

水庫淤泥拌製流動性填料之工程性質

Properties of Flowable Fill Made Using Reservoir Sedimentation

國立中央大學土木系副教授

黃偉慶
W. H. Huang

國立中央大學土木系研究生

劉杏游
Hang-Iao Lao

國立台灣大學農業工程學系助理教授

陳增壽
Tzen-Show Chen

摘要

本文針對國內主要水庫庫底抽砂產生之淤泥，尋求再利用之可能途徑，以解決各水庫淤泥處理的困難。進行之方法係在實驗室內利用少量的水泥、飛灰或細砂與大量的水庫淤泥加水拌合，製成具有良好流動性的泥漿填料，並分別測試各不同配方泥漿之流動性、凝結時間、泌水性、單位重及強度發展等特性，以評估水庫淤泥製作流動性填料之可行性。實驗結果顯示採用波特蘭第一型水泥配合飛灰與水庫淤泥拌合製成之流動性填料，具有良好的流動性及合理的強度，可應用於管槽回填、擋土牆背填、及地下結構物封填等場合，研究成果可提供國內各水庫處理淤泥及再利用之參考依據。

關鍵詞：水庫淤泥，流動性填料。

ABSTRACT

Due to land use limitation and stringent environmental regulations, the disposal of reservoir sedimentation has become more and more difficult. On the other hand, the supply of quality soil and aggregate materials for construction has diminished significantly in Taiwan. The utilization of reservoir sedimentation not only solves a waste disposal problem but also provides an economic construction material. The purpose of this study was to assess the possibility of mixing reservoir sedimentation with cement and/or fly ash to make a flowable material for applications in trench backfill, retaining wall backfill, and underground void filling. Laboratory investigations were conducted on the sedimentation collected from a reservoir in northern Taiwan. Physical properties included specific gravity, organic content, and soil consistency constants were determined. Mixtures consisting of sedimentation, cement, fly ash, and water were tested for their setting time, bleed, flowability, unit weight, as well as strength development characteristics.

Keywords : Reservoir Sediment, Flowable Fill.

一、前言

目前本省各主要水庫由於集水區上游過度開發利用及水土保持不良等問題，以致水庫淤積情形嚴重，因此各水庫皆致力於水庫內淤泥的抽取工作。但隨著棄土處理費用的高漲及環保法規趨於嚴謹，各水庫之淤泥處理已顯得日漸困難。如能針對水庫淤泥之物理特性，進行簡易的篩選，並與其它適當材料拌合製成可供再利用的材料，將有助於紓解水庫淤泥處理的困難，不但可解決淤泥處理的問題，同時可替代傳統的天然砂石，提供國內公共工程開發所需之材料，並保存國家天然資源，解決目前天然砂石材料缺乏的問題。

國內主要水庫目前對於庫底抽取之淤泥大都棄置不用，而堆置於下游河道兩岸沉泥池中，如此不僅需要大量土地堆放，且有造成二次公害的可能。至於具有類似特性的電廠煤灰、高爐爐石、廢電土石等工業廢棄物皆已發展出一些可行的再利用方法，如拌製混凝土、做為路基材料、或製成可流動填料等，並已有許多實際應用的成功案例，可供水庫淤泥再利用之借鏡。

淤泥流動性填料係採大量的水庫淤泥與少量的水泥及飛灰加水拌合，成為具有自流性的流動性填料，應用於土壤回填之替代材料時具有相當多的優點，如管槽回填時可自行流入傳統回填法較難填補的空隙或槽縫，用於擋土結構物背填時由於良好的輸送性與流動性，特別適於出入不易的施工地區，且施工時不需分層夯實滾壓，因而加快回填的速度，此外由於不需滾壓機具，故可在狹窄的工作面施作，降低工程成本；另一方面可依據工程需要調整流動性填料之配方，以獲致所需強度，並使日後如需再度開挖時不致產生困難，且由於添加水泥使填料之顏色與週圍土壤產生差異，減少日後錯誤開挖的機會。本文探討水庫淤泥製成流動性填料之工程性質，以便瞭解其功能及適用範圍，期能一舉兩得解決國內水庫淤泥處理的困難與工程材料匱乏的問題。

二、流動性填料

流動性填料泛指具有良好流動性的低強度混凝土、砂漿或糊漿。一般而言，此材料具有兩個特性，一為可流動，二為僅含少量水泥[1]。常利用多量的土壤與粒料

配合少量的水泥或其它摻配材料加水予以拌合，使其成為具有流動性的材料，而凝結後則具有相當強度，可用以取代傳統的夯實土壤。事實上，國外有許多案例已顯示流動性填料施工迅速簡便，而且相當經濟，因此在許多方面均較夯實土壤回填料為佳。

流動性填料具有許多傳統材料所缺乏的優點。由於具有自流动性因此澆注時對於施工機械、勞力等的需求可降至最低，而在填料凝結後強度即逐漸發展出來，故不需加以夯實，使施工所需時間及工作量減少，以人工澆置作業為例，通常僅需移動流動性填料澆注管之出口端位置即可。流動性填料硬固以後比夯實土壤可承受更大的荷重，且經適當的設計可使日後需再度開挖時不致因強度過高而產生困難。由於流動性填料凝固後強度的主要來源為水泥水化作用產生之膠結物，故可藉調整水泥的使用量來控制其凝固後之強度，但一般應用時係取代夯實土壤做為回填料使用，故強度的要求不高，水泥的使用量也限制在10%（重量比）以內。

2.1 流動性填料之應用

由於可流動填料的自流特性，使其易於應用於出入困難、場地受限的施工場所，且可由單一澆注點對較大的面積進行澆置作業，克服施工場地的限制與困難，而澆置完成即自行凝結硬化，省卻了夯實作業所需的施工機械與人力，使可流動填料成為一低成本、低人力、不需技術性、施工迅速且施工條件不受限制的回填材料，可應用於相當多的場合，如：

(1) 管槽回填 (Trench backfill)：管槽回填為可流動填料到目前為止最為常見的一種應用方式，包括電力、電信、自來水、天然氣等公共事業的地下管線，以及衛生下水道、雨水下水道、乃至灌溉渠道等溝槽開挖後的回填。事實上流動性填料的施工作業不僅人力需求低，且不需技術熟練的工人亦可進行施工，遠較傳統回填土壤夯實時所需的人力要求為低。當管槽開挖地區的現地土壤不良、體積穩定性差、或預期可能產生較大沉陷量時，特別適合使用流動性填料，以降低管槽因前述原因而必須深挖所可能產生的危險與成本。可流動填料亦可做為管線之墊料 (pipe bedding) 使管線獲得較均勻的支承，且避免在管線兩側回填土壤壓實時所可能遭遇的困難。

- (2) 廢棄地下結構物封填 (Abandoned underground structures)：如廢棄的地下礦坑、隧道、水池、涵洞等。在此種應用方式時，流動性填料經由適當的配合設計可使其於單一澆注點流入廢棄地下結構物後，能流動相當長的距離，且仍能達到較周圍土壤更佳的強度，以達成封填的目的。
- (3) 填築難以到達的空隙 (Hard-to-reach spaces)：建築物下方、基礎的四週、或兩相鄰管線間的空隙等，土壤回填料既難以進入，又無法滾壓夯實，而流動性填料可流入任何不規則而不易到達的空隙或孔洞，避免移動或拆除空隙上方表面結構物之困擾。此外，流動性填料在任何不規則的空隙或孔洞中在凝結以前可自行調整水平 (self-leveling)，確實填注各種形狀與形式的空隙。
- (4) 減少荷重：一般流動性填料凝固後的單位重較混凝土或夯實土壤為小，因此應用於地下結構物封填、擋土牆背填、或遭遇較軟弱之壓縮性土壤時，由填料本身自重所產生之荷重較小，對擋土結構物產生的水平壓力也較小，在軟弱地質上應用時所引致的沉陷量亦可降低，進而提升軟弱土壤的承載能力。

2.2 流動性填料之優點 [2]

流動性填料類似傳統大地工程常用的灌漿材料 (grout)，因此具有灌漿材料的優點，但流動性填料本身為自流动性，因此澆注時不需另外施加壓力，可藉重力使填料流入欲填之區域，然後隨著填料中水泥成分的水化作用而發展出強度，達到支承土壤的效果。以下就流動性填料的工程性質分別討論其優點：

- (1) 新拌時具流動性
 - 可填入結構物下方的空隙而不需移動表面土壤或結構物
 - 可填充不規則或難以觸及的表面
 - 減少工作人員在開挖的槽溝內工作的危險
 - 具有流體的自平特性 (self-levels)
 - 管線接頭可獲得充分的封填
- (2) 凝結後
 - 膨脹或乾縮量低
 - 可藉配方的調整來取得所需的工程特性
- (3) 不需滾壓夯實或振動
 - 減少施工人力需求
 - 加速施工程序
 - 提供一均勻的墊層，避免土壤回填滾壓後密度不均勻的問題
 - 管槽開挖時允許較窄的寬度，減少開挖量
- (4) 澆注時較不受天候冷熱或乾溼的影響
- (5) 可能較粒狀填料 (granular fill) 更易於取得
- (6) 單位重較一般土壤及混凝土為小
- (7) 排擠自由水，故澆注時不受表面水的影響
- (8) 易於再度開挖
 - 適當的配合設計使填料之強度高於周圍土壤且亦不致影響日後再次開挖
 - 填料與水泥拌合硬固後，常與周圍土壤外觀、顏色互異，再度開挖時易於辨識
 - 應用於管槽回填時，由於外觀及顏色不同，再次開挖時可提高工作人員警覺，避免不慎挖斷管線。

2.3 流動性填料應用時之限制

流動性填料之眾多優點已如 2.2 節所述，但應用時的一些限制仍應加以說明，以便於設計時先行加以考量，使回填料的功能得以充分發揮。

- (1) 由於可流動填料中水泥所佔比例相當低，凝結所需時間常在 12 小時以上，因此對於緊急修補回填的應用，必須謹慎。
- (2) 由於流動性填料之設計強度低，故其強度發展的速度不及混凝土，尤其添加飛灰之填料也會影響強度發展速率。
- (3) 低強度填料之應用限於有側向支持的封閉區域 (confined location)，以免填料的流失，且側向支持須維持到填料凝結及初期養治為止。如有高於地表的回填時則必須使用模板支撐方可施工。
- (4) 流動性填料澆築管槽時由於浮力作用可能會使管線浮起，因此必須在管子下方添加臨時性的重物來加以防止。
- (5) 由於流動性填料澆築時為流體，其自重對管線或擋土結構物產生之側向壓力必須列入考慮，通常可以採用分層澆置的方式來減少填料所產生之側向壓力。

除了上述限制外，流動性填料的優點並未受到使用者的普遍重視，且由於可流動填料對多數工程人員而言仍屬較陌生的材料，往往使工程單位選用時較為遲疑，因此目前並未有廣泛的應用。未來如欲推廣使用，應朝建立配比設計程序、訂定標準施工規範及擬定示範性計畫供各界觀摩等方面共同推動，使流動性填料獲得應有的重視而得以普遍為工程界接受採用。

2.4 應用範圍與設計考量

流動性填料之應用範圍與對應之設計需求包括填料做為結構構件之考量以及填料本身性質之設計，且必須同時考慮填料之短期性質與長期耐久性，因其短期性質對填料之施工作業影響甚鉅，而長期性質則影響其服務成效。

1. 擋土結構物回填

新拌的流動性填料在硬化前仍為流體故需加以支撐（support），但硬化後填料即具有自承性（self-supporting）而不致對擋土結構物產生荷載，如擋土牆背填採用分層澆築的方式，則僅有最上層未凝結的填料層會對擋土牆產生側向載重，而下層已硬化的填料對擋土牆產生的側向載重則可大幅減少，因此在設計擋土結構物時，應將此一側向荷載列入考慮。此外，流動性填料的表面必須以土壤加以覆蓋，避免直接曝露在外，而受到侵蝕、磨耗或塵埃影響。

一般擋土結構物所須考慮的穩定性問題於使用流動性填料時也應加以分析，尤其是回填區底面的滑動破壞應特別注意，必要時可將原地表面處理成階梯狀，以便提升回填區底面的抗滑能力。此外在回填區與原地地面間應提供適當的排水，且在回填料與擋土結構物接觸面亦需做排水設計，以免地下水造成靜水壓力的升高而危及擋土結構物。

2. 管槽回填與管線襯墊

硬化後的可流動填料較夯實土壤回填可提供更佳的側向支撐，且對管線所產生的垂直載重較小，但在澆置期間，未凝結的流動性填料將回填區內流體的壓力傳遞到管子上，因此管槽回填時如澆築速度太快可能導致管子過度伸長、變形或挫屈，故不可不慎。通常處理的方法係將回填料分層澆築，待下層填料的側向支撐力發展出來後，再繼續上層填料的澆築。

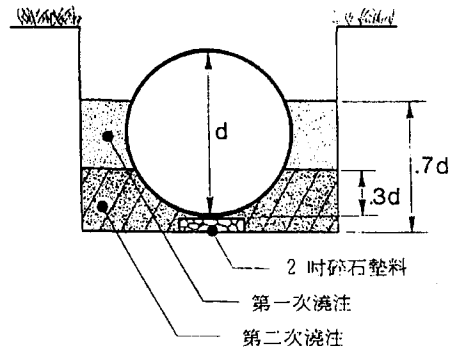


圖 1 管線及襯墊層橫斷面圖

圖 1 為使用 C 級飛灰拌製流動性填料做為導水管襯墊層的實際案例，填料之設計強度為 14 天齡期時達 100psi。將直徑 6 呎的鋼製導水管放入管槽內之碎石層上後，流動性填料即分二層澆注管槽，以防止導水管的浮動。第一層澆注至管徑的 30% 高度處，待其凝固後再行澆置第二層至水管的 70% 高度，管槽剩餘的高度最後再以開挖時之原地土壤回填滾壓，完成的斷面如圖 1 所示 [3]。

3. 孔隙封填

應用可流動填料於地下通道、涵洞或孔隙之封填時，回填料之強度僅需與周圍土壤之強度相當即可，而對流動性之要求則相對提高，以便於少數填料注入口澆注，即可及於較遠處而完成整個地下通道或空隙的封填，如圖 2 所示。

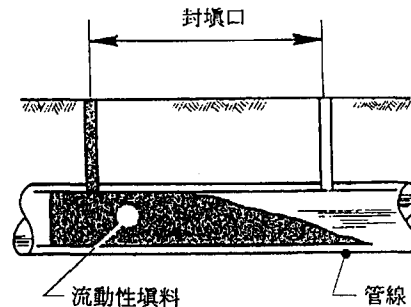


圖 2 地下坑洞或孔隙封填

4. 基礎支撐

流動性填料可用於擴大基腳 (spread footing) 周圍的回填以便協助支撐基腳的底座部分, 如圖 3 所示。雖然一些較佳的材料配合較多的水泥, 可輕易達到要求的強度, 但一般而言仍不足以完全支持集中載重, 如大型建築物基礎下方的補強作業。

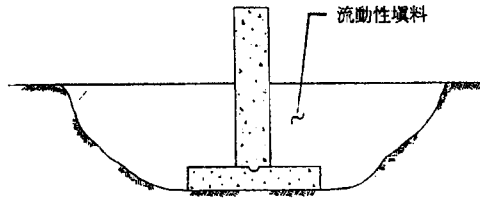


圖 3 基礎開挖回填

三、試驗材料與方法

本試驗著重於探討以水庫淤泥為主所拌製的流動性填料, 用於取代土壤為回填或封填材料時之工程性質。由於流動性填料之工程性質與漿料中之水庫淤泥、水泥與水的含量有密切的關係 [7], 故本試驗以水固比 (water/solid ratio) 及水泥用量為主要控制參數, 其中水固比係指漿料中水量與拌合料中全部固體材料 (包含水庫淤泥、水泥、飛灰或細砂) 之重量比, 而水泥用量在成本考量下固定為全部固體材料的 10% (重量比)。首先使用流度錐針對試拌之配比進行初步試驗, 選擇具有良好流動性的配比再進行凝結時間、泌水、單位重及強度發展等試驗, 以比較不同的材料組成對填料之工程性質的影響。

3.1 試驗材料與試體製作

本試驗採用本省北部地區一水庫庫底抽出而堆放於下游河岸沉淤池內之淤泥, 現場以塑膠桶取得足夠淤泥量攜回實驗室測定含水量後封存。此淤泥之比重為 2.40, 液限 28.0%, 無塑性, 細度 (No. 200 試驗篩餘量, 濕篩法) 3%, 且其有機質含量約為 3.8%。

水泥係市售袋裝之波特蘭第一型水泥, 飛灰為取自台中電廠的 F 級飛灰, 細砂在經濟性考量下, 採用實驗室中不符合混凝土細骨材規格而欲棄置的砂, 且為避免

粒徑過大產生析離現象, 故取通過 10 號篩之細砂。其比重為 2.65, 吸水率 1.48%, 細度模數 3.74, 級配曲線如圖 4 所示。

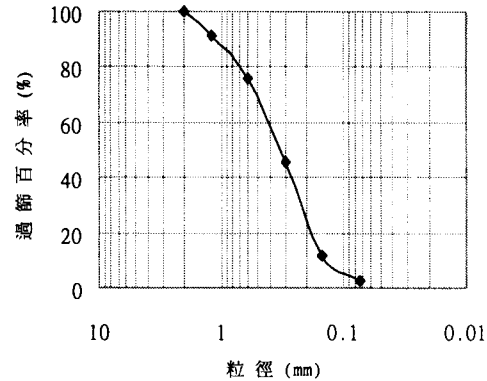


圖 4 細砂級配曲線

拌合料按配比稱重後, 置於攪拌鍋中以低速乾拌一分鐘, 然後加入所需之拌合水量以中速攪拌均勻三分鐘, 攪拌完成之漿料即進行流度錐試驗、泌水試驗及凝結時間測定; 同時以直徑 5 公分高 10 公分之紙模製作圓柱試體, 漿料分兩層倒入紙模, 兩層皆以震動台震動 15 秒。抗壓試驗試體製作完成後置於室內, 在大氣環境下置放, 經 24 小時後拆模, 並續放於室內至預定齡期時, 取出進行無圍抗壓強度試驗。

3.2 試驗方法

1. 流度試驗

漿料攪拌完成後, 即將 1.725 公升的漿料置於馬氏漏斗黏度計 (Marsh Funnel Viscometer) 中, 並暫時將錐口封住, 然後啟動碼錶記錄漿料全部流出流度錐所需之時間, 以秒為單位。馬氏錐尺度與操作程序皆依據 ASTM C939 之標準方法進行。馬氏錐使用前須先以清水加以校正, 使 1.725 公升清水流出的時間為 9 秒, 然後才能進行漿料的試驗。漿料的流度值即以流出流度錐所需之秒數表示, 秒數越低表示漿料的流動性越佳。

2. 泌水試驗

依 ASTM C940 之試驗方法, 將拌合好的漿料置入 1000 毫升的量筒中, 直到漿料達到 800 毫升的刻度為止, 然後加蓋密封, 將量筒置於水平桌上, 切勿碰撞及搖動。定時觀察泌水情況, 直到漿料固體部分高度不再改變為

止，讀取漿料最後高度，計算泌水量。泌水量為泌出水量之體積對原體積之百分比。

3. 凝結時間試驗

凝結時間是以袖珍型貫入儀 (Pocket Penetrometer) 測定。記錄試體製作完成的時間，之後每隔半小時，以貫入儀測其強度。使用袖珍型貫入儀前應先將其指標歸零，貫入試體中直至深度達貫入針的指示深度為止，當指標指示之強度為 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ ，即定義為凝結，記錄其凝結時間。

4. 單位重試驗

分為凝結單位重與乾單位重。凝結單位重係以 5 公分直徑、高 10 公分之圓柱試體凝結後加以稱重，以計算凝結時之單位重；乾單位重則將上述試體養治 7 天後取出放入 105°C 之烘箱中，烘乾 24 小時後稱重計算其乾密度。

5. 無圍抗壓強度試驗

以直徑 5 公分高 10 公分之圓柱試體於室內靜置達一天、三天、七天、二十八天及九十天時分別取出，用石膏蓋平，再以萬能試驗機測定試體無圍抗壓強度，每一配比之試體於各齡期至少量測三個試體之強度，並以三個量測值之平均值為代表強度。

四、結果與討論

4.1 配比設計

流動性填料首重其流動性，如填料流動性不佳，即使其他工程性質良好，亦難以發揮功能，因此本文配比設計皆以流動性作為配比調整的依據。在試驗室內先行拌製各種不同配比，變化其淤泥量、水泥量及用水量等，測定各試驗性配比之流動性及強度，以決定水固比之適當範圍。經初步試驗後選定水固比 0.4 至 0.9 之配比進行試驗，而水泥用量定為全部固體之 10%。此外為了探討飛灰及細砂添加填料之功能，選擇二組配比如 10% 及 20% 之飛灰或細砂取代水庫淤泥，以分析飛灰、細砂對填料性質的影響。另外為了以後敘述的方便，故以下列符號代表摻料之含量：

C：無摻料之控制組配比

S₁₀：摻入 10% 細砂之配比

S₂₀：摻入 20% 細砂之配比

F₁₀：摻入 10% 飛灰之配比

F₂₀：摻入 20% 飛灰之配比

4.2 流動性

拌合完成的回填漿料之流度猶如混凝土之坍度，兩者皆是工作性表徵。漿料的流動性與澆築時之難易程度息息相關，故流動性對施工速度與效率有決定性的影響。若流動性不佳，便失去拌製此類填料之意義，而流動性過大時則有可能發生材料析離現象，產生不均勻的填料。因此對於填料流動性的要求為必須易於輸送、澆注和修飾，且不發生材料析離。

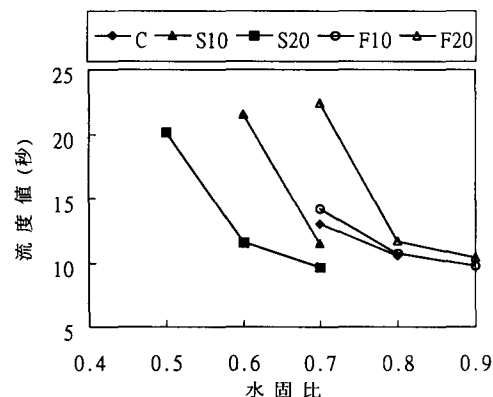


圖 5 各配比之流度值跟水固比之關係

圖 5 所示為各配比之水固比與流度間的關係，水固比越大，即用水量較多，故漿料的流動性越好，而各配比從不能流動到流動性良好，其水固比的變化非常有限。如 S₁₀ 配比之水固比從 0.6 增加到 0.7，其流度值改善了一倍；F₂₀ 配比之水固比從 0.7 增加到 0.8 者亦然。當各個配比之流度值達約 11 秒左右時，即使水固比再增加，漿料之流度值即不再有明顯變化。故此，當流度值較大時，填料對用水量較為敏感，隨著水量的增加填料的流動性變化越少，此可由圖 5 中曲線後段的斜率趨於平緩而得知。

若以細砂取代淤泥，因等量的細砂表面積比淤泥小，表面吸水量相對減少[8]，故對同一水固比的無摻料試體與摻入細砂漿體而言，摻入細砂者，因固料吸水量低，所以有較多的游離水來改善流動性[2]。從實驗結果

顯示，摻入細砂之配比，比無摻料者之流動性好一點。同理，含 20% 細砂之配比 (S₂₀) 之流動性比含 10% 細砂 (S₁₀) 者為佳。

一般而言在混凝土中添加飛灰具有減水功能，但此作用能否發揮，則視漿體中水泥的含量而定 [3]。由圖 6 可看見飛灰用量高之配比 (F₂₀) 較飛灰用量低者 (F₁₀) 流動性為差，此乃因漿體中飛灰與水泥量之比例越大時，飛灰不但不能發揮其減水功能，反而因飛灰量太多而簇結成大顆粒，降低流動性 [2]。但當水固比到達 0.8、0.9 時，不論飛灰用量多少，漿料的流動性都十分接近。

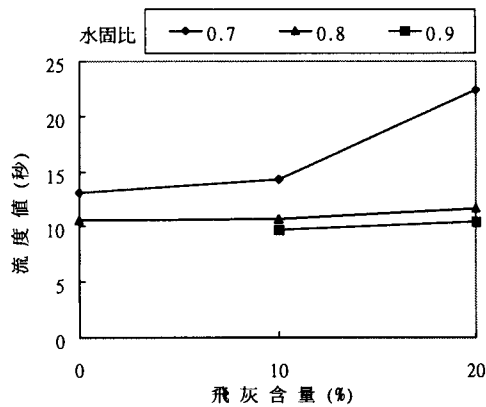


圖 6 飛灰對漿料流度值之影響

4.3 泌水量

漿料中固體顆粒沉降而造成水分上浮現象稱為泌水，主要是由於拌合水量大於水泥水化及顆粒吸收所需之水量，多餘的水因比重較固體顆粒輕而上浮。當水泥水化產物之固態顆粒相互接觸或粒料形成之骨架能承擔整體重量時，泌水才會停止。具有良好流動性的漿料，由於拌合水量高，較易發生泌水現象，不僅影響填料品質，而且會造成施工後體積的減少，因此必須加以注意。

圖 7 為本試驗各配比之泌水量。從圖中可看出，同一配比的泌水量會因用水量的增加而明顯增加。此外，如將圖 5 與圖 7 加以比對，可發現各配比之流度值與泌水量間存在著一定的相關性，即流動性越好的漿料所含之游離水越多，因此泌水量越大。

就同一水固比的多種配比而言，從圖 7 可見摻入細

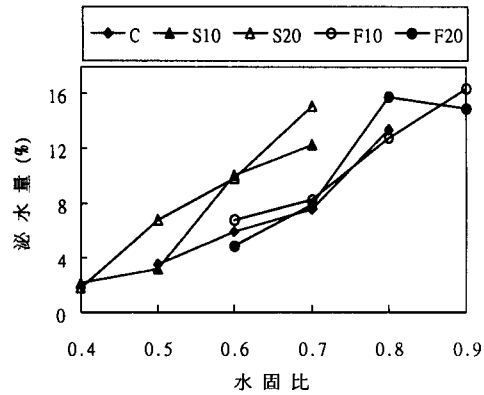


圖 7 各配比之泌水量

砂的漿料之泌水量比其他各組配比高出很多。這是因為砂顆粒較粗，表面積較小，而其他純淤泥或含飛灰的配比則全為細料，表面積皆很大，故吸水量較大，在同一水固比下，含砂之配比就有較多的水多出來，使得泌水較為嚴重。此外，砂的比重為 2.65，它在流動性良好的漿體中很容易下沉，較輕的材料及水就上浮，結果泌水現象更加明顯，圖 8 即顯示漿料中細砂含量越多，泌水量越大。

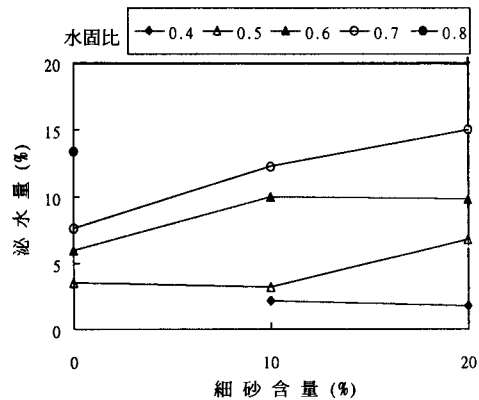


圖 8 細砂對漿料泌水量之影響

漿料中泌水情形嚴重者，已產生細砂與漿料間的析離，使硬固漿體內固體材料的分佈趨於不均勻，因此漿料的泌水量必須加以限制。從實驗中發現各配比到了高水固比後，就容易產生材料析離現象，尤其以泌水量高於 12% 的漿料最為明顯。這些漿料的流動性非常好，但因

出現材料析離情形，會影響硬固漿料的品質，若要應用此等配比時，宜添加其他材料進行試驗改善泌水情形後才可考慮使用。

4.4 凝結時間

凝結行為係因水泥顆粒水化過程中形成細顆粒及水化產物顆粒，並逐漸轉變成膠狀浮體填滿空間，形成凝結構網而使水泥漿料凝結而具強度[9]，故漿料中水泥量愈多則凝結現象愈早發生。流動性填料之凝結時間不宜過快或過慢，過快時難以有充分時間供輸送及澆注，過慢則會延緩澆注工作的進度，不利於工期，且填料的早期強度易於偏低。

本試驗漿料之凝結時間是以袖珍型貫入儀測定，當貫入儀貫入試體一定深度且指示針讀數為 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，則表示漿料凝結。圖 9 顯示各漿料配比之凝結時間。由圖中可見，各配比的凝結時間皆隨水固比增加而增長，即用水量增加，凝結時間變慢。

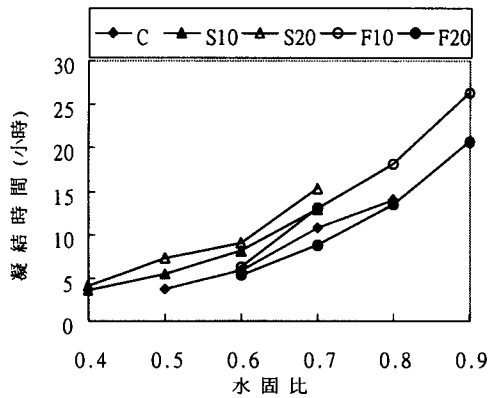


圖 9 各配比之凝結時間

摻入細砂的漿料中，由於細砂不會與水泥及淤泥作用，亦不會起水化反應，因此對漿體的凝結並沒有貢獻。而漿料中加入細砂越多，同一水固比之試體會有更多的游離水出現，過多的水份會使漿體凝結較慢，凝結時間延長，因此細砂的使用量越多，凝結所需時間越長，如圖 10 所示。

由此可知，當填料中水泥用量一定時，影響凝結時間的主要因素是用水量的多少；當用水量相同時，則漿體中游離水的多寡對凝結時間有重要影響，游離水越多

者其流動性較佳且泌水量較大，所以凝結時間也較慢。

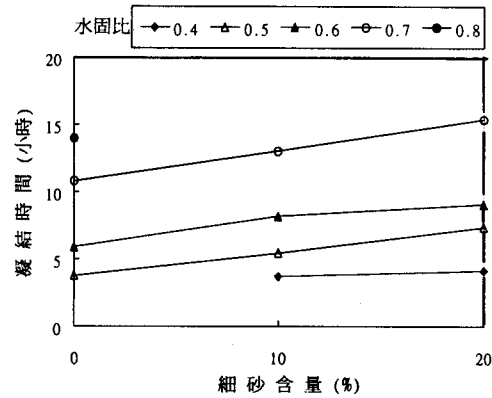


圖 10 細砂對漿料凝結時間之影響

4.5 強度發展

水泥在拌合水的作用下進行水化反應，水化產物逐漸強化、凝聚，漿料因而凝結而產生強度，一般而言，含水泥混合物的強度最常被做為評估其品質好壞的指標。漿料抗壓強度的來源可能為：(a)水泥水化物 C-S-H 提供[10]，(b)水化作用的中間產物石灰與淤泥中的矽化物及鋁化物反應生成的 C-S-H 及 C-A-H 膠結物來提供[4]，(c)由波索蘭材料，如飛灰與氫氧化鈣作用產生之類似 C-S-H 膠體或 C-A-H 鹽類所提供[4]。其中波索蘭反應進行緩慢，可持續達數年之久，因此對填料之晚期強度較有幫助。

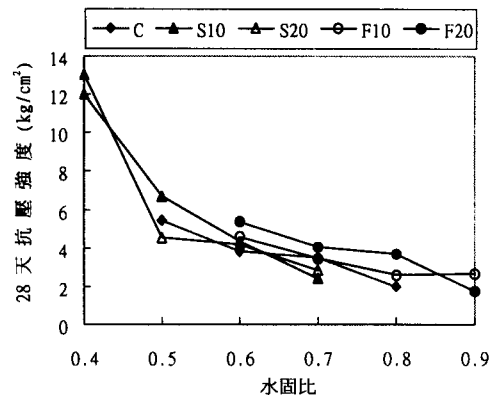


圖 11 各配比 28 天抗壓強度與水固比關係圖

本試驗所採用各配比試體之 28 天抗壓強度示於圖 11。由圖中可看出不同配比的試體強度差異頗大，而各組所加的水泥量皆相等，故此可見漿料之強度受到摻料的影響。一般而言，摻入細砂的漿料試體強度與無摻料者相當，而摻入飛灰的漿料強度則較無摻料者為高。

對漿體而言，以細砂取代淤泥，對強度有提升效果，故只要加入足夠水泥，使漿體固結良好，理論上細砂加入越多，強度越高，但由於漿料中水泥用量限於 10%，當水固比達 0.5 以上時，因用水量太多，使細砂都沉澱在試體底部，試體進行無圍壓縮強度試驗時，由於細砂集中於底部，圓柱試體多在上層發生破壞，以致細砂無法發揮改善強度的功能，亦即試體下部尚未發揮強度時試體即已破壞，使破壞面多集中在試體上部且凹凸不平。這也說明不論細砂含量多少，到了高水固比時，漿料之抗壓強度都相當接近，如圖 12 所示。事實上，若材料均勻分佈於漿體中而無析離現象發生，在進行抗壓試驗時，試體破壞情形就呈典型的 45° 傾斜，顯示試體強度亦較均勻。

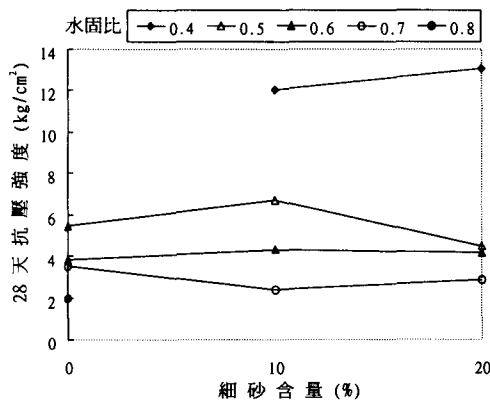


圖 12 細砂對漿料 28 天強度之影響

至於含飛灰的兩組配比，從圖 13 可看到其漿料強度比不含飛灰的控制組高，原因是在混凝土中飛灰係用以取代水泥；而本試驗各漿料配比之水泥用量不變，飛灰是取代對強度無甚貢獻的淤泥，波索蘭反應緩慢進行的結果，使含飛灰的試體強度比無摻料的高出一部份。且飛灰含量較多之配比（20%）由於波索蘭反應可進行較為完整，故強度比飛灰含量少者（10%）略高。但到高水固比時，波索蘭反應的效應即不顯著。

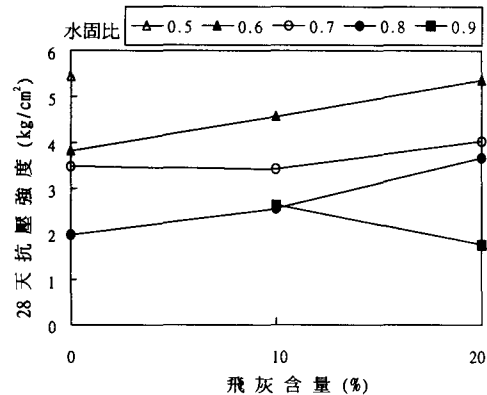


圖 13 飛灰對漿料強度之影響

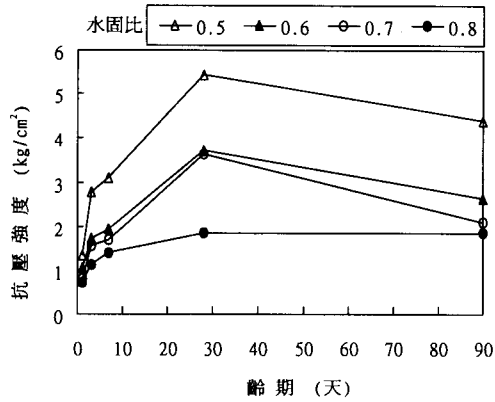
圖 14 為各配比漿料 1 天至 90 天之抗壓強度發展情形，觀察漿體強度發展可發現試體到了 28 天以後，強度開始出現下降現象，其原因目前尚難以判定，可能因試體在大氣下長期養治，水分不斷散失，使淤泥顆料逐漸因乾燥而脫落，因而有損於試體之長期強度。在實際應用時，回填漿料均需以土壤加以覆蓋，如此可避免漿體水分持續流失而影響其長期強度。

4.6 單位重

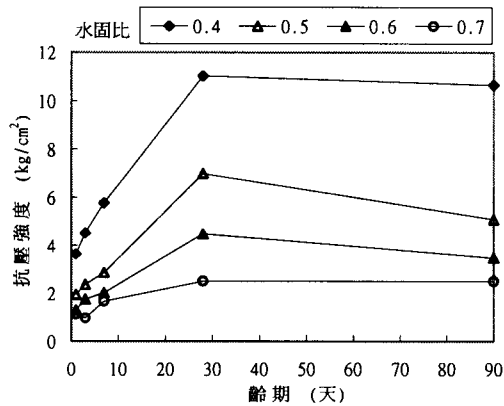
圖 15 所示為本試驗各配比凝結單位重及乾單位重，其中凝結單位重係指漿料泌水停止時之單位重，而乾單位重則為養治完成之烘乾後單位重，分別用以模擬漿料澆置時及日後最糟服務狀況下之單位重。

從圖中可看到，各配比漿料之凝結單位重約從 1.55 至 1.85g/cm³，比一般土壤之濕單位重（約 1.8~2.2 g/cm³）為低，至於漿體乾單位重，則從 1.0 至 1.43g/cm³，遠較土壤之乾比重（1.6~1.9）為低。同一配比的單位重，會隨著水固比的增加而減少，而同一水固比之各配比，其單位重相差不遠。此外，由於砂、飛灰及淤泥的比重分別為 2.65、2.18 及 2.4，故試體的單位重也是以摻入細砂的漿料最大，無摻料者次之，而以摻入飛灰的漿料最低。

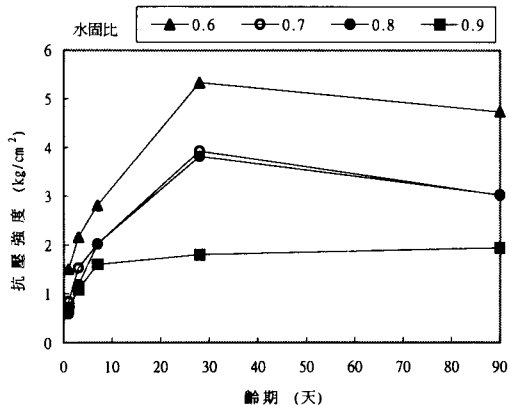
由於以水庫淤泥製作之可流動填料的乾單位重小，作為回填料時，下方土壤承受之垂直荷重因而較小；如作為擋土牆背填料時，所作用於擋土牆背的側向壓力亦較小。另外，凝結單位重是在試體泌水停止時之單位重，



(a) 不含摻料試體



(b) 含 20% 細砂試體

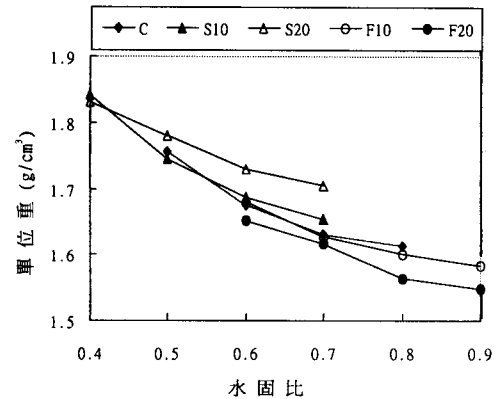


(c) 含 20% 飛灰試體

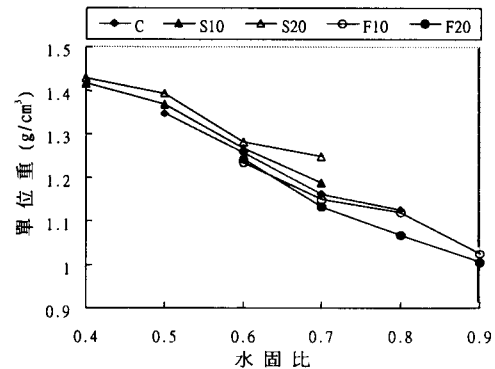
圖 14 不同配比漿料之抗壓強度發展

此時漿料為飽和狀態，因泌水會使試體的體積減小，故凝結單位重比新拌時之單位重略大。由於泌水停止時流動性填料可能尚未凝結，強度發展不足，故在灌漿時應

以凝結單位重考量其側向支撐，以免因側應力過大而破壞了側向支持。



(a) 凝結單位重



(b) 乾單位重

圖 15 各配比漿體之單位重

五、結論與建議

5.1 結論

依本試驗所採用之材料及實驗方法，可得以下結論：

1. 以水庫淤泥拌製之可流動填料，可依工程要求之流動性及設計強度調整填料之配比，其中流動性之提高或減少可藉用水量之增減來加以控制；而抗壓強度的變化則以調整填料之用水量及摻料之種類加以控制。

2. 對於流動性填料之工程性質，除流動性與強度要求外，配比設計時亦應對其凝結時間、泌水量、單位重等加以考量，以利於施工及完工後之成效。
 3. 泌水量隨著拌合水量的增加而增加，泌水終止時間也會延長。當流動性固定時，在漿料中摻入飛灰可減少泌水量。
 4. 漿料水固比過高時容易出現材料析離現象，使硬固漿體之強度產生不均勻現象。實際應用時應先行對設計配比進行試拌，確定不致發生析離現象後，方可進行回填澆注作業。
 5. 在淤泥拌製之填料中以飛灰或細砂取代部份淤泥，對於填料之強度發展具有助益，故可減少水泥用量，降低材料成本。
- 5.2 建議
1. 在本試驗中各配比之試體強度都不太高，如欲拌製較高強度的漿料，可適度增加水泥用量，並配合細砂或飛灰的使用，以增加漿料強度。
 2. 在前面之結果中顯示試體 28 天以後強度有下降現象，此可嘗試把試體放在養治室中養治，量測其強度發展的變化情形，以確知此現象發生的原因。
 3. 流動性填料應用時與傳統回填土相較，除所需人力少、技術性低，且可適應各種施工場所的限制，易於施工、不需夯實，故可縮短工期，亦可降低施工期間對周圍環境的影響，因此為一相當有應用價值的材料，值得國內相關工程嘗試使用。

六、參考文獻

1. 台電公司，含煤灰之可流動材料的工程性質研究，研究報告 114 號，1991。

2. 賴正義，「含煤灰之可流動性材料的工程性質研究」，台灣地區飛灰混凝土應用研討會，1992。
3. 劉昌民，「飛灰混凝土應用問題釋疑」，飛灰及爐石混凝土應用研會，1994。
4. 林平全，混凝土施工，徐氏基金會版，1992。
5. EPRI, "Fly Ash Design Manual for Road and Site Applications, Volume 2," Electric Power Research Institute, Report CS-4419, 1986.
6. Brendel, G. F., Balsamo, N. J., and Glogowski, P.E., "An Overview of the Use of Fly Ash in Slurried Placement Applications," in Proceedings, Eighth International Ash Utilization Symposium, Volume 1, EPRI CS-5362, paper no.10, 1987.
7. Helmuth, R.A., "Fly Ash in Cement and Concrete", PCA R & D Laboratories, Illionis, 1987.
8. Mindess, S., and Young, J.F., Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981.
9. Hwang, C.L., and Shen, D.H., "A Study of The Hydration Mechanism of Portland Cement", Proceeding of the National Science Council ROC(A), Vol.12, No.4, pp.275-283, 1988.
10. Mehta, P.K., Concrete Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1986.

收稿日期：民國 86 年 08 月 02 日

接受日期：民國 86 年 08 月 21 日