

第四章 內湖線 CB420 標潛盾隧道施工

台北捷運內湖線 CB420 標之潛盾隧道需穿越松山機場跑道下方施工，其施工位置特殊，為國內首件潛盾隧道穿越機場之特殊案例。潛盾隧道施工對機場跑道可能造成沉陷或隆起現象，可能因此造成重大傷亡之公安事件因此成為施工單位之重要課題。本章將引用王大榮(2004)論文部分內容，並對其未介紹部份及後續施工增補說明。分別說明內湖線 CB420 標工程概述、松山機場施工沿線之地質概況、潛盾隧道施工作業、松山機場內佈設之監測系統，及目前 CB420 標目前施工進度。

4.1 工程概述

本標工程屬台北都會區捷運系統內湖線（圖 4-1）。CB420 標主要工程範圍如圖 4-2 所示，自松山機場東側濱江街設置通風豎井，向南以鑽掘隧道穿過機場與松山機場站(BR1)銜接，向北穿越中山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。潛盾隧道穿越基隆河後，沿北安路鑽掘至大直憲兵隊東南側約 30 m 處，隧道中心線逐漸爬向上爬昇，於自強隧道圓環前由地下隧道形式改為高架形式，CB420 標之上行及下行潛盾隧道全長約 5899.6 m。

穿越松山機場之潛盾隧道施工範圍，如圖 4-3 所示。其中下行潛盾隧道全長 1240.5 m，自濱江街通風豎井南側發進，穿越機場跑道、試機坪及東側滑行道下方後，以曲率半徑 140 m 之曲線抵達松山機場站（BR1）東側連續壁後棄殼，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，上行隧道全長 1286.3 m。在潛盾隧道施工完成後，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，進行地盤改良並施作 2 道地下聯絡通道(CP-2 及 CP-1)。

4.2 地質概況

本工程位於台北盆地東北隅，即盆地內沖積層與盆地邊緣丘陵山區交界地帶。為基隆河流域基一區（K1 區）土層分區，主要為軟弱粉土質黏土組成，屬湖積地質。表土層為 0.5 m 至 6 m 的回填土(SF)，在表土層下為一厚度約 50 至

60 m 之軟弱粉土質黏土層，由於松山層第五層次及第三次層之粉土質砂層(SM)已尖滅或變薄形成夾層，因此台北盆地典型松山層六個次層於本區已經不存在，厚的黏土層(CL 及 ML)偶夾含貝碎屑之薄砂層為本區主要之特色。

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 22.5 m 至 31.3 m 處。地下水位以淺層水位觀測井測得約在地表下 2 m，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 30 %~ 40 %，接近實驗室之液性限度(LL)，屬中度靈敏性黏土，土壤易受擾動而產生其組構型態及強度的破壞。如圖 4-4 顯示機場下方各土層之性質，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

本層深度約在地表下 2.9 m 至 40 m，厚度約 37 m，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；本層以黏土性質分為以下三層：

(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。

4.3 CB420 標潛盾隧道施工介紹

4.3.1 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粉土質黏性土層為主，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，考慮加泥土壓平衡式潛盾機較適用於黏性土之開挖，及後續施工設備較具經濟性等優點（表 4-1），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 4-5。乃利用潛盾機前方之切刀盤（cutter disk）切削開挖面的土壤，使土倉（earth chamber）內充滿開挖之土壤，以平衡開挖面土壓與水壓。配合螺運機（screw conveyor）的迴轉及配合螺運機排土閘門開口控制，使開挖土渣排出土倉，利用螺運機內螺旋葉片結構及壓縮泵擠壓機構以抑制地下水溢入。

在排土之過程中，若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，加泥孔位置，如圖 4-6 所示，將適量之黏土漿液等加泥材注入開挖面，以增加開挖土壤之塑性流動性。加泥材之種類如表 4-2 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效果，因此使用水、皂土、黏土及高分子添加材作為盾首之加泥材料，其加泥材之配比依現地所開挖土壤配比、土渣出土量、切刀盤扭力等情況進行配比調整。

4.3.2 土渣運送設備

本工程考慮到採用台車搬運方式，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。因此採用泵浦壓送方式，只需從開挖面到地面基地土坑之間設置壓送管，即可避免無法連續開挖之狀況。以開挖同時連續排土之狀態施工對開挖之影響較小，故本工程採用泵浦壓送方式排送土渣。

土渣排出流程如圖 4-7 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 4-8）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 4-9）壓送至地面上之棄土坑(圖 4-10)，經由挖土機及卡車清運後(圖 4-11)，即完成土渣之排除工作。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，則需設置三次中繼土渣壓送泵浦，方能提供足夠之壓力將土渣排送至棄土坑。

4.3.3 襯砌環片規格

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，造成地表之沉陷，本標穿越松山機場工程所使用之隧道襯砌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。

如表 4-3 所示，主要提升為採用之環片外徑為 6000 mm，內徑為 5400 mm，厚度自 250 mm 增為 300 mm，每一環片鋼筋使用量自 1.55 t/R(每環使用 1.55 噸鋼筋)增加為 2.34 t/R，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 4-12)，另外 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 4-13)。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 4-14)取代一般常用之鋼筋混凝土環片，鋼環片上預留灌漿口便於聯絡通道地盤改良作業施作。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。

4.3.4 開挖面土倉壓力管理

潛盾隧道開挖之土質為粉土質黏土層，隧道上方覆土深約為 19.4 ~ 28.2 m。在隧道開挖斷面雖然夾雜少許的砂層，仍可視為全斷面黏土層來作為土層壓力之考量，採用黏性土之側向靜止土壓力作為土壓力之計算。

黏性土靜止土壓力之計算公式說明如下：

$$p_o = K_o \times (\gamma_t \times H + q) \quad (4-1)$$

其中：

p_o ：側向靜止土壓力 (tf/m²)

K_o ：側向靜止土壓係數 (出發端開挖區之靜止土壓力係數估計為 0.6)

γ_t ：土壤的單位重 (開挖區黏土質平均單位重約為 1.83 tf/m³)

H：隧道上方覆土深度（19.4 ~ 28.2 m）+土倉內上方土壓計位置（1.2 m）

q：靜止土壓超載重（地表載重估計為 1 tf/m²）

經由式 4-1 之計算，可得本開挖區之側向靜止土壓值約介於 21.9 ~ 31.6 tf/m²（219 ~ 316 kPa）。

在松山機場跑道正下方之潛盾隧道開挖，因飛機降落跑道時會產生額外地表之載重需加以考慮。但因飛機降落時均採緩降方式，經施工單位分析及估算飛機重量所造成的滑行道衝擊載重，與潛盾隧道側向靜止土壓值相比較後，飛機降落之活載重對土壓控制影響極小，建議可忽略之。

本標機場下方潛盾隧道施工之土壓管理值，乃依據優良工程標（CD550 標）之施工經驗，並以靜止土壓超載重為 1 tf/m²，預備壓為 2 tf/m² 加以考量。土壓控制之管理值敘述如下：

(1) 開挖土壓之下限值： $p_{\min} = \text{靜止土壓} + \text{預備壓} (2 \text{ tf/m}^2)$

(2) 開挖土壓之上限值： $p_{\max} = p_{\min} + 4 \text{ tf/m}^2$

綜合上述，CB420 標開土壓管理值約介於 23.9 ~ 37.6 tf/m²（239 ~ 376 kPa）掘進初期施工單位採用靜止土壓力係數 $K_0 = 0.6$ 進行試挖，並依據通風豎井北側上行隧道掘進初期所獲得之監測資料進行回饋分析，將靜止土壓力係數修正以減少地表沉陷。

4.3.5 背填灌漿作業及管理

潛盾機推進造成周圍之土體因應力之局部解除及潛盾機向前推進時造成之盾尾間隙(tail void)，使原來處於平衡狀態之土層逐漸在隧道周圍形成塑性區。潛盾施工背填灌漿作業目的，即是在土體位移所引致土壤漏失之鬆弛效應尚未向上傳遞前，於開挖土體之自立時間內，即時以漿液順暢流入填充盾尾間隙，快速凝固並獲得強度以減少地盤沉陷。

CB420 標潛盾隧道穿越松山機場施工標用之背填灌漿材料及注入壓力說明如下。

1. 背填灌漿材料

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），背填灌漿材料之基

本配比及要求特性，如表 4-4 及 4-5 所示。圖 4-15(a)，隧道內部 A 及 B 液分別使用直徑 50 mm 及 25 mm 之鋼管在隧道內進行輸送，A 液及 B 液在灌注口混合注入圖 4-15(b)，短時間內(13 秒以內，見表 4-5)可凝結為塑性固體。施工單位於環片頂端及側面下方進行 2 方向之背填灌漿，期望灌漿材料可充分的填充於環片外部之空隙。

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。本標工程潛盾路線被厚層之沖積層所覆蓋，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。使用潛盾機盾之外徑為 6.15 m，襯砌環片外徑為 6.0 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。依台北捷運局規定於直線段施工，灌漿注入量以 150 % 之注入率計劃之，背填灌漿壓力則以地下水壓加 100 ~ 200 kPa (1.0 ~ 2.0 kgf/m²) 為原則。本標工程依現場施工狀況進行管理，施工單位以 300 ~ 490 kPa (3.0 ~ 4.9 kgf/m²) 為壓力管理值。

施工單位考慮以 400 kPa (4.0 kgf/m²) 為背填灌注壓力之設定值，但若是注入率無法達到要求之 150 % 時。則考慮提高背填灌漿壓力至 500 kPa (5.0 kgf/m²)。背填灌漿注入量超過 200% 時，其注入壓仍未達 360 kPa (3.6 kgf/m²) 則繼續灌入作業，直至注入率達 300% 或灌注壓力達 360 kPa (3.6 kgf/m²)。由於覆土深度接近 30 m，覆土壓高達 550 kPa (5.5 kgf/m²)，所以環片應可承受 550 kPa (5.5 kgf/m²) 以上之壓力，在考慮減少沉陷量且環片不致受損之原則下，施工單位視現場狀況將灌漿壓力之上限值提升至 500 kPa (5.0 kgf/m²)，實際施工時背填灌漿之注入率約介於 120 ~ 160 % 之間，背填灌漿壓力介於 390 ~ 590 kPa (3.9 ~ 5.9 kgf/m²) 之間。以此壓力施作之隧道環片並無產生破壞之現象，代表此壓力仍在環片能承受範圍。

本工程的背填灌注時機，為環片自潛盾機盾尾部推出後，在環片上之灌入孔插入背填灌漿管，於潛盾機掘進之同時進行即時(in time)背填灌漿作業。

4.3.6 地面沉陷保護灌漿作業及管理

依據台北市捷運局的要求，施工單位將潛盾隧道穿越松山機場推進之監測安全管理值（表 4-6）區分為一般隧道段，及跑道、停機坪、滑行道下方隧道段之監測管理值。一般隧道段地表沉陷之警戒值及行動值分別為 30 mm 及 50 mm；在潛盾隧道穿越機場跑道、停機坪、及滑行道等敏感區域之地表沉陷警戒值及行動值為 20 mm 及 25 mm。

地面沉陷之保護措施可分為自地面上及自隧道內施作兩種，本隧道工程因位於松山機場之下方，為考量航班起降之安全性，自地面施作沉陷保護措施之可行性甚低，因此本標工程採用自隧道內部進行二次灌漿(secondary grouting)，填充土層中之空隙，降低隧道施工造成的地盤沉陷。

本標隧道工程之二次灌漿位置，在距離施作背填灌漿處後方 5~6 環後續台車上。如圖 4-16 所示，自環片上預設之灌漿孔伸出 1 m 長之灌漿管，自隧道環片頂端起，左右各 45 度圓心角範圍 1m 處施灌化學藥液，在隧道上方形成一扇形灌漿，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 4-7 所示。本標工程 CW1 及 CW2 漿液之輸送管線如圖 4-15 所示。其灌注壓力控制原則為初始可灌入壓力(kgf/m²)加(0.2 × 覆土深度(m))，施工單位將灌注壓力之上限值約控制在 500 kPa (5.0 kgf/m²)，二次灌漿之灌注率則以 1.6 % 土壤漏失率為目標。實際之執行二次灌漿之注入量為每環 360 l，約為 1.94% 土壤漏失率，灌漿壓力高達 650~1100 kPa (6.5~11.0 kgf/m²)，二次灌漿注入量及注入壓力皆高於之管理值。

4.4 監測系統介紹

潛盾隧道開挖施工期間，為了觀察施工對地盤所造成之影響、確保鄰近結構物之安全，及提供災害發生前之預警作用，必須在施工影響範圍內設置監測儀器，於施工期間進行量測與資料之收集回報，作為對鄰近結構物施作保護措施、災害發生預警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、人工監測作業及自動化監測系統之設置。

4.4.1 監測儀器之配置

潛盾隧道穿越松山機場之監測儀器配置如圖4-17 (a) 至圖4-17 (d) 所示，施工單位共設置11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4-18所示，A式監測斷面主要為分別佈置於上、下行隧道中心處及兩隧道中間地面上配置淺式沉陷點(SSI)，其餘8個SSI則配置於隧道兩翼分別距中心4 m、7.5 m、15 m、及25 m處，總共配置11個淺式沉陷點。B式監測斷面則配置2個多點式伸縮儀(EXM)於上、下行隧道中心線上方處，其餘9個淺式沉陷點(SSI) 則比照A式監測斷面排列方式，分別設置於上、下行隧道中心線及距中心4 m、7.5 m、15 m、及25 m處配置。多點式伸縮儀每個孔位測讀2或3個深度之地中沉陷量，最深之測讀位置在隧道上方1 m處。

施工單位從濱江街通風豎井南側處，圖4-17 (a) 所示，至進入機場主跑道前，施工單位共配置5個監測斷面，其編號分別為MC-B-08、MC-B-07、MC-A-03、MC-B-03、及MC-B-06，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。自主跑道經停機坪、滑行道至捷運松山機場站沿線共設置5個監測斷面，圖4-17 (b) 至圖4-17 (d)。其編號分別為MC-B-05，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沉陷量，作為預警作用。

4.4.2 自動化及人工監測系統

於松山機場內部設置之監測系統，因部分監測工作受限於機場飛航安全之管制，必需仰賴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

於松山機場內部，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4-7所示，圖4-19為機場草坪所設置之地面型沉陷點(SM)。圖4-20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，採用不產生反光效果之噴漆代替沉陷釘。圖4-21及圖4-22為機場內部所設置之淺層式沉陷點（SSI）。如有必要，安裝時需先敲除地表鋪面，以減少地表鋪面勁度對沉陷之影響，再將鋼質I型樑灌入孔底土層，以PVC套管保護後利用混凝土固定I型樑，並回填土壤後並加蓋保護。

2. 自動化作業

圖4-23及圖4-24顯示機場下方地層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。如圖4-25伸縮儀感應器獲得之資料經傳輸電纜，連接至CR10資料記錄器，監測資料以無線傳輸方式送至位於雷達站之ST9資料接收站，如此可隨時接收EXM測得之監測資料。圖4-26及圖4-27為機場地盤所設置之電子水壓計（ELP），同樣利用上述無線傳輸方式進行監控地盤內之水壓，以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。

(1) 監測資料收集站（ST1至ST8）

松山機場管制區內共設置8處監測資料收集站，其位置如圖4-17(a)、4-17(b)及4-17(c)所示，資料收集站之配置如圖4-28所示，監測資料收集站設置資料掃描箱、資料擷取器、及電源供應及無線傳輸天線。

(2) 資料收集接收站（ST9）

本站設置於濱江街雷達站5樓，內設置無線接收天線、電腦及不斷電系統（圖4-29），ST9接收站負責所有資料收集站（ST1至ST8）傳出資料的接收作業。並以網際網路方式將資料自ST9接收站傳輸至遠端中央控制室內，如此可進行全天候監測資料接收及監控。

4.4.3 監測頻率

監測潛盾隧道施工所造成之地層影響，主要依據埋設在潛盾隧道中心線之多點式伸縮儀(EXM)及其斷面測點，量測頻率可分為自動化潛盾隧道斷面量測頻率及管制區內人工量測頻率，如表 4-10、表 4-11 所示。自動化監測儀於潛盾距離監測斷面 50 m 外進行初始值量測，於潛盾機掘進接近至 25 m 時每掘進 5 m 量測一次，直至通過監測斷面 5 m 後，改以每週最少量測一次。監測資料可 24 小時即時連線，其資料儲存方式以每 3 小時儲存一筆資料，或超過警戒值及行動值時立即儲存，於機場關閉後，及機場開啟時儲存最近時間之資料。潛盾隧道斷面測量監測頻率依據潛盾機掘進速率及監測結果做調整，每次監測頻率配合潛盾工作進度及工程司認未必要時可調整監測頻率。

日間管制區內人工測量部分，需一個月前向民航局申請，並配合於相關單位規定時間內完成測量作業，於潛盾影響範圍內量測頻率約每日一次，其後每週一次，另外針對主跑道部分增加一次測量，於日間中午進場量測，並於民航局規定時間內完成測量作業。夜間管制區內人工測量部分，於每日機場關閉後及開場前進行量測，量測斷面視掘進進度而定。

量測數據即時回饋至位於濱江街通風豎井之潛盾施工監控室，分析後作為調整潛盾機施工參數之參考。潛盾機自濱江街工作井鑽掘出發後至到達松山機場站(BR1)間，設有 11 個監測段面及人工觀測點，掘進期間可依據監測回饋資料調整潛盾機掘進土倉壓設定、背填灌漿壓力及注入量、二次灌漿壓力及注入量，使其在穿越跑道下方造成之沉陷量符合規範要求。

4.5 CB420 標後續施工

台北捷運內湖線 CB420 標預定施工期間為民國 91 年 5 月至 96 年 2 月。於民國 92 年 10 月 31 日進行潛盾初期掘進。92 年 1 月 7 日開始穿越主跑道，穿越跑道時隧道上方地表發生溢漿及隆起現象，經調整施工管理值後於 2 月 17 日安全穿越主跑道段。於同年 6 月 30 日下行隧道到達松山機場站東側連續壁，並進行潛盾機棄殼作業，完成下行隧道鑽掘作業。

潛盾機棄殼作業完成後，機體於濱江街工作井重新組裝，進行上行隧道鑽掘。上行隧道於民國 93 年 9 月 8 日自濱江街通風豎井向南發進，依下行隧道累

積之施工經驗，上行隧道在穿越機場跑道段時沒有再發生溢漿、隆起等現象，順利通過跑道下方。上行隧道於民國 94 年 1 月 18 日已通過主跑道下方及草坪，目前潛盾隧道掘進已通過新設停機坪南方滑行道。

除進行上行線潛盾隧道之鑽掘作業，施工單位並同時進行 CP-2 聯絡通道地盤改良工程施工，CP-2 聯絡通道目前已完成下行隧道側之地盤改良。

