

# 土釘工法之適用性與設計案例

孫介文 姚大鈞

亞新工程顧問股份有限公司

## 摘要

土釘工法最初由法國開始使用，由於工法之便利及經濟性與可作為臨時或永久結構物之特性，其應用範圍與規模有愈來愈廣的趨勢。除常見使用於擋土設施之設計外，於國內公共工程之設計中土釘工法亦有作為邊坡穩定的案例。本文主要除簡介土釘作為邊坡穩定工法之優點及其運用之限制外，將以國內某工程為例介紹所使用之設計分析方法，作為工程界進行相關設計時之參考。

**關鍵字：**土釘、邊坡穩定、擋土結構

## Applicability of Soil Nail and Case Study

Jeff Sun Daniel Yao

Moh and Associates, Inc.

## ABSTRACT

The soil nails were first designed and installed in field in France. Because of their advantages in construction efficiency, cost, and application in both temporary as well as permanent structures, soil nails have been used for various stabilization purposes and the technology has been significantly advanced since their first application. In addition to the use in earth retaining structures, soil nails have been designed for the slope stabilization in public civil works. This paper presents the advantages of using soil nails for slope stabilization and the application restrictions. An example was used to demonstrate the design methodology.

**KEY WORDS :** soil nails, soil nailing, slope stability, retaining structure

### 一、前言

土釘的目的乃藉由植入較現地土壤強度為高之材料並穿越預估可能破壞面之方式加勁現有地層強度並增加土壤整體穩定性。其施工方式係將特製之鋼棒或碳纖維棒依一定之間距植入土中以產生一加勁之土體。植入方式一般先於預定施作位置鑽孔，鑽孔完成後再將特製之鋼棒或碳纖維棒插入鑽孔，之後再以混凝土砂漿填充鑽孔與鋼棒或碳纖維棒間之空隙，此一填充通常以低壓完成。此一加勁後之土體形成一座類似重力式擋土牆之構造以防止開挖面或邊坡的滑落。土釘可用作現有邊坡的穩定措施亦或開挖後開挖面及邊坡的穩定措施。土釘不像地錨須先施

加預力，故於長期之穩定性與耐久性而言，土釘無需考慮因時間關係可能損失之預力與摩擦力。由於其強度與功能性不易因時間而變化之特性，土釘之應用亦可作為永久結構物。雖然也有些做為土釘之碳纖維棒也會施加預力以減少變形，然其係以加勁材之變形為考量，與加勁後之土體整體穩定性並無直接關係。土釘施工時的主要特徵為由上往下逐層施築，施工無需複雜之設備且技術簡易。其張力主要隨開挖後之變形藉由與周圍土壤之互制作用而逐漸發展增加。第一座土釘擋土牆是法國於 1972 年建造，由於土釘的經濟與便利性，土釘的應用有愈來愈多的趨勢，美國聯邦高速公路局運輸部(U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration)及美國州公路及運輸官員協會 (American Association of State Highway and Transportation Officials) 還特別對土釘的研究 (Byrne, et al., 1993 and Juran, I. and Schlosser, F. M., 1987) 進行一系列的贊助，可見其重要性。

## 二、 土釘之優點與運用的限制

### 2.1 土釘之優點

相較於地錨之施工，土釘較受歡迎之原因主要是因為它的經濟性與施工之便利性。作為臨時之邊坡保護措施，土釘所需之材料簡單，無需施加預力與防蝕所需之特殊材料，且土釘的施工機具較為輕巧簡單，不需大型機具即可施作；在狹窄之施工空間或市區內，小型機具產生的噪音低且機動性高是土釘的一大優勢。此外土釘之施工簡單迅速，技術層次較低且較具彈性，可隨時根據土層變化與工作計劃做調整。

就土釘之變形行為而言，使土釘發揮加勁效果所需之變形量極小，此一變形量相當於具良好支撐系統開挖時所產生之變形量，由於土釘在開挖後的第一時間施作，且與開挖面緊密接觸，因此可以減少地盤擾動及對鄰近結構物的影響。

### 2.2 土釘運用的限制

土釘施作前開挖面必須能至少自立數小時，故所要加勁之邊坡或開挖面其土層需有一定的凝聚力，故土釘對於凝聚力較小或無凝聚力之砂性土壤，較不適用。

且於土釘施作時，開挖面須先降水，避免水從開挖面滲出，影響坡面穩定及土釘施作，且開挖面後方土壤之剪力強度易隨地下水位升高有效應力降低而降低，連帶影響土釘的錨定強度，故如果工期較長或以土釘作為永久之邊坡穩定措施，則開挖面後方應設置有效之排水措施。

土釘使用於軟弱黏土開挖之邊坡穩定常需使用較長且較密之土釘，施作效果較差，故一般來說土釘於軟弱黏土的開挖並不適用。

如果整體滑動分析顯示深層滑動的可能，單靠土釘可能無法滿足設計需求 (土釘長度一般在 2~12m 間)，此時土釘可能需與其他擋土措施如地錨一起運用以符合設計需求。

鋼質土釘使用於長期邊坡的穩定需注意防銹蝕之處理；如使用碳纖維土釘則因其彈性模數較小，在拉力完全發揮時將產生較大之變形量，故以碳纖維複合材作為土釘施作時常需搭配施加預力以減少變形，雖增加施作之複雜性，但由於其重量較輕，相對所需之施作人員較少，故仍有其優勢。

### 三、 土釘的發展趨勢

土釘的經濟與便利使得各種改良工法也相應而生，目前針對土釘於軟弱地層鑽孔灌漿時容易坍孔的缺點，已有廠商利用特殊鑽頭設計，發展出一灌漿系統，此一系統在鑽管時灌漿，不僅避免坍孔發生亦使得施工更為簡單迅速。

另外針對工程臨近鐵路高壓電之雜散電流可能使土釘發生嚴重之銹蝕，不同的材料亦因此被加以研究使用。英國之鐵路延伸線計劃 Sunderland Direct Project 即因此一因素而進行碳纖維及玻璃纖維材料作為土釘適用性之研究( Unwin, H., 2001)，研究之結果顯示玻璃纖維因容易受鉀離子影響而降低其材料性質，故對於此一需 120 設計年限之工程並不適用。此一工程後來使用 16mm 直徑之碳纖維複合材土釘以穩定高達 8m 之邊坡。另外配合碳纖維複合材土釘之使用，本案使用高強度之地工格網做為坡面並於每一土釘頂部設置一分離之混凝土承壓板，地工格網上方並覆蓋 2m 之表土植生，不僅兼顧景觀，亦使得碳纖維複合材與地工格網不致受紫外線之影響而降低其材料性質。

針對短期與長期的邊坡穩定，土釘已經發展成為一種相當成熟的工法，根據上述之案例，土釘使用碳纖維加勁複合材料其設計年限可達 120 年，因碳纖維加勁複合材料之強度對重量比相當高，每一土釘之重量相當輕，不僅施工更加簡易迅速，其工程經費亦較傳統土釘工法節省約 10% 的經費。

### 四、 設計實例

目前較知名的土釘設計方法有 Davis Method(Shen, et al., 1981)、“Modified” Davis(Elias and Juran, 1991)、German Method(Stocker, et al., 1979)、French Method(Schlosser, 1982)和 Kinematical Method(Juran, et al., 1990)，這些分析方法在很多文獻中皆有介紹，在此即不再贅述。作者曾參與國內某重大工程實際設計時，並未直接引用上述的設計方式，而是結合邊坡穩定分析之套裝軟體功能進行土釘之設計。本文將針對此一工程之土釘設計方法做一介紹。

合理的土釘設計程序必需包括三個基本的步驟：

- 估計土釘的應力及可能的破壞面。
- 評估局部土釘的拉出破壞或拉斷破壞。
- 評估土釘結構及周遭地盤的整體穩定，不論是通過土釘的破壞面或位於土釘外側之破壞面。

本工程之土釘設計乃依照上述之三個基本步驟進行設計，首先以電腦軟體進行邊坡穩定分析，分別針對常時、高水位(暴雨)及地震等狀況進行分析，不同之狀況其安全係數要求亦不同。分析時若有任一狀況之安全係數不符要求時，則先考慮在路權範圍內以減少滑動驅動力即修緩坡或以增加抗滑動力即坡趾填土的方式進行邊坡穩定之設計。在此兩方式皆無法達到穩定之要求時，則利用土釘作為穩定邊坡之方法。分析時先根據土層狀況假設其破壞模式為楔型破壞或圓弧破壞，再分別以 Janbu method(1954)或 Bishop Method(1960)求出可能之破壞面，根據此一破壞面決定所需之土釘長度及間距。在決定土釘長度後，根據土釘在破壞面後

之長度及此一長度之平均深度計算土釘所受之有效土壓力，再由土層參數  $c'$  與  $\tan\phi'$  可以求出土釘與土壤間之摩擦力，比較此一摩擦力與拉出破壞及拉斷破壞的大小(檢核局部之穩定)，摩擦力、拉出破壞及拉斷破壞三者之最小值即為沿此破壞面移動變形時土釘可提供之最大拉力。在不會有上述的破壞情形下，利用邊坡穩定分析程式原有之功能，可將此一最大拉力加入後再進行邊坡穩定分析。分析後之安全係數如果符合要求，則此一土釘之間距及長度即符合設計需求。在決定土釘長度時僅考慮土釘拉力的貢獻，忽略土釘之剪力及撓曲勁度，此一作法可以有效減少分析與計算之複雜性，也不致過於保守。邊坡穩定分析與土釘設計之流程如圖一所示。

以下則以一個實際設計案例做說明。

本工程位於新竹，地層分佈除表土外，淺層土壤大部分屬風化之砂岩或頁岩，其土層分佈由上而下依次為表土；高度風化砂岩；中度風化砂岩；中度風化砂岩偶夾頁岩；中度風化砂岩。工址附近之地下水位皆位於地表下方十公尺以上，故常時狀態之邊坡穩定不受地下水位影響（分析時，以無地下水狀況分析）。以本工程之臨時開挖邊坡穩定分析為例，在邊坡開挖前，由於工程需求，需先以水泥混合土壤進行填方後再進行邊坡開挖，故於開挖後邊坡上方有一層水泥混合土壤。開挖後之邊坡其垂直高度約 12m，其坡比為  $V:H=1.0:0.4$ 。

設計時先針對常時狀況、高水位(暴雨)及地震等狀況進行分析，本案例於分析後在常時狀況下，其邊坡穩定分析之安全係數小於規範要求之 1.3。

圖二為利用程式進行邊坡穩定分析之結果。

由分析之結果可知其安全係數為  $0.95 < 1.3$ ，由於安全係數不符合規範之要求，故需以土釘工法進行邊坡加勁之設計，利用以下之公式進行土釘拉力計算。

$$F_{out} = F_1 + F_2 \quad (1)$$

$$F_1 = \pi \times D \times (c' + \sigma'_{v1} \times \tan \phi') \times l_1 \quad (2)$$

$$F_2 = \pi \times D \times (c' + \sigma'_{v2} \times \tan \phi') \times l_2 \quad (3)$$

$F_{out}$ ：最大有效土釘拉力

$F_1$ ： $l_1$  段所貢獻土釘拉力

$F_2$ ： $l_2$  段所貢獻土釘拉力

$D$ ：土釘直徑

$c', \phi'$ ：段所在位置之土層參數

$\sigma'_{v1}, \sigma'_{v2}$ ： $l_1$ 、 $l_2$  段所在位置之有效覆土壓

分析時  $l_1$ 、 $l_2$  段相關位置如圖三所示。各層土釘之拉力算出後必須再針對土壤與灌漿材間，灌漿材與鋼棒(或碳纖維棒)間與鋼棒(或碳纖維棒)本身之張力降伏進行檢核，最大有效土釘拉力以不產生局部破壞為原則。

算出各層土釘之最大有效拉力後，可利用邊坡穩定分析程式原有之功能將土釘之拉力加於坡面後再進行邊坡穩定分析，重複調整土釘之長度及間距直到安全係數符合規範要求為止。圖四為加上土釘後之邊坡穩定分析結果。

分析之結果顯示，在加上 3 排長 8 公尺，間距 2 公尺之土釘（以外徑 30mm，內

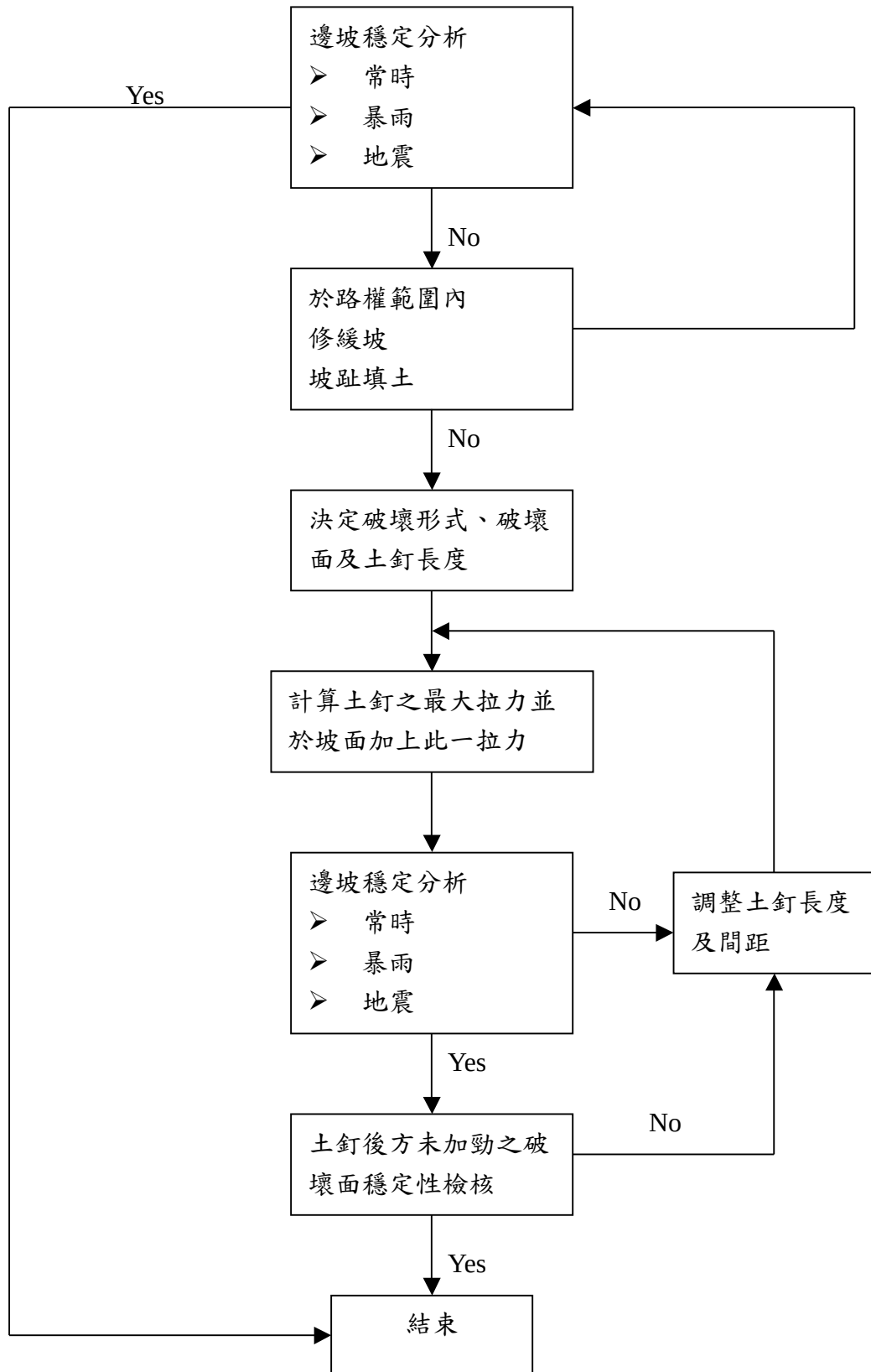
徑 16mm 之鋼棒植入 46mm 孔徑之鑽孔後灌漿，灌漿孔與水平面約呈  $22^{\circ}$  角)後，其邊坡穩定安全係數提高至約 1.37，符合本工程之規範要求。除土釘外，本工程另以噴凝土與鋼絲網做為臨時邊坡之坡面保護。

當然在加上此一土釘後，高水位及地震狀況時之安全係數亦需符合規範之要求，否則必須加長土釘長度或縮小土釘的間距再重新進行分析，直到所有狀況皆符合要求規範為止。

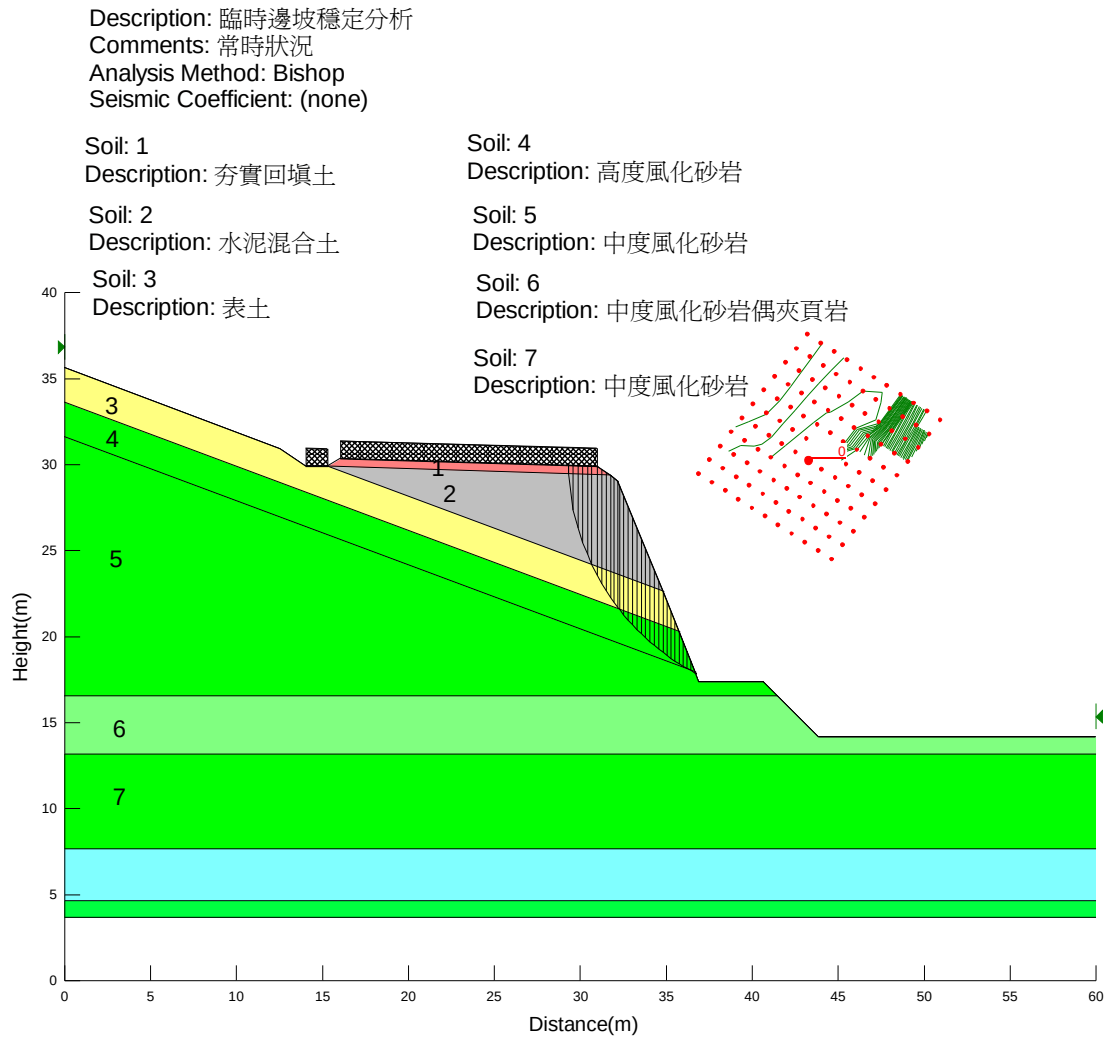
本工程中亦有將土釘使用作為永久擋土結構物之情形，此時針對土釘與其構件則以加熱鍍鋅方式進行防銹處理以達到設計年限之要求，惟施工時仍應注意不可損壞其鍍鋅包覆。謹提供永久土釘完工後之施工照片供參。

## 五、 結論

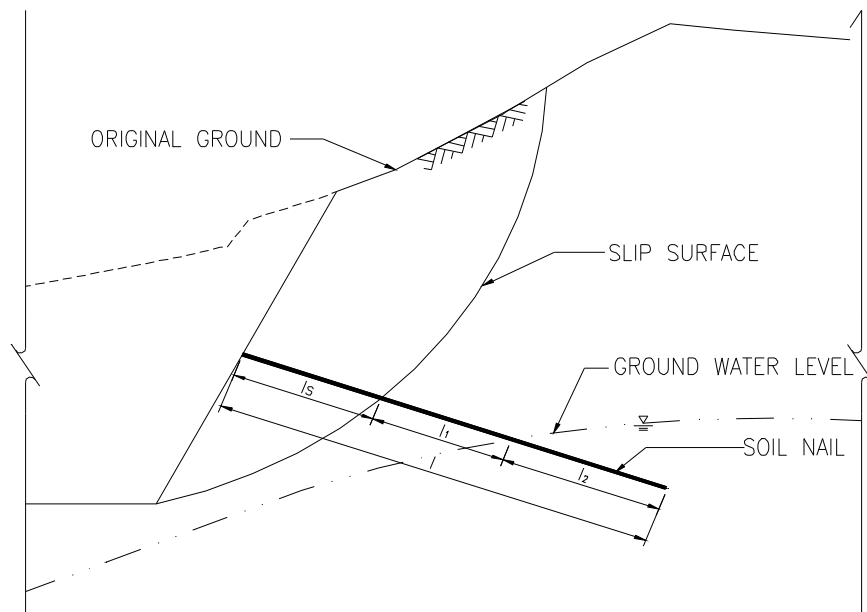
- 1.由土釘之拉力計算中可以看出土釘之拉力大小受水位(有效覆土壓力)影響很大，水位之提高不僅使得邊坡抗滑力下降也會使得土釘拉力降低，故土釘設置長度範圍內應配置橫向排水管，此點於設計時需特別注意。
- 2.依照各個文獻中對土釘分析方法之介紹，本工程之設計方法與 French Method 類似，皆利用切片法進行邊坡穩定分析，惟並不考慮土釘在剪力與彎矩上的貢獻，有效簡化分析的複雜性。
- 3.邊坡穩定分析程式對於最可能之滑動面（安全係數最小之滑動面）需依靠使用者調整尋找，在決定最可能滑動面之土釘之長度時，連帶可能改變了此一滑動面之位置，甚至最可能滑動面將繞過所設置之土釘位置。土釘之設置雖可有效提高原分析最可能滑動面之安全係數，但對於加勁區以外之破壞面則無任何幫助，分析時需注意檢核加勁區以外之滑動面是否符合規範之要求。
- 4.土釘之張力基本上是因土體變形產生，設計土釘時應注意儘量將土釘設於邊坡產生滑動微小變形即可發揮其拉力之處，即坡趾之位置。
- 5.由於本工程對完工後之量測資料較為缺乏，故目前只能以日後之表現來評估設計及施工方式是否成功，對於土釘之設計方法無法作一有效的回饋分析，建議未來如果進行相關設計及施工時，仍應配置適量之監測儀器並進行回饋分析瞭解土釘之設計成效。



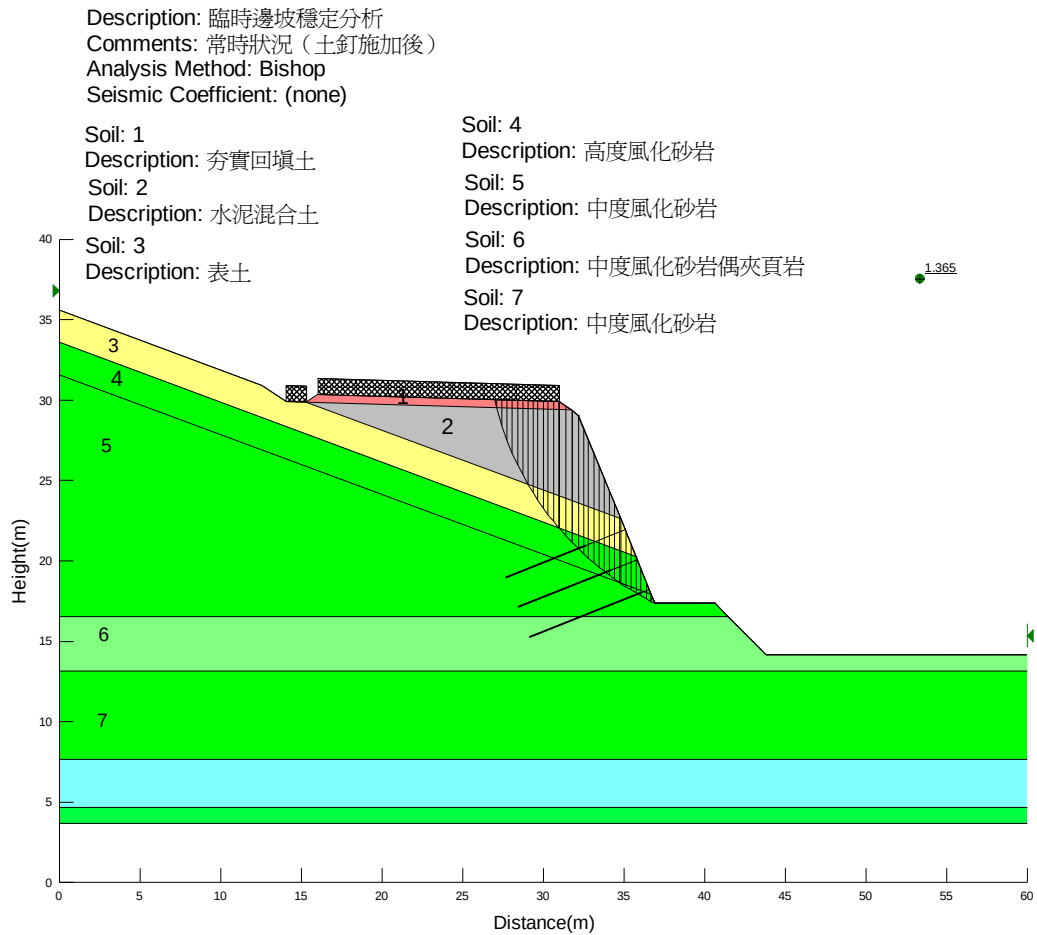
圖一 邊坡穩定分析與土釘設計流程



圖二 利用邊坡穩定分析程式進行邊坡穩定分析之結果



圖三 進行土釘拉力估算時各分段所在位置關係



圖四 加上土釘後之邊坡穩定



照片一 土釘及格梁護坡



## 誌謝

本文承蒙亞新工程顧問有限公司的支持及公司內秦中天協理、王劍虹經理和胡逸舟工程師提供寶貴的意見，另外洪仲機具公司洪造先生也提供珍貴的參考資料，使得本文得以順利完成，謹在此表達對他們謝意。

## 參考文獻

- BISHOP, A. W. AND MORGENSTERN, N. (1960), "Stability coefficients for earth slopes", *Geotechnique*, Vol.10, No.4, pp.129-150.
- BRUCE, D. A. and JEWELL, R. A. (1986), "Soil Nailing: Application and Practice Part I", *Ground Engineering*, November, pp. 10-15.
- BRUCE, D. A. and JEWELL, R. A. (1987), "Soil Nailing: Application and Practice Part II", *Ground Engineering*, January, pp. 21-38.
- BYRNE, R. J., WALKINSHAW, J. L., CHASSIE, R. G., DIMILLIO, A., KEELEY, J. W., JACKURA, K. A., BRUCE, D. A., CHAPMAN, R., NICHOLSON, P. AND LUDWIG, C. (1993), *Soil Nailing Summary Report*, FHWA International Scanning Tour for Geotechnology, Sept.-Oct. 1992.
- ELIAS, V. AND JURAN, I. (1991), "Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations", FHWA-RD-89-198, Federal Highway Administration.
- JANBU, N. (1954), "Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis", European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, Sweden.
- JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, K. AND ELIAS, V. (1990), "Design of Soil Nailed Retaining Structures", *Geotechnical Special Publication*, No. 25, ASCE, New York, pp. 644-659
- JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, K. AND ELIAS, V. (1990), "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structures", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.1, pp.54-72.
- JURAN, I. AND SCHLOSSER, F. M. (1987), "Soil Nailing in Excavations and in Slope Stabilization", National Cooperative Highway Research Program, Report 290, Appendix C, pp. 258-312.
- JURAN, I. AND ELIAS, V. (1990), "Behaviour and Working Stress Design of Soil Nailed Retaining Structures", *Performance of Reinforced Soil Structures*, Proceedings of International Reinforced Soil Conference, British Geotechnical Society, pp. 207-212
- SCHLOSSER, F. (1982), "Behaviour and Design of Soil Nailing", *International Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, pp. 399-413.
- SHEN, C. K., HERRMANN, L. R., ROMSTAD, K. M., BANG, S., KIM, Y. S. AND

- DENATALE, J. S. (1981), "In Situ Earth Reinforcement Lateral Support System", Report No. 81-03, Department of Civil Engineering, University of California, at Davis.
- STOCKER, M. F., KORBER, G. W., GASSLER, G. AND GUDEHUS, G. (1979), "Soil Nailing", International Conference on Soil Reinforcement, Paris, pp. 469-474.
- UNWIN, H. (2001), "Carbon Fibre Soil Nailing for Railway Embankment", Underground Construction 2001 Symposium, Sept., 2001, London, UK.