

轉爐石應用於密級配和開放級配瀝青混凝土之成效評估

陳建旭¹、陳偉全²、廖敏志³、廖敏松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

轉爐石應用於瀝青混凝土已在國內縣市政府轄區內進行示多條示範道路的檢測，然而，高速公路現地轉爐石瀝青混凝土鋪面成效資訊缺乏，並且交通荷重與車速皆不同於市區道路。本研究藉由國道 1 號與國道 3 號之鋪面績效量測和交通量分析，評估轉爐石密級配與轉爐石開放級配瀝青混凝土鋪面之功能性、耐久性與安全性；功能性試驗包含透水量和噪音檢測，耐久性試驗包含車轍、平坦度和衝擊值，安全性試驗為英式擺錘值(BPN)，交通量則以單軸載重當量數(Equivalent Single Axle Load, ESAL)表示。現地鋪面功能性、耐久性和安全性檢測結果顯示，轉爐石瀝青混凝土與傳統含天然粒料之瀝青混凝土的鋪面績效均符合要求，兩種材料間的差異不大。由於目前仍屬於短期績效檢測，仍須持續進行現地檢測與分析長期鋪面績效，評估轉爐石瀝青混凝土和天然粒料瀝青混凝土之不同處。

關鍵詞：轉爐石、現地鋪面成效、單軸載重當量數。

一、前言

台灣高速公路現行採用之鋪面形式可分為剛性鋪面與柔性鋪面，其中柔性鋪面其佔全部高速公路達 95% 以上，鋪面結構主要是以瀝青處理底層(Bituminous Treated Base, BTB)上方鋪築密級配瀝青混凝土(Dense Graded Asphalt Concrete, DGAC)，之後再加鋪開放級配摩擦層(Open Graded Friction Course, OGFC)，形成鋪面結構主體，而 OGFC 主要是增加鋪面紋理與排水性能，提高鋪面摩擦力，減少雨天時在鋪面上產生之水膜。然而，國內高速公路受到重載車輛與高交通流量的影響，部分路段產生車轍、坑洞與裂縫等現象。此外，最上層的 OGFC 容易在短時間內被壓實，形成不透水層，使得在雨天時，可能無法即時排除鋪面上的水膜，導致駕駛人行車視線降低與心理壓力增加，影響行車的安全性。

根據 2011 年交通資料顯示國道 1 號南部高雄段南下主線的平均每日總交通量約為 80,000 輛，重型車(含大客貨車與聯結車)流量約為 16,000 輛，估計平均每日的單軸載重當量數(Equivalent Single Axle Load, ESAL)在 40,000 左右。比較國道 3 號新化南下與國道 8 號東向路段的每日平均 ESAL 值均約為 5,000 左右，國道 1 號南部重載交通之鋪面所受到的荷重程度為其他南部國道路段的 8 倍以上。

一般而言，開放交通 1~2 年後，OGFC 鋪面可能產生緻密現象，降低透水功能，少數路段雨天時表面或許產生水滑現象(hydroplaning)；此外，平均使用壽命在外(重)車道約為 5 年左右，可能需刨除重鋪以改善鋪面品質。除了受到重交通量影響外，原先天然粒料可能無法承受重車碾壓，進而產生車轍、疲勞裂縫、粒料剝離和坑洞等現象[1]。

瀝青混凝土鋪面須具有良好的粒料形狀與強度，才可使級配適當分布之粒料形成一緊密或互鎖的結構，以承載交通荷重，避免產生永久變形的現象；此外，瀝青與粒料介面間亦須具有良好的黏結力，防止水分入侵，避免產生疲勞裂縫和剝脫破壞。然而，台灣開採天然砂石的地點與數量有限，需尋找維持路面耐久性和排水性之替代材料，以達節能減碳的目標[2-4]。

轉爐石(Basic Oxygen Furnace Slag, BOF)為煉鋼過程中的副產品，粒形為多角塊狀，比起一般天然粒料，比重大且洛杉磯磨損值低，又因其表面的粗糙度及氧化鈣成分，使 BOF 與瀝青緊密結合，較不易產生剝脫現象，BOF 粒料的基本特性具有資源再利用價值，可視為綠色材料[5-9]。若經過安定化程序並以瀝青黏結料包裹阻隔處理，可降低 BOF 活性[10、11]；然而 BOF 是否可提昇瀝青鋪面的耐久性與功能性，需要再深入評估以減少養護與維修頻率，使道路成為永續鋪面，達到工業副產品減量和資源再生的目標[12-19]。

二、研究目的

由現地鋪面檢測與交通荷重影響評估轉爐石瀝青混凝土鋪面績效，透過現地資料收集與整理，分析轉爐石應用於密級配和開放級配瀝青混凝土鋪面使用於高速公路之可行性。選擇國道 1 號與國道 3 號南部路段鋪設轉爐石密級配瀝青混凝土(BOF DGAC)及轉爐石開放級配摩擦層(BOF OGFC)鋪設工程，並以含天然粒料之傳統密級配(DGAC)與開放級配瀝青混凝土(OGFC)做對照，本研究目的為：

1. 分析開放級配與密級配轉爐石瀝青混凝土鋪面的材料性質
2. 評估轉爐石瀝青混凝土鋪面的功能性、耐久性和安全性績效
3. 探討交通荷重對轉爐石瀝青混凝土鋪面績效的影響

三、研究方法

3.1 研究流程

研究流程分三階段進行，第一階段為進行現地鋪面檢測，瞭解鋪面績效於施工前後的變化；第二階段為收集及統計試驗路段的交通量，以 AASHTO 之等值單軸載重當量數(ESAL)將交通量化算為交通荷重；第三階段將現地績效檢測的成果，與交通荷重統計後之資料加以比較。

3.2 鋪設地點及材料

本研究使用材料為轉爐石取代天然粗粒料，於高速公路鋪設轉爐石瀝青混凝土(密級配及開放級配)鋪面，選擇南部國道 1 號與 3 號各一處進行評估，鋪設地點如圖 1 和圖 2 所示，道路斷面示意圖如圖 3 所示。表 1 列出鋪設範圍與材料。

背景資料分別說明如下：

1. 國道 1 號岡山段轄區，南下里程數 356K+000，楠梓交流道第二出口匝道(往鳳楠路與鳳仁路方向 11/667~11/967)處，內路肩 1.2m 寬，外路肩 1.8m 寬，及匝道 4.5m 寬，鋪設 10 cm 厚之轉爐石密級配瀝青混凝土，及 2 cm 厚之轉爐石開放級配瀝青混凝土，採用的瀝青黏結料為改質 III 型瀝青，鋪設的面積為 300 公尺長與 7.5 公尺寬。
2. 國道 3 號屏東段轄區，北上里程數 424k+380 至 424k+180，內車道 3.7m 寬及外車道 3.8m 寬，鋪設 5 cm 厚之轉爐石密級配瀝青混凝土，及 2 cm 厚之轉爐石開放級配瀝青混凝土，採用的瀝青黏結料為改質 III 型瀝青，鋪設的面積為 200 公尺長與 8.5 公尺寬。

除此之外，於兩處試驗地點另鋪設天然粒料瀝青混凝土作為對照組，以瞭解轉爐石(BOF)和天然粒料之差異。

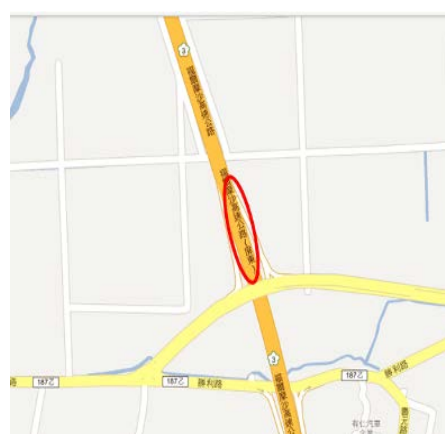
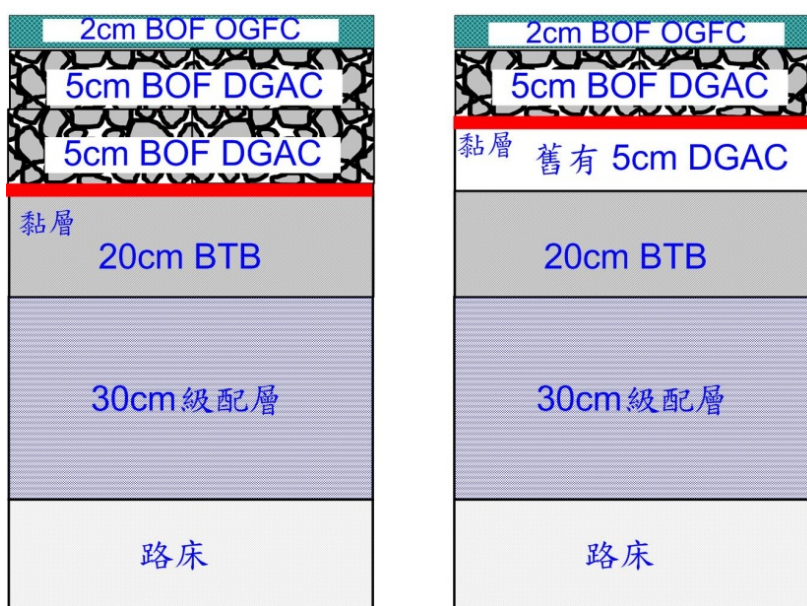


圖 1 國道 1 號岡山段試驗道路鋪設地點 圖 2 國道 3 號屏東段試驗道路鋪設地點



岡山段

屏東段

圖 3 國道岡山段及屏東段道路斷面示意圖

表 1 鋪設範圍與材料

段別	鋪設範圍	鋪面層	材料	鋪面厚度
國 1	356K 11/667	摩擦層	9.5mm OGFC	2 cm
岡山段	356K 11/967	面層	19mm DGAC	10 cm
國 3	424K+180~	摩擦層	9.5mm OGFC	2 cm
屏東段	424K+380	面層	19mm DGAC	5 cm

3.3 試驗點位說明

為與傳統瀝青混凝土(含天然粒料)鋪面成效做對照，岡山段轄區有 3 個試驗點位(分別為 2 個轉爐石瀝青混凝土和 1 個傳統瀝青混凝土點位)，均位於匝道的車道處(此匝道僅有單車道)；屏東段轄區有 2 個試驗點位(分別為 1 個轉爐石瀝青混凝土和 1 個傳統瀝青混凝土點位)，均位於第 2 車道處，現地評估點位如表 2 所示。其中 N1 與 N3 代表國道 1 號與 3 號；NA 代表天然粒料路段；BOF 代表轉爐石路段；L 表示瀝青混凝土中另添加改質劑。

表 2 現地評估點位說明

段別	車行方向	樁號	車道位置	代表符號
國 1	南下	356K (11/400)	匝道	N1-NA
岡山段	南下	356K (11/742)	匝道	N1-BOF
	南下	356K (11/900)	匝道	N1-BOF-L
國 3	北上	424K+100	第 2 車道	N3-NA
屏東段	北上	424K+250	第 2 車道	N3-BOF

3.4 材料

本研究以 BOF 取代天然粒料作為粗粒料使用，在瀝青混凝土材料組成中，停留在#4 號篩(4.75mm)以上的粗粒料為 BOF，通過 4.75mm 號篩以下的細粒料為天然料，通過#200 號篩(75 μ m)的填縫料則為水泥。

3.5 現地鋪面績效評估方法

3.5.1 透水量試驗

現地透水量試驗，如圖 4(a)和(b)所示，係依據日本道路協會「排水性鋪裝技術指針」的方法，評估鋪面之排水能力，以及排水量是否符合新工時規範值 900ml/15sec 之要求。本研究於各試驗路段的左右輪跡處與車道中心處分別進行現地透水量試驗。

3.5.2 噪音量試驗

噪音檢測目的主要是鋪面通車前後，車輛通行所產生的噪音變化情形，如圖 4(c)和(d)所示。每個試驗路段檢測時間約為 20 分鐘。本研究使用積分噪音計進行檢測，並使用軟體計算該路段之等值噪音量(equivalent continuous noise level, L_{eq})，噪音量單位以分貝 dB(A)表示。

3.5.3 平坦度試驗

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，如 4(e)和(f)所示。該步進式平坦儀檢測時以人力推動，檢測速度約 2~3 公里/小時，檢測距離為 200 公尺，量測方式為利用安裝於傾斜儀(inclinometer)上之兩滾輪進行連續路面高程量測，每 25 公分記錄一筆路面高低差資料，沿行走之路面進行連續量測，並自動累加產生路面真實高程輸出值紀錄於機上可攜式紀錄器內，並以軟體計算該路段之 IRI。

3.5.4 車轍量試驗

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，本研究利用 1.8 公尺直規作為車轍量的檢測工具，如 4(g)和(h)所示。本研究於各試驗點位的左右輪跡處與車道中心處，分別進行變形量之量測，並計算出輪跡處的車轍量。

3.5.5 Clegg 衝擊試驗

Clegg 重錘試驗係由 20kg 落錘從預定高度自由落下撞擊試驗體表面時，安裝在落錘上的加速度計輸出到控制單元設備，提供數位數據供讀取。試驗過程依照 ASTM D5874 來進行，將導管中落錘提升至規範規定高度後落下四次後，顯示器讀到的最大加速度為 Clegg 衝擊值(Clegg Impact Value, CIV)，1 個 CIV 單位為 10g 重力加速度值。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，一般而言，CIV 值愈高代表鋪面結構強度愈佳，如圖 4(i)和(j)所示。

3.5.6 摩擦試驗

抗滑度係依據 ASTM E303 評估方法，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，量測值以 British Pendulum Number 表示，簡稱 BPN，用以評估雨天時路面與車輪之間的摩擦力，避免車輛產生打滑的危險，如 4 (k)和(l)所示。



(a) 岡山段透水量試驗



(b) 屏東段透水量試驗



(c) 岡山段噪音量試驗



(d) 屏東段噪音量試驗



(e) 岡山段平坦度試驗



(f) 屏東段平坦度試驗



(g) 岡山段車轍量試驗



(h) 屏東段車轍量試驗



(i) 岡山段 Clegg 衝擊試驗



(j) 屏東段 Clegg 衝擊試驗



(k)岡山段摩擦試驗



(l)屏東段摩擦試驗

圖 4 岡山段和屏東段現地鋪面績效試驗

3.6 交通量和交通荷重分析方法

本研究根據高速公路局南區工程處交控中心所提供的交通流量資料，將試驗路段受到分為 3 種類型車輛載重影響，分別為小型車、大客貨車和聯結車。經過整理統計後，可以得到累積總交通量，計算求得單一車道平均每日交通量 (ADT)。

除了總交通量和 ADT 數據外，本研究採用美國 AASHTO 鋪面結構設計理念中對交通荷重之考量，根據軸重當量因子 (Load Equivalence Factor, LEF)，將各型車輛交通量轉換為等值單軸載重當量數 (Equivalent Single Axle Load, ESAL)，依據 ESAL 值評估交通載重對 PAC 鋪面績效的影響。採用的參數如表 6 所示。ESAL 值的計算式如下所示：

$$\text{ESAL 值} = \text{軸重當量因子} \times \text{交通量} \times \text{軸數} \quad (1)$$

表 6 單軸載重當量數之計算參數 (AASHTO, 1993)

車輛類型	軸重當量因子	軸數
小型車	0.0002	2
大客貨車	1	2
聯結車	1	3

依據美國 AASHTO 鋪面設計理念，軸重當量因子乃是以 18 kips (8 公噸) 的等軸重走一次對路面破壞的影響等於 1 為基準，而小型車單軸重 2 kips (0.9 公噸) 走一次對路面破壞則為 0.0002；換句話說，以二軸之大客貨車走一次對路面的破壞，小型車需走 5,000 次 $(=1/0.0002)$ ；三軸之聯結車走一次對路面的破壞，小型車需走 7,500 次 $[(1 \times 3)/(0.0002 \times 2)]$ 。

AASHTO 試驗道路資料說明超載重車對路面的破壞，呈現 4 次級數的增加，換句話說，規定總重 35 噸的卡重，若重車超載至 40 噸，對路面的損壞將會增加 $(40/35)^4 = 1.7$ 倍，因此 40 噸超載重車走一次對路面的破壞，小型車大約要走 10,000 次才会有相同的路面破壞，綜合重車超載對鋪面之破壞，本研究所使用之軸重當量因子仍屬保守。

四、試驗結果與討論

4.1 材料性質

本次使用的 BOF 粗粒料依尺寸可分為 7 分、4 分和 2.5 分共三種，天然料則分為粗砂和細砂兩種，從容積比重而言，BOF 和天然粒料分別約為 3.5 和 2.6，兩者相差 0.9，於配比設計時，須進行體積修正。此外，本研究使用的瀝青黏結料為符合 CNS14184 規範的改質 III 型瀝青。粒料與瀝青黏結料的基本性質如表 3 至 5 所示。本研究材料由建中工程股份有限公司提供，材料試驗值資料由華光工程顧問有限公司提供；試驗值皆符合規範要求。

表 3 粒料之比重與吸水率【華光工程顧問股份有限公司，2012】

粒料	試驗項目	試驗值
BOF 粗粒料 停留#4 號篩 以上	容積比重，25°C/25°C (烘乾法)	3.471
	容積比重，25°C/25°C (面乾飽和法)	3.524
	視比重，25°C/25°C	3.665
	吸水率，%	1.53
天然細粒料 通過#4 號篩 以下	容積比重，25°C/25°C (烘乾法)	2.553
	容積比重，25°C/25°C (面乾飽和法)	2.614
	視比重，25°C/25°C	2.719
	吸水率，%	2.40
填縫料	視比重，25°C/25°C	3.150

表 4 粒料之基本性質【華光工程顧問股份有限公司，2012】

試驗項目	試驗值	規範值
粗粒料洛杉磯磨損值(%)	17	≤30
粗粒料破碎顆粒含量，兩面破碎(%)	100	≥75
粗粒料破碎顆粒含量，一面破碎(%)	100	≥90
通過#4 篩停留#8 篩粒料破碎顆粒含量(%)	91	≥50
含砂當量	83	≥50
粗粒料長大於寬或寬大於厚或長大於厚之 3 倍含量(%)	1.8	≤10
健性試驗損耗率(%)	粗粒料	0.6
	細粒料	2.3
		≤12
		≤15

表 5 改質 III 型瀝青之性質【華光工程顧問股份有限公司，2012】

試驗項目	試驗值	規範值
瀝青均勻性質	不含水份，加熱至 175°C 不起泡沫	-
25°C 針入度(0.1mm)	36	≥35
60°C 絕對黏度(poise)	63,600	≥8,000
135°C 動黏滯度(cSt)	1,890	≥3,000
閃火點(°C)	232+	≥232
溶解度(%)	99.89	≥99
離析試驗頂段與底段軟化點差值(°C)	1.6	-
RTFOT 後之彈性回復率(%)	83.10	≥70
RTFOT 後之 4°C 針入度	14	≥10
軟化點(°C)	77.0	≥70

4.2 配比設計

本研究的配比設計由華光工程顧問股份有限公司所進行，BOF DGAC 與 BOF OGFC 的各項試驗結果分別說明如下，其中兩者之標稱最大粒徑(NMAS)分別為 19 和 9.5mm。

4.2.1 BOF DGAC 配比設計

根據 BOF、天然砂料和填縫料之篩分析結果，計算出粒料合成後的工作拌和公式(Job Mix Formula, JMF)，將級配曲線調整至級配規範的上下限範圍內，圖 5 顯示依重量設計法之 19mm 密級配瀝青混凝土的級配曲線。

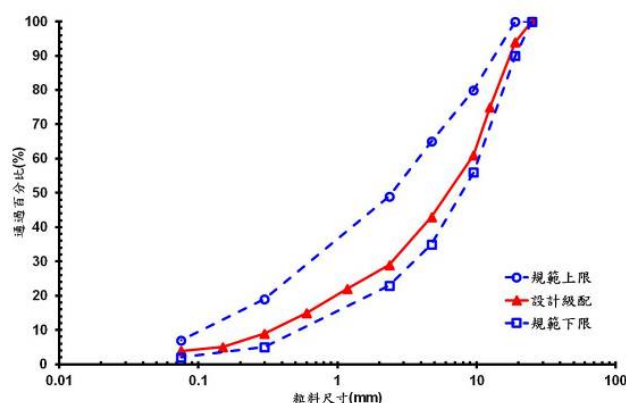


圖 5 BOF DGAC 級配曲線【華光工程顧問股份有限公司，2012】

依照美國瀝青學會(Asphalt Institute) AI MS-2 第六版的試驗方法，將改質 III 型瀝青黏結料按比例與粒料拌和，馬歇爾試體拌和與夯壓溫度對應瀝青黏度的 $170 \pm 20\text{cSt}$ 及 $280 \pm 30\text{cSt}$ ，分別為 $175\sim 181^\circ\text{C}$ 和 $164\sim 169^\circ\text{C}$ ，依重交通量的設計，試體雙面分別夯打 75 次。依照馬歇爾試體空隙率為 4% 時所對應之瀝青用量，檢核單位重、穩定值、流度值、VMA 和 VFA 是否符合設計規範。本配合設計中，建議的瀝青含量為 4.3%，在此含量下之對應瀝青混凝土工程性質如表 7 所示。此外，為評估瀝青黏結料對工程性質的影響，另加入改質 III 型瀝青含量之 4% 的添加劑於 DGAC 中，配比設計建議的瀝青含量為 4.5%，實際用量則由試拌決定。

表 7 BOF DGAC 工程性質【華光工程顧問股份有限公司，2012】

試驗項目	試驗值	試驗值(含添加劑)	規範值
單位重(kg/m ³)	2768	2772	-
穩定值(lbf)	5300	4686	≥ 2700
流度值(0.01")	11	15	8~14
空隙率(%)	4.0	3.4	3~5
VMA(%)	12.2	12.2	依配合設計
VFA(%)	68	72	65~75
滯留強度(%)	88	86	≥ 75

4.2.2 DGAC 配比設計

根據天然粗細粒料和填縫料之篩分析結果，計算出粒料合成後的工作拌和公式(Job Mix Formula, JMF)，將級配曲線調整至級配規範的上下限範圍內，圖 6 顯示依重量設計法之 19mm 密級配瀝青混凝土的級配曲線。

依照馬歇爾試體空隙率為 3.5% 時所對應之瀝青用量，檢核單位重、穩定值、流度值、VMA 和 VFA 是否符合設計規範。本配合設計中，建議的瀝青含量為 4.7%，在此含量下之對應瀝青混凝土工程性質如表 8 所示。

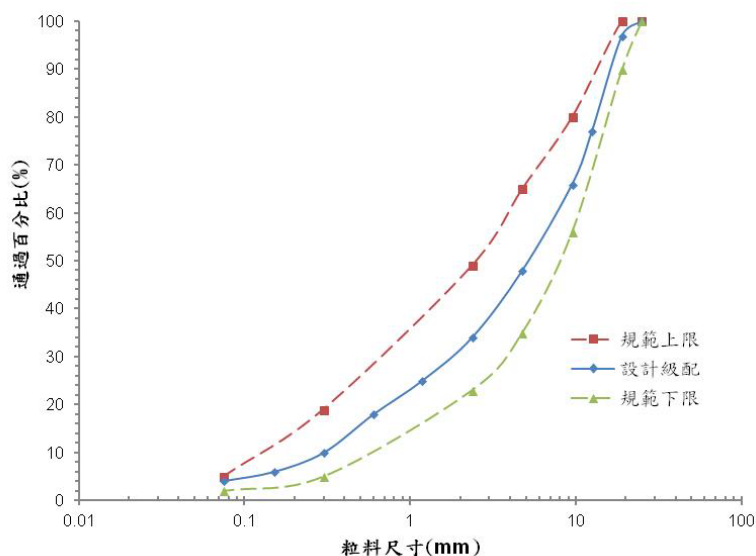


圖 6 DGAC 級配曲線【華光工程顧問股份有限公司，2012】

表 8 DGAC 工程性質【華光工程顧問股份有限公司，2012】

試驗項目	試驗值	規範值
單位重(kg/m ³)	2377	-
穩定值(lbf)	4700	≥2700
流度值(0.01")	13	8~14
空隙率(%)	3.5	3~5
VMA(%)	13.0	依配合設計
VFA(%)	73	65~75
滯留強度(%)	88	≥75

4.2.3 BOF OGFC 配比設計

根據 BOF、天然砂料和填縫料之篩分析結果，計算出粒料合成後的工作拌和公式(Job Mix Formula, JMF)，將級配曲線調整至級配規範的上下限範圍內，圖 7 顯示依重量設計法之 9.5mm 開放級配瀝青混凝土的級配曲線

依照 AASHTO T305-97 的試驗方法，將瀝青含量為 4.5% 時的 9.5mm 開放級配瀝青混凝土，分別在拌和溫度為 136、146 和 156°C 時進行垂流量試驗，試驗結果建議使用的瀝青含量為 4.4%，瀝青混合料拌合溫度為 146°C。

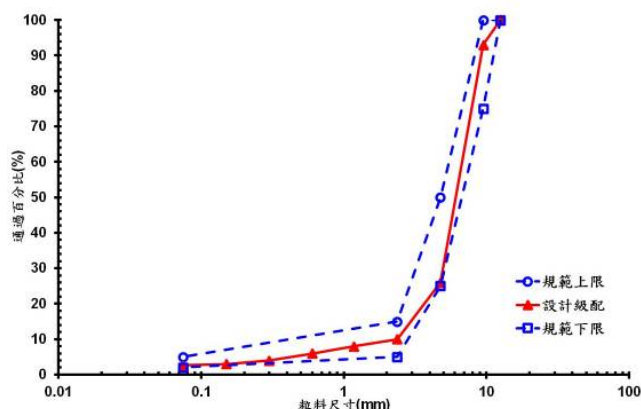


圖 7 BOF OGFC 級配曲線【華光工程顧問股份有限公司，2012】

4.3 現地鋪面績效評估

4.3.1 功能性評估-透水量

現地透水試驗係用以評估鋪面之透水能力，圖 8 為施工後第一次檢測(2012/7/5)之各試驗路段左右輪跡及車道中心處現地透水量。試驗結果顯示鋪面完工後之透水量介於 1100~1200 ml/15sec，透水狀況良好。輪跡處與車道中心處的現地透水量分佈狀況觀察，使用天然粒料、轉爐石或添加改質瀝青，於透水量表現並無明顯差別。

圖 9 為各試驗路段施工前後之現地透水量，輪跡處為左右輪跡之平均值，直條圖上下間距為 2 個標準差的大小。試驗結果顯示各試驗路段於施工前因受長期行駛車輛輾壓載重影響，透水量表現已降低，介於 500~800 ml/15sec 間，而在施工後，透水量則恢復至 1000~1200 ml/15sec 之間水準；另從數據觀察，使用天然粒料、轉爐石或添加改質瀝青，透水量表現並無明顯差距。

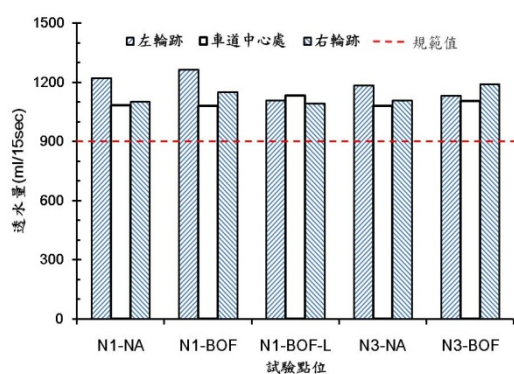


圖 8 施工後左右輪跡透水量試驗結果

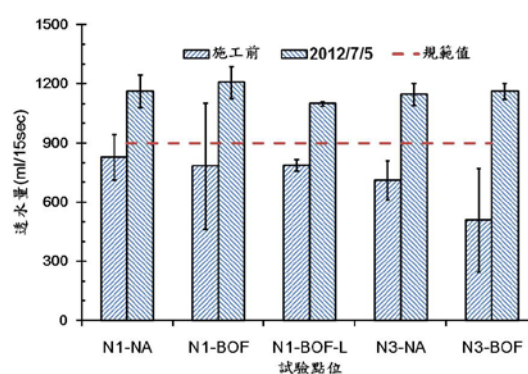


圖 9 施工前後輪跡處透水量變化

4.3.2 功能性評估-噪音量

噪音檢測目的主要是瞭解鋪面通車前後，車輛通行所產生的噪音變化情形。本研究使用積分噪音計進行檢測(檢測時間約為 20 分鐘)，並使用軟體計算該路段之等值噪音量(equivalent continuous noise level, Leq)，噪音量單位以分貝 dB(A)

表示；圖 10、11 分別為國道 1 號、3 號試驗路段施工前後之噪音量變化，由數據觀察，不同材料施作之鋪面對於噪音值影響程度甚小，環境交通流量和類型不同對於噪音影響程度較大。

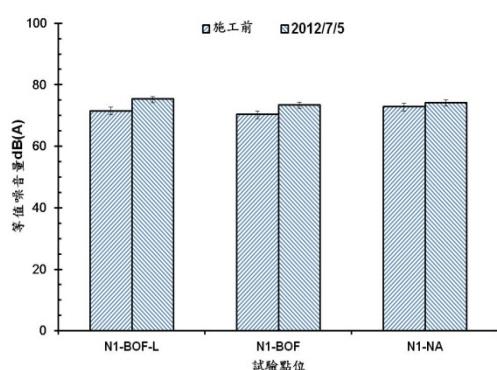


圖 10 國道 1 號試驗路段施工前後噪音量變化

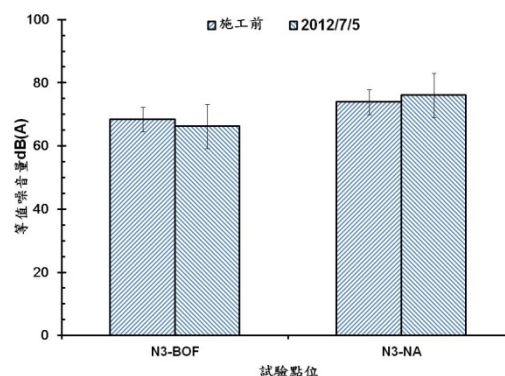


圖 11 國道 3 號試驗路段施工前後噪音量變化

4.3.3 耐久性評估-平坦度

道路平坦與否影響用路人的行車舒適度，本研究利用國際糙度指標 (international roughness index, IRI) 評估施工前後之路面平坦度。圖 12 說明各試驗路段施工後之左右輪跡處 IRI 值，由圖中可知各試驗路段左右輪跡處平均 IRI 都低於 3.0 m/km，行車狀況良好。但若比較相同路段左右輪跡處之 IRI 值，顯示仍有微小差異性存在。一般而言，初期 IRI 值與施工技術有關，IRI 值在 5 個試驗路段中皆在合理範圍內，顯示施工品質符合用路人舒適度之需求。

圖 13 係說明各試驗路段施工前後 IRI 值變化情形，其中各試驗路段施工前因長時間受重車碾壓，IRI 值較高；而於施工後各試驗路段 IRI 值則有顯著降低，顯示行車狀況良好；而由圖中亦可觀察得知，平坦度與施工技術有關，天然粒料和轉爐石對於初期平坦度並無影響。

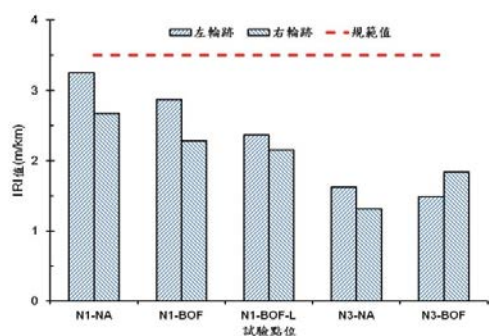


圖 12 施工後左右輪跡平坦度試驗結果

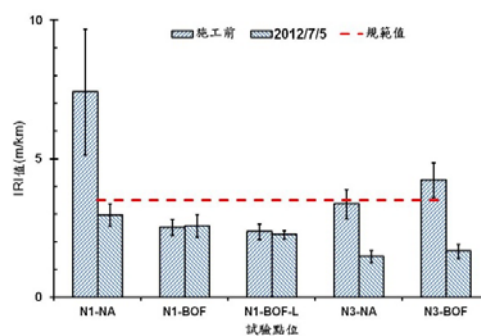


圖 13 施工前後平坦度變化

4.3.4 耐久性評估-車轍量

圖 14 表示各試驗路段左、右輪跡處之車轍量，數據顯示各試驗路段輪跡處車轍量皆低於 5mm，說明路基和基底層狀況良好；圖 15 則為施工前後車轍量變

化關係，試驗點位車轍表現均較施工前為佳。

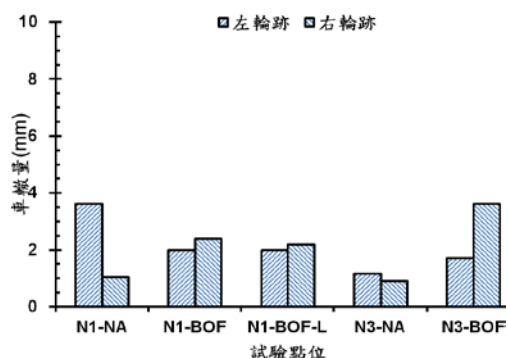


圖 14 施工後左右輪跡車轍量試驗結果

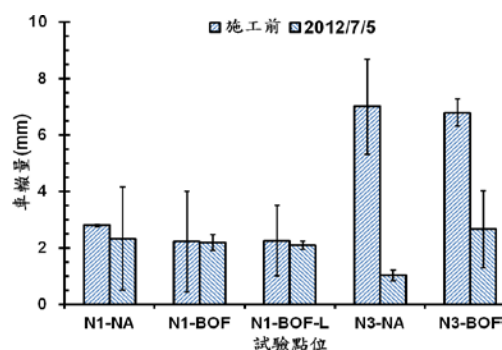


圖 15 施工前後車轍量變化

4.3.5 耐久性評估-Clegg 衝擊值

將 Clegg 衝擊試驗機應用在各試驗路段現地量測作業，檢測試驗路段現地鋪面，應用檢測天然粒料、轉爐石及添加瀝青改質添加劑之路面 CIV 值。CIV 值愈高，代表鋪面結構強度愈佳。當 CIV 值大於 70 時，鋪面狀況良好，可視為穩定區；當 CIV 小於 50 時，鋪面容易有車轍、龜裂和坑洞等現象，可視為不穩定區，當 CIV 值介於 50 和 70 中間，需定期觀測注意鋪面狀況，加以監測故視為觀察區。

圖 16 顯示各點位的 CIV 值均在 70 以上，表示試驗地點的路基與鋪面結構良好，而一般 CIV 值在輪跡處會較車道中央處高，原因是輪跡處受車輪載重次數多，因再壓密的作用使得孔隙逐漸減少，使壓實度上升，CIV 值也會隨之上升；從試驗結果來看，左輪跡、中間車道、右輪跡之 CIV 值並無明顯差異。

圖 17 則為比較施工前後 Clegg 衝擊值變化，結果顯示施工前 CIV 值明顯較施工後成果為高，原因是施工前受車輪載重次數多，因再壓密的作用使得孔隙逐漸減少，使壓實度上升，CIV 值也會隨之上升。

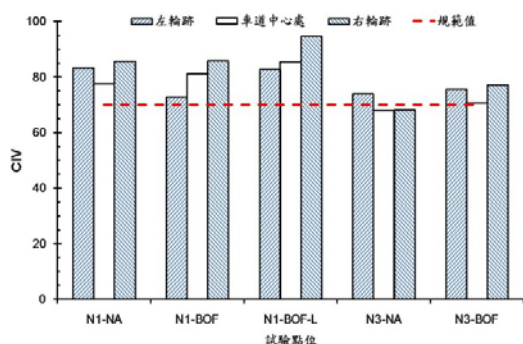


圖 16 2012/7/5 Clegg 衝擊值試驗結果

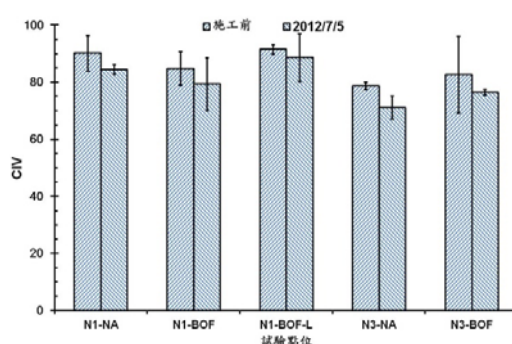


圖 17 施工前後 Clegg 衝擊值變化

4.3.6 安全性評估-抗滑度

本研究利用英式擺錘試驗儀 (BPT) 評估潮濕路面之表面摩擦特性，用以評

估各試驗路段通車前後之抗滑能力，量測值以 BPN 值表示，BPN 值愈大即表示抗滑能力越佳。由於 BPN 值受到溫度影響，本研究 BPN 值都修正到溫度為 20°C 之值為代表。

由圖 18 可知各試驗路段通車前鋪面之平均 BPN 值都已超過 60，部分路段甚至可達接近 90，表示現地鋪面抗滑能力良好；BPN 值與路面表層性質較有關係，在相同路段中可以發現輪跡處與車道中心處的 BPN 值有些許不同，但彼此差異很小。一般而言，BPN 與黏結料種類無關，與粒料和鋪面紋理 (texture) 有關。

圖 19 則為比較施工前後輪跡處抗滑度變化，從目前 BPN 數據觀察得知使用天然粒料、轉爐石或添加改質瀝青，對於抗滑度表現影響不大。

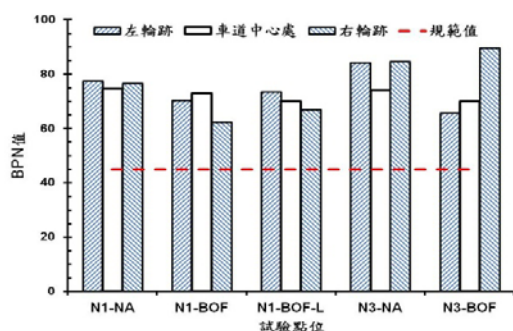


圖 18 2012/7/5 摩擦試驗結果

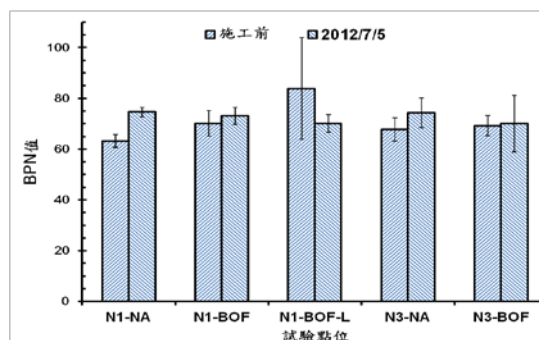


圖 19 施工前後輪跡處抗滑度變化

4.4 交通流量與荷重對鋪面績效之影響

圖 20 顯示國 1 楠梓第二出口匝道及國 3 N424.3K 之平均每日交通量，其交通量分別為 8,717 及 2,646 輛。然而，若僅考慮交通流量之平均每日交通量，可能忽略大型車與聯結車對於鋪面結構的破壞程度，事實上，大型車與聯結車對路面破壞分別是小型車的 5,000 和 7,500 倍以上，需考量各型車或各交通載重對鋪面破壞程度的差異。

依照前述交通荷重分析方法，將平均每日交通量化算為單軸載重當量數 (ESAL)，如圖 21 所示，大客車和聯結車對岡山路段影響甚巨，岡山段和屏東段每日平均 ESAL 值分別為 6,007 和 643。

圖 22 顯示各試驗路段完工後累計總 ESAL 值，其中須先說明天然級配試驗路段因施工完成時間較晚，因此 N1-NA、N3-NA 累計 ESAL 值較轉爐石試驗路段 N1-BOF、N1-BOF-L、N3-BOF 累計 ESAL 值為少。而經過統計，國道 1 號總 ESAL 值累計 456,565 較國道 3 號總 ESAL 值累計 42,459 多達 10.8 倍，顯示國 1 楠梓第二出口匝道交通使用量遠較國 3 N424.3K 使用量大。

1. 透水量與交通荷重關係

圖 23 為輪跡處平均透水量與 ESAL 值的關係，由該圖得知，ESAL 值高低對於短時間內透水量表現並無明顯差距。

2. 噪音量與交通荷重關係

圖 24 說明檢測地點、交通流量與地理環境會造成差異，國 1 岡山段 356K

匝道處之鋪面因位處市區，交通流量大，等值噪音量較高，等值噪音量隨著 ESAL 值之上升而增加，說明重載交通增加，噪音量也隨之增加。

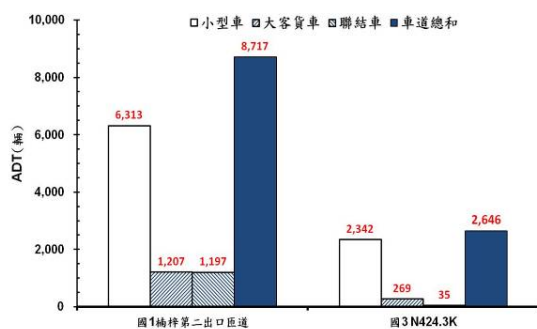


圖 20 平均每日交通量

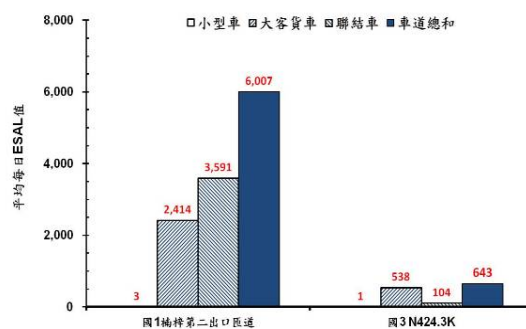


圖 21 平均每日 ESAL 值

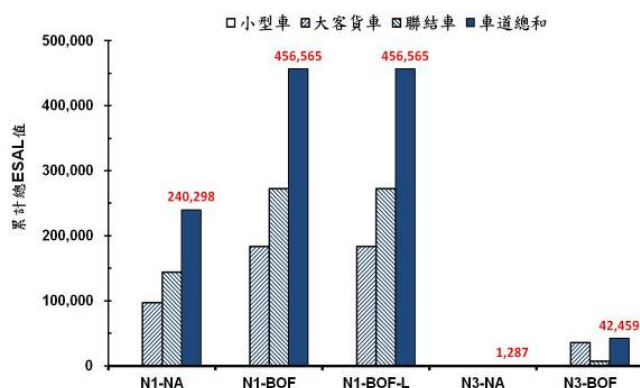


圖 22 完工後累計總 ESAL 值

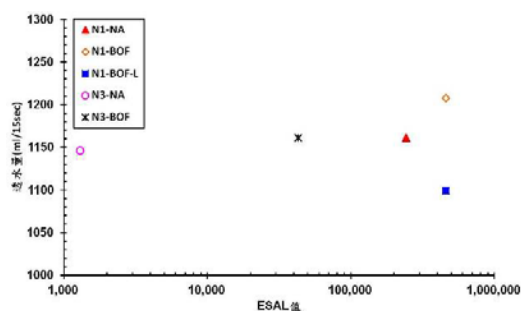


圖 23 輪跡處平均透水量與 ESAL 值的關係

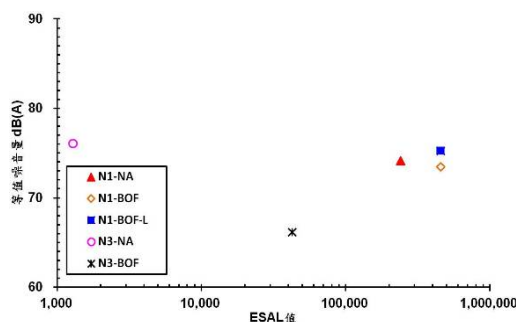


圖 24 噪音量與 ESAL 值的關係

3. 平坦度與交通荷重關係

圖 25 顯示 IRI 值隨 ESAL 值的增加而有明顯上升的趨勢。一般而言，初期 IRI 值與材料、施工技術和養護時間有關，通車後之 IRI 值與交通量與鋪面結構較有關，顯示施工品質和鋪面厚度仍可符合目前交通量之需求。

4. 車轍量與交通荷重關係

圖 26 也顯示車轍量隨 ESAL 值的增加而上升的趨勢。左右輪跡處彼此間之車轍變化小，車轍變形量最大與最小差距在 2mm 之內。另外檢測路段之車轍量

皆低於 5 mm，屬於輕微變形，顯示轉爐石與天然級配等粗粒料發揮互鎖功能，鋪面厚度足夠承載交通荷重，有助於鋪面耐久性。

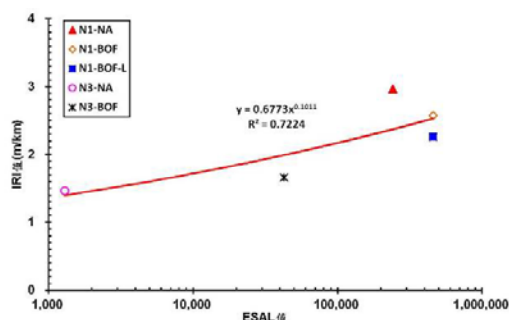


圖 25 IRI 值與 ESAL 值的關係

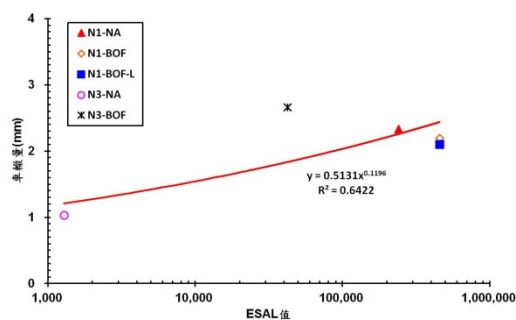


圖 26 車輛量與 ESAL 值的關係

5. Clegg 衝擊值與交通荷重關係

圖 27 為各試驗點位之 CIV 值與 ESAL 值的關係，圖中數據也顯示 CIV 值隨 ESAL 值的增加而上升的趨勢。

6. 抗滑度與交通荷重關係

圖 28 顯示輪跡處之抗滑度 BPN 值隨 ESAL 值的增加而下降，但 BPN 值仍維持在 65 以上，總體而言，抗滑度仍保持良好狀況，可保持行車安全性。其下降趨勢說明輪跡處表層瀝青油膜初期受交通量影響而被磨損，粒料之粗糙面因而顯現，提升路面抗滑能力；但隨著通車時間漸增，粒料粗糙表面受重複車輛載重而磨損，漸漸產生較光滑面，使得抗滑能力呈現降低趨勢。

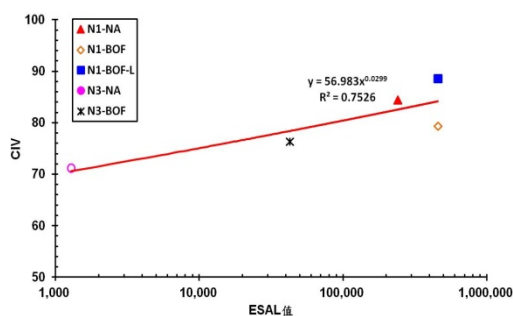


圖 27 輪跡處 CIV 與 ESAL 值的關係

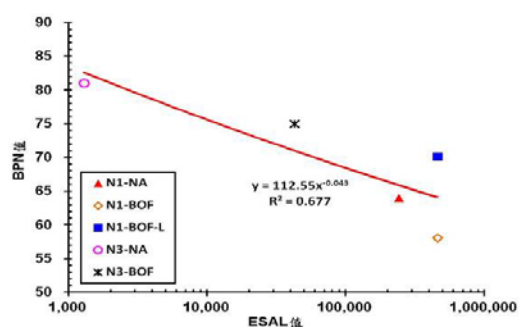


圖 28 輪跡處平均 BPN 值與 ESAL 值的關係

五、結論與建議

本研究分別選擇國道 1 號岡山段南下里程 356K+000，楠梓交流道第二出口匝道處及國道 3 號屏東段，北上里程數 424k+380 至 424k+180 作為案例，進行鋪面績效分析，並收集交通資料彙整進行比對分析，得到以下結論和建議。

5.1 結論

1. 轉爐石材料取代天然級配，並添加改質瀝青，相較採用天然級配對照組，於 OGFC、DGAC 鋪面之透水量表現上，均可達到規範要求，尚無明顯差別；而

隨著通車後 ESAL 值高低對於短時間內透水量表現亦尚無明顯差距。

2. 在鋪面績效噪音值檢測部分，各試驗路段噪音值表現與鋪面種類較無關聯，檢測路段周圍環境、交通流量和類型不同影響程度較大。
3. 各試驗路段左右輪跡處平均 IRI 都低於 3.0 m/km，行車狀況良好。一般而言，初期 IRI 值與施工技術有關，IRI 值在 5 個試驗路段中皆在合理範圍內，顯示施工品質符合用路人舒適度之需求；另 IRI 值隨 ESAL 值的增加有上升的趨勢。
4. 各試驗路段輪跡處車轍量皆低於 5mm，說明路基和基底層狀況良好，並藉由觀察得知車轍量隨 ESAL 值增加而上升的趨勢，此一趨勢與透水量趨勢大致相符，顯示轉爐石與天然級配等粗粒料發揮互鎖功能，鋪面厚度足夠承載交通荷重，有助於鋪面耐久性。
5. 透過 Clegg 衝擊試驗機應用各試驗路段，CIV 值成果均在 70 以上，表示試驗地點的路基與鋪面結構良好，對照交通流量高低，顯示出 CIV 值隨 ESAL 值的增加而上升的趨勢。
6. 各試驗路段之 BPN 值可維持在 65 以上，顯示現地鋪面抗滑能力良好，粗粒料成分不同，對於抗滑度表現影響不大。BPN 值隨 ESAL 值的增加而下降，原因經檢討應為輪跡處表層瀝青油膜初期受交通量影響而被磨損，粒料之粗糙面因而顯現，提升路面抗滑能力；但隨著通車時間漸增，粒料粗糙表面受重複車輛載重而磨損，漸漸產生較光滑面，使得抗滑能力呈現降低趨勢。

5.2 建議

1. 由於目前仍屬於初期鋪面績效檢測，需持續進行現地檢測，收集完整長期鋪面績效，評估轉爐石應用於高速公路密級配和開放級配瀝青混凝土鋪面之可行性。

六、參考文獻

1. 王耀寬 (2007)，「轉爐石對多孔隙瀝青混凝土之影響」，碩士論文，國立成功大學土木工程系，台南。
2. 林志棟，陳世晃，葉銘欽，鐘閔文，林伯儒 (2011)，「轉爐石運用於高交通量之道路可行性評估」，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會論文集，第 107-122 頁，高雄。
3. 陳信榮、張簡國禎 (2011)，「轉爐石對環境相容性之探討」，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會論文集，第 1-9 頁，高雄。
4. 袁家偉 (2007)，「使用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，桃園。
5. 中華鋪面工程學會 (2007)，「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會專輯」，桃園。
6. 中鋼集團 (2007)，「轉爐石利用推廣手冊」，高雄。
7. 許伯良、林平全、徐登科 (2011)，「轉爐石產製與工程應用」，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會論文集，第 10-18 頁，高雄。

8. 楊貫一 (1992),「爐石資源化-中鋼公司爐石應用的過去與未來」,技術與訓練,第 17 卷,第 1 期,第 31-46 頁。
9. 劉國忠 (2001),「煉鋼爐渣之資源化技術與未來推展方向」,環保月刊,第四期,十月號,第 117-118 頁。
10. Bagampadde, U., Al-Abdul Wahhab, H. I., and Aiban, S. A. (1999). "Optimization of Steel Slag Aggregate for Bituminous Mixes in Saudi Arabia," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, NO 1, pp. 30-35.
11. Coomarasamy, A., and Walzak, T. L. (1995). "Effects of Moisture on Surface Chemistry of Steel Slags and Steel Slag-Asphalt Paving Mixes," *Transportation Research Record*, 1492, pp. 85-95.
12. 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。
13. 蔡攀鰲 (1984), 瀝青混凝土, 三民書局, 台北。
14. Crawford, C. B., and Burn, K. N. (1969). "Building Damage from Expansive Steel Slag Backfill," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, pp. 1325-1334.
15. Kandhal, P. S., and Hoffman, G. L. (1997). "Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-Mix Asphalt Mixtures," *Transportation Research Record*, 1583, pp. 28-36.
16. Koide (1993). "Research on using BOF slag for road construction," *Nakayama Steel Works Technical Report*, Osaka, Japan.
17. Noureldin, A. S., and McDaniel, R. S. (1990). "Evaluation of Surface Mixtures of Steel Slag and Asphalt," *Transportation Research Record*, 1269, pp. 133-147.
18. Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., and Chen, Y. (2007). "Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures," *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 2580-2585.
19. Xue, Y., and Wu, S. (2006). "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture," *Journal of Hazardous Materials*, B138, pp. 261-268.