

水泥中鹼當量對含強塑劑水泥漿流變行為之影響

郭文田 張博堯 潘煌錕

(高雄應用科技大學土木工程系, 高雄, 臺灣, 80702)

摘要：水泥中鹼當量對含強塑劑水泥漿流變行為尚未完全瞭解，因此本研究擬以不同型式之水泥(I、II、V 型水泥)，模擬不同之 C_3A 及鹼當量，並添加不同種類強塑劑，利用 Mini Slump 擴散面積、Marsh Cone 流動時間、Brookfield 黏滯度、凝結時間、泌水率，探討鹼當量對含強塑劑水泥漿流變行為之影響。研究結果顯示，水泥中鹼當量會影響強塑劑與水泥的相容性和強塑劑的最佳劑量；隨著鹼當量增加，及強塑劑的使用劑量提高，將造成強塑劑與水泥之相容性問題，進而使水泥漿的流動性損失。

關鍵字：鹼當量；強塑劑；流變行為

1. 前言

高性能混凝土之所以較傳統混凝土具有優越的性能，主要原因之一便是摻料的使用，摻料可概分為礦物摻料及化學摻料兩大類[1]。礦物摻料如飛灰、爐石等，其添加會促進混凝土的工作性與結構緻密性；且由於含有大量的二氧化矽，會消耗混凝土中之鹼質，而有助於抵抗鹼骨材反應；另外取代部分水泥，則可降低水化熱、減輕裂縫的產生而確保混凝土的耐久性。化學摻料以強塑劑為代表，強塑劑本身是一種高分子量的陰離子介面活性劑，使顆粒間產生靜電而互相排斥或聚合物架構之立體障礙的作用機制，進而達到水泥的分散效果[2]，使混凝土流動性大幅增加[3]，而降低需水量而增加強度，或使用相同拌合水量而大幅增加施工時的工作性；因此在配比設計時，能夠達到要求的流動性範圍內的單位水量應儘量減少，同時在輸送過程中能長時間保持良好流動性，不致影響混凝土充填性能。而流動性損失的主要原因，係水化反應產生的水泥顆粒凝聚現象，降低高性能混凝土的性能。由於考慮到流動性的維持需求，抗坍損能力較高的羧酸系強塑劑取代奈磺酸系成為使用主流，促成混凝土具備高流動性質。

強塑劑為造成高性能混凝土高流動性的一種重要化學摻料，在不使用強塑劑時，低鹼水泥較高鹼水泥有較佳之流動行為表現[4]，但使用不同強塑劑時，水泥中鹼當量高低對初始流動行為及坍度損失情況如何改變，則尚未完全瞭解。而水泥中所含的鹼金屬，一般而言有兩種型態，一種水溶性的鹼金屬硫酸鹽，另一種是以固態溶液的型態結合進水泥的單礦物[5]，如鈉會與鋁酸三鈣結合，鉀會與鋁酸二鈣結合。固態溶液存在之鹼金屬，在水泥水化後可能會釋放進入孔隙溶液，此情形對使用強塑劑的初期成效可能影響不大，但是水溶性的鹼金屬硫酸鹽，在遇水後溶解會改變水化系統的 pH 值，因此可能影響水泥顆粒對強塑劑分子的吸附行為，進而影響強塑劑的使用成效，使水泥漿體無法長時間保持良好流動性，造成高性能混凝土的坍度損失。因此本研究採用不同型式之水泥(第 I, II, V 型卜特蘭水泥)，模擬不同 C_3A 含量及鹼當量，並添加不同種類強塑劑，利用 Mini Slump 擴散面積、Marsh Cone 流動時間、Brookfield 黏滯度、凝結時間及泌水率之量測，探

討水泥中鹼當量對含強塑劑水泥漿流變行為之影響。

2. 試驗計畫

2.1 考慮變數

- (1)使用 I 型、I 型低鹼、II 型、V 型卜特蘭水泥，以形成低到高含量之 C_3A 及鹼當量。
- (2)強塑劑種類：SNF(磺化奈-甲醛聚合物)、MTP(羧酸系多元有機酸)兩種形式。
- (3)強塑劑濃度(0.5%、1.0%、1.5%)及固定水泥漿之水灰比($W/C=0.35$)。
- (4)鹼當量：採用不同水泥形式所含之鹼當量外，再額外添加之鹼當量，使水泥形成 0.7% 及 0.9% 之鹼當量。
- (5)時間：在水泥漿體拌合好後之 5、15、30、60、90 分鐘時，分別依序量測黏度值、Marsh Cone 流動時間、Mini Slump 擴散面積之變化。

2.2 分析項目

- (1)坍度變化：利用迷你坍度錐(mini slump) 量測水泥漿之坍度變化，以瞭解時間對坍度影響。
- (2)Marsh cone 流動時間：利用 Marsh cone 量測水泥漿流滿固定容積(400ml)所需時間，以表現其流動行為。
- (3)黏度值：利用 Brookfield DV-II+黏滯度儀量測各水泥漿之黏滯度及降伏應力，並量測其隨時間之剪應力 τ 與剪應變 γ 關係。
- (4)凝結時間：利用維卡針量測水泥漿之初、終凝時間。
- (5)泌水量：吸取水泥漿初凝前表面泌水量並稱重，以計算泌水率。

2.3 試驗材料:

- (1)水泥：I 型、I 型低鹼、II 型、V 型卜特蘭水泥，其化學成份分析結果如表 1 所示。
- (2)強塑劑：磺酸系強塑劑(SNF)及羧酸系多元有機酸高效強塑劑(MTP)兩種。其物理性質如表 2 所示。
- (3)鹼：購自市面，試藥級，分子式為 NaOH 之高純度(99%)氫氧化鈉。
- (4)飛灰：台電燃煤火力發電廠之興達電廠所提供之 F 級飛灰。

3. 試驗結果與討論

3.1 黏度值分析

當含強塑劑之I型水泥漿體，在拌合60分鐘後0.54%鹼當量與0.9%鹼當量之遲滯現象區間比較，如圖1顯示，遲滯現象區間大小會隨著強塑劑劑量及鹼當量添加不同而有所改變，當添加強塑劑劑量不足或鹼當量過多時水泥漿體遲滯現象區間愈大，可見強塑劑劑量與鹼當量影響水泥顆粒間電斥力的大小[6]，顆粒間電斥力愈小，顆粒相互作用影響程度愈大，即水泥顆粒呈聚簇現象，水泥漿體黏度值愈小，漿體受到剪力時不容易達到塑性變形，即降伏應力大，表示水泥漿體流動性差；因此當含SNF及MTP強塑劑不同劑量之水泥漿，其鹼當量為0.54%時之遲滯現象區間皆比0.9%鹼量小，且隨著強塑劑劑量增加，遲滯現象區間愈密合。圖中顯示，隨著強塑劑使用劑量增加，由0.5%添加至1.5%，剪速度與剪應力值之曲線斜率和降伏應力，隨之降低，而曲線斜率為水泥漿體之黏度值，表示漿體黏度值隨著強塑劑使用劑量增加而降低；降伏應力愈低，水泥漿體愈快發生塑性變形，強塑劑造成水泥顆粒分散效果佳，當顆粒間沒有聚簇現象時，表示水泥漿體流動性愈佳。

從圖2發現I型水泥的初始黏度值隨著鹼當量增加而增加，且水泥所含之鹼當量愈多時，水泥漿體流動性衰減越快，黏度值曲線上升越迅速，因為鹼金屬溶于水中時，產生電解質而使水泥顆粒凝聚，或使鹼金屬離子增加 C_3A 之快速水化反應[7]，產生水泥水化產物(鈣氬石)，進而覆蓋吸附於水泥顆粒表面之強塑劑分子，減緩強塑劑使用之效能，造成增加鹼質後使黏度值迅速上升之原因。當1.5%強塑劑(SNF, MTP)使用劑量，

能抵抗水泥鹼當量為0.7%時的黏滯度增稠速度，一旦當水泥鹼當量增為0.9%時，1.5%強塑劑劑量亦無法抵抗高鹼當量造成的水泥顆粒凝聚現象及快速增加C₃A之快速水化反應，使水泥漿持續水化及黏度值曲線將迅速上升。

當添加強塑劑劑量為1.5%和飛灰取代量5%時，水泥鹼當量0.9%時有甚低之黏度值，且黏度值不會隨水化時間進行而迅速上升，維持水泥漿體的流動性。系因使用適合的卜作嵐材料取代部份水泥，利用卜作嵐材料來搶奪水泥中的鹼性物質，因為飛灰化學成份中含有豐富的氧化矽(20%~60%)，飛灰的氧化矽會先與水泥中的鹼性物質起反應[8]，將水泥中的鹼質消耗掉，而且原本飛灰的卜作嵐反應依賴外加鹼性物，適足以使原本相克的作用，反而相生，緩慢與氧化鈣、氧化鈉及氧化鉀反應而消耗鹼質，也同時促進膠結反應，有助長期性質。

根據圖3中，比較II型與I型水泥中鹼當量增加損耗強塑劑的效能，發現II型水泥之黏度值曲線均有相同上升趨勢，但II型水泥的初始黏度值與曲線上升斜率較I型水泥低，因II型水泥C₃A含量低，而反應活度通常為C₃A>C₃S>C₂S≐C₄AF[1]，所以水泥水化反應第一階段約在水泥加水0~15分鐘左右，為C₃A水化反應並產生水化產物，降低強塑劑使用效能，且強塑劑較喜吸附於鋁酸鹽相(C₃A、C₄AF)上，僅少量吸附於矽酸鹽相(C₃S、C₂S)上[9,10]，因此II型水泥C₃A含量少，使得其初始黏度值較低。當水泥中鹼當量為0.9%時，強塑劑使用劑量為1.5%，亦無法抵抗鹼質產生水泥顆粒凝聚現象，造成黏度值曲線持續上升。因此II型水泥改善鹼當量造成流動性損失，其效果比使用I型水泥5%飛灰取代水泥量差。

當採用V型卜特蘭水泥，比較兩種強塑劑(SNF，MTP)使用效能，明顯地MTP型較SNF型能抵抗流動性損失的問題，系因其作用機理的不同。且添加1.5%強塑劑劑量，SNF在水泥含0.9%鹼當量時，黏度值曲線在60分鐘過後明顯上升，因水泥中鹼當量過多，造成SNF強塑劑效能降低，且此時水泥水化進入潛伏期(15分鐘~4小時)，即AF_t結晶持續成長，C-S-H膠體持續增加，當水化系統中SO₄²⁻消耗完時，AF_t轉換為AF_m，膠體結構厚度持續增加[5]，水化反應持續向水泥顆粒中心進行，此階段水化行為控制水泥漿體的流變性質與早期凝結行為，當然化學摻料在此階段亦會與任何活性物質反應，或成為擴散作用、水化成長過程之干擾物質。但是添加MTP強塑劑沒有明顯的流動性損失，較能抵抗水泥中鹼當量增加，所造成之流動性值損耗。

3.2 Marsh Cone 流動時間分析

以流動時間為縱坐標，不同強塑劑劑量為橫坐標，分別以漿體5分鐘和60分鐘的流動時間繪製曲線，當強塑劑劑量逐漸增加，流動時間漸減，表示強塑劑用量增加直接提高水泥漿體流動性，但在劑量超過某一劑量時，流動時間並不再隨強塑劑用量減少，即在超過此一用量後，再增加之強塑劑並不會對水泥漿體流動性有所幫助，於是在使用劑量與流動時間作圖下有一明顯轉換點，此轉換點即為強塑劑在水泥上的飽和吸附點(Saturation Point) [2]，相對應的劑量便為最佳劑量，若無明顯轉換點，便取圖中曲線兩切線之交點所對應的劑量，飽和點試驗可探討強塑劑與水泥的相容性[5]。若漿體在60分鐘後的流動性和5分鐘的流動性相近，則表示在此劑量下強塑劑無流動性損失的問題。

各種水泥之最佳劑量及相容性如表3所示。比較I型水泥含0.45%與0.54%鹼當量，SNF強塑劑兩者皆有不相容情況發生，MTP強塑劑與I型低鹼量水泥相容，但是鹼當量增加至0.54時，亦發生不相容現象。兩種強塑劑在低鹼量(0.45%)時，最佳劑量(飽和點)皆為1.1%，當鹼量增加至0.54時，最佳劑量也增加至1.2%。因此水泥中鹼當量與強塑劑最佳劑量及相容性有關，隨著鹼當量愈高時，所需強塑劑劑量愈多，且5分鐘與60分鐘流動時間曲線區間愈大，表示水泥與強塑劑間愈不相容。同時，MTP與SNF強塑劑其作用機理不同，MTP強塑劑較能維持相同之流動性至1小時左右，與水泥相容性較SNF強塑劑高。當飛灰取代水泥5%時，飛灰的氧化矽會先與水泥中的鹼性物質起反應，將水泥中的鹼質消耗掉，且飛灰圓球顆粒及光滑表面類似軸承效果，

增加水泥漿體流動性，且能維持漿體流動性，增進強塑劑與水泥的相容性，因此在I型水型(0.54%鹼量)之強塑劑的最佳劑量由1.2%降低為1.0%，且水泥與強塑劑由不相容變為相容。在鹼當量由0.54%增加為0.7%時，僅增加最佳劑量為1.1%，並不改變其相容性，證明飛灰能消耗水泥中C₃A含量。II型卜特蘭水泥化學成分中，其鹼當量與C₃A含量比I型水泥少，強塑劑之最佳劑量較I型水泥略低，但是使用SNF強塑劑在60分鐘無法抵抗流動性損失，仍然與II型水泥產生不相容現象。V型卜特蘭水泥含最少量C₃A與少量的鹼當量(0.46%)，所以強塑劑的最佳劑量較I型與II型水泥低，相同地，當鹼當量增加至0.7%時，SNF強塑劑會產生流動性損失，與水泥發生不相容現象，因此水泥中C₃A和鹼當量會影響強塑劑使用劑量與水泥的相容性。水泥與強塑劑相容性問題來自於硫酸根離子之不平衡[7,11]，因石膏在水泥中具有很大的表面吸附能，而使強塑劑吸附在石膏的表面，此被吸附之陰離子界面活性薄層，將抑制石膏溶于水，而造成水溶液中硫酸根離子短缺，使得充足的鈣氫石無法形成，因此在非常短的時間內C₃A水化快速，大量的鋁酸水化產物結晶，相互連接在一起而造成快速凝結。

3.3 Mini Slump 坍流度分析

水泥中鹼當量高低對於坍流度之影響結果如圖 4 所示，其結果與黏度值試驗、Marsh cone 試驗相同，顯示添加 MTP 強塑劑或 SNF 強塑劑，其 mini slump 坍流面積都隨著鹼當量提高而降低。而水泥中鹼當量之存在無可避免，因此在水泥中之硫酸鹽易與城質反應形成硫酸城型式，當水泥中硫酸鹼當量增加，將改變強塑劑吸附行為，即導致強塑劑較喜吸附於 C₃S 及 C₂S 上，因 SO₄²⁻會抑制強塑劑吸附於 C₃A 上，使 C₃A 及 C₄AF 之快速水化反應將增加水泥漿體之黏滯度而降低工作度[6]，且過度之硫酸城，將壓縮水泥顆粒電雙層增加黏滯度[4]，使水泥漿流動性損失。此外比較 MTP 及 SNF 強塑劑對坍流度之影響，可知 MTP 強塑劑對於水泥漿抵抗坍流度損失有較佳之效能，這和先前所提相同，乃與二種強塑劑之分子結構及作用機理不同有關。而 SNF 強塑劑可利用延遲添加(10~15 分鐘)避開 C₃A 水化產物覆蓋[12]，改善水泥漿體流動性嚴重損失問題。

3.4 凝結時間與泌水量

根據表 4 中使用 1.5%強塑劑，為了改善水泥漿短時間內硬稠即凝結問題，在水泥漿中使用強塑劑，強塑劑分子吸附在水泥顆粒表面，水泥顆粒因排斥力而分散，釋放出水化外多餘的水分，影響水泥漿體之流動性質，由於吸附作用將延緩 C₃A、C₃S 及水泥之水化行為和各水化產物之成長速率及形態，使得凝結時間及水化放熱峰因強塑劑的添加而延緩，抑制水泥初期水化，延緩之現象明顯，甚至出現嚴重緩凝現象。同時觀察表 4 水泥中城當量的高低，判斷漿體的凝結時間，發現鹼當量愈高時，水泥漿愈快達到初凝與終凝。因為水泥中之硫酸鹽型式易受到城反應形成硫酸城，一旦水泥中硫酸鹼當量增加，將使 C₃A 及 C₄AF 之快速水化反應將增加水泥漿體之黏滯度而降低強塑劑效能，且過度之硫酸城將壓縮電雙層而縮短水泥漿凝結所需之時間。而比較各種水泥型式的凝結時間，結果顯示並沒有明顯的差異現象，係因水泥水化作用進入第三階段，為 C₃S 及 C₂S 的產生化學反應，水化產物的形成而導致水泥漿體固化。

3.5 綜合討論

觀察圖 5(a)圖中，為使用 SNF 型強塑劑且 0.5%低劑量時，因為低水灰比及強塑劑的劑量不足，使得水泥漿體在高鹼當量下，明顯地，各型水泥漿體初始流動性不佳，且會有坍流度損失問題發生。當劑量增加至 1.0%時，如圖(b)所示，各型水泥抵抗鹼當量所產生的流動性不佳及損失的能力有明顯的區別，圖中漿體黏度值大小為 I 型水泥 > II 型水泥 > V 型水泥 > I 型飛灰(5%)，漿體黏度值愈小流動性愈加，表示漿體在高鹼當量(0.9%)下，I 型飛灰(5%)漿體有最佳的初始流動性，而 I 型水泥漿體稠度最高。因為飛灰屬惰性膠結性材料，能延遲水泥水化反應，且飛灰的氧化矽會先與水泥中的鹼性物質起反應，將水泥中的鹼質消耗掉，減少鹼當量促進 C₃A 之快速水化反應，使得強塑劑添加在 I 型飛灰(5%)水泥有最佳的效能；而 V 型水泥漿體初始流動性次之，其 C₃A 含量為各型水泥中最低，故水化初期時水化速度慢且水化產物較少，使漿體在高鹼當量

下仍然有較佳之流動性；II 型水泥化學分析中 C_3A 含量，為介於 I 型水泥與 V 型水泥之間，所以其漿體初始流動性較 I 型水泥佳，但仍略差於 V 型水泥；I 型水泥 C_3A 含量為各型水泥中最高者，因此在高鹼當量之各型水泥中，其初始流動性最差。當各型水泥中在 1.0% 劑量中，仍然無法抵抗高鹼當量產生的坍流度損失問題。當劑量增加至 1.5% 時，如圖(c)所示，比較各型水泥的初始流動性其結果類似圖(b)，I 型飛灰(5%)仍有最佳的流動性。圖(c)中顯示 I 型飛灰(5%)、II 型水泥及 V 型水泥其初始流動性甚佳，但在水化反應經過 30 分鐘後，II 型水泥及 V 型水泥黏度值曲線開始上揚，依舊無法抵抗高鹼促進 C_3A 水化反應產生的流動性損失問題，明顯地，I 型飛灰(5%)能維持長時間的高流動性，不受水泥中高鹼當量的影響。因此在高鹼當量的各型水泥中，I 型飛灰(5%)使用強塑劑有最佳的效能，其漿體流動性能維持水泥水化作用 60 分鐘後，所以與強塑劑相容性佳，V 型水泥次之，但 I 型水泥與 II 型水泥與強塑劑相容性差。同時因 I 型水泥化學成份中 C_3A 含量較高，使得在添加高劑量(1.5%)的強塑劑下其初始流動性仍然不佳。

4. 結論

- (1) 水泥中之鹼金屬溶于水中時，產生之電解質會使水泥之顆粒凝聚，而鹼金屬離子之增加會加快 C_3A 之反應，其所產生之水化產物會將吸附於水泥顆粒之強塑劑分子覆蓋，而損耗強塑劑之效能。因此鹼當量愈高時水泥漿體初始黏度值愈高，且黏度值會隨著水化時間而迅速上升。
- (2) 根據 I 型、II 型及 V 型水泥中 C_3A 含量與含強塑劑之漿體流動性關係，發現 C_3A 含量最低的 V 型水泥有較佳的流動性，明顯地 C_3A 含量的多寡，確實影響漿體的流動性及初始黏度值；水泥中 C_3A 含量愈多，漿體水化速度愈快，且水化產物愈多，使得吸附於水泥顆粒表面之強塑劑分子被覆蓋，而降低強塑劑使用效能。
- (3) 由於鹼質會影響強塑劑使用劑量與水泥的相容性，隨著鹼當量增加，強塑劑的最佳劑量提高，而且與水泥的相容性變差，因此應限制水泥中鹼當量。
- (4) 比較 MTP 與 SNF 強塑劑在相同劑量下，因作用機理不同，MTP 強塑劑對於水泥漿較能抵抗流動性損失問題。因此擁有長效性減水效果之 MTP 強塑劑對於水泥而言仍是較佳之選擇。
- (5) 當卜作嵐材料(飛灰)取代水泥 5% 時，飛灰圓球顆粒及光滑表面類似軸承效果，能增加水泥漿體流動性；且飛灰能將水泥中的鹼質消耗掉，維持漿體流動性，增進強塑劑與水泥的相容性。
- (6) 水泥中鹼當量增加時，水泥漿愈快達到終凝；此乃水泥中硫酸鹽型式易受鹼反應形成硫酸鹼，一旦硫酸鹼增加，將導致強塑劑吸附行為改變而影響效能，此外過多之硫酸鹼將壓縮電雙層而縮短水泥漿之凝結時間。
- (7) 不同水泥類型的水泥漿，其泌水率都隨著鹼當量增加而降低，因為水泥中鹼質提高而增加水泥漿的稠度及水泥水化速率，降低漿體的流動性及自由水量，使顆粒表面泌水率降低。

參考文獻

1. 黃兆龍. 混凝土性質與行為. 臺北: 詹氏書局, 1997.
2. 許貫中, 葉一賢, 陳秀娘. 材料因素對於強塑劑最佳用量之影響. 強塑劑于混凝土應用研討會論文集. 臺北: 2001. 27 – 41.
3. Aitcin, P. C., The Use of Superplasticizers in High Performance Concrete, . Y. Malier Ed, . High Performance Concrete From Material to Structure . E & FN Spon . 1992. 14-33.
4. 蘇南, 李偉卿. 強塑劑經磁場處理對混凝土工作性之影響. 強塑劑于混凝土應用研討會論文集. 臺北: 2001. 155 – 170.
5. 郭文田. 添加強塑劑對水泥材料水化及其早期行為之影響 (博士論文). 中壢: 中央大學土木工程系, 2000.
6. Byung-G. K. and Pierre-C. A., Dispensing mechanism of PNS superplasticizer in high performance concrete, 強塑劑于混凝土應用研討會論文集. 臺北: 2001. 101 – 118.

7. Shiping Jiang, et al., Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility, Cement Concrete Research, 1999, **29** : 71-78.
8. 林平全．飛灰混凝土，臺北：科技圖書有限公司，1989.
9. Nawa , T., Eguchi., H., and Fukaga, Y., Effect of Alkali Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Paste Containing a Superplasticizer. ACI SP-119, 1989, 405-424.
10. 郭文田，李釗．強塑劑對水泥材料水化及早期行為之影響．強塑劑于混凝土應用研討會論文集．臺北：2001. 81 – 99.
11. 黃兆龍．強塑劑的質與量對混凝土性質的影響．強塑劑于混凝土應用研討會論文集．臺北：2001. 129 – 146.
12. Kung-Chung Hsu, et al., Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability, Cement & Concrete Composites, 1991, **21** : 425-430.

作者簡介：郭文田，博士，副教授。E-mail:wtkuo@cc.kuas.edu.tw。張博堯：碩士。潘煌錕：博士，教授，E-mail:pam@cc.kuas.edu.tw

表 1 水泥之化學成份分析

試驗項目	I 型普通	I 型低碱	II 型水泥	V 型水泥	
化學分析 (%)	Na ₂ O	0.17	0.11	0.13	0.12
	K ₂ O	0.56	0.51	0.52	0.52
	鹼當量	0.54	0.45	0.47	0.46
	SiO ₂	21.59	21.26	21.75	21.88
	Al ₂ O ₃	4.69	4.84	5.21	5.09
	Fe ₂ O ₃	3.71	3.89	4.92	4.53
	CaO	61.54	61.76	60.01	61.21
	MgO	3.63	3.37	3.69	3.55
	SO ₃	2.21	2.26	1.76	1.53
	石膏	2.95	3.69	2.65	2.63
	C ₃ S	43.33	45.33	31.94	29.10
	C ₂ S	29.91	26.76	38.26	42.85
	C ₃ A	6.15	6.24	5.48	4.11
	C ₄ AF	11.29	11.84	14.97	13.22

表 2 強塑劑之基本物性

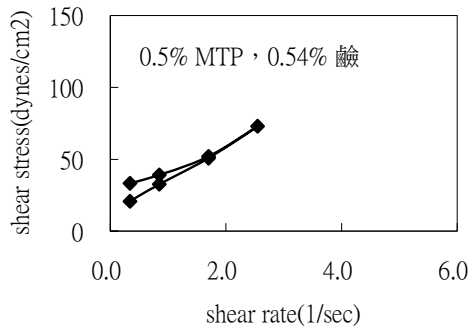
強塑劑 superplasticizer		多元有機酸系 (MTP)	磺酸系 (SNF)
基本物性	類型	F-G 改良型	Type F
	顏色	黃褐色	黑褐色
	pH 值	3~5	8
	比重	1.1~1.13	1.2
	固成分	41%	41%
	氯含量	<500ppm	<500ppm

表 4 添加 1.5% 強塑劑之凝結時間與泌水率

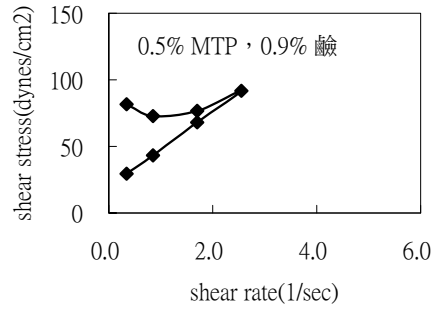
SP	凝結時間		初凝 (min)	終凝 (min)	泌水率 (%)
	水泥	鹼當量(%)			
多元有機酸 1.5%	I 型水泥	0.45	1003	1135	11.02
		0.54	959	1116	9.27
		0.7	920	1040	7.19
		0.9	812	923	6.72
	I 型飛灰	0.54	1046	1181	9.41
		0.7	1088	1158	7.96
		0.9	821	956	6.71
	II 型水泥	0.47	1025	1092	10.54
		0.7	996	1061	8.12
	V 型水泥	0.9	886	986	6.11
		0.46	994	1139	9.72
		0.7	930	1025	8.63
磺酸系 1.5%	I 型水泥	0.9	831	991	5.52
		0.45	654	759	11.12
		0.54	626	747	10.89
		0.7	563	674	8.94
	I 型飛灰	0.9	487	627	5.38
		0.54	720	853	11.46
		0.7	571	682	8.28
	II 型水泥	0.9	465	531	5.76
		0.47	585	687	9.68
	V 型水泥	0.7	481	601	8.14
		0.9	401	521	4.51
		0.46	669	785	10.14
	0.7	501	593	9.09	
	0.9	382	492	4.93	

表 3 不同型式水泥使用強塑劑之最佳劑量與相容性

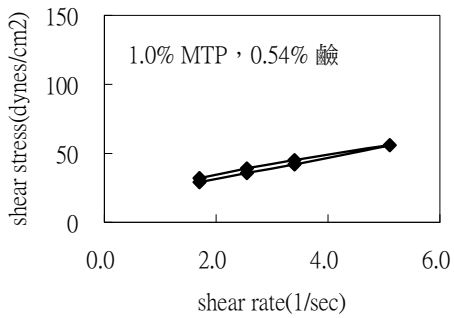
水泥型式		I 型		I 型飛灰		II 型	V 型	
鹼當量(%)		0.45	0.54	0.54	0.7	0.47	0.46	0.7
SNF	最佳劑量(%)	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1
	相容性	不相容	不相容	相容	相容	不相容	相容	不相容
MTP	最佳劑量(%)	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0
	相容性	相容	不相容	相容	相容	相容	相容	相容



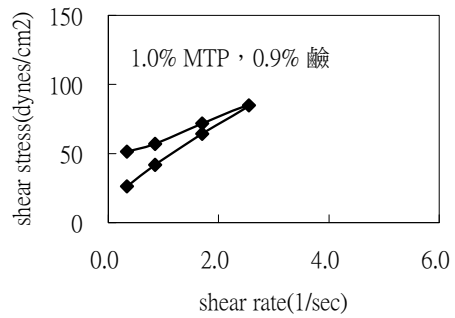
(a) I型水泥-0.54% 域量-0.5% 劑量



(b) I型水泥-0.9% 域量-0.5% 劑量



(c) I型水泥-0.54% 域量-1.0% 劑量



(d) I型水泥-0.9% 域量-1.0% 劑量

圖 1 不同域當量與 MTP 強塑劑劑量之水泥漿剪速-剪力曲線

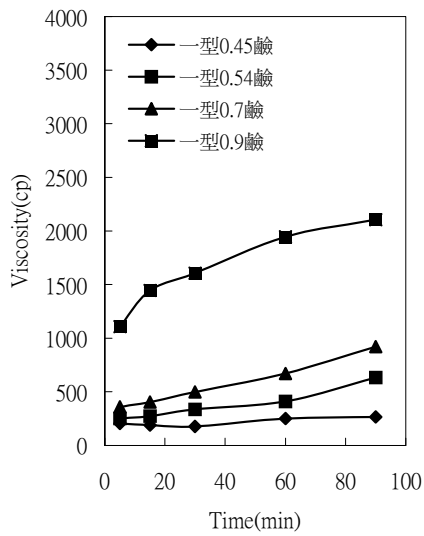


圖 2 I型水泥添加 1.5% SNF 之黏度值曲線

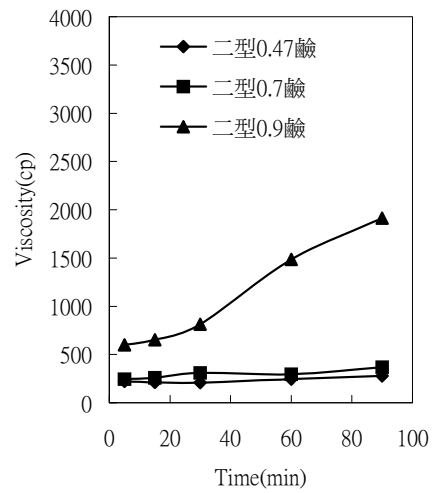


圖 3 II型水泥添加 1.5% SNF 之黏度值曲線

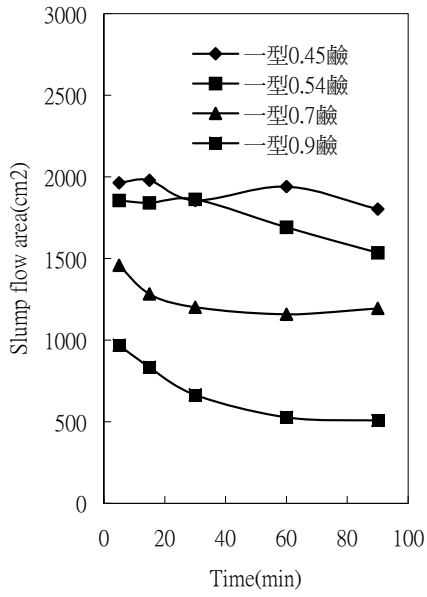
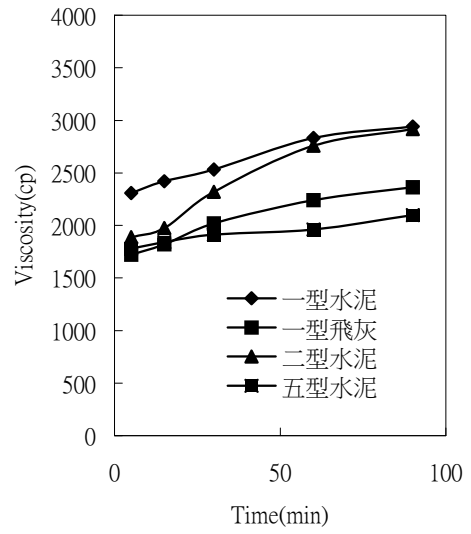
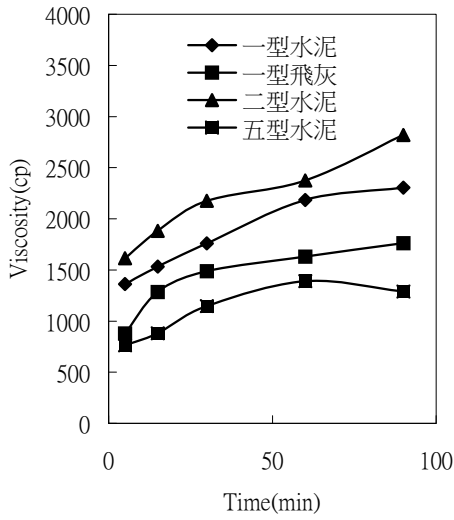


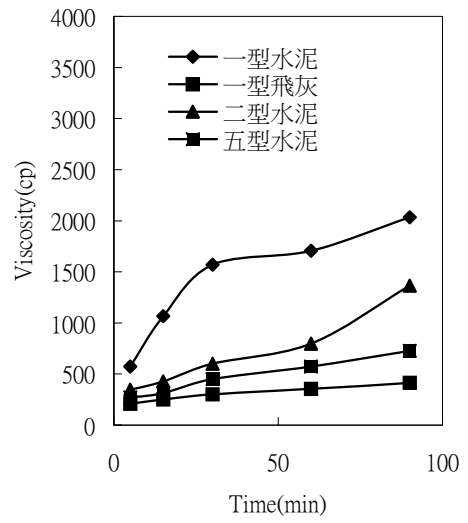
圖 4 I 型水泥添加 1.5% SNF 之坍流面積曲線



(a)0.5% 劑量



(b)1.0% 劑量



(c)1.5% 劑量

圖 5 各型水泥含 0.9% 域當量並添加不同劑量的 MTP 強塑劑之黏度值曲線