

第七章 內湖線 CB420 標潛盾隧道 穿越松山機場施工

台北捷運內湖線 CB420 標，其施工位置特殊，潛盾隧道需穿越松山機場跑道下方施工，為國內首件潛盾隧道穿越機場之特殊案例，其中潛盾隧道施工對機場跑道所造成之沈陷量為不可輕忽之重要問題。本章首先簡單說明工程概述、松山機場區域沿線之地質概況、潛盾隧道施工作業等，最後介紹松山機場內部之監測系統。

7.1 工程概述

本工程屬台北都會區捷運系統木柵線延伸內湖線（圖 7-1），CB42 標主要工程範圍為如圖 7-2 所示，自松山機場東側以鑽掘隧道穿過機場，在濱江街設置通風豎井，再穿越高速公路及基隆河底，於大直市場附近與大直車站（B1 站）銜接，再沿北安路以鑽掘隧道前進，至大直憲兵隊東南側約 30 m 處，逐漸爬昇於自強隧道圓環前連接高架橋，全長約 3460 m。

穿越松山機場之施工範圍如圖 7-3 所示。下行潛盾隧道自濱江街通風豎井南側發進，穿越機場跑道、試機坪及東滑行道下方後，抵達松山機場站（BR1）東側連續壁後棄殼，隧道全長 1241 m。潛盾機解體後運回通風豎井處與新購之盾殼重新投入濱江街通風豎井組裝發進，上行隧道掘進至松山機場站後棄殼解體，隧道全長 1286 m。在潛盾隧道完成後，於上、下行隧道之間，東滑行道北側（UT 0+595）及試機坪北側（UT 0+895）處，設置 2 個地下聯絡通道（圖 7-3）。

7.2 地質概況

本工程位於台北盆地基隆河流域基一區（K1 區）土層分區，仍屬一湖積地質，主要為軟弱粉土質黏土組成。表土層為 0.5 m 至 6 m 的回填土，在表土層下

為一厚度約 50 至 60 m 之軟弱粉土質黏土層，由於台北盆地典型松山層六個次層於本區已經不存在，松山層第五層次及第三次層之粉土質砂層已尖滅或變薄形成夾層，因此厚的黏土層偶夾含貝碎屑之薄砂層為本區主要之特色。如圖 7-4 顯示機場下方各土層之性質，詳述如下：

1. 回填層

為雜草表面、棕黃色粉砂質黏土，本層深度約在地表下至 2.9 m 處，厚度約 3 m，含水量約為 36.5%，SPT-N 值約在 5 左右。

2. 軟至稠粉土質黏土層

為灰色軟至稠粉土質黏土 (CL/ML、CL、ML)，粉土及黏土含量均在 95% 以上；本層深度約在地表下 2.9 m 至 40 m，厚度約 37 m，可分為以下三層：

(1) 地表下 2.9 m 至 16.5 m，厚度約 13.5 m，SPT-N 約為 3 以下，自然含水量約為 28% ~ 33%，液性限度約為 29% ~ 34%，塑性指數約在 6 ~ 13。

(2) 地表下 16.5 m 至 28.5 m，厚度約 12 m，SPT-N 值約為 4 ~ 5，自然含水量約為 31% ~ 41%，液性限度約為 36% ~ 42%，塑性指數約在 13 ~ 18。

(3) 地表下 28.5 m 至 40 m，厚度約 12.5 m，SPT-N 值提升至 6 ~ 11，自然含水量約為 33% ~ 42%，液性限度約為 39% ~ 45%，塑性指數約在 11 ~ 16。

3. 緊密粉土質中細砂夾薄層黏土

深度約在地表下 40 m 以下，厚度至少約有 10 m，砂之顆粒含量達 40%，含水量約在 20% ~ 25%，SPT-N 值約在 25 ~ 41 之間。

CB420 標穿越松山機場區段之潛盾隧道中心高程，由通風豎井至松山機場站約位於地表下 22 m 至 31 m 處，隧道潛盾機掘進區域之土壤多屬於灰色軟至稠黏土，SPT-N 僅為 4 ~ 6 間，土壤天然含水量高達 30 ~ 40%，接近實驗室之液性限度 (LL)，屬中度靈敏性黏土，土壤易受擾動而破壞其組構型態及強度。

7.3 潛盾隧道施工介紹

7.3.1 土壓平衡式潛盾機

本標工程潛盾隧道所穿越之土層以軟弱黏性土層為主，潛盾機形式之選擇採用密閉式潛盾機。密閉式潛盾機可分為泥水式與加泥土壓平衡式兩種，因考慮到加泥土壓平衡式潛盾機較適用於黏性土之開挖，及後續施工設備較經濟等優點（表 7-1），本標工程採用加泥土壓平衡式潛盾機。

加泥土壓平衡式潛盾機（圖 7-5）乃利用潛盾前方之切刀盤（cutter disc）切削開挖面的土壤，使土倉（earth chamber）內充滿開挖之土壤，再利用螺運機（screw conveyor）的迴轉，使開挖土渣排出土倉，在排土之過程中，若因土倉內之土壤摩擦阻力過大，使土壤的流動性減低，螺運機難以順利將土渣排除時，可利用盾首切刀盤上 3 處之加泥注入口，如圖 7-5（b）所示，將適量之黏土漿液等加泥材注入土倉內，以增加土壤間之流動性。加泥材之種類如表 7-2 所示。因本工程土渣排送設備採用泵浦（pump）壓送方式，若土壤注入氣泡材將影響土渣排送，故使用水、皂土、黏土及高分子添加材作為盾首之加泥材料。

7.3.2 潛盾機土渣運送設備

一般土壓平衡式潛盾工法較常用之土渣運送方式可分為台車搬運及泵浦壓送兩種方式。本工程考慮到若採用台車搬運方式，會使隧道作業空間較狹小，且台車在交替搬運土渣時潛盾機無法連續開挖。而採用泵浦壓送方式，只需從開挖面到地面基地土坑之間設置壓送管，即可於開挖同時連續排土，對開挖之影響較小，故本工程採用泵浦壓送方式排送土渣。

如圖 7-6 所示，潛盾於初期掘進時，螺運機排出之土渣經由螺運機出口處之一次土渣壓送泵浦（圖 7-7）壓送通過後續之台車設備及壓送管線後，再經由二次土渣壓送泵浦（圖 7-8）壓送到達棄土坑，經由挖土機及卡車之清運後，即完成土渣之排除工作。但在主掘進時，因潛盾機掘進速度較快，螺運機出土量較大

且運送距離較遠，則需設置三次土渣壓送（中繼）泵浦，方能提供足夠之壓力將土渣排出至棄土坑。

7.3.3 環片使用規格

為減少潛盾隧道因上方覆土重量及外來荷重而產生環片變形，造成地表之沈陷，本標穿越松山機場工程所使用之環片規格與一般台北捷運隧道工程環片規格相比，皆相對提昇，其主要特色為環片厚度大、鋼筋使用量大、螺栓直徑大、及異型環片種類多。

如表 7-3 所示，本工程所採用之環片外徑為 6000 mm，內徑為 5400 mm，厚度自 250 mm 增為 300 mm，每一個環片之鋼筋使用量自 1.55 t/R(每環使用 1.55 噸鋼筋)增加為 2.34 t/R，環片弧形螺栓直徑則自 22 mm 增為 25 mm。在異型環片方面，一般台北捷運工程皆採用 60 mm 異型量之環片規格（圖 7-9）。CB420 標施工單位為了增加曲線施工之精確性，特別增加 30 mm 異型量之環片規格（圖 7-10）。此外，施工單位在聯絡通道施做處採用厚度為 300 mm 之鋼環片（圖 7-11）取代一般常用之鋼筋混凝土環片，鋼環片可於聯絡通道開挖時直接拆除，方便進行聯絡通道之開挖作業，避免敲除鋼筋混凝土環片過程中，施工震動對鄰近環片造成額外之變形。

7.3.4 背填灌漿作業

潛盾機向前推進時造成盾尾間隙(tail void)，盾體周圍之土體因應力之局部解除，將原來之平衡狀態逐漸在隧道周圍形成塑性區。潛盾施工背填灌漿作業目的就是在土體之自立時間內，或土體位移所致土壤漏失之鬆弛效應尚未向上傳遞時，即時填充盾尾間之空隙，以減少地盤沈陷。

CB420 標潛盾隧道穿越松山機場所使用背填灌漿材料及注入壓力說明如下。

1. 背填灌漿材料

常用之背填灌漿材料可分為單液性注入材及雙液性注入材，本工程所使用之注入材料為雙液性注入材，其成分為水泥系硬化材加入流動材（A 液），及有助於硬化材凝結之純液體材（B 液），在隧道內部 A 及 B 液分別使用直徑 50 mm 及 25 mm 之鋼管進行輸送（圖 7-12），A 液及 B 液在灌注口混合注入，短時間內可凝結為塑性固體。背填灌漿材料之配比如表 7-4 所示，背填材料依配比混合後之基本性質如表 7-5 所示。

2. 注入量及注入壓力

背填灌漿注入量受地質狀況、曲線施工、超挖、背填注入材的種類影響。本標潛盾路線為巨厚之沖積層所覆蓋，土層以粘土為主，僅含少量之粉土質細砂或細砂薄層，故隧道開挖面均屬黏性土壤。使用潛盾機盾外徑為 6.15 m，襯砌環片外徑為 6 m，當環片脫離潛盾機盾尾時，環片與開挖土體間將產生 75 mm 盾尾空隙必須即時以背填灌漿方式填充。於正常情況下（直線段），注入量以 150% 之注入率計劃之，背填灌漿壓力則以地下水壓加 $1.0 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 並依現場施工狀況進行管理。曲線施工時若使用超挖刀，時則需考量其超挖量而增加背填材之注入量。本工程的背填灌注方法是由潛盾機盾尾部安裝背填灌漿管，於潛盾機掘進之同時進行即時背填灌漿作業。

7.3.5 地面沈陷保護措施

一般對於地面沈陷之保護措施可分為地面上及隧道內兩種，本工程隧道因位於松山機場之下方，自地面施作沉陷保護措施可行性甚低，因此本標工程採用隧道內部二次灌漿(secondary grouting)填充土層中之空隙，降低隧道施工的地盤沉陷。

二次灌漿之位置設置在距離施作背填灌漿處後方 1~3 環之後續台車上。二次灌漿一般多在潛盾機盾尾第五環處施作，如圖 7-13 所示自環片上之灌漿孔伸出灌漿管，自隧道環片頂端起，45 度圓心角範圍分 2 層每 0.5 公尺灌注一次施灌

化學藥液，形成厚度約 1 公尺之扇形灌漿環，每環灌漿量約為 296 l，灌漿速率為 9 ~ 10 l/min。二次灌漿所使用之化學藥液依地質狀況分為 CW1（無機瞬結注入劑）及 CW2（無機緩結注入劑）兩種，其配比如表 7-6 所示。本標工程 CW1 及 CW2 漿液之輸送管線如圖 7-12 所示。

7.4 監測系統介紹

在潛盾機開挖施工期間，為了確保鄰近結構物之安全、及觀察施工對地盤所造成之影響、及災害發生前之預警作用，必須在施工影響範圍內設置相關之監測儀器，於施工期間進行量測與資料之收集，作為對鄰近結構物施作保護措施之依據及供後續開挖管理值之參考回饋分析。以下介紹台北捷運 CB420 標潛盾隧道穿越松山機場區域監測儀器之配置方式，以及人工及自動化監測系統之設置。



7.4.1 監測儀器之配置

潛盾隧道穿越松山機場之監測儀器之配置如圖 7-14 (a) 至圖 7-14 (d) 所示，施工單位共設置 10 個監測斷面，其中包括 A 式監測斷面 2 個，及 B 式監測斷面 8 個。如圖 7-15 所示，A 式監測斷面主要為配置 11 個淺式沉陷點 (SSI)，分別於上、下行隧道中心處及兩隧道中間地面上配置淺式沉陷點，其餘八個則配置於隧道兩翼分別距中心 4 公尺、7.5 公尺、15 公尺、及 25 公尺處。B 式監測斷面則配置 2 個多點式伸縮儀 (EXM) 及 9 個淺式沉陷點 (SSI)。多點式伸縮儀分別位於上、下行隧道中心線上方，每個孔位測讀 2 或 3 個深度之地中沉陷量，最深之測讀位置在隧道上緣 1 公尺處；淺式沉陷點則比照 A 式監測斷面排列方式設置 9 個淺式沉陷點 (SSI)。

如圖 7-14 所示，施工單位從濱江街通風豎井南側處，至進入機場主跑道前，共配置 5 個監測斷面 (圖 7-14 (a))，其編號分別為 MC-B-08、MC-B-07、MC-A-03、MC-B-03、及 MC-B-06，其主要目的為藉由進入機場跑道下方之前這些斷面之觀

測結果，修正潛盾施工管理參數，以減少潛盾隧道進入主跑道區施工造成之沉陷。在主跑道、停機坪、滑行道上共設置5個監測斷面(圖7-14(b)至圖7-14(d))，其編號分別為MC-B-5，MC-B-04、MC-A-01、MC-B-02及MC-B-01，以隨時監控潛盾隧道施工造成之地盤沈陷量作為預警作用。

7.4.2 自動化及人工監測系統

在松山機場內部設置之監測系統，部分監測儀器因受限於飛航安全之考量，必需以自動化監測系統進行監測，取代人工量測之方式，以減少人工測量及紀錄作業對飛航安全之影響。松山機場內部之人工及自動化監測方式說明如下。

1. 人工作業

以人工方式進行高程及線性測量，利用電腦將所測得之資料加以整理、繪圖、製表等。松山機場內部人工監測儀器之項目如表7-7所示。

圖 7-16 為機場停機坪處所設置之沉陷觀測點 (SB)，施工單位考量在地表面釘入沉陷釘可能對飛航安全造成影響，因此在機場跑道、停機坪、及滑行道處之沉陷觀測點，皆採用不產生反光效果之噴漆代替沉陷釘。圖 7-17 及圖 7-18 為機場內部所設置之淺層式沉陷點 (SSI)，安裝時需先敲除地表鋪面後，減少地表鋪面勁度對沉陷之影響，再將鋼質 I 型梁放入孔底，利用混凝土固定 I 型梁並以 PVC 套管保護後，以土壤回填後並加蓋保護。

2. 自動化作業

如圖7-19所示，施工單位將埋設於地層中之各式自動化監測儀器(如水壓計 ELP及伸縮儀EXM)所測得之監測資料以有線之方式(傳輸電纜)，如圖7-20所示，將監測資料傳輸至機場內部所設置之資料收集監測站(ST1 ~ ST8)。然後透過資料收集站所設置之無線傳輸天線，將所收集之監測資料傳至ST9資料接收

站後（圖7-21），再以網際網路方式將資料傳輸至遠端中央控制室內，進行全天候監測資料接收及監控。松山機場內部自動化監測儀器之數量及所負責之資料收集監測站位置如表7-7及表7-8所示。

（1）資料收集監測站（ST1~ST8）

松山機場管制區內共設置8處資料收集監測站（圖7-14），資料監測站之配置如圖7-20所示，各資料收集監測站設置掃描箱、資料擷取器、及電源供應無線傳輸天線。

（2）資料收集接收站（ST9）

本站設置於濱江街雷達站5F（圖7-21），內設置無線接收天線、電腦及不斷電系統，本站負責所有資料收集監測站（ST1~ST8）資料之接收作業。

圖7-22及圖7-23為機場內部所設置之自動化多點式桿式伸縮儀（EXM），裝設目的為瞭解潛盾隧道施工時，潛盾機四周圍深層土壤之沉陷情形，圖中伸縮儀感應器頂端之資料傳輸電纜埋設於土層中，並連接至資料收集監測站（圖7-20），以無線傳輸方式送至資料收集接收站（ST9），隨時間接收監測資料。圖7-24及圖7-25為機場地盤所設置之電子水壓計（ELP），同樣利用無線傳輸方式進行監控，期望瞭解潛盾機掘進時所激發出之超額孔隙水壓，作為潛盾機掘進管理之依據。