

桃園捷運綠線市區路段之 大地工程挑戰

江承家 萬鼎工程服務股份有限公司 / 大地技師
 張志勇 萬鼎工程服務股份有限公司 / 大地技師
 廖惠生 萬鼎工程服務股份有限公司 / 大地技師
 劉彥君 萬鼎工程服務股份有限公司 / 工程師
 郭鑑智 互助營造公司 / 計畫經理
 今倉和彥 日商華大林組台灣分公司 / 副計畫經理
 歐陽卓豪 大陸工程公司 / 副計畫經理

摘要

本文以桃園捷運工程 GC03 標為例，介紹在桃園市都會區中心之中正路周邊，進行地下捷運工程之重大挑戰。從桃園火車站開始之中正路，為桃園非常繁忙的道路，路寬僅 15 m，兩旁商店林立、生意興隆，延此路線進行工程實為不易，工程用地取得亦是困難重重。主要介紹重大挑戰包括台灣最深之地下車站 G07 車站（桃園火車站共構）、台灣首次採用分離式月台之車站（英國及香港稱 Tube station）、台灣最大捷運潛盾隧道、長距離大斷面卵礫石層掘進、穿越景福宮三級古蹟及民宅…等課題。本文初步說明設計規劃階段如何克服這些挑戰，以供工程界先睹為快，並進一步探討未來可以做為大地工程回饋的重點，冀望對我國大斷面地下捷運之大地工程技術發展有所助益。

一、工程概述

年輕有活力的桃園，是個充滿希望的城市，而前瞻基礎計畫將為桃園打通任督二脈，讓桃園展翅高飛。為此，桃園針對前瞻基礎計畫提出 5 大面向，主要為「北北桃 1 小時生活圈軌道運輸計畫」，包括桃園鐵路地下化、機場捷運增設 A14 站、桃園捷運綠線、捷運綠線延伸至中壢站，桃園「口字型」捷運路網逐漸成形，讓首都減壓。其中綠線路廊在桃園都會區整體路網中因符合都市空間發展結構，為整體路網中可與重大建設及其他交通建設期程上

結合的優先計畫，因此列為桃園都會區捷運路網中最優先推動的捷運路線。

桃園都會區整體軌道路網將以「目字型路網」為主要架構如圖 1，其中綠線路廊為整體路網中可與重大建設及其他交通建設期程上結合的優先計畫，因此列為桃園都會區捷運路網中應最優先推動的捷運路線。桃園市政府配合中央政府推動大眾運輸綠色交通政策及政府重大發展計畫，整體考量規劃範圍內相關重大建設，如桃園鐵路地下化、機場捷運建設、航空城計畫等，捷運綠線由八德擴大都市計畫建德

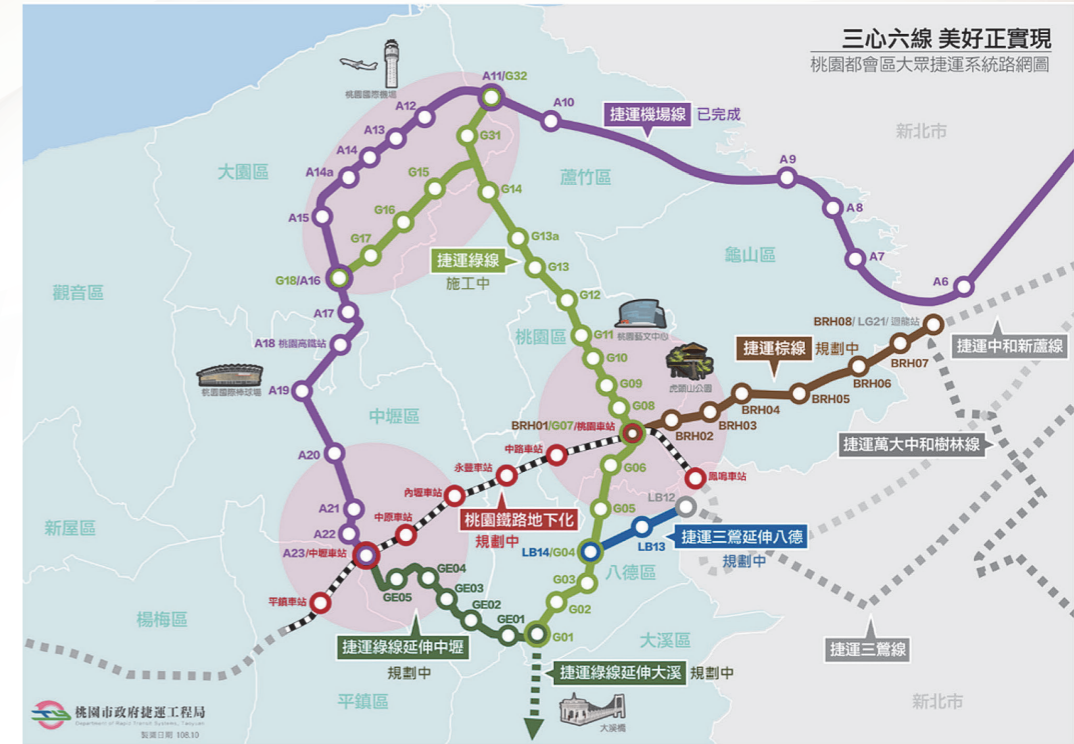


圖 1 桃園捷運綠線路網圖

路起，經八德區介壽路、桃園區建國路、延平路，再經桃園火車站，續沿桃園區中正路、蘆竹區中正北路、省道台 4 線，轉坑菓路，與機場聯外捷運 A11 站銜接。另自 G14 站後路線分岔往西，與機場聯外捷運 A16 站銜接，共設 21 座車站（地下 10 站、高架 11 站），全長 27.8 公里。

桃園捷運綠線 GC03 標（本工程）由桃園火車站（G07），以潛盾隧道沿桃園市區中正路（15 m 寬），行經景福宮、永和市場（G08）、桃園觀光夜市、民光路本工程環境中，桃園捷運綠線核心站是 G07 車站，臺鐵桃園／中壢廊道上重要的東側節點，經此點綠線向北延伸，最終完成桃園環線捷運路網。火車站至慈文路是老中正路，路面較窄（G07、G08、G09），沿路民宅商家已發展形成最具桃園特色的地區，中正路繞景福宮側邊而過，尤其具在地的特色。老中正路向北延伸的新中正路（G10、G11、G12），沿路商業活動發展迅速，具現代都市的景觀，道路綠化良好，呈現與老中正路截然不同的都市景觀，其中又以「中正藝文特

區」為重要節點。路線再向北即進入未來的航空城，代表桃園的未來。這段路線可以說在時間軸上對桃園做了最直接的描述。（G09）、中正藝文特區（G10、G11）、及至中正北路（30 m 寬）交流道（G12）穿越國道 1 號高速公路後出土，至蘆竹區中正北路（北出土段）與 GC01 標之高架橋台銜接，共設 6 座地下車站，全長共約 5.8 公里，工程位置及延線相關照片詳圖 2 及圖 3 所示。除 G12 車站外，其餘 5 座車站皆位於桃園市都會中心，潛盾隧道也在繁忙且狹小的中正路下。

二、地質與地下水概況

工程路線經過之地層以桃園層及大南灣層為主，桃園層主要由卵礫石及上覆厚度約 2~4 m 之紅土所組成，卵礫石大部分為變質石英砂岩、少量為砂岩，卵礫石間充填物以黏土及砂為主，局部夾粉土及膠結不良砂岩，礫石淘選度差，大小不一之圓形礫石凌亂相混。桃園層厚度約在 15~20 m 之間，礫石含量約為 80%，為良好承載層。依據本工程現地試坑調



圖 2 本工程位置圖及願景

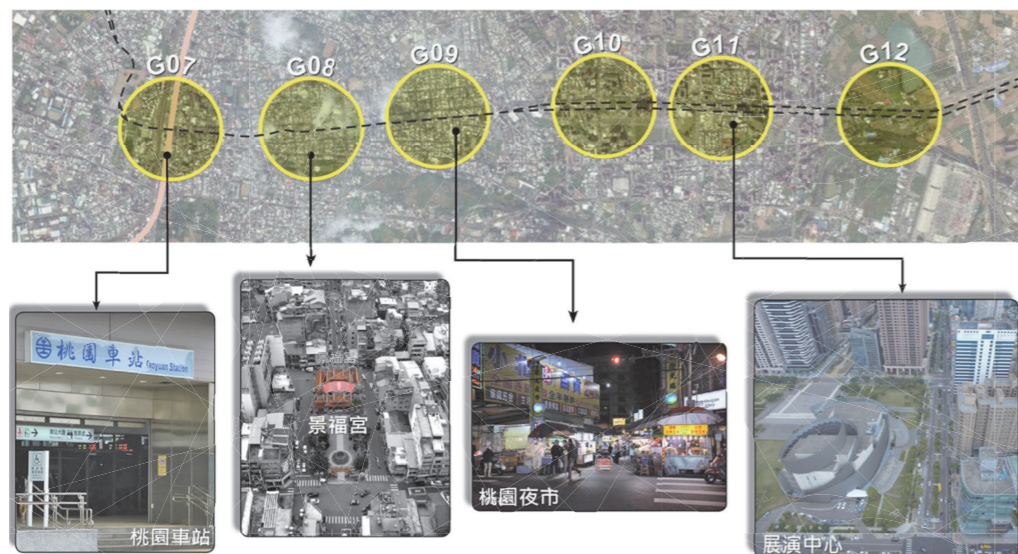


圖 3 本工程沿線相關照片

查結果顯示，卵礫石最大粒徑不超過 60 cm，目前車站連續壁槽溝開挖時之卵礫石最大粒徑亦約 50 cm ~ 60 cm 左右；桃園層以下為更新世之砂岩、粉砂岩或泥岩所組成之大南灣層，計畫路線之區域地質詳圖 4 所示。

鄰近本計畫路線之斷層為湖口斷層、新莊斷層、台北斷層以及山腳斷層，經查中央地質調查所「臺灣活動斷層分布圖 (2010)」，僅湖口斷層及山腳斷層為活動斷層，且皆隸屬推測第二類活動斷層，以山腳斷層距離本標最近約

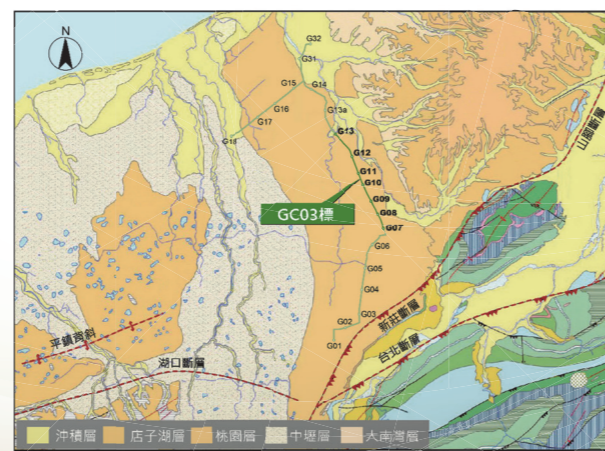


圖 4 本工程區域地質圖

10.7 公里，經地質調查顯示至少在六萬至七萬年前曾經活動過。

依地調成果報告顯示，地層由上至下主要分為回填土層、粉質黏土層、卵礫石層以及砂／泥岩層（大南灣層）等四層，詳圖 5 所示。計畫路徑之地層以卵礫石層及砂／泥岩層為主，卵礫石含量約 80%，標準貫入試驗 N 值則多達 100 以上，卵礫石層厚度由南至北遞降，G07 站附近卵礫石層厚度約 25.5 m，G12 站北側出土段附近約為 17 m，卵礫石層下方之砂／泥岩層為大南灣層，主要為膠結不佳之砂岩、泥質砂岩或砂質泥岩，其中偶夾礫石，此層屬於遇水易軟化之軟岩層。

依據本工程各車站水位觀測井資料地下水位深度約在 GL.-2.8 m ~ GL.-6.5 m 之間，整體地下水位受地勢影響，由南至北遞降，地下水位深度則由北至南漸深，另由現地透水式驗卵礫石層滲透係數 K 約 $1.01 \times 10^{-3} \sim 3.20 \times 10^{-4}$ cm/s 之間。由於本工程路線卵礫石地層特性，在工程施工上主要特殊考量地盤改良工法之選擇，連續壁施工槽溝挖掘坍塌及穩定液逸失等問題，連續壁抓掘機的選擇，施工工率較慢也是對工期一大考驗。在潛盾機型式的選擇，土壓艙卵礫石堵塞與輸送問題，切刃齒高磨耗、施工工率較慢，均為本工程需克服之重點。由於潛盾隧道於 G07 至 G10 車站間位於繁忙且狹窄之中正路底下之，無法條件設置聯絡通道，因此採用內徑 7.5 m 之中圓隧道，將逃生通道設置於隧道內，過 G10 車站後中正路寬 30 m 即有空間設置聯絡通道，因此採傳統內徑 5.6 m 之小圓潛盾隧道，相關位置詳圖 5 所示。

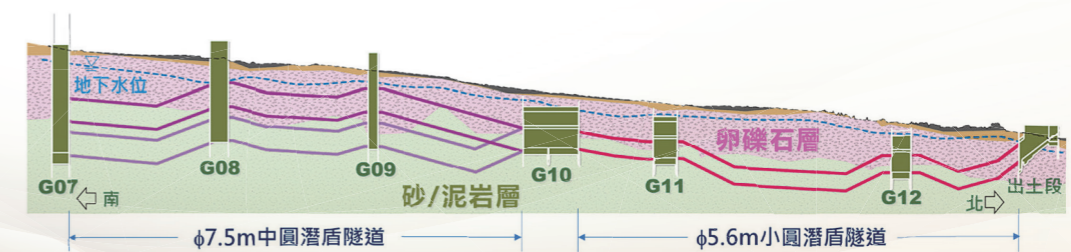


圖 5 工程路線地質剖面圖

三、工程困難與挑戰

3.1 台灣最深之捷運地下車站(G07 車站)

桃園市政府規劃捷運 G07 車站與台鐵地下化桃園站共構，台鐵在上、捷運在下，本工程代辦其台鐵共構之結構工程，原規劃地下八層，開挖深度達 52 m 深左右，經優化後為地下六層，開挖深度 40.8 m，仍是目前國內最深地下車站，G07 車站剖面詳圖 6 所示。如此深的地下車站，連續壁施工、開挖安全性、人員動線規劃、緊急逃生規劃、結構抗浮都是挑戰，除深度深，另基地面積也很大（94 m 長 × 53 m 寬），擋土支撐的勁度需要特別考量。由於 G07 車站緊鄰桃園臨時站和周遭百貨公司林立，人流量大，開挖施工過程的安全性更顯得重要。對大地工程師而言，主要考量開挖擋土穩定安全性，以及在深厚的卵礫石層及砂／泥岩層進行連續壁施工之課題。

本工程團隊在 G07 車站開挖採用逆打工法，以勁度較高的梁或樓版來做為擋土支撐，大幅提高壁體支撐勁度，加上捷運工程與台鐵共構，逆打工法也可以減少樓版底部模板和重型支撐架，而車站結構牆採順打，儘早把結構體完成提高施工安全，減少與台鐵的施工界面。逆打與順打工法之優劣勢詳表 1 所示。

本工程連續壁厚度規劃設計 1.2 m 厚、深度約達 56.3 m。為避免在卵礫石中連續壁槽溝開挖常發生之逸水及坍塌問題，單元可運用縮小單元分割、槽溝內外側灌漿、使用黏稠性較高之穩定液等方案；而連續壁在大南灣層（砂／泥岩層）施工時，考量大南灣層砂岩層的膠

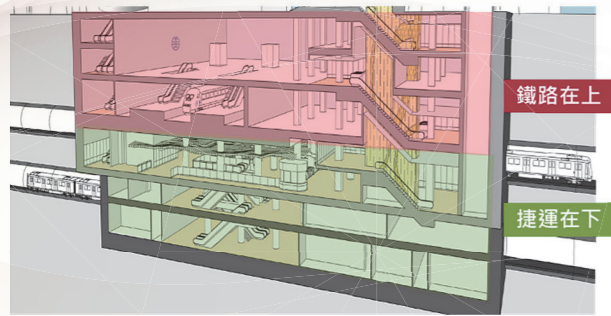


圖 6 G07 車站剖面示意圖

表 1 G07 車站逆打與順打工法比較

逆打工法 Top Down	順打工法 Bottom Up
1. 已施作勁度較高樑或樓版可作擋土支撐，安全性較高	1. 開挖深度大，鋼支撐及連續壁壁體易變形
2. 需增加樁基及逆打鋼柱，土方挖運困難，致工程費較高	2. 工程費用較低
3. 結構體上下同時施作，較不受天候影響，省時，且施工噪音減小，減少與臺鐵可能之施工界面	3. 結構整體性較佳，不會在頂版或各樓板與牆、柱頭處留下接縫
4. 結構體與開挖同時施作，可增強擋土穩定性	4. 開挖支撐及出土等施工方便與迅速
5. 適用於基地面積大、開挖深度較深及有鄰損之處之工程	5. G07 筏基較深厚，需配合支/拆/回撐位置，混凝土採分層澆置

結程度不佳，建議可於先行單元試挖了解是否需採引孔提高施工工率，另也可考慮採用油壓閉合力強的重型抓掘機具來因應。

3.2 G08 及 G09 車站與隧道銜接課題

G08 車站位於現有永和市場，而 G09 車站鄰近桃園觀光夜市，兩車站都在路寬 15 m 之中正路旁，中正路上交通非常繁忙。一般捷運地下車站係於道路下方採用明挖覆蓋車站的方式興建，惟本案環評結論即要求 G08、G09 所在之中正路段禁止明挖覆蓋，遂於基本設計階段規劃於中正路外側設置 G08、G09 車站，詳圖 7 所示。

本工程車站型式參考香港地鐵港島線、英國倫敦地鐵中央線、北京地鐵等，利用連通道銜接月台及車站的方式進行設計、施工，除了結構之設計、施工，綜合評估建築空間、通

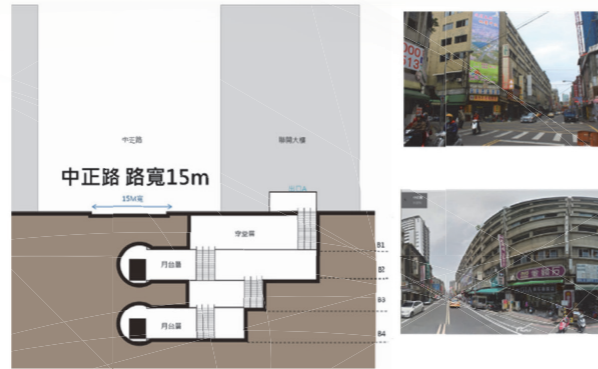


圖 7 中正路外側車站示意及環境照片

風、消防、人流等檢核，都可符合機關需求及規範，是國內首次採用分離式月台之車站 (Split platform 或 Tube station)，詳圖 8 及圖 9 所示。

3.3 地下車站上浮課題及因應

由於捷運地下車站設計需較保守考慮結構上浮問題，地下水位假設位於地表且擋土壁及結構基樁之表面摩擦力不得列入抗浮力計算，

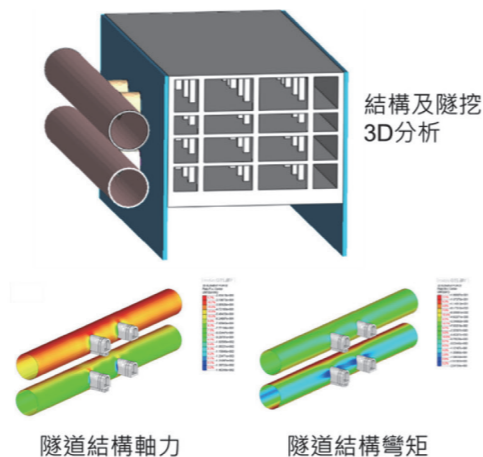


圖 8 G08 車站 3D 隧挖分析



圖 9 國外 Tube station 案例及本工程透視圖

永久性結構抗浮力最小安全係數為 1.07。本工程 G07 因與台鐵地下化共構 (車站底部深度約 40 m)、G08 及 G09 車站採地下疊式車站 (車站底部深度約 30 m)，屬於大深度之地下結構，其上浮課題更顯巨大。

本工程設計在 G07 車站採樓層高度調整，各車站對結構尺寸調整，增加結構自重、減少樓層高度，以減少開挖深度，增加結構自重，並設計在連續壁與樓板做接合，使連續壁之自重得於考慮，另於出土段之明挖覆蓋結構，以加厚胸牆及延伸基礎版之方案來提高安全係數，因應方案詳圖 10 所示。

3.4 隧道排水與聯絡通道課題因應

本工程之聯絡通道規劃於 G11 站至 G12 站間，共計有三座水平聯絡通道作為人員緊急逃生通道，隧道排水一般方案採聯絡通道下方設置集水坑，詳圖 11 所示。依據捷運施工經驗，聯絡通道灌漿後滲水漏砂機率高，可見灌漿品質確實不易掌握，另加上高雄捷運 CO2 標連絡通道災變殷鑑不遠，可見聯絡通道開挖實屬高風險之施工項目。因此本工程中圓及小

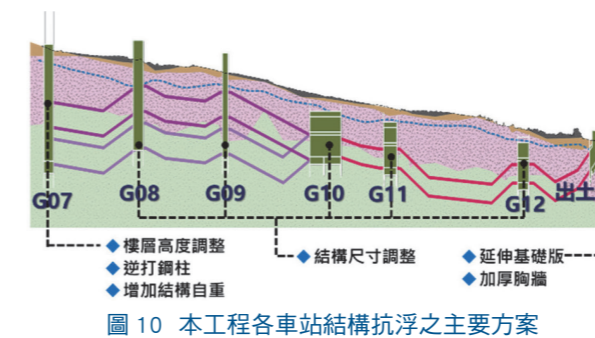


圖 10 本工程各車站結構抗浮之主要方案

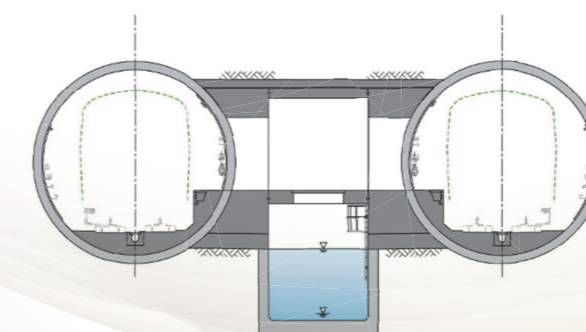


圖 11 傳統以聯絡通道下方設置集水坑

圓潛盾隧道縱坡最低點設置仰拱集水坑，詳圖 12 所示，可符合容量及設計將功能需求，其斷面配置圖所示，且已有實際案例 (臺北捷運松山線 CG590A 區段標)。

3.5 長距離大斷面卵礫石層掘進

本標潛盾機掘進之地層，將經過礫石層 (桃園層)，礫石層之最大礫徑約為 600 mm，其下方為砂岩/泥岩層 (大南灣層)，因此潛盾機掘進必須考慮礫石層切刃齒磨耗、大南灣層土砂附著、轉彎段施工 (小圓潛盾最小曲率半徑 R = 210 m，中圓潛盾最小曲率半徑 R = 110 m)。

本工程潛盾機若採用面板型式切刃盤，由於面盤開口率低，切刃齒必須直接破碎礫石，切刃齒磨耗大，也會降低掘進速度，同時於大南灣層易造成面盤土砂附著，造成掘進之困難。為使礫徑 600 mm 的大型礫石不需破碎又能順利排出，必須防止在高黏性土層掘削時，因土砂附著造成切刃盤阻塞的現象，採用中間支承式之軸輻型切刃轉盤 (規劃開口率約 52 ~ 53%) 及無軸帶式螺運機 (規劃採直徑約 900 mm) 的泥土壓平衡型之中折式潛盾機，詳圖 13 所示，並顯示中圓切刃磨耗分析之初步預測成果。

3.6 出發、到達鏡面風險因應

本工程潛盾出發及到達端深度，於 G07 站往北至 G10 站南側橫渡線之中圓隧道約位於地表下 18 ~ 38 m 間，其由 G10 站往北往至出土段南側之小圓隧道約位於地表下 10 ~ 20 m 間，遭遇地層主要為卵礫石層及砂岩/泥岩為主，地下水壓最高達 38 t/m²，破鏡施工風險

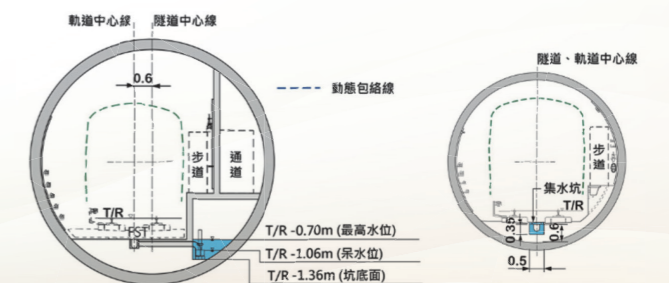


圖 12 本工程仰拱集水坑

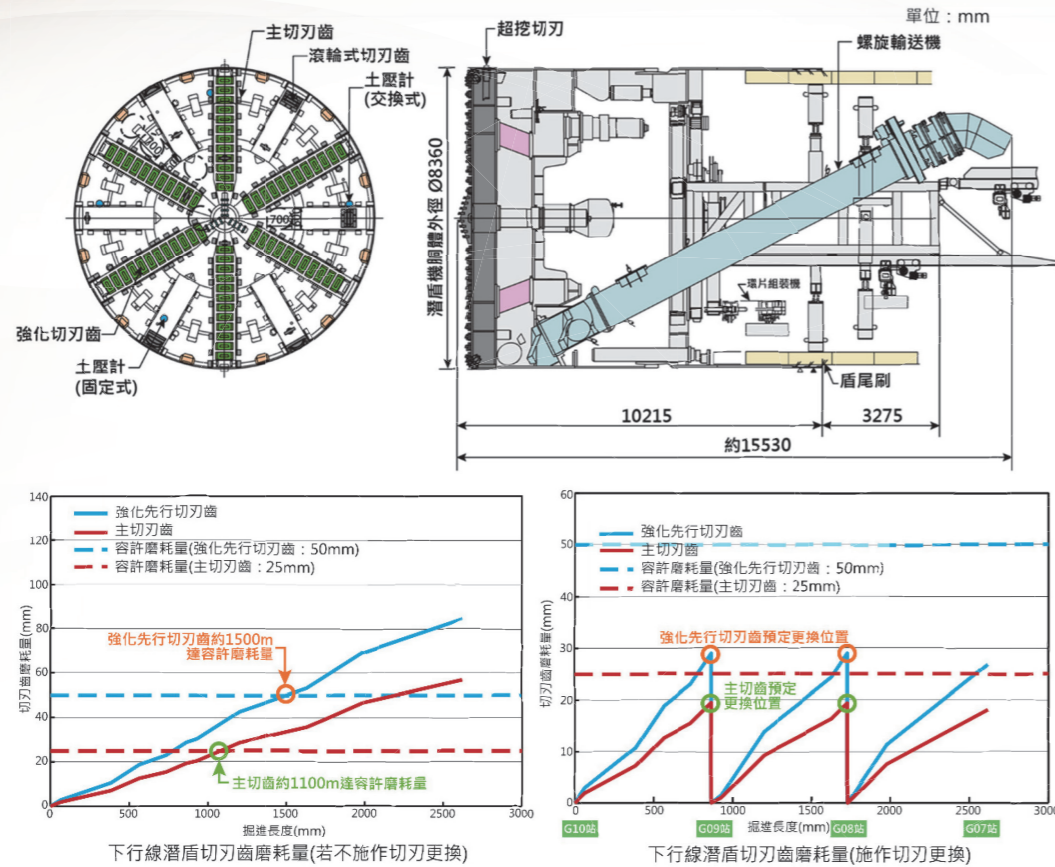


圖 13 本工程中圓潛機示意圖

高，為安全順利完成發進與到達，必須檢討完備的破鏡安全措施。

傳統工法因潛盾機無法直接切削連續壁中之鋼筋，故需事先由工作井內側敲除連續壁混凝土，再切斷鋼筋，最後以約 20 cm 厚之混凝土配合外側之土壤改良體，抵抗巨大之土壓、水壓，施工風險非常高。本工程採 FRP 取代鋼筋，使潛盾機可以直接切削連續壁，降低發進及到達風險。除連續壁採用 FRP 外，針對本工程之地質特性，規劃採用可重覆施灌雙環塞灌漿工法施作地盤改良，鏡面破除採多重防禦觀念，包括試水補灌、地達隔艙、隔艙與連續壁間以 CLSM 或低強度混凝土填充、設置鏡面框及止水封圈等方案提高安全性，整體安全措施詳圖 14 所示，此工法在台北捷運、高雄捷運及台電潛盾洞道均有施工案例，國內技術已相當成熟，可有效降低潛盾隧道出發及到達破鏡之施工風

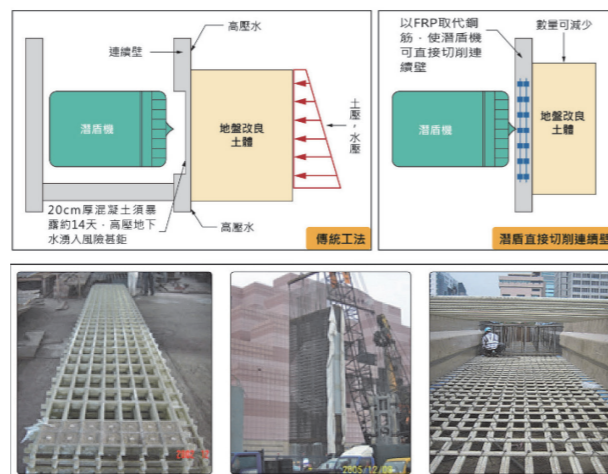


圖 14 FRP 鏡面示意圖及案例照片

險，並可減少地盤改良之範圍並減少道路之交雜空間。

3.7 潛盾掘進施工之建物保護

本工程潛盾隧道鄰近構造物在路面較窄的老中正路旁大多為老舊四層樓公寓，很多建物

調查已呈現大於 1/300 之傾斜量；往北過慈文路後中正路寬 30 m，兩旁主要是高樓大廈，至中山高前後路段，大多為鐵皮屋。潛盾隧道延線行經建物，以三級古蹟景福宮與穿越中山高速公路段為關鍵，而民房段則依據潛盾隧道施工影響評估。

本工程沉陷分析係利用二維有限元素法應用程式 PLAXIS，蒐集類似地層之機場捷運 CM01 施工標時之監測資料，整理潛盾隧道於卵礫石層、岩層中施工時所造成之地表沉陷量，並以 PLAXIS 程式對不同之環片收縮率做分析，依案例回饋分析之收縮率進行本案之沉陷槽分析評估，潛盾行經景福宮及穿越中山高之沉陷分析詳圖 15 所示。施工中秉持嚴謹之態度，規劃多種自動化監測，並訂定相關施工及管理對策，以降低施工風險。

四、結論與建議

1. 本工程在 G07 車站開挖採用逆打工法，以勁度較高的梁或樓版來做為擋土支撐，大幅提高壁體支撐勁度，加上捷運工程與台鐵共構，逆打工法也可以減少樓版底部模板和重型支撐架，儘早把結構體完成，減少與台鐵的施工界面。
2. 本工程參考香港地鐵港島線、英國倫敦地鐵中央線、北京地鐵等。利用連通道銜接月台及車站的方式進行設計、施工，綜合

評估建築空間、通風、消防、人流等檢核，符合機關需求及規範，是國內首次採用分離式月台之車站。

3. 為使礫徑 600 mm 的大型礫石不需破碎又能順利排出，必須防止在高黏性土層掘削時，因土砂附著造成切刃盤阻塞的現象，採用中間支承式之軸輻型切刃轉盤及無軸帶式螺運機的泥土壓平衡型之中折式潛盾機，並以切刃磨耗分析、切刃齒磨耗檢測裝置，並利用車站位置減少路面地改等對策。
4. 中圓潛盾隧環片設計上，採厚度 35 cm 混凝土環片為主，環圈七分割，因國內尚無這麼大直徑的環片，將進行的環片的抗彎、推力及接頭試驗，並在潛盾隧道環片內安裝應變計，以期後續回饋及未來相關案例參考。
5. 本工程隧道沉陷分析，依實際桃園區域之地下潛盾施工實際之沉陷資料回饋作為分析參考，後續透過卵礫石層潛盾隧道沉陷槽之資料收集，做回饋分析供未來案例的參考。

誌謝

本文承蒙桃園市政府捷運工程局、中興工程顧問公司、互助營造股份有限公司、日商華大林組營造股份有限公司台灣分公司、大陸工程股份有限公司，在寫作期間提供施作經驗及資料，特此致謝。

參考文獻

1. 桃園市政府捷運工程局 - 捷運線網站 <https://dorts.tycg.gov.tw/business/mrt-green-line>
2. 「桃園捷運綠線 GC03 標 G07 站至北出土段間地下段土建統包工程」投標文件 (2019)。
3. 中華民國隧道協會 (2009)，「潛盾隧道設計及施工準則與解說」，科技圖書，台北。
4. 日本土木學會 (2010)，「潛盾隧道環片設計 - 從容許應力設計法到極限狀態設計法」。
5. 萬鼎工程 (2019)，「補充地質鑽探及現地試驗成果報告」。

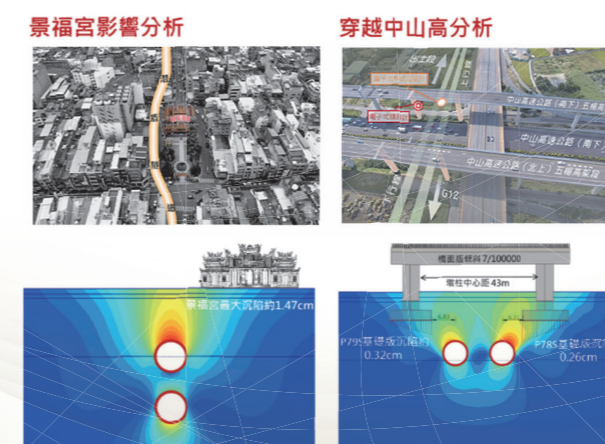


圖 15 潛盾行經景福宮及穿越中山高之沉陷分析