

第五章 內湖線 CB420 標潛盾隧道之施工管理與地盤變位

本章定義研究所需之施工控制參數，並對內湖線 CB420 標潛盾隧道穿越機場段施工之操作管理方式，及所造成地盤隆起、沉陷狀況進行說明，並依據各項施工控制參數探討施工所產生地盤變位。藉由 CB420 標下行隧道穿越松山機場所包含之一般施工段及機場跑道施工段，嘗試建立施工控制參數與地盤位移之關係，期望達到控制潛盾施工產生沉陷之目標。

本章討論之潛盾隧道施工段共計 800 環，如圖 5-1 分三區分別討論，將下行隧道(1R ~800R)沿線施工所造成之現象分為，A 區(發生沉陷量超過警戒值及草坪溢漿)、B 區(發生跑道隆起現象)、C 區(管理值調整後沉陷量小穩定)加以討論。

5.1 施工控制參數之定義

如圖 5-2(a)顯示，本章研究探討之潛盾機掘進控制之參數包含(圖 5-2(b))：土倉壓力(p_{ch})、每環背填灌漿灌注體積(V_{bg})、背填灌漿壓力(p_{bg})、排土率(SDR)、每環盾首加泥灌注體積(V_{mi})、盾首加泥壓力(p_{mi})、每環二次灌漿灌注體積(V_{sg})及灌注壓力(p_{sg})、切刀盤扭矩(T_{cd})、千斤頂總推力(F_{jack})，及潛盾機推進速度(V_{shield})。依據所得施工控制參數與施工造成之地表沉陷進行關聯性討論。

其中，排土率(soil discharge rate, SDR)定義為，潛盾機排土體積與開挖土體積間之比值，其定義方式如下：

$$SDR = \frac{V_{out}}{(V_R + V_{mi})} \quad (5-1)$$

V_{out} = 每環潛盾機絕進螺運機排出之土體體積。

V_R = 潛盾機每環開挖之體積(本案例之開挖土量為每環 $V_R = 29.7 \text{ m}^3$)

V_{mi} = 潛盾機鑽掘每環盾首加泥(mud injection)之體積(本案例為每環盾首加泥大約 $V_{mi} = 2.1 \text{ m}^3$)。

潛盾機盾首土倉(chamber)內之土倉壓力係數 K_{ch} 之定義方式如下：

$$K_{ch} = \frac{P_{ch}}{\sigma_v} \quad (5-2)$$

K_{ch} = 潛盾機土艙壓力係數。

p_{ch} = 潛盾機土艙內土壓力計量測之側向土壓。

σ_v = 潛盾機中心線深度之覆土壓力。

5.2 施工段 A 區 — 以施工管理減少地盤沉陷

施工段 A 區為潛盾隧道濱江街工作井出發，穿過濱江街進入松山機場北側草坪至跑道前之施工範圍。掘進環數 300 環每環寬 1 m，隧道中心深度為地下 27.3 m 至 31.3 m 間。依據地質鑽探資料(BH-08 及 BH-07)顯示，隧道施工位置土層主要為灰色軟至中稠粉土質黏土組成(CL/ML、CL 及 ML)，偶夾含貝碎屑之薄砂層為本區主要之特色。N 值約 4~9，土壤自然含水量高達 30~42%，接近土層之液性限度 (LL = 30~40)，屬中度靈敏性黏土，易受擾動而產生強度之折減。

A 區施工段初期隧道掘進 100 天後所造成沉陷量最大達 43 mm(圖 5-3)，已超過本施工段所規定之地表沉陷警戒值 30 mm 但尚未超過行動值(S = 50 mm)，施工單位逐步調整施工控制參數後，沉陷量獲得明顯改善，至 250 環施工產生沉陷量已減少至 10 mm 以內。造成掘進初期過大沉陷因素討論如下。

潛盾機以固定之速率掘進時，單位時間內挖掘土量與排土量應達到平衡，並控制土艙壓力與側向土壓力平衡。圖 5-4 顯示，初期掘進時排土量與開挖土量相當，排土率(SDR)約等於 1，卻造成較大沉陷。施工單位以逐步降低排土量 (V_{out})，使排土率(SDR)至 50 環下降至 0.91，開挖至 50 環，地表之沉陷也逐步減小至約 24 mm (200 天)，其後施工 SDR 一直維持在大約 91%，本案例之每環開挖土體 $V_R = 29.7 \text{ m}^3$ ，每環盾首加泥的 $V_{mi} = 2.1 \text{ m}^3$ ，帶入公式 5-1：

$$SDR = 0.91 = \frac{V_{out}}{V_R + V_{mi}} = \frac{V_{out}}{29.7 + 2.1}$$

施工用電磁流量計每環所測得知排土量僅 $V_{out} = 28.9 \text{ m}^3$ ，尚不足每環開挖土壤體積 29.7 m^3 ，其原因可能如下：

- (1) 位於後續台車上的電磁流量計測得之出土量讀數可能不準確，施工單位於 139 環至 142 環在棄土坑測得之出土量與電磁流量計測得之出土量體積差異達 5.5 %。
- (2) Holtz and Kovacs (1981)提出，正常壓密(normally consolidated)黏土受剪至破壞，其體積會收縮(compress)，可能因此造成排土量體積減少。

背填灌漿壓力(pressure of backfill grouting, p_{bg})之上限值，依台北捷運局(TRTS)規範訂背填灌漿孔口壓力為360 kPa (3.6 kgf/cm²)，且 p_{bg} 不得超出覆土壓力 σ_v 。在此規範壓力下進行施作，漿液注入量有限，地表沉陷可能會過大。經現地進行背填灌漿試灌後，以現地之地下水壓200 ~ 290 kPa 加100 ~200 kPa，約300 ~ 490 kPa (3.0 ~ 4.9 kgf/cm²)為灌注壓力管理值。

圖5-5所示，潛盾機掘進初期前10環，背填灌漿壓力(p_{bg})低於捷運局建議之施工管理值360 kPa (3.6 kgf/cm²)，造成背填效果欠佳而產生較大沉陷。在考量減少沉陷量且環片不致受損之原則下，施工單位提升背填灌漿施作壓力，至50環處 $p_{bg} = 530$ kPa (5.3 kgf/cm²)， $p_{bg}/\sigma_v = 0.92$ ，於圖5-3，自10環到50環地表沉陷自43 mm 減少至24 mm，圖5-6顯示，背填灌漿量在本區段施作有注入率自70 % 變化至230 %，前50環之背填灌漿注入率非常不穩定，可能因背填灌漿壓力不足且注入率偏低，因此引至大量沉陷。施工單位調整水泥及水玻璃配比方式縮短背填灌漿凝結時間，自掘進初期設定之灌漿凝結時間13秒，縮短為8 ~ 10秒，以減少因漿液膠凝時間太長，未能盡快支撐盾尾閉合造成之沉陷。

本區地表多為草坪，二次灌漿只施作於建物及道路下方，因此二次灌漿極少在本區施作。

經過前 300 環的施工調整後，隧道施工造成之地表沉陷量明顯改善至 10 mm 以內(圖 5-7)。但於通過 305 環後，隧道進入跑道下方，當潛盾機掘進至 326 環處時，發生跑道隆起現象，並發現有漿液侵入 298 環伸縮儀鑽孔，且 299 環附近草坪發生漿液滲出地表之狀況，草坪溢漿位置與潛盾機相對位置，如圖 5-8 所示。施工單位於機場草坪取樣冒出地面之漿材，進行 PH 值檢驗分析，結

果 $\text{PH} = 8 \sim 9$ ，依此推斷出溢出草坪之漿材應為潛盾機盾首加泥材。由於溢出漿液為潛盾機盾首加泥材，因此針對盾首加泥加以探討。

加泥材是由盾首加泥注入口注入開挖面，與開挖土碴混合後進入開挖土艙一同排出，以提升土艙中土材之塑性流動性及止水性。由圖 5-9 可見，於 299 環附近發生溢漿處，盾首灌注壓力比覆土壓高 1.2 倍以上，注泥壓力高於覆土壓力於開挖面施灌，可能造成加泥材於土層中向上方產生水力破壞(hydraulic fracture)情形使加泥材竄升。將發生溢漿狀況附近數環之施工參數與現地覆土壓比較，如表 5-2 所示。自 295 環至 303 環，背填灌漿壓力均高於垂直覆土壓力，且於發生溢漿處(299 環)後續之二次灌漿甚至使用高達 815 kPa (8.15 kgf/cm^2)之灌注壓力。

依據以上述情況，可初步推斷產生於 A 區之地表溢漿及跑道隆起之原因，為施工時潛盾機盾首加泥材之注入壓力過高，造成加泥材進入土層中。當盾首通過 299 環後，因後續背填灌漿壓力及二次灌漿過大及灌注量太多，受推擠之盾首加泥漿液無處宣洩，因此沿伸縮儀鑽孔等地盤弱面縫隙宣洩壓力，漿液溢流至地表。

5.3 施工段 B 區—以施工管理減少跑道隆起

施工段 B 區，潛盾隧道自下方穿越松山機場跑道段(見圖 5-1)，掘進環數 80 環，隧道中心深度約為地下 27.5 m 左右。潛盾機進入跑道段後發生跑道隆起位置(圖 5-10)，隆起後施工單位作立即停機，檢討調整施工管理值後繼續掘進，跑道隆起情況不再發生，且有效維持地表沉陷量在 20 mm 警戒值之內。

5.3.1 跑道隆起發生之經過及應變處理

CB420 標潛盾隧道下行線穿越松山機場段，配合民航局規定施工時間於 93 年 1 月 9 日凌晨 2 點左右，監測人員進行跑道例行沉陷量量測時，發現約在潛盾隧道 317 環上方處跑道面發生隆起現象，隆起範圍約為 $1.5 \text{ m} \times 3.8 \text{ m}$ (如圖 5-11)，隆起量約為 650 mm (如圖 5-12)。跑道及鄰近草坪處可觀察到有漿液滲出地面情況。施工單位緊急刮除跑道隆起處周圍 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 之鋪面，並回填

一般 AC 鋪面材料，並進行滾壓之緊急處理作業（見圖 5-13），主管單位並要求施工單位於 1 月 10 日夜間改採跑道專用之鋪面材料進行修復作業。

隆起發生時，跑道下方施工之潛盾機機首已掘進至主跑道下方 326 環處（見圖 5-8），當時第 317 環襯砌正好推出盾殼。發現跑道隆起後，潛盾隧道立即停工，並以灌注加泥材方式使土倉壓力維持在 330 kPa (3.3 kgf/cm²)，以維持跑道下方地盤穩定。

5.3.2 跑道隆起之原因

潛盾機進入跑道下方後發生地盤隆起現象，依據隆起範圍附近之觀測點紀錄得知，發生隆起前，於 1 月 6 日於 307 環處已有隆起約 2.77 mm 之現象（圖 5-14），據現場施工人員反應表示，觀察到桿式伸縮儀附近已有漿液滲出地表現象。後續於 1 月 7 日施作之 317 環處監測數據顯示，地表隆起約 7.44 mm（圖 5-15），1 月 9 日於 317 環上方測得隆起量 650 mm。由 307 環以前之溢漿現象及 307 及 317 環上方地表隆起現象可推論：在進入 307 環前，即有地盤受漿液上舉力推擠產生液漿及隆起現象，不斷蓄積之漿液壓力將跑道向上舉起。

由上述溢漿及隆起發生順序，可以推測產生隆起之可能原因有二，其一為地層中存在弱面造成滲流路徑，使施工灌漿受壓漿液沿弱面推擠頂升，使跑道造成隆起；其二是施工灌漿壓力所造成上舉壓力高於覆土壓力，向上推擠壓力產生隆起。

為探查地層中弱面所造成之滲流路徑，施工單位於潛盾隧道穿越跑道下方區域使用 300 MHz 高頻透地雷達(GPR)調查跑道下方深度 5 m 之地層，其佈線以垂直下行隧道中心線水平距 30 m，測線間距 1.8 m 各測線長 90 m（見圖 5-16），測線總長 3060 m。分三期施作探測。施測結果發現潛盾穿越跑道下方前後土層擾動並無顯著變化，但有存在局部鬆動區域（圖 5-17）。廠商並針對隆起部分以 80 MHz 低頻透地雷達進行深層探測，發現隆起部分下方土層中存在深達 20 m 左右，垂直方向寬約 200 mm 較疏鬆區域。鬆動區域推測為松山機場過去施工所留下之管路，如地質鑽探孔、基樁等所造成。其土層鬆動區探查結果平面圖，如圖 5-16 所示。

潛盾隧道灌漿壓力可能高於覆土壓力造成上舉推力，本研究比較發生隆起 317 環前後數環之施工管理值與現地覆土壓（表 5-4）。可以發現隆起處附近幾

環，盾首加泥材是以高於覆土壓力 1.2 倍之壓力灌注。背填灌漿注入率皆在 130 % 以上，背填灌漿壓力(p_{bg})多高於覆土壓力(σ_v)，二次灌漿壓力均高於覆土壓力，部份二次灌漿壓力更高達覆土壓之 1.5 倍。由施工管理值可知，為了進量減少地盤沉陷量，施工單位施加之盾首加泥、背填灌漿及二次灌漿注入壓力高於覆土壓力，因此造成受壓漿液向上推擠之現象。

由溢漿之物質特性、GPR 地層探測結果、潛盾機施工順序及施作灌漿壓力推論發生隆起原因，跑道下的疏鬆土層在潛盾機進入主跑道前，即因盾首加泥漿液壓力高於覆土壓力，發生延地盤弱面釋放壓力於地表之溢漿現象。進入主跑道後，盾首之加泥材進入過去施工留下的空隙，於盾尾施作之背填灌漿以及後續進行之二次灌漿以高壓、高灌注率施作，將孔隙中所累積加泥材向上推擠，受壓之加泥材向上推舉跑道鋪面造成隆起(圖 5-18)。

5.3.3 跑道隆起後之施工管理

發生跑道隆起事故後，施工單位變更後續潛盾隧道施作方式，以防止隆起及冒漿事件再次發生。

- (1) 潛盾機後續控制開挖之土倉壓力係數($K_{ch} = p_{ch}/\sigma_v$)從 0.8 調整至 0.7，如圖 5-19 所示。開挖土壓之管理值降至 280 ~ 440 kPa (2.8 ~ 4.4 kgf/cm²)。
- (2) 背填灌漿注入壓力管理值上限由 590 kPa (5.9 kgf/cm²)降為 400 kPa (4.0 kgf/cm²)。
- (3) 盾首加泥灌漿及二次灌漿壓力依現場施工情況隨時調整。
- (4) 針對土層弱面問題，進行隧道開挖區域之空洞調查及收集過去鑽探施工位置。

跑道隆起發生後，控制潛盾開挖之土倉壓力係數降低至 0.7，土倉壓力控制在 350 kPa (3.5 kgf/cm²)，將盾首加泥灌注壓力調整至低於 1.1 倍覆土壓以下施灌(圖 5-9)，背填灌漿壓力以低於覆土壓力($p_{bg}/\sigma_v = 0.7$)施作，背填注入率維持 130 ~ 160 % 之灌注量進行灌注。二次灌漿量維持每環 360 l 的注入量(約 1.94 % 之土壤漏失)。二次灌漿壓力以 500 ~ 900 kPa (5.0 ~ 9.0 kgf/cm²)施作，此壓力高於捷運施工技術規範之管理值上限 500 kPa (5.0 kgf/cm²)，可見施工單位希冀以二次灌漿之效果，來減少其他管理值降低所造成之沉陷量。

圖 5-3 顯示，隆起發生後施工管理值的降低調整，造成本區 300 環至 380 環部分地表沉陷增加，但仍有效控制沉陷量在警戒值 20 mm 之內。基於上述應變原則，潛盾隧道施工進入機場南側草坪 C 段。

5.4 施工段 C 區－穩定小沉陷施工管理

C 區為通過松山機場跑道段後，潛盾隧道進入南側草坪、新設停機坪，及滑行道(圖 5-1)，掘進環數共 480 環，隧道中心深度為地下 24.6 m 至 27.5 m 間。經歷大沉陷量、草坪溢漿及跑道隆起狀況後，本區之施工管理值及地表沉陷量進入穩定控制段。二次灌漿於隧道脫離跑道段後，448 環停止施作(圖 5-20)，直至接近新設停機坪才再次開始施作，無施做二次灌漿處之地表沉陷仍有效控制在草坪區設定之警戒值 30 mm 以內。

本區初期控制開挖土壓力係數設定為 0.7(圖 5-19)，土倉壓力控制在 340 kPa (3.4 kgf/cm^2)，背填灌漿壓力為 400 kPa (4 kgf/cm^2)，背填灌漿注入率以平均每環 120% ~ 150% 施作。自 513 環起施作二次灌漿建物保護，於 520 環進入松山機場新設停機坪，783 環處進入機場滑行道。進入新設停機坪後，依據 A 區及 B 區灌漿壓力控制之經驗，施工單位將潛盾機土倉壓力係數由 0.7 調降為 0.63 ~ 0.65(圖 5-19)，以土倉壓力 310 kPa (3.1 kgf/cm^2)掘進，並以每環 0.91 之排土率(圖 5-4)維持開挖面穩定，加泥壓力維持低於 $1.2\sigma_v$ 之壓力灌注(圖 5-9)。背填灌漿壓力則維持低於覆土壓 σ_v ，但介於地下水壓加 100 ~ 200 kPa 間之壓力施灌(圖 5-5)，背填灌漿量維持注入率 120 ~ 150%。進入滑行道及機場建物下方，二次灌漿量維持每環 360l，壓力以 450 ~ 1010 kPa ($4.5 \sim 10.1 \text{ kgf/cm}^2$)高於灌漿管出口處覆土壓力 2 倍以上之灌漿壓力灌注(圖 5-19)。以上述施工管理值有效控制跑道、停機坪沉陷量之於警戒值 20 mm 以內(圖 5-3)，直至捷運機場站。

5.5 CB420 施工管理分析討論

本研究依據內湖線 CB420 標潛盾隧道穿越機場下方特殊地段之施工監測資料，整合施工管理參數與隧道中心線上方地表 100 天沉陷量之關係，得到以下結論，提出供未來施工管理值設定之建議。

1. 土倉壓力係數

本標潛盾隧道工程，在基隆河流域深度 22.5 m 至 31.3 m 之黏土層，圖 5-21 顯示，施工沿線土倉壓力係數 K_{ch} 及與地表 100 天沉陷量之關係，圖中當土倉壓力係數介於 0.6~0.7 之間，沉陷量呈穩定狀態(5 mm ~ 10 mm)。與學者 Jaky(1944)及 Brooker & Ireland(1965)所提供之靜止土壓係數 K_0 比較，潛盾機土倉壓力係數 K_{ch} 約為學者提出靜止土壓係數之 1.3 ~ 1.4 倍。依據此現象，本研究建議土壓平衡式潛盾機於深度 20 ~ 30 m 之黏土層中進行鑽掘時，潛盾機土倉土壓係數 K_{ch} 設定為 Jaky 靜止土壓係數 K_0 之 1.3 ~ 1.4 倍。

2. 排土率

潛盾機掘進開挖土量與排土量的配合，為土壓平衡式潛盾機造成沉陷之重要操作參數，由圖 5-4 可看出，排土體積多時初期沉陷大，過多土體排出使開挖面失去平衡，土體向潛盾機內移動，造成較大沉陷，將土倉內排土量降低始獲得改善。圖 5-22 顯示排土量與地表沉陷之關係，本工程控制潛盾機排土率自 1.0 下降至 0.91，使地表沉陷量自較大沉陷漸趨漸小，使地表沉陷量小於機場建物下方之沉陷警戒值 20 mm。



3. 背填灌漿

背填灌漿以灌漿填補盾尾間隙，具有防止地盤鬆弛與下陷、防止環片漏水，使環片早期穩定，及防止隧道蛇行等效果，故需充分填實。內湖線 CB420 標以直徑 6.15 m 之潛盾機鑽掘，經計算本標使用潛盾機之盾尾間隙為 1.43 m³，台北捷運規範要求之施工灌注率目標為 1.5 倍盾尾間隙，即 $V_{IV} = 2.15 \text{ m}^3$ 之填充量。圖 5-6 顯示本工程施工背填灌注量，每環背填灌注量為盾尾間隙體積的 1.5 ± 0.5 倍之間(圖 5-6)。圖 5-23 顯示以高注入率灌注，並不能保證產生小沉陷量，圖 5-23。

背填灌注壓力除應考量頂拱處覆土壓力及環片承受壓力之限制外，本研究建議維持背填灌漿壓力 σ_{bg} 高於現地水壓加 100 kPa (1.0 kgf/cm²)能確保灌注效果；且背填灌注壓力不宜高於現地水壓力加 200 kPa (2.0 kgf/cm²)，以避免造成漿液受壓向上推擠造成問題。本研究並依據台北捷運局之規範，建議背填灌漿壓力低於覆土壓力。

4. 盾首加泥

盾首加泥壓力必需高於注入口處之覆土壓力 σ_v 才能順利將加泥材灌入前方地盤，但灌注壓力過大可能造成的土層發生水力破裂的情況。以本標施工發現當加泥灌注壓力 σ_{mi} 超過 $1.2\sigma_v$ ，可能迫使土層之弱面發生水力破裂，造成加泥漿材自開挖面竄流於土層中，本研究建議將盾首注泥壓力控制在 $1.0 \sim 1.2$ 倍覆土壓之間，以確保注泥效果亦可降低灌注壓力造成土層水力破裂之情形。

潛盾施工時必需控制每環加泥材灌注體積 V_{mi} 之穩定，圖 5-24 顯示本標工程之盾首加泥量，平均為每環開挖土壤體積 V_R 的 $5\% \sim 10\%$ 。在此必須說明，在第 326 環，因跑道隆起造成潛盾機停機，由於潛盾機無法向前推進，為保持開挖面的土壓力，只好不斷的在盾首注入加泥材(加泥率達 31%)，以維持跑道下方地盤穩定。

5. 二次灌漿

二次灌漿之目的在於填充背填灌漿所未能填補之孔隙，並可壓實隧道周圍鬆動之土體，硬化後之改良土體產生地拱效應可抑制土壤之漏失朝地表發展，進而達到減少表沉陷之目的。圖 5-25 顯示，本標地表沉陷量與二次灌漿壓力之關係，圖中無施作二次灌漿處之沉陷量與有施作二次灌漿處之沉陷量並無明顯差異，因此二次灌漿對本工程之沉陷量改善成效並不顯著。

6. 切刀盤扭矩

設計者決定切刀盤扭矩時應考慮地盤條件、潛盾機型式等問題，提供適當之寬裕值。圖 5-26 顯示本標工程切刀盤扭矩與沉陷量之關係，地表沉陷量控制與切刀盤扭矩似無直接的關係，切刀盤扭矩應為影響沉陷之次要因素。

7. 千斤頂推力

圖 5-27 顯示，本工程潛盾機千斤頂推力 F_{jack} 較現地靜止土壓力合 p_0 高，原因為千斤頂之推力除提供機身推進力外，尚需克服盾機開挖面阻力、機身與土層間摩擦力、及後續台車牽引阻力等。本工程潛盾機以 20 支推力 1715 kN 之千斤頂推進，依據維持 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 小沉量施工成果之推力，建議在深度 $20 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$ 黏土層中施工時，以千斤頂推力 F_{jack} 以 $1.5 p_0$ 至 $2.0 p_0$ 進行掘進。

8. 潛盾機推進速度

依據日本隧道工程標準規範(1997)建議，一般潛盾機千斤頂操作推進速度約為 50 ~ 100 mm/min，且趨向盡量加大千斤頂的回程速度，以提高施工效率。本工程由於穿越機場下方位置特殊，以 15 ~ 35 mm/min 推進速度謹慎施作。圖 5-28 顯示，以較慢推進速度施作所產生之地表沉陷量為 5 mm ~ 17 mm，與學者 Fujita (1982) 所歸納出，黏土層中土壓平衡式潛盾機造成地面沉陷量預測值範圍為 35 ~ 85 mm(表 5-5)比較，潛盾機以較慢之速度推進有助於控制地盤沉陷。

