

台北市捷運工程之回顧

莫若楫

亞新工程顧問股份有限公司 總經理

摘要

台北捷運初期路網自 1997 年陸續完成通車以來，逐漸成為大台北地區民眾高度依賴的交通工具，並有效紓解了尖峰交通時段的表面交通流量，對區域交通條件的改善有著重大貢獻。捷運初期路網沿線多屬地下隧道段，因此於施工期間曾因台北盆地深厚之軟弱土層以及其下具高透水性之景美礫石層等地層之工程特性，而面臨各種大地工程問題。本文主旨系對台北捷運地下施工作一概述，並回顧探討具代表性之大地工程施工災害和解決方案。

關鍵字：捷運，地下工程，軟土，潛盾隧道，施工災害

Geotechnical Retrospect of the Taipei Rapid Transit System

MOH ZA-CHIEH

Moh and Associates, Inc , President

ABSTRACT

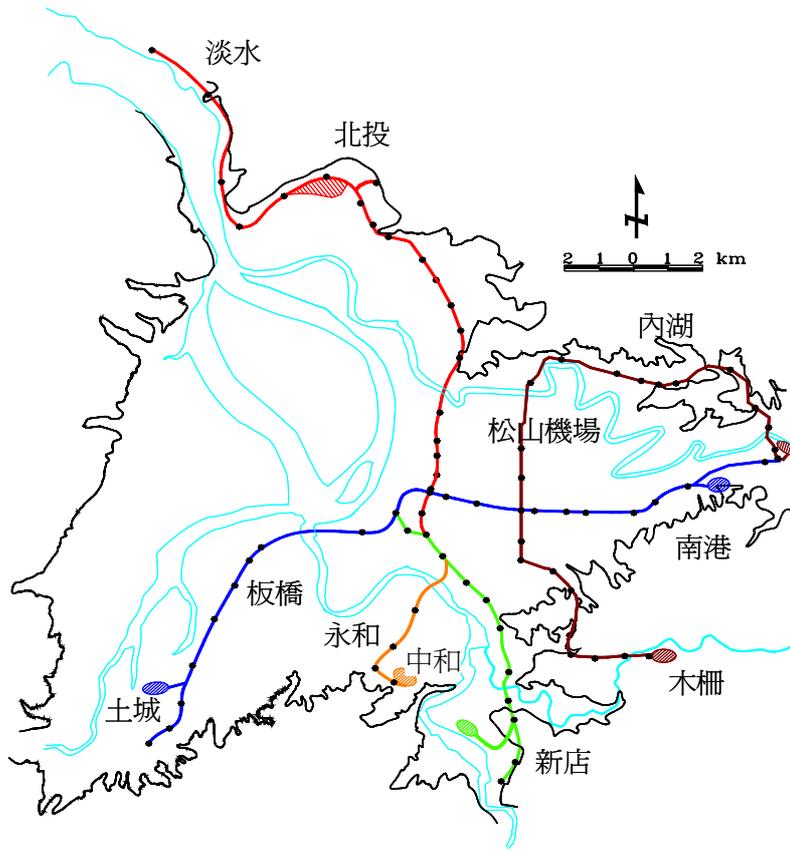
Major part of the 88km priority network of the Taipei rapid transit system was completed in stages and started in operation in 1997. The residents of the Taipei Metropolis now highly rely on this convenient mode of transportation, which effectively eased the surface traffic load as well as improved regional transportation conditions. A major part of the TRTS is underground. Various geotechnical problems were encountered during design and construction due to the existence of extensive soft alluvial subsoils and presence of a highly permeable gravel layer underneath. This paper describes the underground construction of the TRTS and the importance and contribution of the Geotechnical Engineering Specialty Consultant (GESC). Several of the representative geotechnical related failures were reviewed.

Keywords: Mass Rapid Transit, underground construction, soft soil, shield tunneling, failure

一、台北捷運初期路網

台北捷運初期路網一共包含六條路線，分別為木柵線(含內湖延伸線)、淡水線、中和線、新店線、板橋線(含土城延伸線)及南港線等，如圖一所示。初期路網全長約 88 公里，含 77 個車站，除了木柵線是屬於中運量系統外，其餘各線均為重運量系統。本路網沿線約有一半的路段穿行於地下，且主要位於軟弱土層中，表一為台北捷運初期路網各路線之基本資料。至 2002 年 3 月為止，初期路網全線除了土城延伸線目前正在施工，以及內湖延伸線正進行細部設計工作外，其餘諸線均在營運之中，每日運量約達 90 萬人次，在節日曾有 120 萬人次之紀錄。自捷運各線絡續通車以來，台北市市區的交通獲得大幅改善，市民生活品質亦因而提升。2001 年 9 月間，台北市遭受娜莉颱風侵襲，並帶來超

過二百年設計防洪期水位之雨量，造成台北捷運地下段嚴重進水受損，使得其後數個月間地面交通進入黑暗期，市民通勤交通之尖峰時段尤其受到影響。從另一角度來看，此次事件經驗亦充份反映出市民對捷運系統之高度需求和依賴。



圖一 台北捷運初期路網

表一 臺北捷運初期路網

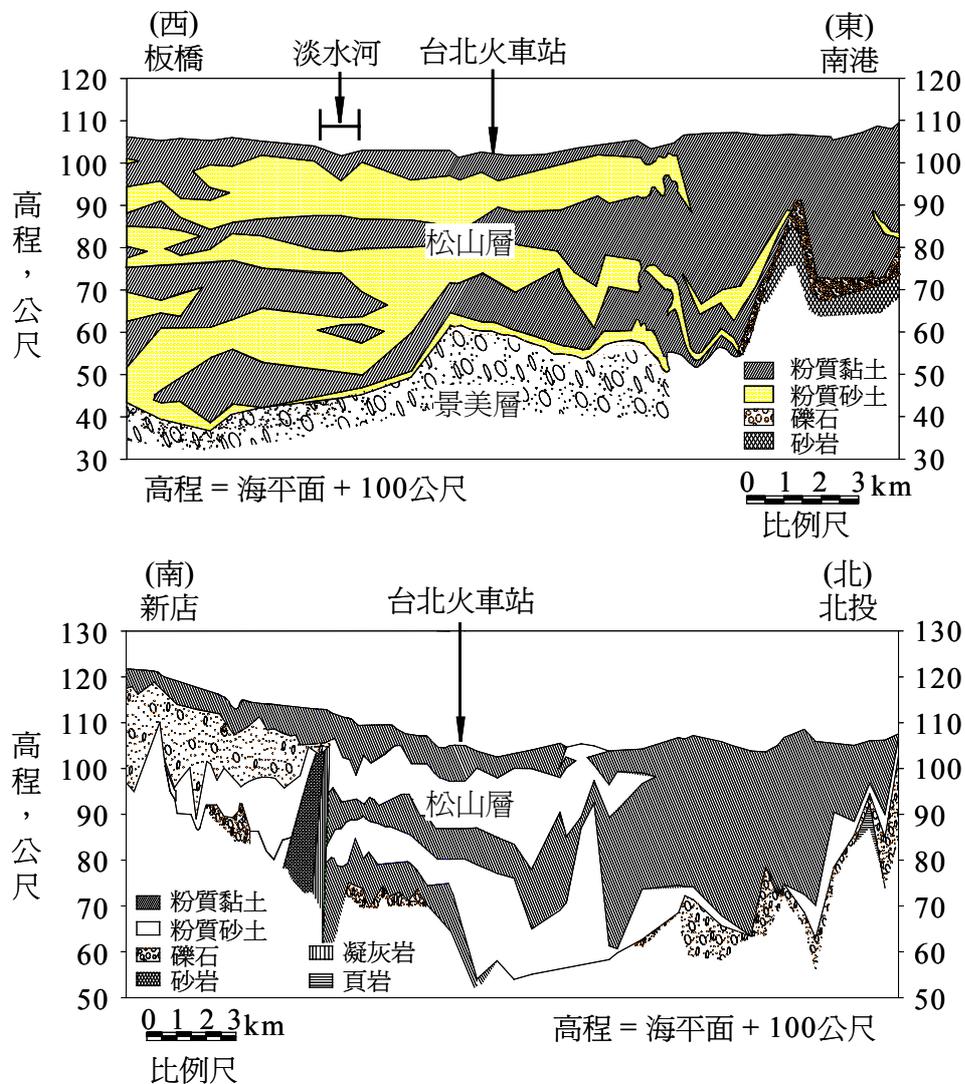
名稱	起訖站	全長	建造型式	通車時間
木柵線	木柵動物園站至中山國中站	10.9 公里	高架	1996.3.28 通車營運
	(內湖延伸線) 中山國中站至南港經貿園區	14.8 公里	地下，高架	設計中
淡水線	淡水站至台大醫院站	22.8 公里	高架，平面，地下	1997.3.28 通車 1997.12.25 全線通車
中和線	古亭站至中和南勢角站	5.4 公里	地下	1998.12.24 全線通車
新店線	台大醫院站至新店市新店站	10.3 公里	地下	1999.11.11 通車
南港線	西門站至南港昆陽站	10.3 公里	地下	2000.12.30 通車
板橋線	府中站至西門站	7.0 公里	地下	西門站至新埔站於 2000.8.31 通車
	(土城延伸線) 土城永寧站至板橋線府中站	5.6 公里	地下	施工中

二、台北地質與大地工程特性

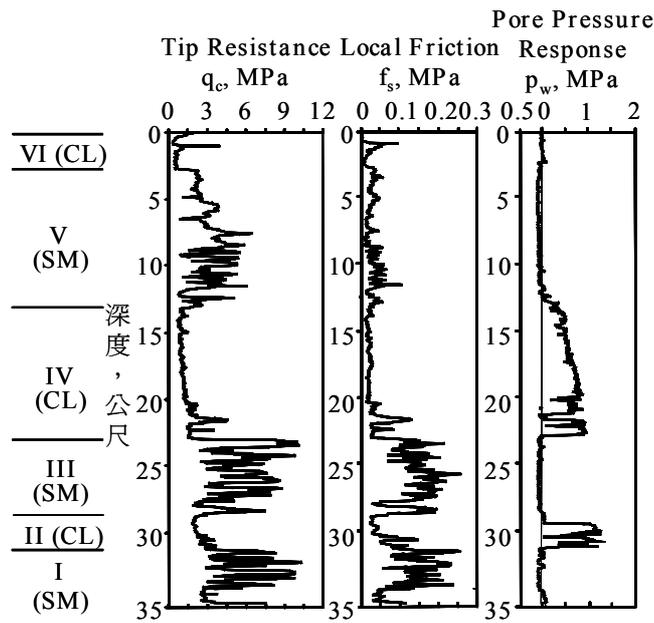
台北捷運初期路網位於台北盆地，此盆地是約在一萬年前由於板塊運動導致地層下陷而形成。

由於海水入侵，在數千年前仍是一個大湖。大漢溪、淡水河、基隆河及其支流帶來大量的泥沙，在湖底累積成數百公尺厚的沉積層，由上而下包括松山層、景美層、新莊層等。其中在表面厚達 60 公尺的松山層之工程性質是大地工程相關課題研究的重點。如圖二所示，松山層有六個次層，其中一、三、及五次層係砂土層，二、四、及六次層係粘土層。松山層以下為景美層係礫石層並夾雜粘土層，這六個次層在盆地中心區尤為明顯，圖三表示在盆地中心善導寺所進行的水壓錐貫入試驗的試驗結果，顯示在各層所得之結果明顯不同，尤其是水壓計的反應尤為清晰。一般而言，松山層中進行深開挖時，連續壁都相當的厚、也相當的深，才能減少壁體變形以及阻絕滲流，以避免地表沉陷以及因地表沉陷所導致之鄰房損害。

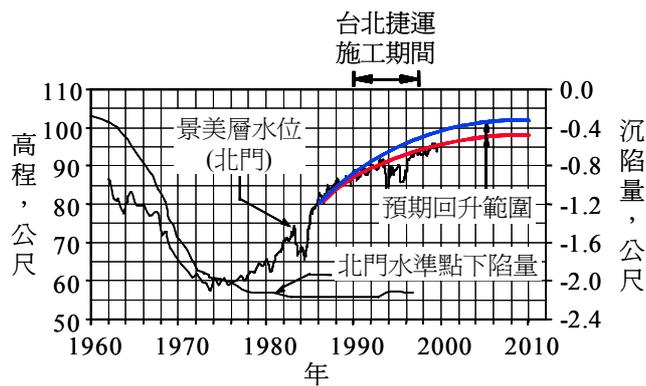
由於松山層中黏土層的壓縮性很高，地下水水位的下降會導致地表沉陷，如圖四所示。過去景美層中的水壓曾因超抽而大幅下降，松山層中的水壓也隨之下降，如圖五所示。在 1980 年代，松三層之水頭在地表下 25 至 30 公尺處，更早則無資料，相信至少也在 35 公尺以下。由於松二、松四兩層是粘土層，壓縮性高，在長期的壓密狀態下，導致地表顯著沉陷，北門一帶的地表沉陷竟達 2.2 公



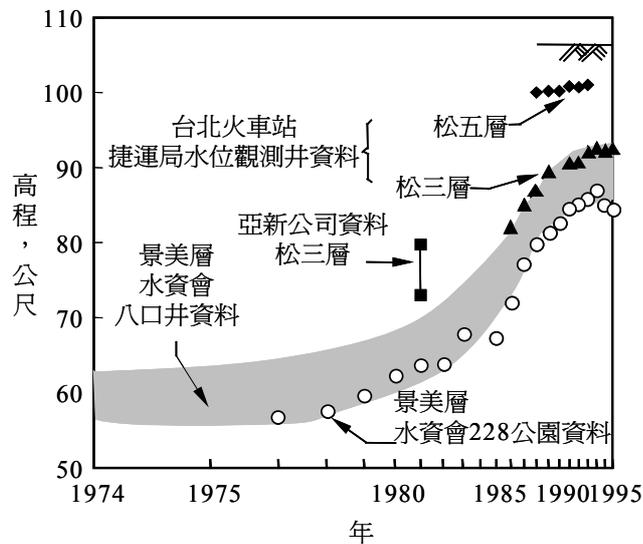
圖二 台北盆地地層剖析



圖三 台北市區水壓錐試驗結果



圖四 台北市區景美層歷年水位變化及地表沉降



圖五 歷年台北市地下水水頭變化

尺，可謂驚人(吳建民，1967；吳建民，1968)。以工程眼光來看，這沉陷並不是全無是處，因為早期的建築大部份是淺基礎或者是筏式基礎，而地表沉陷相當均勻，所以並未造成太多的困擾。反而由於先期壓密作用，減少了近年來深開挖時工區附近的地表沉陷。

除此之外，在進行深開挖時，地下水也是一個十分重要的考量。在捷運工程施工期間發生的災變大都與地下水有關，而松山層下的景美礫石層更是幾個大型災變的罪魁禍首。景美層中夾雜極厚的礫石層與極厚的粘土層，對工程師而言，只對最上一層礫石層有興趣。此一礫石層厚度不一，在台北盆地中心位置其厚度約有 50 公尺。由於超抽地下水，景美層中的水頭曾經下降超過 40 公尺，地表嚴重沉陷。在翡翠水庫完成後，自來水供應普及，而政府也明令限制抽取地下水，景美層中的水壓才明顯回升，地表沉陷趨緩甚至停止。地表不再下沉固然可喜，但地下水壓之上升使得開挖之安全性降低，不得不慎。

另外在景美層與松山層之介面處常有沼氣存在，這也是格外值得注意之處。如眾所周知，沼氣不但足以致命，如果濃度過高甚至有自爆的危險。

松山層中有大量流木存在，過去在進行深開挖時就常有流木出現在工區。而在捷運施工期間也在多個工區挖出巨大流木，很幸運地，在明挖段流木並未帶來太大的困擾。但是流木對隧道工程之影響可就大了，在中和線隧道施工時曾因遭遇流木而有致潛盾機動彈不得之情事，而在幾次大型災變中，固然景美層是罪魁禍首，但是流木也是幫凶。

三、台北捷運大地工程專業顧問

台北捷運自 1986 年規劃初期，即有鑑於初期路網主要均位於台北盆地，後續設計和施工均將面臨盆地內軟弱土層所帶來的各方面大地工程問題之挑戰，乃聘請專業之工程顧問公司(亞新工程顧問公司)擔任大地工程專業顧問(台北市政府捷運工程局，2000)，以協助台北市政府捷運工程局執行捷運工程規劃、設計及施工期間之大地工程相關審查督導作業，包括：

- (1) 大地工程分析、評估與建議(及審核)：
包括規劃、設計和施工階段有關大地工程方面必須考慮事項之建議，配合需要進行研究、分析和評估。
- (2) 設計階段之文件審查與建議：
審查細部設計顧問所提送之細部設計及發包文件，包含補充地質調查計畫、現場試驗、設計參數、監測計畫及施工方法等。
- (3) 施工期間承商施工計畫審查、施工督導，以及監測資料整理分析與建議：
審查施工之施工計畫，如參數選用、監測系統配置、建物保護、地盤改良、抽水、施工時地面沉陷影響、施工災害評估之審核，以及相關報告之撰寫。其中監測系統方面，包括安裝設計之審核、安裝督導、資料收集及分析，將規劃設計及施工時收集有關之大地工程資料如土層資料、觀測資料等輸入電腦資料庫中，尤其是協助捷運局評估及分析監測資料，適時反應狀況。承商提供之監測資料如有異常狀況或達警戒值、行動值，於確定監測資料無誤後，立刻通知捷運局工務所或其他指定單位做處理，以提供工程施工參考。
- (4) 發掘施工潛在問題：現場踏勘並發掘潛在問題提醒工務所注意。
- (5) 現場緊急事件處理：事件發生時全程參與，協助工程師研判狀況並提出建議，審查承商之補救措施，評估其成效及提出建議。
- (6) 協助申訴及賠償案件處理：在有申訴及仲裁事情發生時，協助整理資料，以專家身份提出學理上之解釋，並以觀測資料佐證。
- (7) 技術轉移：包括地質調查、監測系統安裝、電腦軟體應用、監測資料分析研判、工法回饋分析等等。

四、深開挖設計與施工

4.1 設計原則

台北捷運系統工程設計，所依據之規範及準則主要遵照台北市捷運局頒佈之土木工程設計手冊 (Civil Engineering Design Manual，簡稱 CEDM；DORTS，1992)。此設計手冊具有彈性，一方面容許參考經審核之他國最新設計準則，同時能確保整個捷運系統各個設計標間之均衡性及一致性。

手冊內關於大地工程設計規範參考依據列有建築技術規則及美國加州公路運輸及 AASHTO 等規範。捷運局在手冊內要求細部設計者，在設計臨時性與永久性工程時，應對現有土層與地下水狀況等地質調查、試驗資料作獨立研判解釋，以選擇適當之參數。如需獲得進一步資料時，應擬定現場與試驗室之補充地質調查工作，以補充現有之資料。

另一方面，由於捷運系統位於都市及已發展區域內，相關之設計安全係數要求較為嚴格，CEDM 於深開挖工程上之要求安全係數，綜合如表二所示。同時於考慮鄰近結構物對地下結構所導致之超加載重需達每樓層 12KN/m² 在基礎面或至少 50KN/m² 在地表面之載重量。在緊鄰捷運地下結構如有空地時，亦需考慮日後可能發展所導致之超加載重。

為考慮鄰近結構物之完整性及安全，CEDM 規定隧道及深開挖施工所導致之鄰近結構物總沉降量，原則上不得超過 25 公厘，及不均勻所導致基礎角變動量不超過 1/500，但設計者可根據鄰近結構物之基礎狀況與結構型式，訂定可容許之變位量。

所有開挖深度大於 8 公尺者均設計以連續壁為支撐側牆，且大部份係使用雙牆系統。壁體厚度範圍由 1 公尺至 1.2 公尺，但淡水線中山站因其位於非常惡劣之土層且開挖深度達 26 公尺，故其使用之連續壁厚達 1.5 公尺。施工時一般壁體單元開挖之寬度為 6 公尺以下，以達到穩定性之要求，亦曾有嘗試 8 公尺開挖寬度之案例，但並未成功，最後仍將開挖寬度維持在 6 公尺。

表二 台北捷運系統深開挖設計準則(土木工程設計手冊，1992)

破壞模式	安全係數
內向屈伏	1.50
塑性隆起	1.50
管湧或上舉	1.25
浮力：	
施工階段	1.03
施工完成	1.07

4.2 深開挖工法

台北捷運規劃的初期路網除木柵線及部份淡水線外，均為地下工程。在站體及地下街區，大多採 1.0 或 1.2 公尺厚之連續壁為擋土支撐，深度達 30 至 50 公尺不等。開挖方式包括順打及半逆打兩種。

大部份之施工標均以順打施工法施作，因為順打施工法對於在都會區進行施工所遭遇之交通改道問題較具彈性，大部份之站體均於現有道路下施作，使用覆蓋板之鋪設可以維持原有道路之交通流量，覆蓋板及其下之支撐通常以 H 型鋼為中間柱予以支承，中間柱係以反循環樁之施作方式進行。

站體及地下街區主要地下結構體之開挖深度介於 16~30 公尺之間，表三為各線站體及通風豎井之開挖資料。

表三 台北捷運車站及通風豎井開挖資料(摘自黃南輝等，1999)

線別	施工標	車站段					
		站名	施工方式	長度	寬度	深度	地下層數
淡水線	CT201G	台北車站(R13N)	順打	34.10~47.00	30.00	27.80~29.30	U4
	CT201F	台北車站(R13S)	逆打/半逆打	85.00	38.00	28.30	U4
		台北車站(BL7)	逆打	226.50	21.50	19.80~27.30	U3
	CT202A	中山站(R14)	順打	293.00	20.15~25.05	18.00	U 2~U3
		民生站(R15)	順打	271.00	25.05	26.00	U2
	CT202B	民權站(R16)	順打	222.00	21.00	18.00~26.00	U 2~U3
CT216B	行控中心	順打	115.00	95.00	20.40~23.60	U4	
新店線	CH218	台大醫院(R12)	順打	240.00	21.00	16.40	U2
	CH219	中正紀念堂站(G11)	半逆打	350.00	25.00	24.00	U3
	CH220	古亭市場站(G10)	半逆打	325.00	25.00	24.00	U3
		臺電大樓站(G9)	順打	250.00	20.00	18.00	U2
	CH221	通風豎井(中和線)	順打	26m(外徑)		34.95	
		公館站(G7)	順打	250.00	20.00	17.50	U2
	CH223	萬隆站(G6)	順打	250.00	21.00	17.00	U2
	CH224	景美站(G5)	順打	252.00	21.00	17.00	U2
	CH224	大坪林站(G4)	順打	252.00	21.00	17.00	U2
	CH225	七張站(G3)	順打	195.00	22.00	11.00~15.00	U1
	CH226	新店市公所站(G2)	順打	193.00	30.00	10.20~14.30	U1
CH227	新店站(G1)	順打	235.00	32.00	22.50	U4	
CH228	新店機廠	順打	275.00	13.00	6.00	U1	
南港線	CN251	愛國站(G12)	順打	310.00	13.00~19.00	16.50	U2
	CN252	西門站(BL6)	順打	398.00	27.00	24.50	U2
	CN253A	善導寺站(BL8)	順打	240.00	21.50	19.00	U2
	CN253B	MALL 區	順打	307.20	35.30~46.60	18.60~23.40	U2
	CN254	新生站(BL9,O13)	半逆打	308.00	17.90	19.43~27.43	U2~ U3
	CN255	忠孝復興站(BL10)	半逆打	260.00	22.00	19.70	U2
		忠孝敦化站(BL11)	半逆打	256.00	22.30	22.10	U2
	CN256	國父紀念館(BL12)	半逆打	256.00	19.90	16.20	U2
		中山學園地下道	順打	83.00	38.00	11.20~17.80	
	CN256A	車行地下道	順打	31.50	20.50	10.60	U1
	CN257	市政府站(BL13)	順打	278.00	24.00	18.80	U2
	CN258	後山牌站(BL15)	半逆打	293.00	20.00	20.40	U2
松山站(BL14)		半逆打	269.00	19.50	16.70	U2	
CN259C	昆陽站(BL16)	順打	230.00	22.00	15.20	U2	
中和線	CC275	頂溪站(O16)	順打	247.00	20.00	20.00	U2
	CC276	永安市場站(O17)	順打	220.00	11.00	23.85	U2
	CC277	景安站(O18)	順打	211.00	22.00	30.23	U3
	CC278	南勢角站(O19)	順打	283.00	20.00	22.50	U3
中和機廠		順打	300.00	38.00	22.50		
板橋線	CP261	龍山站(BL5)	順打	288.00	21.90	18.90	U2
		通風井 B	順打	34.40	21.10	33.81	
	CP262	通風井 A	順打	23.00	23.50	36.60	
	CP263	江子翠站(BL4)	順打	280.00	18.00	16.80	U2
CP264	新埔站(BL3)	順打	230.00	22.00	17.80	U2	

由於台北盆地的地質太過軟弱，過去在興建高樓地下室時，損鄰事件層出不窮，所以在捷運工

程的設計規範中，擋土系統的設計除考慮力的平衡之外，特別要求設計者限制開挖區附近的地盤變位。因此，一般而言，捷運工程的連續壁厚度較民間工程要厚上 20 公分至 30 公分，而且也都有足夠的貫入深度以切斷滲流。支撐系統也較一般民間工程所用的支撐更為粗壯，而且一律施加預力。雖然工程費不免增加，但是這錢花得十分值得。資料顯示，在沒有地盤改良的情況下，捷運工地的連續壁側向位移不到過去所量測的 3 分之 1。而配合鄰近建物保護施作地盤改良之區段，連續壁側向位移更小。有關鄰房保護措施之探討詳下節所述。

4.3 鄰房保護措施

在台北捷運初期路網中，環繞車站站體及明挖覆蓋段的連續壁長度即達 45 公里，這還不包括環繞出入口四周的連續壁。

同時為充份利用都會區有限之土地資源，地下工程之施工常受到都會區高度發展之限制，使得空間的使用及工程技術受到相當大的挑戰。在進行地下工程施工時，常有導致鄰近地盤位移或結構物產生沉陷、傾斜之情形。為防止或緩和開挖面下方地層發生塑性流動之隆起破壞及擋土壁大幅變位行為；通常設計時採下列方式，以作為軟弱土層深層開挖輔助支撐穩定設施：

- (1) 加強擋土結構勁度或提高支撐預壓力及勁度，減少壁體變形。
- (2) 於基地內地質改良，以提高土壤強度，增加被動土壓抵抗，例如採地中樑或是採用作為提供類似內支撐機制之地中樑，以減少開挖施工造成之壁體側向位移，達到建物保護之目的。

在台北捷運初期路網施工中常用之軟弱土層深層開挖輔助支撐穩定設施，一般有下列幾項：

- (1) 加大壁體勁度—如加大壁厚或採 T 形壁。
- (2) 加大支撐勁度與預力—如增加支撐斷面、層數及預壓力。
- (3) 地中扶壁(Buttress)—對改良深度範圍內之土壤等值抗剪參數有提升作用。
- (4) 地中樑(Transverse Beam)—將地中樑視為勁度頗大之地中內支撐。
- (5) 地中版(Grouting Raft)及深層混合地質改良(SMW)—係將地中版視為一改良地層，其抗剪力 c 值、被動土壓係數 k_p 及彈性模數 E 值均高於原狀地層。

但在沉陷量預估超出結構物之容許值時，則需採取額外適當的保護措施。常用之建物保護措施主要有地盤灌漿改良及施作阻隔樁等。保護工法之擇定需視個別建物狀況、周邊環境、土層狀況及土層擬增加之強度或勁度等因素綜合考量。至於保護成效於不同案例效果不一，並配合施工前對各建物概況及受工程影響之分析評估、制定不同型式建物沉陷及傾斜之監測管理值(闕河淵等，1996)。

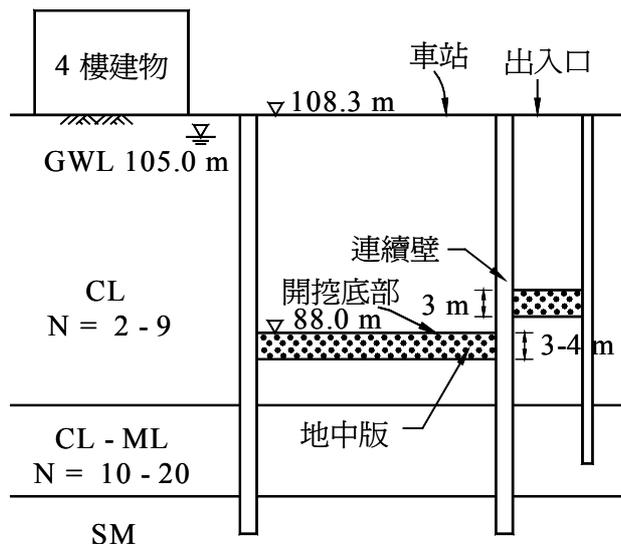
圖六及圖七係以南港線 BL14 站為例，分析不同整體厚度及有無設置地中版對開挖施工所造成壁體側向位移之比較。

圖中採 1.2m 厚連續壁及有四公尺厚地中版，其開挖所引致之壁體側向位移量僅約為 4 公分，而採 1.0m 厚連續壁及無設置地中版者其開挖引致之壁體側向位移量則將高達約 12 公分，此將對鄰近建物造成過大之沉陷量及角變量。經審慎之考量，認為本工區建物保護措施較可行之方式為於最終開挖面下採用一有如預先埋設支撐之地中版(Grouting Raft)，以減少壁體側向變形及開挖區外側之建物沉陷(陳亦耿等，1997)。

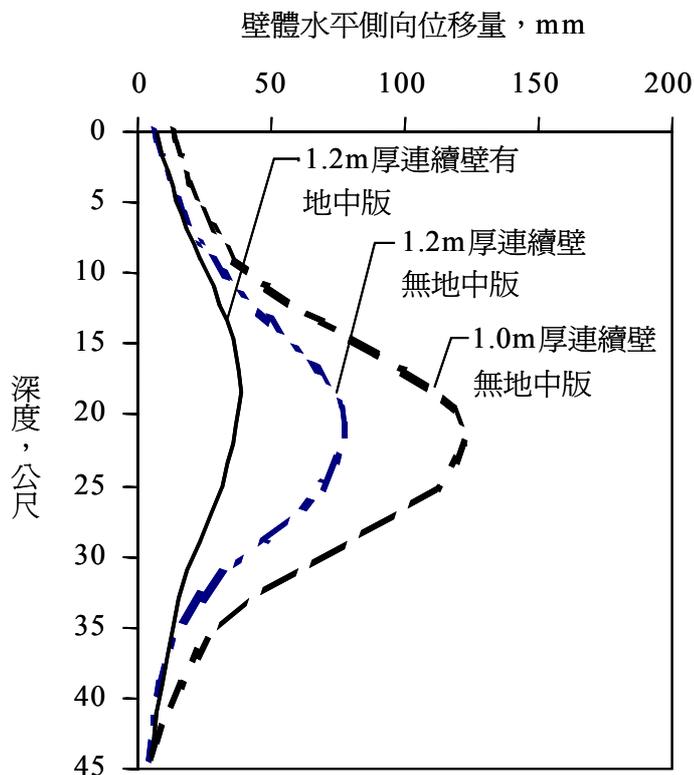
整體而言，台北捷運系統之地下開挖擋土工程由於設計規範要求相當嚴謹，且施工承商為避免開挖期間之損鄰糾紛，甚至採用較原設計更為安全保守的地質改良措施，因此開挖區附近的沈陷也相當小，損鄰事件屈指可數。

五、潛盾隧道施工

台北捷運其建造型式除木柵線為高架、淡水線採地面、高架及地下外，其餘皆為地下結構，在全長總計 36.172 公里的地下工程中除車站與地下街等設施外，行車隧道合計約 24.872 公里，佔隧



圖六 地中版施作剖面示意圖



圖七 分析有無設置地中版之連續壁變位示意圖

道全長 68.76%。潛盾工法相較於傳統隧道工法具有施工安全、迅速等特性，且對地面交通及商業活動等衝擊較小，因此被廣泛使用於台北捷運隧道工程中，約 17.254 公里，佔行車隧道全長 69.37%。以下就潛盾隧道在台北捷運之應用略作說明。

有鑑於台北盆地土層中粉土及粉質粘土層之低強度、高壓縮性，且一般地下水位在地表下 0.5~5 公尺之間，因此在面對高地下水位之軟弱土層及都會區內之施工限制條件時，潛盾機型式與設備的選擇尤其突顯其重要性。在初期路網中，目前已完成有 60 條潛盾隧道，一共先後採用了 30 部潛盾機。捷運各潛盾隧道施工標選用設備綜整如表四所示，可見密閉式潛盾機為台北捷運施工承商的一致選

表四 台北捷運潛盾隧道工程各施工標選用設備一覽表(摘自朱旭等, 1997)

路線別	施工標	覆土深度(m)	最小曲率半徑(m)	最大縱坡度(%)	選用機型	輔助工法	切刀型式	*長度(m)	#外徑(m)	環片內徑/外徑(m)	環片寬度/厚度(m)	二次灌漿	同步背填灌漿設備	出土方式
淡水線	CT201A	9~18	450	3.0	土壓平衡	加泥型	面板式	--/--/--	--/6.09	5.42/6.12	1.00/0.25			X
新店線	CH218	8.5~21	380	3.0	土壓平衡	氣泡型	輪幅式	6.40/6.10/5.70	6.07/6.05	5.40/5.90	1.00/0.25	有	有	Y
	CH219	8.5~22	700	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.50/6.95/6.30	--/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25			Z
	CH221	8~22	400	3.0	泥水加壓	---	面板式	7.10/6.95/6.52	--/6.25	5.60/6.10	1.00/0.25	有		Y
	CH222	9~18	300	2.448	土壓平衡	加泥型	圓頂式	7.77/--/--	6.16/6.12	5.40/6.00	1.00/0.30			Z
	CH223	9~15	350	0.2	土壓平衡	加泥型	輪幅式	--/7.10/6.67	6.04/6.04	5.40/5.90	0.90/0.25			Z
	CH224	9~16	350	3.0	土壓平衡	加泥型	圓頂式	--/7.54/6.62	--/6.04	5.40/5.90	0.90/0.25			Z
南港線	CN251	9.5~16	200	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	--/6.90/--	--/6.25	5.6	1.00/0.25	有		Y
	CN253B	6~11.5	200	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.20/--/6.03	--/6.24	6.1	1.00/0.25		有	Y
	CN253A	10~12	350	0.74	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.40/7.00/6.63	6.04/6.04	5.60/6.10	1.00/0.25			Z
	CN254	11~13	900	0.353	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.40/7.00/6.63	6.04/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25			Z
	CN256	8.5~12	3,000	1.488	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.18/6.88/6.48	6.07/6.05	5.40/5.90	1.00/0.25			Y
	CN257	8~10	1,300	0.759	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.40/7.00/6.63	6.04/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25			Y
	CN258	8~12	300	0.738	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.16/--/--	6.05/6.04	5.40/5.90	1.00/0.25			Z
板橋線	CP261	11~25	330	2.985	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.22/6.92/6.52	--/6.25	5.40/5.90	1.00/0.25	有		Y
	CP262	10.5~2	300	2.8	土壓平衡	加泥型	輪幅式	--/7.68/7.37	--/6.24	5.60/6.10	1.00/0.25	有		Z
	CP263	9~10	1,000	3.0	土壓平衡	加泥型	輪幅式	7.45/6.95/6.50	--/6.24	5.60/6.10	1.00/0.25		有	Y
	CP264	10.5~2	280	2.4	土壓平衡	加泥型	輪幅式	6.27/5.97/5.47	6.28/6.28	5.60/6.10	1.00/0.25		有	X
中和線	CC275	11~26	300	3.0	土壓平衡	加泥型	面板式	6.42/6.09/5.66	6.27/6.26	5.60/6.10	1.00/0.25			Z
	CC276	6.5~22	300	3.5	土壓平衡	加泥型	面板式	6.42/6.09/5.66	6.27/6.26	5.60/6.10	1.00/0.25	有		Z
	CC277	6~22.3	200	3.0	土壓平衡	加泥型	面板式	6.42/6.09/5.66	6.27/6.26	5.60/6.10	1.00/0.25	有		Z

說明：*表示潛盾機之鼻尖至盾尾總長度/刀盤面至盾尾長度/盾身長
#表示潛盾機之刀盤外徑/盾身外徑
A：拆解、吊運、再組立 B：迴轉 C：棄殼
X：膠輪傾卸車 Y：壓送泵浦+排泥管 Z：軌道台車

擇，與施工安全、建物保護及沈陷控制等訴求有直接關係，其中除新店線 CH221 標採用泥水加壓式潛盾機外，絕大多數承商均採用土壓平衡式潛盾機並輔助加泥或泡沫式工法，究其原因，施工用地取得不易與經濟考量應為其主要因素。

除了在新店線曾遇到混合土層，造成坍塌的意外之外，對潛盾施工而言，松山層的地質並不特別困難。在中和地區，雖然有沼氣的存在，由於隧道的送風量加倍，而且對沼氣的密度嚴密的監測及採取周延的防範措施，並未發生任何氣爆事件。地下障礙物的確曾造成幾處坍塌，這些障礙物包括地質鑽探時所遺棄的鋼套管、流木及過強的地質改良(Moh and Hwang, 1999)。

潛盾隧道工法施工所導致隧道上方地面及結構物之沉陷量，可藉由諸如加大潛盾機土倉內壓力、施作二次灌漿(secondary grouting)或遮幕牆(cut-off walls)等方式予以減少，以此達到建物保護之目的。根據實際施工案例顯示，不論採用加大潛盾機土倉內之壓力或施作二次灌漿，均可明顯減少土壤漏失率；其中採用二次灌漿施作曾導致沉陷槽發生偏移及沉陷槽範圍增大之現象。採用遮幕牆施作雖導致遮幕牆內沉陷量之增加，但卻明顯降低遮幕牆以外之沉陷量。

隧道掘進時所導致之地盤沉陷會影響隧道上方及其鄰近建物之安全，必須嚴加管控。更重要的是必須瞭解導致沉陷之機制以及影響沉陷之因素，以期改進施工技術，減少沉陷。

隧道上方之地表沉陷可分為立即沉陷及壓密沉陷，前者起因於盾尾孔隙閉合，後者起因於超額孔隙水壓之消散。理論上，壓密沉陷歷時較長，遠超過沉陷之量測期，甚至超過施工期，而在某些土層中，壓密沉陷甚至遠較立即沉陷為大，因此這兩個不同型態之沉陷有明確區分之必要，否則難以建立正確之經驗公式。

自 Peck(1969)提出軟弱地盤中因潛盾隧道施工所產生的地表沉陷可以「正常化曲線」表示後，此曲線模式即被廣泛應用以分析地表「沉陷槽」，其方程式為：

$$\delta = \delta_{\max} \exp\left(-\frac{X^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

其中

δ = 地表沉陷量

δ_{\max} = 地表最大沉陷量(通常位於隧道中心上方)

X = 沉陷點與隧道中心之距離

i = 沉陷槽「寬度參數」，為隧道中心至反曲點水平距離

而

$$\delta_{\max} = \frac{vA}{2.5i} \quad (2)$$

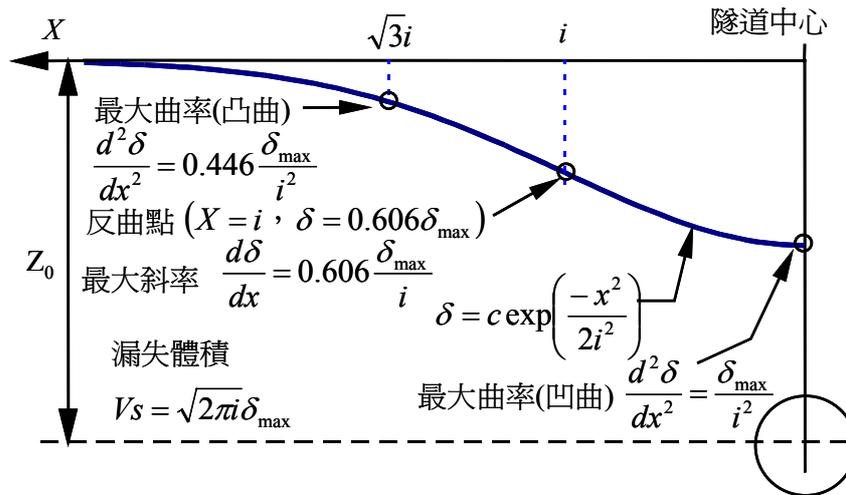
其中

v = 「土壤漏失率」

A = 隧道斷面面積

理想的沉陷槽如圖八所示。在均質土層中，沉陷槽理應左右對稱，最大沉陷發生在隧道中心正上方。除了最大沉陷外，「土壤漏失率」及沉陷槽之「寬度參數」，同是評估隧道施工表現的重要指數。土壤漏失率為沉陷槽之面積與隧道斷面面積之比值，與最大沉陷量有以下之關係：

$$v = \frac{2.5i\delta_{\max}}{A} \quad (3)$$



圖八 理想化沉陷槽

至於壓密沉陷則依下式求得

$$s = \alpha \log(t/10) \quad (4)$$

式中

s ：為壓密沉陷量，mm

α ：為壓密沉陷指數，即潛盾機盾首通過後第 100 天與第 10 天沉陷量之差值，mm

t ：為潛盾機盾首通過後之時間，天

圖九至圖十一為位於中和線與新店線四條隧道交錯重疊處之二至四條潛盾隧道施工所導致地表沉陷預測值與量測值比較結果(楊國榮等，1996)。

其中預測值為各單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷疊加結果。

由比較結果得知，雙潛盾隧道不論為平行或上下重疊配置，施工導致之地表沉陷與單潛盾隧道施工所導致地表沉陷之疊加結果相當吻合。三條或四條潛盾隧道施工所導致之地表沉陷與單潛盾隧道施工所導致之地表沉陷疊加結果亦相當吻合。

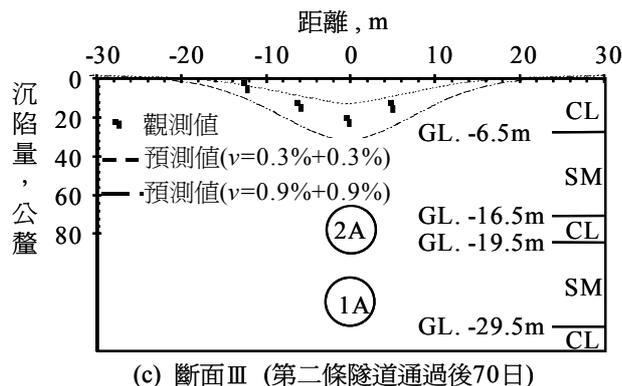
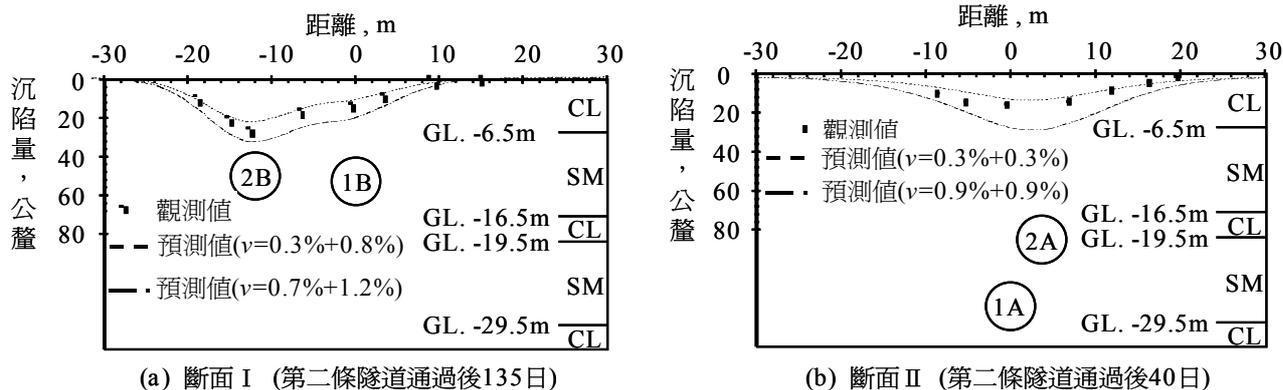
六、景美礫石層之施工災害

台北捷運雙層車站的開挖深度在 18 公尺左右，而三層交會站開挖深度都在 22 公尺以上。幾個通風豎井的開挖深度甚至都超過 30 公尺，而且開挖面下方的黏土層厚度不足，必須採取特別措施以維持安全。如圖十二所示，以中和線的通風豎井為例，開挖面直達景美層的頂部，承商採取將連續壁加深，並在底部以灌漿封底，形成一個人工栓塞的方式來滿足安全係數的要求(青木建設/新亞建設，1991；楊國榮等，1995)。圖十三及十四表示板橋線的 A 及 B 兩豎井是以降水來達到同樣的目的(黃南輝等，1996)。這兩豎井連續壁的底部都有一層黏土層，其作用與圖十二的人工封底相同。這三個豎井所採的方案不同，所遭遇的困難也不盡相同，但均與景美礫石層之高透水性以及豐富含水量有著密切的關係。茲分別就中和線通風豎井以及板橋線之 A 通風豎井施工中發生之災變說明如后。

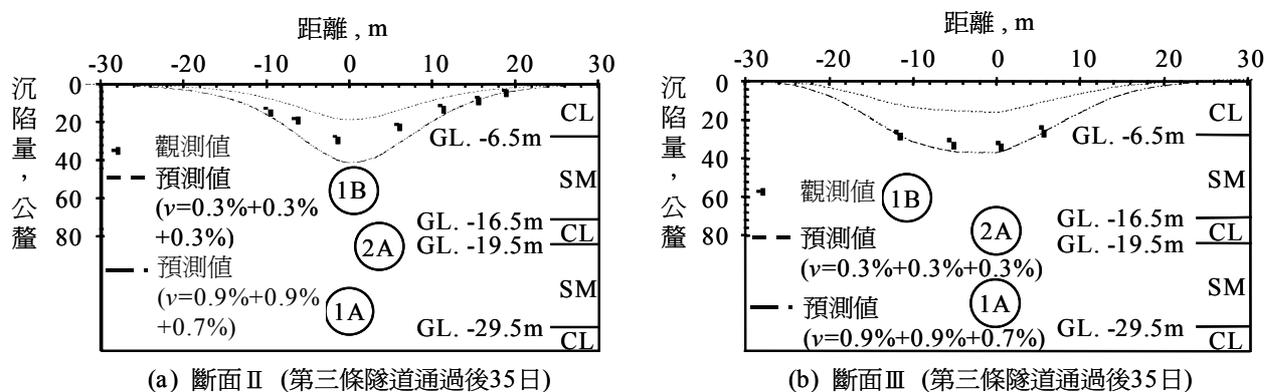
6.1 中和線 CH221 標通風豎井施工災害

CH221 標主要連接 CH221 標與 CC275 標之潛盾隧道，於施工期間作為此二施工標潛盾隧道出發井之用，於營運期間則作為通風與逃生之用。

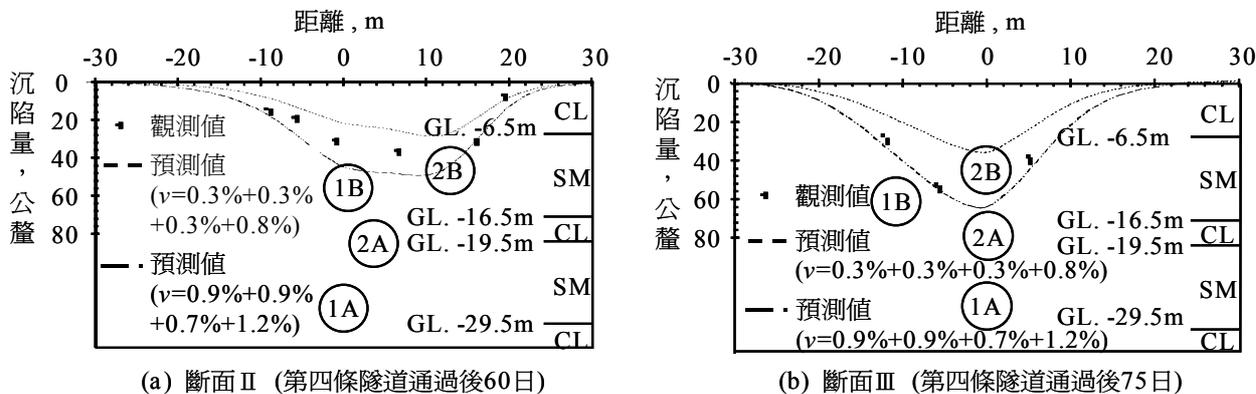
上下行潛盾隧道銜接處柔性接頭施工時可能由於周遭地盤止水灌漿改良仍有部份水路存在，以及柔性接頭施工因素等，於上行隧道已拆除環片處發生湧水，位置如圖十五。大量土砂與水湧入通風



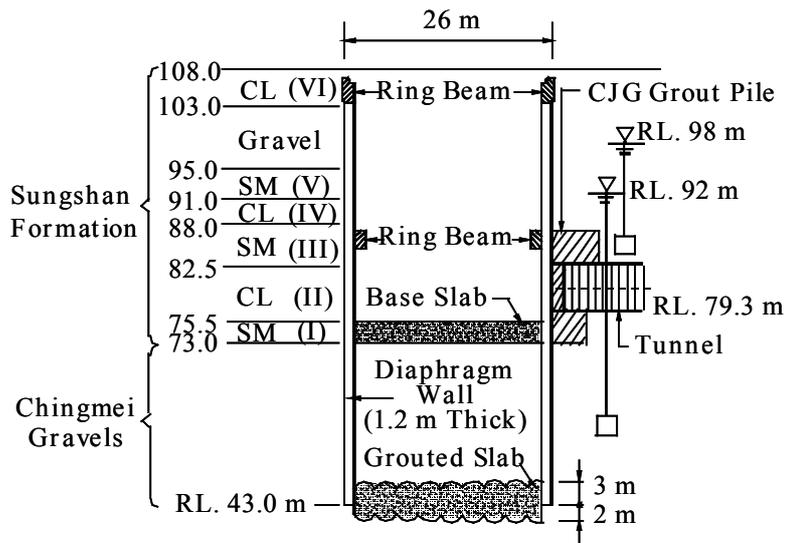
圖九 二條潛盾隧道施工所導致預測沉陷槽與實測值比較成果



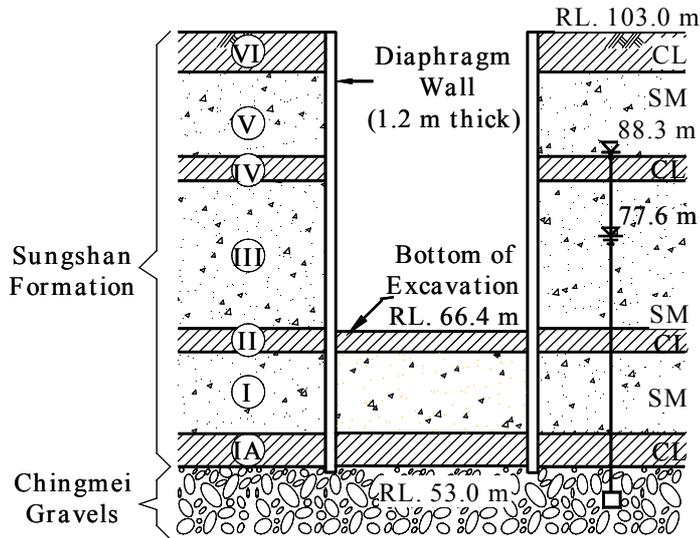
圖十 三條潛盾隧道施工所導致預測沉陷槽與實測值比較成果



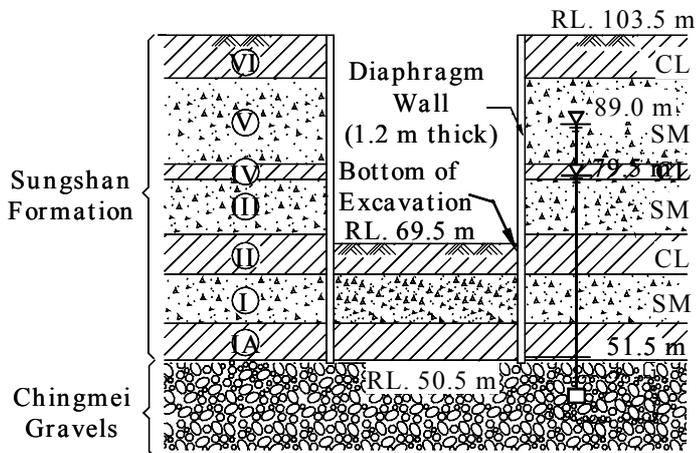
圖十一 四條潛盾隧道施工所導致預測沉陷槽與實測值比較成果



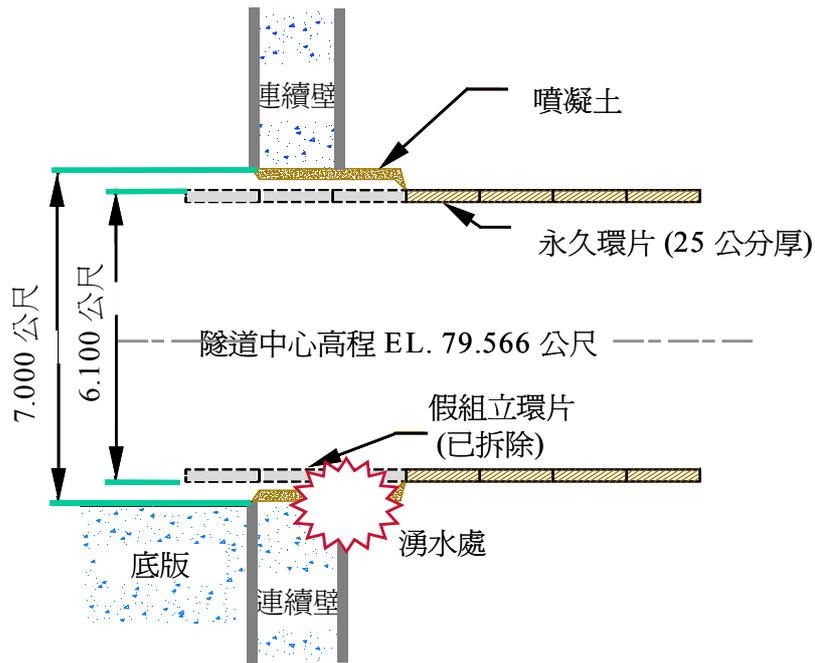
圖十二 中和線通風豎井封底示意圖



圖十三 板橋線通風豎井 A 降水示意圖



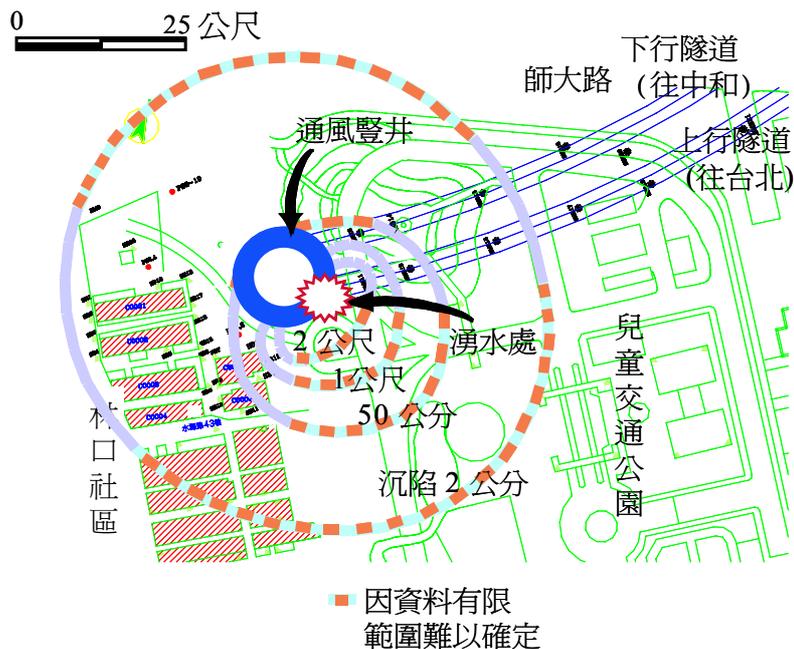
圖十四 板橋線通風豎井 B 降水示意圖



圖十五 中和線通風豎井災變示意圖

豎井內，並導致鄰近地表發生嚴重地盤下陷，其影響範圍約達 100 公尺，有關沉陷影響範圍如圖十六所示。承商為防止災情擴大，災變發生時於通風豎井內進行填砂與灌水，使水位保持在地表下 16 公尺左右，以平衡外在景美層內之水壓力。

在完成各階段應變措施，且地盤已漸趨穩定後，承商即開始進行復舊。隧道復舊作業主要包括：1.受損環片範圍確認與灌漿處理，2.上行隧道土砂與水清除，3.下行隧道洞口地盤改良補強，4.上行隧道洞口處冰凍作業，5.豎井內土砂與水清除及上行隧道洞口封堵施作，6.受損環片更換與柔性接頭施工，通風井及隧道完成復舊之作業時間造成工期延宕近二年。



圖十六 中和線通風豎井災變沉陷影響範圍

6.2 板橋線 A 通風豎井施工災害

CP262 標於 1995 年 7 月 16 日凌晨正在通風豎井 A 之上行隧道到達端進行鏡面破除時，發生湧水且夾帶大量砂進入通風井 A 及隧道內，造成西側地表最大沉陷達 6 公尺，通風井 A 及隧道內各項機具設備(含潛盾機)遭浸水或土砂埋沒，以及隧道局部變形受損之事故。

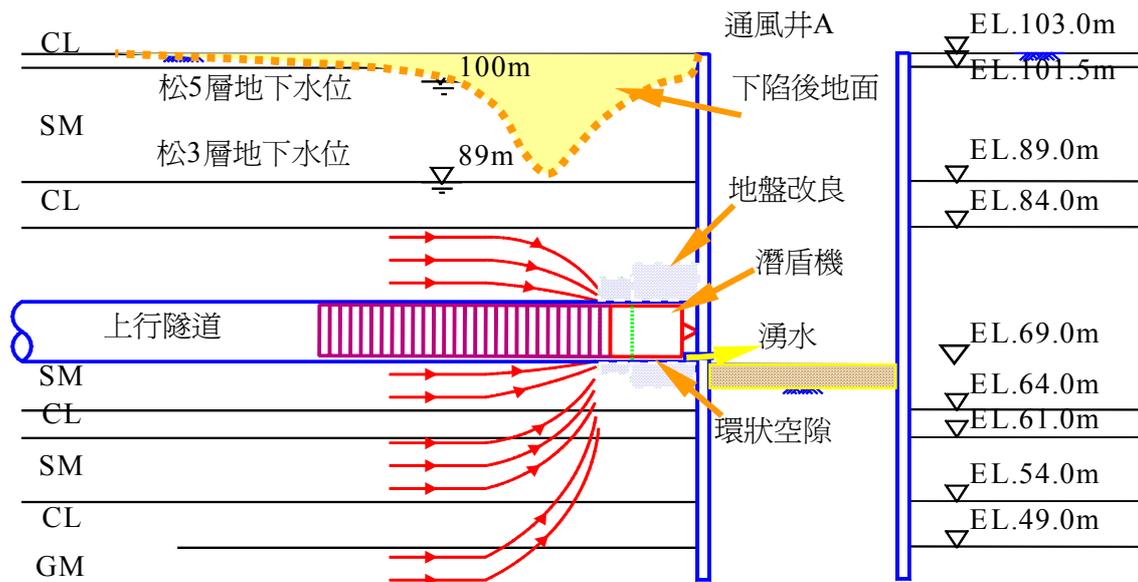
發生災變的原因頗耐人尋味，因為湧水口距景美層尚有 20 公尺(參考圖十七)，照理不應該無法止水才是。在以冰凍工法將洞口封住、井內淤水抽乾後，在潛盾機的下方發現一截流木，同時在這截梳木附近發現一截塑膠管。因此研判這塑膠管是直通景美層的一口已經棄置的抽水井，其四周原本應該有空隙讓景美層的水湧入(朱旭等，1997；Ju, et al., 1998; Lin, et al., 1997)。但是因為在隧道鏡面四周本來就曾經以高壓噴射灌漿工法進行地盤改良(參考圖十七)，這空隙理應已經被封閉，而且在這兒的地盤改良是以三重管施作(CJG)，品質相當地好，照理改良區不至於被水流淘空。因此懷疑塑膠管旁之流木在潛盾機推擠之下，攪動了地盤改良區，造成水路，附近的土、砂得以被帶入通風豎井之內，終於造成捷運初期路網工程中最嚴重的一次災變。

本次意外事故影響範圍達 70 公尺，有關意外事故所造成沉陷範圍詳圖十八。本次意外事故，在完成各階段應變措施，且地盤已漸趨穩定後，承商即開始進行復舊。隧道復舊作業主要包括：1.擾動地層地質調查，2.受損狀況探測，3.通風井 A 鏡面止漏作業，4.隧道內止漏作業，5.災區內隧道外側地盤改良，6.通風井 A 排水，7.凍結工法，8.壓氣工法，9.受損隧道環片復舊。通風井及隧道完成復舊之作業時間造成工期延宕近二年。

6.3 景美層埋設水壓計造成站區開挖災害

在南港線某站體的開挖也因水壓計的埋置而釀成巨大災害(Moh et al, 1997)。該站體係位於台北市中心，其開挖斷面及地層概況如圖十九所示，站體寬約 23 公尺，開挖深度約為 24.5 公尺，採明挖配合 8 層內支撐施工法。擋土壁則為 1.2 公尺厚，44 公尺深之連續壁。

最終開挖面至松二層底部之厚度為 20.5 公尺，松二層底部水壓則有 29.5t/m²，抵抗上舉之安全係數為 1.3。事故發生時已開挖至底部且除了站體南端僅打設 PC 外，其餘大底已打設完成。事故發生主要因為有一支水壓計損壞而重新埋置。鑽孔在開挖底部作業之位置如圖十九所示。當鑽至 RL.54

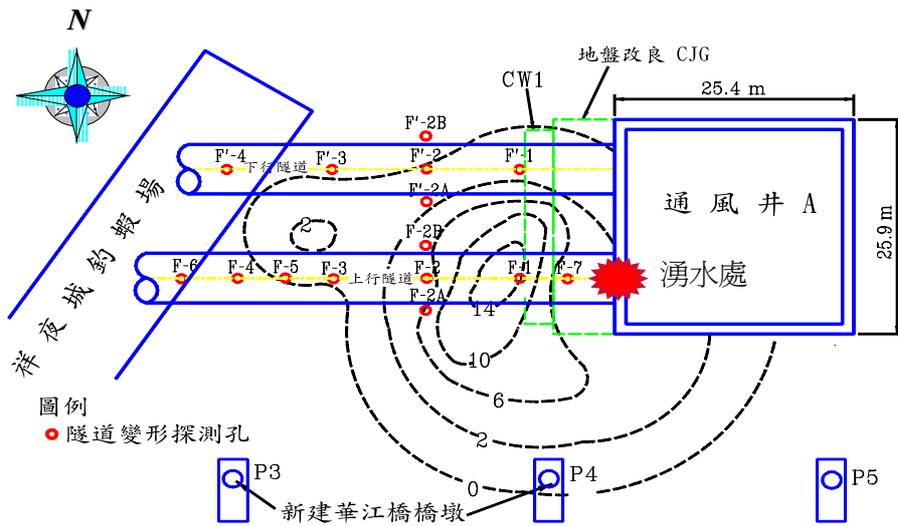


圖十七 板橋線通風豎井 A 災變示意圖

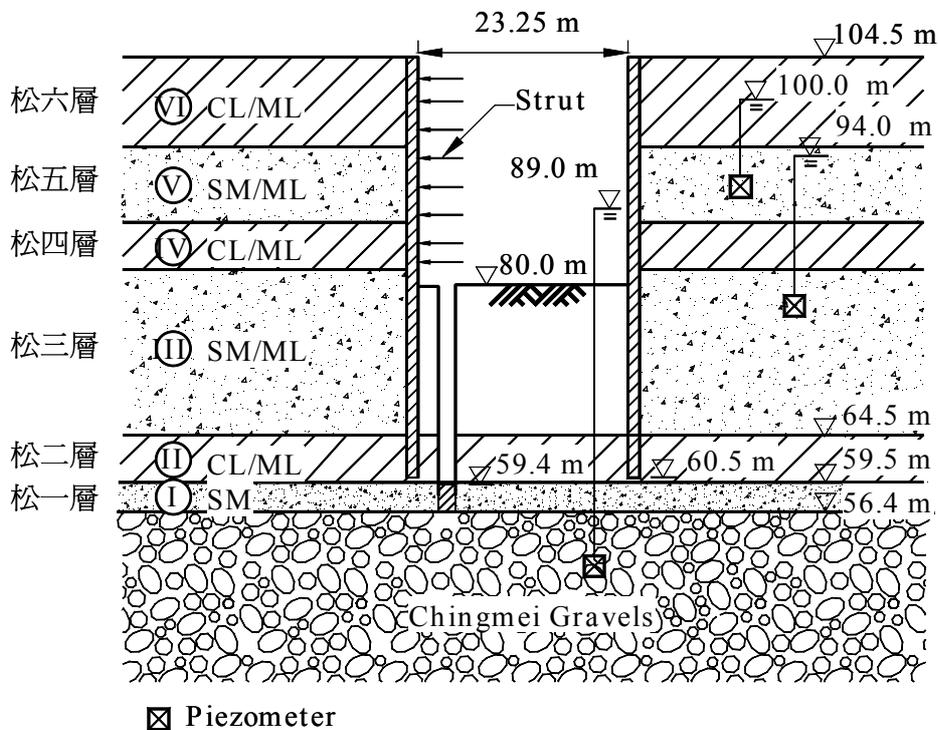
公尺時水由鑽孔中湧出，並夾帶大量泥砂如圖二十所示。承商雖立刻加套管至高程 EL.89 公尺處意圖

平衡景美層之水壓，但已來不及，砂袋也無效果，另緊急調度三部灌漿機採 LW(Labile Wasseglas)灌漿也抑止不住。其結果採用 7 萬噸水灌注才能平衡，另共計用了 3,000 立方公尺的 LW 及 2,400 立方公尺的 CB(Cement-bentonite)漿，才能進行復舊工作。

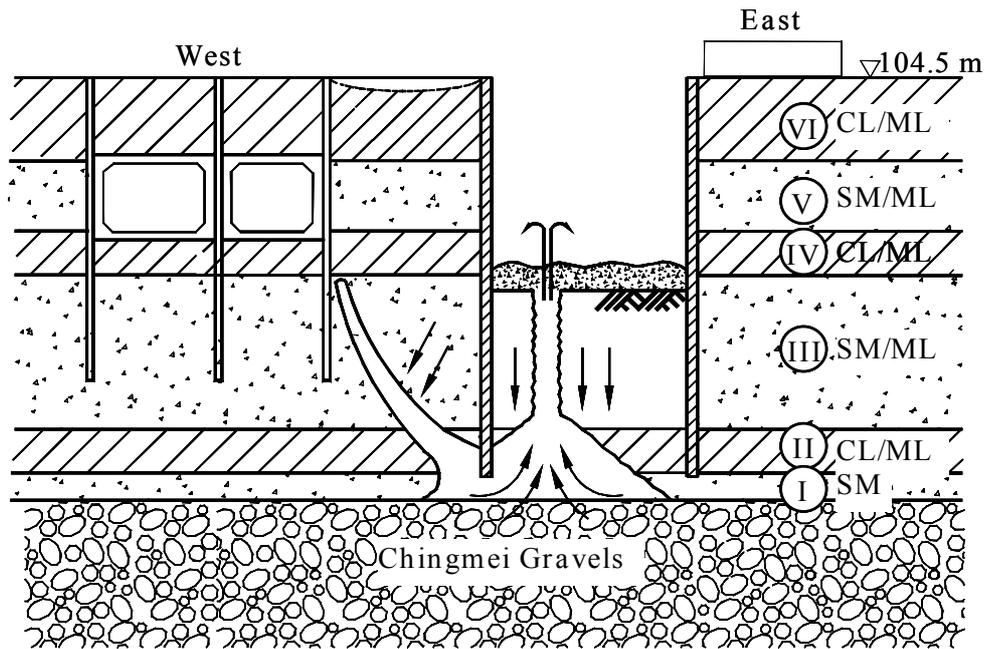
本災害復舊作業包括 1.增加支撐 2.灌漿 3.設置隔幕牆 4.設置小土堤。
 本次災害之復舊工作造成工期延宕近半年。



圖十八 通風豎井 A 意外事故所造成沉陷範圍示意圖



圖十九 鑽孔貫穿黏土封底層導致災變



圖二十 災變示意圖

參考文獻

- Department of Rapid Transit Systems (1992), Civil Engineering Design Manual, DORTS, Taipei City.
- Ju, D. H., Duann, S. W. and Tsai, K. H. H. (1998), "Ground freezing for restoration of damaged tunnel", Proc., 13th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, pp. 615-620.
- Lin, L. S., Ju, D. H. and Hwang, R. N. (1997), "A case study of piping failure associated with shield tunneling", Proc., International NO-DIG'97, Taipei, pp. 6B-1-1~6B-1-13.
- Moh, Z. C. and Hwang, R. N. (1999), "Geotechnical problems related to design and construction of the Taipei Rapid Transit Systems", Keynote Speech, Proc., Commemoration of Dr. Sang-Kyu Kim's Retirement Symposium, April, Seoul, South Korea.
- Moh, Z. C., Ju D. H. and Hwang, R. N. (1997), "A small hole could become really big", Momentous Lecture, Proc., 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany.
- Peck, R. B. (1969), "Deep excavation and tunnelling in soft ground", Proc., 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the Art Report, Mexico City, pp. 225-290.
- 台北市政府捷運工程局 (2000), 台北都會區捷運系統中和線工程總報告。
- 朱旭, 楊慕泉, 段紹緯 (1997), "潛盾施工管理", 第七屆大地工程學術研究討論會, 8月, 金山, 第1033-1040頁。
- 朱旭、宮能文、馮堯松、郭耀程、范世亮 (1997), "隧道鏡面湧水搶救及再出發", 捷運工程軟土隧道案例研討會, 7月, 台灣科技大學, 台北, 第263-284頁。
- 吳建民 (1968), "台北盆地地盤沈陷問題之研究", 土木水利, 第4期, 第53-81頁。
- 青木建設/新亞建設 (1991), "Basic & Schematic Design Examination for Vent Shaft Slurry Wall", 施工報告。
- 陳奕耿、黃俊青、王復國(1997), "深開挖地中版建物保護案例", 第七屆大地工程學術研究討論會, 8月, 金山, 第593~600頁。
- 黃南輝、張培義、王復國、簡敏忠 (1999), "台北捷運深開挖經驗", 近代營建工程研討會系列之三

—土壤深開挖之台北經驗研討會，4月，台灣科技大學，台北，第1~36頁。

黃南輝、許先才、林國楨、闕河淵 (1996)，”降水工法在深開挖之應用”，深開挖與地下水研討會，4月，台灣科技大學，台北，第53-80頁。

楊國榮、黃立煌、王勝男 (1995)，”台北盆地礫石層深開挖地下水問題”，國際卵礫石層地下工程研討會，3月，台北，第4-21~4-28頁。

楊國榮、楊慕泉、趙際禮 (1996)，”泥水加壓式潛盾機施工導致之地表沉陷探討”，現代營建，第197/198期，5/6月，第29-35/27-31頁。

楊國榮、趙際禮 (1997)，”台北捷運系統新店線 CH221 標通風豎井施工”，第七屆大地工程學術研究討論會，8月，金山，第1017~1024頁。

闕河淵、吳沛軫、朱世忠、蘇信淵 (1996)，”地下工程施工對鄰近建物保護施作時機及成效檢討”，地工技術，第54期，第77~86頁。