

以新拌 TAICON 混凝土自動化澆置 RC 構件試驗研究

計畫類別：□個別型計畫 ■整合型計畫

計畫編號：NSC 89--2211-E-002-064

執行期間：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

計畫主持人：高健章

共同主持人：詹穎雯

子計畫：

高健章，「以新拌 TAICON 混凝土自動化澆置 RC 構件試驗研究」

顏聰，「TAICON 之質流行為、工作性測驗及結構性質探討」

蘇南，「TAICON 施工流動性及結構耐久性之研究」

詹穎雯，「TAICON 充填性能對 RC 構件施工性影響之研究」

一、以新拌 TAICON 混凝土自動化澆置 RC 構件試驗研究

本研究涵蓋三部分：1.以 TAICON 為材料，從柱底泵送混凝土，變化坡度與柱內流速，研究鋼筋籠和模板所受的上揚力與柱底壓應力；又考慮坍塌對逆打影響嚴重，故針對二次添加 SP 進行探討。2.以 OPC 與 TAICON 為材料，逆打實尺寸柱，拆模後觀察表面狀況，進行非破壞與破壞試驗求其力學性質。3.在國家地震中心，以順打和逆打施作三支帽樑，比較其力學性質。試驗結果顯示：1.混凝土流速快，拖曳力大。2.混凝土坍塌後，拖曳力增大。3.逆打柱柱表充實完整，柱體均勻性佳。

本研究包含三試驗，試驗略述如下：

1. 柱底澆置基本試驗

柱底澆置基本試驗包含兩部份：一是柱底循環泵送試驗，利用研發的柱模具，將 TAICON 自柱底打入，俟其自柱頂溢流後，導流回泵送車，循環泵送。其目的在研究 TAICON 坍塌過程中，改變柱內混凝土流速對鋼筋籠、模板上揚力及底模壓應力的影響。另一是混凝土流動性量測試驗，內裝 40kgw 混凝土的滾筒，澆於設定的水溫中持續滾動攪拌混凝土，俟其坍塌，二次添加 SP。其目的在研究二次添加

SP，對降伏應力指標及塑性黏度指標的影響。

2. 柱底混凝土充實性試驗

藉由逆打過程，我們製作一支 OPC 實尺寸柱及一支 TAICON 實尺寸柱，皆不使用振動棒。旨在觀察柱表面性質，並藉由非破壞和破壞試驗，研究逆打下，不同材料對硬固後柱體性質的影響。澆置過程中，亦記錄鋼筋籠、模板上揚力及底模壓應力。

3. 實柱澆置試驗

在國家地震中心，配合捷運帽樑實體模型試驗，以 OPC 進行三支實柱澆置試驗。A 帽樑之柱身採順打，柱頂以振動棒搗實。B 帽樑之柱身採順打，柱頂不以振動棒搗實。C 帽樑之柱身採逆打，柱頂不以振動棒搗實。三隻帽樑樑體部分皆為順打澆置。試驗旨在觀察柱表面性質，並藉由非破壞和破壞試驗，研究同一材料下，不同澆置方法對硬固後柱體性質的影響。

具體成果摘要如下：

1. 流速快，拖曳力大：根據試驗結果顯示，鋼筋籠、模板及底模均在流速增快時受力增大，流速變慢時受力減小。流速與柱斷面大小及泵送機單位時間推送量有關。若斷面有特別狹窄處，如橫膈板或其他裝置，將造成拖曳力增加。泵送機單位

時間推送量大者，拖曳力大。

2. 坍塌後，拖曳力增大：坍塌造成泵送啟動困難，柱內部分混凝土失去流動性，柱流有效斷面積減少。由柱底澆置基本試驗結果顯示，第2分鐘和第29分鐘相比，坍塌度由21cm降至不足15cm，後者鋼筋籠上揚力增加10%，底模壓應力增加17%，模板上揚力增加100%。

3. 箍筋量大，鋼筋籠上揚力大：箍筋與繫筋所在位置，減少該位置柱流有效面積。倘箍筋量大，則整支柱處處流動斷面積減少，直接導致上揚力增大。主筋引發的拖曳力比箍筋小，因為在流場中，主筋更具「流線型」。

4. 保護層小，模板上揚力大：狹窄斷面處容易妨礙流動，缺乏觸變性(Thixotropy)的刺激下，造成的惡果就是率先硬化，將原先表面拖曳機制轉為互鎖作用控制上揚力，互鎖作用隨水化反應逐漸增強，上揚力因此增大。

5. TAICON 對鋼筋籠上揚力大，OPC 對模板上揚力大：漿體的黏稠度控制鋼筋籠的上揚力，在柱流流場中，因 TAICON 黏稠度較大，故拖曳鋼筋籠的力量較大。但對 OPC，其過量的粗骨材在保護層擠軋、卡阻、破壞潤滑層，對模板摩擦阻力因而增大。

6. 二次添加 SP，存在一「臨界時機」：在本試驗條件下，即將坍塌的混凝土欲二次添加 SP 存在一「臨界時機」(Critical Moment)，過此臨界時機，二次添加 SP 效果便打折扣，甚至無效。不論 20、28、36 °C，在臨界時間內添加 0.1% SP，添加後流動性持續擴大，於添加後 20 分鐘達最佳點，於添加後 60~80 分鐘再度坍塌。

7. 多次添加 SP，效果宛如「吸毒」：在試驗中發現，第二次、第三次添加 SP，再度坍塌的發生時間愈來愈短，此因水化反應持續進行，未水化的水泥分子愈來愈少，強塑劑的靜電排斥(Electrostatic Repulsion)、立體障礙(Steric Hindrance)對流動性的幫助愈來愈小。想要回復一樣的流動性，要加更多 SP。如果只加同劑量 SP，效果一次比一次差。

8. 逆打有助於表面完整、 E_c 均勻性之提升：由本試驗的結果證明，不論泵送材

料，逆打柱表均無蜂窩。對於柱底死角，高流動性混凝土比傳統混凝土，更能確實填充。雖然逆打柱的柱底 E_c 較柱頂大，但與順打柱比較，逆打柱 E_c 的變異係數較小。在比較同時發現，ACI 公式 $E_c = 15100\sqrt{f'_c}$ (kgf/cm²) 之適用性與齡期有關，公式中卻無齡期因子。

9. 振動能大幅改善 f'_c 與 E_c ：由試驗資料顯示，經過振動的柱頂， f'_c 與 E_c 均顯著提高，也因為提得過高，振過柱體的變異係數均較未振動的柱體大。

二、TAICON 之質流行為、工作性測驗及結構性質探討

本研究主要探討 TAICON 質流性質配比之確立及其力學行為，並確立其適當配比。試驗上以水膠比 0.5、每立方混凝土含水泥砂漿量 0.6 立方、含砂比 $f_v = 0.8$ 、膠結料比例-水泥:飛灰:爐石 = 7:2:1 的混凝土配比为主体，利用坍塌試驗法及以往質流研究基礎設計配比，進行不同條件下各種混凝土之配比研定，並用以探討粗骨材量、含砂比及波索蘭材料含量等 TAICON 混凝土新拌性質及硬固性質之影響。

研究結果顯示，TAICON 的組成材料比例有一定的適當範圍，過多或過少都對混凝土產生不良影響，而添加波索蘭材料可增加混凝土工作性，但須注意其早期強度的折減以及彈性模數的下降。適當的 TAICON 配比建議如表三中的陰影部分。

延續第一年之質流試驗基礎，針對膠結材料添加比例及強塑劑用量等變數測析其對 TAICON 質流行為的影響，並據以建立其質流特性。試驗結果如下：

1. 膠結材料添加比例

加入波索蘭材料之混凝土，其質流行為更顯複雜，除了水泥之水化反應，尚有波索蘭反應在進行。為探討飛灰、爐石對工作性之影響，試驗上採用波索蘭材料取代部份水泥，並採取不同水泥、飛灰、爐石比例，如圖一所示，7:2:1 組有較低之降伏應力及塑性黏滯係數，顯示出較佳的質流性質。

2. 強塑劑劑量

額外添加強塑劑可使混凝土坍度增大，可預知的是，其對質流行為應具有相當的影響。一般而言，強塑劑劑量調高，混凝土坍度會隨之增加，因此用水量若沒有相對減少，則可能會有泌水、析離等現象發生，如此反而不符合良好工作性之定義，故劑量有其一定之限制。然而，為符合 TAICON 坍度之要求，劑量也不可太低。在不改變其他組成材料用量的條件下，本試驗試著調整強塑劑劑量，觀察其對混凝土工作性之影響。試驗結果可由圖二可觀察得出，當 SP/B=0.8% 時，混凝土的降伏應力及塑性黏滯係數最低，顯示此為較佳劑量。

3. TAICON 質流特性

將本文試驗所得之 TAICON 質流參數與普通混凝土、高性能混凝土作一比較，可得如表一所列之結果。由表中可看出，TAICON 之降伏應力 τ_0 大約與普通混凝土者相等，而稍小於高強度高性能混凝土者^[5]；TAICON 之塑性黏滯係數 μ 則比普通混凝土者大，而比高強度高性能混凝土者小^[5]。此結果亦即說明，新拌 TAICON 比普通混凝土容易流動，且流動後之摩擦力亦較小。

本研究針對 TAICON 的工程性質作一系列的探討。綜合以上的研究成果，可得下列結論：

1. 依質流試驗結果，TAICON 可比普通混凝土擁有較佳的工作性。
2. 適當的 TAICON 混凝土，其粗骨材體積可定為 40%，且適合的含砂比為 0.8。
3. 以飛灰、爐石取代水泥，可降低水泥用量並增進混凝土工作性，但須注意其力學性質的退化，尤其在早齡期時。
4. 利用 ACI 318、ACI 363 來預測 TAICON 的彈性模數時，有高估的現象，使用上應特別注意。至於 TAICON 的相松比則大約介於 0.13~0.16 之間。

三、TAICON 施工流動性及結構耐久性之研究

本研究探討材料配比參數對 TAICON 混凝土流動性及耐久性的影響作系統性探

討。利用加速試驗及老化方式探討耐久性對策。耐久性試驗包括抗凍融試驗、中性化(CO₂)試驗及體積乾縮變化試驗、透水性試驗及氯離子試驗。分析各不同材料參數試驗之試驗數據，以提出影響 TAICON 流動性與耐久性之材料因素建議。

本研究具體結論與建議有以下幾點：

1. 對於 TAICON 混凝土之各項試驗研究如流動性方面(坍度、流度)，材料抗分離性方面(V 型槽、L 型槽及 500mm 流度到達時間等)以及 U 型填充高度試驗，本研究發展出之配比及 TAICON 性質都有達到預期效果。
2. 在強塑劑之使用方面，本研究試驗採用有磺酸系列之強塑劑，添加量為膠結料之 1.8%。對於強塑劑對於混凝土品質影響，應當還有相當寬廣的研究空間。
3. 對於 TAICON 混凝土之耐久性試驗，本研究在耐久性試驗以抗凍融試驗、中性化試驗及乾縮試驗得長期反應，再以透水性試驗及氯離子試驗得混凝土添加材料造成反應，分析各種數據及參數。對於 TAICON 混凝土之耐久性試驗還有相當大的研究空間與領域發展。

四、TAICON 充填性能對 RC 構件施工性影響之研究

自充填混凝土的配比設計，必須依建築物的結構條件、施工條件以及環境條件加以考慮，其中結構條件包括結構斷面形狀與尺寸、鋼筋的間距及鋼筋量，而施工條件應考慮的有澆灌作業所需時間、泵送混凝土所需的距離、自由落下的距離、最大的流動距離及模版的形狀等；且混凝土需通過各種的充填性試驗，以能達到自行充填的性能、施工性、強度、耐久性、水密性、析離抵抗性等，這是配比設計的基本要求。

參照日本自充填混凝土的配比設計規範，可將其分為以下三類：粉體系高流動混凝土之配比設計、增稠劑系高流動混凝土之配比設計及併用系高流動混凝土之配比設計。

第一階段的研究規劃為配比調整試驗，其目的是在確保流動性與抗析離能力

的性質下，調整自充填混凝土的配比，並參考國科會之 TAICON 研究群的規劃特性，將其設計強度 f_c' 定在 4000~5000 psi，以滿足現階段產業界之需求，達到著重本土化材料之研發及應用之目標；試驗的方法是先根據國內修正之自充填混凝土配比設計方法，利用不同粉料的比例搭配及細骨材細度模數的調整，以設計出中強度的自充填混凝土，並同時檢測其彈性模數，以確保混凝土的變形量。

第二階段的實驗規劃在探討混凝土的體積穩定性，有鑑於國內目前已有多起自充填混凝土的生產紀錄，在生產上應已掌握新拌混凝土特性，惟在其硬固後之力學行為與變形特性如彈性模數、乾縮潛變量等，是否會因配比特性而與一般混凝土對構件產生不同的影響，則有加以了解的必要，配合實際工程應用之自充填混凝土配比，進行潛變乾縮之試驗。

第三階段的研究規劃為鋼筋之拉拔試驗，其目的有二，一是探討混凝土握裹力隨齡期成長之歷程，並與其抗壓強度之成長歷程相比較，以瞭解混凝土與鋼筋握裹力隨著混凝土初凝、終凝之發展歷程，實際量測、評估自充填混凝土 SCC 與普通混凝土在澆置後初期，影響混凝土與鋼筋間之整體性最關鍵之時機為何；另一則是探討鋼筋間距與高程對鋼筋握裹力之影響程度，鋼筋有效間距之大小會影響混凝土充填之密實性，因而會對鋼筋所受有效握裹力有影響，本階段的研究將以不同的鋼筋間距配置，並分別以自充填混凝土及普通混凝土加以澆置，在由握裹力試驗結果，探討鋼筋間距與高程變化對混凝土握裹力大小之影響。

第四個階段則針對預力樑長期變位與預力損失為探討對象，配合自充填混凝土圓柱試體的潛變試驗、乾縮試驗，以做為混凝土預力樑長期變位與預力損失之研究。

1. 由實驗的經驗可知，自充填混凝土對

於水的用量是非常的敏感，而強塑劑對水的敏感度則有控制的效果，但不同廠牌的藥劑其功用卻有很大的差別，故在使用強度劑前應先建立起其敏感度曲線，以便在實際工程應用時，預拌廠商可調整其下水量的精度，才能生產出品質穩定的自充填混凝土。

2. 握裹強度的大小取決於判斷的標準，若採用極限握裹力來作判斷時，其對應之滑移量已非常大(4~6 mm)，在實際結構物上會產生太大的變形，而有實質的危險性，故建議對於握裹強度的判斷應採裂縫控制的方式，且應建立起小試體與構件間握裹力的關係，以做為比較之依據。
3. 由於鋼筋間距效應組在施以拉拔力時，是對單一鋼筋施力，但在真實結構口是數支鋼筋一起受力，故在這樣的實驗架構下，其他不受力的鋼筋可能會對受力的鋼筋產生類似群樁的效應，建議將其他不受力的鋼筋刨光並上油，如此不但有鋼筋間距的影響亦可減少群樁的效應。
4. 在施作握裹力試驗時，除了要考慮鋼筋的伸長量外，亦需注意混凝土的彈性變形；而為了免除混凝土的變形因素，只須將量測位移裝置的 LVDT 盡量遠離施拉的鋼筋即可。
5. 藥劑對混凝土的穩定性是非常重要的，因為土木工程的進度是非常不容易掌握的，常常有各種突出狀況發生，所以我們不能只將自充填混凝土的充填性能設定在剛下料時或是一個小時，而必需要有持續性和穩定性，讓混凝土的工作度能維持一定的時間，以應付各種工程狀況。

五、參考文獻

- [1] 高健章、陳漢屏，「以新拌 TAICON 混凝土自動化澆置 RC 構件試驗研究」，國科會研究計畫成果報告，國立台灣大學土木工程研究所，民國 90 年 1 月。

- [2] 顏聰、黃玉麟、陳豪吉，「TAICON 之質流行為、工作性測驗及結構性質探討」，國科會研究計畫成果報告，國立中興大學土木工程研究所，民國 89 年 10 月。
- [3] 蘇南，「TAICON 施工流動性及結構耐久性之研究」，國科會研究計畫成果報

告，國立雲林科技大學營建工程系，民國 89 年 10 月。

- [4] 詹穎雯、陳育聖，「TAICON 充填性能對 RC 構件施工性影響之研究」，國科會研究計畫成果報告，國立台灣大學土木工程研究所，民國 89 年 10 月。