

天然粒料與轉爐石瀝青混凝土績效評估—以台南市為例

陳建旭¹、陳偉全²、廖敏志³、陳海通⁴

¹ 成功大學土木工程學系 教授

² 高苑科技大學土木工程學系 副教授

³ 成功大學土木工程學系 博士後研究

⁴ 成功大學土木工程學系 研究生

摘要

本研究探討市區道路使用轉爐石 Basic Oxygen Furnace Slag (BOF) 取代天然粗粒料於石膠泥瀝青混凝土 (Stone Mastic Asphalt, SMA) 及密級配瀝青混凝土 (Dense Graded Asphalt Concrete, DGAC) 面層，評估轉爐石密級配瀝青凝土 (BOF DGAC) 和轉爐石石膠泥瀝青凝土 (BOF SMA) 材料工程性質及鋪面績效。本研究於台南市中華西路一段及中華南路二段，進行試驗路段施工前後之鋪面狀況指標 (PCI)、抗滑度試驗、平坦度試驗、車轍量試驗、鋪面密度試驗、Clegg Hammer 鋪面衝擊試驗及鑽心試驗等績效評估。試驗結果顯示 PCI 以 BOF SMA 最佳；平坦度試驗以天然粒料 DGAC 之 IRI 值比轉爐石瀝青混凝土上升趨勢大；車轍量試驗以粗粒料與粗粒料接觸產生粒料間互鎖機制之 BOF SMA 抗車轍能力較佳；Clegg Hammer 鋪面衝擊試驗呈現 BOF SMA 和 BOF DGAC 路面結構較佳；抗滑度試驗顯示天然粒料 DGAC 平均 BPN 值有下降趨勢。數據分析顯示 BOF SMA 路面績效最佳，其次為 BOF DGAC，最後為天然粒料 DGAC。

關鍵詞：轉爐石石膠泥瀝青凝土、轉爐石密級配瀝青凝土、天然粒料密級配瀝青凝土。

一、前言

目前世界各國皆面臨天然資源短缺的問題，為了維護及確保環境永續發展，紛紛朝向資源永續再利用的發展方向。台灣亦無法置身事外，隨著國家政策邁向工業化之發展，所產生工業副產品，亦面臨永續再利用之課題；再加上近年來，台灣經濟不斷的成長，對於貨物的運輸需求亦不斷的增加，公路上車輛及載重負荷持續的增加，使得營建或道路工程對材料需求及消耗量跟著增加，將造成天然資源不足的現象，尋找可代替天然材料的替代材料是目前尋求的方向。

台灣位處亞熱帶氣候地區，高溫且潮濕多雨，夏季瀝青路面溫度高達 60°C，使得鋪面容易產生車轍 (Rutting)、龜裂 (Cracking)、粒料剝脫 (Raveling) 及疲勞破壞 (Fatigue Cracking) 等破壞，降低路面服務水準及縮短使用壽命，除影響行車舒適性及安全性外，因不斷進行鋪面修補和刨除重鋪等養護措施，使得政府部門有限的資源更捉襟見肘。

面對日益增加的交通量、車載重及高溫多雨的氣候條件，如何提升鋪面績效

及使用年限，減少維修養護頻率進而延長鋪面使用壽命，節省經費開支，成為公路工程師刻不容緩必須解決的問題。以國內外研究指出，一些工業所產生的副產品用於道路工程，表現仍然不差於天然材料、例如：鋼鐵廠所產高爐石及轉爐石等副產品，使用於到道路鋪面工程不但可以減少工業副產物及處理成本，更將工業副產物轉化資源再利用[1-5]。

由一些研究顯示，轉爐石不論是利用於排水性瀝青混凝土或石膠泥瀝青混凝土，都能將其成效做有效的提升，特別是在抵抗車轍與表面抗滑的能力，且添加轉爐石能降低瀝青混凝土中瀝青的使用量，而使工程的成本降低[6、7]；依據黃隆昇等人研究顯示，轉爐石應用於排水級配、密級配、再生級配等，各項成效值顯示轉爐石均優於天然粒料[8]；經試驗得知轉爐石主要成分為CaO，具親油性特性，添加轉爐石之多孔隙瀝青混凝土滯留強度指數亦較高，較能減少水份之侵害，比較不容易造成路面剝脫現象；由輪跡車轍試驗結果，添加轉爐石之多孔隙瀝青混凝土動穩定值亦有提升及車轍變形量降低趨勢，對提昇路面承載交通荷重及抵抗車轍能力[9]。

二、研究目的

轉爐石的應用在台灣已有近十餘年的研究，研究顯示轉爐石添加於瀝青混凝土中之可行性高，然而，對於實際鋪築於市區道路鋪面之績效，仍須進一步評估。本研究於台南市中華南路二段及中華西路一段，進行轉爐石添加於石膠泥瀝青混凝土(SMA)、密級配瀝青混凝土(DGAC)之試驗路段之施工前和後，天然粒料與轉爐石瀝青混凝土之鋪面績效評估，探討轉爐石瀝青混凝土使用於市區道路之可行性，比較轉爐石特性與天然粒料差異及應注意事項。研究目的如下：

1. 比較示範道路施工前後鋪面狀況。
2. 分析天然粒料及轉爐石瀝青混凝土鋪面狀況指標。
3. 評估施工前後天然粒料及轉爐石瀝青混凝土鋪面績效。

三、研究方法

3.1 試驗方式

本研究針對台南市中華西路一段及中華南路二段所進行之轉爐石石膠泥瀝青混凝土 SMA(BOF SMA)、轉爐石密級配瀝青混凝土(BOF DGAC)和天然粒料密級配瀝青混凝土(DGAC)在試驗路段施工前、後之狀況調查與績效評估，分為二階段，其說明如下：

1. 進行試驗路段施工前後之鋪面狀況分析。
2. 進行 BOF SMA、BOF DGAC 和天然粒料 DGAC 之現地鋪面績效試驗及評估，如表 1 所示。

3.2 研究範圍

本研究計畫鋪面調查範圍以鋪設的三種瀝青混凝土鋪面來做為區分，如圖 1 和圖 2 所示：

1. BOF SMA 試驗路段：中華南路二段、中華西路一段十字路口及中華西路一段西側車道(中華南路二段至安工 2 號橋)，如圖 2 所示。BOF SMA 鋪面結構示意圖，如圖 3 所示。
2. BOF DGAC 試驗路段：中華南路二段至中華南路二段 249 巷附近南側車道，長約 250 公尺，如圖 2 所示。BOF DGAC 鋪面結構示意圖，如圖 4 所示。
3. DGAC 對照路段：中華南路二段 249 巷附近至明興路南側車道，長約 250 公尺，如圖 2 所示。DGAC 鋪面結構示意圖，如圖 5 所示。

表 1 現地鋪面績效試驗項目表

項次	試驗項目	評估內容	規範	試驗時間
1	現場目視調查 (PCI)	目視路面表面損壞情形調查係加以記錄，篩選出道路常見的路面損壞形式，並以 PCI 法來對鋪面做評分。	ASTM D6433	試驗路段 施工前、後
2	抗滑度試驗 (BPN)	使用英式擺錘試驗儀 (British Portable Tester, BPT) 量測潮濕路面之表面摩擦特性，用以評估雨天時路面與車輪之間的摩擦力。	ASTM E303	試驗路段 施工前、後
3	平坦度試驗 (IRI)	利用滾動式平坦儀量測各試驗路段之路面平坦度。以國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI) 表示之，目的是作為用路人行車舒適度之評估依據。	ASTM E950	試驗路段 施工前、後
4	車轍量試驗	量測各試驗路段的車轍量，以評估各試驗路段的抗車轍能力變化情形。車轍量即鋪面承受重複交通載重後之垂直變形量，可作為評估不同鋪面抵抗車輛荷重之能力	ASTM E1703	試驗路段 施工前、後
5	鋪面密度試驗	使用 PaveTrackerTM Plus 量測各試驗路段的鋪面密度，以評估瀝青混凝土的壓實度。	-	試驗路段 施工前、後
6	Clegg Hammer 鋪面衝擊試驗	Clegg 衝擊試驗機量測的衝擊加速度最大值即可評估瀝青混凝土鋪面的強度性質，CIV 值愈高代表鋪面結構強度愈佳。	ASTM D5874	試驗路段 施工前、後
7	鑽心試體外觀檢視與量測	針對鑽心試體做外觀檢視，量測裂縫深度並檢視是否有其它類型破壞	-	試驗路段 施工前
8	回彈模數試驗	模擬路面在受瞬間荷重時所引起的彈性變形，該試驗來評估鋪面彈性行為的差異。	ASTM D4123	試驗路段 施工後

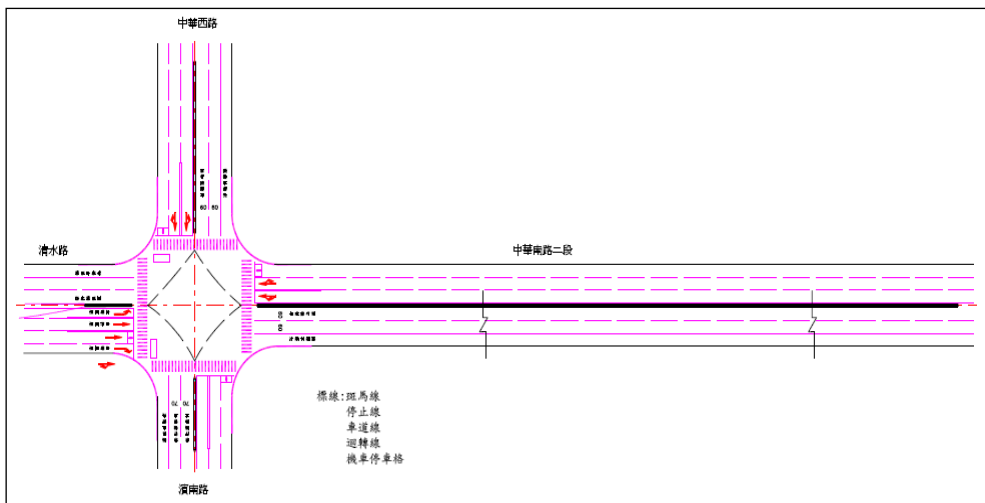


圖 1 現地鋪面調查位置

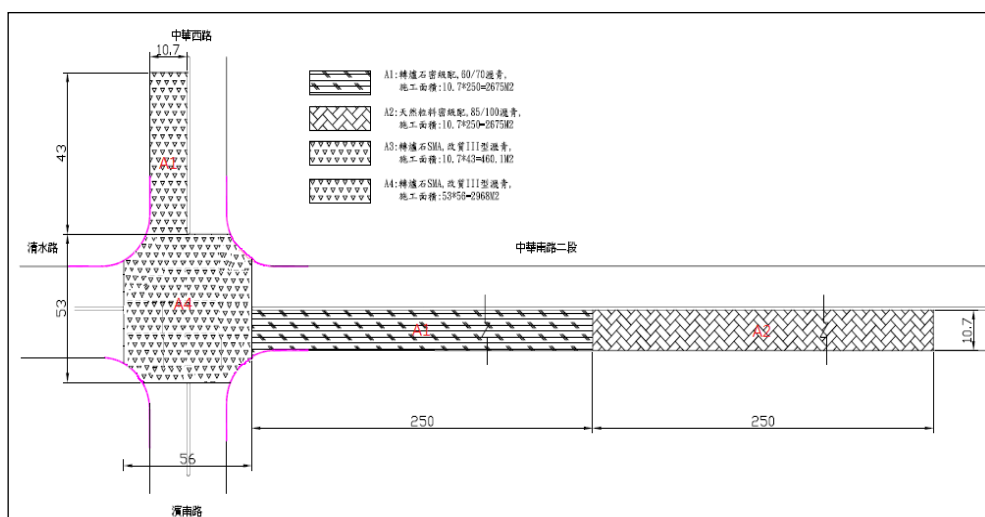


圖 2 試驗路段位置

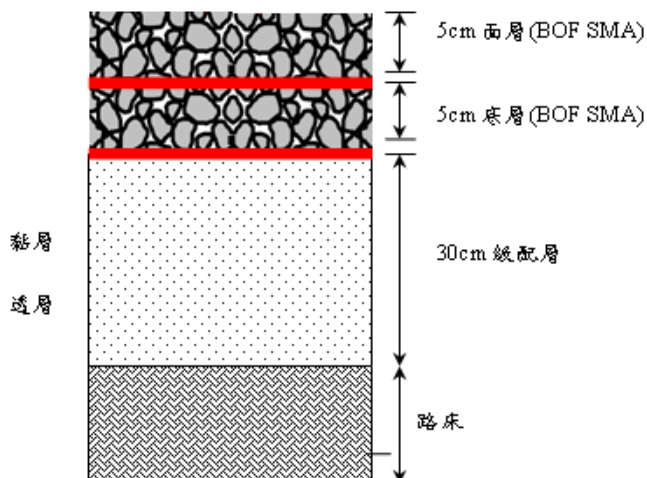


圖 3 中華南路、中華西路 BOF SMA 鋪面結構示意圖

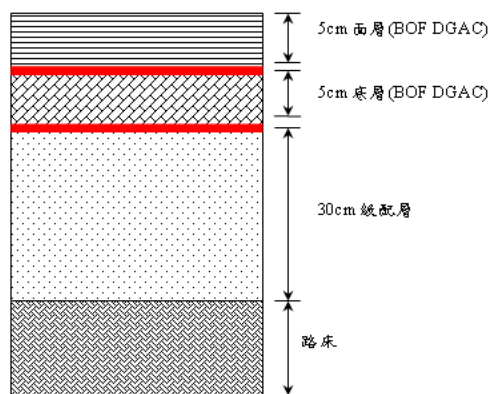


圖 4 中華南路二段 BOF DGAC
鋪面結構示意圖

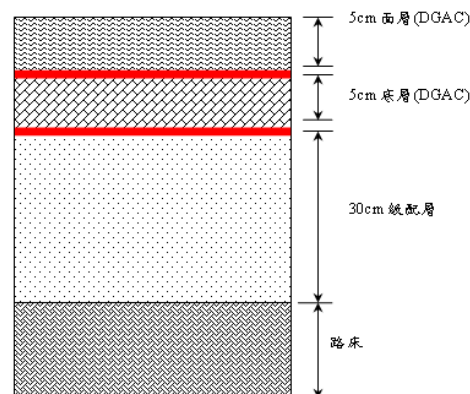


圖 5 中華南路二段 DGAC
鋪面結構示意圖

四、結果與討論

本研究進行施工前路面狀況調查，建立路面基本資料，並針對密級配(DGAC)、轉爐石密級配(BOF DGAC)及轉爐石石膠泥瀝青混凝土(BOF SMA)等 3 種瀝青混凝土探討鋪築後，使用期間鋪面績效。

4.1 施工前鋪面狀況調查

藉由施工前鋪面狀況調查，了解原有鋪面破壞機制。本次共鑽心 14 處，取得試體 14 組，鑽心位置如圖 6 所示。經試驗室調查鑽心試體結果，如表 2、表 3 和表 4 所示，試體裂縫深度深達 4 至 7cm，呈現碎裂型態，鑽心位置大都處於輪跡處，主要破壞原因歸納如下：

1. 安全港區重型卡車停止、啟動及煞車造成車轍及側向推擠，位置如圖 6 之點位 1 所示。
2. 底層裂縫延伸至面層產生裂縫-張力裂縫，位置如圖 6 之點位 4、5 和 6 所示。
3. 面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離或滑動，位置如圖 28 點位 11、12、13 和 14 所示。
4. AC 鋪面老化龜裂，位置如圖 6 點位 7 和 8 所示。

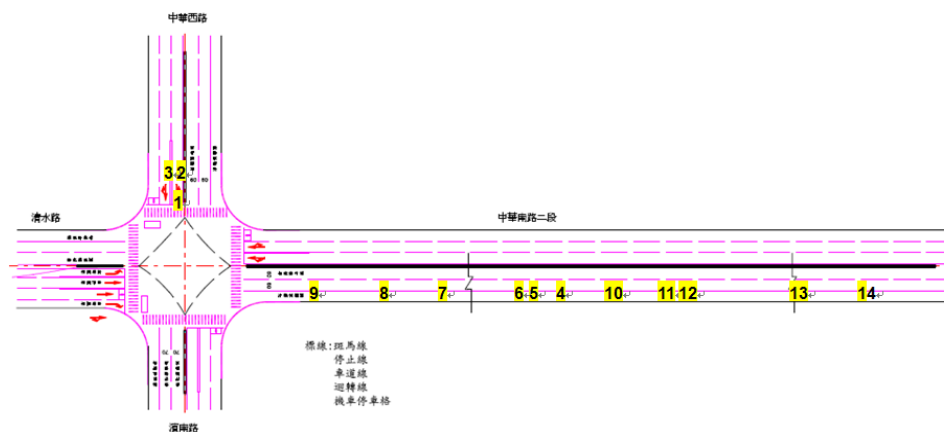


圖 6 現地鋪面鑽心位置

表 2 中華西路中華南路口(BOF-SMA 路段)路面鑽心調查表

試體編號	鑽心位置	損壞情形	損壞原因
1	中華西路一段南 下內車道中間 -0K	●表面變形達 5 cm。	●港區重型卡車停止、啟動及煞車造成車轍及側向推擠
2	中華西路一段南 下內車道右輪 -0K+10	●表面無明顯裂縫。 ●DGAC 面層約 5.5 cm。	無
3	中華西路一段南 下內車道左輪 -0K+10	●表面無明顯裂縫。 ●DGAC 面層約 6.5 cm。	無

表 3 中華南路(BOF-DGAC 路段)路面鑽心調查表

試體編號	鑽心位置	損壞情形	損壞原因
4	中華南路二段 272 號對面東向外 車道右輪	●表面無明顯裂縫，有破損情形。 ●試體厚度約 11cm，並於 4cm 處斷裂。	●面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。
5	中華南路二段 277 號前東向外 車道右輪-第 1 點	●表面裂縫穿透 5 cm，呈現破裂狀態。 ●試體厚度約 5 cm，面層約 5 cm。	● AC 鋪面老化產生龜裂。
6	中華南路二段 277 號前東向外 車道右輪-第 2 點	●表面裂縫穿透 5 cm，往底層延伸至試體底部，呈現破裂狀態。 ●試體厚度約 11cm，面層約 5cm，於 5 cm 處斷裂。	●底層裂縫延伸至面層產生裂縫。 ●面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。 ●AC 鋪面老化龜裂。
7	中華南路二段 313 號前東向外 車道右輪	●表面裂縫穿透 5cm，呈現破裂狀態。 ●試體厚度約 11cm，面層約 5cm，並於 5 cm 處斷裂。	●面層與底層(新舊界面)裂縫延伸至面層產生裂縫。 ●面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。
8	中華南路二段 331 號前東向外 車道中間	●表面裂縫穿透至試體底部。 ●試體面層約 2.5cm。	●AC 鋪面老化龜裂。 ●底層裂縫延伸至面層產生裂縫。
9	中華南路二段 349 號前東向外 車道右輪	●表面無明顯裂縫。 ●試體厚度約 5-6.5 cm。	無

表 4 中華南路(DGAC 路段)路面鑽心調查表

試體編號	鑽心位置	損壞情形	損壞原因
10	中華南路二段 251 號前東向外車道右輪	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面無明顯裂縫。 ● 試體厚度約 6.5-8 cm，面層約 2.4 cm。 	無
11	中華南路二段南對面東向外車道右輪	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面裂縫穿透 5 cm，呈現破裂狀態，裂縫延伸至底層 4 cm。 ● 試體厚度約 11 cm，於 4 cm 處斷裂，斷裂面含泥量較高。 ● 表面裂縫穿透 4 cm，呈現破裂狀態。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 底層裂縫延伸至面層產生裂縫。 ● 面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。 ● AC 鋪面老化龜裂。
12	中華南路二段南對面東向外車道右輪	<ul style="list-style-type: none"> ● 試體厚度約 10cm，於 4cm 處斷裂，斷裂面含泥量較高。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 底層既有裂縫延伸至面層產生裂縫。 ● 面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。 ● AC 鋪面老化龜裂。
13	中華南路二段警察局東向外車道右輪	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面裂縫穿透 7.2cm，呈現破裂狀態。 ● 試體厚度約 7.2cm，於 5 cm 處斷裂。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 底層既有裂縫延伸至面層產生裂縫。 ● 面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。 ● AC 鋪面老化龜裂。
14	中華南路二段 Yamaha 機車行對面東向外車道右輪	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面裂縫穿透 4cm，呈現破裂狀態，裂縫延伸至底層。 ● 試體厚度約 11cm，於 4cm 處斷裂，斷裂面含泥量較高。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 底層既有裂縫延伸至面層產生裂縫。 ● 面層與底層(新舊界面)黏結性不佳，形成弱面產生分離。 ● AC 鋪面老化龜裂。

4.2 施工前後比較

1. 天然粒料 DGAC

圖 7 顯示 DGAC 路段施工前，路面多處管線挖掘及修補，造成路面平坦度不佳，且鋪面呈現老化龜裂現象，易產生坑洞，危害駕駛人行車安全；經鋪築 10 公分 DGAC，路面呈現平整，車道縱向接縫施作良好，如圖 8 所示；開放交通約 3 個月後，外車道明顯產生冒油現象，位於紅綠燈交通號誌前之路面因重載車輛煞車、停止及啟動，所產生冒油現象較為嚴重，如圖 9 和圖 10 所示。



(a) 管線開挖修補



(b) 鋪面龜裂嚴重

圖 7 天然粒料 DGAC 施工前鋪面現況



(a) 鋪築後路面平順



(b) DGAC 鋪面現況

圖 8 天然粒料 DGAC 施工後鋪面現況



(a) 外車道車轍處冒油



(b) 鋪面冒油情形

圖 9 天然粒料 DGAC 開放交通約 3 個月後鋪面現況-1



(a) 外車道車轍處冒油



(b) 外車道鋪面產生坑洞

圖 10 天然粒料 DGAC 開放交通約 3 個月後鋪面現況-2

2. BOF DGAC

圖 11 顯示 BOF DGAC 路段施工前，路面多處管線挖掘及修補，造成路面平坦度不佳，鋪面老化龜裂產生坑洞，危害駕駛人行車安全；經鋪築 10 公分 BOF DGAC，路面呈現平整筆直，車道縱向接縫施作良好，如圖 12 所示；開放交通約 3 個月後，車道有些許冒油情形，較 DGAC 輕微，且現場車道平整，無明顯側擠、坑洞及車轍情形，如圖 13 所示。



(a) 管線開挖修補及鋪面老化

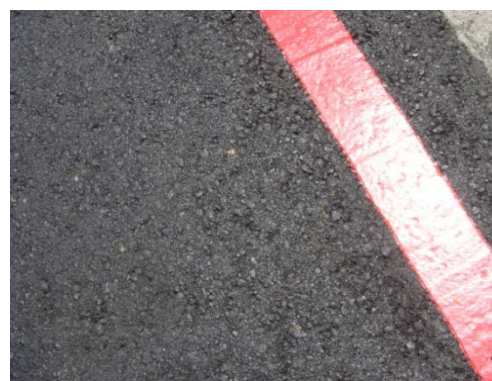


(b) 鋪面龜裂產生坑洞

圖 11 BOF DGAC 施工前鋪面現況



(a) 鋪築後路面整齊平順

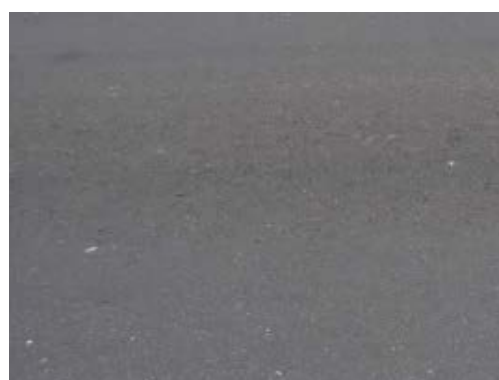


(b) BOF DGAC 鋪面現況

圖 12 BOF DGAC 施工後鋪面現況



(a) 外車道車轍處少量冒油



(b) 鋪面冒油情形

圖 13 BOF DGAC 開放交通約 3 個月後鋪面現況

3. BOF SMA

圖 14 和圖 15 顯示 BOF SMA 路段施工前，十字路口路面多處管線挖掘及修補，中華西路往南內車道鋪面經重新鋪築，因重載車輛荷重，產生嚴重變形，造成路面平坦度不佳，且局部鋪面呈現老化龜裂現象，易產生坑洞，危害駕駛人行車安全；經鋪築 10 公分 BOF SMA，路面呈現平整，車道縱向接縫施作良好，局部鋪面產生油斑，可能降低路面摩擦力，如圖 16 和圖 17 所示；開放交通約 3 個月後，除中華西路往南內車道鋪面產生些許冒油現象外，鋪面狀況良好，如圖 18 和圖 19，顯示 BOF SMA 可能具較優之承載力及抗變形能力。



(a) 內車道車轍變形嚴重



(b) 鋪面冒油、變形及側擠

圖 14 BOF SMA 施工前鋪面現況



(a) 多處管線開挖及修補



(b) 鋪面冒油及變形

圖 15 BOF SMA 十字路口施工前鋪面現況



(a) 路面整齊平順



(b) BOF SMA 鋪面現況

圖 16 BOF SMA 施工後鋪面現況



(a) 路面整齊平順，局部油斑現象



(b) BOF SMA 鋪面現況

圖 17 BOF SMA 十字路口施工後鋪面現況



(a) 局部油斑和車轍處少量冒油



(b) BOF SMA 鋪面冒油情形

圖 18 BOF SMA 開放交通約 3 個月後鋪面現況



(a) 路面平整良好



(b) BOF SMA 鋪面現況

圖 19 BOF SMA 十字路口開放交通約 3 個月後鋪面現況

4.3 施工前後鋪面狀況指標(Pavement Condition Index, PCI)

中華南路二段、中華西路一段十字路口及中華西路一段西側車道(中華南路二段至安工 2 號橋)鋪面施工前均鋪設 DGAC，本次調查依據 ASTM D6433，採鋪面狀況指標(PCI)法，經現場調查結果，以路面破損龜裂及管線挖掘修補後破壞相當嚴重，如圖 20 所示；中華西路一段路口處（與中華南路二段交接處）由於進出安平港區重車停等紅綠燈，造成路面產生嚴重變形，如圖 21 所示；中華南路二段部分慢車道有粒料鬆脫現象，如圖 22 所示。

經現場調查，3 試驗路段鋪面 PCI 值分別為 25.5、5 及 12.5 分，如表 5 所示，鋪面狀況指標(PCI)與路面養護關係表，如表 6 所示，鋪面現況已達很差(Very Poor)及破壞(Fail)之等級，必須進行全面翻修。



(a) 管線挖掘修補



(b) 鋪面產生嚴重龜裂

圖 20 中華南路二段管線挖掘修補、路面龜裂



(a) 鋪面產生嚴重側擠



(b) 鋪面產生嚴重車轍

圖 21 中華西路一段路面產生嚴重變形



(a) 慢車道有粒料鬆脫現象



(b) 慢車道有粒料鬆脫現象

圖 22 中華南路二段慢車道粒料鬆脫現象

表 5 試驗路段施工前 PCI 值及養護措施表

觀察日期	2011/10/18				
試驗路段	BOF SMA				
樣本	1	2	平均	等級	養護方式
PCI 值	20	31	25.5	差	全面翻修
試驗路段	BOF DGAC				
樣本	1	2	平均	等級	養護方式
PCI 值	6	4	5	破壞	全面翻修
試驗路段	DGAC				
樣本	1	2	平均	等級	養護方式
PCI 值	16	9	12.5	很差	全面翻修

表 6 PCI 與路面養護關係表

PCI	判定結果	養護方法
86~100	優良(excellent)	一般養護
71~85	很好(very good)	
56~70	好(good)	一般養護/緊急養護
41~55	尚可(fair)	
26~40	差(poor)	一般養護/大型養護
11~25	很差(very poor)	
0~10	破壞(failed)	

表 7 顯示經開放交通約 5 個月，於現場進行目視調查，BOF SMA、BOF DGAC 及天然粒料 DGAC 試驗路段鋪面現況指標(PCI)值分別為 91、85 及 74 分，與施工前同樣路段 PCI 值 25.5、5 和 12.5 相比，狀況仍然良好。天然粒料 DGAC 試

驗路段 PCI 值最低，主要原因全線外車道冒油相當嚴重，且路面有坑洞情形。

表 7 試驗路段施工後 PCI 值

觀察日期	2012/8/15		
試驗路段	BOF SMA		
PCI 值	91		等級優良
試驗路段	BOF DGAC		
PCI 值	85		等級很好
試驗路段	DGAC		
PCI 值	74		等級很好

4.4 施工前後現場績效評估

本研究試驗路段評估分為施工前和施工後，於施工前評估日期為 2011/10/18，施工後立即評估日期為 2012/03/23，施工後 5 個月，於 2012/8/15 進行第 3 次評估。

4.4.1 耐久性評估—平坦度試驗結果

檢測利用國際糙度指標(international roughness index, IRI)評估路面平坦度，圖 23 和圖 24 顯示施工前試驗點位左右輪跡處之平均 IRI 值約為 5.1 與 7.7 m/km，高於一般要求的 3.5 m/km（新北市路平要求），施工前平坦度有偏高現象。此試驗路段的 IRI 值偏高，可能與服務時間長、重交通量多、現有鋪面存有坑洞等破壞現象有關。

表 8 顯示鋪築後現場 IRI 值差異，天然粒料 DGAC 及 BOF DGAC 試驗點位左右輪跡處之平均 IRI 值分別為 2.33 與 2.40m/km 及 2.61 與 2.31m/km，較鋪築前 IRI 值 7.7 m/km 與 7.86m/km 低，低於一般平坦度要求 3.0 m/km；BOF SMA 試驗點位左右輪跡處之平均 IRI 值為 2.90m/km 與 2.85m/km，較鋪築前 IRI 值 5.47 與 4.79m/km 低，接近於一般要求的 3.0 m/km，顯示鋪築後天然粒料 DGAC 及 BOF DGAC 細粒料含量較高，鋪面表面較為平順，而 BOF SMA 粗粒料含量高，道路鋪築後表面較為粗糙，可能造成 IRI 量測值較高之原因。

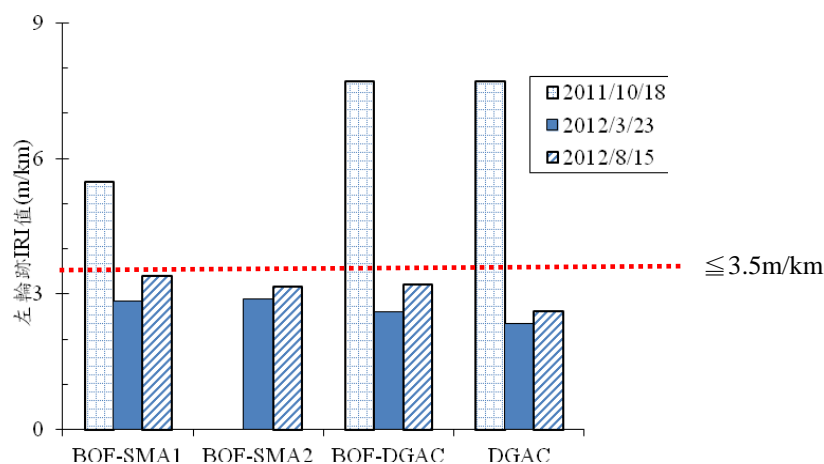


圖 23 左輪跡施工前後 IRI 值

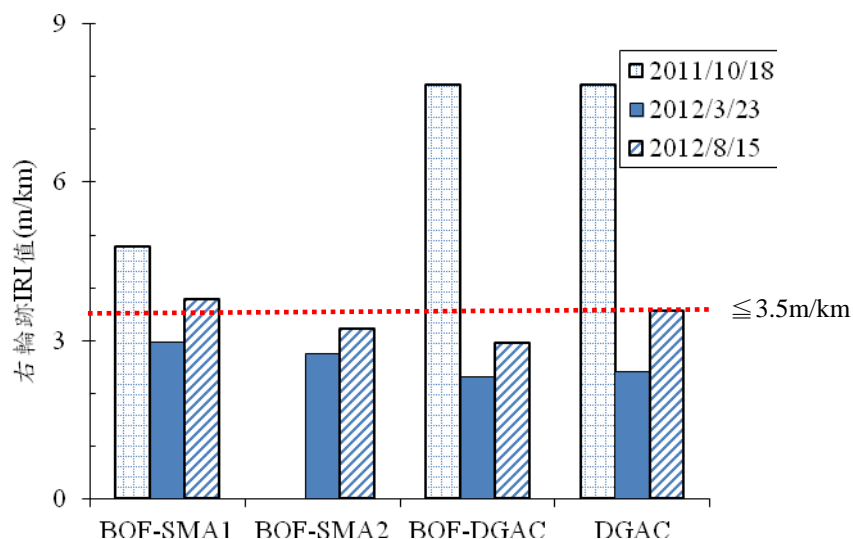


圖 24 右輪跡施工前後 IRI 值

表 8 現場 IRI 值差異比較

檢測日期	BOF SMA	BOF DGAC	天然粒料 DGAC
檢測項目	試驗組	試驗組	對照組
2012/3/23			
IRI 值(m/km)	2.86225	2.4625	2.368
與對照組差異	21%	4%	-
2012/8/15			
IRI 值(m/km)	3.38625	3.0825	3.089
與對照組差異	10%	0%	-

4.4.2 耐久性評估—車轍量試驗結果

圖 25 和圖 26 為各試驗點位輪跡處之車轍量，顯示此路段施工前均有嚴重永久變形，其中 BOF SMA 於輪跡處車轍量達 30mm 以上，為重級車轍變形量。此十字路口為聯接安平港之要道，大型車與聯結車進出車輛多，受荷重影響，車轍變形量明顯。其餘點位車轍量亦相當大，除交通量外，鋪面受損和多處補丁破壞等造成鋪面程載力下降，必須改善現有路況。

BOF SMA 左輪跡、中心處及右輪跡車轍量分別為 6.55、3.76 及 1.85 mm；由於中華南路 BOF DGAC 與 DGAC 試驗路段目前所量測得之現地車轍量數據較不具代表性，須持續進行長期觀測，方可了解車轍變形行為。

表 9 顯示鋪面鋪築後，所量測 BOF DGAC 車轍較天然粒料 DGAC 低 16%；BOF SMA 車轍量較天然粒料 DGAC 低 9%。開放交通後約 5 個月，BOF DGAC 車轍量較天然粒料 DGAC 高 25%；BOF SMA 車轍量較天然粒料 DGAC 低 59%，結果顯示 BOF SMA 有較高抗車轍能力。

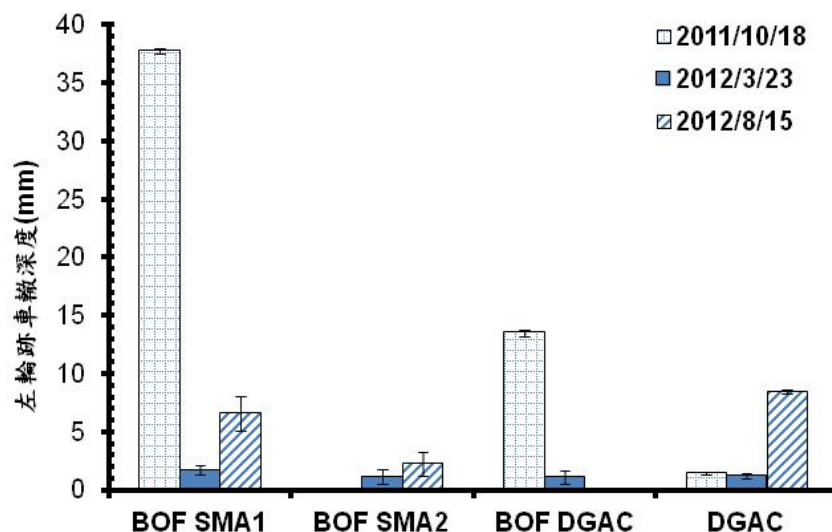


圖 25 左輪跡施工前後車轍深度比較

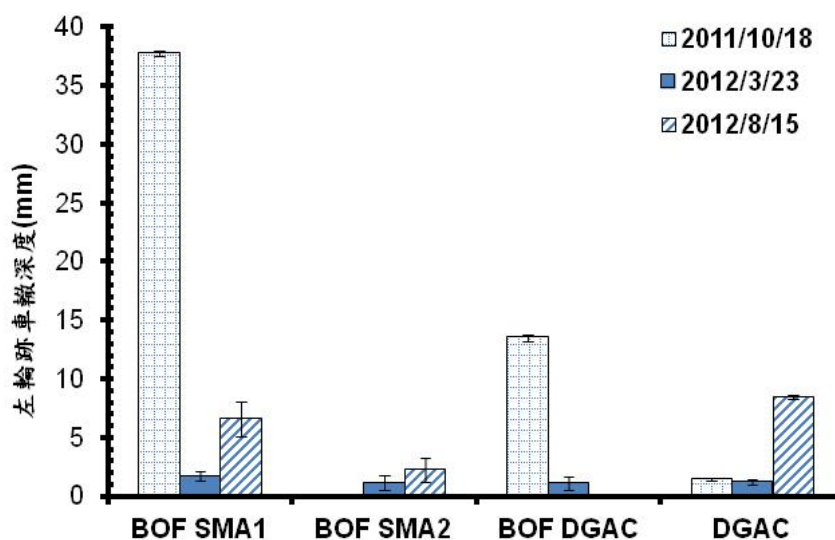


圖 26 右輪跡施工前後車轍深度比較

表 9 現場車轍量差異比較

檢測日期	BOF SMA	BOF DGAC	天然粒料 DGAC
檢測項目	試驗組	試驗組	對照組
2012/3/23			
車轍量(mm)	1.3908	1.291	1.53
與對照組差異	-9%	-16%	-
2012/8/15			
車轍量(mm)	3.3	--	8.05
與對照組差異	-59%	--	-

4.4.3 耐久性評估－鋪面密度試驗結果

圖 27、圖 28 和圖 29 為各試驗點位之鋪面密度，數據顯示施工前 BOF SMA 區段的密度較高，接近 $2500\text{kg}/\text{cm}^3$ ，表示該處的鋪面壓密程度較高，原因是此處多為重車待轉或左轉之車道，經推擠後，鋪面密度因而較高。BOF DGAC 的鋪面密度則約在 $2300\text{kg}/\text{cm}^3$ 左右，而 DGAC 鋪面密度則在 $2200\text{kg}/\text{cm}^3$ 以下，研判係鋪面多處破損並有相當多的疲勞龜裂，因此鋪面密度較低。

鋪築後 BOF SMA 區段的密度較高，接近 $2500\text{kg}/\text{cm}^3$ ，表示該處的鋪面壓密程度較高，此處為重車待轉或左轉之車道，受到推擠機率較高。BOF DGAC 的鋪面密度則約在 $2300\text{kg}/\text{cm}^3$ 左右，而 DGAC 鋪面密度則在 $2100\text{kg}/\text{cm}^3$ 左右。

依據鑽心試體所量測鋪面密度，DGAC 鋪面密度約 $2200\text{kg}/\text{cm}^3$ 左右，與 PaveTracker™ Plus 量測密度相近，而 BOF DGAC 及 BOF SMA 則差距較大，研判可能與轉爐石含黑鈣鐵礦（Srebrodolskite, $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, C2F）、鋪面表面紋理粗糙度和檢測前一天下雨有關，建議進一步探討，測定 BOF 瀝青混凝土介電常數。

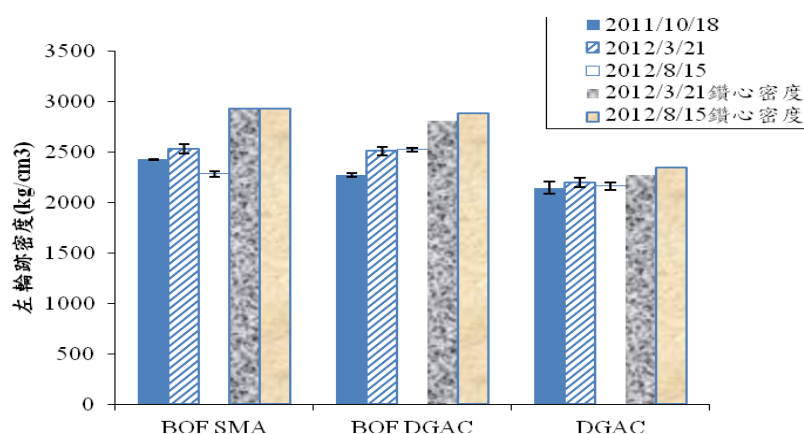


圖 27 左輪跡施工前後鋪面密度

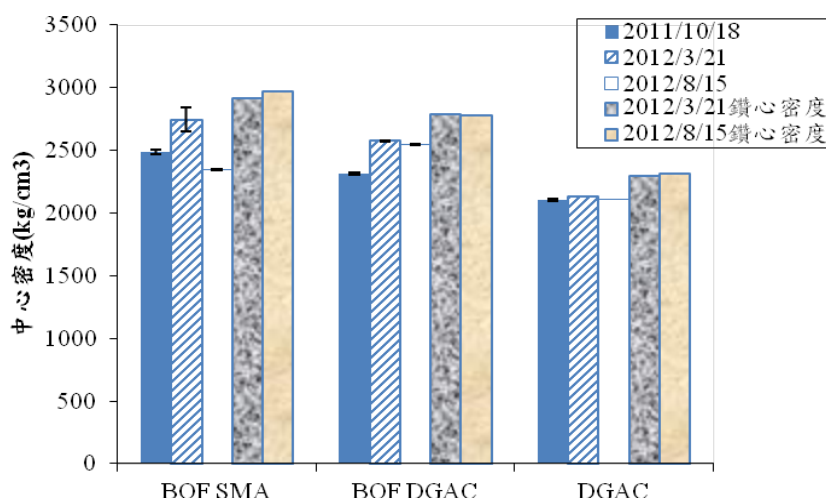


圖 28 中心處施工前後鋪面密度

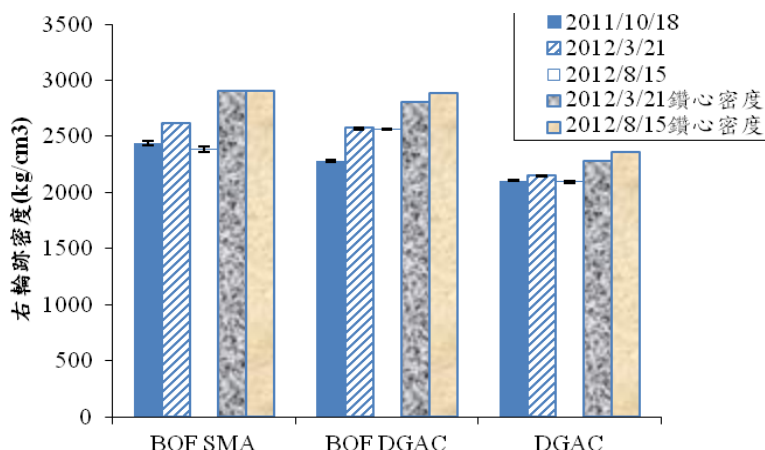


圖 29 右輪跡施工前後鋪面密度

表 10 顯示 BOF SMA 滾壓後現地密度較實驗室密度高，壓實度較天然粒料 DGAC 高 5%；BOF DGAC 現地密度與實驗室密度相近，壓實度較天然粒料 DGAC 高 3%。隨著開放交通，各路段壓實度均有上升趨勢，其中天然粒料 DGAC 試驗路段鋪面壓實度上升幅度最高；BOF SMA 壓實度上升幅度最低，顯示天然粒料 DGAC 因車輛荷重產生較大壓密，發生較嚴重的冒油現象。

表 10 現場壓實度差異比較

檢測日期	BOF SMA	BOF DGAC	天然粒料 DGAC
檢測項目	試驗組	試驗組	對照組
2012/3/23			
壓實度(%)	101.22%	99.79%	96.66%
與對照組差異	5%	3%	-
2012/8/15			
壓實度(%)	101.70%	101.52%	99.17%
與對照組差異	3%	2%	-

4.4.4 耐久性評估—Clegg Hammer 鋪面衝擊試驗結果

圖 30、圖 31 和圖 32 為各試驗點位之 CIV，施工前 BOF-SMA 處之 CIV 仍較其他兩處為佳，仍保持在 85 以上，顯示此處雖有明顯車轍，但鋪面結構依然完好，僅有面層產生永久變形。而其他兩處的 CIV 均在 70 左右，顯示路面結構情況稍微軟弱；但仍在可接受範圍。

施工後 BOF DGAC 之 CIV 較其他兩處為佳，平均值在 90 以上，其次為 BOF SMA 之 CIV 平均值為 86，均高於 85 以上，顯示此二處鋪面結構良好；天然粒料 DGAC 的 CIV 平均值在 70 以下，顯示路面結構情況稍微軟弱。

表 11 顯示鋪面鋪築後，所量測 BOF SMA 之平均 CIV 值較天然粒料 DGAC 平均值高 57%；BOF DGAC 之平均 CIV 值較天然粒料 DGAC 高 49%。開放交通後，除 BOF SMA 之平均 CIV 值近乎相同外，其餘路段平均 CIV 值除均有上升趨勢，其中 BOF DGAC 之平均 CIV 值高於其他兩試驗路段較天然粒料 DGAC

平均值高 39%；其次為 BOF SMA 之平均 CIV 值較天然粒料 DGAC 高 24%。

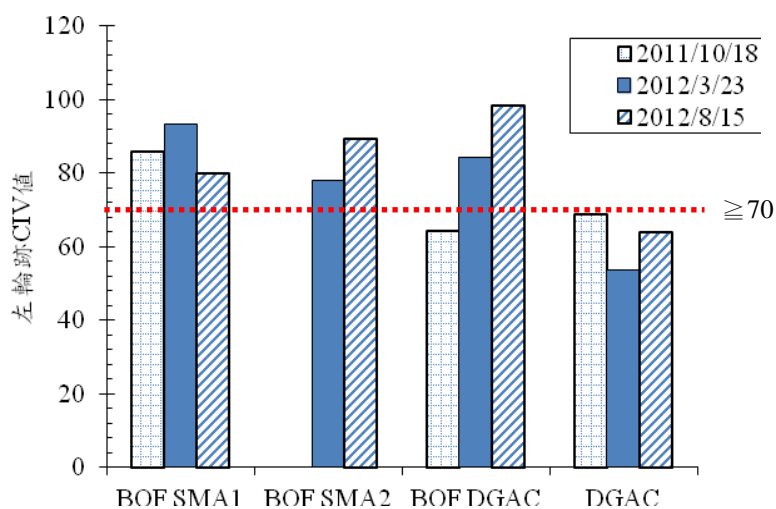


圖 30 左輪跡施工前後 CIV 值

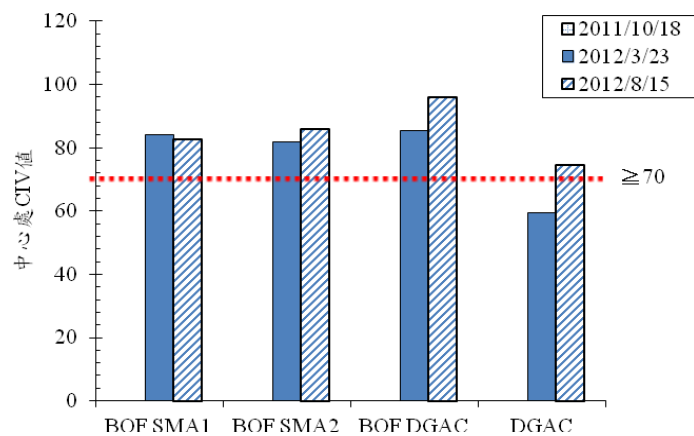


圖 31 中心處施工前後 CIV 值

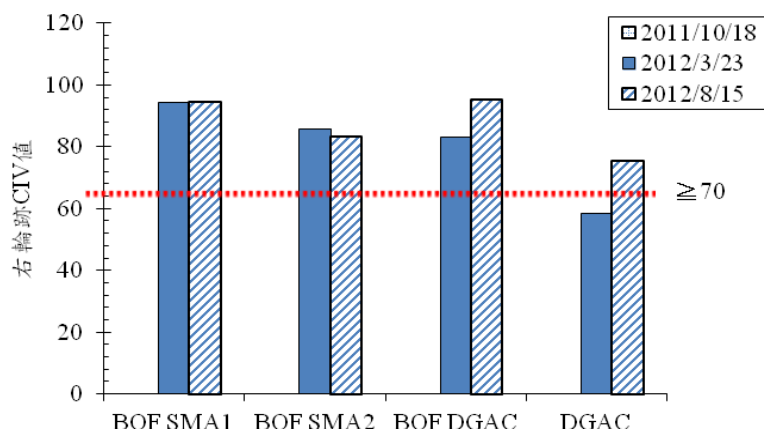


圖 32 右輪跡施工前後 CIV 值

表 11 現場 CIV 值差異比較

檢測日期	BOF SMA	BOF DGAC	天然粒料 DGAC
檢測項目	試驗組	試驗組	對照組
2012/3/23			
CIV 值	87.98	83.70	56.15
與對照組差異	57%	49%	-
2012/8/15			
CIV 值	86.83	96.95	69.80
與對照組差異	24%	39%	-

4.4.5 安全性評估－抗滑度試驗結果

圖 33、圖 34 和圖 35 顯示試驗點位之 BPN 值數據，施工前 BOF-SMA 較其他兩處的抗滑度稍高。BPN 值與鋪面紋理(texture)有關，在相同路段中可以發現輪跡處與車道中央處的 BPN 值有些許不同，主要是表層瀝青油膜受交通影響而被磨損，粒料之粗糙面因而顯現，提升路面抗滑能力；而隨通車時間漸增，粒料粗糙表面受重複車輛載重而磨損，漸漸產生較光滑面，使得抗滑能力稍微降低。而目前 BOF-SMA 處之抗滑度相對較低，研判係此為十字路口轉彎處，較多重車在此處進行起步、剎車與轉向的動作，鋪面紋理磨損情形較嚴重，BPN 值因此較低。但三個區段之 BPN 值都在 45 以上，抗滑度尚在可接受範圍。

鋪築後天然粒料 DGAC 之平均 BPN 值約 70 最高，而 BOF SMA 及 BOF DGAC 之平均 BPN 值相近，分別為 48 和 46；隨著開放交通約 5 個月，BOF SMA 及 BOF DGAC 之平均 BPN 值有上升之趨勢，分別上升至 61 及 60，天然粒料 DGAC 平均值則下降至 68。

表 12 顯示鋪面鋪築後，BOF DGAC 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 35%；BOF SMA 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 31%；隨著開放交通約 5 個月，BOF DGAC 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 11%；BOF SMA 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 9%，有明顯上升之趨勢；天然粒料 DGAC 平均 BPN 值有下降趨勢。

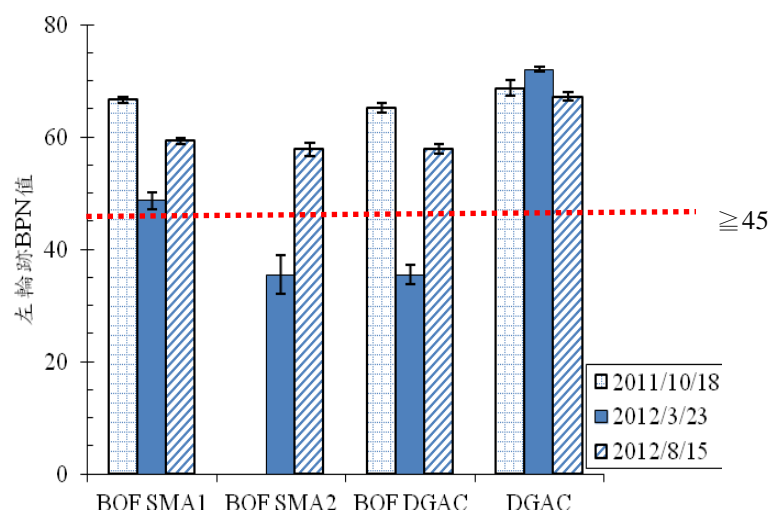


圖 33 左輪跡施工前後摩擦值

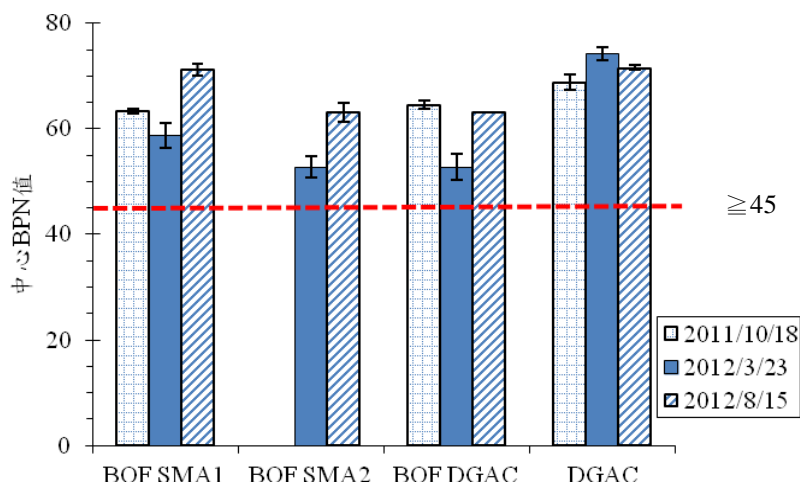


圖 34 中心處施工前後摩擦值

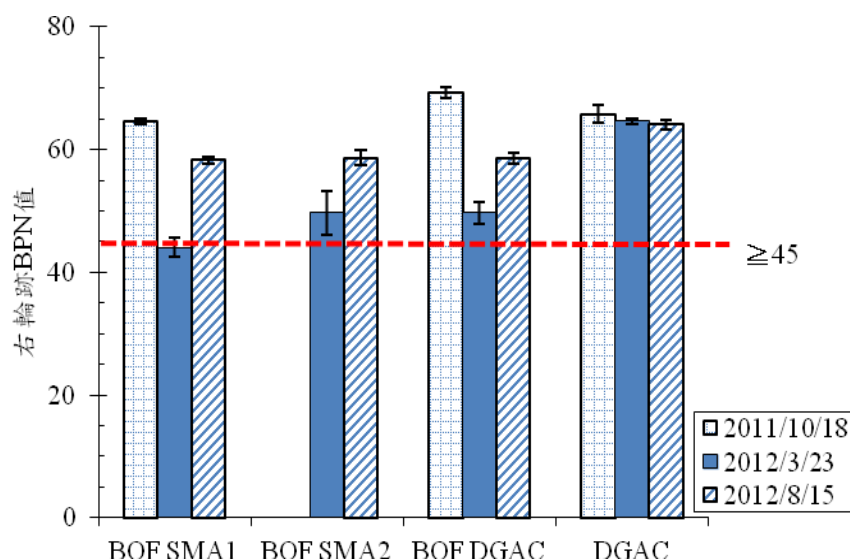


圖 35 右輪跡施工前後摩擦值

表 12 現場 BPN 值差異比較

檢測日期	BOF SMA	BOF DGAC	天然粒料 DGAC
檢測項目	試驗組	試驗組	對照組
2012/3/23			
BPN 值	48.93	42.58	68.32
與對照組差異	-28%	-38%	-
2012/8/15			
BPN 值	58.51	58.25	65.64
與對照組差異	-11%	-11%	-

4.4.6 回彈模數值(M_R)

圖 36 顯示瀝青混凝土之回彈模數(M_R)值，天然粒料 DGAC 之回彈模數值最

高，呈現天然粒料 DGAC > BOF DGAC > BOF SMA。由試驗結果可知，天然粒料 DGAC 和 BOF DGAC 之回彈模數(M_R)值明顯高於 BOF SMA 級配，主要原因是密級配粒料大小均勻分布，形成緻密連續的斷面，具較高彈性恢復力；而 SMA 之骨架為跳躍級配，主要以粗骨材為主，所形成斷面較不連續，荷重傳遞主要以粗粒料與粗粒料接觸產生粒料間互鎖機制，受力行為與 DGAC 由粗粒料、細粒料及填充料共同承受載重不同，故回彈模數(M_R)值試驗結果可能會有偏低現象。

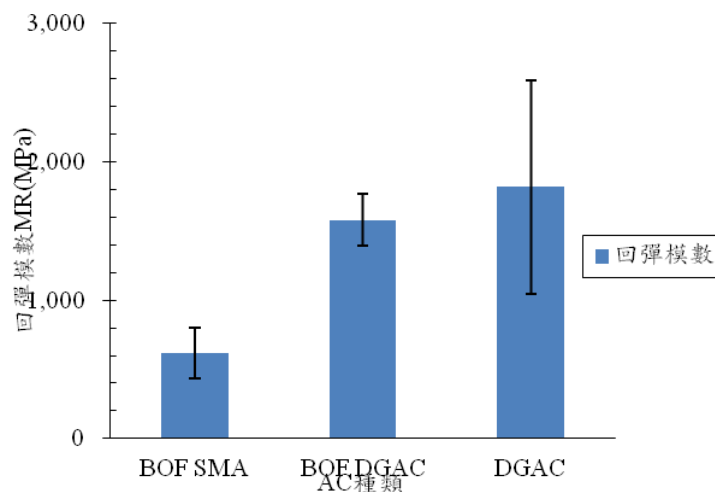


圖 36 現地回彈模數(M_R)比較

五、結論與建議

本研究選擇台南市中華西路一段及中華南路二段路段，分別鋪築轉爐石密級配瀝青混凝土(BOF DGAC)、轉爐石石膠泥瀝青混凝土 (BOF SMA)和天然粒料密級配瀝青混凝土鋪面，進行鋪面績效檢測，經由現地資料收集和分析，得到以下結論和建議。

5.1 結論

1. 綜合各項試驗結果趨勢分析，目前所呈現結果以 BOF SMA 路面績效最佳，其次為 BOF DGAC，最後為天然粒料 DGAC，目前仍屬於短期績效觀察，長期路面績效仍需持續檢測。
2. 天然粒料 DGAC 之 IRI 值比轉爐石瀝青混凝土上升趨勢較大，顯示含天然粒料之瀝青鋪面的平坦度可能因為服務時間長、重交通量大、鋪面結構因而較快變形。
3. 開放交通後約 5 個月，顯示 BOF SMA 有較高抗車轍能力；而 BOF DGAC 與天然粒料 DGAC 之車轍量增加幅度較高部分，仍有待後續進一步探討原因。
4. BOF SMA 和 BOF DGAC 之 VMA 較低，可能因轉爐石粒型方正，粒料容易堆積緊密，因而 VMA 較低。另外，轉爐石表面孔隙較多，吸入孔隙中之瀝青視為無效瀝青，有效瀝青的減少可能也是 VMA 減少的另一個因素。VMA 的減少對 BOF 鋪面的影響，應以現場績效為主。

5. BOF SMA 滾壓後現地密度較實驗室密度高；BOF DGAC 現地密度與實驗室密度相近，結果顯示瀝青混凝土之轉爐石粗粒料含量愈高，鋪面壓實度有上升趨勢。開放交通後，BOF SMA 壓實度上升趨勢最小；天然粒料 DGAC 壓實度上升趨勢較大，顯示天然粒料 DGAC 因車輛荷重產生較大壓密，可能發生較嚴重的冒油現象。
6. BOF DGAC 之 CIV 較其他兩處為佳，平均值在 90 以上，較天然粒料 DGAC 高 41%；其次為 BOF SMA 之 CIV 平均值為 86，較天然粒料 DGAC 高 34%，此二處均高於 85 以上，顯示鋪面結構良好；天然粒料 DGAC 的 CIV 平均值在 70 以下，顯示路面結構情況稍微軟弱。
7. 鋪築後，BOF DGAC 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 35%；BOF SMA 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 31%，顯示 BOF DGAC 及 BOF SMA 可能因轉爐石較易吸油，且表層瀝青油膜較厚，尚未被磨損，BPN 值因此較低。隨著開放交通約 5 個月，BOF DGAC 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 11%；BOF SMA 平均 BPN 值較天然粒料 DGAC 低 9%，有明顯上升之趨勢。

5.2 建議

目前為止 BOF SMA 的鋪面績效較佳，若後續欲鋪設石膠泥瀝青混凝土於市區道路面層，建議可深入探討鋪設標稱最大粒徑 12.5mm BOF SMA 於道路之可行性。

六、參考文獻

1. 歐木己 (1991)，「中鋼公司爐石資源化簡介」，第一屆工業減廢技術與策略研討會，第 5-9~5-26 頁。
2. 中國鋼鐵股份有限公司 (2000)，「轉爐石推廣手冊」，高雄。
3. U.S. Geological Survey. (2005). "Iron and Steel Slag End-Use Statistic", U.S.
4. 王金鐘 (2005)，「轉爐石作為基底層材料及其工程特性之研究」，國立成功大學土木工程系博士論文，台南。
5. 中鋼集團 (2007)，「轉爐石利用推廣手冊」，高雄。
6. 王耀寬 (2007)，「轉爐石對多孔瀝青混凝土之影響」，國立成功大學土木工程系碩士論文，台南。
7. 袁家偉 (2007)，「使用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，國立中央大學土木工程系碩士論文，桃園。
8. 黃隆昇，林登峰，林平全，許伯良 (2010)，「評估煉鋼爐石應用於瀝青混凝土之性質及現場鋪設成效」，中國工程師高雄會刊，第 18 卷，第 2 期，第 47-55 頁。
9. 陳偉全，林平全，葉志穎，姜智通，翁偉儒 (2010)，「轉爐石添加量對多孔瀝青混凝土特性之研究」，中國礦冶工程學會礦冶會刊，第 54 卷，第 1 期，第 97-108 頁。