

潛盾隧道施工地面沉陷控制案例
**CASE HISTORY ON CONTROL OF
SETTLEMENT DURING SHIELD TUNNELING**

楊國榮，王勝男，陳大康
G. R. Yang, S. N. Wang and T. K. Chen

原著載於第八屆大地工程學術研究討論會
1999年8月18~20日，第1433~1443頁

*Reprinted from Proceedings of 8th Conference on Current
Researches in Geotechnical Engineering,
Pingtung, Taiwan
August 18~20, 1999, pp.1433~1443*

潛盾隧道施工地面沉陷控制案例

楊國榮¹

王勝男¹

陳大康²

¹亞新工程顧問公司

²台北市政府捷運工程局

摘要

潛盾隧道工法施工所導致隧道上方地面及結構物之沉陷量，可藉由諸如加大潛盾機土倉內壓力、施作二次灌漿(secondary grouting)或遮幕牆(cut-off walls)等方式予以減少，以此達到建物保護之目的。本文列舉三個實際施工案例，說明上述各工法用於減少隧道上方施工影響範圍內地面及結構物沉陷量之成效。施工案例顯示，不論採用加大潛盾機土倉內之壓力或施作二次灌漿，均可明顯減少土壤漏失率；其中採用二次灌漿施作並導致沉陷槽發生偏移及沉陷槽範圍增大之現象。採用遮幕牆施作雖導致遮幕牆內沉陷量之增加，但卻明顯降低遮幕牆以外之沉陷量。

一、前言

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，故被廣泛使用於都會區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位於潛盾隧道上方施工影響範圍內結構物與管線之沉陷量在容許範圍內，以確保其安全。潛盾隧道施工所導致隧道上方地面及結構物之沉陷量可藉由諸如加大潛盾機土倉內之壓力、施作二次灌漿或遮幕牆等方式予以減小，進而達到建物保護之目的。本文列舉三個實際施工案例說明上述三種工法之成效。

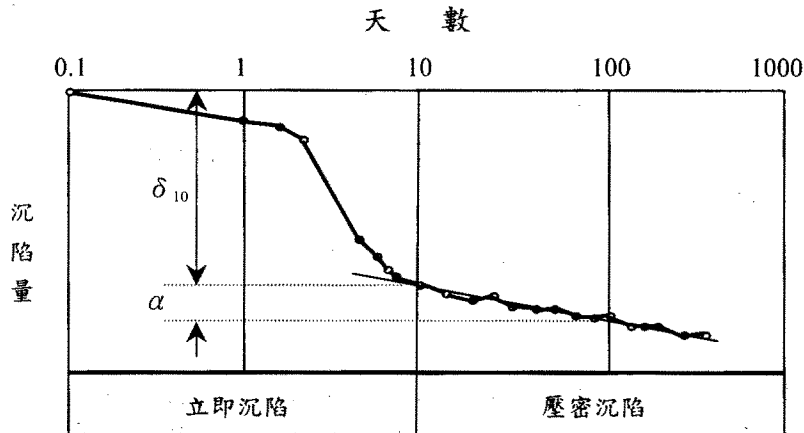


圖1 潛盾隧道施工所導致地表沉陷歷時曲線

二、潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行為

潛盾隧道施工所導致之地表沉陷主要包括立即沉陷與壓密沉陷二種，立即沉陷起因於盾尾空隙閉合，而壓密沉陷則起因於超額孔隙水壓消散所致。此二種沉陷量之大小於實用上可依黃南輝等【3】之建議，由圖1之沉陷歷時曲線上求得，即將潛盾機盾首通過後第10天之沉陷量(δ_{10})定義為因盾尾空隙閉合所導致之立即沉陷，後續發生之沉陷量則為壓密沉陷。其中立即沉陷可用Peck【5】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，

並採用式(1)計算其沉陷槽

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

式中

δ 為距隧道中心線 x 處之地表沉陷量，m

δ_{\max} 為隧道中心線上之地表沉陷量，其值等於 $\frac{vA}{2.5i}$ ，m

v 為土壤漏失率，%

A 為隧道斷面積， m^2

i 為寬度參數，即隧道中心至反曲點水平距離，m，其值可藉由不同之經驗式求得，本文所探討之案例係採用式(2)之經驗式求得

$$i = (D/2)(Z/D)^m \quad (2)$$

式中

D 為隧道直徑，m

Z 為隧道中心至地表之深度，m

m 為參數，當 $m = 0.8$ 時式(2)即為Clough & Schmidt【2】所建議之經驗式

至於壓密沉陷量則由式(3)求得

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

式中

ζ 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

由上可知，潛盾隧道施工所導致之地表沉陷量大小可藉由土壤漏失率(v)及壓密沉陷指數(α)二個參數推估而得。

三、施工案例

3.1 案例一

理論上，當土壓平衡式潛盾機於施工期間之前進速度與出土速度一致時，潛盾機前方之地盤將不致受擾動而產生沉陷或隆起；若前進速度小於出土速度時則易使潛盾機前方地盤發生下陷；反之則導致地盤隆起。前述之現象可藉由裝設於潛盾機前方面板上土壓計與地表沉陷點之量測值進行分析後獲得瞭解。如何於土壓平衡式潛盾機施工期間，藉由土倉壓力之控制以減少因其施工所導致之地表沉陷量，則為本案例討論之重點。

本案例採用台北捷運系統新店線CH218標潛盾隧道施工之結果，藉由土壤漏失率(v)及隧道中心線上壓密沉陷指數(α)與土倉壓力大小之關係，探討潛盾機土倉內壓力之大小對地表沉陷量之影響。其中土倉壓力之大小需將潛盾機施作深度之影響納入考量，即採用土倉壓力係數(β)表示，其計算式如下：

$$\beta = (P-u)/(\sigma_v - u) \quad (4)$$

式中

- β 為土倉壓力係數
- P 為施工期間作用於潛盾機面板上之側壓力，kpa
- σ_v 為潛盾機面板處之垂直現地應力，kpa
- u 為施工前潛盾機面板處之水壓力，kpa

有關本案例中因潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率(v)及隧道中心線上壓密沉陷指數(α)係依據下列步驟求得。

- (1) 採用第一條施作隧道(下行隧道)數個完整量測斷面之地表沉陷觀測結果，藉由式(1)求得各完整量測斷面之 i 值。
- (2) 由數個完整量測斷面所求得之 i 值及其 Z 與 D 值，求得式(2)中之 m 值，以建立 i 值之計算式。(本案例之 m 值約為0.8，結果如圖2所示，亦即Clough & Schmidt之經驗式適用於本案例)

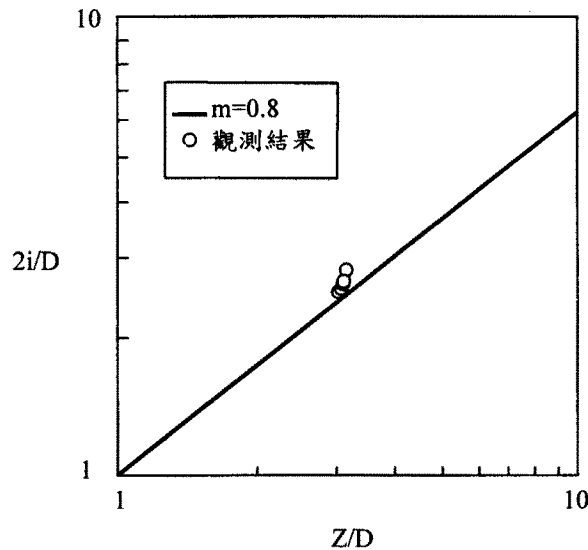


圖2 寬度參數與隧道深度關係圖

- (3) 將位於上下行隧道中心線上方沉陷點之沉陷歷時曲線以如圖1所示之半對數曲線表示，由此沉陷歷時曲線求得該沉陷點之 δ_{10} 及 α 。因CH218標採用二次灌漿進行建物保護，故所選取之沉陷點必需不受此灌漿之影響。除此之外，所選取位於後施作隧道(上行隧道)中心線上方之沉陷點則亦必需不受先行施作隧道(下行隧道)施工之影響。
- (4) 由第(3)步驟所求得之 δ_{10} 及Clough & Schmidt經驗式所求得之 i 值，藉由式(1)求得該斷面之土壤漏失率(v)。

經由上述步驟所求得CH218標上下行隧道沿線之土壤漏失率(v)及隧道中心線上壓密沉陷指數(α)如表1所示。此二參數與地層、施作深度及土倉壓力之關係，楊國榮等【1】已作深入探討，本案例則僅針對其與土倉壓力之關係進行討論。圖3及圖4為土壤漏失率(v)及隧道中心線上壓密沉陷指數(α)與土倉壓力係數(β)之關係。由圖3及圖4之結果可知，土壤漏失率(v)隨土倉壓力係數(β)增大而減小，當土倉壓力係數由0.3增至0.7時，土壤漏失率由1.6%~2%降至1.3%~1.7%。隧道中心線上壓密沉陷指數(α)則不因土倉壓力係數(β)增減而有所改變，其值約介於3mm~6mm之間。

根據上述結果得知，適度地加大潛盾機土倉內壓力可減少因潛盾隧道施工所導致之地表沉陷量。CH218標之潛盾隧道若於地表下16m進行鑽掘時，位於隧道中心線上方面地表之立即沉陷量將因加大土倉壓力而由28mm~35mm降至23mm~30mm，約減少18%；但壓密沉陷量則不會因土倉壓力增大而有所增減。

表1 CH218標沉陷觀測結果一覽表(未施作二次灌漿)

沉陷點編號	位置	環片數	深度(m)	土倉壓力(kpa)	δ_{10} (mm)	α (mm)	v (%)
SM33	下行隧道中心線上	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		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		上行隧道中心線上	56	13.9	215	30	3.3
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	75		14.6	215	24	6.0	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	6.0	1.5
SM221	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	4.0	1.4

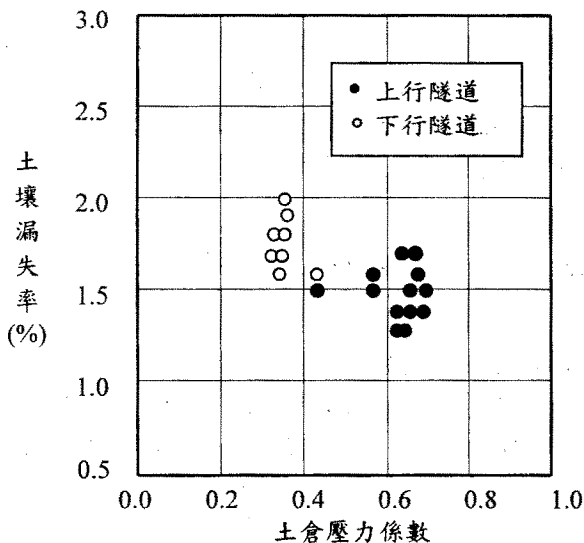


圖3 土壤漏失率與土倉壓力係數關係圖

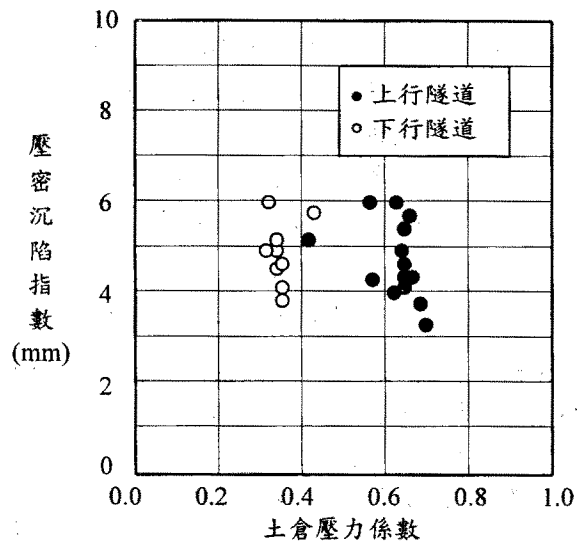


圖4 隧道中心線上壓密沉陷指數與土倉壓力係數關係圖

3.2 案例二

本案例採用位於台北捷運系統新店線CH218標隧道沿線之地面型沉陷點量測資料，探討二次灌漿之機制與其使用於減少因潛盾隧道施工所導致隧道上方地面沉陷之成效。CH218標於潛盾隧道施工期間係採用二次灌漿以減少隧道上方結構物之沉陷量，達到建物保護之目的。所施作之二次灌漿係於潛盾機盾尾後方第5環施作，施工時由隧道內自環片上背填灌漿孔於隧道環片外1m外施作1m厚之灌漿環，施作示意圖如圖5所示，施作範圍與位置則視建物所在位置而定，即於建物側進行施灌。表2為所採用二次灌漿之灌漿材料成份與配比，施工時將此瞬凝與緩凝二種材料分別依序灌注於環片外緣外1.75m與1.25m處之地盤內，以形成1m厚之灌漿環。施工時灌漿壓力控制在200kpa以下以避免造成隧道環片之損壞；灌注量則控制在30%以內，並視潛盾機出土狀況增加其灌注量；施灌速度則視灌漿壓力之大小採用12~20 l/min灌漿速度進行。

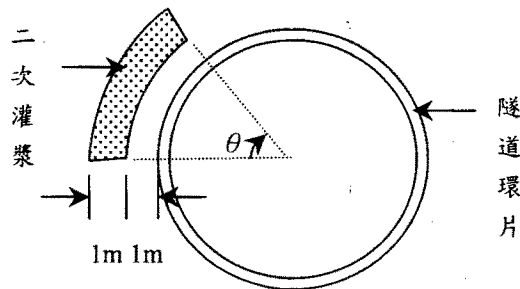


圖5 CH218標二次灌漿施工示意圖

表2 CH218標二次灌漿採用材料配比一覽表

緩凝劑				瞬凝劑	
A液(50 l)		B液(100 l)		(100 l)	
3號矽酸鈉	12.5 l	3號矽酸鈉	25 l	3號矽酸鈉	25 l
水	37.5 l	硬化劑	5 l	硬化劑	5 l
		水	70 l	水	70 l

表3 CH218標下行隧道施作二次灌漿之5個完整量測斷面分析結果

環片數	隧道中心深度 (m)	土倉壓力 (kpa)	偏心率 (m)	i (m)	v (%)	α (mm)	二次灌漿施作角度(θ)	灌漿量 (l)
318	21.7	256	2.75	12.0	1.19	5	45°	300
323	21.9	267	2.80	10.2	1.29	3.5	90°	2136
328	22.2	271	2.45	13.5	1.59	6	135°	3204
333	22.3	275	-0.75	10.4	1.36	4.6	135°	4000
338	22.5	264	1.05	11.3	1.46	6	180°	4620

表3為CH218標先行施工隧道(下行隧道)有施作二次灌漿之5個完整量測斷面之分析結果，圖6至圖9則為採用此分析結果所建立之關係圖。此5個量測斷面位於下行隧道318環至338環間，隧道於地表下21m至23m間施作，隧道上方則為現有道路，各個量測斷面則各配置9處地面型沉陷點，涵蓋範圍則包括隧道中心線左右各約20m。由圖6所示二次灌漿施作角度與沉陷槽偏心率之關係得知，於隧道上方施作二次灌漿時沉陷槽將產生不等之偏心率。當施作角度 θ 為45°時(即於左側0°至45°範圍內施作二次灌漿)，沉陷槽中心線向右側偏移2.8m左右，此偏移量並未隨施作角度增加而明顯減少，但於施作角度達180°時，偏心率則僅向右側偏移約1m左右。由案例一之結果可知，土壤漏失率將因土倉壓力係數之增加而減少，茲將5

個完整量測斷面所求得之土壤漏失率標示於圖3中，結果如圖7所示，顯示土壤漏失率將因施作二次灌漿而減少。至於壓密沉陷指數則不會因是否施作二次灌漿而產生明顯之差異，結果如圖8所示。圖9則為施作二次灌漿對*i*值之影響，其中未施作二次灌漿之*i*值係由Clough & Schmidt之經驗式計算而得。由圖9之結果顯示*i*值將因施作二次灌漿而增加，亦即施作二次灌漿將使沉陷槽變得較為平緩。

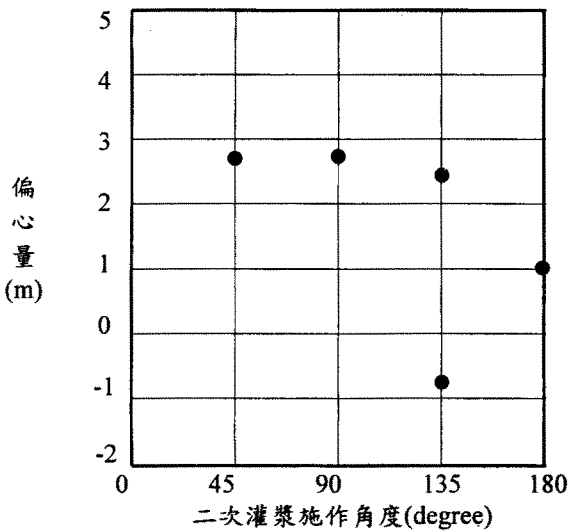


圖6 二次灌漿施作角度與偏心率關係圖

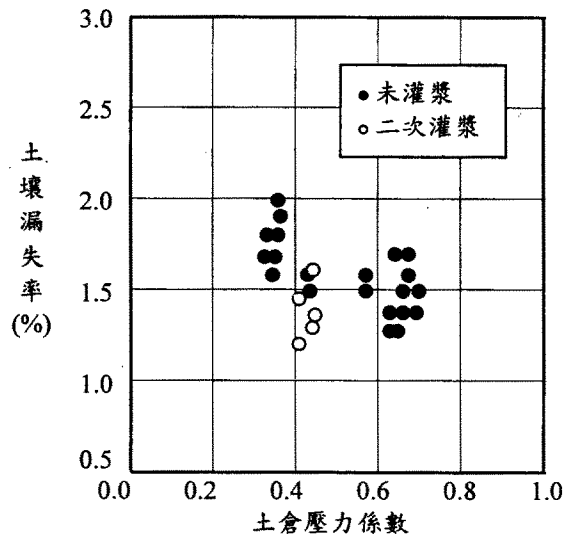


圖7 土壤漏失率與土倉壓力係數關係圖

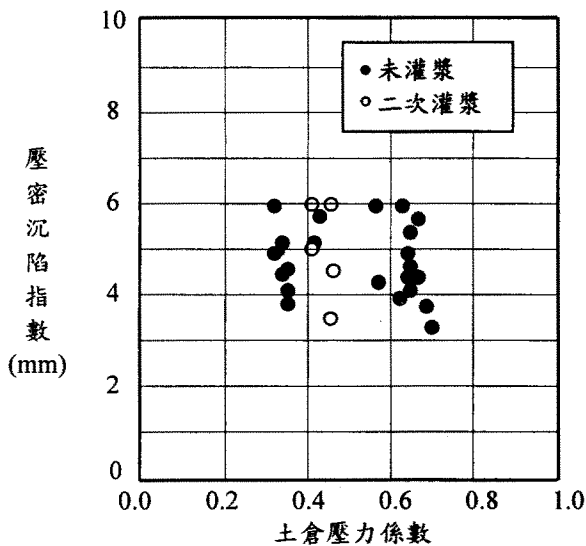


圖8 隧道中心線上壓密沉陷指數與土倉壓力係數關係圖

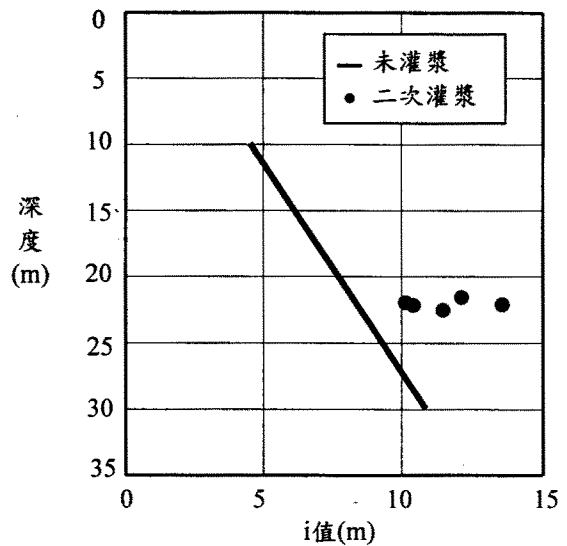


圖9 *i*值與深度關係圖

根據上述結果得知，採用二次灌漿可減少因潛盾隧道施工所導致之地表沉陷量，進而達到建物保護之目的。若潛盾隧道於地表下22m進行鑽掘，並保持土倉壓力係數為0.4之情況下，因潛盾隧道施工所導致之土壤漏失率將因施作二次灌漿後由1.5%~1.9%降至1.2%~1.6%；隧道中心線上壓密沉陷指數則仍維持在3mm~6mm左右；*i*值則由8.5m增加至10.5m以上。若不考慮因施作二次灌漿所產生之偏移情形，據此推估位於該隧道中心線上方地面之立即沉陷量將因施作二次灌漿而由20mm~26mm降至13mm~18mm以下，沉陷量至少減少約35%；壓密沉陷量則並不會因施作二次灌漿而有所增減。上述結果亦可由位於CH218標上下行隧道其他量測斷面中心線上地面型沉陷點之量測結果獲得證實，其結果如圖10與圖11所示。圖中所示未施作二次灌漿之 δ_{10} 乃依據圖3之土壤漏失率(上下行隧道之土壤

漏失率分別為1.3%~1.7%及1.6%~2.0%)計算而得。

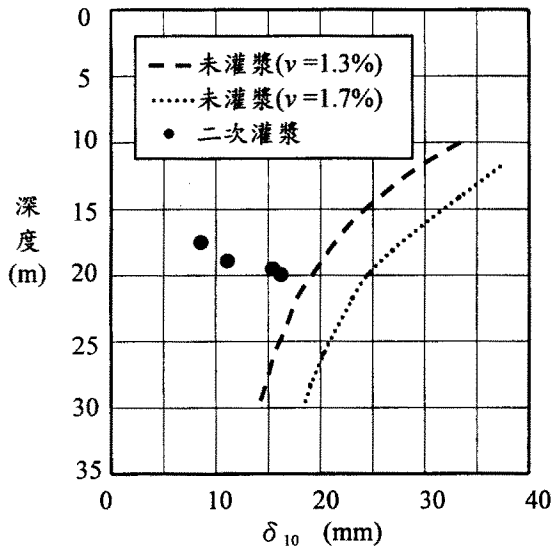


圖10 施作與未施作二次灌漿 δ_{10} 比較結果(上行隧道)

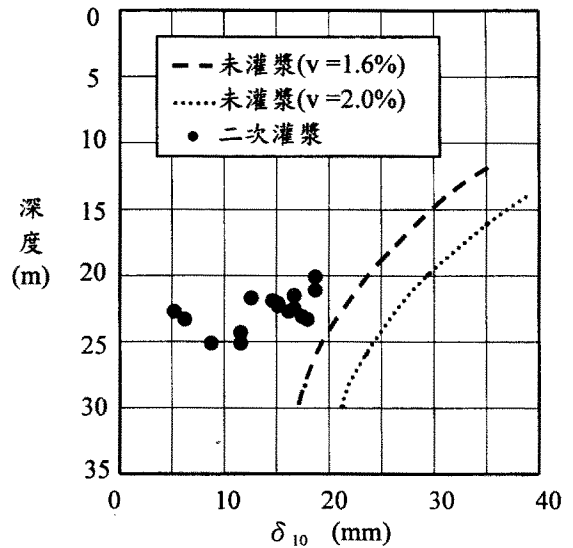


圖11 施作與未施作二次灌漿 δ_{10} 比較結果(下行隧道)

3.3 案例三

藉由本案例所採用之遮幕牆，可限制因潛盾隧道施工所導致沉陷槽之擴大，並防止施工隧道鄰近建物發生嚴重之沉陷，以此達到建物保護之目的。本施工案例係摘錄自 T. HANYA [4] 所發表之文獻，該文獻係採用 B 及 H 二個隧道之地表沉陷觀測結果，探討所採用遮幕牆之功效。

表4 Case B-2與Case B-5沉陷觀測結果之比較

Case	狀況	沉陷量(mm)				
		X=0m	X=5m	X=15m	X=25m	X=55m
B-2 (未採用遮幕牆)	壓縮空氣壓力解除前	166 (73.5)	154 (72.0)	86 (58.1)	23 (43.4)	10 (58.8)
	因壓縮空氣解除之影響	60 (26.5)	60 (28.0)	62 (41.9)	30 (56.6)	7 (41.2)
	總和(A)	226 (100)	214 (100)	148 (100)	53 (100)	17 (100)
B-5 (採用遮幕牆)	壓縮空氣壓力解除前	199 (74.5)	190 (73.9)	28 (71.8)	16 (66.7)	7 (70.0)
	因壓縮空氣解除之影響	68 (25.5)	67 (26.1)	11 (28.2)	8 (33.3)	3 (30.0)
	總和(B)	267 (100)	257 (100)	39 (100)	24 (100)	10 (100)
	(B)/(A)	1.18	1.20	0.26	0.45	0.59

說明：1.()內之值為沉陷百分比

2.X為距隧道中心線之距離

首先探討B隧道之案例，此隧道於某些斷面施作遮幕牆以保護隧道鄰近之建物。此遮幕牆係由二排深度為30m之鋼版樁構築而成，此二排鋼版樁位於二平行隧道之二側，距離隧道邊緣1m。表4及圖12為Case B-5與Case B-2二種案例之比較結果，其中Case B-5採用遮幕牆，Case B-2則未採用遮幕牆。由表4及圖12之結果得知，位於遮幕牆範圍內之沉陷量Case B-5較Case B-2大20%；遮幕牆範圍外10m內之沉陷量Case B-5則為Case B-2之1/3；此二種案例於距遮幕牆較遠處則無太大之差異。至於Case B-2與Case B-5因隧道施工所導致每環之土壤漏失量則如表5所示。由表5之結果得知，位於遮幕牆範圍內之土壤漏失量Case B-5較Case B-2大

20%；遮幕牆範圍外之土壤漏失量Case B-5則為Case B-2之36%；總土壤漏失量Case B-5則約為Case B-2之70%。由上述之結果可知，遮幕牆達到一定之效果。

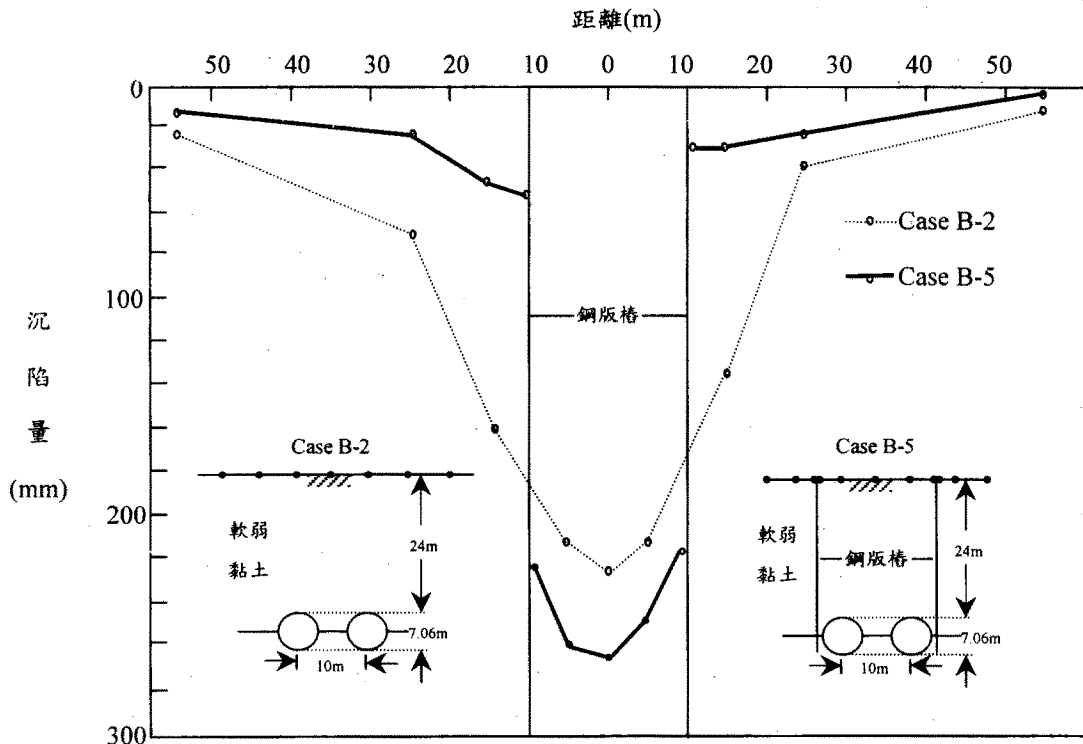


圖12 Case B-2與Case B-5沉陷觀測結果之比較

表5 Case B-2與Case B-5土壤漏失量之比較

Case	土壤漏失量(m ³ /環)			
	0-10m	10-25m	25-55m	總和
B-2	3.75	3.28	1.90	8.93
(A)	(42.0)	(36.7)	(21.3)	(100)
B-5	4.5	0.93	0.92	6.35
(B)	(70.9)	(14.6)	(14.5)	(100)
(B)/(A)	1.2	0.28	0.48	0.71

說明：()內之值為土壤漏失量之百分比

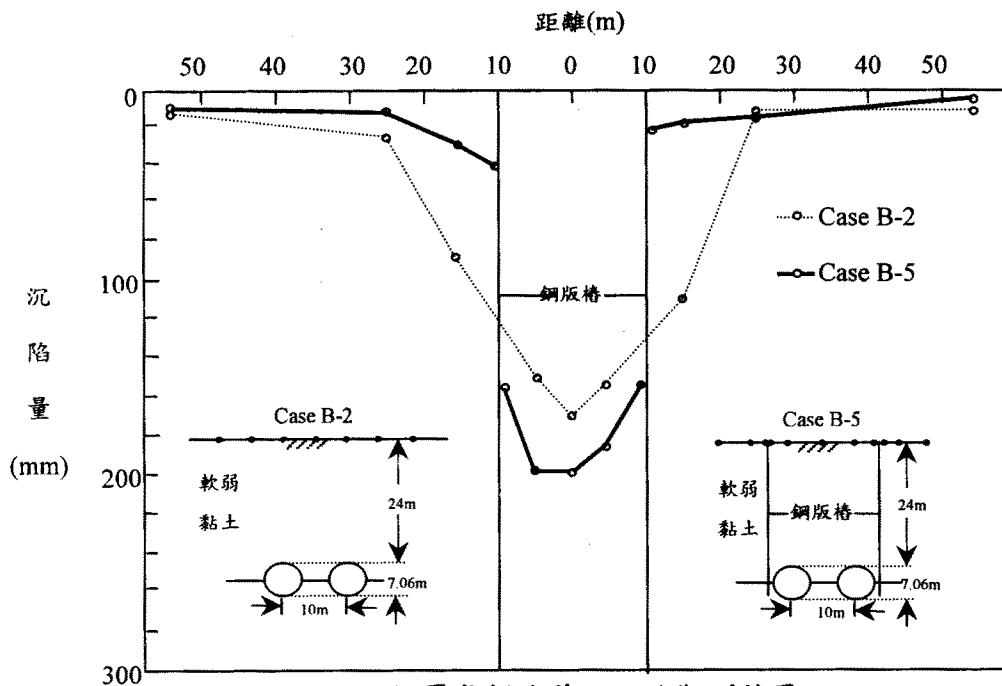
圖12之結果包括壓氣解除之影響，茲將壓氣解除之影響自圖12分離後所得之結果如圖13所示。由圖13(b)結果得知，遮幕牆存在與否對沉陷曲線之分佈影響很大，圖13(a)亦顯示相同之結果，此乃因受隧道施工及壓氣所擾動之區域被遮幕牆隔離所致。

第二個案例為H隧道，此隧道係採用鋼筋混凝土牆作為遮幕牆，圖14為此案例之剖面圖及地表沉陷觀測結果。由圖14之結果得知，採用鋼筋混凝土牆作為遮幕牆，其遮幕牆內側之最大地表沉陷量高達95mm，遮幕牆外側之地表沉陷量則小於10mm。此案例位於遮幕牆外側之沉陷量明顯較B隧道為低，由此可判斷乃因鋼筋混凝土牆較鋼版樁勁度為高使其受較大之圍束所致。

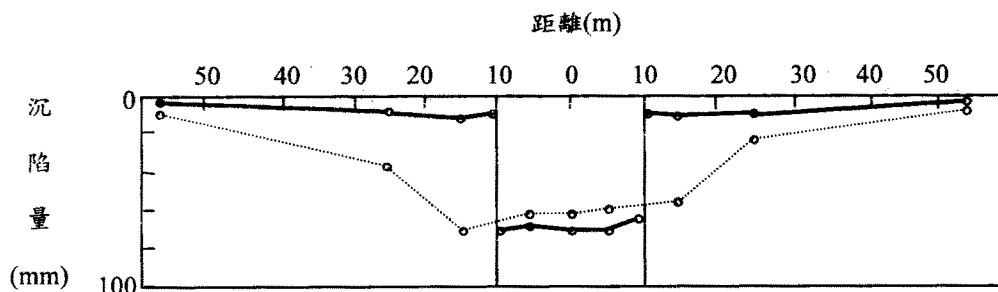
四、結論及建議

由本文所提供之施工案例得知，不論藉由加大潛盾機土倉內壓力、或施作二次灌漿、或施作遮幕牆等方式，皆可有效減少因潛盾隧道施工所導致隧道上方之地表沉陷量。因此若採用上述工法施作，應可減少隧道上方結構物之沉陷量，達到建物保護之目的。本文所提供之案例其涵蓋面雖不夠廣，但其結果應可讓讀者一探各工法之機制與行為。於案例一中，如何於加大潛盾機土倉內壓力之同時，避免損壞已裝設之隧道環片，則為其施作之重點。CH218

標承商於施工期間於潛盾機盾殼四周注入泡沫，藉此減少潛盾機盾殼與其四周地盤之摩擦阻力以達其目的。案例二所使用二次灌漿成效之好壞，作者咸信與其所採用之灌漿材料、灌漿量與施作時機息息相關，施作廠商之經驗亦將直接影響此工法之成效。雖然由案例二之觀測結果得知，進行二次灌漿時採用不同施作角度之結果並未存在明顯之差異，作者認為所施作二次灌漿之位置及範圍仍需視建物所在位置而定，即於建物側進行施灌。案例三所探討之結果僅為因隧道施作及壓氣解除之影響，若所使用之遮幕牆擬採用連續壁施作，因連續壁施工所導致之沉陷量則必需納入考量；若所使用之遮幕牆為鋼版樁，此鋼版樁於隧道施工後拔除之影響亦需納入考量。至於遮幕牆內因隧道施工所導致之沉陷量則可藉由二次灌漿加以減少。



(a) 壓氣解除前之沉陷觀測結果



(b) 壓氣解除後之沉陷觀測結果

圖13 Case B-2與Case B-5沉陷觀測結果之比較

參考文獻

1. 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, 阿里山, 台灣, pp1083-1090.
2. Clough, W. and Schmidt, B. (1981), Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay, Soft Clay Engineering, Elsevier Amsterdam.
3. Hwang, R.N., Fan, C.B., Yang, G.R.(1995), Consolidation Settlements Due to Tunneling, Proceedings, South East Asian Symposium on Tunneling and Underground Space

Development, Bangkok, Thailand.

4. Hanya, T., Ground Movement due to Construction of Shields-Driven Tunnel.
5. Peck, R.B.(1969), Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proc., 7th ICSMFE, State-of-Art Volume, Mexico City, Mexico, pp225-290.

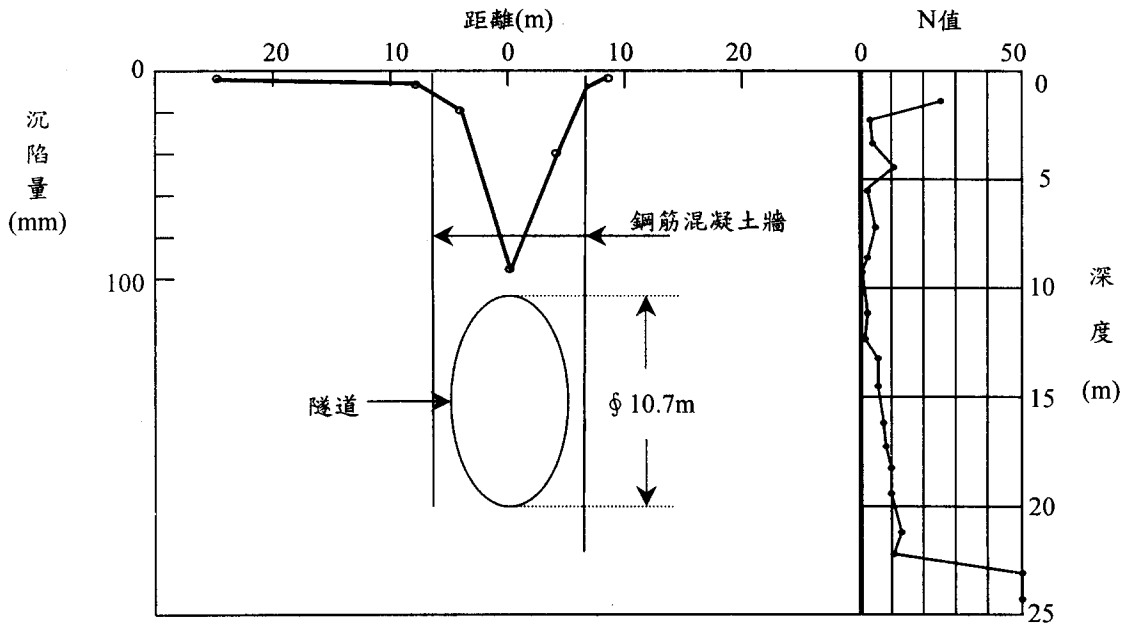


圖14 H隧道沉陷觀測結果

誌謝

本文於撰文期間獲得亞新工程顧問公司黃南輝博士與黃立煌正工程師提供寶貴意見，並承蒙CH218標承商大林組/互助及專業分包商三信建設工業株式會社王錦伍先生提供資料，在此深表謝忱。

Case History on Control of Settlement during Shield Tunneling

G. R. Yang¹ S. N. Wang¹ T. K. Chen²

¹Moh and Associates, Inc., Consulting Engineers

²Department of Rapid Transit System, Taipei Municipal Government

Abstract

The settlement of structures due to tunneling can be reduced by either increasing the chamber pressure of the shield machine, secondary grouting, or by cut-off walls. This paper presents three cases to show the effectiveness of those methods. The ground loss induced by tunneling can be reduced significantly by either increasing the shield chamber pressure or the use of the secondary grouting. However the settlement tough deviates from the longitudinal axis and the width of the trough is larger when secondary grouting is adopted. The settlement inside the cut-off wall becomes larger while that outside the wall is reduced when the cut-off wall method is adopted.