

潛盾施工引致孔隙水壓變化之量測與分析  
**MEASUREMENTS AND ANALYSIS  
OF THE PORE PRESSURE CHANGES INDUCED  
BY SHIELD TUNNELLING**

陳堯中，賴建宏，黃南輝，林國禎  
Y. C. Chen, J. H. Lai, R. N. Hwang and G. J. Lin

原著載於地工技術雜誌第 60 期  
1997 年 4 月，第 97~106 頁

*Reprinted from Sino-Geotechnics  
Taipei, Taiwan  
April, 1997, No. 60, pp.97~106*

# 潛盾施工引致孔隙水壓變化之量測與分析

陳堯中 賴建宏

國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所

黃南輝 林國楨

亞新工程顧問股份有限公司

## 摘要

潛盾施工所引致之地盤沈陷問題為都市土木中隧道工程之重要課題，而由於潛盾機推進隆起、開挖解壓所衍生之地盤漏失及孔隙水壓變化正是造成地盤沈陷之主因。本研究在潛盾機通過電子式水壓計之監測斷面前後實施密集記讀，以瞭解潛盾施工引致孔隙水壓之變化情形。文中亦建立模擬潛盾施工之數值分析架構，利用現地監測資料驗證此分析架構之適用性，以探討推力與超額孔隙水壓增量及壓密沈陷間之關係。

**關鍵字：**隧道、潛盾工法、孔隙水壓、數值分析。

## MEASUREMENTS AND ANALYSIS OF THE PORE PRESSURE CHANGES INDUCED BY SHIELD TUNNELLING

CHEN YAO-CHUNG

LAI JEN-HONG

Department of construction Engineering National Taiwan Institute of Technology

HWANG R. N.

LIN GWO-JEN

Moh and Associates, Inc.

## ABSTRACT

Ground settlement induced by shield tunnelling is an important issue in the tunnel construction in urban area. The ground loss and pore pressure change induced by the advance of shield machine and the unloading of excavation are the major causes for the ground settlement. To understand the mechanism of pore pressure evolution intense measurements of the pore pressure transducers are taken before and after shield machine passing through the monitoring section. An analytical model is established and verified by comparisons with the field data. Numerical analysis is performed to investigate the relationship between thrusts, excess pore pressure increments, and consolidation settlements.

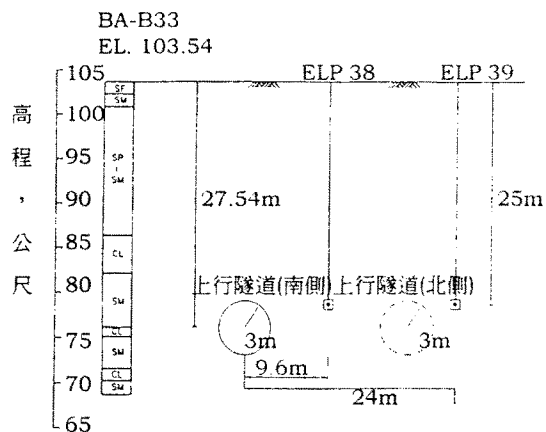
**KEY WORDS :** tunnel, shield tunnelling, pore pressure, numerical analysis.

## 一、前言

潛盾施工所造成之地表沉陷大致可歸納下列原因：(1)隧道開挖面之應力改變，(2)盾尾間隙閉合，(3)擾動土壤之壓密，(4)隧道襯砌環片變形等因素。而其中土壤之壓密沉陷行為則須了解孔隙水壓之變化情形，才能進一步分析。

土壤之壓密沉陷起因於超額孔隙水壓之消散，因此要了解潛盾機通過後造成之壓密沉陷，則需了解潛盾機行進時對於周遭土壤所激發之超額孔隙水壓變化情形。為達此目的，可藉由在潛盾隧道段裝置之電子式水壓計(ELP)，在潛盾通過監測斷面前後實施密集記讀，以了解潛盾通過計測斷面前後孔隙水壓之變化。

本研究於台北捷運板橋線 CP 261 標土壓平衡式潛盾施工中進行一個斷面之密集水壓計監測，以期能由計讀之水壓變化資料配合潛盾施工日報記錄，來了解施工過程中潛盾推力與其所激發之孔隙水壓間之關係。



圖一 CP-261 標潛盾隧道水壓監測斷面配置剖面示意圖

## 二、監測斷面配置及地質概況

本研究之監測斷面位於 T1 地層分區，監測斷面上方之覆土厚約 24.6m，監測斷面之土層分佈、水壓計之配置深度、位置如圖一所示。由圖中得知潛盾隧道是位於松山層第三次層中，土層性質是屬粉土質砂土，土層分佈狀況詳如表一。

CP 261 標之水壓計監測斷面位於和平西路三段 309 巷中，相對於潛盾隧道位置之襯砌環片第 165 環位置，所採用之兩支電子式水壓計是以交泰公司提供之自動資料讀取器，設定每十分鐘之頻率計讀，以持續的記錄水壓變化情形，電子式水壓計之編號為 ELP38 與 ELP39，分別位於上行隧道距中心線 9.6m 及 24m 處。而地表沈陷量之監測資料，則是採取位於桂林路 309 巷 15 弄之水準點(SM 25)之沈陷歷時記錄，如圖二所示，該水準點位於潛盾隧道中心線正上方，距離工作井 16m，由於附近之工作井深開挖工程對此水準點已造成先期沈陷之影響，因此經扣除此前期沈陷量，可得由於潛盾隧道通過所引發之現地最大沈陷量約為 30mm。

## 三、監測結果及分析

### 3.1 水壓計歷時曲線

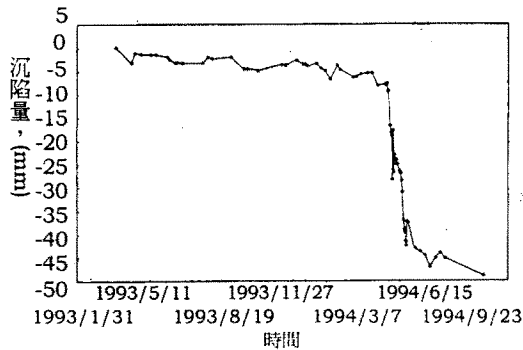
監測計讀之資料經整理後可繪成歷時曲線圖，圖三為板橋線 CP 261 標 ELP38 與 ELP39 水壓計之歷時曲線及施工進度圖，由於兩水壓計埋設之土層、深度相同，因此所激發之孔隙水壓時間、大

表一 環河南路至中華路與長沙街口區段土層分佈狀況綜合表

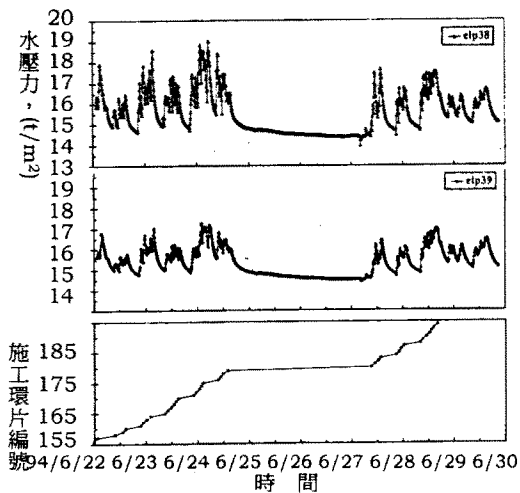
層次	土層描述	土層物理性質	備註
松山層 第VI次層	本層次厚度約 1 至 7 公尺，大致越靠近新店溪厚度越薄，主要為黃棕色轉灰色粘土質粉土，具低塑性，軟弱至中等堅實稠度。	1.N值在 1 至 5 之間。 2. $\gamma_t=1.86\pm 0.06$ 噸/立方公尺。 3.wn=31±4%。 4.wL 約 35% 左右。 5.lp 約 16% 左右。	本層次表層為厚度約 1 至 2 公尺之回填土層，含砂石級配料、磚屑等。
第V次層	本層次厚度約 9 至 12 公尺，大致愈靠近新店溪厚度愈厚，主要為灰色粉土質中細砂偶夾小礫石，具疏鬆至中等緊密程度。	1.N值在 6 至 18 之間。 2.gt=1.98±0.10噸/立方公尺。 3.wn=21±6%。	本層次土壤分類主要為SM，局部為 SP-SM，細顆粒含量大致在 15% 至 30% 之間。
第IV次層	本層次厚度約 3 至 8 公尺，大致愈靠近新店溪厚度愈薄，主要為灰色粉土質粘土，偶夾貝屑、有機物，具低塑性，中等堅實至堅實稠度。	1.N值在 6 至 10 之間。 2. $\gamma_t=1.87\pm 0.06$ 噸/立方公尺。 3.wn=32±4%。 4.wL 約 36% 左右。 5.lp 約 15% 左右。	本層次土壤分類主要為CL，細顆粒含量大致在 95% 以上。
第III次層	本層次厚度大致在 5 公尺以上，部份鑽孔深度止於本層次，故實際厚度未知，主要為灰色粉土質砂，具中等緊密程度。	1.N值在 13 至 27 之間。 2. $\gamma_t=1.94\pm 0.05$ 噸/立方公尺。 3.wn=25±4%。	1.本層次土壤分類主要為SM，部份為鑽孔夾有粉土薄層。 2.細顆粒含量大致在15%至40%之間。
第II次層	本層次鑽孔BA-B37及BA-B39厚度在5至8公尺，由於大部份鑽孔均未鑽及本層次，故實際厚度有待進一步調查。主要為灰色粉土質粘土，偶夾有機物、貝屑及細砂薄層，具低塑性，堅實至極堅實稠度。	1.N值在 13 至 25 之間。 2. $\gamma_t=1.94\pm 0.05$ 噸/立方公尺。 3.wn=25±4%。 4.wL 約 31% 左右。 5.lp 約 12% 左右。	本層次土壤分類主要為 CL。
第I次層	本層次於鑽孔BA-B37及BA-B39其厚度約 10 至12公尺，主要為灰色粉土質砂夾有粉土質粘土薄層，具中等緊密至緊密程度。	1.N值在 25 至 41 之間。 2. $\gamma_t=2.00\pm 0.10$ 噸/立方公尺。 3.wn=20±6%。	1.本層次土壤分類主要為SM，部份為 ML。 2.細顆粒含量大致在 25% 至 40% 之間。
礫石層	本層次於鑽孔BA-B37及BA-B39約出現於地表下約47公尺(高程-42公尺)以下。	N值均大於 100。	1.本層次礫石含量約佔60%-70%，最大粒徑 約為 5 公分。 2.本次鑽探最深進入 2 公尺。

小相近。由圖中可明顯看出砂土層之孔隙水壓變化情形，激發及消散都非常迅速，只要潛盾機一掘進，孔隙水壓便迅速劇昇，潛盾機停下來裝置環片時就洩降，只是孔隙水壓被激發之大小較不規則，難找出其相關原因，不過仍可看出愈接近監測斷面位置(相當於第 165 環襯砌環片上)孔隙水壓被激發的量愈大，通過監測斷面後則有開始遞減的現象，但孔隙水壓昇降之差異仍相當大。圖中有一段期間孔隙水壓並無變化，原因為潛盾機故障停工，所以，

孔隙水壓便呈現穩定的現象。由 CP 261 標之施工日報記錄可知潛盾機在粉土質砂層中所使用之全推力約為 1100-2000tons，變化較大，掘進速度約為 20-40mm/min，土倉壓力約為 3.0 ~ 3.4kg/cm<sup>2</sup>之間，由記錄顯示土倉壓力於掘進過程中約略控制在一定值，並無明顯變化，無法反映其與孔隙水壓之關係，因此本研究以全推力來探討其與超額孔隙水壓之關係。



圖二 監測斷面水準點之地表沉陷量與時間關係

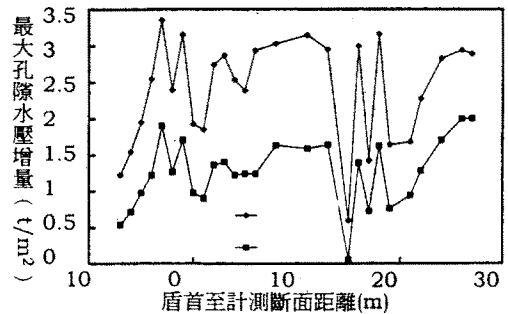


圖三 水壓計歷時曲線與施工進度圖

### 3.2 盾首位置與孔隙水壓增量之關係

由水壓計歷時曲線圖可找出潛盾機每推進一步所激發之最大孔隙水壓力，減去計讀前平均水壓力即可得每一環最大孔隙水壓增量，此最大孔隙水壓增量代表潛盾施工過程中所累積之最大超額孔隙水壓，配合每環與監測斷面距離則可繪成盾首位置與最大孔隙水壓增量關係圖，如圖四，其中橫軸代表盾首至監測斷面之距離，負值代表尚未通過監測斷面。由圖可知雖然孔隙水壓增減之起伏很大，但仍可大致看出最大孔隙水壓增量與盾首位置之遞增、遞減關係。圖五為超額孔隙水壓增量與盾

首位置之關係圖，此處之超額孔隙水壓增量係指每環推進前之最低孔隙水壓力與推進中所激發之最高孔隙水壓力之差，代表每環掘進所實際激發之超額孔隙水壓增量，由圖可知超額孔隙水壓增量與盾首位置距離間亦有遞增和遞減之關係，但值得注意的是盾首通過監測斷面前後，超額孔隙水壓增量有突然劇降之現象，是否與尾隙閉合或潛盾機推力向外傳遞之機制有關，則有待日後更多監測之資料佐證。



圖四 最大孔隙水壓增量與潛盾機盾首位置圖

### 3.3 全推力與超額孔隙水壓增量關係

理論上潛盾機之全推力與超額孔隙水壓增量應有關係存在，推力越大所激發之超額孔隙壓力應越大。圖五中顯示每環全推力與其所激發之超額孔隙水壓增量之關係，顯示雖然全推力與超額孔隙水壓增量之變化相當不規則，但仍可看出兩者之變化具有相關性，全推力增加時超額孔隙水壓增量亦增加。但經迴歸分析後，可知雖然超額孔隙水壓增量有隨全推力增加之趨勢，但兩者之相關性並不高，原因可能為距離對孔隙水壓之影響未消除、地質之變異性未考慮，推進速度之影響也未考慮，而施工日報記錄中之全推力也僅為某一環推進過程中之平均值，無法反映推力之實際變化情形，其確實之影響

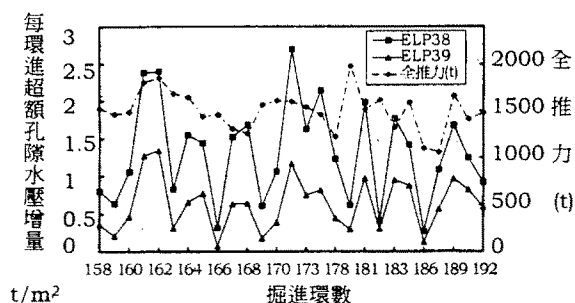
有待日後針對其餘水壓計斷面進行密集計讀時，實際至潛盾隧道中了解施工狀況，配合施工電腦報表記錄加以研判比對，或能找出其中之關係。

## 四、潛盾施工數值模擬分析

### 4.1 文獻回顧

一般分析潛盾施工引致地盤沈陷的方法，可分為兩大類，即經驗法和數值分析法。唯對於潛盾施工引致孔隙水壓變化及後續壓密沉陷之分析，則尚無經驗公式可依循，而數值分析法或許可提供某些定性的資料，以供研判。因此，本研究建立模擬潛盾施工之數值分析架構，利用現地監測資料驗證此分析架構之適用性，並探討推力與超額孔隙水壓增量及壓密沉陷間之關係。

以數值分析法分析潛盾工法引致的地盤沉陷，存在著與分析其他大地工程一樣之問題，其中土壤之應力—應變模式和現地施工狀況之模擬，對於分析結果之精確度影響甚鉅。



圖五 每環進超額孔隙水壓增量及全推力之關係圖

國內外以數值分析法進行隧道工程相關研究之學者甚多，諸如 Finno and Clough (1985)、Rowe and Kack

(1983)、陳堯中及秦中天(民國 76 年)、方永壽及陳秋宗(民國 77 年)、程日晟(民國 80 年)等人曾以數值方法分析潛盾施工造成之地盤沉陷。其中在土壤應力應變模式方面，方永壽、陳秋宗(民國 77 年)利用彈塑性模式，配合 Mohr-Coulomb 破壞準則，分析台北市民權東路下水道工程。而 Finno and Clough(1985)，則考慮複層土壤排水—不排水的特性，粘土用修正劍橋粘土模式(modified Cam-Clay model)，砂土用雙曲線模式(hyperbolic model)，分析舊金山 N-2 隧道工程。

在施工過程之模擬方面，亦有諸多學者加以探討，其中 Finno and Clough(1985)在整個潛盾開挖作業流程中，以(1)計算初始應力狀態，(2)推進隆起，(3)開挖解壓及尾隙閉合，(4)設置襯砌，(5)長期壓密沉陷等五個步驟模擬。由於 Finno and Clough 除了考慮開挖解壓及尾隙閉合外，更模擬土壓平衡式潛盾機推進時，對地層產生擠壓隆起現象，此一步驟將改變初始應力狀態，影響開挖解壓或尾隙閉合造成地盤沉陷之分析結果。其採用之模擬方式是以二向度隧道之縱斷面模擬推力施加於開挖面之推進過程，然後根據開挖面前端之應力狀態，求得於橫斷面平面應變模式分析時加載於斷面之徑向應力，其分佈為一主軸平行水平方向之橢圓形，以模擬推進隆起壓力。而其隆起壓力之大小係依水平變位計測值，經由試誤而得，因此可進行隆起壓力之模擬。本研究將參考 Finno and Clough(1985)之分析步驟建立模擬潛盾施工之分析架構。

### 4.2 基本假設

大地工程實務問題若以數值分析方法模擬，勢必有著諸多不確定因素或分析

技術上的限制，因此適當的假設是必須的。本研究採用有限差分程式 FLAC 進行分析，基本假設如下：

(1)分析型態：潛盾施工引致地盤之變形行為，乃是三向度的問題，然而數值分析常受限於計算機空間與時間，而無法分析三向度問題。由於淺層隧道開挖無法以軸對稱模式分析，因此，本研究採用平面應變模式作為分析之基本型態，以隧道軸線方向之縱斷面平面應變模式模擬潛盾機推進壓力之作用，藉以求得加諸於橫斷面平面應變模式下開挖面周圍之徑向應力，以模擬潛盾推進過程中加載於隧道周圍土壤之推擠壓力。

(2)組合律模式：採用完全彈塑性模式來模擬土層之應力應變狀況，並遵循莫爾-庫倫破壞準則。

(3)邊界範圍之假設：邊界範圍之選定，根據林國楨(民國 83 年)對淺層隧道分析之建議，取 8 倍隧道寬度之範圍進行分析研究。

(4)地下水之假設：本研究之地下水假設為在地表面下 2m 之靜地下水位，不考慮開挖過程可能之洩降，但對於潛盾推進所激發之超額孔隙水壓所造成之壓密沈陷則予以考量。

(5)支撐結構之假設：採用 FLAC 中之樑元素來模擬隧道所設置之襯砌環片，且假設為彈性行為，其模擬方式乃假設於開挖斷面達尾隙閉合量後加以設置。

### 4.3 材料參數選用之依據

(1)彈性模數(E)及包生比( $\nu$ ):本研究所分析之地層屬於台北松山層之粉土質砂(SM)及粉土質粘土(CL)互層之地質，根據陳堯中等人(1992)研究台北盆地深開挖數值回饋分析所得之結果，可推估砂土

層和粘土層之彈性模數，如公式(1)及(2)所示。土壤不排水剪力強度( $S_u$ )為有效覆土應力( $\sigma_v'$ )及摩擦角( $\phi'$ )之函數，如公式(3)所示。

$$\text{砂土層 } E = \frac{(1-K_a)\sigma_v'}{2\varepsilon} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{粘土層 } E = 400S_u \dots\dots\dots(2)$$

$$S_u = \frac{c'\cos\phi' + \sin\phi'[K_o + A_f(1-K_o)]\sigma_v'}{1 + (2A_f - 1)\sin\phi'} \dots\dots\dots(3)$$

其中

$K_a$ ：主動土壓力係數

$K_o$ ：靜止土壓力係數

$\varepsilon$ ：軸向應變量，本研究採用 $\varepsilon=0.125\%$

$A_f$ ：土壤破壞時孔隙壓力參數，本研究採用  $A_f=0.8$

砂土層之包生比( $\nu$ )值取 0.3，粘土層考慮其長期壓密效應，包生比亦取 0.3。

(2)凝聚力( $c'$ )和摩擦角( $\phi'$ ):根據 Cheng(1987)之統計資料，台北松山層之粉土質砂(SM)次層，摩擦角( $\phi'$ )為 $33.2^\circ$ ，在 CL 次層摩擦角( $\phi'$ )則為 $32.7^\circ$ ，而凝聚力( $c'$ )均為零。本研究將膨脹角( $\Psi$ )設為零。

(3)滲透性係數：根據台北都會區捷運系統松板線地質與土壤工程性質調查報告第二卷之資料，SM 層  $k$  值為  $1.3 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ ，CL 層  $k$  值為  $1.3 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ ，地下水之密度為  $1 \text{t/m}^3$ ，體積模數(B)為 2GPa。

(4)土壤乾密度及孔隙率則依據實驗室資料予以設定。

(5)環片：模擬環片支撐之樑元素，所需之分析參數有斷面積二次矩(I)、斷面積(A)及彈性模數(E)，因分析模式為平面應變模式，所以 I 及 A 值均取單位寬度表

示，而彈性模數則依(4)式決定：

$$E = 15100 \sqrt{f'_c} \dots \dots \dots (4)$$

$f'_c$ ：混凝土之抗壓強度  $\text{kg/cm}^2$ ，設計值為  $450 \text{ kg/cm}^2$ 。

經以上之說明，茲將本研究數值分析所採用之材料參數彙整如表二所示。

### 4.4 初始應力之決定

在大地工程數值分析中，初始應力之決定為分析工作之基礎，本研究在初始應力之設定上考慮土體自重及水壓力，並藉計算模擬初始應力狀態，使開挖模擬之土壤能符合  $K_0$  壓密下之應力狀態，而靜止土壓力係數 ( $K_0$ ) 則依據 Cheng(1987) 之研究，在 SM 層  $K_0$  採用 0.45，而 CL 層之  $K_0$  採用 0.41 給定計算。

### 4.5 潛盾機推進之模擬分析

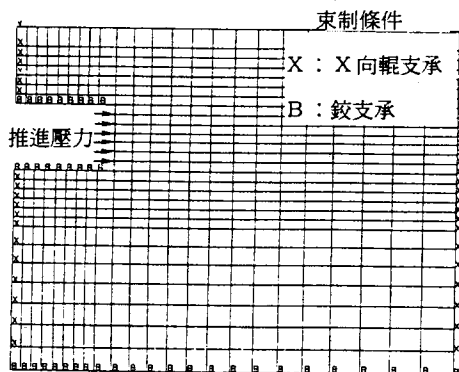
在土壓平衡式潛盾機施工作業時，由於開挖面之推進壓力稍大於開挖面之靜止側向土壓及水壓，將使得初始應力狀態改變且引致地表隆起之現象。而此一推進隆起之狀況屬三向度問題，欲採用二向度分析法模擬潛盾工法之行爲，則必需將推進壓力尋求合理之方式施加在開挖面上。

本研究採用 Finno and Clough (1985) 以縱斷面平面應變模擬潛盾推進壓力之觀念，於縱斷面開挖並於開挖面上加上推進壓力，此推進壓力係以現地施工時千斤頂施加之全推力，換算成施加於開挖面上之平均壓力，忽略潛盾機所受之土壤摩擦力。以縱斷面平面應變方式模擬潛盾推進，與實際狀況比較，將造成潛盾機前方土層承受較大之應力傳遞。本研究在推進壓力之模擬採用 1600t 之全推力分析，因此作用在開挖面上之推進壓力為  $58.5 \text{ t/m}^2$ ，由表一之土壤參數概估本案

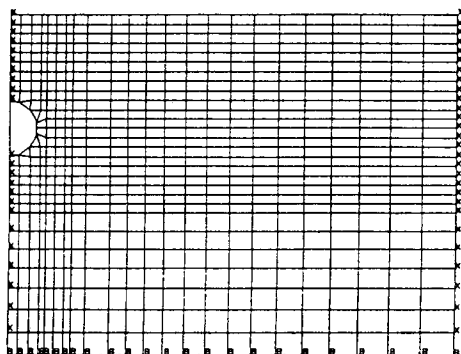
表二 數值分析適用之參數

材料種類	分析參數
砂土層	$E = \frac{(1 - K_a)\sigma'_v}{2\varepsilon}$ $\varepsilon = 0.125\%$ $\nu = 0.3$ $\phi' = 33.2^\circ$ $c' = 0$ $\Psi = 0$ $k = 1.3 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ $K_0 = 0.45$
粘土層	$E = 400S_u$ $S_u = \frac{c' \cos \phi' + \sin \phi' [K_0 + A_r(1 - K_0)]\sigma'_v}{1 + (2A_r - 1)\sin \phi'}$ $A_r = 0.8$ $\nu = 0.3$ $\phi' = 32.7^\circ$ $c' = 0$ $\Psi = 0$ $k = 1.3 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ $K_0 = 0.41$
地下水	$D = 1 \text{ t/m}^3, B_w = 2\text{GPa}$
混凝土環片	$f'_c = 450 \text{ kg/cm}^2$ $d_c = 25 \text{ cm}$

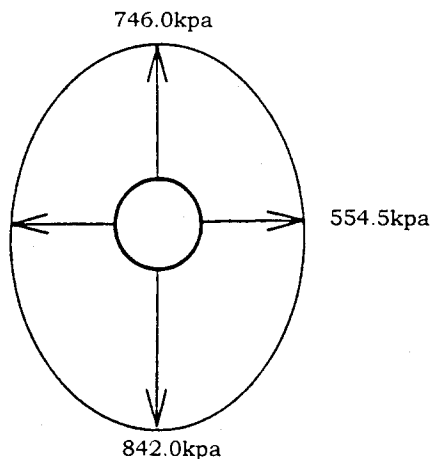
例土層主動土壓力、靜止土壓力及被動土壓力分別為  $34 \text{ t/m}^2$ 、 $39 \text{ t/m}^2$  及  $125 \text{ t/m}^2$ ，因此本案例預期將產生地表隆起現象，而不致發生被動破壞。其分析模式採用之網格和邊界條件如圖六、七所示，在此條件經運算可得縱斷面平面應變模式下開挖面前方之應力狀態，再將此應力態轉換成隧道橫斷面上之徑向應力，其結果如圖八所示，因此即得橫斷面平面應變分析所需之隆起壓力。另外，為瞭解推進隆起壓力之大小，對於潛盾開挖過程孔隙水壓及變形行爲之影響，除了以縱斷面平面應變模式轉換而得之橫斷面隆起壓力加以分析外，同時亦取其 110%、90% 及 80% 加以分析，以四種不同大小之隆起壓力探討不同推力大小對潛盾施工引致地表沈陷分析之影響。



圖六 縱斷面平面應變模擬推進隆起之模式



圖七 縱斷面平面應變模式之數值分析網格



圖八 CP261 標橫斷面平面應變模式之隆起壓力

#### 4.6 尾隙閉合之模擬分析

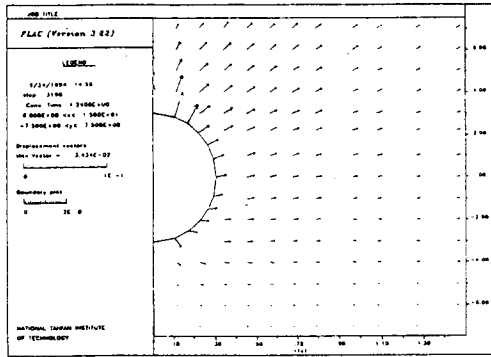
潛盾工法開挖面四周土體，除了在潛盾機推進後，襯砌與潛盾機盾殼外徑間之尾隙沒有支撐外，其餘部份均受潛盾機或襯砌之支撐，因此由開挖解壓造成的土壤位移量，最多等於尾隙閉合量，而此尾隙閉合量亦是造成地盤沉陷之主要來源。

本研究在模擬尾隙閉合之效應時，係於加載之隆起壓力作用完成後，將此隆起壓力歸零，並控制隧道頂拱之速度向量使隧道斷面在無支撐的狀態下，隨自重及開挖解壓而變形，使頂拱變位控制在 8.5cm 之尾隙閉合量。由於襯砌在潛盾機推進後將脫離盾殼，受重力的作用會自然落下，因此尾隙閉合量並非均勻分佈，此情形使得閉合量在隧道上下方有所增減，且加上背填灌漿之改良效應很難估計和模擬，因此本研究加以簡化，採用無支撐狀況下讓隧道斷面解壓變形並控制頂拱變形量為 8.5cm 之方式模擬常態尾隙閉合效應。

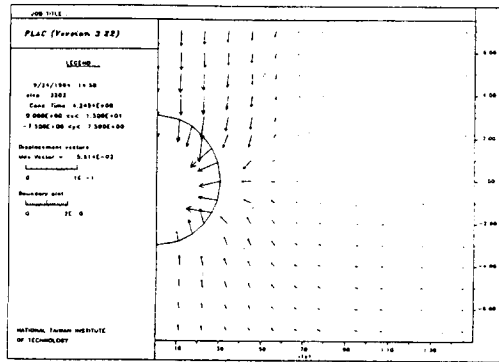
#### 4.7 數值分析結果與討論

(1)以數值分析探討 CP 261 標水壓計位置(ELP38、39)由於推進隆起壓力所激發之孔隙水壓大小，經分析得 ELP38 位置之超額孔隙水壓( $\Delta u$ )為 3.38t/m<sup>2</sup>，而 ELP39 位置之超額孔隙水壓為 1.35t/m<sup>2</sup>，此一結果與現地水壓計歷時記錄所反映 ELP38 之超額孔隙水壓 $\Delta u$ 約為 3t/m<sup>2</sup>及 ELP39 之超額孔隙水壓 $\Delta u$ 約為 1.35t/m<sup>2</sup>之值相當，頗能反映現地量測結果。

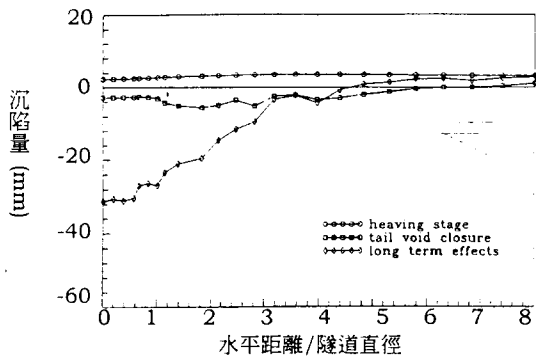
(2)圖九顯示推進壓力作用於隧道開挖面上造成之變位情形。圖十則顯示對於尾隙閉合之數值模擬結果，呈現常態尾隙閉合之現象，其中頂拱沈陷量為 8.5cm，



圖九 隧道周圍之變位向量分佈圖(推進隆起階段)



圖十 隧道周圍之變位向量分佈圖(尾隙閉合階段)



圖十一 CP261 標模擬潛盾開挖過程之地表沉陷分佈

仰拱隆起 4.8cm，總閉合量為 13.3cm，佔此潛盾隧道最大尾隙閉合量(17cm) 起階段)之 78%，引發之土壤漏失量為

4.38%。

(3)圖十一為 CP 261 標數值分析模擬各施工階段之地表沉陷分佈變化情形，圖中顯示於推進隆起壓力作用階段，地表反映出微量之隆起現象，而經尾隙閉合及長期壓密作用後最大地表沉陷量為 31.2mm，與現地隧道中心線上方地表水準點(SM 25)之沈陷量 30mm 相差無幾，頗能反映現地沈陷行為。

(4)表三為不同之隆起壓力作用下，潛盾隧道開挖各施工階段所引致之隧道上方地表沈陷量之比較，結果顯示在較大之推進隆起壓力作用下，推進階段引致之地表隆起量較高，尾隙閉合階段引致之地表沈陷量較小，壓密完成後之地表總沈陷量較小。但較高之推進隆起壓力將激發較高之超額孔隙水壓，使得因壓密所引致之地表沈陷量較大。

表三 不同隆起壓力引致各施工階段地表沈陷分佈情形

模擬階段	(1)推進隆起壓力	(2)尾隙閉合	(3)總沈陷量	長期效應之沈陷量(3)-(2)
1.1Po	3.36	1.15	-29.13	-30.3
Po	2.33	-2.87	-31.17	-28.3
0.9Po	1.20	-8.54	-34.15	-25.6
0.8Po	0.29	-14.75	-39.70	-25.2

註：單位為 mm； 2. 符號 "+"為隆起，"-為沈陷

## 五、結論與建議

本研究針對捷運 CP 261 標水壓計監測斷面在潛盾機通過前後之密集量測資料，加以分析整理，探討在粉土質砂層內潛盾施工所引致之超額孔隙水壓力變化，並研究潛盾機推力與超額孔隙水壓增量之關係。此外，並以 FLAC 程式建立模擬潛盾施工之分析架構，比較不同推力所引致之水壓變化及壓密沉陷行為，期能對潛盾施工引致水壓變化之機制有更深入

之了解。以下為本文之結論與建議：

(1)當潛盾機接近水壓計監測斷面時，孔隙水壓逐漸上升，並在潛盾機通過後逐漸消散。在砂土層中，超額孔隙壓力消散較快，故每環推進所造成之水壓增量在下環推進前已大部份消散，其累積之速率較慢，但仍可看出其最大孔隙壓力隨潛盾機接近而增加，並隨潛盾機遠離而消散之趨勢。

(2)由 CP 261 標之施工紀錄可知，在砂土層中推進時潛盾機所需之推力變化範圍很大，推力與超額孔隙水壓增量間大致具線性關係，推力越大所引致之水壓增量亦越大，但此關係並不顯著，主要影響因素為距離遠近、地質不均勻性、施工狀況等。

(3)以 FLAC 程式模擬砂土層中潛盾施工所引致之超額孔隙水壓時，其模擬結果與監測資料相當一致，證實程式之適用性，值得針對不同土層狀況深入研究。

(4)FLAC 程式可模擬潛盾施工所引致之壓密沉陷行為，本次所探討之監測斷面地表沉陷資料與模擬結果大致吻合。

(5)初步之數值分析結果顯示，推進壓力越大，潛盾前方之地表隆起量越高、尾隙閉合引致之沈陷量越小而往後之壓密沈陷量則較大，但總沉陷量則較小。由於監測資料不多，目前仍無法推論是否推進壓力越大所引致之地表沉陷量越小。若能對此問題更深入研究，充分了解其間之機制，相信對往後之潛盾設計與施工應有相當大之助益。

(6)自動計讀比人工計讀更能掌握資料之完整性，若再配合完整確實之施工報表和紀錄，較能深入探討潛盾施工之各種力學行為與相互之因果關係。建議應朝自動計讀方向努力。

## 誌謝

本研究承蒙亞新工程顧問股份有限

公司提供資料，交泰股份有限公司提供自動計讀儀器，方得以順利完成，特此誌謝。

## 參考文獻

- 方永壽、陳秋宗(民國 77 年)，「潛盾隧道施工盾尾孔隙所引致之地盤沉陷」，中華民國第十二屆力學會議論文集，第 707-716 頁。
- 林國楨(民國 83 年)，「淺層礫石隧道開挖之數值分析」，碩士論文，國立台灣工業技術學院，台北。
- 亞新工程顧問公司(民國 78 年)，「台北都會區捷運系統松板線地質與土壤工程性質調查報告」，台北。
- 陳堯中、秦中天(民國 76 年)，「近地表隧道開挖之數值分析」，中華民國第十一屆全或力學會議，第 1045-1054 頁。
- 陳堯中、喬國華、詹尚宏(民國 81 年)，「台北粉土質粘土在不同應力路徑下之不排水應力-應變及強度特性」，國科會專題研究計畫成果報告，計畫編號 NSC80-0410E-C11-01。
- 程日晟(民國 80 年)，「潛盾工程之有限元素法的分析合理化探討」，碩士論文，國立台灣工業技術學院。
- CHENG, T. Y. (1987), Geotechnical Characteristics of Shunshan Formation Within Taipei City, M.E. Thesis of Asian Institute of Technology, Thailand.
- FINNO, R. J. AND CLOUGH, G. W. (1985), "Evaluation of Soil Response to EPB Shield Tunneling," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 155-173.*
- ROW, P.K. AND KACK, G.J. (1983), "A Theoretical Examination of the Settlements Induced by Tunneling: Four Case Histories", *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 299-314.*

本文之討論意見將在後期刊出，請您將意見於兩個月內寄交本刊編輯委員會。

83 年 10 月 17 日 收稿  
84 年 3 月 6 日 修改  
84 年 5 月 23 日 接受