

再生水泥混凝土材料於瀝青混凝土之應用

林樹豪¹、葉根¹、沈勁利²、游步上¹

¹ 德霖技術學院營建科技系助理教授

² 德霖技術學院企業管理系、營建科技系助理教授

摘要

本研究以廢棄水泥混凝土破碎後充當瀝青混凝土粒料，製作瀝青混凝土試體，再進行馬歇爾穩定值、間接張力強度、回彈模數及車轍輪跡等力學性質試驗，進而探討廢棄水泥混凝土應用於瀝青混凝土鋪面之可行性。研究結果顯示，採用再生水泥混凝土材料 (RCM) 之瀝青混凝土，其單位重較採用天然粒料之傳統瀝青混凝土低，但穩定值、間接張力強度及回彈模數均大於一般瀝青混凝土，且抗車轍變形能力較佳。廢棄水泥混凝土材料的表面粗糙且孔隙較多，因此必須採用較多的瀝青拌合，方可獲得較佳之瀝青混凝土。雖然增加瀝青用量似乎會提高成本，但可藉由節省天然粒料而使造價降低，且可紓解天然骨材日益缺乏之問題。

關鍵詞：再生水泥混凝土材料、回彈模數、間接張力強度、車轍

Practicability of Asphalt Concrete with Reclaimed Concrete Material

Shu-Hao Lin¹, Ken Yeh¹, Jine-Lih Shen², and Pure-Song You¹

¹ Assistant Professor, Department of Construction Technology, De Lin Institute of Technology

² Assistant Professor, Department of Business Administration, De Lin Institute of Technology

Abstract

The recycling of demolished concrete could not only help conserve natural resources, but could also help solve a growing waste-disposal crisis. Reclaimed concrete material (RCM) has been used as aggregate in Portland cement concrete pavements, and is covered by conventional aggregate specifications and by several highway agency specifications in many countries. This study is disintegration some waste concrete blocks, prior to conducting screen analysis. After which, the RCM would be used as an aggregate for asphalt concrete. The results of this study shows that the optimal content according to the Marshall mix design methods, the RCM asphalt concrete needs higher than that of normal asphalt concrete. The RCM asphalt concrete is higher than that of normal asphalt concrete in stability value, flow value, VMA, indirect tensile strength, and resilient modulus. The unit weight and rut depth of the RCM asphalt concrete is less than that of normal asphalt concrete. Based on this study, the RCM asphalt concrete can be applied in flexible pavement.

Keywords: Reclaimed Concrete Material, Resilient Modulus, Indirect Tensile Strength, Rut Depth.

壹、前言

長久以來，水泥混凝土一直是營建工程上的主要材料，此種材料雖具有相當優良的耐久性，但經過一段時期之使用後，終會因各種不同的原因，如年限已到不堪使用或都市更新等而必須拆除。水泥混凝土廢棄物因經濟快速成長與建築物的更新有日益增加之趨勢，根據 1991 年之統計資料，每年所拆除之水泥混凝土廢棄物，美國約 3000 萬噸，日本約 1000 萬噸，全東歐國家約 4000 萬噸，數量相當可觀 [1]，若不妥善處理此廢棄物，任意堆置或拋棄，將造成環境之污染。另一方面，近二十多年來，政府積極進行多項工程建設，以致於河川砂石消耗殆盡，若不謀求解決之道，則台灣地區在不久之將來，各項土木工程建設將面臨無粒料可用之窘境，建造成本勢必提高，甚至工程無法進行。

在國內外之學術研究單位，已有學者從事將廢棄水泥混凝土打碎後，充當再生水泥混凝土粒料方面之研究 [1-5]，而在瀝青混凝土方面之研究，以往多著重於以舊瀝青混凝土鋪面之刨除料，應用於再生瀝青混凝土充當粒料 [6-10]。相形之下，有關廢棄水泥混凝土充當瀝青混凝土粒料方面之研究並不多見 [11]。本研究將廢棄水泥混凝土打碎篩分後，充當瀝青混凝土之粒料，並製作瀝青混凝土試體，探討其各項力學性質，進而探討其應用於瀝青混凝土鋪面之可行性。

貳、試驗材料與試驗方法

本研究採用中油公司生產之針入度 60/70 及 85/100 瀝青，其物性試驗依 ASTM 規範進行，試驗結果如表 1 所示。研究中採用的粒料共有兩種：一為大漢溪砂石新鮮粒料，另一為試驗室之廢棄混凝土圓柱試體經破碎機軋製而得。這些廢棄混凝土圓柱試體的原始抗壓強度平均約為 32 MPa。廢棄水泥混凝土粒料及新鮮粒料之物性試驗依 ASTM 規範進行，試驗結果如表 2。粒料級配採用「高速公路局施工標準規範」之密級配，如表 3 所示。

本研究依據 ASTM D1559 試驗法，取 4.0%，4.5%，5.0%，5.5%，6.0%，6.5% 及 7.0% 七種不同瀝青含量，進行馬歇爾配合設計，求得各種配合之最佳瀝青含量，並進行穩定值、流度值、單位重、孔隙率、VMA、25°C 間接張力強度 (ASTM D4123) 及 25°C 回彈模數 (ASTM D4123) 等各項試驗。此外利用輪壓機模擬工地壓路機之荷重及滾壓型態，將最佳瀝青含量之瀝青混合料於 140°C 溫度下，採用 27 kg/cm 之線壓滾壓至瀝青混凝土單位重 98% 之壓實度，製成 30×30×5 cm 之試體。然後採用輪壓 9 kg/cm²、輪速 35 次/分，進行 1 小時之 60°C 車轍輪跡試驗。

表 1 瀝青之物理性質

項目	比重	針入度 (0.01cm)	延展性 (cm)	絕對粘度 (60°C, poises)	拌合溫度 (°C)	夯壓溫度 (°C)
依據ASTM規範	D70	D5	D113	D4402	D1559	D1559
85/100瀝青	1.026	90.5	150+	1023	150	140
60/70瀝青	1.030	63.0	150+	2032	155	145

表 2 粗、細粒料之物理性質

項目	粗粒料 比重	細粒料 比重	粗粒料 吸水率 (%)	細粒料 吸水率 (%)	洛杉磯 磨損率 (%)	硫酸鈉 健性(%)	扁平率 (%)
依據ASTM規範	C127	C128	C127	C128	C131	C88	D4791
新鮮粒料	2.65	2.62	1.85	1.04	18.6	0.52	6.5
廢棄水泥混凝土 粒料	2.43	2.28	5.65	7.92	33.3	5.65	7.3
規範值	—	—	—	—	40以下	9以下	10以下

表 3 粒料級配

篩號 (美國標準篩)	本研究採用級配 通過百分比 (%)	高公局密級配 通過百分比 (%)
1"	100	100
3/4"	97.5	95-100
3/8"	72.5	65-80
#4	52.5	45-60
#8	37.5	30-45
#30	20	15-25
#50	15	—
#100	10	—
#200	5	3-7

參、試驗結果分析

一、粒料物性試驗

表 2 為粒料物性試驗結果。廢棄水泥混凝土料 (RCM) 的表面較為粗糙且孔隙較多，其比重低於天然新鮮粒料甚多。同樣的情形也反映在吸水率上，RCM 粒料的吸水率大於天然新鮮粒料。RCM 粒料的堅韌性較新鮮粒料差，其洛杉磯磨損率遠大於新鮮粒料。在硫酸鈉健性方面，RCM 粒料之重量耗損率亦大於新鮮粒料，可見前者抵抗化學侵害之能力較差。由洛杉磯磨損率及硫酸鈉健性可知，廢棄水泥混凝土粒料將對瀝青混凝土之耐久性可能造成不良之影響。整體而言，除了扁平率和新鮮粒料相當外，廢棄水泥混凝土粒料之品質多較新鮮粒料為差，不過大致均能符合高速公路局施工標準規範的要求。

二、馬歇爾配合設計

馬歇爾配合設計結果，如表 4 所示。無論使用何種瀝青，RCM 瀝青混凝土的設計含油量均較一般使用新鮮粒料的瀝青混凝土者為高。這是由於廢棄水泥混凝土粒料表面較為粗糙且孔隙較多，吸油率較大，故需較多之瀝青方能有效包裹粒料，為了在粒料表面形成適當厚度之瀝青薄膜，而造成較高的瀝青含量。由表 4 可知，本研究所採用之兩種瀝青混凝土性質均符合高速公路局施工標準規範之要求。雖然 RCM 瀝青混凝土的瀝青用量較高，造成成本增加，但採用 RCM 因節約天然粒料所得之利益，將遠高於瀝青材料所增加之成本。

表 4 瀝青混凝土配合設計結果

粒料種類	瀝青種類	最佳含油量 (%)	穩定值 (kg)	單位重 (kg/m ³)	空隙率 (%)	流度值 (0.01 cm)	VMA (%)
RCM	60/70	6.15	1665	2279	4.85	37.5	16.68
	85/100	6.10	1602	2276	4.66	39.0	17.05
新鮮粒料	60/70	5.40	1240	2333	3.32	28.0	15.25
	85/100	5.30	1205	2331	3.24	30.5	15.67
規範值		---	> 817	---	3~5	20~40	> 14

圖 1 為單位重與瀝青含量之關係。圖中 N 代表天然粒料, R 代表廢棄水泥混凝土粒料。RCM 瀝青混凝土之單位重與瀝青含量的關係曲線和天然粒料瀝青混凝土之曲線相似, 由於廢棄水泥混凝土粒料之鬆比重較天然粒料低且孔隙較多, 採用 RCM 充當粒料之瀝青混凝土, 單位重較採用天然粒料之瀝青混凝土者低甚多, 約在 2250~2281 kg/m³ 之間。

穩定值與瀝青含量之關係, 如圖 2 所示, 穩定值與瀝青含量之關係是呈先增大後減小之趨勢。無論採用何種瀝青, RCM 瀝青混凝土均大於採用天然粒料之瀝青混凝土者。對照最佳瀝青含量的情況, 前者的穩定值亦大於後者, 這顯示雖然 RCM 瀝青混凝土對應之瀝青含量較高, 但似乎其承載交通荷重之能力較佳。RCM 瀝青混凝土之穩定值明顯高於使用天然粒料者, 且後續之間接張力強度、回彈模數與車轍試驗等, 亦出現類似的試驗結果。此係因廢混凝土塊經碎石機軋碎後, 其粒形呈良好之多稜角, 且表面較天然河川砂石粗糙, 此因素將有效提昇粒料間之互制力 (Interlocking Action) 及顆粒間之摩擦力 (Interpartical Friction)。

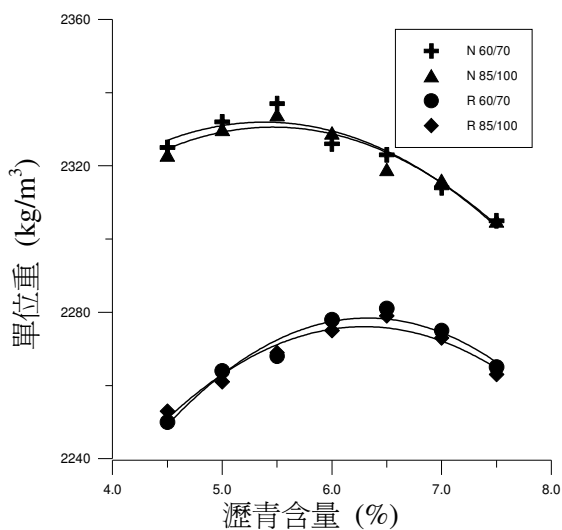


圖 1 單位重與瀝青含量之關係

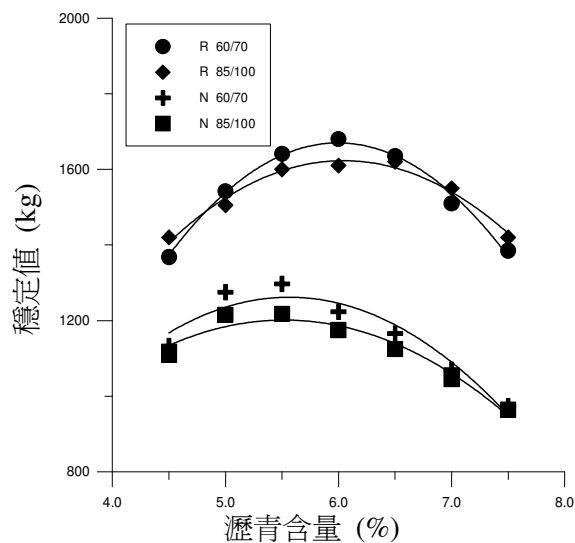


圖 2 穩定值與瀝青含量之關係

三、間接張力強度試驗

當路面承受輪荷重作用時, 面層底部將產生張應力, 而瀝青混凝土應有足夠的張力強度來抵抗張應力。間接張力強度為瀝青混凝土抵抗張力破裂之能力, 其值愈大者, 鋪面愈不易產生龜裂之情形。間接張力強度試驗可用以估計瀝青混凝土面層所能承受之最大極限抗張強度之大小 [12]。瀝青混凝土的張力強度對瀝青混凝土鋪面厚度設計及對鋪面損壞之評估, 如溫度龜裂、疲勞龜裂、永久變形及剝脫分離相當重要。影響間接張力強度的因子有試驗溫度、空隙率、瀝青含量、瀝青黏度、粒料級配、壓實能量和加壓速率等 [13]。

圖 3 為間接張力強度與瀝青含量之關係。採用廢棄水泥混凝土充當粒料之 60/70 瀝青混凝土最大間接張力強度為 5.40 kg/cm^2 ，85/100 瀝青混凝土最大間接張力強度為 5.05 kg/cm^2 ，兩者瀝青含量約 6.20%；而採用天然粒料之 60/70 瀝青混凝土最大間接張力強度為 4.05 kg/cm^2 ，85/100 瀝青混凝土最大間接張力強度為 4.00 kg/cm^2 ，兩者瀝青含量約 4.50%。除了瀝青含量 4.5% 的 RCM 瀝青混凝土之間接張力強度較小外，其餘均大於採用天然粒料之瀝青混凝土，顯示其抵抗張力破裂之能力較佳。瀝青含量 4.50% 之間接張力強度較小，其可能原因為瀝青含量較少，無法充分包裹粒料，所得之瀝青混凝土品質較差。無論是何種粒料，採用 60/70 瀝青為黏結料之瀝青混凝土，其間接張力強度均大於採用 85/100 瀝青之瀝青混凝土，顯示 60/70 瀝青混凝土有較佳的抗張性能。

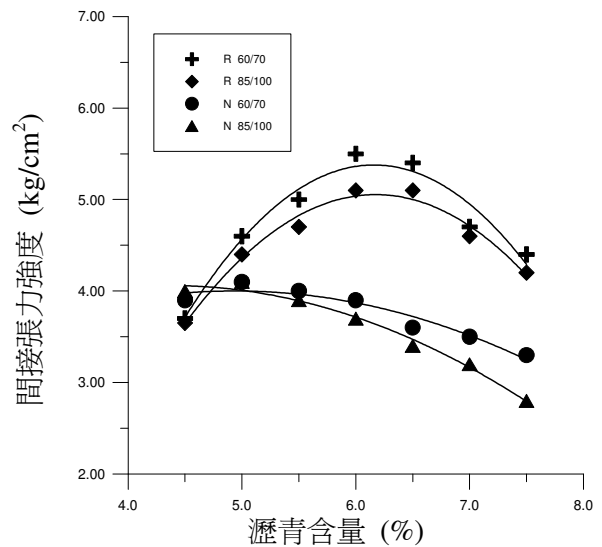


圖 3 間接張力強度與瀝青含量之關係

四、回彈模數試驗

Maupin 等人研究瀝青混凝土撓曲樑疲勞與回彈模數試驗，發現疲勞年限隨瀝青混凝土之回彈模數值增高而延長；在低溫時回彈模數過高者，容易產生低溫龜裂；高溫時，回彈模數低者則易造成車轍的現象 [13, 14]。回彈模數試驗的影響因子有試驗溫度、混合料空隙率、粒料級配、瀝青黏滯度、瀝青含量等，其中以試驗溫度和混合料空隙率對回彈模數影響最大 [13]。

回彈模數與瀝青含量之關係，如圖 4 所示。採用廢棄水泥混凝土充當粒料之瀝青混凝土回彈模數均大於採用天然粒料之瀝青混凝土。回彈模數較大之材料在高溫時抵抗車轍的能力較佳，顯示 RCM 瀝青混凝土在高溫時抵抗車轍的能力較佳，應能適合台灣地區高溫、高車輛軸重及高交通量之環境。

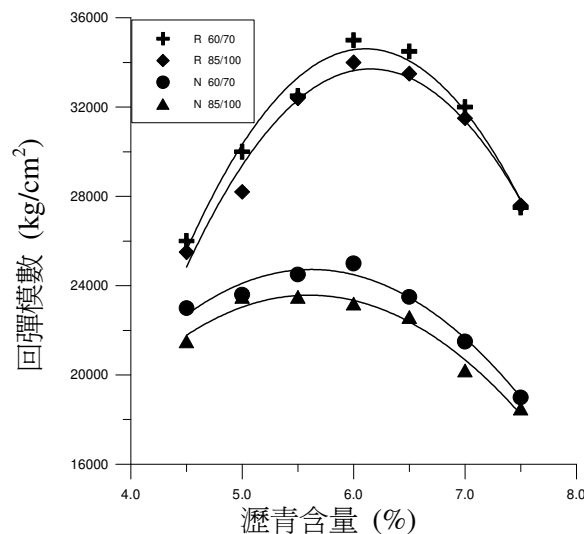


圖 4 回彈模數與瀝青含量之關係

五、車轍輪跡試驗

瀝青混凝土為柔性路面，面層除受車輛胎壓及軸重壓密外，路面任何一層結構發生變形時，面層亦隨即發生車轍變形，此種現象將導致路面失去平坦性，降低對行車之服務品質及提早結束其壽命。台灣自 1990 年代起路面破壞多因車轍所引起，所謂車轍係指輪胎滾壓於路面面層所產生下陷之現象，其形成有兩種原因：一為壓密，另一為橫向推擠 [15]，充分瞭解瀝青混凝土抵抗車轍之性質，對於改善路面品質，將有所助益。

圖 5 為車轍試驗結果。由圖中可知，無論是 60/70 或 85/100 瀝青，RCM 瀝青混凝土之車轍總變形量均小於採用天然粒料之瀝青混凝土者，顯示其抵抗車轍變形之能力較佳。而無論採用何種粒料，60/70 瀝青混凝土之車轍總變形量均小於 85/100 瀝青混凝土者。

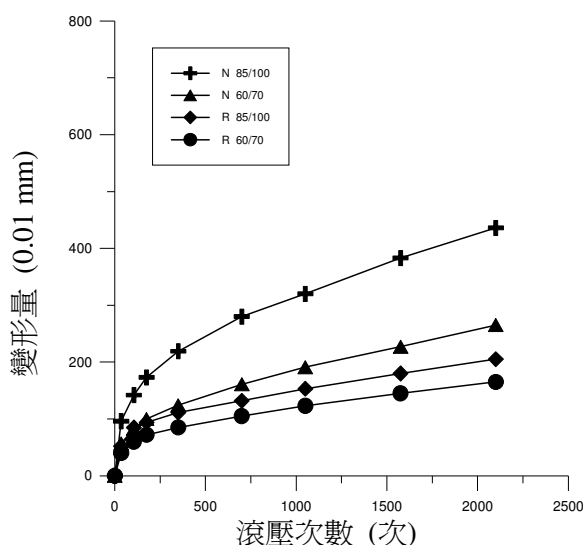


圖 5 車轍輪跡試驗結果

瀝青混凝土的動穩定值愈高，表示其受重覆輪荷重作用之變形增加率愈小，抗變形能力愈佳，試驗所得各瀝青混凝土之動穩定值，如表 5 所示。採用廢棄水泥混凝土充當粒料之瀝青混凝土，其動穩定值均大於採用天然粒料之瀝青混凝土，顯示其抵抗車轍變形之能力較佳。同樣的，無論採用何種粒料，60/70 瀝青混凝土之動穩定值均大於 85/100 瀝青混凝土。

表 5 不同瀝青及粒料之瀝青混凝土之動穩定值 (次/mm)

種類	60/70 瀝青	85/100 瀝青
RCM	2333	1918
新鮮粒料	1346	897

六、經濟可行性分析

以使用針入度 60/70 瀝青為例，RCM 瀝青混凝土的材料成本為 1053 元/噸，稍低於天然粒料之瀝青混凝土之 1085 元/噸，使用 100%再生粒料所降低的粒料成本略少於瀝青含油量增加的成本，其單價分析比較如表 6 所示。由於再生粒料品質較不穩定，為確保再生粒料瀝青混凝土之品質，瀝青混凝土使用再生粒料之比例可訂定一上限值。根據美國猶他州公路局 (Utah Department of Transportation) 提出之建議 [16]，回收廢棄水泥混凝土之再生粒料應用於瀝青混

凝土面層之上限值為 25%，應用於瀝青處理底層之上限值為 40%。若以應用於瀝青混凝土面層來說，RCM 瀝青混凝土的材料成本可能反而略高於採用天然粒料之瀝青混凝土。保守估計在含油量仍為 6.15%時，RCM 瀝青混凝土的材料成本為 1114 元/噸，二者之差異並不太大。使用廢棄混凝土再生粒料並不會使成本產生太大的變化，卻可達到資源再生的目的。在環保意識日漸抬頭且禁採河川砂石的情況下，天然粒料必定日益匱乏，勢將造成天然粒料價格逐漸高漲。反觀再生粒料分類與破碎處理費用，隨著回收處理技術成熟及機具普及化情況下，處理成本將逐漸降低，RCM 瀝青混凝土之經濟效益仍有相當大的成長空間。

表 6 不同粒料瀝青混凝土之單價分析表*

項目	名稱規格	單位	數量	單價 (元)	複價 (元)	備註
天然粒料瀝青混凝土	60/70 瀝青	噸	0.0540	6800	367.2	含運費
	石灰	噸	0.0473	5000	236.5	
	粗粒料	噸	0.4525	662	299.6	
	細粒料	噸	0.4525	401	181.5	
	小計	噸			1085	
RCM 瀝青混凝土	60/70 瀝青	噸	0.0615	6800	418.2	含運費
	石灰	噸	0.0469	5000	234.6	
	RCM 粗粒料	噸	0.4527	550	249.0	
	RCM 細粒料	噸	0.4527	333	150.8	
	小計	噸			1053	

*RCM 粒料單價由總茂環保股份有限公司提供，其他材料單價引自參考文獻 [17]。

肆、結論

本研究之主要目的在評估廢棄水泥混凝土應用於瀝青混凝土鋪面之可行性。由試驗結果分析獲致的結論與建議如下：

1. 廢棄水泥混凝土粒料較天然新鮮粒料之孔隙率大，表面較為粗糙，吸水率高出甚多，堅硬性及韌性較差，此對瀝青混凝土之耐久性可能造成不良影響。整體而言，RCM 之品質較天然新鮮粒料差，但均能符合高速公路局施工標準規範之要求。
2. RCM 瀝青混凝土之單位重較採用天然粒料之瀝青混凝土者低甚多，而其穩定值和瀝青含量均大於採用天然粒料之瀝青混凝土者。
3. RCM 瀝青混凝土之間接張力強度和回彈模數均大於採用天然粒料之瀝青混凝土，顯示其抵抗張力破裂和車轍之能力較佳。
4. 由車轍輪跡試驗的結果可知，RCM 瀝青混凝土之車轍總變形量均小於採用天然粒料之瀝青混凝土者，而其動穩定值均大於採用天然粒料之瀝青混凝土，此顯示其抵抗車轍變形之能力較佳。而無論是採用何種粒料，60/70 瀝青混凝土之動穩定值均大於 85/100 瀝青混凝土。
5. RCM 瀝青混凝土在力學方面之評估均較採用天然粒料之瀝青混凝土佳。雖然增加瀝青用量似乎會提高成本，但此可由節省天然粒料而降低之造價所抵銷，因此廢棄水泥混凝土充當粒料，應用於瀝青混凝土鋪面應屬可行，且可紓解天然骨材日益缺乏之問題。不過關於 RCM 瀝青混凝土耐久性的潛在疑問，仍必須再作進一步研究。

參考文獻

1. 張世健,「再生混凝土之製造及性質研究」,碩士論文,國立中興大學土木工程研究所,台中,(1987)。
2. 張建彥、周家蓓,「剛性路面材料再生工法之探討」,第一屆鋪面材料再生學術研討會,台南,第 111-118 頁,(1993)。
3. 王弘祐、王錦華、李宗憲、張永岡,「廢棄混凝土再生利用之初步探討」,第二屆鋪面材料再生學術研討會,中壢,第 97-106 頁,(1995)。
4. 王弘祐、陳國豪、吳文長等,「廢棄混凝土再生細骨材實用性探討」,中華民國第三屆結構工程研討會,墾丁,第 973-982 頁,(1996)。
5. 劉玉雯,「再生混凝土抗壓行為之研究」,中華民國第十七屆全國力學會議,第 847-853 頁,(1993)。
6. Chesner, W. H., Collons, R. J., and MacKay, M. H., User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction, Federal Highway Administration Office of Engineering R&D, Publication No. FHWA-RD-97-148, Mclean, Virginia, 1997, <http://www.rmrc.unh.edu>.
7. 李得璋、沈得縣,「國內路面再生工法可行性之初步研究」,第一屆路面工程學術研討會,台南,第 307-320 頁,(1985)。
8. 邱亦遷,「再生瀝青混凝土成效之研究」,碩士論文,國立中央大學土木研究所,中壢,(1995)。
9. 吳啓週,「路面再生工法品質檢驗之研究」,碩士論文,國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所,台北,(1988)。
10. 陳偉全,「台灣區中山高速公路瀝青路面再生應用模式之研究」,博士論文,國立成功大學土木研究所,台南,(1996)。
11. 沈得縣、施義隆,「廢棄水泥混凝土塊拌製瀝青混凝土可行性之研究」,中華民國第十屆鋪面工程學術研討會論文集,海洋大學,基隆,第 73-80 頁,(1999)。
12. Kennedy, T.W., "Characterization of Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test," Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.46, pp.132-150, (1977).
13. 林志棟,「試驗室壓實方式對瀝青混凝土特性之影響」,台灣區瀝青混凝土特性研討會論文集,中壢,第 9-1~9-34 頁,(1991)。
14. Maupin, G.W. and J.R. Freeman, Simple Procedure for Fatigue Characterization of Bituminous Concrete, Federal Highway Administration, FHWA-RD-76-102, Washington, D. C. (1976).
15. Tabb, J.R., W.G., Agnew, et al., Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, Strategic Highway Research Program, SHRP-A- 415, National Research Council, Washington, D.C., (1994).
16. 陳宏益,「921 震災建築廢棄物多元再生利用」,廢棄物在工程上之應用研討會,台灣營建研究院,台北,第 1~18 頁,(2001)。
17. 蔡弦志,「再生材料應用於道路鋪面工程之成本效益研究」,碩士論文,國立中央大學土木研究所,中壢,(2003)。