

# 台北貓空纜車 T-16 塔柱邊坡整治工法之有效性評估

黃智民<sup>[1]\*</sup> 王勝賢<sup>[2]</sup> 林德貴<sup>[3]</sup>

**摘要** 本研究採用 2008 年薔蜜颱風之降雨歷線，針對台北市貓空纜車 T-16 塔柱崩塌不穩定邊坡(以下簡稱 T-16 塔柱邊坡)進行崩塌數值模擬，並藉由崩塌前、後之地形比對，來驗證降雨入滲及穩定性數值分析程序及輸入參數之可靠性。同時，再針對 T-16 塔柱邊坡，輸入木柵地區 5、10、25 及 50 年不同回歸期之 48 小時設計雨型，來評估所採用四種整治工法之有效性。在 T-16 塔柱邊坡整治工法，施作後之降雨穩定性分析結果顯示：於未降雨之情況下，T-16 塔柱邊坡，複合型整治工法(由坡頂往坡趾方向，共配置四種工法：即上段之 RC-擋土牆及微型樁工法、中上段之地錨工法、中段之土釘工法、及下段之排樁工法)之施作，對整體邊坡之穩定性確實有大幅提升之效果(對穩定性安全係數值  $FS$  而言，施作前， $FS = 1.297$ ；施作後， $FS = 1.659$ )。然而，在 50 年回歸期之降雨條件下，整治工法施作前、後之  $FS$  值分別為 1.004 及 1.191 (約提升 1.186 倍)，此說明在強降雨情況下，雖然整治工法對  $FS$  之提升有限，但依然可發揮其應有之穩定功能，並防止邊坡在短時間內快速趨於不穩定之臨界狀態( $FS \leq 1$ )。

**關鍵字**：T-16 塔柱邊坡、複合型整治工法、降雨穩定性分析、安全係數

## Evaluation on the Effectiveness of Stabilization Works for T-16 Tower Pier Slope of Taipei Mao-Kong Gondola

Jhih-Min Huang<sup>[1]\*</sup> Sheng-Hsien Wang<sup>[2]</sup> Der-Guey Lin<sup>[3]</sup>

**ABSTRACT** In this study, the failure mechanism of the stabilization works constructed at the down slope of T-16 tower pier, Mao-Kong gondola (or T-16 Slope) at the hillside of Taipei City was simulated using the rainfall hyetograph of Jang-Mi typhoon in 2008 and the numerical procedures and various input parameters in the rainfall-stability analyses were also verified through the comparisons of topography before and after slope failures. In addition, a series of 48 hrs design rainfalls corresponding to 5, 10, 25 and 50 years return periods were prepared using the rainfall data of Mu-Zha rainfall observation station, for the rainfall-stability analyses of T-16 Slope to evaluate the effects of the stabilization works on the overall stability of the slope. At T-16 Slope, there totally 4 types of stabilization works were constructed to stabilize the slope. From the slope top to the slope toe, the stabilization works of T-16 Slope consist of RC-retaining wall with micro-pile foundation at the up-slope, earth anchor at the up/middle-slope, soil nailing at the middle-slope and retaining pile (shear pile) at the down-slope. The stability analyses of T-16 Slope after stabilization demonstrate that the multiple stabilization works (4 types of stabilization works) can greatly improve the slope stability under dry condition and the corresponding  $FS$  value can be promoted from 1.297 before stabilization to 1.659 after stabilization. In addition, the rainfall-stability analyses from return period of 50 years indicate that the  $FS$  value can be promoted from 1.004 before stabilization to 1.191 after stabilization (increase of 1.186 times). This demonstrates that although the promotion of  $FS$  value under torrential rainfall condition is limited, the stabilization works can still function well to prevent the slope from reaching critical state ( $FS \leq 1$ ) within a short rainfall duration.

**Key words:** T-16 Slope, multiple stabilization works, rainfall stability analyses,  $FS$  value

---

[1] 國立中興大學水土保持學系研究生 (\* 通訊作者 E-mail: [mingo4386@gmail.com](mailto:mingo4386@gmail.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

依據 Koukis and Ziourkas (1991)之研究,將影響崩塌因子分類為動態的誘因(降雨、地震)及潛在的環境因子(岩性、褶皺),本研究採用降雨作為主要影響因子。另外,降雨入滲導致坡地崩塌(或地滑, landslide),通常是由於入滲雨水造成孔隙水壓增加與滲流力產生所導致(Terzaghi, 1950; Sidle and Swanson, 1982; Sitar et al., 1992; Anderson and Sitar, 1995),而孔隙水壓增加會降低土壤之剪力強度,驅使邊坡產生破壞(Brand, 1981)。在降雨入滲邊坡穩定數值分析方面, Savage et al., (2000)及 Debray and Savage (2001)模擬邊坡破壞之機制,並提出崩積層之孔隙水壓增加為邊坡破壞之主要原因。此外,林德貴等人(2010)提出降雨誘發土砂災害數值模式,進行率定及驗證程序,將數值分析結果與現地監測值比對,以驗證數值分析方法及輸入參數之有效性。Chandrasekaran et al., (2013)利用有限元素法模擬邊坡在強降雨情況下誘發崩塌之機制,及其對安全係數之影響。上述研究,雖然對於降雨入滲誘發邊坡穩定問題之分析,有很多著墨,但對於邊坡在整治工法施作後,承受降雨擾動時之有效性評估分析研究方面,則相當有限。

2008年9月28日,貓空纜車 T-16 塔柱下方整體邊坡(以下簡稱 T-16 塔柱邊坡)由於蕃蜜颱風豪雨誘發崩塌破壞。崩塌事件發生後, T-16 塔墩帽樑附近亦發生地表下陷及局部墩柱懸挑現象。災後,政府相關部門即在 2010 年 8 月完成崩塌邊坡之整治工作。然而,對於已完成之整治工法,在未來豪雨期間之穩定功能及有效性並無法進行量化評估。同時,過去國內、外雖有大量的邊坡穩定數值分析研究,但大多以無整治工法之邊坡穩定性分析為主。因此,本研究期望針對 T-16 塔柱邊坡之各種整治工法,建置 2D 數值模式,並利用不同降雨頻率之設計雨型,對崩塌坡地整治前、後進行降雨入滲穩定分析,並利用數值分析結果,來探討複合型整治工法對邊坡穩定性之影響及貢獻。

# 二、基本資料

## 1. 基地位置

T-16 塔柱邊坡位於台北市文山區新光路二段 74 巷旁,可由萬壽路經政大御花園社區後,轉入新光路二段 74 巷行經約 1000m 即可抵達此基地位置。基地所在交通位置,如圖 1 所示。



圖 1 T-16 塔柱邊坡基地位置

Fig.1 Location of T-16 Slope (The downslope of T-16 tower pier of Mao-Kong gondola)

## 2. 工址地質

依據台北市文山區萬壽路 75 巷政大御花園蓄蜜風災土石崩塌鑑定報告（2008）中，現地地表露頭調查及地質鑽探成果比對可知，T-16 塔柱邊坡出露之岩層均屬大寮層，由地形及地質剖面圖(如圖 2 及 3)顯示，本基地地層由上而下依序為頁岩夾泥質細砂岩(sh-ss)、厚塊狀砂岩(ss)、厚層砂岩或泥質細砂岩夾薄層頁岩(ss-sh)、砂頁岩互層至頁岩夾泥質細砂岩(ss/sh~sh-ss)、頁岩(sh)、凝灰質砂岩夾凝灰岩(ss-tf)，以及頁岩(sh)。

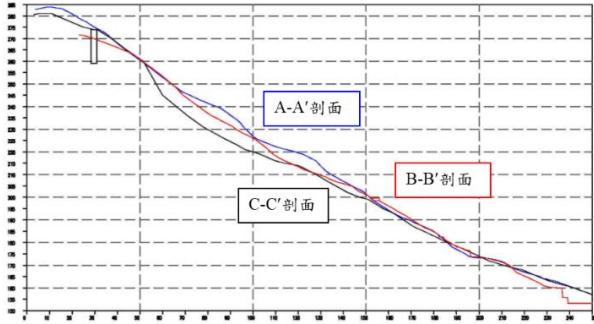


圖 2 T-16 塔柱邊坡(A-A', B-B'及 C-C')地形剖面圖

Fig.2 (A-A', B-B' and C-C') topographic profiles of T-16 slope

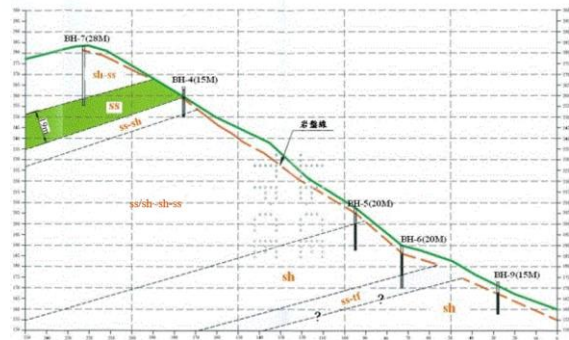


圖 3 T-16 塔柱邊坡 A-A'地質剖面圖

Fig.3 A-A'geological profile of T-16 slope

## 3. 雨量資料

根據中央氣象局公佈資料顯示，造成此次邊坡崩塌之蓄蜜颱風，其警報期間為 2008 年 9 月 26 日 ~ 9 月 29 日，並由氣象局雨量站資料可知，警報期間之總降雨量為 453.0 mm，本區域自 2008 年 9 月 26 日 8 時蓄蜜颱風開始降雨，而崩塌發生時間為 28 日之 20 ~ 21 時，此期間降雨延時達 64 小時，累積降雨量為 406.5 mm，佔蓄蜜颱風總降雨量之 89.74 %。蓄蜜颱風 77 hrs 之降雨量組體圖，如圖 4 所示。

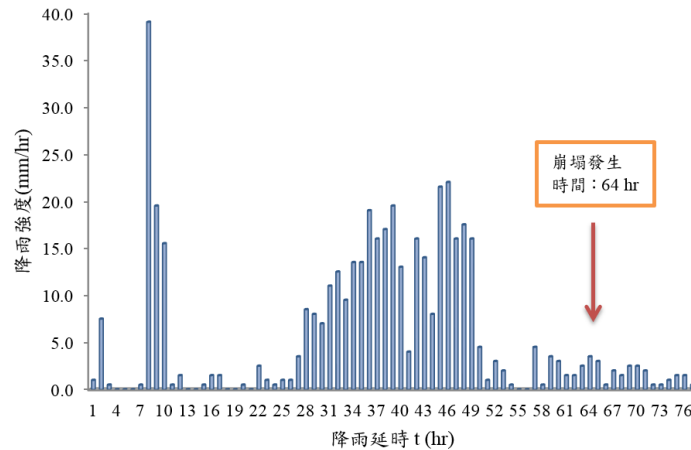


圖 4 2008 年 9 月 28 日蓄蜜颱風 77 小時雨量組體圖

Fig.4 The 77 hrs rainfall hyetograph of Jang-Mi typhoon at 2008/09/28

## 4. 整治工法設計

T-16 塔柱邊坡整治工程設計考量地形、地質情形、破壞原因與模式後，經相關整治設計單位之邊坡穩定與水力分析結果，決定採用之主要穩定設施包括:邊坡穩定設施、坡面保護設施、綠化植生及截排水設施等，至 2010 年 8 月，各工法皆已整治完成，其整治後之竣工圖，如圖 5 所示。整治工程完成後除可將致災之地表逕流截排及鞏固邊坡外，亦可藉綠化植生方法美化環境。



圖 5 T-16 塔柱邊坡整治工法竣工照片(2010 年 8 月)

Fig.5 Implementation of stabilization works on T-16 slope

由於主要致災原因為地表逕流沖刷及地質破碎因素，故於整治設計時主要考量為排水改善及邊坡穩定，並兼顧坡面之綠美化。採用之整治工法如下所述：

- (1)微型樁與 RC 擋土牆(坡面上段處理)：為避免上方邊坡土石滑落維護施工中之安全，於上段塔柱處坡面先行設置微型樁 503 支與 RC 擋土牆。
- (2)地錨及格樑設施(坡面上段處理)：於 EL.240 以上坡面地形較陡且岩盤裸露破碎，其需要較大之抵抗力以穩定邊坡，故採用地錨計約 617 支及格樑設施計約 4055 m<sup>2</sup>。
- (3)土釘加型框噴植(坡面中段處理)：於 EL.215~240 m 處，其坡面較 EL.240 m 以上緩，且覆蓋土層厚度漸增，且無岩盤裸露，所需之抵抗力減低，故採用土釘計約 20102 支加型框設施計約 3645 m<sup>2</sup>，同時噴植綠化。
- (4)排樁與帽樑(坡面中、下段處理)：EL.180~202.5 m 之坡面較緩且覆蓋土層較厚，為避免較深層之滑動破壞發生，故採用 3 排直徑 80 cm、深度 15 m 之排樁，共 104 支用以止滑。樁頂並以帽樑相互連結，以提升整體結構效應。
- (5)掛網噴植及植生復育(坡面下段裸露面處理)：於 EL.215 m 以下坡面因沖刷有裸露現象，為避免進一步侵蝕，故採用掛網噴植、植生復育及植栽台灣欒樹及赤楊共 710 棵以保護坡面。
- (6)設置橫向、縱向排水溝 193 m、8 座集水井及 1 座沉砂池：本處邊坡災害之治災主要原因乃為強降雨時，坡面並無適當之截排水系統導除逕流，故整治工程採用橫向魚骨狀之截水溝連結至坡面中央之縱向排水溝後，向下經 8 座集水井調節水流後，排至下游尾端之沉砂池處理，最後排放至既有聯外排水溝。

本文主要研究之整治工法為：微型樁 RC 擋土牆、地錨、土釘及排樁。工法之配置高程及簡介，如表 1 所示。根據工法整治區域及相關材料參數，可於程式中配置此四種工法，並分析整治前、後各類工法，對坡地穩定性之貢獻及影響，並對工法有效性進行量化評估。

表 1 T-16 塔柱邊坡主要工法配置高程及簡介

Table 1 Briefs and installation elevations of main stabilization works of T-16 slope

高程(EL.)	工法	基本介紹	
約 270、280 m	微型樁與 RC 擋土牆	鋼軌微型樁	40-Nkg 鋼軌、間距 40 cm、孔徑 25 cm
		帽樑	長 12.5 cm、寬 60 cm、深 65 cm
約 240~270 m	地錨及格樑設施	地錨	長 25 m (固定端 10 m)、40T、打設角度 30 度
		RC 格樑	寬 65 cm、深 50 m、垂直高程 2 m、中心線水平間距 2 m
約 215~240 m	土釘加型框噴植	土釘	長 6 m、打設角度 25 度
		型框	20 × 20 cm <sup>2</sup> 、垂直及水平間距 2 m
約 180~202.5 m	排樁與帽樑	排樁	直徑 80 cm 排樁、長 15 m、間距 1.2 m
		帽樑	寬 100 cm、深 80 m

### 三、研究方法

#### 1. 研究流程

為探討台北市貓空纜車 T-16 塔柱下方整體邊坡(以下簡稱 T-16 塔柱邊坡)，崩塌及整治前、後之穩定性分析，研究之工作流程，如圖 6 所示，包括：邊坡災害調查報告彙整、災害發生前之降雨入滲分析、崩塌前之穩定性分析與破壞機制探討、比對數值分析與現地觀測成果、邊坡崩塌後整治前之穩定性分析、邊坡整治工法施作後之穩定性分析，以及整治工法之效益評估。

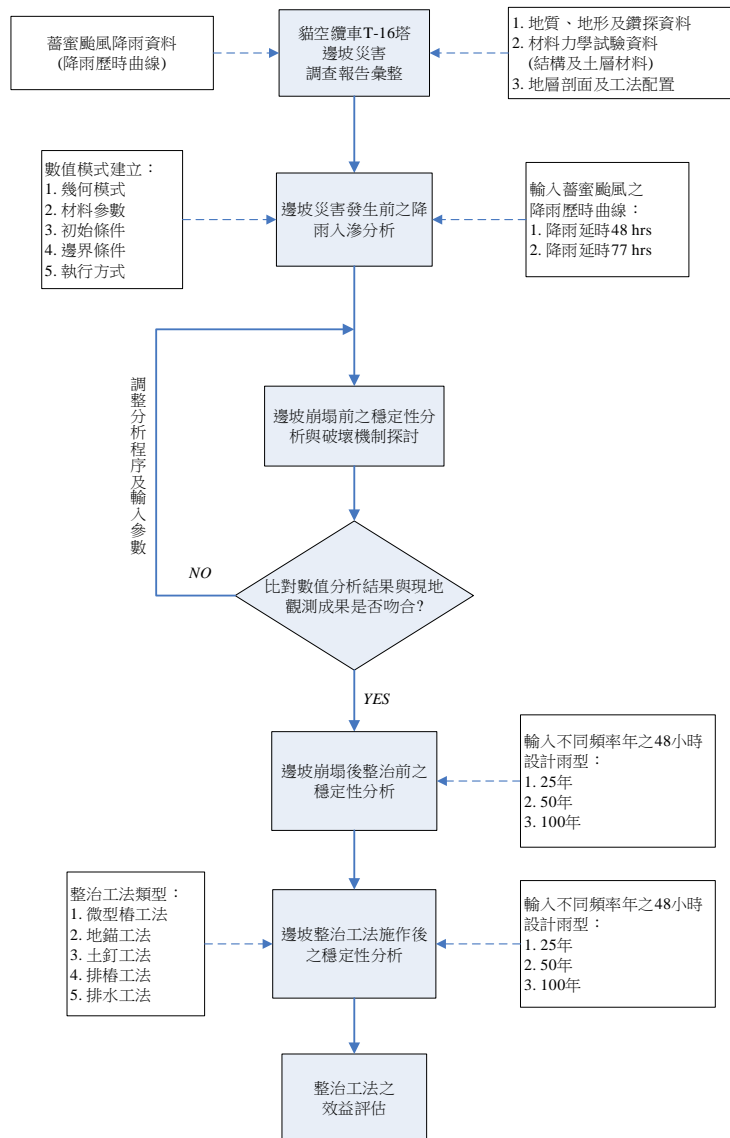


圖 6 研究流程及工作架構

Fig.6 Flow chart and framework of the study

為檢核有限元素強度折減穩定分析法之運算合理性，乃針對邊坡進行數值分析，並比對坡地崩塌前、後地形高程變化之實測值與模擬值之吻合度。圖 7 為 C-C'地形剖面圖，其崩塌前(2006 年)、後(2008 年)之地形變化區位，即為現地主要崩塌發生之區位。本研究將以此崩塌發生區位與數值分析結果之潛在滑動面所在區位進行比對。

邊坡崩塌發生時間約略於蓄蜜颱風降雨第 64 hr。為使有限元素程式計算之崩塌發生時間能與現地實際崩塌時間相吻合，因此，藉由調整及反推實際地層有效凝聚力輸入值  $c'$  (由於  $c'$  之實際試驗值偏低)，來達到此目的。選定輸入參數之調整及率定後之最終輸入參數值，將取代原始輸入參數值，作為爾後程式分析運算之材料模式參數。

本研究之設計雨型分析方法乃採用經濟部水資源局(2001)編製之「水文設計應用手冊」中所提之台灣各區域簡單尺度不變性高斯馬可夫雨型 (Simple Scaling Gauss-Markov, 簡稱 SSGM)分析成果，進行設計雨型分析，可得 5、10、25、50 及 100 年重現期距之 48 hrs 設計雨型，本文因篇幅有限，僅以重現期距 50 年之 48 hrs 設計雨型進行討論，如圖 8 所示。

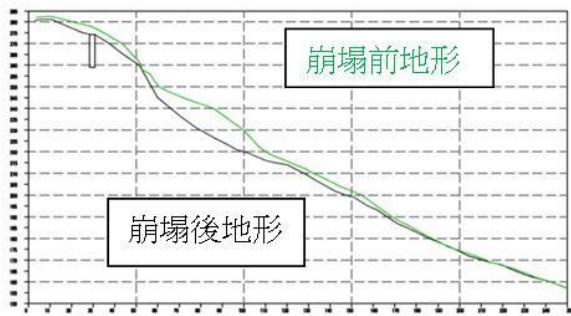


圖 7 T-16 塔柱邊坡崩塌前(2006 年)、後(2008 年)之 C-C'地形剖面圖

Fig.7 The C-C' topographic profiles of T-16 slope before (2006) and after (2008) collapse failures

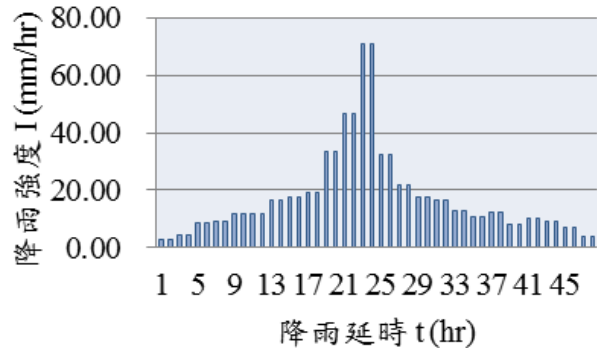


圖 8 重現期距 50 年之 48 小時降雨歷時設計曲線

Fig.8 48 hrs rainfall ~ time duration design curve of 50 years return period

## 2.邊坡穩定數值模擬

### (1)數值模式建立

本研究採用 T-16 塔柱邊坡崩塌區之中央縱向剖面，即 C-C'剖面，進行穩定性分析。C-C'剖面於崩塌區位及崩塌機制最具代表性。本剖面之數值模型，如圖 9 所示。

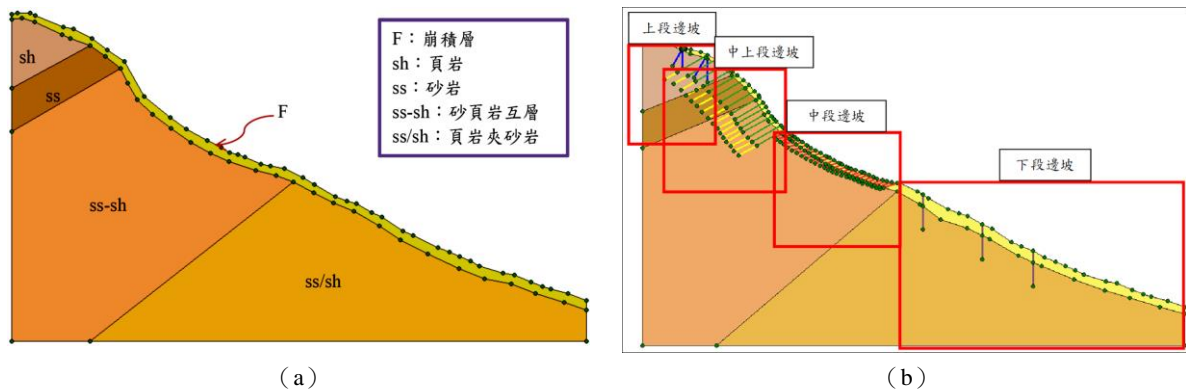


圖 9 崩塌後(a)整治前、(b)整治後之數值模型

Fig.9 Numerical models of T-16 slope after Jang-Mi typhoon (a) before and (b) after stabilization works

### (2)材料模式參數

依據台北市文山區萬壽路 75 巷政大御花園蓄蜜風災土石崩塌鑑定報告 (2008) 中之土壤物理及力學試驗成果，來推估求得地層之材料模式參數，輸入之材料模式參數，如表 2 所示。整治工程之結構材料模式參數輸入值，如表 3 所示。

表 2 各地層之材料模式參數

Table 2 Parameters of material models for various soil strata

材料性質	土層		岩層		
	崩積層 (F)	砂岩層 (ss)	頁岩層 (sh)	頁岩夾砂岩 (sh/ss)	砂頁岩互層 (ss-sh)
孔隙比 $e$	0.616	0.15	0.14	0.148	0.145
$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.52	24.62	23.64	23.84	24.23
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.11	25.41	24.56	24.92	24.97
柏松比 $\nu$	0.3	0.25	0.27	0.26	0.26
$c'$ (kPa)	4.91	679.83	256.04	306.07	467.93
$\phi'$ (°)	26	36	27	30	31.5
$k_x, k_y$ (cm/sec)	$2.763 \times 10^{-4}$	---	---	---	---
$E$ (kPa)	$1.4 \times 10^4$	$1.78 \times 10^6$	$4.91 \times 10^5$	$8.76 \times 10^5$	$1.14 \times 10^6$

表 3 整治工法材料模式參數

Table 3 Material model parameters of stabilization works

工法	單位重 $\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和單位重 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	混凝土抗壓強度 $fc'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) kN/m <sup>2</sup>	孔隙比 $e$	彈性模數 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	凝聚力 $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	摩擦角 $\phi$ (°)	膨脹角 $\psi$ (°)	$k_x, k_y$ (m/hr)	柏松比 $\nu$
RC 擋土牆	23.54	23.54	$2.10 \times 10^2$ $2.06 \times 10^4$	0.15	$2.15 \times 10^6$	100	45	0	$2.5 \times 10^{-5}$	0.2
工法	長度 $L$ (m)	斷面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	混凝土抗壓強度 $fc'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) kN/m <sup>2</sup>	彈性模數 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	慣性矩 $I$ (m <sup>4</sup> )	$EA$ 折減前 折減後 (kN/m)	$EI$ 折減前 折減後 (kN/m <sup>2</sup> /m)	自重 $w$ 折減前 折減後 (kN/m/m)	柏松比 $\nu$	間距 $L_{spacing}$ (m)
微型樁	8.5、9.0、 12.0、12.5	$4.53 \times 10^{-3}$	$2.10 \times 10^2$ $2.06 \times 10^4$	$2.15 \times 10^6$	$1.64 \times 10^{-6}$	$9.74 \times 10^3$ $3.12 \times 10^3$	3.52 1.13	$1.07 \times 10^{-1}$ $3.41 \times 10^{-2}$	0.2	--
地 錨	自由 端	15	$2.10 \times 10^2$ $2.06 \times 10^4$	$2.15 \times 10^6$	--	$6.75 \times 10^4$ $6.75 \times 10^4$	--	--	--	2.0
	錨 碇 端	10	$2.10 \times 10^2$ $2.06 \times 10^4$	$2.15 \times 10^6$	--	$2.03 \times 10^5$ $2.84 \times 10^4$	--	--	--	--
土釘	6	$4 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^2$ $1.72 \times 10^4$	$1.97 \times 10^6$	$1.30 \times 10^{-4}$	$7.88 \times 10^4$ $8.67 \times 10^3$	$2.56 \times 10^2$ $2.82 \times 10^1$	$9.42 \times 10^{-1}$ $1.04 \times 10^{-1}$	0.2	--
排樁	15.8	$5.03 \times 10^{-1}$	$2.10 \times 10^2$ $2.06 \times 10^4$	$2.15 \times 10^6$	$2.01 \times 10^{-2}$	$1.08 \times 10^6$ $7.45 \times 10^6$	$4.32 \times 10^4$ $2.98 \times 10^4$	$1.18 \times 10^1$ 8.17	0.2	--

註：鋼筋彈性模數  $E_s = 2.04 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>  
 混凝土彈性模數  $E_c = 15000 \sqrt{fc'}$  kg/cm<sup>2</sup>  
 一般混凝土單位重：2300 kg/m<sup>3</sup> (22.56 kN/m<sup>3</sup>)  
 一般鋼筋混凝土單位重：2400 kg/m<sup>3</sup> (23.54 kN/m<sup>3</sup>)  
 混凝土之材料參數，參照一般文獻資料決定

強度折減比例：微型樁 32 %  
 地錨自由端 100 % (已採用  $L_{spacing}$  折減)  
 地錨錨碇端 14 %  
 土釘 11 %  
 排樁 69 %

### (3)邊界條件

幾何數值模型邊界於底部採完全束制(即位移量  $u_x = 0$ 、 $u_y = 0$ )，左右側採用固定水平方向(即  $u_x = 0$ 、 $u_y \neq 0$ )。

### (4)薈蜜颱風誘發降雨入滲穩定分析

本研究採用暫態(Transient)模式進行降雨入滲分析。降雨事件採用 T-16 塔柱邊坡發生崩塌期間之薈蜜颱風降雨歷時曲線，如圖 4 所示。降雨入滲分析執行完成後，利用現地監測資料，進行穩定性分析，隨後比對數值分析結果，並調整材料模式參數輸入值，使其符合現地之觀測成果(如邊坡潛在滑動面位置及臨界狀態，即  $FS = 1.0$  之發生時間)。

### (5)崩塌邊坡整治前、後之降雨入滲穩定分析

崩塌邊坡整治前、後之降雨入滲及穩定性分析中，採用之材料模式參數為率定後之參數值，並使用重現期距 50 年之 48 hrs 設計兩型，進行降雨入滲穩定分析。隨後，比對兩者之分析結果，即可評估邊坡整治工法之有效性。

## 四、結果與討論

### 1. 薈蜜颱風誘發崩塌發生區位之比對

模擬薈蜜颱風期間(降雨歷時 77 hrs)降雨入滲情況下，T-16 塔柱邊坡之穩定性。在整個降雨歷程中，潛在滑動面之形成與安全係數  $FS$  之變化，如圖 10 所示。圖中顯示邊坡在未降雨時，主要潛在滑動面(臨界狀態時之增量位移較大，incremental displacement)，約略位於臨近坡頂之陡峭區位，如圖 10 (a)之紅色區域所示；而次要潛在滑動面(臨界狀態時之增量位移較小)，則約略位於邊坡中上段，崩積層最厚實之區域，如圖 10 (a)之黃色區域所示，此結果與圖 7 所示之邊坡崩塌前(2006 年)、後(2008 年)之地形變化相當吻合。圖 10 (b)亦顯示邊坡接近臨界破壞狀態(即  $FS = 1.0$ )之可能時間，介於  $t = 64 \sim 72$  hr 之間 (其相當之  $FS = 1.016 \sim 0.997$ )，此與現地觀測之崩塌發生時間  $t = 64$  hr 相當接近。

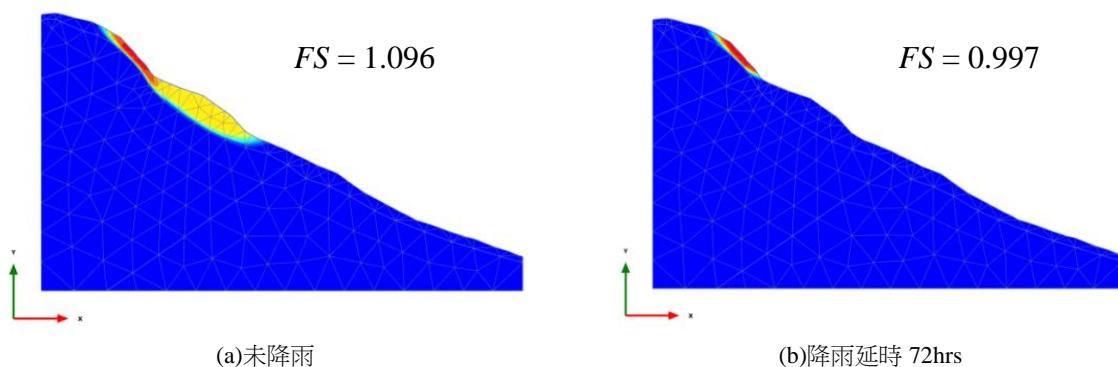


圖 10 T-16 塔柱邊坡 (a)未降雨及(b)72 hrs 降雨入滲之  $FS$  值及滑動面變化

Fig.10 Variations of  $FS$  value and potential sliding surfaces of T-16 slope  
(a) without rainfall and (b) with 72 hrs rainfall infiltration

### 2.崩塌邊坡整治前、後之降雨入滲穩定分析

本節討論未降雨和降雨入滲情況下，邊坡崩塌前及崩塌後穩定性分析之結果，如表 4 所示。其中，崩塌後之分析包括整治工法施作前、後之安全係數  $FS$  之變化。

表 4 T-16 塔柱邊坡薈蜜颱風前、後及整治工法施作前、後之穩定性分析

Table 4 Stability analyses of T-16 slope before/after Jang-Mi Typhoon (or before/after slope failure); and before/after construction of stabilization works

	邊坡崩塌前 (薈蜜颱風前)	邊坡崩塌後(薈蜜颱風後)	
		整治工法施作前	整治工法施作後
未降雨之 $FS$ 值	1.096	1.297	1.659
降雨入滲後 $FS$ 值	0.997 (72 hrs)	1.004 (48hrs, 50 年)	1.191 (48hrs, 50 年)

註：1. 邊坡崩塌前，乃模擬邊坡於薈蜜颱風期間(降雨歷時 77 hrs)降雨入滲情況，計算邊坡接近臨界破壞狀態(即  $FS = 1.0$ )之可能時間為  $t = 64 \sim 72$  hr 之間 (其相當之  $FS = 1.016 \sim 0.997$ )，此與現地觀測之崩塌發生時間  $t = 64$  hr 相當接近。  
2. 邊坡崩塌後，採用中央氣象局木柵雨量觀測站之 20 年降雨資料，所建置的重現期距 50 年之 48 hrs 設計兩型，進行整治工法施作前、後之降雨入滲穩定性分析。



## (1)未降雨情況下整體邊坡之穩定性

在 T-16 塔柱邊坡崩塌後，整治工法施作前、後之整體邊坡在未降雨情況下穩定性分析之結果，如圖 11 所示。整治工法施作前，在未降雨情況下，崩塌後邊坡之  $FS = 1.297$ ，比崩塌前之  $FS = 1.096$  為高，此乃崩塌後邊坡之土砂下移且地形處於較和緩穩定狀態之緣故，如圖 11 (a)所示。

反之，整治工法施作後，在未降雨情況下，邊坡穩定分析結果如圖 11 (b)所示。其安全係數  $FS$  由整治工法施作前之 1.297 提升至 1.659，顯示整治工法對整體邊坡穩定性提升之有效性。

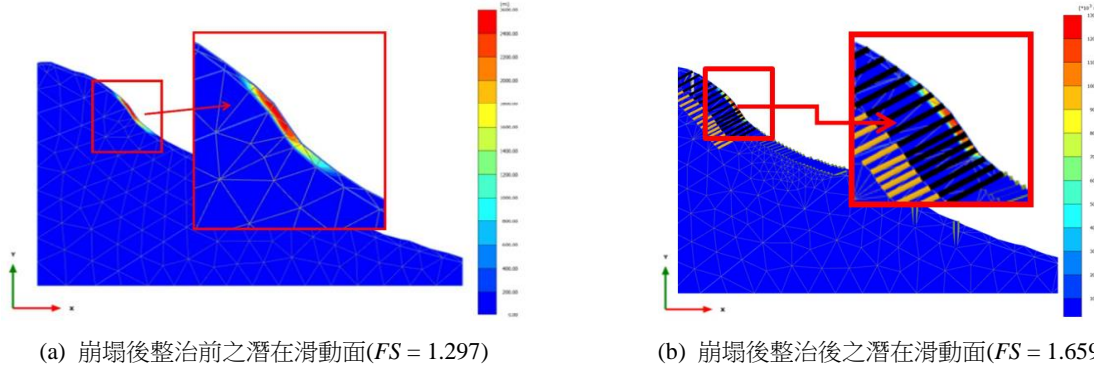


圖 11 T-16 塔柱邊坡蓄蜜颱風崩塌後，未降雨情況下之邊坡穩定性分析(a)整治前及(b)整治後

Fig.11 Stability analyses without rainfall after Jang-Mi typhoon (or after slope failure) (a) before and (b) after construction of stabilization works

## (2)降雨情況下之整體邊坡穩定性

### ① 整治工法施作前

當降雨延時達  $t = 24$  hr 時，崩積層之飽和度  $S(\%)$  增加微小，如圖 12 (a)所示。又當降雨延時分別延長至  $t = 36 \sim 48$  hr 時，崩積層之  $S$  值則呈現顯著提升，如圖 12 (b)所示。此說明，在降雨延時  $t = 0 \sim 24$  hr 之間，由於降雨強度偏低，雨水入滲量不足以引起飽和度  $S$  之變化。然而，當降雨延時達  $t = 24$  hr，即降雨強度最大階段，此時之飽和度  $S$  並未明顯提升，而是在尖峰降雨後，雨水經過約 4 hrs 入滲後，才呈現顯著變化。最後，在降雨延時  $t = 48$  hr，即降雨接近結束時，崩積層已有部分區域接近飽和狀態，如圖 12 (b)之紅色區域所示。由此可推測，崩積層中接近飽和狀態之土層區域將逐漸形成浸潤帶，並導致土體之抗剪強度及抗滑能力大幅下降。

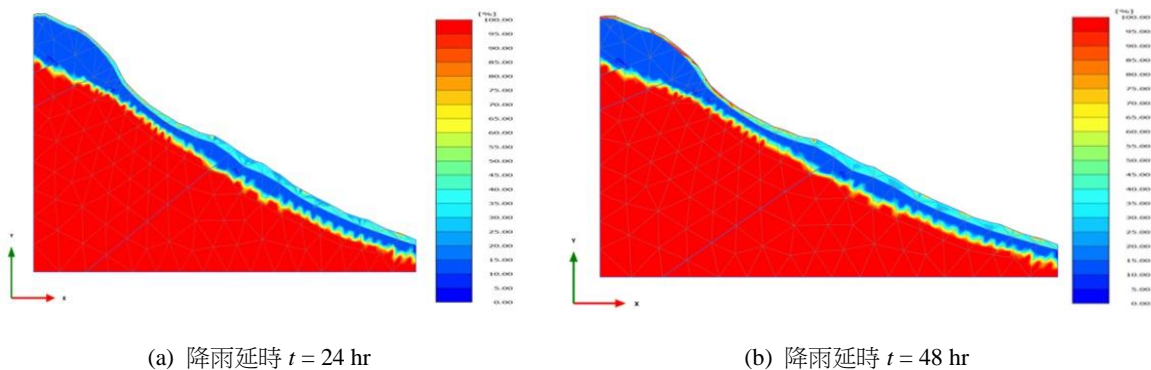


圖 12 蓄蜜颱風崩塌後，整治工法施作前，T-16 塔柱邊坡於 50 年重現期距下，降雨入滲飽和度  $S(\%)$  變化

Fig.12 Variation of degree of saturation  $S(\%)$  of T-16 slope under rainfall of 50 yrs return period after Jang-Mi typhoon and before construction of stabilization works

圖 13 為在重現期距 50 年降雨條件下之邊坡穩定安全係數  $FS$  值。並由圖 14 可知，降雨前之  $FS = 1.297$  下降至 1.004，且潛在滑動面與鄰近坡頂處所形成之浸潤帶(圖 12 (b))位置相當吻合，此說明降雨入滲導致地表崩積層土壤趨於飽和，為邊坡穩定性下降之主要原因。

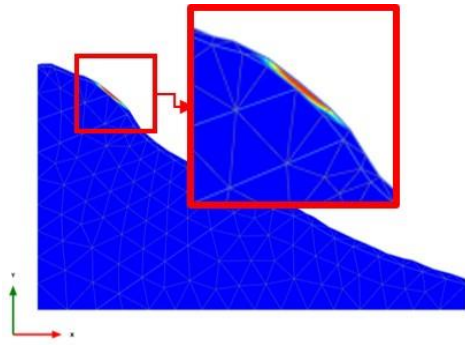


圖 13 整治前，T-16 塔柱邊坡於 48 hrs 降雨延時之潛在滑動面 ( $FS = 1.004$ )

Fig.13 The potential sliding surface of T-16 slope under 48 hrs rainfall before construction of stabilization works ( $FS = 1.004$ )

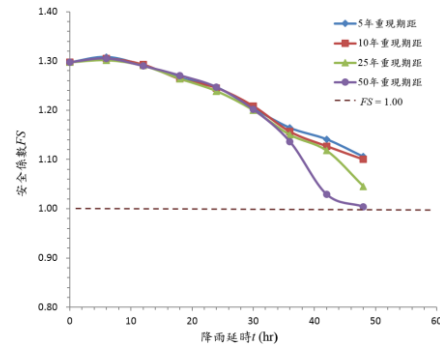


圖 14 整治前，T-16 塔柱邊坡於不同重現期距下之 48 hrs 降雨  $FS$  值變化

Fig.14 Variation of  $FS$  value of T-16 slope under 48 hrs rainfall with different return periods before construction of stabilization works

## ② 整治工法施作後整體邊坡降雨入滲穩定性分析

本節採用 50 年重現期距之分析結果進行討論。圖 15 為整治工法施作後整體邊坡於 50 年重現期距 48 hrs 降雨入滲之穩定性分析結果。其中，降雨  $t = 48$  hr 後之安全係數  $FS = 1.191$ ，與整治工法施作前之  $FS = 1.004$  (圖 13) 比較得知，整治工法有減緩邊坡在降雨期間，穩定性趨近於臨界狀態 ( $FS = 1.0$ ) 之功效。同時，其滑動區位與邊坡未施作整治工法者 (圖 13) 相當接近，此顯示整治前、後邊坡在相同降雨條件下，其破壞型態相類似，滑動面之區位均發展於中上段邊坡處。

圖 16 為降雨重現期距 50 年降雨強度與整治前、後相對安全係數  $RFS (= FS_{\text{整治後}} / FS_{\text{整治前}})$  之關係圖。圖中顯示，當未降雨情況下， $RFS$  值為最大值；而當降雨延時  $t = 30$  hr 時， $RFS$  值降低為最小值，此乃由於邊坡甫經歷降雨強度尖峰值 ( $t = 23 \sim 24$  hr)，強降雨造成之降雨入滲效果最鉅，因而導致整治工法之對邊坡安全性提升之防護效果未如預期。然而，在降雨延時  $t > 30$  hr 之後，由於降雨強度漸緩， $RFS$  值即開始回升。

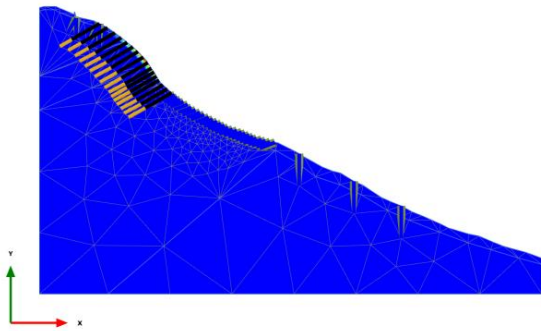


圖 15 整治後，T-16 塔柱邊坡於降雨延時 48hrs 下之穩定性分析 ( $FS = 1.191$ )

Fig.15 Stability analysis of T-16 slope under 48 hrs rainfall after construction of stabilization works ( $FS = 1.191$ )

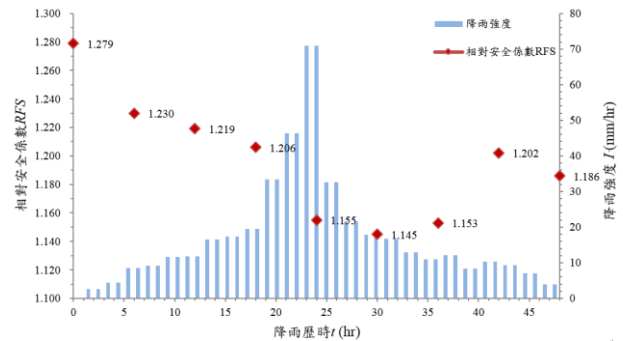


圖 16 相對安全係數  $RFS (= FS_{\text{整治後}} / FS_{\text{整治前}})$  ~ 降雨延時  $t$  ~ 降雨強度  $I$  之關係 (降雨重現期距 50 年)

Fig.16 Relative Factor of Safety  $RFS (= FS_{\text{stabilization}} / FS_{\text{no-stabilization}})$  ~ rainfall duration  $t$  ~ rainfall intensity  $I$  relationship (rainfall return period of 50 yrs)

## 五、結論與建議

### 1. 結論

(1)本研究採用有限元素法，模擬分析貓空纜車 T-16 塔柱下方邊坡在蓄蜜颱風降雨入滲情況下之穩定性。分析結果顯示：崩塌整治後之邊坡，在未降雨情況下之穩定性安全係數  $FS = 1.659$ ，比整治前( $FS = 1.297$ ) 提升了 0.362。在連續降雨入滲情形下，其整治後安全係數  $FS = 1.191$ ，較整治前  $FS = 1.004$  為高（穩定性約提升 18.63%），就分析結果而言，在降雨入滲情況下，整治工法對邊坡趨於臨界破壞具有實質的抑制效果。

(2)整治工法於未降雨情況下，對邊坡穩定性提升效果最佳( $RFS$  值最大， $RFS = 1.279$ )，而在降雨強度較大之情況，在經過一段降雨延時後，由於較劇烈之降雨入滲影響，整治工法對邊坡穩定性之提升效果將會有相當程度之折減( $RFS$  值最小， $RFS = 1.145$ )。

### 2. 建議

(1)進行數值模擬分析時，本研究未考量風化破碎之岩層分布，此區產生之破碎帶可能為造成崩塌發生主因之一。

(2)在進行整治工法之數值模擬分析時，尚未考慮植生工法之護坡及排水工法之排水效果，此亦為邊坡整治工法中之重要項目。

## 六、參考文獻

1. 台北市四大技師工會(土木、大地工程、水土保持、結構工程工業)(2008)，台北市文山區萬壽路 75 巷政大御花園蓄蜜風災土石崩塌鑑定報告。
2. 林德貴、吳正義(2010)，「降雨期間土砂災害危險潛勢數值分析及評估模式」，地工技術，第 123 期，21-36。
3. 經濟部水利署水資源局(2001)，「水文設計應用手冊」。
4. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995), "Analysis of Rainfall-Induced Debris Flow, Journal of Geotechnical Engineering," ASCE, Vol.121, No7, pp. 544-552.
5. Brand, E.W. (1981), "Some Thoughts on Rainfall Induced Slope Failures," Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 373-376. S319-S332.
6. Chandrasekaran, S.S., Sayed Oweise, R., Ashwin, S., Rayansh M. Jain, Prasanth, S., and Venugopalan, R. B. (2013), "Investigation on infrastructural damages by rainfall-induced landslides during November 2009 in Nilgiris, India," Natural Hazards, vol. 65, pp. 1535-1557.
7. Debray, S., and Savage, W.Z. (2001), "A Preliminary Finite-Element Analysis of a Shallow Landslide in the Alki Area of Seattle, Washington," U.S. Geological Survey.
8. Koukis, G., and Ziourkas, C. (1991), Slope instability phenomena in Greece : A statistical analysis," Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Vol. 43, pp. 47-60.
9. Savage, W.Z., Baum, R.L., Morrissey, M.M., and Arndt, B.P. (2000) "Finite-Element Analysis of the Woodway Landslide, Washington," U.S. Geological Survey Bulletin 2180.
10. Sidle, R.C., and Swanston, D.N. (1982) "Analysis of a Small Debris Slide in Coastal Alaska," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 19, pp. 167-174.
11. Sitar, N., S. A. Anderson, and K. A. Johnson (1992), "Conditions for initiation of rainfall-induced debris flow," Stability and performance of slopes and embankments: proceedings of a special conference at U. C. Berkeley, ASCE.
12. Terzaghi, K. (1950) "Mechanism of landslides," In: Paige, S. (Ed.), Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, New York, pp. 83-123.