

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※

※

※ 配 比 參 數 對 自 充 填 混 凝 土 彈 性 模 數 與 ※

※ 收 縮 性 質 影 響 之 研 究 ※

※

※

※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別：☒個別型計畫 ☐整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2211-E-002-156

執行期間：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

計畫主持人：詹穎雯

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：台灣大學土木所

中 華 民 國 91 年 10 月 31 日

一、緒論

自充填混凝土 (Self-Compacting Concrete 簡稱 SCC)，是一種在流動性與鋼筋通過性兩方面取得巧妙平衡，而能在沒有任何震動的情形下，即可自行充填至模版各角落的混凝土。由於自充填混凝土不需要震動搗實，因此消除了一個土木結構，在整個施工環節上，因為人可能造成的混凝土品質低落的因素，使得真實的結構物可以反應原先的設計值，而確保了結構物的品質與安全。因此，SCC 的發展，自從兩年前在台灣發展以來，正以一種驚人的速度普及中。

眾所周知，預鑄廠內多使用低坍度，甚至是無坍度混凝土，這是由於預鑄廠擁有現地不可及的良好的施工環境，使得這種需要大量震動搗實的混凝土變得可行。不過近年來，預鑄廠開始體認到自動化施工的重要性，這無疑是給具有高度流動性，可透過管線澆注的 SCC 一個運用機會。因此 SCC 於預鑄構件的可行性研究，或說，產製早強 SCC 之研究，為本文研究之第一個重點。此外，雖然 SCC 已經相當普及，惟在配比方面，例如細骨材在 SCC 所扮演角色，或者是 SCC 到底適不適合使用輸氣等，在在發現仍有許多現象欠缺剖析，因此徹底對 SCC 的配比作一全盤性之瞭解，本文研究 SCC 配比的主要目的。

二、文獻回顧

分述傳統、高強度與高性能混凝土配比原理。

自充填混凝土配比設計原理，在配比設計原理方面，分就混凝土中粗骨材、細骨材、粉體以及化學摻料在 SCC 中的角色作詳細文獻回顧：概述如下。

粗骨材：在考量鋼筋通過性的要求下，SCC 的粗骨材最大粒徑一般限制在 3/4"，實用上多以 1/2" 為主流。在粗骨材的總量上也有上限，一般以絕對體積 0.28~0.30m³ 為粗骨材建議用量，太多的粗骨材會導致自充填性的大幅下降。

細骨材：細骨材方面，掌握幾個變數是相當重要的，例如 V_s/V_m 一般建議在 0.4 會有最佳的充填效果，F.M. 一般建議在 2.3~3.2 之間，實用上多以 2.7~2.8 為主流，過細容易導致含水率的掌控不易，過粗易導致容易浮水的現象。砂率在 SCC 中僅為參考指標，不過當過大時得注意乾縮潛變量會放大的問題。

粉體：粉體一般指水泥、爐灰、石粉等，粉體的多寡直接影響 SCC 的自充填性，一般來說，粉體越多，自充填性會越好。不過粉體量的提高也代表成本的提高，因此許多的研究均在於如何降低 SCC 的粉體量。

化學摻料：由於 SCC 對於流動性的高度要求，因此如何預防長途運輸後，坍損所導致的流動性損失，變得極為重要。傳統的奈磺酸系強塑劑，被證明無法滿足 SCC 抗坍損的需求。因此另一種成分的強塑劑-羧酸聚合物 (polycarboxylic acid 簡稱 PCA)，開始被重視並採用，此外，因為增稠劑與羧酸系強塑劑較為相容，因此更助長了羧酸系強塑劑在 SCC 上的主流地位。同時輸氣劑也被證明有助於拌置 SCC。

在配比設計方面，可分為三種主要配比設計模式：

粉體系 SCC 配比設計法：還是維持相同的粉體量，但是取代以較便宜的粉體材料，例如使用成本較低的爐石、飛灰來取代水泥，是國內常用的方式。

增稠劑系 SCC 配比設計法：使用增稠劑，使得在粉體量降低時，可以維持相同的黏稠度而能抵抗材料析離。

併用系 SCC 配比設計法：所謂併用系配比設計法，就是綜合粉體系，使用低成本爐石、飛灰或石粉，以及增稠劑系，使用增稠劑，兩者同時使用來達成 SCC。

本節並舉出兩種配比設計實例，分別是 Okamura 配比設計實例與 JSCE 配比設計實例。前者可歸類為粉體系 SCC，後者較偏向於併用系 SCC。

三、實驗計劃

早強 SCC 的定義為兩部分，第一部份需滿足 R2 障礙 SCC 的通過標準，即為坍流度 $60 \pm 10\text{cm}$ 、箱型試驗 30cm 以上。第二部分需滿足早強的標準，即為 $10 \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體 12 小時強度之目標為 90kg/cm^2 ，不過由於溫度對於早期強度發展影響頗巨，因此不同的養護溫度，也會有不同的 12 小時強度。因此強度標準的更確實定義乃是必須的。於是更清楚的強度目標應為，12 小時強度不低於預鑄廠原配比，於相同養護條件（溫度、濕度）下，12 小時之強度表現。而且 28 天設計強度應為 5000psi 。

針對 SCC 早強部分的試拌方式有(1)奈磺酸系強塑劑(2)奈磺酸系強塑劑+增稠劑(3)羧酸系強塑劑+早強劑(4)提高水泥用量(5)奈磺酸系強塑劑+高粉體用量（ 500kg/m^3 以上）(6)降低羧酸系強塑劑用量(7)不同種類之羧酸系強塑劑(8)羧酸系+熱模養護(9)奈磺酸系+輸氣劑(10)熱水試拌。

在 SCC 配比深入研究方面，可分為幾個子題，分別為(1)細骨材之影響力(2)輸氣對 SCC 之影響(3)SCC 初終凝時間之量測(4)SCC 早期成熟度之量測。

此外並針對試拌所得的 SCC 試體進行 E 值的量測，以統計 SCC E 值偏低的情形，並從配比的角度的探討現象的成因。

四、實驗結果與討論

在早強 SCC 試拌方面，實驗結果如下：

(1)奈磺酸系強塑劑：發現在膠結量（ 420kg/m^3 ）與水量（ 175kg/m^3 ）設定下，沒有辦法得到 SCC 的流動效果，除非增加水量，但是這樣會影響 12 小時強度，或者單純增加強塑劑用量，不過這樣一直添加到析離還是沒有辦法得到該有的流動性。

(2)奈磺酸系強塑劑+增稠劑：實驗結果是沒效果。根據提供增稠劑的廠商表示，該種增稠劑本來就可能與奈磺酸系不相容。

(3)羧酸系強塑劑+早強劑：廠商編號 T1 早強劑對終凝之後的混凝土強度發展有幫助，但對於縮短初終凝時間看不出有明顯效果。

(4)提高水泥用量：證明水泥用量提高對流動性大有助益，但由於成本考量，與過高的水泥用量會導致混凝土因水化熱而膨脹導致開裂的問題，因此雖流動性達到 SCC 標準，但本組配比在實用上的價值仍有待商榷。

(5)奈磺酸系強塑劑+高粉體用量（ 500kg/m^3 以上）：配比 32 顯示，當膠結量固定在 540kg/m^3 ，其中水泥佔 385kg ，餘為爐灰；用水量在 $170 \sim 180\text{kg/m}^3$ 之間；則坍度= 27cm ，坍流度 $60 \sim 70\text{cm}$ 之間，並且 12 小時強度在 53kg/cm^2 （養護溫度 22°C 下，目標強度約 56kg/cm^2 ）。數據皆符合標準。但 28 天強度為 8500psi ，超過設計強度 5000psi 甚多。

(6)降低羧酸系強塑劑用量：將強塑劑用量由 1.3%，降低到 0.7%，在相同養護條件下，雖然可以將初凝時間由 13.6 小時大幅降低到 8.8 小時（相同養護環境下，早強需求的初凝時

間要求為 5 小時以內)，但羧酸系的最大優勢；低膠結量 (450kg/m^3 以下) 卻消失了，因此，在 0.7% 的羧酸系使用下，膠結量必須要提高到 500kg/m^3 以上方可有 SCC 之效果。

(7) 不同種類的強塑劑：配比 45，擁有相當優良的 SCC 性能，但經含氣儀檢驗，發現含氣量高達 10% 以上，這對強度有相當大的傷害，28 天強度不到 4000psi。配比 62~64，發現此羧酸系強塑劑相當優良，惟含氣量有隨著膠結量降低而增加之趨勢，當膠結量降至 420kg/m^3 ，雖仍有不錯的自充填性能，但含氣量已達 8%。配比 64，初凝時間 7.6 小時，在相同養護環境下，這是羧酸系中，最接近 5 小時（早強要求之初凝時間）的一組。

(8) 羧酸系 + 熱模養護：配比 68，中午 12:30 分下料，下午 2:05 開始養護，以 11°C/hr 升溫至 70°C ，下午 5:30 分混凝土初凝。總計養護時間達 3.4 小時，初凝時間約 5 小時，恰符合早強需求的 5 小時。如圖 4-4 所示。發現前置期養護是相當有效的，並且不會損失其晚期強度，由於考量到成本增加的問題，因此沒有再進行後續的實驗，不過當有必要時（配筋過密之構件的澆置），使用羧酸系 SCC 再加以前置期熱模養護，不失為一可行之方案。

(9) 奈磺酸系 + 輸氣劑：配比 76、77 可以明顯看出，當含氣量由 1.4% 提升到 5.8% 時，在不改變 SCC 的流動性下，可以將用水量大幅降低 27kg/m^3 。不過透過配比 77、79 可發現，每 1% 氣泡約折損 6% 強度，因此 12 小時強度也大幅由 42.7kg/cm^2 降低到 27.1kg/cm^2 。

(10) 熱水試拌：這原本是一個非常有創意的想法，但是經實際的試拌結果，發現這當中有幾個困難點，將導致結果的不準確性，因此不擬採用。

在配比深入研究方面，實驗結果如下：

細骨材粗細砂級配對 SCC 配比穩定性之影響：一般產製 SCC 所使用之細骨材的細度模數約 2.7~2.8 之間。我們發現，當細骨材調配過細時，可能會產生強度不足的問題，茲詳述於後。事實上，由於 SCC 對於粉體量的需求，使得 SCC 的粉體使用量普遍高於傳統混凝土，此外，更由於 SCC 對於水分控制的敏感，也使得工人偷加水得以杜絕，因此，在一般工程的使用上，使用 SCC 可說就是強度的保證，這點對混凝土的品質無疑是一大進步。但根據我們的研究指出，當 F.M. 約 2.3 的細骨材被使用時，由於過細的細骨材被使用，會導致符合自充填性的坍流度，在用水量較高的情形下才會出現。不但這樣，由於配比顆粒過於緻密的結果，使得混凝土因而不容易析離！因此我們發現以現行預拌廠的設備，是沒有辦法根據目視坍流度的變化，以及拌合機拌合電流值的情形來察覺到這個現象，因此導致可能無形中，由於細骨材含水率的變動，而使水分多加而無從得知。根據實驗數據顯示，含水率的誤差甚至可以達到 50kg/m^3 ，使得 28 天強度大幅由 420kg/cm^2 ，降低至約 300kg/cm^2 。為杜絕此一現象發生，V 漏斗的重新定義變得必須。在這樣的一個實驗中，我們可以定義另一個 V 漏斗的意義，那就是使用 V 漏斗來檢測 SCC 的強度，換句話說，雖然水多加時，我們雖不能由坍度、坍流度，或者箱型試驗中發現，但是我們仍可以由 V 漏斗的通過秒數，來察覺到水多加已經使得 SCC 的黏稠度下降了。因為我們發現，隨著用水量的增加，V 漏斗的通過秒數會隨之下降，而這就代表強度正在下降。雖然不同的配比，沒有一個明確的數字可以說，到底幾秒的 V 漏斗下限，可以保障混凝土不低於設計強度，但是至少我們知道，透過實驗來建立強度與 V 漏斗的關係後，每當同樣的配比被使用時，就可以透過實驗獲得的 V 漏斗下限來保障 SCC 的強度。

細骨材中大顆粒量對 SCC 充填性之影響：在這裡所謂大顆粒是指 #8 篩以上的顆粒。我們發現，碎石砂在 #4~#8 篩之間的量過多，這無形中就是增加 SCC 粗骨材的量。而粗骨材總量對 SCC 的鋼筋通過性有重大影響。過多的粗骨材用量會造成粗骨材在通過鋼筋間隙時產生架

橋現象，而影響 SCC 的自充填效果，因此，才會造成使用碎石砂時，無論坍流度怎麼拉大，箱型試驗總是紋風不動的結果。

輸氣對 SCC 之影響：總結來說，輸氣可以降低用水量、輸氣可以降低膠結量、輸氣具有良好鋼筋通過性、輸氣具有抗析離之效果。此外，輸氣會損害強度、耐久性、過多的輸氣有礙混凝土表面觀瞻。總結來說，低膠結量的 SCC，適度的輸氣是有幫助的。

SCC 初終凝時間之量測：我們發現，使用奈磺酸系強塑劑的 SCC，並不隨著強塑劑的用量增加，而增加其初凝時間；但如果強塑劑用量超過某一限度，則緩凝效果將隨之衍生。對羧酸系強塑劑的趨勢來說：隨著藥劑用量的增加，則初凝時間很明顯的隨之增加。並且普遍來說，羧酸系強塑劑的初凝時間比奈磺酸長了許多。而羧酸系初凝時間比較長的原因，除了羧酸系本身就比較緩凝之外，普遍添加在強塑劑內的增稠劑也有幫助緩凝的效果。

五、結論與建議

SCC 早期行為方面：

不同藥劑種類產製 SCC：使用奈磺酸系強塑劑來產製 SCC，需要較高的膠結量，一般約 500kg/m³ 以上。不過因為坍損快，所以早期強度發展較快。使用羧酸系強塑劑來產製 SCC，由於增稠劑之效用，因此可以降低膠結量至 360kg/m³ 之譜，但由於緩凝之故，所以早期強度發展較慢。

不同種類藥劑對 SCC 初終凝趨勢之影響：對奈磺酸系而言，除非用量大到某個程度，不然藥劑用量增加，不會增加 SCC 初凝時間。對羧酸系而言，SCC 初凝時間會隨藥劑的用量增加，而有顯著的延長。

產製預鑄用 5000psi 早強 SCC 之可行方案：使用羧酸系強塑劑，並加以前置期熱模養護。期待石粉在國內之量產使用。

輸氣對 SCC 之利弊得失：總結，適度的輸氣（4%~5%）對低膠結量（500kg/m³ 以下）SCC 是有利的

SCC 配比研究方面

優良 SCC 細骨材：粒形圓潤：如大陸砂、質地堅硬：如大陸砂或三義碎石砂、級配適中：F.M. 落於 2.7~2.8 之間、大顆粒少：#4~#8 之間的顆粒需符合 CNS 1240 規範值、適度細微顆粒：細微顆粒量（含泥量）在 4%~5% 之間

SCC 可能強度偏低：預防過細的細骨材被使用來產製 SCC。此外，可利用 V 漏斗來檢測 SCC，以確保 SCC 強度不低於設計強度。碎石砂用來產製 SCC：可透過計算碎石砂中較大顆粒的量（大於#4~#8 篩以上），並將之視為粗骨材，然後：藉由提高細骨材的比率，來降低混凝土中顆粒大於#4~#8 篩的總量，或適度混合以天然河砂使用。

SCC 中小於 75 μ m 的顆粒（細微顆粒量或稱含泥量）：SCC 中小於 75 μ m 的顆粒有：細骨材中的含泥量，即通過#200 篩的量，且不具有黏土成分者、水泥爐灰等具有膠結性粉體、石灰石粉或白雲石粉等不具膠結性粉體、增稠劑中的增稠作用效果視同增加小於 75 μ m 顆粒的量懸浮在水中形成所謂“漿”，因而可以帶開混凝土中的大顆粒，而形成所謂 SCC 的流動效果。或說，有這些小顆粒，才有足夠的稠度可以避免，當增大混凝土流動性時，所可能產生的材料析離。