



紅樹林河口段之土壤性質及改良

The Soil Properties of the Estuary with Mangrove Habitat and its Improvement

中華大學土木工程學系
副教授

楊朝平

Chau-Ping Yang

中華大學土木工程學系
碩士班研究生

洪國森

Kuo-Sheng Hong

摘要

「就地取材」為生態工法之大原則，而紅樹林河口段之土層為含砂、粉、粘之土壤，其飽和度高、孔隙比大、承载力低、壓密沉陷量大等，土壤性質不佳。為兼顧防洪及保護紅樹林，以生態工法施做河防構造物最適宜，而河道土壤調查乃工法設計之大根本。為此，本研究以苗栗縣竹南鎮射流溝之河口段為對象，調查該區河道之土壤性質，並建議改良方法。

該河道土壤分類屬 CL 類土（砂質粉粘土）、含水量約為 30.8%、孔隙比 0.81、完全飽和、壓縮指數 0.229。其有機物含量 2.35%、 $pH = 8.3$ ，可藉由夯實及土壤水泥技術改良其工程性質，宜將其含水量控制在 8%~23% 範圍內。無圍壓縮強度於夯實試體為 157 kN/m^2 、於土壤水泥試體（水泥含量 12%）為 $1,066 \text{ kN/m}^2$ ，內摩擦角於不擾動試體為 10.3° 、於夯實試體為 33.3° 、於土壤水泥試體為 57.0° ，知曉夯實及土壤水泥技術之改良成效佳。土壤水泥試體內雖含 12% 之水泥，但其組成仍接近土，植物尚可生長。

關鍵詞：紅樹林河口段，土壤性質，夯實，土壤水泥。

ABSTRACT

One of the principal of the ecological construction method is “full utilization of field materials.” However, the stratum of the estuary with mangrove habitat is soft and in saturation state, with high consolidation settlement and low bearing capacity. The ecological construction methods are suitable for the targets of flood control and preserving mangrove. It is necessary to survey the various properties of soils of mangrove habitat in order to assemble superior construction methods. Therefore, this

study surveyed the properties of stratum in the estuary of the Sirlyu River, Miao-Li County. Then, the surveyed soil will be improved tentatively by the methods of compaction and soil-cement.

The surveyed soil is classified as CL and its group name is sandy silt with clay. The moisture content, void ratio and compression index of the undisturbed soil are 30.8%, 0.81 and 0.229 respectively. The content of organic materials and pH -value in the surveyed soil are 2.35% and 8.3 respectively. Accordingly, it is able to judge that the surveyed soil could be improved by the methods of compaction and soil-cement under the condition of controlling its moisture content in the range of 8%~23%. The unconfined compression strengths for compaction's specimen and soil-cement's specimen with 12 percent of cement content are 157 kN/m^2 and $1,066\text{ kN/m}^2$ respectively. The internal angle of friction ϕ of the undisturbed soil is 10.3° . Whereas, the values of ϕ of the compacted specimen and soil-cement's specimen are 33.3° and 57.0° respectively, these values are rather higher than the one of the undisturbed soil. Though, the soil-cement's specimen contains 12 percent of cement but its nature is still like a soil and the vegetation could grow up in it.

Keywords: Estuary with Mangrove Habitat, Soil's properties, Compaction, Soil-cement.

一、前言

紅樹林河口段為高生產量生態系之一，唯人類的開發行為，特別是近年的混凝土化河川治理工程及其施工作業，經常有意、無意的破壞或影響了紅樹林的生息環境，現今社會要求以生態型工法治理紅樹林河口段之意識已甚高漲。政府相關單位亦甚重視此情形，而在全國大力推廣生態工法。

不同於上、中游河段，紅樹林河口段的環境、河性、地質特徵為(1)是紅樹林、多樣生物的生息區，待保育需要性高；(2)河水含鹽份高、水質不佳；(3)受漲退潮影響，日水位變化大；(4)兩岸多農地，不容許高鹽份河水溢堤或滲流損傷作物；(5)流速緩且屬淤積型河段，無沖刷之虞；(6)河床表層為淤泥，工作性不佳；(7)河道為砂質粉粘土層，為飽和狀態；(8)飽和砂質粉粘土層厚達數十公尺，承載力低、壓密沉降量大；(9)兩岸土層軟弱、含水量高，基礎工程困難度高；(10)因日常水位變化大，剛性基礎所承受之靜水壓上頂力亦多變；(11)開挖土難再利用為工程土方等。

因應上述之紅樹林河口段性質，相關治理工

法有其特殊性，而待研究。為此，本計畫擬以苗栗縣政府管理之「射流溝」為研究區段(見圖1)，首先調查該河道土壤之性質，進而觀察以夯實及土壤水泥技術改良其工程性質之效果，俾供多樣化生態型工法之設計參考，以符合「就地取材」、「因地制宜」之理念。因臺灣西部海岸諸多紅樹林河口段之土壤相近於本研究區段者，故本研究結果將可為他處所應用。

二、文獻回顧

2.1 紅樹林

紅樹林河口段蘊藏豐富底棲動物，捕食底棲動物的鳥類是高等消費者，而依靠河口魚獲生活的人類則是處於消費金字塔尖端，所以紅樹林如一棵生命樹般，其存在至為重要。紅樹林為一無機物流入、有機物流出之開放生態系，其控制因子含物理、化學項(水質、水溫、鹽份、水量、潮汐等)及生物項(落枯葉分解、礦物養份吸收、動物活動等)。生長於射流溝河口段之紅樹林為水筆仔種，長綠小喬木、高達5m、樹皮灰黑色，花期在6月~7月間，胎生苗於12月至翌年4月大量成熟，氣根從側枝下方生出入地後成支持根[郭智勇, 1993；楊朝平, 1998]。

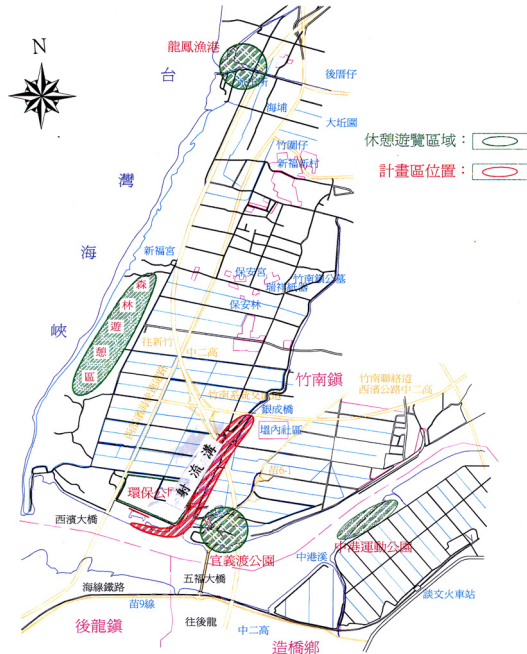


圖 1 射流溝區位

2.2 砂質粉粘土性質

茲概述砂質粉粘土之物理、力學性質如下 [Das, 1997; Budhu, 2000; McCarthy, 2002; 陳文祥, 1986; Liu and Evett, 1998]:

1. 其液性限度 LL 值域為 $0\% \sim 150\%$ 、塑性限度 PL 值域為 $0\% \sim 50\%$ ；土壤之塑性指數 $PI (= LL - PL)$ 值大，表示其可塑性較大。
2. 其現地土層之孔隙比 e 值域為 $0.40 \sim 1.40$ 、含水量 w 值域為 $15\% \sim 50\%$ 、乾單位重 γ_d 值域為 $14.5 \text{ kN/m}^3 \sim 17.0 \text{ kN/m}^3$ ；若土壤之孔隙比大則較疏鬆、單位重低、易滲水、沉限量大、抗剪強度低等，而乾單位重為表示土壤鬆密狀態之物理量，另土壤將隨含水量之增大而趨軟化。
3. 依統一土壤分類法 (USCS)，其分類可能屬於 ML 類、 $ML-CL$ 類及 CL 類土；表其組成多粉土、粘土之細料 (Fine-grained soils, 粒徑 $D < 0.074 \text{ mm}$ 者)，與粒狀土 (granular soils, $D > 0.074 \text{ mm}$ 者) 相較其力學性質 (沉限量、抗剪強度等) 較受含水量支配。
4. 依標準夯實試驗所求得之最佳含水量 w_{opt}

值域，於 ML 類土為 $19.2 \pm 0.7\%$ 、 $ML-CL$ 類土為 $16.18 \pm 0.7\%$ 、 CL 類土為 $17.3 \pm 0.3\%$ 。

5. 依標準夯實試驗所求得之最大乾單位重 $\gamma_{d,max}$ 值域，於 ML 類土為 $16.2 \pm 0.2 \text{ kN/m}^3$ 、 $ML-CL$ 類土為 $17.2 \pm 0.2 \text{ kN/m}^3$ 、 CL 類土為 $17.0 \pm 0.2 \text{ kN/m}^3$ ；吾人依土壤之 w_{opt} 值與 $\gamma_{d,max}$ 值，施行土壤夯實工程之品質管制。
6. 於標準夯實最佳狀態，其內摩擦角 ϕ 值域為 $26^\circ \sim 35^\circ$ ，吾人使用此內摩擦角施行夯實土堤之邊坡穩定分析。
7. 自然土層之透水係數 k 值範圍為 $10^{-3} \text{ cm/sec} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$ ，表其透水性為中~低；根據透水係數值，吾人得以估算於高水位時滲水穿越堤防之時間。
8. 其自然土層之壓縮指數 C_c 值域為 $0.21 \sim 0.55$ ；壓縮指數大者，表其承受上部荷重時所發生的沉限量較大。

2.3 土壤水泥

2.3.1 發展經緯

土壤水泥之發端約源自 1915 年，主要被應用為街道、公路及機場之鋪面基底層，至 1997 年約已有相當於 732cm 寬、160,000km 長之道路鋪面使用土壤水泥。根據美國混凝土協會 (American Concrete Institute, ACI) 之定義，土壤水泥為拌合波特蘭水泥、土壤及水的夯實緻密混合物，其性質近似低強度混凝土；唯其與混凝土之差別，在於土壤顆粒並非完全為水泥漿所包覆。土壤水泥可適用於道路底層，水壩、堤防之邊坡保護，溼地、水塘、河道之襯砌防水層，土堤填方及基礎穩定材等 [ACI, 1990]。

波特蘭水泥協會 (Portland Cement Association, PCA) 於 1970 年制訂「土壤水泥試驗手冊」及「土壤水泥鋪面之厚度設計法」 [PCA, 1970a; PCA, 1970b]，另於 1975 年制訂「於工業重車之土壤水泥鋪面厚度設計法」 [PCA, 1975]。美國聯邦公路運輸部 (Federal Highway Administration Department of Transportation, FHWA) 續參閱 PCA 之「土壤水泥試驗手冊」，

於 1979 年制定「土壤水泥鋪面構造物技術手冊」，其內容含鋪面設計、施工要領及拌合、夯實要領等[FHWA, 1979a; FHWA, 1979b]。美國各州公路及交通官員協會(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)，於 1986 年制訂「鋪面結構之設計導引」[AASHTO, 1986]。於台灣，公路總局於 1997 年將「土壤水泥穩定道路基、底層」項編入其「公路工程施工說明書」裡[公路總局, 1997]。

二次大戰後，於美國大規模興建水庫以開發水資源，美國墾務局(U.S. Bureau of Reclamation, USBR)鑒於其中、南部缺乏保護土壩坡面之拋石，而開始研究以土壤水泥替代土壩坡面拋石之可行性，於 1951 年施行現地試驗，並於 1986 年將「土壤水泥邊坡保護」項編入其「土壩設計基準」裡[USBR, 1986]。從 1961 年至 1997 年，於美國及加拿大約已有超過 300 處之土壤水泥邊坡保護工程案例[Nussbaum and Colley, 1971; PCA, 1986; ACI, 1997]。

2.3.2 土壤種類

除有機土、高塑性粘土、級配不良砂土外，幾乎所有的土都可用於土壤水泥；基本上以粒狀土為佳，因其比細料易拌合、所需水泥含量低，而較經濟；以細料含量為 5%~35%之土壤，屬最經濟之土壤水泥[ACI, 1997]。Randall (2000)建議較好之土壤水泥混合料為級配良好之土壤，其且停留在 4 號篩之量約 25%~50%，而通過 200 號篩之量約 5%~20%。另一方面，依台灣公路總局之規定，土壤水泥之土壤可為原路基土、借土或兩者之混合料，其最大粒徑 $\leq 75\text{mm}$ ，且通過 4 號篩之量需大於 55% [公路總局, 1997]。

早期，美國墾務局所使用於保護土壩坡面土壤水泥之土壤多為細粒粉土質砂（即 USCS 分類屬 SM、SP-SM 者）；唯最近隨著輾壓混凝土技術所帶動拌合、施工法之進步，亦有採用較粗顆粒者。此種土壤級配接近輾壓混凝土之骨材，不過混合及澆注含粗顆粒的土壤水泥使成均勻層較困難。美國墾務局對用於保護土壩坡面土壤水泥之土壤性質要求如下[USBR, 1986]：

1. 最大粒徑 $\leq 38\text{mm}$ 。

2. 至少 85%通過 4 號篩。
3. 10%~30%通過 200 號篩。
4. 低塑性或無塑性細料。
5. 原則上需去除大於 25.4mm 的粘土團粒，或小於 25.4mm 的粘土團粒不得超過 10%。

2.3.3 單位重

土壤水泥之單位重即表示其鬆密狀態之物理量，一般是依 ASTM D-558 規範對土壤水泥混合物施行含水量、密度關係試驗（即夯實試驗），求其夯實最佳狀態之 $\gamma_{d,max}$ 與 w_{opt} ，並據以製作土壤水泥試體俾供無圍壓縮強度 q_u 、耐久性、透水性等試驗用。加水泥入土壤後，水泥之密簇作用會改變土壤水泥之 $\gamma_{d,max}$ 與 w_{opt} ，但其變化趨勢難預測[ACI, 1997]。

一般而言，乾單位重大之土壤水泥，其 q_u 大、耐久性大、透水性低，因此若只重視其工程性質則以乾單位重大者為佳；於現地之夯實品質檢驗，視構造物機能（路基、堤防、填方等）而定，一般要求現地之乾單位重應大於 $0.95 \times \gamma_{d,max}$ 之值。然而，於生態工法之考量上，除要求土壤水泥之工程性質外，尚需考慮其植生性，密實之土壤水泥將不利植物根系之貫入而缺乏生態性，唯其密實程度對植生之影響性，尚有待研究[陳金煌, 2003]。

2.3.4 含水量

以水泥固化並夯實土壤時，土壤需具適量的含水量，以滿足水泥水化反應所需之水量。唯若其含水量過高，則如同水灰比過大會降低混凝土強度般，於拌合夯實過程中，土壤孔隙水會增大水灰比致強度降低；另若其含水量過低，會因水泥水化反應所需的水分不足，致膠結作用不完全而降低強度。

另一方面，因為水泥反應會降低夯實之 $\gamma_{d,max}$ 與增加 w_{opt} ，所以對同一乾單位重之土壤水泥，隨著水泥配比之增加，必須配合增加土樣的含水量以獲得預期強度。USBR 建議於現地輾壓時，土壤水泥之適宜含水量範圍是 $w_{opt} \pm 1\%$ [USBR, 1986]。基本上，決定土壤水泥之含水量應考慮土壤夯實度與水泥配比。於特定含水量狀態下被夯實之土壤水泥，其強度隨水

表 1 土壤水泥之無圍壓縮強度[ACI, 1997]

土 類		無圍壓縮強度 q_u (kN/m^2)	
AASHTO 分類	USCS 分類	養護 7 天	養護 28 天
A-1, A-2, A-3	GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	2,069 ~ 4,137	2,758 ~ 6,895
A-4, A-5	ML, CL	1,724 ~ 3,448	2,069 ~ 6,206
A-6, A-7	MH, CH	1,379 ~ 2,758	1,724 ~ 4,137

泥含量增加而變大之現象已屬無庸置疑之事；然而，具同一水泥含量之土壤水泥，其強度將會因土壤含水量的變化而不同。

王明德(2002)觀察 A-2-4 類(AASHTO 分類法之編號、礫質砂土)，A-3 類(AASHTO 分類法之編號、細砂)兩種土之水泥穩定成效。各調製三種含水量 ($w_{opt} - 2\%$ 、 w_{opt} 、 $w_{opt} + 2\%$)、五種水泥含量 ($a_w = 0\%$ 、 4% 、 8% 、 12% 、 16%) 試料，將其夯實成試體後，於恆溫恆溼狀態下養護 3 天、7 天、28 天，再測其 q_u 值。發現具同一水泥配比與養護期試體，其 q_u 於最佳含水量狀態下最大，而 q_u 於乾、濕兩側會降低 25%~40%，故建議可視 w_{opt} 為適宜之土壤水泥含水量。

2.3.5 水泥含量

工程上應用土壤水泥時，首先必須考慮的問題就是如何決定水泥含量，茲依式(1)定義水泥含量 a_w 。土壤水泥之 a_w 設計，係依據構造物品質要求，對特定土壤於實驗室調製不同 a_w 的土壤水泥試體，測其工程性質(強度、耐久性、透水性等)，再考慮其施工性(拌合、運送、夯實等)，並與往例類似工程相比較後決定之。

$$a_w(\%) = \frac{W_c}{W_s} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

W_c : 水泥重量 W_s : 乾土重

Kenneth and Cliff (2000)敘述土壤水泥之配比設計程序及拌合、輸送、散舖、夯實、養護等作業要領；與傳統工法相比較，土壤水泥具低費用、施工作業單純、進度快等優點。

2.3.6 工程性質

依據王明德(2002)之研究，於夯實最佳狀態、養護 7 天之 A-2-4 類土水泥試體，其於

$a_w = 0\%$ 、 4% 、 8% 、 12% 、 16% 之 q_u 分別為 $211 kN/m^2$ 、 $2,294 kN/m^2$ 、 $3,724 kN/m^2$ 、 $4,746 kN/m^2$ 、 $5,378 kN/m^2$ ，知曉 q_u 隨著 a_w 之增加而變大(參考：鋼筋混凝土之 $q_u \geq 20,685 kN/m^2$ ；無筋混凝土之 $q_u \geq 17,238 kN/m^2$)。表 1 為各類水泥土壤，於夯實最佳狀態、養護 7 天、28 天之 q_u 值範圍 [ACI, 1997]。於水庫邊坡保護方面，要求土壤水泥之 7 天無圍壓縮強度大於 $4,137 kN/m^2$ 、28 天無圍壓縮強度大於 $6,033 kN/m^2$ [USBR, 1986]。

以美國西南部乾燥地區，砂礫土河床質之土壤水泥護岸及堆填壩護坡工程為案例，所得之土壤水泥工程性質如下[ACI, 1997]：

1. 適用之護岸坡度約為 1.0H:1.0V~1.5H:1.0V。
2. 適用之堆填壩上游面護坡坡度約為 3.0H:1.0V。
3. 其養護 7 天之無圍壓縮強度為 $4,140 kN/m^2 \sim 5,170 kN/m^2$ 。
4. 此等構造物之安全性業經多次洪水驗證無虞，所能抵抗之流率為 708cms~1,274cms、最大流速為 6.1m/sec。

三、射流溝環境地質

射流溝與中港溪匯流口處為平原地帶，屬現代沖積層及海岸砂石地。其年平均降雨量約在 1,400mm~1,800mm，參考由水利署於民國 71 年完成之「中港溪治理規劃報告」及「射流溝排水幹線排水調查記錄」，射流溝流域全長 5,384m、集水面積 250ha、平均河床坡降為 1/800、屬淤積型河道、排洪能力 77.01cms。

若以 10 年頻率之計畫洪水量 67.973cms 析水理因素，得其於河口段之洪水位為 5.71m、



圖 2 射流溝現況 (2002 年 11 月)

通水面積 $175.72 m^2$ 、水面寬 $38.56m$ 、平均流速 $1.407m/s$ ；計畫河寬為 $30m\sim 40m$ 、計畫河床高為 $0.43m\sim 1.06m$ 。圖 2 為射流溝河口段之現況照片，其上游段鄰近第二高速公路跨越橋，河道為紅樹林區；唯現有堤防高不足，且早期之整治工法多為混凝土護岸，實有以生態工法改善之需要。

四、試驗方法

於射流溝河口段開挖取不擾動土樣，觀察土層剖面。並取擾動土樣回實驗室，日曬氣乾後，將其打碎、去除雜物（如樹幹、飲料罐、塑膠袋...等），並充分混合、分袋包裝作為後續試驗之土樣。生態工法之材料與構造物甚具多樣性，其材料含土、土壤水泥、石材、木材、籠等，而其構造物則為此等材料之組合。無論採用何種構造物，其安全性分析項目雷同，如邊坡穩定、沉陷、基礎版水壓上頂力、土壤水泥之配比等。本研究，根據上述生態工法之安全性分析需求，擬定了試驗項目，茲說明其試驗方法於后。

4.1 土壤分類試驗

含比重試驗 (ASTM D-854)、粒徑分佈試驗 (ASTM D-422)、阿太堡限度試驗 (ASTM D-4318)、分類法 (USCS)。

4.2 pH 值試驗

於土壤中添加水泥，土壤與水泥產生之化學反應會造成混合料之 pH 值增大而鹼性漸增，pH 值愈高愈有利於離子交換作用之進行，改良效果

愈好。ACI(1990)指出水泥固化土之 pH 值低於 5.3 時，可能無法和水泥正常反應。茲依 ASTM D-2976 規範施行河道土壤及土壤水泥之 pH 值試驗，即取通過 40 號篩之氣乾試樣土 25g 置入容量 150ml 塑膠瓶內，加入適量蒸餾水，鎖緊塑膠瓶蓋搖動之使呈濃稠液，15 分鐘後將濃稠液移入燒杯內，以 pH 儀測定其 pH 值。

4.3 有機物含量試驗

Lancaster et al. (1996) 建議若土壤之有機物含量大於 10% 時，不適用為待夯實改良之土料；而土壤之有機物含量亦會影響其土壤水泥試體之強度。因此，依燒失法 (AASHTO T-267-86) 量測土樣之有機物含量，即將經 $110 \pm 5^\circ C$ 烘乾之粒徑小於 2mm 之土樣搗碎，置入 $700^\circ C\sim 800^\circ C$ 之高爐灼熱，在此溫度下其所含之有機物會被氧化，燃燒成水與二氧化碳而逸散，茲依式(2)計算有機物含量。

$$\text{有機物含量}(\%) = \frac{W_o}{W_d} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

W_o ：以 $700^\circ C\sim 800^\circ C$ 灼燒後之土樣燒失重

W_d ：以 $110 \pm 5^\circ C$ 烘乾後之土樣重

4.4 夯實試驗

於河道土壤方面，依 ASTM D-1557 規範 (夯實能量 $E_c = 600 kN \cdot m / m^3$) 施行夯實試驗。於土壤水泥方面，依 ASTM D-558 規範 ($E_c = 600 kN \cdot m / m^3$) 施行夯實試驗，於本研究依美國水泥協會之建議設定水泥含量 a_w 為 12% [ACI, 1997]；調製 5 種不同含水量 w 之試樣，於密閉容器放置 24 小時以上，再拌合水泥入試樣裡，立即夯打成試體。

4.5 無圍壓縮試驗

為了比較土壤水泥技術之改良成效，對處夯實最佳狀態之夯實試體 ($a_w = 0\%$) 及土壤水泥試體 ($a_w = 12\%$) 施行無圍壓縮試驗；於夯實試體依 ASTM D-2166 規範施行之；於土壤水泥試體，依 ASTM D-1663 規範施行之，施行壓縮試驗前

需將試體置於養護室(溫度 $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 、濕度 95%) 裡養護 7 天。

4.6 壓密試驗

由於調查河道之土層厚達數十公尺，其孔隙比 e_o 高達 0.81、飽和狀態，故可預期壓密沉陷量大，而需觀察其壓密性質。依 ASTM D-2435 規範對不擾動試體施行壓密試驗。其加壓、解壓、再加壓之正向應力 p 的變化順序，乃先從 45 kN/m^2 開始加壓，待該階段之壓密結束後，續進行正向應力分別為 98.1 kN/m^2 、 180 kN/m^2 、 350 kN/m^2 之壓密，而完成加壓過程；接著，將正向應力解壓回 180 kN/m^2 ，而完成解壓過程；最後，施行再加壓過程，即階段性的將正向應力由 180 kN/m^2 增大至 350 kN/m^2 、 700 kN/m^2 。

於試驗結果整理上，茲繪其加壓、解壓、再加壓過程之($e \sim \log p$)曲線，計算其於加壓過程之($e \sim \log p$)曲線斜率而得壓縮指數 C_c ，於解壓過程之($e \sim \log p$)曲線斜率而得回脹指數 C_s 。此外，繪其於 $p=98.1 \text{ kN/m}^2$ 加壓下之 $S(t) \sim \log t$ 曲線，以求其壓密係數 C_v ， $S(t)$ 為經過 t 時間後之沉陷量，吾人可根據壓密係數來估算沉陷發生所需時間。

4.7 直接剪力試驗

為了估算現地土層之承載力及分析夯實土堤之邊坡穩定性，需先求得土樣之凝聚力 c 、內摩擦角 ϕ ，故施行了直接剪力試驗。依 ASTM D-3080 規範，分別對不擾動試體、夯實試體及土壤水泥試體施行直接剪力試驗，加載之三種正向應力 σ 為 50 kN/m^2 、 100 kN/m^2 、 150 kN/m^2 。先繪其於各垂直應力條件下之(剪變位 \sim 剪應力)曲線，以找出個別的抗剪強度 S ，再迴歸正向應力、抗剪強度之直線關係式($S = c + \sigma \cdot \tan \phi$)，而得該土樣之 c 、 ϕ 值。

五、結果與討論

5.1 物理性質

圖 3 為河道土壤之粒徑分佈，知曉其含砂

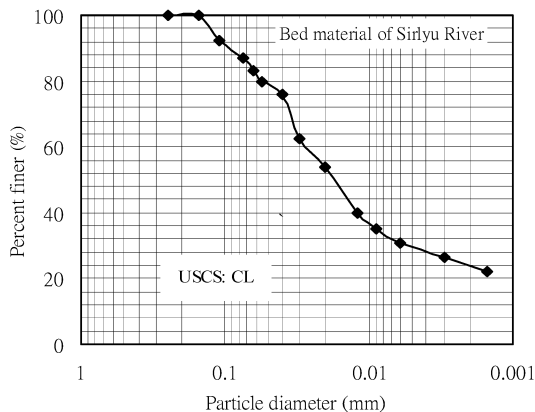


圖 3 河道土壤之粒徑分佈

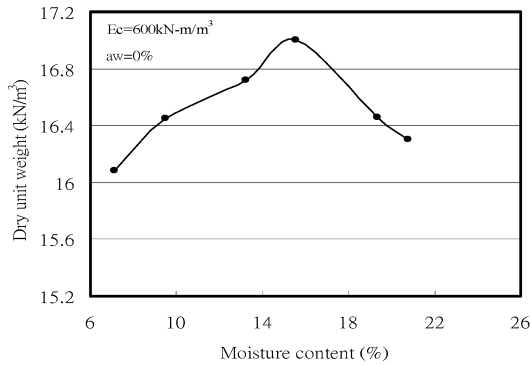
(粒徑 $D > 0.074 \text{ mm}$ 者) 13%、粉土 ($0.02 \text{ mm} < D < 0.074 \text{ mm}$ 者) 33%、粘土 ($D < 0.02 \text{ mm}$ 者) 54%。其液性限度 LL 為 30.8%，塑性限度 PL 為 19.9%；即塑性指數 PI 為 10.9，屬低塑性土。根據統一土壤分類系統(USCS)，其屬 CL 類土，為低塑性之砂質粉粘土。

河道現地土壤之比重 $G_s = 2.63$ 、含水量 w 約為 30.8%、濕單位重 $\gamma = 19.4 \text{ kN/m}^3$ 、乾單位重 $\gamma_d = 14.4 \text{ kN/m}^3$ 、孔隙比 $e_o = 0.81$ 、完全飽和，可據以判釋此土層之壓縮性大、抗剪強度小、承載力低。另一方面，河道土壤之有機物含量為 2.35%，表尚可藉夯實及土壤水泥技術改良其性質； pH 值為 8.3。於 $a_w = 12\%$ 的土壤水泥試樣其 pH 值增大至 10.7 屬強鹼性，表此狀態有利於水泥之水化作用進行。

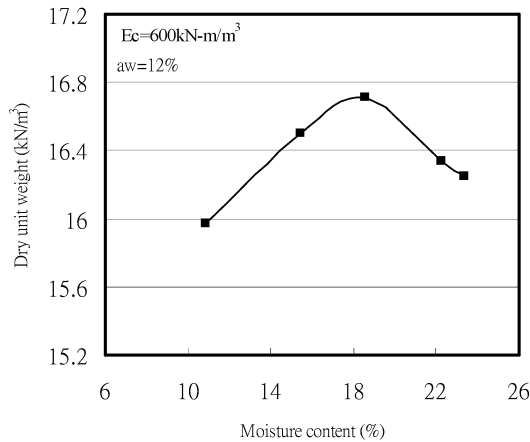
5.2 夯實性質

5.2.1 河道土壤

見圖 4(a)，該土壤之夯實曲線呈鐘型，表可藉夯實來改良其工程性質，其 $w_{opt} = 15.1\%$ 、 $\gamma_{d,max} = 17.0 \text{ kN/m}^3$ 。因其屬 CL 類，故建議其較適用之夯實機械為膠輪或羊角滾夯實機。其 $w_{opt} = 15.10\%$ ，而現地河道土層之含水量為 30.8% 甚高於 15.10%，故知曉如欲以夯實技術來改良該土壤以作為填土方，則需將其日曬之以降低含水量。若以填土方之乾單位重需大於 $0.95 \gamma_{d,max}$ 之夯實品質要求而論（即單位重 $\gamma_d = 0.95 \times 17.0 \text{ kN/m}^3 = 16.15 \text{ kN/m}^3$ ），則依圖



(a) 河道土壤



(b) 土壤水泥

圖 4 河道土壤及土壤水泥之夯實試驗結果

4(a)可判釋出其合乎品質要求的含水量範圍約為 8%~23%。

另一方面，依 $E_c = 600 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^3$ 之標準夯實試驗結果，於最佳含水量 15.1% 之條件下，夯實可將其乾單位重提昇至 $17.0 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，甚大於現地土層之 $14.4 \text{ kN} / \text{m}^3$ 。此外，因其 $\gamma_{d, \max} = 17.0 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，大於「公共工程施工綱要規範」所定工程土方之下限值 $14.7 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，故可判釋其為「土方工程適用材料」，即可就地取材使用此河道土壤為堤防土料。

5.2.2 土壤水泥

圖 4(b)為水泥含量 $a_w = 12\%$ 之土壤水泥混合料夯實性質，其夯實曲線呈鐘型，表含水量對其夯實性質影響大，其 $w_{opt} = 18.1\%$ 、 $\gamma_{d, \max} = 16.7 \text{ kN} / \text{m}^3$ 。土壤水泥混合料之 $\gamma_{d, \max}$ 值小於河道土壤之 $17.0 \text{ kN} / \text{m}^3$ ，其可能原因為土壤水

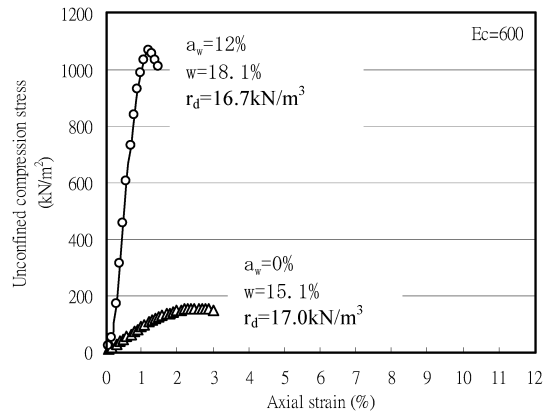


圖 5 夯實試體 ($a_w = 0\%$) 及土壤水泥試體 ($a_w = 12\%$) 之無圍壓縮試驗結果

泥混合料之 w_{opt} 為 18.1% 大於土壤之 15.1%，致土壤水泥混合料於夯實最佳狀態之含水較多而使其乾單位重變小。

5.3 無圍壓縮強度

於無圍壓縮強度試驗所用之夯實試體及土壤水泥試體皆為處夯實最佳狀態者，其試驗結果示於圖 5。其無圍壓縮強度 q_u 於夯實試體為 $157 \text{ kN} / \text{m}^2$ 、於土壤水泥試體為 $1,066 \text{ kN} / \text{m}^2$ ，其破壞應變於夯實試體為 2.5%、於土壤水泥試體 1.2%。

於變形性質方面，因試體之彈性模數隨應力水準而變化，固於設計上一般是以割線模數 E_{50} 為該材料之代表彈性模數； E_{50} 為估算構造物產生變形的參數， E_{50} 越大表其抗變形能力也大；於應力-應變曲線上連接 $0.5 q_u$ 點與原點之直線，計算此直線之斜率為 E_{50} 。其 E_{50} 於夯實試體為 $9.12 \text{ MN} / \text{m}^2$ 、於土壤水泥試體為 $96.59 \text{ MN} / \text{m}^2$ 。知曉於土料中拌合 12% 水泥夯實之並養護 7 天，即可提昇其無圍壓縮強度約 7 倍、割線模數約 10 倍。表示經土壤水泥技術改良後之試體，強度會大幅增強，且抵抗變形的能力亦增加，但試體會較趨於脆性。

於生態工法之材料組合上，當然是以使用「土」屬最自然、經濟者，然而土堤往往與人強度不足之感。但由上述結果知曉，若將土壤拌以水泥並夯實之，其強度會大幅增強；而土壤水泥

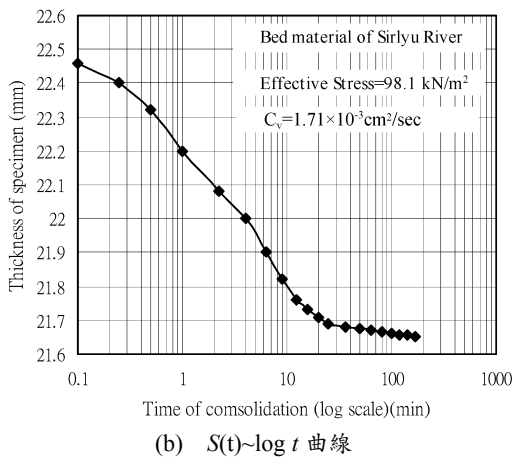
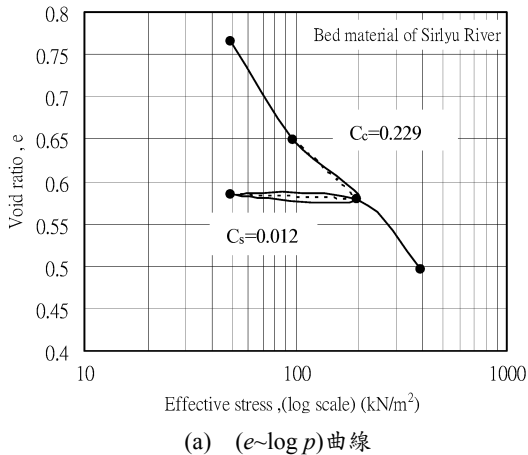


圖 6 不擾動試體之壓密試驗結果

試體內雖含 12% 之水泥，但其組成仍接近土植物尚可生長；故認為土壤水泥夯實土堤，乃是一可兼顧生態與安全之河防構造物。

5.4 壓密性質

依據 Terzaghi 氏之壓密理論，吾人使用 C_c 、 C_s 估算土層之壓密沉陷量，使用 C_v 估算壓密沉陷之進行速率，不擾動試體之壓密試驗結果示於圖 6。圖 6(a) 為其 $(e \sim \log p)$ 曲線，據此計算得其 $C_c=0.229$ 、 $C_s=0.012$ ；圖 6(b) 為正向應力 98.1 kN/m^2 荷重階段之 $S(t) \sim \log t$ 曲線，據此計算所得之壓密係數 $C_v=0.00171 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 。知曉其 C_c 值甚大，又因河道軟弱土層甚厚，故可預期壓密性質顯著。

若在軟弱土層上構築堤防，則其護坡面或堤頂可能會因土層發生過度的壓密沉陷量而變形、塌陷。此現象將引起下述工程問題：

1. 設計堤頂高降低，致損及防洪安全。
2. 堤身發生裂縫而滲水，導致堤防崩潰。
3. 剛性護坡面發生沉陷與裂縫。
4. 柔性護坡面發生沉陷，表面凹凸。
5. 堤防周邊附屬構造物發生沉陷與裂縫，損及機能等。

於國內常見之生態型護岸為石籠、砌石及擋土牆蓆墊砌石等，然而此等構造物作用於基礎土層之壓力往往比土堤大、且集中，而易產生局部的過度沉陷或不均等沉陷，應注意此問題。

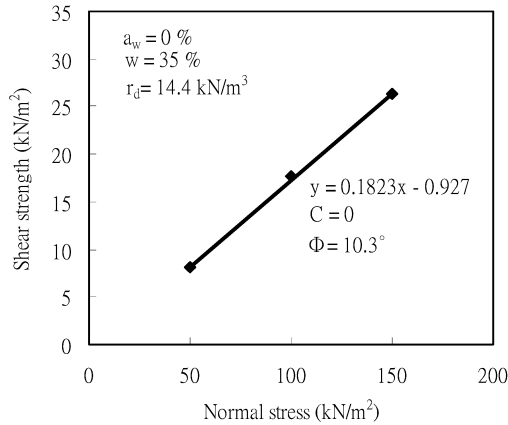
5.5 抗剪強度

圖 7(a) 為不擾動試體之直接剪力試驗結果，因河道土層軟弱、孔隙比大，故抗剪強度低，其凝聚力 $c=0 \text{ kN/m}^2$ 、內摩擦角 $\phi=10.3^\circ$ 。夯實試體之直接剪力試驗結果示於圖 7(b)，其 $c=8.3 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=33.3^\circ$ ，表夯實改良技術可大幅提昇其抗剪強度。

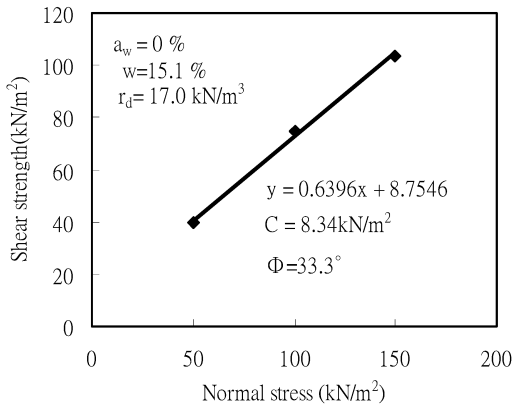
另一方面，有關於土壤水泥抗剪強度之研究較少，唯 FHWA 之研究報告提及水泥穩定土之 c 值約為數百 kN/m^2 ，而 ϕ 值於粒狀土為 $40^\circ \sim 45^\circ$ 、於細料土為 $30^\circ \sim 40^\circ$ [FHWA, 1979b]。因為水泥穩定土之密度皆為自然土層狀態，而土壤水泥之密度則為夯實最佳狀態往往大於水泥穩定土者，故可據以判釋土壤水泥之 c 與 ϕ 應大於水泥穩定土者。圖 7(c) 為本研究土壤水泥試體之直接剪力試驗結果，其 $c=349 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=57.0^\circ$ ，甚大於夯實試體者。可預期將土壤水泥改良技術運用於調查區位之夯實土堤上，將大幅提升其邊坡穩定之安全係數。即若使用土壤水泥堤防，其邊坡之容許坡度可較陡，而達縮減堤底寬之效，於施工上可減小侵入河道紅樹林區之範圍。

六、結論與建議

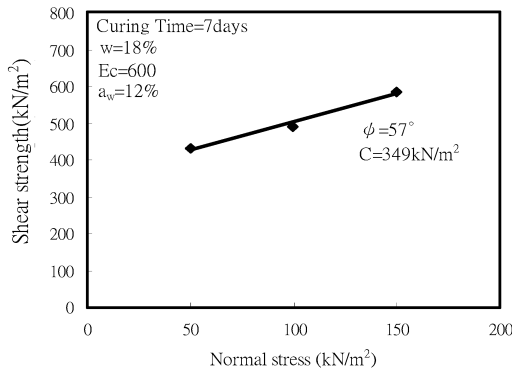
本研究調查紅樹林河口段之土壤性質，觀察夯實與土壤水泥技術之改良成效，所得之結論如下：



(a) 不擾動試體



(b) 夯實試體



(c) 土壤水泥試體

圖 7 直接剪力試驗結果

- 河道土壤為低塑性之砂質粉粘土(CL 類)，有機物含量 2.35%、 $pH = 8.3$ 。
- 河道現地土層之含水量約為 30.8%、濕單位

重 19.4 kN/m^3 、孔隙比 0.81、完全飽和、壓縮指數 0.229。

- 依標準夯實試驗所得河道土壤之 $\gamma_{d,max} = 17.0 \text{ kN/m}^3$ 、 $w_{opt} = 15.1\%$ ，土壤水泥之 $\gamma_{d,max} = 16.7 \text{ kN/m}^3$ 、 $w_{opt} = 18.1\%$ 。
- 無圍壓縮強度於夯實試體為 157 kN/m^2 、於土壤水泥試體為 $1,066 \text{ kN/m}^2$ ，其割線模數於夯實試體為 9.12 MN/m^2 、於土壤水泥試體為 96.59 MN/m^2 ，其破壞應變於夯實試體為 2.5%、於土壤水泥試體為 1.2%。
- 不擾動試體之 $c = 0 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 10.3^\circ$ 、夯實試體之 $c = 8.3 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 33.3^\circ$ ，土壤水泥試體之 $c = 349 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 57.0^\circ$ 。

依本研究成果所做之河口段整治建議為：

- 該河道土層軟弱、可預期壓密沉陷量大，石籠、砌石及擋土牆蓆墊砌石等生態型護岸，易產生局部的過度沉陷或不均等沉陷，應注意。
- 可藉由夯實及土壤水泥技術，提昇該河道土壤之抗剪強度，達縮減堤防底寬、減小施工侵入紅樹林區範圍之效。
- 欲夯實該河道土壤為土堤，宜將其含水量控制在 8%~23% 範圍內。
- 土壤水泥試體之無圍壓縮強度約為夯實試體之 7 倍，其雖含 12% 之水泥但其組成仍接近土植物尚可生長，故土壤水泥堤防為一可兼顧生態與安全之河防構造物。
- 臺灣西部海岸諸多河口段之土壤性質相近於本研究土樣，故本試驗結果可應用於他處。

誌 謝

本研究承蒙國科會之經費資助(NSC 92-2211-E-216-020)方得以完成，特此致謝。

參考文獻

- 公路總局，1997，公路工程施工說明書，台灣省交通處公路局，第 2.03 章。
- 王明德，2002，水泥固化剩餘土石方之改良成效，中華大學土木工程碩士論文，第四章。

3. 郭智勇，1993，紅樹林沼澤區的鳥類，臺灣博物，第12卷，第3期，pp.14~20。
4. 陳文祥，1986，開壩工程，中國土木水利工程學會，台北，pp.7-30~7-31。
5. 陳金煌，2003，水泥穩定處理剩餘土石方之性質，中華大學土木碩士論文，第四章。
6. 楊朝平，1998，基隆河口紅樹林生態變化之調查研究，財團法人臺北市七星農田水利研究發展基金會，第二章。
7. AASHTO, 1986, Guide for Design of Pavement Structures 1986, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
8. ACI, 1990, State-of-the-Art Report on Soil Cement, Materials Journal, Vol.87, No.4, pp.167-174.
9. ACI, 1997, State-of-the-Art Report on Soil Cement, ACI 230.1R-90, American Concrete Institute, Reapproved 1997.
10. Budhu, M., 2000, Soil Mechanics & Foundations, John Wiley & Sons, New York: pp.30~45, pp.183-211.
11. Das, B. M., 1997, Principles of geotechnical engineering 4th Edition, PWS Publishing Company, Tokyo: ch.2-ch.5.
12. FHWA, 1979a, Soil Stabilization in Pavement Structures - A User's Manual for Pavement Design and Construction Considerations, Federal Highway Administration Department of Transportation, Contract No. DOT-FH-11-9406.
13. FHWA, 1979b, Soil stabilization in pavement structures - A User's Manual for Mixture Design Considerations, Federal Highway Administration Department of Transportation, Contract No. DOT-FH-11-9406.
14. Kenneth, D.H. and Cliff, S., 2000, Construction of Stair-Stepped Soil-Cement Bank Protection, Proceeding of Sessions of Geo-Denver, Soil-Cement and Other Construction Practices in Geotechnical Engineering, pp.1-12.
15. Lancaster, J., Waco, R., Towle, J. and Chaney, R., 1996, The effect of organic content on soil compaction, Proceedings, 3rd international symposium on environmental geotechnology, San Diego: pp.152-161.
16. Liu, C. and Evett, J. B., 1998, Soils and Foundations 4th Edition, Prentice-Hall, Inc., Tokyo: pp.129-130, p.201, p.411.
17. McCarthy, D. F., 2002, Essentials of Soil Mechanics and Foundation 6th Edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey: pp.93-231.
18. PCA, 1970a, Soil-Cement Laboratory Handbook, Engineering Bulletin No.EB052S, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
19. PCA, 1970b, Thickness Design for Soil-Cement Pavements, Engineering Bulletin No.EB068S, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
20. PCA, 1975, Thickness Design of Soil-Cement Pavements for Heavy Industrial Vehicles, Information Sheet No.IS187S, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
21. PCA, 1986, Soil-Cement for facing Slopes and Lining Channels, Reservoirs, and Lagoons, Information Sheet No.IS126W, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, p.8.
22. Randall, P.B., 2000, Quality Control of Soil-Cement Construction for Water Resources, Proceeding of Sessions of Geo-Denver, Soil-Cement and Other Construction Practices in Geotechnical Engineering, pp.13-35.
23. Nussbaum, P.J. and Colley, B.E., 1971, "Dam Construction and Facing with Soil-Cement," Portland Cement Association, Skokie, Illinois, p.11.
24. USBR, 1986, Design Standards No.13 - Embankment Dams, Chapter 17, Soil-Cement Slope Protection, (DRAFT), U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

收稿日期：民國 93 年 11 月 18 日

修正日期：民國 94 年 2 月 22 日

接受日期：民國 94 年 2 月 4 日