

ISSN:1812-2868

臺灣公路工程

第 41 卷 第 7 期

〈每月 15 日出刊〉



TAIWAN HIGHWAY ENGINEERING

Vol. 41 No.7 July 2015

交通部公路總局

中華民國 104 年 7 月 15 日

聖嚴法師 自在語

～ 人間智慧 ～

遇事正面解讀逆向思考，成事確立方向鍥而不捨。

路遇懸崖峭壁走過去，巧過人間仙境莫逗留。

權勢財富屬社會共享，禍福苦樂乃各人因緣。

誘以名利權位不動心，陷於千軍萬馬無所懼。

天不錯地不錯是心錯，他有理你有理我沒理。

莫怨孝子賢孫何其少，但問養育兒女怎麼教。



封 面 說 明

台9線476k+000

楓港高架橋

林文貴攝

臺灣公路工程

TAIWAN HIGHWAY ENGINEERING

中華民國 41 年 11 月 11 日創刊

第 41 卷 第 7 期 目錄

本刊為中華民國 41 年 11 月 11 日創刊，至 63 年 3 月 1 日發行第 22 卷第 5 期，經合併本局發行之臺灣公路工程、養路及公路機料等三種月刊，仍以臺灣公路工程為名，於 63 年 7 月 15 日起重訂為第 1 卷第 1 期繼續發行

臺灣公路工程

發行人

趙興華

社長

夏明勝

總編輯

李忠璋

總幹事

張宇博

編輯

吳進興 黃開平

賴常雄 陳進發

張運鴻 蔡宗成

鄧文廣 薛讚添

陳敬明 林清洲

廖吳章 翁有來

邵厚潔 陳松堂

賴明煌 黃三哲

實務報導

工程施工經驗分享 - 以台 31 線由台 66 線延伸至台 1 線新建工程為例

.....薛讚添、林振生、莊建銘、莊毅豪...(2)

專題研究

瀝青組成、老化、還原與應用

.....陳建旭、陳世梵、廖敏志、黃碩偉...(14)

本刊內容不代表本局意見

發表之文字如需轉載請先徵得本刊之同意

出版者：交通部公路總局

社址：10863 臺北市萬華區東園街 65 號

Address: No.65, Dongyuan St., Wanhua Dist.,

Taipei City 10863, Taiwan(R. O. C.)

電話：(02) 2307-0123 轉 8108

網址：<http://www.thb.gov.tw/>本局資訊/影音及出版品

工程施工經驗分享 -

以台 31 線由台 66 線延伸至台 1 線新建工程為例

薛讚添^{*}、林振生^{**}、莊建銘^{***}、莊毅豪^{****}

摘要

工程施工過程中，可能因監造、施工者經驗不足、疏漏，或設計圖說未詳盡等因素，導致施工錯誤。如能於施作前或施作過程中及時發覺，尚有研思補救或補強的空間，否則良機一逝，可能只有打除重做一途，因此監造、施工兩者皆不可不慎。諺云：「魔鬼藏在細節裡」，小細節漏失的後果，不僅廠商需耗費額外的金錢、時間、人力進行改善缺失，甚而嚴重延宕完工期限，對甲乙雙方都是莫大損傷。

本處針對近期施作的工程，所發生數例施工錯誤的情形，諸如預力大梁梁底楔角漏做、預力梁端與橋台背牆間距過大、預留鋼筋方式錯誤、邊溝蓋版未施作就鋪築瀝青混凝土等，提出檢討及改善方案。俾提供本局工程同仁參考，避免再發生類似狀況，冀期對本局施工品質之提升稍有助益。

關鍵詞：預力梁、楔角、預埋鋼筋、瀝青混凝土

一、工程緣起

民國 95 年行政院依公路法公告高鐵橋下道路桃園段、嘉義段及台南段分別納編為省道台 31 線、台 37 線及台 39 線，正式將橋下道路納入公路路網。台 31 線（桃園段）北起台 4 線，南迄台 66 線（東西向快速公路觀音大溪線），全長約 17 公里已開放通車，主要沿高鐵橋下兩側佈設，為高鐵桃園青埔站聯外主要交通幹道。惟自台 66 線以南至台 1 線湖口段，全長約 12 公里之高鐵路段尚未佈設橋下道路，因其路線貫穿桃園台地南側中心區域，串連桃園市新屋、楊梅及新竹縣湖口地區，又為臨山側台 1 線及濱海側

^{*} 公路總局第一區養護工程處 處長

^{**} 公路總局第一區養護工程處工務課 課長

^{***} 公路總局第一區養護工程處中壢工務段 幫工程司

^{****} 公路總局第一區養護工程處新竹工務段 約僱工務員

台 15 線間之唯一南北向幹道，因此，為紓解現況省道台 1 線之交通負荷，並提供桃園地區便捷之交通路網，地方民意皆殷切期盼能早日完成，本局遂積極推動台 31 線由台 66 線延伸至台 1 線建設計畫（以下稱本計畫）。

二、被遺漏的梁底楔角

（一）問題說明：

1. 本計畫跨越鐵路段新建工程，北上線橋梁縱坡為-0.88%~6%，採預力 I 型梁設計，梁底楔角詳圖雖標示梁底支承面寬 50 公分、支承中心墊高 5 公分（詳圖 2.1），但預力梁施作時疏忽未施作梁底楔角，俟發現楔角漏作，又逕以混凝土支承墊塊施作成斜面方式補救，造成吊梁缺失情形。
2. 縱坡 6%路段之斜長比水平長增加約 6 公分，35 公尺預力大梁梁端間隙會增加為 16 公分，承商仍將吊梁間隙維持設計之 10 公分，後吊之梁因累積誤差造成預力梁坐落於支承墊上位置及伸縮縫位置逐漸偏移，並造成伸縮縫間隙變大。（詳圖 2.2）
3. 同一墩柱帽梁頂之兩相鄰混凝土支承墊採同一高程設置，未詳細計算依縱坡及曲線所影響之高程作調整，且因縱坡上兩梁端旋轉角度相反，造成兩梁端有高低差情形。（詳圖 2.2）

（二）改善措施：

上述缺失經工程處邀集專家學者召開檢討會議研議以下列方式辦理改善：

1. 配合南下線吊梁後，現有鐵路北側梁場淨空後，將 6 跨計 30 支預力梁全數吊下，移至鐵路北側梁場，以 H 型鋼為枕墊高，進行後續改善事宜。
2. 混凝土支承墊塊改善：進行支承墊高程檢核，依橡膠支承墊位置及設計縱坡，計算支承墊高度，相關檢核結果無誤後進行支承墊施作。（詳圖 2.3、2.4）
3. 楔角施作：（詳圖 2.5、圖 2.6）
 - (1)依橋梁縱坡設計楔型墊塊尺寸，楔型墊塊從梁端施作 80 公分，將此範圍內之底部高 10 公分之混凝土保護層鑿除至原設計鋼筋面。
 - (2)以#4 鋼筋加工成 U 型並銲接於梁筋。
 - (3)楔角模板採梁底楔角底板、外加兩側封板及封頭板。模板預留灌漿孔及通氣孔，以利楔角灌漿能填滿無收縮水泥砂漿。
4. 俟楔角及支承墊施作完成，依檢核資料並將伸縮縫間隙調整成一致後，預力梁重新吊裝完成。相關改善中、改善後照片詳圖 2.7、2.8、2.9。

本工程橋梁縱坡度最大達 6%，梁底楔角遺漏未做，工地為補救缺失，原採行將混凝土支承墊塊做成斜面的作法，惟如逢大地震，其所形成之水平地震力，可能造成預力

梁向低側滑移的嚴重後果。雖然本處及時發現並立即進行補救之相關作業及措施，但仍對工程進度造成嚴重延宕。

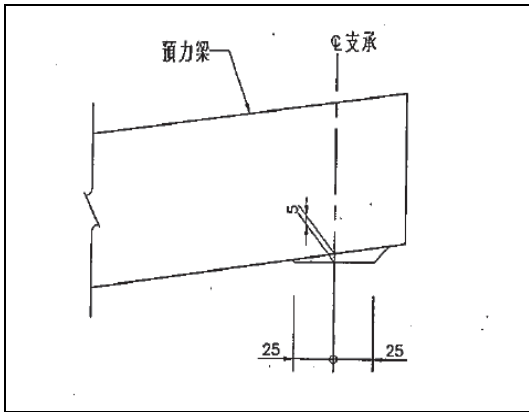


圖 2.1 梁底楔角詳圖(原設計)



圖 2.2 梁端支承(改善前)

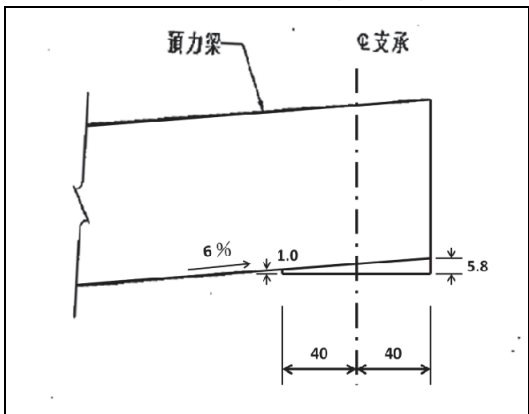


圖 2.3 梁底楔角詳圖(修正後)

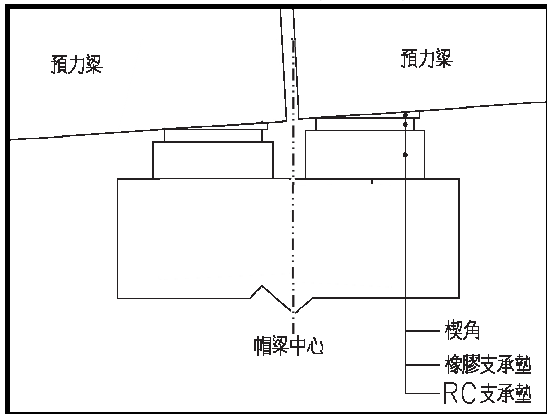


圖 2.4 支承位置、坡度完成示意圖(修正後)

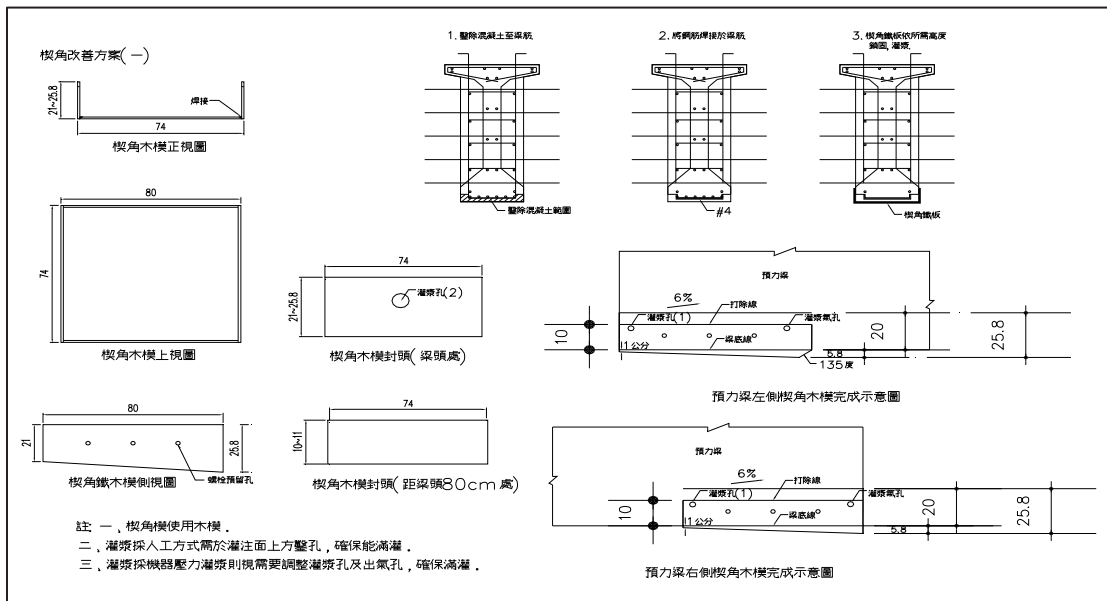


圖 2.5 楔角施工詳圖(修正後)

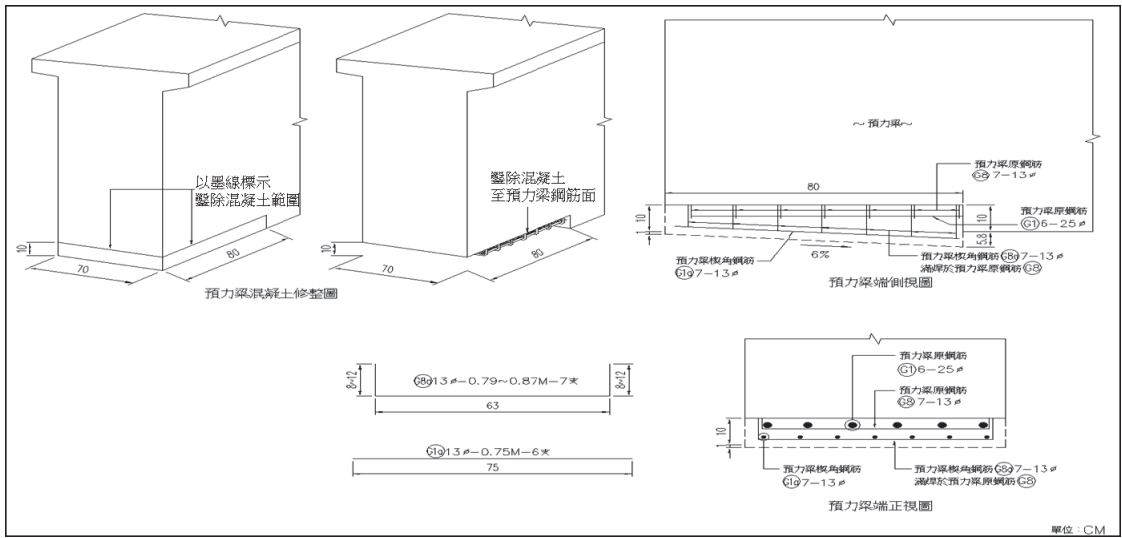


圖 2.6 楔角模板詳圖(修正後)



圖 2.7 梁底支承打除及鋼筋銲接(改善中)

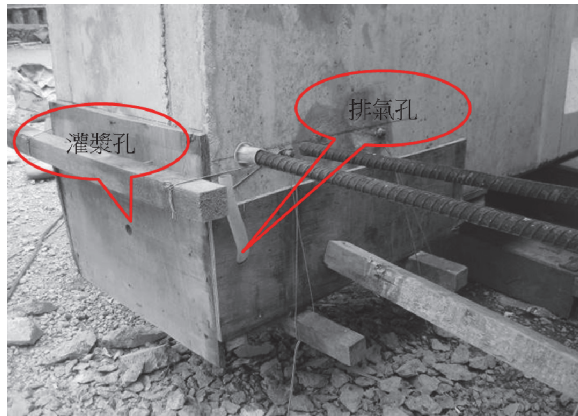


圖 2.8 模板組立及灌漿(改善中)

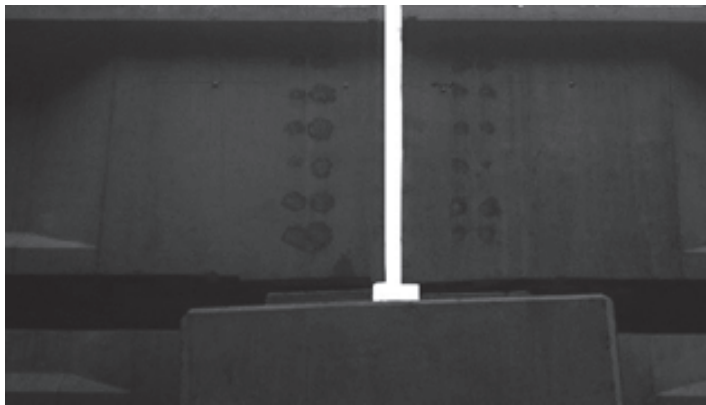


圖 2.9 楔角施作吊梁完成(改善後)

三、間距不能留得太大

(一) 問題說明：

本計畫前項工程之預力梁吊裝後，亦發現橋台背牆處與預力梁間之間距預留過寬，原設計值為 10 公分，實際寬度達 22~25 公分（詳圖 3.1）。由於間距加大，造成其後施作之伸縮縫在支撐版不變的情況下懸空段加長，完工後車輛衝擊力在伸縮縫處形成的彎距加大，將影響伸縮縫的使用壽命，惟因橋面版混凝土已澆置完成，經檢討僅能改採於預力梁側以植筋加長托梁方式辦理。

(二) 改善措施：

因橋面版及橋台背牆間空間受限，故採行於預力梁側以植筋加長托梁方式辦理。經研議並進行結構安全檢核無誤（詳附錄），改善方式採加長托梁，以維持伸縮縫寬度為 10 公分。（詳圖 3.2），說明如下：

1. 將植筋表面打成粗糙面。
2. 採用植筋方式，上下各 1 支 16 ϕ ，間距 15 公分，植筋深度 15 公分。（詳圖 3.3、圖 3.4）
3. 綁紮上下 2 支 16 ϕ 副筋。
4. 組模。
5. 澆置前將表面清潔塗抹環氧樹脂。
6. 澆置 280kg/cm² 混凝土。
7. 托梁完成。（詳圖 3.5）

本案例之縫距過與不及都有不良後果，且為影響伸縮縫壽命的重要因素之一，但在工程上常被忽略。本案雖採行補救措施，但如能及時於未澆置隔梁及橋面版混凝土前發現，則可採取調整預力梁位置或採取加厚橋台背牆方式辦理，則能取得較佳的處置方案，對工程品質提供更佳保證，殊值引以為鑑。



圖 3.1 橋台背牆與預力梁間距過大(改善前)

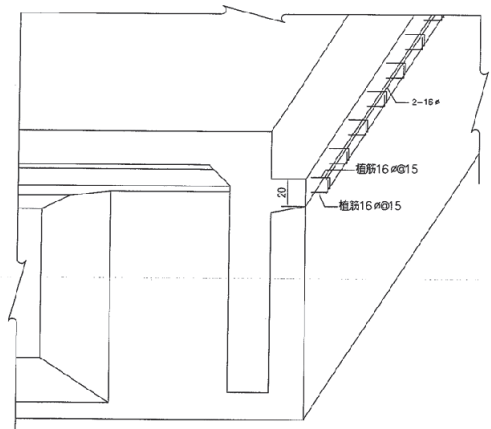


圖 3.2 托梁植筋示意圖(改善中)



圖 3.3 托梁植筋(改善中)

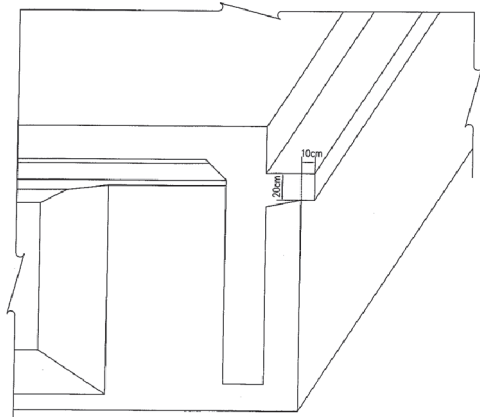


圖 3.4 托梁補強完成示意圖(改善後)

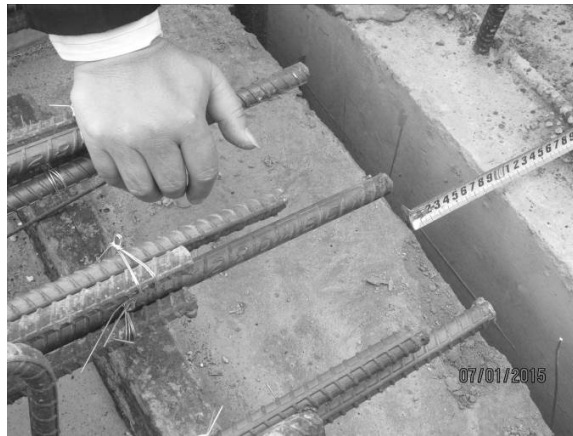


圖 3.5 托梁補強完成

四、不要小覷預埋鋼筋

(一) 問題說明：

本計畫某標新建工程引道，除主線車道外側設置排水溝外，外側自行車道亦設置排水溝，並採與擋土牆共構方式設計，以利自行車道排水（詳圖 4.1）。設計時係考量快車道之路面橫向排水先行截流，不使流過綠帶漫流至自行車道；惟施工時經檢討該處引道縱坡較大且自行車道寬僅 2 公尺逕流量有限，故將本案排水溝取消施作（詳圖 4.2）。惟未取消前，承商基於施作擋土牆的便利性，已在部分擋土牆預埋彎折之排水溝底、頂版鋼筋，於牆身澆置完成後，再敲除部分混凝土將預埋筋彎出，此舉將使鋼筋經兩次彎折而嚴重減損其抗拉強度。（詳圖 4.3、圖 4.4）

(二) 改善措施：

1. 取消自行車道排水溝施作，並使自行車道得加寬為 2.8 公尺。
2. 部分平面道路僅設外側排水溝仍有與擋土牆共構之設計，經檢討修正施作方

式，先將擋土牆施作至排水溝底位置後，將排水溝底部土壤回填夯實後，再將底板鋼筋預置於擋土牆身內，完成排水溝底板鋼筋混凝土澆置後，接續施作排水溝牆身及溝蓋版。（詳圖 4.5、圖 4.6）

結構物為應下一階段構造物之施作，常有預埋或預置鋼筋之情形，可謂司空見慣，亦屬必要之舉措，但如何正確預埋且不損及其功能，應在施工前加以探討、確認無虞後行之，雖屬枝微末節之技，然亦應小心謹慎而為。

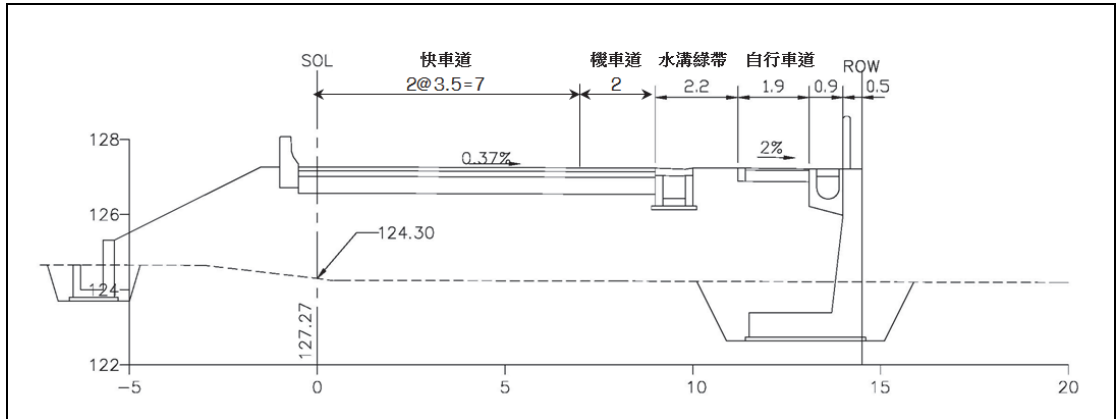


圖 4.1 橫斷面圖(原設計)

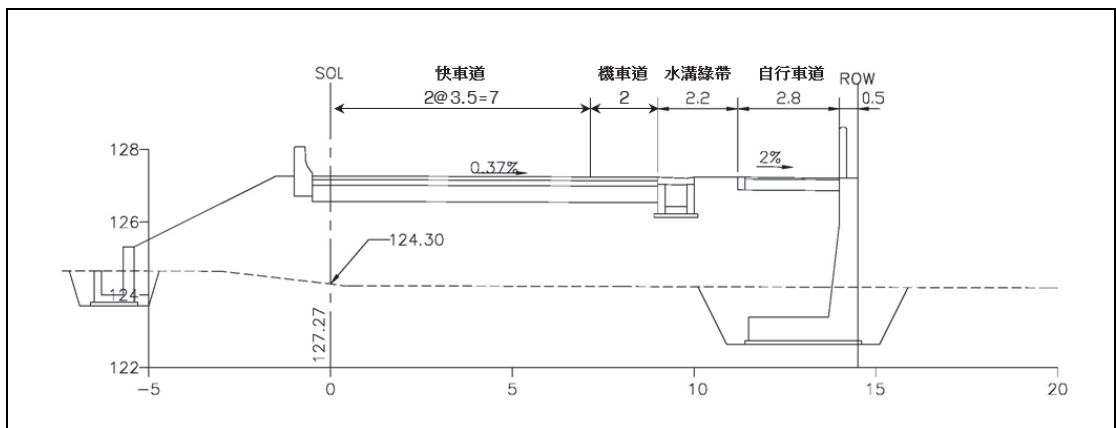


圖 4.2 橫斷面圖(變更後)



圖 4.3 溝底預留鋼筋彎折(改善前)



圖 4.4 溝蓋版預留鋼筋彎折(改善前)



圖 4.5 溝底預留鋼筋及組模(改善後)



圖 4.6 溝底預留鋼筋完成(改善後)

五、恪慎工序才是正辦

(一) 問題說明：

本計畫前項工程施工時，於路基級配面層試驗完成合格後，未先鋪設預鑄水溝蓋版即依設計鋪設第一層 5 公分粗級配與溝牆頂齊平，因施工順序錯誤，鋪設第二、三層瀝青混凝土後，與溝蓋版間留有 10 公分未填滿之空隙，造成日後縫隙鋪設瀝青混凝土之壓實度將有不足之虞（詳圖 5.1、圖 5.2）。

(二) 改善措施：

1. 其補救措施係於鋪設第四層瀝青混凝土時，先將縫隙清除乾淨，再確實噴灑黏層後將縫隙填滿瀝青混凝土，先以小型人工壓路機壓平均後，再採三鐵輪壓路機初壓、膠輪壓路機複壓、二鐵輪壓路機終壓完成滾壓作業，並針對該處進行鑽心檢驗壓實度是否符合規定。（詳圖 5.3、圖 5.4、圖 5.5、圖 5.6）
2. 嗣後即修正施工順序，於各段溝牆完成時即先施作溝牆調整層，並置放預鑄水溝蓋版調整線形及高程，待級配面層整理完成試驗合格後，噴灑透層 24 小時後鋪設第一層瀝青混凝土完成滾壓後，再噴灑黏層並施作第二、三、四、五層瀝青混凝土。（詳圖 5.7、圖 5.8）

工程為趨趕進度，時有調整工序之舉，但仍應謹慎慮及是否有不妥之處，觀諸本例，頗有欲速則不達之嘆，對實質進度並無提升。本案幸經補救而未對施工品質有所影響，後續施工亦回歸正常程序，如此才是正辦。



圖 5.1 未吊放溝蓋版即鋪設瀝青混凝土
(改善前)



圖 5.2 鋪設瀝青混凝土後再吊放溝蓋版所形
成之縫隙(改善前)



圖 5.3 溝邊縫隙鋪設瀝青混凝土(改善中)



圖 5.4 溝邊縫隙三輪壓路機滾壓(改善中)



圖 5.5 溝邊縫隙膠輪壓路機滾壓(改善中)



圖 5.6 溝邊縫隙二輪壓路機滾壓(改善中)



圖 5.7 先吊放溝蓋版再噴灑透層(改善後)



圖 5.8 先吊放溝蓋版再鋪設瀝青混凝土(改善後)

六、結語

如期、如質完成工程是廠商與監造共同的目標，廠商水準固然是一個重要影響因素，但監造者自身仍應具備基本的工程知識，以及良好的敬業精神，並發揮對事以真的態度，一旦被交付工程任務，對於工程契約及相關文件，如施工補充條款、補充施工說明書…等均應深入了解，尤其設計圖是所有構造物成型的依據，應多加檢視、仔細核對。相互關聯的構造物圖說應相互比對，是否有銜接上的問題，所有工項工序皆應了然於胸，以免遺漏而發生錯誤。

附錄

橋台背牆與預力梁間距過大之托梁檢核

一、檢核說明

1. 考量吊梁作業空間，預留較大之伸縮縫寬度，約為 20~22cm。
2. 改善方案：維持伸縮縫寬度 $\leq 12\text{cm}$ ，托梁長度加長 10cm，並採植筋方式聯結補強。
3. 以原托梁斷面進行檢核 (托梁厚度不變)。
4. AN2~PN19 跨預力梁斷面配置。

二、托梁檢核

1. 端隔梁托梁

托梁深度 $h=$	30	cm
有效深度 $d=h-4$ (保護層) =	26	cm
托梁頂支承寬 $l=$	25	cm
托梁頂支承長 $b=210-105=$	105	cm

2. 材料強度及容許應力

28 天圓柱試體混凝土強度 $f_c'=$	280	kgf/cm ²
承受設計載重時混凝土容許壓應力 $f_c=0.4f_c'=$	112	kgf/cm ²
混凝土彈性模數 $E_c=15000*\sqrt{f_c'^2}=$	250,998	kgf/cm ²
鋼筋降伏強度 $f_y=$	2800	kgf/cm ²
鋼筋容許拉應力 $f_s=$	1,400	kgf/cm ²
鋼筋彈性模數 $E_s=$	2.04E+06	kgf/cm ²

3. 載重

伸縮縫無收縮混凝土深度 $e=$	30	cm
伸縮縫最大過寬 $\Delta=$	12	cm
C 級伸縮縫寬度 $c=40+40+16+\Delta=$	108	cm
無收縮混凝土靜載重 $W_s=e*b*(\Delta+1)*2400/10^6=$	280	kgf
活載重 1		

以 HS20-44 貨車後輪作用於伸縮縫中央

集中載重 $P_1=$	7,300	kgf
托梁端反力 $R_{l1}=P_1/2*(1+I)=$	4,745	kgf
(1) $V_{n1}=W_s+R_{l1}=$	5,025	kgf

活載重 2

以 HS20-44 車道載重作用於伸縮縫中央

集中載重 $P_2=$	8,200	kgf
均佈載重 $w_s=$	9.6	kgf/cm
托梁端反力 $R_{l2}=(P_2/2+w_s*c/2)*(1+I)=$	6,004	kgf
(2) $V_{n2}=W_s+R_{l2}=$	6,284	kgf (取用)
衝擊係數 $I=$	0.3	
4.主鋼筋檢核		
(1)剪力摩擦鋼筋		
$A_{vs}=V_n/f_s=$	4.49	cm^2 (取用)
(2)受撓鋼筋		
$M_n=V_n*l/2=$	78,550	kgf-cm
$n=E_s/E_c=$	8	
$k=n*f_c/(n*f_c+f_s)=$	0.390	
$j=1-k/3=$	0.870	
$A_f=M_n/f_s*j*d=$	2.48	cm^2
(3)施工採設計 5-16 ϕ		
截面積 $a_s=$	1.986	cm^2
$A_s=5*a_s=$	9.93	(ok)

瀝青組成、老化、還原與應用

陳建旭*、陳世梵**、廖敏志***、黃碩偉****

摘要

回收瀝青混凝土 (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) 為原有鋪面瀝青混凝土之刨除料或挖除料,回收料經由瀝青拌和廠添加新鮮瀝青和粒料加熱混拌後,即成為再生瀝青混凝土 (Recycled Asphalt Concrete, RAC)。RAP 再利用雖可減少自然資源消耗, RAP 中之瀝青黏結料老化因而變得脆硬,過量使用或不恰當使用 RAP,可能產生再生瀝青鋪面之耐久性問題。本文章探討瀝青的組成特性、瀝青老化的原因與機制、還原劑種類與機理、和國內再生瀝青混凝土應用狀況,提出說明和建議。瀝青組成可依極性之不同,分類為飽和族 (Saturate)、芳香族 (Aromatic)、膠質 (Resin) 和瀝青精 (Asphaltene),此四組份簡稱 SARA。瀝青老化一般可分為短期老化與長期老化,在拌和廠產製、運輸和鋪築滾壓期間之瀝青老化稱為短期老化,由於瀝青混合料曝露於高溫作用下,短期老化使瀝青黏結料黏度顯著上升;在鋪面服務期間之瀝青硬化稱為長期老化,開放交通通車後,鋪面壓實緊密,孔隙有限,瀝青黏度增加緩慢。瀝青老化過程主要為氧化作用,也是化學反應,造成瀝青精含量增加,膠質與芳香族含量降低,飽和族則無明顯變化。還原劑分為軟化劑與再生劑兩種,老化瀝青還原理念主要可分為 (1) 組份調節和 (2) 相容性兩種機理,使用合宜和適量還原劑可補足老化瀝青消失的組份並恢復其質流性質,降低老化瀝青的黏度,改善鋪面績效;需注意的是瀝青老化過程為不可逆之現象,添加還原劑無法將老化瀝青中增加的瀝青精還原成膠質或芳香族。老化瀝青應用時,添加之還原劑應視為整體瀝青含量的一部份;當老化瀝青黏度較高時或老化瀝青含量過多時,為達到目標黏度,需添加較多還原劑來達到要求,因而可能導致過多油量問題,進而產生冒油現象。同時,再生瀝青混凝土之績效和還原劑於老化瀝青中的擴散程度有密切關係,擴散程度影響再生瀝青混凝土均勻拌和程度,因此需選擇適合的還原劑使用。老化瀝青與再生劑混合後之黏度,並不具有如一般規範添加比例之對數線性關係,因此在調

* 國立成功大學土木系 教授

** 國立成功大學土木系博士 候選人

*** 湖南大學土木學院道路系 副教授

**** 國立成功大學土木系研究助理

整 RAP 至規範等級時，須注意再生劑之種類和添加量。再生劑用量隨配合設計、瀝青、粒料性質、老化瀝青黏度與擴散性質等因素而改變，須經由實驗室分析與廠拌確認合適添加比例與種類。

一、前言

台灣土地狹窄、自然資源有限，在環境保護、節能減碳與節省經費的考量下，再生材料的使用已成為一項重要的議題。除交通量、荷重和氣候影響外，當瀝青材料與空氣及紫外線接觸而老化，於使用一段時間後，老化瀝青是可能導致鋪面績效下降之因素之一。

國內道路大多採用瀝青混凝土鋪面，具有施工便利、行車舒適以及容易維修等優點。然而，受到交通載重、環境因素和材料老化的交互影響，鋪面服務品質難免隨時間降低；同時，近年來交通流量與荷重增加，對路面產生較高的應力，更加速鋪面破壞，一旦影響用路人舒適或安全性，大部分道路養護單位採用刨(挖)除重鋪方式維修道路，刨除料或挖除料即成為回收料 (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)，台灣使用 RAP 之經驗已經超過 30 年，RAP 具有再利用價值 [蔡攀鰲，2009]。當熱拌瀝青混凝土 (Hot Mix Asphalt Concrete, HMA) 達到服務壽命，舊有路面即需進行維修，老化路面刨(挖)除後，刨(挖)除料 (RAP) 仍有殘餘價值；加入還原劑後，回收料可以重新加熱再使用產製再生瀝青混凝土 (Recycled Asphalt Concrete, RAC)，以降低新鮮材料的需求量。台灣產、官和學各界須正視砂石等工程材料可能枯竭的問題，也需考慮將來大量刨除料的去處，因此如何將回收瀝青混凝土有效利用為綠色建材 (Green Material) 便成為重要議題。本文首先闡述新鮮瀝青組成，接著探討瀝青老化原因與機制、說明還原劑種類與機理、最後分析國內再生瀝青混凝土之應用現況。

二、新鮮瀝青組成特性

2.1 概述

新鮮瀝青在鋪面服務溫度的情況下表現出黏彈行為，然而經過長時間的使用而老化後，瀝青則會變脆硬，針入度下降且黏度增加。如果繼續使用，瀝青則容易脆化，導致瀝青鋪面的疲勞龜裂。添加還原劑於老化瀝青中，目的是將老化黏結料回復至如新鮮瀝青原本的黏彈特性，使再生瀝青混凝土的工程性質合乎新鮮料的標準，本文首先說明新鮮瀝青組成特性。

2.2 瀝青基本化學元素

瀝青的基本化學元素取決於油源，如表 2.1 所示，不同產地產出的瀝青成分有明顯

差異，瀝青主要成分為碳（約 80-88 wt.%）與氫（8-12 wt.%），瀝青中碳氫化合物含量超過 90 wt.%，氫原子與碳原子的莫爾數比（molar ratio, H/C）約為 1.5，介於芳香結構（H/C = 1）與飽和結構（H/C~2）之間。此外，瀝青中也含硫（0-9 wt.%）、氮（0-2 wt.%）以及氧（0-2 wt.%）等異質原子（Heteroatom），並包含部分的微量金屬，其中數量較多的是鈳與鎳，最大含量分別約為 1480 ppm 與 145 ppm [Lesueur, 2009]。上述基本化學元素乃是瀝青四組份（Four Fractions）之組成成份，瀝青四組份說明如下。

表 2.1 瀝青元素分析 [Mortazavi, 1993；Lesueur, 2009]

瀝青	AAA-1	AAB-1	AAC-1	AAD-1	AAF-1	AAG-1	AAK-1	AAM-1	
元素	產地	Canaa	USA	Canaa	USA	USA	USA	Venezuela	USA
C	wt.%	83.9	82.3	86.5	81.6	84.5	85.6	83.7	86.8
H	wt.%	10	10.6	11.3	10.8	10.4	10.5	10.2	11.2
H+C	wt.%	93.9	92.9	97.8	92.4	94.9	96.1	93.9	98
H/C	Molr	1.43	1.55	1.57	1.59	1.48	1.47	1.46	1.55
O	wt.%	0.6	0.8	0.9	0.9	1.1	1.1	0.8	0.5
N	wt.%	0.5	0.5	0.7	0.8	0.6	1.1	0.7	0.6
S	wt.%	5.5	4.7	1.9	6.9	3.4	1.3	6.4	1.2
V	ppm	174	220	146	310	87	37	1480	58
Ni	ppm	86	56	63	145	35	95	142	36
Mn	g/mol	790	840	870	700	840	710	860	1300

2.3 瀝青之組成

瀝青成分分析方式主要以層析法為主，利用瀝青組份之不同極性，首先以正庚烷將瀝青分為不可溶的瀝青精(Asphaltene)與可溶質(Maltene)，如圖 2.1 所示。Corbett [1967] 透過層析的方式，將瀝青溶於不同極性與芳香化的溶劑中，依序經過活性鋁製成的層析柱（Chromatographic Column）洗滌，這種層析方式能夠將可溶質進一步分類，透過正庚烷與甲苯作為溶劑可分別層析出分為飽和成分（Saturate）與芳香族（Aromatic），最後再分別以苯與甲醇 50/50 比例混合的溶劑以及三氯乙烯洗提，最後獲得膠質（Resin）。

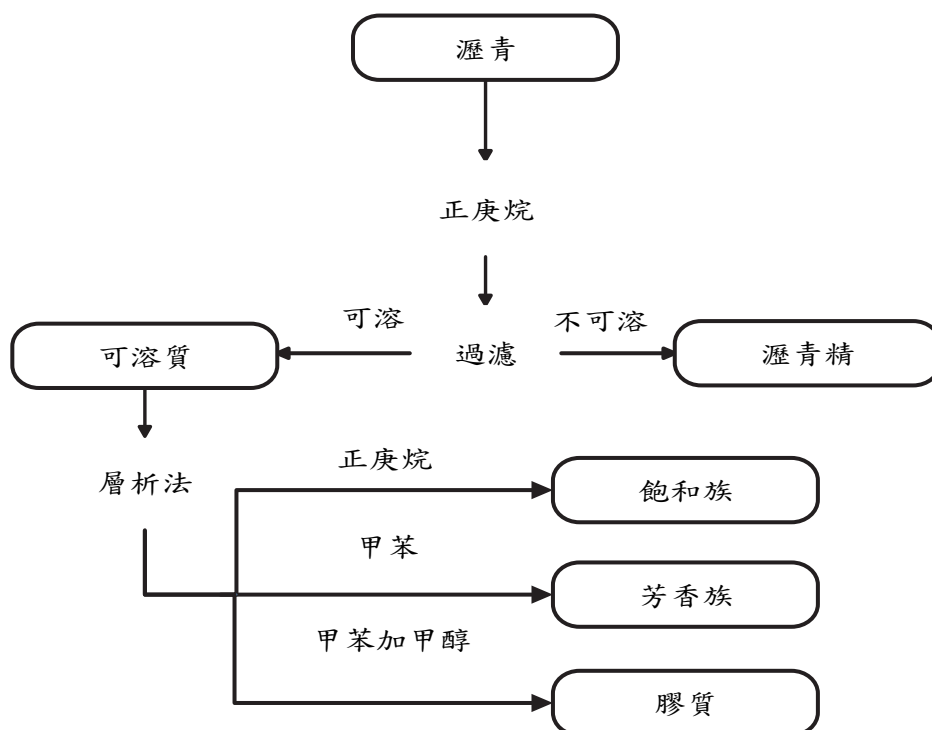


圖 2.1 瀝青之四組份

根據上述方法，依不同極性可以將瀝青組份分類為飽和族（Saturate）、芳香族（Aromatic）、膠質（Resin）和瀝青精（Asphaltene），簡稱為 SARA，瀝青四組份性質分別說明如下：

1. 飽和族（Saturate）

飽和成分為白色或淺棕色的非極性油性成分，由具直鏈與支鏈的脂肪族碳氫化合物、環烷以及部份含烷類的芳香族組成，並包含一部分的蠟（wax）。飽和族占瀝青成分的 5%至 15%，平均分子量約為 600 與芳香族接近，常溫下為液態。飽和族為軟成分，不可過多，過多將分散芳香族，過少則形成不穩定膠體分散體系。

2. 芳香族（Aromatic）

芳香族室溫下為深棕色具黏稠液體，占瀝青成分 30%至 45%，由瀝青中分子量最低的環烷芳香烴（naphthenic aromatic）組成，並作為介質使瀝青精溶解於其中。芳香族包含非極性的碳鏈與未飽和的環狀系統（芳香烴），對於高分子量的碳氫化合物有高度的溶解能力。芳香族的黏度在同溫下，較飽和族高一些，平均分子量通常介於 300 至 2000 [Shell Bitumen, 2003；Lesueur, 2009]。芳香族為軟成分，使膠體分散體系穩定。

3. 膠質 (Resin)

膠質或稱極性芳香族，為深棕色的固體或半固體，可溶於正庚烷中，成分類似瀝青精，瀝青延展性主要來源。膠質含大量的氫與碳以及少量的氮、氧與硫，但其芳香烴連接數較瀝青精少，一般約為 2 至 4 個，具極性與強烈的附著力，有時極性甚至高於瀝青精。膠質於瀝青中扮演瀝青精分散劑 (dispersing agent) 的角色，兩者間的比例關係決定瀝青為溶膠 (solution, SOL) 或凝膠 (gelatinous, GEL) 型態，膠質分子量介於 500 至 50,000 間，占瀝青成分 30% 至 45%，而 H/C 比值為 1.3 至 1.4。膠質與瀝青精交互作用的模式，膠質透過極性端 (氫鍵與偶極-偶極力) 吸附於瀝青精膠體，而另一石蠟性官能基端則與油性端相連 [Boukir, 2001]。膠質為硬成分，具有良好的膠性和黏附性，使瀝青精穩定地膠溶於體系中。

4. 瀝青精 (Asphaltene)

瀝青精室溫下為黑色或棕色的固體，定義不溶於正庚烷 (n-heptane) 之瀝青組份，但溶於甲苯，除了碳與氫外，亦包含部分氮、硫與氧，同時具有複雜的芳香性環，加上如鎳、鈳與鐵...等微量金屬，使得瀝青精具較高的極性且有相當高的分子量。試驗資料顯示瀝青精的分子量介於 1000 至 100,000 間，分子大小介於 5 至 30 nm，而氫/碳原子 (H/C) 比值約為 1.1。瀝青精的含量對瀝青質流性質有極大影響，瀝青精集結或分散程度影響瀝青的黏度，瀝青精含量高時會產生較硬且黏性較大的瀝青，也具較低的針入度與較高的軟化點。瀝青精約佔瀝青的 5 至 25%，典型的瀝青精分子結構如圖 2.2 所示。瀝青精為硬成分，可改善瀝青抗高溫性質，但過多時，容易造成脆裂 [Lesueur, 2009; Chen et al., 2014a]。

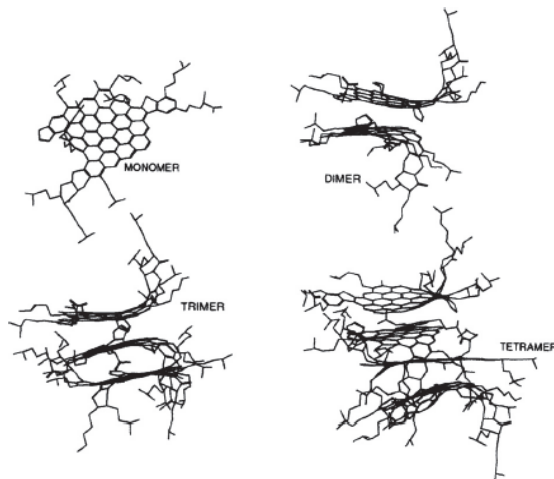


圖 2.2 瀝青精分子聚體 [Lesueur, 2009]

三、瀝青老化原因與機制

3.1 瀝青老化為不可逆的化學反應

瀝青老化過程主要為氧化，受到老化時間增加時，芳香族和膠質與空氣中的氧產生化學反應，生成瀝青精；青成分變化依序為芳香族逐漸轉變成膠質，膠質再老化成瀝青精，也就是芳香族→膠質→瀝青精的變化順序，因此瀝青老化為不可逆的化學反應。

瀝青老化過程影響其物性與化性，各分子間仰賴相對弱的化學鍵結合，且此鍵結受熱或剪力後會被破壞。這些微弱的化學鍵主要來自異質原子（heteroatoms）間的靜電與氫鍵，以及微量長鏈烴類間的凡德瓦力。描述瀝青結構常見的模型為溶膠狀和凝膠狀（SOL - GEL model），這種結構將瀝青視為一黏膠狀系統，也就是高分子量的瀝青精分散或溶解於低分子量之可溶質（Maltenes）中，如圖 3.1 和 3.2 所示，可溶質包含芳香族、膠質與飽和族成分。

微膠粒（Micelles）可視為瀝青精與高分子量芳香族的結合體，這些芳香族就如同穩定的溶劑。由微膠粒中心向外延伸，各成分會逐漸轉換為極性較低的芳香族與膠質，最外層則為少量的芳香族分散介質（Aromatic Oily Dispersion Medium）。瀝青精分散於膠體中的數量與程度對其黏度有顯著的影響。因此，溶膠狀（solution，SOL）的瀝青有足量的膠質與芳香族，使瀝青精自由流動於油質中，如圖 3.1 所示，此時黏度較低，溶膠狀比較屬於剛提煉後新鮮瀝青的狀況。

凝膠狀（Gelatinous，GEL）瀝青包含的膠質與芳香族數量較少，溶解能力不足，瀝青精便會在瀝青內部聚集成塊狀甚至是連續的網狀結構，如圖 3.2 所示，瀝青長期老化後之結構趨向於凝膠狀，大部分瀝青性質介於溶膠狀與凝膠狀之間，使用還原劑的目的是將凝膠狀的老化瀝青逐漸還原成溶膠狀。需注意的是，瀝青老化為不可逆反應，還原劑只是補充老化瀝青減少的芳香族與膠質，調整老化瀝青四組份成分，因此添加適當種類和用量還原劑的老化瀝青，此種再生瀝青將與新鮮瀝青之四組份比例類似 [Valcke et al., 2009；Shell Bitumen, 2003]。



瀝青精



芳香/環烷氫化合物



高分子量芳香性碳氫化合物



環烷/脂肪碳氫化合物



低分子量芳香性碳氫化合物



飽和碳氫化合物

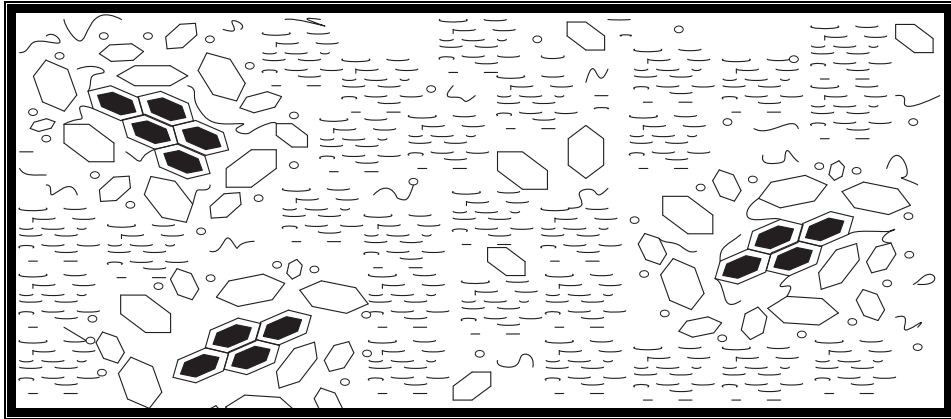


圖 3.1 溶膠狀 (SOL) 形式之瀝青 [Shell Bitumen, 2003]

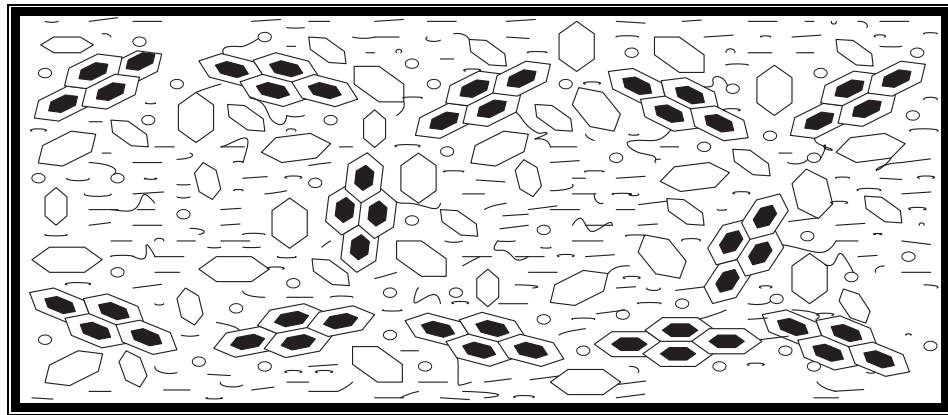


圖 3.2 凝膠狀 (GEL) 表示之瀝青 [Shell Bitumen, 2003]

3.2 短期老化和長期老化

瀝青老化一般可分為短期老化與長期老化，瀝青老化與服務時間之關係以圖 3.3 說明，在拌和廠產製、運輸和鋪築期間之瀝青老化稱為短期老化。在拌和鼓 (Pugmill) 產製過程時，包裹粒料之瀝青薄膜承受高溫，瀝青容易硬化，此階段之瀝青黏結料暴露於溫度約 130°C 至 165°C 的熱空氣中，造成黏度顯著上升，使得複合剪力模數與內聚力等質流與化學性質間的關係改變。

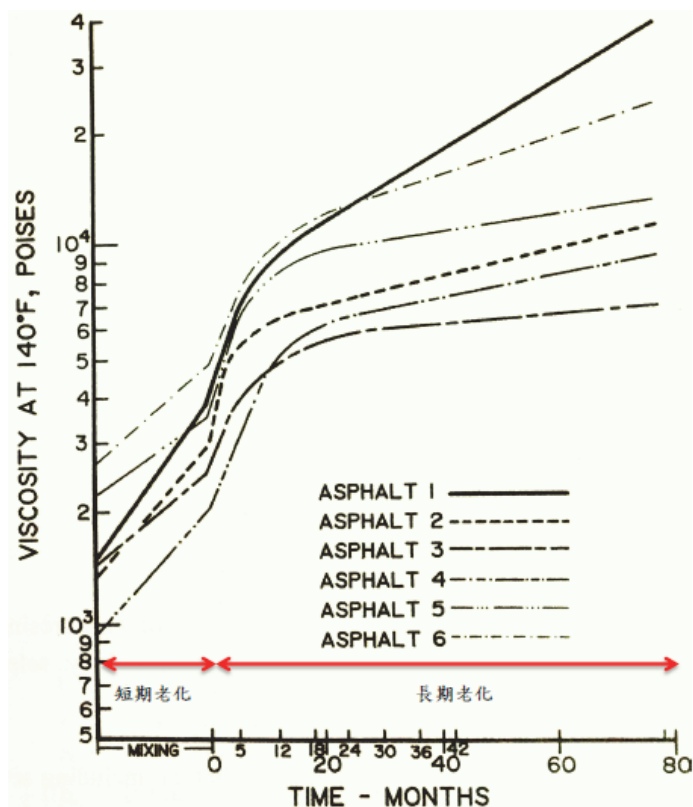


圖 3.3 瀝青短期老化、長期老化與 60°C 黏度關係圖 [Kandhal et al.,1973]

在鋪面服務期間之瀝青硬化稱為長期老化，瀝青黏結料會在不同機制下逐漸老化，如圖 3.3 所示，鋪築後，瀝青混凝土相對於短期老化，黏度增加緩慢。不同瀝青之老化趨勢不同，縱使同一種黏度之瀝青，如圖 3.3 中之瀝青 1、2 與 3 在 60°C (140°F) 時黏度約為 1,500 poise，服務 80 個月後，黏度分別為 40,000、10,000 與 6,000 poise；其中瀝青 1 之鋪面於施工完後，孔隙率高於 10%，以致造成瀝青黏度大幅上升，當空隙率控制在 8% 以下時，瀝青老化速率將可得到適當控制。需注意的是，圖 3.3 乃是根據 1973 年美國賓州交通廳 (Pennsylvania Transportation of Department) 進行之試驗道路結果，瀝青短期和長期老化趨勢可能和國內施工規範和環境溫度不同。綜合上述，瀝青老化的機制可分為下列 6 種 [Karlsson and Isacson, 2006；Roberts et al., 2009；Chen et al., 2014b]：

1. 瀝青與空氣中的氧氣產生化學變化
2. 瀝青中輕質成分揮發與蒸發而產生老化
3. 各分子間聚合成較大的分子而硬化
4. 鋪面受低溫影響而產生搖變性硬化 (thixotropic hardening)
5. 由於瀝青黏結料中油份滲出至薄膜表面，當這些油份揮發，使瀝青產生收縮變得較硬脆
6. 因粒料孔隙吸收瀝青中油性成分、膠質或瀝青精使瀝青黏結料產生硬化

3.3 再再生瀝青混凝土 (RRAP)

瀝青由拌和廠至現地鋪築完成後，鋪面服務期間承受日照及交通反覆載重作用，瀝青老化作用持續進行，可能產生局部裂縫。陳建旭等人 [2006] 針對溫度與現地環境條件、瀝青的拌和與刨除材料現地取樣實際值，分析數據採用國道、省道和縣道之試驗結果，以現地黏度資料，瀝青的拌和性質及時間為獨立變數，應用統計軟體，以非線性迴歸分析 (Nonlinear Regression) 方式建立相關之預測模數，解釋 AC(I)10 及 AC(I)20 瀝青之長期老化趨勢，分別如圖 3.4 和圖 3.5 所示。國內新鮮瀝青 AC(I)10 及 AC(I)20 之 60°C 黏度範圍為 1000±200poise 和 2000±400poise。為進一步評估 AC(I)10 及 AC(I)20 瀝青老化情形，以老化指數 (Aging Index, AI) 作為分析指標，老化指數定義如式 (1)：

$$\text{老化指數 (AI)} = \frac{\text{老化瀝青之黏度}}{\text{新鮮瀝青之黏度}} \quad (1)$$

由於國內鋪面約 3~5 年刨除重鋪一次，保守估計以每 5 年為一階段，顯示 AC(I)10 及 AC(I)20 之時間與現地老化關係數值，由所得之預測值及現地實際值繪製成圖 3.4 及圖 3.5 之瀝青老化趨勢圖，分成兩個階段說明，第一階段為第一次使用後刨除料之黏度成長，第二階段為刨除料再次使用後，第二次黏度增加的情形。

從統計觀點來分析，表 3.1 可以用來解釋模式的適用性，其中 Se 為預測值的標準差， Sy 為實驗值的標準差，當兩種比值越小，則表示實驗與預測值相當接近。針對 AC(I)10 及 AC(I)20 瀝青材料，圖 3.4 和圖 3.5 預測趨勢的判定係數 (R^2) 分別為 0.84 及 0.94；且變異數比值 (Se/Sy) 分別為 0.016 及 0.007，參考表 3.1 其數值顯示適合度之範圍分別為“好”及“優”之評定，顯示此趨勢可合理說明瀝青現地之老化行為。

表 3.1 模式等級分類表

係數	R^2	Se / Sy
優	> 0.89	< 0.35
好	0.70 ~ 0.89	0.36 ~ 0.55
佳	0.40 ~ 0.69	0.56 ~ 0.75
差	0.20 ~ 0.39	0.76 ~ 0.90
劣	< 0.19	0.90 ~ 1
無相關	虛數	> 1

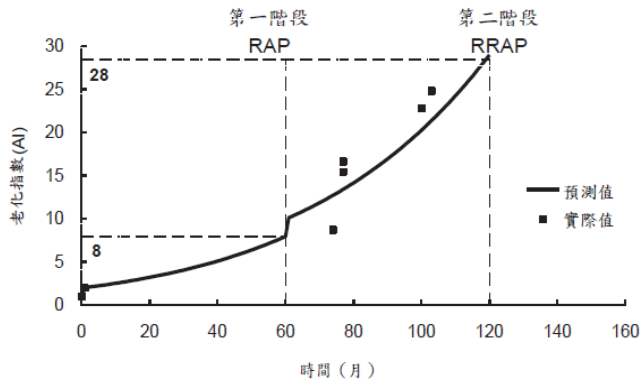


圖 3.4 AC(I)10 之瀝青年份與老化指數關係圖 [陳建旭等人, 2006]

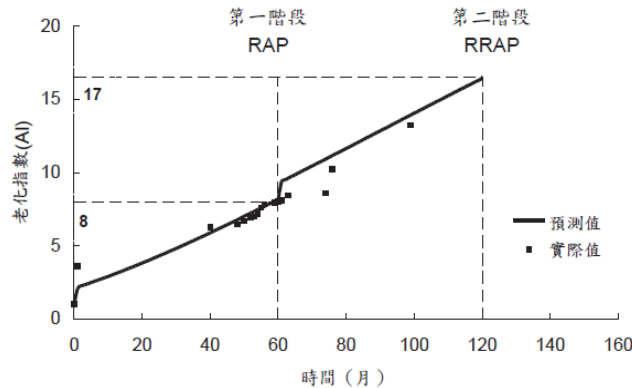


圖 3.5 AC(I)20 之瀝青年份與老化指數關係圖 [陳建旭等人, 2006]

瀝青材料經短期及長期時間現地老化後，以每 5 年（60 個月）區分成一階段，其 AC(I)10 及 AC(I)20 為兩階段共 120 個月，其趨勢皆呈現隨時間成長之行為，由圖 3.4 及圖 3.5 之趨勢，回收瀝青料（RAP）及再再生瀝青混凝土（RRAP）之說明如下：

1. 第一階段

第一階段為新鮮瀝青 AC(I)10 及 AC(I)20，經拌和廠生產與鋪築之短期老化至現地使用後 60 個月之長期老化情形；短期老化指的是瀝青經拌和廠生產與鋪築所造成的瀝青氧化，使黏度大幅提升。然而，長期老化乃是路面鋪築滾壓完成，開放交通後，瀝青黏度變化情形，路面服務期間瀝青黏度增加速度明顯緩慢，AC(I)10 及 AC(I)20 經 60 個月老化後老化指數約為 8，換句話說，老化瀝青 60°C 黏度分別約為 8,000 和 16,000 poise 左右。

2. 第二階段

第二階段為第一階段所刨除之回收料，經拌和廠運輸、合適配比設計至現地再次使用，在經過第二次的短期及長期老化 60 個月後，AC(I)10 及 AC(I)20 老化趨勢也有所變化，圖中第二個較陡峭之上升段即為 RAP 經拌和廠生產與鋪築之短期老化；經過第二次 60 個月的短期與長期老化觀測後，AC(I)10 老化指數明顯地增加許多；AC(I)20 的老化指數雖然較平緩，但其起始黏度較高，故二次老化後之黏度

也相當可觀。此種將刨除回收料再次使用之情形，即回收料（RAP）的再次使用定義為再再生瀝青混凝土（Recycling of RAP, RRAP）。由圖 3.4 與圖 3.5 得知 AC(I)10 與 AC(I)20 之老化指數分別為 28 及 17，故 RRAP 之黏度可分別視為 28,000 和 34,000 poise。

圖 3.4 和圖 3.5 所採用的使用年限為 5 年，乃一保守值；綜合 AC(I)10 與 AC(I)20 之黏度值，假如回收瀝青之黏度值大於 28,000 poise 就有可能是再再生瀝青混凝土。同時，國內 RAP 常重複使用，因而產生再再生瀝青混凝土的機會相對增加，RRAP 的瀝青老化程度更加嚴重，容易產生黑石頭（Black Rock）現象。在瀝青過度老化的情況下，瀝青會喪失黏結能力，此時瀝青會有較少的附著力（adhesive）與較多的內聚力（cohesive），增加其脆硬性，鋪面可能容易產生龜裂情形，因此 RAP 或 RRAP 的再生使用是國內鋪面界急需面對的課題。

3.4 影響瀝青老化之因素

瀝青老化程度和速率與是否接觸空氣有密切關係，瀝青老化之主要因素包含瀝青混凝土空隙率和瀝青所在之鋪面深度。圖 3.6 顯示瀝青黏度隨著鋪面之空隙率增加而上升，當鋪築後之瀝青混凝土空隙率過高時，易使空氣、水與陽光進入鋪面內部，因而加速瀝青老化；也就是滾壓後之瀝青混凝土空隙率越高，瀝青越容易老化，圖 3.7 說明針入度隨著鋪面之空隙率增加而下降。滾壓後之瀝青混凝土如有過高空隙，除導致瀝青容易老化外，而且容易引起水侵害，加速鋪面剝脫、龜裂或坑洞現象；但空隙率也不宜過低，過低容易引起鋪面冒油，導致車轍或雨天時與輪跡處容易積水，引起交通事故。基於上述考量，國內密級配瀝青混凝土鋪面滾壓後之壓實度一般要求介於 95% - 99% 之間，此時密級配瀝青混凝土孔隙率大略介於 6% - 8% 之間，降低瀝青老化機率，以確保路面耐久性。

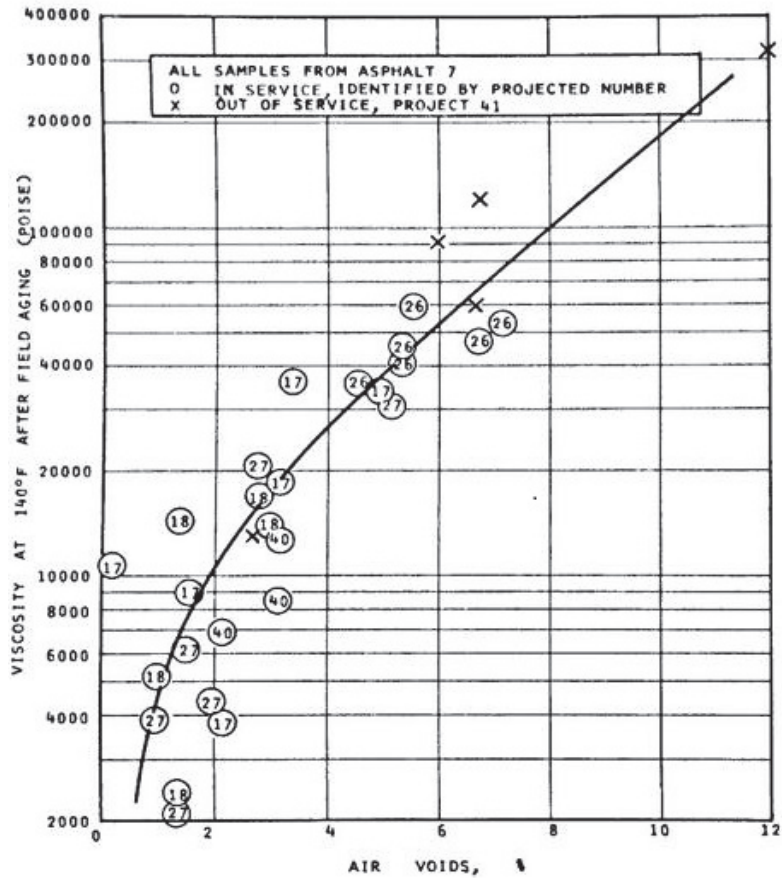


圖 3.6 瀝青黏度與空隙率關係 [Vallerga at al., 1971]

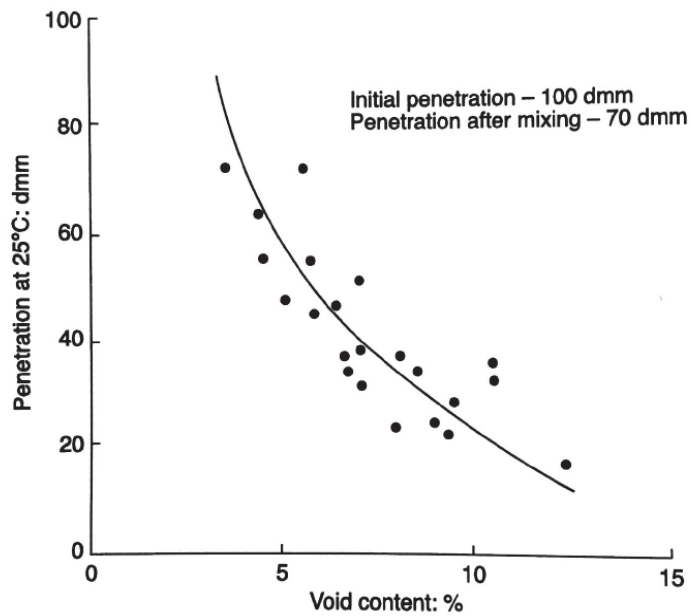


圖 3.7 瀝青針入度與空隙率關係 [Lubbers, 1985]

瀝青的老化除了隨時間而成長外，也與鋪面距離表面之深度相關，如圖 3.8 所示，隨著時間的遞移，越靠近表層之鋪面，如 6.38mm 處，瀝青老化指數（AI）越高，當使用 120 月後，AI 值接近 8；鋪面深度越深，如 139.7mm 處，AI 值接近 1，瀝青幾乎無老化現象。換句話說，越靠近鋪面表層瀝青越容易受到氧氣與紫外線的老化作用，瀝青老化速率較快，老化程度較明顯；但只限於鋪面表面，受到影響之瀝青有限，屬於表面老化。絕大部分瀝青位於路面表層之下，只要滾壓確實，老化機制幾乎不存在，瀝青老化速度緩慢。

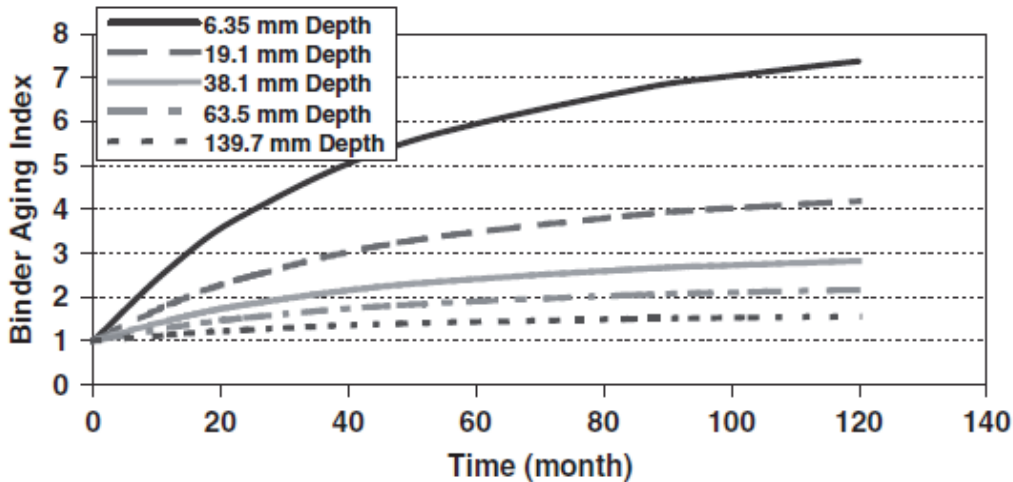


圖 3.8 老化指數（AI）與鋪面深度關係圖 [Al-Khateeb at al., 2005]

四、還原劑種類與機理

4.1 概述

還原劑（Recycling Agents）係指一種碳氫化合物（烴類）材料，具有調整老化瀝青之功能，主要目的為將老化瀝青之黏度降低，使再生瀝青黏結料（Reclaimed Asphalt Binder, RAB）能符合鋪面績效要求。還原劑可分為再生劑（Rejuvenating Agent, RA）和軟化劑（Softening Agent）。再生劑一般為調製之化學摻料，添加再生劑之目的為補充消失的芳香族，並降低瀝青黏度，為了使老化瀝青恢復其必要的化學組份，再生劑必須有高閃火點、易於擴散、低揮發性、不易硬化與拌和時能維持均勻性等優點。軟化劑指的是黏度較低的新鮮瀝青，如 AC (I) 10 或 Pen 85/100，其主要是降低老化瀝青黏結料的黏度，而再生劑則是同時回復老化瀝青的物性與化性，使其性質接近新鮮瀝青 [Roberts et al., 2009; Chen et al., 2007; 沈得縣等人，2006；林炳森等人，2008]。當瀝青分子與空氣中的氧氣反應，會使瀝青中易與氧反應之芳香族減少，同時增加瀝青之黏度，此為一不可逆之反應。在回收瀝青混凝土鋪面中添加還原劑主要有以下功能 [姜榮彬，1993; Madrid

et al., 2000] :

- 1.使老化瀝青恢復適當的黏稠性質
- 2.使老化瀝青恢復合適的化學與物理特性
- 3.提供再生瀝青符合瀝青混凝土設計之需求

一般而言，再生劑能透過重組老化瀝青黏結料的化學組成回復其性質。瀝青黏結料經過氧化老化後，產生（1）較低濃度的活性成分，包含氨基（Nitrogen base, N）加上初酸基（First Acidaffins, A1），與（2）較高濃度的低活性成分，包含石蠟精（Paraffines, P）加上次酸基（Second Acidaffins, A2）。用於回復老化瀝青的再生劑通常有最小的 N/P（氨基/石蠟精）比值 0.5，以確保老化瀝青與再生劑彼此相容並預防膠泥產生收縮。再生劑須滿足黏度（60°C）、閃火點、揮發性、相容性、化學成分以及比重等規範要求 [Shen et al., 2007]。還原劑與老化瀝青的拌和效果受到下列因素影響 [Tran et al., 2012] :

- 1.機械攪拌
- 2.擴散
- 3.相容性

再生劑添加的目的是為了調整 RAP 之老化瀝青，使其恢復至所需的物理與化學性能，因此再生劑須滿足以下的技術要求:

- 1.必須具有較強的親和力與滲透能力
- 2.必須具有低熱損（Low Volatile Loss）
- 3.必須具有溶解與分散老化瀝青的能力
- 4.必須具有高閃火點，承受高溫拌和

Shen 等人 [2007] 比較再生劑和軟化劑添加於回收料的 RAC 工程性質，結果指出：（1）添加再生劑之試體的間接張力強度（ITS）和車轍試驗皆優於添加軟化劑的試體，（2）Superpave 混合料試體可以使用再生劑含量 10%以上較添加軟化劑含量來得多，和（3）Superpave 黏結料規範可以建立混合圖表，用來決定回收再生劑的含量。再生劑的含量會明顯影響再生瀝青混凝土與黏結劑的工程特性，結果指出：（1）再生劑含量對壓實特性的影響甚小，和（2）使用建議規範中線值的再生劑添加量，在輪跡試驗中的動穩定值（Dynamic Stability, DS）明顯較新鮮混合料來得高 [García et al., 2011]。

Dony 等人 [2013] 指出使用低黏度的再生劑對疲勞抗性的增加有顯著影響；在穩定值試驗方面，RAP 含量為 30%並且添加 15%低黏度的再生劑（60°C黏度為 830 cSt）可以和新鮮料有相近的結果；然而，與中、高黏度再生劑的車轍輪跡試驗結果相比，低黏度再生劑對動穩定值的明顯降低，但依舊符合規範標準。

4.2 再生劑相關規範

台灣國家標準（CNS）、美國材料試驗學會（ASTM）、美國州公路暨運輸官員協會

(AASHTO) 和日本公路單位分別將依再生劑 60°C 的黏度加以分級，如表 4.1、4.2 和 4.3 所示，再生劑材料本身的要求，考慮再生劑的黏度、閃火點、化學飽和成分、薄膜烘箱老化程度、重量損失等因素；其中 CNS 和 ASTM D4552 規範一致，AASHTO R14 依黏度將再生劑作更清楚分類，如表 4.2 所示。從施工安全考量，再生劑應有足夠高的閃火點，至少在 218°C 以上；為防止使用過量蠟質材料產生負面效果，台灣和美國皆規範飽和族需小於 30%。不過，日本對於再生劑的化學組成並沒有提出具體要求，而再生劑組成對老化瀝青再生效果至關重要，日本規範似乎存有不足之處。再生劑種類繁多，來源不同，可能存有不明溶劑現象；並非符合規範之再生劑，皆具有同樣效果，應謹慎選擇再生劑種類和合適的用量。

表 4.1 CNS 15359 與 ASTM D4552 再生劑規範

項目	試驗方法	RA 1	RA 5	RA 25	RA 75	RA 250	RA500
黏度，60°C，cSt	D2170 or D 2171	50~175	176~900	901~4500	4501~12500	12501~37500	37501~60000
閃火點，COC，°C	D92	>218	>218	>218	>218	>218	>218
飽和度，wt,%	D2007	<30	<30	<30	<30	<30	<30
RTFOT 後黏度比， 163°C	D2872 or D1754	<3	<3	<3	<3	<3	<3
RTFOT 後質量變 化，±，%		<4	<4	<3	<3	<3	<3
比 重	D70 or D1298	依報告	依報告	依報告	依報告	依報告	依報告*

*:[依報告] 表示必須進行該試驗項目，但無規範值，需將試驗結果呈現於報告中，作為比較之參考值。

表 4.2 AASHTO R14 再生劑規範

項 目	RA 1	RA 5	RA 25	RA 75	RA 250	RA500
黏度，60°C，cSt	50~150	200~800	1000~4000	5000~10000	15000~35000	40000~60000
閃火點，COC，°C	>218	>218	>218	>218	>218	>218
飽和族，wt,%	<30	<30	<30	<30	<30	<30
RTFOT 後黏度比，163°C	<3	<3	<3	<3	<3	<3
RTFOT 後質量變化，±，%	<4	<4	<3	<3	<3	<3
比 重	依報告	依報告	依報告	依報告	依報告	依報告

表4.3 日本再生劑規範 [日本道路協會，2004]

項目	標準性質
動黏度，cSt	80-1000
閃火點，℃	>230
薄膜烘箱加熱後黏度比，%	<2
薄膜烘箱質量變化率，%	<3
密度	依報告
成分分析	依報告

4.3 還原機理

老化瀝青的再生，從本質上來說是瀝青老化的反向思考，添加還原劑主要目的是調整老化黏結料之物理性質和化學成分比例。根據此思維，可將瀝青的還原機理區分為（1）組份調節與（2）相容性兩個基本構想說明。組份調節理論是從瀝青老化添加還原劑後所產生組份變化的角度出發，如圖 4.1 所示，新鮮瀝青老化後，老化瀝青之瀝青精含量增加，芳香族和膠質含量降低，飽和族含量變化不大，導致老化瀝青各組份之間比例失去平衡。添加還原劑後，形成再生瀝青（Reclaimed Asphalt Binder, RAB），增加芳香族和膠質含量、降低瀝青精含量，調節老化瀝青四組份之比例，使得再生瀝青與新鮮瀝青接近。

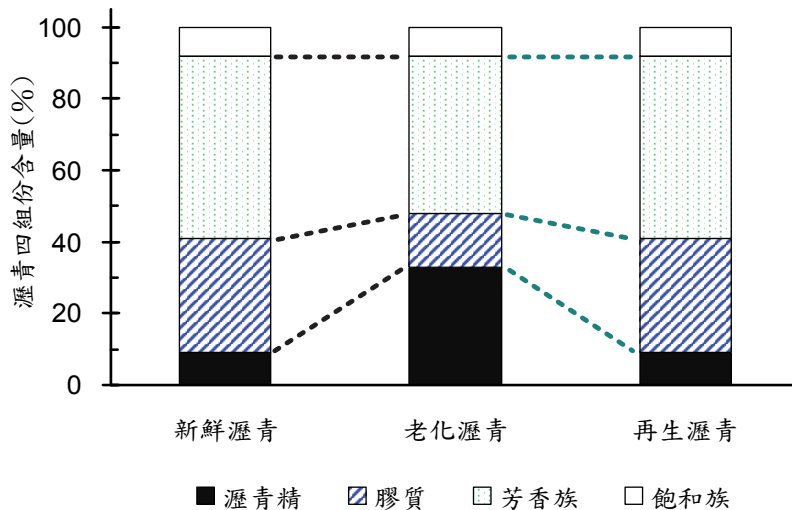


圖 4.1 組份調節示意圖

相容性理論是從熱力學的角度出發，瀝青老化後，各組份的相容性降低，進而導致各組份之間擴散和溶解度參數差質增大；透過加入適當擴散度參數的還原劑，可以降低各組份溶解度參數的差異，使老化瀝青恢復原有化學性能。須注意的是還原機理需老化瀝青和還原劑在完全拌和（Total Blending）和擴散（Diffusion）情況下方可成立，剛鋪築後之再生瀝青混凝土鋪面需一段時間方可達到組份調節與相容性兩種效果。需注意的是瀝青老化主要為氧化作用，氧化過程為化學反應，化學變化乃是不可逆的過程，已經氧化的瀝青精無法經由再生劑的添加還原成膠質或芳香族，再生劑需同時具有組份調節和相容性兩種效果。

五、國內再生瀝青混凝土之應用

5.1 概述

回收瀝青混凝土為原有鋪面瀝青混凝土刨除或挖除料，回收料添加還原劑、新鮮粒料與新鮮瀝青，經過瀝青拌和廠或現地處理後，再鋪築於道路之鋪面，即成再生瀝青混凝土（Recycled Asphalt Concrete, RAC），如圖 5.1 所示。在美國，每年有超過 5000 萬噸的瀝青鋪面材料被刨除回收，台灣每年也有超過 400 萬噸的瀝青回收料，基於資源再生利用及環境保護之考量，瀝青混凝土刨除料之再生利用有其必要性。由於新鮮瀝青混凝土成本的提升，使用 RAP 比例逐漸提高，主要是因為回收瀝青混凝土（RAP）在降低成本花費以及節能減碳上具有優勢；美國已經使用 RAP 接近 50 年，回收料添加於 RAC 之用量可高達 40% [Hajj et al., 2010；West et al., 2013]。

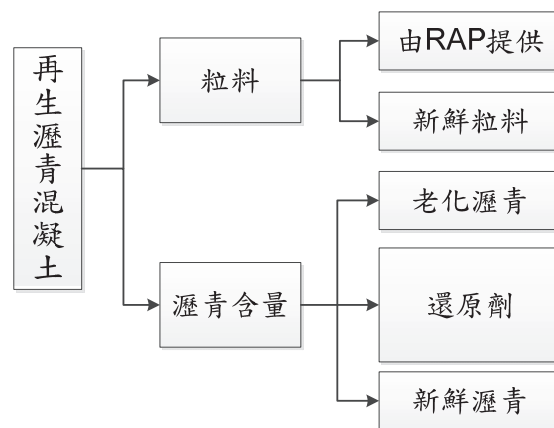


圖 5.1 再生瀝青混凝土材料組成

使用 RAP 可減緩採用新料時自然資源的損耗，並可解決 RAP 閒置的問題；然而，RAP 為老化之瀝青混凝土，由於黏結料老化，使 RAP 變為脆硬，在工程性質方面，RAP 雖可增加抗車轍能力，但對於抗裂縫能力可能降低 [Kim et al., 2009；West et al., 2009]。

由於瀝青混凝土鋪面老化主要是瀝青黏結料老化所導致，而瀝青老化則係指當瀝青混凝土鋪面暴露在自然環境下，瀝青因氧化產生化學變化，使瀝青精成份比例逐漸增加，質流性質因而變硬變脆，並降低粒料間的黏結效果 [林志棟等人，2000；許慧玲，2005；徐登文等人，2012]。瀝青再生的原理就是添加還原劑於老化瀝青材料中，補充因氧化而消失的芳香族，回復瀝青原本的質流性質，使再生瀝青混凝土之穩定性與耐久性合乎新料的需求。

5.2 冒油可能原因

冒油乃是指於道路表面產生光亮薄膜現象，如圖 5.2 所示。最近國內鋪面冒油和車轍現象似乎有增加趨勢，當雨天來臨時，車轍凹陷處積水，冒油路面容易引起水滑（Hydroplaning）現象，可能導致交通事故，因此，本文探討再生瀝青混凝土（RAC）相關議題，期盼有助於提升鋪面績效和耐久性。



(a) 道路冒油和車轍



(b) 街道冒油和變形

圖 5.2 鋪面冒油情形

冒油發生之可能原因如下

- 1.瀝青用量過高
- 2.通過#200 石粉過少
- 3.孔隙率過低
- 4.飽和率（Void Filled with Asphalt, VFA）過高
- 5.運料卡車塗抹柴油過多
- 6.混合料溫度過高
- 7.壓密過度

- 8.不當使用回收料
- 9.添加不明溶劑過量。

5.3 過多油量概念

為了使再生瀝青膠泥 60°C 黏度控制在目標值範圍下，往往需添加較多的還原劑或不明溶劑來降低老化瀝青之黏度；如圖 5.3 (a) 所示，再生瀝青混凝土之瀝青用量包含 RAP 老化瀝青、還原劑和新鮮瀝青。因為還原劑的添加量屬於瀝青含量的一部分，因此在達到目標黏度的條件下，可能產生 RAP 添加量之加總，超過配合設計的最佳瀝青用量，導致過多油量的情形發生。如圖 5.3 (a) 所示，假設配比設計之瀝青用量為 5% 時，若 RAP 添加比例較低或老化瀝青黏度較低之一般情況下，僅需添加少量的還原劑即可恢復老化瀝青性質至規範之目標黏度內，因此老化瀝青、還原劑與新鮮瀝青添加量能控制在配比設計用量範圍，黏結料用量適當，鋪面狀況正常，鋪面冒油的機率大降。

然而，在 RAP 添加比例過高或瀝青過度老化的情況下，則需大量的還原劑添加量才能使老化瀝青恢復至規範的目標黏度範圍內，當還原劑與老化瀝青之加總超過配比設計瀝青用量時，即產生過多油量問題，冒油情形即容易發生，圖 5.3 (b) 顯示過多瀝青現象，來自於過多老化瀝青和過多還原劑用量。從實務觀點而言，圖 5.3 (b) 過多油量可以說明部份國內道路冒油和車轍情形。為了避免過多油量之情況發生，可使用合適之再生劑種類和用量，降低老化瀝青黏度。此外，在鋪面績效確認前提下，也可藉由提高再生瀝青的目標黏度來減少還原劑用量，進而避免過多油量的情況發生。

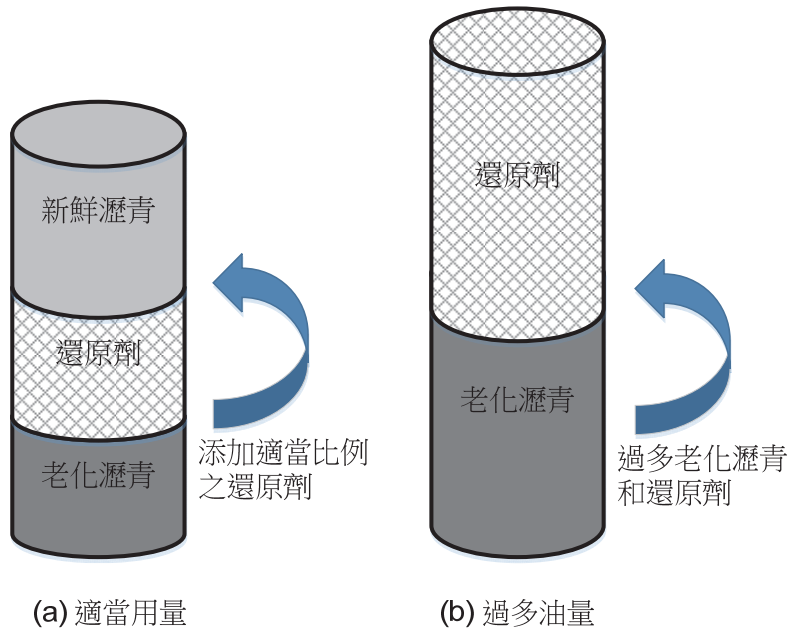


圖 5.3 正常用量與過多油量狀況

5.4 冒油建議因應策略

上述 5.2 節所提出因素皆可能引起冒油現象，但瀝青價格相對高昂，使用過量瀝青黏結料於 RAC 混合料之情形較少見；拌和廠產製 RAC 過程中一般使用回收粉塵，通過 #200 石粉使用量不至於過少。孔隙率過低和飽和率過高乃是產製過程中，產製用之級配曲線可能偏離配比工作拌和公式（Job Mix Formula, JMF）過大所致，確實執行上、下午熱料篩分析，依據熱料斗狀況調整配比，可避免孔隙率過低和飽和率過高現象。運料卡車塗抹柴油過多、混合料溫度過高和壓密過度所產生之冒油大部分是局部性現象，一般可即時發現，經由現地監造得到管控。不當使用回收料或添加不明溶劑過量則屬於拌和廠可能產生議題，不明溶劑組成複雜，不明溶劑不具有組份調節和相容性效果，可能產生冒油等負面影響，必須加以管理。公路工程師須有正確使用回收料和添加合宜還原劑等知識，方可得到品質穩定之 RAC。

當 RAP 使用比例過高，且老化瀝青黏結料黏度亦高時，為使老化瀝青黏結料降至合理值，往往需使用較多量還原劑或添加不明溶劑，但使用量超過合適之瀝青用量時，可能產生過多油量問題。過多油量問題是指 RAP 老化瀝青存留量與還原劑添加量之總和超過配比設計所建議的瀝青用量，過多油量可能造成鋪面提早破壞，如冒油和變形。如前所述，還原劑可分為軟化劑和再生劑，前者指的是針入度較高或黏度較低之新鮮瀝青如 Pen85/100 或 AC(I)10，後者為可改變老化瀝青化學成份之碳氫合成產品 [林炳森等人，2008；Roberts et al., 2009; Denneman et al., 2013]。還原劑與老化瀝青拌和後即形成再生瀝青黏結料（Reclaimed Asphalt Binder, RAB），RAB 為再生瀝青混凝土實際上之黏結料，如圖 5.1 所示，RAB 包含回收料內之老化瀝青、還原劑和可能添加之新鮮瀝青。RAB 物理和化學性質對鋪面績效扮演重要角色；然而，如何選擇還原劑種類和含量，如何調整老化瀝青至適合等級，國內產、官、學相關單位應積極重視。

從學理上而言，以單一點 60°C 黏度作為控制鋪面績效可能產生負面效果，無法反應國內鋪面使用狀況；同時，60°C 黏度值乃是假設還原劑與老化瀝青完全拌和，實際上並非如此，還原劑擴散仍持續進行，不是完全拌和，因此容易導致冒油。一般而言，60°C 黏度值只是作為新鮮瀝青等級分類之用，歐、美、日等先進國家之再生瀝青混凝土規範不以 60°C 黏度值作為控制點，乃是以鋪面績效為最終考量點。為減少冒油現象，建議逐步廢除現有以 60°C 黏度為依據之再生瀝青混凝土規範，改以績效為主之鋪面規範。

5.5 再生劑擴散（Diffusion）

由於還原劑與老化瀝青拌和後，需一段時間方可達到完全擴散，也就是完全拌和（Total Blending）狀況。再生劑藉由擴散至老化瀝青內部來恢復黏結料結構與重組其化學成分，因此，再生劑於老化瀝青中之擴散程度是老化瀝青再生之重要因素 [Shen et al.,

2005]。由於瀝青內部化學性質複雜，使得分析瀝青擴散行為也較複雜。理論上，瀝青內部分子擴散速率，取決於分子組成與當時附近的分子狀態 [Karlsson and Isacsson, 2003]。選擇適合的老化瀝青再生劑，不僅須考慮再生劑降低瀝青黏度的能力，也需考慮再生劑的化學組成方式。此外，老化瀝青與再生劑的混合程度對再生瀝青混合料的影響極大，而擴散是達到完全拌和的必要條件 [Karlsson and Isacsson, 2002]。

Huang 等人 [2005] 使用分層萃取法測定 RAP 與新鮮瀝青混合後黏度，發現 RAP 外層之瀝青黏度低於內層，60%靠近 RAP 粒料的內層部分，其瀝青性質與 RAP 老化瀝青無異，而靠近外層的 40%部分則會與新鮮瀝青拌和。Carpenter 與 Wolosick [1980] 發展再生劑對 RAP 混合料的擴散模型，擴散作用如圖 5.4 所示，說明再生劑與老化瀝青之黏度變化，擴散過程包含下列步驟：

- 1.再生劑形成極低黏度層包裹老化瀝青包覆的粒料，如圖 5.4 (a) 和 5.4 (b) 所示。
- 2.再生劑開始滲透 RAP 黏結料，同時軟化老化的瀝青且再生劑的數量開始減少，如圖 5.4 (c) 所示。
- 3.所有再生劑擴散入 RAP 黏結料，包覆粒料的老化瀝青黏度開始降低，而外層（再生劑）黏度則增加，如圖 5.4 (d) 所示。
- 4.再生劑與老化瀝青達平衡，完全拌和，如圖 5.4 (e) 所示。

步驟 1.中，再生劑僅包裹 RAP 但無交互作用，此時再生劑與老化瀝青黏度幾乎維持不變，初期混合料抵抗車撤能力有限，這就是添加再生劑的鋪面可能面對初期車轍的挑戰；接著再生劑開始擴散，滲入老化瀝青，包覆 RAP 的再生劑逐漸減少，再生劑與老化瀝青的交互影響會使外部的老化瀝青黏度開始降低。同時，殘餘的再生劑黏度開始提升如步驟 2.與步驟 3.所示。這些過程會持續至所有再生劑滲入老化瀝青達到平衡，如步驟 4.所示，並產生均質的再生瀝青黏結料。一般而言，軟化劑的擴散速率較低，達到完全拌和的時間較長，服務期限內可能呈現軟化劑特性；使用再生劑的擴散速率較快，但初期黏度可能較低，整體再生瀝青品質較容易掌握。

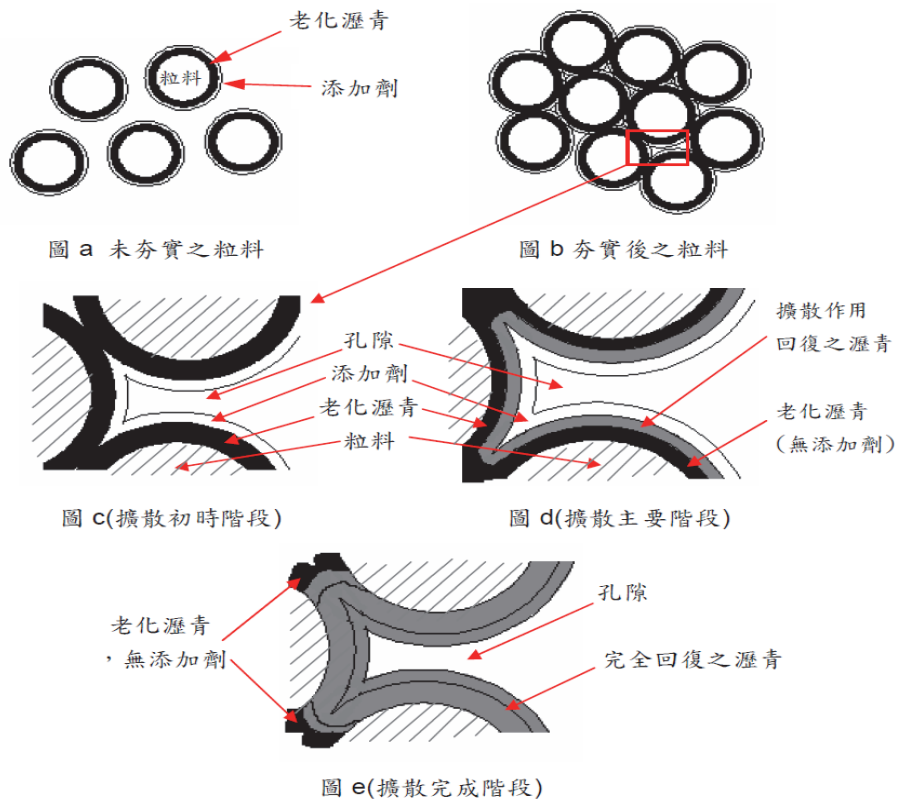


圖 5.4 再生劑擴散步驟 [Carpenter and Wolosick, 1980]

5.6 再生瀝青黏度

為使再生瀝青回復至適合的黏度等級，一般使用 ASTM D4887 的瀝青黏度與還原劑添加比例圖，來確認還原劑與老化瀝青（RAM Binder）的混合比例。如圖 5.5 所示，縱軸為 60°C 黏度之座標，橫軸為還原劑添加比例，A 點為還原劑之 60°C 黏度，B 點為老化瀝青之 60°C 黏度，將 A、B 兩點連線，並與目標黏度之水平線交會，獲得交點所對應的 X 軸座標，C 點或 D 點即為還原劑添加比例，其中 C 點對應軟化劑，D 點對應再生劑。

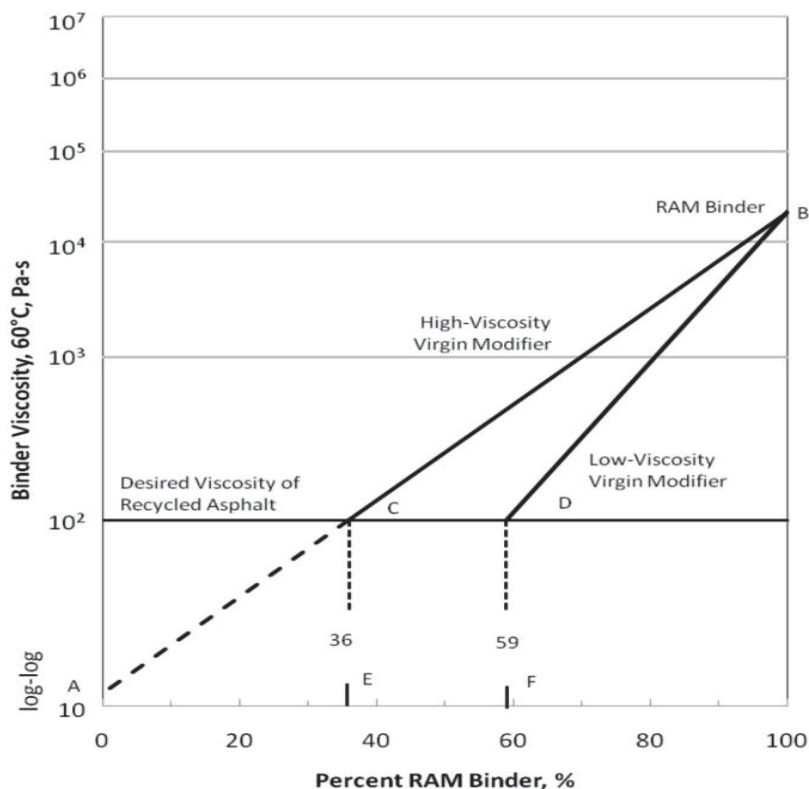


圖 5.5 老化瀝青與還原劑添加比例圖 [ASTM D4887, 2011]

ASTM D4887 是根據 Arrhenius (1887) 推導的公式而得，假設老化瀝青與還原劑之混合，有對數黏度之添加比例線性關係，如式 (2) 所示 [Chen et al., 2014b]:

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

其中

- η_m = 再生瀝青黏度值
- η_{ra} = 還原劑黏度值
- η_{as} = 老化瀝青之黏度值
- x_{as} = 老化瀝青的重量百分比
- x_{ra} = 還原劑的重量百分比

分析國內老化瀝青和再生劑混拌後之再生瀝青黏結料性質，圖 5.6 顯示軟化劑 (AC5、AC10) 與老化瀝青 (R1.6) 之添加比例關係，R1.6+AC10 和 R1.6+AC5 兩條曲線大致符合 Arrhenius 的推論，其中 R1.6 代表 60°C 黏度為 1,600,000 poise 的老化瀝青，R1.6 為再再生瀝青混凝土黏結料，代表嚴重老化之瀝青。然而，再生劑 (RA5、RA75) 與老化瀝青之組合並非呈現對數黏度之線性關係，而是成對數黏度之添加比例曲線關係。

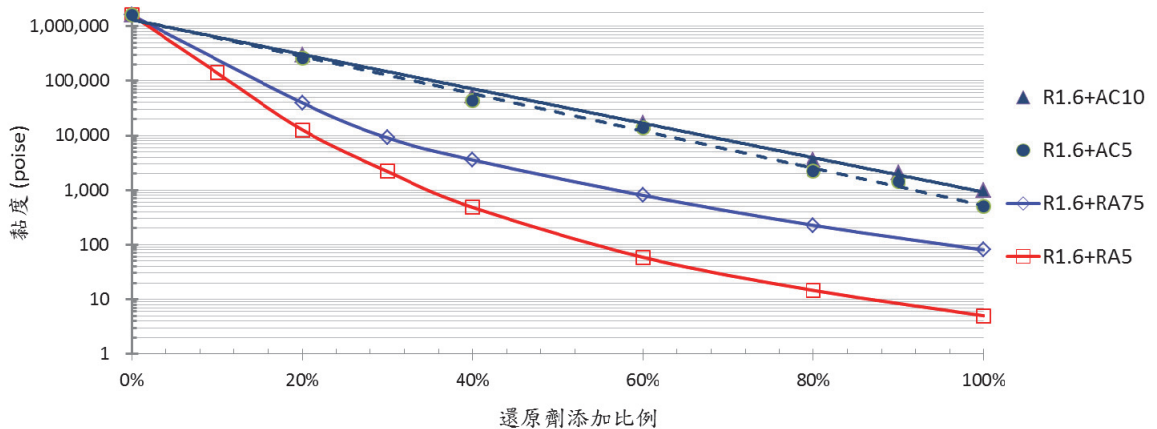


圖 5.6 再生瀝青黏度與還原劑添加比例之關係

ASTM D4887 規範似乎不適用添加再生劑對老化瀝青黏度之影響，原因在於再生劑中芳香族組份之比例極高，且黏度相較於軟化劑甚低，再生劑可降低再生瀝青（RAB）黏度。因此，添加再生劑相較於軟化劑，對於恢復 RAB 質流性質有更佳表現；如圖 5.6 中，R1.6+RA75 與 R1.6+RA5 之再生劑添加比例曲線，於再生劑添加比例低時，曲線斜率較陡峭，少量之再生劑添加量即可大幅降低 RAB 黏度。

再生劑的組份組成比例與 RAB 之組份組成比例差異極大，可視為兩種不同物質，當再生劑添加比例較高時，該 RAB 與再生劑混合物之性質已偏向再生劑之性質，因此，再繼續增加再生劑添加量對 RAB 之質流性質影響不大；如圖 5.6 中，R1.6+RA75 與 R1.6+RA5 兩條再生劑添加比例曲線，於再生劑添加比例高時，曲線斜率較平緩，添加再生劑對降低 RAB 黏度之效能較不明顯。再生劑與還原劑用量隨配合設計、瀝青、粒料性質、老化瀝青黏度與性質等因素而改變，須經由實驗室分析與廠拌確認合適添加比例與種類。

六、結論與建議

根據上述討論與分析結果，得到以下結論與建議：

1. 瀝青組份依極性不同，可分為瀝青精、飽和族、芳香族與膠質四種組份，瀝青老化過程主要是芳香族和膠質與空氣中的氧反應，生成瀝青精；瀝青老化過程造成瀝青精含量增加，膠質與芳香族含量降低，而飽和族則無大幅變化。
2. 瀝青老化分為生產與鋪築階段的短期老化與服務期間的長期老化，短期老化造成的瀝青氧化，使黏度大幅提升；然而，長期老化乃是路面鋪築滾壓完成，開放交通後之瀝青黏度變化情形，在此期間瀝青黏度增加緩慢。
3. 瀝青黏結料主要受到氧氣與紫外線作用而氧化，瀝青老化為不可逆的化學反應，且

- 受到鋪面孔隙率、使用時間與距離鋪面表面深度之影響。
- 4.鋪築後，瀝青路面長期老化緩慢，黏度增加有限，影響因素包含瀝青混凝土空隙率和瀝青所在之鋪面深度，當鋪築後之瀝青混凝土空隙率過高時，易使空氣、水與陽光進入鋪面內部，因而加速瀝青老化。越靠近鋪面表層瀝青越容易受到氧氣與紫外線的老化作用，老化速率較快，但受影響之瀝青只限於表層；路面表層以下之瀝青，老化之機制幾乎不存在，瀝青較不容易老化。
 - 5.還原劑分為軟化劑與再生劑兩種，添加還原劑具有調整老化瀝青性質之功能，能使老化瀝青之黏度降低，使用適當還原劑種類和用量，再生瀝青黏結料能符合鋪面績效要求；瀝青老化過程為不可逆之現象，添加還原劑無法將瀝青精還原成膠質或芳香族。
 - 6.再生劑應含有高含量之芳香族，能補足老化瀝青消失的芳香族組份，使老化瀝青恢復至適合的物理與化學特性與黏稠性質，符合瀝青配合設計的要求。
 - 7.還原劑或不明溶劑用量不當可能產生過多油量問題，導致鋪面冒油與車轍，進而影響鋪面耐久性與績效，建議使用適當再生劑種類和用量，掌握再生瀝青混凝土品質，避免過多油量之發生。
 - 8.從學理上而言，以單一點 60°C 黏度作為控制鋪面績效可能產生負面效果，為減少冒油現象，建議逐步廢除現有以 60°C 黏度為依據之規範，改以績效為主之鋪面規範。
 - 9.再生劑與老化瀝青混合後，需要一段時間擴散，方能完全拌和，使老化瀝青恢復其質流性質與化學組份，選擇適合的再生劑種類和用量可增加再生瀝青的混合程度。
 - 10.再生劑與老化瀝青之混合，並非對數黏度之添加比例線性關係，而是曲線關係，當再生劑添加量少時，再生瀝青黏度大幅下降；但當再生劑含量高時，黏度由再生劑主導。
 - 11.再生劑用量隨配合設計、瀝青、粒料性質、老化瀝青黏度與性質等因素而改變，建議經由實驗室分析與廠拌確認合適添加再生劑比例與種類。

參考文獻

1. 日本道路協會 (2004)鋪裝再生便覽，東京。
2. 沈得縣、吳佳銘 (2006)「瀝青混凝土拌合廠評鑑及認可機制」，第六屆鋪面工程材料再生及再利用學術研討會 (CD-ROM)。
3. 林志棟、廖坤溪、林秉祁、王睿懋 (2000)「台灣地區再生瀝青混凝土規範初步研擬之研究」，土木水利，第 27 卷，第 75-80 頁。
4. 林炳森、程聰賢 (2008)「再生瀝青混凝土回收瀝青黏滯度與刨除料添加量最適化之研究」，鋪面工程，第 6 卷，第 1-12 頁。

5. 徐登文、蕭宏智、林建宏 (2012) 「以力學試驗探討 RAP 回收料在再生瀝青混凝土混合料中拌和模式之研究」, 第十屆鋪面工程材料再生及再利用學術研討會 (CD-ROM)。
6. 姜榮彬 (1993) 「再生瀝青原理與應用」, 第 1 屆鋪面材料再生學術研討會, 第 191-200 頁。
7. 許慧玲 (2005) 分析回收瀝青添加再生劑之膠漿性質, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 台南。
8. 陳建旭、朱柏彥、蕭志銘、林桂儀 (2006) 「定義再再生瀝青混凝土並分析其工程性質」, 中國土木水利工程學刊, 第 18 卷, 第 3 期, 頁數 385-393。
9. 蔡攀鰲 (2009) 瀝青混凝土, 三民書局, 台北。
10. AASHTO R14 (2003) Classifying Hot-Mix Recycling Agents, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
11. ASTM D4552 (2010) Standard Practice for Classifying Hot-Mix Recycling Agents, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
12. ASTM D4887 (2011) Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Bituminous Materials, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
13. Al-Khateeb, G., Qi, X., Shenoy, A., Stuart, K., and Mitchell, T. (2005) "Assessment of Aging at FHWA' S Pavement Testing Facility," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1940, TRB, National Research Council, Washington, D.C, pp.146-155.
14. Al-Qadi, I.L., Elseifi, M., and Carpenter, S.H. (2007) Reclaimed Asphalt Pavement - A Literature Review, Illinois Center for Transportation, FHWA-ICT-07-001.
15. Boukir, A., Aries, E., Guiliano, M., Asia, L., Doumenq, P., and Mille, G., (2001) "Subfractionation, Characterization and Photooxidation of Crude Oil Resins," Chemosphere, Vol.43, pp.279-286.
16. Boukir, A., Guiliano, M., Asia, L., Hallaoui, A.E., and Mille, G. (1998) "A Fraction Study of Photo-Oxidation of BAL 150 Crude Oil Asphaltenes," Analisis, Vol.26, pp.358-364.
17. Bullin, J.A., Glover, C.J., Davison, R.R., Lin, M.S., Chaffin, J., Liu, M., and Eckhardt, C. (1996). Development of Superior Asphalt Recycling Agents, DOE/AL/94460-1, U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies, Washington, DC
18. Brown, E.R., Kandhal, P.S., Roberts, F.L., Kim, Y.R., Lee, D.Y. and Kennedy, T.W. (2009) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, third edition, Maryland.
19. Carpenter, H.S., and Wolosick, R.J. (1980) "Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Material," Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, No.777, TRB, National Research Council, Washington, D.C, pp.15-25.
20. Chen, J.S., C.C. Huang, P.Y. Chu and K.Y. Lin (2007). "Engineering Characterization of Recycled Asphalt Concrete and Aged Bitumen Mixed Recycling Agent," Journal of Materials Vol.41 No.7 July 2015

Science, Vol.42, pp.9867-9876.

21. Chen, J.S., S.F. Chen and M.C. Liao (2014a). "Physical and Chemical Properties of Asphalts Associated with Performance," *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, (accepted for publication).
22. Chen, J.S., S.F. Chen, M.C. Liao, and S.W. Huang (2014b). "Laboratory Evaluation of Asphalt Blends of Recycling Agents Mixed with Aged Binders," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, (accepted for publication).
23. Corbett, L.W. (1967) "Composition of Asphalt Based on Generic Fractionation, Using Solvent Deasphalting, Elution-Adsorption Chromatography and Densimetric Characterization," *Analytical Chemistry*, Vol.41, No.4, pp.576-579.
24. Denneman, E., Dias, M., Malone, S., Choi, Y., Woodall, E. and Urquhart, R. (2013) *Maximizing the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement: Binder Blend Characterization*, AP-T245-13, Austroads, Sydney, Australia.
25. Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., and Navaro, J. (2013) "Reclaimed Asphalt Concretes with High Recycling Rates: Changes in Reclaimed Binder Properties According to Rejuvenating Agent," *Construction and Building Materials*, Vol.41, pp.175 - 181.
26. García, A., Schlangen, E., and van de Ven, M. (2011) "Properties of Capsules Containing Rejuvenators for Their Use in Asphalt Concrete," *Fuel*, Vol.90, pp. 583 - 591.
27. Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E., Kandiah, P. (2010) "Evaluation of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Airfield HMA Pavements," *Journal of Transportation Engineering*, Vol.136, pp.186-189.
28. Huang, B.Z., and Li, G., (2005) "Laboratory Investigation of Mixing HMA with RAP," *Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board*, No.1929, pp.37 - 45.
29. Jennings, P.W., Pribanic, J.A., Raub, M.F., Smith, J.A., and Mendes, T.M. (1993) *Advanced High Performance Gel Permeation Chromatography Methodology*, SHRP-A-630, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, DC
30. Kandhal, P.S., Sandvig, L.D., Koehler, W.C., and Wenger, M.E. (1973) "Asphalt Viscosity - Related Properties of In-Service Pavements in Pennsylvania," *ASTM STP 532*, pp.42-56.
31. Karl, W. J., Santucci, L. E. and Coyne, L. D. (1979) "Hot Mix Recycling of Asphalt Pavements," *Association of Asphalt Paving Technologists*, pp.192-220.
32. Karlsson, R. and Isacsson, U. (2006) "Material-Related Aspects of Asphalt Recycling—State-of-the-Art," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.18, pp.81-92.
33. Karlsson, R. and Isacsson, U. (2003) "Investigations on Bitumen Rejuvenator Diffusion and Structural Stability," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.72, pp.463-501.

34. Kim, S., Sholar, G.A., Byron, T., and Jim, J. (2009) "Performance of Polymer-Modified Asphalt Mixture with Reclaimed Asphalt Pavement," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, No. 2126, TRB, National Research Council, Washington, D.C, pp.109-114.
35. Isacsson, U., and Karlsson R., (2002) "Bitumen Rejuvenator Diffusion as Influenced by Ageing," *Road Materials and Pavement Design*, 3:2, pp.167-182.
36. Lesueur, D. (2009) "The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen," *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol.145, pp.42-82
37. Lubbers H.E. (1985) "Bitumen in de weg- en waterbouw," *Nederlands Advies-bureau voor Bitumentoepassingen*, Gouda.
38. Madrid, R.C., R.R. Davison and G.J. Glover (2000). "Compositional Evaluation of Asphalt under Recycling Agents," *Petroleum Science and Technology*, Vol.18, pp.153-175.
39. Mortazavi, M., Moulthrop, J.S. (1993) SHRP Materials Reference Library, SHRP-A-646, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
40. Petersen, J.C. (2009) "A Review of the Fundamental of Asphalt Oxidation," *Transportation Research Circular E-C140*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
41. Shell Bitumen (2003) *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen, UK
42. Shen, J., Serji, A., and Jennifer, A.M. (2007) "Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, pp.376-384.
43. Shen, J. A., Amirhanian, S.J., Lee, S.J. (2005) "The Effects of Rejuvenating Agents on Recycled Aged CRM Binders," *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.6(4), pp.273-279.
44. Tran, N.H., A. Taylor, and R. Willis (2012). *Effect of Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mixtures with High RAP and RAS Contents*. NCAT Report 12-05, Auburn University, Auburn, Alabama.
45. Valcke, E., Rorif, F., and Smets, S. (2009) "Ageing of EUROBITUM Bituminised Radioactive Waste: An ATR-FTIR Spectroscopy Study," *Journal of Nuclear Materials*, Vol.393, pp.175-185.
46. Vallerga, B.A. and Halstead, W.J. (1971) "Effects of Field Aging on Fundamental Properties of Paving Asphalts," *Highway Research Record*, No.361, pp.71-92
47. Walczak, I. (2000) "Determination des produits organiques d'alterations chimiques et radiochimiques du bitume," *Applications aux enrobes bitumes*. Thesis. Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.
48. West, R., Kvasnak, A., Tran, N., Powell, B., and Turner, P. (2009) "Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes: Laboratory and Accelerated Field Performance Testing at the National Center for Asphalt Technology Test Track,"

Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, No. 2126, TRB, National Research Council, Washington, D.C, pp.100-108.

49. West, R., Willis, J.R. and Marasteanu, M., (2013) Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content, NCHRP Report 752, Washington, D.C.



廣告



「省道即時交通資訊APP」

結合省道即時交通資訊及地圖顯示，提供使用者於行前規劃或旅途中，查詢交通部公路總局轄管道路之防災資訊、交管措施、即時路況影像、資訊可變標誌訊息及其他交通生活資訊，讓您一手掌握省道最新路況。



服務功能如下：

1. 運用區域選擇及GPS定位，快速查詢省道即時路況。
2. 查詢大客車禁行路段、風景路線績效，確保旅遊安全及品質。
3. 最新消息、防災資訊及交管措施，迅速掌握省道通阻資訊。
4. 單鍵撥號功能及更貼心的交通生活資訊。



交通部公路總局總機：(02) 2307-0123(代表號) 路況語音查詢專線：1968 網址：<http://www.thb.gov.tw>

臺灣公路工程徵稿簡則

- 一、本刊為交通部公路總局工程同仁業餘進修刊物，歡迎本局同仁及國內外有關公路之工程、經濟、規劃、管理、資訊等未經刊登於其他刊物之研究論著均接受投稿；論文如屬接受公私機關團體委託研究出版之報告書之全部或一部份或經重新編稿者，作者應提附該委託單位之同意書，並於論文中加註說明。凡由本刊主動邀稿者，不受上述限制。
- 二、本刊為一綜合性公路工程刊物，下列各類稿件均表歡迎：
 1. 論著：以公路工程之理論著述，創作發明，具有學術價值者為主。
 2. 專題研究：以實際經驗及創見，促進技術之改進者為主。
 3. 譯述：以譯述國外書刊雜誌或工程報導，具有參考或實用價值者為主，長稿予以節譯，如涉及著作權問題，由譯者自行負法律責任。
 4. 實務報導：以報導工程設計、施工、試驗之實際經驗為主。
 5. 法令釋義：以介紹或解釋公路交通法規為主。
 6. 新書介紹：以介紹國內外有關公路工程交通新書為主。
 7. 工程文摘：以介紹國內外有關公路交通工程新知識為主。
 8. 讀者通訊：以反應或解答有關公路交通工程問題為主。
 9. 工程報導：以報導國內公路交通工程動態為主。
 10. 業餘隨筆：以有關工程方面之輕鬆雋永之散文記述為主。
- 三、為便於一次刊出，來稿以一萬五千字為限，其中應包括三百字以內之摘要及三至五個關鍵詞，並請註明姓名、身份證字號、戶籍地址、服務單位、職稱、聯絡地址及電話。
- 四、文稿中需註釋處，請標明上標無括號序碼，按順序往下連續編號，再於引註當頁下方加橫線排印註釋。文稿中之數學式，函數請排正體字、變數請排斜體字。圖及表中之中文字請排細明體，英文字請排 Times New Roman 體，圖原則上不加框，表之框線均採細線。參考文獻請按出現序排列，文中提及時請標明上標加括號序碼，參考文獻資料必須完整無缺，請依序書寫作者姓名、論文篇名、期刊（書名）名稱、卷期、出版社、出版日期、起迄頁碼。
- 五、來稿請打印清楚，照片、圖片請附寄原版，凡無法清晰辨認及製版者，恕不接受；並請提供 Microsoft Word 版本可讀檔案格式之電子檔。
- 六、本刊編輯委員對來稿在不變更其論點之原則下有刪改權，來稿一經發表，依本社規定致稿酬，版權歸本局所有，其他刊物如需轉載，應同時徵得作者及本刊同意，並註明出處。
- 七、如欲退還稿件請附足郵資。
- 八、稿件請寄臺北市萬華區東園街 65 號 8 樓臺灣公路工程月刊社收。

臺灣公路工程

編者：臺灣公路工程編輯委員會
地址：10863 臺北市萬華區東園街65號
電話：(02) 2307-0123 轉 8108
網址：<http://www.thb.gov.tw/> 本局資訊/影音及出版品
編者：臺灣公路工程編輯委員會
出版年月日：中華民國104年7月15日
創刊年月日：中華民國41年11月11日
刊期頻率：每月15日出刊
本期定價：新臺幣30元
展售處：

五南文化廣場

地址：40042 臺中市中山路6號
電話：(04)2226-0330

國家書店松江門市

地址：10485 臺北市中山區松江路209號1樓
電話：(02)2518-0207 (代表號)
國家網路書店：<http://www.govbook.com.tw>

三民書局

地址：10045 臺北市重慶南路一段61號
電話：(02)2361-7511
印刷者：彩之坊科技股份有限公司
地址：23558 新北市中和區中山路2段323號
中華民國104年7月初版一刷

GPN:2004100003

ISSN:1812-2868

著作財產權：交通部公路總局

欲利用本刊全部或部分內容者，須徵求本局同意或
書面授權。請洽臺灣公路工程月刊社
(電話：(02)2307-0123轉8108)

行政院新聞局出版事業登記證局版北市誌字第1360號
臺灣郵政北臺字第○七三八號執照登記為新聞紙類(雜誌)交寄
臺灣郵政劃撥儲金帳戶10286620號
中華民國雜誌事業協會會員

ISSN 1812-2868



9 771812 286005

GPN:2004100003

本期定價新臺幣 30元
半年新臺幣150元
全年新臺幣300元
軍人及學生訂閱半價優待