

# 隧道施工安全評估方法整合研究

蕭富元\* 洪世勳\*\* 陳錦清\*\*\*

## 一、前言

隧道在鐵公路運輸系統及水利工程中均扮演重要之一環，隨著臺灣環島運輸系統逐漸完備，隧道工程新建數量雖已減少，惟後續新規劃之隧道工程多位在高山峻嶺，各種困難地質或高地應力等問題，使興建難度大幅提高，如推動興建中之臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫隧道群，即將面對高岩覆、斷層破碎帶、大理岩溶洞湧水等潛在困難問題，引發施工安全關注。

施工安全為隧道興建過程首要關注之課題，對於隧道施工可能遭遇之各種問題評估方法，國外學者已陸續發表許多研究成果可供參考，成果雖已大致涵蓋隧道施工常遭遇之各項問題所需評估方法，惟各評估方法零散於各研究案或發表於不同文獻，未經系統性整合，在實際應用上需具豐富經驗及專業背景之工程師方能正確使用。而臺灣目前隧道工程之從業人員與工程師，常在未經完整專業培養前，即需投入隧道工程之就業市場，因多僅具備部分專業知識，或因分工關係，僅熟悉部分業務，欠缺對隧道工程較全面之瞭解，對於各種安全評估方法之應用時機、適用狀況及如何使用，常無法掌握，在問題發生時，無法及時做出正確研判，錯失最佳因應時機，以致隧道施工遭遇安全問題之案例仍時有所聞。

為提昇臺灣隧道施工安全，有必要整合中興社研發成果與國內外其他可參考方法，對隧道施

工安全提出一套有系統之評估方法與流程，提供隧道施工現場或未具備豐富經驗之工程師，在面對各種不同問題時可合理且及時研判，掌握問題發生潛勢，降低隧道施工風險，同時使中興社之研發成果可落實推廣應用於國內隧道工程。

## 二、隧道施工安全評估方法彙整

山岳鑽炸隧道施工受地質材料力學特性、地質構造、大地應力規模、地形、隧道開挖尺寸、開挖工法、支撐設計等諸多因素影響，衍生可能遭遇之安全問題繁多。本研究將臺灣山岳鑽炸隧道施工常遭遇之重要安全問題，歸納分為強度應力問題、構造弱面安定、空間布置影響、洞口邊坡穩定、特殊地盤問題等五大類型，如圖 1 所示。各類型問題之安全評估方法甚多，由於本研究設定於工地現場使用，因此乃摒除理論深奧、過程複雜及參數繁多之方法，僅取簡單實用者，評估精度可能受限，但可快速取得評估結果，掌握問題發生潛勢，及時採取必要之因應措施。上述各類型問題發生原因及其簡易實用安全評估方法，彙整說明如下：

### (一) 強度應力問題

強度應力問題主要係指因隧道圍岩應力過高所產生之不安定問題，問題之發生與岩石強度、岩盤等級及現地應力大小有密切關係，主要破壞

\* 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

\*\* 中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員

\*\*\* 中興工程顧問社大地工程研究中心顧問

型態包括擠壓變形與脆性破壞（含剝裂破壞及劇烈岩爆）等。

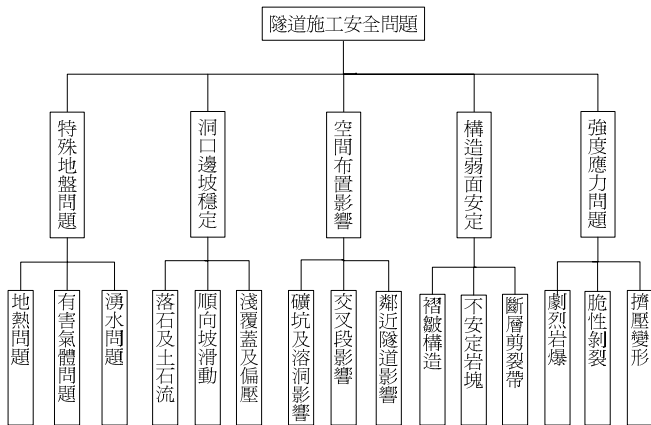


圖 1 臺灣山岳鑽炸隧道施工安全問題類型分類圖

本類型問題之現場安全評估重點主要包括：隧道擠壓潛能研判、隧道脆性破壞潛能研判，以及隧道圍岩變形安全評估等。根據依國內外學者之建議，岩盤單壓強度（ $\sigma_{cm}$ ）與岩覆應力（ $P_0$ ）比值關係（簡稱岩盤強度比），可被採用作為隧道擠壓潛能研判依據。本研究參考歸納 Jethwa（1984）、Bhasin（1996）、陳錦清（1998）及 Hoek（2000）等人所提之評估準則後，採用：

- (1)  $\sigma_{cm}/P_0 > 0.45$  為輕度或無擠壓性岩盤；
- (2)  $0.25 < \sigma_{cm}/P_0 \leq 0.45$  為中度擠壓性岩盤；
- (3)  $\sigma_{cm}/P_0 \leq 0.25$  為高度擠壓性岩盤。

對於中度或高度擠壓性岩盤，意謂隧道施工可能出現擠壓變形問題，因此進一步進行隧道圍岩變形安全評估。本研究採用日本櫻井氏（1993）初步提出，並經由陳錦清及蕭富元等（2008）進一步以臺灣隧道工程案例進行檢視與修正，所建立適用於臺灣節理發達岩盤之隧道安全管理經驗基準，以岩盤單壓強度（ $\sigma_{cm}$ ）與圍岩應變量（ $\delta r$ ）關係，建立三條安全管理基準線，如圖 2 所示。圖中之綠色區域（在基準線 II 以下）意謂隧道處於安全狀態，可正常施工；而圖中之紅色區域（在基準線 III 以上）則意謂隧道處於不安全狀況，建議暫緩施工，並徹底檢討

不安定原因，採取必要因應措施；至於圖中之灰色區域（基準線 II~III 之間）則表示隧道可能有安全疑慮，建議增加監測頻率及現場目視檢查。

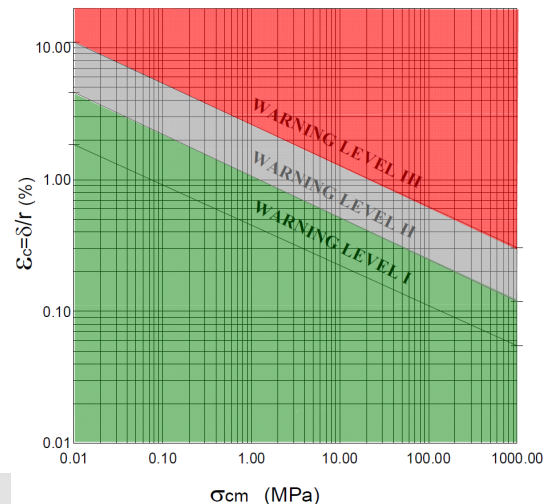


圖 2 隧道安全管理經驗基準

至於本類型之脆性破壞問題，係指完整硬岩受過高應力所產生之剝裂或爆裂破壞行為。目前臺灣在硬岩脆性破壞之研究仍在起步階段，因此乃參考國外研究成果（Russenes, 1974；Hoek and Brown, 1980；林生與王蘭生, 1999；Anderson, 2000），採用：

- (1) 岩石單壓強度（ $\sigma_c$ ） $> 100$  MPa；
- (2) 岩體評分 RMR  $> 50$  分；
- (3) 隧道圍岩側壁最大切向應力（ $\sigma_\theta$ ）與岩石單壓強度（ $\sigma_c$ ）比值關係等因子進行脆性破壞潛能研判。

對於中度及高度脆性破壞潛能岩盤（即  $\sigma_\theta/\sigma_c > 0.5$ ），則以 Martin（1999）利用實際隧道案例經驗所歸納建立之隧道圍岩脆性破壞深度與最大應力比值關係式： $R_f/a = 0.49 (\pm 0.1) + 1.25 (\sigma_{max}/\sigma_c)$ ，其中  $R_f$  為脆性破壞深度、 $a$  為隧道開挖半徑、 $\sigma_{max}$  為隧道側壁最大主應力，推估可能產生之脆性破壞深度，提供施工參考。

## (二) 構造弱面安定

構造弱面安定主要係指岩體節理弱面與隧道開挖凌空面切割所形成之不安定岩塊掉落或滑落

問題，問題之發生與岩體弱面組數、方位、延伸及隧道開挖方向有關。本研究採用石根華博士所發展之關鍵岩塊分析程式（1992），以統計方式或現場實際出露位置生成節理弱面，並利用隧道擴張展開方式，計算潛在不穩定岩塊之三維形狀與大小。評估步驟包括：（1）可能不安定（關鍵）岩塊評估、（2）不安定岩塊安全係數評估、（3）不安定岩塊支撐力需求評估。

### （三）空間布置影響

本類型問題主要指因隧道結構物空間布置所造成之不安定問題，包括鄰近隧道影響及交叉段影響等。其中鄰近隧道影響可利用陳錦清及蕭富元（1999）以數值分析法，模擬各種不同岩石強度、岩體優劣等級、岩覆深度及隧道間距條件下，先行施工隧道與鄰近隧道之相互影響關係，所據以建立之雙孔隧道互制影響研判基準，利用岩盤強度比（ $\sigma_{cm}/P_0$ ）、隧道開挖跨徑（B）及鄰近隧道距離（W）等因子，評估鄰近隧道開挖影響顯著程度。

其次對於隧道交叉段影響研判，則可參考中興社（2005）研究專案成果，針對可能影響隧道交叉段力學行為之主要因素，包括岩石強度、岩盤等級及岩覆深度等，進行 80 個不同組合案例之三維數值分析，並據此建立隧道橫坑交叉影響研判基準。以隧道斜交角度及岩盤強度比關係，評估隧道交叉段影響程度。

### （四）洞口邊坡穩定

隧道洞口邊坡可能出現之不穩定問題種類甚多，包括順向坡、土石流、落石、淺覆蓋及偏壓等。由於成因複雜，除地質與地形因素外，亦與雨量、地下水、地震等外力因素有關，不易以簡單計算或圖表查詢方式，獲得所需評估結果，宜進行個案分析探討。

本研究僅針對近來備受關注之順向坡滑動問題，分析其邊坡坡角（ $\alpha$ ）、弱面傾角（ $\delta$ ）及弱面摩擦角（ $\phi$ ）關係，如圖 3 所示，簡單研判是否具順向坡滑動潛勢。由於順向坡滑動評估需考慮因素甚多，因此滿足邊坡坡角（ $\alpha$ ）>弱面傾角（ $\delta$ ）>弱面摩擦角（ $\phi$ ）之條件，僅意謂邊坡具滑動潛能，並非一定產生滑動破壞。仍須再視邊坡地下水、地震力及護坡保護工等情形做進一步審慎研判。

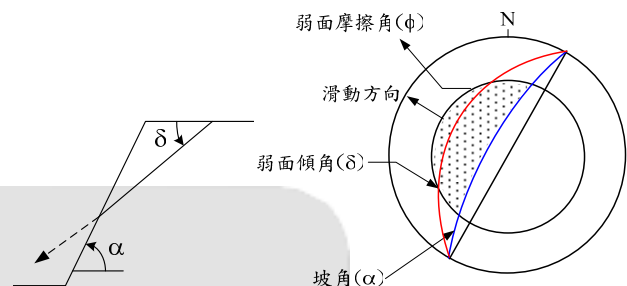


圖 3 順向坡滑動潛能研判示意圖

### （五）特殊地盤問題

特殊地盤問題係指除前述各種不安定問題外，其餘各種特殊地盤，包括湧水性地盤、有害氣體地盤、地熱性地盤等。由於此類問題成因複雜，不易有簡單評估方法可採用，實際上應視個案情形進行評估為宜。

## 三、安全評估系統開發

本研究之安全評估系統應用環境係設定於工地現場使用，考量部分偏遠工務所可能不易安裝完善之網際網路，且系統執行尚需呼叫外部視窗程式之使用環境下，因此規劃為單機版；在開發工具之選用上，為加強程式穩定性，系統採用 VB.NET 來開發，可快速建立視窗化應用程式，並藉由 .NET Framework 提供之基礎工具及類別函式庫，使程式執行於穩定及高效率環境。

系統主要由 2 個功能模組及 5 個評估模組所

架構而成，主操作畫面如圖 4 所示，各模組操作介面力求親善及統一，於視窗點選各項模組按鈕，即可進入各模組進行安全評估。系統各評估模組所共用的地質資料放置於「隧道地質參數設定」功能模組（參見圖 5），系統評估手冊則置於「注意事項/評估手冊」功能模組中。5 個評估模組包括：（1）洞口邊坡穩定評估模組、（2）空間布置影響評估模組、（3）強度應力分析評估模組、（4）構造弱面安定評估模組、（5）特殊地盤問題評估模組。各評估模組各自獨立，可單獨進行安全評估。其中空間布置影響評估模組及構造弱面安定評估模組需再呼叫外部程式進行評估，而使用者若有安裝中興社所研發的「大地工程監測資料分析系統」，系統亦能讀取此資料庫進行監測資料之展示。系統評估結果可輸出成 Word 檔，提供使用者列印及加值應用。

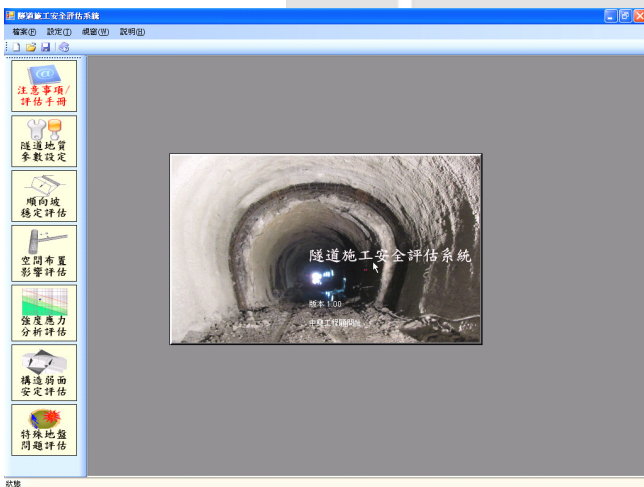


圖 4 隧道施工安全評估系統主畫面

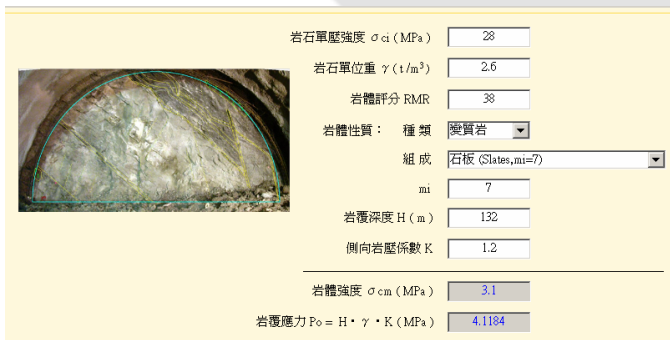


圖 5 案例隧道斷層帶地質參數設定畫面

## 四、工程案例應用

本研究以多個山岳鑽炸隧道工程案例進行系統之實用性測試，囿於篇幅限制，本文僅說明二個案例應用結果，分別說明如下：

### （一）山岳引水隧道案例

本案例為臺灣南部之某引水隧道，分為東、西兩座隧道，其長度分別約 9.6 km 及 4.3 km，隧道開挖跨徑約 6 m，施工採鑽炸及 TBM 掘進兩種方式，本研究僅針對鑽炸施工段進行應用探討。

案例之東、西引水隧道均通過臺灣南部之重要斷層帶，本研究以系統之「強度應力分析模組」進行安全評估。其中東引水隧道斷層帶之岩覆深度約 132 m，開挖面出露岩盤為硬頁岩，岩心單壓強度約 28 MPa，部分高角度弱面可見擦痕夾泥及亮面，開挖面有滲水情形，滲水量約 80~100 L/min 左右，RMR 岩體評分約為 38 分，將上述資料輸入安全評估系統之「隧道地質參數設定」功能模組，如圖 5 所示，進一步點選「強度應力分析評估」模組，可得該處隧道圍岩之岩盤強度比 ( $\sigma_{cm}/P_0$ ) 約為 0.76 (如圖 6)，隧道施工預期無擠壓變形疑慮或僅有輕度擠壓變形。本段隧道實際施工之水平收斂量為 1.5cm，施工過程未出現異常擠壓變形情形，與系統研判結果相符。



圖 6 案例東引水隧道斷層帶擠壓潛能研判結果

另西引水隧道斷層帶之岩覆深度約 120 m，開挖面出露之岩盤為頁岩偶夾砂岩，岩層已被剪磨，層面褶曲發達，層厚多小於 10 cm，層面開口多擦痕亮面及剪裂泥，開挖面雖為全乾狀態，但岩體破碎易坍塌，RMR 岩體評分僅 20 分。系統評估結果顯示該處之岩盤強度比 ( $\sigma_{cm}/P_0$ ) 約為 0.1，圍岩具高度擠壓潛能，預期隧道施工可能出現嚴重擠壓變形且不易穩定。實際變形監測之水平收斂量約 23.3 cm，且變形並未隨開挖面遠離而收斂穩定，甚或隧道開挖貫通後，本段圍岩仍持續變形，隧道噴凝土出現龜裂及鋼支保扭曲等支撐工損壞情形（參見圖 7），最終隧道進行修挖，並以施作二次襯砌支撐隧道。



圖 7 案例西引水隧道斷層帶鋼支保挫屈破壞情形

## (二) 山岳公路隧道案例

本案例為臺灣中部之某山岳公路隧道，隧道為東西向之雙向雙孔兩線道隧道，包含兩條人行聯絡道及一條逃生隧道兼車行聯絡道。主線部分採上半斷面、台階及仰拱分階開挖，聯絡道部分採全斷面開挖。主線隧道寬度約 12 m，高約 10.5 m，兩隧道間距約 26 公尺，採鑽炸法施工。

本研究乃針對案例隧道之車行聯絡道及人行聯絡道交叉段空間布置影響進行評估。其中車行聯絡道交叉段所出露之岩盤以礫質頁岩為主，岩心單壓強度約為 2~5 MPa，岩體評分約在 10~15 之間，岩覆深度約 60 m，點選系統「隧道地質參

數設定」模組，輸入上述參數，再進一步點選「空間布置影響」評估模組，並輸入隧道斜交角度為 90 度。系統評估結果顯示，車行聯絡道交叉段之岩盤強度比 ( $\sigma_{cm}/P_0$ ) 約為 0.15，隧道間距 (W/B) 比值為 2.17，雙孔隧道互制影響顯著，意謂兩主隧道施工互制影響不可忽視。點選下一步進入「隧道交叉段影響研判」，結果得交叉段影響亦極為顯著，意謂聯絡道開挖將導致交叉段圍岩變形大幅增加，系統之支撐對策建議為應採用保守之挖撐方式及必要之輔助工法，並以三維分析檢核其適用性，如圖 8 所示。

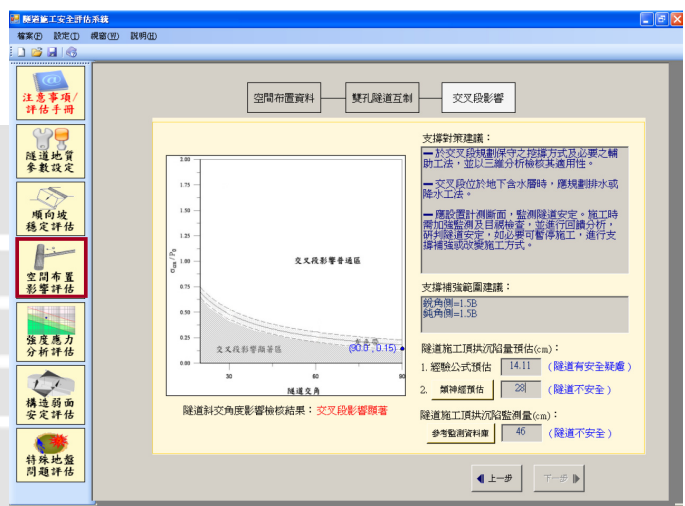


圖 8 車行聯絡道交叉段影響研判結果畫面

本案例隧道實際施工過程初始並未對交叉段訂定特定之支撐補強設計，西行線主隧道開挖後導致聯絡道圍岩變形大幅增加，交叉段雖經施作地錨與固結灌漿補強，仍於東行線主隧道破孔開挖過程發生約 300 立方公尺之抽坍（參見圖 9）。系統對於車行聯絡道交叉段研判結果，大致與現場施工結果相符。

至於案例隧道之人行聯絡道交叉段，其開挖所遭遇之地質較佳，RMR 岩體評分約在 41-60 之間，施工所遭遇之白冷層石英質砂岩強度約在 75~150 MPa 之間，岩覆深度約 80 m。依照上述評估步驟，輸入相關參數進行研判，結果得岩盤強度比 ( $\sigma_{cm}/P_0$ ) 約為 10.42，雙孔隧道互制影響

與交叉段影響均不顯著，意謂無需特別考慮鄰近隧道開挖與交叉段施工影響，人行聯絡道交叉段與車行聯絡道交叉段影響研判結果之比較參見圖10所示。隧道人行聯絡道實際施工過程亦無特殊問題產生，與系統評估結果相符。



圖 9 案例隧道東行線交叉段頂拱抽坍情形

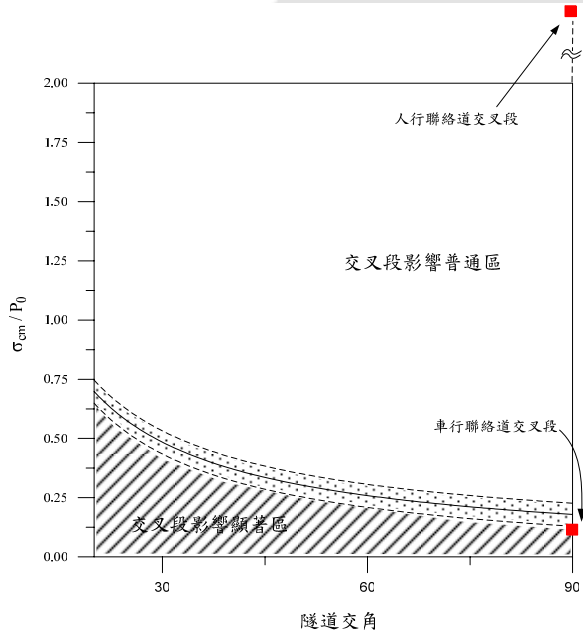


圖 10 案例隧道交叉段影響研判結果圖

## 六、結論與建議

山岳隧道貫穿高山峻嶺或丘陵台地，由於臺灣地質多變，以及開挖支撐設計適用性等問題，施工安全為臺灣隧道興建常面臨之挑戰。對於隧道施工可能遭遇之問題與安全評估方法，國內外已有許多研究成果可供參考，惟各研究成果零散於不同文獻或報告，在實際應用上需具豐富經驗之專業工程師方可正確使用。為將各種研究成果推廣落實應用於工地，本研究針對臺灣隧道施工常遭遇之五大類型安全問題（包括強度應力問題、構造弱面安定、空間布置影響、洞口邊坡穩定、特殊地盤問題），蒐集其簡易實用之安全評估方法，並進一步開發安全評估系統，提供工地現場使用，以提昇臺灣隧道施工水準。

本研究雖已針對隧道各種施工問題，蒐集其簡易安全評估方法，惟現階段仍有部分問題，因不確定性因素甚多，如隧道滲湧水問題，目前尚未有簡易之評估方法，未來如有進一步新的研究成果與適用方法，可將其蒐集納入本研究之安全評估系統，以擴充系統適用之廣度。

此外本研究所建立之安全評估系統，雖已摒除理論深奧及過程複雜之方法，但對於部分未具豐富經驗之工程師，初期在系統使用上或許仍會遭遇困難，因此建議如有必要時應先進行簡易理論及系統操作之教育訓練，以使系統應用發揮功能。