

轉爐石應用於改質瀝青混凝土之成效

黃隆昇*、林登峰**、林平全***、徐登科****、黃祥亞*****

Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used in Modifier Asphalt Mixture

Long-Sheng Huang, Deng-Fong Lin, Ping-Chuang Lin,
Teng-Ker Hsu, Hsiang-Ya Huang

摘 要

本研究探討轉爐石應用於瀝青混凝土之成效，並比較改質瀝青混凝土添加轉爐石或天然粒料之差異，包含瀝青混凝土之間接張力強度及潛變模數。試驗結果得知，轉爐石瀝青混凝土無論浸泡於海水及淡水，其間接張力殘餘強度均比天然粒料瀝青混凝土大。浸水前後轉爐石瀝青混凝土靜態潛變差異不大，但傳統天然粒料瀝青混凝土則有明顯差異。溫度25°C及40°C時，轉爐石瀝青混凝土之潛變永久變形量均比天然粒料瀝青混凝土小。歸納轉爐石應用於瀝青混凝土時，其變位量少且强度高，可增加鋪面品質及使用年限。

關鍵詞：轉爐石、改質瀝青、潛變、間接張力強度

ABSTRACT

This paper discussed the mechanical properties of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag and natural aggregate in modifier asphalt mixtures, including indirect tensile strength and creep modulus. Test results shows that BOF slag used in modifier asphalt concrete immersed in seawater and freshwater, which residual indirect tension strength than the natural aggregate. In addition, the creep modulus of BOF slag asphalt mixtures showed no difference before and after soaking. The traditional natural aggregate asphalt mixtures were significant differences. The creep permanent deformation of BOF slag asphalt mixtures was less than natural aggregates asphalt mixtures. Summarized, BOF slag used in modifier asphalt mixtures could increase the mechanical properties and service life of pavement.

Keywords: Basic Oxygen Furnace (BOF) slag, Modifier asphalt mixture, Creep, Indirect tensile strength

*樹德科技大學運籌管理學系助理教授

**義守大學土木與生態工程學系教授

***中聯資源公司技術室主任

****中聯資源公司研發處經理

*****中鋼公司廠內運輸處課長

I. 前 言

隨著工業建設的增加和國民生活品質上的需求，國內各種重工業蓬勃發展，其中鋼鐵產品的需求更是大幅度的增加。而轉爐石粒料為煉鋼過程之副產物，2010年12月CNS國家標準公告「瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料」，轉爐石已被國家認定為資源產物，可合法做為鋪面材料替代品，目前轉爐石每年產量約為120萬噸左右，後續處理應用絕大部分以做為工程填方、填海造地方式進行。

由於轉爐石比重大能承受載重、硬度高抗磨損；又經軋製過程，具有扁平率低及破碎面大特性，顯見將轉爐石回收再利用是可行方式，美國每年鋼渣再利用約770~830百萬噸之多。現今將轉爐石再利用於瀝青鋪面上，不但可以降低轉爐石後續處理成本，且對於鋪面工程而言，多了一種替代砂石來源。若能再加以推廣，一方面可以有效解決國內轉爐石處理及砂石短缺的問題，二方面可節省國家資源，以及改善環境相關問題。

近來許多國內外文獻研究顯示，轉爐石可取代作為瀝青混合料粒料使用，Xue et al.⁽¹⁾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(Adhesion Ability)。Wu et al.⁽²⁾研究發現轉爐石具有多孔隙特性，可吸附瀝青，進而降低高溫時永久變形量。轉爐石應用於不同級配瀝青混合料亦有其成效，Shen et al.⁽³⁾探討轉爐石用於多孔隙(Porous Asphalt)級配之成效，顯示可增加抗滑性、浸水敏感性、抗車轍能力、噪音吸附能力。Wu et al.⁽⁴⁾探討轉爐石用於石膠泥瀝青混凝土(Stone Mastic Asphalt, 簡稱SMA)級配之成效，可增加高溫性質及低溫脆裂能力。基於全球致力於節能減碳之目標。林志棟教授⁽⁵⁾等人

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，在國內轉爐石添加於瀝青混凝土成效已有初步評估及實例，2003年於高雄市南星計畫加鋪轉爐石瀝青混凝土，以100%轉爐石取代天然粗粒料；2007年於中鋼廠區內動力東路鋪設，2007年於中聯A廠廠區道路鋪設；2007年中華鋪面工程學會進行「利用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」；2008年義守大學進行「再生瀝青混凝土添加轉爐石成效之研究」；2009年高雄縣澄清路鋪設轉爐石再生瀝青混凝土鋪面；2009年於中聯台中廠及中龍廠區鋪設，評估結果均顯示添加轉爐石可改善瀝青混凝土之品質，有效提升耐久性成效。

瀝青混合料績效呈現，係藉由瀝青黏結料與粒料緊密結合，以發揮抗載重強度。上述國內外研究成果及實際鋪設案例，均著重於以轉爐石取代部分粗粒料及應用於密級配、再生級配、排水級配等。近來年由於重車型式及載重持續增加，傳統鋪面材料已無法提供適合之強度，導致鋪面耐久性不足。目前除改變粒料級配外，採用高黏度之瀝青黏結料，可增加與粒料圍束能力，例如改質瀝青、格斯(Guess)高剪瀝青，並且其質流行為較趨向彈性行為，降低載重塑性變形之特性。基於尚未以改質瀝青黏結料轉爐石瀝青混凝土之成效評估資料，本研究即以轉爐石取代全部粗粒料，並以改質III型瀝青膠泥作為黏結料，評估轉爐石應用於瀝青混凝土之成效。

II. 文獻回顧

1. 改質瀝青特性

改質瀝青為在傳統瀝青膠泥內加入高分子聚合物，以增強在鋪面上之特性，高分子聚合物以苯乙烯-丁二烯為主，主要可增加傳

統瀝青膠泥之高溫黏滯性，加強瀝青膠泥高溫彈性行爲。目前改質瀝青已列入CNS14184規範，依據黏度大小分爲改質 I、II、III型(表1)。

表1 CNS14184之改質瀝青規範
Table 1 Standard specification of CNS14184 for type III modified asphalt

改質瀝青分類			
規範項目	I 型	II 型	III 型
針入度(25°C、100g、5秒、0.1mm)	>65	>50	>35
黏度(60°C、泊(poise))	>2,500	>4,500	>8,000
閃火點(°C)	>232	>232	>232
三氯乙烯溶解度(%)	>99	>99	>99
滾動薄膜烘箱(RTFOT)老化試驗後彈性回復率(25°C、10cm伸長、%)	>60	>60	>70
滾動薄膜烘箱(RTFOT)老化試驗後針入度(4°C、200g、60秒)	>15	>15	>10

改質瀝青近年來已廣泛適用於瀝青混凝土，Morales等人⁽⁶⁾於回收瀝青加入改質劑，可增加瀝青膠泥高溫黏度、抗剪能力及降低溫感性等特性。Ai等人⁽⁷⁾以70/100針入度瀝青添加Starch(廠牌名)改質劑，發現比常用之高分子聚合物(SBS)改質瀝青更有較佳之成效，包含抗車轍能力、溫感性、水份敏感性等性質，並比較出添加5% Starch改質劑爲建議最佳用量。Yu等人⁽⁸⁾使用ATH(廠牌名)改質劑，可大幅提升瀝青混凝土抗車轍能力，及降低瀝青易燃性(Flammability)。Kim等人⁽⁹⁾以長期鋪面維修觀點計算，添加高分子聚合物改質瀝青之鋪面，可比傳統瀝青混凝土鋪面降低約30%之成本。

在國內研究部分，劉文宗等人⁽¹⁰⁾以不同等級瀝青膠泥應用在排水鋪面，發現改質III型瀝青具有較佳抗剝脫及抗車轍能力，陳建旭及黃建中⁽¹¹⁾使用高黏度改質瀝青添加於多孔隙瀝青混凝土，並實際鋪設於國道六號道

路，發現能維持較佳排水效果與控制變形量能力。高黏度改質瀝青能維持較佳排水效果與控制變形量的能力。

2.瀝青混凝土潛變

瀝青混凝土兼具黏彈性材料行爲，黏彈性材料包括了固體的彈性性質及液體的黏性性質⁽¹²⁾，一般黏彈性理論之解析程序是基於彈性-黏彈性一致性的原則，將所有與時間有關的參數和方程式藉由拉普拉斯(Laplace)轉換(如肯雷爾(Kenlayer))，將黏彈性問題轉變爲彈性問題，藉此解決所有與時間相關之力學問題；再將彈性問題的解經由肯雷爾或傅利葉(Fourier)反轉換爲黏彈性問題的解。而在分析材料行爲爲彈性且與時間無關時，由於柏松比(Poisson Ratio)對鋪面行爲之影響很小，因此轉換之過程中通常只考量彈性模數爲黏彈性並與時間相關。在應力維持不變的狀態下，勃格氏模型(Burgers Model)的應變爲馬克斯威爾模型(Maxwell Model)和凱文模型(Kelvin Model)的應變和，因此總應變包括了三個部分(圖1)。

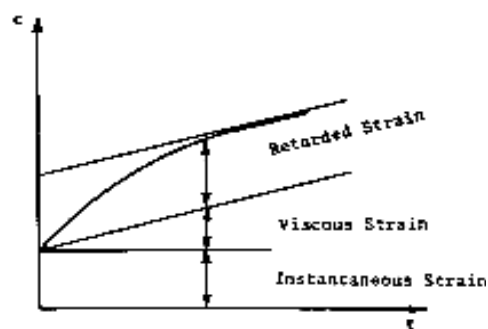


圖1 勃格氏模型時間與應變關係圖
Fig.1 Burgers model for relationship between time and strain

潛變模數的定義是在應力不變的狀況下與時間相關的應變，此時的潛變模數爲楊式模數的倒數，馬克斯威爾模型、凱文模型及勃格氏模型的潛變模數。圖2爲典型的勃格氏模型的潛變模數圖形。

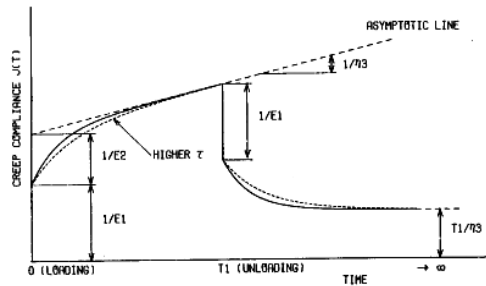


圖2 典型勃格氏模型的潛變模數
Fig.2 Typical creep module of Burgers model

材料模式無法模擬靜態潛變中的變形行為，即塑性、黏塑性及無法回復之黏彈性，Gillespie等人⁽¹³⁾提到由柏克萊和德州農工大學分析由荷重引起的瀝青混凝土反應之結果顯示：「對於疲勞裂縫和車轍的發展而言，瀝青混凝土材料性質屬於非線性，包含彈性、塑性、黏彈性及黏塑性等四個變形分量所組成」。經過Sousa等人⁽¹⁴⁾修正傳統黏彈力學的材料模式，修改成簡單的塑性分量，圖3為之彈-黏-塑模式。

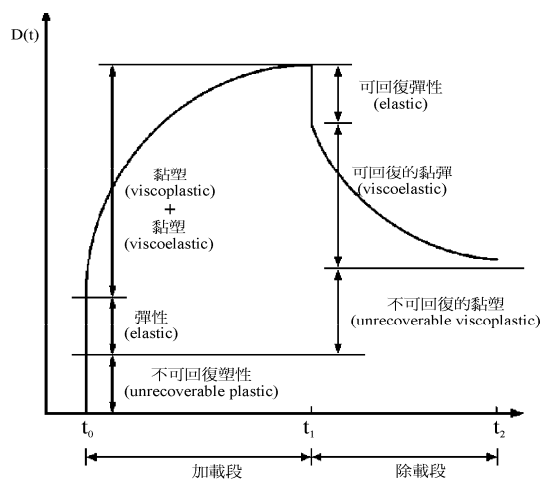


圖3 彈-黏-塑材料模式柔量之變化曲線⁽¹⁵⁾
Fig.3 Curve type in elastic-viscous-plastic material model⁽¹⁵⁾

III. 研究材料及方法

1. 試驗材料來源及粒料級配

(1)轉爐石：由中聯資源公司提供，來源取自於小港區處理廠區(圖4)。



圖4 轉爐石
Fig.4 Appearance of BOF slag

(2)天然粒料：由光隆瀝青公司提供(圖5)。



圖5 天然粒料
Fig.5 Appearance of nature aggregate

(3)黏結料：本研究採用改質III型瀝青膠泥，由光隆瀝青公司拌合廠提供。

(4)填充料：使用石粉取代200號篩以下之粒料。

(5)粒料級配：採用最大粒徑19.5mm之密級配，轉爐石全取代粗粒料(#4以上)。

2. 動態潛變試驗

動態潛變試驗為利用重複加壓方式係模擬車輛行經路面時，造成反覆荷重的試驗。試驗步驟如下：

(1)馬歇爾試體製作完成。

(2) 加載條件：

- a. 調整恆溫箱溫度，使保持恆溫，試驗溫度為25℃、40℃。
- b. 以一般道路設計值800kgf為試驗加載重量。
- c. 選定正弦波形，荷重頻率為1Hz，試驗次數1,000次。
- d. 架設測微計(LVDT)於試體中點，量測加載時試體的變位，加載前必須將測微計歸零並於加載後記錄。

3. 靜態潛變試驗

瀝青混凝土之潛變行為與車轍有相當的關聯，由於材料太過堅硬，當其受外力時，造成面層下的材料疲勞龜裂，而導致車轍的發生。以瀝青膠泥而言，其流變行為相當明顯，但以瀝青混凝土而言，粒料會因本身的互鎖力(Interlock)，造成較大的內摩擦力，可減少潛變的發生。試驗步驟如下：

- (1) 馬歇爾試體製作完成。
- (2) 測定試體厚度。
- (3) 將試體放置於恆溫箱，調整所欲測試的溫度，恆溫24小時以上。將試體置於潛變試驗儀上，調整所欲測試之條件，進行加壓、解壓各3,600秒，由電腦記錄變形量。

潛變模數值計算：

$$\text{潛變模數}(\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2) = \text{應力}(\text{kg}/\text{cm}^2) \times \text{時間}(\text{sec}) / \text{最終應變量}$$

IV. 研究成果與分析

1. 基本物性分析

本研究所使用轉爐石及天然粒料之粗粒料進行物性實驗。試驗結果如表2，轉爐石比重約為3.38，天然粒料為2.61，轉爐石比重遠大於天然粒料比重，此外，轉爐石吸水率為2.73%，天然粒料為1.67%，因轉爐石內部多

空隙，所以吸水率方面比天然粒料高。粒料磨損率比較，轉爐石磨損率僅9%，而天然粒料之磨耗率25.7%，顯示轉爐石具有較佳的抗磨損特性。另外轉爐石破碎面多且粒形接近方形或圓形，更能夠達到粒料間互鎖現象，而這些都顯示出轉爐石都優於天然粒料。

表2 轉爐石及天然粒料之基本物性
Table 2 Physical properties between BOF slag and nature aggregate

試驗類別	轉爐石	天然粒料	
比重	3.387	2.612	
吸水率(%)	2.73	1.67	
洛杉磯磨損率(%)	9.0	25.7	
破碎面(%)	二面(含)以上	99.0	89.2
扁平率(%)	寬厚比 ≥ 3	0.8	9.0

2. 粒料級配

經由篩分析粒徑分佈之後，決定粗細粒料間所需的比例，本研究設計粒料級配為密級配，為求減少其它因素，將轉爐石及天然粒料之粒料級配過篩百分比相似，其數據更能降低誤差性，其轉爐石及天然粒料之粒徑分布結果如圖6。

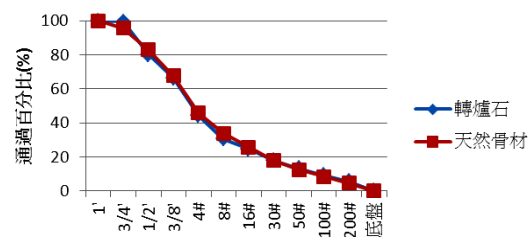


圖6 級配粒徑分布

Fig.6 Aggregate size distribution

3. 馬歇爾基本性質

本研究以轉爐石應用於瀝青混凝土，並以改質III型瀝青膠泥作為黏結料，製作馬歇爾試體，並與傳統天然粒料製成之瀝青混凝土比較(表3)。

表3 瀝青混凝土配合設計值

Table 3 Criteria and asphalt concrete mix design

項 目	傳統瀝青 混凝土	轉爐石瀝 青混凝土	規範值
建議瀝青含量(%)	4.975	4.275	4.0~7.0
設計目標黏度 (poise)	9,800	9,800	>8,000
夯壓後試體單位 重(kg/m ³)	2,300	2,770	-
理論最大密度 (kg/m ³)	2,410	2,810	-
穩定值(kgf)	1,658	2,311	>816
流度值(0.25mm)	11.3	11.6	8~14
空隙率-V.A (%)	4.15	4.36	3~5
粒料間空隙率 -V.M.A (%)	15.27	16.07	≥13.0
瀝青填充率 -V.F.A (%)	73	72	65~75
粒料平均比重	2.622	3.15	-

單位重比較，傳統天然粒料瀝青混凝土及轉爐石瀝青混凝土之單位重分別是2,300 kg/m³及2,770kg/m³，傳統瀝青混凝土粒料級配是以粒料重量比例配置每個篩號，而轉爐石瀝青混凝土單位重較傳統瀝青混凝土大甚多，需以體積比例配置，以得到粒料間合理之空間排列。

穩定值比較，穩定值係瀝青混凝土強度參考值之一，規範規定要817kgf以上。結果顯示轉爐石瀝青混凝土與傳統瀝青混凝土與穩定值分別是2,311kgf、1,658kgf，相差700kgf，瀝青混凝土添加轉爐石之穩定值較佳，說明轉爐石瀝青混凝土具有較高穩定程度。

流度值比較，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。實驗結果顯示轉爐石瀝青混凝土與傳統瀝青混凝土流度值分別是11.3、11.6 (0.25mm)，兩者的流度值差異不大。

粒料間空隙率(V.M.A.)比較，粒料間空隙率係指粒料之間不加瀝青經過壓實後所占的空隙率百分比，依規範規定最少為13%，過少

則容易造成車轍問題。由表2、3可以看出，轉爐石及天然粒料之粒料間空隙率分別約為16%、15%，一般轉爐石瀝青混凝土係以重量比例方式進行配合設計，常見粒料間空隙率值有偏低趨勢，本研究以體積比例方式進行配合設計，故轉爐石及天然粒料之粒料間空隙率差異不大，均可符合規範大於13%之要求。

空隙率比較，空隙率係粒料混合瀝青後空隙所占的比例，依規範規定為3~5%，當空隙過大時透水率提升會影響耐久性質，反之會因無變形空間易造成推擠。轉爐石及天然粒料之空隙率，轉爐石本身含有內部空隙，故轉爐石瀝青混凝土所占空隙率比天然粒料混凝土高出許多。

4.改質III瀝青混凝土之強度

(1)間接張力強度

間接張力強度試驗又稱為劈張試驗，為測定材料張力強度的方法之一。可用以評估瀝青混凝土的抗張強度、波松比、抗張應變，彈性模數及勁度。影響瀝青混凝土所承受之應力為粒料互鎖能力、以及瀝青與粒料間的黏結性。本試驗模擬鋪面常溫時25°C之間接張力，圖7為轉爐石粒料及天然粒料拌合瀝青混凝土之25°C之間接張力強度，轉爐石瀝青混凝土在25°C時為18kgf/cm²，而傳統天然粒料瀝青混凝土約11.8kgf/cm²。

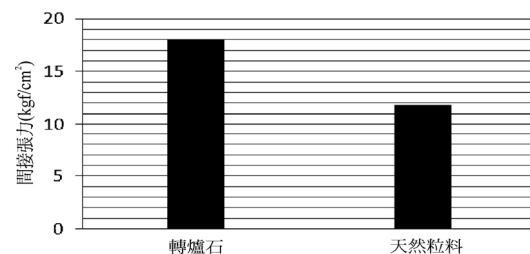


圖7 轉爐石及傳統瀝青混凝土之常溫抗裂
Fig.7 The ambient temperature anti-crack between BOF slag and traditional asphalt concrete

(2) 殘餘強度

瀝青混凝土間接張力殘餘強度(Tensile Strength Ratio, TSR)試驗主要目的是在量測瀝青混凝土浸水前後水分敏感性，評估對於水分浸入情況下是否對瀝青混凝土試體造成影響。鋪面受到外在物理作用，如水分、空氣、溫度、交通量等因素均會影響間接張力殘餘強度，在水分滲透比較上，本研究進行瀝青混凝土其淡水與海水之浸入破壞，以模擬現地鋪面情況。試驗方式將轉爐石與傳統瀝青混凝土試體分別放入淡水與海水之中，在60°C的水溫浸泡24小時並進行浸水後殘餘強度量測。圖8為不同水質之浸水後殘餘強度。天然粒料瀝青混凝土試體在浸泡於淡水與海水中殘餘強度分別為2.215kgf/cm²及2.115kgf/cm²，而轉爐石瀝青混凝土浸泡於淡水與海水分別為3.145kgf/cm²及2.68kgf/cm²，顯示瀝青混凝土浸泡於海水中，對於間接張力殘餘強度較具敏感性，轉爐石瀝青混凝土無論浸泡於海水及淡水，其間接張力殘餘強度均比天然瀝料瀝青混凝土大。

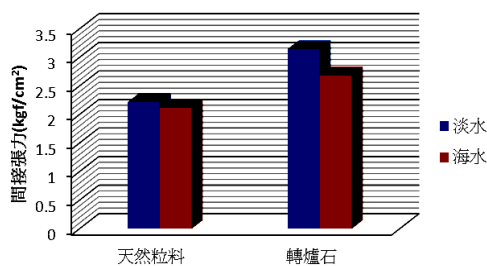


圖8 不同水質之殘餘強度
Fig.8 The tensile strength ratio of different water quality

(3) 回彈模數

回彈模數(Resilient Modulus, MR)係用於評估不同材料彈性行為，可做為路面厚度設計分析之資料，其可設定不同溫度

、荷重大小、作用速率、加壓時間對材料特性之影響比較。圖9為轉爐石與天然粒料25°C時之回彈模數，轉爐石瀝青混凝土優於傳統瀝青混凝土，其值約為11,800kgf/cm²，而傳統瀝青則約為9,500kgf/cm²，兩者約差為2,300kgf/cm²。

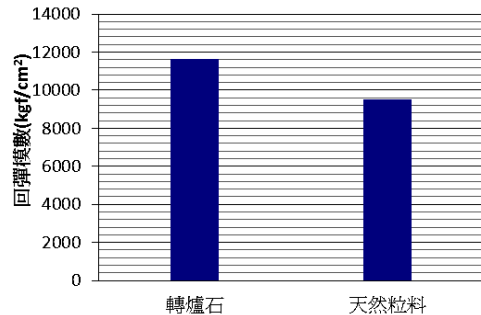


圖9 不同粒料之回彈模數(25°C)
Fig.9 The resilient modulus of different aggregates(25°C)

(4) 動態潛變

本試驗探討轉爐石與天然粒料應用於鋪面之動態潛變，利用重覆加壓方式模擬瀝青混凝土鋪面受到車輛行進時荷重反覆作用之情形，應變越小即抗變形能力越好。將轉爐石瀝青混凝土與傳統瀝青混凝土試體，分別進行不同溫度25°C及40°C實驗，加壓次數設定為1,000次，實際選定某條道路部分路段鋪設，另外區分輪跡與非輪跡之試體以進行比較分析。圖10為鋪面鑽心試體之25°C動態潛變比較。在溫度25°C狀態，天然粒料非輪跡位置垂直變位約0.58mm，天然粒料輪跡位置垂直變位0.02mm，轉爐石輪跡位置、非輪跡位置垂直變位分別是0.09mm及0.15mm。圖11為鋪面鑽心試體之40°C動態潛變。天然粒料非輪跡垂直變位約0.79mm，天然粒料輪跡垂直變位0.04mm，轉爐石輪跡、非輪跡位置分別是0.32mm及0.22mm。

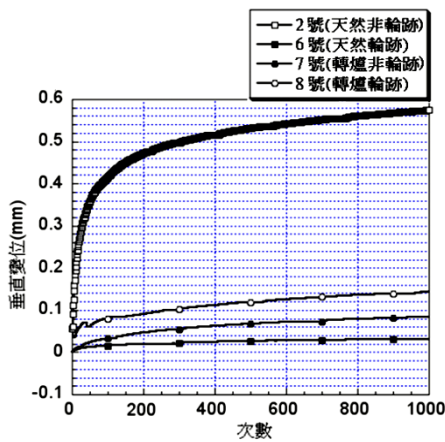


圖10 路面動態潛變(25°C)
Fig.10 Pavement dynamic creep(25°C)

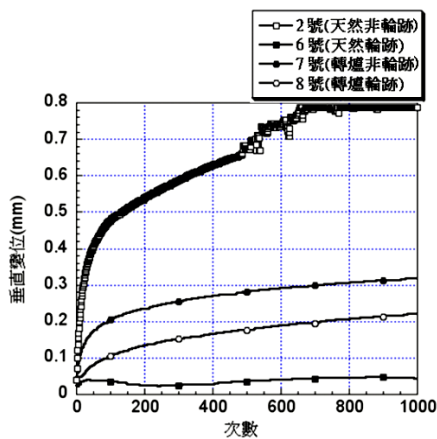


圖11 路面之動態潛變(40°C)
Fig.11 Pavement dynamic creep(at 40°C)

(5) 靜態潛變

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12、圖13分別為路面鑽心試體不同溫度之靜態潛變。圖12中可以看到天然粒料輪跡位置垂直變位為0.58mm，另外同

樣天然粒料非輪跡位置垂直變位為0.05 mm，轉爐石瀝青混凝土的輪跡位置與非輪跡位置則分別為0.19mm與0.11mm，表示傳統瀝青混凝土經過車子反覆的滾壓，會使得不可回復的垂直變位提高許多，然而轉爐石瀝青混凝土的輪跡雖然比非輪跡增加一些，但沒有很明顯的差異；表示出轉爐石瀝青混凝土不會因為車子行駛下有太大變異，而傳統瀝青混凝土會因為車子行駛會有極大的差異。也代表轉爐石瀝青混凝土在使用過程中保有最佳的效用，將使用年限提高。

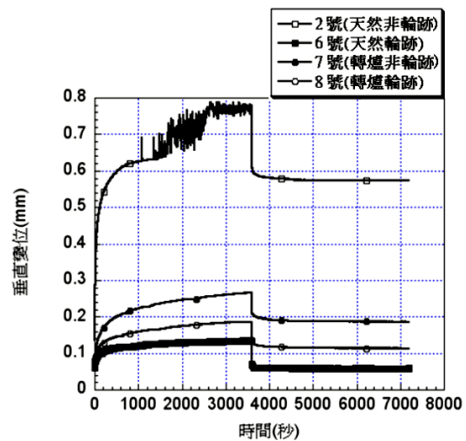


圖12 路面靜態潛變(25°C)
Fig.12 Pavement static creep(at 25°C)

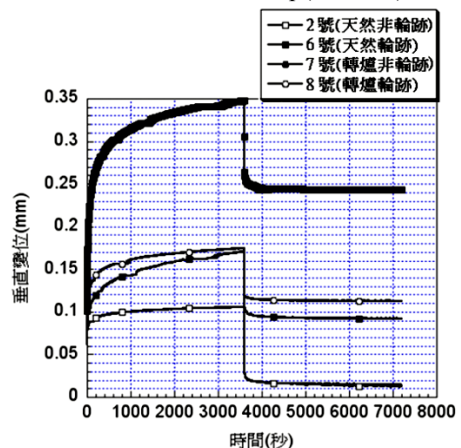


圖13 路面靜態潛變(40°C)
Fig.13 Pavement static creep(at 40°C)

圖13係路面鑽心試體40℃之靜態潛變。由圖中可以看到轉爐石也會因為溫度提高而有所變化，與溫度25℃有類似的結果，由靜態潛變顯示轉爐石瀝青混凝土的永久變形量較小，相對其工程使用年限應會比傳統瀝青要來的佳。

V. 結 論

1. 轉爐石比重大於天然粒料，而且轉爐石粒料比天然粒料較接近方形，添加於鋪面後會增加粒料間互鎖作用，故可提高瀝青混凝土之穩定值及降低流度值，提升瀝青混凝土之耐久性。
2. 轉爐石幾乎沒有扁平率問題存在，而天然粒料約有9%過於扁平之粒形；轉爐石於磨損率、破裂面及扁平率方面皆優於天然粒料，適合發展轉爐石鋪面技術。
3. 轉爐石瀝青混凝土無論浸泡於海水及淡水，其間接張力殘餘強度均比天然粒料瀝青混凝土大。
4. 靜態及動態潛變試驗顯示，轉爐石瀝青混凝土的靜態潛變量及動態潛變量均比傳統瀝青混凝土低，表示其永久變形量較小，可增加瀝青混凝土鋪面彈性行為，增加抗載重能力。

VI. 致 謝

本研究感謝中聯資源公司、光隆瀝青公司王忠山主任等人協助提供資料，始能順利完成本文，僅此致謝。

參考資料

- (1)Xue, Y., Wu, S., Hou, H., Zha, J., “Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture”, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 138, Issue 2, pp.261-268, 2006.
- (2)Wu, S., Qiu, J., Mo, L., Yu, J., Zhang, Y., Li, B., “Investigation of temperature characteristics of recycled hot mix asphalt mixtures”, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 51, Issue 3, pp.610-620, 2007.
- (3)Shen, D.H., Wu, C.M., Du, J.C., “Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, Issue 1, pp.453-461, 2009.
- (4)Wu, S., Qiu, J., Mo, L., Yu, J., Zhang, Y., Li, B., “Investigation of temperature characteristics of recycled hot mix asphalt mixtures”, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 51, Issue 3, pp.610-620, 2007.
- (5)林志棟，“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，2006。
- (6)García-Morales, M., P. Partal, F.J. Navarro, F. Martínez-Boza, C. Gallegos, N. González, O. González, M.E. Muñoz, ” Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen”*Fuel*, Vol.83, pp.31-18, 2004.
- (7)Al-Hadidy, A., Tan, Y., and Ayman, Y.H., “Starch as a modifier for asphalt paving materials”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 1, pp.14-20, 2010.
- (8)Yu, J., Cong, P., and Wu, S., “Investigation of the properties of asphalt and its mixtures containing flame retardant modifier”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, Issue 6, pp.2277-2282, 2009.
- (9)Kim, B., Roque, R., and Lee, S.H., “Cost Analysis for use of SBS Modifier in Asphalt Pavement using a Performance-based Fracture Criterion”, *Road Materials And Pavement Design*, Vol. 9, Issue 4, pp.571-588, 2008.
- (10)劉文宗、張偉哲、黃詔璋、翁俊堯，“不同等級瀝青膠泥應用在排水鋪面之研究”，鋪面工程，8卷2期，p.29-40，2010。
- (11)陳建旭、黃建中，“國道六號多孔隙瀝青混

- 凝土鋪面績效”，鋪面工程，7卷3期，p.17-23，2009。
- (12)林宗賢，“重車與環境因素對柔性鋪面的影響”，碩士論文，中央大學土木工程研究所，中壢市，2003。
- (13)Gillesple, T. D., Karamihas, S. M., Sayers, M. W., Nasim, M. A., Hansen, W., Ensan, N. and Cebon, D., “Effects of heavy-vehicle characteristics on pavement response and performance,” NCHRP Rep.353, pp.29-38, 1993.
- (14)Sousa, J. B., Weissman, S. L., Sackman, J. L., and Monismith, C. L., “Nonlinear elastic viscous with damage model to predict permanent deformation of asphalt concrete mixes,” Transportation Research Record, Vol.1384, pp.80-99, 1993.
- (15)林志憲，“應用解析方法評估瀝青混凝土之力學機制”，成功大學土木工程研究所博士論文，2003。