

第三章 國外潛盾隧道施工意外事故案例

3.1 華盛頓都會區地下鐵延伸線工程

3.1.1 工程概述

在 1986 至 1988 年間，美國首都華盛頓進行該都會區最北端之地下鐵 (Washington Metro) 延伸線工程，施工分為 F3 及 F4 兩標，如圖 3-1 所示。Clough and Leca (1993) 說明，F4 標之工程為橫越 Anacostia 河至海軍船塢 (Navy Yard) 通風井間之地下隧道。F3 標則分成三段 F3a、F3b 及 F3c。此項工程中 F4 標及 F3a、F3c 兩段為直徑 5.74 m 之雙向地下隧道，均採用土壓平衡式潛盾機施工。F3 標中之 F3b 段為採明挖覆蓋工法施工之車站。

F3 標之施工，乃先興建 F3b 段之車站，再以此車站做為 F3a、F3c 段潛盾機發進工作井。F3a 段潛盾隧道之施工順序，潛盾機由 F3b 段之車站發進，先施工 IB 隧道 (Inbound)，到達 M 街道之通風井後，將潛盾機再解體運回 F3b 車站，再進行 OB 隧道 (Outbound) 之發進施工。車站東側 F3c 段潛盾隧道之施工順序，潛盾機由 F3b 段之車站進行 OB 隧道之發進施工，到達海軍船塢通風井後，潛盾機即在井內 180 度轉向後，進行 IB 隧道之施工。

3.1.2 地層概況

F3a 段區域之土層分佈狀況，如圖 3-2 所示。圖中各土層之土壤物理性質，如表 3-1 所示。現地之土層構造可分為四層，自地表由上而下依序為人工回填之表土層、近代的沖積層 (以 A 土層表示)、更新世地層 (以 T 土層表示) 及白堊紀的波多馬克 (Potomac) 河之沉積層 (以 P 土層表示)。位在隧道的上方之 A1 粘土層是近代沖積土壤，具有輕度過壓密及易壓縮之性質。T1 粉質粘土層若依其性質可再分為上下兩層，即上土層 T1(A) 及下土層

T1(F)，其中T1(A)層較為堅硬（不排水剪力強度 $S_u=120 \sim 168$ kPa），而下土層T1(F)則較軟（ $S_u=29 \sim 38$ kPa）。T5 為非常緊密之礫石砂層且含有一些大巨石（boulder）。P1、P2 及P3 層之標準貫入試驗（SPT）之N值均大於 100，表示P層相當的堅硬。隧道約位在地表下 13 ~ 29m處。

3.1.3 F3a 段潛盾隧道施工意外事故

F3a 段潛盾隧道頂拱約位在地表面下 10 m 左右，如圖 3-2 所示。F3a 段潛盾隧道因位於市區街道下方，故其地盤沉陷之監測作業更為嚴密，以避免損害鄰近之建築物。F3a 段潛盾隧道所通過之土層斷面，由圖 3-2 可知，部份區段包含兩個土層，在位置 96+00 至 109+00 之間及 113+50 附近之一小段，隧道開挖面上方之土層為 T5 礫石砂層，隧道下方之土層為較硬之 P2 粘質砂層。F3a 段之 IB 隧道先行施工，當隧道開挖經過該混和土層區域時，不幸於 102+00 與 104+00 間，地表產生大量之位移，並造成道路凹陷（如圖 3-2 所示之 Failure Area）。意外事故發生後，施工單位緊急以混凝土填補街道之凹陷區域。經由此次意外事故獲得經驗，在進行 OB 隧道施工之前，於上述事故區域先進行化學灌漿工作，在位置 100+02 至 100+38 間及 96+75 至 97+53 間，將藥液（矽酸鹽）注入 T5 礫石砂層中，以預防地表面產生大量沉陷。當 OB 隧道通過該混和土層後，經由監測資料顯示，其沉陷量確已明顯地減少（如圖 3-2 所示），尤其是淺層之沉陷量。

3.1.4 探討及分析

Clough and Leca（1993）說明意外事故發生之原因及預防方法如下：

- （1）當潛盾隧道開挖面遭遇 T5 礫石砂層及 P2 黏土質砂層之混和土層時，產生顯著的土層流失及地表沉陷現象。可能由於潛盾機切刀盤在含礫石及卵石之砂土層內推進時，在開挖面附近造成大量的超挖現象（Overexcavation），鄰近土層流向開挖面，若未實施適當輔助地層穩定的

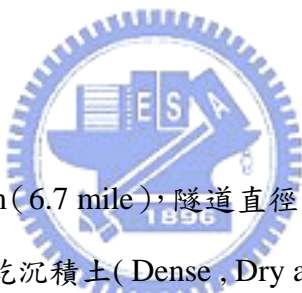
方法，則地盤很可能產生崩塌。

- (2) 於潛盾隧道施工前，在混和土層中進行化學灌漿，對控制地表面之沉陷頗為有效。

3.2 洛杉磯捷運紅線 Segment 2 隧道工程

洛杉磯紅線 Segment 2 隧道工程是位於洛杉磯好萊塢地區 LA Metro Red Line 計畫的一部份。捷運隧道紅線路網主要由 Wilshire/Vermont 車站向北延伸至好萊塢北部，以及向西連接 Segment 3 工程，如圖 3-3 所示。Segment 2 工程包含 8 個車站，全線原訂 1998 年 12 月完工通車。

3.2.1 工程概述



此隧道工程全長 10.7 km (6.7 mile)，隧道直徑為 6.7 m，隧道深度 18.3 m (60 ft)，主要鑽掘地層為緊密、乾沉積土 (Dense, Dry alluvial soil)。採用開放式無壓氣潛盾機 (Open faced non-pressurized shields) 施工。環片為 4 片一組，12 in (30.48 cm) 厚，HDPE 塑膠防水膜。在必要時，預計自地表進行水泥或化學灌漿來控制不穩定之地盤狀況。Ribs and laggings 支撐工法則作為立即支撐。

3.2.2 意外事故之發生過程

1996 年 6 月，捷運隧道正進行環片移位修正工程 (向隧道右側修正)，如圖 3-4 所示，整體修正工程長度約 20 片環片。當時已進行至工程進度的 80%，至 6 月 22 日 03: 30，此時隧道側向開挖作業已完成，正在進行上部環片之修正工作時，移開環片後，隨即出現滲水狀況，墊於環片間之枕木則出現 12 ~ 18 in (30.5 ~ 45.7 cm) 之沉陷，隨後水開始滲入隧道，20 名工人被迫馬上帶離隧道而往地

表面前進，之後緊急應變措施啟動。施工單位首先封閉隧道施工區域，3小時後，隨著隧道內持續湧水，路面發生崩塌。而洛杉磯當地媒體也利用空中直昇機將路面崩塌新聞播出。到隔日 10:00，因道路持續惡化崩塌停泊於崩塌附近路面的貨櫃車，掉入崩塌的大洞內，隨後道路旁的路間隔版也落入坑洞中，最後瓦斯與自來水管線也因道路持續崩塌而破壞。災變發生後，當地居民被迫遷離，其中還包括 27 名鄰近醫院之精神病患。這次災變一共導致 80 ft (24 m) 隧道坍塌意外，以及長 30 m，深達 15 ft (4.5 m) 地面坑洞，如圖 3-5 所示、部分瓦斯及水路管線損毀。

3.2.3 意外事故之發生原因探討

災變事後顧問公司的調查報告指出：

1. 隧道支撐是由預鑄混凝土環片 (6 m) 所構成，隧道測量發現，隧道有兩處環片出現偏移，需進行校正。一處為 Hollywood Boulevard 南側隧道，一處為 Hollywood Boulevard 北側隧道。承包商先進行南側隧道的校正，隧道環片校正工程主要是先把上部四分之一之環片移除，然後對露出之地盤進行補挖掘，將隧道的中心修正回原始設計位置，並利用鋼架支撐於隧道內部以穩定地盤，而鋼架支撐則以枕木 (foot blocks) 作基礎，架設於隧道底部尚未移除之環片上。將環片更換後，混凝土壁樑置於鋼架底側旁，承受鋼架側向壓力。當上部的修正工作完成後，則繼續移除下半部之環片，對隧道下部進行開挖修正後，安裝下部鋼架，架支撐，相同的也將混凝土壁樑置下部於鋼架旁，承受移除環片後，原本混凝土襯砌所承受之壓力。
2. 1994 年 9 月，隧道南側隧道校正工程完成。1996 年進行北側隧道的校正工程，在進行一個禮拜之後，於快完成第一階段 (Heading) 校正工程時，發現隧道滲水，上部鋼架之枕木沈陷達 12 ~ 18 in，之後隧道即發生坍塌。
3. Wiss, Janney, and Elastner 公司 (WJE) 調查指出，校正工程之臨時支撐設計

有缺失，明顯地未考慮到枕木的承载力，而混凝土壁樑（Concrete wall beam）也有同樣的問題；設計者居然設計以枕木去承受厚達 60 ft (18 m) 的覆土壓力，而且也忽略側向土壓力(lateral earth loading)的問題。雖然工程人員辯稱是隧道上方水路管線破裂，導致隧道坍塌意外，但 WJE 公司的調查指出，上方水管破裂會加速隧道坍塌，但絕不是導致隧道坍塌的主因。

3.3 英國 Kingston-upon-Hull 下水道隧道工程

Kingston-upon-Hull 下水道隧道工程是 Yorkshire Water's Humber Care 計畫的一部份，位於北英格蘭 Humber 河北岸，如圖 3-6 所示。此隧道用於連接新建造的污水處理廠，及現有的下水道管線，目的為將處理後的污水導入 Humber 河，而排入北海（North Sea），預訂公元 2000 年完工。



3.3.1 地層概況

隧道開挖地層由上而下如圖 3-7 所示，依序是沖積砂土層 (alluvial sand)，厚度約為 13 m，其次是位於隧道頂拱位置之有機黏土-泥炭土層 (organic clay peat)，厚度約為 0.6 m，其次是黏土狀砂層 (clayey silty sand)，厚度約為 0.9 m，其次是沖積粒狀沈積層 (alluvial granular deposits)，厚度約為 2.1 m，位於隧道仰拱部分土層為一黏土薄層 (laminated clay)，厚度約為 2.4 m，其下方為風化砂土層 (aeolian sand) 砂土/礫石層 (sand / gravel)，厚度約為 1 m。

3.3.2 工程概述

此隧道工程全長 10.6 km，隧道直徑為 3.6 m，位於 Humber 河北岸的河床底下，隧道深度介於 15 ~ 25 m (隧道中心 -15.5 m)。此項工程包含了 10 個豎井，深度 30 m，直徑介於 7.5 ~ 12.5 m 之間，相距間隔約 1.8 km。潛盾機為土壓平衡

式潛盾機(Earth Pressure Balance Machine, EPBM),襯砌環片為6片一組,250 mm厚,使用 EPDM (Ehtylene Propylene Diene Monomer) 襯墊。

鏡面外側地盤採用灌漿工法加以改良,並於 EPBM 潛盾機周圍實施背填灌漿。為求工程進行順利,原計畫施作地盤灌漿並輔以降水工法,但是因成本過高,因而以壓氣工法搭配降水至隧道上5 m處作為替代方案。

3.3.3 意外事故之發生過程

1999年11月15日晚間19:00,在編號2403與2404環片間,隧道右下側環片接頭處發現滲漏,初始滲流量為2 l/min,到了16日01:00,隧道右下側環片接頭處持續滲漏,而頂拱也因火車經過也發生滲漏,隨即仰拱處地下水夾帶泥沙滲入隧道,滲水狀況類似岩漿(水及褐色泥砂)湧出。於02:20,一組工程人員開始將襯砌環片間的螺栓重新插回,但是環片已經開始滑動,而且環片已經產生層層剝落碎裂破壞,03:30封閉隧道。災變發生後,施工單位隨即疏散人員,施加壓氣12個小時以穩定隧道,因地盤流失地表出現直徑60 m的坑洞,深達2 m,如圖3-8所示。

3.3.4 意外事故之解決方案

施工單位另開工作井移除潛盾機,如圖3-9所示,原本打算採用垂直冰凍工法穩定地盤,但是考慮大範圍的冰凍可能導致隧道與工作井之間產生差異變形,因此決定採用水平凍結工法(液態氮)結合噴凝土襯砌進行復舊工作。採用此復舊工法有下列幾點好處:

1. 針對各種狀況的處理,具有較佳的彈性
2. 縮減鑽孔(冰凍)的長度
3. 冰凍土的完整性較高
4. 相較於 Brine (鹽鹵冰凍法)而言,液態氮較不受地下水流的影響

5. 主要冰凍面 (primary freeze phase) 能快速建立

意外事故之復舊方案規劃各階段如下：

Stage 1：於新開設工作井外側施作垂直鑽孔，建立冰凍土隔艙

Stage 2：進行破鏡

Stage 3：於隧道開挖面前方，從工作井向隧道方向施做 25 m 之水平冰凍工法，形成第一階段冰凍區域

Stage 4：於冰凍地盤內進行第一階段開挖，並於隧道內部施做噴凝土襯砌

Stage 5：施做第二階段之水平冰凍工法，形成第二階段冰凍區

Stage 6：繼續向隧道方向開挖，並施做噴凝土襯砌

Stage 7：施做最後階段之水平冰凍

Stage 8：開挖最後階段隧道

Stage 9：施做永久噴凝土襯砌，並安裝防水膜



3.3.5 意外事故之發生原因探討

為模擬意外事故的行為，劍橋大學的研究人員施作 7 組 1/75th 之離心機試驗，如圖 3-10 所示，得到以下多項結論：

1. 襯砌環片支撐產生裂縫，隧道則會發生崩塌。
2. 若隧道發生移動，則工作井會固定隧道，產生差異變形。
3. 地下水夾帶土砂湧入隧道，隧道崩塌無法避免。
4. 即使隧道只是一小段在軟弱地盤中，其後果也和一大段在軟弱地盤中一樣的嚴重。

Tindall et al.(2002)的 3D 數值分析顯示下列幾點結果：

1. 軟弱地層厚層與薄層分析結果相似。

2. 即使在非常軟弱（擾動）地層，襯墊發生破裂後，環片間產生縫隙是無法避免。
3. 環片接頭處，會發生應力集中的現象。
4. 假如環片於環片發生剪應力的話，環片可能破損。
5. 在環狀接頭外圍，環片有可能受到直接應力作用而破損，但它不是導致隧道崩塌的主要因素。

英國隧道協會（British Tunnelling Society）總結可能導致隧道漏水因素，認為這是因為隧道相對於工作井 T3 產生位移導致災變發生。因為(隧道位移)使得環狀接頭產生空隙，使鄰近環片受到剪力作用，於襯墊附近發生局部結構破壞（local structural failure），進而使仰拱滲水。

由於先前豎井、隧道施工擾動地層，加上因隧道滲地下水而使地下水位下降，搭配隧道的上浮力，造成隧道頂拱對泥炭土(peat)與有機黏土層承受更大的壓力，導致頂拱也產生裂縫而滲水進入隧道中。隧道下方是一風化褐色 Aeolian 砂土層，於隧道開始滲水後，砂土則被入滲水夾帶於隧道仰拱滲出，最終導致隧道災變。

3.4 羅馬尼亞 Bucharest 捷運隧道工程

為因應羅馬尼亞首都對大眾運輸的需求，Bucharest 捷運局在 1975 年成立，其主要工作為在 Bucharest 建立新的捷運網路，如圖 3-11 所示。Beldean and Ciugudean-Toma 指出全部捷運網路涵蓋 45 個車站、4 個維修場，總長度達到 71.6 km。

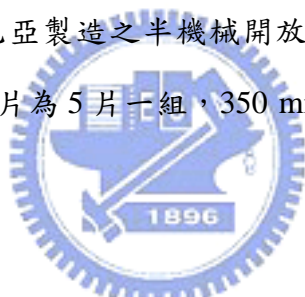
Line 4 延伸線全長 8.4 km，於 1988 年開始設計，1989 年開始動工，但是因為資金短缺，該工程於 1996 年中斷。

3.4.1 地層概況

Line 4 延伸隧道施工之地層分佈如圖 3-12 所示。回填土層厚度約為 3 m，隧道頂拱處為一砂土層(upper sand)，厚度 6 m，其下方是黏土層(lower clay)，厚度 5 m，隧道仰拱處土層為砂土層(lower sand)，厚度 3 m。隧道下方則為黏土與砂土互層，地下水位位於地表下 7 m 處（隧道上方 2 m）。

3.4.2 工程概述

Line 4 延伸線隧道直徑為 6.4 m，隧道深度 12.2 m，隧道上部覆土層厚度介於 5 ~ 12 m 之間，其中發生事故的區段為，Nicolase Grigorescu 車站到 Linia de Centura 車站段，如圖 3-11 所示。該段隧道工程包含了 4 個工作豎井，以及兩個車站。施工潛盾機為羅馬尼亞製造之半機械開放式潛盾機（Semi-mechanized Open face shield）。襯砌環片為 5 片一組，350 mm 厚，寬 1 m，使用氯丁橡膠襯墊(neoprene gasket)。



隧道進行過程中，利用設置在工作面前 50 m 與工作面後 150 m 的抽水井，將地下水水位一直保持在仰拱之下 2 m 處，以利工程進行。潛盾隧道發進與到達端則使用混凝土隔艙（Concrete Bulkheads）輔助破鏡，不過因為如此破鏡過程，也造成一些超挖，導致地盤流失，地表發生超額沈陷。

隧道鑽掘過程中，由於部分區域採用全斷面或部分斷面人工方式挖掘，也導致地表沈陷。隧道進行過程中若是發生超挖的情況，則利用背填灌漿的方式，將水泥砂漿與皂土混和液以 200~300 kPa 的壓力填滿環片接頭及背後之空隙，如有必須則使用二次灌漿（400~500 kPa），以達成穩固環片之效。

3.4.3 意外事故之發生過程

1996 年因為資金困乏，因而終止整個隧道工程。當時隧道工程部分環片背

填灌漿與二次灌漿的工作尚未進行，加上降水系統因工程中斷也被迫停止降水。如此一來，地下水壓回升，迫使污水夾帶泥沙則從地盤與環片間的空隙滲出，將整個隧道淹沒，從 Nicolae Grigorescu 車站到 Linia de Centura 車站間，全長 4.7 km，所有地下結構無一倖免，難逃被污水淹沒的命運。

3.4.4 意外事故之解決方案

1. 1996 年隧道淹水事故發生後，工程單位只執行了些許零星的監測計畫，觀測地下水位的變化，發現地下水位已回升至地表下 6 ~ 7 m，這也表示所有位於地表下 12 m 的地下隧道結構皆淹沒於水中。直到 2000 年中，工程單位才展開地質與大地的調查，對 Zone 1 (圖 3-13) 進行相關地盤特性、水位變化、地表與鄰近建物沈陷觀測等調查，以其得到相關大地設計參數。Zone 2 則於 2000 年底也進行類似的調查，發現以下幾點結果：

- (1) 環片間有裂縫存在，部分甚至損毀，如圖 3-14 所示 (請注意環片接合之弱面並未錯開)。
- (2) 隧道裡發現的泥沙，表示環片接頭間曾發生滲漏的情況，隧道周圍地盤也因土砂大量流失，而處於軟弱鬆弛的狀態。由靜態與動態貫入試驗的結果顯示，取淹水部分的地層與 50 m ~ 70 m 遠處未淹水之地層試驗結果進行比較，發現 Zone 1，上層黏土與砂土層強度驟減 50%，而 Zone 2 則驟減 35 ~ 50%，試驗結果跟羅馬尼亞針對非凝聚性土壤的標準比較，表示隧道上方之地層 (砂土層) 產生鬆弛效應 (loosening effect)。
- (3) 部分車站與隧道口結構受損，如圖 3-15 所示。
- (4) 連續壁產生變位 (構築連續壁時產生)

2. 基於以上調查結果，工程單位決定先採用降水工法，以減低結構變位，確保穩定。

3. 就不同的降水程序進行數值分析，並於隧道裡安裝伸張計，監測隧道於降水

期間之變位，及時反應隧道狀況，根據監測讀數可採取相關因應措施。

4. 對目前處於鬆弛狀態下的地盤進行環片穩定度重新分析，檢驗環片是否能承受已變異之地質狀況，重新檢討混凝土的設計強度。
5. 對隧道內的環片混凝土強度進行檢測，利用破壞、非破壞性、化學侵蝕等檢測試驗，檢查浸泡於水中之環片混凝土是否發生結構及材料上的變化，能否符合設計強度。檢測結果發現大部分的混凝土環片皆符合設計強度，不需要特殊環片補強（嚴重受損的環片除外）。
6. Zone 1 分 4 個區段進行隧道抽水，抽水過後，清理隧道、防水、隧道結構修護等問題皆會一一浮上台面，不容忽視。整個修護工程預計將花費 18 個月，在資金無虞的情況下，預計 2004 年底完工。

3.4.5 意外事故之發生原因探討

根據有關當局之調查報告，下列幾項因素可能導致該隧道之湧水：

1. 因降水系統終止運作，回升之水壓可能使得環片產生裂縫或損毀而導致滲水。
2. 環片環向遭遇嚴峻的地質改變（上半部為黏土，下半部為砂土），導致環片喪失穩定度。