

根系加勁邊坡之穩定性分析及評估

林德貴⁽¹⁾ 劉明山⁽²⁾ 徐森彥⁽³⁾

摘 要

由本文作者先前對各類型土~根直剪試驗所完成之數值模擬研究得知，分析中所採用之二維有限元素法平面應變模擬程序及材料參數轉換技巧，對於土~根力學行為預測之有效性可獲得確認。本文承接上述之數值模擬運算程序及技巧，對全尺寸植生邊坡進行定量穩定性分析，並藉此建立含根邊坡之合理數值模式。本研究並以根系~加勁材轉換法及根系~加勁等值層轉換法等兩種數值模式，對植生工程中根系之各項設計因子進行參數研究後，再以量化方式探討各項設計因子在邊坡穩定性中所具有之影響度。

(**關鍵字**：植生邊坡、穩定性分析、根系~加勁材轉換法、根系~加勁等值層轉換法)

Analysis and Evaluation on the Stability of Root Reinforced Slope

Der-Guey Lin⁽¹⁾, Ming-Sam Liou⁽²⁾, Sen-Yen Hsu⁽³⁾

Associate Professor, Master Student, Doctoral Student, Department of Soil and Water Conservation National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C

ABSTRACT

Previous numerical simulation of mechanical experiments performed by authors had verified the effectiveness of the proposed numerical procedure and the conversion techniques of material parameters of root system in the predictive behavior of soil/root samples. Using the aforementioned computation schemes, it is feasible to carry out a quantitative evaluation of the stability of vegetated slope and eventually to establish a rational numerical model. A series parametric study has been performed on root parameters such as root length and growth angle of root system in vegetation engineering. Two numerical models were adopted for analysis namely root/reinforcement conversion model and root/equivalent reinforced layer conversion model. The influence of various design parameters of root system on slope stability is also investigated quantitatively.

(1)國立中興大學水土保持學系副教授

(2)國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

(3)國立中興大學水土保持學系博士班研究生

(Keywords: Vegetated Slope, Stability Analyses, Root~Reinforcement Conversion, Root~Equivalent Reinforced Layer Conversion)

前言

目前國內外含根邊坡穩定性之定量分析及研究方面仍屬有限，故本研究嘗試採用數值方法，以量化方式來評估植生根系對邊坡穩定性的力學加勁效果。承用本文作者先前所建立且有效性獲得確認之土~根直剪試驗數值模擬運算程序及技巧，本研究將針對全尺寸根系加勁邊坡，建立一套數值分析模式，以使用於評估根系加勁邊坡之穩定性。在穩定性分析中，同時考慮邊坡角(i)、根系生長角(α)及根長(L)對穩定性之影響。

為分析根系各項參數對邊坡穩定性之影響，數值模擬採用二維有限元素法平面應變分析，對全尺寸根系加勁邊坡之穩定性進行有系統的研究。再者，分析方法則採用根系~加勁材轉換法及根系~加勁等值層轉換法等兩種分析模式進行。

根系~邊坡穩定性分析數值方法

2.1 $C-\phi$ (凝聚力-摩擦角)折減穩定分析法

本研究同時對全尺寸無根邊坡及含根邊坡進行有限元素法土壤 $c-\phi$ 折減之穩定性安全檢算及比較，並藉此將根系各項設計因子對邊坡穩定性之影響度予以量化。 $c-\phi$ 折減穩定分析法，乃將邊坡地層材料之剪力強度 (τ_{\max} 或其中之 c 值與 ϕ 角)依固定百分比(例如 10%)逐漸折減，使邊坡處於臨界穩定狀態並求得維持此狀態所需之最小剪力強度(τ_{\min} 或

其中之 c_r 值與 ϕ_r 角)後，即可定義邊坡之整體 (overall)穩定安全係數($FS)_{os}$ 如下：

$$(FS)_{os} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}} = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_r + \sigma_n \tan \phi_r} \quad (1)$$

式中，

$$c_r = c \left(1 - \sum_{i=1}^m M_i^{FS} \right), \tan \phi_r = \tan \phi \left(1 - \sum_{i=1}^m M_i^{FS} \right)$$

其中， σ_n 為潛在滑動破壞面之正向應力， M_i^{FS} 為第 i 次 $c-\phi$ 之折減百分比，而 c_r 及 ϕ_r 分別為凝聚力及摩擦角之折減殘餘值。再者，於每一階段之折減穩定分析，程式可同步計算邊坡之相對變形量及潛在滑動破壞模式。

2.2 元素類型及材料模式

有限元素程式依問題所涉及不同性質之土壤及非土壤(結構)材料，設計不同功能之元素類型 (element type) 及材料模式 (material model) 來進行數值模擬。

2.2.1 邊坡土層

採用 15 結點(nodal points)之三角形土壤元素(soil element)進行模擬，元素中含有 12 個應力點(stress points)或高斯點(Gaussian points)。元素應力點之變位乃利用計算求得之結點變位及四次多項式內插函數內插求得，而元素之勁度矩陣則以應力點之局部座標及權重值進行數值積分後予以決定。

土層材料採用摩爾-庫倫(Mohr-Coulomb)完全彈塑性模式進行模擬，其主要輸入材料

參數包括：彈性模數 E_s 、柏松比 ν 、凝聚力 c 、摩擦角 ϕ 及膨脹角 Ψ 。

2.2.2 根系

採用 5 結點(配合 15 結點土壤元素)之線形地工格網元素(geo-grid element)進行模擬。元素中含有 8 個應力點(stress points)，同時祇具有軸向勁度，而不具有彎曲勁度，且祇承受拉力而不承受壓力。根系材料採用彈性模式進行模擬，並假設為完全彈性材料，其主要輸入材料參數為軸向勁度 $E_r \times A_r$ 。其中， E_r 與 A_r 分別為根系之彈性模數與截面積。

根系~邊坡穩定分析

首先對無根邊坡進行穩定分析，並先求取一安全係數 FS_o 值趨近於 1.0 之臨界邊坡。然後，再在針對上述無根邊坡進行植生並求取含根加勁邊坡之安全係數 FS 值。

3.1 無根邊坡穩定性數值分析

3.1.1 建立幾何模式

建立一高為 H ($= 4.2 \text{ m}$)、邊坡角為 i ($=45^\circ$)、土層深度為 $3H$ ($= 12.6 \text{ m}$) 之邊坡，依過去有限元素數值分析之經驗，左右邊界距坡頂與坡趾為 $3H$ ($= 12.6 \text{ m}$) 以上時，數值分析的結果受邊界位置的影響極為微小。左右邊界之位移條件設定為水平向固定無變位而垂直向自由可變位，底邊界之位移條件則設定為水平與垂直雙向固定無變位。幾何模式與有限元素網格分別如圖 1(a)及(b)所示。

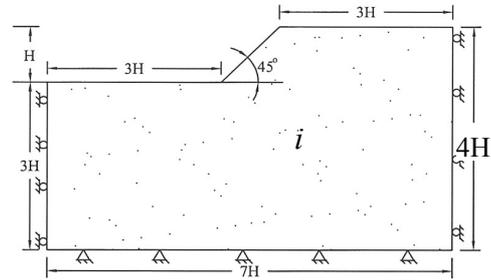


圖 1(a)

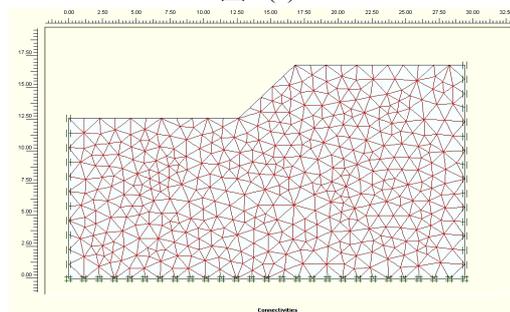


圖 1(b)

圖 1. 無根邊坡之 (a)幾何模式 (b)有限元素網格
Figure 1. (a) Geometry model (b) finite element mesh of soil slope without root system.

3.1.2 輸入參數

1. 彈性模數 E_s

大部分土壤材料在承載之最初階段即呈現非線性行為。因此，當材料在較大之應變範圍內，仍呈現線彈性行為之情況下， E_s 可採用 E_0 (初始正切模數)，但一般而言，對於承受荷重之土壤通常採用 E_{50} ，即軸差應力 $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 等於 50%極限強度時之正割模數，如圖 2 所示。其中， σ_1 與 σ_3 分別為最大與最小主應力，而 ϵ_1 為最大主應變。本研究採用 $E_s = 1.0 \times 10^4 \text{ kPa}$ 。

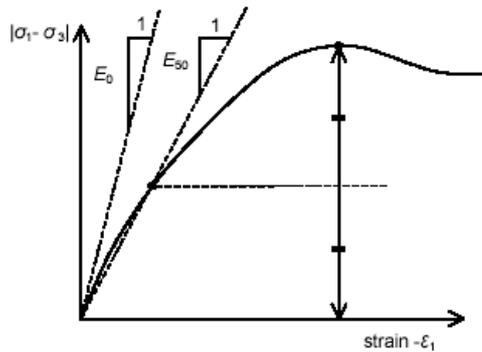


圖 2. 摩爾-庫倫模式彈性模數 E_0 及 E_{50}

Figure 2. Elastic modulus E_0 and E_{50} of Mohr-Coulomb soil model

2. 柏松比 ν

採用摩爾-庫倫模式或彈性模式時，可配合土層之靜止側向土壓力係數 K_0 來選用 ν 值，其中 $K_0 = \sigma'_{ho} / \sigma'_{vo} = \nu / (1 - \nu)$ ；而 σ'_{ho} 和 σ'_{vo} 分別為現地土層之初始有效水平及垂直應力。大部分情況下， ν 值約在 0.3~0.4 之間。本研究採用 $\nu=0.35$ 。

3. 凝聚力 c

依土壤所含細料之多寡、含水量之高低及稠度可決定 c 值。在摩爾-庫倫模式中， c 值控制土壤之破壞準則，因此建議輸入一至少之 c 值 (>0.2 kPa)，以便模式能順利運算。對於無根邊坡，凝聚力乃經由穩定分析反算求得之臨界凝聚力 c_0 ，即穩定性安全係數 FS 趨近於 1.0 時之凝聚力。

4. 摩擦角 ϕ

摩擦角 ϕ 決定土壤之剪力強度，依土壤之疏鬆或緊密度可決定 ϕ 角。一般疏鬆之沉泥質砂土， ϕ 角約為 30° 。

5. 膨脹角 Ψ

粘性土壤之 $\Psi \approx 0$ 。砂性之 Ψ 角依土壤之密度及摩擦角 ϕ 而定，一般含石英之砂質土 $\phi > 30^\circ$ 時 $\Psi = (\phi - 30^\circ)$ ；而 $\phi < 30^\circ$ ， $\Psi \approx 0$ 。最後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 $\Psi = 0^\circ$ 。

總結上述討論，無根邊坡穩定分析所需之土壤材料參數輸入值摘示如表 1。

表 1. 無根邊坡各參數輸入值

Table 1. Various input parameters of soil slope without root system

材料 模式	c (kPa)	ϕ (deg.)	ν	E_s ($\times 10^4$) (kPa)	γ_{unsat} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)
莫爾- 庫倫	3 (= c_0)	30	0.35	1.0	18	20

3.1.3 模擬分析之執行

維持邊坡角 $i = 45^\circ$ 及摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 不變，折減 c 值以便求得臨界凝聚力 c_0 。採用兩個階段數值模擬：

phase 1：利用自重之重力加載(Gravity Loading)計算初始應力。

phase 2：進行 c - ϕ 折減，穩定性安全係數 FS 值計算。

改變 c 值並反覆 phase 1 及 phase 2 之計算，直到求得 FS 趨近於 1.0 時之 c 值即為臨界凝聚力 c_0 值。由計算可得，當邊坡角 $i = 45^\circ$ 且 FS=1.0 時， $c=c_0=3.0$ kPa。

3.1.4 參數研究

無根邊坡穩定性分析求取臨界凝聚力 c_0 值之數值程序已在前節獲得確認。因此，

可進一步探討改變邊坡角(i)，對臨界凝聚力 c_0 值的影響。

3.2 根系~加勁材轉換法

本節以根系轉換成加勁材之方式，建立根系加勁邊坡穩定性之數值分析模式。

3.2.1 建立幾何模式

建立一高為 $H (=4.2 \text{ m})$ 、邊坡角 45° 之邊坡。土層深度 $3H (=12.6 \text{ m})$ ，並假設根系垂直坡面生長且根長 L 為 1.5 m 。

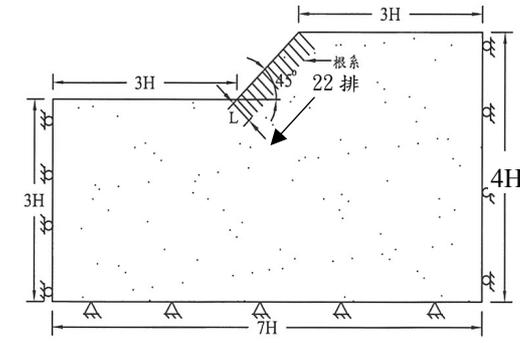


圖 3(a)

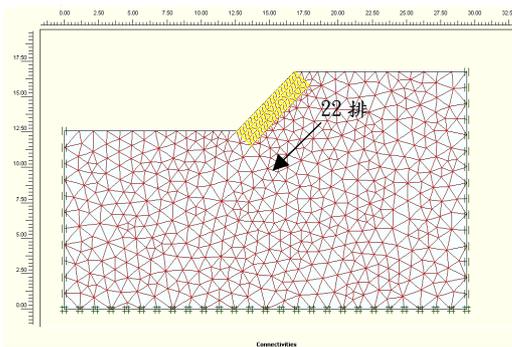


圖 3(b)

圖 3. 根系加勁邊坡之(a)幾何模式(b)有限元素網格

Figure 3. (a) Geometry model (b) finite element mesh of root reinforced slope.

3.2.2 輸入參數

含根邊坡之穩定分析所需輸入之土壤材料參數，與表 1 者相同。另外，根系材料參數則須經由合理假設、推估及平面應變轉換之程序來決定如下：

1. 假設受剪面上根系所提供之平均拉力強度 $T_r = (t \times A_r / A_s) = 270 \text{ kPa}$ 。其中，單根之拉力強度 $t = 28.22 \text{ MPa}$ 、受剪面面積約等於坡面面積 $A_s = 6 \text{ m}^2$ ，而受剪面上根系之總斷面積 A_r ，可由根系各種等級根徑（例如 i 等級根徑， $i=1 \sim m$ ，共有 m 種等級之根徑）之根數 n_i 與其根斷面積 a_i 乘積的總和決定 ($A_r = \sum n_i \times a_i$)。因此，可估算受剪面上根系所提供之總抗拉力 $T_{\text{total}} (= T_r \times A_s = t \times A_r) = 1620 \text{ kN}$ 。
2. 假設根系之平均根徑 $d = 3 \text{ mm}$ ，可得平均根斷面積 $a = 7.07 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。再由 $T_{\text{total}} = t \times a \times n$ ，可間接求得根系總根數 $n = 8118$ 支。
3. 將根系總根數 $n = 8118$ 支，沿坡面配置 22 排後，並於每一排之垂直紙面方向(即平面應變 1 m 縱深)再配置 369 支根，幾何模式與有限元素網格分別如圖 3(a)及(b)所示。
4. 根系平面應變之彈性模數 E_{rPl} 可由其實際配置之彈性模數 $E_{rLab} = 217.8 \text{ MPa}$ ，轉換求得。

依 $E_{rPl} = (A_{rLab} / A_{rPl}) \times E_{rLab} = 0.8694 \times E_{rLab} = 189.4 \text{ MPa}$ 。式中，每一排實際配置根系之斷面積 $A_{rLab} = 369 \times (3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times \pi / 4)$ ，而平面應變根系之斷面積 $A_{rPl} = 3 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 。

總結上述推算結果，含根邊坡根系~加

勁材穩定分析法所需之土壤與根系材料參數輸入值摘示如表 2。

表 2 根系~加勁材邊坡各項參數輸入值
Table 2. Various input parameters of soil slope with root~reinforcement conversion system

材料 模式	c (kPa)	ϕ (deg)	ν	E_s (kPa)	γ_{unsat} kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	E_{rPl} (kPa)
莫爾-庫倫 (=C _o)	3.0	30	0.35	10000	18.0	20.0	189.4

3.2.3 模擬分析之執行

採用三階段數值模擬，求取含根邊坡之安全係數：

phase 1：利用自重之重力加載(Gravity Loading)計算初始應力。

phase 2：啟動邊坡土壤中之根系。

phase 3：進行 c - ϕ 折減，穩定性安全係數 FS 值計算。

另外，藉由建立之無根邊坡與含根邊坡幾何模式，以及土壤凝聚力變化($c=3$ 、 5.0 、 7.0 、 9.0 kPa)進行穩定分析，可探討根系加勁效果與土壤凝聚力間之關係。

3.2.4 參數研究

含根邊坡數值分析之有效性已在前節予以確認。本節再對含根邊坡之根系，採用三種根長($L=1$ 、 1.5 、 2 m)並配合七種根系生長角 α (與鉛垂線之夾角 $\alpha=0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90°)進行穩定分析。當根系生長角 α 等於邊坡角 i 時，表示根系生長方向垂直坡面。

3.3 根系~加勁等值層轉換法

V. Operstein and S. Frydman (2000) 之研究指出，根系與邊坡潛在滑動面呈正交時，滑動面上可提供之最剪力強度 (S_{max}) 為：

$$S_{max} = (c + 0.25T_r) + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

其中，令 $c_{total}=(c+0.25Tr)=(c+\Delta c)$ 為邊坡受到根系加勁後，土壤之總外視凝聚力 (total apparent cohesion)。其中， $\Delta c=0.25Tr$ 為根系所提供之外視凝聚力增量。本節將根系加勁區之土層以一等值層取代，以模擬根系對土壤的加勁效果。再依此轉換法進行邊坡穩定數值分析，並與根系~加勁材轉換法之分析結果比較。

3.3.1 建立幾何模式

邊坡幾何模式與無根邊坡相同，坡高 H ($=4.2$ m)、邊坡角 45° ，土層深度 $3H(=12.6$ m)。加勁等值層的厚度依實際根系長度可控制在 $1\sim 2$ m 之間，幾何模式如圖 4 所示。

3.3.2 輸入參數

土壤採用莫爾-庫倫模式，將根系所分佈的範圍，以加勁等值層取代，進行穩定分析。其中，根系之 $Tr = (t \times Ar / As) = 270$ kPa，加勁等值層之 $c_{total}=(c+0.25Tr)=(3+67.5)=70.5$ kPa，土壤其餘相關參數， ϕ 、 E_s 、 ν 與無根邊坡相同。含根邊坡根系~加勁等值層穩定分析法所需之土壤與根系材料參數輸入值摘示如表 3。

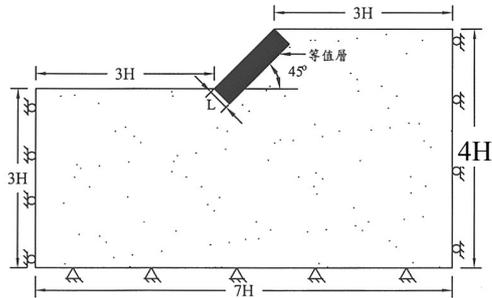


圖 4. 根系加勁等值層邊坡幾何模式示意
Figure 4. Illustration of geometry model of root~equivalent reinforced layer conversion system

表 3. 根系~加勁等值層邊坡各項材料參數輸入值

Table 3. Various input parameters of root~equivalent reinforced layer conversion system

土層類型	c (kPa)	ϕ (deg)	E_s (kPa)	ν
無根土層	3.0 (= c_0)	30	10000	0.35
含根土層 (等值層)	70.5 (= c_{total})			

3.3.3 模擬分析之執行

phase 1：利用自重之重力加載(Gravity Loading)計算初始應力。

Phase 2：進行 c - ϕ 折減，穩定性安全係數 FS 值計算。

結果與討論

4.1 無根邊坡數值穩定分析

圖 5 為邊坡角與臨界凝聚力 c_0 間的關係。

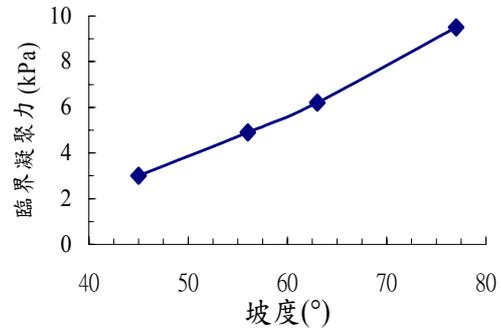


圖 5. 邊坡坡度與臨界凝聚力之關係圖

Figure 5. Relationship of slope inclination and critical cohesion

在坡高 H ($=4.2$ m) 不變之情況，隨著邊坡角的增加，土壤滑動潛勢亦會提高。為產生足夠之滑動抗力，在 ϕ 角不變之情況下，使邊坡維持於臨界穩定狀態時，所需之 c_0 值亦必須隨之提高。

圖 6 顯示，在無根邊坡穩定分析中，強度參數 c ($=c_0$) 值及 ϕ 角逐漸折減至潛在滑動面產生之情況。潛在滑動面乃在強度參數作最後一次折減時，連結土層應變增量最大的點所形成。

4.2 含根邊坡數值穩定分析

本研究對根系在邊坡之加勁效果，採用相對安全係數(Relative Factor of Safety) $RFS = (FS_r / FS_0)$ 來進行評估。其中， FS_r = 含根邊坡之安全係數， FS_0 = 無根邊坡之臨界安全係數(約為 1.0)。因此， RFS 值之大小可完全反應根系對邊坡穩定性提升量及貢獻度之高低。

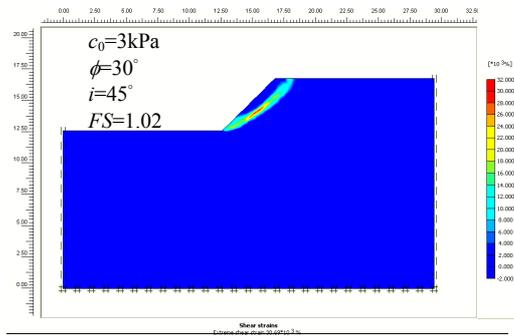


圖 6. 無根邊坡穩定分析潛在破壞面位置
Figure 6. The location of potential failure surface of soil slope without root system

4.2.1 根長對邊坡穩定之影響

如圖 7 所示，分析中固定坡高 H ($=4.2$ m)，及邊坡角 $i=45^\circ$ 。根系採用四種生長角即根系與坡面鉛垂線之夾角 α ($=30^\circ$ 、 45° 、 60° 、 75°)及三種根長 L ($=1$ 、 1.5 、 2 m)。由圖可知在 $\alpha \geq 45^\circ$ 之情況，邊坡之 RFS 值皆隨根長之增加呈線性提升。另外，分析結果亦顯示，當 $\alpha=30^\circ$ 時，根長對 RFS 值之影響有限，因此圖中未納入 $\alpha=30^\circ$ 之情況。此亦暗示根系之生長方向，就猶如錨錠工程之打設角，對邊坡之加勁效果有重大影響。再者，圖 8 顯示根系生長角 $\alpha=45^\circ$ 及根長 $L=1.5$ m 之含根邊坡穩定分析中，潛在滑動面之位置。由圖中可知，潛在滑動面之發展位置受根系長度之影響，根長將限制滑動面產生的區位。根系愈長時，邊坡表土層受根系加勁之區域愈大，由於此區域抗剪強度之提高，滑動面因而被限制導往邊坡之較深處發展，此為滑動面向下伸展而邊坡整體安全性 RFS 值提高之主因。

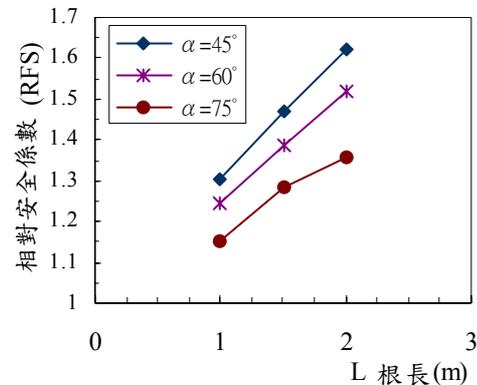


圖 7. 根長對邊坡相對安全係數 RFS 的影響
Figure 7. The influence of root length on the relative factor of safety (RFS)

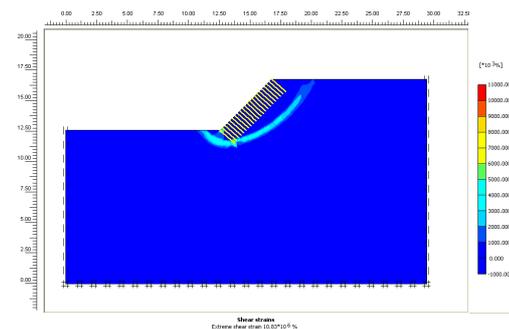


圖 8. 根系生長角 $\alpha=45^\circ$ (生長方向與坡面垂直) 時之邊坡穩定分析潛在滑動面位置
Figure 8. The location of potential failure surface in slope stability analysis with root system of growth angle $\alpha=45^\circ$ (the growth direction of root system perpendicular to the slope surface)

4.2.2 根系生長角 α 對邊坡穩定之影響

圖 9 為根系在特定根長情況下，其生長角 α 變化對與 RFS 值之影響。分析中固定邊坡之坡高 H ($=4.2$ m)，邊坡角 $i=45^\circ$ 及其臨界凝聚力 $c_0=3.0$ kPa。由分析結果知，在

$\alpha=0^\circ \rightarrow 15^\circ$ 之情況，尤其在 $\alpha=0^\circ$ (根系往重力方向生長) 之情況，無論根長為何根系對邊坡穩定性提升之貢獻度相當有限。而在 $\alpha=15^\circ \rightarrow 45^\circ$ 之情況，RFS 值呈現約 30% 之大幅增量。其中，在 $\alpha=45^\circ$ 時，RFS 值達到最大值。最後，在 $\alpha > 45^\circ$ 之情況，RFS 值呈逐漸降低。

另外，當 $\alpha=30^\circ \rightarrow 45^\circ$ 且根長為 2 m 時，RFS 值之增量約為 20%；但同一條件下，根長減為 1 m 時，RFS 值之增量則僅有 1.3%。因此，根長較短之根系(1 m)在生長角度達 30° 時，大部分的加勁效果即已發揮。

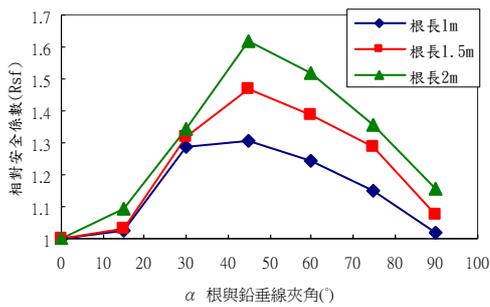


圖 9. 根系生長角(α)對 RFS 的影響

Figure 9 . The influence of growth angle of root system on relative factor of safety (RFS)

如圖 10 所示，當根系之生長角 $\alpha=0^\circ$ (即生長方向與重力方向吻合) 時，潛在滑動面將直接切過根系加勁區並由坡趾穿出，此將使得趾部下方部分根系未發揮其應有加勁效果。直至根系生長角 $\alpha > 30^\circ$ 後，潛在滑動面才得以延伸至所有根系加勁區之下方土層(如圖 8 所示)。此亦為 RFS 值在 $\alpha=45^\circ$ 時大幅增加的原因。

當根系生長角 $\alpha=90^\circ$ (即生長方向與水平方向吻合) 時，潛在滑動面亦隨之由較深

層處向坡面縮移，但滑動面在坡趾區域並未切過太多的根系，如圖 11 所示。

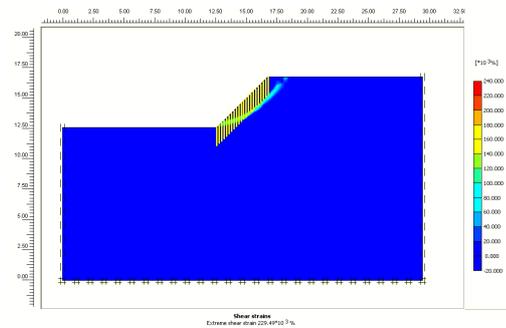


圖 10. 根系生長角 $\alpha=0^\circ$ (生長方向與重力方向吻合) 時之邊坡穩定分析潛在滑動面位置

Figure 10 . The location of potential failure surface in slope stability analysis with root system of growth angle $\alpha=0^\circ$ (the growth direction of root system coincident with the gravity)

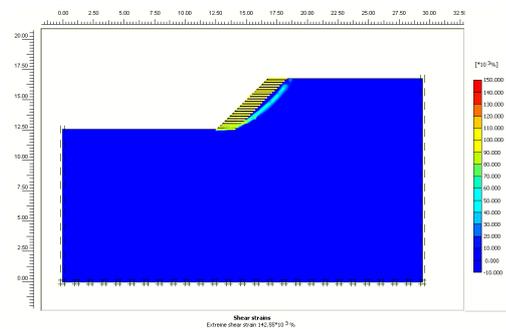


圖 11. 根系生長角 $\alpha=90^\circ$ (生長方向與水平方向吻合) 時之邊坡穩定分析潛在滑動面位置

Figure 11 . The location of potential failure surface in slope stability analysis with root system of growth angle $\alpha=90^\circ$ (the direction of root growth coincident with the horizontal direction)

4.2.3 坡度對根系加勁邊坡的影響

分析中，固定坡高 $H(=4.2\text{ m})$ ，採用四個邊坡角 i ($=45^\circ$ 、 56° 、 63° 、 77°)，根系生長角 $\alpha=45^\circ$ (生長方向與坡面垂直)，根長 L 為 1.5 m 的情況下，進行穩定分析。由於上述之四個邊坡角，在分別配予四個臨界凝聚力 c_0 ($=3$ 、 4.9 、 6.3 、 9.5 kPa)後，即可導致無根邊坡處於臨界狀態($FSo\approx 1.0$)。因此，RFS 值之增加，完全是由於根系的加勁所造成。如圖 12 所示，在同一植生條件下，根系對邊坡的加勁效果將隨著邊坡坡度的增加而愈趨於顯現。

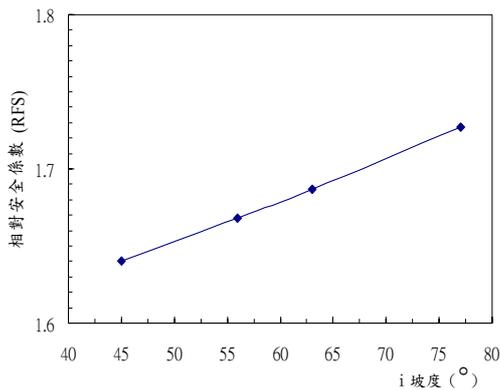


圖 12. 坡度對 RFS 的影響

Figure 12 . The influence of slope inclination on relative factor of safety (RSF)

由前節已知，在根系垂直坡面(生長角 $\alpha=45^\circ$)且邊坡角 $i=45^\circ$ 的情況下，滑動面為一完全通過根系下方土層之圓弧(如圖 8 所示)。然而在同一根系條件下，當邊坡變的陡峭時(如 $i=77^\circ$)，潛在滑動面依然完全通過根系下方土層，而滑動面更遠離坡面，如圖 13 所示。

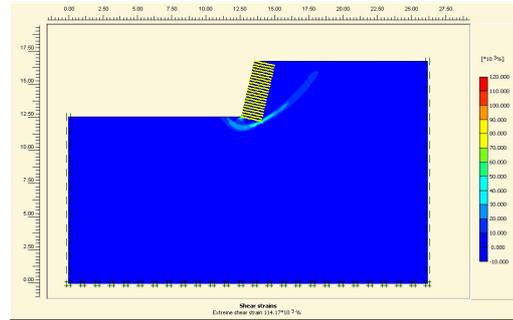


圖 13. 邊坡角 $i=77^\circ$ 且根系生長角 $\alpha=45^\circ$ 時之邊坡穩定分析潛在滑動面位置

Figure 13. The location of potential failure surface in slope stability for the case of slope inclination angle $i=77^\circ$ and root growth angle $\alpha=45^\circ$

4.2.4 土壤凝聚力對根系加勁之影響

分析中，固定坡高 $H(=4.2\text{m})$ 及邊坡角 $i=45^\circ$ ，採用四個凝聚力 c ($=3$ 、 5.0 、 7.0 、 9.0kPa)，根系生長角 $\alpha=45^\circ$ (生長方向與坡面垂直)，根長 L 為 1.5m 的情況下，進行穩定分析。由圖 14 可知，根系對邊坡穩定性的貢獻度將由於土壤凝聚力 c 值的增加而逐漸降低。

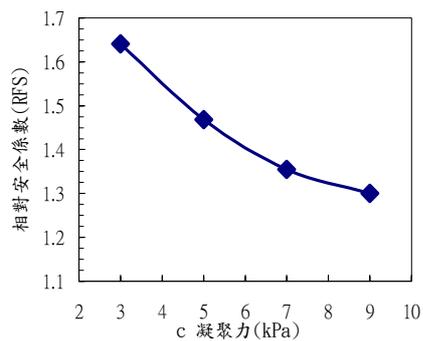


圖 14. 土壤凝聚力對含根邊坡穩定貢獻度的影響

Figure 14 . The effect of cohesion on the contribution of root system to the slope stability

4.3 加勁等值層應用於邊坡穩定分析

於分析中，固定坡高 $H=4.2\text{ m}$ 及邊坡角 $i=45^\circ$ ，根系生長角 $\alpha=45^\circ$ (生長方向與坡面垂直) 及根長 $L=1、1.5、2\text{ m}$ ，在凝聚力 $=3、5\text{ kPa}$ 之情況下，將含根區之加勁效果轉換成一具有外視凝聚力增量 $\Delta c(=0.25Tr)$ 之加勁等值層(equivalent layer)，進行穩定分析。由圖 15 可知，採用根系~加勁材轉換與根系~加勁等值層轉換兩種根系模擬方法所求得的 RFS 值相當吻合，其間差異小於 10%。此亦間接証實，由含根直剪試驗所推求之外視凝聚力增量理論公式($\Delta c=f(Tr)$)的可靠性。

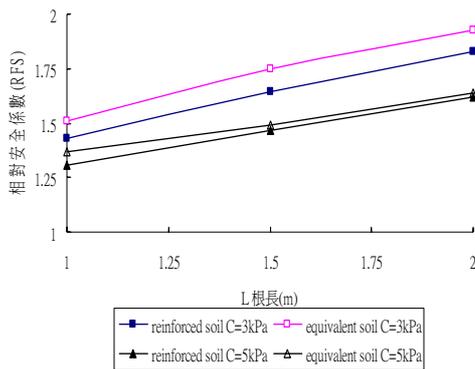


圖 15. 根系~加勁材轉換與根系~加勁等值層轉換邊坡穩定分析法之比較

Figure 15 . Comparison of slope stability methods using root~reinforcement conversion system and root~equivalent reinforced layer conversion system

必須強調者，加勁等值層轉換分析法祇適用於模擬根系垂直坡面的情況。倘若在根系斜交坡面的情況下，採用此法進行穩定分析將會發生穩定性高估的現象。此結果與 V. OPERSTEIN 與 S. FRYDMAN (2002) 所分析者相同。由加勁等值層邊坡穩定分析潛在破壞面位置圖(如圖 16)，可以發現加勁等值

層在破壞面的發展形式上與加勁土壤邊坡相似，這也是兩種分析法具有相似 RFS 值之原因。

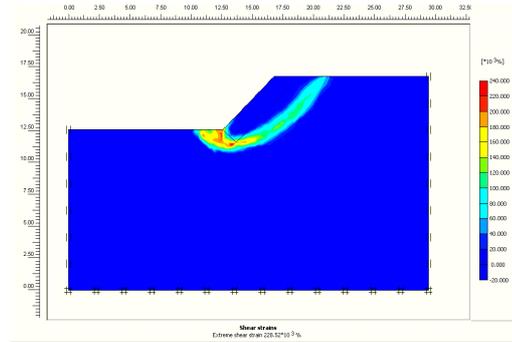


圖 16. 根系~加勁等值層轉換($\alpha=45^\circ$)邊坡($i=45^\circ$)穩定分析潛在破壞面位置

Figure 16 . The location of potential failure surface using root~equivalent reinforced layer conversion system for the case of $\alpha=45^\circ$ and $i=45^\circ$

結論與建議

依據無根及含根邊坡在各種坡度、土壤凝聚力及根系參數條件下之穩定分析結果，可歸納下列結論與提出幾項建議：

5.1 結論

1. 當根系生長角 (根系與鉛垂線之夾角) $\alpha=0^\circ\sim 15^\circ$ 時，尤其在 $\alpha=0^\circ$ (根系往重力方向生長) 之情況，無論根長為何根系對邊坡穩定性提升之貢獻度相當有限。當 $\alpha>30^\circ$ 後，根系對邊坡穩定之影響才逐漸顯現。而當 $\alpha=45^\circ$ (根系垂直坡面) 時，根系之加勁效果可得最佳發揮，其 RFS 值最大。隨之，在 $\alpha>45^\circ$ 後， RFS 值即持續降低。
2. 根系之生長角度 α 與長度 L ，明顯影響

潛在滑動面發展之位置。當 $\alpha=0^\circ$ 時，滑動面將直接切過根系加勁區並由坡趾穿入，此將使得趾部下方部分根系未發揮其應有之加勁效果。當 $\alpha>30^\circ$ 後，滑動面才得全部延伸至所有根系加勁區下方之土層，此時根系的加勁效果才得完全發揮。直到根系垂直坡面時($\alpha=45^\circ$)，滑動面位置之深度最大，其相當之 *RFS* 值最高。當 $\alpha>45^\circ$ 後，滑動面又逐漸往坡面縮移。此時由於根系漸趨水平，而 *RFS* 值亦隨之降低。

3. 在同一植生條件下，隨著邊坡坡度的增加根系的加勁效果愈趨顯現。此乃由於在同一根系條件下，當邊坡轉為陡峭時，潛在滑動面依然完全落於根系下方之土層且滑動面更遠離坡面所致。
4. 根系對邊坡穩定性的貢獻度將隨著土壤既有凝聚力 *c* 值的提升而逐漸下降。
5. 採用根系~加勁材轉換與根系~加勁等值層轉換兩種分析法所求得之 *RFS* 值相當吻合，其間之差異小於 10%。此証實，由含根土直剪試驗為基礎所推導之等值外視凝聚力增量理論公式之可靠性。但必須注意者，加勁等值層轉換之分析法祇適用於模擬根系垂直坡面之情況。若在根系斜交坡面的情況下，採用該分析法則可能會導致穩定性被高估的後果。

5.2 建議

1. 未來可將植生對水文特性如地下水變化及土壤含水量等影響效應，納入邊坡穩定分析中。
2. 對常見應用植生植物之根系力學特性及

計算型力學模式，應儘速建立其資料庫。尤其針對常用植物根系之生長分布型式及力學強度，將有助於各類分析及設計實務上之運用。

3. 現場或室內根系力學試驗程序及儀器之設計，應以能充分呈現植物根系實際力學行為並引據國際相關之試驗流程來考量。
4. 因應生態工程中之植生設計及其效益評估，建立標準化之根系力學試驗及根系調查統計模式有其急切性。
5. 利用有效之數值模擬工具進行量化之實務驗證，以確立分析模式。最後，可嚐試針對各類特定植物建立植生工程設計圖表，提供根系設計實務操作之參考。

參考文獻

1. 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研究所碩士論文。
2. V. Operstein and S. Frydman (2000) The influence of vegetation on soil strength, *Ground Improvement* 4 (2), 81~89.
3. V. Operstein & S. Frydman (2001), Numerical simulation of direct shear of root-reinforced soil, *Ground improvement* 5(1), 41-48.
4. V. Operstein & S. Frydman (2002) The stability of soil slopes stabilized with vegetation, *Ground improvement* 6 (4), 163-168.

97 年 01 月 05 日 收稿
97 年 01 月 20 日 修改
97 年 01 月 27 日 接受