

潛盾隧道施工所導致之地表沈陷  
**GROUND SETTLEMENTS  
DUE TO SHIELD TUNNELLING**

楊國榮，王勝男，范陳柏  
G. R. Yang, S. N. Wang and C. B. Fan

原著載於第六屆大地工程學術研究討論會論文集  
1995年8月18~20日, 第1083~1090頁

*Reprinted from Proceedings of the 6th Conference on Current  
Researches in Geotechnical Engineering in Taiwan  
August 18-20, 1995, pp.1083~1090*

## 潛盾隧道施工所導致之地表沈陷

楊國榮 王勝男

范陳柏

亞新工程顧問公司

台北市捷運局

### 摘要

本文採用台北捷運系統新店線兩個地區沉陷觀測結果，探討潛盾隧道於台北盆地T2區松山層第四與第五次層及H2區上部礫石層內施工所導致地表沉陷行為。研究指出潛盾隧道施工所導致土壤漏失率與壓密沉陷指數T2區較H2區為大。其中土壤漏失率於T2區隨土倉壓力係數增加而減少，於H2區則因礫石大小分佈不均導致面板受力呈現極大差異，而難以建立與土倉壓力係數之關係。至於壓密沉陷指數，不論於T2或H2區，其值並不因土倉壓力係數改變而呈現太大差異，但隨距隧道中心水平距離增加而遞減。研究亦指出雙潛盾隧道施工所導致之地表沉陷可由單潛盾隧道施工所導致之沉陷槽疊加而得。

### 一、前言

台北市近年來因都市快速發展與實際之需要而開始著手興建捷運系統，依捷運局之規劃台北都會區捷運系統之初期路網包括木柵、淡水、南港、新店、中和與板橋等六線，位置詳圖1。上述規劃之路網包括地面段、高架段與地下段。於人煙稠密之市區內除木柵線規劃為高架段外其餘皆規劃為地下段，地下段之施工方式主要採用明挖覆蓋工法、潛盾隧道工法與新奧工法進行施工。其中潛盾隧道工法因其施工安全快速且對地面交通之衝擊較小，故

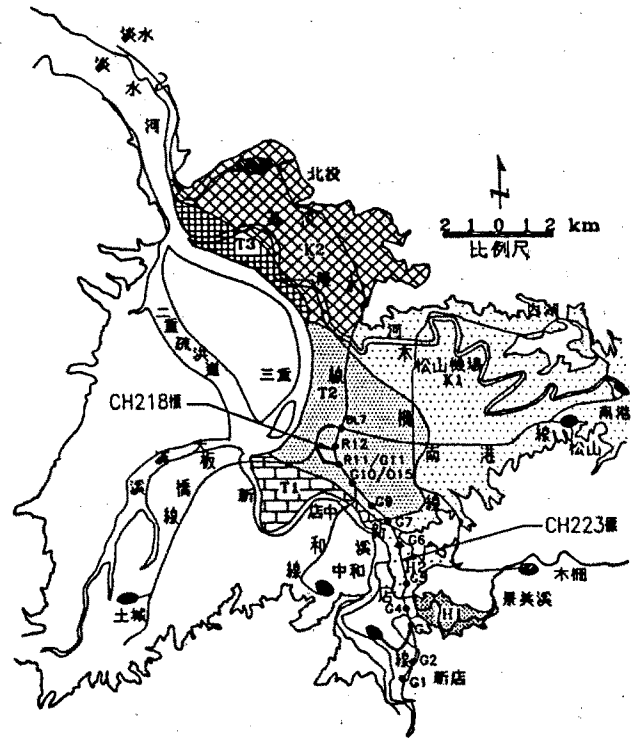


圖1 台北捷運系統初期路網配置

被廣泛使用於台北捷運系統地下段之施工。採用潛盾隧道工法施作時，最重要之考量則需於施工進行當中妥善控制地表沉陷在容許範圍內，以確保位於潛盾隧道上方結構物與管線之安全。本文主要採用新店線CH218標與CH223標地面型沉陷點監測結果，統計出預估潛盾隧道施工所導致地表沉陷之土壤漏失率與壓密沉陷指數，由此統計之參數探討其與土倉壓力及土

種類之關係，並用此統計參數所預測之沉陷槽瞭解雙潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行為。

## 二、基地位置

台北捷運新店線由位於台北市公園路與常德街交口，新公園旁之新公園車站，往南沿公園路、羅斯福路、新店北新路至新店碧潭橋附近之新店車站。於新店北新路與中正路交口處，新店線分一支線至新店機廠。新店線全線共分12個施工標，包括11個車站、1座機廠，其餘則為隧道，平面位置如圖1所示。CH218標位於新店線最北方，該施工標之潛盾隧道由新公園車站 (R12) 出發，經過公園路、弘道國中、師院附小至羅斯福路、愛國西路、中山南路交口處與CH219標之中正紀念堂車站 (G11) 相接，隧道全線45%區域通過建物下方，其餘則於道路下方施工。CH223標則位於新店線中間偏南部份，該施工標之潛盾隧道由興隆路與羅斯福路交口附近之萬隆車站 (G06) 至景美分局附近之景美車站 (G05)，其間並有一明挖覆蓋隧道，本標之潛盾隧道主要於羅斯福路正下方施工。

## 三、基地地層與地下水狀況

新店線沿線之地層分佈狀況如圖2所

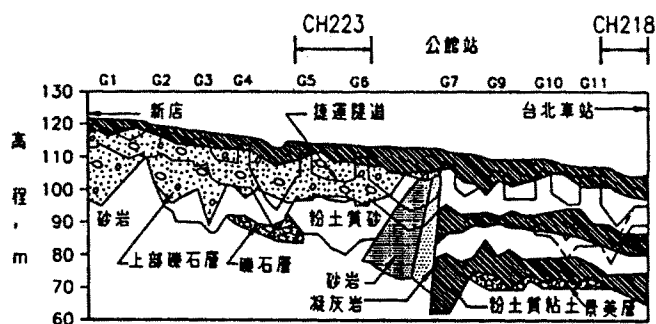


圖2 新店線沿線地層分佈狀況

示，於公館站 (G07) 以北地表下為層次分明之松山六次層，其下即為景美層。公館站以南為由砂岩與凝灰岩所組成之蟾蜍山，位於蟾蜍山以南之地層則完全不同於G07車站以北之地層，於地表下數公尺即

出現上部礫石層，其下方為夾有粉土質黏土層之砂土層，砂土層下方則為景美層，於新店線之最南端，上部礫石層下方即為砂岩層。

新店線沿線之地下水位狀況，於蟾蜍山以北因1950至1970年代於景美層長期抽取地下水，導致地下水位下降，而呈非靜態之分佈。自1970年代起政府禁止抽取地下水後，地下水位開始回升，其水壓分佈與回升狀況如圖3所示。於蟾蜍山以

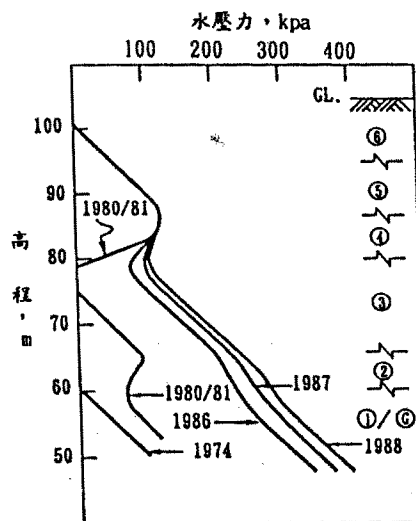


圖3 台北盆地水壓分佈狀況

南之景美地區，因淺層礫石層下方之砂層內存在不透水層，故水壓亦呈非靜態分佈，至新店地區因此不透水層消失，水位則呈靜態分佈。

CH218標位於新店線北方，所在位置之地層為台北盆地T2區，地層分佈與工程特性詳表1，水位呈非靜態分佈，第2

表1 CH218標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)
1	CL	7	18.7	3±2	30-50
2	SM	11	19.7	11±5	-
3	CL	7	19.0	8±3	60-80
4	SM	5	19.7	20±5	-

層 (即松五層) 之水位位於地表下4m左右，第4層 (即松三層) 之水位則位於地表下10m左右。CH223標位於新店線中間偏南部份，所在位置之地層為台北盆地

H2區，地層分佈與工程特性詳表2，水位則位於地表下9.5m左右。

表2 CH223標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)
1	SM/CL	4	20	5±2	20
2	GM/GW	9	23	40±10	-
3	SM	20	22	13±2	-

#### 四、潛盾隧道施工所導致地表沉陷行為

採用土壓平衡式潛盾機進行隧道施工時，因施工所導致之地表沉陷主要包括因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。傳統上上述沉陷量之分析與預估皆採用Peck【3】之沉陷槽觀念，並以沉陷槽面積與隧道斷面積之比值，俗稱土壤漏失率作為指標，其沉陷槽上各點之沉陷量可以下列所示之正常曲線方程式而求得

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

式中

$\delta$  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【1】之建議式計算

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

式中

$Z$  為隧道中心至地表深度, m

$D$  為隧道直徑, m

但此土壤漏失率是否包括壓密沉陷則不明確。為從沉陷歷時曲線上明確區分上述二種沉陷，可依黃南輝等【2】之建議，將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4所

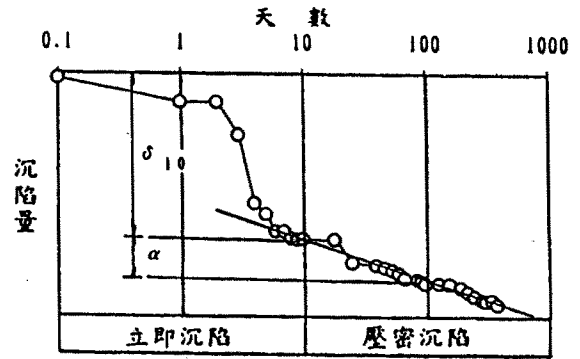


圖4 潛盾隧道施工所導致地表沉陷歷時曲線

示。上述二種沉陷之成因與行為並不相同，必需採用不同方法表示。其中因盾尾空隙閉合所導致之沉陷量可用Peck【3】所建議之土壤漏失率表示，並採用公式(1)計算其沉陷槽。壓密沉陷則依下式求得

$$\xi = \alpha \log(t/10) \quad (3)$$

式中

$\xi$  為壓密沉陷量, mm

$\alpha$  為第100天與第10天沉陷量之差值, 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年後沉陷量終止，則總沉陷量為

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

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

#### 五、潛盾隧道施工狀況

##### CH218標

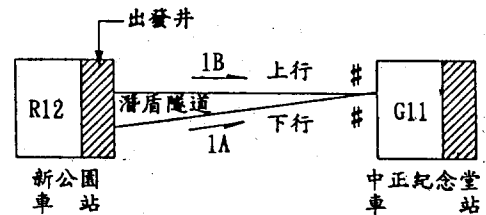
CH218標潛盾隧道內徑為5.4m，環片厚0.25m，寬1m，分上下行二條，各長約635m與654m，隧道出發時大致呈平行配置，於到達CH219標G11車站時隧道為上下重疊。隧道中心鑽掘深度下行隧道由地

表下12m至24m左右，上行隧道則由地表下11m至20m左右，鑽掘之地層經過松山第三、第四與第五次層。隧道全線45%區域通過建物下方，其餘則於道路下方施工。承商於本施工標採用直徑6.05m之土壓平衡式潛盾機進行施工，待完成下行隧道施工後即進行上行隧道施工，施工採二班制，每日工作24小時，鑽掘進度約每日9環至10環。鑽掘期間並於潛盾機前方與四周採用加泥與氣泡方式處理，以利施工時出土並減少潛盾機盾殼與四周地層之摩擦阻力，於施工期間隨鑽掘之進行並於環片四周實施背填灌漿，其每環之灌漿量約為 $1.4\text{m}^3$ 至 $2.1\text{m}^3$ ，藉此達到減少地表沉陷之目的。承商同時由潛盾隧道施工期間監測儀器之量測結果，隨時調整潛盾機鑽掘速度與出土量，由裝設於潛盾機面板上之土壓計顯示，下行隧道施工時之土倉壓力約為160kpa至340kpa，上行隧道施工時之土倉壓力則約為180kpa至340kpa。為達到建物保護之目的，承商於潛盾機通過建物下方時，由隧道內施作二次灌漿。

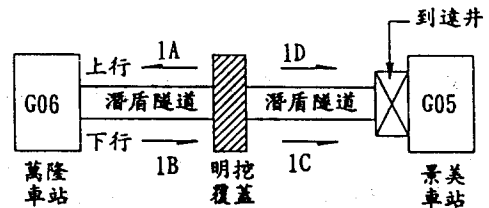
### CH223標

CH223標潛盾隧道內徑為5.4m，環片厚0.25m，寬0.9m，分上下行二條，各長約673m與665m，其間有一明挖覆蓋隧道將其切割成四條隧道，隧道呈平行配置。隧道中心鑽掘深度由地表下11m至14m左右，鑽掘之地層90%為上部礫石層，其餘則為砂層，主要於道路下方施作。承商於本施工標係採用直徑6.04m土壓平衡式潛盾機進行施工，先行施作明挖覆蓋至G06車站之隧道，再行施作明挖覆蓋至G05車站之隧道，施工採二班制，每日工作24小時，隧道之鑽掘進度約每日3環至8環。鑽掘期間於潛盾機前方採用注泥方式處理以利潛盾機施工出土，並於施工期間隨鑽掘之進行於環片四周實施背填灌漿，其每環之灌漿量約為 $1.8\text{m}^3$ 至 $3\text{m}^3$ ，藉此達到減少地表沉陷之目的。由設於潛盾機面板上之土壓計顯示，土倉壓力於施作期間呈現相當大變化，介於50kpa至350kpa之間。

上述二個施工標潛盾隧道推進示意圖如圖5所示。



(a) CH218標



(b) CH223標

圖例：1A = 1號機第一條隧道  
# 棄殼

圖5 CH218標與CH223標潛盾隧道推進示意圖

## 六、監測資料整理與參數決定

### CH218標

本施工標係採用裝設於隧道中心線上之地面型沉陷點作為研究對象，其中已將受建物保護灌漿影響之點位去除，但所採用之沉陷點程度上多少會受諸如地面車輛、地下水位升降等外在因素之影響，這些影響因子亦借由施工範圍以外之沉陷點量測結果加以修正。進行資料整理時，先將地面型沉陷點之沉陷歷時曲線以如圖4所示之半對數表示，由此沉陷歷時曲線求出盾尾空隙閉合所導致之沉陷量 $\delta_{10}$ 與壓密沉陷指數 $\alpha$ 。再借由 $\delta_{10}$ 與公式(2)求出之*i*值，求得因盾尾空隙閉合所導致之土壤漏失率*v*，其結果示於表3。

為驗證表3所列*v*與 $\alpha$ 值之代表性，將施工標內數個斷面之實際量測結果與推估之沉陷槽相比較，其中計算推估沉陷槽所採用之土壤漏失率為1.6%至2%，壓密沉陷指數則為5mm。由圖6之比較結果得知，採用表列*v*與 $\alpha$ 值所預測之沉陷槽與實測值相當吻合。

表3 CH218標隧道中心線地面型沉陷點量測結果

沉陷點編號	位置	環片數	隧道中心至地表之深度 (m)	土倉壓力 (kpa)	$\delta_{10}$ (mm)	$\alpha$ (mm)	$v$ (%)
SM33	下行隧道	136	16.4	185	29	4.9	1.7
SM34		168	17.3	205	31	4.1	1.9
SM35		199	18.2	215	31	3.8	2.0
SM112		203	18.2	215	29	4.6	1.8
SM121		208	19.1	215	28	6.0	1.8
SM130	1A	213	18.7	215	26	4.9	1.7
SM139		218	18.7	215	24	5.1	1.6
SM36		220	18.6	215	26	4.5	1.7
SM148		223	18.8	235	24	5.7	1.6
SM215	上行隧道	56	13.9	215	30	3.3	1.5
SM216		61	14.0	215	27	3.8	1.4
SM217		68	14.3	215	29	4.3	1.5
SM28		69	14.3	215	26	4.1	1.4
SM218		71	14.4	215	25	5.4	1.3
SM219	上行隧道	75	14.6	215	24	6	1.3
SM27		92	15.2	215	29	4.3	1.6
SM25		170	17.2	215	25	5.2	1.5
SM220		180	17.5	250	24	6	1.5
SM221	1B	190	17.8	275	28	5.7	1.7
SM222		195	18.0	275	24	4.6	1.5
SM223		201	18.1	280	26	4.3	1.6
SM24		206	18.3	275	26	4.9	1.7
SM224		214	18.9	280	21	4	1.4

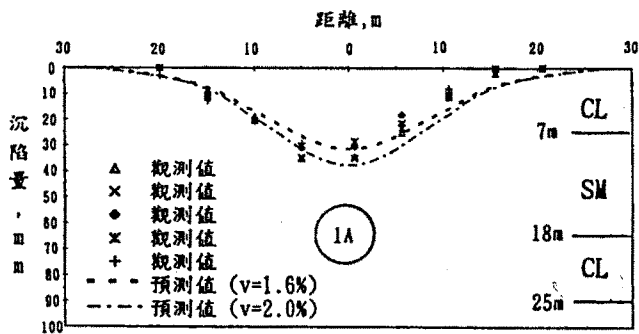


圖6 CH218標預估沉陷槽與實測值比較結果 (潛盾隧道通過後200日)

### CH223標

本施工標亦採用裝設於隧道中心線之地面型沉陷點作為研究對象，資料處理方式與CH218標資料處理方式相同。各地面型沉陷點所求出之土壤漏失率與壓密沉陷指數示於表4。圖7則為預估沉陷槽與實測值之比較結果，其中計算預估沉陷槽

表4 CH223標隧道中心線地面型沉陷點量測結果

沉陷點編號	位置	環片數	隧道中心至地表之深度 (m)	土倉壓力 (kpa)	$\delta_{10}$ (mm)	$\alpha$ (mm)	$v$ (%)
SM106	下行	48	12.6	130	15.6	1.4	0.7
SM100		68	12.7	140	18.3	2.3	0.9
SM95	下行	87	12.9	110-160	23.5	1.3	1.1
SM92		96	12.9	130-180	16.2	1.6	0.8
SM90	下行	125	13.1	140	15.1	1.2	0.7
SM81		161	13.3	130-320	10.5	2.1	0.5
SM75	1B	181	13.3	140-330	9.3	1.6	0.5
SM73		208	13.2	140-340	10.8	1.4	0.5
SM74	上	46	13.4	160	9.3	2.8	0.5
SM76	行	74	13.3	160-230	19.2	2.8	0.9
SM91	下行	130	13.2	100-220	22	2.9	1.1
SM93		159	13.0	100-220	19	2.3	0.9
SM97	1A	168	12.9	100-220	17.5	2.6	0.8
SM102		187	12.9	120-210	14.6	2.0	0.7
SM108		207	12.8	110-210	12.1	1.4	0.6

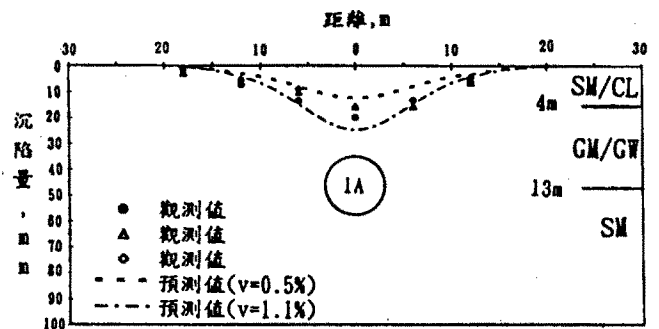


圖7 CH223標預估沉陷槽與實測值比較結果 (潛盾隧道通過後100日)

所採用之土壤漏失率為0.5%至1.1%，壓密沉陷指數則為2mm。由圖示之比較結果得知，採用表列 $v$ 與 $\alpha$ 值所預測之沉陷槽與實測值相當吻合。

### 七、討論

#### 隧道施工導致之沉陷

如前述潛盾隧道施工所導致之地表沉陷量可由土壤漏失率與壓密沉陷指數而求得。此二參數因施工所採用潛盾機種類、鑽掘地層及施工期間潛盾機面板所反應土倉壓力不同而呈現不同結果。其中土倉壓力之大小必需將施作深度之影響納入考

量，即可採用土倉壓力係數 $\beta$ 表示， $\beta$ 值計算式如下：

$$\beta = \frac{p-u}{\sigma_v-u} \quad (5)$$

式中

$\beta$ 為土倉壓力係數

$p$ 為土倉壓力，kpa

$\sigma_v$ 為垂直現地應力，kpa

$u$ 為潛盾隧道施工前之水壓力，kpa

CH218標所整理地表沉陷資料，係為潛盾機於松山層第四與第五次層內施作之結果。由圖8所示土壤漏失率與土倉壓力

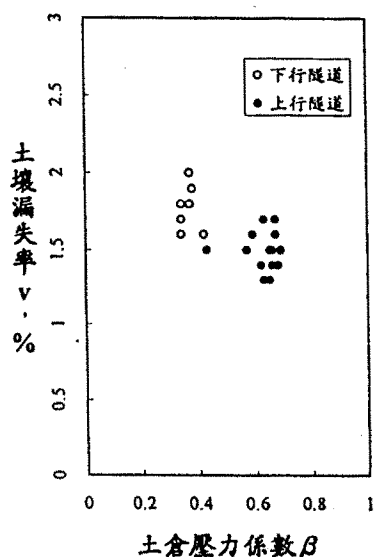


圖8 CH218標土壤漏失率與土倉壓力係數之關係

係數之關係得知，潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率約為1.3%至2%，其大小因土倉壓力係數不同而呈現不同結果，土倉壓力係數愈大，其土壤漏失率愈小。圖9則為土壤漏失率隨深度變化之關係，由圖得知上行隧道土壤漏失率並未隨深度而呈現太大變化，下行隧道亦得到相同之結果。但上行隧道土壤漏失率較下行隧道土壤漏失率為小，此乃因土倉壓力係數較大所致。

圖10與圖11則分別為CH218標沿隧道中心線上沉陷點壓密沉陷指數與土倉壓力係數及隨深度變化之關係。由圖得知CH218標隧道中心線上之壓密沉陷指數約為4mm至6mm，其值與土倉壓力係數及地

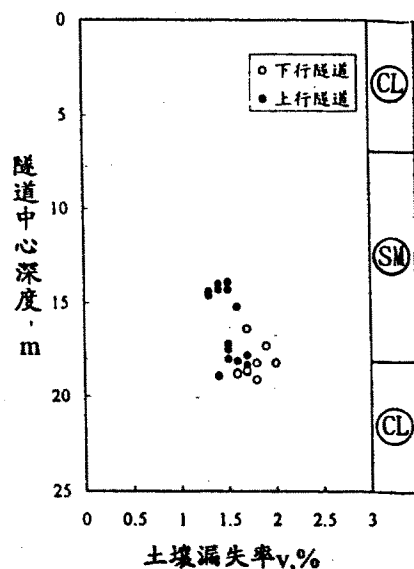


圖9 CH218標土壤漏失率隨隧道中心深度之變化

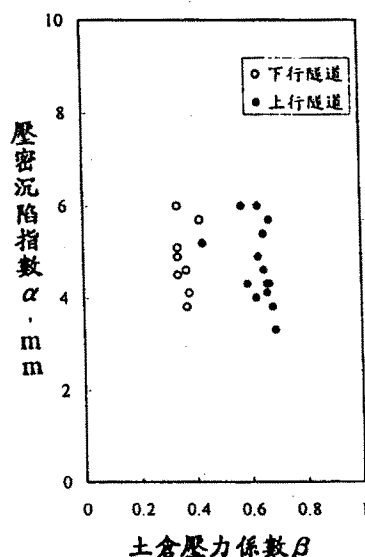
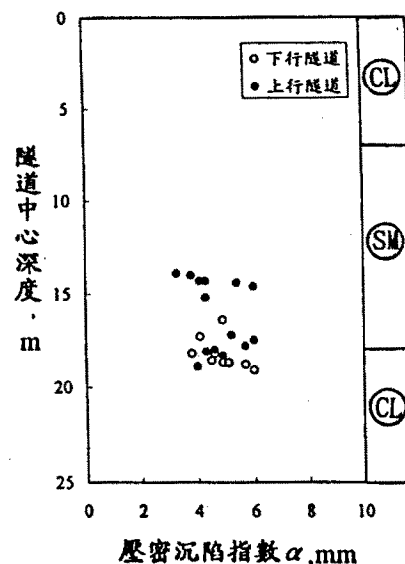


圖10 CH218標隧道中心壓密沉陷指數與土倉壓力係數之關係



層種類無關，但隨距隧道中心水平距離增加而遞減，結果如圖12所示。

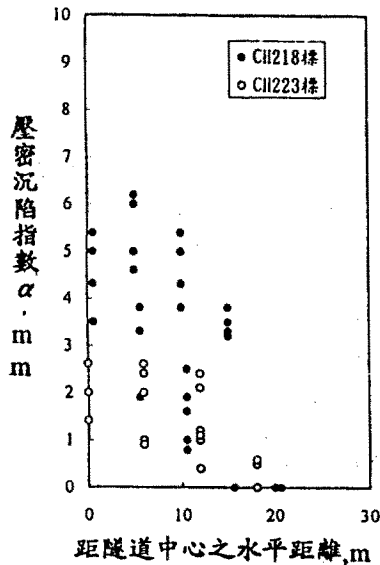


圖12 壓密沉陷指數與距隧道中心水平距離之關係

CH223標潛盾隧道主要於上部礫石層內施工，因礫石大小分佈不均，由裝設於土倉之土壓計所量測得土倉壓力變化相當大，故難以建立土壤漏失率與土倉壓力係數之關係。由潛盾隧道施工結果得知，因潛盾機盾尾空隙閉合所導致之土壤漏失率約為0.5%至1.1%，隧道中心壓密沉陷指數則約為1mm至3mm。其壓密沉陷指數亦隨距隧道中心水平距離增加而遞減，結果亦示於圖12。

由上述結果可知，潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率與壓密沉陷指數H2區較T2區為小，此乃因上部礫石層之強度較松山層第四與第五次層之強度為高所致。

### 雙潛盾隧道施工導致之沉陷

雙潛盾隧道施工所導致之沉陷行為較單潛盾隧道施工所導致之沉陷行為複雜，茲選擇四個量測断面作探討。其中一個断面位於CH218標，其餘則位於CH223標，此四個断面之相關資料詳表5。圖13與圖14則為預測值與量測值比較結果，其中預測值為單潛盾隧道施工所導致地表沉陷之疊加結果。計算單潛盾隧道施工所導致地表沉陷之土壤漏失率，於CH218標下行隧道採用1.6%至2%，上行隧道採用1.3%至1.7%；CH223標不論上行或下行隧道則皆採用所有統計之結果，即採用0.5%

表5 雙潛盾隧道施工相關資料

施工標	環片數 (下行)	第一條隧道			第二條隧道		
		隧道 編號	潛盾到達時間 (月/日/年)	土倉壓力 (kpa)	隧道 編號	潛盾到達時間 (月/日/年)	土倉壓力 (kpa)
CH218	91	1A	10/21/92	190	1B	6/23/93	215
CH223	87	1A	6/21/94	100-220	1B	10/23/94	110-160
CH223	68	1A	6/24/94	120-210	1B	10/19/94	140
CH223	48	1A	7/1/94	110-210	1B	10/14/94	130

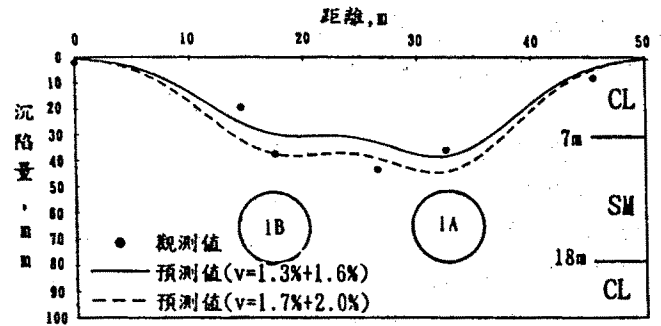


圖13 CH218標平行潛盾隧道預估沉陷槽與實測值比較結果 (第二條隧道通過後60日)

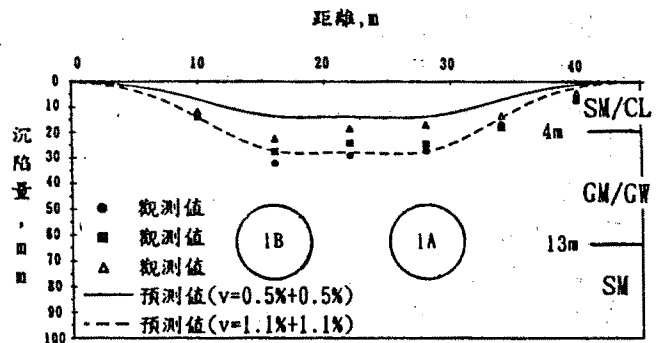


圖14 CH223標平行潛盾隧道預測沉陷槽與實測值比較結果 (第二條隧道通過後100日)

至1.1%。壓密沉陷指數於CH218標採用5mm，於CH223標則採用2mm，其值隨距隧道中心水平距離增加而遞減。由圖13與圖14之比較結果得知，雙潛盾隧道施工所導致之地表沉陷與單潛盾隧道施工所導致地表沉陷之疊加結果相當吻合。

### 八、結論

本文根據台北捷運新店線CH218標於台北盆地T2區松山層第四與第五次層及CH223標於H2區上部礫石層採用土壓平衡式潛盾機施作之經驗，可歸納獲得以下結論：

1. 潛盾隧道施工所導致地表沉陷可分為盾尾空隙閉合所導致之立即沉陷與超額孔隙水壓消散所產生之壓密沉陷。此二種沉陷於實用上可依據黃南輝等【2】之建議由沉陷歷時曲線上加以區分，並分別採用Peck【3】所建議之正常曲線公式(1)與公式(3)求得。
2. 於T2區松山層第四與第五次層內進行潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率約為1.3%至2%；於H2區上部礫石層內進行潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率則約為0.5%至1.1%。其中於T2區進行潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率，並不因施作深度及地層種類不同而呈現太大變化，但其大小端視土倉壓力係數大小而定，土倉壓力係數愈大，土壤漏失率愈小。於H2區內施作所導致之土壤漏失率，因礫石大小分佈不均導致面板受力呈現極大之差異，而難以建立與土倉壓力係數之關係。
3. 壓密沉陷指數並不因土倉壓力係數與施作深度改變而呈現太大差異，但隨距隧道中心水平距離增加而遞減。隧道中心線壓密沉陷指數於T2區松山層第四與第五次層約為4mm至6mm，於H2區上部礫石層則約為1mm至3mm。
4. 雙潛盾隧道施工所導致地表沉陷可藉由單潛盾隧道施工所導致地表沉陷結果以疊加方式估計。
5. 根據本文之探討可初步瞭解潛盾隧道於台北盆地T2區松山層第四與第五次層及H2區上部礫石層內施工所導致地表沉陷行為，但需收集更多資料加以驗證其結果。

### 九、誌謝

作者感謝於亞新工程顧問公司執行台北捷運系統大地工程專業顧問服務工作計劃期間，承獲承商大林組/互助共同承攬及泛亞公司提供施工資料，及業方台北市捷運局同意本文之發表，深感誌謝。於撰文期間獲得亞新同仁林美華小姐協助繪圖與黃立煌經理提供寶貴意見，本文得以順利完成，亦一併誌謝。

### 參考文獻

- 【1】 Clough, W. and Schmidt, B. (1981), Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay, Soft Clay Engineering, Elsevier Amsterdam
- 【2】 Hwang, R.N., Fan, C.B., Yang, G.R., (1995), Consolidation Settlements Due to Tunneling, Proceedings, South East Asian Symposium on Tunnelling and Underground Space Development, Bangkok, Thailand
- 【3】 Peck, R.B. (1969), Deep excavations and Tunnelling in Soft Ground, Proc., 7th ICSMFE, State-of-Art Volume, Mexico City, Mexico, pp225-290

### GROUND SETTLEMENTS DUE TO SHIELD TUNNELLING

G.R. Yang S.N. Wang C.B. Fan  
Moh & Associates SDPO, DORTS  
Taipei Taipei

### ABSTRACT

This paper applies the ground settlement observation data collected from 2 sites which are located on the Hintien Line of the Taipei Rapid Transit Systems to study the settlement behavior of shield tunnelling in the T2 and in the H2 zone where the clayey sublayer 4, the sandy sublayer 5 and the upper gravel layer have been encountered. The results indicate that the ground loss and consolidation settlement index in the T2 zone are larger than those in the H2 zone. The larger pressure exists in the earth chamber during shield tunnelling, the less ground loss would occur in the T2 zone. The correlation between ground loss and chamber pressure in the H2 zone cannot be established because of the difference in size of the gravel. Variation of the consolidation settlement index have not changed with the chamber pressure. The consolidation settlement decreases as horizontal distance from centerline of tunnel increases. The results also show that settlement due to twin tunnelling can be estimated by superimposing the settlements of two single tunnels.