

使用轉爐石於瀝青混凝土配合設計之效益

陳裕新

台灣世曦工程顧問股份有限公司材料試驗部協理

摘要

資源的有效利用是當今國際上的趨勢，台灣地區由於天然資源相對匱乏，對於資源再生利用的重視程度日益提昇，業已成為國家發展的重要政策之一，「轉爐石」係中鋼公司於鋼鐵煉製生產過程中的主要副產品，材料性質優良與產量穩定等二項因素均有利於道路工程之應用，其中尤以瀝青混凝土材料更屬使用誘因兼備，故推動轉爐石材料應用於瀝青混凝土鋪面係符合資源再生利用及提昇道路工程品質之雙重目的。民國 99 年 12 月 30 日經濟部標準檢驗局公告 CNS 15310[瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料]、CNS 15307[熱拌、熱鋪瀝青鋪面混合料]、CNS 15308[瀝青鋪面混合料用粗粒料]及 CNS 15309[瀝青鋪面混合料用細粒料]，正式將鋼爐渣(即轉爐石)納為瀝青混凝土之粒料來源之一，對於轉爐石應用於瀝青混凝土之成效及推廣具有肯定與提昇的正面價值。

一、前言

轉爐石比重大、粒形圓正且親油基甚佳，應用於瀝青混凝土材料時，相較於一般砂石粒料，在配合設計階段可明顯降低瀝青膠泥的建議用量，且具有工作性佳、易於夯實、穩定值高的特點，材料性質本屬優異。為更深入瞭解轉爐石應用於瀝青混凝土之特性，提供日後使用於道路鋪設時之依據與參考，並藉以推廣轉爐石之應用，達到資源再生利用與提昇道路工程品質之目的，本規劃以國內道路鋪面使用最為普遍之密級配瀝青混凝土，於配合設計作業上以轉爐石粗粒料取代一般砂石之粗粒料為瀝青混凝土組成材料，並與一般砂石粒料進行結果比對。

基本組成條件是以轉爐石粗粒料、一般細粒料、填縫料(石粉)及 AC-20 瀝青、CNS 14184 改質Ⅲ型瀝青為瀝青混合料之組成材料之一；另在相同級配規格條件下，以一般砂石粒料、填縫料(石粉)及 AC-20 瀝青、CNS 14184 改質Ⅲ型瀝青為瀝青混合料之組成材料之二，綜合探討密級配瀝青混凝土在轉爐石與一般粒料間之瀝青含量差異、配合設計各項結果的特性，及其對於瀝青混凝土品質的影響，藉以驗證瀝青混凝土配合設計作業使用轉爐石之效益。

二、配合設計組成

2.1 級配組成構想

為探討瀝青混凝土使用轉爐石取代粗粒料之成效，級配組成採用於相同級配規格中調配不同粗細之比例，且考量轉爐石親油性甚佳、可降低瀝青含量及粒形圓正的特性，配合設計後續之成效評估試驗，分別以建議瀝青含量為基準，使用不同的瀝青用量，且規劃施予不同的夯壓能量。

1. 以轉爐石粗粒料取代一般砂石粗粒料

- (1) 級配規格：以國內道路工程於密級配瀝青混凝土常用之級配規範 ASTM D3515，依其表 1 級配編號 D-4 之標稱最大粒徑為 19.0mm 級配規格。
- (2) 於 D-4 級配規格內，調整粗、細粒料之組合比例，配製成粗、中、細三個混合粒料級配。
- (3) 三個混合粒料級配各自進行配合設計作業，分別求取最佳瀝青含量(OAC)。
- (4) 三個混合粒料級配分別以各自的 OAC 及 OAC-0.3%、OAC-0.6%的瀝青用量，為後續之試驗條件。
- (5) 瀝青用量為 OAC 者，施以不同之夯壓能量夯製馬歇爾試體，夯打次數分別為於試體兩面各 35、75 及 100 下，進行滯留強度、間接張力、穩定值、流度值及摩擦係數等試驗。
- (6) 瀝青用量為 OAC-0.3%、OAC-0.6%者，施以正常之夯壓能量夯製馬歇爾試體(夯打次數為試體兩面各 75 下)，進行滯留強度、間接張力、穩定值、流度值及摩擦係數等試驗。

2. 一般砂石粒料組成

- (1) 使用與轉爐石粒料組成相同之級配規格。
- (2) 於級配規格內配製適切的 1 組混合粒料級配。
- (3) 混合粒料級配進行馬歇爾法之配合設計作業，求取最佳瀝青含量(OAC)，並以 OAC 及 OAC-0.3%、OAC-0.6%為後續之試驗條件。
- (4) 瀝青膠泥用量為 OAC 者，施以不同之夯壓能量夯製馬歇爾試體，夯壓能量分別為於試體兩面各 35、75 及 100 下，進行滯留強度、間接張力、穩定值、流度值及摩擦係數等試驗。
- (5) 瀝青用量為 OAC-0.3%、OAC-0.6%者，施以正常之夯壓能量夯製馬歇爾試體(夯打次數為試體兩面各 75 下)，進行滯留強度、間接張力、穩定值、流度值及摩擦係數等試驗。

密級配瀝青混凝土之試驗配置情形如表 1。

2.2 組成材料物性試驗

1. 粒料

粒料物性試驗包含下列項目：

- (1) 篩分析與小於 75 μ m 篩含量試驗。
- (2) 比重及吸水率試驗
- (3) 洛杉磯磨損試驗。
- (4) 健度試驗。
- (5) 破碎顆粒含量試驗。
- (6) 扁平粒料含量試驗。
- (7) 填縫料阿太堡指數試驗。

2. 瀝青

(1) AC-20 瀝青依據 AASHTO M226 項目進行試驗。

(2) 改質 III 型瀝青依據 CNS14184 項目進行試驗。

2.3 配合設計作業

依據美國瀝青學會 AIMS-2 辦理。

2.4 配合設計級配條件之代號

為便於試驗結果之分析彙整，不同之級配條件依下列方式編定其代號：

1. 密級配(轉爐石，AC-20，級配條件粗)：密-爐(20)粗
2. 密級配(轉爐石，AC-20，級配條件中)：密-爐(20)中
3. 密級配(轉爐石，AC-20，級配條件細)：密-爐(20)細
4. 密級配(轉爐石，改質 III 型，級配條件中)：密-爐(III)中
5. 密級配(一般粒料，AC-20，級配條件中)：密-普(20)中
6. 密級配(一般粒料，改質 III 型，級配條件中)：密-普(III)中

表 1 瀝青混凝土試驗項目配置表

級配規格	粒料組成	瀝青膠泥	混合粒料級配	配合設計 OAC	試驗條件 (瀝青用量)	夯壓能量 夯打次數	試驗條件 試驗項目
ASTM D3515 D-4	1.轉爐石 粗粒料 2.一般細 粒料 3.填縫料	AC-20	粗	OAC1	OAC1-0.3% OAC1 OAC1-0.6%	75 35、75、100 75	1.滯留強度 2.間接張力 3.摩擦係數 4.穩定值 5.流度值
		1.AC-20 2.CNS14184 改質 III 型	中	OAC2	OAC2-0.3% OAC2 OAC2-0.6%	75 35、75、100 75	
	AC-20	細	OAC3	OAC3-0.3% OAC3 OAC3-0.6%	75 35、75、100 75		
	1.一般砂 石粒料 2.填縫料 (石粉)	1.AC-20 2.CNS14184 改質 III 型	中	OAC4	OAC4-0.3% OAC4 OAC4-0.6%	75 35、75、100 75	

三、配合設計結果及分析

3.1 物性試驗結果

1. 瀝青膠泥

(1) AC-20 瀝青試驗結果如表 2。

(2) 改質 III 型瀝青試驗結果如表 3。

表 2 AC-20 瀝青試驗結果

試驗項目 (AASHTO M226)	試驗值	規範值	試驗方法
絕對黏度，60°C，poises	1904	2000±400	AASHTO T202
動黏度，135°C，cst	567	≥300	AASHTO T201
針入度，25°C，100g，5s，0.1mm	63	≥60	AASHTO T49
閃火點，°C	243	≥232	AASHTO T48
溶解度(二氯甲烷)，%	99.8	≥99.0	AASHTO T44
轉動薄膜烘箱加熱損失率 163°C，5 小時，%	0.2	≤0.5	AASHTO T179
熱損失後絕對黏度 60°C， poises，	2464	≤8000	AASHTO T202
熱損失後延性 25°C， 5cm/min，cm	50+	≥50	AASHTO T51

表 3 CNS 14184 改質 III 型瀝青試驗結果

試驗項目	試驗值	規範值	試驗方法
針入度，25°C，100g，5s，0.1mm	43	≥35	AASHTO T49
絕對黏度，60°C，poises	11584	≥8000	AASHTO T202
動黏度，135°C，cst	735	≤3000	AASHTO T201
閃火點，°C	253	≥232	AASHTO T48
溶解度(二氯甲烷)，%	99.7	≥99.0	AASHTO T44
離析試驗，°C	1.5	—	CNS 2486
瀝青均勻性質	不含水份，加熱至 175°C 時不起泡沫	—	CNS 14184
滾動薄膜烘箱加熱後，彈性回復 率，25°C，10cm，%	80	≥70	CNS 14250 ASTM D5892
滾動薄膜烘箱加熱後，針入度， 4°C，200g，60s，0.1mm	25	≥10	CNS 14250 AASHTO T49

2. 粒料

(1) 轉爐石

以轉爐石粗粒料取代一般砂石粗粒料之級配依 ASTM D3515 D-4 級配規格配製分為粗、中、細等三種混合粒料級配，粒料物性試驗係依其配合設計工作拌和公式進行，結果如表 4、表 5、表 6 所示。

(2) 一般砂石

一般粒料依 ASTM D3515 D-4 級配規格配製一種混合粒料級配，粒料物性試驗依其配合設計工作拌和公式進行，結果如表 7 所示。

表 4 使用轉爐石粒料之物性試驗結果(密-爐(20)粗)

試驗項目	試驗值	規範值	試驗方法	
粗粒料洛杉磯磨損值%(B級 500 轉)	16	≤40	AASHTO T96	
粗粒料破碎顆粒含量%(二面破碎)	100	≥75	ASTM D5821	
含砂當量(%)	82	≥50	AASHTO T176	
健性試驗損耗率(%) (硫酸鈉溶液五循環)	粗粒料： 細粒料：	0.0 1.5	≤12 ≤15	AASHTO T104
粗粒料扁平率%(寬：厚=3：1)	0.3	≤15	ASTM D4791	
粗粒料細長率%(長：寬=3：1)	0.0	≤15		
填縫料阿太堡指數	LL：	—	—	AASHTO T89
	PI：	NP	≤4	AASHTO T90

表 5 使用轉爐石粒料之物性試驗結果(密-爐(20)中 & 密-爐(III)中)

試驗項目	試驗值	規範值	試驗方法	
粗粒料洛杉磯磨損值%(B級 500 轉)	17	≤40	AASHTO T96	
粗粒料破碎顆粒含量%(二面破碎)	100	≥75	ASTM D5821	
含砂當量(%)	79	≥50	AASHTO T176	
健性試驗損耗率(%) (硫酸鈉溶液五循環)	粗粒料： 細粒料：	0.2 1.3	≤12 ≤15	AASHTO T104
粗粒料扁平率%(寬：厚=3：1)	0.0	≤15	ASTM D4791	
粗粒料細長率%(長：寬=3：1)	0.0	≤15		
填縫料阿太堡指數	LL：	—	—	AASHTO T89
	PI：	NP	≤4	AASHTO T90

表 6 使用轉爐石粒料之物性試驗結果(密-爐(20)細)

試驗項目	試驗值	規範值	試驗方法	
粗粒料洛杉磯磨損值%(B級 500 轉)	17	≤40	AASHTO T96	
粗粒料破碎顆粒含量%(二面破碎)	100	≥75	ASTM D5821	
含砂當量(%)	74	≥50	AASHTO T176	
健性試驗損耗率(%) (硫酸鈉溶液五循環)	粗粒料： 細粒料：	0.2 1.9	≤12 ≤15	AASHTO T104
粗粒料扁平率%(寬：厚=3：1)	0.0	≤15	ASTM D4791	
粗粒料細長率%(長：寬=3：1)	0.0	≤15		
填縫料阿太堡指數	LL：	—	—	AASHTO T89
	PI：	NP	≤4	AASHTO T90

表 7 使用一般粒料之物性試驗結果(密-普(20)中 & 密-普(III)中)

試驗項目	試驗值	規範值	試驗方法
粗粒料洛杉磯磨損值(%) (B 級 500 轉)	18	≤40	AASHTO T96
粗粒料破碎顆粒含量(%) (二面破碎)	96	≥75	ASTM D5821
含砂當量(%)	86	≥50	AASHTO T176
健性試驗損耗率(%) (硫酸鈉溶液五循環)	粗粒料：	1.1	AASHTO T104
	細粒料：	2.0	
粗粒料扁平率(%) (寬：厚=3：1)	2.5	≤15	ASTM D4791
粗粒料細長率(%) (長：寬=3：1)	0.0	≤15	
填縫料阿太堡指數	LL：	—	AASHTO T89
	PI：	NP	≤4 AASHTO T90

註：表 4、5、6、7 規範值係依據工程會施工綱要規範第 02796 章密級配改質瀝青混凝土鋪面(v30)。

3.2 配合設計結果

1. 混合粒料級配

使用轉爐石粒料之三種混合粒料級配如表 8、粒徑分布曲線如圖 1；使用一般粒料之一種混合粒料級配如表 9、粒徑分布曲線如圖 2；四種混合粒料級配之組合比較如圖 3。

2. 配合設計結果

密級配使用轉爐石及一般粒料之配合設計結果彙整如表 10。

表 8 使用轉爐石之混合粒料級配

篩號	混合粒料級配			ASTM D3515 D-4 規範	各篩號全距
	密-爐(20) 粗	密-爐(20)中 密-爐(III)中	密-爐(20)細		
25mm(1 in)	100	100	100	100	0
19mm(3/4in)	95	97	97	90-100	2
12.5mm(1/2in)	67	78	81	-	14
9.5mm(3/8in)	57	67	75	56-80	18
4.75mm(No.4)	34	44	57	35-65	13
2.36mm(No.8)	21	29	40	23-49	19
1.18mm(No.16)	16	22	30	-	14
0.6mm(No.30)	11	16	21	-	10
0.3mm(No.50)	7	10	13	5-19	6
0.15mm(No.100)	5	7	9	-	4
0.075mm(No.200)	3.2	4.8	5.8	2.0-8.0	2.6
轉爐石占混合粒料 比例(重量比)(%)	75	64	49	—	—

表 9 使用一般粒料之混合粒料級配

篩 號	混合粒料級配		ASTM D3515
	密-普(20)中 & 密-普(III)中		D-4 規範
25mm(1 in)	100		100
19mm(3/4in)	94		90-100
12.5mm(1/2in)	81		-
9.5mm(3/8in)	71		56-80
4.75mm(No.4)	53		35-65
2.36mm(No.8)	34		23-49
1.18mm(No.16)	25		-
0.6mm(No.30)	17		-
0.3mm(No.50)	10		5-19
0.15mm(No.100)	7		-
0.075mm(No.200)	4.5		2.0-8.0

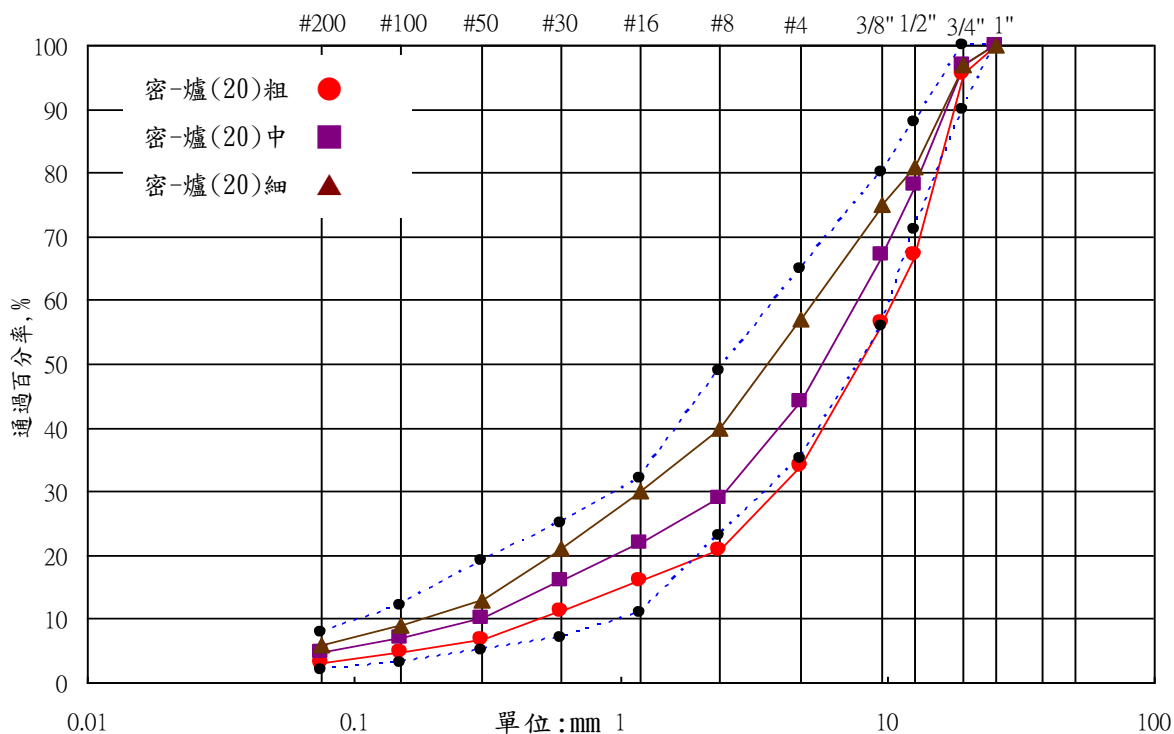


圖 1 使用轉爐石之混合粒料級配粒徑分布曲線

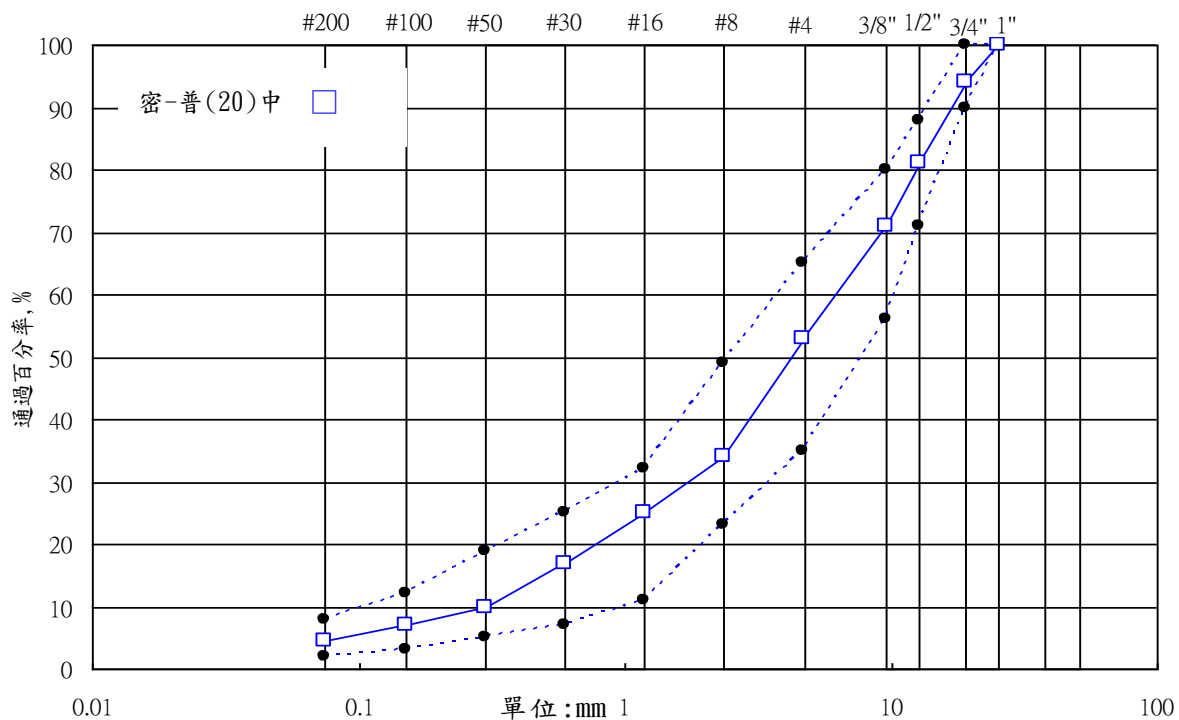


圖 2 使用一般粒料之混合粒料級配粒徑分布曲線

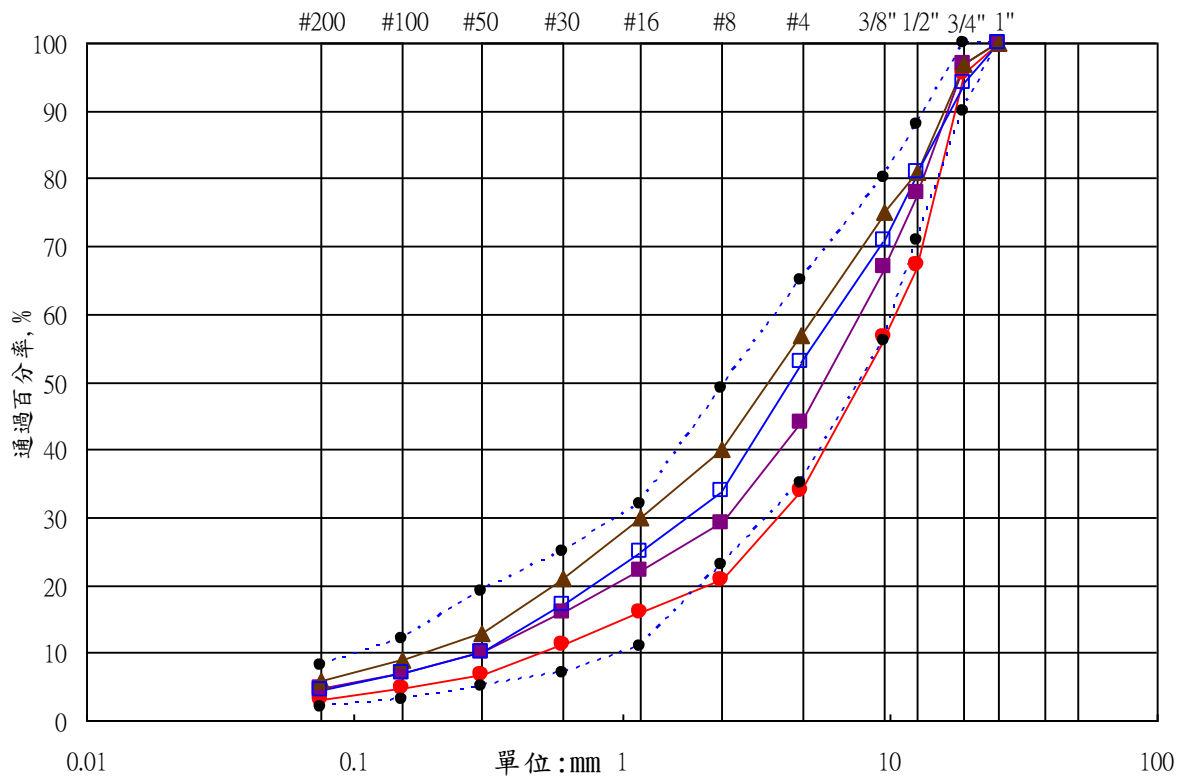


圖 3 使用 4 種混合粒料級配粒徑分布曲線

表 10 密級配配合設計結果值

項目	密-爐 (20)粗	密-爐 (20)中	密-爐 (20)細	密-爐 (III)中	密-普 (20)中	密-普 (III)中	AIMS-2 規範值
混合粒料 容積比重	3.133	3.037	2.910	3.037	2.600	2.600	—
混合粒料 有效比重	3.238	3.144	3.057	3.140	2.650	2.646	—
瀝青比重	1.032	1.032	1.032	1.031	1.032	1.031	—
吸油率(%)	1.068	1.156	1.705	1.114	0.749	0.689	—
建議瀝青含量(%) (對混合料重量比)	4.2	4.4	4.6	4.3	5.0	4.9	—
建議瀝青含量(%) (對混合料容積比)	11.75	11.93	11.97	11.69	11.71	11.50	—
於建議瀝青含量之相對應瀝青混合料性質							
空隙率(%)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3-5
VMA(%)	12.8	12.8	11.7	12.6	13.7	13.7	≥13
VFA(%)	68	69	67	68	72	71	65-75
穩定值(lbf)	3160	4470	4660	5180	3140	4620	≥1800
流度(0.01in)	11	10	10	13	11	12	8-14
單位重(kg/m ³)	2852	2768	2692	2774	2360	2358	—

3.3 配合設計結果分析

密級配瀝青混凝土配合設計之建議瀝青含量選擇方式依照 AIMS-2(第六版)所建議之以空隙率 4.0% 所對應之瀝青含量為選擇基準，藉單一化條件，探討不同級配組成之配合設計結果於同一基準上的差異，分述如后。

1. 建議瀝青含量

由圖 4 可知使用轉爐石之瀝青混合料確實較一般粒料更能節省瀝青用量，由本配合設計結果，相同等級級配之瀝青用量、於重量基礎上可節省達 0.6%(對混合料)。

轉爐石在重量基礎上可節省瀝青用量，係因轉爐石比重高且親油性佳，可有效吸附瀝青，並非減少單位瀝青用量而損及耐久性的要求，若將瀝青混凝土以容積為基礎計算瀝青用量，可得使用轉爐石密級配之單位容積瀝青用量仍是高於一般粒料約 0.2%~0.4%，如圖 5。

2. 試體單位重

密級配之 6 組配合設計之於建議瀝青含量所對應之試體單位重差異如圖 6 所示，其趨勢與組成材料之比重大小相符，屬於使用轉爐石之級配，其級配較粗者亦高於較細者。

3. 吸油率

由圖 7 可知，轉爐石之吸油率明顯高於一般粒料，其親油性可再次確認。

4. 穩定值與流度值

密級配使用轉爐石於級配越細者，其穩定值越高，即在同一個級配規格條件下，級

配越緻密者，其組成架構之抗荷重能力越大；在相同等級之級配條件下，改質Ⅲ型瀝青的穩定值高於 AC-20 乃屬必然之合理現象，對轉爐石而言，更為具體的特徵是相同等級之級配條件及瀝青材料，轉爐石所獲得的穩定值均高於一般粒料，如圖 8。

流度值於不同組成條件下則無明顯之差異或趨勢，如圖 9。

5. VMA 及 VFA

VMA 為粒料間孔隙，其值與試體單位重及混合料容積比重之比值呈反比關係，若粒料形狀特性容易產生較緻密之組成架構，則獲得之試體單位重越大，即 VMA 越小，在密級配配合設計領域，當 VMA 不足時，調整級配使之偏粗條件，或選擇使用破碎顆粒及稜角率較高的粒料，皆是避免試體過度緻密之考量。此外，粒料吸油率較高時，有效瀝青含量較低，亦容易導致 VMA 偏低的現象。

由表 10 可發現轉爐石之級配組成於吸油率明顯高於一般粒料，再比較其試體單位重及混合料容積比重之比值，轉爐石平均高於一般粒料約 8.5%，此等特性使轉爐石應用於密級配瀝青混凝土時，VMA 會較一般砂石粒料為低的現象。

又因為密級配使用轉爐石之 VMA 偏低，在空隙率設定為 4.0% 之基準下，其 VFA 必然較一般粒料低，但仍位於規範之容許範圍內。如圖 10 及圖 11。

3.4 配合設計後續試驗結果分析

密級配瀝青混凝土配合設計之後續試驗條件所得之結果彙整如表 11，就其試驗結果分析分述如后。

1. 穩定值

轉爐石組成條件之偏粗級配因緻密程度較差，穩定值較中及偏細級配組成條件為低，惟仍達 3000 lbf 以上，明顯高於一般粒料，且使用 AC-20 的轉爐石中級配穩定值可達 4000 lbf，偏細級配達 4500 lbf，均顯示轉爐石具有高於一般粒料強度的特性，單就穩定值因素而論，使用改質瀝青及屬於中或偏細級配之較緻密的轉爐石組成條件是較佳且優於其他組合條件的使用方式。

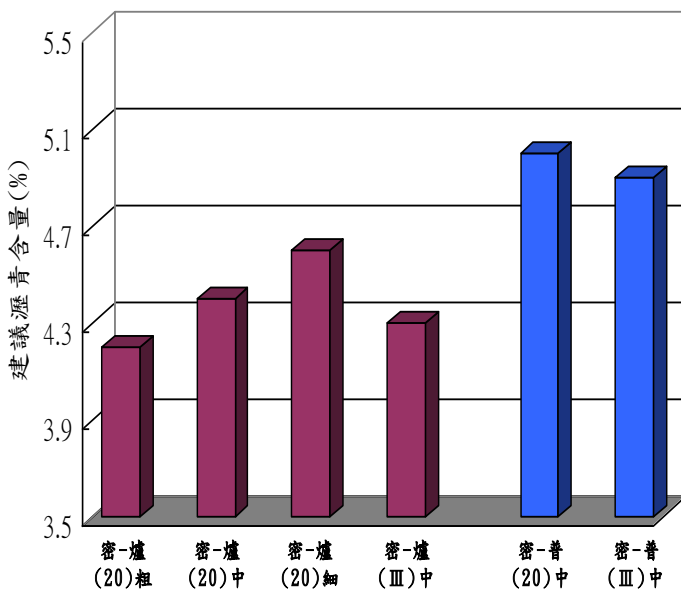


圖 4 建議瀝青含量(重量比)

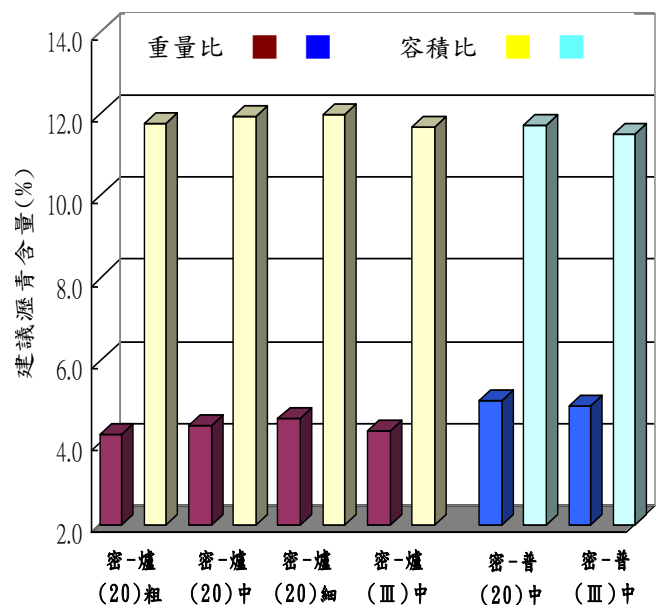


圖 5 建議瀝青含量比較

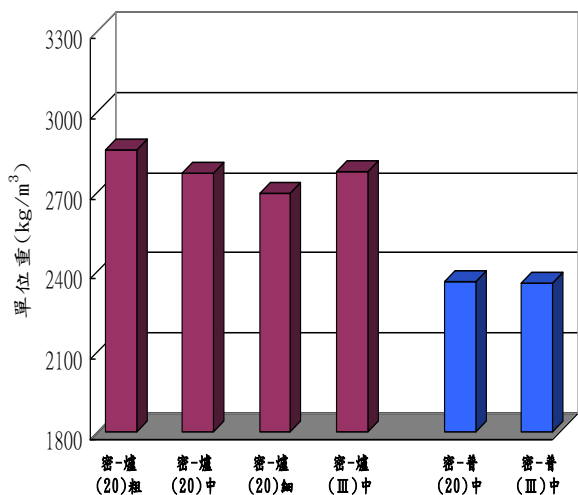


圖 6 試體單位重

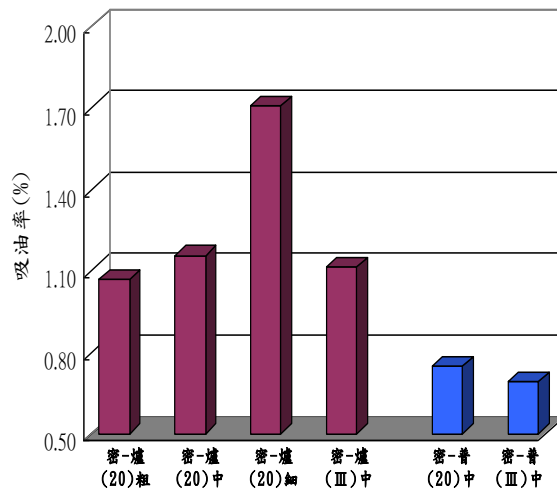


圖 7 吸油率

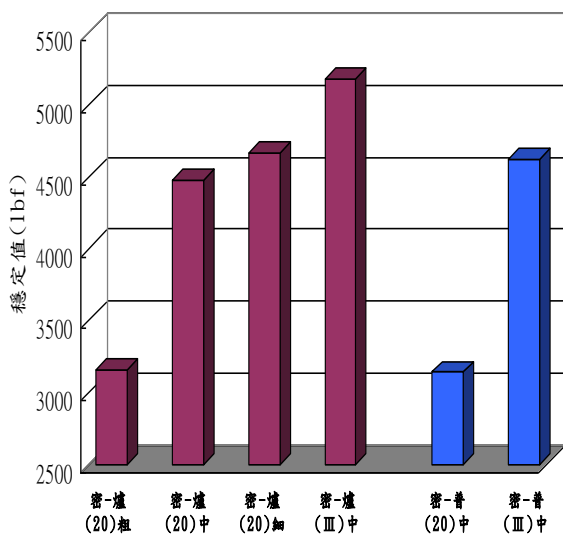


圖 8 穩定值

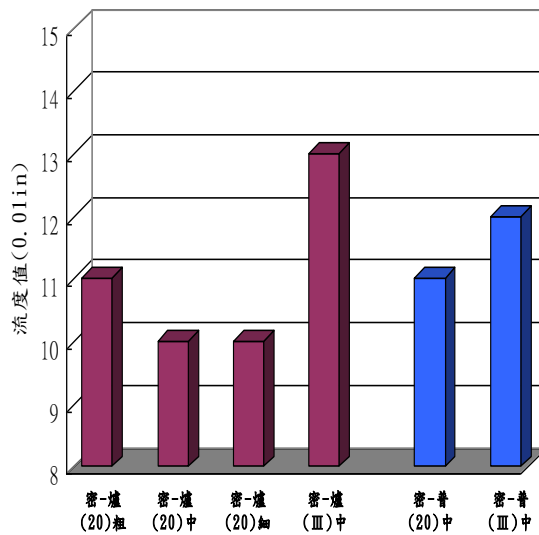


圖 9 流度值

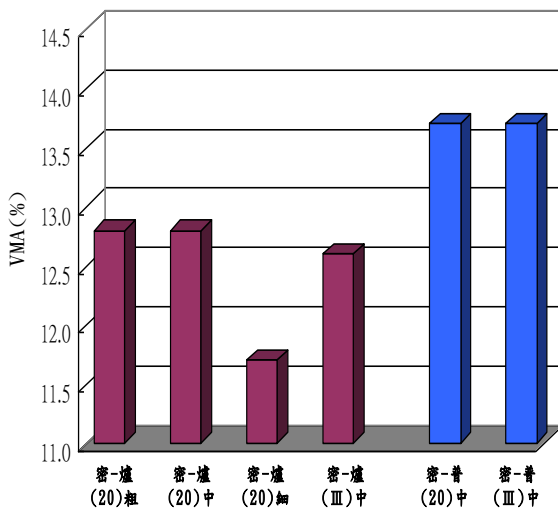


圖 10 VMA

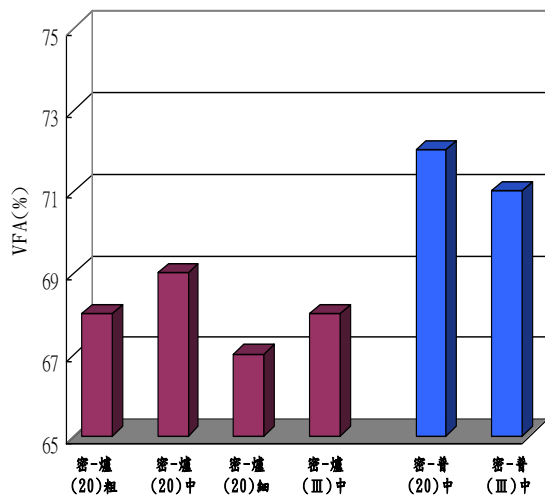


圖 11 不同配比之 VMA 比較

表 11 各試驗條件試驗結果彙整表

級配代號	瀝青用量 (%)	夯打次數	穩定值 (lbf)	流度值 (0.01in)	滯留強度 (%)	間接張力 (psi)	磨擦係數 (BPN)	空隙率 (%)	壓實度 (%)
密-爐(20)粗	3.6 (OAC-0.6%)	75	3102	13	70.7	101	74	6.9	
	3.9 (OAC-0.3%)	75	3242	11	76.9	108	73	3.6	
	4.2 (OAC)	35	1968	12	72.5	81	68	4.8	98.5
		75	3385	12	86.2	100	76	3.4	100.0
		100	3453	11	86.4	126	72	1.6	101.9
密-爐(20)中	3.8 (OAC-0.6%)	75	3938	10	80.7	137	77	7.2	
	4.1 (OAC-0.3%)	75	3881	11	84.9	131	74	3.9	
	4.4 (OAC)	35	2407	12	75.2	97	74	5.9	97.8
		75	4288	10	79.3	144	75	3.8	100.0
		100	4278	10	91.2	151	75	2.0	101.8
密-爐(20)細	4.0 (OAC-0.6%)	75	4329	10	78.3	148	65	8.7	
	4.3 (OAC-0.3%)	75	4603	12	87.6	142	64	4.7	
	4.6 (OAC)	35	2488	11	77.3	111	65	7.1	96.7
		75	4352	11	88.8	156	72	3.9	100.0
		100	5332	11	84.5	167	74	2.2	101.8
密-爐(III)中	3.7 (OAC-0.6%)	75	4356	14	77.3	179	80	7.4	
	4.0 (OAC-0.3%)	75	4715	13	94.2	207	73	4.8	
	4.3 (OAC)	35	2986	16	81.8	135	70	6.0	98.3
		75	4149	13	88.7	180	75	4.3	100.0
		100	5942	12	86.9	230	81	3.2	101.1
密-普(20)中	4.4 (OAC-0.6%)	75	2381	10	79.4	110	71	6.8	
	4.7 (OAC-0.3%)	75	2645	10	82.8	116	72	3.6	
	5.0 (OAC)	35	1815	13	75.9	75	69	6.6	96.8
		75	2761	12	87.8	108	75	3.5	100.0
		100	2761	10	83.9	119	72	1.6	101.9
密-普(III)中	4.3 (OAC-0.6%)	75	3580	14	77.2	159	72	8.0	
	4.6 (OAC-0.3%)	75	3736	13	89.7	168	79	5.3	
	4.9 (OAC)	35	2685	19	75.2	121	89	7.4	96.8
		75	3976	14	87.8	153	79	4.3	100.0
		100	4596	14	84.1	164	79	3.5	100.8

穩定值關係如圖 12 及圖 13，轉爐石組成條件之「密-爐(20)中及密-爐(20)細」於瀝青含量 OAC-0.3% 之穩定值高於瀝青含量為 OAC 者，其餘二者轉爐石組成條件於瀝青含量 OAC-0.3% 的穩定值較之 OAC 者並無顯著降低，且以實務應用規範之 1800lbf 基本要求而論，此等穩定值已屬優異，顯示轉爐石使用於密級配瀝青混凝土、於現行配合設

計機制所得之建議瀝青含量具有與一般粒料間差異的調整空間。

轉爐石組成條件之偏粗級配因緻密程度較差，穩定值較中及偏細級配組成條件為低，惟仍達 3000 lbf 以上，明顯高於一般粒料，且使用 AC-20 的轉爐石中級配穩定值可達 4000 lbf，偏細級配達 4500 lbf，均顯示轉爐石具有高於一般粒料強度的特性，單就穩定值因素而論，使用改質瀝青及屬於中或偏細級配之較緻密的轉爐石組成條件是較佳且優於其他組合條件的使用方式。

馬歇爾試體於密級配重交通量之標準夯打次數為 75 下，於夯打次數為 100 下之過度夯實的情形，部分級配組成條件之穩定值繼續上揚，部分則無明顯差異，顯示粒料組成架構在過度夯實的情形下，未必可達到強度的提昇；夯打 35 下為壓實度較低者，其穩定值確實較低，但是即使是最低值的「密-普(20)中」組成條件，也達 1800lbf 以上，仍高於規範值；於轉爐石中夯打 35 下之穩定值最低者為「密-爐(20)粗」，穩定值為 1968lbf，最高者為「密-爐(III)中」，穩定值為 2968lbf，另二者則逾 2400lbf，接近一般粒料之「密-普(20)中」組成條件於夯打 75 下之穩定值，顯示轉爐石粒料應用於瀝青混凝土時，在低壓實度條件下，其穩定值更勝要求且明顯優於一般粒料。

2. 流度值

流度值與馬歇爾試體內部粒料組成架構具有高度的關聯性，各種組合方式之級配條件於流度值並無明顯的趨勢，惟均符合規範要求。如圖 14 及圖 15。

夯打次數 75 下與 100 下之流度值結果基本上大致相同，正常夯實與過度夯實造成的變形量並無明顯差異，夯打 35 下的流度值則明顯偏高，於一般粒料的「密-普(III)中、密-爐(III)中」組成條件，流度值已逾越規範上限，在工程實務上，此種現象屬於壓實不足、易生變形，而轉爐石的四種組成條件雖然流度值亦高於正常夯實者，但皆低於對應之一般粒料組成條件且部分並未超過規範上限，分析原因係轉爐石粒形圓正易於壓實，夯打 35 下所得的壓實度已高於一般粒料於相同條件下的壓實度，故變形量亦相對較低，顯示轉爐石不易因壓實不足而產生過大的變形量。

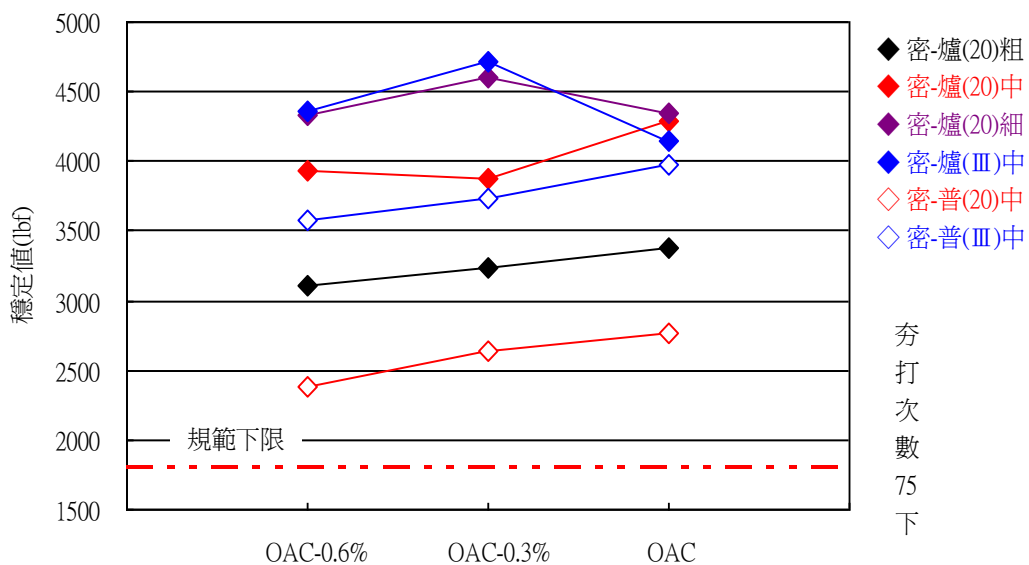


圖 12 各組成條件之穩定值試驗結果

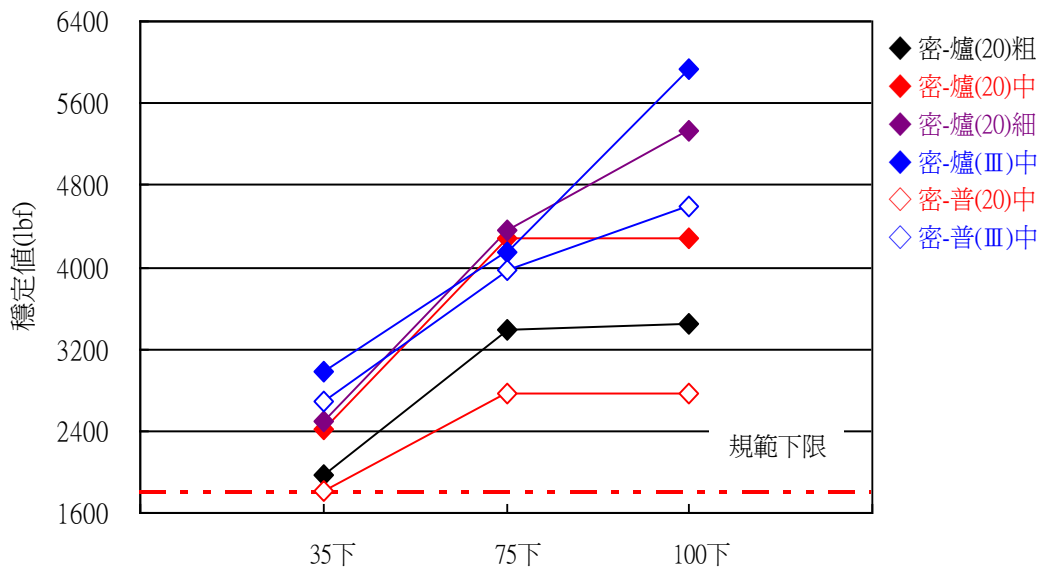


圖 13 各組成條件於不同夯打次數之穩定值試驗結果

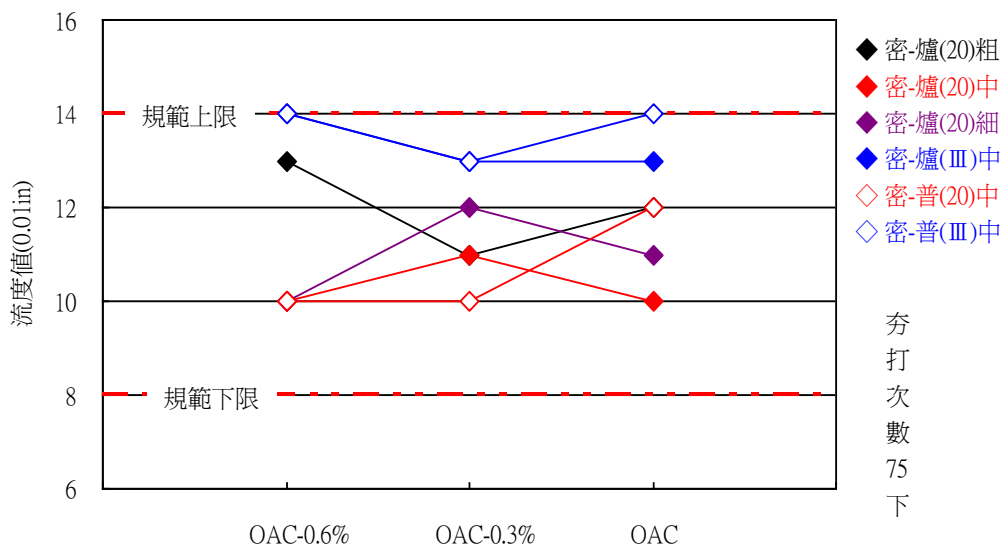


圖 14 各組成條件之流度值試驗結果

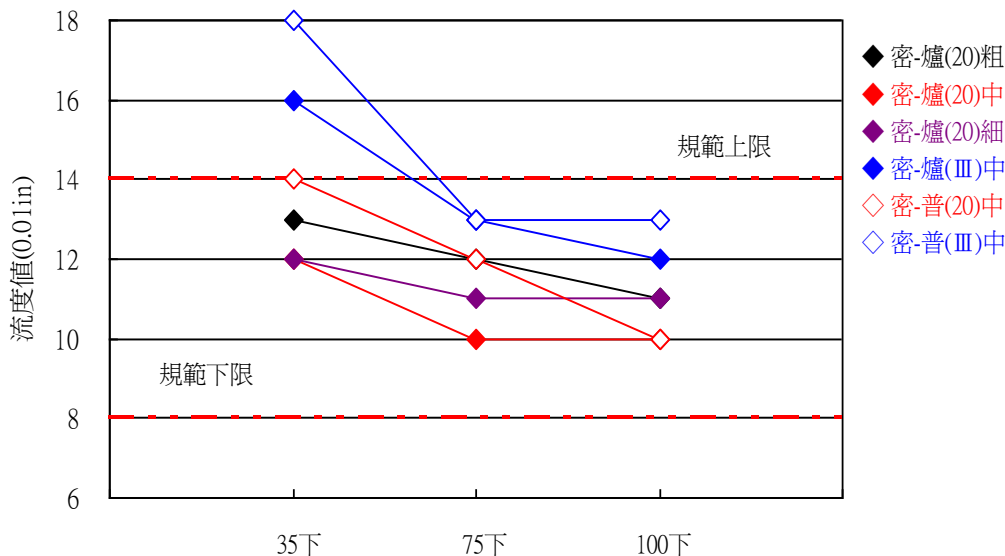


圖 15 各組成條件於不同夯打次數之流度值試驗結果

3. 滯留強度

如圖 16 及圖 17，除「密-爐(20)粗」組成條件之外，轉爐石之組成於瀝青含量 OAC-0.3%之滯留強度具有高於瀝青含量 OAC 者的趨勢，此與穩定值的現象有相同的意涵；瀝青含量 OAC-0.6%之滯留強度近於或低於現行施工規範常用之 75%合格值，佐證過低的瀝青含量確實不利於抵抗水份浸害，表示現行的配合設計機制所得之建議瀝青含量值對於轉爐石或一般粒料應無大幅調整之需要。

滯留強度高低依序為「密-爐(III)中」、「密-普(III)中」、「密-爐(20)細」、「密-爐(20)中」、「密-普(20)中」、「密-爐(20)粗」，對於抵抗水份浸害影響而言，改質瀝青如預期的優於 AC-20，轉爐石則以中或偏細級配之較緻密組合條件優於他種組合方式，但是瀝青種類的影响程度顯然高於粒料種類。

在夯打能量方面，除「密-爐(20)中」組成條件外，夯打次數 100 下之滯留強度並未高於 75 下者，甚至有部分降低的現象，顯示過度壓實未必有利於抵抗水份浸害的能力；夯打次數 35 下之滯留強度較低則是預期的現象，除「密-爐(20)粗」組成條件於夯打 35 下之滯留強度低於一般施工規範的 75%外，其餘組成仍高於 75%，轉爐石的表現仍然優於一般粒料，就施工實務分析，達到規範壓實度之瀝青混凝土鋪面，對於抵抗水份浸害的影響應可符合原配合設計階段的試驗成果與規範要求。

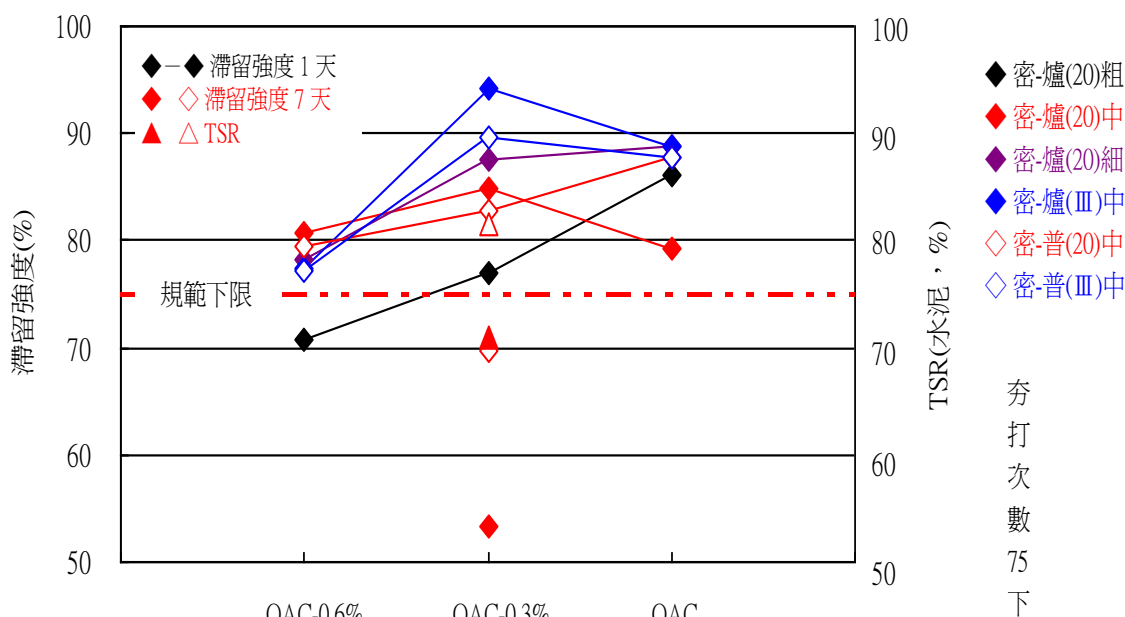


圖 16 各組成條件之滯留強度與 TSR 試驗結果

4. 間接張力

間接張力為瀝青混凝土抵抗交通量荷重的指標之一，在相同組成條件下，間接張力與壓實度成正比，試驗結果顯示瀝青黏結材的影響程度高於粒料與級配種類，而粒料種類仍是轉爐石組成者較佳，級配種類方面則是越緻密之級配，間接張力也越大，反之，緻密性越差的級配，其間接張力值落差越大，整體而言以「密-爐(III)中」最高，「密-爐(20)細」及「密-普(III)中」次之。

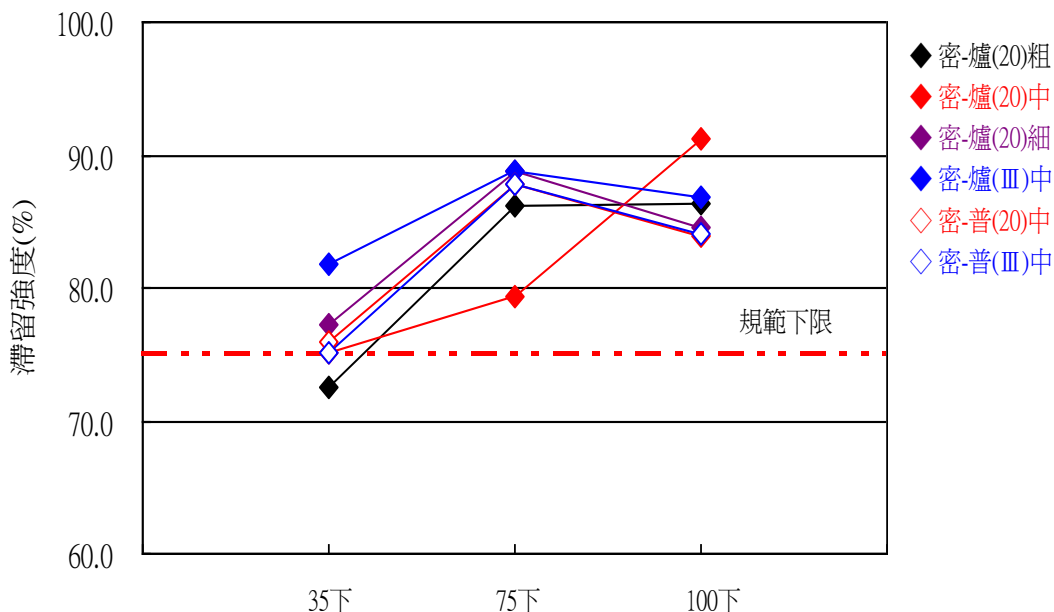


圖 17 各組成條件於不同夯打次數之滯留強度試驗結果

至於瀝青含量之影響，雖然部份組成之 OAC-0.3% 的間接張力高於 OAC，但整體而言，此趨勢並不顯著，且 OAC-0.6% 之間接張力亦不遜於另二種較高的瀝青含量，表示瀝青含量高低對於新完成的瀝青混凝土鋪面、初期尚不會造成間接張力明顯的落差。

與壓實度密切相關的夯打次數方面，夯打次數越多者，間接張力越大，表示壓實度越大者，確實可得到較大的間接張力，轉爐石與一般粒料在夯打能量所展現的特性趨勢相同，惟仍應搭配其他指標與耐久性合併考量。試驗結果分析圖如圖 18 及圖 19。

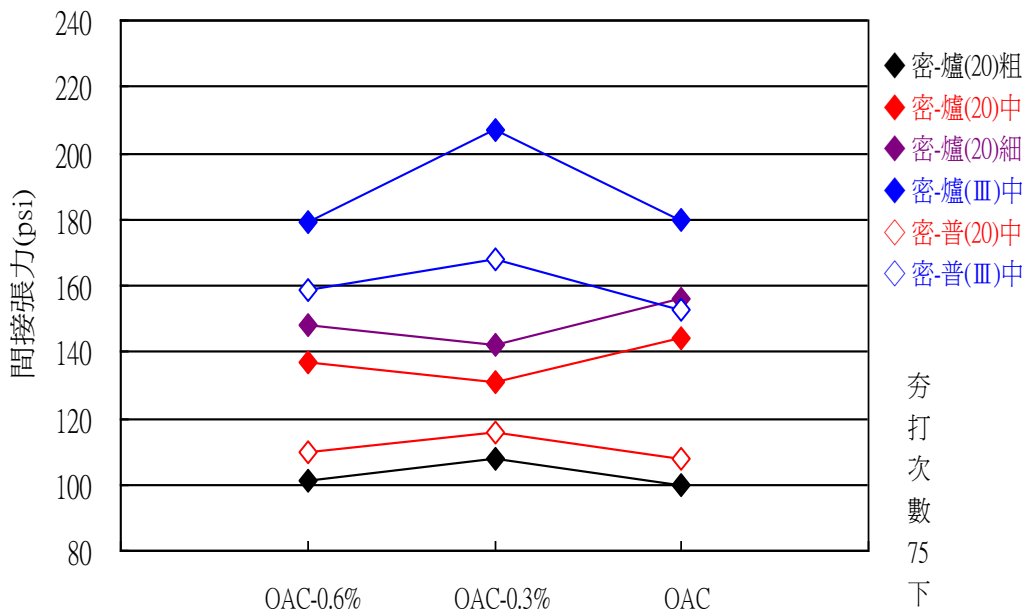


圖 18 各組成條件之間接張力試驗結果

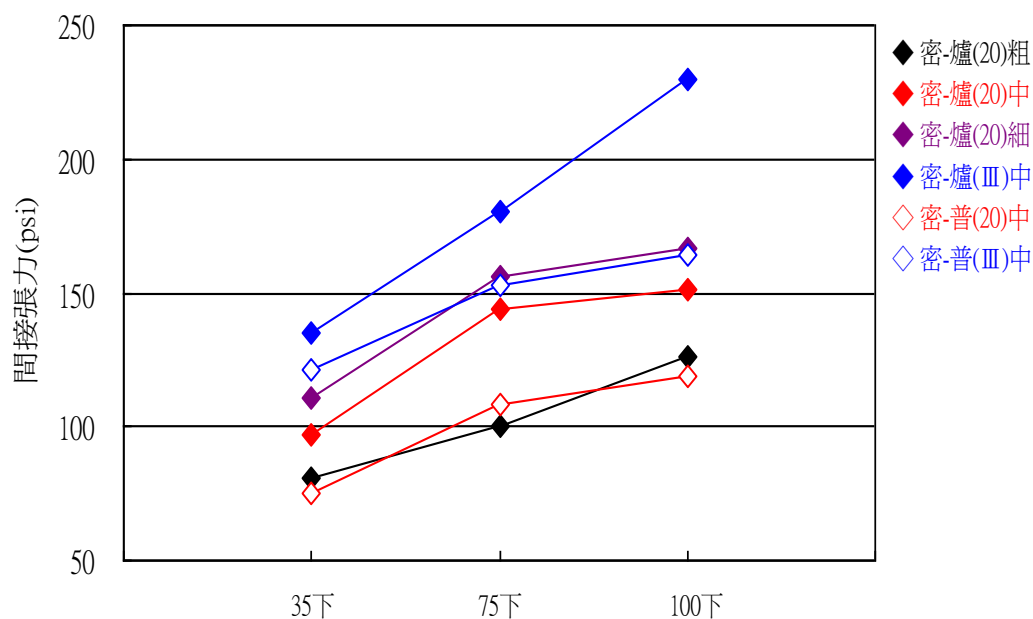


圖 19 各組成條件於不同夯打次數之間接張力試驗結果

5. 摩擦係數

摩擦係數為鋪面安全中的重要一環，由圖 20 及圖 21 顯示組成條件之「密-爐(20)細」的摩擦係數較低，「密-普(III)中」最高，應是試體表面粒料架構之因所致，若以粒料種類分析結果趨勢，除偏細級配之組成外，轉爐石與一般粒料於瀝青含量 OAC-0.3% 與 OAC 間之差異不大，均可達到 0.8μ 以上，且二種瀝青含量亦頗為接近，一般公路鋪面於新鋪設完成時的摩擦係數約在 0.66μ 以上，高速公路於鋪設摩擦層(OGFC)後約可達 0.77μ 以上，以鋪面安全而言，轉爐石各項組成條件於摩擦係數皆可符合要求。

部分組成級配條件於瀝青含量 OAC-0.6% 之摩擦係數高於另二種瀝青含量，研判應該是因為粒料受包覆情形較低所致，惟過低的瀝青含量不利於瀝青混凝土耐久性。若以瀝青種類而論，改質瀝青基本上仍然優於 AC-20。

在夯打能量方面，多數組成條件於夯打次數越多者，其摩擦係數呈現向上成長的趨勢，不同的是「密-爐(20)粗」及「密-普(20)中」組成條件之夯打 75 下摩擦係數高於夯打次數 100 下者，但與其他呈現正相關成長的組成條件比較，此等夯打 75 下與 100 下間的成長或稍有下降的幅度並不顯著，研判係試體表面粒料組成情形所致。

可確定的是，雖然轉爐石粒形圓正，使用於瀝青混凝土鋪面時，在壓實度規範條件之上的摩擦係數是沒有疑慮的。

6. 空隙率

空隙率是密級配配合設計選擇建議瀝青含量的主要依據，依試驗結果顯示，無論是轉爐石或一般粒料，瀝青含量 OAC-0.6% 之空隙率均高於配合設計規範上限 5.0% 甚多，顯示依據現行配合設計準則所建議之 OAC 並無可高達 0.5% 以上的調降空間，於瀝青含量 OAC-0.3% 者，除「密-普(III)中」組成條件之空隙率高於 5.0% 外，其餘組成條件之空隙率皆位於 3.0~5.0% 間，且與瀝青含量 OAC 之差異不大，就轉爐石材料而論，前述多項試驗結果指標於瀝青含量 OAC-0.3% 所獲致的成果並不低於、甚至優於 OAC 者，轉

爐石組成條件所對應之空隙率約界於 3.6~4.8，因此依據現行配合設計作業於選擇建議瀝青含量時，採用低於原建議 OAC 瀝青含量 0.3% 的瀝青含量，除進一步節省瀝青用量外，可獲致平均優於 OAC 之對應性質且其對應之空隙率亦合於規範範圍。分析圖如圖 22。

在夯打能量方面，由圖 23 所示結果很明確可知，過度壓實之 100 下與壓實不足之 35 下之夯打能量均不利於瀝青混合料之空隙率組成，以趨勢而言，正常夯打能量 75 下可獲得較符合的空隙率結果，且若以空隙率 4.0±0.5% 之配合設計選擇建議瀝青含量之原則，夯打次數約界於 75±2 下間，就密級配條件，轉爐石之配合設計夯打次數於台灣地區最常使用之重交通量，75 下應是合於材料特性的能量，並無調整之需要性。

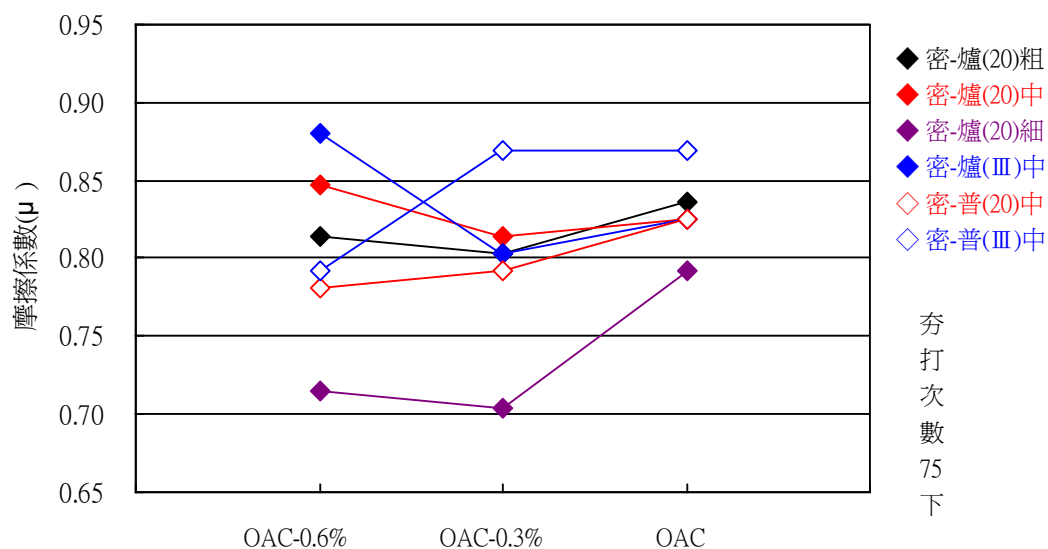


圖 20 各組成條件之摩擦係數試驗結果

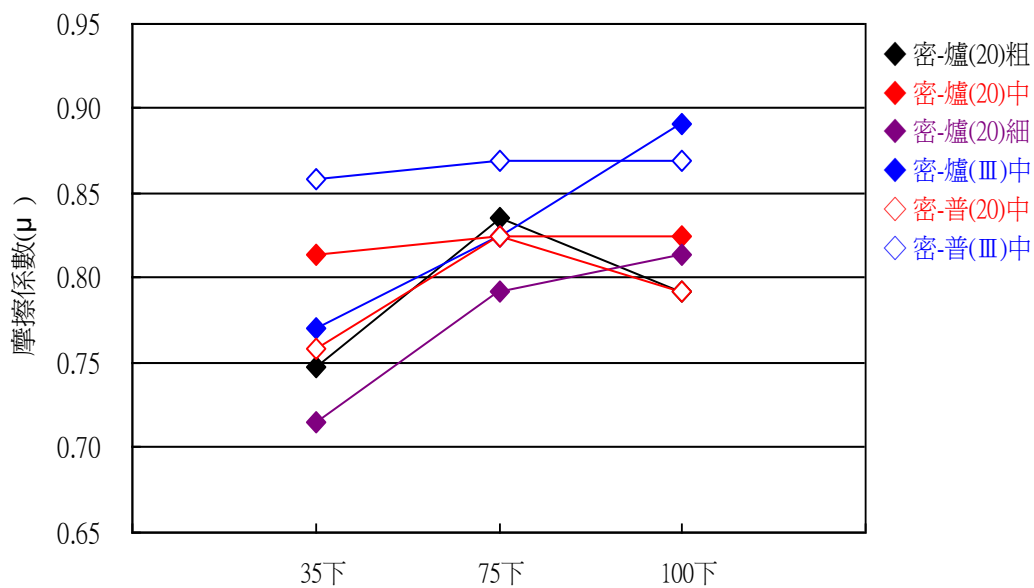


圖 21 各組成條件於不同夯打次數之摩擦係數試驗結果

7. VMA 之影響

轉爐石因粒形圓正、易於壓實，使用於密級配瀝青混凝土常導致 VMA 較低的現象，但依配合設計結果所進行之各項試驗條件，轉爐石組成條件展現之性質多優於一般粒料，於摩擦係數絕大多數大於 0.80μ ，即使是偏細組成條件之「密-爐(20)細」亦達至少 0.70μ 以上，就鋪面安全所需之摩擦係數而言，皆無疑慮，因之，轉爐石使用於密級配瀝青混凝土雖易導致 VMA 不足，惟此 VMA 不足現象並未減損其優良性質之展現，且多數皆優於一般粒料。

依研究結果，轉爐石使用於密級配瀝青混凝土之關鍵因素在於宜使用較高黏度之瀝青黏結材及相同規格下之較緻密組成，可現極佳的性質，至於 VMA 之略顯不足並未造成性質之降低，亦不致構成使用轉爐石之考量要件。

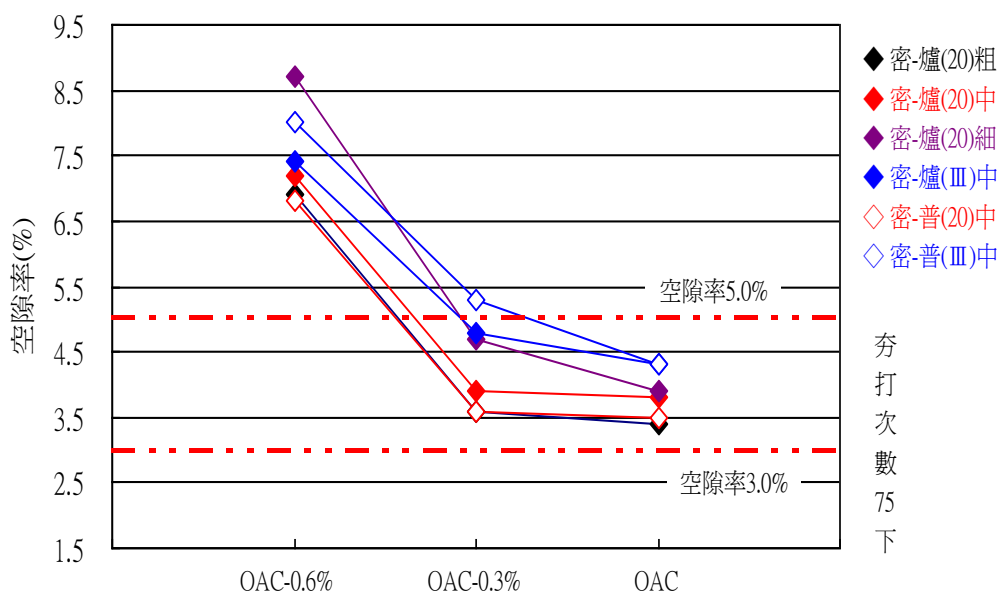


圖 22 各組成條件之空隙率結果

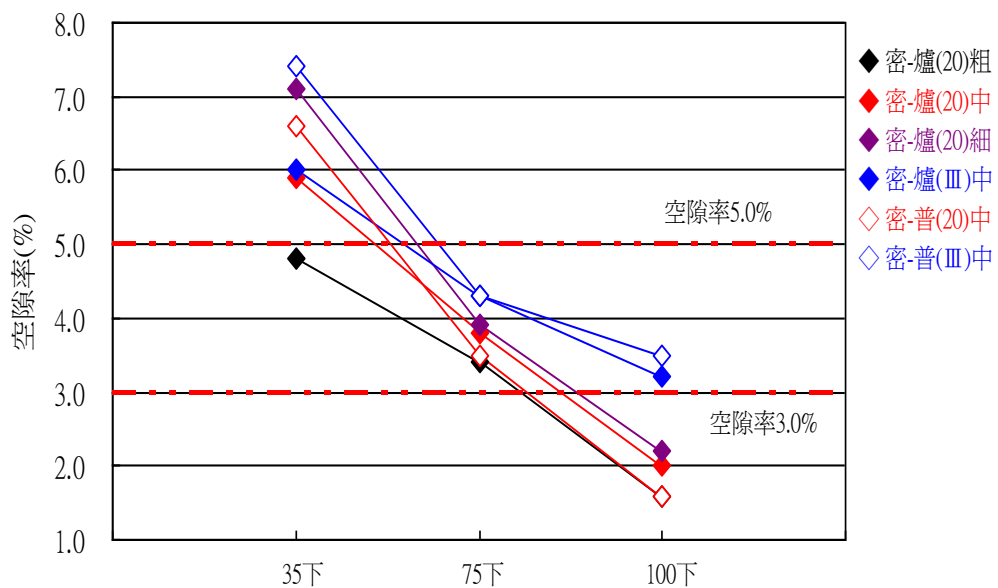


圖 23 各組成條件於不同夯打次數之空隙率結果

四、使用轉爐石之效益及結論

藉不同瀝青黏結材、級配組成條件之不同緻密程度、不同瀝青含量及不同夯打次數等所獲試驗結果之分析，對於轉爐石使用於瀝青混凝土之特性及與一般粒料之比較，結論如下：

1. 轉爐石具有高比重、硬度大、粒形圓正之特性，此特性恰為瀝青混凝土用粒料所需之優質特性，能與瀝青膠泥密切結合，利於拌和過程瀝青膠泥之包裹作用。
2. 轉爐石粒形圓正之特性，幾無扁平粒料含量，在壓實過程中，粒料的重新排列較一般砂石粒料容易，壓實條件易於達到。
3. 使用於密級配瀝青混凝土方面：
 - (1) 轉爐石之顆粒質重，使用之瀝青黏結材以黏度較高之改質瀝青較能與轉爐石相輔相成、發揮並彰顯其優質特性。
 - (2) 在相同級配規格且使用改質瀝青之組成條件下，轉爐石於穩定值、間接張力、滯留強度等指標性質皆優於一般傳統粒料，於代表變形量之流度值結果顯示亦低於一般傳統粒料；於摩擦係數方面則不低於一般傳統粒料，且符合鋪面安全所需之摩擦係數條件。
 - (3) 在相同級配規格下，轉爐石級配宜採較緻密之組成條件，搭配使用改質瀝青可發揮最佳的組合成效，且顯著優於一般傳統粒料。
 - (4) 轉爐石粒料形圓正，親油基佳，可節省瀝青黏結材之用量，依試驗研究結果，依現行密級配配合設計機制所得之建議瀝青含量(OAC)，調降約 0.3%瀝青用量，獲得之各項指標性質可優於或不低於 OAC 者。
 - (5) 轉爐石使用之瀝青用量較低，惟若以容積比為基礎，轉爐石於單位容積內之瀝青用量仍略高於一般粒料，包裹條件並無疑慮。
 - (6) 轉爐石粒料圓正易於壓實，即使是低壓實能量狀態之各項性質仍優於一般傳統粒料。
 - (7) 轉爐石粒形圓正易於壓實，滾壓或夯實過程若未謹慎控制，易過度壓實，由試驗結果顯示，過度壓實於穩定值、滯留強度、車轍輪跡及空隙率等指標皆未必有利，且會產生性質下降之虞。
 - (8) 由空隙率及其對應之各項指標結果，現行密級配配合設計機制於重交通量夯打 75 下之夯實能量，就轉爐石而言應是適當的夯打次數。
 - (9) 轉爐石使用於密級配瀝青混凝土雖易導致 VMA 不足，惟此 VMA 不足現象並未減損其優良性質之展現，且多數皆優於一般粒料。
 - (10) 彙整轉爐石使用密級配瀝青混凝土之研究結果，建議之最佳化使用組成為：在相同級配規格下，調配較緻密之級配組成、使用黏度較高的改質瀝青、施以配合設計作業重交通量之 75 下夯打、依配合設計準則選定之建議瀝青含量酌減 0.2~0.3%，可充分發揮轉爐石之優質特性且顯著優於一般粒料。

五、參考文獻

1. 袁家偉，林志棟，「使用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，國立中央大學碩士論文，2007 年。

2. 黃大衛，林志棟，「轉爐石取代傳統粒料對瀝青混凝土 VMA 性質影響之研究」，國立中央大學碩士論文，2008 年。
3. 「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會專輯」，社團法人中華鋪面工程學會及中華環安衛科技協會，2007 年。
4. 「轉爐石應用於鋪面工程研討會」，中聯資源股份有限公司、中國鋼鐵股份有限公司、國立中央大學土木工程研究所，2006 年。
5. 「轉爐石應用於鋪面工程推廣手冊」，中聯資源股份有限公司、中國鋼鐵股份有限公司、國立中央大學土木工程研究所，2006 年。
6. 「利用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，中國鋼鐵股份有限公司及社團法人中華鋪面工程學會，2007 年。
7. Sakatchewan Highways and Transportation STP 204-19，Asphalt Film Thickness Determination.
8. 公共工程施工綱要規範第 02796 章密級配改質瀝青混凝土鋪面(v30)。
9. 第 02797 章排水性改質瀝青混凝土鋪面(v30)。