

山區道路均質及異質邊坡背拉式擋土排樁之穩定性參數研究

陳家棟^[1*] 陳威翔^[2] 林德貴^[3]

摘要 本研究首先針對林務局羅東林區管理處 2012 年度宜專一線地滑區與背拉式地錨擋土排樁(以下簡稱背拉式擋土排樁)之監測結果, 進行三維有限元素數值分析。同時, 設置兩組虛擬邊坡, 即崩積層-均質邊坡及崩積層/岩層-異質邊坡之典型模型邊坡, 進行排樁及地錨之設計參數研究。在數值模型中, 選用上、下邊坡之坡度($\alpha_u=30^\circ$, $\alpha_d=40^\circ$), 地錨不同錨碇段長度 L_g 及地錨傾角 θ , 以及排樁打設間距比 S/D 等參數, 探討其對邊坡穩定性及排樁結構力學行為之影響。最後, 可歸納出背拉式擋土排樁穩定邊坡中, 所採用排樁及地錨設計參數之最佳化配置原則。依據分析成果可知, 排樁在崩積層/岩層-異質邊坡之穩定性安全係數 FS , 皆高於崩積層-均質邊坡者, 此說明排樁設計時, 樁尖貫入岩層(承載層)之重要性。當排樁打設間距比 $S/D=6\rightarrow 8$ 時, FS 幾無變化; 但當 $S/D=8\rightarrow 10$ 時, FS 會明顯降低。由此可推論, 排樁打設間距超過 8 倍樁徑後, 排樁間之土拱效應將消失。再者, 當地錨之錨碇段長度由 $5\rightarrow 7$ m 時, 崩積層-均質邊坡之 FS 明顯上升, 而崩積層/岩層-異質邊坡之 FS 則微幅提升; 而錨碇段長度由 $7\rightarrow 10$ m 時, 兩者之 FS 皆趨於定值。由此可推論, 採用地錨之錨碇段長度 7 m 為較合適之設計參考尺寸。

關鍵詞: 三維有限元素數值分析、背拉式擋土排樁、錨碇段長度、穩定性安全係數

Parametric Studies on the Stability of Tied-Back Retainin Piles Installed in the Homogeneous and Heterogeneous Cut Slope of Mountainous Road

Jia-Dong Chen^[1*] Wei-Xiang Zhen^[2] Der-Guey Lin^[3]

ABSTRACT Firstly, this study performed a series of three-dimensional (3-D) finite element analyses to investigate the stability and stabilization mechanism of tie-back retaining pile of landslide at Yi-Zhuan No. 1 forest road (or Yi-Zhuan-No.1 Landslide) using monitoring data of tie-back anchors. Meanwhile, two groups of fictitious model slopes, namely, homogeneous slope of colluviums (or homogeneous slope) and heterogeneous slope of colluviums on bedrock (or heterogeneous slope), were established to carry out a systematic numerical experiment on various design parameters (or numerical variables) of tie-back retaining pile. In numerical experiments, the design parameters consist of inclination angle of up and down slopes ($\alpha_u=30^\circ$, $\alpha_d=40^\circ$), the anchorage length (L_g), inclination (θ) and spacing ratio (S/D =pile spacing/pile diameter) of retaining pile. The effects of design parameters on the slope stability and mechanical behaviors of tie-back retaining pile were also detected. Finally, based on the numerical experiments, the optimal configuration of design parameters for the stability and stabilization mechanism of tied-back anchor retaining pile can be drawn. For a fictitious slope, the FS value of heterogeneous slope (colluviums on bedrock) is always higher than that of homogeneous slope (colluviums) and this shows the importance in the design to penetrate the retaining pile into the bedrock (bearing stratum). Moreover, the FS value turns into greatly decrease as the installation spacing S value larger than $8D$ ($S \geq 8D$) and this indicates that the arching effect between two adjacent piles immediately disappears when the spacing of piles is larger than 8 times of pile diameter. In addition, the FS value of homogeneous slope is greatly promoted when the anchorage length L_g increase from 5 to 7 m while it is not the case for heterogeneous slope the increase is very rare. However, the FS values of the two types of fictitious slopes, become unchanged and tend to be a constant when the L_g value increases from 7 to 10 m. Accordingly, it can be concluded that an anchorage length of 7 m can be adopted appropriately in the design of tie-back retaining pile.

Key Words: Three-dimensional (3-D) finite element analyses, Tied-back retaining pile, Stabilization works, Anchorage length, Factor safety of slope stability

[1] 國立中興大學水土保持學系研究生 (* 通訊作者 E-mail: ax02tom@hotmail.com)
Graduate Student, Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan
[2] 國立中興大學水土保持學系博士生
PhD Student, Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan
[3] 國立中興大學水土保持學系教授
Professor, Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

一、前言

國內道路邊坡在颱風豪雨期間之崩塌災害處置，通常必須在短時間內完成設計施工，且施工經費有限。一般而言，最常使用之工法為無背拉或背拉式 RC 擋土排樁。Duncan and Wright (2005) 研究發現排樁水平打設間距，通常應介於 2 至 4 倍樁徑($S=2D \sim 4D$)之間，排樁方能發揮土拱效應，有效抵抗邊坡滑動。另外，地錨之設計以錨碇段長度、打設傾角及間距，作為設計時之主要考量。實務上，錨碇段設計長度多採用 3~10 m 之間。Habib (1989) 及 Schnabel (2002) 在其錨碇段設計長度之研究中指出，當錨碇段長度超過某臨界值後，即便長度持續增加，其極限錨碇力亦無法相對提高。莊培凱(2003)針對相同之埋入深徑比之地錨進行研究得知，地錨打設傾角 $\alpha=20^\circ$ 時，尖峰摩擦力最大且錨碇力也是最大，而 $\alpha=10^\circ$ 時，其尖峰摩擦力最小。

在排樁穩定邊坡數值分析方面，2D 平面應變數值模型，除了打設間距關係與樁體勁度必須進行修正外，模型亦無法反應群樁間之力學互制機制行為，如相鄰兩排樁間之土拱效應 (Poulos, 1995)。同時，過去國內、外相關研究，雖已進行一些 3D 數值分析，但大多以無背拉地錨排樁穩定邊坡之穩定機制研究為主(Wei and Cheng, 2009)。其中，3D 數值模型中之排樁尺寸及邊坡型態，皆以理想化之有限邊坡方式來處理，此與一般山區道路上、下長邊坡現況有所差異。另外，有關土壤/排樁/地錨三者間之互制行為 3D 數值分析研究方面，由於數值工具之功能性限制，在各類輸入參數及分析技術上，皆有許多假設及簡化(廖洪鈞等, 2005)。因此，本研究期望採用現階段最先進之 3D 數值分析工具，並配合山區道路邊坡，採用背拉式地錨擋土排樁(以下簡稱背拉式擋土排樁)工法進行穩定之現況條件，來建立 3D 數值模型，再以數值模擬技術，來探討此工法對邊坡穩定性之影響以及整體邊坡之力學及變形行為。

二、研究區域概況

本研究依據林務局羅東林區管理處(2012)之 2012 年宜專一線與翠峰景觀道路地滑與地錨監測委託技術服務-規劃報告書之鑽探監測成果作為研究區，進行地滑地穩定性之分析與探討。10.8 K 工區內傾斜管為 2010 年監測案與 2011 年工程案所設置，如圖 1 所示，粗體虛線為本研究所採用之分析剖面。

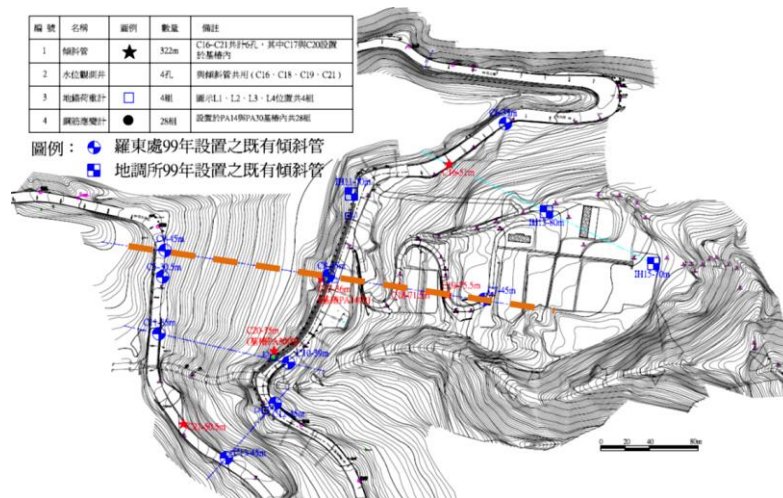


圖 1 2011 年宜專一線 10.8K 地滑整治工程案之成效監測設施配置

Fig.1 Monitoring layout of remediation works of landslide at the mileage of 10.8 K of Yi-Zhuan No. 1 forest road (or Yi-Zhuan-No.1 Landslide) in year 2011

圖 1 中藍圓點為前期既有傾斜管位，藍方點為地調所既有傾斜管位，紅星點為前揭工程案規劃增設之傾斜管 6 孔(編號 C16 至 C21)，其中 C17 與 C20 分別預埋於該整治工程之基樁 PA14 與 PA30 內，另有水位觀測井 4 孔、地錨荷重計 4 組與鋼筋應變計 28 組等設施，用以觀測基樁穩定性與評估地滑整治成效。

三、研究方法

1. 研究流程

首先，參用林務局羅東林區管理處 2012 年宜專一線，地滑區之整治成果與地錨監測結果，進行 3-D 數值模擬，以探討背拉式擋土排樁之穩定機制。隨之，設置兩組虛擬邊坡，即崩積層-均質虛擬邊坡(以下簡稱均質邊坡)及崩積層/岩層-異質虛擬邊坡(以下簡稱異質邊坡)之典型模型邊坡，進行排樁及地錨之設計參數研究。本研究採用有限元素法進行邊坡穩定分析，針對背拉式擋土排樁穩定工法中，地錨不同錨碇段長度 L_a 及打設角度 α_{anchor} 、以及排樁不同打設間距 S 等參數，探討其對邊坡穩定性及排樁結構力學行為之影響。最後，依據分析成果，可歸納出背拉式擋土

排樁邊穩定坡中，所採用排樁及地錨設計參數之最佳化配置原則。其研究執行流程如圖 2 所示。

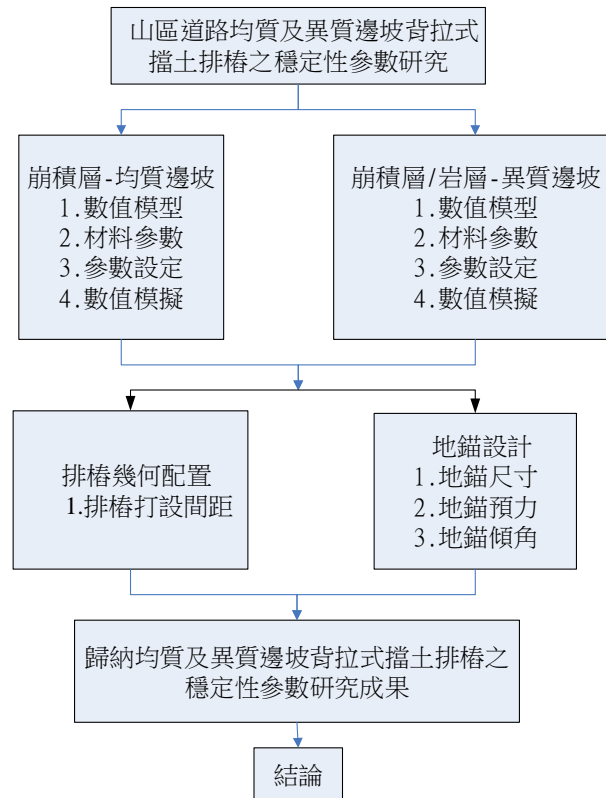


圖 2 研究執行流程圖

Fig.2 Flow chart and framework of the study

2.崩積層-均質邊坡背拉式擋土排樁設計參數研究

2.1 幾何模式

本研究建立多組典型虛擬邊坡之數值模型，進行穩定性數值分析。並依據分析結果中，虛擬邊坡潛在滑動面之發展情況，最吻合山區道路破壞實況之一組虛擬邊坡，來進行背拉式擋土排樁設計參數研究。虛擬邊坡幾何形狀之設定原則說明如下：

(1)坡度

本研究參考水土保持技術規範(2012)坡度分級選擇屬於六級坡之上邊坡(坡角=30°)及六級坡之下邊坡(坡角=40°)之坡度進行分析。

(2)坡高

依據行政院農委會林務局(2011)針對大鹿、人倫林道 45 處高崩塌潛勢路段，進行上邊坡坡高量測調查結果顯示，坡高有 44% 在 15 m 以下，如表 1 所示。故本研究將虛擬邊坡之數值模型坡高設定為 15 m。

表 1 台灣林道高崩塌潛勢路段之坡高分布 (行政院農委會林務局，2011)

Table 1 Percentage distribution of slope height for forest road with high potential landslide in Taiwan

(Forestry Bureau, Agricultural Commission, Executive Yuan, 2011)

坡高(m)	百分比(%)
$0 < H \leq 15$	44
$15 < H \leq 25$	25
$35 < H \leq 45$	13
$45 < H$	18

(3) Y-方向擋土排樁配置方向邊界

根據邱倍堅(2012)針對 3-D 虛擬邊坡在 Y-方向(如圖 3)之寬度範圍：10 m、15 m、20 m 及 30 m，採用強度折減

穩定分析法進行邊坡穩定性分析，並繪製在不同 Y-方向邊界範圍情況下，計算求得之邊坡穩定性安全係數 FS 。當 Y-方向邊界範圍超過 20 m 時，邊坡 FS 之數值解已漸趨穩定收斂。在經濟運算時間及最小邊界效應考量下，本研究採用 30 m 作為 3-D 數值模型在 Y-方向邊界範圍。

綜合上述坡型設定原則，吾人建立多組典型虛擬邊坡之數值模型，並於多組數值模行中，選定山區道路之虛擬邊坡(上邊坡坡度 $\alpha_u = 30^\circ$ ；下邊坡坡度 $\alpha_d = 40^\circ$)來進行設計參數研究。隨之，將選定之虛擬邊坡分別以每次增加 5° 來進行組地錨傾角變化($\theta = 10^\circ \sim 45^\circ$)及三組地錨預力變化($T_a = 40$ 、50 及 60 t)，探討不同坡度比之情況下，地錨傾角及地錨預力之邊坡穩定性。最後，選定中間參數值之地錨傾角 $\theta = 35^\circ$ 及地錨預力 $T_a = 50$ t，進行不同排樁打設間距及地錨施設尺寸之數值模擬，其邊坡之幾何模型，如圖 3 所示。其中， L_s =坡面長度、 L =坡面長度之水平投影長、 L_p =排樁打設長度、 D =樁徑及 S =兩相鄰排樁中心之間距； L_a =地錨長度($=L_f + L_g$)、 L_f =自由段長度、 L_g =錨碇段長度。

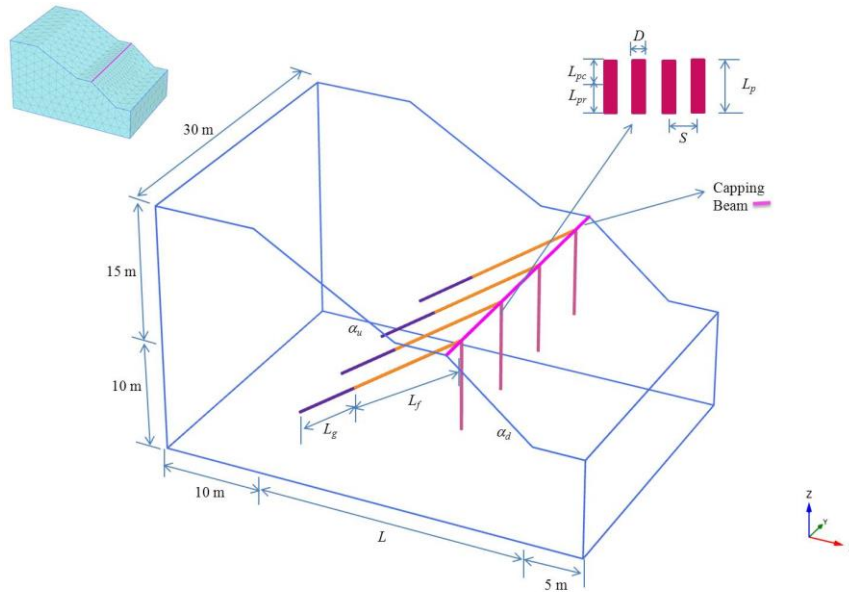


圖 3 崩積層-均質虛擬邊坡 3-D 數值模型幾何配置

Fig. 3 Three-dimension (3-D) numerical model and geometry layout of colluviums-homogeneous slope

2.2 邊界條件

3-D 數值模型之四周側面邊界設定為水平位移束制邊界(滾輪邊界, roller boundary)，即水平位移量 $\Delta X=0$ 及 $\Delta Y=0$ 而垂直位移量 $\Delta Z=0$ 。而底面邊界則設定為位移完全束制邊界(鉸接邊界, hinge boundary)，即水平位移量 $\Delta X=0$ 及 $\Delta Y=0$ ，且垂直位移量 $\Delta Z=0$ 。

2.3 土壤材料參數

為使各虛擬邊坡於施設穩定工法前處於臨界狀態($FS_o \approx 1.0$)，吾人可針對土壤之凝聚力 c' 及摩擦角 ϕ' 進行調整。原則上，可固定摩擦角 ϕ' ，只對凝聚力 c' 值進行調整(因降雨或地震期間， c' 值將很快消失)。經由分析可反算，虛擬邊坡處於臨界狀態($FS_o \approx 1.0$)時之相當土壤性質及強度參數，如表 2 所示。其中，有效應力之楊氏模數 E' 由 Bowles (2001) 經驗公式 $E' = 600[(SPT-N)+6]+2000$ (kPa) (for gravelly sand with $SPT-N > 15$) 來決定。因此，崩積層之 $E' = 600[(50)+6]+2000 = 35600$ (kPa)。

表 2 崩積層-均質虛擬邊坡處於臨界狀態之相當土壤材料模式參數

Table 2 Soil material model parameters for the critical state ($FS_o \approx 1.0$) of colluviums-homogeneous slope

Soil Layer	$\gamma_{unsat}(\gamma_{sat})$ (kN/m ³)	ν'	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	E' (kPa)	k_x, k_y, k_z (m/day)	R_{inter}
崩積層	19(22)	0.3	3	27	0	3.56×10^4	3.499	0.75

2.4 結構材料參數

樁體結構材料參數中，採用 Das (2007) 所提之公式計算樁/土界面，最大摩擦阻抗 T_{max} 如下：

$T_{max} = \sum p \times f = \sum p \times K_o \times \sigma_v' \times \tan \delta = (1 \times 3.14) \times (1 - \sin 35^\circ) \times [(25 \times 40.5) \tan(0.8 \times 35^\circ)] = 720.8$ (kN/m)，其餘參數，如

表 3 所示。

表 3 擋土排樁之材料模式參數
Table 3 Material model parameters of retaining pile

材料參數	E (kPa)	γ (kN/m ³)	Pile type 選項	Predefined pile type 選項	D (m)	A (m ²)	I_3 (m ⁴)	I_2 (m ⁴)	T_{max} (kN/m) 樁身 摩擦阻抗	F_{max} (kN) 樁尖 端點阻抗
Embedded pile	2.36×10^7	23.52	選用 Predefined	選用 Massive circular pile	1	0.79	0.049	0.049	720.8	700

2.5 排樁打設間距

排樁間之土拱效應所產生的剪力阻抗，具有減緩邊坡滑動體向下滑動之趨勢。此外，排樁打設間距會影響土拱效應的發展，因此為了確認其最佳打設間距(或土拱效應能夠發揮作用之最大打設間距)，本研究設定排樁打設間距比 $S/D=5、6、7、8$ 及 9 等五組不同打設間距比。其中， D =樁徑， S =相鄰排樁中心之距離。

2.6 地錨施設尺寸

背拉式地錨是利用施拉之預力，對擋土設施提供大量之側向抵抗力，且因地錨之打設深度較不受限，可穿過邊坡內部之潛在滑動面，錨碇至岩盤深處，能有效提升整體擋土工法對邊坡穩定之效益。由於錨碇段為主要提供錨碇力之部分，因此，為探討最佳之錨碇段長度，本研究固定地錨之總長度 $L_a=20$ m，並設定錨碇段長度 $L_g=10$ m、 7 m 及 5 m (即 case T1、T2 及 T3)等三組不同之地錨施設尺寸，如表 4 所示。

表 4 地錨施設尺寸

Table 4 Size dimension used for anchor installation

地錨編號	case T1	case T2	case T3
自由段長度 L_f (m)	10	13	15
錨碇段長度 L_g (m)	10	7	5
總長度 L_a (m)	20	20	20

2.7 數值模擬執行

首先，採用臨界狀態($FS_0 \approx 1.0$)下之崩積層-均質虛擬邊坡，作為穩定工法施作前之初始邊坡。其次，針對三組不同排樁打設長度($L_p=6$ m、 9 m 及 12 m)及五組排樁打設間距比($S/D=5、6、7、8、9$)，進行設計參數研究。隨之，固定排樁打設長度 $L_p=9$ m 及打設間距 $S=8D$ (土拱效應能夠發揮作用之最大打設間距)，來進行三組不同之地錨施設尺寸(L_g)之參數研究，且每組數值模擬皆進行強度折減穩定性分析。最後，共完成 18 組(=3 組 $L_p \times 5$ 組 $S + 3$ 組 L_g)數值模擬演算，可歸納出背拉式擋土排樁之設計參數最佳化配置原則。

3.崩積層/岩層-異質邊坡背拉式擋土排樁設計參數研究

3.1 幾何模式

崩積層/岩層-異質虛擬邊坡之幾何形狀設定原則與 2.1 節相同，但採用上層為崩積層，下層為岩層之地層情況。依據多數山區道路邊坡之崩積層厚度為 $5 \sim 20$ m，本研究採用 6 m 為異質虛擬邊坡之崩積層厚度。崩積層/岩層-異質虛擬邊坡之幾何模型，如圖 4 所示。其中， H_a =崩積層厚度、 L =坡面長度之水平投影長、 L_f =地錨之自由段長度、 L_g =地錨之錨碇段長度、 L_p =排樁打設長度、 L_{pc} =樁長貫入崩積層之深度、 L_{pr} =排樁之入岩深度、 D =樁徑及 S =兩相鄰排樁中心之距離。

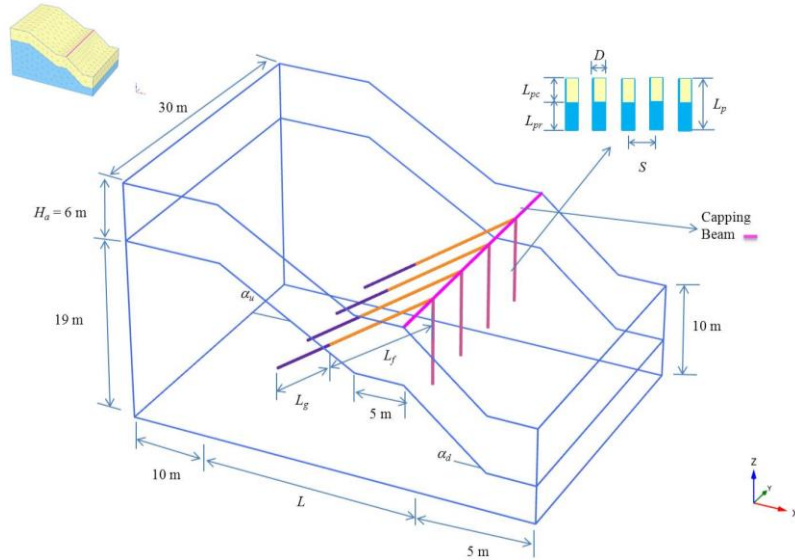


圖 4 崩積層/岩層-異質虛擬邊坡 3-D 數值模型幾何配置

Fig. 4 Three-dimension (3-D) numerical model and geometry layout of colluviums/bedrock-heterogeneous slope

3.2 邊界條件

邊界條件設定方式與 2.2 節中所述相同。

3.3 土壤材料參數

土壤材料模式參數設定與 2.3 節中所述相同。差別在於崩積層/岩層-異質虛擬邊坡中，分為兩個層次，上層為崩積層而下層為岩層。經由分析可反算虛擬邊坡處於臨界狀態($FS_0 \approx 1.0$)時之相當土壤性質及強度參數，如表 5 所示。

表 5 崩積層/岩層-異質虛擬邊坡處於臨界狀態之相當土壤/岩層材料模式參數

Table 5 Soil/rock material model parameters for the critical state ($FS_0 = 1.0$) of colluviums/bedrock-heterogeneous slope

Soil Layer	$\gamma_{unsat}(\gamma_{sat})$ (kN/m ³)	ν'	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	E' (kPa)	k_x, k_y, k_z (m/day)	R_{inter}
崩積層	19(22)	0.3	3	27	0	3.56×10^4	3.499	0.75
岩層	22(25)	0.2	50	35	5	8.00×10^5	4.752×10^{-2}	0.90

3.4 結構材料參數

樁體結構材料參數中，採用 Das (2007) 所提之公式計算樁/土界面，最大摩擦阻抗 T_{max} 如下：

$T_{max} = \Sigma p \times f = \Sigma p \times K_o \times \sigma'_v \times \tan \delta = (1 \times 3.14) \times (1 - \sin 35^\circ) \times [(25 \times 15) \tan(0.8 \times 35^\circ)] = 235$ (kN/m)，其餘材料參數設定與 2.4 節中所述相同。

3.5 排樁入岩深度

排樁貫入岩層不同深度之情況，會影響排樁對邊坡穩定性之貢獻度。因此，為探討排樁入岩深度對邊坡穩定性之影響，本研究於崩積層/岩層-異質虛擬邊坡中，設定三組排樁入岩深度比 $R_r = L_{pr}/L_{pc} = 1/6$ 、 $2/6$ 及 $3/6$ ，來進行分析。其中， L_{pr} = 排樁之入岩深度， L_{pc} = 排樁貫穿崩積層之厚度。其中， $L_{pr} + L_{pc} = L_p$ = 排樁打設長度

3.6 排樁打設間距

排樁間之土拱效應所產生的剪力阻抗，具有減緩邊坡滑動體向下滑動之趨勢。此外，由於排樁打設間距將影響土拱效應的發展；為了確認其最佳打設間距，本研究設定排樁打設間距比 $S/D = 6$ 、 8 及 10 等三組不同打設間距比。其中， D = 樁徑， S = 兩相鄰排樁中心之距離。

3.7 地錨施設尺寸

本研究為探討錨碇段長度對邊坡穩定性之影響，固定排樁打設間距 $S=8D$ (依土拱效應之作用情況，在均質虛擬邊坡為最佳打設間距)、排樁打設長度 $L_p=9\text{ m}$ 、地錨總長度 $L_a=20\text{ m}$ 、地錨預力 $T_a=490.5\text{ kN}$ 及地錨傾角 $\theta=35^\circ$ 等參數，改變三組不同錨碇段長度 L_g (即 case T1、T2 及 T3) 之地錨施設尺寸，如 2.6 節表 6 所示。

3.8 數值模擬執行

採用臨界狀態 ($FS_o \approx 1.0$) 下之崩積層/岩層-異質虛擬作為穩定工法施作前之初始邊坡，固定排樁打設間距 $S=8D$ ，並分別計算三組不同排樁之入岩深度比 ($R_r=L_{pr}/L_{pc}$) 及三組不同地錨之錨碇段長度 (L_g)。另外，在固定排樁入岩深度比 $R_r=3/6$ 及錨碇段長度 $L_g=7\text{ m}$ 條件下，計算三組不同排樁打設間距 (S)，來進行設計參數研究 (其中， $L_g=7\text{ m}$ 、 $S=8D$ 與 $R_r=3/6$ ，重複兩次，2 組重複)。且每組數值模擬皆進行強度折減穩定性分析。最後，共完成 7 組 (=3 組 R_r +3 組 L_g +3 組 S -2 組重複) 數值模擬演算，可歸納出於崩積層/岩層-異質虛擬邊坡中，背拉式擋土排樁設計參數之最佳化配置原則。

四、結果與討論

1. 崩積層-均質邊坡背拉式擋土排樁設計參數研究

1.1 邊坡數值模型之選定

為選定參數研究使用之邊坡數值模型，改變多種不同上、下邊坡坡度之模型變化。最後選定 $\alpha_u=30^\circ$ 、 $\alpha_d=40^\circ$ 之邊坡模型作為典型虛擬邊坡，崩積層-均質臨界虛擬邊坡之初始階段 (穩定工法未施作階段) 之總位移增量等值圖 (contour of incremental displacement)，如圖 5 所示。

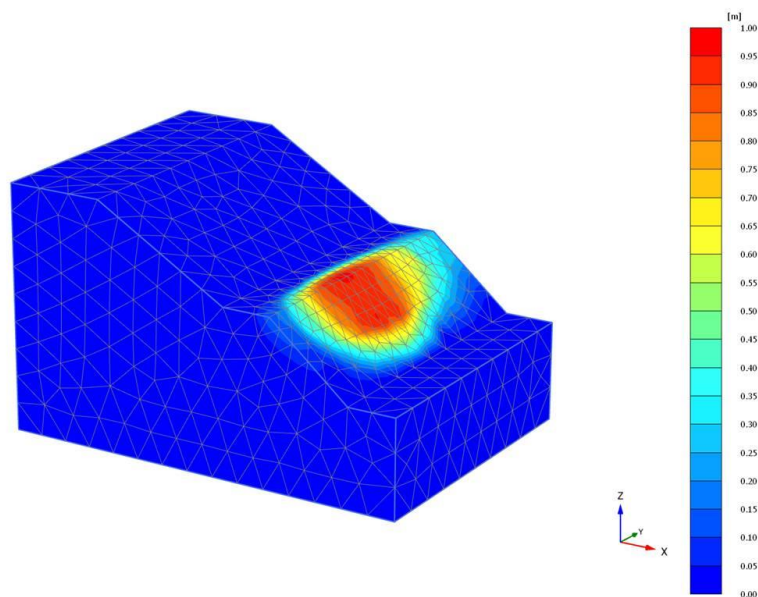


圖 5 崩積層-均質虛擬邊坡在初始階段 (穩定工法未施作階段) 處於臨界狀態 ($FS_o \approx 1.0$) 之總位移增量等值圖

Fig. 5 Contour of total displacement increment for critical state ($FS_o \approx 1.0$) at initial phase (phase without remediation works) of colluviums-homogeneous slope

1.2 排樁打設間距

為探討打設間距比 ($S/D=5\sim 9$) 對邊坡穩定性之影響，在固定排樁打設長度 $L_p=9\text{ m}$ 之條件下，擷取強度折減穩定分析之運算結果，來探討不同排樁打設間距，對邊坡穩定性之影響，如圖 6 所示。並彙整地錨施設前、後之邊坡總位移增量等值圖及潛在滑動破壞模式，如圖 7 及圖 8 所示。最後，繪製不同排樁打設間距之樁身彎矩曲率 $M/EI (= 1/\rho)$ ， ρ =曲率半徑)，以瞭解邊坡排樁之受力行為，如圖 9、圖 10 所示。

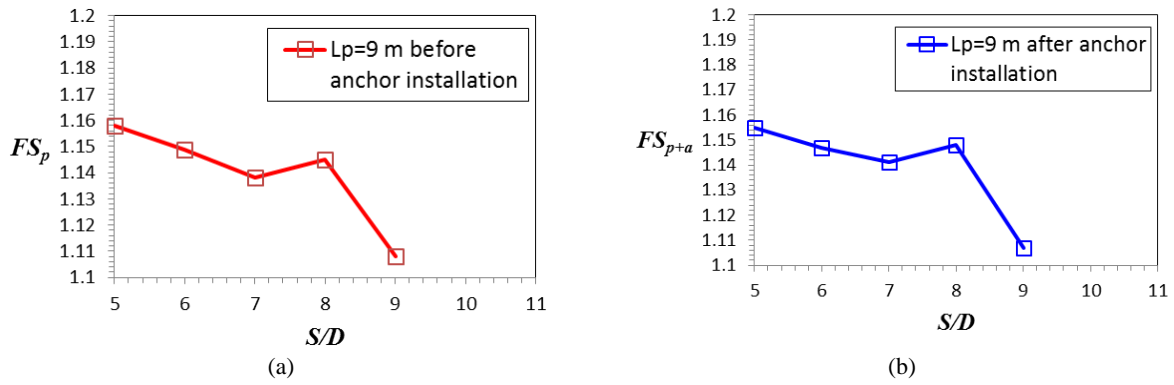


圖 6 不同排樁打設間距對邊坡穩定性之影響(a)地錨設施前，安全係數 FS_p 及(b)地錨設施後，安全係數 FS_{p+a}

Fig. 6 Influence of installation spacing ratio S/D of retaining pile on slope stability (a) before and (b) after anchor installation

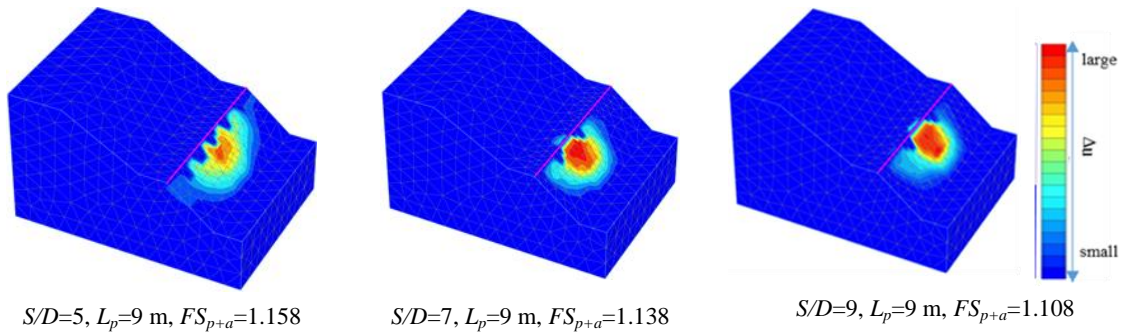


圖 7 在設施地錨前，打設排樁崩積層-均質邊坡之總位移增量等值圖及潛在滑動模式

Fig. 7 Contour of total displacement increment and potential sliding mode of colluviums-homogeneous slope reinforced by retaining piles (before anchor installation)

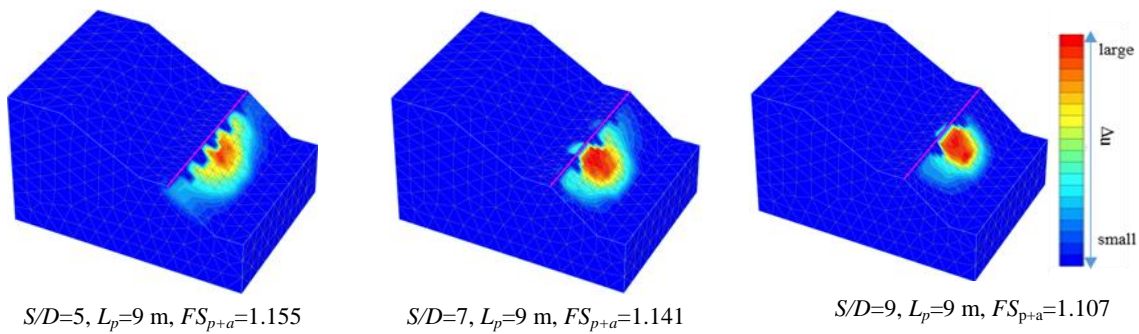


圖 8 在設施地錨後，打設排樁崩積層-均質邊坡之總位移增量等值圖及潛在滑動模式

Fig. 8 Contour of total displacement increment and potential sliding mode of colluviums-homogeneous slope reinforced by retaining piles (after anchor installation)

由圖 6 可知，隨著排樁打設間距比(S/D)增加， FS 值將逐漸減小，且當打設間距比 $S/D > 8$ 時， FS 值將大幅下降。因此，在 $S > 8D$ 之情況，由於打設間距過大，使得排樁間之土拱效應消失所導致，此結果與 Wei and Cheng (2009) 之研究成果一致。同時，圖 7 及圖 8 亦顯示，隨著排樁打設間距比(S/D)之增加，邊坡之潛在滑動面發展範圍擴大之現象越為明顯。此外，由圖 9、圖 10 可知，不同排樁打設間距造成之 M/EI 值大小為 $S = 5D < 7D < 8D \cong 6D < 9D$ 。當排樁打設間距越大時，單樁負擔之土壓力越大，其最大彎矩值也越大。

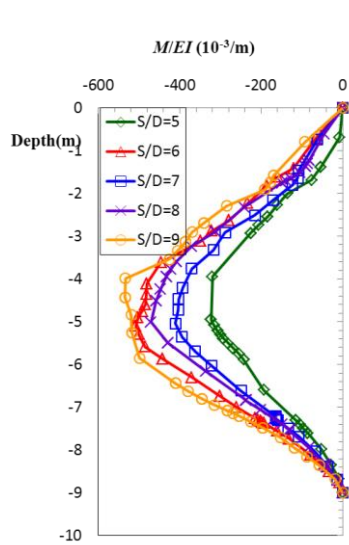


圖 9 地錨施設前，打設排樁均質邊坡在不同排樁打設間距之樁身彎矩曲率分布 ($L_p=9$ m)

Fig. 9 Distribution of moment curvature of pile shaft for different pile installation spacing of homogeneous slope ($L_p=9$ m) (before anchor installation)

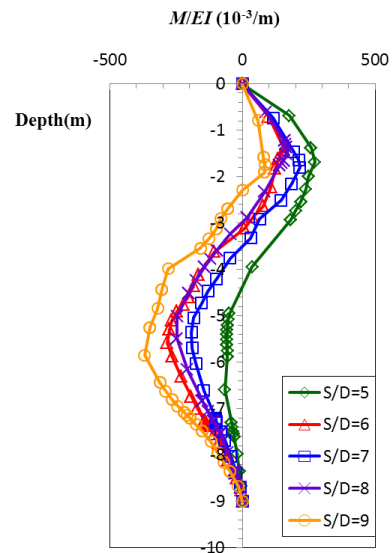


圖 10 地錨施設後，打設排樁均質邊坡在不同排樁打設間距之樁身彎矩曲率分布 ($L_p=9$ m)

Fig. 10 Distribution of moment curvature of pile shaft for different pile installation spacing of homogeneous slope ($L_p=9$ m) (after anchor installation)

1.3 地錨施設尺寸

為探討地錨自由段及錨碇段之尺寸設計對邊坡之影響，在固定排樁打設長度($L_p=9$ m)、排樁打設間距比($S/D=8$)及地錨總長度($L_a=20$ m)之條件下，變化不同地錨施設尺寸(錨碇段長度 $L_g=L_a-L_f=10$ m、7 m 及 5 m)，經強度折減穩定分析法運算後，邊坡總位移增量等值圖及潛在滑動破壞模式，如圖 11 所示。求得之不同地錨之錨碇段長度對邊坡穩定性之影響，如圖 12 所示。

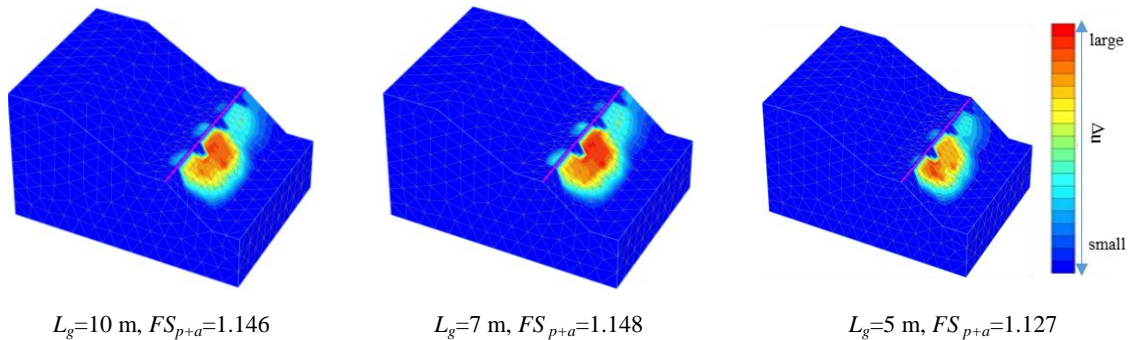


圖 11 採用背拉式擋土排樁穩定崩積層-均質虛擬邊坡($S/D=8$)之總變位增量等值圖及潛在滑動面模式

Fig. 11 Contour of total displacement increment and potential sliding mode of colluviums-homogeneous slope ($S/D=8$) reinforced by tied-back retaining piles

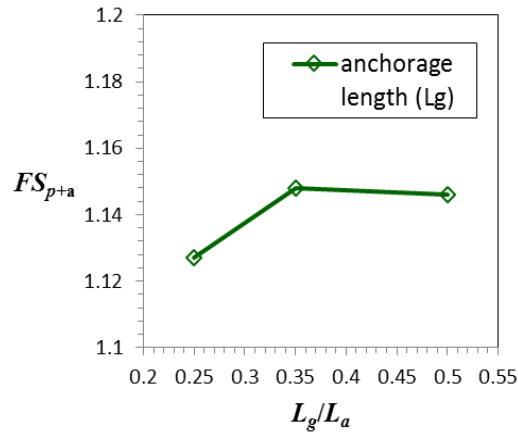


圖 12 排樁打設長度($L_p=9$ m)及打設間距比($S/D=8$), 在固定地錨總長度 $L_a (=20$ m)條件下, 地錨錨碇段長度比對邊坡穩定性之影響

Fig. 12 Influence of anchorage length ratio L_g/L_a on slope stability reinforced by retaining piles with pile length L_p of 9 m, installation spacing ratio S/D of 8 and anchor total length L_a of 20 m

由圖 11 及圖 12 可得知, 邊坡穩定性安全係數隨著地錨錨碇段長度增加而提升, 而終將趨於一定值, 且當錨碇段長度達 7 m 之後, 縱使再增加錨碇段長度, 邊坡穩定性安全係數並無提高之趨勢, 此結果與廖洪鈞等(1992)、Schnabel(2002)、Habib(1989)及唐小雯(2006)等人之研究結果一致。

2.崩積層/岩層-異質邊坡背拉式擋土排樁設計參數研究

2.1 邊坡數值模型之選定

為探討背拉式擋土排樁對邊坡穩定性之貢獻度, 本研究針對未施作整治工法之邊坡, 計算崩積層/岩層-異質虛擬邊坡臨界狀態($FS_0 \approx 1.0$)之穩定性, 其之臨界狀態之總位移增量等值圖, 如錯誤! 找不到參照來源。所示。

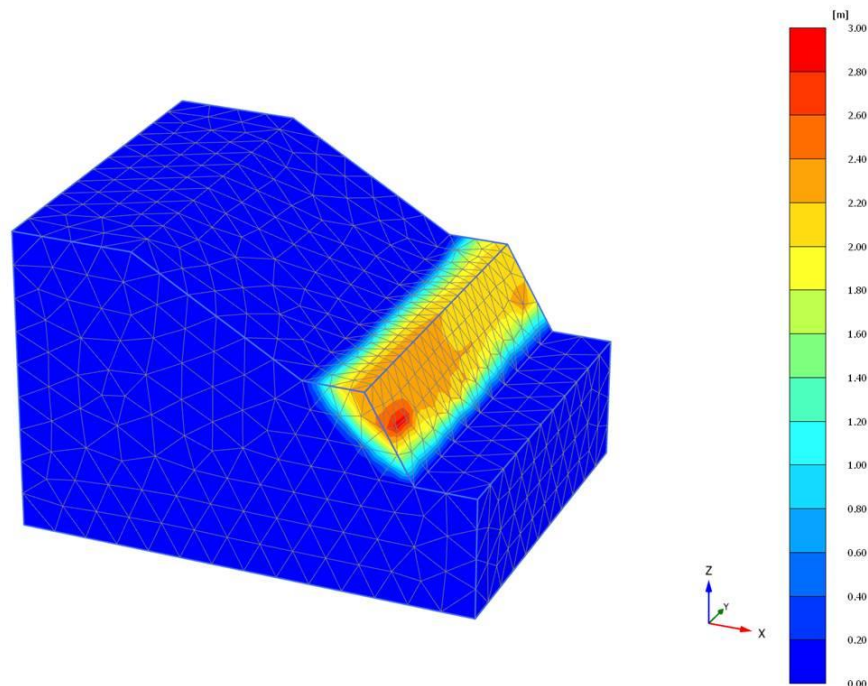


圖 13 崩積層/岩層-異質虛擬邊坡在臨界狀態($FS_0 \approx 1.0$)下之總位移增量等值圖

Fig. 13 Contour of total displacement increment for critical state ($FS_0 \approx 1.0$) of colluviums/bedrock-heterogeneous slope

2.2 排樁入岩深度

固定排樁打設間距比 $S/D=8$, 並針對排樁之入岩深度, 探討排樁中間區域單樁最大彎矩。經強度折減穩定分析法

運算後，崩積層/岩層-異質虛擬邊坡之總位移增量等值圖及潛在滑動破壞模式，如圖 14 所示。並繪製不同排樁入岩深度比對邊坡穩定性之影響圖，如圖 15 所示。另外，可繪製不同排樁入岩深度比 $R_r=L_{pr}/L_{pc}$ (L_{pr} =排樁之入岩深度及 L_{pc} =排樁之崩積層貫穿厚度)之樁身彎矩曲率 M/EI ，如圖 16 所示。

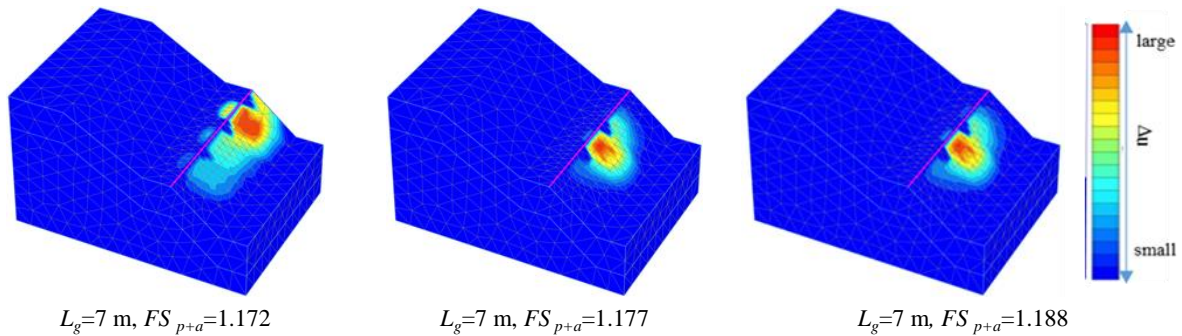


圖 14 打設間距比 $S/D=8$ ，不同排樁入岩深度比 R_r 之崩積層/岩層-異質虛擬邊坡總位移增量等值圖及潛在滑動破壞模式
(a) $R_r=1/6$ (b) $R_r=2/6$ (c) $R_r=3/6$

Fig. 14 Contour of total displacement increment and potential sliding mode of colluvium/bedrock-heterogeneous slope for different bedrock embedment depth ratios R_r (a) $R_r=1/6$ (b) $R_r=2/6$ (c) $R_r=3/6$ (installation spacing ratio $S/D=8$)

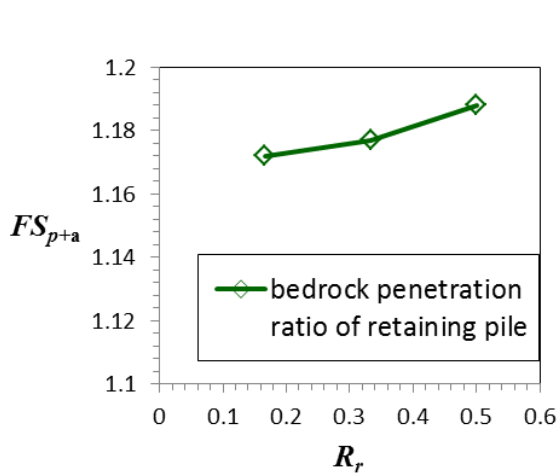


圖 14 在打設間距比 $S/D=8$ 之條件下，崩積層/岩層-異質虛擬邊坡，排樁入岩深度比 R_r 對邊坡穩定性之影響

Fig. 15 Influence of bedrock embedment depth ratio R_r of retaining piles on the stability of colluvium/bedrock-heterogeneous slope (installation spacing ratio $S/D=8$)

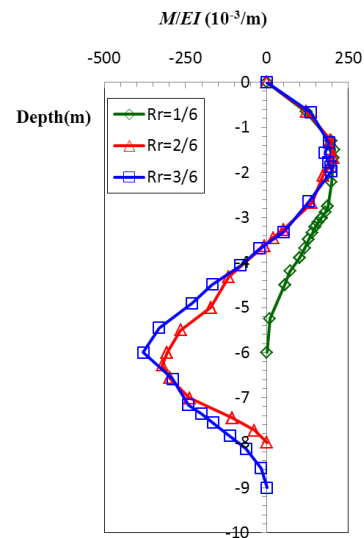


圖 15 在打設間距比 $S/D=8$ 之條件下，崩積層/岩層-異質虛擬邊坡，不同排樁入岩深度比 R_r 之樁身彎矩曲率分布

Fig. 16 Distribution of moment curvature ($=M/EI$) of pile shaft for different bedrock embedment depth ratios R_r of retaining piles in colluvium/bedrock-heterogeneous slope (installation spacing ratio $S/D=8$)

圖 14 及圖 15 可得知，在打設間距比 $S/D=8$ 之條件下，邊坡穩定安全係數 FS_{p+a} 隨著排樁入岩深度增加(貫入崩積層厚度相同之條件下)而提升。由圖中可知，潛在滑動面皆侷限於下邊坡，同時，隨著排樁入岩深度增加，潛在滑動面之發展範圍越為縮小。另外，圖 16 則顯示，當排樁入岩深度比由 $R_r=2/6 \rightarrow 3/6$ 時，排樁樁身之彎矩曲率 M/EI 已趨於一致，且 FS 值亦趨於定值。因此，可推斷排樁入岩深度比 $R_r=2/6$ ，可作為一較安全且經濟之參考值。

2.3 排樁打設間距

固定排樁入岩深度比 $R_r=L_{pr}/L_{pc}=3/6$ ，彙整排樁不同打設間距條件下，中間區域單樁承受之最大彎矩與剪力值，如表 6 所示。為探討打設間距對邊坡之影響，摘錄強度折減穩定分析法運算結果，排樁間中點位置 3D 之總位移增量等值圖，如圖 16 所示。採用不同排樁打設間距與邊坡穩定性之關係可作圖，如圖 17 所示。並繪製在不同排樁打設間距下，樁身之彎矩曲率 M/EI ，如圖 18 所示。

表 6 崩積層/岩層-異質虛擬邊坡施設地錨後，排樁在不同打設間距比(S/D)條件下之最大彎矩與剪力

Table 6 Maximum bending moment and shearing force of retaining piles for different installation spacing ratios (S/D) in colluvium/bedrock-heterogeneous slope

NO.	$R_r=L_{pr}/L_{pc}(m)$	S/D	$L_g=L_a-L_f$		FS_{p+a}	$(M_{13})_{max}(kN\cdot m)$		$(V_{12})_{max}(kN)$	
			代號	$L_g(m)$		+	-	+	-
1	3/6	6	T2	7	1.173	263.310	319.779	221.194	334.833
2	3/6	8	T2	7	1.188	234.030	404.338	271.581	303.185
3	3/6	10	T2	7	1.149	49.340	1238.113	581.556	766.548



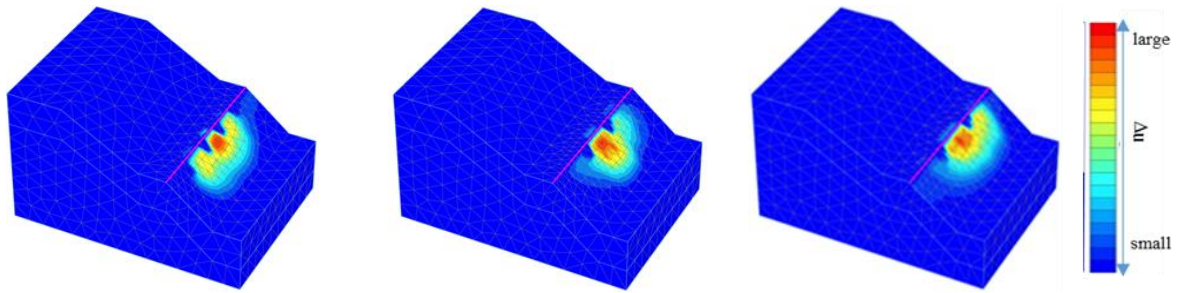
Bending moment >0



Bending moment <0

Shear force
- 往上邊坡作用
+ 往下邊坡作用

構件之右側為上邊坡，左側為下邊坡



(a) $L_g=7\text{ m}$, $FS_{p+a}=1.173$

(b) $L_g=7\text{ m}$, $FS_{p+a}=1.188$

(c) $L_g=7\text{ m}$, $FS_{p+a}=1.149$

圖 16 排樁入岩深度比 $R_r=3/6$ 之崩積層/岩層-異質邊坡總位移增量等值圖及潛在滑動模式(a) S/D =6 (b) S/D =8 (c) S/D =10

Fig. 17 Contour of total displacement increment and potential sliding mode of colluvium/bedrock-heterogeneous slope reinforced by retaining piles with bedrock embedment depth ratio $R_r=3/6$ (a) S/D =6 (b) S/D =8 (c) S/D =10

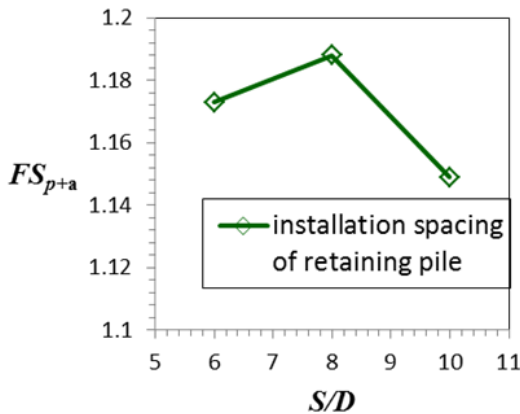


圖 17 排樁入岩深度比 $R_r=3/6$ ，崩積層/岩層-異質虛擬邊坡之排樁打設間距對邊坡穩定性之影響

Fig. 18 Influence of installation spacing ratio of retaining piles on the stability of colluvium/bedrock-heterogeneous slope (bedrock embedment depth ratio $R_r=3/6$)

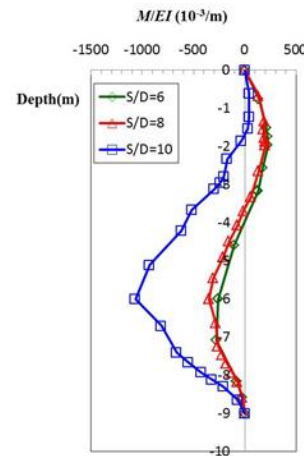


圖 18 排樁入岩深度比 $R_r=3/6$ ，崩積層/岩層-異質虛擬邊坡不同排樁打設間距比 S/D 之樁身彎矩曲分布

Fig. 19 Distribution of moment curvature of pile shaft for different installation spacing ratios S/D in colluvium/bedrock-heterogeneous slope (bedrock embedment depth ratio $R_r=3/6$)

由圖 16 及圖 17 可知，排樁入岩深度比 $R_r=3/6$ 之情況下，當排樁打設間距比超過 $S/D=8$ 時，邊坡穩定性安全係數 FS_{p+a} 將大幅下降，其原因為超過 8 倍樁徑之打設間距過大，使得排樁間之土拱效應消失所導致。另外，比較 $S/D=6$ 及 $S/D=8$ 之情況，原本 $S=6D$ 造成之 FS_{p+a} 理應大於 $8D$ 者，然而卻由於 $S/D=6$ 之最邊緣排樁與模型邊界之距離為 $S/D=8$ 者之兩倍，而產生 $S/D=8$ 之 FS_{p+a} 值偏高之結果。由圖 18 則顯示，排樁之彎矩曲率皆隨著排樁打設間距加大而增加，

且打設間距比 $S/D=10$ 時，樁身之 M/EI 值為最大。由此可知，當打設間距增大時，每一單樁負擔之土壓力越大，其最大彎矩值也越大。

2.4 地錨施設尺寸

為探討不同地錨施設尺寸對邊坡穩定性之影響，本研究固定排樁打設間距比 $S/D=8$ 及排樁入岩深度比 $L_p/L_{pc}=3/6$ ，採用強度折減穩定分析法運算結果，邊坡總位移增量等值圖及潛在滑動破壞模式，如圖所示。並將不同地錨施設尺寸對邊坡穩定性之影響作圖，如圖所示。

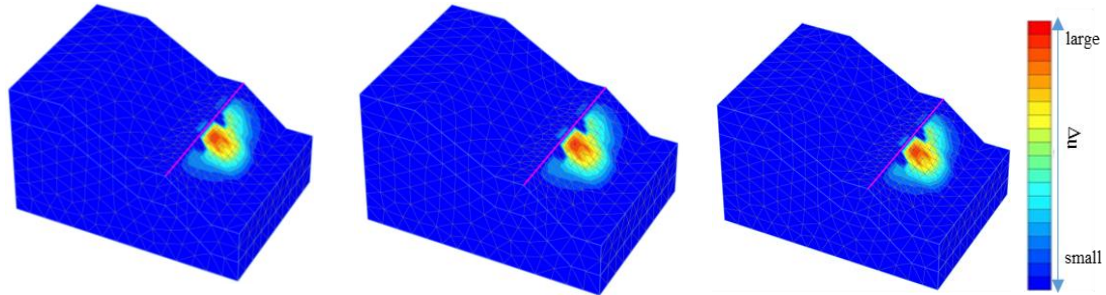


圖 20 排樁打設間距比 $S/D=8$ 及入岩深度比 $R_r=3/6$ ，在不同地錨錨段長度 L_g 條件下，崩積層/岩層-異質邊坡之總位移增量等值圖及潛在滑動模式

(a) $L_g=10$ m, $FS_{p+a}=1.191$ (case T1) (b) $L_g=7$ m, $FS_{p+a}=1.188$ (case T2) (c) $L_g=5$ m, $FS_{p+a}=1.181$ (case T3)

Fig. 20 Contour of total displacement increment and potential sliding mode of colluvium/bedrock-heterogeneous slope reinforced by retaining piles with installation ratio $S/D=8$ and bedrock embedment depth ratio $R_r=3/6$
(a) $L_g=10$ m, $FS_{p+a}=1.191$ (case T1) (b) $L_g=7$ m, $FS_{p+a}=1.188$ (case T2) (c) $L_g=5$ m, $FS_{p+a}=1.181$ (case T3)

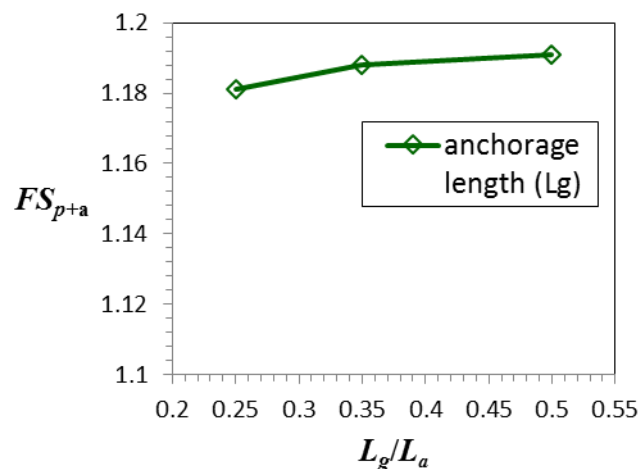


圖 21 排樁打設間距比($S/D=8$)及入岩深度比($R_r=3/6$)之條件下，地錨錨段長度比 L_g/L_a 對崩積層/岩層-異質虛擬邊坡穩定性之影響

Fig. 21 Influence of anchorage length ratio L_g/L_a on the stability of colluvium/bedrock-heterogeneous slope reinforced by retaining piles with installation spacing ratio $S/D=8$ and bedrock embedment depth ratio $R_r=3/6$

由圖及圖可得知，邊坡穩定性安全係數隨著地錨之錨段長度增加而微幅提升，但當錨段長度由 7 m 增加至 10 m 時，地錨之錨段長度對邊坡穩定性之提升效果並不明顯，由此可推斷當地錨之錨段長度增至 7 m 後，再增加其錨段長度並非經濟之作法，此結果與廖洪鈞等(1992)、Schnabel(2002)、Habib(1989)及唐小雯(2006)等人之研究結果一致。

五、結論

1. 崩積層-均質邊坡背拉式擋土排樁設計參數研究

(1)在各種打設間距比($S/D=5\sim 9$)條件下，若將排樁打設長度($L_p=6、9、12$ m)加深，則 FS 值將隨之增加，且與未施作地錨之情況相比較，施作地錨之效果在其能縮小潛在滑動面發展之範圍，進而可間接減緩擋土排樁承受之側向土壓

力，並提高其抗滑能力。

(2)若排樁打設間距比 S/D 增加，則 FS 值將逐漸減小，且當打設間距比 $S/D > 8$ 時， FS 值將大幅下降。此結果顯示：當 $S > 8D$ 時，排樁由於打設間距過大，拱效應大幅喪失，使得潛在滑動面更易於往排樁間之下邊坡發展(在臨界狀態時($FS=FS_{min}$)之總位移增量亦大幅增加)，並導致穩定性安全係數 FS 值下降。

(3)在固定地錨總長度之情況下，逐漸增加地錨之錨碇段長度(L_g)，雖然 FS 值亦會隨之提升，但終將趨於一定值。此可說明：增加地錨之錨碇段長度，來維持邊坡處於特定之穩定狀態下，是有其限度的。此亦間接驗證，實務運用上地錨之錨碇段長度一般不大於 10 m 之工程施作方式。

2. 崩積層/岩層-異質邊坡背拉式擋土排樁設計參數研究

(1)於打設間距比 $S/D=8$ 之條件下， FS 值隨著排樁入岩深度增加而提升。且當排樁入岩深度比 $R_r=(L_{pr}/L_{pc})=2/6 \rightarrow 3/6$ 時，排樁樁身之彎矩曲率 M/EI 分布已趨於一致，此說明排樁入岩深度比 $R_r=2/6$ 為較安全且經濟之入岩深度比。

(2)在 $R_r=3/6$ 之情況下，若提高排樁打設間距： $S=6D \rightarrow 8D \rightarrow 10D$ 時， FS 值將逐漸減少，且當 $S > 8D$ 時，其 FS 值將大幅下降。此結果與均質邊坡之情況相同。而排樁樁身之彎矩曲率，皆隨著排樁打設間距加大而顯著增加。

(3)在固定排樁打設間距比 $S/D=8$ 及排樁入岩深度比 $R_r=3/6$ 之條件下， FS 值隨著錨碇段長度(L_g)增加而微幅提升。然而，當錨碇段長度 $L_g: 7 \rightarrow 10$ m 時，錨碇段長度對邊坡穩定性之提升效果並不明顯。此顯示：在固定地錨總長度之情況下，逐漸增加地錨之錨碇段長度(L_g)，雖然 FS 值亦會隨之提升，但終將趨於一定值。

(4)在背拉式擋土排樁打設條件相同之情況下，崩積層/岩層-異質邊坡之 FS 值均高於崩積層-均質邊坡者。由此可知，地錨錨碇段及排樁樁尖入岩之施作方式，對於邊坡穩定度有決定性的影響。在實務設計及運用上，岩盤所在區位是否確定，對於地錨及排樁設計之有效性，影響重大。

參考文獻

1. 林務局羅東林區管理處(2012)，「宜專一線與翠峰景觀道路地滑與地錨監測成果」，勇霖工程顧問有限公司執行。
2. 行政院農委會水土保持局(2012)，水土保持相關法規彙編，水土保持技術規範。
3. 莊培凱(2003)，「砂中傾斜擴座地錨之錨碇行為」，私立朝陽科技大學，碩士學位論文。
4. 邱倍堅(2012)，「擋土止滑排樁穩定邊坡之力學行為三維數值分析」，國立中興大學水土保持學系，碩士學位論文。
5. 唐小雯(2006)，「沉泥質砂土中背拉式地錨之錨碇行為」，朝陽科技大學，碩士學位論文。
6. 廖洪鈞(1992)，「砂土中單段錨碇端受力行為和群錨行為之研究」，行政院國家科學委員會專題研究報告，NSC80-0410-E-011-16。
7. Duncan, J. M. and S. G. Wright, (2005), Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey
8. Das B.M. (2007), Principles of Foundation Engineering, 6th ed., Thomson Canada, Ltd., 445p.
9. Habib, P. (1989), Recommendations for the Design, Calculation, Construction and Monitoring of Ground Anchorages, A.A. Balkema Publishers.
10. Joseph E. Bowles (2001), Foundation Analysis and Design 5th., McGraw-Hill., 768p.
11. Schnabel, H. (2002), Tiebacks in Foundation Engineering and Construction, A.A. Balkema Publishers.
12. Wei W. B. and Cheng Y. M. (2009), Strength reduction analysis for slope reinforced by piles, Computers and Geotechnics, 36(7), pp.1176–1185.
13. Poulos H. G. (1995), Design of reinforcing piles to increase slope stability, Can Geotech J 1995, 32, pp. 808-18.