

隧道施工專家系統整合應用與改進

俞旗文* 蕭富元** 李國榮**

一、前言

台灣山多平原少，許多鐵、公路交通運輸及水利系統均無可避免需興建隧道，根據統計台灣目前不列計軍事用途之隧道工程案例已有 830 座，隧道長度已達 821.7 公里。自岩體分類及新奧工法等技術觀念引進台灣，以定量岩體評分與經驗設計，並採半剛性支撐系統，已先後完成了許多困難的長大山岳隧道與地下洞室工程。在隧道設計理念與硬體設備上均有長足之發展，惟在現場施作上，因地質複雜多變，斷層破碎帶與豐沛地下水等因素均增加施工困難度，同時廠商之施工品質、專業素養、現場管理及施工界面聯繫等，常使現場施工出現預期之外狀況，甚或影響隧道安全。

隧道工程從規劃、探勘、設計、開挖施工，到營運管理等完整過程中，累積之資料極為龐大且繁瑣，包括地質狀況、挖撐施工、圍岩變形、工進物料、維護管理等。但以往這些資料均缺乏有效管理與充分利用，尤其在隧道施工階段，各施工項目資料多以表單或圖紙等書面方式呈現，零散且無系統之資料，使施工各環節資料缺乏橫向與縱向之聯繫與共享，影響施工決策與因應時機，同時對於資料保存與經驗傳承亦極為不易。因此架構於資料採集、儲存、分析及顯示之信息化專家系統，已成為當前隧道工程之潮流與趨勢。為提昇台灣隧道工程技術水準，研發一套具

專家知識庫、資料庫與工具庫適用於台灣之施工專家系統，實有其必要性。

二、系統開發介紹

財團法人中興工程顧問社為提昇台灣隧道設計與施工水準，近年來戮力於建立國內隧道工程設計及施工之信息化處理系統，目前之研發成果包括隧道設計整合系統、隧道施工資料管理系統、隧道維護管理系統及隧道施工專家系統等。其中於 2003 年開發完成之隧道施工專家系統 (TEX2003)，係由中興工程顧問社大地工程研究中心主導，並結合大陸武漢岩土力學研究所、北京水利與水電科學研究院、北方交通大學土建學院等單位，針對隧道施工階段之現場資料處理、工程分析計算、施工決策、安全評估及進度成果展示等需求，所發展之施工專家系統，系統開啟執行畫面如圖 1 所示。

本系統具有案例庫、工具庫並結合學理與經驗方法，可提昇現場施工資訊處理之效率與精度、落實施工回饋、掌握施工動態及決策合理化。現有之系統包含：(1) 地質資料擷取與處理系統、(2) 施工支撐決策輔助系統、(3) 關鍵岩塊分析系統、(4) 隧道變形預估系統、(5) 隧道施工仿真分析系統、(6) 隧道施工安全評估系統、(7) 現場施工動態顯示系統等七個子系統。各子系統主要功能參見案例應用說明。

* 中興工程顧問社大地工程研究中心副經理

** 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

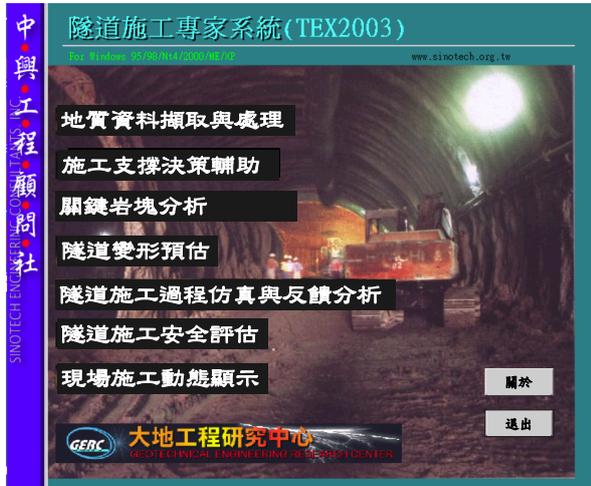


圖 1 隧道施工專家系統開啟執行畫面

三、工程案例應用

本研究之專家系統在國內係屬首創，系統開發時所規劃之目標雖已大致完成，但在資料、工程案例與開發經驗均有限之情況下，應仍屬雛形成果，有必要對系統進行實際應用與結果回饋。故本研究嘗試以台灣近年來陸續施工之水利與公路隧道工程，進行系統之應用測試，茲將系統應用結果彙整概述如下：

(一) 地質資料擷取與處理系統應用

本隧道地質資料擷取與處理子系統，採用數據資料庫與影像資料庫搭配方式，進行開挖面地質資料之擷取、處理與保存。現場地質師以數位相機拍攝開挖面地質影像照片，取代傳統紙本手繪方式之資料紀錄，並透過系統所提供之弱面構造擷取功能，詳細記錄開挖面地質構造分布，繪製開挖面構造擷取解釋圖及投影分析圖，結果如圖 2 所示。本子系統已實際應用於曾文水庫越引水隧道、基隆河員山子分洪隧道、東西向快速道路八里五股段觀音山隧道等多個案例，顯示系統已具商程式等級。

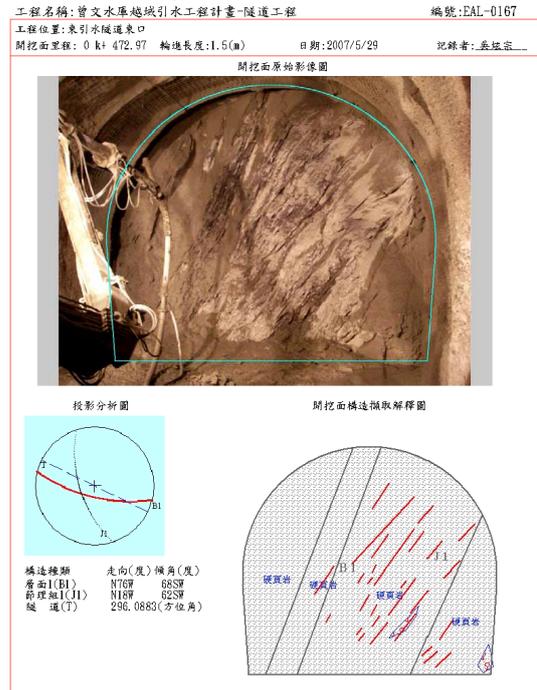


圖 2 系統開挖面地質影像及構造擷取解釋圖

(二) 施工支撐決策輔助系統

本系統主要提供隧道施工支撐決策輔助參考。基隆河員山子分洪隧道在番子澳褶皺擾動帶遭遇擠壓變形安定問題，茲將此擾動帶挖撐設計資料，輸入系統案例庫推理法(CBR)模組及倒傳式類神經網路法(BPN)模組，結果如表 1 所示。由表中可見，相對於同等岩覆深度及開挖尺寸條件之「中等岩體」，番子澳褶皺擾動帶所採用之挖撐方式均較系統建議值保守；而對同等條件之「極劣岩體」，番子澳褶皺擾動帶之挖撐方式則略有不足。顯示根據系統所蒐集之案例庫資料，對於番子澳褶皺擾動帶此種劣等岩體，應採更保守之挖撐方式為宜，例如採多階開挖、加厚噴凝土厚度、增加岩栓長度及施作密度等。

(三) 關鍵岩塊分析系統

本系統之實際工程案例應用，茲以曾文水庫越域西引水隧道西段里程 12K+235.6 處所發生之岩塊掉落事件為例。開挖面坍塌之岩塊大小約

1.40m×0.76m×0.3m，重約 700kg，如圖 3 所示。將現場出露之弱面節理參數、向量參數、隧道位態、隧道形狀與尺寸等資料，輸入系統分析模組，結果顯示本區確實存在不安定岩塊，最主要之不安定岩塊將出現於左側上方。進一步輸入現場實際出露弱面之空間位置、長度及位態等資料，計算弱面與隧道面交線軌跡，並將隧道與弱面之交線展開圖及立體圖，以等長度投影之方式展開，結果顯示可能滑動之不安定岩塊最深達 1.8m，凌空面面積為 0.91 m²，單位面積下滑力為 1.04 Ton/m²。系統分析所得之不安定岩塊位置與深度均與現場實際狀況大致相符。

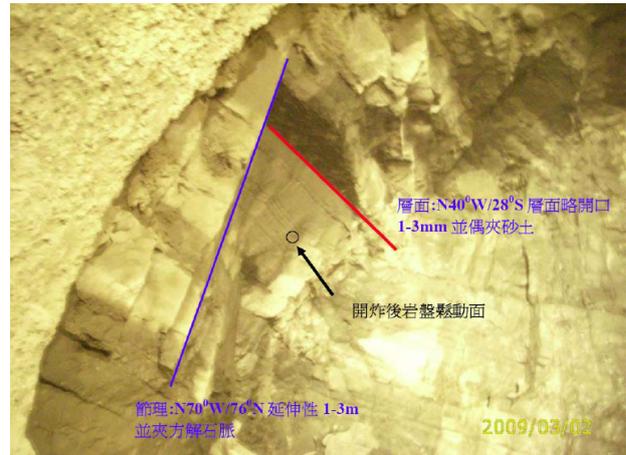


圖 3 曾文越域西引水隧道西段里程 12K+235.6 開挖面左側壁上方岩塊坍塌之岩盤弱面狀況

表 1 員山子分洪隧道番子澳褶皺擾動帶與系統案例類比法挖撐建議比對表

	番子澳褶皺擾動帶	中等岩體		極劣岩體	
		案例庫推理法挖撐建議	類神經網路法挖撐建議	案例庫推理法挖撐建議	類神經網路法挖撐建議
開挖程序	上半先進	上半先進	上半先進	多段台階	上半先進
輪進長度	1.2m	>2.0m	>2.0m	0.5m~1.0m	1.0m~1.5m
噴凝土	20cm	10~15cm	10~15cm	20~25cm	20~25cm
岩栓	25mmφ L=4 @2.0m×1.2m	L=4~6m @1.5~2.0m ×1.5~2.0m	L=2~4m @1.5~2.0m ×2.0m	L=6~8m @1.0~1.5m ×0.5~1.0m	L=4~6m @1.0~1.5m ×1.5~2.0m
鋼支保	H150-H175 @1.2m	H100-H125 @>2.0m	H100-H125 @>2.0m	H150-H200 @0.5~1.0m	H125-H150 @1.0~1.5m

* 番子澳褶皺擾動帶實際採用 220-32-4B 之桁型鋼支保，表中所示為相對應之 H 型鋼支保。

(四) 隧道變形預估系統

隧道變形預估子系統主要係提供施工現場在面對各種複雜地質狀況時，可合理且迅速預估隧道變形量之參考工具。本研究嘗試對曾文水庫越域引水隧道施工所遭遇之三條主要斷層（包括老濃斷層、旗山斷層及平溪斷層）及一般地質開挖區進行施工變形預測，由於曾文水庫越域引水隧道圍岩變形主要係發生於水平側壁，故系統變形預測與實測值之比對乃以水平收斂變形為依據，結果如表 2 所示。

表 2 曾文水庫越域引水隧道變形預估結果

案例編號	隧道位置	岩性	RMR	支撐等級	σ _c (MPa)	岩覆深度 (m)	實測總變位量 (cm)	系統預測值 (cm)
1	東引水隧道東段 老濃斷層帶 (0K+440~0K+710)	砂岩夾硬頁岩	45	III	30	146	6.6	5.0~10.2
2	東引水隧道東段 較高岩覆段 (1K+710)	砂岩夾頁岩	41	III	35	490	7.6	4.9~9.8
3	西引水隧道東段 旗山斷層帶 (10K+060~10K+438)	剪裂帶	22	IV	5	130	27	21~26
4	西引水隧道東段 一般地質區 (10K+732)	頁岩夾砂岩	41	III	20	321	11.1	9~12
5	西引水隧道西段 平溪斷層帶 (13K+690~12K+775)	剪動破碎砂岩	25	IV	15	282	35cm	10~58
6	西引水隧道西段 一般地質區 (13K+870)	砂岩	65	II	50	130	2.1cm	0.9~2.2

老濃斷層在案例隧道內未見厚層斷層泥出露，主要為剪裂帶及破碎砂岩，案例編號 1 為老濃斷層帶施工變形預測結果。彙整老濃斷層帶之計測資料，並依陳錦清等人（2001）之隧道圍岩變形比值與計測儀器安裝測讀時機關係，可得隧道實際總變形量約 4.6cm 左右，結果顯示系統對老濃斷層帶施工變形預估與實測相近。

表 2 之案例編號 2 係為東引水隧道東段較高岩覆段（岩覆深度為 490m）之變形預估結果；案例編號 3 為西引水隧道東段旗山斷層帶變形預估結果；案例編號 4 為西引水隧道東段一般地質區變形預估結果；案例編號 5 為西引水隧道西段平溪斷層帶內剪裂破碎岩盤變形預估結果；案例編號 6 則為西引水隧道西段一般地質區之變形預估結果。整體而言，系統之變形預估值與案例隧道各不同挖撐等級及不同地質特性段之實際施工變形結果相近，顯示本子系統適用於案例隧道之施工變形預估。

（五）隧道施工仿真分析系統

隧道施工仿真分析子系統主要提供隧道施工反算及正算分析工具。曾文水庫越域西引水隧道東段在旗山斷層帶發生嚴重之擠壓變形問題，部分區段更有長期潛變趨勢出現。實測資料顯示，具長期潛變區段之圍岩頂拱沉陷量約在 5cm~10cm 間，水平收斂變形量約在 18cm~23cm 間；而無潛變行為之區段，其圍岩頂拱沉陷量則約在 3cm~7cm 間，水平收斂變形量約在 8cm~15cm 間。

以二維隧道仿真分析程式（TunCad）針對本段進行反算分析，材料力學模式採用內建之彈粘塑性模式，首先不考慮材料粘性行為（取粘性參數為 0.0001 Day-MPa），分析得隧道水平變位量約為 12cm，頂拱沉陷量約為 3cm。此結果與無潛變區段之變形實測值大致相符，另分析所得圍岩塑性區範圍主要發生於仰拱與側壁處（如圖

4-a 所示），此結果亦與現場仰拱路面上浮破壞，且支撐工損壞多發生於側壁之狀況一致。進一步修正粘性參數值為 10000（Day-MPa），意即考慮材料粘性行為，再次進行隧道挖撐模擬分析，結果得隧道水平變位量約為 18cm，頂拱沉陷量約為 6cm。此結果亦與具潛變行為區段之實測結果大致相符，另圍岩塑性區範圍與無潛變發生狀況相比，除仰拱與側壁塑性區範圍再擴大外，主要為隧道頂拱塑性區有較大幅度之增加（如圖 4-b），現場隧道頂拱噴凝土於此區段發生開裂損壞情況，可證明此分析之合理性。

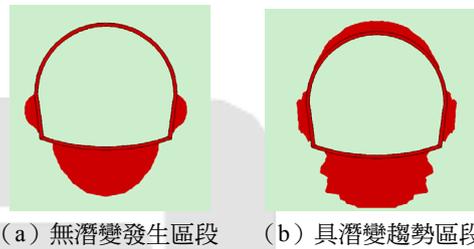


圖 4 曾文水庫越域西引水隧道旗山斷層帶之圍岩塑性區範圍分析結果

（六）隧道施工安全評估系統

隧道施工計測儀器種類繁多，通常每隔約 20-30 公尺設置一處計測斷面，故隨開挖長度之增加，計測資料日益龐大且繁瑣。隧道施工安全評估子系統以易於查詢、排序、編輯等優點之資料庫進行監測資料之記錄、展示與儲存，另再結合施工進度資料，自動產生各項監測儀器之歷時曲線圖。圖 5 為系統在國道六號埔里隧道監測資料之處理應用結果。

另本子系統亦提供隧道施工圍岩變形安全評估工具。以曾文水庫越域引水隧道工程為例，系統安全評估結果如圖 6 所示，圖中可見現場發生不同程度破壞之斷面（實心資料點），基本上多落在基準線 III 附近或以上，而無損壞之斷面（空白資料點）則均在基準線 II 附近或以下。整體而言，案例隧道現場施工行為與系統施工安全研判結果大致吻合。

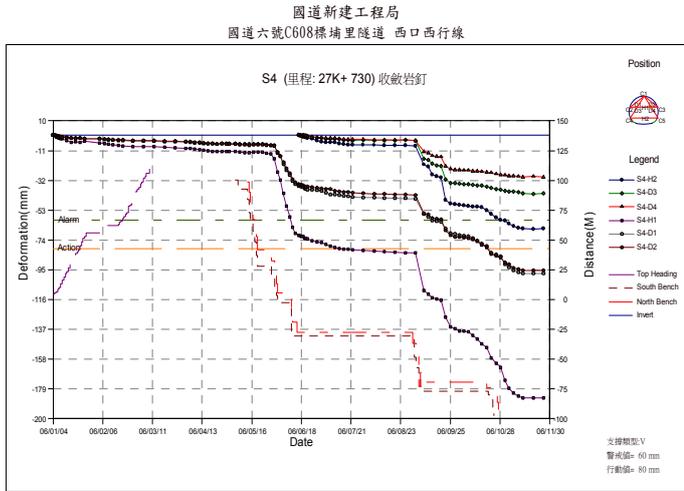


圖 5 國道六號埔里隧道西行線里程 27K+730 內空變位歷時曲線圖

(七) 現場施工動態顯示系統

隧道開挖施工進度為隧道施工階段重要之訊息，一般現場係以報表方式每日提送工程日報表，惟因隧道多具數個開挖工作面，施工項目繁多，故書面表單方式不易呈現與查詢。現場施工動態顯示子系統即採資料庫格式，以圖形呈現隧

道施工進度動態訊息。圖 7 為曾文水庫越域引水隧道之施工進度與沿線地質狀況關係，藉由選取上方「起始日期」與「終止日期」功能，可隨時掌握任一時段施工進度。

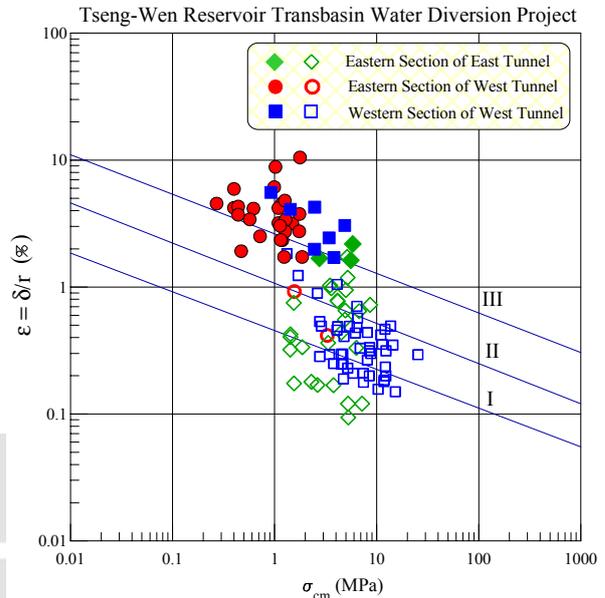


圖 6 曾文水庫越域引水隧道鑽炸段施工安全評估結果圖

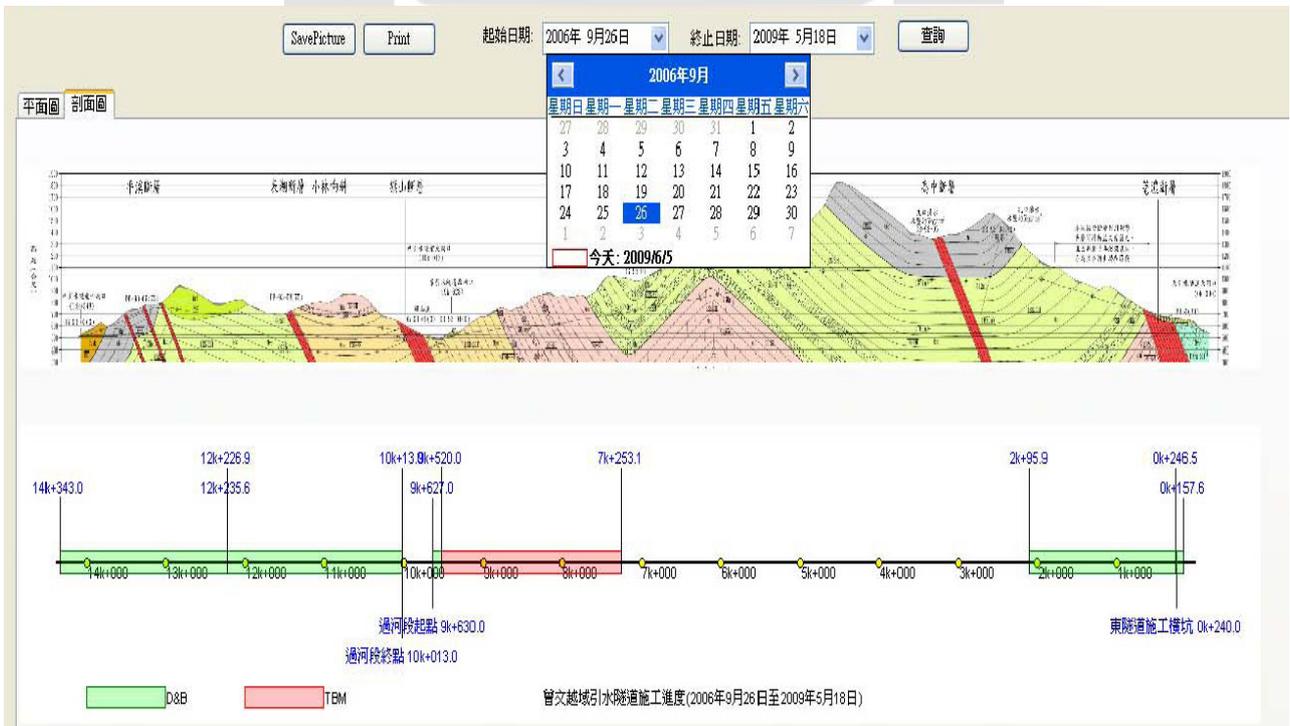


圖 7 曾文水庫越域引水隧道施工進度與地質剖面動態顯示圖

四、案例庫擴充與內容

本系統在 2003 年初步開發完成後，持續進行工程案例庫及數值案例庫資料之擴充，以期擴增系統適用範圍。截至目前為止，工程案例庫資料筆數已達 400 筆，涵蓋台灣許多重要隧道工程案例，包括國道三號之木柵隧道、景美隧道、新店隧道、福德隧道、台北聯絡線隧道及國道五號之彭山隧道、雪山隧道與基隆河員山子分洪隧道等案例。

另數值案例庫在開發階段所建立之資料內容，主要以 V、VI 類劣級岩盤內開挖大斷面隧道為主。本階段亦採用與開發階段相同之分析工具—FLAC3D，持續進行數值案例庫資料之擴充，包括 III、IV 類圍岩之中等岩盤及小跨徑隧道（5m）案例等，分析完成後案例共達 144 筆，資料內容如表 3 所示。

表 3 系統數值案例庫資料內容表

岩盤等級	III類(RMR=45~60)、IV類(RMR=30~45)、V類(RMR=16~30)、VI類(RMR<15)
岩質單壓強度	軟岩(5MPa)、中硬岩(25MPa)、硬岩(50MPa)
隧道埋深	75m、150m、300m、500m
隧道跨徑	5m、10m、15m
施工程序	標準施工程序、非標準施工程序
開炸品質	無開炸影響、不良開炸品質
側壓係數K	1.0、1.5

*表內粗體字表示本階段新增案例條件

五、系統功能提昇與改進

根據實際工程案例應用結果回饋，系統進行一系列之修正改進與功能提昇，茲概述如下：

1. 原地質資料擷取與處理子系統中，無「崩積層」項目，以致隧道洞口遭遇崩積層時，開挖面構造解釋圖無法繪製呈現。目前系統已新增「崩積層」選項及相對應之顯示花紋。
2. 由於隧道開挖可能遭遇不同地質材料混合出現，為確實呈現開挖面地質構造，乃於系統增加人為手工線條繪製及文字加註等功能，使系統之構造解釋圖繪製功能更加完善。
3. 由於隧道工程常需配合辦理洞口邊坡計測工作，故在隧道施工安全評估子系統新增邊坡計測儀器處理功能，包括傾斜儀、位移觀測點、水位計及地錨荷重計等。
4. 因應許多新式監測儀器本身即具備資料讀取與儲存功能，故系統新增可直接讀取儀器量測資料之操作介面，提昇系統便利性。
5. 針對行政院公共工程委員會所提出之 PCCR 岩體分類系統。本階段亦將 PCCR 評分方式新增納入系統之岩體分級表記錄功能。

六、結 論

隧道施工專家系統係結合海峽兩岸隧道工程界專家經驗、知識與案例之整合性施工專家系統，包括地質資料擷取與處理、施工支撐決策輔助、關鍵岩塊分析、隧道變形預估、施工仿真分析、施工安全評估及現場施工動態顯示等子系統功能，提供鑽炸隧道各施工作業環節所需之技術、分析與評估。經 2003 年初步開發完成後，本階段主要係進行實際工程案例應用，並配合應用成果回饋與開發經驗累積，進行系統程式改進與功能提昇。本系統在國內數個工程案例應用結果，顯示系統具實用性及商業化價值。