

瀝青混凝土級配設計粒料構架形成特性

夏明勝*

摘要

Bailey 級配調整法主要在分析級配粒料的粒徑分佈，如何在現有粒料下調整其粗細顆粒比例，以使級配產生粒料構架，如此能生產出抗車轍、及耐久的瀝青混凝土鋪面。並且在配合設計的過程中，依據選擇單位重 CUW、CA Ratio、 FA_c 、及 FA_f 等參數與 VMA 的變化關係，來調整整體級配的體積特性，一方面可以配合規範值，另一方面可以滿足工易性及使用績效的需求。CA Ratio 增加，則可使 VMA 增加； FA_c 增加則會令 VMA 下降； FA_f 增加亦會使 VMA 下降。但是選擇單位重 CUW 的變化，則會對粗級配及細級配造成不同影響，CUW 增加時，粗級配中的 VMA 會增加；而細級配中的 VMA 會下降。

關鍵字：Bailey、級配、標稱最大粒徑、粒料構架、粒料相嵌、VMA、粗粒料、細粒料、單位重

壹、前言

瀝青混凝土由粗、細粒料加上瀝青黏結劑拌合而成，其中不同尺寸的礦物粒料是十分堅硬的碎石及砂，而瀝青黏結劑相對於礦物粒料而言，是十分柔軟的材料，瀝青混凝土作為鋪面材料，其對於交通及環境所施加之各種載重所表現的行為，與組成材料的性質及配合比例（體積比例）有關。作用在瀝青混凝土上的載重通常由礦物粒料構架所承擔，而礦物粒料構架的性質與粒料的硬度、形狀、表面紋理、及級配分佈有關。

瀝青混凝土配合設計中，對於級配的選擇，如何將粗、細粒料做適當比例配合，以達設計目標的過程是十分繁瑣複雜的作業，通常靠設計者的經驗及試誤(trial and error)過程，級配究竟設計得較粗，抑或較細？不同尺寸的級配，其在實際使用時，績效表現如何？施工時是否容易夯壓？是否會產生粒料分離現象？粒料間空隙率(Voids in Mineral Aggregates, VMA)含量高低及其隨著級配改變如何變化？均為級配設計時要考慮的問題。

從前工程師在設計級配時，通常使用 0.45 次方級配圖(0.45 power grading chart)做為工具，使用的主要原則為“將級配曲線離開最大密度線，可增加 VMA。”如此而外，改變級配曲線對其他性質的影響，無從得知，設計者僅能從經驗中得知不同性質的變化。

本文所介紹的 Bailey 級配調整法為一系統性方法，考量級配夯壓時，粒料的擠壓緊密特性(packing characteristics)，就可得的粒料，將粗、細粒料比例作適當配合，使得混和料中的粗顆粒能達到顆粒與顆粒相嵌的粒料構架，如此能確保混和料具有高度抗車轍性能及耐久性。

所謂級配為不同尺寸顆粒的組合體，長久以來科學家及工程師對不同尺寸的顆粒材料在圍束

* 公路總局東西向快速公路高南區工程處副處長

體積內的壓實行爲十分有興趣，1900 年代 Weymouth 研究不同尺寸顆粒球體所組成級配所能形成最大密度，其研究結果認爲，縱軸爲過篩百分比，橫軸爲顆粒尺寸，以對數尺度所繪之過篩顆粒尺寸分佈曲線，斜率 0.5 之直線爲最大密度級配曲線。

不同顆粒尺寸分佈對級配壓實度會有一定影響，以實際工程上會使用的礫石顆粒，而非理論性光滑圓球，來研究級配分佈與壓實度關係時，繪製在 log-log 雙對數座標上，直線之級配曲線可得最大夯實密度，惟與球型顆粒不同的是，最大密度曲線之斜率爲 0.45。此一結果同時適用於碎石及未軋碎之礫石⁽¹⁾。

0.45 曲線斜率之獲得是使用漸進式夯實方法以達到最大壓實密度，該法首先將二種不同尺寸顆粒混和，求得達到最大密度時之混和比例。然後在原混和料中加入第三種較小尺寸粒料，用相同方法決定最大壓實密度時，兩者之比例。如此循環，逐步加入更小尺寸顆粒。

1960 年代，美國聯邦公路局 (FHWA) 發展出 0.45 次方 (0.45 power) 級配曲線作爲決定級配最大密度及調整級配使用。該工具是依據 Goode 及 Lufsey⁽²⁾ 在公路工程局 (Bureau of Public Road) 之研究成果，他們使用實際道路工程之材料作爲試驗材料，根據研究結果發展出一種特殊圖示曲線，縱軸爲過篩百分率，橫軸爲篩尺寸之 0.45 次方，這一特殊的 0.45 次方級配曲線一直被工程界沿用至今，作爲調整級配單位重之工具。

混和料中不同尺寸粒料的比例可用以決定粒料間的空隙 (VMA)，先量測或預估細小粒料 (dust) 顆粒尺寸粒料之 VMA，然後使用 Hudson 及 Davis⁽³⁾ 之建議方法來決定級配之 VMA，但由於預估細小顆粒粒料 VMA 十分困難且易致誤差，故未被工程界廣泛採用。

Huber 及 Shuler⁽⁴⁾ 研究發現，在 0.45 次方曲線上，由原點連結到最大粒徑 (過篩率 100% 的最小篩號) 之直線爲最大密度曲線。他們建議「標稱最大粒徑 (Nominal Maximum Partical Size, NMPS)」之定義必須做適當修正，建議標稱最大粒徑定義爲：「留篩率超過 10% 的最大篩號再大一號之篩。」另外，當級配固定時，粒料的形狀及表面紋理會影響級配顆粒的夯壓緊實程度，圓角狀礫石所組成之混和料的空隙率，由於較易夯實，故其在相同夯實能量下，將會較碎石所組成混和料之空隙率，約少 1%。

貳、Bailey 級配調整法

一、Bailey 方法簡介

一般而言，在配合設計時，混和料的級配設計成果，與設計者的經驗有甚大關係，尤其是在剛開始選擇混和料試拌級配時。許多業界及研究者相信瀝青混凝土對車轍的抵抗性能主要依靠混和料之粒料構架 (aggregates skeleton)，即粒料顆粒彼此間所形成之相嵌 (interlocking) 作用以達到力量的有效傳遞，但是如何去評估粒料顆粒間的相嵌程度是一問題。混和料中粒料顆粒間的空隙含量，即 VMA 對瀝青混凝土的實際使用績效有甚大影響，在配合設計時如何改變級配以調整 VMA 數值是十分複雜的過程，從前配合設計工程師使用 0.45 次方級配圖來調整級配曲線，以達到調整 VMA 的目的，例如讓級配曲線遠離最大密度線 (maximum density line)，可增加混和料中之空隙，但是這多少要靠設計者之經驗與試誤結果。Bailey 方法提供了明確的遵循步驟及調整參數，讓調整級配以改變 VMA 的過程成爲一系統性步驟，級配設計成果，以產生相嵌作用的粒料構架，做爲瀝青混凝土承擔載重之結構，並且在達到設計目的的同時，能夠保持粒料級配的分佈均勻性⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

Bailey 級配調整方法不是一種配合設計法，而是用來在試驗室及工地分析及調整瀝青混凝土混和料級配的工具，它能让設計者及施工者能正確的評價級配中粒料，在夯壓過程中粒料如何擠實，混和料的體積特性的變化，及施工性的變化。Bailey 法主要重點集中在評估混和料的夯壓填實程度 (degree of packing)，該夯壓填實程度對於配合設計最終所得之混和料級配成果及夯實度具有決定性影響。欲瞭解級配粒料的夯壓填實行爲，我們必須先決定在粒料構架中何者形成骨材構架？何者爲骨材構架空隙的填充者？級配夯壓填實的特性受到許多因素影響，如：粒料的形狀、

強度、表面紋理、級配組成、及夯壓能量。Bailey 法能讓設計者設計一堅實的粒料構架，如此能有效的抵擋永久變形，同時藉由調整粗、細粒料的夯壓填實程度去調整混和料中 VMA 大小，如此可確保有足夠的瀝青黏結料含量，以達到瀝青混凝土的耐久性。

二、Bailey 級配調整法依據及主要原則

欲將不同尺寸粒料顆粒組合，以形成粒料相嵌構架，並且能夠滿足瀝青混凝土級配設計的所有體積性質(volumetric properties)，必須瞭解及控制影響級配混合料的各项因素。

Bailey 法在決定粒料級配與混合料的體積性質二者間的基本關係時應用下列兩條件：

1. 粒料夯壓緊實程度(degree of packing)及特性。
2. 粗粒料(coarse aggregate)及細粒料(fine aggregate)的定義

基於上述兩大條件，Bailey 法的主要步驟為：

1. 將不同尺寸粒料做體積組合。
2. 分析組合後混合料之特性。

基於上述之考量，Bailey 法在調整級配時依循四大原則：

1. 首先區分級配中何者為粗粒料、何者為細粒料，如圖 1 中①所示。決定何者組成粒料構架並產生空隙，何者填入縫隙。並且決定何者主導粒料構架結構（粗級配抑或細級配）。
2. 級配中粗粒料部分的夯壓緊實程度，會影響到細粒料的夯壓緊實情形，如圖 1 中②所示。
3. 細粒料中的粗顆粒，圖 1 中（③-④）的部分，與整體級配中的細粒料的夯壓緊實狀況有關。
4. 細粒料中的細顆粒，圖 1 中④，與混和料中的細粒料級配的夯壓緊實狀況有關。

以上每個原則均在級配混和料中的顆粒排列緊實程度及 VMA 上扮演著一定的角色，且與級配的現地施工時的壓實度及是否容易產生粒料分離有關。調整級配時，在不同試拌料間如何評估 VMA 及空隙率的變化，與上述四原則有密切關連。

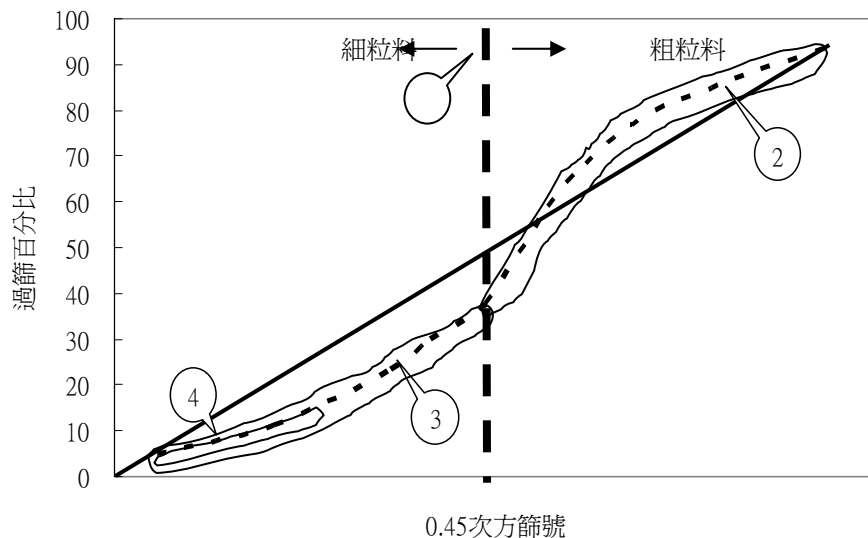


圖 1、Bailey 法四大原則與級配粒料尺寸之關係示意圖

三、粒料夯壓填實特性

顆粒狀材料無法完全填滿一任意體積，顆粒與顆粒間總會存在有一定之空隙，單位體積中能被填實的百分比取決於：

1. 夯實能力的輸入：有數種夯實顆粒材料的方法，例如靜態加壓法(static pressure)、衝擊法（如馬歇爾夯壓儀）、剪力搓揉法（如旋轉夯壓儀或加州搓揉夯壓儀）。夯壓輸入能量高者，可得較高壓密度，例如較高的靜態壓力、較多的衝擊次數、及較多的旋轉搓揉次數。
2. 顆粒形狀：不規則且扁長形顆粒在密實的狀態下會抵抗夯壓的作用。接近立方形的規則顆粒形狀，則較易方向及位置，如此將較易夯實。
3. 粒料表面紋理：較光滑的表面在夯壓時較容易調整方向及滑動，故較容易夯實。粗糙的粒料表面紋理，使得顆粒間摩擦力增加，顆粒與顆粒間較不易相對移動，因此較難夯實。
4. 不同尺寸顆粒分佈比例，即級配：單一尺寸粒料，無法像多尺寸粒料組合能獲得較高單位重。
5. 粒料強度：在拌合及夯壓過程中，粒料顆粒會產生擊碎或磨損，級配會產生一定程度的降格(degradation)，故強度低的粒料會較強度高的粒料產生較大的降格，並且能夠被夯實的更為緊實。

四、粗、細粒料之定義

傳統上瀝青混凝土級配料中，粗粒料與細粒料以 4.75mm 篩來做區分，通過 4.75mm 篩者稱為細粒料；留在 4.75mm 篩以上者稱為粗粒料。不因級配標稱最大粒徑的不同而改變，也就是說，標稱最大粒徑為 25mm 之級配，與標稱最大粒徑為 12.5mm 或 9.5mm 的級配，其粗、細粒料的分界皆為 4.75mm 篩。

Bailey 法中，粗、細粒料的定義，依據不同標稱最大粒徑及粒料夯壓填實程度有而有不同。Bailey 級配調整法的主要概念為：決定級配料中何者為粗粒料(Coarse Aggregate, CA)、何者為細粒料(Fine Aggregate, FA)，將之適當組合，以決定何者形成骨架，何者填入空隙。粗、細粒料間之區分篩號稱之為第一控制篩(PriMayy Control Sieve, PCS)，如圖 2 所示。第一控制篩定義為：「最接近標稱最大粒徑 0.22 倍之篩號」：

$$PCS = NMPS \times 0.22 \quad (1)$$

PCS：級配之第一控制篩號。

NMPS：級配之標稱最大粒徑，在 Bailey 法中之定義為：「留篩率超過 10% 的最大篩號再大一號之篩。」

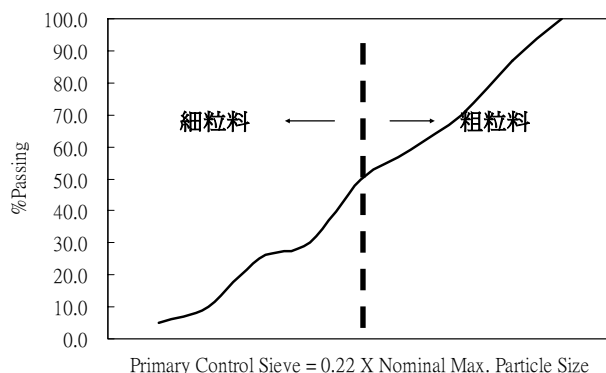


圖 2、粗、細粒料及第一控制篩示意圖

PCS 式中的係數 0.22，係由經驗決定。顆粒與顆粒間的縫隙大小取決於顆粒形狀及尺寸。當顆粒形狀為圓形時，顆粒與顆粒接觸時中間的空隙尺寸為 0.15 顆粒直徑（即 0.15d）；當三個接觸的顆粒其中二個為圓形，一個為平面時，其中間的空隙為 0.2 顆粒直徑（即 0.2d）；當三個接

觸的顆粒其中一個為圓形，二個為平面時，其中間的空隙為 0.24 顆粒直徑（即 0.24d）；當三個接觸的顆粒其接觸面均為平面時，中間的空隙為 0.29 顆粒直徑（即 0.29d），四者取平均得 0.22d，如圖 3 所示。表 1 所列為不同標稱最大粒徑級配之 PCS 篩號，若採用 0.24 作為 PCS 計算依據者（即三顆接觸顆粒中至少一顆為平面），PCS 篩號仍不變。

表 1、標稱最大粒徑與 PCS 關係

| NMPS | NMPS × 0.22 | PCS |
|--------|-------------|--------|
| 37.5mm | 8.250mm | 9.50mm |
| 25.0mm | 5.500mm | 4.75mm |
| 19.0mm | 4.180mm | 4.75mm |
| 12.5mm | 2.750mm | 2.36mm |
| 9.50mm | 2.090mm | 2.36mm |
| 4.75mm | 1.045mm | 1.18mm |

如表 1 所示，粗粒料之空隙尺寸與粒料尺寸及形狀有關，因此，標稱最大粒徑 9.5mm 粒料級配的平均空隙尺寸，小於標稱最大粒徑 37.5mm 粒料級配的平均空隙尺寸。由於平均空隙尺寸的差異，所以不同尺寸的級配，其粗粒料間所產生的空隙，必須以不同尺寸的細粒料予以填充。第一控制篩 PCS 的功用，不僅只在區分粗、細粒料的尺寸，另外還在區分形成粒料構架的粗粒料的比例，及填縫的細粒料的比例。大於 PCS 尺寸之粒料為粗粒料，小於 PCS 尺寸之粒料為細粒料。

五、粒料混合之體積特性

除了一般性的粒料體積特性，如級配分佈、虛容積比重(Bulk Specific Gravity, Gsb)外，粗粒料及細粒料個別的夯壓緊實特性以鬆單位重(Loose Unit Weight, LUW)及搗實單位重(Rodded Unit Weight, RUW)來評估，試驗步驟與 AASHTO T19 求粒料單位重與空隙率的方法相類似。但是將粗粒料及細粒料分開單獨試驗。

若每一料堆的粒料尺寸大多數大於第一控制篩 PCS 者，該料堆稱之為粗料堆；若料堆中大多數粒料顆粒通過第一控制篩 PCS 者，稱之為細料堆。對於粗粒料或細粒料在單位體積重量試驗時，其空隙率的多寡主要受到相對顆粒尺寸，即小於 PCS 尺寸之細粒料和大於 PCS 尺寸之粗粒料所影響，所以 PCS 稱之為第一控制篩。

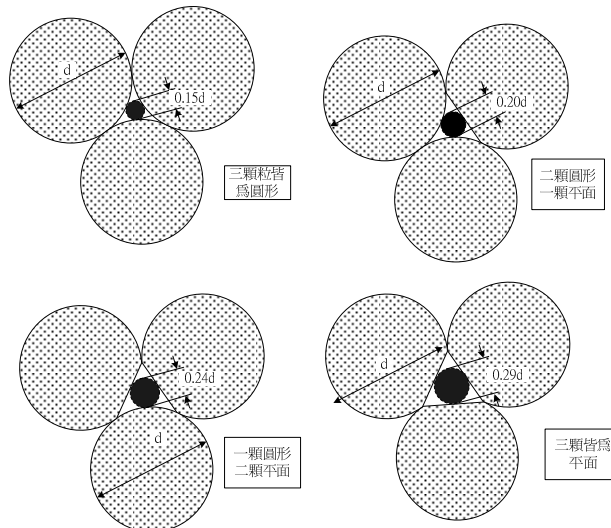


圖 3、顆粒形狀與空隙尺寸關係圖

六、VMA 之變化

在配合設計時，經過一定的夯壓能量，例如馬歇爾配合設計中之 75 下打擊次數，或 Superpave 中 100 次旋轉夯壓，可將混和料夯實至一定程度，夯實後混和料中的 VMA 含量與三個因素有關：

1. 級配
2. 粒料表面紋理
3. 粒料形狀

改變混和料的粒料尺寸分佈，即改變級配，會影響混和料骨材構架間的空隙分佈。

若混和料級配固定不變，在一定夯實能量下，混和料之夯實程度與粒料表面紋理有關，粒料表面粗糙者，顆粒與顆粒間的摩擦力大，顆粒與顆粒間較不亦相對移動，故對夯實的抵抗力大，比較不容易夯實，因此其夯實後之 VMA 將較高。一般而言，破碎的粒料表面較非破碎的粒料表面有較多的紋理。礫石材料，破碎面愈多者，其粗糙的表面紋理愈高。基本上破碎面愈多的粒料會含有愈多的表面紋理，但並非一定如此，有些礦物材料其破碎面十分光滑，對於這種材料而言，破碎面對表面紋理的增加，並無助益。

在一定的級配曲線下，粒料的顆粒形狀也會影響混和料夯實程度，這與夯實能量輸入的形式有關。在旋轉夯壓機，或類似交通車輛輪重碾壓的作用下，接近立方體的顆粒形狀，其壓實度將無法如較扁平粒料來得緊密，扁平粒料容易上下堆疊平躺，顆粒與顆粒間之空隙較小，故 VMA 較低。在車輛輪重碾壓的作用下，混和料中之個別顆粒容易平躺並滾落堆疊，這個現象正如旋轉夯壓機製作混和料試體的狀況。但是在馬歇爾配合設計中，使用馬歇爾夯壓機製作試體時，其使用夯擊作用夯實試體，在這種情形下，混和料中的粒料顆粒較無法自由轉動，扁平粒料容易形成架橋作用，而使得混和料中空隙較多，因此 VMA 較高。因此不同的顆粒形狀，在不同夯壓方法下，其結果是會有差異的，在解讀試驗數據時宜謹慎。

七、以體積為基礎組合粗、細粒料

所有的級配組合均含有一定尺寸及數量的空隙，該尺寸及數量特性與級配之夯壓緊實程度有關，在組合粗、細粒料前，首先必須決定粗粒料構架所形成之空隙尺寸及體積為何，然後使用適量的細粒料填入這些空隙中。

配合設計主要以體積特性為分析基礎，但是實際施做時是以重量為組合依據，當不同料堆的材質有差異時，我們必須將以重量為基礎所計算之過篩率，修正為以體積為基礎的過篩率。Bailey 法為了評估粒料間相嵌的程度，設計者必須以體積為基礎來設計混合料級配。

以體積來組合粒料，必須獲得更多的粒料特性，對於每一粗粒料堆，必須量測其鬆單位重及搗實單位重（將在下一節述及）；對於每一細粒料堆，必須量測其搗實單位重。在一定的空隙結構下，這些量測值能夠提供評估粒料相嵌性質的體積數據。

八、鬆單位重及搗實單位重

鬆單位重之量測，係將粒料傾倒入一定容積的容器內，不做任何搗實動作，所測得之單位重。量測容器之直徑必須至少大於粒料標稱最大粒徑的 10 倍以上，以使邊界效應(edge effect)對粒料填擠緊實程度的影響降至最低。容器的體積對於粒料填擠緊實程度的特性亦有所影響，對於標稱最大粒徑小於 25mm 的粒料而言，0.007~0.009 m³ 的圓形金屬容器應已足夠。容積約 0.001 m³ 的 CBR 試驗的 Proctor 金屬模，可適用於標稱最大粒徑小於 4.75mm 的細粒料量測鬆單位重使用。使用一堅固，直徑約 15mm 的金屬棒作為粒料刮平使用。將粒料乾燥完成後，傾倒入量測容器內，直至充滿溢出為止，然後使用金屬棒刮平，在施做過程中應注意勿加壓夯實，然後量測單位重，一次至少製作三組試驗取平均，得鬆單位重。

粒料搗實單位重，是將粒料分層傾入量測容器內，分三層加入容器，每層均勻搗實 25 下，然後將滿溢部分刮平，量測單位體積重量，一次至少製作三組試驗取平均，得搗實單位重。在量

測搗實單位重過程中，每次均應使用新材料，以免粒料在搗實過程中發生級配降格現象。對於混合料級配所用的每一不同尺寸粗粒料堆，均應分別施做鬆單位重及搗實單位重。

分別決定粗粒料中鬆單位重及搗實單位重時的空隙率，一般而言，不同狀況下粗粒料空隙率，大概在以下之範圍內：

1. 鬆單位重時之空隙率約為 43%~49%。
2. 搗實單位重時之空隙率約為 37%~43%。
3. 鬆單位重及搗實單位重兩者間空隙率之差異約為 4%~8%。

對於大多數細粒料而言，空隙率範圍如下：

1. 鬆單位重時之空隙率約為 35%~43%。
2. 搗實單位重時之空隙率約為 28%~36%。
3. 鬆單位重及搗實單位重兩者間空隙率之差異約為 5%~10%。

九、粗粒料選定單位重與粗級配、細級配分類

在級配設計之初，設計者必須先決定其所設計的級配中粗粒料的相嵌程度，因此設計者必須先決定粗粒料的選定單位體積重量(Chosen Unit Weight, CUW)，如此能夠決定在整體混合料中，粗粒料所佔體積，及粗粒料的相嵌程度。在 bailey 法中，將級配區分為粗級配(coarse graded)及細級配(fine graded)。所謂的粗級配為：「由粗粒料產生相嵌之粒料構架狀況下之級配」；而所謂的細級配是：「粗粒料數量不足，故無法形成粒料構架，因此粗粒料被細粒料撐開，粗粒料顆粒間彼此互不接觸，粗粒料顆粒浮於細粒料顆粒之間的狀況」。因此在粗級配的狀況下，載重大部分由粗粒料構架所承擔，而在細級配的狀況下，載重主要由細粒料承擔。

粗粒料的鬆單位重 LUW 為粗粒料產生相嵌作用之下限，理論上鬆單位重為粗級配與細級配的分界點，當設計之初所決定之粗粒料單位重小於粗粒料鬆單位重時，則單位體積中粗粒料的數量不足，粗粒料將被細粒料撐開，無法形成顆粒與顆粒互相接觸的狀況，因此無法產生粗粒料骨材構架。這時即為細級配的狀況，混合料的性質主要與細粒料特性有關。

密級配粗粒料的搗實單位重 RUW 為粗粒料產生相嵌作用之上限，通常 RUW 約等於 110% LUW，當粗粒料的選定單位重 CUW 接近 RUW 時，為達到設計壓密度的夯實能量明顯增加，實際施工時將較難夯實。

密級配的 CUW 通常以粗粒料的 LUW 的百分比來表示，若欲設計為粗級配，且產生粗粒料顆粒相嵌狀況時，CUW 應介於 95%LUW~105%LUW 之間。若粒料材質強度不足，容易產生級配降格之現象者，CUW 應更接近 105%LUW。應避免 CUW 超過 105%LUW，如此將增加級配降格程度，並且造成施工困難。

當 CUW 小於 90%LUW 時，設計級配即為細級配，此時粒料結構由細粒料主導。對於密級配而言，粗粒料選定單位重 CUW 避免落在 90%LUW~95%LUW 之間，當 CUW 落在這個區間時，級配中粗粒料顆粒的相嵌情形，將會在形成與消失間擺盪，如此將造成粒料結構的不確定性。

在級配混和料中加入瀝青拌和後，由於瀝青料的潤滑作用，使得實際夯壓密度會大於 CUW。同時由於在決定單位重時所用的粗粒料，其中多少會含有一定數量的細粒料，如此會造成量測的單粗粒料位重會較真正粗粒料單位重來得大一些，因此，當 CUW 值即使低到 95%LUW 時，仍會產生一定程度的粗粒料相嵌作用。夯壓時超過 CUW 的過渡壓密程度與下列因素有關：

1. 粒料強度、形狀、及表面紋理。
2. 當量測 LUW 及 RUW 時，粗粒料中所含細粒料的量。
3. 不同料堆粒料拌和之特性。
4. 粗粒料選定單位重 CUW 與搗實單位重 RUW 的關係。
5. 夯壓能量的輸入（夯擊次數 50 下或 75 下）。

當決定了 CUW 後，填入粗粒料空隙中的細粒料的量亦同時決定。就密級配而言，粗粒料單位重決定後，其粗粒料顆粒間的空隙將由相同體積的細粒料填充，而這細粒料為搗實單位重狀況

下之細粒料，使用搗實單位種的細粒料目的在確保細粒料結構接近其最大強度。

十、級配分析的其他相關參數

選定標稱最大粒徑後，決定第一控制篩 PCS 篩號，然後決定粗粒料選定單位重 CUW，如此決定了粗粒料顆粒相嵌程度。Bailey 法在分析級配時，將粗粒料及細粒料分開分析其組成成分。圖 4 顯示粗粒料及細粒料中之顆粒再分類點，利用該等再分類點，可進一步分別分析粗粒料或細粒料中之顆粒夯壓緊實程度及其對級配體積特性的影響。表 2 所列為不同之標稱最大粒徑所對應之細粒料再分類的第二控制篩(Secondary Control Sieve, SCS)，SCS 可將細粒料中之顆粒再一次分類為粗顆粒與細顆粒。表 3 為第三控制篩(Tertiary Control Sieve, TCS)，TCS 之功用與 SCS 類似，可將細粒料中的細顆粒再分類為粗顆粒與細顆粒材料。

1. 粗粒料組成：

粗配中的粗粒料為停留於 PCS 以上之部分，在這粗粒料中，又可使用圖 4 中所示的粗粒料中間篩號(Half Sieve of CA)將之分類為粗顆粒及細顆粒，中間篩號定義為：

$$\text{Half Sieve of CA} = \text{NMPS} \times 0.5 \quad (2)$$

粗粒料中間篩代表粗粒料結構中的分界點，如果變化該篩號，將會改變粗粒料的夯壓緊密程度特性。Bailey 級配設計法的重要觀念為，粗粒料形成骨材構架，細粒料為填縫材料。雖然粗粒料中間篩將級配中的粗粒料再細分為粗顆粒及細顆粒，但是大於 PCS，小於 Half Sieve 的粗粒料中的細顆粒之尺寸仍然大於粗粒料骨材構架中的縫隙尺寸，故其仍然是粗粒料骨材構架的一部份，而非填縫料。

表 4 中所列的 CA Ratio 與級配中粗粒料的夯壓緊實特性有關，其定義如下：

$$\text{CA Ratio} = \frac{(\text{Half Sieve 過篩百分比}) - (\text{PCS 過篩百分比})}{100 - (\text{Half Sieve 過篩百分比})} \quad (3)$$

CA Ratio 的分子代表粗粒料中的細顆粒部分，稱之為攔截子(interceptor)，因為這些粗粒料中的細顆粒，會將粗粒料構架中的粗顆粒推開，如此將影響粗粒料夯壓特性。CA Ratio 的分母代表粗粒料中的粗顆粒部分，稱之為填塞子(plugger)，因為加入這種尺寸的顆粒到級配中時，它會佔據級配體積空間，而減少 VMA 的數值。

如上所述粗粒料中的細顆粒，並不會填入粗粒料構架中的空隙中，它們扮演著插入者的角色，將粗粒料中大於 Half Sieve 的粗顆粒擠開。粗粒料的夯壓緊實特性影響整體級配的 VMA，並且和施工時的壓實度有關。CA Ratio 的最佳值受到許多因素的影響，但是其通常在 0.4~0.8 的範圍內，當 CA Ratio 增加時，VMA 亦跟著增加，即 CA Ratio 與 VMA 的變化方向相同。

CA Ratio 值較低時，通過 PCS 篩的細粒料將會被夯壓得較緊密，而 CA Ratio 值增加時，通過 PCS 篩的細粒料的壓實度就會降低。若混和料之 CA Ratio 值低時，混和料就需要材質較堅固及級配較開放的細粒料，如此方能保持適當的空隙率。CA Ratio 低時，由於粗粒料中顆粒尺寸分佈不均衡，如此施工時將會容易產生粒料分離的狀況(aggregate segregation)。

當 CA Ratio 值接近 1.0，表示粗粒料中的粗顆粒與細顆粒大約均等，任一者均無法主導粗粒料構架之組成，雖然如此較不易造成粒料分離，但是由於級配中攔截子的數量過多，如此將造成粗粒料的不均勻表現，及粗粒料顆粒間無法相嵌良好，在這種狀況下，混和料在實際施工時將不易夯壓且容易產生過大的變位。

當 CA Ratio 值超過 1.0 時，粗粒料中的細顆粒將成為粗粒料構架中的主要成分，此時，粗粒料中的粗顆粒實際扮演著填塞者的角色，由於它在粗粒料構架中成為單獨分開的個體，故其會佔據空間，而減少整體級配之空隙率。

2、細粒料組成：

級配中細粒料的定義為，通過 PCS 的所有粒料。如果細粒料部分單獨視為一個完整的級配時，則可將其再區分為粗、細不同尺寸的顆粒的組成。利用第二控制篩 SCS 可將細粒料再區分為粗顆粒與細顆粒，如同 PCS 將整體級配粒料區分為粗粒料及細粒料之作用般。

若將小於 PCS 的細粒料視為一整體級配，將 PCS 的過篩率視為 100%，如此按比例重新計算 PCS 以下各篩號之過篩率時，在大多數的情況下，小於 PCS 的第一個篩號，通常其留篩百分比都會大於 10% 以上，如此則就細粒料級配而言，原始級配的 PCS 篩號將成為細粒料級配的標稱最大粒徑，即細粒料級配之 NMPS。細粒料之 SCS 定義為：

$$SCS = PCS \times 0.22 \quad (4)$$

若將原始級配中小於 PCS 尺寸之細粒料視為一完整級配時，則相同的觀念，可將之再區分為形成粒料構架之粗顆粒，及填入粒料構架空隙中的細顆粒等兩大部分。而粗顆粒粒料構架所產生的空隙被適當數量的細顆粒填充，此細顆粒的體積不應超過粗顆粒構架的空隙體積，如此方不至破壞粒料構架結構。細粒料中的粗顆粒比例 FA_C 是用來評估細粒料中的粗顆粒構架的夯實特性，其定義為：

$$FA_C = \frac{SCS \text{ 通過百分比}}{PCS \text{ 通過百分比}} \quad (5)$$

對於大多數的密級配混和料而言， FA_C 約介於 0.25~0.50 之間，當該值增加，則整體級配中的細粒料部分將會被壓密的更為緊實。較高的 FA_C 值意味著填充細粒料構架的細顆粒部分增加，通常會造成軟弱的混和料，尤其是使用了天然砂的混和料。 FA_C 值較低時，細粒料中的粗顆粒構架中的空隙體積超過細粒料中的細顆粒體積。若 FA_C 值太低者，將會產生不均勻的級配，致使夯壓困難。

級配料中的空隙率及 VMA 可藉由改變 FA_C 值來控制變化，當 FA_C 值增加時，VMA 將減少，混和料中的空隙率將增加。在 FA_C 、 FA_F 、及 CA Ratio 三者中，以 FA_C 對 VMA 的影響最為顯著。

細粒料中通過 SCS 篩者為細粒料中之細顆粒部分，這一部份之顆粒組成亦可將之視為一完整的級配，其中包括不同尺寸的粗、細顆粒組成。就此一顆粒組成級配而言，SCS 篩即為這部分級配之標稱最大粒徑尺寸。細粒料第三控制篩(Tertiary Control Sieve, TCS)之定義為：

$$TCS = SCS \times 0.22 \quad (6)$$

就像一完整級配一樣，細粒料中通過 SCS 的細顆粒所組成的級配，同樣可將尺寸大於 TCS 的顆粒部分視為粗顆粒，這一部份組成粗顆粒構架，而通過 TCS 的顆粒視為填充粗顆粒構架空隙的細顆粒，為了不破壞粗顆粒構架，細顆粒之總體積不得大於粗顆粒構架中之空隙體積。 FA_F 值可用來評估細粒料中的細顆粒的夯實特性，其定義為：

$$FA_F = \frac{TCS \text{ 通過百分比}}{SCS \text{ 通過百分比}} \quad (7)$$

FA_F 值可用來評估級配中最細顆粒部分的夯實特性，同 FA_C 相同， FA_F 值應該介於 0.25~0.50 之間，如此方不致於粒料構架的空隙被過份填充，而破壞構架穩定性。變更 FA_F 值亦會改變整體級配混和料的體積特性，當 FA_F 值增加時，混和料中之空隙率降低。

表 2、不同尺寸混和料之第二控制篩

| NMPS (mm) | PCS (mm) | PCS X 0.22 | SCS (mm) |
|-----------|----------|------------|----------|
| 37.5 | 9.50 | 2.090 | 2.36 |
| 25.0 | 4.75 | 1.045 | 1.18 |
| 19.0 | 4.75 | 1.045 | 1.18 |
| 12.5 | 2.36 | 0.519 | 0.60 |
| 9.50 | 2.36 | 0.519 | 0.60 |
| 4.75 | 1.18 | 0.260 | 0.30 |

表 3、不同尺寸混和料之細粒料第三控制篩

| NMPS (mm) | PCS (mm) | SCS (mm) | SCS X 0.22 | TCS (mm) |
|-----------|----------|----------|------------|----------|
| 37.5 | 9.50 | 2.36 | 0.519 | 0.600 |
| 25.0 | 4.75 | 1.18 | 0.260 | 0.300 |
| 19.0 | 4.75 | 1.18 | 0.260 | 0.300 |
| 12.5 | 2.36 | 0.60 | 0.132 | 0.150 |
| 9.50 | 2.36 | 0.60 | 0.132 | 0.150 |
| 4.75 | 1.18 | 0.30 | 0.066 | 0.075 |

表 4 所列為不同尺寸級配，粗粒料中的粗顆粒比例(CA Ratio)；細粒料中的粗顆粒比例(CA Ratio of FA, FA_c)；及細粒料中的粗、細顆粒比例(FA Ratio of FA, FA_F)。表中所列 CA Ratio、FA_c 及 FA_F 三個比例為利用 Bailey 法以體積特性設計密級配瀝青混和料所得之計算式。對於不同之粒料來源及材質，表 4 所列之比例，可能並非為粗、細粒料混和之最佳比例，但是經過調整後，最終之混和料級配，仍會得到類似結果。

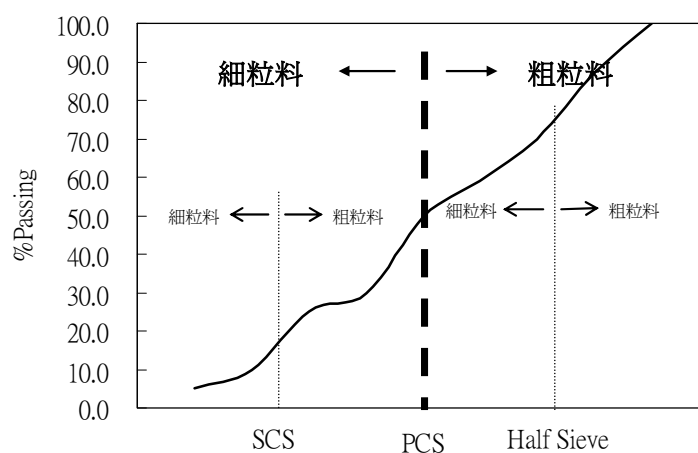


圖 4、粗粒料及細粒料中之粗、細分界點

表 4、粗細粒料控制篩定義及組成

| | | | | |
|------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| NMPS | 25mm | 19mm | 12.5mm | 9.5mm |
| PCS | 4.75mm | 4.75mm | 2.36mm | 2.36mm |
| Half Sieve of CA | 12.5mm | 9.5mm | 4.75mm | 4.75mm |
| CA Ratio | $\frac{P_{12.5} - P_{4.75}}{100 - P_{12.5}}$ | $\frac{P_{9.5} - P_{4.75}}{100 - P_{9.5}}$ | $\frac{P_{4.75} - P_{2.36}}{100 - P_{4.75}}$ | $\frac{P_{4.75} - P_{2.36}}{100 - P_{4.75}}$ |
| SCS | 1.18mm | 1.18mm | 0.60mm | 0.60mm |
| FA _C | $\frac{P_{1.18}}{P_{4.75}}$ | $\frac{P_{1.18}}{P_{4.75}}$ | $\frac{P_{0.6}}{P_{2.36}}$ | $\frac{P_{0.6}}{P_{2.36}}$ |
| TCS | 0.30mm | 0.30mm | 0.15mm | 0.15mm |
| FA _F | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ |

註：P12.5 代表 12.5mm 篩通過百分比，餘類推。

十一、影響級配體積性質之 Bailey 參數

1. 粗粒料的 CA Ratio：這一數值影響粗粒料的夯壓緊實特性，即粗粒料如何形成骨材構架，而細粒料如何填入粗粒料所形成構架中的空隙。
2. 細粒料的 FA_C：這一數值影響級配中細粒料的夯壓緊實特性，即細粒料中的粗顆粒如何形成骨材構架，而細粒料中的細顆粒如何填入粗顆粒所形成構架中的空隙。
3. 細粒料的 FA_F：這一數值影響級配細粒料中的細顆粒的夯壓緊實特性，即細粒料中細顆粒裡的粗粒子如何形成骨材構架，而細粒料中細顆粒裡的細粒子如何填入粗粒子所形成構架中的空隙。

上述三個參數的建議範圍如下：

1. CA Ratio：在不同的 NMPA 值時 CA Ratio 約介於 0.3~0.95 之間。
2. FA_C 值：建議介於 0.35~0.5 之間。
3. FA_F 值：建議介於 0.35~0.5 之間。

上述三個參數對於評估及調整 VMA 有甚大幫助，當試驗室試拌出初步的級配設計後，可依據上述三個參數與 VMA 的關係予以計算調整後，可得進一步的級配設計。

1. 選定單位體積重 CUW 改變的影響：

改變粗粒料的 CUW 會對混和料的體積性質產生顯著的影響，當 CUW 大於 LUW 時，增加 CUW，會增加混和料中的空隙率，VMA 同時跟著增加。這是因為單位體積內的粗粒料體積增加，如此會加強粒料相嵌作用，而使得混和料難以夯實，而使得空隙含量增加。

CUW 的增加與 VMA 的改變量的關係究竟如何？與粒料的形狀及表面紋理有關，在形成粗粒料骨材構架的混和料中，每增加 CUW 5%時，VMA 會增加 0.5%~1.0%。細級配（CUW < 90%LUW）的狀況時，CUW 的改變並不會對 VMA 有顯著影響，因為此時並無粗粒料構架存在。

CUW 改變時，亦會影響混和料夯實的難易度。當 CUW 增加時，單位體積混和料中會有更多的粗粒料，這些多量的粗粒料互相嵌和成一堅實的構架，如此將難於夯實。所以雖然高 CUW 狀況下，可得到堅實的混和料，但相對的會增加施工困難度。

2、CA Ratio 改變的影響

CA Ratio 的改變對於熱拌瀝青混和料的體積性質有顯著影響，該參數反映粒料級配中粗

粒料中的較大顆粒與較小顆粒間的平衡狀況，改變該參數，會改變混和料的夯壓特性。CA Ratio 增加時會使得空隙率及 VMA 增加，這是由於粗粒料中含有更多的攔截子時，粗粒料結構難於壓密。

CA Ratio 的改變與 VMA 的變化關係，與粒料形狀及表面紋理有關，就粗級配而言(CUW > 95%LUW)，CA Ratio 每增加 0.2，VMA 增加約 0.5%~1.0%。

除了對混和料體積性質的影響外，CA Ratio 會對施工產生影響，若 CA Ratio 太低時，混和料容易產生粒料分離，粒料分離時，部分區段會有粗粒料集中，部分區段會缺少粗粒料，如此會減少瀝青混凝土使用壽命。若 CA Ratio 接近，甚至大於 1.0 時，粗粒料部分會不均衡，大於 Half Sieve 的大顆粒和 PCS 與 Half Sieve 之間的較小顆粒兩者間，無一者能主控粒料結構，如此將會造成混和料在夯壓時，產生過大的變形。

3、FAc 及 FA_F 改變的影響

FAc 及 FA_F 的改變對於熱拌瀝青混和料的體積性質有所影響，當 FAc 或 FA_F 增加時，會減少空隙含量及 VMA，這是因為當 FAc 或 FA_F 增加時，細粒料將會被擠壓的更為密實，如此將會減少空隙率。FAc 每減少 0.05，VMA 會增加約 0.5%~1.0%。

十二、級配拌和設計

在獲得了材料的基本性質，如級配、單位重...等，可依據 Bailey 法四大原則來決定粒料的混和比例，下列為試拌的方法與步驟：

1. 決定混和料種類及 NMPS：

NMPS 通常由規範要求決定。而混和料種類屬於粗級配還是細級配則由設計者來決定，通常與鋪築厚度、材料特性、及施工經驗有關。

2. 決定粗粒料單位重：

粗粒料單位重通常以 LUW 的百分比來表示，粗級配的單位重約為 95%LUW~105%LUW；細級配單位重約為 LUW 的 90%以下；石膠泥瀝青混凝土(SMA)的單位重約為 110%LUW~125%LUW。

3. 將不同料堆之粗粒料以體積做為計算基礎拌和：

若一個料堆中的粒料大多數顆粒尺寸均大於 PCS 者，該料堆稱之為粗粒料。若有多個粗粒料料堆需拌和使用，則設計者應以體積做組合，所有料堆組合後之體積總和為 100%，應以數學計算各料堆組合比例，再計算各料堆理論空隙體積，組合後之粗粒料不再量測單位重量。粗粒料組合體積與各料堆之級配為決定及調整 CA Ratio 的重要因素。

4. 將不同料堆之細粒料以體積做為計算基礎拌和：

若一個料堆中的粒料大多數顆粒尺寸均通過 PCS 者，該料堆稱之為細粒料。若有多個細粒料料堆需拌和使用，則設計者應以體積做組合，所有料堆組合後之體積總和為 100%，應以數學計算各料堆組合比例，再計算各料堆理論單位重量，組合後之細粒料不再量測單位重量。細粒料組合體積與各料堆之級配為決定及調整 FAc 的重要因素。若任一細粒料堆含泥量過高者，則體積組合比例亦將影響 FA_F 值。

5. 決定小於#200 篩粒料百分比：

此一步驟僅適用於配合設計時獨立添加礦物填充料或回收粉塵的狀況，通常將粉塵及礦物填充料加以考量的目的，主要是考慮粒料在拌和過程中，會有一定程度的級配降格，其級配降格的程度與粒料的硬度、耐磨性、瀝青混凝土拌和生產機具特性、及生產速率有關。

經過上述五個步驟後，可得到各別料堆的混和比例（體積或重量），然後將試拌的混和料依據 NMPS 及 Bailey 法四大原則來評估其適用性。

十三、評估混和料適用性

1. Bailey 第一原則：

首先區分級配中何者為粗粒料、何者為細粒料；何者組成粒料構架並產生空隙，何者填入縫隙；並且決定何者主導粒料構架結構（粗級配抑或細級配）。

在評估混和料是否適用前，首先必須決定在混和料中何種粒料為主導粒料，不同的主導粒料會產生不同的級配行為。在混和料中 PCS 是決定粗、細粒料的分界，表 5 為粗級配及細級配中 PCS 及粗粒料體積變化對 VMA 的影響效果，例如，假若為細級配，即細粒料主導級配行為，若 PCS 的過篩率每增加 6% 時，則 VMA 及空隙率約會增加 1%。但是若為粗級配，即粗粒料主導級配行為，若 PCS 的過篩率每減少 4% 時，則 VMA 及空隙率約會增加 1%。

表 5 粗級配及細級配中 PCS 及粗粒料體積變化對 VMA 影響的比較^[8]

| 細級配（細粒料主導） | 粗級配（粗粒料主導） |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 單位體積中大於 PCS 的粗粒料不足，粗粒料顆粒被細粒料擠開，個別懸浮於細粒料中。 | 大於 PCS 的粗粒料形成骨材構架，細粒料扮演填充粗粒料構架空隙的角色。 |
| 粗粒料無法產生顆粒相嵌作用。 | 粗粒料產生顆粒相嵌作用 |
| 力量傳遞主要由細粒料結構承擔。 | 力量傳遞主要由粗粒料結構承擔。 |
| 由於細粒料為主導粒料，故細粒料必須具備適當級配、顆粒形狀、表面紋理、及強度以支承载重。 | 由於粗粒料為主導粒料，故粗粒料必須具備適當級配、顆粒形狀、表面紋理、及強度以支承载重。但是細粒料仍然扮演支撐粗粒料的角色。 |
| PCS 與 VMA 的變化方向相同，PCS 過篩率每改變 6% 時，VMA 及空隙率約會產生 1% 的改變。 | PCS 與 VMA 的變化方向相同，PCS 過篩率每改變 4% 時，VMA 及空隙率約會產生 1% 的改變。 |
| 減少粗粒料體積時，VMA 及空隙率會增加。 | 增加粗粒料體積時，VMA 及空隙率會增加。 |
| 當粗粒料體積增加至接近粗粒料 LUW 的 90% 時，混和料會在粗粒料相嵌作用產生與消失間變化，會造成實際施工時壓密度的變化。 | 粗粒料體積增加時，工地壓密作業困難增加。 |

2. Bailey 第二原則：

級配中粗粒料部分的夯壓緊實程度，會影響到細粒料的夯壓緊實情形。

粗粒料的夯壓緊實狀況，影響到細粒料的夯壓緊實情形，級配中的粗粒料為停留於 PCS 以上之部分，在這粗粒料中，又可使用圖 4 中所示的粗粒料 Half Sieve 將之分類為粗顆粒及細顆粒，停留於粗粒料 Half Sieve 以上之顆粒為填塞子，為粗粒料中的粗顆粒。通過粗粒料 Half Sieve 的部分稱之為攔截子，為粗粒料中的細顆粒。由於攔截子尺寸雖小於 Half Sieve，但是大於 PCS，故其無法填入粗粒料構架之空隙中，它的作用是将填塞子推開。攔截子與填塞子之比例稱之為 CA Ratio，該參數對於級配性質之影響列於表 6。

表 6 CA Ratio 與級配 VMA 之關係⁽⁸⁾

| 細級配 (細粒料主導) | 粗級配 (粗粒料主導) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| (Half Sieve = 0.5 X PCS), 將小於 PCS 的細粒料部分視為一完整級配, 則在該細級配中, 原始級配的 PCS 即為細級配的標稱最大粒徑 NMPS。因此 Half Sieve 的定義改變如上式。 | Half Sieve = 0.5 X NMPS |
| (新 PCS) = 0.22 X (原 PCS) | PCS 定義不變。 |
| 新定義的粗粒料小於原始粗粒料, 故其對於變化較不敏感。 | 級配中之粗粒料顆粒較大, 因此對於變化較敏感。 |
| 新定義的 CA Ratio 每增加 0.35, VMA 及空隙率將增加約 1%。 | CA Ratio 每增加 0.2%, VMA 及空隙率增加 1%。 |
| 新定義的 CA Ratio 太低者, 表示攔截子太少, 因此 VMA 及空隙率會較低。 | CA Ratio 太低者, 表示攔截子太少, 因此 VMA 及空隙率會較低。 |
| 在新定義混和料中, 粗粒料懸浮於細粒料中。原始混和料之 CA Ratio 不影響粒料分離。 | CA Ratio 太低者, 表示粗顆粒太多, 因此混和料容易產生粒料分離現象。 |
| 若新定義之 CA Ratio 太高者, 表示攔截子含量高, 因此混和料軟弱並難於夯壓。 | CA Ratio 太高者, 表示攔截子含量高, 因此混和料軟弱並難於夯壓。 |
| 新定義之 CA Ratio 建議值為: 0.6~1.0 | CA Ratio 建議值取決於 NMPS。 |

3. Bailey 第三原則:

細粒料中的粗顆粒, 與整體級配中的細粒料的夯壓緊實狀況有關。

細粒料中的粗顆粒比例 FAc 與整體級配中的細粒料的夯壓緊實狀況有關, 通過 PCS 的粒料為細粒料, 這部分的細粒料再以 SCS 篩再區分為粗、細顆粒, 這細顆粒與粗顆粒的比例稱為 FAc。FAc 參數為級配中控制 VMA 及空隙率的最主要因素, 表 7 為 FAc 與 VMA 及空隙率變化之關係:

表 7 FAc 與 VMA 及空隙率變化之關係⁽⁸⁾

| 細級配 (細粒料主導) | 粗級配 (粗粒料主導) |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| (新定義 PCS) = 0.22 X (原始 PCS) | PCS = 0.22 X NMPS |
| (新定義 SCS) = 0.22 X (新 PCS) | SCS = 0.22 X PCS |
| 新定義 FAc 建議範圍為 0.35~0.5。 | FAc 建議範圍為 0.35~0.5。 |
| 新定義 FAc 不超過 0.5 時, 每增加 0.05, VMA 及空隙率約減少 1%。 | FAc 不超過 0.55 時, 每增加 0.05%, VMA 及空隙率約減少 1%。 |
| 當新定義 FAc 超過 0.5 時, VMA 開始隨著 FAc 的增加而增加。 | 當 FAc 超過 0.55 時, VMA 開始隨著 FAc 的增加而增加。 |
| 當新定義 FAc 增加至接近 0.5 時, 細粒料較容易被壓密。 | 當 FAc 增加至接近 0.55 時, 細粒料較容易被壓密。 |

4. Bailey 第四原則:

細粒料中的細顆粒, 與混和料中的細粒料級配的夯壓緊實狀況有關。

Bailey 法使用 TCS 篩號來評估細粒料之骨材結構, SCS 將級配中細粒料區分為粗顆粒及

細顆粒，TCS 將細粒料中的細顆粒再區分為粗粒子及細粒子，細粒料中細顆粒的細粒子與細粒料中細顆粒的粗粒子比例為 FA_F ，通過 SCS 但留於 TCS 上之粒料所產生的空隙，由通過 TCS 的粒子所填充。 FA_F 參數的相關性質如表 8 所列：

表 8 FA_F 與級配 VMA 之關係^[8]

| 細級配（細粒料主導） | 粗級配（粗粒料主導） |
|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| (新定義 TCS)=0.22 X (新定義 SCS) | TCS = 0.22 X SCS |
| (新定義 SCS)=0.22 X (新定義 PCS) | SCS = 0.22 X PCS |
| 新定義 FA_F 的建議範圍 0.35~0.5。 | FA_F 的建議範圍 0.35~0.5。 |
| 新定義 FA_F 不大於 0.5 時， FA_F 增加，則 VMA 減小。 | FA_F 不大於 0.55 時， FA_F 增加，則 VMA 減小。 |
| 當新定義 FA_F 大於 0.5 時， FA_F 增加，則 VMA 亦增加。 | 當 FA_F 大於 0.55 時， FA_F 增加，則 VMA 亦增加。 |

表 9 粗級配及細級配各控制篩

| NMPS (mm) | | | | | | |
|--------------|------|-------|-------|------|------|-------|
| | 37.5 | 25.0 | 19.0 | 12.5 | 9.5 | 4.75 |
| 粗級配（粗粒料主導） | | | | | | |
| Half Sieve | 19.0 | 12.5 | 9.5 | 4.75 | 4.75 | 2.36 |
| PCS | 9.5 | 4.75 | 4.75 | 2.36 | 2.36 | 1.18 |
| SCS | 2.36 | 1.18 | 1.18 | 0.60 | 0.60 | 0.30 |
| TCS | 0.60 | 0.30 | 0.30 | 0.15 | 0.15 | 0.075 |
| 細級配（細粒料主導） | | | | | | |
| 原始 PCS | 9.5 | 4.75 | 4.75 | 2.36 | 2.36 | 1.18 |
| 新 Half Sieve | 4.75 | 2.36 | 2.36 | 1.18 | 1.18 | 0.60 |
| 新 PCS | 2.36 | 1.18 | 1.18 | 0.60 | 0.60 | 0.30 |
| 新 SCS | 0.60 | 0.30 | 0.30 | 0.15 | 0.15 | 0.075 |
| 新 TCS | 0.15 | 0.075 | 0.075 | — | — | — |

表 10 粗級配（粗粒料主導性質）的 Bailey 參數建議值^[8]

| NMPS | 37.5mm | 25.0mm | 19.0mm | 12.5mm | 9.5mm | 4.75mm |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CA Ratio | 0.80~0.95 | 0.70~0.85 | 0.60~0.75 | 0.50~0.65 | 0.40~0.55 | 0.30~0.45 |
| FAc | 0.35~0.50 | | | | | |
| FA_F | 0.35~0.50 | | | | | |

表 11 細級配（細粒料主導性質）的 Bailey 參數建議值^[8]

| NMPS | 37.5mm | 25.0mm | 19.0mm | 12.5mm | 9.5mm | 4.75mm |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 新定義 CA Ratio | 0.60~1.00 | | | | | |
| 新定義 FAc | 0.35~0.50 | | | | | |
| 新定義 FA_F | 0.35~0.50 | | | | | |

表 12 粗級配及細級配 Bailey 參數綜合表

| NMPS (mm) | | | | | | |
|-----------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| | 37.5 | 25.0 | 19.0 | 12.5 | 9.5 | 4.75 |
| 粗級配 (粗粒料主導) | | | | | | |
| CA Ratio | $\frac{P_{19} - P_{9.5}}{100 - P_{19}}$ | $\frac{P_{12.5} - P_{4.75}}{100 - P_{12.5}}$ | $\frac{P_{9.5} - P_{4.75}}{100 - P_{9.5}}$ | $\frac{P_{4.75} - P_{2.36}}{100 - P_{4.75}}$ | $\frac{P_{4.75} - P_{2.36}}{100 - P_{4.75}}$ | $\frac{P_{2.36} - P_{1.18}}{100 - P_{2.36}}$ |
| FAc | $\frac{P_{2.36}}{P_{9.5}}$ | $\frac{P_{1.18}}{P_{4.75}}$ | $\frac{P_{1.18}}{P_{4.75}}$ | $\frac{P_{0.6}}{P_{2.36}}$ | $\frac{P_{0.6}}{P_{2.36}}$ | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ |
| FA _F | $\frac{P_{0.6}}{P_{2.36}}$ | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ | $\frac{P_{0.075}}{P_{0.3}}$ |
| 細級配 (細粒料主導) | | | | | | |
| CA Ratio | $\frac{P_{4.75} - P_{2.36}}{100 - P_{4.75}}$ | $\frac{P_{2.36} - P_{1.18}}{100 - P_{2.36}}$ | $\frac{P_{2.36} - P_{1.18}}{100 - P_{2.36}}$ | $\frac{P_{1.18} - P_{0.6}}{100 - P_{1.18}}$ | $\frac{P_{1.18} - P_{0.6}}{100 - P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.6} - P_{0.3}}{100 - P_{0.6}}$ |
| FAc | $\frac{P_{0.6}}{P_{2.36}}$ | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.3}}{P_{1.18}}$ | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ | $\frac{P_{0.075}}{P_{0.3}}$ |
| FA _F | $\frac{P_{0.15}}{P_{0.6}}$ | $\frac{P_{0.075}}{P_{0.3}}$ | $\frac{P_{0.075}}{P_{0.3}}$ | — | — | — |

表 13 Bailey 參數與 VMA 之變化方向關係

| Bailey 參數 | 粗級配 | 細級配 |
|-------------------|-------|-------|
| CUW ↑ | VMA ↑ | VMA ↓ |
| CA Ratio ↑ | VMA ↑ | VMA ↑ |
| FAc ↑ | VMA ↓ | VMA ↓ |
| FA _F ↑ | VMA ↓ | VMA ↓ |

表 14 Bailey 參數與 VMA 之變化量關係

| 粗級配 | | 細級配 | |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| CUW ↑ 4% | VMA ↑ 1% | CUW ↑ 6% | VMA ↓ 1% |
| CA Ratio ↑ 0.2 | VMA ↑ 1% | CA Ratio ↑ 0.35 | VMA ↑ 1% |
| FAc ↑ 0.05 | VMA ↓ 1% | FAc ↑ 0.05 | VMA ↓ 1% |
| FA _F ↑ 0.05 | VMA ↓ 1% | FA _F ↑ 0.05 | VMA ↓ 1% |

參、Bailey 級配調整計算

由於 Bailey 法調整級配時是以體積為計算依據，故設計者在設計之初必須先收集下列資料：

1. 不同尺寸料堆的級配及 Bulk Specific Gravity G_{sb}。
2. 不同尺寸料堆的鬆單位重 LUW 及搗實單位重 RUW。

除此而外，設計者必須針對不同料堆組合作一些決定：

1. 選定單位重 CUW (以 LUW 的百分比來表示)。
2. 通過 0.075mm 篩之粒料百分比。

3. 粗粒料堆的拌和體積比例。
4. 細粒料堆的拌和體積比例。

1、計算範例：

以下計算案例取材自 Transportation Research Circular No. E-C044，以供讀者對計算方式作進一步瞭解。

本計算範例使用二粗粒料堆(CA1'CA2)、一細粒料堆(FA1)、及填充料 MF(mineral filler) 組成，其級配及性質如表 15 所列。另設計決定如下：

- 設計選定單位重為 LUW 的 103%。
- 粗粒料堆體積百分比為：CA1 佔 25%、CA2 佔 75%。
- 通過 0.075mm 篩粒料含量 4.5%。

表 15 計算範例級配及單位重

| 篩號(mm) | CA1 | CA2 | FA1 | MF |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 19.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 12.5 | 94.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 9.50 | 38.0 | 99.0 | 100.0 | 100.0 |
| 4.75 | 3.0 | 30.0 | 99.0 | 100.0 |
| 2.36 | 1.9 | 5.0 | 79.9 | 100.0 |
| 1.18 | 1.8 | 2.5 | 48.8 | 100.0 |
| 0.60 | 1.8 | 1.9 | 29.0 | 100.0 |
| 0.30 | 1.8 | 1.4 | 14.2 | 100.0 |
| 0.15 | 1.8 | 1.3 | 8.8 | 98.0 |
| 0.075 | 1.7 | 1.2 | 3.0 | 90.0 |
| Gsb | 2.702 | 2.698 | 3.162 | 2.806 |
| LUW (kg/m ³) | 1425 | 1400 | — | — |
| RUW (kg/m ³) | 1608 | 1592 | 2167 | — |

2. 計算步驟：

1. 依據選定單位種的比例計算各粗粒料堆選定單位重：

$$CA1 : CUW = 1425 \text{ kg/m}^3 \times 103\% = 1469 \text{ kg/m}^3$$

$$CA2 : CUW = 1400 \text{ kg/m}^3 \times 103\% = 1441 \text{ kg/m}^3$$

2. 依據體積比例計算各粗粒料堆分配重：

$$CA1 : \text{分配量} = 25\% \times 1469 \text{ kg/m}^3 = 367 \text{ kg/m}^3$$

$$CA2 : \text{分配量} = 75\% \times 1441 \text{ kg/m}^3 = 1081 \text{ kg/m}^3$$

3. 計算各粗粒料堆中空隙體積：

$$\text{粗粒料中空隙體積} = \left[1 - \frac{CUW}{G_{sb} \times 1000} \right] \times (\text{體積比例})$$

$$CA1 : \text{單位體積中空隙含量}(\%) = \left[1 - \frac{1469}{2.702 \times 1000} \right] \times 25 = 11.4$$

$$CA2 : \text{單位體積中空隙含量}(\%) = \left[1 - \frac{1441}{2.698 \times 1000} \right] \times 75 = 34.9$$

單位體積粗粒料中所含細粒料體積百分比：

$$11.4\% + 34.9\% = 46.3\%$$

4. 計算單位體積中細粒料含量：

$$FA1 : \text{分配量} = 2167 \text{ kg/m}^3 \times 100\% \times 46.3\% = 1002 \text{ kg/m}^3$$

5. 計算混和料單位體積重量：

$$367 \text{ kg/m}^3 + 1081 \text{ kg/m}^3 + 1002 \text{ kg/m}^3 = 2450 \text{ kg/m}^3$$

6. 依據重量計算各不同料堆所佔總混和料之百分比：

$$CA1 : \text{重量百分比} = \frac{367 \text{ kg/m}^3}{2450 \text{ kg/m}^3} = 15\%$$

$$CA2 : \text{重量百分比} = \frac{1081 \text{ kg/m}^3}{2450 \text{ kg/m}^3} = 44.1\%$$

$$FA1 : \text{重量百分比} = \frac{1002 \text{ kg/m}^3}{2450 \text{ kg/m}^3} = 40.9\%$$

以上所計算各料堆之比例，係依據設計之初所選定混和料中粗粒料含量所得，惟由於各粗粒堆中含有一定量的細粒料，而各細粒料堆中亦含有一定比例的粗粒料，故必須進一步調整該比例。

7. NMPS = 12.5mm，PCS = 2.36mm

$$CA1 : \text{料堆中細粒料含量}(\%) = 1.9\%$$

$$CA2 : \text{料堆中細粒料含量}(\%) = 5.0\%$$

$$FA1 : \text{料堆中粗粒料含量}(\%) = 100\% - 79.9\% = 20.1$$

8. 計算各粗粒料堆中細粒料在總混和料中所佔百分比：

$$CA1 : \text{總混和料中細粒料含量}(\%) = 15.0\% \times 1.9\% = 0.3\%$$

$$CA2 : \text{總混和料中細粒料含量}(\%) = 44.1\% \times 5.0\% = 2.2\%$$

9. 總混和料中各粗粒料堆中細粒料所佔百分比總和：

$$CA1 + CA2 \text{ 總混和料中細粒料含量}(\%) = 0.3\% + 2.2\% = 2.5\%$$

10. 計算各細粒料堆中粗粒料在總混和料中所佔百分比：

$$FA1 : \text{總混和料中粗粒料含量}(\%) = 40.9\% \times 20.1\% = 8.2\%$$

11. 校正各粗粒料堆混和後，由於粗料堆中的細粒料含量，所造成各料堆佔總混和料比例的改變：

$$CA1 : \text{校正後料堆佔總混和料量}(\%)$$

$$= 15.0\% + 0.3\% - \frac{15.0\% \times 8.2\%}{15.0\% + 44.1\%} = 13.2\%$$

$$CA2 : \text{校正後料堆佔總混和料量}(\%)$$

$$= 44.1\% + 2.2\% - \frac{44.1\% \times 2.5\%}{15.0\% + 44.1\%} = 40.2\%$$

12.校正各細粒料堆混和後，由於細料堆中的粗粒料含量，所造成各料堆佔總混和料比例的改變：

FA1：校正後料堆佔總混和料量(%)

$$= 40.9\% + 8.2\% - \frac{40.9\% \times 2.5\%}{40.9\%} = 46.7\%$$

13.計算各料堆校正後比例中所含小於 0.075mm 尺寸之粒料比例：

CA1：總混和料中小於 0.075mm 粒料量(%) = 13.2% × 1.7% = 0.2%

CA2：總混和料中小於 0.075mm 粒料量(%) = 40.2% × 1.2% = 0.5%

FA1：總混和料中小於 0.075mm 粒料量(%) = 46.7% × 3.0% = 1.4%

總和 = 0.2% + 0.5% + 1.4% = 2.1%

14.計算礦物填充料 MF 之添加量：

$$MF(\%) = \frac{4.5 - 2.1}{90\%} = 2.7\%$$

15.加入 MF 後，細粒料堆佔總混和料比例必須再做調整：

$$FA1：最終所佔總混和料比例(\%) = 46.7\% - \frac{46.7\% \times 2.1\%}{46.7\%} = 44.0\%$$

3. 配合成果：

表 16 配合比設計各料堆所佔總混和料百分比

| 料堆 | 百分比(%) |
|-----|--------|
| CA1 | 13.2 |
| CA2 | 40.2 |
| FA1 | 44.0 |
| MF | 2.7 |
| 100 | |

表 17 設計級配計算成果

| 篩號(mm) | CA1(%) | CA2(%) | FA1(%) | MF(%) |
|--------|--------|--------|--------|-------|
| 19 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 12.5 | 94 | 100 | 100 | 100 |
| 9.5 | 38 | 99 | 100 | 100 |
| 4.75 | 3 | 30 | 99 | 100 |
| 2.36 | 1.9 | 5 | 79.9 | 100 |
| 1.18 | 1.8 | 2.5 | 48.8 | 100 |
| 0.6 | 1.8 | 1.9 | 29 | 100 |
| 0.3 | 1.8 | 1.4 | 14.2 | 100 |
| 0.15 | 1.8 | 1.3 | 8.8 | 98 |
| 0.075 | 1.7 | 1.2 | 3 | 90 |

| 設計級配(%) |
|---------|
| 100.0 |
| 99.2 |
| 91.4 |
| 58.6 |
| 40.0 |
| 25.3 |
| 16.4 |
| 9.6 |
| 7.2 |
| 4.4 |

| 各料堆設計百分比(%) | | | |
|-------------|------|----|-----|
| 13.2 | 40.2 | 44 | 2.7 |

4、Bailey 參數計算

16.計算 CA Ratio：NMPS=12.5mm、PCS=2.36mm、Half Sieve=4.75mm

$$CA\ Ratio = \frac{(HalfSieve過篩百分比) - (PCS過篩百分比)}{100 - (HalfSieve過篩百分比)}$$

$$CA\ Ratio = \frac{58.7 - 40.1}{100 - 58.7} = 0.45$$

17.計算 FA_c：

$$FA_c = \frac{SCS通過百分比}{PCS通過百分比}$$

$$FA_c = \frac{16.4}{40.1} = 0.41$$

18.計算 FA_f：

$$FA_f = \frac{TCS通過百分比}{SCS通過百分比}$$

$$FA_f = \frac{7.2}{16.4} = 0.44$$

表 18 Bailey 參數

| | |
|-----------------|------|
| CA Ratio | 0.45 |
| FA _c | 0.41 |
| FA _f | 0.44 |

肆、結語

瀝青混凝土配合設計中，對於級配的選擇，如何將粗、細粒料依適當比例拌合，以達設計目標的過程是十分繁瑣複雜的作業，通常靠設計者的經驗及試誤過程，惟設計或施工時，也僅以是否符合規範級配（各篩號過篩率，及其上下限）為主要考量，至於其在實際使用時，績效表現如何？施工時是否容易夯壓？是否會產生粒料分離現象？VMA 含量高低及其隨著級配改變如何變化？就不是設計者或施工者的主要關心問題。

本文介紹的 Bailey 級配調整法，並不是配合設計法，Bailey 法主要在分析級配粒料的粒徑分佈，如何在現有粒料下調整其粗細顆粒比例，以使級配產生粒料構架，如此能生產出抗車轍、及耐久的瀝青混凝土鋪面。並且在配合設計的過程中，意欲調整級配的各種體積性質的方式將不再是完全依靠經驗及試誤過程，我們可依據選擇單位重 CUW、CA Ratio、FA_c、及 FA_f 等參數與 VMA 的變化關係，來調整整體級配的體積特性，一方面可以配合規範值，另一方面可以滿足工易性及使用績效的需求。

中英及簡寫名詞對照表

| | |
|------------|----------------------------------------|
| CA | 粗粒料(Coarse Aggregate) |
| CUW | 選定單位體積重量(Chosen Unit Weight) |
| FA | 細粒料(Fine Aggregate) |
| LUW | 鬆單位重(Loose Unit Weight) |
| NMPS | 標稱最大粒徑(Nominal Maximum Partical Size) |
| PCS | 第一控制篩(PriMayy Control Sieve) |
| RUW | 搗實單位重(Rodded Unit Weight) |
| SCS | 第二控制篩(Secondary Contral Sieve, SCS) |
| TCS | 第三控制篩(Tertiary Contral Sieve,) |
| VMA | 粒料間空隙率(Voids in the Mineral Aggregate) |
| 0.45 次方級配圖 | 0.45 power grading chart |

參考文獻

1. Nijboer, L.W., "Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Road Carpets," Elsevier, 1948.
2. Goode, J.F., and Lufsey, L.A., "A New Graphical Chart for Evaluating Aggregate Gradations." Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 31, 1962, pp. 176-207.
3. Hudson, S.B. and Davis, R.L., "Relationship of Aggregate Voidage to Gradation," Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.34, pp. 574-593, 1965.
4. Huber, G.A., and Shuler, T.S., "providing Sufficient Void Space for Asphalt Cement : Relationship of Mineral Aggregate Voids and Aggregate Gradation." Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147, Philadelphia, 1992, pp. 225-251.
5. Vavrik, W.R., Pine, W.J., Huber, G., Carpenter, S.H. and Bailey, R., "The Bailey Method of Gradation Evaluation : The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate," The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, 2001.
6. Vavrik, W. R., W. J. Pine, and S. H. Carpenter, "Aggregate Blending for Asphalt Mix Design: The Bailey Method." Presented at the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.
7. Transportation Research Circular No. E-C044, "Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design". Transportation Research Board, Washington, DC, October 2002.
8. Aurilio, V., Pine, W.J., and Lum, P., The Bailey Method. Achieving Volumetrics and HMA Compactability. 2005.

軟化劑對再生瀝青混凝土之影響

陳建旭*、朱柏彥**、邱德超***

摘要

瀝青混凝土具有可回收利用的特性，將路面刨除料回收，依照 ASTM 方法決定軟化劑之添加量，再依照配合設計即可使回收瀝青混凝土恢復原有鋪面功能，在環保意識抬頭的情形下，不失為一個良好的路面材料。本研究使用三種軟化劑，以不同比例添加於兩種現地回收料中，利用瀝青物性及混凝土工程性質，探討軟化劑對再生瀝青混凝土的影響。研究結果指出，軟化劑能夠使老化瀝青恢復原有性能，但重油超過 20% 會使膠漿呈現液態，因此不適合作為添加劑。在黏度預測方面，若能考慮材料交互作用參數，則能更精確的預測瀝青膠漿的黏度，有助於推算回收料的添加量。若在 RAP 中添加軟化劑時，可能會出現黑石頭現象，建議以控制目標黏度的方法來檢查再生瀝青混凝土有無產生黑石頭現象。

關鍵詞：瀝青混凝土回收料、再生瀝青混凝土、軟化劑、黑石頭現象、無因次對數黏度

一、前言

瀝青混凝土路面經交通載重與環境因素的交互作用，隨著使用時間增加，路面現況服務指標 (present serviceability index) 逐漸降低，影響用路人的行車舒適及安全，故需將舊有路刨除或挖除，加以整修。如果刨 (挖) 除的瀝青混合料能再生使用，一方面可以減少環境污染，另一方面對於砂石資源較為匱乏的台灣來說，則是綠色節能材料的開發，因此使用再生瀝青混凝土 (recycled asphalt concrete, RAC) 是保護環境、創造優質生活空間的方法之一。

再生瀝青混凝土是將瀝青混凝土回收料 (reclaimed asphalt pavement, RAP) 從路面上刨 (挖) 起，加上新料料調整級配，使用新鮮瀝青和添加劑 (additives)，依據 ASTM D4887 拌合圖表決定添加劑種類與添加量，再依照配合設計經加熱拌合均勻，使舊的瀝青混凝土恢復原有性質而滿足路面功能，重新作為道路面層鋪設之用。添加劑分為軟化劑 (softening agent, SA) 和再生劑 (recycling agent, RA) 兩種，目的在補充老化瀝青消失的芳香成分，降低瀝青稠度，改善低溫流動現象。研究指出適當添加 RAP 之再生瀝青混凝土，與傳統瀝青混凝土之粒料級配差異不大，再生瀝青膠漿黏度也可控制在一般鋪路瀝青黏度範圍內。

RAP 可能會有黑石頭現象 (black rock)，指的是老化變硬的 RAP 黏結料不能與新黏結料混合，在 RAC 中被視為粒料的一部份，無法發揮黏結料的功能，但黑石頭的真正情形，迄今仍無深入的研究。在 Soleymani 等人的研究中使用三種不同老化程度之 RAP、兩種新鮮瀝青和兩種 RAP 比例 (10% 和 40%) 評估新鮮及老化瀝青間的交互作用，並以黑石頭、實際拌合 (standard practice)

* 國立成功大學土木工程學系教授

** 國立成功大學土木工程學系博士班學生

*** 國立成功大學土木工程學系碩士

及完全拌合 (total blending) 三種拌合方式來模擬。結果顯示，當 RAP 含量為 10% 時，三種拌合方式之 RAC 工程性質並無太大差異；當 RAP 含量為 40% 時，實際拌合與完全拌合之 RAC 試體工程性質較接近，所以無明顯黑石頭效應。然而國內對於 RAP 的性質與來源無法建立資料庫加以控管，導致 RAP 重複再利用的情況發生，造成 RAP 黏結料的黏度過高，老化變硬的 RAP 黏結料可能無法與新黏結料混合。因此需要不同等級或大量的軟化劑才能使老化瀝青回復到需要的等級，然而添加軟化劑拌合之後的擴散效果 (diffusion) 需要重新評估，以瞭解是否會產生黑石頭現象。

本研究收集兩種不同來源的回收料，添加不同種類、比例的軟化劑拌合成瀝青膠漿 (recycled asphalt binder, RAB)，以進行各項物性與化性試驗，同時製作馬歇爾試體進行工程性質試驗，主要目的有以下幾點：

1. 評估軟化劑與回收瀝青的基本特性。
2. 探討黑石頭對 RAC 之影響。
3. 評估 RAB 之鋪面績效。

二、拌合公式之理論推導

瀝青混凝土之再生原理為添加再生劑或軟化劑於已老化之瀝青材料中，使老化瀝青恢復至接近原本新鮮料之性質，讓再生瀝青混凝土之抗車轍、穩定性、耐久性皆達到品質要求。依不同重量百分比添加於回收老化瀝青中，在決定添加劑使用量時，由添加劑使用量與黏度關係曲線，選一添加劑添加量所對應之數值符合規範之黏度範圍，該添加量即為最佳添加劑使用量，需注意的是老化瀝青與添加劑混合而成之膠漿 (mastic) 也需符合針入度和軟化點之規定。

目前最常使用之規範為 ASTM D4887，使用黏度-添加劑比例關係圖 (viscosity-blending chart)，如圖 1 所示，以回收瀝青之黏度，決定添加劑瀝青的添加比例；圖中 A 點為 60°C 下老化瀝青之黏度，B 點為 60°C 下添加劑之黏度，連接 AB 為添加劑之直線，由目標黏度值繪一水平線相交 AB 線於 C 點，是為添加劑所需添加量，約為 65%。

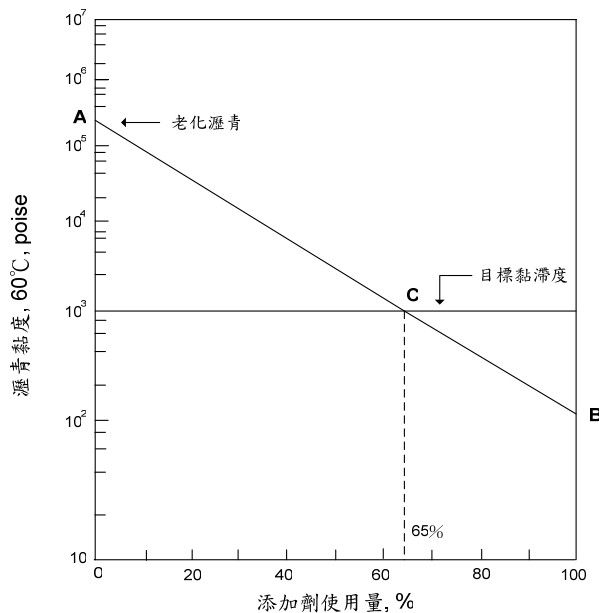


圖 1 黏度—添加劑比例關係圖

事實上 ASTM D 4887 乃是依據 1887 年 Arrhenius 之公式而得，表示法如下：

$$\ln \eta_m = x_{as} \cdot \ln \eta_{as} + x_{ra} \cdot \ln \eta_{ra} \quad (1)$$

其中 η_m 為膠漿黏度值(cP)

x_{as} 為老化瀝青的重量百分比

η_{as} 為老化瀝青之黏度值(poise)

x_{ra} 為添加劑的重量百分比

η_{ra} 為添加劑黏度值(poise)

上述公式並未考慮添加劑與老化瀝青之交互作用，只是將兩種材料做純物理性的混合，忽略添加劑與老化瀝青之物化作用(physical-chemical relation)，Grunberg 和 Nissan 提出修正公式 (2) 如下：

$$\ln \eta_m = x_{ra} \cdot \ln \eta_{ra} + x_{as} \cdot \ln \eta_{as} + x_{ra} \cdot x_{as} \cdot G_{12} \quad (2)$$

其中 G_{12} 為交互係數(interaction coefficient)

為擴大公式 (2) 的使用，不受單位換算之困擾，將公式 (2) 正規化則得公式 (3)，為無因次對數黏度 (dimensionless log viscosity, DLV)，表示如下：

$$DLV = \frac{\ln(\eta_m/\eta_{ra})}{\ln(\eta_{as}/\eta_{ra})} = \left(1 + \frac{G_{12}}{\ln(\eta_{as}/\eta_{ra})}\right) \cdot x_{as} + \left(\frac{-G_{12}}{\ln(\eta_{as}/\eta_{ra})}\right) \cdot x_{as}^2 \quad (3)$$

三、研究材料與方法

3.1 回收料

本研究選用兩種不同道路等級的回收料，分別代表省道與國道，分別以 RAP-1 與 RAP-2 代表。回收料依據 ASTM D2172 及 ASTM D5405 將老化瀝青萃取及回收，並測得 60°C 黏度分別為 40,900 與 28,000 poise。此外，為了減少回收粒料變異性，分別將回收料分成粗、細粒料堆，再分別求得各級配曲線，以便進行配合設計流程。

3.2 基底瀝青與軟化劑

本研究採用 AC-20 作為基底瀝青，當作對照組，並採用 AC-5、AC-10 和重油當作軟化劑。其中重油為國內瀝青業者為降低膠漿黏度至規範值 2,000 poise 所用的低黏度軟化劑。本研究製作目標黏滯度 2,000 poise 之混凝土試體，當添加劑含量與再生瀝青膠漿總合未達最佳瀝青含量時，則以 AC-20 補充不足瀝青量。其基本物性如表 1、2 所示。

表 1 瀝青基本物性

| 試驗項目 | 種類 | 試驗值 | 規範值 | 試驗方法 |
|----------------------------------|-------|-------|------------|------------|
| 60°C 黏度 (poise) | AC-5 | 557 | 500 ± 100 | ASTM D2171 |
| | AC-10 | 1000 | 1000 ± 200 | |
| | AC-20 | 1950 | 2000 ± 400 | |
| 針入度，min (0.1mm，100g，5 秒，25°C) | AC-5 | 131.3 | 120 | ASTM D5 |
| | AC-10 | 100 | 70 | |
| | AC-20 | 64.5 | 40 | |

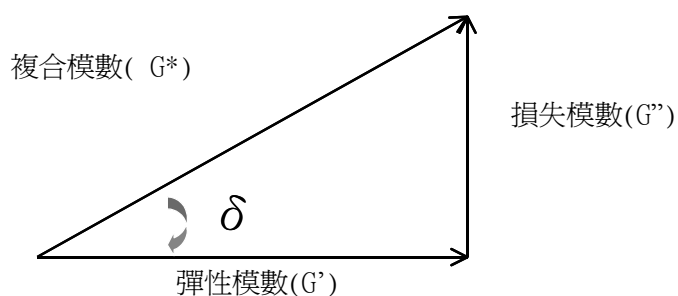
表 2 重油基本物性

| 檢驗項目 | 試驗值 | 規範 | 試驗方法 |
|--------------------------|--------|--------|------------|
| 密度 (15°C, ks/L), max | 0.9184 | 0.9855 | ASTM D1298 |
| 閃火點 (°C), min | 138 | 60 | ASTM D93 |
| 黏度 (cSt), max (50°C) | 106.1 | 424 | ASTM D445 |
| 含硫量 (%), max | 0.39 | 0.5 | ASTM D4294 |
| 含水量(%), max | 0.1 | 0.5 | ASTM D95 |
| 水份及沉澱物(%), max | 0.3 | 1 | ASTM D1796 |

3.3 試驗方法

3.3.1 動剪流變儀 (dynamic shear rheometer)

由於瀝青基本物理性質如針入度、延展性等，無法有效的與鋪面績效作連結，因此美國策略公路研究計畫中(Strategic Highway Research Program, SHRP)使用複合模數 G^* (complex modulus) 與相位角 δ (phase angle)，解釋瀝青流變行為，來探討永久變形、疲勞龜裂與低溫裂縫的規範值。複合模數與相位角的關係如圖 2 所示。

圖 2 複合模數(G^*)與相位角(δ)的關係

3.3.2 浸水殘餘強度

水侵害為影響瀝青混凝土耐久性之主要因素之一，當水分侵入鋪面後，會使瀝青和粒料間失去黏結能力，進而造成剝脫發生，本研究利用 AASHTO T283 試驗法製作直徑 10cm、高 6.35cm 的試體，將之浸泡於 60°C 熱水中，用以模擬實際路面於下雨過後浸泡於水中之情形，於 24 小時後取出置於 25°C 水中養治 2 小時，進行間接張力試驗，用以評估路面長期受水侵害之耐久性，以殘餘強度比值(index of retained strength, IRS)表示，如式 4 所示。

$$IRS = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (4)$$

上式中： IRS = 殘餘強度比值
 S_1 = 未浸泡水試體之間接張力強度
 S_2 = 浸泡 60°C 水中 24 小時試體之間接張力強度

3.3.3 回彈模數試驗

回彈模數 (Resilient Modulus, MR) 可用於評估不同材料間相對的品質及做為路面厚度設計評估與分析之資料, 也可用以研究溫度、荷重大小、作用速率、加壓時間 (Rest Time) 對材料特性之影響。在本研究中, 以 0.5Hz 頻率、加壓 100 次以及 30% 間接張力值於 25°C 中進行試驗, 評估添加 AC-5 與 AC-10 之黑石頭現象。並利用式 5~8 求得回彈模數與即時回彈。

$$E_{RI} = \frac{P(v_{RI} + 0.27)}{t\Delta H_I} \quad (5)$$

$$E_{RT} = \frac{P(v_{RT} + 0.27)}{t\Delta H_T} \quad (6)$$

$$v_{RI} = \frac{3.59\Delta H_I}{\Delta V_I} - 0.27 \quad (7)$$

$$v_{RT} = \frac{3.59\Delta H_T}{\Delta V_T} - 0.27 \quad (8)$$

其中, E_{RI} = 即時回彈 (instantaneous resilient modulus of elasticity), 單位為 psi 或 MPa

E_{RT} = 回彈模數 (total resilient modulus of elasticity), 單位為 psi 或 MPa

v_{RI} = 即時回彈之波松比

v_{RT} = 回彈模數之波松比

P = 反覆載重, 單位為 lbf 或 N

t = 試體厚度, 單位為 in 或 mm

ΔH_I = 水平淨變形 (instantaneous recoverable horizontal deformation), 單位為 in 或 mm

ΔV_I = 垂直淨變形 (instantaneous recoverable horizontal deformation), 單位為 in 或 mm

ΔH_T = 水平變形 (total recoverable horizontal deformation), 單位為 in 或 mm

ΔV_T = 垂直變形 (total recoverable horizontal deformation), 單位為 in 或 mm

3.3.4 車轍輪跡試驗

本試驗主要模擬實際路面受交通荷重作用下, 路面變形的觀測。主構造共分五部份, 即載荷部分、車輪部份、運轉部份、變位量測部分及恆溫室。為模擬實際路面, 受車輪動荷重下之抵抗變形能力, 可控制的條件計有: 溫度、輪壓、輪速、荷重次數以及橫向往返移動。本儀器為日本製編號 TR-332M Dial-Gauge, 精度可達 0.01 mm, 量測範圍 30 mm 橡膠內胎規格為 D200XW50, 前後往返速度範圍每分鐘由 0 至 50 次以模擬實際交通情形。本實驗可以量測動穩定值 (DS) 與變形率 (RD), 計算方式如下所示。

- (1) 動穩定值: 以滾壓次數為橫軸, 變形量為縱軸, 可繪得變形量與滾壓次數關係曲線, 取曲線中滾壓 450 次至 750 次直線部份之滾動次數差與變形量差之比值, 即為動穩定值, 如式 9 所示。

$$DS = \frac{\Delta n}{\Delta d} \quad (9)$$

式中, DS=動態穩定值(次數/公分)

Δn =滾壓次數差(次數)

Δd =變形量差(公分)

- (2) 變形率: 滾壓 450 次至 750 次間滾壓次數與滾壓時間的比值, 即為變形率, 如式 10 所示。

$$RD = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (10)$$

式中，RD=變形率(公分/秒)
 Δd =變形量差(公分)
 Δt =滾壓時間(秒)

四、試驗結果與討論

4.1 軟化劑對傳統試驗值之影響

4.1.1 針入度

藉由針入度試驗可以判定瀝青等級，同時亦可用來評估回收瀝青含量的多寡。圖 3 顯示回收瀝青含量與針入度之關係圖，由圖可知針入度會隨著回收瀝青含量的增加而減小，且在回收瀝青比例較低時，下降比例較大，回收瀝青添加 40% 以後，下降幅度較平緩。添加軟化劑雖可以降低瀝青的針入度值，但如果回收瀝青添加一半以上時，仍舊無法將瀝青恢復到 60-70 等級。由圖 3 可發現，若要將老化瀝青恢復到某一等級時，不同老化程度所需添加之軟化劑含量也會有所不同，如 RAP-1 與 RAP-2 分別需添加 27~33% 與 20~30%。圖 4 顯示選用不同軟化劑添加於同一種老化程度回收瀝青中，針入度會隨著軟化劑含量增加而上升，如果選用較軟等級之軟化劑時，添加相同含量之軟化劑，瀝青的針入度也會變得比較大，顯示軟化劑等級越低時，越能有效地軟化老化瀝青。此外，以重油為軟化劑時，由於重油本身無黏結能力，因此在重油含量超過 20% 時，瀝青膠漿即呈現液態，亦即無針入度入值可言，故重油不適合當作軟化劑。

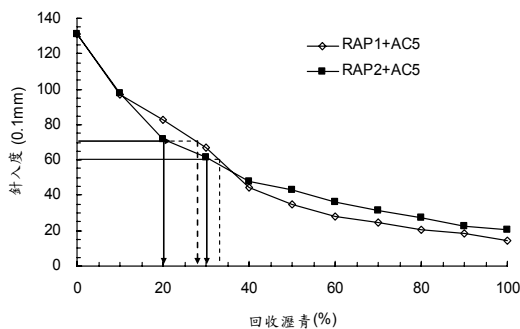


圖 3 以 AC-5 為軟化劑時回收瀝青含量與針入度之關係

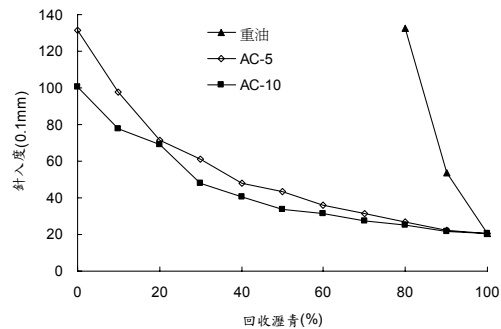


圖 4 添加不同軟化劑後 RAP-2 回收瀝青含量與針入度關係

4.1.2 軟化點

軟化點試驗之目的在觀察瀝青達流動狀態時所對應之溫度，可作為鋪面高溫變形的指標。圖 5 為兩種不同回收瀝青與不同添加劑之軟化點，由圖中可知不同回收瀝青使用相同添加劑(AC-5)時，軟化點皆會隨著回收瀝青含量增加而上升，而使用 RAP-1 的軟化點最高，其他添加劑也有相同趨勢。此外，若以同一種老化瀝青添加不同軟化劑來看，各膠漿之軟化點也會隨著回收瀝青量的增加而增加。當回收瀝青量為 70% 時，即軟化劑添加 30%，使用 AC-10 與 AC-5 的軟化點分別為 70 與 54.5 °C，顯示軟化劑越軟，越能有效的軟化老化瀝青。值得注意的是，當採用重油為軟化劑時，雖然添加重油的斜率較添加 AC-5 與 AC-10 斜率來得高，即軟化效率越高，但當 RAP-2 回收瀝青含量低於 80% 時，瀝青膠漿在常溫下呈現流動狀態，無軟化點可言。

若從鋪面高溫時抵抗車轍能力來看，由於台灣地區夏季鋪面最高溫約為 60°C，因此必須注意添加劑的含量，避免再生瀝青膠漿在夏季高溫時產生軟化現象，導致車輛對鋪面造成破壞，影

響服務年限。由圖 5 可看出使用 RAP-2 添加 AC-10、AC-5 與重油的限制添加量分別為 30%、11.5% 與 2.5%，顯示當添加的軟化劑越軟時，所需的軟化劑添加量越少，就可以達到軟化點的要求，相對的可以提高回收料的使用含量。

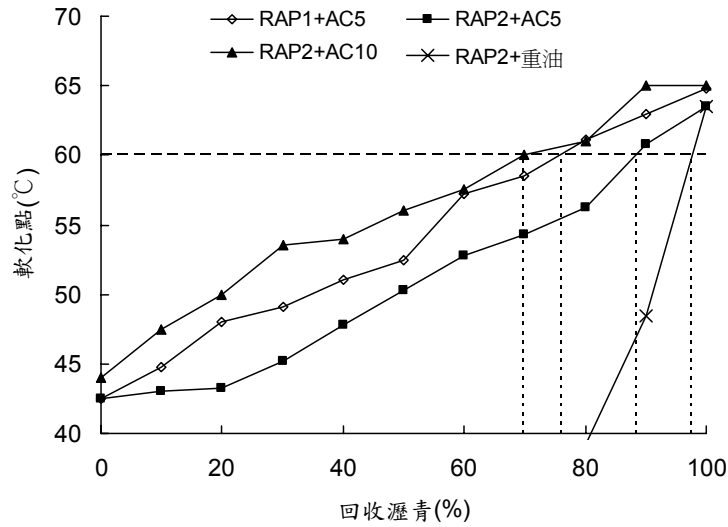


圖 5 添加不同軟化劑之回收瀝青含量與軟化點關係

4.1.3 黏度

黏度試驗為瀝青抵抗流動能力的判定，黏度大者較不易流動，反之，則趨向於牛頓流之狀態。圖 6 為以 AC-5、AC-10 與重油作為軟化劑，與 RAP-1 回收瀝青拌合後得到之回收瀝青含量與黏度關係圖。由圖中可知，不論添加何種軟化劑，老化瀝青黏度均會隨著軟化劑的含量增加而降低。在 90 - 100% 回收瀝青含量區段，亦即添加 0 - 10% 軟化劑，以 AC-5 作為軟化劑之斜率比 AC-10 來得高，表示添加少量的軟化劑，較低黏度之軟化劑對老化瀝青黏度影響較大。若以重油為軟化劑，添加約 30% 以上的重油，再生瀝青膠漿的黏度趨向於重油本身之黏度。

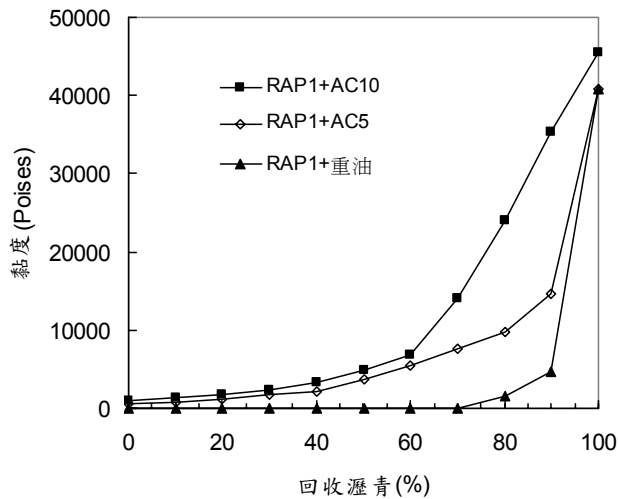


圖 6 添加不同軟化劑於 RAP-1 後之回收瀝青含量與 60°C 黏度關係

根據針入度、軟化點和黏度等試驗結果可知，添加軟化劑可以恢復老化瀝青的基本物性，如提高針入度、降低軟化點和黏度。若以較低黏度之軟化劑作為添加劑時，同樣含量之軟化劑效果會更明顯，有助於提升回收料的使用量，惟在鋪面高溫之抗車轍能力方面，需特別注意再生瀝青膠漿之軟化點需大於 60°C，以免提早發生破壞，影響鋪面使用年限。此外，以重油作為軟化劑時，雖然可以有效的降低瀝青黏度，提高回收料含量，但是當重油含量超過 5%時，再生瀝青膠漿軟化點即低於 60°C，由此可知重油不適合作為軟化劑。

4.2 軟化劑對瀝青膠漿流變性質之影響

根據 SHRP 所提出的瀝青分級制度，使用動剪流變儀 (Dynamic Shear Rheometer, DSR) 以固定頻率和固定應力，或固定溫度及固定應力方式，利用不同的頻率掃描，針對不同老化程度，不同回收瀝青含量，以及不同軟化劑之瀝青膠漿進行擺盪 (oscillation) 試驗，藉此評估再生瀝青的添加對鋪面績效之影響。

圖 7 為添加不同含量的 AC-5 於回收瀝青中，由圖中可看見當溫度上升時， G^* 值逐漸下降；而由不同含量之 RAB 來看，高含量回收瀝青的 G^* 值均較低含量值來得高，這是因為老化瀝青具有較高的勁度與較佳的彈性模數。圖 8 為以 AC-5 為軟化劑，在不同軟化劑添加比例下，再生瀝青膠漿的 G^* 與頻率關係。由圖中可以知道添加軟化劑時， G^* 會隨著頻率增加而逐漸增加。由圖 7 與圖 8 可以知道溫度、頻率與老化瀝青含量皆為複合模數 G^* 的影響因子，且軟化劑確能達到軟化老化瀝青的效果。

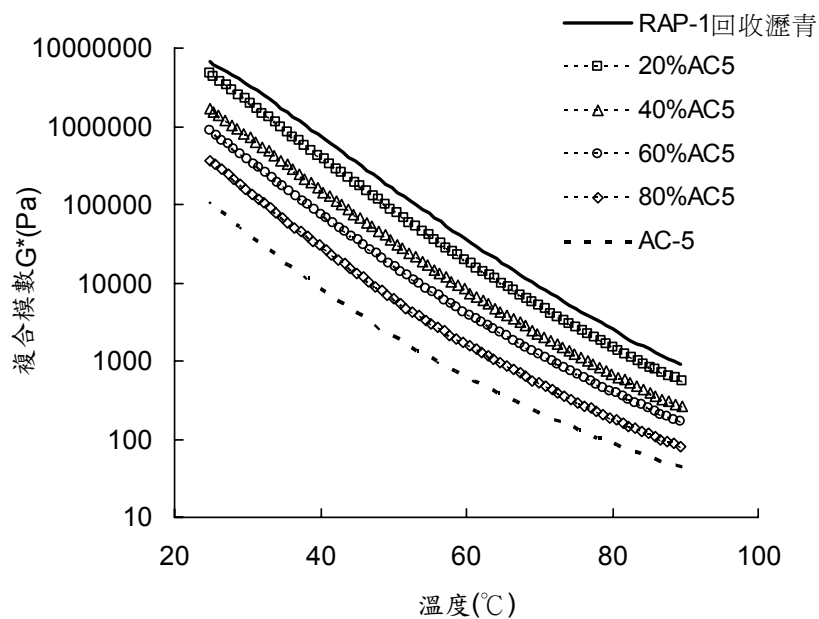


圖 7 RAP-1 回收瀝青與不同軟化劑含量在 1.59 Hz 作用下溫度與 G^* 關係

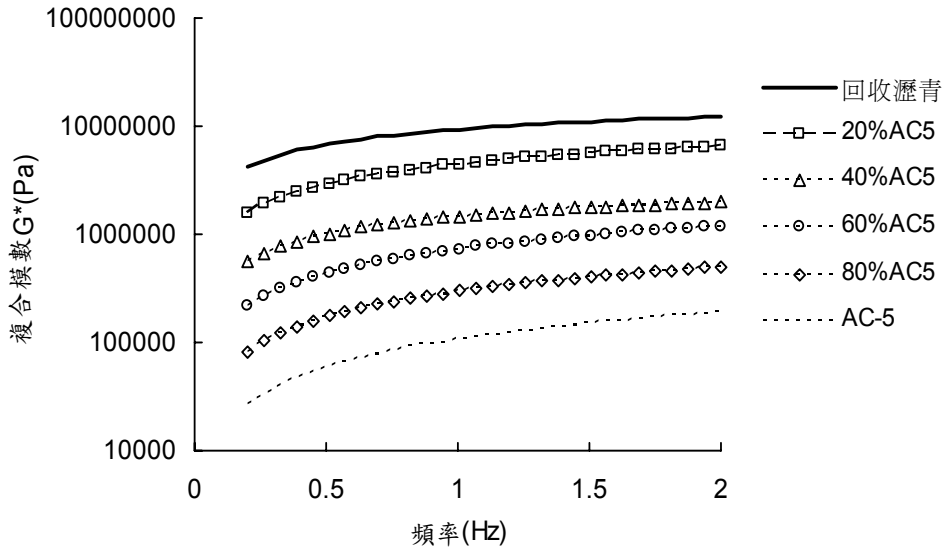


圖 8 RAP-1 回收瀝青與不同軟化劑含量之 G^* 與頻率關係圖

為了評估不同添加劑種類與含量對再生瀝青膠漿抵抗車轍變形之能力，研究採用 SHRP 提出的老化瀝青膠漿之車轍績效指標 ($G^*/\sin \delta$) 來考量，指標要求最小值為 2.2 kPa。圖 9 為再生瀝青膠漿車轍績效指標等於 2.2kPa 時，對應溫度與回收瀝青含量之關係圖，考慮到國內夏季鋪面表面最高溫度約為 60°C，因此採用此溫度所對應之回收瀝青含量來求取各添加劑的最大添加量，避免過量添加導致膠漿過度軟化，影響鋪面績效。由圖可知車轍績效指標所對應之溫度會隨著回收瀝青含量增加而上升，顯示老化瀝青的添加可以提高抵抗車轍能力。以重油為軟化劑時，圖形斜率較大，表示重油為三者之中最能有效軟化老化瀝青之添加劑，然而一旦添加超過 40%，其車轍績效指標已無法測得，顯示重油過度軟化老化瀝青，完全無抵抗車轍之能力。添加 AC-5 與 AC-10 之瀝青膠漿在 60°C 所對應之回收瀝青含量約為 28% 與 18%，同樣顯示較低等級之軟化劑可以提高回收瀝青使用量。

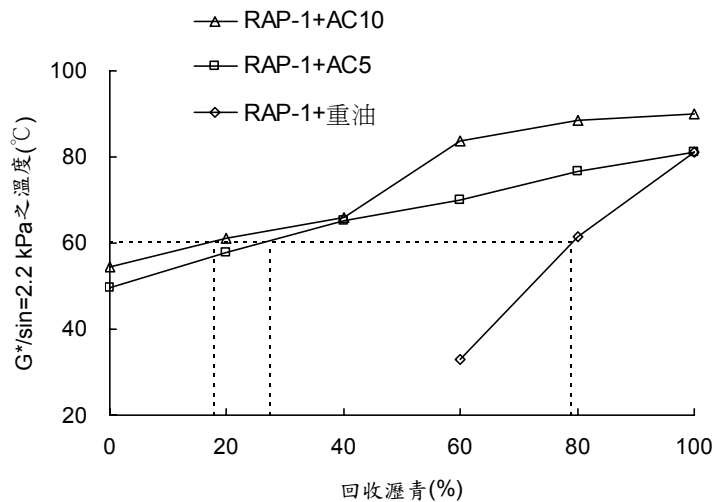


圖 9 不同軟化劑之 $G^*/\sin \delta$ 為 2.2 kPa 時所對應 RAP-1 回收瀝青含量與溫度關係圖

4.3 黏度拌合公式

再生瀝青混凝土之原理為在老化瀝青中添加再生劑或軟化劑，使老化瀝青恢復至原本新鮮瀝青之性質，讓再生瀝青混凝土之抗車轍、穩定性、耐久性皆達到品質標準。目前決定再生瀝青混凝土回收料用量的方法是依據以 ASTM D4887 的黏度拌合圖表，該圖表是依據 Arrhenius 提出之方程式 (1)，採用圖解法而得，由於未考慮新、舊瀝青之間的相互作用，因此預測值與實際值有所偏差，如圖 10 所示。

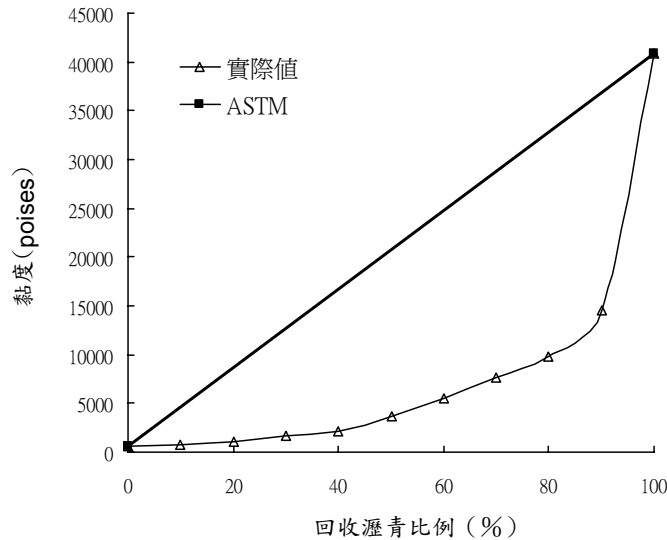


圖 10 添加 AC-5 之 RRAB-1 黏度與回收瀝青含量關係圖

研究採用 Grunberg 和 Nissan 提出的修正公式 (2)，並利用 DLV 值來預測 RAB 中回收瀝青之添加含量比例，依據 SPSS 統計分析軟體求出 Grunberg 公式中回收瀝青與添加劑間交互作用參數 (G_{12})，結果如表 3 所示。表中顯示重油之 G_{12} 參數最高，顯示當添加劑的黏滯度越低時，與老化瀝青的交互作用越明顯；若以不同老化瀝青來看，RAB 黏度越高會有較小之參數，顯示 RAB 與添加劑黏度差異越大，混合後所得到之 G_{12} 參數越小。

表 3 使用不同添加劑之 Grunberg 參數

| 添加劑 | Grunberg 參數 (G_{12}) | |
|-------|--------------------------|-------|
| | RAB-1 | RAB-2 |
| AC-5 | -1.5 | -0.02 |
| AC-10 | -1.03 | -0.96 |
| 重油 | -9.86 | -7.36 |

圖 11 為添加不同軟化劑之 RAB-1 含量與 DLV 關係圖，圖中之 ASTM 直線代表 $G_{12}=0$ 之線，即不考慮兩相之間的交互作用。根據添加不同軟化劑後之 DLV 線段來看，可以發現當軟化劑為 AC-10 時，所推估出來的拌合公式與 ASTM 偏離較少，而以重油所推估的拌合公式則偏離較多，顯示 DLV 在與 ASTM 拌合公式相較之下，利用 DLV 的方式可以合理預測結果。若由軟化劑之黏度來探討，則黏度較低的軟化劑，偏離 ASTM 較多；黏度較高的軟化劑，偏離 ASTM 較少，由此可知 ASTM 不適用於低黏度之軟化劑。

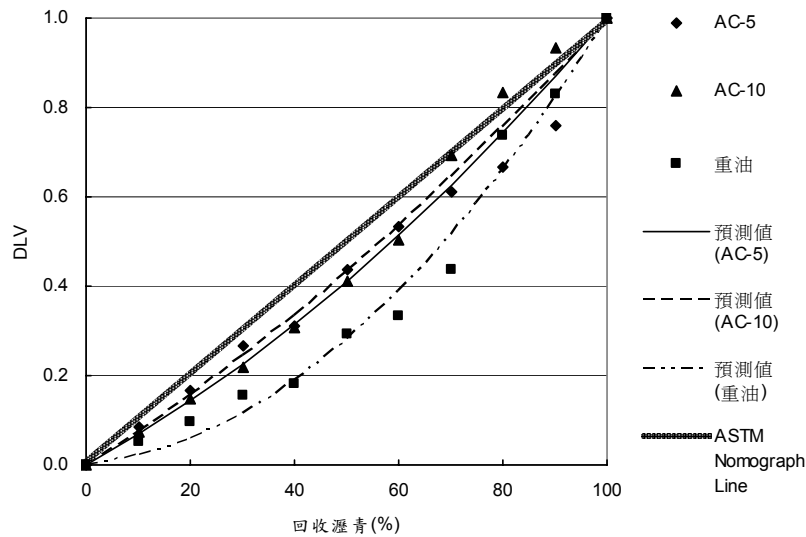


圖 11 RAB-1 之 DLV 與不同軟化劑含量關係圖

將 ASTM、Grunberg 兩種不同拌合公式所求得之預測值，與本研究之實驗結果對照，比較兩種方法之精確度，結果如表 4 所示，可知 Grunberg 的偏差值較小，可以精確地預測拌合後的黏度值；而 ASTM 的偏差值則較高，所預測的黏度值偏離實際黏度值許多。因此本研究建議採用 Grunberg 之公式預測再生瀝青之黏度值。

若利用 Grunberg 公式計算回收瀝青與不同軟化劑添加量之預測黏度，如圖 12 所示。圖中顯示老化瀝青添加不同軟化劑時，若依照 AC-20 之規範要求推算，則 AC-10 與 AC-5 之回收瀝青添加比例分別為 16~30%、30~40%，顯示軟化劑黏度越低時，則可添加之回收瀝青含量越高。若以相同軟化劑（AC-10）添加不同老化瀝青觀點來看，則 RAB-1 與 RAB-2 之添加比例各為 16~30%與 20%~33%，顯示瀝青老化程度越嚴重，則所需之軟化劑含量越多，因此回收瀝青比例相對降低。

表 4 兩種拌合公式之精確度（以 RAB-1 為例）

| 添加劑 | 實驗值 (1) | ASTM (2) | Grunberg (3) | 誤差 | |
|-------|------------|-------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | $\frac{ (1)-(2) }{(1)} * 100$ | $\frac{ (1)-(3) }{(1)} * 100$ |
| AC-5 | 2120 | 3106 | 2168 | 46.7% | 2.3% |
| AC-10 | 2290 | 3145 | 2532 | 37.4% | 10.6% |
| 重油 | 1660 | 4125 | 785 | 148.5% | 52.7% |

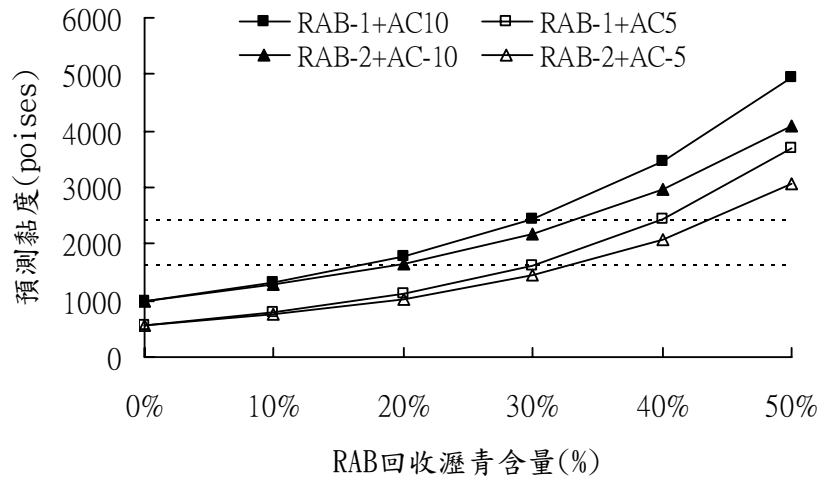


圖 12 回收瀝青含量與軟化劑之預測黏度值

4.3 瀝青混凝土黑石頭現象

瀝青混凝土之再生原理為添加再生劑或軟化劑於老化瀝青中，使老化瀝青恢復至接近原本新鮮瀝青之性質，然而從上一節可以看出新鮮瀝青與老化瀝青間的交互作用參數不為零，顯示兩者間的混合並非完全拌合，為了探討老化瀝青與新鮮瀝青黏結效果，本研究將使用三種拌合方式來模擬，分別為黑石頭、實際拌合與完全拌合。三種拌合方式的比較如下：

1. 黑石頭：新鮮粒料和 RAP 回收料（不含老化瀝青）先行混合後，再與新鮮瀝青拌合以模擬「黑石頭」行為。表示新、舊瀝青間無交互作用。
2. 實際拌合：新鮮瀝青與粒料直接與 RAP（含老化瀝青）拌合。
3. 完全拌合：新鮮瀝青與回收瀝青先行拌合，拌合後的瀝青膠漿再與新鮮粒料和 RAP 回收料（不含老化瀝青）一起拌合。

若 RAP 有黑石頭現象，表示回收瀝青無法與新鮮瀝青拌合，亦即黑石頭與實際拌合的試驗結果應該相似。若 RAP 能與新鮮瀝青完全拌合，則實際拌合與完全拌合的試驗結果相似。若回收瀝青與新鮮瀝青僅部分拌合，那麼實際拌合的試驗結果應該介於黑石頭與完全拌合的試驗結果之間，如圖 13 所示。

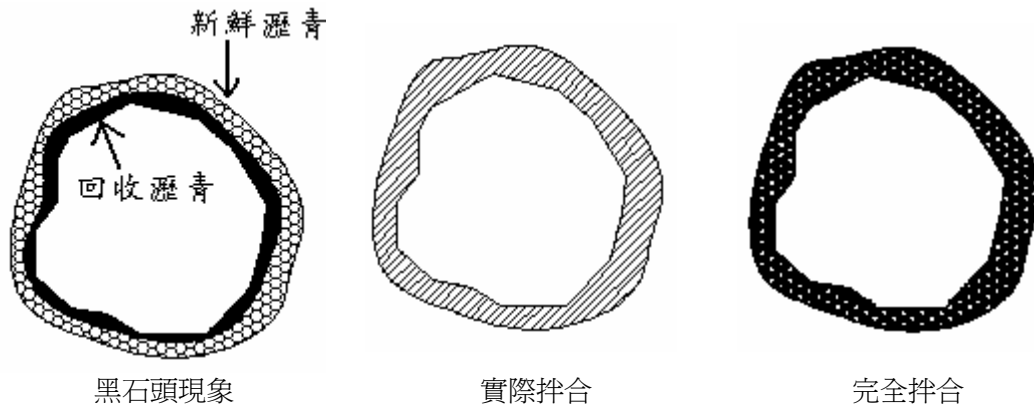


圖 13 回收瀝青與新鮮瀝青間之關係

圖 14 與圖 15 分別為新鮮瀝青混凝土與含回收料之 RAC 在掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 放大 200 倍下所觀測到的圖片，這兩種混合料的瀝青含量均為 5.2%，且級配皆為相同的密級配。從圖 14 中可看出包裹在粒料表面之瀝青薄膜厚度較圖 15 來得厚，推測所添加 RAP 之瀝青已經無法與新鮮瀝青黏結，導致薄膜厚度變薄，即已產生黑石頭現象。

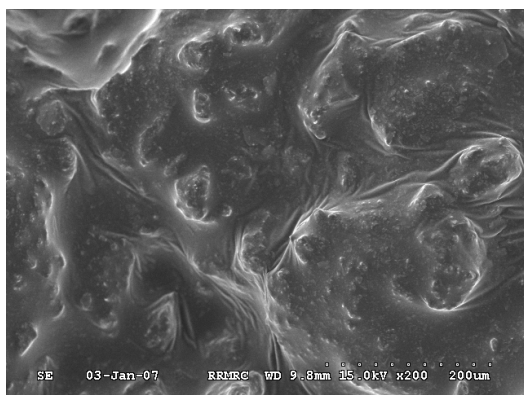


圖 14 新鮮瀝青混凝土於 SEM 放大 200 倍下之表面

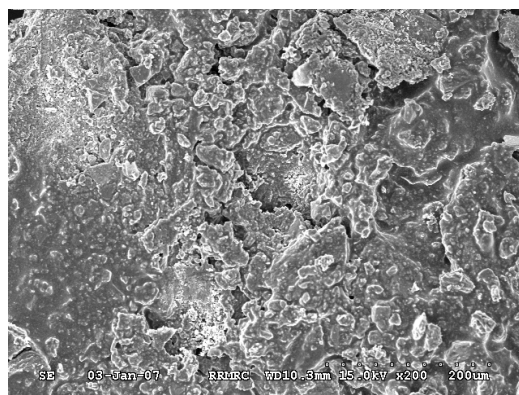


圖 15 含 RAP 之瀝青混凝土於 SEM 放大 200 倍下之黑石頭效應

為瞭解再生瀝青混凝土在控制 RAP 含量與控制目標黏度之黑石頭現象，本研究在固定 RAP 含量 RAC 試體製作過程中，根據不同拌合方式添加適量的軟化劑與 RAB；而在控制 2000 poises 目標黏度 RAC 試體製作過程中，根據不同拌合方式添加適量的重油、AC-5 與 AC-10 做為軟化劑。

4.3.1 控制 RAP 添加量 40%

圖 16 為控制添加 40%RAP 之 RAC 間接張力試驗值，結果顯示使用 AC-5 與 AC-10 做為軟化劑時，實際拌合與完全拌合相當接近，表示使用 AC-5 與 AC-10 做為軟化劑時，RAP 表面的回收瀝青能與軟化劑完全拌合，故無黑石頭現象。而在以重油做為軟化劑時，由於重油無法提供黏結力，因此黑石頭與實際拌合部份皆無間接張力值。此外，在完全拌合過程中，添加 60%重油的 RAC 產生剝脫現象，由黏度試驗可知，添加 60%重油於 RAP-1 回收瀝青時，RAB 黏度為 2120 poises，雖然符合新鮮瀝青 AC-20 之黏度範圍，但添加重油之瀝青混凝土間接張力值卻遠不如新鮮瀝青 AC-20。因此，由間接張力試驗結果可推測，重油雖在 RAB 中能發揮降低老化瀝青黏度之功能，但在瀝青混凝土中不適用。圖 17 顯示控制添加 40%RAP 之 RAC 殘餘強度，結果與間接張力試驗之趨勢相似，顯示添加 AC-5 與 AC-10 皆不會產生黑石頭現象。

值得注意的是，當控制 RAP 添加量為 40%時，添加 AC-5 與 AC-10 的 RAC 黏度在實際拌合與完全拌合時非常接近，如表 5 所示，因此間接張力與殘餘強度試驗結果相近應該是 RAC 黏度直接造成之影響，因此採用控制 RAP 添加量的方式，無法判斷 RAC 是否真的產生黑石頭現象。

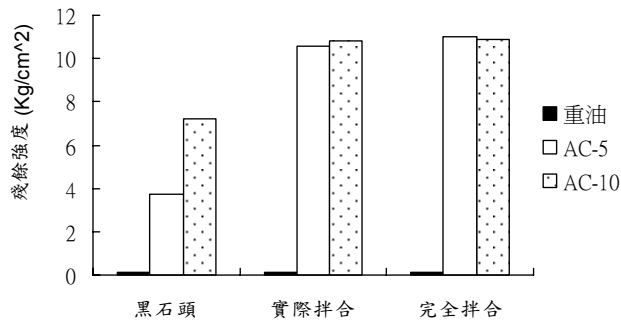


圖 16 控制黏度 40%RAP 之 RAC 間接張力強度

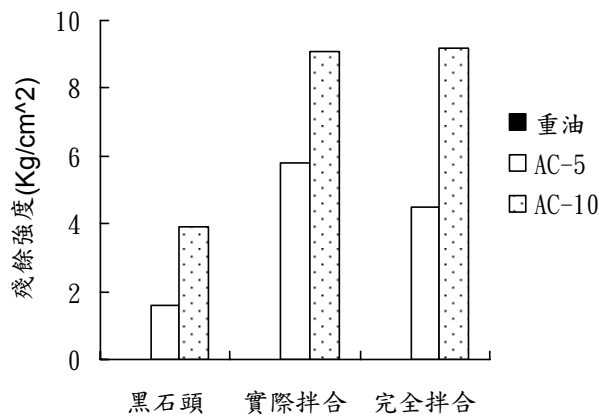


圖 17 控制黏度 40%RAP 之 RAC 殘餘強度值

表 5 控制 RAP 含量為 40% 時之 RAC 黏度

| 添加劑 | 60°C 黏度(poises) | | |
|-------|-----------------|------|------|
| | 黑石頭 | 實際拌合 | 完全拌合 |
| AC-5 | 557 | 1740 | 2120 |
| AC-10 | 1000 | 2290 | 3240 |

4.3.2 控制目標黏度

圖 18 所示為將黏度控制在 2000 poises，RAC 之間接張力強度，添加重油、AC-5 以及 AC-10 做為軟化劑時，RAP 添加量分別為 92.25%、31.4%和 21.12%。由圖中可以發現，控制目標黏度時，添加重油實際拌合的間接張力值較黑石頭與完全拌合的間接張力值小，此表示在實際拌合過程中使用重油做為軟化劑，由於重油無法提供任何的黏結能力，因此瀝青混凝土本身將因無提供足夠黏結力而使得強度變小。使用 AC-5 與 AC-10 作為軟化劑時，間接張力結果較接近黑石頭拌合，顯示會有黑石頭現象的產生。圖 19 為控制目標黏度為 2000 poises 時，使用 AC-5 與 AC-10 做為軟化劑之殘餘強度試驗結果，結果顯示添加新鮮瀝青 AC-20 之黑石頭殘餘強度最高，且實際拌合的殘餘強度值介於黑石頭與完全拌合之間，且與黑石頭拌合的效果最接近，因此可以知道在控制目標黏度為 2000 poises 時的 RAC，回收瀝青與軟化劑僅部份拌合，會產生部份的黑石頭現象。

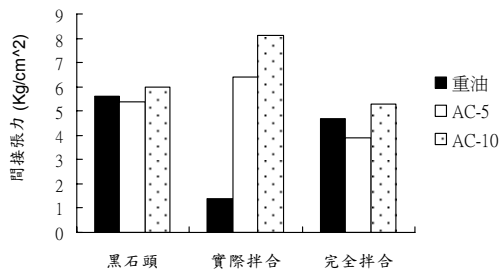


圖 18 控制目標黏度之 RAC 間接張力強度

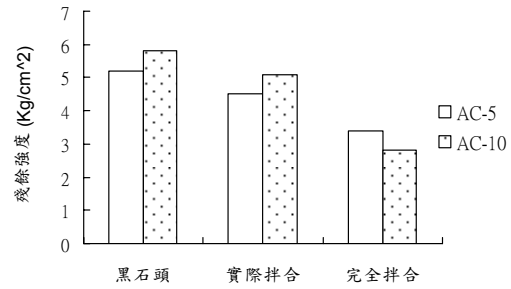


圖 19 為控制目標黏度之 RAC 殘餘強度

由控制目標黏度為 2000 poises 之 RAC 的回彈模數來看，如圖 20 所示，當添加 AC-10 做為軟化劑時，實際拌合結果介於黑石頭與完全拌合之間，此表示 AC-10 與 RAP-1 回收瀝青僅部份混合；而當使用 AC-5 做為軟化劑時，實際拌合回彈模數均較黑石頭與完全拌合結果小，顯示實際拌合時，添加 AC-5 之回彈能力較差。不同添加劑之 RAC 即時回彈也呈現同樣的趨勢，如圖 21 所示。

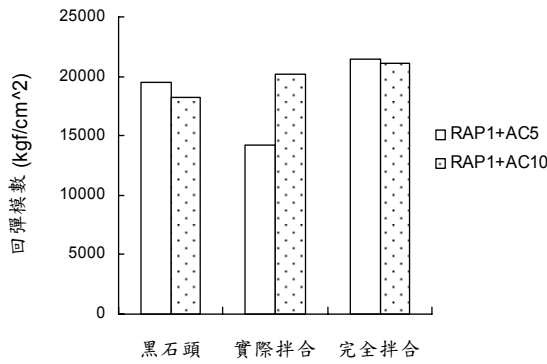


圖 20 控制目標黏度之 RAC 回彈模數試驗

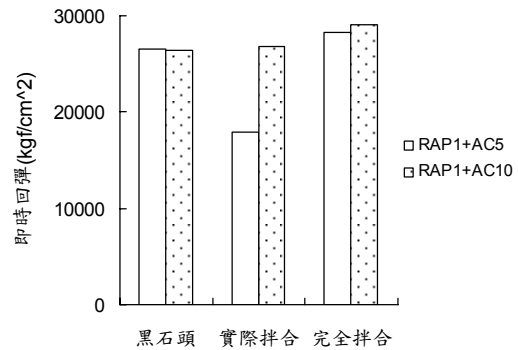


圖 21 控制目標黏度 2000 poises，回彈模數之黑石頭檢驗

車轍為瀝青混凝土最常產生之破壞，一般而言，車轍是瀝青黏結層由於交通載重作用而無法回復之殘餘變形所累積的永久變形。表 6 為控制目標黏度之 RAC 在實際拌合情況下進行試驗所得之車轍深度、動穩定值與變形率。由表中可知使用重油為軟化劑之 RAC 所產生的車轍深度最大，AC-10 最小，這可能是因為採用重油為軟化劑時，所需添加量為 21.2%，此時再生瀝青膠漿的軟化點低於 60°C，而車轍試驗溫度正好為 60°C，因此可能產生較大的車轍。此外，AC-10 則有最大的動穩定值與最小的變形率，顯示添加黏度較高的軟化劑有助於增加 RAC 的抗車轍能力。

表 6 控制目標黏度之 RAC 車轍深度、動穩定值與變形率

| 軟化劑 | 車轍深度 (mm) | 動穩定值 (次/mm) | 變形率 (mm/sec) |
|-------|--------------|----------------|-----------------|
| 重油 | 39 | 37.5 | 1.33 |
| AC-5 | 16 | 200 | 0.25 |
| AC-10 | 4 | 600 | 0.08 |

五、結論

1. 再生瀝青膠漿的針入度與延展性都會隨著 RAP 含量增加而減小，而軟化點與黏度則會隨著 RAP 含量增加而變大。
2. 由瀝青膠漿性質來看，軟化劑確能軟化老化瀝青。惟使用重油當軟化劑雖可明顯降低回收瀝青黏度，但由針入度、延展性與軟化點試驗結果可知，添加超過 20%後，RAB 即呈現液態，因此重油不適合作為軟化劑。
3. 由黏度拌合公式可知，使用黏度較低的軟化劑時，RAB 的黏度偏離 ASTM 預測值較多，因此推測 ASTM 不適用於低黏度之軟化劑。添加軟化劑時，若能考慮材料交互作用參數，則能更準確的預測 RAB 的黏度。
4. 由軟化點試驗、車轍績效指標在 60°C 所對應之添加劑含量以及拌合公式反推之添加劑用量可以做為參考依據。
5. 由黑石頭現象的試驗結果顯示控制 RAP 含量的方式無法判斷 RAC 是否產生黑石頭，若改用控制目標黏度為 2,000 poises 之方式，可以發現當使用 AC-5 與重油為軟化劑時，會有黑石頭現象產生，建議以控制目標黏度的方法來檢查黑石頭現象。

六、參考文獻

1. Arrhenius, S., "The Viscosity of Aqueous Mixture," Physical and Chemistry, Vol.1, pp.285~298 (1887).
2. Chaffin, J.M., Davison, R.R., Glover, C.J. and Bullin, J.A., "Viscosity Mixing Rules for Asphalt Recycling," Transportation Research Record 1507, pp. 78-85 (1995).
3. Grunberg, L. and Nissan, A.H., "Mixture Law for Viscosity," Nature, Vol.164, pp. 799-800 (1949).
4. Little, D.H., Holmgren, J.R. and Epps, J.A., "Effect of Recycling Agents on the Structural Performance of Recycled Asphalt Concrete Materials," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, pp.32~63 (1981).
5. Soleymani, H.R., Anderson, M., McDaniel, R. and Abdelrahman, M., "Investigation of the Black Rock Issue for Recycled Asphalt Mixtures," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 69, pp. 366-390 (2000).

橋墩保護工法之新概念

黃進坤*、徐立昌**

摘要

本文提出兩種橋墩保護的新工法：成功人工水草(CKAW)及成功筐網(CKPB)，此兩種新工法將依橋墩破壞的不同形式，給予適當的佈置以達到保護橋墩的效果。依試驗結果及現地測試可以達到良好的保護效果，值得應用在實地的橋墩保護工程上。

一、前言

所謂橋墩沖刷為橋墩受水流作用後，導致河川床面比建橋時下降者，即稱橋墩沖刷。亦即由外觀上能顯示出位於橋墩處之河床面下降的現象，依此定義橋墩的沖刷類型，大略分為：一般化沖刷(*general scour*)及局部化沖刷(*localised scour*)。一般化沖刷受制於河川變動特性，與橋墩存在無關，依影響時間之長短，可以分為長期一般沖刷(*long-term scour*)及短期一般沖刷(*short-term scour*)；局部化沖刷主要受橋墩本身影響，可以分為束縮沖刷(*constriction scour*)及局部沖刷(*local scour*)，一般以局部沖刷為討論重心，本文亦以此做為橋墩保護工法探討的方向。有關水流通過橋墩的流場及其沖刷特性，在一些參考文獻中已有詳細的論述，本文不再說明。

本文主要重點將分析橋墩的沖刷型態以及針對此些沖刷型態探討其適當的保護方式。

二、橋墩破壞形式

依橋墩破壞的類型，大略將其分成六大類：(1)凹岸沖刷，(2)橋台沖刷，(3)保護工破壞，(4)固床工破壞，(5)基礎擴大，(6)兩河交匯，等所造成的橋墩破壞。

(1)凹岸沖刷

當橋墩位於彎道凹岸時，因為此種流場之水流將集中在凹岸，使得凹岸沖刷較深，橋墩將受到凹岸沖刷影響，導致橋墩更容易造成破壞的現象，如六龜大橋(圖 1)及義林大橋(圖 2)。

* 國立成功大學水利及海洋工程學系副教授

** 經濟部水利署第五河川局副工程司



圖 1 六龜大橋在 p2 產生傾斜



圖 2 義林大橋產生沖刷下陷

(2)橋台沖刷

當橋面橫跨在橋台上時，若橋台產生沖刷將危及橋梁安全，在 2005 年 7 月楓港大橋斷橋事件為一橋台沖刷而造成橋面下陷的現象，見圖 3 所示。依圖 3 得知，當橋台受到沖刷後，導致橋台靠近馬路的基礎被沖刷而產生交通中斷。



圖 3 楓港大橋因橋台沖刷而產生破壞

(3)保護工破壞

當橋墩因沖刷而產生嚴重裸露時，為了橋墩安全常在其周圍佈置保護工，如異形塊、蛇籠，以抵抗沖刷，但是，如此施作的結果，造成橋梁斷面處產生一較堅強的保護層，若此保護層沒有受到破壞時，則橋墩沖刷可以控制；反之，一旦遭受破壞下，常常僅在某一局部處產生沖刷，此局部破壞形成一弱面，水流將由此弱面開始做較劇烈的垂向沖刷，而加劇沖刷深度，因為橫向沖刷已經受到未破壞的保護工所限制，如高屏大橋斷橋為一顯著的案例。圖 5 為高屏大橋在洪峰已經通過 2 天之後，橋墩下陷處的流場，依此流場得知其原蛇籠保護層已經遭到破壞，不再有保護層保護河床，但是兩側的保護層仍然存在，導致水流集中於此斷面，單寬流量足以起動泥沙，而產生繼續向下沖刷現象，直到再過兩天的沖刷作用後而導致橋墩下陷，見圖 4 所示。



圖 4 高屏大橋斷橋

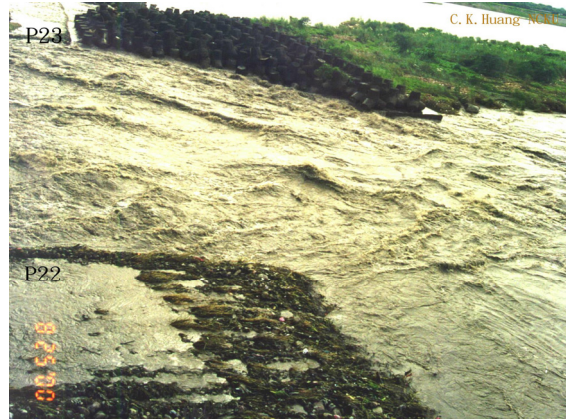


圖 5 颱風過後保護工破壞情況

(4) 固床工破壞

當河床逐漸下降時，導致橋基裸露，最常使用的保護方法為在橋梁下游建一固床工來穩定河床，以達到回淤效果。但是，若此固床工遭到破壞時，將產生一深槽河道，使得橋基裸露更嚴重，圖 6 為自強大橋下游固床工損壞的情況，產生一較深主槽，而使得橋基嚴重裸露，走向橋梁重建的命運。



圖 6 自強大橋下游固床工破壞



圖 7 橋基產生嚴重沖刷

(5) 基礎擴大

當橋墩基礎裸露時，為加強其安全性，可能以增加基礎承載來抵抗沖刷。但是，因為基礎斷面增加，其沖刷深度亦隨之增大，若僅擴大基礎斷面，而無增加其深度時，將導致因為沖刷深度增加而使得基礎深度不足，以致產生橋墩下陷的後果，蘭陽溪牛鬥橋為一例子，見圖 8 所示。



圖 8 牛鬥橋因橋基擴大造成沖刷加深而產生下陷

(6)兩河交匯

當橋墩位於兩河交匯處時，因受到兩河流場的相互作用，產生一漩渦，此種流場容易將橋墩基礎的泥沙掏空，對橋墩產生安全產生威脅。在荖濃溪上游的寶來一號橋正位於兩河交匯處，雖在橋墩處有一固床工存在，但是在賀伯颱風的洪水作用下產生向下游傾斜的現象。



圖 9 重建的寶來一號橋



圖 10 寶來一號橋受賀伯颱風傾倒情況

三、防止沖刷的方法

3-1 成功人工水草之工法

本方法乃是利用底床泥沙輸送減緩的特性來穩定河床。佈置成功人工水草(簡稱 CKAW)之上游泥沙輸送較快，而在 CKAW 保護區域內，受到水流底床剪力減小之影響，輸沙能力減弱，因此，當泥砂運行到此 CKAW 保護區域內時，受人工水草保護的效應，位於此區內的泥砂不易被攜出，泥砂將產生淤積現象。

CKAW 主要特性：(1)改變流場的剪力分布，(2)可以隨地形變動而自動調整保護方位，(3)可以順著流向來自動調整保護位置，使得在流向改變時亦能改變保護的方向，(4)對原本流場的干

擾甚小。現場施工安裝簡易，可於工廠先行製造，再至工地施工，以爭取最快速時間，且材料便宜，降低成本，達到經濟效益，任何地形均可以使用，本身穩定度極佳，不易損壞，更換簡易。

圖 12 為 CKAW 在橋墩保護上的佈置及效果。圖 12a 將 CKAW 佈置在橋墩四周，在橋墩迎水面以交叉方式安裝，其佈置範圍大約為 3 倍橋墩寬度。圖 12b 為受到保護時沖刷 1.3cm，若不做保護時的沖刷深度 7cm(圖 12c)，CKAW 產生顯著的保護效果。

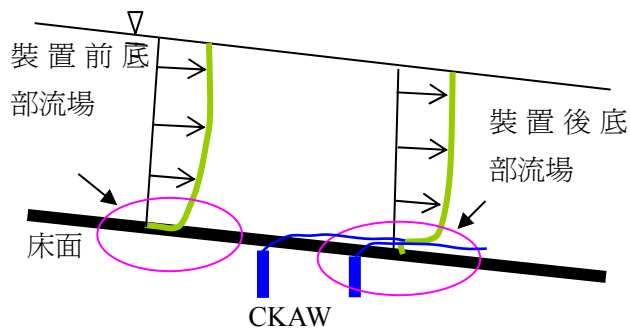


圖 11 成功人工水草之佈置



圖 12a CKAW 橋墩保護之佈置



圖 12 b 保護下的沖刷深度

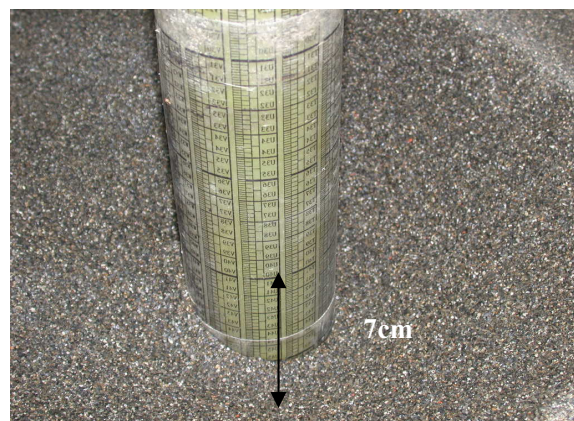


圖 12 c 未保護下的沖刷深度

3-2 成功管網之工法

成功管網(簡稱 CKPB)之結件由一些網管所組成，內部為空心型態，不必填入任何東西，可以由不同材料製成，包含有樹枝類(如柳枝、竹、藤條...等)、金屬類(如不鏽鋼網、鐵絲網、多孔空心柱...等)、化學材料類(如 PE 塑膠、有洞 pvc 管、塑鋼...等)...等等。當水流通過管網結構物後，受到網格的分散效應而產生大量的動能損失，使得流速減小，降低沖刷能量，而達到保護橋墩的效果。CKPB 依其作用方式，大略分成兩類，第一類為垂向式，應用在橋墩保護上；第二類為橫向式，應用在跌水沖刷保護上。

就垂向式而言，見圖 13 為現場測試的結果，其主要特性為使流速減慢及在其正下方產生沖刷而其下游背水區產生淤積。可以利用此種特性來做橋墩保護、流路控制、及凹岸保護。

就橫向式而言，見圖 14 所示，其佈置方向和水流垂直，應用在跌水沖刷的保護上，不但可以消滅跌水的能量，而且可以將跌水水舌由垂向導向水平方向，以降低跌水所造成的沖刷深度。

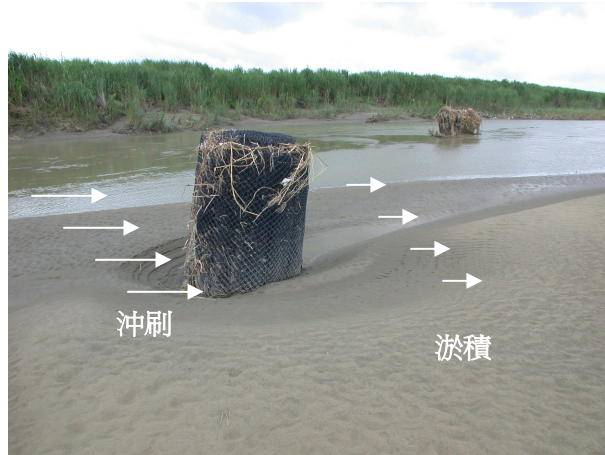


圖 13 成功籠網的基本特性

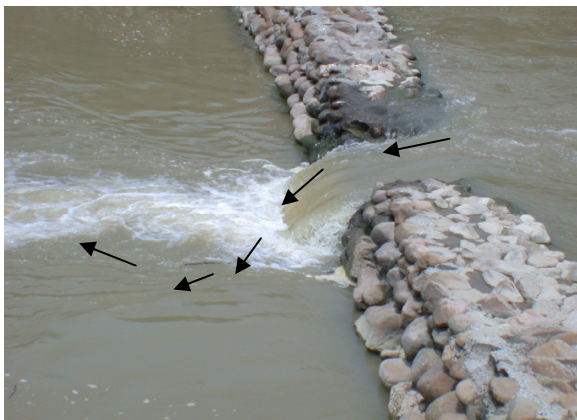


圖 14a 未保護時的跌水現象

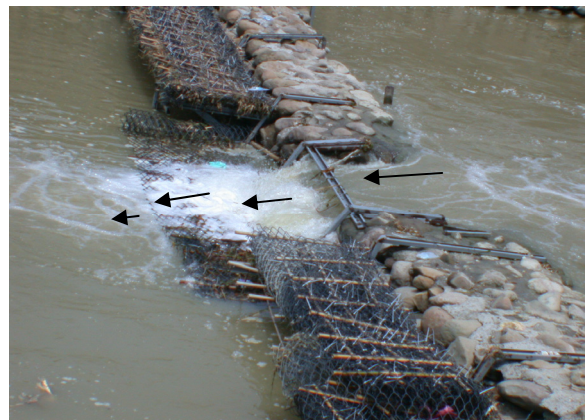


圖 14b 受保護時的跌水消能及導流

3-3 案例說明

依前節的橋墩破壞類型，本節將分成四個部分來說明橋墩在不同狀態下的保護方式，分為橋台保護、橋墩保護、固床工保護及河川流路控制等四種。

(1) 橋台保護

當水流通過橋台時，受橋台阻水影響，在上游面產生橫向流動，再配合主流造成在側面形成一極強的向上螺旋流，見圖 15c 所示，如此，將導致其上游側產生極大的沖刷深度。為控制此沖

刷深度，在橋台四周佈置 CKAW(圖 15b)，以減緩泥沙移動，而降低底床的沖刷，依圖 15d 顯示，沖刷深度可以由未保護時的 6cm 降為保護時的 0.6cm。

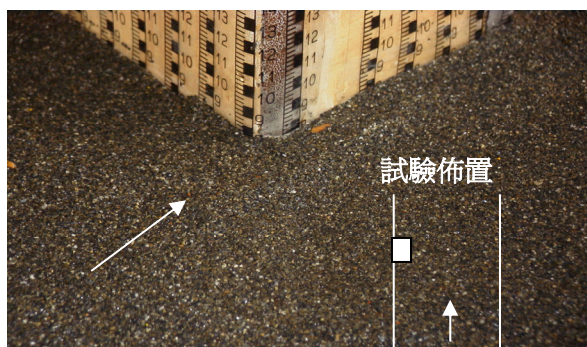


圖 15a 原始地形



圖 15b CKAW 佈置在橋台周圍

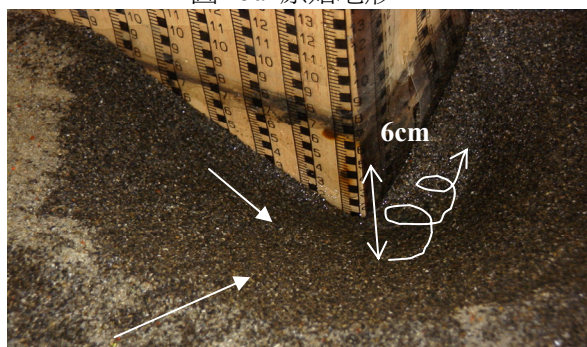


圖 15c 未保護時的沖刷深度 6cm

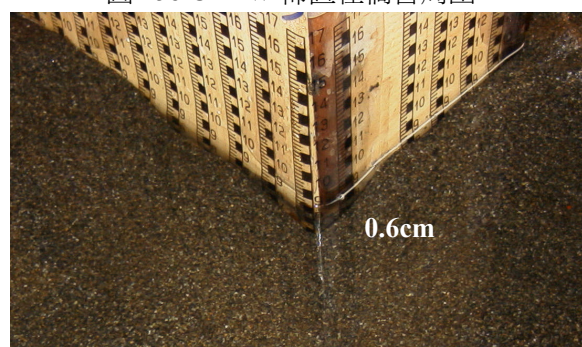


圖 16d 保護時的沖刷深度 0.6cm

(2) 橋墩保護

當水流通過橋墩時，受橋墩束縮作用，形成一局部沖刷，其未保護時之沖刷深度為 6cm。若在其一倍橋墩直徑處放置兩個 CKPB，則沖刷深度明顯降低，僅為 0.4cm，產生極佳的保護效果，見圖 17 所示。在實際的應用上，其 CKPB 的佈置方式見圖 18 所示，在橋墩上游以一筐網群加以佈置，成一三角形狀，各單元間相互連結，以增強水流沖擊。依室內及現地試驗結果可以得到良好的橋墩保護效果。

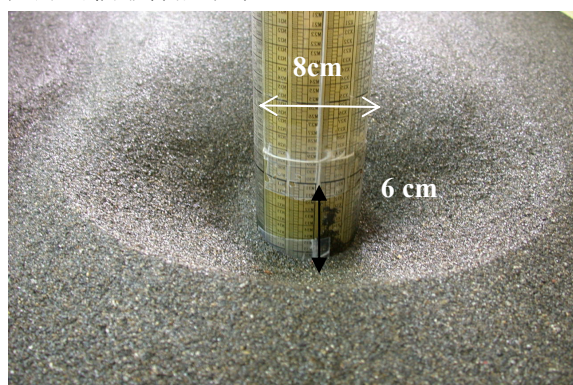


圖 17a 未保護下的沖刷為 6cm



圖 17b 保護下的沖刷為 0.4cm

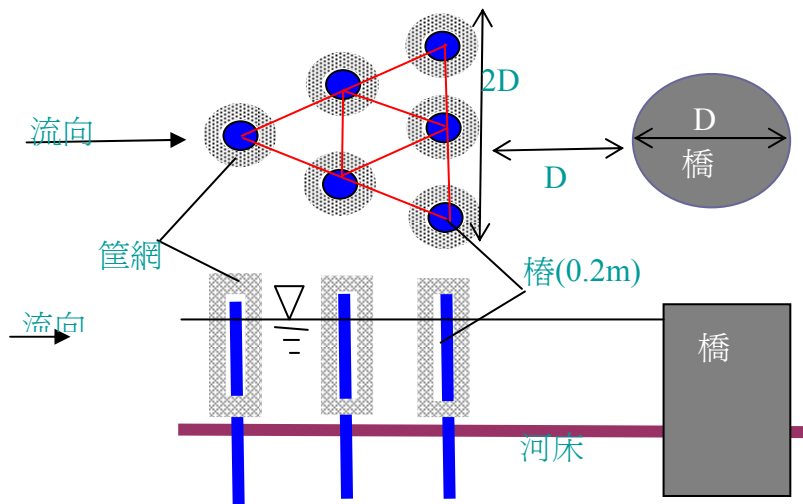


圖 18 CKPB 在實際橋墩保護的佈置情況

(3) 固床工保護

以固床工來穩定河床，達到防止橋墩沖刷的目的，為現場經常使用的方法。但是固床工本身是否安全，為此工法成敗重要的關鍵所在。因為固床工損壞而導致橋墩裸露嚴重者經常發生，如濁水溪中的自強大橋、西螺大橋、中沙大橋。本文以橫向的成功筐網(CKPB)來控制跌水沖刷，可以得到良好的結果。依現地六重溪試驗，見圖 19 所示，當有保護時，其減少約 2m 的沖刷深度。



圖 19a 六重溪多重固床工



圖 19b 橫向成功筐網佈置情況



圖 19c 未保護時的跌水流況



圖 19d 保護時消能及導流作用



圖 19e 未保護時的水深約 3m



圖 19f 保護下跌水水深約 0.9m

(4)控制河川流路

當橋樑必需橫渡河川時，常受到河川流路變遷的影響，使得原本位於高灘的橋墩反而落在主深槽內，構成對橋墩的威脅。或是有些橋在主深槽以完成橋墩基礎的加深作業，若河道可以控制在此區域內流動，則橋樑安全將可以受到控制。因此，有效控制河川流路的方法亦是保護橋墩安全的另一手段，本文將以垂向成功管網來控制河川流路，以確保高灘上的橋墩不再受到沖刷。就濁水溪中的溪洲大橋及西螺大橋，在主深槽區域內的橋墩已經有強化其抵抗沖刷能力，但是在靠近高灘區中的橋墩尚未加深其基礎，因此，若能在其兩側以 CKPB 將主流路控制在中間河道中，則可以穩定河川流路，而達到保護高灘橋墩的效果，圖 20 中虛線為 CKPB 佈置方式。



圖 20 濁水溪導流工法穩定河道流路以保護高灘橋墩

利用垂向成功管網做為河川流路控制，在現地已有成功案例，位於八掌溪三角子處有一凹岸，一般以丁壩群加以保護，如今以 CKPB 來改變流路以達到凹岸保護的功效，達到極佳的成效。圖 21 為現場狀況，在凹岸上游佈置三排 CKPB，以將主深槽導離凹岸。圖 22a 為原本以丁

壩群加以保護凹岸的狀況，依圖得知在原本流路為蜿蜒河道，對凹岸產生沖刷，因此做一丁壩群加以保護。在凹岸上游完成成功管網導流工之後，經過 95 年 6 月 9 日的洪水之後，主流線被導離凹岸，致使原本凹岸處產生淤積的效果，見圖 22b 所示，一些丁壩被淤沙所覆蓋。

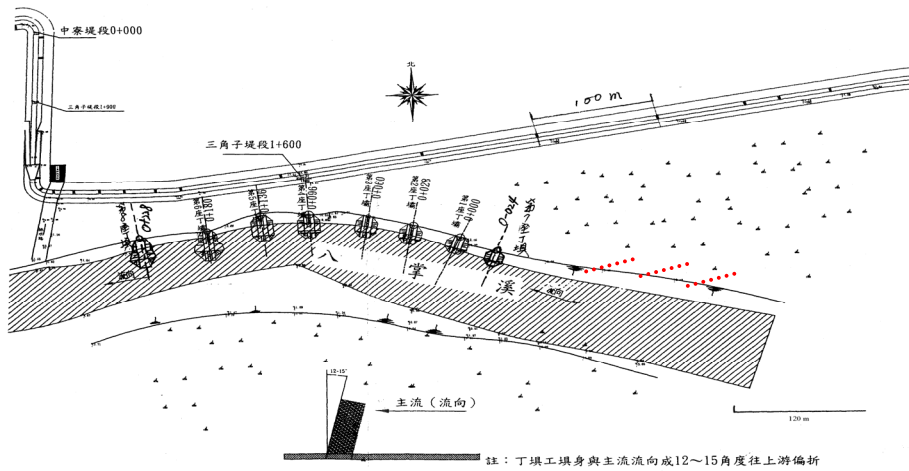


圖 21 成功管網在八掌溪現地試驗佈置



圖 22a 以丁壩群保護凹岸



圖 22b 受 CKPB 作用產生淤積

依上述成功管網的導流成果，應用在橋墩保護上，圖 23 為六龜大橋附近地形，在其上游有一極大彎道，導致凹岸產生明顯的沖刷，而使得六龜大橋橋墩亦產生較大沖刷，見圖 24 之水工模型試驗結果，橋墩處底床露出，沖刷顯著。若能以成功管網導流工法，將流路導離凹岸，則可以使得橋墩沖刷顯著的下降，以達到保護橋墩的效果，見圖 25 所示，依圖顯示橋墩處的底床已被泥沙覆蓋，沖刷減小。

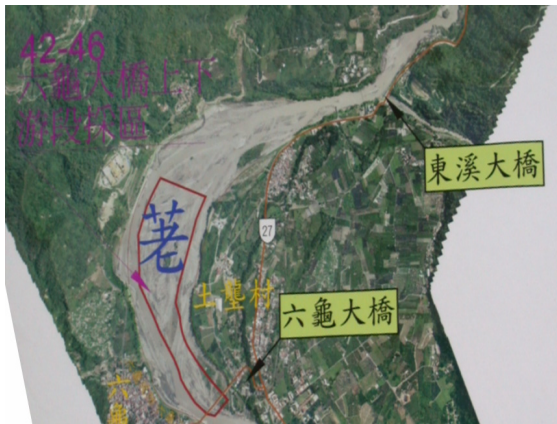


圖 23 六龜大橋現場地形

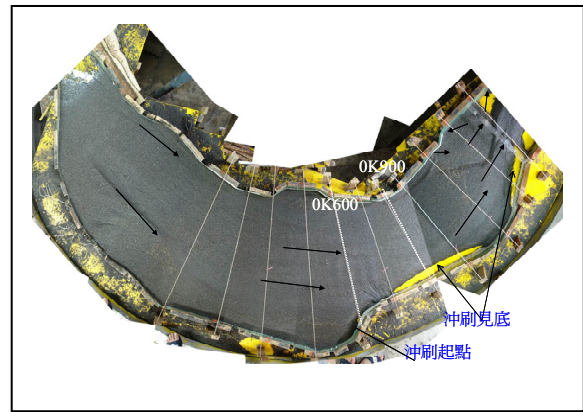


圖 24 未做保護時凹岸產生顯著冲刷

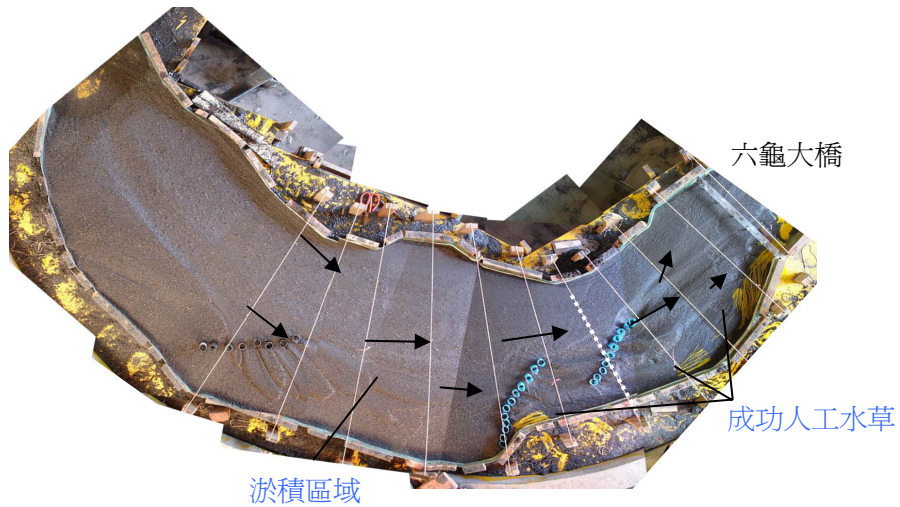


圖 25 經過成功管網導流之後，冲刷顯著下降

參考文獻

1. 洪勝榮、張三郎、黃進坤、洪丕振、徐立昌，2006，“管網結構物對凹岸冲刷保護現地測試探討”，水利，第 16 期，pp.97-103。
2. 黃進坤，2006，“橋墩保護新工法之研究”，台灣公路工程，第 32 卷第 8 期，p39~44。
3. 黃進坤，2006：“六龜大橋上游段適度疏浚對堤防及橋墩冲刷之試驗研究”，經濟部水利署第七河川局報告。
4. 黃進坤，2001，“高屏大橋地形冲淤變動對斷橋之影響”，台灣水利，第四十九卷第一期，pp.73~80，台灣。