

廢陶瓷砂於瀝青混凝土之應用

林樹豪¹ 葉根² 沈勁利³

^{1,2} 德霖技術學院土木工程系助理教授

³ 德霖技術學院空間設計系助理教授

摘要

如同許多已開發國家，台灣地區正逐漸呈現砂石資源枯竭之現象。為了減緩國內砂石漸趨不足的問題，本研究嘗試利用廢陶瓷砂代替細粒料，並探討其製成瀝青混凝土之可行性，以作為國內未來進一步研究與推展的參考依據。由試驗結果顯示，經由一般配比設計程序，即能使廢陶瓷瀝青混凝土達到設計規範的要求，且廢陶瓷瀝青混凝土之與鋪面成效有關的性質甚至優於一般瀝青混凝土。因此建議可使用廢陶瓷砂取代部分細粒料於瀝青混凝土中，以達成促進營建資源再生的目標。

關鍵詞：粒料、廢陶瓷砂、瀝青混凝土

The Application on Waste Ceramics as Fine Aggregate for Asphalt Concrete

Shu-Hao Lin¹, Ken Yeh¹, Jine-Lih Shen²

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, DLIT

²Assistant Professor, Department of Interior Design and Spatial Digital Application, DLIT

Abstract

An absence of aggregate has led to environmental and cost issues in Taiwan. Moreover, as the volume of waste and by-product materials generated in our society and the cost of disposal continue to increase, there is increased pressure and incentive to recover and recycle these materials for use in secondary applications. When waste ceramics is crushed to sand-like particle sizes, similar to those of natural sand, it exhibits properties of an aggregate material. The objectives of this study are to evaluate the physical and engineering properties of waste ceramics and asphalt concrete made with that aggregate; and to provide practical suggestion for the use of waste ceramics for asphalt concrete.

Keywords: aggregate, waste ceramics, asphalt concrete

壹、前言

由於國內工商業迅速發展，各種工程建設長期過度依賴河川砂石作為骨材料源，導致河川砂石資源日益短缺，甚或有些不肖廠商盜採砂石，更造成許多水土保持的問題。而陸上砂石之開採則面臨環保、道路交通運輸、土地取得、都市計劃配合與土地二次利用等問題；海域砂石則仍有含鹽過高之「海砂屋」的疑慮。凡此種種因素已經造成台灣地區如同許多已開發國家般，逐漸呈現砂石資源枯竭之現象。雖然目前國內基於環保意識及水土保持問題，政府已逐漸擴大河川禁採砂石範圍，但也使得營建砂石更是供不應求 [1]。

面對於砂石短缺且須兼顧環保的現況，本研究考慮利用廢棄陶瓷材料代替細骨材製成廢陶瓷瀝青混凝土，並探討其相關工程性質。若能有效回收廢棄陶瓷材料充當骨材使用，且經由配比設計程序使其達到設計規範之要求，將有助於紓解河川砂石資源枯竭之現象及其衍生之環境問題。本研究之主要目的在於：(1) 了解廢陶瓷瀝青混凝土試體與一般瀝青混凝土試體間之差異；(2) 評估廢陶瓷瀝青混凝土於工程應用上之可行性；(3) 建立本土化再生廢陶瓷瀝青混凝土的資訊，以提供未來產官學界使用之參考。

貳、廢陶瓷材料

目前一般廢陶瓷材料主要源自於建築物拆除工程及陶瓷工廠的不良品，其中尤以後者為大宗。由全國陶瓷工廠統計可知 [2]，瓷磚不良品一天全國產量約 320 公噸，日用磁及衛浴瓷一天約 30 公噸。不良品在陶瓷工廠中的定義包括了：不潔、針孔、脫釉、流釉、缺損、括痕、厚度不齊、接縫不齊、色斑、色調不齊、圖案不對稱等等，不過這些缺陷對於陶瓷本身的力學性質幾乎沒有影響，加上各種產品間之差異有限、易於控制，因此廢陶瓷材料之再利用多以陶瓷工廠的不良品為主。

廢陶瓷材料因其幾何特性，在粒徑較大時，扁平狀顆粒比例偏高，應用在水泥混凝土或瀝青混凝土時，易因扁平率過高，而造成級配降格。過去的研究顯示：廢陶瓷砂與傳統細粒料在物理性質方面相近 [2]，且廢陶瓷混凝土的 28 日抗壓強度亦與一般水泥混凝土差異不大 [3]。

鶯歌為台灣陶瓷工業的大鎮，全鎮工廠約 800 多家。本研究使用的廢陶瓷乃由順欣資源處理股份有限公司所提供。其係將鶯歌各陶瓷工廠產生之陶瓷廢棄物（主要為廢棄建築面磚），清運至回收工廠再處理。由於各類陶瓷廢棄物形狀大小不一，最大者之長寬達 40 cm，並不利於直接回料使用。因此回收場利用機器破碎、研磨等方式製成 5 mm (#4 號篩) 以下之成品。

參、試驗材料及研究方法

由於骨材資源日益短缺，研究廢棄陶瓷是否可以取代砂石，一來符合環保理念，二來亦可解決資源不足之問題。本研究試驗流程，如圖 1 所示。首先將回收之廢陶瓷經分類打碎、研磨，並取通過 #4 號篩者作為代替細粒料之用。

研究中選用標稱最大粒徑 19 mm 之公路局 IVC 級配，使用之天然粒料取自大漢溪，並採用國內常用的 AC-20 瀝青，再以不同重量百分比的廢陶瓷砂 (0%、25%、50%、75%、100%) 取代細粒料，其中通過 200 號篩的填縫料均使用石粉。然後依馬歇爾配合設計法製作廢陶瓷瀝青混凝土，並比較其最佳瀝青含油量和體積測定性質。其中瀝青基本性質，粗、細粒料和廢陶瓷砂相關的物理性質和級配篩分析，分別如表 1~表 3 所示。

在後續與鋪面成效相關的性質方面，本研究將於各種組合之最佳瀝青含量下製作試體，並進行馬歇爾穩定值、流度值試驗 (ASTM D1559)、間接張力強度試驗 (ASTM D4123)、浸水殘餘強度試驗 (AASHTO T283) 以及車轍輪跡試驗等，藉以評估廢陶瓷瀝青混凝土可能面臨之鋪面成效的問題。

表 1. 瀝青基本性質

60°C 黏度 (poise)	2187
135°C 黏度 (cp)	500
25°C 針入度 (0.1 mm)	62
25°C 延展性 (cm)	100 ⁺
比重	1.029

表 2. 粒料基本性質

	粗粒料	細粒料	廢陶瓷砂
比重 (SSD)	2.672	2.727	2.476
吸水率 (%)	2.03	2.52	2.95
硫酸鈉健性試驗 (%)	—	2.43	1.63

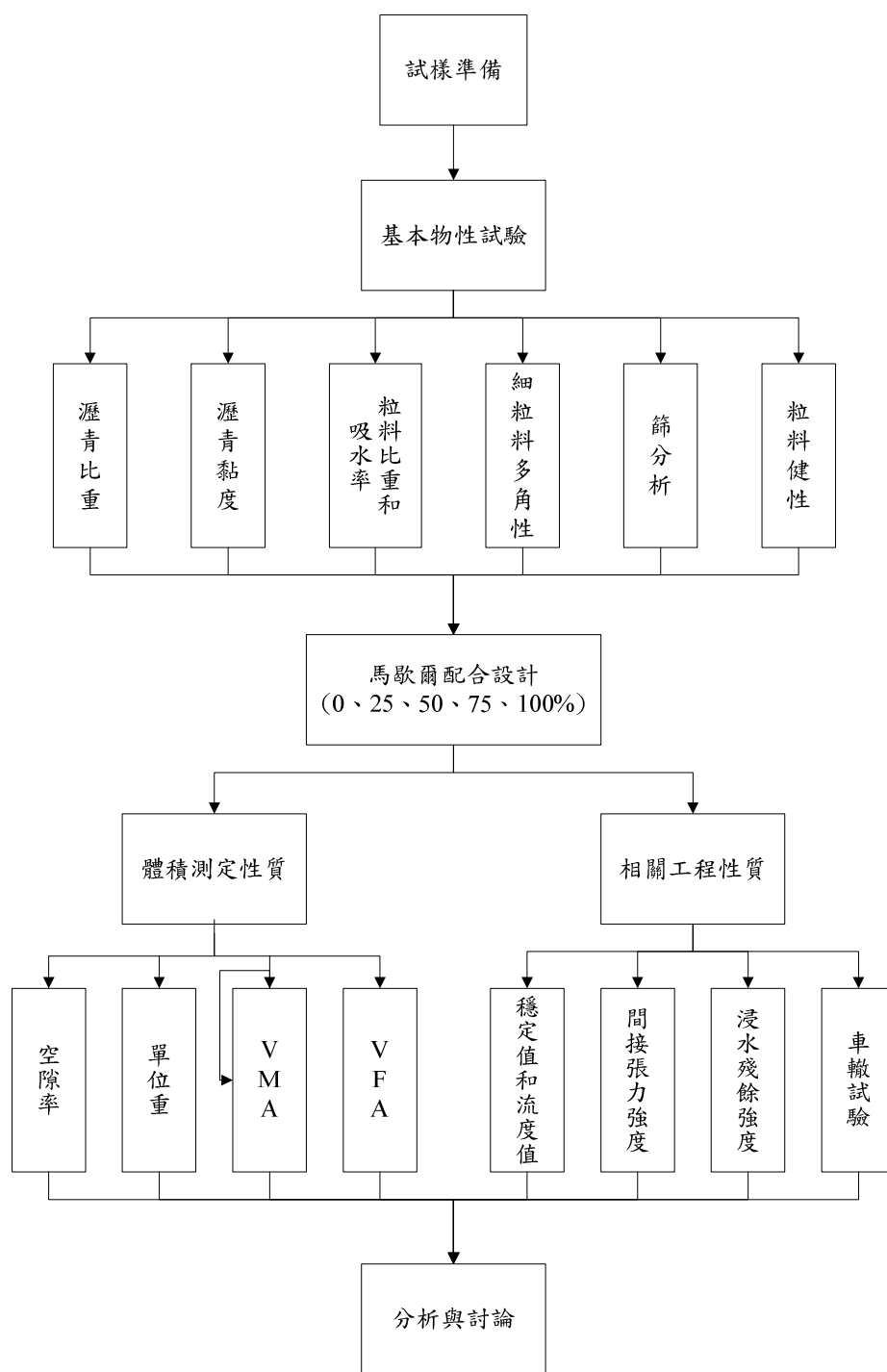


圖 1. 試驗流程

表 3. 粒料級配

過篩百分比	粗粒料	細粒料	廢陶瓷砂	選用級配	級配規範
1"	100	—	—	100	100
3/4"	95	—	—	96	90~100
3/8"	45	100	—	75	56~80
#4	2.5	97.5	100	53	35~65
#8	—	90	87.5	42	23~49
#16	—	67.5	65	33	—
#30	—	42.5	40.5	22	—
#50	—	20	25.5	15	5~19
#100	—	6	15	10	—
#200	—	2	1.5	4	2~8

肆、試驗結果分析與討論

一、馬歇爾配合設計

表 4 為不同組合之馬歇爾配合設計的結果。當粗骨材和級配相同時，細骨材的未經夯壓空隙率愈大，意味著將需要愈多的瀝青，來維持瀝青混凝土所需的設計空隙率。由細骨材多角性試驗 (ASTM C1252) 的結果可知，如表 5，隨著廢陶瓷砂取代細粒料的添加量增加，其未經夯壓空隙率也增加。因此瀝青混凝土的設計瀝青含量、VMA 和 VFA 亦隨之增加，如表 4 所示。表 2 亦顯示廢陶瓷砂的吸水率大於天然粒料，而這同樣也影響廢陶瓷瀝青拌合料所須的瀝青含量。另外表 2 中廢陶瓷砂的比重明顯略小於天然粒料，因此由表 4 可知，當廢陶瓷砂的用量增加，再加上瀝青用量增加的影響，瀝青混凝土的單位重將隨之漸小。

表 4. 馬歇爾配合設計結果

廢陶瓷添加量	0%	25%	50%	75%	100%
設計含油量 (%)	5.89	6.07	6.35	7.07	7.56
設計空隙率 (%)	4	4	4	4	4
VMA (%)	13.1	13.4	13.7	14.8	15.7
VFA (%)	69.3	70.4	72.7	73.3	74.9
單位重 (kg/m ³)	2334	2306	2265	2225	2165
穩定值 (N)	10965	14507	12482	9603	8133
流度值 (0.25 mm)	12.3	9.2	10.1	9.7	13.4

表 5. 細骨材多角性試驗結果

廢陶瓷添加量	0%	25%	50%	75%	100%
未經夯壓空隙率 (%)	45.8	47.3	49.3	51.1	53.0

陶瓷材料硬度普遍較高，並且在製土及鍊土的過程中，各種成份已經拌合均勻，其抗磨損能力較天然粒料為佳 [2, 3]，且韌性亦優於天然粒料，如表 2 所示。除此之外，表 4 中所有的配合設計結果均符合設計規範的要求，因此初步判斷瀝青混凝土應該可以使用廢陶瓷砂來取代其

中部分的細粒料。

圖 2、圖 3 分別為在最佳瀝青含量下，不同廢陶瓷取代量之瀝青混凝土的穩定值和流度值。不似設計瀝青含量、VMA 和 VFA 般，廢陶瓷添加量對瀝青混凝土的穩定值和流度值並沒有明確之漸增或漸減的影響。不過當廢陶瓷取代量達 25%~50%時，瀝青混凝土具有較高的穩定值和較低的流度值，而這似乎表示廢陶瓷砂可能存在一「最佳取代量」。

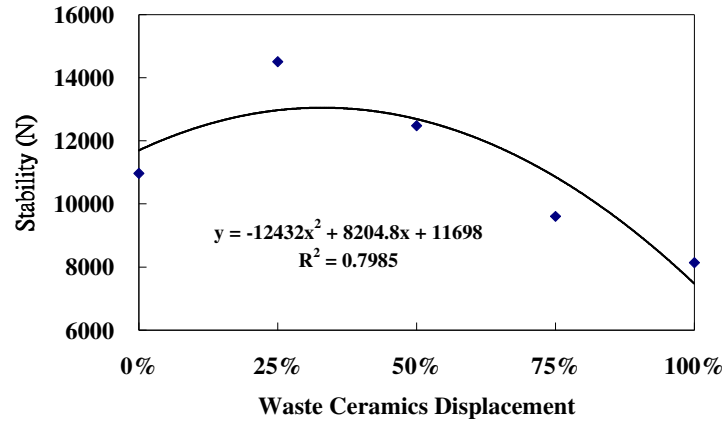


圖 2. 不同廢陶瓷組合之穩定值

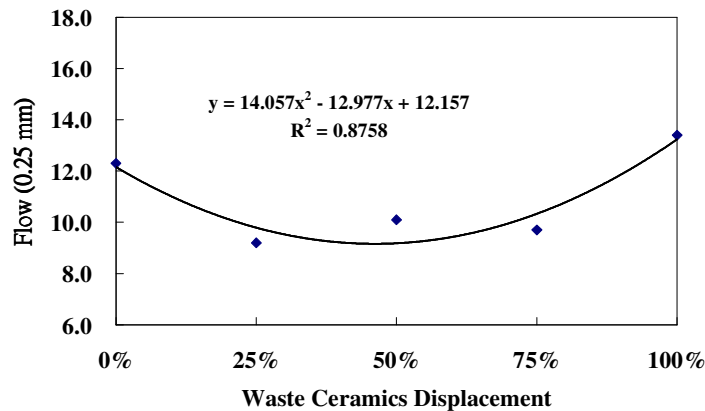


圖 3. 不同廢陶瓷組合之流度值

二、間接張力強度

一般來說，間接張力強度較高的瀝青混凝土，較具有抵抗裂縫發生的能力 [4]。圖 4 為不同添加量之廢陶瓷瀝青混凝土 25°C 之間接張力強度。由圖可知，隨著廢陶瓷取代細粒料的量增加，瀝青混凝土的間接張力強度愈大。這是因為廢陶瓷瀝青混凝土使用較多的瀝青含量，而瀝青提供瀝青混凝土抵抗張力裂縫的能力，因此儘管廢陶瓷瀝青混凝土的單位重較小，其間接張力強度仍大於未添加廢陶瓷者。

三、浸水殘餘強度

浸水殘餘強度試驗主要依據 AASHTO T283 的方法進行試驗，其中殘餘間接張力比 (TSR)

的計算，如式 1 所示。研究發現 [5]，試驗結果和現地水分侵害的關連性相當高。過去研究亦顯示：由間接張力試驗及剝脫殘餘比率的判定結果可知，只進行一次凍融循環試驗對加速試體破壞的效果有限 [6]。因此本研究對所有試體僅進行抽氣養治，而不經凍融處理。

$$TSR = \frac{\text{三個經真空抽氣養治試體之平均間接張力強度}}{\text{三個未養治試體之平均間接張力強度}} \quad (1)$$

圖 5 為浸水殘餘強度之試驗結果，其中廢陶瓷瀝青混凝土的殘餘間接張力比 (TSR) 均高於一般未添加廢陶瓷砂的瀝青混凝土 (0%) 者。值得注意的是，雖然由於瀝青含量的增加，使得添加廢陶瓷砂間接能增加瀝青混凝土抵抗剝脫的能力，但取代量若大於 50% 以上，可能由於廢陶瓷砂之未破裂面的表面釉料有礙瀝青有效包裹粒料，致使其抗剝脫能力反倒有下降之虞。

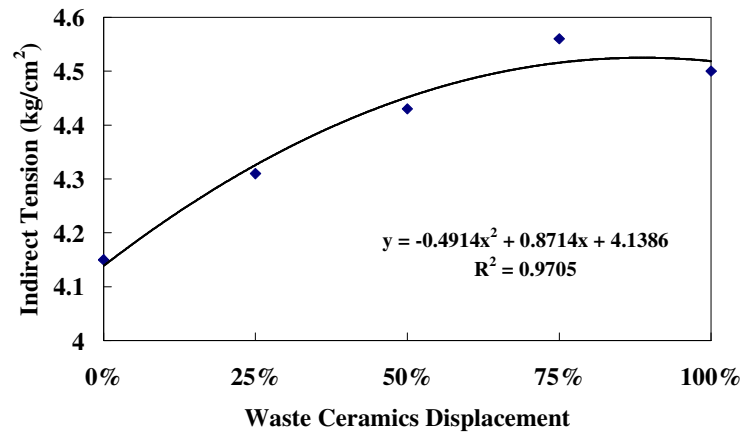


圖 4. 間接張力強度試驗結果

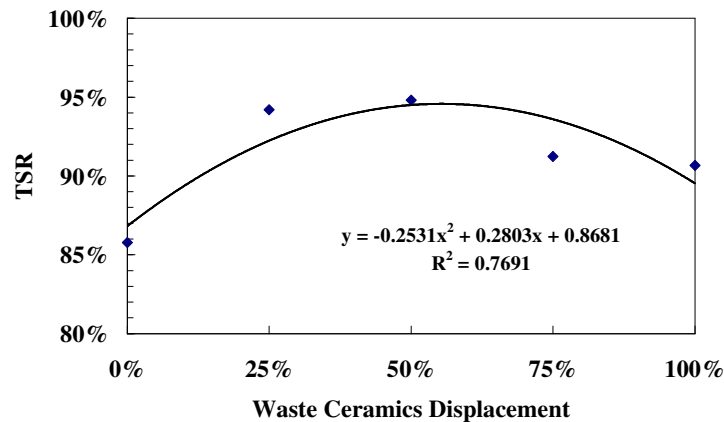


圖 5. 浸水殘餘強度之試驗結果

四、車轍輪跡

車轍輪跡試驗為一結構性之成效試驗，其乃藉由調整輪跡試驗機之滾壓荷重、滾壓速度、滾壓次數及試驗溫度，來模擬瀝青混凝土鋪面受交通荷重後之壓實情形。本研究先將熱拌料置

入 30x30x7 cm 之模具中，藉輪壓機壓製成空隙率約 7% 之版狀車轍試體，然後將試體置於輪跡試驗機中，於試驗溫度 60°C 下以 5.5 kg/cm² 之固定胎壓，50 次/min 之往返速率，進行 3600 秒的車轍試驗。車轍輪跡試驗之結果，如圖 6 所示。

廢陶瓷砂的未經夯壓空隙率較細粒料者大，亦即表示廢陶瓷砂較具粒料多角性，而能提供瀝青混凝土擁有較佳的车轍抵抗。但是另一方面，隨著廢陶瓷添加比例增加，瀝青混凝土中的瀝青含量亦隨之增加，這也相對增加瀝青混凝土產生永久變形的可能性。如圖 6 所示，當廢陶瓷砂取代量接近 50% 時，瀝青混凝土試體的车轍深度最低；但若完全使用廢陶瓷砂來取代細粒料，其瀝青混凝土的抗永久變形能力並不見得優於一般瀝青混凝土。此一情形與表 4 中穩定值、流度值的結果相似，當廢陶瓷取代量達 25% ~50% 時，廢陶瓷瀝青混凝土似乎擁有最佳之車轍抵抗能力。

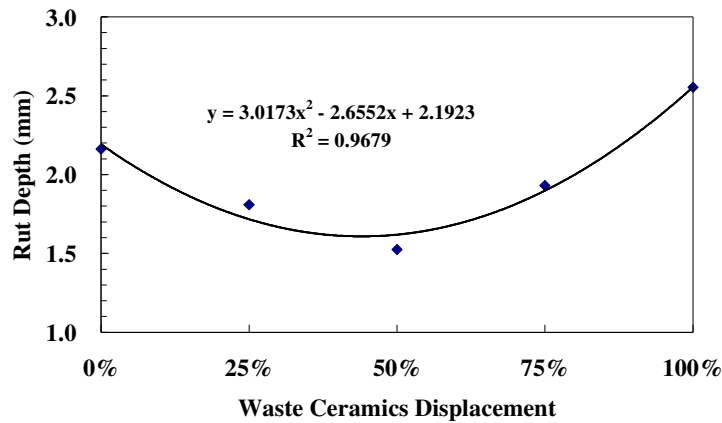


圖 6. 車轍輪跡試驗結果

五、最佳取代量

由前面各節的討論，我們可以發現將廢陶瓷砂應用於瀝青混凝土中似乎存在一可能的「最佳取代量」。就本研究有限的試驗結果可知，廢陶瓷瀝青混凝土無論在永久變形、裂縫抵抗以及水分侵害等方面均優於一般瀝青混凝土，但當取代細粒料至某一程度後，廢陶瓷瀝青混凝土的成效卻有降低的現象。此一廢陶瓷取代量，整理如表 6 所示。進一步對照圖 4~圖 6，表 6 中使用 44%~55% 的廢陶瓷似乎是取代細粒料的最佳範圍。

表 6. 廢陶瓷可能取代量

鋪面成效	相關試驗	可能最佳取代量
永久變形	車轍輪跡	44%
疲勞裂縫	間接張力強度	89%
水分侵害	浸水殘餘強度	55%

伍、結論

本研究考慮以不同重量百分比的廢陶瓷砂 (0%、25%、50%、75%、100%) 代替細骨材，然後依馬歇爾配合設計法製作廢陶瓷瀝青混凝土，並比較其最佳瀝青含油量和體積測定性質。然後於最佳瀝青含量下製作試體探討其與鋪面成效相關的性質。

有限的試驗室結果顯示，經由一般配比設計程序，即能使廢陶瓷瀝青混凝土達到設計規範的要求。廢陶瓷砂與傳統細粒料在物理性質方面相近，且廢陶瓷瀝青混凝土之與鋪面成效有關的性質甚至優於一般瀝青混凝土。廢陶瓷瀝青混凝土中似乎存在一「最佳取代量」。使用44%~55%的廢陶瓷取代量時，瀝青混凝土可能具有較佳的成效。本研究建議可使用廢陶瓷砂取代部分細粒料於瀝青混凝土中，以達成促進營建資源永續使用的目標。

陸、參考文獻

- (1) 蘇南、王博麟，「廢混凝土回收粗粒料品質與再生混凝土工程性質之探討」。中國土木水利工程學刊，第十二卷，第三期，第 436-444 頁（1990）。
- (2) 王睿懋、林秉祁、林沂賢、林志棟，「廢陶瓷應用於瀝青混凝土之初步研究」，第二屆鋪面工程師生研究成果聯合發表會論文集，中央大學，第 32-41 頁（2001）。
- (3) 林樹豪，黃暉淇，「廢陶瓷砂於水泥混凝土之應用」，第六屆鋪面材料再生學術研討會論文集，正修科技大學，高雄，第 E1-1-E1-7 頁（2004）。NSC 92-2815-C-237-006-E
- (4) Roberts, F. L., P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Lee, and T. W. Kennedy, Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, NAPA Education Foundation, Maryland, 238-240 (1991).
- (5) Scholz, T. V., R. L. Terrel, A. Al-Joaib, and J. Bea, "Water Sensitivity: Binder Validation," Report No. SHRP-A-402, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 67-90 (1994).
- (6) 林樹豪，「水分侵害對瀝青混凝土之影響」，德霖學報，第十八期，德霖技術學院，第 181-196 頁（2004）。

