

第八章 內湖線 CB420 標地盤隆起事故

本章主要說明內湖線 CB420 標潛盾隧道穿越松山機場施工之地表沉陷槽預測、潛盾機掘進之管理方式，以及潛盾機施工造成之地表沉陷量，接著介紹潛盾機施工時發生之機場跑道隆起事故，與隆起事故發生後之緊急處理措施及後續處理對策，最後說明跑道隆起之可能原因探討。

8.1 地表沉陷槽之預測

依照捷運局的要求，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8-1）分為一般隧道段，及跑道、停機坪、滑行道段之監測管理值。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；在穿越機場跑道、停機坪、及滑行道處地表沉陷之警戒值及行動值為20 mm及25 mm。在潛盾隧道進行施工前，需先行預估可能發生之地表沉陷槽，以有效控制施工所造成之沉陷。

潛盾隧道施工對地表沈陷量之估計，一般最常採用之方法為利用Peck（1969）、Clough and Schmidt（1981）及Fujita（1982）等以實際之經驗為依據之分析預估方法。Fang et al.（1994）建議Peck-Fujita的經驗方法估算在不同的機型、土質、隧道深度及隧道直徑下，施工所造成的地表沉陷曲線。以下利用Peck-Fujita的經驗方式，預估CB420標潛盾隧道施工所造成之單隧道及雙隧道之地表沈陷槽。隧道開挖斷面圖如圖8-1所示。潛盾隧道施工基本資料如下：

地表高程 = 103.94 m

潛盾隧道中心高程 = 76.42 m

潛盾隧道中心深度（Z） = 27.52 m

隧道外徑（R） = 6.0 m

雙隧道中心水平距離 = 20.0 m

8.1.1 單隧道施工地表沈陷分析

依Peck (1969) 所歸納出之不同土層沉陷槽寬度 (i/R) 與隧道深度 ($Z/2R$) 之無因次關係圖 (圖8-2)，根據隧道中心線深度 (Z)，隧道半徑 (R) 及土壤種類 (soft to stiff clay)，可求出沈陷槽寬度參數 (i) 之可能範圍約介於7.65 ~ 11.7 m，並依據Fujita (1982) 所歸納出之地表最大沉陷量預測值 (表8-2)，可依潛盾機的型式 (土壓平衡式) 及開挖土壤的種類 (黏土層)，定出隧道中心上方的地表最大沈陷量 (S_{max}) 之範圍約界於35 ~ 85 mm，並將所求得之 i 及 S_{max} 帶入Peck (1969) 所提出之地表沉陷量之常態分佈曲線公式 (normal distribution curve) 後，估算出潛盾隧道施工對地表所造成之沈陷曲線 (圖8-3)。由圖可知，若採用一般掘進管理施工，單隧道施工所造成之地表最大沈陷量明顯超出跑道斷面沈陷行動值 $S=25$ mm。



8.1.2 雙隧道施工地表沈陷量分析

Hoyaux and Ladanyi (1970) 提出隧道周圍塑性區域之分佈範圍對於雙隧道互相干擾之影響，他們認為若雙隧道間之水平間距夠遠 ($L > 2.72R$, L 為雙隧道中心軸之水平距離)，則隧道周圍土壤之塑性區便不至於重疊，隧道間的沈陷行為不會相互影響。本案例可藉由Peck-Fujita經驗方法，分別估算上行及下行隧道施工引致的長期地表沈陷曲線範圍，再以疊加 (Superposition) 方式，求出平行雙隧道潛盾施工所引致的地表總沈陷量。由圖8-4預估CB420標雙隧道施工造成地表最大沈陷量約介於48.6 ~ 118 mm。

依據上述經驗方法之分析結果可知，單隧道及雙隧道潛盾施工所造成之地表最大沈陷量，都可能大於跑道、停機坪、及滑行道地表沈陷警戒值20 mm及行動值25 mm。施工單位進行潛盾隧道施工時，顯然必須格外注重潛盾機施工管理方式及相關應變措施，控制隧道開挖造成之地表沈陷降至最低。

8.2 潛盾機掘進之管理方式

內湖線CB420標潛盾隧道開挖之施工管理重點包含潛盾機盾首開挖土壓、盾首加泥灌漿、背填灌漿、及二次灌漿之管理。為減少潛盾隧道施工造成之地盤沈陷，施工單位對各項壓力之管理值皆相對略微提升，各項壓力管理方式分別說明如下。

8.2.1 開挖土壓管理

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 ~ 28 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：

$$p_o = K_o \times (\gamma_t \times H + q) \quad (8-1)$$

其中：

p_o ：側向靜止土壓力 (tf/m²)

K_o ：側向靜止土壓係數（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 ~ 28 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 8-1 之計算，可得本開挖區之側向靜止土壓值約介於 22.8 ~ 32.6 tf/m² (2.3 ~ 3.3 kgf/cm²)。

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/m^2 ，預備壓為 2 tf/m^2 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 標開土壓挖管理值約介於 $24.8 \sim 38.6 \text{ tf/m}^2$ ($2.5 \sim 3.9 \text{ kgf/cm}^2$)

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為 0.8，逐漸提升開挖土壓，以減少地表沈陷，使潛盾機開挖土壓管理值增加為 $32.4 \sim 49.5 \text{ tf/m}^2$ ($3.2 \sim 5.0 \text{ kgf/cm}^2$)。穿越松山機場下行隧道施工時，潛盾機開挖之土壓力被控制介於 $3.9 \sim 4.2 \text{ kgf/cm}^2$ 之間，皆在土壓管理值之範圍內。表 8-3 及表 8-4 為部分潛盾機開挖土壓之管理值。



8.2.2 盾首注泥管理

潛盾機於掘進時利用盾首切刃盤上 3 處加泥注入口，將適量之黏土漿液等加泥材注入開挖面，以維持土倉內部開挖土壤之塑性流動。開挖土壤在土倉攪拌後產生之泥土壓力與地層土壓、水壓抗衡，保持開挖面穩定。施工單位說明，盾首加泥材料以 1% 水性之高分子溶液進行灌注，注入量需視現地之土質、螺運機之扭力、泵浦之壓送壓力而定，注入管理值為開挖體積的 3 ~ 9%。實際施工時，加泥量約介於開挖面體積之 5 ~ 14% 之間（表 8-3 及表 8-4），注入量較設定之管理值為高。加泥壓力則介於 $5 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ 之間，大於土壓之管理值。在 281 環處，隧道中心線在地表下的 28.3 m 處，假設土壤單位重為 1.8 tf/m^3 ，靜止土壓力係數 $K_0=0.6$ ，作用於盾首切刃盤中央處之靜止土壓力 p_0 為 3.06 kgf/cm^2 ，圖 8-5 顯示各環盾首加泥壓力 Δp 與靜止土壓力 p_0 ($\Delta p/p_0$) 之關係。其中 289 環之注泥壓力 Δp 為靜止土壓力 p_0 的 2 倍以上，注泥壓力太大如同壓力灌漿，可能在黏土層內造成水力破裂 (hydraulic fracture)，造成周遭土層呈樹枝狀開裂，注泥向外流散，開

挖面掘進控制流程如圖8-6所示。

8.2.3 背填灌漿管理

盾尾間隙閉合是造成地盤流失的重大原因，若背填灌漿管理良好，可有效的降低地盤沈陷量。本標工程施工單位所採用之背填灌漿方式為即時背填灌漿，於環片脫離盾殼保護之際，立即以漿液填補盾尾空隙，施工單位以 25 % 之 CW1 與 75% 之 CW2 材料混合後，在直線段隧道掘進時以盾尾間隙體積之 150% 注入率進行灌注（見表 8-3 及表 8-4），灌漿壓力則視現場地下水壓（ $2.0 \sim 2.9 \text{ kgf/cm}^2$ ）加 $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ （約 $3.0 \sim 5.9 \text{ kgf/cm}^2$ ）為壓力管理值。背填灌漿壓力之上限值捷運局規範訂為 3.6 kgf/cm^2 。施工單位說明，在此規範之壓力下，注入量有限，地表沈陷可能會過大。因本施工區隧道上方覆土深度較大（ $19 \sim 28 \text{ m}$ ），所採用環片之厚度達 30 cm，鋼筋用量亦為一般環片之 1.5 倍。在考慮減少沉陷量且環片不致受損的原則下，施工單位視現場狀況將灌漿壓力之上限值提升至 5 kgf/cm^2 ，表 8-3 及表 8-4 顯示部分環片的背填灌漿壓力已超過壓力上限值 5.0 kgf/cm^2 。

為避免灌漿時環片承受壓力之激增，如圖8-7施工單位於環片頂端及側面下方進行2方向之背填灌漿，使灌漿材料可充分的填充於環片外部之空隙。漿液之膠凝時間也自施工初期之13秒，縮短為8~10秒間，以減少因膠凝時間太長所造成之盾尾閉合沉陷。

實際施工時背填灌漿之注入率約介於120~160%之間（見表8-3及表8-4），背填灌漿壓力介於 $3.9 \sim 5.9 \text{ kgf/cm}^2$ 之間，符合壓力管理值，但大於背填灌漿之規範值 3.6 kgf/cm^2 。

8.2.4 二次灌漿管理

施工單位依細部設計之要求於跑道、停機坪、及滑行道建物下方，環片脫離盾殼3~6 m範圍內，於環片加作頂部 90° 範圍，環片外注入厚度1 m之二次灌漿（見

圖8-8)，以抑止施工擾動周圍土層造成之地盤沉陷量。施工單位將灌漿壓力之上限值約控制在 5 kgf/cm^2 ，灌漿之注入率則以1.6 %土壤漏失率（每環約293 l）為目標，進行二次灌漿。實際之二次灌漿注入量為每環356 l（見表8-3及表8-4），約為1.94%土壤漏失率，灌漿壓力高達 $6.5 \sim 7.5 \text{ kgf/cm}^2$ 之間，注入量及注入壓力皆大於二次灌漿之管理值，可見施工單位十分希望達成極低的地盤沉陷。

下行潛盾隧道自工作井出發後，到達機場跑道前約有250 m推進距離，其間設有5個監測斷面。如圖8-9所示，施工單位可依據初期監測資料，修正潛盾機掘進開挖土壓、背填灌漿壓力及注入量、二次灌漿壓力及注入量，以期在穿越跑道下方時之沉陷量能符合管理值要求。

施工單位利用初期掘進時所得到之監測資料進行回饋分析，並作為後續掘進管理值之依據。表8-5顯示，掘進至246環為止，潛盾隧道通過第10天之沉陷量，已由初期第13環時之15.3 mm沉陷量，縮小至第246環時之5.02 mm沉陷量；而土壤漏失率，由初始的1.43%，減少為0.64%。表示本階段施工單位進行回饋分析後之掘進管理效果良好，地表沉陷量已受到控制。

綜合CB420標各項施工設備及施工管理方式，潛盾施工管理之特性敘述如下：

1. 在隧道掘進過程中，施工單位依據初期掘進之監測資料進行回饋分析，取得適當之壓力管理值，配合即時背填灌漿，於環片脫離盾殼之際立即填補空隙。並於機場跑道下方，環片脫離盾殼3~6 m內，施作環片外周部之二次灌漿，可有效的減少地表之沉陷量。
2. 施工單位於穿越機場設置自動化監測及人工監測系統，其中自動化監測結果藉由設置於松山機場管制區內之自動化作業系統，透過無線及ADSL傳輸方式，可在中央控制室內全天候接收所有監測資料，並進行監測資料之回饋分析，獲得到最適當之掘進管理值，以達減少地表沉陷量之目的。

8.3 潛盾隧道施工造成之地表沉陷

下行隧道潛盾機自松山機場南側之通風豎井發進，圖8-10顯示MC-A-03斷面在潛盾機通過後第37天時之地表沉陷槽，圖中實線為依據Peck-Fujita經驗方法（Fang et al., 1994）所估算出之地表沉陷範圍，監測結果顯示地表沉陷量非常小， S_{\max} 僅13.91 mm。本監測斷面之沉陷槽寬度參數 i 約為18.9 m，大於依據Peck（1969）之方法所預測之 $i=7.65 \sim 11.7$ m。實測沉陷槽之單位長度沉陷槽體積（ V_s ）為 0.659 m^3 ，土壤漏失率為2.33%。

圖8-11顯示MC-B-07斷面在潛盾機通過第46天時之地表沉陷，最大地表沉陷量 S_{\max} ，發生在隧道正上方處約為18.21 mm，小於一般斷面以SSI監測之警戒值30 mm。圖中實線為依據Peck-Fujita經驗方法所估算出之地表沉陷範圍，結果顯示監測值較接近預測之最小沉陷曲線。本監測斷面之沉陷槽寬度參數 i 約為14.4 m。單位長度沉陷槽體積（ V_s ）為 0.37 m^3 ，土壤漏失率為1.32%。圖8-12為MC-B-08斷面在潛盾通過後第86天之地表沉陷，其最大地表沉陷達32.67 mm，已超過一般斷面以SSI監測之警戒值30 mm，且與Peck-Fujita方法預估之最小值 $S_{\max}=35$ mm接近。

由圖8-10至圖8-12中，本研究以Peck-Fujita經驗方法預估單隧道施工造成之地表沉陷範圍。預估值與實測值之比較顯示，監測值皆小於預估之最小沉陷量曲線之最大值，且實測值皆小於施工單位設定之行動值，表示CB420標潛盾機施工管理控制頗為良好。

8.4 潛盾隧道施工所造成地盤隆起事故

8.4.1 事故發生之經過

CB420標潛盾隧道下行線穿越松山機場段，於93年1月9日凌晨2點左右，監

測人員進行跑道沈陷量測時，發現在316環上方處跑道面（位置見圖8-13及圖8-14）發生隆起現象，隆起範圍約為1.5 m × 3.8 m（圖8-14），其最大隆起量約為6.5 cm（圖8-15）。現場觀察到跑道及鄰近草坪處有潛盾施工之盾首加泥材料滲出之現象。施工單位緊急刮除跑道隆起處周圍10 m × 10 m之鋪面，並回填及滾壓鋪面材料。隆起發生時，在跑道下方施工之潛盾機已掘進至主跑道內部約10 m處，於事故發生後潛盾隧道立即停工。

8.4.2 事故發生後之緊急處理

因事故發生時間緊迫，且隆起位置為機場主跑道，若因此造成飛安意外事故，後果將非常嚴重。經台北市捷運局及施工單位評估後，決定立即將主跑道隆起部分以挖土機刮除12 cm厚之AC（Asphalt Concrete）鋪面。在刮除過程中，於刮除面處發現有蓄積之漿液陸續流出，該刮除面可能為新舊AC之介面。因機場跑道專用之AR4000鋪面備料不及，且為因應早班飛機起降，在不影響飛航安全原則下，刮除範圍暫時以一般AC回填及滾壓（圖8-16），主管單位並要求施工單位於1月10日半夜再採用AR4000進行修復作業。

跑道隆起發生時，潛盾機盾尾處第317環正好推出盾殼，主管單位要求施工單位立即停工，停機時潛盾機土倉壓力維持在3.3 kgf/cm²。

8.4.3 後續之處理對策

於事故發生後，後續之潛盾隧道施作方法其處理對策敘述如下：（1）為避免再度發生跑道隆起，將潛盾機後續開挖土層之靜止土壓力係數從0.8修正至0.7（開挖土壓之管理值降為2.8 ~ 4.4 kgf/cm²）。（2）背填灌漿管理上限值由5 kgf/cm²降為4 kgf/cm²。（3）盾首加泥灌漿及二次灌漿壓力依現場之施工情況隨時調整。（4）收集松山機場過去鑽探施工位置，及進行潛盾隧道開挖區域之空洞調查，以預防再次發生隆起及冒漿事件。

8.4.4 跑道隆起之可能原因探討

1. 開挖之土層存在滲流路徑

施工單位(2004)指出,如圖8-17所示,松山機場下方可能存在過去工程所遺留之管路,如地質調查鑽探孔、基樁、廢棄水井等空隙存在。潛盾掘進時從開挖面注入加泥材,加泥材於空隙中流竄及累積,潛盾機盾尾通過時進行即時背填灌漿,將孔隙中所累積之加泥材往上推擠,並滲透至混凝土(約50 cm厚)及AC鋪面(約25 cm厚)下方之空隙,受壓加泥材於鋪面較弱部分造成隆起。

2. 潛盾施工上舉壓力所造成之地面隆起

內湖線CB420標潛下行線潛盾隧道施工作業之壓力,包含潛盾機掘進土壓力、盾首加泥、背填灌漿、及二次灌漿,其各項施工壓力值如表8-3及表8-4所示。由表中數據我們可以發現,盾首掘進壓力皆在土壓管理之範圍內(3.9 ~ 4.2 kgf/cm²),與側向靜止土壓達成平衡狀態,較不可能因開挖面壓力過大而造成地盤隆起之現象。但若從盾首加泥灌漿、背填灌漿、及二次灌漿施工壓力數據可發現,其灌漿壓力大部分皆已超過規定之管理值,甚至大於覆土壓力(5.1 kgf/cm²)。在一般情況下,當潛盾機通過時,會因盾尾間閉合隙產生地盤沉陷情況,但本工程反而在跑道造成隆起,顯然表土層內部有漿液壓力之蓄積。表8-3及表8-4顯示,此階段盾首加泥壓力甚大,且注入量也很可觀,開挖面附近之加泥材可能有部分受擠壓流竄至土層中,表8-3及表8-4中背填灌漿之注入率達120 ~ 160%之間,已遠大於盾尾間隙之空間,明顯將會有多餘背填漿液被擠壓到地層中。由施工單位在機場草坪取樣冒漿材,進行PH值檢測結果為8 ~ 9,推斷出本次冒出地面之漿材為盾首加泥材。依據上述證據,可初步推斷機場跑道隆起之可能原因,為施工時灌漿壓力過大且注入量過多,受壓漿液無處宣洩,在地層中四處流竄,進而產生冒漿及跑道隆起之情形。

於事故發生後，施工單位採取緊急應變措施，將後續潛盾隧道開挖之施工管理值降低，以減少地中壓力之蓄積，另外配合所收集到之過去鑽探孔位置及進行開挖區域之空洞位置，以預防受壓漿液再次由地盤孔隙滲出。

後續之跑道監測資料顯示，潛盾機於停機後恢復掘進，通過跑道時引致之地表沉陷量皆大約維持在10 mm，表示施工壓力管理值降低後，有效減少地中壓力之蓄積，跑道不再發生隆起現象。圖8-18為機場跑道監測C斷面在潛盾機通過第47天後之地表沉陷槽，此監測斷面最大地表沉陷量為11.4 mm。沉陷槽寬度參數約為13.4 m。單位長度沉陷槽體積為0.38 m³，土壤漏失率為1.35%。

