

山黃麻根系對土/根系統剪力強度之提升效果研究

林德貴^{(1)*} 黃伯舜⁽²⁾ 王勝賢⁽³⁾

摘要

依據山黃麻現地調查之根系結構，再利用數值工具可建構山黃麻土/根系統之二維數值模型，並進行現地土/根系統拉拔抗力試驗之數值模擬。藉由比對土/根系統拉拔抗力試驗之拉拔抗力~拔出量關係曲線(即 $P-L_p$ 曲線)及極限拉拔抗力值 P_u 後，得知數值模擬結果與實際量測成果之吻合度相當良好。隨之，再採用與拉拔抗力試驗相同之土/根系統數值模型，進行直接剪力試驗之數值模擬，並推估土/根系統之抗剪強度增量值 ΔS_r 。最後，採用 P_u 與 ΔS_r 之數值模擬成果，即可建置土/根系統極限拉拔抗力 P_u 與相應之土/根系統抗剪強度增量 ΔS_r 之力學關係式，即 $\Delta S_r=f(P_u)$ 關係函數。此關係函數，在植生邊坡穩定性量化分析上提供了一套方便之土/根系統力學轉換模式，其將土/根系統之拉拔抗力試驗成果直接轉換為抗剪強度增量。此抗剪強度增量可直接運用於植生邊坡之二維穩定性分析上。同時，在未來吾人針對不同植生植物土/根系統之既有大量現地拉拔抗力試驗資料庫，來建置其個別之 $\Delta S_r=f(P_u)$ 關係函數時，本研究所提之建置作業程序，將可作為一相當實用之參考範例。

(**關鍵字**：土/根系統、拉拔抗力試驗、數值模型、抗剪強度增量、力學轉換模式)

The Effect of Indiacharcial Trema Root on the Shear Strength Increment of Soil/Root System

Der-Guey Lin⁽¹⁾ *Bor-Shun Huang*⁽²⁾ *Sheng-Hsien Wang*⁽³⁾

Professor⁽¹⁾ and Doctoral student⁽²⁾⁽³⁾, Department of Soil and Water conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan ROC

ABSTRACT

In this study, two dimensional (2-D) finite element numerical simulations were carried out on the pull-out resistance and the shear strength of soil/root system of Indiacharcial trema. Based on the field investigations of Indiacharcial trema root morphology, one can establish a 2-D numerical model of soil/root system to simulate the pull-out test at field site. It was indicated the simulated pull-out

(1) 國立中興大學水土保持系教授，通訊作者 e-mail: dglin@dragon.nchu.edu.tw

(2) 國立中興大學水土保持系博士研究生

(3) 國立中興大學水土保持系博士研究生

resistance versus pull-out displacement curve (or $P\sim L_p$ curve) and the ultimate pull-out resistance P_u are in good agreement with those from measurement. Subsequently, a 2-D numerical model of soil/root system identical with the pull-out test was repeatedly used for the simulation of direct shear test to estimate the shear strength increment ΔS_r resulted from root system. Eventually, using the numerical results of P_u and ΔS_r values, a mechanical relationship between P_u and ΔS_r (or $\Delta S_r=f(P_u)$ function) for soil/root system are proposed. The relationship offers the stability analysis of vegetated slope a convenient mechanical conversion model which enables a direct transformation of pull-out resistance into shear strength increment of root system and an immediate application to 2-D slope stability analysis. As a result, to establish an individual $\Delta S_r=f(P_u)$ function for various plant roots using the large quantity of existing data bank from in-situ pull-out test in near future, it is suggested to regard the proposed working procedures as a practical and useful reference example.

(Key words: soil/root system, test of pull-out resistance, numerical model, shear strength increment, mechanical conversion model)

前言

爲了量化土/根系統中，根系對土壤的加勁效果以及對邊坡穩定性的影響，有必要藉由土/根系統之直接剪力試驗來求取土/根系統之抗剪強度增量。然而，現地土/根系統直接剪力試驗由於試坑開挖及試體準備相當費力耗時，且試體易受擾動試驗儀器組裝亦較複雜。同時，由於土/根系統直接剪力試驗成果之數量較少，因此其代表性亦相對較低。反之，相較於直接剪力試驗，現地土/根系統根系拉拔抗力試驗之執行程序簡易快速，亦能獲得較多之試驗數量及較高之代表性。因此，建立根系極限拉拔抗力與其抗剪強度增量之轉換機制，即變得相當有必要性。本研究期望藉由數值程序來建立根系極限拉拔抗力與其抗剪強度增量之轉換機制，並將此轉換機制運用於植生邊坡穩定分析中根系力學參數之決定上，使整體分析能更迅速且有效率地來執行。

文獻回顧

2.1 根系力學試驗

植物根系之生長受氣候、地質、地形及齡期之影響，根系材料之物理及力學特性則具有高度隨機性，縱使同一種類之植物在不同環境之下也存在相當之差異。在植生工程之工法分析中之土/根系統，其力學特性一般較不易進行定量分析。因而，透過大量的根系力學試驗以及根系力學數值驗證即可針對土/根系統之工程特性進行量化檢核。根系力學試驗在根系力學理論公式之建立及驗證上，亦有其必要性。

根系力學試驗包含根系拉拔(pull-out)試驗、單根拉力試驗、土/根(土/根系統)直剪(direct shear)試驗等。以上三種試驗皆爲植生邊坡穩定分析，決定強度參數所必須進行之試驗。由於根系力學試驗程序目前並無標準規範可依循，因此，在試樣準備方式、試區條件、加載速率、操作程序及儀器設備組裝等，皆因人因地而異。

2.1.1 單根拉力強度試驗

早期，Waldron(1977, 1981)即有利用機械式拉力試驗機(Instron model 1130 拉力試驗機)

進行根系拉力試驗，近期則有多數學者，包含吳正雄(1990, 1993)採用 JJ 公司之 T5K 萬能試驗機，林信輝(1995)採用 HT-9012 型萬能試驗機，陳秀婷(2006)採用根系水平拉力握裹試驗儀，許家賓(2008)採用 Shimadzu 公司之 Ag-10tg 拉力試驗機，V. Operstein & S. Frydman(2000)採用簡易式靜載試驗機，針對多種植物根系進行試驗與分析。

進行單根拉力強度試驗時，使用一般平面夾片或錐形夾片之夾具，常發生根系於夾具處斷裂，原因多半由於夾具之挾持力造成根樣局部開裂，因而產生集中應力，或因根樣之表皮於試驗時剝落，使試驗時根樣自夾具滑脫，這些將導致根系拉伸強度之低估。因此，在夾具方面之設計，可參考 Operstein & Frydman(2000)之做法(夾具採用直徑 30mm 之圓管，根樣置於管中心軸後，以環氧樹脂及小石料混合材灌滿固定)，或於根樣與夾具間使用適當的保護墊片，避免根樣於夾具端斷裂。

2.1.2 現地根系拉拔試驗

現地根系拉拔試驗方面，林信輝(1995)採用日製人工拉拔機，Operstein & Frydman(2000)採用手拉式彈簧秤及油壓式千斤頂進行拉拔試驗。近期如賴俊帆(2007)、宋熙辰(2008)採用日製荷重元及 SMD-10A 引拔荷重紀錄器與電腦連線以繪製根力拉拔抵抗力及拉出量之歷程。

2.1.3 土/根系統直接剪力試驗

直接剪力試驗之力學行為最接近坡地滑動時，土/根系統之受剪狀態。可利用現地直接剪力試驗來求取根系對土壤所造成之抗剪強度增量，其為植生邊坡穩定分析中，必須使用之最重要參數。

Waldron(1977, 1981)、Operstein & Frydman(2000)等採用大型直接剪力儀，進行試驗室內之土/根系統壤直接剪力試驗；Wu et al.(1988)、吳正雄(1991, 1993)、阿部侑時(1996)等人利用油壓式千斤頂等設備，自行設計現地適用之試驗儀器進行根系之現地直接剪力試驗。許家賓(2008)則以直接剪力儀、直剪儀動力控制器及資料自動擷取系統等儀器來進行試驗。在土壤直接剪力試驗速率方面，因試驗有分為快剪、壓密快剪以及壓密慢剪，就國家標準之程序而言，快剪、壓密快剪試驗剪動速率為 1.5 mm/min，壓密慢剪則為 0.06 mm/min；各研究人員進行之含根直剪則在 0.1~20 mm/min 之間。

2.2 根系力學數值模擬

2.2.1 現地根系拉拔試驗數值模擬

Dupuy et al. (2005)採拓樸學(topology)將根系形態(root morphology)依主根、側根分枝方式分為三類，並以有限元素數值分析程式進行根系拉拔試驗，據而提出不論植物根型，其皆可以根系單根直徑 d 及根系分枝數量 n 來有效預測拉拔抵抗力。由此顯見，在一定之體積量下，側根之量將可決定根系拉拔能力。林德貴等(2007, 2008)採用根系轉換加勁材料(reinforced material)之方式進行現地拉拔試驗之數值模擬，就其模擬成果可知，紫花苜蓿根系較長時，具有較強之抗拔能力。桂竹為數較多且分布較廣之鬚根，在拉拔試驗初期能提供較佳之錨錠效果，但也因此在根系拔出過程中，帶動大範圍之土體上移，使土體發生大變形破壞，所以試驗中期之後根系錨錠效果迅速下降。

2.2.2 土/根系統直接剪力試驗數值模擬

Operstein & Frydman(2001)、何昱昀

(2004)、林德貴等(2006、2008)採用根系轉換加勁材料(reinforced material)之方式進行土/根系統直剪試驗之數值模擬。其中，Operstein & Frydman(2001)使用數值模擬程式 FLAC 來分析根系加勁土壤的適用性。由於數值模擬結果與試驗量測值具有相當的吻合度，因此，利用數值模擬分析根系加勁土壤力學行為是可行的。何昱昀(2004)於實驗室直剪試驗研究成果指出，由於土壤組合模式先天性的限制，造成初期抗剪力有驟增的現象外，當位移量漸增時模擬結果與實驗數據會漸趨於一致。林德貴等(2008)據研究成果提出根系在提供土壤抗剪強度增量方面，與原土壤之摩擦角關連性不大。此亦驗證過去研究，將根系提供之土壤抗剪強度增量歸諸於土壤凝聚力增量之適宜性。

研究方法

參考 Operstein et al. (2001)、何昱昀(2004)、黃伯舜(2005)等人過去研究成果可建立研究方法。首先，本研究採用 PLAXIS 二維平面應變有限元素法，針對現地之山黃麻根系拉拔抗力試驗(pull-out resistance test)進行拉拔抗力行為之數值模擬。模擬分析中，依據現地根系拉拔試驗成果，配合植物根系圖鑑，可建立土-根系統之簡化數值模型，並參考既有根系力學模式及數值分析方法，發展一套數值程序來模擬現地根系拉拔試驗之拉拔抗力~拔出量關係。藉由數值模擬結果與試驗量測成果(拉拔抗力~拔出量關係曲線)之比較，來確認數值程序之可靠性及準確度。隨即採用相同之數值模型，進行土/根系統直接剪力數值模擬。由土/根系統直接剪力試驗之模擬成果，可決定其抗剪強度增量，並利用於土/根系統極限拉拔抗力與抗剪強度增量間關係之推導。本研究之工作流程，如圖 1 所示。

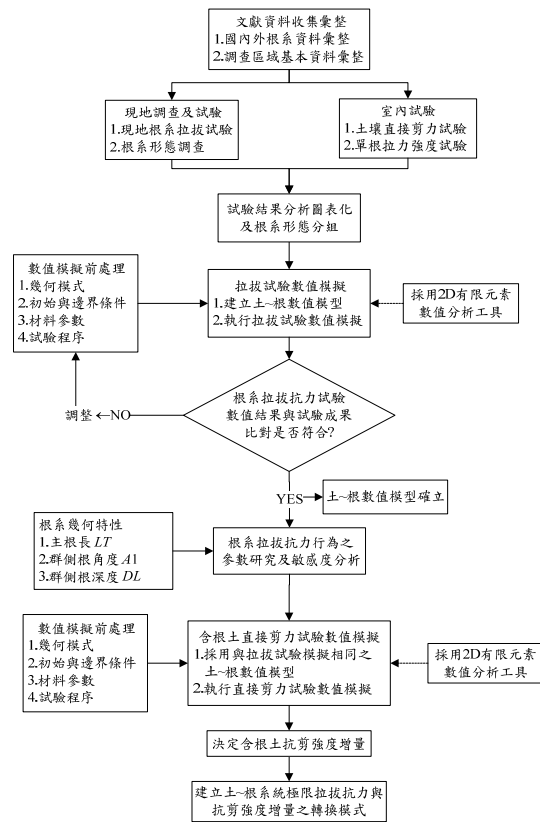


圖 1 研究工作流程圖

Figure 1. Flow chart of research work

於根系力學試驗中，包含根徑、根長、單根拉力、楊氏模數...等根系參數以及土壤參數中之單位重量、凝聚力及摩擦角...等，皆會影響其試驗結果。本研究利用經驗證之數值模擬程序，進行有系統的參數研究，而不必透過準備工作極為費時之根系力學試驗，來分析及評估相關參數在土壤-根系應力-應變互制行為之影響性。

3.1 試驗資料收集及彙整

3.1.1 試區選定

本研究選定兩處試驗區，分別位於桃園縣復興鄉羅浮村台七線 24 km 及高坡地區台七線 27

km 處，試驗區屬石門水庫集水區之範圍，位於北橫公路旁。

3.1.2 研究標的植生

山黃麻(*Trema orientalis* (L.) Blume)，英名：*Indiacharcoal trema*，俗名山油麻、異色山黃麻。為落葉大喬木，產在臺灣平地至海拔 1000 m 以下之開墾、伐採或崩塌跡地。分布於中國大陸、印度、馬來西亞。並為崩場地優勢物種、陽性先驅樹種之一，在崩場地能快速形成純林群落，但約 30 年即老化而被其他數種取代，並可做為泥岩地區造林之植生材料。本種移植不易，以直播為宜。性喜向陽地，耐旱，生長快速。

依據顏正平(2000, 2004)根系分布基本型態分類之相關研究可知，山黃麻屬於平行型(P-type)，特性為根性生長深度為淺至中層。超過 80% 根系分布在距地表 30 cm 深度範圍內。根系延伸型態為平行於坡面，並且在側向之分布較寬廣。依現場調查結果得知，山黃麻根系基本型態主要是以水平根為主，主要係由主根、群側根及深側根所構成。其中，群側根係指主根淺層處發展之根系；深側根係指主根較深處生長之根系，如圖 2 所示。山黃麻主根長約 6~50 cm、直徑界於 2~12 cm。群側根之生長深度約為 0.5~8 cm，側向長度約為 30~140 cm、根徑界於 0.5~5.5 cm，與主根之夾角約為 48°~87°。深側根側向長度約 15~100 cm，根徑界於 0.4~3 cm，與主根之夾角約為 19°~85°。

3.2 土根系統力學試驗

3.2.1 單根拉力強度試驗

本試驗將由試驗區所取得之植物根系材料中選取完整根系樣本進行試驗。首先將取出之根系置入封口袋中並加以冷藏，以保持其濕度和新

鮮度。並於三日內完成室內單根拉力強度試驗。試驗採用電腦伺服材料試驗機 GT-AI-700-L。由試驗獲得之成果，可用以推導根徑~單根極限拉力之關係式。



圖 2 山黃麻植株地下部

Figure 2. Rhizome of trema

3.2.2 現地根系拉拔抗力試驗

針對山黃麻進行現地拉拔試驗，以獲得根系之拉拔抗力~拔出量關係曲線，以及根系極限拉拔抗力。本試驗之執行程序及使用設備，詳述如下：

1. 將植株周圍枯枝落葉、雜草等清除乾淨。
2. 在適當位置(約距地面 30 cm)，砍除植株地上部。
3. 用電鑽在植株體鑽洞，鑽孔直徑必須大於鋼桿直徑。鑽孔完成後，將鋼桿插入洞口，並在鋼桿上下處，各束一紮實之套環，以防拉拔力量過大，造成植株體破裂。
4. 將定速率拉拔系統水平架設於植株體正上方，並連接荷重元(load cells, 荷重容量 5 t)及吊鈎，再將特別訂製之鋼索(吊掛容量 2 t)與吊鈎連結，並繫束於鋼釘兩側。儀器架設方式

如圖 3 所示。

5. 荷重計則先連接拉拔荷重紀錄器後，與電腦串接並設定每 5 秒紀錄拉拔抗力及其對應之拔出量一次。
6. 拉拔試驗完成後，將根系土壤清洗乾淨，再進行拍照及植物根系形態調查。



圖 3 現場根系拉拔抗力試驗設備

Figure 3. Equipment of pull-out resistance test of root system

3.2.3 現地土壤直接剪力試驗

為決定試驗區土壤之力學參數(凝聚力 c 及摩擦角 ϕ)，於選定之調查區域，採用薄壁鋼圓管進行土壤採樣，以進行直接剪力試驗。試驗中，採用 4 組(50 kPa、100 kPa、150 kPa 及 200 kPa)不同之正向應力(σ)施加於剪力盒上，並設定剪動速率 1.5 mm/min，依序測定最大剪應力(τ)，再以 4 組不同正向應力(σ)與所對應之最大剪應力(τ)求得其迴歸式，並找出其對應之 c 值與 ϕ 角。

3.3 現地拉拔抗力試驗數值模擬

本研究採用 PLAXIS 二維平面應變有限元

素法，依據現地山黃麻根系調查結果與山黃麻根系圖鑑可建構簡化之根系數值模型以進行山黃麻土/根系統之現地根系拉拔抗力試驗之模擬。首先，於根系主根與地面接觸處施加 0.1 kN 之向上拉拔力以模擬定速率拉拔系統所施之作用力。隨之，再持續以等增量方式逐步施加拉拔力來進行模擬。最後，藉由拉拔抗力~拔出量關係曲線(即 $P-L_p$ 曲線)及極限拉拔抗力 P_u 之模擬值與量測值之比對，以驗證數值模擬程序之可靠性。

3.3.1 數值模型

1. 幾何模式

有限元素數值模型之尺寸為 14 m×7 m (=寬×高)，有限元素網格，如圖 4 所示。

2. 邊界條件

在拉拔抗力試驗模擬過程中，遠離拉拔試區之邊界土體之位移量極小可忽略。因此，將數值模型之左側、右側及底側邊界設定為雙向位移約束邊界(即水平位移量 $\Delta X=0$ 及垂直位移量 $\Delta Y=0$)。

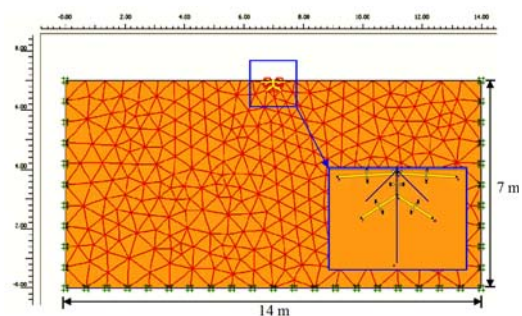


圖 4 土/根系統拉拔抗力試驗有限元素網格

Figure 4. Finite element mesh of pull-out resistance test of soil/root system

3.3.2 輸入參數

1. 土壤

土壤模式之材料組合律採用莫爾-庫倫 (Mohr-Coulomb) 破壞準則及彈性~完全塑性 (elastic perfectly plastic) 應力~應變關係。試驗區土壤於實驗室直接剪力試驗結果，得凝聚力 $c=23.5$ kPa，摩擦角 $\phi=21.3^\circ$ 。

膨脹角 ψ 依據經驗，一般粘土之 $\psi \approx 0^\circ$ ；砂土之 ψ 角則依土壤之單位體積重及摩擦角 ϕ 而定。一般含石英之砂質土，在 $\phi > 30^\circ$ 時， $\psi = (\phi - 30^\circ)$ ；而 $\phi < 30^\circ$ 時， $\psi \approx 0^\circ$ 。對於非常疏鬆之砂土，其 ψ 角可能為一很小之負值 ($\psi \approx 0^\circ$ 且 $\psi < 0^\circ$)。本研究採用 $\psi = 0^\circ$ 。楊氏模數 $E_s = 5000$ kPa、松柏比 $\nu = 0.3$ 。土/根界面強度 $c_{int} (=R_{int} \times c)$ 及 $\phi_{int} (=R_{int} \times [\tan^{-1} \tan \phi])$ ，採用土壤強度 c 及 ϕ 之 80% 輸入，即強度折減參數 $R_{int} = 0.8$ 。土壤材料參數輸入值，如表 1 所示。

2. 根系參數

依據現地根系調查結果與圖鑑資料可建構簡化之根系數值模型，並依相關試驗成果設定根系材料參數，如表 2 所示。山黃麻之根系圖鑑及數值模型幾何模式分別如圖 5 及圖 6 所示。其中， DL 及 LT 分別為群側根及深側根位置之深度。而 $A1$ 及 $A2$ 分別為群側根及深側根之擴展角度。

表 1 數值模擬之土壤材料參數

Table 1. Input of soil model parameters for numerical simulation

c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	ν	E_s (kPa)	γ_{sat} (kN/m^3)	R_{int}
23.5	21.3	0	0.3	5000	20	0.8

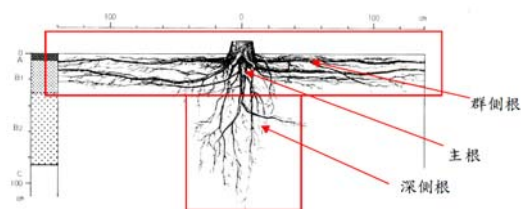


圖 5 山黃麻根系圖鑑

Figure 5. Rhizomatous illustration of trema

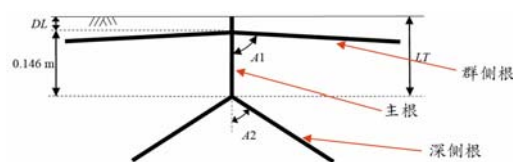


圖 6 山黃麻根系數值模型(幾何模式-1)

Figure 6. Rhizomatous numerical model of trema (geometry model -1)

根系之單根極限拉力 t 可由單根拉力試驗所得之回歸公式: t (kN) = $0.0263 \times (d)^{1.88}$ 來決定。在數值模型中，依主根、群側根及深側根之直徑可計算其對應之極限拉力。根系材料之楊氏模數 E_r 值可依據單根拉力試驗所得之應力~應變曲線來決定，其值約為 815 kPa ($=E_r$)。主根、群側根及深側根皆以土工織物元素 (geotextile element) 來進行模擬，其材料參數以輸入軸向勁度為主，即 $E \times A \neq 0$ ，而無撓曲勁度，即 $E \times I = 0$ ，其參數輸入值，如表 2 所示。根系數值模型之基本形態，如圖 6 所示。調整根系數值模型基本形態中側根之有、無及其與主根之夾角，並將其分為 6 組，如表 3 及圖 7 所示，再針對各組分別進行數值試驗及敏感度分析。

3.3.3 數值模擬分析之執行

執行根系拉拔抗力數值模擬時，先於根系主

根與地面接觸處施加垂直向上之拉拔力增量，並記錄該拉拔抗力增量所對應之拔出增量，直至總施加之拉拔抗力達極限拉拔抗力（拔出量達 40 mm 時所對應之拉拔抗力或根系周圍土壤之應力達塑性點）為止。

表 2 數值模擬之根系材料參數
Table 2. Input of rhizomatous parameters for numerical simulation

部位	d (cm)	a (cm^2)	L (cm)	E_r (kPa)
主根	2.2	3.80	17.3	815
群側根	1.5	1.77	39	815
深側根	1	0.79	27.6	815

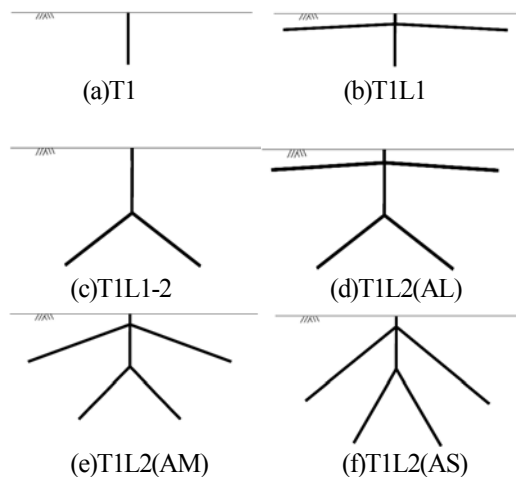


圖 7 山黃麻根系數值模型(幾何模式-2)

Figure 7. Rhizomatous numerical model of trematoma (geometry model -2)

3.4 土/根系統直接剪力試驗數值模擬

在完成拉拔抗力試驗數值模型之驗證後，隨即採用同一組數值模型，進行土/根系統直接剪力數值模擬。由土/根系統直接剪力試驗之模擬成果，可決定其抗剪強度增量，並運用於土/根系統極限拉拔抗力與抗剪強度增量間關係之推

導。

表 3 根系拉拔抗力試驗數值模擬之根系形態
Table 3. Rhizomatous type for numerical simulation of pull-out resistance test

組別	T1	T1L1	T1L1-2	T1L2 (AL)	T1L2 (AM)	T1L2 (AS)
LT (cm)	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3
DL (cm)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
$A1(^{\circ})$	-	87	-	87	70	50
$A2(^{\circ})$	-	-	57	57	45	30

3.4.1 數值模型

1. 幾何模式

整體有限元素數值模型之尺寸為 14 m×7 m(=寬×高)，直剪試區之尺寸為 1.5 m×0.2 m(=寬×厚)，如圖 8 所示，而根系數值模型之有限元素網格，如圖 9 所示。

2. 邊界條件

在直接剪力試驗模擬過程中，遠離直剪試區之邊界土體位移量極小可忽略。因此，將數值模型之左側、右側及底側邊界設定為雙向位移束制邊界(即水平位移量 $\Delta X=0$ 及垂直位移量 $\Delta Y=0$)。

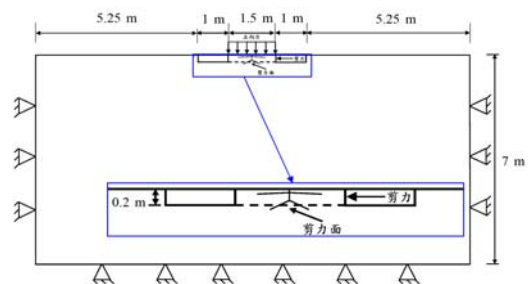


圖 8 土/根系統直接剪力試驗數值模型

Figure 8. Soil/root numerical model of direct shear test

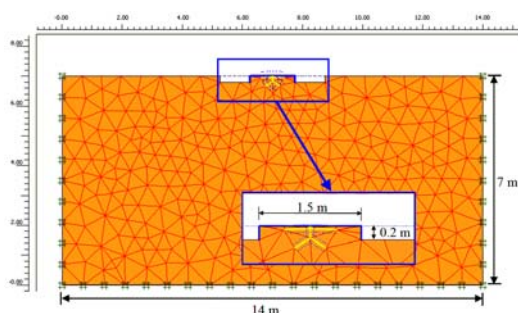


圖 9 土/根系統直接剪力試驗有限元素網格
Figure 9. Finite element mesh of direct shear test of soil/root system

3.4.2 輸入參數

1. 土壤

採用表 1 與土/根系統拉拔抗力試驗數值模擬相同之土壤參數。

2. 根系參數

採用表 2 與土/根系統拉拔抗力試驗數值模擬相同之根系材料參數，並選定 T1L2(AL)、T1L2(AM)及 T1L2(AS)等 3 組之幾何形態來進行模擬。

3. 剪力盒參數

土/根系統直接剪力試驗數值模擬中，於直剪試區邊界，採用厚 1 cm 之鋼板作為剪力盒，其楊氏模數 $E_{steel}=200$ GPa，泊松比 $\nu_{steel}=0.25$ 。

3.4.3 數值模擬分析之執行

直接剪力試驗數值模擬共進行 3 組，每 1 組採 3 個作用正向應力 σ 來進行模擬。首先，於直剪試區施加之正向應力 $\sigma=\Delta\sigma+W$ 。其中， $\Delta\sigma$ =正向應力增量， W =土體覆土壓力。3 個作用正向應力之增量 $\Delta\sigma$ 分別設定為 5 kPa、10 kPa 及 30 kPa。因 $W=0.2$ m (直剪試區土壤厚度) \times 18

kN/m³ (土壤單位重)=3.6 kPa，故 3 個作用正向應力 σ 分別為 8.6 kPa、13.6 kPa 及 33.6 kPa。試驗模擬開始時，於直剪試區之施力側逐級施加推力，直至剪斷面之剪應力達尖峰剪應力為止。

結果與討論

4.1 現地根系拉拔抗力試驗模擬成果

根系於土中之生長具有隨機性，因此，不易以其實際生長形態來建構數值模型。本研究依據現地調查之山黃麻根系生長形態並配予特定根徑 d ，來建構等值根系數值模型以進行拉拔抗力試驗數值模擬。同時，計算拉拔抗力~拔出量之關係曲線，再與試驗量測曲線進行比對，以驗證數值程序之有效性。

拉拔抗力試驗數值模擬中，T1L2(AL)組不同階段之土/根變形模式、數值模擬之土/根系統之土壤垂直位移等值圖分布，分別如圖 10、11 所示。6 組數值模擬與 4 組現地試驗之拉拔抗力~拔出量之關係曲線，如圖 12 所示。由數值模擬成果可得下列結論：

1. 由圖 10 可見，包圍根系周遭之虛線代表有限元素法之界面元素(interface element)，其功能在使土/根系統在受到較大拉拔力作用並發生大量位移時，可造成土壤與根系間之相對滑移(或相對位移)。如此，將使山黃麻土/根系統之拉拔抗力行為更切合實際。
2. 由圖 11 可知，主根承受拉拔力後其周圍土壤之向上位移量最大。根系周圍土壤之向上位移等值圖以主根為中心，隨著深度增加呈 U 字型分布，並逐漸向外擴張，但向上位移值則隨著深度增加而逐漸變小。此結果說明，現地拉拔抗力試驗中，拉拔力係直接施加於

主根上，因此，主根之拔出位移量最為顯著，並造成其周邊土體之位移量亦相對較大，此效應隨著根系深度與根系寬度之增加而遞減。因此，土壤之向上位移等值圖呈現如上述之U字型分布。

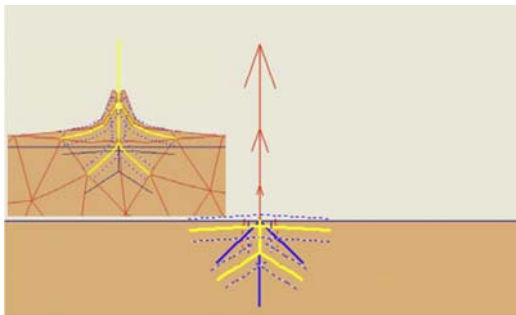


圖 10 土/根系統拉拔抗力試驗數值模擬有限元素網格變形($P=0.8$ kN, $L_p=32.72$ mm)
Figure 10. Deformation of finite element mesh of pull-out resistance test of soil/root system ($P=0.8$ kN, $L_p=32.72$ mm)

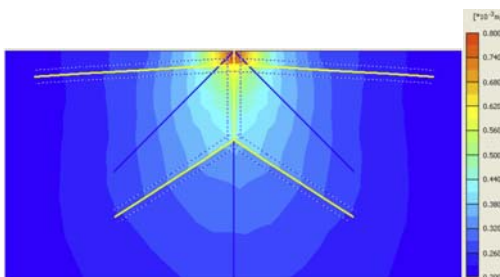


圖 11 土/根系統之土壤垂直位移等值圖 ($P=0.8$ kN)
Figure 11. Contour of vertical displacement of soil/root system ($P=0.8$ kN)

3. 由 T1L2(AL)、T1L2(AM)及 T1L2(AS)等 3 組數值模擬之根系抗拔拉力~拔出量關係曲線之斜率比較可知，在拉拔抗力試驗前期(拉拔抗力 < 0.4 kN)，三組根系之錨碇效果大致相

同，但於中後期(拉拔抗力 > 0.4 kN)，雖然根系之錨碇效果隨著根系之側根擴展角 A1、A2 之增加而有提升，但提升幅度相當有限，如圖 12 所示。

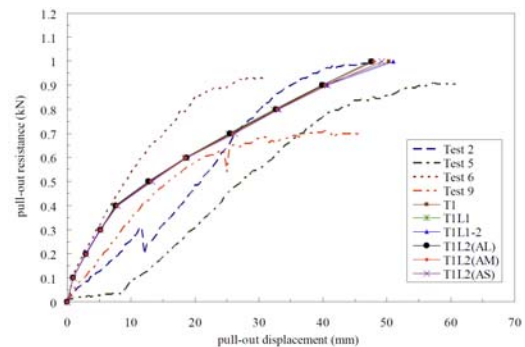


圖 12 現地拉拔試驗及數值模擬之拉拔抗力~拔出量關係曲線 ($P\sim L_p$ 曲線)
Figure 12. Relationship of pull-out resistance~pull-out displacement of pull-out test from field measurement and numerical simulation ($P\sim L_p$ curves)

4.2 土/根系統直接剪力試驗模擬成果

土/根系統直接剪力試驗數值模擬採用 T1L2(AL)、T1L2(AM)及 T1L2(AS)等 3 組根系模型，以及與根系拉拔抗力試驗數值模擬相同之土壤進行模擬。於逐次加載過程中，T1L2(AL)組於作用剪力=43.2 kN，水平剪位移=19.5 mm 下，其土/根變形模式、數值模型之水平方向(X 方向)位移及剪應力分布，分別如圖 13~15 所示。

圖 16 為三組土/根系統直接剪力模擬試驗成果之剪應力~正向應力 ($\tau\sim\sigma$) 關係。其中，T1L2(AL)組所得之土/根系統剪力強度方程式： $\tau=29.1+\sigma\tan 20.32^\circ$ ；式中， τ 及 σ 單位為 kPa。T1L2(AM)組所得之土/根系統剪力強度方程式

： $\tau=28.2+\sigma\tan 20.59^\circ$ ；T1L2(AS)組所得之土/根系統剪力強度方程式： $\tau=27.7+\sigma\tan 20.95^\circ$ 。而原土壤之剪力強度方程式： $\tau=23.5+\sigma\tan 21.3^\circ$ 。比對三組土/根系統及無根土之剪力強度方程式，可得根系對土壤提供之抗剪強度增量 ΔS_r ，分別為：T1L2(AL)組之 $\Delta S_r=5.6$ kPa，T1L2(AM)組之 $\Delta S_r=4.7$ kPa，以及 T1L2(AS)組之 $\Delta S_r=4.2$ kPa。由直剪試驗數值模擬成果可驗證，根系對土壤之加勁作用主要是增加土壤之凝聚力 c ，而對土壤之摩擦角 ϕ 則影響不大。

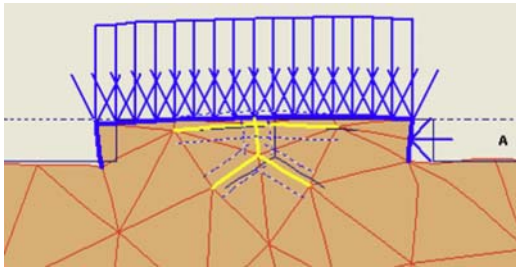


圖 13 土/根系統直接剪力試驗數值模擬有限元素網格變形

Figure 13. Deformation of finite element mesh of direct shear test of soil/root system

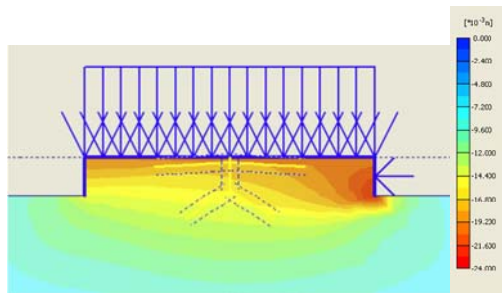


圖 14 土/根系統直接剪力試驗數值模擬水平方向位移等值圖

Figure 14. Contour of horizontal displacement from numerical simulation of direct shear test of soil/root system

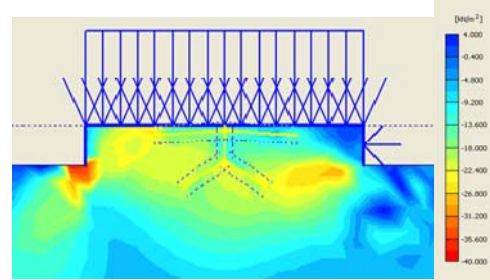


圖 15 土/根系統直接剪力試驗數值模擬剪應力 (τ_{yx}) 分布等值圖

Figure 15. Contour of horizontal displacement from numerical simulation of direct shear test of soil/root system

4.3 根系極限拉拔抗力與土/根系統剪力強度增量之轉換程序

土/根系統之剪力強度公式： $S_r=c+\Delta S_r+\sigma\tan\phi$ ，其中，根系對土壤剪力強度之貢獻即為抗剪強度增量 ΔS_r 。為求得根系極限拉拔抗力 P_u 與抗剪強度增量 ΔS_r 間之關係，本研究針對山黃麻之根系，以 T1L2(AL)、T1L2(AM)及 T1L2(AS)之模擬成果，推導根系 $\Delta S_r=f(P_u)$ 關係式如下：

$$\Delta S_r=m \times \ln P_u+n$$

式中，

- ΔS_r = 抗剪強度增量(kPa)
- P_u = 根系極限拉拔抗力(kN)
- m = 為轉換參數，與植生種類有關。
- n = 為轉換參數，與植生種類有關。

T1L2(AL)、T1L2(AM)及 T1L2(AS)之根系拉拔抗力及土/根系統直接剪力試驗數值模擬成果，如表 4 所示。藉由表 4 資料，可繪製山黃麻根系 $\Delta S_r=f(P_u)$ 之關係，如圖 17 所示。據此可求得轉換參數 m 及 n 分別為 159.6 及 22.5。

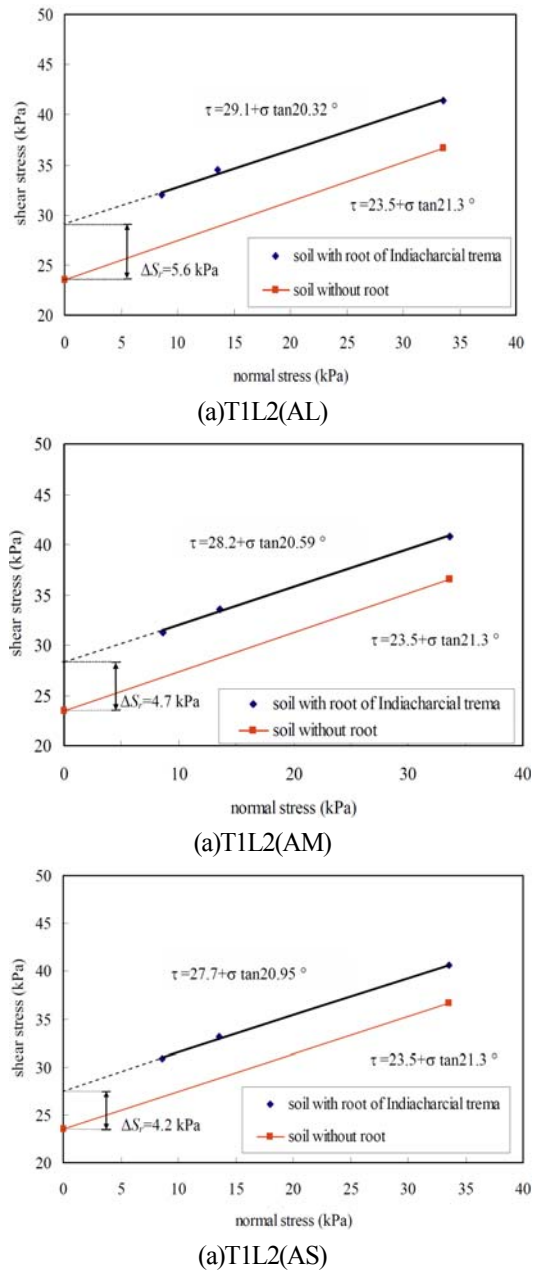


圖 16 無根土及土/根系統直接剪力試驗數值模擬剪力強度包絡線

Figure 16. Shear strength envelope of numerical simulation of direct shear test with and without root system

表 4 土/根系統拉拔抗力及直接剪力試驗數值模擬成果

Table 4. Numerical results of pull-out resistance and direct shear test of soil/root system

組別	土/根系統拉拔抗力試驗	土/根系統直接剪力試驗
	P_u (kN)	ΔS_r (kPa)
T1L2(AL)	0.8988	5.6
T1L2(AM)	0.8956	4.7
T1L2(AS)	0.8915	4.2

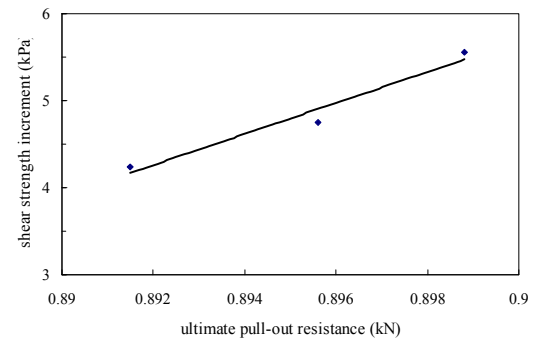


圖 17 極限拉拔抗力與剪力強度增量關係
Figure 17. Relationship of ultimate pull-out resistance and shear strength increment

結論與建議

5.1 結論

1. 山黃麻根系之拉拔抗力模擬曲線之模擬結果與試驗成果相當吻合。由此可確認本研究提之根系數值模型及其材料參數輸入值可有效反應山黃麻土/根系統之拉拔抗力行為。
2. 據土/根系統拉拔抗力試驗數值模擬成果顯示，主根之拔出位移量最為顯著，並造成其周邊土體位移量亦相對較大，此效應隨著根系深度與根系寬度之增加而遞減。

3. 藉由有效之土/根系統數值模型及數值模擬成果，可推導山黃麻土/根系統極限拉拔抗力 P_u (kPa)與抗剪強度增量 ΔS_i (kPa)之關係式(即 $\Delta S_i=f(P_u)$ 關係函數)，如下所示：

$$\Delta S_i=159.6 \times \ln P_u+22.5$$

4. 上述 $\Delta S_i=f(P_u)$ 關係函數，可直接運用於山黃麻植生邊坡穩定性量化評估之分析中。
5. 由直剪試驗數值模擬成果可驗證，根系對土壤之加勁作用主要是增加土壤之凝聚力 c ，而對土壤之摩擦角 ϕ 則影響不大。因此，可將根系之影響完全歸諸於凝聚力分量部份。本結果可同時驗證過去研究，將根系提供之土壤抗剪強度增量歸諸於凝聚力增量之論點。

5.2 建議

1. 本研究未加入降雨、入滲、地下水位之影響，以及風力、地震等因素，此等方面之問題可於未來研究中納入探討。
2. 本研究採用二維平面應變程式進行模擬分析，雖其建置模型和程式計算之時間均較三維數值程式簡易且快速，與現地試驗成果之比對亦相符合，但二維幾何模型之建構上有其限制，因為在二維計算前、後皆必須考慮實際三維之條件及數值解轉換(二維解轉換為三維解)。因此，未來土/根系統之數值分析有必要朝三維分析方面來發展。
3. 由於植生種類繁多，因此，需要有系統地彙整大量之根系形態、物理性質、根系力學特性等資料，才能有效地建構各類植生之根系力學資料庫，以供未來植生復育及坡地工程相關從業人員參考。

誌謝

本論文部份資料引用行政院農業委員會水土保持局之「2010 植物根系於邊坡穩定力學行為之研究」計畫成果，並承蒙其經費補助，謹此致謝。

參考文獻

1. 宋熙辰(2008)，「桂竹林根系特性與其引拔力學關係之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
2. 何昱昀(2004)，「根系對土壤加勁效果之數值模擬」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
3. 吳正雄，(1990)，「崩場地優勢草本植物根力特性之研究」，中華水土保持學報，21(1):27-54。
4. 吳正雄、陳信雄(1991)，「台灣杉根力與坡面穩定關係之研究」，中華林學季刊，24(1):27-40。
5. 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 24(2):23-37。
6. 阿部和時(1996)，「由現地直接剪力試驗探討根系抑制坡面崩壞效果之研究」(日文)，日本綠化工學會誌，22(2):95-108。
7. 林信輝(1995)，「山鹽菁與山水柳在石灰石礦區之生長與根力特性之研究」，水土保持學報，27(1):88-99。
8. 顏正平(2000)，「根系型在水土保持適用效能之研究」，水土保持植生工程研討會論文，pp.127-137。

9. 顏正平(2004) , 「樹木之地下世界—植物根系分布類型之研究」, 博學。
10. Dupuy, L., Fourcaud, T., Stokes, A., (2005). A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *European Journal of Soil Science* 56, 319-327.
11. Operstein, V., Frydman, S., (2000). The Influence of Vegetation on Soil Strength. *Ground Improvement* 4, 81-91.
12. Operstein, V., Frydman, S., (2001). Numerical simulation of direct shear of root-reinforced soil. *Ground Improvement* 5, 41-48.
13. Waldron, L.J., (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil SCI. SOC. AM. J.* 41, 843-849.
14. Waldron, L.J., Dakessian, S.,(1981). Soil reinforcement by root : calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Science* 132(6), 427-435.
15. Wu, T.H., McOmber, R.M., Erb, R.T., Beal, P.E., (1988) Study of Soil-Root Interaction. *J. of Geotechnical Engineering* 114(12), 1351-1375.

99年 09月 20日收稿

99年 10月 04日修改

99年 10月 28日接受