

# 潛盾穿越營運中捷運車站下方分析評估與 施工規劃安全管控

李榮瑞 黃啟修 黃文俊 蘇福來

中興工程顧問股份有限公司

崔澎生 陳耀維

臺北市政府捷運工程局東區工程處

## 摘要

近年來隨著國民生活水準提昇與都市快速發展，人口與建築物日趨密集，重大交通工程於規劃上往往需考量遭遇既有結構障礙物衝突之影響，隨著臺北捷運第一階段與第二階段路網陸續完成，後續路網為了串聯既有捷運車站路線，必須與營運中的路線或車站重疊交會，因此就設計分析上需慎密考慮如何將施工風險降低，本文主要介紹於環狀線捷運施工標潛盾隧道穿越營運中既有大坪林捷運G4車站下方的案例，為降低潛盾掘進之風險，規劃設計時即考量於穿越車站連續壁前方及站體下方配置一系列垂直及水平地盤灌漿改良工法，於細設段分別以二維及三維分析軟體配合現場之邊界條件及合理之假設，依施工工序模擬潛盾穿越對既有車站結構物之影響，並將分析結果落實於後續施工風險管控，施工過程中引進新的施工技術，包括水平鑽孔定位儀確認施工精度、配合人員出艙以高壓水刀、鑽石鏈鋸切割及油壓劈裂G4站及新設Y6車站連續壁，潛盾穿越G4車站站體下方過程中輔以嚴密之掘進管控及自動監測系統，期將此成功案例供後續類似工程參考。

**關鍵字：**連續壁破除、地盤改良、自動監測。

## Analytical Evaluation and Construction Planning of a Shield Tunnel Passing Underneath an Operating MRT Station

Rong-Ruey Lee Chi-Hsiu Huang Wen-Jun Huang Fu-Lai Su

Sinotech Engineering Consultants, Ltd.

Pon-Sn Tsuei Yao-Wei Chen

Department Of Rapid Transit Systems, Taipei City Government

## Abstract

In recent years, an increase in the living standards and rapid urban development has led to an increase in populations and building density. In the planning phase of major transportation projects, the obstacles that existing structures present should be considered. After the completion of the first and second phases of the Taipei MRT project in the near future, the additional following routes will overlap the operating routes or stations to connect with the existing MRT network. Therefore, the means of reducing the construction risk must be considered in the design and analysis phases. This paper presents a circular line case of a shield tunnel that passes underneath an operating MRT station. To reduce the risk of shield machine launching, the vertical and horizontal ground improved grouting method used in front of diaphragm wall of station and beneath station was considered in the planning and design stage. Moreover, in the detail design, two- and three-dimensional analytical software was used. According to the construction process, the influence of a shield passing underneath the existing station structure was simulated on the basis of the actual boundary conditions and reasonable assumptions. New construction technologies were applied during construction. For example, a horizontal

drilling locator was used to confirm the construction accuracy, and a high-pressure water jet and diamond chainsaw were used to cut both the existing and new diaphragm walls of the station. The analysis results were considered for the subsequent construction risk control. The process of the shield tunnel passing underneath the existing MRT station was managed by the launching control and automatic monitoring system. This successful case can be referred to for similar projects in the future.

**Key Words** : breakthrough of diaphragm wall, ground improvement, automatic monitoring.

## 一、前言

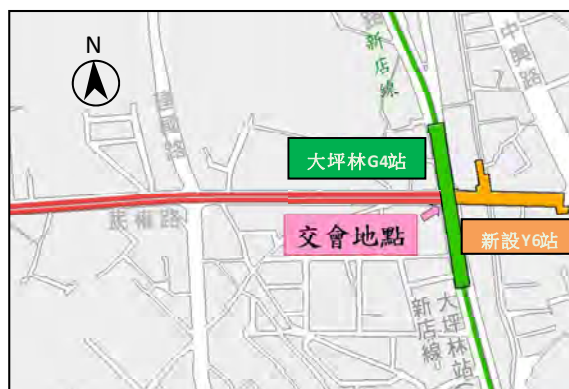
配合潛盾穿越重要結構物下方之施工方法有多種選擇，包括管幕工法、冰凍工法及潛盾工法，在考量本穿越工程之施工空間及施作過程中對於既有車站、建物及地面沉陷管控之因素，選擇在國內已有多起成功實績案例的潛盾穿越工法，包括新莊線CK237施工標及松山線CG290施工標穿越營運中的高鐵與台鐵隧道下方，且本穿越工程屬台北捷運首次穿越營運中捷運車站下方之施工案例，對於安全之要求更為嚴謹。

本文將針對此穿越工程從工法選擇、穿越工序之模擬分析設計、安全管理值之規範、設計與施工風險評估、施工規劃與相關配合工法細節、實際穿越過程之監測管控等要項逐一討論，並針對部分施工規劃之細項配合現場狀況之調整過程另行說明。同時為了有效降低施工風險，本工程引進新的技術工法，對於工法適用性及其效果也將在文中探討，隨著臺北捷運第一階段與第二階段路網陸續完成，後續路網為了串聯既有捷運車站路線，相信捷運路網重疊交會之可能性大增，期望分享此成功案例供後續類似工程規劃設計參考。

## 二、工程背景說明

### 2.1 工程說明

本工程案例位於景美溪南側、新店溪右側，捷運路線(東西向)將與已營運中的G4車站(南北向)交會(圖一)，兩條捷運線交會處將新設立一座捷運Y6站作為後續路網的延伸站，並與既有的捷運車站連通且於站內進行直接轉乘。Y6站必須緊鄰既有營運中的車站旁進



圖一 新設Y6站與營運中既設G4站交會位置圖

行擋土壁施工及開挖，路線段隧道將由既有車站下方穿越通過。

### 2.1.1 工址地層及地下水條件

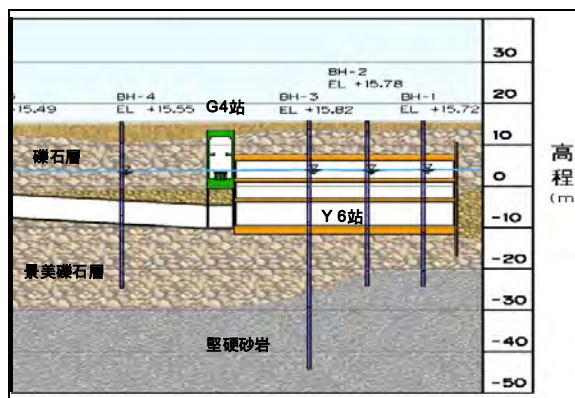
本工程案例工址位處台北盆地南側，屬盆地內新店溪沖積而成的平原地形，其地層屬全新世沖積層。新店溪東側民權路與十四張地區一帶，主要地層為景美層卵礫石，可概分上、下兩層(圖二)，上層礫石層接近地表，下層為景美礫石層，卵礫石粒徑約5~20cm，上下層卵礫石間夾有約3m~10m厚的相對較疏鬆或軟弱粉土質砂層或粉土質粘土層，下層景美礫石層之下方為堅硬之砂岩，屬中新世沉積岩，以砂岩或砂頁岩互層為主。參考本工程地質調查報告，代表性地層分布詳見表一。依「環狀線DF111標補充地質調查成果報告」(中興工程，2005)之地下水位觀測結果，上部礫石層之地下水位則約在GL-10m左右，下部景美層之地下水位則約在GL-11~-12m左右，為避免(枯水期)量測之地下水位而低估工址之地下水位，並考慮豐水期或偶然暴雨對地下水位之影響，設計地下水位訂在地表下8m，且設定為靜態水壓分布。

### 2.2 潛盾穿越工法說明

G4站為一地下二層，站體結構採以連續

表一 潛盾穿越段地層分布及簡化參數表

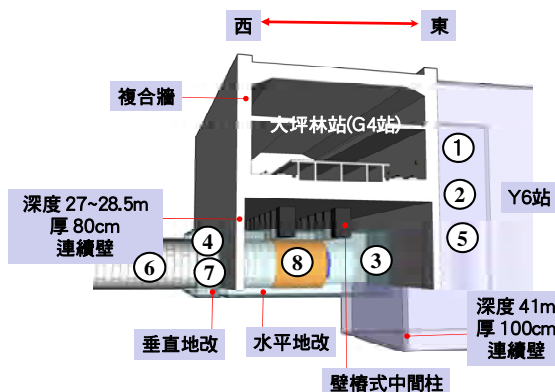
地層	深度(m)	SPT-N	$r_t$ (tf/m <sup>3</sup> )	$c'$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg)	$S_u$ (tf/m <sup>2</sup> )
1 回填/覆土層(SF/CL)	0.0~5.1	8	1.9	0	28	-
2 卵礫石層(GP/GM)	5.1~12.7	>50	2.25	0	37	-
3 粉土質黏土層(CL)	12.7~16.1	5	2.04	0	27	4~6
4 礫石或砂礫石層(GP/SP)	16.1~18.4	23	2.25	0	32	-
5 粉土質黏土層(CL)	18.4~24.0	7	2.01	0	27	6~8
6 卵礫石層(GP/GM)	24.0~48.7	>50	2.38	0	40	-



圖二 工址地層剖面圖

壁作為部分永久牆設計(複合牆)(圖三)，連續壁80cm及牆厚60cm，車站寬度為20.7m，深度為16.8m，連續壁深度約為27~28.5m，車站下方仍存在配合當年開挖所使用的壁樁式中間柱，寬度1.8m，厚度0.8m，深度於底板下方約3.5m，H型鋼殘留於底板下方約2.5m，隧道頂拱距離壁樁式中間柱下方約15cm以上之距離，潛盾隧道須穿越G4站下方兩側80cm厚之連續壁。另Y6站位於G4車站東側，連續壁亦採複合牆設計，厚度100cm，連續壁混凝土強度採350kg/cm<sup>2</sup>，深度44m，因此潛盾在穿越站體東側時，需同時通過G4車站80cm連續壁及Y6車站100cm連續壁。

因潛盾工程施工所需要之空間較小，穿越工法考量直接以潛盾機穿越站體下方的方式，剛好可避開大坪林站下方約3.5m長之壁樁式中間樁，但必須配合G4車站體西側之垂直地改以及下方的水平地改(詳見圖三)，因潛盾機並無直接鑽掘連續壁之設計，因此必須以人員出艙方式破除連續壁體，其垂直地改目的主要為保護人員出艙作業的安全，東側兩道連續壁則自新設車站工作井進行破除，壁體破除後需在壁體鏡面處以潛盾封艙或鏡面隔艙方式回填皂土，一切就緒後，潛盾機由G4站體西



圖三 營運中G4站及潛盾隧道穿越示意圖

側往東側穿越到達Y6工作井，相關穿越細節及配合作業詳述後節。

### 三、數值分析

為了瞭解潛盾穿越過程營運中G4站體之影響，細設顧問在細設階段依據現地狀況分別進行2D及3D的數值模擬，配合規劃之施工工序、地質狀況以及相關邊界條件進行分析，本工程於營運中G4車站週邊施工順序如下(示意圖詳圖三)：

1. Y6車站施作1.0m厚，44.0m深連續壁。
2. Y6車站配合抽降水進行十一階開挖及架設十層支撐。
3. 於開挖區內向G4車站下方進行水平雙柵管地盤改良並探查中間樁深度及範圍。
4. 於西側複合牆旁由地面向下施作雙柵管地盤改良。
5. Y6車站內向外試水、破鏡並安裝隔艙。
6. 潛盾機由西側橫渡線工作井發進。
7. 潛盾機進入已灌漿完成之區域後停機，人員出艙前後進行連續壁前壁後試水，出艙排土，逐階破除連續壁並回填皂土。
8. 潛盾機通過G4站下方並到達Y6站工作井。

## 3.2 分析流程

上述分析項目及流程，可以了解所施作工項對於營運中G4站的影響，大致可以分為兩個部分，第一個部分為Y6站深開挖、架設支撐、拆撐、結構版施築及抽水過程對於G4站之影響；第二個部分為G4站下方地盤改良及潛盾隧道穿越之影響。本文主要著重在潛盾穿越G4站下方之過程，針對Y6站的開挖將視為已完成之工作井站體，分析程序與結果不再多著墨。

潛盾穿越將分別採用二維(PLAXIS)及三維軟體(MIDAS GTS)進行分析(賴等人，2009)，以下分別針對分析程序與結果做進一步說明。

### 3.2.1 PLAXIS-2維分析

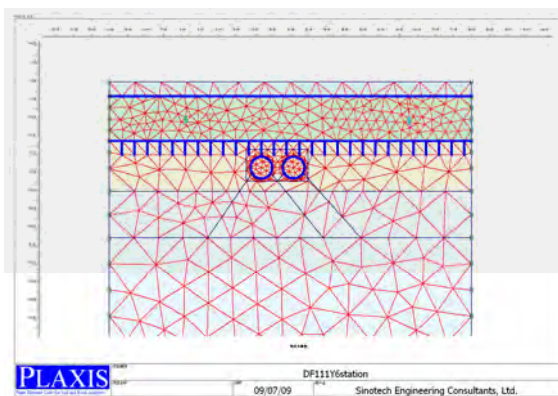
PLAXIS程式於潛盾隧道分析上應用部分，主要依據Loganathan and Poulos (1998)的回饋方式以及冀等人(2000)台北捷運新店線、淡水線以及南港線、土城線CD266標、CD268標及CD269標等近80個監測斷面沉陷資料所做的回饋分析，將成果導入PLAXIS程式中。於模擬分析潛盾隧道開挖地表沉陷量，包含開挖前建物重量模擬、二次背填灌漿模擬以及潛盾隧道開挖間隙收縮，並且對於孔隙水壓的激發以及壓密沉陷量的分析，均使用該程式進行分析。目前臺北捷運松山線(賴等人，2006)已採用此套模式分析潛盾隧道上方共管開挖，以及潛盾隧道通過對鄰近結構物之影響。於土城線CD269標主要為通過卵礫石層，由CD269標回饋的結果，其單條隧道通過後所造成最大地表平均沉陷量約7.48mm，由沉陷槽推估土壤漏失率所出間隙參數約21.08mm，反推PLAXIS分析所需環片之收縮率為0.7%，將此分析潛盾隧道穿越後脫盾之收縮量。

PLAXIS程式設定幾何網格圖如圖四，上方為G4站，連接G4站下方為既有的中間樁，G4站下方即為新穿越之潛盾隧道，潛盾機殼外徑為6.24m，隧道環片外徑為6.10m，其差值為14cm，單側環片外有7 cm的盾尾間隙。

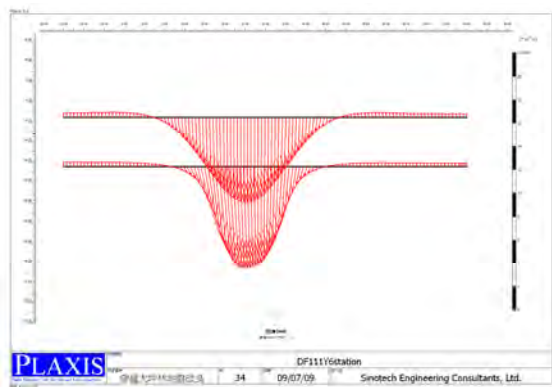
網格建立完成，初始應力平衡後，實際分析施工階段包括站體結構、中間樁、地表載重

及初始水位設定，地盤改良模擬，上下行隧道之鑽掘、環片架設、修正水壓以及脫離盾殼後所產生間隙量模擬與壓密分析等。

分析完成後，因潛盾隧道通過所造成G4站底板之沉陷變位情形詳見圖五，依據所分析的結果發現，底板最大沉陷量為8.71mm，最大垂直傾斜量為2.75/5000。



圖四 新設穿越隧道通過G4站下方分析網格圖

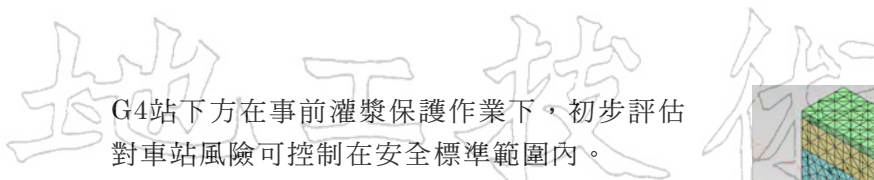


圖五 潛盾隧道穿越後G4站頂底板變位圖

於軌道標準來看，「臺北都會區大眾捷運系統禁建限建範圍內列管案件管理及審核基準(臺北市政府，2007)」規定為不得造成軌道水平及垂直方向之位移超過該系統軌道各組件之總容許位移量，而軌道養護標準訂立垂直或水平總位移為10mm，5m內有3mm之垂直或側向扭曲之規定。本分析參照營運中捷運車站分析檢核安全標準如表二所示，潛盾穿越

表二 營運中捷運車站分析檢核安全標準

評估項目	安全標準	採用依據
垂直變位量	10 mm	軌道標準控制
水平變位量	10 mm	軌道標準控制
垂直傾斜量	3/5000	軌道標準控制
水平扭曲量	3/5000	軌道標準控制



G4站下方在事前灌漿保護作業下，初步評估對車站風險可控制在安全標準範圍內。

### 3.2.2 採用MIDAS於潛盾隧道分析說明及結果

MIDAS GTS 3D屬地工三維分析軟體，以有限元素分析與隧道架構的專業性而開發的地質與隧道架構有限元分析軟體，適用於隧道(公路隧道、鐵路/捷運隧道等)、地下廠房結構、水壩、擋土牆、深開挖、基樁、橋台、橋墩基礎等結構分析領域。

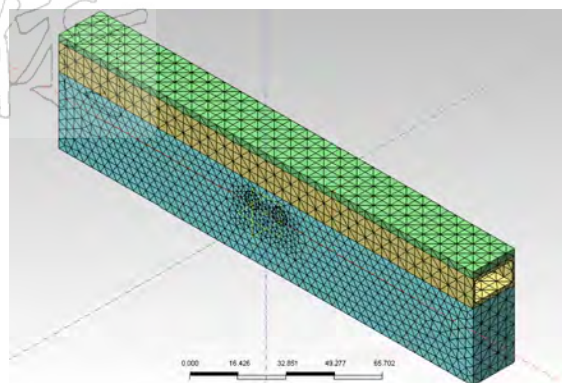
而本工程因潛盾隧道穿越G4站下方時，距離底板非常近，為評估潛盾隧道施工過程中，潛盾機的面板推力、千斤頂推力、即時背填灌漿壓力、以及後續脫盾所造成沉陷對營運中車站的影響，乃採用三維分析軟體MIDAS GTS程式來進行此部分的模擬(圖六)，可彌補二維軟體較難模擬潛盾機推力及灌漿壓力對於週遭結構物的影響，同時可評估潛盾隧道鑽掘穿越對於G4站之影響分析。

首先先建立G4站、土層分層、潛盾機實體及環片等模型，並切割隧道實體(以每1m為輪進單元做切割)。於分析階段設定為潛盾機推進時面盤的壓力、千斤頂之壓力、以及同步背填灌漿注入的壓力。於推進過程中，面盤推力設定為靜止土壓力+0.2kg/cm<sup>2</sup>，分析時採開挖面泥土壓管理之中間值0.23MPa(約2.3 kg/cm<sup>2</sup>)，同時考慮機殼摩擦力，合併計算後即為千斤頂所需輸出之推力，另外為避免背填壓力過大造成環片破壞或接合螺栓鬆脫變形，本分析之背填灌漿壓力設定在2~3kg/cm<sup>2</sup>，於每一環重複輸入上述壓力模擬潛盾機推進，設定推力情形及網格詳見圖七。分析完成後發現G4站變位及新設潛盾隧道變位見圖八。而車站底板因為脫盾後所產生最大垂直沉陷量約為7.3mm，而東西向底板最大傾斜量為1/5000，南北向底板最大傾斜量為2.86/5000，分析結果皆符合在安全標準範圍內。

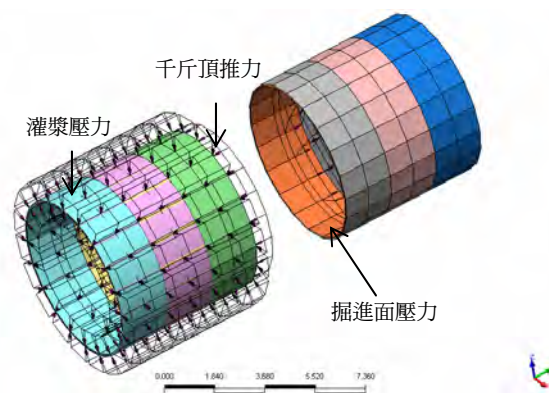
## 四、潛盾穿越之施工與風險管控

### 4.1 潛盾機特殊設計

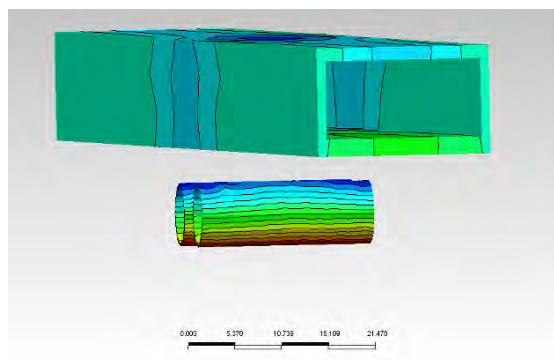
本工程之潛盾隧道工程共設置一段二條單向潛盾隧道，上行線長約527.7公尺，下行



圖六 潛盾隧道穿越G4站三維分析網格圖



圖七 灌漿壓力、千斤頂推力及掘進面壓力設定圖



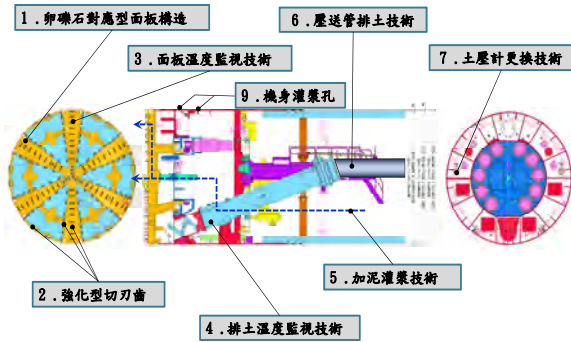
圖八 潛盾隧道穿越後地層與結構整體變位圖

線長約528.8公尺，上、下行線合計長約1057公尺，其間設置1座聯絡通道，隧道內徑為5.6公尺，依據地質鑽探資料地層組成分別為卵礫石夾棕黃色粉土粗細砂層(46%)、灰色砂質粘土層(44%)、灰色礫石質砂層(10%)，且沿線地下水位平均約在地下11公尺，潛盾隧道中心位置約在地下10~24公尺處，水頭差約為-1公尺~13公尺左右。

依據過往施工經驗，潛盾機於卵礫石層掘進且位處於地下水位以下時，有可能造成施工失敗之原因如：切刃齒及面板磨耗嚴重；土層

較難達到塑性流動化之狀況；止水困難，容易造成土砂噴發。

配合掘進所面臨卵礫石層的特性，針對潛盾機進行下列特殊的設計(皇昌營造，2012)，詳圖九。



圖九 潛盾機特殊設計

1. 潛盾機面鉸構造採環抱之掘進方式設計，盾首開口率51%，將卵礫石破碎至一定尺寸(約略60cm)直接排出，可明顯減少切刃齒及面鉸磨耗問題。

2. 配合環抱式掘進手法及大口徑絲帶式螺運機之設計，以盡量不破碎卵礫石而直接排出，同時於潛盾機設置壓送鋼管，利用鋼管本身之內摩擦力抑制噴發現象，既滿足大口徑絲帶式螺運機之設計，也克服礫石塊噴發所產生相關之問題。

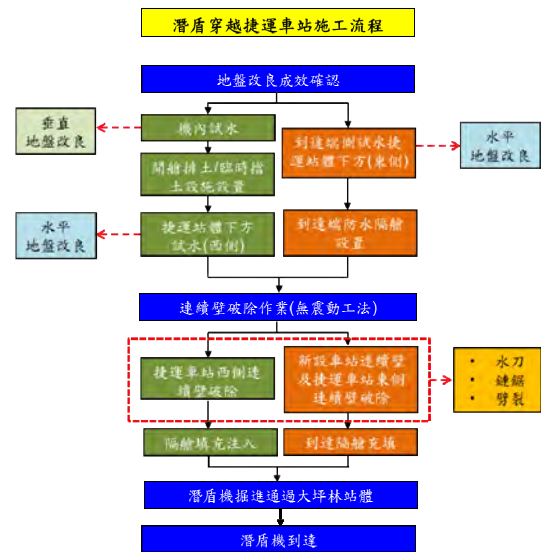
3. 潛盾機面板及螺運機溫度監視技術。一般潛盾掘進順暢時其排出之土砂溫度約為29~34℃，若異常掘進發生時，排出之土砂溫度將超過34℃。利用面板及螺運機之溫度可推測出土砂之溫度，藉此判斷切刃齒是否過度削切卵礫石產生額外之摩擦熱，以確保掘進方式符合環抱之行為模式且管理土倉是否阻塞。

4. 特殊加泥技術。為落實潛盾機於卵礫石層能採環抱之方式進行掘進，依據土層狀況調定特定比例之皂土及氣泡，其目的為使土倉內之土壤具有流動性，為潛盾工程成功與否之關鍵。

原細設階段風險評估過程中曾建議潛盾機需增設地中障礙物排除、盾首灌漿與備用壓氣灌漿等設備，在考量壓氣工法對施工人員之負面影響，以及過去國內潛盾穿越實績案例(CK237標)，決定採灌漿孔配置密集之垂直與水平地盤改良灌漿並配合機身灌漿設備，以提供出艙人員較安全舒適之作業環境及降低潛盾穿越之風險。

#### 4.2 潛盾穿越G4站施工規劃與施工風險

潛盾穿越工程之施工步驟遵循設計階段之規劃，施工流程參考圖十，相關施工細節部分詳述於後，另外針對施工中預期遭遇到之風險與處理對策見表三~表四。



圖十 潛盾穿越捷運車站施工流程圖

表三 連續壁破除施工風險

	施工風險	處理對策
G4站西側連續壁破除	由潛盾機機內出艙進行破除作業，土倉實屬侷限作業空間，故相關施工動線及可投入之機具有所限制，施工機具之作業能量將攸關整體進度。	採用高壓水刀進行主要之施工方式，高壓水刀作業期間人員無須出艙進行操作，可確保人員之安全。高壓水刀噴射之水壓高達25000PSI，遠超出傳統式破碎機之能量。
G4站東側連續壁破除	整體施工啟動時程受限於新設連續壁完成時間而定，且緊鄰土壤側(下方為卵礫石層；地下水位高)，破除期間需要特別注意是否有出水之現象	依據西側破除之狀況了解既有連續壁混凝土之特性，沿用最適新設連續壁且最有效率之破除方式，同時現場相關灌漿設備機組待命。
G4站連續壁破除	新設連續壁混凝土設計強度為350kgf/cm <sup>2</sup> ，且撓曲、水平及剪力鋼筋間距多為15cm，高壓水刀破除強度較高且鋼筋布設密集之混凝土效率上將會折減，進而影響施工時程。	為避免高壓水刀破除成效不佳，同時備有鑽石鏈鋸機組、鑽孔設備及油壓劈裂設備做為輔助及替代工法使用。

表四 潛盾穿越G4站過程施工風險

施工風險	處理對策
潛盾隧道預定路線恐觸及既有車站之中間樁，且隧道頂部距離車站底板僅有3.5m，掘進過程中對潛盾機對前方土壤之擾動及背填灌漿之影響，皆可能造成車站底板隆起或下陷之情況，進而影響列車行駛。	配合水平地盤改良作業先行鑽孔探查既有中間樁之位置，並重新檢討潛盾路線是否會碰觸至中間樁。 潛盾通過車站下方時以符合規範要求之掘進速度(小於5mm/min)且配合安裝於車站內之自動化監測儀器(監測頻率調高至5min/次)，並連線至潛盾機操作室內配合掘進進行觀測。

### 4.3 垂直及水平地盤改良

地盤改良是潛盾穿越工程之前導作業，係為降低人員出艙施工風險與穿越過程中對G4車站及鄰近結構物之影響。針對現地的土層狀況，本工程採用二重管雙環塞灌漿工法，可固結地盤以增加土體自立性及降低土層透水率。在一般砂質地層可完全固結，粉土質細砂層可達到固結及脈狀滲透之改良效果，固結後之地層強度，將因土壤密度及粒狀大小而異。

二重管雙環塞灌漿工法之優點：

1. 可有效封堵外灌注管與孔壁間之空隙，確保灌漿液得以滲透於各階段之灌注土層中。
2. 原有地層較大之空隙及軟弱部分，因有先行一次灌注(CB漿)使其成為侷限地層，可使灌注效果極為重要之二次灌注(矽酸鈉化學漿材)，得以照預定計畫範圍均勻滲透。
3. 灌漿管裝置作業與施灌作業獨立進行，可提高雙環塞工法施灌效率。
4. 二次灌注採低壓、低流量之方式，且膠凝時間較長，故細粒之土層亦能均勻滲透。
5. 灌注效果可藉由作業記錄進行判讀，不足部分進行補足灌漿，可獲得均質之地盤改良成果。

因穿越段地質上部主要為黏土層及礫石層，下部則皆為礫石層，依據施工計畫書建議之灌注率(皇昌營造，2014)，本工程總注入率採用35%，其中CB\_10%，SL\_25%。材料配比詳表五。

表五 材料配比表

水泥 180-250 kg	皂土 50-60 kg
水897-923 kg	
總計 1000L	

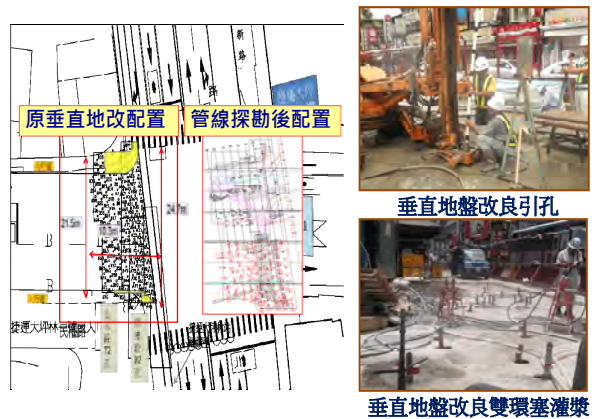
(a) 雙環塞工法一次灌漿材(CB)配比表

水玻璃 250 L	反應劑 50 L
水700L	
總計 1000L	

(b) 雙環塞工法二次灌漿材(SL)配比表

#### 4.3.1 垂直與水平地改施工規劃遭遇問題與解決方案

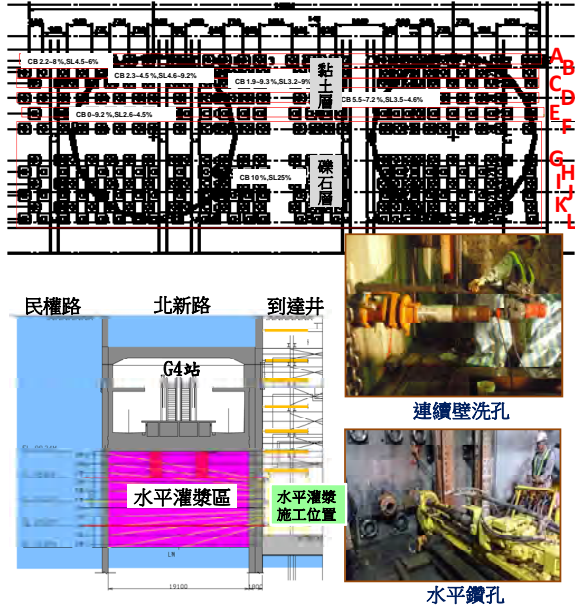
垂直地改原先平面置採均勻分布，由於現場管線探勘中發現地下既有線路過多，在考量施工進度下未進行管線遷移，改於鄰近管線處採斜樁施灌(皇昌營造，2013)。為確保地盤改良之成效，於管線探勘中同步於管線邊埋設預埋管做為後續灌漿用，且增設補樁以縮短原預定之滲透範圍，以利地改漿液能有效注入土體中。管線探查後垂直鑽孔配置圖詳圖十一。



圖十一 管線探勘前後垂直地改灌漿配置圖

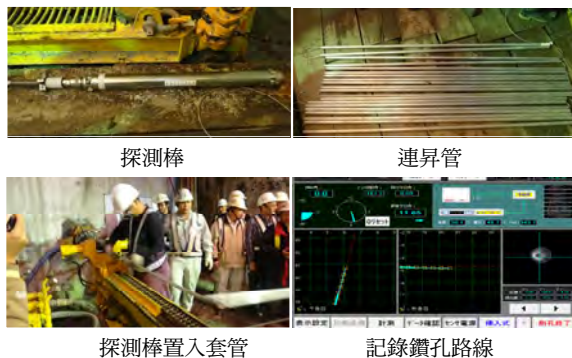
水平地盤改良區之地層分為上部(黏土層)及下部(礫石層)之土層(圖十二)，礫石層採原注入率(灌注量/改良體積)35%進行灌注並輔以壓力檢測補灌注入，但因黏土層其透水係數小，原設計之灌注率為CB\_10%、SL\_25%，但在灌注黏土層區域時，由自動監測儀器量測資料發現，地改區上方之G4站月台產生隆起，累積隆起量接近10mm(警戒值8mm，行動值10mm)，且累積傾斜量已接近甚至超過管理值206sec(警戒值)，考量本工區掘進深度內之黏土層之自力性高，因此調整黏土層之灌注率為：CB\_0~9.3%，SL\_2.6~9.2%，至於礫石層灌注率則無須調整。同時配合地改區上方

G4站之自動監測儀器監測即時資料，對於數值偏高處則採分階段注入(皇昌營造, 2014)，並控制監測值在安全規範內。



圖十二 水平地改良灌漿平剖圖

另外水平鑽孔長度最長超過20m以上，且G4站下方含有中間樁，為避免鑽孔過程中因長度過長、斜孔施作及既有地中障礙物等影響施工精度，特地採用專利技術水平鑽孔定位儀進行相關孔位之驗證，其作用原理係將內藏陀螺儀與加速計之探測棒插入鑽孔套管內，透過位置偵測裝置將其結果以數值及畫面呈現確認其鑽孔路線，實際施工情況如圖十三所示。

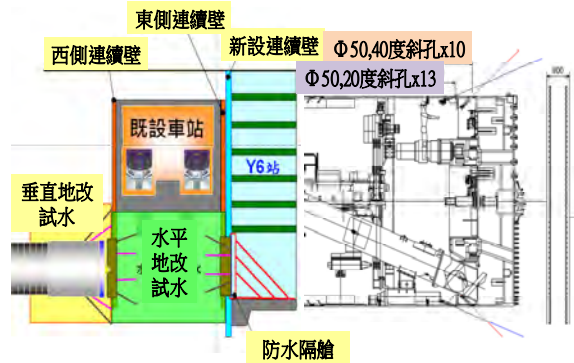


圖十三 水平地改鑽孔定位儀操作過程

#### 4.3.2 地盤改良試水

垂直地盤改良及水平地盤改良雖已於灌漿施工完成後依照規範之規定進行檢驗，然為求慎重，垂直地盤改良部分於潛盾機停機後，

於機內預留之試水孔(單一潛盾機合計23孔)進行試水試驗(圖十四)，以確保土體止水成效，方可進行人員出艙作業。



圖十四 潛盾穿越過程中地改試水及預留試水孔

另外有關水平地盤改良部分，已於灌漿作業完成後進行試水試驗，待欲進行連續壁破除前分別由G4站西側及東側連續壁壁外再次進行試水試驗，確認皆符合規範(出水量換算滲透係數 $<10^{-5} \text{cm/sec}$ )後方可進行連續壁破除作業。各階段試水孔數詳表六。

表六 各階段灌漿試水孔數

位置		現地透水試驗	湧水量試驗	備註
垂直	路面檢測	7孔		
	機內試水	—	46孔	上下行線合計
水平	Y6站	—	32孔	灌漿完成後檢測，上下行線合計
		—	28孔	鏡面破除前檢測，上下行線合計
	G4站西側連續壁		28孔	鏡面破除前檢測，上下行線合計
合計		7孔	134孔	

### 4.4 潛盾穿越施工說明

#### 4.4.1 G4車站西側連續壁破除

西側連續壁破除須採用人員出艙施工，此工程是穿越過程中風險最大的工項，直接驗證垂直地改效果，當潛盾機於G4站西側連續壁前方約1.5m處停機，潛盾機與穿越壁體為斜交，在確認止水合格且符合開艙條件後即進行臨時擋土設施設置，擋土措施採先行設置於隧道頂部上方及兩側，在潛盾機外殼上以固定間距約118 cm 焊接H-100 之型鋼，同時於西側連續壁鑽孔並利用膨脹螺絲將型鋼固定之



# 地工技術

(圖十五)，型鋼間設置兩層  $\phi 5\text{mm} \times 100 \times 100$  之鋼絲網配合噴凝土。開挖支撐完成後，再進行水平地盤改良試水試驗，確認符合規範後即可進行連續壁破除作業。實際出艙發現開挖面自立性佳，且無濕潤滲水狀況，驗證垂直地改發揮止水與補強效果。

針對G4站西側連續壁採用高壓水刀作為破除方式，施工平面及剖面圖如圖十六所示，將高壓水刀機具架設於潛盾機面板上，利用機械動能依鐘擺隨緣新轉動之方式進行連續壁之破除，配合伸縮手臂作業將整體鏡面自圓心均分為4階段進行施作，待全部破除至第一層保護層後即進行鋼筋切除及出渣作業，完畢即將潛盾機面盤嵌入連續壁內並進行土艙填充。

高壓水刀將乾淨水經過增壓器增壓至25000psi，藉由高壓軟管輸送，通過直徑為1.542mm的鑽石噴嘴後射出高速水箭。此種壓力可切割各種非金屬物質。

#### 4.4.2 G4車站東側及Y6站連續壁破除

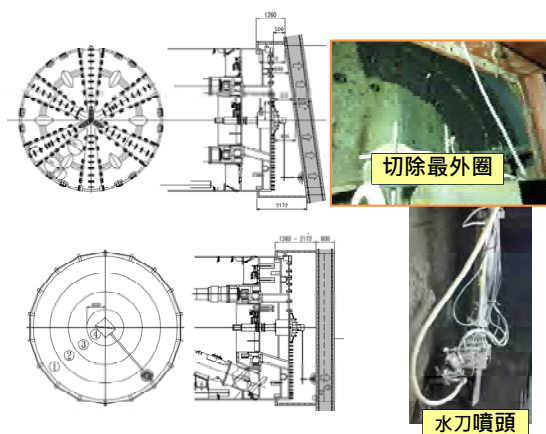
到達端連續壁包括G4站東側及Y6站連續壁，當到達工作井鏡面試水完畢後隨即進行防水隔艙及反力座安裝作業，原定採用高壓水刀進行破除作業(皇昌營造，2015)，惟Y6站之連續壁混凝土強度遠超過設計值(350kg/cm<sup>2</sup>)，且鋼筋間距僅有15cm，噴射出之高壓水箭作用於鋼筋上對於破除混凝土毫無助益，連續壁破除為高風險作業項目，倘能縮短破除作業可降低整體施工風險，因此考慮採用替代工法包括鑽石鏈鋸切割(圖十七)及油壓劈裂接續後續作業，各連續壁破除方式及實際施工時間詳表七。

#### 4.4.3 潛盾通過G4站下方施工控制

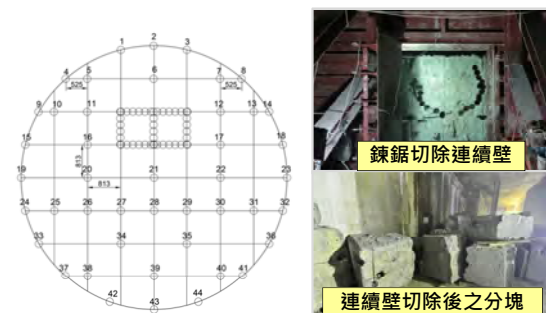
當潛盾機進入G4營運車站下方，依據施工規範之規定掘進之速度不可大於5mm/min，以免潛盾機推力太大破壞地盤改良體而產生水路，掘進時將觀測潛盾機之土壓力及出土量，同時配合比對G4站內之自動監測數值之變化趨勢，若監測數值變化有趨於惡化之情況，將立即調整掘進之方式或停機檢討，潛盾機通過營運車站下方時為24小時施工不中斷，直至潛盾機到達為止。潛盾機在穿越過程須注意下列事項：



圖十五 潛盾人員出艙開挖擋土現況圖



圖十六 高壓水刀破除示意圖



圖十七 鑽石鏈鋸切割分塊圖

表七 連續壁人工破除方式統計表

連續壁位置	破除方式	花費時間
G4站西側下行線	水刀	55天
G4站西側上行線	水刀	50天
G4站東側下行線 Y6站下行線	水刀+鏈鋸+油壓劈裂	81天
G4站東側上行線 Y6站上行線	鏈鋸	61天

#### 1. 潛盾停機及再掘進之配套措施

由於連續壁破除作業之時程約2個月左右，潛盾機在長期停機之狀態下，需要進行以下措施：

(1) 停機期間一天一次使用自動測量系統測量潛盾機位置，以監視潛盾機位置是否異常。

(2) 至少一天1次轉動切刃盤一圈。

(3) 發進時需注意土壓管理及適度添加加泥材，以確保混合土艙內之掘削土有足夠土壓。

## 2. 遭遇G4站下方之地中障礙物

依據營運車站站體竣工圖說，其站體壁樁式中間柱之底部高程為EL95.84m，距離設計潛盾隧道路線高程頂端應有約13~15cm之高差，同時依據先前於水平地盤改良進行鑽孔作業時，極少部分鑽孔遭遇中間柱之型鋼或柱底混凝土，可知潛盾機接觸營運車站站體中間柱底部混凝土機會相當有限，應不至於影響整體掘進作業，惟須考慮G4站中間柱施工誤差及掘進線形誤差。若潛盾機接觸營運車站站體中間柱底部混凝土時，將會有明顯推力及切刃盤扭力上升之情況，此時將採取以下措施：

(1) 潛盾機慢速前進以切刃盤將樁體混凝土磨碎後通過(依據施工圖，壁樁式中間柱內之H型鋼高於柱底1m左右，潛盾機掘進時並不會碰觸至H型鋼)。

(2) 24小時持續監控營運車站監測數值。

(3) 派員進入營運車站月台層觀察是否有異常聲響及變化，並與操作室保持聯繫，決定採取之行動。

(4) 若干斤頂推力、切刃盤扭力及電力異常上升時，採取停機檢討後續處理方式。

潛盾機自2015年5月25日自下行線開始進行G4站下方鑽掘，過程中潛盾機並未碰觸既有車站下方之型鋼，也無因遭受障礙進而影

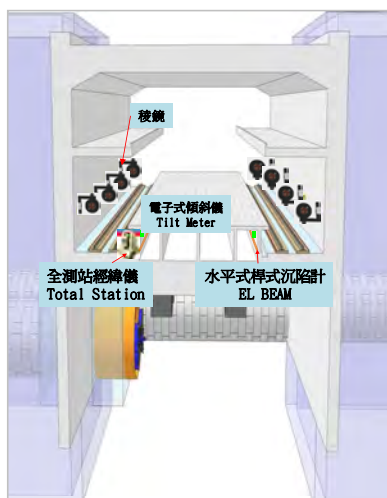
響推力之反應，並於2015年6月5日上行線到達Y6站工作井，潛盾機上下行相隔5天到達，順利完成潛盾穿越工程。

## 4.5 自動監測系統

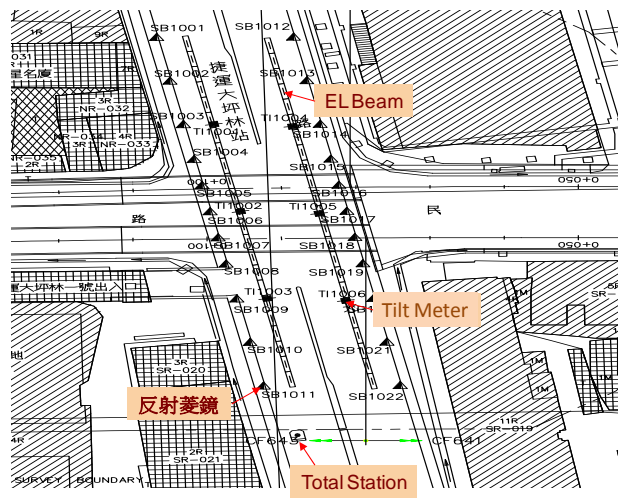
自動監測系統，包括全測站(Total Station)系統(自動量測軌道板的三維變位量)、水平式桿式沉陷計(EL Beam)(量測結構物之垂直沉陷量)，以及電子式傾斜計(Tiltmeter)(量測結構物之傾斜量)，配合自動化傳輸軟體，可全時的監測G4站設施的安全性和具有預警性，只要監測數據異常或超出管理值即時以手機訊息方式通知權責人員處理。自動監測儀器自Y6站連續壁施工前即裝設，監測期間自Y6站開挖、垂直及水平灌漿、連續壁破除到潛盾穿越到達，全時的監測與完整記錄各個重要工項對G4站的影響。

裝設位置受限於列車動線以及避免因列車行駛過程震動誤差量過大，因此EL Beam及Tiltmeter分別裝設於上下行月台下廊道，Total Station則裝設於軌道層避車道，觀測稜鏡設置於側牆結構上，詳圖十八及圖十九。相關數量、監測頻率及管理值詳表八，其中監測頻率將配合現場需求予以調整。

儀器布設方式如下，Tiltmeter以新設車站站中心線上下行線向南及向北每20公尺設儀器布設方式如下，Tiltmeter以新設車站站中心線上下行線向南及向北每20公尺設儀器布設方式如下，Tiltmeter以新設車站站中心



圖十八 自動監測配置圖



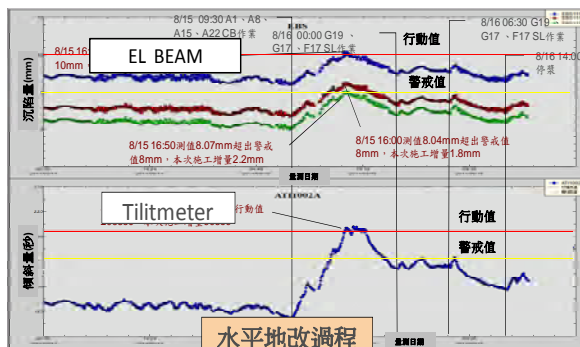
圖十九 自動監測平面配置圖

表八 自動監測數量及量測頻率表

監測儀器	數量	監測頻率	警戒值	行動值
電子式桿式沉陷計	160	5min/次	垂直總位移量 ± 8mm 或 5m 內有 2.5mm 之垂直扭曲	垂直總位移量 ± 10mm 或 5m 內有 3mm 之垂直扭曲
電子式傾斜計	6	5min/次	± 103 秒	± 123 秒
全測站自動經緯儀	2	15min/次	垂直、水平或隧道側向總位移量 ± 8mm 或 5m 內有 2.5mm 之垂直扭曲或側向扭曲。	垂直、水平或隧道側向總位移量 ± 10mm 或 5m 內有 3mm 之垂直扭曲或側向扭曲。
觀測稜鏡	22	15min/次		
軌道沉陷水準點	2	二星期/次		

線上下行線向南及向北每20公尺設尺。另外為求得G4站軌道之絕對沉陷值，於G4站上下行軌道區施工影響區域範圍外(經捷運公司核准)，各設置一軌道沉陷水準點(反射稜鏡)，作為全測站經緯儀自動測沉系統量測時之參考點，亦為電子式桿式沉陷計絕對沉陷值推算之基準點，並定期由地面之永久水準點進行導線測量，檢核此沉陷水準點的絕對座標(X,Y,Z)。

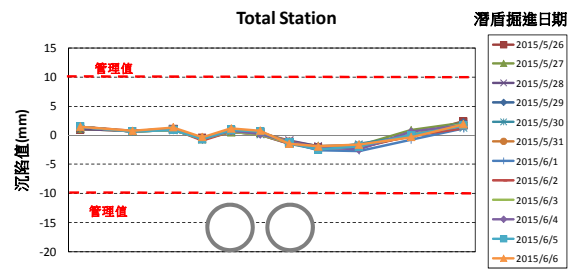
根據監測結果，自動監測數據變化較明顯且部分儀器超過管理值之時間點，主要為水平地盤改良階段，且於黏土層灌注過程中，EL BEAM及Tiltmeter變化尤為明顯(圖二十)。



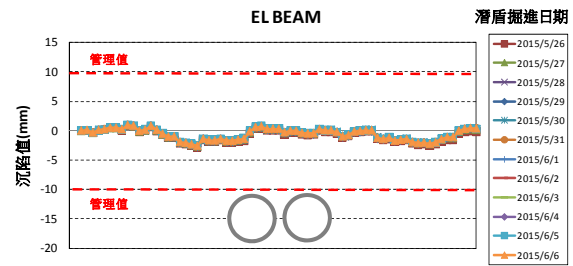
圖二十 水平地改過程自動監測數據變化圖

但在調整灌漿比例後，且分階段灌注，監測數據即回穩不再上升。至於潛盾於G4站下方通過期間，因水平地改發揮功效，且掘進推力與土壓力控制良好，使得穿越過程中監測數值幾乎無明顯變化，詳圖二十一~二十三。

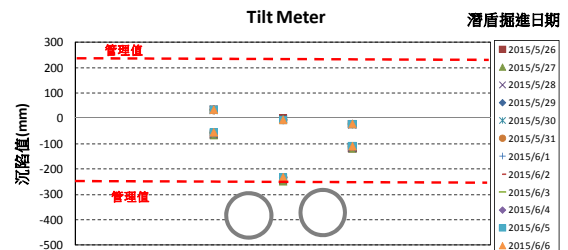
本潛盾機到達方式於設計階段基於風險之考量，建議採用棄殼方式，亦即潛盾機到達後將機殼完全嵌入連續壁內(圖二十四)，可有效抑制到達端上方之沉陷，其效果已完全反應在監測數據上。



圖二十一 潛盾穿越過程G4站全測站經緯儀測值



圖二十二 潛盾穿越過程G4站桿式沉陷點測值



圖二十三 潛盾穿越過程G4站建物傾斜計測值



圖二十四 潛盾機上下行順利到達以棄殼方式拆解

# 地工技術

## 五、結論

### 致謝

本穿越工程屬臺北捷運首次穿越營運中之捷運車站下方之成功案例，工程得以順利完成，綜合以下關鍵因素

1. 選擇適宜的施工工法：潛盾穿越重要結構物下方工法有多種選擇，包括管幕工法、冰凍工法及潛盾工法，設計初期在考量本工程之施工空間及施作過程中對於風險及沉陷的管控之因素，選擇已在國內已有多起成功實績的潛盾穿越工法，不管在維持營運安全、工法可行性、工期與經費上均具備較優勢之條件。

2. 必要之施工風險評估：本工程細部設計階段即將此穿越工程列為高危險工項，進行風險評估，擬定風險對策處理方案，並實際運用於施工階段，尤其是本工程風險最高之人員出艙破除連續壁垂直地改保護之風險處理對策，發揮極佳效果。

3. 合理的數值分析模擬：於設計階段依據合理的施工規劃程序與地層分析參數，進行二維及三維的數值模擬，且將分析結果落實於後續之施工安全管控之依據。

4. 縝密的施工規劃風險管控：施工廠商遵循設計單位建議之工法及施工程序，進行施工規劃，並預估可能之施工風險，研擬因應對策，同時遵循既定之施工程序按部就班循序漸進的施工。

5. 引進新材料新工法：施工廠商採用適宜現場環境之施工機具，並引進最新的施工技術(水平地改之水平鑽定位儀、以高壓水刀破除連續壁)降低施工風險。

6. 全時自動監測管理系統：G4站體內之自動監測系統提供即時監控，施工過程依據監測管理值掌控對G4站之安全影響。

7. 正向思考工程問題與尋求合理的解決方案：現場施工過程倘遭遇問題(如垂直地改管線阻礙、黏土層進行水平灌漿造成G4車站底板隆起、連續壁破除方式的檢討)，業主、施工廠商與設計單位主動針對問題充分討論，在安全的前提下尋求適合的解決工法。

本文承皇昌營造股份有限公司姚南智經理、日商奧村組營造股份有限公司台灣分公司山本所長、專任技師劉韋廷協助提供相關施工紀錄及諮詢，使本文得以順利完成，深表謝忱。

## 參考文獻

- 中興工程股份有限公司 (2005)，環狀線DF111標補充地質調查成果報告，中興工程股份有限公司/臺北市捷運工程局。
- 皇昌營造股份有限公司 (2012)，「臺北都會區捷運系統計畫環狀線CF640區段標工程(CF643A子施工標)」，潛盾詳細設計計畫書，皇昌營造股份有限公司/臺北市捷運工程局。
- 皇昌營造股份有限公司 (2013)，「臺北都會區捷運系統計畫環狀線CF640區段標工程(CF643A子施工標)」，潛盾隧道到達垂直地改施工計畫書，皇昌營造股份有限公司/臺北市捷運工程局。
- 皇昌營造股份有限公司 (2014)，「臺北都會區捷運系統計畫環狀線CF640區段標工程(CF643A子施工標)」，潛盾隧道到達端水平地盤改良工程施工計畫書，皇昌營造股份有限公司/臺北市捷運工程局。
- 皇昌營造股份有限公司 (2015)，「臺北都會區捷運系統計畫環狀線CF640區段標工程(CF643A子施工標)」，潛盾隧道到達鏡面破除及大坪林站連續壁破除施工計畫書暨到達隔艙防水應力計算書，皇昌營造股份有限公司/臺北市捷運工程局。
- 臺北市政府 (2007)，「臺北都會區大眾捷運系統禁建限建範圍內列管案件管理及審核基準」。
- 冀樹勇、林金成、陳錦清 (2000)，「間隙參數模式在潛盾隧道引致地盤位移之最佳化回饋分析」，中國土木工程學刊，第12卷，第4期，735-746頁。
- 賴建名、黃繼鋒、黃啟修、蘇福來、胡庭豪、陳俊宏 (2009)，「營運中捷運車站旁深開挖與下方潛盾穿越影響分析及評估」，地工技術，第119期，97-108頁。
- 賴建名、蘇啟鑫、胡庭豪 (2006)，「台北捷運潛盾隧道沉陷回饋分析與PLAXIS程式之應用」，中興工程，第九十二期，39-47頁。
- Loganathan, N. and Poulos, H. G. (1998). "Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE., 124(9), 846-856.