

多重潛盾隧道施工導致之地表沉陷
**GROUND SETTLEMENT TROUGHS INDUCED
BY MULTIPLE SHIELD TUNNELLING**

楊國榮，楊鵬飛，范陳柏
G. R. Yang, P. F. Yang and C. B. Fan

原著載於第二屆結構與地基國際學術研討會
1997年1月7~10日，第744~751頁

*Reprinted from Proceedings of 2nd International Symposium on
Structures and Foundations in Civil Engineering
Hong Kong, China
January 7~10, 1997, pp.744~751*

多重潛盾隧道施工導致之地表沉陷

楊國榮 楊鵬飛

范陳柏

亞新工程顧問公司

台北市政府捷運工程局南區工程處

摘要

本文採用位於台北捷運系統新店線三個施工標內七個量測斷面地表沉陷觀測結果，探討二至四條平行或重疊潛盾隧道施工導致之地表沉陷行爲。研究指出於台北盆地T2區與H2區進行二至四條潛盾隧道施工時，不論隧道爲平行或上下重疊配置，因其施工所導致之地表沉陷槽皆可由單潛盾隧道施工所推估之地表沉陷槽疊加而得。

一、前言

潛盾隧道施工所導致之地表沉陷爲潛盾隧道設計與施工中重要考量因素之一。都會區捷運系統之潛盾隧道一般規劃爲上行與下行二條，多呈平行或上下重疊，於不同捷運路線交會處甚至出現多條隧道交錯重疊情形。故於探討潛盾隧道施工所導致地表沉陷行爲時，二條以上潛盾隧道施工所導致之地表沉陷愈發顯得重要，而值得進一步探討。本文擬採用位於台北捷運系統新店線CH218、CH221與CH223三個施工標內七個量測斷面之地表沉陷觀測結果，探討二至四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行爲。

二、基地位置

台北捷運系統初期路網平面配置如圖1所示，包括木柵、淡水、南港、新店、中和與板橋等六線。其中新店線由位於台北市公園路與常德街交叉口附近之二二八和平公園（原新公園）旁之新公園車站（R12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（G01站），全線皆

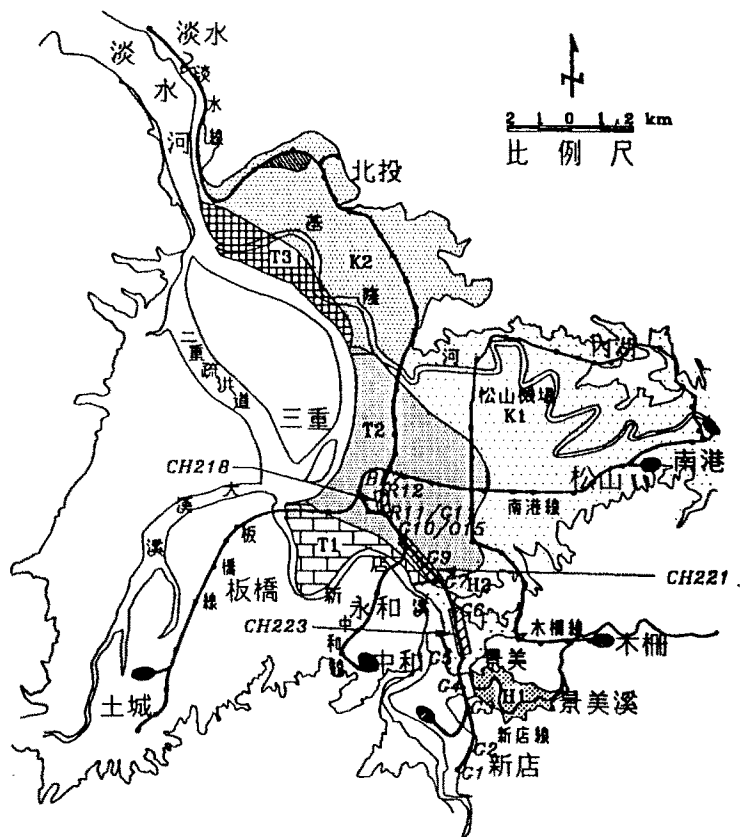


圖 1 台北捷運系統初期路網配置及基地位置圖

為地下段。新店線於羅斯福路二段與南昌街交叉口附近與中和線銜接，並於新店北新路與中正路交叉口處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。本文擬探討之量測斷面，其所屬之施工標CH218、CH221與CH223則分別位於新店線偏北與中間部份，其位置亦示於圖1。

三、地層與地下水狀況

新店線沿線地層分佈狀況如圖2所示，以蟾蜍山為分界將其地層分為南北完全不同之區域。CH218標與CH221標位於蟾蜍山以北，所在位置之地層屬台北盆地T2區，為黏土層與砂土層交互出現之典型松山層。CH223標位於蟾蜍山以南，所在位置則屬台北盆地H2區，基地淺層存在礫石層。

至於CH218標與CH221標地下水位則因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。

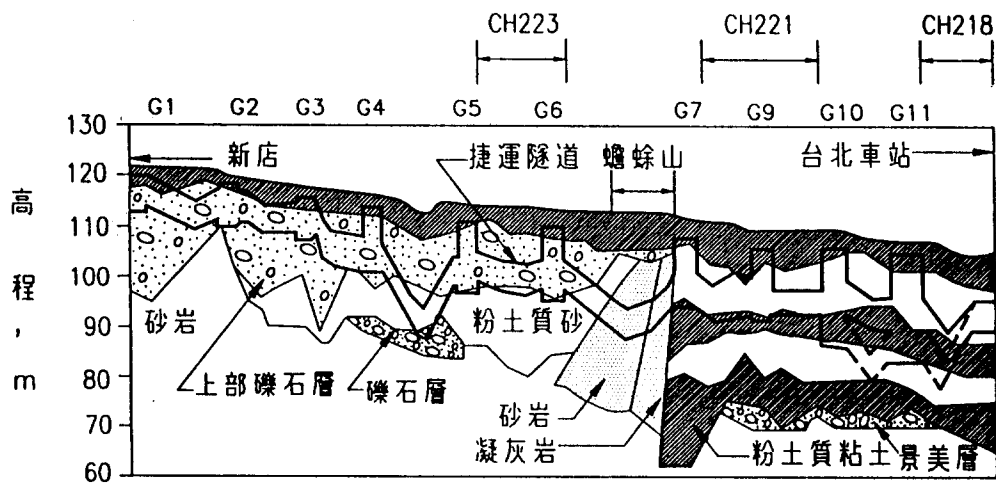


圖 2 新店線沿線地層分佈狀況

CH223標之地下水位則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。

四、潛盾隧道施工狀況

CH218標

CH218標潛盾隧道位於新公園站（R12站）與中正紀念堂站（G11站）間，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，此二條隧道大致呈平行配置，但於鄰CH219標G11站處為上下重疊。上下行隧道中心鑽掘深度分別位於地表下11m至20m左右與地表下12m至24m左右，鑽掘之地層則經過松山第三、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作。

本施工標採用一部直徑6.05m，長度6.1m之土壓平衡式潛盾機進行施工，潛盾機由鄰R12站旁之工作井出發，先行施作下行隧道（1A）再施作

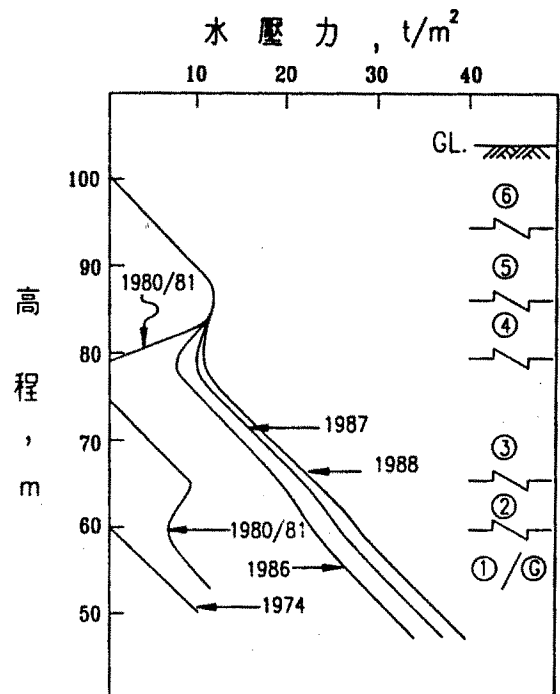


圖 3 台北盆地水壓分佈狀況

上行隧道（1B）。施工採二班制，每日工作24小時，鑽掘進度不論1A或1B隧道每日皆約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，每環之灌漿量不論1A或1B隧道皆約為 1.4m^3 至 2.1m^3 。為達到建物保護之目的，承商於潛盾機通過建物下方時，由隧道內於隧道上方1m外施作1m厚之灌漿環，即俗稱之二次灌漿。

CH221標

CH221標潛盾隧道分中和線與新店線二部份，中和線位於古亭市場站（G10站）與通風豎井間，新店線則位於古亭市場站與台電大樓站（G09站）間。隧道內徑為5.6m，環片厚0.25m、寬1m。中和線分上行隧道（2A）與下行隧道（1A）二條，分別長約600m與580m，1A與2A隧道地表至隧道中心深度分別約為24m至30m與16m至32m，鑽掘之地層則經過松山第二、第三、第四與第五次層，30%路段於結構物下方施作，其餘則於道路或公園下方施工。新店線亦分為上行隧道（2B）與下行隧道（1B）二條，分別長約438m與439m，1B與2B隧道地表至隧道中心深度分別約為12m至18m與10m至13m，鑽掘之地層則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呈平行配置，但於鄰G10站旁之回收井附近四條隧道交錯重疊。

本施工標採用二部直徑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1A與2A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1B與2B隧道之鑽掘工作。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 1.6m^3 至 2.3m^3 。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1m厚之二次灌漿。

CH223標

CH223標潛盾隧道位於萬隆站（G06站）與景美站（G05站）間，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，其間有一轉轍站將其區分成四條隧道，隧道呈平行配置。此四條隧道中心鑽掘深度位於地表下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。

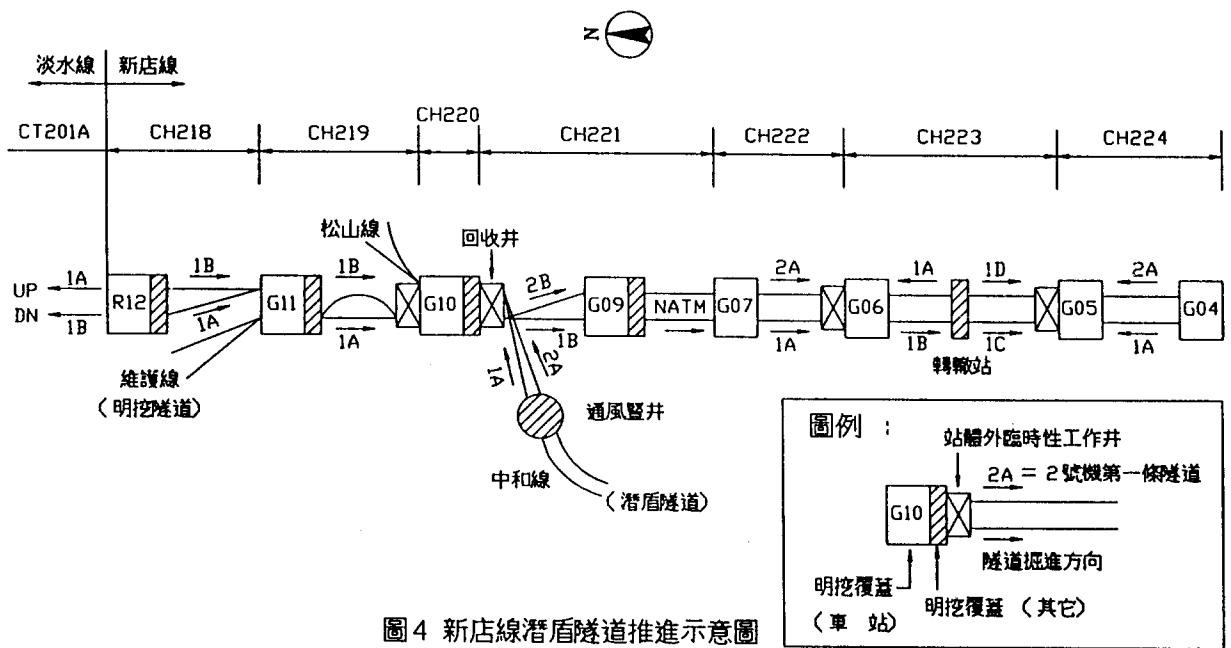


圖4 新店線潛盾隧道推進示意圖

本施工標採用一部直徑6.04m，長度7.1m之土壓平衡式潛盾機進行施工，先依序施作轉轍站至G06站之上行隧道（1A）與下行隧道（1B），再行施作轉轍站至G05站間之下行隧道（1C）與上行隧道（1D）。施工採二班制，每日工作24小時，隧道鑽掘進度約每日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1.8m³至3m³。

有關上述三個施工標之潛盾隧道推進示意圖則如圖4所示。

五、單潛盾隧道施工導致之地表沉陷

單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5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

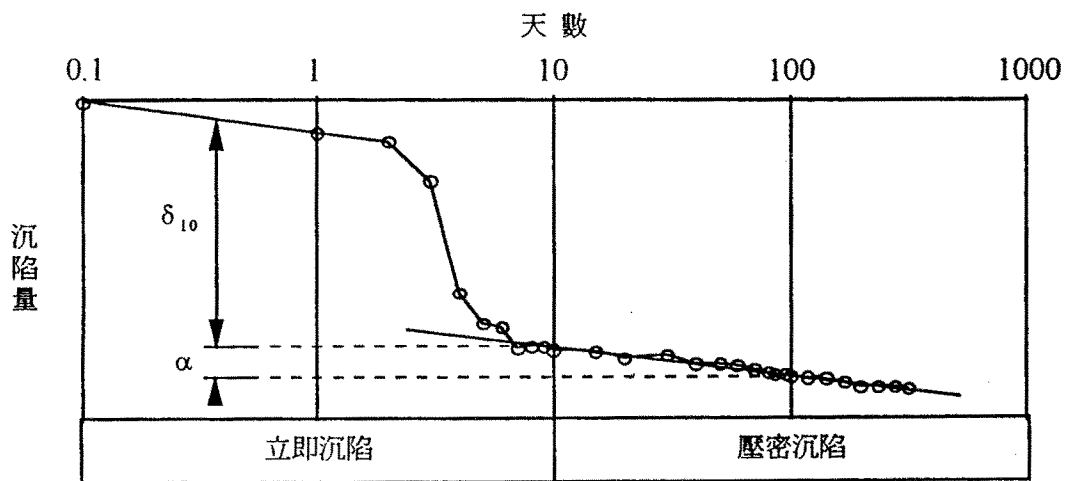


圖5 潛盾隧道施工所導致地表沉陷歷時曲線

- 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

依據台北盆地T2區與H2區之經驗【4，5】，計算地表沉陷槽之 i 值可採用下式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 為地表至隧道中心之深度， m
- D 為隧道直徑， m

至於壓密沉陷則依下式求得

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

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

由上述得知，單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷槽可藉由土壤漏失率 ν 與壓密沉陷指數 α 推估而得。此二參數受潛盾機種類、地層種類、施工方法與施工品質之良窳影響而呈現明顯之差異性。楊國榮等【4，5】已針對台北捷運系統新店線CH218、CH221與CH223標各條潛盾隧道施工所導致之地表

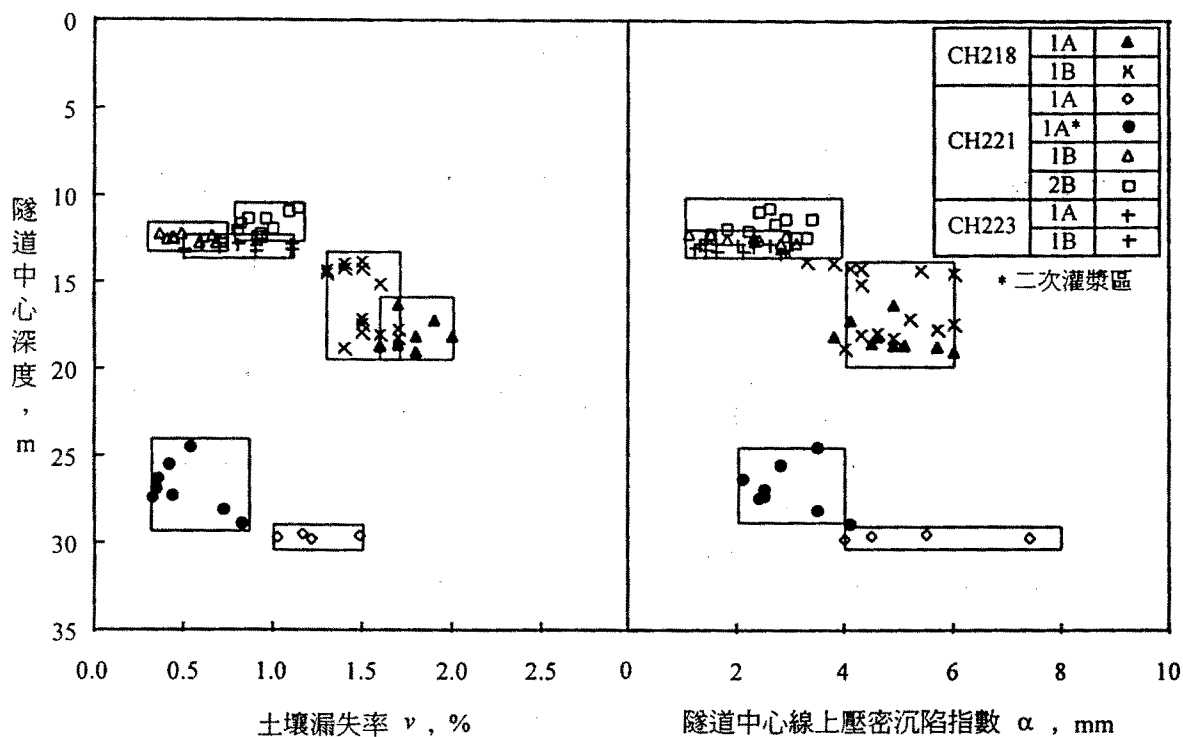


圖6 土壤漏失率與隧道中心線上壓密沉陷指數隨深度變化之關係

沉陷行為作過探討，並整理得因潛盾隧道施工所導致之 v 值與隧道中心線上 α 值隨深度之關係，結果示於圖6，其中 α 值則隨距隧道中心水平距離增加而遞減，如圖7所示。

六、案例探討

本節擬針對位於台北捷運系統新店線 CH218、CH221 與 CH223 三個施工標內七個量測断面之地表沉陷觀測結果，探討二至四條平行或重疊隧道施工所導致之地表沈陷，茲分述如下：

断面 I

本断面位於 CH218 標 1A 隧道 91 環處，通過本断面之 1A 與 1B 隧道，其隧道中心深度皆位於地表下 15m 左右，於松五次層內鑽掘，此二條隧道中心水平

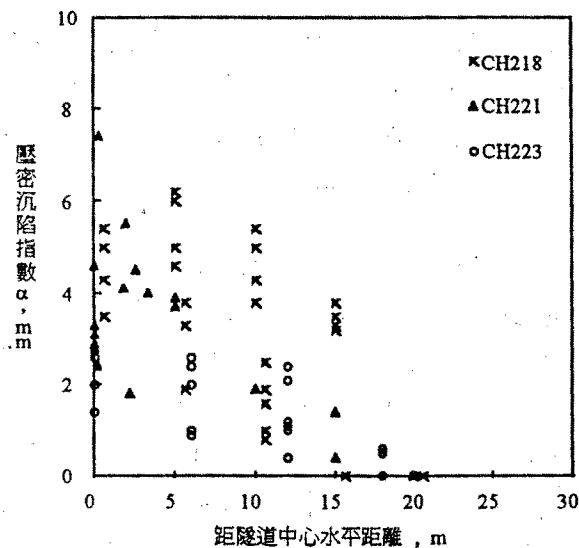


圖7 壓密沉陷指數隨距隧道中心水平距離變化之關係

斷面II

本斷面位於CH221標1A隧道422環處，通過此斷面之四條隧道，1A、2A、1B與2B，其隧道中心深度分別位於地表下27.4m、19.6m、12.8m與10.7m，並於松三、松四與松五次層內鑽掘。此四條隧道於本斷面呈交錯重疊配置，各條隧道間之隧道中心水平距離約為0.6m至12.8m，隧道中心垂直距離則約為2.1m至16.7m，隧道上方共配置7處淺式沉陷計（編號為SSI602至SSI608），其剖面如圖9（a）所示。本斷面隧道施作順序依序為1A、2A、1B與2B，所採用之潛盾機分別於民國82年8月2日、9月29日、12月29日與次年2月6日依序通過本斷面。當施作本斷面1A與2A隧道時，承商並於隧道上方施作二次灌漿。

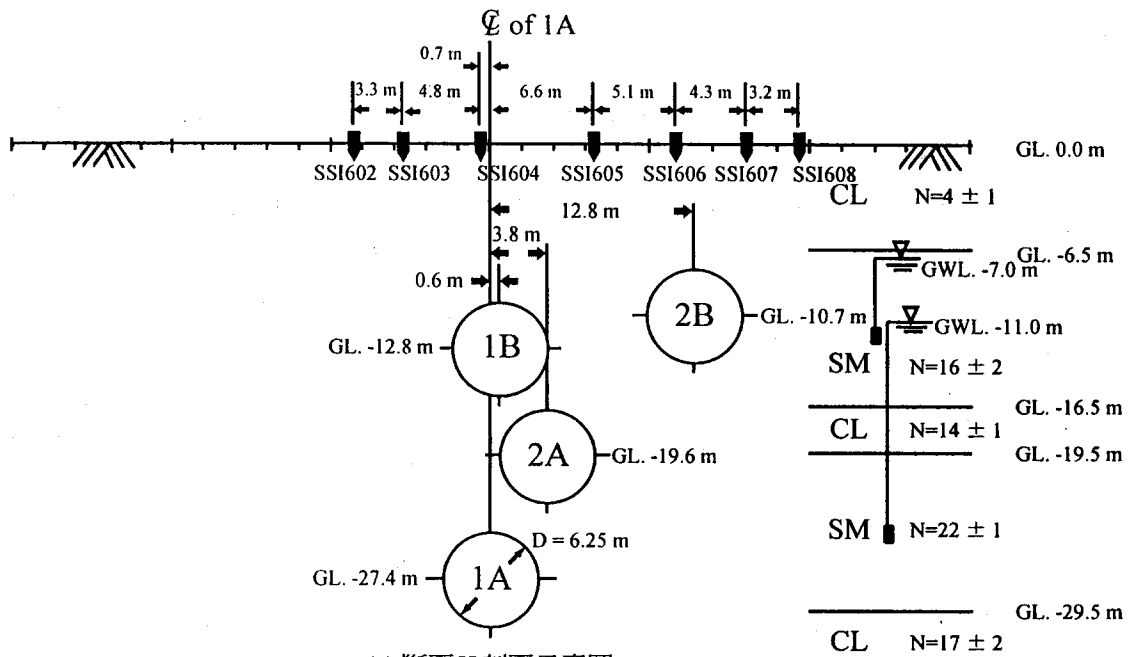
為瞭解本斷面二至四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行為，分別將本斷面（1）2A隧道施作完成後90日、（2）1B隧道施作完成後35日與（3）2B隧道施作完成後60日之地表沉陷觀測值與預估沉陷槽示於圖9（b）至圖9（d）並加以比較，其中預估沉陷槽係為各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽之疊加結果。用於推估本斷面各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽所採用之 ν 值與隧道中心線上 α 值係由圖6而求得，其值列於表1，表中之 α 值則需考量其值係隨距隧道中心水平距離增加而遞減。因2A隧道並無可用之監測資料，故表中所列2A隧道施工所導致之 ν 值與隧道中心線上 α 值主要採用1A隧道之結果，即假設2A與1A隧道施工狀況相同。由圖9（b）至圖9（d）之比較結果得知，本斷面因二至四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷觀測值皆約位於預估沉陷槽之上下限間。

表1 CH221標潛盾隧道沉陷推估所採用之 ν 值與隧道中心線上 α 值

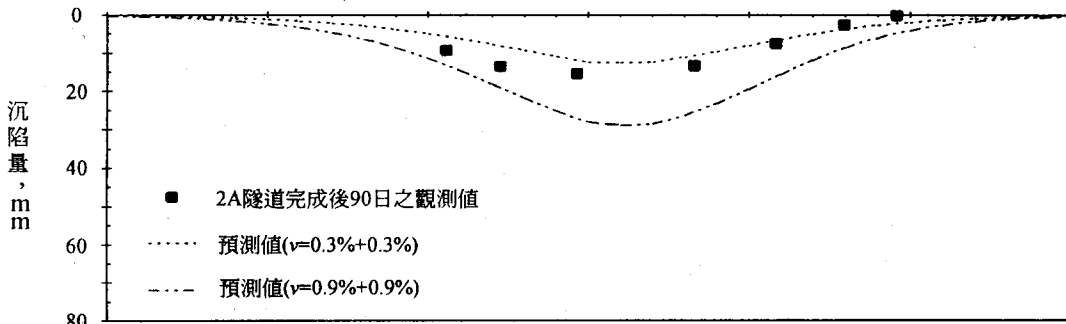
隧道編號	ν (%)	隧道中心線上 α 值 (mm)
1A	0.3至0.9	3
2A	0.3至0.9	3
1B	0.3至0.7	2.5
2B	0.8至1.2	2.5

斷面III

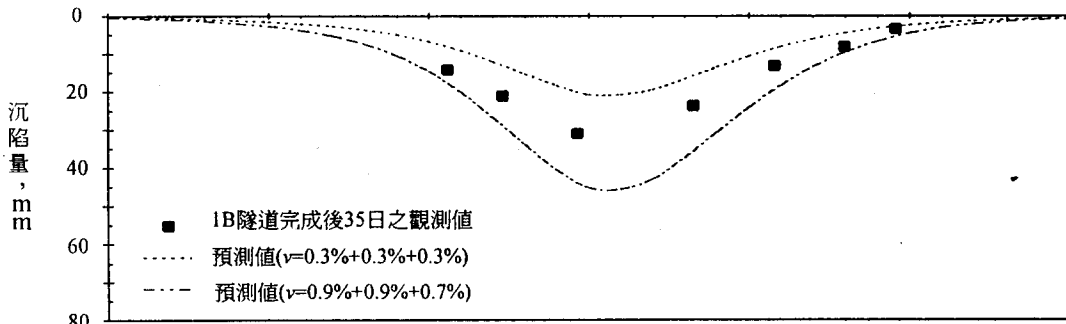
本斷面位於CH221標1A隧道471環處，通過此斷面之四條隧道，1A、2A、1B與2B，其隧道中心深度分別位於地表下26.5m、18.1m、14.3m與10.4m，並於松三、松四與松五次層內鑽掘。位於本斷面之四條隧道呈交錯重疊配置，各條隧道間隧道中心水平距離約為0.2m至11.1m，隧道中心垂直距



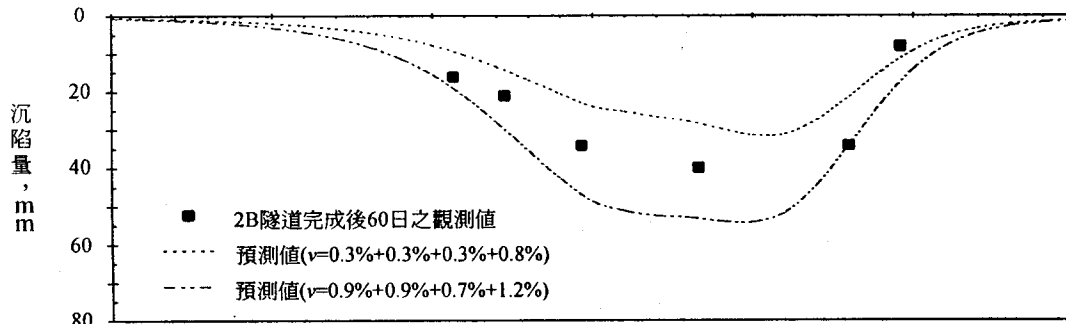
(a) 断面II剖面示意圖



(b) 1A與2A二條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果



(c) 1A,2A與1B三條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果



(d) 1A,2A,1B與2B四條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果

圖 9 断面II剖面示意圖與沉陷觀測結果

離則約為3.8m至6.1m，隧道上方共配置4處地面型沉陷點（編號為EXM533、EXM536、EXM541與EXM543），其剖面如圖10（a）所示。本斷面隧道施作順序依序為1A、2A、1B與2B，所採用之潛盾機分別於民國82年8月10日、10月6日、12月24日與次年2月1日依序通過本斷面。當施作本斷面之1A與2A隧道時，承商並於隧道上方施作二次灌漿。

為瞭解本斷面二至四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行為，分別將本斷面（1）2A隧道施作完成後70日、（2）1B隧道施作完成後35日與（3）2B隧道施作完成後75日之地表沉陷觀測值與預估沉陷槽示於圖10（b）至圖10（d）並加以比較，其中預估沉陷槽係為各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽之疊加結果。用於推估本斷面各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽所採用之 ν 值與隧道中心線上 α 值亦可由表1而獲得，其中 α 值亦需考量其值係隨距隧道中心水平距離增加而遞減。由圖10（b）至圖10（d）之比較結果得知，因二條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷觀測值約位於預估沉陷槽之下限，至於因三或四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷觀測值則約位於預估沉陷槽之上限。

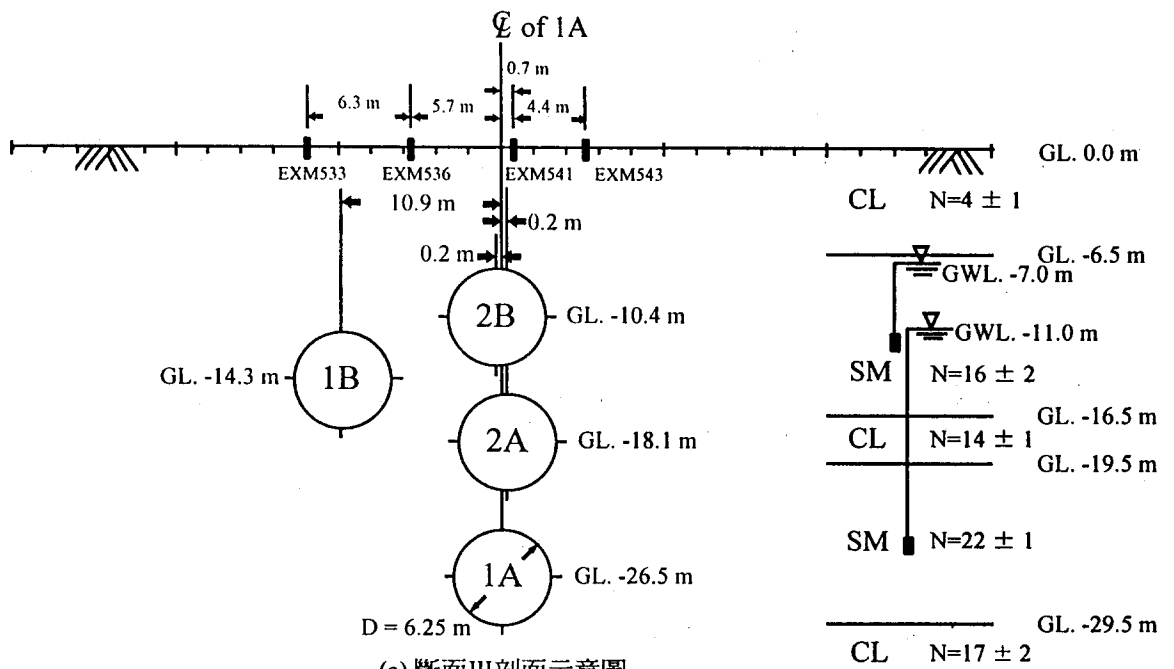
斷面IV

本斷面位於CH221標1B隧道288環處，通過此斷面之1B與2B隧道，其隧道中心深度分別位於地表下12.2m與11.6m左右，於松五次層內鑽掘，此二條隧道中心水平距離約為11.8m左右，隧道上方共配置8處淺式沈沉陷計（編號為SSI579至SSI586），其剖面如圖11（a）所示。CH221標承商先行施作1B隧道再施作2B隧道，所採用之潛盾機分別於民國83年1月14日與2月28日通過本斷面。

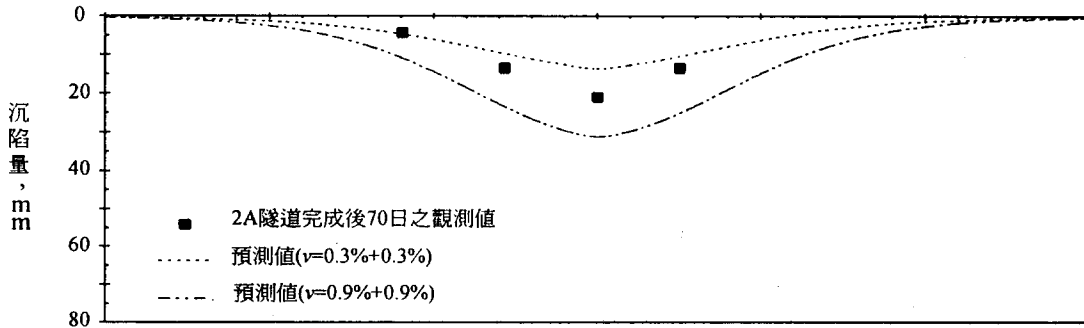
圖11（b）為本斷面2B隧道施作完成後100日之地表沉陷觀測值與預估沉陷槽之比較，其中預估沉陷槽為各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽之疊加結果。有關推估本斷面1B與2B隧道施工所導致地表沉陷槽所採用之 ν 值與隧道中心線上 α 值則亦如表1所示，其中 α 值亦需考量其值係隨距隧道中心水平距離增加而遞減。由圖11（b）之比較結果得知，因二條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷觀測值約位於預估沉陷槽之下限。

斷面V至VII

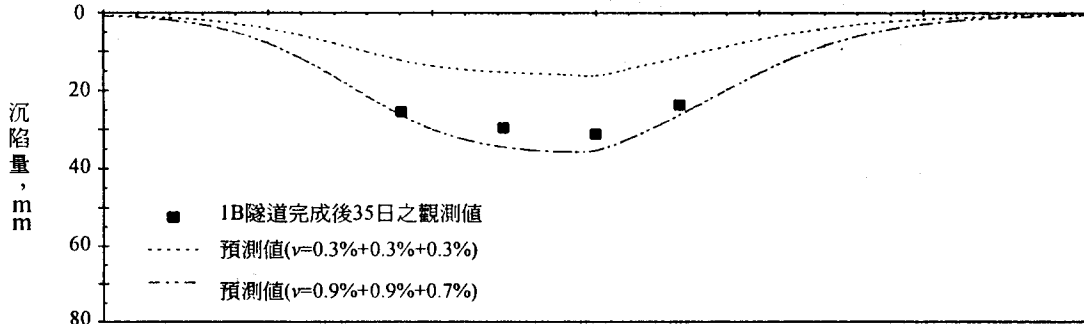
斷面V至斷面VII分別位於CH223標1B隧道48環、68環與87環處，通過此三個斷面之1A與1B隧道，其隧道中心深度皆位於地表下13m左右，並於砂礫層與砂層內鑽掘，隧道間之水平距離則皆相距約12m左右，各斷面之隧道



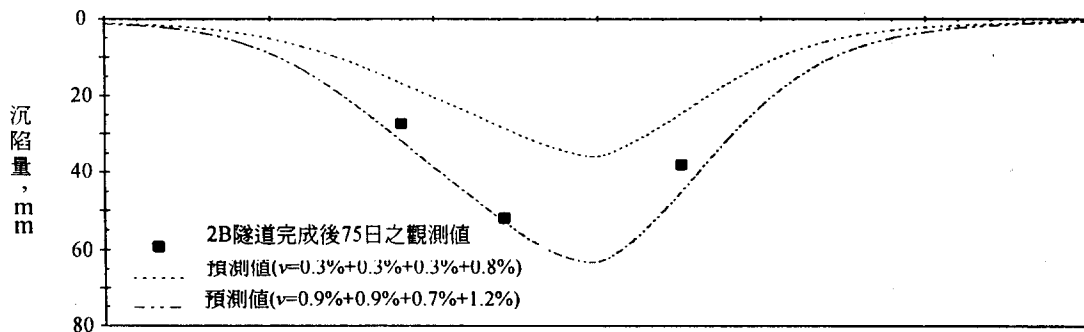
(a) 斷面III剖面示意圖



(b) 1A與2A二條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果

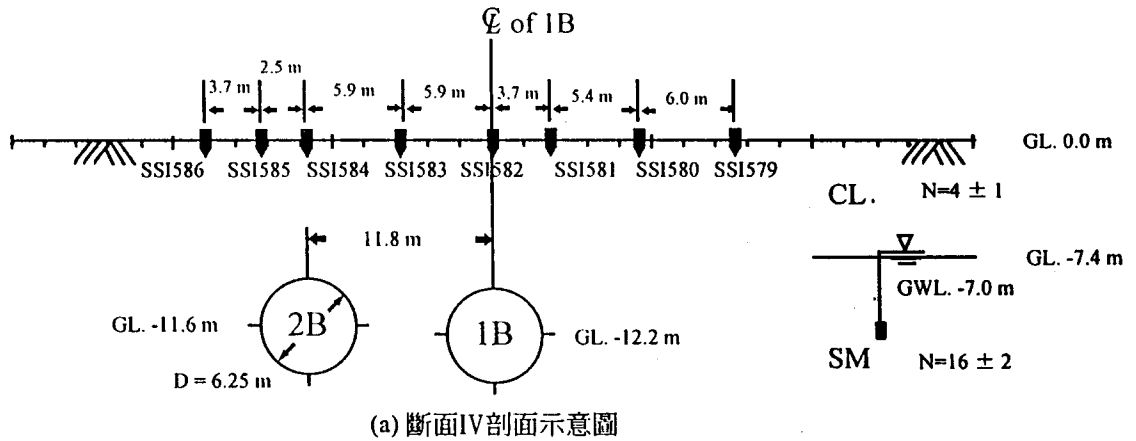


(c) 1A,2A與1B三條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果

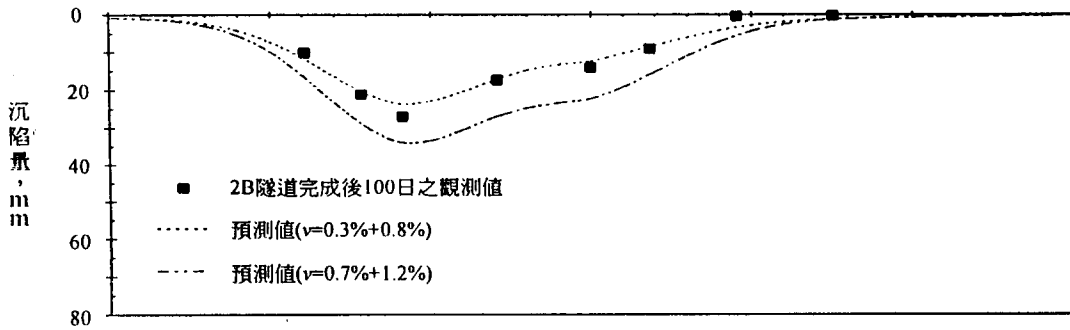


(d) 1A,2A,1B與2B四條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果

圖10 斷面III剖面示意圖與沉陷觀測結果



(a) 斷面IV剖面示意圖



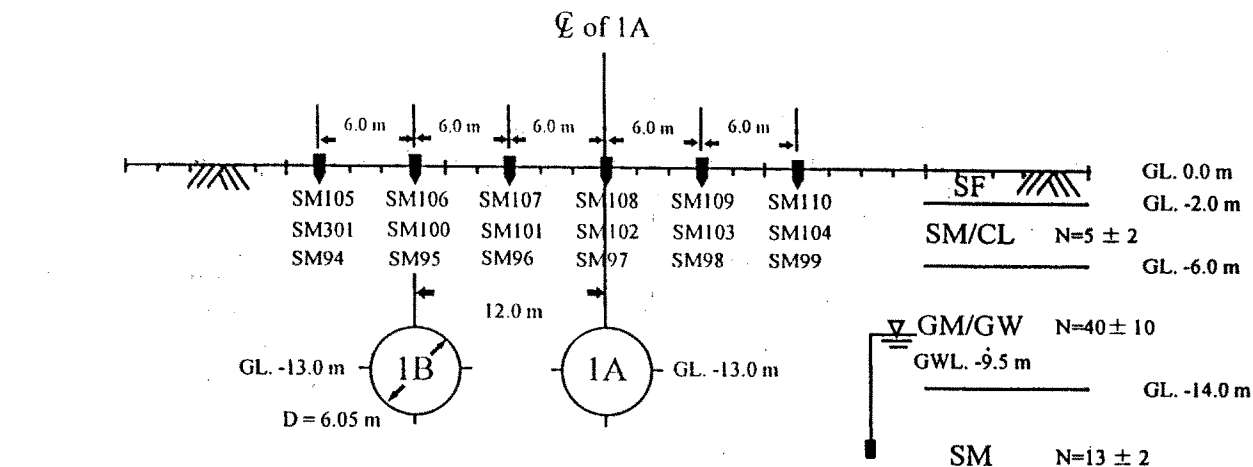
(b) 1B與2B二條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果

圖 11 斷面IV剖面示意圖與沉陷觀測結果

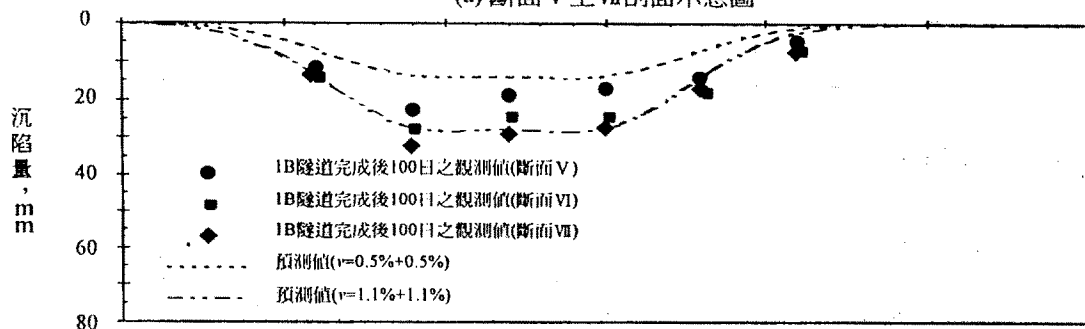
上方各配置6處地面型沉陷點（儀器編號於斷面V為SM105至SM110，於斷面VI為SM301、SM100至SM104，於斷面VII則為SM94至SM99），其剖面如圖12（a）所示。CH223標承商先行施作1A隧道再施作1B隧道，所採用之潛盾機通過上述三個斷面之日期如表2所示。

圖12（b）為此三個斷面1B隧道施作完成後100日之地表沉陷觀測值與預估沉陷槽之比較，其中預估沉陷槽為各單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽之疊加結果。有關推估斷面V至斷面VII之1A與1B隧道施工所導致地表沉陷槽所採用之 ν 值與隧道中心線上 α 值乃由圖6而求得，其值分別約為0.5%至1.1%與2mm，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。由圖12（b）之比較結果得知，地表沉陷之觀測值約位於預估沉陷槽上下限之間。

綜合上述七個量測斷面之觀測結果可知，大部份地表沉陷觀測值位於預估沉陷槽上下限之內，少數點位則分散於預估沉陷槽之外，整體而言因二至四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷觀測值與預估沉陷槽相當吻合。



(a) 断面V至VII剖面示意圖



(b) 1A與1B二條潛盾隧道施工所導致地表預估沉陷槽與量測值比較結果

圖 12 断面V至VII剖面示意圖與沉陷觀測結果

表2 断面V至断面VII潛盾隧道施工相關資料

断面	環片數 (下行)	隧道編號	潛盾隧道到達時間 (月/日/年)	隧道編號	潛盾隧道到達時間 (月/日/年)
V	48	1A	7/1/94	1B	10/14/94
VI	68	1A	6/24/94	1B	10/19/94
VII	87	1A	6/21/94	1B	10/23/94

於探討上述七個量測断面多重潛盾隧道施工所導致之地表沉陷時，所採用之觀測值係依據下述原則而進行：

- (1) 原則上採用隧道施作完成後100日之觀測值進行比較
- (2) 若觀測值受諸如地下水下降與鄰近施工等外在因素之影響而導致額外之沉陷時，其觀測值必需採用受影響前之讀值，但此觀測值之觀測時間必需超過隧道施作完成後30日以上

- (3) 探討斷面II與斷面III中二與三條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷時，所採用之觀測值係為所探討隧道施作完成後，下一條隧道施作前之觀測值，但其觀測時間必需超過所探討隧道施作完成後30日以上。

根據上述七個量測斷面內所有觀測值之歷時曲線可知，依上述原則所採用之觀測值已呈穩定狀態，故用此觀測值探討多重潛盾隧道施工所導致之地表沉陷時，其結果應具有代表性。

七、結論

- 1、單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷槽可藉由土壤漏失率與壓密沉陷指數而求得。此二參數受潛盾機種類、地層種類、施工方法與施工品質良窳之影響而呈現明顯之差異性，故於評估多重潛盾隧道施工所導致地表沉陷行為時，必需先針對單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷行為進行瞭解。
- 2、由位於台北盆地T2區與H2區內七個施工案例之觀測結果得知，雙潛盾隧道不論為平行或上下重疊配置，因施工所導致之地表沉陷槽可藉由單潛盾隧道施工所導致地表沉陷槽以疊加方式而獲得。縱使施作三條或四條重疊隧道，因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。

八、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、青木/新亞共同承攬與泛亞工程公司提供施工資料，及業方台北市捷運局同意本文之發表，深感誌謝。

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
- 【5】 楊國榮、楊慕泉、趙際禮 (1996) , 泥水加壓式潛盾機施工所導致之地表沉陷探討, 現代營建雜誌