

台北捷運 CN253B 標潛盾隧道穿越 北門古蹟下方之保護措施

李正剛、彭盛昌
財團法人中華顧問工程司

闕河淵、吳沛軫
台北市政府捷運工程局

摘要

北門為國家一級古蹟，台北捷運南港線 CN253B 標連接中華路及忠孝西路二重要交通路段，於此道路下方構築潛盾隧道而穿越北門古蹟。此區域建物除北門外，亦包括高架橋匝道及民房。經過縝密之路線研選後，雖採最小之隧道曲率半徑設計，儘量避開北門以減少對該結構物影響，但仍不免侵入北門基礎下方 70 公分範圍。

由於北門係一相當重要文化資產，細部設計階段即審慎進行最佳保護方案之規劃、研選與評估，決定採用高壓噴射灌漿(JSG)土壤改良法以阻隔潛盾施工對北門所可能引致之負面影響；並在施工階段依循設計考量重點妥善計劃各項施工細節及嚴密監控，克服施工期間不可預期的問題與地盤反應行為所造成之沉陷，文中將簡述施工過程所遭遇之問題及其因應對策。在潛盾上、下行隧道分別通過後，北門發生的累積最大沉陷量僅 21mm，在嚴謹要求的安全標準範圍內，有此一成果誠屬不易，是台灣地區首次兼顧古蹟保護與施工建設之成功案例。

關鍵字：高壓噴射灌漿，建物保護，支撐系統，潛盾隧道。

THE NORTH GATE MONUMENT PROTECTIVE MEASURES FOR THE SHIELD TUNNEL UNDERNEATH THE NORTH GATE TAIPEI MRT CONTRACT CN253B

LEE J. K. PERNG S. C.
China Engineering Consultants, Inc.

CHUAY H. Y. WU P. J.
Department of Rapid Transit System Taipei City Government

ABSTRACT

The North Gate is a class 1 national historical monument which is located around the intersection of Chung-hwa Road and Chung-hsiao west Road. Taipei MRT Nankang line construction contract CN253B was planned to go underneath the vicinity of North Gate. For preservation purpose, the shield tunnel construction method was used. The near by also includes elevated highway ramps and some private-owned buildings. With a careful alignment study, a minimum tunnel radius standard was chosen to minimize the impact to the North Gate and other near by structures. However, the shield tunnels pass area underneath 70cm of the North Gate foundation can not be avoided.

Due to the importance of the North Gate, a building protection planning and evaluation study was conducted during the earlier detailed design stage. The JSG method of soil improvement was applied to isolate the negative impact from construction of shield tunnel method. During construction stage, the concept in design stage was implemented and settlement due to construction was controlled. This paper depicts the problems and solutions during construction. After the shield tunnels were completed, the cumulative maximum settlement of North Gate was less than 21mm and very small under the strict criteria. This is the first successful construction case which also took good care of historical monument.

KEY WORDS : jet grouting, building protection, shoring system, shield tunnel.

一、前言

台北捷運南港線 CN253B 標潛盾隧道沿著中華路進入忠孝西路，並通過北門東南隅。北門為內政部於民國七十二年十二月公布指定之第一級古蹟，而北門所在位置之地層屬台北盆地松山層之粉質粘土、及粉質砂土互層，且其基礎型式為淺基礎，係構築於松六層之軟弱土層上，為避免潛盾通過造成北門結構體損傷，乃以地盤改良方式隔絕潛盾挖掘造成之影響，達到間接保護北門的目的。此外為使得北門結構體不致發生無法復原之損傷情事，為審慎計於北門四周設置支撐增加一層防護措施，除可加強確保其安全外，亦可於遭逢不可預期之狀況時，得以爭取應變處置的時間。

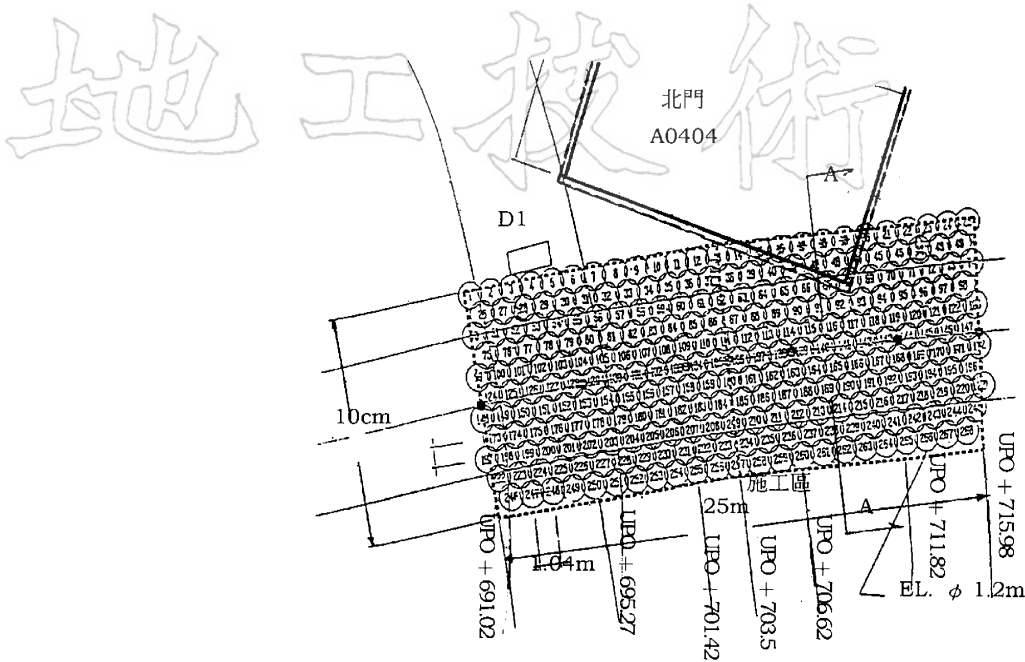
捷運南港線 CN253B 標潛盾隧道呈

上、下重疊形式通過北門東南隅，下行隧道已於 84 年 6 月順利通過，上行隧道亦於 85 年 1 月底挖掘通過完成，本文將從設計階段之建物保護方案評估、選定，至施工歷程、施工成果及所遭遇之狀況與採行之因應措施等，分別予以說明。

二、設計考慮

2.1 潛盾通過北門造成之影響

潛盾隧道通過北門東南隅，其上行隧道之最小覆土深度約為 7.2m（詳圖一及圖二），為避免潛盾機挖掘過程中所可能引致之地層變位及地表沈陷危害北門，須控制施工使地層之受擾程度減至最低，且造成之沈陷量在建物容許範圍內，為達到以上目的，除慎選潛盾機型式及挖掘方式外，並在施工作業時，尚須注意開挖面穩定、土倉壓力管理及背填灌漿是否確實填



圖一 北門 JSG 改良平面圖(台北市政府捷運局中工處, 民國 84 年)

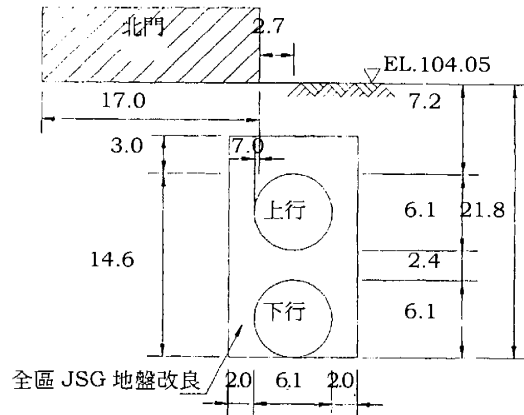
充環片與土壤間隙。

在設計階段會針對地盤未改良情況下以電腦程式模擬分析潛盾通過後, 對北門之影響, 分析程式使用 MISES 3 套裝軟體, 土壤性質特性材料模式採 Mohr-Coulomb 模式, 以有限元素法方式進行, 由分析結果顯示北門預估發生之最大沈陷量與角變量達到 84mm 與 1/222, 已超過容許管理值 25mm 與 1/500, 故必須採取保護措施以維北門安全。

2.2 北門保護方案評估

潛盾隧道沿線施工影響所及之建物保護方式種類繁多, 主要視地質狀況、建物基礎形式、隧道施工方式及輔助工法等, 來決定最適當保護方案。細部設計顧問公司參酌在日本常用之建物保護方式, 研擬數種方案加以進行可行性分析, 比較後選取一最佳保護方案。

經綜合評估各種保護方式, 以高壓噴



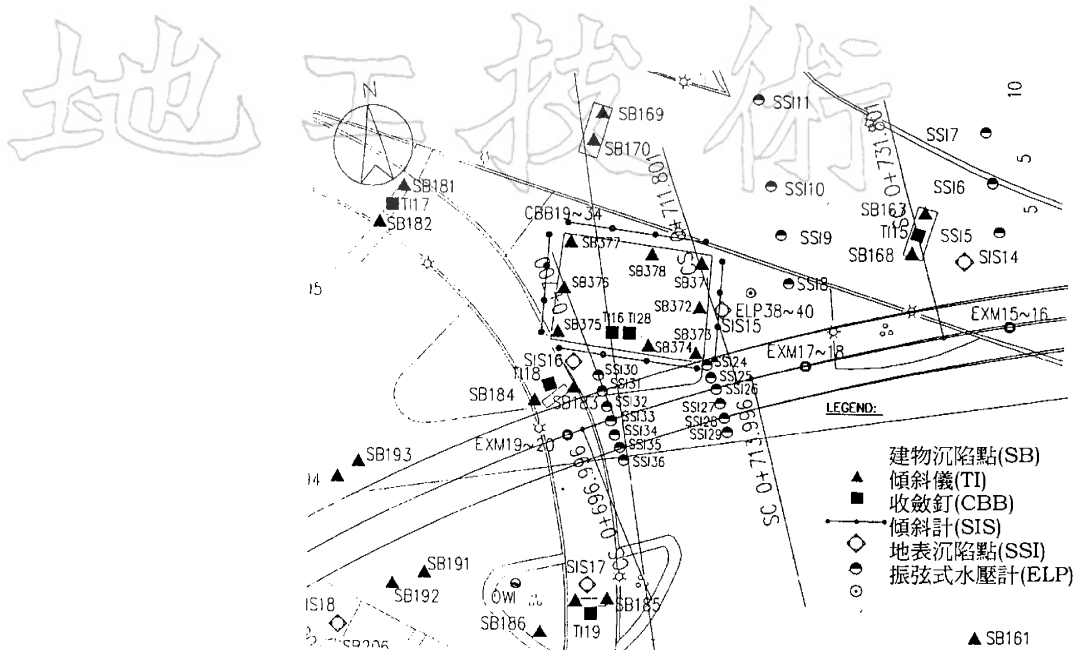
圖二 北門 JSG 改良剖面圖(台北市政府捷運局中工處, 民國 84 年)

射灌漿工法較能符合北門現況要求, 評估過程之細節說明, 請參考林軒, 林正記(民國 81 年)。

2.3 監測系統擬定

2.3.1 監測目的

監測系統設置主要目的為嚴密掌握北



圖三 北門監測儀器位置圖

門建物與鄰近其他構造物於施工期間之反應行為及異狀，並監控潛盾施工，藉量測建物沉陷傾斜狀況、地層變動情形及隧道變形量，評析、預測可能產生之問題，並回饋修正施工方式或採行輔助措施以達到確實保護北門古蹟與施工安全之目的。

2.3.2 監測儀器配置

為達到上述之目的，監測儀器設計配置之平面圖，如圖三所示，其主要之監測儀器配置項目概述如后。

(1) 建物沉陷點 (Building Settlement Reference Points) – 配置於北門建物四周與其他鄰近構造物藉以了解其沉陷量。

(2) 傾斜儀 (Tiltmeter) – 配置於北門與其他鄰近構造物，可量測施工過程中該等結構所發生之傾斜量。

(3) 傾斜計 (Inclinometer Casing in Earth) – 在北門與潛盾隧道之間設置，可監測地層所產生之側向變形量，以了解潛盾挖掘對地盤穩定性之影響並可據以預估

地表沉陷量及沉陷影響範圍。

(4) 地表沉陷點 (Settlement Reference Points, Shallow Substructure Type) – 在潛盾隧道穿越北門前後端各設置一排，可了解地表在潛盾施工時造成之土壤漏失 (Ground loss) 所導致之地表沉陷情況。

(5) 水壓計 (Piezometer) – 監測地下水之高程。

(6) 多段式伸縮儀 (Multiple Position Rod Extensometer) – 可在同一地點同時量測不同深度之沉陷量，藉以掌握各層次所產生之沉陷量，以確定施工期間沉陷變化之主要影響層次與範圍，做為應變處理之參考依據。

(7) 支撐應變計 (Strain Gage) – 使用於北門保護之輔助支撐系統，可以了解實際支撐軸力反應，支撐雖可維護突發異狀時之北門結構體完整性，若支撐力過大亦有可能損傷北門結構，仍需予以嚴謹監測管理。

表一 北門監測管理值(摘自郭正道等, 民國 80 年)

監測項目	監測儀器種類	警戒值	行動值	
地下水位及水壓力	水壓計(Piezometer)	-1.0m	-2.0m	
	水位觀測井(Observation Well)	-1.0m	-2.0m	
建物位移	地表沉陷點(Settlement Reference Points, Shallow)	45mm	60mm	
	建物沉陷點 (Settlement Reference Points)	磚造結構(for Brick, Masonry, Structures)	20mm	25mm
	多段式伸縮儀(Multiple Position Rod Extensometer)	40mm	50mm	
	傾斜儀(Tiltmeter)	4.0min. of arc	6.0min. of arc	
	裂縫計(Crack Gauge)	1mm	2mm	
	傾斜計(Inclinometer Casing In Earth)	30mm	40mm	
收斂	收斂觀測點(Tape Extensometer -Convergence Points)	變化量超過 10mm	變化量超過 15mm	

2.3.3 監測安全之管理值

如前所述監測資料可了解潛盾隧道施工對於北門影響程度，為謹慎安全計，各監測儀器讀值依其所代表之安全界限意義之不同，將其管理值分為二階段，第一階段為達到警戒值階段後，立即檢討形成原因，並擬定應變計劃因應，第二階段則為達到行動值階段，達到此設定標準時，立即採取應變計劃中所擬定之措施，各監測資料之管理值，參考表一所列。

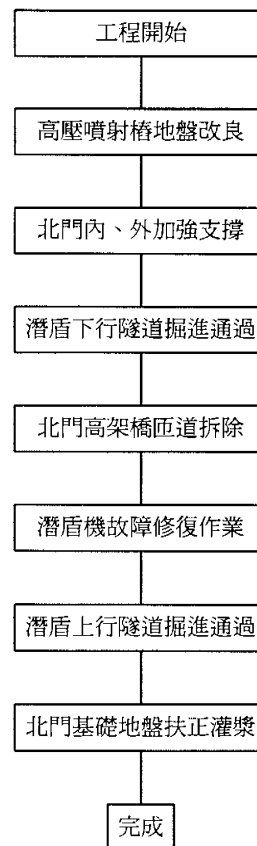
三、施工階段歷程與處理方式

施工階段主要歷程詳表二，其中除北門高架匝道拆除作業不屬本工程範圍外，其餘歷程分述如下。

3.1 高壓噴射樁(JSG)地盤改良階段

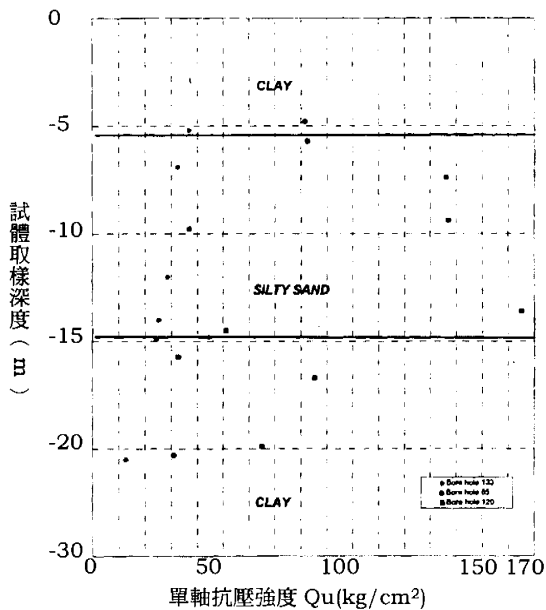
高壓噴射樁之設計強度為 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上，於施工階段所定之改良目的強度在砂土層為 $30\text{kg}/\text{cm}^2$ ，粘土層為 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上，均較設計所規定強度為高。

表二 施工階段主要歷程



改良土壤範圍約在 $25\text{m} \times 10\text{m}$ 區間（詳圖一），深度則從地表面下 4.2m 至 21.8m （詳圖二），高壓噴射樁徑取 1200ϕ ，總計 268 支高壓噴射樁，施工期間為避免灌注漿液自北門底部溢出，在鄰北門牆角斜灌部分設置套管導引鑽灌用水及漿液自套管溢出。

改良完成之土體強度檢驗，係以現場鑽孔取樣作單軸抗壓強度試驗，總計採取完成三組試驗，每組有 6 個試體，由試驗結果顯示改良後 28 天土體強度皆超過原先規劃強度（詳圖四），砂質土層較粘土層改良强度高，另一方面淺層土層因水泥回漿量關係導致水泥含量高，形成强度高亦為其另一特性。

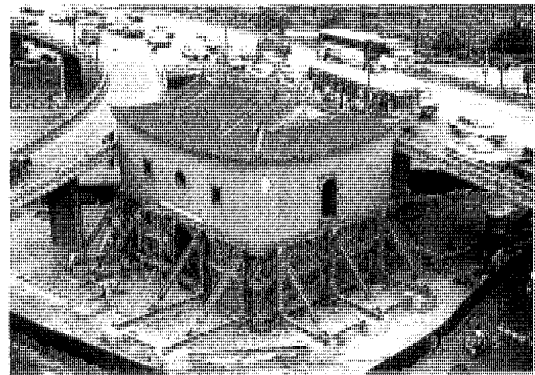


圖四 JSG 地盤改良強度

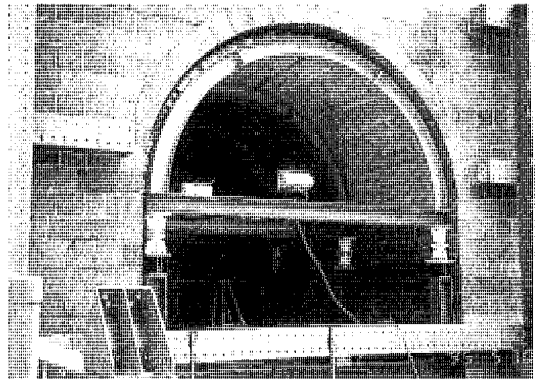
3.2 北門內、外加強支撐階段

北門鋼支撐分內支撐及外支撐，內支撐設置於北門通道內，主要功能在緊急時能托撐北門結構體自重，為保護及分散型鋼作用於北門牆體應力故排置木製角材於

牆面上，並在與牆面接觸介面以保麗龍材料貼附保護；外支撐設置於北門城牆四周（詳照片一），內支撐則於拱門內架設（詳照片二），外支撐採用型鋼斜撐方式，然為避免支撐作用力損傷北門牆體，故佈設木襯版及保麗龍於其接觸面，支撐基礎採用剛性較低獨立基腳之淺基礎方式固定，並以繫材連結各基礎以增加基礎抵抗水平推力之能力，其優點在於提供應變時間，利於北門遭逢突發之急劇變化時妥為因應處理。由於淺基礎特性使支撐軸力得以逐漸消散不致因支撐受力過大而影響北門結構安全。



照片一 北門與鄰近建物照片



照片二 北門拱門內支撐照片(台北市政府捷運局中工處，民國 84 年)

以上之構想，在潛盾通過上行隧道階段，後續所做的因應措施，如止水灌漿、

扶正地盤灌漿以及北門沉陷量等均造成支撐軸力短暫上揚現象，爾後支撐軸力即陸續下降，但已有足夠時間完成應變措施達到原先預期目標。

3.3 潛盾挖掘階段

在 JSG 改良灌漿及支撐前置作業完成後，潛盾挖掘工作隨即展開，潛盾隧道施工首先必須依據地質條件及施工需求決定潛盾機種，再配合適切之工程管理及足夠因應突發狀況之能力。

預計潛盾掘進對北門影響範圍約在其東南隅前後各 25 公尺之間，在潛盾施工期間密集觀測監測資料，並每日檢討及追蹤其變化趨勢，下行隧道於 84 年 6 月順利通過北門下方，上行隧道亦於 85 年 1 月通過。在通過北門(85 年 1 月 29 日)影響範圍時，北門累計之最大沉陷量約 19mm，略小於警戒值 20mm 及行動值 25mm。之後雖有微小之沉陷增量，但其變化量已緩和並有趨向穩定之趨勢，皆在預期之安全範圍內。雖言施工成果與監控工作都甚良好，但施工期間遭遇之困難，仍需配合採用多項輔助措施方得以達成任務，以下分別說明主要之施工措施。

3.3.1 潛盾機選擇

潛盾機的選擇必須考慮地質狀況、隧道外徑、路線線形、抗水壓及防水機制、鄰房及地中障礙物及施工環境等因素，由於考量因素眾多，故須作功能需求整體評估後，才可選定妥恰當之施工機具。

(1) 潛盾機型評估

(a). 本工程之施工環境特性

潛盾上行線通過地區大致上為鬆散之粉質砂土，掘削面易產生崩落，下行線則為粉質粘土；地下水位高，在下行隧道水壓大致維持在 $15 \text{ t/m}^2 \sim 19 \text{ t/m}^2$ 範圍內。本

工程另一特性即為北門古蹟須予以審慎保護，以致在選擇潛盾機械時，必須考慮以上工程特性以確保施工及北門安全。

(b). 潛盾機選定

為符合施工環境特性之要求，潛盾機機能必須具有防水能力、開挖面之安定性及輔助工法施作之便利性，在上述條件下不適合開放式機型，而須採用密閉式機型。至於密閉型中又以土壓平衡式及泥水加壓式較能符本工程需求，在考量施工管理簡便性、地面附屬裝置簡易、無需擴大工作井用地及經濟因素情形下，決定採用土壓平衡式潛盾機較符合以上條件。

(2). 輔助設備

(a). 自動立即背填灌漿設備

潛盾機推進後，盾尾與環片間會產生間隙，此一間隙填充之密實度良窳，將影響地表沉陷量之大小，最理想之注入時機即為盾尾推進時同時注入，為達到此一目的，乃配置自動背填灌漿設備，使能及時背填灌漿，並且能夠全程自動記錄灌漿量、壓力，檢核與監控實際灌漿量，以及必要時修正其理論設定值。

(b). 崩坍檢測裝置

在掘進階段時，開挖面之穩定對地表沉陷量亦有直接影響，為隨時了解開挖面之穩定性，遂於機頭土倉壁上裝設土壓計，藉由土壓計測讀值之有效管理，以確實掌握開挖面土、水壓維持平衡穩定之狀況。

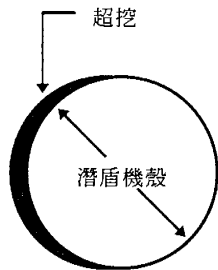
(c). 超挖裝置

本工程最小曲率半徑為 200 公尺，潛盾施工必須借助超挖方式機身才能通過，故於機頭周圍設置二支超挖刃(COPY CUTTER)，超挖方式如圖五所示，以單邊超挖進行。

(d). 製泥及排泥設備

製泥設備大部分與背填灌漿設備共

用，只需增加泥漿注入泵之相關設備即可。由於土壓平衡式潛盾機於掘進中注入添加料於掘削土中，靠機械攪拌混合使其具有優越塑性流動泥漿並充滿土倉內，並藉助螺運機排泥及壓送泵輸出坑道外。



圖五 超挖示意圖

3.3.2 潛盾機操作管理

為掌控施工安全於是訂定潛盾機操作準則(詳表三)做適當之管理，規範之內容包括推進時之推力、扭力及背填灌漿控制、排泥量等，由前述之施工成果可檢核實際施工與理論估算值是否相符，並可避免不當之施工情形發生。

3.3.3 超挖刃故障修復

由於潛盾機盾殼長度固定(6.6 公尺)必須以水平超挖方式滿足設計上最小曲線半徑 200 公尺之線形需求，在掘進上行隧道施工時曾經發生在盾殼外側超挖刃故障

予以短暫停機(二個星期)情形，在經過評估各種補救方式後，決定採用打開土倉修復超挖刃的方式最能滿足在最短時間內修復，並減少對北門的影響。在輔助措施方面，首先在原先 JSG 灌漿改良區周圍施做止水灌漿以加強 JSG 灌漿之止水可靠性(詳圖六、七)，止水灌漿完成後接著進行排泥及開啓土倉進行修復作業，修復作業在一天內完成，該期間土倉內維持開挖面穩定之壓力解除，恐造成開挖面坍塌之不穩定現象，而引起地表大量沉陷，所幸並未發生此狀況，由監測資料顯示北門結構體亦無明顯變化，故修復作業對北門結構幾乎沒有產生不良影響。

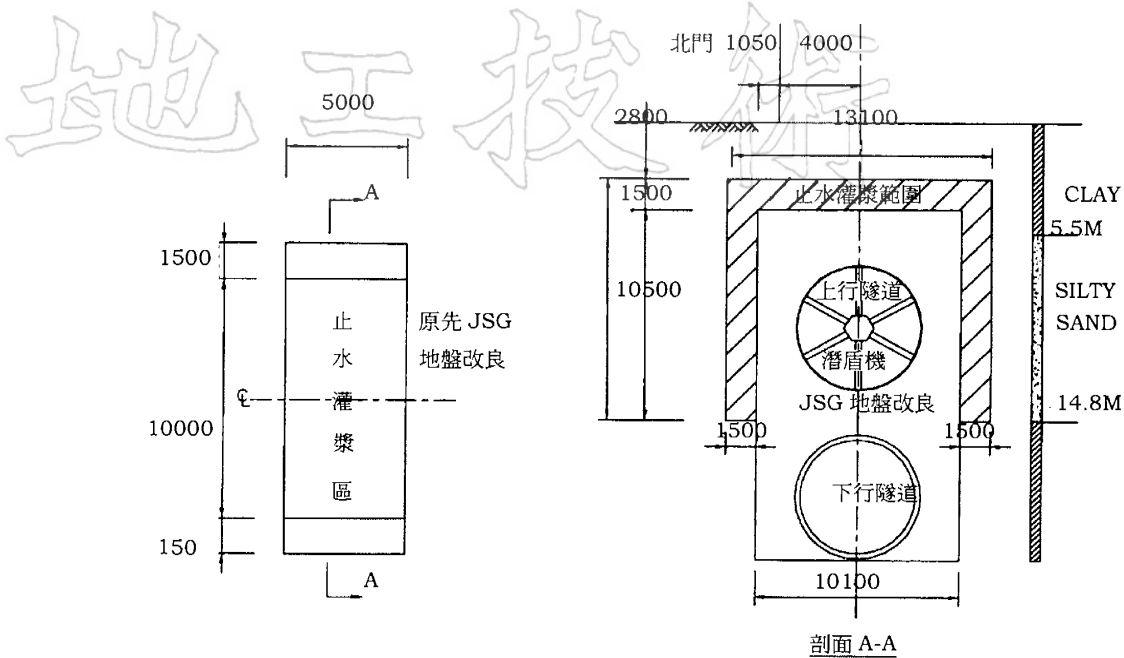
3.3.4 北門基礎地盤扶正灌漿

北門因年代久遠基礎形式無法確切查明獲知，僅能由有限相關之文獻記載及在灌漿過程中了解其為深度 1 ~ 2 公尺之淺基礎，所以北門建物對於表層土壤變位容易產生明顯之反應變化，儘管 JSG 地盤改良已阻絕大部分之施工影響，但北門仍難避免因淺土層變化而發生些許沉陷量，根據以往經驗與已完成之隧道監測資料，潛盾掘進造成之沉陷量大部分將在數月內完成。

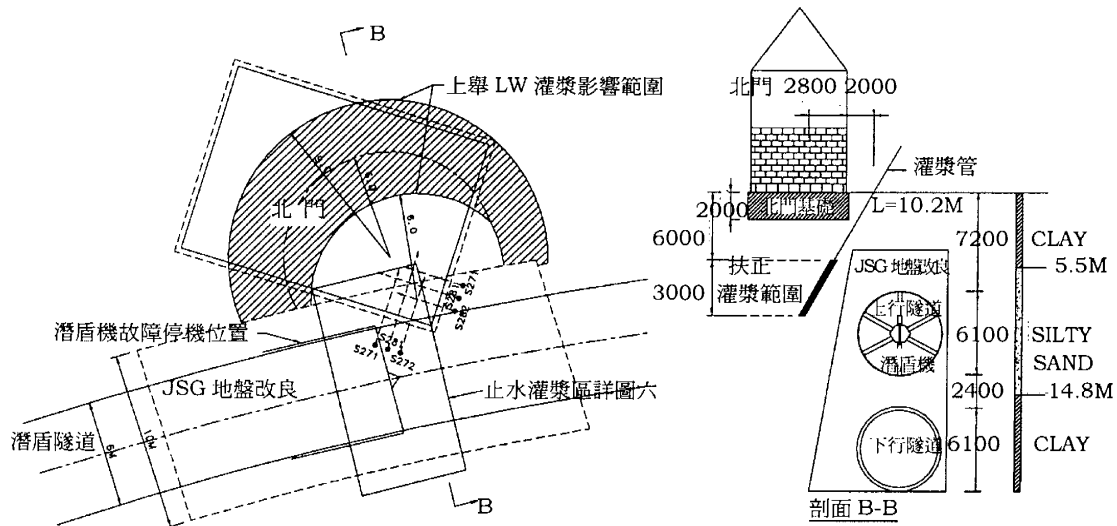
北門基礎扶正灌漿作業係由 GL-9m 開始施作 LW 灌漿至 GL-6m 止，且漿液勢

表三 潛盾機操作準則(摘自台北市政府捷運局中工處，民國 84 年)

項 目	合 適 值	管 理 值	備 考
掘進速度	25mm/分	30mm/分以下	與土壓連動
掘進推力	1000t	1500t 以下	超過 1500t 時利用掘進速度調低
螺運機扭矩	0.50t.m	0.50 ± 0.05t.m	
螺運機回轉數	8rpm	10rpm 以下	
土 壓	1.9	靜止土壓 < X < 2.0	
背填灌漿壓力	4kg/cm ²	4 ± 1kg/cm ²	
背填灌漿灌漿量	3m ³ /ring	合適值之 110 ~ 130%	
排 泥 量	掘削地層土量 × 100% + 加泥材量	合適值 ± 3%	



圖六 超挖刀修復止水灌漿平面圖



圖七 北門扶正灌漿平面圖

必流往土層中軟弱夾層或孔隙，造成北門上舉。灌漿材料則使用水泥及水玻璃混合液，作業方式請參考圖七。

(1) 灌漿材料與工法選定

根據本工程之地層特性與需求，使用之灌漿材料及工法必需滿足下列要求。

目的：

- 穩固北門基礎。
- 土粒子間空隙填充。
- 基礎局部、微量隆起。

灌漿材料特性：

- 灌漿範圍內土層為粉土質砂，須具

良好滲透性。

- 具有較短固結時間，使灌漿範圍較易掌握及達到頂升效果。
- 固結時間容易調配。

現場狀況：

- 使用低壓施作，避免損傷北門結構。
- 具有強度，達到基礎加固作用。
- 鄰近潛盾隧道，須保護其安全。

考量以上因素後選定懸濁型藥液灌漿 (L.W.) 最為適當，L.W. 成分主要為水玻璃、水泥及水混合而成預定凝結時間約為 1 分～1 分 30 秒，改良強度在砂層大致上約為 $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 範圍內。

(2) 有效範圍決定

在考慮低壓灌漿下及地下水水位後，決定使用灌漿壓力以小於 10 kg/cm^2 方式施

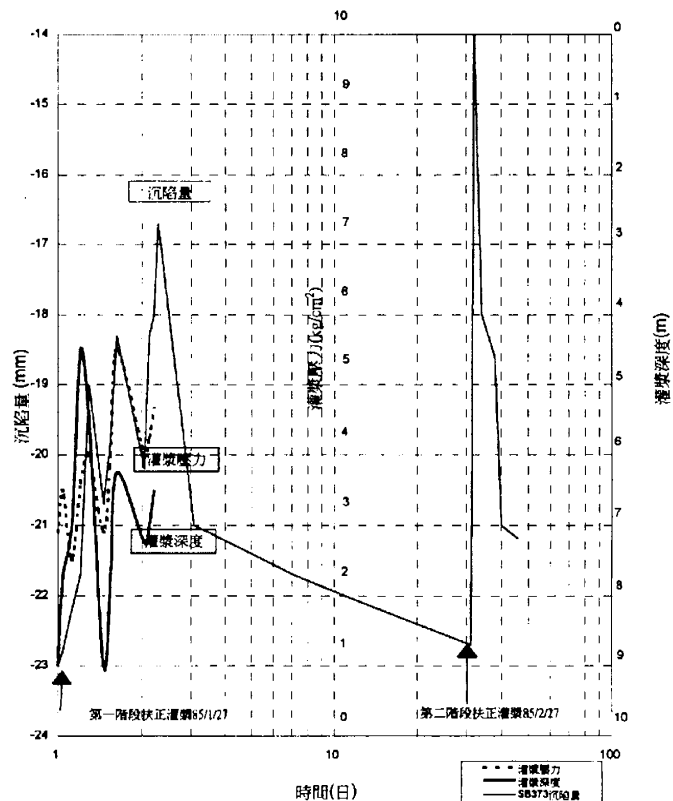
作。北門東南側因已有 JSG 改良，顧慮到隧道安全及灌漿成效，遂採取斜灌單管多層次灌漿方式施工，另一方面 JSG 改良區亦可視為一良好阻隔壁，使灌漿液能廣泛地在北門基礎下方發展。

灌漿孔位置選擇在北門東南角，灌漿深度由地表下 9 公尺至 6 公尺較深層之灌漿以較溫和、緩慢之頂升效果達到保護北門結構及扶正之目的，預計灌漿有效範圍可參考圖七。

(3) 灌漿過程與成果

在北門結構脆弱及基礎淺之條件下，選擇以二階段較深層方式灌漿，並控制灌漿壓力在低壓下施作，扶正北門地盤灌漿成果圖請參考圖八。

灌漿施工選擇在北門東南隅處設置 6 灌漿孔，施作順序為東、南二側配對依序進行



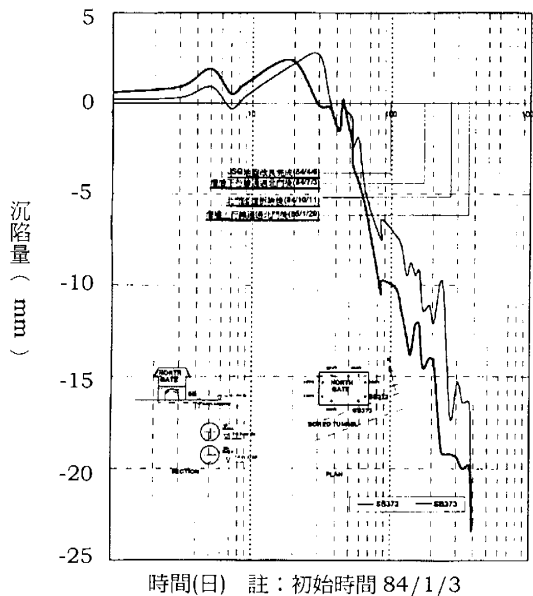
圖八 扶正灌漿施工成果圖

總共三組, 在 1 月 27、28 日完成第一階段灌漿, 在上行潛盾隧道通過後比照第一階段灌漿方式施作第二階段灌漿(2 月 27 日)。

在第一次灌漿後北門東南角上舉 5mm(由 -24mm 到 -19mm), 西北角不到 1mm, 東南角之回沉量約為 4mm(由 -19mm 到 -23mm) (詳圖八), 此回沉量主要除孔隙水壓消散後壓密沉陷因素外, 潛盾通過後盾尾間隙閉合亦是其中原因之一。

在潛盾通過後一個月進行第二階段灌漿, 灌漿完成後在東南角上舉 8.5mm(由 -23mm 到 -14.5mm), 後續回沉量 7mm, 西北角上舉 1.5mm。

在第一階段灌漿完成後與先前之 JSG 改良土壤形成一圍束區(詳圖八), 故在第二階段施灌時孔隙水壓容易增加進而頂升效果明顯, 之後隨著孔隙水壓消散灌漿區亦伴隨回沉, 雖然頂升量不大, 但就古蹟安全考量已達到溫和施工及擴大強固北門基礎目的。



圖九 建物沉陷點 SB 372 - 373 監測資料

四、監測結果

在各種監測儀器及觀測點輔助下得以了解北門在施工過程中變化情形, 本文僅就監測資料變化較顯著者予以說明:

4.1 建物沉陷量

在北門四周設置八處建物沉陷點, 由資料顯示北門東南偶處沈陷量變化較大, 由圖九時間與沉陷量關係圖顯示北門在 JSG 灌漿期間產生 2 ~ 3mm 隆起量隨後即發生沉陷, 此緩慢沈陷趨勢延伸到一年時間後方呈平穩狀況。由沉陷歷時圖顯示隧道施工對北門影響較為立即但時間短暫, 在下行隧道施工期間產生約 5mm 沉陷量; 上行隧道施工期間因較接近地表面影響較大, 但仍控制在安全範圍(25mm)以內(至 85 年 2 月 27 日止)。

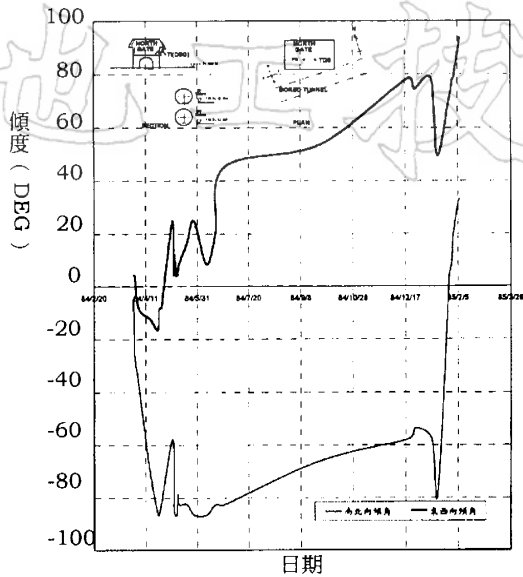
4.2 建物傾斜量

在北門建物上裝設二只傾斜儀分別在西側(TI16)及東側(TI28)拱門內牆上。東側傾斜儀測讀值之變化情形顯示(圖十), 由於接近 JSG 改良區, 故在 JSG 改良期間有往西北傾斜情形, 此一狀況為灌漿區地表隆起造成所致, 隨後即改往東南方向回傾, 在潛盾通過下行隧道前組立及北門支撐架後, 傾斜量即維持穩定狀態, 直到潛盾通過上行隧道階段因輔助灌漿才發生較大變化。

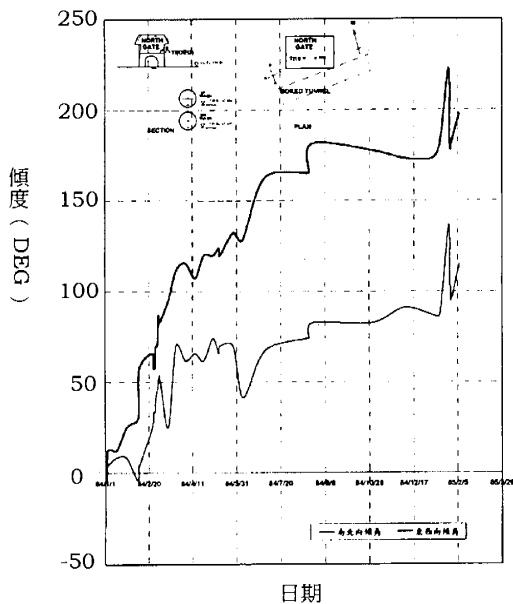
西側傾斜儀(TI16)測讀值之變化趨勢大致與東側相同(圖十一), 主要差異點在於距離 JSG 改良區較遠, 受隆起影響小, 其主要傾斜趨勢亦是東南方向。

4.3 土體側向變位

在北門東北、西南隅各裝設一組傾度計觀測管藉以量測施工期間土體發生之側

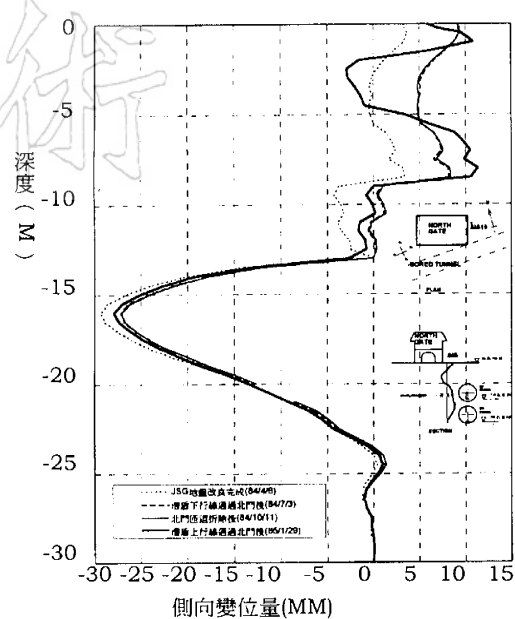


圖十 傾斜計 TI - 28 監測資料



圖十一 建物傾斜計 TI - 16 監測資料

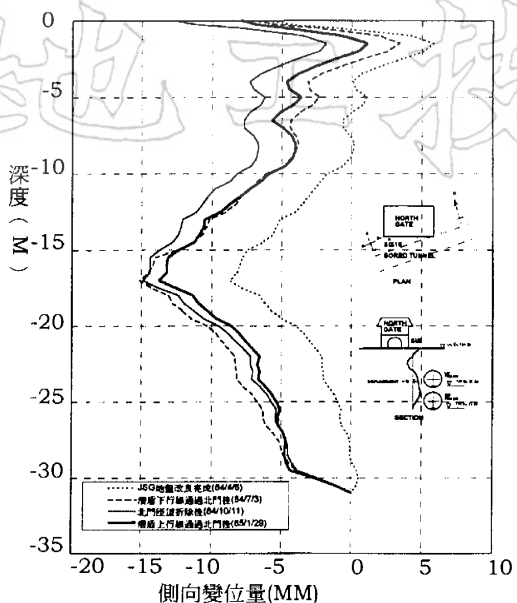
向變位量，由東北隅傾斜計(SIS-15)測讀資料顯示(圖十二)在 JSG 灌漿階段擾動及擠壓土層，為造成主要側向變位原因，其發生側向變位量較顯著之範圍為地表下 13m 至 23m 之區間，其中最大變位量之



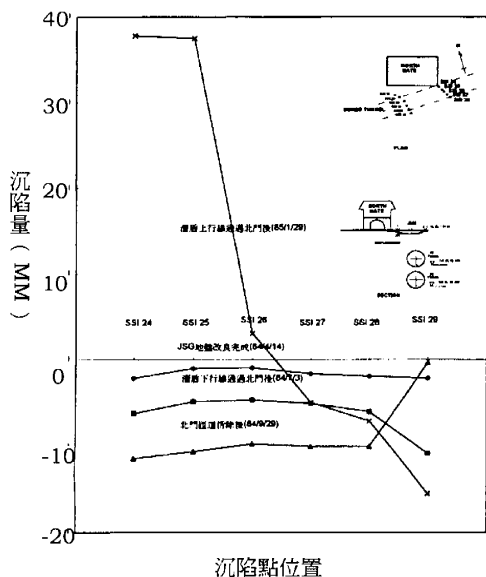
圖十二 傾斜計 SIS-15 監測資料

位置約在地表下 17m 處，產生約 3 公分之側向變位量，經過潛盾施工影響在深層土層側向變位量僅有微小變化，淺土層則因上 7 行隧道施工及灌漿作業而略有變化；在地表最大變化量約為 0.4 公分，由於地表發生之側向變位小，所以對於北門影響有限，應不致傷害北門結構體，此一觀點亦可藉由北門周長變化量觀測獲得印證，其北門城牆長度變化量皆在 0.5 公分以內，證明結構只發生微小之側向變位量。

西南隅處傾斜觀測管(SIS-16)較接近潛盾隧道，因 JSG 灌漿所引致之土壤側向變位量，以地表下 10m 至 25m 間之地層較為顯著，且受其潛盾施工影響較為明顯，最大側向變位量亦發生在地表下 17m 處，其側向變位量約為 1.5 公分，其中潛盾施工造成沉陷增加的部分約 0.5 公分左右。另外，由於儀器鄰近高架橋橋墩，高架橋匝道在此期間進行拆除作業，拆除作業完成後，因有解除橋梁載重作用(橋基採



圖十三 傾斜計 SIS-16 監測資料



圖十四 地面沉陷點 SSI24 ~ 29 監測資料

50m 之摩擦樁)使得土體之側向變位量亦產生明顯的反應現象(詳圖十三)。

4.4 地表沈陷量

除了在通過潛盾上行隧道時所作之輔

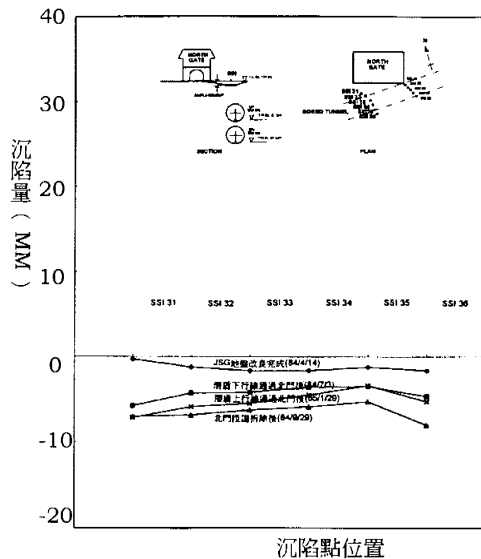
助灌漿作業造成鄰近地表產生隆起現象外,其餘觀測點變化情形大致呈均勻沉陷走勢,並未因潛盾施工而有明顯變化(詳圖十四及十五),主要原因是因為 JSG 地盤改良強度良好,形成類似地中混凝土梁,承載施工後造成應力解放效應,有效地減少土體變形,在 JSG 改良區外之沉陷量則因無以上之強化土壤功能而有較大之沉陷量發生。

在施工期間主要沉陷發生在北門東南隅,因此扶正措施之地盤灌漿作業範圍亦以北門之東南角為主,所以由地表沉陷點測得之地表隆起量以東南隅處較大,最大隆起量約為 4 公分。

由資料顯示隧道上方地表土層沉陷量均勻,且潛盾施工前後沉陷量變化微小,受潛盾施工所產生之影響不明顯。

五、北門在施工階段沉陷量檢討

在潛盾隧道通過北門後,雖然僅產生



圖十五 地面沉陷點 SSI31 ~ 36 監測資料

微小沉陷，但回顧檢討沉陷原因，仍屬必要。北門沉陷大致上可歸因於潛盾挖掘、地盤改良土體體積改變、大地與其他因素等，其中前二者為施工階段人為因素所產生，後二者為北門基礎結構、地質地層條件及工址環境因素所造成。以下將針對前二者變動情形較大之因素予以檢討並比較鄰近區域之監測結果。

5.1 潛盾挖掘

潛盾機在施工過程中造成地表沉陷之原因，為挖掘土體後之大地應力解放及開挖面的穩定平衡性改變。為維持開挖面的穩定性，在設計潛盾機型時，即考量以密閉式機型並輔以土壓平衡方式穩定開挖面，在謹慎施工及管理下得以避免挖掘面之不穩定。在另一方面，JSG 地盤改良主要目的在於提高土壤強度藉以減少挖掘時之應力解放率及其延伸範圍。由監測資料顯示在潛盾通過下行隧道後，隧道上方地表沉陷量增加 3mm (84 年 7 月 3 日)，通過上行隧道後沉陷量增加 1.5mm (85 年 1 月 29 日但不包括後續沉陷)，由於下行隧道上方尚有厚 11.5m 厚之 JSG 覆蓋，且應力解放效應只佔 3mm 沉陷量產生原因之一部分而已，其餘原因如上段陳述之因素亦可能有所影響；而上行隧道上方改良土體厚度僅有 3m，應力解放效應似較為顯著，由監測結果顯示地表沉陷受其影響較為直接且明顯。

5.2 地盤改良之土體體積變化

北門在潛盾施工中為保護北門結構體，及因應施工突發狀況所施作之輔助措施，總計施作了 JSG、SL、LW 三種地盤改良措施，其中 JSG、LW 屬水泥材料系灌漿，SL 屬化學藥液非水泥系灌漿材料，水泥材料特徵之一即為澆置(或灌漿)

後產生體積收縮，體積收縮現象可區分為二部分，一為漿液固化收縮(Shrinkage)；另一為潛變(Creep)。收縮現象是灌漿體在硬化時之體積減少量，收縮程度與水泥含量、水灰比等因素有關；潛變發生原因則因改良土體受力產生應變，由於北門灌漿區穿越北門東南角下方基礎，故北門結構體重量與改良土體上方之土壤重量作用於改良土體使得改良土體承受長期作用之載重應力產生應變，進而發生潛變現象。

根據一般常用之 ACI Committee 209(1992),收縮、潛變預估方式如下：

$$\text{潛變(Creep)應變 } \nu_t = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} \nu_u \dots (1)$$

收縮(Shrinkage)應變

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{35+t} (\epsilon_{sh})_u \dots \dots \dots (2)$$

上式中： t =時間(天)

ν_u =極限潛變係數

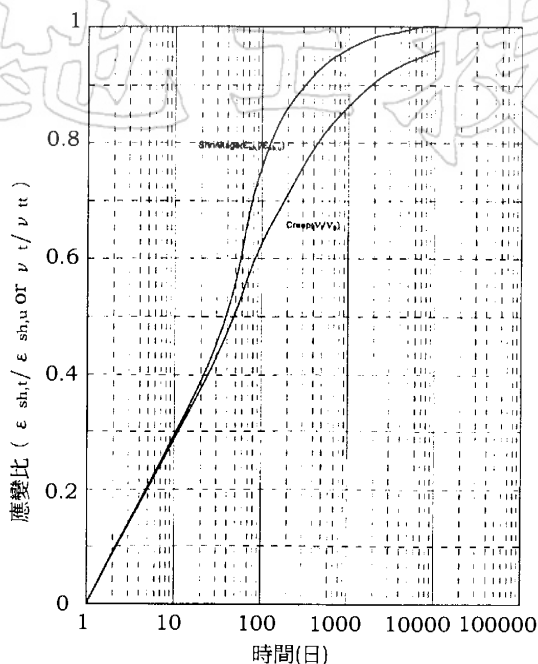
$(\epsilon_{sh})_u$ =極限收縮應變係數

比照式(1)、(2)之推估可獲得 JSG 改良完成後一個月收縮及潛變變化量約為永久變化量之 43%，一年後則分別達到 91%、78%，收縮及潛變歷時曲線圖詳圖十六。另由現場監測結果獲得在 JSG 灌漿完成後一個月內北門沉陷量約 1 公分，若根據以上方式推估收縮及潛變所生之最終變位量約為 2.3 公分，對照北門東南角沉陷量變化趨勢與收縮及潛變變化相吻合，目前距 JSG 改良已達一年半之久(至 85 年 10 月止)上述之體積變化行為業已完成 90%以上。

另外灌漿後孔隙水壓消散產生之壓密沉陷亦是造成地表沉陷另一重要因素。

5.3 臨近監測斷面地表沉陷量之比較

在距北門約 90m 處之隧道上方路面



圖十六 水泥系灌漿材縮收潛變應變比

設置有地表沉陷觀測點，這些監測點工址中其下方為覆土厚度約 8m 之上、下行重疊断面之潛盾隧道，與北門潛盾隧道上方之覆土厚度 7.2m 情形相近，此二者之地表沉陷大致上可對照為潛盾施工對土壤改良前、後土體變動之反應行為。

當上、下行潛盾隧道通過此一鄰近監測點後之一個月時間內地表沉陷量合計約為 38mm 至 72mm 之範圍內，而位在北門工區當潛盾通過後同一期間地表沉陷量合計約為 11mm(上、下行隧道通過後增量分別為 4mm 及 7mm)，由以上監測數據顯示北門地盤經 JSG 改良後較未改良區能夠有效地減少地表沉陷量發生。

六、結論

潛盾隧道順利通過北門下方不僅是工程上一項成就，亦是在台灣地區兼顧工程

施工與歷史古蹟的一個成功案例。就本工程特性可歸納數點結論如下：

(1). 規劃階段評估後所採用 JSG 地盤改良保護方式為一正確保護北門安全之處理方式，由於 JSG 地盤改良有效的阻隔潛盾施工造成的影響，由施工完成後僅產生微小沉陷量獲得印証。

(2). JSG 地盤改良後之改良土體，因其所採用之水泥系固化材料之特性影響，該土體硬化收縮與潛變造成改良土體體積減少現象，依改良作業完成後全隧道挖掘前的沉陷監測資料研判及推估此類改良土體之體積變化特性，對地表沉陷行為會產生相當程度之影響，採用此類地盤改良方法進行鄰房保護或托底工程時，宜審慎分析評估其影響。

(3). 完整的監測儀器系統佈設及周延的監測作業計劃，可有效提供資訊發揮預警作用，以及進行回饋分析因應措施研擬，達到確保施工安全之目標。

誌謝

本工程之能順利完工，應為業主(捷運局中工處)之督導，承商(清水—太平洋聯合承攬)、大地專業顧問(亞新)以及細部設計顧問(日本復建工程顧問公司，中華顧問工程司)等各工作人員於施工期間共同合作辛勤努力之成果。

本文之能完成，感謝周功台先生不厭其煩多方指導及吳仁哲、倪致紳先生協助以及捷運局同意發表及指正，並向各界之工作人員致敬及致謝。

參考文獻

行政院文建會(民國 75 年, "臺閩地區第一級古蹟圖集")。

林軒，林正記(民國 81 年)，「台北捷運臨近建物保護案例介紹」，「地工技術雜誌」，第 40 期，第 91 至 112 頁。

郭正道、何泰源，「台北捷運系統南港線 171 設計標北門古蹟之建物保護設計之技術報告」，中華顧問工程司 171 標專案計劃，民國 80 年 1 月

台北市政府捷運局，「南港線 CN253B 標西門站至台北車站間隧道工程及台北市西側地下街延伸工程工程圖說」，民國 79 年 3 月

台北市政府捷運局中工處(民國 84 年)，「北門古蹟保護工作簡報資料」，4 月

台北市政府捷運局中工處(民國 85 年)，清水／太平洋聯合承攬，「超挖刃修復施工方案及評估」，1 月

DAN E. BRANSON (1977). Deformations of Concrete Structures. New York: McGraw Hill, pp11-27, 44-55.

ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effect in Concrete Structure", *ACI Manual of Concrete*

Practice, ACI 209R-92。

吳偉特(民國 77 年)，「台北盆地地盤分區土壤之工程特性」，地工技術雜誌第 22 期，第 5 至 27 頁。

吳建民(民國 77 年)，「台北盆地地盤下陷之回顧」，地工技術雜誌第 20 期，第 34 至 49 頁。

歐晉德、李延恭、鄭在仁(民國 72 年)，「台北盆地松山層地下水水位及水壓分佈對基礎工程影響」，土木水利期刊第十卷第三期，第 89 至 102 頁。

「最新トンネル工法，機材便覽」，日本機材便覽編集委員會。

本文之討論意見將在後期刊出，請您將意見於兩個月內寄交本刊編輯委員會。

86 年 4 月 25 日 收稿

86 年 5 月 13 日 修改

86 年 5 月 29 日 接受