

土工合成材料應用於水庫淤泥處理之探討

Study of Reservoir Sediment Treatment Using Geosynthetic

盟鑫工業股份有限公司國內業務處			土木技師
工程師	工程師	協理	
蔡嘉仁	朱蕙蘭	鄭恆志	陳衍舜
Chia-Jen Tsai	Huei-Lan Jhu	Heng-Chih Cheng	Even Chen

摘要

台灣地理位置位於環太平洋地震帶，且山脈形成在地質歷史中較晚，易受地震豪雨等因素引發坡面沖蝕造成土石崩落災害，大量泥砂淤積造成水庫之蓄水量日益減緩，嚴重影響水庫供需平衡，目前全臺水庫清淤量遠不及淤積量的產生，加上水庫清淤費用高且效率不彰，如何解決水庫淤積及蓄水問題為目前首要之課題。

本研究採用現地淤泥進行前期室內試驗，依據室內試驗結果選出較合適之地工織物並研擬施工方式進行現地試驗，希望藉由現地試驗結果得到土工砂腸(袋)工法在清淤作業中，淤泥脫水效率、淤泥保留效率、土工砂腸(袋)在成型後自體壓密沉陷情形、汙濁防止膜於施工前後的攔汙效果、現地施工方式，以作為後續清淤工程利用之可行性參考。

由現地試驗結果可得到在填灌作業完成後第一週土工砂腸(袋)高度變化最大，其後高度變化會趨於穩定，並且土工砂腸(袋)在陸上施作單元比水中施作單元之含水量下降速率快，約 2 周含水量即可下降至 44.95~47.12% 左右，水中單元則須 4 周方可下降至 45.32~46.32% 左右；而汙濁防止膜於施工中可有效使周遭水域的固體懸浮物含量下降，能減緩清淤作業當中因受擾動之土樣易造成水汙染的現象，使受汙染水源不因水流而擴大汙染範圍。經試驗結果採用地工砂腸袋於水庫清淤方面之施工可行性及汙濁防止膜攔汙效果上有初步成果，可作為後續工程規劃設計與實際應用參考之依據。

關鍵詞：水庫淤泥、土工砂腸袋、汙濁防止膜、淤泥脫水

Abstract

Taiwan is located in the Circum - Pacific seismic zone with weather features of frequent typhoons and heavy rainfalls. Its relatively young geology is easily affected by earthquakes and rainstorms to trigger slope collapse, erosion disaster and cause debris flow hazard. Massive amount of sediment is therefore deposited in the middle and lower reaches and reduces the storage capacity of reservoir day by day. The supply and demand of reservoir is heavily influenced, but the speed of dredging is far behind that of deposition in all reservoirs in Taiwan. Accompanied with the high expense of reservoir dredging, it makes how to solve the sediment problem and increase storage capacity in reservoirs as an issue with first priority.

In this research, the in-situ sediment was applied for the preliminary laboratory test.

According to the test result of this small-scale laboratory test, the appropriate geotextile was chosen for the in-situ test. Through the results obtained from the in-situ test by applying geotextile tube method, the efficiency of sediment dewatering, the self-weight consolidation behavior of geotextile tubes after forming, and the working efficiency of Silt Curtain were learned and the results can be used as reference for feasibility study of the following dredging projects.

From the result of in-situ test, it was learned that the height variation of geotextile tube was the most obvious in the first week after filling, and then the height variation gradually became stable. The water content of sediment in geotextile tube on land was decreased faster than of sediment in geotextile tube underwater. Water content of sediment in geotextile tube on land was decreased to 44.95~47.12% in approximately 2 weeks; but for the geotextile tube underwater, it took 4 weeks to reach 45.32~46.32%. Silt Curtain efficiently helped the drop of suspended solid content in the surrounding water area during installation process, decreasing water pollution caused by the disturbance of soil and preventing turbid water from expansion due to water flow. With the application of geotextile tube, the positive result in sediment containing efficiency and installation feasibility was verified. The results can be used as reference for the design and practical application of future projects.

Key words: Reservoir Sediment , Geotextile Tube , Silt Curtain, Sediment Dewatering

一. 前言

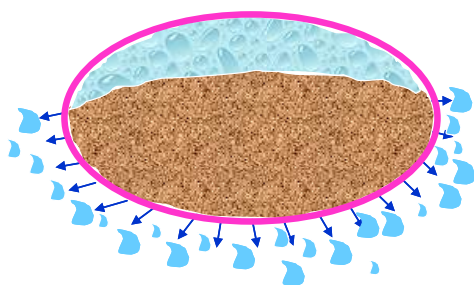
每當颱風季節總會夾帶狂風暴雨來襲，往往會使台灣的集水區與水庫造成淤泥淤積，水資源無法有效利用，大量淤泥堆積為當今社會與環境的一大難題。淤泥處理的目的在於增加水資源的利用，清除集水區與水庫淤泥後，水源涵養能力能夠提升，可以積蓄大量的水資源提供乾早期使用，有「減緩民眾、農業或工業對缺水所產生的不滿意程度」與「維持乾枯水季河溪之生態需水量」等不可計量之效益。

目前台灣的集水區與水庫淤泥採用之傳統沉澱池搭配開挖曝曬工法進行淤泥脫水，受限於曝曬場地有限及夏季的梅雨和東季的多雲天氣，所需壓密排水時間甚長，很難達到清運要求的含水量 70% 及掩埋要求於 50% 以下，使得淤泥難以大量減積和清運。有鑒於國外有許多利用地工砂腸(袋)工法處理淤泥之案例，故本研究欲實際應用地工砂腸(袋)工法將淤泥直接脫水，以利於淤泥減積及後續清運，並且記錄試驗過程與成果，作為後續工程規劃設計與實際應用參考之依據。

二. 試驗方法

1. 地工砂腸(袋)脫水原理

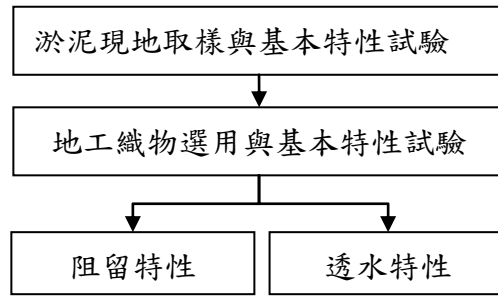
Miki et al.(1996)提出地工砂腸(袋)利用地工織物強度提供堆疊地工砂腸(袋)之穩定性，另一方面地工織物運用排水、隔離等功能，利用灌注的方式將混有泥砂及水的液體灌注到地工砂腸(袋)內，設法留住泥砂並加速排出淤泥中的高含水量(如圖一)。所以設計地工砂腸(袋)時我們必須考量其施工時灌注壓力、地工織物的表觀開孔徑、填充材料粒徑、填充材料土壤性質及現地條件等，來選用合適的地工砂腸(袋)。



圖一. 地工砂腸(袋)排水機制示意圖

2. 地工織物室內試驗流程

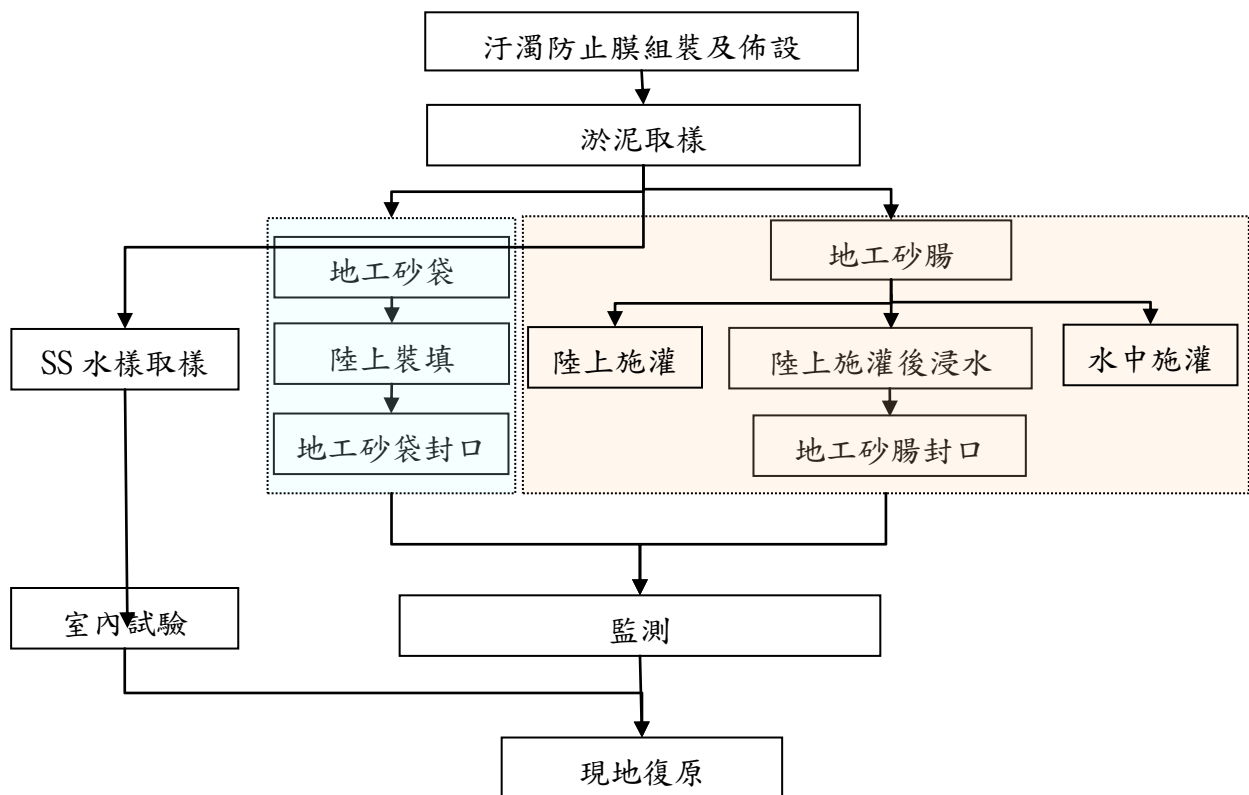
伍美玲(2009)提出水庫淤泥多為小於 $2\mu\text{m}$ 的細粒黏土礦物，因此使用地工織物製成之地工砂腸(袋)時，對於填充材料的阻留特性就顯得十分重要，由於地工砂腸(袋)乃以抽取泥水並加壓灌注方式進行地工砂腸(袋)灌注作業，因此除填充材料的阻留特性外也應一並考慮其地工織物透水特性，因此本研究針對現地取樣之淤泥搭配不同織物針對此特性進行小型室內試驗，以探求其透水特性和阻留特性，找出符合淤泥處理需求的地工砂腸(袋)之地工織物。地工織物室內試驗流程如圖二所示。



圖二. 室內試驗流程

3. 土工砂腸(袋)及汙濁防止膜現地施工流程

施工方式部份，利用挖土設備於岸邊挖取淤泥，將淤泥灌注至土工砂腸(袋)，藉由袋體的透水性與過濾性將水排出，達到淤泥脫水的目的。現地條件部份，考量堆置土工砂腸(袋)場址的環境及土工砂腸(袋)施工方式會影響土工砂腸(袋)的透水特性、阻留特性及成型後自體壓密沉陷情形等，本研究以陸上施灌土工砂袋、陸上施灌土工砂腸、陸上施灌後土工砂腸再行浸水與水中施灌土工砂腸等四種施工方式進行探討。最後為防止施工過程中，擾動底部淤泥造成原水濁度升高，本研究於施工範圍周圍佈設汙濁防止膜，以利觀察探討汙濁防止膜於施工前後的攔汙效果。土工砂腸(袋)及汙濁防止膜之現地施工流程(如圖三)。



圖三. 現地試驗規劃流程圖

4. 土工織物透水率

本研究之集水區與水庫淤泥試驗涉及水質保育，試驗過程中絕不能添加任何化學藥劑進行淤泥處理，所以無法以化學藥劑來凝聚細顆粒淤泥，故本研究選用一般常用之土工織布搭配不同的土工不織布進行土工織物透水率試驗，土工織物透水率試驗方法依據公共工程委員會(2011)的 CNS 13298 土工織物正向透水率試驗法規範，計算公式如下：
透水率(S^{-1}) = [流量(mm^3) × 溫度修正係數] ÷ [試片之上水頭(mm) × 試片之橫斷面積(mm^2) × 時間(S) × 試驗時水流通過織物的厚度(cm)].....(1)

5. 砂袋、腸淤泥含水量

配合每週尺寸量測時進行淤泥取樣，進行含水量試驗，試驗方法依據 ASTM International (1998)的 ASTM D2216-92 試驗規範進行，計算公式如下：
土壤含水量(%)=[溼土重(g) - 乾土重(g)] ÷ 乾土重(g) × 100..... (2)

6. 固體懸浮物含量 (Suspended Solids, SS)

利用運輸船於汙濁防止膜內側(取土區)和汙濁防止膜外側，進行施工前、中和後的水質取樣，進行固體懸浮物含量試驗，試驗方法依據行政院環保署(2006)的 NIEA W210.57A 進行，計算公式如下：
懸浮固體(mg/L)=[懸浮固體及濾片重(g) - 濾片重(g)] × 1000 ÷ 樣品體積(L) (3)

三. 研究成果

1. 土工織物室內試驗結果

(1) 土工織物透水效果

由室內試驗得知採用一般常用地工織布(A&B)搭配不同的不織布(C&D)的四種組合透水效果約介於 1.23×10^{-3} ~ 1.81×10^{-4} 之間(如表一)，除織布 A+不織布 C 的透水效果較差外，其餘透水效果大致接近，都在試驗容許誤差內。

表一. 室內試驗透水結果

組別	單位	織布 A	織布 B	織布 A+不織布 C	織布 A+不織布 D
厚度	mm	1.1	1	4.1	2.2
透水率	S^{-1}	2.04×10^{-3}	3.05×10^{-3}	1.81×10^{-4}	1.23×10^{-3}

(2) 土工織物阻留效果

由室內試驗阻留結果(如表二)可以得知，只有織布時雖然初期透水效果良好，但初期之濾出液 SS 與原始泥水 SS 差距不大，約莫 3~5 分時濾出液才逐漸呈現澄清狀，也就是說土工織物表觀開孔徑大時其透水性大，造成淤泥顆粒隨水流於土工織物開孔間流出，所以土工織物阻留效果不好；反之，而採用織布及不織布複合，一開始濾液即呈現澄清狀，也就是說採用織布及不織布複合時土工織物表觀開孔徑小其透水性小，初期淤

泥顆粒隨水流停留於土工織物孔徑間形成阻塞現象，後期淤泥顆粒遮住織物表面形成遮蔽現象，所以土工織物阻留效果佳，為確保細料土壤阻留效果建議採用織物複合不織布方式製作土工砂腸(袋)。

表二. 室內試驗阻留結果 (單位: ppm)

組別	單位	織物 A	織物 B	織物 A+不織布 C	織物 A+不織布 D
織物表觀開孔徑	mm	0.435	0.435	0.435+0.2	0.435+0.1
原始泥水 SS	ppm	>10 ⁶	>10 ⁶	>10 ⁶	>10 ⁶
最終濾液 SS	ppm	1800	4000	1600	20

綜合上述兩項室內試驗成果，以高透水及高阻留兩原則考量，現地試驗採用織布 A 複合不織布 D 進行現地試驗。

2. 土工砂腸(袋)現地試驗結果

(1) 尺寸及高度變化

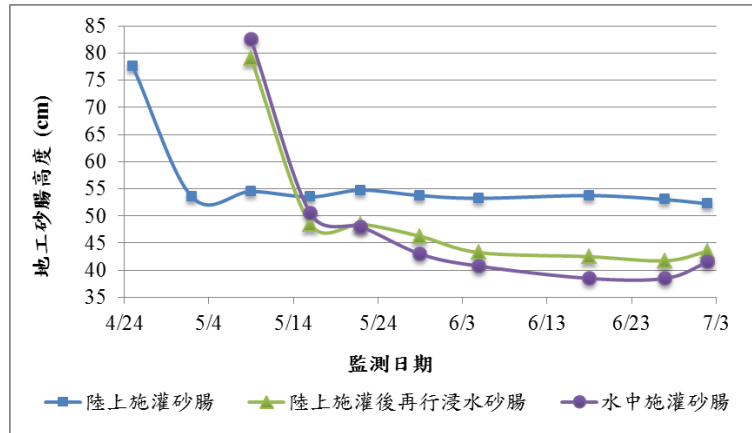
由現地試驗寬度變化結果(如圖四)可以得知，陸上施灌土工砂腸隨著袋體內淤泥含水量下降則袋體高度降低，袋體長寬尺寸變化率約介於 5~10% 左右，整體而言變化幅度相對有限。由現地試驗高度變化結果(如圖五)可以得知，在灌注作業完成後第一週砂腸(袋)高度變化最大，變化幅度約達總高度變化 8~9 成，其後高度變化趨勢皆轉而趨緩或呈現穩定剩餘高度可達到完工高度 50%~67% 左右。

土工砂腸袋以三種不同施工條件比較而言，陸上施灌時，高度隨時間變化最快呈現穩定，且高度總變化最小;陸上施灌後再行浸水時，高度隨時間有變化幅度減緩趨勢，總變化量次之;水中施灌時，高度隨時間有變化幅度減緩趨勢，總變化量最高。

總結高度變化結果顯示變化幅度由大至小依次分別為水中施工、施工後浸水、陸上施工，浸水狀態由於袋內淤泥水分排除效果及路徑皆不如純陸上施工，確實會造成砂腸成型高度變化量提高及延長高度穩定所需時間，最終仍可呈現一穩定狀態。



圖四. 陸上施灌土工砂腸高度變化情形



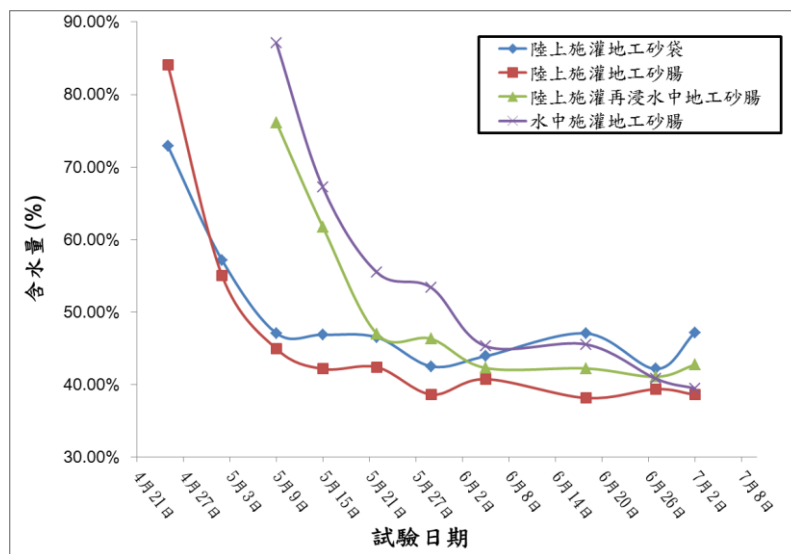
圖五. 土工砂腸高度隨時間變化情形

(2) 含水量變化

由現地試驗含水量變化結果(如圖六)可以看出填灌完成初期為高速脫水期，而後壓密脫水區速率趨緩，約 2~4 週時間含水量可由約 70~80% 下降至 40% 左右，其後含水量變化趨於穩定，即便期間有降雨情形但對袋體內淤泥含水量影響不大。

針對袋體個別含水量變化整理說明如下。陸上裝填的土工砂袋含水量約 2 週即下降至 47.12%，其後含水量雖有變化但趨勢趨於穩定，於監測最終日含水量為 47.19%。陸上施灌的土工砂腸，含水量約 2 週即下降至 44.96%，其後含水量雖有變化但大致相同，於監測最終日所量取含水量為 38.64%。陸上施灌後再浸入水中的土工砂腸含水量約 4 週下降至 46.32%，後續含水量轉為穩定趨勢，於監測最終日所量取含水量為 42.77%。水中施灌的土工砂腸含水量約 4 週下降 45.32%，後續含水量轉為穩定趨勢，於監測最終日所量取含水量為 39.50%。

總結袋體個別含水量變化結果，在灌注及裝填作業完成後約 2 週時間陸上施作的土工砂袋及土工砂腸含水量變化即轉趨穩定，含水量下降效率較佳；陸上施灌後再行浸水時及水中施灌土工砂腸含水量變化則約 4 週後方才呈現穩定趨勢。



圖六. 土工砂袋及土工砂腸含水量變化情形

(3) 袋體留存淤泥能力

利用挖土設備於岸邊挖取淤泥，加以拌合成濃度較高之淤泥漿(如圖七)，將淤泥漿灌注至土工砂腸(袋)，利用袋體的透水性與過濾性將水排出(如圖八)，達到淤泥脫水的目的。從試驗結果可以得知採用地工砂腸(袋)工法，能排出清澈之濾出液(如圖九)並將淤泥之固體懸浮物有效地留置袋體內，達到提高淤泥處理之效率。



圖七. 高濃度之淤泥漿



圖八. 透水效果

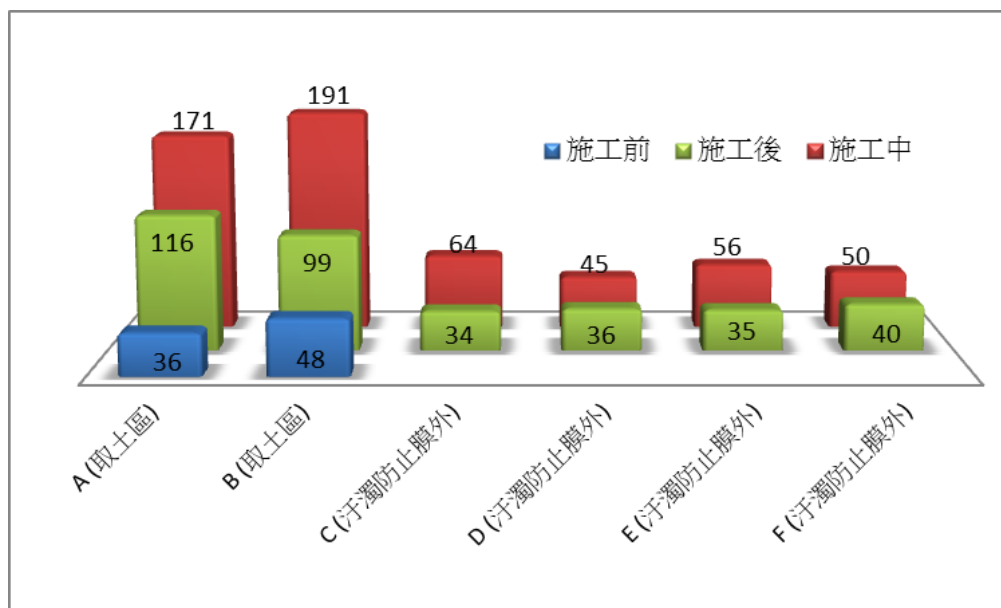


圖九. 淤泥漿與濾出液比較

3. 污濁防止膜現地試驗結果

(1) 固體懸浮物含量變化

由現地試驗固體懸浮物含量變化結果(如圖十)可以得知，在施工中污濁防止膜都可以有效使周遭水域水源的固體懸浮物含量由 171~191mg/L 下降至 45~64mg/L，降低幅度約 6~7 成左右。而在停工數小時後，工區內水源固體懸浮物含量仍有 99~116mg/L 左右，而污濁防止膜外部則已下降至 34~40mg/L 左右，與未施工時的原水情形相當，可見污濁防止膜其效果相當明顯且有效，而污濁防止膜的實際使用效果(如圖十一)所示。



圖十. 固體懸浮物含量試驗結果比較圖



圖十一. 污濁防止膜具有明顯攔汙效果

4. 土工砂腸(袋)工法效益探討

台灣常見利用傳統沉澱池配合開挖曝曬工法進行水庫淤泥脫水處理，但處理用地有限，尤其夏季的梅雨和東季的多雲天氣，使傳統沉澱池配合開挖曝曬工法脫水效率降低，雖然有濾壓式脫水機工法可取代傳統沉澱池配合開挖曝曬工法，隨著濾壓式脫水機工法脫水效率提高其耗電量亦隨之增加，致使處理過程二氧化碳量排放量上升，對地球環境產生負擔，跟降低全球暖化之目的是背道而馳的，在全球暖化和土地成本上升的現今，本研究擬採用地工砂腸(袋)工法，來取代傳統沉澱池配合開挖曝曬工法和濾壓式脫水機工法。

土工砂腸(袋)可堆疊放置於有限的處理用地，節省儲存淤泥空間，加上可藉由土工砂腸(袋)之保留淤泥能力，以多次充填淤泥來提高沉積於土工砂腸(袋)內淤泥濃度，提高淤泥處理之效率。後續處理部分，脫水後袋體可直接運送至廢棄物處理場處理或由袋體和淤泥所構成的複合材，應用於構築造地之圍堤或護岸等。如葉世正(2009)提出淤泥搭配袋體及原海灘砂源置換應用於人工養灘、淤泥搭配袋體及固化劑應用於人工魚礁等河海復育應用方式。

土工砂腸(袋)工法使用材料為少量的輕質地工織物，配合現地淤泥填灌而成，符合綠色材料就地取用天然材料的作法，確實符合『綠色材料』中天然材料及採用現地材料的原則要求；以土工砂腸袋體製作圍堤、護岸與人工魚礁，進而減少其他工程材料用量，符合『綠色工法』中減量的原則要求；土工砂腸(袋)工法採用自然壓密脫水，相較於高耗能的機械式脫水工法，更能符合『綠色能源』的原則要求。

土工砂腸(袋)工法所帶來的效益不僅只有加速淤泥處理速度，減少淤泥量，其間接效益如提供工程材料和節能再生資源等資源利用的永續效益，此工法不論在綠色工法、綠色材料及綠色能源的各項綠色內涵原則下皆可符合，因此採用地工砂腸(袋)工法進行集水區與水庫淤泥脫水處理，實應加以推廣使用，以符合政府推動節能減碳的政策目標。

四. 結論與建議

1. 結論

- (1) 以高度變化試驗結果，土工砂腸不論以何種方式施工，在灌注作業完成後第一週高度變化最大，變化幅度約達總高度變化 8~9 成，其後高度變化會趨於穩定，剩餘高度可達到完工高度 50%~67% 左右。變化幅度由大至小依次分別為水中施工、施

工後浸水、陸上施工。

- (2) 隨高度變化結果，袋體長寬尺寸也會有所變化，一般袋體長度及寬度會比完工時增加 5~10% 左右。
- (3) 含水量變化試驗結果顯示，地工砂腸及地工砂袋不論以何種方式試作，約 1 個月左右時間變化即會趨於穩定，含水量可由 78.48% 降至 40% 左右。含水量下降速率而言以陸上施工地工砂腸及地工砂袋較優於水中施工及施工後浸水地工砂腸。
- (4) 污濁防止膜於施工中可有效使周遭水域水源的固體懸浮物含量由 171~191mg/L 下降至 45~64mg/L，降低幅度約 6~7 成左右。而在停工數小時後，工區內水源固體懸浮物含量仍有 99~116mg/L 左右，而污濁防止膜外部則已下降至 34~40mg/L 左右，與未施工時的原水情形相當，污濁防止膜效果相當明顯且有效。

2. 建議

- (1) 砂腸袋體成型以圓周 4m 砂腸而言，可灌注高度 1.2m 來說，建議預估洩水後成型高度為 0.5m 左右，而寬度與長度變化約在 5~10% 左右，整體影響不大，建議納入容許誤差範圍。
- (2) 依試驗結果，袋體內淤泥含水量約可下降到 40% 左右，建議可以此作為後續評估分析及設計之參考含水量。

參考文獻

- (1) ASTM International, ASTM D2216-92 : Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, pp. 295-298, 1998.
- (2) GRI Test Method GT10, Test Methods, Properties and Frequencies for High Strength Geotextile Tubes used as Coastal and Riverine Structures, 2012.
- (3) GRI Test Method GT11, Installation of Geotextile Tubes used for Coastal and Riverine Structures, 2012.
- (4) Heibaum, M. "Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering." J. Hydraul. Eng., 126(7), pp.556-557, 2000.
- (5) Miki, H. , Yamada, T. , Kokubo, H. , Takahashi, I. and Sasaki, T. , "Experimental Study on Geotextile Tube Dehydration Method of Dredged Soil ", Geosynthetics: Applications , Design and Construction, Balkema, Rotterdam, pp.933-941, 1996.
- (6) US Army Corps of Engineers, Geotextile Tube Structures Guidelines for Contract Specifications, 2006.
- (7) 伍美玲, 「台灣水庫淤泥之性質研究」, 國立成功大學資源工程學系碩士論文, p329-34, 2009
- (8) 行政院環保署, NIEA W210.57A: 水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法: 103 °C ~

105 °C 乾燥法，2006。

- (9) 行政院公共工程委員會,第 02342 章 土工織物，行政院公共工程委員會施工綱要規範，2011。
- (10) 財團法人成大研究發展基金會,水庫淤泥應用於國土保育之研究,1.2.3 冊,經濟部水利署,2004。
- (11) 葉世正,「水庫淤泥在海岸復育之應用」,國立海洋大學河海工程學系碩士論文,2009
- (12) 盟鑫工業股份有限公司,鯉魚潭水庫淤泥試灌作業總結報告書，2010。
- (13) 盟鑫工業股份有限公司,日月潭水庫淤泥處理工程-土工織物與現地淤泥阻留及透水特性研究報告，2011。
- (14) 盟鑫工業股份有限公司，日月潭水庫淤泥處理工程現地試驗成果報告書，2012。