鋼纖維噴凝土材料管理與規範探討—以蘇花改谷風隧道為例

關鍵詞：鋼纖維噴凝土、濕拌噴凝土、格板試驗、成熟度指數

台灣世曦工程顧問股份有限公司／蘇花改監造專案／正工程師／陳明宏 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／蘇花改監造專案／專案經理／侯嘉松 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／蘇花改監造專案／專案協理／周允文 ❸

摘 要 ABSTRACT

台灣東部地區台9線蘇花公路，因受地形、地質影響，每逢颱風豪雨常造成坍方中斷，交通部公路總局推動「台9線蘇花公路山區路段改善計畫(以下簡稱蘇花改)」，秉持「經濟發展」、「環境永續」、「安全穩定」與「社會公義」之原則，全面推展此東部民眾一條安全回家的路。

隧道工程基於安全、經濟、快速等目標，除須周詳規劃設計外，材料管理及施工規範完整性亦屬重要。鑑此，本文以蘇花改谷風隧道(B3標)為例，探討隧道鋼纖維噴凝土材料管理及施工規範、材料試驗項目與標準、材料配比、預拌廠試拌確認及工地試噴、預拌廠料源砂石及鋼纖維混入率管理項目、工地試體噴鑽與驗收以及隧道噴凝土中有關材料規定異同處，以供工程界參考。

壹、材料管理

鋼纖維噴凝土為水泥、粗、細粒料、鋼纖維、矽灰、水與附加劑等材料依規定拌和後，以噴漿機具及特殊噴嘴，藉壓縮空氣摻入速凝劑噴佈於施工面之混凝土。噴凝土依施工方式可分乾拌法(Dry Mix Process)及濕拌法(Wet Mix Process)2種，影響濕拌法的控制參數為水膠比(w/cm)，而乾拌法為水泥與粒料之比例[1]。蘇花改噴凝土施工規範計有第1類標稱最大粒徑4.75mm細粒料級配、第2類標稱最大粒徑9.5mm粗粒料級配以及第3類標稱最大粒徑12.5mm粗粒料級配等3種選用級配；ACI 506R-2005年版僅規定第1類細粒料級配及第2類粗粒料級配，本工程採用濕拌法之第2類標稱最大粒徑9.5mm粗粒料級配。採用粗粒料級配噴凝土可減少粒料表面積而降低用水量、減少噴凝土乾縮量(一般在3個月之乾縮量介於0.06%~0.10%)、提升泵送能力、增加單位密度及經濟配比等效益，惟有較大回彈量(Rebound)、無法適用於較薄噴凝土、須選擇較大口徑軟管及較高噴灑速率等技術問題[1]。噴凝土係由預拌廠材料生產品質管控、現場噴漿機具的傳送穩定、氣動平衡與相位轉換、以及隧道地質施工等因素所構成之系統混凝土，與一般傳統澆置之混凝土略有不同，以下僅針對鋼纖維噴凝土使用鋼纖維材料作探討，其材料、施工規範、試驗方法、試驗項目及檢驗頻率詳表1。

一、鋼纖維選用值與規範值之標準

纖維之添加可減少裂紋產生、增加抗彎強度、改善延展性與韌性、提升耐衝擊性及耐久性等效益。纖維依材質可區分為鋼、玻璃、合成和天然材料；鋼纖維依ASTM A820載明製造有五種類別，本工程採用第一類冷拉鋼線束排之圓形斷面鋼纖維，經試驗結果統計，其平均長度35.8 mm，平均直徑0.77 mm，平均長度

表1 鋼纖維噴凝土用材料名稱、施工規範、試驗方法、試驗項目及檢驗頻率表

材料名稱	施工規範	試驗方法	試驗項目/規範值	檢驗頻率
第一類冷拉鋼纖維(TYPE Ⅰ cold-drawn wire)	補充施工說明書第02424章第2.1.6節	ASTM A820 (CNS 12892)	1. 長度cm/長約2.5~4.0 cm 2. 直徑mm/直徑0.5~0.8 mm之圓形斷面或等面積之他種斷面 3. 長徑比/長度與等值直徑比為40~80 4. 抗拉強度(kgf/cm^2)/抗拉強度：大於3,450 kgf/cm^2 5. 抗彎強度/抗彎強度：在不低於16°C溫度下可沿內半徑3.18 mm之圓弧彎曲90°而不會折斷。	1. 料源改變。 2. 數量管制：每批取樣1次，批次中每5 噸取代表性樣品，再混樣為批次樣品送驗。 3. 時間管制：每年取樣1次。 註：承商須提報供應商之廠自主檢查報告。
卜特蘭水泥Ⅱ型低鹼	補充施工說明書第02424章第2.1.1節 施工說明書第03050章第2.1.2節	CNS 61	化性試驗依CNS 61表1及表2 物性試驗依CNS 61表3及表4	1. 料源改變。 2. 數量管制：依連工帶料發包材料抽檢驗之規定，Ⅰ型水泥每500公噸至少抽樣1次，Ⅱ型水泥每三百公噸至少抽樣1次，每10件樣品至少1件按CNS61檢驗。 3. 時間管制： 第03050章2.3.7水泥試驗規定：散裝水泥出廠6個月以上者，應再行試驗。每年取樣1次。
矽灰(Silica Fume)	第02424章隧道噴凝土第2.1.7節	ASTM C1240	1. 細度通過#325篩%/細度：通過#325篩之重量百分比大於90%。 2. 強度活性指數/加速膠凝作用指標：與水泥混合7天後大於85%。 3. 化學成份：二氧化矽(Si02)含量大於85%；燒失量小於6%。 4. 密度	1. 料源改變。 2. 數量管制：每批取樣1次 3. 時間管制：每年取樣1次。
濕拌式噴凝土第9類速凝早強劑液態(Type II—Wet-mix shotcrete Grade 9—Accelerating admixture, quick-setting)	第02424章隧道噴凝土第2.1.3節	ASTM C1141/ASTM C1398(CNS 14689)	1. 鹼當量(Na_2+0.658K_2O)%/Na_2O鹼當量(Na_2O+0.658K_2O)不得超過自重之1%。 2. 氯離子%/速凝劑之氯化物含量不得超過自重之1% 3. 初凝凝結時間/初凝時間：1～3分鐘 4. 終凝凝結時間/終凝時間：12分鐘以內 5. 比重 6. 建立各批料之成分或其他標準值，如pH值、比重等試驗步驟與建立比對標準。(進料前建置) 7. 拒收基準： 7.1空氣含量/含摻料噴凝土大於5%，得拒絕此摻料。 7.2不符合標準規定中任一，得拒收。 7.3試驗完成後，儲存超過6個月時，應重新試驗，再試驗不符合標準規定中任一，得拒收。 7.4摻料之量與所標明重量或體積差異超過2%時，得予拒收。	1. 料源改變。 2. 數量管制：每批取樣1次，惟以3天內貨至工區視為1批次。 3. 時間管制：每年取樣1次。
混凝土化學摻料(高性能減水緩凝劑TYPE G 聚羧酸聚合物)	第02424章隧道噴凝土第2.1.8節 第03050章第2.1.8	ASTM C494 CNS 12283	1. 用水量 2. 坍度 3. 抗壓抗彎 4. 初凝時間及終凝時間 5. 長度變化率 6. 均勻性及同等性：烘乾殘留量、摻料比重、PH值 7. 氯離子含量	1. 料源改變，檢驗項目為左列項目。 2. 數量管制：每批取樣1次，惟以3天內貨至工區視為1批次，檢驗項目為均勻性及同等性：烘乾殘留量、摻料比重、PH值、氯離子含量。 3. 時間管制：每年取樣1次，檢驗項目為均勻性及同等性：烘乾殘留量、摻料比重、PH值、氯離子含量。
噴凝土拌合水	第03050章混凝土基本材料及施工方法2.1.7	須符合CNS 13961規定。 依據CNS 1237 方法辦理。	1. 懸濁物含量 2. 水溶性蒸發殘留物 3. 氯離子含量 4. 酸鹼度 5. 硫酸根離子含量 6. 鹼含量 7. 油脂 8. 水泥凝結時間與控制試驗之差異 9. 水泥砂漿抗壓強度比	1. 料源改變。 2. 時間管制： 2.1.每月取樣1次，檢驗項目為氯離子含量、硫酸根離子含量、鹼含量、油脂。 2.2.每年取樣1次，檢驗項目為左列項目。 3. 拌合水氯離子含量CNS 5858 [工業廢水氯離子檢測法]：每一料源至少1 次，有疑慮時隨時檢測。

(續上表)

材料名稱	施工規範	試驗方法	試驗項目/規範值	檢驗頻率
卜特蘭水泥混凝土之粒料	第03050章混凝土基本材料及施工方法2.1.3粒料之一般規定	粒料須符合CNS 1240規定	1.細粒料： 1.1篩分析CNS 486 1.2表面含水率 CNS489 1.3通過0.075mm篩之細粒料CNS 491/細粒料通過No.200篩之有害物質含量不得大於3% 1.4土塊及易碎顆粒CNS 1171 1.5細粒料健度CNS 1167 1.6細粒料中之水溶性氯離子含量CNS13407 1.7有機不潔物CNS 1164 1.8煤及褐炭輕質顆粒CNS 10990 1.9鹼質反應溶解矽量Sc、鹼質反應耗用鹼量Rc 2.粗粒料： 2.1篩分析CNS 486 2.2通過0.075mm篩之細粒料CNS 491 2.3表面含水率CNS489 2.4土塊及易碎顆粒CNS 1171 2.5粗粒料健度CNS 1167 2.6粗粒料磨損CNS 490 2.7破碎面(二面)/ 粗粒料之組成至少應有90%之重量比為碎石顆粒，每顆碎石顆粒至少應有2個破碎面 2.8煤及褐炭輕質顆粒CNS 10990 2.9鹼質反應溶解矽量Sc、鹼質反應耗用鹼量Rc	1.料源改變。 2.時間管制： 2.1.每日試驗項目： 粗細粒料篩分析CNS 486 表面含水量CNS 489 混凝土氯離子含量CNS13465 新拌混凝土溫度 新拌混凝土坍度 2.2.每週試驗項目： 土塊及一碎顆粒CNS 1171 通過0.075mm之細粒料CNS 491 新拌混凝土單位重CNS 3090 2.3.每6個月試驗項目： 粗粒料健度CNS 1167 細粒料健度CNS 1167 粗粒料磨損CNS 490 2.4.每12月試驗項目： 預拌廠計量器設備 廠拌均勻性 粗細粒料，每1年檢驗1次，檢驗項目為左列項目。 3.水溶性氯離子： 細粒料水溶性氯離子CNS 13407 [細粒料中水溶性氯離子含量試驗法]：每一料源至少1次，有懷疑時隨時檢測。 4.新拌混凝土水溶性氯CNS 13465 [新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法]：(1) 配比設計時每一配比1次。(2) 預拌混凝土要求預拌廠每一料源至少檢測1次，有懷疑時隨時檢測。(3) 工地拌和混凝土每一料源至少1 次，有懷疑時隨時檢測。 5.硬化混凝土水溶性氯AASHTO T260 [混凝土及其原材料中總氯離子含量試驗法]：有懷疑時專案辦理。

與直徑比為46.8，詳表2及圖1至圖3所示。本工程補充施工說明書第02424章規定：[鋼纖維噴凝土之每批鋼纖維之品質應符合ASTM A820第一類之規定，…鋼纖維應符合下列要求：尺寸：長約2.5~4.0 cm，直徑0.5~0.8 mm之圓形斷面或等面積之他種斷面，長度與等值直徑比為40~80…]，然ASTM A820試驗規定：[長度與規定值之差異不得超過±10%，直徑或當量直徑與規定值之差異不得超過±10%，長徑比與規定值之差異不得超過±15%]。且由表1及圖1至圖3得知，施工選用長度下限值25.0 mm與管制下限34.0 mm、試驗規定下限32.4 mm；施工選用直徑下限值0.5 mm與管制下限0.7 mm、試驗規定下限0.72；以及施工選用長徑比上限值80與管制上限48.9、試驗規定上限54.1等有所差異，為使試驗規定值與施工選用值明確化，如將施工規範修正為：[鋼纖維噴凝土之鋼纖維品質及試驗頻率應符合ASTM A820第一類之規定，…鋼纖維應依下列要求：選用尺寸：長約2.5~4.0 cm，選用直徑0.5~0.8 mm之圓形斷面或等面積之他種斷面，選用長度與等值直徑比為40~80…]，得以明確規定選用尺寸規格，惟試驗結果仍需符合ASTM A820規定。

表2 第一類冷拉鋼線鋼纖維長度、直徑、長徑比、抗拉強度檢測結果統計表

試驗項目	平均值	標準差	變異係數	管制下限(-3σ)	管制上限(+3σ)	施工選用下限	施工選用上限	試驗規定下限	試驗規定上限
長度(mm)	35.8	0.61	1.70	34.0	37.6	25.0	40.0	32.4	39.6
直徑(mm)	0.77	0.01	1.48	0.70	0.80	0.50	0.80	0.72	0.88
長徑比	46.8	0.72	1.53	44.6	48.9	40	80	39.95	54.1
抗拉強度(kgf/cm²)	9803	484	4.94	8351	11256	3450	----	3450	-----

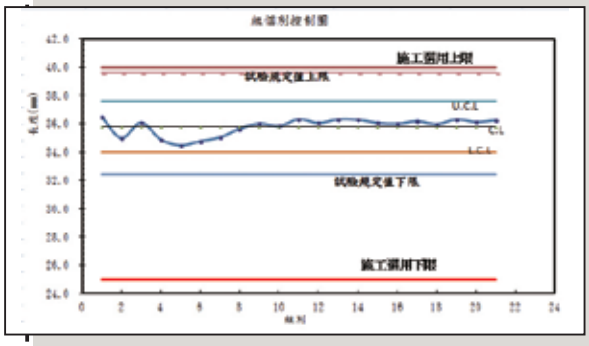


圖1 第一類冷拉鋼線鋼纖維(Type I, cold-drawn wire)長度檢測結果管制圖

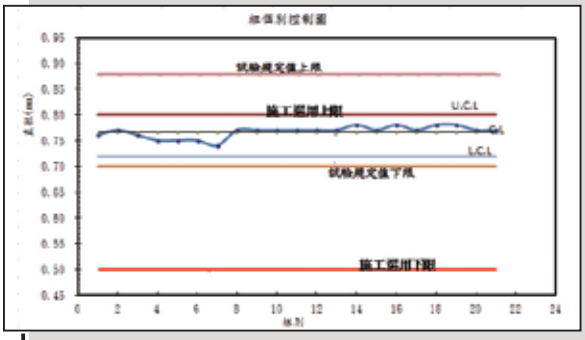


圖2 第一類冷拉鋼線鋼纖維(Type I, cold-drawn wire)直徑檢測結果管制圖

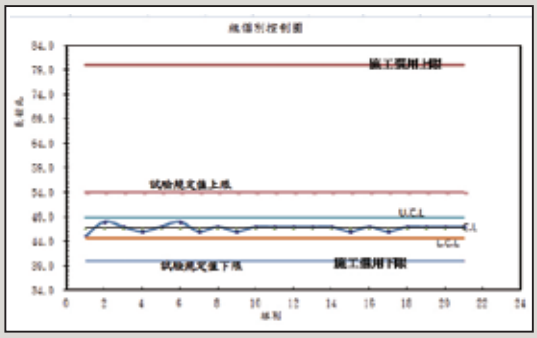


圖3 第一類冷拉鋼線鋼纖維(Type I, cold-drawn wire)長徑比檢測結果管制圖

二、材料配比及預拌廠試拌確認、工地試噴

(一) 材料配比及預拌廠試拌確認

本工程噴凝土配比計有210 kg/cm²噴凝土、280 kg/cm²噴凝土及255 kg/cm²鋼纖維噴凝土3種(詳表3)。噴凝土配比設計應於施工前一個月，依CNS 12891 [混凝土配合設計準則] 及ACI 211.1 [Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete] 之要求決定配合比例，並由TAF認可之ISO/IEC 17025實驗室辦理，混凝土配比之要求平均抗壓強度fcr'，因預拌廠無以往試驗紀錄配比來計算標準差，故依CNS 12891 規定求得平均抗壓強度，以設計強度255 kgf/cm² 鋼纖維噴凝土為例，其fcr'=255+85=340 kgf/cm²；續依據施工補充條款137條規定進行配比實際廠試拌，以確保坍度損失、混凝土品質及施工性能符合現場實際要求並據以調整最終配比。

由於噴凝土為材料、施工、地質等因素所構成之系統混凝土，為鑑別現場施工或預拌廠生產品質之責任歸屬，執行現場鑽取有速凝劑噴凝土試體及預拌廠內未摻速凝劑製作圓柱抗壓強度加以比對，詳表4及圖4。而由表3統計表及由ACI 214-02 [混凝土管制水準評估準則]判定得知，預拌廠未加速凝劑圓柱試體抗壓強度之全面變異標準差21.3kgf/cm² < 28.1kgf/cm²屬極優，組內變異係數4.6%介於4%~6%屬良好；現場鑽取有速凝劑噴凝土試體抗壓強

度之全面變異標準差60.1kgf/cm² > 49.2kgf/cm²屬不良，組內變異係數14% > 6.0%亦屬不良，然ACI 214-02其統計參數僅適用於普通混凝土抗壓、抗彎強度、坍度、含氣量和密度等評估，並不適用噴製之噴凝土試體，由於噴凝土強度除受制於鑽取位置差異、鋼纖維方向性、地質非均質性、地質含水條件等因素；此外，噴凝土施工乃逐層漸次噴佈，常存有不良壓實度(Poorly Compacted，不同於傳統混凝土搗實震動)，噴漿作業手之工藝技術實為重要影響因素。諸多因素均可導致噴凝土內部蘊藏不均質弱面(Weak)、空隙(Voids)及危害的微觀結構(Damaged Microstructure)存在，此乃造成強度高低顯著差異。

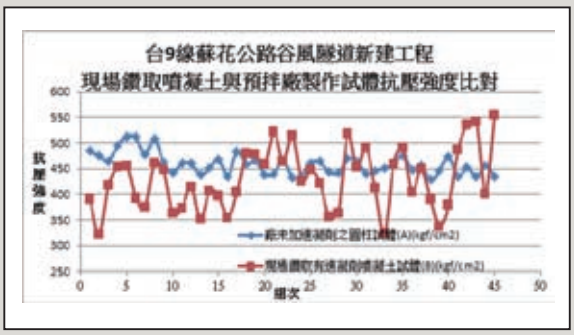


圖4 現場鑽取有速凝劑噴凝土試體及預拌廠內未摻速凝劑之製作圓柱抗壓強度比對(齡期28天)管制圖

(二) 工地試噴

工地試噴格板依ACI 506及ASTM C1140（或CNS 14917)規定執行格板試驗(Panel Test)，本工程試噴格板製作尺寸為長75CM、寬75CM、厚度20CM(ACI 506及ASTM C1140 規定長61CM、寬61CM、最小厚度8.9CM，但針對噴漿機具設備操作員資格考試格板要求長76CM、寬76CM、厚度 7.5CM)，另施工

表3 台9線蘇花公路谷風隧道新建工程B3標噴凝土配比設計表

設計強度 kgf/cm²	設計坍度	含氣量	標稱最大粒徑	需求強度	水膠比	S/A	各材料用量kg/m³							總重
							水泥(II)	矽灰	鋼纖維	粗粒料	細粒料	藥劑	水	
							C1	C5	SF1	G1	S1	AE	W1	
	mm	%	mm	kgf/cm²		%	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg/m³
210S(噴凝土)	17	2.3	10	295	0.480	66	380	0	0	628	1230	2.28	180	2420
280S(噴凝土)	18	2.6	10	365	0.492	66	429	0	0	584	1143	2.15	209	2367
255SFS (鋼纖維噴凝土)	17	2.4	10	340	0.424	66	399	28	45	588	1149	3.30	197	2409

表4 現場鑽取有速凝劑噴凝土試體及預拌廠內未摻速凝劑製作圓柱抗壓強度比對統計表(齡期28天)

	廠未加速凝劑之圓柱試體	現場鑽取有速凝劑噴凝土試體	標準差	標準差等級
統計組數n	45	45	<28.1	極優
ΣX	20659	19336	28.1~35.2	甚佳
平均強度X	459	430	35.2~42.2	良好
標準差σ	21.3	60.1	42.2~49.2	普通
變異係數V=(σ/ X)*100%	4.6	14.0	>49.2	不良
最大值	513	553		
最小值	428	322		

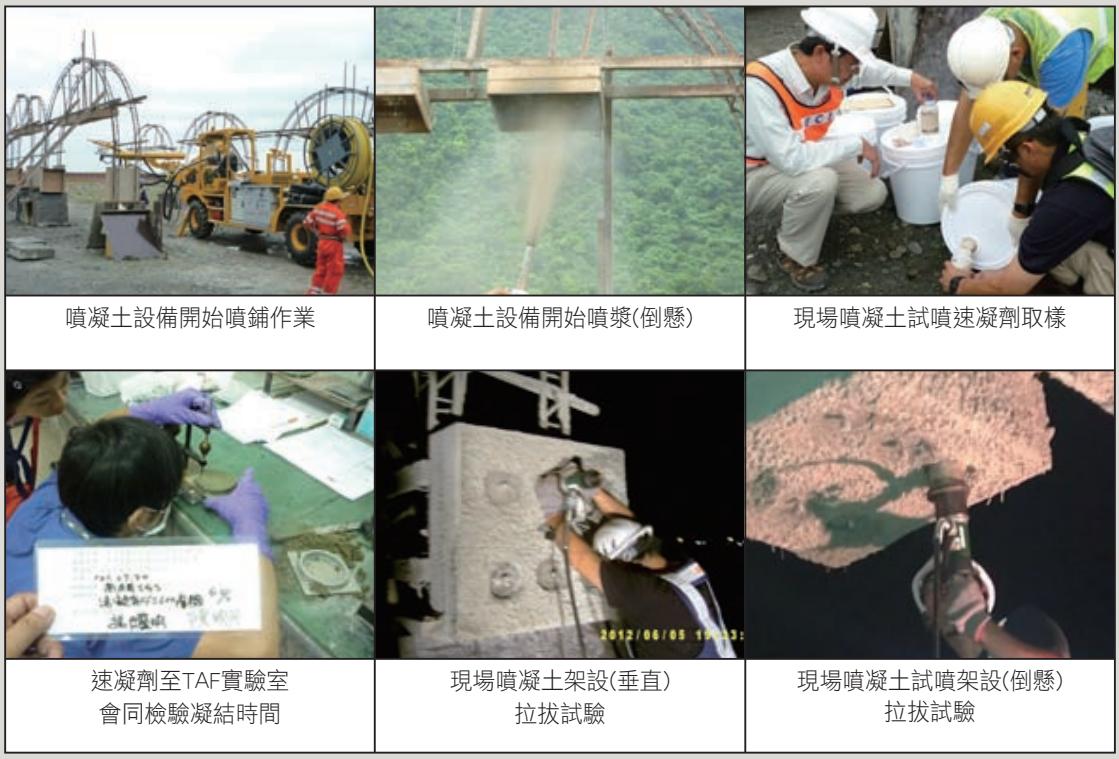
中例行驗收之格板製作尺寸為長50CM、寬50CM、厚度20CM(補充施工說明書第02424章規定長46CM、寬46CM、厚度20CM)，然ACI 506R-2005sec.6.4所引用規範ASTM C1140(等同CNS 14917)取樣規定：[不得從格板外緣向內距離等於深度加25.4mm之範圍內的噴凝土中取樣]，如以本工程施工驗收格板尺寸長50CM、寬50CM、厚度20CM為例，其取樣範圍僅剩長49.2mm、寬49.2mm可取，然規定需各3個鑽心試體直徑7.5cm及抗彎試體10cm×10cm×30cm，若依上述取樣規定則施工驗收格板製作尺寸應為長120.16CM、寬120.16CM、厚度20CM，噴凝土單位重為2409kg/m^3，淨噴凝土總重約695.6kg (不含鐵模重)，此格板尺寸及重量似乎不適宜現場取樣作業。

格板施噴時應分垂直及倒懸兩種情形施噴，試噴後在每一格板參考ASTM C900拉拔試驗，評估8小時齡期之抗壓強度，並從每一格板中鑽取直徑7.5cm之試體，依CNS 1238規定，分別試驗其3天及28天齡期之抗壓強度，詳表5工地格板試噴垂直及倒懸試驗結果統計表及圖5，試噴前需對噴漿機速凝劑流量查驗，詳圖6。

有關採ASTM C900拉拔試驗評估8小時齡期之抗壓強度中，參照 ACI 228.1R [In-Place Methods to Estimate Concrete Strength] 建現場拉拔力與圓柱試體抗壓強度關係曲線應於試驗室先前建置，然其中拉拔試驗ASTM C900 [Pullout Test] 之代表平均組內變異係數為7%~10%，是標準圓柱試體抗壓強度之2~3倍差異[7]。

表5 工地格板試噴垂直及倒懸試驗結果統計表

設計強度	試噴試驗結果	A藥劑商	B藥劑商	C藥劑商	規範值
210kgf/cm^2	8小時拉拔(倒懸)	74.9	74.4	78.3	≧50
	8小時拉拔(垂直)	82.9	90.3	86.3	≧50
	3天鑽心抗壓(倒懸)	188	197	180	≧140
	3天鑽心抗壓(垂直)	197	189	170	≧140
	28天鑽心抗壓(倒懸)	292	285	277	≧210
	28天鑽心抗壓(垂直)	302	299	255	≧210
255kgf/cm^2	8小時拉拔(倒懸)	91	92	99.3	≧50
	8小時拉拔(垂直)	109.5	104.3	110.1	≧50
	3天鑽心抗壓(倒懸)	200	199.3	188.3	≧170
	3天鑽心抗壓(垂直)	204.7	205.7	216.7	≧170
	28天鑽心抗壓(倒懸)	295.7	259.3	329.3	≧255
	28天鑽心抗壓(垂直)	322.3	286	322.7	≧255
	28天切割抗彎(垂直)	66	54.7	65	≧50
	28天切割抗彎(倒懸)	68.7	53.6	65.3	≧50
	28天切割抗彎韌性指數I5(垂直)	4.6	5	4.7	≧4
	28天切割抗彎韌性指數I5(倒懸)	4.8	4.6	4.9	≧4
	28天切割抗彎韌性指數I10(垂直)	8.3	8.6	8.7	≧6
	28天切割抗彎韌性指數I10(倒懸)	8.8	6.9	8.9	≧6
	28天切割抗彎韌性指數I20(垂直)	12	13.5	14.3	≧10
	28天切割抗彎韌性指數I20(倒懸)	14	12.5	14.1	≧10



噴凝土設備開始噴鋪作業 | 噴凝土設備開始噴漿(倒懸) | 現場噴凝土試噴速凝劑取樣

速凝劑至TAF實驗室會同檢驗凝結時間 | 現場噴凝土架設(垂直)拉拔試驗 | 現場噴凝土試噴架設(倒懸)拉拔試驗

圖5 工地噴凝土試噴

流量設定 | 配比確認 | 開始測試

桶接劑量

劑量秤取

噴凝設備之速凝劑計量查驗

流量設定(kg/hr.)	450		
等值流量(kg/min.)	7.5		
流體比重(用水量測)	1.0		
速能劑用量(%)	6.0		
設定量測時間(min)	1.0		
量測流量kg	NO.1	NO.2	NO.3
	7.733	7.785	7.748
平均量測流量(kg)	7.755		
計算量測流量(kg/min.)	7.76		
量測誤差%	6.40		
實測速能劑用量誤差%	0.20		

查驗計算

圖6 速凝劑流量查驗

ACI 506R-05 Sec.9.8指明報告內所載7種評估方法，用於評估抗壓強度可能不具可靠度。今工程採用日本JSCE-G 561-2005 [Test method for early strength of sprayed concrete by pullout method] 並參照日本JSCE-G 561-2005解說，依據日本道路公團[JHS 702-1992]，建議抗壓強度≒4τ [8]，詳表6。

表6 ASTM C900-13與JSCE-G 561-2005差異表

差異性	美國ASTM C900-13	日本JSCE-G 561-2005	備註
應力表示	正應力表示fn=P/A Sinα	剪應力表示τ=P/A	影響試驗結果要素：崁入噴凝土之拉拔設備架構、承壓環尺寸、埋入深度、粒料尺寸大小。
拉拔設置斷面	d3介於2.0~2.4d2；h=d2；d4≧1.25d3；d1≦0.6d2	d3=3d2；h=1.8d2；d4未說明；d1=0.6d2	埋入深度h，影響拉拔力主因，故日本試驗拉拔力大於ASTM。
拉拔試驗轉換抗壓強度	參照 ACI228.1R [In-Place Methods to Estimate Concrete Strength] 建置現場拉拔力與圓柱試體抗壓強度關係曲線，對於新建結構物，此關係曲線應於試驗室先建置，報告內容共載有7種評估方法，然其中拉拔試驗之代表性平均組內變異係數為7%~10%，是標準圓柱試體抗壓強度之2~3倍差異。	參照日本JSCE-G 561-2005解說，依據日本道路公團[JHS 702-1992]建議抗壓強度≒4τ。	

表7 料源砂石生產進料檢驗停留點項目及頻率表

試驗項目及試驗方法	檢驗頻率
細粒料： 篩分析CNS 486、表面含水率 CNS489、通過0.075mm篩CNS 491、土塊及易碎顆粒CNS 1171、健度CNS 1167、水溶性氯離子含量CNS13407、有機不潔物CNS 1164、煤及褐炭輕質顆粒CNS 10990。	1. 料源改變。 2. 時間管制： 每日試驗項目： 粗細粒料篩分析、表面含水量、混凝土氯離子含量、新拌混凝土溫度、新拌混凝土坍度。 每週試驗項目： 土塊及一碎顆粒、通過0.075mm之細粒料、新拌混凝土單位重CNS 3090。 每6個月試驗項目： 粗粒料健度、細粒料健度、粗粒料磨損。 每12月試驗項目： 預拌廠計量器設備、廠拌均勻性、粗細粒料每年檢驗1次(檢驗項目為左列項目)。 3. 水溶性氯離子管制： 細粒料、新拌混凝土、硬化混凝土：每一料源至少1 次，有疑慮時隨時檢測。
粗粒料： 篩分析CNS 486、通過0.075mm篩CNS 491、表面含水率CNS489、土塊及易碎顆粒CNS 1171、健度CNS 1167、磨損CNS 490、破碎面(二面)、煤及褐炭輕質顆粒CNS 10990。	

三、預拌廠料源砂石及鋼纖維混入率管理項目

(一) 料源砂石生產進料管制

有關料源砂石生產進料檢驗停留點項目及頻率表，詳表7及圖7。

(二) 鋼纖維噴凝土鋼纖維混入率

對於加入鋼纖維之混凝土，依據ASTM C143試驗方法測量坍度，因鋼纖維之長徑比及鋼纖維用量增加，將導致測量的坍度被放大，故ACI 544.1R-1996建議採用ASTM C995 [Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete

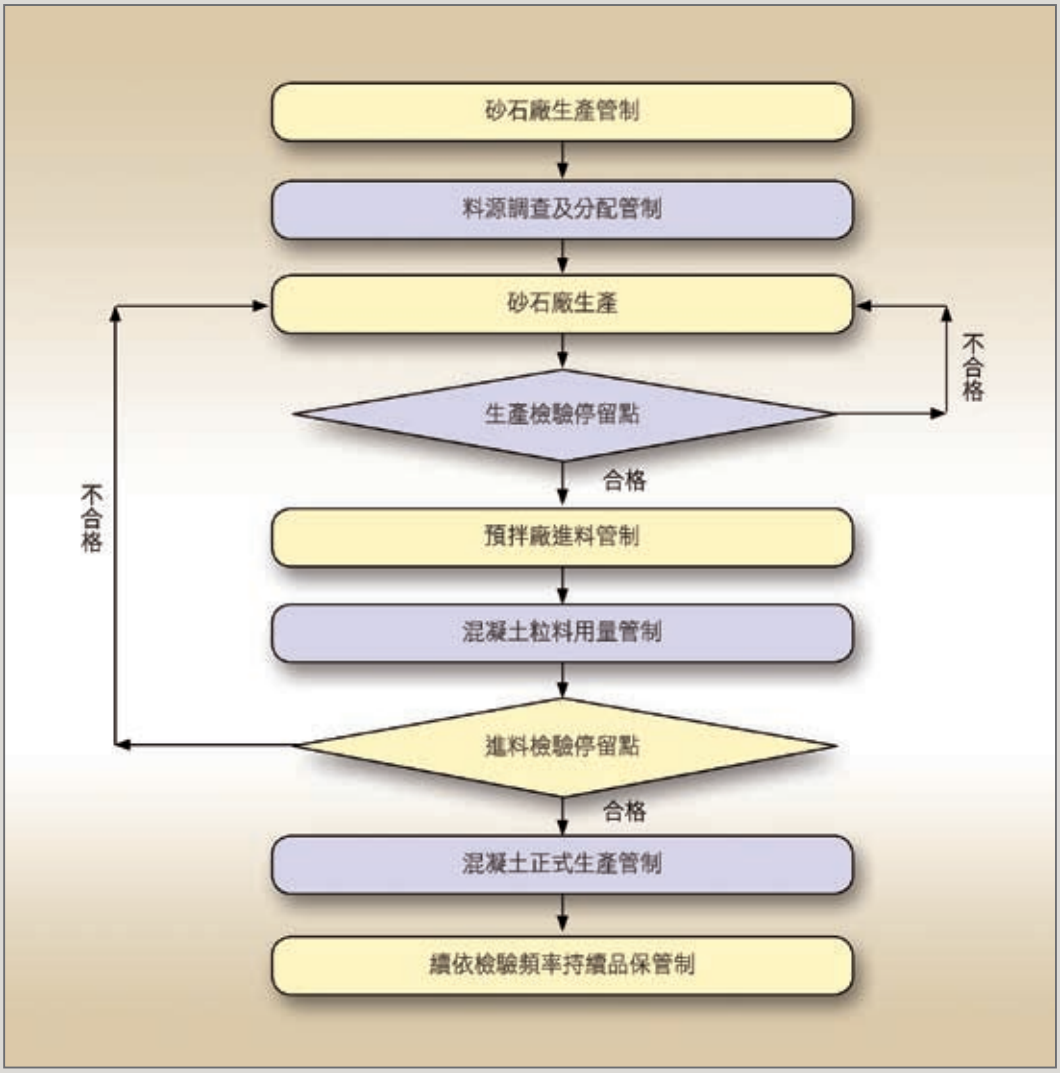


圖7 料源生產進料管制流程圖

Through Inverted Slump Cone] 或The Vebe Test (BS 1881)評估新拌鋼纖維混凝土流動時間之工作性[6]。通常鋼纖維用量大約0.5%~2.0%的拌合體積(約39 kg/m³至157kg/m³)，本工程鋼纖維噴凝土鋼纖維摻入量為45 kgf/m³佔配比體積約0.5%。為管控預拌混凝土廠鋼纖維含量生產變異性，依據日本鋼纖維噴凝土鋼纖維混入率含量試驗(wash-out testing，水洗法)，分別抽驗廠內拌合車及該拌合車至工地的鋼纖維混入率含量，以了解廠內生產及經運送至工地後鋼纖維含量變化與均勻性，詳表8及圖8。

由鋼纖維含量平均值48 kg/m³，標準差1.07 kg/m³、變異係數2.24%、最大值51.1kg/m³、最小值45.1 kg/m³，全距最大值3.8 kg/m³、最小值0.3 kg/m³，顯示廠內生產及經運送至工地後鋼纖維含量之變異小，其均勻性佳、無結球及鋼纖維沉澱析離現象。

四、工地試體噴鑽與驗收

為統一噴凝土試體制式化管理，故擬定隧道噴凝土試體製作、取樣、養護、切割及送驗標準作業流程，分別說明如下。

表8 鋼纖維混入率含量(日本wash-out testing，水洗法)檢驗差異統計表

材料名稱：鋼纖維		X_i 個別值(kg/m³)			該組平均	連續五組強度平均	該組全距	連續十組全距平均	備註
組號	取樣日期	X1 (廠內拌合車取樣)	X2 (工地拌合車取樣)	X3					
1	2014/5/11	48.7	50.3		49.5		1.6		
2	2014/5/12	46.1	49.0		47.6		2.9		
3	2014/5/13	49.6	47.3		48.5		2.3		
4	2014/5/14	47.6	46.6		47.1		1.0		
5	2014/5/15	48.3	49.7		49.0	48.3	1.4		
6	2014/5/16	48.9	45.9		47.4	47.9	3.0		
7	2014/5/17	50.0	47.7		48.9	48.2	2.3		
8	2014/5/18	47.1	49.0		48.1	48.1	1.9		
9	2014/5/19	46.0	47.0		46.5	48.0	1.0		
10	2014/5/20	45.1	45.6		45.4	47.2	0.5	1.8	
11	2014/5/21	47.6	48.6		48.1	47.4	1.0	1.7	
12	2014/5/22	50.1	49.1		49.6	47.5	1.0	1.5	
13	2014/5/23	49.6	46.7		48.2	47.5	2.9	1.6	
14	2014/5/24	49.0	47.0		48.0	47.8	2.0	1.7	
15	2014/5/25	47.9	46.3		47.1	48.2	1.6	1.7	
16	2014/5/26	47.0	49.6		48.3	48.2	2.6	1.7	
17	2014/5/27	48.4	46.0		47.2	47.8	2.4	1.7	
18	2014/5/28	47.9	47.3		47.6	47.6	0.6	1.6	
19	2014/5/29	50.7	48.6		49.7	48.0	2.1	1.7	
20	2014/5/30	46.9	48.3		47.6	48.1	1.4	1.8	
21	2014/5/31	49.4	47.9		48.7	48.1	1.5	1.8	
22	2014/6/1	46.6	49.1		47.9	48.3	2.5	2.0	
23	2014/6/2	46.0	48.1		47.1	48.2	2.1	1.9	
24	2014/6/3	45.6	47.4		46.5	47.5	1.8	1.9	
25	2014/6/4	49.4	46.9		48.2	47.6	2.5	2.0	
26	2014/6/5	46.6	47.9		47.3	47.4	1.3	1.8	
27	2014/6/6	51.1	47.3		49.2	47.6	3.8	2.0	
28	2014/6/7	48.4	46.9		47.7	47.8	1.5	2.1	
29	2014/6/8	46.0	45.7		45.9	47.6	0.3	1.9	
30	2014/6/9	48.7	51.0		49.9	48.0	2.3	2.0	

統數組數n	30	Rm=規定值*V1*d_2	4.38
ΣX	959	組內全距平均值R=ΣR/n	1.837
平均X	48.0	組內標準差σ1=R/d_2	1.08
標準差σ	1.07	組內變異係數V1=(σ1/X)*100%	2.26%
變異係數V=(σ/X)*100%	2.24	連續十組全距平均值	1.790
		d_2=	1.693

(一) 隧道現場噴凝土作業

隧道噴凝土試體種類計有現場鑽心抗壓圓柱試體、格板鑽心抗壓圓柱試體、格板切割抗彎長條試體3種。

(二) 噴凝土格板試體噴製

格板鑽心抗壓圓柱試體及格板切割抗彎長條試體2種，依頻率及試體噴製管制表，噴製格板大小為46cm×46cm×20cm。

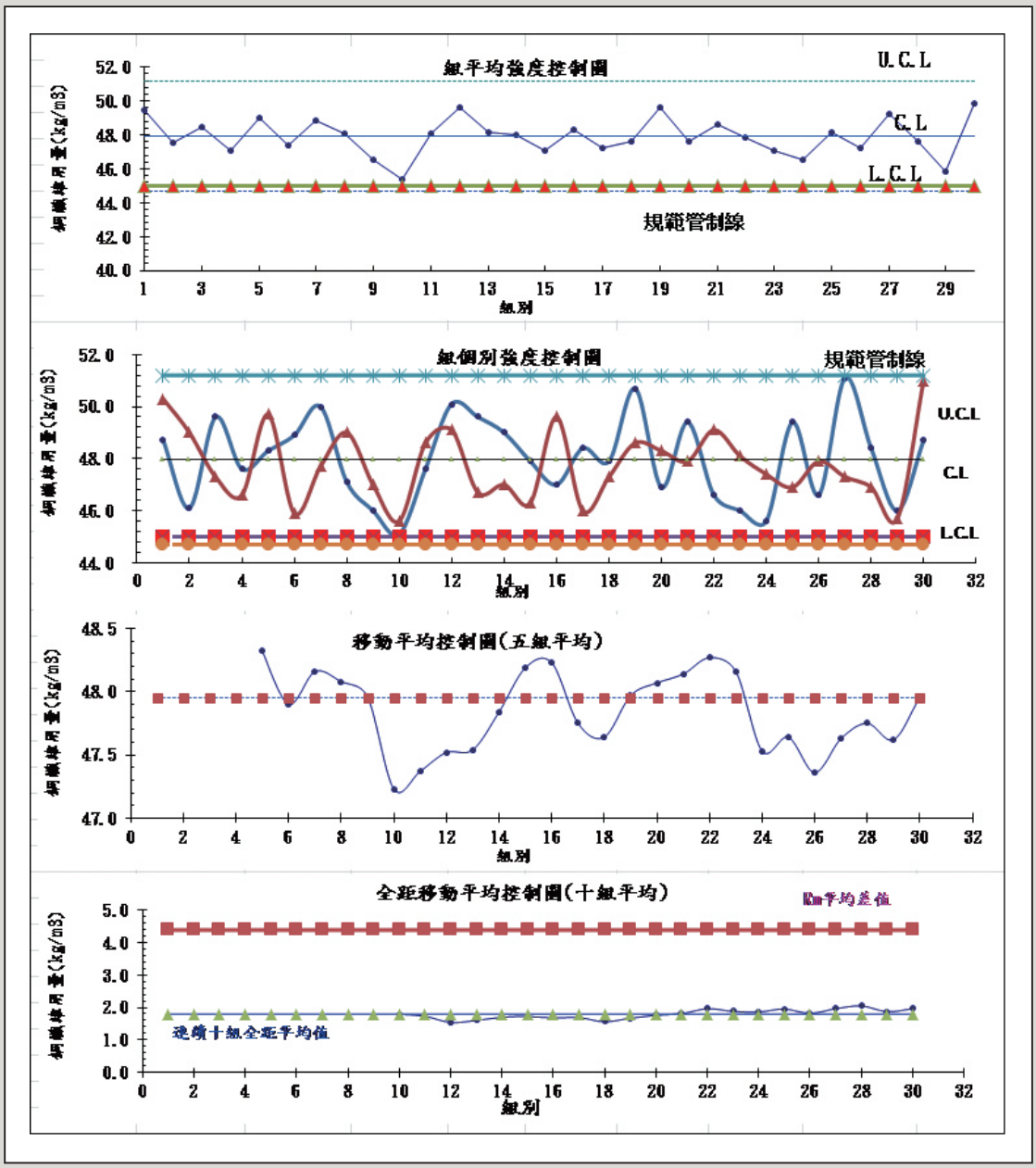


圖8 鋼纖維混入率含量(日本wash-out testing水洗法)檢驗差異管制圖

(三) 噴凝土格板試體識別

工班噴製格板，待噴凝土硬固後(約15分鐘)，由工班於格板試體粗糙表面噴漆識別；以B3標為例，「NS7/ T96/102.01.23」，NS7：北上線南向工作面；T96：第T96輪；102.01.23：噴製格板日期，噴製完成後其工班須回報品管工程師，以利追蹤管制。

(四) 噴凝土格板試體移置管制區

噴製後第2天，工班將格板試體移置集中試體暫儲養護管制區；以B3標為例，設置於8K+225橫坑與NS7及SS8主隧道交叉口2處，10K+768橫坑入口1處，設置點需隨工作面進度而調整。

(五) 噴凝土格板試體簽名

監造及承包商現場工程師，需會同於格板試體簽名，以當天噴製格板試體值班工程人員為主。

(六) 噴凝土格板試體現場養護

依規定模擬現場條件養護，養護歷程為期3週。

(七) 現場及格板圓柱抗壓噴凝土試體鑽取

3週後進行現場及格板圓柱抗壓噴凝土試體鑽取，現場圓柱抗壓噴凝土試體鑽取1組3個試體，辦理28天齡期抗壓強度試驗(作為判斷合格與否之依據)；格板圓柱抗壓噴凝土試體鑽取1組3個試體，辦理3天齡期抗壓強度試驗(作為施工品管之參考)，經隨機鑽取並由監造及承包商現場工程師，會同於鑽心試體簽名且置於集中試體暫儲養護管制區，以利材料工程師送驗作業。

(八) 噴凝土格板抗彎試體切割

材料工程師3週後，將噴凝土格板抗彎試體送至切割廠裁製抗彎試體1組6個試體，辦理28天齡期之3個抗彎、3個抗彎韌性試驗(作為判斷合格與否之依據)。

(九) 噴凝土試體送驗、會壓及試驗結果評核

材料工程師連同現場鑽心抗壓圓柱試體、格板鑽心抗壓圓柱試體、格板切割抗彎長條試體，應於試驗齡期前3日內，由監造及承包商材料工程師會同送至TAF實驗室，以利進行後續會試及試驗結果評核分析。

貳、規範探討

有關鋼纖維噴凝土用材料名稱、施工規範、試驗方法、試驗項目及檢驗頻率表(詳表1)及施工說明書第02424章隧道噴凝土中材料規定異同處(詳表9)，摘述規範探討如下：

一、鋼纖維稱量允許差及批次代表數量

有關預拌廠生產之每盤配比稱量允許差，於ACI 506-R2005規定：「水泥允許差：配比權重±2%、粒料允許差：配比權重±4%、附加劑允許差：配比權重±6%」，惟查鋼纖維允許差ACI未說明，施工說明書規定鋼纖維噴凝土鋼纖維最少摻入量45 kgf/m^{3}僅為下限要求，對於規範允許上下限允許差的精神及預拌廠磅秤的精確度未予規定；然由經驗得知，預拌廠生產噴凝土稱料允許差之限制是可以放寬的，因此建議鋼纖維噴凝土之鋼纖維允許差可同水泥允許差：配比權重±2%。

至於取樣批次代表數量，施工規範載明：[鋼纖維噴凝土每批鋼纖維之品質應符合ASTM A820 TYPE Ⅰ規定]，未說明批次代表數量，而ASTM A820試驗方法：[規定以每批5噸且至少隨機採取10個以上試樣，且於第1.3節：說明當產品說明書和本說明書之間要求發生衝突情況下，以該產品說明書為準。]；為使取樣批次明確化以免混淆；建議施工規範修改為：[鋼纖維噴凝土之鋼纖維品質及取樣頻率應符合ASTM A820 TYPE Ⅰ規定]，取樣批次代表數量仍以試驗規定為主。本工程要求取樣頻率為(1)料源改變取樣1次(2)數量管制：每批取樣1次，批次中每5噸取代表性樣品，再混樣為批次樣品送驗(3)時間管制：每年取樣1次，另要求承商須提報供應商之廠自主檢查報告，並視需要得至供應廠驗廠及採原母材鋼板取樣送驗。

二、試噴拉拔標準

有關施工說明書規定依ASTM C900執行工地噴凝土試噴拉拔標準試驗，評估8小時齡期之抗壓強度，前已於第壹、二、(二)章節說明，建

表9 施工說明書第02424章隧道噴凝土中有關材料規定異同處

項目	台9線谷風隧道新建工程補充施工說明書 (100年07月版)	公路總局施工說明書 (101年版)	工程會施工綱要 (101年V6.0版)
施工方法	濕拌法。	濕拌法或乾拌法。	濕拌法或乾拌法。
相關標準	無引用中華民國國家標準(CNS)	引用中華民國國家標準(CNS)： CNS 14688 A2280　噴凝土用材料 CNS 14689 A2281　噴凝土用摻料 CNS 14917 A3402　噴凝試驗格板樣品之準備與測試法 CNS 12892 A2247　纖維混凝土用鋼纖維	
凝結方法	速凝劑凝結時間方法ASTM C1141及ASTM C1398規定	速凝劑凝結時間方法CNS 14689規定	速凝劑凝結時間方法CNS 14689及ASTM C1398規定
配比規定	噴凝土水泥參考使用量為400 kgf/m³，鋼纖維噴凝土之水泥參考使用量為420 kgf/m³，並得於5%範圍內調整。	噴凝土水泥參考使用量為400 kgf/m³，鋼纖維噴凝土之水泥參考使用量為420 kgf/m³，並得依配比成果調整。	與台9線谷風隧道補充施工說明書一致。
級配選用	級配有 I、II、III 3種級配。	級配 I、II 2種級配。(與ACI 506R-05相同)	級配須符合CNS 14688級配編號1、級配編號2、級配編號3。
速凝劑用量規定	無用量規定。	1. 5.6(3)噴凝土(含鋼纖維噴凝土)之速凝劑用量應依1.5.4噴凝土配比試驗及3.3試噴成果辦理。 2. 1.6(3)速凝劑之參考用量以水泥之(5±2)%為原則，另遇特殊地質狀況，或其添加比例經工程司確認仍可符合施工品質要求時，該速凝劑用量之限制得酌予放寬，惟上限部分仍不得超過下列規定： A.採用粉狀速凝劑，用量不得超過水泥用量之8%。 B.採用液狀速凝劑，用量不得超過水泥用量之10%。	無用量規定。
鋼纖維要求	鋼纖維品質應符合ASTM A820 TYPE I 規定。	鋼纖維品質應符合CNS 12892 A2247第一類規定	與台9線谷風隧道補充施工說明書一致。
附加減水劑規定	附加之減水劑及強塑劑，其品質應符合ASTM C494規定。輸氣劑應符合ASTM C260規定。	附加之減水劑及強塑劑，其品質應符合CNS 12283規定。輸氣劑應符合CNS 9208規定。	附加之減水劑及強塑劑，其品質應符合CNS 12283規定。輸氣劑應符合CNS 3091規定。
飛灰及高爐石粉	不得添加飛灰及高爐石粉等導致緩凝之添加料。		無此規定是否制止添加。
工地試噴	工地試噴應依ACI 506規定，餘三者相同。	工地試噴應依ACI 506及CNS 14917規定，餘三者相同。	工地試噴應依CNS 14917規定，餘三者相同。
鑽心抗壓試驗	試驗方法為ASTM C42規定辦理，餘三者相同。	試驗方法為CNS 1238規定辦理，餘三者相同。	試驗方法為CNS 1238規定辦理，餘三者相同。
格板抗彎試驗	應依ASTM C78抗彎試驗。	應依CNS 1233之抗彎試驗。	應依CNS 1233之抗彎試驗。
噴凝土厚檢驗度	無此規定。	3.6.3工程司應依工程特性選擇適當方法檢驗噴凝土厚度，必要時得進行鑽心試驗檢驗。	無此規定
次品質噴凝土	與公路總局內容相同，惟第(1)、(2)A、及(2)B個別值及平均值與工程會規定相反，建議應修正同工程會一致，方符合ACI 506 1.6.2.4「The mean compressive strength of a set of three cores shall equal or exceed 0.85 fc' with no individual core less than 0.75 fc'. The mean of a set of three cubes shall equal or exceed fc' with no individual cube less than 0.88 fc'.」規範述求。	3.6.4各式噴凝土試驗結果具有下列情形，但經工程司研析結果並不影響結構安全而予接受時，則該批噴凝土謂之「次品質噴凝土」。 (1) 噴凝土 1個或多個抗壓試體強度低於178 kgf/cm²，但3個試體之平均強度大於157 kgf/cm²。 (2) 鋼纖維噴凝土 A. 1個或多個抗壓試體強度低於216 kgf/cm²，但3個試體之平均強度大於191 kgf/cm²。 B. 1個或多個抗彎試體強度低於50 kgf/cm²，但3個試體之平均強度大於42 kgf/cm²。 C. 1個或多個試體抗彎韌性試驗I5＜4，I10＜6，I20＜10，但3個試體平均之I5＞3，I10＞4，I20＞8。	3.3.3各式噴凝土試驗結果具有下列情形，但經工程司研析結果並不影響結構安全而予接受時，則該批噴凝土謂之「次品質噴凝土」。 (1) 噴凝土 一個或多個抗壓試體強度低於[157] [　　] kgf/cm²，但三個試體之平均強度大於[178] [　　] kgf/cm²。 (2) 鋼纖維噴凝土 A. 一個或多個抗壓試體強度低於[191] [　　] kgf/cm²，但三個試體之平均強度大於[216] [　　] kgf/cm₂。 B. 一個或多個抗彎試體強度低於[42] [　　] kgf/cm²，但三個試體之平均強度大於[50] [　　] kgf/cm²。 工程會未對抗彎韌性之次品質噴凝土規定作說明。

議仍須依據ACI 228.1R建置現場拉拔與抗壓強度關係曲線。

三、驗收材料項目與頻率之契約制式化

有關鋼纖維材料於施工說明書與依據試驗方法的規定值、取樣的批次代表數量與頻率應予明確化，以免造成契約執行爭議，建議於施工說明書中檢驗章節，明確表列如表1模式，載明此章節所使用材料設備、試驗項目、試驗方法、規定標準及檢驗頻率，以利契約執行之明確量化。

參、結論與建議

一、噴凝土乃系統混凝土，需考量預拌廠內材料生產管控、噴漿機具的性能、隧道地質及施工因素，且影響鋼纖維噴凝土的兩大參數水膠比(w/cm)及水泥與粒料之比例。故粗、細粒料級配選配，應考量噴凝土乾縮量、彈性模數、泵送能力、回彈量、耐久與經濟等效益，工地現場試噴及工班能力驗證，是不容忽視的課題。

二、噴凝土噴製施作方式，易造成噴凝土不良壓實度及蘊藏不均質弱面、空隙存在，建議配比需確認單位重及空氣含量(空氣含量建議不得大於5%)[1]，且依據ASTM C642試驗求得噴凝土鑽心試體的吸水率及透水空隙體積，鑑別噴凝土噴佈壓實度、弱面或微觀結構危害的程度指標，可參酌ACI 506.R-2005建置允收之透水空隙體積為14%至17%及煮沸之吸水率是6至9%間。

三、一般工程大多依ACI 211.1或CNS 12891進行混凝土配比設計，惟未規定須依ASTM C1074建置成熟度指數(maturity index)，將傳統加溫養護及時間之理念，以溫度與時間乘積組合為勒斯一索羅(Nurse—Saul)成熟度，並採ASTM C918來預估強度方法。因現場鑽取噴凝土強度變異大不易建置，然可針對廠內生產未加速凝劑前的噴凝土配比或其他種類混凝土的強度，建置成熟曲線來控制生產強度。

參考文獻

1. ACI 506R-05 Guide to Shotcrete---Reported by ACI Committee 506。
2. ACI 506.1R-98 Committee Report on Fiber Reinforced Shotcrete---Reported by ACI Committee 506。
3. ACI 506.2-95 Specification for Shotcrete----Reported by ACI Committee 506。
4. ACI 506.3R—91 Guide to Certification of Shotcrete Nozzlemen---Reported by ACI Committee 506。
5. ACI 506.4R-94 Guide for the Evaluation of Shotcrete---Reported by ACI Committee 506。
6. ACI 544.1R-1996 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete---Reported by ACI Committee 544。
7. ACI 228.1R-95 In-Place Methods to Estimate Concrete Strength Reported by ACI Committee 228。
8. 日本隧道工程標準規範及解說，[山岳工法篇]、財團法人中興工程科技研究發展基金會譯印，中華民國90年6月。

2
專題報導