

隧道開挖收方技術與回饋分析模式之研究及其應用軟體之研發

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93- 2211 - E - 216 - 002 -

NSC 94- 2211 - E - 216 - 001 -

執行期間： 93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

94 年 08 月 01 日至 95 年 07 月 31 日

計畫主持人： 李煜舫

共同主持人：

計畫參與人員：陳聖彥、王銘鋒、劉凱文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位： 中 華 大 學

中 華 民 國 九 十 五 年 七 月 三 十 一 日

摘 要

本研究為兩年期之研究計畫，研究主題為「隧道開挖收方技術與回饋分析模式之研究及其應用軟體之研發」，其主題內容包含兩大研究主軸：(I) 隧道開挖收方量測技術之研究與其應用軟體之研發（第一年計畫）和 (II) 隧道開挖現地計測資料回饋分析模式之研究與其應用軟體之研發（第二年計畫）。

本計畫之研究目的有二，首先是，考量隧道開挖前進效應影響和在現地複雜工程的條件下，建立快速便捷之收方量測技術，以此技術嘗試替換傳統副計測之收斂量測方法，同時以 M. S. Visual Basic 程式語言開發新資訊平台軟體，迅速確實地將隧道三維量測座標轉換成可用之縱剖面變形曲線與整體隧道圓弧變形斷面，並提供現場施工單位圖形化之資訊和研判，以便作出及時安全評估或支撐系統修正之建議，並達到便捷安穩之工程應用目標。

其次，本計畫之第二研究目的為，以現地隧道收斂計測資料為依據（包含隧道開挖計測岩栓、伸張儀、收方量測之變形剖面或曲線等相關位移收斂資料），利用數值化收斂圍束法理論，並採用外顯式分析法建立計算流程和步驟；同時以 M. S. Visual Basic 程式語言開發新資訊平台軟體，繪製隧道開挖縱剖面變形曲線，並經由回歸分析而獲得此曲線之模式參數，由計算獲得隧道開挖無支撐之前期位移量，建立地盤收斂曲線和支撐反力曲線之互制關係，進而完成隧道輪進開挖支撐設計之檢核或修正，以達現地施工現況及時反應控制之目標。

關鍵詞：隧道開挖、收方測量、資訊平台開發、回歸分析、收斂圍束法、外顯式分析、回饋分析

Studies and Development of applicable software for the technical wriggle survey and for the model studied of back analysis in tunnel excavation

ABSTRACT

The phase of project is estimated two years. The subject of this research is “Studies and development of applicable software for the technical wriggle survey and for the model studied of back analysis in tunnel excavation – (I) technical wriggle survey and software development (for the first year), and (II) model studied of back analysis and software development (for the second year)”.

The two objectives of this paper are, the first is that the field measurements obtained by convergence rockbolt that is particularly replaced by the wriggle survey method was established in this study. The information platform developed by using C++ program language is considered to make the relation between field measurements and standard profile, and to check the stability immediately after the advancing face of tunnel excavation.

The second is that the using of the numerical Convergence-Confinement method, the establishment of explicit steps of analysis and the calculation by means of the regression analysis obtained from field measurements are particularly studied. The prediction of behavior of the interaction between rock mass and support system in tunnel excavation, for example the longitudinal deformation profile, ground response curve and support reaction curve etc., is realized by the numerical analysis program developed in the research laboratory.

The results obtained of this study include that (1) bibliographies of the tunneling model, the theory of convergence-confinement method, the establishment of field measurements and geology data base, (2) establishment of wriggle survey technical and steps, (3) development of information platform, (4) regression analysis from the measurements; (5) establishment of the explicit steps of elastoplasticity analysis; (6) analysis and modeling of behavior of rock mass and support system and application of convergence-confinement method in tunnel excavation; (7) comparison of results between numerical calculation and experimental data; and (8) application of the results obtained to engineering design.

Keywords : Tunnel Excavation, Wriggle Survey, Software Development, Regression Analysis, Convergence-Confinement Method, Explicit Analysis, Back Analysis

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 錄	VI
表 目 錄	IV
圖 目 錄	VII
符號說明	XIX
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 研究架構	2
1.4 研究流程	3
第二章 文獻回顧	4
2.1 前言	4
2.2 收斂圍束法之基本理論	4
2.2.1 地盤反應曲線	5
2.2.2 支撐反力曲線	6
2.2.3 縱剖面應力曲線	7
2.3 外顯式收斂圍束法	9
2.3.1 外顯式收斂圍束法之原理與基本假設	9
2.3.2 外顯式收斂圍束法之分析步驟	9
2.4 岩體分類系統	10
2.4.1 RMR 岩體分類系統	11
2.4.2 Q 系統岩體分類法	11
2.4.3 GSI 岩體分類法	12
2.4.4 PCCR 台灣岩體分類系統	13
2.5 隧道之回饋分析	16
2.5.1 回饋分析理論	17
2.5.2 分析方法	17
2.6 斷面收方技術	19
2.6.1 斷面收方量測技術與原理	19
2.6.2 斷面收方視窗程式之相關應用	20
2.7 程式語言技術	20
2.7.1 Visual Basic 6.0 程式語言簡介	21
2.7.2 Visual Basic 語言應用於工程應用上之技術	23
2.8 資料庫系統	23
第三章 視窗程式之設計撰寫與介面整合	40

3.1 前言	40
3.1 程式撰寫與設計內容	40
3.1.1 主要視窗程式介面撰寫	40
3.1.2 工程資訊系統視窗程式之撰寫	41
3.1.3 岩體分類系統視窗程式之撰寫	41
3.1.4 隧道收斂資料處理系統視窗程式之撰寫	42
3.1.5 參數計算系統視窗程式之撰寫	43
3.1.6 支撐建議系統視窗程式之撰寫	43
3.1.7 資訊繪圖系統視窗程式之撰寫	44
3.1.8 說明系統視窗程式之撰寫	44
3.1.9 案例測試與分析比較	45
3.2 隧道斷面收方技術視窗程式與可視化外顯式收斂圍束法之整合	45
3.3 外顯式收斂圍束法視窗程式之演進	46
第四章 實際案例之分析與應用	56
4.1 前言	56
4.2 視窗程式之基本假設與步驟	56
4.3 八卦山公路隧道工程	56
4.3.1 八卦山公路隧道簡介	56
4.3.2 八卦山公路隧道之地質狀況與施工內容	57
4.4 八卦山公路隧道計測資料分析及程式測試結果	58
4.4.1 視窗程式分析現地計測資料	58
4.4.2 視窗程式之分析結果討論	59
4.5 東部工程處新北迴鐵路隧道工程	61
4.5.1 新北迴鐵路隧道簡介	61
4.5.2 新北迴鐵路隧道之地質狀況與施工內容	61
4.6 東部工程處新北迴鐵路隧道計測資料分析及程式測試結果	62
4.6.1 視窗程式分析現地計測資料	62
4.6.2 視窗程式之分析結果討論	64
第五章 結論與建議	93
5.1 結論	93
5.2 建議	93
第六章 參考文獻	95
第七章 研究成果自評	108
第八章 附錄使用手冊	112

表 目 錄

表 2.1 Bieniawski 地質力學分類法評分標準.....	31
表 2.2 RMR 與岩體凝聚力及摩擦角之關係.....	32
表 2.3 隧道開挖及支保方法之關係.....	32
表 2.4(a) NGI 之 Q 值描述及評分標準.....	33
表 2.4(b) 不同安全等級之 ESR 建議值.....	35
表 3.1 假設案例之使用參數表.....	55
表 3.2 不同方法之迴歸分析比較值.....	55
表 3.3 外顯式分析計算值與視窗程式計算值之結果比較.....	56
表 4.1 八卦山隧道工程案例分析參數.....	78
表 4.2 八卦山隧道工程計測斷面 EL054 之分析結果.....	78
表 4.3 八卦山隧道工程計測斷面 WL029 之分析結果.....	79
表 4.4 八卦山隧道工程計測斷面 WR058 之分析結果.....	80
表 4.5 新北迴單軌隧道群隧道案例分析相關參數.....	81
表 4.6 新永春隧道南口測點 YSS5 之分析結果.....	81
表 4.7 新永春隧道南口測點 YSS20 之分析結果.....	82
表 4.8 新永春隧道北口測點 YSN9 之分析結果.....	82
表 4.9 新南澳隧道北口測點 NP20 之分析結果.....	83

圖 目 錄

圖 2.1 隧道開挖岩體收斂與支撐圍束間之互制示意圖.....	36
圖 2.2 不同支撐構件所提供的支撐壓力與位移關係圖.....	37
圖 2.3 支撐勁度與支撐應力、位移之關係圖.....	37
圖 2.4 模擬隧道所支撐混凝土之支撐互制曲線.....	38
圖 2.5 地盤反應曲線與不同支撐系統之關係圖.....	38
圖 2.6 隧道開挖前進之縱剖面變形曲線.....	39
圖 2.7 各案例隧道 RMR 之分佈.....	40
圖 2.8 岩體節理及特性描述.....	40
圖 2.9 GSI 評分描述.....	41
圖 2.10 GSI 補充之量化評分方式.....	42
圖 2.11 逆分析法與直接分析法之演算過程差異.....	43
圖 2.12 反算分析法之分析步驟.....	43
圖 2.13 Microsoft Visual Basic 6.0 視窗程式設計介面.....	44
圖 2.14 Microsoft Access 2000 資料庫系統.....	44
圖 2.15 本研究視窗程式內 Access 2000 資料之儲存.....	45
圖 3.1 程式之主要連結頁面.....	57
圖 3.2 可視化外顯式收斂圍束法之主視窗.....	57
圖 3.3 工程基本資料鍵入系統.....	58
圖 3.4(A)台灣岩體分類法.....	58
圖 3.4(B)RMR 岩體分類法.....	59
圖 3.4(C)GSI 岩體分類法.....	59
圖 3.4(D)Q 系統岩體評分.....	59
圖 3.5 隧道收斂資料處理系統.....	60
圖 3.6 參數計算系統.....	60
圖 3.7 支撐建議系統.....	61
圖 3.8 資訊繪圖系統.....	61
圖 3.9 說明系統.....	62
圖 3.10 各系統使用介紹.....	62
圖 3.11 可視化收斂圍束法視窗程式發展流程圖.....	63
圖 4.1 計測點 EL054 時間位移曲線.....	84

圖 4.2 計測點 EL054 收斂資料匯入視窗.....	84
圖 4.3 計測點 EL054 參數計算結果(L1).....	85
圖 4.4 計測點 EL054 縱剖面變形曲線(L1).....	85
圖 4.5 計測點 EL054 支撐互制曲線(L1).....	86
圖 4.6 計測點 EL054 支撐建議系統.....	86
圖 4.7 計測點 WL029 時間位移曲線.....	87
圖 4.8 計測點 WL029 收斂資料匯入視窗.....	87
圖 4.9 計測點 WL029 參數計算結果(L1).....	88
圖 4.10 計測點 WL029 縱剖面變形曲線(L1).....	88
圖 4.11 計測點 WL029 支撐互制曲線(L1).....	89
圖 4.12 計測點 WL029 支撐建議系統.....	89
圖 4.13 計測點 WR058 時間位移曲線.....	90
圖 4.14 計測點 WR058 收斂資料匯入視窗.....	90
圖 4.15 計測點 WR058 參數計算結果(L1).....	91
圖 4.16 計測點 WR058 縱剖面變形曲線(L1).....	91
圖 4.17 計測點 WR058 支撐互制曲線(L1).....	92
圖 4.18 計測點 WR058 支撐建議系統.....	92
圖 4.19 計測點 YSS5 時間位移曲線.....	93
圖 4.20 計測點 YSS5 收斂資料匯入視窗.....	93
圖 4.21 計測點 YSS5 參數計算結果(L1).....	94
圖 4.22 計測點 YSS5 縱剖面變形曲線(L1).....	94
圖 4.23 計測點 YSS5 支撐互制曲線(L1).....	95
圖 4.24 計測點 YSS5 支撐建議系統.....	95
圖 4.25 計測點 YSS20 時間位移曲線.....	96
圖 4.26 計測點 YSS20 收斂資料匯入視窗.....	96
圖 4.27 計測點 YSS20 參數計算結果(L1).....	97
圖 4.28 計測點 YSS20 縱剖面變形曲線(L1).....	97
圖 4.29 計測點 YSS20 支撐互制曲線(L1).....	98
圖 4.30 計測點 YSS20 支撐建議系統.....	98
圖 4.31 計測點 YSN9 時間位移曲線.....	99
圖 4.32 計測點 YSN9 收斂資料匯入視窗.....	99
圖 4.33 計測點 YSN9 參數計算結果(L1).....	100

圖 4.34 計測點 YSN9 縱剖面變形曲線(L1).....	100
圖 4.35 計測點 YSN9 支撐互制曲線(L1).....	101
圖 4.36 計測點 YSN9 支撐建議系統.....	101
圖 4.37 計測點 NP20 時間位移曲線.....	102
圖 4.38 計測點 NP20 收斂資料匯入視窗.....	102
圖 4.39 計測點 NP20 參數計算結果(L1).....	103
圖 4.40 計測點 NP20 縱剖面變形曲線(L1).....	103
圖 4.41 計測點 NP20 支撐互制曲線(L1).....	104
圖 4.42 計測點 NP20 支撐建議系統.....	104

符號說明

c	凝聚力；
d	隧道前進開挖面與支撐系統之距離；
E_c	噴凝土彈性模數；
E_m	岩體彈性模數；
G_m	岩體剪力模數；
H	覆土高；
K_0	側向土壓力係數；
K_n	支撐構件之正向總支撐勁度；
m	Panet 縱剖面變形曲線之參數；
P_s	噴凝土支撐應力；
$P_{s(max)}$	噴凝土最大支撐應力；
R	隧道半徑
r	觀測點至隧道中心之距離；
r_p	塑性半徑
t	噴凝土厚度；
U_R	隧道徑向位移量；
U_R^8	隧道最終徑向位移量；
$U_{R(max)}$	無支撐隧道最大徑向位移量；
U_R^s	有支撐隧道平衡狀態下之徑向位移量；
Z	隧道中心軸線座標；
α_0	前期收斂比值；
ϕ	內摩擦角
γ	岩體單位重；
λ	釋放圍束比；
λ_δ	無支撐距離 δ 之釋放圍束比；
λ_e	彈性極限之釋放圍束比；
ν_c	噴凝土波松比；
ν_m	岩體波松比；
σ_c	噴凝土單壓強度；
σ	隧道水平應力值；
σ	隧道徑向應力值；
σ_h	垂直應力；

第一章 前言

1.1 研究背景

隨著科技、資訊、網路日益發達，都市的發展使得交通運量、時間上的需求也就越顯重要。近幾年來，政府不斷投入鐵路地下化、捷運工程、北二高及高速鐵路等大量的公共建設，為的就是縮短城鄉之間運輸距離、降低運輸成本與時間，目的就是要使台灣本島完成一完整的運輸網路。而台灣由於地形的關係，東西部交通被中央山脈所阻擋，南北部交通由河流所切斷，眾山脈亦錯縱分佈，若要藉由交通建設平衡島內各區域發展，則構築隧道貫聯山區間之交通連結實為必要之措施。然由於台灣地區板塊擠壓，造成地質條件惡劣，工程規劃路線多遭遇諸如軟弱地盤、軟礫石層等不同性質之地層空間，因此在建造過程中常易遭遇許多偏壓、湧水、岩爆等大大增加施工上之困難度。

而隧道在施工中若稍有不慎，往往會造成嚴重的人員傷亡。因此，在隧道建造過程當中從設計、施工、維護每一階段都必須謹慎注意。自開始設計時研判工址岩體種類、地質特性、節理走向及地下水位態等資料評估岩盤等級後，再結合現地及科技等各方資訊以決定每階段最後施工設計。而在傳統隧道計測資料處理上，往往都無法實際發揮其功效，若能藉由將計測資料回饋分析所獲得的位移量，藉由力學模式的分析，反求現地材料的力學性質，將可預測現地材料之變形模數及下一階段隧道開挖所引致的變形。並藉由回饋分析所得之資料且符合邊施工邊設計 (on going design)，選擇最適合之支撐模式，相信將更能掌握隧道施工之施工進度、安全性。

1.2 研究動機與目的

目前傳統隧道開挖工程多半採用新奧地利隧道施工法 (New Austrian Tunnelling Method) 施做，利用岩體本身具有自持能力之特性，而發展成功的施工觀念，以噴凝土、岩栓、鋼筋等支撐達到隧道開挖後應力平衡之目的，並利用計測隨時觀察岩體行為，回饋設計。然計測所得之岩體收斂資料實為龐大且分析複雜，一般無法即時判斷開挖行為是否異常或支撐構件是否足夠。因此若能藉由電腦科技迅速發展之便，將龐大之計測資料由電腦軟體回饋分析，使隧道工程人員可迅速研判隧道之收斂、支撐行為，相信對隧道工程實為一大助益。

本研究目的在於增加外顯式視窗化程式之功能性，視窗化電腦軟體之優點在

其介面以人性化設計，使使用者能輕易的資料整合。一完整之電腦輔助軟體無論是在專業介面、外觀、正確性都必須具備，在增加此視窗化程式之實用功能、外觀介面之後，在輔以分析若干案例，用以顯示本程式應用之即時輔助成果。

1.3 研究架構

第一章 前言:闡述研究背景、研究動機、研究目的、研究架構等內容，並針對本研究進行初步性的介紹。

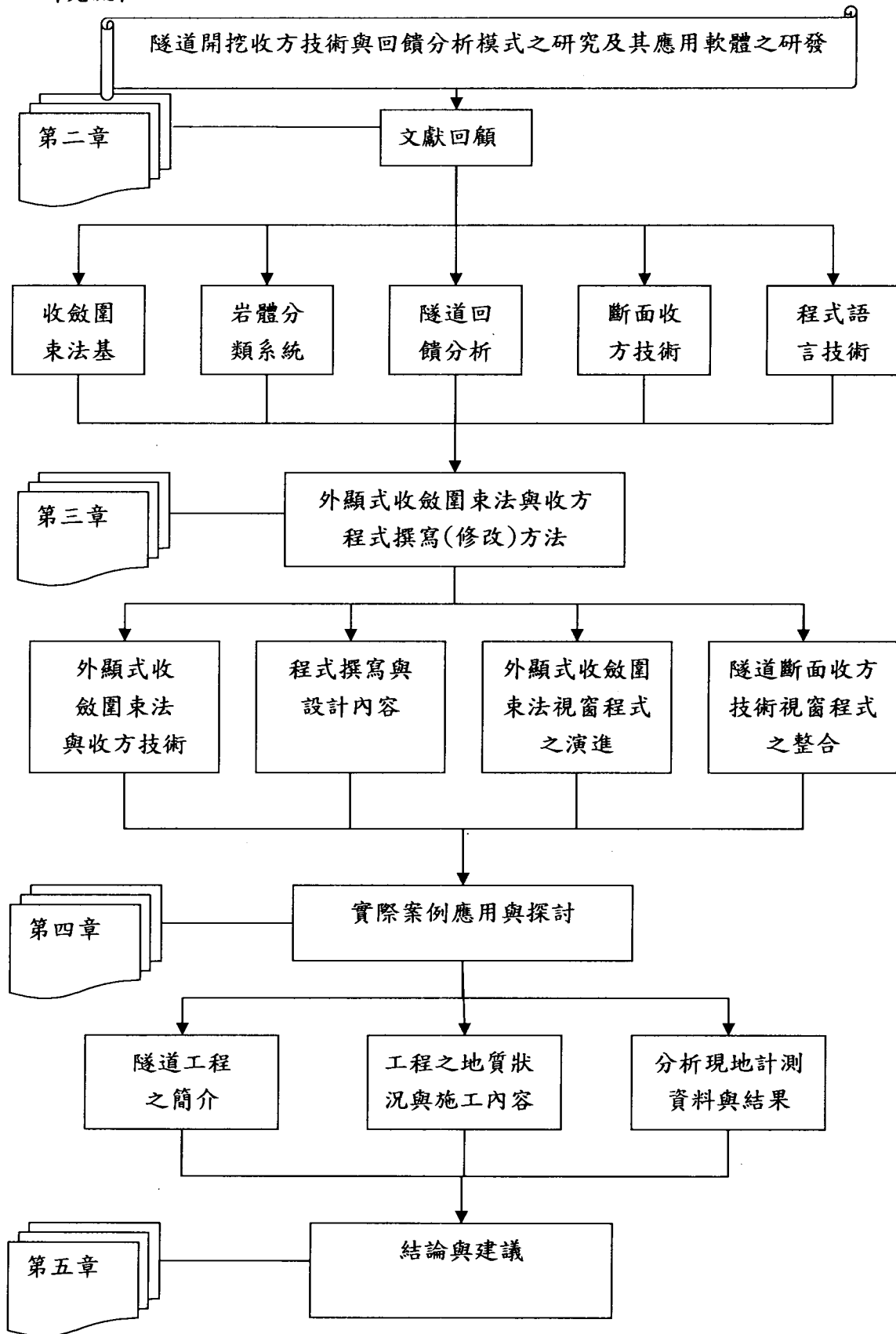
第二章 文獻回顧:針對研究所包含之前人所研究內容進行回顧，其包含岩體分類系統、收斂圍束法相關理論、隧道回饋及迴歸分析方式、程式語言技術等進行介紹。

第三章 針對各個模組視窗系統設計架構進行說明，包含程式撰寫方式與成果展示。

第四章 實際案例應用與探討：於本章節中將針對所撰寫之程式，藉由現地實際案例進行分析及討論。

第五章 結論與建議：在本章中將針對研究部分的成果作一簡述並提出建議期望能對後續研究者有所幫助。

1.4 研究流程



第二章 文獻回顧

2.1 前言

隧道之目的通常在運輸，種類有鐵路、公路、人行道路、污水、給水、灌溉、水利等項。隧道在建造應不影響地面物，但亦有在建造時，層應用挖開及填回之方法，一度影響地面，致完工時乃恢復地面之原狀之坑道，亦稱為隧道。時至今日，隧道工程仍為單價昂貴而間為的工程。如何降地建造費用並改善作業安全時為海內外工程施工同之課題。且隧道之高低與施工速度之快慢成反比，如何提高工程速度亦極為重要。

隨著隧道施工技術的提升、電腦資訊處理能力快速發展，將專業領域與電腦資訊科技進行整合實為現今各領域的重要課題。在隧道施工過程中，所需要處理與紀錄的資訊相當多，例如施工紀錄、監測資料、監測資料回饋分析等等。應用電腦軟體科技來替代耗時耗力的人為資料分析處理，相信對隧道工程之應用性以及安全性更有幫助。而一套完整且多元化之應用軟體，無論是在人性化介面、內容、外觀包裝等皆為重點方面。一介面簡易且操作方便的應用軟體可輕易的使工程人員操作快速上手。

針對上述，本章節中將針對前人所研究之成果如收斂圍束法、岩體分類系統、隧道之回饋分析方式、程式語言技術等，並引述國內、外專家學者之相關研究做一介紹及回顧。

2.2 收斂圍束法之基本理論

自從Rabcewicz (1964) 提出隧道開挖與支撐之新奧工法 (NATM) 之後，至今約四十年。此工法之基本原理，為利用岩體本身具有之自持力的特性而發展之隧道施工法；其於隧道開挖後，利用噴凝土、岩栓、支保等支撐構件，配合周圍岩體形成一支撐拱圈，支撐作用於隧道之岩壓、水壓等作用力。其後於1970年至1990 年間在歐洲逐漸發展出隧道開挖支撐的分析方式與設計方法，即所謂之收斂圍束法 (Convergence – Confinement Method)。其主要的考量為以二維平面應變及隧道縱剖面變形曲線之分析方式，在考量三維隧道開挖前進效應條件下，模擬分析隧道開挖所引致岩體應力位移變化和支撐結構之互制力學行為問題 (李煜舫，2003)。

1979 年法國學者 Panet 針對收斂圍束法提出相關理論，其包含假設在等向性

初始應利條件下，一無支撐圓形(半徑 R)深隧道開挖於均質且線彈性的岩體中，利用釋放圍束比 λ 計算及評估，藉以模擬隧道開挖前進效應。在距離隧道前進開挖面前方遠處 ($\lambda=0$)，因岩體未受到隧道開挖的影響擾動，其徑向應力或切向應力和初始應力之比為 1。然隨著隧道繼續開挖前進，岩體壓力持續變化，其釋放圍束比在 0 到 1 之間 ($0<\lambda<1$)。最後，當前進開挖面距離為無窮遠處時 ($\lambda=0$)，在開挖面上岩體因壓力完全釋放而達到最終平衡狀態，其徑向應力和現地應力之比為 0，且其徑向位移量 U_R 為最大值 $U_{R(\max)}$ 。而上述各階段之應力值及位移量，可分別表示如下：

$$\text{當 } \lambda=0 \text{ 時， } \sigma_R = \sigma_o, \sigma_\theta = \sigma_o, U_R = 0 \quad (2-1)$$

$$\text{當 } 0<\lambda<1 \text{ 時， } \sigma_R = (1-\lambda)\sigma_o, \sigma_\theta = (1+\lambda)\sigma_o, U_R = \lambda \frac{\sigma_o R}{2G} \quad (2-2)$$

$$\text{當 } \lambda=1 \text{ 時， } \sigma_R = 0, \sigma_\theta = 2\sigma_o, U_{R(\max)} = \frac{\sigma_o R}{2G} \quad (2-3)$$

式中 σ_o 為垂直初始應力， σ_R 與 σ_θ 分別為徑向及切向應力， G 為岩體的剪力模數。

Carranza-Torres and Fairhurst (2000)，以符合 Hoek-Brown 破壞準則的觀點，提出應用收斂圍束法於實際隧道之設計。遵循 Hoek-Brown 破壞準則，做為收斂圍束法分析之依據。而建立收斂圍束法三個基本的組成方程：(1) 縱向變形剖面圖 (Longitudinal Deformation Profile, LDP)、(2) 地盤反應曲線 (Ground Reaction Curve, GRC) 及 (3) 支撐特徵曲線 (Support Characteristic Curve, SRC)。

根據前述作者之理論，李煜舫 (2002) 對收斂圍束法理論做更詳細的說明，除了上述的三個基本組成方程，更加入縱剖面應力曲線 (Longitudinal Stresses Curves, LSC)、互制作用曲線 (Interaction curve, IC)、釋放圍束比 (Deconfinement Ratio, λ)，以及平衡點 (Equilibrium Point, EP)，其互制作用關係如圖 2.1 所示。

2.2.1 地盤反應曲線

於地盤中進行隧道開挖，地盤之應力平衡狀態將因開挖而受擾動，於是隧道面之位移將隨著開挖面前進而增日，同時穩定隧道面繼續變形所需之撐壓力亦將隨良改變。因此，充份瞭解隧道變形與所需支撐壓力間之關係，即隧道之地盤反

應曲線（陳正勳，1989）。地盤反應曲線之應力與位移關係如圖 2.1 所示，當隧道尚未開挖時，岩體未受到擾動（ $\lambda=0$ ），此時徑向應力與初始應力的比值為 1，且徑向位移量為零。當隧道開挖前進後，岩體持續受到擾動，為達成新的平衡狀態，岩體會藉由位移之產生，使應力得以重新調整。而隧道持續開挖，此時岩體持續釋放應力，隧道開挖面的徑向位移量亦隨之增加。彈性狀態下之地盤反應曲線，其徑向應力與位移正規化後的關係為一直線，斜率為 $2G$ ，其中 G 為岩體材料之剪力模數，與楊氏模數和波松比有關。且當岩體應力釋放完全時，產生一最大彈性徑向位移量 U_R^∞ 。

$$U_R^\infty = \frac{\sigma_o R}{2G} \quad (2-4)$$

而彈性之隧道開挖解析解，考慮釋放圍束比於隧道前進效應時之徑向及切向應力解為：

$$\sigma_R = (1 - \lambda)\sigma_o \quad (2-5)$$

$$\sigma_\theta = (1 + \lambda)\sigma_o \quad (2-6)$$

趙華誠（1998）於應用收斂圍束法理論與雙曲線組成律模式模擬隧道開挖之地盤反應曲線研究中指出，雙曲線模式中凝聚力與內摩擦角對於隧道開挖周圍的徑向位移量和地盤反應曲線的影響性較小。

2.2.2 支撐反力曲線

由於隧道開挖後，岩盤因隧道開挖範圍內之岩石挖除而失去天然支撐作用，則岩體環壓將隨著隧道的收斂變形而變小。若不及時提供人為支撐設施維持岩體之穩定，則可能引起岩體破壞。支撐受變形與支撐應力間之關係曲線稱為支撐反力曲線，支撐反力曲線之斜率即為支撐構件的支撐勁度 K_s 。隨著支撐構件不同，其支撐勁度與應力也隨之產生差異。在隧道施工過程中，當支撐構件之支撐勁度較大，所能提供之支撐應力也較多，進而控制隧道之徑向位移量也愈佳。由圖 2.2 所示，支撐反力曲線其斜率即為支撐構件之支撐勁度 ks ，當隧道支撐其支撐構件有 2 種以上時，所形成的複合支撐系統其支撐勁度可由單一支撐構件之支撐勁度累加而得。

Hoek and Brown (1980) 亦提出單一支撐結構可由彈性勁度累加而得。公式如下：

$$K_S = K_{S1} + K_{S2} \quad (2-7)$$

以 $u_{\max_1} = \frac{P_{S(\max)_1}}{K_{S_1}}$ 和 $u_{\max_2} = \frac{P_{S(\max)_2}}{K_{S_2}}$ 中，用最小位移量做設計較為保守。

式中， K_{S1} 為第一支撐結構之勁度； K_{S2} 為第二支撐構件之勁度； $P_{s(\max)}$ 為最大支撐壓力； u_{\max} 為最大位移量。

Verman and Singh 等人 (1995) 提出外顯式收斂圍束法之基本理論中三種反應曲線，地盤反應曲線、支撐反力曲線、縱剖面應力曲線。並探討隧道使用鋼支撐時的支撐反力曲線，目前一般隧道皆是使用鋼絲網加上混凝土襯砌作為支撐，提出可使用 $1/k=1/k_s+1/k_b$ 來計算其複合勁度，進而可以求得複合的支撐反力曲線。圖 2.3 為支撐勁度與支撐應力、位移之關係。

林志民 (1996) 研究發現相鄰隧道施工，促使導坑產生新的收斂變形與支撐應力之變化，塑性區亦因此而擴大，這些結果顯示相鄰隧道開挖的確會對已完工隧道造成影響。就隧道支撐應力所受的影響而言，若考慮相鄰隧道施工的影響，有可能會造成原本已達穩定隧道之支撐因鄰近其他隧道之交互作用而造成破壞。

Sonmez and Ulusay (1999) 說明模擬隧道所支撐用的混凝土硬化的過程，使用收斂圍束法的基本假設（混凝土襯砌假設為線彈性），並且實際應用在隧道設計當中（如圖 2.4）。

Ozsan (2003) 於研究中指出，地盤反應曲線與支撐互制曲線關係（如圖 2.5 所示），由圖知隧道之支撐勁度大多還是以混凝土所提供之支撐勁度為主，岩栓所提供的支撐勁度有限，其最主要目的為提供隧道塑性區產生時能即時產生拉力以增加安全性。

2.2.3 縱剖面應力曲線

李煜艸 (2002) 於研究中指出，當進行開挖時，隧道開挖面上因施工立即產生前期位移量，若考慮隧道為無支撐情況下隨同隧道開挖，徑向位移量將隨之逐漸增加，在距離隧道開挖前進面遠處，岩體已達無支撐平衡狀態，此時徑向位

移量最大為最終徑向位移量 $U_{R(\max)}$ ，徑向應力因開挖而完全釋放其值為零，此時釋放圍束比為 1。

若所分析之目標為有支撐系統隧道時，隧道開挖面上亦產生一前期徑向位移量，且隨同開挖持續進行架設支撐系統，此時釋放圍束比為 λ_d ，徑向位移量為 U_R^d ，其徑向應力 $\sigma_R^d = (1 - \lambda_d)\sigma_o$ ，切向應力 $\sigma_\theta^d = (1 + \lambda_d)\sigma_o$ 。而隨著隧道開挖前進面持續前進，當有支撐隧道達平衡狀態時，此時所產生之徑向位移量為 U_R^s ，徑向應力等於支撐應力 $\sigma_R^s = P_s$ ，而因應力釋放完成，釋放圍束比為 1。

而在隧道縱剖面變形曲線之相關研究方面，近藤達敏 (1979)、Lee (1994)、Panet (1995) 及 Hoek (1999) 於研究中分別提出隧道縱剖面變形曲線相關公式，如下所示：

(1) 近藤達敏 (1979)

$$U_R = C(1 - e^{-DZ}) \quad (2-8)$$

(2) Lee (1994)

$$\frac{U_R}{U_{R(\max)}} = \frac{1}{2} \left[1 - \tanh\left(\frac{1}{3} - \frac{Z}{2R}\right) \right] \quad (2-9)$$

(3) Panet (1995)

$$\frac{U_R}{U_{R(\max)}} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \left[1 - \left(\frac{m}{m + Z/R}\right)^2 \right] \quad (2-10)$$

(4) Hoek (1999)

$$\frac{U_R}{U_{R(\max)}} = \left[1 + \exp\left(\frac{-Z/2R}{0.55}\right) \right]^{-1.7} \quad (2-11)$$

其中

α_0 = 隧道前期變位量

R = 隧道半徑

Z = 隧道軸向距離

C、D 及 m = 岩體材料參數

$U_{R(\max)}$ = 隧道平衡後儀器量測最大變位

U_R = 儀器量測變位

Carranza-Torres (1999、2000) 等人在研究中指出，隧道最大徑向位移量約

會產生於8倍隧道半徑之後，而在隧道半徑4倍遠處隧道變形量約為0(如圖2.6)。

2.3 外顯式收斂圍束法

2.3.1 外顯式收斂圍束法之原理與基本假設

收斂圍束法其主要理論乃以二維分析模式模擬實際三維隧道開挖支撐互制行為，即岩體受外力擾動而產生反應變形，並依據現場計測岩體收斂情況研判支撐構件的多寡，進而設計出主要之支撐構件系統。而外顯式分析法(李煜舫,2002)乃以收斂圍束法之基本理論，以疊加的數值計算方式，即可模擬隧道開挖引致岩體收斂與支撐結構圍束之互制行為的分析方法。但實際隧道開挖行為係為複雜之三維情況，開挖界面與支撐構件間之關係也甚為密切。因此在分析時必須給予適當之假設，分述如下：

- (1) 岩體視為等向性且均質之線彈性材料；
- (2) 噴凝土、岩栓及鋼支保等支撐結構為線彈性材料；
- (3) 隧道岩體與支撐結構兩者應力狀況處於彈性範圍內，且主要支撐結構系統為等值斷面之噴凝土；
- (4) 岩體力學行為不考慮時間效應；
- (5) 收斂岩釘安裝位置距隧道開挖前進面距離為無支撐距離；
- (6) 隧道開挖不考慮地下水之影響。

2.3.2 外顯式收斂圍束法之分析步驟

外顯式分析法模擬計算和分析方法包含迴歸分析和正常運算分析等步驟。其相關計算步驟，分別敘述如下：

- (1) 依據現地實際收斂岩栓計測資料，採用公式(2-10)迴歸求得相關參數 m 值和 α_0 ；
- (2) 離隧道開挖前進面若有存在一無支撐距離 d 時，可由公式(2-10)計算相對之釋放圍束比值 λ_d ；
- (3) 由計測資料得知計測位移歷時曲線中之最大位移量或相對穩定位移量 U_R^d 值；

(4) 由公式 $K_c = \frac{E_c [R^2 - (R-t)^2]}{(1+\nu_c) [(1-2\nu_c)R^2 + (R-t)^2]}$ 計算支撐結構總勁度 K_n ，式

中， E_c 、 ν_c 和 t 分別為噴凝土之彈性模數、柏松比和厚度；

(5) 根據公式 $\frac{U_R^s}{R} = \frac{2G_m + \lambda_d K_n}{2G_m + K_n} \left(\frac{\sigma_o}{2G_m} \right)$ 反算求得岩體剪力模數 G_m (若已知

波松比 ν ，即可求出岩體之彈性模數 E)；

(6) 結構支撐壓力 P_s 值，可由式 $P_s = \frac{K_n}{2G_m + K_n} (1 - \lambda_d) \sigma_o$ 計算獲得；

(7) 再由式 $\Delta\lambda = \frac{1}{n} \left[\frac{2G_m (1 - \lambda_d)}{2G_m + K_n} \right]$ 計算釋放圍束比之變化量 $\Delta\lambda$ 值；

(8) 依據應力釋放之疊加值 n 值，在依下列方式計算，獲得各階段之累加

值：

(a) 釋放圍束比值： $\lambda = \lambda_d + \Delta\lambda$

(b) 地盤反應曲線和互制作用曲線： $U_R^s = U_R^d + n\Delta\lambda$ 和 $\sigma_R^s = \sigma_R^d + n\Delta\lambda$

(c) 支撐反力曲線： $P_s = n\Delta\lambda \left(\frac{K_n}{2G_m} \right)$

(d) 由式 $\frac{R}{Z} = m \left(\frac{1}{\sqrt{1-\lambda}} - 1 \right)$ 計算釋放圍束比值 λ 和其相對應之距離比

Z/R 值

(9) 重複步驟 (8) 之計算，最後求得平衡點之結構支撐壓力 P_s 或岩體應力 σ_R^s 與徑向位移量 U_R^s ；

(10) 繪製地盤反應曲線 (GRC)、支撐反力曲線 (SRC)、互制作用曲線 (IC)、縱剖面變形曲線 (LDC)，以及比較收斂岩栓計測資料之位

移歷時曲線和計算分析結果。

2.4 岩體分類系統

近代隧道工程技術的發展，在設計及施工應同時兼顧經濟性以及安全性。基本上，由於地下工程中地質特性變異極大，如果完全配合地質條件之差異而採用不同的支撐設計，則同一工程中可能出現數十種不同的岩盤種類與支撐系統設計，不僅造成設計、施工上諸多困擾，亦增添計價之不便。為避免此種情況，有

必要對不同之岩體依其工程特性加以區分等級，簡化其分類並擴大對應支撐系統之適用範圍，此為岩體分類的最大特性。岩體分類的方法有很多種，各種方法所考量的因素都不盡相同，但最終目的都是對所需的工程場址進行計量性的評分。然由於國內地質情況相當多變，很難將同一套岩體分類系統視為通用，且常引用國外發展多年之岩體分類系統。以下針對國內常使用之南非 Bieniawski (1973) 之 RMR (Rock Mass Rating) 法、挪威 Barton (1974) 之 NGI-Q (Norwegian Geotechnical Institute Tunneling Quality Index) 法、Hoek 與 Brown 之地質強度指數 (Geological Strength Index, 簡稱 GSI) 以及由公共工程委員會近年所發展之台灣岩體分類與隧道支撐系統 (PCCR-System)，做逐一介紹。

2.4.1 RMR 岩體分類系統

南非之 Bieniawski 氏自 1973 年所發展出岩體評分法 (又稱地質力學法，簡稱 RMR) 以來，經過多次的修正，更趨於完善且目前常應用於隧道工程以及相關大地工程。其主要評分為根據六項因子：岩石材料強度、岩石品質指標 (RQD)、節理間距、節理面情況、滲流水狀況、及節理走向和傾角方向等分別評分，其中各因素評分標準與岩體分數詳如表 2.1。

Bieniawski (1973) 收集隧道及礦坑案例共 351 個，案例之 RMR 值如圖 2.7。並以 RMR 評分值進行支撐系統建議 (如表 2.2、表 2.3 所示)。RMR 系統自 1973 年至 1989 年共歷經 4 次修正，主要為各評分因子之評分權重調整。於 1989 年時主要之修正為：弱面間距、弱面狀況及地下水情況，弱面間距等。

2.4.2 Q 系統岩體分類法

為挪威地工技術研究所 (Norwegian Geotechnical Institute) 之 Barton、Lien 及 Lunde 等三人在 1974、1975 共同提出，該分類法根據 200 處以上岩力條件不同之隧道支撐、統計而成。其同樣考慮六項因子做評分，但並不是用相加而是相乘除，其計算式如下：

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2-12)$$

式中 RQD: 岩石品質指標， J_n : 節理組數， J_r : 節理面粗糙度， J_a : 節理面變質情況，

J_w :地下水扣減係數，SRF:應力扣減係數，其中 RQD/J_n 代表個別岩塊尺寸， J_r/J_a 代表岩塊間之抗剪強度， J_w/SRF 代表作應力特性。因 NGI-Q 系統每個評分因素頗為細密，經由上述六種因子組合後。可表示約 30 萬種以上不同岩力特性之岩體，有關其評分詳細過程如表 2.4。

Ramamurthy (2004) 等人試圖決定岩體無圍壓縮強度的可靠性與岩體的試驗模數。使用 RMR、Q、GSI 三種岩體分類法，得到岩體參數 C 、 ϕ 。並加入一重要因子 J_f (節理因子)計算當岩體在有節理的情況下使用 Q 法去計算岩體之 C 、 ϕ 值。其計算式如下:

$$c_j = (RQD/J_s)(1/SRF)(\sigma_{ci}/100) \quad (2.13)$$

$$\phi_j^{\circ} = \tan^{-1}(J_r J_w / J_a) \quad (2.14)$$

2.4.3 GSI 岩體分類法

GSI (Geological Strength Index) 系統係由 Hoek (1994) 及 Hoek et al. (1995) 所提出的一個系統，用以量測於不同地質情況下岩體強度的評分系統，(如圖 2.8、圖 2.9 所示)。圖 2.8 所顯示之經驗，經由對現地觀察，識別岩體構造以及弱面之情況即可對該場址之岩體進行研判分類。這些規則隨後發展出量化評分之方法如圖 2.9 量測 GSI 的值，由圖 2.9 可看出 GSI 值為一界定範圍而不是完全一評分值，因此應用 GSI 分類系統需要一有相當專業經驗之工程師。

一旦 GSI 值已知，則描述岩體強度特性的參數可以下列式子作計算:

當 $GSI > 25$

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (2-15)$$

$$a = 0.5$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (2-16)$$

當 $GSI < 25$

$$s = 0$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (2-17) \text{ 其中當}$$

$GSI=25$ ，介於原來和修正的準則間，可任意的選擇。

Hoek et al. (1995) 提出岩體的壓縮強度與 Hoek-Brown 破壞準則之凝聚力與摩擦角參數值的計算方法。此方法可計算當知道現地相關應力參數，配合 GSI 岩體分類系統，經由迴歸參數計算，可求出現地之凝聚力、摩擦角參數值與隧道之塑性半徑。

Sonmez and Ulusay (1999) 嘗試提供一個更能以數量來表示的數學準則用於 GSI 值評估，以新的參數和評分法，例如：表面情形評分 (surface condition rating, SCR) 和結構評分 (Structure Rating, SR) 且 SR 和 SCR 基於體積節理計算 (volumetric joint count, J_v) 和量測 RMR 輸入參數 (例如：粗糙度、風化和填充物)。

Ozsan and Basarir (2003) 說明高度風化以及軟弱層區的隧道支撐之能力。而建立 Q 法岩體支撐的應力與支撐的方式，並引用土耳其一地下開挖隧道來分析說明此種岩體分類法之計算，並說明各種數值分析以及支撐應力計算。

Cai and Kaiser 等人 (2004) 補充了 GSI 系統之量化評分方式，利用加入塊體體積 (V_b)、量化節理情況因子 (J_c) 兩個評分修正因子，更準確的為 GSI 系統評分方式做一解釋，量化法如圖 2.10。

2.4.4 PCCR 台灣岩體分類系統

行政院公共工程委員會專案研究計畫「台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立」(2000) 中提出一套初步研究計畫，蒐集了眾多前人分類法所考量過之參數，利用主成分分析與條件機率法，加上充足的隧道資料，針對不同地質特性 (如礫石、泥岩、斷層...等) 之隧道進行台灣地區岩體分類因子重新評估，判斷出合何種分類方式或因子較能適用台灣地質環境，以及因子的權重是否能合理的反應出地質情況，進而設計出一套適合台灣地區的分類標準，提供工程上使用正確的支撐方式。並針對台灣隧道岩體分類與隧道支撐系統於下列狀況之適用性進行評估，並評估台灣地區隧道工程之主要影響因子。

- (1) 擠壓性岩盤
- (2) 湧水性岩盤
- (3) 第三紀晚期膠結較差之泥岩
- (4) 第四紀卵礫石

(5) 大斷面隧道

(6) 高岩覆隧道

而後依據地質材料特性，參考地質年代、對水的敏感性以及相關強度特性，將台灣全區之地層劃分為 A、B、C、D 四種岩體類別，並據此建立各岩體類別之岩體評級法。並透過案例推理、類神經網路、及案例比對等方法進行案例分析，且藉由專家諮詢會議凝聚國內隧道專家意見，據以研擬 A、B、C、D 各岩類之隧道支撐建議與設計方法，範圍涵蓋噴凝土、鋼支保、岩栓等初期支撐之規格尺寸及隧道襯砌之厚度與強度，進而建置台灣岩體分類與隧道支撐系統。以下就此 A、B、C、D 四種分類做逐一說明：

A 岩類

岩體工程特性：包括台灣地區所有的變質岩類及亞變質岩類，火成岩類中除火山角礫岩的岩層，沈積岩類中岩化程度高、膠結良好者。岩心單壓强度高，大致可對應於 ISRM 地質材料強度分級中，强度高於或等於中強岩之地質材料。A 類岩石材料不會因含水量高低而明顯影響其工程力學性質，且因強度較高，岩質堅脆，故易因地體構造運動大地應力影響而產生發達節理等地質弱面；除高應力區有可能產生岩爆外，一般而言其岩體破壞機制係屬於構造破壞，主要沿節理面、層面、劈理以及片理等地質材料的弱面發生。

適用之岩體分類法：採用 RMR 定量岩體分類法。

概略分布範圍：中央山脈東翼地質區、中央山脈西翼地質區、西部麓山帶、上新世早期以前之地層。

代表地層：中央山脈東翼地質區的大南澳片岩、畢祿山層、禮觀層、廬山層；中央山脈西翼地質區：雪山山脈中、南部的十八重溪層、達見砂岩、白冷層(佳陽層、眉溪砂岩)、水長流層；雪山山脈北部的西村層、四稜砂岩、乾溝層、粗窟砂岩、大桶山層、澳底層、蘇樂層；西部麓山帶北部的蚊子坑層、五指山層、木山層、大寮層、石底層、南港層等等。

B 岩類

岩體工程特性：本岩類皆屬沈積岩中之較軟弱已固結岩層，由於岩化時間較短，故雖已固結但膠結程度低於 A 岩類，岩體本身強度較低，大致可對應於 ISRM 地質材料強度分級中相當於弱岩之地質材料。B 岩類般堅脆，岩質不如 A 岩類般

堅脆，故在地體構造運動大地應力作用下並不容易產生發達節理等弱面，而係多以變形取代脆性破壞。本岩類岩石組成材料會因含水量提高而產生不容忽視之強度降低現象，岩體在乾燥狀況下，主要的破壞機制仍如同 A 岩類一般沿地質弱面發生構造破壞，但在高含水量狀況下，地質材料會因軟化而會使岩體主要破壞模式轉變為材料破壞。

適用之岩體分類法：應仍可採用 RMR 定量岩體分類法，但因其岩體破壞模式與 A 岩類有所差異，故需做部分適當修正。

概略分布範圍：西部麓山帶西緣中上新世至早更新世之較年輕已固結岩層，部份海岸山脈地質區。

代表地層：北部（基隆、台北、桃園）、中北部（新竹、苗栗）、中部（台中、彰化、南投）地區中上新世至早更新世錦水頁岩以及卓蘭層；西部麓山帶中南部（嘉義、台南）地區上新世早期的中崙層與烏嘴層；西部麓山帶南部（台南、高雄）地區中新世晚期的烏山層等。

C 岩類

岩體工程特性：涵蓋所有大致可對應於 ISRM 地質材料強度分級中，強度小於或等於甚弱岩之地質材料，土層亦包含在內；此外，亦涵蓋所有粗顆粒（粒徑大於 4 號篩大小）含量少於 50%，力學行為受控於細粒料之地質材料。將粒徑大於 4.75mm（即 4 號篩之大小）之細礫、粗礫以及卵石視為粗顆粒。C 岩類岩體膠結程度遠低於 A 岩類及 B 岩類，其地質材料遇水軟化的現象極為明顯，甚至會因高含水量而形成流動性地盤。由於此岩類岩質不堅脆，在地體應力作用下多以柔性變形吸收應力，而極少產生明顯的地質弱面，故不易形成構造破壞，岩體的破壞方式以材料破壞為主。C 岩類岩盤強度的決定因素主要為組成材料性質、膠結程度與含水量高低等。

適用之岩體分類法：此岩類若以 RMR 法評分，會因其不具明顯發達之弱面構造而給予較高評分，而無法確實反映其材料破壞的主要特性，故宜採用定性岩體分類法。

概略分布範圍：中南部西部麓山帶晚上新世至更新世之膠結不佳沈積岩，東部海岸山脈帶膠結不佳之沉積岩，以及墾丁層與利吉層等混同層。

代表地層：西部麓山帶北部頭嵙山層香山相、楊梅層照鏡段、通霄層、觀音山層、

大南灣層；西部麓山帶中南部的沅水溪層、六重溪層、崁下寮層、二重溪層以及六雙層；西部麓山帶南部的北寮頁岩、玉井頁岩、蓋子寮層、古亭坑層（泥岩）與六雙層；恆春半島的墾丁層、馬鞍山層、鵝鑾鼻層；海岸山脈地質區的利吉層。

D 岩類

岩體工程特性：前述 A、B、C 岩類可視為強度由高至低之一系列岩體，而 D 岩類則為一種獨立於此系列之外的特殊岩體，係泛指以粗顆粒或塊石為主（含量超過 50%），夾有細粒料之複合地質材料，包含一般所謂之礫石層岩體、火山角礫岩、火山集塊岩等等。這類岩體的單壓強度係取決於粗顆粒間含量相對較少之膠結物質的固結程度，故強度試驗值具有相當大的變異範圍，且將進一步影響弱面產生的多寡；此外，含水量高低對於整個岩體強度所造成的影響程度大小，亦係視個案而異，故有必要將此岩類獨立區分出來。

適用之岩體分類法：RMR 評分法中的佔有大部分比重之單壓強度及弱面特性因子，無法確實反應 D 岩類岩體特性，故宜採用定性岩體分類法

概略分布範圍：涵蓋所有岩體中塊石或粗顆粒含量超過 50% 之複合材料地層。如西部麓山帶北部、中北部、中部地區第四紀頭嵙山層及其相當地層、以礫石為主的台地堆積層；西部麓山帶南部晚更新世的六龜礫岩、台地堆積層；海岸山脈地質區的都巒山層；全台灣地區的火山角礫岩。

代表地層：西部麓山帶的北部、中北部、中部地區的林口層、店子湖層、頭嵙山層之火炎山相、楊梅層照門段；西部麓山帶的南部則是六龜礫岩；台灣全區不晚於更新世之台地堆積層及火山角礫岩；海岸山脈地質區的都巒山層、港口石灰岩、水璉礫岩、卑南山礫岩。

2.5 隧道之回饋分析

回饋分析係利用施工監測值（一般利用隧道開挖產生之內空變位量），經由回饋分析反推材料參數及初始應力場，使分析結果能夠充分反應現場實際施工狀況，並據以分析後續開挖所造成的影響，必要時調整原設計，以達施工之安全性及經濟性。近年來反算回饋的理論及程序已經被廣泛地使用在工程實務上，用以解決及改善土壤與岩石工程地質特性、應力行為與大地施工設計間的複雜關係（廖博才，2002）。

2.5.1 回饋分析理論

回饋分析方法大致可分為「逆分析法」(Inverse Approach)和「直接分析法」(又稱數值擬合分析法, Direct Approach)兩大類。「直接分析法」是一種數據擬合分析之計算方法,一般皆以位移擬合分析法,其意義為將經由有限元素法、有限差分法等應力分析之位移,經由最小化程序使誤差值(目標函數)最小時,所得到的材料參數即為所求參數。「逆分析法」其分析順序為先將工程計測資料所獲得之位移、應變視為已知,後將數值解析模式及邊界條件進行假設,而在完成上述步驟後,進入回饋分析以求得現地材料參數及現地初始應力。彙整逆分析與直接分析之差異如圖 2.11。

后振宇(2003)指出,研究八卦山隧道開挖之分析結果顯示,經由外顯示分析法反算現地岩體之彈性模數,應加入隧道開挖前進效應之影響,並對此影響加以修正,再以有限元素法做直接分析,即可獲得岩體之位移以及結構之支撐應力等較為接近之預估值。

吳耀焜等人(2003)利用現地計測值,藉助回饋分析反求岩體參數及現地應力,據以分析後續開挖所引致岩體及支撐構件等應力及應變,綜合判斷開挖方式及支撐系統之實用性及安全性並應用現場計測資料反推求得實際開挖地層之岩體參數及初始應力場。

Sakurai 等人(2003)等人對隧道工程提出利用反算分析法之原理發展出另一觀察的模式,利用觀察的方法發展出可視化的分析程序以及以電腦為基礎的反算分析步驟。其分析步驟如圖 2.12。

2.5.2 分析方法

迴歸分析-舉凡需處理大量數據或是經由人為進行紀錄等,需將資料間之誤差量降至最低的過程,都可以使用迴歸方式進行分析。最佳化(Optimization)分析是提供一種邏輯方法,並將此方法用於所有可能的分析設計中當作最好的選擇。而此方法於工程設計、統計分析或模式之模擬等領域中已變成很重要的一項技術。

而此研究中是利用陳聖彥(2004)將法國學者 Panet 於 1995 年發表之縱剖

面變形曲線 (2-10) 式，將此式應用於所撰寫之分析程式內，以最小平方根法迴歸分析，其整理之公式如下：

$$\lambda = 1 - \left(\frac{m}{m + \frac{z}{R}} \right)^2 \quad (2.18)$$

假設 $let \rightarrow x = \frac{z}{R}$ ，因此(2.18)式經整理後可得(2.19)式

$$\lambda = 1 - \left(\frac{m}{m + x} \right)^2 \quad (2.19)$$

接著將 (2.19) 式進行整理可依序得到 (2.20) 式及 (2.21) 式

$$\lambda - 1 = - \left(\frac{m}{m + x} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$\sqrt{1 - \lambda} = \frac{m}{m + x} \quad (2.21)$$

假設 $let \rightarrow A = \sqrt{1 - \lambda}$ ，因此 (2-21) 式經整理後可得 (2-22) 式

$$A = \frac{m}{m + x} \quad (2.22)$$

而 (2-22) 式經整理後，可得到 (2.23) 式

$$A \cdot (m + x) = m \quad (2.23)$$

再將括號內之參數提出得到 (2.24) 式

$$A \cdot m + A \cdot x = m \quad (2.24)$$

兩邊同時取 ln 得到 (2.25) 式

$$\ln(A \cdot x) = \ln(m \cdot (1 - A)) \quad (2.25)$$

將等號兩邊整理後得到 (2.26) 式

$$\ln x - \ln m = \ln \left(\frac{1 - A}{A} \right) \quad (2.26)$$

調整公式得 (2.27) 式

$$\ln x = \ln \left(\frac{1 - A}{A} \right) + \ln m \quad (2.27)$$

最後由 (2-27) 可得到與迴歸分析公式之關係式 (2.28)、(2.29)、(2.30) 式，因避免參數與原公式混亂，故參數之表示另以 X、Y 表示

$$Y = \ln x \quad (2.28)$$

$$X = \ln\left(\frac{1-A}{A}\right) \quad (2.29)$$

$$a = \ln m \quad (2.30)$$

2.6 斷面收方技術

2.6.1 斷面收方量測技術與原理

「測量」在工程進行當中，往往扮演著相當重要的角色，尤其隧道系統，需要比一般的土木工程更高的精度，測量的重要性更是不言而喻。不過，除非是精度的掌控有了缺失，大部分的人是不太容易注意其重要性。所以為解決隧道工程人力短缺之問題，節省隧道斷面量測時間與人力，並提高量測之精度，於是發展自動化收方測量系統以提高施工安全性。且雖然一個斷面有數個觀測量，但是只要錯了一個，結果就是滿盤皆錯，當然就得去現場再做複測。為了要突破這層盲點，現在有所謂的「全斷面自動收方儀」。不但幾乎沒有盲點，而且也可以當場監測量測成果，報表輸出又快速，更可以顯示完整之橫斷面與縱斷面圖。

根據許榮達（2004）之研究中指出，當後方交會法測站角度限制介於 $30^\circ \sim 120^\circ$ 時，容易產生誤差。為兼顧架設儀器站多種方法選擇，發展「綜合式後方交會法」，當測站與稜鏡站皆為已知點時，於後置處理虛擬另一位觀測點，距離設定為 0.1mm ，將方向偏差量控制在半徑 0.1mm 以內，若條件角度符合 $30^\circ \sim 120^\circ$ 則使用後方交會法。

然後依其定出測站測量方法不同，其步驟分別敘述如下：

- (1) 架設在隧道內任一點上：採用此方法測量儀器需經過特殊處理，於儀器上有安裝稜鏡桿之孔位，以利觀測儀器之位置，其方法為另外一台儀器架設在已知點，後視另一已知點稜鏡，觀測收方斷面位置儀器上稜鏡之水平角、距離、高程差，計算平面座標及高程。
- (2) 架設在已知點：針對斷面收方位置進行放樣作業，有兩種狀況：其一為按已知中心線里程座標資料，放樣到現場並觀測高程差計算高程；其二為按現場需要定出觀測斷面位置，計算架設儀器位置之平面座標與高程，此兩種狀

況皆為事先將架設儀器位置點位定出，並求出高程資料。

- (3) 後方交會法又稱三點法：利用現場已知控制點，將儀器架設在收方斷面不妨害通行之位置，觀測兩處已知點，計算儀器位置平面座標與高程。
- (4) 綜合式後方交會法：作業同架設在已知點，進行後置處理，一點為實測值，另一點為虛擬現場已知點距離設定為 0.1mm，使誤差值控制在 0.1mm 以內。

2.6.2 斷面收方視窗程式之相關應用

Visual 是視覺化的意思，Visual Basic 的命名，就表示它是一套視覺化的程式開發工具。同時，它也採用了易學的 BASIC 語言，並且把關於介面操作的細節部份事先包裝起來。並符合製作圖形使用者介面的編寫軟體，以視覺化為主的基礎程式語言，由一開始的外觀介面設計、基本物件建立、表單的配置到內部撰寫程式等。國內目前有許多學者，將視窗化程式所賦予的便利性應用於工程上，以下以現行 Visual Basic 應用之近況做一回顧。

許榮達（2004）對隧道斷面量測方向及高程控制、開挖斷面收方、絕對變位量測與其它相關測量工作做深入探討，並提到隧道斷面收方，必須先建立基本資料—平面線形、設計高程，隧道設計斷面，作為比對斷面之基本資料。且經過實際案例探討，介紹隧道斷面收方量測之技術。

李文元（2006）利用傳統隧道斷面收方的方法結合 Visual Basic 程式語言撰寫成一套視窗程式，並藉由實際隧道斷面收方資料測試視窗程式之可行性。結合測量原理與程式編輯撰寫適合隧道斷面收方之程式且撰寫完成之視窗程式經測試後可使用在實際隧道的斷面收方上。

2.7 程式語言技術

程式語言（Program Language）是開發應用系統最為常用的工具之一，基本上依階層、使用模式和應用的不同，可以將程式語言劃分為幾個類別範圍。從最早的直譯式、編譯式的開發環境，演變為今日的視覺化開發環境。開發環境如下：

（一）直譯式開發環境

此種類型的發展環境，最主要的特色在於輸入的程式能立即地看到輸出結果，而

不需再經過編譯的動作，而原始程式小，也是其特色之一。它必需透過開發環境才能執行程式，且程式的保密性不是很好，所以很少人用來開發軟體。但是對初學程式設計者而言，相當方便，例如 GwBASIC、dBase III Plus 等等。

(二) 編譯式開發環境

編譯式的開發環境是最常見的，使用者利用文書編輯器或是系統所附的程式編輯器，將程式鍵入之後，再利用編譯軟體對原始程式進行編譯後，產生可供系統執行的目的程式檔。

(三) 視覺化開發環境

視窗作業系統的普及，使得視覺化開發環境成為主流。在這種環境下，使用者只需使用一隻滑鼠，在畫面上點、畫出需要的物件，了解每個物件的屬性及控制方式，再對該物件進行控制或設計，即能設計出軟體。例如 Visual Basic、Visual C++、Delphi ... 等等。

2.7.1 Visual Basic 6.0 程式語言簡介

BASIC (Beginner's All-Purpose Symbolic Instruction Code)，早期它是為提供初學者學習程式設計而發展的程式語言，自個人電腦的誕生，Basic 成為電腦發展史上應用最廣的程式語言。Visual 是指開發圖形使用者介面 (GUI, Graphical User Interface) 的方法，它具有類似繪圖程式的圖形物件 (如指令按鈕、文字框、圖形方塊...等)，且這些圖形物件都有預設的使用者介面。程式設計師只需將預設物件拖曳到某一點即可畫出物件外觀，然後在該物件的介面加入程式碼即可。

Visual Basic 是以 BASIC 程式語言為基礎，發展成數百個敘述、函數、及關鍵字 Windows 應用程式發展工具。Visual Basic 可設計出任何其它 Windows 程式語言所能做到的功能，即使是初學者也可以很輕易建立實用的應用程式。同時 Visual Basic 是一種物件導向的程式語言，物件導向 (Object oriented) 就是把現實世界中的現象，以更接近自然的方式在電腦世界中反映出來，每一個物件都有屬於自己的屬性 (property) 和方法 (Method)。物件與物件間是靠著方法 (Method) 來傳遞物件的訊息 (Message)。程式之程序性 (Procedural) 設計也為主要一點：重視程式流程控制，強調結構化 (Structured-Programming) 以及模

組化 (Modulization) 也為 Visual Basic 程式語言寫作之風格。

目前高階語言像 Visual Basic 6.0，不論是編寫程式、說明文件、編譯程式、執行程式、測試程式、即時觀察變數、除錯等方面，可以在其所提供的整合開發環境 (Integrated Development Environment 簡稱 IDE) 中完成；換句話說，Visual Basic 所提供的這個整合環境，不但融合了解譯及編譯式環境的優點，而且功能更為強大，對於學習及日後開發商用程式都會有相當的幫助。接下來對所使用之 Visual Basic 6.0 設計工具以及介面逐一作說明。

Visual Basic 6.0 設計介面 (如圖 2.13) 主要可分為工具箱、專案總管、程式碼視窗、屬性視窗。「工具箱」為整合開發環境所預設工具，都是 Windows 標準控制項，工具箱中除了最右上角的滑鼠指標外，其餘所放的都是一些常使用之控制項 (Control)。「專案總管」一個完整的 Visual Basic 程式是以專案為單位，而每一個專案下可能包含許多的表單或模組；這些表單或模組都是屬於同一個程式、但分散於不同的檔案，所以必須要統籌管理，這就是所謂的專案總管。專案總管理以樹狀結構來表示模組間的關係，當然，在編輯程式時，如果必須切換表單或模組，也可以直接點選樹狀結構的圖示來切換。「程式碼視窗」程式碼視窗是用來顯示與編寫程式的區域。「屬性視窗」屬性視窗通常會出現在螢幕的右方。當表單上任意選取了一個物件 (包括表單本身)，屬性視窗會立即將該物件的屬性欄、以及目前各屬性欄的屬性值 (預設值) 顯示出來，物件的屬性除由屬性視窗來設定外，也可以透過程式來修改。

而當我們在設計程式時可經由以下的步驟來對所需之程式要求做設計：

1. 建立介面：依照需求，規劃程式的畫面所需的各種元件，建立表單 (主視窗)、及其他必要的使用介面。
2. 設定屬性：設定各物件的屬性，以符合何前面的規劃。
3. 撰寫程式碼：判別應用軟體發生的事件，撰寫事件處理程序的程式碼，及所需處理的資料的程式碼。
4. 測試程式：測試程式功能，必要時重複一至四的動作，直到滿意、正確為止。

2.7.2 Visual Basic 語言應用於工程應用上之技術

Visual Basic 是一套功能強大的軟體工具，是專門用來設計 Windows 應用程式的熱門軟體，它承襲了 BASIC 語言易學用的特性，同時具備物件導向的程式設計、視覺化的程式設計環境、豐富暢通的應用軟體系統支援等優點。因此，國內有許多專家學者，將程式所賦予的高度便利性應用於土木工程上，以下就簡單的以現行 Visual Basic 工程應用之近況做一回顧。

陳威甫(2001)為了能讓是用者能簡易的使用設計程式，應用 Visual Basic 語言整合數值程式，研發出一套視窗化滯洪尺寸設計模組。

林子軒(2003)使用 Visual Basic 程式語言開發並利用多媒體技術補強相關知識建立一視覺化之多媒體輔助說明，可用來輔助工程師或決策者參考目前問題的情境與特徵來增加其類比推理能力。並建立一個知識管理與支援決策輔助系統。

黃毓棋(2004)研究利用微軟公司所發展出 Visual Basic.NET 語言，使用簡易 Bishop 及改良 Bishop 法發展一套視窗化邊坡穩定分析軟體，進行邊坡穩定之參數影響分析。

劉立泰(2004)針對微震自動化監測系統進行研究與開發，並使用 Visual Basic 6.0 建立一套監測系統的使用者平台。

陳聖彥(2004)以 Microsoft Visual Basic 6 程式語言編寫，以迴歸分析方式，並採用外顯式收斂圍束法之反算分析，開發視窗化程式在隧道工程之應用。

王銘鋒(2005)採用外顯式收斂圍束法的反算分析模式，以 Microsoft Visual Basic 6 程式語言改寫視窗程式，並輔以模組化方式連結各運算及繪圖等系統，撰寫隧道分析視窗軟體，並分析實際相關案例用以佐證應用程式之分析。

2.8 資料庫系統

資料庫(database)是相關資料的集合。傳統上係將所需之資料記載在紙上，然而當資料數據一但龐大，很容易出現錯誤。二十世紀的資訊時代，資料庫已成為人類存放各類資料的寶庫，將以往放往「紙上」的資料，轉換成存放在電子媒體的資料。在程式回饋分析當中，經由隧道計策資料匯入程式反算分析求得所需之參數動作，必須讀入大筆資料，因此利用資料庫系統來儲存資料並且管理，為

增加軟體使用之便利性以及易維護性。而資料庫之優點以及特點如下:

- (1) 整齊化一性 (Uniformity): 大量結構相同的資料項目, 有相同的大小, 並且在儲存時整齊不易出錯。
- (2) 資料錄導向 (Record orientation): 基本的資料項由固定長度記錄 (fixed length record) 組成, 即使資料龐大資料庫本身檔案也不會過大。
- (3) 基元欄位 (Atomic fields): 在一個紀錄的欄位內都很短, 而且長度固定。同時, 在欄位內沒有結構 (structure) 性組成。
- (4) 靜態概觀架構 (Static conceptual schema): 資料庫的綱要 (schema) 並不會改變, 即使變動, 其改變的類別也很簡單。簡單來說, 所儲存的資料位置固定, 尋找及變更容易。

現今市面上之資料庫有很多種, 大至 SAP、MS SQL 亦或小型如 SOHO 的應用、Access 等, 每一種皆有其特性以及使用上之優點。在本研究中, 所研發之程式不需伺服器, 可歸類為小專案型軟體, 因此選擇 Access 2000 作為資料庫應用之軟體, 且目前為微軟之 office 作業軟體使用者廣泛, Access 2000 也較普遍, 也為直接輸入介面、容易維護、儲存容量小之優點。Access 2000 資料庫軟體包含資料表、查詢、表單、報表、巨集及模組等。資料表是 Access 2000 資料庫中實際進行使用者資料儲存的地方, 也是資料庫其他延伸物件的資料來源基礎, 而在使用上資料表的建立除了利用資料表精靈外, 使用者也可以在軟體所提供之設計檢視工具中個別輸入資料, (如圖 2.14 所示)。

資料庫在本軟體研發中所佔的角色為提供資料進行放置, (如圖 2.15 所示), 在可視化收斂圍束法在隧道工程之應用、隧道斷面收方過程中, 由計測所獲得原始資料計可經由介面進行匯入後, 經視窗程式運算儲存工程基本資料以及計算成果資料。

表 2.1 Bieniawski (1989) 地質力學分類法評分標準

A. 分類項目與評分

	岩石材料強度	點荷重指數	>10MPa	4~10MPa	2~4MPa	1~2MPa	以單壓強度為準 MPa		
		單壓強度 MPa	>250	100~20	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
		評 分	+15	+12	+7	+4	+2	+1	0
2		RQD	90~100	75~90	50~75	25~50	<25		
		評 分	+20	+17	+13	+8	+3		
3		弱面間距	>2m	0.6~2m	200~600mm	60~200mm	<60mm		
		評 分	+20	+15	+10	+8	+5		
4		弱面狀況	表面非常粗糙 不連續，岩面 未風化	表面略粗糙 內寬<1mm 岩面略風化	表面略粗糙 內寬<1mm 岩面高度風化	連續，擦痕或 泥<5mm 或 內寬1~5mm	連續，軟泥>5mm 或內寬>5mm		
		評 分	+30	+25	+20	+10	0		
5	地下水 情況	流量/10m 隧道	0	<10 l/min	10~25 l/min	25~125 l/min	>125 l/min		
		弱面水壓 σ_1	0	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		一般滲水情況	全乾	潮	濕	滴水	流水		
		評 分	+15	+10	+7	+4	0		
6		弱面位態 (走向、傾角)	很有利	有利	可	不利	很不利		
	評 分	隧道	0	-2	-5	-10	-12		
		基礎	0	-2	-7	-15	-25		
		岩坡	0	-5	-25	-50	-60		

B. 節理走向和隧道開挖面走向之影響

弱面走向與隧道軸垂直	弱面走向與隧道軸 平行	任何弱面走向
------------	----------------	--------

開挖方向與傾斜方向相同		開挖方向與傾斜方向相反				
Dip45-90	Dip45-90	Dip45-90	Dip45-90	Dip45-90	Dip20-45	Dip0-20
很有利	有利	普通	不利	很不利	可	可

C. 所有岩體評分決定之岩體品質

評分(RMR)	100~81	80~61	60~41	40~21	<21
岩體分類	I	II	III	IV	V
描述	非常好之岩體	好的岩體	中等岩體	劣質岩體	非常劣質岩體

表 2.2 RMR 與岩體凝聚力及摩擦角之關係 (Bieniawski, 1989)

等級	1	2	3	4	5
RMR 評分	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
岩體凝聚力 C(kPa)	>400 kPa	300-400 kPa	200-300 kPa	100-200 kPa	<100 kPa
岩體摩擦角 ψ (度)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

表 2.3 隧道開挖及支保方法之關係 (Bieniawski, 1989)

岩體分類	開挖方法	岩栓 20mm ψ 全面膠結	噴凝土	鋼支保
1: 甚佳 RMR81-100	全斷面 開挖一次推 進 3m			
2: 佳 RMR61-80	全斷面 1.0-1.5m 支保 不遠於前壁 20m	頂拱局部岩栓長 3m 間距 2.5m	頂拱 50mm	0
3: 中等 RMR41-60	上部先挖 1.5-3m 每 一循環皆須支保支保 不遠於前壁 10m	頂拱側壁皆須有系統 岩栓長 3m 間距 1.5-2m	頂拱 50-100mm 側壁 30mm	0
4: 劣 RMR21-40	上部先挖 1.5-3m 支保 與開挖並進支保不遠 於前壁 10m	頂拱側壁皆須有網及 有系統岩栓 長 4.5m 間距 1.5-2m	頂拱 100-150mm 側壁 100mm	輕鋼保 1.5m

5:甚劣 RMR<20	多導坑上部先挖 0.5-1.5m 支保與開挖 並進開挖後立即噴漿 保漿	頂拱側壁皆須網及有 系統 岩栓長 5-6m 間 距 1-1.5m 仰拱須岩栓	頂拱 150-200mm 側 壁 150m 前壁 50mm	中至重形距 離 0.75m
----------------	--	--	---	------------------

表 2.4 (A) NGI 之 Q 值描述及評分標準 (Barton 等人, 1974)

1.岩心品質指標		RQD
A	惡劣	0-25
B	劣	25-50
C	普通	50-75
D	良	75-90
E	優良	90-100

(1) 當 RQD ≤ 10 時 (包括 0), 於計算 Q 值採用 10

2.節理組評分		J_n
A	厚岩層	0.5-1.0
B	一組節理	2
C	一組節理加偶現節理	3
D	兩組節理	4
E	兩組節理加偶現節理	6
F	三組節理	9
G	三組節理加偶現節理	12
H	四組節理以上	15
I	粉碎如土壤般的岩石	20

註：(1) 在交叉段採用 $3 \times J_n$
(2) 在洞口採用 $2 \times J_n$

3.節理粗糙度評分		J_r
G	具擦痕平面狀	0.5
(c)	剪動時, 兩壁不會接觸	
(a)	節理面保持接觸	
H	含黏土, 其厚度足以使兩壁不致 剪動若不過 10cm 則兩壁保持接觸	1
(b)	發生接觸	
A	不連續節理	4
I	不含砂礫石值或破碎帶, 其厚度	1
B	粗糙或不規則, 波浪狀	3
C	光滑, 波浪狀	2
D	具擦痕波浪狀	1.5
E	粗糙或不規則平面狀	1.5
F	光滑平面狀	1

4.節理面蝕變評分		J_a	ϕ_r
(a) 節理面兩壁接合			
A	緊密閉合堅硬，夾心不軟化與不透水	0.75	-
B	兩壁面未蝕變僅表面鏽染	1	25-35
C	兩壁面輕輕蝕變，壁面外層為不軟化，礦物砂質顆粒，不含年土之崩解岩石	2	25-30
D	壁面外層為粉質或砂質黏土，含少量黏土	3	20-25
E	壁面外層為軟化或低摩擦力黏土礦物	4	8-16
(b) 剪動若不超過 10cm 則兩壁保持接觸			
F	砂質顆粒不含年土之崩解岩石	4	25-30
G	高度過壓密不軟化土礦物夾心（連續，但厚之黏度 <5mm）	6	16-24
H	中度或低過壓密軟化之黏土夾心（連續，但厚度 <5mm）	8	12-16
I	膨脹性黏土夾心（連續，但厚度 <5mm） J_a 值視膨脹性黏土含量百分比及與水接近之情況而定	8-12	6-12
(c) 剪動時兩壁岩石不會接觸			
J	夾崩解或粉碎岩石與黏土	6-12	6-24
K	夾粉質砂質黏土，少量黏土成分	5	-
L	夾厚且連續之黏土	13-20	6-24

5.節理滲水折減因子		概估水壓	J_w
A	開挖面乾裸或少量滲水	<1.0	1.0
B	中度滲水或水壓	1-2.5	0.66
C	堅固岩盤之無夾心節理大量滲水或有高水壓	2.5-10	0.5
D	大量滲水或高水壓，大量節理夾心被洗出	2.5-10	0.33
E	開炸時冒出極大量滲水或極高水壓，但逐漸減小	>10	0.2-0.1
F	極大量湧水或極高水壓，持續無明顯減小	>10	0.1-0.05
註：(1) C 至 F 項係概估，如有排水設施，可略為提高 (2) 不考慮結冰所引起的特別問題			

(b) 優良岩石，岩盤有應力問題		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
H	低應力，近地表，開口節理	>200	<0.01	2.5
I	中等應力，有利的應力情況	200-10	0.01-0.3	1
J	高應力，極緊密結構，通常對穩定有利，可能對側壁不利	10-5	0.3-0.4	0.5-2
K	厚層岩盤在一小時後發生中等應力破裂	5-3	0.5-0.6	5-50
L	厚層岩盤在數分鐘後發生應力破壞或岩爆	3-2	0.65-1	0.65-1
M	厚層岩盤強烈岩爆與中等動態變形	<2	>1	>1

(1) 若現地應力經量測具高度異向性，當 $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ 時，將 σ_c 折減為 $0.75\sigma_c$ ，當 $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ，將 σ_c 折減為 $0.5\sigma_c$ 。 σ_c = 單軸抗壓強度， σ_1 、 σ_3 分別為最大與最小主應力， σ_θ = 依據彈性理論估計之最大切向應力

(2) 由於僅有少數頂拱 (Crown) 深度小於跨距寬度之案例，在此種情況下建議 SRF 由 2.5 增加至 5 (第 H 項)

(c) 擠壓性岩盤: 軟弱岩盤在高岩壓影響發生塑性流動		σ_n/σ_c	SRF
N	中等擠壓性岩壓	1.5	5-10
O	高等擠壓性岩壓	>5	10-20

註: (4) 深度 $H > 350Q^{1/3}$ 時岩盤可能發生擠壓，岩體抗壓強度可以下式估算: $q = 7\gamma Q^{1/3}$ (MPa)，其中 γ = 岩盤密度 (gm/cc)

(d) 膨脹性岩盤: 因水存在引起化學性膨脹作用		SRF
N	中等膨脹岩壓	5-10
O	高度膨脹岩壓	10-15

(b) 不同安全等級之 ESR 建議值

開挖種類	ESR
A 臨時性採礦開挖	2-5
B 永久性採礦，水力發電之引水隧道 (不含高壓力隧道)、探查隧道、大型開挖之導坑與上半斷面、解湧室 (Surge chamber)	1.6-2.0
C 地下、水處理廠、次要公路及鐵路隧道、橫坑	1.2-1.3
D 發電廠、主要公路及鐵路隧道、防空洞、洞口、交叉段	0.9-1.1
E 地下核能電廠、鐵路車站、運動場及公共設施、工廠、主要瓦斯管線隧道	0.5-0.8

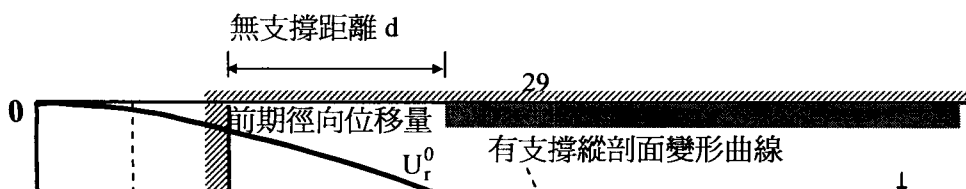


圖 2.1 隧道開挖岩體收斂與支撐圍束間之互制示意圖（李煜舫，2002）

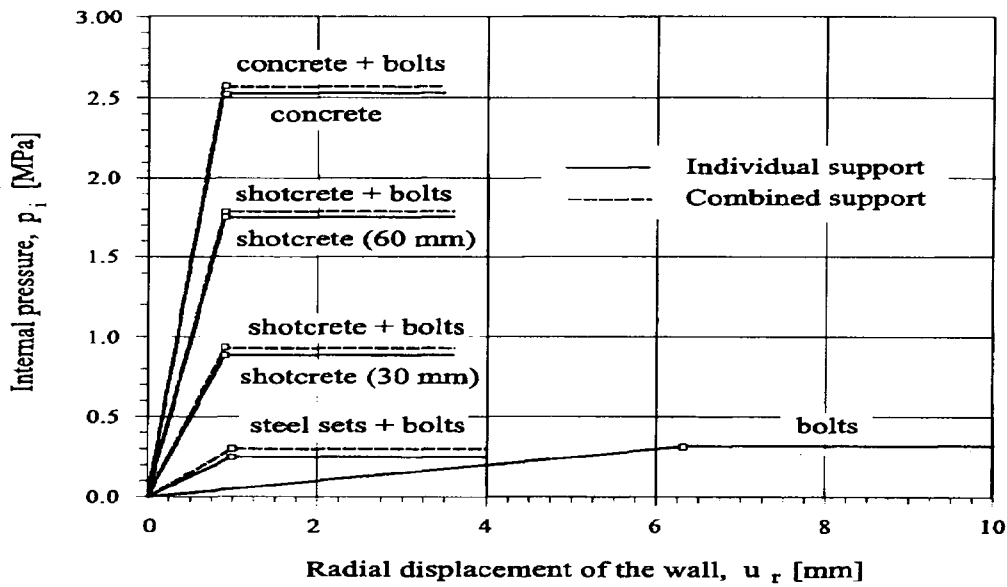


圖 2.2 不同支撐構件所提供的支撐壓力與位移關係圖
(Carranza-Torres and Fairhurst, 2000)

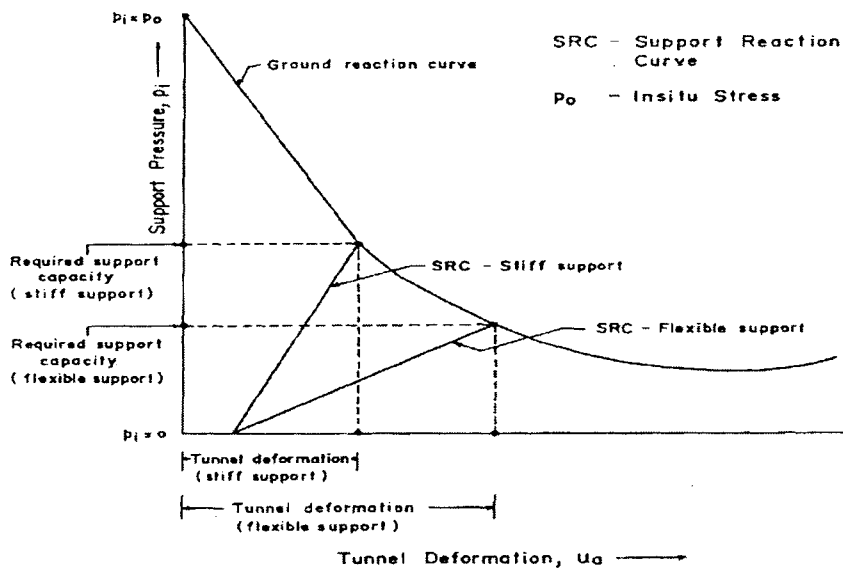


Figure 1. Effect of support stiffness on tunnel deformation and required support capacity.

圖 2.3 支撐勁度與支撐應力、位移之關係圖
(Verma and Singh 等人, 1995)

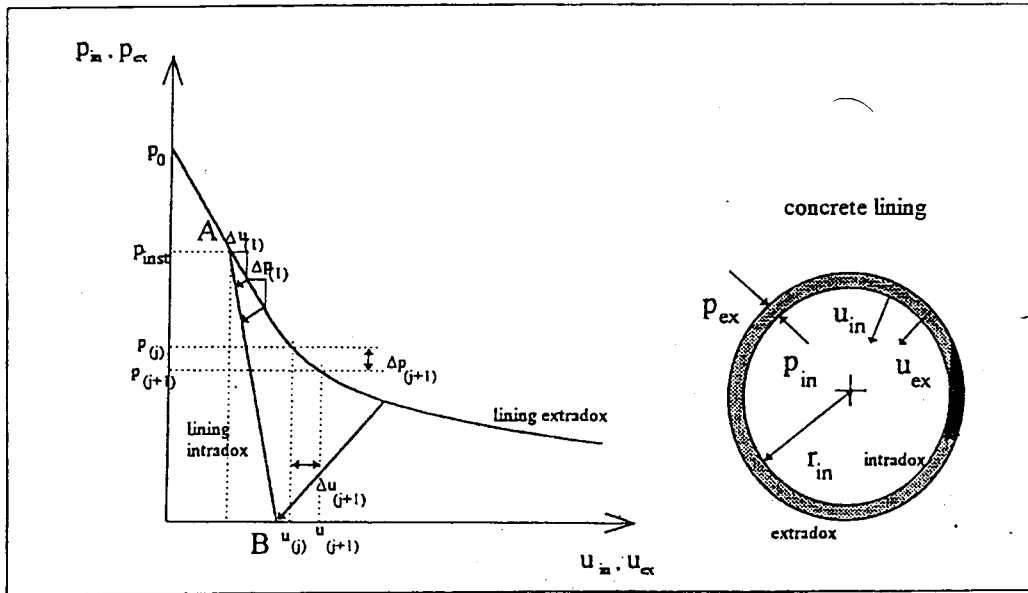


Figure 1. Supported and unsupported convergence-confinement curves. Key: p_0 : undisturbed lithostatic pressure in the rock mass.

圖 2.4 模擬隧道所支撐混凝土之支撐互制曲線
(Sonmez and Ulusay, 1999)

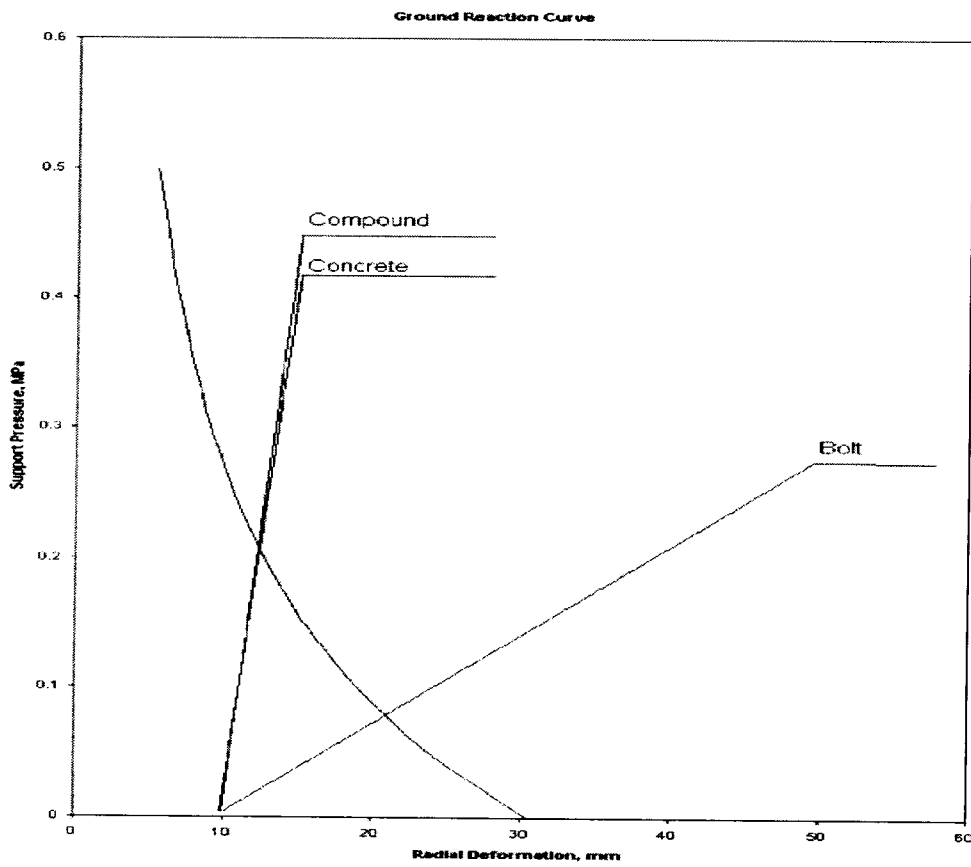


圖 2.5 地盤反應曲線與不同支撐系統之關係圖
(Ozsan and Basarir, 2002)

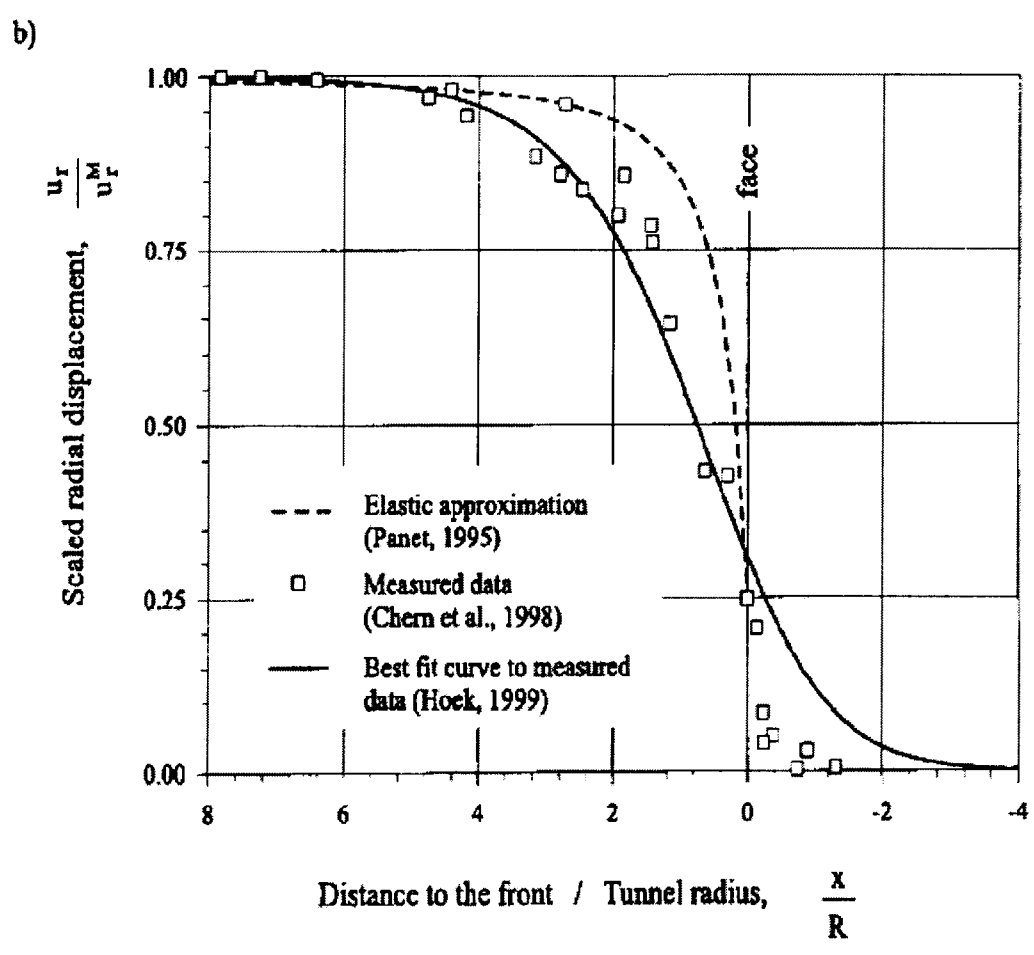
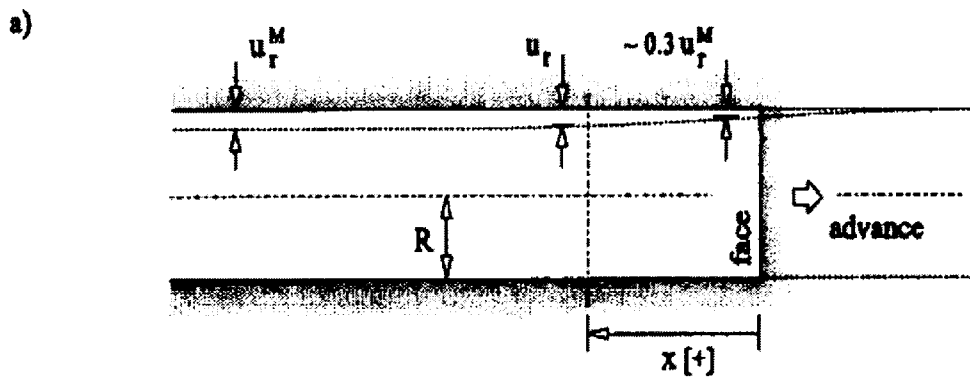


圖 2.6 隧道開挖前進之縱剖面變形曲線
(Carranza-Torres and Fairhurst, 2000)

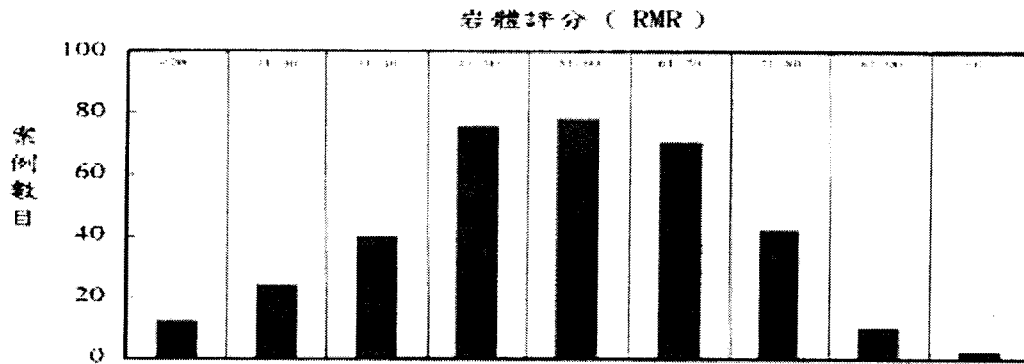


圖 2.7 各案例隧道 RMR 之分佈 (Bieniawski, 1973)

ROCK MASS CHARACTERISTICS FOR STRENGTH ESTIMATES		SURFACE CONDITIONS				
<p>Based upon the appearance of the rock, choose the category that you think gives the best description of the 'average' undisturbed in situ conditions. Note that exposed rock faces that have been created by blasting may give a misleading impression of the quality of the underlying rock. Some adjustment for blast damage may be necessary and examination of diamond drill core or of faces created by pre-split or smooth blasting may be helpful in making these adjustments. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration.</p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY ▼				
STRUCTURE	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ▼	B/VG	B/G	B/F	B/P	B/VP
<p>BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets</p>		VB/VG	VB/G	VB/F	VB/P	VB/VP
<p>BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>		BD/VG	BD/G	BD/F	BD/P	BD/VP
<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces</p>		D/VG	D/G	D/F	D/P	D/VP

圖 2.8 岩體節理及特性描述 (Hoek and Brown, 1997)

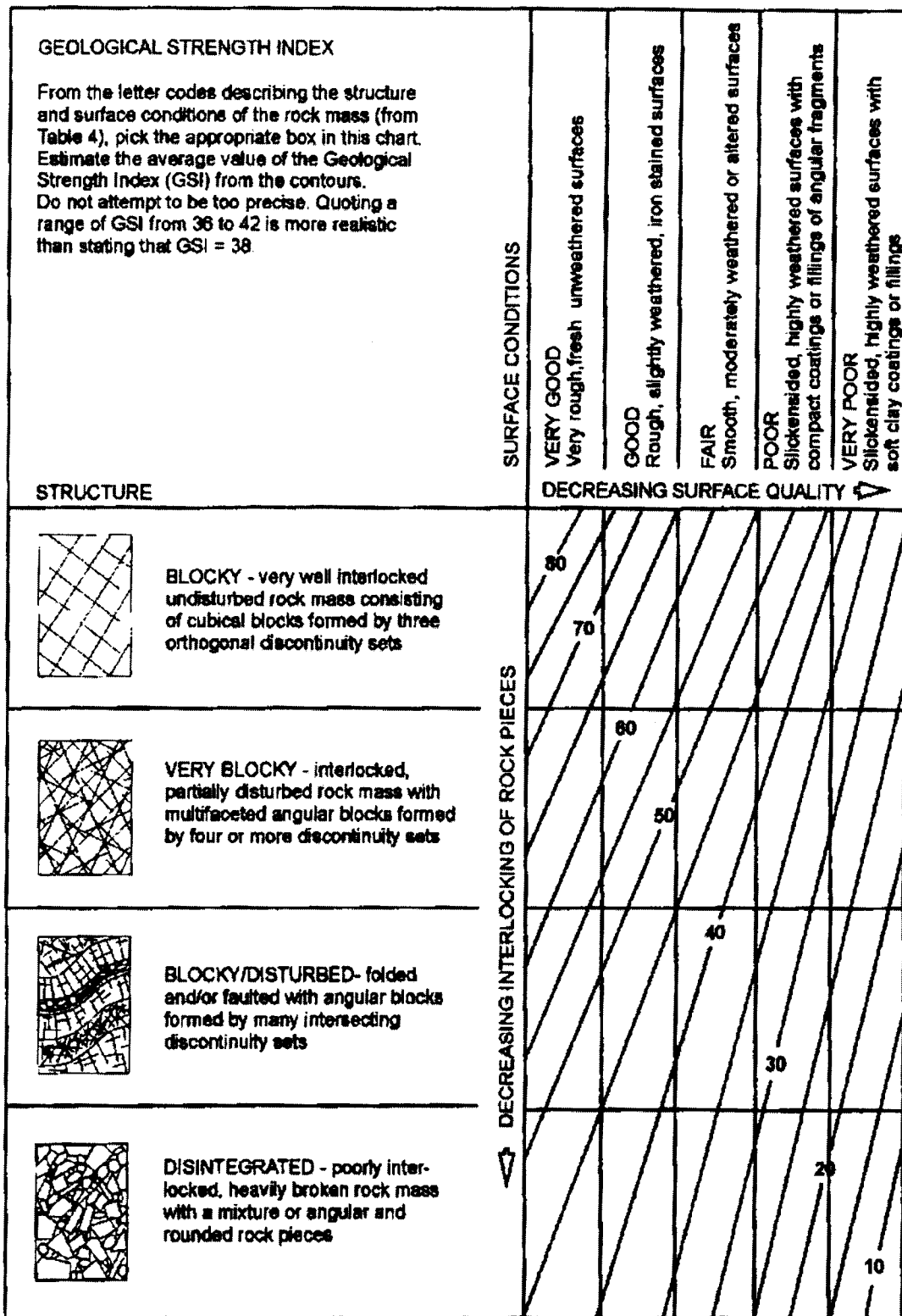


圖 2.9 GSI 評分描述 (Hoek and Brown, 1997)

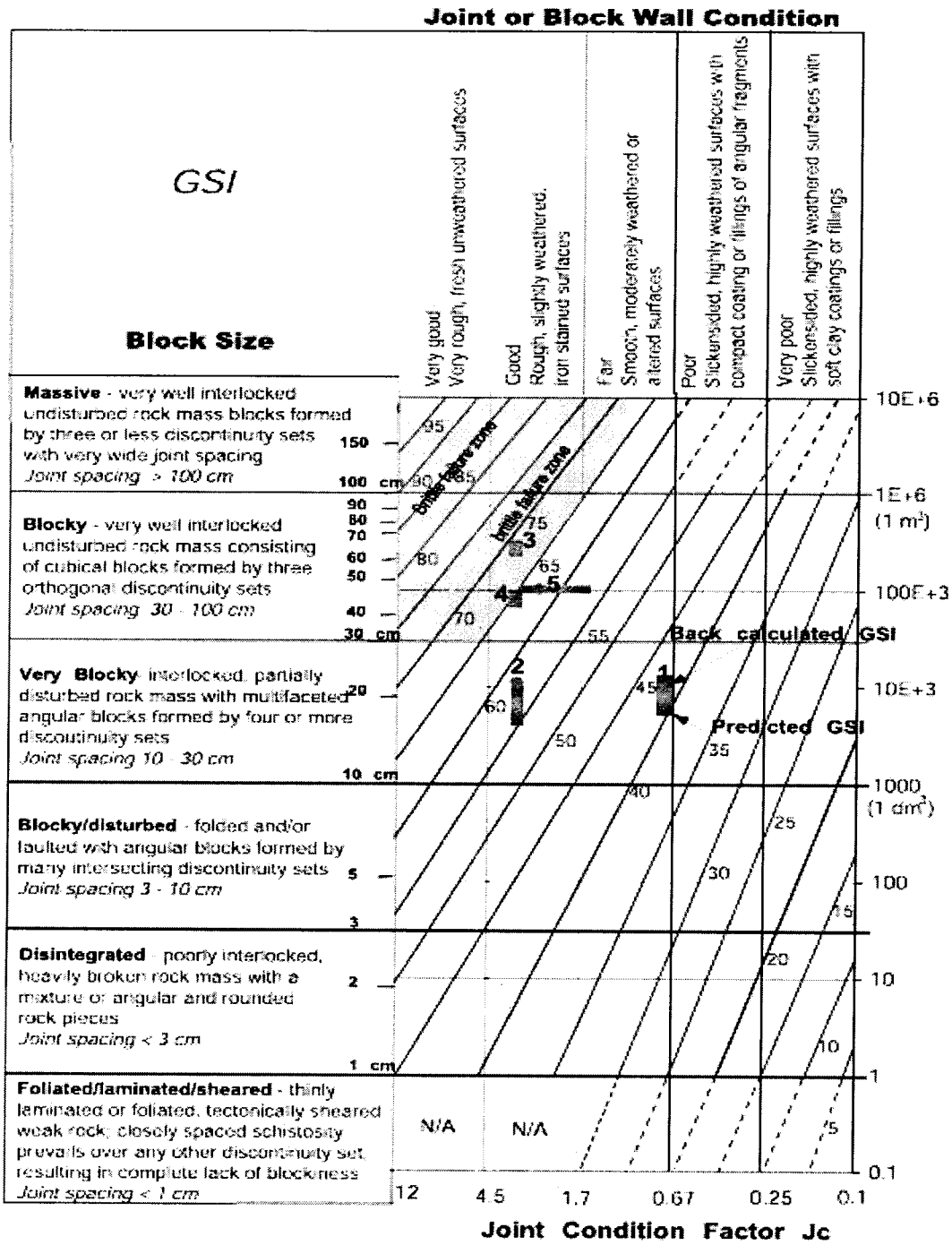
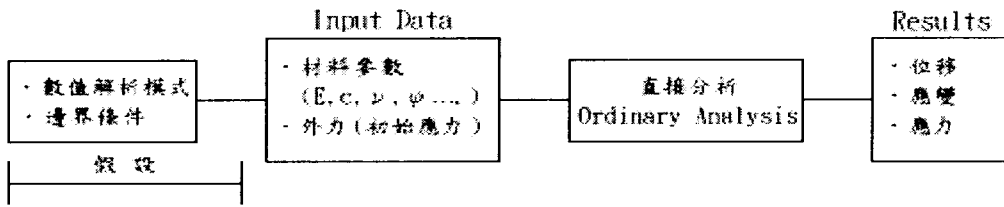
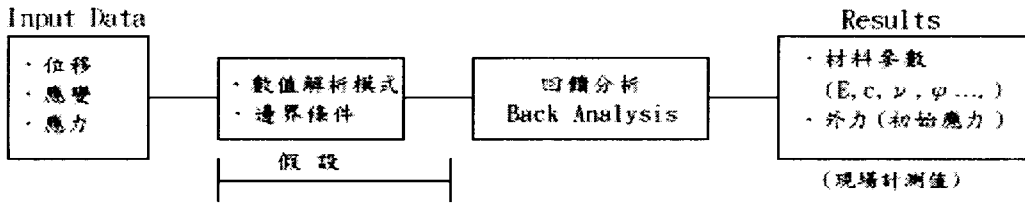


Fig. 7. Quantification of GSI chart.

圖 2.10 GSI 補充之量化評分方式
(Cai and Kaiser, 2004)



(a) Ordinary Analysis



(b) Back Analysis

圖 2.11 逆分析法與直接分析法之演算過程差異

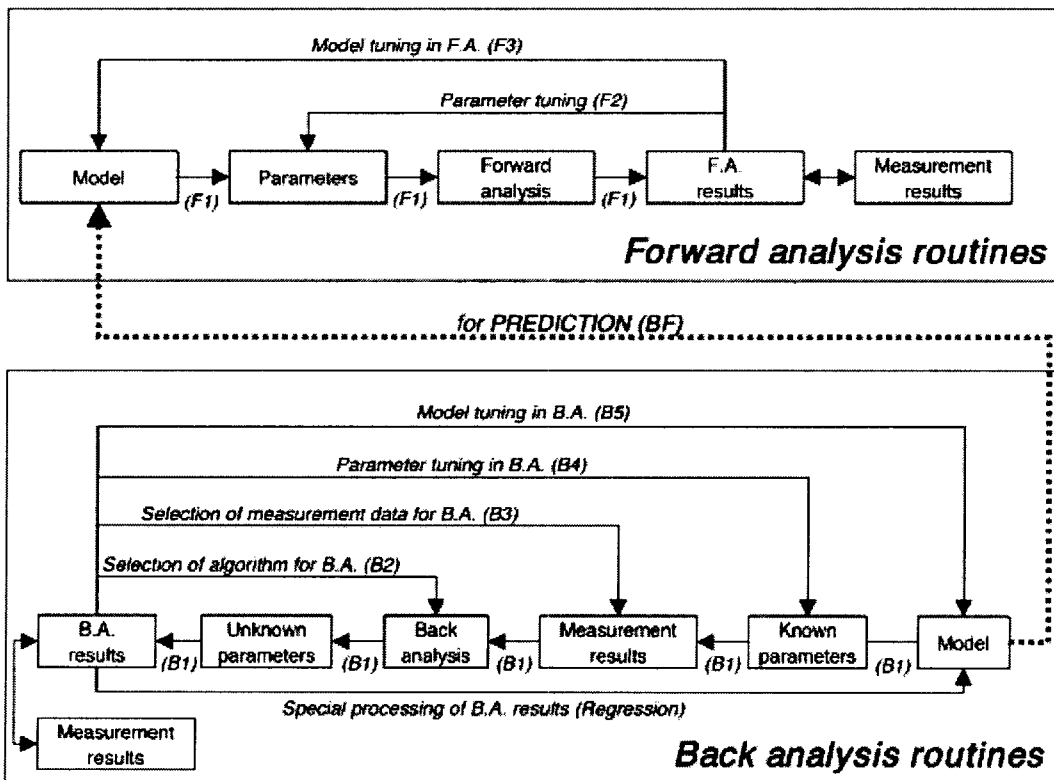


圖 2.12 反算分析法之分析步驟(Sakurai 等人, 2003)

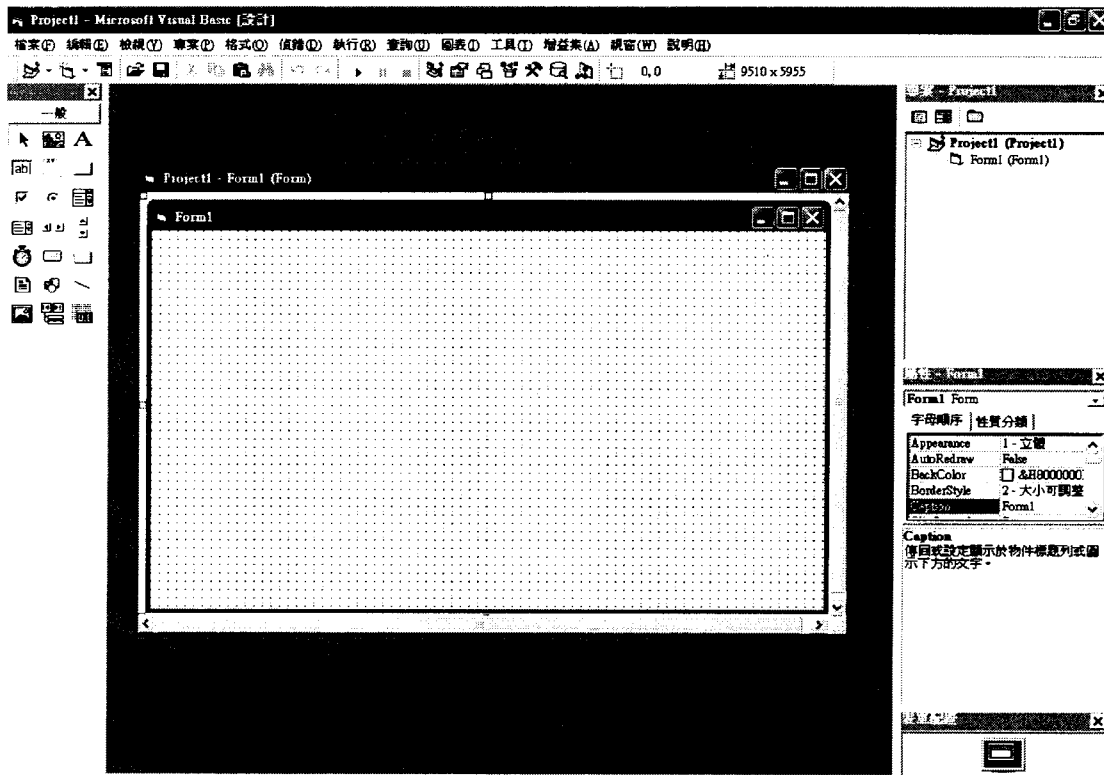


圖 2.13 Microsoft Visual Basic 6.0 視窗程式設計介面

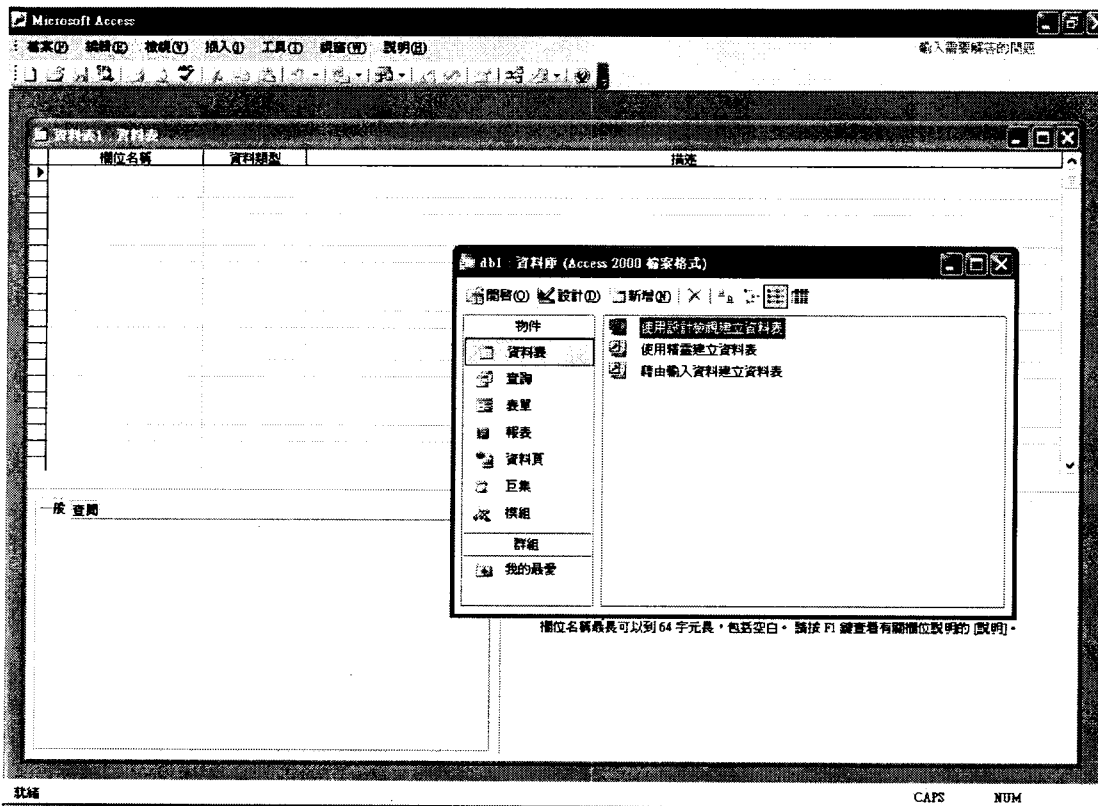


圖 2.14 Microsoft Access 2000 資料庫系統

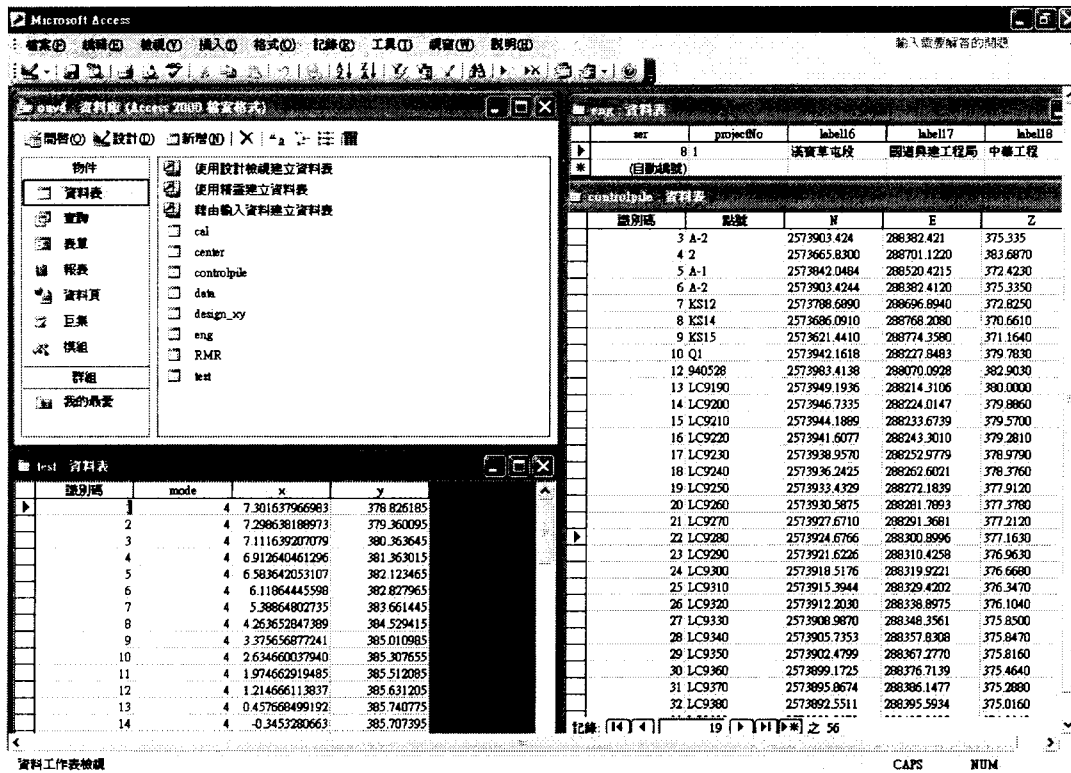


圖 2.15 本研究視窗程式內 Access 2000 資料之儲存

第三章 視窗程式之設計撰寫與介面整合

3.1 前言

本章節對本視窗程式，依據陳聖彥（2004）所發展之視窗化程式、王銘鋒（2005）將程式模組化之程式內容，就各模組視窗進行修改與增加，以便貼近使用者介面，以下章節將針對視窗程式架構進行介紹：

3.1 程式撰寫與設計內容

發展一套應用軟體需考慮其相容性、完整性和使用性，並且在專業介面、與外觀等都必須具備。可視化收斂圍束法在隧道工程之應用程式乃由陳聖彥(2004)研發、王銘鋒(2005)將程式模組化，並將大而長的程式分割成許多程序，經組合多個程序而形成完整的程式。針對所謂模組化視窗程式，可較為輕易的依據各個模組內之內容進行使用上之需求增加。首先，必須了解需求為何，不足之處需要加入哪些應用元件、參數討論等。並先行了解其適用條件、程式限制等等，並且包含除錯等應用上之重要考慮部分。在本研究與應用上更加入了李文元(2006)發展之可視化隧道斷面收方程式，以期達到發展一套可適用在隧道工程之多功能應用軟體。

本研究補增之視窗程式為了達分析計算之要求，除了結合使用工具、分析方法及相關輔助方法外，更必須符合使用者的基本需求。本章節對所增加之各章節做逐一說明，包含（1）主要視窗程式介面撰寫、（2）工程資訊系統、（3）岩體分類系統撰寫、（4）隧道收斂資料處理系統撰寫、（5）參數計算系統撰寫、（6）資訊繪圖系統撰寫、（7）支撐建議系統撰寫（8）說明系統撰寫等。以下針對各模組視窗撰寫方式進行介紹。

3.1.1 主要視窗程式介面撰寫

主要視窗為一程式之主要開頭界面，此介面包含所有程式之內容、並且連結能使使用者輕易的了解整個程式之架構，方便使用。本程式加入了李文元(2006)發展之可視化隧道斷面收方程式，因此在主要連結兩個應用程式部份加入主要連結頁面（如圖 3.1 所示）。此可視化外顯式收斂圍束法之應用與斷面收方程式連結頁面包含了可點選之兩大按鈕，經由點選兩按鈕可以進入各別需要應用之視窗程式。

關於可視化外顯式收斂圍束法主要視窗（如圖 3.2 所示），在軟體中之主要功能為標示出工程之基本資料，其內容主要可區分為三部分，第一部份為上方之主功能選項，包含檔案管理視窗、工程基本資料輸入視窗、岩體分類視窗、資料匯入視窗、參數計算視窗、資訊繪圖視窗、支撐建議視窗和說明視窗。使用者可經由點選進入各個視窗使用，也可經由順序依步使用。

第二部份為工程基本資料紀錄區，其內容包含工程名稱、業主（工程之甲方）、設計單位、工程地點（工程之施工地點範圍）、工程時間（整體工程從開工至完工所預估需花費之時間）、監造單位之顯示。

第三部份為施工資訊紀錄區，其內容包含此工程所挖掘之斷面形式（指工程所用斷面形狀，如為馬蹄形斷面、圓形斷面、橢圓形斷面、半圓形斷面、多心圓斷面或其他斷面）、開挖工法（指工程所使用之施工方式，如全斷面工法、上半段面先進工法、上半環狀開挖工法、底設導坑先進上半段面開挖工法或其他工法）、隧道半徑、岩層種類及無支撐距離（輪進長度）。此部份所顯示之資料由使用者於工程資訊系統視窗輸入後顯示。

3.1.2 工程資訊系統視窗程式之撰寫

工程資訊系統為鍵入工程資本資料之用（如圖 3.3 所示），包含了顯示於主頁面之工程相關資料，將其概分為基本資料及施工資訊兩部份。資本資料包含工程名稱、施工地點、業主、設計單位、監造單位、工程時間、人員名稱、職稱、工程範圍等輸入內容。施工資訊部分包含隧道半徑、無支撐距離、岩層種類（單位重）、斷面形式、覆土高度、開挖工法、襯砌厚度。使用者依據工程資料以及施工之工程內容輸入，待完成後點選下一步以完成使資料鍵入之步驟。

3.1.3 岩體分類系統視窗程式之撰寫

岩體分類系統資訊視窗（如圖 3.4 所示）在軟體上主要功能為由現地試驗及探測所得到之相關參數值，藉由各種岩體分類系統選擇提供現地工程師開挖及現地岩體之基本岩體資訊。台灣一般常用國外所研發之岩體分類法，但因地質條件與地層構造的不同，在應用上難免有所出入。因此在岩體分類系統部分加入了 3 種岩體評分，除了一般常用之 RMR 岩體分類系統（1989），另加入了 Barton、

Lien 及 Lunde 等人 (1999) 提出的 Q 法岩體分類系統、Hoek 等人 (1997) 提出之 GSI 岩體分類系統、行政院公共工程委員會 (2000) 提出之 PCCR 台灣岩體分類法。本視窗內容依 4 種岩體分類系統分成 4 個頁面。

第一部份為台灣岩體分類法屬於定性評分 (如圖 3.4A)，依照點選該工程區之岩體特性，其工程特性主要分為變質岩類、沉積岩類、強度較弱之地質材料 (如土層)、包含礫石層等之細粒地質材料，點選後立即顯示該工程地區之岩類、蓋略分佈範圍、以及重要之工程特性。使用者可立即了解該工程區之岩體特性以及工程特性，即時對該區做地盤之初步了解。

第二部份為 RMR 岩體分類系統 (如圖 3.4B)，其對岩體評分主要分為 6 大項，包含岩石單壓強度、岩石品質指標 (RQD)、節理距離、節理情況、地下水狀況、節理方位。依照對工程區之地質描述，使用滑鼠點選後立即評分，評分後左下方即時顯示該地區岩體之等級、凝聚力、摩擦角等工程參數，在右下方部份也顯示 RMR 系統建議之支撐設計，其提供之內容包含岩體分類等級、開挖方法、一次開挖距離、支保架設距離、岩栓佈設方式、岩栓佈設深度、噴漿厚度及鋼支保佈設方式。

第三部份為地質強度指數 (GSI) 評分系統 (如圖 3.4C)，GSI 評估因素包括構造 (structure) 與節理表面情況 (surface condition) 兩項，經由工程師判斷該區之兩項地質因子，直接點選圖示之該評分區及立即得到評分值。右方係經由評分之 GSI 值與岩體之相關參數 (如完整岩石單壓強度、隧道半徑等) 可計算該區之岩體凝聚力、摩擦角以及變形模數。由於 GSI 岩體評分系統較屬經驗應用，因此使用上較無經驗之工程師可由其他岩體評分系統輔以使用。

第四部份為 Barton 等人提出之 Q 值岩體分類系統 (如圖 3.4D)，評分項目包括六項，岩心品質指標、節理組數評分、節理粗糙度評分、節理面蝕變評分、節理滲水折減因子和應力折減因子，經由點選後即時給予評分。視窗下方顯示岩體分類等級，以及變形模數。現地工程師可根據以上岩體分類資訊並實際參與之施工經驗於此幾種岩體評分中提供現地開挖與支撐建議方法。

3.1.4 隧道收斂資料處理系統視窗程式之撰寫

在計測資料處理區中 (如圖 3.5 所示)，為方便使用者輸入資料，資料處理

方面可採外部匯入方式，即是由外部匯入 Excel 程式之.csv 檔點選匯入資料後，選擇已建檔之現地計測資料，為軟體之主要資料讀入區。資料一經程式讀入，下方區讀入之資料將顯示於計測資料顯示區中，其提供輸入之資料方式有筆數、日期、上半、台階及仰拱開挖面距離、H1、H2、D1、D2、D3、D4、L1..等等分析所需之計測資訊。

在本視窗之左上方之即時圖形顯示區，一但計測資料匯入，即顯示現地計測資料筆數與位移之關係圖。使用者可監看計測資料是否有人為鍵入錯誤之情形，並可以馬上了解計測資料之變化趨勢，如有疑似錯誤之資料，則可利用刪除按鈕對資料進行修改。同時地可以點選新增之按鈕，對計測資料進行增加之動作。完成後點選參數計算按鈕完成資料讀入之動作，並對計測資料進行迴歸分析與相關之計算。

3.1.5 參數計算系統視窗程式之撰寫

當軟體獲得由使用者所匯入之計測資料後，程式會根據所輸入之相關參數，如隧道半徑、無支撐距離、覆土高、初始應力等與匯入之資料進行回饋分析，所使用之計算公式為外顯法之計算方式分析。回饋分析或將所計算之收斂沉陷釘 m 值顯示在視窗之表格中。當 m 值計算出後，撰寫於程式內部之外顯式收斂圍束法方程式進行計算現地計測之迴歸值。

原程式內建可計算隧道頂拱之 L1 點，現增加上台階 H1 以及 D1、D2 三點，共可分析隧道斷面四個計測點，增加程式之實用性。程式並對各點之現地工程參數進行前期位移量計算，其顯示參數包含現地應力 (σ)、前期收斂比值 (α)、參數分析值 (β)、釋放圍束比值 (λ)、支撐構件之正向總支撐勁度 (Kn)、有支撐隧道平衡狀態下之勁向位移量 (U_S)、岩體彈性模數 (E)、噴凝土支撐應力 (P_S)、最大沉陷量 (U_{Rmax})。(如圖 3.6 所示)。

3.1.6 支撐建議系統視窗程式之撰寫

當程式讀入計測資料後，經由內部分析計算後，根據所計算之數值給予現地之支撐建議 (如圖 3.7)。在支撐建議視窗按下右方計算鈕，程式會顯式計算之安全細數、結構支撐壓力、混凝土最大支撐壓力，並根據安全係數是否符合設計值，

給予是否提高結構支撐勁度之建議。假如安全係數不足，程式內建將安全係數提高至 2，根據安全係數為 2 時計算其建議之結構勁度，並給予提高之噴混凝土襯砌厚度、鋼支保型號之建議值。

下方之塑性區計算為給予岩栓打設之建議與岩體相關參數，經過塑性區計算後岩栓打設長度必須高於塑性區長度，建議將以 3、6、9 公尺給予建議。左方視窗為 RMR 針對各類岩體所給予之支撐建議，供使用者做以比較之用。將建議值顯示完畢後，上方將顯示隧道之簡易支撐圖示。

3.1.7 資訊繪圖系統視窗程式之撰寫

經由參數計算系統計算完成後，在參數計算視窗點選資訊繪圖，即可顯示資訊繪圖系統視窗（如圖 3.8）。資訊繪圖視窗共分為支撐互制曲線、縱剖面變形曲線、距離位移曲線、時間位移曲線。顯示資訊之圖形依比例大小與圖形格式顯示於視窗中。

（一）支撐互制曲線依照所計算之結果進行現地地盤及支撐互制資訊繪圖，其 X 軸為 $\frac{U_R}{U_{Rmax}}$ ，Y 軸為 $\frac{\sigma_R}{\sigma_o}$ ，由於皆為正規化之後，範圍由 0 至 1。

（二）縱剖面變形曲線則是需經過迴歸分析方式取得資訊，在曲線顯示圖中，X 所得之資訊為經過正規化後之距離長度，而 Y 則是在經由程式進行參數分析後，將所分析出之參數帶入分析公式中繼續運算所獲得之資訊。

（三）時間位移曲線所根據之資料為頂拱計測點（L1）所得之收縮量為 Y 軸，每監測次時間為 X 軸，而在獲得上述資訊後進行繪圖。距離位移曲線所根據之資料為（L1）所得之收縮量為 Y 軸，在隧道開挖之距離長度為 X 軸，而在獲得上述資訊後進行繪圖。

3.1.8 說明系統視窗程式之撰寫

說明系統視窗（圖 3.9）即針對本程式做一簡單說明，分別分為程式簡介、程式使用說明、程式流程做介紹。於程式簡介部份對程式做一簡單說明，並對程式安裝所適用之作業系統、硬體配備做介紹，且說明程式所使用之輸出入檔案。

於使用說明部份（圖 3.10）針對主頁面、檔案功能、工程鍵入系統、岩體分

類系統、資料匯入系統、參數計算系統、資訊繪圖系統、支撐建議系統分別做介紹，使用者可按下各個系統按鈕，在右上方為系統簡易圖示，右下方為使用說明。而程式流程圖為顯示本程式作業之流程，方便使用者使用上之了解。

3.1.9 案例測試與分析比較

為了測試程式之使用迴歸分析正確性與計算值，本節使用一假設案例來比較其程式之分析值。迴歸分析部份與 SPSS 統計軟體做一比較，外顯式收斂圍束法計算則以 Microsoft Office Excel 計算做對照。在假設案例之基本材料參數使用表如（表 3.1）所示。

在迴歸分析部份，先行假設外顯式收斂圍束法之迴歸 m 值做為迴歸值比較，分別假設 m 值等於 2、4、8、12、16。再將所假設之 m 值帶入外顯式收斂圍束法公式 (2-10) 即可得到所需之迴歸數值，分別將迴歸參數值帶入 SPSS 統計迴歸軟體與可視化收斂圍束法迴歸計算，兩方法所迴歸出之計算值如（表 3.2）所示。由（表 3.2）可以得知，利用本視窗程式與統計軟體 SPSS 所迴歸出之誤差值約為 1.08%，應屬於容許位差範圍之內。

接下來利用假設 $m=5$ 時之值為程式分析計算與收斂圍束法之計算比較，計算公式為本章之 3.2.2 外顯式收斂圍束法之分析步驟 1 至 10。計算值如（表 3.3）所示。由（表 3.2）、（表 3.3）所顯示之分析計算比較值比看出，可視化收斂圍束法視窗程式所應用之迴歸值、計算值除在迴歸 m 值部份略有誤差，於其他計算值部份並無錯誤。

3.2 隧道斷面收方技術視窗程式與可視化外顯式收斂圍束法之整合

隧道斷面收方技術應用在隧道開挖面量測方面早已發展多年，由許榮達（2004）經過實際案例探討，介紹隧道斷面收方量測之技術。李文元（2006）利用 Visual Basic 程式語言撰寫成一套視窗程式，並藉由實際隧道斷面收方資料測試視窗程式之可行性。並經測試後可使用在實際隧道的斷面收方上。

有鑑於目前應用於隧道方面之軟體程式並不多，因此將隧道量測之斷面收方技術與可視化外顯式收斂圍束法作一整合，期望在兩個隧道相關應用軟體間可以相互輔助。斷面收方視窗程式可對隧道開挖面開挖後即時顯示隧道設計斷面與開挖面量測之情形，工程師可於計測資料匯入斷面收方程式後判斷是否超挖或不

足。而外顯式收斂圍束法可針對隧道整個開挖力學行為做分析計算，而後以圖形資訊顯示開挖互制行為，並且給予支撐建議。而整合的方式係以表單組合模式進行結合，並對資料庫系統整合為一。因此整合此兩個視窗程式期望可發展為一應用於隧道應用之視窗軟體。

3.3 外顯式收斂圍束法視窗程式之演進

可視化外顯式收斂圍束法在隧道工程應用程式從陳聖彥（2004）研發以來，經過王銘鋒（2005）針對使用模組分為六大區，為工程基本資料鍵入視窗、岩體分類系統鍵入視窗、隧道收斂計測資料處理視窗、繪圖視窗、參數計算視窗、支撐建議視窗進行個別撰寫，使其為各個獨立系統自為一模組。再進一步針對各模組間進行增加使用性、介面修改等以及整合等動作，此版本不僅可對隧道上半部計測點進行分析，對於岩體分類部份更有 4 種不同之岩體分類系統可供選擇參考，而後並對繪圖資訊視窗、支撐建議視窗以及說明視窗進行細部修改。在擴充應用性方面，可在主頁面選擇增加了斷面收方視窗程式，增加了使用者對隧道相關軟體的選擇性。此將程式歷屆研究發展之流程圖如（圖 3.11）所示。程式碼撰寫過程詳列於附錄 A-1。

在使用方面，增加了使用手冊，以便利使用者對本軟體應用模式上手之速度，並且說明此軟體之讀入與輸出檔、使用介面等方法，使用手冊詳列於附錄 A-2。

表 3.1 假設案例之使用參數表

假設參數		
K 值=1	隧道半徑 R=5.2(m)	覆土高=50(m)

岩體單位重=20 (KN/m ³)	岩體變形模數 E=300(MPa)	岩體波松比 $\nu=0.25$
無支撐距離 d=1(m)	噴凝土單位重=25 (KN/m ³)	噴凝土彈性模數 E=24000(MPa)
噴凝土波松比 $\nu=0.2$	噴凝土厚度 t=0.2 (m)	

表 3.2 不同方法之迴歸分析比較值

計算 m 值 假設 m 值	SPSS 迴歸比較	視窗程式迴歸	誤差百分比%
m=2	2.00	2.00	0
m=4	4.00	3.96	1
m=8	8.00	7.9	1.25
m=12	12.00	11.9	0.83
m=16	16.00	15.8	1.25

表 3.3 外顯式分析計算值與視窗程式計算值之結果比較

假設使用 m=5 計算	外顯式計算值	視窗程式計算值
m 值	4.979(SPSS)	4.97
β	0.0371	0.0371
α	0.0728	0.0727
λ	0.1404	0.14

支撐勁度 Kn(MPa)	989.7147	989.7147
剪力模數 G(MPa)	75.9	75.9627
彈性模數 E(MPa)	189.975	189.9067
噴凝土最大支撐應力 Ps(MPa)	0.8	0.7922

視窗化外顯式收斂圓束法在隧道工程之應用與斷面收方程式


Chung Hua University
 Department of Civil Engineering
www.cv.chu.edu.tw

[可視化外顯式收斂圓束法在隧道工程之應用](#)
[可視化斷面收方程式](#)

土木與工程資訊研究所 大地組
 指導教授 李煜舫 博士
 製作群：陳聖彥 王銘鋒 劉凱文
 連絡我們：m09304019@chu.edu.tw

圖 3.1 程式之主要連結頁面

可視化收斂圍束法

檔案(F) 工程基本資料鍵入(Z) 岩體分類視窗(M) 資料匯入(I) 參數計算(O) 資訊繪圖(P) 支撐建議(S) 說明(H)

工程基本資料

工程名稱 施工地點 操作人員

業主 施工單位 職稱

監造單位 工程時間

工程範圍 從 公里 公尺 至 公里 公尺

隧道半徑(m) 岩層種類

輪進距離(m) 單位重(MPa/m)

斷面形式 覆土高度(m)

開挖工法 襯砌厚度(m)

狀態 2006/6/8 下午 04:38

圖 3.2 可視化外顯式收斂圍束法之主視窗

工程基本資料鍵入系統

工程基本資料

工程名稱 施工地點 隧道半徑 無支撐距離(m)

業主 設計單位 岩層種類 滑鼠左鍵點選 單位重 (MPa/m)

監造單位 工程時間 斷面形式 滑鼠左鍵點選 覆土高度 m

人員名稱 職稱 開挖工法 滑鼠左鍵點選 襯砌厚度 m

工程範圍 從 公里 公尺 至 公里 公尺

下一步

圖 3.3 工程基本資料鍵入系統

岩體分類系統

台灣岩體分類法 RMR岩體分類法 GSI評分系統 Q法評分系統

台灣岩體分類法

精選特殊工程區之岩體特性

岩體

屬B類者，仍可用RMR定量岩體分類法，但因其岩體破壞模式與A岩類有所差異，故量數部分適當修正。

經修正後之數值

西部高山帶與中上新世至早更新世之板岩已剝離岩層，部份兩岸山巔地質區。

工程特性

B岩類較堅脆，岩質不如A岩類般堅脆，故在地體構造運動大地應力作用下並不容易產生發達節理等弱面，而係多以變形取代脆性破壞。本岩類岩石組成材料會因含水量提高而產生不容忽視之強度降低現象，岩體在乾燥狀況下，主要的破壞機制仍如同A岩類一般沿地質弱面發生構造破壞，但在高含水量狀況下，地質材料會因軟化而會使岩體主要破壞模式轉變為材料破壞。

圖 3.4(A)台灣岩體分類法

岩體分類系統

台灣岩體分類法 RMR岩體分類法 GSI評分系統 Q法評分系統

RMR岩體分類系統

岩石單軸強度(MPa) RQD 節理距離

115 20 1

12 3 15

節理情形 地下水狀況 節理方向

內寬<1mm 岩層間節理堅硬 無 0

25 7 -5

RMR岩體評分系統

岩體單軸力 23至35度 RMR值 57 變形模數E值 14

岩體摩擦角 200至300 岩體等級 III：中等

Q法岩體評分系統

Q法 293 岩體品質 劣

圖 3.4(B)RMR 岩體分類法

岩體分類系統

台灣岩體分類法 RMR岩體分類法 GSI評分系統 Q法評分系統

GSI

	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Blocky - very well interlocked, replacement rock, matrix consisting of coherent blocks formed by three or four sets of discontinuity sets.	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Very Blocky - interlocked, partially disintegrated rock mass with multiple sets of angular blocks formed by four or more discontinuity sets.	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	
Blocky - disintegrated - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets.	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5		
Disintegrated - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces.	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5			

節理距離對應GSI評分值

44-65分

由RMR轉換所得GSI值

GSI值 52

由GSI參數評估岩體之C、φ值

輸入完整岩石單軸強度 (MPa)

完整岩石m值

GSI值

m值

節理半徑 (m)

φ值 C值 E值

OK

圖 3.4(C)GSI 岩體分類法

圖 3.4(D)Q 值岩體分類法

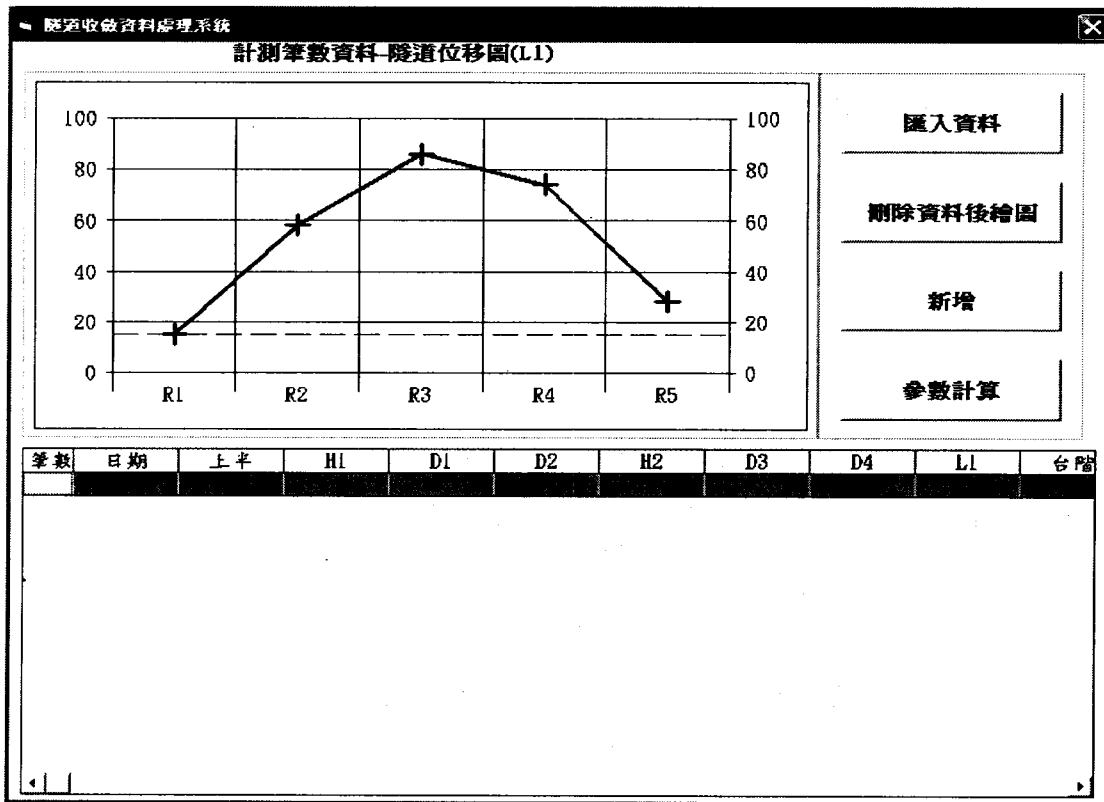


圖 3.5 隧道收斂資料處理系統

參數計算系統(外顯示收斂劇東法)

現地參數計算(已知值)

初始應力 $\sigma(0)$ (Mpa)
 無支撐距離d(m)
 各斷面覆土高H(m)
 隧道襯砌厚(m)
 混凝土單軸壓縮強度 Mpa
 假設噴澆土強度 $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

H1	D1	D2	L1

H1	D1	D2	L1

H1	D1	D2	L1

L1	D1	D2	H1

L1上半開挖最大計測位移量(mm)

預估之岩體剪力模數G(Mpa)

預估之岩體彈性模數E(Mpa)

預估之無支撐最大位移U(mm)

預估前期位移量 $U_r = \alpha \text{ or } U$ (mm)

預估之結構支撐壓力Ps(Mpa)

混凝土最大支撐壓力Psmax(Mpa)

無支撐距離d時L1之位移量 $= \lambda \text{ or } U$ (mm)

支撐結構勁度Ka(Mpa/m)

前期位移量佔上半位移量的百分比(%)

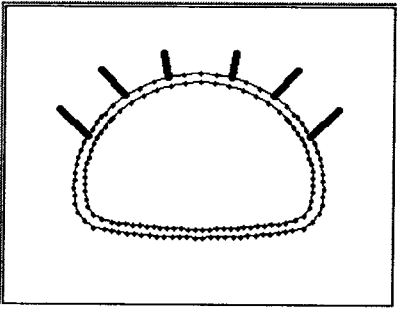
計測裝設時已產生之位移量佔上半最大位移量之百分比(%)

L1
H1
D1
D2

按此參數計算
計算結果匯出
資訊繪圖
支撐建議

圖 3.6 參數計算系統

支撐建議



RMR分類 第五類岩盤

RMR分類 第五類岩盤: 多導坑, 上部先挖0.5-1.5m, 支保與開挖並進, 開挖後立即噴將保護; 天盤側壁皆需鋼及有系統岩栓; 長5-6m, 距1-1.5m仰拱需岩栓; 天盤150-200m, 側壁150mm, 前壁50mm; 中至重型距離0.75m塞緊或插板仰拱閉合受壓岩體且強度低, 內含破碎帶或剪裂帶, 常導致岩體之剪力破壞。常處於中至高之覆蓋深度下, 襯砌受壓及變形延續一段時間後將造成岩體之漸進破壞, 岩壓亦可能由膨脹性黏土礦物造成

隧道半徑R(m) 混凝土最大支撐壓力Psmax(Mpa)
 初始應力 σ_0 結構支撐壓力Ps(Mpa)
 安全係數FS=

參數設定可以接受

建議提高結構勁度為(當FS=2時)

提高安全係數時之建議噴澆土襯砌厚度(m)

<<<建議結果

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值

凝聚力C(Mpa) $\sigma(c)$

摩擦角 ϕ 彈性極限值 λ_e

離隧道開挖面特定距離之情況 $r > r_p$ 隧道開挖面上之情況 $r = r_p$

塑性區半徑rp(m) 塑性區半徑rp(m)

建議打設3m長的岩栓 建議打設3m長的岩栓

圖 3.7 支撐建議系統

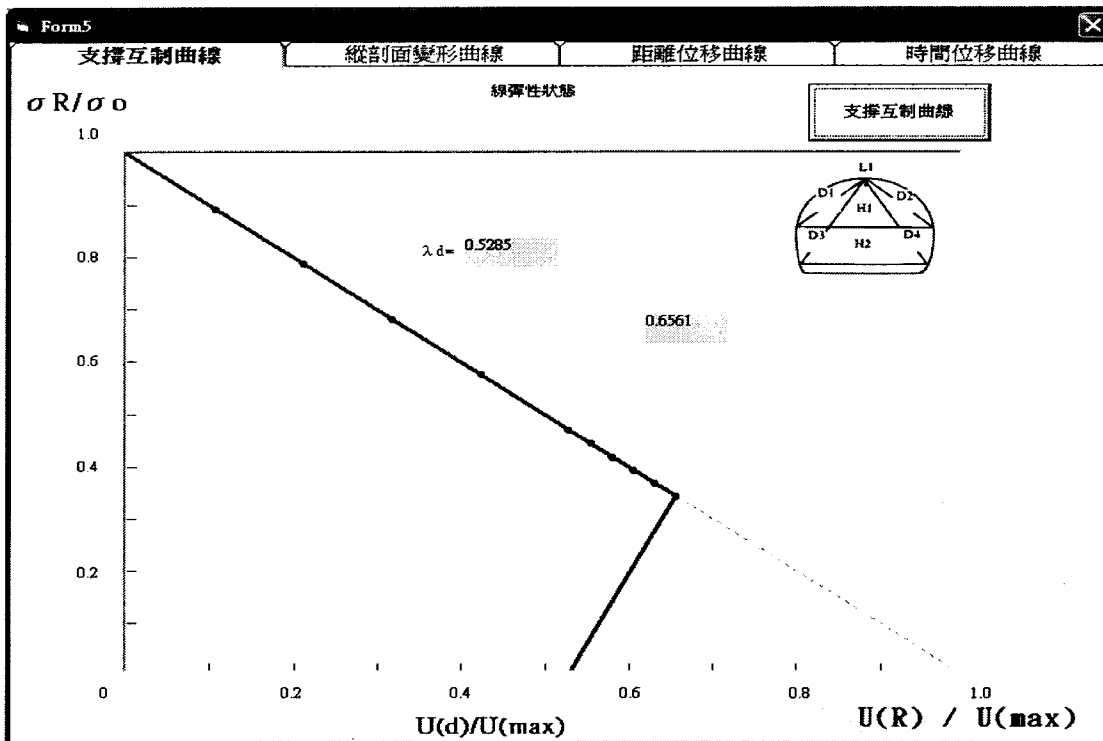


圖 3.8 資訊繪圖系統



圖 3.9 說明系統

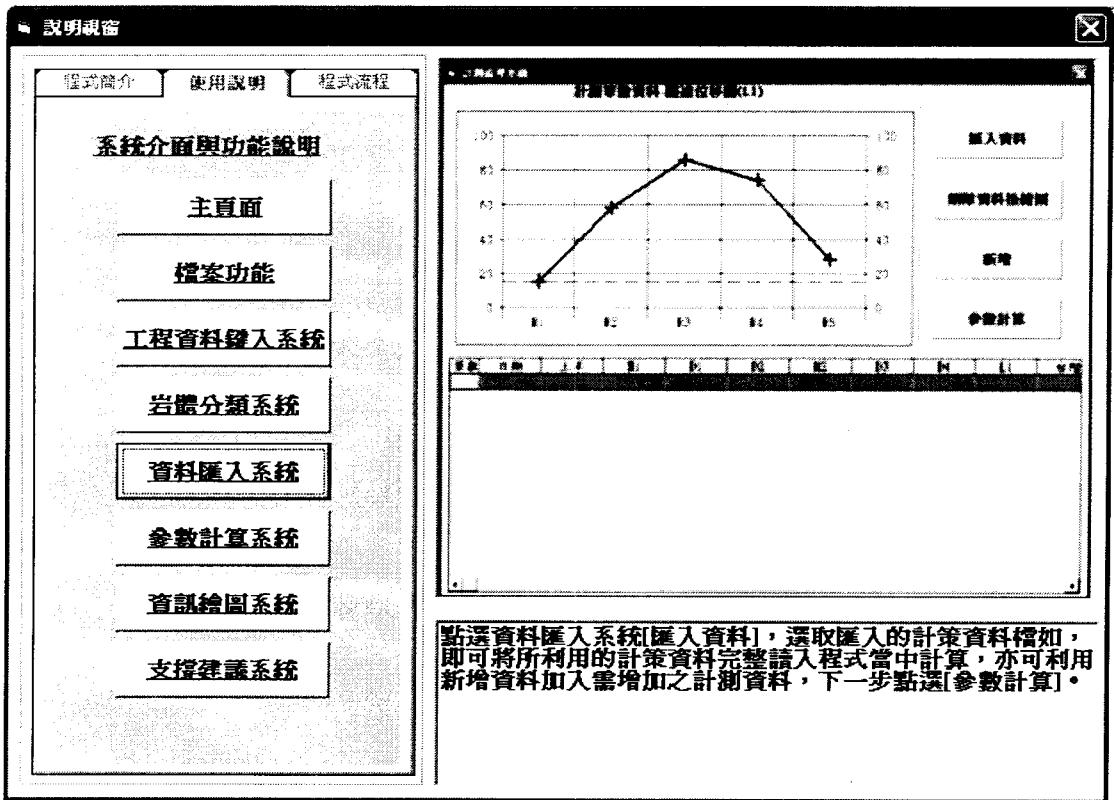


圖 3.10 各系統使用介紹

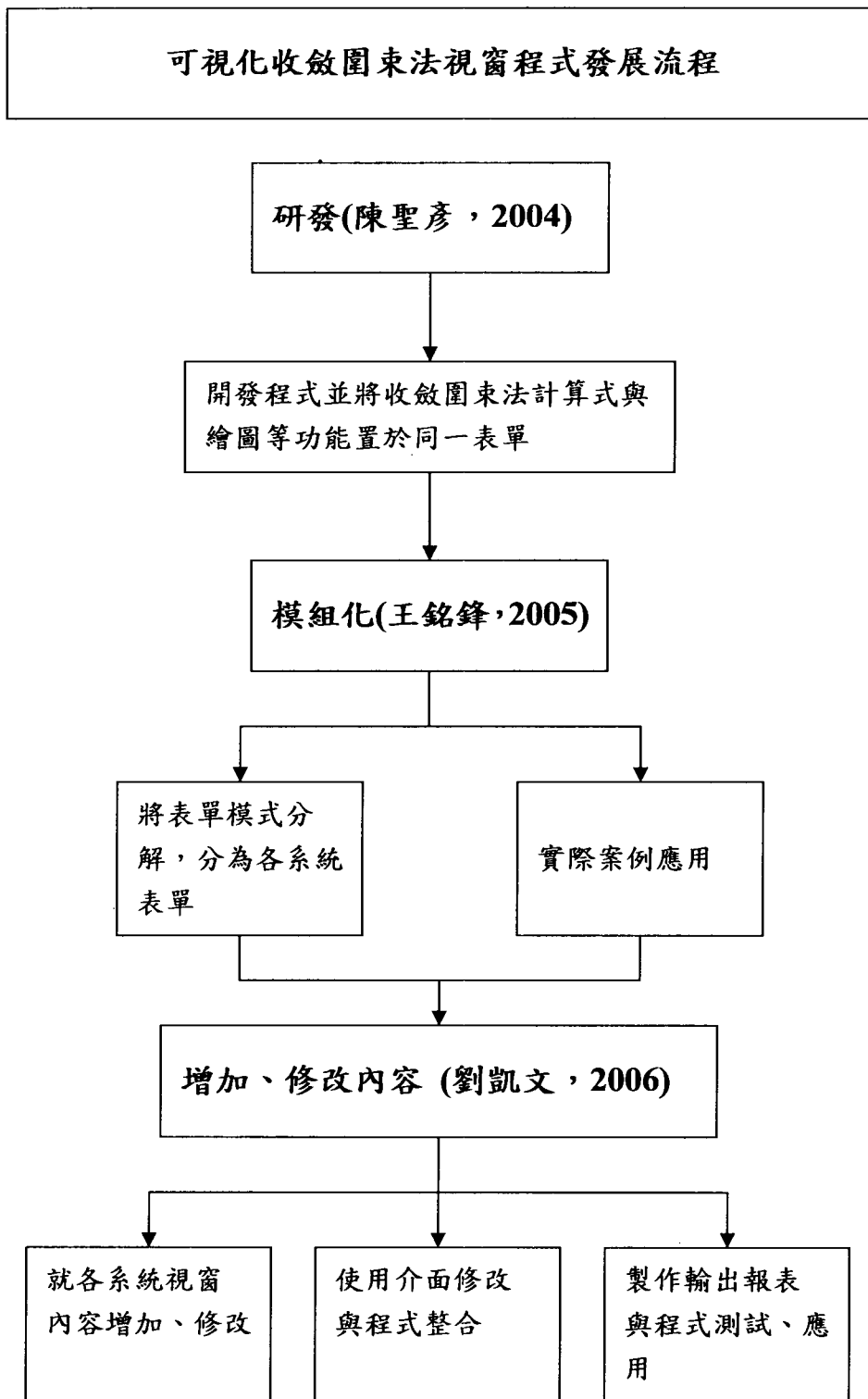


圖 3.11 可視化收斂圍束法視窗程式發展流程圖

第四章 實際案例之分析與應用

4.1 前言

本章節將利用撰寫完成之視窗程式測試於實際案例應用，案例包含八卦山公路隧道工程，以及東部變質岩之新北迴隧道群之隧道工程等。經由視窗程式分析計算現地斷面監測資料，並即時顯示各種資料變形曲線，以及反推求現地之變形模數、位移等參數，並給予參考之隧道支撐建議。(分析計算結果等將與林銘益(2003)、陳翊安(2004)分析現地隧道收斂資料做一比較)。

4.2 視窗程式之基本假設與步驟

本視窗程式用於分析針對所用之方法做下列為基本假設：

- (1) 岩體為等向性且均質之線彈塑性材料。
- (2) 噴凝土、岩栓等支撐結構為線彈塑性材料。
- (3) 計測安裝位置距隧道開挖前進面距離視為無支撐距離。
- (4) 不考慮地下水之影響。
- (5) 不考慮開挖速度與時間效應。

視窗程式分析執行步驟：

- (1) 將現地安全計測報告經由資料篩選後，進行所需計測資料的整理。
- (2) 將整理後之資料存成 EXCEL 之.csv 之副檔，而後於資訊匯入系統將計測檔案匯入外顯式程式進行分析。
- (3) 匯入完成後於參數計算視窗經視窗程式迴歸分析，再以外顯式收斂圍束法計算求得隧道相關參數並與以顯示。
- (4) 而後於資訊繪圖系統可繪出隧道之距離位移曲線、時間位移曲線、縱剖面變形曲線及支撐互制曲線。
- (5) 由所計算之值判斷隧道所需支撐壓力及混凝土最大支撐壓力之關係，再予建議噴凝土厚度、使用 H 型鋼型號等支撐方法。

4.3 八卦山公路隧道工程

4.3.1 八卦山公路隧道簡介

東西向快速公路漢寶草屯線是行政院十二項建設計畫所規劃興建 12 條東西

向快速公路之一，連接西濱快速公路、中山高速公路及第二高速公路，形成一完整交通網。其中漢寶草屯線 E407-1 標為八卦山隧道工程，西起彰化縣員林鎮貫穿八卦山台地至南投縣頂寮附近，長約 5 公里係目前國內第二長公路隧道。八卦山隧道從 137 線向東延伸至國道三號中興系統交流道，長約五公里，是目前僅次於北宜高速公路雪山隧道第二長的公路隧道，也是漢寶草屯線施工項目最複雜艱難的一段，隧道貫穿八卦山脈，位於台 76 線林厝交流道至中興系統交流道間，左線（西行）全長 4928 公尺、右線（東行）全長 4935 公尺，雙孔雙車道設計，其隧道斷面形狀為六心圓，隧道半徑為 6.3m。連接彰化縣員林鎮與南投縣草屯鎮，通車後大大縮短了彰投兩地往返的時間。

4.3.2 八卦山公路隧道之地質狀況與施工內容

本隧道穿過之主要地層為頭嵙山層火炎山相礫石層，依其特性大致可分為砂質粉土層及礫石層。砂質粉土層厚薄不一，以粉土層為主或間夾黏土層；粉土層以扁平之中細砂及黏土夾少量小礫石為主，膠結疏鬆；黏土層則以黏土為主，夾不等量細砂，塑性較高，厚度約 0.8m~1.0m。卵礫石層中卵礫石含量平均約 70~80%，通過 #4 篩比例約 20~30%，卵礫石粒徑大者約達 40~50cm，卵礫石間之細料成份以青灰色粗、中砂及棕黃色粉質泥岩為主。大部分礫石均屬輕度風化、礫石層膠結不佳，礫石極易剝落，偶有較細之礫石夾粗砂，礫石層內所夾之砂層或黏土層常呈薄層或凸鏡狀，亦有部份呈巨厚狀，較厚者達 2m 以上（陳羿安，2004）。

由於此隧道工程所在位置之地質條件為低凝聚性之卵礫石地層，其開挖及支撐過程中，隧道內空變形及地層變形之控制極為重要，特別是覆蓋層厚度、卵礫石膠結性及地下水等為影響隧道開挖面（含頂拱、側壁）穩定性之關鍵因素。過大之頂拱沈陷極易造成隧道整體不穩定，進而造成抽心崩塌。因此本隧道應用 NATM 工法觀念設計，並以噴凝土、鋼線網、岩栓及鋼支保為支撐構件維持壁面之穩定。當遭遇地質條件惡劣者，則配合輔助工法（如管幕工法、固結灌漿、雙側導坑及強制抽排水等）進行之。開挖程序採用短台階之施工方式，開挖分上半斷面、台階及仰拱。施工時採全能班施工方式，以期爭取最佳之施工時效。開挖方法經評估比較鑽炸法與機械開挖兩者後，決定採用以挖土機（back hole）與破

岩機 (rock breaker) 為主之機械開挖方式，再以鬆土機 (ripper) 修挖斷面，以避免因隧道鑽炸造成地表地層鬆動。襯砌分為兩層，第一層為外襯砌，內含鋼絲網、自鑽式岩栓、噴凝土及鋼支保及其它輔助之支撐構件；第二層為襯砌混凝土，係現場澆注混凝土 (吳耀焜等人，2003)。

4.4 八卦山公路隧道計測資料分析及程式測試結果

本研究進行分析時所採用之計測資料，係取自中華工程顧問公司於八卦山公路隧道所作的安全計測報告，期數為第 13 期至 123 期，共 111 期的安全日報表。由於八卦山隧道為雙口雙向，茲定義四種方向編號，分別為東口右側 ER、東口左側 EL、西口右側 WR 和西口左側 WL。在本研究所選取計測值採用隧道上半處收斂岩栓 (L1、H1、D1、D2、) 4 個計測點，截取上半開挖計測資料進行視窗程式分析。擷取 3 個計測點分別為:EL054、WL029、WR058 進行分析。

4.4.1 視窗程式分析現地計測資料

本程式分析八卦山公路隧道斷面共 3 個斷面，其 3 段面相關分析參數如表 4.1 所示。以下就各點進行分析資料說明與討論。

(1) 計測點 EL-054

斷面覆土深度為 212 m，無支撐距離 2 m，L1 開挖之最大徑向位移量 27 mm、H1 開挖之最大徑向位移量 18.49 mm、D1 開挖之最大徑向位移量 4.8 mm、D2 開挖之最大徑向位移量 4.08 mm。

測點歷時及位移曲線圖 (如圖 4.1 所示)。以 L1 上半資料進行分析時 m 值為 1.1、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.3977$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.6372$ 。H1 上半資料進行分析時 m 值為 1.422、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.3317$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.5534$ 。D1 上半資料進行分析時 m 值為 1.599、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.3039$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.5154$ 。D2 上半資料進行分析時 m 值為 1.57、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.3081$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.5213$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議 (如表 4.2、圖 4.3、圖 4.4、圖 4.5 及圖 4.6 所示)。

(2) 計測點 WL-029

斷面覆土深度為 34 m，無支撐距離 3 m，L1 開挖之最大徑向位移量 15 mm、

H1 開挖之最大徑向位移量 6.04 mm、D1 開挖之最大徑向位移量 5.09 mm、D2 開挖之最大徑向位移量 5.54 mm。

測點歷時及位移曲線圖（如圖 4.7 所示）。以 L1 上半資料進行分析時 m 值為 4.465、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.1835$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.3333$ 。H1 上半資料進行分析時 m 值為 8.479、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.1035$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.1963$ 。D1 上半資料進行分析時 m 值為 8.054、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.1085$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.2053$ 。D2 上半資料進行分析時 m 值為 8.547、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.1028$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.195$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議（如表 4.3、圖 4.8、圖 4.9、圖 4.10、圖 4.11 及圖 4.12 所示）。

（3）計測點 WR-058

斷面覆土深度為 54 m，無支撐距離 2 m，L1 開挖之最大徑向位移量 16 mm、H1 開挖之最大徑向位移量 18.14 mm、D1 開挖之最大徑向位移量 8.53 mm、D2 開挖之最大徑向位移量 13.39 mm。

測點歷時及位移曲線圖（如圖 4.13 所示）。以 L1 上半資料進行分析時 m 值為 2.486、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.2137$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.3817$ 。H1 上半資料進行分析時 m 值為 2、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.2553$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.4454$ 。D1 上半資料進行分析時 m 值為 1.726、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.2865$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.491$ 。D2 上半資料進行分析時 m 值為 1.748、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.2838$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.487$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議（如表 4.4、圖 4.14、圖 4.15、圖 4.16、圖 4.17 及圖 4.18 所示）。

4.4.2 視窗程式之分析結果討論

本節針對程式所分析的資料值比對陳昇安（2004）所使用斷面分析計算迴歸之 m 值來討論，並依據斷面分析的前期位移量、結構之支撐勁度、無支撐之最大位移等進行探討。

（1）計測點 EL-054:

由視窗程式所分析之 m 值 L1、H1、D1、D2 分別為 1.1、1.42、1.599、1.57，與陳羿安（2004）所分析之 m 值建議為 3.9 至 7.5 來的小，初探究其原因為所採用之計測略有異，在此處所取用之計測點約為 5 倍半徑，而於 5 倍半徑內隧道收斂之位移屬於較為迅速，而（陳羿安 2004）所得到 m 值越小、收斂曲線斜率越大，於此情況相符合。而分析所得之預估無支撐最大位移為 32.9mm、預估其前期位移量為 13.08mm，該斷面上半開挖完成時之徑向位移量佔最終計測位移量的 77.41%，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 0.836MPa，由程式所運算後其安全係數仍小於 1，因此建議之支撐補強為 40 公分厚之噴凝土與打設 9m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相比略大，亦較為保守。

(2) 計測點 WL-029:

由視窗程式所分析之 m 值 L1、H1、D1、D2 分別為 4.465、8.479、8.054、8.547，與陳羿安（2004）所分析之 m 值建議為 4.5 至 9 相符合，其預估地層之彈性模數 E 值為 168~571Mpa。而分析所得之預估無支撐最大位移為 35mm、預估其前期位移量為 6.42mm，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 0.4295MPa，由程式所運算後其安全係數雖大於 1，可參考建議取安全因子為 2 時建議之支撐補強為 30 公分厚之噴凝土與打設 3m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相符合。

(3) 計測點 WR-058:

由視窗程式所分析之 m 值 L1、H1、D1、D2 分別為 2.486、2、1.726、1.748，與陳羿安（2004）所分析之 m 值建議為 0.59 至 8.9 偏小，初探究其原因為所採用之計測略有異，在此處所取用之計測點約為 5 倍半徑，而於 5 倍半徑內隧道收斂之位移屬於較為迅速，而（陳羿安 2004）所得到 m 值越小、收斂曲線斜率越大，於此情況相符合。其預估地層之彈性模數 E 值為 291.5~774.29MPa，而分析所得之預估無支撐最大位移為 31mm、預估其前期位移量為 6.62mm，該斷面上半開挖完成時之徑向位移量佔最終計測位移量的 73.75%，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 0.5768MPa，由程式所運算後其安全係數小於 1，因此建議之支撐補強為 40 公分厚之噴凝土與打設 6m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相比略大，亦較為保守。

4.5 東部工程處新北迴鐵路隧道工程

4.5.1 新北迴鐵路隧道簡介

台灣東部花蓮至台東鐵路，未能與西部鐵路相連接，運輸諸多不便，蘇花公路及橫貫公路，因受地質影響，道路工程標準較差，無法負荷東西間的運輸動脈，以致東部人力、礦產及土地資源，未盡充份開發利用。為溝通東西部交通於是決議興建北迴鐵路以解決此問題。北迴鐵路全長 88 公里，橋樑 22 座。81 年 12 月 25 日動工，施工近 11 年，新建 13 座隧道，總長 33 公里 890 公尺。

4.5.2 新北迴鐵路隧道之地質狀況與施工內容

本章節摘錄交通部鐵改建工程局東部工程處新永春、新南澳等兩座隧道之工程規劃設計、地質調查成果及施工總結報告等隧道地質、地形及實際開挖相關內容，作為本研究之基本資料（詳細資料可參考林銘益，2003）。

(一)新永春隧道

新永春隧道通過之區段其山嶺高聳、地勢陡峻，山嶺分佈與延展多受地質構造及岩性影響。隧道沿線區域出露之地層包括大南澳片岩及廬山層，於南口則為沖積層。本區最常見之構造線為層理、片理、劈理、節理，其發育情形隨岩性而異，依地質調查顯示此區段有兩組發達之節理面，區域內小型褶皺甚為發育，包括同斜及等斜褶皺及複雜褶皺等。變質岩層中之斷層可能有變質作用前及變質作用後之斷層。

新永春隧道實際開挖：二類岩盤計 822 公尺，約佔 15.6%；三類岩盤計 1354 公尺，約佔 25.7%；四類岩盤計 1802 公尺，約佔 34.2%；五類岩盤計 1291 公尺，約佔 24.5%。

(二)新南澳隧道

新南澳隧道位於東澳至南澳間，屬中央山脈東斜面，地勢甚為陡峭，全區平均坡度約在 40°左右。本區域之地層分佈約為大南澳片岩、角閃岩、石墨片岩，

常見之構造為層理、片理、褶皺、節理。層理在深度變質之大南澳片岩中難以辨識，僅在不同類別岩層交接處可量得層理。隧道內小型褶皺甚為發達，分有同一外力擠壓下，不同岩性常形成同類型之中褶皺。

新南澳隧道長 5344 公尺，實際開挖類別及百分比:明挖段計 58 公尺，約佔 1.1%；二類岩盤計 65 公尺，約佔 1.2% 三類岩盤計 1640 公尺，約佔 30.7%；四類岩盤計 2762.1 公尺，約佔 51.7%；五類岩盤計 819.2 公尺，約佔 15.3%。

在隧道開挖不久後應立即進行施作之外支撐（Outer or Primary Support）系統，以及隧道變形達穩定狀況（淨空變位計測量小於 1.5mm/月）後，進行澆置之內襯砌（Inner or Secondary Lining）兩部份，組合而成隧道永久襯砌。

（1）施工順序：

岩體評分、分類→決定支撐系統→打前進鋼管（筋）→鑽孔、裝藥、開炸→通風→修炸→出渣→架鋼絲網、鋼支保→噴凝土→打系統岩釘→計測工作【1. 隧道內淨空之變位測定（收斂儀）、2. 隧道頂部之沉陷測定、3. 岩盤鬆動範圍測定（伸張儀）、4. 計測岩釘（岩釘拉拔）、5. 襯砌之應力測定（應力計）】→襯砌（9M~12M 施作混凝土澆置）。

（2）輔助工法：

熱瀝青灌入法：於突破軟弱地盤及大量湧水地區使用- 新永春隧道。

鋼纖維噴凝土：於取代傳統乾式噴凝土及掛鋼線（絲）之工法，可節省每一隧道施工輪進 1~2 小時- 新南澳隧道。

4.6 東部工程處新北迴鐵路隧道計測資料分析及程式測試結果

本研究採用之實際分析案例為交通部鐵路改建工程局東部工程處北迴線單軌隧道群，採用林銘益（2003）所整理之現地隧道收斂資料。依岩體分類別選擇新永春隧道、新南澳隧道共 4 個計測點資料進行分析計算。新永春隧道使用北口 YSN9、南口 YSS5、南口 YSS20 三點計測資料。新南澳隧道使用北口 NP20 點計測資料，而選取之計測資料採用隧道上半處收斂岩栓 L1、H1 點使用。

4.6.1 視窗程式分析現地計測資料

本程式分析新北迴鐵路隧道斷面共 4 個斷面，其 4 段面相關分析參數（如表

4.5 所示)。以下就各點進行分析資料說明與討論。

(一)新永春隧道

(1) 新永春隧道南口測點 YSS5：RMR 分類第三類岩盤:

隧道開挖岩性屬砂質灰色片岩，覆土高為 56m，於 RMR 岩體分類屬第三類岩盤，於民國 86 年 1 月 22 日安裝計測儀器，安裝里程為 N9+576，頂拱最大沉陷量為 7.74mm。

測點歷時及距離曲線圖（如圖 4.19 所示），程式分析結果如下：經迴歸分析求得 m 值後，再加以回饋分析可得下列結果：L1 上半資料進行分析得 m 值為 8.139、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.2$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.361$ 。H1 上半資料進行分析得 m 值為 14.177、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.1274$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.2386$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議（如表 4.6、圖 4.20、圖 4.21、圖 4.22、圖 4.23 及圖 4.24 所示）。

(2) 新永春隧道南口測點 YSS20：RMR 分類四類岩盤:

隧道開挖岩性屬角閃岩，覆土高為 195.92m，於 RMR 岩體分類屬第四類岩盤，於民國 87 年 4 月 08 日安裝計測儀器，安裝里程為 N8+565，頂拱最大沉陷量為 8mm。

測點歷時及距離曲線圖（如圖 4.25 所示），程式分析結果如下：經迴歸分析求得 m 值後，再加以回饋分析可得下列結果：L1 上半資料進行分析得 m 值為 6.083、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.146$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.27$ 。H1 上半資料進行分析得 m 值為 12.9、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.073$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.14$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議（如表 4.7、圖 4.26、圖 4.27、圖 4.28、圖 4.29 及圖 4.30 所示）。

(3) 新永春隧道北口測點 YSN9：RMR 分類第五類岩盤:

隧道開挖岩性屬砂質灰色板岩，覆土高為 89.6m，於 RMR 岩體分類屬第五類岩盤，於民國 86 年 6 月 24 日安裝計測儀器，安裝里程為 N5+710，頂拱最大沉陷量為 10mm。

測點歷時及距離曲線圖，(如圖 4.31 所示)，程式分析結果如下：經迴歸分析求得 m 值後，再加以回饋分析可得下列結果：L1 上半資料進行分析得 m 值為 5.60、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.2799$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.4815$ 。H1 上半資料進行分析得 m 值為 8.08、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.208$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.372$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議 (如表 4.8、圖 4.32、圖 4.33、圖 4.34、圖 4.35 及圖 4.36 所示)。

(二)新南澳隧道

(1) 新南澳隧道北口測點 NP20：RMR 分類第五類岩盤：

隧道開挖岩性屬砂質灰色片麻岩，覆土高為 441m，於 RMR 岩體分類屬第五類岩盤，於民國 88 年 7 月 25 日安裝計測儀器，安裝里程為 13K+900，頂拱最大沉陷量為 24.5mm。

測點歷時及距離曲線圖 (如圖 4.37 所示)，程式分析結果如下：經迴歸分析求得 m 值後，再加以回饋分析可得下列結果：L1 上半資料進行分析得 m 值為 5.066、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.3$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.513$ 。H1 上半資料進行分析得 m 值為 7.818、初始釋放圍束比 $\alpha_0=0.214$ 、無支撐距離 d 時之釋放圍束比 $\lambda_d=0.382$ 。計測資料處理、視窗程式迴歸分析結果圖形及支撐建議 (如表 4.9、圖 4.38、圖 4.39、圖 4.40、圖 4.41 及圖 4.42 所示)。

4.6.2 視窗程式之分析結果討論

本節針對程式所分析的資料值比對 (林銘益 2003) 所使用斷面分析計算迴歸之 m 值來討論，並依據斷面分析的前期位移量、結構之支撐勁度、無支撐之最大位移等進行探討。

(一)新永春隧道：

(1) 南口測點 YSS5：

由視窗程式所分析之 m 值 L1、H1 分別為 8.439、14.177，與林銘益 (2003) 所分析之 m 值建議為 7.26 至 8.458 來的略大，初探究其原因為所採用之計測略

有異，此處隸屬 RMR 分類三類岩層，地盤等級與其它地層相比為佳，因此頂拱位移較緩、收斂曲線相對亦較緩，而陳羿安（2004）所得到 m 值越小、收斂曲線斜率越大，於此情況相符合。其預估地層之彈性模數 E 值為 217~1130MPa，而分析所得之預估無支撐最大位移為 26.3mm、預估其前期位移量為 5.27mm，該斷面上半開挖完成時之徑向位移量佔最終計測位移量的 55.97%，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 0.885MPa，由程式所運算後其安全係數仍小於 1，因此建議之支撐補強為 35 公分厚之噴凝土與打設 3m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相比略大，亦較為保守。

(2) 南口測點 YSS20:

由視窗程式所分析之 m 值 $L1$ 、 $H1$ 分別為 6.083、12.93，與林銘益（2003）所分析之 m 值建議為 7.64 至 29 來的略小，初探究其原因為所採用之計測略有異，在此處所取用之計測點約為 5 倍半徑，而於 5 倍半徑內隧道收斂之位移屬於較為迅速，而陳羿安（2004）所得到 m 值越小、收斂曲線斜率越大，於此情況相符合。而分析所得之預估無支撐最大位移為 14.4mm、預估其前期位移量為 2.1mm，該斷面上半開挖完成時之徑向位移量佔最終計測位移量的 48.75%，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 2.56MPa，由程式所運算後其安全係數仍小於 1，因此建議之支撐補強為 40 公分厚之噴凝土與打設 3m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相比略大，亦較為保守。

(3) 北口測點 YSN9:

由視窗程式所分析之 m 值 $L1$ 、 $H1$ 分別為 4.4、5.343，與林銘益（2003）所分析之 m 值建議為 3.67 至 6.32 相符，其預估地層之彈性模數 E 值為 98.87~295.1Mpa。而分析所得之預估無支撐最大位移為 29.7mm、預估其前期位移量為 4.03mm，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 1.55MPa，由程式所運算後其安全係數仍小於 1，因此建議安全因子為 2 時之支撐補強為 40 公分厚之噴凝土與打設 3m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相比略大，亦較為保守。

(二)新南澳隧道

(1) 北口測點 NP20

由視窗程式所分析之 m 值 $L1$ 、 $H1$ 分別為 5.06、7.818，與(林銘益 2003)所分析之 m 值建議為 2.72 至 3.9 來的略大，初探究其原因為所採用之計測資料略有異，一般會將較為突兀之計測點踢除，使迴歸值較為合理。而分析所得之預估無支撐最大位移為 35.1mm、預估其前期位移量為 10.61mm，該斷面上半開挖完成時之徑向位移量佔最終計測位移量的 74.07%，可做為相似地層開挖之參考評估。

另計算後結構之支撐壓力為 3.679MPa，由程式所運算後其安全係數仍小於 1，因此建議之支撐補強為 35 公分厚之噴凝土與打設 9m 之岩栓。與中華顧問工程司之施工內容建議之 30 公分相比略大，亦較為保守。

表 4.1 八卦山隧道工程案例分析參數

隧道斷面編號	EL054	WL029	WR058
平均半徑 (m)	6.3	6.3	6.3
無支撐距離 d (m)	2	3	2

岩體	覆土高度 (m)	212	34	54
	單位重 γ (MPa/m ³)	20	20	20
	波松比 ν_γ	0.25	0.25	0.25
噴凝土	彈性模數 E_c (kN/m ²)	24000	24000	24000
	波松比 ν_c	0.2	0.2	0.2
	厚度 t (m)	0.3	0.3	0.3

表 4.2 八卦山隧道工程計測斷面 EL054 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1	D1	D2
迴歸之 m 值	1.1	1.422	1.599	1.57
初始釋放圍束比 α_0	0.3977	0.3317	0.3039	0.3081
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.5534	0.5531	0.5154	0.5213
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	449.06	656.13	670.36	677
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	1122.66	1640.3	1688.5	1690
預估之無支撐最大位移 U (mm)	32.9	22.5	5.1	4.3
預估前期位移量(開挖距離, Z=0)	13.08	7.46	1.549	1.325
預估之結構支撐壓力 Ps (MPa)	0.836	0.6772	0.223	0.192
混凝土最大支撐應力 P _{smax} (MPa)	0.6561	0.6561	0.6561	0.6561
無支撐距離 d 時 L1 之位移量(開挖距離, Z=d) (mm)	20.9	12.4	2.6	2.2
支撐結構勁度 Kn (MPa/m)	869.336	869.336	869.336	869.336
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	48.46	40.36	32.29	32.47
計測裝設時產生之位移量佔上半最大位移量之百分比 (%)	77.41	67.06	54.17	53.92

表 4.3 八卦山隧道工程計測斷面 WL029 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1	D1	D2
迴歸之 m 值	4.465	8.479	8.054	8.547
初始釋放圍束比 α_0	0.1835	0.1035	0.1085	0.1028
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.3333	0.1963	0.2053	0.195
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	67.59	169.69	228.44	194.72
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	168.99	424.24	571.12	486.8

預估之無支撐最大位移 U (mm)	35	13.9	10.4	12.2
預估前期位移量(開挖距離, Z=0)	6.42	1.4386	1.128	1.2542
預估之結構支撐壓力 Ps (MPa)	0.43	0.3534	0.3207	0.3387
混凝土最大支撐應力 P _{smax} (MPa)	0.6561	0.6561	0.6561	0.6561
無支撐距離 d 時 L1 之位移量 (開挖距離, Z=d) (mm)	11.7	2.7	2.1	2.4
支撐結構勁度 Kn (MPa/m)	812.79	812.79	812.79	812.79
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	42.82	23.82	22.17	22.64
計測裝設時產生之位移量佔上半最大位移量之百分比 (%)	78	44.7	41.26	43.32

表 4.4 八卦山隧道工程計測斷面 WR058 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1	D1	D2
迴歸之 m 值	2.86	2	1.726	1.748
初始釋放圍束比 α_0	0.2137	0.2553	0.2865	0.2838
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.3817	0.4454	0.491	0.487
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	121.39	116.61	309.71	178.68
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	303.48	291.53	774.29	446.70
預估之無支撐最大位移 U (mm)	31	32.2	12.1	21
預估前期位移量(開挖距離, Z=0)	6.6247	8.22	3.46	5.958
預估之結構支撐壓力 Ps (MPa)	0.5768	0.5818	0.43	0.523
混凝土最大支撐應力 P _{smax} (MPa)	0.656	0.656	0.656	0.656
無支撐距離 d 時 L1 之位移量 (開挖距離, Z=d) (mm)	11.8	14.4	6	10.2
支撐結構勁度 Kn (MPa/m)	869.33	869.33	869.33	869.33
前期位移量佔上半位移量的百分	41.4	45.32	40.64	44.51

比 (%)				
計測裝設時產生之位移量佔 上半最大位移量之百分比 (%)	73.75	79.38	70.34	76.18

表 4.5 新北迴單軌隧道群隧道案例分析相關參數

隧道		新永春	新永春	新永春	新南澳
隧道斷面編號		Y SS5	YSS20	YSN9	NP20
平均半徑 (m)		3	3	3	3
無支撐距離 d (m)		3	3	3	3
RMR 岩體分類類別		三	四	五	五
岩體	覆土高度 (m)	56	195.92	89.6	441
	單位重 γ (MPa/m ³)	0.0265	0.0289	0.0272	0.026
	波松比 ν_γ	0.25	0.25	0.25	0.25
噴凝土	彈性模數 E_c (kN/m ²)	24000	24000	2400	24000
	波松比 ν_c	0.2	0.2	0.2	0.2
	厚度 t (m)	0.1	0.15	0.2	0.2

表 4.6 新永春隧道南口測點 YSS5 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1
迴歸之 m 值	8.439	14.177
初始釋放圍束比 α_0	0.2	0.1274
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.361	0.2386
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	86.9682	410.52
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	217.42	1026.3
預估之無支撐最大位移 U (mm)	26.3	5.6

預估前期位移量 (開挖距離, Z=0)	5.278	0.71
預估之結構支撐壓力 Ps (MPa)	0.8854	0.6628
混凝土最大支撐應力 P _{smax} (MPa)	0.6767	0.656
無支撐距離 d 時 L1 之位移量 (開挖距離, Z=d) (mm)	9.5	1.3
支撐結構勁度 Kn (MPa/m)	1752.26	1752.26
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	47.99	26.62
計測裝設時產生之位移量佔 上半最大位移量之百分比 (%)	86.36	48.51

表 4.7 新永春隧道南口測點 YSS20 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1
迴歸之 m 值	6.083	12.93
初始釋放圍束比 α_0	0.146	0.073
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.27	0.14
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	599.06	708.38
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	1497.6	1770.96
預估之無支撐最大位移 U (mm)	14.4	12.2
預估前期位移量 (開挖距離, Z=0)	2.1	0.89
預估之結構支撐壓力 Ps (MPa)	2.56	2.39
混凝土最大支撐應力 P _{smax} (MPa)	0.6767	0.656
無支撐距離 d 時 L1 之位移量 (開挖距離, Z=d) (mm)	3.9	1.7
支撐結構勁度 Kn (MPa/m)	1880.06	1880.06
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	26.3	14.32
計測裝設時產生之位移量佔 上半最大位移量之百分比 (%)	48.75	27.33

表 4.8 新永春隧道北口測點 YSN9 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1
迴歸之 m 值	5.6	8.08
初始釋放圍束比 α_0	0.279	0.208
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.4815	0.3729
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	203.14	66.912
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	507.84	167.23
預估之無支撐最大位移 U (mm)	17.3	52.4
預估前期位移量 (開挖距離, Z=0)	4.84	10.9

預估之結構支撐壓力 P_s (MPa)	0.9843	1.126
混凝土最大支撐應力 P_{smax} (MPa)	0.67	1.353
無支撐距離 d 時 L1 之位移量(開挖距離, $Z=d$) (mm)	8.3	19.5
支撐結構勁度 K_n (MPa/m)	1752.2	1752.2
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	48.42	49.84
計測裝設時產生之位移量佔 上半最大位移量之百分比 (%)	83	89.12

表 4.9 新南澳隧道北口測點 NP20 之分析結果

上半各點之 m 值分析	L1	H1
迴歸之 m 值	5.06	7.181
初始釋放圍束比 α_0	0.3	0.21
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.51	0.38
預估之岩體剪力模數 G_m (MPa)	513.29	652.95
預估之岩體彈性模數 E_m (MPa)	1283.24	1362.38
預估之無支撐最大位移 U (mm)	35.1	27.6
預估前期位移量 (開挖距離, $Z=0$)	10.61	5.9
預估之結構支撐壓力 P_s (MPa)	3.67	3.343
混凝土最大支撐應力 P_{smax} (MPa)	0.6767	1.353
無支撐距離 d 時 L1 之位移量(開挖距離, $Z=d$) (mm)	18	10.5
支撐結構勁度 K_n (MPa/m)	1752.2	1752.2
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	43.69	33.17
計測裝設時產生之位移量佔 上半最大位移量之百分比 (%)	74.07	58.99

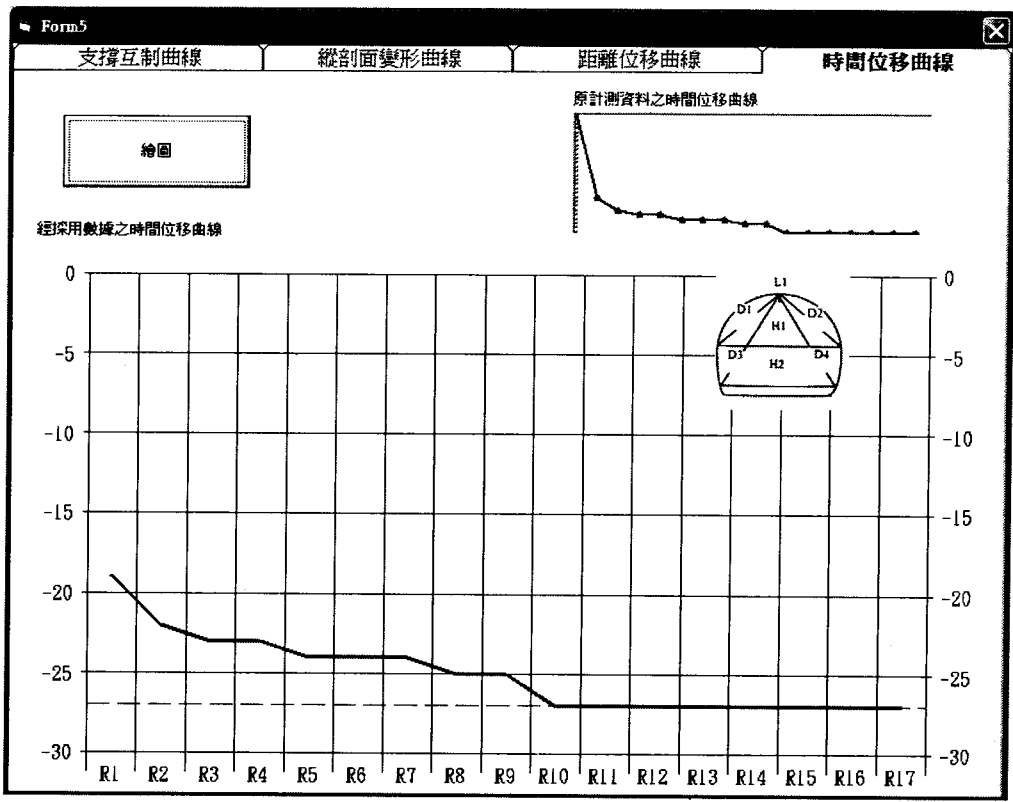


圖 4.1 計測點 EL054 時間位移曲線

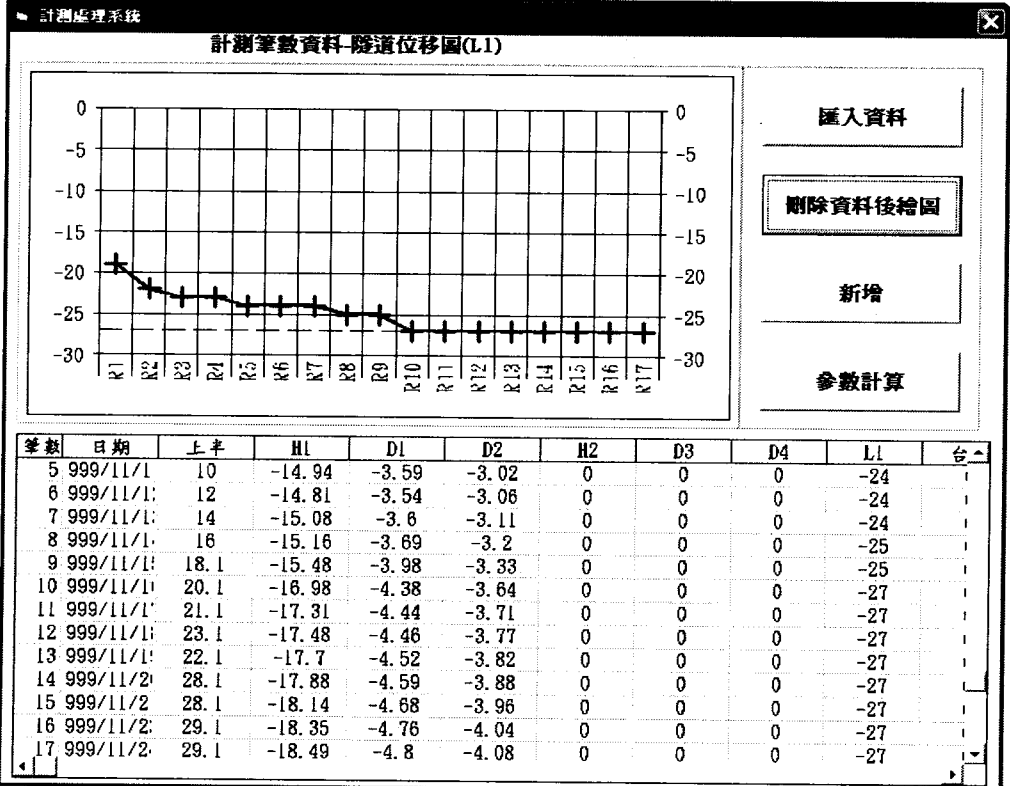


圖 4.2 計測點 EL054 收斂資料匯入視窗

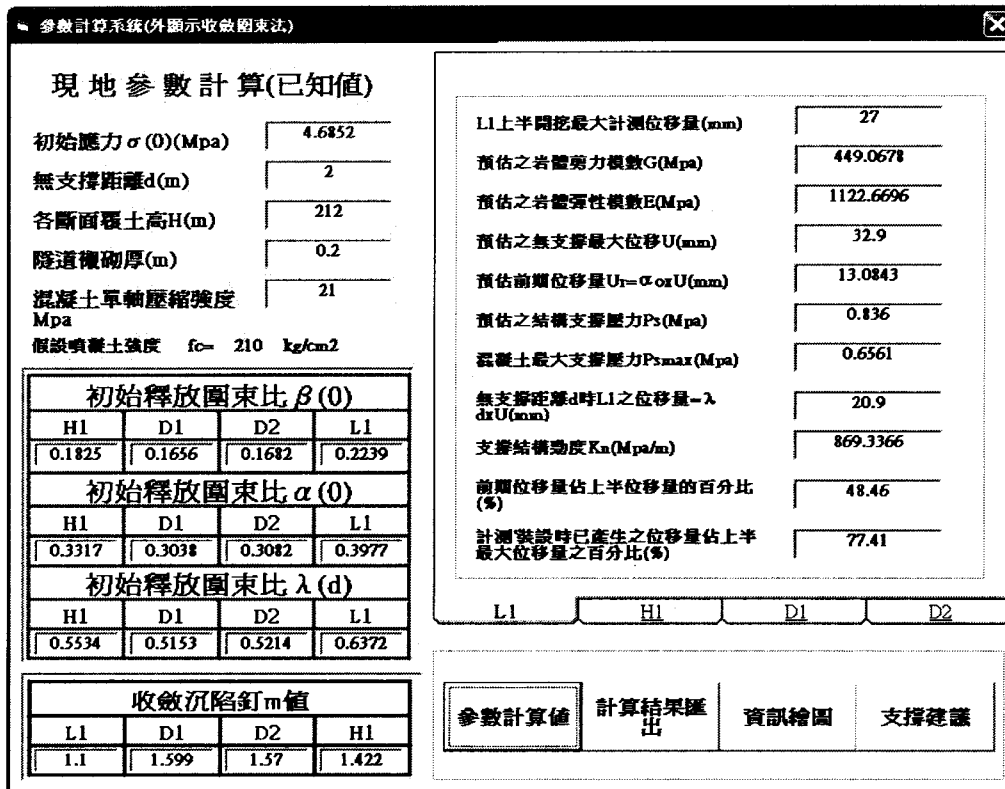


圖 4.3 計測點 EL054 參數計算結果(L1)

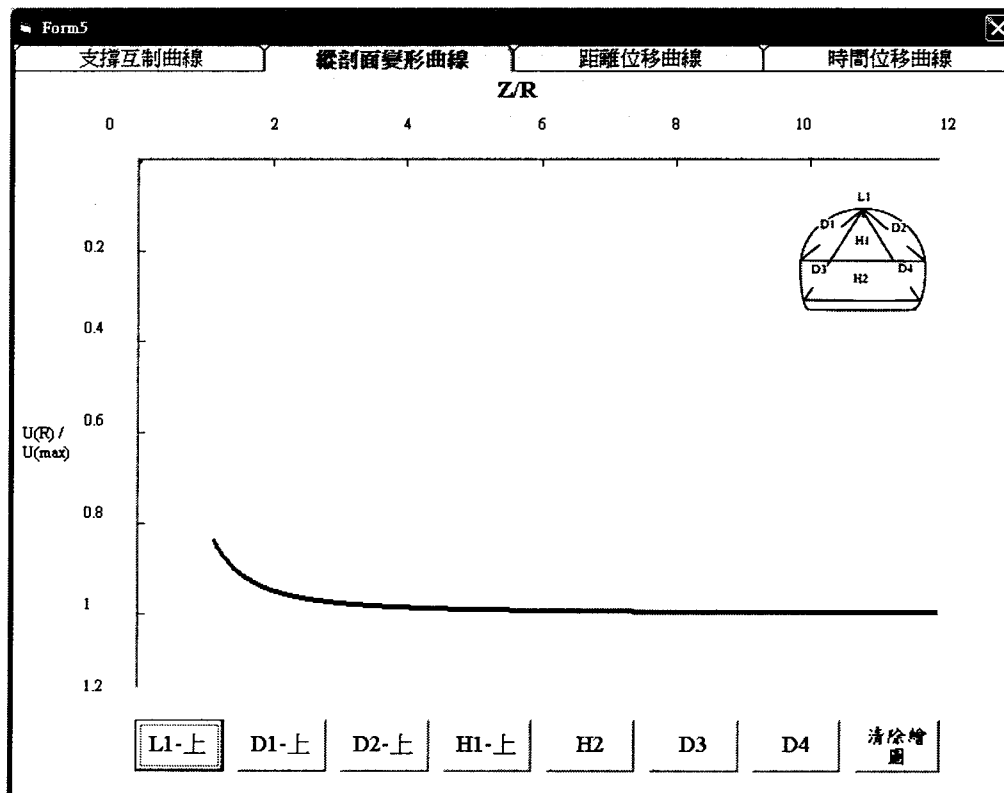


圖 4.4 計測點 EL054 縱剖面變形曲線(L1)

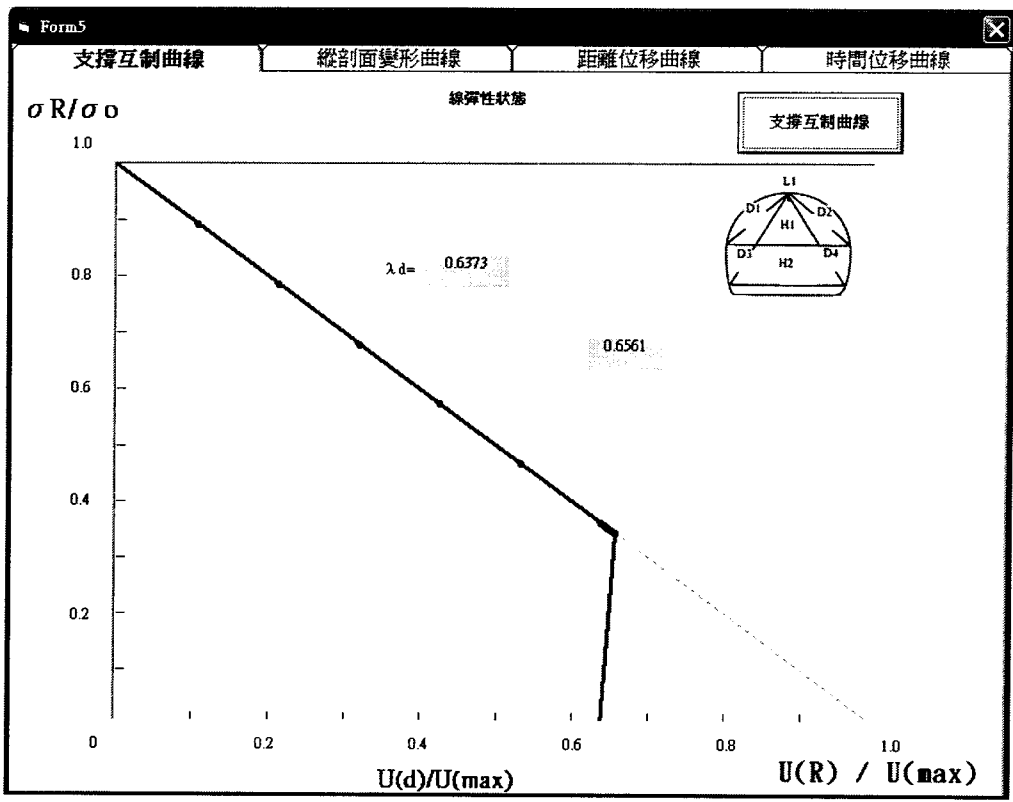


圖 4.5 計測點 EL054 支撐互制曲線(L1)

支撐建議

隧道半徑R(m) 6.3 混凝土最大支撐壓力 P_{smax} (Mpa) 0.6561

初始應力 σ_0 4.6852 結構支撐壓力 P_s (Mpa) 0.8358

安全係數FS= 0.8

注意!安全係數小於1!

建議提高結構勁度為(當FS=2時) 1738.7219

提高安全係數時之建議噴混凝土襯砌厚度(m) 0.4054009

<<<建議結果

RMR分類 第四類岩盤

RMR分類 第四類岩盤: 上部先挖1.5-3m, 支保與開挖並進, 支保不遠於前壁10m; 天盤側壁皆需網及有系統岩柱長4-5m, 距1-1.5m; 天盤100-150mm, 側壁100mm; 如有必要, 輕型鋼支保1.5m完全破裂, 或軟弱, 或輕微受壓之岩體, 岩體自立時間短, 常須以鋼肋或鋼桁架配合噴混凝土襯砌來確保施工安全。輕微岩壓及塑性變形有可能發生, 但數天內可趨於穩定, 依監測可能需要仰拱閉合

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值

凝聚力C(Mpa) 1 $\sigma(e)$ 2

摩擦角 ϕ 15 彈性區界限 λe 0.417015

離隧道開挖面特定距離之情況 r_{ip} 隧道開挖面上之情況 r_{ip}

塑性區半徑 r_p (m) 16.4375 塑性區半徑 r_p (m) 16.4375

建議打設9m長的岩柱 建議打設9m長的岩柱

圖 4.6 計測點 EL054 支撐建議系統

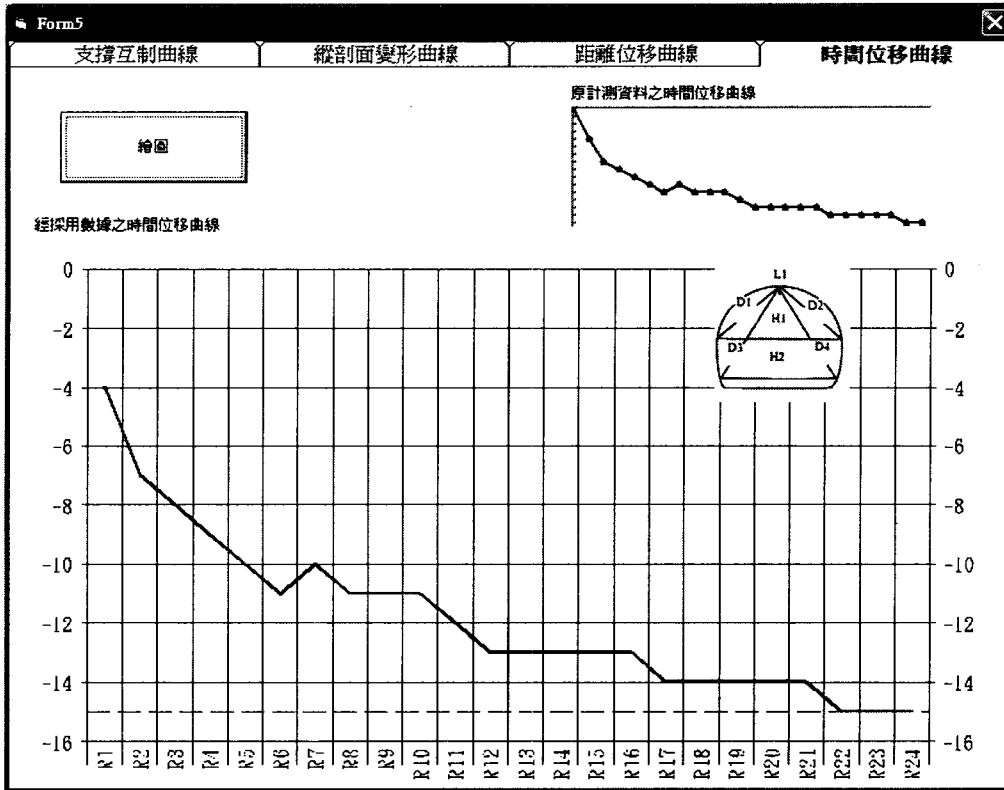


圖 4.7 計測點 WL029 時間位移曲線

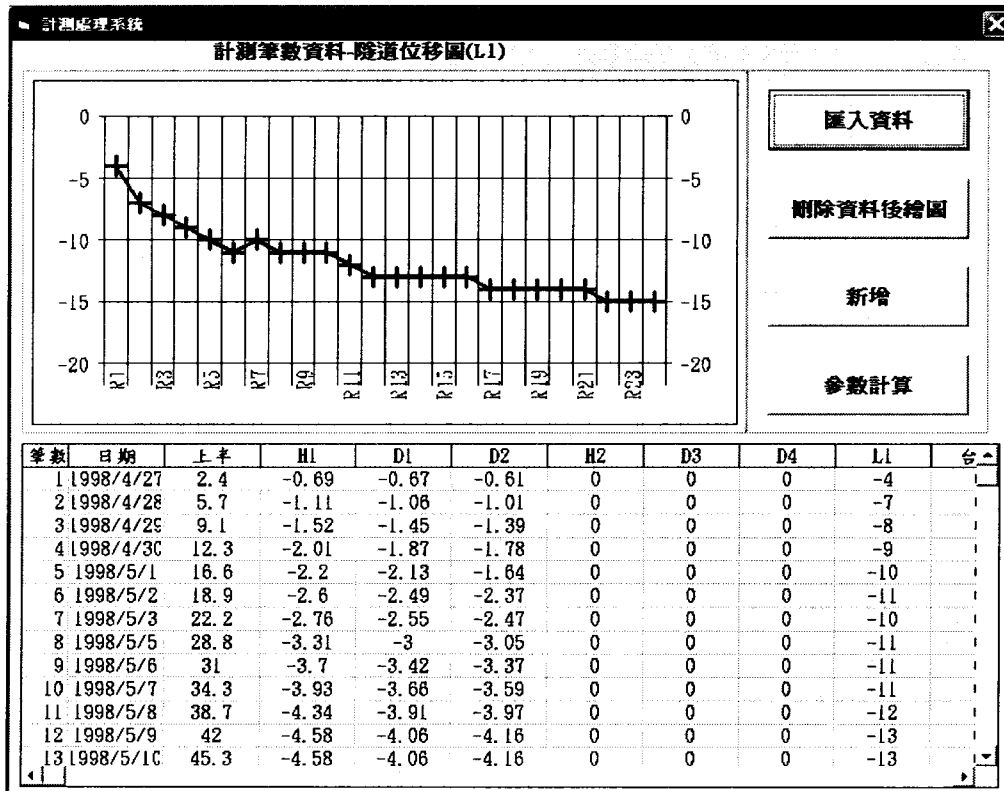


圖 4.8 計測點 WL029 收斂資料匯入視窗

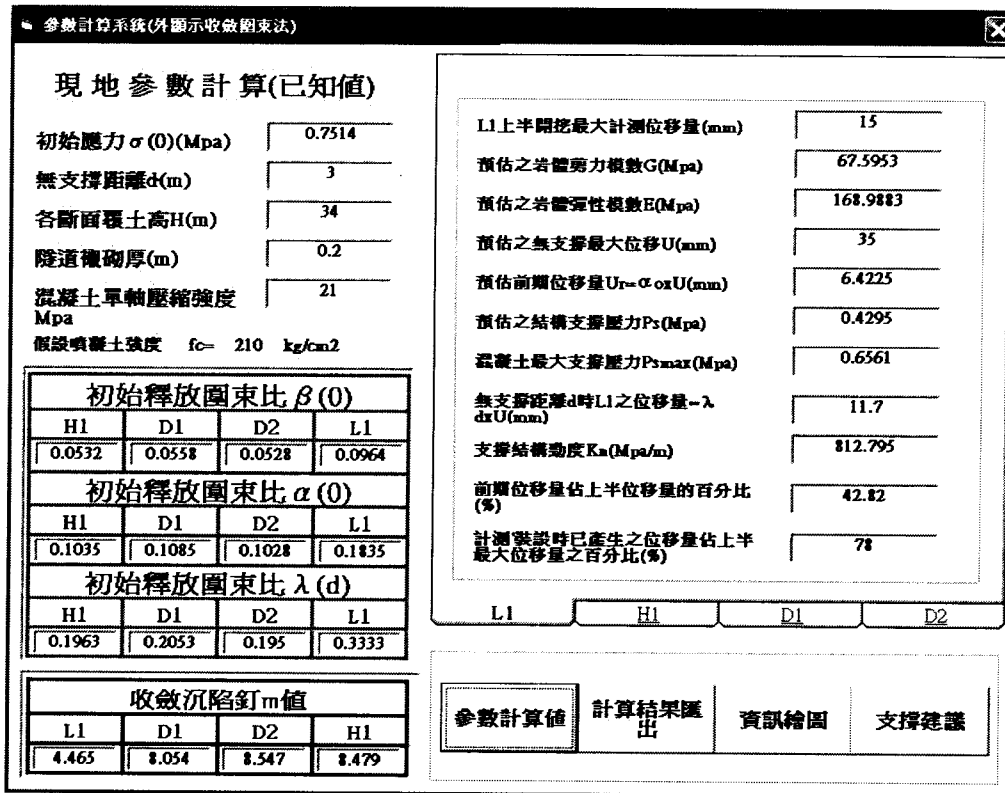


圖 4.9 計測點 WL029 參數計算結果(L1)

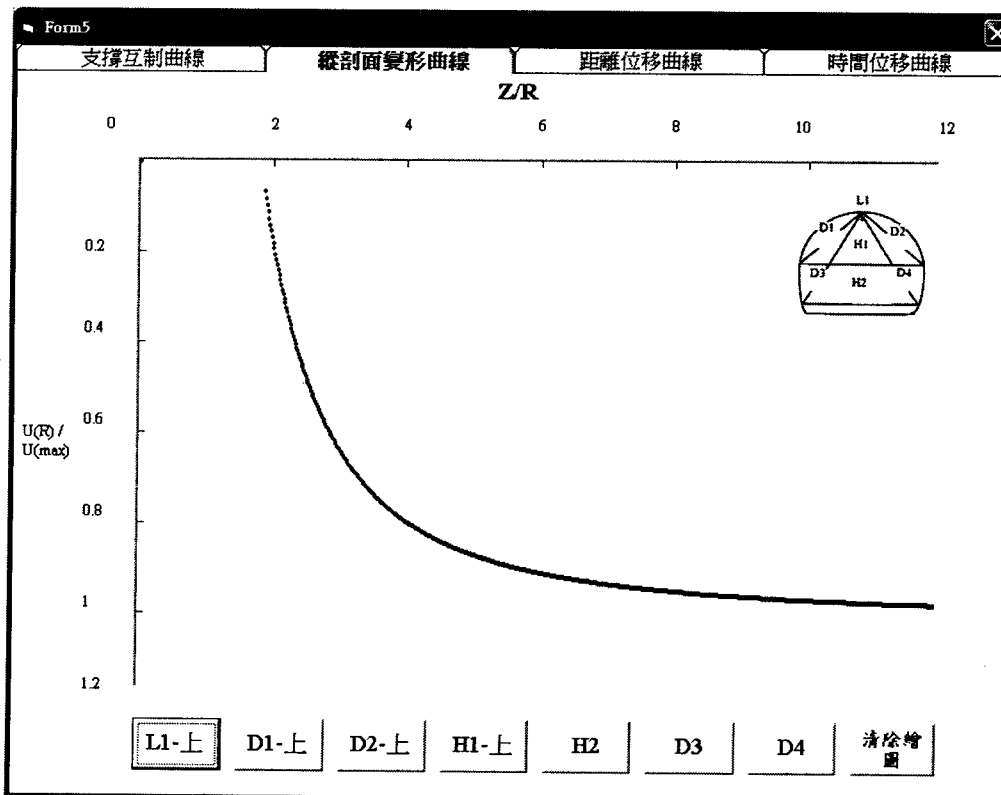


圖 4.10 計測點 WL029 縱剖面變形曲線(L1)

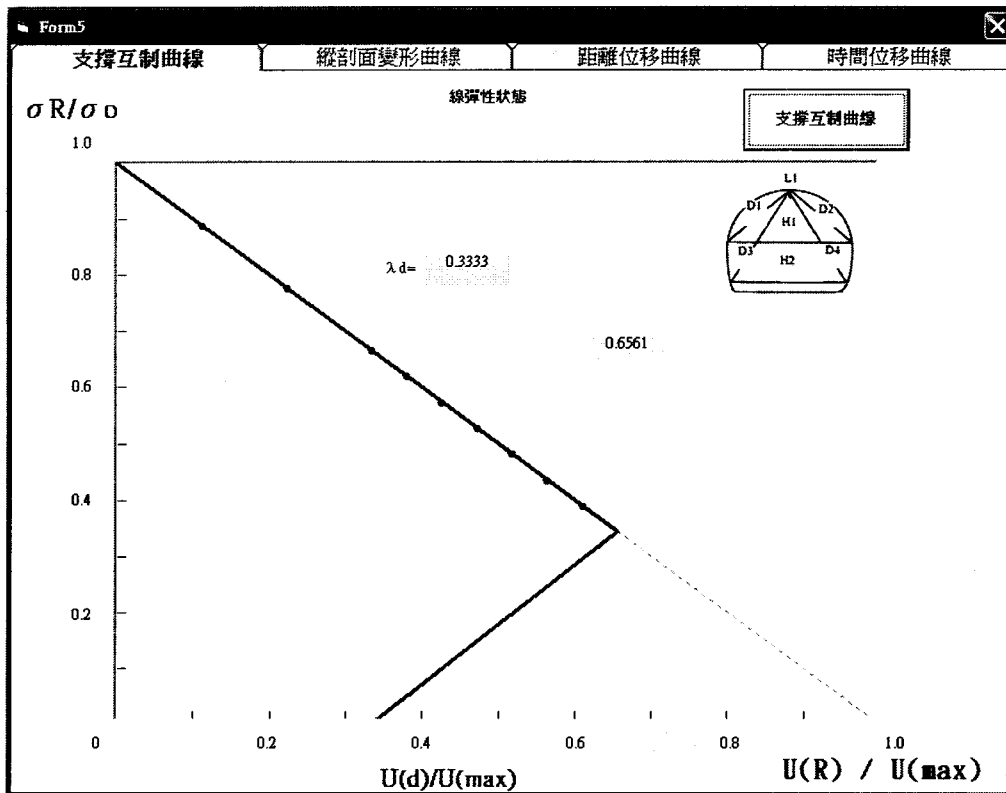


圖 4.11 計測點 WL029 支撐互制曲線(L1)

支撐建議

隧道半徑R(m) 6.3 混凝土最大支撐壓力 P_{max} (Mpa) 0.6561

初始應力 σo 0.7514 結構支撐壓力 P_s (Mpa) 0.4295

安全係數FS= 1.5

參數設定可以接受

建議提高結構勁度為(當FS=2時)

提高安全係數時之建議噴混凝土襯砌厚度(m)

<<<建議結果

RMR分類 第四類岩盤

RMR分類 第四類岩盤: 上部先挖1.5-3mm, 支撐與開挖並進, 支撐不遠於前壁10m; 天盤側壁皆需鋼架及有系統岩柱長4-5m, 距1-1.5m; 天盤100-150mm, 側壁100mm; 如有必要, 輕型鋼支撐1.5m完全破裂、或軟弱、或輕微受壓之岩體, 岩體自立時間短, 常須以鋼肋或鋼桁架配合噴混凝土襯砌來確保施工安全。輕微岩壓及塑性變形有可能發生, 但數天內可趨於穩定, 依監測可能需要仰拱閉合

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值
凝聚力C(Mpa) 1 $\sigma (c)$ 2

摩擦角 ϕ 15 彈性極限值 λe 1.245219

離隧道開挖面特定距離之情況 $r > r_p$ 隧道開挖面上之情況 $r = r_p$

塑性區半徑 r_p (m) 5.7277 塑性區半徑 r_p (m) 5.7277

建議打設3m長的岩栓 建議打設3m長的岩栓

圖 4.12 計測點 WL029 支撐建議系統

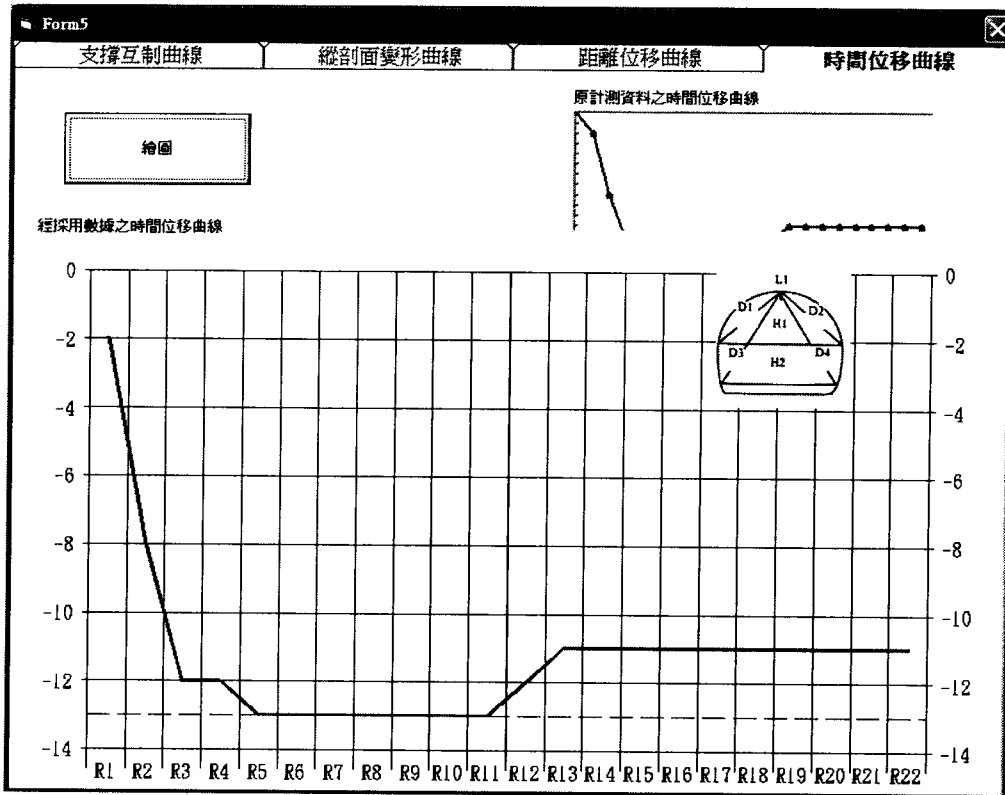


圖 4.13 計測點 WR058 時間位移曲線

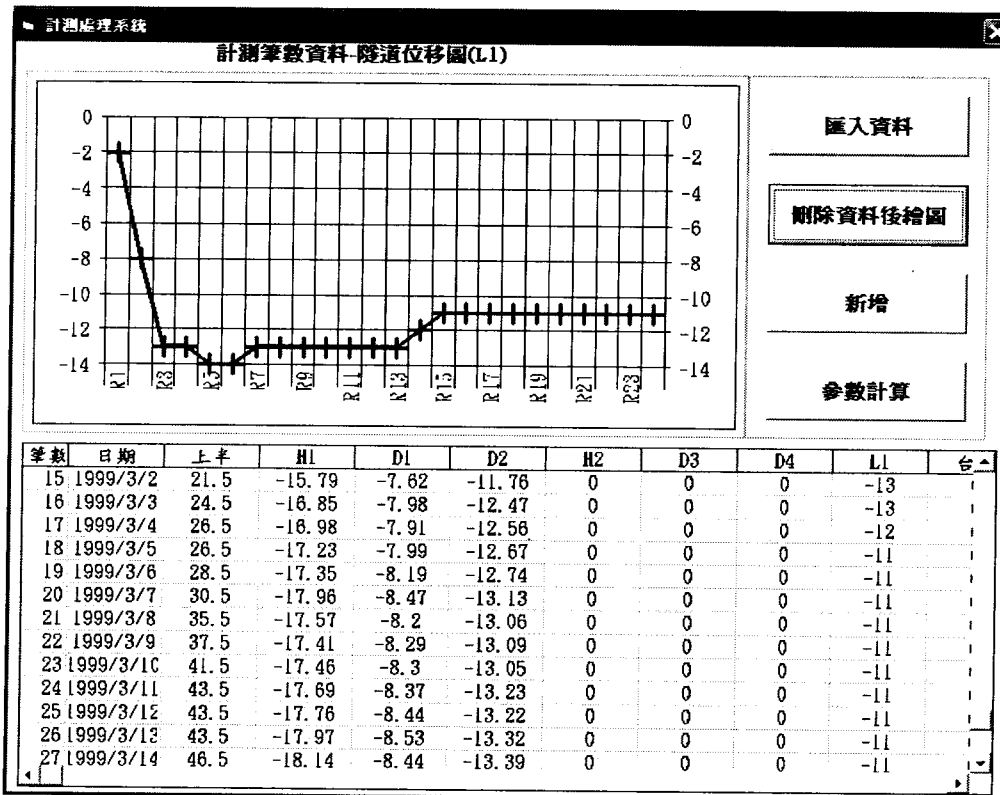


圖 4.14 計測點 WR058 收斂資料匯入視窗

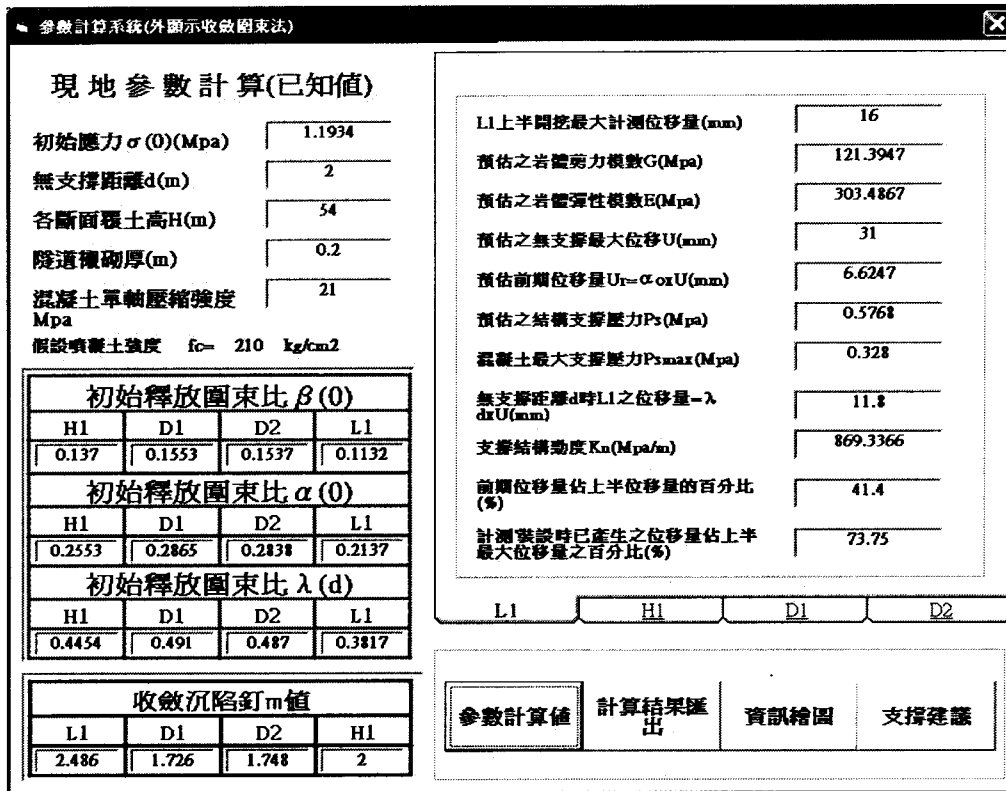


圖 4.15 計測點 WR058 參數計算結果(L1)

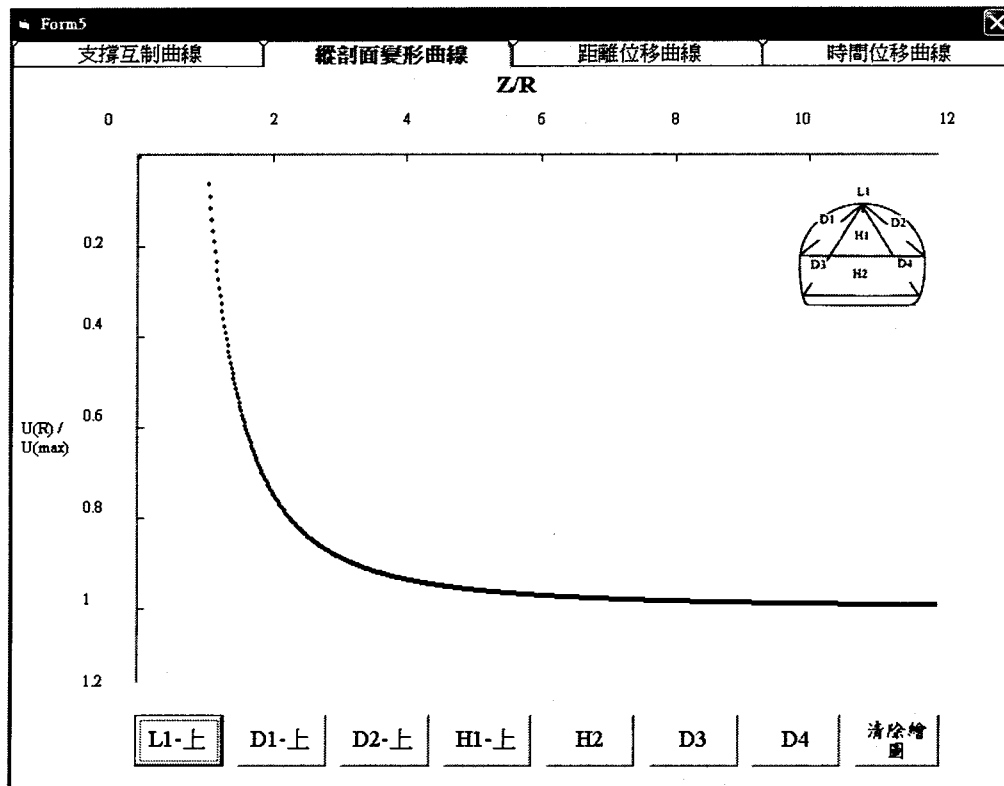


圖 4.16 計測點 WR058 縱剖面變形曲線(L1)

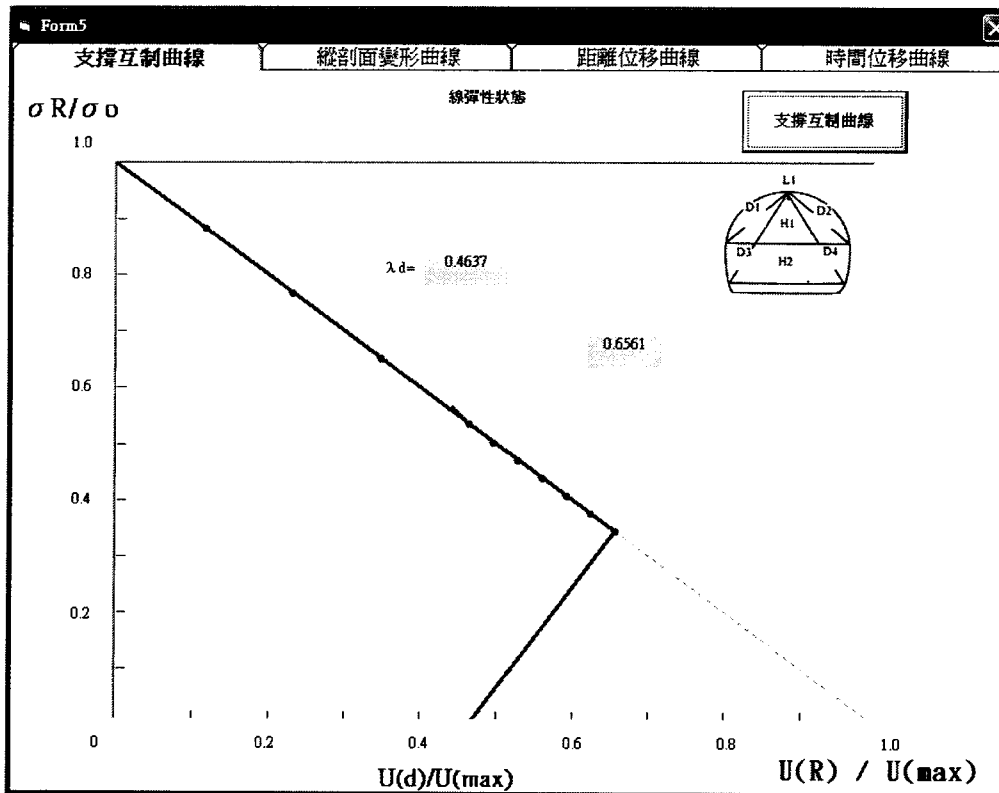


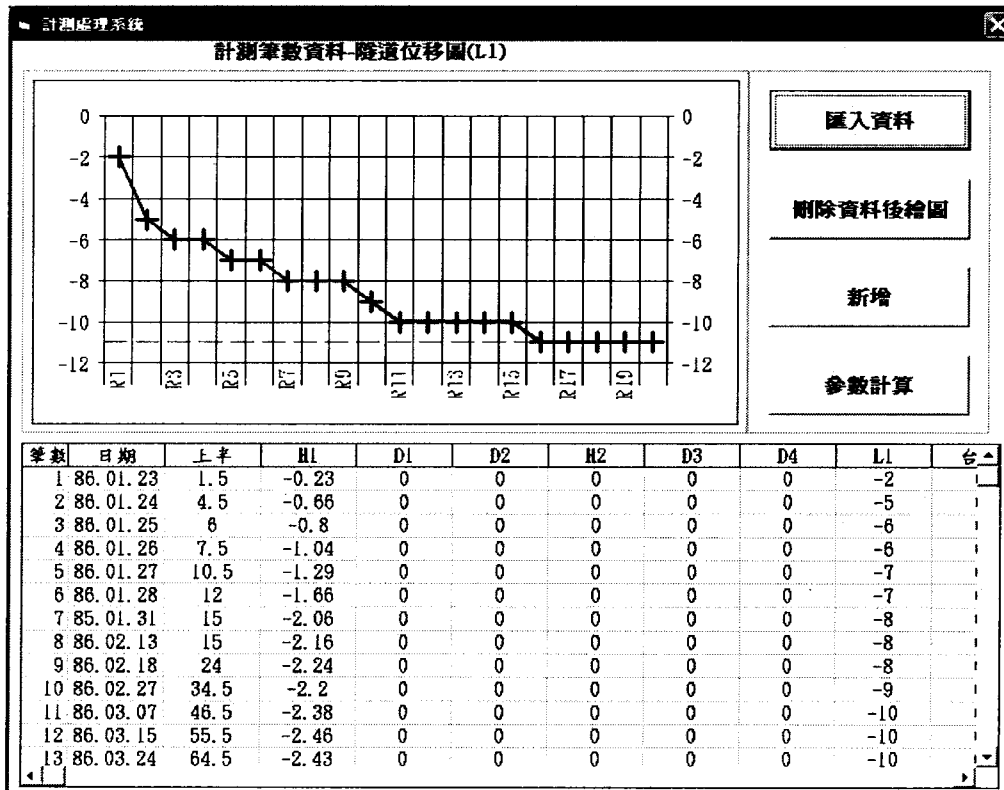
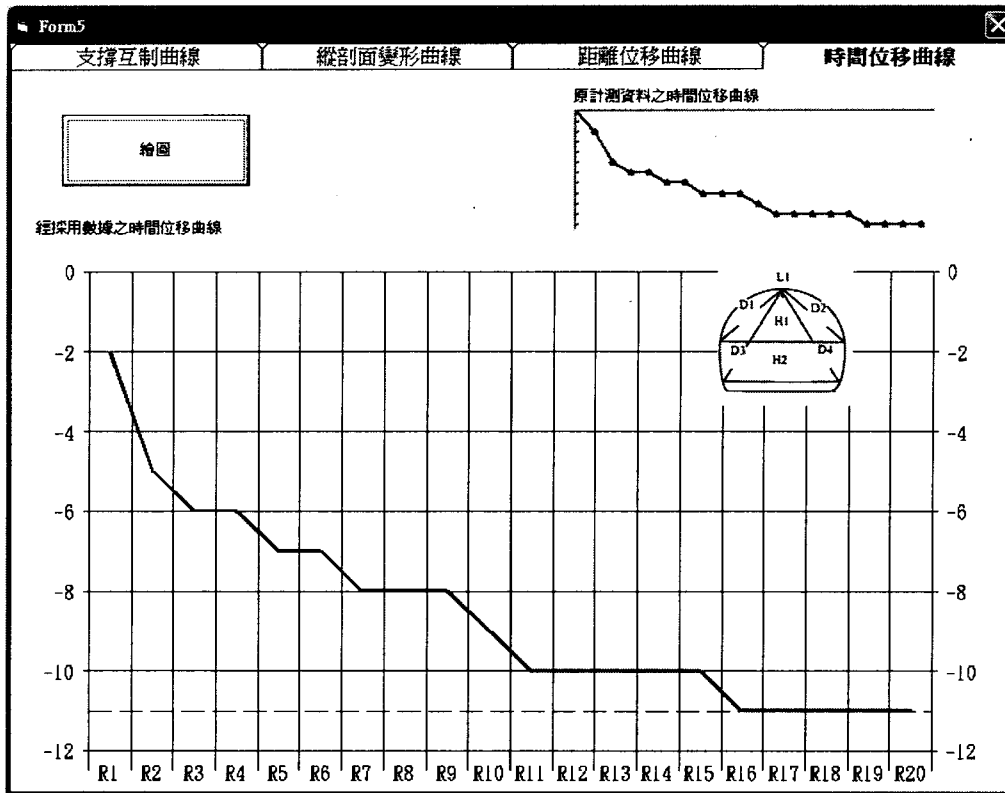
圖 4.17 計測點 WR058 支撐互制曲線(L1)

Figure 4.18 is a software window titled '支撐建議' (Support Recommendation). On the left is a diagram of a tunnel with support bolts. Below it, a dropdown menu shows 'RMR分類 第四類岩盤'. The main area contains several input and output fields:

- 隧道半徑R(m): 6.3
- 混凝土最大支撐壓力 P_{smax} (Mpa): 0.328
- 初始應力 σ_0 : 1.1934
- 結構支撐壓力 P_s (Mpa): 0.5573
- 安全係數FS=: 0.6
- 建議提高結構勁度為(當FS=2時): 1739.1248
- 提高安全係數時之建議噴凝土襯砌厚度(m): 0.4054900

 A warning box says '注意!安全係數小於1!'. At the bottom, there are two buttons: '建議打設6m長的岩徑' (Recommend setting 6m long rock bolts) and '<<<建議結果' (Recommendation result).

圖 4.18 計測點 WR058 支撐建議系統



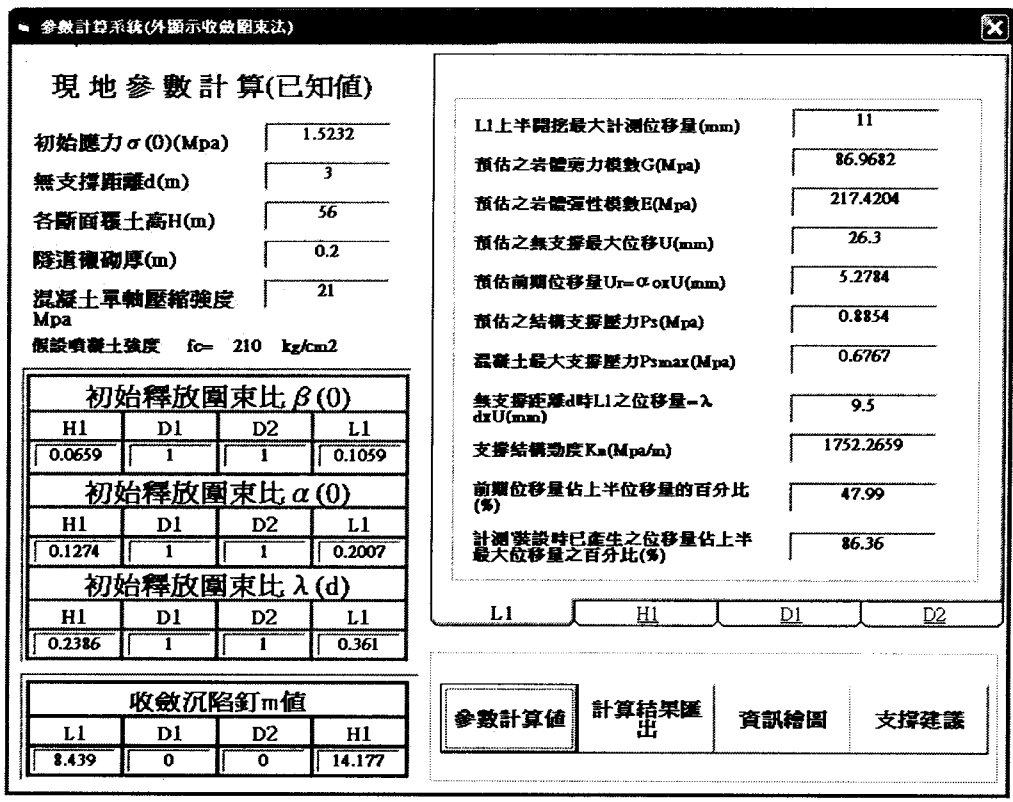


圖 4.21 計測點 YSS5 參數計算結果(L1)

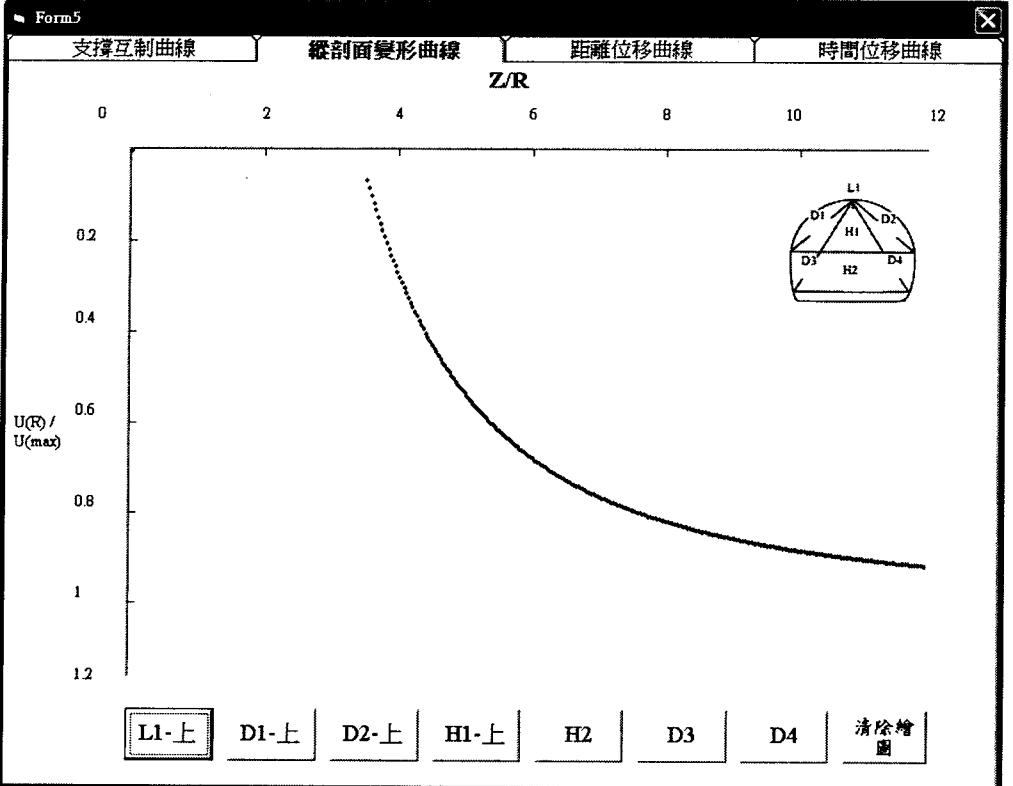


圖 4.22 計測點 YSS5 縱剖面變形曲線(L1)

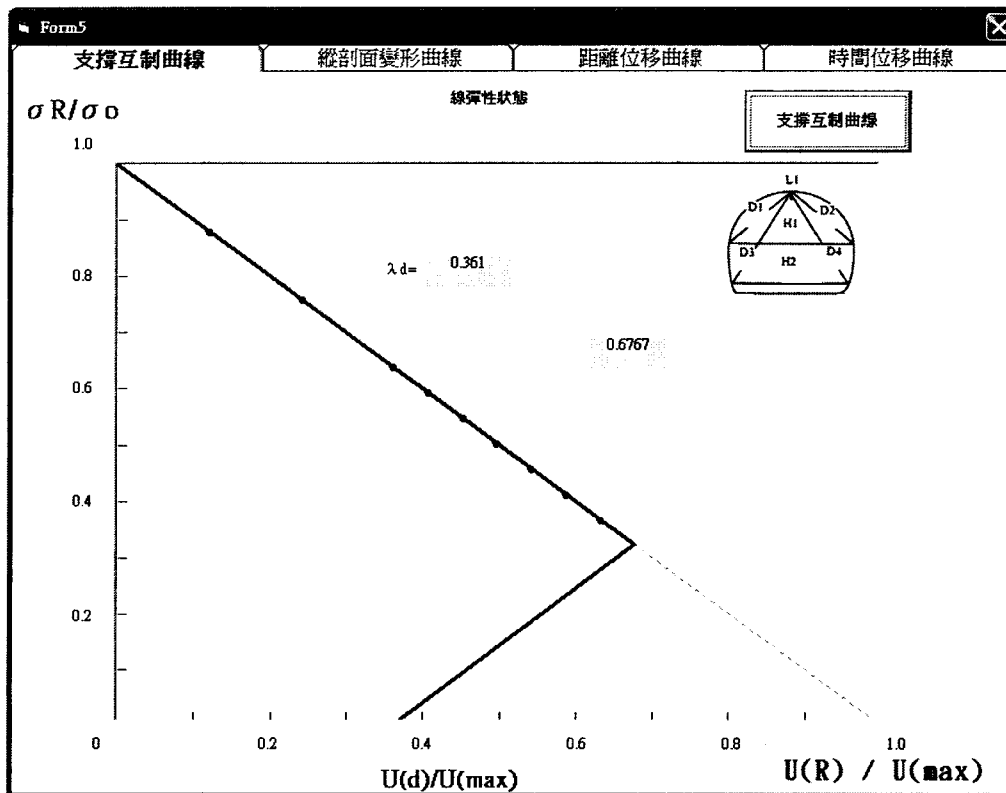


圖 4.23 計測點 YSS5 支撐互制曲線(L1)

支撐建議

隧道半徑R(m) 3 混凝土最大支撐壓力 P_{smax} (Mpa) 0.6767

初始應力 σ_0 1.5232 結構支撐壓力 P_s (Mpa) 0.8854

安全係數FS= 0.8

注意!安全係數小於1!

建議提高結構勁度為(當FS=2時) 3503.0682

提高安全係數時之建議噴混凝土襯砌厚度(m) 0.3699887

<<<建議結果

RMR分類 第三類岩盤

RMR分類 第三類岩盤:上部先挖1.5-3m,每一循環皆需支撐,支撐不遠於前壁10m;天盤側壁皆須有系統岩栓長4m,距1.5-2m,天盤需網天盤100-150mm側壁30mm,嚴重破裂之不穩定岩體,層面強度低且節理情況不利,若無適當支撐,局部破裂有可能漸進導致隧道不穩定,頂拱及側壁均需採系統性支撐,局部區域可能超壓

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值

凝聚力C(Mpa) 2 $\sigma(c)$ 3.999999

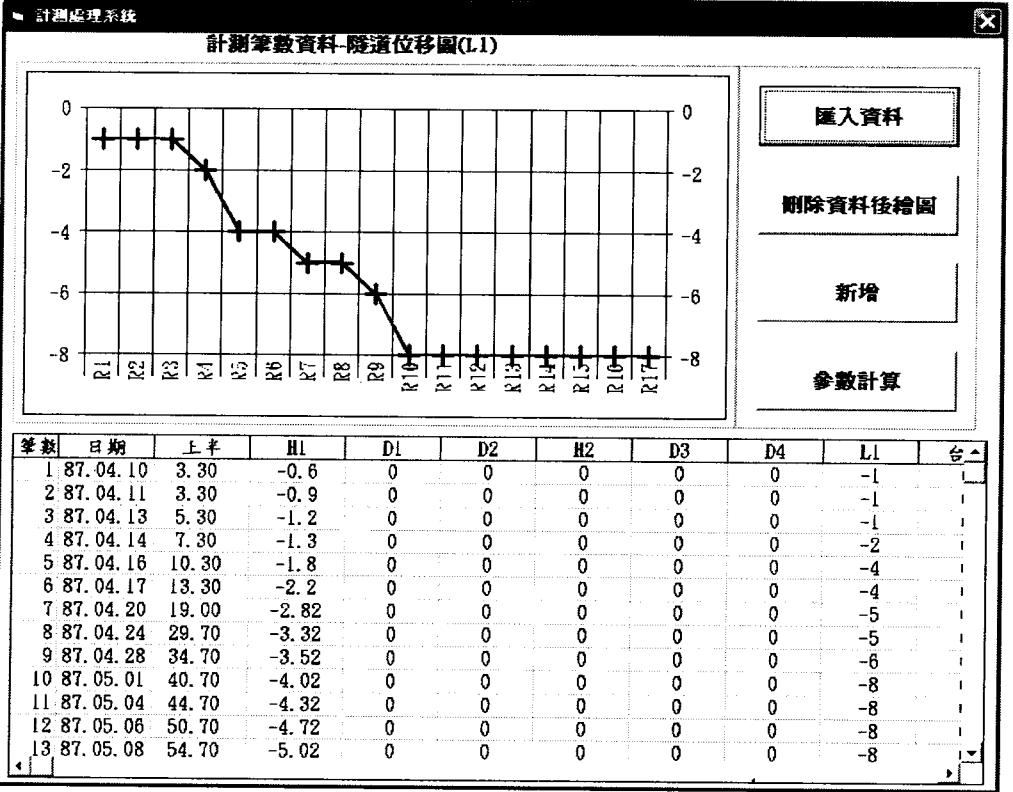
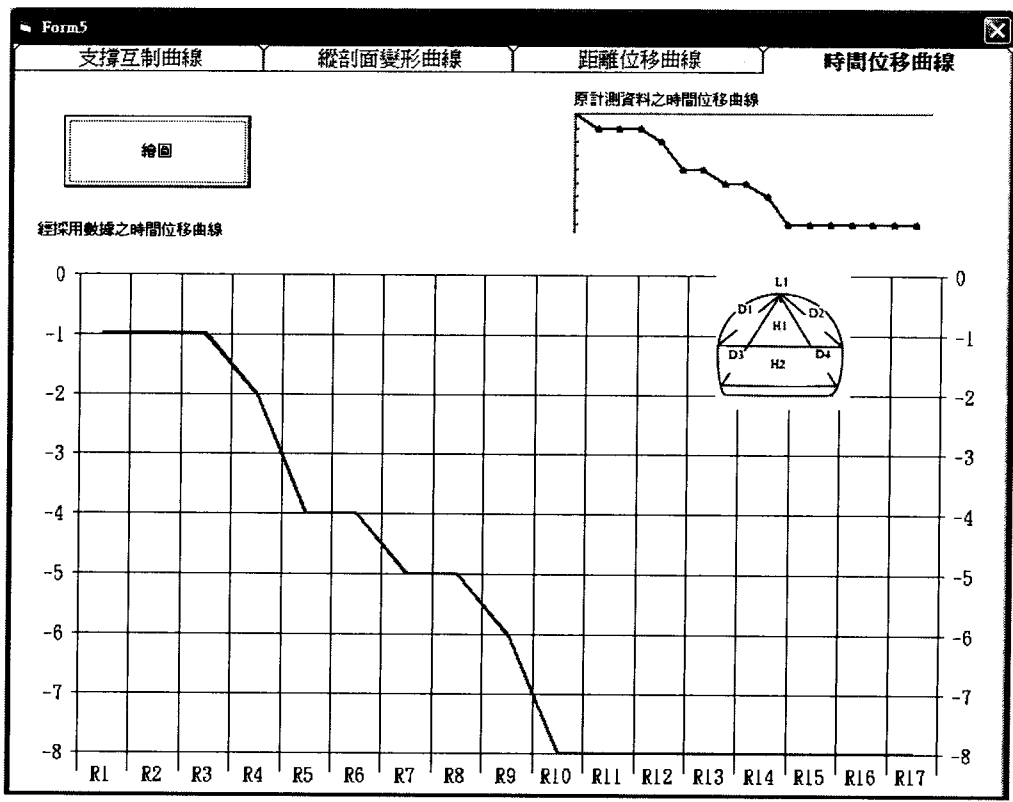
摩擦角 ϕ 25 彈性極限值 λ_e 1.180735

離隧道開挖面特定距離之情況 $r=rp$ 隧道開挖面上之情況 $r=rp$

塑性區半徑 r_p (m) 2.79007 塑性區半徑 r_p (m) 2.79007

建議打設3m長的岩栓 建議打設3m長的岩栓

圖 4.24 計測點 YSS5 支撐建議系統



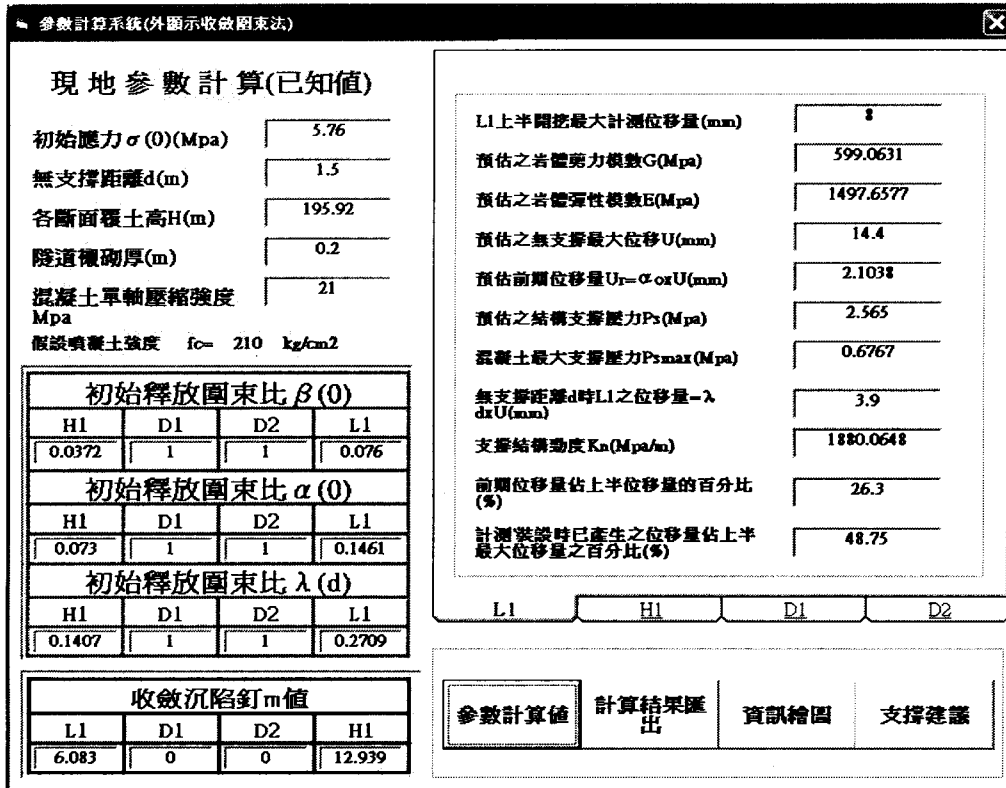


圖 4.27 計測點 YSS20 參數計算結果(L1)

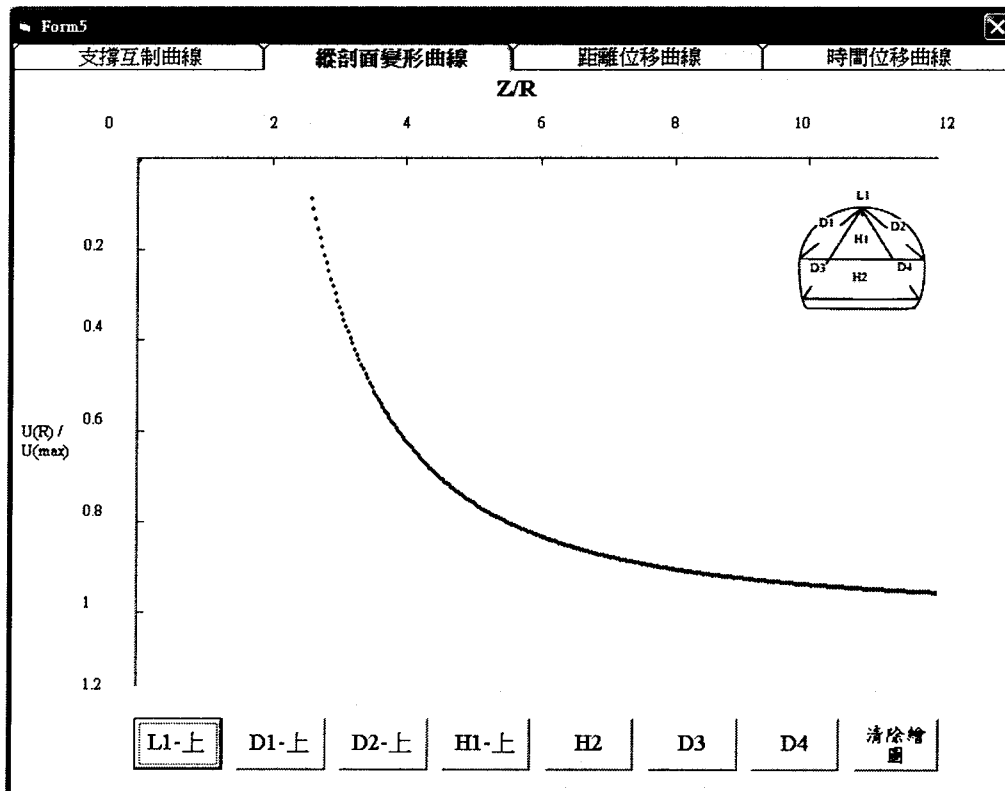


圖 4.28 計測點 YSS20 縱剖面變形曲線(L1)

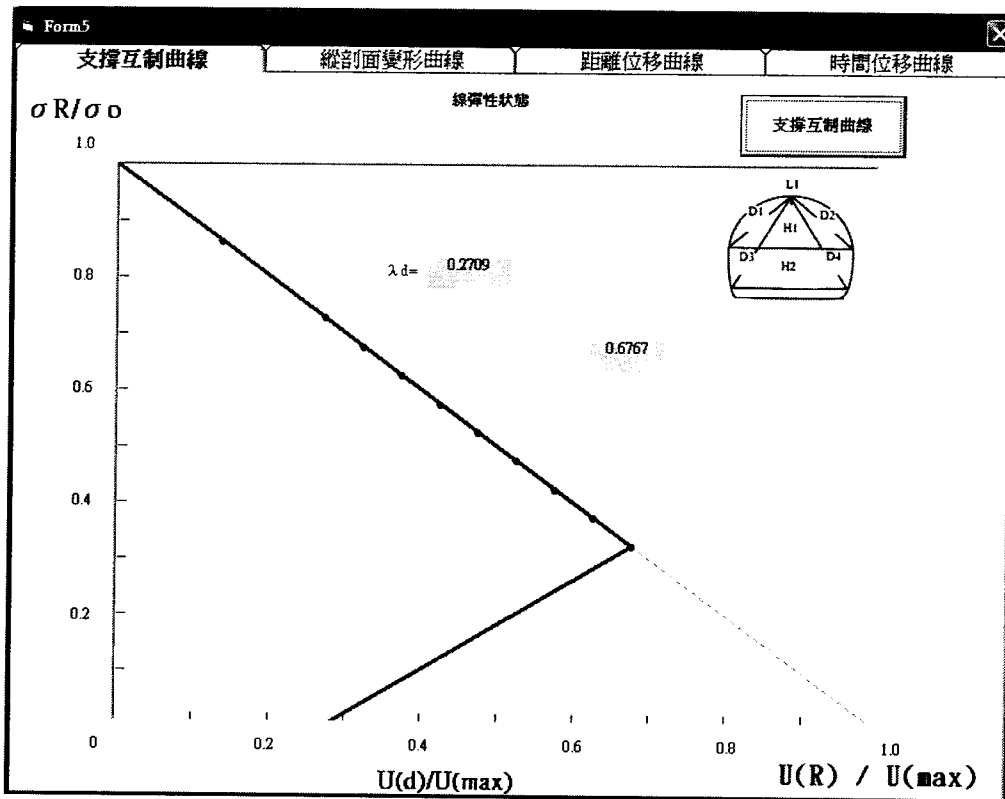


圖 4.29 計測點 YSS20 支撐互制曲線(L1)

支撐建議

RMR分類 第四類岩盤

RMR分類 第四類岩盤: 上部先挖1.5-3m, 支保與開挖並進, 支保不遠於前壁10m; 天盤側壁皆需鋼及有系統岩柱長4-5m, 距1-1.5m; 天盤100-150mm, 側壁100mm; 如有必要, 輕型鋼支保1.5m完全破裂、或軟弱、或輕微受壓之岩體, 岩體自立時間短, 常須以鋼筋或鋼桁架配合噴凝土襯砌來確保施工安全。輕微岩壓及塑性變形有可能發生, 但數天內可趨於穩定, 依監測可能需要仰拱閉合

隧道半徑R(m) 3 混凝土最大支撐壓力 P_{smax} (Mpa) 0.6767

初始應力 σo 5.76 結構支撐壓力 P_s (Mpa) 2.565

安全係數FS= 0.3 **注意!安全係數小於1!**

建議提高結構勁度為(當FS=2時) 3760.1414

提高安全係數時之建議噴凝土襯砌厚度(m) 0.3944042

<<<建議結果

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值

凝聚力C(Mpa) 1 $\sigma(c)$ 2

摩擦角 ϕ 15 彈性極限值 λe 0.387496

離隧道開挖面特定距離之情況 $r=rp$ 隧道開挖面上之情況 $r=rp$

塑性區半徑 rp (m) 9.47091 塑性區半徑 rp (m) 9.47095

建議打設9m長的岩柱 建議打設9m長的岩柱

圖 4.30 計測點 YSS20 支撐建議系統

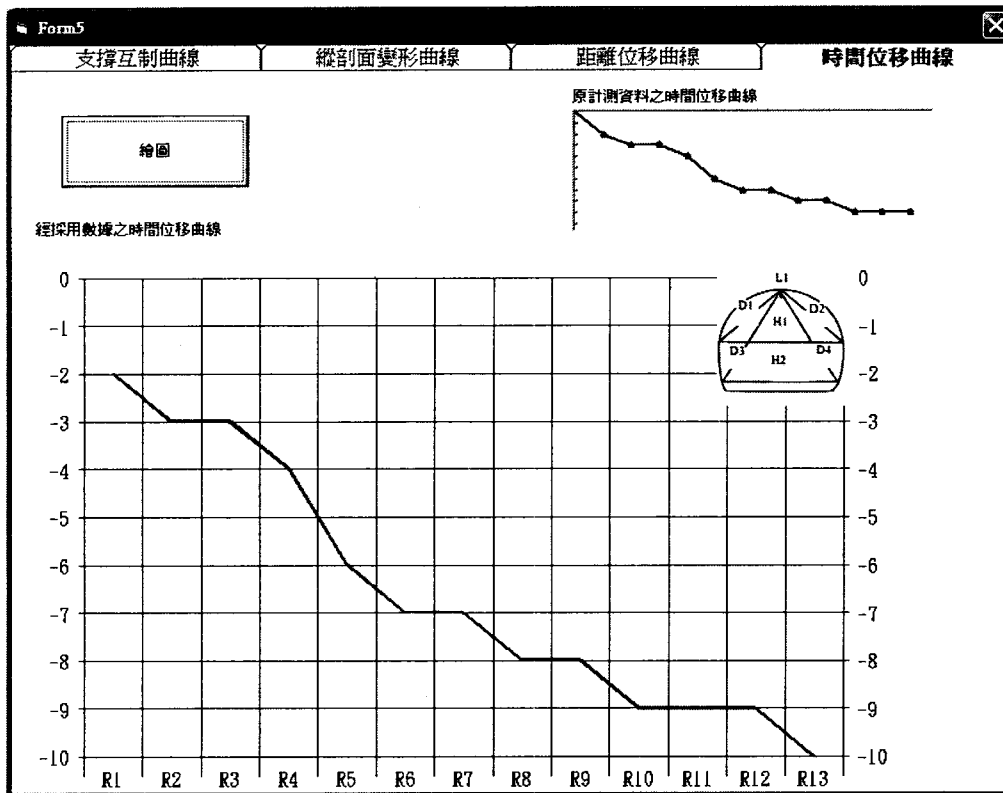


圖 4.31 計測點 YSN9 時間位移曲線

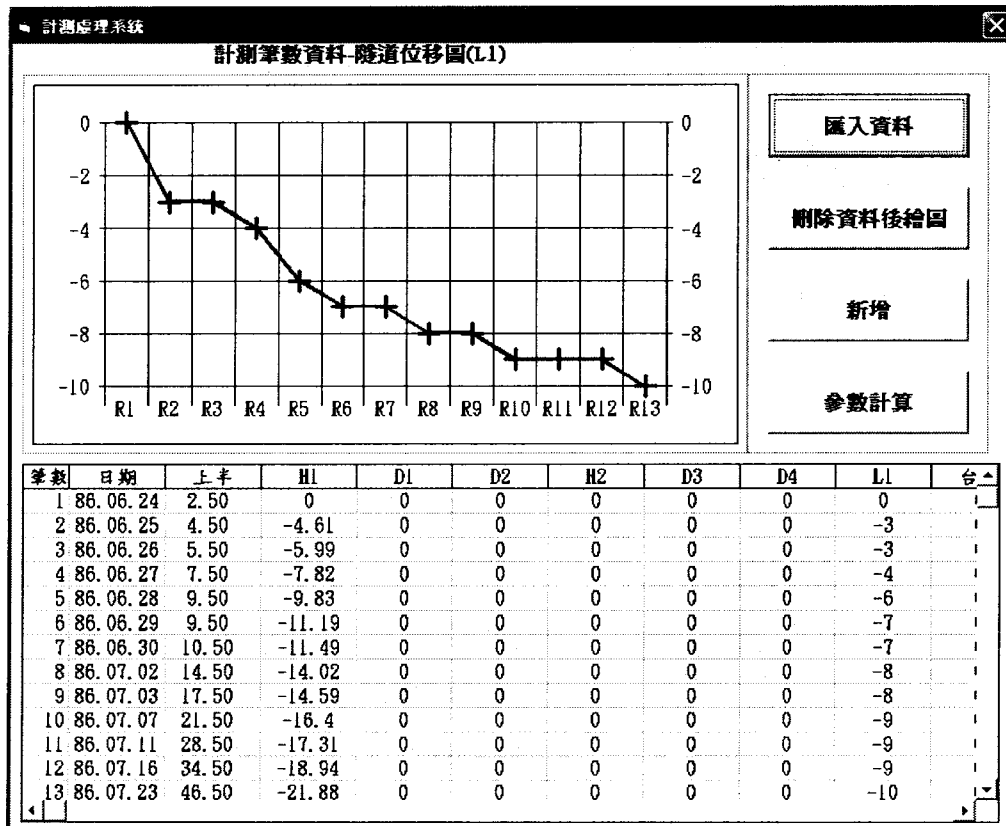


圖 4.32 計測點 YSN9 收斂資料匯入視窗

參數計算系統(外顯示收斂圖表法)

現地參數計算(已知值)

初始應力 $\sigma(0)$ (Mpa) = 2.3386
 無支撐距離d(m) = 3
 各斷面覆土高H(m) = 89.6
 隧道襯砌厚(m) = 0.2
 混凝土單軸壓縮強度 Mpa = 21
 假設噴凝土強度 $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

初始釋放圍束比 $\beta(0)$			
H1	D1	D2	L1
0.1101	1	1	0.1514

初始釋放圍束比 $\alpha(0)$			
H1	D1	D2	L1
0.2081	1	1	0.2799

初始釋放圍束比 $\lambda(d)$			
H1	D1	D2	L1
0.3729	1	1	0.4815

收斂沉陷釘m值			
L1	D1	D2	H1
5.604	0	0	8.082

L1上半開挖最大計測位移量(mm)	10
預估之岩體剪力模數G(Mpa)	203.1395
預估之岩體彈性模數E(Mpa)	507.8488
預估之無支撐最大位移U(mm)	17.3
預估前期位移量 $U_r = \alpha \cdot \sigma U$ (mm)	4.8423
預估之結構支撐壓力 P_s (Mpa)	0.9843
混凝土最大支撐壓力 P_{smax} (Mpa)	0.6767
無支撐距離d時L1之位移量 $-\lambda \cdot dx U$ (mm)	8.3
支撐結構勁度 K_n (Mpa/m)	1752.2659
前期位移量佔上半位移量的百分比(%)	48.42
計測裝設時已產生之位移量佔上半最大位移量之百分比(%)	83

圖 4.33 計測點 YSN9 參數計算結果(L1)

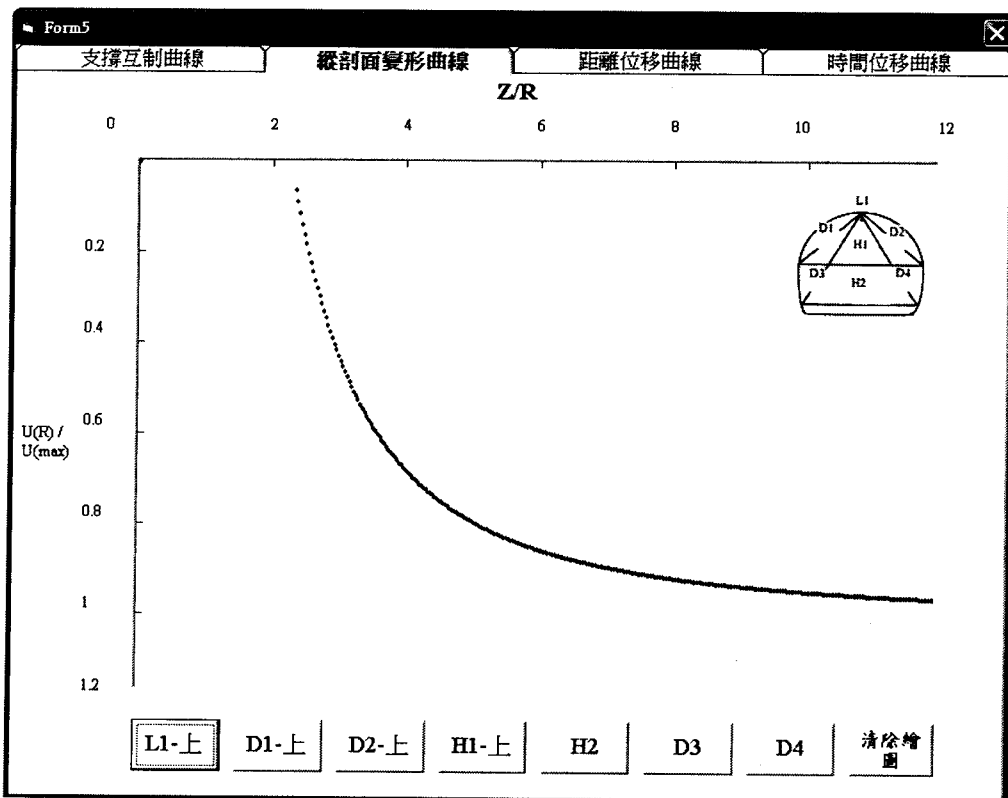


圖 4.34 計測點 YSN9 縱剖面變形曲線(L1)

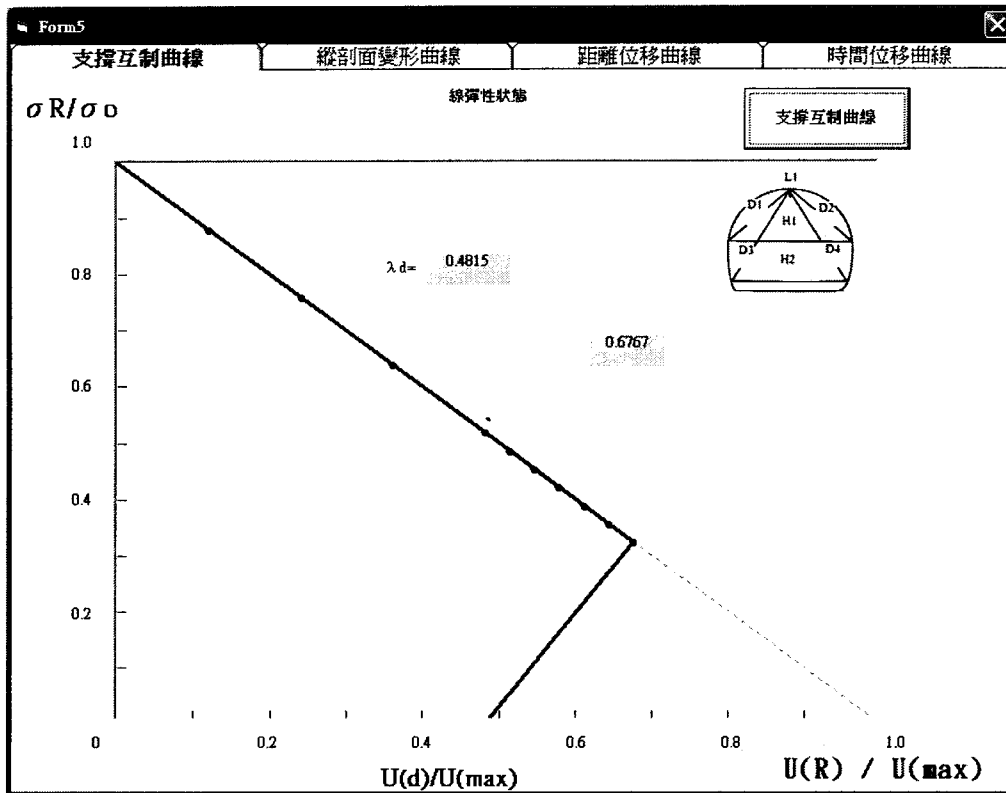


圖 4.35 計測點 YSN9 支撐互制曲線(L1)

支撐建議

隧道半徑R(m) 3 混凝土最大支撐壓力Pmax(Mpa) 0.6767

初始應力 σo 2.3386 結構支撐壓力Ps(Mpa) 0.9843

安全係數FS= 0.7 **注意!安全係數小於1!**

建議提高結構勁度為(當FS<2時) 3503.8398

提高安全係數時之建議噴凝土襯砌厚度(m) 0.3700625

<<<建議結果

RMR分類 第五類岩盤

RMR分類 第五類岩盤:多導坑,上部先挖0.5-1.5m,支保與開挖並進,開挖後立即噴將保護;天盤側壁皆需網及有系統岩柱長5-6m,距1-1.5m仰拱需岩柱;天盤150-200m,側壁150mm,前壁50mm;中至重型距離0.75m塞緊或插板仰拱閉合受壓岩體且強度低,內含破碎帶或剪裂帶,常導致岩體之剪力破壞。常處於中至高之覆蓋深度下,襯砌受壓及變形延續一段時間後將造成岩體之漸進破壞,岩壓亦可能由膨脹性黏土礦物造成

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值

凝聚力C(Mpa) 0.99 $\sigma (c)$ 1.98

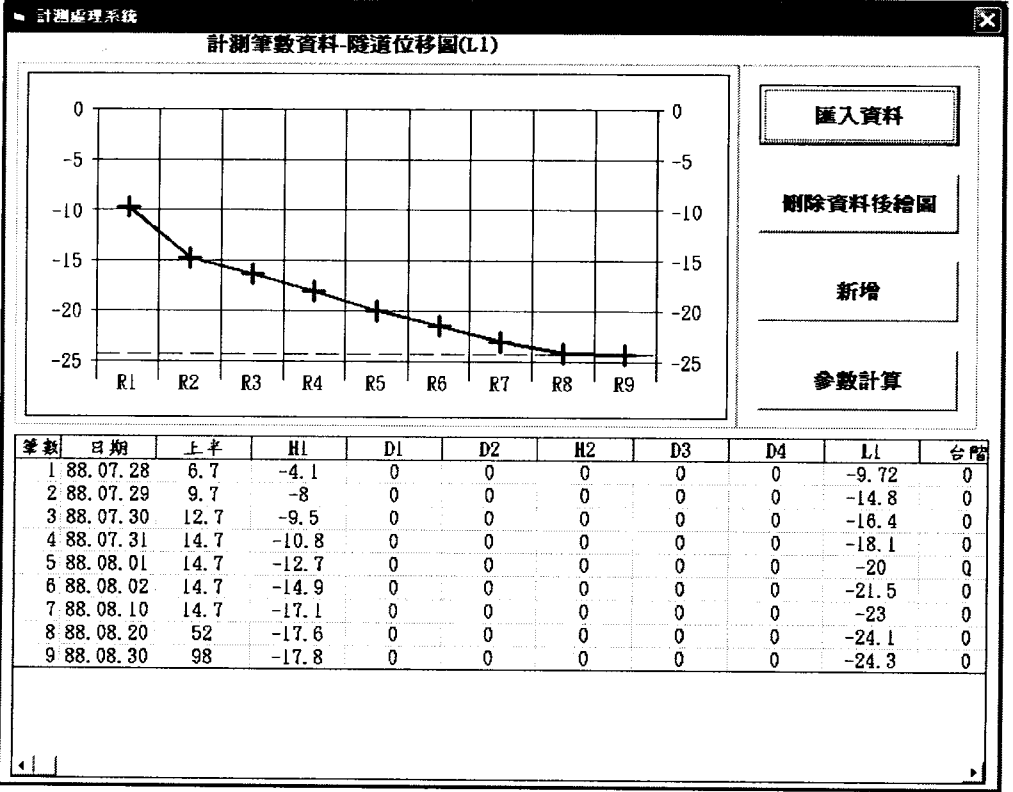
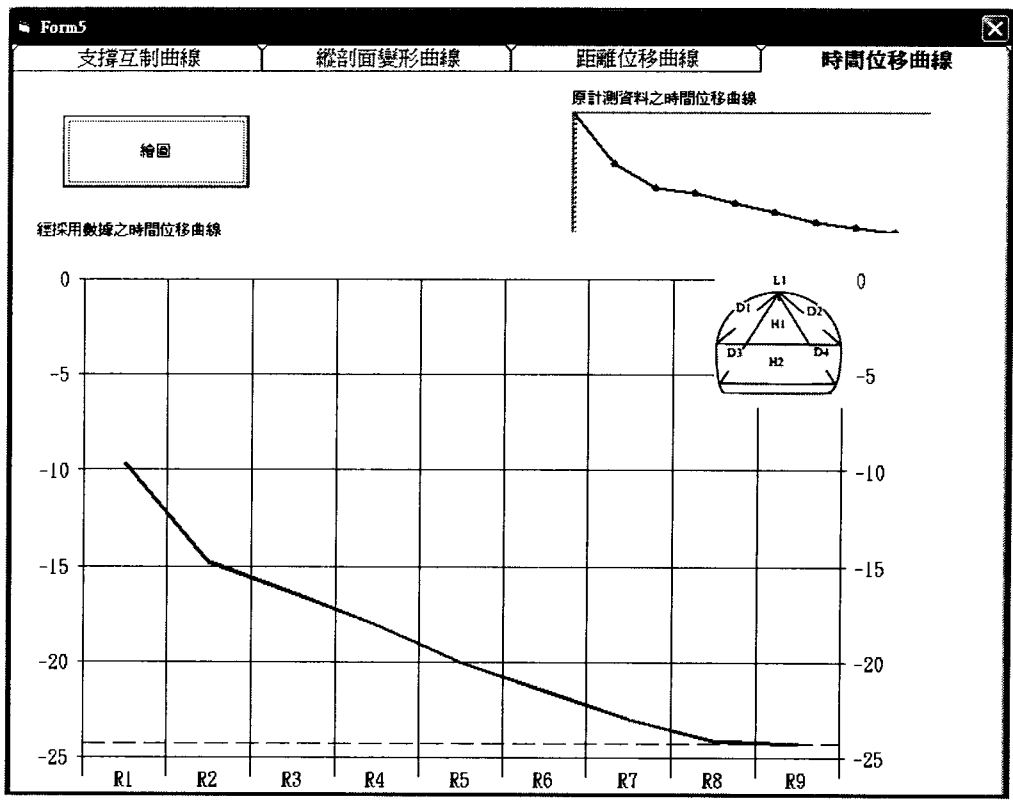
摩擦角 ϕ 14 彈性極限值 λe 0.562839

離隧道開挖面特定距離之情況 $r=rp$ 隧道開挖面上之情況 $r=rp$

塑性區半徑rp(m) 4.6874E 塑性區半徑rp(m) 4.6874E

建議打設3m長的岩栓 建議打設3m長的岩栓

圖 4.36 計測點 YSN9 支撐建議系統



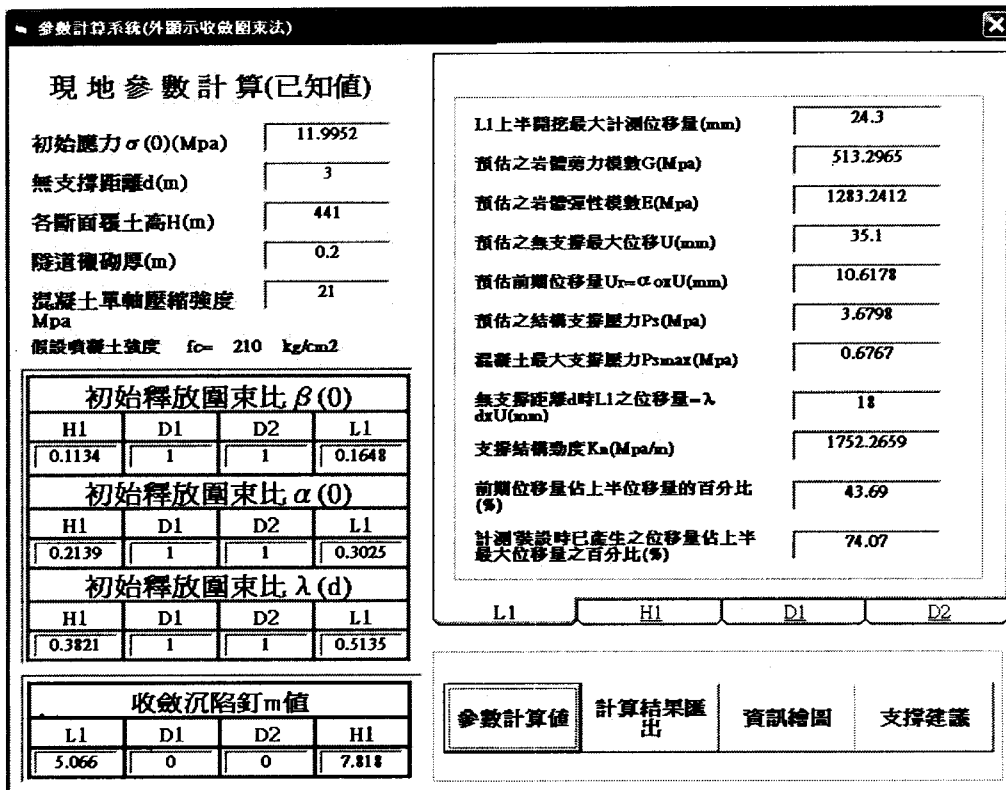


圖 4.39 計測點 NP20 參數計算結果(L1)

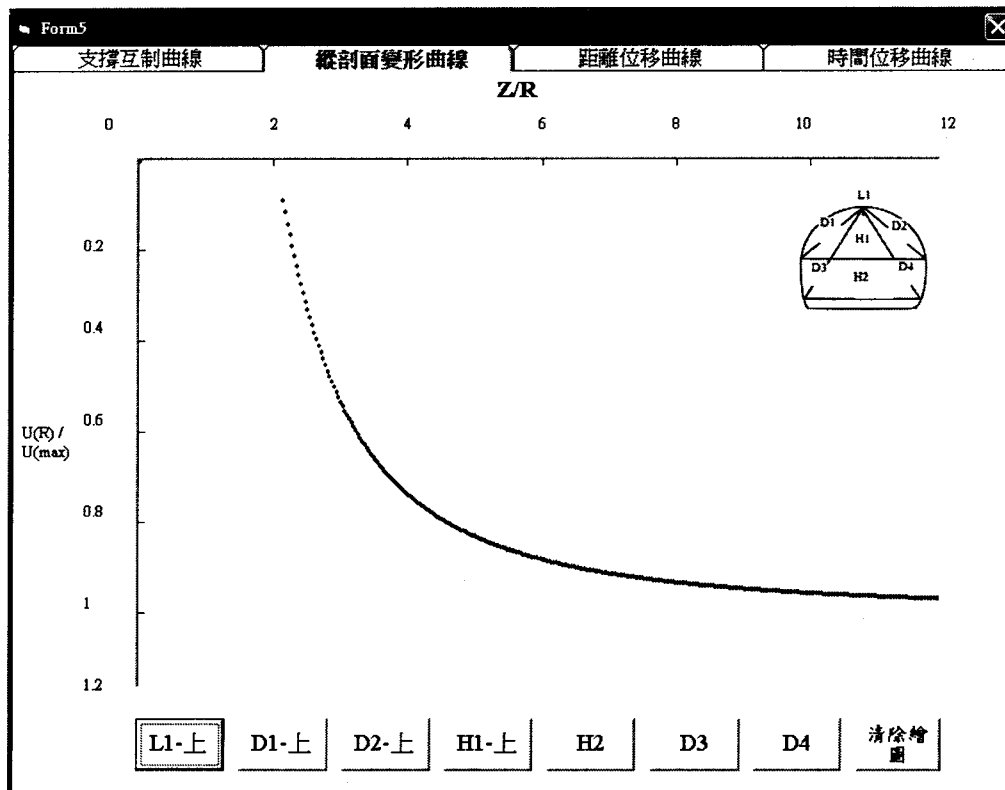


圖 4.40 計測點 NP20 縱剖面變形曲線(L1)

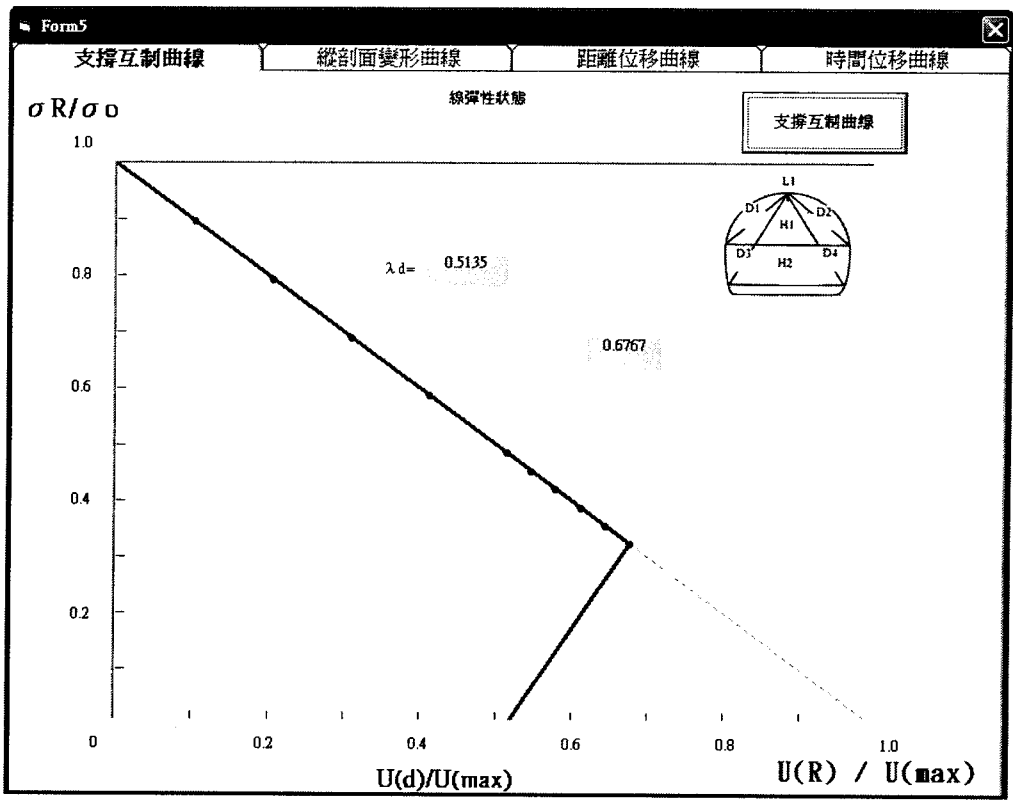


圖 4.41 計測點 NP20 支撐互制曲線(L1)

支撐建議

隧道半徑R(m) 3 混凝土最大支撐壓力Pmax(Mpa) 0.6767

初始應力 σo 11.9952 結構支撐壓力Ps(Mpa) 3.6798

安全係數FS= 0.2 **注意!安全係數小於1!**

建議提高結構勁度為(當FS=2時) 3504.5397

提高安全係數時之建議噴凝土襯砌厚度(m) 0.3701294

<<<建議結果

RMR分類 第五類岩盤

RMR分類 第五類岩盤: 多導坑, 上部先挖0.5-1.5m, 支撐與開挖並進, 開挖後立即噴將保護, 天盤側壁皆需網及有系統岩栓長5-6m, 距1-1.5m仰拱需岩栓: 天盤150-200mm, 側壁150mm, 前壁50mm: 中至重型岩體且強度低, 內含破碎帶或剪裂帶, 常導致岩體之剪力破壞。常處於中至高之覆蓋深度下, 襯砌受壓及變形延續一段時間後將造成岩體之漸進破壞, 岩壓亦可能由膨脹性黏土礦物造成

塑性區計算結果

可手動輸入或依RMR建議之值

凝聚力C(Mpa) 0.99 $\sigma(c)$ 1.98

摩擦角 ϕ 14 彈性極限值 λe 0.304488

離隧道開挖面特定距離之情況 r=rp 隧道開挖面上之情況 r=rp

塑性區半徑rp(m) 23.195 塑性區半徑rp(m) 23.195

建議打設9m長的岩栓 建議打設9m長的岩栓

圖 4.42 計測點 NP20 支撐建議系統

第五章 結論與建議

本研究隧道開挖收方技術與回饋分析模式之研究及其應用軟體之研發，於外觀式收斂圍束法可視化程式中增加其功能性、實用性，並針對各個系統視窗做介面修改，最後輔以實際案例分析。以下即針對本研究之過程，並綜合第四章之分析結果與討論提出以下結論與建議。

5.1 結論

- (一) 針對本視窗程式之實用性、使用性做階段性的增加、修改。於岩體分類系統部分增加 GSI、Q 及台灣岩體分類系統使用判斷，並給予工程參數 C、 ϕ 參數值提供使用者在工程區域以及施工之參考。並且在計算分析部份除原本之隧道斷面上半頂拱 L1 點分析計算，更加入上半 H1、D1、D2，使程式能對整個上半隧道斷面進行分析。於支撐系統視窗，針對支撐建議部分給予補強支撐之建議，除原本噴凝土支撐外，再加入鋼支保支撐建議使用。本研究同時針對其他視窗做介面修改，對各系統視窗之介面給予整理。於資訊繪圖視窗，將原本之縱剖面變形曲線繪圖予以修改，使繪圖視窗依照格式進行曲線繪製。
- (二) 針對本視窗程式迴歸分析、計算參數之正確性進行測試，測試結果於計算參數部份並無錯誤。於迴歸分析計算部份，與統計分析軟體 SPSS 進行假設迴歸計算，計算後結果本視窗程式之誤差值約為 1~3%，應屬容許範圍內。
- (三) 利用實際分析隧道斷面，使用八卦山、新永春以及新南澳隧道之計測資料，結果顯示，隨著地盤等級之優劣（三、四、五類）迴歸參數 m 值隨地盤等級較佳而增大、彈性模數 E 值亦同、而斷面開挖完成之位移量與最終之位移量百分比則變小。同時，最終之位移量與地域覆土高、岩體分類相關。
- (四) 程式同時研發斷面收方程式，而整合的方式係以表單組合模式進行結合，並對資料庫系統整合為一。整合此兩個視窗程式期望可發展為一應用於隧道之多樣化視窗軟體。

5.2 建議

- (一) 支撐建議系統目前程式使用 RMR 評分參數給予建議，可增加其他種類支撐建議，或依據台灣常用之支撐系統輔以參考。
- (二) 整合之可視化收斂圍束法視窗程式與斷面收方視窗程式使用上可針對相關

性進行輔助相互應用。例如當斷面收方程式判斷出開挖是為超挖或不足後，

性進行輔助相互應用。例如當斷面收方程式判斷出開挖是為超挖或不足後，可利用外顯式收斂圍束法程式進行探討分析，對下一階段開挖給予參考、建議。

(三)目前程式資料庫系統為儲存與置放之功能，如能將分析後之隧道資料整合，提供一使用平台，連結網路等系統資訊應用，對隧道工程應用為一大助益。

第六章 參考文獻

- [1] 王銘鋒，「可視化收斂圍束法在隧道工程分析與設計之研究」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（2005）。
- [2] 行政院公共工程委員會，「台灣地區隧道岩體分類系統暨 隧道工程資料庫之建立總報告書」，台灣（2000）。
- [3] 后振宇，「卵礫石層隧道開挖與支撐互制行為之研究」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（2003）。
- [4] 李煜舫，「隧道開挖前進效應與岩體力學行為關係之探討」，第三屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，四川成都，pp.359~365(2002)。
- [5] 李煜舫，「收斂圍束法在新奧隧道工法之分析與應用」，地工技術，第九十五期，第 95-106 頁（2003）。
- [6] 李文元，「隧道斷面收方技術與視窗程式設計之研究」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（2006）。
- [7] 吳耀焜，張宏德，羅國峰，「八卦山隧道工程施工計測管理與回饋分析」，台灣公路工程，第三十卷，第五期，第 30-46 頁（2003）。
- [8] 林志民，「岩石隧道之模組化分析-多孔隧道之交互影響應用」，碩士論文，國立交通大學土木工程系，新竹（1996）。
- [9] 林銘益，「台灣東部變質岩隧道群收斂資料之分析與應用」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（2003）。
- [10] 林子軒，「土木結構修復補強知識管理與支援決策輔助資訊系統之研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程系，新竹（2003）。
- [11] 柳雅濤，「模糊德菲層級分析法應用於岩體分類之研究」，碩士論文，國立成功大學資源工程學系，台南（2002）。
- [12] 陳正勳，「岩石隧道地盤反應曲線之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程系，台北（1989）。
- [13] 陳威甫，「視窗化滯洪池設計之研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程系，台中（2001）。
- [14] 陳聖彥，「視窗化收斂圍束法在隧道工程之研究與應用」，碩士論文，

- 中華大學土木工程系，新竹（2004）。
- [15] 陳羿安，「卵礫石層隧道計測資料之分析與應用」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（2004）。
- [16] 許榮達，「隧道斷面收方技術開發與工程應用之研究」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（2004）。
- [17] 黃毓棋，「加勁邊坡之分析與電腦程式開發」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中（2004）。
- [18] 張榮興，Visual Basic數值解析與工程計應用，全威圖書有限公司，台北（2002）。
- [19] 趙華誠，「以雙曲線模式探討隧道開挖之地盤反應曲線」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹（1998）。
- [20] 廖博才，「以雙曲線模式模擬卵礫石層隧道開挖之最佳化數值分析研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程系，台北（2000）。
- [21] 劉立泰，「微震監測自動化系統程式之建立」，碩士論文，國立成功大學土木工程系，台南（2004）。
- [22] 嚴嘉錚，Visual Basic 6.0 實務經典，領達圖書有限公司，台北（1998）。
- [23] Bieniawski, Z.T., "Engineering rock mass classification," Wiley, New York, 251 pp. (1989) .
- [24] Barton, N., "Some new Q-value correlations to assist insite characterisation and tunnel design," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, pp. 185-216 (2002) .
- [25] Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., "The elasto-plastic response of underground excavation in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, pp .777-809 (1999) .
- [26] Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., "Application of the Convergence-Confinement Method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.16, No.2, pp. 187-213 (2000) .
- [27] Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y. and Minami, M., "Estimation of

- rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 3-19 (2004) .
- [28] Hoek, E., and Brown, E.T. *Underground Excavation in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy London, England. (1980) .
- [29] Hoek, E. and Brown, E. T., “Practical estimates of rock mass strength,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No. 8, pp. 1135-1186 (1997) .
- [30] Ozsan.A. and Basarir.H, “Support capacity estimation of a diversion tunnel in weak rock,” *Engineering Geology*, Vol. 68, pp. 319–331 (2002) .
- [31] Oreste, P. P., “Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence confinement approach,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, pp. 347-363 (2003).
- [32] Panet, M., “Calcul des tunnels par la méthode de Convergence-Confinement, ” Press de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. (1995)
- [33] Ramamurthy, T., “A geo-engineering classification for rocks and rock masses,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 89-101 (2004) .
- [34] Sonmez, H. and Ulusay, R., “Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability of slopes,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, pp. 743-760 (1999) .
- [35] Sakurai, S., Akutagawa, K., Shinji, M., and Shimizu,N. “Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, pp. 185-196 (2003) .
- [36] Verman, M., Singh, B., Jethwa, J. L. and Viladkar, M. N., “Determination of support reaction curve for steel-supported tunnels,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No.2 , pp. 217-224 (1995) .

第七章 研究成果自評

本研究計畫具有兩個研究主軸包含：「(I) 隧道開挖收方量測技術之研究與其應用軟體之研發」與「(II) 隧道開挖現地計測資料回饋分析模式之研究與其應用軟體之研發」。

首先是本計畫之第一研究目的，考量隧道開挖前進效應影響和在現地複雜工程的條件下，建立快速便捷之收方量測技術，以此技術嘗試替換傳統副計測之收斂量測方法，同時以 M. S. Visual Basic 程式語言開發新資訊平台軟體，迅速確實地將隧道三維量測座標轉換成可用之縱剖面變形曲線與整體隧道圓弧變形斷面，並提供現場施工單位圖形化之資訊和研判，以便作出及時安全評估或支撐系統修正之建議，並達到便捷安穩之工程應用目標。

其次，本計畫之第二研究目的為，以現地隧道收斂計測資料為依據（包含隧道開挖計測岩栓、伸張儀、收方量測之變形剖面或曲線等相關位移收斂資料），利用數值化收斂圍束法理論，並採用外顯式分析法建立計算流程和步驟；同時以 M. S. Visual Basic 程式語言開發新資訊平台軟體，繪製隧道開挖縱剖面變形曲線，並經由回歸分析而獲得此曲線之模式參數，由計算獲得隧道開挖無支撐之前期位移量，建立地盤收斂曲線和支撐反力曲線之互制關係，進而完成隧道輪進開挖支撐設計之檢核或修正，以達現地施工現況及時反應控制之目標。

對於參與研究工作人員之專業訓練，兩年研究期間共培養四位碩士研究生，並以上述兩主題為其碩士班研究論文題材，同時發表論文於大地工程領域之研討會（2006 岩盤工程研討會、2006 第五屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會），並獲得 2006 岩盤工程研討會頒發之「優良論文獎」。

因此，目前研究成果已達預期年度研究工作與目標，且研究內容與成果與原計畫程度相符。本研究成果在應用價值上，可以應用到隧道開挖收方技術的整合應用，以及隧道開挖岩體收斂結構支撐間之互制行為模擬即時化的結果。其次可進一步著手日後專利之申請，已達研究成果轉移產業技術的目標！

第八章 附錄使用手冊

一、程式簡介

二、程式安裝

2.1 系統需求

2.2 程式安裝

三、輸出入檔案

3.1 檔案說明與輸出入格式

四、系統介面與功能說明

4.1 可視化外顯式收斂圍束法在隧道工程之應用

4.2 可視化斷面收方程式

五、程式流程

一、程式簡介

本可視化視窗程式為適用隧道開挖工程的程式以及隧道開挖面收方測量計算之應用，外顯式收斂圍束法在隧道工程之應用基本之分析模式係以外顯示收斂圍束法之基本假設以及原理應用。程式本身提供使用者在分析輸入及輸出時之多種方便性：

1. 輸入檔之匯入方式使用 Microsoft Office Excel 所建立，只需將資料輸入 excel 檔即可匯入。
2. 全圖形化之輸出視窗界面，讓使用者可隨時檢視輸入參數、分析斷面與分析結果之圖形展示，達到使用者親和界面之目的。並藉由程式所提供之分析與展示，使設計者能快速完成最佳之隧道開挖支撐設計以及斷面分析。

二、程式安裝

2.1 程式需求

本程式為視窗環境下所發展之應用程式，可於一般視窗作業系統下執行，如 Window95/98/2000/XP 等，其軟硬體系統需求如下：

IBM PC 或相容電腦

Pentium 以上等級 CPU

32MB 以上記憶體

100MB 以上可用硬碟空間

VGA 以上等級顯示卡(解析度設定 1024-768 像素與小字型較佳)，螢幕解析度與字型設定由[控制台]→[顯示]→[設定值]中設定。

微軟相容滑鼠

光碟機

Window9x、Millennium Edition、NT4.0、2000 或 XP 作業系統。

2.2 程式安裝

程式安裝相當簡便，執行 SETUP.EXE 即進行系統安裝程序，遵循螢幕畫面指示進行安裝即可。若需移除本程式，可由 Windows 系統[控制台]之[新增移除程式]執行移除動作。

三、輸出入檔案

3.1 檔案說明與輸出入格式

本程式之輸出入檔案包括輸入檔(*.csv)、輸出檔(*.txt)，所以檔案皆支援中文檔名與長檔名(英文總長 80 字元以內)。其中輸入檔由 Microsoft Office Excel 所建立，並將計測資料案一定格式輸入後另存為(*.csv)檔，即可匯入使用(詳使用手冊第 4 章)。

而完整輸出檔包含所有分析結果，其中包含上半開挖最大計測位移量、預估之岩體剪力模數、預估之岩體彈性模數、預估前期位移量、預估之結構支撐壓力、混凝土最大支撐應力、支撐結構勁度、前期位移量佔上半位移量的百分比、裝設時已產生之位移量佔上半最大位移量之百分比，其皆為純文字檔，可作為輸出結果資料處理。

四、系統介面與功能說明

當程式安裝完畢後，由桌面所顯示之捷徑可啟動程式，並即可進入系統主畫面，本程式之主畫面如圖 4.1 所示，畫面中共有兩選項可點選應用程式，[可視化外顯式收斂圍束法在隧道工程之應用]、[可視化斷面收方程式]，主功能下各有子功能選項，分述如下：

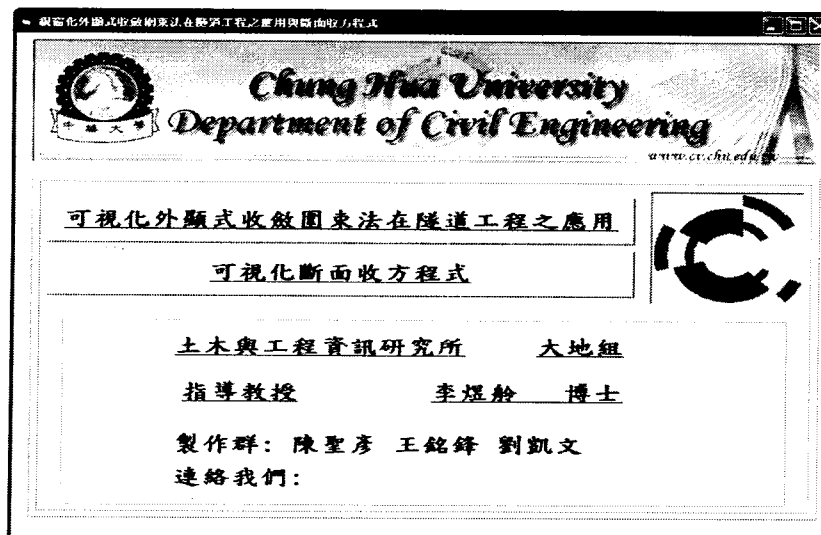


圖 4.1 執行主畫面

4.1 可視化外顯式收斂圍束法在隧道工程之應用

主功能選項分為:檔案、工程基本資料輸入、岩體分類視窗、資料匯入、參數計算、資訊繪圖、支撐建議、說明。

圖 4.2 可視化外顯式收斂圍束法在隧道工程之應用主畫面

4.1.1 檔案功能

[檔案] 功能選項包含[新增檔案]、[開啟檔案]、[儲存檔案]、[另存新檔]、[列印]、[結束程式]。如圖 4.3 所示。

圖 4.3 檔案功能

4.1.2 工程基本資料輸入選項

工程基本資料可由此選項輸入基本參數以及相關工程資料，其中包含工程名稱、施工地點、業主、設計單位、人員名稱、工程範圍等。待輸入完成後點選下一步進入岩體分類系統。

工程基本資料輸入系統

工程基本資料

工程名稱 | 施工地點 | 隧道半徑 | 無支撐距離(m)

業主 | 設計單位 | 岩層種類 | 單位重 (Mpa/m)

監造單位 | 工程時間 | 断面形式 | 覆土高度 m

人員名稱 | 職稱 | 開挖工法 | 基礎厚度 m

工程範圍 從 至 | 公里 | 公尺

下一步

圖 4.4 工程基本資料輸入系統

4.1.3 岩體分類系統

岩體分類系統選項包括[台灣岩體分類法]、[RMR 岩體分類法]、[GSI 岩體評分系統]、[Q 法評分系統]。分別如圖 4.5~4.8 所示。

台灣岩體分類法:利用選擇該工程區之岩體特性即可立即了解其地區之岩類、工程特性等相關性質。

RMR 岩體分類法:RMR 評分法係以輸入岩石單壓強度、RQD、節理間距、節理情形、地下水狀況以及節理方位等進行評分，待輸入完成後自動進行評分，並輸出分類結果以及評分值。

GSI 岩體評分系統:GSI 系統係利用圖表點選評分來判別該地區岩體評分值，只要依據圖表對岩體之構造、弱面狀況點選即可進行評分。依照國外學者 Hoek 等人所提出之回饋分析計算，按照所必須輸入之參數值也可對岩體進行評分。

Q 法評分系統:Q 法系統利用岩心品質指標、節理組數評分、節理粗糙度評分、節理面蝕變狀況、節理滲水折減因子、應力折減因子共六項點選進行評分。

岩體分類系統

台灣岩體分類法 RMR岩體分類法 GSI評分系統 Q法評分系統

台灣岩體分類法

請選擇該工程區之岩體特性

滑層左鍵點選

岩類

裂隙分布範圍

工程特性

圖 4.5 台灣岩體分類系統

岩體分類系統

台灣岩體分類法 **RMR岩體分類法** GSI評分系統 Q法評分系統

RMR岩體分類系統

岩石單壓強度(Mpa) RQD 節理距離

Text18 Label12 Text19 Label30 Text20 Label31

節理情形 地下水狀況 節理方向

滑層左鍵點選 Label11 滑層左鍵點選 Label32 滑層左鍵點選 Label33

RMR岩體評分系統

岩體凝聚力 RMR值 變形模數E值

Text29 Text21 Text13

岩體摩擦角 岩體等級

Text28 Text22

Q法岩體評分系統

Q法 岩體品質

Text23 Text24

圖 4.6 RMR 岩體分類系統

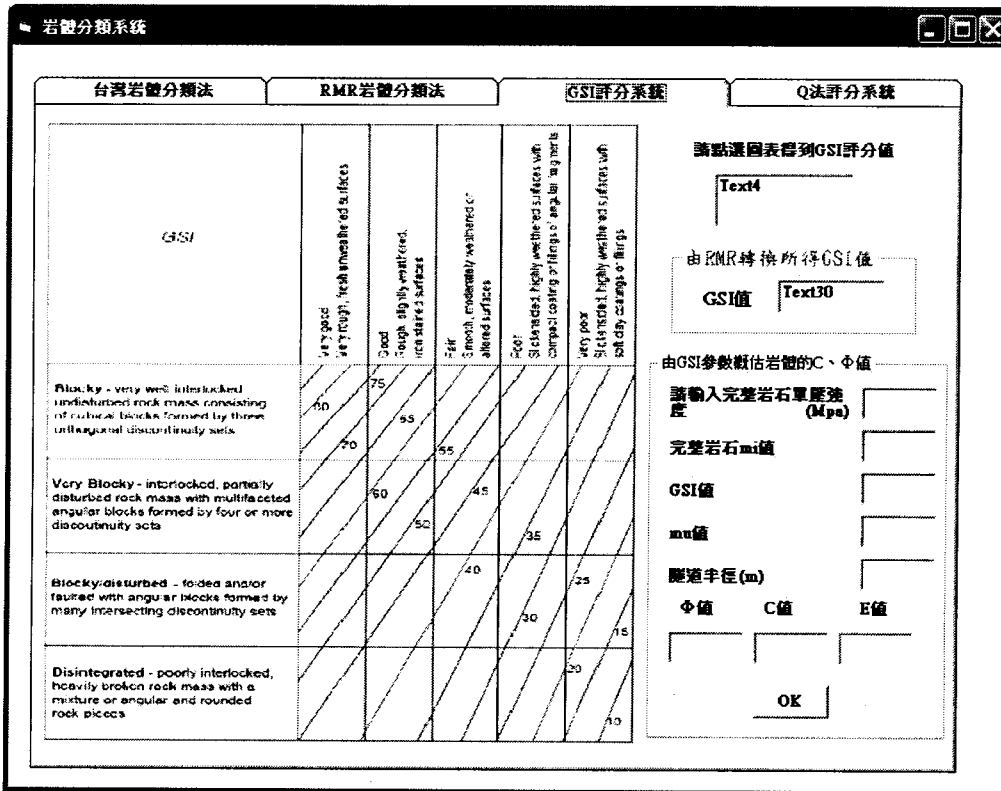


圖 4.7 GSI 岩體分類系統

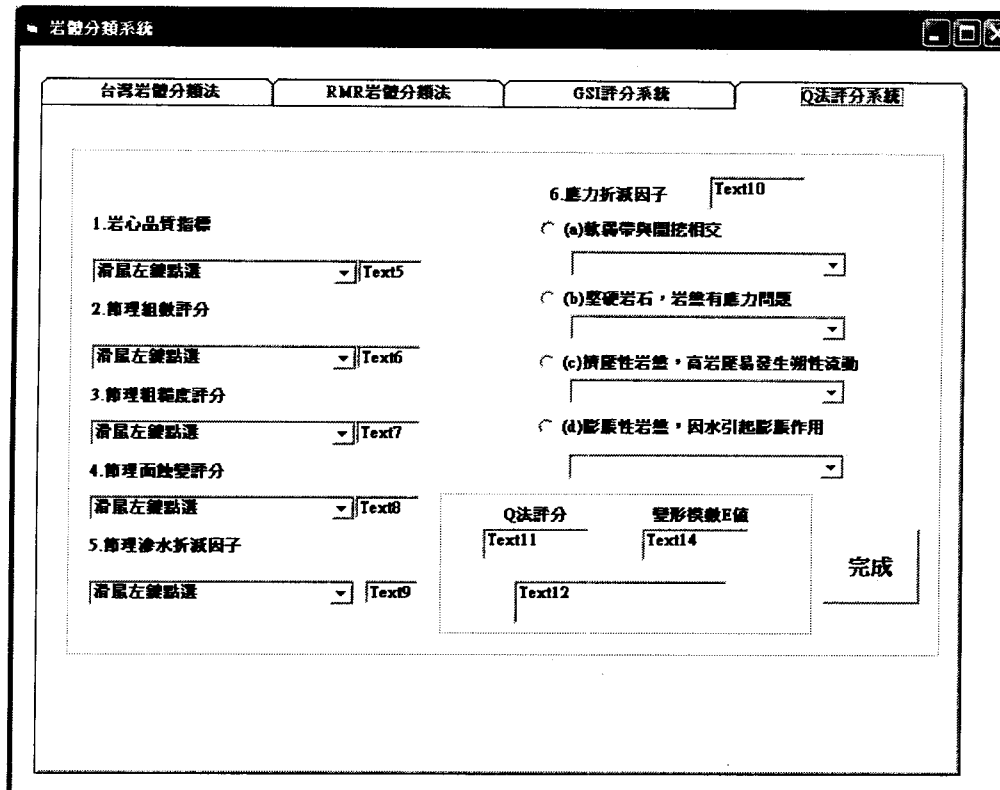


圖 4.8 Q 法岩體分類系統

4.1.4 資料匯入系統

點選(圖 4.10)之資料匯入系統[匯入資料]鑑，選取匯入的計策資料檔如(圖 4.9)，即可將所利用的計策資料完整讀入程式當中計算，亦可利用新增資料加入需增加之計測資料，下一步點選[參數計算]。

序號	量測日期	上半	H1	D1	D2	H2	D3	D4	L1	台階	仰拱
1	87.07.07	6	4	6	6	6	6	6	6	3.5	6
2	87.07.08	10	4.2	10	10	10	10	10	10	5.6	10
3	87.07.09	14	4.4	14	14	14	14	14	14	6.2	14
4	87.07.10	18	4.6	18	18	18	18	18	18	6.4	18
5	87.07.11	22	4.8	22	22	22	22	22	22	6.5	22
6	87.07.12	22	5	26	22	22	22	22	22	6.6	22
7	87.07.15	26	5.2	30	36	36	36	36	36	6.6	36
8	87.07.18	30	5.4	34	44	44	44	44	44	6.7	44
9	87.07.21	34	5.6	38	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	6.7	49.5
10	87.07.24	38	5.8	42	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	6.7	55.5
11	87.07.27	42	6	46	65.5	65.5	65.5	65.5	65.5	6.7	65.5
12	87.08.04	46	6.2	50	114	114	114	114	114	6.7	114
13	87.08.11	50	6.4	54	136	136	136	136	136	6.8	136
14	87.08.18	54	6.6	58	162	162	162	162	162	6.8	162
15	87.08.26	58	6.8	62	190	190	190	190	190	6.7	190
16	87.09.11	62	7	66	227	227	227	227	227	6.7	227
17	87.09.26	66	7.2	70	287	287	287	287	287	6.7	287
18	87.10.11	70	7.4	74	329.5	329.5	329.5	329.5	329.5	6.72	329.5
19	87.10.26	74	7.6	78	389.4	389.4	389.4	389.4	389.4	6.72	389.4

圖 4.9 匯入之 EXCEL 檔(*.CSV)

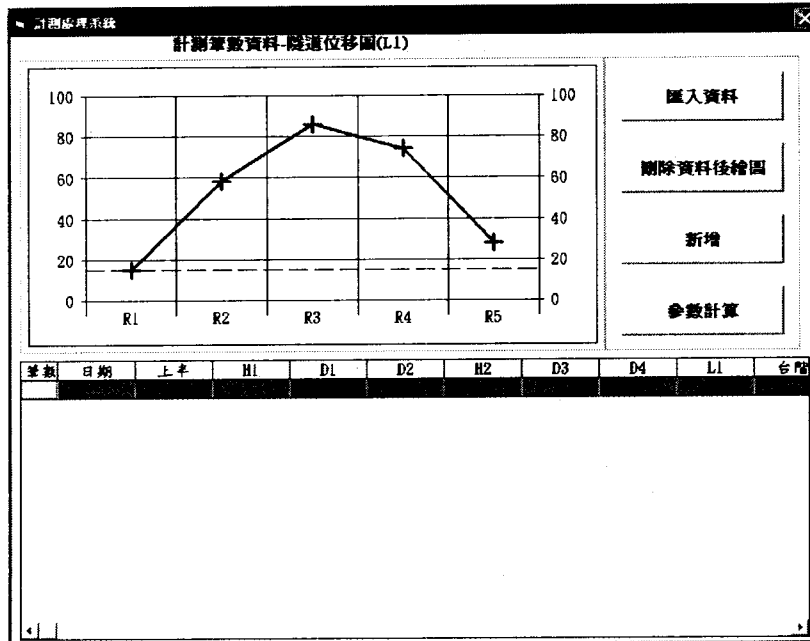


圖 4.10 資料匯入系統

4.1.5 參數計算視窗

當匯入資料完成後點選參數計算視窗之[參數計算]後，即可立即得到計算之釋放圍束比、收斂沉陷 m 值、L1、D1、H1、H2 點之最大計測位移量、岩體剪力模數、無支撐最大位移等等相關計算得知參數。也可點選[計算匯出]將所計算之資料以(*.TXT)檔匯出。如圖 4.12。計算完畢點選[資訊繪圖]、[支撐建議]進行下一步動作。

圖 4.11 參數計算視窗

```

參數計算結果
-----已知-----
初始應力σ(0)(Mpa) 110.5
無支撐距離d(m) 2
各斷面覆土高H(m) 50
隧道襯砌厚(m) 0.2
-----計算預估-----
L1上半開挖最大計測位移量(mm) 6.8
預估之岩體剪力模數G(Mpa) 50983.4732
預估之岩體彈性模數E(Mpa) 127458.683
預估之無支撐最大位移U(mm) 6.8
預估前期位移量Ur = α·oxU(mm) 2.1304
預估之結構支撐壓力Ps(Mpa) 0.4404
混凝土最大支撐壓力Psmax(Mpa) 0.6561
無支撐距離d時D2之位移量=λ·dxU(mm) 3.6
支撐結構勁度Kn(Mpa / m) 869.3366
前期位移量佔上半位位移量的百分比(%) 31.33
裝設時已產生之位移量佔上半最大位移量之百分比(%) 52.94
    
```

圖 4.12 參數計算結果匯出檔

4.1.6 資訊繪圖視窗

資訊繪圖視窗共包含支撐互制曲線、縱剖面變形曲線、距離位移曲線、時間位移曲線 4 種，以頁面方式進行轉換，於支撐互制曲線中點選[支撐互制曲線]按鈕，即可得到支撐與地盤之情況。如圖 4.13。於縱剖面變形曲線頁面中，點選需要之 L1、D1 等所需點，即可得到該點之縱剖面變形曲線，如圖 4.14。於距離位移曲線頁面中點選[繪圖]按鈕，即可得到距離位移曲線，如圖 4.15。於時間位移曲線頁面中點選[繪圖]按鈕，即可得到時間位移曲線，如圖 4.16。

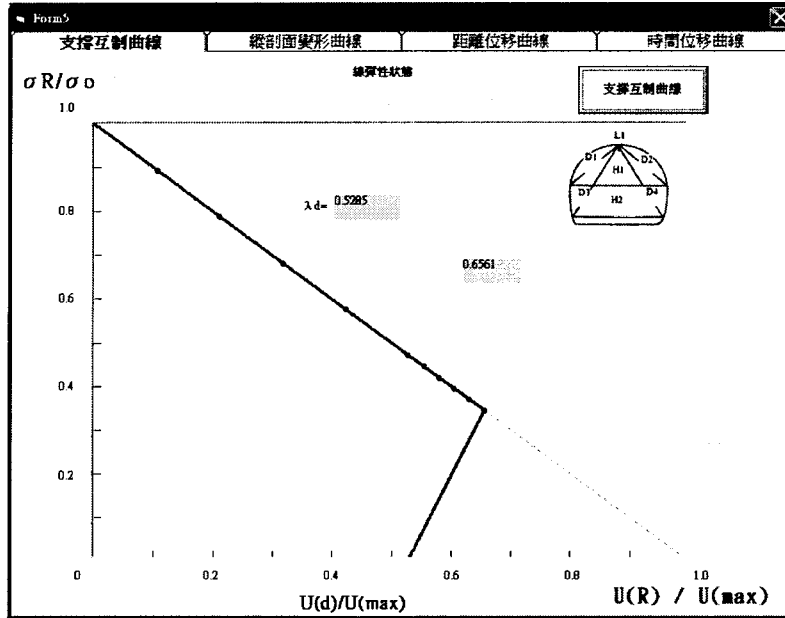


圖 4.13 支撐互制曲線視窗

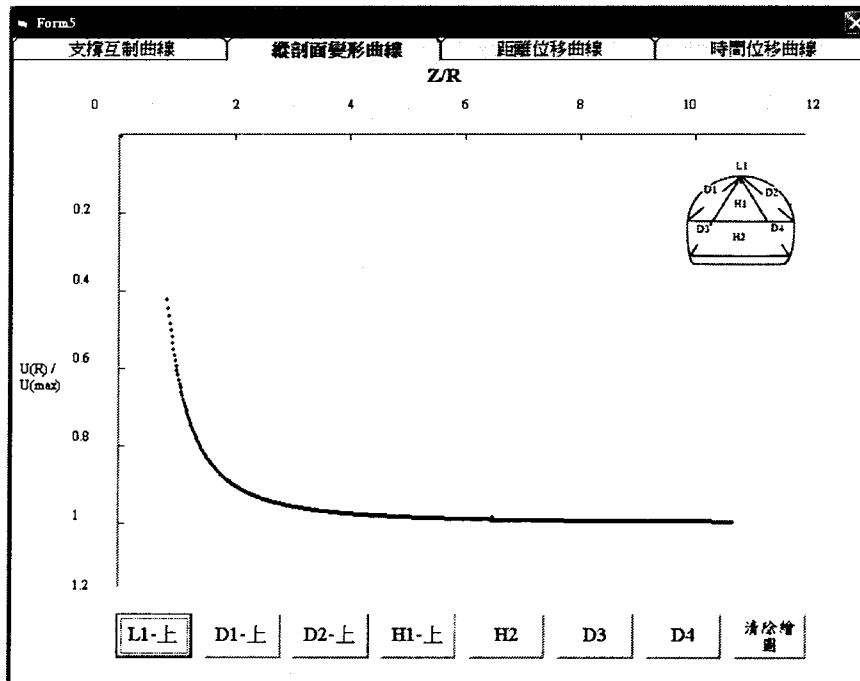


圖 4.14 縱剖面變形曲線

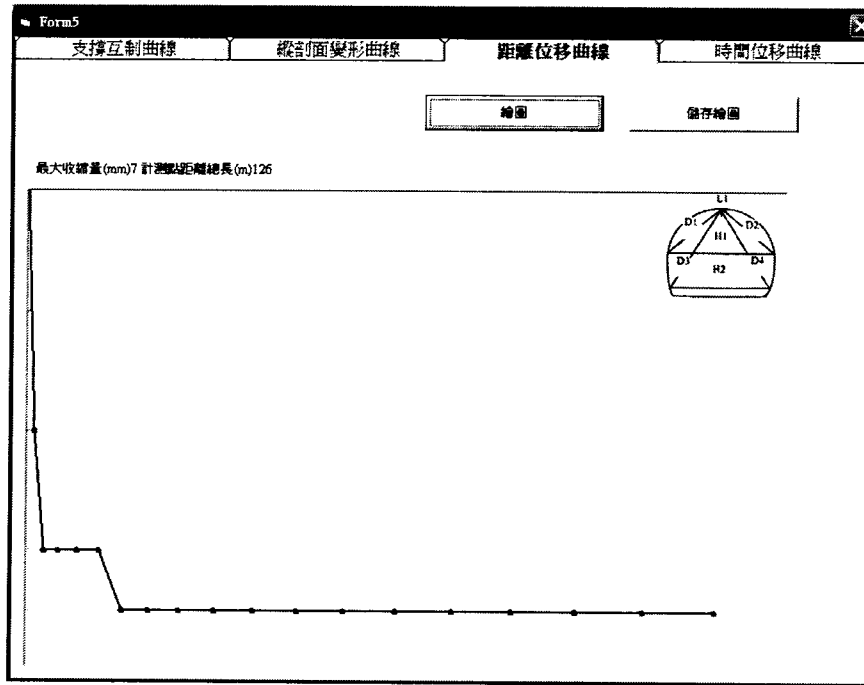


圖 4.15 距離位移曲線

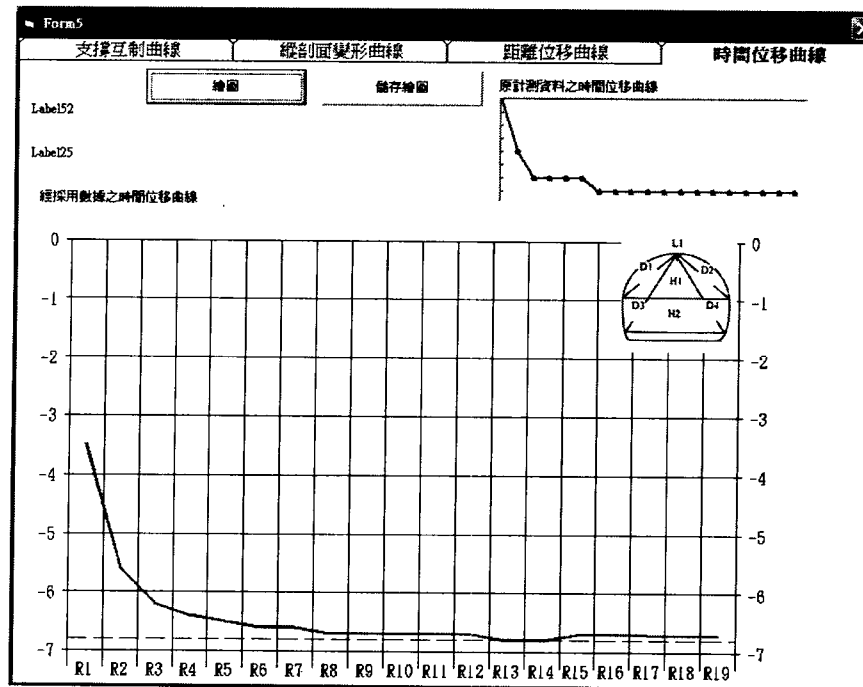


圖 4.16 時間位移曲線

4.1.7 支撐建議系統

首先點選右方之[計算按鈕]，即可得到安全係數以及襯砌最大支撐壓力，當安全係數小於一時，點選[安全係數不足時]按鈕，即得到所建議加強結構勁度與提高襯砌厚度之值。左下方碩性區計算結果點選[計算]可得知建議岩栓打設之距離。

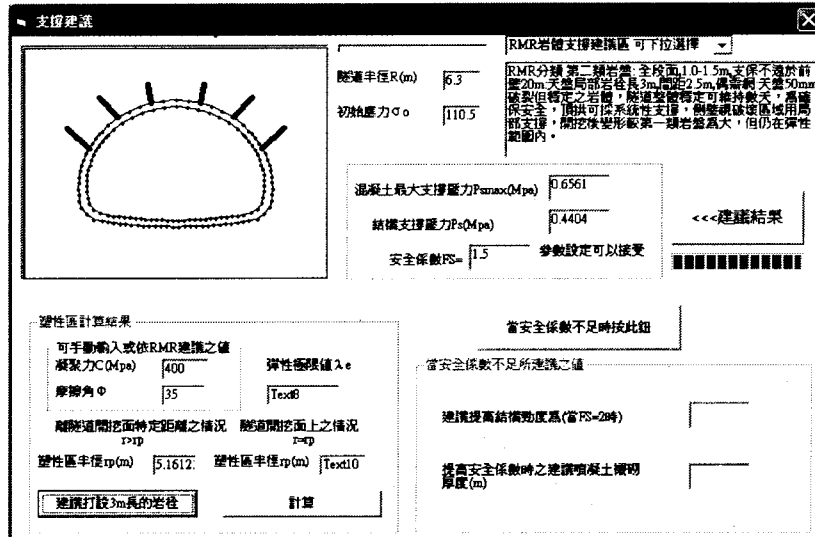


圖 4.17 支撐建議視窗

4.1.8 說明視窗

說明視窗包含系統資訊、程式教學、關於可視化收斂圍束法，其目的在於對程式之基本架構作一說明。如圖 4.18、4.19、4.20。

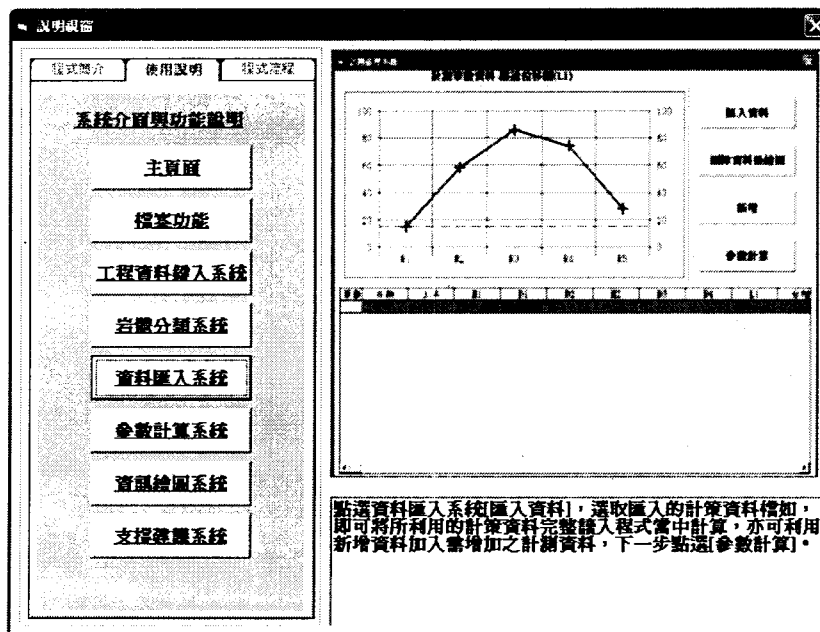


圖 4.18 說明視窗

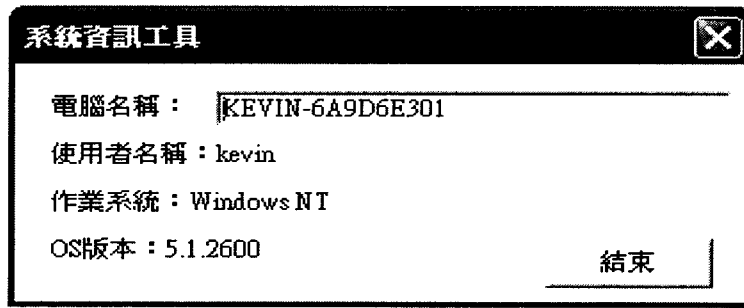


圖 4.19 系統資訊工具視窗

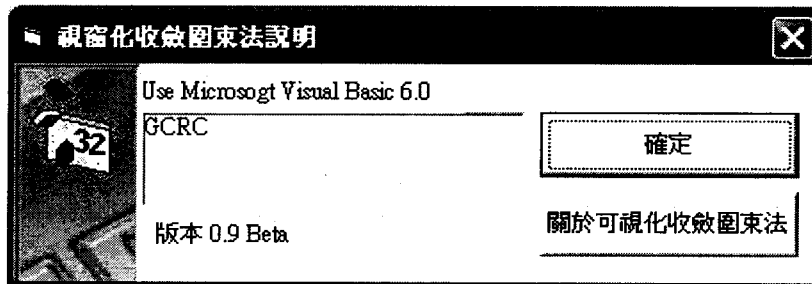


圖 4.20 視窗化收斂圍束法說明視窗

4.2 可視化斷面收方程式

主功能選項分為:檔案、隧道斷面收方資料處理、說明。如圖 4.21 所示。

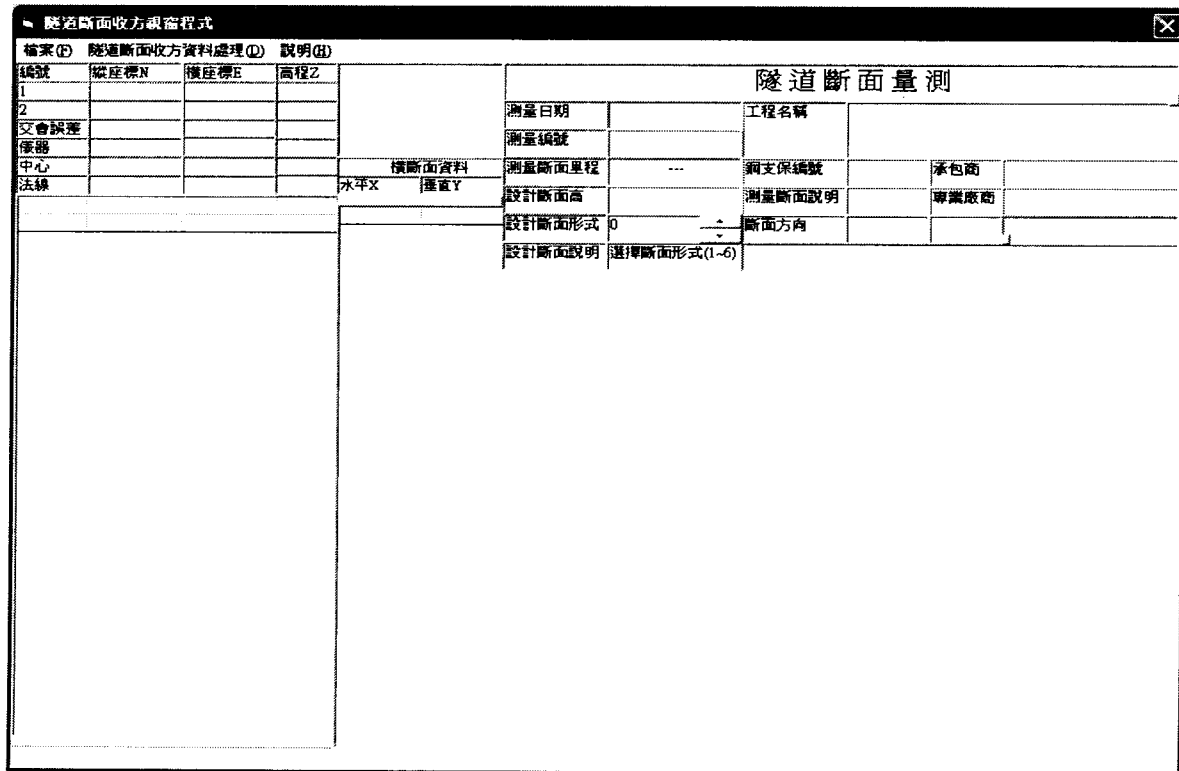


圖 4.21 隧道斷面收方程式主視窗

4.2.1 檔案功能

[檔案] 功能選項包含 [開啟舊檔案]、[建立新檔]、[儲存]、[列印]、[結束程式]。

4.2.2 隧道斷面收方資料處理

先行點選檔案功能中之[建立新檔]，出現工程資訊視窗(如圖 4.22)。

待輸入完畢工程名稱、設計斷面等先關資料後，點選[下一步]。顯示收方資料處理視窗(如圖 4.23)，再行點選[原始收方資料匯入]，將如圖 4.25 之原始收方資料檔匯入計算。

完畢後點選第二頁面之隧道收方資料結果並在收方資料結果視窗(圖 4.24)顯示所匯入之資料結果，點選確定之後即立刻顯示收方完成之繪圖結果，如圖 4.26。

圖 4.22 工程資訊視窗

圖 4.23 收方資料處理視窗

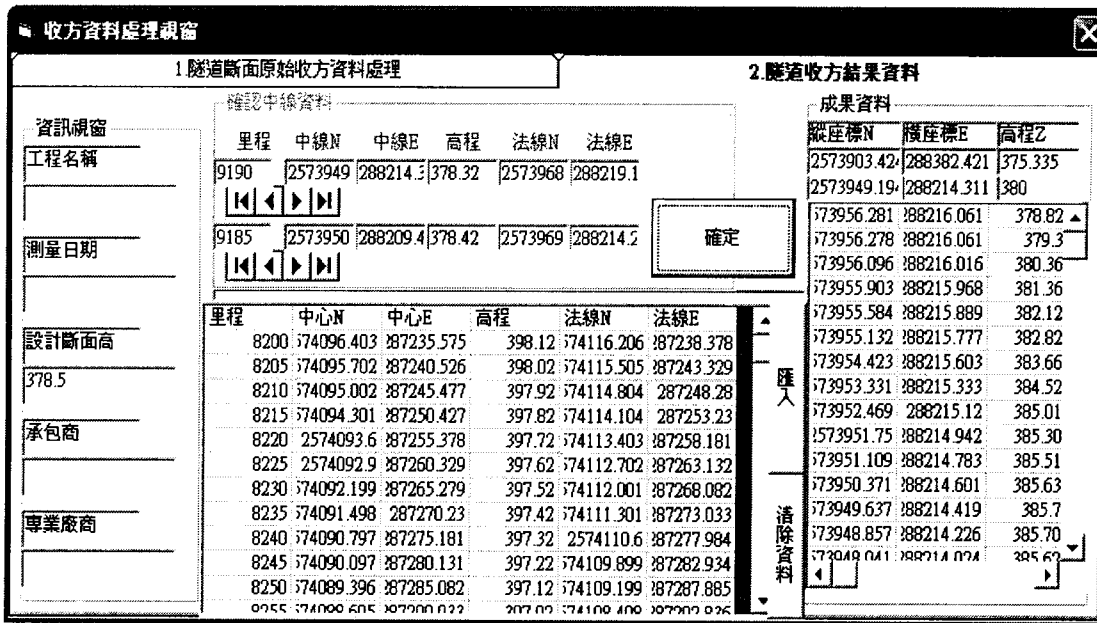


圖 4.24 收方結果資料視窗

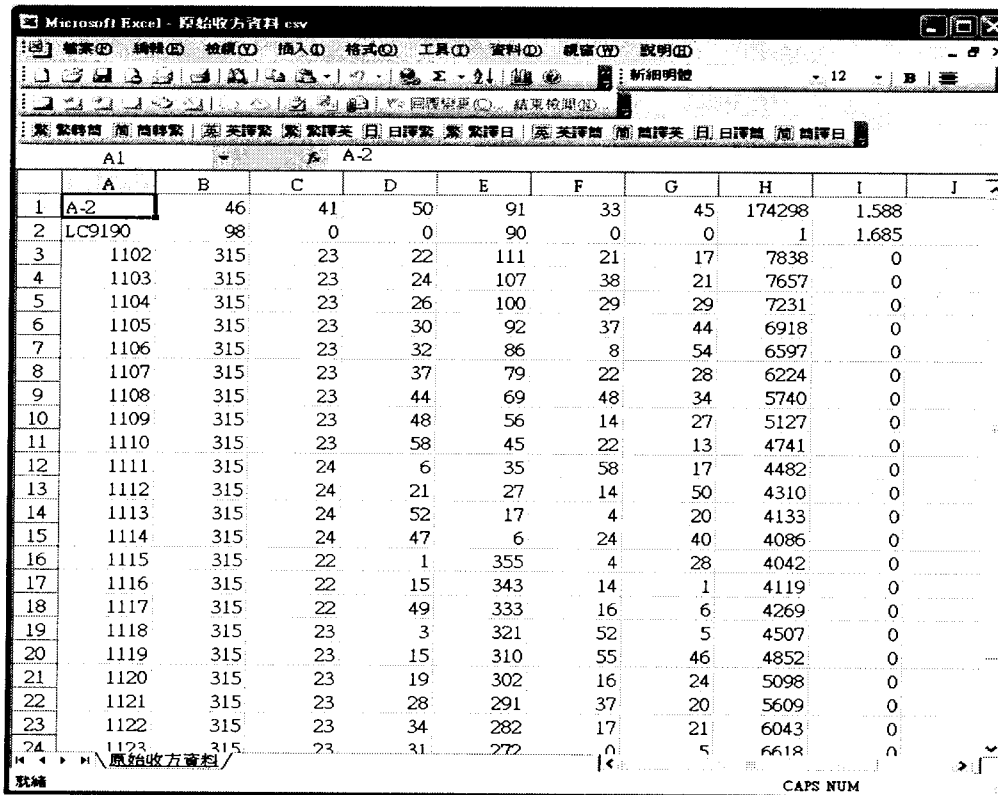


圖 4.25 原始收方資料 EXCEL 檔

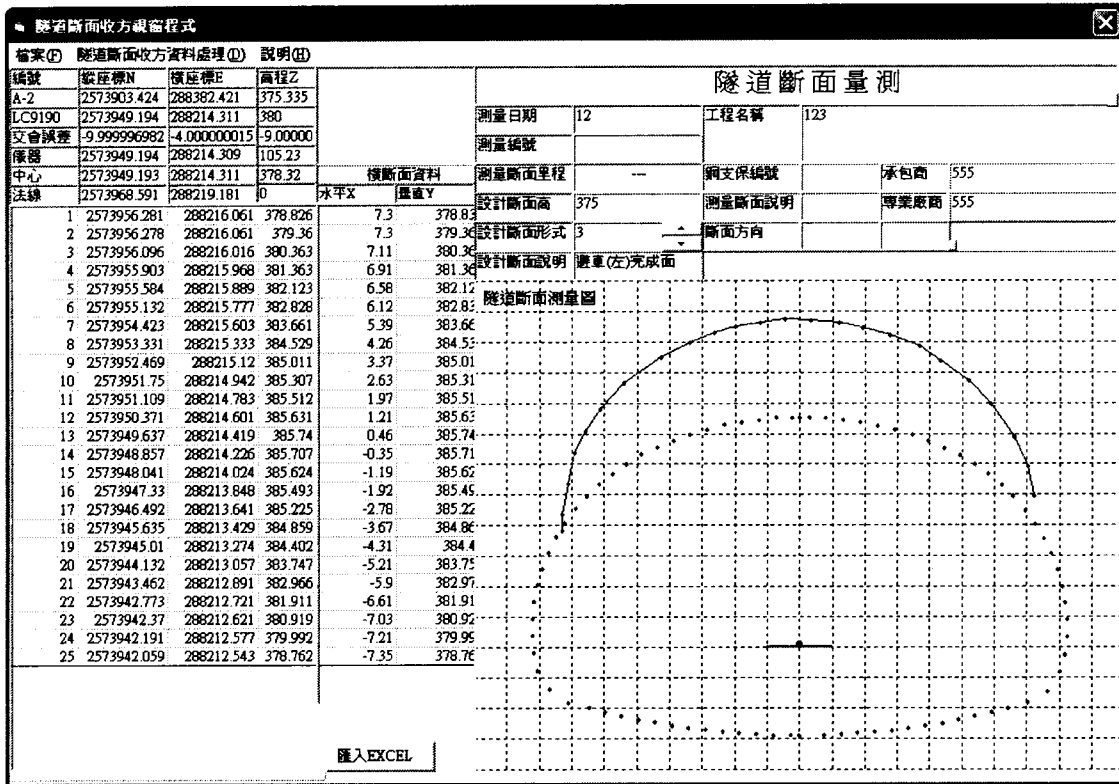
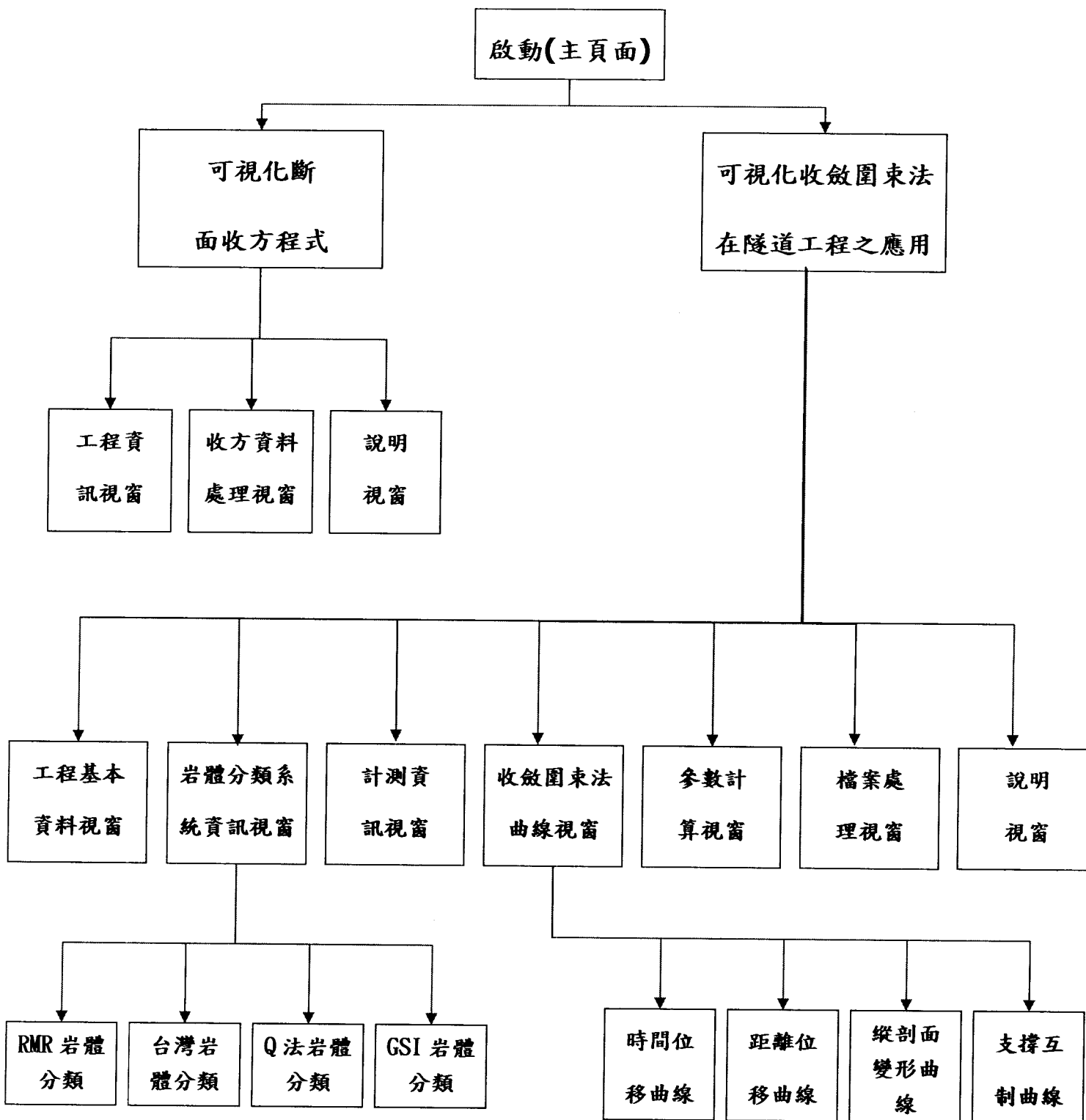


圖 4.26 收方完成之主視窗

五、 程式流程



隧道斷面收方技術與視窗程式設計之應用

李煜舫¹ 王銘鋒² 李文元³

中華大學土木與工程資訊學系

摘要

本文主要目的為利用傳統隧道斷面收方的量測技術結合Visual Basic程式語言撰寫成一套視窗程式，並應用到實際隧道斷面收方資料的處理，以及達到測量資料可視化與即時處理的目的。本文內容包含隧道斷面收方的量測技術與測量原理探討、Visual Basic程式語言應用於工程技術應用等介紹，以及視窗程式的撰寫與測試、隧道斷面收方資料處理與結果繪圖的比對等。本研究成果之視窗化表單包含工程基本資料系統、隧道斷面收方資料處理系統、隧道斷面收方繪圖系統與程式操作說明系統。

關鍵字：隧道斷面收方、修正後方交會法、Visual Basic視窗程式設計、可視化。

一、前言

隧道斷面的開挖，無論是使用鑽炸或機械工法，其開挖範圍之管理值完全由隧道斷面收方所控制。然而，在1991年以前之測量儀器僅少部分具備雷射測距及雷射光功能，且單價非常高，更遑論收方程式設計。在毫無軟硬體設備，又需量測隧道淨空斷面之下，完全依靠傳統測量工具，如經緯儀、測距儀、稜鏡、皮尺或鋼尺及標竿或箱尺，量測角度與距離。並經由人工計算繪製收方圖比對設計斷面，或使用設計半徑比對法，判讀斷面是否侵入鄰界的建築界線或符合設計斷面。

本研究乃延續許榮達(2003)之現場的收方經驗及方法，應用測量儀器、AMT Profile 4000全自動隧道斷面收方儀之現場操作為基礎架構，自行研發編輯合適的視窗程式以實際應用於隧道收方，期能提昇隧道收方工程品質與水準。以安全、經濟及快速的量測方法，達成開挖符合設計斷面的目標，並藉由相關資料之彙整、檢討分析與實際應用，提供具體方法乃本研究的主要目的。

二、文獻回顧

2.1 隧道斷面收方之量測技術

基於隧道開挖施工後，需測定隧道斷面是否符合設計。如欲求得縱向線型或橫斷面等，大多在接近開挖面的附近進行測定，不僅危險性高，且測量時阻礙通路，導致影響施工作業進度甚大。為了改善此一狀況，於是就有自動化收方測量系統之研究發展，以提高施工安全性。蔡茂生（1998）於研究中提出可利用一組旋轉之發射器及攝影機以光波，如紅外線等介質方式射向隧道壁面，自攝影機的反射影像之時間進行距離估計，當掃描隧道壁面一週後即可自動描繪出隧道之斷面。

瑞士公司 Aemberg Measuring Technique 所發展出的一套全自動隧道斷面收方系統（隧道斷面收方系統 Profiler4000 量測技術），以 Leica DIOR3002S 免稜鏡測距儀加上伺服馬達驅動的定位裝置，並配合該公司所研發的後置軟體組合而成。於國內工程應用部份，該系統曾使用於交通部鐵路改建工程局東部工程處新觀音隧道工程段進行測試（許榮達，2004）

為配合國內三維變形光學量測技術之引進與研發，交通部鐵路改建工程局東部工程處於民國 85 年 12 月特購置一套自動辨識照準全測儀（型號 TCA1800）於北迴雙線新觀音隧道。針對三維變型光學量測技術所包含之設備儀器、功能及規格、測量步驟、優缺點及效益評估進行研究（陳堯中等人，1995 和 1998）。

2.2 隧道斷面收方之測量原理

隧道測量之基本資料包含水平距、垂直角、水平角、斜距及高程差，其原理是量測基本資料，因時、因地使用不同之測量方法。另隧道斷面收方之測量原理包含：前方交會法、後方交會法，以及修正後方交會法。由於篇幅限制，其中前方交會法和後方交會法可參考相關文獻獲得（管晏如，1990 和 1991）。本研究隧道斷面收方量測方法係延續許榮達（2004）所提出之量測方法，另在其研究中指出隧道收方量測過程的不同處，在於定出隧道測站的位置。本節僅就文中所使用之修正後方交會法加以說明如下。

當後方交會法測站角度限制介於 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 時，容易產生誤差。為兼顧架設儀器站多種方法選擇。當測站與稜鏡站皆為已知點時，於後置處理虛擬另一位置觀測點，距離設定為 0.1 mm，將方向偏差量控制在半徑 0.1mm 以內，若條件符合（角度介於 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ）則使用後方交會法。依其定出測站測量方法不同，其步驟分別敘述如下：

- (1) 架設在隧道內任一點上：採用此方法測量，儀器需經過特殊處理，加裝安裝稜鏡桿之孔位，以利觀測儀器之位置，其方法為另外一台儀器架設在已知點，後視另一已知點稜鏡，觀測收方斷面位置儀器上稜鏡之水平角、距離、高程差，計算平面座標及高程。
- (2) 架設在已知點：針對斷面收方位置進行放樣作業，有兩種狀況：其一為按已知中心

線里程座標資料，放樣到現場並觀測高程差計算高程；其二為按現場需要定出觀測斷面位置，計算架設儀器位置之平面座標與高程，此兩種狀況皆為事先將架設儀器位置點位定出，並求出高程資料。

- (3) 後方交會法又稱三點法：利用現場已知控制點，將儀器架設在收方斷面不妨害通行之位置，觀測兩處已知點，計算儀器位置平面座標與高程。
- (4) 修正後方交會法：作業同架設在已知點，在後置處理，一點為實測值，另一點為虛擬現場已知點距離設定為 0.1mm，使誤差值控制在 0.1mm 以內。

2.3 Visual Basic 視窗程式語言之原理與相關應用

視窗化動作亦可視為將程式以圖形使用者介面 (Graphics User Interface, 簡稱 GUI) 顯現，圖形使用者介面是一種以圖形化為基礎的使用者介面。Visual Basic 程式語言即是一個符合製作圖形使用者介面的編寫軟體，以視覺化為主的基礎程式語言，由一開始的外觀介面設計、基本物件建立、表單的配置到內部撰寫程式等。陳聖彥 (2004) 以 Visual Basic 程式語言為視窗設計之基礎，研發一套適合隧道開挖支撐互制行為的外顯式收斂圍束法。

三、隧道斷面收方作業

對於在隧道內的收方方式，必須因應當時工作的情形而有所對應。收方的時機必須選擇在工作的空檔，以不妨害工進為原則且要在視線良好的情況進行。當進行收方工作時，熟練操作步驟，可縮短量測時間與避免錯誤發生。當隧道進行斷面收方時因功能需求而有不同幾何線形、坡度及設計斷面。此基本資料為建立隧道標準斷面之依據，作為設計與實際收方斷面之比對，以了解實際開挖情況，是否有超挖或淨空斷面不足現象，可作為開炸佈孔之參考及修挖或計價的依據。

3.1 隧道斷面收方基本資料蒐集

隧道斷面收方工作之進行，必須先行蒐集路線資料及隧道支撐型式，俾利於程式內建立收方基本資料，得以比對隧道斷面。不同功能之隧道線形其曲線規定亦不同，國內常使用之路線種類包含：(1) 單曲線、(2) 緩和曲線 (目前國內公路系統採用克羅梭曲線，鐵路系統採用三次拋物線)、(3) 豎曲線。

隧道施工方法採機械或開炸，階梯開挖區分為上半、下半及仰拱三個階段，其步驟皆為開挖、出碴、支保組立、噴凝土 (單層網或雙層網)。收方斷面區分為，開挖完成面、單層網噴漿面或雙層網噴漿面、襯砌前斷面。

3.2 隧道斷面收方之時機

國內隧道工程收方時機，受限於人力與素質無法全面性收方，僅針對鋪設防水模或永久

襯砌前，進行實際斷面與設計斷面收方比對，檢視是否符合設計斷面之最小要求，作為計價之依據。本研究內容隧道斷面收方為全性面，可區分為四種不同階段收方包括：(1) 開挖面、(2) 上半噴凝土面、(3) 下半噴凝土面、(4) 鋪設防水模或襯砌前。收方其時效性各異，依其經驗彙整出最佳時機，以下分別敘述之：

(1) 開挖面收方：由於機具與人員等待開挖成果，建議採後方交會法可於最短時間完成收方工作，另一重要原因為在支撐完成面下進行開挖面收方，避免儀器與人員暴露於未支撐危險環境下作業。(2) 上半噴凝土面：施工廠商為了解淨空及預估變形量數據，收方時效無迫切性，選定開挖面施打岩栓、前進支撐、機械保養或停工，建議採用架設在已知點。(3) 下半噴凝土面：依其從事隧道工程經驗，檢視下半噴凝土面有其必要性，由於隧道上、下斷面設計半徑不同，隧道測量對於下半開挖大部分沿用上半開挖斷面向下延伸，容易產生下半支保腳入侵，更需要進行收方工作。建議採用架設在已知點。(4) 鋪設防水模或襯砌前：施工廠商於襯砌前必須進行完成面收方檢送收方圖交業主檢核襯砌厚度是否符合最小厚度設計要求，作為襯砌鋼模定位前之準備工作，業主、承攬廠商及協力廠商三方面按規定每 10m 整樁里程（視現場需要調整）必須進行斷面收方圖檢核，由於針對特定斷面收方，此時已遠離開挖面，仰拱亦澆置完成，收方時機同上半噴凝土面收方，建議採用架設在已知點，可量測相同斷面之資料，避免因架設測站位置不同而產生爭議。

四、隧道斷面收方視窗程式撰寫與設計

現行隧道工程界應用之隧道斷面收方後處理，係計算設計斷面與實際斷面半徑差值比較法。雖然可以達到收方之效果，但缺點在於無法自動繪製收方圖，僅比對收方斷面點位之偏差量。在本研究中將針對自行研發之隧道斷面收方後置處理視窗軟體所使用之方法進行說明，研發分析軟體方法包含軟體程式撰寫工具之 Microsoft Visual Basic 6.0 程式語言、用於資料儲存之 Access2000 資料庫系統等，使隧道斷面收方軟體具自動繪製收方斷面圖形比對設計斷面圖等功能。

4.1 Visual Basic 6.0 程式語言

本文採用簡易入手的 Visual Basic 程式語言進行視窗程式之編寫，在執行軟體時，是以建立專案方式編輯（如圖 1 所示），一般程式撰寫選擇標準執行檔型式，即可於表單內編輯程式碼。如需特殊表單形式亦可由 Visual Basic 6.0 內建之輔助精靈選擇所需求之形式，Visual Basic 6.0 有著相當多的功能可供程式設計者使用，開啟 Visual Basic 6.0 後介面（如圖 2 所示），主要可分為五個部分，分別為功能表、工具箱及視窗開發的主要控制視窗：專案總管視窗、屬性視窗及表單設計視窗，圖形化介面程式製作則是以這五個部份進行編寫。

在圖形化介面化程式設計中，程式碼撰寫的工具為程式碼編輯視窗（如圖 3 所示），在此

視窗內使用者可編寫物件類別、表單等程式碼，其使用方式與多數文字編輯器相似，連續點擊物件表單即可在物件裡面撰寫程式碼，且此視窗也提供許多支援程式開發的功能，其中包含程式碼拖放編輯、色彩區別關鍵字、程式碼輔助查詢、程式碼快速查詢及關鍵字自動完成等。

4.2 資料庫系統

在本研究中資料的匯入及匯出方式以 Excel 之.csv 檔型式 (如圖 4 所示)，以及存取於 Access 2000 資料庫檔案內兩種，關於 Access 2000 資料庫軟體包含資料表、查詢、表單、報表、巨集及模組等。資料表是 Access 2000 資料庫中實際進行使用者資料儲存的地方，也是資料庫其他延伸物件的資料來源基礎，而在使用上資料表的建立除了利用資料表精靈外，使用者也可以在軟體所提供之設計檢視工具中個別輸入資料 (如圖 10 所示)。資料庫在軟體研發中所佔的角色為提供資料進行放置 (如圖 11 所示)，在隧道斷面收方過程中，由收方所獲得原始資料計可藉由介面進行匯入後，經視窗程式運算儲存收方之成果資料。

4.3 隧道斷面收方資料處理程序與視窗程式設計

軟體之研發目標為提供使用者快速取得所需之分析參數與分析結果，因此在內部程式建立中需具備程式最佳化、簡單化等要素。其目的除使程式的快速無誤執行外，也方便日後程式的修改與功能添增。

本節主要針對使用者輸入介面進行分析與設計，如何提供使用者簡易且快速的資料輸入環境。簡單地說，此部份即是由繪圖視窗表單連結其他表單的方式進行撰寫，在設計斷面形式有隧道斷面的混凝土面、完成面、避車(左)完成面、避車(右)完成面、避車(左)噴凝土面、避車(右)噴凝土面，使用者可選擇 1 至 6 種的隧道斷面形式與所獲得之收方資料進行繪圖比對 (如圖 7 所示)。

在輸入區中，將工程資訊資料鍵入輸入區中，例如工程名稱、監造單位、施工單位、施工日期、隧道斷面設計高等資料 (如圖 8 所示)。

在隧道原始收方資料處理區中，為方便使用者輸入資料，因此資料處理方面可採外部匯入方式，可由外部匯入 Excel 程式之.crv 檔，或可由視窗程式內之手動輸入區中自行鍵入數值，經外部匯入隧道斷面收方資料後，程式內部即進行運算如角度、勁度轉換，再以後方交會法等測量原理進行座標轉換等動作，各運算動作的撰寫及設計 (如圖 9 所示)。

當使用者匯入隧道斷面收方資料時，經計算後顯示於計算結果的區域，此部分可以視為一般軟體運算之中間運算部分 (如圖 10 所示)。經由運算，資料確定無誤後，收方結果即傳至主要的繪圖區域，完成整個收方的動作。

其次即是針對視窗程式的操作之相關程式教學說明，在技術支援視窗程式中 (如圖 11 所

示)，點擊視窗系統名稱後，表單上列的顯示區即以圖片播放方式進行視窗程式教學，方便使用者進行學習操作。

五、隧道斷面收方視窗程式實測

本文採用東縣長濱鄉玉長公路隧道斷面收方資料之實際案例，作為研發隧道斷面收方視窗應用測試比較之依據。

5.1 玉長公路隧道工程概述

玉長公路西起台九線玉里鎮安通橋附近，東迄台東縣長濱鄉白桑安，全長約十六公里，總經費計新台幣二十七億七千餘萬元，開工的新建隧道工程，全長 2660 公尺，設計為單孔雙車道，淨寬 10 公尺、高 4.6 公尺，隧道內左右兩側各設置二處避車道。玉長公路角色功能有如台灣西部的東西向快速道路，完工通車後將只有目前繞道距離的四分之一，可大幅縮短花東縱谷與東海岸之間往返距離。

5.2.1 工地作業過程之步驟

關於玉長公路隧道工程之量測方法，本文採用修正後方交會法，此方法係修正量測方法之儀器架設在已知點及後方交會法，克服狹窄空間之限制、提高斷面收方量測之精度，以下分別敘述工地作業過程之步驟：

- (1) 於收方里程附近之已知點架設儀器及稜鏡，計算收方斷面中線里程之夾角與距離，放樣定出現場之點位並求出高程，作為斷面收方架設儀器之位置。
- (2) 儀器架設於事先已定點之收方斷面位置，測量儀器高度單位至公釐，儀器內部儀器高及稜鏡高皆設定為零，後視稜鏡為圓形稜鏡，稜鏡係數 $mm = 0$ 。
- (3) 架設稜鏡在已知點，測量稜鏡高度單位至公釐。
- (4) 儀器基本設定完成後，後視稜鏡並紀錄，儀器旋轉 90 度將視準軸對準法線方向，手簿記錄儀器高及稜鏡高、測站及稜鏡站編號、斷面起訖點流水編號、日期、支保編號、完成階段（例單層網、雙層網噴漿面、防水膜或開挖面等），作為後置處理資料處理，逐一測量斷面點位，每一斷面點位設定 50 點以內（視現場需要調整程式之限定點數）。
- (5) 若設站量測多斷面時，儀器視準軸則必須照準收方斷面，沿著法線方向量測。

5.2.2 隧道斷面收方程式使用過程與步驟

在應用隧道斷面收方程式進行後置收方繪圖程序中，其相關之使用過程和步驟，分別敘述如下：

- (1) 視窗程式執行後，即出現執行後之主畫面（如圖 12 所示）。在此主畫面中包含：上方的檔案選項、隧道斷面收方資料處理選項、說明選項、右上方的工程資訊資料部分及右下方的繪圖區。另外主程式畫面亦是收方繪圖的主畫面，首先可選擇上方目錄中的檔案，以新

建檔案方式開啟新檔，或點選隧道收方資料處理選項直接進行後置收方作業處理。以玉長公路隧道為例，選擇上方目錄中的檔案開啟新檔（如圖 13 所示）。輸入完基本資料後按下一步繼續。

- (2) 工程基本資料輸入完成後，下一步動作即是處理現場收方之測量數據，將現場測量儀器所測量之數據資料，連接至個人電腦匯出，經整理後製成 Excel 檔案（如圖 14 所示）。於工程資訊系統鍵入資料後，下一步的動作則為資料處理視窗操作（如圖 15 所示）。資料處理視窗係進行隧道斷面收方的原始資料匯入，資料匯入鈕位畫面右下方處，亦可在此視窗的下方部份手動一筆一筆鍵入資料。另外依測量的後方交會法理論，需兩個已知的控制樁點資料，在此視窗輸入兩個已知的控制樁點資料，確定輸入資料無誤後則按下一步進行內部計算，經上述動作以後，匯入完成及運算完畢後之畫面（如圖 16 所示）。
- (3) 接著可看到經視窗程式運算後之成果（如圖 17 所示），在圖中的正中央為已知的中線資料，圖右側為運算後之成果資料，如確認無誤後可按確定進行收方繪圖。
- (4) 資料傳回主畫面後，即可進行隧道斷面收方繪圖動作（如圖 18 所示），畫面中的設計斷面形式可鍵入斷面形式的編號，或按上下鈕擇想要進行比對的隧道斷面設計形式。

五、結論

本文主要目的為利用傳統隧道斷面收方的量測技術結合 Visual Basic 程式語言撰寫成一套視窗程式，並應用到實際隧道斷面收方資料的處理，以及達到測量資料可視化與即時處理的目的。本文內容包含隧道斷面收方的量測技術與測量原理探討、Visual Basic 程式語言應用於工程技術應用等介紹，以及視窗程式的撰寫與測試、隧道斷面收方資料處理與結果繪圖的比對等。經研究成果顯示可獲得下列結論：

- (1) 以 Visual Basic 視窗程式語言撰寫視窗化應用程式，對於隧道斷面收方資料之處理，可具體呈現計算結果之可視性和及即時性。
- (2) 本研發之隧道斷面收方視窗程式，不僅以修正後方交會法理論為計算模式，而且結合工程資訊系統、隧道斷面收方資料處理系統、主要繪圖系統等資訊撰寫測試而成，並應用在玉長公路隧道斷面收方資料與設計斷面資料的比對。
- (3) 使用本視窗化程式可達到隧道斷面收方資料處理的目的，並可比對隧道設計斷面，進而用以預判隧道開挖面是否為內傾或超挖等情形。

六、參考文獻

1. 蔡茂生，「山岳隧道施工自動化」，地工技術雜誌，第 65 期，第 5~18 頁 (1998)。
2. 許榮達，「隧道斷面收方技術開發與工程應用之研究」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹 (2003)。
3. 陳堯中、翁世樑、張文城，「隧道工程監測自動化技術引進及推廣」，內政部營建署營建自動化專業計畫成果報告，共 123 頁 (1995)。
4. 陳堯中、吳俊傑、傅子仁，「隧道變形量測及斷面收方之自動化技術」，地工技術雜誌，第 65 期，第 43~52 頁 (1998)。
5. 管晏如，「測量學」，有寧出版有限公司，台北 (1990)。
6. 管晏如，「電子測距」，國立編譯館出版，台北 (1991)。
7. 陳聖彥，「視窗化收斂圍束法在隧道工程之研究與應用」，碩士論文，中華大學土木工程系，新竹 (2003)。

ABSTRACT

This research includes the measurement of resection method, the principle of profile survey of tunnel and the application of Visual Basic programming language to engineering techniques. According to the coding of visualization programming, Microsoft Visual Basic 6, using visualization as a principal part, makes it possible for users to immediately see data frames executed in progress. The content of programming design in this research consists of the data processing and illustration of the profile survey of tunnels, etc

Keywords: profile survey, resection method, visual basic programming, visualization.

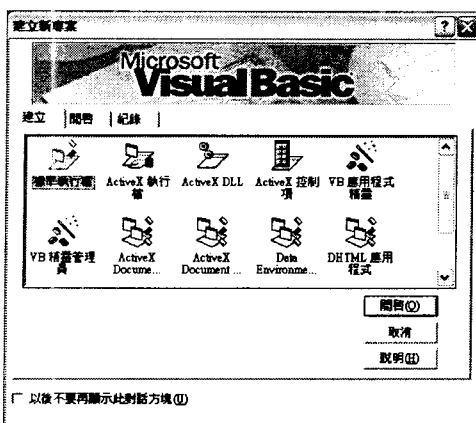


圖 1 專案建立選擇圖示

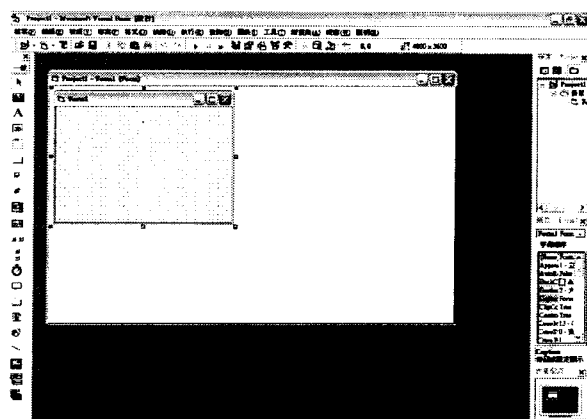


圖 2 Visual Basic 設計介面視窗

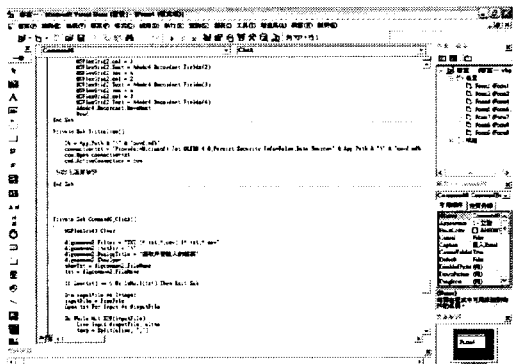


圖 3 程式設計視窗

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
2	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
3	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
4	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
5	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
6	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
7	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
8	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
9	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
10	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
11	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
12	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
13	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
14	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
15	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
16	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
17	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
18	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
19	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
20	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
21	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
22	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
23	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
24	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
25	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				
26	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0				

圖 4 Excel 之 csv 檔案形式

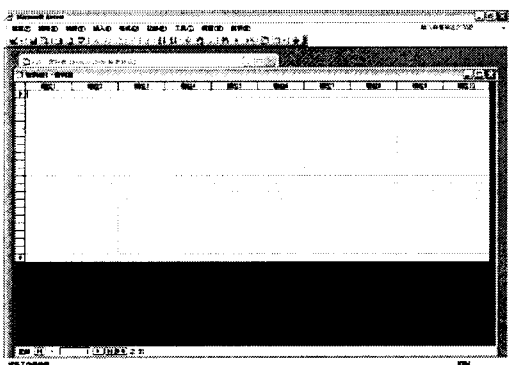


圖 5 Access 2000 資料庫介面

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
2	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
3	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
4	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
5	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
6	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
7	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
8	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
9	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
10	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
11	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
12	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
13	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
14	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
15	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
16	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
17	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
18	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
19	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
20	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
21	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
22	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
23	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
24	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
25	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	
26	100	3.5	23	22	111	21	17	7838	0	

圖 6 匯入 Access 2000 資料庫

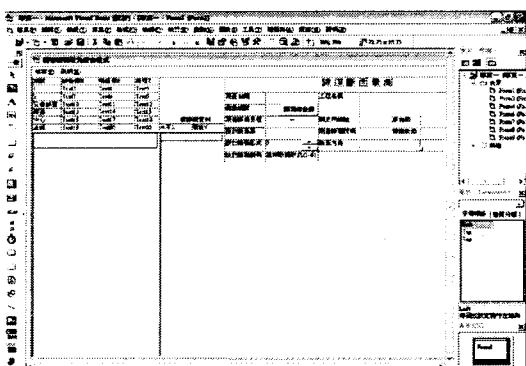


圖 7 主要繪圖系統之視窗設計

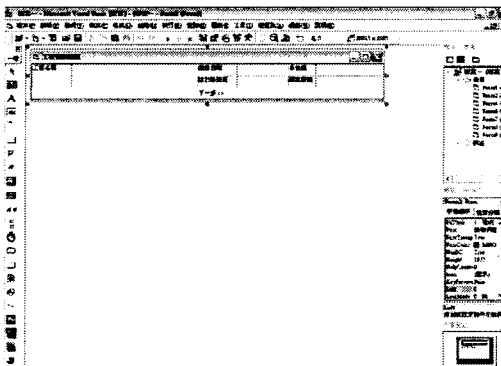


圖 8 工程資訊系統之視窗設計

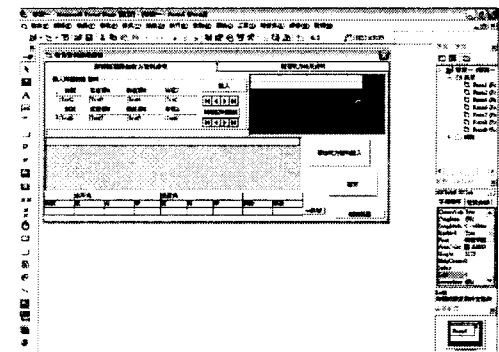


圖 9 資料處理設計之視窗設計

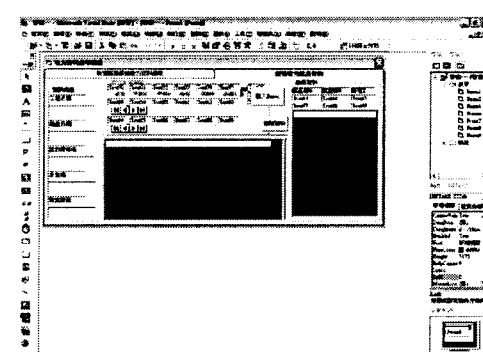


圖 10 成果顯示系統之視窗設計

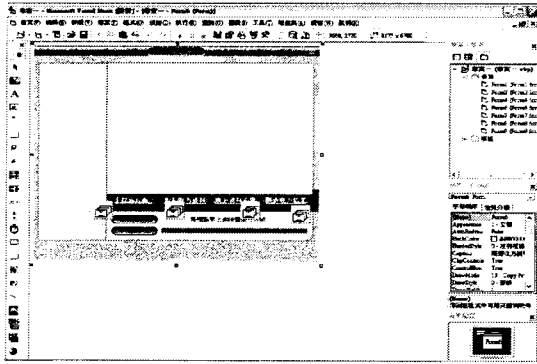


圖 11 技術支援系統之視窗設計

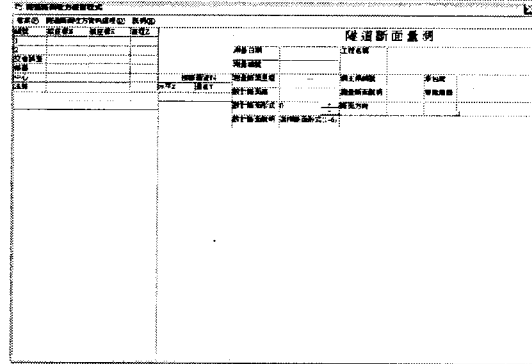


圖 12 隧道斷面收方程式主畫面

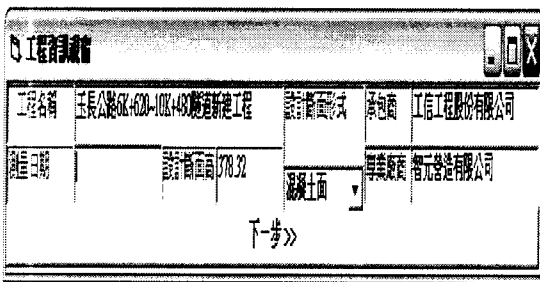


圖 13 工程基本資料輸入系統

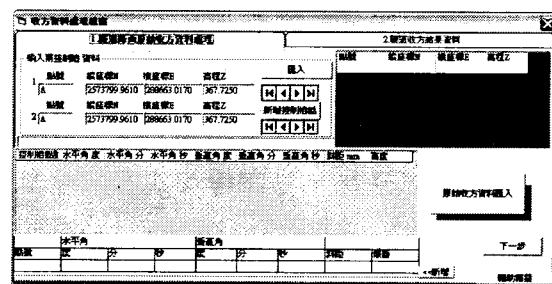


圖 14 資料處理系統

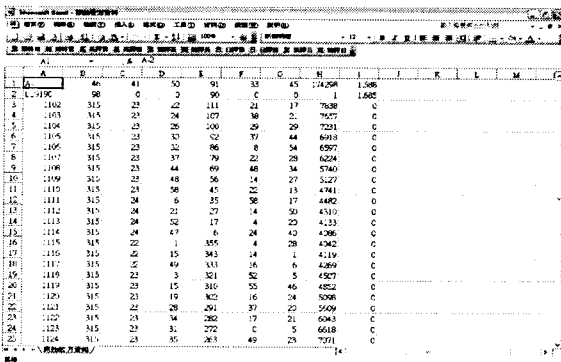


圖 15 原始隧道斷面收方資料處理視窗

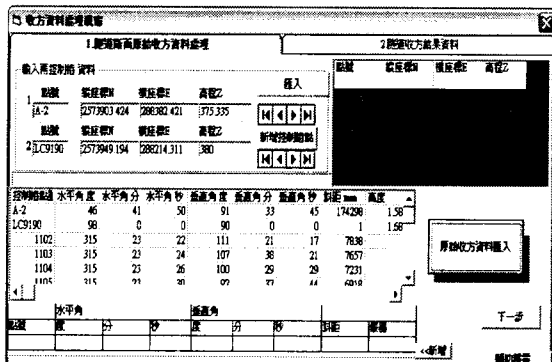


圖 16 隧道斷面收方資料處理匯入視窗

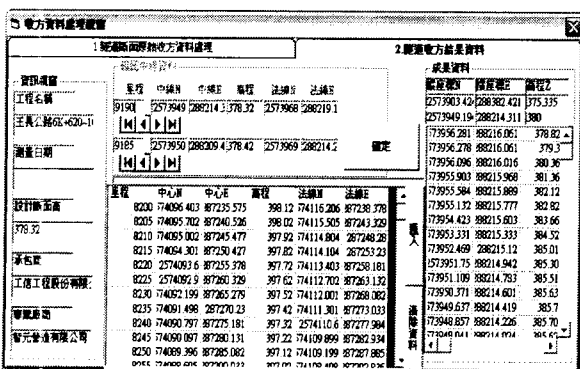


圖 17 成果顯示系統視窗

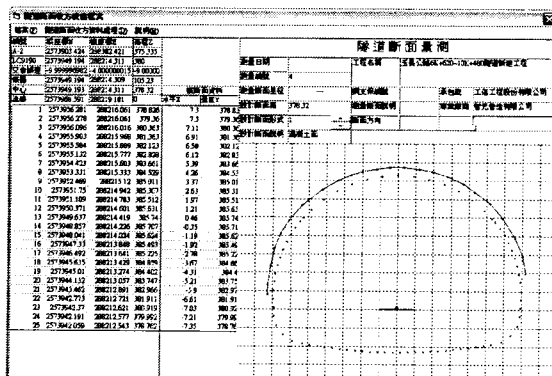


圖 18 隧道斷面收方繪圖視窗

可視化收斂圍束法在隧道工程分析與設計之研究

李煜舫¹ 王銘鋒²

¹中華大學土木工程學系副教授

²中華大學土木工程學系碩士班研究生

摘要

本研究之目的為以隧道現地計測資料為依據，利用回歸分析方法同時結合外顯式收斂圍束法之分析模式，撰寫成一套工程應用之視窗程式。此程式將計算過程中所需之處理動作以多表單模組化方式編寫，並將各表單模組進行整合為一視窗程式使其更具功能性，並藉由實際隧道分析測試視窗程式適用性。本研究所完成之多模組化表單包含工程基本資料鍵入處理系統、岩體分類系統、隧道收斂計測資料處理系統、資訊繪圖視窗、參數計算系統及隧道支撐建議系統。

關鍵字：可視化、隧道收斂計測資料、外顯法、收斂圍束法、視窗程式。

一、前言

目前隧道開挖工程大多採新奧工法（NATM）施作，然在此類施工過程中必須使用計測儀器記錄隧道開挖所產生之位移量，以做為反算分析之資料。利用所紀錄之位移量，並根據岩體材料性質以數值方法反算出岩體與噴凝土中之相關應力，進而適時修正設計及支撐系統。然而隧道開挖的不確定因素很多，即使採用室內或現地試驗所得材料參數進行設計，與實際隧道行為相比尚具某些差異，而運用計測資料進行設計回饋分析恰可彌補此項缺憾，也提供設計者另一種的設計思維

本文研究目的為建立外顯式收斂圍束法視窗程式的可用性，強化使用本程式進行回饋分析結果之準確性，及應用於隧道工程分析設計上能具即時顯示輔助之成果。

二、文獻回顧

本文將針對前人所研究之成果例如岩體分類系統、隧道開挖之力學變形行為、回饋分析方式、隧道應用程式設計技術等，並引述國內、外專家學者之相關研究做一介紹及回顧。

2.1 岩體分類系統

目前岩體分類方式大致以Bieniawski (1989) 之地質力學分類法 (Rock Mass Rating, 簡稱RMR) 為參考依據，此法經多次的修正已更趨完善，且

大量應用於隧道設計及其他大地工程上。而除RMR岩體分類法外，尚有挪威NGI Barton (1974) 根據200條隧道的資料所整理出的岩體分類法（一般稱Q法）。另Hoek與Brown (1997) 找出有關岩石材料參數（ m 、 s 和 a ）與Bieniawski所發展的RMR法之相關性，發現這些岩石參數只在 $m > 25$ 時，有良好的相關性；當RMR小於18時，則不適用。為突破上述限制，Hoek與Brown另設地質強度指數（Geological Strength Index，簡稱GSI）。

2.2 收斂圍束法之基本理論

收斂圍束法其主要的考量為以二維分析模式模擬實際三維隧道開挖支撐時，岩體受外力擾動而產生反應變形之行為。其重點包括：地盤反應曲線（Ground Response Curve, GRC）、支撐反力曲線（Support Reaction Curve, SRC）、縱剖面變形曲線（Longitudinal Deformation Curve, LDC）、縱剖面應力曲線（Longitudinal Stresses Curves, LSC）、互制作用曲線（Interaction curve, IC）、釋放圍束比（Deconfinement Ratio, λ ），以及平衡點（Equilibrium Point, EP），其互制作用關係如圖一所示（李煜舫，2002）。

2.3 回歸分析方法

回歸分析方法不僅僅應用在隧道開挖監測的部分，舉凡需處理大量數據或是經由人為進行紀錄等，需將資料間之誤差量降至最低的過程，都可以使用回歸方式進行分析。本研究利用最小平方根法為基礎公式，分析現場隧道計測資料並使其為最佳化之數據。

陳聖彥（2004）於研究中亦利用法國學者 Panet（1995）所主張之隧道縱剖面變形曲線，將此方程式內建於所撰寫之分析程式中，以最小平方根法方式編輯回歸分析系統，且為使符合程式之語法將公式另做整理，如圖二所示。應用最小平方根法進行回歸分析方法中之參數 a 及 b 推導，如圖三所示。陳昇安（2004）同時以此縱剖面變形曲線進行八卦山公路隧道之計測資料回歸，求得曲線相關參數 m 值後；輔以外顯式收斂圍束法進行隧道分析計算，且於研究中指出回歸出之 m 值越小，隧道變形收斂速度越快等關係。

2.4 Visual Basic 語言應用於整合系統之技術

楊道昌與游保杉（2002），使用 Microsoft Visual Basic 6 與 Microsoft Fortran PowerStation 兩種程式語言設計，分別作為中文視窗介面設計與運算分析使用，供使用者更為便利之操作，有益於未來擴充新增模組之功能。楊森閔（2002）則在其研發系統中，利用 Microsoft 所發行之軟體程式 Visual Basic 為工具進程式設計，並以 Access 2000 進行資料庫結合，以回歸分析模式作為主要程式架構進行視窗化分析。陳聖彥（2004）結合前述兩種方法，以 Microsoft Visual Basic 6 程式語言編寫，以回歸分析方式採用外顯式收斂圍束法之反算分析，用於視窗化程式之開發。

三、外顯式收斂圍束法理論分析之概述

外顯法（Explicit Method）係依據傳統之收斂圍束法基本理論，而發展出以

疊加方式的數值計算方式。陳聖彥(2004)將此一分析法以 Visual Basic 6 程式編寫成圖形介面視窗軟體，藉由計測資料經回歸分析求得曲線 m 值後，即可求得隧道之初始釋放圍束比 α_0 、岩體彈性模數 E_m 等分析結果。其次，在利用釋放圍束比值之迴圈計算關係進行計算，並繪製彈性狀態下之地盤反應曲線、支撐反力曲線、互制曲線和縱剖面變形曲線(李煜舫, 2003)。

3.1 外顯式收斂圍束法之原理與基本假設

外顯式乃根據傳統收斂圍束法之基本理論，輔以疊加的數值計算方式，藉以模擬隧道開挖所引致之岩體收斂與支撐結構互制行為。但實際隧道開挖與支撐結構間之關係，尚存許多複雜且不確定的因素；因此在分析與計算的過程中，必須給予適當之假設條件，以利於二維平面應變模擬分析與計算。基本假設如下：岩體為等向均質之彈塑性材料、支撐結構為線彈性材料、主要支撐鋼結構系統假設為等值斷面之噴凝土、岩體力學行為不考慮時間效應、收斂岩釘安裝位置距隧道開挖前進面距離為無支撐距離，以及隧道開挖不考慮地下水之影響。

3.2 外顯式收斂圍束法之分析步驟

外顯式法的分析過程中所使用的參數包含：隧道覆蓋高、岩體單位重、隧道開挖半徑、現地計測位移量、縱剖面變形曲線之參數等，藉上述資料反算獲得現地岩體的彈性模數、開始支撐時之釋放圍束比值及結構支撐應力值。最後利用釋放圍束比值之迴圈關係，繪製地盤反應曲線、支撐反力曲線、互制曲線和縱剖面變形曲線。

四、視窗程式撰寫與模組化設計

在程式撰寫與分析方法整合的過程中，必須包含三個重要因素，分別為 (a) 分析方法之確立，(b) 程式的設計及 (c) 程式之測試。

分析方法確立後即是軟體程式之結構規劃，在好的專業軟體設計中，軟體架構的設計往往佔整個軟體研發時間的三分之一。使用介面選擇、軟體日後維護、使用者介面友善與否、相容性、可擴充性、程式動作流程等，皆是程式設計者應需考慮之重點。為方便後續之研究與日後整個程式之發展，依據陳聖彥(2004)所發展之視窗化程式，針對其基本架構進行個別系統的模組化設計及撰寫，使各個系統獨立。以便貼近使用者介面，以下章節將針對 Visual Basic 程式語言與多模組化視窗程式架構進行介紹：

4.1 Visual Basic 程式語言

Visual Basic 6 在使用上具有相當多的功能可供使用者於程式設計時選用，例如內建於文書處理軟體的 VBA 程式 (Visual Basic For Application)，雖然簡化許多功能 (像是轉譯成執行檔、製作 ActiveX 元件...)，但執行能力大致上與 VB 相同，只要啟動像是 Word、Excel、AutoCAD 2000 等的 VBA，即可執行簡單的 VB 編譯功能，於取得及練習操作上皆屬便利。

4.2 模組化視窗程式撰寫與測試

本研發之視窗程式為了達分析計算之要求，除了結合使用工具、分析方法及相關輔助方法外，更必須符合使用者的基本需求。本研究之視窗程式架構規劃整理，如圖四所示。在圖中左列顯示為各模組之表單類別，右列為表單內之內容，藉此簡圖可以更了解整個程式的架構組織。以下針對各模組撰寫方式進行介紹。

4.2.1 主要視窗程式介面撰寫

由於本程式在進行分析前須針對各項參數進行讀取，因此為方便使用者現地工程資訊之輸入，在前置輸入區中，將所需參數歸類於同一區中。除統一其數值輸入單位外，對於文字資訊輸入方面也盡量製作下拉選單供使用者進行選擇以增加其便利性。關於程式資料庫部份，可由 Microsoft Office 之 Access 軟體建立一資料庫檔案，輔助本軟體儲存與讀取之用（如圖五所示）。

4.2.2 工程資訊系統及岩體分類系統撰寫

視窗程式於設計時，將工程資訊鍵入系統與岩體分類系統置入同一表單內（如圖六所示），方便使用者一起輸入工程相關資料，雖置入同一表單，但可視為兩獨立系統。在資料鍵入區中，當使用者輸入相關六項岩體性質後，岩體性質評估區、支撐建議區等輔助分析區會根據使用者輸入之數值進行顯示。在岩體評分的部份，國內對於岩體評分系統主要採用 RMR 系統、Q 系統及 GSI 系統進行輔助分析，而在軟體選擇方面，因 RMR 系統應用範圍包含岩石基礎、岩石邊坡及岩石隧道，其案例數量相當多，加上現地施工人員對於 RMR 之分析較為熟析，因此在軟體選用方面則僅採用 RMR 岩體分類系統為主，另加入 Q 系統、GSI 系統岩體分類法的轉換關係，藉由相關方程求得其岩體分類法之評估值。

4.2.3 隧道收斂資料處理系統撰寫

在計測資料處理區中，為方便使用者輸入資料，因此資料處理方面可採外部匯入方式，即是由外部匯入 Excel 程式之 .crv 檔，或可由視窗程式內之手動輸入區中自行鍵入數值，在分析過程中，計測資料之正確性與回饋分析準確性有極大關係。鑑於此，在程式設計時必須考慮到此點，為表現出分析的及時性，使用者於匯入計測資料時程式可即時繪出計測資料與資料筆數之關係圖。圖七為計測處理系統展示圖，圖之下方為資料筆數與隧道位移之關係圖。此設計方式讓使用者可清楚判斷計測資料之正確性，並可手動刪除不當之資料筆數，以增加回饋計算之準確性。在此部分軟體主要採用方式為對計測資料採回歸分析方式，在比較過相關學者的分析方法後，軟體採用之現地參數回歸分析曲線為 Panet (1995) 所發表之經驗公式。由於其以實際隧道計測資料進行研究所獲得之關係較接近實際曲線趨勢。因此成為軟體程式架構中初步相關參數的分析程式。

4.2.4 參數計算系統撰寫

視窗程式之參數計算部份，所使用之計算公式為外顯法之計算方式。將相關參數撰寫於程式內部，接著將資料擷取之部份則設定為視窗使用者介面之資料輸入位置，因此當使用者啟動軟體之同時，程式內部會自動根據內部所建立及撰寫的公式進行一系列運算，並將結果輸出至預先設定好之位置，並配合計測匯入之動作，讀取施工時所紀錄之監測資料，由先程式處理，或由人為篩檢計測資料後，計算現地計測之回歸值。最後，配合外顯法之計算以獲得隧道收斂情形，展示圖見圖八。

4.2.5 支撐建議系統撰寫

由隧道收斂資料匯入，經視窗程式處理及回歸計算後，系統依計算後所獲得之值給予隧道支撐建議，在混凝土厚度部分，依據前述外顯法獲得之結構支撐壓力及混凝土最大支撐壓力進行判斷，並進一步給予隧道混凝土襯砌厚度之建議。另外所輸入之資料內含岩體資料，於此部分亦會給予 RMR 岩體分類系統中所提之支撐建議及岩體凝聚力與內摩擦角，可計算出隧道之塑性半徑，再給予岩栓打設長度之建議，此部分系統展示圖（如圖九所示）。另關於隧道塑性半徑計算部份，除可利用 RMR 所建議之岩體凝聚力與內摩擦角外，亦可手動鍵入更改此二部份之數值計算之。

4.2.6 資訊繪圖系統撰寫

經由前述之計算過程後，系統可進行繪圖動作，由先前之計算可繪出隧道之時間位移曲線、距離位移曲線、縱剖面變形曲線、收斂支撐互制曲線，展示圖見圖十。

4.2.7 說明系統撰寫

在軟體研發過程在使用者介面設計部分共可以分為六區，為工程基本資料鍵入視窗、岩體分類系統鍵入視窗、計測資訊視窗、繪圖視窗、參數計算視窗、支撐建議視窗，此部份即是對此六個表單模組系統進行使用教學及介紹。於圖中，按下左列各模組之按鈕名稱後，表單右列之顯示區即以投影片方式進程式操作說明，（如圖十一所示）。

五、實際案例應用與探討

本文除了將撰寫完成之視窗程式應用於實際案例分析外，亦作為視窗程式測試之平台。本研究實際案例包含：卵礫石層隧道計測案例之東西向快速公路漢寶-草屯線八卦山公路隧道工程，以及東部變質岩之新北迴隧道群之永春、新南澳隧道工程等。依照前述所介紹之外顯式收斂圍束法，並整理分析實際斷面監測資料，找出隧道縱剖面變形曲線相關參數，且經由數值計算後，反算出現地彈性模數、所需結構的支撐力和隧道開挖前期位移量等無法直接獲得的重要參數。

5.1 視窗程式分析現地計測資料與結果

配合岩體分類法之岩體性質概估進行輔助分析，以下資料取自新南澳隧道南口測點、新南澳隧道北口測點、新永春南口測點之各依測點資料進行分析，所取資料以 RMR 分類依序為第三類、第四類及第五類岩盤，並將各測點之相關參數整理為表一（林銘益，2003）。

將上述之新北迴單軌隧道群之各測點由程式所獲得之分析結果整理，另將林銘益（2003）對新北迴鐵路隧道所作之研究（如表二所示），以及外顯式收斂圍束法程式對新北迴鐵路隧道所求得之彈性模數及隧道前期位移量、最大位移量及無支撐距離 d ($Z=d$) 時之位移作比較（如表三所示）。由兩者比較結果得知，發現可視化外顯式收斂圍束法程式計算之數值與林銘益（2003）計算所獲得結果近似。

六、結論與建議

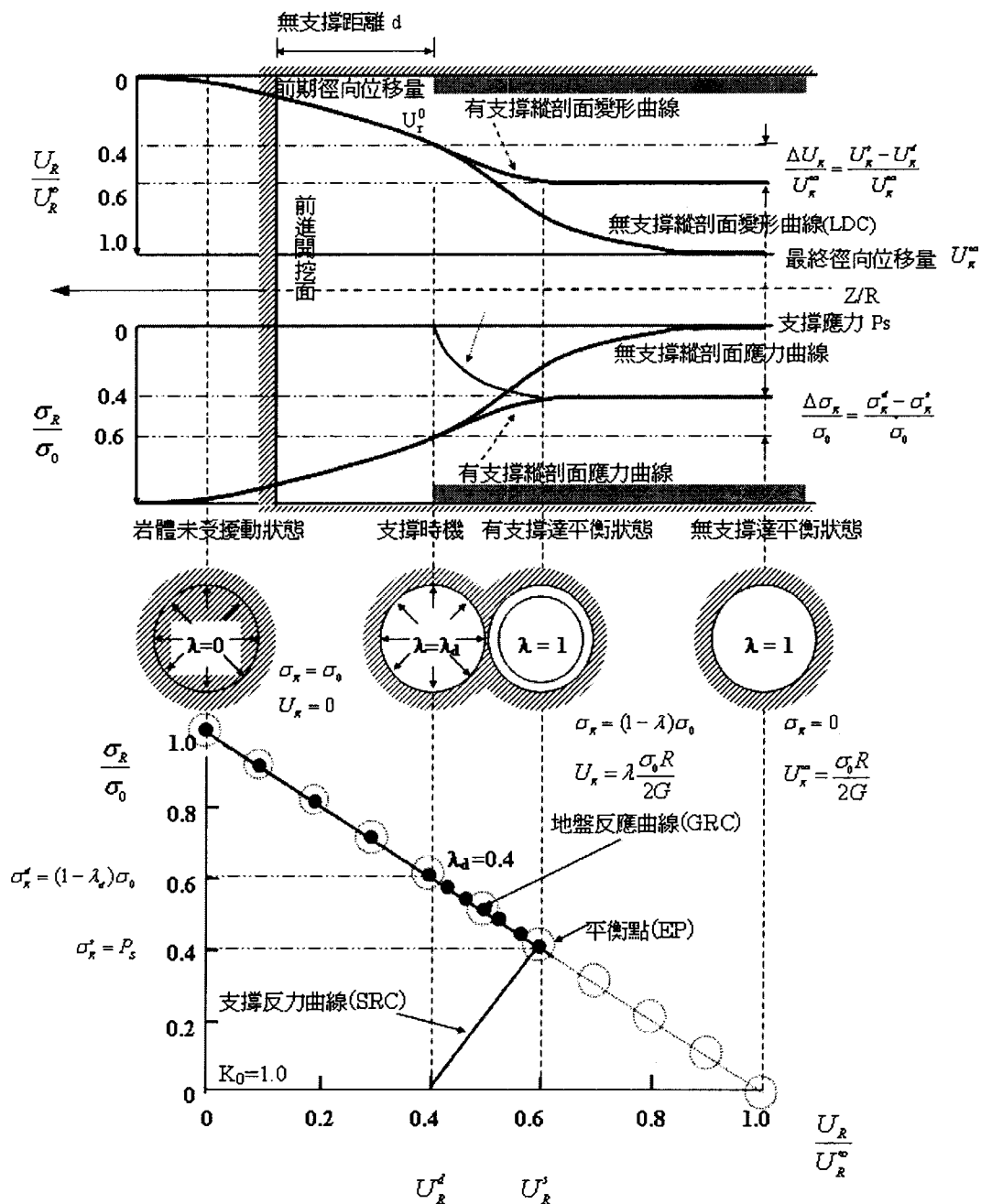
經研究動機、目的、文獻蒐集、方法確認，以及實際撰寫後測試得到成果，針對研究過程所遇到之問題與想法提出以下結論：

- (a) 本研究以多模組化方式撰寫視窗程式，所獲得之結果可具體呈現程式的視窗化。
- (b) 視窗程式結合岩體分類系統、隧道收斂資料處理系統、參數計算系統、繪圖系統及支撐建議系統進行撰寫，對於整體隧道計測分析及反算在使用上具整合性，且撰寫完成之視窗程式經測試後可使用在實際隧道的分析上。
- (c) 利用隧道收斂資料並以隧道收斂資料系統進行回歸後，可得隧道相關參數 m 值。由表三中可知，回歸之 m 值，於相同的預設襯砌厚度下， m 值越大者其結構所需之結構支撐壓力越大，意即 m 值越大者混凝土厚度須加厚，以提高安全性。
- (d) 由參數計算系統所求之隧道開挖時之前期位移量及最終位移量得知，隧道位移量隨岩體分類而異，岩體越差其收斂釋放比值越大，隧道相關位移量即越大。

參考文獻

- (1) BARTON, N., LIEN, R. and LUNDE, J. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", *Journal of Rock Mechanics*, 6(4), pp.189-236.
- (2) BIENIAWSKI, Z. T. (1989), "Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining", *Civil and Petroleum Engineering*. New York: Wiley, pp.215.
- (3) Hoek, E. and Brown, E. T. (1997), "Practical estimates of rock mass strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, pp.1165-1186.
- (4) 李煜齡 (2002), 「收斂圍束法在三維隧道開挖支撐之分析與應用」, 海峽兩岸岩土工程與地工技術交流研討會論文集-城市地下工程與環境保護, 上海, 台灣卷 pp.261-272。
- (5) 李煜齡 (2002), 「隧道開挖前進效應與岩體力學行為關係之探討」, 第三屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會, 四川成都, pp.359-365。
- (6) 李煜齡 (2003), 「收斂圍束法在新奧隧道工法之分析與應用」, 地工技術, 第九十五期, pp.95-106。
- (7) 林銘益 (2003), 「台灣東部變質岩隧道群收斂資料之分析與應用」, 碩士論文, 中華大學土木工程系, 新竹。

- (8) 陳聖彥 (2004), 「視窗化收斂圍束法在隧道工程之研究與應用」, 碩士論文, 中華大學土木工程系, 新竹。
- (9) 陳羿安 (2004), 「卵礫石層隧道計測資料之分析與應用」, 碩士論文, 中華大學土木工程系, 新竹。
- (10) 楊道昌, 游保杉 (2002), 「區域連續行降雨-逕流模式視窗化軟體之發展與應用」, 土木水利第二十八卷第四期 pp.106-117。
- (11) 楊森閔 (2002), 「由現地基樁試驗資料歸納土壤 P-Y 曲線」, 碩士論文, 國立台灣大學土木工程研究所, 台北。



圖一、隧道開挖岩體收斂與支撐圍束間之互制示意圖 (李煜舫, 2003)

$$\lambda = 1 - \left(\frac{m}{m + \frac{z}{R}} \right)^2$$

$$\text{let } \rightarrow x = \frac{z}{R} \rightarrow y = 1 - \left(\frac{m}{m+x} \right)^2 \rightarrow y-1 = - \left(\frac{m}{m+x} \right)^2 \rightarrow \sqrt{1-y} = \frac{m}{m+x}$$

$$\text{let } \rightarrow A = \sqrt{1-y} \rightarrow A = \frac{m}{m+x} \rightarrow A \cdot (m+x) = m \rightarrow A \cdot x = m \cdot (1-A)$$

$$\ln(A \cdot x) = \ln(m \cdot (1-A)) \rightarrow \ln A + \ln x = \ln m + \ln(1-A) \rightarrow \ln x - \ln m = \ln \left(\frac{1-A}{A} \right)$$

$$\ln x = \ln \left(\frac{1-A}{A} \right) + \ln m \begin{cases} \rightarrow Y = \ln x \\ \rightarrow X = \ln \left(\frac{1-A}{A} \right) \\ \rightarrow a = \ln m \end{cases} \rightarrow \text{回歸分析}$$

圖二、縱剖面變形曲線之方程整理

$$G(b,a) = \sum_{i=1}^n [bx_i + a - y_i]^2$$

$$\frac{\partial G(b,a)}{\partial b} = 0 \quad \frac{\partial G(b,a)}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial G}{\partial b} = \sum_{i=1}^n [bx_i + a - y_i]^2$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = an + b \sum_{i=1}^n x_i$$

$$an = \sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - \frac{b \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$G(b,a) = \sum_{i=1}^n [bx_i + a - y_i]^2$$

$$\frac{\partial G(b,a)}{\partial b} = 0 \quad \frac{\partial G(b,a)}{\partial a} = 0$$

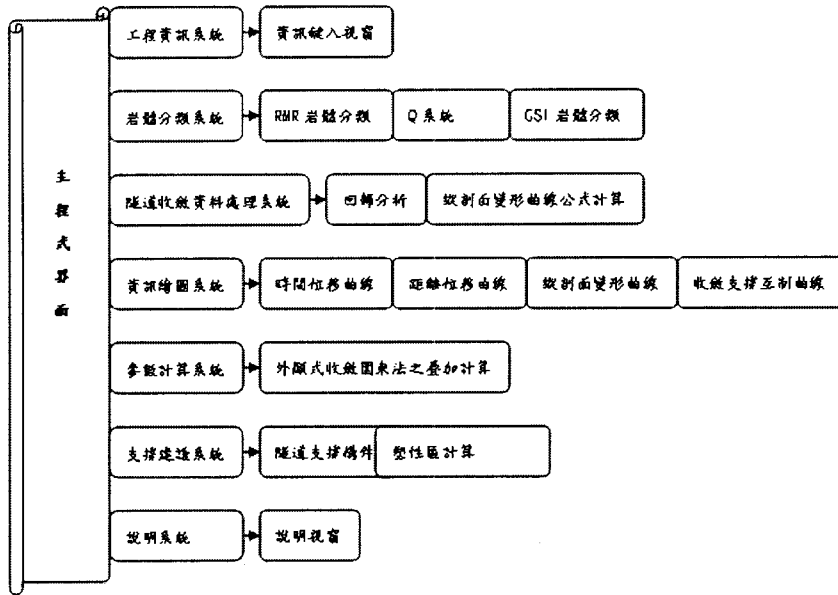
$$\frac{\partial G}{\partial a} = \sum_{i=1}^n [bx_i + a - y_i]^2$$

$$= \sum_{i=1}^n \left[bx_i + \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - \frac{b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \right) - y_i \right] x_i$$

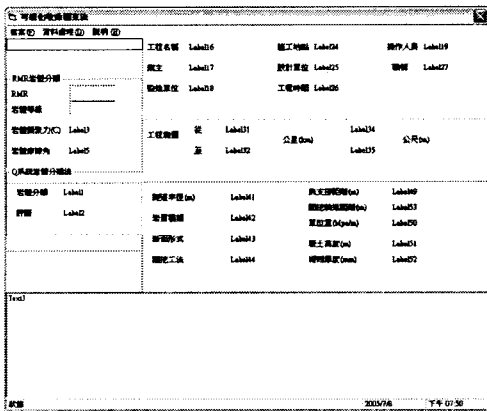
$$b \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}$$

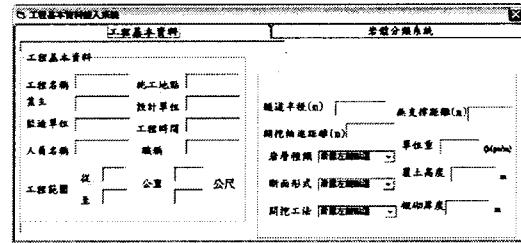
圖三、應用最小平方根法進行回歸分析方法中之參數 a 及 b 推導



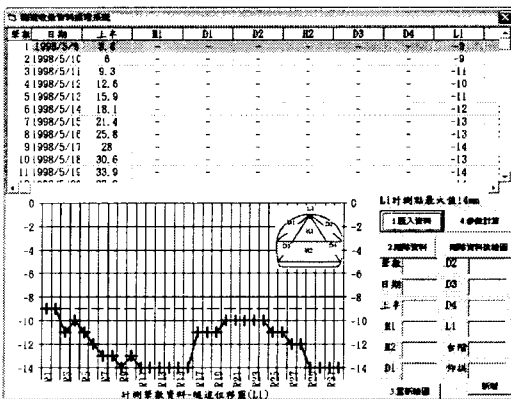
圖四、視窗程式設計架構圖



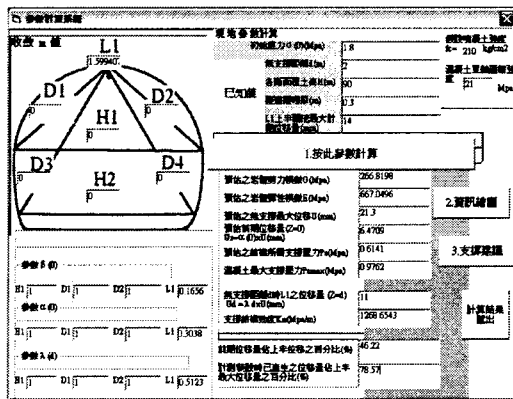
圖五、主要視窗測試展示圖



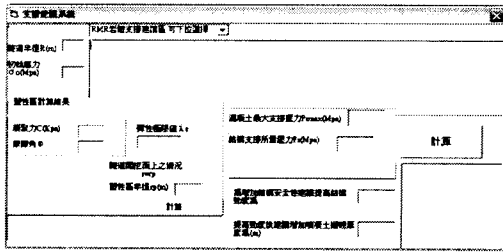
圖六、資訊鍵入及岩體分類系統視窗測試展示圖



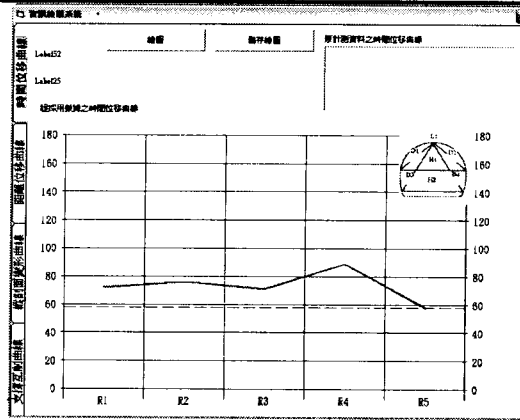
圖七、計測資料處理視窗測試展示圖



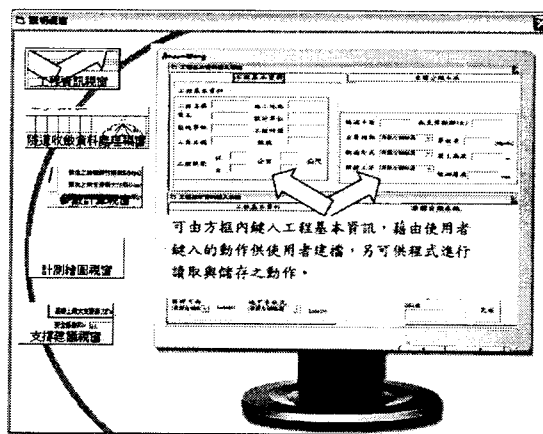
圖八、參數計算視窗測試展示圖



圖九、支撐建議視窗測試展示圖



圖十、繪圖視窗測試展示圖



圖十一、說明視窗實際測試展示圖

表一、新北迴單軌隧道群隧道案例分析相關參數 (林銘益, 2003)

隧道斷面編號		SP18	NP10	YSN16
平均半徑 (m)		3	3	3
無支撐距離 d (m)		1.5	6	4.6
RMR 岩體分類類別		第三類岩盤	第四類岩盤	第五類岩盤
岩體	覆土高度 (m)	232	323.2	240.47
	單位重 γ (kN/m ³)	0.0265	0.0289	0.026
	波松比 ν_γ	0.25	0.25	0.25
噴凝土	彈性模數 E_c (kN/m ²)	24000	24000	24000
	波松比 ν_c	0.2	0.2	0.2
	厚度 t (m)	0.1	0.15	0.2

表二、新北迴單軌隧道群隧道案例分析結果 (林銘益, 2003)

以上半頂拱 L1 之 m 值分析	測點 SP18	測點 NP10	測點 YSN16
頂拱 L1 回歸之 m 值	13.04	4.86	6.009
初始釋放圍束比 α_0	0.0725	0.4978	0.3652
無支撐距離 d 時之釋放圍束比 λ_d	0.1397	0.7478	0.5971
預估之岩體剪力模數 Gm (MPa)	816.26	1926.719	724
預估之岩體彈性模數 Em (MPa)	2040.65	4816.79	1811
預估之無支撐最大位移 U (mm)	11.3	7.3	12.9
預估前期位移量 (開挖距離, Z=0)	0.8192	3.6339	4.71
預估之結構支撐壓力 Ps (MPa)	1.849	0.606	1.4227
混凝土最大支撐應力 P _{max} (MPa)	0.6883	1.0238	1.353
無支撐距離 d 時 L1 之位移量 (開挖距離, Z=d) (mm)	1.6	5.4	7.7
支撐結構勁度 Kn (MPa/m)	877.45	1334.7594	1880
前期位移量佔上半位移量的百分比 (%)	10.37	53.44	47.11
計測裝設時產生之位移量佔 上半最大位移量之百分比 (%)	20.25	79.41	77
建議增加襯砌厚 (m)	0.09	0	0.19
隧道塑性半徑 (m)	4.61	15.5	10
建議打設岩栓長 (m)	3	9	9

表三、外顯式收斂圍束法程式計算結果與林銘益 (2003) 新北迴單軌隧道群隧道開挖預估位移量之比較

RMR 岩盤分類	(林銘益, 2003)			(可視化外顯式收斂圍束法計算結果)		
	前期位移量 (mm)	最大位移量 (mm)	無支撐距離 d 時之位移 量 (mm)	前期位移量 (mm)	最大位移量 (mm)	無支撐距離 d 時之位移 量 (mm)
第三類 片岩	1~1.5	7.8~12	1.9~2.7	0.8192	11.3	1.6
第四類 角閃岩	0.92~ 2.92	6.76~ 20.43	1.79~ 5.41	3.63	7.3	5.4
第五類 板岩	3.32~ 5.37	17.01~ 27.56	5.99~ 9.7	4.71	12.9	7.7