

# 再生瀝青混凝土拌合均勻性與再生劑軟化效率之評估方法研究

邱垂德<sup>1</sup>      黃浩昌<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中華大學土木工程學系副教授

<sup>2</sup> 中華大學土木工程學系碩士班研究生

## 摘要

再生瀝青混凝土之品質控制，乃以成份為主要考量，亦即於品質檢驗時，確認再生瀝青混凝土之瀝青含量、粒料級配、和回收瀝青 60°C 黏度，與傳統瀝青混凝土相同；然因目前主要的檢驗方法，乃以將混合成品用溶劑作一次整體回收為主，無法判定加入的刨除料是否與新料拌合均勻，亦無法分辨新舊瀝青間是否產生分子交換而達黏度一致的效果；本研究引用美國學術界對熱拌再生瀝青混凝土品質認定之相關研究，採華盛頓大學建議之化學染色法(Dye Chemistry)，判斷拌合均勻性，以普渡大學採用之分段回收法(Stage Extraction)，判斷新瀝青對舊瀝青的軟化效率，這兩種檢測方法的本土化，將對國內再生瀝青工法的研發及品質之確認，提供助力。

## 一、前言

於國內推動再生瀝青混凝土之使用，已成為政府既定的政策，臺灣省公路局、臺北市政府工務局、及高雄市政府工務局等單位，亦將配合中央政策推出瀝青混凝土資源再利用路段，國內部份拌合業者也已引進日本、德國等機具設備，開始生產，再生瀝青混凝土於未來幾年內，必將充斥於國內路面工程市場，然因國內負責養路之單位眾多，品質規範與監督水準不一，使舊路面刨除料之品質變異性較高，加上拌合廠商良莠不齊，未來瀝青混凝土產品的品質變異，很可能因再生瀝青混凝土之進入市場，而急速擴大；面對此種狀況，國內工程單位應儘速參考美、日各國之再生瀝青混凝土品質控制方法，於施工規範中加訂再生瀝青補充條款，對成品的回收黏度進行規範，以確保再生後瀝青

混凝土黏度之一致性；但因國內路面工程界以往較少檢測瀝青之黏度，對目標黏度之選定，需依靠逐步進行的試鋪路段中，經試驗後研擬，而學術界更應深入分析新舊瀝青的拌合均勻性，及新瀝青或再生劑對舊瀝青的軟化效率，本研究案即為確保再生工法之順利推行，而由行政院國家科學委員會補助進行的品質確認方法研究。

## 二、文獻回顧

以成品回收瀝青的物理性質(25 針入度或 60 黏度)作為再生瀝青混凝土的主要品質控制項目，為美、日等國普遍採行的方法，回收法中的溶劑溶解與回收的過程中，進行著不同瀝青分子間的再混合，無法真實代表新瀝青(或再生劑)於成品中的分佈狀況，也無法顯現新舊瀝青分子間的作用，若刨除料與新瀝青、新骨材間拌合不均勻，但因皆呈現黑色，而沒有由鋪築現場之工程人員察覺，則鋪築路面將因各局部之黏度不均，而於日後產生嚴重析離，又或新瀝青雖已均勻裹覆於新舊材料上，但因新瀝青無法有效地將刨除料表面之舊瀝青軟化，亦將因檢驗步驟中的再混合作用，而無法測知。

拌合均勻性與新瀝青(或再生劑)對舊瀝青的軟化效率，受制於新舊瀝青的物理特性、骨材特性、拌合溫度、拌合機性能、新舊瀝青的化學相容性等，許多複雜因素交互影響，美國學術界曾分別由華盛頓大學(University of Washington)[1]及普渡大學(Purdue University)[2]，進行過再生瀝青之拌合均勻性與再生劑的軟化效率等研究，臺灣地區有本土特有的環境與材料特性，應迅速進行本土化的類似研究，以確認再生瀝青混凝土的品質，經由本土化經驗，研擬適當的再生劑規範或判定方法，以確保瀝青混凝土資源再利用的順利進行。

評估拌合均勻性的方法，依華盛頓大學的研究結果，傳統土木試驗方法，如回彈模數等，無法有效測知新瀝青的散佈狀況，在廣泛地探討包括化學染色法、光譜分析、超音波掃描、紅外線光譜、核磁共振、X 光分析等非傳統土木試驗法後，建議以化學染色法(Dye Chemistry Technique)評估。此方法乃將少量化學染劑均勻溶於新瀝青(或再生劑)中，於製作再生瀝青混凝土時，以添加染劑之新瀝青，與新、舊骨材、或瀝青拌合，夯製成試體，試體之切鋸面用偶氮染料處理之染布，印出代表新瀝青散佈痕跡之染劑分佈狀況，此種試驗方法雖不需貴重的新儀器，但因將染劑加入新瀝青的步驟，於實際生產過程中不容易執行，國內以往沒有類似經驗，且有可能以較國外再生劑硬的針入度

85/100 瀝青為新瀝青而不使用再生劑，會否有拌合無法均勻之疑問，應可以化學染色法於試驗室內進行評估。

在新瀝青均勻裹覆的先決條件下，新瀝青是否具有將舊瀝青軟化、以形成再生瀝青混凝土中黏度一致的黏結料，Carpenter 及 Wolosick[3]針對再生劑的軟化程序，提出所謂擴散模型(Diffusion Model)，黏度低的新瀝青先裹覆於舊瀝青之最外層，經由擴散作用滲入舊瀝青層內，使內層舊瀝青之黏度降低，外層新瀝青黏度增加，終達平衡，此種擴散模型，解釋新舊瀝青之交互作用，並獲得工程實務上的認同，由於擴散作用與時間相關，美國瀝青協會(Asphalt Institute)即以實務經驗認為新舊瀝青之作用需於拌合後一段時間才會達成，而認為儲料倉之使用有助於此種作用之達成[4]。

新瀝青能擴散入黏度高的舊瀝青中，依靠的是兩者間的相容性(Compatibility)，此相容性對化學成份複雜的瀝青材料而言，不容易定義與檢測，普渡大學的研究顯示，可以使用分段抽取法(Stage Extraction)對新瀝青的軟化效率進行評估，此法乃將傳統抽油試驗(ASTM D2172 Method A)，以使用溶劑之量與浸泡時間分成四個階段，各階段抽取所得溶液，經回收得之瀝青，代表整體瀝青膜之四個層次，量測此四層次之瀝青黏度，可用以判定新瀝青(或再生劑)之適用與否。

### 三、化學染色法判斷拌合均勻性

化學染色法可用以判斷新瀝青或再生劑於再生瀝青混凝土中散佈狀況，本研究經由與財團法人中國紡織工業研究中心染整工業部之諮詢，選擇採用 Teron Red AFG 酸性染料，該染料為黑色粉末，遇水則溶解成紅色，較大部份需以有機溶劑為染劑之染料更適於本研究所需。

化學染色法執行之方式，為將適量染料與新瀝青均勻拌合，再將新瀝青加入再生瀝青混凝土中，製成馬歇爾試體，將馬歇爾試體乾鋸為數個切鋸面，再以用水濕潤過的濾紙或染布接觸切鋸面，含有染劑之部份因染料溶解而呈紅色，其它不含染料之部份則不產生任何顏色，由於新瀝青或再生劑與染料拌合均勻，含染劑之部份即代表切鋸面上新瀝青或再生劑的部份，觀察濾紙或染布之顏色是否分佈於整個圓面上，即可判斷試體切鋸面中新瀝青的分佈狀況，亦即再生瀝青混凝土中，新舊材料有否拌合均勻，試驗方法流程簡圖，如圖 1 所示。

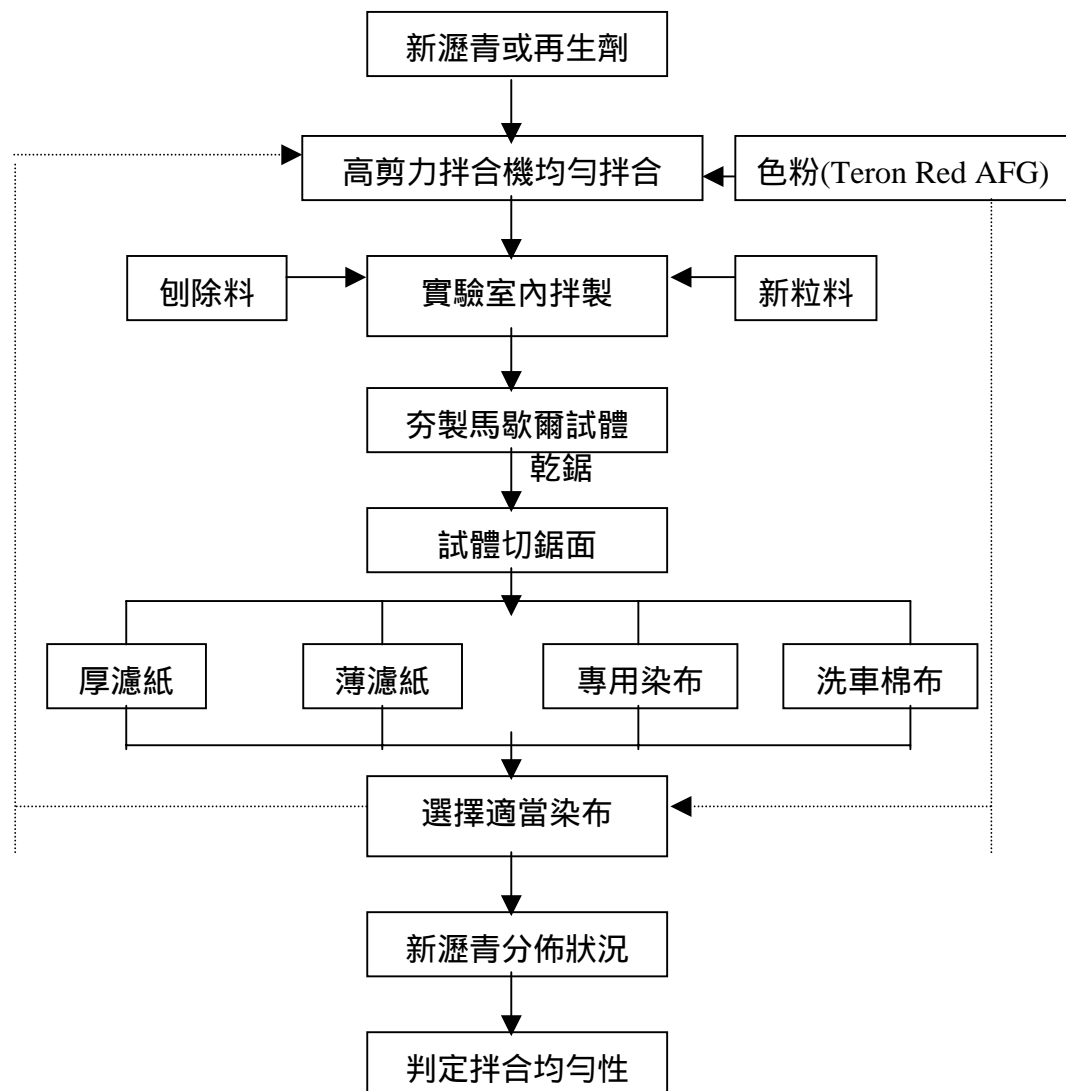


圖 1、本研究進行之化學染色法試驗流程

本研究先於試驗室中，以高剪力拌合機(Silverson High Shear Mixer)，將色粉均勻拌入新瀝青內，再以此新瀝青，分別製作全新瀝青混凝土與刨除料添加量為 50% 之再生瀝青混凝土馬歇爾試體(IVb 級配)，再生瀝青混凝土則又區分為攪拌均勻與攪拌不均勻兩種，攪拌不均勻試體之製作方式，乃將刨除料烘至 130℃，新料與新瀝青於拌合機內拌

合均勻後，以另一容器裝，於夯製馬歇爾試體時，先將一部份新瀝青混凝土放入試模底端，再將烘熱刨除料全部填入試模中央，最後將新瀝青混凝土置於其上，依標準方法搗 25 次後，夯成試體內部新舊料拌合不均勻之再生瀝青混凝土試體；此類試體之切鋸面與全新瀝青混凝土試體切鋸面，或拌合均勻再生瀝青混凝土試體切鋸面，未以濕潤染布接觸前，無法判斷有拌合不均之現象，但經以濕潤染布接觸後，則有明顯不同的染色效果，驗證化學染色法，可以用作拌合均勻性之判斷。

由於色粉濃度與染布種類會影響染印效果，進而影響化學染色法之判斷能力，本研究以三種不同色粉濃度與四種不同染布，進行化學染色法試驗，並定義染色效果及配分如表一所示，以不同色粉濃度新瀝青製作之三種馬歇爾試體之切鋸面，分別以四種染布印染，觀察染印效果，並將定性的染印效果，依表一化為定量的配分，以決定建議化學染色法使用之色粉濃度與染布種類，試驗結果如表二所示，由表二選擇最高配分者，亦即使用色粉濃度為 8%，以薄濾紙為染布時，將有最好的染印效果。

表一、化學染色法之染印效果及其定量配分

染印效果描述	染印效果總評	配分
染布上無色粉反應	無反應	0
少數色粉反應	太淡	1
有色粉反應，但有些部位不明顯或色痕擴散	色淡或擴散	2
色粉分佈均勻，但無法辨識骨材分佈	尚可	3
色粉分佈均勻，可辨識部份骨材分佈	佳	4
色粉分佈均勻，且可清楚辨識骨材分佈	優	5

經由本研究之試驗結果，採用新瀝青重量 8% 的酸性染料 Teron Red AFG，以高剪力拌合機拌合均勻，製成的馬歇爾試體，經乾鋸成切鋸面後，可以一般瀝青試驗室夯製馬歇爾試體使用的薄濾紙潤濕後，作為染布，以染色法判斷再生瀝青混凝土之拌合均勻性。於實務工程上，此種方法可用於評估不同再生製程的拌合均勻性，但較大的困難是要將 8% 的色粉，均勻拌入熱拌廠之新瀝青或再生劑儲油槽內，且需不影響瀝青之工作性，此一難處是化學染色法離實務應用有一段距離之主要原因。

表二、不同濃度色粉及染布的染印效果配分

染印效果配分		色粉濃度			小計
試體種類	染布種類	3%	5%	8%	
全新瀝青混凝土試體	厚濾紙	1	3	4	8
	薄濾紙	1	4	4	9
	專用染布	1	3	3	7
	洗車棉布	1	2	2	5
50% RAP 添加量之再生瀝青混凝土試體 (拌合均勻)	厚濾紙	1	2	2	5
	薄濾紙	0	2	3	5
	專用染布	1	3	3	7
	洗車棉布	1	2	2	5
50% RAP 添加量之再生瀝青混凝土試體 (拌合不均勻)	厚濾紙	1	2	2	5
	薄濾紙	1	3	4	8
	專用染布	1	1	3	7
	洗車棉布	1	1	2	4
小計		11	28	34	

總分：厚濾紙 18、薄濾紙 22、專用染布 21、洗車棉布 14。

#### 四、分段回收法判斷新瀝青的軟化效率

普渡大學使用之分段回收法為將 1,200 克瀝青混凝土試樣,以 200ml 200ml 300ml 及 700ml 四階段溶劑,各浸泡 5 分鐘後離心分離,而為使每階段都可由分離溶液中回收得足夠執行量測之瀝青試樣量,必需以 7 個試體,才能組成一個回收瀝青試樣;本研究為確保各階段之回收試驗,可依 ASTM D1856 於 8 小時內完成,以消除溶劑造成的硬化現象,乃採將樣品量擴大為 2,000 克,各階段溶劑量依比例增為 300ml、300ml、450ml、及 1,000ml,並將浸泡時間縮短為 2 分鐘,第四階段浸泡 3 分鐘且增加攪拌,進行之流程如圖 2 所示。

本研究於熱拌再生廠內,取得新粒料、新瀝青(針入度 85/100)、與刨除料之樣品,先用中華大學提出之「瀝青混合物中瀝青的回收試驗方法(草案)」[5],求得刨除料之瀝青含量、粒料級配、與回收瀝青 60 黏度,並檢測新瀝青之 60 黏度,再於試驗室內拌製 40%刨除料添加量之再生瀝青混凝土樣品(IVb 級配,瀝青含量 5.5%),因刨除料之瀝青含量為 4.15%,取部份刨除料烘熱後(130℃),加新瀝青至瀝青含量達 5.0%,製成 100%刨除料之再生瀝青混凝土試樣,另以新粒料與新瀝青拌成全新瀝青混凝土試樣,

共四種不同瀝青混合料，分別進行圖 2 之分段回收試驗，其中刨除料及兩種再生瀝青混凝土，又以回收試驗法進行一次整體回收。

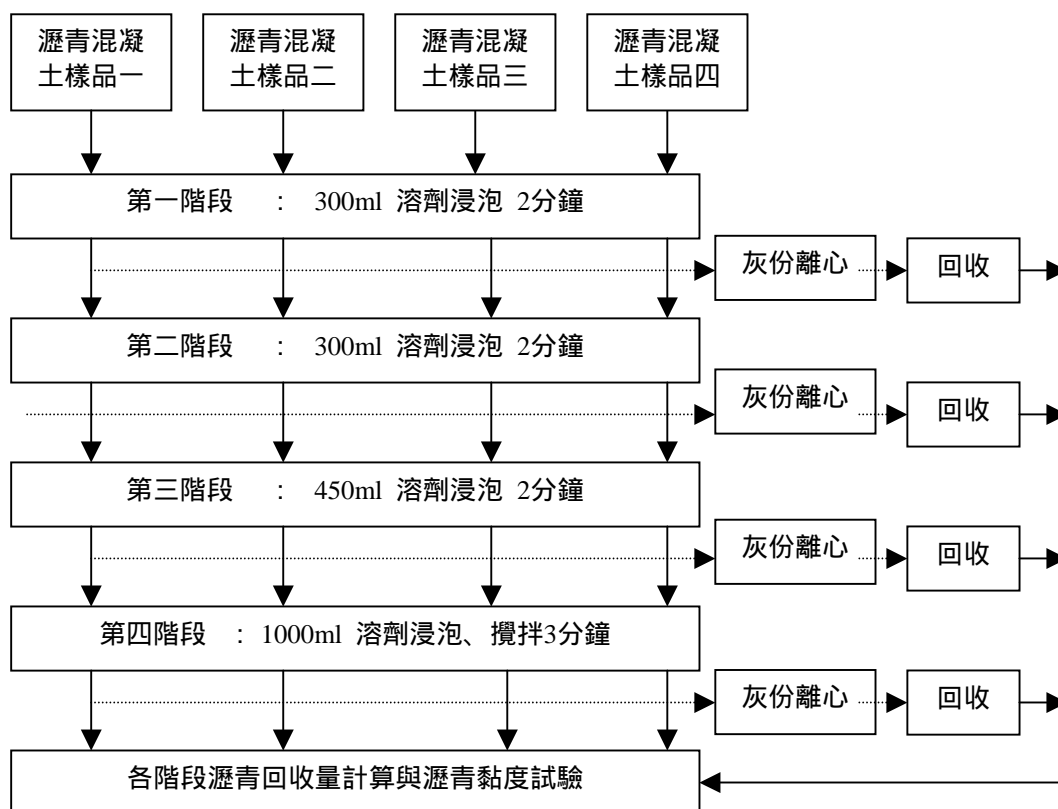


圖 2、本研究進行之分段回收法試驗流程

分段回收之瀝青量部份，試驗結果整理如表三所示，由表三可知含刨除料之混合物皆較全新瀝青混凝土難將瀝青以溶劑洗出，與刨除料相比，添加新瀝青的再生料有瀝青較易於前三階段洗出之現象，是否可以代表新瀝青之分子已擴散入舊瀝青，而使舊瀝青較易被洗出，研究人員認為仍只是一種證據薄弱的推論，由於此種試驗方法廢時費力，本研究並未進行重覆試驗，因此無法對各試驗值的差異是否顯著作統計分析。由表三亦可看出，無論哪一種混合料，第一階段皆洗出大於 40% 以上的瀝青，前二皆段則可洗出 75% 以上的瀝青。

表三、本研究四種瀝青混合料分段回收各階段累積洗出瀝青量百分比

瀝青混合物類別	各階段累積洗出瀝青重量百分比			
	階段一	階段二	階段三	階段四
全新瀝青混凝土	51.29	88.18	97.43	100
刨除料	44.76	77.3	92.13	100
40%RAP 再生瀝青混凝土	48.38	82.86	95.18	100
100%RAP 再生瀝青混凝土	44.81	78.94	95.31	100

至於各種混合料分段回收各階段之回收瀝青 60 黏度值，整理如表四所示，刨除料之瀝青含量為 4.15%，100%RAP 之再生瀝青混凝土中，新瀝青只佔總瀝青量之 17%，由表四中可知，整體回收黏度為 9,626poise，已超出一般鋪路等級瀝青之黏度範圍，但由各階段黏度值，可知新瀝青似乎有將舊瀝青軟化之效果，然因新瀝青百分比過低，軟化的量，若改以黏度較低之新瀝青，則應可將黏度調至鋪路瀝青之 8,000poises 以下，此時各階段黏度是否均勻，則未可知。

表四、本研究四種瀝青混合料分段回收各階段回收瀝青 60 黏度值

瀝青混合物類別 (新瀝青 60 黏度：1,174)	各階段收瀝青 60 黏度值(poises)					依各階段計算 整體黏度**
	整體回收	階段一	階段二	階段三	階段四	
全新瀝青混凝土	未測	2,079	2,282	2,217	*	略
刨除料	10,887	10,146	11,745	10,684	8,196	10,566
40%RAP 再生瀝青混凝土	2,080	1,840	2,436	2,540	2,280	2,129
100%RAP 再生瀝青混凝土	9,626	9,218	9,054	9,369	6,782	9,053

註：\* 本階段所得瀝青量不夠執行黏度試驗。

\*\* 計算式[6]為：

$$\log(\log \eta) = p_1 \log(\log \eta_1) + p_2 \log(\log \eta_2) + p_3 \log(\log \eta_3) + p_4 \log(\log \eta_4)$$

此中

$\eta$  為混合整體黏度、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$  為各階段之黏度。

$p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$  則為各階段佔整體比例。

至於 40%RAP 再生瀝青混凝土，表四中明顯顯示，黏度為 1,174poises 的針入度 85/100 瀝青，已將再生瀝青混凝土中瀝青黏度軟化為 2,080poises，此數值與分段回收各階段瀝青量與黏度，用理論計算[6]之 2,129poises 相當接近，且各階段之黏度差異不大，應可用以說明本研究採用之針入度 85/100 瀝青，具有將舊瀝青軟化的效果，此現象可以圖 3 表示，圖 3 中縱座標為黏度，橫座標為裹覆骨材瀝青膜由外至內之厚度，依刨除料



瀝青含量為 4.15%，拌製之再生成品瀝青含量 5.50% 計算，新瀝青佔總瀝青量之 69.8%，與前述 100% RAP 再生樣品中，新瀝青只佔 17%，差異相當大；目前工程會「再生瀝青混凝土鋪面施工特定條款」（以下簡稱特定條款）[7]，限定刨除料上限為 40%，若以針入度 85/100 瀝青為新瀝青，假設刨除料瀝青含量為 4.50%、再生成品總瀝青量為 5.00%，則新瀝青佔 64%，新瀝青黏度為 1,000poises。既使刨除料黏度高達 1,000,000poises，依理論計算，成品整體黏度也只有 7,084poises，仍在一般鋪路瀝青黏度範圍內，足可見限定刨除料上限為 40% 的效果，將可使國內本土再生瀝青混凝土之成品黏度，被有效控制一般在一般鋪路瀝青之範圍，不必採用更軟的再生劑。

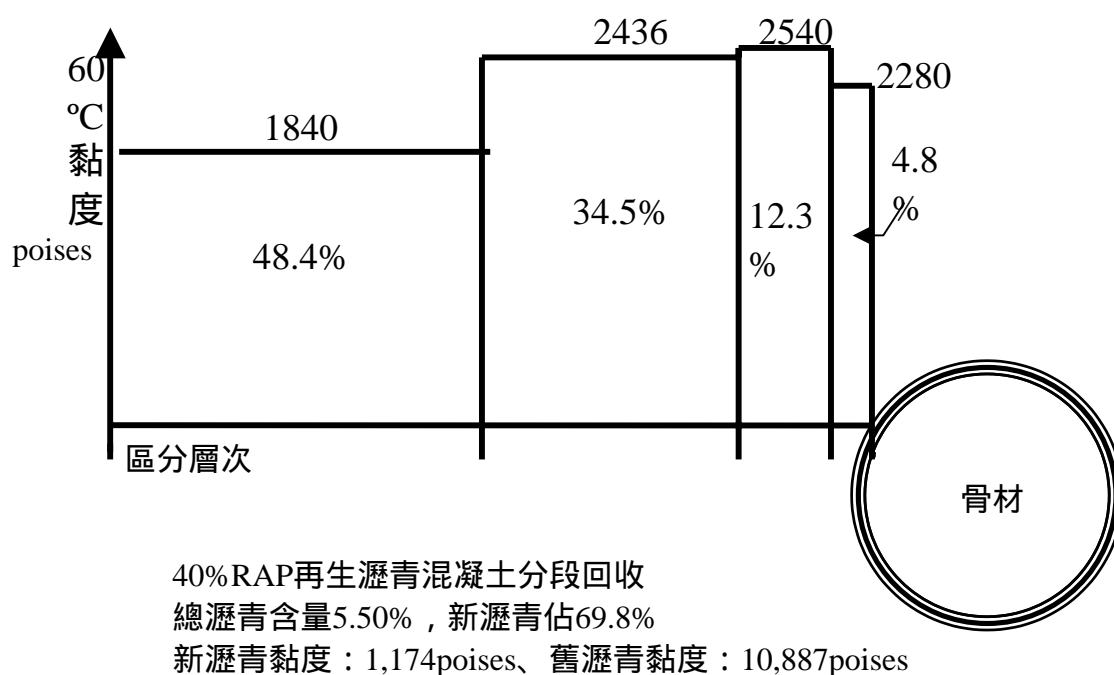


圖 3、分段回收法試驗結果之圖示

## 五、結論與建議

本研究為確認本土產製再生瀝青混凝土之拌合均勻性，和新瀝青對舊瀝青的軟化效率，以本土材料，完成美國學術文獻中引用的化學染色法與分段回收法之試作，本研究建議採用的化學染色法，將可用於製程設備的選擇，以排除拌合不均的製程，而建議採用的分段回收法，可用於排除軟化效率不佳的新瀝青或再生劑。

依目前工程會之特定條款規定，生產熱拌再生瀝青混凝土之拌合廠，必需具有刨除料之加熱設備，將刨除料加熱後再與新料拌合，對再生成品拌合均勻性，將有很大的提昇，應較少拌合不均的狀況發生，若對製程的此項能力有顧慮時，可採用化學染色法進行評估，依本研究試作之結果，採用新瀝青重量 8% 的酸性染料 Teron Red AFG，以高剪力拌合機拌合均勻，製成的馬歇爾試體，經乾鋸成切鋸面後，可以一般瀝青試驗室夯製馬歇爾試體使用的薄濾紙潤濕後，作為染布，以染色法判斷再生瀝青混凝土之拌合均勻性。此種檢驗方法的困難處，是必需將色粉均勻拌入所用新瀝青中，在試驗室中可以本研究採用之高剪力拌合機執行，在實際製程中則較為困難。

設若分段回收法各階段回收所得瀝青，確可代表再生瀝青混凝土中瀝青膜之各層次，則本研究採用之針入度 85/100 瀝青，將具有將刨除料軟化之良好效率，而工程會特定條款中限制刨除料添加量為 40% 之條款，將可確保現階段生產再生瀝青混凝土成品之黏度在鋪路瀝青範圍內，只要採用慣用針入度 85/100 瀝青為新瀝青即可，不必特別選用其它的再生劑，但長期而言，發展一種評估再生劑軟化效率的方法是必需的，本研究採用之分段回收法，執行上耗時費力，尚無法作為一般檢驗單位檢測用的試驗方法，研究人員認為仍有改進或尋求其它較方便試驗方法的必要。

## 誌謝

本研究得以進行，乃由行政院國家科學委員會 NSC87-2211-E-216-010 之經費補助，研究所用之色粉，則由財團法人中國紡織研究中心染整工業部紡織化學研究組組長陳崇裕博士，按本研究之需求，代為選擇並免費提供，於此一併致以謝忱。

## 參考文獻

- 1、 T. C. Lee, Ronald L. Terrel, and Joe P. Mahoney, “Measurement of Mixing Efficiency in Pavement Recycling,” APPT Vol.52, 1983, pp. 61~87.
- 2、 Asmed Samy Noureldin and Leonard E. Wood, “Rejuvenator Diffusion in Binder Film for Hot-Mix Recycled Asphalt Pavement,” Transportation Research Record No. 1115, 1985, pp. 51~61
- 3、 H. C. Samuel and J. R. Wolosick, “Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Materials,” Transportation Research Record No. 777, 1980, pp. 12~22.
- 4、 The Asphalt Institute, Principles of Construction of Hot Mix Asphalt Pavement, Manual Series No. 22, 1983.
- 5、 邱垂德等，熱拌再生瀝青混凝土品質驗證期中報告，行政院公共工程委員會專案研究計畫，中華大學土木工程學系執行，民國 86 年 12 月，附錄一。
- 6、 Mang Tia, “Fundamentals of Asphalt Pavement Recycling-Mix Design and Quality Control”, Proceeding of The First National Conference on Pavement Recycling, Taiwan, 1993.
- 7、 行政院公共工程委員會，「再生瀝青混凝土鋪面施工特定條款」，民國 86 年 8 月。

## 英文摘要

### A Study on Test Methods for Evaluating Mixing Efficiency and Asphalt Diffusion of Recycled Hot Mix Asphalt

C. T. Chiu<sup>1</sup>      H. C. Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chung Hua University

<sup>2</sup> Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chung Hua University

## Abstract

The environmental considerations and lack of aggregate resources make the recycling of old pavements an imminent task for pavement engineers in Taiwan. This particular study

is sponsored by National Science Council to evaluate test methods for identifying the mixing and asphalt diffusion of recycled hot mix produced in Taiwan. The dye chemistry technique and stage extraction coped with rotovapor recovery, which were introduced in the literature, were investigated by using local materials. These two test methods are found to be able to identify non-homogeneous mix and effective recycling agent, respectively. Due to the long performing time and complex procedures needed, however, these two methods are unable to be used as routine tests.