

應用影像分析比較不同配合設計法之壓實效果

林樹豪¹、葉根¹、沈勁利²、游步上¹

¹ 德霖技術學院營建科技系助理教授

² 德霖技術學院企業管理系助理教授

摘要

本研究利用影像分析技術 (IPT) 計算粒料扁平率、級配降級程度以及粒料排列一致性比率，並與實際量測和現地鑽心試體相比較，藉以評估二種不同試驗室壓實方式的壓實效果。研究中採用二種不同配合設計方法：馬歇爾配合設計法 (AI MS-2, 1993) 及 Superpave Level1 配合設計系統 (ASSHTO SP-2, 2002)，使用 AC-20 瀝青，並收集台灣四個地區的粒料進行配合設計。配合設計結果顯示，馬歇爾配合設計法高估 VMA 而導致使用較高的設計瀝青含量。從影像分析與實際量測的粗粒料扁平率並無顯著不同可知，影像分析具有取代傳統骨材幾何性質試驗的潛力。無論使用影像分析或者實際將試驗室壓實試體經洗油篩分析後與原來工地拌合級配比較，亦能發現使用馬歇爾夯壓機造成級配降級的程度遠比 SGC 旋轉壓實機者嚴重。從粒料排列一致性比率的影像分析結果顯示，馬歇爾夯壓試體的粒料排列較具方向性，而 SGC 試體和鑽心試體的粒料排列則較為隨機。整體而言，SGC 的旋轉壓實方式明顯較能模擬現場鋪設滾壓的情況。

關鍵詞：壓實效果、配合設計法、影像分析技術

Comparison on Compaction Effects of Different Mix Design Methods by Using Image Process Technique

Shu-Hao Lin¹, Ken Yeh¹, Jine-Lih Shen², and Pure-Song You¹

¹ Assistant Professor, Department of Construction Technology, De Lin Institute of Technology

² Assistant Professor, Department of Business Administration, De Lin Institute of Technology

Abstract

The objective of this study is to compare compaction effects of different mix design methods by the application of image process technique (IPT). IPT was applied to analyze aggregate flatness, degradation and orientations in asphalt concrete mixtures. In this study, Marshall mix design (AI MS-2, 1993) and Superpave mix design (AASHTO SP-2, 2002) were applied. Four types of aggregates and AC-20 asphalt were adopted. It was found that the Marshall mix design will overestimate VMA in asphalt concrete mixture, which will then cause excessive optimal asphalt content. To compare the traditional aggregate shape test with image shape indices as flatness, the IPT is considered as a more viable and cost effective alternative. From IPT and actual recycled aggregate sieve analysis results, specimens compacted using the Marshall compactor were found to have more aggregate degradation than specimens compacted using the SGC. The aggregate orientation results indicate that aggregates have preferred directional consistency in Marshall specimens while they appear to have more of a random distribution in SGC and cored specimens. Through various actual measurement and cored specimens, aggregate orientation has significant difference. In general, the specimen made by the SGC can be better to

simulate the compaction in the field.

Keywords: Compaction Effect, Mix Design Method, Image Process Technique.

壹、前言

國內公路以瀝青混凝土路面為主，以中山高速公路為例，瀝青混凝土路面即佔 97%。瀝青混凝土的品質受配合設計、材料性質、厚度設計、施工鋪築、交通量和氣候環境所影響。配合設計的目標在於決定粒料與瀝青之經濟配合，俾使產生的混合物具有耐久性、足夠之穩定性、適當之空隙率及良好的工作性 [1]。在試驗室中配合設計法之選擇是否理想，攸關日後瀝青混凝土的性質與鋪面成效。

1930 年代馬歇爾發展出馬歇爾配合設計法。國內瀝青混凝土配合設計素以馬歇爾法為主，過去此法在美國亦為 75% 的公路單位所採用 [2]。但是無論在國內外仍有許多瀝青混凝土路面提早發生破壞，此一現象顯示配合設計採用馬歇爾法有其缺失；至少對於某些鋪面破壞，馬歇爾法即無法提供瀝青混凝土相關的性質 [3]。對鋪面工程而言，配合設計、結構設計以及鋪面成效，應該同時考慮，而不能視為各自獨立。由於馬歇爾配合設計法是根據經驗關係發展而來，其所壓製之試體的性質與鋪面設計和現地成效的關聯性不佳，所以並無法預估鋪面在實際鋪築之後的成效 [4, 5]。

1993 年美國策略性公路研究計畫 (SHRP, Strategic Highway Research Program) 提出優良成效鋪面 (Superpave, Superior Performing Pavement) 配合設計系統。馬歇爾配合設計法與 SHRP 之 Superpave 配合設計法最大的差異在於：壓實設備和成效試驗的不同。前者採用夯壓方式壓實，後者則採用旋轉揉壓壓實。所有的配合設計法均試圖以其採用的壓實方式使試體達到與實際鋪面相同的狀況 [6]。不同壓實方式所壓製的試體，其顆粒排列與性質皆有所差異。馬歇爾配合設計當初的發展，試體夯壓後的密度必須到達地在交通負載下的最終密度。若是試驗室的夯壓結果不能達到現地最終密度，則選用的瀝青含量可能會過高。Brown 等人的研究指出現地的瀝青混凝土密度常常超過試驗室夯壓結果 [5]。馬歇爾夯壓方式並不足以模擬現地的壓實 [7]，且易壓碎骨材而對瀝青混凝土的性質造成些許影響 [8]。一些現地研究亦指出即使在試驗室夯打 75 次也不能達到路面的最終密度，以這樣的壓實度所設計的含油量，在現地將使得瀝青膠泥填滿空隙，而導致瀝青混凝土產生塑性流動和車轍 [9]。許多研究顯示旋轉壓實的方式比馬歇爾夯壓方式對瀝青性質與級配種類較為敏感，對於壓製空隙率較小的試體較為方便及省時 [3, 4, 8-10]。目前旋轉壓實的方式已被引進美國、法國、瑞典、瑞士及澳洲等國家，成為配合設計採用的壓實方式之一 [6]。

試驗室的壓實方式是配合設計法的關鍵。以往比較不同配合設計法的研究，常以試體力學性質和鋪面成效來間接評估何種壓實方式較能模擬路面滾壓鋪築與開放交通後車輛之壓實 [3, 6, 8]。壓實方式的不同將導致不同的壓實能量和粒料顆粒排列，使得試體內部填塞瀝青的空間有所差異，也可能造成級配降級程度的不同。過去常以粒料間空隙率 (VMA) 來評估試體內部填塞瀝青空間的大小，但是 VMA 並無法進一步評估粒料顆粒排列的情況。而過去要了解級配降級的狀況，則需要經過瀝青含量試驗法 (AASHTO T164) 和抽取粒料之篩分析 (AASHTO T30) 等成本高昂、耗時的洗油篩析程序。近年來，數位影像分析技術已快速成為量化物體幾何

形狀的工具。某些研究應用影像分析來估量瀝青混凝土的內部結構，如空隙率或粒料方位測定 [11, 12]。其他研究則著重在描述粒料的形狀，如細長性、多角性、表面紋理以及表面積等幾何性質 [13, 14]。因此，本研究應用影像分析技術評估瀝青混凝土試體內部的粒料顆粒排列以及級配降級的程度，藉以比較馬歇爾夯實機和SGC旋轉壓實機二種壓實方式與現地鋪面滾壓的差異。

貳、試驗材料

本研究使用台灣地區最常用之 AC-20 瀝青，並收集台灣地區北、中、南、東四個地區的粒料進行配合設計。瀝青和粒料的基本性質分別如表 1、表 2 所示。在級配部分，採用標稱最大粒徑 19.0 mm，同時符合台灣區高速公路局及 Superpave 級配規範，如表 3，且該級配通過限制區之下方。本研究採用二種配合設計方法：馬歇爾配合設計法 (AI MS-2, 1993) 及 Superpave Level1 配合設計系統 (ASSHTO SP-2, 2002)，其中 Superpave Level1 配合設計系統使用配合本土重交通量的設計圈數，如表 4 所示 [15]。

表 1 瀝青之物理性質

項目	比重	針入度 (0.01cm)	延展性 (cm)	絕對粘度 (60°C, poises)	拌合溫度 (°C)	夯壓溫度 (°C)
60/70瀝青	1.030	62.0	100+	2108	150-155	140-145

表 2 粒料之物理性質

項目	虛比重 G_{sb}	視比重 G_{sa}	有效比重 G_{se}	吸油率 (%) P_{ba}	3:1扁平率 (%)
北 (頭前溪)	2.554	2.699	2.635	1.20	20.2
中 (濁水溪)	2.614	2.715	2.620	0.60	16.2
南 (高屏溪)	2.624	2.724	2.675	0.72	16.0
東 (木瓜溪)	2.670	2.731	2.688	0.40	12.6

表 3 粒料級配

篩號 (美國標準篩)	北部採用級配 通過百分比 (%)	中部採用級配 通過百分比 (%)	南部採用級配 通過百分比 (%)	東部採用級配 通過百分比 (%)	高公局密級配 通過百分比 (%)
1"	100	100	100	100	100
3/4"	95	97	96	97	95-100
1/2"	72	84	80	90	—
3/8"	69	67	65	79	65-80
#4	60	46	55	60	45-60
#8	41	33	45	43	30-45
#16	28	22	33	29	—
#30	20	16	19	15	15-25
#50	15	11	10	9	—
#100	8	6	4	4	—
#200	3	3	3	3	3-7

表 4 Superpave 本土化之壓實圈數

交通等級 (10 ⁶ ESAL)	N _{ini}	N _{des}	N _{max}
<0.3	7	45	74
0.3 to <3	10	83	147
3 to <30	13	140	266

參、影像分析

本研究使用 C++自行編譯開發影像分析程式，主要分成二值化處理 (distinguish) 和參數計算 (calculate) 二個主要部分。二值化的功能在於辨識瀝青與粒料，並計算影像的像素數。本研究採用 ISODATA 分類法進行瀝青、粒料分類。在參數計算方面，包含計算 3:1 扁平率 (F)、近似圓直徑 (R) 和排列一致性比率 (Δ)。圖 1 顯示影像處理前與經過二值化的產生結果。

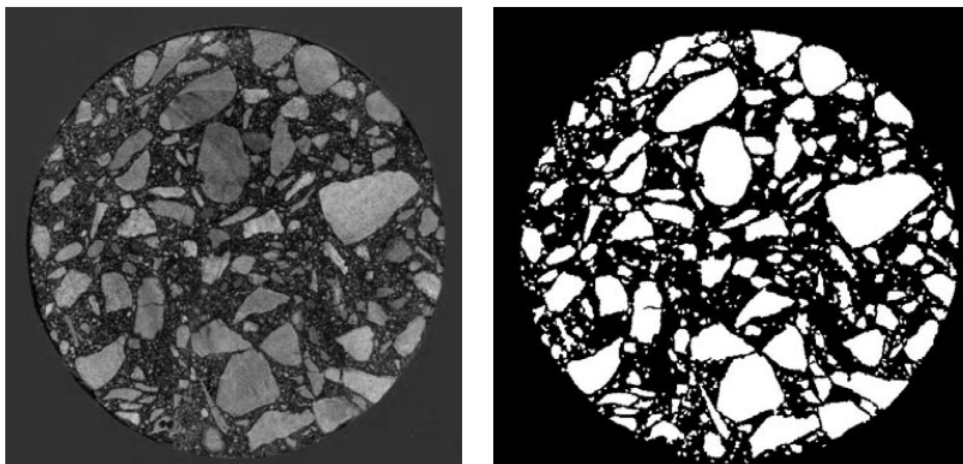


圖 1 影像處理前與經過二值化的產生結果

影像分析中對單一顆粒的扁平性 (Flatness) 是以粒料斷面一組正交之長軸與短軸的最大比值來表示 [13]，如式 1。首先在顆粒邊緣上任兩點像元間尋找最大之連線長，以此定義為長軸。再沿長軸搜尋與長軸正交之最大顆粒邊緣的連線長，以此定義為短軸。長、短軸的比值即為扁平性。將所有長軸大於 4.75 mm 的粒料均視為粗骨材，則其中扁平性大於 3 的粒料數目與所有粗骨材數目的比值，即為影像分析所得之 3:1 扁平率 (F)。近似圓直徑 (D_c) 的計算，如式 2，其中 A 為顆粒面積，可由已知的單一像元面積乘上顆粒所佔總像元數而得。

$$Flatness = \max. \left\{ \frac{\text{max. feret diameter}}{\text{min. feret diameter}} \right\} \tag{1}$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{2}$$

粒料排列評估，即向量法，是採用南北向與東西向做為主軸，來評估一群顆粒分佈的一致性，稱為排列一致性比率 (consistency ratio, Δ)。Δ介於 0%~100%之間。若粒料分佈情形愈隨機，其值會較接近於 0%，相對的，若粒料分佈情形在方向性愈相同，其值會愈接近 100% [16]。

本研究利用先前影像分析所決定的長軸，可求出各粒料長軸與水平軸的夾角 (θ_k)，再代入式 3，統計所有粒料之分佈情形。

$$\Delta = \frac{100}{\sum N} \sqrt{(\sum \sin 2\theta_k)^2 + (\sum \cos 2\theta_k)^2} \quad (3)$$

N : 粒料數目

肆、試驗結果分析

一、配合設計結果

表 5 為使用北、中、南、東四個地區粒料之馬歇爾配合設計 (MS-2) 和 Superpave 配合設計 (Taipave) 的結果比較。由四個地區最佳含油量的比較可以發現，除了北部地區的差異較不顯著外，其他地區馬歇爾配合設計的最佳含油量遠比 Superpave 配合設計的結果高出許多。平均而言，二者最佳含油量的差異多達 6.75%。

表 5 馬歇爾配合設計和 Superpave 配合設計結果之比較

	北		中		南		東		規範值
	MS-2	Taipave	MS-2	Taipave	MS-2	Taipave	MS-2	Taipave	
最佳含油量 (%)	6	5.9	5.9	5.3	5.7	4.6	5.9	5	-
空隙率 (%)	4	4	4	4	4	4	4	4	3-5
VMA (%)	15.1	14.8	17	15	15.4	13	17.6	15	13+
VFA (%)	73.5	73.0	76.5	73.3	74.0	69.2	77.3	73.3	65-75

同樣的現象也可以觀察到：Superpave 配合設計之瀝青混凝土的 VMA 亦遠低於馬歇爾配合設計所得之 VMA。馬歇爾配合設計法高估 VMA 的結果導致使用較高的設計瀝青含量去填充 VMA，使得原本配合設計中被預估為空隙率的部分被多餘的瀝青所取代。在開放交通一段時間後，由於瀝青混凝土的再密實效應 (Densification) 將使得瀝青沒有足夠的空隙來填充，因此鋪面產生冒油、車轍及推擠的狀況，而這些正是台灣地區鋪面常見的破壞型式。過去台灣地區若使用馬歇爾配合設計的結果直接去鋪築路面，常會有含油量過高的情形，甚至等滾壓完成後就會出現片狀冒油的情形，故現地工程師目前一般都大概會降低設計含油量來防止這種狀況的發生。

表 5 中所有的配合設計結果均符合規範的要求，除了中、東地區使用馬歇爾配合設計法所得之 VFA 略為超出規範值。以 VFA 的觀點而言，VFA 若過高可能會導致車轍、冒油、推擠的情況發生。如同先前 VMA 偏高的討論般，考慮台灣地區高交通量且氣候炎熱的情況，如果適度修正馬歇爾配合設計法決定的最佳瀝青含量，減少的含油量將提高瀝青混凝土的空隙率，進而降低 VFA。假設 VMA 維持不變，依照目前台灣鋪面工程師減少 0.2%~0.5% 左右含油量的做法，中、東地區使用馬歇爾配合設計法所得之 VFA 皆能控制在規範值的範圍內。

二、粒料扁平率

除了因為使用 Taipave 本土超重交通量設計外，馬歇爾配合設計法的最佳含油量、VMA 和 VFA 高於 Superpave 配合設計所決定者的原因在於級配降級程度的差異與壓實效果的不同。過去研究顯示，粗骨材顆粒扁平率會影響粒料的破裂，扁平率大於 3：1 或 5：1 的百分比與粒料通過#4 號篩百分比的變化有關 [17, 18]。粗骨材顆粒細長、扁平性質試驗的方法極為簡易，且試驗結果的再現性高。雖然粗粒料之扁平率可藉由如 ASTM D4791 所制訂的卡尺模更方便且客觀地量測，但由於規範中訂定之具代表性粒料數量過大，故相對於影像分析而言，試驗時間成本極大。尤其是當需要計算不同扁平率 (3：1 或 5：1) 的顆粒百分比時，使用卡尺模等於要對每顆粒料重複進行二次試驗，反之，影像分析則無重複量測的困擾。

本研究利用馬歇爾壓實機與 SGC 旋轉壓實機，依四個地區粒料分別在最佳含油量下各製作三個試體。依照配合設計法的規定，前者為直徑 4” 試體，後者為 6” 試體。每個試體皆橫切出四個面進行影像分析。因此每種粒料配合共計有 12 筆計算結果。除了計算扁平率外，後續探討級配降級以及瀝青混凝土中粒料排列狀況等影像分析亦使用相同的影像資料。

在影像分析過程中，本研究將所有長軸大於 4.75 mm 的粒料均視為粗骨材。計算扁平性大於 3 的粒料數目與所有粗骨材數目的比值，做為影像分析所得之 3:1 扁平率。扁平性的定義和計算，如式 1 所示。表 6 為影像分析的平均值與實際採用卡尺模量測粗粒料扁平率的結果。由成對母體平均數差異 t 檢定可知，無論使用馬歇爾壓實機 (p-value=0.311) 或 SGC 旋轉壓實機 (p-value=0.368) 製作試體的影像分析結果，其與實際量測的粗粒料扁平率在統計上並無顯著不同。這也意味著影像分析具有潛能取代傳統的骨材幾何性質試驗，進而節省大量試驗時間和人工成本。

表 6 影像分析與實際量測粗粒料 3:1 扁平率之結果

3:1扁平率 (%)	影像分析 MS-2	影像分析 Taipave	實際量測
北 (頭前溪)	18.6	19.2	20.2
中 (濁水溪)	17.4	17.1	16.2
南 (高屏溪)	18.0	17.2	16.0
東 (木瓜溪)	17.5	13.7	12.6

三、級配降級程度

就表 6 數據看來，SGC 旋轉壓實機製作試體的影像分析結果較接近實際量測者。或許可能的原因之一是因為壓實方式造成級配降級程度的不同。本研究進一步將上述試體進行之洗油篩分析試驗，並且利用影像分析計算試體橫切面上通過 3/8”號篩、停留於#4 號篩佔整體粗粒料的百分比來探討兩種壓實方式對級配降格之情形。橫切面上所有長軸大於 4.75 mm 的粒料均視為粗粒料。利用式 2，可以計算每顆粒料的近似圓直徑 (D_c)。假設該球體體積可代表顆粒的真實體積且粒料比重相同，又考慮切面處並非粒料最大斷面，因此過篩與否以長軸尺寸來判斷，則 #4 號篩佔整體粗粒料的停留體積百分比可與實際洗油篩分析的重量百分比進行比較。

表 7 為馬歇爾夯壓機 (MS) 及 SGC 旋轉壓實機 (SGC) 所製作的試體，經洗油篩分析後與

原來工地拌合級配 (JMF) 之比較。除了北部地區以外，使用馬歇爾夯壓機造成級配降級的程度遠比 SGC 者嚴重。配合先前 VMA 之比較可以發現，北部地區粒料級配降級的情形不嚴重，兩種配合設計法求得之 VMA 的差異就不大；而其他地區粒料級配降級較為嚴重，VMA 的差異也明顯較大。使用 SGC 旋轉壓實機並不會造成級配太大的降級，因此相對於馬歇爾夯壓機，旋轉壓實方式與現地輪壓機的壓實效果較為相近。

表 7 壓實試體洗油篩分析與原來級配之比較

篩號	北部粒料級配 (%)			中部粒料級配 (%)			南部粒料級配 (%)			東部粒料級配 (%)		
	MS	SGC	JMF	MS	SGC	JMF	MS	SGC	JMF	MS	SGC	JMF
1"	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3/4"	97	97	95	96	96	97	97	96	96	97	95	97
1/2"	90	90	72	85	84	84	80	81	80	86	73	90
3/8"	81	80	69	79	67	67	73	65	65	76	69	79
#4	60	60	60	60	44	46	58	54	55	61	59	60
#8	44	45	41	42	32	33	37	45	45	34	42	43
#16	31	31	28	31	21	22	25	33	33	23	30	29
#30	18	18	20	21	15	16	22	19	19	16	21	15
#50	12	11	15	17	10	11	14	11	10	12	16	9
#100	7	6	8	10	5	6	7	4	4	8	10	4
#200	5	4	3	4	4	3	5	3	3	4	4	3

表 8 為馬歇爾夯壓機 (MS) 及 SGC 旋轉壓實機 (SGC) 試體切面各 12 組影像分析平均值與原來級配之通過 3/8" 號篩、停留於 #4 號篩佔整體粗粒料百分比的比較。由成對母體平均數差異 t 檢定可知，相對於原來工地級配，使用馬歇爾壓實機 (p-value=0.036) 或 SGC 旋轉壓實機 (p-value=0.013) 製作試體的影像分析結果均具有顯著差異。試體經過切割應是造成級配降級顯著的原因之一，進一步比較不同壓實方式的影像分析結果可知，馬歇爾夯壓試體造成級配降級的情況遠較 SGC 試體嚴重。

表 8 影像分析與工地級配之 #4 號篩佔整體粗粒料停留百分比

#4號篩佔整體粗粒料停留百分比	影像分析 MS-2	影像分析 Taipave	JMF
北	50.8	51.4	47.5
中	46.6	42.5	38.9
南	34.1	23.8	22.2
東	38.0	24.9	22.5

四、粒料排列評估

考慮現場鑽心取樣試體 (國道 3 號北上 87k+500) 的級配和粒料來源，本研究選擇之前北區粒料的影像檔來評估馬歇爾夯壓機與 SGC 何者較接近現場鋪設滾壓的情況。三個現場鑽心試體同樣經過橫切四個面，共計有 12 筆影像分析的結果。利用粒料排列一致性比率 (Δ)，如式 3，計算粒料排列分佈之情形，以比較試驗室二種不同的壓實方式與現地壓實之差異。圖 2 為馬歇爾試體、SGC 試體以及現地鑽心試體二值化影像的典型例子。

表 9 為馬歇爾試體 (MS) 及 SGC 試體相對於現地鑽心試體粒料排列一致性比率之 t 檢定。結果顯示馬歇爾夯壓試體 (p-value=0.047) 的粒料排列與現地鑽心試體者具顯著差異，而 SGC 試體的 Δ 值 (p-value=0.789) 與現地鑽心試體則沒有明顯的不同。就粒料排列而言，馬歇爾夯壓試體的粒料排列較具方向性，而 SGC 試體和鑽心試體的粒料排列則較為隨機。因此 SGC 的旋轉壓實方式明顯較能模擬現場鋪設滾壓的情況。

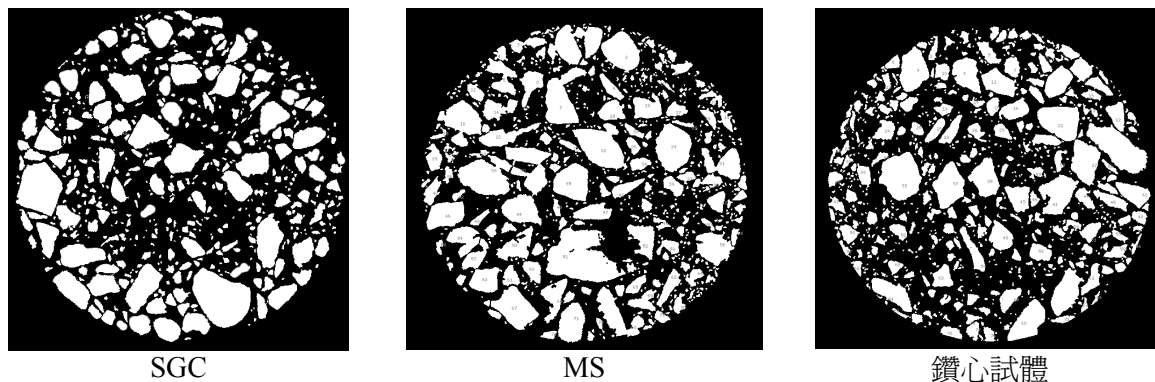


圖 2 二種試驗室壓實試體以及現地鑽心試體的二值化影像

表 9 粒料排列一致性比率之 t 檢定

Δ	MS	SGC	鑽心試體
平均數	22.6	17.3	17.8
變異數	34.5	28.9	26.0
觀察值個數	12	12	12
t 統計	2.105	-0.271	—
P-value 雙尾	0.047	0.789	—

伍、結論

壓實方式的不同將導致不同的壓實能量和粒料顆粒排列，使得試體內部填塞瀝青的空間有所差異，也可能造成級配降級程度的不同。過去常以粒料間空隙率 (VMA) 來評估試體內部填塞瀝青空間的大小，但是 VMA 並無法進一步評估粒料顆粒排列的情況。而過去要了解級配降級的狀況，則需要經過成本高昂、耗時的洗油篩析程序。近年來，數位影像分析技術已快速成為量化物體幾何形狀的工具。因此，本研究利用影像分析計算粒料扁平率、級配降級程度以及粒料排列一致性比率，並與實際量測和現地鑽心試體相比較，藉以評估二種不同試驗室壓實方式：馬歇爾夯壓機與 SGC 旋轉壓實機的壓實效果。由試驗結果分析獲致的結論如下：

1. 由北、中、南、東四個地區粒料之配合設計的結果可以發現，除了北部地區的差異較不顯著外，馬歇爾配合設計法高估 VMA 的結果導致使用較高的設計瀝青含量。
2. 無論是使用馬歇爾夯壓機或 SGC 旋轉壓實機製作試體，影像分析與實際量測的粗粒料扁平率並無顯著不同，而這也意味著影像分析具有取代傳統骨材幾何性質試驗的潛力。
3. 試驗室壓實試體經洗油篩分析後與原來工地拌合級配比較可知，除了北部地區粒料外，使用馬歇爾夯壓機造成級配降級的程度遠比 SGC 旋轉壓實機者嚴重。比較不同壓實方

式的影像分析結果也得到類似的結果。相對於原來工地級配，二種試驗室壓實試體的影像分析結果均呈現明顯的差異。就級配降級而言，旋轉壓實方式與現地輪壓機的壓實效果較為相近。

4. 粒料排列一致性比率的影像分析結果顯示，馬歇爾夯壓試體的粒料排列與現地鑽心試體者具顯著差異，而 SGC 試體的粒料排列與現地鑽心試體則沒有明顯的不同。就粒料排列而言，SGC 的旋轉壓實方式明顯較能模擬現場鋪設滾壓的情況。

參考文獻

1. Cominsky, Ronald, et al, *The Superpave Mix Design Manual For New Construction and Overlays*, Report No. SHRP-A-407, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, DC, (1994).
2. Kandhal, P. S., and W. S. Koehler, "Marshall Mix Design Method: Current Practices," AAPT, Vol. 54, pp. 284-303, (1985).
3. Von Quintus, H.L., J. A. Scherocman, C. S. Hughes and T. W. Kennedy, Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System, National Cooperative Highway Research Program, Report 338, TRB, National Research Council. Washington, DC, (1991).
4. Van der Heide, J. P. J., "Material and Mix Design Practices in Europe," AAPT, Vol. 61, pp. 584-607, (1992).
5. Brown, E. R. and S. A. Cross, "A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements," AAPT, Vol. 61, pp. 535~582, (1991).
6. Blankenship, P. B., K. C. Mahboub, and G. A. Huber, "Rational Method for Laboratory Compaction of Hot-Mix Asphalt," TRR 1454, TRB, pp. 144-153, (1995).
7. Epps, J. A., B. M. Gallaway, and W. M. Scott, "Long-Term Compaction of Asphalt Concrete Pavements," HRR 313, HRB, pp. 79-90, (1970).
8. Cominsky, Ronald, et al, *Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning*, Report No. SHRP-A-408, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, DC, (1994).
9. Roberts, F. L. , P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Y. Lee, T. W. Kennedy, *HOT MIX ASPHALT MATERIALS, MISTURE DESIGN, AND CONSTRUCTION*, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland, (1991).
10. 蕭志銘，林樹豪，郭世建，「骨材級配與瀝青混凝土抗變形能力之研究」，中國土木水利工程學刊，第十卷，第二期，第 173-182 頁，(1998)。
11. Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., and Harman, T., "Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete," ASCE Geotechnical Special Publication, GSP No. 85, pp. 69-80, (1998).
12. Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., and Harman, T., "Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis," ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering (Special Issue on Image Processing), Vol. 13, No. 2, pp. 88 - 95, (1999).

13. Kuo, C. and Freeman, R. B., "Imaging Indices for Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Aggregates," 79th Annual Meeting in January 2000 of the Transportation Research Board, Washington, D.C., CD file-00419, (2000).
14. Brzezicki, J. M. and Kasperkiewicz, J., "Automatic Image Analysis in Evaluation of Aggregate Shape," ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering (Special Issue on Image Processing), Vol. 13, No. 2, pp. 123 - 130, (1999).
15. Jyh-Dong Lin, Shih-Huang Chen, Pei Liu, Shu-Hao Lin. "Establishing the Superpave N_{design} Compaction Matrix Using Information Collected in Northern Taiwan Area". Transportation Research Board 82nd Annual Meeting CD-ROM, (2003).
16. Curray, J. R., "Analysis of Two Dimensional Orientation Data", Journal of Geology, Vol. 64, pp. 117-131, (1956).
17. West, R. C., and B. E. Ruth, "Compaction and Shear Strength Testing of Stone Matrix Asphalt Mixtures in the Gyratory Testing Machine," AAPT, Vol. 64, pp. 32-53, (1995).
18. Kumar, A. and W. H. Goetz, "The Gyratory Testing Machine as a Design Tool and as an Instrument for Bituminous Mixture Evaluation," AAPT, Vol. 43, pp. 350-371, (1974).