

現場含根土壤直接剪力試驗與抗剪強度增量評估

Assessment of Shear Strength Increment and Measurement of Direct Shear Test on Rooted Soil Sites

中國科技大學
土木與防災設計系
教授

游新旺

Hsin-Wan Yu

中國科技大學
規劃設計學院
教授兼院長

陳主惠*

Chu-Hui Chen

成功大學
水利及海洋工程學系
教授

羅偉誠

Wei-Cheng Lo

中國科技大學
土木與防災設計系
碩士

陳彥旭

Yen-Hsu Chen

摘 要

本研究對現場實施整地、挖土至土體製作，再進行土體的直接剪力試驗，並繪製不同土體的剪變位與剪力強度關係圖。直接剪力試驗完成後，於剪斷面處讀取根數且在試體周圍取出相當數量之植物根作根徑-長度量測與直接拉力試驗，以取得現場植物根的必要參數，並據以進行根力模式分析。由於現場植物生長在排水情況不佳和土質不一致情況下，土壤的根系顯得錯綜複雜，造成根力模式不容易評估含根土壤之剪力強度增量。故本研究於模式分析時，考慮剪力帶厚度和土根間之平均握裹強度為變量，分別尋求含根土壤抗剪強度增量值。經由分析結果與現場試驗結果比較發現，隨著土體側向位移量的增加，剪力帶厚度將增加，但土根間之平均握裹強度則隨土體側向位移量的增加而有變小的趨勢。

關鍵詞：含根土壤，現場直接剪力試驗，剪力強度。

ABSTRACT

This study performed the field direct shear tests on soil samples after on-site soil preparation, digging, and production. The direct shear tests were proceeded and the relationship between the shear strength and the lateral displacement was established simultaneously. After the test, the number of roots on the shear plane was counted and then the plant roots around the samples were extracted to measure the roots diameter and length and conduct direct tensile tests. According to the data obtained from experiments, the statistical analysis was performed to obtain the parameters for the root strength model

*通訊作者，中國科技大學規劃設計學院教授，11695 北市興隆路 3 段 56 號，chuhui@cute.edu.tw

study. Because the field plants exist in the poor-drained sandy and non-uniform grained soils, the roots of the plants on the field soils appear to be more complicated. It is not easy to evaluate, the shear strength increment of the soil using the model analysis with simple assumptions. Hence, this study used shear zone thickness and average root-soil bond strength as variables to explore the influences of these variables on the shear strength increment of rooted soils. By comparing with the result of the model analysis and the on-site test, it was found that, as the lateral displacement of the soil increased, the shear zone thickness increased and the average root-soil bond strength decreased.

Keywords: Rooted soil, The field direct shear test, Shear strength .

一、前 言

邊坡產生滑移時，一般研究顯示，土根系統之根系於剪力面將產生斷裂或滑移之現象。根力模式對於含根土壤剪力強度增量考慮到根與土壤間力學行為、垂直根長度及根系形態等(Yu *et al.*, 2011)。早期 Holch (1931)研究顯示各植物品種其根系均有其初始特性，且其根系發長狀況深受陽光及水分之影響，並認為含水量高的土壤將抑制根系的發展，Lin *et al.* (2002)提出邊坡草本植物根系發展將受地下水流影響，使得根系將向山谷側發展，因此邊坡的農業發展將嚴重影響河流水質。自然環境下，土壤養分、溫度和平時水位高低等不同生長環境將造成植物在競爭模式下產生不同品種的植物生長，Sainju and Good (1993)提出同一品種植物的根系形態和垂直根長度將受不同位置的養分、通氣狀況和水位高低等影響。

以五節芒植物為例，經由壓克力盒培養的五節芒，由於排水狀況良好且植物生長之土質亦為經過篩選通過的均勻土質，故其根系生長條件一致，各試體間發展之根系形態大致相同且根伸展之方向為較垂直之鬚根系，故將根力模式用於評估經由壓克力盒培養的植物根系抗剪強度增量計算，可以得到不錯的預測結果(Waldron and Dakessian, 1981；游等人 2008, 2009)。但對於現場生長之同一種植物的根系形態除了受平常水位影響外，由於現場環境的排水狀況和土壤含水

量等將受不同土質層分布和地形的影響，使得現場含根土壤之五節芒根系發展為較錯綜複雜的鬚根系形態。

根系對土壤抗剪強度增量貢獻，Garf (1978)和 Wu 等人(1976, 1979)，提出之評估方法傾向於簡易評估方式，即將土壤剪力強度直接視為土壤凝聚力、根的容積重量及垂直力之函數。Waldron and Dakessian (1981)提出根力模式取理想根系為垂直主根段，且根系應力係來自於剪力帶範圍內之根系變形，將剪力強度增量視為根在力學上之加勁行為，考慮根之應力與應變關係、根與土壤間之平均握裹強度及根之斷裂強度等對土壤剪力強度增量之影響。Lin and Kung (2000)和林昭遠等人(2005)對於邊坡穩定的滑動行為，均認為植生對於防止淺層邊坡崩塌具有相當效益，但對於邊坡整體破壞面的滑動抑制則助益不大。林德貴等人(2006)則配合根力模式提出數值模式分析程序，以有限元素模擬室內及現場根系力學試驗之含根土體結構，配合邊界條件探討含根土壤之應力行為機制及根之變形模式。由於學者們對含根土壤抗剪行為之接續研究，使得含根土壤剪力強度增量的計算呈現具體化。對於剪力帶厚度的研究，Abe and Ziemer(1991)提出不同根-土面積比在側移過程中對剪力帶厚度變化有顯著影響，且剪力帶厚度將隨著側向位移量之增加而改變，Fan and Su(2009)則認為剪力帶厚度的決定，對含根土壤抗剪強度增量的計算值有顯著影響。

本研究於現場土體作直接剪力試驗完成後，於剪斷面處讀取根數且在試體周圍取出相當數量之現場植物根作根徑-長度量測與直接拉力試驗，再經由統計迴歸處理方式，取得現場植物根的長度、勁度和斷裂強度等需要參數。根力模式分析時，分別考慮土根間的平均握裹應力和剪力帶厚度為變量，計算剪變位和根提供土壤抗剪強度增量關係，並與完成之試驗結果進行比較，以了解現場植生根系對土壤抗剪強度增量之貢獻及相關力學行為。

二、理論背景與分析方法

Waldron and Dakessian (1981)和國內學者蔡(1994)在含根土壤抗剪力試驗中，提出根系對於土壤摩擦角影響並不顯著，根系對於含根土壤剪力增量之貢獻，可視為土壤凝聚力之補強效果。

2.1 根在土壤之力學行為

假設土壤因受剪產生剪變位，造成剪力帶厚度 Z 範圍內根與土體之位移變化及受力狀況，如圖 1 所示。其中，圖 1(a)為直立根，圖 1(b)為剪變位量為 Δ 時，根周圍土體之增量作用力。

討論根對土體作用力增量變化，取剪斷面上方之根周圍土體為自由體，如圖 1(b)所示。當根因剪變位而受拉力時，根對土體之剪力增量除了受根之拉力 $T_i a_{r,i}$ 而增加之水平分力 $T_i a_{r,i} \sin \beta$ 外，土體亦將因根受拉力而承受垂直正向壓力 $T_i a_{r,i} \cos \beta$ ，此正向壓力於土體受剪過程將增加摩擦力 $T_i a_{r,i} \cos \beta \tan \phi'$ ，故根系中直徑屬於第 i 級

之單根因土壤承受剪變位所產生之剪力增量，如式(1)及式(2)所示(Waldron and Dakessian, 1981; Fan and Su, 2009)。

$$\Delta V_i (= \delta T_i a_{r,i}) = T_i a_{r,i} \sin \beta + T_i a_{r,i} \cos \beta \tan \phi' \quad \dots (1)$$

$$\delta = \sin \beta + \cos \beta \tan \phi' \quad \dots \dots \dots (2)$$

式中：

ΔV_i 為直徑屬於第 i 級之單根所提供之剪力增量(N)。

T_i 為直徑屬於第 i 級之單根承受剪變位後，因變形所承受之拉應力(MPa)。

$a_{r,i} = \pi d_i^2 / 4$ 為直徑屬於第 i 級之單根斷面積(mm^2)。

d_i 為根系中根徑屬於第 i 級之根直徑(mm)。

δ 為根之剪力增量係數。

β 為根在剪力帶厚度範圍因剪變位所產生之傾斜角。

ϕ' 為含根土壤之有效摩擦角。

2.2 根之量測參數

在對根作直徑、長度量測及資料之數值處理後，根長度 L_i 與直徑 d_i 關係，依據 Waldron and Dakessian (1981)及 Pollen (2007)建議，應呈指數關係如式(3)所示。

$$L_i = R d_i^g \quad \dots \dots \dots (3)$$

式中： L_i 為根之長度(mm)。

R, g 為經由迴歸分析取得之參數。

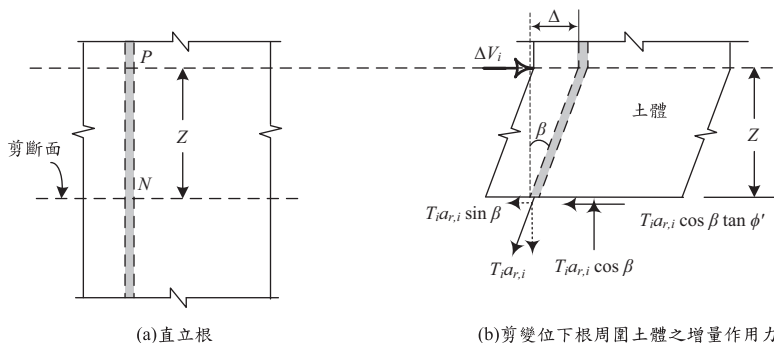


圖 1 剪力帶厚度 Z 處，根與土體在剪變位下之受力狀況

2.3 根之力學參數

經由根之拉力試驗，Operstein and Frydman (2000) 及 Tosi (2006) 提出根斷裂強度 (rupture strength) $T_{F,i}$ 與直徑 d_i 呈指數關係，如式(4)；另在作根之拉力試驗同時，可經由根之應力與應變關係，求得不同直徑 d_i 所對應之根彈性係數 E_i ，Operstein and Frydman (2000) 亦建議根之彈性係數與直徑間亦呈指數關係，如式(5)。

$$T_{F,i} = c_1 d_i^f \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$E_i = a d_i^b \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中： $T_{F,i}$ 為直徑屬於第 i 級之單根達斷裂之拉力強度(MPa)。

E_i 為直徑屬於第 i 級之根彈性係數(MPa)。

c_1, f, a, b 為經由回歸分析取得之參數。

2.4 根土間之力學性質

假設根與剪斷面垂直，由於根在土壤發生剪變位過程，位於剪斷面向上、下兩側之根與土壤間的握裹應力傳遞長度 l 為變量，且隨著剪變位量 Δ 之增加而增加。當剪斷面深度扣除根頸長度後，得到剪斷面以上根之有效埋置長度為 $L_{2,i}$ ，剪斷面以下根之有效埋置長度為 $L_{1,i}(=L_i - L_{2,i})$ ，如圖 2(a)所示。當剪斷面上、下兩部份之試

體產生相對剪變位，則土-根界面之握裹應力與根內力關係如圖 2(b)。

定義直徑屬於第 i 級之單根斷裂所需最小埋置長度為錨定長度，則根徑 d_i 欲達錨定所需長度 $l_{d,i}$ ，如式(6)。

$$l_{d,i} = \frac{T_{F,i} d_i}{4\tau} \quad \dots\dots\dots (6)$$

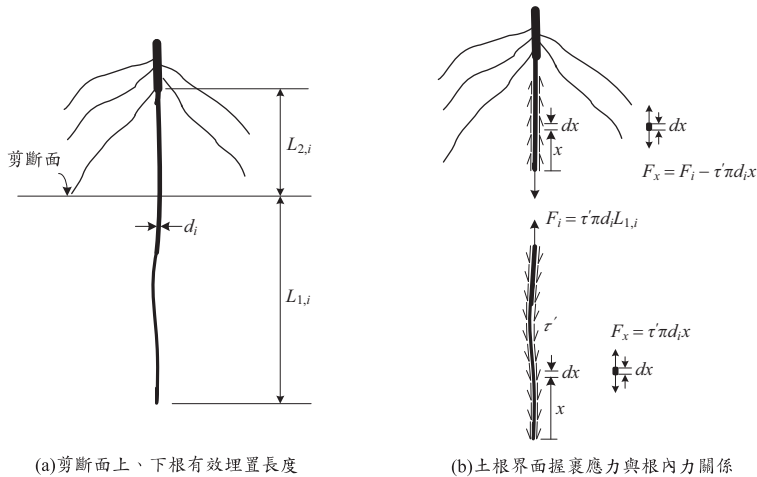
式中： τ' 為根與土壤交界面的平均握裹強度。

再者，當土壤之剪變位量持續增加時，若根尚未斷裂，則根徑為第 i 級之根，其握裹應力傳遞長度將達到剪斷面以下之根埋置長度 $L_{1,i}$ ，取圖 2(b)剪斷面以下之根段為自由體，由力平衡可得該根位於剪斷面處之截面所承受內力 F_i ，如式(7)。

$$F_i = \tau' \pi d_i L_{1,i} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中： F_i 為根徑第 i 級位於剪斷面處單根所承受的內力(Nt)。

當剪斷面以下根埋置長度 $L_{1,i}$ 大於剪斷面上根埋置長度 $L_{2,i}$ 時，土-根界面的應力傳遞長度將在達到 $L_{2,i}$ 後，再持續向下延伸至埋置長度 $L_{1,i}$ ，此時，根最大伸長量之公式推導如式(8)。



(a) 剪斷面上、下根有效埋置長度 (b) 土根界面握裹應力與根內力關係

Source: Yu, et al., 2011

圖 2 根因剪變位受之外力與內力關係自由體圖

$$\begin{aligned} \Delta L_i \left(= \frac{Z}{\cos \beta} - Z \right) &= \sum \int \frac{F_x dx}{a_n E_i} \\ &= \int_0^{L_{1,i}} \frac{\tau' \pi d_i x dx}{a_{r,i} E_i} + \int_0^{L_{2,i}} \frac{\tau' \pi d_i (L_{1,i} - x) dx}{a_{r,i} E_i} \\ &= \frac{\tau' \pi d_i}{a_{r,i} E_i} \left(\frac{L_{1,i}^2 + 2L_{1,i}L_{2,i} - L_{2,i}^2}{2} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中： ΔL_i 為根之總伸長量(mm)。

消去式(7)及式(8)之變數 τ' ，可得到根在彈性範圍內，因伸長變形之拉應力 T_i 值可表示為：

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{F_i}{a_{r,i}} = E_i \left(\frac{Z}{\cos \beta} - Z \right) \left(\frac{2L_{1,i}}{L_{1,i}^2 + 2L_{1,i}L_{2,i} - L_{2,i}^2} \right) \\ &= E_i Z (\sec \beta - 1) \left(\frac{2}{L_{1,i}(1 + 2(L_{1,i}/L_{2,i})^{-1} - (L_{1,i}/L_{2,i})^{-2})} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(9)$$

若根之拉力強度受滑移控制時，由圖 2(b)可得到該根因握裹行為下，位於剪斷面處根之拉應力 T_i 為：

$$T_i (= T_{slip,i}) = \frac{F_i}{a_{r,i}} = \frac{4\tau' L_{1,i}}{d_i} \quad \dots\dots\dots(10)$$

將式(9)及式(10)相乘，可將根位於剪斷面處之拉應力 T_i 值，整理成 $L_{1,i}/L_{2,i}$ 比值之函數，如式(11)及式(12)。

$$T_i = \left(\frac{4\tau' EZ}{d_i} \right)^{\frac{1}{2}} (\sec \beta - 1)^{\frac{1}{2}} \lambda \quad \dots\dots\dots(11)$$

其中修正因子 λ 為：

$$\lambda = \left(\frac{2}{1 + 2(L_{1,i}/L_{2,i})^{-1} - (L_{1,i}/L_{2,i})^{-2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式(11)可視為根在彈性範圍內位於剪斷

面處之拉應力 T_i 值之上限解，當入土之根系長度恰平分於剪斷面上、下兩側，且不考慮根頸及其側向支根協助錨定時，取 $L_{1,i} = L_{2,i} = L_i/2$ ，代入式(12)可得 $\lambda = 1$ 。

若剪斷面以下埋根置長度 $L_{1,i}$ 小於錨定所需長度 $l_{d,i}$ ，則在持續剪變位過程中，根與土壤間的握裹傳遞長度 l_i 將達到 $L_{1,i}$ ，定義式(10)之根系應力 T_i 為對應於握裹滑移之拉力強度 $T_{slip,i}$ 。則根徑 d_i 單根因剪變位所產生的根拉應力計算值 T_i^a ，可定義為：

$$\text{當 } T_i < T_{F,i} \text{ 時， } T_i^a = \min(T_i, T_{slip,i}) \quad \dots\dots\dots(13a)$$

$$\text{當 } T_i \geq T_{F,i} \text{ 時， } T_i^a = 0 \quad \dots\dots\dots(13b)$$

經由式(13)取得根拉應力計算值 T_i^a 後，代入式(1)可得到直徑屬於第 i 級之單根對土壤之剪應力增量 ΔS_i 的貢獻。

$$\Delta S_i = \Delta V_i / A_s = \delta T_i^a a_{r,i} / A_s \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中： A_s 為剪斷面處之土壤斷面積(mm^2)。

則在不同根系組成中，式(15)為所有根對受剪試體提供之剪應力增量計算。

$$\Delta S = \sum_{i=1}^m n_i \Delta S_i \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中： $i(=1 \sim m)$ 為根徑之等級，根系中根徑共分 m 個等級。

n_i 為對應於直徑屬於第 i 級之根的數量。

2.5 分析流程圖

本研究進行根力模式分析時，輸入剪斷面以上五節芒根之埋置長度 L_2 為地表面至剪斷面深度減去根頸長度。分析時對不同土體之五節芒根頸長度統一取 50 mm ，壓克力盒內側土體截面積 $A_s (= 240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm})$ ，土壤有效摩擦角 $\phi' (= 30^\circ)$ ，土體剪變位增量 $d\Delta (= 2 \text{ mm})$ ，其他相關參數之取得詳述於後，模式分析計算根對土壤抗剪強度增量的計算流程，詳見圖 3。

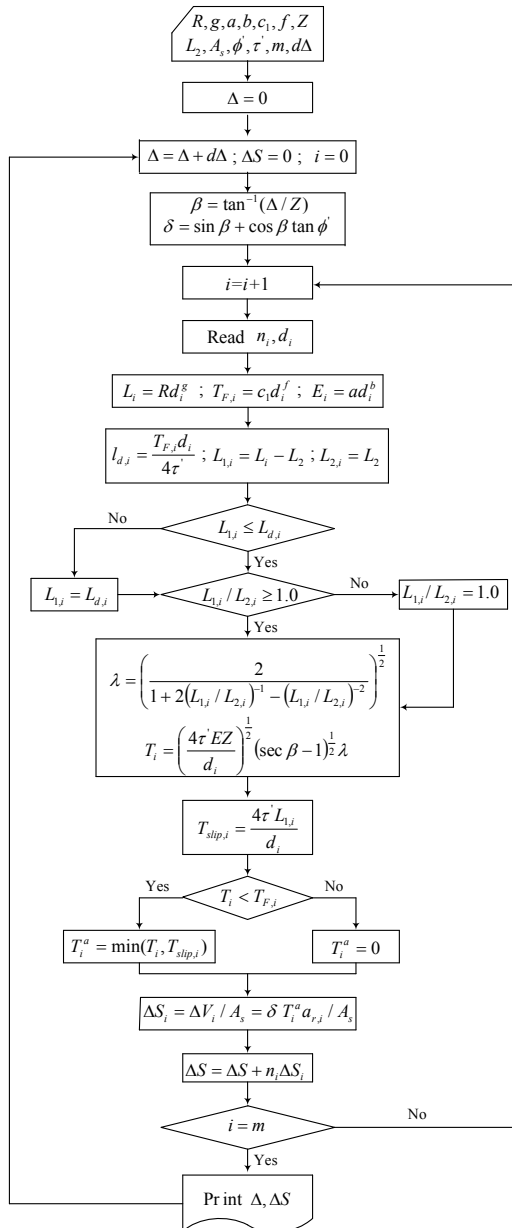


圖 3 模式分析計算根對土壤抗剪強度增量流程圖

三、研究方法

3.1 試驗規畫

現場試驗取中國科技大學台北分校後山邊坡五節芒生長位置為試驗對象，如圖 4(a)。首先在試驗周圍實施整地，開挖前將五節芒高於地表約 20 cm 之莖、葉剪掉如圖 4(b)所示，再執行



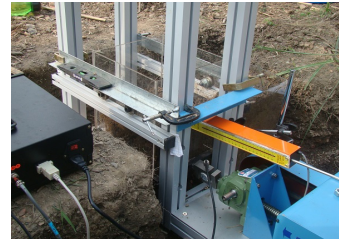
(a) 整地前五節芒生長情況



(b) 土體製作過程



(c) 試驗前土體保持表面有水



(d) 直剪儀於現場組合完成之現況

圖 4 試驗前五節芒生長現況及現場組合完成之直剪儀

挖土及製作土體等工事。依據現場五節芒根系生長情況試體 1 剪斷面取土壤表面下 15 cm，試體 2 剪斷面取土壤表面下 20 cm，藉由不同剪斷面深度以了解根在不同埋置深度下對土壤抗剪強度增量之影響。另製作不含根對照土體。現場土樣製作 24 cm × 24 cm × 15 cm 及 24 cm × 24 cm × 20 cm 兩種，經覆蓋壓克力外盒現況如圖 4(c)所

示，不含根對照土體之剪斷面位置亦分別位於土壤表面下 15 cm 和 20 cm 是為了避免剪斷面承受不同垂直力所造成的額外影響。圖 4(d)則為試驗前直剪儀於現場組合完成之現況。為模擬長期淋雨狀態下土體之抗剪力，於試驗前三天讓土體維持在淋雨狀態，且在試驗時持續澆水，使土體表面維持在有水狀態，用來模擬長期降雨情況且盡可能讓不同土體均維持相同含水量。

3.2 土質分析及根系調查

3.2.1 土質分析

於試驗現場取挖掘出來的土樣作粒徑分析，並取通過 50 號篩的土粒 1000 克做液限和塑限試驗得到資料如下表，依據 Casagrande 塑性圖表分析(Terzaghi and Peck, 1967)，得到試驗現場土質為低塑性砂土(ML)。

3.2.2 根系調查

試體受剪完成後，另取附近未受干擾之五節芒根系土體，以水洗法將土壤沖洗去除，得到完整根約 100 支，據以量測根系直徑和長度，並經由迴歸分析得到直徑 d_i 與長度 L_i 的關係式中，式 (3)的參數 $R = 333.8$ ， $g = -0.037$ ，根系直徑和長度關係如圖 5 所示。

表 1 土壤粒徑分析

	液限	塑限	塑限指數	土壤分類
試驗現場土壤	30.6	25.7	4.9	低塑性砂土

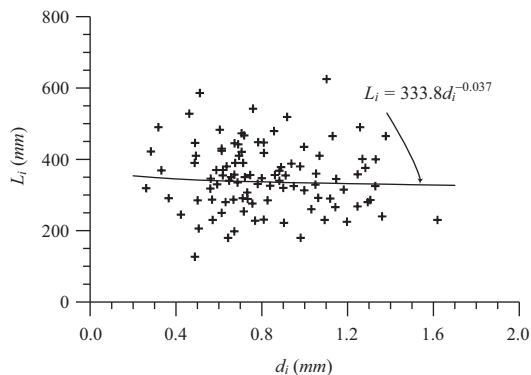


圖 5 根系直徑和長度關係

量測完成後，將已編號之根兩端先以膏狀快乾膠塗抹後，以熱溶膠固定於聯接器端子，再以每分鐘約 10 mm 的速率拉扯直到根斷裂，在受拉過程中，結合荷重及位移感應器傳輸訊號 (LVDT)，經由數據機傳至電腦，配合軟體程式繪出根之伸長量 ΔL 與拉力 F 關係圖，進而尋求根之應變 ($\epsilon = \Delta L / L_0$) 與應力 ($T = F / \pi d_i^2$) 關係圖。由應變-應力關係圖中，取最大應力值為斷裂強度 $T_{F,i}$ ，取原點與最大應力點的連線為根之彈性係數 E_i ，在成功完成 32 支根之斷裂強度 $T_{F,i}$ 與彈性係數 E_i 之數據後，將受拉前之根徑與斷裂強度經由迴歸分析得到式(4)的參數 $c_1 = 19.6$ ， $f = -1.002$ ，如圖 6 所示。同理，得到直徑與彈性係數的關係式中，即式(5)的參數 $a = 136.8$ ， $b = -1.47$ ，如圖 7 所示。

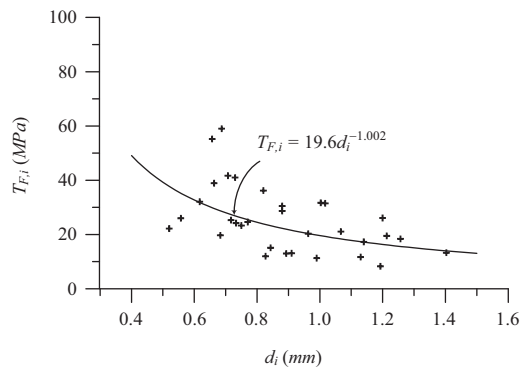


圖 6 根系直徑和斷裂強度關係

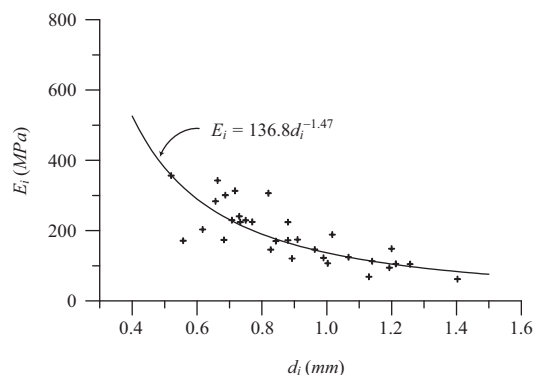


圖 7 根系直徑和彈性係數關係

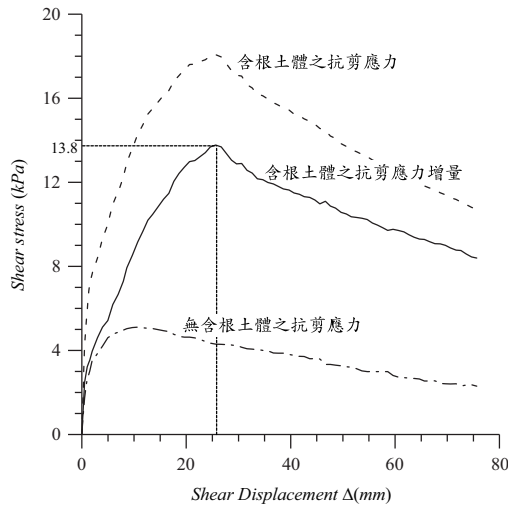


圖 8 試體 1 之剪變位與抗剪應力

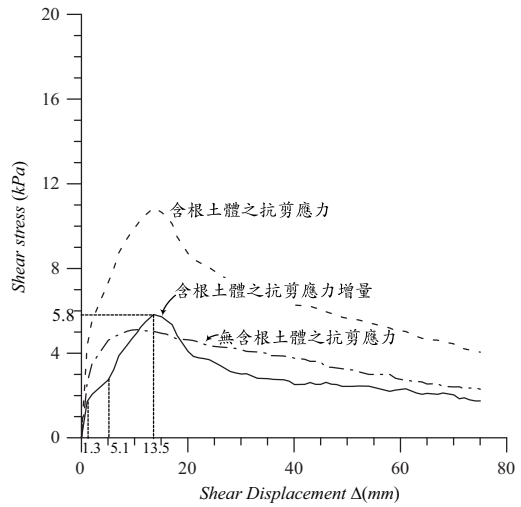


圖 9 試體 2 之剪變位與抗剪應力

3.3 直接剪力試驗

現場直接剪力試驗後，成功取得 2 個含根土壤和 1 個不含根土體之剪變位與剪力強度增量關係圖。其中含根土體受剪後，整理土體受剪斷面處之根系，得到受剪斷面在土壤表面下 15 cm (試體 1) 的根數為 65 根，受剪斷面在土壤表面下 20 cm (試體 2) 的根數為 49 根。但在整理試體 2 受剪斷面處的根系發覺，試體 2 剪斷面下方約 25 cm 處有緊密砂礫石，不利根系向下生長，根系呈現往側面方向生長，造成試體 2 大部分根系在剪斷面下的垂直向埋置長度不足。分別將試體 1 和試體 2 之植生土體與無植生對照土體的剪變位與抗剪應力關係圖繪製如圖 8 和圖 9 的虛線圖，同時將試體 1、試體 2 和不含根對照土體，在改變剪變位下，計算植根對土體之抗剪應力增量繪製如圖 8 和圖 9 之實線圖。其中，圖 8 之實線圖中，65 支的根系對試體 1 的土壤提供最大抗剪應力增量(即剪力強度增量)為 13.8 kPa，剪變位與抗剪應力增量關係圖的斜率(即勁度)大致上隨著剪變位的增加而遞減。但圖 9 試體 2 的根系，由於根垂直向埋置長度不足，使得剪斷面下根與土壤間的錨錠機制無法發揮，根系對土體之抗剪強度增量貢獻，最高值只達到 5.8 kPa，當剪變位超過 20 mm 後，藉著側向根系的支撐，根對土壤的抗剪應力增量維持在 2~3 kPa 之間。

四、分析結果與討論

對於經由壓克力培養之大麥、五節芒或百喜草等含根土壤之抗剪強度增量分析，一般根力模式分析均可以得到很好的預測結果(Waldron and Dakessian, 1981；游和范，2012)。本研究為了解生長於戶外現場五節芒根對土壤抗剪強度增量的貢獻。於戶外做直接剪力試驗後，經由根系之直徑、長度量測與拉力試驗等，得到現場根系之力學與形態參數，再代入根系力學模式分析。由於土壤含水量增加時，土壤粒子和根系的界面握裹應力隨之減少，將導致根對土壤抗剪強度增量急速降低，本研究考慮不同剪力帶厚度情況下，取根與土壤界面握裹強度為變量，探討現場五節芒含根土壤試體之剪變位與剪應力增量關係，並與試驗結果進行比較。

4.1 試體 1

圖 10 說明，當根土界面間的平均握裹應力強度在 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 以下時，根系隨著剪變位量的增加將僅產生滑移而不會斷裂。此時，根之最大應力係由根土間之滑移控制 ($T_i^a = T_{slip,i}$) 時，根對土體之抗剪應力增量 ΔS_i 隨著根土界面間的平均握裹應力強度 τ' 的增加而增加(Yu et al., 2011)，圖 10 亦顯示根對土壤抗剪強度增量貢獻，於

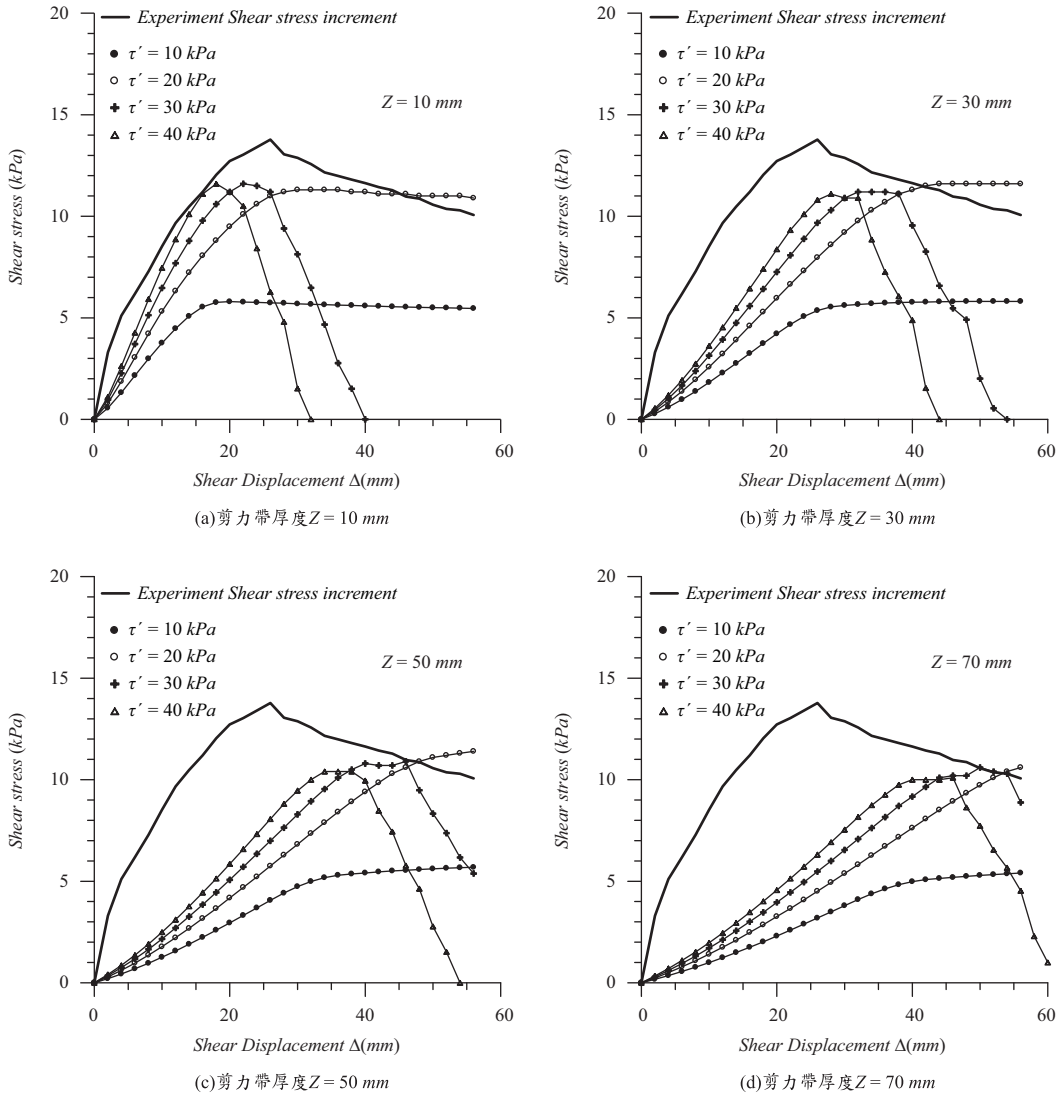


圖 10 試體 1 根力模式分析與試驗結果比較

$\tau' = 20 \text{ kPa}$ 約為 $\tau' = 10 \text{ kPa}$ 的兩倍。又圖 10(a)~圖 10(d)中發現，當 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 對土體提供之抗剪應力增量貢獻並不小於 $\tau' = 30 \text{ kPa}$ 和 $\tau' = 40 \text{ kPa}$ ，此分析結果與 Schwarz *et al.* (2010)之研究一致，說明根之拉力強度受斷裂控制時，根對土壤抗剪應力增量的貢獻，並不隨著根土界面間握裹應力強度的增加而增加。

一般研究認為，剪力帶厚度將隨著剪變位量的增加而變化(Abe and Ziemer, 1991)，本研究經與試驗結果比較發覺剪力帶厚度 Z 值越小，剪變

位與抗剪應力增量關係圖之初始勁度越接近試驗值，如圖 10(a)~(d)所示。現場植生根系對土壤抗剪強度增量 ΔS 達最大值時所對應之剪變位約在 26 mm 處，大致介於圖 10(a) $\tau' = 20 \sim 30 \text{ kPa}$ 最大抗剪強度增量對應之剪變位之間。又圖 10(a)的根力模式分析顯示，當 $\tau' = 30 \text{ kPa}$ 時，於剪變位 $\Delta = 40 \text{ mm}$ 時即完全斷裂($\Delta S = 0$)，但現場含根土體的剪變位與抗剪應力增量關係圖則沒有完全斷裂的現象。顯示現場植生根系與土壤間的力學機制，除了剪力帶厚度會隨著剪變位量的

增加而增加外，現場根與土壤間的平均握裹強度也會因剪變位量增加造成剪力帶附近土質鬆動而變小，方能使現場含根土體在承受直剪時，根系提供之抗剪強度增量不致因剪變位量增加，而陸續斷裂降至零。圖 10(a)至圖 10(d)中，隨著剪力帶厚度 Z 由 10mm ，經由 30mm 、 50mm 至 70mm 時，根力模式分析之剪變位與抗剪應力增量關係圖明顯有逐漸向右偏離現場試驗關係圖的現象。另由現場直接剪力試驗關係圖發覺，在達到最大抗剪強度增量前，隨著剪變位量的增加，剪應力增量與剪變位關係圖之勁度亦隨之變小，造成此種現象可歸納為土體在承受直剪試驗時，隨著剪變位量的增加，剪力帶厚度將隨之增加且根土界面間平均握裹應力亦隨之變小。

對於現場生長之五節芒的根系形態發展較經由壓克力盒培養的五節芒試體的根系形態錯綜複雜，如剪斷面以下根系埋置長度足夠時，由於根力模式未考慮側向支根對土體所增加之土壤凝聚力，使得圖 10 試體 1 之模式分析所計算之最大抗剪強度增量值較現場試驗值為低。

4.2 試體 2

試體 2 剪斷面位於地表面下 20 cm ，但地表面下 $25\sim 30\text{ cm}$ 處有緊密砂礫石，不利根系向下

生長，根系只好往側向發展，使得現場對試體 2 直剪試驗所得到根對土體的抗剪應力增量值偏低。由於根力模式分析時，係依據試驗土體周圍植物根系為樣本，並視為垂直根系做根徑與長度調查以取得相關參數。故將這些參數使用在試體 2 作根力模式分析並與現場直接剪力試驗比較，發覺現場試體 2 的 49 支根對土體之抗剪應力增量貢獻並沒有完全發揮，經由根力模式分析出來之抗剪強度增量值，除了 $\tau' = 10\text{ kPa}$ 外均高於試體 2 之試驗結果。說明試體 2 之根系雖然有足夠的根密度值，但因根系實際垂直向埋置長度不足，導致根對土壤之抗剪強度增量貢獻降低。另由圖 11 現場試驗之剪變位與剪應力增量關係圖中發覺，當剪變位在 $1.3\sim 5.1\text{ mm}$ 時，含根土壤剪變位與剪應力增量圖之勁度在這段區間偏低，超過 5.1 mm 勁度反而增加，顯示這段區間根系與土壤間的錨定機制有鬆動現象。

圖 11 的根力模式分析得到和圖 10 一樣的分析結果，即當根與土壤界面間的平均握裹強度由 $\tau' = 20\text{ kPa}$ 增加至 $\tau' = 40\text{ kPa}$ 時，土壤之抗剪強度增量幾乎沒有增加。造成此原因乃是根力模式分析因假設根垂直向下發展，高估許多根系在剪斷面下的根埋置長度，此時根之拉力強度將受斷裂控制，根土間平均握裹強度 τ' 的提高，只是造

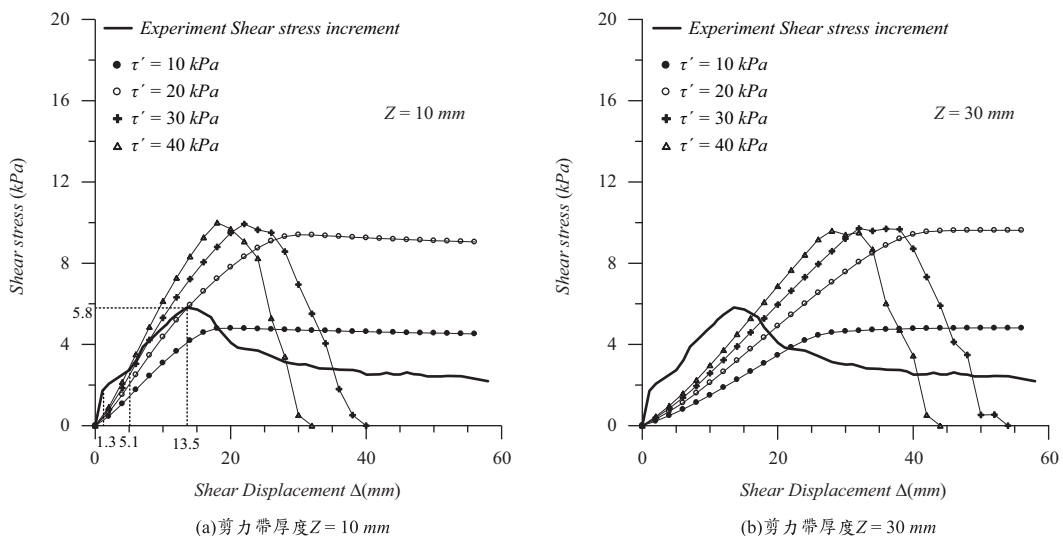


圖 11 試體 2 根力模式分析與試驗結果比較

成根提早斷裂，對土體抗剪強度增量貢獻不大。

五、結論與建議

1. 當剪斷面下根系埋置長度足夠時，根之拉力強度將受斷裂控制，此時根對土壤抗剪強度增量的貢獻，並不會隨著土根交界面間平均握裹強度的增加而增加。
2. 經由現場含根土壤之直接剪力試驗結果和根力模式分析結果比較發現，隨著剪變位量的增加，剪力帶厚度和土根界面間平均握裹強度會隨著剪變位量增加而改變。
3. 現場植物根系可能受水位深度或土質結構影響，造成根系無法向下生長而不得不往側面生長，當剪斷面以下根系埋置長度足夠時，由於現場植物根系之側向支根發達，根力模式如只考慮垂直根系，則其計算所得最大抗剪強度增量值將較現場試驗值偏低；又當剪斷面以下根系埋置長度不足夠時，根力模式因假設根系垂直故計算所得最大抗剪強度增量值將較現場試驗值高。
4. 本研究在「根系直徑與長度關係」、「根系直徑和斷裂強度關係」和「根系直徑和彈性係數關係」的統計分析中發覺，根系直徑與長度關係分佈圖顯得較為分散，根力模式分析取參數為定值的處理方式，可能造成土體在某一剪變位下同等直徑等級的根系集體斷裂，未來研究應針對此項缺點以數值模擬等方式加以改進。

誌謝

本文承蒙國科會計畫 (NSC102-2221-E-163-001-) 給予經費支持，得以順利進行，特此致謝。

參考文獻

1. Abe, K., and Ziemer, R. R., "Effect of Tree Roots on a Shear Zone: Modeling Reinforced Shear Stress," *Canadian Journal of Forest Research* 21, pp. 1012-1019, 1991.
2. Fan CC, Su CF. "Effect of soil moisture content on the deformation behaviour of root-reinforced soils subjected to shear." *Plant Soil* 324: 57 – 69, 2009.
3. Graf, W.L., "Fluvial adjustments to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region." *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1491-1501, 1978.
4. Holch, A. E., "Development of roots and shoots of certain deciduous tree seedlings in different forest sites." *Ecology* 12, 259-298, 1931.
5. Lin, H. D., and Kung, H. S., "Rain-Induced Slope Failure in Taiwan," *Asian Conf. on Unsaturated Soils-from Theory to Practice*, Singapore, 801-803, 2000.
6. Lin, C. Y., Chou, W. C., and Lin, W. T.: Modeling the width and placement of riparian vegetated buffer strips: a case study on the Chi-Jia-Wang Stream, Taiwan. *Journal of Environmental Management* 66, 269-280, 2002.
7. Operstein V., and Frydman, S., "The influence of vegetation on soil strength." *Ground Improv* 4(2), 81-89, 2000.
8. Pollen, N., "Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture," *CATENA*, 69(3), 197-205, 2007.
9. Sainju, U. M. and Good, R.E., "Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests," *Plant and Soil* 150, 87-97, 1993.
10. Schwarz, M., P. Lehmann, and D. Or., "Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands," *Earth Surf Proc Land* 35(3): 354-367, 2010.
11. Terzaghi, K., and Peck, R. B., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., Wiley, New York, 1967.
12. Tosi, M., "Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines

- (Italy),” *Geomorphology Journal*, Vol. 87, pp. 268-283, 2006.
13. Waldron, L. J., and Dakessian, S., “Soil Reinforcement by Roots, Calculation of Increased Soil Shear Resistance from Root Properties,” *Soil Science*, Vol. 132, No. 6, pp. 427-435, 1981.
 14. Wu, T.H., “Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska,” Department of Civil Engineering, Ohio State University, Columbus. *Geotech. Eng. Rep. No. 5*, 1976.
 15. Wu, T.H., Mckinnell, W. P., and Swanston, D. N., “Strength of Tree Roots and Landslides on Prince of Wales Island, Alaska,” *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1): pp. 19-33, 1979.
 16. Yu, H.W., Chen, C.H., Lo, W.C. “Mechanical behavior of the soil-root system.” *Soil Science*, Vol. 176(2), pp. 99-109, 2011.
 17. 蔡光榮，「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」，*地工技術*，第48期，第49-61頁(1994)。
 18. 林昭遠(召集人)、李鏐、李榮珍、李耀旭、周文杰、林文賜、林長立、邱創益、張文章、張俊彥、陳明義、陳美珍、陸象豫、曾美冠、黃隆明、謝杉舟，水土保持手冊-植生方法篇，台灣：行政院農業委員會水土保持局、中華水土保持學會，2005。
 19. 林德貴、黃伯舜、林信輝，「土-根系統之力學模式及試驗分析」，*中華水土保持學報*，37(2)：157-172，2006。
 20. 游新旺、陳主惠、吳瑞賢、陳秀婷，「根力模式與含根土壤剪力強度增量之研究」，*台灣農業工程學報*，54(4)：83-97，2008。
 21. 游新旺、陳主惠、陳致向，「含根土壤剪力強度增量評估－簡易法與蒙地卡羅模擬」，*中國土木水利工程學刊*，21(3)：353-365，2009。
 22. 游新旺、范書瑋，「百喜草根加勁土壤力學行為之研究」，*中華水土保持學報*第43卷第2期，2012。

收稿日期：民國 104 年 1 月 22 日
 修正日期：民國 104 年 7 月 15 日
 接受日期：民國 104 年 7 月 30 日