

高黏度瀝青膠泥與轉爐石對 SMA 施工特性

朱崇德¹、林登峰²

¹ 建中工程股份有限公司 經理

² 義守大學土木與生態工程學系 教授

摘 要

近年來國內道路交通量逐漸增加，因此鋪面的品質要求也越來越高。特別是鋪設重交通量之老舊路面改善，對於瀝青路面的高溫穩定、低溫抗裂等路用性能也有更高的要求，因此如何延長瀝青混凝土路面之生命週期及性能表現已成為現代道路工程的重要議題。石膠泥瀝青混凝土(SMA)配合設計為採用高品質的粗粒料級配、高含油量及高含石粉量，具有柔性、高溫抗車轍能力、低溫抗裂性能、耐久性及水穩定性等特性，能減少鋪面破裂、剝脫與車轍等現象的發生，因此可提高路面壽命及抗車轍能力，而粗粒料轉爐石表面被相當數量的石膠泥漿裹覆著，所以石膠泥漿也具備了很好的韌性及柔性，可提高SMA的抗變形能力，且轉爐石為煉鋼過程的副產品，具備了很好的物理及工程的性質，很適合做為SMA之粒料使用，能提高穩定性及耐久性，應用於獨特結構的SMA路面，可提高路面承載能力及抗車轍能力，並達到廢棄物的減量與資源化再利用。

關鍵詞：SMA 瀝青混凝土。

一、前言

傳統道路鋪面由於車輛載重越來越大，瀝青混凝土強度明顯不足，導致重車行駛之道路常有車轍、凹陷、推擠等現象。且國內公共工程砂石需求量遠大於砂石來源的供應，為了建設所需，部分砂石業者過度濫採，嚴重影響河川生態，因此解決國內砂石問題，是公共工程最重要的問題。

SMA 石膠泥瀝青其特性具備抗高溫、低溫穩定性，良好的水穩定性，良好的耐久性和表面功能等，且 SMA 瀝青混凝土粒料級配屬於跳躍級配，載重作用下粒料間產生互鎖機制，粗粒料架構使混合料內部形成相對較高之孔隙率，能夠有效抵抗車轍變形，使路面耐久性提升。此外，SMA 鋪面表面有較大的孔隙特性，鋪面構造深度大，抗滑能力較佳，比傳統密級配瀝青混凝土具有更佳之鋪面成效[1-3]，故使用壽命長，綜合經濟效益和環境效益好。

轉爐石具耐磨及高硬度之特性，粒料本身為煉鋼之副產物，添加轉爐石之鋪面明顯比傳統瀝青混凝土鋪面較佳。文獻研究顯示轉爐石可取代作為瀝青混合料粒料使用，並適用於不同級配之瀝青混合料，Xue et al.[4]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.[5]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。蕭志銘[6]於研究發現轉爐石之粒料形狀有抗風化及抗磨耗等特性，就

粒料基本性質而言，粗轉爐石作為石膠泥瀝青混凝土粒料可產生良好的顆粒間摩擦力。

由於大多數將轉爐石應用於 SMA 鋪面，並無詳細探討工程實務上，故本研究於拌合廠內對轉爐石拌合溫度、含油量的控制、纖維添加的方式及比例等進行評估，並且於鋪設現地，對運輸卡車上、鋪裝機鋪築、滾壓時進行詳細的檢測，比較轉爐石應用於 SMA 路面與傳統密級配路面之間的差異性，以提供工程業界的參考。

二、轉爐石 SMA 瀝青混凝土特性

由於 SMA 瀝青混凝土鋪面之級配設計通常使用較大粒徑骨材，一般較大的骨材標稱最大粒徑抗永久變形能力較佳[7]，而轉爐石之特性，如表 1 與圖 1，其本身粒料形狀方正，且密度較天然粒料高，因內部含有金屬氧化物之成分，硬度高及抗磨損能力較佳，毛孔大與抗水侵害能力佳等優點，且轉爐石本身為親油性材料，可有效吸附瀝青膠泥，使粒料與膠泥包覆較佳，可避面拌合過程中產生垂流、冒油等現象。

SMA 配以較高比例粗骨材，發揮粗骨材互鎖作用之粗粒料充份穩定粒料構架、較能抵抗變形以及剝脫能力，可增加 SMA 瀝青混凝土之耐久性[8、9]。SMA 骨材級配之粗、細粒料組合型式，轉爐石使得骨材間互鎖能力提高，而空隙由瀝青膠漿填充，其餘空隙可做為載重作用下骨材移動之空間，有效降低永久變形量。

SMA 路面有抗車轍和高耐久性等具有優良性能，在雨天行車不會產生水霧及濺水現象，且可有效降低噪音，是傳統密級配瀝青混凝土無法比擬的[10-12]。

表 1 轉爐石物理性質

物理性質	試驗值	規範值
容積比重(烘乾法)	3.34	-
視比重	3.373	-
吸水率(%)	1.32	-
L.A 磨損率(%)	8.95	<40
扁平率(%)(>1:3)	0.81	<15
破碎面(%)	99.02	≥90
健性(%) (硫酸鈉)	1.332	<12



圖 1 轉爐石粒形方正，表面孔隙較多

三、SMA 配合設計試驗

SMA 的配比設計應選取熱拌瀝青混合料配合設計規範相關的目標配比、生產配比及試拌試驗鋪築等三個階段，確定粒料級配及最佳瀝青含量。

SMA 配合設計一般仍採用馬歇爾夯壓試體(4" ϕ 試體，兩面各夯壓 50 下)，而 $VCA_{MIX} < VCA_{DRC}$ 為 SMA 重要的體積特性，VCA 代表粗骨材顆粒間的孔隙體積，拌合瀝青膠漿(指細骨材、填縫料、瀝青及纖維)後的混合料 VCA 必須小於粗骨材乾搗狀態下的 VCA，以確保骨材構架並未被瀝青膠漿撐開，無法形成粗骨材互相接觸產生互鎖作用。因此，SMA 配合設計流程與傳統密級配瀝青混凝土有所不同，先以試拌瀝青含量依級配規範帶拌製試體，擇定符合上述規定體積特性且 VMA 較大的級配作為設計級配，再以設計級配在不同瀝青含量下拌製試體，以試體性質與瀝青含量繪製關係圖，求得最佳瀝青含量。

粗骨材如改用轉爐石時，轉爐石單位重較之天然石單位重大很多，故重量與體積比應多加注意，最後再進行垂流及浸水殘餘強度試驗。其流程如圖 2，品質規定如表 2。孫杰等人[13]研究結果顯示 SMA 級配設計中應重視 0.075、2.36、4.75mm 三個關鍵篩孔區段的通過率，尤其 2.36~4.75mm 之間的集料含量，對 SMA 各項體積指標有明顯的影響。

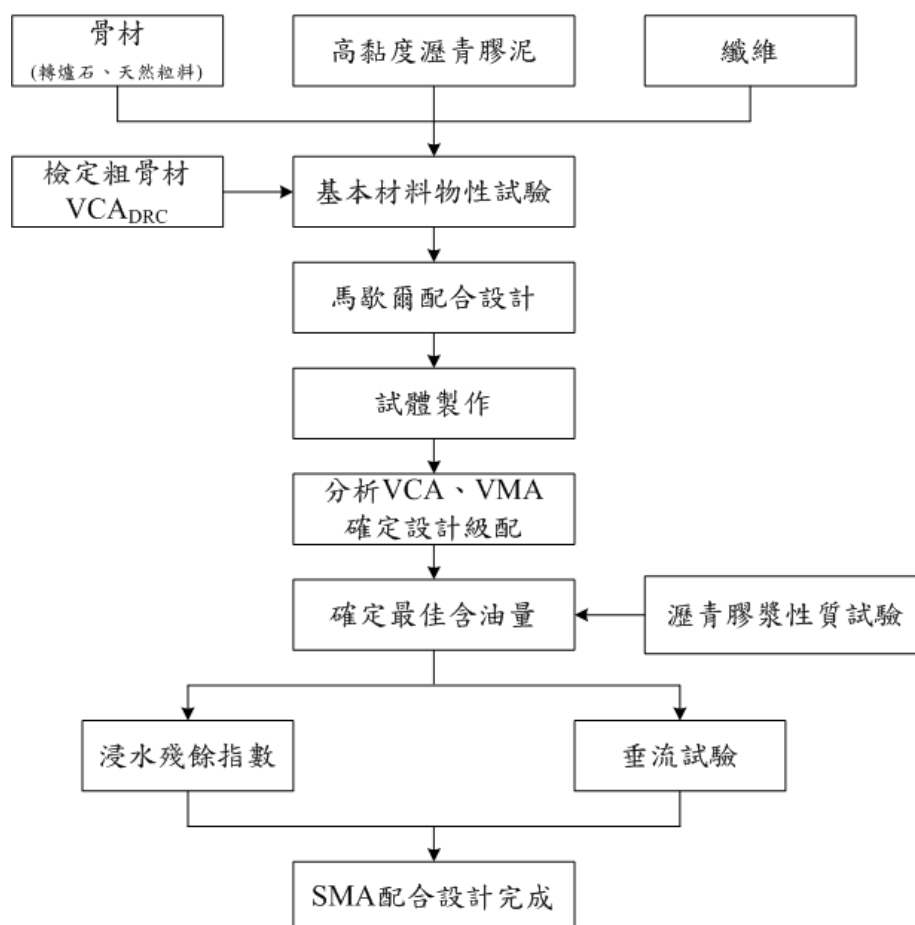


圖 2 SMA 配合設計

表 2 石膠泥瀝青(SMA)混凝土之品質規定(面層)

試驗項目	試驗值
試體上下端各夯打次數	50
穩定值	(KN) > 6.2
流度值	(0.25mm) 8~16
空隙率(%)	(%) 3.0~4.0
粒料間空隙率 VMA	(%) > 17.0
VCA _{mix}	(%) > VCA _{DRC}
飽和度 VFA	(%) 75~85
垂流量	(%) < 0.3
滯留強度(TSR)	(%) > 75

SMA 在台灣稱為石膠泥瀝青混凝土，在高含油量(採高黏度瀝青或採用纖維穩定劑不產生垂流)、高填充料含量(石粉)，形成的石膠泥瀝青(增加油膜厚度)，可以使瀝青的用量增加、感溫性減小。用它來填充由單一粒徑的碎石相互嵌擠而形成的骨架空隙，從而使混合料既保持了開放級配抗滑表層的優點，又克服耐久性差的缺點。

SMA 石膠泥瀝青混凝土是依瀝青混凝土內結構摩擦角最大的原則，以單一級配的粗粒料形成相互嵌擠的粒料骨架，然後按照空隙率較小的原則，以石膠泥瀝青漿填充互鎖骨架的空隙，形成一種骨架密實結構。Nejad et al.[14]研究中比較不同標稱最大粒徑之 SMA 在不同溫度下的疲勞壽命，發現疲勞壽命隨著粒徑越大而增加。

SMA 瀝青混凝土所用的填充料(石粉)宜採用石灰石或玄武岩等礦石材料加工而得。也有採用水泥、飛灰等礦物填充料。礦物填充料為乾燥不黏聚而能自由流動，且不含有機雜質及塑性指數應該小於 4，不得將拌和廠回收的粉塵作為礦物石粉使用。

高黏度改質瀝青(黏滯度 60°C > 200,000 Poise)在 SMA 是使瀝青混凝土在高瀝青含量下防止瀝青析漏現象，表 3 為其物理性質。如使用 CNS14184 改質三型瀝青(黏滯度 60°C > 8,000 Poise)。表 4 為其改質瀝青物理性質，經垂流試驗後，必要時可添加穩定劑(纖維材料)，這些纖維材料在對高溫 SMA 之儲存、運送及鋪築時都有抑制瀝青膠泥垂流效果。

石膠泥瀝青(SMA)混凝土混合料中添加之纖維類材料，國外多位學者[17、18]針對不同種類之纖維添加瀝青黏結料中之行為進行比較，研究結果顯示，添加纖維可增加瀝青膠漿之黏度與彈性以及提高軟化點。而台灣目前使用礦物纖維及木質素纖維的量較多，一般添加量以瀝青混凝土重量計，礦物纖維為 0.4% 計、木質素纖維為 0.3% 之間，其規格如表 5 及表 6 所示。

其中木質纖維特色為黏結與穩定效果最佳，如圖 3 所示，選用任一種纖維類材料之使用量需依垂流試驗決定。高黏度改質瀝青經試驗不產生垂流現象者，可不添加纖維穩定劑；若考慮加勁效果，則以聚酯纖維為最佳考量[15]。木質纖維通常被認為親水性較高，因此鋪面可能容易受到水侵害而破壞，但關於這方面的研究顯示，水份對於木質纖維以及礦物纖維之影響並無顯著的差異[16]。

轉爐石 SMA 是將單一料改採用轉爐石替代天然石，由於轉爐石特性為密度高、粒型方正、抗磨損佳及抗水浸害佳等，使得骨架改善達到密實結構，克服了普通骨架密實結構易於離析破裂的缺點，同時增大的瀝青用量也使得骨料表面包裹著較厚的瀝青油膜，混合料的表面被相當數量的石膠泥漿裹覆著，如圖 4 所示，石膠泥漿具有很好的韌性和柔性，可大大地提高 SMA 的抗變形能力，使各項道路性能得到顯著提高。

表 3 高黏度瀝青膠泥物理性質

項目	規範值
針入度	25°C, 100g, 5sec, 0.1mm
軟化點	°C
延展性	15°C, 1cm
閃火點	°C
薄膜加熱損失率	%
薄膜熱損針入度殘留率	%
韌性(25°C)	N·m(kgf·cm)
黏結力(25°C)	N·m(kgf·cm)
60°C 黏度	Pa·S(Poise)
	40 以上
	80.0 以上
	50 以上
	260 以上
	0.6 以下
	65 以上
	20.0(200)以上
	15.0(150)以上
	20000(200000)以上

附註：本表係參考日本改質瀝青協會之高黏度改質瀝青之規格

表 4 改質瀝青物理性質

試驗項目	一般鋪面		
	改質 I	改質 II	改質 III
針入度, 25°C, 100g, 5s, 1/10mm(最小值)	65	50	35
粘度, 60°C, 1s ⁻¹ Pa·s (poise)(最小值)	250(2500)	450(4500)	800(8000)
粘度, 135°C, mm ² /s(cSt) (最大值)	3000	3000	3000
閃火點, °C(最小值)	232	232	232
四氯乙烯中溶解度, % (最小值)	99	99	99
離析試驗頂段與底段軟化點差值, °C	試驗紀錄	試驗紀錄	試驗紀錄
滾動薄膜烘箱(RTFOT)後, 彈性回復率, 25°C, 10cm 伸長, % (最小值)	06	60	70
滾動薄膜烘箱(RTFOT)後, 針入度, 4°C, 200g, 60s(最小值)	15	10	10

表 5 礦物纖維規格

項目	規格
纖維長度	(mm)
纖維厚度	(mm)
雜質含量：通過 0.25mm(#60)篩	(%)
通過 0.063mm(#230)篩	(%)
	6 以下
	0.005 以下
	90±5
	70±10

附註：1.纖維長度係由 Bauer McNettsp 分離器測得。

2.纖維厚度或直徑係由相差顯微鏡 (Phase Contrast Microscope) 測定至少 200 條纖維的平均值。

3.雜質含量係對纖維狀材料的質量要求, 係 ASTM C612 方法通過振動篩 0.2mm 及 0.063mm 所測得的含量。

表 6 木質纖維規格

項目	規格
篩分析：纖維長度	6 以下
通過 0.85mm (#20) 篩	85±10
通過 0.425mm (#40) 篩	65±10
通過 0.106mm (#140) 篩	30±10
灰分含量	(%) 18±5
pH 值	7.5±1.0
吸油率	(倍) 纖維質量的(5.0±1.0)
含水量	(%) 5% 以下(以質量計)

附註：

1. 篩分析係使用 0.85 mm、0.425 mm、0.25 mm、0.18 mm、0.15 mm 及 0.106 mm 等標準篩孔，取 10 公克纖維樣品，篩分時每一標準篩需配合搖篩器及兩把尼龍毛刷輔助測定各篩通過率。
2. 灰分含量係取 2~3 公克纖維樣品，置於坩鍋內精密秤重後，加熱到 595~650°C 至少 2 小時，在乾燥器內冷卻後，精密秤重。
3. pH 值係取 5 公克具代表性的纖維加入 100ml 蒸餾水中，攪拌保持 30 分鐘後，測此溶液之 pH 值。
4. 吸油率係取 5 公克具代表性的纖維浸入礦物油類（如煤油）中至少 5 分鐘後，取出放入孔徑為 0.5mm² 的篩網上濾乾，再搖篩 10 分鐘後，秤留篩重，計算纖維吸油的最大質量，以纖維自身質量的倍數表示之。
5. 含水量係取 10 公克具代表性的纖維在 120°C 的烘箱烘乾 2 小時後，測其水分損失量。
6. 本表係參考 AASHTO 建議草案之規格。

目前使用於瀝青混凝土路面的粗粒料為經過顎式碎石機加工過後的河川砂石及陸地砂石，試驗結果如表 7 及表 8 所示，以傳統顎式碎石處理過的碎石，扁長狀的比率含量較高，容易在滾壓的過程中斷裂，而洛杉磯磨損率偏高，容易在開放交通後碎裂，在岩性成份分析方面，天然粗細粒料的 SiO₂ 含量較高，使得天然粒料偏矽酸性，在工程地質之母岩分類上，此類粒料應屬砂岩(Gritstone)，此種粒料親水性較高，也就是說瀝青與此種粒料之間黏結性較差，抵抗剝脫之能力也愈差，在台灣多雨的環境，須添加適量的防剝劑以抵抗水對瀝青混合料的影響。



圖 3 木質素纖維



圖 4 高瀝青石膠泥漿裹覆

表 7 粒料基本物理性試驗結果

粒料性質	傳統碎石	離心式碎石	鐳式加工碎石
洛杉磯磨損率(%)	33.1	22.6	-
BS 扁長率指數	23	11	12
1:3 扁長率	33	13	6
1:5 扁長率	11	3	2
粗粒料稜角率	100/95	100/99	100/98

1. 細粒料

細粒料雖然只佔 SMA 較少的比例，但是影響著 SMA 抵抗變形的能力，細粒料依來源分成天然砂及人工砂(機製砂)，由於機製砂是採用堅硬岩石反覆破碎製成，所以具有良好的稜角性和互鎖作用，而天然砂經過多年的風化，基本上是球形顆粒，大部份為砂岩或石英砂岩，在抗剝能力上不是良好材料，加上球形顆粒，在抵抗高溫變形能力上較不如採用機製砂。

歐州一般要求細粒料為人工砂(機製砂)，在德國 ZTV Asphalt-StB 94 規範規定，機製砂與天然砂的比例必須大於 1:1，即機製砂必須多於天然砂。國內施工技術規範 02742 中亦規定，通過#4 停留#8 之破碎率須>50%，包含意義即為機製砂與天然砂的比例必須大於 1:1。

2. 礦物填縫料

在傳統瀝青混合料中，填充料使用量不會超過瀝青用量的 1.2 倍，但是 SMA 需要足夠的填充料，填充粗粒料骨架間的空隙，使用量達到瀝青用量的 1.8~2.0 倍。瀝青混合料可以使用的填充料包括了石灰石粉、水泥、石灰、粉煤灰等，但是在 SMA 中填充料使用量比傳統瀝青混凝土多一倍左右，所以對於填充料的品質需特別重要。礦物填充料對混合物會產生加勁效應，以及由細粒料與瀝青膠漿結合後之產物會產生更高的黏滯度及稠度。根據美國鋪面工程界的經驗顯示改良 Rigden 孔隙率大於 50%，瀝青膠在高溫時勁度值較大，會使 SMA 之膠漿變得過硬，而影響其工作性[19]。

由於近年來環保意識高漲，部分瀝青拌合廠都購置集塵器，其中除了環保因素外，更重要的是所回收的細粉可以再加以利用。添加入瀝青混合料中，不需要有額外的開支去購買石粉等填充料，但是回收粉塵中含有較多的塵土及少量的瀝青，且粒料中的石粉經過燃燒，高溫處理，會變得較脆，過度使用回收粉塵會使瀝青勁度明顯增大，變硬變脆。AASHTO 在 SMA 規範建議中，明確規定回收粉塵使用量不得超過 50%，歐州及國內施工技術規範 02796 中，更要求 SMA 不能使用回收粉塵。

目前國內礦物填縫料規定如下：

- (1) 礦物填縫料係指通過 0.60mm CNS386 篩(美國篩 30 號篩)之細料，於粗細粒料經混合結果缺少通過 0.075mm CNS386 篩(美 200 號篩)之材料使用。
- (2) 礦物填縫料可用完全乾燥之石灰、礦物填縫料末或水泥；或其他經工程司認可之塑性指數小於 4 之無機物粉末，惟不得含有塊狀物或其他有害物質，其級配應符合表 8 之規定。

表 8 礦物填縫料級配

試驗篩(mm)	通過方孔試驗篩之重量百分率
0.6(NO.30)	100
0.30(NO.50)	95~100
0.075(NO.200)	70~100

添加纖維中，若是多使用一種材料則需增加一個材料添加口，目前纖維的添加有人工添加以及機器自動添加兩種方式，如圖 5 所示。採用人工添加僅需加開一個加料口，由工人於每一次拌合時投入設計添加量，應特別注意投入時機以及每一盤是否都確實投入；機器自動添加則依拌合量自動控制添加量，並可由控制室控制添加時機，機器設備費用較高。

高使用量的石粉，針對這項材料的添加，拌合廠應該作下列的修改：

- (1) 增設石粉立倉：石粉添加量大約為 8~10% 左右，若以日產能為 500 噸的拌合廠為例，則石粉需求量為 40~50 噸/日，應增設大容量立倉以供生產需求，如圖 6 所示。
- (2) 修改石粉計量設備：一般瀝青混凝土的石粉添加量通常不高(<4%)甚至不需添加，對 SMA 而言，以一個每一次拌合兩噸的拌合機為例，其石粉添加量即為 160kg，計量設備的容量至少需提高至 250kg，且計量速度要能在每一拌合時間內完成(約 1 分鐘內)，避免造成總拌合時間過長，產生級配降級之疑慮。

另外因為 SMA 使用大量石粉填充料，因為比例過高又無加溫過程，因此其於骨材加溫時應注意總拌合溫度，避免因石粉填充料之溫度偏低，而使總拌合溫度未達到要求而影響品質。



圖 5 人工投入纖維



圖 6 高填充料含量按比例分開儲存計量秤重

石膠泥瀝青(SMA)混凝土混合物之最佳拌和溫度與夯壓溫度之計算，宜以所用瀝青膠泥之黏滯度與溫度之關係曲線上求得，瀝青膠泥經黏滯度試驗後，將 60°C 及 135°C 時黏滯度值畫在溫度黏度圖對應 170±20cps 及 280±30cps 時之溫度，分別為代表最佳夯壓溫度範圍及最佳拌合溫度範圍，拌合溫度主要依使用的瀝青等級決定之，但拌合溫度最高不超過 185°C，避免聚合物分子鏈高溫斷裂及瀝青也因高溫而產生碳化。拌合溫度範圍=175°C~190°C，到場鋪築溫度>170°C，

如圖 7 所示。

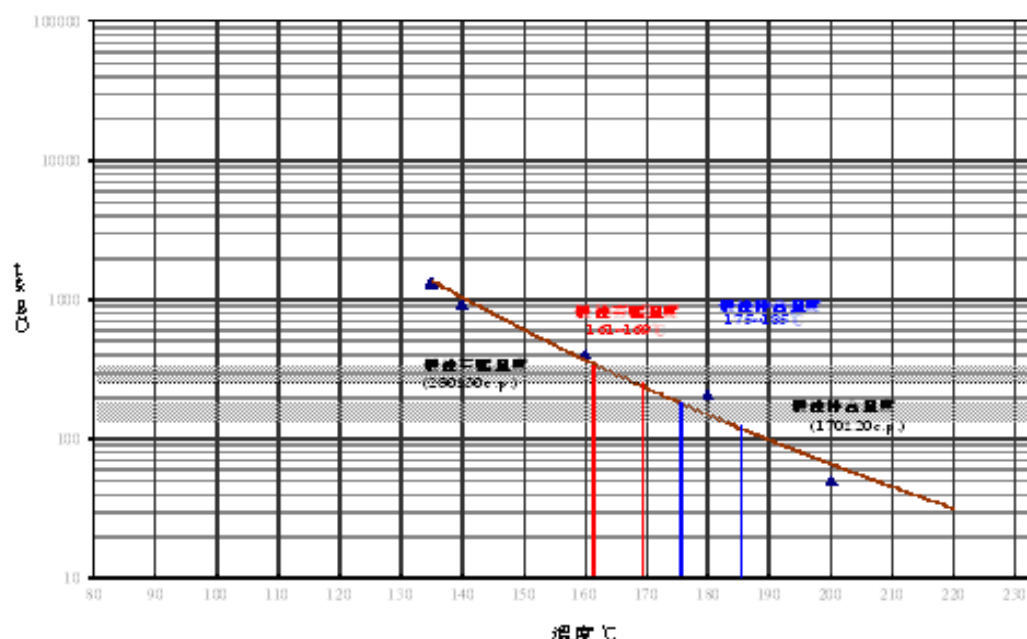


圖 7 瀝青膠泥黏度-溫度圖

SMA 混合料的運送時間應儘可能縮短，切不可為了延長運送時間而任意增加混合料的生產溫度，因為高溫加上運送過程的振動將會造成瀝青油膜的過度流失。同時，因為 SMA 混合料具較厚油膜，應該增加運送卡車上防黏劑的塗抹次數，以減少混合料黏結於卡車上，所用隔離劑嚴禁使用純石油製品。必要時熱拌 SMA 瀝青混凝土可多添加 0.1% 纖維，以減少垂流現象發生。

由於 SMA 混合料大部份由粗骨材所組成且黏性較高，應儘量以鋪裝機鋪築，減少人工耙動，鋪平後隨即以鋼輪壓路機滾壓，SMA 大多為粗骨材之架構，因此它的壓密沉陷量較傳統密級配瀝青混凝土為低，約為鋪築厚度的 5% 至 10%，為了達到壓密度的要求，可以使用震動壓路機，但應避免過度震動造成骨材破碎而使膠漿浮出表面，應以高頻率低振幅的震動為宜。

瀝青鋪築機(自重>14 公噸)應裝有敏捷而效率良好之操縱設備，其前進與後退之速度每分鐘不得小於 30 公尺，且能在不使石膠泥瀝青 (SMA) 混合料發生析離現象下，鋪築至少一公分之厚度，其最大鋪設寬度不得小於 3.75 公尺，且應能將鋪築寬度調整為 3.75 公尺以下。鋪築時鋪裝機內之石膠泥瀝青 (SMA) 混合料應能保持連續，均勻且不間斷的鋪築，鋪裝機應附電熱控溫自動設備，避免底板因溫度過低產生沾黏而影響鋪面品質。

鋪築機之速度必須妥為控制，為使鋪築機不間斷的均勻鋪築，一般以不超過每分鐘 3~4 公尺，如圖 8 所示。

壓路機滾壓速度的選擇應依據壓路機本身的能力；壓實厚度、壓路機在縱列中的位置等等而定，一般滾壓速度可按表 9 執行之：

表 9 壓路機滾壓速度(公里/小時)

壓路機類型	初壓	複壓	終壓
靜壓鐵輪壓路機	1.5~3.0	2.5~5.0	2.5~5.0
振動壓路機	1.5~5.0 (靜壓)	4.0~5.0 (震壓)	2.0~5.0 (靜壓)

註：振動壓路機之靜壓係指關閉振動裝置以靜壓方式執行

石膠泥瀝青 (SMA) 混合料鋪設後，應以自走式鐵輪壓路機或以振動壓路機 (碎石抗壓强度高及使用最低瀝青含量下) 滾壓。通常一部瀝青鋪築機應配備二部鐵輪壓路機或配備一部振動壓路機。壓路機應裝有水箱、噴霧設備、刮板及棕刷等，保持機輪濕潤，以免石膠泥瀝青(SMA)混合料黏附機輪上。鋪築厚度在 5 公分以下者，不宜採用振動壓路機滾壓，如圖 9 所示。



圖 8 轉爐石 SMA 瀝青混凝土鋪築滾壓 圖 9 天然石 SMA 瀝青混凝土鋪築滾壓

依溫度黏度如圖 7 顯示：初壓 160~170°C 3km/hr

複壓 >130°C 5km/hr

因為 SMA 瀝青混凝土架構為粗粒料佔極大多數，而膠輪壓路機容易將完成面之膠漿挑起，不建議在滾壓過程中使用，但可視情況可在路面溫度大約降至 90°C 以下時進行終壓壓密，可將空隙率(%)控制在 3~4%，如圖 10 所示。

完工後路面開放通車時機如下：

1. 路面溫度經量測 <60°C 時開放通車，如圖 11 所示。
2. 路面完工至少二小時以上。避免路面餘溫甚高，經開放通車後，造成行駛車輛頻繁而產生車轍變形。

圖 12 為轉爐石配合設計 VMA 性質結果，轉爐石瀝青混凝土含油量 4.6~5.4% 的 VMA 性質在 16% 左右，因為天然粒料的比重低，VMA 性質規範為 >17%，轉爐石粒型方正、比重大、表面孔隙較多，因此 VMA 值在轉爐石瀝青混凝土中有較低趨勢，因此粗骨材使用轉爐石代替時應特別注意。



圖 10 終壓膠輪壓路機



圖 11 <60°C 時開放通車

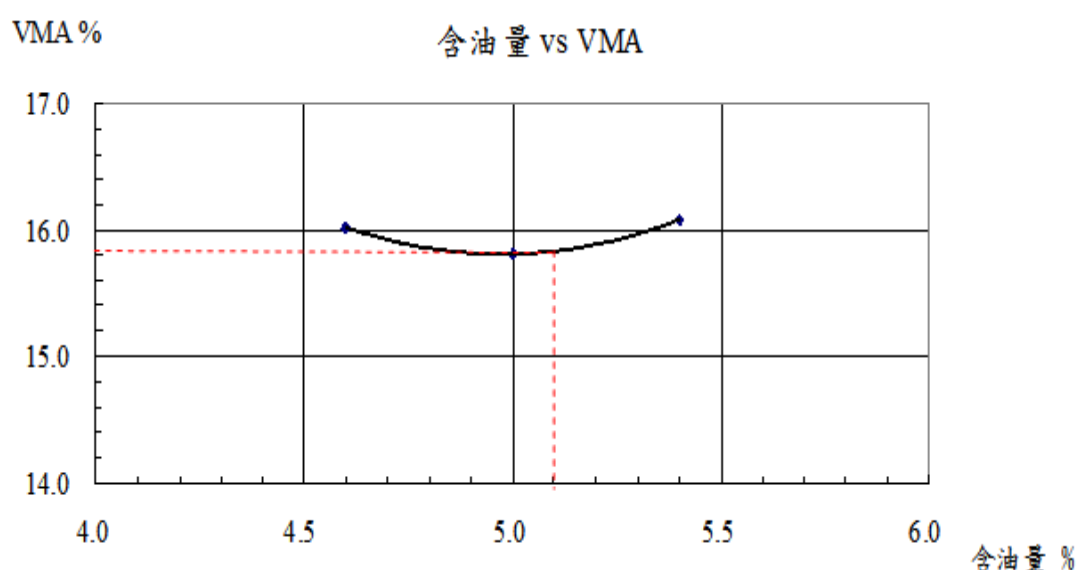


圖 12 SMA 之 VMA

SMA 瀝青混凝土使用天然石的 VMA>17%，但是轉爐石用於 SMA 瀝青混凝土後，因為轉爐石特性，如果工作拌合公式取中值，則造成 VMA 值有偏低趨勢，參考表 10。

表 10 不同轉爐石添加量

混凝土性質	0%	20%	40%	60%	80%
孔隙率(%)	3.46	4.36	4.23	3.84	3.73
VMA(%)	17.42	16.51	16.62	15.57	15.65
規範值(%)			≥17		

本次 SMA 配合設計以轉爐石粒料約 60% 以上之比例取代天然粗粒料，級配則符合施工綱要 02743 章 SMA 瀝青混凝土要求。如圖 13 為級配分布曲線圖。

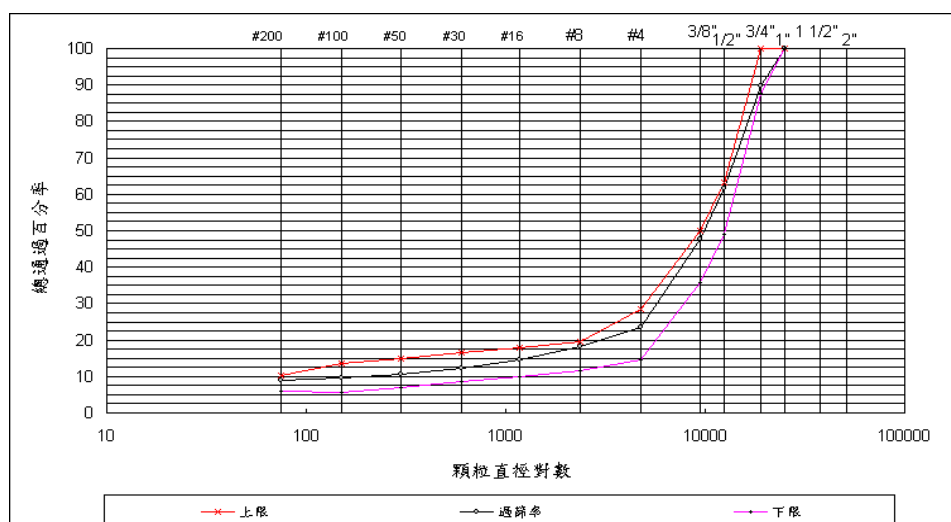


圖 13 級配分佈曲線圖

四、結論

1. SMA 石膠泥瀝青混凝土係使用大量粗骨材架構組成，對於粗骨材品質要求及控制比較高，因此選用粗粒料實應特別注意，所以骨材之長扁率及磨損率變得非常重要，轉爐石材料在高瀝青含量及高填充料含量，能完整包覆不受水浸害產生不規則膨脹，其物理性質非常符合前述高品質要求。
2. 轉爐石與天然機軋砂石外觀及物理性質有非常大的差異，轉爐石粒型方正、含金屬氧化物之單位重大、耐磨損試驗值佳、不易變形破裂，對瀝青混凝土抗磨損能力有很大的幫助，另外轉爐石壓實之鬆實方比也比天然砂石為小，對於完工後壓密沉陷較易控制。
3. 轉爐石 SMA 瀝青混凝土剝脫試驗結果，轉爐石材料對抵抗剝脫的能力優於一般天然粒料，主要因為 CaO 的存在，CaO 本身的特性是屬於親油性，使得轉爐石和瀝青的結合能力佳，較之天然砂石對瀝青混凝土抵抗剝脫能力好。
4. 轉爐石瀝青混凝土完工後路面溫度下降比天然砂石慢，因此需將開放通車時間延長，或表面溫度降至 60°C 再行開放通車。
5. SMA 瀝青混凝土組合為高品質粗粒料級配、高含油量及高含石粉量，因此粗粒料轉爐石表面被相當數量的石膠泥漿裹覆著，石膠泥漿具有很好的韌性和柔性，可提高 SMA 的抗變形能力，SMA 的空隙率很小約 3~4%，混合料受水的影響很小，抗水浸害性佳、抗老化性能佳。

五、參考文獻

1. Nikolaidis, A. (2000). "Rutting and Volumetric Properties of SMA Mixture," *Proceedings of The Institution of Civil Engineers Transport*, pp.135-141 .
2. Brown, E.R., ands Haddock, J.E., and Mallick, R.B., and Lynn, T.A. (1997). "Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA)," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.66, pp.1-30..

3. 沈金安 (1999), 「改性瀝青與SMA路面」, 人民交通出版社, 中國。
4. 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.
5. 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.
6. 蕭志銘、蔡汶璇 (2010), 「轉爐石添加於石膠泥瀝青混凝土之城效評估」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
7. Lynn, T.A., and Brown, E.R., and Cooley, L.A. (1999). "Evaluation of Aggregate Size Characteristics in Stone Matrix Asphalt and Superpave Mixtures," *Journal of Transportation Research Record* 1681, pp.19-27.
8. Brown, E.R., and Cooley, L.A. (1999). "Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavement," NCHRP Report 425.
9. Brown, E.R. and Mallick, R.B. (1995). "Evaluation of Stone-On-Stone Contact in Stone Matrix Asphalt," *Journal of Transportation Research Record* 1492, pp.208-215.
10. 朱夢良、張起森 (2001), 「SBS改性瀝青及SMA混合料的應用研究」, 中國公路學報, pp13-20。
11. 王娜、申愛琴 (2006), 「SMA瀝青混合料改性瀝青瑪蹄脂的性能」, 長安大學學報, 自然科學版, pp27-33。
12. Jiang Fu, and Ling Jianming. (2007). "ZHAO Hongduo. Test and Analysis on Performances of Drainage Asphalt Pavement," International Conference on Transportation Engineering, Chengdu, Southwest Jiaotong University, 822-827.
13. 孫杰、張肖寧 (2010), 「SMA路面配合比設計的關鍵技術及應用」, 華南理工大學道路工程研究所, 廣州。
14. Nejad, F.M., and Aflaki, E. and Mohammadi, M.A. (2010). "Fatigue Behavior of SMA and HMA mixtures," *Construction and Building Materials*, Vol.24 pp.1158-1165.
15. 林桂儀 (2006), 「不同添加料對瀝青膠漿特性之影響」, 博士論文, 國立成功大學土木工程研究所, 台南。
16. Cooley, L.A., and Brown, E.R. and Watson, D.E. (2000). "Evaluation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers," *Journal of Transportation Research Record* 1723, pp.19-25.
17. Peltonen, P.V. (1991). "Characterization and Testing of Fiber-modified Bitumen Composites," *Journal of Materials Science*, Vol.26, pp.5618-5622.
18. Akbulut, H., and Woodside, A.R. and Woodward, W.D.H. (2000). "Polymer Modified Cellulose Pellet Fiber in Bituminous Mixtures," *Proceedings of the*

2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, pp.674-677.

19. 邱垂德、呂理成 (2002),「以廢輪胎橡膠瀝青拌製石膠泥瀝青混凝土之研究」, 中華民國第五屆鋪面材料再生學術研討會論文集。