

掘進機開挖及新奧工法支撐之台北捷運
木柵隧道工程
ROAD HEADER/NATM IN MUCHA TUNNEL OF
MUCHA LINE

陳國華，葉向陽，王文通
K.H. Chen, H.Y. Yeh and W.T. Wang

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.203-214, Taipei, 1993*

掘進機開挖及新奧工法支撐 之台北捷運木柵隧道工程

陳國華—亞新工程顧問公司工程地質師

葉向陽—台北市政府捷運局東區工程處處長

王文通—台灣電力公司營建處計劃工程師

摘要

台北都會區捷運系統木柵線之木柵隧道，為雙線電車隧道，施工中分南北二隧道共長712公尺，承包商選用二部50噸級部份斷面掘進機分頭開挖隧道，並依新奧工法觀念施工。機械開挖中，掘進速率在厚砂岩平均約為每小時17立方公尺，在砂頁岩層則平均為每小時27立方公尺。北隧道先開挖，如略去廢煤坑段處理五個月不計，其上半開挖及支撐之平均月進度為46公尺；而南隧道之上半開挖及支撐之月進度為51公尺。

施工中之監測分洞口及隧道內監測，觀察結果足以證明隧道穩定。另外施工中曾遭遇廢棄煤坑，花費五個月才通過。四號洞口淺層覆蓋在隧道開挖之前先由地面向下做灌漿錨錠及固結灌漿以改善地層，當隧道開挖通過此段時，由地表沈陷觀測證明預錨和灌漿甚為成功。

Road Header/NATM In Mucha Tunnel of Mucha Line.

K. H. Chen — Engineering Geologist, Moh and Associates Inc.

H. Y. Yeh — Director, EDPO, Department of Rapid Transit Systems,
Taipei Municipal Government.

W. T. Wang — Project Engineer, Design and Construction Dept., Taiwan
Power Co.

Abstract

Mucha Tunnel of Mucha Line Project in Taipei Metropolitan Area Rapid Transit Systems is a double-lane electric train tunnel. The 712 meters long tunnel was separated into two portions, i.e. North and South tunnel during construction.

Contractor choosed two 50-ton road headers to excavate the two portions separately, and applied NATM concept in their construction activities. Excavation rate in massive sandstone was about $17\text{m}^3/\text{hr}$, and was $27\text{m}^3/\text{hr}$ in interbedded sandstone and shale layers. The advancing rate for north tunnel was 46 meters per month and 51 meters per month for south tunnel.

The stabilities of this tunnel during construction were closely monitored. Some difficulties were encountered during construction. This paper briefly described the measures taken.

壹、前言

台北捷運木柵線之木柵隧道，自本柵區臥龍街麟光新村至辛亥隧道東口止，全長822公尺。由於地形的緣故，施工中分為北隧道和南隧道，各長225公尺和487公尺，合計712公尺，其餘110公尺為挖填隧道，分別在南北二隧道間及南隧道口。本隧道為雙線電車隧道，開挖方式採上半先進、台階二斷面工法。

由於隧道在台北市近郊，鄰近有民宅，承包商選用50噸級部份斷面掘進機(Road Header)二部開挖隧道，以避免開炸對民眾之干擾。此種機械開挖在國內都市隧道尚屬首次使用，其開挖情況及飛塵情形，值得向隧道工程界就教。再者開挖中遭遇廢棄煤坑，四號洞口段覆蓋層淺需預先採取灌漿錨錠及固結灌漿等措施改善地層等，均值得提出報告。

貳、工程概述

隧道沿線地形屬台北盆地邊緣丘陵山區(圖1)，地表標高介於18公尺至100公尺間，隧道沿線之岩層屬第三紀中新世石底層，主要為砂岩，頁岩及砂頁岩互層，局部含薄層煤層，其中砂頁岩常形成條紋狀薄葉互層。地層層態一般為 $N72^\circ E, 24^\circ \sim 30^\circ S$ ，北隧道前進方向與地層走向約正交，與傾斜方向相反。南隧道前進方向亦約與地層走向正交，與傾斜方向相同。

砂岩之平均單壓強度為283公斤/平方公分，點荷重指數為7.8公斤/平方公分，頁岩則僅為砂岩之四分之一。風化岩層之P波速為870至1880公尺/秒，新鮮岩層則為2750至3540公尺/秒。

本隧道為雙線隧道，開挖寬度9.17公尺至9.48公尺，高度6.99公尺至7.14公尺。內層襯砌為30公分厚無筋混凝土，外層支撐與內襯間設防水層，並有排水系統以防止地下水滲入隧道內。

初步設計時依據探查所得地質及力學試驗資料，將隧道沿線之岩體依定量法之RMR及Q值分類為A至E五級(詳表1)，各級岩體之支撐則由A至E逐漸加強，有岩栓、噴凝土、鋼線網、鋼肋、支撐鋼管等，請參閱圖2及表二。

本隧道初步設計時訂有三種監測斷面，第一種監測斷面用以確證設計，並提供修正設計之依據，項目包括收斂儀、伸縮儀、應力計和計測岩栓，各裝於C及D類岩體共2組。第二種斷面用以確證岩體位移和穩定性，項目有收斂儀、伸縮儀，裝於各類岩體共6組。第三種斷面則用以監視隧道內空相對位移圍岩之穩定，項目僅有收斂儀。此種斷面一般10至30公尺裝1組，共裝32組。請閱圖3。

另外在二號及三號洞口，為監視岩坡穩定及地層移動量，而設有伸縮儀及傾度管。請閱圖4。

參、施工

一、部份斷面掘進機(Road Header)開挖

本隧道承包商採用日製三井三池S-200部份斷面掘進機二部，每部機具總重50噸，切削頭電力200仟瓦，最大切削高度6.0公尺，寬度6.4公尺。切削頭上每一鑽頭均有一噴嘴，水壓350公斤/平方公分。

使用新型掘進機開挖隧道在國內都市隧道還算第一次(據稱約民國六十八年中油曾使用於油窟開挖)，承包商之作業手經過訓練後就能開挖。在本隧道之厚砂岩，A、B類岩體，掘進速率約為每小時17立方公尺，而在砂頁岩層，C、D類岩體之掘進率則為每小時27立方公尺。當然此速率為連續順利開挖之情況。在掘進機切削時，雖然由切削頭之多噴嘴噴水，仍然粉塵瀰漫，操作手常看不清開挖面，以致常有挖掘不足或超挖情形。此飛塵久久不散，空氣品質惡劣，不利於作業人員之健康及工作意願。掘進機切削的同時，碴料由抓碴手臂經輸送帶向後運送，並由卡車裝運出碴。此切削及出碴後，才能施噴噴凝土，然後再打設岩栓。

每一輪切削後掘進機後退，應即進行保養，諸如鑽頭(Pick)之鎖定或換裝，抓碴臂及底盤和輸送帶鍊條粘著泥土之清除，電力和供水系統之維護及延長等均需確實做好，否則一定故障連連，延誤工程進度(照片1)。

經筆者事後探討，認為本隧道未設置強力吸塵機，僅以水舌企圖減少飛塵非但效果不佳，而且使掌子面岩體變軟，開挖地面泥濘不堪。為改善工作面之空氣情況，避免超挖或少挖以及避免地面泥濘，避免降低工作效率，國內承包商實應購置吸塵機與掘進機配對使用，而且吸塵機和通風機及管線之容量和佈置也應足夠和正確。

二、支撐選定

每一輪開挖上半斷面後，隨即進行岩體評分及地質紀錄，依據岩體評分結果決定岩體等級及該等級岩體之支撐。此評分及支撐選用需於工地由甲乙雙方代表及大地專業顧問簽字。支撐選用在工地曾由有關人員判斷而採較差一級支撐，如一號及二號洞口段，基於覆蓋不足以形成良好岩拱作用，而將C級岩體改用D級支撐以求安全。亦有依監測結果顯示岩體穩定而減少岩體支撐，如減少噴凝土、系統岩栓改為局部岩栓的例子，如南隧道中段。另外隧道沿線實際採用之支撐較初步設計所估計為少，經檢討有三原因即(一)原設計依鑽炸法開挖估計所需之支撐，而實際則用掘進機開挖，對隧道圍岩破壞甚小。(二)新奧工法契約務實，有彈性調整支撐之辦法。(三)實際開挖所遭遇的岩體狀況平均而言較原設計預期者為佳。

三、施工進展

本隧道採用新奧工法之觀念施工，於79年7月21日由二號洞口進洞，用一部掘進機開挖北隧道。先挖上半，台階則在上半開挖面之後約50公尺開挖。每輪開挖同時出碴後，掘進機後退，隨即施噴噴凝土並掛鋼線網，岩栓則於二輪後才安裝。北隧道上半開挖於80年4月27日貫通共281天，其間因遭遇廢棄煤坑段23公尺，其調查及處理費時5個月，扣除此段之時間則北隧道平均月進度為46公尺。

南隧道長487公尺，於79年10月31日進洞，用另一部同型掘進機開挖上半，台階亦在上半之後開挖。上半於80年8月17日貫通，共291天，平均月進度為51公尺。

四、監測結果

(一)洞口監測：由二號及三號洞口之監測結果，可得知洞口上方地層因隧道開挖而產生側向位移，其中以二號洞口上方地層位移較明顯，原因是該洞口上方土壤或風化層較厚約9公尺，且滑動面位於土壤與岩層界面。三號洞口上方地層則為較佳岩盤，故位移量較二號洞口小。上述位移大部份發生於隧道上半開挖階段，台階開挖則影響較小。

(二)隧道監測：隧道收斂監測值，一般於上半開挖及台階開挖後各有一次迅速增加位移。水平收斂值H1比斜向收斂值D1、D2為大，推測乃是地層傾斜，有偏壓之故。一般內空收斂在四天和約距開挖掌子面1倍隧道直徑時，就已達到全部收斂量之90%，且趨於平穩。(圖5)

隧道圍岩上半水平測線H1之每日平均變化速率，在儀器安裝初期尚接近開挖面，收斂量變化可達4公厘/日，在距上半開挖面20公尺附近則變化速率降至每天1公厘以下，此項結果可作為爾後類似隧道施工監測管理值之參考。至於不同等級岩體之收斂值，大體上顯示RMR或Q值大者，收斂值小，而RMR或Q值小者，收斂量大。然而水平及斜向收斂最大值僅為16公厘，而頂拱沈陷最大值約65公厘。

伸縮儀監測顯示大多數岩體變位均在5公厘以下，唯接近舊煤坑之伸縮儀，上半段兩側變化較大。台階處岩體變位均明顯較上半處為小。

岩栓軸力由計測岩栓顯示曾達9.1噸，但仍小於管理值11噸，且較岩栓破壞強度20噸小。岩栓軸力分佈不均勻，多數分佈於靠近側壁之淺處。

噴凝土應力計顯示切向應力以頂拱部份較大，推測是頂拱噴凝土承受兩側地層傾斜所生之偏壓所致另外徑向應力均小於切向應力，切向應力遠小於噴凝土設計強度210公斤/平方公分。

肆、施工中遭遇的挑戰

一、北隧道廢棄煤坑處理

於北隧道自二號洞口進洞開挖約100公尺時，承包商遭遇預料之外的廢棄煤坑，開挖面鋼肋架設完成後，突然發生岩體滑動，崩落約50立方公尺，最大石塊約1.5立方公尺。崩落穩定後在開挖面前方隧道上方1公尺處發現高1公尺，寬2公尺之坑洞口。經入廢坑內查看，可見隧道上方空穴寬10公尺，長7公尺，高1公尺(照片2)，坑洞頂部為厚層砂岩，底及兩側為板狀落石，表面呈鐵染狀，在東側發現許多廢舊支撐木柱(5公分直徑，100公分長)。另在開挖右側壁發現1公尺寬，1.6公尺高，可見長約60公尺之廢棄工作坑。經業主、顧問公司和承包商人員研商後決定採取下列措施：

(一)開挖面附近之穩定措施--先將坍塌處以噴凝土封面，另施噴噴凝土擋牆，預埋灌漿管，並用輕質泡沫混凝土回填煤坑及工作坑。

(二)補充鑽探--由掌子面向前水平鑽探3孔，以探查煤層分佈及地層受煤坑坍塌擾動程度。鑽探期間每天開鑽前及上下鑽桿時，探測是否有有害氣體存在，所幸結果顯示在安全值內。為確定煤坑分佈是否延伸至已完成之隧道下，以垂直孔鑽探，結果顯示此段地層曾受煤坑坍塌擾動，但在15公尺內未再發現煤坑。

(三)煤層段處理--先做LW低壓固結灌漿改良地層，壓力最大10公斤/平方公分，用3號水玻璃，灌漿範圍包括隧道頂部上方10公尺之低仰角環形面積。為避免再遭遇坑洞，頂部先打設支撐鋼管，間距約30公分，長3公尺，然後採環狀前進開挖，縮短輪距為0.8至1公尺。隨即掛鋼線網、架鋼肋、施噴一層噴凝土約10公分，接著再開挖土心及開挖次一輪，而已開挖之十輪再噴一層噴凝土使總厚度達25公分，並安裝非預力岩栓長5公尺，間距1.0×1.0公尺。此段仰拱打40公分厚混凝土，使外層支撐形成閉合環。同時為保守計，設計單位將此段內層襯砌加強為厚60公分之鋼筋混凝土。此段收斂監測每10公尺設一斷面，以加強隧道圍岩穩定性的觀察。

以上加強措施按步就班施工，此段隧道在承包商戰戰兢兢的工作，業主、顧問公司人員督導下，順利通過，也證明了所採取的施工方法及步驟甚為合適(圖6)。

二、四號洞口預錨及灌漿

由於四號洞口覆蓋淺，洞口段約50公尺之覆蓋厚僅約6至20公尺，部份覆蓋厚小於隧道開挖寬度9公尺，為慎重謀求合適的加強措施，於80年1月初辦理鑽孔及試驗，結果顯示此隧道口段50公尺夾有一層3公尺厚軟弱炭質頁岩層，其間有一逆斷層型的剪動帶。

為避免此段隧道開挖時造成坍塌和威脅洞口已完成的機房結構的安全，經業主、顧問公司和承包商商議探討，決定在隧道未開挖到此段之前先對此段隧道由地表施做灌漿錨錠使其發揮預錨效果，以及由地表向下做LW低壓固結灌漿。灌漿錨筋沿隧道線方向每3公尺設一排錨筋，每一排3支，1支在隧道中心，2支在隧道兩側。錨筋略向北傾，使與層面交角較大，總共安裝24支，總長487.6公尺。LW灌漿則用3號水玻璃和波特蘭3號水泥，漿液之水、灰、水玻璃之比例為3.86：1：0.64，漿液膠凝時間為36秒至57秒。灌漿壓力在10公斤/平方公分以下。承包商報告全部使用漿液為655.2立方公尺(圖7)。

當南隧道由三號洞口向南開挖至南端四號洞口段時，顧問公司為瞭解洞口上方之地表沈陷情形，進行地表縱向和橫向測點之水準測量，結果顯示沈陷量均在

2公分以內。地表沈陷範圍由隧道中心向兩側各12公尺，即全寬24公尺有沈陷。而隧道中心沈陷略小於兩側，此現象推測係由於隧道上方打設灌漿錨筋，產生預錨作用所致。從縱剖面分佈來看，覆蓋層淺者沈陷大，覆蓋層厚者沈陷小。

由於洞口地層軟弱且覆蓋淺，經先打設灌漿錨筋和LW固結灌漿後再開挖隧道，施工和監測證明所採用之事先加強措施非常成功。

伍、結論

木柵隧道採用Road Header 機械開挖，具有低擾動度、高安全度、開挖面平滑及可精確地控制開挖線是其最大的特點。惟其不便之處即是飛塵的問題，猶待克服。另外操作人員的素質、機械維修及保養亦是響影工程進度的重要因素。

廢棄煤坑段採用填充、固結灌漿及輔助工法及四號洞口淺覆蓋層的先期穩定處理均為成功的案例。

施工中能夠彈性地視現場岩體狀況予以最適當的配合，達到安全、經濟與效率之效益，此為NATM工法的特色，但亦有賴業主支持與配合，方能達相輔相成，事半功倍之成效。

誌謝

本文之資料收集、結果分析及撰寫承蒙台北市捷運局東區工程處同仁之協助，並承蒙亞新工程顧問公司莫總經理若楫、游協理坤、郭經理文祥、杜專案副理保興之指導斧正，和所有參與木柵隧道工程之泰興、眾力、亞新同仁之多方協助，特此誌謝。

參考文獻

- [1] N. Barton, R. Line and J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", Rock Mechanics, Vol.6, 1974, pp.189-236.
- [2] Z. T. Bieniawski, "The geomechanics classification in rock engineering applications", Proc. 4th Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM, Montreux, Rotterdam: Balkema, 1979, Vol.2, pp.41-48.

表1 岩體評分及岩體等級。

採用Bieniawski[1]之RMR 值和Barton et. al.[2]之Q 值

岩體等級	RMR 值	Q 值	性質
A	≥ 65	≥ 10	穩定, 堅實至中等破碎
B	55~65	4~10	中等破碎至輕微脆弱
C	45~55	1~4	破碎至脆弱
D	35~45	0.4~1	高度脆弱至擠壓
E	≤ 20	0.01~0.1	煤層及採煤跡影響段

表2 各級岩體支撐配置摘要

支撐等級		A	B	C	D	輔助支撐
岩 栓 (直徑29 公厘)	是否施預力	是	是	是	否	-
	長度(公尺)	3	4	4	5	≥ 5
	縱向間距(公尺)	1.5	1.5	1	1	-
	橫向間距(公尺)	2.5	2	2	2	-
噴凝土厚度(公厘)		50	50	100	150	≥ 200
鋼線網層數		-	-	1	1	-
鋼肋 抑拱開挖、閉合 支撐鋼棒		-	-	-	視工 程司 要求	需要
掌子面支撐		-	-	-	50公厘 噴凝土	-

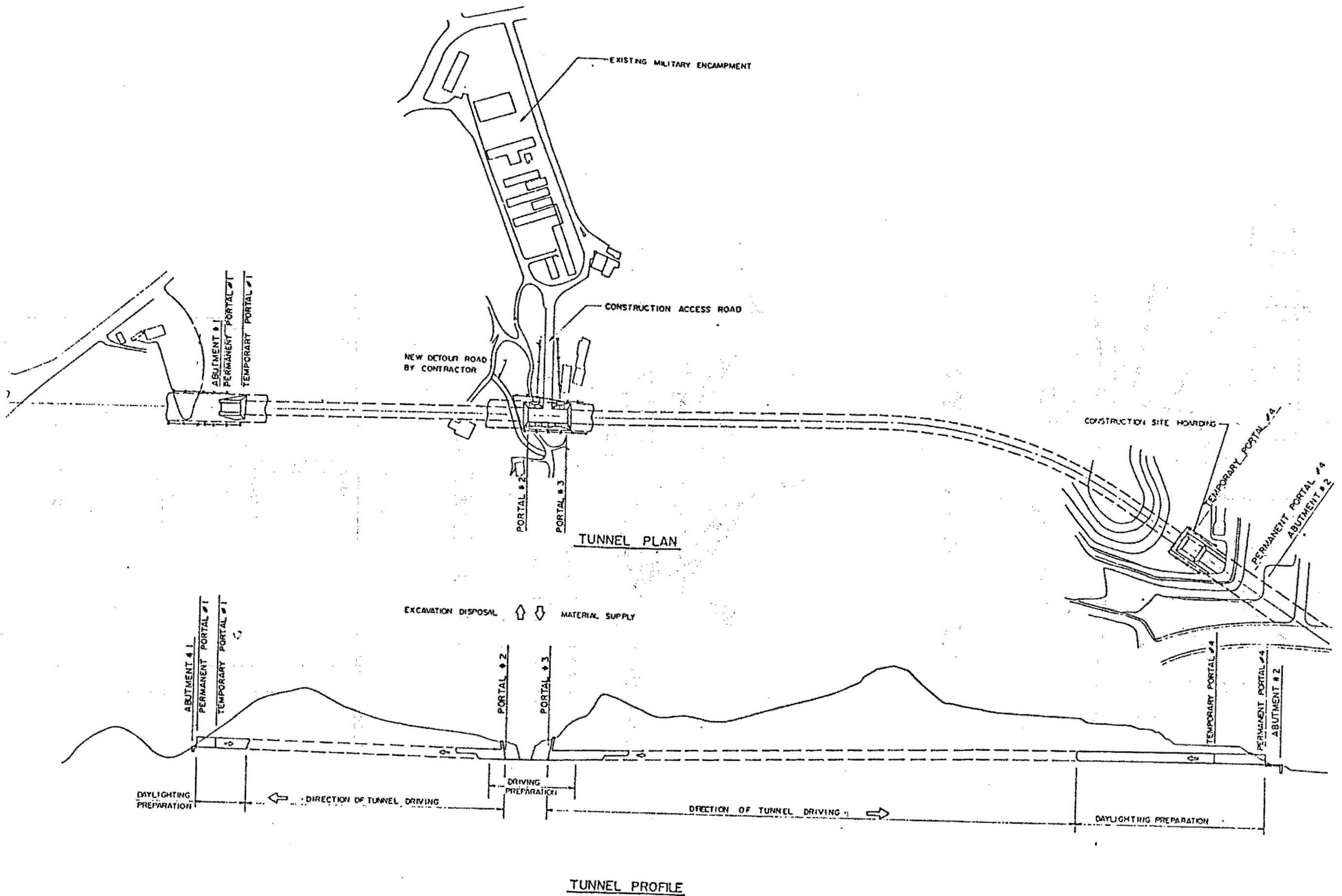


圖 1 木柵隧道平面及剖面圖

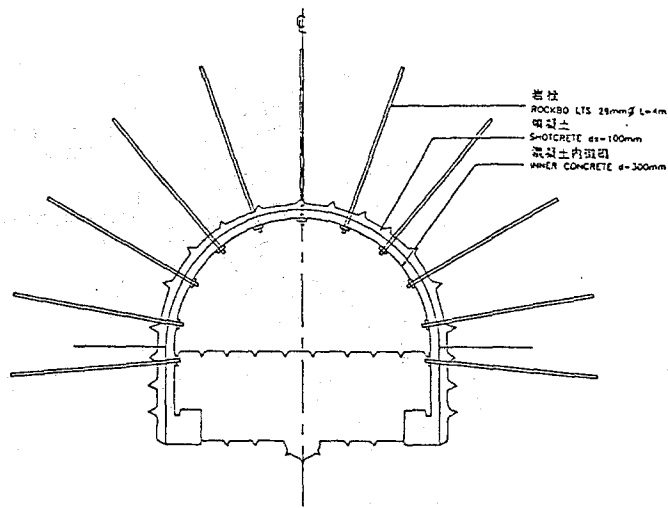
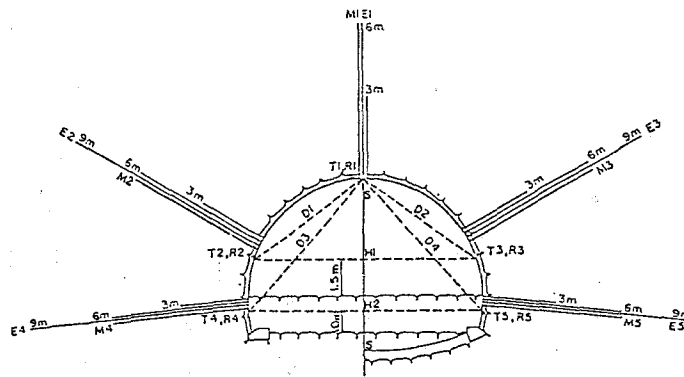
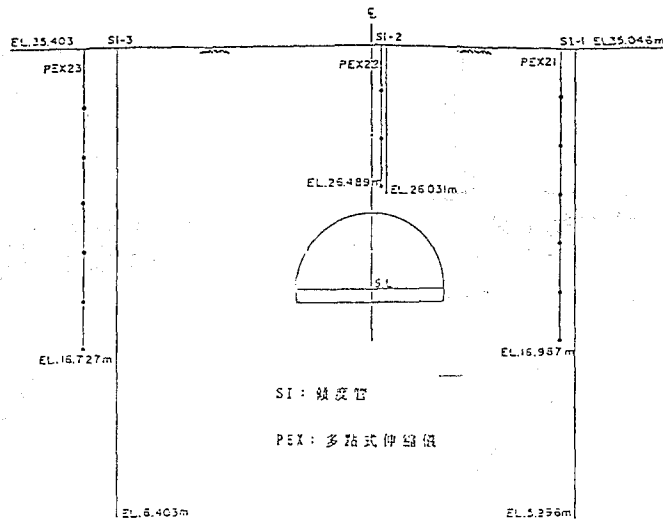


圖 2 岩體支撐示意圖



E: 伸縮儀 X: 計測岩栓 T: 切向壓力計
 R: 徑向壓力計 D1~D4, H1, H2: 收斂岩釘
 S: 頂拱/四拱沈陷點

圖 3 監測斷面 I



SI: 橫皮管
 PEX: 多點式伸縮儀

圖 4 二號洞口監測儀器

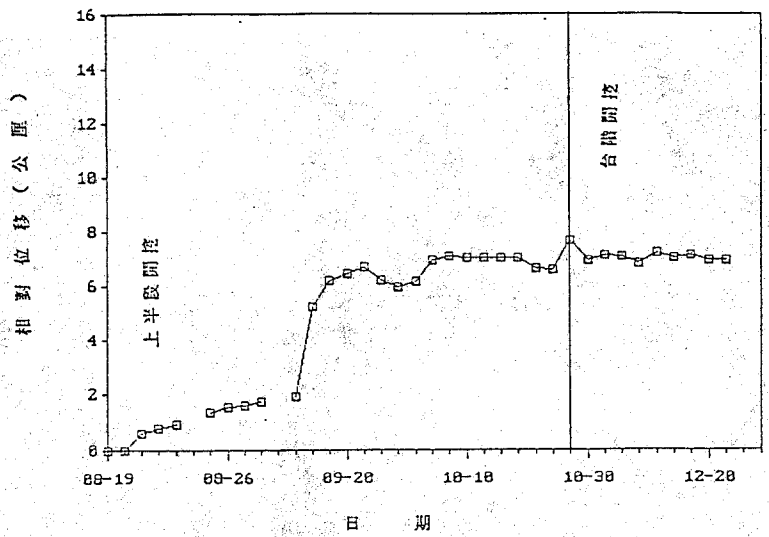
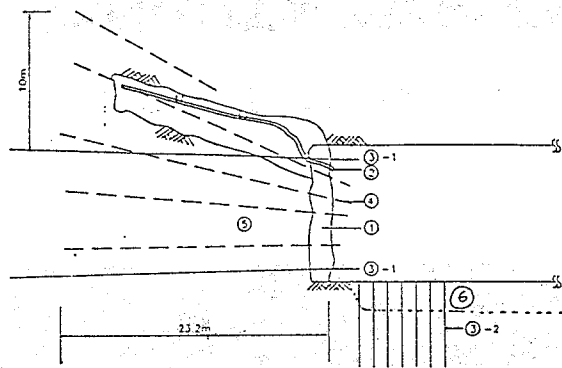


圖 5 木柵隧道典型上半段水平向收斂量



1. 掛鋼線網、填裝土撐盤(厚30公分)
2. 空穴輕質混凝土回填灌漿
3. 地質調查鑽探 3-1:水平鑽探3孔,深度30公尺 3-2:垂直鑽探7孔,深度7至15公尺
4. LW低壓圍結灌漿
5. 先掛鋼線網、留土心、破碎岩卸攔閉,每輪進1公尺
6. 後縱仰拱混凝土打設,厚40公分

圖 6 廢棄煤坑段隧道處理示意剖面圖

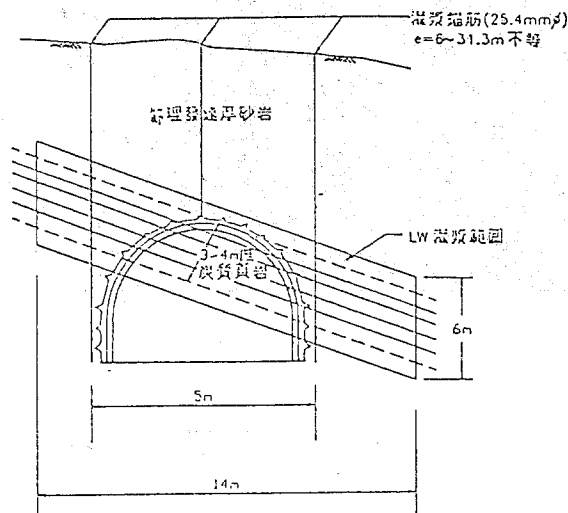
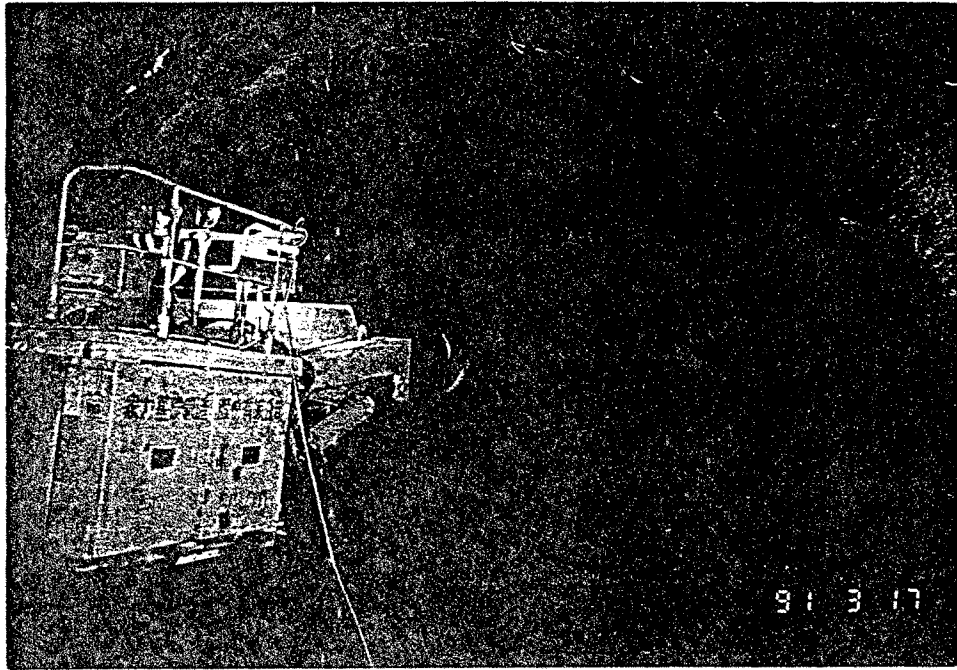


圖 7 四號洞口段預錨及灌漿剖面示意圖



照片 1 Road Header 開挖及平滑的開挖面



照片 2 隧道開挖遭遇塌陷後的廢棄煤坑洞穴