

台北捷運CH221標冷凍工法施工案例  
**CASE STUDY ON GROUND FREEZING  
OF CONTRACT CH221 OF  
THE TAIPEI MRT SYSTEM**

楊國榮，范陳柏，趙際禮，王錦伍

G. R. Yang, C. B. Fan, C. L. Chao and K. N. Wong

原著載於地工技術雜誌第 71 期

1999 年 2 月，第 83~96 頁

*Reprinted from Sino-Geotechnics  
Taipei, Taiwan*

*February, 1999, No. 71, pp.83~96*

# 台北捷運CH221標冷凍工法施工案例

楊國榮

亞新工程顧問股份有限公司

范陳柏 趙際禮

台北市政府捷運工程局

王錦伍

三信建設工業株式會社

## 摘要

冷凍工法主要藉由冷凍液經由埋設於地盤中之凍結管，將地盤中之熱發散於大氣中，以使地盤凍結，達到地盤不透水及增加地盤強度之目的。本文介紹此工法之細節，與其應用於台北捷運系統新店線CH221標2A潛盾隧道受損環片更換之施工案例。

**關鍵字：**冷凍工法、凍結管、測溫管、CH221標。

## CASE STUDY ON GROUND FREEZING OF CONTRACT CH221 OF THE TAIPEI MRT SYSTEM

YANG, G. R.

Moh and Associates, Inc., Consulting Engineers

FAN, C. B., CHAO, C. L.

Department of Rapid Transit System, Taipei Municipal Government

WONG, K. N.

Sanshin Corporation

## ABSTRACT

The ground freezing technique was used to improve the watertightness and the shear strength of the ground. By transferring the heat in the ground via the brine circulation pipes into the atmosphere, the ground is then frozen. This paper presents the details of ground freezing and the application of this technique to the restoration of the damaged linings of tunnel 2A of Contract CH221 of Taipei MRT.

**KEY WORDS :** Ground freezing, Freezing pipe, Temperature monitoring Pipe, Contract CH221.

## 一、前言

為解決工程上所遭遇之種種困難，工程師無不竭盡所能想盡辦法克服。地盤改良為工程師解決問題之一種選擇，藉地盤改良之施作可降低地盤透水性並增加地盤強度。一般地盤改良係採用水泥系或化學系材料與地盤混合滲透或局部置換以達成其施作目的。位於台北捷運系統新店線CH221標與中和線CC275標介面上之通風豎井，因CH221標承商施作通風豎井與2A潛盾隧道銜接處之柔性接頭時，發生湧水災變損及2A潛盾隧道部份環片，而採用異於上述地盤改良工法之冷凍工法進行受損環片之更換工作。有關冷凍工法之細節以及其應用於台北捷運系統新店線CH221標2A潛盾隧道受損環片更換工作之施工細節，將於文中加以介紹與討論。

## 二、工法原理與冷卻方式

冷凍工法之原理係將凍結管埋入地盤中，並藉由流經凍結管內之冷凍液將凍結管周圍地盤之熱發散於大氣中，而使地盤內孔隙水凍結形成不透水及高強度之凍土。於凍結初期各凍結管周圍開始形成

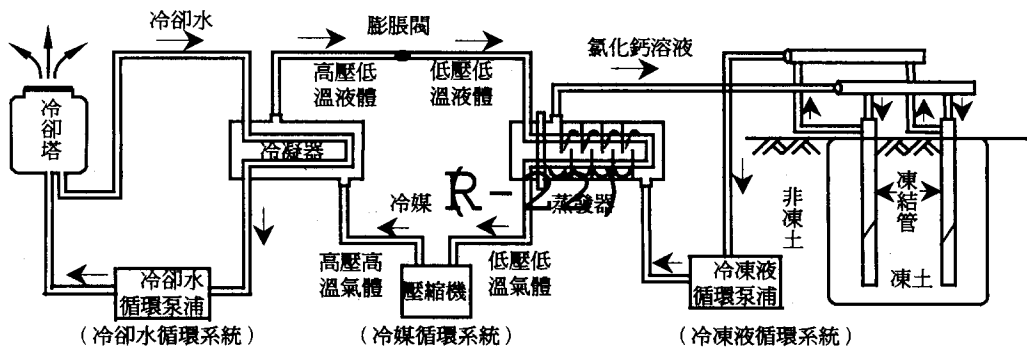
環狀之凍土，視所規劃之凍結管配置情形，此環狀凍土相互連接成長，於地盤中形成任意形狀之截水牆或耐力牆。目前地盤凍結之冷卻方式一般採間接與直接二種方式進行，茲分述如下：

### 1. 間接方式

此種方式之冷卻運作如圖一所示，係經由冷媒、冷卻水與冷凍液等三個循環系統，將地盤內之熱間接發散於大氣之中，以達到地盤凍結之目的。各個循環系統之運作原理詳述如下。

#### (1) 冷媒循環系統

此循環系統係由壓縮機、冷凝器與蒸發器所組成。運作時係將被壓縮機壓縮而成為高壓高溫之氣態冷媒(R-22)，藉由冷凝器將其經冷卻水冷卻成高壓低溫之液態冷媒，此液態冷媒通過膨脹閥減壓，然後於蒸發器中蒸發成氣態冷媒並吸收氯化鈣溶液之熱，此氣態冷媒再進入壓縮機壓縮成高壓高溫之氣態冷媒，以形成一完整之冷凍循環，具備此冷凍循環者稱為冷凍機。其中冷媒為一種容易揮發之液體，在冷凝器中放熱凝結，在蒸發器中則吸熱蒸發。壓縮機則於此循環系統中建立壓力差，以使冷媒於系統中循環流動。



圖一 凍結循環示意圖(間接方式)

## (2) 冷卻水循環系統

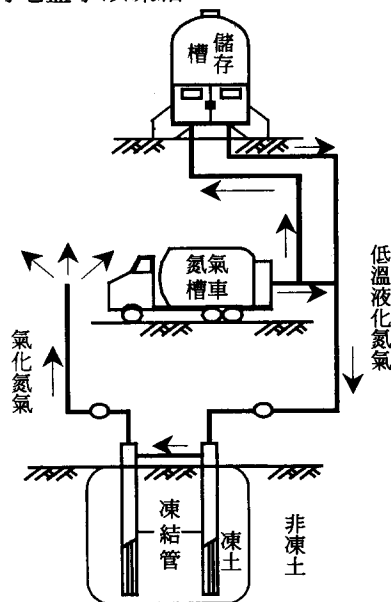
此循環系統係由冷卻水循環泵浦、冷凝器與冷卻塔所組成。運作時係藉由冷卻水循環泵浦將冷卻水加以循環。此冷卻水將自冷凝器內吸收冷媒氣體之熱，並經由冷卻塔將所吸收之熱發散於大氣中。冷凝器內以冷卻水作為冷卻介質之冷凍機稱為水冷式冷凍機。

## (3) 冷凍液循環系統

此循環系統係由冷凍液循環泵浦、蒸發器與凍結管所組成。運作時係藉由冷凍液循環泵浦將所使用之冷凍液(氯化鈣溶液，凝固點為 $-55^{\circ}\text{C}$ )加以循環。地盤中之熱則藉由凍結管內循環之氯化鈣溶液加以吸收，再將其熱藉由蒸發器發散於氣態冷媒中。其中凍結管扮演吸熱之功能。

### 2. 直接方式

此種方式之冷卻運作如圖二所示，係將液化之氮氣(蒸發溫度為 $-196^{\circ}\text{C}$ )直接經由輸送管，或經由連接於氮氣槽車之儲存槽直接送入埋設於地盤內之凍結管，藉由蒸發之潛熱將地盤予以凍結。



圖二 凍結循環示意圖(直接方式)

上述二種冷卻方式中，使用間接方式形成凍土所需之時間較長，但能形成穩定之凍土，此方式適用於大規模與施工期長之工程。採用直接方式則其凍結速度較快，於水流較高之地層亦可達到其功效，此方式適用於 $150\text{m}^3$ 以下小規模之凍土與凍結時間僅數日之工作。以凍土規模與凍結時間而言，直接方式之費用較間接方式之費用昂貴。

## 三、工法特色與特性

### 3.1 工法特色

冷凍工法具有如下之特色:

1. 地盤經凍結後，強度激增，所形成之凍土牆為高強度之耐力牆。
2. 經凍結之地盤可達到完全不透水。
3. 經凍結之地盤可達到與其他結構物完全密接之效果。
4. 適用於任何地盤，不同地盤經凍結後可形成一體之效果。
5. 凍土自然解凍之速度緩慢，施工期間不會因短暫停電或機械故障而對工程造成危害，工法之安全性頗高。
6. 經凍結之地盤解凍後，地盤恢復原狀，不致於地中形成障礙物，或破壞原地質狀況。
7. 冷凍工法乃利用自然界之熱傳導現象，其成效非常確實可靠。
8. 地盤凍結後所形成凍土之範圍與強度可藉由地下溫度之測定確實掌握，施工管理可確實執行。
9. 此工法以電氣為能源，循環液僅使用氯化鈣溶液或液體氮氣，並不會造成污

染，又可避免噪音與震動等公害。

但亦有下列之缺點：

1. 凍結期間因凍脹而可能對周圍現有結構物或設施造成影響。

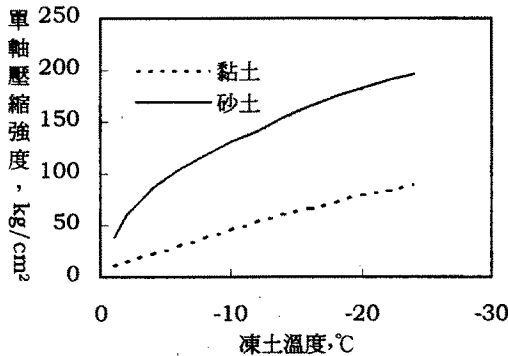
2. 因地下水流之流速大小，而影響凍結時間，甚或不能凍結。

以上兩點如能加以仔細調查及探討，本工法費用雖高昂，但不受地質條件所限，應是它最大的特色。

### 3.2 工法特性

#### 1. 凍土特性

地盤經施作冷凍工法形成凍土後，應不具透水性。另就其強度而言，不論砂土或黏土經凍結後之強度皆隨溫度降低而顯著增加，其中砂土經凍結後之單軸壓縮強度，於同一溫度下明顯較黏土為高，如圖三所示。彎曲或剪斷強度亦呈現相同之結果。



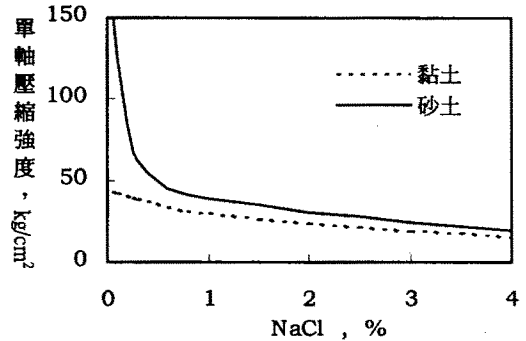
圖三 凍土單軸壓縮強度與溫度之關係 (精研株式會社)

圖四則為地盤中鹽分含量多寡對凍土強度之影響程度，顯示不論砂土或黏土，其凍土強度將隨鹽分增加而降低，砂土於低鹽分含量時其強度降低比率尤為顯著。

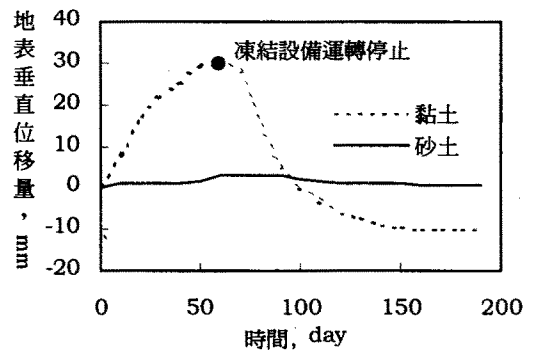
#### 2. 地盤凍結膨脹與解凍收縮特性

地盤將因施作冷凍工法而造成隆起

現象，此隆起量主要發生於黏性土層中，砂土層則較不顯著，如圖五。由圖5亦可知，冷凍工法進行解凍後，將導致黏性土層發生明顯之沉陷，其沉陷量將較原先之隆起量為大，砂土層則無此特性。



圖四 凍土單軸壓縮強度與鹽份含量之關係 (凍土溫度為-10°C) (精研株式會社)



圖五 凍結與解凍所導致之地表垂直位移量變化情形 (日本建設機械化協會, 昭和56年)

#### 3. 地下水流之影響

當凍結地盤中之地下水流速高於某種界限時，因水之流動而將熱引進，致使凍結管之間的凍土無法連結，而未能形成所期待的凍土牆。此雖可藉由改變凍結管之排列方式形成凍土，但仍需併用諸如地盤改良等減低流速之措施，方能達到預期凍結之效果。由施工經驗得知，當地下水流速低於 2m/day 時採用間接方式，地下

水流速低於10m/day時採用直接方式進行凍結作業，此時之地下水流將對凍結效果無任何之影響。

#### 4. 解凍速度特性

凍土自然解凍速度極為緩慢，但將因外氣或水加熱，以及由其它構造物傳導熱而加速其解凍。

### 四、工法設計

冷凍工法設計主要包括凍土結構計算(凍土厚度)與熱計算(凍結速度、凍結負荷、溫度分佈與解凍速度等)二部份。其中凍土之結構計算可依照所處理之問題，採用一般結構物計算所採用之方式進行，計算時所採用之凍土強度則視土層種類依凍土平均溫度由表一而求得。熱問題則將土層之熱性質代入熱傳導方程式中以凍結理論求得解答。其中土層熱性質可藉由試驗而求得，或藉由土層容積含水率由表二查得，並經現場施作結果驗證之。土層容積含水率則由式(1)求得

$$P = nS \dots\dots\dots (1)$$

式中P 土層容積含水率， $m^3/m^3$

n 土層孔隙率

S 土層飽和度

凍結理論有平板與單管二種理論，而實際施工之凍結方式則為介於單管與平板間之管列凍結，此管列凍結係以上述二種理論加以組合予以計算，即於凍結之初採用單管凍結理論，待各凍結管所形成之凍土接觸後則採用平板凍結理論，採用此管列凍結理論所計算之結果與實驗及實際之施工結果相當一致。

#### 4.1 凍結速度

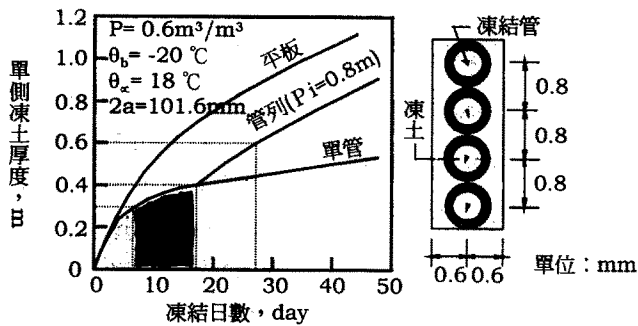
圖六為採用不同凍結理論計算所得之凍土成長曲線，由圖可知平板凍結之凍結速度較單管凍結為快，而管列凍結之凍結速度則介於二者之間。如前所述，實際施工之凍結方式為管列凍結，是以凍土之凍結速度可直接藉由圖六所示之管列凍土成長曲線而求得，即依據凍土區內凍結

表一 不同土層凍土強度一覽表(日本建設機械化協會，昭和56年)

土層種類	-10°C			-20°C		
	壓縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	彎曲強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	剪斷強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	壓縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	彎曲強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	剪斷強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
黏土層	20-40	15-20	15-20	45-60	20-30	20-30
砂土層	40-70	20-30	20-35	60-100	30-45	30-50

表二 飽和土熱性質(日本建設機械化協會，昭和56年)

容積含水率 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
飽和土濕密度 (kg/m <sup>3</sup> )	凍結前 r <sub>2</sub>	2440	2260	2080	1900	1720	1540
	凍結後 r <sub>1</sub>	2416.32	2224.48	2032.64	1840.80	1648.96	1457.12
飽和土比熱 (kcal/kg °C)	凍結前 C <sub>2</sub>	0.28393	0.32354	0.37	0.42526	0.49209	0.57455
	凍結後 C <sub>1</sub>	0.24043	0.25329	0.25858	0.28705	0.30982	0.33859
飽和土熱傳 導率(kcal/mh °C)	凍結前 λ <sub>2</sub>	2.1667	1.8702	1.6222	1.4101	1.2254	1.0624
	凍結後 λ <sub>1</sub>	2.7624	2.6307	2.5201	2.4146	2.3137	2.2158
飽和土溫度傳播率 (m <sup>2</sup> /h)(x10 <sup>-3</sup> )	凍結前 α <sub>2</sub>	3.1275	2.5577	2.1078	1.7452	1.4478	1.2007
	凍結後 α <sub>1</sub>	4.7549	4.6690	4.6162	4.5696	4.5288	4.4912
飽和土凍結潛熱 (kcal/kg)	6.5803	10.7216	15.6447	21.5939	28.9273	38.1918	

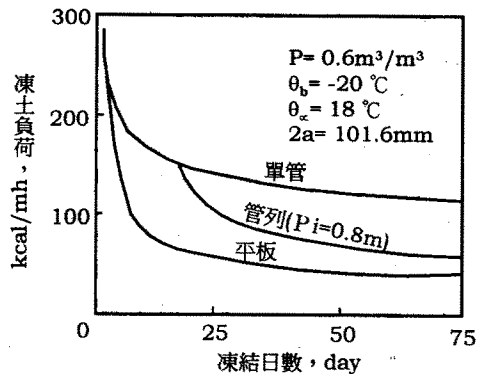


圖六 凍土成長示意圖

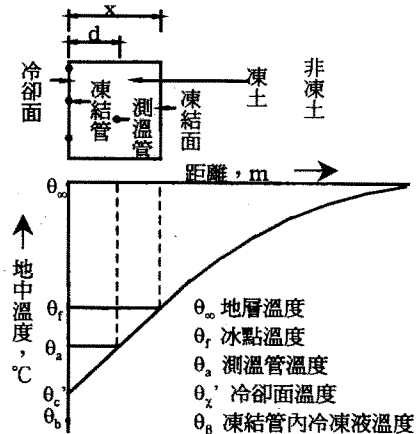
管排列方式，由形成設計凍土厚度所需之凍結管單側凍土厚求得凍結所需之時間。上述之管列凍土成長曲線則因土層內溫度( $\theta_{\infty}$ )、凍結管內冷凍液溫度( $\theta_b$ )、凍結管外徑( $2a$ )、土層容積含水率( $P$ )及凍結管埋設間距( $P_i$ )不同而有不同之結果。於土層溫度愈低、凍結管內冷凍液溫度愈低、凍結管外徑愈大、容積含水率愈低之情況下，其凍土成長速度愈快。當凍結管之埋設間距愈小，行為愈接近平板凍結，其凍結速度則愈快。

#### 4.2 凍結負荷

圖七為採用不同凍結理論計算所得之凍土負荷曲線，由圖可知凍土負荷在凍結開始時較大，隨著凍土之成長而減少。平板負荷最初比單管負荷的值大，但因凍土成長快，因此其負荷減少之比例亦大，一段時間後反而比單管負荷小。實際施工之管列凍結最初是單管負荷，管列間的凍土連結後，逐漸接近平板負荷。依冷凍施工時凍結所需之時間，藉由圖7求得凍結管單位長負荷，並由此凍結管單位長負荷及凍結管凍結長度求得凍土負荷，再考慮非凍結部負荷、配管負荷、開挖所造成之負荷等則可算出冷凍施工時所需凍結裝置的必要容量。



圖七 不同凍結理論下之凍土負荷曲線 (精研株式會社)



圖八 凍土與非凍土區溫度分佈曲線

#### 4.3 溫度分佈

地盤中凍土與非凍土區之溫度分佈曲線如圖八所示，由圖可知凍土區內凍土

之溫度係呈直線變化，非凍土區內之地盤溫度則呈非線性變化，至相當遠處等於地盤溫度，此地盤溫度則由地下水溫度直接測得。施作冷凍工法之地盤，其冷凍範圍將隨時間而成長，其成長情形則可藉由埋設於凍土區內測溫管所量測之地中溫度採用式(2)推估而得。至於凍土區內之凍土平均溫度則依凍結管排列方式採用表三之計算式加以計算而得。

$$X = d \theta_c' / (\theta_c' - \theta_a) \dots \dots \dots (2)$$

式中X 所形成凍土厚度，m

d 測溫管距凍結管距離，m

$\theta_c'$  管列冷卻面溫度， $^{\circ}\text{C}$

$\theta_a$  測溫管溫度， $^{\circ}\text{C}$

其中  $\theta_c'$  藉由式(3)(日本建設機械化協會，昭和56年)而求得

$$\theta_c' = \theta_b(1 + Mx) / 2 \dots \dots \dots (3)$$

式中  $\theta_b$  凍結管內冷凍液溫度， $^{\circ}\text{C}$

$$Mx = (A_1 + A_2) / (B_1 + B_2)$$

$$A_1 = \log(0.5a / \text{Pi}) \log(4m / 9)$$

$$A_2 = \log(1.5a / \text{Pi}) \log(4n)$$

$$B_1 = \log(m / 2) \log(n / 2)$$

$$B_2 = -\log((m\text{Pi}) / (3a)) \log(n\text{Pi} / a)$$

$$m = (X^2 + (1.5\text{Pi})^2) / \text{Pi}^2$$

$$n = (X^2 + (0.5\text{Pi})^2) / \text{Pi}^2$$

a 凍結管半徑，m

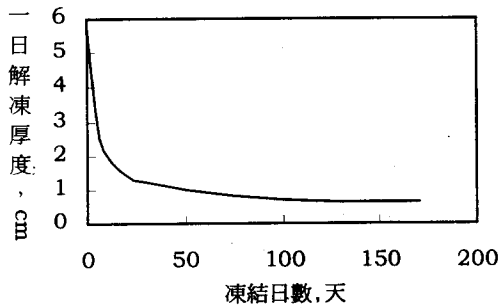
Pi 凍結管埋設間距，m

#### 4.4 解凍速度

凍土之自然解凍速度係依平板解凍理論求得，其解凍速度依凍結時的冷卻溫度與凍結時間而定，冷卻溫度愈低、凍結時間愈久則解凍速度愈慢。由圖九之解凍速度曲線得知，地盤凍結50日後予以解凍，其一日之解凍厚度僅為1cm。一般而言，凍土之自然解凍速度是極為緩慢的，是以，凍結維持期間因短暫停電或機械故障所導致冷卻中斷之影響可以不必顧慮。

表三 有效凍土厚度與凍土平均溫度計算方式一覽表(日本建設機械化協會，昭和56年)

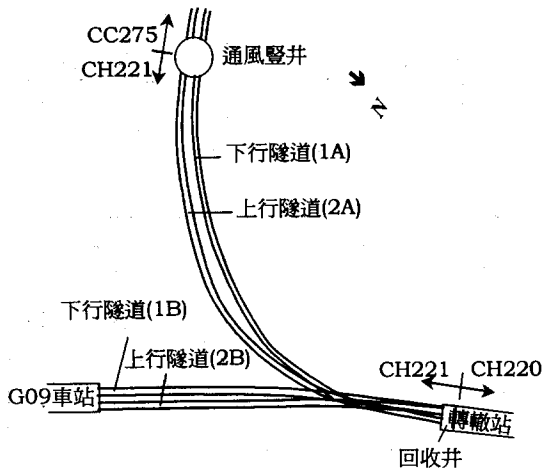
狀況	一列凍結管		二列凍結管
平面圖			
溫度分佈			
有效凍土厚度	$X_0 + X_1$	$X_0 + X_1$	$X_0 + l + X_1$
凍土平均溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\frac{1}{2}(\theta_c' + \theta_e)$		$\frac{(\theta_c' + \theta_e)(X_0 + X_1) + 2\theta_c' \cdot l}{2(X_0 + X_1 + l)}$



圖九 凍土解凍速度曲線(精研株式會社)

### 五、施工案例

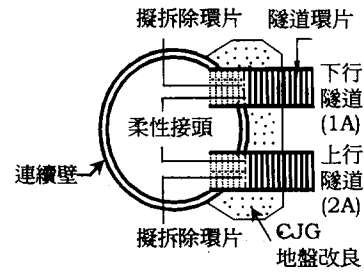
本文所探討之冷凍工法施工案例，其基地位於台北市兒童交通公園內西北角，水源路與師大路交叉路口東南側之通風豎井處，位置如圖十及圖十二。此通風豎井位於台北捷運系統新店線CH221標與中和線CC275標之介面，並銜接此二施工標之潛盾隧道。因CH221標承商進行通風豎井與該標2A潛盾隧道銜接處之柔性接頭施工時發生湧水災變，損及已施工完成之部份2A潛盾隧道環片，而採用冷凍工法進行受損環片之更換工作。



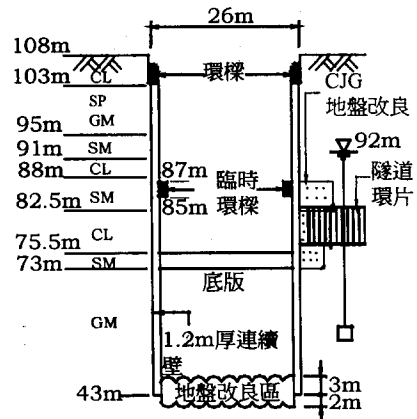
圖十 通風豎井平面位置圖

### 5.1 災變現況

圖十一(a)為CH221標柔性接頭位置之所在，此柔性接頭係設置於通風豎井與潛盾隧道銜接處，以避免地震發生時損及其結構。此柔性接頭之施工係於1A、2A、1B與2B四條潛盾隧道(位置如圖十)施作完畢後進行，施作時必需拆除通風豎井連續壁外側局部之隧道環片(隧道外徑為6.1m)，並進行擴挖(直徑約7m)。CH221標承商於1A及2A潛盾隧道施作前即於此二條隧道洞口處採用CJG工法進行地盤改良(範圍如圖十一(a)及圖十一(b))，以確保1A及2A潛盾隧道出發與柔性接頭施工時之安全。



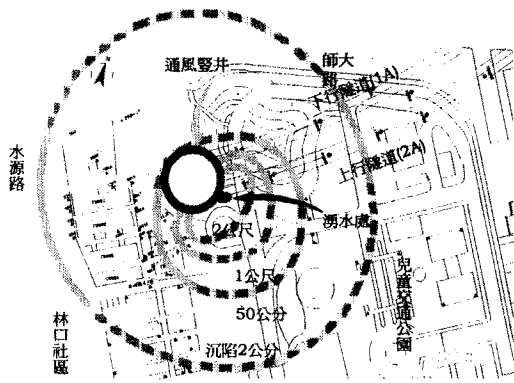
(a) 平面圖



(b) 剖面圖

圖十一 通風豎井與 CH221 標隧道銜接處施工狀況示意圖

CH221標承商施作柔性接頭期間，於2A潛盾隧道已拆除環片處發生湧水。大量土砂與水湧入通風豎井內，並導致鄰近地層與建物發生嚴重下陷，其湧水位置與沉陷影響範圍如圖十二所示。承商為防止災情擴大，於災變發生時於通風豎井內進行填砂與灌水。此時CC275標潛盾隧道尚未進行鑽掘，而1A、2A、1B與2B四條潛盾隧道及G09車站已完工並相連通，1A潛盾隧道柔性接頭已完成擴孔、噴凝土及鋼筋組立，而2A潛盾隧道柔性接頭則只完成擴孔及噴凝土作業。因此次湧水而導致通風豎井、1A與2A潛盾隧道為土砂所淹沒，甚至波及回收井及1B潛盾隧道，因CH220標轉徵站與回收井間為連續壁所隔離，故並未受到波及。為防止水持續溢流至1B潛盾隧道，承商藉由抽水(抽水量約為0~250 t/min)將通風豎井內之水位維持在地表下17m，即高程91m處(較景美礫石層內地下水水位低1m)。

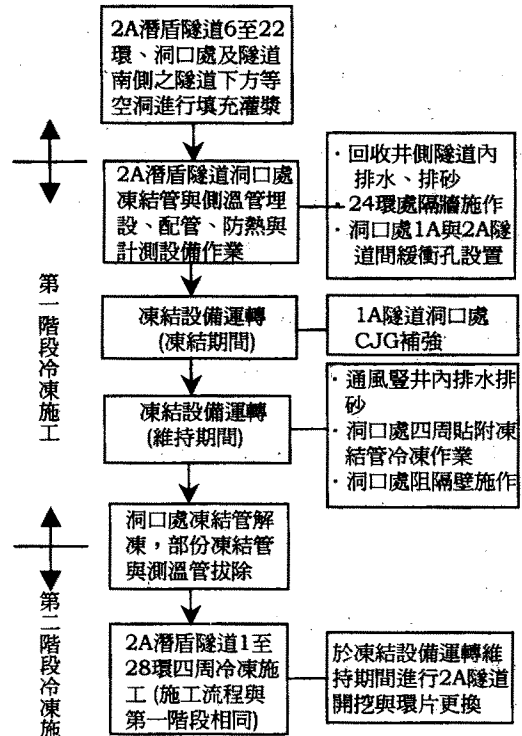


圖十二 湧水位置圖與災變發生後沉陷影響範圍

## 5.2 復舊工作

CH221標承商於控制災情後，隨即進行通風豎井附近地盤之填充灌漿，並進行通風豎井與1A、2A潛盾隧道結構體受損

狀況之確認，得知除2A潛盾隧道1至20環之環片(每環環片寬度為1m)已受損外，判斷其餘結構體應未受損。圖十三為受損環片更換施工流程，以下僅就圖十三所列二階段冷凍工法施工細節作探討，其他相關措施在此不作贅述。



圖十三 2A潛盾隧道受損環片更換施工流程

### 5.2.1 第一階段冷凍施工

本階段冷凍施工之主要目的，在將通風豎井與2A潛盾隧道銜接處洞口之地盤，以冷凍工法加以固結，形成凍土牆，以便進行通風豎井內土砂與水之清除，以及2A潛盾隧道洞口處阻隔壁之施作。

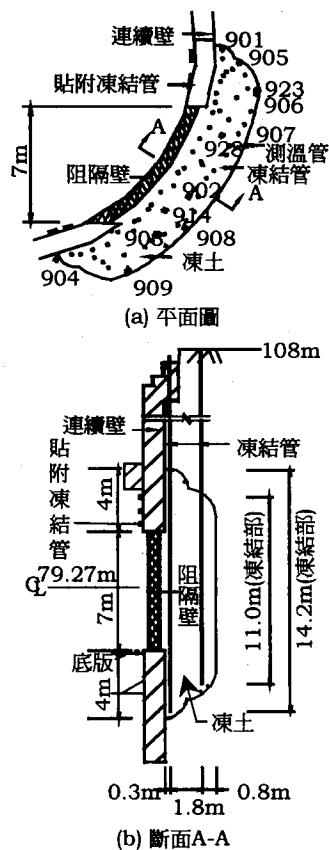
為達到本階段冷凍施工之目的，2A潛盾隧道洞口處凍土牆之厚度至少需2.9m，凍土平均溫度則需維持在-10℃以下，此凍土牆並由隧道洞口開口部外緣往上下左右各延伸4m，範圍如圖十四所示。

此2.9m厚之凍土牆，係藉由埋設於洞口處之垂直凍結管，經其管內冷凍液之循環加以冷凍形成。其凍土成長情形則藉由埋設於凍土牆擬凍結範圍內測溫管內溫度之量測結果加以確認，同時由通風豎井內洞口處地下水流狀況，瞭解其水密性，並以此決定進行通風豎井內土砂與水清除之時機。於進行通風豎井內土砂與水清除期間，持續維持洞口處凍土牆之凍結作業，並隨開挖之進行於洞口四周連續壁壁面上安裝貼附凍結管，並進行其凍結作業，以此加強凍土牆凍結效果。

埋設於洞口處之垂直凍結管係規劃配置於洞口處距連續壁0.3m與2.1m處，各排凍結管之凍結管間距則為0.8m。測溫管則主要配置於二排凍結管間(編號902、903、914與928之測溫管)與外圍凍結管外側(編號901、904至909與923之測溫管)。因洞口處崩坍後複雜之狀況，進行凍結管與測溫管埋設之鑽孔作業時易發生偏移，導致其實際埋設位置與原先規劃位置有所出入，圖十四為本階段凍結管與測溫管實際裝設情形，裝設數量則示於表四。

本階段冷凍施工係採用第2節所述之間接方式進行，冷凍施工期間所採用之凍結設備、凍土之體積及各凍結作業所使用之時間亦示於表4。凍結設備運轉後冷凍液溫度於12日內由-15°C逐漸下降至-30°C至-34°C間，其後並維持此溫度直至凍結設備運轉停止。凍結設備運轉期間大氣中之溫度則介於14°C至22°C間。

凍結設備運轉前，2A潛盾隧道洞口處地層之溫度約為24°C左右，圖十五與圖十六分別為埋設於二排凍結管間與外圍凍結管外側測溫管內溫度於凍結設備運轉41日之量測結果，顯示埋設於二排凍結管



圖十四 2A隧道洞口處凍土範圍與凍結管、測溫管裝設示意圖

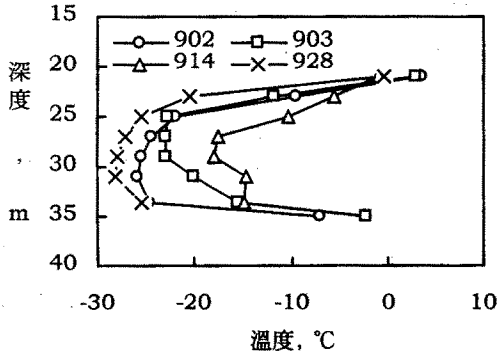
間測溫管內溫度之量測值明顯較埋設於外圍凍結管外側測溫管內溫度之量測值為低，可知二排凍結管間凍土成長較凍土牆外緣為快。上述二區域內各測溫管內溫度之量測值，因距凍結管距離之不同而呈現明顯之差異，由各支測溫管內溫度之量測值與其埋設位置推估，凍土牆之凍結範圍與凍土平均溫度於凍結設備運轉41日已達設計之要求。

凍土牆於凍結設備運轉41日確實亦已達水密性之效果，此可由(1)並不需進行抽水以維持通風豎井內之水位，與(2)通風豎井內2A潛盾隧道洞口處地層溫度隨時間而穩定下降獲得證實。

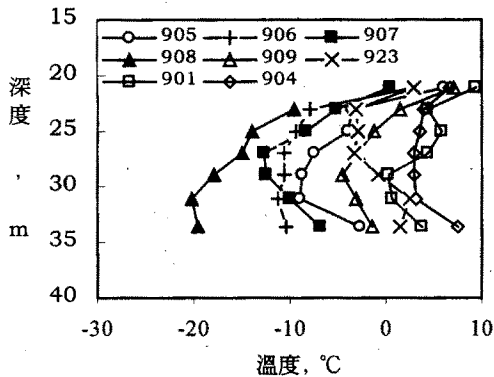
表四 各階段冷凍施工相關資料一覽表

施工階段	凍結管(支)			測溫管(支)		凍結作業(日)			凍結設備(台)			凍土 體積 (m <sup>3</sup> )
	垂直	水平	貼附	垂直	水平	前置 作業	凍結設備運轉		150KW型	75KW型	37KW型	
							凍結	維持				
第一階段	56	0	150	12	0	55	41	69	1	1	0	530
第二階段	55	38	96	11	10	67	87	105	1	1	1	2000

說明:1.前置作業包括凍結管與測溫管埋設,配管、防熱與計測設備作業等  
2.垂直凍結管外徑為101.6mm,水平凍結管外徑為114.3mm,貼附凍結管口徑為100mmx50mm

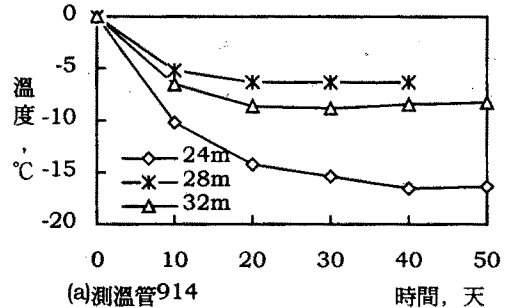


圖十五 二排凍結管間測溫管內溫度量測結果  
(第一階段凍結設備運轉41日)

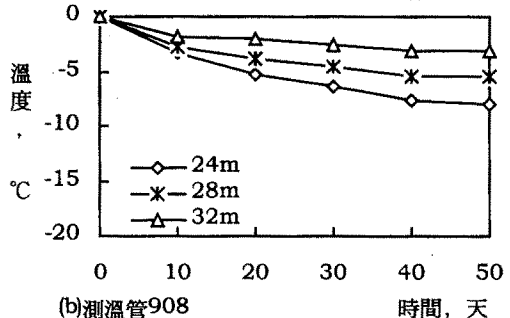


圖十六 外圍凍結管外側測溫管內溫度量測結果  
(第一階段凍結設備運轉41日)

本階段凍結設備運轉41日以後,即凍結設備運轉維持期間,測溫管內之溫度仍隨時間而逐漸降低,其溫度降低之情形如圖17所示,顯示凍土牆凍結範圍仍持續成長。於此凍結設備運轉維持期間順利完成通風豎井內土砂與水之清除及2A潛盾隧道洞口處阻隔壁之施作。



(a)測溫管914



(b)測溫管908

圖十七 測溫管內溫度於凍結設備運轉維持期間變化情形(第一階段)

### 5.2.2 第二階段冷凍施工

本階段冷凍施工係於2A潛盾隧道洞口處阻隔壁施作完成,第一階段凍結管解凍與部份凍結管拔除後進行。其施作之主要目的,在將2A潛盾隧道擬更換環片外圍之地盤,以冷凍工法加以固結,形成凍土環,以便進行受損環片更換之施工。

為達到本階段冷凍施工之目的,2A潛盾隧道擬更換環片外圍之凍土環厚度至少需2.5m,凍土平均溫度則需維持在-12°C以下,此凍土環之凍土範圍如圖十八所示。此2.5m厚之凍土環,係藉由埋設於

隧道南側之垂直凍結管、隧道四周之水平凍結管、及裝設於隧道25環至28環環片內側上與通風豎井內洞口處四周連續壁上之貼附凍結管，經其管內冷凍液之循環加以冷凍形成。並藉由埋設於凍土環擬凍結範圍內測溫管內溫度之量測結果，確認凍土環成長情形，同時由隧道內滲水狀況，瞭解凍土環之水密性，以此決定進行2A潛盾隧道受損環片更換開挖之時機。於隧道開挖期間並持續維持此凍結作業至受損環片更換施作完畢為止。

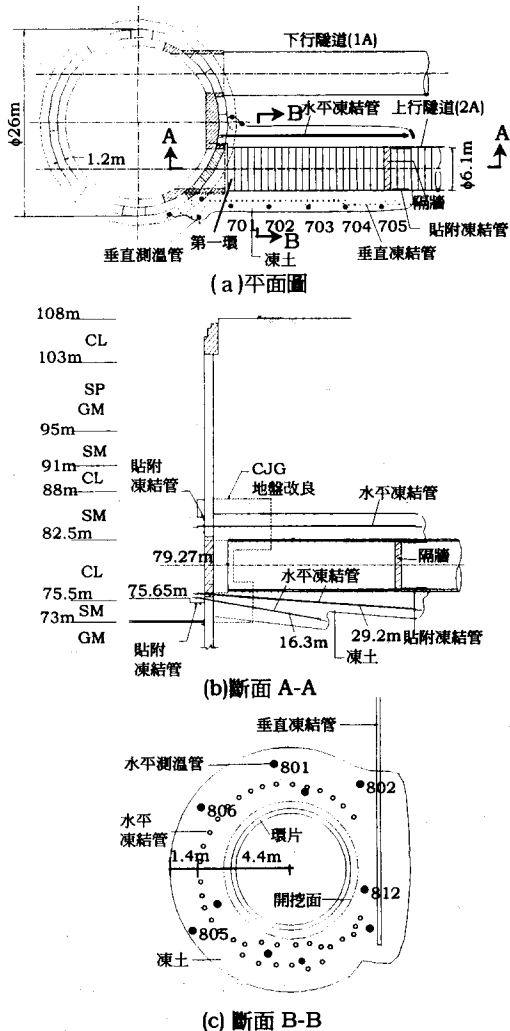
埋設於受損環片四周之水平凍結管與南側之垂直凍結管係配置於距隧道中心4.4m處，間距則為0.8m。位於隧道底部之水平凍結管則因底版妨礙施工，而變更施作角度，並增設一排水平凍結管。測溫管則依需求配置於凍土環擬凍結範圍內。圖十八為本階段凍結管與測溫管實際裝設情形，裝設數量則示於表四。

本階段冷凍施工所採用之冷凍方式及凍結作業項目與第一階段相同，冷凍施工期間所採用之凍結設備、凍土之體積與各凍結作業所使用之時間亦示於表4。凍結設備運轉後冷凍液溫度於50日內由-5°C逐漸下降至-26°C至-29°C間，其後並維持此溫度直至凍結設備運轉停止。凍結設備運轉期間大氣中之溫度則介於21°C至25°C間。

凍結設備運轉前，2A潛盾隧道擬更換環片四周地層之溫度約為24°C左右，圖十九與圖二十為配置於凍土環外緣之部份垂直測溫管(編號701至705之測溫管)與水平測溫管(編號801、802、805、806、812之測溫管)，於凍結設備運轉87日之量測結果，顯示測溫管內之溫度量測值因距凍結管距離之不同而呈現明顯之差異。由各支測溫管內溫度之量測值與其埋設位置推估，凍土環之凍結範圍與凍土平均溫度於凍結設備運轉87日已達設計之要求。

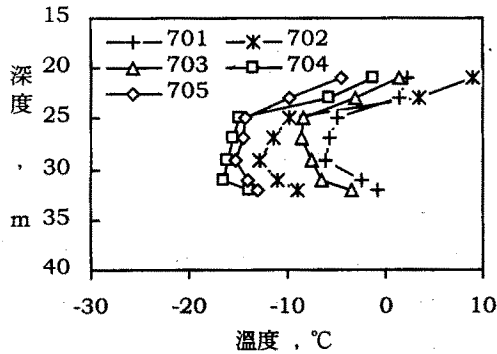
待凍結設備運轉87日，於2A潛盾隧道中央高程80.2m處鑽掘26.5m長試水孔，得知並無滲水發生，顯示凍土環已達水密性之效果。

本階段凍結設備運轉87日以後，即凍結設備運轉維持期間，測溫管內之溫度仍隨時間而逐漸降低，其溫度降低之情形如圖二十一所示，顯示凍土環凍結範圍仍持

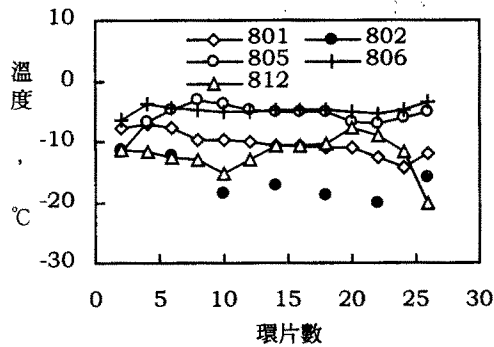


圖十八 2A隧道凍土範圍與凍結管、測溫管裝設示意圖

續成長。於此凍結設備運轉維持期間進行開挖，並於隧道上方加設隔熱材料，順利完成開挖作業及受損環片更換之施工。



圖十九 凍土環外緣垂直測溫管內溫度量測結果(第二階段凍結設備運轉87日)

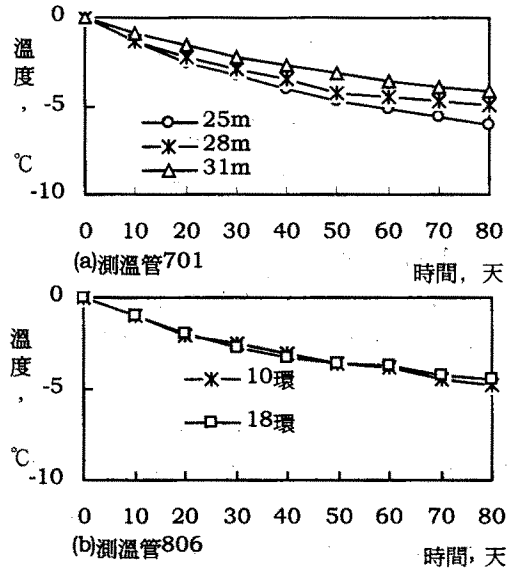


圖二十 凍土環外緣水平測溫管內溫度量測結果(第二階段凍結設備運轉87日)

### 5.2.3 設計與施工考量

上述冷凍施工案例中所採用垂直凍結管/測溫管與水平凍結管/測溫管係分別由地面上與豎井內進行鑽孔予以埋設，埋設精度則控制在1/150以內。為達到案例中冷凍施工目的所需之最小凍土厚度，已將此因鑽孔施作所導致之最大容許偏移量納入考量，計算此凍土厚度所採用之安全係數則為2。

至於形成本案例設計凍土厚度所需凍結時間與凍結設備之預估值，係於施工前分別藉由管列凍結理論計算所得之凍



圖二十一 測溫管內溫度於凍結設備運轉維持期間變化情形(第二階段)

土成長與負荷曲線( $P=0.6\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $\theta_b=-25^\circ\text{C}$ 、 $\theta_\infty=24^\circ\text{C}$ 、 $P_i=0.8\text{m}$ 、 $2a=101.6\text{mm}$ 或 $114.3\text{mm}$ )而求得，其中形成第一與第二階段設計凍土厚度所需之預估時間係考慮單側凍土厚度分別為 $0.8\text{m}$ 與 $1.4\text{m}$ 時求得。表4所列形成本施工案例二個階段設計凍土厚度所需之實際凍結時間及凍結設備與施工前之預估結果相符。因第一階段之凍土體積較小，凍結管內冷凍液之初始溫度則較低，此階段冷凍液溫度並降至 $-30^\circ\text{C}$ 至 $-34^\circ\text{C}$ 之間，以加強確保此階段施工安全。

為確保所採用凍結管能達到預期效果，乃於凍結管裝設完成後，於管內施加 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 壓力，並持續維持此壓力6小時，以此方式檢驗凍結管之水密性，以免冷凍施工期間因冷凍液外洩，造成土壤無法凍結的情形，影響到凍土牆之止水能力。待凍結作業施作完畢後，將垂直凍結管與測溫管予以拔除，水平凍結管與測溫管則留置於原地，以水泥漿填充之。

## 六、結論

由本文所探討台北捷運系統新店線CH221標採用冷凍工法處理災變之經驗可獲得以下結論：

1. 採用冷凍工法施工時，形成設計凍土厚度所需之凍結時間與凍結設備可於施工前藉由管列凍結理論計算所得之凍土成長與負荷曲線求得。

2. 採用冷凍工法施工時，凍土隨時間而持續成長，其成長情形可於施工期間藉由埋設於凍土區內測溫管內溫度之量測值加以確認，其施工之安全性頗高。

3. 冷凍工法提供大地工程師處理問題之另一種選擇方案。

## 誌謝

本文承蒙承商青木/新亞，專業分包商精研株式會社吉田龍夫提供資料，亞新

工程顧問公司莫若楫博士、黃南輝博士、姚義久博士與大同工學院鄭金祥教授提供寶貴意見，在此深表謝忱。

## 參考文獻

社團法人日本建設機械化協會，地盤凍結工法-計劃、設計與施工。

青木建設株式會社/新亞建設聯合承攬，“V/S災害復舊工程排水、排土、環片更換防護凍結工施工計劃書”。

精研株式會社，ARTIFICIAL SOIL FREEZING。

精研株式會社，地盤凍結工法。