

泥水加壓式潛盾機施工
導致之地表沉陷探討
**GROUND SETTLEMENTS
DUE TO SLURRY SHIELD MACHINE TUNNELLING**

楊國榮，楊慕泉，趙際禮
G. R. Yang, M. C. Yang and C. L. Chao

原著載於現代營建第 197 / 198 期
1996 年 5~6 月，第 29~35 頁 / 第 27~31 頁
*Reprinted from Modern Construction of Civil Engineering
and Architecture Monthly
Taipei, Taiwan
May / June, 1996, pp.29~35 / pp.27~31*

泥水加壓式潛盾機施工導致之地表沉陷探討

楊國榮

楊慕泉

趙際禮

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CH221標地表沉陷觀測結果，探討泥水加壓式潛盾機施工所導致地表沉陷行為。研究指出於台北盆地T2區內採用泥水加壓式潛盾機進行施工所導致之土壤漏失率約為0.3%至1.5%，其值因背填灌漿施作時機延遲而增大，因施作二次灌漿而減少；壓密沉陷指數則約為1mm至8mm，其值並隨距隧道中心線水平距離增加而遞減。因施工時泥水倉內反應所得之土倉壓力係數僅約0.2至0.4，故其對隧道施工所導致之沉陷影響仍需藉由更多施工與監測資料加以瞭解。研究亦指出潛盾隧道不論為平行或上下重疊，其施工所導致之地表沉陷槽皆可藉由單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷槽疊加而得。

一、前言

台北捷運系統初期路網平面配置如圖1所示，主要包括木柵、淡水、南港、新店、中和與板橋等六線。上述路網中大部份路段均採用潛盾隧道工法施工以減少施工期間對地面交通之衝擊。所有潛盾隧道中除新店線CH221標採用泥水加壓式潛盾機施工外，其餘皆採用土壓平衡式潛盾機進行施作。本文擬依據CH221標地表沉陷觀測結果，統計出預估泥水加壓式潛盾機施工所導致地表沉陷之土壤漏失率與壓密沉陷指數，並由此統計參數探討其與地層

種類及土倉壓力係數之關係，並由此統計參數所預測之沉陷槽瞭解二至四條重疊隧道施工所導致之地表沉陷行為。

二、基地位置

CH221標位於古亭市場站（G10站）與公館站（G07站）間，主要包括通風豎井、回收井、潛盾隧道、台電大樓站（G09站）、明挖覆蓋隧道與新奧工法隧道，位置如圖1所示。本文所探討之潛盾隧道位於本標最北端，範圍涵蓋中和線與新店線二部份，中和線潛盾隧道位於羅斯福路與南昌街交叉口附近之回收井與兒童交通公園西北角之通風豎井間，30%路段穿越結構物下方，其餘則位於道路與公園下方。新店線潛盾隧道則位於回收井與G09站間，主要通過羅斯福路正下方。圖2為本標潛盾隧道平面配置示意圖。

三、地層與地下水狀況

CH221標潛盾隧道經過之地層屬台北盆地T2區，為典型之松山層，其下即為景美礫石層，但於鄰通風豎井處第五次層上方有一礫石層。典型之松山層主要分為六個次層，由粉土質黏土與粉土質細砂層交互組合而成。即松六、松四、松二次層為粉土質黏土層，松五、松三、松一次層為粉土質細砂層，其地層分佈與工程特性詳表1。

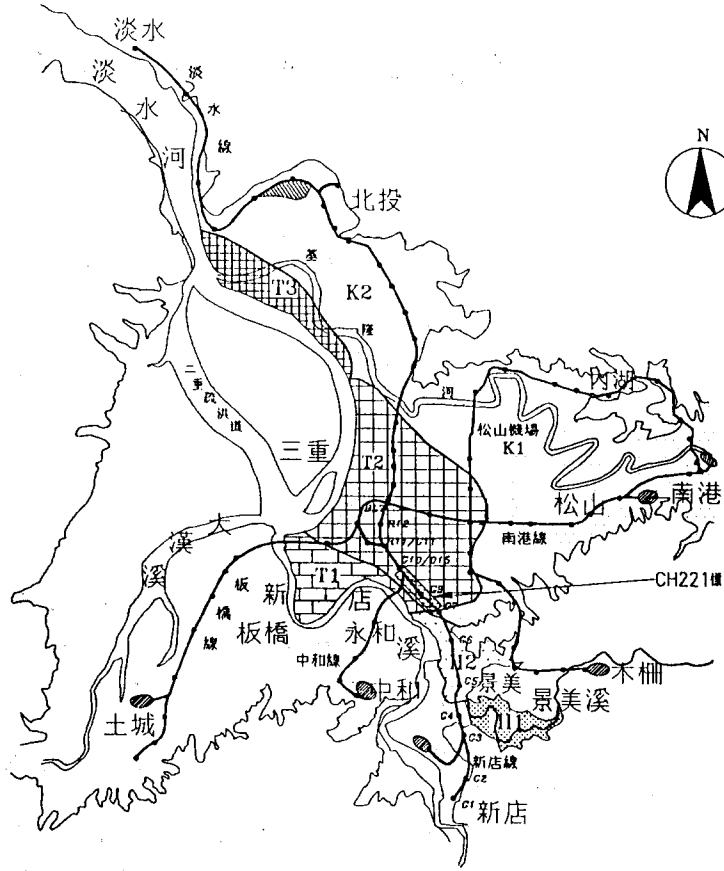


圖1 台北捷運系統初期路網配置與CH221標位置示意圖

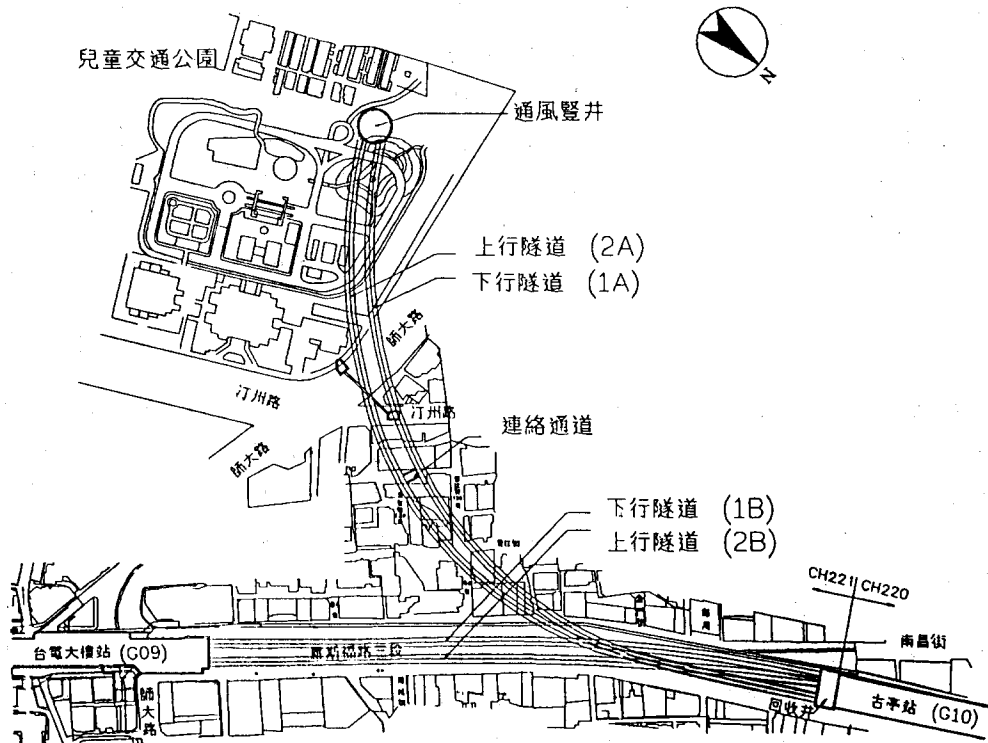


圖2 CH221標潛盾隧道平面配置

表1 潛盾隧道段地層分佈與工程特性

地層編號	地層種類	土壤單位重 (t/m ³)	N值	Su (t/m ²)
松六	CL	1.9	4 ± 1	2
-	GP/GM	2.2	26 ± 2	-
松五	SM	2.0	16 ± 2	-
松四	CL	2.0	14 ± 1	5
松三	SM	2.0	22 ± 1	-
松二	CL	2.0	17 ± 2	8

與580m，地表至隧道中心深度上行隧道約為16m至32m，下行隧道則約為24m至30m，鑽掘之地層經過松山第二、第三、第四與第五次層，30%路段於結構物下方施作。新店線亦分為上下行二條，分別長約438m與439m，地表至隧道中心深度上行隧道約為10m至13m，下行隧道則約為12m至18m，鑽掘之地層經過松山第四與第五次層。中和線與新店線上下行隧道主要皆呈平行配置，但於回收井附近四條隧道交錯重疊。

本施工標係採用二部直徑6.25m，長度7m之泥水加壓式潛盾機進行施工，此二部潛盾機由通風豎井出發，先後進行中和線下行與上行隧道之鑽掘工作，到達位於G10站旁之回收井後，於回收井內迴轉，再進行新店線下行與上行隧道之鑽掘工作，至G09站止。施工時係採二班制，每日共工作24小時，中和線鑽掘速度約每日6環，新店線鑽掘速度則約每日8環至13環。於潛盾機鑽掘推進之同時並於環片四周實施背填灌漿，其每環之灌漿量中和線與新店線皆約為1.6m³至2.3m³。為控制潛盾隧道施工所導致上方結構物沈陷量在容許範圍內，承商於潛盾機經過中和線結構物下方時，由隧道內於隧道上方1m外施作2m厚之灌漿環，即俗稱之二次灌漿。

五、潛盾隧道施工所導致地表沉陷行為

潛盾隧道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。此二種沉陷可依黃南輝等【2】之建議由沉陷歷時曲線上明確區分，即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所示。其中立即沉陷可用Peck所建議之土壤漏失率，即沉陷槽面積與隧道斷面積之比值表示，並採用下式計算其沉陷槽

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

式中

δ 為地表沉陷量, m

水壓力, $1/m^2$

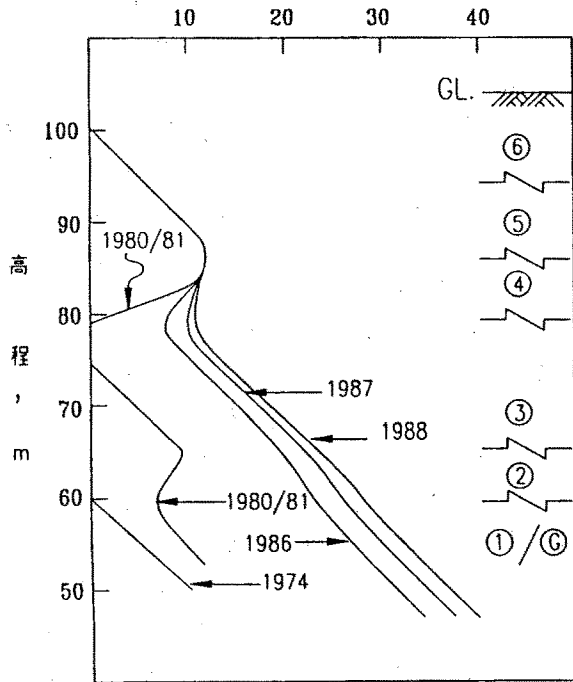


圖3 台北盆地水壓分佈狀況

台北盆地因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。本標潛盾隧道沿線水位隨深度之變化亦如圖3所示呈非靜態分佈，施工期間松五次層之水位位於地表下6.5m至7.5m左右，松三次層之水位則位於地表下10.5m至11.5m左右。

四、潛盾隧道施工狀況

CH221標潛盾隧道內徑為5.6m，環片厚0.25m、寬1m，分中和線與新店線二部份。中和線分上下行二條，分別長約600m

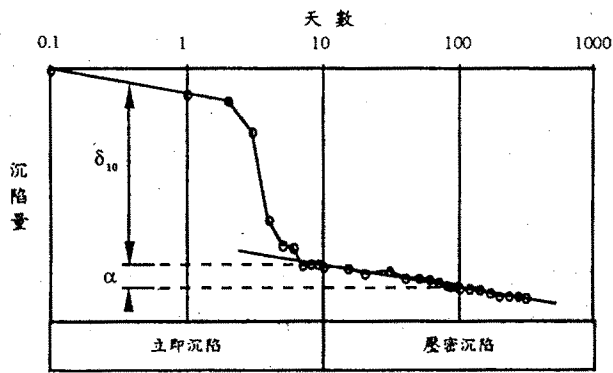


圖4 潛盾隧道施工所導致地表沉陷歷時曲線。

ν 為土壤漏失率, %
 A 為隧道斷面積, m^2
 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 值可採用不同之經驗式求得, 本標係採用 Clough & Schmidt 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

至於壓密沉陷則依下式求得

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

式中

ξ 為壓密沉陷量, mm
 α 為壓密沉陷指數, 即潛盾機盾首通過後第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

六、監測資料處理與參數決定

本施工標主要採用裝設於隧道中心線上方或附近之地面型沉陷點與淺式沉陷計量測結果, 推估中和線與新店線各條潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率 ν 與壓密沉陷指數 α 。上述四條隧道中, 除位於中和線上行隧道 (2A) 上方之監測點位, 因受先行施工之下行隧道 (1A) 影響, 而無法用於推估 2A 隧道施工所導致之 ν 與 α 值外, 其他三條隧道施工所導致之 ν 與 α 值, 皆可藉由位於其隧道上方之監測儀器量測結果而求得。

用於推估 ν 與 α 值之各沉陷觀測點, 其量測值多少會受諸如地面車輛、地下水位升降等外在因素而有所影響, 其影響程度需加以瞭解並予以修正。進行 ν 與 α 值推估時, 先將用以推估此二參數之沉陷點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立即沉陷量 δ_{10} 與計算壓密沉陷量之 α 值。 ν 值則藉由 δ_{10} 與式2建議之 i 值求得, 結果示於表2與表3。

表2 CH221標中和線潛盾隧道沉陷量測結果

沉陷點編號	隧道編號	環片數	支距 (m)	隧道中心至地表深度 (m)	土倉壓力 (t/m^2)	δ_{10} (mm)	ν (%)	α (mm)	備註
SM518	1A	77	3.34	29.9	29.5	13.1	1.22	4.0	次未灌施漿作二
EXM501		84	0.29	29.8	27.3	11.6	1.03	7.4	
SM522		126	2.58	29.7	26	16.4	1.49	4.5	
SM524		149	1.98	29.6	26.2	13.0	1.17	5.5	
SM528		189	1.83	29.0	27.7	9.4	0.83	4.1	
SM532		218	3.05	28.2	27.6	8.2	0.73	3.5	施作二次灌漿
SSI604		422	0.72	27.5	26.5	4.0	0.33	2.4	
SM557		428	0.2	27.4	26.5	5.3	0.44	2.5	
SM559		453	0.37	27.0	24.8	4.3	0.35	2.5	
SM561		472	0.4	26.4	23.8	4.4	0.36	2.1	
SM563		496	0.07	25.6	22.9	5.3	0.42	2.8	
SM566		522	0.58	24.6	20.8	7.1	0.54	3.5	

表3 CH221標新店線潛盾隧道沉陷量測結果

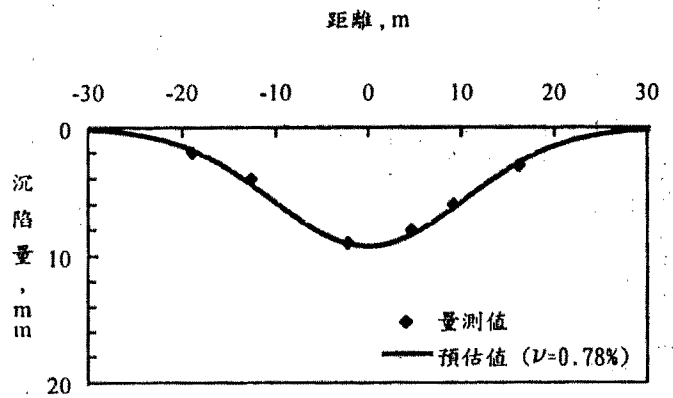
沉陷點編號	隧道編號	環片數	支距(m)	隧道中心至地表深度(m)	土倉壓力(t/m ²)	δ_{10} (mm)	ν (%)	α (mm)	備註
SSI582	1B	288	0	12.3	8.8	11.1	0.49	1.1	未 施 作 二 次 灌 漿
SM581		288	0	12.3	8.8	8.4	0.37	1.5	
SM583		313	0	12.4	9.7	14.9	0.66	2.9	
SM585		338	0	12.5	9.7	9.9	0.44	2.3	
SSI589		348	0.2	12.6	11.9	10.1	0.45	2.4	
SM587		362	0	12.6	11.7	9.3	0.41	1.8	
SM589		387	0	12.8	11.7	15.0	0.68	3.1	
SSI595		416	0	12.8	12.8	13.0	0.59	2.8	
SM576	2B	213	0	10.8	8.3	28.9	1.14	2.6	
SM578		238	0	11.0	8.3	27.3	1.09	2.4	
SSI584		286	0	11.4	9	23.4	0.96	2.9	
SM582		288	0	11.4	9.1	20.8	0.86	3.4	
SM584		313	0	11.7	9.7	19.4	0.82	2.7	
SSI590		346	2.2	12.0	10.1	21.3	1.00	1.8	
SM588		362	0	12.1	10.1	18.6	0.80	2.2	
SM590		387	0	12.3	10.1	21.3	0.93	1.5	
SM592		412	0	12.5	10.1	20.6	0.91	3.3	
SSI597		416	0	12.5	10.1	21.3	0.94	3.1	

為確認推估表2與表3所列 ν 值時所採用 i 值之適用性，茲藉由位於先行施工隧道(1A與1B)數個量測斷面之觀測結果加以驗證。圖5為因土壤漏失所導致之預估沉陷槽與量測值之比較，圖中所示預估沉陷槽係採用式(1)而求得，式中之 i 值則藉由式(2)而求得。由比較結果得知，不論隧道斷面進行二次灌漿施作或未施作二次灌漿，其預估值與實測值相當吻合，即可驗證由Clough & Schmidt所建議之 i 值適用於本標沉陷槽之推估。

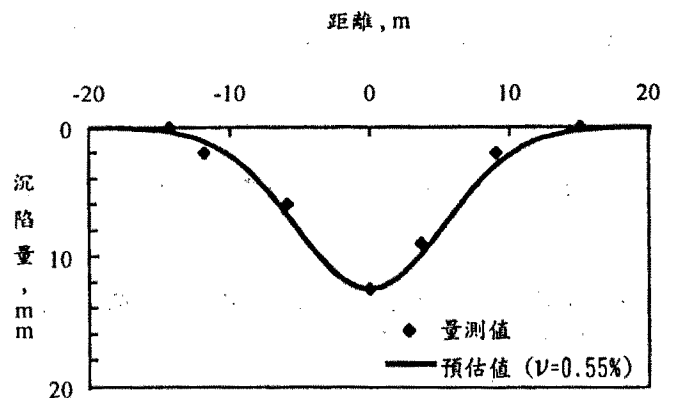
七、討論

隧道施工導致之沉陷

土壤漏失率 ν 與壓密沉陷指數 α 為推估潛盾隧道施工所導致地表沉陷二個重要參數。楊國榮等【4】曾探討台北盆地內此二參數與潛盾隧道施工之關連性。由其所探討之案例發現於台北盆地T2區松五與松四次層內採用土壓平衡式潛盾機進行隧道施工時，適度的加大土倉壓力將可使 ν 值降低，但對 α 值則無太大影響。於探討上述倉壓大小時，已將潛盾機施作深度之影



(a)1A隧道二次灌漿區



(b)1B隧道非二次灌漿區

圖5 因土壤漏失所導致之預估沉陷槽與量測值之比較

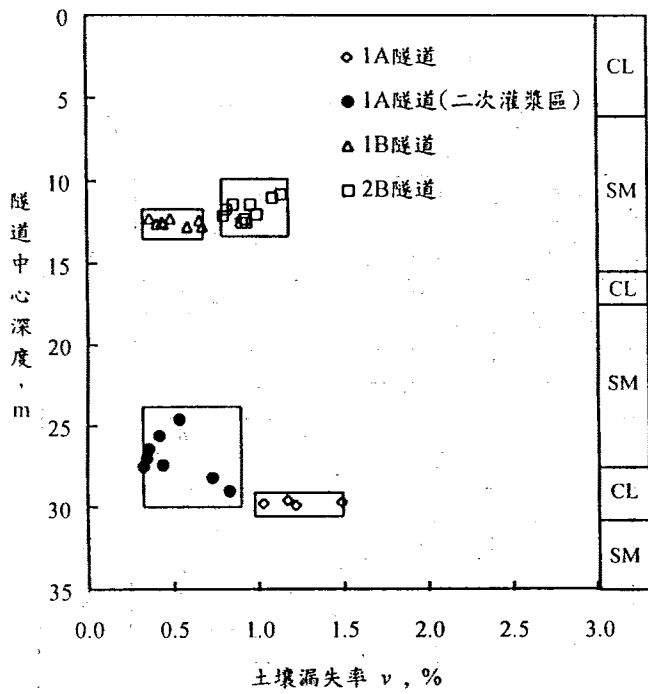


圖6 土壤滲失率隨隧道中心深度變化之關係

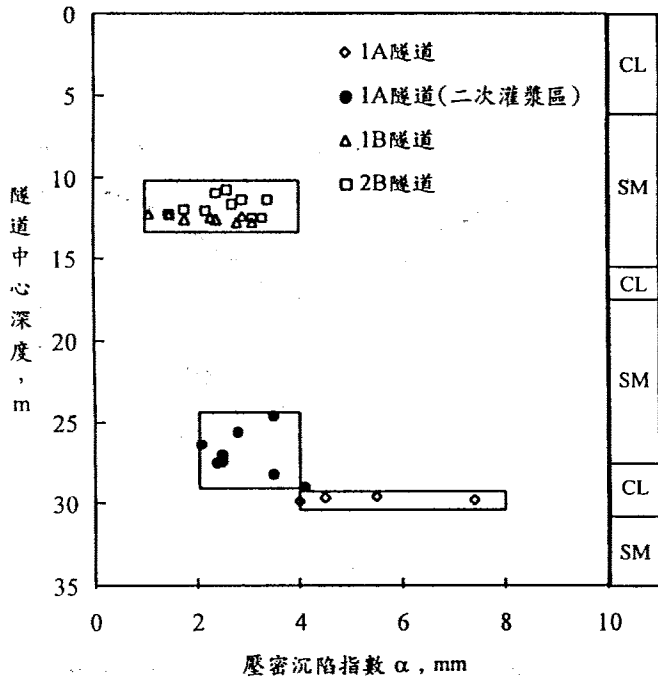


圖7 隧道中心線上壓密沉陷指數隨隧道中心深度變化之關係

響納入考量，即採用土倉壓力係數 β 值表示，其計算式如下：

$$\beta = \frac{p-u}{\sigma_v-u} \quad (4)$$

式中

β 為土倉壓力係數

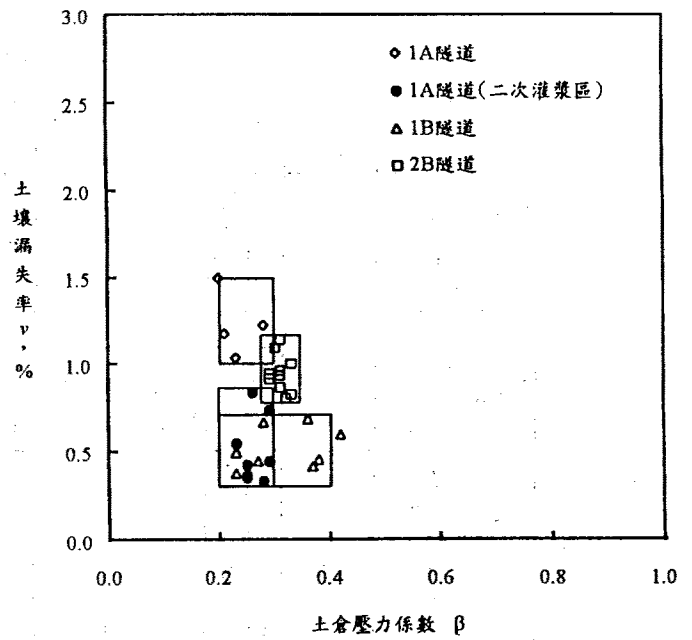


圖8 土壤滲失率與土倉壓力係數之關係

p 為土倉壓力，kpa

σ_v 為垂直現地應力，kpa

u 為潛盾隧道施工前現地之水壓力，kpa

本節則擬依據表2與表3所整理之資料探討泥水加壓式潛盾機於T2區施工所導致之地表沉陷行為。表中所列之1A隧道多數點位並未位於隧道中心線上，因其所對應之隧道深度較深，沉陷影響範圍較廣，故用其計算所得之 α 值代表隧道中心線上之 α 值進行下述討論，其差異性較小應可予以忽略。

由圖6與圖7所示 v 值與隧道中心線上 α 值隨隧道中心深度變化之關係得知，1A隧道所整理之資料為潛盾隧道於松二與松三次層施作之結果，1B與2B隧道所整理之資料則為潛盾隧道於松五次層內施作之結果，其中1A隧道並於部份路段施作二次灌漿。1A隧道於松二次層內施工所導致之 v 值與隧道中心線上 α 值分別約為1%至1.5%與4mm至8mm；施作二次灌漿後，其施工所導致之 v 值與隧道中心線上 α 值則分別降至0.3%至0.9%與2mm至4mm；1A隧道於松三次層內施工並施作二次灌漿，其施工所導致之 v 值與隧道中心線上 α 值亦分別約為0.3%至0.9%與2mm至4mm。1B與2B隧道於松五次層內施工所導致之 v 值則分別約為0.3%至0.7%與0.8%至1.2%，其差異性可能因施作2B隧

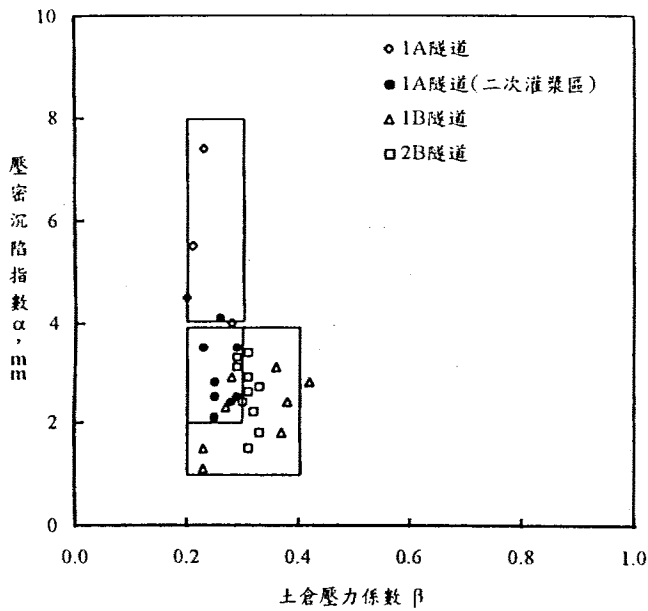


圖9 隧道中心線上壓密沉陷指數與土倉壓力係數之關係

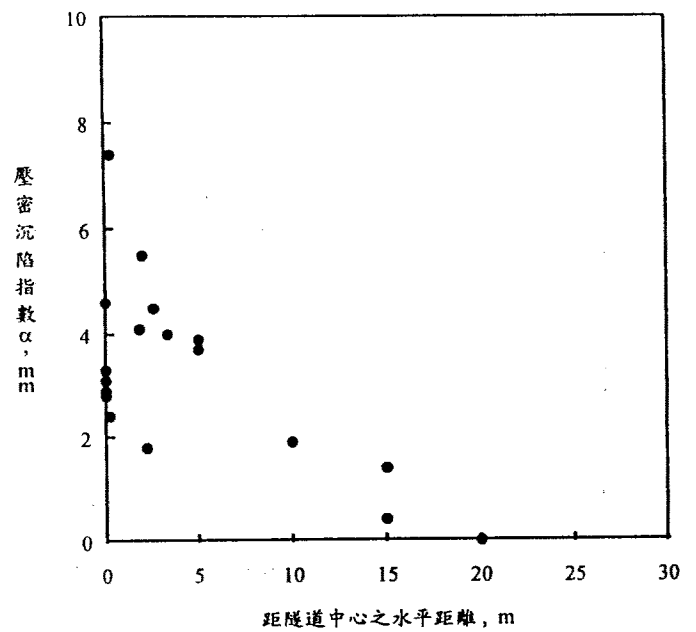


圖10 壓密沉陷指數與距隧道中心水平距離之關係

道時施作背填灌漿較遲所致；至於施工所導致之隧道中心線上 α 值則皆約為1mm至4mm。

圖8與圖9則分別為 ν 值及隧道中心線上 α 值與 β 值之關係，由圖得知本標潛盾隧道施工時泥水倉內反應所得之 β 值僅約0.2至0.4， ν 值與隧道中心線上 α 值於此 β 值下並未呈現顯著之差異，至於加大 β 值後之影響則需藉由更多潛盾隧道施工與其監測結果加以瞭解。但其中 α 值則隨距隧道中心水平距離增加而遞減，如圖10所示。

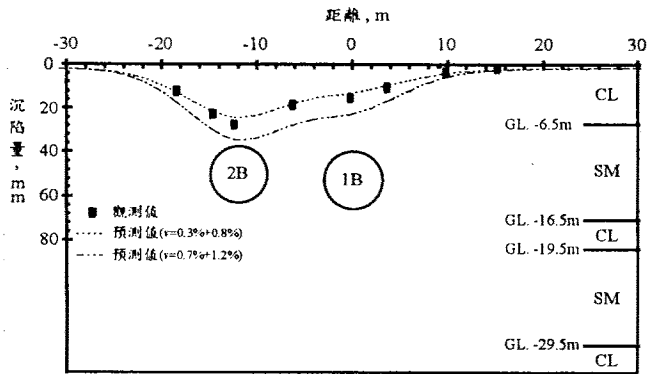
行為較單潛盾隧道施工所導致之沉陷行為複雜，茲選擇3個量測斷面（斷面I至斷面III）量測結果探討二至四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行為，此3個量測斷面施工相關資料詳表4。其中斷面I位於新店線，為二條平行隧道，斷面II與斷面III則位於中和線與新店線四條隧道交錯重疊處，斷面II與斷面III中之1A與2A隧道於施工期間施作二次灌漿。圖11至圖13為二至四條潛盾隧道施工所導致地表沉陷預測值與量測值比較結果，其中預測值為各單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷疊加結果。計算各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷之土壤漏失率 ν 與隧道中心線上壓密沉陷指數 α 如表5所示，其值係採用圖6與圖7之統計結果，其中 α 值則需考量其值係隨距隧道中心水平距離增加而遞減。因2A隧

二至四條潛盾隧道施工導致之沈陷

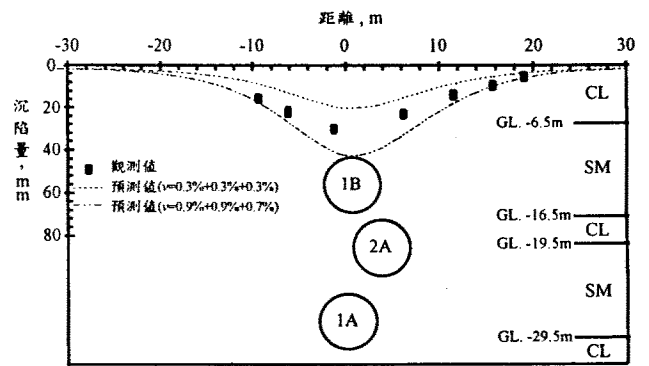
二條以上潛盾隧道施工所導致之沉陷

表4 斷面I至斷面III潛盾隧道施工相關資料

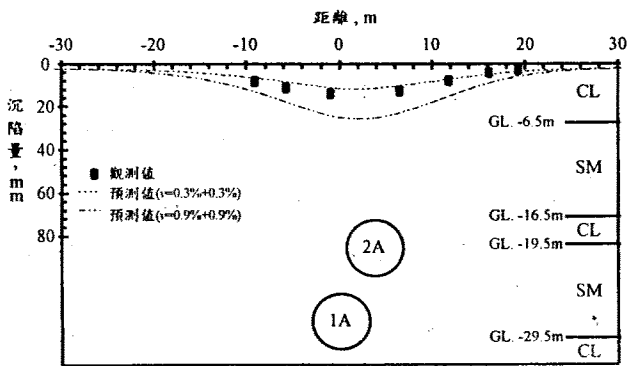
斷面編號	對應環片數(下行)隧道	第一條隧道		第二條隧道		第三條隧道		第四條隧道	
		隧道編號	潛盾隧道到達時間(m/d/y)	隧道編號	潛盾隧道到達時間(m/d/y)	隧道編號	潛盾隧道到達時間(m/d/y)	隧道編號	潛盾隧道到達時間(m/d/y)
I	新店線288環	1B	1/14/94	2B	2/28/94	-	-	-	-
II	中和線422環	1A	8/2/93	2A	9/29/93	1B	12/29/93	2B	2/6/94
III	中和線471環	1A	8/10/93	2A	10/6/93	1B	12/24/93	2B	2/1/94



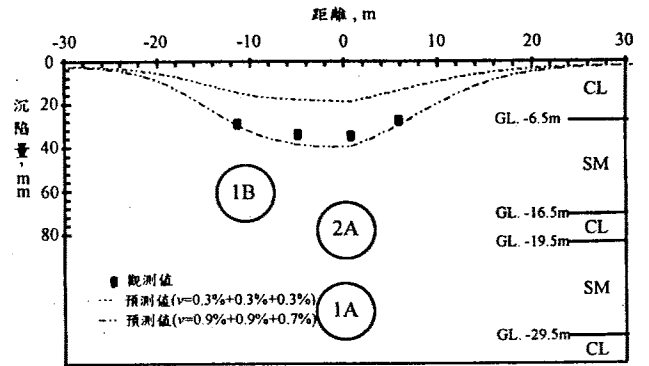
(a) 断面 I (第二條隧道通過後135日)



(a) 断面 II (第三條隧道通過後35日)

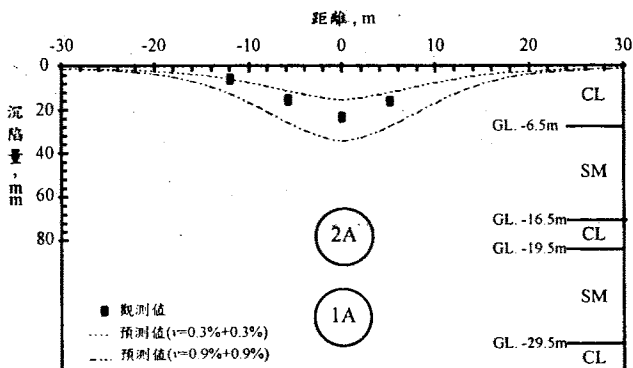


(b) 断面 II (第二條隧道通過後40日)



(b) 断面 III (第三條隧道通過後35日)

圖12 三條潛盾隧道施工所導致預測沉陷槽與實測值比較結果

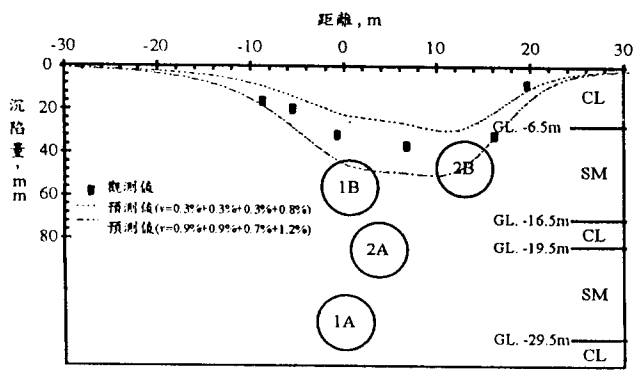


(c) 断面 III (第二條隧道通過後70日)

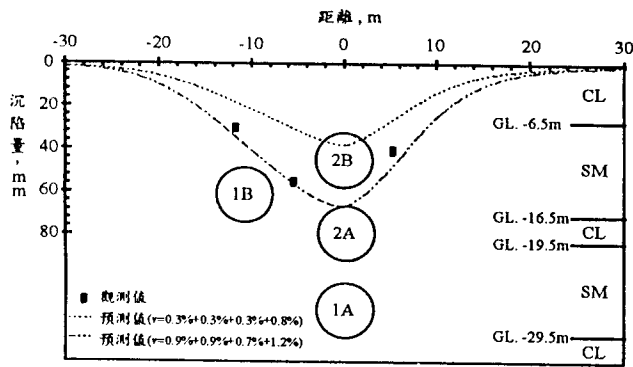
圖11 二條潛盾隧道施工所導致預測沉陷槽與實測值比較結果

表5 隧道沉陷分析所採用 ν 值與隧道中心線上 α 值

隧道編號	ν (%)	隧道中心線上 α (mm)
1A	0.3至0.9	2至4
2A	0.3至0.9	2至4
1B	0.3至0.7	1至4
2B	0.8至1.2	1至4



(a) 断面II (第四條隧道通過後60日)



(b) 断面III (第四條隧道通過後75日)

圖13 四條潛盾隧道施工所導致預測沉陷槽與實測值比較結果

道並無可用之監測資料，故假設其施工狀況與1A隧道施工狀況相同，即 v 與 α 值係採用1A隧道之結果。由圖11至圖13之比較結果得知，雙潛盾隧道不論為平行或上下重疊配置，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。三條或四條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之地表沉陷疊加結果亦相當吻合。

八、結論

本文根據台北捷運系統新店線CH221標採用泥水加壓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、潛盾隧道於台北盆地T2區松五、松三與松二次層內施工所導致之土壤漏失率約為0.3%至1.5%，於上述各次層內施工所導致之土壤漏失率於現有土倉壓力下並未呈現明顯之差異性。於松五次層內施工時因施作背填灌漿時機延遲而導致較大之土壤漏失率，於松二次層內施工時因施作二次灌漿而有效降低土壤漏失率。
- 3、潛盾隧道於台北盆地T2區松五、松三與松二次層內施工所導致之隧道中心線上壓密沉陷指數約為1mm至8mm，於上述各次層內施工所導致之隧道中心線上壓密沉陷指數於現有土倉壓力下並未呈現明顯之差異性，但其值則隨距隧道中心水平距離增加而遞減。
- 4、雙潛盾隧道不論其為平行配置或上下重疊，因施工所導致之地表沉陷槽皆可藉由單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷槽以疊加方式而獲得。縱使施作三個或四個重疊隧道，其施工所導致之地表沉陷槽亦可藉由單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷槽疊加而得。
- 5、因潛盾隧道施工中泥水倉內反應所得之土倉壓力係數僅約0.2至0.4，故無法瞭解倉壓大小對土壤漏失率與隧道中心線上壓密沉陷指數之影響，此仍需搜集更多資料作深入瞭解。
- 6、根據本文之探討可初步瞭解採用泥水加壓式潛盾機於松山層內施工之經驗，但仍需搜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，承獲承商青木/新亞共同承攬提供施工資料，及業方台北市捷運局同意本文之發表，深感誌謝。

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
- 【4】 楊國榮、王勝男、范陳柏 (1995) , 潛盾
隧道施工所導致之地表沉陷, 第六屆大地
工程學術研究討論會, 台灣, pp1083-1090