

轉爐石瀝青混凝土之產製及施工評估

廖敏志¹、陳建旭²、陳偉全³、陳海通⁴

¹ 成功大學土木工程學系 博士後研究

² 成功大學土木工程學系 教授

³ 高苑科技大學土木工程學系 副教授

⁴ 成功大學土木工程學系 研究生

摘要

本文探討以轉爐石(basic oxygen furnace slag, BOF)取代天然粗粒料，進行轉爐石石膠泥(stone mastic asphalt, SMA)及密級配(dense graded asphalt concrete, DGAC)瀝青混凝土的實驗室配合設計、材料產製與現地施工評估，以台南市市區轉爐石瀝青混凝土現地鋪面材料與施工狀況做為研究範圍。以 BOF 取代天然粒料時，實驗室材料配合設計必須以體積設計的觀念，計算實際粒料與瀝青黏結料的體積組成比例，反映實際粒料尺寸分布情形；如使用傳統的重量配合設計，級配曲線會有誤導現象。此外，轉爐石表面孔隙較多，造成有效瀝青的減少，而且轉爐石粒型方正，粒料容易堆積緊密，可能導致轉爐石瀝青混凝土之粒料間空隙(VMA)較低。由於轉爐石瀝青混凝土的比重不同於傳統熱拌瀝青混凝土，實驗室配比設計所得結果必須與試拌時的廠拌料相互比對，最終決定正式產製時的最適級配曲線與瀝青用量。因為 BOF 的孔隙率與對水的敏感性較天然粒料為高，應架設遮雨設施於 BOF 堆料場和拌和廠的冷料輸送帶，避免轉爐石瀝青混凝土於產製過程中具較高的含水量。當運送 BOF SMA 時，需使用合適的隔離劑並均勻灑佈於卡車車斗底部，避免材料局部結塊，造成瀝青混合材料析離。此外，應有時間與運具平衡的材料產製與現地鋪裝，才可使轉爐石瀝青混凝土發揮最佳的鋪面績效。

關鍵詞：配合設計、產製、運輸、鋪築。

一、前言

熱拌瀝青混凝土(hot-mix asphalt, HMA)為公路柔性鋪面主要材料，體積組成比例包含瀝青黏結料、粒料與空隙。HMA 按照粒料尺寸分佈可分為密級配(dense-graded)、開放級配(open-graded)和跳躍級配(gap-graded)三類。透過適當的實驗室材料配合設計，瀝青拌和廠材料產製和現地施工，方可滿足設計壽命內的鋪面績效[1,2]。

由於 HMA 是一種黏彈性材料，經長期交通荷重作用與溫度變化的雙重影響下，在鋪面輪跡碾壓處會產生永久變形或疲勞龜裂，台灣因地處亞熱帶，夏季高溫且氣候潮濕，再加上交通流量與荷重迅速成長，導致傳統含天然粒料之密級配瀝青混凝土(dense graded asphalt concrete, DGAC)鋪面面臨嚴重考驗，在市區道路

經常發生車轍變形、疲勞開裂及剝脫等鋪面提早破壞的現象，降低鋪面服務品質，而經常性維修，不僅增加路面養護經費，也增加維修時交通擁塞的社會成本。為解決瀝青鋪面提早破壞的情形，高品質粒料的使用是解決方法之一，然而，國內面臨優良天然砂石資源短缺問題，為確保環境永續發展，已朝向工業副產品材料永續再利用的發展方向[3-6]。

鋼鐵工業所衍生的副產品如：轉爐石(basic oxygen furnace slag, BOF)，經安定化處理與足夠瀝青薄膜厚度包裹後，可取代天然粒料應用於瀝青鋪面工程，英國國家標準規範BS EN 13043及BS 4987-1中說明在符合瀝青道路使用之物理性質標準下，只要BOF的體積膨脹率及氧化鎂在規定之內，且乾搗實後的密度在1600至1800 kg/m³之間，皆可做為瀝青鋪面之粒料使用[7,21]。實驗室的研究數據顯示添加BOF於HMA中以完全取代天然粗粒料時，其工程性質表現優於傳統含天然粒料之瀝青混凝土，不論是用於多孔性瀝青混凝土(porous asphalt concrete, PAC)或DGAC，都能將其鋪面成效做有效提升[9-12]，原因是BOF洛杉磯磨損值較低，也因為產製的過程使BOF的粒形較為方正，進而降低車轍變形量；也因成分含有氧化鈣(CaO)，具親油特性，可提升抗水侵害能力 [13-19]。使用BOF於HMA中，不僅減少煉鋼副產品的處理成本，亦落實資源再利用的政策。

雖然轉爐石的應用在台灣已有近十餘年的研究，然而，目前產官學界普遍對於轉爐石瀝青混凝土的材料配比設計，以及與傳統瀝青混凝土間的拌和廠材料產製與現地施工之差異仍不甚了解。由於BOF的比重介於3.2至3.5之間，與傳統HMA所使用的天然粒料，如：石灰石(limestone)之比重約介於2.6至2.7之間，兩者有所差距，因此當以BOF取代做為粗粒料時，實驗室HMA材料配比設計必須以體積設計(volumetric design)的觀念[12]，計算出材料體積組成比例，再換算回實際重量配比，方便實際瀝青拌和廠操作人員HMA產製，以及實驗室品管人員的材料品質控管。由於轉爐石瀝青混凝土的比重亦不同於傳統HMA，實驗室配合設計所得結果可能與廠拌材料(plant mixes)有所差異，故必須進行試拌相互比對數據，最終決定正式產製時的最適級配曲線與瀝青用量。此外，實際盤式拌和廠(batch plant)每盤每噸產製的體積量較小，拌製以及所需的運輸次數也會較多，因此，需有時間與運具平衡的材料產製與現地鋪裝，才可使轉爐石瀝青混凝土發揮最佳的鋪面績效[8,20]。

本研究將針對現有轉爐石瀝青混凝土試驗鋪築路面的材料配比、產製和現場施工做深入探討，HMA材料包含：轉爐石密級配(BOF DGAC)、轉爐石石膠泥(BOF SMA) 和天然粒料密級配(DGAC)瀝青混凝土。

二、研究目的

本研究目的為針對現有轉爐石瀝青混凝土試驗鋪築路面的材料配比、產製和現場施工做探討，研究目的如下：

1. 評估轉爐石瀝青混凝土之材料配比設計
2. 探討轉爐石瀝青混凝土之產製

3. 分析轉爐石瀝青混凝土之運輸與現地鋪築

三、研究方法

3.1 研究流程

本研究針對位於台南市中華西路的 BOF SMA、中華南路的 BOF DGAC 與中華南路的 DGAC 之市區現地試驗鋪築道路，首先進行鋪設前的實驗室配比設計，接著分析於瀝青拌和廠產製中的轉爐石瀝青混凝土，最後為探討施工中的現地鋪築，研究流程如圖 1 所示。

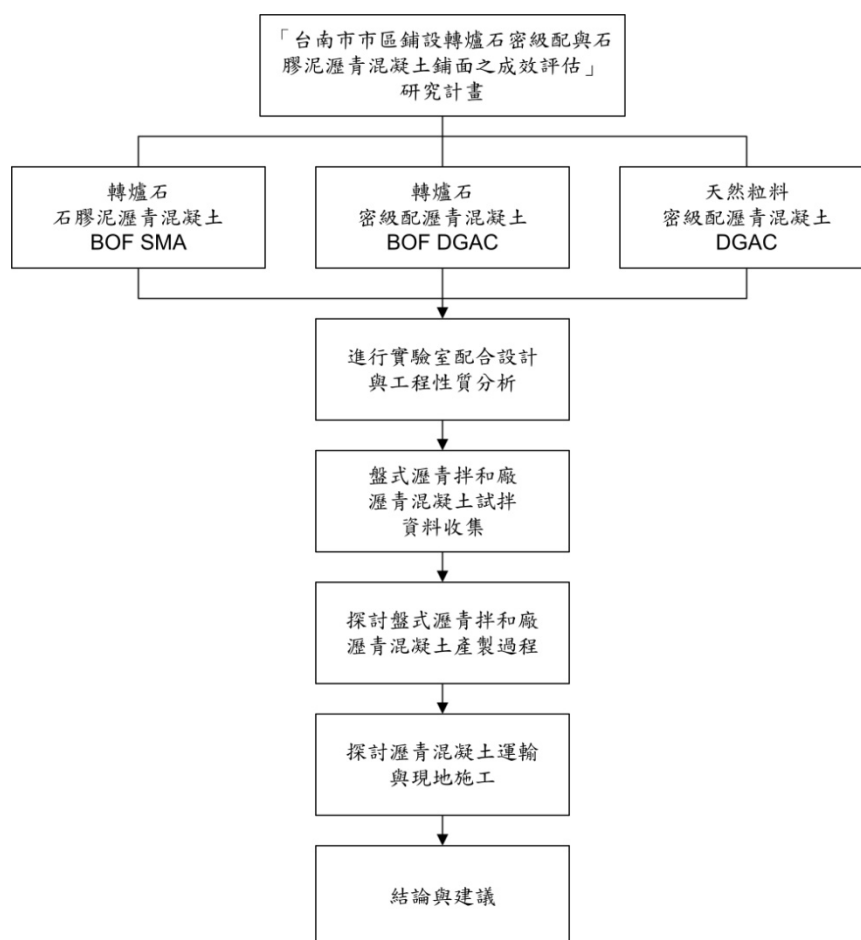


圖 1 研究流程

3.2 研究範圍與材料

本研究現地鋪面施工範圍分別以鋪設的三種瀝青混凝土鋪面材料來做為區分，如圖 2 所示。工程內容為刨除 10cm 厚之舊有鋪面，再分兩層鋪設 10cm 厚之新瀝青鋪面，轉爐石瀝青混凝土材料試拌與產製的地點為建中工程股份有限公司永康瀝青拌和廠。本研究鋪設材料與面積為：

1. 鋪設 43 公尺長，10.7 公尺寬，標稱最大粒徑為 19mm 的 BOF SMA (添加改質 III 型瀝青) 於中華西路南向雙車道，以及中華西路與中華南路路口，車輛直行

與轉彎處，長寬分別為 53 與 56 公尺。

2. 鋪設 250 公尺長，10.7 公尺寬，標稱最大粒徑為 19mm 的 BOF DGAC(添加針入度 60/70 瀝青)於中華南路東向雙車道。
3. 鋪設 250 公尺長，10.7 公尺寬，標稱最大粒徑為 19mm 的 DGAC(添加針入度 85/100 瀝青)於中華南路東向雙車道。



圖 2 示範道路鋪設地點與材料示意圖

四、結果與討論

本研究首先進行實驗室材料配比設計，接著分析瀝青拌和廠產製中的轉爐石瀝青混凝土，最後為探討施工中的現地鋪築。

4.1 材料配比設計

本研究的材料級配類型分為三類，說明如下：(1) DGAC:全部採用天然粒料，標稱最大粒徑 19 mm，黏結料為針入度 85/100 瀝青，(2)BOF DGAC:採用通過#4 篩的天然細粒料，及停留在#4 篩的轉爐石粗粒料，標稱最大粒徑為 19 mm，黏

結料為針入度 60/70 瀝青，和(3)BOF SMA:採用通過#4 篩的天然細粒料，及停留在#4 篩的轉爐石粗粒料，標稱最大粒徑為 19mm，並添加 0.3%木質纖維防止瀝青垂流。進行材料基本試驗後，依照配比設計製作各類型瀝青混凝土的馬歇爾試體，進行各項工程性質試驗並比較其差異。

4.1.1 材料基本試驗

1. 瀝青黏結料基本性質

本研究採用針入度 85/100 瀝青、針入度 60/70 瀝青，應符合 CNS 2260 K5030 鋪路瀝青—針入度分級之規定；改質瀝青 III 型，應符合 CNS 14184 改質瀝青第 III 型之規定，試驗結果均符合規範要求，分別列於表 1、表 2 和表 3。

表 1 針入度 85/100 型瀝青試驗結果

針入度 85/100	試驗值	規範值
新鮮瀝青		
針入度(0.1mm)	95	85~100
黏度(60°C, poise)	1137	-
(135°C, cSt)	321	-
閃火點(°C)	>232	>232
溶解度(%)	99.9	>99
薄膜烘箱試驗後		
熱損百分比(%)	0.1	<0.5
殘餘針入度比(%)		>47
延展性(cm)	125+	>75

表 2 針入度 60/70 型瀝青試驗結果

針入度 60/70	試驗值	規範值
新鮮瀝青		
針入度(0.1mm)	63	60~70
黏度(60°C, poise)	2693	-
(135°C, cSt)	512	-
閃火點(°C)	>232	>232
溶解度(%)	99.5	>99
薄膜烘箱試驗後		
熱損百分比(%)	0.01	<0.5
殘餘針入度比(%)	55	>52
延展性(cm)	100	>75

表 3 改質 III 型瀝青試驗結果

改質 III 型	試驗值	規範值
新鮮瀝青		
針入度(0.1mm)	25	-
黏度(60°C, poise)	10753	>8000
(135°C, cSt)	1658	<3000
閃火點(°C)	>232	>232
溶解度(%)	99.7	>99
離析試驗頂段與底段軟化點差值(°C)	2	依報告
滾動薄膜烘箱後		
彈性回復(25°C, 10cm, 伸長(%))	85	>70
針入度(4°C, 200g, 60sec, 0.1mm)	20	>10

2. 粒料基本物性試驗

表 4 顯示粗粒料試驗結果，轉爐石與天然粒料皆符合規範要求。天然粗粒料洛杉磯磨損率為 17.75%，轉爐石粒料為 10.26%，均小於規範值 30%，說明轉爐石粒料抗磨損能力優於天然粒料，洛杉磯磨損值越低，則抵抗鋪面變形能力越佳。轉爐石的裂解產製過程使得粒形會較為方正，且粒徑大小一致，因此在料場粒料堆放(stockpile)時，比較不容易有粒料析離(segregation)的問題；而天然粗粒料粒形則會在砂石場中受碎石過程的影響，砂石堆中可能會存在部分形狀扁長或尺寸不均的顆粒，於料場堆放或進行砂石搬運時，導致粒料析離的情形。另外，表 5 也顯示天然細粒料的各項基本試驗值，均符合規範要求。

此外表 4 顯示天然粗粒料比重為 2.62，當進行傳統完全含天然粒料瀝青混凝土配比設計時，因為各尺寸間天然粒料的比重相差甚小，可以重量設計法進行配比設計，此時的重量配比設計等於體積配比設計結果；然而，本研究的轉爐石比重為 3.41，轉爐石比重為天然粗粒料 1.3 倍，轉爐石粗粒料及天然細粒料之比重差異接近 0.8，需回歸到體積設計法進行材料配比，再轉換回材料間的重量組成比例，才不致造成粒料級配偏細之情形。故本研究中的 BOF DGAC 和 BOF SMA 均採用體積設計法。

表 4 粗粒料試驗結果

試驗項目	轉爐石	天然粒料	規範值	試驗法
洛杉磯磨損率(500 轉, %)	10.26	17.75	< 30	AASHTO T96
扁長率(%)				ASTM D4791
1:3	3.12	3.84	< 15%	
1:5	0.52	1.56	< 5%	
比重(G_b)	3.41	2.62	-	AASHTO T85
吸水率(%)	2	1.28	< 2	
健性(硫酸納 5 次循環損失, %)	0.65	0.73	< 12	AASHTO T104
破碎面(%)				
一面	100	100	100	ASTM D5821
兩面	100	-	>90	

表 5 細粒料試驗結果

試驗項目	天然粒料	規範值	試驗法
健性(硫酸納 5 次循環損失, %)	7.9	< 15	AASHTO T104
含砂當量	93.6	> 50	AASHTO T176
比重(G_b)	2.69	-	AASHTO T85
吸水率(%)	1.64	-	

4.1.2 粒料級配

1. 天然粒料密級配瀝青混凝土(DGAC)

DGAC 完全採用天然粒料，標稱最大粒徑 19 mm，DGAC 做為 BOF DGAC 及 BOF SMA 級配之對照組，以評估各項工作績效。其級配範圍及曲線如圖 3 所示，皆符合規範。

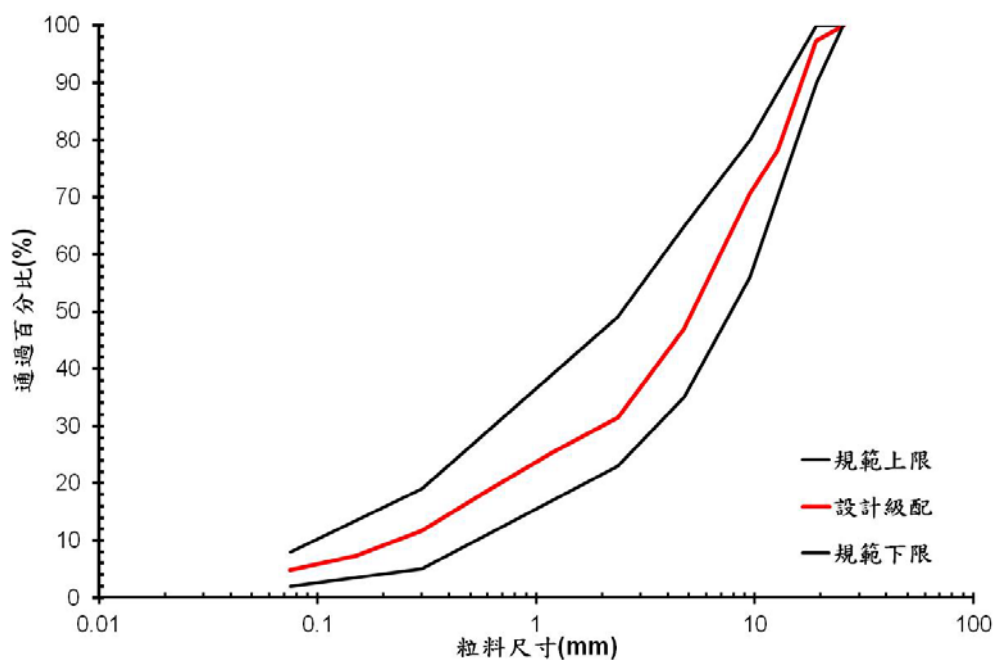


圖 3 DGAC 之粒料級配曲線

2. 轉爐石密級配瀝青混凝土 (BOF DGAC)

BOF DGAC 採天然細粒料及轉爐石粗粒料，標稱最大粒徑為 19 mm，因轉爐石比重達 3.41，必須進行體積設計法。圖 4 顯示轉爐石重量設計曲線位於體積設計曲線處下方；當由體積比修正後，轉爐石體積比就趨近上下限之中間範圍內，代表 BOF DGAC 的粒料大小實際分佈狀況。

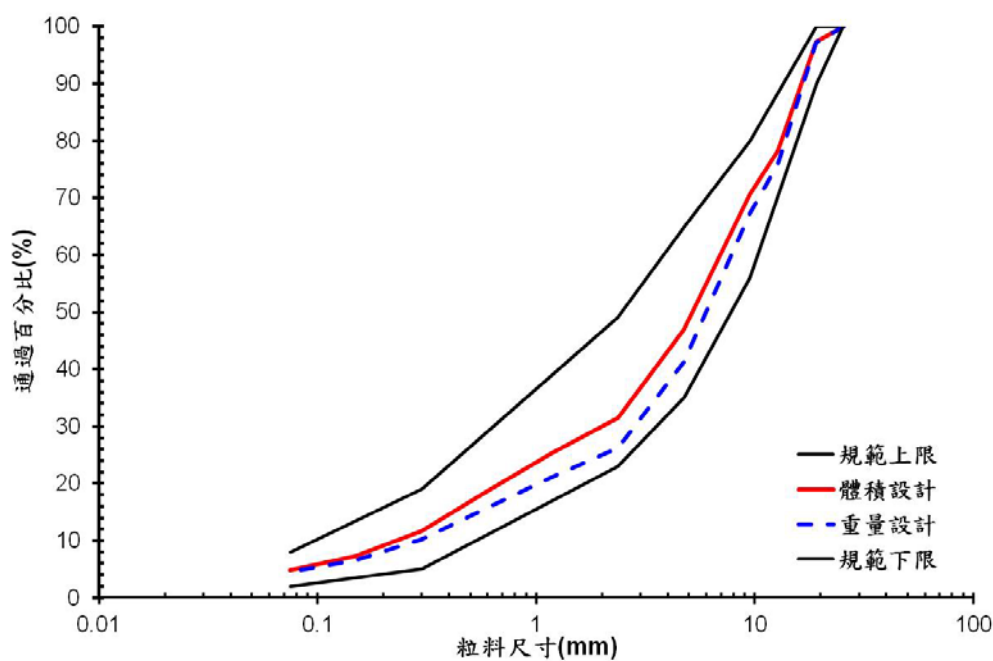


圖 4 BOF DGAC 之粒料級配曲線

3. 轉爐石石膠泥瀝青混凝土 (BOF SMA)

BOF SMA 採天然細粒料及轉爐石粗粒料，標稱最大粒徑為 19 mm，因轉爐石比重達 3.41，必須進行體積設計法。圖 5 同樣顯示重量設計曲線位於體積設計曲線之下方，體積設計曲線代表 BOF SMA 實際粒料大小分佈狀況。

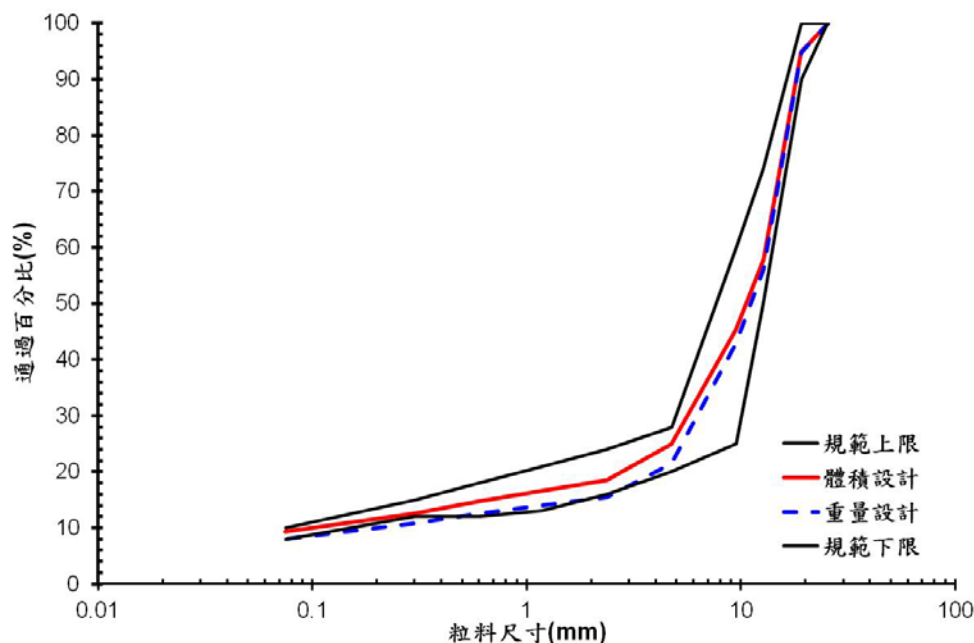


圖 5 BOF SMA 之粒料級配曲線

4.1.3 配比設計結果

1. 天然密級配瀝青混凝土 (DGAC)

NA-DGAC 性質如表 6 所示，考量工程性質與經濟因素，建議之瀝青用量為混合料重量之 5.1%。

表 6 NA DGAC 性質

項目	試驗結果	規範
穩定值(kgf)	1111	>816
流度值(mm)	2.2	2-3.5
空隙率(%)	4.3	3-5
VMA (%)	17.6	>13
VFA (%)	70	65-75
滯留強度 (%)	91.2	>75

2. 轉爐石密級配瀝青混凝土 (BOF DGAC)

BOF DGAC 性質如表 7 所示，考量工程性質與經濟因素，建議之瀝青用量為混合料重量之 4.3%。

3. 轉爐石石膠泥瀝青混凝土 (BOF SMA)

BOF SMA 混合料性質，如表 8 所示，建議之瀝青用量為混合料重量之 5.2%。

表 7 BOF DGAC 混合料性質

項目	試驗結果	規範值
穩定值(kgf)	1822.3	>816
流度值(mm)	3.2	2-3.5
空隙率(%)	4	3-5
VMA (%)	11.3	>13
VFA (%)	69.7	65-75
滯留強度 (%)	84.3	>75

表 8 BOF SMA 混合料性質

項目	試驗結果	規範值
穩定值(kgf)	930.7	>632
流度值(mm)	3.6	2-4
空隙率(%)	4	3-5
VMA (%)	15.9	>17%
VFA (%)	75.6	75-85
VCA _{mix}	34.9	<VCA _{DRC}
VCA _{DRC}	36.2	-
垂流量(%)	0.02	<0.3
滯留強度 (%)	84	>75

4.1.4 瀝青混凝土之工程性質

本節主要探討各種級配瀝青混凝土之各項工程性質，評估添加轉爐石粗粒料之 BOF DGAC 及 BOF SMA 相關特性。

1. 馬歇爾穩定值和流度值

由圖 6 可知 DGAC 及 BOF DGAC 級配之穩定值需在 816 kgf 以上，而 BOF-SMA 之穩定值規範則在 632 kgf。三種混合料中，BOF DGAC 具有最大之穩定值 1822.3kgf，其次為 DGAC 穩定值 1111kgf，最小的為 BOF SMA 穩定值 930.7 kgf。一般而言，穩定值不適用於評估 SMA 級配，BOF SMA 之穩定值只是可為參考，實際強度須視鋪面績效來反映。

馬歇爾穩定值可用來評估瀝青混合料之品質與試體能承受之載重，較高的馬歇爾穩定值表示可承受相對較大的交通荷重。馬歇爾流度值為混合料承受載重至破壞時所對應之變形，流度值過高表示瀝青混凝土容易產生塑性流動；流度值過低則易產生龜裂、破碎，會有耐久性的顧慮。

圖 7 為各種級配之流度值，其中 BOF SMA 具有最高之流度值 3.6mm，其次為 BOF DGAC 流度值 3.2mm，而 DGAC 流度值最小為 2.2mm。一般 SMA 流度值大於密級配，且在大致呈現級配越粗流度值越高之趨勢，因 SMA 屬於跳躍級配，流度值較高屬於合理趨勢，國外並無針對 SMA 之流度值進行相關規範。

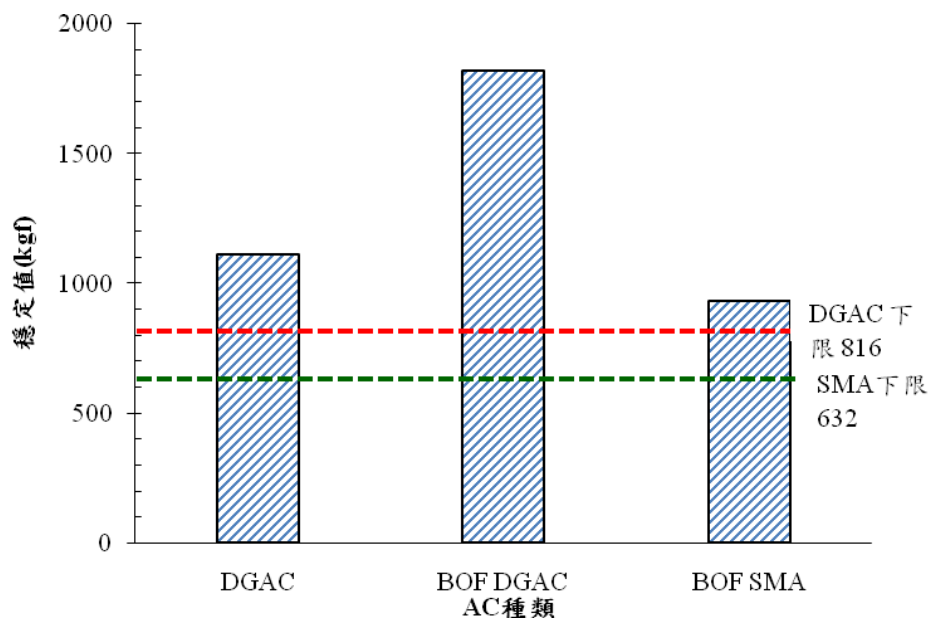


圖 6 各級配之穩定值

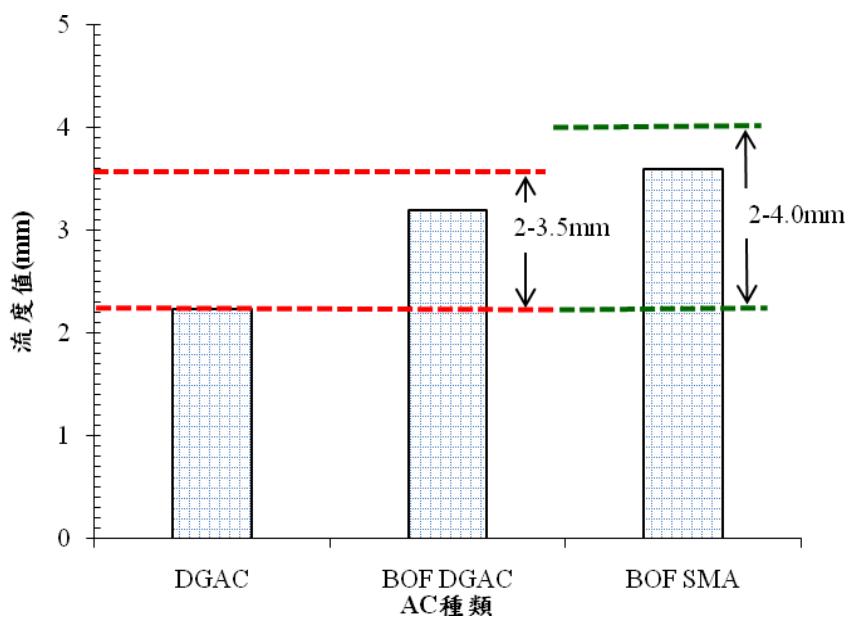


圖 7 各級配之流度值

2. 粒料間空隙(VMA)

粒料間空隙(VMA)為混合料空隙及有效瀝青所佔體積總和，圖 8 顯示 BOF DGAC 之 VMA 低於規範 13%，BOF SMA 也低於規範值 17%。VMA 主要是提供適當空間給瀝青包裹粒料，產生黏結效果，同時，又不至於在鋪面溫度過高時，產生冒油。如果混合料 VMA 過小，可能沒有足夠空隙提供給瀝青，瀝青油膜可能因為重載交通被擠壓至路面，即冒油現象，可能有耐久性的問題；如果 VMA 過大，混合料架構鬆散，可能會有穩定性問題。依據美國瀝青協會對於 VMA 建議，隨著最大標稱粒徑的降低，最低 VMA 會增大，這是因為細粒料間之總空隙

大於粗粒料間之總空隙。

轉爐石粒型方正，粒料容易堆積緊密，因而 VMA 較低。另外，轉爐石表面孔隙較多，吸入孔隙中之瀝青視為無效瀝青，有效瀝青的減少可能也是 VMA 減少的另一個因素。VMA 的減少對 BOF 鋪面的影響，應以現場績效為主。

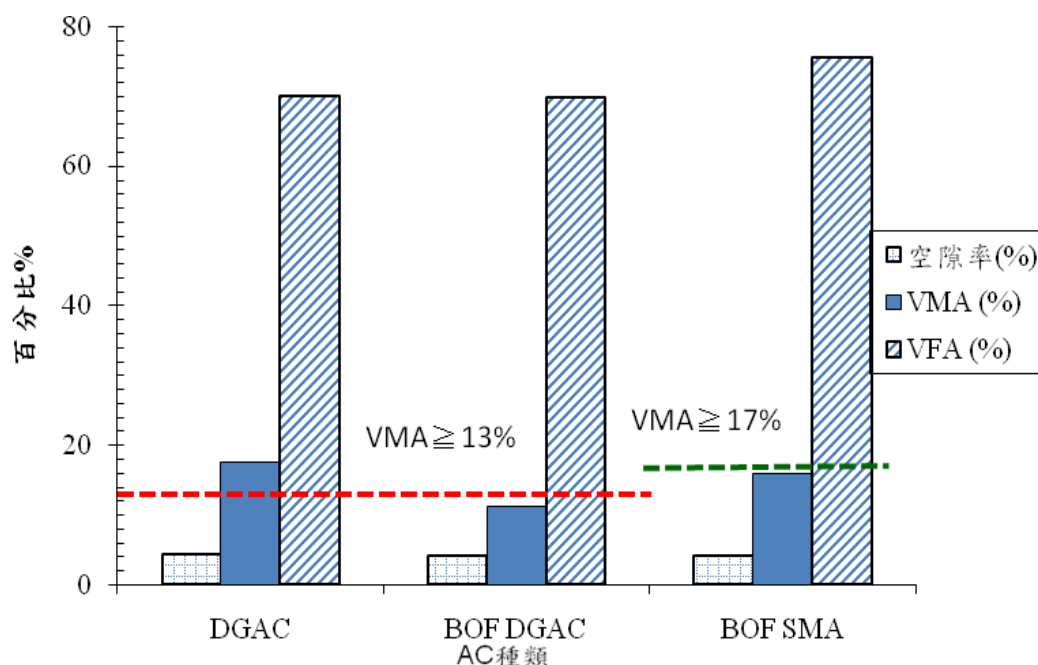


圖 8 各級配之空隙率、VMA 和 VFA

表 9 顯示測得 BOF SMA 平均壓實度為 101.22%；BOF DGAC 平均壓實度為 99.79%，高於規範值 95%，相對地，天然粒料 DGAC 平均壓實度為 96.66%與規範較相近，可能是天然粒料粒形變化較大，扁平顆粒亦較多，相較於轉爐石粒料粒形較為方正一致，扁平顆粒較少，在滾壓的過程中，由於粒形方正關係，轉爐石較容易達到規範壓實度；相對地，天然粒料因粒形變化較大，粒料排列較為參差不齊，相較於轉爐石較不容易達到規範壓實度。相對地，轉爐石瀝青混凝土於滾壓時必須注意容易產生過度壓實情形，造成空隙過小的情形，如圖 9 和圖 10 所示。英國國家標準規範 BS 594987 建議對於轉爐石瀝青混凝土的現地滾壓，可視情況較傳統瀝青混凝土鋪面滾壓溫度低約 10°C[20]。

表 9 瀝青混凝土壓實度

	BOF SMA	BOF DGAC	DGAC
配比設計密度(kg/cm ³)	2.8845	2.8075	2.3600
現地鑽心密度(kg/cm ³)	2.9197	2.8017	2.2811
現地壓實度(%)	101.22	99.79	96.66
要求壓實度(%)	95 以上	95 以上	95 以上

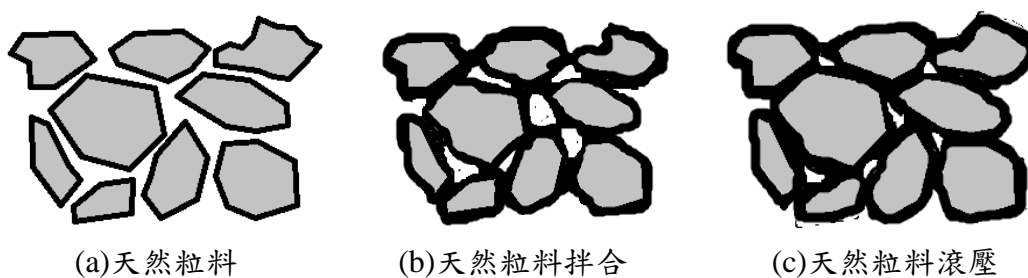


圖 9 天然粒料孔隙及 VMA 變化示意圖

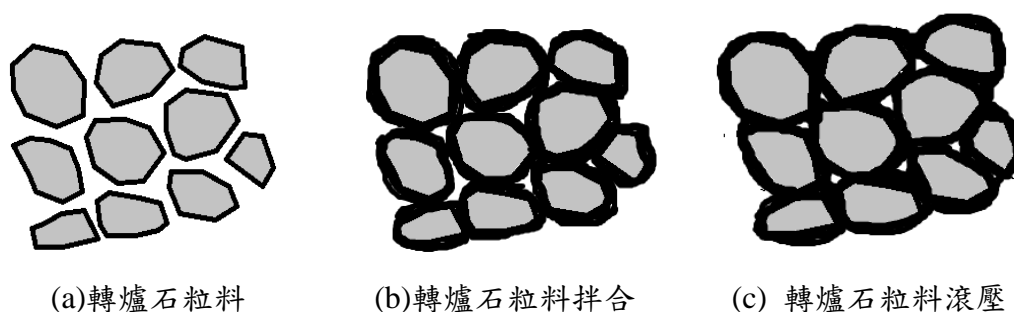


圖 10 轉爐石粒料孔隙及 VMA 變化示意圖

3. 滯留強度(%)

本試驗可用來評估粒料介面與瀝青材料受水侵害後的剝脫行為，圖 11 即為各級配之滯留強度，可知 DGAC、BOF DGAC 及 BOF SMA 皆能符合滯留強度大於 75% 的規定。DGAC 具有最高之滯留強度 91.2%，其次為 BOF DGAC 滯留強度 84.3%，BOF SMA 滯留強度 84%。轉爐石粒料含碳酸鈣，屬親油性材料，因而不受水侵害。

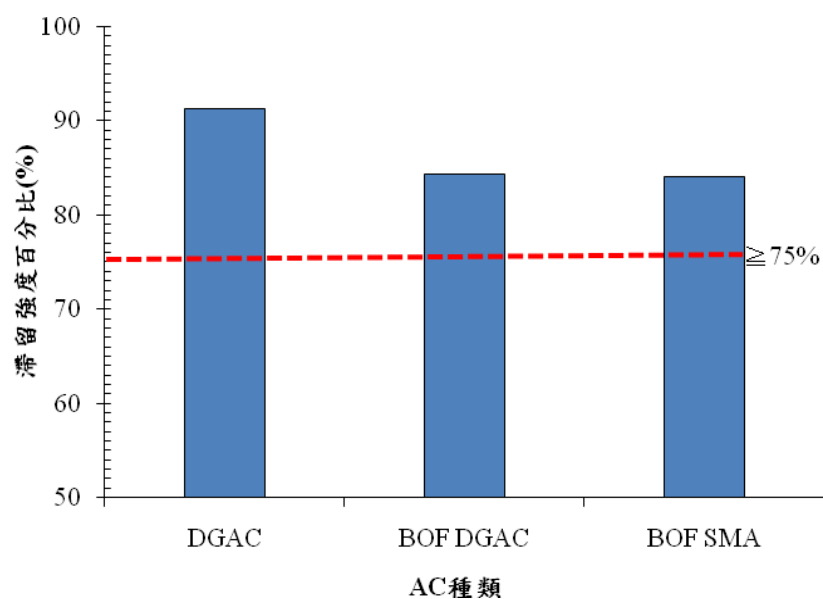


圖 11 各級配之滯留強度(%)

4.2 材料產製

根據實驗室配比設計，進行 BOF SMA 與 BOF DGAC 試拌。BOF DGAC 及 BOF SMA 產製作業流程大致與 DGAC 相同，但由於轉爐石比重較大，且材料性質與天然粒料不同，需對產製設備做部分調整。首先，校正拌和廠所有的供料速率、乾燥爐溫度控制及計量系統，以確認計量的正確性。粒料含水量、天候狀況、瀝青等級和纖維種類等因素，皆會影響瀝青混凝土的產製溫度，其中 BOF SMA 拌和溫度不得超過 180°C，避免瀝青過度老化，並防止垂流現象的發生。本節將針對 BOF DGAC 及 BOF SMA 與一般天然粒料之間產製過程的差異進行分析比較。

4.2.1 轉爐石瀝青混凝土材料試拌

由於轉爐石的比重、孔隙等材料性質與天然粒料不同，有必要進行新材料、新工法試拌作業。因此，業主中聯資源股份有限公司，連同各單位，於民國 101 年 3 月 8 日在建中工程股份有限公司永康瀝青拌和廠進行材料試拌，目的在於依據配合設計，生產合乎規範的瀝青混凝土。永康瀝青拌和廠為盤式(Batch)，如圖 12 所示，每盤產量為 1.5 噸。



圖 12 1.5 噸盤式瀝青拌和廠

1. 轉爐石石膠泥混凝土(BOF SMA)試拌

BOF SMA 試拌之瀝青為改質 III 型瀝青，瀝青用量為混合料重量之 5.2%；拌和溫度為 175~179°C，由於添加木質纖維，粒料乾拌時間增加為 25 秒，而濕拌時間增加為 40 秒；試拌之粒料使用百分率，如表 10 所示。

BOF SMA 粒料通過#4 篩體積百分比為 24.9%，粗粒料重量含量達 75.1%，遠高於 DGAC 之 49%及 BOF DGAC 之 53%，且 BOF SMA 級配曲線為跳躍級配，試拌過程中，瀝青溫度、粒料輸送速率、乾燥爐溫度、拌和時間(乾拌、濕拌)與傳統 DGAC 不同，必須重新校正測試。

表 10 BOF SMA 試拌之粒料使用量

粒料	轉爐石 六分石	轉爐石 三分石	轉爐石 二分石	砂	石粉	粒料 合計	瀝青	木 質 纖 維	混合 料 合 計
粒料配比 (%)(重量)	36	33.5	10.0	12	8.5	100	5.2	0.3 (對混 合料 重量 比)。	--
每盤重量 (公斤)	512	476	142	171	121	1422	74	4	1500

另外需先進行粒料乾拌，檢視木纖維分布情形，如圖 13 所示。經過三次試拌後，圖 14 顯示 BOF SMA 第三次試拌後之廠拌料外觀。圖 15 顯示拌和溫度在 178°C-192°C 之間，觀察其三次拌和溫度起伏較高，其中第 1 次 186°C 及第 3 次 192°C，試拌拌和溫度均超過配比設計所建議之拌和溫度 175~179°C，混合料即發生垂流現象，如圖 16 所示。分析其原因可能因轉爐石富含鐵質，當轉爐石冷料經過乾燥爐加熱，溫度提升較天然粒料快速，當乾燥爐的轉速及溫度未能調整穩定，所產生熱料溫度變化較大，造成拌和溫度上下起伏之情形。



圖 13 BOF SMA 乾拌之粒料外觀



圖 14 BOF SMA 試拌之廠拌料外觀

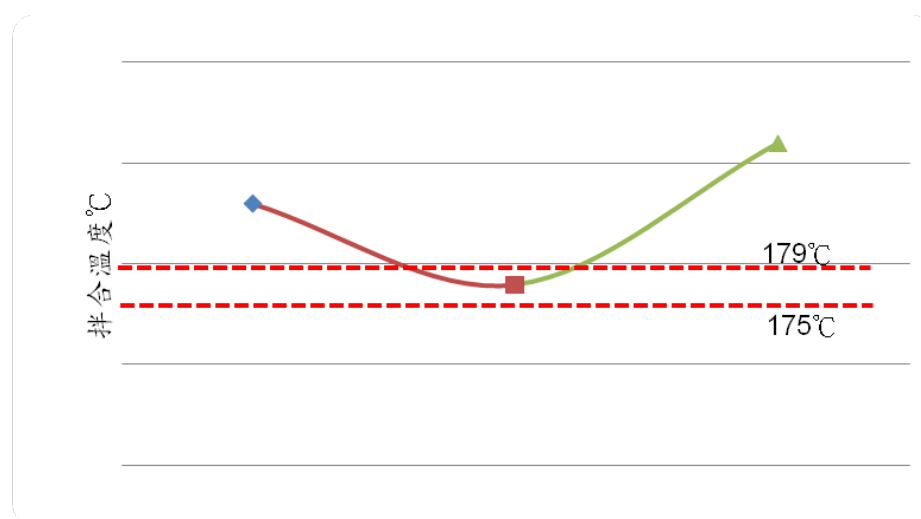


圖 15 BOF SMA 三次試拌之拌和溫度

2. 轉爐石密級配瀝青混凝土(BOF DGAC)試拌

BOF DGAC 試拌之瀝青等級為針入度 60/70，瀝青用量為混合料重量之 4.3%；拌合溫度為 161~165°C，粒料乾拌時間 15 秒，而濕拌時間為 35 秒；經試拌和熱料篩分析後，粒料使用百分率，如表 11 所示。

表 11 BOF DGAC 試拌之粒料使用量

粒料	轉爐石 六分石	轉爐石 三分石	轉爐石 二分石	砂	石粉	粒料 合計	瀝青	混合料 合計
粒料配比 (%)(重量)	18	23	19	39	1.0	100	4.3	--
每盤重量 (公斤)	258	330	273	560	14.5	1435.5	64.5	1500

雖然天然粗粒料與轉爐石粒料粒形、孔隙率及材料性質不同，由實驗室配合設計可知 DGAC 與 BOF DGAC 兩者粒料級配分佈差異不大，因此 BOF DGAC 試拌過程應與 NA-DGAC 類似；但由於 BOF 對於溫度較敏感，對粒料及拌和溫度的控制及穩定性，於 BOF DGAC 正式產製時仍需注意。圖 17 為 BOF DGAC 試拌之廠拌料外觀。



圖 16 BOF SMA 垂流現象



圖 17 BOF-DGAC 試拌之廠拌料外觀

4.2.2 轉爐石瀝青混凝土材料產製

瀝青混凝土生產應由合格瀝青拌和廠產製，國內一般都採用盤式拌和廠(batch plant)生產，拌和產製時間隨瀝青混凝土級配而有所不同，分為乾拌和濕拌時間。本研究所採盤式瀝青拌和廠，對於粒料進料重量安裝有磅秤控制，乾燥爐針亦有溫度控制，拌和鼓時間均有計數及自動控制設備。拌和級配為 BOF DGAC 以及 BOF SMA 兩種，分別使用瀝青等級針入度 60/70 以及改質瀝青 III 型，每盤 1.5 公噸。

1. 轉爐石石膠泥瀝青混凝土(BOF SMA)

- (1) 瀝青等級採改質 III 型，因拌和溫度為 180°C，槽內瀝青維持於 170°C。
- (2) 六分、三分、二分轉爐石粗粒料及天然、機製砂自冷料斗經輸送帶進入乾

燥爐進行烘乾及熱料程序，烘乾溫度應設定為 200°C。

- (3) 熱料經由輸送帶送至振動篩過篩後進入熱料倉，應視情況調整粒料輸送速度。
- (4) 熱料通過磅秤進入拌和鼓，並加入石粉，以人工方式將木質纖維(圖 18)，投入拌和鼓投注口，進行乾拌 25 秒後，瀝青瀝青經由磅秤後注入拌和鼓，進行濕拌 40 秒，完成 BOF SMA 拌合。



(a)木質纖維

(b)木質纖維形狀

圖 18 木質纖維外觀

2. 轉爐石密級配瀝青混凝土 (BOF DGAC)

- (1) 瀝青等級採針入度 60/70，拌和溫度為 155°C，儲存槽內瀝青溫度為 145°C，瀝青儲存溫度應低於拌和溫度約 10°C。
- (2) 六分、三分、二分轉爐石粗粒料及天然、機製砂自冷料斗經輸送帶進入乾燥爐進行烘乾及熱料程序，烘乾溫度設定為 165°C。
- (3) 熱料經由輸送帶送至振動篩過篩後進入熱料倉，容易因輸送帶速率過快，造成熱料倉粒料滿溢之情形，當使用 BOF 粗粒料時，應重新進行冷料斗流量校正，防止溢流(over flow)現象。
- (4) 熱料通過磅秤進入拌和鼓，並加入石粉進行乾拌 15 秒後，瀝青經由磅秤後注入拌和鼓，進行濕拌 35 秒，完成 BOF DGAC 拌和。

4.2.3 瀝青混凝土材料產製綜合討論

本節係針對 BOF DGAC 與 BOF SMA 於產製過程，按瀝青、拌和廠、操作人員及粒料分別提出應注意事項。

1. 瀝青

施工前，改質瀝青儲存槽之加熱溫度約 170°C，除情況特殊，應儘量不超過 180°C，避免老化。

2. 拌和廠

乾燥爐溫度較高時，容易造成粒料溫度過高，使瀝青混合料提早老化及垂流現象，顯示乾燥爐溫度控制需小心控制。

本次研究中盤式瀝青拌和廠對於粒料進料重量安裝磅秤控制，乾燥爐亦有溫度控制，拌和鼓時間均有計數及自動控制設備；惟如對於冷料斗輸送帶的速率未校正，SMA 因級配與傳統級配不同，易造成部分粒料有過多或不足情形，存在溢流(overflow)情形，因此產製 BOF SMA 時，必須重新調整冷料斗輸送速率。

拌和廠內儲料場、冷料倉及輸送帶需設置遮蓋設備，如遇雨天或潮濕天氣，控制冷料之含水量小於 1%，避免影響拌和溫度。

3. 操作人員

當乾燥爐尚於冷機狀態，熱料尚未達工作溫度，操作人員若進行拌和，將造成粒料無法充分包裹瀝青膠漿，可能產生析離或易遭水侵害。

由於 BOF SMA 中粗粒料比例高，細粒料少，供需平衡狀況異於傳統 DGAC，若操作人員未能調整正確輸送帶速率，使得輸送帶輸送速率過快，易造成熱料倉粒料滿溢之情形。

4. 粒料

BOF SMA 之粗粒料比例高，因 BOF 含鐵質，溫感性較高，為能確保溫度控制，因此 BOF 與瀝青之溫度相差不宜超過 10°C。

4.3 運輸與現地施工

4.3.1 瀝青混凝土之運輸

為維持瀝青混凝土運送過程與鋪築速度之順暢，應對整個施工作業時程妥善規劃，使運輸卡車數量符合瀝青拌和廠生產速率，運輸車輛上應覆蓋帆布來防止溫度下降；BOF DGAC 及 BOF SMA 之溫感性較天然粒料高，而且，BOF SMA 為跳躍級配，比一般傳統含天然粒料之密級配熱拌瀝青混凝土更易冷卻，在低溫或強風時的運送與鋪築，須更加注意瀝青混凝土之保溫。

本次運輸車輛採 35 噸聯結卡車，BOF DGAC 每輛車裝載 19 盤瀝青混凝土，重量約 28.5 噸(1.5 噸×19 盤)，每輛聯結卡車平均裝載時間約為約 19 分鐘。其中 BOF DGAC 裝載完成並過磅時之平均溫度約 149.8°C，運輸至工地平均溫度降為 129.2°C，混合料溫度下降約 20.6°C，BOF DGAC 運輸過程應注意下列事項：

1. 為便於卸料，運輸車輛之車斗內應清潔、緊密、光滑並應先塗一薄層石蠟、或油水混合液等防黏著用隔離劑，如圖 19(a)所示。有時運輸車輛可能採用煤油等溶劑充當隔離劑，易使車斗底部部份瀝青混合料溶解，造成部分混合料瀝青裹漿不均勻。

運輸車輛於裝載瀝青混合料時，如 19(b)所示，需前後移動車輛，應先卸料於車斗前部，然後移動車輛於車斗後部卸料，最後再移動車輛，使餘下之料卸於車斗中部均勻分裝，避免混合料離析現象。

BOF SMA 因每盤裝載時間約為 75 秒(25 秒乾拌+ 40 秒濕拌+10 秒裝載)，因較 BOF DGAC 多 15 秒拌和時間，為避免等待時間過久，造成 BOF SMA 冷卻，每輛車裝載 15 盤瀝青混凝土，重量約 22.5 噸(1.5 噸×15 盤)，每輛車平均裝載時間為平均約 18.75 分鐘。BOF SMA 裝卸完成過磅時之平均溫度約 173.1°C，運輸至工地平均溫度降為 148.6°C，混合料溫度下降約 24.5°C，BOF SMA 運輸過程應

注意下列事項：

1. 由於瀝青膠漿薄膜厚度較厚，且為防止垂流而採改質 III 型瀝青，因其黏度較高，容易黏附於運輸車輛之車斗，在裝載 BOF SMA 前，運輸車輛之車斗底鈹和側鈹需先塗一層石蠟或其他經認可之防黏劑。本次以石粉灑於運輸車輛車斗，如圖 20(a)和(b)所示，但需小心因過多的石粉吸附瀝青易造成 BOF SMA 瀝青膜厚變薄，且因車斗石粉未經充分灑佈也容易造成 BOF SMA 有結塊之情形，如圖 21(a)和(b)所示。
2. BOF SMA 從瀝青拌和廠出料後以卡車載送至鋪築現場之運輸時間，建議運輸時間盡量在 50 分鐘以內，再加上 10 分鐘等候卸料時間，因此應避免超過 1 小時，以免影響鋪築之工作性。運輸車輛於工地現場等待時間亦不宜過長，以免造成 BOF SMA 產生垂流現象，或因粒料溫度過低，使 BOF SMA 凝固於車斗而難以卸料，如圖 22(a)與(b)所示。



(a)噴灑隔離劑於車斗

(b)車輛需前後移動

圖 19 BOF DGAC 裝載過程



(a)石粉隔離劑於車斗

(b)BOF-SMA 部分結塊

圖 20 石粉隔離劑



(a)粒料被石粉包裹

(b)石粉於 BOF-SMA 表面結塊

圖 21 部分 BOF-SMA 結塊



(a)BOF-SMA 凝固於車斗

(b) BOF-SMA 產生垂流現象

圖 22 部分 BOF-SMA 凝固與垂流

4.3.2 瀝青混凝土鋪面之刨除鋪築

本次工作範圍內之鋪面均採刨除 10 公分，鋪築 10 公分之施作方式，本節將針對舊有鋪面刨除、清掃及修補、噴灑黏層、鋪築及滾壓等施工過程分別提出應注意事項。

1. 刨除

- (1) 本次刨除 10 公分瀝青混凝土鋪面，採用刨除機進行鋪面刨除作業，遇人孔手孔，刨除機無法施作，必須採用挖土機挖除瀝青混凝土鋪面，可能造成人手孔周邊基底層鬆軟，如圖 23 所示。
- (2) 十字路口所埋設管線及人手孔甚多，道路原有基層及底層遭挖掘及施工，依據圖 24 顯示管線及水溝施工，回填壓實度似有不足之現象，可能因基底層承载力不足，造成瀝青混凝土鋪面產生沉陷之情形。
- (3) 部分管線因埋設深度較淺，於路面刨除過程，刨除機將管線挖破或挖斷之情形，如圖 25 所示。該部分鋪面可能因管線埋設過淺，當承受荷重時，鋪面可能會產生較大變形及反射裂縫，造成管線埋設處鋪面壽命縮短。



(a)挖土機挖除瀝青混凝土

(b)人手孔周邊基底層鬆軟

圖 23 挖土機挖除瀝青混凝土鋪面



(a)水溝施工回填壓實不足

(b)管線施工回填級配鬆軟

圖 24 挖土機挖除瀝青混凝土鋪面



(a)管線保護層破損

(b)管線遭挖斷

圖 25 管線埋設過淺造成之損壞

2. 清掃及修補

- (1) 刨除機進行鋪面刨除作業後，進行刨除面清掃工作，清除刨除機所散落之

顆粒，如圖 26 所示，避免瀝青混凝土與刨除面黏結不良之情形。

- (2) 經清掃後刨除面常呈現錯綜複雜的管線開挖痕跡，如圖 27 所示，一般道路主管機關所進行路面改善大都屬面層刨鋪，對於現有基底層之狀況往往難以評估，修補現有破壞狀況較不受重視；刨除後，應檢視地下管線是否破洞、或基底層承载力不足等問題，避免日後路面凹陷，產生裂縫，雨水滲入，造成路面坑洞，影響路面使用壽命。



(a) 清掃刨除面殘留粒料

(b) 清掃刨除面殘留粒料

圖 26 清掃刨除面



(a) 弱電寬頻管線開挖痕跡

(b) 電信電力管線開挖痕跡

圖 27 管線開挖基底層破壞情形

3. 噴灑黏層

- (1) 原有鋪面表面應先噴灑瀝青黏層，使新舊鋪面相互黏結，可採用人工噴灑方式，如圖 28 所示，但注意黏層需噴灑均勻，過多容易發生面層滑動及側擠；過少則因面層與底層黏結不良，當雨水入侵，容易發生鋪面剝離現象，應採用撒佈機噴灑黏層。
- (2) 市區路面經常為佈滿管線開挖，經刨除後大都呈現裸露碎石級配，依據 AASHTO M43 規範，碎石級配應噴灑瀝青透層，並至少等待 24 小時讓液態瀝青滲透碎石級配，主要目的是黏結碎石級配層與瀝青混凝土，受外力

時，因黏結作用減少分離發生。另一目的是減少水份滲入碎石級配層內；或地下水位升高或下雨時，阻隔水份流過。透層所使用材料一般與黏層不同，瀝青用量較多，應為 0.9~1.4 L/m²，目前瀝青混凝土刨鋪大都以噴灑黏層方式處理。



圖 28 黏層噴灑

4. 鋪築及滾壓

- (1) BOF DGAC 的鋪築及滾壓方式與 DGAC 相同，於瀝青鋪築機完成鋪築後，以雙軸鐵輪壓路機進行初壓，以膠輪壓路機複壓後，可再以雙軸鋼輪壓路機完成終壓，即修面滾壓。
- (2) 瀝青混合料倒入鋪築機鋪築時之溫度，應不得低於 120°C；鋪築施工時，應將卡車上材料使用完畢，以避免產生冷料情形，影響鋪面耐久性。
- (3) 因 BOF SMA 施工位置位於十字路口，施工較一般直線段鋪面耗時及困難，鋪築過程較為緩慢，容易導致運輸車輛所裝載 BOF SMA 混合料降溫冷卻，凝固於車斗上，如圖 29 所示。
- (4) 壓路機應緊隨鋪築機之後，距離以不超過 60 公尺為宜，以鐵輪壓路機在滾壓溫度時依初壓方法滾壓 4~6 遍，使瀝青混凝土達到規定密度而無顯著輪跡為止。
- (5) BOF SMA 滾壓過程中，由於車斗上之石粉隨同混合料進入鋪築機拌和後鋪築，可能因此造成於部分 BOF SMA 鋪面產生局部較大面積油斑(fat spot)，如圖 30 所示。



(a) BOF SMA 下料困難



(b) BOF SMA 凝固於車斗

圖 29 BOF SMA 凝固



(a) BOF SMA 鋪面油斑 I

(b) BOF SMA 鋪面油斑 II

圖 30 局部油斑產生於 BOF SMA 鋪面

五、結論與建議

5.1 結論

1. 由於轉爐石與天然粒料比重間的差距，需進行實驗室體積配合設計法，反映實際粒料之粒徑分佈狀況。
2. BOF SMA 和 BOF DGAC 之 VMA 無法達到傳統 HMA 之規範值，原因為轉爐石粒型方正，粒料容易堆積緊密，因而 VMA 較低；另外，轉爐石表面孔隙較多，吸入孔隙中之瀝青視為無效瀝青，有效瀝青的減少可能也是 VMA 減少的另一個因素。VMA 的減少對 BOF 鋪面的影響，應以現地績效為主。
3. BOF 表面孔隙率、吸水率以及對水敏感性都較天然粒料高，因此堆料場、冷料斗及輸送帶應設置遮雨設施，避免 BOF 含水量太高進，因而可能造成現地鋪設時，出現局部油斑的現象。
4. 使用合適的隔離劑均勻灑佈於卡車車斗內，避免 BOF SMA 結塊與析離現象發生。
5. BOF SMA 拌和產製時間較長，且在與傳統瀝青混凝土同重量下的體積較小，所需的卡車數量可能需要增加，應就整體產製-運輸-施工流程及時間進行調配。

5.2 建議

1. 由於 BOF 與天然粒料的比重差異，建議於轉爐石瀝青混凝土鋪面正式鋪設前，必須進行廠拌與道路試驗鋪築，確保轉爐石瀝青混凝土發揮最佳鋪面績效。
2. 轉爐石瀝青混凝土無法達到天然粒料瀝青混凝土之 VMA，建議應對轉爐石瀝青混凝土之 VMA 標準進行修正。
3. BOF 較天然粒料粒形方正，扁平顆粒少，在滾壓的過程中，轉爐石瀝青混凝土較容易達到規範壓實度，建議或可將滾壓溫度調降。
4. 進行鋪面刨除時，建議保留原有瀝青鋪面薄層，避免擾動造成路基土壤鬆動。

六、參考文獻

1. US Army Corps of Engineers (2000). "Hot-Mix Asphalt Paving," *United States of*

America.

2. Read, J. and Whiteoak, D. (2003). "The Shell Bitumen Hand Book," *Fifth Edition*, Thomas Telford Publishing, London, United Kingdom.
3. 陳建旭，廖敏志 (2011)，「開放級配瀝青混凝土添加轉爐石粒料評估服務工作(100)」，交通部高速公路局南區工程處，台南。
4. 中鋼集團 (2007)，「轉爐石利用推廣手冊」，高雄。
5. 中華鋪面工程學會 (2010)，「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊」，桃園。
6. 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。
7. British Standards Institution, BS EN 13043 (2002). "Aggregates for Bituminous Mixtures and Surface Treatments for Roads, Airfields and Other Trafficked Areas," London, United Kingdom.
8. Highways Agency (2009). "Manual of Contract Documents for Highway Works," Vol. 1-Specification for Highway Works, United Kingdom.
9. 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。
10. 國立中央大學木工程研究所 (1999)，「轉爐石取代天然粗細粒料應用於瀝青混凝土之成效評估」，桃園。
11. 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。
12. 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。
13. Bagampadde, U., and 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.
14. 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*, NO 1492, pp. 85-95.
15. Kandhal, P. S., and Hoffman, G. L. (1997). "Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot-Mix Asphalt Mixtures," *Transportation Research Record*, NO 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*, NO 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. Vol.16, pp.276-282.

19. Xue, Y., Wu, S. (2006). "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture," *Journal of Hazardous Materials*, B138, pp. 261-268.
20. British Standards Institution, BS 594987 (2010). "Asphalt for Roads and Other Paved Areas. Specification for Transport, Laying, Compaction and Type Testing Protocols," London, United Kingdom.
21. British Standards Institution, BS 4987-1 (2005). "Coated Macadam (Asphalt Concrete) for Roads and Other Paved Areas - Part 1: Specification for Constituent Materials and for Mixtures," London, United Kingdom.