

捷運工程於複合地層之大地議題與對策 — 以北捷土城線延伸頂埔段為例

張皓凱／亞新工程顧問股份有限公司大地工程師

周忠仁／亞新工程顧問股份有限公司副理

張榮峰／亞新工程顧問股份有限公司正工程師

謝宇珩／臺北捷運工程局北區工程處副處長

摘要

隨著台北捷運路網漸往外緣擴展，捷運工程除週遭環境之限制，也會通過複合地層，增加工程困難。本文以「臺北捷運土城線延伸頂埔段工程」為例，探討捷運工程於複合地層遭遇之大地議題及對策。本案例車站及隧道沿線所經之地層主要為卵礫石層及砂岩層，可預期於此複合地層及週遭環境之限制下對施工品質及效率會造成一定影響，故針對捷運工程於此複合地層遭遇之五項大地工程議題加以探討，內容包含站體連續壁於堅硬地層施作考量、潛盾隧道於複合地層與卵礫石層掘進、連絡通道地盤改良、隧道與既有營運中車站之銜接及破鏡施工考量、全生命週期隧道安全監測等大地工程議題。期藉由本工程於施工規劃所遭遇之困難與解決對策，作為後續類似工程之參考。

Abstract

While Taipei MRT network continues to expand its route to the outskirts of the city, MRT construction would possibly encounter such environment restrictions as mixed ground that significantly increases the complexity and difficulty of the project. This paper presents the project of “Taipei MRT Tucheng Line Dingpu Section Contract DD170” as an example to look into the geotechnical engineering issues and countermeasures associated with mixed ground. The

project encounters mixed ground of gravels and sandstone and a total of five issues were raised, such as diaphragm wall construction on gravels, TBM passing through mixed ground and gravels, ground treatment for cross passages, shield tunnels connecting to the operating MRT station, and the life-cycle monitoring for tunnel safety. The experiences and feedbacks obtained from these challenges are expected to provide references for similar projects.

工程概述

「臺北捷運土城線延伸頂埔段工程」（以下簡稱本計畫）為板南線的最後一塊拼圖，它的完工將擴展整體捷運路網並提昇效能，擔負銜接串聯雙北科技園區（包括頂埔科技園區、土城工業園區及南港軟體工業園區等）及後續三鶯線發展之重要橋梁。本計畫之工程範圍係自永寧站南端經新北市土城區中央路三、四段後，止於頂埔站，全長約 1,950 公尺，包含 (1) 一座明挖覆蓋車站（含地下二層及變電站）及橫渡線，總長約 421 公尺、(2) 潛盾隧道，上下行隧道平均長約 1,529 公尺，及四座聯絡通道（CP1~CP4）。沿線除隧道段採用潛盾工法施築外，其餘皆採明挖覆蓋工法施作。計畫範圍平面配置詳圖 1 所示。

大地議題與對策

本計畫地下車站及隧道所經之地層，主要以全新世沖積層之卵礫石（GP）及上新世桂竹林層之砂岩

(SS) 為主，於永寧站附近則以粉質細砂及粉質粘土為主。沿線之地下水位深度，除永寧站附近之地下水位較高（約為地表下 3.0 ~ 4.0 m 之間）外，其餘路段之地下水位約在地表下 11.3 ~ 12.5 m 間。考量沿線之地層及地下水位，複合地層（上為最大粒徑大於 40 公分之卵礫石、下為膠結不完全之砂岩）及低地下水位將對站體連續壁施作品質及潛盾隧道鑽掘效率，造成一定程度之影響。綜合上述地層條件及環境限制（包括銜接營運中車站、地層/地下水、道路、交通及管線等），本計畫之主要大地議題及對應地層剖面如圖 1 所示，相關對策綜整如表 1 所示，並分述於以下各節。

複合地層連續壁施工

本計畫頂埔站鄰近頂埔科技園區，車站主體及明挖覆蓋隧道開挖深約 21.5 m，其所在地層以卵礫石層

（約地表下 1.5 ~ 24.5 m 間）與砂岩層（約地表下 20 ~ 24 m 以下）為主，地下水位約位於地表下 11.4 ~ 13.4 m，如圖 2 所示。基於上述考量，採厚 1 m，長約 27 m 連續壁進行擋土，可預期連續壁施工將遭遇機具損耗、坍塌、逸水等問題，進而降低其施工性。因此，施工前即針對上述情況進行評估，規劃包含：(a) 岩層引孔（圖 3(a)），增加施工效率並減少振動對周遭科技廠房之影響、(b) 連續壁縮小單元（圖 3(b)）及無翼尾單元等因應措施，減少壁體變形與坍塌發生；並以粘土作為防逸材，填補卵礫石間之孔隙，以降低穩定液於地下水位以上產生逸流的機率。

另因頂埔科技園區對噪音振動之要求，於連續壁預埋型鋼作為覆工版系統之支承梁，復舊過程則與以燒鍛運離，以降低敲除近地表部分，所產生之噪音振動對附近居民生活及電子廠房作業之影響，相關之施工照片詳圖 4 所示。

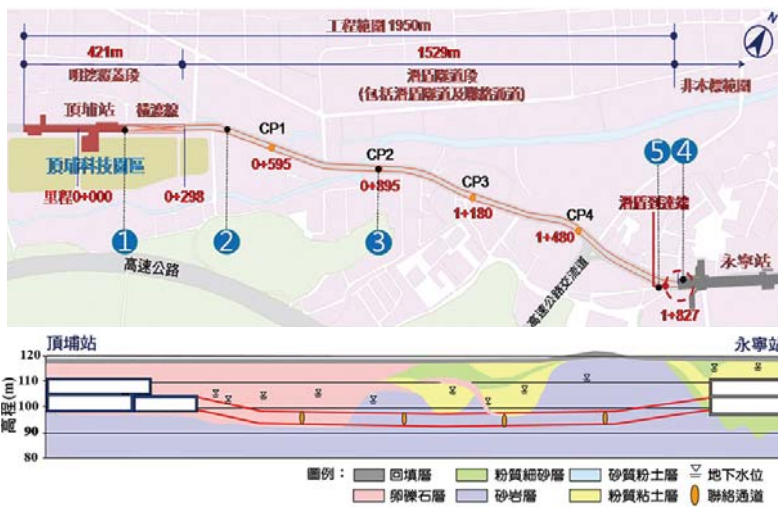


圖 1 主要大地議題對應圖

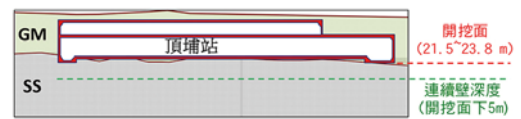
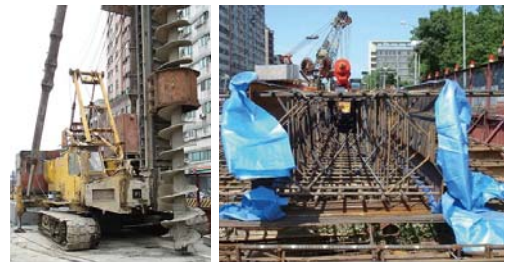


圖 2 開挖深度示意圖



(a) 岩層引孔設備 (b) 連續壁縮小單元

圖 3 連續壁因應措施

表 1 大地議題對策縱整表

項次	工程困難	背景敘述	對策
1	複合地層（卵礫石層/岩層） 連續壁施工	<ul style="list-style-type: none"> 卵礫石：鑽探及現地調查最大粒徑約 40 cm（潛盾段遭遇粒徑 100 cm）、礫石含量約 60%。 桂竹林層砂岩：極軟弱強度、膠結不完全。 	<ul style="list-style-type: none"> 全線 33 鑽孔全程取樣併地球物理探測共 1,120m 以確認土岩介面。 連續壁施作採縮小單元、無翼尾、防逸材及岩層引孔等方式。 潛盾鑽掘採環抱吞食、加大開口率、無軸螺運機、磨耗檢知器及中折等方式及設備。 卵礫石層（CP1/CP3）：地面上施作雙環塞（Double Packer）灌漿。 岩層（CP2/CP4）：隧道內水平探查兼作水平灌漿。
2	複合地層（卵礫石層/岩層/砂層/粘土層） 潛盾隧道施工		
3	連絡通道（卵礫石層/岩層） 地盤改良		
4	與營運車站銜接	<ul style="list-style-type: none"> 維持車站營運。 	<ul style="list-style-type: none"> 進行增設到達井及潛盾棄殼等方案評估。 以大樁徑（φ3.5 m）超高壓灌漿及箱涵引孔進行到達端地盤改良。 成效驗證包括變水頭及測音試驗以及改良體取樣。 潛盾到達試水補灌、棄殼及鏈鋸等工法與車站銜接。 配置自動監測系統。
5	穿越箱涵地盤改良	<ul style="list-style-type: none"> 人員、機具及棄渣管制以及噪音、振動及粉塵防制。 站體侷促空間施工。 車站上方管線密集外，另有一雙孔箱涵（4.3 m × 2.8 m + 4.3 m × 2.8 m）。 	



圖 4 連續壁預埋型鋼

複合地層潛盾隧道鑽掘

本工程潛盾隧道所經過之地層主要為卵礫石層及膠結不完全之砂岩層，潛盾機於卵礫石層鑽掘大致可以「破碎」或「環抱」等理念進行面盤設計，雖各有其優缺點，然設計階段蒐集類似地層之相關案例，發現主要以兩者並行考量為大宗。施工廠商於地層和工期的考量下，純以「環抱」理念進行設計，儘可能增加潛盾機開口率，使卵礫石直接進入土艙內，並配合無軸式螺運機（圖 5）輸送出坑，以提升鑽掘速率並減少切刃磨損及其因損耗所需更換次數與時間。惟潛盾機於卵礫石層中掘進時，遭遇流木或粒徑較大之卵礫石，無法藉由刃齒破碎排除，及至開艙確認，切刃齒多已損毀且傷及輪幅結構（圖 6）。經進行必要之評估後，針對潛盾機面盤改造及切刃齒配置（圖 7），包含：(a) 縮小內周強化先行切刃齒間距（原間隔 300 mm 配置一處，縮為 150 ~ 200 mm），以提高對於流木之磨削能力；(b) 增設 6 處外周強化先行切刃齒（原 12 處，增為 18 處）、2 處刮刀齒（原 10 處，增為 12 處）、6 處切削刀齒、3 處外周保護齒、3 處滾輪切刃齒及 6 處滾輪切刃齒保護齒，以強化破碎及排除外周部滯留



圖 5 無軸式螺運機

的卵礫石能力及耐磨耗能力；(c) 加強環圈抗磨耗之能力。除了針對面盤改造外，掘進過程依照切刃盤扭力狀態調整掘進速度，並確實進行適當的土壓、排土及加泥材管理，以確保開挖面的安定、排土的流動性及避免噴發等現象。藉由面盤改造及掘進管理，俾使潛盾順利鑽掘，且並未因此耽延本計畫之工期。

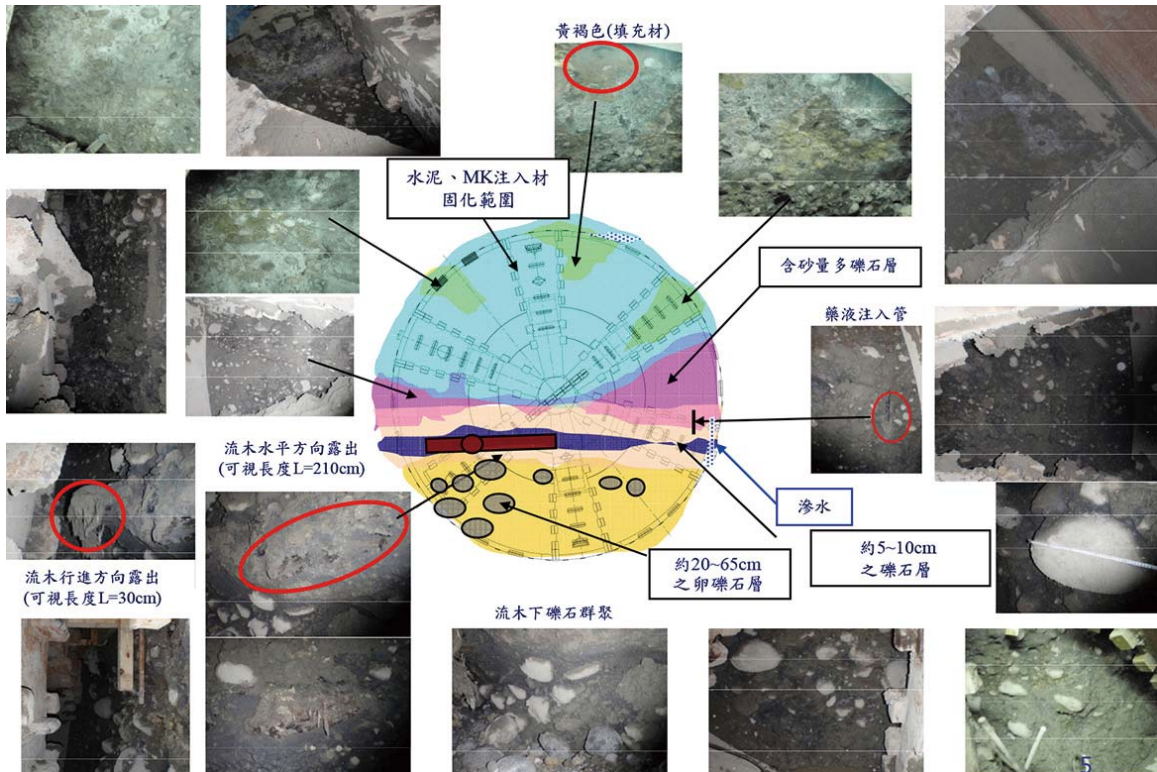
連絡通道施工

連絡通道於地下開挖之施工流程如圖 8 所示，因涉及施工因素及地層條件影響，屬高風險項目之一，故連絡通道之開挖需建立多層防護措施（如圖 9 所示），包含 (1) 第一道防護措施：地盤改良；(2) 第二道防護措施：架設內支撐，在連絡通道開挖之主隧道前後兩側架設鋼支撐，以維主隧道之安全；(3) 第三道防護措施：試水及補灌漿，要求透水係數小於 10-5 cm/sec，必要時則進行化學低壓灌漿；(4) 第四道防護措施：設置臨時鋼製閘門，在連絡通道兩端設置臨時鋼製閘門，當地下水及土砂湧入開挖區時，應緊急關閉臨時鋼製閘門，以減少災害發生之機率。

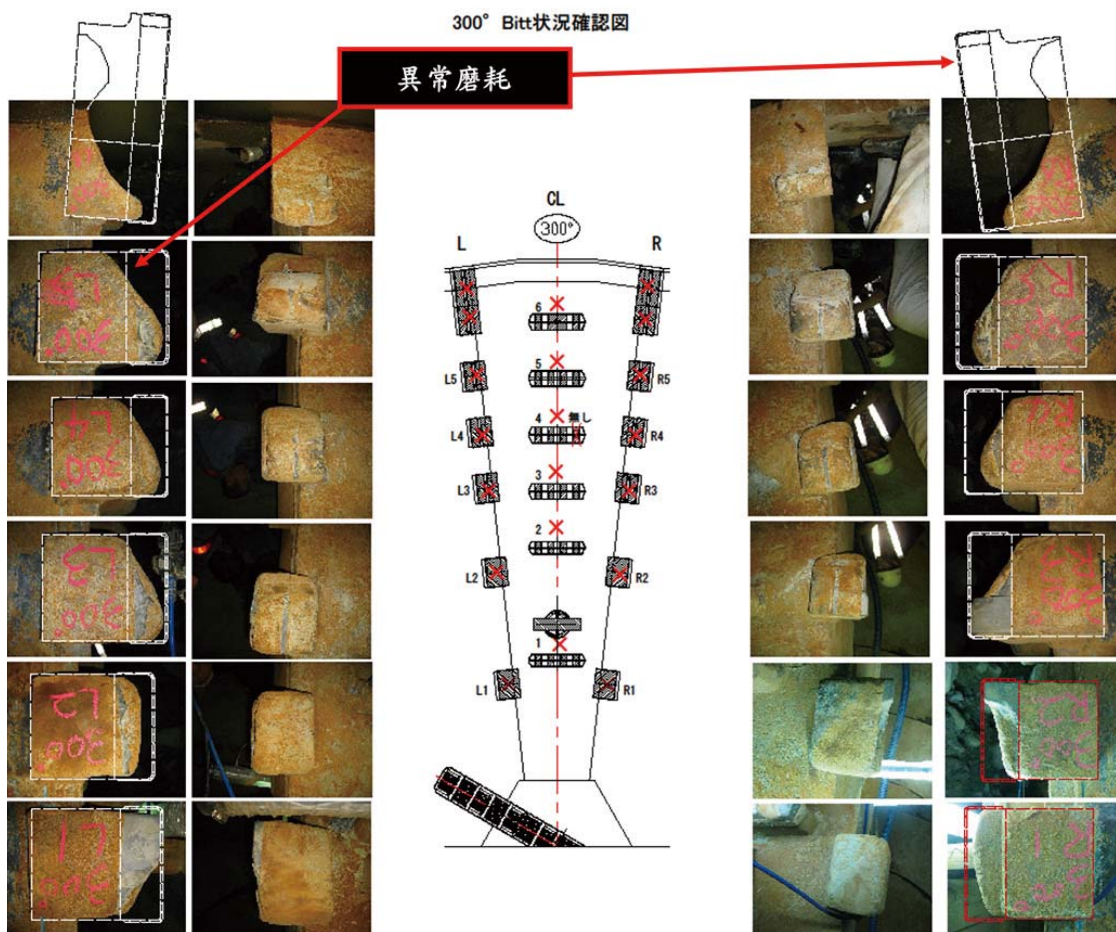
本計畫潛盾隧道共規劃 4 座連絡通道，為縮短工期遂與隧道併行施工：採用新奧工法配合鋼襯板擋土進行開挖。經考量各連絡通道位置之地層特性、施工安全與經濟性後，各連絡通道採用之地盤改良工法建議如表 2 所示。其中，連絡通道 CP2/CP4 位於自立性良好之砂岩層未進行地改，僅於隧道內水平探查並輔以水平灌漿，連絡通道 CP1/CP3 主要位於卵礫石層，為減少開挖時漏水及土體崩塌之現象，故於潛盾機通過前，先行於地面以雙環塞灌漿工法進行地層改良，降低連絡通道四週土壤之透水性。其中，CP3 地盤改良範圍上下層存在粘土及砂岩層，在互層及深度變化考量下，於互層處均設計 2m 交疊長，以確保其改良成效（圖 10）。

潛盾隧道與營運中車站銜接

由於本計畫為既有捷運路線之延伸，潛盾到達端為營運中之車站，因此潛盾隧道與營運中車站之銜接遂成為大地高風險項目之一，故於設計階段，即針對隧道沿線之地層、地下水、鄰近建物及管線分布等狀況，以事件樹及失誤樹分析技術，進行潛盾隧道銜接既有車站施工工法之風險評估。考量之工法包括 (a) 增

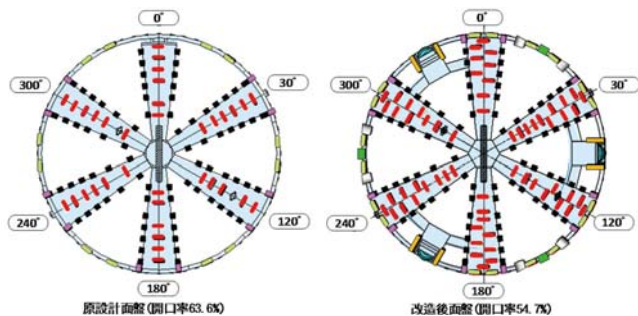


(a) 潛盾機開艙後開挖面狀況 (上行線)



(b) 潛盾機 300 度輪幅及切刀損耗情況 (上行線)

圖 6 潛盾機遭遇卵礫石及流木



圖示	名稱	改造前數量	改造後數量
	內周強化先行切刀齒	35	62
	外周強化先行切刀齒	12	18
	刮刀齒	10	12
	切削刀齒	0	6
	外周保護齒	0	3
	滾動切刀齒	0	3
	滾動切刀保護齒	0	6

圖 7 潛盾機面盤改造及切刀齒配置示意圖

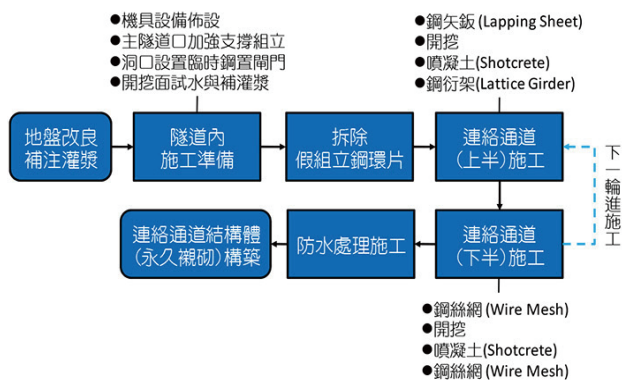


圖 8 連絡通道施工流程圖

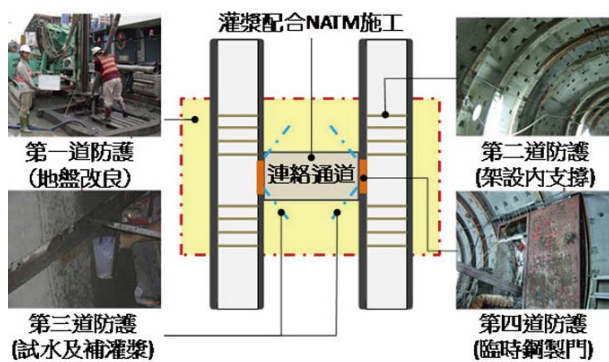


圖 9 連絡通道防護措施示意圖

設到達工作井、(b) 潛盾棄殼加地盤改良、及 (c) 潛盾棄殼加地盤改良搭配冷凍輔助工法等三個方案，各方案綜合評估比較整理如表 3 所示。

經綜合評量各方案之施工風險、工期及經費因素，方案 (a) 因既有車站上方之雙孔排水箱涵 (詳圖 11) 遷移不易，且站體內無足夠施工空間可使用，面臨的施工風險最高，故不建議增設到達工作井；方案 (c) 之施工風險雖然最低，惟工期較長、經費較高，無法

表 2 聯絡通道地盤改良建議工法

項目	CP1	CP2	CP3	CP4
隧道里程	0 + 595	0 + 895	1 + 180	1 + 480
主要地層	卵礫石層	砂岩層	卵礫石與砂岩層	砂岩層
地盤改良工法	雙環塞灌漿工法	水平探查及灌漿	雙環塞灌漿工法	水平探查及灌漿

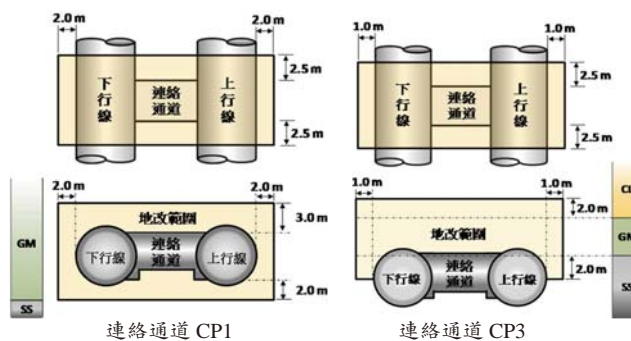


圖 10 地盤改良 (雙環塞灌漿工法) 範圍示意圖

表 3 方案評估比較表

方案	風險	工期	經費
(a) 增設工作井	高	長	▲ 中
(b) 棄殼 + 地改	▲ 中	▲ 中	低
(c) 棄殼 + 地改 + 冷凍工法	低	短	高

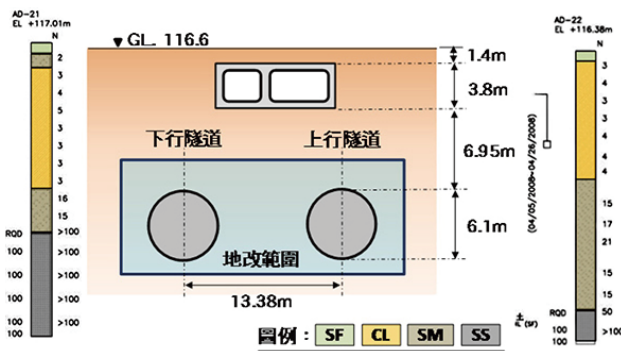


圖 11 潛盾到達端箱涵分布剖面圖

達到業主對工期及預算之要求，方案 (b) 因排水箱涵阻隔，造成局部地改區域須進行斜灌或引孔灌漿，其地改成效及其他施工風險雖較方案 (c) 為高，惟藉由良好之施工品質控制、試水及潛盾機內補灌等措施，可進一步降低其施工風險，故以方案 (b) 作為潛盾隧道銜接既有車站之施工工法。

方案 (b) 施工作業及順序大致為：(1) 到達鏡面地盤改良、(2) 潛盾機鑽掘到達並試水補灌漿、(3) 潛盾機殼嵌入連續壁、(4) 潛盾機棄殼及設備撤除、(5) 鏡面結構破除及 (6) 銜接柔性接頭，如圖 12 所示。為確實管

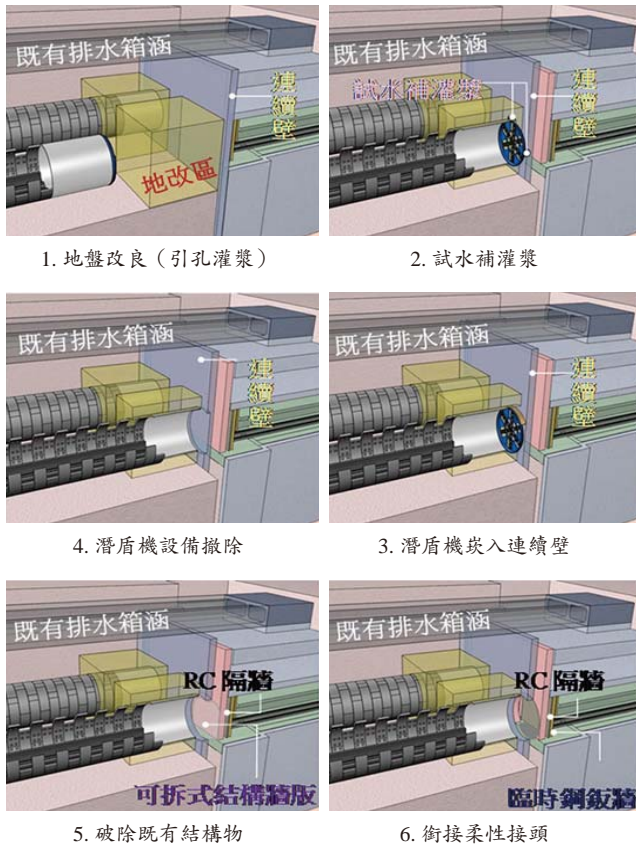


圖 12 潛盾到達施工順序示意圖

控隧道到達施工之安全性，施工階段擬定詳細之施工作业流程，並於過程中進行止水灌漿及試水檢驗，以確保到達鏡面破除之安全性。

● 潛盾到達鏡面地盤改良

考量潛盾隧道到達端地層以粉質粘土、粉質細砂及砂岩層為主，針對此混合地層建議採用高壓噴射灌漿工法以達改良範圍內地層強化及止水目的。在台灣一般常用之高壓噴射灌漿工法有效樁徑約 2.0 m，由於到達端上方存在雙孔箱涵，若採斜灌方式（一般角度以 10° 以內為限），部份範圍將無法施作且有改良樁徑成形及地改成效較差之虞。因此，引進 3.5 m 大樁徑的超高壓噴射灌漿（V-JET）工法，先在箱涵內以局部圍堰（堆疊砂包）方式導水（圖 13），再由道路上方進行鑽孔及預埋灌漿套管方式垂直灌漿，除可確保到達鏡面之地改品質，亦可減少箱涵鑽孔的數量，減低對箱涵結構的破壞（圖 14）。為使超高壓噴射灌漿之施工控制及保護措施更為周全，以增設迴漿導管（圖 15）方式，有效引導高壓噴射灌漿之置換泥漿液排出至地面，減少地面隆起及對排水箱涵結構之影響。



圖 13 箱涵圍堰導水示意圖

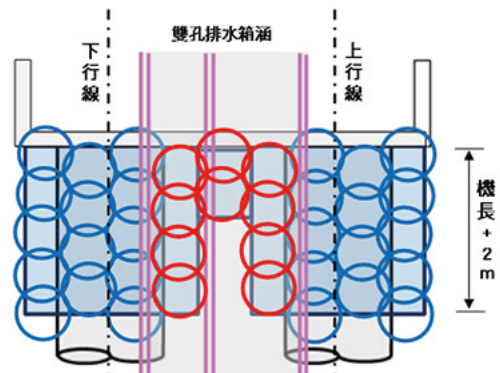


圖 14 3.5 m 大樁徑地改範圍示意圖

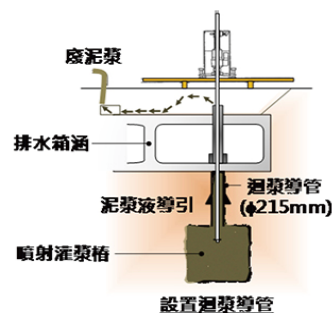


圖 15 迴漿導管設置示意圖

● 潛盾鏡面結構破除施工

潛盾機掘進地改區後，應審慎管控潛盾機之掘進速度並確實執行試水補灌漿動作，避免鏡面破除時振動過大對到達端結構產生影響，以達施工之安全性，鏡面破除施工照片詳圖 16 所示。

另，考量車站連續壁及可拆式結構牆版進行破除時，潛盾機已拆解完成，隧道與車站結構之銜接僅潛盾機盾殼與連續壁，若鏡面結構敲除產生振動過大，盾殼與連續壁界面易產生裂隙，增加鏡面滲水甚或漏砂之施工風險；另考量鏡面結構破除時，得降低施工噪音、振動及粉塵對營運中車站及週遭科技園區作業之影響，因此採用低噪音、低振動之鑽石鍊鋸切割工法。其主要施工流程包括：(1) 切割單元規劃及放樣；(2) 單元切割面端點鑽孔，於單元切割面端點進行鑽孔，以利鑽石鍊條穿越設置；(3) 單元鏈鋸切割；鑽石鍊條設置完成後，利



圖 16 鏡面破除施工照片

用切割機動力引導，沿預定切割路徑切除鋼筋混凝土結構；(4) 單元塊體運棄，將切割完成之鋼筋混凝土塊體卸下，利用潛盾隧道搬運台車，將單元塊體運送至出發井運棄。相關施工流程示意圖及照片如圖 17 所示。

● 潛盾到達端安全監測

為確保潛盾到達破鏡施工過程安全，除藉由每道防線之確認工作外，亦設置安全監測系統於同地點進行量測，以監控破鏡區地層狀況及車站結構之變形行為，並藉監測結果判斷破鏡施工之安全性，即時採取相關應變措施，確保既有車站營運不受影響。潛盾隧道到達端安全監測儀器整理如表 4 所示，安全監測系統平面配置情形詳見圖 18。

量測結果顯示，量測車站軌道變位之電子式桿式沉陷計有持續增加的趨勢（圖 19），但單支最大值約介

表 4 潛盾隧道到達端安全監測儀表

監測項目	儀器名稱	代號	警戒值	行動值
車站軌道及結構變位	電子式桿式沉陷計	BS	0.96	1.2
	電子式傾斜計	ETI	0.96 (200 秒)	1.2 (250 秒)
地下水壓	電子式水壓計	ELP	初值 ±1 t/m ²	初值 ±2 t/m ²
地層沉陷及側向變位	潛式沉線點	SSI	32 mm	40 mm
	桿式伸縮儀	EXM	32 mm	40 mm
	土中傾度桿	SIS	24 mm	30 mm

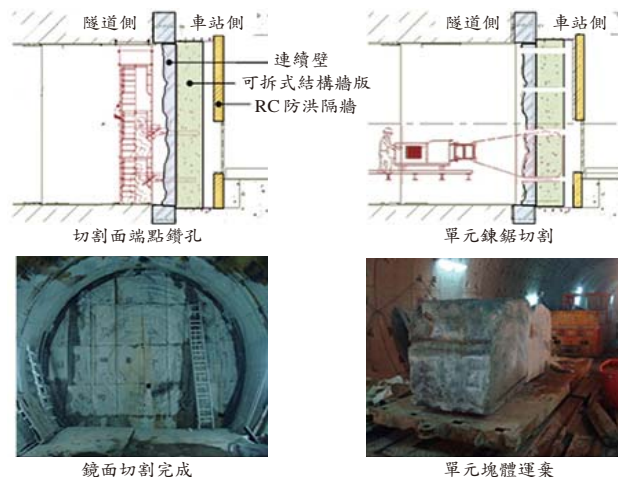


圖 17 鑲鋸切割工法示意圖及照片

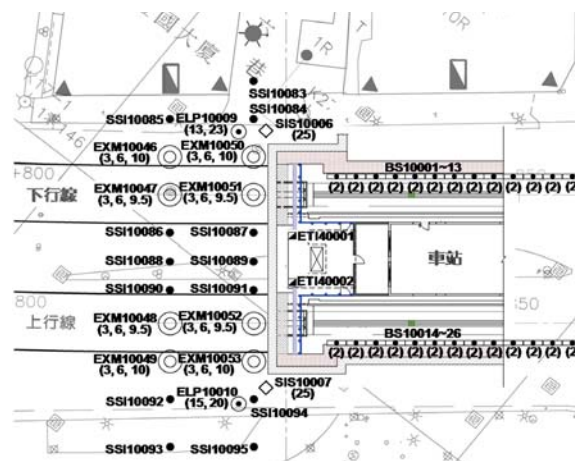


圖 18 安全監測系統配製圖

於 ±0.8 mm 之間，均在管控之警戒值（換算為 2 m 長度軌道變位為 1.9 mm）範圍內，另參考台北捷運禁限建相關規定，桿式沉陷計之變位累加量，亦未超過規定要求之軌道總沉陷警戒值 8 mm。

圖 20 為車站端牆結構之傾斜變化。圖中顯示隨著到達破鏡施工的進行，電子式傾斜計在法線及切線方向數值持續增加，傾斜最大值發生在上行隧道側的 ETI40002，法線及切線方向之最大傾斜值分別約為 +40 秒及 -120 秒，未超過管控之警戒值範圍。

隧道側鏡面地改區之淺式沉陷點（SSI）及桿式伸縮儀（EXM）監測值原則上皆在警戒值（32 mm）範圍內，除 EXM10046 於 1/30/2013 隆起量最大達約 50 mm，推測係下行線潛盾到達連續壁後，進行潛盾機周遭背填灌漿及第一次補充止水灌漿所致。另土中傾度管（SIS）監測結果顯示地層側向變位僅在 2 mm 以內。

全生命週期隧道安全監測

因應捷運局重視捷運設施維護檢測及監測管理且

考慮計畫沿線鄰近建物開挖時之地盤解壓作用對隧道環片之影響，遂規劃於隧道襯砌環片內設置光纖應變計、應變計及土/水壓力計，配合收斂觀測點及電子式傾斜計等監測系統，以隨時掌控鄰近施工對營運中捷運設施之影響。本計畫共計佈設 8 個計測斷面，每斷面之監測儀器配置及照片如圖 21 所示。

結論

本計畫之順利完工，除了設計及施工階段完整考量工程技術面、政策面與民意需求，提出最佳執行方案外，實賴業主/設計/施工/監造單位等參與團隊的努力方能達成，本計畫所遭遇之工程困難及因應對策可整理如下。

- (1) 因頂埔站所在之地層以卵礫石層與砂岩層為主且緊鄰科技園區，為確保開挖期間的施工安全，採連續壁作為站體之擋土設施。依該區之地質條件，連續壁施工時將遭遇機具之損耗、坍孔、逸水等問題，因此設計階段即針對卵礫石特性進行評估，規劃以岩層引孔、連續壁縮小單元及無翼尾單元等作業進行槽溝之開挖；並以粘土作為防逸材，降低穩定液於地下水位以上產生逸流的機率。連續壁之工作得以順利完工。
- (2) 潛盾隧道經過之地層主要為卵礫石及砂岩層，初期採加大開口率配合無軸螺運機運出土渣方式掘進，惟掘進過程遭遇刃齒無法破碎排除之障礙（流木、大粒徑卵石），導致多數刃齒損毀並傷及輪幅結構。經工期考量及配套措施評估後，針對面盤改造並配置滾輪切刃齒；配合添加材控制及掘進管理，俾使潛盾機能在卵礫石層中順利鑽掘。
- (3) 潛盾隧道到達端將銜接營運中之永寧站，為不影響車站營運安全和避免既有設施之遷移，隧道到達端施工採棄殼方式處理，配合鑽石鍊鋸切割工法破除鏡面結構，並依據本區地質及週遭環境條件，使用大樁徑（3.5 m）超高壓噴射灌漿及箱涵內引孔灌漿方式進行地改，且確實執行試水補灌漿作業，降低破鏡施工風險，成功確保永寧站營運不受施工影響。
- (4) 鏡面到達破除施工屬高風險施工項目，作業前設置電子式桿式沉陷計（BS）、電子式傾斜計（ETI）、電子式水壓力計（ELP）、淺式沉陷點（SSI）、桿式伸縮儀（EXM）、土中傾度管（SIS）等安全監測儀器，以人工和自動化系統進行監測，及時反應施工現況以維施工安全。施工中量測結果顯示，隨著破

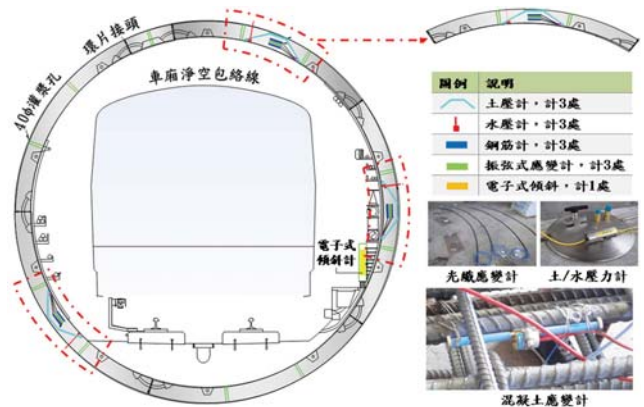


圖 21 環片監測儀器配置示意圖

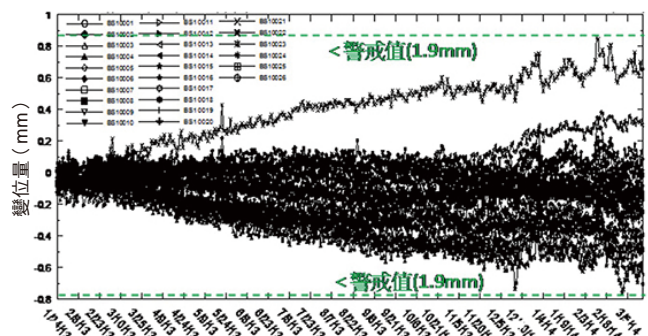


圖 19 電子式桿式沉陷計監測結果

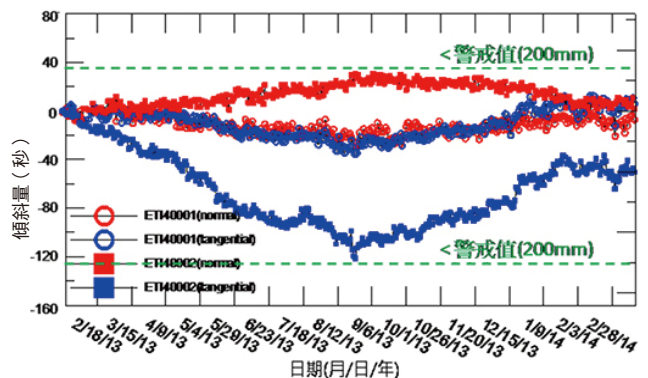


圖 20 電子式傾斜計監測結果

鏡作業進行，各監測儀器之數值均有增加趨勢，但其值皆未超過管控之警戒值範圍。

- (5) 考量新完工隧道後續維護檢測及監測管理之參考，和瞭解近接建物開挖解壓對隧道環片之影響，遂規劃於隧道襯砌環片內設置光纖應變計、應變計及土/水壓力計，配合收斂觀測點及電子式傾斜計等儀器，以隨時掌控鄰近施工對營運中捷運設施之影響。

參考文獻

1. 謝宇珩、周忠仁、張榮峰（2014），「卵礫石層潛盾施工之困難及解決方案」，技師期刊 66 期。
2. 周忠仁、賴永豐、張榮峰（2015），「新建潛盾隧道與營運中捷運車站銜接之工程探討」，第十六屆大地工程學術研究討論會。