

百喜草根加勁土壤力學行為之研究

游新旺* 范書瑋

摘要 本研究將探討含百喜草根之土壤試體，在不同剪變位下根與土壤間之力學行為，同時對含根土壤剪力強度增量之兩種評估模式提出檢驗。簡易評估法 (Wu et al., 1979) 假設垂直根系在同一時間斷裂，根力模式 (Waldron and Dakessian, 1981) 則假設垂直根系在不同階段循序斷裂。研究中發現，根生長茂密之植物，只考慮垂直根系之力學行為推估土壤之剪力強度增量，可能低估側向細根對土壤加勁所增加之土壤抗剪力。對於根生長稀疏之植物，假設根同時斷裂之簡易評估法，則可能會高估植物根對土壤之抗剪能力。結果顯示，經由根力模式所計算之土壤剪力強度增量有較正確之評估值。同時亦提供了較合理的評估程序和較易了解之土根間力學行為。

關鍵詞：根力模式、加勁土壤、力學行為。

A Study of the Mechanical Behavior of Soils Reinforced by Bahia Grass Roots

Hsin-Wan Yu* Shu-Wei Fan

ABSTRACT This study examined the mechanical behavior of soils reinforced with Bahia grass roots under different shear displacements with two different models. The simple assessment method (Wu et al., 1979) assumes simultaneous breakage in vertical roots while the root strength model (Waldron and Dakessian 1981) assumes sequential breakage of vertical roots. Results indicate an underestimation of the shear strength increment of the soil among dense cluster roots when solely considering vertical roots and ignoring the contribution of lateral fine roots to soil reinforcement. On the contrary, the shear strength increment of the soil in sparse roots was overestimated with the assumption that the root's mechanical behavior is characterized by simultaneous root breakage as proposed in the simple assessment formula. Compared with the simple assessment formula, the root strength model gives a more accurate estimation of value and its procedure is more realistic for understanding the mechanics of soil-root systems.

Key Words : Root strength model, reinforced soil, mechanical behavior.

一、前言

對於邊坡產生滑移時，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。本文將引用 Wu et al. 於 1979 年提出之簡易評估法 (simple assessment method) 與游新旺等 (2009) 提出之修正根力

模式 (modified root strength model)，分別計算植物根系對土壤剪力強度增量值，並與完成之試驗結果比較。

為探索根之拉力強度，Operstein and Frydman (2000), Tosi (2006) 及 Mickovski et al. (2007) 曾對不同根系結構進行拉拔試驗，以了解根徑與根抗拉力關係及根型態與根土間握裹應力關係等。對於不同根系結

構之模擬，Wu et al. (1988) 假設根系由垂直主根與兩個側向支根組成，且盡可能模擬根系之真實力學行為；Denis et al. (2000) 則模擬不同根系結構並配合試驗量測數據，發現根系埋置長度及側向支根數的增加，將使土-根界面之握裹強度亦隨之增加。本研究對於百喜草根系結構，則引用 Waldron and Dakessian (1981) 之研究，採用之理想化根系為垂直主根段，配合試驗取得主根段土-根界面握裹強度值，據以計算含根土壤之剪應力增量。根力模式假設含根土壤剪應力增量來自於根與土壤間力學行為、垂直根長度及根系形態等特性，模式分析對於根徑與長度關係均將其分成數根一組，以定值方式代入根力模式分析，此時同組根將於同一時間斷裂，因此造成土壤剪應力增量與剪變位關係歷程，呈現鋸齒狀的錯位。本研究將百喜草根系分成數根一組和採用一根一組之方式，分別計算含根土壤之剪力強度增量，並據以比較其差別。

植生力學欲有效使用於植生邊坡穩定分析，必需了解國內本土性植物的生長情形及其根系分佈狀態。林信輝等 (2005)，針對九芎植生木樁分別於網室、野外試驗地及崩塌地，進行木樁萌芽生長調查，以探討植生木樁地上部與地下部之生長情形，以作為植生工程施工效益之參考。林德貴等 (2008) 使用有限元素之數值分析方法，以參數模擬方式評估植生根系對邊坡穩定性的加勁效果。由於學者們對植生工程之接續研究，使得根力模式在土壤邊坡穩定分析之運用，呈現明朗而具體化。

二、含根土壤之力學行為

蔡光榮 (1994) 在台灣西南部泥岩地區現地含根土壤剪力試驗研究，認為根系對於土壤摩擦角影響並不顯著，故植物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。此研究結果與 Waldron and Dakessian (1981) 所提根力模式，將植物根的貢獻視為土壤剪力強度增量且不改變土壤摩擦角之假設一致。

1. 簡易評估法

Wu et al. (1979) 假設植物根在同一剪變位下同時斷裂，取含根土壤之剪力增量計算如下式 (Preti and Giadrossich, 2009)。

$$\Delta V = 1.2 \sum_{i=1}^m n_i a_{r,i} T_{F,i} \quad (1)$$

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 為對應於根徑屬於第 i 級之根的數量。 $a_{r,i} = \pi d_i^2 / 4$ 為根徑屬於第 i 級之單根截面積。 $T_{F,i}$ 為根徑屬於第 i 級之單根斷裂之拉力強度。

游新旺等 (2009) 和 Yu et al. (2011) 研究，依據單一調查之某一剪斷層根數，配合根系分佈調查，提出根力模式之研究結果發覺根系組成不變時，剪斷層深度愈深，根提供土壤抗剪應力增量貢獻愈低。Preti and Giadrossich (2009) 亦提出含根土壤斜坡之破壞面深度愈深，根提供土壤凝聚力之增加量越小，對邊坡穩定性之提供也愈低。然 Wu 等人提出之簡易評估公式 (1)，在根系組成不變時，其對不同剪斷層深度提供之土壤抗剪應力增量貢獻將為定值。

2. 修正根力模式

Waldron and Dakessian (1981) 假設實根垂直於剪斷面且鉗於剪斷面兩側之土壤中，提出根因變形受力、根之斷裂強度及土-根界面握裹強度等力學行為對土壤剪力強度增量計算之分析模式。其中土壤因受剪產生側向位移，造成剪力帶厚度 Z 範圍內根之位移變化及受力狀況，如圖 1 (Yu, et al., 2011)。

當根因側移承受拉力時，其對土壤抗剪力增量除了受根之直接拉力影響外，土壤亦將因根變形承受正向壓力而增加摩擦力。其中受根拉力影響而增加之水平剪力增量包含根之水平分力 $T_i a_{r,i} \sin \beta$ 和根之垂直分力 $T_i a_{r,i} \cos \beta$ 作用在土體正面上而增加之土體摩擦力 $T_i a_{r,i} \cos \beta \tan \phi$ ，故根系中根徑屬於第 i 級之單根因土壤側向位移所增加之土體抗剪力增量表示如下。

$$\Delta V_i = (\sin \beta + \cos \beta \tan \phi) T_i a_{r,i} \quad (2)$$

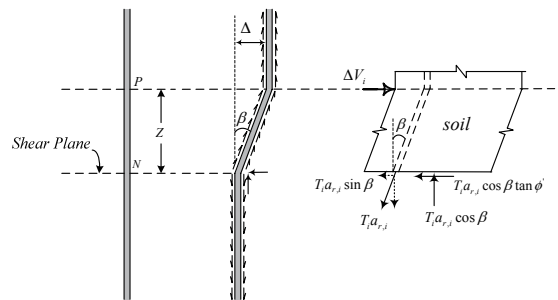


圖 1 剪力帶厚度 Z 處根之位移變化及受力狀況

Fig.1 Lateral displacements and sheared conditions of roots within the shear zone Z

式中： ΔV_i 為根徑屬於第 i 級之單根所提供之抗剪力增量。 T_i 為根徑屬於第 i 級之單根受剪側移後，因變形所承受之根拉應力。 β 為根在剪力帶厚度範圍因側向位移所產生之傾斜角。 ϕ 為土壤摩擦係數。

在經由根徑與長度量測及資料之數值處理後，可得根之長度 L_i 與根徑 d_i 成指數關係，如下所示 (Waldron and Dakessian, 1981; Pollen, 2007)。

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

式中： L_i 為根徑 d_i 之根系長度。 R, g 為經由回歸分析所取得之參數。

在進行根之直接拉力試驗同時，可得根之應變-應力關係，以求得同根徑 d_i 所對應之根彈性係數 E_i 。則根達斷裂之拉力強度 $T_{F,i} = (F_{r,i} / (\pi d_i^2 / 4))$ 與根徑之關係如下 (Operstein and Frydman, 2000; Tosi, 2006)。

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

在進行根之直接拉力試驗同時，可得根之應變-應力關係，以求得不同根徑 d_i 所對應之根彈性係數 E_i 。研究中發現根之彈性係數與根徑關係亦呈指數關係如下式 (Operstein and Frydman, 2000)。

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

式中： E_i 為根徑屬於第 i 級之根彈性係數。 c_1, f, a, b 為經由回歸分析所取得之參數。

Waldron and Dakessian (1981) 文獻之根力模式係假設所有根長皆平分於剪斷面上、下兩側，在此假設下其所選植物樣本之所有根長度，必需均已達到剪斷面以下，且將忽略剪斷面以上根、莖相接處根頸及其側向支根協助錨錠之功用及低估剪斷面以下深根系植物之根實際埋置長度，同時無法模擬及計算不同深度滑動面，植物根對土壤剪力強度增量之影響。由於 Waldron 等人之根力模式具有以上不合乎實際之假設，本研究將引用一般根系具有根頸及其側向支根協助錨錠之實際狀況所推導之根力模式。

游新旺等人 (2009) 提出修正根力模式，考慮剪斷面上方根頸及其側向支根協助錨錠之效應。在扣除根頸長度後，取剪斷面以上之根有效埋置長度為 $L_{a,i} = L_a$ ，剪斷面以下之根有效埋置長度為 $L_{b,i} (= L_i - L_{a,i})$ ，如圖 2(a) 所示。當剪斷面上、下兩部份之試體產生相對側向位移，剪斷面上下之握裹傳遞

長度 l_a 和 l_b 亦隨即產生，則土-根界面之握裹應力與根內力關係如圖 2(b) (Yu, et al., 2011)。

剪斷面上下之根據裹傳遞長度分別為 l_a 和 l_b 時，根總伸長量之公式推導如下：

$$\begin{aligned} \Delta L_i \left(= \frac{Z}{\cos \beta} - Z \right) &= \sum \int \frac{F_x dx}{a_{ri} E_i} \\ &= \int_0^{l_b} \frac{\tau' \pi d_i x dx}{a_{ri} E_i} + \int_0^{l_a} \frac{\tau' \pi d_i (l_b - x) dx}{a_{ri} E_i} \\ &= \frac{\tau' \pi d_i}{a_{ri} E_i} \left(\frac{l_b^2 + 2l_a l_b - l_a^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： ΔL_i 為根之總伸長量。

當土壤之側向位移量持續增加時，若不考慮根之斷裂現象，剪斷面上下之根據裹傳遞長度 l_a 和 l_b 將分別達到根埋置長度 $L_{a,i}$ 和 $L_{b,i}$ 。圖 2(b) 取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 。

$$F_i = \tau' \pi d_i l_b \quad (7)$$

式中， F_i 為根徑第 i 級位於剪斷面處單根所承受的內力。消去式 (6) 及式 (7) 之變數 τ' ，可得到根在彈性範圍內，對應於伸長變形之拉應力 T_i 值如下：

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{F_i}{a_{ri}} = E_i \left(\frac{Z}{\cos \beta} - Z \right) \left(\frac{2l_b}{l_b^2 + 2l_a l_b - l_a^2} \right) \\ &= E_i Z (\sec \beta - 1) \left(\frac{2}{l_b (1 + 2(l_b / l_a)^{-1} - (l_b / l_a)^{-2})} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

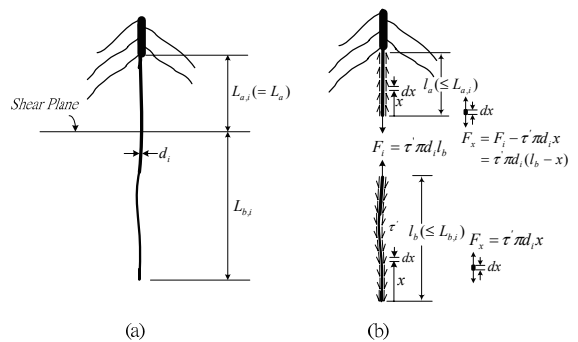


圖 2 根力剪應力受側向位移之關係自由體圖
Fig.2 Free body diagrams for the tensile force and the shear bond stress at the soil-root interface

同理，如圖 2(b) 所示，該根系在握裹應力作用下，經由式 (7) 可得位於剪斷面處之根拉應力 T_i 為：

$$T_i = \frac{F_i}{a_{r_i}} = \frac{4\tau' l_b}{d_i} \quad (9)$$

將式 (8) 及式 (9) 相乘，可得到根在彈性限度內位於剪斷面處之拉應力 T_i 值

$$T_i = \left(\frac{4\tau' EZ}{d_i} \right)^{\frac{1}{2}} (\sec \beta - 1)^{\frac{1}{2}} \lambda \quad (10)$$

其中，修正因子 λ 可寫成根握裹傳遞長度比 l_b/l_a 之函數，以下式表示：

$$\lambda = \left(\frac{2}{1 + 2(l_b/l_a)^{-1} - (l_b/l_a)^{-2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

假設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之協助錨錠效應時，可取 $l_a = l_b = l/2$ ，代入式 (11) 可得 $\lambda = 1$ 。此時式 (10) 與 Waldron and Dakessian (1981) 假設剪斷面向上及向下兩側之握裹應力傳遞長度均為 $l/2$ 所推導之公式相同。當剪斷面下側之根埋置長度 $L_{b,i}$ 大於上側之根埋置長度 $L_{a,i}$ 時，假設根由剪斷面下產生滑移，應力傳遞長度 l_b 將達到 $L_{b,i}$ ，即 $l_a = L_{a,i}$ 且 $l_b = L_{b,i}$ 。由於 $l_b > l_a$ ，故修正因子 λ 經由式 (11) 計算可得 $\lambda > 1$ ，此時，式 (10) 可視為根在彈性限度內位於剪斷面處拉應力 T_i 值之上限解。

定義根徑 d_i 之根斷裂所需最小埋置長度為錨錠長度 $l_{d,i}$ ，則該根徑欲有效發展達錨錠所需之長度可表示如下：

$$l_{d,i} = \frac{T_{F,i} d_i}{4\tau'} \quad (12)$$

若剪斷面以下根埋置長度 $L_{b,i}$ 小於錨錠所需長度 $l_{d,i}$ ，則在持續側移過程中，該根系將在應力達到斷裂強度之前即產生握裹滑移，此時根系對應於滑移之應力 ($T_{slip,i}$) 可表示如下：

$$T_{slip,i} = \frac{4\tau' L_{b,i}}{d_i} \quad (13)$$

式中： $T_{slip,i}$ 為根徑 d_i 在根-土間產生滑移時根之相當拉應力。

考慮根與土壤間因側移變形受力、握裹滑移及根斷裂等力學行為時，根徑 d_i 最後產生的拉應力計算值 T_i^a ，可定義如下：

$$\text{當 } T_i < T_{F,i} \text{ 時， } T_i^a = \min(T_i, T_{slip,i}) \quad (14a)$$

$$\text{當 } T_i \geq T_{F,i} \text{ 時， } T_i^a = 0 \quad (14b)$$

經由式 (14) 取得根拉應力計算值 T_i^a 後，可得到根徑 d_i 單根對土壤之抗剪應力增量 (ΔS_i) 之貢獻，如下式表示：

$$\Delta S_i = \Delta V_i / A_s = \delta T_i^a a_{r_i} / A_s \quad (15)$$

式中： A_s 為剪斷面處之土壤截面積。則在含有不同根徑之根系中，所有根對受剪試體提供之抗剪應力增量可計算如下：

$$\Delta S = \sum_{i=1}^m n_i \Delta S_i \quad (16)$$

式中： $i (=1 \sim m)$ 為根徑之等級，計分 m 個等級。 n_i 為對應於根徑屬於第 i 級之根的數量。

三、試驗量測與參數決定

試驗樣本採用之植物培養皿為透明壓克力版，外部尺寸為 $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，版厚 $t=4\text{mm}$ ，剪斷面位於土壤底部算起 300mm 高度，四周用 $h \times L \times t=3\text{mm} \times 250\text{mm} \times 4\text{mm}$ 之長條狀壓克力隔開。試驗樣本計分兩組，A 組材料選用台灣本島適合於邊坡及裸露地坡面整治用之植物-百喜草，將其種子播種於植生培養皿試體內，並製作準備條件完全一樣之植生試體三個；而 B 組為純土樣不種植任何植物試體兩個。

1. 直接剪力試驗

種植時間 9 月後，取有種植百喜草之 A 組試體及純土樣 B 組各一個，於泡水兩日後，維持上部有水情況下，以每分鐘約 3.6mm 的速率進行直接剪力試驗，可記錄植生土樣與純土樣之剪變位與抗剪應力值。在同一剪變位下，針對含植生與純土樣對應之抗剪應力值相減，可得到剪變位與抗剪應力增量關係圖，如圖 3 實線圖所示，植生土壤最大剪應力增量 (即剪力強度增

量) 為 10.4 kPa。並於植生土樣 A-1 試體直剪試驗完成後, 細數剪斷面處受剪之百喜草總根數計有 197 根。

2. 根系調查

取 A 組另一個百喜草試體 A-2, 將其試體以沖洗方式洗淨, 洗淨之百喜草根如圖 4 所示。取該試體根長超過 30 cm 之根總數 200 根, 並量測各根徑 d_i 及其對應長度 L_i 之數據 (d_i, L_i), 得其長度平均值為 56.3cm, 再經由統計回歸分析得到式 (3) 根徑與長度關係曲線之參數 $R = 815.6, g = 0.123$ 。

3. 拉力試驗

將洗淨百喜草試體 A-2 之部份根於量測各根徑後, 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 10mm 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 ($T = 4F / \pi d_i^2$) 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 (最大應力點正割彈性係數), 在成功完成 19 組根之斷裂強度 $T_{F,i}$ 與彈性係數 E_i 之數據後, 將受拉前之根徑 d_i 與斷裂強度 $T_{F,i}$ 之數據 ($d_i, T_{F,i}$) 繪於圖 5, 經由回歸分析, 得到式 (4) 之參數 $c_1 = 23.4, f = -0.91$; 根徑 d_i 與彈性係數 E_i 之數據 (d_i, E_i) 繪於圖 6, 經由回歸分析, 得到式 (5) 之參數 $a = 28.9, b = -1.65$ 。

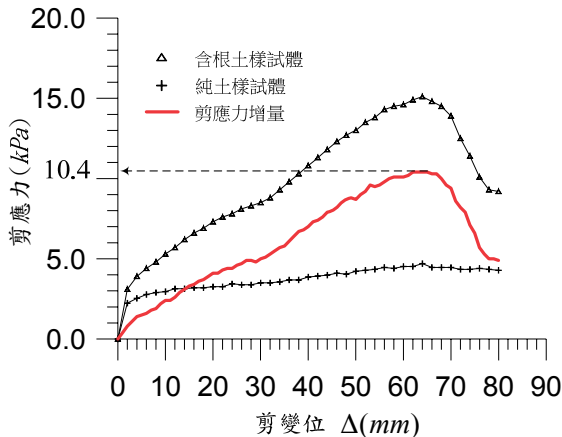


圖 3 含百喜草根土壤試體之剪應力與剪變位關係
Fig.3 Shear stress versus shearing displacement of Bahia rooted soil

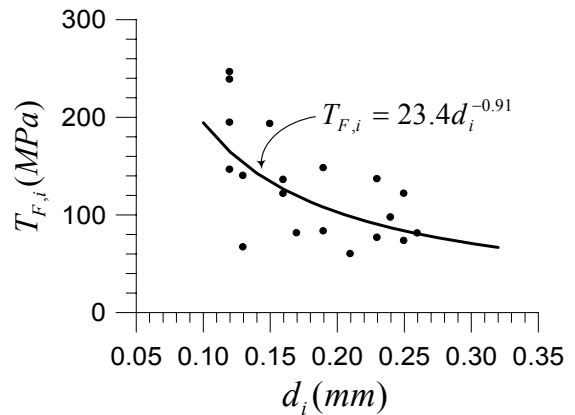


圖 5 根徑與根斷裂強度關係圖
Fig.5 Plot of breakage tensile strength versus root diameters



圖 4 洗淨之百喜草根
Fig.4 Cleaned roots of Bahia grass

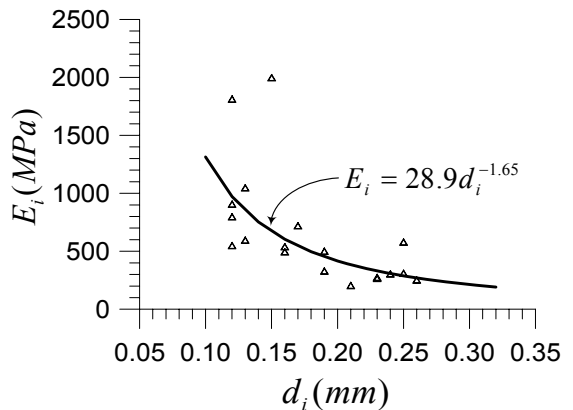


圖 6 根徑與彈性係數關係圖
Fig.6 Plot of elastic modulus versus root diameters

4. 直接拉拔試驗

直接拉拔試驗，首先取用 A 組第三個百喜草試體 A-3，在除去試體上部草葉後，挖除約十五公分之土壤，泡水兩天後，維持上部有水情況下，逐一對單根進行直接拉拔試驗，在進行 20 根拉拔試驗中，發覺大部分根系均為斷裂式破壞，只有埋置深度較淺之 3 根短根為握裹滑移。故待 A 組第三個試體風乾數天後，取其長、寬各為 100mm 左右，高度由大至小分為 80mm、70mm、60mm 和 50mm 四種不同厚度之土塊，其中之一土塊如圖 7 所示。將另一純土壤試體 B-2 從剪斷面處截斷，將土塊安置於 B-2 下半段試體之中央(如圖 8 之示意圖)，清除土塊之上部土壤，預留根上端約 20mm，先以膏狀快乾膠塗抹後，再以熱溶膠固定於聯接器端子，於泡水兩日後，維持試體上部有水之環境，以每分鐘約 10mm 的速率拉拔直到根被拔出或斷裂，經由成功取得握裹滑移樣本之數據發現，在本試驗設定之環境下，被拔出而未斷裂之百喜草根，在取得根對應於滑移之拉拔力 $T_{slip,i}$ 、根徑 d_i 、與埋置長度 $L_{b,i}$ 等量測資料後，經由式 (13) 計算可得到土根界面間之握裹強度 τ' ，並得到平均值約為 20kPa。考慮到根可能處於飽合或接近飽合土壤狀態及拉拔試驗時根斷裂而未根被拔出等情況，本研究取根土間之握裹強度平均值 τ' 分別為 5, 20 和 30 kPa。

四、分析結果與討論

本研究先取 Wu et al. (1979) 所提之簡易評估法和游新旺等人 (2009) 所提之根力模式，分別就五節芒和百喜草含根土壤之剪力強度增量 ΔS 進行比較。接著以游新旺等人 (2009) 之根力模式就百喜草含根土壤試體，分別取剪力帶厚度和根-土界面握裹強度為變量，



圖 7 拉拔試驗用之百喜草含根土塊
Fig.7 Bahia grass rooted soil block for pull-out test

探討百喜草含根土壤試體之剪變位與剪應力增量關係圖變化及根與土壤間之力學行為。最後，基於根徑大小接近之不同根歸納於同一等級根系時，由於同等級不同根之相關參數均假設為同一定值，將使根力模式分析時，產生同等級之不同根在同一剪變位下同時斷裂。研究中為避免分析時產生根集體斷裂現象，另依直徑大小細分成以一根為一等級之根系，重新計算含根土壤之抗剪強度增量及抗剪強度增量與試驗強度比，並據以比較。

1. 簡易評估法分析

取游新旺等人 (2009) 文獻資料，五節芒根經由拉力試驗得到式 (4) 中，根斷裂強度 $T_{F,i}$ 之參數 $c_i=36.9$ 、 $f = -1.86$ 及根徑分佈等資料，依據 Wu, et al. (1979) 所提簡易評估公式分析資料，如表 1 所示。

表 1 五節芒含根土壤抗剪強度之簡易評估公式分析結果

Table 1 Shear strength increment of Silver grass rooted soil by the simple assessment method

根徑等級 m_i	1	2	3	4	5	6	計
等級根數 n_i	4	6	14	11	4	5	44
根徑 d_i (mm)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.4	1.8	-
根斷裂強度 $T_{F,i}$ (MPa)	346.0	95.4	44.9	26.3	19.7	12.4	-
根斷裂內力 $a_{r,i} T_{F,i}$ (Nt)	24.5	27.0	28.6	29.7	30.4	31.5	-
根剪力增量 $1.2 n_i F_i$ (Nt)	97.8	161.8	399.8	327.1	121.6	157.4	1265
根抗剪強度增量 ΔS (kPa)	1.70	2.81	6.94	5.68	2.11	2.73	22.0

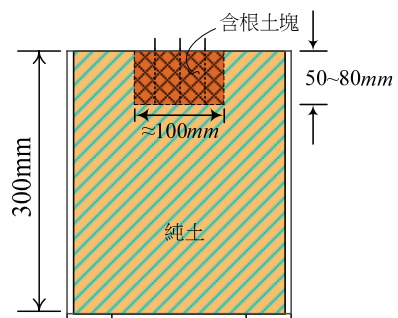


圖 8 含根土塊安置於純土樣上
Fig.8 Bahia grass rooted soil block installed into the soil sample

再取本研究針對百喜草之拉力試驗所得式 (4) 中, 根達斷裂強度 $T_{F,i}$ 之參數 $c_1=23.4$, $f=-0.91$ 及根徑分佈等資料, 依據 Wu, et al. (1979) 所提之簡易評估公式分析, 如表 2 所示。

依據游新旺等人 (2009) 之試驗結果, 含五節芒根之土壤剪力強度增量為 15.3 kPa , 而表 1 之計算結果為 22.0 kPa , 試驗值與簡易評估法提供之計算值比為 0.7。但對於百喜草之剪力強度增量, 本研究之試驗結果為 10.4 kPa , 而表 2 之計算結果為 10.6 kPa , 試驗值與簡易評估法提供之計算值比為 0.98。

由以上之分析結果發現, 對於根生長較稀疏之五節芒試體, 假設根同時斷裂之簡易評估法, 其分析結果顯然過於高估。但對於根生長較茂密之百喜草試體, 則有不錯之評估值。推測原因為百喜草根因生長較茂密, 相對其側向支根亦較為發達, 土壤網結之加勁效果較大, 對土壤之抗剪應力增量貢獻亦增加。故表 2 簡易評估公式計算結果能得到不錯之評估值, 可視為所有根同時斷裂之假設對土壤剪力強度增量 ΔS 之高估量, 大略由簡易評估公式無法考量根系固結作用力, 而對土壤剪力強度增量 ΔS 之低估量所抵銷。

2. 根力模式分析

游新旺等人 (2009) 將剪斷面處之五節芒總根數為 44 根之根徑分成六個等級, 經由根力模式分析得到第一次根系斷裂前最大剪力強度增量可達到 17.6 kPa , 斷裂後則降為 14.7 kPa , 而試驗結果則為 15.3 kPa 。該五節芒試體根系斷裂前, 模式分析所得最大剪力強度增量與試驗之強度比為 1.15。

本研究取百喜草含根土壤試體, 假設剪斷面上根垂直段之埋置長度在扣除根頸長度後所有根系之埋置長度 $L_{b,i}$ 均為定值 L_a , 取 $L_a=250\text{ mm}$ 。則剪斷面以下根系埋置長度 $L_{b,i}=L_i-L_a$ 。剪斷面處之百喜草總根數為 197 根, 依根徑大小將其分為九個等級, 已知根徑與長度關係曲線之參數 $R=815.6$, $g=0.123$, 經由式 (3) 求得各級根徑之對應長度 L_i , 另由式 (12) 計算 $\tau'=5\text{ kPa}$ 和 $\tau'=20\text{ kPa}$ 時, 根斷裂所需最小埋置長度 $l_{d,i}$ 列於表 3。由表 3 可知當 $\tau'=5\text{ kPa}$ 時, 第 1~9 級所有根系之 $l_{d,i}$ 均大於 $L_{b,i}$, 表示此九組根系之根, 其握裹傳遞長度均將先達到 $L_{b,i}$ 而產生滑移, 故根系將沒有斷裂現象; 另

表 2 百喜草含根土壤抗剪強度之簡易評估公式分析結果

Table 2 Shear strength increment of Bahia grass rooted soil by the simple assessment method

m_i	7	2	3	4	5	6	7	8	9	計
n_i	2	25	42	35	48	24	15	4	2	197
d_i	0.050	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325	0.375	0.500	-
$T_{F,i}$	357.7	247.3	155.3	114.4	91.0	75.8	65.1	57.2	44.0	-
$F_i (Nt)$	0.70	1.09	1.91	2.75	3.62	4.50	5.40	6.31	8.64	-
$1.2n_iF_i (Nt)$	1.40	27.32	80.09	96.31	173.70	108.08	81.04	25.26	17.28	610
$\Delta S (kPa)$	0.02	0.47	1.39	1.67	3.02	1.88	1.41	0.44	0.30	10.6

表 3 百喜草根徑、數量與長度等資料整理

Table 3 Parameters calculated for the Bahia grass root system

m_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
n_i	2	25	42	35	48	24	15	4	2	
$d_i (mm)$	0.050	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325	0.375	0.500	
$L_i (mm)$	563	593	634	658	679	696	710	723	749	
$L_{a,i} (mm)$	250	250	250	250	250	250	250	250	250	
$L_{b,i} (mm)$	313	343	384	408	429	446	460	473	499	
$\tau'=5\text{ kPa}$										
$l_{d,i} (mm)$	894	928	971	1001	1024	1043	1058	1072	1100	
$\tau'=20\text{ kPa}$										
$l_{d,i} (mm)$	224	232	243	250	256	261	265	268	275	

當 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 時，第 1~9 級所有根系之 $l_{d,i}$ 均小於 $L_{b,i}$ ，表示剪變位持續增加時，所有等級之根系均將陸續產生斷裂。

(1) 剪力帶厚度之影響

假設剪力帶厚度分別模擬為 $Z=5, 10, 30, 50 \text{ mm}$ ，取 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 進行根力模式分析，得到含根土壤之剪變位與剪應力增量關係，並與圖 3 經由直接剪力試驗之剪變位與剪應力增量關係合併繪於圖 9。當含根土壤試體產生剪變位初期 ($\Delta \leq 5 \text{ mm}$)，剪力帶厚度 $Z=5 \text{ mm}$ 之剪變位與剪應力增量變化歷程較接近試驗量測；當 $Z=30 \text{ mm}$ 時，理論解在根第 2 次斷裂前，剪應力增量達到尖峰為 9.0 kPa ，其對應之剪變位量 $\Delta = 64 \text{ mm}$ ，而直接剪力試驗之試驗結果，也於剪變位量 $\Delta = 62 \sim 65 \text{ mm}$ 處，剪應力增量達到最大值。

(2) 根與土壤接觸面握裹強度之影響

假設土-根界面握裹強度分別為 $\tau' = 5, 20, 30 \text{ kPa}$ 計 3 種，剪力帶厚度取 $Z=30 \text{ mm}$ ，探討不同土-根界面握裹強度對含根土壤剪應力增量評估之影響，以了解根系之力學行為。

表 3 可知當 $\tau' = 5 \text{ kPa}$ 時，第 1~9 級所有根系之 $l_{d,i}$ 均大於 $L_{b,i}$ ，表示此九組根系之根，其握裹傳遞長度均將達到 $L_{b,i}$ 後產生滑移，故根系將沒有斷裂現象；另當 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 時，表 3 說明第 1~9 級之所有根系均產生斷裂，故當握裹強度 $\geq 20 \text{ kPa}$ 時，根系斷裂將達 9 次，經查該百喜草試體斷裂之順序為第 1 級→第 2 級→第 3 級...→第 9 級。圖 10 之根徑與剪力強度增量圖中，當 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 時顯示有 8 次錯位，經查其中第 1 級根系在剪變位量 $\Delta = 38 \text{ mm}$ 時產生斷裂，然該級根系因根徑太小且只有 2 根，導致圖 10 於該剪變位量看不出有錯位現象。圖 10 中，如不考慮根斷裂，土根界面之握裹強度越大，對土壤剪力強度增量貢獻也越大。然百喜草因其垂直主根將側生許多細根，使得大部份根系在本研究之試驗環境下仍然無法拉出，故其土根界面握裹強度一般在 20 kPa 以上。圖 10 顯示，當土壤之剪力強度增量為根之斷裂強度控制時，握裹強度 τ' 由 20 kPa 增加至 30 kPa 時，只能使剪斷面以下根與土壤界面之應力傳遞長度提早達到錨錠之對應長度而斷裂，並沒有提高土壤之剪力強度增量，

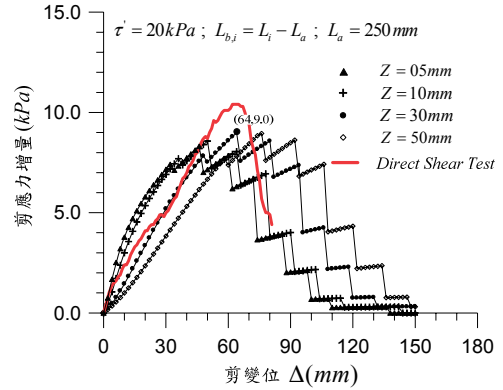


圖 9 不同剪力帶厚度模擬對含百喜草根土壤剪應力增量之影響

Fig.9 Effect of shear zone thickness on the stress increment of Bahia grass rooted soil

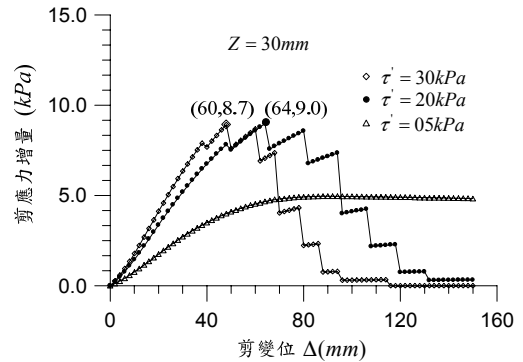


圖 10 不同界面握裹強度對含百喜草根土壤剪應力增量之影響

Fig.10 Effect of interface bond strengths on the stress increment of Bahia grass rooted soil

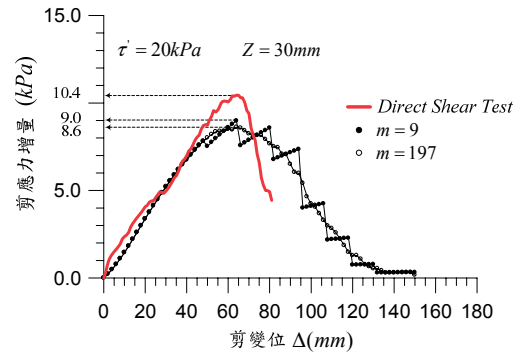


圖 11 不同組別之根系對含百喜草根土壤剪應力增量之影響

Fig.11 Effect of root size classes on the stress increment with displacement for Bahia grass rooted soil

但將使含根土壤最大剪力強度增量對應之剪變位置提前達到。

(3) 根系分級組數不同之影響

當 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 時，由於將 197 支根分成 9 組根系，使得根徑大小接近之不同根因歸納於同一等級根系，在參數設定為定值情況下，根力模式分析中同等級之不同根將產生集體斷裂，造成圖 10 中，土壤之剪變位與剪應力增量關係圖有錯位之現象。今將 197 支根假設一根一組，即分成 197 組，取剪力帶厚度 $Z = 30 \text{ mm}$ ，再做根力模式分析，於 $\tau' = 20 \text{ kPa}$ 時，模式分析所得結果發現，根系組數 $m = 197$ 所得之剪變位與剪應力增量關係圖並沒有集體斷裂之錯位現象，且其剪應力增量大致位於根系組數 $m = 9$ 時，斷裂前和斷裂後之計算值間，如圖 11 所示。當根系分級組數 $m = 9$ 時，模式分析所得最大剪應力增量為 9.0 kPa ，試驗值與分析值比為 1.15；又根系分級組數 $m = 197$ 時，模式分析所得最大剪應力增量為 8.6 kPa ，試驗值與分析值比為 1.21。

五、結 論

本研究經由百喜草根土壤試體之直接剪力試驗結果與參考五節芒含根土壤試體之研究（游新旺等，2009），探討簡易評估法和根力模式對含根土壤剪力強度增量分析結果之適用性，並得到主要結論如下。

1. 含根土壤剪力強度評估，對於根系生長稀疏之植物，假設根同時斷裂之簡易評估法，可能導致分析值過高，根力模式分析則可得到較保守的分析值且分析結果較接近試驗值。另對於根生長較茂密之植物，相對其側向支根亦較為發達，土壤網結之加勁效果較大，如只考慮以垂直根系推估含根土壤之抗剪應力增量，可能低估根生長茂密之植根對土壤抗剪應力增量之貢獻。
2. 根力模式分析中，當土壤含水量高且凝聚力低之含根土壤，其土壤剪力強度增量將由握裹滑移控制，此時土-根界面之握裹強度增加可提高含根土壤剪力強度增量，對邊坡表層穩定將有顯著貢獻。但對土壤含水量低且凝聚力高之含根土壤，土壤剪力強度增量將由根斷裂強度控制，此時土-根界面握裹強度增加，只能使剪斷面以下根與土壤界面之應力傳遞長度提早達到錨錠之對應長度

而斷裂，對土壤剪力強度增量及邊坡表層穩定之貢獻非常有限。

3. 根力模式分析中，根系分級數目越少，不同根產生集中斷裂之情形將越嚴重。又根系分級數目越多，根產生滑移或斷裂之行為模擬越接近實際斷裂狀況，此時根力模式分析所得之剪變位與剪應力增量關係圖將不再出現根集體斷裂之錯位現象，且可得到較保守的土壤抗剪強度增量分析值及提高根力模式分析模擬之真實度。

誌 謝

作者感謝國科會 NSC97-2221-E-163 -005 計畫支持及陳主惠教授參與計畫執行及討論。

參考文獻

1. 林信輝、楊宏達、陳意昌 (2005)，「九芎植生木樁之生長與根系力學之研究」，中華水土保持學報，36(2)，123-132。(Lin, S.H., Yang, H.T., Chen, Y.C. (2005). "The Growth and Root Strength of Lagerstroemia subcostata Vegetation Stake." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 36 (2), 123-132. (in Chinese))
2. 林德貴、劉明山、徐森彥 (2008)，「根系加勁邊坡之穩定性分析及評估」，中華水土保持學報，40(1)，27-38。(Lin, D.G., Liou, M.S., and Hsu, S.Y. (2008). "Analysis and Evaluation on the Stability of Root Reinforced Slope." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 40(1), 27-38. (in Chinese))
3. 游新旺、陳主惠、陳致向 (2009)，「含根土壤剪力強度增量評估－簡易法與蒙特卡羅模擬」，中國土木水利工程學刊，21(3)，353-365。(Yu, H.W., Chen, C.H., and Chen, C.H. (2009). "Simplified Method and Monte Carlo Simulation on Prediction of Shear Strength Increment for Soil-Root System." *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 21(3), 353-365. (in Chinese))
4. 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，48，49-61。(Tsai, K.J. (1994). "The Suitability Of Root Mechanical Model Applied On Vegetative Slope Protection For The Mudstones In Southwestern Taiwan." *Sino-Geotechnics*, 48, 49-61. (in Chinese))

5. Denis, S., Bremand, F., and Herbert, Y. (2000). "An Experimental Study on the Mechanical Behavior of the Maize Root System: Analysis of the Soil/Root Bond and Determination of Rigidity Modulus." In: A. Stokes(ed.), *The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology*, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 295-304.
6. Mickovski, S.B., Bengough, A.G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., Hallet, P.D., and Sonnenberg, R. (2007). "Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems." *European Journal of Soil Science*, 58, 1471-1481.
7. Operstein, V., and Frydman, S. (2000), "The influence of vegetation on soil strength." *Ground Improvement*, 4(2), 81-89.
8. Pollen, N. (2007). "Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture." *CATENA*, 69(3), 197-205.
9. Preti, F., and Giadrossich, F. (2009). "Root Reinforcement and Slope Bioengineering Stabilization by Spanish Broom. (*Spartium Junceum* L.)" *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1713-1726.
10. Tosi, M. (2006). "Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy)." *Geomorphology Journal*, 87, 268-283.
11. Waldron, L.J., and Dakessian, S. (1981). "Soil Reinforcement by Roots, Calculation of Increased Soil Shear Resistance from Root Properties." *Soil Science*, 132(6), 427-435.
12. Wu, T.H., Mckinnell, W.P., and Swanston, D.N. (1979). "Strength of Tree Roots and Landslides on Prince of Wales Island, Alaska." *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), 19-33.
13. Wu, T.H., McOmber, R.M., Erb, R.T., and Beal, P.E. (1988). "Study of Soil-Root Interaction." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(12), 1351-1375.
14. Yu, H.W., Chen, C.H., and Lo, W.C. (2011). "Mechanical Behavior of the Soil-Root System." *Soil Science*, 176(2), 99-109.

2011年03月02日 收稿

2011年10月18日 修正

2012年01月05日 接受

(本文開放討論至 2012年12月31日)