

轉爐石瀝青混凝土應用於屏東縣縣道之研究

黃隆昇¹、林登峰²、王昱凱³

¹ 樹德科技大學運籌管理系 助理教授

² 義守大學土木與生態工程學系 教授

³ 義守大學土木與生態工程學系 研究生

摘要

本研究主要目的在屏東縣轄區道路鋪設轉爐石瀝青混凝土，實際觀測路面長期成效，並與傳統天然粒料瀝青混凝土鋪面比較，提供工程界設計與施工參考。本研究之方法以轉爐石取代全部粗粒料，重點在評估轉爐石材料應用於瀝青混凝土性質及現場實際鋪設之長期品質成效，包括馬歇爾試驗、回彈模數、潛變試驗等，並藉由現場道路試驗平坦度、車轍等檢測鋪面分析，綜合呈現轉爐石各項特性。

研究發現轉爐石比重較天然粒料大，可以提高瀝青混合料穩定值，轉爐石粒料比天然粒料較接近方形，加入鋪面後有互鎖作用。轉爐石屬於親油性之材料，因轉爐石的化學特性影響，會提升抗剝脫的能力。轉爐石瀝青混合料降溫速率較小，較具有保溫效果。故能降低運輸時間過長導致瀝青混合料溫度不足之疑慮。轉爐石瀝青混凝土鋪面現地成效上，平坦度、車轍量與天然粒料瀝青混凝土鋪面無明顯差異，且其抗滑性天然粒料瀝青混凝土好，可增加行車安全性。開放交通近 10 個月，轉爐石瀝青混凝土鋪面多數粒料仍然有瀝青膠泥包覆。粒料與粒料仍可維持接觸，顯示可維持粒料間互鎖機制，加上轉爐石粒料比重大，較能夠承受車輛載重作用。

關鍵詞：轉爐石、降溫、瀝青混凝土、影像。

一、前言

傳統道路鋪面由於車行載重越來越大，瀝青混凝土鋪面強度多明顯不足，導致重車行駛之道路常有車轍、凹陷、推擠之現象，Huang and Kang [1]以 Portable falling weight deflectometer (PFWD) 貫入試驗結合道路應力分析，得知瀝青混凝土鋪面層直接與車輪接觸，約承受 70%以上載重。瀝青混凝土鋪面若包裹不完整，則瀝青混合料體積穩定性不足，經過車輛反覆作用，容易產生水平應力，導致鋪面產生車轍變形，顯見鋪面材料影響道路強度甚鉅。

轉爐石為煉鋼過程之副產品，一貫作業煉鋼廠在煉製鋼液時，將鐵水、副原料及廢鋼加入轉爐後，以純氧吹煉而產出鋼液及熱熔渣，其中經冷卻之熱熔渣即稱為轉爐石 (Basic Oxygen Furnace slag, BOF slag) [2]，年產量約 120 萬至 150 萬公噸。基於節能減廢政策，目前已有將轉爐石使用於瀝青混凝土之成功案例，轉爐石比重大、軋製後扁平率低，其粒料構架可發揮聚溫及高承載能力，減少拌

合熱能之損耗，達到節能兼具減碳的目的。不但可以創造其經濟價值，亦可降低鋪面材料對於河川砂石的使用率。

由於轉爐石具有耐磨及高硬度之特性。鑑此，近年來已有將轉爐石取代傳統瀝青混合料之部分粗粒料研究文獻。依據林志棟 [3] 評估轉爐石提升瀝青混凝土耐久性研究，添加轉爐石能提升路面抗滑能力、回彈模數、抗車轍能力，並降低設計含油量等優點，Shen 等人 [4] 將轉爐石添加於排水性瀝青混凝土，轉爐石能提升排水性瀝青混凝土抗滑能力、水敏感性、抗車轍能力、吸音能力。林志棟教授等人 [5] 研究發現中鋼轉爐石含有高量的氧化鈣(CaO)可增加粒料與瀝青膠泥間的膠結性，降低路面剝脫現象發生，基本物理性質均可符合工程規範需要。

轉爐石做為 SMA 鋪面粒料，具有高抗車轍能力、高溫穩定性及抗水分侵入、可提升高溫永久變形穩定性及低溫脆裂性質、有效增加混合料穩定性進而節省資源 [6、7]。呈現轉爐石可做為瀝青混凝土鋪面粒料替代品。Shen et al. [8] 探討轉爐石用於多孔隙級配之成效，研究顯示轉爐石具有較高表面紋理 (rough surface texture)，可展現良好互鎖機制 (interlocking mechanism)、內摩擦力 (internal friction)、鋪面抗滑力 (skid resistance)。Xue et al. [9] 以轉爐石做為瀝青混合料粒料，顯示轉爐石比天然粒料具有較粗糙之紋理，可增加與瀝青膠泥之凝聚力，Wu et al. (2007) [10] 探討轉爐石用於 SMA (stone mastic asphalt) 級配之成效，研究發現轉爐石具有多孔隙特性，可吸附瀝青，可增加高溫性質及低溫脆裂能力。進而降低高溫時永久變形量。

此外，國內針對轉爐石瀝青混凝土材料，已有實際現地鋪設案例，從最早由中鋼公司、中聯公司、中龍公司廠區內鋪面改善，即全部以瀝青混凝土添加轉爐石鋪設；2003 年高雄市南星填海造陸計畫道路於即鋪設轉爐石瀝青混凝土；2009 年改制前之高雄縣政府於縣政府前澄清路道路，已鋪築再生瀝青混凝土添加轉爐石道路，鋪設後開放交通至今，各項鋪面績效良好。2011 年台南市政府亦於中華西路進行鋪設；2012 年高雄市政府亦於大業北路及金福路重載路段鋪築瀝青混凝土添加轉爐石道路等，諸多路段對於轉爐石應用於鋪面材料之機會有所突破。故轉爐石應用於瀝青混凝土，可達到工業副產品有效使用之效益，值得推廣採用。

轉爐石做為瀝青混合料粒料，現地成效仍處於試驗道路鋪築評估階段，即由鋪築評估單位自行委託瀝青拌合廠生產及施工廠商現地鋪設，並與傳統天然粒料進行比較。轉爐石瀝青混合料應用於現地道路，最終仍需由工程主辦單位依據採購法規定進行工程案招標，由得標廠商進行生產及施工。鑑於少見針對轉爐石瀝青混凝土與天然粒料瀝青混凝土於相同路段，由不同廠商生產及施工成效之研究。本研究即選擇屏東縣高樹鄉市區道路鋪築工程，設計為轉爐石瀝青混凝土道路，配置二個試驗斷面，分別為傳統再生瀝青混凝土(總粒料比例 20%-40%)、轉爐石瀝青混凝土(粗粒料約占總粒料 60%，以轉爐石全取代粗粒料)，分別由二家不同瀝青拌合廠產製拌合；以及二家不同施工廠商進行現地鋪築、滾壓，直接評估不同瀝青拌合廠及不同施工廠商對於瀝青混凝土鋪面成效之優劣。

二、研究方法及進行步驟

2.1 試驗路段

瀝青混凝土鋪面績效 (pavement performance) 之優劣，在材料部分主要為粒料與瀝青黏結料兩部份配合。外在環境部分主要為交通軸重、軸次、溫度、雨量等。轉爐石具有較高耐磨性、單位重、穩定性等特性，鑑此，本研究針對以轉爐石取代原有砂石粗粒料，來評估鋪面績效。並維持扁平率 3:1 型態，粒料級配及黏結料依照試驗道路設計使用之規範。

本研究試驗路段位於屏東縣高樹鄉產業路，為屏 27 縣道，如圖 1 所示，試驗路段鋪設 1000 公尺，分為傳統天然粒料及轉爐石粒料共二種断面，粒料級配一律採用密級配以利比較，其中採用天然粒料断面鋪設位置起點為台 27 線與 185 縣道(產業路)交叉口起算，往南鋪設 500 公尺。轉爐石粒料断面為接續天然粒料断面鋪設，鋪設長度亦為 500 公尺。

本試驗路段工程進行方式亦區分二種發包方式，其中天然粒料断面部分，由屏東縣政府工務處依據標準採購工程發包招標程序進行，由縣府工程得標承攬廠商自行選擇拌合廠，提供瀝青混凝土材料及施工機具，依據一般道路工程施工方式進行。並委由工程顧問公司進行設計及監造。

轉爐石粒料断面則由中華鋪面工程學會進行馬歇爾配合設計工作，配比成果再交由中聯資源公司，由該公司另行選擇拌合廠產製，並同樣提供轉爐石瀝青混凝土材料及施工機具，進行施工工作。

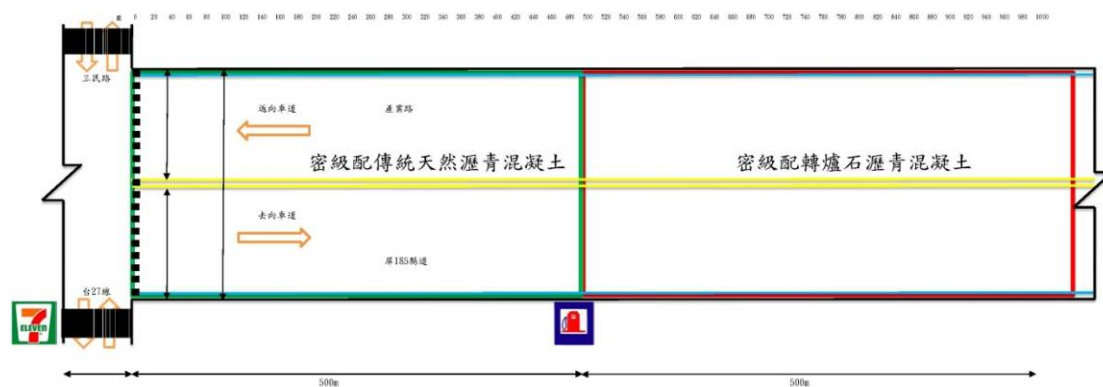


圖 1 試驗路段概略位置

2.2 試驗項目

本試驗路段設計為轉爐石瀝青混凝土道路，配置二個試驗断面，分別為傳統天然瀝青混凝土、轉爐石瀝青混凝土(粗粒料約占總粒料 60%，以轉爐石全取代粗粒料)，評估不同粒料對於瀝青混凝土鋪面成效之優劣。本研究重點在針對轉爐石粒料性質，以及拌合廠產製過程再深入探討，結合從產品檢驗、配合設計、拌合廠廠製、鋪築等過程，進行品管及鋪面調查，並計劃於待鋪設完工後至少每三個月做現場觀測試驗及非破壞性檢測工作，進行現地長期觀測，包括車輻量，平坦度、抗滑值等檢測項目，並配合實驗室檢測結果，如馬歇爾試驗，間接張力

強度試驗、回彈模數、動靜態潛變等實驗，評估轉爐石應用於現地鋪面的成果。並與一般道路比較其耐久性，詳細評估轉爐石資源應用於市區道路之整體績效。

三、試驗結果與分析

3.1 現地調查及檢測

道路鋪設前，先至現地勘查觀測現有路面破壞情況、破壞位置，並予以記錄。經現地勘查結果，試驗路段多呈現鱷魚狀龜裂破壞，如圖 2 所示，其鋪面服務指標明顯降低，有重新刨除加鋪之必要。此外，為了解道路基底層狀況，作為判定道路破壞係由鋪面材料或由基底層承载力不足引起之原因，本研究進行現地檢驗，如圖 3 所示，其中鑽心取樣觀察破壞是否為基底層強度不足之反射裂縫，初步判定並無明顯反射裂縫，應該以加鋪或刨除方式進行。初步目測原路面與鄰近建築物高程齊平，如圖 4 所示，故建議以刨除 5 公分，再鋪築 5 公分方式進行，以維持既有排水坡度，避免鄰近住戶產生淹水之疑慮。



(a) 鱷魚狀龜裂破壞

(b) 與交叉路段路段粒料鬆散

圖 2 試驗路段現況



(a) 鋪築前摩擦試驗

(b) 鋪築前鑽心取樣

圖 3 試驗路段現況檢驗



(a) 路面破壞及與鄰近建物

(b) 與鄰近建物高程

圖 4 試驗路段高程

3.2 瀝青及粒料基本性質

本研究使用之轉爐石，來源取自於中聯資源(股)公司，瀝青膠泥採用 AC-20 等級瀝青。瀝青膠泥及粒料及基本性質如表 1、2 所示。

天然粒料與轉爐石比重分別為 2.6、3.3。就粒料比重比較，轉爐石可增加抗載重能力。馬歇爾配合設計目的為確保瀝青混合料中各個粒料的體積所佔比例分布能符合設計級配規範規定，傳統瀝青混合料係採用天然粒料，未包含其他種類粒料，由於天然粒料比重接近，亦即單位重量所佔的體積接近，故通常以各粒料重量比例計算每個篩號之粒料所佔體積。轉爐石比重與天然粒料差異大，導致單位重量之體積較小，基於此，本研究轉爐石瀝青混凝土配合設計過程係以各粒料所佔體積比例方式配置粒料級配，目的在於使得天然粒料與轉爐石混拌之粒料體積分布，能符合粒料級配適當範圍。

此外，粒料扁平率為瀝青混凝土抗載重能力基本指標，是以粒料之長軸與短軸之比為依據。天然粒料同時有塊狀及圓盤狀，但約有 7% 趨於扁平粒形，扁平率越大表示粒料容易斷裂，導致抗載重能力降低，並會增加粒料間之空隙及滲透潛勢。轉爐石粒料由於是固定軋製，形狀趨於一致較接近於塊狀，幾乎沒有扁平率粒料，可增加粒料間互鎖作用，並提高瀝青混凝土抵抗車轍與延長生命週期。

表 1 瀝青膠泥基本性質

項目	試驗數值
比重	1.037
軟化點 (°C)	58
延展性 (cm)	100+
閃火點 (°C)	230+
60°C 瀝青膠泥黏度(poise)	1680
170±20cSt 之拌合溫度°C	157
280±30cSt 之壓實溫度°C	145
25°C 100g5s 針入度(0.1mm)	68.7

表 2 轉爐石及天然粒料基本性質

試驗類別	轉爐石	天然粗粒料	天然細粒料	填充料	規範值
比重	3.31	2.61	2.59	2.59	-
吸水率(%)	2.60	1.69	-	-	<3
洛杉磯磨損試驗(%)	11.35	27.19	-	-	<40
破裂面	三面以下(%)	2.74	20.19	-	-
	三面(含)以上(%)	97.23	79.84	-	-
扁平率 1:3(含)以上(%)	0.89	6.91	-	-	<7
含砂當量%	-	-	-	-	81

3.3 粒料篩分析試驗

轉爐石瀝青混凝土鋪面粒料級配採用密級配IVC 規範，混合粒料的級配粒徑曲線圖如圖 5 所示，轉爐石粒徑粒形趨於一致，且係取代作為粗粒料，整體瀝青混合料相對細粒料較少。為了呈現一致性比較方式，將混合粒料(轉爐石及天然粒料)粒料級配，每個篩號儘量配置相似之粒徑分佈。

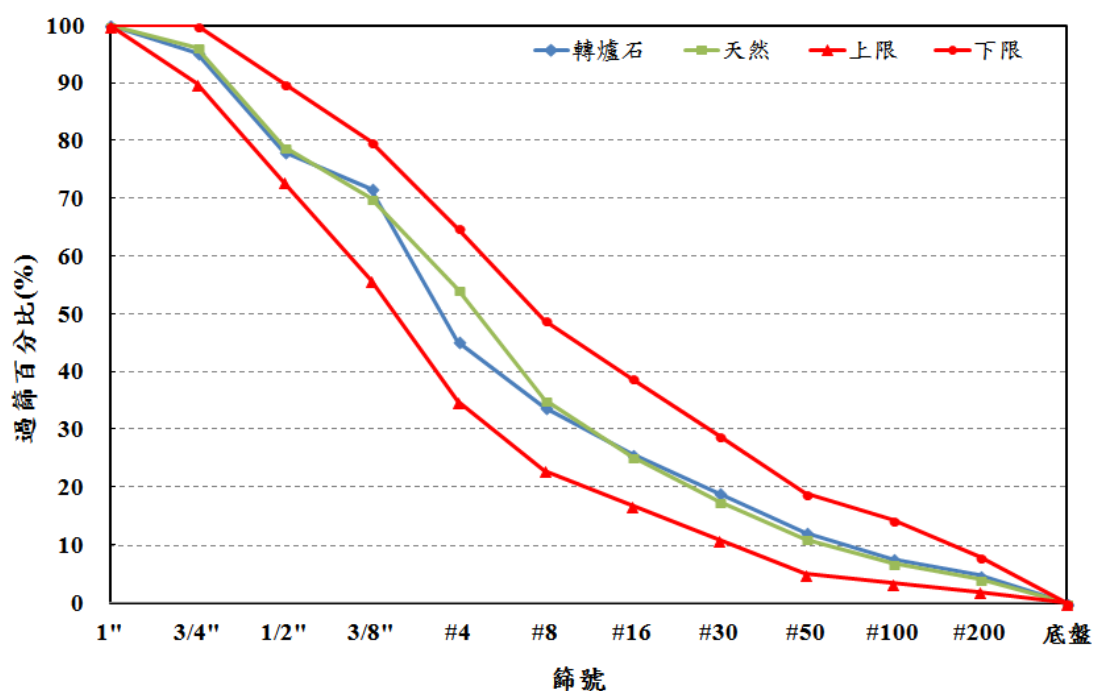


圖 5 級配粒料篩分析

3.4 鋪築時現場實際取樣

實際鋪設前，於要鋪設兩種瀝青混合料斷面拌合車料斗實際取樣，如圖 6、7 所示。進行各項試驗如粒料篩分析、穩定值、流度值、單位重、壓實度....等，再製作試體進行間接張力試驗、剝脫試驗、回彈模數、影像分析試驗等。由實際瀝青混凝土鋪築料，直接比較天然粒料鋪面與轉爐石粒料鋪面性質。



圖 6 於鋪裝機取樣



圖 7 取得瀝青混合料盆料

此外，為了解不同瀝青混凝土溫度變化速率，於產製拌合完成出廠後，即於載運卡車出發及到達時量測溫度並記錄，並於鋪面預定位置埋設溫度感應線圈，如圖 8 及 9 所示，實際觀測轉爐石瀝青混凝土從拌合完成，經過運輸、鋪築、滾壓等階段之降溫趨勢。於瀝青混凝土運輸過程，主要觀察瀝青混合料之降溫趨勢。



圖 8 量測載運卡車溫度

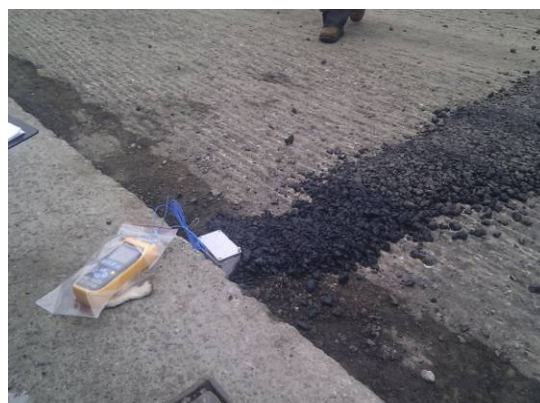


圖 9 鋪面埋設溫度感應線圈

3.5 瀝青混凝土鋪面粒料篩分析

鋪面與轉爐石粒料鋪面篩分析試驗結果如表 3 所示，觀察 3/4”、1/2”、3/8”、#4 等粗粒料篩號通過百分率，轉爐石粗粒料通過百分率均小於天然粒料，亦即轉爐石粗粒料粒徑明顯比天然粒料大，前述轉爐石粗粒料比重高於天然粒料，基於此，理論上大粒徑及比重大之粒料，鋪面強度較高。

3.6 瀝青混凝土馬歇爾值

本研究於鋪築前直接於鋪裝機分別取樣，並製作試體，比較天然粒料及轉爐石瀝青混凝土鋪面各項現地馬歇爾試驗值，如表 4 所示，天然粒料及轉爐石瀝青混凝土鋪面瀝青含量分別是 5.2%、4.5%，轉爐石粒料具有親油性，容易與瀝青膠泥吸附包裹，故在相同試驗基準下，可降低瀝青含量。

轉爐石及天然粒料單位重分別為 3.105、2.314，轉爐石粒料含有氧化鐵的成

分，轉爐石本身比皆大於天然粒料。穩定值是瀝青混凝土強度為參考值之一，其規範規定必須要大於 817kgf 以上。轉爐石瀝青混合料及天然粒料瀝青混合料穩定值分別為 2360kgf、1640 kgf，瀝青混凝土添加轉爐石後，可增加鋪面穩定強度。流度值主要為瀝青混凝土受壓後破壞之變形量，當流度值過大會造成車轍情況，但過小則容易造成粒料間黏結力不足。轉爐石瀝青混合料及天然粒料瀝青混合料流度值分別為 11.4mm、13.4mm，均符合規範上下限 8-14mm 之規定。轉爐石瀝青混凝土鋪面流度值較小，表示受壓變形量較低，較可以維持鋪面抗變形能力。

表 3 天然粒料瀝青混凝土斷面與轉爐石瀝青混凝土斷面粒料篩分析

篩號	天然粒料斷面	轉爐石斷面	密級配 IVC 規範
1"	100.00	100	100
3/4"	96.27	99.12	90~100
1/2"	79.01	77.41	-
3/8"	70.13	67.53	56~80
#4	54.39	44.87	35~65
#8	35.24	32.21	23~49
#16	25.41	25.11	-
#30	17.63	17.50	11~29
#50	11.13	9.29	-
#100	6.82	5.06	-
#200	4.15	3.18	2~8
底盤	0.00	0.00	-

表 4 瀝青混凝土馬歇爾試驗值

項目	天然粒料斷面	轉爐石斷面	規範值
最佳瀝青含量%	5.2	4.5	4.0~7.0
設計目標黏度 (poise)	-	1870	>2000
夯壓後試體比重(kg/m ³)	-	2.82	-
理論最大比重(kg/m ³)	-	2.813	-
穩定值 (kgf)	1640	2360	>816
流度值(0.25mm)	13.4	11.4	8~14
空隙率-VA (%)	4.7	4.31	3~5
粒料間空隙率-V.M.A (%)	15.2	13.37	≥13.0
瀝青填充率-V.F.A (%)	-	72	65~75
粒料平均比重	2.314	3.105	-
粒料吸油率%	0.032	0.421	-

粒料間空隙率(Void in the mineral aggregate. 簡稱 V.M.A.)，係指粒料之間不加瀝青經過壓實後所佔的空隙率百分比，以規範規定最少為 14%，過少則會產生車轍問題。計算轉爐石瀝青混凝土與天然粒料瀝青混凝土 V.M.A 值分別為 13.37%、15.2%，添加瀝青膠泥混拌後，在最佳瀝青含油量狀態下，轉爐石瀝青混凝土 V.M.A 值較小，可能係轉爐石粒料屬於多孔性材料，部分瀝青膠泥滲入轉爐石粒

料內部，剩餘部分瀝青膠泥則填充粒料間空隙，造成 V.M.A 值較小。此外空隙率轉爐石瀝青混凝土與天然粒料瀝青混凝土空隙率接近。黃大衛（2008）[11]研究指出，轉爐石粒料會造成瀝青混凝土 V.M.A 降低，但透過試驗室成效試驗結果，V.M.A 的降低並不影響瀝青混凝土之耐久性。

馬歇爾配合設計目的為確保瀝青混合料中各個粒料的體積所佔比例分布能符合設計級配規範規定，傳統瀝青混合料係採用天然粒料，未包含其他種類粒料，由於天然粒料比重接近，亦即單位重量所佔的體積接近，故通常以各粒料重量比例計算每個篩號之粒料所佔體積。轉爐石比重與天然粒料差異大，導致單位重量之體積較小，基於此，本研究轉爐石瀝青混凝土配合設計過程係以各粒料所佔體積比例方式配置粒料級配，目的在於使得天然粒料與轉爐石混拌之粒料體積分布，能符合粒料級配適當範圍，但馬歇爾配合設計觀念為控制粒料間空隙較小，以維持瀝青混凝土強度，故添加轉爐石後，以粒料間空隙公式計算之 V.M.A 值、V.F.A 值相對較小。

轉爐石瀝青混凝土與天然粒料瀝青混凝土吸油率分別為 0.421%、0.032%，轉爐石具有親油性質，吸油率較高，可降低瀝青用量，但如上述轉爐石內部空隙高，與瀝青膠泥結合後，容易產生吸附作用，加上試驗室係採取夯壓方式，壓實能量較高，會強制將瀝青膠泥滲入轉爐石內部。轉爐石瀝青混凝土具親油性質，可降低最佳瀝青含量，轉爐石瀝青混凝土瀝青含量比天然粒料瀝青混凝土鋪面降低約 0.2%，差異不顯著，基於維持瀝青混凝土 V.M.A 值，或可維持與天然粒料瀝青混凝土鋪面相同之瀝青含量，相對可提升 V.M.A 值。

3.7 瀝青混凝土溫降梯度

本試驗於產業路鋪築當天，以溫度熱感線連接溫度記錄器，分別在不同粒料之瀝青混凝土鋪築路段埋設熱感線，並自鋪築開始量測直到溫度降於常溫為止，以評估開放交通前轉爐石及傳統天然瀝青混凝土之溫度變化。

為探討天然粒料及轉爐石粒料的蓄熱能力，於瀝青拌合廠，當拌合完成之瀝青混合料傾洩於裝載卡車時，分別於裝載轉爐石及傳統天然瀝青混合料之卡車上。距離瀝青混合料表面深度 10cm 處，埋設溫度感應器，並記錄其詳細溫度及當時大氣溫度，當傳統天然瀝青混凝土及轉爐石瀝青混凝土裝載卡車從拌合廠出發及到現場目的地，分別記錄溫度及其時出發到達時間，用以比較不同粒料之瀝青混合料於運輸時間溫度變化差異。

瀝青混合料於產製完成卸入裝載卡車時，量測瀝青混合料溫度平均為 170°C，圖 10 顯示瀝青混凝土運輸過程溫度變化圖，自瀝青拌合廠開始至目的地，運輸時間約 60 分鐘，到達目的地後，轉爐石瀝青混合料與傳統天然粒料瀝青混合料溫度分別為 135°C、102°C，顯示轉爐石瀝青混合料較具有保溫效果。研判轉爐石粒料本身的蓄熱能力遠大於天然粒料，其原因可能是因為轉爐石粒料為煉鋼之副產物，內部含有殘餘鋼成分能夠有效儲存混凝土之熱量。由於瀝青混合料表面直接與大氣接觸，由於溫度差異大，容易產生熱對流現象，依據能量不減原理，內部位置熱能會上升補充瀝青混合料表面損失之熱能，所以其溫度降低較為快。

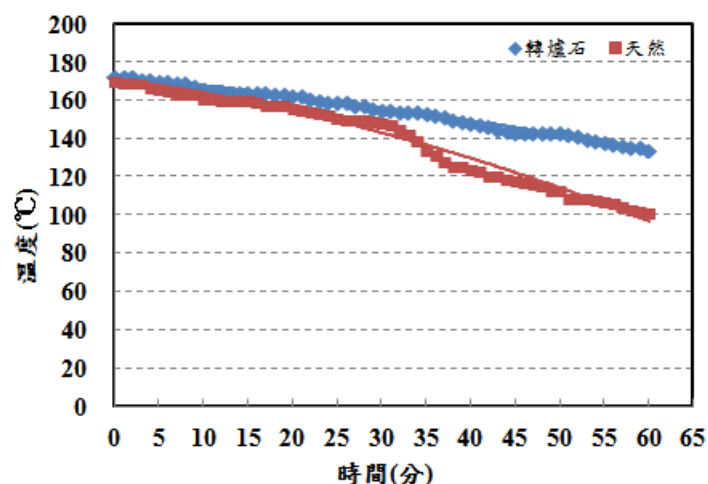


圖 10 卡車運輸過程中溫度變化

圖 11 中瀝青混合料降溫比較，天然瀝青混凝土降溫最多為 17.3°C，而轉爐石瀝青混凝土降溫最多則只有 6.8°C，運輸過程大氣溫度平均約 29°C。

整體而言，傳統天然瀝青混凝土與轉爐石瀝青混凝土在相同內部深度位置之降溫趨勢有明顯差異，而從圖中顯示轉爐石瀝青混凝土可維持整體溫度，發揮保溫效應。

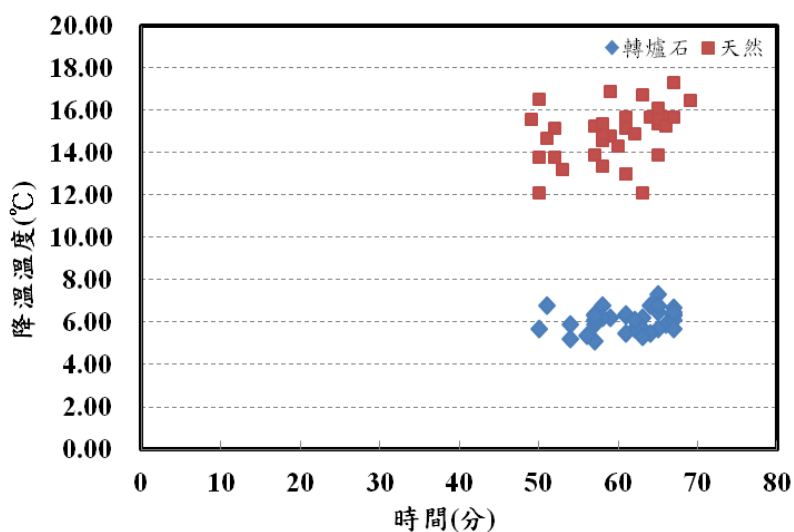


圖 11 瀝青混凝土溫降關係圖

鋪築時段大氣溫度在 30°C~32°C，處於初夏時期，由圖 12 不同粒料之瀝青混凝土降溫趨勢圖來看，其降溫趨勢走向差異性極大，在 20~25 分時，傳統天然瀝青混凝土路段溫度大幅下降，直到降到 100°C，即 50 分鐘後才開始趨於平緩。而轉爐石瀝青混凝土的降溫趨勢從開始到將於常溫趨勢皆較為平緩，且降至常溫時間較傳統天然瀝青混凝土長，將轉爐石與傳統天然瀝青混凝土互相比較可發現，轉爐石瀝青混凝土大約在 360 分鐘時溫度才會降至常溫，而傳統天然瀝青混凝土則在 270 分鐘時就完全降至常溫，顯示轉爐石粒料擁有將熱能吸收儲蓄之能力，

且因轉爐石鋪面吸收周圍熱能後溫度增加，再試放自身儲存之熱能，使拌合料溫度增高，但基於相對能量守恆定律，由於轉爐石瀝青混凝土鋪面熱能傳導性佳，故相對的內部各點位溫度與天然粒料瀝青混凝土鋪面類似。

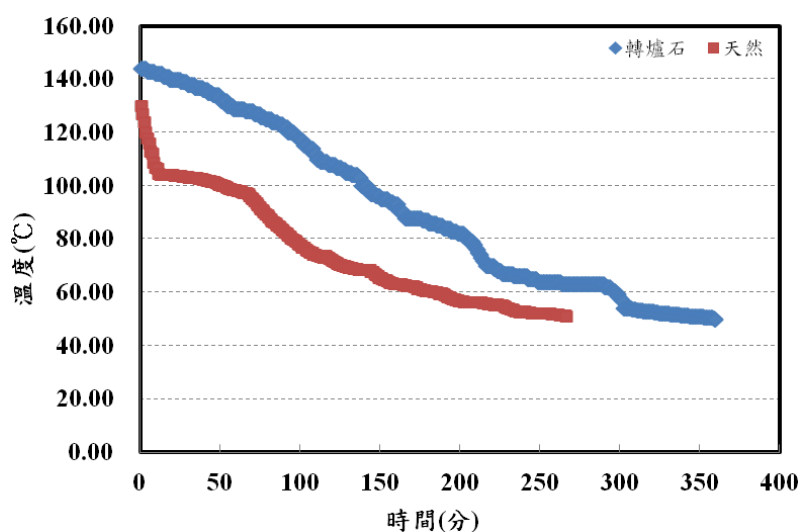


圖 12 降溫梯度與降溫時間關係圖

四、瀝青混凝土鋪面現地成效

4.1 馬歇爾試驗值

4.1.1 單位重

圖 13 為產業路不同粒料之瀝青混凝土鋪面之單位重變化比較，鋪設後開放通車近 10 個月，轉爐石瀝青混凝土鋪面，單位重從 2.78 kg/cm^2 提升至 2.89 kg/cm^2 。天然粒料瀝青混凝土鋪面，單位重從 2.32 kg/cm^2 提升至 2.40 kg/cm^2 ，試驗結果顯示轉爐石瀝青混凝土鋪面單位重較天然瀝青混凝土大轉爐石粒料比重大。隨開放交通時間增加，瀝青混凝土鋪面逐漸被來往行使之車輛壓實，單位重隨之增加。

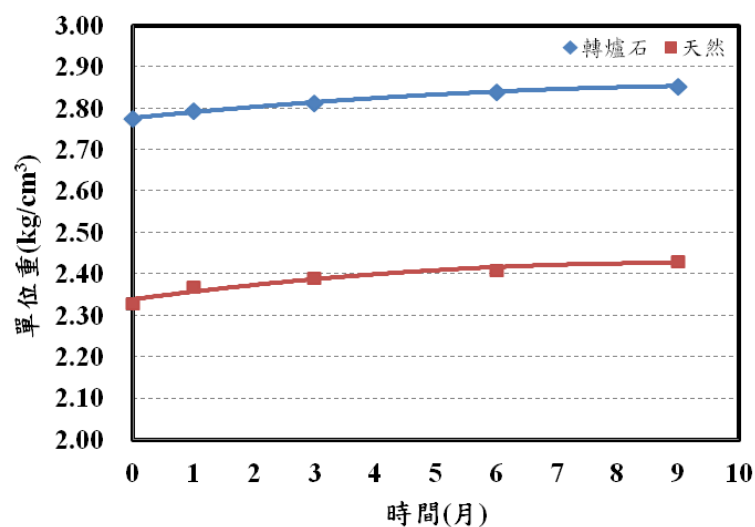


圖 13 轉爐石與天然瀝青混凝土之單位重

4.1.2 穩定值

穩定值為瀝青混凝土強度主要參考值之一，密級配瀝青混凝土規範規定須大於 817kgf 以上。圖 14 為產業路不同粒料之瀝青混凝土鋪面之穩定值，顯示瀝青混凝土穩定值添加轉爐石後，穩定值明顯增加。開放通車近 10 個月，天然粒料瀝青混凝土鋪面穩定值從 1478kgf 持續降低至 1203kgf，而添加轉爐石之瀝青混凝土鋪面，其穩定值從 1863kgf 降低至 1784kgf，顯示出轉爐石瀝青混凝土明顯可維持高於規範值穩定強度，應用於道路實際鋪設可增加鋪面之耐久性。

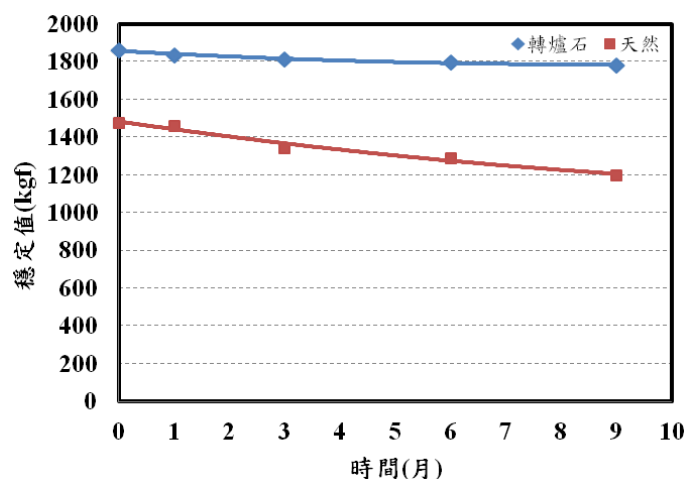


圖 14 轉爐石與天然瀝青混凝土之穩定值

4.1.3 流度值

流度值主要是為瀝青混凝土受壓到破壞之變形量，過大容易造成車轍，過小則容易造成粒料黏結不足。圖 15 為產業路不同粒料之瀝青混凝土鋪面之流度值，隨開放交通時間增加，兩種瀝青混凝土流度值逐漸降低，表示瀝青混凝土逐漸變硬脆，轉爐石瀝青混凝土鋪面流度值從 8.21 降低至 7.82(0.25mm)，天然粒料瀝青混凝土鋪面流度值從 8.21 降低至 7.62(0.25mm)，兩者相差約為 0.06~0.4(0.25mm)之間。顯示轉爐石瀝青混凝土流度值隨著時間降低速率較天然瀝青混凝土平緩，較能維持瀝青混凝土鋪面之效益。

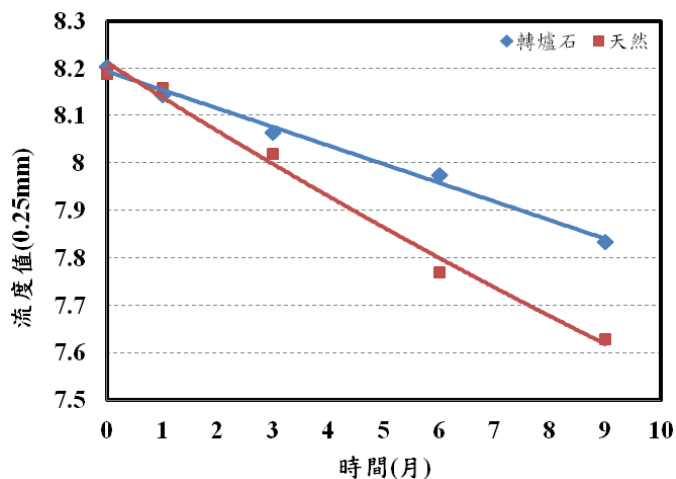


圖 15 轉爐石與天然瀝青混凝土之流度值

4.1.4 V.M.A.

V.M.A 係指粒料之間不加瀝青經過壓實後所站的空隙率百分比，規範規定最少為 14%，過少則會產生車轍問題。圖 16 為產業路不同粒料之瀝青混凝土之 V.M.A. 變化圖，鋪面受車輛反覆輾壓，瀝青混合料逐漸緊密，故 V.M.A. 隨開放通車時間增加而隨之降低，且轉爐石瀝青混凝土之 V.M.A. 較天然瀝青混凝土低，通車 10 個月後，其 V.M.A. 值約為 15.225%，仍高於 V.M.A. 值最低規範許多。

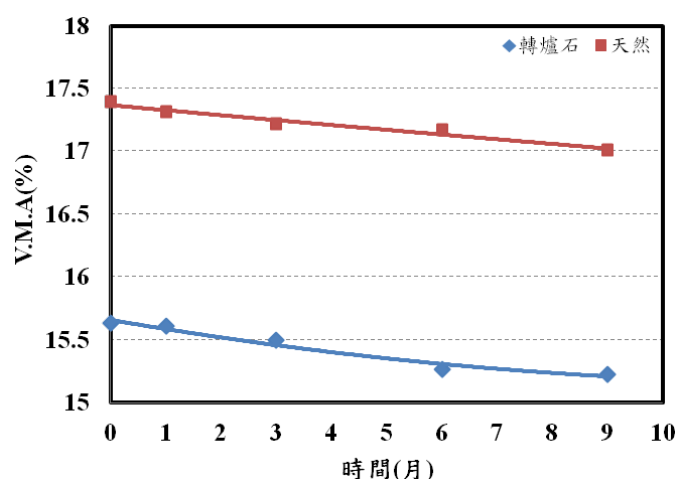


圖 16 轉爐石與天然瀝青混凝土之 V.M.A

4.1.5 空隙率

空隙率係粒料混合瀝青後空隙所佔的比例，規範規定為 3%~5%，過大透水性增加影響耐久性，過低無變形空間易造成車轍。圖 17 為產業路不同粒料之瀝青混凝土之空隙率，轉爐石粒料屬於多孔隙之粒料，且具親油性質，與瀝青膠泥接觸後，容易吸附瀝青，並易滲入轉爐石粒料內部空隙，故粒料混合瀝青後空隙所佔的比例相對較高，即空隙率隨著轉爐石量增加而增加。此外，通車近 10 個月，兩種瀝青混凝土鋪面空隙率仍維持在 4%-4.5% 之間，表示尚可維持鋪面受壓後瀝青膠泥流動之空間。

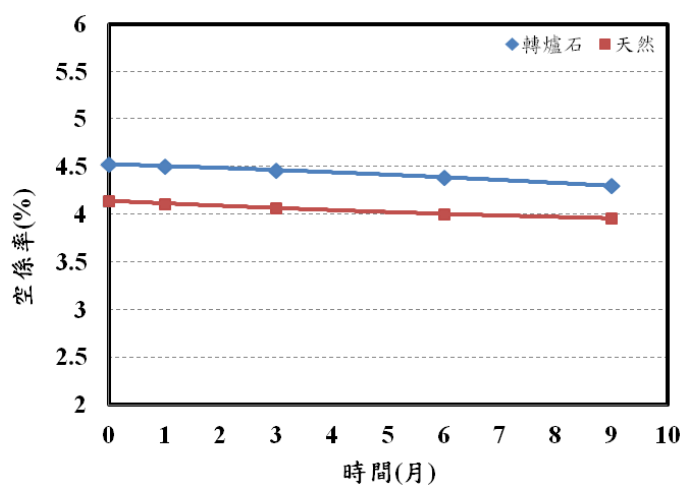


圖 17 轉爐石與天然瀝青混凝土鋪面空隙率

4.2 瀝青混凝土鋪面強度

4.2.1 間接張力強度試驗

圖 18 為產業路不同粒料瀝青混凝土之間接張力強度比較，鋪設後至開放交通近 10 個月，轉爐石瀝青混凝土間接張力強度值在 $18.5 \text{ kgf/cm}^2 \sim 12 \text{ kgf/cm}^2$ ，傳統天然粒料瀝青混凝土間接張力強度值在 $14 \text{ kgf/cm}^2 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ 之間，兩種瀝青混凝土路段相差約為 5 kgf/cm^2 。轉爐石本身粒料為多角塊狀性，加上表面較粗糙，以理論推測，轉爐石取代量越多時，能夠隨著提升極限應力，Noureldin 等人(1990) [12]的試驗結果顯示材料本身具有良好特性，需結合適當薄膜厚度提供良好的黏著力與粒料間的互鎖能力，以展現出良好的間接張力。本研究於瀝青混凝土添加轉爐石，其最佳瀝青含量可降低，但仍可維持間接張力強度。

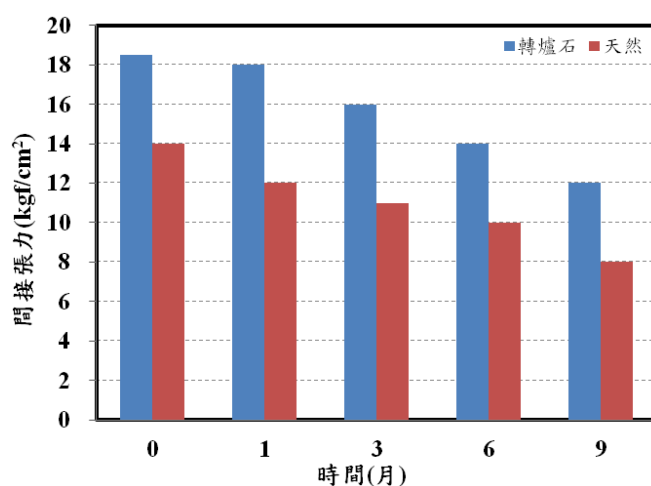


圖 18 轉爐石與天然瀝青混凝土鋪面之間接張力強度變化

4.2.2 間接張力殘餘強度

瀝青混凝土間接張力殘餘強度 (Tensile Strength Ratio, TSR) 為浸水前後間接張力強度百分比，主要目的是在量測瀝青混凝土對於水份滲入敏感性，Kanitpong (2003) 等人[13]指出間接張力試驗所造成的破壞是以黏結材本身的內聚力為主，當試體浸水後，由瀝青和粒料間黏結力與瀝青內聚力兩者控制間接張力的破壞。

AASHTO T180 規範規定瀝青混凝土間接張力殘餘強度需高於 75% 以上，圖 19 為產業路不同粒料瀝青混凝土之間接張力殘餘強度比較，通車近 10 個月，轉爐石瀝青混凝土鋪面間接張力殘餘強度為 95%，但傳統天然粒料瀝青混凝土鋪面間接張力殘餘強度為 85%，表示轉爐石瀝青混凝土鋪面較具有抗水分滲入之能力。應該與轉爐石粒料之親油性，會提升抗剝脫的能力有關。Burak(2007)[14]提出 TSR 隨著瀝青薄膜厚度的增加而上升之結果。轉爐石屬於親油性之材料，與瀝青之間的黏結，會提升殘餘強度。

本試驗道路為產業路段，道路兩旁為農作區，農作物需時常澆水灌溉，而台灣為多雨地區，午後常會有雷陣雨，會造成水分從鋪面隙縫滲入鋪面之機會，可

能造成粒料與瀝青產生剝脫，故添加轉爐石可提升瀝青混凝土鋪面耐久性。

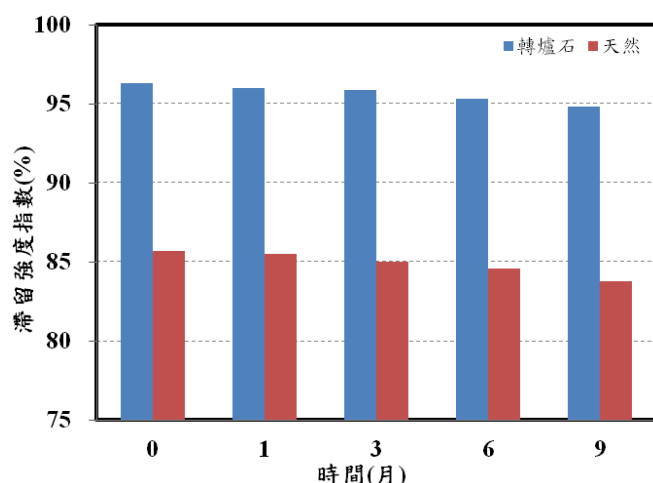


圖 19 轉爐石與天然瀝青混凝土之殘餘強度

4.3 回彈模數試驗

回彈模數(Resilient Modulus, Mr)係瀝青混凝土受載重後所能回復之最大強度，圖 20(a)為產業路不同粒料之瀝青混凝土之回彈模數 25°C 比較圖，通車近 10 個月，轉爐石瀝青混凝土鋪面回彈模數從 58100 kg/cm² 降低至 56104kg/cm²，天然粒料瀝青混凝土鋪面回彈模數從，其值為 33719 kg/cm² 降低至 30010 kg/cm²，兩種鋪面相差約為 13000 kg/cm²。圖 20(b)為不同粒料之瀝青混凝土之回彈模數 40°C 比較圖，亦有類似趨勢，通車近 10 個月後，轉爐石瀝青混凝土回彈模數較高，其值約為 29556kg/cm²，傳統瀝青混凝土較低，其值約為 21342 kg/cm² 兩者差約為 8000 kg/cm²。

理論上瀝青混凝土在溫度較低時應具有較高的黏塑性以承受應力與應變，以維持適當的柔韌度，避免裂縫產生，即回彈模數值在低溫時不希望太高；在高溫時應具有足夠的彈性以抵抗推擠所造成之變形，並保有適當強度，即在高溫時希望有較高的回彈模數值。瀝青混凝土添加轉爐石後，開放交通近 10 個月，在常溫及高溫狀態均高於傳統瀝青混凝土鋪面，表示可增加抗永久變形之能力。

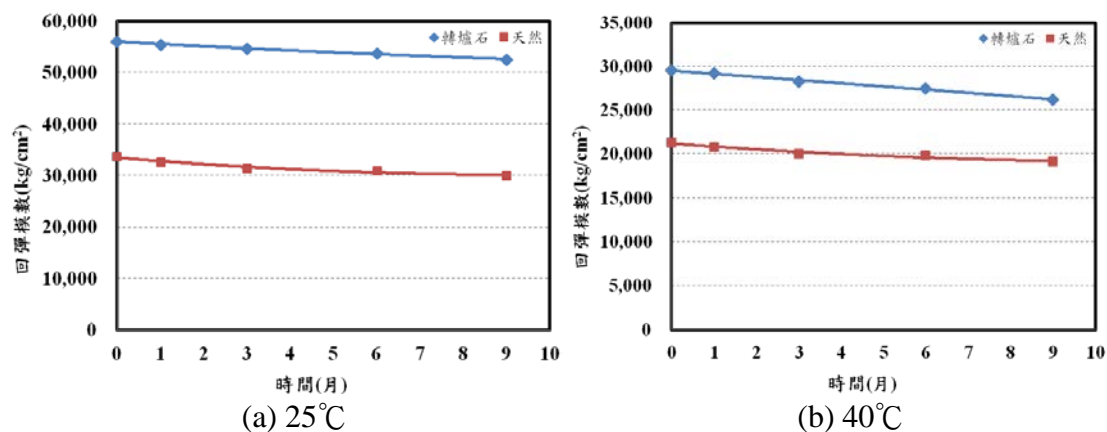


圖 20 轉爐石與天然瀝青混凝土之回彈模數比較圖

4.4 瀝青混凝土潛變試驗

瀝青混凝土潛變模數值會影響材料永久變形量的大小，潛變模數值在 Burger's model 中為線性假設，若時間愈長，所累積之變形量就會愈大，而潛變模數值與變形量的大小成反比，潛變模數值愈小則變形量就愈大，潛變模數值的大小可以用來評估瀝青混凝土路面是否容易有車轍現象發生。

本試驗道路於轉爐石瀝青混凝土斷面與傳統天然粒料瀝青混凝土斷面分別進行鑽心取樣，將試體送回試驗室分別進行動態潛變及靜態潛變試驗，加壓次數設定為 1,000 次，而瀝青是屬於高感溫性的材料，故使用溫度 25°C 及 40°C 分別進行試驗。

靜態潛變模數值會影響材料的永久變形量的大小，若加壓時間越長，所累積之變形量就越大，而潛變模數值也與變形量的大小成正比，潛變模數越小則變形量就越大，因此潛變模數的大小可以預測是否容易產生車轍問題。圖 21 為產業路不同粒料之瀝青混凝土鋪面之靜態潛變比較，研究結果顯示其變化趨勢為隨著通車時間增加，其靜態潛變逐漸減少，但轉爐石瀝青混凝土硬度較天然瀝青混凝土高，相差約在 $20000 \text{ sec} \cdot \text{kg}/\text{cm}^2$ ，表示轉爐石粒料之硬度及其互鎖作用能夠有效提高靜態潛變之能力，轉爐石瀝青混凝土較能夠有效抵抗垂直載重。此結果與林志棟等人 (2005) [15] 研究成果類似。

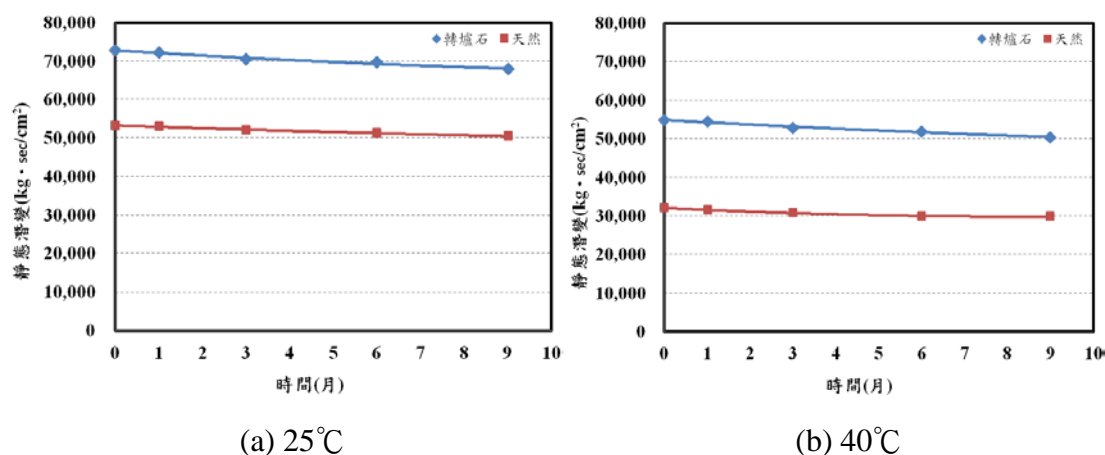


圖 21 轉爐石與天然瀝青混凝土鋪面之靜態潛變比較圖

動態潛變試驗與靜態潛變試驗之主要差異在於應力作用方式不同，利用重複加壓方式模擬瀝青混凝土鋪面受到車輛行經時荷重反覆作用之情形，與車轍輪跡試驗受壓情形類似。試驗室加壓頻率與車輛行經速度有關，即車輛速度愈快，鋪面受壓時間愈短，在試驗室的試驗加壓時間也愈短，試驗結果以應變表示，應變愈小即抗變形能力愈好。

圖 22 為產業路不同粒料之瀝青混凝土鋪面之 25°C 及 40°C 動態潛變比較，結果顯示剛鋪設完成時，兩種瀝青混凝土鋪面動態潛變變形量並無明顯變化，但開放通車近 10 個月，天然瀝青混凝土之動態潛變隨著時間增加而相對增加，但轉爐石瀝青混凝土鋪面動態潛變變形量則無明顯變化，轉爐石瀝青混凝土及天然瀝

青混凝土 25°C 動態潛變變形量分別為 0.51%、0.68%；40°C 動態潛變變形量分別為 0.32%、0.44%，從此結果中可得知，轉爐石做為瀝青混凝土粗粒料，動態潛變優於天然粒料，可減少重車輾壓所產生之變形。

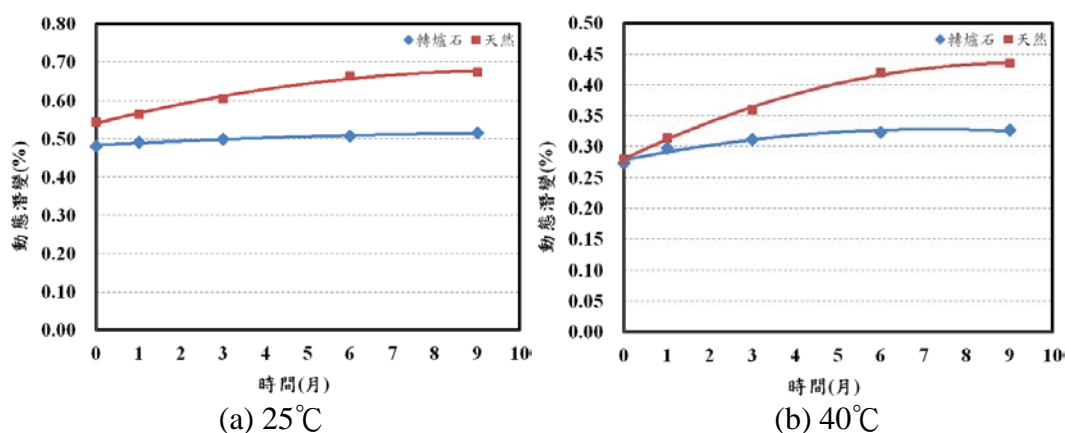


圖 22 轉爐石與天然粒料瀝青混凝土鋪面之動態潛變比較圖

4.5 瀝青混凝土鋪面現地測試

4.5.1 平坦度試驗

路面鋪築之目的在鋪面具平坦性，增進乘客舒適感，及減輕車輛耗損。平坦度之測試，在檢驗及控制路面最後鋪築面之平坦性，或檢驗在使用中路面平坦度，以作為路面維修之資料。就平行路線方向檢驗平坦度，平坦度標準差不得大於規範之 4mm，超過規定者應改善至合格為止。本研究以高低平坦儀進行道路平坦度檢測，計算參數採平坦度標準差，

本研究於鋪築前後分別進行道路平坦度量測，目的在於觀察舊路面損壞情況，以做新鋪完成之路面參考。由圖 23 為產業路舊路面與新路面鋪築後之平坦度，鋪築完成後到開放交通約 10 個月觀測平坦度，轉爐石瀝青混凝土鋪面及天然粒料瀝青混凝土鋪面並無太大差異，開放交通 10 個月後現況如圖 24 及 25 所示，鋪面平坦度約 1.6mm，顯現轉爐石瀝青混凝土鋪面亦可維持平坦度，將再持續長期觀測，比較轉爐石瀝青混凝土鋪面及天然粒料瀝青混凝土鋪面長期平坦程度差異。

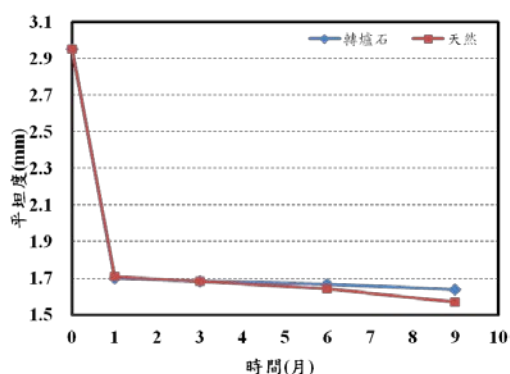


圖 23 轉爐石與天然瀝青混凝土之平坦度



圖 24 平坦度現地試驗過程



(a) 轉爐石瀝青混凝土鋪面

(b) 天然粒料瀝青混凝土鋪面

圖 25 瀝青混凝土鋪面現況

4.5.2 抗滑試驗

本研究以英式擺錘試驗儀施作抗滑度試驗，記錄其英式擺錘係數值 (British Pendulum Number, BPN)，BPN 值起於英國於 1964 年開發出使用儀器摩擦潮濕平面，觀察其能量損耗情形所測定出之抗滑值。國內交通部自 2006 年要求各地方政府標線抗滑值施工標準應高於 45，以確保民眾行駛的安全。

路面抗滑能力優劣係表示道路可提供車輛行駛時之摩擦能力，由於抗滑能力重要性在雨天路面濕滑狀態最能展現，摩擦力的大小關係到行車安全，故本研究採用濕滑狀態之抗滑值做為分析。車輛行駛時，輪胎主要接觸於車道的左、右兩側輪跡處，針對車輛輪跡處進行抗滑試驗。

如圖 26 所示，產業路原路面 BPN 值為 43，低於施工標準，BPN 值過低，主要因素是鋪面表面瀝青薄膜逐漸被車輛輾壓而變硬脆。而新鋪築之轉爐石瀝青混凝土鋪面及天然粒料瀝青混凝土鋪面 BPN 值約為 77，顯現新鋪築瀝青混凝土鋪面可提升摩擦能力。此外，鋪面摩擦能力 BPN 值隨開放交通時間增加而逐漸降低。開放交通 10 個月之後，轉爐石瀝青混凝土鋪面及天然粒料瀝青混凝土鋪面 BPN 值分別為 71.5、61.5，表示轉爐石瀝青混凝土鋪面較具有摩擦力。

粒料種類及鋪面粗糙度會影響輪胎與鋪面接觸面上水消散能力及輪胎抓地力，而轉爐石粒料本身較接近方形，較天然粒料粗糙，故其抗滑值較高於天然粒料，而隨時間的增加對轉爐石瀝青混凝土鋪面的抗滑並無產生明顯變化，但傳統天然瀝青混凝土已有明顯下降之趨勢，更可顯示轉爐石粒料之硬度及粗糙度可有效提升瀝青混凝土鋪面抗滑值，圖 27 為抗滑試驗過程。

4.5.3 車轍試驗

鋪面車轍量位在輪跡處之縱向表面下陷，沿著車轍邊可能發生鋪面上舉，也可能併有橫向位移，一般係由交通荷重所引起之壓密或側向位移。再以三米直規量測現地鋪面車轍量。

以實際檢測結果顯示添加轉爐石相較於天然粒料對於近期路面平坦度有很大的影響關係，最主要原因為轉爐石粒料本身硬度大，有益延長路面舒適度。目

前並無實際規範。由圖 28 之試驗結果顯示，轉爐石瀝青混凝土鋪面車轍量遠低於傳統天然瀝青混凝土鋪面，且隨時間增加，轉爐石瀝青混凝土鋪面能夠抵抗車轍，而傳統天然瀝青混凝土已呈現車轍的狀況，研判轉爐石粒料硬度大於天然粒料，故轉爐石瀝青混凝土鋪面於重車輾壓下，具有長期抗車轍的能力，圖 29 為三米直規試驗過程。

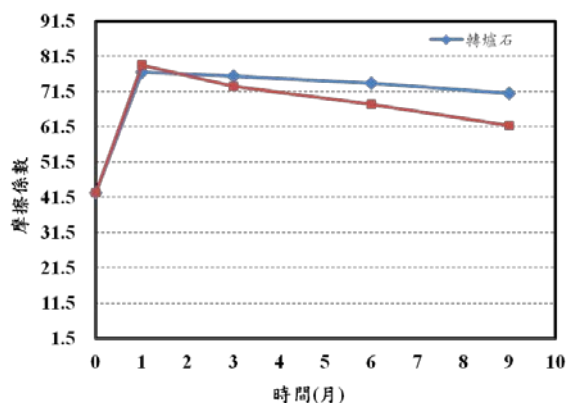


圖 26 轉爐石與天然瀝青混凝土之摩擦係數

圖 27 抗滑試驗現地試驗過程

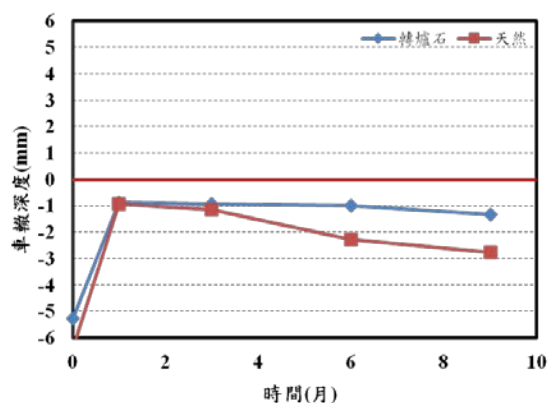


圖 28 轉爐石與天然瀝青混凝土之車轍量

圖 29 三米直規量測車轍量過程

4.6 轉爐石瀝青混凝土鋪面滾壓過程

本研究為評估轉爐石瀝青混凝土鋪面抵抗載重能力，於施工滾壓過程及開放交通後三、六、十個月，於固定位置拍攝鋪面現地影像，持續觀察粒料分布變化，藉以呈現轉爐石瀝青混凝土鋪面受壓過程，本研究於現地鋪築時，選定直線通行無煞車之路段進行拍攝，拍攝過程中前將方形模板至於選定區域進行噴漆，然後將相機固定於腳架上，腳架高度及相機角度皆固定不動，角架置放區域也進行噴漆定位，以方便日後拍攝時保持同一位置，拍攝出影像如圖 30。

如圖 31、32 所示，由圖 31 可觀察比較，轉爐石瀝青混凝土鋪面在滾壓過程，隨滾壓次數增加，粒料即逐漸有聚積互鎖現象，滾壓 6 次以上，粒料與粒料接觸現象較明顯，一般公共工程滾壓次數需在 8-10 以上，轉爐石瀝青混凝土鋪面滾壓 6-8 次即可發揮粒料間接觸互鎖效應，顯示轉爐石較容易滾壓。



圖 30 瀝青混凝土鋪面拍攝影像



(a) 滾壓 2 次



(b) 滾壓 4 次



(c) 滾壓 6 次



(d) 滾壓 8 次



(e) 滾壓完成

圖 31 轉爐石瀝青混凝土鋪面滾壓過程影像比較圖

圖 32 為轉爐石瀝青混凝土鋪面開放交通後，相同位置鋪面影像圖，開放交通後 3 個月，瀝青混合料粒料相對位置並未有明顯改變，開放交通後 6 個月、10 個月，由於經過車輛反覆輾壓，鋪面表面瀝青油膜部分會被車輪帶走，故表面顏色逐漸變淡，但多數粒料周圍仍然有瀝青膠泥包覆，驗證轉爐石親油性質，可與瀝青膠泥緊密包覆。此外，可觀察開放交通後 6 個月、10 個月後，粒料與粒料仍可維持接觸，顯示轉爐石粒料比重大，較能夠承受車輛載重作用，較不致產生剪力移動變形。



(a) 開放交通 3 個月



(b) 開放交通 6 個月



(c) 開放交通 10 個月

圖 32 轉爐石瀝青混凝土鋪面開放交通後影像比較圖

五、結論

本研究於第一年檢測期間，從鋪築過程至開放交通後，每三個月至六個月到鋪築現場進行測試及取樣試驗，初步結論茲列於下：

1. 轉爐石比重較天然粒料大，可以提高瀝青混合料穩定值，轉爐石粒料比天然粒料較接近方形，加入鋪面後有互鎖作用，能提升瀝青混凝土之力學及耐久性。
2. 轉爐石沒有扁平率問題存在，而天然粒料約有 7% 過於扁平之粒形，且轉爐石於磨損率、破裂面及扁平率方面皆優於天然粒料。
3. 轉爐石瀝青混合料 V.M.A. 值變化，原因為轉爐石本身粒料皆屬於多孔隙粒料

所導致，但實驗顯示結果轉爐石取代傳統粒料都還在規範內，印證轉爐石仍可以取代傳統天然粒料之可行性。

4. 轉爐石屬於親油性之材料，因轉爐石的化學特性影響，會提升抗剝脫的能力。
5. 轉爐石瀝青混合料降溫速率較小，較具有保溫效果。故能降低運輸時間過長導致瀝青混合料溫度不足之疑慮。瀝青混凝土添加轉爐石能降低各個位置溫度離散程度，亦即較具有聚溫儲熱效應。
6. 轉爐石瀝青混凝土鋪面現地成效上，平坦度、車轍量與天然粒料瀝青混凝土鋪面無明顯差異，且其抗滑性天然粒料瀝青混凝土好，可增加行車安全性。
7. 開放交通近 10 個月，轉爐石瀝青混凝土鋪面影像顯示粒料與粒料仍可維持接觸，較能夠承受車輛載重作用。(與摘要問題類似請老師修飾一下內容)

六、參考文獻

1. Huang, L. S., and Kang, Y. V. (2010). "Nondestructive Evaluation of Thickness and Bearing Capacity of Roadway Pavement Structure," *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 3, No. 6, pp.311-319.
2. 林志棟 (2006)，「氣冷轉爐石添加飛灰、底灰應用於基底層材料之研究」，期末報告，國立中央大學土木工程研究所。
3. 林志棟 (2006)，「轉爐石於道路工程之推廣及應用」，鋼鐵工業爐渣資源化再利用實務研討會。
4. Shen, D. H., and Wu, C. M., and Du, J. C. (2009). "Laboratory Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag for Substitution of Aggregate in Porous Asphalt Mixture," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, NO 1, pp.453-461.
5. Xue, Y., and Hou, H., and Zhu, S., and Zha, J. (2009). "Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Stone Mastic Asphalt Mixture: Pavement Performance and Environmental Impact," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, NO 2, pp.989-996.
6. Xue, Y., and Wu, S., and Hou, H., and Zha, J. (2006). "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture," *Journal of Hazardous Materials*, Vol.138, NO 2, pp.261-268.
7. Kanitpong, K., and Bahia, H. U.(2003). "Role of Adhesion and Thin Film Tackiness of Asphalt Binders in Moisture Damage of HMA," *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72, pp.502-pp. 528.
8. Wu, S., and Xue, Y., and Ye, Q., and Chen, Y., (2007). "Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures," *Building and Environment*, Vol. 42, NO 7, pp.2580-2585.
9. Noureldin, A. S.,and Mcdaneil, R. S. (1990). "Evaluation of Surface Mixtures of Steel Slag and Asphalt," *Transportation Research Record* ,NO 1269 ,pp.133-147.

10. Burak, S., and Emine, A.(2007). “Effect of Asphalt Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt,” *Building and Environment*,Vol. 42,pp.3621-3628.
11. 林志棟、林平全、張東源、葉銘欽 (2005),「轉爐石於耐久性鋪面之研究」, 九十四年轉爐石工程材料應用研討會, 高雄, Part 4, 第 1 頁至 17 頁。