

桃園國際機場多功能大樓施工中 桃園捷運潛盾隧道安全監測

何金益 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 大地技師

歐皓智 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 土木技師

摘要

桃園機場多功能大樓為第三航站區計畫之一部分，由於其位置在既有桃園捷運潛盾隧道正上方，且施工行為包含近接全套管基樁施作及大範圍開挖，施工前預計桃園捷運潛盾隧道可能因施工導致變位，因此在桃園捷運內採用全自動化監測儀器管控施工行為對於潛盾隧道之影響。本案例將介紹多功能大樓施工與既有捷運隧道之關係，並針對風險較大之區域採取監測手段，在施工過程中，監測成果除了可確認當前施工行為對於捷運之風險於控管範圍內，亦可作為施工順序調整之參考。

一、前言

桃園國際機場第三航站區位於第二航廈與華航園區之間（圖 1），基地面積約為 640,000 m²，主要開發內容包含第三航廈主體建築、登機廊廳及多功能大樓（MFB）等設施，位於桃園捷運機場段上方，而該捷運路段已於民國 106 年 3 月通車營運。依據《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》之規定，對於第三航站區鄰近工區之後續施工，須加強掌握其對捷運系統可能造成之影響，並作為未來相關責任歸屬釐清的依據。

第三航站區於捷運禁限建範圍內施工期間，必須辦理桃園捷運機場段之安全監測工作。至 113 年底於禁限建範圍內施工之工程包含：機坪整地工程、主體航廈土方及基礎工程、主體航廈結構施工、MFB 多功能大樓基樁工程、MFB 多功能大樓土方及基礎等工程。監測工作之主要

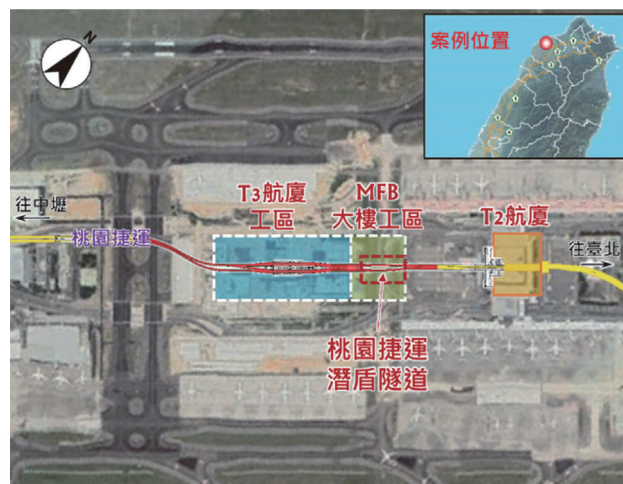


圖 1 桃園國際機場第三航站區工址位置及範圍

目的係掌握第三航站區於捷運禁限建範圍內施工對桃園捷運機場段設施之影響，監測範圍約 950 m，以確保桃園捷運於施工期間之安全性及營運舒適度。

本文將著重討論桃園國際機場第三航站區 MFB 多功能大樓施工期間，潛盾隧道內監測布設、隧道檢測，並以監測結果討論 MFB 多功能大樓施工行為對於潛盾隧道之影響。

二、案例工程背景

2.1 地形與地層概況

本工址位於桃園市西北隅，地形係位於桃園台地西緣，地勢大致平坦，惟由東向西緩傾，坡度甚小，工址地形高程約在 EL.10 ~ 30 m。

工址地層屬於桃園台地群之更新世「桃園層」，主要可區分為下部的礫石層與上部的紅土層。「桃園層」以下之地層未於本工程區出露，依區域地質推測，下伏層可能為楊梅層（厚度超過 800 m）與大茅埔礫岩（厚度約 80 m）。

蒐集鄰近鑽探資料計 160 孔，其中約 95 孔位於工址範圍內。經綜合檢視分析後，工址地層大致可分為三層（圖 2），分別為覆土層、卵礫石層及砂岩層。覆土層厚度主要分布於地表至下方 0.2 ~ 5.1 m 之間，部分區域存在厚度達 0 ~ 13 m 之回填層，其主要組成含砂質之卵礫石，粒徑約為 2 ~ 30 cm。卵礫石層深度範圍自地表下約 0.2 ~ 27 m，平均厚度約 25 m，標準貫入試驗 N 值大於 100，礫石粒徑亦多介於 2 ~ 30 cm，鄰近區域最大粒徑可達 60 cm。其下層為膠結性較差之砂層或泥質砂岩層，厚度大於 20 m。

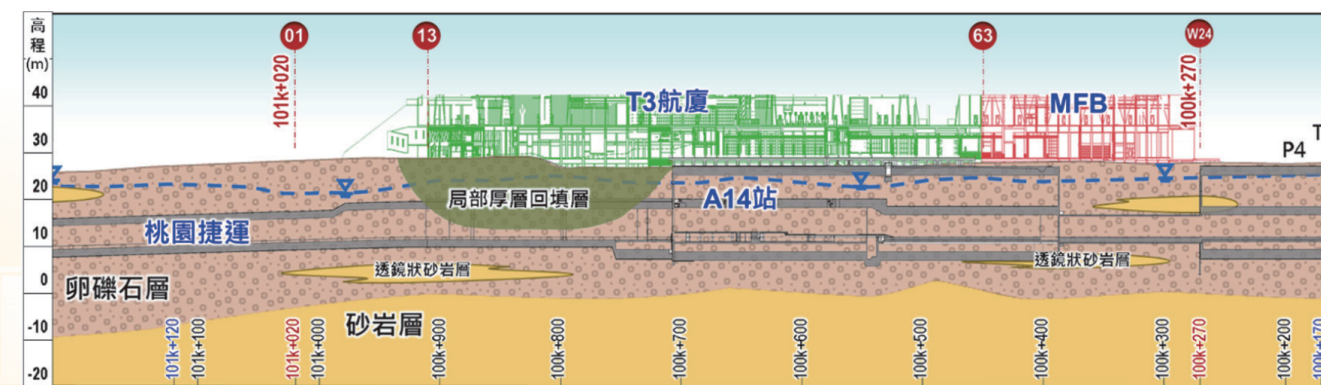


圖 2 工址地層剖面圖

2.2 施工範圍內既有捷運結構

工區範圍內桃園捷運區段包含 A13（第二航廈站）至 A14（第三航廈站）間地下結構及隧道、A14 車站結構及 A14 至 A14a（機場旅館站）間隧道。結構形式包含明挖覆蓋隧道、明挖覆蓋車站及潛盾隧道。明挖覆蓋隧道於採順打方式施作，依空間斷面需求，車站結構採雙層矩形明挖覆蓋，其餘為單層明挖矩形隧道；此外，桃園捷運施工時，為穿越桃園國際機場舊 WC 滑行道且不影響其服務，以 $\Phi 5.6$ m 潛盾隧道分上、下行線穿越滑行道下方，潛盾隧道通過長度約 113 m（盧與童，2008）。因明挖覆蓋隧道與潛盾隧道之斷面尺寸及結構勁度差異較大（圖 3），兩不同結構型式之隧道間以柔性接頭結合，允許接頭處可產生較大之差異變位，避免應力集中於接頭處造成結構破壞。

2.3 潛盾隧道上方施工行為

由平面圖（圖 1）可見，潛盾隧道上方主要為多功能大樓（MFB）施工區域。為減少大樓荷重對潛盾隧道可能造成之變位影響，設計階段於潛盾隧道南下線北側、北上線南側及雙孔間加設全套管基樁，總數共計 70 支（圖 4）。該基樁設計用以將多功能大樓之主要荷重傳遞至潛盾隧道下方較深層之地層。全套管基樁與潛盾隧道最近淨距離僅約 2 m（圖 5），施工行為屬高敏感度施工（圖 6）。



圖 3 潛盾段與明挖覆蓋段交接處

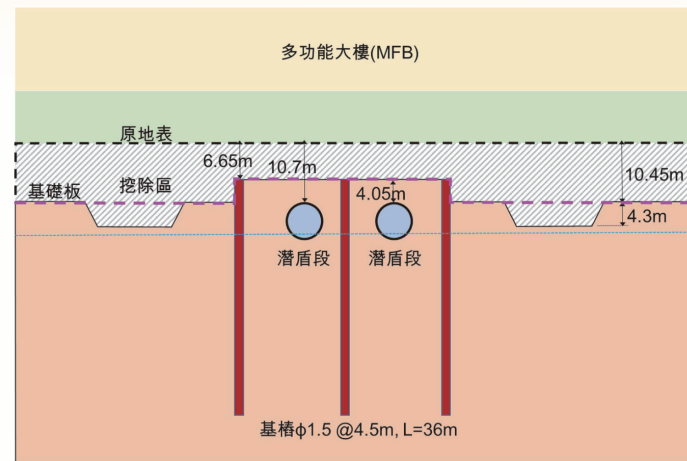


圖 4 捷運潛盾段上方開挖示意圖

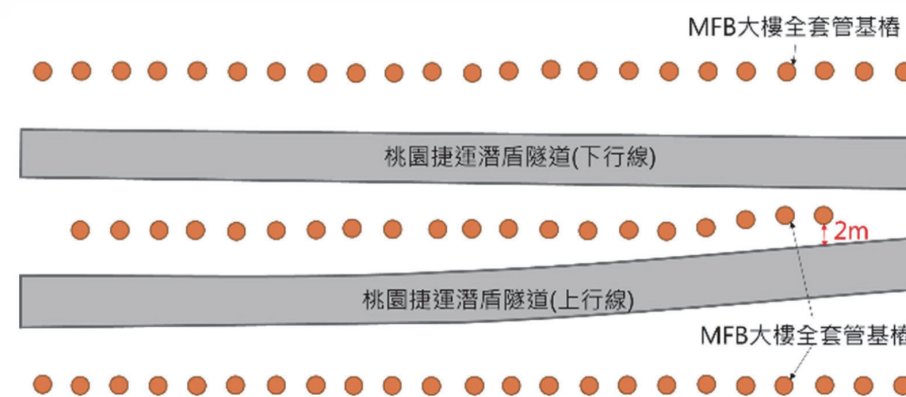


圖 5 MFB 基樁與潛盾隧道平面示意圖

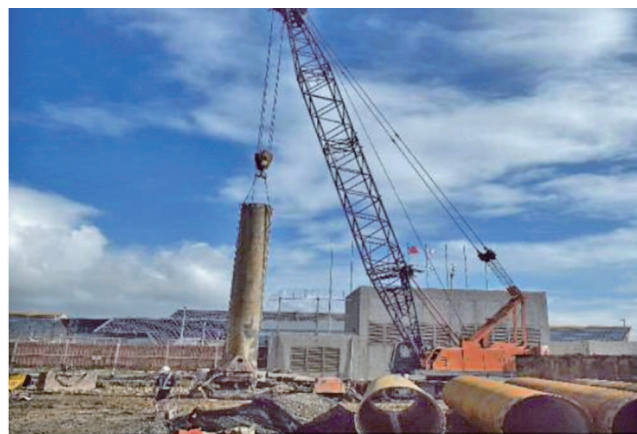


圖 6 全套管基樁施作現場照片



圖 7 潛盾隧道上方斜坡明挖

潛盾隧道正上方覆土厚度原有約 10.7 m，須開挖 6.65 m，開挖完成後剩餘覆土厚度剩餘 4.05 m，開挖方式斜坡式明挖方式施作（圖 7），開挖分 6 區塊施工，依潛盾監測成果調整開挖順序。

三、監測方式

3.1 監測項目及布設原則

依據《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》（交通部，2019），於捷運禁建限建範圍內施工，

須確保捷運設施變形值低於容許值。參考交通部《大眾捷運系統兩側禁建限建辦法》、《桃園市辦理大眾捷運系統禁建限建範圍內列管案件管理及審核基準》之規定，潛盾隧道「徑向容許變形量 2 cm」，軌道位移以「垂直或水平總位移量 1 cm」及「5 m 內 3 mm 之垂直或側向扭曲」為管控值。因此在監測儀器方面，本案例至少須滿足潛盾隧道徑向變形及軌道變位等監測需求。

本案例考量監測標的為捷運行駛之隧道，人工量測較為困難，且監測頻率要求高，因此採用全自動監測儀器執行。主要以全測站經緯儀搭配菱鏡監測。由於潛盾結構整體勁度較明挖覆蓋箱涵結構低，預計其受施工影響較敏感，又潛盾與箱涵結構間以柔性接頭銜接，雖可避免銜接處結構破壞，亦可能因施工有較大的相對位移量，須確保施工期間相對位移於管理值內，以避免影響捷運行駛安全及舒適度。因此在潛盾隧道段，反光菱鏡監測斷面的布設間距為 5 m 一組斷面，每組斷面布設 4 組菱鏡以監測結構變位及內空變位，並設置陣列式位移計（SAA）加強量測軌床的位移量（圖 8）。

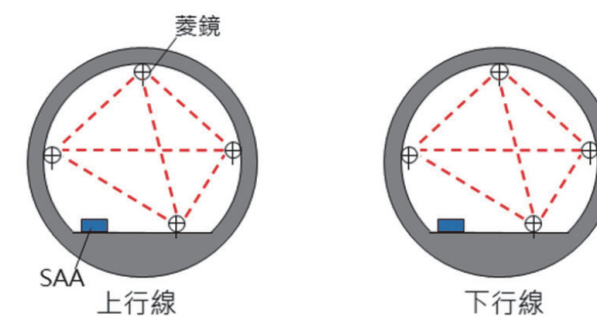


圖 8 潛盾隧道儀器內布設示意圖

此外，施工區域內原水位高程約略高於潛盾隧道，強降雨或施工抽降水亦會影響隧道結構位移量，因此本案例在沿線布設自動化水位計及雨量站。本案例於潛盾隧道之儀器項目及布設原則綜整如表 1（何等人，2024）。

3.2 資料傳輸方式與監測頻率

本案例監測儀器皆採用自動化儀器，監測資料傳輸方式分為兩類，其中全測站經緯儀測量資料直接以 4G 無線方式傳輸至監測伺服器中心；水位計、SAA 等監測資料，則先以有線方式傳輸至集錄器（logger），再藉由 4G 模組傳輸至監測伺服器中心。監測伺服器中匯入監測資料庫，再由監測平台抓取資料庫內容，藉由網際網路供相關人員查看。同時電腦運算進行初步判斷，一旦監測值異常或超出管理值，則以電子郵件及手機通訊方式主動警報（圖 9）。

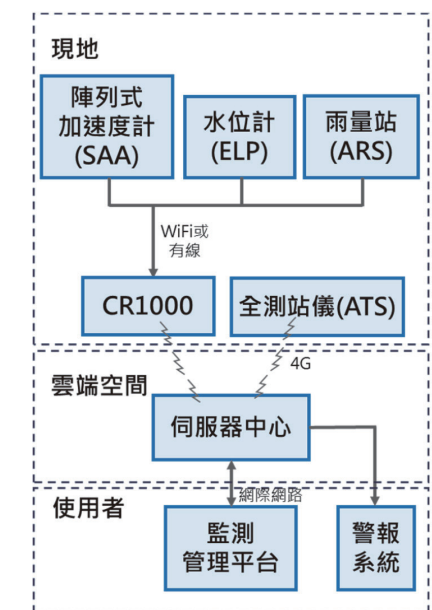


圖 9 本案例監測資料傳輸示意圖

表 1 隧道安全監測儀器配置

監測儀器	監測目的	布設位置	監測型式
全測站經緯儀	隧道結構體之沉陷、側移及淨空變化	上、下行線潛盾隧道口兩側壁處	自動化監測
菱鏡		約 5 m 一監測斷面，每個斷面 4 組菱鏡。	自動化監測
陣列式位移計	潛盾段軌床位移量	上、下行線潛盾段隧道軌道床側壁	自動化監測
自動化水位計	藉由振弦式水壓計進行水位量測，確認降水效果	臨桃園捷運隧道外側雙邊裝設	自動化監測
自動化雨量站	監測降雨量	開挖區外不受破壞位置	自動化監測

由於監測保護對象為捷運系統為重要交通建設，因此全測站及水位計之量測頻率為每小時至少 1 次，SAA 則為每小時至少 2 次。於 MFB 大樓基樁工程施作期間，為降低施工風險，將 SAA 量測頻率調整至每 5 min 至少 1 筆，並且施工期間須隨時注意監測值變化。至於全測站經緯儀，其監測值用以判斷變位趨勢相當可靠，惟其監測頻率受監測方式所限，為自動照準菱鏡，須進行正鏡及倒鏡量測，並且量測完範圍內設定之菱鏡後始能進行下一次量測，因此在量測頻率上會依現場環境狀況與量測菱鏡數量有所限制，在監測頻率設定上應有所考量。

3.3 全斷面襯砌影像掃描

為確認施工對於隧道之影響，除了自動化監測外，另以全斷面襯砌影像掃描紀錄各階段之潛盾隧道環片襯砌異狀，如其他案例中發生之環片龜裂、環片錯位、環片開裂、滲漏水等。本案例為提高檢測品質與效率，經綜合評估，採高精度之雷射光掃描儀器 GRP5000 進行影像掃描工作（圖 10）。

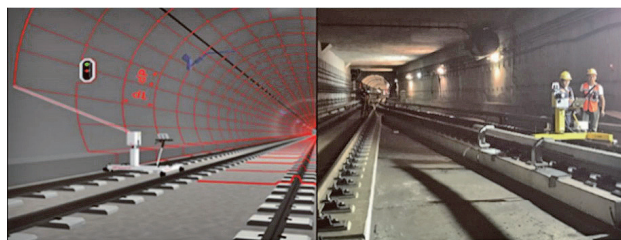


圖 10 本案例隧道襯砌影像掃描原理及現場作業

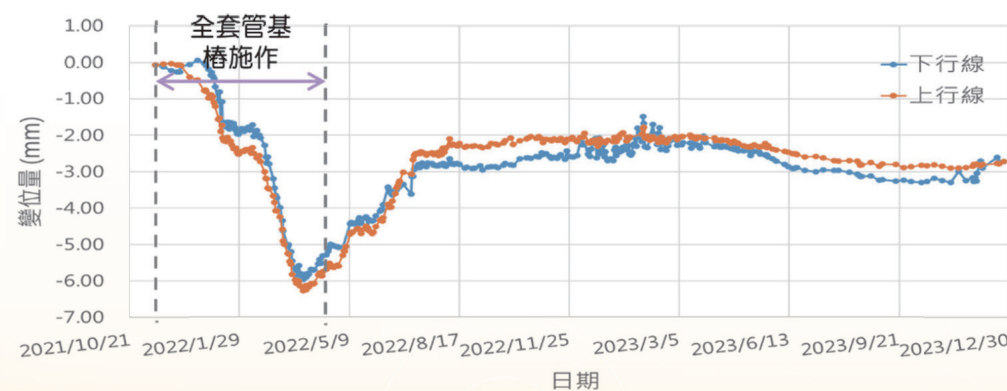


圖 11 潛盾隧道里程中點歷時曲線

四、監測成果分析

4.1 全套管基樁施作期間之影響

MFB 大樓全套管基樁自 110 年 10 月開始施作，至 111 年 3 月完成所有基樁施作。潛盾隧道變位以基樁施作前為初始值，紀錄全套管基樁施工對於潛盾隧道之影響。

取潛盾隧道里程中點之位移量歷時曲線（圖 11），在 MFB 大樓基樁施作期間，潛盾隧道里程中點有下沉的趨勢，下沉量最大值達將近 7 mm。而後隨基樁施作完成、基樁機具撤場，此沉陷量亦慢慢回彈至約 2 ~ 4 mm 後，潛盾隧道變位趨於穩定（圖 12）。依現場施工行為研判，此下沉趨勢可能源自於施工機具、材料之臨時載重及基樁置換原土層導致。

進一步取整段潛盾及前後明挖覆蓋段隧道變位繪製沿里程變位，成果顯示明挖覆蓋段隧道未因全套管基樁施作有相似於潛盾隧道之變位情形，導致兩隧道結構間有明顯的相對變位及角變位產生，須加以注意避免此角變位持續擴大影響捷運行駛中乘客舒適度及捷運行駛安全。

本案例監測資料回饋予施工單位及監造單位擬定施工策略參考，施工單位於明挖覆蓋結構上方以太空包施加载重，控制角變位量皆小於 3 mm/5 m，此角變位量遠小於影響乘客舒適度之標準。另外，針對此變位趨勢，施工與監造單位

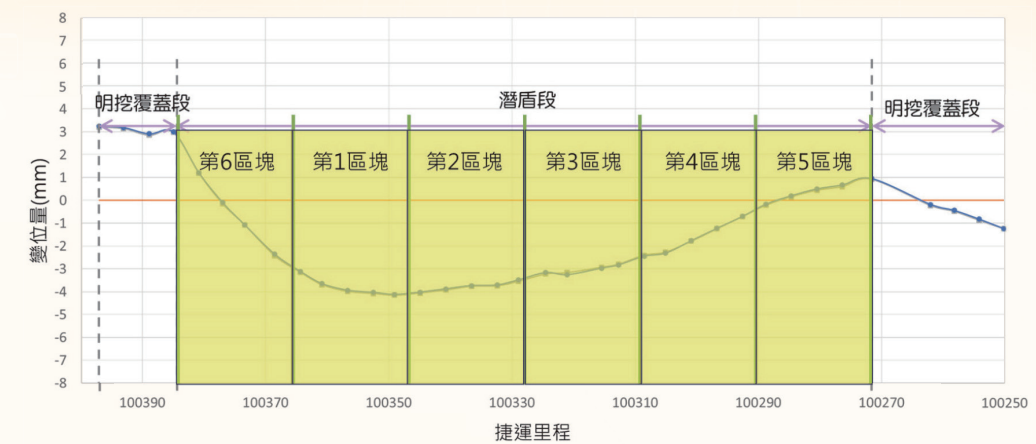


圖 12 基樁施工期間潛盾隧道沿里程變位及開挖分區

調整斜坡明挖分區及施作順序，將以潛盾隧道沉陷量最大之里程上方開始開挖，並將角變位最大之區段留至最後開挖區，試圖降低角變位，亦可先掌握此區域開挖對於潛盾隧道變位之影響，再行施作風險較高區域。

4.2 潛盾隧道正上方開挖期間之影響

自 113 年 12 月至 114 年 4 月，MFB 大樓於潛盾正上方開挖作業進度至第 2 區塊完成，取位於第 1 開挖區塊之角變位量最大之監測點及沉陷量最大之監測點追蹤潛盾隧道受開挖之影響，以確保施工行為對於潛盾隧道之風險於控管內。繪製兩監測點變位及角變位歷時曲線與施工行為比對（圖 13），於第 1 區塊開挖作業期間，對應至第 1 區塊下方潛盾隧道約上浮 2 mm 之趨勢，角變位量亦有略微下降趨勢。在第 2 區塊開挖期間，前述兩監測點位已無上浮趨勢，甚至有些微下沉趨勢，但整體而言施工對於潛盾隧道之風險相較於開挖前並無進一步上升。

截至本文完成時，第 6 區塊尚未進行開挖。依第 1 區塊開挖監測結果，第 6 區塊開挖時潛盾隧道仍有機會有上浮之變位，屆時可能導致角變位進一步上升，因此可觀察其餘區塊之 FS 版、BS 版施作完成後，是否可因此分攤開挖或加載之影響，以達到控制角變位之目的。

4.3 潛盾隧道影像掃描成果

MFB 大樓施工前，為比對該施工行為對於潛盾隧道是否有影響，於 110 年 6 月進行隧道襯砌影像掃描，掃描成果顯示（圖 14），此區段潛盾隧道結構狀態良好，無環片龜裂、錯位或開裂等結構異狀，僅有在少數環片接合處有水痕，經現場目視檢查後，該水痕無明顯滲水狀況。而在潛盾隧道結構與明挖覆蓋箱涵交界處，則有明顯滲水痕跡（圖 15），須持續觀察施工行為是否導致此處異狀增加或加劇。

五、結論

本案例為礫石層中淺覆蓋潛盾隧道上方受施工行為之監測，結果顯示在此條件下，施工機具載重、基樁施作及開挖等施工行為，皆會對潛盾隧道產生變位。本案例採用自動化監測儀器，可控管此變位之風險，並進一步使用此監測數據作為施工順序之依據。因此於近接既有重要結構之開挖時，妥善規劃監測布設，可降低風險及避免過度保守之施工。

誌謝

本文撰寫特別感謝桃園國際機場股份有限公司及桃園第三航站區主體航廈工程之設計、監造及施工團隊，提供標案資料及施工進度等資訊，使本文得以順利完成，特此致上謝忱。

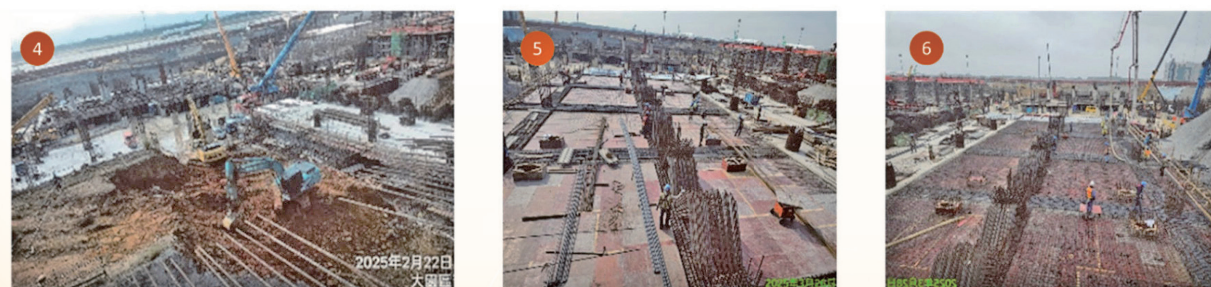
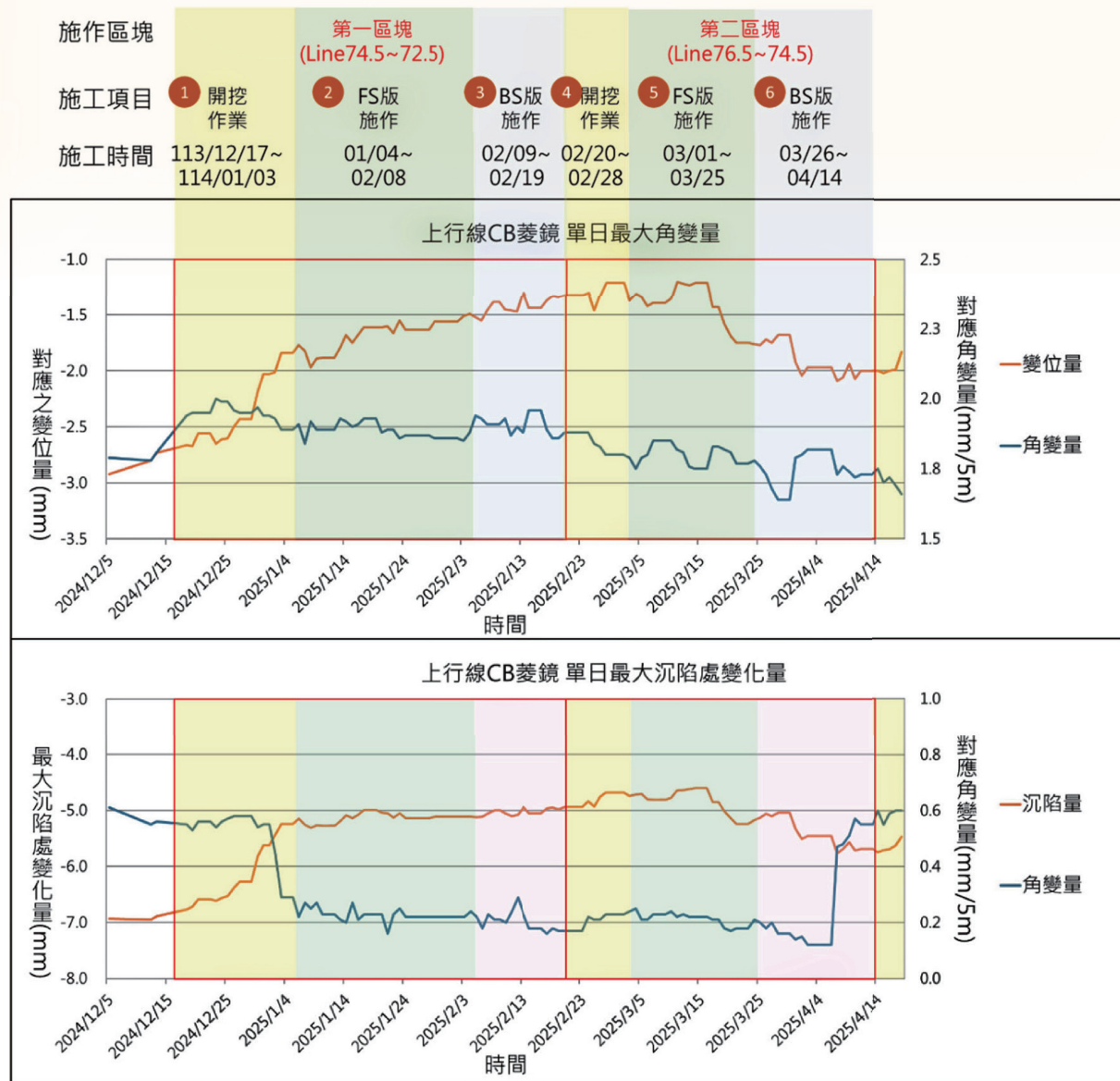


圖 13 潛盾隧道於 MFB 開挖期間歷時變位曲線及施工照片

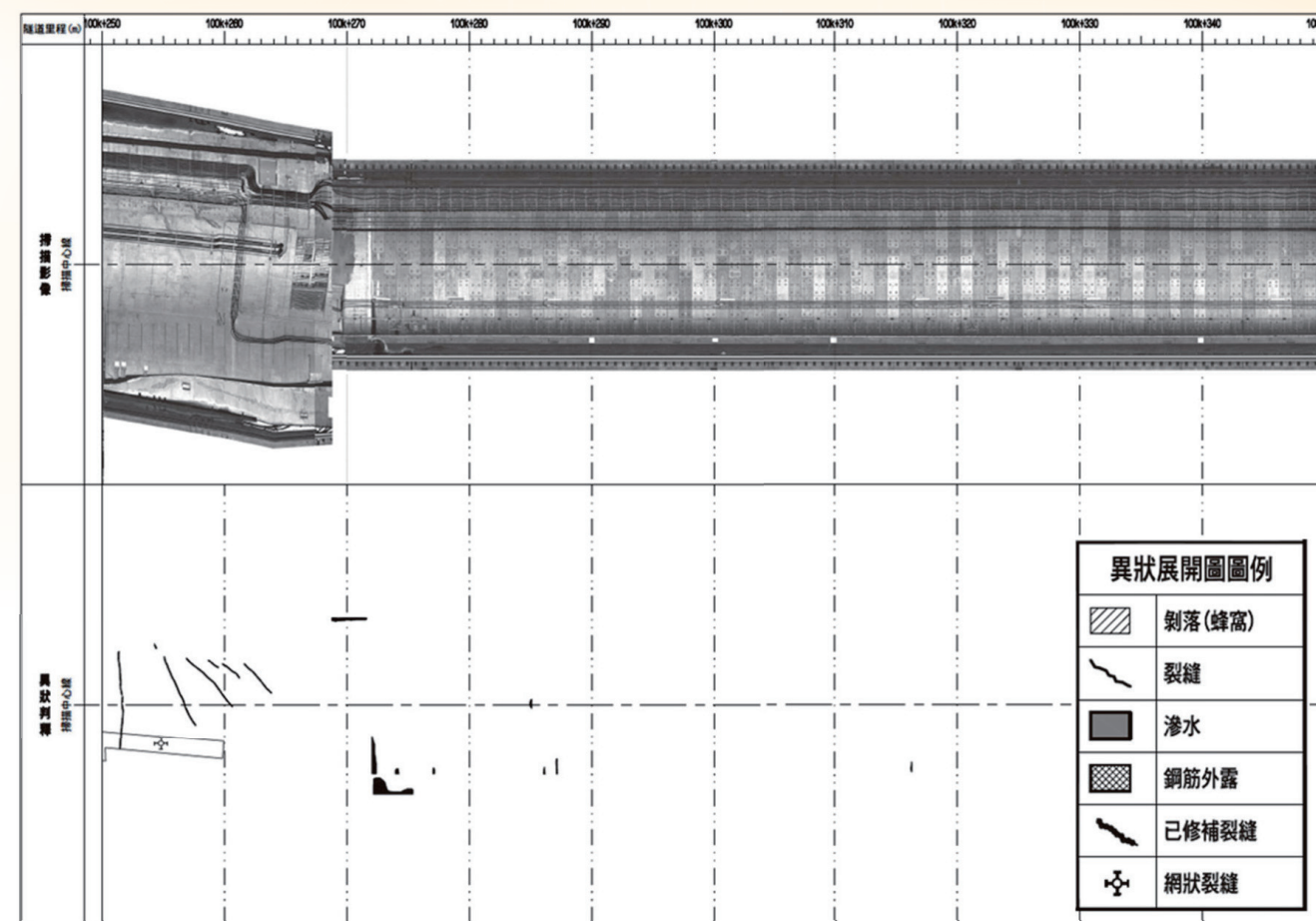


圖 14 MFB 大樓施工前影像掃描成果及異狀判釋

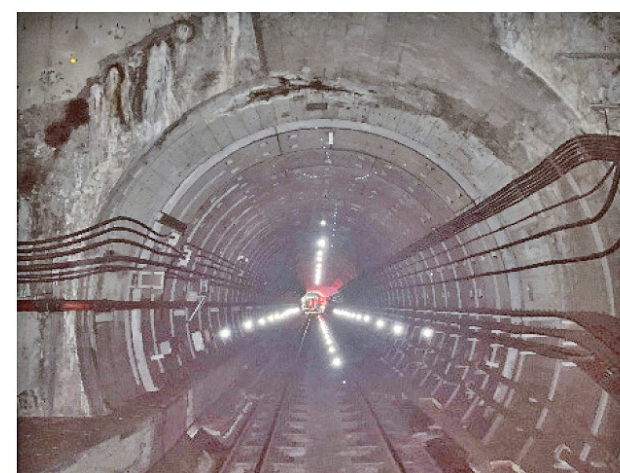


圖 15 潛盾隧道交界處異狀照片

參考文獻

- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2017),「臺灣桃園國際機場第三航站區新建工程基地開挖及建造施工對機場捷運設施之安全影響評估第三階段 (柱線 13~W24)」, 桃園國際機場股份有限公司。
- 交通部 (2019),「大眾捷運系統兩側禁建限建辦法」。
- 何金益、黃慧仁、陳聰海、陳正勳、蕭秋安 (2024),「應用物聯網與雲端技術於特殊地工安全監測之案例分享」, 地工技術, 第 179 期, 第 43-50 頁。
- 盧協成、童念遠 (2008),「潛盾機於桃園卵礫石層之設計與施工案例探討」, 地工技術, 第 118 期, 第 59-68 頁。