

# 土壤冰凍工法應用於台北捷運隧道修復實例

朱旭

台北市政府捷運工程局

段紹緯、黃南輝

國際亞新工程顧問有限公司

## 摘要

台北都會區地下土層軟弱而且複雜，其下方為透水性極佳且儲水量豐富之卵礫石層，地下工程施工之風險相當的高。在台北捷運初期路網興建期間，幾個重大災變都肇因於卵礫石層中的地下水大量湧入開挖區或地下結構物所致。本文介紹之這起災變發生於台北捷運板橋線新店溪西岸之通風豎井A，除井內湧入大量土砂和地下水，兩部潛盾機及後方台車全遭到淹埋，隧道環片受破壞外，同時亦造成了豎井外廣達五千平方公尺的地表沉陷。為修復更換受損之隧道環片，在經過詳細評估後應用了冰凍工法，成功地封住水路。此實際經驗顯示，冰凍工法如果運用得宜，確能有效處理此種高風險之隧道修復工程。

## Ground Freezing for Restoration of Damaged Tunnels of Taipei Rapid Transit Systems

Daniel Ju<sup>1</sup>, Shaw-Wei Duann<sup>2</sup>, Richard N. Hwang<sup>2</sup>

1. Department of Rapid Transit Systems, Taipei City Government

2. MAA Engineering Consultants International Ltd.

## Abstract

Panchiao Line tunnels of the Taipei Rapid Transit Systems were seriously damaged due to a large quantity of water from an underlying gravelly stratum to spurt at the tunnel invert during construction. Sinkhole of thousands cubic meters in volume was made outside the shaft described in this paper, and as a result, the shaft was flooded. Ground freezing was adopted to seal up the portals so the damaged tunnel could be restoration. The successful applications prove that ground freezing is an effective measure in cases of a similar nature.

## 1. 前言

一般而言，捷運工程都會有相當長的路段是在地下興建，而且工程內容包含深開挖、隧道及各式基礎，所以是大地工程師可以發揮長才之地。而由於大多數的都會區都是位於沖積層之上，地質軟弱，地下水位高，所以工程風險相當地高。在台北捷運初期路網興建期間，名列前茅的幾個大災變都是因為來自景美層的地下水大量湧入開挖區或地下結構物所致。其中發生於板橋線通風豎井A (Ju, Duann and Tsai,1998 ; Lin, Ju and Hwang,1997) 及中和線通風豎井 (Hwang等, 1998) 的兩起災變尤其嚴重。這兩起災變都導致豎井內大量積水以及隧道環片的破壞。承商採用冰凍工法為輔助封住水路，方能抽乾豎井內積水、更換受損環片。由於受限於篇幅的關係，本文僅針對板橋線之案例進行探討。由於施工工期長和所需費用高的關係，應用冰凍工法之案例甚少。本案例成功的經驗足為日後類似復舊工作之借鏡。

## 2. 台北盆地地質狀況

台北盆地在四、五千年前還是一個大湖，底部地層主要是由新店溪、大漢溪和基隆河沖積而成，地質軟弱而且變化複雜。與工程密切相關之地層為松山層和其下方之景美層。松山層由粘性土層與砂性土層交互沉積而成，地質軟弱而且變化複雜。典型的松山層可分成六個次層，由上而下，第六、四、二次層為粘性土層，第五、三、一次層則為砂性土層。李咸亨教授根據這六個次層的分布，將台北盆地分為 22 個地質分區 (李咸亨, 1996)。松山層之下方為以卵礫石層為主之景美層，亦稱為景美礫石層。景美層除了是一個很好的基樁承載層外，亦是一個透水性良好，含水量極為充沛的貯水層，導水係數介於 0.12 至 0.18 m<sup>2</sup>/sec，儲水係數約介於 0.001 至 0.004 之間。

由於台北盆地是由湖泊經沖積而成，所以松山層中有大量浮木存在 (朱旭等, 1997)，潛盾設計施工均需注意其影響，施工規範中亦要求承商採取因應措施。此外，松山層中尚有沼氣的存在，其量不大，並呈零星分布 (胡逸舟等, 1996；朱介平等, 1997)。在發現有沼氣的地區，

施工規範要求增加隧道中之換氣率以稀釋沼氣濃度，故並無沼氣在密閉空間累積至臨界濃度而生爆炸之情事發生。

### 3. 台北捷運板橋線通風豎井案例發生經過

台北捷運板橋線通風井A(VSA)靠近新店溪與大漢溪會合處（參考圖 1），距新店溪行水區約 340 公尺。井長 23.5 公尺，寬 23 公尺，開挖深度 36.3 公尺，擋土結構連續壁厚度 1.2 公尺，並貫入景美礫石層中 3 公尺。由於通風井底部是隧道段最低點，除供通風使用外，亦兼設集水井，供隧道排水之用，隧道底部深度達 33.6 公尺。

本標之兩條隧道都採用土壓平衡式潛盾機鑽掘。潛盾機自西端之轉轍段出發，經過通風井A後繼續往東，過新店溪，直到東端通風井B出土。在通風井A與隧道之接頭處事先曾以CJG (Column Jet Grout) 改良土壤強度與透水性（參考圖 2 和圖 3）以策安全。改良範圍長 6.27m，橫斷面為寬 11.9m，高 13.5m。緊接CJG改良之末端，再以化學灌漿CW1 延長 3m，故地盤改良合計總長 9.27m。在上行隧道潛盾機到達通風井西側改良區之前，曾於井內共進行 6 次水平鑽孔試水，若有發生漏水情事，則於外側地面進行高壓CJG 補灌，於井內進行低壓OH和LW灌漿以止水。此外當潛盾機進入地盤改良體內後，又從潛盾機內灌注CW1 和Set Foam等灌漿以填補可能因掘進所造成之裂隙。

然而在上行隧道之潛盾機抵達通風井，施工承商破除連續壁時，仍發生極嚴重發生湧水、湧砂事件。初期湧水量約 200m<sup>3</sup>/hr，幾個小時後即增加至 500 m<sup>3</sup>/hr。大量泥砂隨地下水進入井內，造成四周地面沉陷。在搶救無效後，只得迅速灌水回注，以平衡地下水水壓，在外側之沉陷區回填及灌漿，並打設長 12m之鋼鈹樁，以避免災害範圍繼續延伸擴大。本事件導致地面下陷面積約達 5,000 m<sup>2</sup>，深達 6m，除造成周邊建物損壞外，也造成隧道下陷、環片受損而需置換之情況。不但如此，與其相鄰的下行隧道亦遭波及，部分環片必須置換。所幸下行隧道之潛盾機已通過通風井，往東前進達 25 公尺。這一小段隧道亦沒入水中，但環片並未受損，該潛盾機亦可在清理後修復。

俟災情穩定後，施工承商即進行地質調查，共施作 8 個鑽孔，深度為 37 至 45m，鑽探過程中同時進行標準貫入試驗(SPT)，以瞭解地盤受

擾動之程度。調查結果顯示，發生沉陷區域的地盤，已經有效地填充與壓密，上行隧道最大沉陷量為 1.46m，下行隧道最大沉陷量為 0.34m。上行隧道有 39 環，下行隧道有 34 環環片嚴重受損，須要更換。下行隧道之環片在以傳統的灌漿方式進行地盤改良後順利更換。由於潛盾機卡在洞口，上行隧道的復舊作業卻是相當困難。

#### 4. 上行隧道復舊工作

意外事故發生後，施工承商、業主及顧問(咨詢)公司即展開修復工程方案之評估，曾評估的可能方法有：

- (1) 採用壓氣式沉箱與冰凍工法：即利用壓氣式沉箱完成水平冰凍管之作業，再拆除損壞環片，及重新施作隧道襯砌，該沉箱為永久結構。
- (2) CJG灌漿輔以冰凍及壓氣工法：如圖3所示，即在隧道受損環片四周進行CJG地盤改良。上行隧道因仍有台車在隧道內，難以自地面貫穿隧道至隧道下方灌漿，僅能施作門型灌漿，故須配合壓氣施作，此外，水平冰凍管則僅在潛盾機下方施作。
- (3) 明挖工法輔以深井降水工法。
- (4) 冰凍和壓氣工法：將欲修復之環片四周，全部進行土壤冰凍作業，以凍土將其包圍。自VSA裝設水平冰凍管，並在上行隧道以壓氣工法輔助施工。

經過評估比較各方案之施工安全性、經濟性、工期、對周遭環境之影響，及檢討各項工法之優缺點，最後決定採用方案(2)，即採CJG灌漿輔以冰凍及壓氣工法。最主要的原因是方案(2)工期估計可較其他方案縮短約 10 個月以上。此外，相較於其他方案施工費用亦屬經濟，在地質變化複雜或受擾動大之土層中施工，以壓氣及冰凍工法來處理漏水都是十分有效的，應可大幅降低復舊工程施工之風險性。又方案(4)另有水平管太長，施工精度難以配合應用之缺點，仍需使用壓氣工法輔助施工。

## 5. 冰凍設計與施工

凍結工法施作位置有三，分別是通風井A西側潛盾機到達區，通風井A東側的潛盾機發進區，以及通風井B西側之潛盾機到達區，其中以應用於通風井A西側潛盾機到達區之復舊工程為主，也是以下討論的重點，其他二處只是未雨綢繆，僅施作一排凍結管，以降低鏡面破除時漏水之風險。

為阻擋井外水、砂之繼續湧入，以方便清除井內之水和砂，承商首先在水中澆置一座重力混凝土牆將出事的洞口封閉（參考圖3）。未來在使用壓氣工法以便進行環片更換作業時，這座混凝土牆就成為栓塞，使壓縮空氣不致逸出。在將井內淤水及泥沙清除後，即開始冰凍管之安裝作業。凍結系統包括不凍液循環系統、冷媒循環系統和冷卻水循環系統。不凍液循環系統以幫浦將不凍液（氯化鈣溶液，凍結溫度 $-55^{\circ}\text{C}$ ）自機房送至凍土區，吸收土中熱量後，再回流到機房。因為熱量被不凍液吸收，凍結區土壤之溫度持續下降，在降至冰點以下時土體即凍結成高強度的冰塊。不凍液自土壤帶回的熱量由冷媒循環系統吸收，不凍液的溫度也因此回降至原始溫度。冷水循環系統再將冷媒系統所吸收的熱量發散到大氣中，冷媒系統的溫度也因此回降。

凍結管的配置見圖4，在洞口四周一共裝有垂直凍結管62支，水平凍結管11支，凍結管間距均為0.8m，且成列狀埋設。凍結管為直徑3.5”之SGP管(Steel Gas Pipe)。其設計參數為：土壤含水率 $P=0.6\text{m}^3/\text{m}^3$ ，不凍液溫度 $\theta_{\infty}=24^{\circ}\text{C}$ （鹽分濃度為0%），設計凍土厚度需求為1.4m，凍土平均溫度為 $-12^{\circ}\text{C}$ ，其單軸壓縮強度需達到 $60\text{kg}/\text{cm}^2$ ，以使凍土承受外側土水壓力時，安全係數仍能在2以上。為監測地盤中凍土生成情形，以及作為冷凍運轉管理上之依據，在凍土中裝有垂直與水平測溫管，測溫管中裝置溫度計，其深度及位置如圖4所示。

凍結管的實際位置影凍結效果、而測溫管的實際位置影響溫度的量測以及凍結效果的研判，所以兩者都必須加以確認。尤其本工程凍結管埋設深度在27至36m之間，百分之一的傾斜，即可能造成30公分的偏差，所以每個鑽孔的傾斜度都經測定，若偏移太大，則有必要增設凍結管。而事實上也的確有偏斜過大的情事，因此一共增加了4支凍結管，所以總共有66支垂直管。同時，由於不凍液之冰點甚低，若不慎漏出，

即可能形成不凍結區，使凍土無法連續，所以凍結管的外管均以  $7 \text{ kg/cm}^2$  之高壓空氣測定是否漏氣。此外，由於台灣地區位處亞熱帶，土壤及空氣中溫度較高，有必要施作隔熱措施，以免影響凍結效果。所有配管都有厚度  $50\text{mm}\sim 25\text{mm}$  之發泡性隔熱材以防水膠帶捆包於外，形成隔熱護壁，再漆上白漆，配管上方搭架遮蓋，凍土區上方亦有遮陽簾幕。

## 6. 土壤冰凍情形

配管工程於 1995 年 11 月下旬開始，1996 年 1 月中旬進行凍結運轉，1996 年 4 月下旬則進入維持運轉階段。依據 1996 年 5 月底量測資料所繪製之溫度分佈圖表示於圖 5 及圖 6。由該兩圖可以得知，在隧道上方凍土厚度達 3m 以上，其他各側也有 1.5m 以上，達到設計要求。

## 7. 冰凍施工檢討

### (1) 凍土成長與解凍速度

由於通風井西側地盤曾受大幅擾動，雖經回填及改良，但地質之變異性甚大。此外，凍結作業並非復舊工程要徑，復舊工程之要徑是壓氣作業下之環片拆除與組裝，所以在凍結作業之初期，西側之潛盾機到達區之凍結是以水平凍結管為主，整體凍結系統並未完全啟動。直到東側潛盾機發進區開始凍結(1996 年 3 月 6 日)後，凍結作業才趨正常，故就凍土成長而言，東側發進區之凍結作業較具代表性，分析結果也較具意義。

圖 7 表示東側潛盾機發進區內垂直凍結管與測溫管之配置。雖然三支測溫管均距凍結管列 0.8 公尺，由圖 8 可見各部位凍結之效果並不相同。S12 和 S13 位於凍土區內部，S11 則位於凍土區之邊緣，所以在 S12、S13 位置凍土生成較快，在 S11 位置凍土生成較慢。各管之測溫點資料顯示，下方較上方為早形成凍土。以 S12 位置為例，底部（以 S12-1 代表）在 4 月初已結冰，而頂部（以 S12-6 代表）要到 4 月下旬才結冰，相差 20 天左右。這應是由於本工程採用二重管式凍結管，不凍液由內管進入，先流至凍結管底部開始與地盤進行熱交換，才繼續由內外管間邊往上流回，邊與土壤進行熱交換之故。

如圖 9 所示，依據理論，約 30 日凍土即可達管外 0.8 公尺之處。經比較測溫管附近凍土形成時間，在 S12 位置約需 40 日，在 S13 位置約須 50 日才能形成凍土，在 S11 位置則遲遲未能凍結。這是因為圖 9 之理論曲線是根據冷凍液是溫度 $-25^{\circ}\text{C}$ 恆溫。然而凍結初始時，冷凍液溫度係逐漸下降，約 10 日方達下降至 $-25^{\circ}\text{C}$ 以下之目標，而且其後曾做冷媒補充、膨脹閥修理等動作，故整體而言，凍土成長控制尚稱理想。當然若值夏令時節，凍結速度應會較慢些。

1996 年 8 月 1 日因賀伯颱風降下豪雨，通風井被水淹沒，冷凍機受損停止運轉。經統計各測點資料，土體溫度每日上升 $0.2\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ ，平均 5 天上升 $2.3^{\circ}\text{C}$ ，推估凍土解凍程度不超過 10 公分，所以 10 天估計僅約上升 3 至 5 度，冰凍封層的厚度減少量估計應在 30 公分以內。參考其他文獻，解凍速度應隨時間加長而趨緩，且溫度愈低凍結時間愈久，解凍速度則愈緩。相較於其他工法，如壓氣作業，對電力中斷所造成安全上影響，凍結工法的安全性明顯較高。

## (2) 冰凍管設置精度

依規範，垂直凍結管實際裝設深度與設計深度相差不得大於 10 公分，且垂直傾斜應控制在 1/100 以內。本工程實際所裝設之垂直凍結管，平均深度約 31 公尺，其最大傾斜量約 55 公分，平均傾斜量約 20 公分，傾斜度平均為 1/160。水平凍結管裝設約 20m 長(包括長約 10m 之連續壁，內牆及重力止水牆)，最大傾斜量亦約達 40 公分，平均傾斜量約 20 公分，傾斜度平均為 1/100，所以水平凍結管之裝設傾斜量，於設計施工均需特別注意。例如若本工程欲如前述修復方案(4)，用水平凍結管完全將修復段包圍，則上行隧道須打設近 60 公尺之水平凍結管，即可能造成近 1 公尺之誤差，再加上修復段隧道沉陷最大達 1.46 公尺，欲使凍土連續確保施工之安全而有所困難，同時施工費用、凍結能量負荷上亦不經濟。

## (3) 盾殼對凍土之影響

上行線修復段，於 1997 年 1 月完成受損環片拆除後，即依序進行環片重新安裝、環片背填注入，修復段外廢土清除、連絡通道施工，復舊段及連絡通道之試水、止漏與灌漿後，於 1997 年 5 月 20

日壓氣作業解壓後，開始進行潛盾機第一次解體(不含切刀盤與土艙隔板)，潛盾機盾殼則採永久棄殼。由於此時壓氣作業已經終止，後續之重力混凝土與鏡面混凝土破除，以及潛盾機二次解體，除了既有之CJG外，是靠冰凍作業在受過擾動的地盤中維護施安全。

然而後續作業過程中，發現由於盾殼導熱性良好，加上電銲拆解關係，凍土有溫度回升現象，依據S4測溫管量測結果，S4-1測溫點(貼近盾殼面位置)有解凍現象。S5-1測溫點亦有類似情形，S3-1(隧道中心線上方，距離上較S4、S5靠近鏡面)則較佳，依1996年7月17日溫度量測結果，分別為2.6°C、5.5°C及-4.7°C，同時在重力混凝土上部破除後亦出現漏水，流進工作井情況。除加強防熱，以帆布遮蔽外，再以隔熱材貼住盾殼內側，減少接觸熱源，同時為避免盾殼週邊有不連續凍土存在，而可能形成水路，在潛盾機內側進行2排環狀OH灌漿，兩環相距1公尺，每環灌漿孔30孔，灌漿孔間距約0.5公尺。灌漿後水量未見明顯降低，水量約0.5公升/min，又水溫為6°C，隧道內氣溫為28°C，潛盾機內為13°C，經研判此時漏水位置應非自潛盾機盾殼旁，而可能是連續壁與內牆間流出。雖說如此，擋土牆和鏡面破除仍全程皆在高度警戒下進行，工程師全程在場監督，並備妥不織布、砂包(VSA及Cross over各約2000個)、怪手等，破除後之混凝土塊堆置在旁，以備若有需要時，立即填塞。

隨著破除工程之進行，證實所漏出之水係來自連續壁與內牆防水膜之間流入，然檢視連續壁與鏡面間，均可看到結成十餘公分厚之冰，顯示凍土與連續壁間冰凍、密接十分良好。切刀盤配合鏡面破除逐段切除後，立即裝上止水鐵板，延伸盾殼並固定於連續壁上，止水鐵板背面並灌漿，以確保無漏水之虞，最後修復工程終於完成。值得一提的是，在鏡面破除階段，發現潛盾機切刀盤附近有多處地下流木塊，且在事故前局部破除鏡面時就發生事故之位址，發現有流木塊與疑似潛盾機掘削過之直徑6~8" PVC管，其在凍土中皆與凍土密接良好，可證明凍土與其他材料優異之密接性，能提供極佳之止水性。

#### (4) 冰凍作用對周圍環境影響

凍土若在細料含量較多之地層中生成，將可能造成膨脹，而解凍時又發生沉陷情形。依據VSA發進端監測儀器量測結果，裝置於通風井A發進端，東側連續壁中之傾度管量測結果，顯示凍土生成及維持運轉期間，連續壁位移量逐漸增加，至解凍前大約造成了一公分之位移量，解凍後連續壁又有回復現象。然而裝設於傾度管附近之連續壁中鋼筋計，其量測結果則無明顯變化。由於通風井A意外事故發生時，通風井A 1.3公尺厚內牆業已完成，否則連續壁位移量會更大，鋼筋應力變化亦可能會較明顯。故在開挖施工階段，對於易生膨脹之地層，支撐系統之安全應特別注意，應加裝監測儀器觀測，以監控施工之安全，必要時可鑽孔做解壓井，減輕其影響。另由通風井A東側連續壁外約 5m之多點式伸縮儀(位於隧道中心線上，裝設深度 18, 21 和 24 公尺)量測結果所示，於冰凍階段並未發生明顯變位情形，由於本工程冰凍位置約在地表下 24m以下，冰凍又在砂性土層中，原本膨脹率就低，其對地表沉陷的影響應可以忽略。

## 7. 後續作業

通風井A西側第一段隧道之上行隧道，更換其受損之環片是在壓氣工法的輔助下完成。由於洞口冰凍效果皆能達到預期，閉塞混凝土牆得以重新打開。現場在緊鄰通風井連續壁處，發現有一支直徑 200mm之PVC管，屬於廢棄抽水井的一部分，且應是抽用透水性高、蓄水量豐富之景美礫石之地下水。此PVC管是被潛機切斷後形成一條水的通路，被認為與災變有關。潛盾(盾構)隧道與通風井間的柔性接頭亦在凍土的保護下，依據原設計完成施作。此外新的潛盾機重新發進施工，最後隧道得以順利完成。

## 8. 結語

雖然基本假設與現地狀況不盡相同，量測結果顯示冰凍效果與分析所預期相接近，驗證了冰凍分析之實用性。而復舊工作得以順利進行顯示冰凍工法為正確之選擇。

冰凍工法雖然已有不算短的歷史，但實際應用案例並不多見，相關文獻稀少，這是因為該工法遠較灌漿工法昂貴之故。但在特殊狀況下，

冰凍工法有其難以取代的優點。在本文案例中，由於有隧道之存在形成障礙，灌漿難以周全，而且地下水充沛，水壓極高，風險極大。只要冰凍管的安裝得宜，位置準確，冰凍工法可以確保冰體內無縫隙，不致再度湧水造成二次災變。

隧道洞口最易發生災變，台北捷運初期路網施工過程中所發生的數次大災變都發生在洞口，而在這些洞口都曾以灌漿工法進行地盤改良，而且在潛盾機出發或到達時也曾進行試水及止水灌漿。災變的發生足証灌漿工法並非萬全，而降水工法可能導致地盤沉陷造成鄰損。雖然冰凍工法較為昂貴，但在風險較高之處，如近貯水層或位於河底，或者貼近鄰房，冰凍工法不失為最佳選擇。

冰凍工法之管理要配合監測儀器之妥善規劃，透過監測資料之分析檢討，作為進行冰凍管理之依據，從而發揮冰凍工法之功效。

### 誌謝

本文作者對鹿島/大友為聯合承攬承商提供詳細的資料與完成傑出的工作，以及台北市政府捷運工程局同仁所做的努力非常的感謝。作者亦對細部設計顧問，中興工程顧問公司，台北市政府捷運局初期路網大地工程專業顧問，亞新工程顧問公司提供之寶貴貢獻深致謝忱。

### 參考文獻

- 朱介平、崔澎生、高蔚明、虞尚仁〔1997〕“捷運中和線二七五標過新店溪潛盾施工”，台北捷運局十週年局慶工程研討會，九月，第310~338頁
- 朱旭、宮能文、段紹緯〔1997〕“台北盆地流木分布對地下工程之影響”，第七屆大地工程學術研究討論會，八月，金山，第1041~1048頁
- 李咸亨〔1996〕“台北市區工程地質分區”，地工技術，第54期，四月，pp. 25~34
- 胡逸舟、秦中天、劉泉枝〔1996〕“台北盆地大地工程相關特性之探討”，地工技術，第54期，第5~14頁

- Hwang, R. N., Moh, Z. C., Yang, G. R., Fan, C. B., Chao, C. L. and Wong, R. K. (1998) "Ground freezing for repairing a damaged tunnel", Proc., 13th South East Asian Geotechnical Conference, 16~20 November, Taipei
- Ju, D. H., Duann, S. W. and Tsai, H. H. (1998) "Ground freezing for restoration of damaged tunnel", Proc., 13th South East Asian Geotechnical Conference, 16~20 November, Taipei
- Lin, L.S., Ju, D. H. and Hwang, R. H. (1997) "A case study of piping failure associated with shield tunnelling", Proc., 15th International No-Dig '97, 26~28 November, Taipei

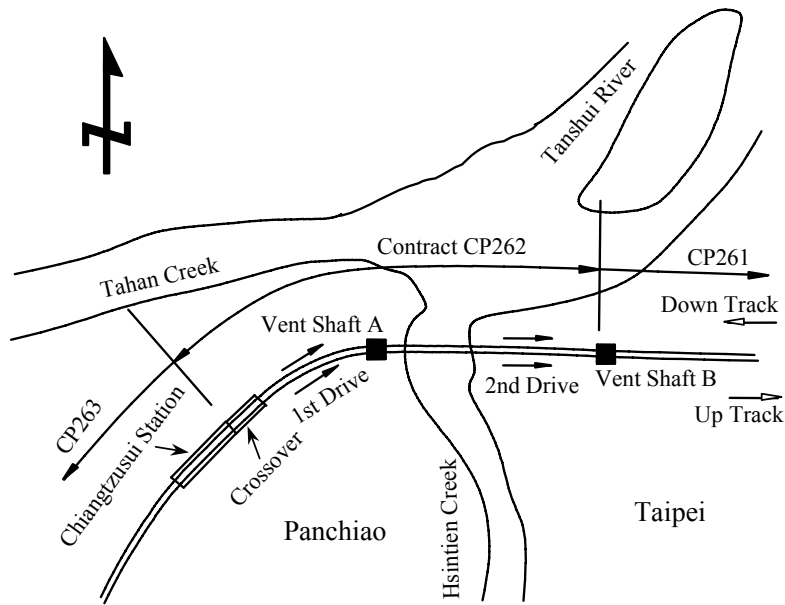


圖 1 板橋線通風井A位置圖

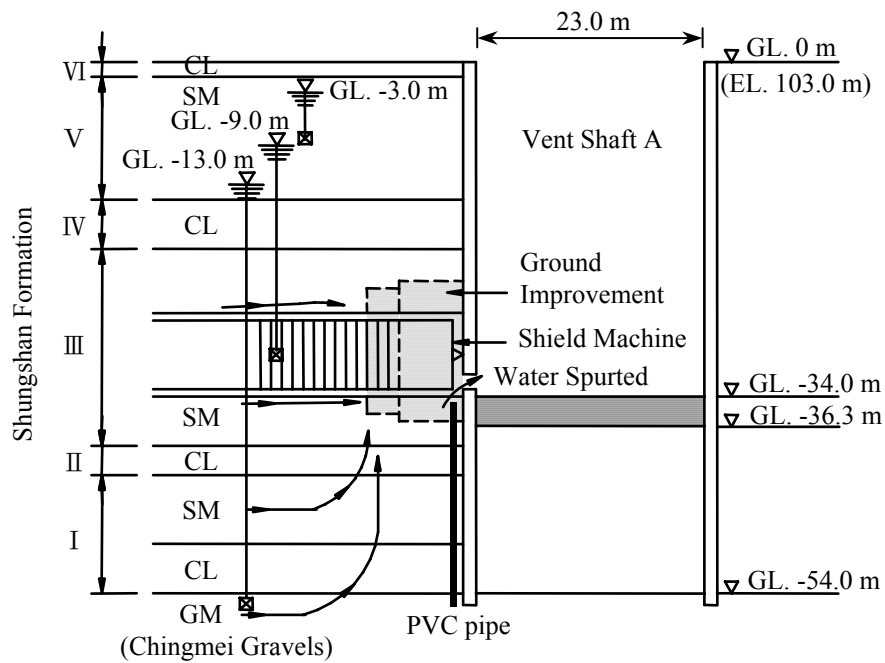


圖 2 板橋線通風井A縱剖面圖

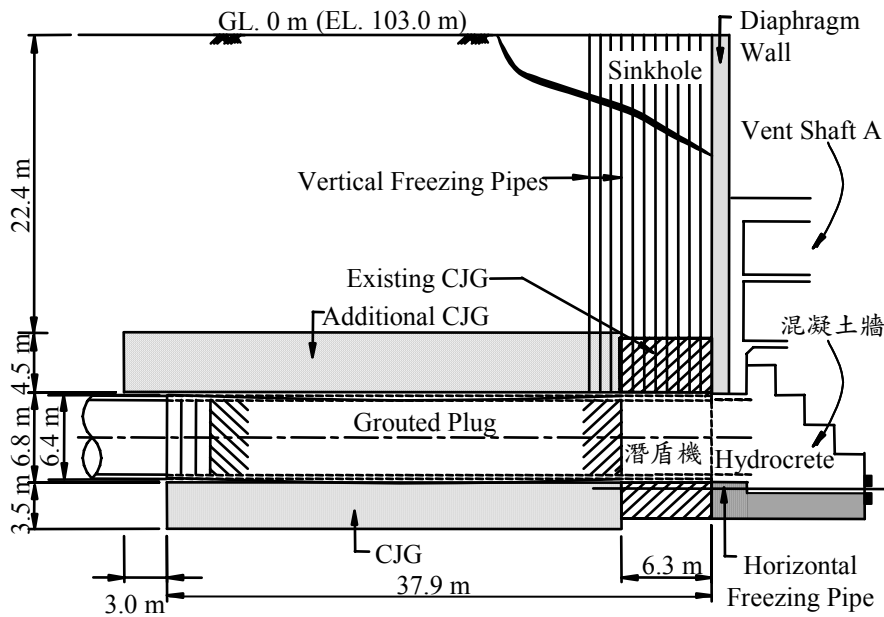


圖 3 復舊作業方法

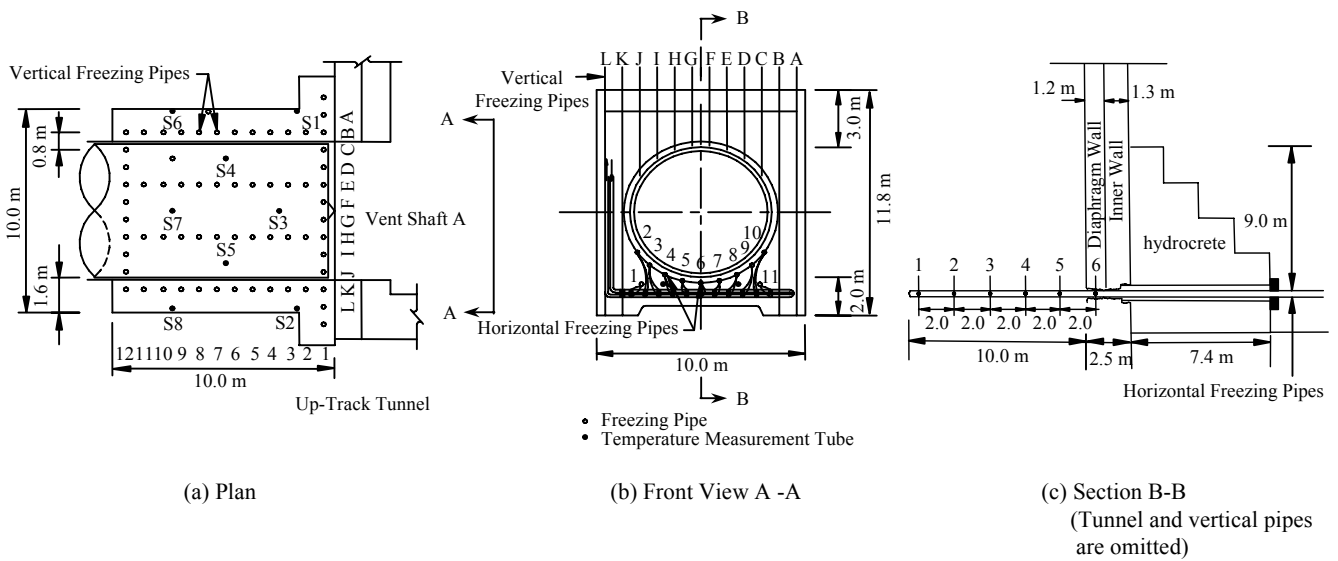


圖 4 冰凍管和溫度測量管配置圖

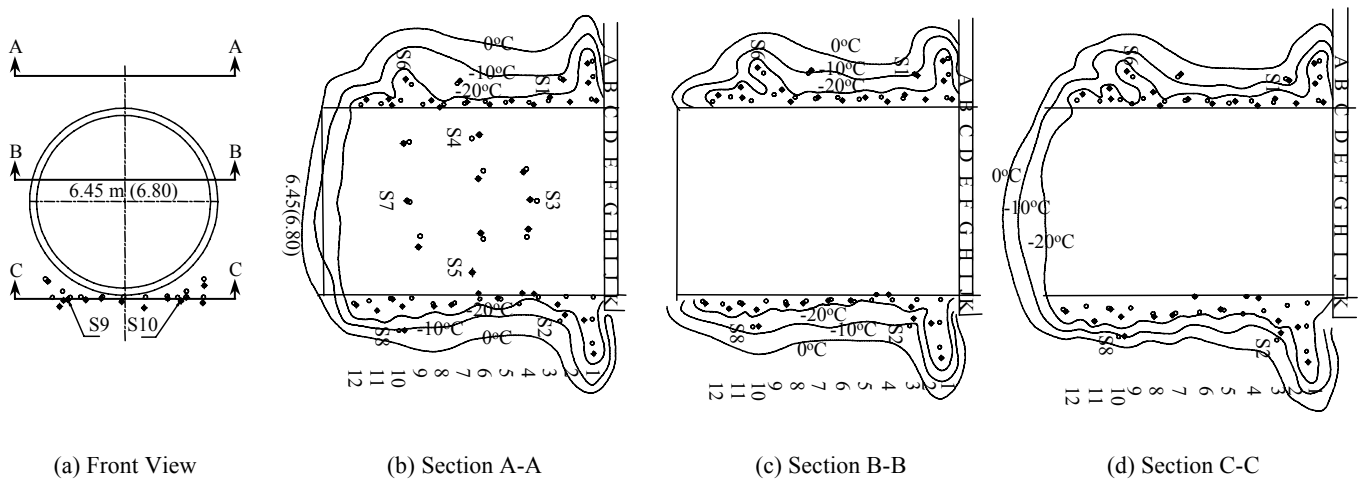


圖 5 水平剖面溫度分布圖

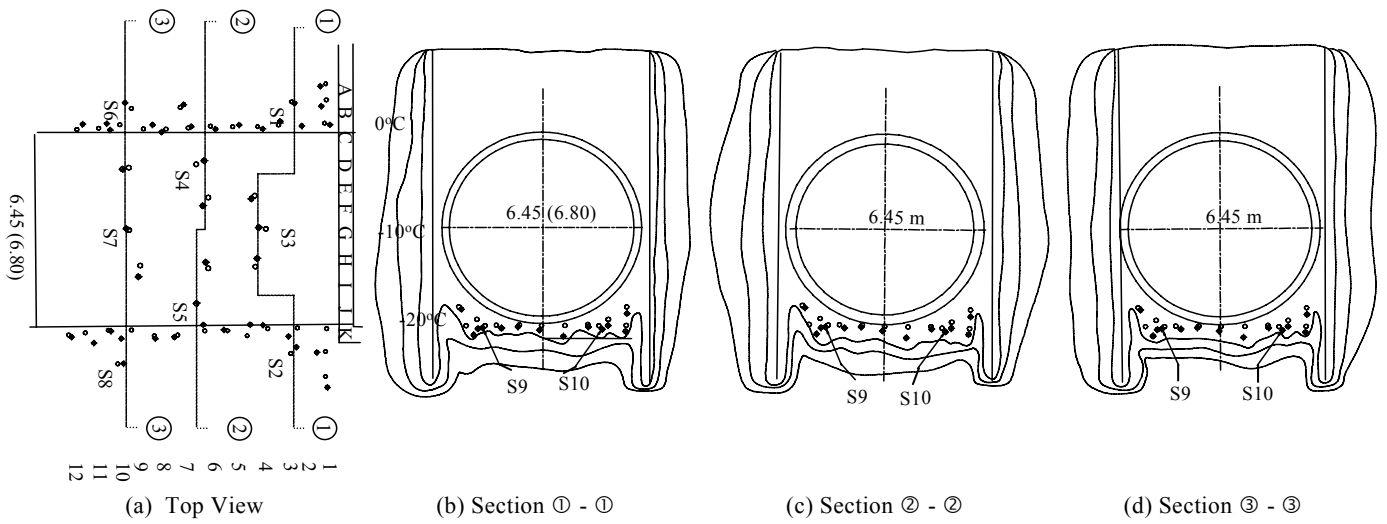


圖 6 縱剖面溫度分布圖

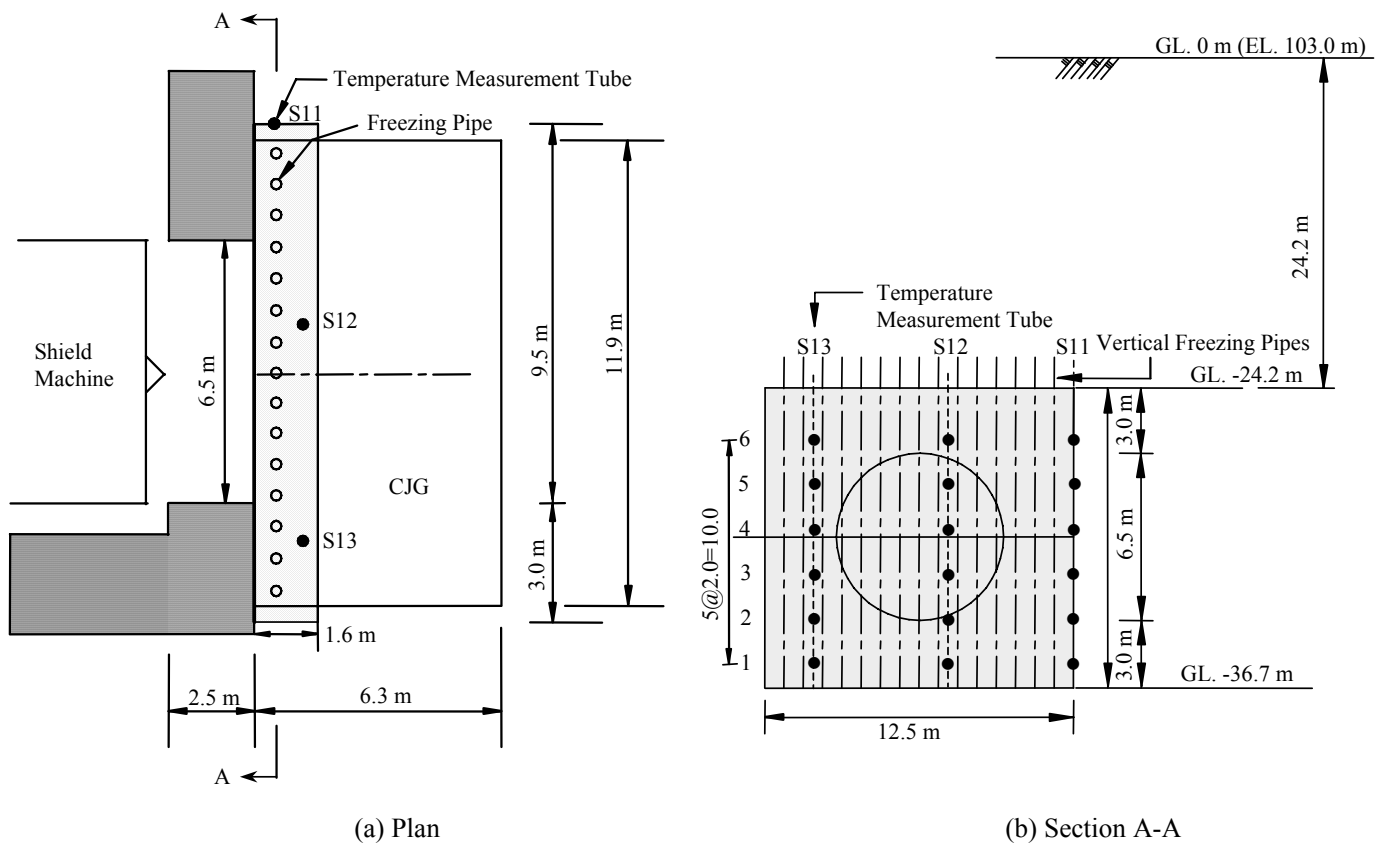


圖 7 潛盾機第二次發進前所進行之冰凍作業

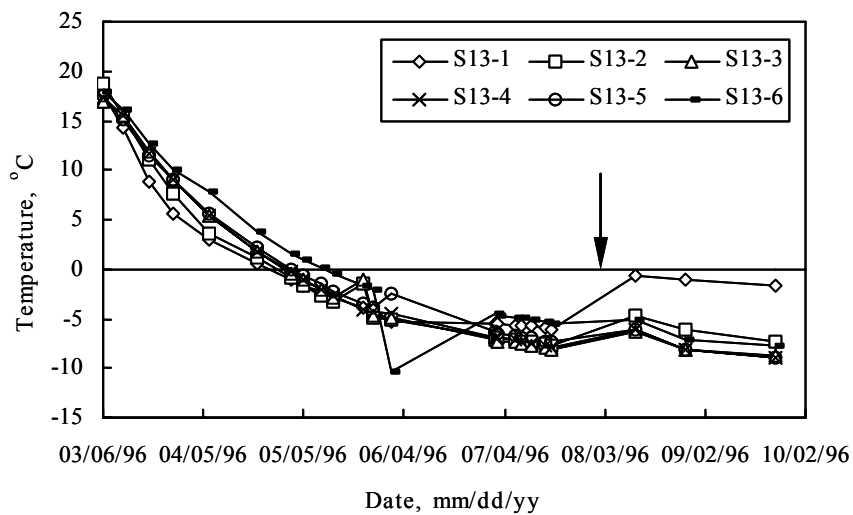
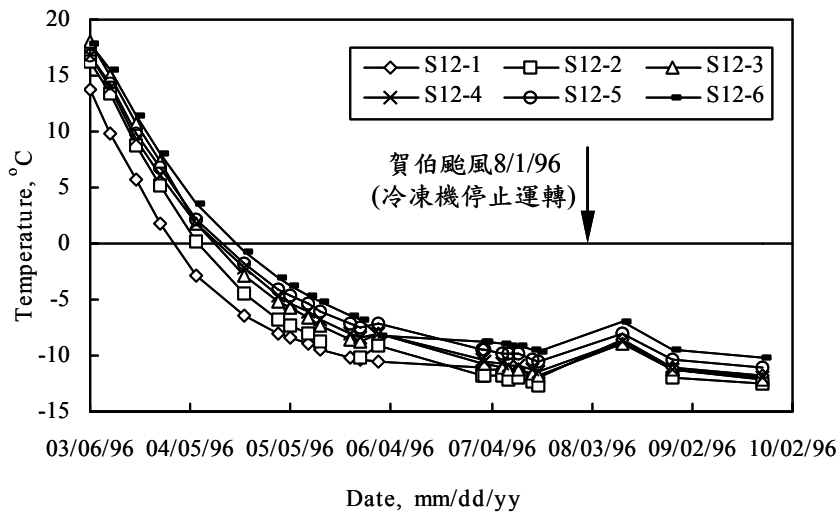
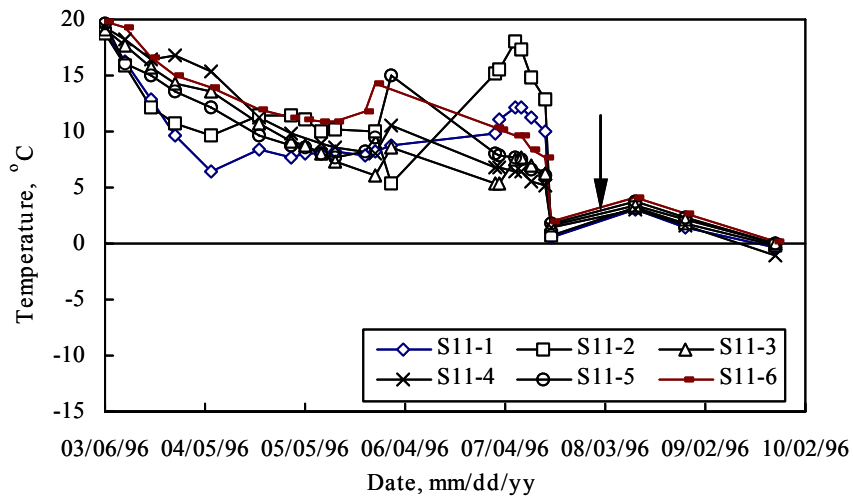


圖 8 溫度隨時間變化情形

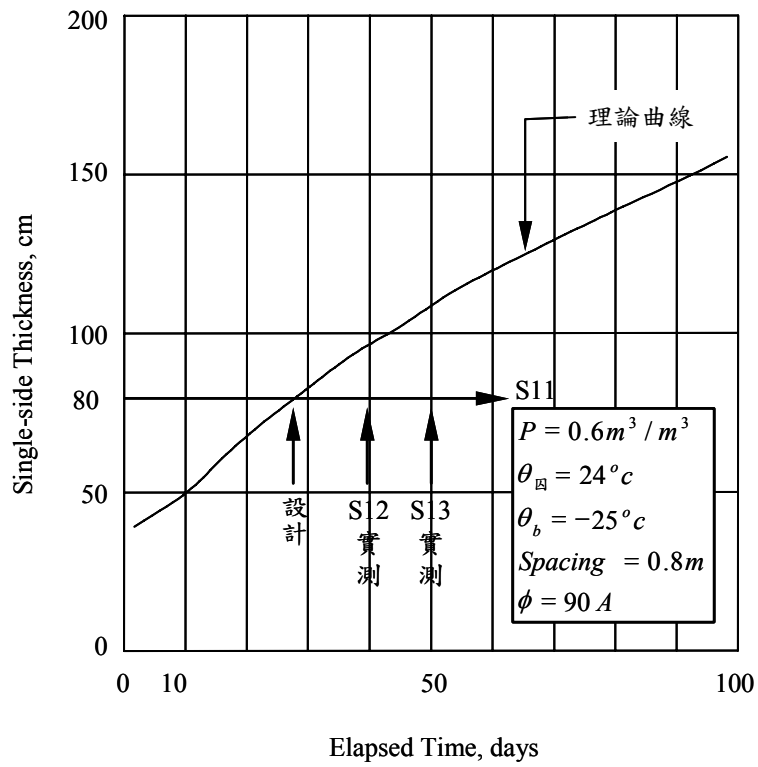


圖 9 推估冰凍作業需要時間