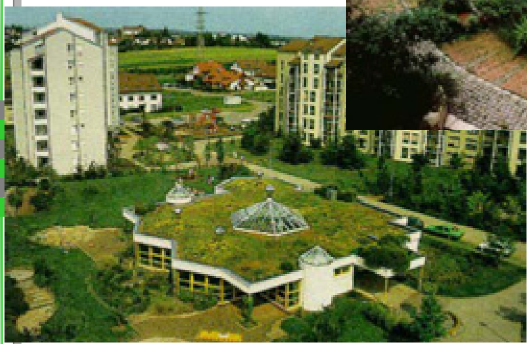
透水地坪推廣



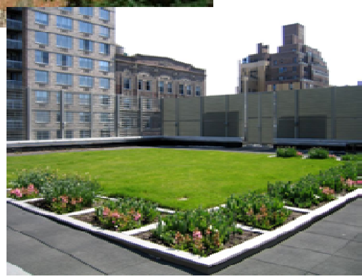
屋頂綠化

陳賜賢、陳孝順，2002綠營建研討會

鋪面研究室



Dipl.-Ing. Harald Sommer, Storm Water Management in Germany



U.S. EPA, 紐約某小學屋頂

鋪面研究室

由排水設計轉變為暴雨管理

由排水設計轉變為暴雨管理

傳統的暴雨處理方式：排水設計

- 地下水補注量降低
- 水流强度增大
- 水體易受污染
- 工程費用高

暴雨管理：確保水的自然循環，避免增加水流速度

鋪面研究室

美國的暴雨管理規定

暴雨管理是美國EPA淨水法(Clear Water Act)對非點污染源的延申，目前已進入Phase II (2003年生效)，規定所有都市城鎮、所有工廠、超過1英畝的營建工地、學校等大資產所有人，必須負起暴雨污染的責任，由這些土地排出的雨水(逕流)，須經美國污染控制系統(National Pollution Discharge Elimination System, NPDES)驗可並發出准許排放證明。

將傳統的不透水面改為透水鋪面可以不必設置草澤地、窪地、滲透溝、滯洪池等設施，使土地之應用效益增高。

鋪面研究室

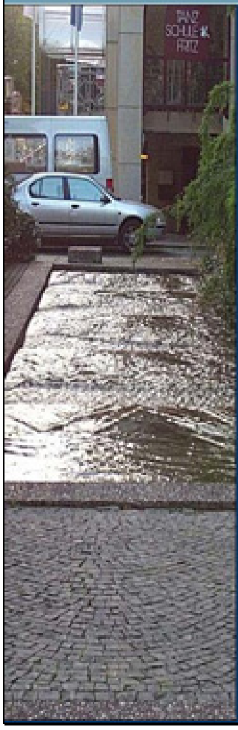
設計案例

2005年馬里蘭州Westminster開發木器工場，基地總面積12英畝，其中的8英畝為停車場；原規劃採瀝青鋪面停車場，依暴雨管理法規，須設置1.5英畝滯洪池，且須在停車場設計排水系統；經評估改採透水混凝土鋪面停車場，而不需滯洪池，即可符合規定，多出13%有效應用的場地面積，且省下約$400,000的排水設施費用。

資料來源：Dann Huffman, “Understanding Pervious Concrete,” *Construction the Specifier*, December 2005.

鋪面研究室

工 程 Introduction to Ecological Engineering Methods



建構「保水」環境

- 傳統營建公共工程過於強調結構安全，導致不透水舖面比率遽增，大地喪失保水能力。
- 國中校園達69%、國小達68%的不透水面積。台北市而言，市中心或舊社區的綠蔽面積均在18%以下，全市之平均不透水面積亦達58.6%。
- 不透水面積的增加強化地表逕流的流出率，形成較大洪峰流量（Peakflow），形成洪患。
- 歐美及日本最新的生態防洪對策中，均逐步採用具有貯留雨水、吸收部分逕流水量，而達到軟性防洪及具有生態水循環的保水舖面設計。

WERC

美國綠建築委員會(U. S. Green Building Council)的LEED(Leadership in Energy and Environmental Design)

sustainable site development,
water savings,
energy efficiency,
materials selection, and
indoor environmental quality.

鋪面研究室

綠建築九大指標

GREEN BUILDING TARGET

一、生物多樣化指標
二、綠化指標
三、基地保水指標
四、日常節能指標
五、二氧化碳減量指標
六、廢棄物減量指標
七、水資源指標
八、污水與垃圾改善指標
九、室內健康與環境指標

包括社區綠網系統、表土保存技術、生態水池、生態水域、生態邊坡 / 生態圍籬設計和多孔隙環境

包括生態綠化、牆面綠化、牆面綠化澆灌、人工地盤綠化技術、綠化防排水技術和綠化防風技術

包括透水鋪面、景觀貯留滲透水池、貯留滲透空地、滲透井與滲透管、人工地盤貯留

鋪面研究室

透水鋪面

透水鋪面乃指水可由面層滲入，暫存在底下的碎石級配層，經一段時間後滲入土壤中的鋪面結構。如果用這種透水鋪面取代停車場的傳統不透水鋪面，則下在停車場上的暴雨可直接滲入土壤中，進行水質淨化處理。透水鋪面的面層可以是透水瀝青(porous asphalt)、透水混凝土(pervious concrete)、植草磚、連鎖磚或其它塊狀鋪裝。

將土地開發後的不透水面改為透水鋪面，具有增加基地保水面積、降低表面逕流量、降低雨水污染、補注地下水量、維持水的自然循環等效益，是EPA公認的暴雨管理採行的BMP。

鋪面研究室

透水鋪面的地下水質淨化效果(移除%)

透水鋪面的地下水質淨化效果(移除%)

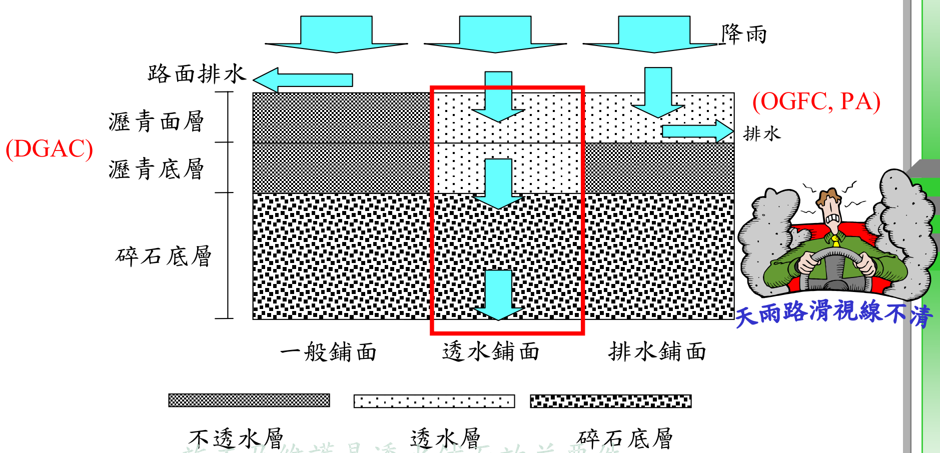
Study Location	總固體懸浮物	總磷	總氮	化學需氧量	重金屬
Prince William, VA	82	65	80	-	-
Rockville, MD	95	65	85	82	98~99

Schueler, 1987, as quoted in EPA, 2004

鋪面研究室

排水鋪面與透水鋪面

排水鋪面與透水鋪面



施工及維護是透水鋪面效益要件

施工及維護是透水鋪面效益要件

鋪面研究室


Introduction to Ecological Engineering Methods
德　國
Step 1
Step 3
Step 2
WERC


Introduction to Ecological Engineering Methods
Step 1
台北市
Step 3
Step 2
WERC


台南縣新嘉國小校園西側教學大樓後方道路及車棚


Introduction to Ecological Engineering Methods
Step 1
Step 2
Step 3
台北市
WERC

Picture Taken in France

Pavement without OGFC

Pavement with OGFC

內政部建築研究所新店實驗區

資料來源：國立中央大學，「透水性鋪面成效之探討」

鋪面研究室

國立中正大學透水鋪面試驗

資料來源：國立中央大學，「透水性鋪面成效之探討」

鋪面研究室

不宜鋪設透水鋪面的場合

不宜鋪設透水鋪面的場合

交通荷重大不宜：透水鋪面結構不緻密且底下土壤常處在飽和狀態，不能承受大的荷重。

有過多污染活動的地方(Stormwater Hot Spots)：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。(污染物經沖入孔隙造成阻塞而失去功能)

鋪面研究室

透水鋪面的選址原則

透水鋪面的選址原則

一、基地土壤的透水率需達0.5in//hr。

二、暫貯水碎石級配層的底面應為水平面使所貯水可由整個面滲入土壤中。

三、基地在工業區附近時，至少應距飲用井100英呎，比最高地下水位高2至5呎。

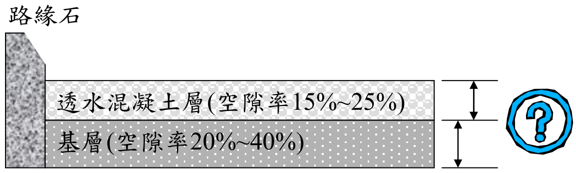
四、交通量為低至中，住宅區小道或停車場較佳。

資料顯示透水鋪面的失敗率較高(75%二年內)，最近的資料則顯示，以透水混凝土做為面層的案例成功率較高。

鋪面研究室

混凝土透水鋪面的設計

混凝土透水鋪面的設計



水力特性
承載特性

透水鋪面除了要能承載可能荷重外，亦要產生基地透水保水的效果。此兩項因素在設計時分別考慮，求得兩個厚度取其大者。

http://www.perviouspavement.org/benefits.htm

鋪面研究室

設計混凝土透水鋪面的水力特性

設計混凝土透水鋪面的水力特性

鋪面欲處理的表面逕流量：由降雨量考慮(二年暴雨)

- 被動降低逕流(passive runoff mitigation)
- 主動降低逕流(active runoff mitigation)
  - 不只單純設計用透水混凝土取代原不透水面，還寄望用所設計的透水鋪面協助處理周遭不透水面排入的雨水量。

鋪面研究室

透水鋪面的透水性及貯水量

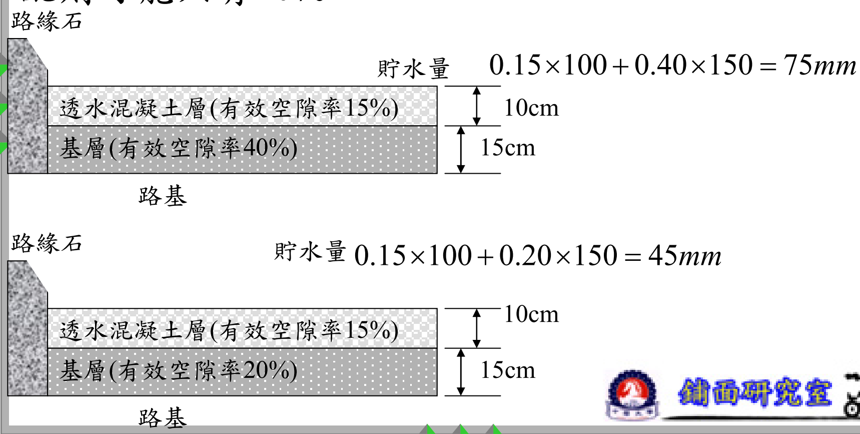
透水鋪面的透水性及貯水量

透水混凝土的透水性至少有0.2cm/s，也就是每小時可流過3600mm的雨量(已超過平均年雨量)。基層或路基的透水性則有可能是透水鋪面透水性的關鍵。

一般滲透係數超過12mm/hr (2×10^{-2}cm/min., 除了沉泥質壤土、粉土及黏土以外大都可符合)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，在設計上期望透水鋪面設計之貯水量能在5天內滲入土中。

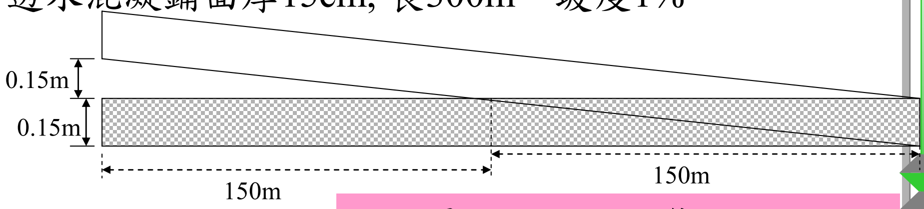
鋪面研究室

貯水量則受透水鋪面的有效孔隙比(effective porosity)控制，設若該孔隙比為15%，則每1cm厚可貯水0.15cm；基層和路基部份，若採用細料很少的清石基層，由於有效孔隙比可高達40%，傳統的碎石級配則可能只有20%。

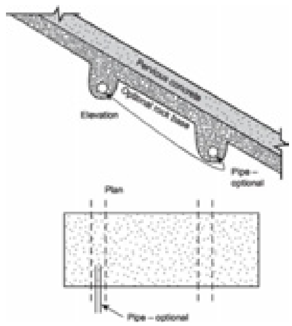


坡度對貯水量的影響很大

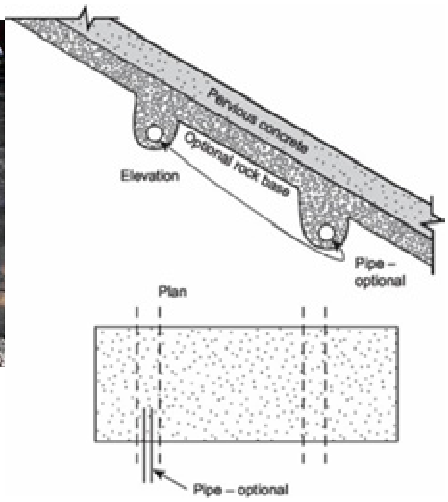
透水混凝鋪面厚15cm, 長300m，坡度1%



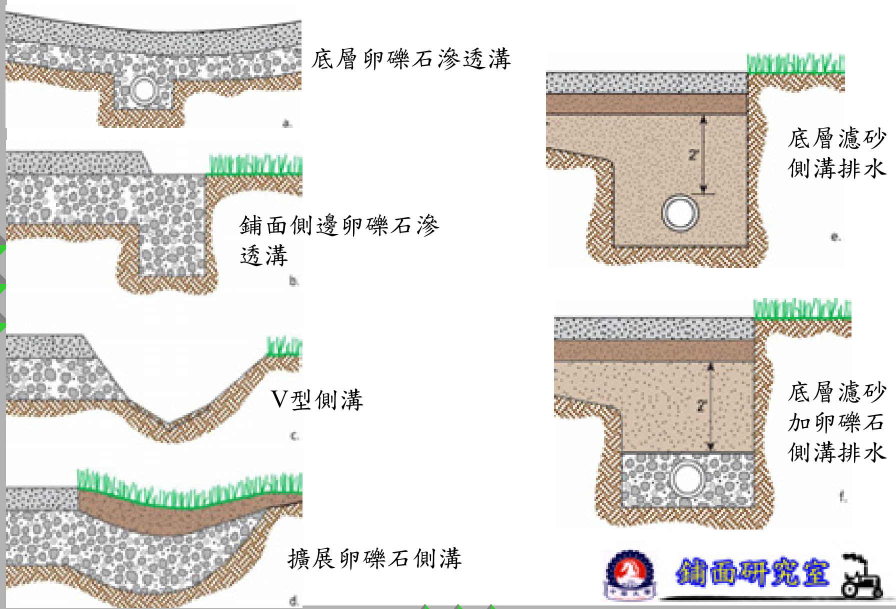
貯水量只剩水平狀態下的25%



故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。

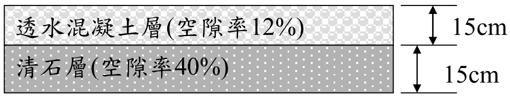


路基土壤滲透性低時採底層排水設計



設計例

停車場面積60m×60m



路基(粉土，滲透率4.23×10^{-3}cm/s)

主動降低逕流設計，需能容納周遭2300m^{2}基地產生的逕流量，經由氣象資料及地表資料，二年、24小時暴雨量估算，該區域因有該透水鋪面停車場，以設計暴雨產生的總逕流量(深度)由30mm降為20mm。

設計混凝土透水鋪面的結構厚度

路基土壤類別	支撐力	k 值 (pci)	CBR值	R-value
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

$$k=\frac{M_R}{19.4}$$ M_R以psi為單位

遇黏土及膨脹性路基時應換土或改良

交通量可依一般方法調查ADT、ADTT、ESAL

用交通量、路基反力模數、混凝土版的彈性模數及抗彎強度，以AASHTO法設計版厚

AASHTO低交通量版厚設計：5in.~7in.

一般混凝土版停車場：4 in.

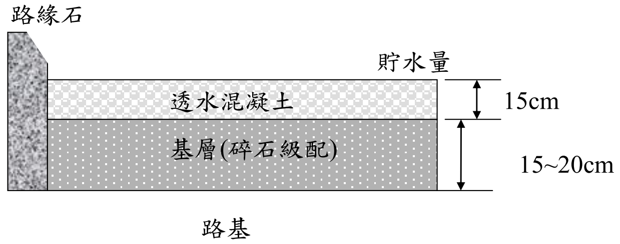
由於透水混凝土強度較低，建議增厚50%

一般透水混凝土停車場：6in.

鋪面研究室

美國最常採用的斷面

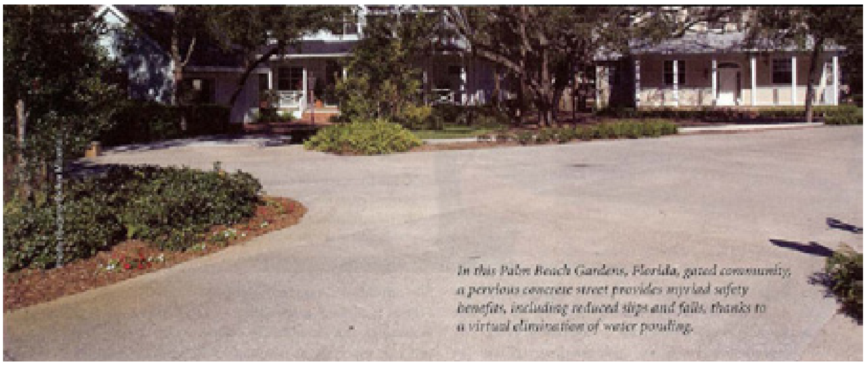
美國最常採用的斷面



若路基土壤為透水性高的砂質土壤，也可不設計碎石級配層。

建議設置溫縮縫(切縫、低交通量不必綴縫筋)

鋪面研究室



美國佛羅里達州Palm Beach Gradens社區，採用透水混凝土鋪面，消除積水打滑的危險。

鋪面研究室

透水鋪面的施工及品質檢測

透水鋪面的施工及品質檢測

基底層準備： 壓密、均質、依設計整平

鋪混凝土前應潤溼(不要有自由水)，以免吸收混凝土的水份。

計量及拌合：依配比設計，水量控制要更精準，以免過多使漿料流動改變開放空隙架構。

骨材的含水量監控很重要

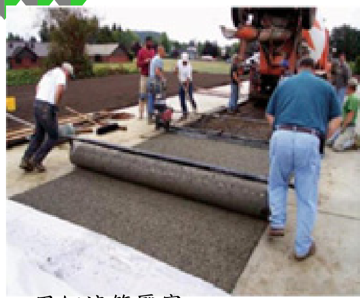
乾硬、不好拌合，故常要延長拌合時間

運送：拌合後1小時內應卸料完成。低(零)坍度不易卸料，採大卸料口的運送機具。

注意天候(溫度、風)的影響

鋪面研究室

用振動勻泥器拉平



用鋼滾筒壓實

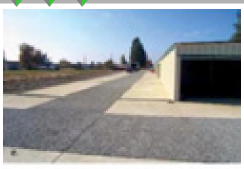
用鑽心厚度及單位重驗收品質

用特製滾筒切縫

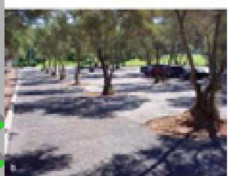
馬上用塑膠布覆蓋養護

鋪面研究室

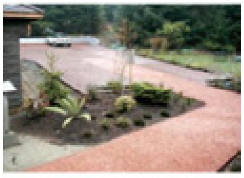
奧瑞崗州動物園的小徑



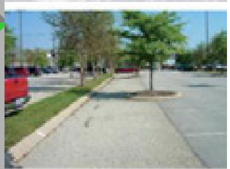
奧瑞崗州某倉儲基地



加州Fair Oak的公園小徑

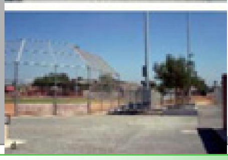


華盛頓州Brainbridge Island的彩色透水混凝土步道



田納西州某體育館之停車場

喬治亞州Buford的的透水混凝土停車場



加州某運動公園

鋪面研究室

透水鋪面的造價與保養

透水鋪面的造價與保養

透水鋪面的造價較高，美國一般瀝青及水泥混凝土鋪面單價每平方英呎0.5至3美元，透水鋪面每平方英呎則提高到2至8美元。將傳統的不透水面改為透水鋪面可以不必設置草澤地、窪地、滲透溝、滯洪池等設施，使土地之應用效益增高，故在地價較高的地區很划算。

由於透水鋪面較易堵塞而失效， 經常性的清掃保養(有時需要高壓沖洗)也很重要，在沒有編列這類保養經費的地區，應將這些經費納入評估。

鋪面研究室

公共工程委員會施工綱要規範

第02794章 透水性鋪面

1 通則

2 產品　2.1 設計概要中2.1.2「無細料混凝土」

2.2 材料之一般規定中2.2.3面層缺「透水混凝土」

2.3 工廠品質管制應加「2.3.2透水混凝土」部份

3 施工

應增加「3.1.3 透水混凝土鋪面」部份

「3.2 面層」「3.3 檢測」「3.4 管理與維護」之規定以「透水瀝青鋪面」為主，建議重新修訂。

4 計量與計價

鋪面研究室


Introduction to Ecological Engineering Methods
德　國
台北市


Introduction to Ecological Engineering Methods
德　國
台北市

鋪面改良：透水性路面

在林間小徑、步道卻鋪設不具透水性的舖面！

03 5186715

簡報完畢，敬請指教！

網頁：http://www.chu.edu.tw/~ctc

鋪面研究室


鋪面研究室

交通部運輸研究所九十六年度合作研究計畫

MOTC-IOT-96-H1DB004

透水混凝土應用於交通工程之研究

教育訓練簡報

計畫主持人： 李明君 副教授

協同主持人： 顏聰 教授、邱垂德 副教授

執行單位 ： 朝陽科技大學營建工程系

中華民國 九十六 年 十 月 二十五 日

報告大綱

- 壹、研究內容與工作項目
- 貳、建立透水混凝土之製程與試驗標準
- 參、驗證透水混凝土之最適配比
- 肆、路面相關交通工程進行現地施作，以驗證透(排)水效果
- 伍、小結

壹、研究內容與工作項目如下：

1)建立透水混凝土之製程與試驗標準。
2)驗證透水混凝土之最適配比。
3)路面、擋土牆或邊坡等相關交通工程，擇一進行現地施作，以驗證透(排)水效果。
4)評估透水混凝土應用於交通工程設施之種類及適用性。
5)舉辦教育訓練課程。

透水混凝土重要文獻:

1. ACI 522R-06 Pervious Concrete
2. NRMCA Pervious Concrete Pavement
3. PCA Pervious Concrete Pavement

Concrete Thinking
for a sustainable world

貳、建立透水混凝土之製程與試驗標準

本單元可分為建立透水混凝土製程與建立透水混凝土試驗標準兩部份，經由專家座談(96/6/13)書面審查後，再登錄於期中報告第三章*建立透水混凝土製程與試驗標準*與附錄*專家座談會審查意見答覆書*。

3-1 建立透水混凝土之製程

1. 透水混凝土之組成材料
2. 透水混凝土之配比
3. 透水混凝土之拌合輸送澆置養護

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，茲以鋪面工程作為本研究主要說明，詳停車場現地施作 。

3-2 建立透水混凝土之試驗標準

3.2.1 透水混凝土施工前檢試驗

3.2.2透水混凝土施工中檢試驗

3.2.3透水混凝土施工完成後之試驗

參、驗證透水混凝土之最適配比

最適配比(第一年成果)的建議為水灰比0.35、骨材粒徑0.48cm、填充孔隙百分比80%，其透水係數0.1cm/s、28天抗壓強度＝214.2kg/cm^2 (21MPa)。

試驗材料配比(1/2)

0.35 -A- 1:4.5

水灰比

水/水泥

骨材尺寸

19 mm (A)

4.8 mm (B)

漿骨比

水泥:粗骨材

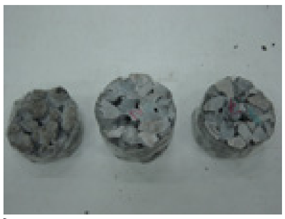
註：本實驗4種配比，每一種配比又分為輕搗實(Y)、重搗實(X)。

試驗材料配比(2/2)

配比	骨材粒徑	水灰比	粗骨材	水泥	水
(0.35-A-1:4)	19 mm	0.35	1524	381	133.35
(0.35-A-1:4.5)	19 mm	0.35	1524	338.67	118.53
(0.35-B-1:4)	4.8 mm	0.35	1311	327.75	114.71
(0.35-B-1:4.5)	4.8 mm	0.35	1311	291.33	110.97

- 配比：水灰比-骨材粒徑-水泥:粗骨材(又分重-X、輕-Y搗實)
- 備註：1單位重量(kg/m^3)

試驗項目



- 新拌混凝土單位重與孔隙試驗
- 抗壓試驗

  尺寸大小：Φ10cm×20cm

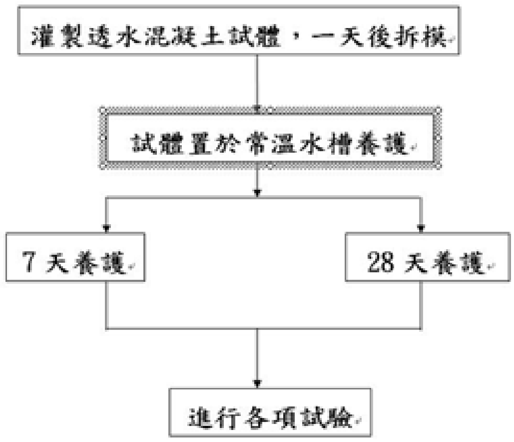
- 抗彎試驗

  尺寸大小： 15cm×15cm×53cm

- 透水試驗

把Φ10cm×20cm試體切3層分別為上、中、下。

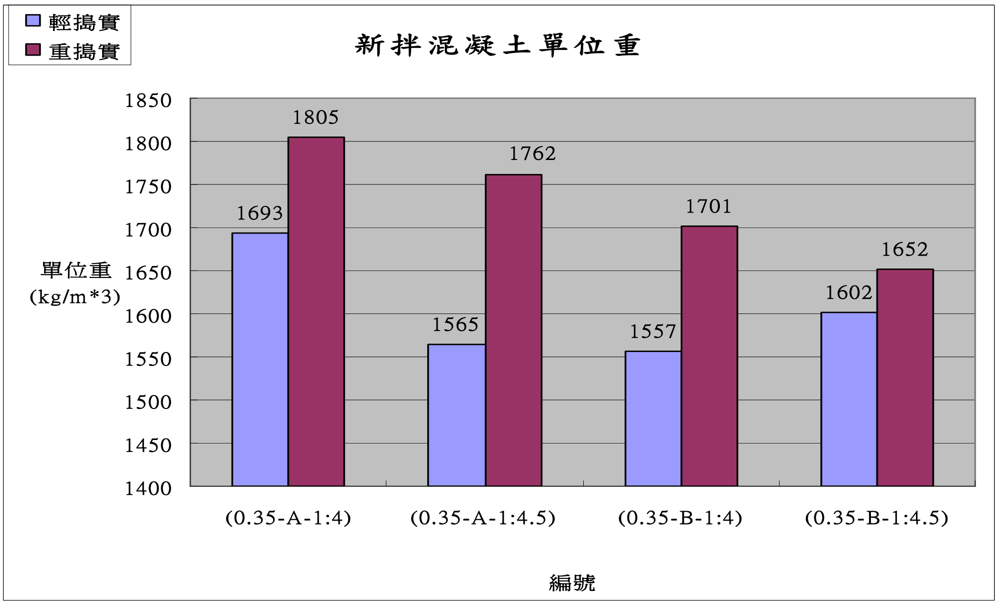
試體養護流程



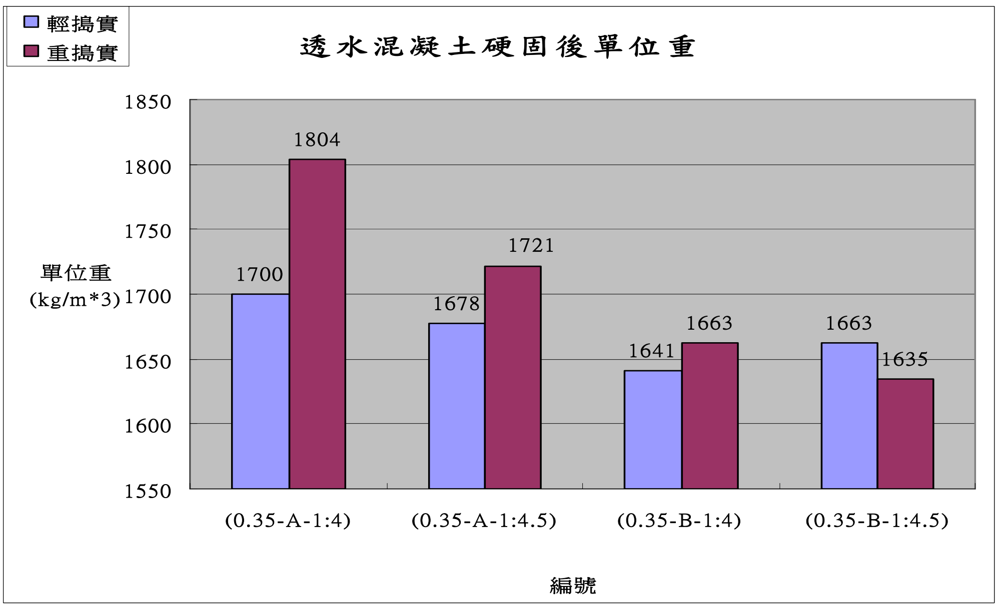
結果與討論

- 新拌混凝土單位重
- 透水混凝土硬固後單位重與孔隙率結果討論
- 透水混凝土抗壓、抗彎試驗結果討論
- 透水混凝土透水試驗結果討論
- 預拌廠試拌
- **路面相關交通工程進行現地施作**
- 综合討論

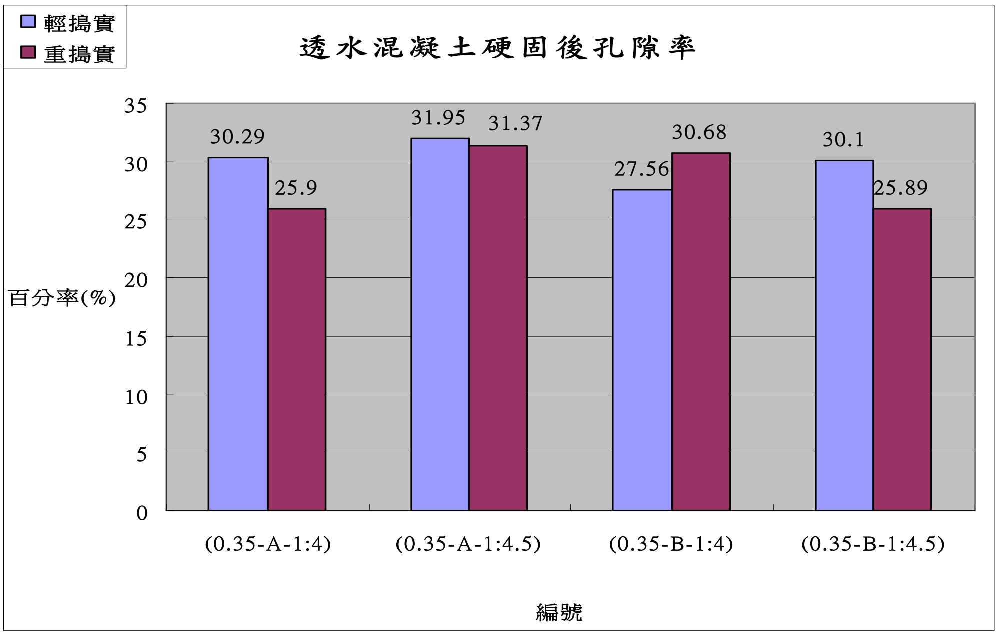
新拌混凝土單位重



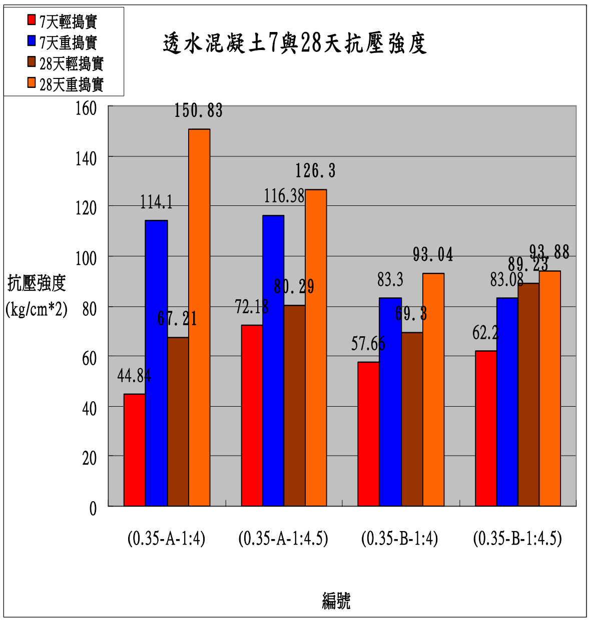
透水混凝土硬固後單位重結果



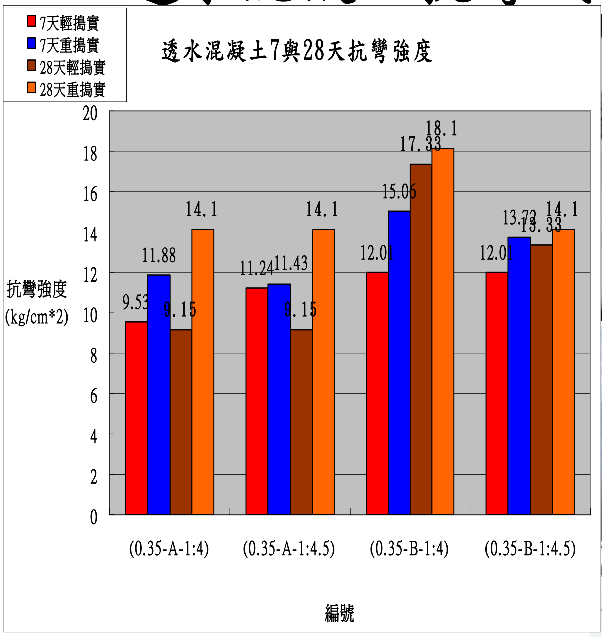
透水混凝土硬固後孔隙率結果討論



透水混凝土抗壓試驗結果討論

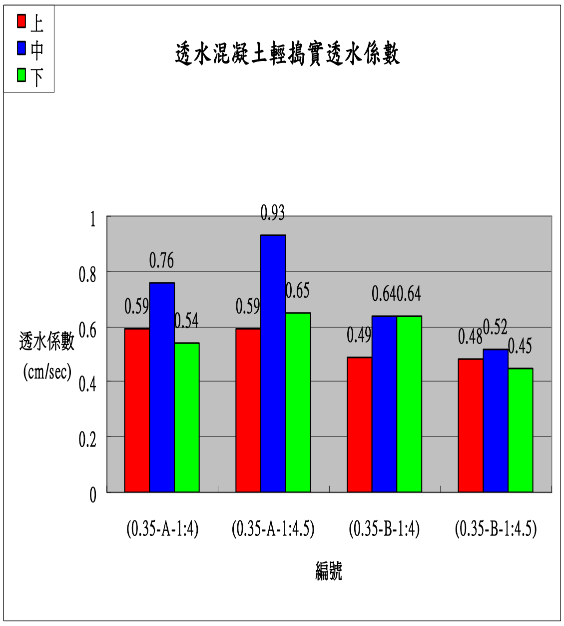


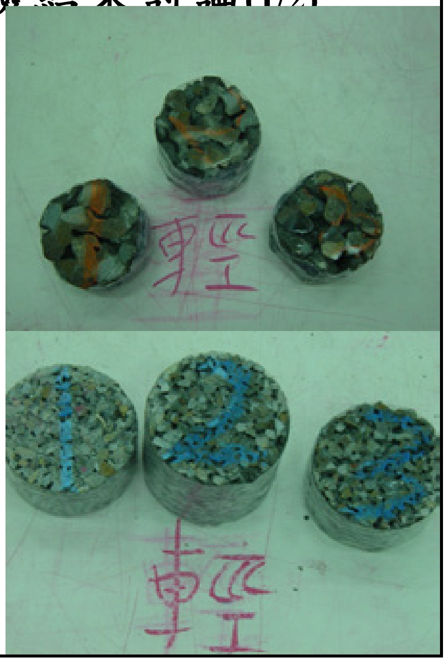
透水混凝土抗彎試驗結果討論



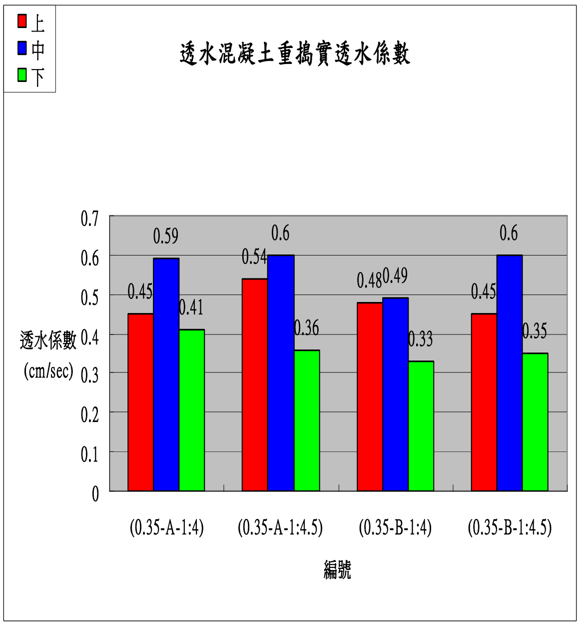
透水混凝土透水試驗

透水混凝土透水試驗結果討論(1/2)





透水混凝土透水試驗結果討論(2/2)



驗證最適配比

本研究之八種配比與第一期研究之最適配比(水灰比0.35、透水係數0.1cm/s、28天抗壓強度21MPa)有兩大差異，首先是第一期研究之最適配比未符合ACI 522R-06建議之透水係數範圍介於0.16至1.22 cm/s；其次是第一期之最適配比之單位重約2044 kg/m^{3}較本研究之試體高甚多，因此相對本研究之試體強度較低。

驗證最適配比

本研究驗證最佳透水混凝土的配比，實驗結果透水係數大約為第一期研究透水係數0.1cm/s 之3~6倍，但抗壓強度不足，為要提升試體強度又要使其透水係數符合ACI 522R-06建議範圍，遂行大幅降低配比之水灰比至0.30以下、使用強塑劑與改用品質佳之粗骨材進行試拌。

實驗室試拌配比

編號	水灰比	骨材粒徑 (mm)	粗骨材	水泥	水	強塑劑
0.25-B-1:4 X(Y)	0.25	4.8	1311	328	82	3.28

註：每一配比又分為X=重搗實與Y=輕搗實，單位=kg/m^3

實驗室試拌配比試驗結果

編號	水灰比	骨材粒徑 (mm)	28天抗壓強度 (MPa)	透水係數K (cm/sec)
0.25-B-1:4 X	0.25	4.8	16.3	0.29
0.25-B-1:4 Y	0.25	4.8	8.2	0.42

註：X=重搗實與Y=輕搗實

預拌廠試拌試驗配比(骨材不同，較佳)

配比	水灰比	粗骨材	水泥	水	強塑劑
(0.35-B-1:4)	0.35	1498	333	117	0
(0.28-B-1:4)	**0.28**	**1498**	**333**	**95**	**1.66**

- 配比：水灰比-骨材粒徑-水泥:粗骨材**(粗骨材不同)**
- 分為重搗實(X)、輕搗實(Y)
- 備註：1單位重量(kg/m^3)

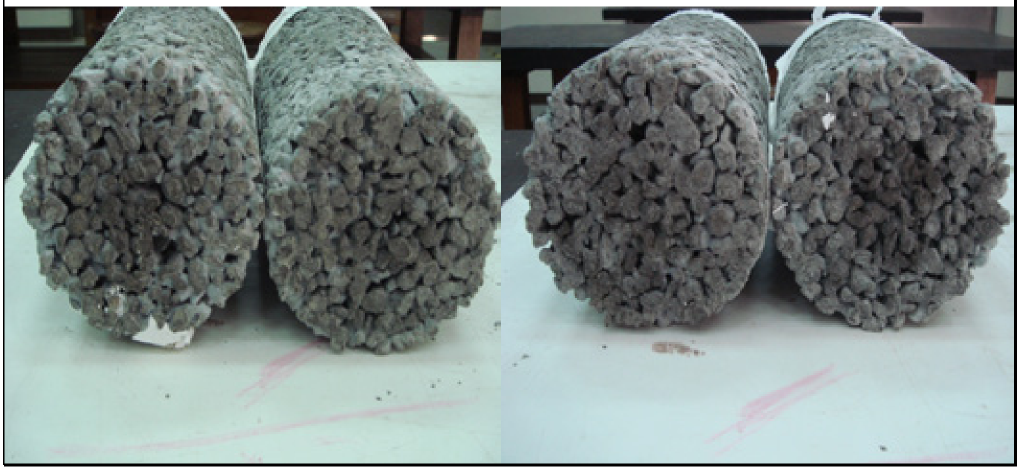
比較適合配比綜合試驗結果

配比	水灰比	骨材粒徑 (mm)	f'$_c$ (MPa)	單位重 **(kg/m^3)**	透水係數 (cm/s)
0.28-B-1:4-X*	0.28	4.8	20.8**	2018	0.02
0.28-B-1:4-Y*	0.28	4.8	17.7**	1962	0.30
0.25-B-1:4-X	0.25	4.8	16.3	1743	0.29
0.35-B-1:4-X	0.35	4.8	9.1	1663	0.43
先期最適配比	0.35	4.8	21.0	2044	0.10
ACI 522R-06配比	**0.25~0.45**	~	**2.8 ~ 28.0**	**1600 ~ 2000**	**0.16 ~ 1.22**

*為預拌廠試拌試驗材料配比；**為7天抗壓強度，其餘為28天抗壓強度。

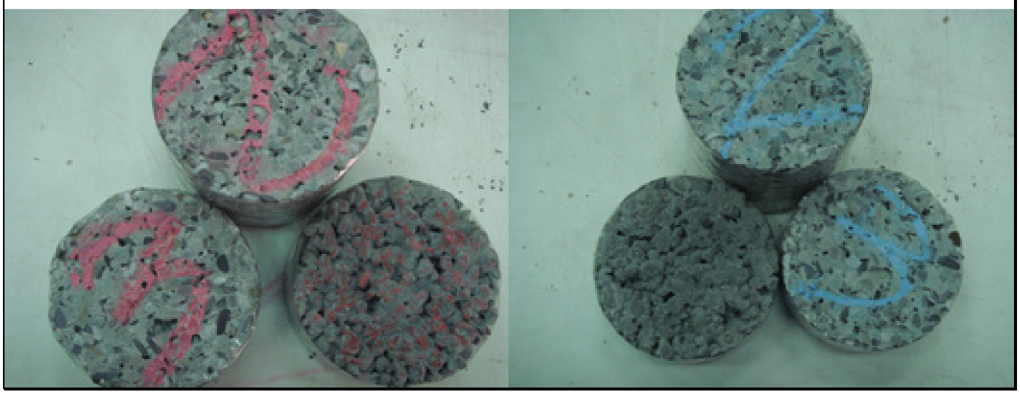
最適配比照片-1

配比	水灰比	骨材粒徑 (mm)	f'$_c$ (MPa)	單位重 (kg/m^3)	透水係數 (cm/s)
0.28-B-1:4-X*	0.28	4.8	20.8**	2018	0.02
0.28-B-1:4-Y*	0.28	4.8	17.7**	1962	0.30



最適配比照片-2

配比	水灰比	骨材粒徑 (mm)	f'$_c$ (MPa)	單位重 (kg/m^3)	透水係數 (cm/s)
0.28-B-1:4-X*	0.28	4.8	20.8**	2018	0.02
0.28-B-1:4-Y*	0.28	4.8	17.7**	1962	0.30



肆、路面相關交通工程進行現地施作，以驗證透(排)水效果為何

驗證透（排）水效果:(擇一)

1. 現場透水量試驗，或者
2. 現場鑽心試體透水試驗，或者
3. 現場製作圓柱試體於實驗室試驗其透水係數。

現場透水量試驗




1.預拌混凝土廠試作其設計透水混凝土配比：**w/c=0.31,**
f'c28=2000psi,
透水係數約**0.16cm/s**↑

2.路面相關交通工程進行現地施作：決定選擇在本校停車場進行3種不同滾壓(滾筒)汽車停車位。

現地施作，開挖深度約**30**公分，共計**6**格停車位

拌合料預拌車卸料

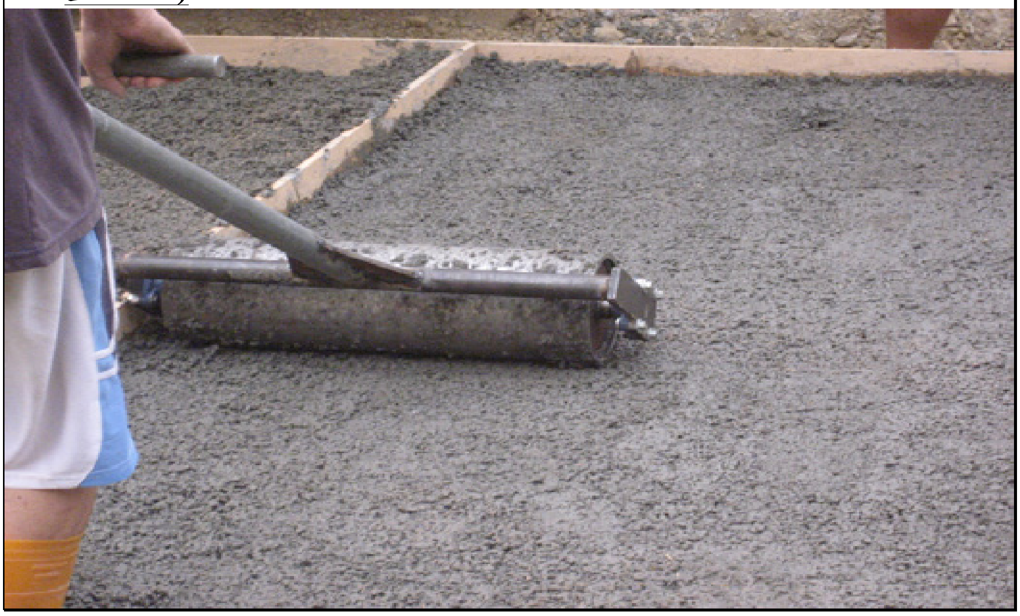
拌合料卡車卸料

大滾筒(照片)壓密大區域透水混凝土:

一般3.7m (12 ft)道面寬所使用大滾筒之重量約是270kg至320kg (600至700lb)

小滾筒(照片)壓密小區域透水混凝土:

小區域鋪面可使用較小滾筒之重量大約是90kg至140kg (200至300lb)



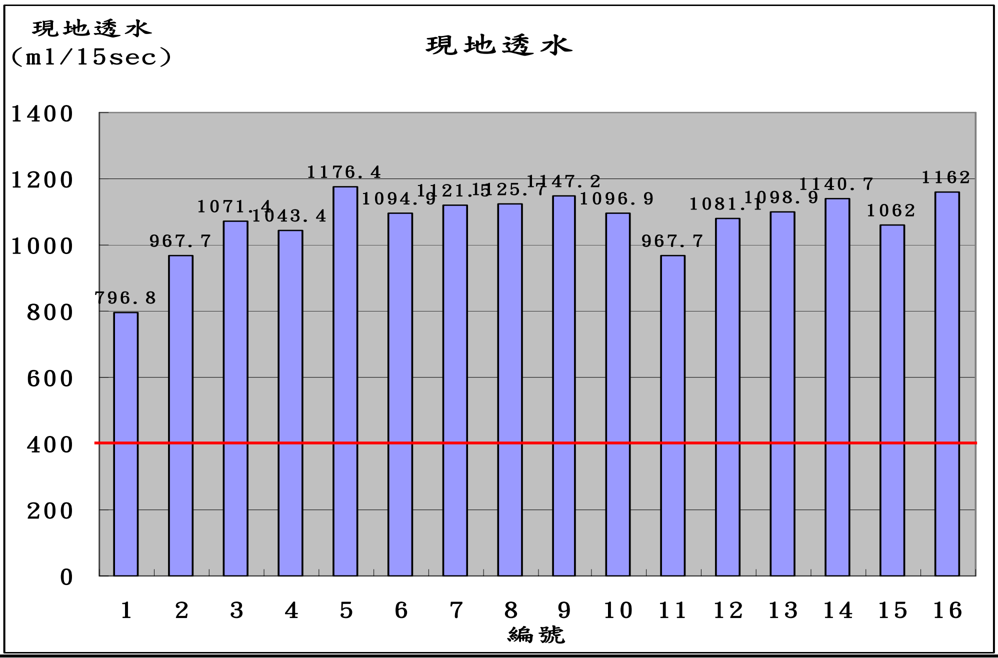
拌合料滾壓完成面

1.塑膠布覆蓋養護透水混凝土鋪面
2.現地透水混凝土試体

透水混凝土鋪面驗證水龍頭MTV

現地透水量試驗MTV

現地透水混凝土28天



鑽心試体28天抗壓強度

鑽心試體	上層(kg/cm2)
#1停車格	192
#2停車格	180
#3停車格	105
#4停車格	—
#5停車格	—
#6停車格	117

雨天(28天)現地透水混凝土停車

伍、小結(1/4)

- (1) 典型透水混凝土其單位重介於100 lb/ft^{3}與125 lb/ft^3 (1600 kg/m^{3}與2000 kg/m^3)之間；本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體之單位重介於1630至1805 kg/m^{3}間，試體合乎典型透水混凝土單位重之間，上述試體硬固後經目測檢視垂流現象不明顯。

柒、小結(2/4)

- (2)典型透水混凝土透水係數範圍介於0.16至1.22 cm/s之間；本研究所試驗之八種不同透水混凝土試體之透水係數(試體切割成 上、中與下三層進行測試)介於0.33至0.93 cm/s之間符合上述典型透水混凝土透水係數範圍。
- (3)典型透水混凝土其孔隙率範圍為18%至35%之間，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±4%，屬於一般強度低透水混凝土；另一組孔隙率為30±5%，屬於低強度高透水混凝土。

柒、小結(3/4)

- (4) 有關路面現地施作，在本校停車場鋪築六個透水混凝土停車格滲透性相當良好，其平均約為1000ml/15sec，均可滿足工地透水試驗標準400ml/15sec以上範圍要求。
- (5)新拌透水混凝土停車格鋪築現地施作，原設計使用震棒搗實，結果不彰無搗實效果，造成鋪面經滾壓後，混凝土各層夯實度(孔隙率)與抗壓強度各不相同， 建議透水混凝土鋪面需要適度分層(滾筒或振動刮板)搗實。

柒、小結(4/4)

- (6)在本校停車場停車格鋪築3種不同滾壓之透水混凝土鋪面， 使用之配比 0.31-B-1:4進行試鋪， 驗證3種滾壓停車格其透水試驗效果均良好，可滿足車輛承載需求，故可應用於一般停車場或低交通量路面工程。
- (7)環保透水混凝土應多推廣，若要使用於高速公路或高交通量路面工程應進行詳細評估與配比設計。

教育訓練海報

教育訓練報到

開訓致詞

課程進行

附錄 4

期末簡報

交通部運輸研究所九十六年度合作研究計畫
MOTC-IOT-96-H1DB004

透水混凝土應用於交通工程之研究

期末簡報

計畫主持人： 李明君 副教授
協同主持人： 顏聰 教授、邱垂德 副教授
執行單位 ： 朝陽科技大學營建工程系

中華民國 九十六 年 十 一月 十四 日

報告大綱

- 壹、研究內容與工作項目
- 貳、建立透水混凝土之製程與試驗標準
- 參、驗證透水混凝土之最適配比
- 肆、路面相關交通工程進行現地施作，以驗證透(排)水效果
- 伍、評估透水混凝土應用於交通工程設施之種類及適用性
- 陸、教育訓練課程
- 柒、結論建議(預期成果自評)

壹、研究內容與工作項目如下：

1)建立透水混凝土之製程與試驗標準。
2)驗證透水混凝土之最適配比。
3)路面、擋土牆或邊坡等相關交通工程，擇一進行現地施作，以驗證透(排)水效果。
4)評估透水混凝土應用於交通工程設施之種類及適用性。
5)舉辦教育訓練課程。

透水混凝土重要文獻:

1. ACI 522R-06 Pervious Concrete
2. NRMCA Pervious Concrete Pavement
3. PCA Pervious Concrete Pavement

Concrete Thinking
for a sustainable world

貳、建立透水混凝土之製程與試驗標準

本單元可分為建立透水混凝土製程與建立透水混凝土試驗標準兩部份，經由學者專家書面審查與期中報告後，再登錄於第三章***建立透水混凝土製程與試驗標準***。

參、驗證透水混凝土之最適配比

最適配比(第一年成果)的建議為水灰比0.35、骨材粒徑0.48cm、填充孔隙百分比80%，其透水係數0.1cm/s、28天抗壓強度 = 214.2kg/cm^2 (21MPa)。

試驗材料配比(1/2)

0.35 -A- 1:4.5

水灰比

水/水泥

骨材尺寸

19 mm (A)

4.8 mm (B)

漿骨比

水泥:粗骨材

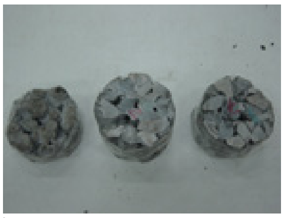
註：本實驗4種配比，每一種配比又分為輕搗實(Y)、重搗實(X)。

試驗材料配比(2/2)

配比	骨材粒徑	水灰比	粗骨材	水泥	水
(0.35-A-1:4)	19 mm	0.35	1524	381	133.35
(0.35-A-1:4.5)	19 mm	0.35	1524	338.67	118.53
(0.35-B-1:4)	4.8 mm	0.35	1311	327.75	114.71
(0.35-B-1:4.5)	4.8 mm	0.35	1311	291.33	110.97

- 配比：水灰比-骨材粒徑-水泥:粗骨材(又分重-X、輕-Y搗實)
- 備註：1單位重量(kg/m^3)

最適配比試驗項目



- 新拌混凝土單位重與孔隙試驗
- 抗壓試驗

  尺寸大小：Φ10cm×20cm

- 抗彎試驗

  尺寸大小： 15cm×15cm×53cm

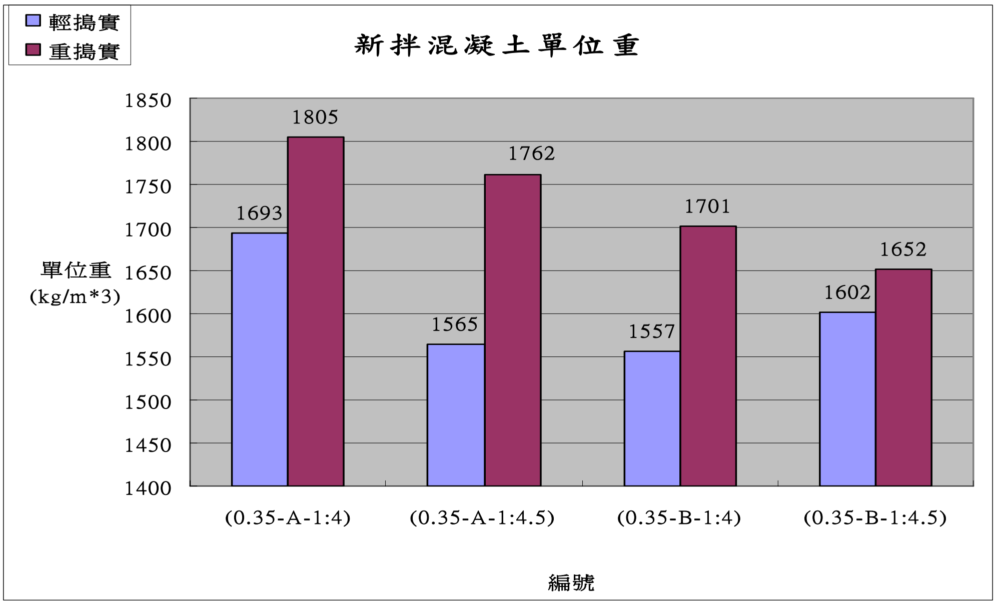
- 透水試驗

把Φ10cm×20cm試體切3層分別為上、中、下。

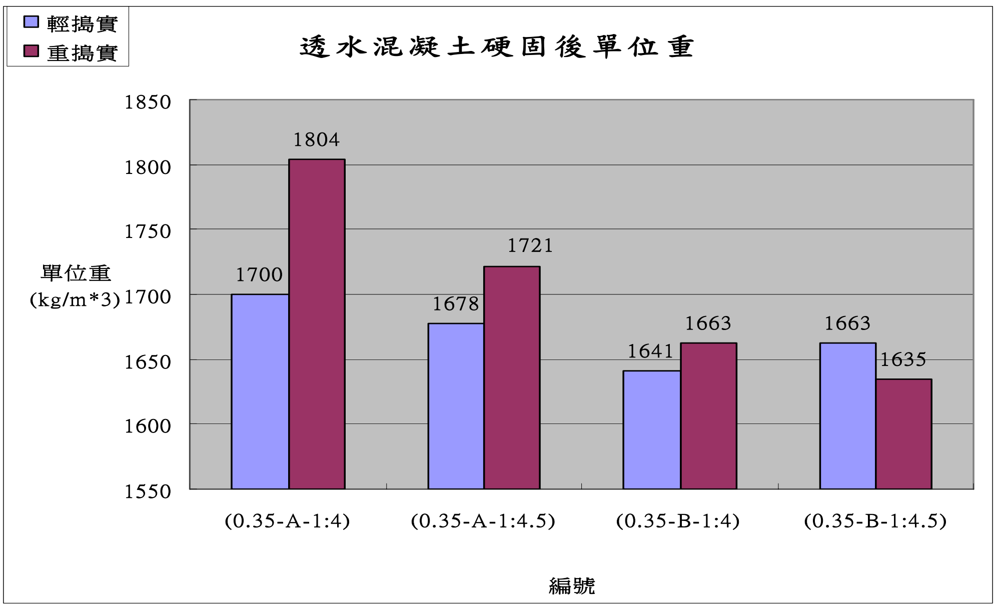
最適配比試驗結果與討論

- 新拌混凝土單位重
- 透水混凝土硬固後單位重與孔隙率結果
- 透水混凝土抗壓、抗彎試驗結果
- 透水混凝土透水試驗結果
- 配比綜合試驗結果

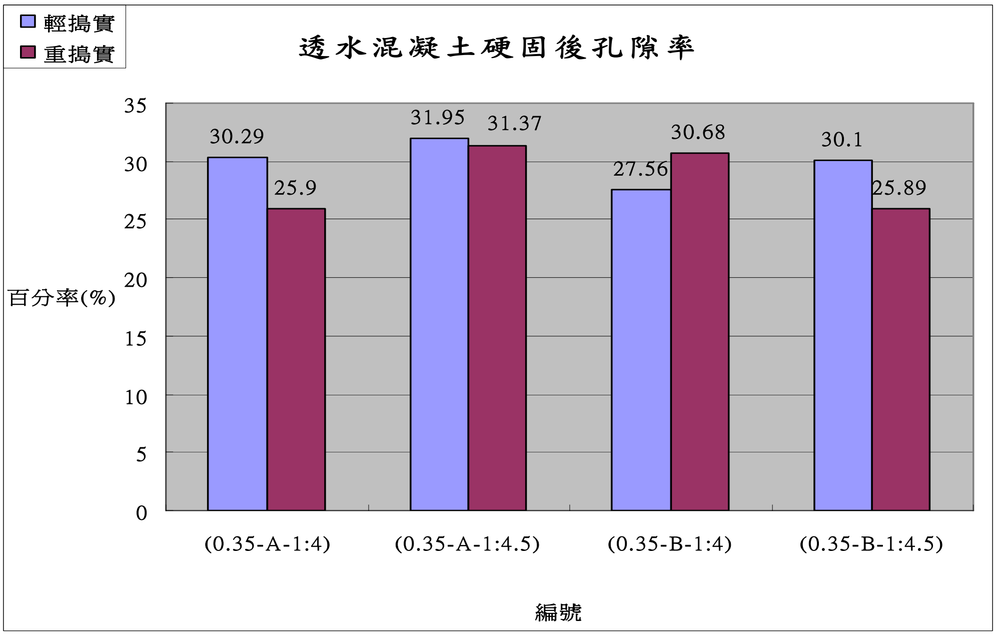
新拌混凝土單位重



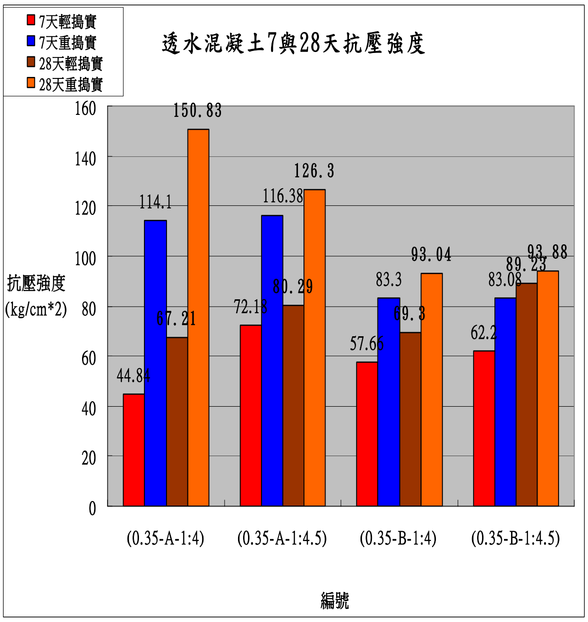
透水混凝土硬固後單位重結果



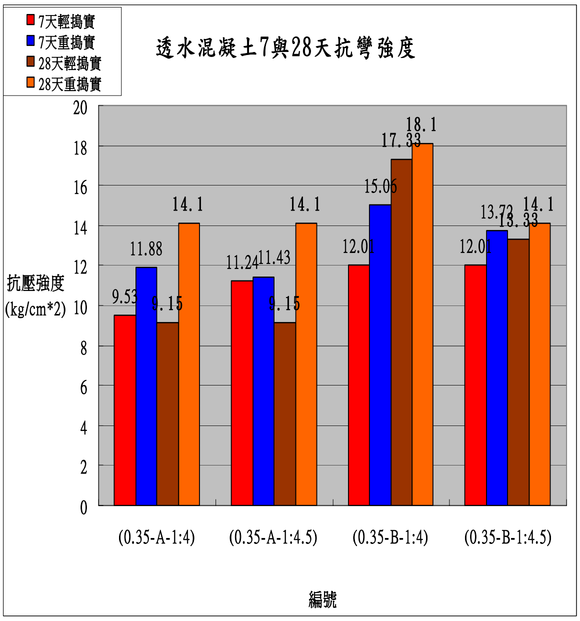
透水混凝土硬固後孔隙率結果討論



透水混凝土抗壓試驗結果討論

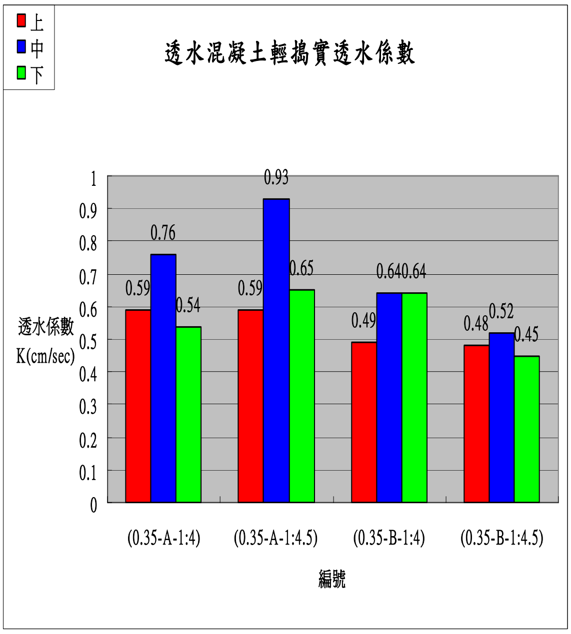


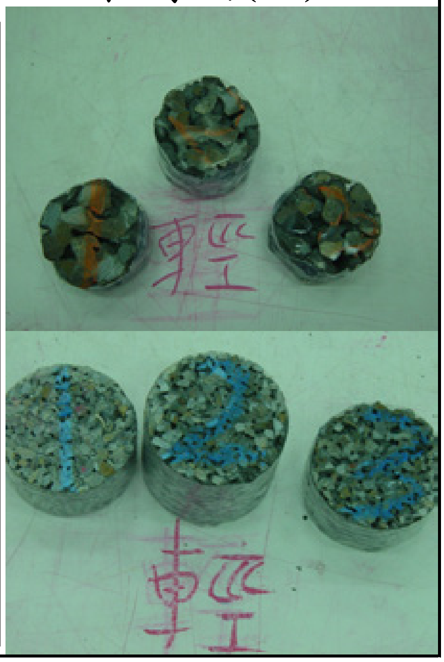
透水混凝土抗彎試驗結果討論



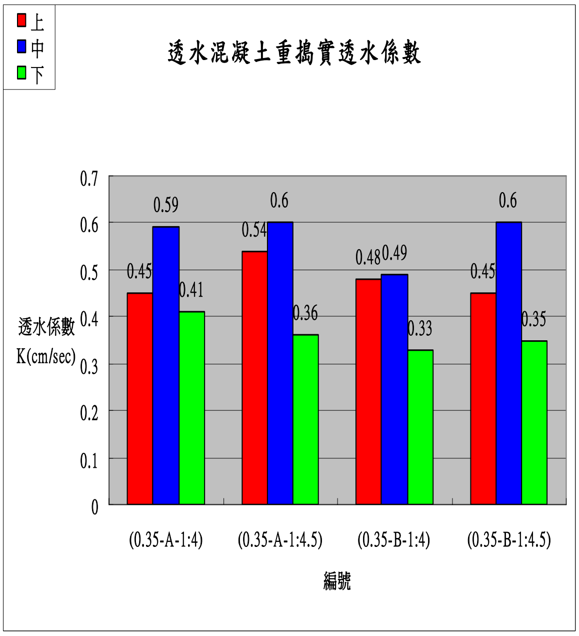
透水混凝土透水試驗

透水混凝土透水試驗結果討論(1/2)





透水混凝土透水試驗結果討論(2/2)



驗證最適配比

本研究之八種配比與第一期研究之最適配比(水灰比0.35、透水係數0.1cm/s、28天抗壓強度21MPa)有兩大差異，首先是第一期研究之最適配比未達到ACI 522R-06建議之透水係數範圍介於0.16至1.22 cm/s；其次是第一期之最適配比之單位重約2044 kg/m^{3}較本研究之試體高甚多，因此相對本研究之試體強度較低。

驗證最適配比

本研究驗證最佳透水混凝土的配比，實驗結果透水係數大約為第一期研究透水係數0.1cm/s 之3~6倍，但抗壓強度不足，為要提升試體強度又要使其透水係數符合ACI 522R-06建議範圍，逕行大幅降低配比之水灰比至0.30以下、使用強塑劑與改用品質佳之粗骨材進行試拌。

實驗室試拌配比

編號	水灰比	骨材粒徑 (mm)	粗骨材	水泥	水	強塑劑
0.25-B-1:4 X(Y)	0.25	4.8	1311	328	82	3.28

註：每一配比又分為X=重搗實與Y=輕搗實，單位=kg/m^3

實驗室試拌配比試驗結果

編號	水灰比	28天抗壓強度 (MPa)	透水係數 (cm/sec)
0.25-B-1:4X	0.25	16.3	0.29
0.25-B-1:4Y	0.25	8.2	0.42

註：X=重搗實與Y=輕搗實

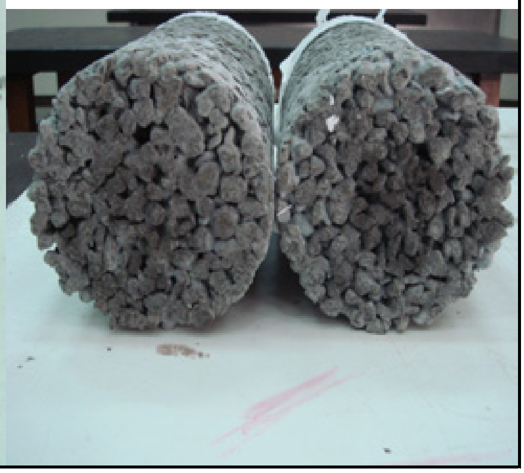
預拌廠粗骨材配比(骨材不同，較佳)

配比	水灰比	粗骨材	水泥	水	強塑劑
(0.28-B-1:4)*	**0.28**	**1498**	**333**	**95**	**1.66**

- 配比：預拌廠試拌粗骨材來源不同(骨材粒徑4.8mm)

驗結果(7天齡期)

徑 (m)	7天 f'c (MPa)	單位重 (kg/m^3)	透水係數 (cm/s)
	20.8**	2018	0.02
	17.7**	1962	0.30



比較適合配比綜合試驗結果

配比	水灰比	骨材粒徑 (mm)	f'c (MPa)	單位重 (kg/m³)	透水係數 (cm/s)
0.28-B-1:4-X*	0.28	4.8	20.8**	2018	0.02
0.28-B-1:4-Y*	0.28	4.8	17.7**	1962	0.30
0.25-B-1:4-X	0.25	4.8	16.3	1743	0.29
0.35-B-1:4-X	0.35	4.8	9.1	1663	0.43
先期最適配比	0.35	4.8	21.0	2044	0.10
ACI 522R-06配比	0.25~0.45	~	2.8～28.0	1600～2000	0.16～1.22

*為預拌廠試拌試驗材料(粗骨材不同)；**為7天抗壓強度，其餘為28天抗壓強度(X為重搗實X、Y為輕搗實)。

肆、路面相關交通工程進行現地施作，以驗證透(排)水效果為何

驗證透（排）水效果:(擇一)

1. 現場透水量試驗，
2. 現場鑽心試體透水試驗，
3. 現場製作圓柱試體於實驗室試驗其透水係數。

1.預拌混凝土廠試作：
設計透水混凝土配比：w/c=0.31, $f'c_{28}$=2000psi,
透水係數約0.16cm/s↑

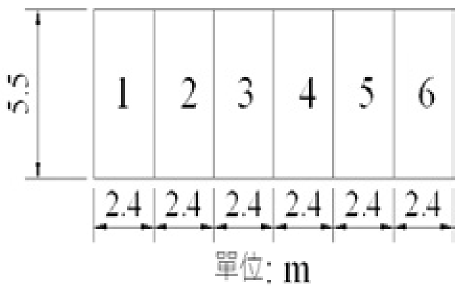
2.路面相關交通工程進行現地施作：決定選擇在本校停車場進行3種不同滾壓(滾筒)汽車停車位。

拌合料碎石

廠拌配合比

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）
0.31	4.8	1498	344	105	2.3

朝陽科技大學操場後面之第二停車場停車格示意圖



現地施作，開挖深度約**30**公分，共計**6**格停車位

現地施作，開挖深度**30**公分後，鋪設約**5~10**公分礫石

拌合料預拌車卸料

拌合料卡車卸料

3種不同滾壓滾筒：

大滾筒(照片)壓密大區域透水混凝土：

一般3.7m (12 ft)道面寬所使用大滾筒之重量約是270kg至320kg (600至700lb)

小滾筒(照片)壓密小區域透水混凝土:

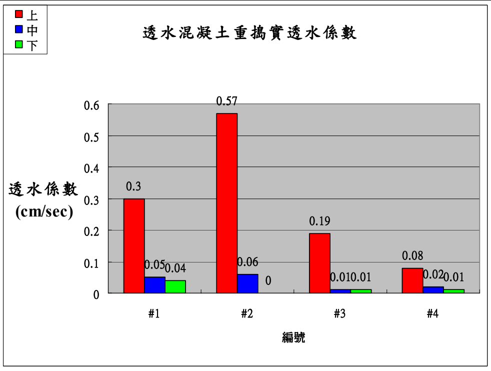
小區域鋪面可使用較小滾筒之重量大約是90kg至140kg (200至300lb)

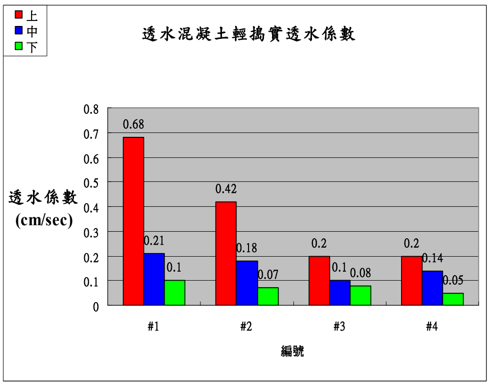
肆、路面相關交通工程進行現地施作，以驗證透(排)水效果爲何

1. 拌合料滾壓完成面

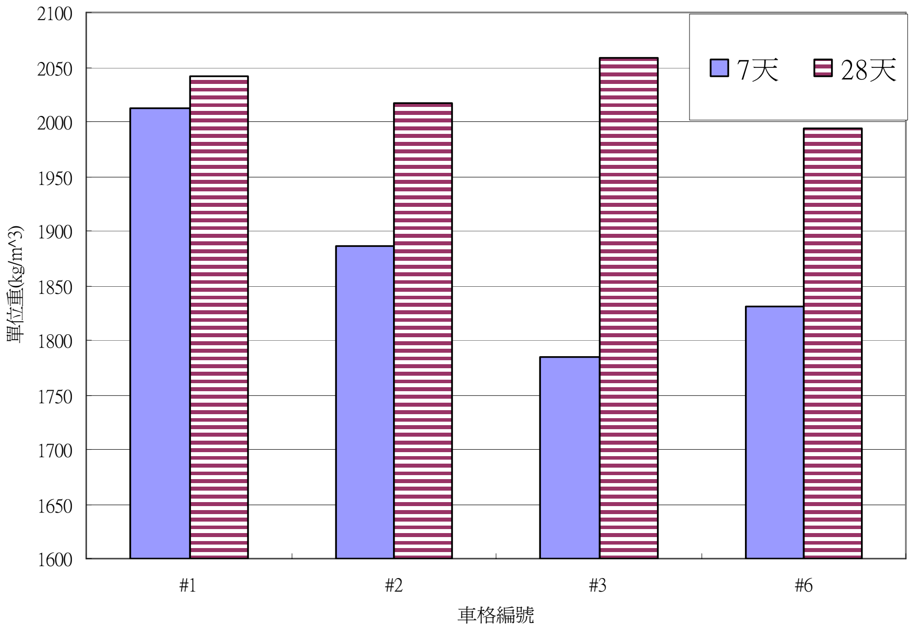
2. 塑膠布覆蓋養護透水混凝土鋪面

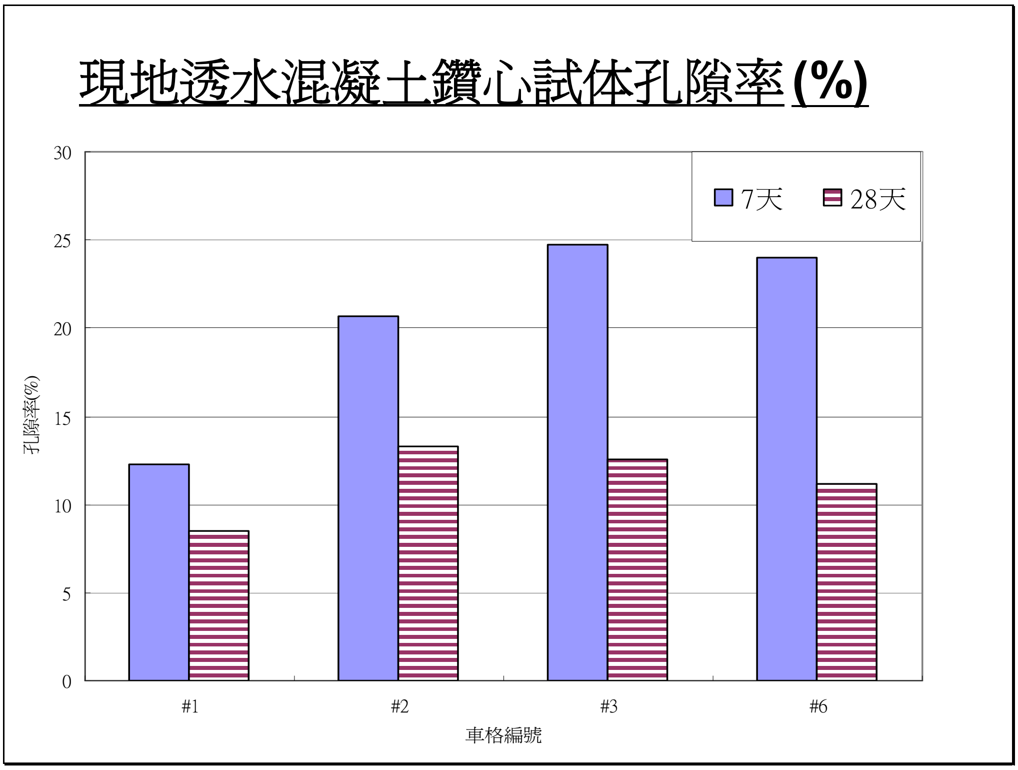
1. 現地透水混凝土試体上中下三層透水係數(K在0 ~ 0.68 cm/sec間)變化差異相當大，透水係數由上層往中下層遞減，下層混凝土有些垂流現象產生。

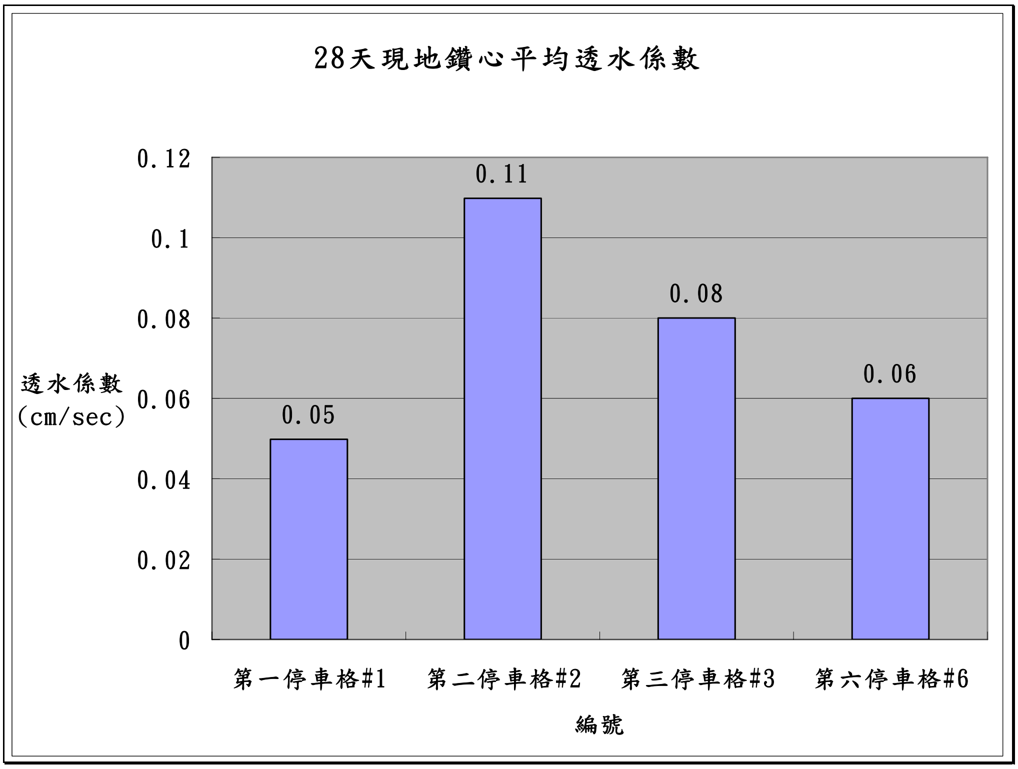




現地透水混凝土鑽心試体單位重(kg/m³)

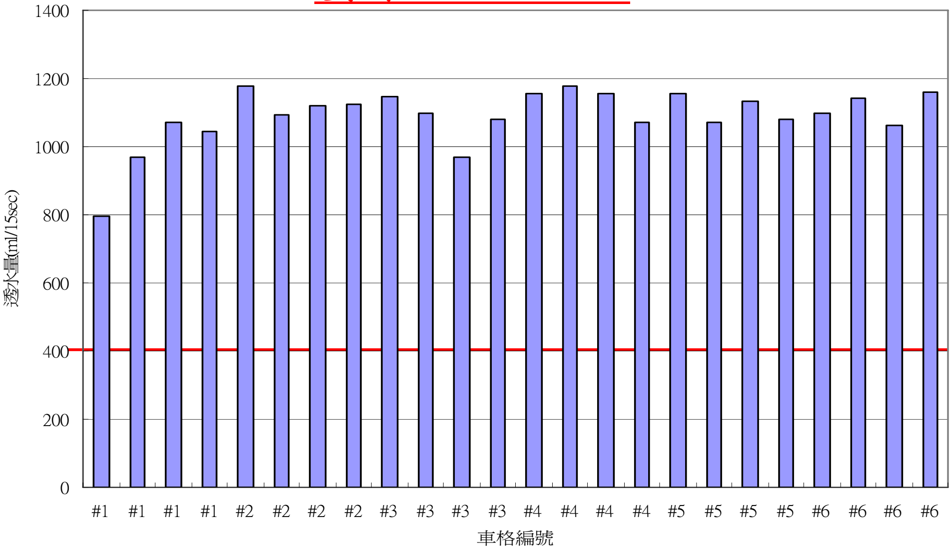



現地透水混凝土鑽心試体孔隙率(%)
30
25
20
15
10
5
0
孔隙率(%)
7天
28天
#1
#2
#3
#6
車格編號


28天現地鑽心平均透水係數
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
透水係數
(cm/sec)
0.05
0.11
0.08
0.06
第一停車格#1
第二停車格#2
第三停車格#3
第六停車格#6
編號

現地透水量試驗MTV

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。



透水混凝土鋪面驗證水龍頭MTV

鑽心試体28天抗壓強度(kg/cm^2)

鑽心試體	上層(下層)
#1停車格	192 (106)
#2停車格	146 (181)
#3停車格	106 (82)
#4停車格	—中間斷裂
#5停車格	—中間斷裂
#6停車格	118 (76)

雨天(28天)現地透水混凝土停車

現地混凝土鋪面試驗問題檢討

1. 本次透水混凝土試鋪，因預拌廠骨材無法事先清倉，導致生產製程無法自動計量，改為手動操作，而產生拌和誤差(無此種透水混凝土程序書管制之)。
2. 第一次供貨時使用攪拌車搬運，結果造成卸出困難之問題。第二次供貨時使用傾卸卡車搬運，則無卸出困難之問題。
3. 透水混凝土單價是否較高？

現地混凝土鋪面試驗檢討與對策(1/3)

1. 經由此次經驗，可知需事先將骨材進料倉，讓生產自動計量拌和，若需改為手動操作時，應制定程序書管制之。拌和機操作人員對於混凝土坍度之目視判斷及掌控能力應在±1.5公分內。
2. 若透水混凝土使用攪拌車搬運時，應考慮運輸時間與氣溫所造成新拌混凝土坍度損失之問題，必要時應摻用緩凝劑以延長有效時限；若仍有卸出困難之問題，則應使用配有攪拌器(Agitator)之卡車或車載式拌和機運送。

現地混凝土鋪面試驗檢討與對策(2/3)

3. 低坍度透水混凝土使用傾卸卡車搬運，但新拌混凝土易因水份蒸發而乾燥，故搬運中應以聚乙烯(PE)布將混凝土表面蓋住，以防止混凝土水份蒸發流失。
4. 將來量產時，現今拌合廠若有足夠料倉，按照規範程序執行，應都可以生產出品質穩定之透水混凝土。

現地混凝土鋪面試驗檢討與對策(3/3)

5.應防止工地排水及重機具進入透水鋪面區；營建過程的施工交通載重不得駛入透水鋪面。

6.土壤透水性須加驗證，一般建議透水率0.5in/hr（13mm/hr），土層厚4ft（1.2m以上）。

- 材料成本分析

	水泥 kg/m³	粗骨材 kg/m³	粗骨材 kg/m³	水 kg/m³	SP kg/m³	材料單價 元/m³
透水混凝土 w/c=0.31	344	1498	0	105	2.3	1950
普通混凝土 3000Psi	308	770	1100	200	2.0	1800

1.比較之基準係以28天抗壓強度爲21MPa。
2.各材料計算時不含運費。

透水混凝土可以不使用細骨材，粗骨材使用單一粒徑越級配用量較大，依據預拌廠計算本次透水混凝土配比之單價約與一般**3000 Psi**混凝土接近。

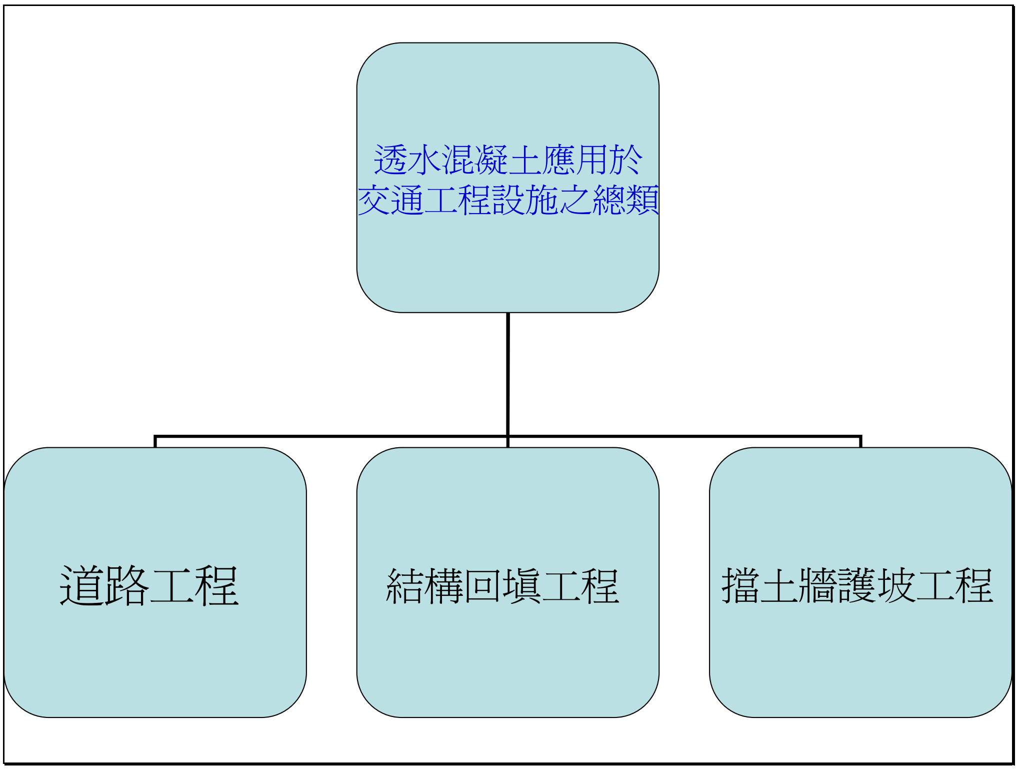
第七章　評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性

– 透水混凝土應用於交通工程設施之總類
– 交通建設適用透水混凝土之項目

透水混凝土之應用範圍(ACI 522R-06)

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、網球場及動物園區等之面層
8) 橋樑基座（embankments）
9) 游泳池地版
10) 海濱結構和防波堤(seawall)
11) 污水處理場的污泥床
12) 太陽能儲存系統
13) 人工漁礁

- 通常，上述透水混凝土都不加鋼筋補強



交通建設適用透水混凝土之項目

道路工程適用透水混凝土之項目

可用於道路、人行道、停車場、路肩等鋪面工程之面層、透水基底層及邊緣排水，國內常見相關透水構造之工程或工法為塊狀鋪面拼接、鏤空鋪面及透水磚鋪面等，以結構之空隙提供水份進出。

透水混凝土鋪面VS傳統混凝土鋪面之優點：

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

擋土牆護坡工程
適用透水混凝土之項目

可用於擋土牆、護坡、護岸、邊坡保護、防波堤、海濱結構和人工漁礁，國內常見相關透水構造之工程或工法有石籠、格框牆、加勁牆、堆砌石、框格植生、地工蜂巢、及抗沖蝕網等，以結構之空隙提供植生及小型生物進出通道。

交通建設適用透水混凝土之項目

結構回填工程
適用透水混凝土之項目

可用於橋台基座、擋土牆及護岸等之背填，國內常用相關透水構造之工法為土石級配加人造透水管，以回填材料之孔隙提供排水功能，降低結構體背面水壓。若採用透水混凝土方式進行回填，其優點為施工迅速，施工後與橋台差異沈陷量小，排水功能較一般透水級配粒料佳。

透水混凝土技術推廣應用之可行性評估

- **1.**排水或保水功能
  - 將其應用於鋪面面層時可迅速地排水，減少路面的積水現象，若面層與底層形成一連續的通路，則水份可直接滲透進入土壤，具有保水的效能。
- **2.**水質淨化功能
  - 多孔混凝土可用於河川、封閉水域或港灣的海水淨化，其原理是應用塊石表面上易附著微生物，形成所謂的生物膜，消耗氧氣而分解水中的懸浮物質和已溶解的有機性污濁物，使水質達到淨化的目的。
- **3.**增加生物的棲息空間
  - 因表面有許多微小的連續孔隙，作為海洋復育的魚礁或藻礁石，可增加甲殼類或體型較小之魚種、魚苗之棲息場所，站在生態效果的觀點上，多孔性混凝土而表面凹凸的混凝土，都優於普通混凝土。
- **4.**植栽綠化功能
  - 多半利用體積較小的透水混凝土製品，再以組合的形式組織成結構單元體，除了材料本身具有為小孔隙可提供植物生長時根部的附著外，各材料間仍留有部分的較大組合間隙，可作為植物成長的空間。
- **5.**吸音功能
  - 多孔性混凝土直接暴露面對噪音源時，入射的聲波一部分被反射，一部分被材料吸收，另一部分則藉連通孔隙穿透，不若普通混凝土被反射的聲波較多，因此具有吸音的效能。若將其應用於交通工程上可降低交通噪音，如應用於道路鋪面或作為高速道路兩側的吸音板。

陸、教育訓練課程

課程內容(已於96/10/25辦理完畢)

1)透水混凝土性質與應用(顏聰教授)

2)透水混凝土在鋪面工程之應用(邱垂德副教授)

3)透水混凝土應用於交通工程之研究計畫(李明君副教授)

4)綜合座談會(高邦基處長)

柒、結論建議(1/5)

- (1) 典型透水混凝土其單位重介於100 lb/ft^3與125 lb/ft^3 (1600 kg/m^3與2000 kg/m^3)之間；本研究室內試驗之八種不同透水混凝土試體之單位重介於1630至1805 kg/m^3間，試體合乎典型透水混凝土單位重之間，上述試體硬固後經目測檢視垂流現象不明顯。

柒、結論建議(2/5)

- (2)典型透水混凝土透水係數範圍介於0.16至1.22 cm/s之間；本研究室內試驗之八種不同透水混凝土試體之透水係數(試體切割成 上、中與下三層進行測試)介於0.33至0.93 cm/s之間符合上述典型透水混凝土透水係數範圍。
- (3)典型透水混凝土其孔隙率範圍為18%至35%之間，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±4%，屬於一般強度低透水混凝土；另一組孔隙率為30±5%，屬於低強度高透水混凝土。

柒、結論建議(3/5)

- (4)新拌透水混凝土施工時，目視判斷是否垂流現象產生與其單位重試驗為透水混凝土現場品質管制首要的關卡。
- (5)日本規範排水性鋪裝技術指針之現場透水量試驗方法為柔性鋪面(透水瀝青混凝土)現地透水性能力評估，首次發現可用於剛性鋪面(透水混凝土)現地透水性能力評估與驗證。

柒、結論建議(4/5)

- (6)有關現地施作，在本校鋪築六個透水混凝土汽車停車格透水性良好，其現場透水量平均約為1000ml/15sec，均可滿足工地透水試驗規範標準400ml/15sec以上要求。
- (7)現地透水計算鋪面透水率約216.7 $L/m^2/min$，上述符合典型透水混凝土的透水率介於120 至320 $L/m^2/min$間。

柒、結論建議(5/5)

- (8)在本校停車場停車格鋪築3種不同滾壓之透水混凝土鋪面， 使用之配比 0.31-B-1:4進行試鋪， 驗證3種滾壓停車格其透水試驗效果均良好，可滿足車輛承載需求，故可應用於一般停車場或低交通量路面工程。
- (9)現地施作以驗證透水混凝土發現，一鑽心試体抗壓強度可達192kg/cm^2，已經超過一般混凝土結構物規範要求(175 kg/cm^2)。
- (10)環保透水混凝土應多推廣，若要使用於高速公路或高交通量路面工程應進行詳細效益評估與配比設計。

柒、計畫預期成果達成自評如下：

1. 評估透水混凝土應用於交通工程設施之可行性。(第七章 評估透水混凝土應用於交通工程設施之總類及適用性)預期達成
2. 透水混凝土產製技術與試驗標準之建立。(第三章 建立透水混凝土之製程與試驗標準)預期達成
3. 現地透水試驗與方法，以驗證透水混凝土透(排)水效果之建立。(第六章 現地試鋪結果與討論)預期達成
4. 透水混凝土之推廣。(已於96/10/25舉辦教育訓練課程)預期達成