

植生複合材料應用於渠道內面工之研究

A Study of Composite Vegetation Materials Applied on Channel Lining

國立屏東科技大學土木工程系
副教授

鄧 禕*

I Tsou

國立屏東科技大學土木工程系
研究生

鍾 肇 光

Chao-Kuang Chung

國立屏東科技大學土木工程系
研究生

邱 敬 翔

Ching-Hsiang Chiu

摘 要

本研究以百喜草與土壤結合成之植生複合材料為研究對象。百喜草為臺灣目前主要推廣之一般邊坡、裸露地及蝕溝控制用草種，為水土保持重要方法之一。研究之目的為建立以此種植生複合材作為一般渠道工程設計施工時所需之各項基本資料。試驗設計以屏東科技大學土壤及高屏溪河川地土壤培養不同植生密度，不同植生土層厚度及不同生長時間之樣本，進行拉拔力試驗及剪力試驗。結果顯示，在相同的植生時間以及相同植生密度下，土壤凝聚力會隨著含水量的增加而降低，下降約 87%~42%。相同的植生時間在高含水量 35%時，凝聚力隨植生密度增加有顯著增加，約增加 3.2~0.7 倍。而固定含水量以及植生密度，培植時間愈久凝聚力愈大，同樣在高含水量 35%時此現象更為明顯，凝聚力大約增加 1.9~0.2 倍。此外植生土壤之內摩擦角由含水量 15%的 41°下降至含水量 35%時之 26°。另外拉拔力試驗結果顯示，同樣含水量情況下，由植生時間 60 天增加至 90 天，學校土壤樣本拉拔力約增加 2.3~2.1 倍，高屏溪土壤樣本約增加 2.5~1.7 倍。比較學校土壤樣本之拉拔力約為高屏溪土壤植生樣本之 1.7~1.9 倍。

關鍵詞：百喜草，拉拔力試驗，剪力試驗。

ABSTRACT

This study is consider that Bahia grass and soil as a composite material for channel lining design. Bahia grass is one of the most important plants for soil conservation engineering. The purpose of the research will focus on measuring the basic design parameters of this composite material. Two types of soil, which are National Pingtung University of Science & Technology campus soil and Kaopin-river's riverbed soil, are

*通訊作者，屏東科技大學土木系副教授，912 屏東縣內埔鄉學府路 1 號，tsou@mail.npust.edu.tw

chosen to develop composite samples with different vegetation density, soil depth and duration of growth. The samples, which are construct by root and soil, are using to process the analysis of pulling resistance and shear force and soil mechanics characteristics. The result shows that with the same duration and density cohesion decrease 87%~42% when moisture content increase. With high moisture content at 35% the cohesion increases about 3.2 to 0.7 times when vegetation density increase. Also the results show that at high moisture content cohesion increase about 1.9~0.2 times when growing duration increase. In addition to cohesion, the result shows that the angle of friction decrease from 41° at 15% moisture content to 26° at 35% moisture content. As for pulling resistance that increase about 2.3~2.1times for campus soil sample and 2.5~1.7times for riverbed soil, when growing duration increase from 60 to 90 days. Also the pulling resistance is about 1.7~1.9times compare campus soil to riverbed soil sample.

Keywords: Bahia grass, Pulling resistance, Shear force.

一、前言

1.1 研究背景

渠道工程為水利工程最重要之一環，不管是自然河道之防洪整治，或是農田灌溉排水之輸水渠道，均與人有最直接之關聯。一般渠道工程之設計規劃，主要以渠道輸送能力及防洪效果等工程效果為考量重點。除了較早期之工程可看到土堤、砌塊石、蛇籠等工法，目前均以混凝土鋪面作為設計施工，因其所需之設計參考，如粗糙率、沖淤流速、水量損失率等均已較佳之掌握，但這種俗稱「三面光」的渠道卻造成許多大問題：(1)阻隔河水入滲地下，留不住寶貴的水資源。(2)構造物面光滑，河水流速加快，增大洪峰流量。(3)構造物表面缺少動植物可以利用的孔隙，並阻隔陸域與水域的棲地連結，對生態環境造成嚴重傷害。(4)河川景觀單調，休閒價值遞減，不利於遊憩及觀光產業的發展。所以為了兼顧河道輸水能力、維持環境生態之自然風貌，並且考量人與河川之互動，必須對於渠道內面襯砌工法之功效有所取捨，因此，近年來國內各河川局及農田水利會均在設計上採用所謂之「生態工法」。

「生態工法」牽涉範圍相當廣泛，而「植生工程」亦為其一，然國內外對使用自然材或植生材於邊坡穩定性之研究，已有相關研究成果，因

此，參考前人研究之根系力學試驗經驗，將植生材應用於渠道內面，進行摩擦角及凝聚力之相關性研究，達到渠道內面工法之穩定結構、正常輸送水流、維護生態環境之功效。

1.2 研究目的

本研究以「百喜草」與土壤結合成之植生複合材為研究對象。「百喜草」為臺灣目前主要推廣之一般邊坡、裸露地及蝕溝控制用草種，由於其根系發達，容易繁殖，覆蓋良好，生長迅速且容易控制，所以極力推廣作為水土保持選用材料。目前針對邊坡穩定等議題已有相當之研究探討，因此本研究之目的為建立以此種植生複合材作為一般渠道工程設計施工時所需之各項基本資料，並進一步與生態工法施工準則加以結合，建構完整的河川生態體系，避免河川環境造成二次破壞，獲取最高的經濟及生態效益，永續經營。

本研究之主要目的：

1. 百喜草根系與土壤所組成之複合材料之一般物理特性。
2. 建立各項影響因子對摩擦角及凝聚力之相關性研究。

二、文獻回顧

蔡宗霖(2002)在「生態工法中預鑄混凝土護

坡最佳植被之調查」中，根據國內外對於植生工程研究試驗指出，植物具有控制雨水及流水沖蝕及穩定坡面的功能，百喜草用作覆蓋作物無論在陡坡及緩坡地，均可有效地防止水土流失。吳正雄(1990)於「植生根力與坡面穩定關係之研究」中提到，森林植生提供坡面穩定的功能，主要來自於蒸散作用而調節土壤水分的機能，以及根系補強力量所提供的根力效果。根系補強力量則由於根株的機械補強力量以及根與土壤的緊縛力量所發揮的結果。各供試樹種之根拉力強度與根直徑成指數迴歸關係，此迴歸方程式可推估各徑級之根拉力強度。顏正平、林信輝、周天穎(1983)於「水土保持應用草類生育習性及種子繁殖試驗」中，研究種子之繁殖方法與根系分佈生長情形，並以直接剪力試驗，測定含不同草種根系土壤之摩擦剪應力以探討根系對土壤之補強效應。廖綿濬、劉金龍、黃俊德(1970)在「草溝之研究」中主要係藉由草類襯砌渠面以保護不致發生沖蝕；又以草類之生長復舊能力，維護之所需，探究於適當流量及斷面下，其適用草類及渠道坡度之陡峻程度，以推廣之初步依據。

摩爾(Mohr, 1900)提出了材料破裂的理論，認為一材料之破壞是因為正向應力與剪應力之組合達到一臨界狀況，而破壞面上之正向應力與剪應力有一如下之函數關係：

$$\tau_f = f(\sigma) \dots\dots\dots(3.1)$$

公式(3.1)所定義之破壞包絡線是一曲線，在土壤力學中約略假設在破壞面上之剪應力是正向應力之線性函數即足夠(Coulomb, 1776)。

根據 Terzaghi 有效應力理論，此一線性函數可以寫成式(3.2)：

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \psi' \dots\dots\dots(3.2)$$

- 其中 τ_f = 土壤剪力強度
- c' = 土壤有效凝聚力
- σ' = 土壤有效垂直應力
- ψ' = 土壤有效內摩擦角

以上之關係稱為摩爾-庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb failure criteria)。

三、研究方法

3.1 複合材樣本培植

樣本培植日期從民國 93 年 12 月 1 日開始，至民國 94 年 4 月 30 日止，於國立屏東科技大學植保系溫室培植，試驗材料為百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)小葉種子，為一禾本科多年生草類，花序為細長之穗狀花序，有二至三支，穗長約在 8.66~14.24cm。由於其根系發達，容易繁殖，覆蓋良好，生長迅速且容易控制，所以選為本研究試驗材料。培植土壤選用屏東科技大學土壤及高屏溪河川地土壤，以兩種培植器皿：深盆(50cm×30cm×7cm 立方之樣本盒)、淺盆(50cm×30cm×4cm 立方之樣本盒)進行培植。

3.2 土壤之基本物理性質分析

本研究土壤種類選用學校土壤及高屏溪河床地沖刷土壤為試驗對像，依 ASTM 分類標準，首先進行土壤物理性質分析(比重試驗、篩分析試驗、阿太堡試驗)，便於了解培養土的種類。再者由普羅克達試驗求出最佳含水量(OMC)及所對應之最大乾密度(λ_{dmax})值，以便求得後續進行之直剪試驗所需用土量。

3.3 拉拔力試驗

草株於渠槽中受水流作用會產生倒伏現象，因此考量草株倒伏受力之情形，拉力試驗為植生材料正向應力之研究，配合剪力試驗得到之橫向剪應力，可以瞭解植生複合材在實際應用時之材料應力範圍，提供設計者於設計規劃時所需之各項基本資料參考。

目前拉拔力試驗儀大部分均針對機械螺絲或地錨等較高抗力所設計。本研究自行設計簡單槓桿原理之儀器，配合電子式拉壓力計及測試機檯進行實驗。如圖 3-1 所示。夾取草株之測試夾連接鋼線，經由試驗檯座一端之量角器控制欲拉拔之角度，由另一端裝設有電子式拉壓力計之測試機檯控制拉拔速度，透過拉拔力試驗檯座傳遞作用力，再由電子式拉壓力計接收測試數值，數值經摩擦力矯正公式計算後得到實際之拉拔力

表 4-1 土壤基本物理性質分析結果

分析項 土樣	比重	#4 累積通過 百分比	#200 累積通 過百分比	液限指數 (PL)	塑限指數 (LL)	塑性指數 (PI)	土壤分類
學校土樣	2.79	98.94%	93.12%	40.50	26.50	14	貧瘠配黏土
高屏溪土樣	2.98	100%	100%	25	NP	25	砂質有機黏土

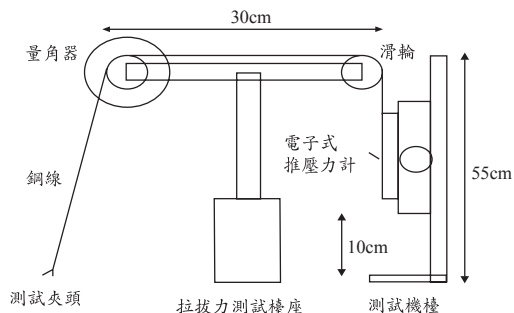


圖 3-1 拉拔力儀器示意圖

值。最後再進一步探討各影響因子情況下植物根系對土壤之固土效果。

3.4 剪力試驗

一土體之剪力強度(shear strength)是每單位面積所能提供防止土體內沿任何平面的破壞或滑動之阻抗。首先必須瞭解剪力阻抗之特性，才能分析土壤穩定的問題。

剪力試驗以小型直剪儀進行。針對不同土樣、植生時間、土壤含水量、植生密度等因子進行與根垂直方向之剪力試驗。由試驗結果，可以求得各影響因子組合情況下之凝聚力 c 及摩擦角 ψ ，並觀察凝聚力與摩擦角之變化，分別與每一影響因子做比較，建立更準確之百喜草植生材力學特性，做為本次試驗之結果討論。

四、結果與討論

4.1 土壤物理性質與植生記錄

試驗將分成比重分析、篩分析、阿太堡試驗等，做為統一土壤分類法的基本資料。如表 4-1 所示。

4.1.1 土壤之基本物理性質分析

由表 4-1 可知，學校土壤依 ASTM 分類標準，其#200 累積通過率大於 50%，所以土壤為細

表 4-2 百喜草根及葉觀察紀錄

土壤 量測部位 種植週數	學校土樣		高屏溪土樣	
	葉高 (cm)	根長 (cm)	葉高 (cm)	根長 (cm)
1	2.0	2.5	2.7	2.1
2	3.6	2.8	3.6	2.6
3	5.6	2.8	4.2	3.6
4	6.2	4.3	5.0	4.3
5	6.9	5.4	6.0	5.2
6	8.3	5.7	7.2	5.3
7	9.0	6.3	7.6	5.4
8	9.8	7.3	8.1	5.5
9	10.8	7.4	10.1	5.7
10	11.1	7.5	11.7	6.1
11	11.9	7.6	12.6	7.3
12	14.3	7.6	14.1	7.7

粒土壤；液限指數小於 50、塑性指數大於 7，故為 CL；其#200 停留百分比小於 30%，又小於 15% 停留在#200，故此種培養土為貧級配黏土。而高屏溪土壤依 ASTM 分類標準，其塑性指數大於等於 4，且在塑性圖-A 線上方，所以為 OL；其#200 累積通過率大於等於 30%，且砂之百分比大於等於礫石之百分比，又礫石百分比小於 15%，故此種培養土為砂質有機黏土。

4.1.2 植生記錄

將百喜草種植於培養盒中，觀察根部與葉高生長情況，並以 7 天為一觀察週期。植栽時間分三批種植，分別為第一批 12 月 1 日~2 月 28 日，第二批 1 月 1 日~3 月 30 日，第三批 2 月 1 日~4 月 30 日。由觀察紀錄結果依植生時間取其平均數。如表 4-2 所示。

由表 4-2 可看出，百喜草於學校土壤培植初期生長速率較快，至植生第三個月時，兩種土壤樣本之植生狀況近乎相同。由此可知，在生長週期內，植生時間愈長，百喜草之生長狀況會趨於

平衡。於植生三個月期間，學校土壤植生葉高與根長對時間之迴歸式可各別表示為 $y=0.9844x+1.8803$ 及 $y=0.5173x+2.3$ ；高屏溪土壤植生葉高與根長之迴歸式可各別表示為 $y=1.0178x+1.1258$ 及 $y=0.4524x+2.1258$ 。

初步觀察其根系數量有愈來愈多的趨勢，且根系強韌，在拔起植生材時，根系帶有大量土壤，顯示此根系與土壤之結合具有一定程度之凝聚力。在生長至第 8 週時，其根系發展有生長遲緩現象，觀察可能因根系受到樣本盒深度阻礙，影響其向下發展的空間轉而往側向生長。

4.2 直接剪力試驗分析

本試驗探討百喜草在不同土樣、不同植生時間、不同密度及不同含水量等 4 種影響因子下，植生根系對土壤之補強效益，並且建立該植物根系與土壤所組成之複合材料之力學特性。

4.2.1 普羅克達夯實試驗分析

普羅克達夯實試驗主要目的是為了在進行直接剪力試驗時，求得最大乾密度與最佳含水量，進而計算土壤在 15%、25%、35%含水量情況下之直剪用土量。

首先以 4 種不同的含水量進行試驗，得出各別的乾土單位重。繪製夯實曲線圖，由圖可求得學校土壤最大乾密度為 1.64，最佳含水量為 24.4%；高屏溪土壤最大乾密度為 1.59，最佳含水量為 20.7%。以乾側(夯實曲線最高點以左部分)90%夯實度求取 90%之最大乾密度與含水量，帶入(4.1)式計算出 90%之最大濕密度，再將含水量 15%、25%、35%代入(4.1)式，分別求取其乾密度，最後計算直剪試驗所需之用量。

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1+w} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(4.1)$$

4.2.2 直接剪力試驗分析

本實驗土樣分學校土壤及高屏溪土壤兩種，植生時間分成 30、60、90 天三組，各組依不同含水量分成 15%、25%、35%三組距，再各別依密度因子於樣本盒內取單位面積(6×6 cm²)1 株、單位面積 4 株、單位面積 8 株等三組

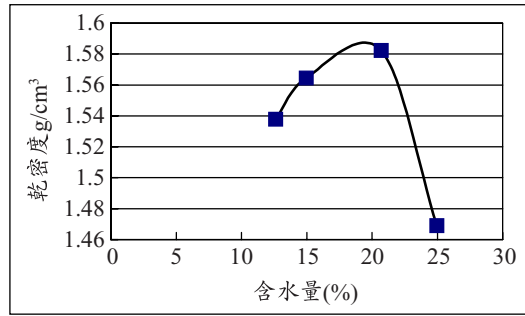


圖 4-1 學校土壤夯實曲線圖

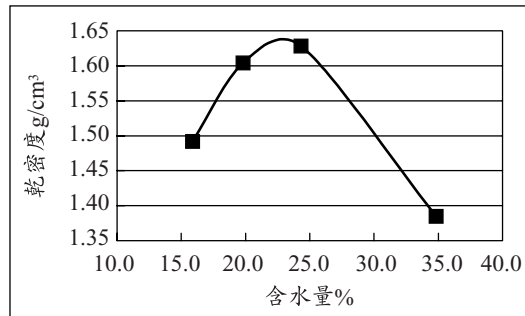


圖 4-2 高屏溪土壤夯實曲線圖

距。每一組以取樣環各取 4 個植生土樣樣本進行試驗，總計兩種土樣試驗組數為 60 組。

本實驗以土壤物理性質分析觀念，根據直接剪力試驗結果，將求得之剪力強度數值與正向應力求其關係方程式，以分析出植生複合材之凝聚力 (C) 及摩擦角 (ψ) 等參數，並分別與每一影響因子做比較，結果將可作為植生護坡、土壤根系補強之參考依據。數據整理如表 4-3 所示。可知學校無根系土壤之凝聚力 C 值為 0.564 (kg/cm²)，以及摩擦角 ψ 值為 41°。

由於高屏溪土壤與百喜草結合成附合材的凝聚力為負值，表示無法看出有效土壤凝聚力，顯示百喜草與高屏溪土壤結合後凝聚效果不顯著。以下針對學校土壤與百喜草結合後之附合材所得之凝聚力，整理如圖 4-1、圖 4-2 及圖 4-3 加以分析討論。

分析結果如下：

1. 如圖 4-3 與表 4-3，在相同的植生時間以及相同植生密度下，土壤凝聚力 C 會隨著含水量的增加而降低。由含水量 15% 的 0.561~

表 4-3 各個影響因子條件之 C、 ψ 值比較

時間	密度	土樣項目 含水量	學校土壤		高屏溪土樣		
			摩擦角 ϕ	凝聚水 C (kg/cm ²)	摩擦角 ϕ	凝聚水 C (kg/cm ²)	
30 天	無根	15%	41.0	0.564	44.5	-0.3109	
		25%	39.6	0.470	44.4	-0.6304	
		35%	26.8	0.100	43.9	-0.3348	
	1 株	15%	41.1	0.561	46.4	-0.0806	
		25%	40.5	0.491	45.7	-0.2848	
		35%	10.4	0.073	45.1	-0.0804	
		4 株	15%	41.0	0.567	51.2	-0.6870
			25%	41.1	0.504	47.0	-0.5500
			35%	26.5	0.270	45.1	-0.4304
8 株	15%	41.0	0.574	51.2	-0.6913		
	25%	18.1	0.554	46.6	-0.4652		
	35%	25.9	0.309	45.4	-0.2913		
60 天	1 株	15%	43.5	0.573	45.3	-0.5000	
		25%	40.0	0.498	44.1	-0.4862	
		35%	35.5	0.209	41.0	-0.3043	
	4 株	15%	45.7	0.583	46.1	-0.7563	
		25%	41.3	0.513	45.4	-0.4130	
		35%	26.1	0.317	44.5	-0.3652	
	8 株	15%	49.7	0.604	52.5	-0.8739	
		25%	40.3	0.565	45.9	-0.6652	
		35%	24.6	0.344	44.7	0.1652	
90 天	1 株	15%	42.3	0.578	49.4	-0.4348	
		25%	40.2	0.517	47.3	-0.1435	
		35%	30.8	0.214	44.5	-0.4109	
	4 株	15%	41.1	0.583	51.6	-0.7652	
		25%	40.4	0.526	50.4	-0.4543	
		35%	26.4	0.326	45.7	-0.2957	
	8 株	15%	40.0	0.630	54.8	-1.1022	
		25%	39.6	0.570	50.5	-0.6783	
		35%	39.9	0.365	46.0	-0.4000	

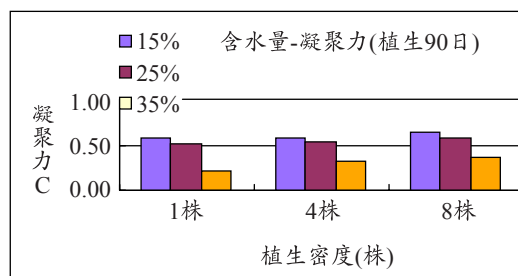


圖 4-3 固定植生時間及植生密度下之凝聚力

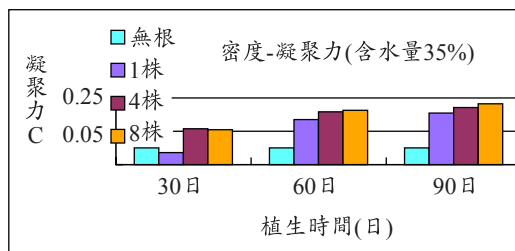


圖 4-4 固定植生時間及含水量下之凝聚力

0.630 (kg/cm²) 降至含水量 35% 的 0.073~0.365 (kg/cm²)。下降約 87%~42%。且無根系之土壤亦有此情形，顯示土壤水份在影

響土壤凝聚力有一定的作用存在。

2. 如圖 4-4 與表 4-3 所示，在同一植生時間、相同含水量之情況，其凝聚力隨著植生密度增加而有變大的趨勢。特別是在高含水

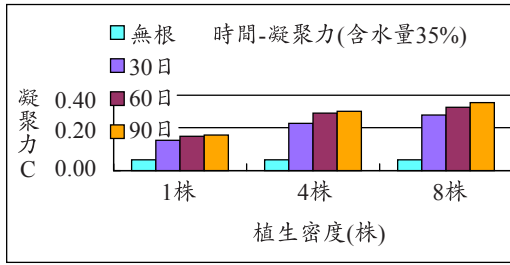


圖 4-5 固定含水量及植生密度下之凝聚力

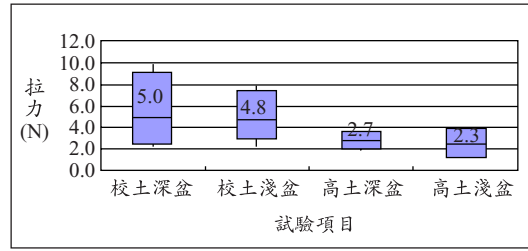


圖 4-7 土層厚度-拉拔力關係圖

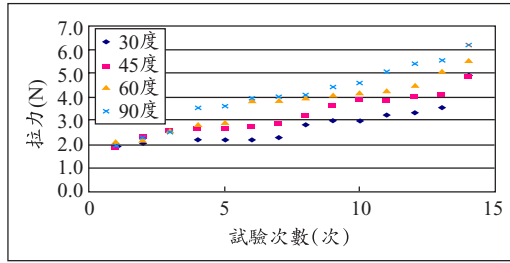


圖 4-6 角度-拉拔力關係圖

表 4-4 各影響因子條件下之平均拉拔力

時間 含水量 土樣	30 天			60 天			90 天		
	15%	25%	35%	15%	25%	35%	15%	25%	35%
校土	1.28	1.20	0.88	5.02	3.25	2.78	16.34	10.76	8.51
高土	2.01	0.91	1.24	2.70	1.89	1.65	9.56	5.56	4.52

間、不同含水量之植生樣本對拉拔力之影響關係。

試驗結果第一階段以學校土壤、植生 1 個月、含水量 25%之樣本進行 90°(垂直)、60°、45°及 30°四種不同角度之拉拔試驗。如圖 4-6。結果顯示，拉力會隨著角度變大而增加，30°比 90°拉力小了約略 2 倍。

另外根據學校土樣及高屏溪土樣、植生 1 個月、含水量 15%之樣本進行不同土層厚度之拉拔試驗。如圖 4-7。結果顯示，深盆植生之拉力比淺盆植生之拉力略大。但是整體來說，不同角度因子對拉拔力的影響程度及樣本土層厚度之影響需要更多支樣本進一步之研究。因此圖本研究暫不考慮拉拔角因子，僅針對其他影響因子進行分析比較。

第二階段根據不同土樣、不同植生時間、不同含水量等因子之試驗結果，將實驗求得 14 筆資料之平均拉拔力與每一影響因子之關係整理如表 4-4、表 4-5、表 4-6 所示。結果分析如下：

- 量 35%時，凝聚力有顯著增加。以不同植生時間而言，凝聚力從植生密度 1 株的 0.073~0.214(kg/cm²)增加至植生密度 8 株的 0.309~0.365(kg/cm²)。凝聚力大約增加 3.2~0.7 倍。
3. 如圖 4-5 與表 4-3，在固定了含水量以及植生密度，培植時間較久的土壤凝聚力明顯的比培植時間短的凝聚力來的大。同樣在高含水量 35%時此現象更為明顯，在不同植生密度下凝聚力由植生時間 30 日的 0.073~0.309(kg/cm²)增加至植生時間為 90 日的 0.214~0.365(kg/cm²)。凝聚力大約增加 1.9~0.2 倍。
 4. 由表 4-3 摩擦角之數據可看出在含水量 15%~25%時角度約維持在 39°~41°之間。當含水量到 35%趨於飽和時，除了植生 90 天密度 8 株之摩擦角例外，其餘摩擦角均降為 26°以下。結果顯示含水量增大會迅速降低土壤抵抗滑動之能力。

4.3 拉拔力試驗分析

第一階段依不同角度、不同土層厚度進行拉拔試驗，第二階段探討不同土樣、不同植生時

1. 由表 4-4 可知，兩種土樣植生 30 天樣本之拉拔力較看不出明顯差距。當植生時間增加至 60 天、90 天，學校土壤樣本之拉拔力約為高屏溪土壤植生樣本之 1.7~1.9 倍。
2. 表中資料顯示兩種土壤在根系發展穩定，較長植生時間 60, 90 天之情況下，含水量

表 4-5 學校土樣在各影響因子條件下之拉拔力

土樣 時間 含水量 次數	學校土樣								
	一個月			二個月			三個月		
	15%	25%	35%	15%	25%	35%	15%	25%	35%
1	0.4	0.6	0.4	2.3	1.9	2.0	13.2	6.6	4.8
2	0.7	0.7	0.4	2.5	2.4	2.0	13.3	7.5	6.0
3	0.8	0.8	0.6	3.6	2.6	2.1	13.5	7.9	6.0
4	0.8	1.0	0.6	3.6	2.7	2.2	14.0	8.3	6.6
5	0.9	1.1	0.7	4.0	2.7	2.2	14.2	9.1	7.2
6	0.9	1.1	0.8	4.1	2.8	2.2	14.5	9.2	7.5
7	0.9	1.2	0.8	4.4	2.9	2.3	14.5	10.0	7.9
8	1.0	1.2	0.9	4.6	3.2	2.8	15.6	10.1	8.0
9	1.0	1.3	0.9	5.1	3.6	3.0	15.7	11.2	8.2
10	1.2	1.3	0.9	5.4	3.9	3.0	18.0	11.2	10.0
11	1.5	1.4	1.0	5.6	3.9	3.2	18.5	13.4	10.9
12	1.6	1.5	1.2	6.2	4.0	3.3	19.2	13.7	11.2
13	1.7	1.8	1.2	9.1	4.1	3.6	22.0	15.3	11.2
14	2.0	1.8	1.7	9.8	4.8	4.9	22.5	17.2	13.4

越高，拉拔力相對的變小。學校土壤之樣本約降低 45~48%，高屏溪土壤約降低 39~53%。

3. 在根系發展穩定後，植生時間越長，因根系生長越趨發達，與土壤結合效果增強，所以拉拔力有增大的趨勢。由表中資料看出，在同樣含水量情況下，由植生時間 60 天增加至 90 天，學校土壤樣本拉拔力約增加 2.3~2.1 倍，高屏溪土壤樣本約增加 2.5~1.7 倍。

五、結論與建議

本研究花費相當之時間培養植生土壤樣本，除了記錄百喜草成長情況，並依據各影響因子條件進行直接剪力試驗及拉拔力試驗。所得之各項結果分析如前節所述。本節僅將較重要之結論摘要如下：

5.1 結論

1. 觀察百喜草於學校土壤培植初期成長速率較高屏溪土壤快，應是土壤本身肥力（土壤化學性質）不同之故。而生長至第 8 週時，其根系發展有遲緩現象，可能因根系受到

表 4-6 高屏溪土樣在各影響因子條件下之拉力

土樣 時間 含水量 次數	高屏溪土樣								
	一個月			二個月			三個月		
	15%	25%	35%	15%	25%	35%	15%	25%	35%
1	1.4	0.6	0.3	1.9	1.2	0.7	5.7	4.3	2.6
2	1.6	0.8	0.4	2.0	1.3	1.2	6.3	4.3	3.9
3	1.8	0.8	0.6	2.1	1.3	1.2	6.8	4.4	4.0
4	1.8	0.8	0.6	2.2	1.4	1.2	8.0	5.4	4.4
5	1.9	1.0	0.6	2.4	1.6	1.4	8.2	5.5	4.8
6	2.0	1.2	0.7	2.4	1.8	1.5	8.8	5.6	5.0
7	2.0	1.2	0.7	2.6	1.9	1.6	9.6	5.8	5.6
8	2.0	1.2	0.7	2.7	2.0	1.8	10.3	6.0	5.6
9	2.0	1.4	0.9	2.8	2.0	1.8	10.3	6.1	5.8
10	2.0	1.5	1.2	2.8	2.0	2.0	10.3	6.1	5.8
11	2.1	1.5	1.3	3.1	2.2	2.0	10.6	6.7	5.8
12	2.2	1.6	1.6	3.2	2.2	2.0	10.8	9.1	6.0
13	2.5	1.8	1.6	3.6	2.4	2.3	13.1	9.1	6.0
14	3.1	1.9	1.6	4.1	3.1	2.4	15.1	9.7	6.1

樣本盒深度阻礙，影響其向下發展的空間轉而往側向生長。百喜草根系發展為單生根式生長，觀察其支根部位需生長三個月以上才會與鄰近草株支根產生交結現象，且植生材料之凝聚力因此逐漸增加。

2. 土壤凝聚力，隨著含水量增加而減少。由含水量 15% 增加至 35%，其值約下降 87%~42%。且無根系之土壤亦有此情形，顯示土壤水份在影響土壤凝聚力有一定的作用存在。植生土壤之內摩擦角亦由含水量 15% 的 41° 下降至含水量 35% 時之 26°。顯示即使有植生根系土壤在飽和含水情形下，抵抗滑動之能力亦將減低甚多。
3. 土壤凝聚力隨著植生密度增加增強。亦隨著植生時間增加而增大。特別是在高含水量 35% 時，凝聚力有顯著增加。如果植生時間固定，凝聚力從植生密度 1 株增加至植生密度 8 株，凝聚力大約增加 3.2~0.7 倍。如果植生密度固定，則凝聚力由植生時間 30 日增加至植生時間為 90 日，凝聚力大約增加 1.9~0.2 倍。表示植生密度使土壤在飽和含水量時可顯著增加抵抗滑動之能力。

4. 兩種土壤在根系發展穩定，較長植生時間 60，90 天之情況下，含水量越高，拉拔力相對的變小。學校土壤之樣本約降低 45 ~ 48%，高屏溪土壤約降低 39~53%。在同樣含水量情況下，由植生時間 60 天增加至 90 天，學校土壤樣本拉拔力約增加 2.3~2.1 倍，高屏溪土壤樣本約增加 2.5~1.7 倍。

5.2 建議

1. 由於實驗設計只培育 3 個月的百喜草作為完全成長的情況，未來如有更充裕的時間，可以針對每項因子擴大探討範圍。
2. 因為溝渠或邊坡植生根系發展情形與在平地時不盡相同，本研究植栽方式為平地培植，建議往後研究能朝不同角度培植樣本，以更合乎實際生長環境。
3. 直剪試驗是採用小型直剪盒做為直接剪力試驗主要儀器，可能較不能客觀地呈現出現地植生情況，因此未來建議採用大型直剪，並增加植生單位面積之密度，以便更精確的反應出現地情形。
4. 在進行直剪試驗以高屏溪土壤做為植生材之培養土部分，試驗結果其凝聚力效果並不顯著，建議可採用更多樣化之土壤做為樣本培植參考。
5. 本研究在植生時間 30 天情況下所進行的拉拔力試驗，在考量土層厚度因子方面結果並不顯著，建議在植生時間二個月以上開始施做，較能顯現出根系力學特性。
6. 未來可針對植生複合材之透水速度、孔隙率進行正向透水率試驗，並且擴大渠槽試驗之規模應用於現地溝渠。加入材料之單價分析，進行成本評估。

參考文獻

1. 中興工程顧問公司(2000)河川保留基流量評估技術研究計劃(一)，2-16。
2. 李文權、李國堅(1975)台灣區百喜草(*Bahia grass, paspalum notatum*)品種特性之研究。中華水土保持學報，6(1)：1-10。

3. 吳正雄(1993)樹根力與坡面穩定關係之研究。中華水土保持學報，23-37。
4. 連惠邦、郭芳吟(2004)土工材料在河川工程上之應用。土工合成材料於生態工法之應用研討會，4-1 頁。
5. 廖綿濬、劉金龍、黃俊德(1970)草溝之研究。中華水土保持學報，1(1)。
6. 蔡光榮(1994)台灣西南部泥岩地區植生護坡之根系力學模式應用性探討。土工技術雜誌，48：49-62。
7. 顏正平、林信輝、周天穎(1983)水土保持應用草類生育習性及種子繁殖試驗。中華水土保持學報，7-19。
8. 蔡宗霖(2002)生態工法中預鑄混凝土護坡最佳植被之調查。逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文。
9. Jarrett, R. D. (1984) Hydraulics of high-gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(11): 1519-1539.
10. Kouwen, N. (1969) Flow retardance in vegetated channels. *Journal of Irrigation and Drainage Division*. ASCE 95(IR2).
11. Liu, W. C., M. H. Hsu, and C. F. Wang (2003) Modeling of flow resistance in mangrove swamp at mouth of tidal Keelung river. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE 129(2): 86-92.
12. Sepaskhah, A. R. and H. Bondar (2002) Estimation of Manning roughness coefficient for bare and vegetated furrow. *Biosystems Engineering*. 82(3): 351-357.
13. Tsujimoto, T., Y. Shimizu, T. Kitamura, and T. Okada (1992) Turbulent Open-Channel Flow over Bed Covered by Rigid Vegetation. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*. 10(2): 13-25.
14. Wormleaton, P. R. and M. Karmegam (1983) Parameter optimization in flood routing. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(12): 1799-1814.
15. Wu, F. C., H. W. Shen, and Y. J. Chou (1999)

Variation of roughness coefficient for Unsubmerged and submerged vegetation. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 125(9): 934-942.

收稿日期：民國 94 年 11 月 1 日

修正日期：民國 95 年 4 月 27 日

接受日期：民國 95 年 5 月 17 日