

石膏含量與型式對含強塑劑水泥漿流動性質之影響

Effect the Flowability Properties of Cement/Superplasticizer Related to the Content and Type of Gypsum in the Cement

郭文田¹ 潘煌鏗² 陳宗揚³

Wen-Ten Kuo, Huang-Hsing Pan, Chung-Yang Chen

^{1,2} 國立高雄應用科技大學土木工程系副教授、教授

³ 國立高雄應用科技大學土木工程系碩士

^{1,2} Associate Professor, Professor, Department of Civil Engineering

National Kaohsiung University of Applied Sciences

³ Master, Department of Civil Engineering

National Kaohsiung University of Applied Sciences

摘要

本研究以熟料中添加不同比例之二水石膏、半水石膏及無水石膏，並添加不同種類強塑劑，利用 Brookfield 黏滯度，Mini slump 坍流面積，Marsh cone 流動時間，SEM 微觀結構分析，凝結時間及浮水之量測，探討不同型式石膏及含量對水泥漿流動性之影響。研究結果顯示，石膏含量愈高其與 C₃A 作用形成之水化產物愈多，佔據強塑劑分子之吸附位置，強塑劑吸附量降低，使得漿體流動性降低，凝結時間縮短。即水泥漿流動性大小依序為含 0%、3%、6%、9% 之石膏。此外水泥漿之流動性亦隨石膏溶解速率增加而下降，不同型式石膏，以半水石膏溶解速率最快，其次為無水石膏，最慢的為二水石膏。即水泥漿體中添加半水石膏流動性最差，其次為含無水石膏，而含二水石膏流動性較佳。

關鍵字：石膏，強塑劑，水泥漿，流動性。

Abstract

Material parameters of this research concern consist of viscosity, marsh cone flow time, mini slump spread areas, setting time and bleeding. The goal of this work is to highlight the role of different type and content of gypsum in the flowability properties of cement paste. Experiment results show that the higher gypsum content reactions to C₃A, the more hydration products are produced. Thus, the occupied absorption spaces of SP were increased and the amount of adsorption was decreased. The flowability properties of cement paste were reduced and the setting time was shortened simultaneously, namely, cement paste from great flowability to small flowability of cement paste are the 0 percent, 3 percent, 6 percent and 9 percent of gypsum content in turns. Furthermore, the flowability properties are decreased along with the rate of gypsum melt. From the different type of gypsums, the melt rate of gypsum-hemihydrate is the fastest, the melt rate of gypsum-anhydrite is the slower and the melt rate of natural gypsum is the slowest, namely, the flowability properties of cement paste were worst, better and best when gypsum-hemihydrate, gypsum-anhydrite and natural gypsum was added in the cement paste respectively.

Key Words: gypsum, superplasticizer, cement past, flowability.

一、前言

水泥在拌和後消耗水之速度，影響著水泥漿之流變性質，水泥在拌和後一小時內，強塑劑之高分子消耗量，關係著水泥與強塑劑之間的相容性。Aitcin認為此相容性問題來自於硫酸根離子之不平衡。一方面，水泥加水拌和後，大部份之水與水泥進行水化反應，因此僅剩較少的水可容納硫酸根離子，硫酸鹽無法有效溶解，形成沉澱造成凝結異常。另一方面，強塑劑分子將與C₃A產生化學反應。強塑劑在混凝土中之角色，包括分散固體顆粒，干擾水化動力行為及影響硫酸鈣之溶解速率，所以影響強塑劑效益之因素包括：水泥中C₃A及C₄AF之濃度，水泥之細度、鹼含量、硫酸鈣之含量及溶解度。

實際上硫酸根之所以會造成問題，係起源於水泥製造過程中產生不同形式之硫酸鹽，其包括二水石膏(CaSO₄·2H₂O)、半水石膏(CaSO₄·½H₂O)、可溶無水石膏(CaSO₄)、不可溶無水石膏及鹼金屬硫酸鹽(K₂SO₄, Na₂SO₄)。且硫酸鹽之數量及溶解速率又不同，CaSO₄·½H₂O大於CaSO₄及CaSO₄·2H₂O，另鹼金屬硫酸鹽又大於含鈣離子硫酸鹽，過多之SO₄²⁻造成假凝(石膏沉澱)，不足，又造成閃凝(水化石榴石)，因此石膏之含量及溶解度對水泥漿之流動性有重要之影響。

水泥水化時C₃A的水化速率最快，因此常需要添加石膏減緩C₃A的水化速率，以避免閃凝的現象，然而在使用強塑劑時，C₃A在早期水化產生水化石榴石(hydrogarnet)，或與石膏共同水化生成鈣釩石或單鋁型硫酸鈣時，其會將水泥顆粒表面之強塑劑分子覆蓋而消耗大量強塑劑分子，降低強塑劑使用成效。此外水泥產製過程中石膏在研磨時若溫度過高，將使帶兩個結晶水石膏，變成帶半個(或無)結晶水石膏，於水泥加水拌和時，脫水石膏會吸收拌和水，很快的水化變成兩個結晶水石膏，水泥中帶脫水石膏過多，會使水泥產生假凝現象而失去工作性，且脫水石膏其快速水化，亦可能消耗強塑劑成效。故水泥中所含有不同型態石膏時其溶解速率不同常造成水泥不正常凝結，與其他化學摻料共同使用時，將影響摻料與水泥之相容性而改變水泥之流變行為。因此本研究擬以黏滯度、Marsh cone流動時間、迷你坍流面積等流變行為，配合凝結時間及浮水率測定，以及SEM微觀分析等試驗，探討石膏含量與型式對含強塑劑水泥漿流動性之影響。

二、試驗計劃

不同種類之強塑劑與不同成份和性質之水泥，二者間相互作用的機理相當複雜，因此本研究利用抽絲剝繭的方法，首先自行研磨I型及II型水泥熟料，並且配合添加不同型式及含量之石膏，探討其與不同強塑劑之流變行為(rheology)。期望藉以瞭解水泥中石膏含量及型式，對不同強塑劑的相容性，作為改善強塑劑使用成效及改善水泥產製之品質依據。

(一)試驗材料

- 1.水泥熟料：由亞洲水泥公司提供竹東廠之I型及II型水泥熟料。
- 2.石膏：購自市面，試藥級之二水石膏、半水石膏及無水石膏，其分子式分別為CaSO₄·2H₂O(二水石膏)、CaSO₄·½H₂O(半水石膏)、CaSO₄(無水石膏)
- 3.強塑劑：市售之強塑劑，包括磺化奈甲醛聚合物(SNF)，及多元有機酸(MTP)。

(二)試驗變數

- 1.石膏含量：0%、3%、6%、9%。
- 2.石膏種類：二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)；半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)；無水石膏(CaSO_4)。
- 3.強塑劑種類：採用甲醛聚合物(SNF)，及多元有機酸(MTP)二種作用機理不同之強塑劑。
- 4.強塑劑濃度：添加量由低至高為0.5%、1%、1.5%。
- 5.水灰比(W/C)：0.35、0.47。

三、試驗結果分析與討論

1.黏度值之測定

(1) 石膏含量：

圖1顯示，石膏含量由0%添加至9%黏度值之趨勢為石膏含量愈多則黏度值愈大，即0%黏度值最小，9%黏度值最大，由此可見強塑劑之吸附行為受 CaSO_4 含量之影響，石膏含量增加強塑劑吸附量隨之降低，石膏含量多則石膏和 C_3A 作用形成之水化產物大量生成一交錯結構空間網，佔據強塑劑之吸附位置致使吸附量降低，強塑劑分子吸附量少，則水泥顆粒間凡得瓦力產生之聚簇現象將加劇，水分子或水化產物間之強鍵結力形成之網狀結構，將造成水泥漿黏滯度上升，流動性降低。此外大量生成之水化產物將覆蓋吸附於水泥顆粒上之強塑劑分子，導致漿體中強塑劑濃度消耗，濃度降低則水泥漿之分散性下降，顆粒束制特性使水被封閉於顆粒間無法排出黏滯度因而上升。

唯卜特蘭水泥中添加石膏之目的為緩和 C_3A 之快速反應，控制凝結時間，於常理而言未添加石膏即石膏含量0%時應有閃凝之現象發生而致黏滯度升，但於試驗中發現石膏添加量0%時其黏滯度最小，究其原因應係試驗中採用之水灰比較大(0.35, 0.47)，以及水泥熟料粒徑分不過廣致使閃凝現象無法表現。

(2) 石膏型式：

水泥漿中添加之石膏型式不同其黏滯度也不同，漿體黏滯度由高至低為半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)漿體、無水石膏(CaSO_4)漿體、二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)漿體，此一現象顯示，石膏之溶解速率影響水泥之水化速率，本研究採用之石膏溶解速率為半水石膏大於二水及無水石膏，石膏溶解速率快則水泥水化產物出現時間愈早，水化產物多將影響強塑劑之吸附量，降低強塑劑使用成效，此外水泥與水拌和初期，當水泥中含脫水石膏，脫水石膏將吸收拌和水轉化為二水石膏，此過程使漿體稠度上升，而形成假凝現象，而此情形將因拌和而將聚簇現象破壞，回復其流動性，添加半水石膏及MTP之漿體及添加無水石膏及SNF之漿體，於黏度曲線上皆有出現明顯轉折點，此即假凝現象，大體上含脫水石膏之漿體皆有假凝現象，但觀察各黏度曲線圖，並非皆有轉折現象，此乃假凝出現時間並非試驗設定量測時間，假凝現象因擾動而破壞，因此並未顯示於曲線上。

(3) 強塑劑型式及含量：

比較二種強塑劑(SNF及MTP)之使用成效，可發現，水泥漿中強塑劑劑量較低時(0.5%)MTP對改善水泥漿顆粒之聚簇現象有較佳之貢獻，推斷此乃SNF因劑量過低，當強塑劑分子吸附於水泥顆粒時，石膏與 C_3A 反應生成之水化物，將很快的覆蓋於強塑劑分子之吸附面上，由於劑

量較低，漿體內之 SNF 強塑劑分子已無足夠濃度吸附於被覆蓋之水化產物上，使得含 SNF 之漿體在低劑量時流動性低，而 MTP 之作用機理為利用立體支鏈的羧酸吸附水泥顆粒上，靠羧酸基之負電荷產生靜電排斥力，於低劑量時，雖吸附於水泥顆粒表面之強塑劑有部分被水化產物所覆蓋，但其長條突起之支鏈，依舊有其分散效果。當強塑劑濃度增加時(1.0%及 1.5%)，添加 SNF 之漿體因強塑劑濃度足夠，雖早期強塑劑分子為水化產物覆蓋，但隨後之活性高分子開始產生活化，而吸附於水泥產物上，使水泥粒子再分散，黏滯度因而較低，反觀 MTP 雖具有長條支鏈維持顆粒之分散性，但大量之石膏，使鈣鈦石大量生成，覆蓋其上，雖不致喪失流動性，但漿體流動性就不如高劑量之 SNF 漿體高，在強塑劑劑量方面，強塑劑添加量愈多則水泥漿之分散性愈大，此點與常理並無違背，強塑劑於漿體中劑量愈高，則強塑劑之吸附量愈大，吸附量大漿體之流動性愈大，黏滯性愈小，此亦印證石膏含量高時會抑制強塑劑吸附於 C₃A 上，欲達到相同工作度，需使用較高之強塑劑量。

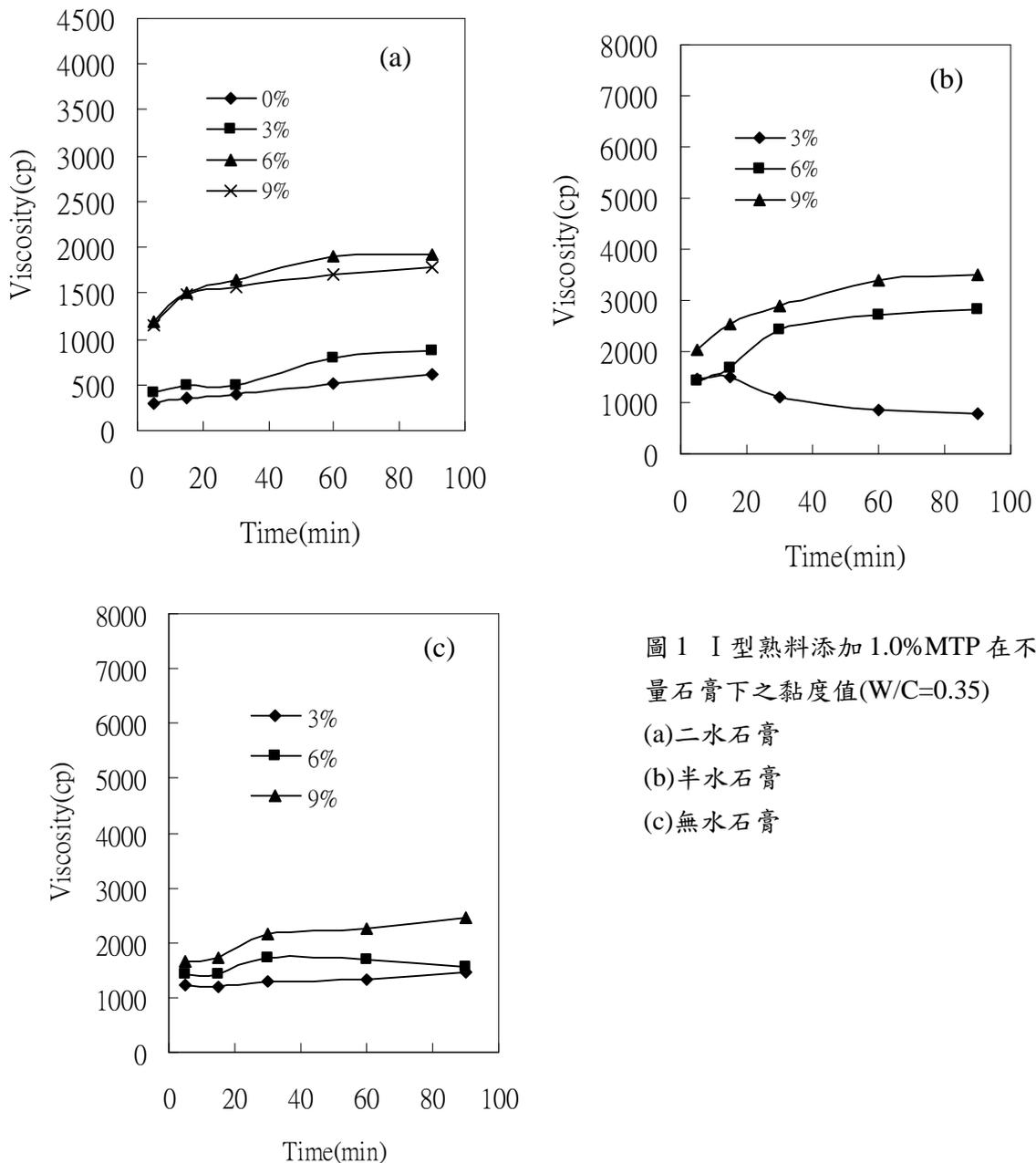


圖 1 I 型熟料添加 1.0% MTP 在不同含量石膏下之黏度值(W/C=0.35)

- (a) 二水石膏
- (b) 半水石膏
- (c) 無水石膏

2. Marsh cone 流動時間測定

石膏含量由 0% 增加至 9% 時水泥漿流動性之趨勢為石膏含量愈高，漿體通過 Marsh cone 時間愈長，此現象與黏度值之結果相吻合，原因同黏度值測定之討論所提及，即石膏含量過高，大量之水化產物降低了強塑劑吸附量且水化產物覆蓋了強塑劑分子，降低了其在漿體中之濃度，造成漿體流動性降低。另外石膏添加量為 0% 時，水泥漿體閃凝之現象也未出現，甚至流動時間為最快，此點乃與本試驗採用之水灰比(0.35 及 0.47)以及熟料粒徑分佈有關。不過本試驗採用高水灰比乃是必須的，因為 Marsh cone 流度錐較適合高流動性漿體，否則漿體因稠度過高將無法順利通過 Marsh cone，試驗將無法完整進行。

熟料中添加二水石膏漿體流動性較佳，其次為無水石膏，而含半水石膏之漿體其流動性最差，尤其於強塑劑劑量為 0.5% 時，半水石膏之試體，無論石膏含量多寡都無法順利通過 Marsh cone，漿體所呈現之稠度非常高，此與黏度值結果相符，即漿體流動性受石膏之溶解速率(半水 > 無水 > 二水)所影響，石膏之溶解速率愈快，鈣氫石生成速度愈快，鈣氫石覆蓋了強塑劑分子，強塑劑無法發揮其效能，而使漿體稠度升高。另含脫水之石膏，拌和時吸收拌和水，使漿體水分喪失，且脫水石膏轉化為二水石膏，會形成硬化結晶都將使得水泥漿體之稠度升高，造成了 Marsh cone 流動時間之延遲，然而此現象將因拌和作用而破壞，因此漿體流動性會再次展現，顯示於 Marsh cone 曲線上將出現轉折點，如圖 7 所示添加半水石膏及 MTP 漿體和添加半水石膏及 SNF 之漿體皆有明顯曲線轉折現象，不過並非全數出現曲線轉折現象，因為假凝現象仍要配合出現於量測時間點上，曲線才會出現轉折點。

比較二種強塑劑之使用成效，結果與黏度儀所量測之趨勢大致相同，但仍有些許差異，如 I 型熟料添加二水石膏於 1.5% 之漿體，及 II 型熟料添加二水石膏於 1.5% 之漿體，二者於高劑量強塑劑(1.5%)時 MTP 之成效皆高於 SNF，研判為二水石膏溶解較慢，因此石膏與 C_3A 作用生成之鈣氫石並未短時間增生，且強塑劑處於高劑量狀態，MTP 之長條羧酸支鏈於劑量濃度高及水化產物生成緩慢下，仍能保持分散顆粒之效果，超越 SNF 之使用成效，而其餘之試體仍舊遵照強塑劑低劑量時(0.5%)MTP 成效較佳，高劑量時(1.0% 及 1.5%)以 SNF 成效較顯著，SNF 在劑量足夠下對於水泥中石膏脫水產生之漿體稠度上升之情形有較佳之改善效果。

添加半水石膏及 MTP 漿體曲線出現二個轉折點，第一個轉折點出現於拌和後 5 分鐘，第二個出現於拌和後 30 分鐘，研判第一個轉折點為假凝現象所引致，第二個為強塑劑於 30 分鐘後吸附達最大量，因此漿體流動性較佳，過 60 分鐘後因水化產物之增生，覆蓋強塑劑分子，使流動性下降。

在強塑劑劑量的使用效益上，仍是劑量愈高則漿體流動性愈佳之結果，強塑劑濃度愈高則吸附於水泥顆粒之分子愈多，分散性當然愈好。

3. Mini slump 坍流面積測定

漿體中石膏含量由 0% 增加至 9% 時，坍流度與石膏添加量呈反比現象；0% 石膏含量之坍流面積最大 9% 石膏含量時坍流面積最小，此與黏度值及 Marsh cone 之結果相似。其成因皆為石膏添加量愈多，則石膏與 C_3A 生成之水化產物佔據強塑劑吸附位置及覆蓋強塑劑吸附於水泥顆粒

之分子，使強塑劑性能降低，漿體坍流度因此較差。而0%石膏含量未出現閃凝之坍流度損失現象，其原因其原因同黏度值及 Marsh cone 所提及，乃水灰比過高及熟料粒徑分佈過大所致。

含脫水石膏漿體，於 Mini slump 曲線上有轉折點，此乃假凝所造成漿體短暫稠度上升現象，在經由拌和擾動後，流動性會回復，因此 Mini slump 曲線上會出現轉折點。

漿體中石膏添加之型式對坍流面積有明顯之影響，其大小依序為二水石膏>無水石膏>半水石膏，此現象與石膏之溶解速率相反，在石膏形式中半水石膏溶解速率最快，則石膏與 C_3A 作用生成之水化產物(鈣鈣石)出現愈快也愈多，強塑劑之吸附因此降低，而造成坍流度下降。此外脫水石膏吸收拌和水轉變為二水石膏之過程，亦會使漿體稠度上升坍流面積下降，但經由拌和後又可恢復其流動性，因此於 Mini slump 曲線上會出現轉折點，添加無水石膏及 MTP 和添加無水石膏及 SNF 二組試體，於拌和後 15 分鐘後皆出現假凝現象而有轉折點，不過仍舊要配合出現於量測時間點上，曲線才會出現轉折點現象。

二種強塑劑使用效益之差異上，基本上與黏滯度量測與 Marsh cone 量測有同樣之結果，漿體採用二種減水機理不同之強塑劑，其行為之表現為強塑劑在低劑量(0.5%)時以 MTP 之減水效果較佳，即漿體坍流面積較大，而強塑劑劑量較高時(1.0%及 1.5%)，則 SNF 之減水劑效益較好，此乃二種強塑劑減水機理不同所致，因此 SNF 在高劑量時用於水泥中含脫水石膏之漿體似乎有較好之減水效果，但若由 Mini slump 坍流面積仔細觀察，含 MTP 之水泥漿其坍流面積有隨時間增加而增加之趨勢如圖 13、圖 14 所示，其現象大都表現於含脫水石膏時，而含 SNF 之漿體呈現時間愈長坍流面積愈小之現象，探討其原因為 MTP 採用之作用機理與傳統之 SNF 不同，MTP 為一種共聚合分子，主要係其共聚合物在水泥初期水化產生的鹼性溶液中，羧酸架橋體會逐漸解離成具分散作用的羧酸而後吸附在水泥顆粒表面上，發揮分散水泥顆粒的效果，故羧酸類 SP 在拌和後 30 分鐘方可發揮其分散水泥顆粒之減水效果，羧酸類強塑劑中具有之立體狀支鏈吸附於水泥顆粒上，藉著羧酸之陰離子產生靜電排斥力，及支鏈產生之立體排斥力，使水泥顆粒分散。一定時間後，隨水泥水化之進行產生水化產物，雖吸附於水泥顆粒之高分子強塑劑有一部分被水化產物所覆蓋，但由於立體狀的支鏈大部份仍未被水化產物所覆蓋，故可維持較長時間之減水效果，本研究施測時間最長至 90 分鐘，若單純的以 90 分鐘內之坍流面積欲判斷其減水效益，則 SNF 似乎成效較好，但含 MTP 之漿體曲線趨勢有上揚現象，若將施測時間拉長，則含 MTP 之漿體有較好之坍流度，因此在 Mini slump 量測上 MTP 之效益較好，即有較高減水效果。此外漿體之坍流面積，隨著強塑劑劑量之提升而加大，即與強塑劑之劑量成正比，證明強塑劑濃度越高吸附量越大則水泥漿流動性越高，坍流面積越大。

4. 浮水量及凝結時間測定

(1) 石膏含量：

大體上石膏含量愈高則浮水率愈低凝結時間愈快，此乃石膏含量影響水化產物之生成，及強塑劑之吸附量，即石膏含量高則其與 C_3A 大量生成之水化產物，將佔據強塑劑之吸附位置，導致強塑劑吸附量降低，使強塑劑效益降低，漿體稠度升高，另外水化產物覆蓋強塑劑吸附於水泥顆粒之分子，使漿體中強塑劑濃度降低，亦是漿體稠度升高之原因，水泥漿稠度上升則浮水率隨之降低，凝結時間加快，因此水泥中石膏含量與浮水率呈反比，與凝結時間成正比。

(2)石膏型式：

石膏溶解速率影響水泥漿體之浮水率及凝結時間，石膏溶解愈快水化產物生成愈早，水化產物將影響強塑劑之吸附，降低強塑劑之效益，致漿體稠度上升，此外脫水石膏拌和時吸收拌和水亦是造成漿體稠度升高之主因，所以含二水石膏之漿體其浮水率大於含無水石膏及半水石膏之漿體。且含半水石膏之漿體凝結時間最快，其次為無水石膏之漿體，最慢凝結的為二水石膏之漿體。

(3)強塑劑型式及含量：

強塑劑含量愈高漿體之浮水愈多，係因強塑劑濃度高，則束制於顆粒間之水分將大量排出造成漿體稠度降低，稠度過低即產生漿體中之固體成份分離之現象，因此強塑劑於混凝土配比中劑量應適當，才不致造成骨材析離之現象，而影響混凝土之強度。

MTP之緩凝效果高於SNF，因此可印證MTP採用之長條支鏈對於水泥漿之延緩凝結有較佳之效果。然而由黏度值、Marsh cone、Mini slump等量測之結果對照凝結時間可發現，添加SNF之漿體在高劑量情形下流動性較高，不過其凝結時間卻較短，究其原因為二種強塑劑之減水機理不同所致，於短時間內SNF似乎具有較佳流動行為，然而MTP之立體支鏈雖然短時間其漿體流動性不如SNF之漿體，但因MTP之支鏈能避免水化產物之覆蓋，因此於長時間仍能維持漿體流動性，所以含MTP之漿體雖未見得比同劑量之SNF漿體流動性佳，但可避免流動性損失之現象。

另外當強塑劑劑量高時，漿體凝結時間較長，此乃強塑劑濃度愈高，吸附量就愈大，強塑劑吸附量大，則水泥顆粒之分散性愈大，稠度愈低，凝結時間因此較長。

四、結論

1. 水泥中石膏含量由0%添加至9%，水泥漿體流動性隨石膏含量增加而降低，其中以9%流動性最差，由此證明大量之石膏與 C_3A 作用形成之水化產物生成交錯之結構空間網，佔據強塑劑之吸附位置致使吸附量降低，強塑劑之效能下降，導致水泥顆粒間凡得瓦力之聚簇現象加劇，水分子或水化產物間之強大鍵結力形成之網狀結構，將造成水泥漿流動性降低。
2. 水泥中石膏含量增加，凝結時間縮短，浮水率降低，其中以石膏含量9%時，凝結時間最快，浮水率最低。
3. 水泥漿體之流動性，隨著添加石膏之型式不同而有差異，本次研究添加之石膏按其溶解速率大至小排列為(半水石膏>無水石膏>二水石膏)，水泥中石膏溶解速率愈快，則水化產物生成愈快，此將影響強塑劑吸附量，造成強塑劑減水效果降低，因此含二水石膏之漿體流動性最佳，無水石膏之漿體次之，半水石膏之漿體其流動性最差。
4. 水泥中含脫水石膏，在水泥與水拌和時產生之假凝現象，使得漿體稠度上升，流動性降低。
5. 以黏滯度試驗、Marsh cone、Mini slump等流動性試驗而言SNF對於漿體之短時間(90分鐘內)流動性具有較佳之效益，但由凝結時間試驗結果發現MTP減水效果持續較長，其長效性流動性損失較小。
6. 由強塑劑添加量可印證，試驗中強塑劑濃度愈高，吸附量愈大，漿體流動性愈佳，但過高易產生浮水析離等之不良後果。

7. 水灰比 0.47 之水泥漿其流動性大於水灰比 0.35 之水灰比，水灰比大則漿體流動性較佳，但過多之拌和將造成大量之浮水，使漿體內部產生不均質現象。
8. 利用 SEM 觀測漿體微觀晶相，可印證漿體流動性確實受制於水化產物之多寡，水化產物多則強塑劑吸附降低，漿體流動性下降，反之強塑劑吸附量高，漿體流動性較佳。

誌謝

本研究為國科會專題研究計畫（NSC 90-2211-E-151-005）之部份成果，承蒙國科會經費補助，謹此致謝。

參考文獻

1. 郭文田，李釗，2001，“強塑劑對水泥材料水化及早期行為之影響” 強塑劑於混凝土應用研討會，頁 129-154，台北，4月。
2. Cottin, B., 1992, “The First Reaction in Cement Hydration”, in Hydration and Setting of Cement, Nonat, A., and Mutin, C., Edts., E&FN Spon., pp. 89-100, New York.
3. Ramachandran, V. S., and Feldman, R. F., 1984, “Superplasticizers”, in Concrete Admixture Handbook, Ramachandran, V. S. Edt., Noyes, New Jersey.
4. Lim G. G., Gong, S. S., Kim, D. S., Lee, B. J., and Rhb, J. S., 1999, “Slump Loss Control of Cement Past by Adding Polycarboxylic Type Slump-Releasing Dispersant”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, pp. 223-229.
5. Hamou, A. T., and Aitcin, P. C., 1993, “Cement and Superplasticizer Compatibility”, World Cement, August, Vol. 24, No. 8, pp.38-42.
6. Jiang, S., Kim, B. G., and Aitcin P. C., 1999, “Importance of Adequate Soluble Alkali Content to Ensure Cement/Superplasticizer Compatibility”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 1, pp.71-78.
7. Doston, V. H., and Hayden, T. D., 1989, “Another Look at the Portland Cement/Chemical Admixture Incompatibility Problem”, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 11, No. 1, pp.52-56.
8. 黃兆龍，2001，“強塑劑的值與量對混凝土性質的影響”，強塑劑於混凝土應用研討會，頁 129-154，台北。
9. 郭文田，2000，添加強塑劑對水泥材料水化及其早期行為之影響，國立中央大學，博士論文。
10. Nawa, T., Eguchi, H., and Fukaga, Y., 1989, “Effect of Alkali Sulfate on the Rheological Behavior of Cement Past Containing a Superplasticizer”, ACI SP-119, pp.405-424.
11. Menetrier, D., Jawed, I., and Skalny, 1980, “Effect of Gypsum on C_3S Hydration”, Cement and Concrete Research, Vol. 10, pp.697-701.