

台北捷運木柵隧道之
FLAC 程式回饋分析
**BACK ANALYSIS OF MUCHA TUNNEL, TRTS
BY FLAC PROGRAM**

陳江淮，林衍竹，杜保興
C.H. Chen, Y.J. Lin and P.H. Toh

原著載於台北捷運工程研討會,1993年

*Reprinted from Proceedings of
Symposium of Taipei Metropolitan Rapid Transit Systems,
Vol.C, pp.12-22, Taipei, 1993*

台北捷運木柵隧道之FLAC程式回饋分析

陳江淮—亞新工程顧問公司大地工程師

林衍竹—亞新工程顧問公司大地工程師

杜保興—亞新工程顧問公司捷運專案(一)副理

摘要

本文將先說明FLAC之分析架構，包括組合律、網格邊界條件、岩體材料參數、初始應力、支撐材料參數及支撐延遲之模擬，然後敘明木柵隧道開挖過程中所作數值分析所得之變形量，岩栓受力和噴凝土應力值。將此分析值與對應之監測值比較，並探討差異之可能原因。

Back Analysis of Mucha Tunnel, TRTS by FLAC Program

C. H. Chen - Geotech. Engineer, Moh and Associates Inc.

Y. J. Lin - Geotech. Engineer, Moh and Associates Inc.

P. H. Toh - Deputy Project Manager, GESC I, Moh and Associates Inc.

Abstract

This paper describes the analysis framework of FLAC adopted in the study, including the constitutive law, boundary conditions of the finite element mesh, parameters of rock mass material and supports, initial stresses, and time-lag simulation for delayed support.

It also illustrates the results of numerical analysis conducted on the Mucha Tunnel, TRTS, in terms of tunnel deformation, stresses in rock bolts and stresses in shotcrete. The analysis results are compared with corresponding measured values, and the possible causes of discrepancy are discussed.

壹、前言

變形為直接量得到的物理量，因此收斂監測量成為評估岩石隧道開挖及支撐安定的重要依據。近年來隧道工程廣泛採用新奧工法之觀念來設計和施工。除了使用柔性支撐使與隧道圍岩密切接合構成複合支撐環外，施工中之變形和應力等之監測亦為新奧工法之重要一環。

為探究監測結果所顯示之隧道開挖及支撐之穩定情形，以及變形、應力等現象之原因，常以數值分析法作為分析工具。本文將報告台北捷運本柵隧道用Road Header開挖過程中使用FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)程式 [1]來模擬地形產生之偏壓、延遲支撐及上半斷面開挖與台階開挖分段施工之影響[2]，並求得收斂、岩栓受力和噴凝土應力等物理量，然後將此等分析值與監測值比較，並推測發生偏差之原因。

貳、FLAC分析架構

一、概述

FLAC 是以外顯有限差分程式 (Explicit Finite Difference Code) 模擬以土壤、岩石或其他達降伏限度後呈塑性流動的材料所構成之構造物的行為，以求解運動定律方程式。

用FLAC解析問題，首先必須決定問題之幾何形狀，邊界條件及材料性質，以便建立有限元素網格，並給定邊界條件及材料參數。網格定義後，視問題之狀況給定初始應力或外力，然後依給定的條件作反覆運算，直至速度或不平衡力收斂至指定範圍內為止。

二、分析架構之建立

(一) 組合律 (Constitutive law)：假設岩體為均質 (Homogeneous)，均向 (Isotropic)，且其應力—應變關係為完全彈塑性 (Elasto-Perfectly Plastic)；破壞準則為線性之Mohr-Coulomb準則，塑性應變則為線性之Mohr-Coulomb準則，塑性應變則遵循非諧合流準則(Non-associated Flow Rule)。

(二) 網格邊界條件：本隧道之網格邊界取隧道軸起算五倍隧道直徑為分析之

左、右及下邊界；上邊界則模擬至地表面，並配合地形之，變化網格之形狀。左、右邊界給予X方向之束制，下邊界給予Y方向之束制，地表面則為開放之自由面。

(三) 岩體材料參數：由於假設隧道圍岩為彈塑性應力—應變關係，FLAC所需輸入的岩體參數有剪力模數(Shear Modulus, G)，體積模數(Bulk Modulus, B)，密度以及 C 、 ϕ 值，必要時亦可輸入張力強度。本分析依岩體之RMR或Q值區分之B、C及D三等級，選取三組岩體參數。

(四) 初始應力：由於本隧道之覆蓋層厚度約為18~70公尺，為淺層隧道，故假設垂直應力係因覆蓋岩層之重量所致，且此岩層為自然沈積，故靜止壓力係數 $k_0 = \nu / (1 - \nu)$ ，水平應力 $\sigma_h = k_0 \sigma_v$ ，由不同覆蓋層厚度計算初始應力。

(五) 支撐之材料參數：以樑元素(Beam Element)模擬噴凝土，以桿件元素模擬岩栓。樑元素需輸入材料之彈性模數，並取隧道軸向單位寬及噴凝土厚計算斷面積及斷面積二次矩。桿元素除輸入岩栓之斷面積、彈性模數、降伏強度外，亦需輸入岩栓與周圍材料之握裹勁度(Bond Stiffness)與握裹強度(Bond Strength)。本分析依三種岩體等級定義三組支撐材料參數，經由換算成為FLAC之輸入參數。

(六) 支撐延遲之模擬：隧道開挖均有一段未支撐，此段岩體在未安裝支撐前，已有相當的變形。因此需估計延遲支撐所造成的變形，並以FLAC之時階控制此變形量之產生，以及算出該變形下之應力狀態，於此應力狀態時才加入支撐元素，以模擬現地之支撐安裝情況。

參、數值分析與監測值之比較

一、數值分析

FLAC分析所需輸入參數包括岩體及支撐材料之參數如表1及表2。共分析20個計測斷面，岩體B、C、D三種及其所安裝之支撐。隧道分析網格見圖1。為探討各種支撐對隧道淨空收斂量之影響，曾取一計測斷面作支撐靈敏度分析，分析上半斷面開挖後，無支撐、噴凝土支撐、岩栓支撐及噴凝土和岩栓同時支撐四種狀況。隧道淨空變形量測一般包括五條測線，如圖2所示。由於此一隧道係分成上下半斷面開挖，加上管線設施之阻礙，五條測線中僅H1及H2之資料較完整；而上下半斷面之前

進工作面有時相差極遠，因此又以H1之資料較完整。分析結果顯示系統岩栓對抑制H1收斂量之貢獻有限，且噴凝土支撐與噴凝土、岩栓同時支撐所得之H1相近。

隧道圍岩之變形量如圖2，係以向量表示，箭頭之長短與方向分別代表變形之大小與方向。為將分析變形量與監測值H1、H2、D1、D2、D3及D4六條測線之收斂量相比較，需將分析值換算成相對測線變形。

FLAC分析岩栓受力情形，以監測斷面之實際岩栓佈置，輸入而得知其受力。分析噴凝土受力情況亦以監測斷面處之噴凝土厚度，計算其受力值。

二、數值分析值與監測值之比較

(一) 初始變形量之推估：由於收斂釘初次觀測時，隧道圍岩已經變形，為與FLAC分析值比較，需用Guenot et.al.[3]之公式求初始變形量，即

$$F(X) = u + c \left[1 - \left(\frac{A}{A+X} \right)^2 \right]$$

其中X = 距離開挖面之距離

u = 初始變形量

c = X趨近於 ∞ 時之最終變形量

A = 常數

F(X) = 距開挖面X處之變形。

各監測斷面之初始變形量加上監測最終收斂量即得最終變形量。

(二) 同等級岩體處，覆蓋厚度與收斂量之關係：同等級岩體，依覆蓋厚度與收斂量之關係圖，可看出當覆蓋厚度大於35公尺時，分析值與監測甚為接近。但覆蓋厚度小於35公尺時，兩者之差異較大。推測係因數值分析採平面應變分析，但於覆蓋較淺之洞口處，其應力型態為三度空間，實際與分析假定不符。在2號洞口及3號洞口收斂分析值均較監測值為小。

(三) 覆蓋厚度相同時，不同等級岩體與收斂值之關係：覆蓋厚度在20和30公尺時，分析值與監測值差異較大，且以後者較高。當厚度大於40公尺時在定性和定量上分析與監測值較為一致。

(四) 隧道沿線收斂分析與監測值之比較：在2號及3號洞口附近分析和監測值差異較大。分析時考慮地形高度之自重，因此收斂值與地形高度有一致之變化，但在

岩體等級變化處則有明顯起落情形。一般H1分析值較監測收斂值為小，且均小於15公厘。而H1監測收斂量小於25公厘。請閱圖3。

(五) 岩栓及噴凝土受力之分析與監測值比較：在定量方面，數值分析所得之岩栓受力與監測值差異較大，定性方面，分析之岩栓受力和監測值均顯示靠近隧道側壁岩栓受力較大，趨勢一致。請閱圖4。

至於噴凝土受力，分析值實測值均以切向應力較徑向應力大，且趨勢一致，請閱圖5、6。

肆、結論

(一)以數值分析模式分析隧道開挖工程時，應考慮覆蓋層地形及開挖與支撐程序，並由監測之收斂量推估初始收斂量，使分析結果更趨完整。

(二)由本案例得知，以FLAC程式建立之分析模式，應可適當模擬淺層隧道。惟分析時未將複雜的現地地質條件列入，且因程式功能之限制，對於隧道洞口無法適當模擬，致使地質構造複雜地區及洞口處分析結果與監測值差異較大。因此，必要時可將複雜的地質條件列入考慮，且於洞口處用三維度(Three-Dimension)模擬，使數值分析結果更趨完整。

(三)數值分析時，參數之選擇對分析結果影響極大。因此於目前國內相關工程中，利用監測值進行回饋分析，建立當地力學參數，供爾後隧道工程分析設計時使用，應為隧道工程界努力的目標。

誌謝

本文之資料收集及撰寫承蒙台北市捷運局東區工程處葉處長向陽之鼓勵、該處同仁之協助，並蒙亞新工程顧問公司莫總經理、捷運專案(一)游協理坤、大地二部郭經理文祥、台電公司王文通先生指導斧正，以及參與木柵隧道工作之亞新捷運專案一部同仁多方協助，特此誌謝。

參考文獻

- [1] ITASCA Consulting Group, Inc., FLAC User's Manual (Version 2.25), 1991
- [2] 林衍竹，岩石隧道變形行為之研究，國立台灣工業技術學院工程技術研究所營建

表 1 岩體材料與強度參數

岩體分類	單軸壓縮強度 σ_c (N/m^2) $\times 10^6$	變形模數 E (N/m^2) $\times 10^9$	密度 d (kg/m^3)	剪力模數 G (N/m^2) $\times 10^9$	體積模數 B (N/m^2) $\times 10^9$	凝聚力 C (N/m^2) $\times 10^6$	內摩擦角 ϕ	備註
$\nu = 0.25$								
B	28	2.2	2380	0.880	1.470	0.13*	30*	*試驗值
C	28	1.6	2380	0.640	1.067	0.20	25	
D	6	1.0	2590	0.400	0.670	0.15	20	
$\nu = 0.33$								
B	28	2.2	2380	0.827	2.157	0.13*	30*	*試驗值
C	28	1.6	2380	0.600	1.569	0.20	25	
D	6	1.0	2590	0.376	0.980	0.15	20	

表2 支撐系統材料參數

岩體分類	噴 凝 土			岩 栓				
	變形模數 E (N/m^2) $\times 10^9$	斷面二次矩 I (m) $\times 10^{-4}$	斷面積 A (m^2)	彈性模數 E (N/m^2) $\times 10^{10}$	握裹強度 S_b (N/m)	握裹勁度 K_b ($N/m/m$) $\times 10^7$	降伏強度 y_i (N)	斷面積 A (m^2) $\times 10^{-4}$
B	20	0.104	0.05	20.7	24525	0.3832	184800	6.6
C	20	0.833	0.10	20.7	24525	0.3832	184800	6.6
D	20	2.814	0.15	20.7	19620	0.3066	184800	6.6

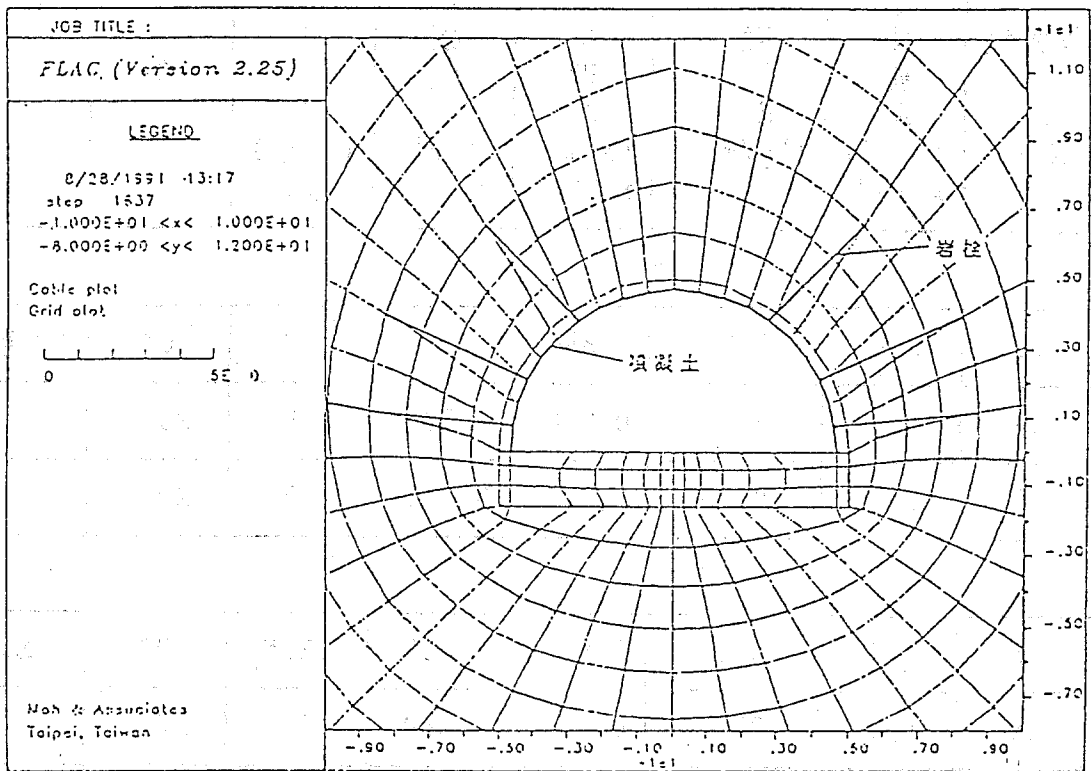


圖1. 隧道斷面分析網格

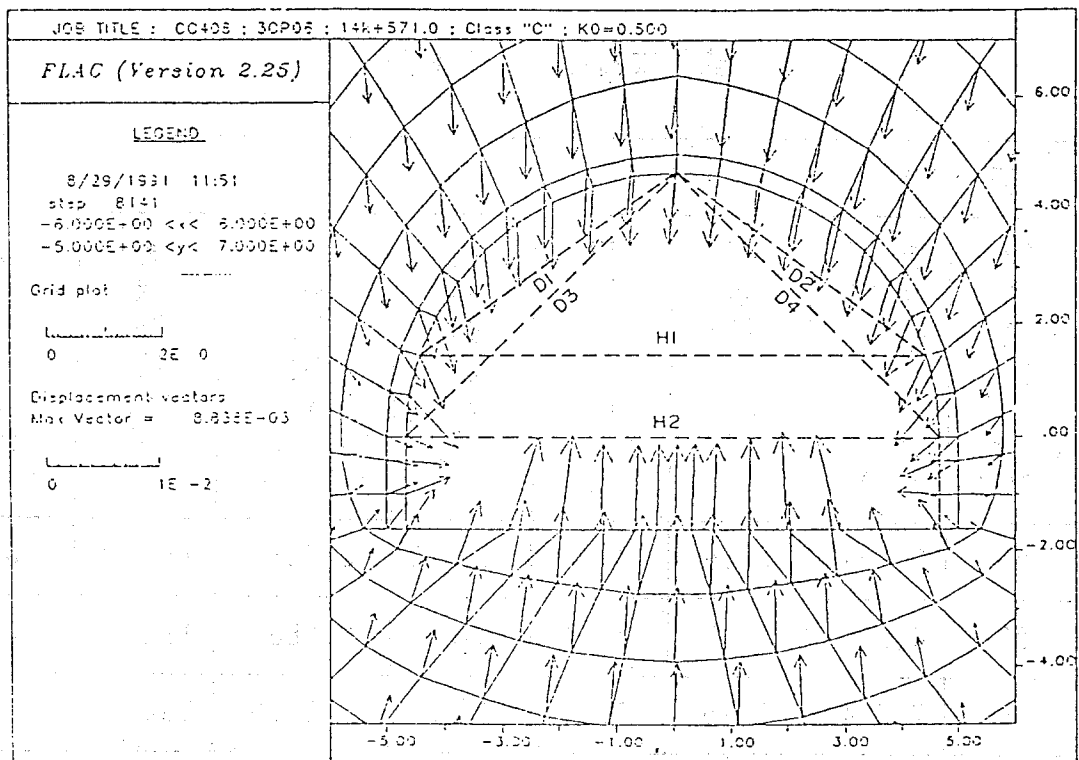


圖2. 隧道壁面變形量與內空收斂測線位置

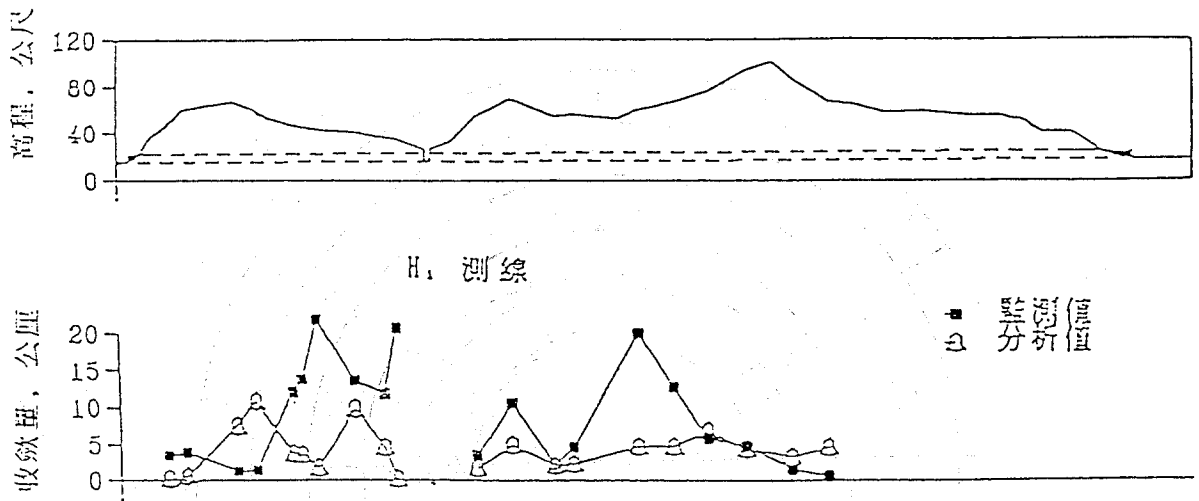


圖 3. 隧道縱斷面之分析值與監測值之比較

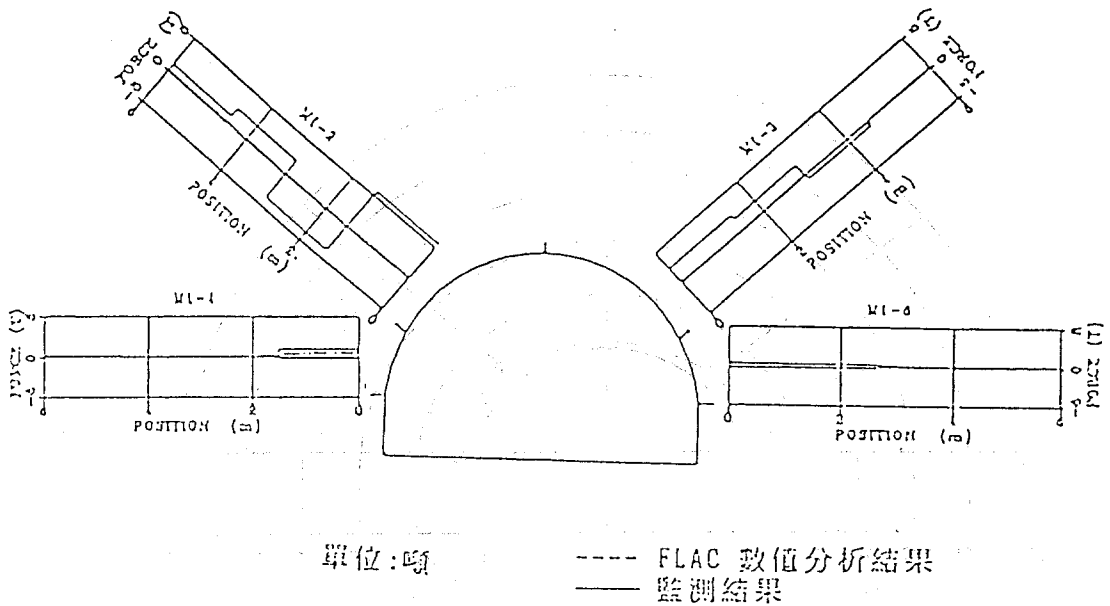
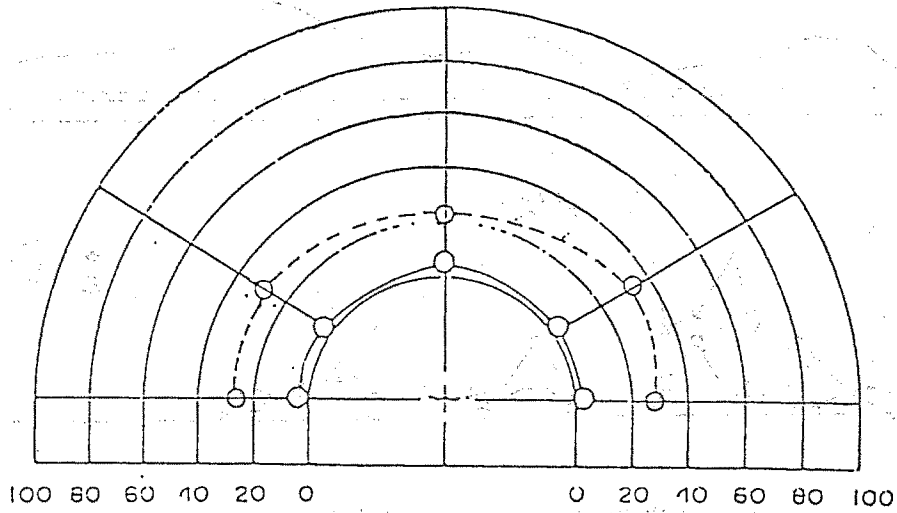
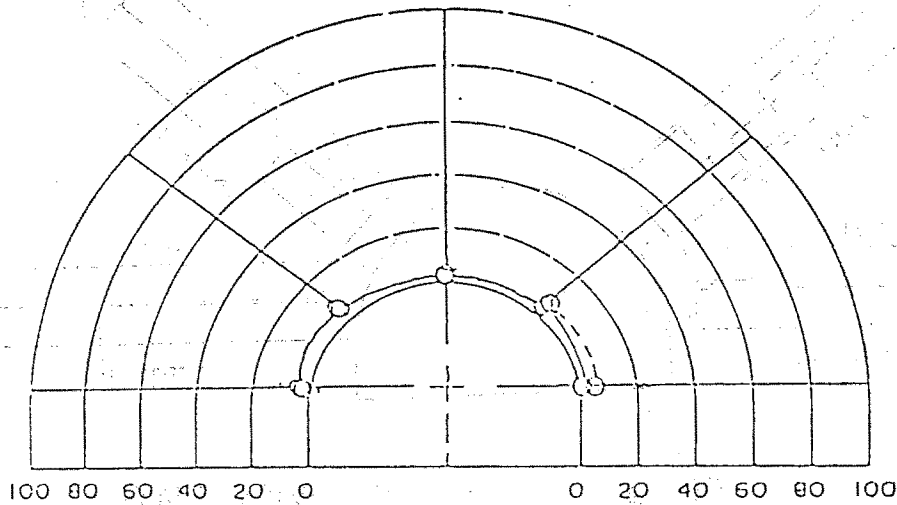


圖 4. 14km+328.8m 岩栓受力情形之數值分析結果與監值之比較
(D 類岩體, 覆蓋深度約 15m)



單位:kg/cm² - - - - FLAC 數值分析結果
 ———— 監測結果

圖5. 14km+328.8m 噴凝土切向應力之數值分析結果與監值之比較
 (D 類岩體, 覆蓋深度約15m)



單位:kg/cm² - - - - FLAC 數值分析結果
 ———— 監測結果

圖6. 14km+328.8m 噴凝土徑向應力之數值分析結果與監值之比較
 (D 類岩體, 覆蓋深度約15m)