

不同瀝青膠泥應用於多孔隙轉爐石瀝青混凝土行為比較之研究

徐登文¹ 林群凱²

¹ 國立中興大學土木工程學系 教授

² 國立中興大學土木工程研究所 碩士

摘要

本研究以 AC-30 及 AR-80 兩種瀝青膠泥與轉爐石拌合成多孔隙瀝青混凝土，透過一系列試驗探討此兩種多孔隙轉爐石瀝青混凝土抵抗車轍及疲勞能力之差異。

根據在試驗室配合設計結果並比較此兩種瀝青膠泥所拌合的多孔隙轉爐石瀝青混凝土成效試驗發現：AR-80 膠泥拌合的瀝青混凝土較 AC-30 有較大穩定值及較低流度值，顯示其有較佳抵抗變形之特性。另外由車轍輪跡試驗數據結果可看出，AR-80 所拌合的瀝青混凝土試體具有較大之動穩定值，較低變形率以及較小總變形量。顯示 AR-80 所拌合的瀝青混凝土抗車轍能力較 AC-30 為佳。接著由動態模數主曲線的實驗結果皆顯示，AR-80 膠泥拌合瀝青混凝土之動態模數在高溫下較 AC-30 膠泥拌合的瀝青混凝土為高，而三軸重覆荷重試驗的永久應變主曲線亦顯示達到相同試體應變時所需簡化時間也較長，表示 AR-80 拌合的瀝青混凝土有較佳抵抗車轍之能力。再由間接張力破裂能量試驗結果顯示：AR-80 瀝青混凝土在間接張力破壞時較 AC-30 須有較大的破裂能量，此結果表示 AR-80 多孔隙轉爐石瀝青混凝土較 AC-30 有較佳抵抗疲勞的能力。

關鍵詞：動態模數主曲線、三軸重覆荷重試驗、間接張力破裂能量試驗

一、前言

鋪設多孔隙鋪面主要目的為提高用路人之安全性及舒適性，在雨天可降低前方車輛掀起水霧，亦可避免路面標誌及標線在夜間反光增加其見識度，同時可降低因行車所產生的噪音。又其路面粗糙度較一般傳統密級配瀝青混凝土高，摩擦阻力增大，可降低煞車有效距離，增加行車安全。近年來車輛大量且迅速地增加，新建及養護鋪面工程之粒料需求也跟著增加，台灣地區天然砂石料源開發有限。因此，尋求替代之砂石粒料如轉爐石應用於多孔隙鋪面不失為解決砂石短缺的方法。而本試驗所使用轉爐石(Basic Oxygen Furnace Slag, 簡稱 BOF)為中聯爐石處理資源化股份有限公司所生產經過第三代處理過程的產物。第三代轉爐石處理過程是將剛出渣之轉爐渣置於渣盤，待其冷卻至 200℃~300℃後，將轉爐渣推入水坑中，放置 8~10 小時後隨即挖出，取粒徑 50mm 以下之粒料進行篩分，形成 6 分、3 分及 2 分之轉爐石[1]。

二、研究目的

多孔隙瀝青混凝土一般都採用開放級配(Open-Graded)，其中粗粒料含量高達 70~85%，空隙率達 20%左右，以促進排水功能。由於顆粒間孔隙甚大，因此黏結粒料的瀝青膠泥就顯得其重要。瀝青膠泥除提供適當黏結力外，還要有足夠膜厚包裹粒料以

增加耐久性，同時須具有足夠勁度而不致產生垂流(Draindown)現象。本研究目的在於使用 AC-30 及 AR-80 兩種膠泥拌合於多孔隙轉爐石瀝青混凝土，在研究過程中透過一系列試驗求取其相關的力學參數，並以此比較兩種瀝青膠泥所拌合的多孔隙瀝青混凝土抵抗車轍變形及疲勞行為之差異。

三、研究方法

3.1 試驗材料及研究流程:

1. 粒料

本研究所使用粗粒料為中聯公司所提供之轉爐石，包括六分粒料、三分粒料、二分粒料等三種骨材。至於細粒料砂則為台中縣烏日鄉三富瀝青廠所提供天然砂。試驗前先洗淨粗粒料表面的附著物及塵土，放入 110°C 烘箱烘乾至恆重，冷卻至室溫。再進行洛杉磯磨損試驗、含砂當量、篩分析試驗、比重及吸水率等物性試驗。最後將全部粗細粒料依不同篩號篩出，放入各塑膠桶內加蓋存放，進行粒料級配配工作。

2. 瀝青膠泥

根據工程會第 0279A 章「多孔隙瀝青混凝土鋪面」規定[2]，所使用的瀝青材料如採用一般瀝青，應為符合 AASHTO M226 所訂 AC-30 及 AR-80 等級以上黏度較稠之瀝青膠泥材料。如使用改質瀝青應符合 CNS 14184 第 III 型或高黏度改質瀝青在 60°C 黏度至少 200,000 poise 以上。本試驗所使用瀝青是中油公司所生產之 AC-30 及 AR-80 瀝青膠泥，其物性試驗試驗結果分別如表 1 及表 2 所示。

表 1 AC-30 瀝青膠泥物性試驗

試驗項目	試驗值
比重	1.028
黏滯度 60°C : Poises	3050
針入度 25°C, 100g, 5 秒 : 0.1mm	56
軟化點 : °C	57
閃火點 : °C	350
燃燒點 : °C	390
延展性 25°C, 5cm/min : cm	> 100
薄膜烘箱熱損率 : %	0.03
薄膜烘箱熱損後黏滯度 60°C : Poises	5860

3. 礦物填充料

本研究於混合料中加入 1% 熟石灰當做填充料。

4. 纖維

由於多孔隙混合料之瀝青含量一般稍高於密級配混合料，為使在生產、運送及鋪築期間不會產生瀝青垂流現象 (Drain-down)，並能使具有足夠的瀝青油膜厚度以增加耐久性，本研究加入礦物纖維，其用量為瀝青混凝土混合料重的 0.4%。

表 2 AR-80 瀝青膠泥物性試驗

AASHTO T240 試驗後殘餘瀝青試驗項目	試驗值
比重	1.031
黏滯度 60°C : Poises	7140
黏滯度 135°C : Poises	660
針入度 25°C,100g,5 秒 : 0.1mm	37
殘餘瀝青針入度和原針入度比值 : %	70
延展性 25°C,5cm/min : cm	> 100
原地瀝青試驗項目	試驗值
閃火點 : °C	349
三氯乙烯中溶解度 : % Wt	99.6

5. 研究流程

在粒料中分別添加 AC-30 及 AR-80 瀝青膠泥，根據工程會第 0279A 章「多孔隙瀝青混凝土鋪面」所訂配合設計方法決定最佳級配及最適含油量。AC-30 及 AR-80 兩種瀝青膠泥所拌合級配曲線分別如圖 1(a)及圖 1(b)所示。接著以所決定粒料級配及最佳瀝青含量利用馬歇爾夯打機來製作試體，進行實驗室成效試驗評估。另外，使用 Superpave 旋轉揉壓機(Superpave Gyrotory Compactor, SGC)製作在配合設計時最佳含油量下空隙率的試體，並以切割機將試體兩端切平，其尺寸約為直徑 100 mm(直徑 4 in.)高度 150 mm(高度 6 in.)的圓柱試體，放置於材料試驗機(Material Test System, MTS)上進行不同圍壓、溫度、頻率下的動態模數試驗，三軸重覆荷重下永久變形試驗。接著進行車轍輪機儀車轍試驗。另將直徑 4 in.×高度 6 in.試體，以切割機切割成直徑 4 in.，厚度 1.5 in.試體，進行間接張力破裂能量試驗，將上述試驗結果比較其抵抗車轍及疲勞性能間之差異。

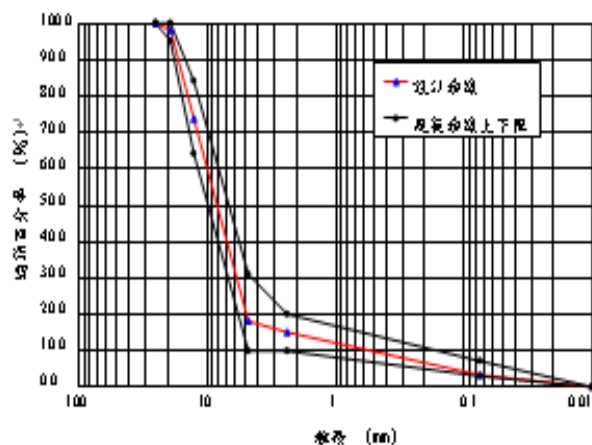


圖 1(a) AC-30 瀝青混凝土級配曲線

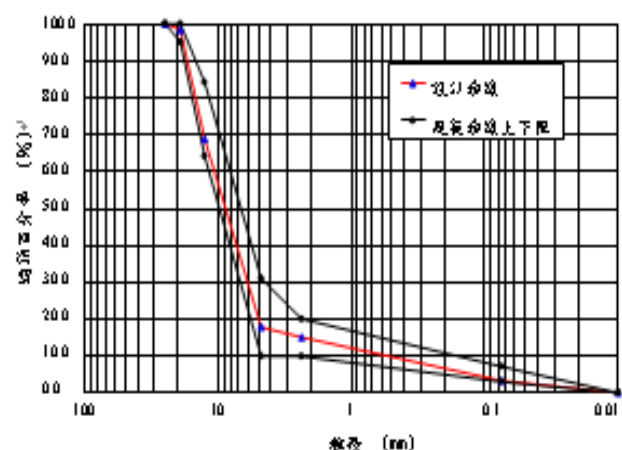


圖 1(b) AR-80 瀝青混凝土級配曲線

3.2 動態模數試驗及三軸重覆荷重下永久變形試驗

美國國家公路合作研究計畫(NCHRP)在 1-37A 計劃中發表了 2002 年路面結構設計指

南[3]。該指南建議使用動態模數作為路面結構之力學設計參數。而動態模數是常用來評估瀝青混凝土永久變形與疲勞裂縫的指標。試驗過程是以不同溫度與荷重頻率，施加以單軸向連續正弦波(Sinusoidal)或半正弦波(Haversine)荷重於瀝青混凝土圓柱試體，且控制變形在線性黏彈性(Visco-elastic)範圍內，量測軸向應力、應變以求得動態模數(Dynamic modulus)，動態模數試體所使用量測垂直應變的 LVDT 架構以及動態模數試驗所使用的三軸恆溫室分別如圖 2(a)及圖 2(b)所示。動態模數試驗主要是量取的參數為瀝青混凝土動態模數 $|E^*|$ 以及相位角 δ 等，動態模數 $|E^*|$ 定義為：

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (1)$$

式中 σ_o ：尖峰應力值；
 ε_o ：可恢復的軸向應變值。



圖 2(a)動態模數試體所使用 LVDT 架構



圖 2(b)動態模數試驗所使用的三軸室

根據國外的研究，線性黏彈性狀態下的瀝青混凝土，為一種熱流變單純(thermorheologically simple, TRS)物質，此材料特性為在低溫、短時間荷重下，所得的勁度模數相類似，即低溫的受力行為與短時間(高頻率)荷重相似；而高溫、長時間(低頻率)荷重下，勁度模數相似，即高溫的受力行為與長時間荷重相似。所以在瀝青混凝土在未受破壞的狀態下，可以應用時間溫度疊加(time-temperature superposition)特性，進行時間和溫度的等值互換。將溫度對加載時間之動態模數曲線，平移成參考溫度 25 °C 之動態模數主曲線，使成一單獨之平滑曲線函數。經過此橫移後，動態模數主曲線就不再是時間、溫度的函數，而成為以簡化時間(reduced time)或簡化頻率(reduced frequency)的表示方式。本研究採用 Pellinen(2001)[4]所提，將動態模數主曲線使用非線性最小平方迴歸方法，迴歸出一個 S 形函數(sigmoidal function)，表示式如下：

$$\text{Log} |E^*| = a + \frac{b}{1 + e^{c+d(\log t_r)}} \quad (2)$$

式中 t_r 為簡化時間；

a 、 b 、 c 、 d 為迴歸係數;

$|E^*|$ 為動態模數。

而簡化時間(reduced time, t_R)，其定義如下：

$$t_R = \frac{t}{a_T} \quad (3)$$

式中 t_R 為簡化時間;

t 為加載時間;

a_T 為時間溫度橫移因子。

而每個溫度動態模數曲線平移的大小就是 a_T ，透過此時間溫度橫移因子 a_T 所發展出動態模數主曲線，可對不同溫度區段的損害(distress)分析如車轍及疲勞特性進行探討。

本研究另外進行相關三軸重覆荷重瀝青混凝土試體永久變形試驗，在圍壓 30 psi 狀態下，於 25、40、55°C 三種溫度下施以 120 psi 垂直重覆軸向壓力將試體壓至應變達 4 % 塑性應變範圍內，探討此兩種膠泥瀝青混凝土試體在不同溫度下抵抗永久變形能力的差異。根據上述時間溫度疊加特性，將不同溫度的應變透過溫度橫移因子 a_T 的平移重疊在一起，並以兩者動態模數主曲線比較解釋之。

3.3 車轍輪跡試驗

本試驗目的在於模擬實際路面受交通荷重作用下，評估路面抵抗車轍變形之行為。該試驗可計算出動態穩定值(Dynamic Stability)，變形率 (Rate of Deformation) 以及總變形量 (Total Displacement)。

本試驗在高苑科技大學進行，該儀器是英製 77-B0350 型輪跡試驗儀。所夯製的試體為 30×30×5 公分，試驗模下層為 30×30×3.5 公分之橡膠塊，與上層之試體相接。主要的作用在橡膠墊片的勁度值與路基之性質相近，使底層較接近路面行為，模擬底層受外力荷重所產生張力作用的反應。將拌合均勻的混合料置入鐵模內，利用輪壓機進行滾壓製作試體後，將其養治試驗調至溫度(60°C)，並保持恆溫狀態。接著將試體放入輪跡試驗儀底部移動的座檯上。試驗時此移動的座檯是以 230±5 mm 移動距離作簡諧運動，其頻率設定在每分鐘 42 次。車輪外層是以實體橡膠包覆其直徑為 200mm，車輪荷重一般設定為 700±10N。另外以 25mm 衝程的 LVDT 架設在試體中央量測其車轍變形量。試驗結果分別以下列數值表示，根據此量測數據比較兩種瀝青膠泥拌合的瀝青混凝土抵抗車轍性能差異：

1. 動態穩定值 (Dynamic Stability) DS 表示:

以車輪滾壓次數為橫軸，變形量為縱軸，繪得變形量與滾壓次數關係曲線，取曲線中 1890 次(60 min.)與 2520 次(45 min.)直線部分之滾壓次數差與變形量差之比值，即為動態穩定值。

2. 變形率 (Rate of Deformation) RD 表示:

變形率為車轍試驗數據中，截取變形量與時間關係圖中之直線部分，將變形量差與滾壓時間差之比值稱為變形率。

3. 總變形量 (Total Displacement) 表示:

為車轍試驗設定之車輪滾壓次數完成後，其最終與最初變形量之差距。

3.4 間接張力破裂能量試驗

在進行間接張力試驗求取瀝青混凝土破裂能量時，以應變控制方式每分鐘 75 mm 之加壓速率，將其壓至破裂。試體在受壓過程中，繪製試體垂直面上所受張應力 $S(t)$ 及其相對應試體中央水平應變 $(\epsilon_{x=0}(t))$ 關係圖，該圖所含蓋之面積即為試體破裂能量。試驗過程中進行三組試驗，並將三組數據統整求取其平均值即為所求，張應力 $S(t)$ 計算公式為：

$$S(t) = \frac{2P(t)}{\pi Dt} \quad (4)$$

式中 $S(t)$: 試體受荷重過程中之間接張應力值 (kgf/mm^2)；

$P(t)$: 不同時間下之加載荷重 (kgf)；

D : 試體直徑 (mm)；

t : 試體厚度 (mm)。

圓柱試體受外力垂直荷重時，在試體內同時產生垂直及水平之應力，為準確量取試體中央水平之變形量 $(\epsilon_{x=0}(t))$ ，瀝青混凝土圓柱試體的兩端平面皆須裝設垂直及水平之計量器共計四組，並以此兩面變形量所量測平均值作為分析數據，其裝置圖如圖 3(a)及圖 3(b)所示。為求取中央水平之變形量 $(\epsilon_{x=0}(t))$ ，先量得試體在受外力荷重過程中的包生比 $v(t)$ ，其計算公式為 (Kim and Wen [5])：

$$v(t) = -\frac{\alpha_1 U(t) + V(t)}{\alpha_2 U(t) + \alpha_3 V(t)} \quad (5)$$

式中 $v(t)$: 包生比；

$U(t)$: 水平位移量 (mm)；

$V(t)$: 垂直位移量 (mm)；

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 應變計之常數 (與試體直徑與應變計之長度有關)。

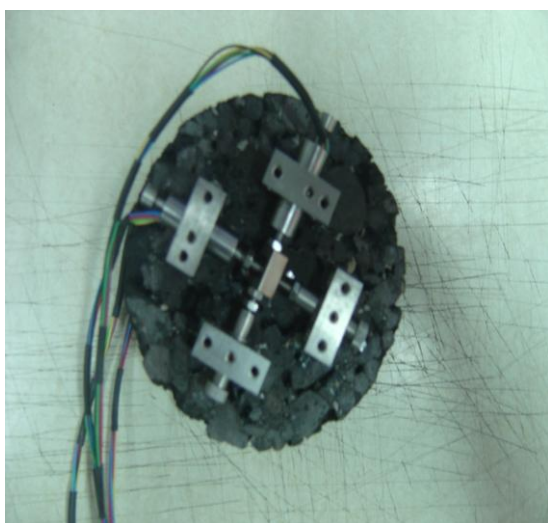


圖 3(a) 試體兩面貼水平與垂直應變計

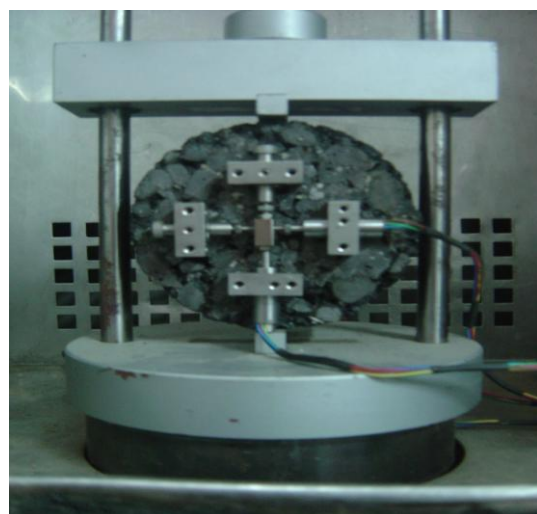


圖 3(b) 試體於間接張力儀內進行試驗

將包生比代入下式求取試體中央水平應變 ($\epsilon_{x=0}(t)$):

$$\epsilon_{x=0}(t) = U(t) \frac{\gamma_1 + \gamma_2 v(t)}{\gamma_3 + \gamma_4 v(t)} \quad (6)$$

式中 $\epsilon_{x=0}(t)$: 試體中央水平應變;

$v(t)$: 包生比;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$: 應變計之常數 (與試體直徑與應變計之長度有關)。

四、結果與討論

4.1 成效試驗結果分析

根據研究流程之配合設計所求得之最適級配與最佳含油量，以馬歇爾夯打機，上下 2 面各夯打 50 次製作試體，進行包括馬歇爾穩定值、流度值試驗，室內滲透係數試驗，垂流試驗，Cantabro 磨耗試驗以及滯留強度試驗等，比較此兩種瀝青膠泥所拌合的多孔隙瀝青混凝土成效試驗，其結果如表 3 所示。根據成效試驗結果發現：使用 AR-80 及 AC-30 兩種膠泥拌合的多孔隙轉爐石瀝青混凝土試體均符合規範要求；其中 AR-80 膠泥拌合的多孔隙轉爐石瀝青混凝土較 AC-30 拌合成的瀝青混凝土有較大穩定值及較低流度值，顯示其有較佳抵抗變形之特性。其它成效方面結果亦顯示 AR-80 瀝青混凝土有較低的 Cantabro 磨損值顯示其耐久性較佳，垂流量較低及較高的滲透係數亦表示其工作性能較佳。

表3 成效試驗結果

試驗項目	AC-30	AR-80	規範值
穩定值(kgf)	624	685	350
流度值(0.1mm)	29.1	24.7	20~40
空隙率(%)	19.7	20.1	15~25
滯留強度指數(%)	85.6	87.3	80(75)以上
Cantabro 磨耗試驗	9.9	9.1	20 以下
垂流試驗(%)	0.018	0.013	0.3 以下
滲透係數(cm/sec)	0.1975	0.2318	10 ⁻² 以上

4.2 動態模數試驗及三軸重覆荷重永久變形試驗結果與分析

在圍壓 30 psi 狀態下，比較 AC-30 及 AR-80 兩種瀝青膠泥與轉爐石拌合成的多孔隙瀝青混凝土動態模數主曲線如圖 4 所示，簡化時間 t_r 越大，即在高溫環境低荷重頻率下，AR-80 瀝青混凝土動態模數較高於 AC-30，因此 AR-80 瀝青混凝土較 AC-30 瀝青混凝土於高溫下有較佳抵抗車轍能力。

另外在圍壓 30 psi 下，於三種不同溫度 25、40、55°C 施以 120 psi 垂直軸向壓力進行重覆荷重瀝青混凝土試體永久變形試驗，其典型結果如圖 5(a)所示。將此三種不同溫度下永久變形與時間關係曲線圖以 25°C 之應變曲線為基準，應用溫度橫移因子 a_T ，將 40°C、55°C 應變曲線的時間 t 按式(3) 計算成簡化時間 t_R ，繪製應變與簡化時間關係圖，此三條應變曲線幾乎重疊如圖 5(b)所示，表示時間溫度疊加特性在大變形亦是存在。取

其試驗結果並予平均，計算出一條永久應變主曲線，應用此時間溫度重疊準則，可求得去除溫度因素所得瀝青混凝土應變與簡化時間關係圖。將 AC-30 及 AR-80 轉爐石瀝青混凝土永久應變與簡化時間關係圖相比較如圖 6 所示，顯示 AR-80 瀝青混凝土須要有較長簡化時間達到相同應變 4%，此表示 AR-80 瀝青混凝土有較佳抵抗車轍變形性能。

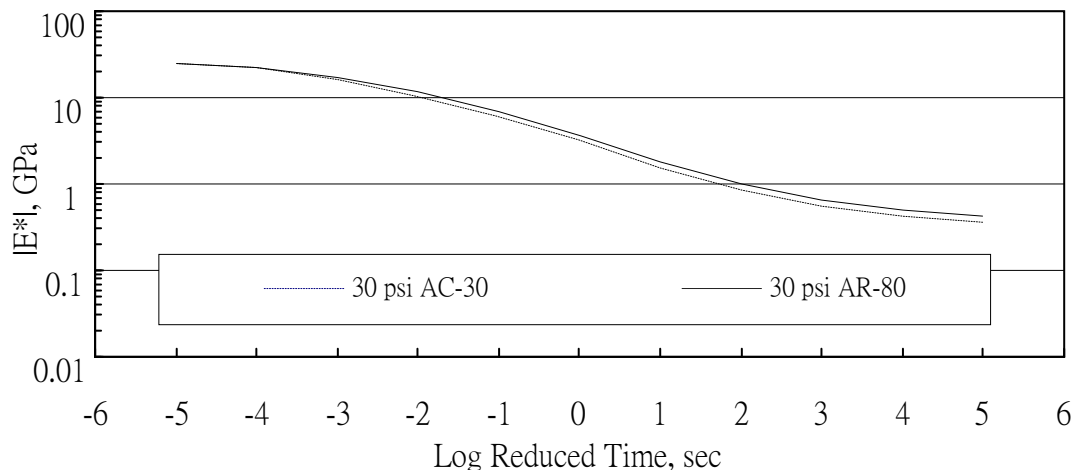


圖4 AC-30與AR-80多孔瀝青混凝土在圍壓30 psi下動態模數主曲線比較圖

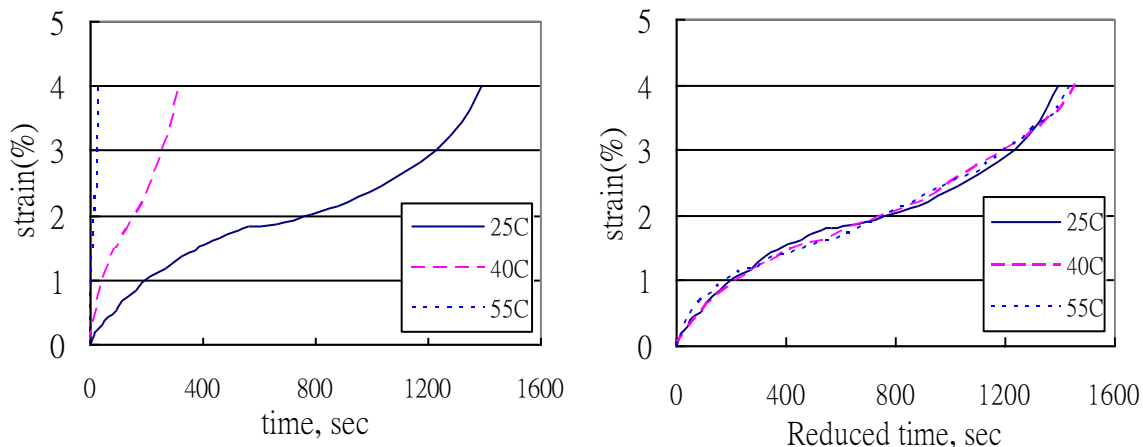


圖 5(a) 永久應變與時間關係圖

圖 5(b) 永久應變與簡化時間關係圖

(圍壓 30psi，AR-80 多孔瀝青轉爐石瀝青混凝土)

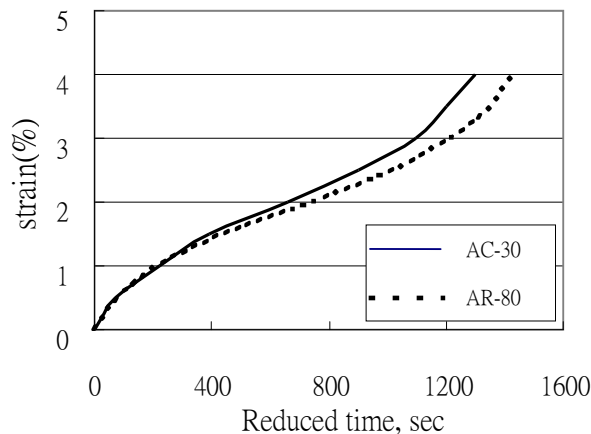


圖 6 不同瀝青膠泥瀝青混凝土對永久變形主曲線關係比較圖

4.3 車轍輪跡試驗結果分析

車轍輪跡試驗為目前在模擬鋪面經車輛碾壓後評估車轍之方法。本研究以孔隙率為 20%，進行 30×30×5(cm) 的車轍試體製作，車轍試驗結果如圖 7 及表 4 所示。由該圖及表試驗數據結果可看出，在試驗溫度 60°C 時，AR-80 所拌合的多孔隙瀝青混凝土試體具有較大之動穩定值，較低變形率以及較小總變形量。顯示 AR-80 瀝青膠泥的所拌合的多孔隙瀝青混凝土試體抗車轍能力較 AC-30 為佳。

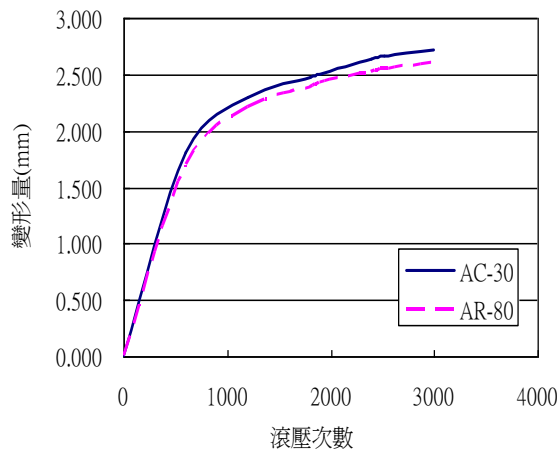


表 4 車轍試驗結果

瀝青種類	動穩定值 (次/mm)	變形率 (mm/min)	總變形量 (mm)
AC-30	4068.8	0.0103	2.710
AR-80	4846.2	0.0087	2.600

圖 7 不同瀝青膠泥瀝青混凝土滾壓次數與變形量關係比較圖

4.4 間接張力破裂能量試驗結果與分析

以應變控制方式每分鐘 75 mm 之加壓速率對試體進行間接張力破裂能量試驗，將試體壓至破裂。繪製施壓過程中試體所受張應力及相對應中央水平應變關係圖。AC-30 及 AR-80 轉爐石瀝青混凝土試體應力應變關係圖分別如圖 8(a) 及 8(b) 所示。將圖 8(a) 及 8(b) 應力應變力下之面積量出，即可求得 AC-30 及 AR-80 轉爐石瀝青混凝土之破裂能量值分別為 3.348 kPa 及 3.620 kPa，比較此兩圖破裂能量可發現 AR-80 轉爐石瀝青混凝土需有較多的能量完成間接張力破裂過程，顯示 AR-80 轉爐石瀝青混凝土有較佳抵抗疲勞性能。

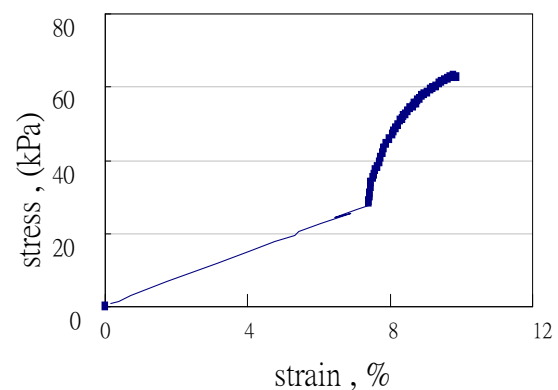
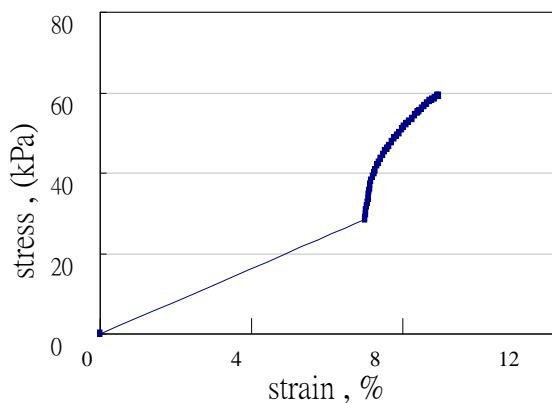


圖 8(a) AC-30 應力應變下破裂能量圖

圖 8(b) AR-80 應力應變下破裂能量圖

五、結論與建議

1. 比較 AR-80 及 AC-30 兩種瀝青膠泥所拌合的多孔隙瀝青混凝土成效試驗結果發現: AR-80 膠泥拌合的多孔隙轉爐石瀝青混凝土較 AC-30 拌合成的瀝青混凝土有較大穩定值及較低流度值，顯示其有較佳抵抗變形之特性。結果亦顯示 AR-80 瀝青混凝土有較低的 Cantabro 磨損值顯示其耐久性較佳，垂流量較低及較高的滲透係數亦表示其具有較佳的工作性能。
2. 在高溫環境低荷重頻率下，AR-80 瀝青混凝土動態模數較高於 AC-30，因此 AR-80 瀝青混凝土較 AC-30 瀝青混凝土於高溫下有較佳抵抗車轍能力。又根據三軸重覆荷重永久變形試驗結果顯示 AR-80 瀝青混凝土相較 AC-30 瀝青混凝土須有較長簡化時間達到相同應變，此表示 AR-80 瀝青混凝土有較佳抵抗車轍性能。
3. 車轍輪跡試驗數據結果可看出，AR-80 所拌合的多孔隙瀝青混凝土試體具有較大之動穩定值，較低變形率以及較小總變形量。顯示 AR-80 瀝青膠泥的所拌合的多孔隙瀝青混凝土試體抗車轍能力較 AC-30 為佳。
4. 根據間接張力破裂能量試驗結果分析，AR-80 爐石瀝青混凝土相較 AC-30 瀝青混凝土需有較多的能量完成間接張力破裂的過程，顯示 AR-80 轉爐石瀝青混凝土有較佳抵抗疲勞能力。

六、參考文獻

1. 中華鋪面工程學會，「轉爐石應用於鋪面工程之推廣期末報告」，桃園，2006。
2. 「多孔隙瀝青混凝土鋪面」公共工程委員會第0279章，2000。
3. “Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures,” NCHRP 1-37A, National Research Council, 2004.
4. Pellenen, T.K., “Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt Performance.” Ph.D. Dissertation, Arizona State Univ., 2001.
5. .Kim, Y.R. and Wen, H., “Fracture Energy from Indirect Tension Testing”. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.71, pp.779-793. 2002.