

# 台北捷運潛盾施工引致沉陷探討

陳俊宏<sup>1</sup> 段紹緯<sup>2</sup> 黃南輝<sup>2</sup>

1. 台北市政府捷運工程局

2. 亞新工程顧問股份有限公司

## 摘要

本文綜整台北捷運系統初期路網潛盾隧道工程之監測資料，探討在台北盆地不同的地質分區，各潛盾工程的施工表現。分析結果顯示於立即沉陷階段的土壤漏失率( $\nu$ %)，分佈在0.4~1.4%之間，除部份曲線段和中和線南端的C區外，都在1%以下；長期沉陷的壓密沉陷指數( $\alpha$ )，分佈在2~9mm之間，其中以具深厚粘土層之K1區數值較大。本文綜整之台北捷運潛盾施工經驗，應可供在類似施工條件下，潛盾工程設計施工之參考。

## Ground Subsidence Caused by Shield Tunneling for the Taipei Mass Rapid Transit Systems

Chun Hung Chen<sup>a</sup>, Shaw-Wei Duann<sup>b</sup>, Richard N. Hwang<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Rapid Transit Systems, Taipei Municipal Government, Taipei, Taiwan

<sup>b</sup>Moh and Associates Inc., Taipei, Taiwan

## ABSTRACT

This paper summarizes and discusses ground subsidence caused by shield tunneling for the Taipei Mass Rapid Transit Systems. The settlements observed were evaluated for different geological zones in the Taipei Basin. The results show that the averages of the ground loss ( $\nu$ %) varied from 0.4% to 1.4%. Except in some curved sections and Zone C of south section of the Chunggho Line, the ground losses were found less than 1%. The averages of long-term consolidation settlement indices ( $\alpha$ ) ranged from 2 mm to 9 mm. Among these consolidation settlement indices, those in Zone K1 appeared relatively high due to the presence of thick clay layers. The experience learned could be used for the designs or construction of other similar projects in the Taipei basin or in other areas with similar geological conditions.

## 一、前言

捷運工程在設計階段及施工前，均需對潛盾施工所可能引致之地表沉陷，評估其沉陷量和沉陷影響範圍，以及評估對鄰近建物和管線之影響程度，據以決定是否需進行保護或者採取其他因應措施。此評估結果對工程安全、施工和社會成本，以及施工順利與否關係甚大。

本文綜整台北捷運潛盾隧道施工過程中的監測資料，探討並歸納潛盾施工經驗，以供台北捷運後續路網和其他地區設計施工之參考。

台北捷運初期路網有六條路線，如圖一所示。其中除木柵線全線高架外，其餘五條路線都有地下段，而且都有潛盾隧道。圖二表示各線的潛盾隧道及潛盾機數量，隧道以1A、1B...等方式標示。1A表示1號機所鑽掘的第一條隧道，1B表示1號機所鑽掘的第二條隧道，以此類推。不含土城延伸線，一共60條潛盾隧道，動用30部潛盾機。除了新店線的CH221標的兩部泥水式潛盾機外，其它的都是土壓平衡式潛盾機。土城延伸線共有10條隧道，預期使用5部潛盾機。

所有潛盾隧道都是以混凝土環片為襯砌，除了新店線的CH222標的環片厚度為30公分外，其他隧道的環片厚度都是25公分。環片內徑有5.4公尺及5.6公尺兩種尺寸，新店線除CH221標外，其他標的隧道內徑都是5.4公尺；南港線除CN251標之外，所有其他標的內徑都是5.4公尺；而中和線及板橋線所有隧道的內徑則都是5.6公尺。

## 二、捷運沿線地質

在地質分區方面，本文採用李咸亨教授(1996)所發表的地質分區圖，捷運路線所經過的地質分區已表示於圖一。台北盆地的地質在文獻中經常報導，相信讀者耳熟能詳，因此不擬在此贅述。為讀者方便，各條路線沿線的土層剖面及地質分區表示於圖三至圖六，由這些圖可以看出，除了穿過新店溪底及其鄰近路段隧道較深外，其他捷運隧道的頂部約在10公尺至18公尺之間，而所有的潛盾隧道都位於松山層之中。除了新店線南段(G07至G09站)及中和線中段在隧道所在深度有礫石層出現外，其他路段都是經過砂土及粘土層。圖七表示台北市區的電子錐試驗結果，松山層的各個次層可以很明確地辨識，市區段的隧道大都在松山層第四次層及松山層第五次層中穿行。圖八表示實驗室三軸試驗結果，由圖可見在隧道所在的深度，粘土的抗剪強度在50至100kPa之間。

## 三、沉陷槽分析

隧道上方的地盤沉陷一般都是以Peck教授(1969)所建議的「正常化曲線」表示(參考圖九)，

$$\delta_x = \frac{vA}{2.5i} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \dots \dots \dots (1)$$

其中

$\delta_x$ ：距隧道中心水平距離  $x$  處之地表沉陷量, m

$\nu$ ：土壤漏失率

$A$ ：隧道斷面積,  $m^2$

$x$ ：距隧道中心水平距離, m

$i$ ：沉陷槽寬度參數，隧道中心至反曲點水平距離, m

通常地表最大沉陷量位於隧道中心線上方，即  $x = 0$ ,

$$\delta = \frac{\nu A}{2.5i} \dots\dots\dots(2)$$

$i$  值為沉陷槽寬度參數可參考 Clough & Schmidt (1981) 建議之公式計算：

$$i = \left(\frac{D}{2}\right)\left(\frac{z}{D}\right)^{0.8} \dots\dots\dots(3)$$

$z$ ：取隧道中心至地表深度, m

$D$ ：隧道直徑, m

地盤沉陷分為立即沉陷及長期沉陷，前者肇因於盾尾孔隙閉合，後者的機制則十分複雜，並無定論，姑且以壓密沉陷視之。主要起因於超額孔隙水壓之消散。而在某些土層，壓密沉陷甚至遠較立即沉陷為大，因此這兩種型態之沉陷有明確區分的必要。理論上，壓密沉陷經年累月，遠超過沉陷之量測期，甚至超過工期，為求比對公允，黃南輝等(1995)建議將盾首通過後第十天的沉陷定為立即沉陷，並以  $\delta_{10}$  表示之，其後之沉陷定為長期沉陷，並以半對數繪製的歷時曲線之斜率表示之（參考圖十）。

$$\delta = \delta_{10} + \alpha(\log t - 1) \dots\dots\dots(4)$$

$$t \geq 10$$

$t$  是盾首通過後的天數。簡單的說， $\alpha$  也就是第10天至第100天的沉陷。

因為導致立即沉陷及長期沉陷的機制不同，在進行沉陷槽分析時，兩者應分別考慮。

表一及表二表示兩百多個斷面的分析結果。

影響隧道上方沉陷的因素相當地多，諸如地層特性、隧道深度、潛盾機型式、土倉壓力、盾尾孔隙、超挖、背填灌漿、地盤改良、多隧道效應等等，本文的目的在求對整個初期路網潛盾工程作通盤的檢討，著重於各標的表現，所以排除灌漿、土倉壓力等人為因素及多隧道效應等等因素，只考慮線形及地質狀況。

## 四、線形

在潛盾推進的過程中，常會利用超挖以調整進行方向，理論上，超挖會影響土壤漏失率，亦會造成沉陷槽朝向曲線段內側之偏心現象，參考黃南輝等人(1997)的研究，以目前台北捷運潛盾施工所設計之潛盾機與超挖方式，若曲率半徑為200至400公尺，理論上僅就超挖位置考量，可能會對沉陷槽造成約0.5~1.0m的偏心量，對沉陷槽的形狀影響極微，所需修正土壤漏失率的幅度亦微不足道，故在土壤漏失率的計算上，可不必特別對偏心情形修正，但是超挖所增加潛盾隧道四周的空隙，是否會因而提高土壤漏失率的部份，則應納入考量。同時，在潛盾工程設計與施工上應注意此種行為，對鄰近建物的影響。

現在將分析所得結果區分為直線段及曲線段，以評估超挖的影響。直線段的平均土壤漏失率為0.71%，而曲線段的平均土壤漏失率為1.13%，較直線段的平均土壤漏失率高上60%，差別較大的是T1及T2區，在其他區曲線段的平均土壤漏失率反而較小。這可能是因為在T1及T2區的幾個轉彎的曲率較大之故。直線段的平均壓密沉陷指數為6.04mm，而曲線段的平均壓密沉陷指數為5.33mm，較直線段的平均壓密沉陷指數小12%，由於其數值本身即很小，如此差異可說是在容許誤差之內。

基於以上理由，以下的分析限於直線段以減少不確定性。

## 五、地質因素

本節探討不同地質分區之土壤漏失率，係已先過濾掉有施作二次灌漿的路段。各區結果請詳表一及參考圖三至圖六，以平均值表示可以顯示資料數據的集中趨勢，標準偏差則可以顯示數據資料的分散情形。由各地質分區的資料分析顯示土壤漏失率與深度的關係並不明顯，各地質分區直線段土壤漏失率，除了位於中和線南端的C區之外，所有其他地質分區的平均土壤漏失率都在1%之下，平均值大致介於0.6%至0.9%之間，標準偏差則約介於0.2%至0.5%之間。此外，數據相對於平均值的變異係數偏大，顯示即使在同一地質分區，資料亦相當分散，顯示受各種施工因素綜合所造成的影響很大。同時，若數據樣本數不多，亦可能影響其準確性，而造成較大的誤差。中和線C區的土壤漏失率平均值較大，但由於可靠的數據樣本不夠多，原因並不明瞭。

各地質分區平均壓密沉陷指數如表二所示，平均壓密沉陷指數在10mm之下，分佈在 $2.0\pm 0.7$ 至 $8.9\pm 4.3$ mm之間。以位於地層為深厚粘土層之K1區中施工，其壓密沉陷指數較大。值得注意的是，各分區中不同施工標壓密沉陷指數差異亦很大，例如K1區中有CN256、CN257和CN258標，其中CN257標平均壓密沉陷指數最大，為 $11.8\pm 4.2$ mm；CN258為 $9.0\pm 2.1$ mm；CN256標則最小，為 $5.8\pm 3.3$ mm，但CN257標平均土壤漏失率卻最小，此原因是CN257標在施工過程中部份路段讓地表有輕微隆起，使得立即沉陷較小，研判其卻可能因為擾動較大，致使長期壓密量較大。

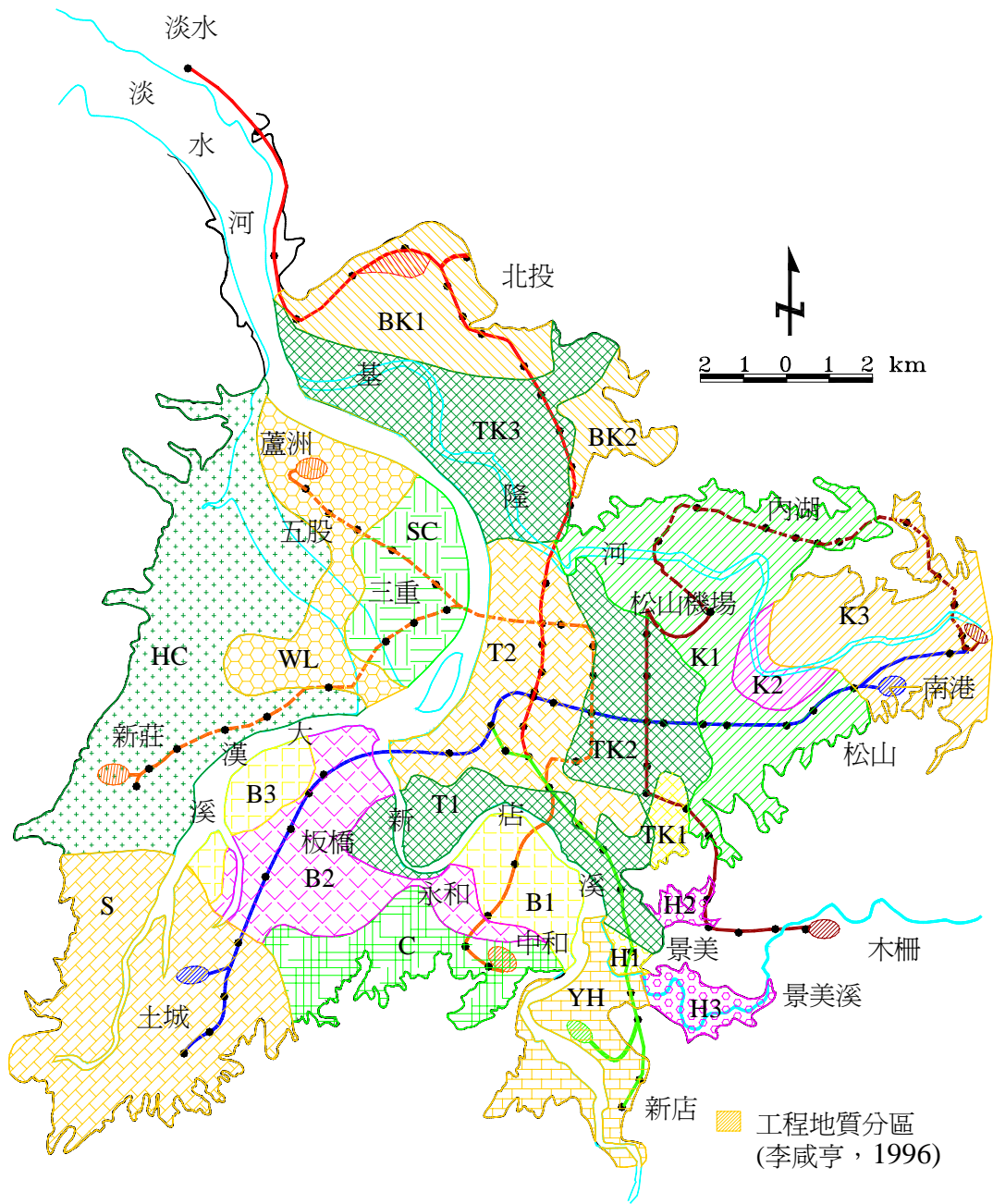
由此可見施工控制因素對各階段沉陷量影響很大，因此對於沉陷量的推估，應將立即沉陷和長期壓密沉陷做整體考量，並非單獨考慮。此外，由於影響沉陷量的因素十分複雜，設計時可應用機率方法，進行風險性分析，避免設計時過於保守或者風險過高。

## 六、結語

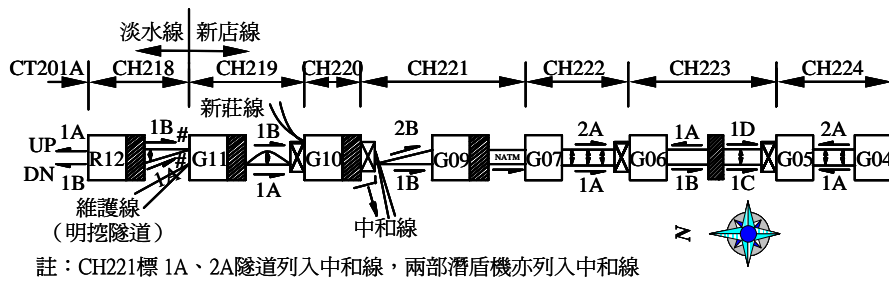
- (1) 本文所蒐集整理之各地質分區土壤漏失率及壓密沉陷指數，可供潛盾設計施工參考，唯部份分區由於樣本數較少，誤差可能較大。
- (2) 潛盾隧道曲線段施工，對沉陷量及沉陷槽偏移所造成額外之影響，在設計和施工中應予注意。
- (3) 即使在同一地質分區，潛盾施工技術與品管對沉陷量的影響上，仍扮演極為重要之角色。
- (4) 本文係以目前台北盆地地質分區做基準，來探討潛盾施工引致之沉陷行為，在考量影響沉陷因素眾多，而且影響程度複雜情形下，或許可將眾多地質分區簡化，提高使用上的方便性。
- (5) 整體而言，台北捷運潛盾施工引致之沉陷量，與以往其他工程施工結果比較，有顯著降低之現象，此應與經驗累積和施工品管有密切的關係。

## 參考文獻

- 李咸亨(1996)，「台北市區工程地質分區」，地工技術，第54期，第25~34頁。
- 黃南輝、黃奕祥、黃姿連、楊鵬飛(1997)，「潛盾施工所導致之沉陷槽分析」，地工技術，第60期，第45~56頁。
- Clough, W. and Schmidt, B. (1981), "Design and Performance of Excavations and Tunnel in Soft Clay", *Soft Clay Engineering*, Elsevier Amsterdam.
- Hwang, R.N, Fan, C.B., and Yang, G.R.,(1995), "Consolidation Settlements Due to Tunnelling" Proc., the South East Asian Symposium on Tunnelling Underground Space Development, pp 79-86, Bangkok, Thailand.
- Peck, R.B. (1969), "Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground", Proc., 7th ICSMFE, State-of-the-Art Report, pp 225-290, Mexico City, Mexico.

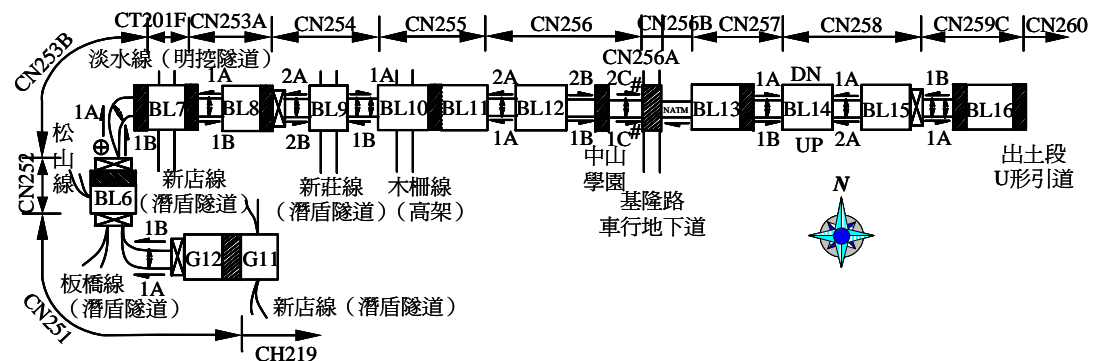


圖一 台北捷運路網及台北盆地地層分區圖

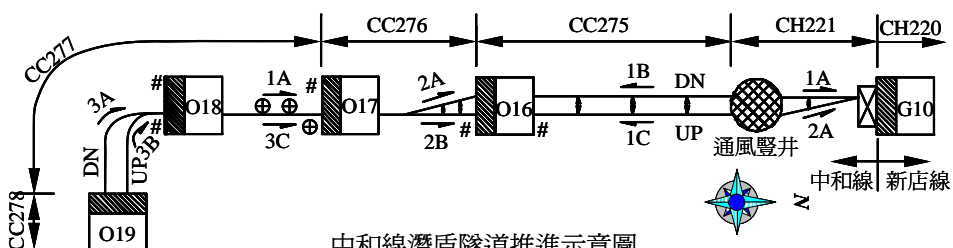


註：CH221標 1A、2A隧道列入中和線，兩部潛盾機亦列入中和線

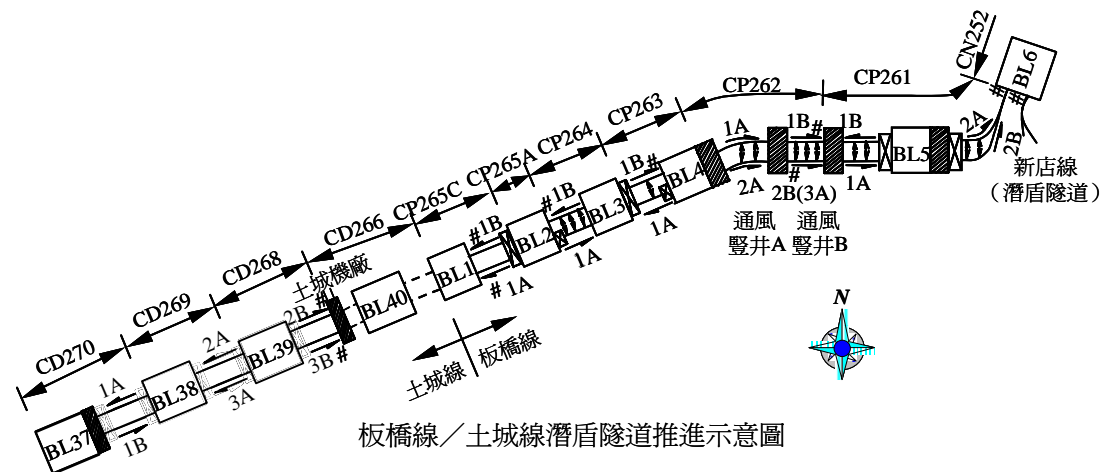
新店線/淡水線潛盾隧道推進示意圖



南港線潛盾隧道推進示意圖



中和線潛盾隧道推進示意圖



板橋線/土城線潛盾隧道推進示意圖

統計：	新店線	南港線	中和線	板橋線	淡水線	
潛盾隧道	12	22	10	14	4	條
潛盾機	6	11	5	8	2	部

\* 本統計未包含土城線

圖例：

○ 站體外臨時性工作井

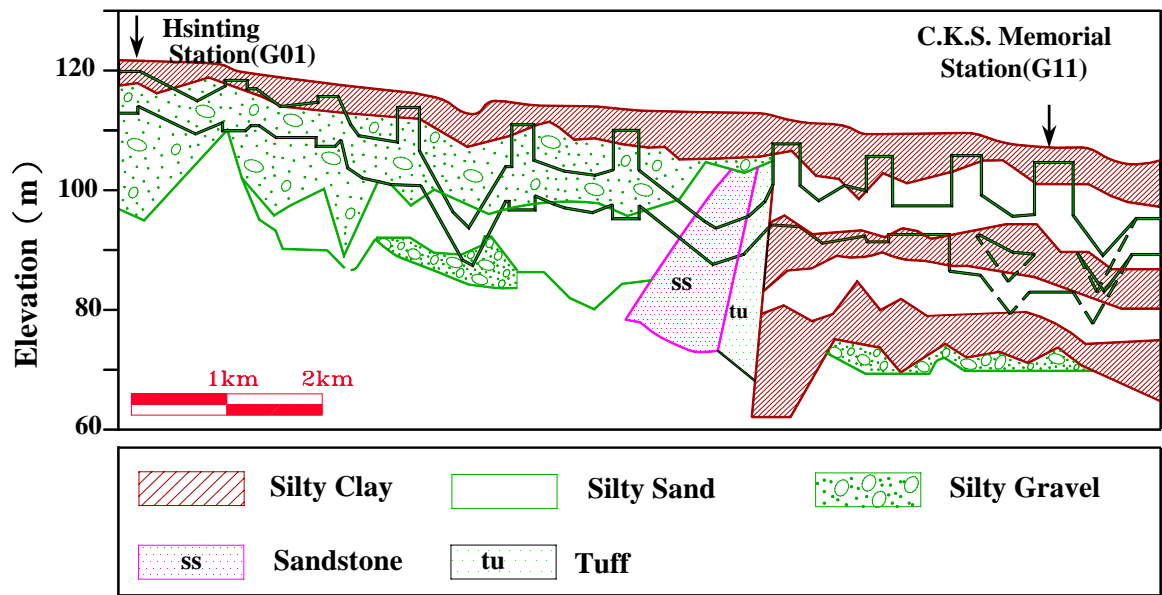
2A = 2號機第一條隧道

# 棄殼

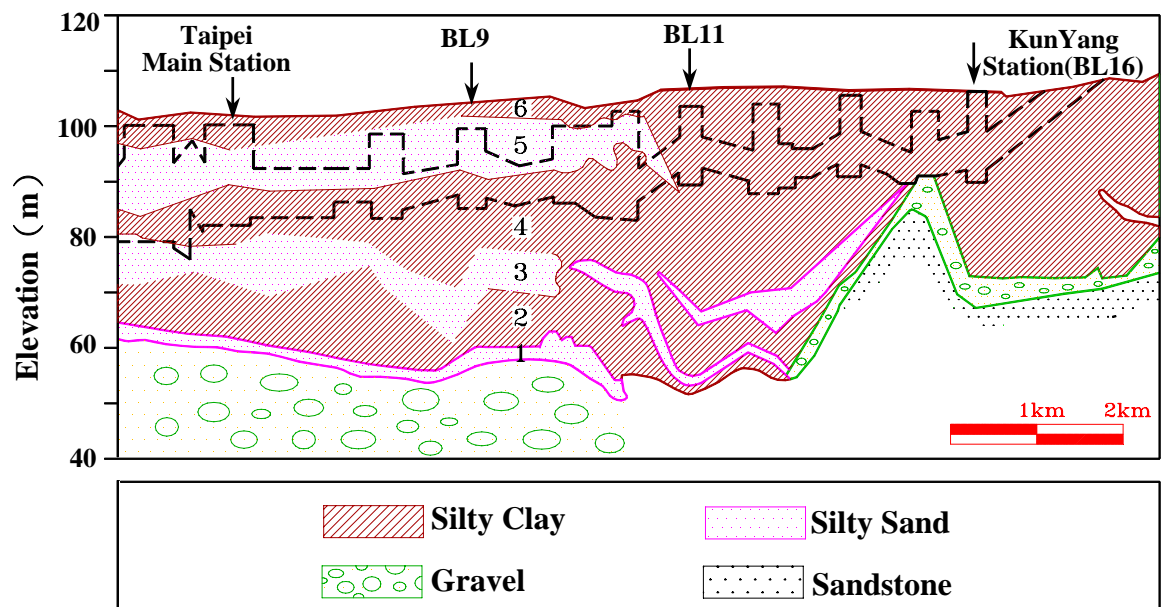
明挖覆蓋 (車站)    ↑↑ 隧道掘進方向    ↓ 連通道 (水平)

明挖覆蓋 (其它)    ⊕ 連通道 (垂直)

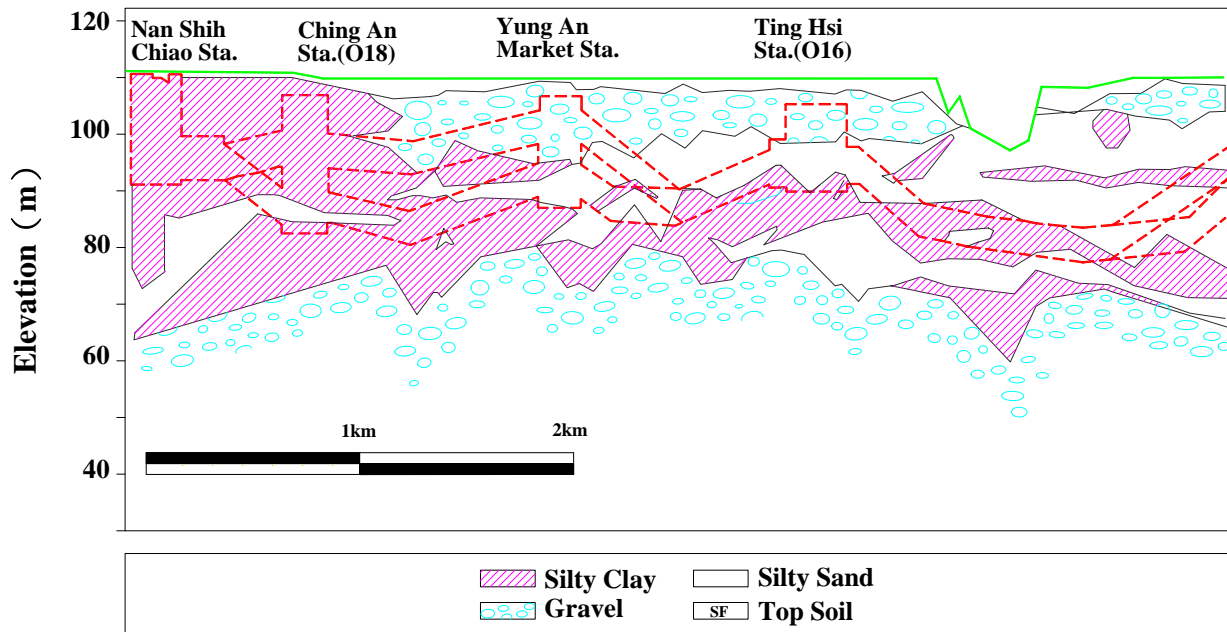
圖二 台北捷運初期路網潛盾隧道工程施工順序



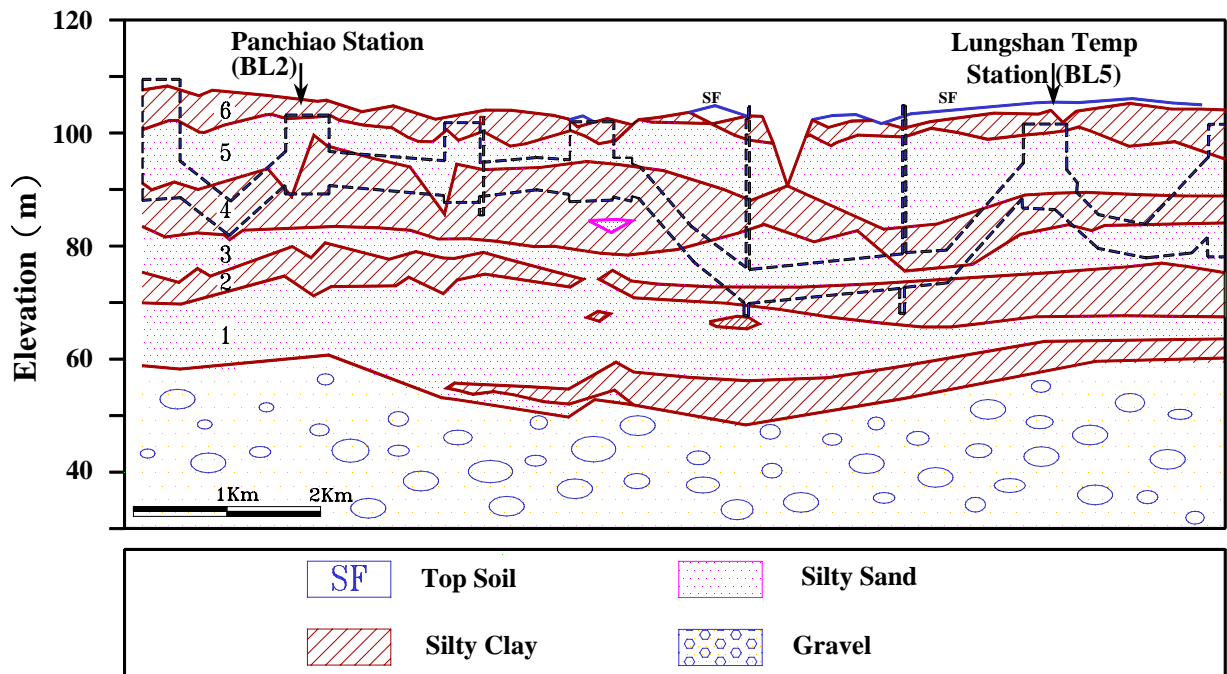
圖三 台北捷運新店線沿線土層剖面圖



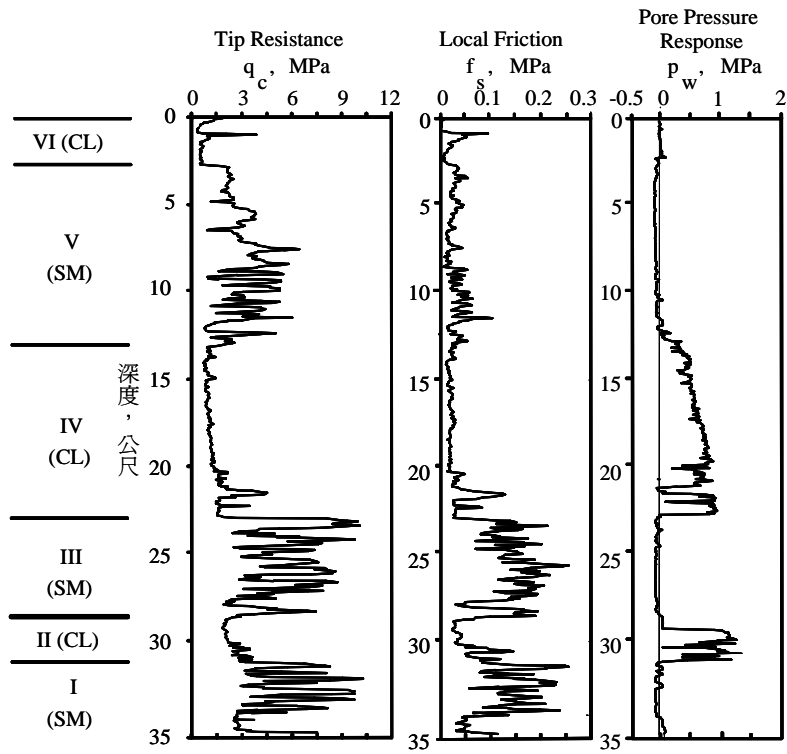
圖四 台北捷運南港線沿線土層剖面圖



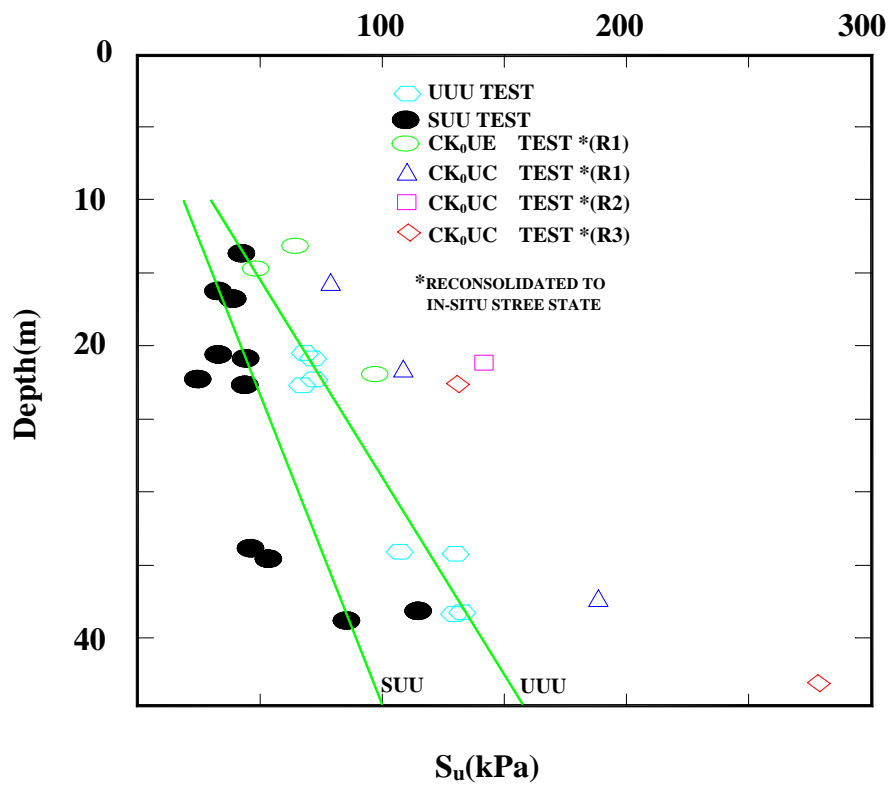
圖五 台北捷運中和線沿線土層剖面圖



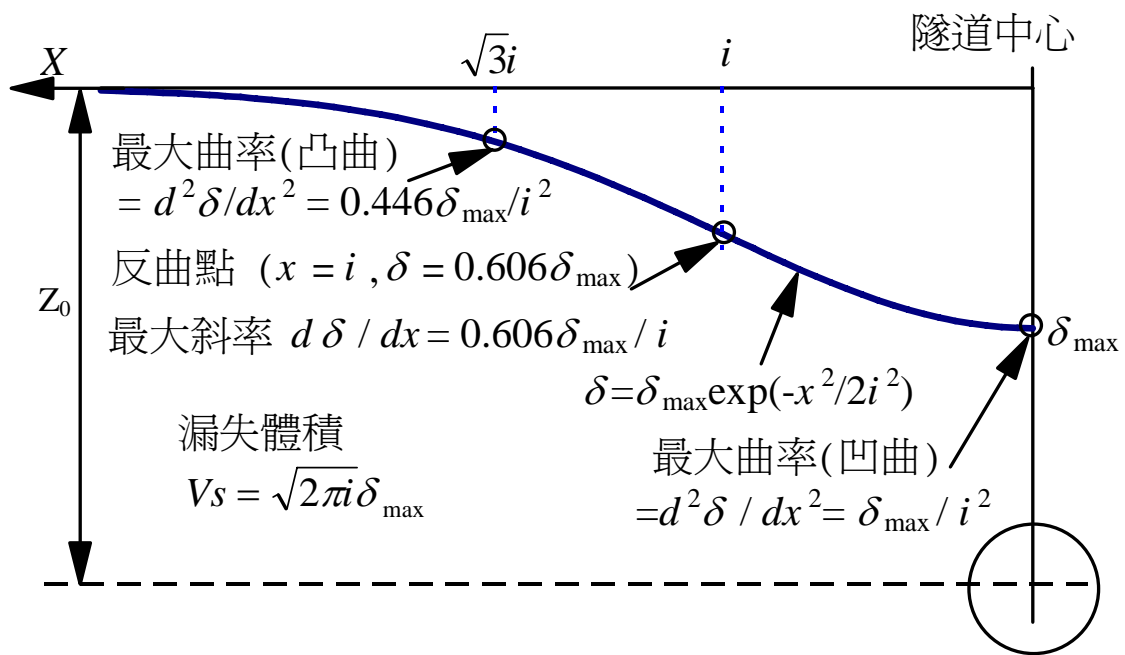
圖六 台北捷運板橋線沿線土層剖面圖



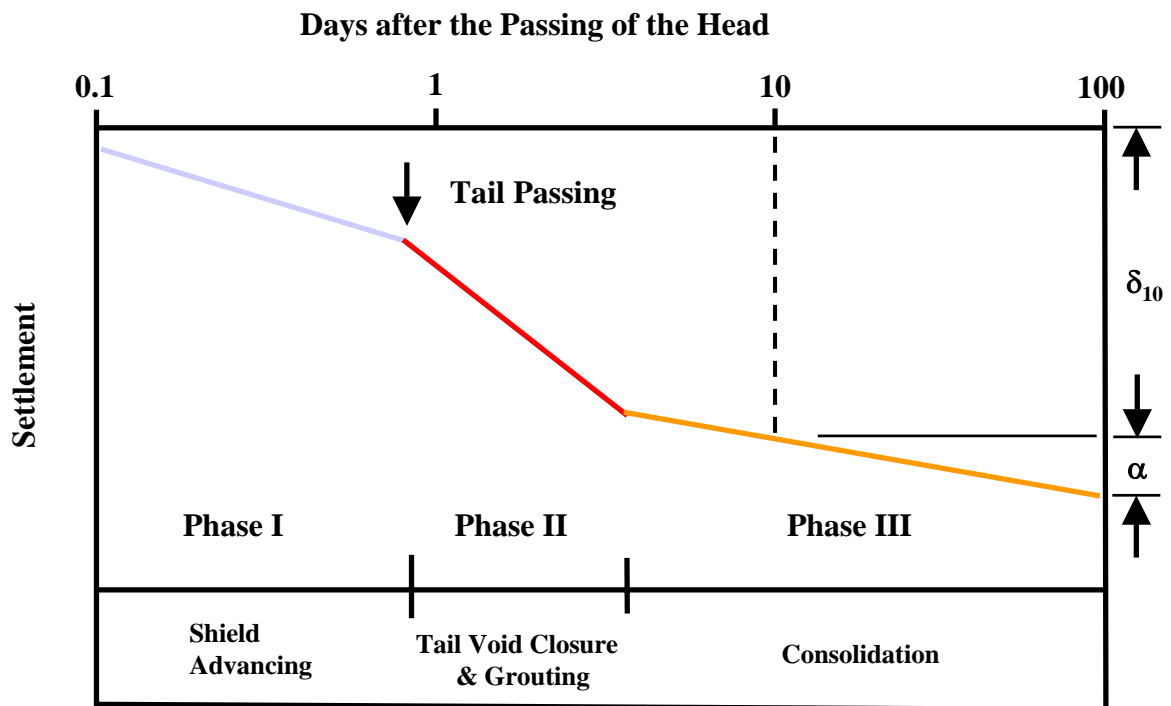
圖七 台北市區電子錐試驗結果



圖八 台北市區粘土層抗剪強度



圖九 理想化沉陷槽



圖十 潛盾隧道施工引致地表沉陷之歷時曲線

表一 各地質分區之土壤漏失率

地質分區	土壤漏失率 (%)					
	直線段			曲線段		
	斷面數	平均值	標準差	斷面數	平均值	標準差
T1	17	0.70	0.23	4	1.23	0.12
T2	21	0.64	0.54	11	1.42	0.51
TK2	3	0.70	0.35			
K1	34	0.66	0.55			
H1	6	0.76	0.17	3	0.41	0.04
YH	13	0.89	0.41			
B1	19	0.86	0.42	7	0.84	0.36
B2	62	0.63	0.45			
C	5	1.42	0.26	2	1.37	0.19
	180	0.71		27	1.13	

表二 各地質分區之壓密沉陷指數

地質分區	壓密沉陷指數 , mm					
	直線段			曲線段		
	斷面數	平均值	標準差	斷面數	平均值	標準差
T1	16	2.00	0.70	4	5.80	1.20
T2	21	5.40	2.70	11	6.10	1.50
TK2	4	5.50	0.90			
K1	44	8.90	4.30			
H1	6	5.20	2.00	3	3.00	0.80
YH	12	6.80	2.80			
B1	19	7.40	3.60	7	5.20	2.90
B2	74	5.10	2.80			
C	6	5.00	1.60	1	3.00	
	202	6.04		26	5.33	