中國土木水利工程學刊　第十卷　第一期　(民國八十七年)
Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 145–149, 1998

技術短文　*Technical Short Paper*

淺層礫石層隧道施工之監測與分析

陳堯中[1]　　廖惠生[2]

關鍵詞： 礫石層、隧道、監測。

摘　要

本文以三義壹號隧道礫石層段之施工爲研究對象，經由現地監測資料之整理分析及數值回饋分析，綜合探討淺層礫石層隧道施工之變形行爲。監測資料之整理分析可了解各施工階段對地表沉陷及隧道變形之影響程度與影響範圍。數值分析則針對隧道上半斷面施工之各種條件進行模擬分析，並提出適當之力學參數以供參考。

MONITOR AND ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION OF SHALLOW GRAVEL TUNNEL

Yao-Chung Chen　　Huei-Sheng Liao

Department of Construction Engineering
National Taiwan University of Science and Technology
Taipei, Taiwan 10672, R.O.C.

Key Words: gravel layer, tunnel, monitor.

ABSTRACT

The construction of the section of Sanyi No. 1 tunnel in the gravel layer is studied. The deformation behavior of the construction of shallow gravel tunnel is investigated by analyzing the monitoring results and performing numerical analysis. The influencing effects and extents of each construction stage on ground settlements and tunnel deformation is studied by analyzing the monitoring data. The top heading construction of the gravel tunnel is simulated numerically. Appropriate mechanical parameters are suggested for references.

一、前　言

依交通部高速鐵路工程籌備處所辦理之「台灣西部走廊高速鐵路工程」基本設計工作中，初步規劃出總長度約 23,000m、共計 26 座之隧道工程。其中的 16 座隧道 (約 11,000m 長) 將會通過卵礫石層之地質，尤以林口隧道長 6,425m 爲最。就工程困難度而言，此項隧道工程應爲全線工程之要徑，因此，佔隧道總長度約 50% 之礫石層隧道之重要性自不待言。台灣之礫石層隧道施工案例甚少，且未留下完整施工紀錄，因此可資參考者並不多見。而理論模式之建立與分析，則更加欠缺。

台灣鐵路局主辦之竹南至豐原間山線鐵路雙軌化工程，其中以榮工處統包之三義壹號隧道工程最爲艱鉅，通過礫石層之隧道長度約有 400m，隧道直徑 11m。此區礫石層之礫石含量自 60% ~ 90% 不等，礫石主要以石英砂岩或變質砂岩爲主，礫徑自數公分至 1.5 公尺不等 (最大有達 2.0m 者)，其中以 15 ~ 30cm 最常見，且大多爲圓形至次圓形。細粒料以砂爲主，內含粉土及粘土。由於現地地下水位高且礫石層透水性佳，易造成開挖面滲水而將礫石間之細粒料沖失，進而造成開挖面因自持力變差而崩坍。

[1] 國立台灣科技大學營建工程技術系教授
[2] 國立台灣科技大學營建工程技術系碩士

三義礫石層隧道可分爲二個區段施工，即高速公路穿越段和東側井向南段，本文探討之重點爲高速公路穿越段。高速公路穿越段全長 183m，其覆土厚度僅 8 ~ 20m，地下水位約在地表下 1 ~ 5m，由於必須兼顧高速公路之暢通與安全，所以施工時特別謹慎，採灌漿及管幕前撐等補助工法，開挖分成上半斷面、洞台及仰拱。隧道內之灌漿作業每輪施作 12m，灌漿範圍涵蓋隧道前方及上半斷面外圍 3m 厚之區域。每輪灌漿完成後，接著進行拱圈之管幕施工，管幕由 38 支直徑 3.5 英吋、長 12m 之鐵管所構成，配置間距約 30cm。灌漿及管幕完成後，接著進行上半斷面開挖，每輪進 1m，開挖 9m 後停止，進行下一輪 12m 之灌漿作業，保留 3m 灌漿區，以避免地下水入滲及保護開挖面。上半斷面施工之月進度約 10 至 12m，其中灌漿、管幕及開挖所費之時間約略相同，故本文將其上半斷面之施工作業分成灌漿、管幕及開挖三部份。詳細之施工過程可參考翁等人 [1] 及陳等人 [2]。施工單位在高速公路穿越段設置了許多監測儀器，並於施工過程中密集監測。本文希望經由監測資料之整理研判與數值回饋分析，能對往後類似工程之規劃設計及施工有所助益。

二、 高速公路穿越段之監測

2.1 監測斷面配置

高速公路穿越段之監測斷面里程及配置，如圖 1 所示，每隔 20m 設置一處監測斷面，共計 11 處監測斷面。監測項目包括隧道內之水平收斂變形、斜向收斂變形與頂拱沉陷，以及隧道上方距中心線 20 ~ 30m 範圍內之地表沉陷。除此之外，也在高速公路之路肩和中隔島上布設密集之沉陷點，總計地表沉陷點有 152 處，構成嚴密之監測網。圖 1 中亦顯示隧道上半斷面開挖至各監測斷面之日期。

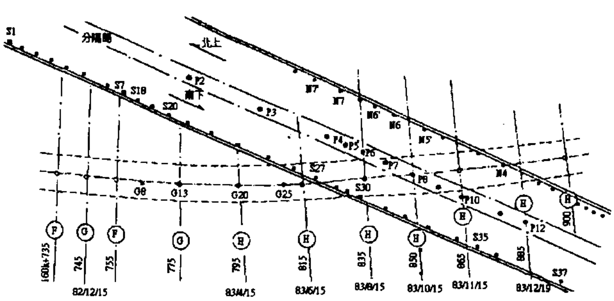

圖 1　高速公路穿越段監測斷面配置圖

2.2 隧道變形監測資料之整理與分析

隧道內之監測項目包括頂拱沉陷、水平收斂變形和斜向收斂變形，本文希望從監測值與各施工階段之關係，整理出各施工階段對監測值之影響程度，此處將隧道上半斷面之施工簡化爲前進灌漿、管幕鑽灌和開挖支撐三個階段，其中開挖支撐階段包括開挖、架設支撐、噴凝土封面等施工作業。

本文以 X 代表監測斷面與開挖面之距離，X 爲正代表監測斷面在開挖面之後，X 爲負代表監測斷面在開挖面之前。隧道 11 處監測斷面中有 6 處之資料較完整，其頂拱沈陷和各施工階段之對應關係，整理如圖 2 所示。同時將各施工階段引致之頂拱沈陷累計值和正規化距離 (X/B，B 代表隧道寬度) 之關係繪於圖 3，限於篇幅，此處僅顯示其中一處監測斷面之資料。因爲取每一施工循環爲單位，即前進灌漿、管幕鑽灌和開挖支撐，施工長度大約爲 9m，因此曲線較不平滑。由圖 3 可知各施工階段對開挖面後方頂拱沈陷之影響範圍， 前進灌漿和管幕灌漿之影響範圍大於開挖支撐，整體施工之影響範圍約 1 ~ 4 倍之隧道寬度，且覆土厚度越大其影響範圍越小。

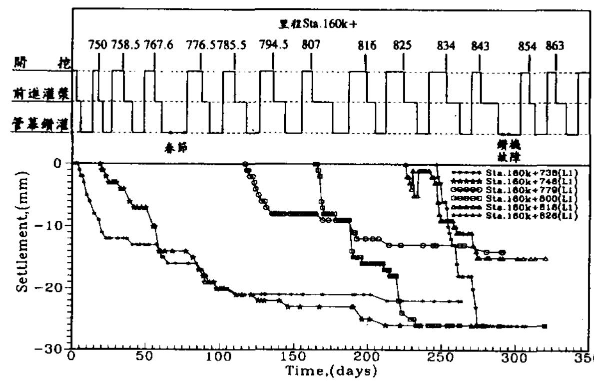

圖 2　各施工階段與頂拱沈陷之對照圖

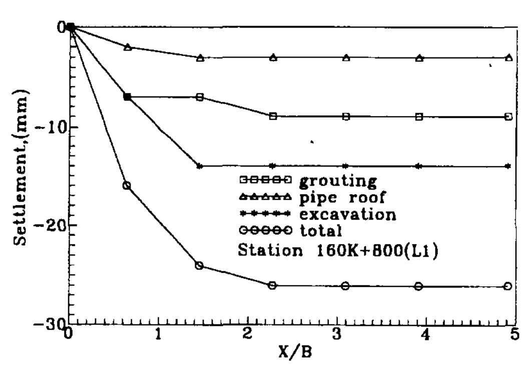

圖 3　各施工階段引致之頂拱沈陷累計圖

將上半斷面各施工階段對頂拱之影響整理於表 1，可得下列結果：

(1) 其頂拱沈陷大約爲 14mm 到 26mm 之間。

(2) 上半斷面開挖各施工階段頂拱沈陷之影響，前進灌漿約佔 20 ~ 50%，管幕鑽灌約佔 10 ~ 40%，開挖支撐約佔 20 ~ 60%。

(3) 覆土厚度在 12m 以下時，前進灌漿和管幕鑽灌兩者引起之頂拱沈陷超過 50%，然而隨著覆土厚度的增加開挖支撐導致之頂拱沈陷均超過 50%，因此可知灌漿之影響隨覆土厚度的增加而減小。

此外，將上半斷面各施工階段引致之水平收斂變形資料整理於表 2，可得下列結果：水平收斂變形值大約在 19mm ~ 68mm 之間，約爲頂拱沈陷值之 0.8 ~ 2.6 倍。各施工階段對水平收斂變形之影響，前進灌漿約佔 10 ~ 51%，管幕鑽灌約佔 0.0 ~ 50%，開挖支撐約佔 32 ~ 67%。覆土厚度越大灌漿之影響越小。

表 1　上半斷面開挖各施工階段對頂拱變形之影響

斷面里程 160k+	覆土厚 (m)	頂拱總沈陷 (mm)	灌漿沈陷 (mm)	管幕沈陷 (mm)	開挖沈陷 (mm)	首測時間/距離 (day/m)
738	12	-22	-10 (45.5%)	-8 (36.3%)	-4 (18.2%)	2 / 4.5
746	12	-26	-13 (50.0%)	-7 (26.9%)	-6 (23.1%)	4 / 4
779	12	-14	-3 (21.4%)	-5 (35.7%)	-6 (42.9%)	14 / 6.5
800	18	-25	-8 (32.0%)	-3 (12.0%)	-14 (56.0%)	8 / 7
818	18	-19	-7 (36.8%)	-3 (15.8%)	-9 (47.4%)	10 / 7
826	18	-26	-8 (30.8%)	-2 (7.7%)	-16 (61.5%)	3 / 5

註：括號內之值表示各施工階段所引致之沈陷佔總沈陷之百分比

表 2　上半斷面開挖各施工階段對水平收斂變形之影響

斷面里程 160k+	總變形 (mm)	灌漿變形 (mm)	管幕變形 (mm)	開挖變形 (mm)
738	-45.29	-4.75 (10.5%)	-22.78 (50.3%)	-17.76 (39.2%)
746	-47.98	-19.48 (40.6%)	-13.30 (27.7%)	-15.20 (31.7%)
779	-22.54	-5.92 (26.3%)	-9.16 (40.6%)	-7.46 (33.1%)
800	-19.68	-3.26 (16.6%)	-3.29 (16.7%)	-13.13 (66.7%)
818	-21.26	-10.88 (51.2%)	+0.36 (-1.7%)	-10.74 (50.5%)
826	-67.81	-25.84 (38.1%)	-0.28 (0.4%)	-41.69 (61.5%)

註：括號內之值表示各施工階段所引致之變形佔總變形之百分比

2.3　地表沈陷值之整理與分析

各施工階段對地表沈陷量之影響示於表 3，開挖至地表監測斷面時已產生之前期變形量整理於表 4，可得下列結果：

(1) 各施工階段對地表沈陷之影響，前進灌漿約佔 11 ~ 28%，管幕鑽灌約佔 29 ~ 40%，開挖支撐約佔 36 ~ 58%。

(2) 開挖至地表監測斷面時已產生之前期變形量爲 11 ~ 23mm，約佔總地表沈陷之 35 ~ 64%，平均約 50%。

(3) 管幕鑽灌對前方之影響比前進灌漿大，可能由於管幕鑽灌時造成土壤之擾動而導致此結果。

(4) 隧道施工對前方地表沈陷之影響範圍約 2 ~ 3 倍隧道寬度，對後方地表沈陷之影響範圍約 4 ~ 5 倍隧道寬度 [2]。

爲了保持高速公路之行車安全，高速公路沈陷量的監控特別重要，因此沿著高速公路兩邊路肩和中隔島設置許多監測點以作爲安全之檢核。南下路肩共設置 27 個沈陷監測點，其地表沈陷之量測結果示於圖 4，其中 L 代表各監測點與隧道中心線之距離，B 代表隧道寬度，由圖 4 可知：

表 3　上半斷面開挖各施工階段對地表沈陷之影響

斷面里程 160k+	總沈陷 (mm)	灌漿沈陷 (mm)	管幕沈陷 (mm)	開挖沈陷 (mm)
763	-21.7	-6.1 (28.1%)	-6.2 (28.6%)	-9.4 (43.3%)
775	-17.5	-1.9 (10.8%)	-5.4 (29.2%)	-10.2 (58.3%)
795	-34.0	-8.1 (23.8%)	-13.7 (40.3%)	-12.2 (35.9%)

註：括號內之值表示各種施工階段引致沈陷佔總沈陷之百分比

表 4　高速公路穿越段之前期變形量 (上半斷面)

斷面里程 160k+	首測距離 (m)*	地表總沈陷 S (mm)	前期變形量 S1 (mm)**	S1 / S (%)
763	-19.5	-21.8	-11.9	54.6
775	-31.5	-17.5	-11.2	64.0
795	-51.5	-34.0	-11.9	35.0
810	-66.5	-44.1	-20.6	46.7
835	-91.5	-45.2	-23.1	51.1
平均值				50.0

* 首測距開挖面距離負值表示開挖面在計測斷面之後

** 前期變形量指開挖至計測斷面已產生之位移，並假設地表首測時前期變形量爲零

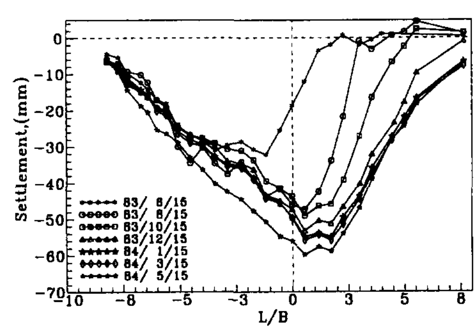

圖 4　高速公路南下路肩之地表沈陷曲線

(1) 由於隧道和高速公路斜交 30°，所以隧道開挖首先影響到隧道中心線之左側部分。隨著開挖面通過南下路肩監測斷面，最大沉陷點逐漸移向隧道中心線之右側。84 年 1 月 15 日上半斷面貫通時，地表沈陷最大值約爲 55mm。

(2) 由地表沈陷曲線估計上半斷面開挖影響之左右邊界約 8 ~ 10 倍隧道寬度，但由於隧道和高速公路斜交 30°，所以實際影響範圍約 4 ~ 5 倍隧道寬度。

中隔島部分共設置 11 個沈陷監測點，上半斷面貫通時最大沈陷值約爲 69mm。北上路肩共設置 14 個沈陷監測點，上半斷面貫通時最大沈陷值約爲 58mm。圖 5 爲地表沈陷之等值圖，由此圖可知最大之地表沈陷值均集中在隧道之周圍，且最大沉陷量發生在中隔島上，可能與中隔島無舖面或夯實度較低有關。

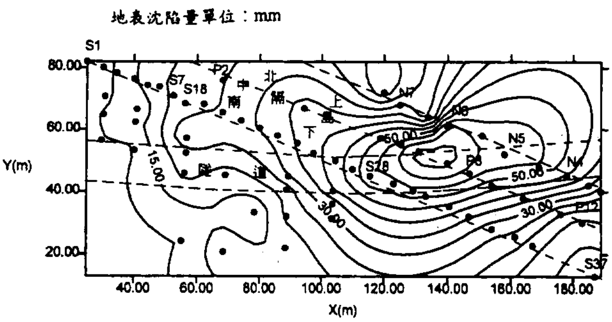

圖 5 高速公路穿越段上半斷面開挖引致之地表沈陷等值圖

三、數值回饋分析

本研究利用 FLAC3.22 版為分析工具 [3]，依據陳等人 [4] 建議之淺層礫石隧道數值分析架構，模擬隧道上半斷面開挖後之應力與變形行為。

3.1 分析步驟

(1) 設定分析型態與組合律模式：本研究採用平面應變模式，並取半側之對稱分析。假設礫石層為均質、均向，並忽略潛變效應。以完全彈塑性模式、莫爾－庫倫破壞準則及非諧合流法則來模擬礫石層之力學行為。

(2) 建立分析網格與邊界條件：由前節可知，根據高速公路南下路肩之地表沈陷曲線估計其水平影響範圍約 4 ~ 5 倍隧道寬度，所以本分析取 8 倍隧道寬度為水平邊界，5 倍隧道寬度為底部邊界，且邊界設為輥。

(3) 設定材料參數；並以重力平衡配合給定之側向應力係數設定初始應力。

(4) 模擬灌漿改良區，假設隧道周圍有 3m 厚之灌漿改良區，其材料參數與礫石層不同。

(5) 在模擬隧道上半斷面開挖時，為考慮延遲支撐之情況，於隧道斷面上半斷面開挖後，讓隧道在無支撐狀況下使之變形，當達到設定之變形量後，即架上支撐元素使之平衡。

3.2 高速公路穿越段分析之基本假設

(1) 彈性模數(E)：一般而言，土壤覆蓋越深彈性模數越大，但並無適當之關係式可供參考，因此本研究假設彈性模數為常數，不隨深度改變。

(2) 包生比：礫石層之包生比約為 0.15 ~ 0.40，本研究採 0.35。

(3) 凝聚力 (c) 和摩擦角 (ϕ)：根據現地直剪試驗之結果 [5]，$c = 0.15$ kg/cm^2，$\phi = 54.3°$。考慮非諧合流法則，土層膨脹角 (ψ) 一般介於 0 至 ϕ 之間，本文取平均值 $\phi/2$ 分析。

(4) 支撐參數：以彈性之樑元素來模擬噴凝土 (厚度 25cm)，噴凝土與土壤間考慮完全密合之情況，噴凝土之彈性模數按一般經驗公式計算；鋼肋 (H175) 係轉換為等值斷面之噴凝土。隧道開挖面上設置於頂拱上方之前撐管幕，具有防止開挖時之崩落及抑制開挖面前方變形之功效，惟在數值分析中屬於三向度問題，因此無法對此效應加以探討。

(5) 地盤改良區參數：在高速公路穿越段部份，灌漿材料採用水玻璃加超微粒水泥系之漿液，根據室內灌漿試驗 [2] 所得之結果，灌漿對試體之凝聚力有影響，而對摩擦角及彈性模數之影響較小，故本文假設改良區之凝聚力提高 2 倍達 0.30kg/cm^2，摩擦角及彈性模數保持不變。

(6) 前期變形量：根據陳與彭 [6] 之研究，在彈塑性模式下，隧道之前期變形量約佔最終變形量之 30% ~ 80%，主要受延遲支撐與岩體性質之影響。由前節地表沈陷之整理，可知高速公路穿越段地表沈陷之前期變形量約佔總地表沈陷之 35 ~ 64%，故在分析中假設不同之前期變形量。

(7) 灌漿回流壓力：高速公路穿越段灌漿改良區採用 10kg/cm^2 之灌漿壓力施灌，並採用較低之灌漿速率以提高改良效果。然而由於灌漿時漿液向後回流之作用，造成在隧道開挖面後方之支撐系統承受額外之壓力，致使隧道內空收斂變形在灌漿階段有明顯之增加。由前節監測資料之整理可知灌漿對監測值之影響很大，因此有必要對灌漿回流壓力加以模擬，然而灌漿對頂拱和側壁之影響並不相同，所以分析時分別對頂拱和側壁施加不同之壓力 P1 和 P2。

(8) 車行載重：監測斷面 Sta.160k + 818 和 Sta.160k + 826 因在高速公路下方，其車行載重根據 AASHTO 規範之建議，採用 1.2t/m^2 之靜載重作用在地表上。

3.3 高速公路穿越段分析之結果與討論

高速公路穿越段之分析結果如表 5 所示，在該表中 S 表示分析所得隧道中心點之地表沈陷值，前期變形量百分比係指頂拱前期變形量佔總頂拱變形之百分比，以下分別討論之。

(1) 靜止土壓力係數 (K_o)

穿越段回饋之 K_o 值約在 0.92 ~ 1.25 之間。一般而言，正常沈積土壤之水平應力小於垂直應力，即 K_o 值小於 1，一般顆粒性材料之靜止土壓力係數約 0.4 ~ 0.6。三義地區礫石土之組織緊密，應屬於緊密砂之行為，與一般疏鬆之正常沈積土壤不同，此過壓密行為亦可由現地直剪試驗之應力應變曲線具有明顯尖峰強度而間接証實 [5]。

(2) 彈性模數 (E)

一般礫石層之彈性模數值約介於 29MPa 至 205MPa 之間。穿越段分析所得之彈性模數約 20MPa 至 43MPa，可見分析所得之彈性模數值較低，偏低之可能原因如下：

表 5　高速公路穿越段回饋分析之結果

計測斷面編號		1	2	4	5	6	7
計測斷面里程		160k+738	160k+746	160k+779	160k+800	160k+818	160k+826
覆土厚度(m)		12.00	12.00	12.00	12.00	18.00	18.00
地下水位GL(m)		9.00	9.00	9.00	9.00	12.00	12.00
前期變形量百分比(%)		40.00	40.00	50.00	50.00	85.00	70.00
計測值	L1(mm)	-22.00	-26.00	-14.00	-25.00	-19.00	-26.00
	D1(mm)	15.00	-16.24	-3.21	-6.37	3.30	-6.94
	D2(mm)	-8.05	-16.33	-1.88	-6.00	-10.47	-1.83
	H1(mm)	-45.29	-47.98	-22.54	-19.68	-21.26	-67.81
分析值	L1(mm)	-21.85	-22.82	-13.49	-27.68	-19.84	-24.70
	D (mm)	-3.10	-3.16	-2.11	-1.19	-2.16	-1.70
	H1(mm)	-49.70	-55.18	-23.04	-22.60	-19.64	-62.00
	S (mm)	-27.71	-30.16	-18.07	-33.00	-36.93	-36.00
反推參數	Ko	1.15	1.10	1.00	0.92	1.05	1.25
	E(MPa)	31.00	28.00	43.00	22.00	30.00	20.00
	P1(kg/cm^2)	0.70	0.60	0.45	0.45	0.50	0.45
	P2(kg/cm^2)	2.50	2.50	1.70	1.00	0.80	1.70

(a) 由於頂拱處設置管幕之效果頗佳，造成水平變形比頂拱沉陷大許多，量測所得之水平變形約爲頂拱沉陷之 0.8 ~ 2.6 倍。所以回饋分析時必須提高靜止土壓力係數，降低彈性模數，以符合量測值。

(b) 一般而言，土層之彈性模數隨覆土厚之增加而增加，但此關係並無明確之結論，因此分析時假設彈性模數爲常數。而回饋分析係根據隧道周圍之變位進行回饋分析，所以分析所得之參數可說是代表隧道周圍礫石層之等值參數，本段覆土僅 8 ~ 20m，所以分析所得之彈性模數偏低。

(c) 礫石層爲明顯之複合材料，其整體之材料參數不易判斷。

(3) 灌漿回流壓力 (P1、P2)

穿越段分析所得頂拱處回流壓力 P1 約 0.45 ~ 0.70kg/cm^2，約佔灌漿壓力 (10kg/cm^2) 之 4.5 ~ 7.0%。側壁處回流壓力 P2 約 0.8 ~ 2.5 kg/cm^2，約佔灌漿壓力之 8 ~ 25%。由於 P1 壓力對頂拱沉陷之影響受管幕之限制，無法完全反映回流壓力之大小，故灌漿回流壓力應以 P2 較能代表真正之回流壓力。

四、結　論

(1) 灌漿會造成隧道開挖面後方之頂拱沈陷及內空收斂變形，灌漿之影響程度及影響範圍隨覆土厚度的增加而減小。

(2) 隧道施工對前方地表沈陷之影響範圍約 2 ~ 3 倍隧道寬度，對後方地表沈陷之影響範圍約 4 ~ 5 倍隧道寬度。

(3) 隧道開挖至地表監測斷面時已產生之前期變形量約佔總地表沈陷之 35 ~ 64%，平均約 50%。

(4) 隧道上半斷面開挖引致之地表沉陷槽範圍約爲 4 ~ 5 倍隧道寬度。

(5) 高速公路穿越段上半斷面開挖之回饋分析結果，所得之 K_o 值約爲 0.92 ~ 1.25，彈性模數約爲 20 ~ 43MPa。

(6) 回饋分析結果顯示灌漿回流壓力約佔灌漿總壓力之 8 ~ 25%。

誌　謝

本研究承蒙榮民工程事業管理處贊助研究經費，並提供監測資料，方得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 翁世樑、謝玉山、劉甡，「中山公速公路下方之卵礫石層中隧道施工探討」，國際卵礫石地下工程研討會論文集，台北，第 2-125–2-138 頁 (1995)。
2. 陳堯中、梁樾、翁世樑、謝玉山、陳志南，「礫石層隧道工程行爲及數值分析之研究」，台灣營建研究中心研究報告，台北 (1995)。
3. *FLAC User's Manual*, Version 3.22, ITASCA Consulting Group, Inc., U.S.A. (1992).
4. 陳堯中、林國楨、謝玉山，「淺層礫石隧道開挖之數值分析」，中國土木水利工程學刊，第八卷，第三期，第 457–462 頁 (1996)。
5. 褚炳麟、黃承郎、鄭順益、潘進明，「台地礫石堆積層與頭料山礫岩層之現地直接剪力試驗研究」，第三屆大地工程學術研討會，第 695–706 頁 (1989)。
6. 陳堯中、彭嚴儒，「延遲支撐對隧道變形行爲之影響」，中國土木水利工程學刊，第六卷，第一期，第 111–118 頁 (1994)。

85 年 10 月 30 日　收稿
86 年 2 月 25 日　修改
86 年 3 月 3 日　接受