

軟弱地盤新奧工法隧道施工  
**CONSTRUCTION OF  
NATM TUNNEL IN SOFT GROUND**

楊國榮，楊鵬飛，范陳柏，趙際禮  
G. R. Yang, P. F. Yang, C. B. Fan and C. L. Chao

原著載於第七屆大地工程學術研究討論會  
1997年8月28~30日，第二冊，第1009~1016頁

*Reprinted from Proceedings of 7th Conference on Current  
Researched in Geotechnical Engineering  
Chinshan, Taiwan  
August 28~30, 1997, Vol. 2, pp.1009~1016*

# 軟弱地盤新奧工法隧道施工

楊國榮 楊鵬飛

范陳柏 趙際禮

亞新工程顧問公司

台北市政府捷運工程局南區工程處

## 摘要

台北捷運系統新店線CH221標於大世紀戲院附近至台灣大學傅園附近羅斯福路三段與四段下方之隧道採用新奧工法施工。此隧道為永久襯砌外徑約6m，單隧道長度約222m之雙平行隧道。因施作地層為軟弱地層且位於地下水位以下，故於施工期間採用壓氣、降水、地盤改良與水泥自土牆等輔助工法。本文針對此新奧工法隧道之設計與施工作詳細介紹，以供後續類似工程設計與施工之參考。

## 一、前言

新奧工法為一山岳隧道常使用之施工理念，於軟弱地盤採用新奧工法施工則必需配合壓氣、降水或地盤改良等輔助工法進行。台北捷運系統新店線CH221標於其最南端之隧道採用新奧工法之施工理念進行施工，施工期間並採用降水、壓氣、地盤改良與水泥自土牆等輔助工法。本文針對CH221標新奧工法隧道之設計理念與施工細節作介紹，並由監測儀器之觀測結果強調監測儀器在此工程中之重要性。

## 二、基地位置與現況

本文探討之新奧工法隧道位於台北捷運系統新店線CH221標之最南端，北鄰CH221標明挖覆蓋隧道，南接CH222標公館車站（G07站）。即位於大

世紀戲院附近至台灣大學傅園附近間羅斯福路三段與四段道路下方，於羅斯福路與新生南路口並於一深約6m之現有人行地下道下方通過，隧道沿線二側除羅斯福路與新生南路交口東南側為台灣大學空地外，其餘為一層至十二層建物，平面配置如圖1。

## 三、地層與地下水狀況

新奧工法隧道沿線地表相當平坦，其高程約位於109.8m。隧道沿線地層屬台北盆地T2區，為典型松山六次層，即松六、松四與松二次層為粉土質黏土層，松五、松三與松一次層為粉土質細砂層，但於鄰G07站附近松六與松五次層間出現礫石夾層，此礫石夾層最大粒徑約7cm，礫石含量則約佔60%左右，地層分佈與工程特性詳表1。

新奧工法隧道沿線地下水位因受台北盆地長期抽取地下水之影響而呈非靜態分佈，圖2為其地下水壓分佈狀況，松五次層之地下水位約位於高程102m，松三次層之地下水位則約位於高程98m。

## 四、工法選擇

負責本新奧工法隧道設計之細部設計顧問瑞士電華/中華顧問工程司/奧地利吉奧(ELECTRO WATT/CECI/GEOCONSULT)於設計初期對本施工段擬採用的工法包括明挖覆蓋工法、潛盾隧道工法及新奧工法等三種。其中因明挖覆蓋工法對周遭環

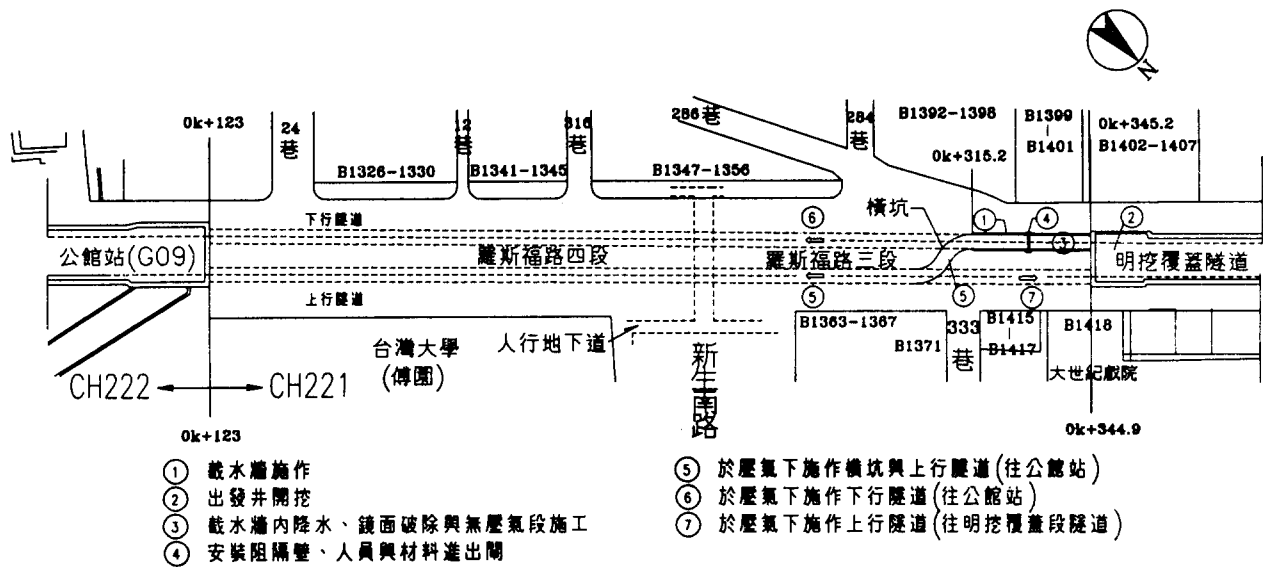


圖1 新奧工法隧道平面配置與施工順序示意圖

表1 新奧工法隧道地層分佈與工程特性

地層編號	地層種類	厚度 (m)	土壤單位重 (kN/m <sup>3</sup> )	N值	Su (kPa)
松六	CL/ML	5-11	18.9	5	20
-	GP/GW	0-5	22.5	46	-
松五	SM	5-10	19.8	12	-
松四	CL/ML	5	19.2	10	55

境及交通的衝擊太大而不予採用，至於採用新奧工法而不採用潛盾隧道工法之理由如下：

- (1) 隧道位置可能與羅斯福路與新生南路交口處之人行地下道相衝突，其混凝土擋土樁將成為潛盾施工之障礙，以新奧工法則可輕易且安全的拆除。
- (2) 減少材料設備佔用道路所需之儲放空間。
- (3) 整體施工費用較為經濟。

細部設計顧問同時亦針對現地地層對新奧工法與壓氣輔助工法之適用性作探討，結果如下：

- (1) 依據日本土木學會的統計資料，於軟弱地盤採用新奧工法，其地盤的單軸壓縮強度與彈性模數之下限值分別為0.1MPa與10MPa。本新奧工法隧道通過之地層為松五次層，其彈性模數約為40MPa，其值較適用之下限值為大。
- (2) 歐洲與日本根據相關工地統計資料，規定採用壓氣新奧工法之地盤，其透水係數需分別小於10<sup>-3</sup>m/sec與10<sup>-4</sup>m/sec。本施作新奧工法之地層為透水係數約為10<sup>-5</sup>m/sec之松五次層，其值小於規定值。
- (3) 本新奧工法隧道上方為厚約5m至11m的粉土質黏土層 (CL/ML)，為足夠且良好之封層。

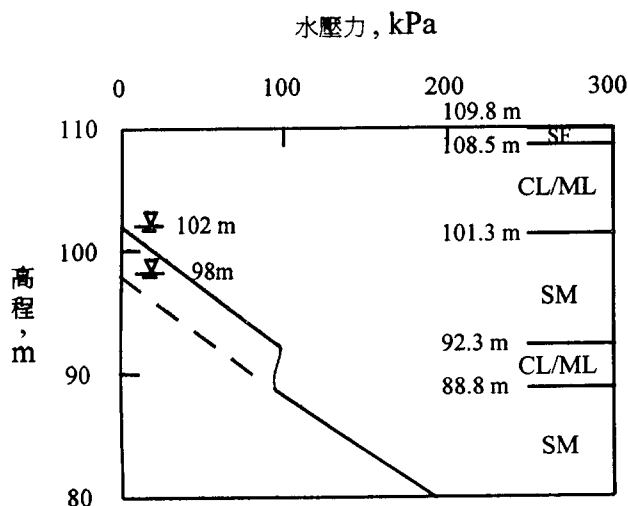


圖2 新奧工法隧道地下水分佈狀況

## 五、施工概述

本新奧工法隧道分為上下行二條平行隧道，分別位於里程0k+344.9m至里程0k+123m與里程0k+345.2m至里程0k+123m之間，各長約222m，上

下行隧道於里程0k+239處各設置一集水井。隧道標準斷面如圖3所示，此二條隧道永久襯砌外徑皆約為6m，地表至軌道面深度皆約為14m至17m，此二條平行隧道中心水平距離約為13m，主要於松五次層內進行施工。

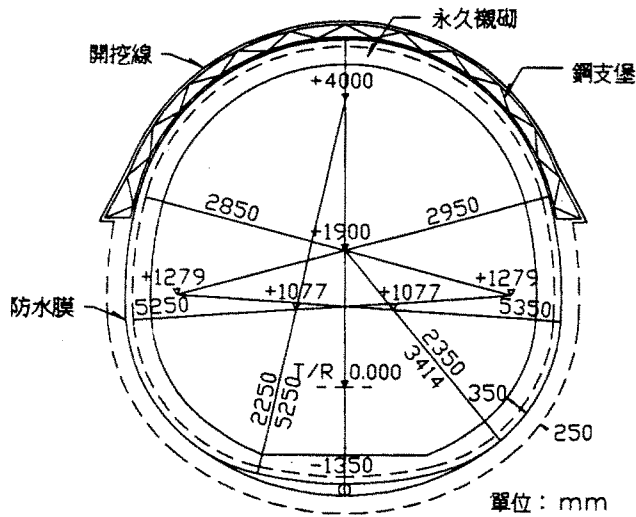


圖3 新奧工法隧道標準斷面

本新奧工法隧道之施工主要分為出發井施工、無壓氣段隧道施工、壓氣段隧道施工與永久結構體施作，其施工順序如圖1所示，其中有關無壓氣段與壓氣段隧道施工之細節則分述如下。

### 無壓氣段隧道施工

#### ◎ 截水牆施作與降水作業

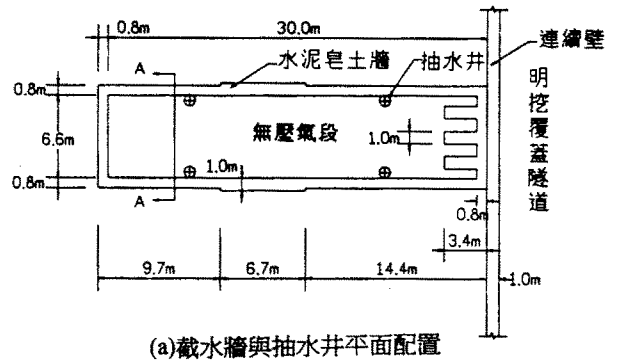
新奧工法隧道施工初期30m（下行隧道里程0k+345.2至0k+315.2）之開挖係於大氣壓力下進行，此無壓氣段隧道之施工係採用截水牆並配合牆內降水為輔助工法進行。原設計之截水牆係由直徑0.8m、深18m(高程102m至84m)之JGP所組成，承商青木/新亞共同承攬考慮可能會因施工不良而無法達到水密性之效果，而改採水泥皂土壁作為截水牆，此截水牆由厚0.8m或1m、深25.8m(地表至高程84m)之36個水泥皂土壁單元組成，平面配置如圖4(a)所示。其中7個水泥皂土壁單元係鄰連續壁處施作，以確保鏡面破除時之安全。為使水泥皂土壁單元能

達到透水係數小於 $10^{-6}m/sec$ 及28天單軸抗壓強度為1MPa之效果，其所採用之漿液配比如表2所示。

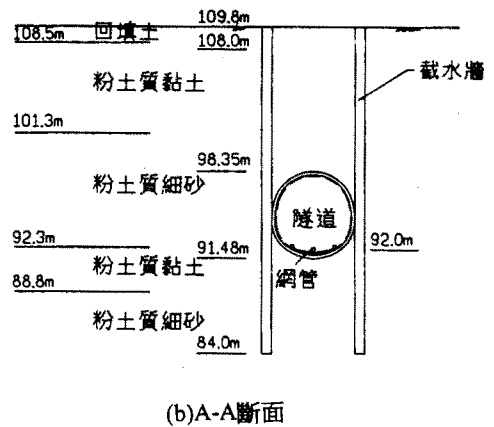
表2 截水牆採用漿液配比一覽表

項目	配比
水泥	2.4~2.5kN/m <sup>3</sup>
皂土	0.3~0.35kN/m <sup>3</sup>
緩凝劑	0~0.02kN/m <sup>3</sup>
分散劑及減滲劑	皂土重量的4~20%

截水牆內之降水作業，承商係由截水牆內先後設置之四口深28m之抽水井(位置詳圖4(a))，採用5HP沉水泵浦進行施作。因地下水位無法降到預定之高程89.5m，於是承商由出發井內於高程92m處裝設3支長29m、直徑5cm、坡度5%之網管(裝設位置如圖4(b))進行降水，待截水牆內之地下水位降至預定之高程後，承商即進行鏡面破除與無壓氣段之施工。



(a)截水牆與抽水井平面配置



(b)A-A斷面

圖4 截水牆與抽水井配置詳圖

#### ◎ 鏡面破除

本新奧工法隧道進行無壓氣段隧道之開挖時必需先進行鏡面破除之工作。因隧道鏡面為厚達1m之

連續壁，為避免連續壁敲除時之撞擊對鄰近結構造成影響，承商於施工前先進行連續壁之鑽孔，再進行鏡面破除之工作，其施工步驟如圖5，並詳述如下。

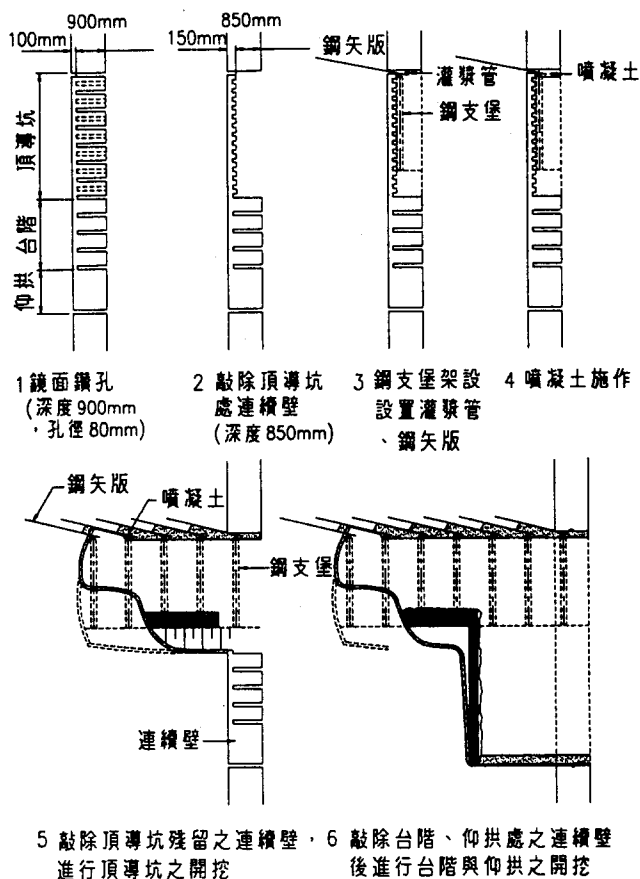
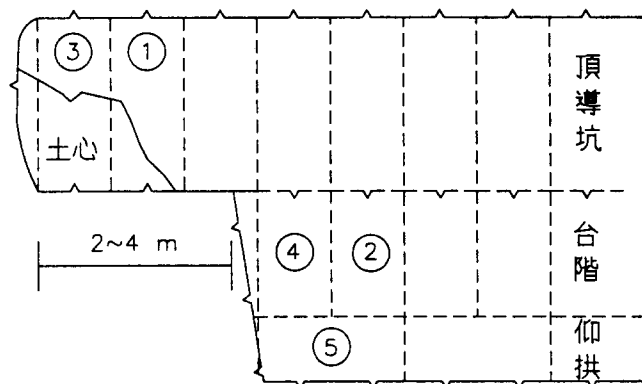


圖5 鏡面破除施工順序示意圖

- (1) 標記計劃敲除之範圍，使用核心鑽機沿隧道外緣施作深1m、直徑8cm、間距15cm之鑽孔。另於頂導坑與台階處施作深0.9m、直徑8cm、間距分別為35cm與50cm之鑽孔。
- (2) 鑽孔施作完畢後，使用巨型破碎機開始敲除頂導坑（Top Heading）之連續壁，敲除之深度為85cm。
- (3) 設置鋼支堡（Lattice Girder），打設2m長、6mm厚之鋼矢版（Lagging Sheet），並設置灌漿管。
- (4) 以噴凝土固定鋼支堡及鋼矢版。
- (5) 敲除頂導坑剩餘連續壁，開始頂導坑之開挖。
- (6) 待頂導坑前進5m後，敲除台階（Bench）之連續壁，開始台階之開挖。待台階前進4m後，敲除仰拱（Invert）部分之連續壁，開始仰拱之開挖。

## ◎ 隧道施工

無壓氣段隧道開挖係以迷你台階工法施作，開挖面大致分成頂導坑、台階及仰拱三部分。每次開挖時頂導坑及台階均前進1m，仰拱則為2m。開挖頂導坑時先挖外環並保留土心部分以穩定開挖面，在不影響施工安全之情況下，承商有時候並不保留土心部分。台階之開挖進度落後頂導坑2m至4m，仰拱之開挖進度則落後台階2m至4m，每一步驟開挖完成後立即以噴凝土封面，圖6為隧道開挖施工順序，各部份之詳細施工步驟如下所述。



說明：施工係依 ①②③④⑤ 順序進行

圖6 新奧工法隧道開挖施工順序示意圖

1. 頂導坑施作
  - (1) 以人工配合挖土機進行開挖，每次開挖長度為1m。開挖時由隧道中心頂端向左右交互地切下，並使開挖面保持平滑且成圓形。
  - (2) 開挖完畢後，除去附著於鋼矢版之土砂，並施以厚5cm之一次噴凝土，而開挖面及土心亦施以厚3cm之噴凝土，輔助開挖面自立。
  - (3) 一次噴凝土施作完成後架設鋼支堡，並將鋼支堡與開挖面以噴凝土固定，以防止後續施打鋼矢版時造成鋼支堡變形並產生位移。
  - (4) 鋼支堡架設完成後，用裝置於挖土機上的打入機，由隧道頂部左右交互地將鋼矢版一支緊鄰著一支打入。
  - (5) 鋼矢版施打完畢後，鋪設第一層鋼絲網。
  - (6) 施作厚15cm的二次噴凝土。
  - (7) 鋪設第二層鋼絲網。
  - (8) 施作厚5cm的三次噴凝土。

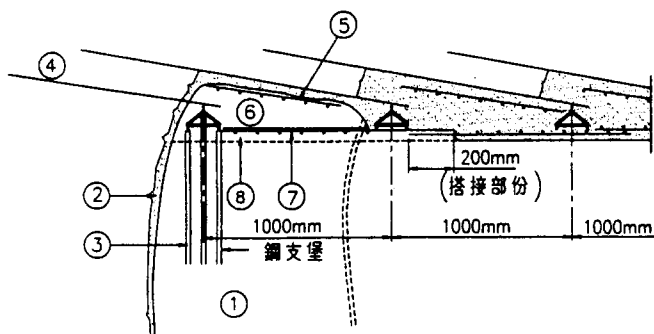
有關上述頂導坑詳細施工步驟如圖7所示。

## 1. 氣閘設備

氣閘設備主要有阻隔壁、材料進出閘、人員進出閘與醫療閘等四部分，其相關資料示於表3。

表3 氣閘設備一覽表

項目	尺寸
阻隔壁(Bulkhead)	鋼結構
材料進出閘 (Material Lock)	$\phi$ 3000mm
	L=17000mm
	$P_{max}=200kPa$
人員進出閘 (Man Lock)	$\phi$ 1550mm
	L=9500mm
	$P_{max}=200kPa$
醫療閘 (Hospital Lock)	3 compartment
	$\phi$ 1706mm
	L=4808mm
	$P_{max}=550kPa$
	2 compartment



施工步驟：

- |         |                          |         |
|---------|--------------------------|---------|
| ① 開挖    | ④ 鋼矢版打設<br>(L=2m, t=6mm) | ⑥ 二次噴凝土 |
| ② 一次噴凝土 | ⑤ 鋼絲網架設                  | ⑦ 鋼絲網架設 |
| ③ 鋼支堡架設 |                          | ⑧ 三次噴凝土 |

圖7 頂導坑詳細施工步驟示意圖

## 2. 台階施作

台階每次開挖之長度為1m，開挖後迅速向壁面施以厚10cm之一次噴凝土，接著再施以厚10cm之二次噴凝土，於鋪設鋼絲網後繼續施以厚5cm之三次噴凝土。於施作一次噴凝土時並向開挖面施以厚3cm之噴凝土。

## 3. 仰拱施作

仰拱每次開挖之長度為2m，主要使用挖土機開挖，最後的整修則以人工施行使開挖面平整。開挖完畢後向壁面施以厚10cm之一次噴凝土，鋪設鋼絲網後再施以厚10cm之二次噴凝土。二次噴凝土施作完畢後再進行仰拱部分回填。待仰拱二次襯砌施作前再將回填料清除並施作三次噴凝土。於施作一次噴凝土時並向開挖面施以厚3cm之噴凝土。

依上述施工順序與步驟完成無壓氣段隧道之施工後，承商即於無壓氣段隧道內進行壓氣設備之組裝工作。無壓氣段隧道之開挖工作費時約60日，壓氣設備之組裝工作則費時約40日完成。

## 壓氣段隧道施工

### ◎ 壓氣設備

進行壓氣新奧工法時所使用的壓氣設備主要可分為氣閘設備與供氣設備二部分，分述如下。

## 2. 供氣設備

新奧工法隧道施工時所需之壓縮空氣可分為低壓與高壓二種，其所使用之供氣設備如下述。

### (1) 低壓壓縮空氣供氣設備

低壓壓縮空氣主要用於穩定開挖面、抑制地下水湧出、減少地面沉陷、易於施作噴凝土與供人員呼吸之用。施工時承商採用最大供氣壓力為250kPa，最大供氣量為70.8m<sup>3</sup>/min之無油螺旋式空氣壓縮機4台。由空氣壓縮機所產生之壓縮空氣，係以20cm的鋼管引導至自動壓力流量調整閥，再經由分配管分別送至人員進出閘與隧道內。藉由自動壓力流量調整閥顯示隧道內壓力之變化，可控制隧道內壓力以確保施工安全。

### (2) 高壓壓縮空氣供氣設備

高壓壓縮空氣主要用於噴凝土施工與氣動工具之使用。承商於施工期間採用最大供氣壓力為700kPa、最大供氣量為11m<sup>3</sup>/min之空氣壓縮機2台。

### ◎ 隧道施工

壓氣段隧道開挖係於氣閘設備組裝完畢後進行，此段隧道之開挖主要採用壓氣並配合地盤改良為輔助工法進行。此壓氣段隧道之開挖方式與無壓

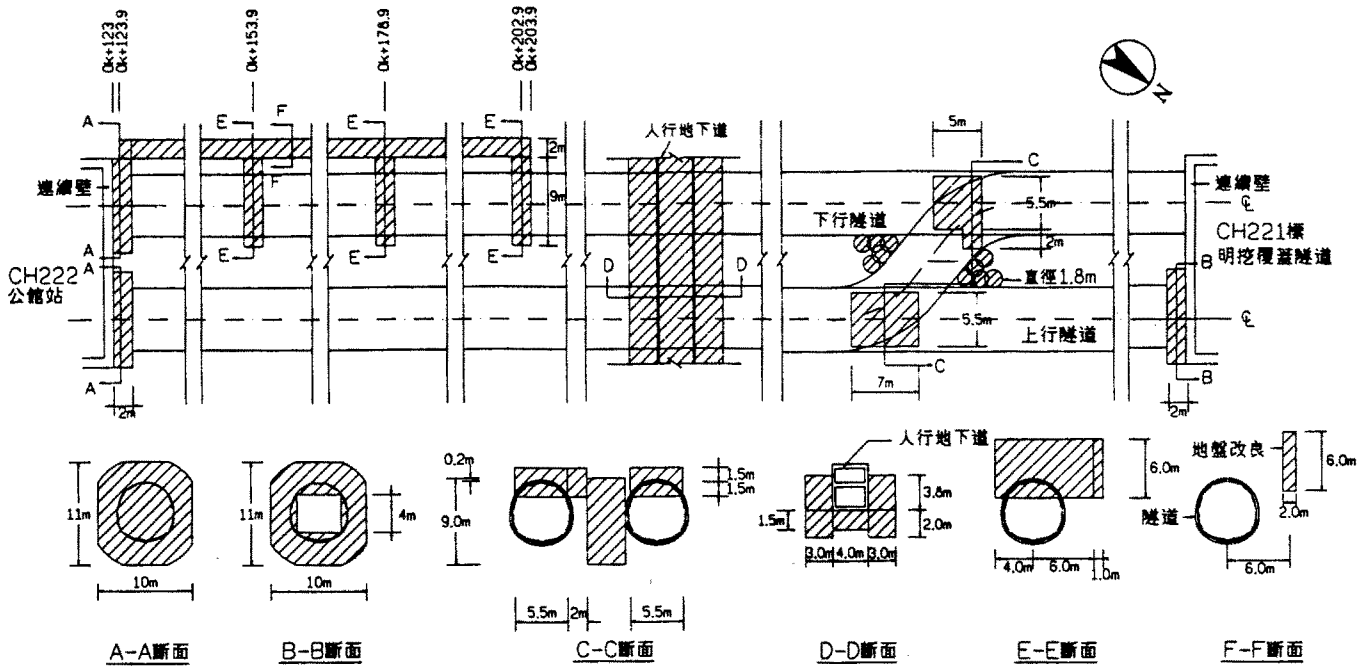


圖8 新奧工法隧道地盤改良平面配置與剖面圖

氣段隧道開挖方式相同，施工期間所進行之地盤改良工作如下。

### 1. 橫坑（Cross Drift）處地盤改良

橫坑係施工期間連接上下行隧道間之臨時性連絡通道，施作此橫坑之目的在於使進行此二條隧道開挖時僅需使用一組壓力閘。因為此二條隧道相當接近，在構築橫坑期間會造成橫坑二側土體發生應力集中，因此在橫坑施工前需針對此區域進行地盤改良。橫坑之地盤改良主要於橫坑南北二側與鄰橫坑處上下行隧道頂部施作，其位置與施作範圍如圖8所示。

橫坑南北二側係採用JSG工法各施作5支樁徑1.8m，長9m之改良樁。此改良樁施工時所採用之漿液配比係於1m<sup>3</sup>之材料中使用5kN水泥與8.4kN水。鄰橫坑處上下行隧道頂部則採用二重管灌漿工法進行地盤改良。施工時灌漿間距採用1m，灌注率採用35%進行施作。灌漿時則由下往上施作，上下施灌間隔為0.25m，所採用灌漿材料為硬化時間為6至12秒之CW-1無機瞬結灌漿劑，配比如表4。

表4 橫坑二重管灌漿材料配比一覽表

A液(200 ℓ)		B液(200 ℓ)	
3號矽酸鈉	75 ℓ	硬化劑-AI	0.22kN
水	125 ℓ	水	193 ℓ

### 2. 到達部地盤改良

位於上行隧道南北二端與下行隧道南端到達部之地盤改良係採用二重雙栓塞工法(SLEEVE GROUT)施作，其灌漿位置與範圍如圖8。此地盤改良主要施灌於隧道挖掘部份之外圍，以防止隧道與連續壁交接面於壓氣期間發生崩塌與漏氣。因為鄰CH222標之連續壁於CH222標車站開挖時有漏水，故此處到達部隧道挖掘部份亦施作灌漿。到達部地盤改良施工時所採用之灌漿間距為1m，一次與二次灌漿之灌注材料分別採用水泥皂土與硬化時間為60分之CW-3C有機系矽膠溶液，灌注率分別採用5%與30%進行施作。各灌漿孔之上下施灌間隔為0.33m，所採用灌漿材料配比如表5。

表5 到達部地盤改良灌漿材料配比一覽表

項目	材料	配比	
封堵材 (1000 ℓ)	水泥	1.77kN	
	皂土	0.625kN	
	水	剩餘	
一次灌漿	與封堵材相同		
二次灌漿 (CW-3C)	A液 (200 ℓ)	3號矽酸鈉	100 ℓ
		水	100 ℓ
	B液 (200 ℓ)	GS	6至10 ℓ
		H劑	6至8 ℓ
	水	剩餘	

### 3. 開挖面地盤改良

上下行隧道開挖至里程0k+190.5與0k+188.2附近時，因頂導坑出現礫石層而導致開挖面不穩定與供氣量嚴重漏失。承商於開挖面頂導坑位置處針對礫石層進行灌漿，藉此改良開挖面前方地盤，以穩定開挖面並減少供氣量漏失。此處地盤改良係採用二重管灌漿工法施作，灌漿間距為1.2m，所形成之樁徑為1.5m。施灌時所採用之材料主要為硬化時間為1至2分之LW，灌注率採用30%，材料配比如表

表6 開挖面地盤改良灌漿材料配比一覽表

A液(200 ℓ)		B液(200 ℓ)	
3號矽酸鈉	70~100 ℓ	水泥	0.5kN
水	130~100 ℓ	水	剩餘

6. 此區域開挖期間一旦發生供氣量嚴重漏失之情形，則改採配比如表4之CW-1無機瞬結灌漿劑施作。開挖面之基本灌漿位置如圖9所示，實際施灌位置則視現場礫石之位置而調整，各階段灌漿施工步驟如下述。

- (1) 鑽機從開挖面往前施作8m長之鑽孔。
- (2) 鑽孔至預定位置後，由前端開始灌漿至開挖面前2m處停止，其施灌間隔採0.5m進行。
- (3) 往前開挖6m後再重覆(1)(2)之步驟，直至施工至G07站連續壁為止。

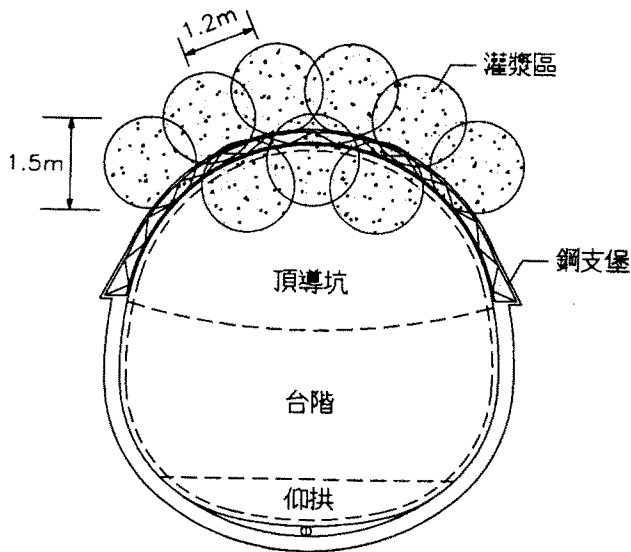


圖9 開挖面地盤改良位置示意圖

### 4. 下行隧道西側地盤改良

羅斯福路西側路面與建物地下室於上行隧道施作期間多處地點發生漏氣。考慮於施作下行隧道時將因更接近該區域，漏氣現象可能會更嚴重。因此

在下行隧道開挖前，承商於下行隧道西側里程0k+203.9至0k+123.9間距離下行隧道中心線6m處，施作長80m、厚2m、深6m(高程103m至97m)平行於隧道之地盤改良壁。並於里程0k+202.9、0k+178.9與0k+153.9三處施作長9m、厚2m、深6m(高程103m至97m)垂直於隧道之地盤改良壁將漏氣區予以區隔，以減少下行隧道施工時該區域之漏氣量。上述地盤改良壁之施作深度涵蓋礫石層，頂部則深入松六次層內1m，施作位置與範圍如圖8所示。為防止在灌漿過程中引起噴氣及漿液噴出，本區域採用二重管灌漿工法施工，其灌漿孔間距、灌注率、灌漿材料及配比與橫坑處地盤改良相同，但灌漿孔呈交錯排列，上下之灌漿間隔則採用0.5m進行。

### 5. 人行地下道地盤改良

位於羅斯福路與新生南路口之現有人行地下道於上行隧道施工期間發生嚴重漏氣與噴砂噴水現象。承商除於人行地下道內鋪面澆置0.5m厚之混凝土及裝設數處洩氣孔外，並於人行地下道二側與正下方施作灌漿，施作範圍如圖8。人行地下道正下方係採用單管由地下道內進行灌漿，所採用之材料主要為水泥皂土，其配比係於1m<sup>3</sup>材料中使用2.5kN至3.5kN水泥、0.5kN至0.6kN皂土、其餘則為水。若於施工中發生土砂與水噴出現象導致施工困難時，則裝設逆止閥改採配比如表6之LW進行施作。地下道二側則採用二重管由地表進行灌漿，地下道底部以上所採用之材料為配比如表4之CW-1，地下道底部以下所採用之材料則為配比如表4與表7之CW-1與CW-2。上述灌漿施工時之灌注率，水泥皂土採用25%，其餘則皆採用35%進行，上下施灌間隔則皆為0.5m。

表7 CW-2材料配比一覽表

A液(200 ℓ)		B液(200 ℓ)	
3號矽酸鈉	75 ℓ	硬化劑-B	0.12kN
水	125 ℓ	水	195 ℓ

上述壓氣段隧道之開挖工作歷時19.5個月完成，期間於上行隧道頂導坑施作至里程0K+227處時，因位於羅斯福路與新生南路口之地下道內發生土砂流失導致路面發生坍塌，停工約4個月。施工期間隧道內所使用之最大供氣壓力約為130kPa，最大供氣量則約為260m<sup>3</sup>/min。

待完成壓氣段隧道之施工後，承商以每小時2.5kPa之速度進行解壓，期間於漏水處並採用止水灌漿進行處理，所有解壓工作費時12日完成。待解壓工作完成後，則進行連續壁敲除與永久襯砌之施作。

## 六、監測儀器量測結果

新奧工法隧道段裝設之監測儀器包括地面型沉陷點、淺式沉陷計、多點伸縮儀、管線沉陷點，房屋傾斜儀、結構物沉陷點及裂縫計、空氣壓力計、水壓計、觀測井、混凝土應變儀、襯砌土壓計、襯砌水壓計、襯砌應力計與隧道收斂觀測點等。承商藉此監測儀器瞭解施工對周遭環境之影響，並確保隧道本身於施工期間之安全。

由監測新奧工法隧道本身安全之監測儀器量測結果可知，施工期間隧道本體一直處於安全之狀態下，並無特殊狀況發生。至於施工期間施工對周遭環境則造成某種程度之影響，尤其是壓氣所造成之影響不可等閒視之。

本壓氣新奧工法施工對地層與地下水位之影響，可藉由圖10之監測儀器觀測結果獲得瞭解。圖10為裝設於本施工區內之空氣壓力計(AP)、水位觀測井(OW)與地面型沉陷點(SM)之歷時曲線，其中空氣壓力計可正確反應隧道內壓力之變化情形。由圖可知，地下水位隨隧道內壓力之增減而升降，隧道開挖所導致之地層沉陷並不大，但因壓力之降低而導致較大地層沉陷。

## 七、結論

1. 新奧工法為一施工理念，施作時必需視地層狀況與工地現況採用適合之輔助工法進行施工。
2. 採用壓氣新奧工法施工時，工區內之地質狀況(尤其是卵礫石之存在)、附近結構物之狀況、地下管線(尤其是自來水、瓦斯、排水管線)、溝渠的確實位置，必需於施工前加以確認。
3. 採用壓氣新奧工法施工，地層因施工所導致之沉陷量並不大，但因壓力解除後所發生之沉陷量則不可忽視。
4. 新奧工法隧道之施作需由有經驗之工程師負責督導，並藉由監測儀器量測結果隨時作施工上之調整，以竟其功。

## 誌謝

本文於撰文期間獲得三信建設工業株式會社王錦伍先生、亞新工程顧問公司莫若楫博士與黃南輝博士提供寶貴意見，謹誌謝忱。

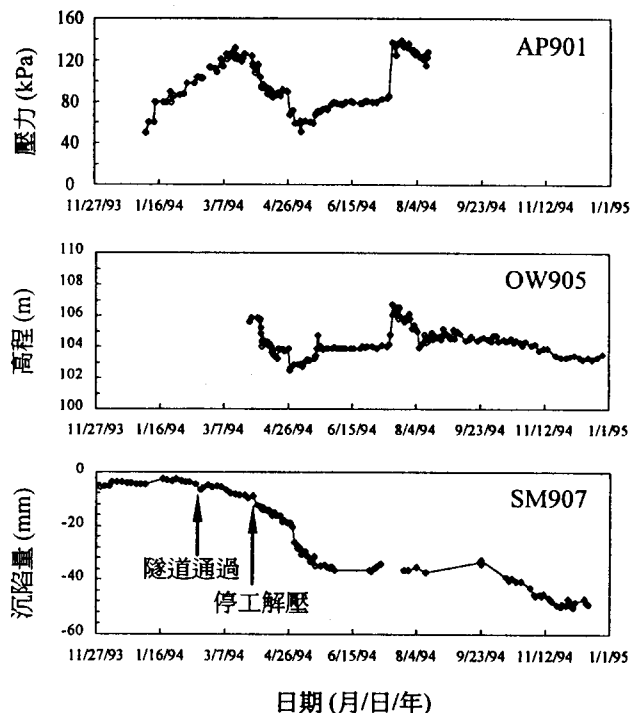


圖10 新奧工法隧道監測儀器觀測結果

## Construction of NATM Tunnel in Soft Ground

G.R. Yang P.F. Yang C.L. Chao C.B. Fan  
Moh & Associates SDPO, DORTS  
Taipei Taipei

### Abstract

The twin tunnels for Contract CH221 of the Hsintien Line of the Taipei MRT was constructed by using the NATM method. The tunnels have a diameter of 6m and a route length of 222m. Due to the presence of soft subsoil and high groundwater table, supplementary measures of compressed air, groundwater lowering, ground treatment and bentonite cement cut-off walls were adopted. This paper presents the details of the design and the construction of the NATM tunnels and provides valuable information for the design and the construction of similar works.