

自充填混凝土之適用性介紹

*陳松堂 **林建宏

一、前言

混凝土是一種由水泥、粗骨材（碎石）、細骨材（砂）及水，或添加附加劑等以比例拌合並在一定時間澆置及凝固而成。也由於其組成之材料來源不穩定性造致性能掌控不易，再加上澆置構造物之複雜度，施作人員技巧之差異及環境之不同等，其品質確難維持穩定不變，尤其在人為作業之疏失或缺陷為甚，故減少人為不確定因素，並加強材料品質管制，則可大大提昇混凝土品質。

88年09月21日集集大地震後，構造物之耐震設計要求大幅提高，地震甲區之工址水平加速度係數 $Z_h=0.33g$ ，並需考慮垂直加速度之影響，工址垂直加速度係數 $Z_v=Z_h/3$ ，故構造物因耐震設計之柱主筋及圍束箍筋之鋼筋量大量增加結果，造成鋼筋間距嚴重減小，除鋼筋組立非常困難外，混凝土之澆置及搗實亦相對不易。倘若混凝土澆置後無法確實填實，形成所謂「蜂窩」情形，則其結構有效斷面積減少外，亦可能造成鋼筋未達裹握效果，足以危及結構之安全，因此耐震設計時構造物之斷面尺寸及鋼筋配置，均應考量混凝土澆置搗實施工之容易性。

傳統之混凝土材料及施工方式實有迫切加以改善俾提昇工程品質之必要，早在1986年日本東京大學岡村甫教授提出由混凝土本身材料自行充填免搗實而填滿模板各處之「自充填混凝土」之觀念因應而起，改良混凝土之性質及減少人為施工之影響，洽似可解決因混凝土澆置搗實施工不易之問題。且在國內已有數個施工案例使用「自充填混凝土」施工，如中二高快官草屯段之烏日交流道連絡道穿越橋（箱型梁橋，橋長90公尺）、桃園長庚醫院復建大樓、安碁資訊 Data Center 大樓、台北國際金融中心新建工程、南投縣政大樓新建工程等。惟應用於建築工程較多而土木工程則較少，應與國內缺乏規範有關，今公共工程委員會已將「自充填混凝土」之施工規範納入公共工程施工綱要規範第03315章，將有助於「自充填混凝土」應用於公共工程。

二、何謂自充填混凝土（Self-Compacting Concrete，簡稱 SCC）

依公共工程委員會公共工程施工綱要第03315章「自充填混凝土」之定義為「自充填混凝土係指具有『澆置過程不需施加任何振動搗實，完全藉由自身流動性與充填性能填充至鋼筋間隙及模板之各角落』能力之混凝土」。

又依據美國混凝土學會（ACI-American Concrete Institute）對「高性能混凝土」之定義，指稱「高性能混凝土」（HPC-High Performance Concrete）為性質優於傳統混凝土。為其「性質」所指為何未詳述，應可包含強度、彈性模數、工作度、流動性、體積穩定性、耐久性、耐磨性、水密性、完整性及其他特殊功能（如低水化熱）經濟性等。因此所謂高性能乃是針對一般傳統

*公路總局第二區養護工程處副處長

**國立中興大學土木工程系教授

混凝土的施工方式仍無法滿足工程需求的情況下，所開發出來的混凝土，高性能混凝土可能具有一種甚至數種的「高性能」以符合工程的需求。其實可將「高性能混凝土」視為是一個較廣義的工程材料名稱。而 SCC 所要求的「高性能」便是「自行填充、免振動搗實」，更明確來說 SCC 應該是 HPC 的一種。

三、自充填混凝土工程效益

SCC 具有施工澆置時免振動搗實、高流動性暨通過鋼筋間隙及充填模板之能力，以達到確保混凝土構造物之品質與可靠度之目的。故自充填混凝土的工程效益可歸納如下：

用於混凝土搗實困難之結構物：

如預力箱型梁、橋墩、梁柱系統、剪力牆及隧道襯砌等不易施工或無法振動搗實之構造物。

混凝土充填密實有效提昇結構之可靠性：

由於水密性佳，可作為地下結構物防水材料，以節省防水工程設施。

用於巨積混凝土以減少勞力及縮短工期：

因免搗實，可減少施工勞力；並應持續施工，可縮短工期。

減少工地噪音符合環保：

免搗實之故，無振動機械之噪音產生，亦可適用於夜間安靜施工。

用於預鑄製品：

可應用於預鑄製品，以達到混凝土施工之自動化、合理化。

用於當作修補材料：

可應用於混凝土構造物遭局部損壞致需部分敲除重作而澆置及搗實不易之處。

四、自充填混凝土性能要求

SCC 之相關性質係分別以坍流度、V 型漏斗流出時間、間隙通過性及現場全量通過性表示之，其相關性能要求參考值如表一所示。*SCC 相關性能試驗如附錄一及品管試驗方法如附錄二。

*表一、SCC 相關性能要求之參考值

混凝土充填能力等級		1	2	3
構 造 條 件	鋼筋最小間距 (mm)	30 60	60 200	200 以上
	單位體積鋼筋用量 (kg/m ³)	350 以上	100 350	100 以下
鋼筋間隙通過(箱型或U型)試驗 充填高度 (mm)		300 以上 (R1 障礙)	300 以上 (R2 障礙)	300 以上 (無障礙)
流 動 性	坍 流 度 (mm)	550 700		550 650
抗析離性	V 漏 斗 流 出 時 間 (sec)	10 20	7 20	7 20
	坍流度達 50cm 所需時間(sec)	5 25	3 15	3 15

*日本土木學會「高流動混凝土施工指針」，1998 年 7 月

**公共工程委員會公共工程施工綱要第 03315 章「自充填混凝土」

五、自充填混凝土材料

SCC 的特性要求高流動性、高抗析離性，以滿足免搗實及自充填的功能，其主要關鍵在於

配比設計。而配比設計控制在材料品質及用量，故材料之選用非常重要，另礦物摻料及化學摻料之使用，更需瞭解其變異性及審慎使用，俾能製作良好之 SCC。

水泥

「卜特蘭水泥須符合 CNS 61 Type I 或 Type II，高爐水泥須符合 CNS 3654，飛灰水泥須符合 CNS 11270 之規定。」

「除設計者同意，不同廠牌、來源及型號之水泥不可交替使用於同一結構物。」

粒料

SCC 選用之粒料應以硬度值高、吸水率低及扁平率在 10% 以下者為佳。

「混凝土粒料須符合 CNS 1240 之規定。」

粗粒料

粗粒料標稱最大粒徑之選用，一般均取決於結構體配筋量之多寡，以避免產生架橋之現象（如圖一）。SCC 最大粒徑通常須小於 25mm，在結構物配筋密集時可採用 13mm (1/2")，而在結構物配筋稀少時則可採 25mm (1")，為能滿足 SCC 之充填與間隙通過性能其最小鋼筋間距與採用之粗粒料粒徑之關係，單向鋼筋其淨距至少為 (2+ 3) 倍的粗粒料半徑，雙向鋼筋其淨距至少為 (2+2 2) 倍的粗粒料半徑。

因粗粒料用量會影響 SCC 之彈性模數 (E 值)，其較一般混凝土的彈性模數為低，故不宜降低粗粒料用量。依工程會施工綱要，SCC 粗粒料使用量參照表二之規定。

表二、SCC 粗粒料使用量之參考值

混凝土充填能力等級		1	2	3
構造條件	鋼筋最小間距 (mm)	30 60	60 200	200 以上
	單位體積鋼筋用量 (kg/m ³)	350 以上	100 350	100 以下
粗粒料之絕對體積 (m ³ /m ³)		0.28~0.31	0.30~0.33	0.30~0.36

一般每立方用量以不低於 760kg 為原則，又據中興大學之研究，若每立方用量在 900kg 以上，則可獲得工程性質較佳之 SCC。

細粒料

細粒料使用率 (S/A) 對 SCC 之工作性能亦有甚大的影響，當 S/A 大時，將難確保所需之流動度，而 S/A 小時，則容易產生材料析離現象，因細粒料之單位重量遠小於粗粒料，且懸浮優於粗粒料，有助於阻止粗粒料下沉，但在重力作用下相對運動之能力則遜於粗粒料，過量使用將降低 SCC 澆置時之自充填衝力。因此一般細粒料之細度模數在 2.5~3.2 間，SCC 之 S/A 建議在 48%~55% 間。

水

拌合用水不得含有油脂、酸類、氯化物、有機不純物及懸濁物等對混凝土及鋼材產生不良影響的物質達有害量。

「混凝土拌合用水須符合 CNS 13961 之規定。」

「拌合用水之檢驗應按 CNS 1237 之規定。」

摻料

「選用之摻料，以能達混凝土自充填及免振動搗實之性能需求，且對混凝土其他性質無妨害為原則。」

「礦物摻料品質可參考下列任一相關標準之規定：」

「飛灰或卜作嵐摻和物須符合 CNS 3036 之規定」

飛灰一般是指燃煤電廠所產生之煤渣物，是一種矽質（石英質）或矽質與鋁酸鹽（萊士質）之混合物，於潮濕及常溫狀態下，將與氫氧化鈣發生反應產生具有膠結力之矽酸鈣

化合物，此種性質稱為卜作嵐反應。反應過程中直接消耗 CH，而增加 C-S-H 膠體，填補混凝土間之空隙，提高粒料與漿體界面之鍵結強度，有助於降低混凝土透水性及提高耐久性。飛灰取代部分水泥，就像增多水泥成分 C_2S 一般，可降低水化熱，具有緩凝作用，若使用在巨積混凝土，效果更為顯著。

「爐石粉須符合 CNS 12549 之規定」

爐石粉末顆粒較小且圓、表面平滑、間細緻密，當用水量固定，可增加坍流度。工作性將隨著爐石粉顆粒愈細而愈增。爐石粉的卜作嵐反應可歸納出三要點：反應較慢，釋放的水化熱與強度較慢。此反應可消耗易溶於水之氫氧化鈣，可抵抗硫化物與鹼粒料反應，增加耐久性。可有效填塞空隙，故可逐漸增加強度與不透水性。使用爐石粉多以降低水化熱及鹼粒料反應為目的，其細度可分 4000、6000 及 8000 三級，目前使用以 6000 級較為普遍。

化學摻料

SCC 乃為全面提昇混凝土品質，使混凝土耐久堅固為目的，故降低單位用水量，使混凝土更為緻密化，以改善品質；在不增加單位用水量的情況下增加坍流度以改善施工性和減少單位水泥用量，以抑制水化熱等種種對策因運而生，上述幾項對策除添加礦物摻料外，添加化學摻料似乎是不可或缺。經驗證可採用強塑劑，高性能減水 AE 劑等。但摻用時需注意新拌階段時的坍流度損失為取捨依據。

六、配比設計

為滿足新拌混凝土之高流動及自充填性，水泥礦物摻料、粗細粒料、高性能減水劑（化學摻料）及含氣量等各材料須符合特定比例及規格，且應符合硬固後所設計之強度及其他所需之特質。

配比設計宜考慮下列諸因素：

各使用材料之基本性質

粗/細粒料之容積

漿體體積

水粉比例

含氣量（一般為混凝土容積之 1~3%）

高性能減水劑之使用

應通過充填等級之障礙通過試驗

配比設計強度要求

平均抗壓強度 f'_{cr} 應為設計強度 f'_c 之 1.15 倍；即 $f'_{cr}=1.15f'_c$ 。

使用三種不同水膠比（W/B）進行配比設計試驗。

每一試驗齡期至少需依 CNS 1230 或 CNS 1231 製作三個試體，不須分層澆置及不須搗實，圓柱試體抗壓強度試驗應按 CNS 1232 之規定辦理。

繪製試體抗壓強度與水膠比之關係曲線圖，以決定所需之混凝土水膠比。

配合設計建議值如表三。

配比計算

決定充填性能等級

決定使用粗/細粒料之最大粒徑

測定粗/細粒料、水泥、飛灰及爐石之比重

決定使用粗粒料之用量

決定含氣量

決定使用細粒料之用量

計算漿體體積

決定用水量

決定粉體體積

決定粉體量（以爐石粉、飛灰取代部分水泥）

決定強塑劑之用量

應注意事項

龜裂原因與配比之關係

龜裂原因	配 比
混凝土粒料下沉、浮水	單位用水量、稠度、微粒分量成分
水泥的水化熱	單位水泥量
混凝土乾燥收縮	單位用水量、單位水泥量

故如何減少浮水量，減少單位用水量，減少單位水泥量應是配比設計應重視的課題。

配比設計需設定能滿足高流動性、高抗析離性、自充填性、安全性、耐久性。

化學摻料選擇不但要具有高減水性，並需在混凝土澆置前保持良好且較長時間的高流動性使用化學摻料時，應確認對混凝土之凝結硬化、強度、耐久性沒有不良影響且以不腐蝕鋼筋為原則。

設計配比不應單單在試驗室作試拌，經室內試拌確認後，應做預拌廠實機廠拌，並確認其性質、性能及強度等符合規定。

新拌混凝土之水溶性氯離子含量依 CNS 13465 測定之值，不得大於表四之規定。

表四、細粒料及新拌混凝土水溶性氯離子含量規定

水溶性氯離子含量		
細粒料	預力混凝土	<0.012%
	鋼筋水泥混凝土	<0.024%
混凝土	預力混凝土	<0.15kg/m ³
	鋼筋水泥混凝土	<0.30kg/m ³

七、產製

配比廠(產)拌

配比選定後，須於混凝土預拌廠內進行廠(產)拌試驗，以確認採用此配比之混凝土在正式生產時，其品質均能符合規範之規定。

拌和廠

拌和廠之料倉、計量器、校正用標準砝碼、給水之計量設備等須符合 CNS 3090 之規定。

水、水泥、粗細粒料、礦物摻料及化學摻料，須使用各別的自動計量器計量其質量。而且水之計量器，須能分一次水計量及二次水計量，並能在各別之水量任意設定時間內自動放出。計量之許可差如下表五所示。

表五、計量許可差

材料	水	膠結料	礦物摻料	粗細粒料	化學摻料
許可差%	1	1	3	3	1

拌和機及攪拌機

拌和機及攪拌機須符合 CNS 3090 第 10 節拌和機及攪拌機之規定，均勻性試驗項目之「坍塌度」應改為「坍塌度」，最大許可差為 50mm(2in)。且抗壓強度試驗之試體製作可一次置入試模內(不分層、不搗實)。

拌和與輸送

拌和

預拌 SCC 應以中央拌和方式拌和，並輸送至指定之地點。

拌和時間必須由拌和機性能試驗決定之。

除契約規定外，氣溫低於 5°C 時，可以預熱水拌和，但應將熱水與粒料混合後再加入粉體。

除契約規定外，氣溫高於 32 °C 之炎熱天候施工時，得以等重冰屑替代部份拌和水，但冰屑應於拌和過程終全部融化。

以熱水或冰屑拌和前應確認溫度對化學摻料之影響。

化學摻料須於拌和時間內發揮其全部或部份性能以滿足工作性之要求。

輸送

輸送方式及設備的選定，應考慮 SCC 的高流動性及自充填性，並以不使其產生析離為原則。

輸送混凝土過程中，不得添加水及其他物料。

八、施工

澆置

KSCC 具高流動性(工作性)，澆置時以不振動、不搗實為原則，以免材料析離。其他任何引起材料析離之動作亦應避免(如以人力推送)。

澆置時，輸送管線及卸料口之配置應確保讓 SCC 有適當的流動性以達材料均勻分布之目的，且嚴禁加水。

澆置前應將埋設物表面雜物清除，模板表面應塗布適量脫模劑。由於油性脫模劑不利於 SCC 與模板接面之氣泡排出，若欲求得較平滑之表面，可採水性脫模劑，切忌振動。

nSCC 澆置時，模板之側向壓力應以完全液體計算(比重可以 2.35t/m³ 估計之)並加強模板支撐穩固性及密閉性(不應以傳統鐵線固定，採適當之模板繫條)。承包商應指派有經驗之工程人員隨時檢視模板之狀況。若發現不當沈陷、變形、變位、扭轉或嚴重漏漿等情形時，應立即停止澆置，經檢查並加強穩固後，方得繼續澆置。

預拌廠之供料應配合 SCC 的澆置速度，同時施工單位應妥善規劃泵送出料點，避免澆置中斷。

澆置作業時，新拌 SCC 不得靜置超過 30 分鐘。分層連續澆置時，應注意避免層間之澆置時間過長，以防層間介面有冷縫產生。

構造物之構件較深時或有死角處，在模板上應預留一些小開孔以排出空氣。澆置面若有斜度應注意 SCC 所具有之自平特性。

澆置過程中嚴禁振動搗實，若發生阻塞於鋼筋間隙之狀況可以現場棒狀工具疏通，並立即檢討充填性需求及充填能力之設計。

拆模時間應以試體強度為主要參考依據。

若自充填混凝土用於高樓泵送，應於品管計畫書內考慮高樓泵送對新拌混凝土的漿體損耗及坍流度損失。

澆置口應視工地情況及 SCC 特性事先規劃，並適時移動卸料口，不得任其自行流動過遠的

距離，以維持混凝土均勻性避免產生析離現象及充填不完整造成蜂窩現象。

養護

新澆置 SCC 應特別注重養護，尤其在天候炎熱、乾燥、風大、陽光曝曬的氣候，更應著重澆置完成後初期之養護時機。對於大面積暴露之混凝土面，可於澆置完成後即刻施以噴霧水、灑水或滯水，澆置完成 24 小時內須嚴防混凝土表面迅速凝結及水份蒸發過快等狀況發生，造成表面之微小塑性收縮裂縫，並應在初期(澆置後 48 小時內)隨時觀察混凝土乾縮情形。

養護時間不得少於七天。

九、檢驗

品質評定

品管人員應對 SCC 要有相當程度之認知，須受 SCC 教育訓練。

品質管制過程均應製成紀錄。

各項作業應有完整計畫並按計畫執行。

各項機具應以合格機具正確操作。

SCC 運抵工地時，應先核對送貨單上資料，包括運輸車號、工程名稱、送達地點、澆置位置、混凝土規格、設計坍流度、化學摻料、設計單位重、出廠時間等，並確認為本工程所需混凝土，以免錯用。

品質檢驗

澆置過程中應依契約所訂之頻率抽樣，確認新拌 SCC 以濕篩水洗法之粗粒料單位用量及標稱最大粒徑是否符合配比設計，以防粗粒料過少、過細造成混凝土硬固性質不佳。

ISCC 在澆置完成後，初期之濕治養護須嚴格落實執行，尤其在澆置後的第一小時內即應開始進行養護工作。

新拌 SCC 之品管試驗應包含下列一項或多項，並可視需要訂定檢驗頻率。

坍流度試驗

箱型或 U 型槽間隙通過試驗

V 型漏斗流出時間試驗

全量通過試驗

強度試驗應依 CNS1174、CNS1231、CNS1232 之規定辦理。

十、SCC 工程性質

粗粒料用量影響彈性模數及乾縮、潛變，使用時應詳加考慮充填性及結構用途，不宜追求過高之充填性而過分降低粗粒料用料。

ISCC 之彈性模數隨粗粒料用量降低而下降，故在設計時應先了解 SCC 之工程性質。

純混凝土及結構之 SCC 之乾縮與潛變量亦均與粗粒料用量有關，尚須試驗評估。

rSCC 因充填密實之故，其鋼筋握裹強度優於一般混凝土。

十一、結論與建議

SCC 於澆置過程不需施加任何振動搗實，可完全藉由自身流動性與充填性能填充鋼筋間隙及模板之各角落，減少人為施作不當並節省人力，改善傳統混凝土澆置因鋼筋過密或搗實不易

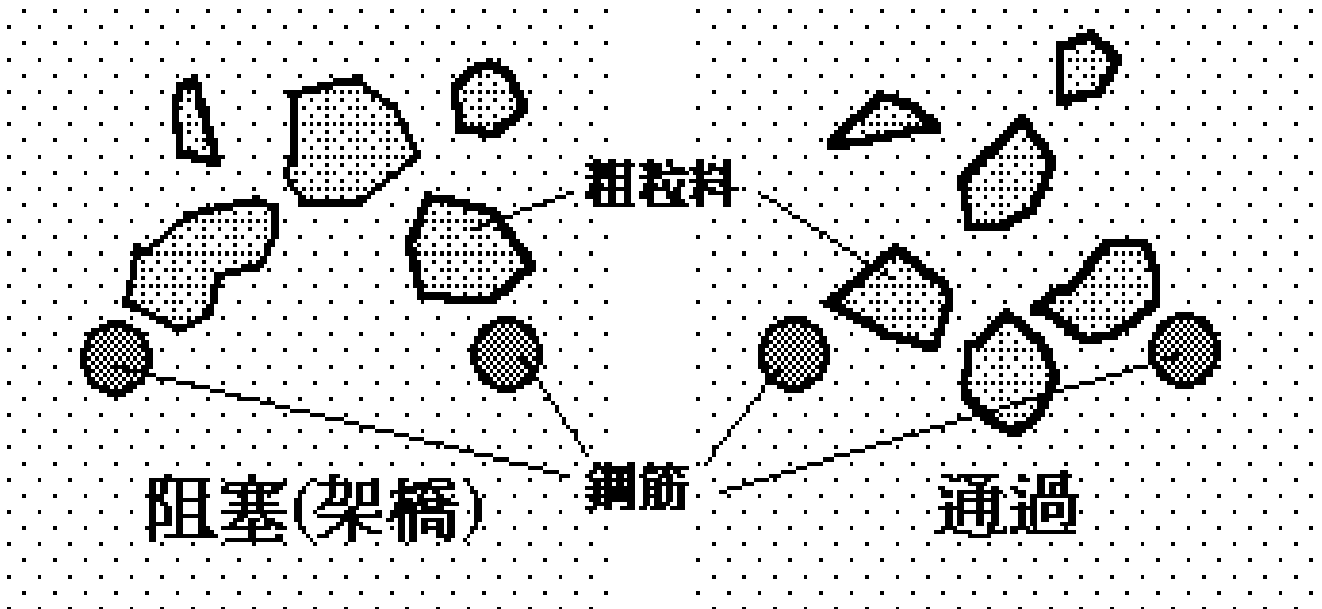
而造成「蜂窩」現象。在設計使用 SCC 前應先充分了解 SCC 之工程性質、施工規範及以往施工案例，俾確保設計及施工之品質。

橋梁跨越土石流潛在區域之河流時，因需考慮土石流對橋墩之衝擊影響及橋墩耐震設計之需求，橋墩均設計以全周式防衝鋼板包裹保護，並作為橋墩澆置混凝土模板之用，惟因一般橋梁橋墩尺寸大且因耐震設計主筋及箍筋間距甚密，混凝土澆置搗實不易與防衝鋼板間密合情形不佳，為此，將於中橫公路東勢至谷關段兩座橋梁工程於橋墩(台)試用 SCC 施工(約 1500m³)，藉以評估瞭解 SCC 之性質，若試用成果良好，則再考量試用於預力混凝土梁。

因 SCC 施工規範已由行政院公共工程委員會納入施工綱要規範第 03315 章，且民間工程及國道中二高皆已採用，目前因為普遍價格比傳統混凝土稍高約二~三成，惟因 SCC 具有品質佳、省工及減少噪音等之優越性，若能不降低粗骨材單位用量，減少對工程結構之影響，並俟對 SCC 之工程性質及品質控制能從學術界之研究及工程界之採用得到更多資料及更加瞭解後，希冀 SCC 能廣被使用，以達確保混凝土工程品質之目的。

參考文獻

- 一、行政院公共工程委員會「公共工程施工綱要規範」第 03315 章自充填混凝土。
- 二、陳育聖「自充填混凝土之工程特性」碩士論文，89.06。
- 三、台灣營建研究院「自充填混凝土之產製與應用」，91.10。
- 四、吳江富、陳志超、王永東「自充填混凝土之特性與應用」。
- 五、Chien-Hung Lin (林建宏) and Wen-Chih Lee “Shear Behavior of High-Workability Concrete Beams” ACI Structural Journal/September-October 2003



圖一、架橋現象表

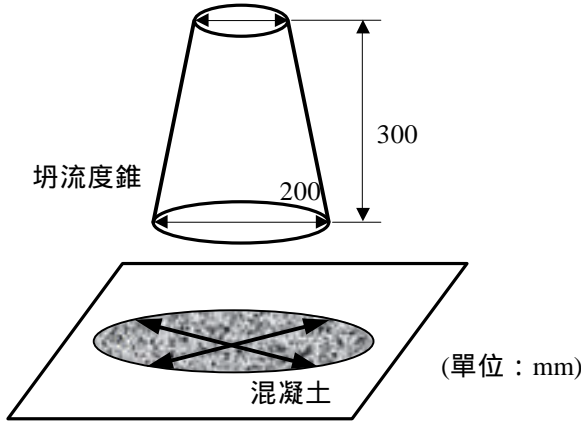
三、日本各研究單位之配比建議準則（國立台灣大學土木系詹穎雯教授整理）

材 料	條 件	備 註
粗粒料	鬆體積比 (G/G_{lim})=0.5	岡村甫 教授
	單位絕對體積 (m^3/m^3)、 $D_{max}=20\sim 25mm$ 粉體系：0.28 0.30(R1)、0.30 0.33(R2)、0.32 0.35(R3) 併用系：0.28 0.30(R1)、0.30 0.33(R2)、0.30 0.35(R3)	日本土木學會
	單位粗粒料用量 0.3 0.35 m^3/m^3	日本建築學會
細粒料	$V_s/V_m=0.4$	岡村甫 教授
	$V_s/V_m=0.4\sim 0.47$	日本土木學會 (粉體系)
	單位體積扣除粗粒料、含氣量體積及必要之漿體體積所剩餘。顆粒過粗易導致浮將、過細則流動性易受力量含水量變化影響。F.M.=2.5~3.0	日本土木學會 (其他)
	$V_s/V_m=0.48\sim 0.52$	日本建築學會
水膠比 W/B	0.85 拘束水比	岡村甫 教授
	0.85 1.15 (體積比) 0.28 0.37 (重量比)	日本土木學會 (粉體系)
	視使用性 (強度、耐久性) 工作性需求	日本土木學會 (併用系)
水	由水、粉體積比推算	岡村甫 教授
	155 175 kg/m^3	日本土木學會 (粉體系)
	由流動性和分離抵抗性決定	日本土木學會 (併用系)
	160 185 kg/m^3	日本建築學會
粉 體	由水、粉體積比推算	岡村甫 教授
	16 0.19 礦物摻料最大置換率：飛灰→30%水泥量；爐石粉→70%水泥 爐石粉+飛灰→ $(F/30) + (RSg/70) \leq 1.0$ ；矽灰→15%水泥	日本土木學會 (粉體系)
	由單位水量和水膠比決定，但未達良好的充填性，單位粉體量要 0.13 M^3/M^3	日本土木學會 (併用系)
	礦物摻料最大置換率： 飛灰→20%水泥量；爐石粉→60%水泥；矽灰→15%水泥	日本建築學會
含氣量	依實際需求或耐久性條件而定，耐凍融需 4.5%	日本土木學會
	4~7% (工程會 1~3%)	日本拌混凝土工會

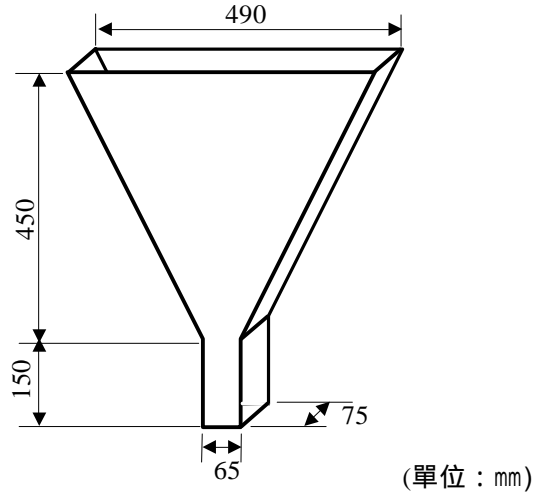
附錄一、SCC 相關性能試驗之目的及器具

1. 坍流度試驗

- 1.1 試驗目的：試驗新拌 SCC 流動能力。
- 1.2 試驗器具：如附圖 1。
- 1.3 試驗項目：坍流度、坍流度達 50cm 所需時間。



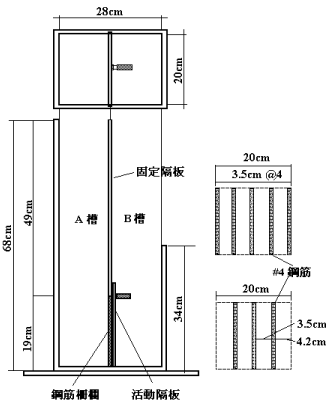
附圖 1 SCC 試驗用坍流度儀



附圖 2 SCC 試驗用 V 型漏斗

2. V 型漏斗流出時間試驗

- 2.1 試驗目的：試驗 SCC 稠度、析離性。
- 2.2 試驗器具：如附圖 2。
- 2.3 試驗項目：新拌 SCC 完全流出 V 型漏斗下方出口所需時間。



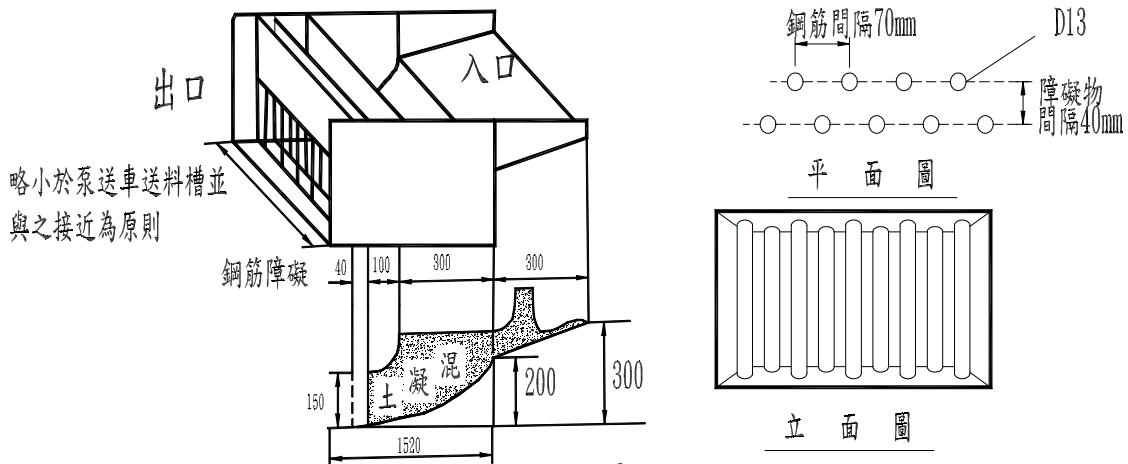
附圖 3 SCC 試驗用箱型槽

3. 間隙通過試

- 3.1 試驗目的：試驗新拌 SCC 通過鋼筋間隙及自行充填至模板角落之能力。
- 3.2 試驗器具：鋼筋障礙共有三種，其中第三種為無障礙，如附圖 3。
- 3.3 試驗項目：新拌 SCC 由 A 槽靜置 1 分鐘後流至 B 槽之高度。

4. 新拌 SCC 全量通過試驗

- 4.1 試驗目的：確定新拌 SCC 經過攪拌車及泵送之後仍能達到自充填的工作性。
- 4.2 試驗器具：使用 D13@7cm 鋼筋，如附圖 4。



附圖 4 全量通過試驗儀

附錄二、SCC 品管試驗方法

1. 坍流度試驗

任何取樣進行各種性能試驗之 SCC 樣品均應試驗其坍流度，坍流度試驗方法如下：

1.1 試驗用器具(詳附圖 1)

1.1.1 使用 CNS1176[混凝土坍度試驗法]規定之坍度錐。

1.1.2 具十足水密性及剛性 厚度 2.0mm 以上, 表面大於 0.8m x 0.8m 並足以於其表面繪設 50cm 圓形之鋼製平板。若設有握把, 其位置須不妨害測定坍流度。

1.1.3 坍流度用縮尺或讀數為 1mm 之量尺及測定用輔助器具。測定用輔助器具可為 L 形角鋼切割加工而成。倘能保證使用量尺即能夠正確測量時亦可不設測定用輔助器。

1.1.4 裝載容器用有 12 公升左右容量水桶。

1.1.5 馬錶, 使用能測到 0.1 秒的馬錶。

1.2 試樣依 CNS1174[新拌混凝土取樣法]規定

1.3 試驗步驟。

1.3.1 錐之內外面用布擦拭後置於水平平板上並以水平器確認之。

1.3.2 試樣以一次均勻填滿坍度錐內。

1.3.3 試樣填滿坍度錐須在 2 分鐘內完成。

1.3.4 將填滿混凝土之坍度錐頂面刮平, 並於 2 ~ 3 秒時間拉上 30cm 高度。拉高後俟坍度錐內混凝土停止流動, 量測擴散圓形的最大直徑及與其垂直的另一直徑, 兩者平均值即為坍流度值。量測次數一次即可。

1.3.5 50cm 坍流度到達時間: 拉上坍度錐開始至混凝土流到直徑達 50cm 的時間, 用馬錶計測到 1/10 秒。

1.3.6 測坍流度停止流動時間: 拉上坍度錐開始用目視確認混凝土停止流動的時間, 用馬錶計測到 1/10 秒。

1.3.7 量測時應同時觀察混凝土是否有析離(如粒料成堆聚於中央)。

1.4 試驗結果

1.4.1 坍流度以 cm 為單位, 量得的垂直兩直徑, 取其平均值時以 0.5cm 表示。

1.4.2 坍流度如偏離圓形, 而兩直徑相差 5cm 以上時須以同盤試樣重做試驗。

1.5 報告必須記載下列事項:

日期、天候、氣溫、編號、粒料最大粒徑、混凝土溫度、坍流度及 50cm 坍流度到達時間。

2.溫度量測

每一取樣檢驗之新拌混凝土樣品均應量測其溫度。溫度應不超過 32 。

3.空氣含量試驗

進行本項試驗應按 CNS9661[新拌混凝土的空氣含量試驗法(壓力法)]或 CNS9662[新拌混凝土空氣含量試驗法(容積法)]之規定，測定混凝土抗壓強度檢驗樣品之空氣含量。

4.單位重試驗

應按 CNS11151[混凝土單位重，拌和體積及含氣量(比重)試驗法]之規定測定混凝土單位重。

5.V 型漏斗流出試驗

進行本項試驗時應按下述規定方法測度之：

5.1 試驗用器具(詳附圖 2)

5.1.1 如附圖 2 上所示形狀、尺寸，容量 10 公升、內部平滑之鋼製混凝土試驗用 V 型漏斗。

5.1.2 漏斗試驗裝置設有支撐台，該支撐台以能調整水平、容易拆裝方便為原則。

5.1.3 漏斗放口、開口、可瞬間打開具水密性的底蓋、上端都必須磨光平滑。

5.1.4 漏斗試驗裝置以外，準備投料用容器(5 公升左右塑膠杯)、受料容器(12 公升左右)、上端蓋平用直尺、能測到 1/10 秒之馬錶、濕布等。

5.2 試料依 CNS1174[新拌混凝土取樣法]之規定。

5.3 試驗步驟

5.3.1 將洗淨之漏斗垂直(上面水平)設置，裡面用布擦乾。

5.3.2 排放口下放置受料盤。於填充 SCC 前，應先檢查排放口，並於確認操作正常後關閉底蓋。

5.3.3 將試樣用塑膠杯慢慢投入漏斗。

5.3.4 用蓋平尺將漏斗上面 SCC 抹平。

5.3.5 抹平完 10 秒內打開排放口底蓋，用馬錶計測全量排完時間，察看並記錄排放中是否有部份塞住現象。黏性較高 SCC，較難判斷瞬間排完時間，可從上面觀看下面排放口開口瞬間排完時間，以馬錶計測到 1/10 秒。另，排放流出時間在 5 分鐘以內以新試樣測 2 次以上為宜，此時漏斗用水洗淨後再做試驗。如可用試樣較少只能做 2~3 次，取其平均值作評價也可減少取樣偏差。

5.4 試驗結果

5.4.1 排放流出時間(秒)，計算至小數點 1 位。

5.4.2 記錄流下中途情況(如:有無阻塞現象)。

5.5 報告：在報告中必須記載下列事項。

5.5.1 SCC 配比

5.5.2 SCC 溫度

5.5.3 SCC 流出時間

6.間隙通過試驗(箱型或 U 型槽填充高度試驗)按下述規定測定 SCC 間隙通過能力：

6.1 試驗用器具(詳附圖 3)

6.1.1 填充裝置應使用十分堅固表面平滑材料，並以透明者為佳之 U 型或箱型容器。各部尺寸如附圖 3 所示。

6.1.2 填充裝置中央配置有柵狀障礙物，該流動障礙物由 D10 竹節鋼筋 5 支組成(R1)或由 D10 竹節鋼筋 3 支組成(R2)。

6.1.3 填充裝置中央部份設活動隔板，用可開關隔板將裝置分隔成兩室(A 室、B 室)構造。A

室和 B 室能保持平衡時 B 室的高，U 形計算上為 365mm；箱形計算上為 345mm。此兩數字表示這裝置最大填充高度，但容器尺寸誤差，隔板、開關門厚度都會影響最大填充高度。為準確起見可測試 B 室的靜水位，確定使用裝置的最大填充高度。

6.1.4 如需稱量通過流動障礙之粗粒料量，可利用在 B 室下方的採樣閘門。

6.1.5 填充裝置以外需要準備投料容器(約 5 公升)、刮平用刮刀、讀數 1mm 量尺、測至 1/10 秒馬錶、濕布等。

6.2 試驗

6.2.1 填充裝置垂直放置，上面水平。

6.2.2 裝好填充裝置隔間門的流動障礙隔板。

6.2.3 容器內面、隔間門、流動障礙隔板用濕布擦乾淨。

6.2.4 關閉隔間門，將 SCC 試料置入 A 室，不使用搗棒或敲打連續置入至 A 室上端。

6.2.5 用金屬製規尺或鐵抹刀除去多餘試料後再用刮刀抹平，靜置 1 分鐘。

6.2.6 一口氣拉開隔間門，SCC 就通過流動障礙流入 B 室，充填 B 室至靜止流動。

6.2.7 B 室容器底端至填充 SCC 上面高度，用量尺測到 1mm 為填充高度 B_h (mm)，測容器寬方向兩端及中央 3 處。

6.2.8 從開隔間門至 B 室停止填充時間用馬錶測到 1/10 秒就是填充時間 B_{time} (秒)。

6.3 報告：在報告中必須記載下列事項。

6.3.1 配比。

6.3.2 SCC 溫度。

6.3.3 坍流度。

6.3.4 坍流度達 50cm 所需時間。

6.3.5 使用之填充器種類。

6.3.6 流動障礙種類。

6.3.7 填充高度 B_h 。

6.3.8 填充時間 B_{time} 。

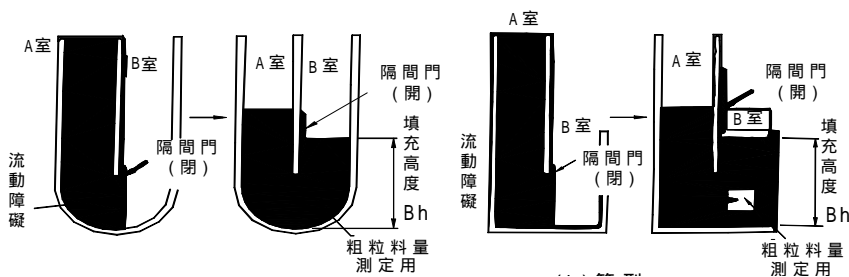
7. 現場全量通過試驗(於工地可以間隙通過試驗取代)

7.1 混凝土於送達工地時須先經過本項試驗，試驗裝置如附圖 4 所示。

7.2 試驗

7.2.1 混凝土需由運輸攪拌車卸入本裝置之入口，流經兩排鋼筋障礙後，經出口進入泵送機。如混凝土可通過本裝置代表混凝土具有所需要的充填性能，同時可確保混凝土經泵送後仍有其流動性能。無法通過本裝置之混凝土，則應以退車處置。

7.2.2 鋼筋障礙使用 D13 鋼筋間距 70mm 雙排間距 40mm，適用混凝土最大粗粒料粒徑 20mm；本裝置之全寬可依實際泵送機尺寸、能量及運輸攪拌車數量作適當調整。施工時並須注意全量通過速率與澆置速率之配合。



附圖 5 間隙通過試驗填充高度示意

八卦山隧道工程施工計測管理與回饋分析

*吳耀焜 **張宏德 ***羅國峰

一、前言

八卦山隧道工程為國內少數穿越卵礫石層之長、大型公路隧道。由於以往卵礫石層之隧道施工經驗並不多見，因此工程界對於卵石地盤隧道之工程特性並未清楚之掌握。由於 NATM 工法之基本理念係利用隧道周圍岩盤之自承能力，輔以柔性支撐構件，使得地盤之自承能力得以完全發揮，以期達到開挖後應力平衡之目的。因此，於隧道開挖之施工進行過程中，必須藉由施工計測，掌握地盤及支撐之行為，並藉以進行回饋分析及研判。本文擬藉由八卦山隧道工程所進行之施工計測管理與回饋分析之作業之情形加以說明，以作為日後本局其他類似隧道施工之參考。

二、八卦山隧道工程

2.1 工程概要

東西向快速公路漢寶草屯線八卦山隧道工程，西起彰化縣員林貫穿八卦山台地至南投縣頂寮附近，為十二項建設計劃所規劃興建東西向十二條快速公路漢寶草屯線唯一之隧道工程，全長左線 4928m、右線 4935m；其型式為雙孔單向雙車道，雙車道寬 7.5m，車道淨高 5.1m，其單一斷面開挖面積為 117 m²，最低設計速率為 80 km/hr，路面縱坡：0.5% < SC < 2.0%，平曲線最小半徑 800 m。其間並設有通風豎井乙座，內徑 9.5m，深度 240m，隧道機電附屬設備包括：通風、照明、電力、監控及防災等，並配置有機房三座。本標工程係由公路總局東西向快速公路中區工程處第五工務段承辦，承包廠商為中華工程股份有限公司，開工日期為 85.11.15，預定完工日期為 93.6.13。由於本隧道工程困難度高，因此特委由財團法人中華顧問工程司辦理監造。未來本工程完工通車後（斷面示意圖如圖一），將成為國內第二長之公路隧道，亦為漢寶草屯線完成之關鍵工程。

2.2 地質條件

八卦山隧道穿過之主要地層為頭料山火炎山相礫石層，依其特性大致可分為砂質粉土層及礫石層。砂質粉土層厚薄不一，以粉土層為主或以黏土層為主；粉土層以扁平之中細砂及黏土

*公路總局東西向快速公路中區工程處第五工務段段長

**財團法人中華顧問工程司八卦山隧道監造工程處經理

***公路總局西濱公路南區工程處工務員、國立成功大學土木工程研究所博士班研究生

夾少量小礫石為主，結構疏鬆；黏土層則以黏土為主，夾不等量細砂，塑性較高，厚度約 0.8m 1.0m。礫石層中礫石含量平均約 70 80%，通過 #4 篩比例約 20 35%，礫石粒徑大者約達 40 50 公分，礫石間之細料成份以青灰色粗、中砂及棕黃粉砂質泥岩為主。大部份礫石均屬輕度風化、礫石層膠結不佳，礫石極易剝落，偶有較細之礫石夾粗砂，內所夾之砂層或黏土層常呈薄層或透鏡狀，亦有部份呈巨厚狀，可達 2 公尺以上。圖二為地電阻法 (Resistivity Method) 之調查結果。由圖中亦可發現三個低電阻區域 29k+800、30k+070 及 30k+330 等，推估此區域應為地層中地下水含量較高之區域或此區為低電阻所組成之材料地層，而其所形成之局部摺皺現象，成因應與八卦山西麓造山運動由東向西推擠有關。

由於隧道工程岩體分類法中常用之南非 CSIR 之 RMR 及挪威 NGI 之 Q 法，係以材料強度、RQD、弱面特性、現地應力等影響因素區分不同等級而給予地盤不同評分，進而以量化分數分類之，而此分類系統所考量之評分因子並不適用於卵礫石地層。因此八卦山隧道之地質分類則以定性方式，參酌日本與歐美類似地質條件之隧道分類，並將卵礫石之力學行為列入考量。由於卵礫石層之透水性較高(其透水係數約為 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ cm./sec)，而且其滲水為一全面性之現象，惟若含有沉泥層或粘土層等，其滲水將局部集中在界面流出，基於地下水對不同卵礫石層開挖穩定性均具整體性之影響(若地下水存在時)，應於隧道開挖、支撐構件架設前，即先行處理地下水，包括止水及排水工法，並在此前提下進行地層之分類。

本工程之地層分類係就隧道開挖中所遭遇地層之力學特性，加以定性評估分類，作為訂定開挖方式、輪進長度及選定支撐類型之依據。由於本隧道之地層不同於一般岩石隧道，其地層分類以地層特性為依據將地層分為 D、DII、Co、C、CII 洞口段等六類，其中 D 及 D 係針對火炎山相卵礫石層，Co CII 則係針對砂岩層、泥岩層及其互層而定，如表一所示，而地層分類與開挖支撐型式如表二、三。

另外由於地盤內地下水滲出，亦可能將卵礫石層顆粒間之填充細粒料連帶掏洗出，而造成卵礫石膠結性質之破壞。依據地質調查階段之水位觀測井及所蒐集之隧道沿線既有水井之水位資料顯示，隧道段含有兩層較厚之不透水層，兩不透水層皆成背斜狀，其間之兩個含水層皆為火炎山相礫石層，上方第一含水層中，地下水位隨著乾雨季變化而有很大的變動，雨季時水位上升，乾季時期明顯下降，水井之水位變化相當明顯。

2.3 施工方法

由於本隧道工程所在位置之地質條件為低凝聚性之卵礫石地層，其開挖及支撐過程中，隧道內空變形及地層變形之控制極為重要，特別是覆蓋層厚度、卵礫石膠結性及地下水等為影響隧道開挖面(含頂拱、側壁)穩定性之關鍵因素。過大之頂拱沈陷極易造成隧道整體不穩定，進而造成抽心崩塌。因此本隧道應用 NATM 工法觀念設計，並以噴凝土、鋼線網、岩栓及鋼支保為支撐構件維持壁面之穩定。當遭遇地質條件惡劣者，則配合輔助工法(如管幕工法、固結灌漿、雙側導坑及強制抽排水等)進行之，現地施工情形如圖三 圖八。

開挖程序採用短台階之施工方式，開挖分上半斷面、台階及仰拱。施工時採全能班施工方式，以期爭取最佳之施工時效。開挖方法經評估比較鑽炸法與機械開挖兩者後，決定採用以挖土機(back hole)與破岩機(rock breaker)為主之機械開挖方式，再以鬆土機(ripper)修挖斷面，以避免因隧道鑽炸造成地表地層鬆動。襯砌分為兩層，第一層為外襯砌，內含鋼絲網、自鑽式岩栓、噴凝土及鋼支保及其它輔助之支撐構件；第二層為襯砌混凝土，係現場澆注混凝土。

三、計測管理

3.1 計測管理之目的

計測管理之工作，在於確保施工之安全性及經濟性。在施工前參考理論分析及數值解析或類似條件下之隧道施工實績，於規劃設計階段即研擬管理基準（隧道頂拱、側壁及內空變位之速率及最大變位量）與因應之對策。施工期間，則依據各斷面之地盤條件、計測值之長時變化及計測項目之相互關係。另考量地盤力學特性及其他項目監測結果，進行回饋分析研判並視需要調整開挖方式、支撐構件、支撐計畫及管理基準，作為施工控制之依據。簡言之，現地計測之主要目的：

- 1.確保隧道周圍岩盤之安定。
- 2.做為現場施工管理之指標。
- 3.作為將來工程規劃設計參考。

3.2 計測項目

一般而言，NATM 工法之現場計測可分為計測 A 類與計測 B 類。其分類之原則，計測 A 類係指日常定期之施工管理為副計測斷面，而計測 B 類則視地盤條件而選定辦理者，係代表性檢測，為主計測斷面。各類之檢測項目如下：

(一)計測 A 類：

- 1.隧道內觀測調查
- 2.內空變位測定
- 3.頂拱沉陷測定

(二)計測 B 類

- 1.岩栓拉拔試驗
- 2.襯砌應力測定
- 3.地中變位測定
- 4.岩栓軸力測定
- 5.地表、地盤內沉陷測定
- 6.隧道內彈性測定

八卦山隧道於設計階段即因應施工需要擬定隧道計測計劃，包括：

第 I 類計測斷面，儀器包括：頂拱沈陷觀測釘（1 點）收斂岩釘（5 點，3、6、9 m/點）伸縮儀（5 點，3、6、9 m/點）計測岩栓（5 點，3、6、9 m/點）及噴凝土應變計（7 或 10 點），此計測斷面用於代表性地盤。

第 II 類計測斷面，儀器包括：頂拱沈陷觀測釘（1 點）收斂岩釘（5 點，3、6、9 m/點）伸縮儀（5 點，3、6、9 m/點）及噴凝土應變計（7 或 6 點），此計測斷面每 200~500m 設置乙處。

第 III 類計測斷面，儀器包括：頂拱沈陷觀測釘（1 點）收斂岩釘（5 點，3、6、9 m/點），此計測斷面每 25~50m 設置乙處。

在全長約 5km 隧道中，左右線分別設置類別 III 221 處，類別 I、II 為主計測斷面，左右線分別設置 35 處。各項計測儀器，於開挖後 12 小時內安裝完成並讀取初始值。原則上，安裝七

天內，每天測讀一次；第八天起，每三天測讀一次；經一個月後，每週測讀一次至收斂變形趨於穩定為止，惟地質狀況特殊時，得調整其量測頻率，隧道計測斷面類別示意圖如圖九。

3.3 計測管理基準與處理對策

隧道工程之施工計測管理基準之訂定、直接影響施工安全、工期及對策，因此必須考量整個隧道之斷面大小、地質條件等因素訂定之。本標工程係依據本隧道之設計時數值解析之成果，並參考 Sakurai (1982)及 Franklin (1976)之建議值，以變位速率及最大變位量二者中任一項先達者為優先管理基準，而制訂本隧道計測管理基準如表四。而當實際計測值及坑內觀察情況達頂拱、內空變位之速率最大變位量和坑內檢查之三種基準時，則分別採行報告、計測儀器檢查確認、加強計測頻率等施工管理等級如表五與處理對策如表六。

四、回饋分析

4.1 回饋分析原則

施工期間利用現地計測值，藉助回饋分析反求得岩體參數及現地應力，據以分析後續開挖所引致岩體及支撐構件等應力及應變，並且考量施工現況，綜合研判開挖方式及支撐系統之實用性及安全性。隧道施工中，隨著施工階段之不同，必須分別執行計測回饋分析：

1. 上半斷面開挖階段
2. 台階開挖階段
3. 仰拱開挖階段

本工程之回饋分析係採用日本櫻井教授之逆解析理論所發展之逆分析有限元素法回饋分析程式 ISNA-DBAP。應用現場計測資料反推求得實際開挖地層之岩體參數及初始應力場，並以數值模擬方式預估地層變形趨勢及支撐變形受力狀態，據以分析後續開挖所造成之影響，進而調整預估變形量、支承形式及輪進長度。

4.2 回饋分析成果

各階段施工於現地收集資料完成後，即由專業人員開始進行回饋分析 (feedback analysis)。一般回饋分析之成果以下列內容為主：

I. 隧道開挖及支撐構件之檢討

其中包含噴凝土 (軸力及彎矩) 之安全係數檢討、岩栓拉力與破壞力之比較、岩體應變與岩石材料破壞應變之比較及隧道開挖方式及支撐構件強度之檢討。

II. 開挖方式及支撐構件調整之建議

以分析應力構件值除該構件當時之強度可得安全係數。再由綜合評估可研判支撐構件及開挖方式及輪進長度是否適當，必要時並提出調整方案

III. 預留變形量和管理基準之檢討及建議

由回饋分析之隧道斷面變形量與設計階段預留變形量進行比較，可判斷預留變形量是否需要調整。另外，回饋分析之變形量可綜合研判頂拱沈陷、內空變位之絕對量和變形速率等管理基準是否需調整。

五、應用實例

以東口右線（30K+250~30K+200）縱向變位之統計資料分析比較（如圖八），其中厚砂夾礫石膠結差全面滲水之地盤，穩定性最差，因此常需管幕工法、固結灌漿及強制抽排水等輔助工法，以期穩定開挖之地盤。其中頂拱變位 L1 為 40~50cm 者約佔 2%，側壁變位 H1 超過 40cm 者約佔 1%（如圖九、十）。以下則擬取本工程之東、西洞口之左右線各一，共計四個計測斷面之資料，進行回饋分析。

5.1 基本資料說明

本次分析係依據 2002.06.16~2002.06.30 期間八卦山隧道現地計測資料，進行回饋分析。經評估後，本次之分析斷面為東口左線 EL106、東口右線 EL104、西口左線 WL113、西口右線 WR100 等四處計測斷面，其定期量測之資料如表七。

5.2 隧道變形分佈

一般而言，在相同之地盤覆土厚度下，產生有不對稱之變形分佈，即表示有明顯之潛在危險。其中最大變形量發生位置顯示斷面潛在可能之龜裂區域。另回饋分析所得部分數據略有不同於量測結果（所得統計數據如表八），係因考慮前期變形量所致，各斷面變形分佈圖如圖十一

圖十四，其中 EL106、ER104 及 WR100 之最大變位均發生於頂拱，惟 WL113 之最大變位發生於約 60 度處，因此本位置應特別注意地盤偏壓之產生及後續發展。

5.3 隧道主應力向量分佈

良好之岩體在圍壓不大之正常情況下，主應力向量在隧道開挖面附近最大，再漸次減小到初始應力。主應力向量如圖十五 圖十八，其中向量分佈密集處即為主應力集中區，此將有潛在造成岩體破壞之能力；若分佈越小則必須考慮張力破壞之可能性，所得之統計結果如表九所示。另依據主應力等值圖（圖十九 圖二十二），施工時應特別注意其支保腳之潛在破壞能力，可考量導、排水措施，以降低水位及水壓至仰拱位置以下，惟應注意於抽排水過程中避免淘出細粒料。

5.4 隧道剪應力分佈等值圖

若岩體之破壞由莫爾庫倫準則所控制，則紅色區域為最可能之潛在危險區域，如表九所示，應注意剪應力之破壞（圖二十三 圖二十四）。

5.5 綜合研判

東口左線綜合各項資料回饋分析，計算所得之地盤彈性模數約為 6085 kg/cm^2 ，襯砌噴凝土應力 195 kg/cm^2 （本標工程噴凝土設計強度 $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$ ），顯示此段岩盤性質及襯砌受力偏大，惟由長時之頂拱變形記錄，本測計斷面已逐漸脫離岩盤之不安定區段，惟台階開挖長度仍應以短台階為原則。

東口右線綜合各項資料回饋分析，計算所得之地盤彈性模數約為 6692 kg/cm^2 ，襯砌噴凝土應力 101 kg/cm^2 ，顯示其襯砌受力狀況仍在安全範圍內。

西口左線綜合各項資料回饋分析，計算所得之地盤彈性模數約為 8618 kg/cm^2 ，噴凝土襯砌應力 69 kg/cm^2 ，顯示其襯砌受力狀況尚屬正常，惟內空變位紀錄顯示變形過份集中於右上側，應特別注意其後續發展，必要時得採取灌漿補強。

西口右線綜合各項資料回饋分析，計算所得之地盤彈性模數約為 7452 kg/cm^2 ，噴凝土襯砌應力 62 kg/cm^2 ，顯示其襯砌受力狀況尚屬正常，若現地施工許可，應考慮輪進長度及台階開挖長度加大。

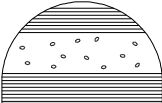
六、結論

1. 隧道計測過程中，常因施工人員之忽略而損毀或移動原有計測儀器，而導致以往之施工紀錄無法延續或有奇異點產生，而致前功盡棄，應特別留意並加以保護。
2. 有鑑於台灣地質條件之複雜，日後隧道施工之計測斷面數量、位置及內容，應更具彈性、機動性，以隨時掌握地盤變動之情形。
3. 隧道工程利用回饋分析進行穩定性評估之施工計測管理方式已可迅速預測即將施工區間之危險性，惟為避免危險之施工處理對策，仍須靠現地工程師依據各項記錄及地盤狀況之經驗進行判斷。
4. 由於八卦山隧道工程之施工難度極高，目前施工已累積諸多之施工記錄與經驗，實屬難得。未來應將各項資料逐步整理及歸納，以供本局全體同仁參考，以作為日後卵礫石地盤工程設計規劃參考之用。


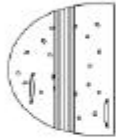

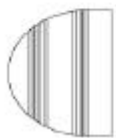

參考文獻

1. 財團法人台灣營建研究院，「東西向快速公路漢寶草屯線八卦山西麓補充地表地質（含空洞）調查及評估工作報告」，第 37 頁，2001。
2. 財團法人中華顧問工程司，「公路局東西向快速公路漢寶草屯線 E407 標細部設計報告」，台灣省公路局委託，台北，1993。
3. 財團法人中華顧問工程司，「交通部公路局東西向快速公路漢寶草屯線 E407-1 標計測回饋分析報告，第 110 期」，91 年 6 月 16 日~91 年 6 月 30 日。
4. 梁樾、湯輝雄、周允文、何泰源，「八卦山卵礫石層隧道施工案例探討」，第一屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，第 973-977 頁，1999。
5. 林炳森，「隧道新奧工法監測之個案分析」，地工技術雜誌第 10 期，第 62 頁-第 78 頁（1985）。
6. 何泰源、陳卓然，「北二高基隆隧道之回饋分析與施工計測管理」，隧道工程技術、機具及工法研討會第三冊第 6-1 頁 第 6-29 頁，1997。

表一 八卦山隧道地層分類表

地層類別	地 層 特 性	地質剖面參考圖示
C0	砂岩無其他夾層，固結及膠結佳，質地堅實。	
C1	砂岩與泥岩互層或粉砂岩與泥岩互層，偶夾礫石層。	
CII	泥岩或泥岩為主夾砂岩、粉砂岩或礫石層	
DI	卵礫石層或卵礫石層夾有凸鏡體粉砂層、砂層，固結及膠結較佳，係指須以地質錘方能將礫石敲落之狀態。	
DII	卵礫石層夾凸鏡體粉砂層、砂層或泥層，固結及膠結較差。	
洞口段	覆蓋土層厚度 2D之隧道洞口段。(D:隧道開挖寬度)	

表二 八卦山隧道地層分類與開挖支撐型式表

地層分類	DI	DII	CO	CI	CII	洞 口 段
標準 斷						
地 層 特 性	卵礫石層或卵礫石層夾凸鏡體粉砂層、砂層，固結及膠結較佳，係指須以地質錘方能將礫石敲落之狀態。	卵礫石層夾凸鏡體粉砂層、砂層或泥層，固結及膠結較差。	砂岩無其他夾層，固結及膠結佳，質地堅實。	砂岩與泥岩互層或粉砂岩與泥岩互層，偶夾礫石層。	泥岩或泥岩為主夾砂岩、粉砂岩或礫石層。	覆蓋土層厚度≤ 2D 之隧道洞口段 (D:隧道開挖寬度)
上半斷 輪進(I)	10~12M	0.8~1.0M	1.2~1.5M	1.0~1.2M	0.8~1.0M	0.8~1.0M
岩 栓	岩栓 L=4.0M@2.5M5.0 支/M L=6.0M@2.5M3.63 支/M	岩栓 L=4.0M@1.75M7.22 支/M L=6.0M@1.75M7.78 支/M	灌漿岩栓 29φ L=4.0M@2.5M4.09 支/M L=6.0M@2.5M4.55 支/M	灌漿岩栓 29φ L=4.0M@2.5M4.19 支/M L=6.0M@2.5M4.55 支/M	灌漿岩栓 29φ L=4.0M@1.5M7.22 支/M L=6.0M@1.5M7.78 支/M	自鑽式岩栓 L=4.0M@2.5M3.33 支/M L=6.0M@2.5M7.78 支/M

表三 八卦山隧道地層分類與開挖支撐型式表 (續)

噴凝土	T:25cm B:25cm	T:30cm B:30cm	T:20cm B:20cm	T:25cm B:25cm	T:30cm B:30cm	T:30cm B:30cm
鋼線網	T,B:2-5/5mm (100×100)	T,B:2-5/5mm (100×100)	T,B:2-5/5mm (100×100)	T,B:2-5/5mm (100×100)	T,B:2-5/5mm (100×100)	T,B:2-5/5mm (100×100)
鋼支保	T,B:H-125×125 @1.0M~1.2M	T,B:H-150×150 @0.8M~1.0M	T,B:MU29/TH29 @1.2M~1.5M	T,B:MU29/TH29 @1.0M~1.2M	T,B:MU29/TH29 @0.8M~1.0M	T,B:H-200×200 @0.8M~1.0M
開挖面封面噴凝土	T:局部5cm B:局部5cm	T:局部5cm B:局部5cm	T:局部5cm B:局部5cm	T:局部5cm B:局部5cm	T:局部5cm B:局部5cm	T:局部5cm B:局部5cm
仰拱	設仰拱	設仰拱	設仰拱	設仰拱	設仰拱	設仰拱
自鑽式岩栓 (支撐鋼管)	T:部份 栓L=3M	T:全面 栓L=3M	T:部份 栓L=3M	T:部份 栓L=3M	T:部份 栓L=3M	T:部份 自鑽式岩栓L=3M

表四 八卦山隧道計測管理基準

計測管理基準				
項目等級	變位速率		最大變位量	
	頂拱及側壁	內空	頂拱及側壁	內空
控制基準	5 mm/day	5 mm/day	40 mm	40 mm
警戒基準	10 mm/day	10 mm/day	70 mm	70 mm
行動基準	15 mm/day	15 mm/day	150 mm	150 mm

表五 隧道施工管理等級與對策

管理等級	管理基準	計測管理	施工管理	處理對策
平常	計測值 < 控制值	<ul style="list-style-type: none"> 定時計測及提送報告 	<ul style="list-style-type: none"> 依原計劃施工 	—
第一次警戒 (綠燈)	控制基準 ≤ 計測值 < 警戒基準	<ul style="list-style-type: none"> 向駐地工程司提出報告 檢查計測儀器 計測每天1次 原因分析 	<ul style="list-style-type: none"> 注意施工作業 強化現場狀況之檢查 管理對策檢討 	—
第二次警戒 (黃燈)	警戒基準 ≤ 計測值 < 行動基準	<ul style="list-style-type: none"> 強化計測管理 原因分析 檢討管理基準 計測每天1~2次 	<ul style="list-style-type: none"> 注意施工作業 強化現場狀況之檢查 實施處理對策 	處理對策A
第三次警戒 (紅燈)	計測值 ≥ 行動基準	<ul style="list-style-type: none"> (同上) 計測每天2次 	<ul style="list-style-type: none"> 暫時停止開挖工作 實施處理對策 	處理對策B

表六 隧道施工管理等級與對策 (續)

校核點	施工中之現象	處理方式 A	處理方式 B
		以較簡易之措施即可處理之方法	須以增設支撐等較大幅度變更之方法
開挖面及開挖面附近之地層	開挖面趨於不穩定	<ul style="list-style-type: none"> 縮短輪進之長度 以保留土心之方式開挖 開挖面噴漿 施作擋板、miniroof pipe等 	<ul style="list-style-type: none"> 縮小斷面 採用開挖面安定工法(如開挖面、岩栓等) 施作地層改良
	開挖面頂部之面層脫落增多	<ul style="list-style-type: none"> 縮短開挖時間及施予早期噴漿。 施作面層脫落防止措施(擋板,miniroof pipe等) 縮短輪進長度 分割開挖斷面 	<ul style="list-style-type: none"> 增設鋼肋 施作地層改良
	開挖面出現湧水或湧水量增大	<ul style="list-style-type: none"> 提早噴凝土硬化(增加急結劑量) 施作噴凝土之排水處理 施予細目之鋼絲網 施予排水膜(sheet) 	<ul style="list-style-type: none"> 施作排水工法(洩水鑽孔、深井、點井等) 施作地盤改良(止水)
	地層之承载力不足,使沉陷趨大	<ul style="list-style-type: none"> 以不損傷支承地層之方式開挖 加厚趾部之噴凝土以增大支承面積 	<ul style="list-style-type: none"> 增加岩栓 縮短台階長度、面積使早期閉合 以噴漿施作臨時仰拱 施作地層改良
	產生隆起	<ul style="list-style-type: none"> 施予仰拱之早期噴漿 	<ul style="list-style-type: none"> 於仰拱亦打設岩栓 縮短台階長度、使早期閉合 採用微台階工法(mini)
噴凝土	噴凝土浮離或脫落	<ul style="list-style-type: none"> 開挖後儘可能施予早期噴漿 加放鐵絲網(mesh) 排除湧水壓 增加噴凝土厚度 	<ul style="list-style-type: none"> 打設岩栓或增設岩栓
	由於噴凝土之應力增加,產生裂痕或剪力破壞	<ul style="list-style-type: none"> 加放鋼絲網(mesh) 設伸縮縫(slit)於噴凝土 	<ul style="list-style-type: none"> 增設岩栓(較原設計長) 視情況加設可縮型鋼支保
岩栓	由於岩栓之軸力增大,使承壓板(anchor plate)變形或岩栓斷裂	—	<ul style="list-style-type: none"> 增設岩栓(較原設計長) 使用耐力較大之岩栓 為增加岩栓之變形能力,視情況加設壓縮體於墊板間
鋼肋	因鋼肋之應力增加而導致彎曲	<ul style="list-style-type: none"> 以鬆開銜接部之螺栓,剷除噴凝土等,以便得以可縮 	<ul style="list-style-type: none"> 增設岩栓(較原設計長) 使用耐力大之螺栓 鋼支保設為可縮型;噴凝土設伸縮縫
地中表沉及陷地	地表沉陷或地中沉陷趨大,沉陷速率增加	<ul style="list-style-type: none"> 以較長之mini piperoof施工 縮短由開挖至支保之時間 縮短開挖長以早期抑制地盤 以保留土心方式開挖 	<ul style="list-style-type: none"> 縮短台階長度以提早仰拱之閉合 改換為臨時仰拱工法 施予地盤改良
地中變位	地中變位趨大,鬆動區異常擴大	<ul style="list-style-type: none"> 縮短開挖至支保之時間 提前打設岩栓 	<ul style="list-style-type: none"> 打設或增設岩栓(較原設計長) 加設鋼支保 縮短台階以施予早期閉合 改換為微台階或臨時仰拱工法 施予背填灌漿或地層改良
內空變位	內空變位趨大,變位速率加快	<ul style="list-style-type: none"> 縮短由開挖至支保時間 提前打設岩栓 縮短台階、仰拱輪進長度 當噴凝土產生裂痕時,宜增設伸縮縫 	<ul style="list-style-type: none"> 增設岩栓(較原設計長) 縮短台階以施予早期閉合 為增加岩栓之變形能力,視情況加設壓縮體於墊板間 改換微台階或增設仰拱工法

表七 現地計測斷面量測資料

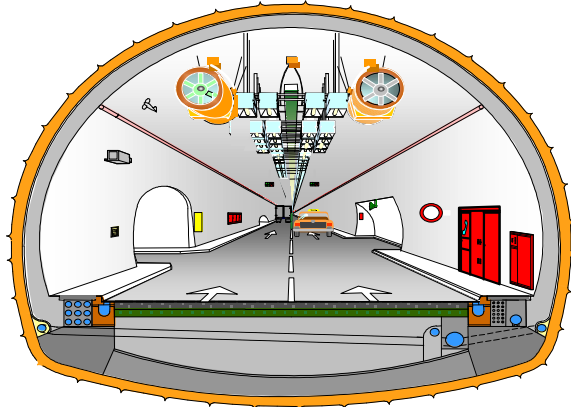
分析斷面	覆土高度 (m)	支撐類別	量測日期 (y/m/d)	量測數值 (mm)			
				D1	D2	H1	L1
EL106 (29K+949)	271	DII	2002/03/11	-0	-0	-0	-0
			2002/06/30	-63.9	-57.7	-116	-114
ER104 (30K+008)	230	DII	2002/03/03	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
			2002/06/30	-37.5	-39.8	-73.6	-93
WL113 (29K+466)	220	DII	2002/06/13	-0	-0	-0	-0.0
			2002/06/30	-50	-47.1	-72	-50
WR100 (29K+163)	156	DII	2002/05/13	-0	-0	-0	-0.0
			2002/06/30	-12.26	-13.97	-23.38	-47

表八 回饋分析斷面變形統計表

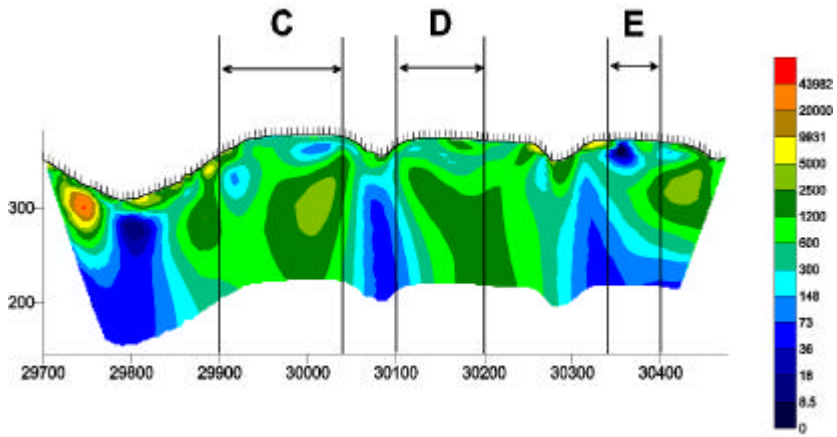
分析斷面	分析時機	總變形量 (mm)	發生位置
EL106	台階	109	頂拱
ER104	台階	90	頂拱
WL113	上半斷面	83	頂拱右側
WR100	上半斷面	49	頂拱

表九 最大主應力向量統計表

分析斷面	最大主應力向量值 (kg/cm ²)	/ H	剪應力值 (kg/cm ²)	潛在破壞區
EL106	197.5	3.64	65.1	支保腳
ER104	154.3	3.35	50.3	支保腳
WL113	333.2	7.57	107.5	支保腳側面
WR100	101.6	3.25	31.3	支保腳側面



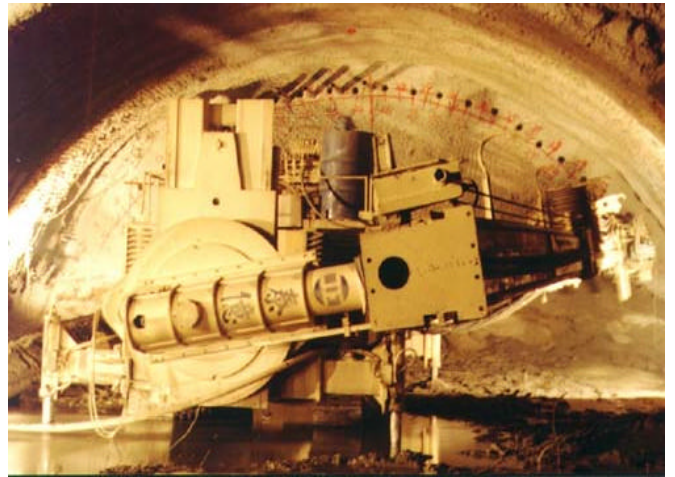
圖一 八卦山隧道斷面完工示意圖



圖二 八卦山隧道沿線地電阻調查探測成果



圖三 隧道上半斷面開挖



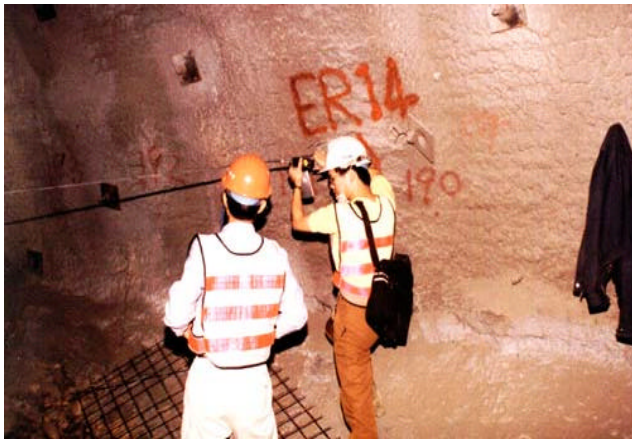
圖四 管幕工法鑽設



圖五 臨時仰拱噴凝土施工



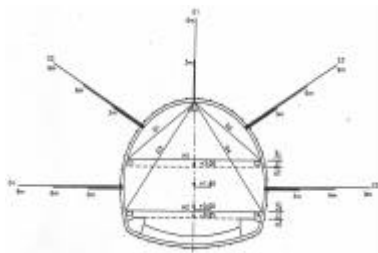
圖六 雙側導坑施工



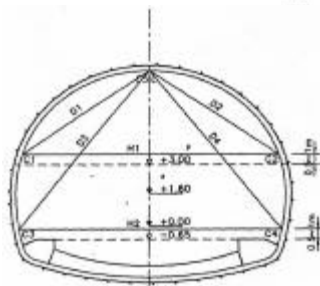
圖七 隧道施工計測



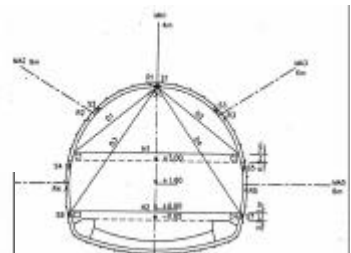
圖八 隧道全斷面完成



(a) 類別 I



(c) 類別 III



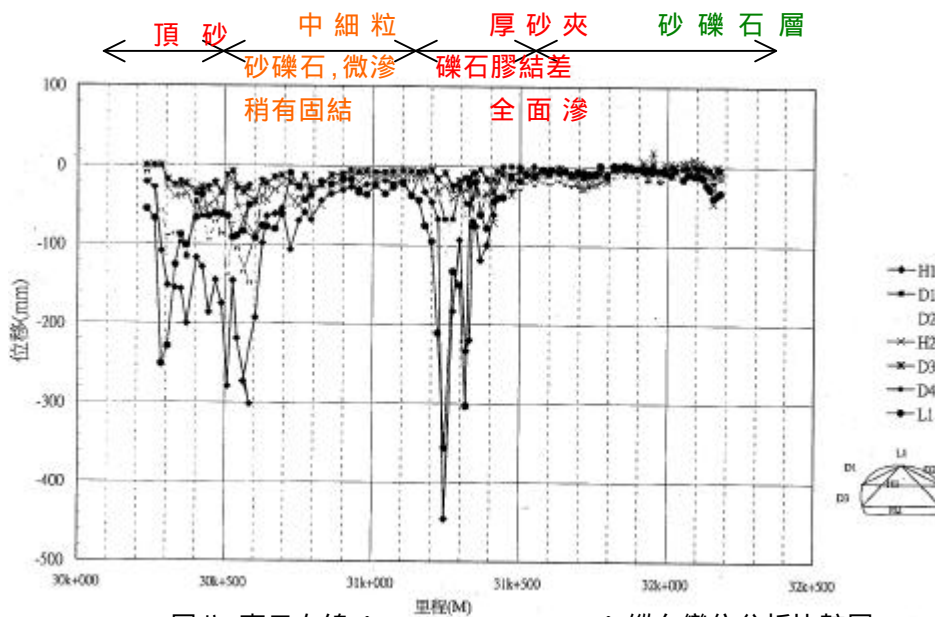
(b) 類別 II

主隧道計測			
計測類別 (m)	設置間距 (m)	計測斷面 (處)	
		左線	右線
I	200	25	25
II	500	10	10
III	20 (覆土 > 25m)	190	190
	10 (覆土 < 25m)	31	31

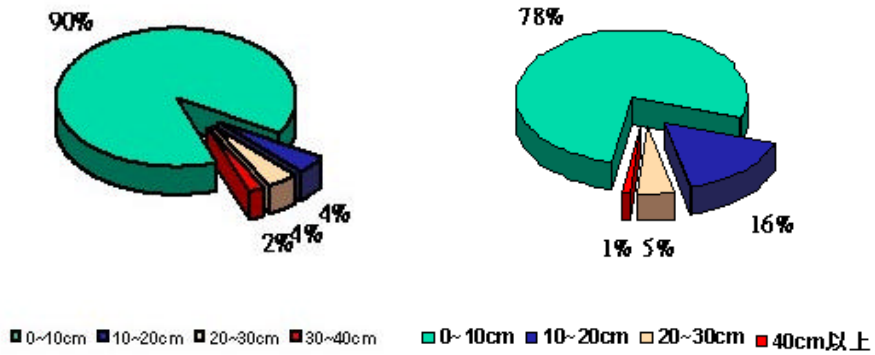
圖例：C-收斂岩釘、L 沈陷觀測釘、E 伸縮儀、MA 計測岩釘、S-噴凝土應變計 H-水平變位觀測、D-斜向變位觀測、R-徑向應力計

(d) 隧道計測斷面示意圖

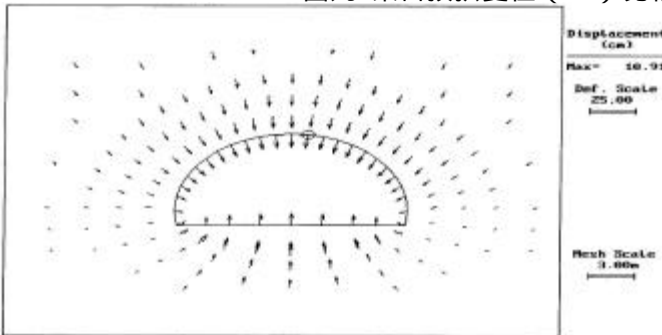
圖九 隧道計測斷面類別示意圖



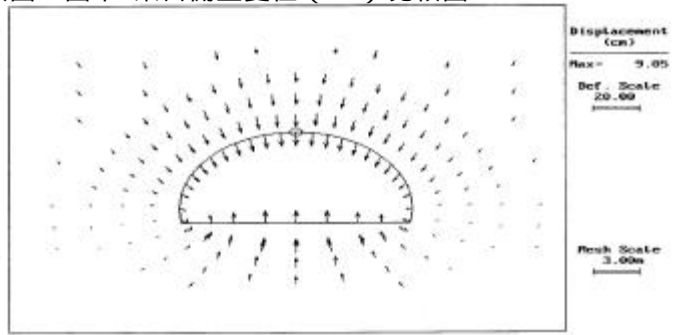
圖八 東口右線 (30K+250~30K+200) 縱向變位分析比較圖



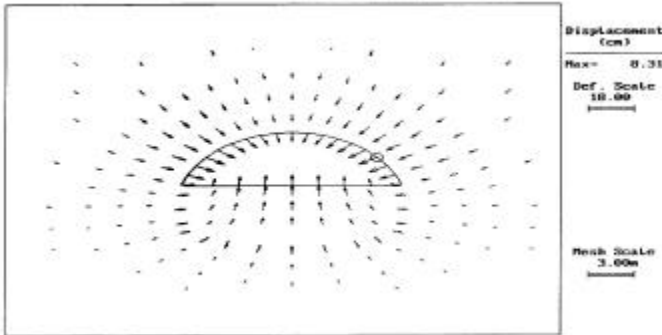
圖九 東口頂拱變位 (L1) 比較圖 圖十 東口側壁變位 (H1) 比較圖



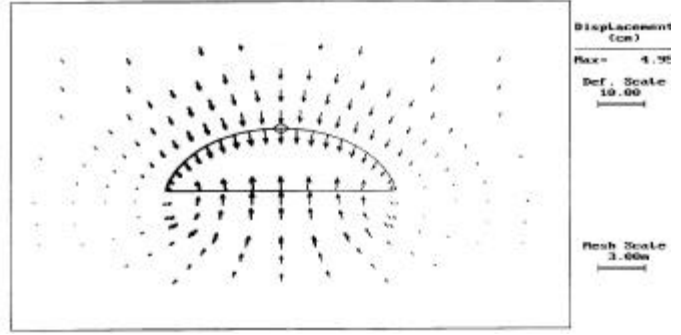
圖十一 EL106 變位向量圖



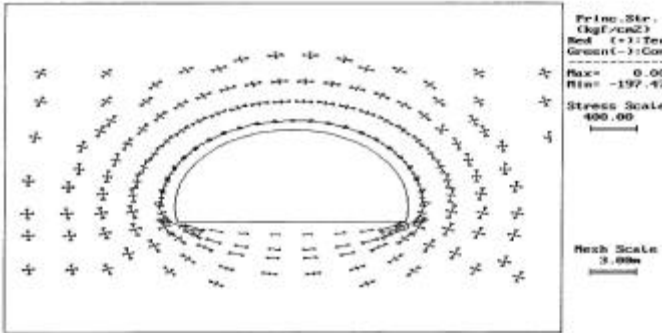
圖十二 ER104 變位向量圖



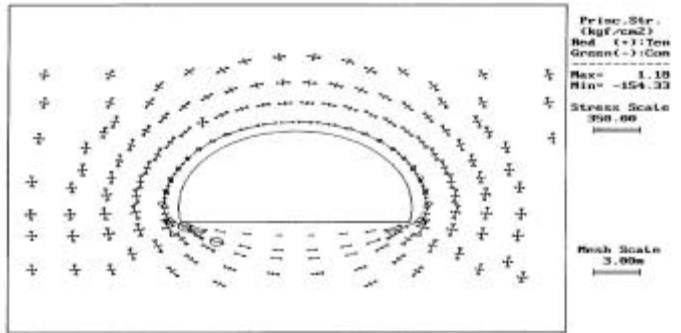
圖十三 WL113 變位向量圖



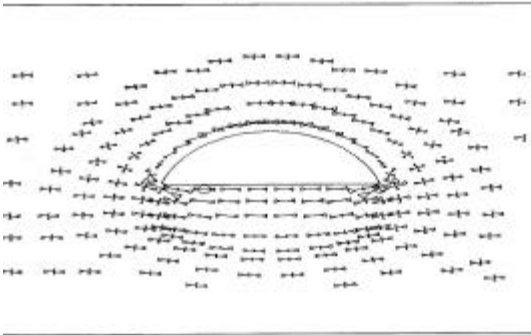
圖十四 WR100 變位向量圖



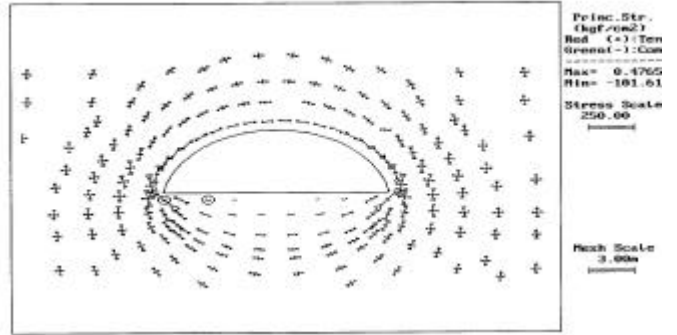
圖十五 EL106 主應力向量圖



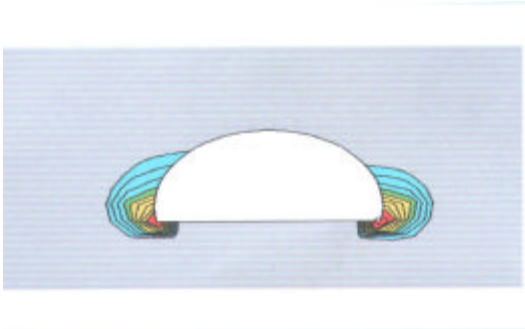
圖十六 ER104 主應力向量圖



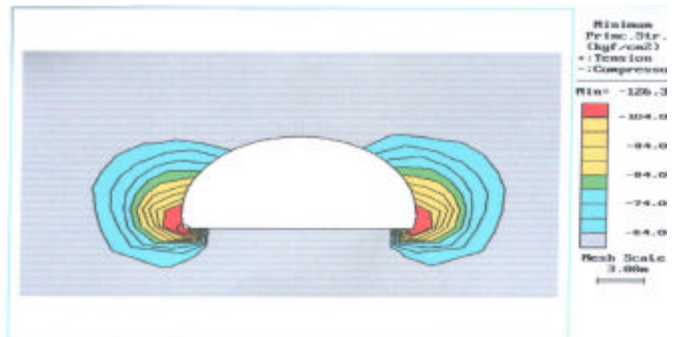
圖十七 WL113 主應力向量圖



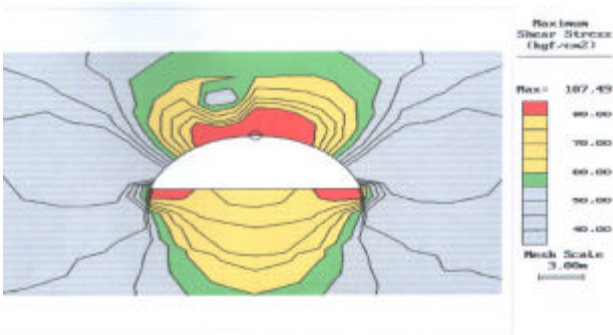
圖十八 WR100 主應力向量圖



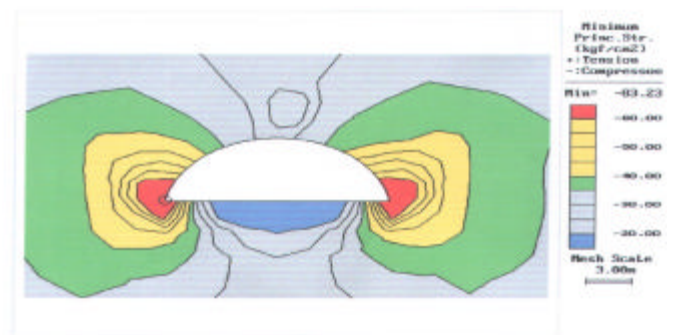
圖十九 EL106 主應力等值圖



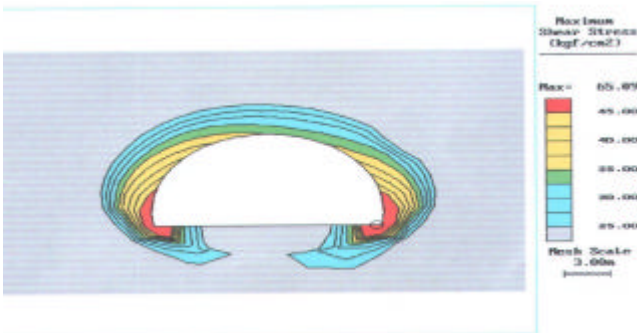
圖二十 ER104 主應力等值圖



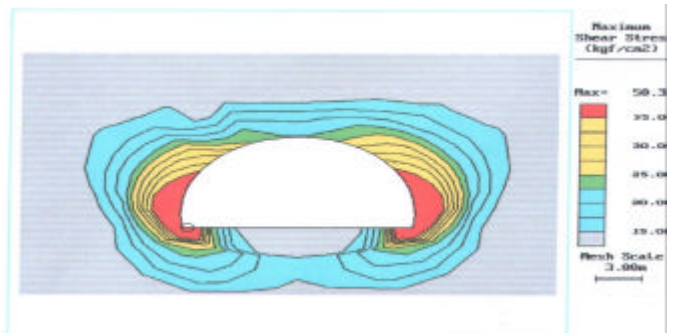
圖二十一 WL113 主應力等值圖



圖二十二 WR100 主應力等值圖



圖二十三 EL106 剪應力等值圖



圖二十四 ER104 剪應力等值

評估高分子改質瀝青之工程性質

*林志憲 **陳偉全

摘要

採用改質瀝青時，改質材料特性需與瀝青混凝土的生產流程適度配合，例如乳化橡膠瀝青所用橡膠乳液，需在瀝青混凝土拌合過程中加入，並需延長拌合時間；而橡化瀝青或高剪率瀝青，則必須在改質瀝青的生產工廠中，先將改質劑及瀝青材料以高溫高速攪拌若干時間後，再將改質瀝青運至瀝青拌合廠，依一般瀝青混凝土生產流程生產。改質後的性質也必須重作拌合與滾壓溫度試驗才可運用於現場鋪築，這些改變帶給現場工程師極大的挑戰，因此本研究針對高分子改質瀝青在實際應用前，先行評估試驗室性質，作為材料選用之參考。

一、前言

瀝青混凝土路面經常產生車轍、龜裂、剝脫等破壞，實有採用改質瀝青來改善鋪面破壞問題的必要，在國外道路發展經驗中⁽¹⁰⁾，應用高分子改質瀝青於鋪面材料上，能增加瀝青混凝土的勁度模數，有效解決鋪面破壞的問題，一般採用的高分子改質劑(polymer modifier)不僅能增加抗車轍的能力，亦能改善低溫破裂的問題。高分子改質劑的種類眾多，但並非每種都能夠促進瀝青的改質，使用上大致可分為兩種⁽¹¹⁾，包含(1)塊狀聚合高分子(block copolymer)：如苯乙烯-丁二烯(styrene-butadiene, SB)、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(或稱聚丁二烯)(styrene-butadiene-styrene, SBS)、苯乙烯-異戊二烯-苯乙烯(styrene-isoprene-styrene, SIS)、苯乙烯-乙烯-丁二烯-苯乙烯(styrene-ethylene-butylene-styrene, SEBS)等；和(2)熱塑性材料(thermoplastic)：如低密度聚乙烯(low-density polyethylene, LDPE)、乙烯-醋酸乙烯共聚體(ethyl-vinyl-acetate, EVA)和乙烯-丙烯-二烯(ethylene-propylene-diene monomers, EPDM)等。每一種高分子添加劑都有其特殊功效，以聚丁二烯(SBS)為最常使用，此因其試鋪後對於路面抗車轍變形上效果顯著，另外對於疲勞破壞、低溫破裂、剝脫和老化等也有不錯的改善情形⁽⁴⁾。然而對於 SBS 添加量的多寡並無定論，一味增加 SBS 用量，除了成本提高外，對改質瀝青整體性質的影響探討仍相當缺乏；本研究將針對改質瀝青的流變行為與工程性質作分析，深入探討不同高分子添加量之間的變化，提供道路工程主管機關或瀝青製造業界參考，進而提昇道路使用年限，減少維修費用。

*私立高苑技術學院兼任講師

**私立高苑技術學院副教授兼系主任

二、文獻回報

2.1 高分子的發展

“polymer”這個字源自於希臘文，意謂“很多部分”的意思。現今以化學來描述高分子，是表示由很多不同成分的東西所聚合起來的。一般高分子材料可分為天然與人造，天然的高分子材料如：橡膠(rubber)和纖維(cellulose)；而人造的高分子材料則是由原油提煉的產品所合成。近年來在交通量與車軸重量激增下，國外早已致力於添加高分子改質劑於瀝青膠泥中，主要是借重高分子的下述多項優點以促進瀝青的改質，使得原本的瀝青膠泥能夠達到下述要求：

- 一、促進瀝青在高溫時的黏滯度，以防夏天鋪面產生車轍變形。
- 二、增加瀝青在低溫時的柔度，以防冬天鋪面開裂。
- 三、增加瀝青張力強度以抵抗在重複荷重下的疲勞破壞。
- 四、減少瀝青的溫感性。
- 五、增進瀝青膠泥耐久性。
- 六、預防瀝青膠泥提前老化。

而最常使用的高分子首推以聚丁二烯為基底的材料(polybutadiene-base)，尤其在美國公路機關多採用 SBS，在於它具有比其他種類改質劑有更多的功能，尤其是在抗車轍變形上效果顯著，另外對於疲勞破壞、低溫破裂、剝脫和老化等也有不錯的改善情形⁽⁴⁾。

2.1.1 SBS 的結構

SBS 是一種熱塑性(thermoplastic)材料，顧名思義就是由苯二烯-丁二烯-苯二烯(styrene-butadiene-styrene)所組成的塊狀聚合高分子(block copolymer)材料。一般 SBS 可分為兩種，一種是線狀(liner)，即 SBS 以一直線的方式排列而成，因此線狀的 SBS 與瀝青的拌合工作性會較佳；而另一種則稱為星狀(branch 或 radial)，望文生義即 SBS 的排列方式有如樹枝狀，能夠緊緊的纏繞瀝青分子。加入 SBS 這樣的三塊狀分子(triblock)可在瀝青中形成網路(network)。兩端的苯二烯形成網狀區域，負責纏結瀝青分子，中間的丁二烯則提供此網路中的彈性部分⁽⁶⁾，並吸收瀝青中的油質以膨脹體積，增加 SBS 在瀝青中的相位⁽¹⁾。

一般用來作瀝青改質的 SBS，其苯二烯/丁二烯(styrene/ butadiene)的比例為 30/70 左右，而分子量大約在 100000 以上。其製造過程是利用聚合作用(polymerization)，將 SB(styrene-butadiene，稱為雙塊狀高分子，diblock copolymer)的尾端以化學聯結(coupling)的方式形成了連續的三塊狀高分子(triblock copolymer)的 SBS，而沒有完全連結作用(coupling)而殘留的 SB 也存在於 SBS 中，而這些殘留的 SB 約占 SBS 的 10%-25%，因為 SB 少了一端的連結力，因此其連結力會較差⁽⁹⁾。所以當我們採用 SBS 作為瀝青改質劑時，我們要考慮到 SBS 中的 SB 含量有多少，若含過量 SB 可能表示 SBS 製造過程的聚合作用不佳，進而影響瀝青改質效果。

2.1.2 高分子改質瀝青

在交通量與車軸重的激增，以及純瀝青溫感性的考量下，傳統的 60/70 或 85/100 瀝青早已

不敷使用，採用高分子改質瀝青是勢在必行的方法了，但必須考量高分子與瀝青本身的相容性 (compatible)，鋪築工程時的工作性和其成本與維修的費用，因此要了解二者相混合時的連結行為，才能決定使用何者為佳。

使用高分子改質劑時，當改質劑的添加量達到某一臨界值(critical concentration)時，黏結料中能經由交聯作用(crosslink)或纏繞作用(entanglement)形成網狀結構(network)，前者在不同分子間有產生化學作用，形成共價鍵，後者僅是長分子捲繞形成。此二機制如圖 1 所示。此網狀結構在化學上稱之為纏繞連結(entanglement coupling)，起因於高分子量的非定型高分子材料經由纏繞而糾結在一起，形成具有彈性的網狀組織，一般可以由改質瀝青的主曲線在高溫(或低頻)時，表現出不隨溫度或頻率改變的行為反應出來。當此網狀結構形成時，改質瀝青的抗車轍能力，抗疲勞能力及抗老化能力均有顯著提昇。

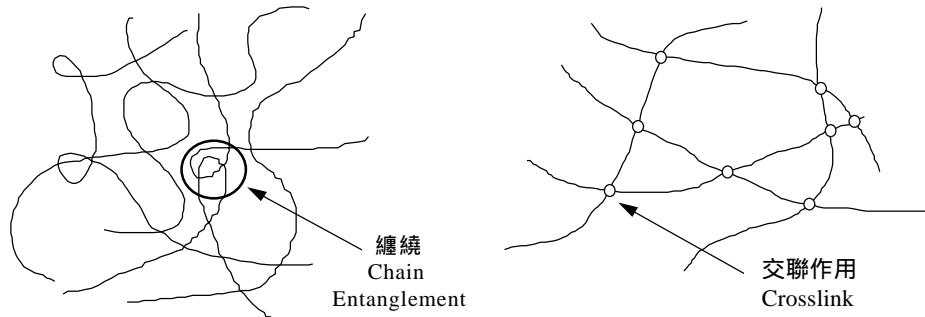


圖 1 經由纏繞或交聯作用形成網狀結構

2.1.3 高分子改質瀝青的結構

改質劑以多層相(multiphase)存在，並分散(dispersed)至瀝青膠泥內，於分散作用時，將產生不相容度(degree of incompatibility)，尤其在儲存、處理黏結料，生產運送瀝青混合物及鋪面施工時，經常發生物理、溫度與化學分離機制，而影響其績效。苯乙烯塊共同聚合物(styrenic block copolymers)，被用來改善瀝青黏結料的物理與質流性質，以及瀝青混凝土的績效。此種聚合物由玻璃狀聚苯乙烯與橡膠狀聚丁二烯組成，於鋪面服務溫度內，以兩種分開相(separate phase)存在，如圖 2 所示三度網狀硬體結構，苯乙烯球體有如物理交互作用，傳佈力量於系統上，於 100 以上，軟化成流體有剪力作用，因此容易混合進入瀝青中。於冷卻後，形態自然改變成為橡膠狀增加黏結料彈性性質⁽¹³⁾。Shuler 等人以 3% 與 6% 的苯乙烯塊共同聚合物，添加於 AC-5 基底瀝青，認為可以增加其軟化點、黏度、延展性、韌性與黏性，減小針入度。比基底瀝青黏結料更有彈性，亦即在量測溫度下，高聚合物含量的瀝青黏結料，其 \tan 值低，顯示有更多彈性。

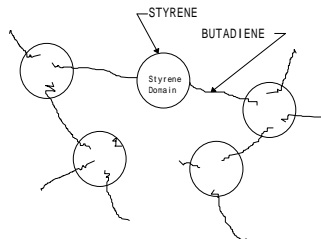


圖 2 苯乙烯-丁二烯塊共同聚合物示意圖⁽¹³⁾

2.2 高分子材料之流變行為

在早期為了得到更佳的材料，將各種高分子材料依各種比例添加拌合是為重大發展，因此動力力學分析(dynamic mechanical analysis)就格外重要。瀝青膠泥的分子量在 200-3000 間，也是高分子材料，因此改質瀝青應從高分子的複合理論觀之。高分子材料的流變行為亦是隨著溫度與時間而改變，因此為了解高分子複合材料在拌合前個別的性質與在拌合後混合的結構機制，利用動力力學分析可讓我們知道材料特性，最重要的是，能夠預測複合材料在何種使用範圍內發揮最大功效。

在 FHWA 採用 SHRP 的 Superpave 黏結料規範內，使用動態剪力質流儀(dynamic shear rheometer, DSR)量測瀝青黏結料的黏彈特性。於 1997 年，Dongre 等人比較了八個試驗室的試驗結果，認為試驗者的技術與訓練可以說明在各試驗室間的一些變異性，不同結果誤差的主要來源，取決於儀器型式、製造商、應力或應變、溫度控制。因此提出使用 Cannon N2700000 黏度標準(viscosity standard)作為一種參考材料來界定質流試驗的精確度，經統計分析比較結果，此種標準參考材料，對於 DSR 試驗的品質保證與品質控制確有潛在的用處⁽⁸⁾。

未來的瀝青試驗和規範應是朝向科學化且有理論根據為基礎，並考量瀝青材料受溫度與載重時間的影響，可以 DSR 計算剪應力 t 與剪應變值 g ，如式 1 與 2。式中， T 為最大扭矩， θ 為轉動角， r 為試體半徑及 h 為試體高度。

$$= \frac{2T}{pr^3} \quad (1)$$

$$= \frac{qr}{h} \quad (2)$$

於材料線性黏彈(linear viscoelastic)範圍內，應力與應變均是時間的正弦函數，如式(3)及式(3)，對於相位角在 0 至 90 度的黏彈材料以星號 * 表示。式中， S_0 為最大之應力(Pa)， ω 為頻率(1/sec) t 為時間(sec)， e_0 為最大之應變及 δ 為相位角(°)。

$$* = S_0 \exp[i(\omega t + \delta)] \quad (3)$$

$$* = e_0 \exp(i \omega t) \quad (4)$$

從虎克定律可得到複合模數 G^* 為複合應力與應變的比值⁽⁷⁾，如下式：

$$G^* = \frac{S^*}{e^*} = \frac{S_0}{e_0} \cdot \exp(i\delta) \quad (5)$$

利用尤拉定理 [$\exp(i\delta) = \cos \delta + i \sin \delta$] 將複合模數(G^*)分為兩部分，如下式：

$$G^* = \left(\frac{S_0}{e_0} \right) \cos \delta + i \left(\frac{S_0}{e_0} \right) \sin \delta \quad (6)$$

另代換後以下兩式表示：

$$G^* = G' + iG'' \quad (7)$$

$$\tan \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{G''}{G'} \quad (8)$$

G' 是代表材料的能量儲存部分，亦為彈性部分； G'' 代表材料的能量消散部分，即為黏性部

分, $\tan \delta$ 代表黏性部分與彈性部分之比值, 因此利用動態力學分析配合各種黏彈模式, 能夠適用於多相的複合材料分析⁽³⁾。利用 DSR 量測瀝青在溫度與頻率範圍內的複合模數 G^* (complex modulus)與相位角 (phase angle)等質流性質, 其試驗原理如圖 3 所示, 儀器對瀝青施以一正弦的扭矩來回往復旋轉, 以量得瀝青的質流參數, 由於瀝青膠泥是黏彈性, 具有黏滯的延遲特性, 因此會產生一相位角, 相位角與複合模數 G^* 有一個畢氏直角三角形的關係, 如圖 4 所示, 在低溫時, 相位角趨近於 0 度, G^* 接近 G' , G' 為儲存模數(storage modulus), 表示材料能量仍儲存著, 此時行為為彈性; 而在高溫時, 相位角則趨近於 90 度, G^* 接近 G'' , G'' 稱損失模數(loss modulus), 表示材料能量受熱損失, 此時行為為黏性; 在一般鋪面使用的溫度範圍所產生之相位角在 0 度與 90 度間, 其行為是黏彈性兼具⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

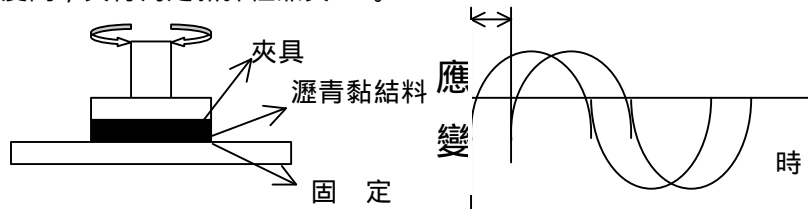


圖 3 動剪質流儀(DSR)試驗原理

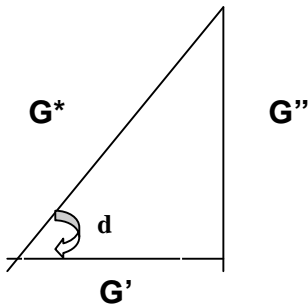


圖 4 複合模數 G^* 與相位角 δ 的關係

美國瀝青協會 AI 以複合模數 G^* 與相位角 δ 來描述瀝青黏結料之質流行為, 複合模數 G^* 為重覆剪力作用下變形總阻抗, 由圖 5 可知其分成 G' (彈性可恢復部份)與 G'' (黏性不可恢復部份)兩部份。圖 6 顯示兩種 G^* 相同, 但 δ 不同之瀝青材料, 瀝青 B 比瀝青 A 有較大彈性變形及較低黏性變形。

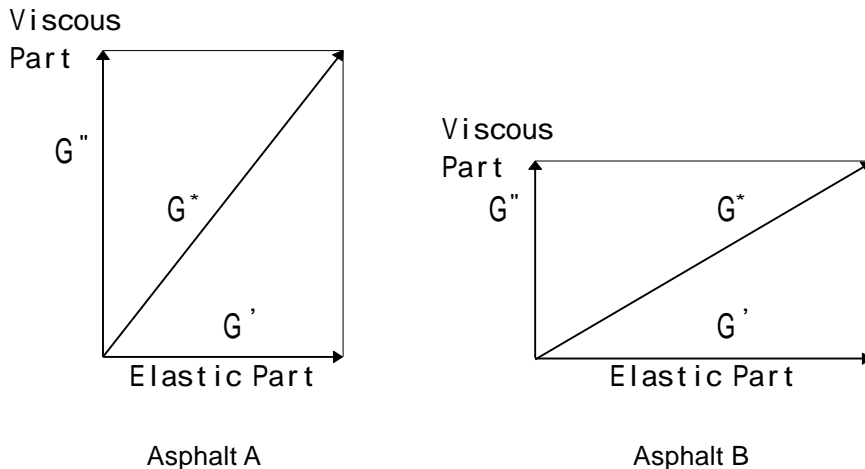
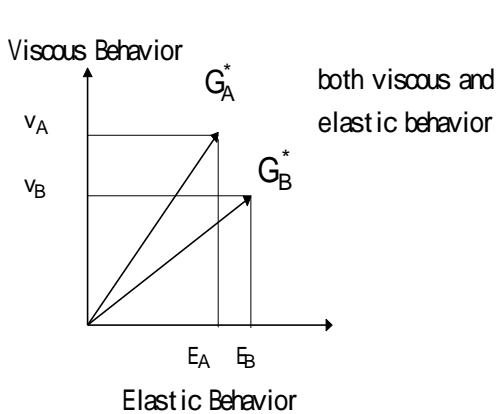


圖 5 複合模數 G^* 的組成(12)



Bahia 與 Anderson[1995]指出所有未改質瀝青與大部份改質瀝青，經氧化老化(oxidative aging)結果， G^* 值增加， δ 值減少，使得黏結料更有彈性，大大增加抗車轍能力⁽⁵⁾。亦即黏結料的初始性質比老化後性質更具臨界值(critical)，這也是SHRP 只規定未老化和經 RTFOT 老化瀝青黏結料的 $G^*/\sin \delta$ 最小值，來控制車轍的原因。

圖 6 瀝青黏結料黏彈性行為⁽²⁾

三、試驗材料與方法

本研究以中國石油公司生產直餾瀝青為基底瀝青，在試驗室內添加不同劑量的高分子材料 SBS 以生產改質瀝青。再以不同的試驗方法，如物性試驗(軟化點、延展性、回彈率)、黏滯度試驗、質流試驗等，檢驗這些試驗室內自行調配的改質瀝青。探討高分子改質材料與其所用劑量對瀝青膠泥工程性質的影響。

3.1 85/100 瀝青黏結料物性

本研究所使用的 85/100 瀝青基本物性如表 1：

表 1 85/100 瀝青膠泥基本物性

針入度(0.1mm)	軟化點()	延展性(cm)	比重(g/cm ³)	回彈率(%)
85	45	100 以上	1.016	10.89

3.2 SBS 高分子改質劑物性

本研究所使用的高分子 SBS 材料基本物性由奇美公司所提供，數據如表 2：

表 2 高分子 SBS 材料基本物性

品名類型	PB-5201 線性 SBS
揮發份 w%	0.6
灰份 w%	1.2
5% 甲苯溶液黏度 cps	9.5
結合苯乙烯 %	31

引張強度 kgf/cm ²	180
300% 模數 kgf/cm ²	23
延伸率 %	750
硬度 Shore A	75
假比重 g/ml	0.30
外觀	發泡粒子
用途	鞋材、瀝青改質、黏膠

3.3 試驗方法

一、改質瀝青拌合

本研究中主要研究在瀝青中添加各種不同含量的高分子改質劑 SBS 的質流行為，由於必須利用高轉速及高溫攪拌才可將兩者混合為均勻的複合材料，本研究採用日本 EYELA 公司的 DC-3S 高速攪拌機，周邊設備包括控溫設備、耐熱雙口反應瓶和溫度計；為了能使高分子材料 SBS 充分溶於 AC-30 瀝青中，攪拌過程必須在高溫且高轉速下進行，儀器攪拌溫度設定為 180，拌合時間為 60 分鐘，轉速為 3000rpm。

二、動剪質流儀(dynamic shear rheometer, DSR)

採用 Carri-Med 公司所製 CSL-500 型流變儀，含空壓機、氣壓儲存槽、冷卻器等相關設備，用以測定瀝青材料應力、應變、時間及溫度間之黏彈特性，並以潛變行為分析、剪應力掃描分析、頻率掃描分析、溫度掃描分析及時間掃描分析等模式分析各項參數，如複合模數(G^*)，正切損失($\tan \delta$)等，依據 SHRP 試驗所使用之試驗頻率範圍由 0.1~100 rad/sec，在進行頻率掃描之前，於選定的溫度下需進行應變掃描確定最大應變，所有試驗均控制於最大應變下以維持瀝青線性黏彈行為。

四、試驗結果與討論

4.1 SBS 高分子改質瀝青物性

4.1.1 SBS 改質瀝青的軟化點

軟化點量測目的在於觀察瀝青黏結料於何種溫度環境下開始軟化，可做為鋪面高溫變形時的參考。從圖 7 中可以看到尚未添加 SBS 時的 85/100 瀝青軟化點在 45，而隨著 SBS 添加量的增加，軟化點也隨之增高，當增加至 9%時，軟化點可達到 70 以上。由此看來，單純使用 85/100 瀝青來做為鋪面材料，在夏季鋪面溫度達到 60 時，瀝青早已軟化，應該無法避免變形的產生，但若添加 SBS，可提高軟化點，在添加量 6%時，軟化點可達 60 以上，黏結料在未軟化前，應可抵抗荷重下變形的產生。

4.1.2 SBS 改質瀝青的延展性

SBS 的添加量越多，瀝青黏結料的物理行為會越來越偏向 SBS 的行為，從圖 8 中可以看到，隨著添加含量的增加，延展性會變的越差。這顯示純瀝青是一種延性極佳的材料，然而相對於延性是脆性，6%時的延展性只有 45.8cm，添加 9%時也僅有 36.3cm，雖然改質瀝青強度變強了，延展性卻變差，應用於鋪面時，延展性也是一考量因素。

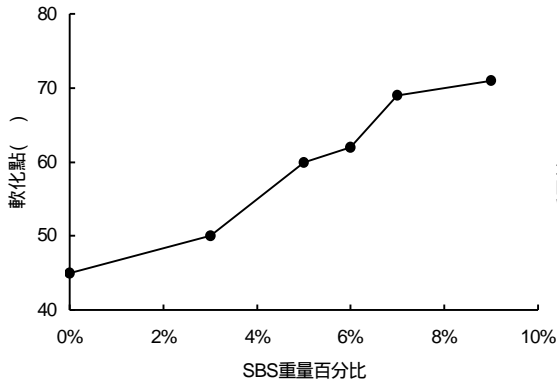


圖 7 SBS 改質瀝青軟化點與重量百分比的關係

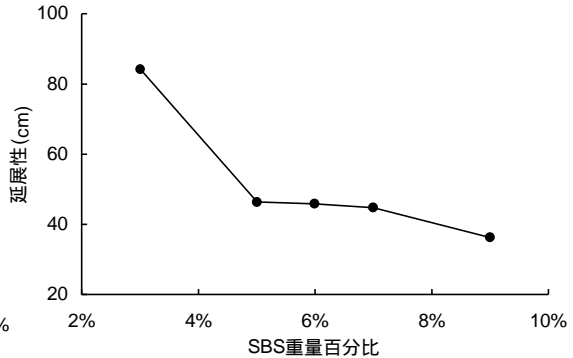


圖 8 SBS 改質瀝青延展性與重量百分比的關係

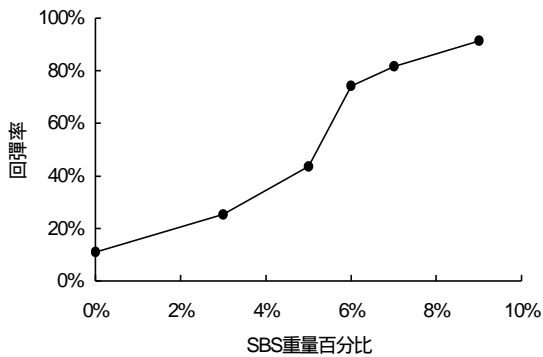


圖 9 SBS 改質瀝青回彈率與重量百分比的關係

4.1.3 SBS 改質瀝青的回彈率

量測回彈率的目的是在於觀察瀝青黏結料受力變形後的回復能力，可做為材料彈性行為的指標。圖 9 中，純瀝青的回彈率僅在 11% 左右，隨著添加量的增加，材料越趨向彈性行為，回復能力也越強，添加至 9% 時，回彈率可達到 90% 以上，顯示添加越多的 SBS，材料行為也越趨向 SBS 的行為而變得更有彈性。雖然如此，仍需考量材料延展性與脆性的問題，而不是一味的只求增加彈性。

4.2 黏度試驗

柔性鋪面鋪築所使用的瀝青混凝土材料是將瀝青與骨材混合在一起，但瀝青是一種黏彈材料，隨溫度改變其行為。低溫是呈彈性，高溫則為黏性，呈流動的行為，因此拌合時必須將瀝青加熱至可流動的狀態，才能將二者充分拌合均勻，可是拌合溫度又不能夠過高以防瀝青材料嚴重變質。因此利用 Brookfield 黏度儀量測瀝青黏度的目的在於了解瀝青在溫度範圍下的流動情形。

圖 10 顯示 85/100 瀝青在 60 至 180 時的黏度變化，黏度會隨著溫度增加而減小，材料漸漸呈現流動狀態，或說是牛頓流狀態。在馬歇爾配合設計當中規定瀝青混凝土的拌合溫度規定為瀝青黏度在 170 ± 20 cSt (約為 170 ± 20 cps) 時，瀝青混凝土試體夯壓溫度則是瀝青黏度在 280 ± 30 cSt (約為 280 ± 30 cps) 時；在 SHRP 的規定則是 135 時瀝青的黏度不得大於 3 Pa-s (約為 3000 cps)。因此根據圖 10 顯示，若採用 85/100 瀝青時的拌合溫度約在 167 左右，而夯壓溫度則為 155。在 135 時的黏度為 620 cps，亦小於 3000 cps。添加 3% 至 9% 重量百分比的高分子改質劑 SBS 於 85/100 瀝青中，從圖中明顯看出改質瀝青的黏度會隨添加量的增加而越大。由

於添加量的增加，使得在 60 及 80 時，改質瀝青的黏度已經大到使得黏度儀無法量測。

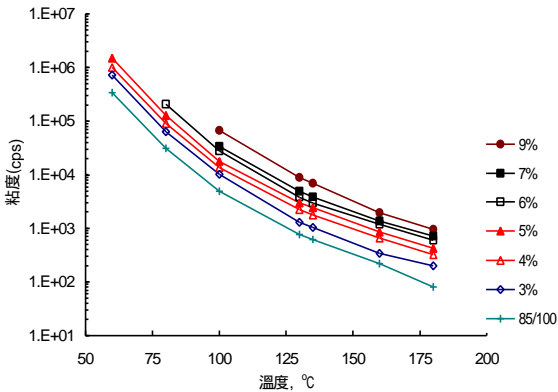


圖 10 各含量的 SBS 改質瀝青黏度

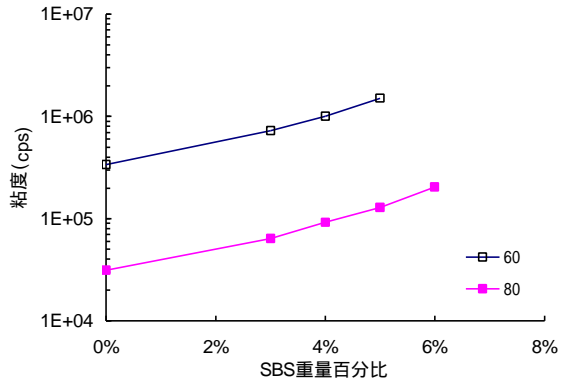


圖 11 SBS 重量百分比在 60 與 80 對黏度的關係

圖 11 可看到 SBS 添加量與黏度的關係，在 60 及 80 之區間，即鋪面在高溫最可能發生車轍之溫度範圍時，隨著 SBS 添加量的升高，黏度隨之迅速爬昇，而非一線性關係，因此可以解釋為，隨著重量百分比穩定增加，黏結料的黏度卻激增，鋪面在高溫時較不易產生變形或車轍。但隨著溫度的升高，分別在 160 及 180 時，黏度卻幾乎呈線性增加，見圖 12。因此改質瀝青在高溫時，其黏度會隨著添加劑重量百分比的增加而穩定增加，對於預估添加劑含量對拌合溫度與夯壓溫度的決定有很大的幫助。

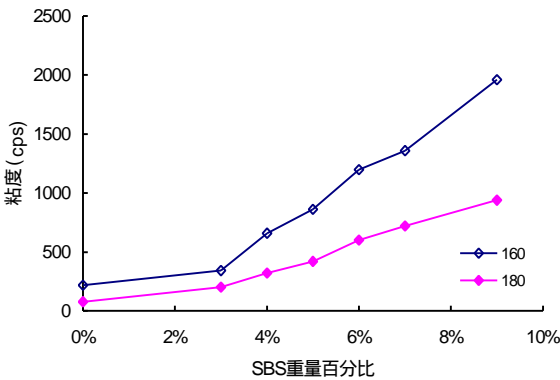


圖 12 SBS 重量百分比在 160 與 180 黏度的關係

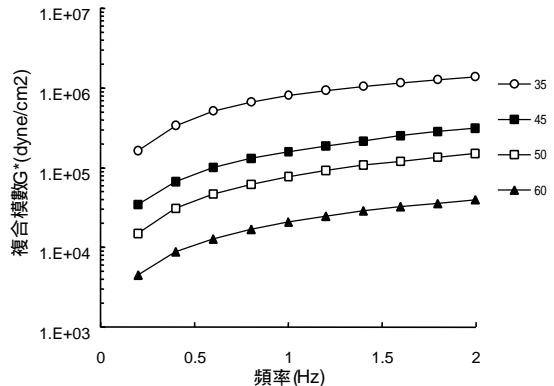


圖 13 85/100 瀝青在各溫度下之頻率掃描

4.3 質流試驗

4.3.1 85/100 瀝青的質流參數

瀝青是一種黏彈材料，其行為除了隨溫度改變外，還會隨受力時間而變，因此應用 DSR 對瀝青做動力力學分析可以了解其在溫度與時間範圍內的黏彈行為。對 85/100 瀝青做各溫度下的頻率掃描，頻率範圍為 0.2Hz 至 2Hz。很明顯的，瀝青的複合模數 G^* 會隨著溫度的降低而增加，

漸趨向於彈性行為; G^* 也隨著頻率的增加而增加,表示在越短的受力情況下材料越硬,見圖 13。

在 60 時分別做 85/100 瀝青 G^* 、 G' 與 G'' 的頻率掃描,見圖 14,可知 G^* 與 G'' 相差無幾,而 G' 則很小,材料呈黏性狀態,因此若使用 85/100 瀝青,在夏季鋪面溫度達到 60 以上時,容易有車轍變形產生。

為了解 85/100 瀝青在各溫度下 G^* 的變化,在頻率為 1.67Hz 時對 85/100 瀝青做溫度掃描。從圖 15 中可看出, G^* 會隨著溫度的增加而變小,而在溫度由 25 升至 60 時, G^* 的變化較為劇烈,即其行為由彈性轉為黏彈性時,只要溫度稍有改變,質流行為會變化甚大,這也表示瀝青在黏彈區受溫度的影響很大; 60 以後的 G^* 的變化則趨於平緩,故 45 大約是接近材料的軟化點,而形成一轉折點。

從圖 16 也清楚顯示相位角 在 60 時,角度均在 85 度以上, G'' 幾乎要與 G^* 相等, G' 的部分則很小,因此材料是處於黏性的狀態。而從圖 17 中相位角的溫度掃描來看,溫度越低,相位角的角度也越小,而且在溫度由 25 升至 60 黏彈區中,相位角的變化幅度也逐漸趨向平緩。

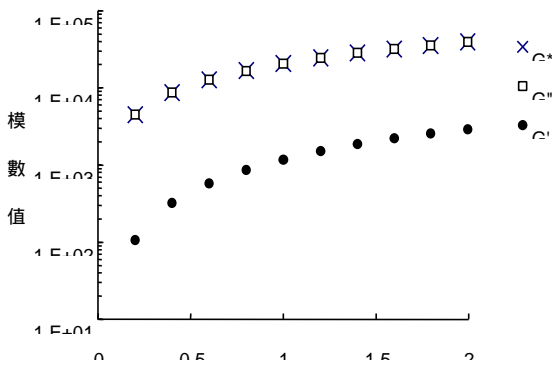


圖 14 85/100 瀝青在 60 時 G^* 、 G' 、 G'' 之頻率掃描

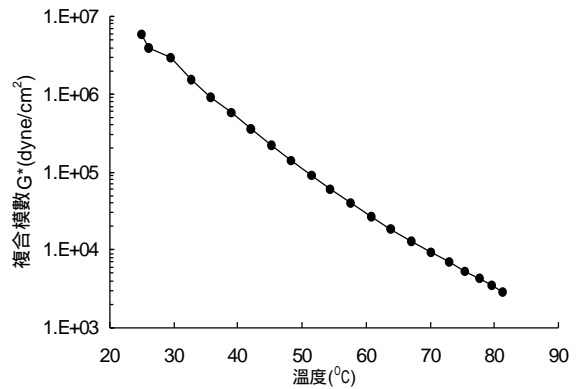


圖 15 85/100 瀝青在 1.6Hz 之溫度掃描

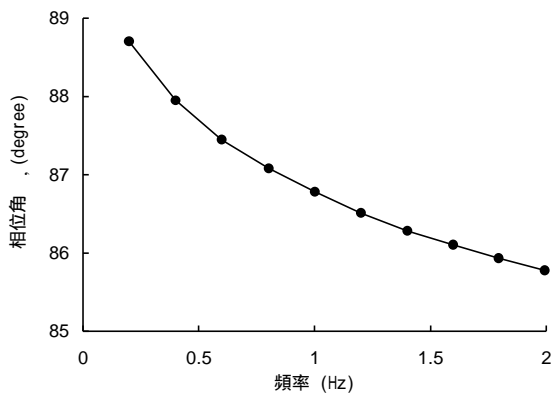


圖 16 85/100 瀝青在 60 相位角之頻率掃描

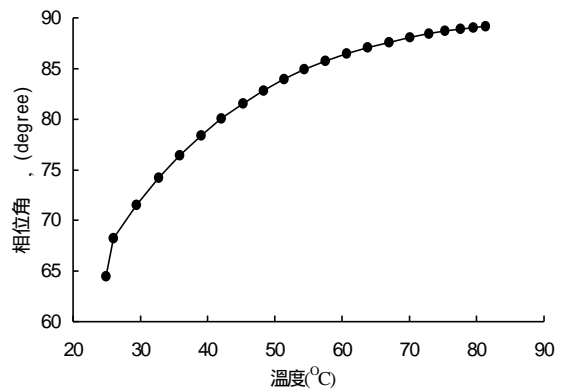


圖 17 85/100 瀝青相位角之溫度掃描

$\tan \delta$ 是 G'' 與 G' 的比值,從圖 18 來看, $\tan \delta$ 隨溫度的升高而增加,表示瀝青材料的黏性部分(G'')與彈性部分(G')差距越來越大,材料越趨向黏性;另外 $\tan \delta$ 也隨著頻率的增加,即隨受力時間的縮短,而隨之減少,材料越趨向彈性。

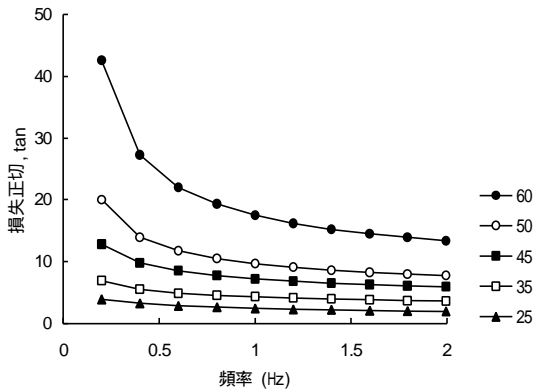


圖 18 85/100 瀝青 tan 之頻率掃描

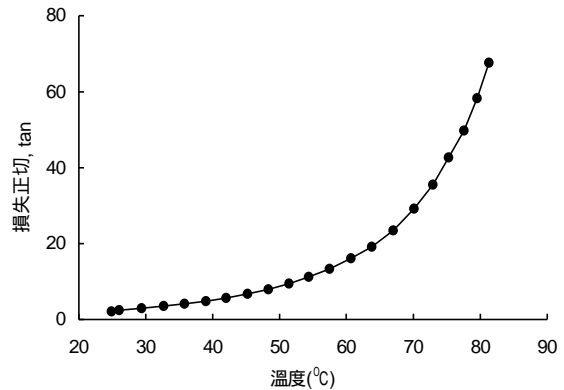


圖 19 85/100 瀝青 tan 在 1.6Hz 時之溫度掃描

若在 1.6Hz 時對 85/100 瀝青的 tan 做溫度的掃描，見圖 19，則可發現隨著溫度的提高，tan 會迅速增加，表示溫度越高時，黏性部分也會迅速增加。

4.3.2 高分子材料 SBS 的質流參數

對 SBS 做頻率掃描分析，見圖 20， G^* 隨著溫度的升高而減小，顯示 SBS 和瀝青一樣是受溫度的改變而變化，但是在試驗的頻率範圍 0.2Hz 至 2Hz 之內的 G^* 卻變化不大，這表示受力時間的長短對 SBS 的影響較小。

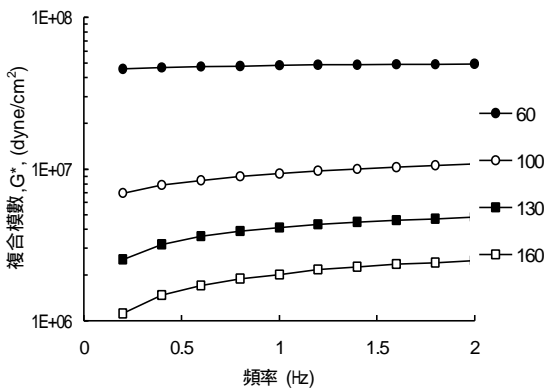


圖 20 高分子材料 SBS 之 G^* 頻率掃描

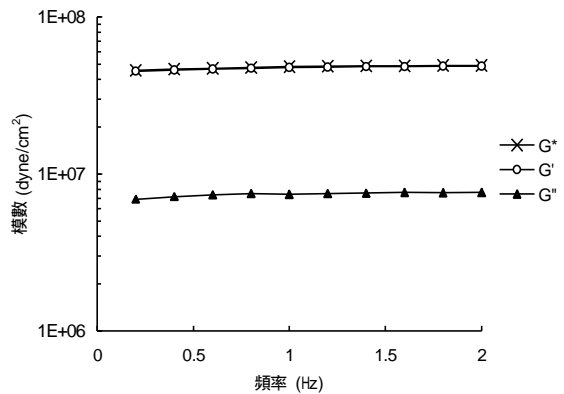


圖 21 高分子材料 SBS G^* 、 G' 和 G'' 在 60 時之頻率掃描

圖 21 中，SBS 在 60 時的 G^* 值與 G' 值很接近， G'' 則相差較大，此時的 SBS 仍處於彈性區域，恰與 85/100 瀝青的黏性行為相反(見圖 14)。因此 85/100 瀝青加入 SBS 可提供並增加瀝青的彈性部分。若觀察 SBS 的 G^* 在頻率為 1.6Hz 時的溫度掃描情形，見圖 22， G^* 隨溫度升高而減少，特別是在約 100 時也有一轉折點，因此可判斷 SBS 的軟化點大概也在此處。因此瀝青加入 SBS，可提升瀝青的軟化點。

從 SBS 相位角 在 60 時之頻率掃描的圖形來看，見圖 23，大約保持在 9 度左右，表示材料處於彈性，並且隨受力時間的縮短，相位角的變化也不大。若從圖 24 對 的溫度掃描分析，會隨溫度的升高而增加，材料越趨向於黏性，且在 100 至 130 時會產生一平台的現象；此時 SBS 之交聯網狀(crosslink)逐漸鬆弛，承載荷重減低。

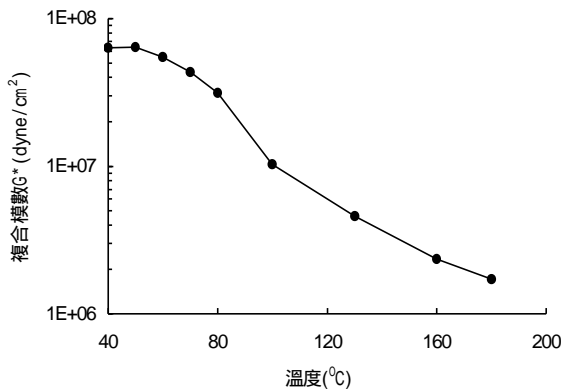


圖 22 高分子材料 SBS 的 G^* 在 1.6Hz 時之溫度掃描

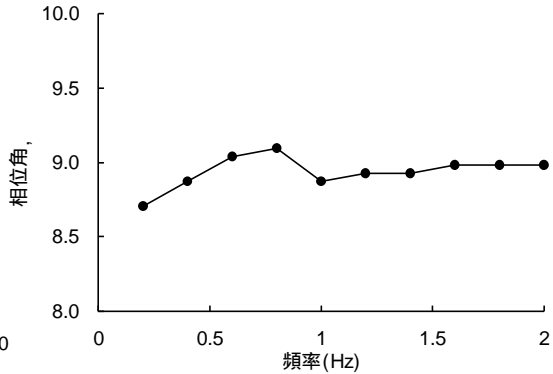


圖 23 高分子材料 SBS 60 時相位角之頻率掃描

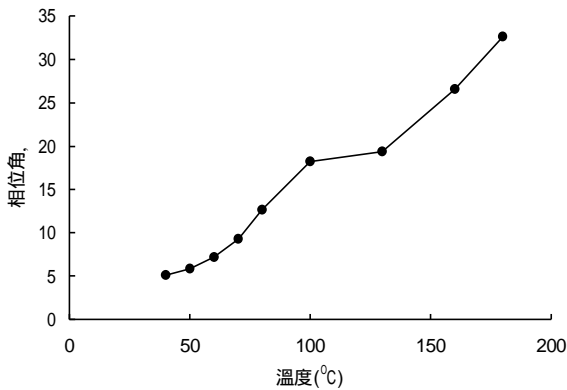


圖 24 高分子材料 SBS 相位角之溫度掃描

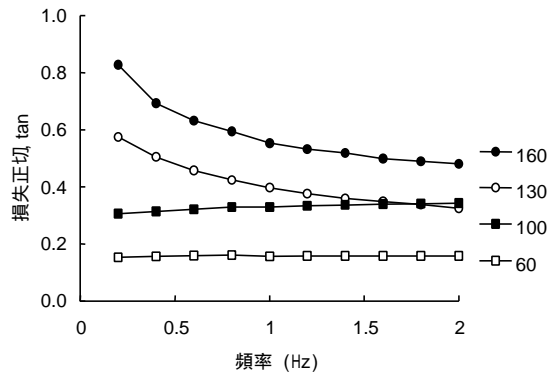


圖 25 SBS 的 \tan 頻率掃描

由圖 25 中可看到，當溫度在 60 與 100 時的 \tan 大致保持水平，不隨受力時間而改變，60 時的 \tan 約在 0.15 至 0.16 間，表示黏性僅佔彈性部分的 15%-16%，故材料為彈性行為；100 時的 \tan 則約在 0.3 至 0.34 間，表示黏性僅佔彈性部分的 30%-34%；而在 130 與 160 時， \tan 會隨受力時間的減少而降低，尤其溫度越高，變化的程度則會越大，如圖 26。

4.3.3 SBS 改質瀝青的質流參數

從圖 27 中可看到，SBS 的 G^* 值遠高於 85/100 瀝青，因此添加 3% 至 9% 的 SBS 於瀝青後，提高了瀝青的勁度， G^* 值會隨著添加量的增加而增加，使材料具有較大的抵抗力，增加的幅度隨著含量的增加而穩定的增加，見圖 28。從溫度掃描來看，溫度越低時， G^* 增大的幅度會越大，尤其是含量越大時，幅度越大，表示黏結料由黏彈性迅速地到達彈性，見圖 29。

分析改質瀝青 G^* 、 G' 和 G'' 的關係，以 5% 的 SBS 改質瀝青在 60 時為例，從圖 30 上的曲線來看， G^* 與 G'' 較為分開，不像 85/100 瀝青之 G^* 幾乎與 G'' 重疊。因此可以說添加了改質劑後，材料黏性與彈性部分一消一長，在夏季鋪面高溫時較能抵抗車轍。

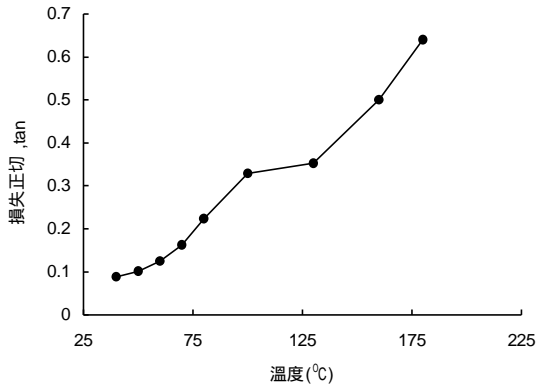


圖 26 SBS 的 tan 溫度掃描

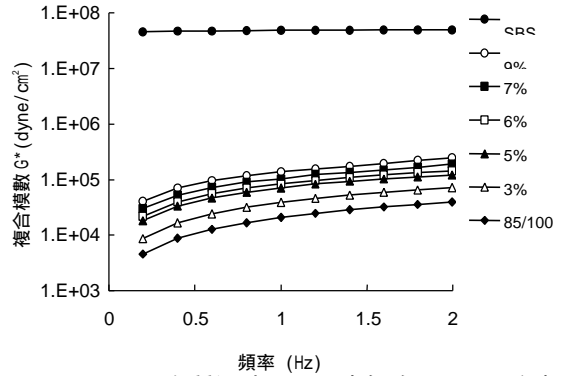


圖 27 SBS 改質瀝青 60 時各含量下 G*之頻率掃描

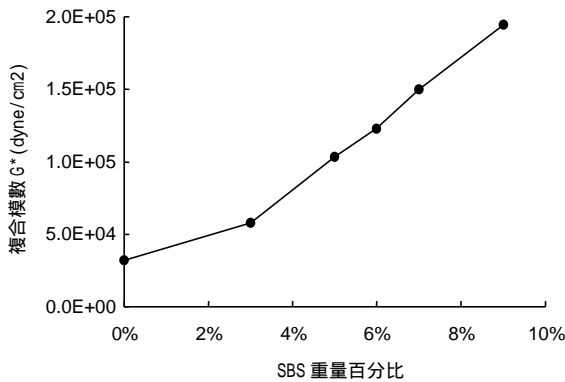


圖 28 60 時 SBS 改質瀝青含量與 G*之關係

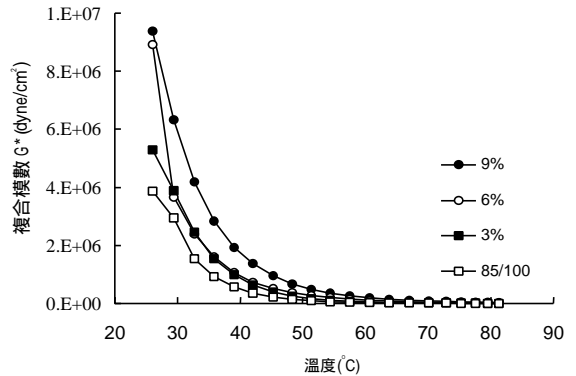


圖 29 SBS 改質瀝青各含量在 1.6Hz 時 G*之溫度掃描

單看 G^* 、 G' 和 G'' 的曲線變化並不能看出彈性與黏性間消長的情形，只能判斷在溫度與作用時間下的趨勢。從圖 31 來看， \tan 隨著 SBS 含量的增加而減少，彈性部分漸增，黏性部分漸減，材料越趨於彈性。85/100 瀝青的變化幅度很大，含量越增加，變化的幅度就越小，尤其是從 3% 增至 5% 時， \tan 突然變得不易受作用時間的影響。SBS 幾乎是呈水平線，因此不過才加了 5% 的 SBS，影響卻如此之大，表示影響改質瀝青特性的因素不是只有添加的重量百分比，體積百分比的影響應該是更為重要。再從圖 32 來看，在 5% 時確有這種趨勢， \tan 隨著含量的增加，而越不易受溫度變化的影響，或從圖 33 來分析，說明了添加 SBS 後可減低瀝青的溫感性。

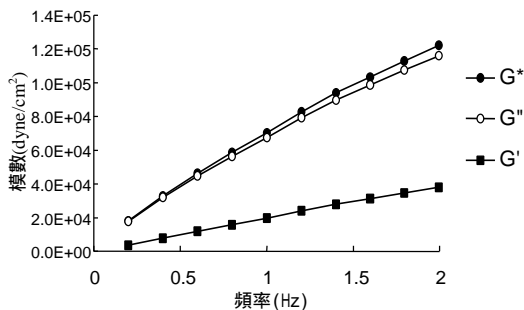


圖 30 5% 的 SBS 改質瀝青 60 時 G^* 、 G' 、 G'' 之頻率掃描

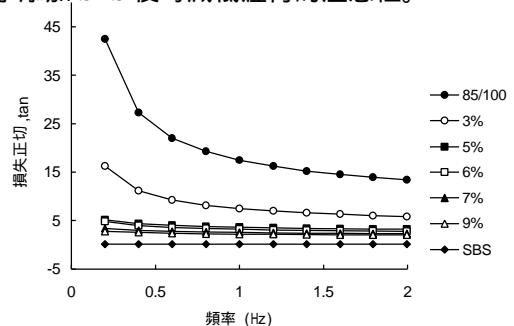


圖 31 SBS 改質瀝青各含量在 60 時 \tan 之頻率掃描

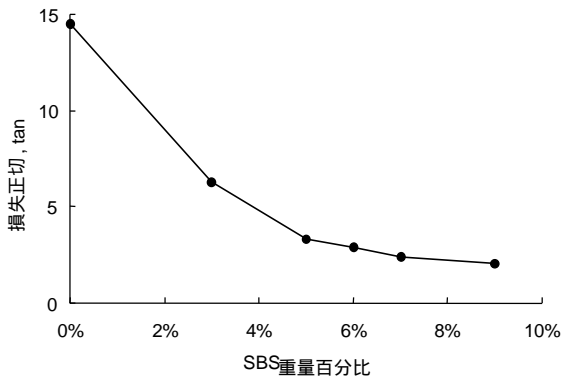


圖 32 SBS 改質瀝青 1.6Hz, 60 時含量與 tan 的關係

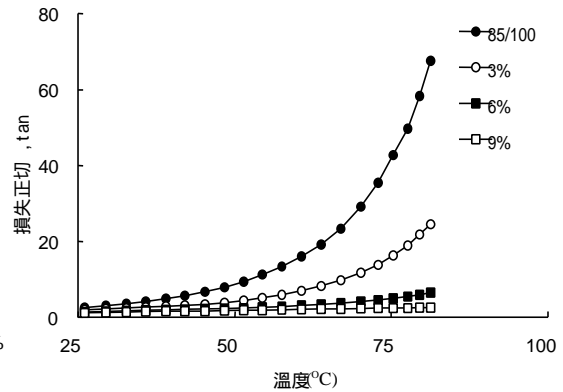


圖 33 SBS 改質瀝青各含量在 1.6Hz 時之溫度掃描

五、結論與建議

改質瀝青目前在鋪面工程已漸漸被採用，拌合料品質仍待改善，本研究主要是探討高分子改質瀝青之工程性質，根據研究結果可以得到以下結論，供品質管理參考：

尚未添加 SBS 時的 85/100 瀝青軟化點在 45，添加 SBS 之改質瀝青，軟化點明顯提高，在添加量 6% 時，軟化點可達 60 以上，回彈率可達到 70% 以上。由此看來，單純使用 85/100 瀝青來做為鋪面材料，在夏季鋪面溫度達到 60 時，瀝青早已軟化，且 G^* 與 G'' 相差無幾，材料呈黏性狀態，在添加改質劑後，其黏度會隨著添加劑增加而穩定增加，且材料黏性與彈性部分一消一長可有效降低瀝青的溫感性，避免夏季鋪面溫度變化過大產生路面車轍現象，能抵抗變形的產生；然而添加過多改質劑，材料漸漸偏向 SBS 的行為時，性質尚變得又硬又脆且延展性不佳，在重複荷重作用下，可能會產生疲勞脆裂。在質流儀試驗中，85/100 瀝青或添加 SBS 改質瀝青呈現出黏彈性材料特性，複合模數 G^* 會隨著溫度的降低而增加，漸趨向於彈性行為， G'' 也隨著試驗頻率的增加而增加，表示在越短的受力情況下材料呈現出硬質行為，這種現象顯示路面高溫環境下有較弱的抗變形能力，溫度變化對於瀝青材料行為之影響極大。

從質流儀溫度掃描分析中，溫度越低、SBS 含量越高時， G^* 增大的幅度會越大，tan 隨著 SBS 含量的增加而減少，彈性部分漸增，黏性部分漸減，改質瀝青由黏彈性迅速地到達彈性。然而當 SBS 含量從 3% 增至 5% 時，tan 突然變得不受作用時間與溫度變化的影響，說明了添加 SBS 後可減低瀝青的溫感性。因此不過才加了 5% 的 SBS，影響卻如此之大，表示影響改質瀝青特性的因素不是只有添加的重量百分比，體積百分比的影響應該是更為重要。

誌 謝

本研究承蒙交通部「台灣柔性路面破壞與瀝青材料性質關係之研究」之補助，謹此誌謝。

參考文獻

- kAdedeji, A., Grunfelder, T., Bates, F.S. and Macosko C.W., "Asphalt Modified by SBS Triblock Copolymer: Structures and Properties," *Polymer Engineering and Science*, Vol.36, No.12, pp.1707-1723, 1996.
- l Asphalt Institute, *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Test*, Asphalt Institute Superpave Series No.1(SP-1), Kentucky, 1994.
- mBandyopadhyay, G.G., Bhagawan, S.S., Ninan, K.N. and Thomas, S., "Viscoelastic Behavior of NBR/EVA Polymer Blends: Application of Models," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol.70, No.4, Sep- Oct, pp.650-662, 1997.
- nBahia, H.U., W.P. Hislop and H. Zhai, "Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders," *Journal of the Asphalt Paving Technologists*, Vol.67, pp.1-41, 1998.
- oBahia, H.U., and Anderson, D.A., "Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters : Background and Comparison with Conventional Properties," *Transportation Research Record*, Vol.1488, pp.32-39, 1995.
- pBlanco, R., R. Rodriguez, M. Garcia-Garduno and V.M. Castano, "Rheological Properties of Styrene-Butadiene Copolymer- reinforced Asphalt," *Journal of Applied Science*, Vol.61, pp.1493-1501, 1996.
- qChristensen, D.W., and Anderson, D.A., "Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data For Paving Grade Asphalt Cements," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.61, pp.67-116, 1992.
- rDongre, R., Ramaiah, S., and D'Angelo, J., "Use of Viscosity Standard Fluid to Control Quality of Rheological Measurements for Characterizing Asphalt Binders," *Asphalt Binders and Binder Specification. Transportation Research Record*, No.1586, pp.24-31, 1997.
- sMcKay, K.W., Gros, W.A. and Diehl, C.F., "The influence of Styrene- Butadiene Diblock Copolymer and Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer Properties and Product Performance," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.56, pp.947-958, 1995.
- tKing, G.N., King, H.W., Harders, O., Chavenot, P., and Planche, J. P., "Influence of Asphalt Grade and Polymer Concentration on the High Temperature Performance of Polymer Modified Asphalt," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.61, pp.29-61, 1992.
- uLu, X., Isacson, U. and Ekblad, J., "Phase Separation of SBS Polymer Modified Bitumens," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.11, pp.51-57, 1999.
- vRoberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W., *Hot Mix Asphalt Materials Mixture Design and Construction*, NAPA Education Foundation, Second Edition, 1996.
- wShuler, T.S., Collins, J.H., and Kirkpatrick, J.P., "Polymer-Modified Asphalt Properties Related to Asphalt Concrete Performance," *American Society for Testing and Materials (ASTM) STP 941*, pp.179-193, 1987.