

粘土層潛盾施工引致之地表沉陷  
**GROUND SETTLEMENTS  
DUE TO SHIELD TUNNELLING IN SOFT CLAY**

吳國安，莊復盛，王復國  
G. A. Wu, F. S. Chuang and F. G. Wang

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1025~1032頁

*Reprinted from Proceedings of 7th Conference on Current  
Research in Geotechnical Engineering  
Chinshan, Taiwan  
August 28~30, 1997, Vol. 2, pp.1025~1032*

# 粘土層潛盾施工引致之地表沉陷

吳國安

莊復盛 王復國

台北市政府捷運局東區工程處

亞新工程顧問公司

## 摘要

本文採用台北捷運南港線東端之地表沉陷觀測結果，探討潛盾隧道於台北盆地 K1 區軟弱粘土層中施工所引致之地表沉陷行爲。研究結果顯示，單一潛盾隧道於軟弱粘土層中施工所引致之土壤漏失率約 0.5% 至 2.0%，壓密沉陷指數約 4 至 14 mm，使得單一潛盾隧道施工引致之地表最終沉陷量達 20 至 50mm。本研究結果並顯示，因兩隧道相距夠遠，潛盾雙隧道於軟弱粘土層中施工所引致之地表沉陷，可由單一潛盾隧道施工所引致之地表沉陷槽預測值以疊加方法求得。另外由探討潛盾施工控制與地表沉陷之關係得知，地表沉陷隨土倉壓力增大而減小，但倉壓須控制在適當之範圍內，至於背填灌漿壓力與地表沉陷之關係則不明確，有待進一步研究。以往於 K1 區軟弱粘土層進行潛盾施工之案例極少，上述研究結果正可作為後續設計及施工工作之參考。

## 一、前言

依台北市政府捷運局之規劃，於台北都會區捷運系統初期路網中(含淡水、木柵、新店、南港、

中和及板橋線等六條路線)，除木柵線及淡水線，其餘主要規劃為地下段。地下段之施工方式主要採用挖覆蓋開挖工法及潛盾隧道工法。其中採用潛盾工法進行隧道施工時，最重要之考量即為妥善進行施工管理與控制，使鄰近區域地盤沉陷控制在容許範圍內，以確保結構物及公共管線之安全。有關潛盾施工所引致地盤沉陷，已有部份資料在國內外刊物發表(如 Hwang 等(1995) [1]、楊國榮等(1995) [2])，但多侷限於地層分佈以砂粘土互層交錯為主之 T2 區、T1 區及 H2 等區域。本文主要採用台北盆地 K1 區南港線東段 CN258 標地面型沉陷點量測資料，彙整潛盾隧道於軟弱粘土層施工引致之土壤漏失率與壓密沉陷指數，並探討二者與土倉壓力及背填灌漿壓力之關係，最後並藉由單隧道沉陷槽之疊加結果與實測之地表沉陷量比較，建立雙隧道潛盾施工所引致沉陷分佈之預估模式。

## 二、基地地層與地下水狀況

台北捷運南港線 CN258 標西起忠孝東路五段虎林街口，往東沿忠孝東路五段至永吉路口為止。其潛盾隧道由後山碑站(BL15 站)出發，往西沿忠孝

東路至 松山站(BL14 站)結束。南港線沿線之地層分佈狀況如圖 1 所示，於忠孝敦化站 (BL11 站，忠孝東路與敦化南路交會口)以東之地層屬於台北盆地之 K1 區，地表下主要由深厚之粘土層及其下方之景美礫石層組成。CN258 標位於南港線東段，所在位置之地層屬於台北盆地 K1 區，其地層分佈與土壤性質詳表 1 所示。本施工標潛盾施工影響範圍內(深度約 18m)之地層其 SPT N 值介於 1 至 4 之間，且自然含水量與液性限度接近，屬於極軟弱至軟弱之粉質粘土層。

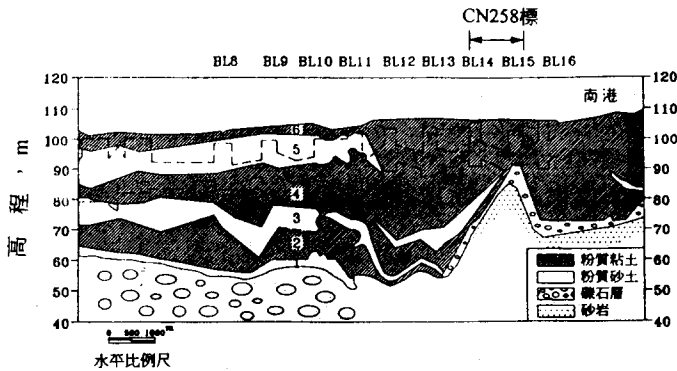


圖 1 南港線沿線地層分佈狀況

表 1 CN258標地層分佈與土層性質

層別	地層種類	深度 (m)	土壤單位重 (kn/m <sup>3</sup> )	N 值	Su (kpa)
1	CL	8	18.5	3	40
2	CL	13~22	18.5	3	60
3	SM	15~22	19.5	15	-
4	SP/GM	18~25	20.0	>100	-
5	SS/SH	20~	22.0	>100	-

本區之淺層地下水位約位於地表下 2m，地表下 17m 以上接近靜態水壓分佈，地表下 17m 以下至景美礫石層之地下水壓則呈非靜態分佈，低於靜態水壓約 2 至 6 t/m<sup>2</sup>。

### 三、潛盾施工引致地表沉陷之特性

根據 Hwang 等人(1995)[1] 指出採用土壓平衡式潛盾機進行隧道施工引致之地盤垂直變位大致可分為 3 個階段，包括

1. 盾首到達時：由於盾首面板對前方土壤之推擠造成地盤隆起，隨後則因掘削作業引致地盤沉陷。
2. 盾尾閉合：尾隙閉合時引致地盤沉陷。
3. 長期壓密沉陷：因潛盾施工激發之超額孔隙水壓消散後引致壓密沉陷。

如上所述潛盾隧道施工所導致之地表沉陷主要包括因盾首掘削及盾尾空隙閉合所導致之立即沉陷與因超額孔隙水壓消散所產生之壓密沉陷二種。此二種沉陷發生之時間重疊，故其分界點無法明確區分。一般對於上述沉陷量之分析與預估皆採用 Peck (1969)[3]之沉陷槽觀念，以沉陷槽面積與隧道斷面積之比作為指標，一般稱為土壤漏失率，但此土壤漏失率是否包括壓密沉陷則不明確。沉陷槽上各點之沉陷量可以下列所示之正常化曲線方程式進行推估

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

式中

- δ 為地表沉陷量, m
- v 為土壤漏失率, %
- A 為隧道斷面積, m<sup>2</sup>
- x 為距隧道中心水平距離, m
- i 為隧道中心至反曲點水平距離, m

i 值可採用 Clough & Schmidt (1981) [4]建議之公式計算：

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

式中

- Z 為隧道中心至地表深度, m
- D 為隧道直徑, m

為從沉陷歷時曲線上明確區分上述立即沉陷與壓密沉陷，可採用 Hwang 等人(1995)[1]之建議，以潛盾機盾首通過後第 10 天之沉陷量定義為因盾尾空隙閉合所導致之立即沉陷，後續發生之沉陷則為

壓密沉陷，如圖 2 所示。其中因盾尾空隙閉合所導致之沉陷量  $\delta_{10}$  可採用 Peck [3] 所建議之經驗公式 (1) 據以推算土壤漏失率，並以  $V_{10}$  表示。壓密沉陷則依下式求得

$$\zeta = \alpha * \log(t/10) \dots\dots (3)$$

式中

$\zeta$  為壓密沉陷量, mm

$\alpha$  為第 100 天與第 10 天沉陷量之差值, 稱為  
壓密沉陷指數, mm

$t$  為潛盾機盾首通過後之時間, 天

通常假設潛盾機盾首通過 1 年後沉陷量達到平穩狀態，則總沉陷量為

$$\delta_t = \delta_{10} + 1.56\alpha \dots\dots\dots (4)$$

式中

$\delta_t$  為總沉陷量, mm

$\delta_{10}$  為潛盾機盾首通過後第 10 天之沉陷量, mm

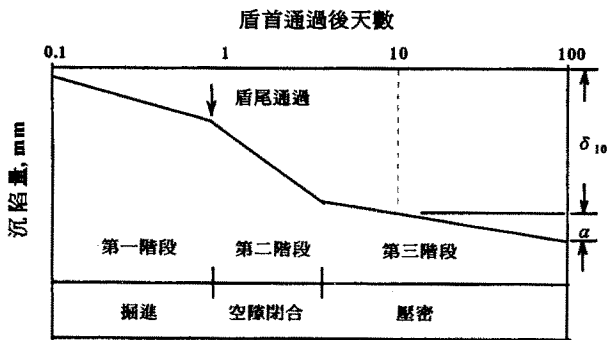


圖 2 潛盾隧道施工引致地表沉陷之歷時曲線

#### 四、潛盾隧道施工概要

CN258 標潛盾隧道分為上行及下行隧道，長度分別為 574m 與 561m，隧道環片外徑為 5.9m，厚 0.25m，寬 1.0m。上行及下行隧道自出發至到達大致呈平行配置，隧道中心深度由發進端之地表下 14.8m 漸昇至到達端之地表下 11.1m 左右，鑽掘經過之地層絕大部份為軟弱粘土層。本標承包商採用 2 部土壓平衡式潛盾機進行施工，潛盾機直徑為

6.04m，切刀 (Cutter) 為輪幅式 (Spoke)。於上行隧道發進 35 日並掘進完成 50 環後即使用第二部潛盾機開始進行下行隧道之掘進施工，施工採二班制，每日工作 24 小時，鑽掘進度約每日 6 至 8 環。承商於施工期間同時配合監測儀器之量測結果及原設定之土倉壓力管理值，據以調整掘進速度與出土量，以免引致過量之沉陷。為量測盾首土倉室之土壓力，承商於潛盾機土倉內面板及運土螺旋機各裝設一土壓計，其位置約位於潛盾機之中心軸。由掘進時土壓計之讀值顯示，上行隧道施工時之土倉壓力約為 140kPa 至 340kPa，下行隧道施工時之土倉壓力則約為 140kPa 至 460kPa。隨著潛盾機之掘進，承商並於盾尾環片四周適時實施背填灌漿，每環之灌漿量約為 1.0m<sup>3</sup> 至 4.7m<sup>3</sup>，使其填塞盾殼與環片間之空隙，藉以減少因盾尾閉合時引致之地表沉陷。有關本施工標之潛盾隧道推進示意圖如圖 3 所示。

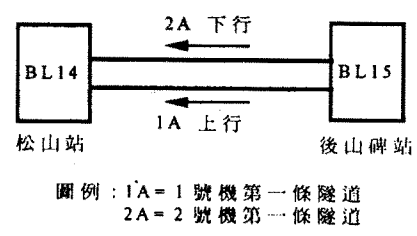


圖 3 CN258 標潛盾隧道推進示意圖

#### 五、監測資料之分析與討論

本文採用 CN258 標裝設於潛盾隧道上方地面型沉陷點之量測結果，藉以了解單隧道於粘性土層中施工引致之地表沉陷大小及分佈，並進而探討施工控制與地表沉陷之關係，最後引用雙隧道施工時地表沉陷之分佈與預測值進行比對，以求得雙隧道潛盾施工時地表沉陷分佈之預估方法，茲分述如下。

## 5.1 單隧道引致之地表沉陷

有關單隧道施工引致之地表沉陷，可藉由兩方面進行探討：(1)隧道中心線之地表沉陷量，及(2)地表沉陷槽之分佈。對於監測資料之整理步驟，須先推算土壤漏失率與壓密沉陷指數。首先將隧道中心線上地面型沉陷點之沉陷歷時曲線以如圖 2 所示之半對數方式表示，求得盾尾空隙閉合所引致之沉陷量  $\delta_{10}$  及壓密沉陷指數  $\alpha$ ，再藉由  $\delta_{10}$  引用公式(2) 所求出之  $i$  值，則可求得因盾尾空隙閉合所引致之土壤漏失率  $V$ ，計算結果詳表 2 所示。由表 2 之結

果顯示土壤漏失率為 0.5%至 2.0%，數值分散之範圍頗大，可能和施工控制等因素有關，容後再進行討論。另壓密沉陷指數之大小介於 4 至 14mm 之間，半數以上超過 10mm，此結果約為 T2 區新店線 CH218 標量測結果(楊國榮(1995) [2])之 2 倍，研判可能因本施工標隧道上方覆蓋之粘土層厚度較大，使得壓密沉陷所佔之比例較大所致。由表 2 中之下行隧道實測單隧道最終沉陷量與預估值之比較，得知以土壤漏失率  $V$  與壓密沉陷指數  $\alpha$  預測單隧道最終沉陷量，可得到合理之結果。

表 2 CN258標隧道中心線地面沉陷點量測結果

隧道別	沉陷點編號	環片數	隧道中心深度 (m)	土倉壓力 (kPa)	背填灌漿壓力 (kPa)	$\delta_{10}$ (mm)	土壤漏失率 (%)	壓密沉陷指數 (mm)	預估單隧道最終沉陷量 (mm)	實測單隧道最終沉陷量 (mm)
上行 隧道 1A	SM137	153	14.02	163	210	37	2.01	10	53	--
	SM117	212	13.51	163	264	26	1.36	12	45	--
	SM110	241	13.33	191	280	22	1.13	10	38	--
	SM101	271	13.04	231	212	26	1.30	10	41	--
	SM84	330	12.41	142	287	39	1.91	9	53	--
	SM74	346	12.38	145	252	25	1.22	8	37	--
	SM62	360	12.32	142	220	25	1.22	8	37	--
	SM57	388	12.19	141	202	40	1.93	7	51	--
	SM52	419	11.92	175	298	20	0.95	11	37	--
	SM47	448	11.74	178	236	17	0.80	4	23	--
SM41	478	11.43	150	326	10	0.46	10	26	--	
下行 隧道 2A	SM164	64	14.84	271	191	16	0.88	14	37	38
	SM142	122	14.30	456	282	27	1.48	11	44	41
	SM135	151	14.02	436	259	27	1.43	11	44	41
	SM123	179	13.75	333	258	26	1.36	12	44	42
	SM115	209	13.51	319	259	17	0.89	10	33	31
	SM108	238	13.33	320	264	21	1.08	12	40	37
	SM99	267	13.04	343	283	27	1.37	12	46	42
	SM82	325	12.41	164	262	24	1.17	13	44	42
	SM70	341	12.38	170	279	36	1.75	4	42	40
	SM60	354	12.32	161	281	16	0.78	11	33	30
	SM55	382	12.19	175	299	20	0.96	11	37	34
	SM50	413	11.92	159	292	29	1.37	12	48	44
	SM45	441	11.74	173	259	25	1.17	11	42	38
SM39	470	11.43	145	275	44	2.01	5	52	51	
SM13	541	11.16	157	340	10	0.45	7	21	22	

註:1.實測單隧道最終沉陷量為上行(或下行)隧道通過360天之量測結果。

2.上行隧道掘進35天後，下行隧道即開始掘進，故上行隧道單獨引致之最終沉陷量無法求得。

另為驗證表 2 所列之土壤漏失率於推估沉陷槽之代表性，本文另選擇上行隧道數個斷面實際量測結果與以表 2 所列土壤漏失率推估所得之沉陷槽進行比較，由圖 4(a)至圖 4(d)之比較結果顯示，採用表 2 之 V 值推估所之沉陷槽與實測值十分吻合。

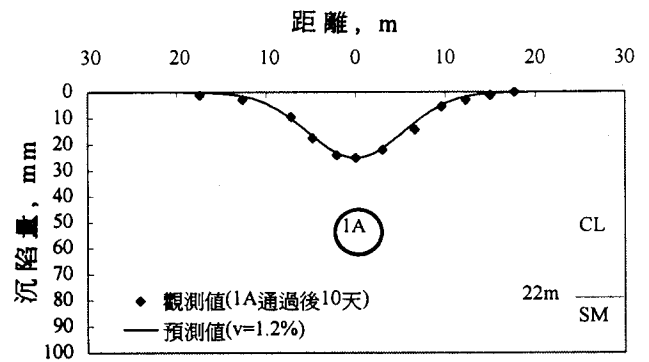


圖 4(d) CN258 標預估沉陷槽與實測值比較結果

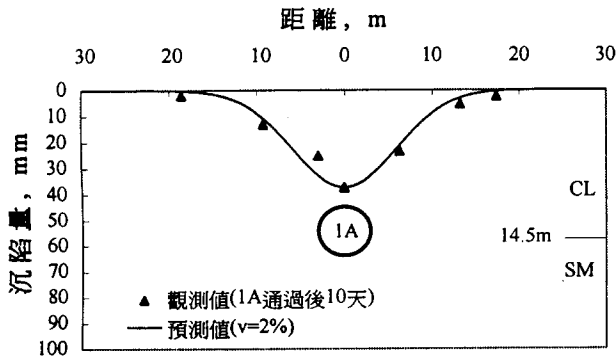


圖 4(a) CN258 標預估沉陷槽與實測值比較結果

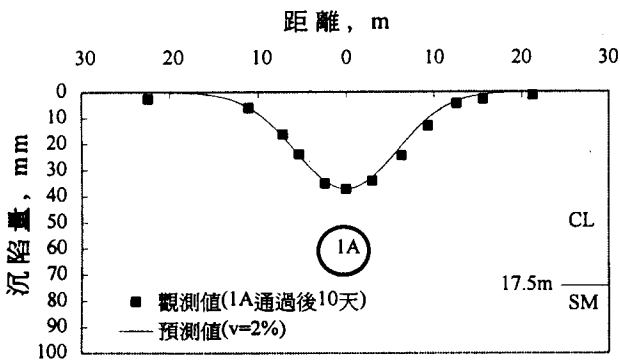


圖 4(b) CN258 標預估沉陷槽與實測值比較結果

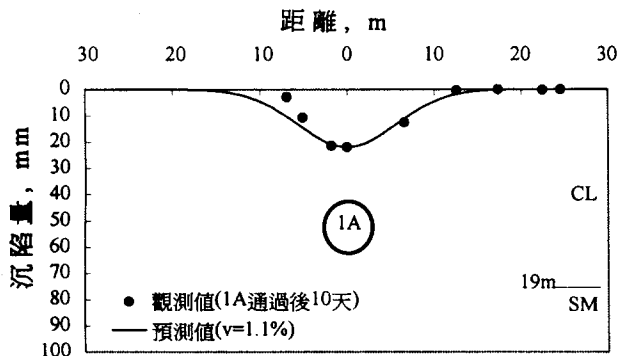


圖 4(c) CN258 標預估沉陷槽與實測值比較結果

## 5.2 施工控制與地盤沉陷之關係

有關潛盾隧道施工控制與地表沉陷間之關係，可由盾首到達時土倉壓力之控制，及盾尾空隙閉合時背填灌漿之控制等兩個施工階段分別探討，茲說明如下。

1. 土倉壓力控制與地表沉陷之關係：潛盾機掘進時通常藉由掌控土倉壓力、出土量及推進速率，以維持開挖面之穩定，而土倉壓力為此階段施工控制之樞紐。探討土倉壓力與地表沉陷之關係，應將潛盾機所在深度之影響納入考量，本文引用楊國榮等(1995) [2]之建議，以土倉壓力係數  $\beta$  表示， $\beta$  值之計算如下：

$$\beta = \frac{p - u}{\gamma H - u} \dots\dots(5)$$

式中

$\beta$  為土倉壓力係數

$p$  為土倉壓力,  $t/m^2$

$\gamma$  為土壤總單位重,  $t/m^2$

$H$  為潛盾機土壓計對應之深度,  $m$

$u$  為潛盾機土壓計對應深度之水壓力,  $t/m^2$

本施工標之土壤漏失率與土倉壓力係數之關係詳圖 5 所示。由圖 5 顯示土壤漏失率隨土倉壓力之增大而減小，其中以土倉壓力略大於靜止土壓時（靜止土壓係以  $\gamma = 18.5 \text{ kn}/m^2$ ， $K_0 = 0.5$  計算）土壤漏失率最小(如圖中b區)，但過大之土倉壓力則可

能因軟弱粘土受到過度擾動，使得土壤漏失率增大(如圖中c區)。圖6為土壤漏失率隨深度變化之關係圖，圖中顯示上行及下行隧道之土壤漏失率均未隨深度而呈明顯之變化情形，可能因土倉壓力之影響大過隧道中心深度之效應所致。

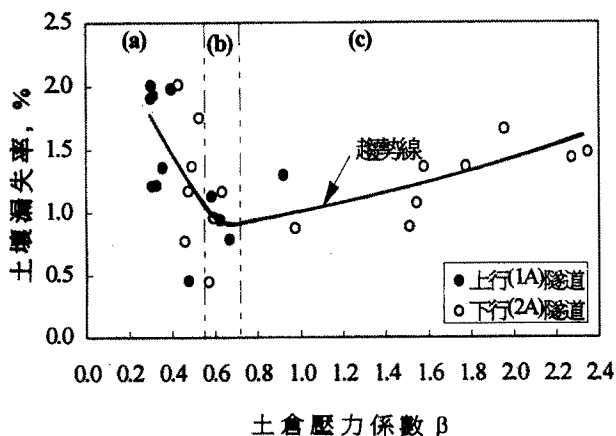


圖 5 土壤漏失率與土倉壓力係數之關係

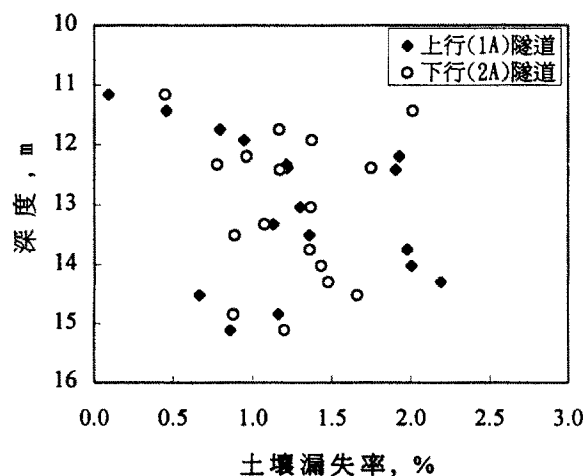


圖 6 土壤漏失率隨隧道中心深度之變化

圖 7 為壓密沉陷指數與土倉壓力係數之關係圖。由圖 7 中之資料，以圖中之(b)區與(c)區比較，土倉壓力係數於 0.7 以上時，壓密沉陷指數均達 10mm 以上，顯示土倉壓力過大時將引致較大之壓密沉陷。

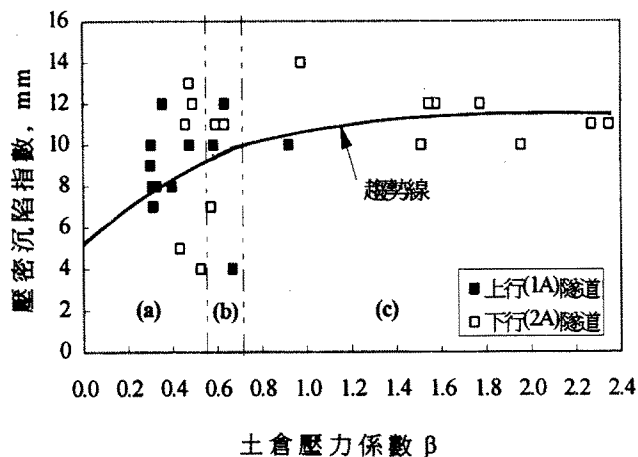


圖 7 壓密沉陷指數與土倉壓力係數之關係

2.背填灌漿控制與地表沉陷之關係：盾尾空隙閉合時背填灌漿之注入灌漿量、灌漿時機及灌漿壓力，均與地表沉陷有關。因本隧道上方為自立性較佳之粘性土層，且於環片離開盾尾時即施行背填灌漿，故注入量及灌漿時機對沉陷量變化之影響可略而不計。圖8及圖9為土壤漏失率及壓密沉陷指數與背填灌漿壓力之關係。由圖中顯示土壤漏失率及壓密沉陷指數均未隨背填灌漿壓力變化而呈現明顯之變化趨勢，可能因施工時採用之背填灌漿壓力為2至4 kg/cm<sup>2</sup>，並未特別採用較低或較高之灌漿壓力，以致未能突顯背填灌漿壓力之效應。

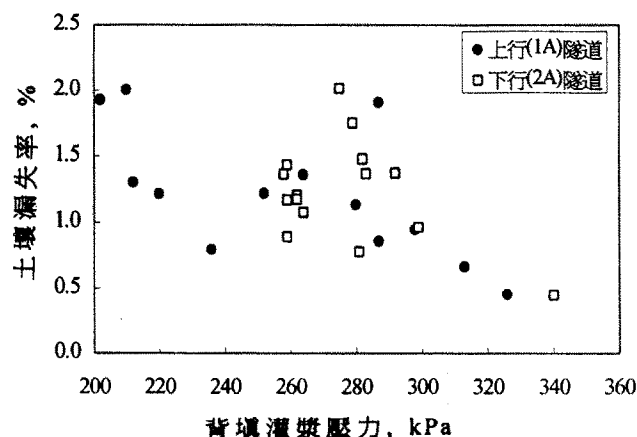


圖 8 土壤漏失率與背填灌漿壓力之關係

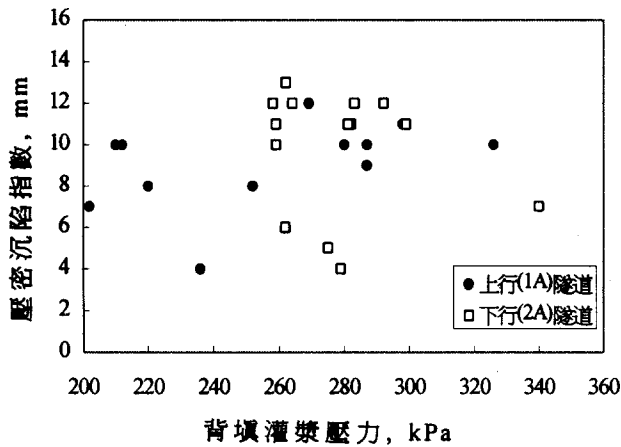


圖 9 壓密沉陷指數與背填灌漿壓力之關係

### 5.3 雙隧道引致之地表沉陷

如前所述，PECK 所建議之經驗公式可用於推估潛盾單隧道引致之地表沉陷槽，惟就設計實務之考量需著眼於潛盾雙隧道所引致之地表沉陷分佈，且須將壓密沉陷考慮在內。基本上因土壤漏失率與壓密沉陷發生之機制不同，理論上不應混為一談，但就實務之觀點，本文將總沉陷量包含壓密沉陷在內，以土壤漏失率之方式表示，以便建立一簡化之預測模式。本文採擇 2 個代表性之潛盾雙隧道斷面進行探討，隧道相關資料詳表 3 所示。由圖 10(a)及圖 10(b)之預測值與實測值之比較結果顯示，潛盾雙隧道施工所引致之地表沉陷與單隧道施工所引致地表沉陷槽預測值疊加結果十分吻合。

表3 潛盾雙隧道施工資料

環片數 (1A)	第一條隧道(1A)			第二條隧道(2A)		
	隧道通過 時間 (月/日/年)	土倉 壓力 (kpa)	背填灌漿 壓力 (kpa)	隧道通過 時間 (月/日/年)	土倉 壓力 (kpa)	背填灌漿 壓力 (kpa)
241	11/8/95	191	280	11/25/95	320	264
271	11/11/95	231	212	11/27/95	343	283

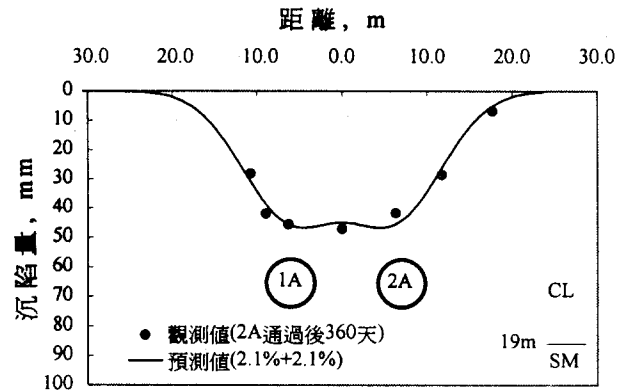


圖 10(a) 潛盾雙隧道預估沉陷槽與實測值之比較

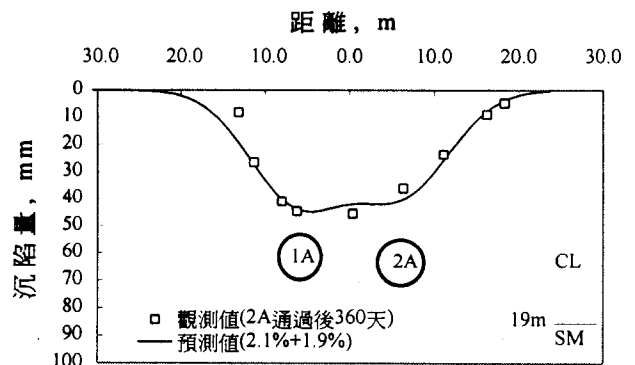


圖 10(b) 潛盾雙隧道預估沉陷槽與實測值之比較

## 六、結論

本文根據台北結運南港線 CN258 標採用土壓平衡式潛盾機於軟弱粘土層進行隧道施工之經驗，歸納獲得以下幾點結論：

1. 於軟弱粘土層中之潛盾隧道施工引致之地表沉陷可依據 Hwang等[1]之建議，由沉陷歷時曲線上加以區分為盾尾空隙閉合時之立即沉陷及超額孔隙水壓消散所產生之壓密沉陷。二者可分別採用 PECK[3]所建議之公式(1)與 Hwang等[1]建議之公式(3)求得。
2. 於K1區地層中進行潛盾隧道施工，隧道上方覆蓋之軟弱粘土達10至12m，其引致之土壤漏失率約為0.5%至2.0%，壓密沉陷指數約 4 至 14 mm之

間，其中壓密沉陷指數約為台北盆地T2區類似施工條件案例之2倍。

3. 土壤漏失率及壓密沉陷指數並未隨隧道深度之變化而呈現明顯之變化趨勢。土壤漏失率隨土倉壓力之增大而減小，但土倉壓力過大則土壤漏失率有隨之增大之趨勢，由監測資料顯示土倉壓力係數介於0.5至0.7時土壤漏失率最低。另外，在粘土層中採用過大之土倉壓力亦引致較大之壓密沉陷。總之加大土倉壓力可減小地表沉陷，但應控制在比靜止土壓略大之範圍內。
4. 土壤漏失率及壓密沉陷指數並未因背填灌漿壓力之大小而有明顯之差異，可能因施工時採用之背填灌漿壓力為2至4 kg/cm<sup>2</sup>，並特別採用較低或較高之灌漿壓力，以致未能突顯背填灌漿壓力之效應。
5. 因兩隧道相距夠遠，故於軟弱粘土中進行潛盾雙隧道施工引致之地表沉陷，可藉由單隧道施工所引致地表沉陷槽預測值以疊加方法推估。

### 參考文獻

- [1] 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.*
- [2] 楊國榮、王勝男、范陳柏(1995), "潛盾隧道施工所導致地表沉陷", 第六屆大地工程學術研究討論會, 第1083 -1090頁, 阿里山。
- [3] 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.*

- [4] Clough, W. and Schmidt, B. (1981), "Design and Performance of Excavations and Tunnel in Soft Clay", *Soft Clay Engineering, Elsevier Amsterdam.*

### 誌謝

本文於撰寫期間承蒙亞新工程顧問公司莫若楫博士與黃南輝博士等人提供寶貴意見，謹致謝忱。

### GROUND SETTLEMENTS DUE TO SHIELD TUNNELLING IN SOFT CLAY

G.A. WU  
EDPO, DORTS  
Taipei

F.S. ZHUANG F.G. WANG  
Moh & Associates, Inc.  
Taipei

### ABSTRACT

This paper utilizes the ground settlement data collected from the NangKang Line of the Taipei Rapid Transit Systems to study the settlement behavior due to shield tunnelling in soft clay in the K1 zone of the Taipei Basin. The results indicate that ground loss due to single tunnelling is about 0.5% to 2.0% with consolidation settlement indices varying from 4 to 14mm, the final ground settlements reached 20 to 50mm. When the distance between twin tunnels is far enough, the ground settlements caused by twin tunnels can be estimated by superimposing the settlement troughs of the two tunnels. In addition, the results also show that ground loss decreases as pressure in the earth chamber increases. Therefore, chamber pressure should be controlled in an appropriate range. The relationship between backfill grouting pressure and the ground settlements is not clear and has to be further studied. Since there is little experience of shield tunnelling in soft clay in the K1 zone, this study will provide useful information for the future design and construction.