

污泥灰添加 Nano SiO₂ 應用於軟弱路基土壤穩定處理之研究

林登峰¹、陳立²、蔡明篤³、黃正忻⁴

¹義守大學土木與生態工程學系 教授

²樹人醫護管理專科學校 助理教授

³義守大學土木與生態工程學系 研究生

⁴正修科技大學土木工程學系 助理教授

摘 要

隨著都市快速發展與城市河川的整治，污水處理廠每年產生之污泥量逐年增加，污泥灰有效的再生利用係未來城市發展的重要課題。國內大地工程不斷施作，而台灣地區土域狹小，使用軟弱不良之地盤來開發利用將是必然的趨勢，其中水泥是常用的土壤改良穩定材料之一，而污泥經高溫焚化後產生之灰渣與水泥具有相同的卜作嵐特性，將污泥灰應用於改良軟弱路基土壤是一項資源有效再利用的方法。本研究採用之土樣屬低壓縮性沉泥，取自於路竹科學園區與台北盆地之紅土來進行穩定處理改良，兩種土樣分別混合污泥灰，再添加 Nano SiO₂ 材料，經由土壤基本試驗及微結構觀察，以求得改良軟弱路基土壤之工作性、強度、滲透性及剪力強度的最佳配比。初步研究成果顯示，污泥灰確實能改良軟弱路基土壤，但其成效有一定的限度，而 Nano SiO₂ 的添加將可提升污泥灰的使用範圍與成效。

關鍵詞：污泥灰、Nano SiO₂、土壤穩定處理

一、前言

近年來國內的經濟迅速發展，相對的工業廢料也隨之增加，如未能妥善加以利用，其廢料的堆置場所與處理費用將會增加社會成本，處理不當也將造成環境的污染破壞，因此將廢料進行資源再利用是目前急需探討的重要課題。下水道污水處理廠所產生之污泥，在早期被視為工業廢料，但目前國內正積極的再予利用，而最常見的方式係將下水道污泥焚化成灰渣再應用於工程上，因污泥經高溫處理後可除去水分與大部分的有機物質，使污泥趨於穩定安全的狀態。Tay 與 show【1、2】研究發現，粉碎後的下水污泥灰渣，其強度活性指數(strength activity index,SAI)為 58~67%(即達到控制組波特蘭水泥 28 天抗壓強度之比例)，已相當接近 ASTM C618 之 C 級卜作嵐物質之標準，所以污泥灰經常被使用來取代水泥之用量或改良軟弱路基土壤，顯示出污泥灰不將再是最終廢棄物的代表，而是

具有相當潛力之再生利用材料。

隨著大地工程建設不斷的增加，且台灣地區土域狹小，未來將無法避免使用軟弱不良之地盤，如何有效的改良土壤與節省成本的花費將是急需解決的問題。在國內外使用工業廢料於改良道路路基土壤的穩定已有不少案例，而火力發電廠的飛灰與煉鋼廠的高爐熟料是最常見的改良材料，Edil【3】研究中發現，原始土壤的 CBR 值約 1~5 之間，而 Mr 值為 3 到 15 MPa，但添加 10%飛灰後其 CBR 值提升到 8~17 之間，且其 Mr 值介於 12~60 MPa 之間，進而將飛灰量提升到 18%會使其 CBR 值介於 15~31 之間，Mr 值將提升到 51~106 MPa 之間，顯示其具良好的成效，而 Monzo【4】認為下水道污泥灰取代部份水泥時，在早期對強度的貢獻超過飛灰，且抗壓強度及抗彎強度隨著取代量的增加而增加，進一步證實下水道污泥灰具有卜作嵐活性，楊朝平等【5】也提出添加 12% 之水泥於土壤中，其土壤-水泥的組成特性仍然接近於土質，植物尚可於此生長，由此顯示改良軟弱路基土壤兼具對生態與工程上之需求。污泥灰係具有卜作嵐特性的材料，應用於改善軟弱路基土壤具有相當的成效【6】，為使其成效有更佳明確的改良程度，將添加 Nano SiO₂ 進行進一步之探討。

二、方法與步驟

本研究中選用的土壤取自於高雄縣路竹鄉南部科學園區，南部科學園區的土壤在此稱為土壤 A，粒徑皆小於 4.75mm(4#)屬細粒料，外觀為土黃色的粉狀土居多，而污泥灰是取自於高雄市中洲污水廠之下水道污泥，並將其污泥焚燒為灰燼後，再以研磨機處理為粉狀顆粒。奈米二氧化矽(Nano-SiO₂)為白色粉末狀，其基本性質如表一。

楊中政【7】將污泥灰取代土壤 2、4、8、16、22%中發現，污泥取代量約在 16%時會有較佳知剪力強度與滲透性，因此本研究將採用污泥灰取代軟弱路基土壤 15%來進行相關試驗，而 Nano SiO₂ 添加量為污泥灰之 0~3%(N0S、N1S、N2S、N3S)，製成試驗用之土壤混合物，試驗項目是依據美國 ASTM 規範進行，試驗可分成兩大部分，各項試驗方法如下：

(1) 土壤基本物性試驗：

土壤比重試驗：ASTM D854-83

土壤含水量試驗：ASTM D2216-80

土壤分類試驗：ASTM D2487-85

土壤夯實試驗：ASTM D698-78，D1557-78

阿太堡試驗：ASTM D4318-84，D427-83

(2) 添加摻合料後試驗：

土壤夯實試驗：ASTM D698-78，D1557-78

阿太堡試驗：ASTM D4318-84，D427-83
 土壤 pH 值試驗：(環檢署 27038-S410.60T)
 無圍(無旁束)壓縮試驗：ASTM D2166-85
 掃描式電子顯微鏡試驗(SEM Test)

表一 Nano SiO₂ 基本資料

Nano SiO ₂	
球狀粒子	
平均粒徑(nm)	30±5
比表面積(m ² /g)	160±20
純度(%)	>99.5
羥基含量(%)	>35
紫外反射率(%)	>75

三、試驗結果與分析

3.1 土壤基本物理性質

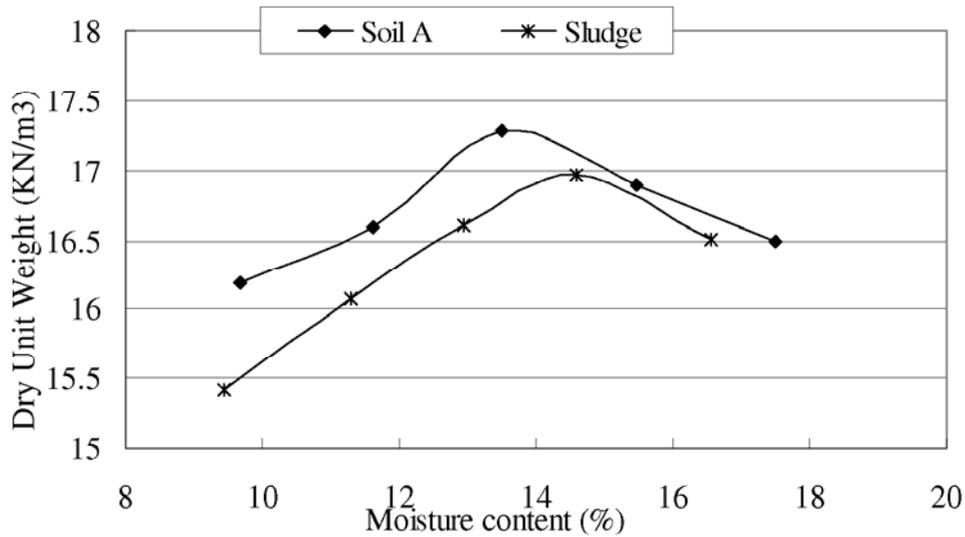
表二 土壤 A 基本物理性質

Soil Property	Soil A	Standard
Gs	2.72	ASTM D854-83
Liquid Limit (LL)	25.8	ASTM D4318-84
Plasticity Index(PI)	8.8	
Classification	CL	USCS
Classification	A-4	AASHTO
Max Unit Weight (kN/m ³)	17.3	ASTM D698-78
Optimum Moisture Content (%)	13.5	
Unconfined Compressive	29.5	

3.2 土壤夯實試驗(Compaction Test)

由圖一可以看出，污泥灰添加於土壤 A 在夯實試驗下，求得之 $\gamma_{d,max}$ = 16.96KN/m³、 W_{opt} =14.6%，而土壤 A 之乾單位重為 $\gamma_{d,max}$ =17.28KN/m³ 與最佳含水量 W_{opt} =13.5%，皆大於「公共工程施工綱要規範」所訂定工程土方之下限值 14.7 KN/m³，故可判定兩者皆為土方工程適用之材料，而土壤-污泥灰比原始土壤之最佳含水量(OMC)高約 1.1% 左右，但最大乾單位重卻小於土壤 A，其可能是因污泥灰比重約為 2.13 g/cm³ 較原始土壤的 2.72 g/cm³ 小很多，而導致土壤之最大乾單位重有下降之情形發生，且土壤-污泥灰的最佳含水量也較原始土壤高

約 1.1% 左右，因此土壤-污泥在夯實最佳狀態下的含水量較多，其乾單位也相對會較低。

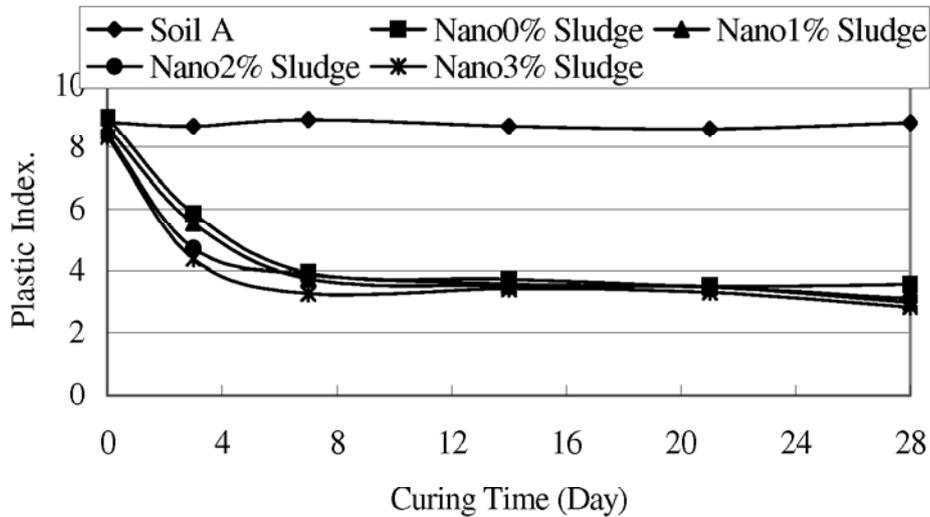


圖一 污泥灰添加於土壤之夯實試驗

3.3 阿太堡限度(Atterberg Limits)

圖二為污泥灰(Sludge)添加 Nano SiO₂ 於土壤 A 的塑性指數(Plastic Index)與養護齡期關係變化圖，其中污泥灰於土壤 A 之比例為 15%，而奈米二氧化矽(Nano SiO₂)的添加量分別為污泥灰的 1%、2%與 3%。由圖中得知，污泥灰添加於土壤 A 中能有效降低土壤的塑性指數，顯示出污泥灰確實有改良軟弱路基土壤之功效。在污泥灰拌合於土壤 A 之初期階段，添加污泥灰的土壤較未添加的土壤其塑性指數高約 0.2 左右，可能是因為污泥灰尚未產生水化反應(Hydration Reaction)，所以土體較易吸收水份，進而導致液性限度上升，但隨著 Nano SiO₂ 的添加又會使塑性指數下降，每添加 1% 的 Nano SiO₂ 約降低 0.1~0.2 之間，由此得知初期 Nano SiO₂ 的添加可改善土壤的塑性指數值。

隨著養護齡期的增加，污泥灰改善軟弱路基土壤的趨勢愈明顯，土壤養護三天後其塑性指數由原來之 8.7~8.8 降低至 4~6 之間，養護七天時更下降至 3~4 左右，而 Nano SiO₂ 的添加更能加速土壤塑性指數的下降，其 0%、1%、2%、3% Nano SiO₂ 三天養護齡期之塑性指數分別為 5.86、5.53、4.72、4.38，七天養護齡期分別為 3.92、3.74、3.87、3.27，但塑性指數在養護齡期七天後逐漸趨於穩定狀態，隨著養護齡期的增加其塑性指數不再持續銳減，添加 Nano SiO₂ 的影響趨勢也逐漸縮小，而在養護齡期 28 天時顯示添加 Nano SiO₂ 確實能降低其塑性指數，但添加之比例相互間的差距並不多，塑性指數多在 2.8~3.8 之間變動。

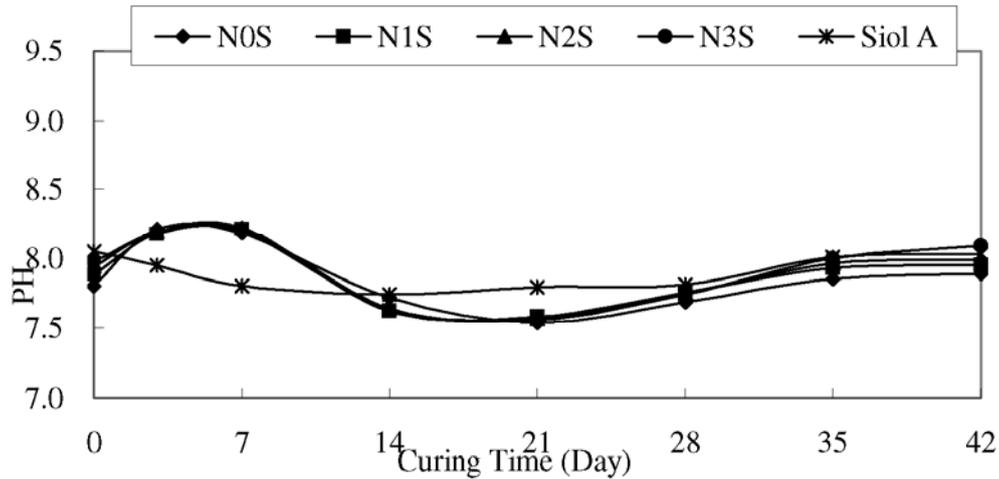


圖二 污泥灰添加 Nano SiO₂ 於土壤 A 之塑性指數與養護齡期關係圖

3.4 pH 值試驗(pH Test)

圖三為污泥灰添加 Nano SiO₂ 於軟弱路基土壤 A 之酸鹼度(pH 值)與養護齡期關係圖。圖中顯示，污泥灰添加於土壤 A 在靜置兩小時後就會降低土壤本身之酸鹼度，係因污泥灰的 pH 值為 7.8，而土壤 A 之原始 pH 值是 8.0 左右，因此兩種材料剛拌合時相對將會減低原始土壤 A 之 pH 值，但隨著養護齡期的增加污泥灰-土壤之 pH 值確有明顯的提升，養護齡期 3 天與 7 天 pH 值分別提升至 8.22 與 8.18 左右，原因係污泥灰水化反應而生成之 CH、氧化矽與 C-S-H 生成物皆為鹼性物質所致，因而污泥灰土壤之 pH 值會隨養護齡期而逐漸上升，不過在養護齡期 7 天與 28 天又突然降低，隨後 pH 值又持續往上攀升，推估為污泥灰雖然是卜作嵐材料，但其卜作嵐特性較差，在養護齡期 7~14 天之間會緩慢其水化反應，因而造成 pH 值有些許下降而後再提升的趨勢。整體而言，污泥灰添加於土壤 A 之 pH 值變化並不大，雖然會隨著養護齡期有下降及上升之行為發生，但整體的趨勢都是偏向中性，對路基滲水進入大地涵養水層不會造成太大的影響，

在初期添加 Nano SiO₂ 會使污泥-土壤的 pH 值有些許提升，也會隨著 Nano SiO₂ 的含量增加而升高，但其變化皆不大，每 1% 的 Nano SiO₂ 其 pH 值大約僅提升約 0.1 左右，之後的發展情形與無添加 Nano SiO₂ 的土壤具有相同的趨勢，但其添加 Nano SiO₂ 會加速污泥灰-土壤的 pH 值發展，在養護齡期 21 天後，Nano SiO₂ 對污泥灰-土壤的影響趨勢才會逐漸提升，且 Nano SiO₂ 的含量多，其 pH 值上升速度愈快，在養護齡期 42 天之 0、1、2、3% Nano SiO₂ 之 pH 值分別為 7.89、7.95、7.99、8.09，但所有 pH 值數值仍然偏向中性，對土壤的酸鹼度顯然影響不大。



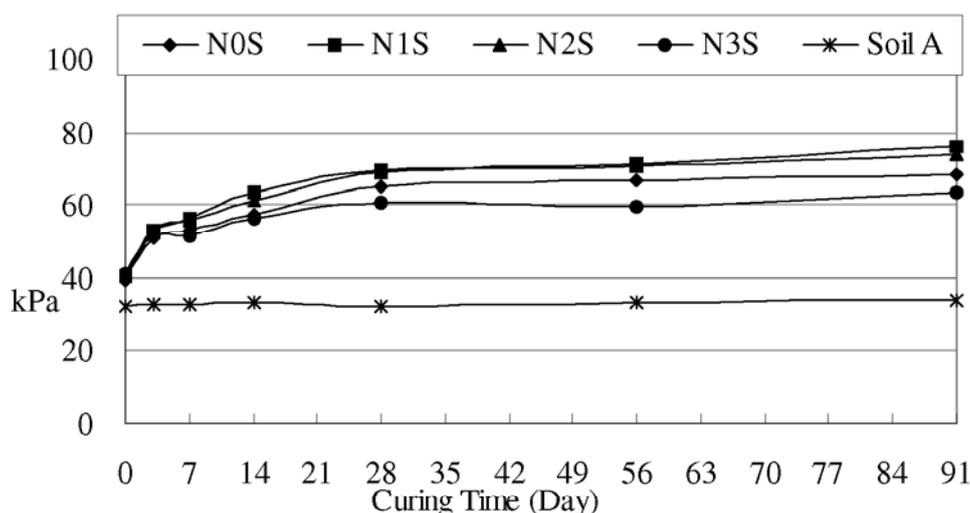
圖三 污泥灰添加 Nano SiO₂ 於土壤 A 之 pH 值

3.5 無圍壓縮試驗分析(Unconfined Compression Test)

圖四為污泥灰添加 Nano SiO₂ 於土壤 A 之無圍壓縮數值與養護齡期關係圖。圖中顯示出污泥灰的添加確實能使土壤 A 的無圍抗壓強度提升，原始土壤的無圍抗壓強度在 32.5~33.8 kPa 之間，其為較軟弱的土壤無圍壓縮強度，如果運用此土壤於路基底層，將會導致路面受重車輾壓而產生車轍，使得瀝青混凝土路面凹凸不平，嚴重影響到行車安全，而添加污泥灰於土壤 A 會使無圍壓縮強度大幅提升，其初始添加就能約略提升土壤強度 0.5 倍左右，而無圍抗壓強度在養護齡期三天時已可以達到 51 kPa 左右，與原始土壤相較下提升了 1.5 倍左右，在養護齡期 28 天時更提升到 2 倍之多，因為污泥灰具有卜作嵐反應，能使土壤內部更加堅硬且土層間的鏈結性被加強，因此污泥灰能提升土壤的無圍抗壓強度，使土壤在改良後能大大的提升使用效能。添加污泥灰的土壤在養護齡期 28 天後，其無圍壓縮強度會繼續的提升，養護齡期在 56、91 天時為 66.6、68.5 kPa，提升率分別為 2.8、2.9%，由此得知污泥灰運用於改良軟弱路基土壤，其無圍抗壓強度會持續緩慢的上升，可能是因土體不斷的受上層土壤的載壓與污泥灰的卜作嵐反應填補了土體內的孔隙，漸漸提升了土壤的無圍壓縮強度，故污泥灰添加於軟弱路基土壤會使其強度提升。

污泥灰添加 Nano SiO₂ 後的土壤無圍抗壓強度有提升的效能存在，但並不是添加愈多的 Nano SiO₂ 就會使其土壤強度成正向的發展，圖四中顯示在養護齡期 28 天時，添加 0、1、2、3% 的 Nano SiO₂ 其土壤強度分別為 64.8、69.2、69.1、60.6 kPa，而養護齡期在 56、91 天時，其土壤無圍壓縮強度為 66.6、71.2、70.6、59.7 kPa 與 68.5、75.7、73.7、63.2 kPa，由此得知污泥灰添加 1% Nano SiO₂ 的無圍壓縮強度為最佳，但 Nano SiO₂ 含量持續向上提升將會導致土體強度下降，添加 3% 的 Nano SiO₂ 甚至會低於無添加 Nano SiO₂ 的污泥灰土壤，可能是因 Nano SiO₂ 本身的吸水性較強，如果添加過多的量將會導致土壤內的水分被搶走，污泥灰無法與充足的水產生水化反應，造成 Nano SiO₂、污泥灰、土壤三方面的搶水

效應，因此土壤的無圍抗壓強度自然會相對的降低，不過污泥灰添加 0、1、2、3% 的 Nano SiO₂ 其無圍抗壓強度均遠高於原始土壤 A 之數值，未來若要將 Nano SiO₂ 運用於改良軟弱路基土壤須先找出其最佳比例與含水量，否則會浪費生產的成本且無法達到最佳的使用效益。



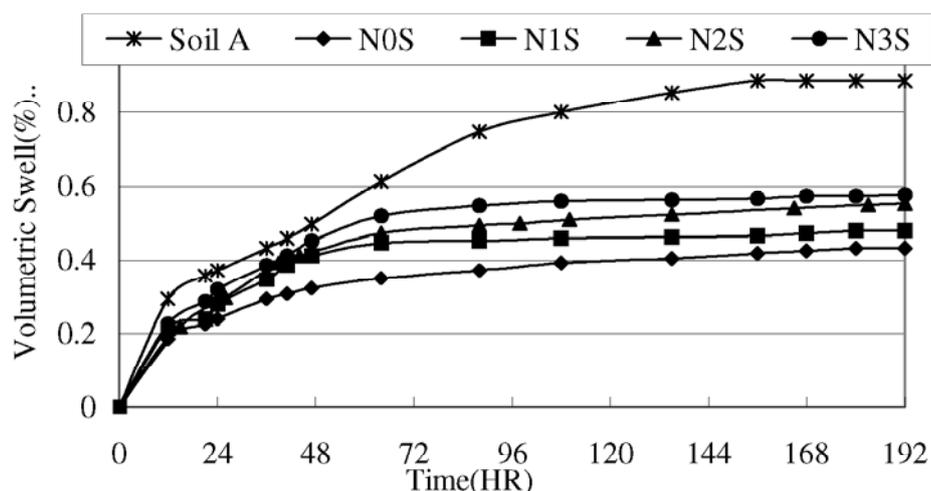
圖四 污泥灰添加 Nano SiO₂ 於土壤 A 之無圍壓縮數值

3.6 膨脹潛能(Swell Potential)

本試驗是以膨脹潛能來印證污泥灰運用於軟弱路基土壤的可行性，再以不同 Nano SiO₂ 添加量來觀測污泥灰抑制土壤回脹性的效能。圖五顯示出，原土壤 A 的膨脹量會隨著時間的增加而不斷的提升，土壤膨脹量直到 6 天(144hr)後才逐漸趨於平穩狀態，其膨脹率已高達 0.89%，此現象會使路基土壤滲水時體積增大，導致面層的瀝青混凝土鋪面高凸而剝離，造成路面服務指數降低及危及行車安全，因此找出適當的穩定添加劑進行改良是不可或缺的一環。一般土壤之回脹行為係指土體在濕潤情況下體積發生改變，與其土壤中有機物質、黏土礦物的種類與含量、土體吸附之陽離子等有相對關聯，而污泥灰之有機物質經過高溫燒結後已消失，且污泥灰不含黏土礦物成分，污泥灰成分中的鈣元素會釋放出鈣離子 (Ca²⁺) 作為取代土壤擴散雙層中氫鍵的鍵結，使污泥灰對土壤具有抑制膨脹之作用，因此在圖中顯示出土壤添加污泥灰的膨脹量較原始土壤低約 0.46%，下降幅度為 52%，且其三天後土體膨脹率已呈平緩趨勢，由此可知污泥灰確實有穩定降低土壤膨脹量之效能。

由圖五可以得知，污泥灰的膨脹量會隨著 Nano SiO₂ 的增加而提升，顯示出添加 Nano SiO₂ 並不會降低土壤膨脹率，反而是使土樣的膨脹率提升，從 0、1、2、3% Nano SiO₂ 的添加其膨脹率分別為 0.43、0.48、0.55 與 0.58%，與單純添加污泥灰的土壤相較下，約略提升了 11.6、27.9、34.9%，故添加 Nano SiO₂ 對

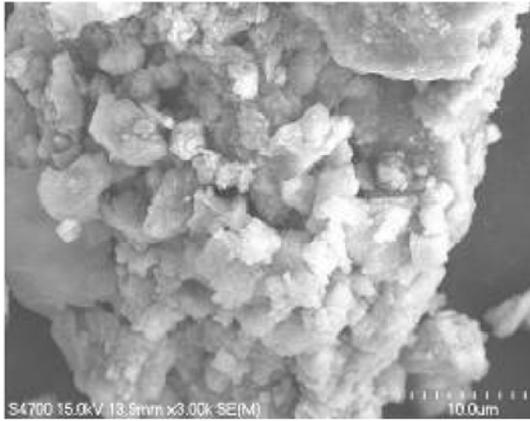
土壤的膨脹穩定性是成反比的關係，未來要將 Nano SiO₂ 應用於改良軟弱路基土壤必須適量的添加或尋找新的穩定添加劑來抑制土體膨脹。圖中顯示雖然 Nano SiO₂ 的添加會使得土體膨脹率提升，造成土壤回脹性不良，但添加污泥灰會大幅降低土壤的膨脹性，整體觀之土壤混合物還是呈現較穩定的狀態，從 1、2、3% Nano SiO₂ 的添加，膨脹率與原始土壤分別降低 0.41、0.34、0.31%，下降幅度為 46、38、35%，且 Nano SiO₂ 雖添加愈多膨脹率越高，但其達穩定狀態的時間卻有縮短的趨勢，顯示出 Nano SiO₂ 確實能加速土壤達到穩定的狀態。



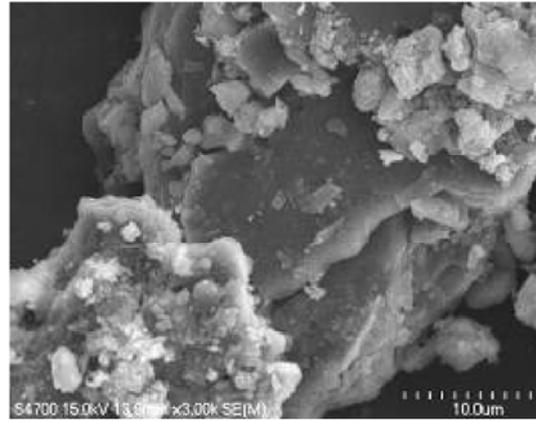
圖五 污泥灰添加 Nano SiO₂ 於土壤 A 之回脹率

3.7 掃描式電子顯微鏡試驗(SEM Test)

圖六、七為污泥灰添加 Nano SiO₂ 在 3000 倍微觀下之圖像，由圖六(1)可以發現污泥灰在養護齡其七天時，尚未有明顯的氫氧化鈣生成物與 C-S-H 膠體，其表面生成物較為鬆散，而養護齡其達 56 天時的微觀影像如圖六(2)，氫氧化鈣與 C-S-H 膠體的生成物明顯增多，此亦為污泥灰能夠提升無圍壓縮強度的原因，圖七(1)顯示添加 2% Nano SiO₂ 在養護齡其七天的結構性較為緊密，故其無圍壓縮強度表現較無添加 Nano SiO₂ 的污泥灰-土壤為佳，在養護齡期 56 天後的片狀物為氫氧化鈣與 C-S-H 膠體生成物，不僅比例上明顯增加，在生成物的孔隙間均有微小結晶物生成，故其膠結性亦有所提升，顯示出 Nano SiO₂ 對污泥灰-土壤確實有正面的影響效果。

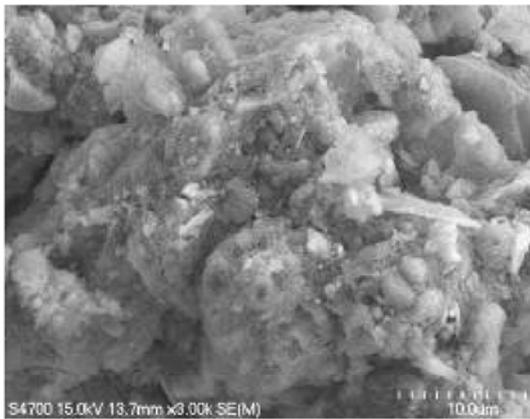


(1)養護齡期七天

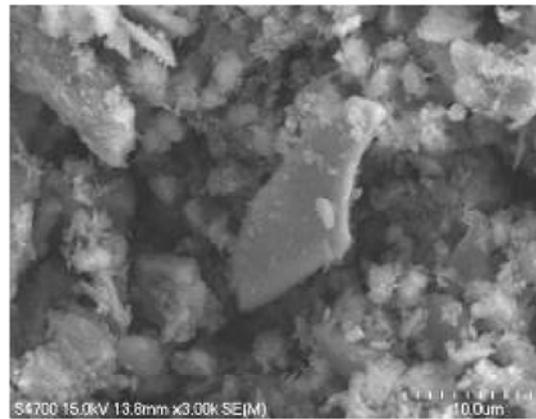


(2)養護齡期五十六天

圖六 污泥灰在 3000 倍下之微觀試驗



(1)養護齡期七天



(2)養護齡期五十六天

圖七 污泥灰添加 2% Nano SiO₂ 在 3000 倍下之微觀試驗

四、結論

1. 污泥灰可提升軟弱路基土壤強度約一倍左右，在各項試驗中亦展現其效能，例如能降低土壤之塑性指數與抑制土體膨脹率，充分顯示出其運用於土壤改良之可行性。
2. 由土壤無圍壓縮強度試驗顯示，Nano SiO₂ 添加至污泥灰中運用於改良土壤確實能顯現出其成效，最佳添加量約為 1~2% 之間，過量添加其成效並無明顯的提升，為達成本效益，應取其最佳含量應用之。
3. Nano SiO₂ 應用於改良軟弱路基土壤之回脹行為發現，添加 Nano SiO₂ 會使土壤之膨脹率提升，但卻能加速土壤達到膨脹穩定的狀態，因此欲將 Nano SiO₂ 應用在土壤的改良方面，需再添加與污泥灰相同能抑制土壤膨脹之材料。
4. 污泥灰添加 Nano SiO₂ 於軟弱路基土壤中，其夯壓試驗求得之最佳水量似乎都不足以提供污泥灰、Nano SiO₂ 與土壤反應，但含水量過多會使其水灰比

較高，而導致土壤強度降低，含水量過低又會造成土體產生搶水現象，因而尋求合適之含水量來添加，將是未來探討的方向。

參考文獻

1. Tay, J. H. and K. Y. Show, “Reuse of wastewater Sludge in Manufacturing Non-conventional Construction Material- an Innovative Approach to Ultimate Sludge Disposal”, *Water Science and Technology*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 1165-1174(1992a).
2. Tay, J. H. and K. Y. Show, “The Use of Lime-blended Sludge for Production of Cementitious Material”, *Water Environment Research*, Vol. 64, No. 1, pp.6-12(1992b).
3. Edil, Tuncer B.; Acosta, Hector A.; Benson, Craig H. “Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash” Source: *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No 2, p 283-294(2006).
4. Monzo, J., J. Paya, M. V. Borrachero, and E. Peris-Mora, “Mechanical Behavior of Mortars Containing Sewage Sludge Ash (SSA) and Portland Cements With Different Tricalcium Aluminate Content”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 87-94(1999).
5. 楊朝平、洪國森，“紅樹林河口段之土壤性質及改良”，*農業工程學報*，第51卷第1期，第1至11頁(2005)。
6. 林登峰、黃正忻、陳立、楊中政，“污泥灰與飛灰於石灰土壤處理之比較研究”，第七屆鋪面材料再生學術研討會，第111至122頁(2006)。
7. 楊中政，「污泥灰應用於軟弱路基土壤穩定處理之研究」，國立高雄應用科技大學，碩士論文，高雄（2004）。