

大地工程與基礎建設

莫若樞
亞新工程顧問股份有限公司 總經理

摘要

本文以四個案例從經濟和安全的觀點來討論大地工程在基礎建設中之重要性。這四個案例包括台北市捷運系統、台北市復興北路機場車行地下道、泰國曼谷至瓊普瑞快速公路及曼谷第二國際機場。這四個案例不單在工程規模上是超大型計畫並且各具特色。討論重點包含土壤調查資料之可靠性、分析模式與施工方法之選擇、對土壤變化之應變能力以及對監測資料之及時分析與應用。

關鍵字：大地工程、台北市捷運系統、台北市復興北路機場車行地下道、曼谷公路、曼谷第二國際機場、地盤改良、深開挖、隧道

Geotechnical Engineering and Infrastructure Development

Za-Chieh Moh
Moh and Associates, Inc., President

ABSTRACT

Four major infrastructure projects in Taipei and Bangkok were discussed to illustrate the importance of geotechnical engineering in any infrastructure development in terms of safety and economy. The four projects are the Taipei Rapid Transit Systems, the Taipei Airport Underpass, the Bangkok-Chonburi New Highway and Ground improvement of the Second Bangkok International Airport. They were selected not only because of the mega size in terms of construction cost but also because of the complexity or uniqueness of the project. Emphasis has been placed on the importance of adequate and reliable subsurface information, appropriate selection of analysis principles and construction methodology/details, ability to copy with variation in ground conditions and timely interpretation of field performance data.

Keywords: geotechnical engineering、Taipei Rapid Transit Systems、Taipei Airport Underpass、Bangkok-Chonburi New Highway、Second Bangkok International Airport、ground improvement、deep excavation、tunnel

1. 前言

近年來，台灣經濟的蓬勃發展，成就了所謂『台灣奇蹟』，公共工程是帶動經濟的火車頭，經濟發展有賴基礎建設，國人能享受繁榮，工程師自然功不可沒。而在基礎建設中，無論是設計，或者是施工，大地工程都是重要的一環。可是與其他專業不同的是，因為土壤的變異性，大地工程還沒有成熟到可以稱為科學的程度，所以在處理問題時，實務經驗極端重要，尤其是解決疑難雜症時，大地工程師根據經驗所作的判斷遠較數值分析可靠。本文謹就國內兩個案例及國外兩個案例闡述大地工程之複雜性並針對幾個特別的課題進行探討，以拋磚引玉，就教於諸先進。

2. 台北盆地工程案例

國內的許多重大工程中，以地下工程而言，在量的方面自然首推台北捷運工程，在施工困難度方面，則非松山機場穿越道莫屬。在這兩個工程進行

的過程中，都曾遭遇到一些特殊狀況，針對這些狀況，也發展出一些特殊的解決方法，值得為日後施工之借鏡，因此特別在此對這兩案例中與大地工程有關的課題作個介紹。

2.1 案例介紹

案例一：台北捷運初期路網

如圖 1 所示，台北捷運初期路網一共有六條線，除了木柵線是屬中運量系統外，其他各線都屬重運量系統，路網全長 88 公里，含 77 個車站，一半的路段穿行於地下，而地下段中除了一小段路段外，其餘全都是位於軟弱土層之中。第一條捷運線：木柵線，於民國 85 年 3 月通車。目前，板橋線新埔站至永寧站這一段尚在施工，內湖線的細部設計剛才開始，除此之外，其餘諸線都在營運之中，每日運量約達 90 萬人次，在節日曾有 120 萬人次之紀錄。自捷運各線陸續通車以來，台北市市區的交通

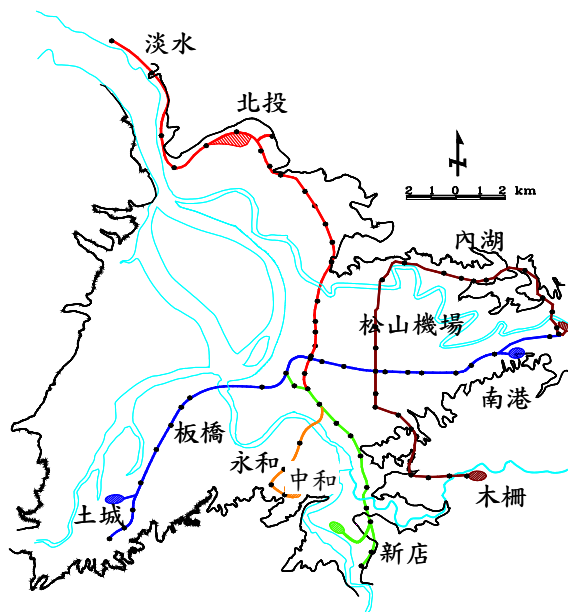


圖 1 台北捷運初期路網

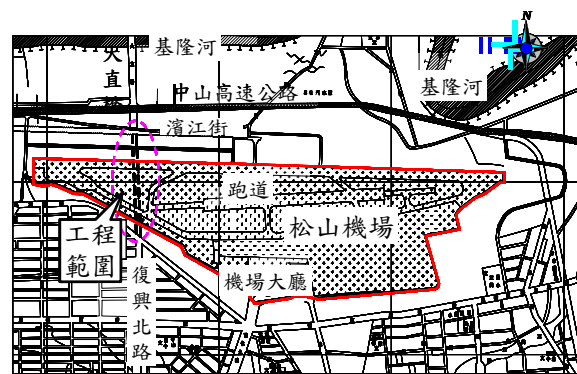
有明顯的改善，市民生活品質大幅提升。在每天的尖峰時段，及每逢節日及慶典，捷運系統班班滿載，充分發揮舒解交通的功能，捷運也成為全體市民之最愛。

案例二：松山機場地下穿越道

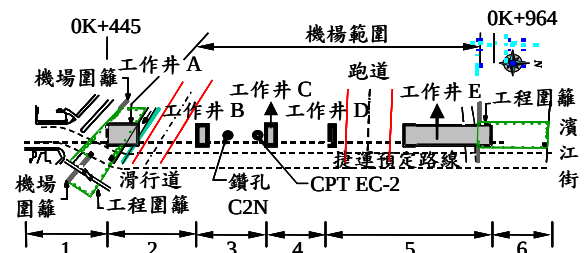
近十年來，內湖與東湖發展迅速，人口驟增，但由於松山機場之阻隔，市中心區與內湖及東湖地區之聯外幹道不足，平面交通十分壅擠。雖然捷運為台北市民帶來無比的便利，但是內湖延伸線因為種種原因，延至今日才開始細部設計，緩不濟急。為舒解車流，市府決定將復興北路向北延伸，自松山機場與基隆河下方穿過，與大直橋相接。這計畫早在民國 78 年即已完成規畫，在 84 年完成設計，民國 85 年 7 月發包，原預計在 90 年 12 月通車。但由於當地居民之抗爭，進度不如理想，完工日期將因之延後。

如圖 2 所示，由於其上方有捷運木柵線隧道，更上又有一條大排水箱涵，所以該車行穿越道必須在機場之南側以 7% 縱坡急速下潛，在最深處達地表下 21.37 公尺〔指路面高程〕，所以工程難度相當的高。在機場北側，由於要與濱江街相連，而機場跑道距濱江街不過 200 公尺，即使以最大縱坡定線，該車行穿越道的頂部距跑道鋪面也只有 5 公尺的距離。松山機場是軍民共用機場，空中交通繁忙，光是民用客機每天即有 300 班次起降，戰備要求也不容許本工程對空中交通有任何影響。所以民航局嚴格要求：

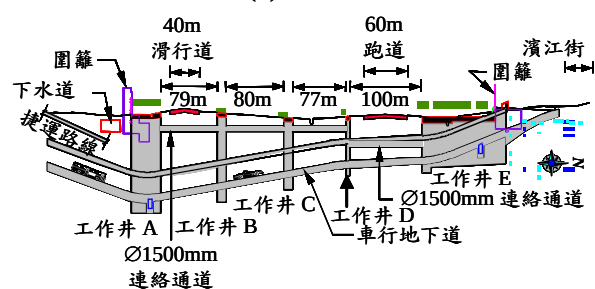
1. 所有地面上的活動只能在晚上 11 點至清晨 5 點之間進行，換句話說，人員與機具只能在晚上 11 點過後進場，而必須在清晨 5 點以前離場。
2. 跑道與滑行道之沉陷量不得超過 2.5 公分。



(a) 工程範圍示意圖



(b) 平面圖



(c) 剖面圖

圖 2 穿越松山機場車行地下道工程示意圖

為確保飛行安全，本工程採用管幕工法施工，並在跑道及滑行道下方以『無限自走工法』推進預鑄混凝土節塊〔熊谷鑑，1997；亞新工程顧問公司，1992〕。目前〔民國 90 年 7 月〕所有管幕都已安裝就位，地盤改良作業已經部分完成，節塊也正準備自 E 工作井出發。

2.2 台北盆地之地質狀況

台北盆地是約在一萬年前由於板塊運動而導至地層下陷而形成。由於海水入侵，在數千年前仍是一個大湖。大漢溪、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，包括松山層、景美層、新莊層等。以工程的眼光而言，在表面厚達 60 公尺的松山層自然是研究的對象，如圖 3 所示，松山層有六個次層，這六個次層在市中心區尤為明顯，圖 4 表示在善導寺附近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，松山層的所有六個次層都相當鬆軟，所以在松山層中進行深開挖時，連續壁都相當的厚、也相當的深，

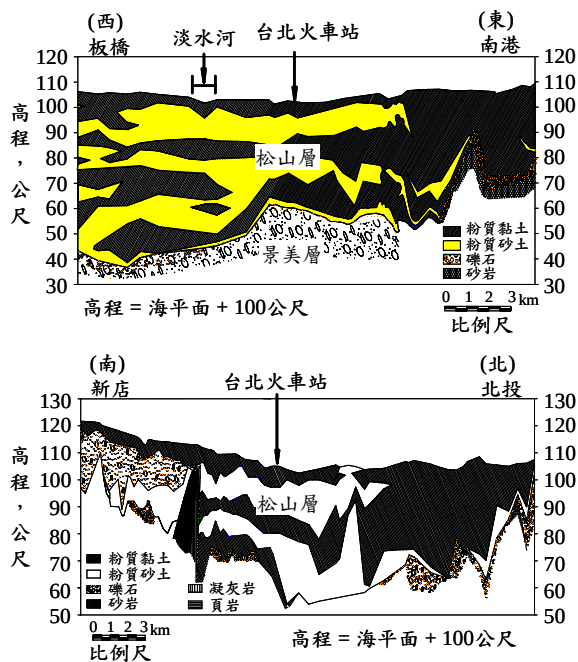


圖 3 台北盆地地層剖析

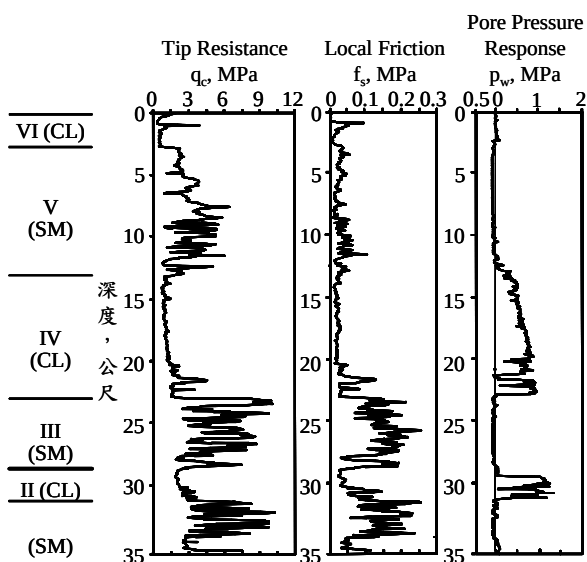


圖 4 台北市區荷蘭錐試驗結果

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。

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。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，景美層中的水頭才明顯回升，地表沉陷趨緩甚至停止。地表不再下沉固然可喜，但水頭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。

幸好在捷運工程設計時即已注意到這一問題，在施工規範中訂定因應措施，在施工時各相關單位也能防範得宜，並未造成嚴重困擾。

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。

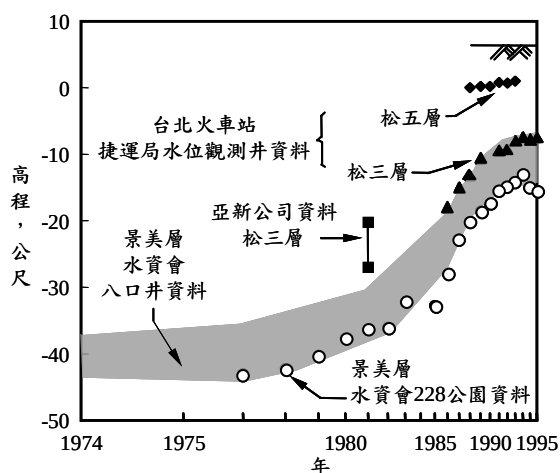
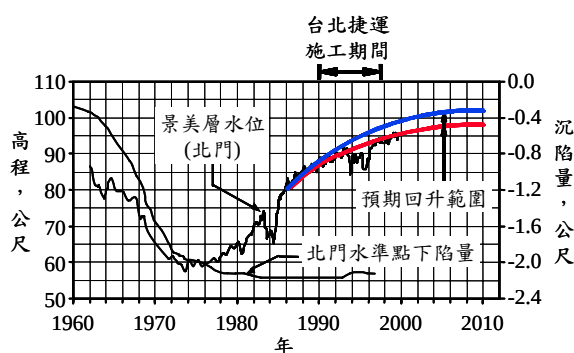
以下謹就以上所提到的幾個地質方面問題作較為詳盡的說明。

2.2.1 軟弱土層的問題

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，捷運工程的連續壁之厚度較以前民間工程要厚上 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，但是這錢花的十分值得。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三分之一，有地盤改良的話，側向位移更小，所以開挖區附近的沉陷也相當小，損鄰事件屈指可數〔黃南輝等，1999；黃南輝，2001〕。若非如此，由於捷運工程的開挖深度遠較過去為深，損鄰事件當會倍增，而且由於六線齊發，出事頻率必高，加上媒體及有心人士之渲染，民眾會對捷運工程失去信心，甚至抗爭不斷，工程將因此而延耽，所延伸之社會成本將遠超過連續壁加厚、加深所花的費用。

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。在上萬的單元中，瑕疵難免，偶有連續壁接縫處漏水漏砂之情事並不足為奇。一般而言，只要處理得當不致於引起嚴重的後果。有幾次大型地陷是因為地盤的位移導致壁外自來水管與水管間之接頭錯動，大量的逸水掏空連續壁後方土體所致。這類的狀況是設計者無法預防的，有賴施工者對連續壁之施工品質嚴加控制，以及在發現滲水時及時處理。

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 5 所示，過去景美層中的水頭曾因超抽而大幅下降，松山層中的水頭也隨之下降，如圖 6 所示，在 80 年代，松山三次層之水頭在地表下 25 至 30 公尺處，更早則無資料，相信至少也在 35 公尺以下。由於松山二、四兩次層是粘土層，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。反而由於預壓作用，減少了近年來深開挖時工區附近的地表沉陷。

捷運車站及轉轍段都相當地深，所以開挖區附近的地表沉陷一直是設計單位、施工單位以及監造單位所關注的重點。幸好在大部分地區開挖面下都有相當厚度的黏土層，所以只要連續壁有足夠的貫入深度，就能有效地切斷水路，在開挖區內降水就不至造成太大的困擾。因為開挖區內降水而造成區外地表沉陷以致鄰房受損的情事可說是相當地少。但也曾發生過承商在連續壁尚未閉合時即急於進行抽水試驗以致鄰房受損的例子，所以日後在訂定規範，以及在現場作業時，應注意防範類似情況的發生。

相當多的承商在進行鑽探或在施作連續壁時，抽取地下水作為施工用水。一般而言，景美層的水量豐富，小量的抽水不致導致造成地表沉陷。但不乏承商抽取松五層的地下水作為施工用水，在進行開挖之前，鄰房沉陷即有超過警戒值甚至行動值的例子。所以施工規範應明定不得抽取地下水作為施工用水，監造單位也應警覺，注意防範。因為一旦鄰房受損，其復舊費用可觀，而且後遺症頗大。

在過去廿年間，台北市區大樓如雨後春筍，不斷出現，而地下室也越挖越深。所以在捷運工程開始之前，無論是設計或者是施工，工程師對深開挖

的經驗可說是已經相當豐富。相對而言，在隧道方面，就比較陌生。早年在埋設衛生幹管時，地表沉陷動則達數十公分，造成路面破壞以及鄰房嚴重受損〔方永壽等，1991〕。而捷運的設計主要是根據過去的經驗，所以土壤漏失率被過份高估。由於承商引進改良式泥水加壓式及土壓平衡式潛盾機，施工品質大為改進，加上確實施作背填灌漿以及時填塞盾尾孔隙，捷運隧道上方的土壤漏失率平均不到1%，地表沉陷平均不到2公分，遠較預估值為小〔楊國榮等，1995；1996；賴慶和等，1997；吳國安等，1997〕。未來若能加強監測與管理，相信地表沉陷可以控制到一公分之內，對建物之影響將微乎其微。

但在構築復興北路機場穿越道時，遇到前所未有的挑戰。如圖 7 所示，本穿越道雙向各有二線，結構體高 7.8 公尺，寬 22.2 公尺。若要將所有車道納在一個單一隧道之內，隧道的內徑將要超過 14 公尺，即使是分成兩個隧道，直徑也要到 10 公尺，在跑道下方並沒有足夠的覆土，所以必須出奇制勝，以先進的技術克服困難〔熊谷鎰，1997；亞新顧問公司，1992；Moh 等，1999〕。本工程主體全長 1,037 公尺，包括南引道長 445 公尺，穿越道 519 公尺，以及北引道 73 公尺。為縮短工期，全線設五個工作井，分 6 段施工。工作井是以明挖覆蓋法施作。因為有足夠的空間，所以引道部分也是以明挖覆蓋法施作，其他段位在機場範圍之內，為免影響飛航空安全，只能以隧道方式構築。由圖 8 及圖 9 所示鑽探及電子錐試驗結果，可見該地地質相當鬆軟，而且有兩個施工段是位在跑道及滑行道下方，根本無法自地面進行地盤改良。經過仔細評估，選擇管幕工法進行施工。如圖 10 所示，管幕工法的原理是先在隧道四周先以鋼管形成一道屏障，再在其中進行開挖，由於鋼管的支撐，開挖面得以維持穩定〔熊谷鎰，1997；亞新顧問公司，1992〕。有必要時，在地質狀況特別差的地段進行地質改良，以固化土心〔參考圖 11〕，除了提高安全性之外，也可減少地盤變位。

由於地面上的施工活動限在 23:00 至 05:00 之間進行，所以在工作井完成之後，先以推管工法施作一條 1.5 公尺直徑的輸送管以連通工作井（參考圖 2），方便人員、機具及材料之運送。在這輸送管完成後，後續的工作即可不分晝夜地在地下進行。只有如此，才有希望在預定時程內完工。

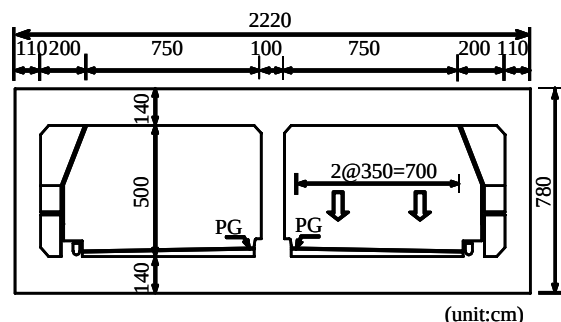


圖 7 復興北路車行地下道斷面

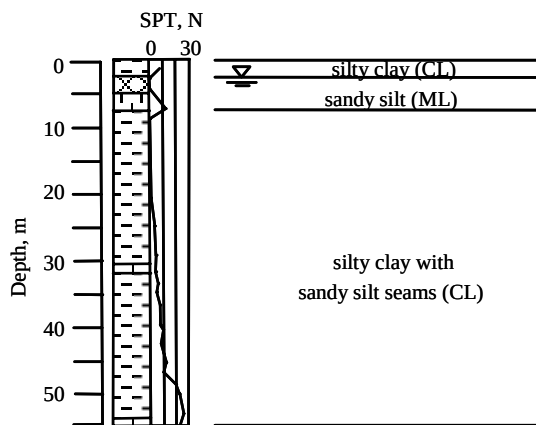


圖 8 松山機場 C2N 號鑽孔結果

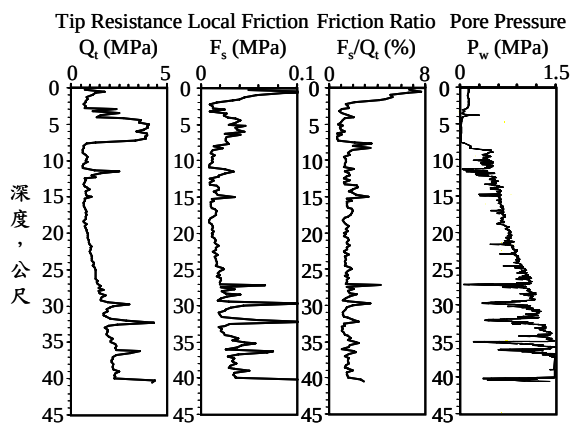


圖 9 松山機場 EC-2 號水壓錐試驗結果

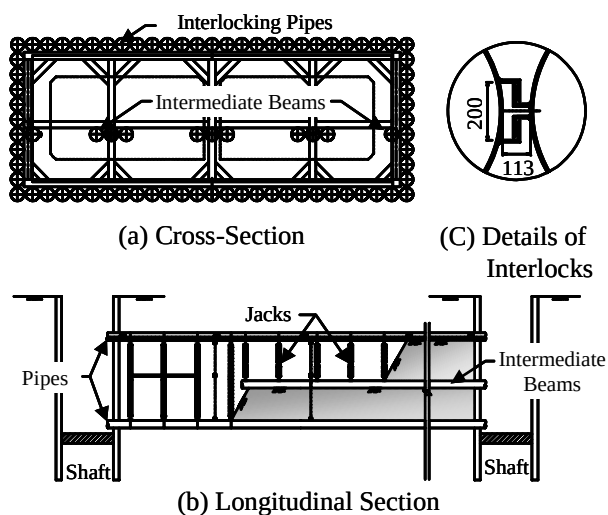


圖 10 車行地下道第三及第四施工段掘進示意圖

鋼管是以推管方式施作，鋼管外徑 812.8 公厘，管壁厚度 7 公厘。每管之兩側有接榫與相鄰兩管相卡緊。公母接榫間之縫隙以保麗龍填塞以止水。但是在跑道下方及滑行道下方，單只憑管幕作為屏障，仍不足以保證施工之安全，鋼管之勁度也難以保證跑道及滑行道鋪面的沉陷不超過容許值。在評估眾多方案後，在跑道及滑行道下方，採取

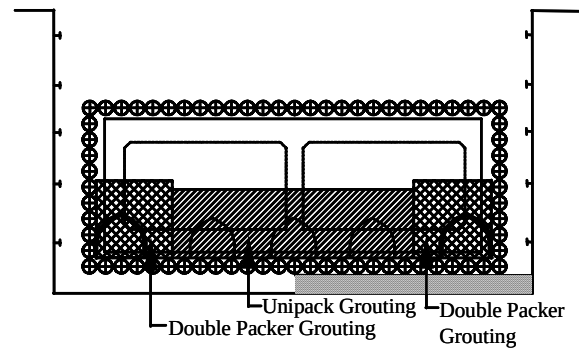


圖 11 車行地下道地盤改良示意圖

『無限自走式』工法將預鑄節塊推入洞內。圖 12 是無限自走工法之示意圖，以第 2 施工段為例，涵體共分為 8 節，除第一節長 6.5 公尺外，其他各節都是 10.5 公尺。如圖 13 所示，土心的上方有 10 根，兩側各有 1 根，總共有 12 根鋼導管連通前後兩工作井，鋼導管中穿有鋼腱，鋼腱的一端連到到達井的反力牆〔參考圖 12〕，另一端連到涵體最後一節節塊的尾端。土心的下方有 5 個導坑，導坑的底部有鋼軌以支撐節塊並且控制節塊的前進方向。另外在導坑內也有鋼腱，鋼腱的一端連到到達井的反力牆，另一端連到最後一節節塊的尾端。

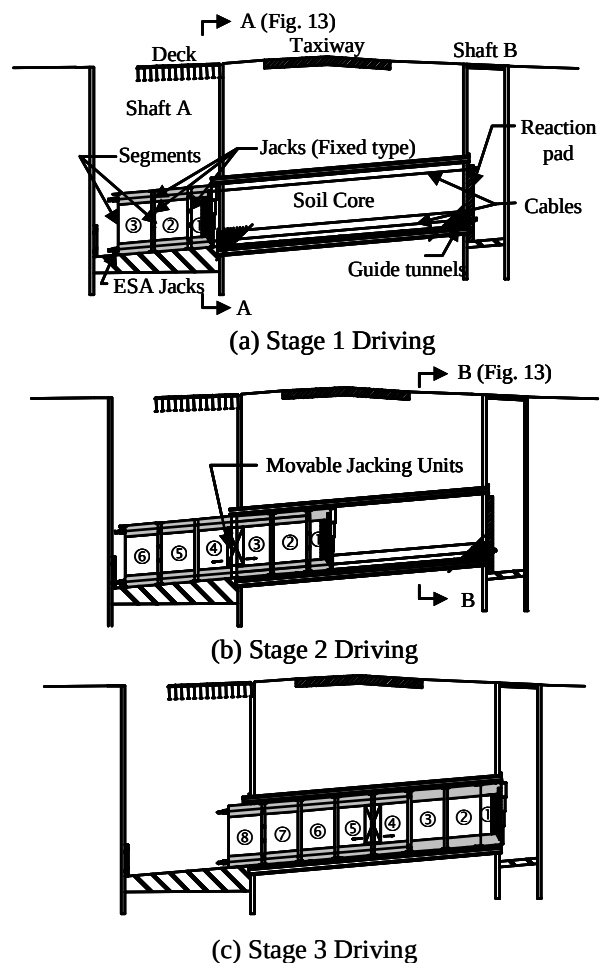


圖 12 第二施工階段無限自走工法示意圖

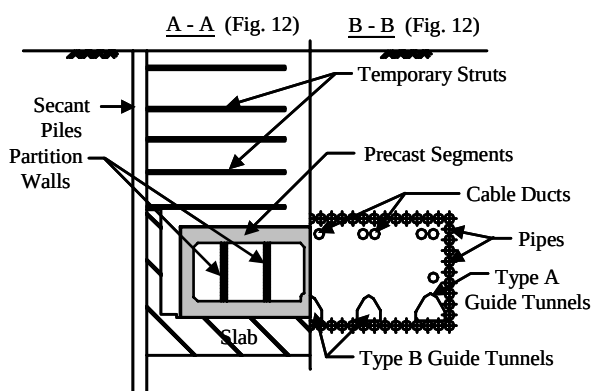


圖 13 無限自走工法施工段斷面圖

如圖 14 所示，在第一節有 4 排，每排 6 間，一共 24 間隔艙，挖掘工作是在每個間艙中分別進行，每個隔艙的開挖面有獨自的面板作為臨時支撐，所以安全性相當地高。前後兩節節塊之間裝有千斤頂，提供推力。在推第一節時，第二及第三節提供足夠的摩擦力作為反力。但在推第二節時，第三節的摩擦力可能已經不足，部分的力量會藉達到第三節尾端的鋼腱傳至到達井的反力牆。在推進第三節時，部分的反力是靠第四、五及六節的摩擦力提供，部分的反力會藉裝在導坑中的鋼腱傳到到達井的反力牆，部分的反力會藉上方裝在鋼導管中的鋼腱傳到第二節的前端，並由第二節的摩擦力承受。這樣一節一節的推進，由於每次只推一節，而大部分的反力都由其他節的摩擦力承擔，作用在反力牆的力量很小，所以這工法適用於鬆軟的土質。理論上，節塊的數量可以無限，隧道的長度也就可以無限，所以名之為『無限自走工法』。

在業主的督導之下，承商準備了一個周詳的監測計畫，現場佈設了千餘個測點，包括沉陷計、傾度計、水平測管等儀器。其中多項儀器可以自動量測，並將資料藉由網路線傳回工務所。工務所有一套電腦系統及時處理為數龐大的監測資料，並加檢核，如有異常現象，能夠即時顯示警訊。

2.2.2 地下水問題

松山層下方的景美礫石層是一個很好的承載

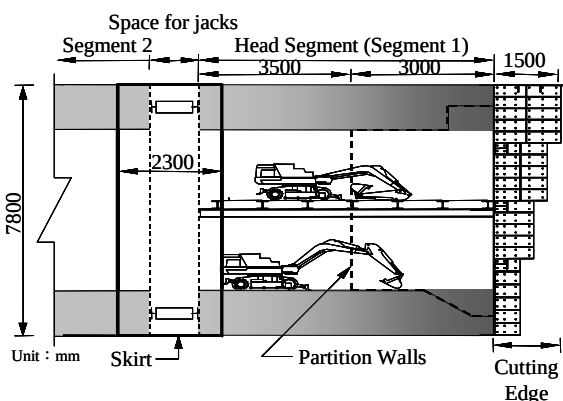


圖 14 切刀及首部節塊

層，提供樁基礎承载力。但是對深開挖而言，景美礫石層卻是一大威脅，必須嚴加注意。景美層是一個很好的地下水庫，在翡翠水庫完成之前，大台北地區的民生用水一直是靠抽取景美層中的地下水來供應，可見其水量之充沛。由於台北市的工商日漸發達，人口大幅成長，用水量激增，因之補注不及，景美層之水頭逐年下降。如圖 5 所示，根據水資源局之資料，在 60 年代及 70 年代的初期，在北門一帶所測得的景美層的水頭下降至高程+60 公尺左右，根據文獻，在日據時代，景美層是受壓水層，其水頭超出地面。以北門地區為例，目前地表高程約在+102.5 公尺〔平均海平面為+100.0 公尺〕，假設過去地表有 3 公尺的沉陷，則在日據時代，地表高程應在+105.5 以上，由此推論當年景美層的水頭應在高程+107 公尺以上。與日據時代相較，景美層的水頭下降達 47 公尺之多，相當驚人〔吳建民，1967；吳建民，1968〕。在 70 年代中期，翡翠水庫完成，自來水供應普及，同時政府也頒布禁令，除戰備及緊急用水〔如醫院〕外，限制抽取地下水作為民生用水，景美層的水頭才逐漸回升。目前已回升到高程+95 公尺之處，相當於回升了 35 公尺，而回升速率也自初期的每年 3 公尺減少到每年 1 公尺。未來之回升速率會受到地下工程之影響，捷運長期路網〔新莊、松山、信義等線〕的興建會延滯水頭的回升。應注意的是，由於水頭的回升，上舉及管湧的危險性也隨之升高，以上舉為例，假設土的單位重為 1.9t/m³，安全係數為 1.25，則水頭每上升 1 公尺，安全開挖深度就會減少 0.66 公尺。假如以前不用採取任何防範措施就可以開挖到 35 公尺的話，現在由於水頭上升了 35 公尺之故，只能挖到 12 公尺，不可不慎。

台北捷運雙層車站的開挖深度在 16 至 18 公尺左右，而三層交會站的開挖深度都在 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 15 所示，以中和線的通風豎井為例，開挖面直達景美層的頂部，承商是採取將連續壁加深，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，1995a〕。圖 16 及 17 表示板

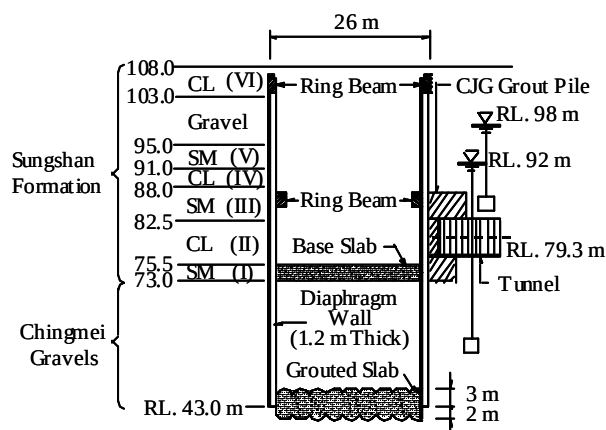


圖 15 中和線通風豎井封底示意圖

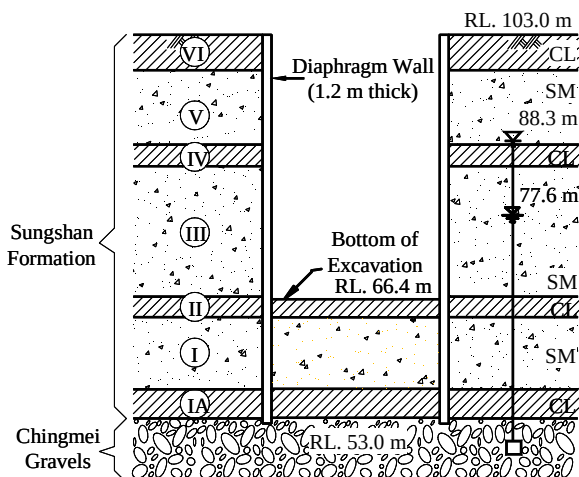


圖 16 板橋線通風豎井 A 降水示意圖

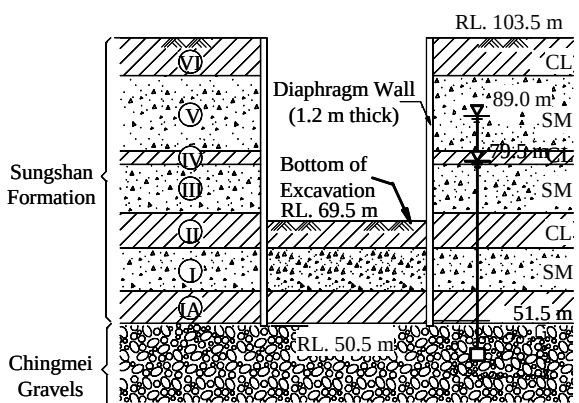


圖 17 板橋線通風豎井 B 降水示意圖

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 15 的人工封底相同。這三個豎井所採的方案不同，所遭遇的困難也不同。中和線豎井的連續壁貫入景美層達 30 公尺，在卵礫石層中施作如此深度的連續壁並不容易。該豎井是圓形結構，外徑 26 公尺，光是施作連續壁就花了半年的時間才完成〔黃敏祥，1993；楊國榮等，1997〕。至於板橋線的兩個豎井是以降水來滿足安全係數的要求，洩降都在 10 公尺左右，由於景美層的透水性極高，抽水量極大，A 井的抽水量達每小時 4176 噸，而 B 井每小時也有 3600 噸，抽水期間超過 6 個月，成本也是相當地高。降水的影響範圍也相當地廣，如圖 18 所示，在距離豎井 2、3 公里之外，仍有 1、2 公尺的洩降。幸好豎井附近地下黏土層極薄，地表沉陷不大，也十分空曠，並沒有帶來任何困擾〔黃南輝等，1996〕。

在台北捷運施工期間曾發生過幾個大型災變，而景美層都是罪魁禍首。圖 15 所示的中和線豎井即因在與隧道的接合處施作柔性接頭時發生湧水現象而導致災變〔范陳柏等，1997〕。圖 16 所示的通風豎井 A 也曾潛盾機到達時，在接頭發生湧水現象而一發不可收拾〔朱旭等，1997a〕。這兩案例在文獻中都有詳細的報導，在此不再浪費篇幅。如

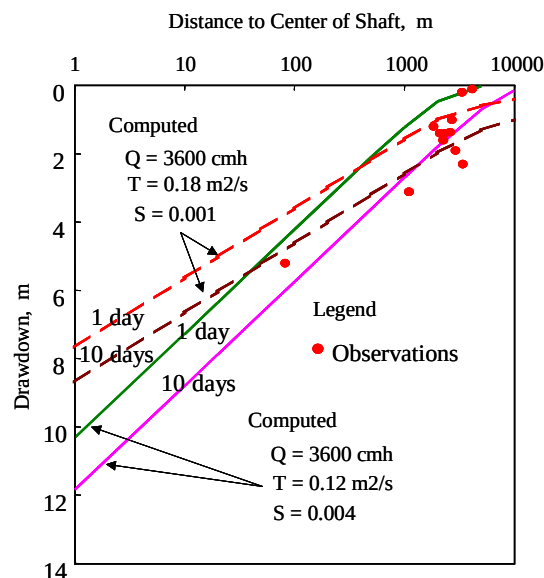


圖 18 景美層中抽降水之影響範圍

圖 19 所示，另外一個災變是因為南港線 CN252 標承商在到達最終開挖面後補裝水壓計，鑽孔貫穿黏土層，直達景美層，形成水路，終成大害〔朱旭，1997〕。這三個案例說明景美層的危險性，一旦水路連通至景美層，再要切斷水路可說是難上加難。所以只要有景美層存在的地方進行深開挖，無論是設計或者是施工都必須特別小心謹慎。

2.2.3 流木問題

在台北市區進行地下室開挖時時常有流木的出現〔朱旭等，1997b〕，長達 5 公尺、直徑達 1 公尺的流木並不罕見，而這些流木由外表看來還蠻新鮮。在板橋 2 號探測井 9 公尺深之處所挖掘出的流木，經檢定其樹齡約為 6,760 年，在 23 公尺深之處所挖掘出的流木經檢定樹齡約為 7,950 年〔劉平妹，1994；劉聰桂等，1994〕。雖然流木出現頻頻，但就筆者所知，並未對深開挖帶來太大的困擾。連續壁及中間柱都很幸運地避開了流木。

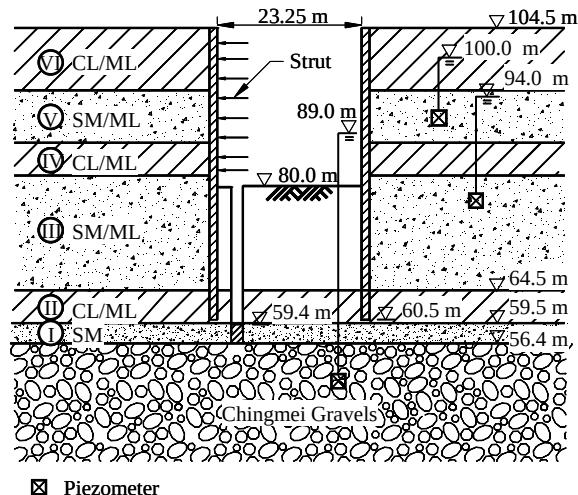


圖 19 鑽孔貫穿黏土封底層導致災變

很不幸地，流木卻造成捷運的隧道工程多次災變〔朱旭，1996；1997；朱旭等，1997；1997a，1997b〕。雖然在設計階段即已知到流木存在之事實，但是確無法確知流木會在何地出現。所以在設計及施工規範中即要求潛盾機要有足夠的馬力及切削能力以克服障礙，但是基於成本的考量不可能要求每部潛盾機都是削鐵如泥的巨無霸、鐵金鋼，適度的風險分擔才是業主的最佳利益。而事實上，在自隧道排出的土中常見大量的木屑，這可以證明，只要流木不是太長太粗的話，潛盾機都能削過。但在中和線的上行隧道自景安站鑽掘至永安市場站前方 200 公尺處卻遭遇到極大困難〔參考圖 20〕。先是進行不順〔Lin, et al., 1997〕，後來越走越慢，到距離永安市場站 150 公尺時終於被流木完全卡住無法前進。更遭的是，切刀不斷空轉，附近的土體不斷地進入土倉內而在馬路上造成一個大空洞。由於中和地區交通本即擁擠，景安路又是一條特別繁忙的幹道，為免對交通造成過大衝擊，避免以工作井方式排除障礙，只好在盾首前方進行地盤改良，方便工作人員出到機外搶救。最後自切刀盤前方取出一截 40 公分長，另一截 50 公分長的流木。根據推進紀錄看來，這兩截流木可能被推進了 50 公尺，而且也可能已經被削去了一大截，原來會更長。

在上一節曾介紹由於景美層的水大量湧入開挖區而造成災變的三個案例。第一個案例〔見圖 15〕是在中和線的通風豎井與隧道的柔性接頭時，地下水自隧道下方湧入。因為湧水口相當接近景美層，止水困難可以想見〔范陳柏等，1997；Hwang, et al., 1998〕。第三個案例〔圖 19〕是因為鑽孔貫穿黏土層直通景美層，形成水路，這也不難理解〔朱旭，1997；Moh, et al., 1997〕。第二個案例則耐人尋味，因為湧水口距景美層尚有 20 公尺之遙〔參考圖 16〕，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，同時在這截流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，1997a；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 21〕，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。因此懷疑塑膠管旁這流木在潛盾機推擠之下，攪動了地盤改良區，造成水路，附近

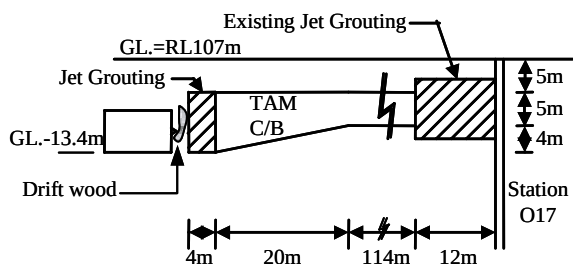


圖 20 中和線潛盾機掘進時遭遇流木而受阻

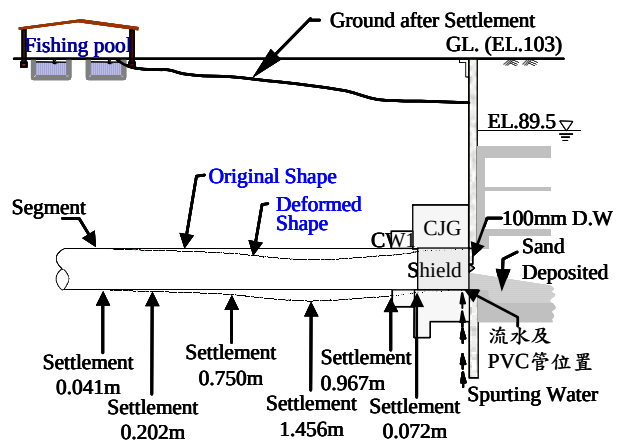


圖 21 板橋線通風豎井 A 災變示意圖

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。

復興北路機場穿越道的推管作業也曾因流木而受阻，在自 C 工作井推往 D 工作井的過程中，推管機被流木卡住，無法前進，只好自地面施作一個臨時工作井〔參考圖 22〕，由工作人員下到井內將流木挖除，其中兩截流木長約半公尺，直徑約 20 公分。為了這小小兩截流木，大費周章、耗費了不少時日，但也無可奈何，幸好一切順利沒有其他意外發生〔Moh, et al., 1999〕。

2.2.4 沼氣問題

除了上述的幾個特殊地質狀況之外，松山層中還有沼氣存在，對地下工程也是一個潛在的威脅。沼氣是足以致命的氣體，在報章上不乏因吸入過多沼氣而致死的報導，但這些案例大多發生在工人進入下水道進行檢查或維修時發生，也曾有過工人在地下室進行燒焊工作時發生爆炸的情事，這些沼氣都是因為地下腐植物所釋出的沼氣在密閉空間累積所致，非本文所欲探討的課題。本文所欲探討的是存在土中之沼氣可能會進入地下結構體而引起的災害。

鑽孔資料顯示，台北盆地發現沼氣的地點四處分散，並不集中在任何一區，但是發現沼氣的深度卻有規則可尋。一般而言，沼氣出現在深度 20 公尺

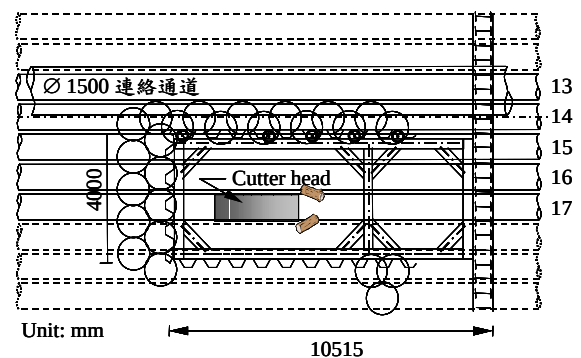


圖 22 復興北路車行地下道推管作業以工作井排除流木

至 33 公尺之間的松一層之中，而且是存在於拱形的砂質土體中。其上方有松二層覆蓋，由於松二層是黏土層，透水性極低，沼氣不至外逸〔崔澎生，1996；朱介平等，1997〕。在兒童交通公園附近的一個鑽孔在鑽到 34.75 公尺時，突然有大量的沼氣及泥水漿噴出，水柱高度達 10 公尺，孔中所埋設的水壓計也被沖出，經過 2 個月才完全停止噴漿。取樣化驗其成分含 CH₄:24ppm, O₂:0.3ppm, CO:18ppm 及 H₂S:0ppm，沼氣的濃度達 5%〔崔澎生，1996；朱介平等，1997〕。

沼氣可溶於地下水，經裂隙滲入地下結構物。只要是結構物的止水性很好，而且通風適當，沼氣累積到可危害人體的濃度的機會很小。但若是密閉空間，沼氣長期累積下來甚至可以達到爆炸的程度。根據文獻，沼氣自爆的濃度因壓力而異，介於 5%至 15%之間。在捷運初期路網設計期間即體會到沼氣對隧道施工的潛在威脅，而在施工規範中要求承商採取防範措施。在潛盾機之上，以及隧道之中都裝有有害氣體偵測器以及警報器。隧道的通風量也自一般的每分鐘 780 立方公尺增加一倍。當沼氣濃度達到 1.25%時，供電系統自動切斷，要到濃度降到 1%才會恢復供電〔崔澎生，1996；朱介平等，1997〕。

雖然在地質調查階段，發現沼氣的地方分散在台北盆地的四處，但就筆者所知，在捷運系統初期路網的施工期間，以中和線所遇到的困擾較多。為確保安全，每當沼氣出現在某一鑽孔，承商就在該孔附近加鑽解壓孔以釋放沼氣。在中和線沿線，這樣的解壓孔有數十個。在 CC275 標下行隧道的潛盾機在掘進到 127、150、176 及 187 環時也的確曾遇到沼氣，其濃度介於 17%至 57%之間。但於防範得宜，並未造成任何問題〔崔澎生，1996；朱介平等，1997〕。

2.3 監測作業

如眾所周知，地下工程充滿許多不確定的因素，無論地質調查是多麼詳盡，也無法完全保證工程的安全。在工程進行的過程中，有賴監測時時提供資訊供工程人員判斷其所面對的情況，作最明智的決定或者採取最適當的措施。雖然大地監測是以工程安全為著眼，其目的並不限於工程安全。扼要的說，大地監測的目的包括：

設計期間

基地現況之瞭解 — 如地下水水位、長期壓密沉陷、有害氣體之偵測

現場試驗數據之取得 — 如樁載重試驗、震動試驗

施工期間

安全之維護 — 災變之預警、損害之界定及復舊

工法之驗證 — 如擠壓灌漿、地盤改良之成效驗證

施工步驟之調整 — 潛盾推進、建物扶正、新奧工法之施作

技術之提升 — 作為回饋分析之資料

作為仲裁或訴訟之根據 — 責任釐清及作為求償之佐証

在初期路網設計的過程中，因為資料缺乏，所引用的理論數據多來自國外文獻，因為國外地質狀況與台北盆地的地質狀況不一定相同、所用機具及施工水準也不一樣，這些理論及數據不見得全然適用於台灣或者台北盆地。捷運局於是委託亞新顧問公司為大地專業顧問，協助捷運局審查設計並為施工安全把關。

監測作業包括規劃、設計及現場作業。規劃及設計之權責屬細部設計顧問，現場作業則涉及業主、承包商、細部設計顧問、大地專業顧問。初期路網的監測作業的方式大致如下：

- (a) 細部設計顧問訂定監測作業規範，其內容包括儀器、材料、檢驗、安裝、量測、及報告，將關係到施工安全以及為特殊目而安裝的監測儀器標示於圖說之上。
- (b) 承包商為驗證其工法所必須加裝的儀器以及因應特殊狀況所必須加裝的儀器並不在內，這些儀器應該包括在承商所提的建議書或工作計畫中。
- (c) 細部設計顧問考量施工需求及工區附近的建物狀況訂定各種監測儀器的管理值（包括預警值、警戒值及行動值）並將其納入圖說之中以便承包商遵行。
- (d) 現場量測作業是由各施工承包商、或其監測專業分包商依據合約及細部設計顧問所擬定規範和圖說執行。除了提供監測報告之外，承包商並應將量測結果製成所謂「傳送檔」存放於磁片之上，送交工務所，以便後續處理。
- (e) 工務所在收到承包商或其專業分包商所提送的磁片後，將其轉交大地專業顧問在工地所設的監測站處理。

在木柵線及淡水線施工期間，大地專業顧問協助現場工程師們督導承包商安裝監測儀器、確認儀器的功能、建立儀器的初始值，檢核承商所提送的儀器讀值，同時也對部份監測儀器獨立複測，以確保成果的品質。在新店線與南港線施工期間，現場複測作業改為會測，由大地專業顧問選擇部份儀器和專業承包商一同量測，以精簡人時。在板橋線及中和線施工期間，會測的數量更為縮減，並將會測作業陸續移交給工務所同仁執行。

大地專業顧問監測站在接收到承包商所提送的監測報告及傳送檔後，即進行以下作業：

- (a) 檢視承包商所傳送的監測資料，並判斷其合理性。如有可疑之處即知會工務所請承包商澄清，有必要時再與承包商複測或會測。
- (b) 將現場所得數據與細部設計顧問所訂定的管理值進行比對，如監測結果超過管理值

即依核定的程序發布告知單。

(c) 如有異常狀況發生，與工務所、細部設計顧問以及承包商共商對策，並對承包商所提方案提供意見。

(d) 定期彙整所有監測資料並提送給工務所及工程處。

在工程進行的高峰期，大地工程專業顧問一共有 18 個監測站在為 48 個工程施工標服務，並在總部成立資料處理中心執行以下工作：

(a) 統一訂定資料傳送檔的格式及資料傳輸的方式。

(b) 訂定監測站的作業程序。

(c) 接受監測站所傳回的資料並建立資料庫妥為保存。

(d) 提供資料給工程師進行回饋分析。

(e) 定期將資料庫的新增資料傳送至捷運局資訊中心作永久保存。

在防止意外方面，在初期路網施工期間，監測作業發揮了其應有的功效，現場許多狀況是由監測儀器首先反應才被發現。以淡水線 CT201A 標潛盾機在出發時因地盤處理不當而造成地陷一事為例，是監測專業分包商發現沉陷桿失蹤才知道混凝土地面下方已經有一個 70 立方公尺的洞穴，經立即搶救才未成大禍。另一個類似的案例發生在板橋線的 CP264 標，在潛盾掘進時因為超挖而引起路面過量沉陷，這也是由沉陷桿的讀值看出，在採取適當措施後，潛盾機方能繼續前進，並未造成任何災害。其他如連續壁漏水、建物沉陷等情事，每標都有，不勝枚舉，這些狀況都適時在監測儀器的讀值中反應出來。在意外事件的後續處理過程中，監測資料更是不可或缺，最明顯的例子是在板橋線 CP262 通風豎井發生災變後只有靠沉陷的量測來判定灌漿是否已經有效地穩定住地盤，靠傾度管的側向位移以及傾斜計來判定華江橋是否安全。

在工法驗證方面，監測儀器也是絕對有其必要。諸如擠壓灌漿、高壓噴射灌漿等工法都在正式施作之前都例行先進行驗證試驗，藉監測資料以評估其功效及適用性，而其施工步驟也根據試驗結果而修正。新店線 CH221 標及板橋線 CP262 標所採用的冰凍工法更是一個很好的案例，如無溫度計無法証實土壤已經成功地凍結，也無法判斷開挖是否安全。新店線 CH221 標以及南港線 CN265B 標所採用的新奧工法也是要靠監測儀器讀值來評估其安全性。而事實上新奧工法本身即為「觀察法 (observation method)」，其基本理念就是不斷地觀察，不斷地修正設計、不斷地調整進度，以同時達到安全與經濟的目的。冰凍工法及在軟弱土層中進行新奧工法在台北都算是新的嘗試，而其成功在土木工程史上也可算是一個里程碑，而監測作業自然居功不小。

在施工步驟調整方面，在潛盾隧道掘進的過程中有賴監測儀器提供土、水壓以及沉陷資料時時調整其掘進速度，使地表沉陷減至最小。而在板橋線杏林大廈扶正的過程中，也是隨時注意其上升量而

調整灌漿壓力與灌漿量。在 CN253B 潛盾機穿過北門下方時，因為北門是一級古蹟，為慎重起見，捷運局邀請知名專家學者成立督導委員會，密切注意因潛盾施工所導致的沉陷，務求北門的絕對安全。負責監造的工程處同仁以及負責施工的承包商更是小心翼翼，在北門四周佈滿監測儀器，隨時將讀值向委員們報告。最後經儀器讀值証實保護措施有效地降低北門的沉陷量至安全容許範圍，工程方能順利完成。

在回饋分析方面，監測資料也是厥功甚偉。在過去十年間，相信國內外有關台北捷運施工的學術論文不下百篇，對潛盾施工、深開挖、輔助工法以及建物保護等等主題都有廣泛而詳盡的報導。藉監測資料之助，對以下項目都發展出適合本地地質狀況的經驗公式，可供日後設計及施工時參考及引用。這不但對未來捷運路網的興建裨益非淺，對整個土木界技術之提升也有所助益。若無監測資料，很多事是知其然而不知其所以然，而寶貴的經驗更是無法傳承。回饋分析大大地改善了設計的不確定性，使設計更具合理及經濟性，以達到節省工程成本的目的。更重要的是設計本土化，過去因為缺乏經驗，不得不仰仗國外顧問、依賴國外經驗及資料，如今有了屬於自己的經驗，工程師憑添信心，可以獨肩堅巨，甚至可以將技術拓展至國外，提升國際形象。

監測資料在仲裁及訴訟中也是必要的佐証，可以用以界定責任歸屬及賠償額度。依據合約，承包商在遭遇到不可預期的不利因素時可以求償。在合約執行過程中，不利因素以地下土質狀況為最多。在這方面，案例應該是相當地多，例如，CH221 及 CP262 兩座通風豎井的災變都涉及仲裁及求償，也都提出監測資料以為佐証。CC560 潛盾在鑽掘過程中遭遇流木導致地陷，最後以灌漿處理，也提出仲裁。

電腦技術的突飛猛進，網路技術的快速進步。在大地監測資料庫的運用上，也應走上資源共享的運用型態，使得多人可同時使用同一個資料庫，如此不但保證資料的安全，也避免了版本的紊亂。利用網際網路的無遠弗際的功能，不僅僅在監測站的工作人員可以享受到，電腦發展所帶來資料共享的便利之外，只要在權限範圍之內都可以立即自網路上獲得最新的大地監測資料。

網際網路科技還可以用之於防災及應變通報系統。過去以傳真方式發布告知單的作法可以改用電子信箱執行，除了更加迅速之外，也方便所有相關單位自地理資訊系統取得最新、最完整的資訊，甚至還可以將閉路電視影像以網際網路傳輸現場狀況。當然資料的保密性是最大的考慮，所以資料可以以其保密性分級，如無、密、機密、極機密等，各有其授權範圍。在技術方面這已經不是問題，網路上已可建立嚴密的認證機制，問題是在使用者可能經意或不經意地將密碼洩露出去。這可以採用信用卡的認證方式管控，以目前的科技這是不難做到的。

3. 曼谷地區工程案例

曼谷的地質在許多方面與台北盆地的地質相似，在地表有一層相當厚的軟弱土層，因為地下水的過度開發而地表持續沉陷。由於地勢低窪，重大工程都有大規模的填土作業。在以下的兩個案例中，是以填土作業以及土堤的沉陷作為探討的重點。

3.1 案例介紹

案例三：曼瓊公路〔Bangkok-Chonburi New Highway, 簡稱 BCNH〕

由於工商業的迅速發展，曼谷的東區及東南區日趨繁榮，曼谷大都會區的交通狀況也就日漸惡化。在 Laem Chabon 和 Map Ta Pud 有兩個商港正在興建，同時在 Nong Ngu Hao 興建的第二國際機場完成後，這個區域交通情況更將雪上加霜。為了舒解交通，交通部決定興建曼谷至瓊普瑞的高速公路。本公路的設計規範見表1。預計在2000年至2008年之間，交通量將有約50%的成長。

表 1 曼瓊公路設計規範

路線長度	81.7 公里
設計標準	雙向各二線
設計車速	
主線	110 km/hr
支線	80 km/hr
開道	40 km/hr
設計年限	15 年
設計高程	地下高水位上至少 30 公分
預期交通量	
2000 年	16,500~39,700 車/日
2008 年	25,800~61,300 車/日

如圖 23 所示，本公路起自 Sri Nakarin 路，跨越 OBRR 快速道路後往東延伸與 36 號國道〔也就是瓊普瑞至芭堤雅公路〕相接。全線長約 82 公里、有 8 個交流道，耗資 128 億泰銖〔合美金 5 億，當年 1 美元合 25 泰銖〕，其中一半是日本 OECF 貸款。本工程於 1994 年 6 月動工，於 1997 年 12 月全線通車。

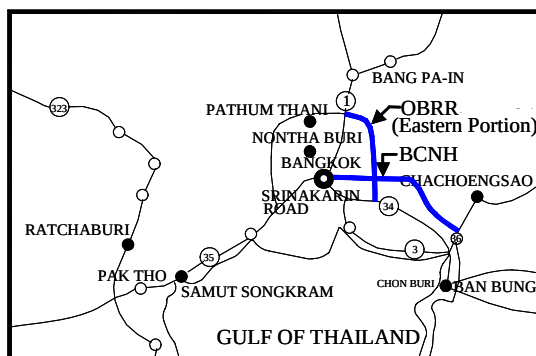


圖 23 曼瓊公路位置圖

除了一段長約 15 公里的路段之外，本公路全線穿越泰國中部平原，在地表是厚達 15 至 20 公尺的軟弱沉泥質黏土。圖 24 是代表性土層剖面圖。根據土層分布，將全線分為 5 區，各區的土層特性表示於表 2。由該表可見，各區土壤的差異性不是很大。

表 2 曼瓊公路軟黏土性質

工區 (里程)	含水量 (%)	單位重 (t/m ³)	液性限度 (%)	塑性指數 (%)
第 1 工區 (0+000~15+700)	60~120	1.4~1.5	70~140	30~40
第 2 工區 (15+700~34+700)	70~160	1.4~1.5	90~140	30~60
第 3 工區 (34+000~41+500)	70~120	1.4~1.5	70~120	40~60
第 4 工區 (41+500~49+700)	70~90	1.4~1.5	70~90	30~40
第 5 工區 (49+700~60+200)	70~120	1.4~1.5	70~100	30~50

本工程的細部設計是由 Thai Engineering Consultants Co. 負責，亞新顧問公司並未參與設計，僅在施工期間負責所有與地工有關的工作，包括監測作業以及地盤改良成效的評估，以及移除預壓覆土時機之判定。

案例四：曼谷第二國際機場

泰國政府早在 20 年前即已規畫曼谷第二國際機場，除了因應空運之要求之外，並且規劃該機場為大曼谷地區的空運中心。機場的初步規畫在 1984 年即已完成，泰國政府在 1991 年批准該計畫，並在 1994 年成立一個特許公司：the New Bangkok International Airport Company Ltd (NBIA)，負責整個工程的執行。新機場預定在 2004 年開始營運，預計運量初期可達每年 3 千萬旅次及 146 萬噸貨物之轉運。長期目標是 1 億旅次以及 460 萬噸貨物。機場的興建費用是 1,200 億泰銖〔合美金 30 億元，金融危機後泰幣貶到 1 美元合 40 泰銖〕，其中 60% 是工程費。

這個新機場是位在 Samut Prakan 省的 Nong Ngu Hao〔參考圖 25〕，在曼谷市區東南方約 30 公里處。機場占地 3,200 公頃，地勢低窪，地面高於海平面不到一公尺，是一個洪泛區。機場範圍內，地質狀況大致均勻，變化不大。如圖 26 所示，最上是約 1 公尺厚的風乾表層，其下有厚達 11 公尺的軟泥〔very soft to soft clay〕，再下是幾公尺厚的中度黏土〔medium stiff clay〕，更下是硬黏土〔stiff clay〕。其下在深度 25 公尺處有一層緊密砂層。在上面的軟泥的含水量通常超過 100%，其抗剪強度低，壓縮係數高，是地工設計的重點。

場站區內，包括機場跑道、滑行道及停機坪等處〔參考圖 27〕的鋪面設計是由 Airport Design Group 負責，其成員包括 DMJM International, Scott-Wilson-Kirkpatrick, Norconsult International,

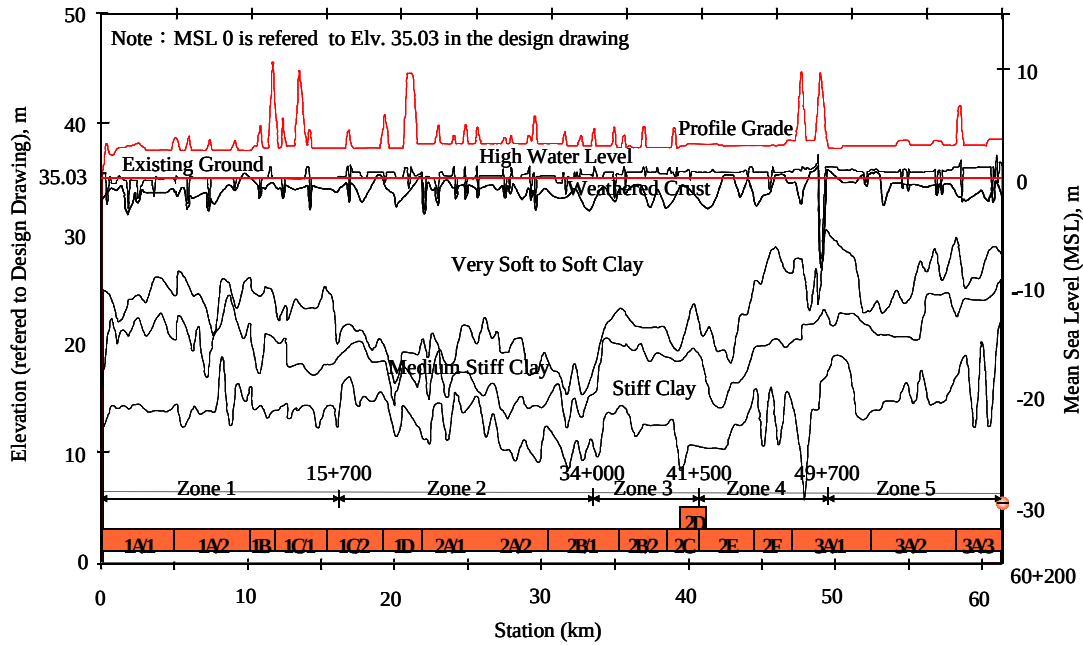


圖 24 曼瓏公路垂直排水帶佈設地段之土層剖面圖



圖 25 曼谷第二國際機場位置圖

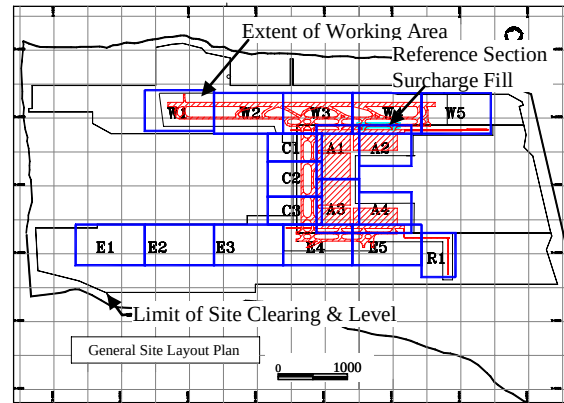


圖 27 曼谷國際機場場站區地盤改良範圍

SPAN 以及 SEATEC。亞新顧問公司的泰國分公司參與第一期地盤改良的監造作業。

3.2 地盤改良

案例三及案例四的地質狀況極為相似，兩者都位於泰國中部平原，在地質上屬湄公河三角洲沖積層。位於表層下方的軟弱土壤是許多災變之主因，也是地表沉陷的根源。在曼谷，路面高低不平已是不足為奇，尤以 3 號及 34 號國道為最。在過去 20 年間，工程界對曼谷軟泥曾作過不少研究，也針對地盤改良的各種方法，包括覆土預壓、真空預壓、垂直排水帶、砂樁、水泥及石灰樁等進行過評估〔AIT, 1974; Moh et al., 1987; Bergado, et al., 1998〕。根據這些研究結果，由於曼谷軟泥的壓密是以主壓密為主，而且有足夠的工期完成壓密，兩地的地盤改良都以預壓加垂直排水帶最為經濟有效。

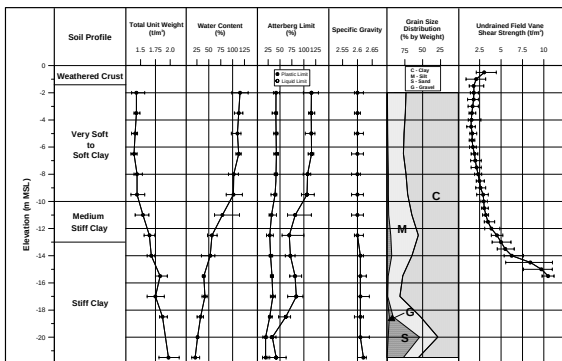


圖 26 曼谷第二國際機場土層剖面圖

過去在泰國，垂直排水帶僅配合砂樁用在小規模的現地試驗，並沒有大面積的實作經驗。曼谷公路是第一個以垂直排水帶在曼谷地區進行大規模地盤改良的工程，垂直排水帶全長達 2,300 萬公尺。圖 28(a)表示其代表性斷面，地盤改良的設計參數表示於表 3。填土高度自 2.55 公尺至 3 公尺不等，分三階段堆置，排水帶長度自 6 公尺至 12 公尺不等。規範要求在移除覆土之前，每個月的沉陷量不得超過 2 公分，主壓密必須完成 80%以上。

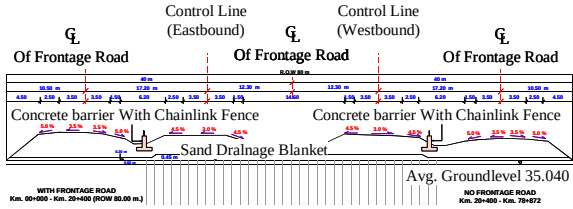
曼谷機場新建工程於 1997 年 11 月開始，代表性斷面見圖 28(b)。除了 1,700 公頃〔占機場總面積的 53%〕的整地之外，先期作業也包括在西跑道、滑行道、東跑道〔部分〕以及兩條跑道北端〔R1 及 W1 區〕的緊急道路〔參考圖 27〕的範圍內進行地盤改良以減少地表沉陷及未來路面的維護費用。地盤改良的面積達 308 公頃，占機場整個面積的十分之一。垂直排水帶的長度達 3,200 萬公尺，費用達 82 億泰銖〔美金 2 億元〕，預計在 2002 年的四月完成。第二期地盤改良工程包括東跑道，貨運場以及周邊道路，估計費用達 50 億泰銖。限於篇幅本文僅討論第一期地盤改良工程。

新機場地盤改良的設計參數表示於表 3。填土高度自 3.8 公尺至 4.2 公尺不等，分二階段堆置，排水帶長度一律為 10 公尺。規範要求，在預壓覆土移除前，如果覆土重是 75kPa 的話，最後一個月的沉陷不得超過總沉陷量的 4%，如果覆土重是 85kPa 的話，最後一個月的沉陷不得超過總沉陷量的 2%，無論如何，主壓密也必須完成 80%以上。

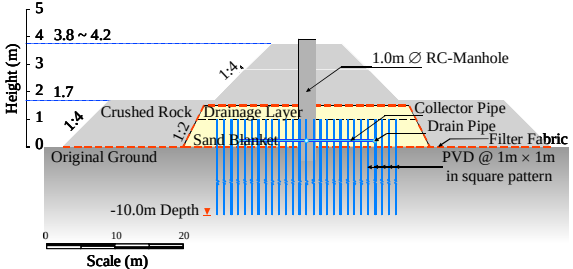
表 3 曼谷公路與曼谷第二國際機場地盤改良設計參數

	曼谷公路	曼谷第二國際機場
黏土層厚度	8~12m	9~11m
填土厚度	2.55~3.00m	3.80~4.20m
砂質排水層	40 cm (PVD portion) 20 cm (berm)	1.5m
濾層	none	2 layers
垂直排水帶長度	6m ~ 12m	10m
填土	sand	crushed rock
覆土載重	50~60 kPa	75 kPa & 85 kPa
填土階數	3 stages	2 stages
靜置期	9 months	6 & 11 months
沉陷規範	≤ 2 cm/month	settlement ratio ≤ 4% (75Kpa) ≤ 2% (85kPa)
壓密規範	80% Primary	80% Primary

在兩個案例中，現場的監測儀器包括水壓計、沉陷版、深層沉陷計、傾度計以及側位移量測樁。在機場設有一條 500 公尺長的參考斷面，在進行填土之前即裝置了相當數量的監測儀器，其目的在：(a) 驗證設計參數以及評估規範之合理性、(b) 承商的工法、及(3)驗證監測儀器的適用性。



(a) BCNH Roadway



(b) SBIA Airside Pavements

圖 28 地盤改良代表性斷面

以下謹就兩地的地盤改良作介紹，著重於所遭遇的困難以及對策。至於詳細資料，可參考 Moh 等〔1998〕、Ruenkairergsa 等〔2001〕以及 Lin 等〔2000〕。

3.3 地盤改良之成效

〔A〕地表沉陷

如圖 29 所示，在曼谷公路，地表沉陷與軟泥的厚度關係密切，最大沉陷發生在第 2 施工段。在 2A/1、2A/2 以及 2B/1 三個施工段所量到的地表沉陷都超過 250 公分，遠超過預期的沉陷值〔參考表 4〕。圖 30 表示在里程 28+200 處之沉陷槽及基礎地盤的側向位移，其沉陷的歷時曲線表示於圖 31。由於實測的沉陷量超過預測值，於是用 Asaoka 所建議的方法推估最終沉陷並判斷何時可達到規範所訂的 80%主壓密，以決定移除預壓覆土的時機〔Asaoka, 1978〕，其結果見表 4。以 2-A/1 段為例，原設計靜置期為 9 至 12 個月，但實際靜置期達 15

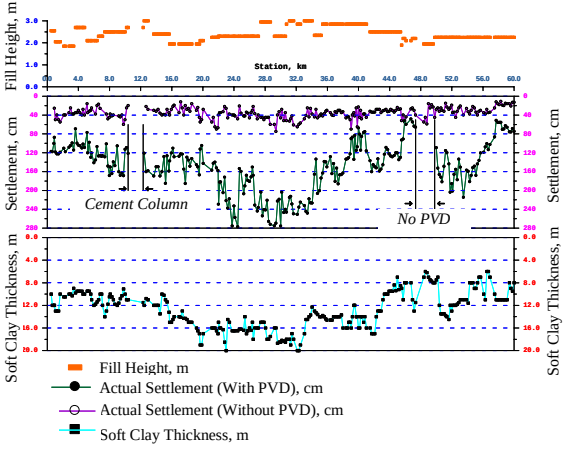


圖 29 曼谷第二國際機場填土進度與地表沉陷進度

表 4 曼瓊公路預估沉陷與實測沉陷

施工段	里程	靜置期		預估沉陷 公分	實測最大沉陷 公分	Asaoka 法 推估沉陷 公分
		設計	實際			
		月	月			
1-A/1	0+000~5+100	9~12	施工中	124~150	122.50	160.0
1-A/2	5+100~10+100		12~14		168.00	178.0
1-B	10+100~12+400		施工中	140~160	106.70	130.0
1-C/1	12+400~15+700		10~13		185.00	190.0
1-C/2	15+700~19+600		12~14	152~185	173.70	210.0
1-D	19+600~22+000		9~11		169.20	190.0
2-A/1	22+000~26+400		14~15	170~183	275.40	285.0
2-A/2	26+400~30+700		15~17		272.70	290.0
2-B/1	30+700~35+200		15~17	155~165	260.00	300.0
2-B/2	35+200~38+600		12~15		186.10	230.0
2-C	38+600~41+500		9~13	100~117	134.20	160.0
2-D	0+000~1+000		12~13		166.10	170.0
2-E	41+500~15+450 (主線)		9~13	95~135	160.20	165.0
	1+000~2+880 (引道)				182.30	195.0
2-F	45+450~47+675		10~11	96~106	106.70	110.0
3-A/1	47+675~52+000		12~13		181.50	210.0
3-A/2	52+000~57+600		10~11		201.50	215.0
3-A/3	57+600~64+500		9		76.30	80.0

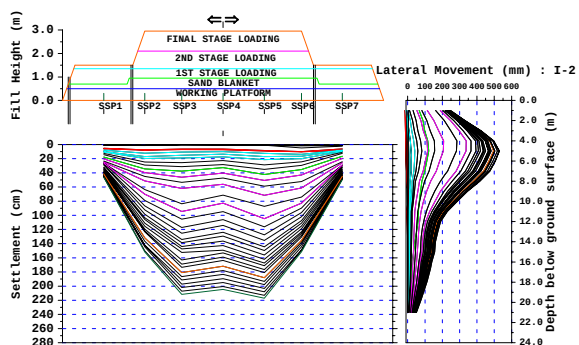


圖 30 曼瓊公路 2A/2 断面 (里程 Sta. 28+200) 土堤沉陷與地盤之側向位移

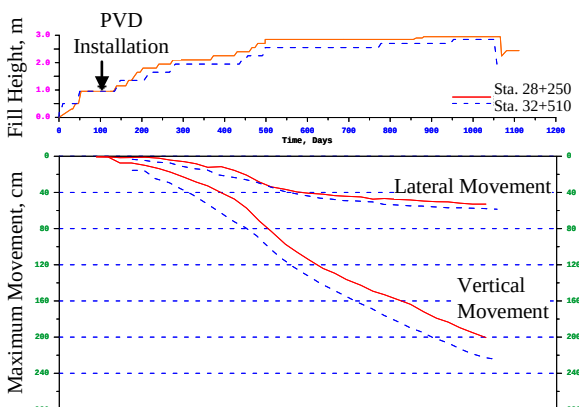


圖 31 曼瓊公路里程 Sta. 28+250 and 32+510 填土進度與土堤沉陷

至 17 個月。原預計沉陷量在 170 公分至 183 公分之間，但在靜置期期滿時沉陷達 275.4 公分。以 Asaoka 方法估計最終沉陷應為 285.5 公分。

各區的實測沉陷量與預估值比對於表 5。在工程結束，公路開放通車後的一年期間，測量顯示 24+800 及 25+400 處兩測站仍有 3.6 至 5.4 公分的後續沉陷〔JICA, 2000〕。其後路面雖仍然繼續下沉，但下沉之速率已趨緩和。

表 5 曼瓊公路沉陷量與基礎地盤側向位移

施工區	軟泥厚度 公尺	填土厚度 公尺	預期沉陷 公分	實測沉陷 公分	實測側向 位移 公分
1	4.3~12.5	2.70~3.00	124~185	122~185	9.5~22.7
2	11.7~18.0	2.85~3.00	152~185	169~275	15.1~58.6
3	10.9~14.8	2.85	100~165	134~186	33.3~34.2
4	7.0~16.4	2.55~2.85	95~135	107~182	13.1~34.4
5	5.5~10.2	2.55~2.70	104~214	76~181	13.5~27.8

曼谷第二機場試驗填土區的實測沉陷量及預測值與亞洲理工學院的試驗填土區〔AIT, 1995〕的沉陷量相比對於圖 32。該區的沉陷槽及基礎地盤的側向位移表示於圖 33。由這兩圖可以看出，實測沉陷量與預測值相去不遠。該區的沉陷量較曼瓊公路上所測得的沉陷量為小，原因之一是曼瓊公路的基礎地盤的側向位移較大之故。在曼瓊公路，側向位移達 50 公分〔參考圖 30〕而在曼谷新機場側向位移只有 12 公分〔參考圖 33〕。

垂直排水帶的功效見圖 34。有排水帶的地區的沉陷遠較無排水帶地區迅速，在第二階覆土堆置後一個月內，有排水帶的地區較無排水帶的地區沉陷量多了 50 公分，其功效自不待言。

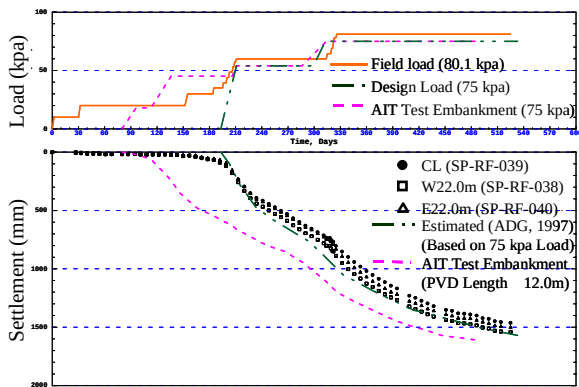


圖 32 曼谷第二國際機場填土進度及沉陷與亞洲理工學院試驗法

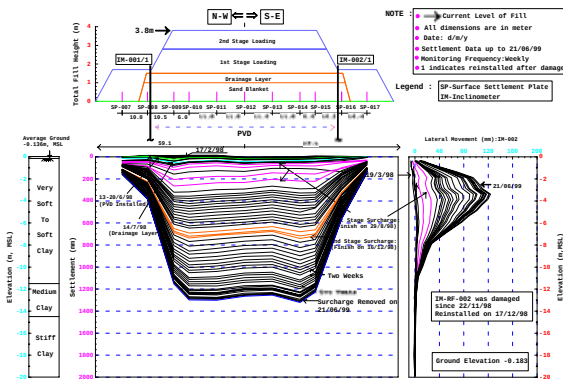


圖 33 曼谷第二國際機場參考段土堤沉陷及地盤之側向位移

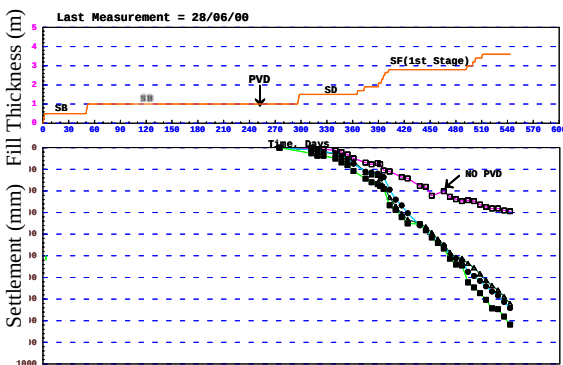


圖 34 垂直排水帶對沉陷速率之影響

〔B〕邊坡穩定

在堆置覆土時，邊坡的穩定是一個十分重要的考慮因素。在這方面有賴監測資料以為研判。除了要有足夠的監測儀器之外，監測頻率也需要調整以配合覆土的堆置。在有明顯變化時，應增加監測的頻率。

一般在設計時，沉陷量的計算只考慮到土壤的壓密而並未考慮到基礎地盤側向位移的效果。Ladd〔1991〕的研究結果顯示，在正常壓密的地盤上填土，在初期，壓密沉陷尚不顯著時，側向位移與沉

陷的比值可達 0.9 ± 0.2 。隨時間增加，壓密效應逐漸彰顯，該比值降至 0.16 ± 0.07 。在這兩個案例中，以比值 0.33 為安全之管控。當比值達 0.25 時填土的速率即予以放緩。在曼瓏公路，側向位移十分的大，是因為軟泥的厚度較厚之故。

〔C〕土質改良

一般而言，壓密會降低土壤的含水量、空隙率以及透水度，但會增加土壤的單位重以及抗剪強度。在這兩個案例中，土壤的性質因預壓而明顯地改良。圖 35 比較曼瓏公路改良前與改良後的土壤性質。土質改變的效果在垂直排水帶貫入深度之內十分顯著，但在垂直排水帶不及之處，改良前與改良後的變化不大。該圖也顯示，在預壓後的頭一年改良效果最大，其後的改良效果幾不可見。

曼谷第二國際機場的地盤改良效果見圖 36，結論與曼瓏公路所得相類似。

3.4 課題探討

〔A〕排水系統

在曼瓏公路，首先在原地面上方覆蓋一層 50 公分厚的砂性覆土，再在其上加上一層 45 公分厚的砂質排水層。除此之外並無其他排水措施。在初審時，監造顧問即指出因為沉陷量過大以致排水層會陷入地下而致土堤與護坡分離的危險。如果這情形發生，由垂直排水帶所排出的水將無法流入排水層。在第二階填土後果然發生高孔隙水壓無法消散，沉陷過於緩慢等現象，在挖溝並加裝抽水井後才改善〔Moh, et al., 1998〕，如圖 37 所示。這問題在第二國際機場並未發生，因為在砂質排水層中已設計了相當完善的排水系統。

〔B〕土堤龜裂

為了省錢，在這兩個案例中，垂直排水帶只裝在主土堤的下方，在邊坡的下方並沒有排水帶，因此土堤與邊坡之間產生了很大的差異沉陷，導致裂痕。有時裂痕甚至發生在土堤的中線。為了土堤的安全，必須降低填土高度、加寬邊坡或者改善排水系統以加速孔隙水壓之消散。這當然不免會增加工期及工程費。所以未來進行類似計畫時，最好在邊坡之下也打設排水帶以減少差異沉陷，但是排水帶的長度可自坡頂向坡腳方向遞減。

〔C〕邊坡沖蝕

在泰國，雨季時時有暴雨。在填土時有必要採取防範措施以免邊坡被沖刷。通常會在邊坡上方覆蓋一層植栽土，在幾星期內即會布滿青草。但應注意的是，應避免阻絕水路以致土堤內積水排不出去。由於水路之被阻絕，而致積水無法宣洩，的確有造成破壞的案例。

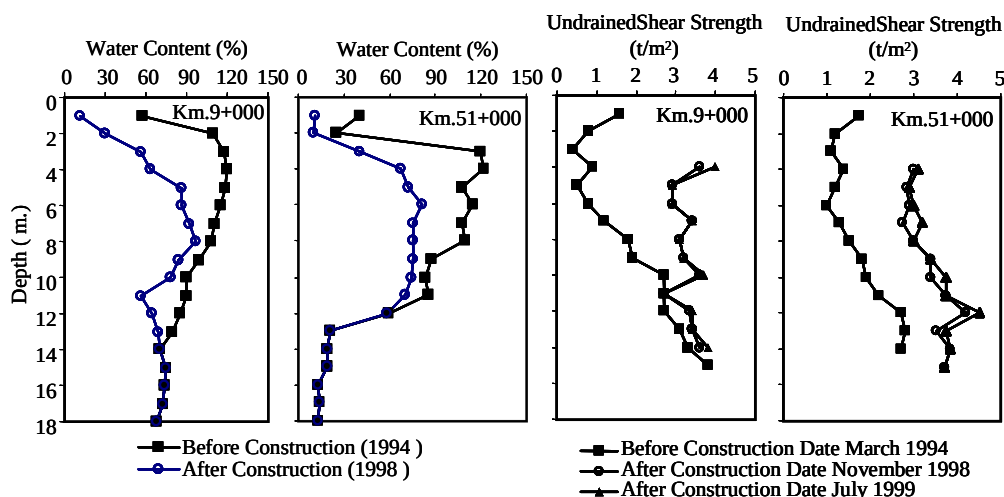


圖 35 曼瓊公路地盤改良效果 — 預壓前後之土壤性質之比較

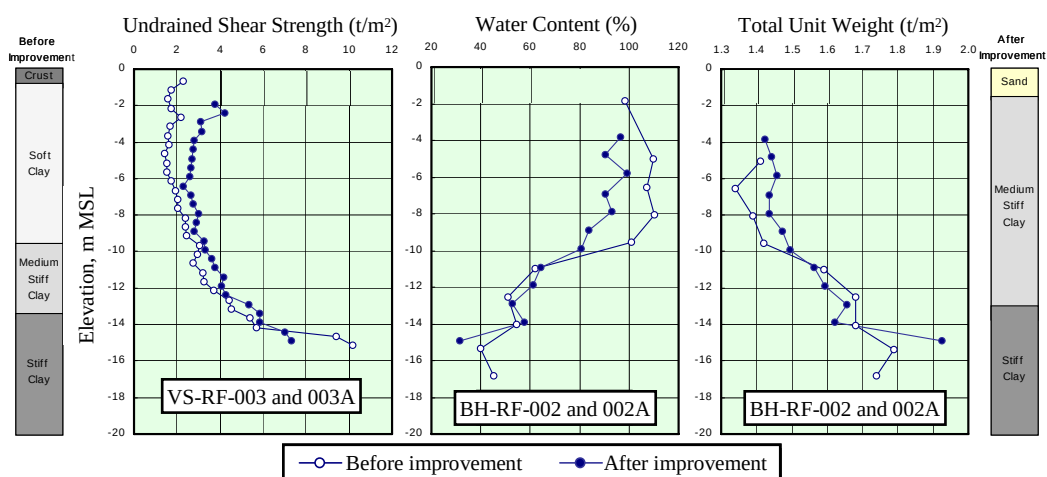


圖 36 曼谷第二國際機場地盤改良效果 — 預壓前後土壤性質比較

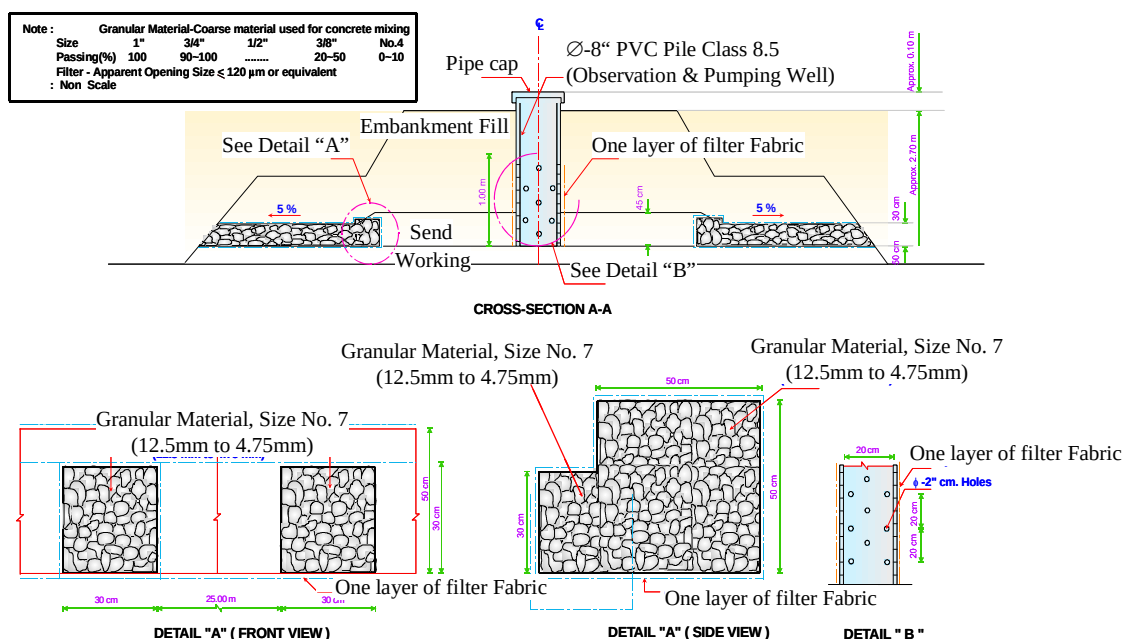


圖 37 曼瓊公路追加排水措施

在曼瓊公路，由於路旁有魚池以及河道之限制，護坡土堤的寬度不足，以致在好幾個地方產生破壞。在這情形下，必須時時注意側向位移與沉陷之比值，並調整填土之速率。在有些地方，在護坡土堤下方以水泥或石灰樁改良地質以增加邊坡的穩定度。

4. 結論

在基礎建設中，大地工程無論是在安全方面或者經濟方面都相當重要。由於地質的複雜性以及技術的不成熟，大地工程還未發展成為科學。有賴工程理論，實務經驗以及判斷來解決問題。本文四個案例指出在設計時無法掌握的因素。這些包括地質的變化、工學原理、施工方法、現場的應變以及監測資料的詮釋。

如表 6 所示，大地工程與醫學有很多相似之處。醫生講究的是臨床經驗，大地工程師講究的是現場經驗。一個好的醫生除了要有豐富的學識之外，還要憑病人的病歷及症狀作正確的判斷，一切的病理化驗結果只能作為參考。同樣的，大地工程師除了書本上的知識外，也要根據過去的案例以及現場的觀察作正確的判斷。鑽探及試驗室的試驗結果只能作為參考。疑難雜症不是一劑藥即能見效，必須長期追蹤，必要時更換藥方。同樣的，複雜的工程問題也不能期望大地工程師當機立斷，馬上拿出對策，有時必須藉長期監測以為研判，必要時改弦易轍，嘗試不同的方案。所以筆者要在此再三強調，大地工程師不要迷信電腦計算出的結果，只有經驗才能成就優良的大地工程師。

表 6 大地工程師與醫療人員之比較

大地工程師	醫療人員
對計畫要有全盤瞭解	對病理要全盤瞭解
現場踏勘與背景資料調查	觀察病人症狀及查閱病歷
進行現場試驗及實驗室試驗	進行病理試驗
土壤力學、岩石力學、工程地質學是基本訓練	生化學、解剖學是基本訓練
有賴實務經驗作正確的判斷	有賴臨床經驗作正確的判斷
簡化問題、進行分析	綜合病人症狀及試驗結果診斷病因
作出建議或進行設計	開處方或進行手術
現場監測、評估監測結果作出修正建議	追蹤病情變化、繼續檢驗、對症下藥

5. 誌謝

筆者在此謹向台北市政府捷運工程局及工務局新建工程處、泰國公路局及曼谷機場工程公司致謝。也特別謝謝亞新顧問公司的兩位同仁：黃南輝博士及林本騏工程師準備資料及手稿。

參考文獻

- Asaoka, A. (1978), Observational procedure for settlement prediction, *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 4, pp. 87~101
- Asian Institute of Technology (1995), The full scale field test of prefabricated vertical drains for the Second Bangkok International Airport, *Final Report*, AIT, Bangkok
- Bergado, D.T., Chai, J. C., Hanh, L. T. and Balasubramaniam, A. S. (1998), Vacuum consolidation with PVD at SBIA site on soft Bangkok Clay, *Proc., 13th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, Taipei, Vol. 1, pp. 265~270
- 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 Southeast Asian Geotechnical Conference*, Taipei, Vol. 1, pp. 16~20
- Japan International Corporation Agency (2000), Surface settlement monitoring of highways with ground improvement, *Study Report*, JICA, Bangkok
- 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
- Ladd, C. C. (1991), Stability evaluation during staged construction, the 22nd Terzaghi Lecture, *ASCE Geotechnical Engineering*, Vol. 11, No. 4
- Lin, L. S., Chang, J. L. and Chu, D. C. P. (1997), Shield tunneling of the Chungho Line of Taipei MRT, *Proc., 9th Int'l Conf. of the Asso. of Computer Methods and Advances in Geotechnics*, Wuhan, China
- 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
- Lin, P. C., Karim, M., and Chantawong, S. C. (2000), Ground improvement performance at the reference section of Second Bangkok International Airport, *Proc., 3rd Seminar on Ground Improvement in Highways*, Bangkok, Department of Highways, Kingdom of Thailand
- Moh, Z. C., Hsiung, K. I., Huang, P. C., and Hwang, R. N. (1999), Underpass beneath Taipei International Airport, *Proc., Conference on New Frontiers and Challenges*, Bangkok
- Moh, Z. C. and Hwang, R. N. (1997), Geotechnical problems related to design and construction of the Taipei Transit Systems, *Proc., of Keynote Speeches, Professor Chin Fung Kee Memorial*

Lectures, Institute of Engineers, Malaysia, Kuala Lumpur

Moh, Z. C., Ju, D. H. and Hwang, R. N. (1997), A small hole could become really big, *Proc., 14th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg

Moh, Z. C., Ruenbrairergsa, T., Lin, P. C. and Karim, M (1998), Improvement of soft Bangkok Clay by use of prefabricated vertical drains, *Proc., 13th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, Taipei, Vol. 1, pp. 369~376

Moh, Z. C., Woo, S. M. (1987), Preconsolidation of Bangkok Clay by non-displacement sand drains and surcharge, *Proc., 9th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, Bangkok, Vol. 1, pp. 8-171~8-184

Ruenkrairergsa, T., Lin, P. C. and Sumantapongsak, S. (2001), Performance of PVD road embankment on soft Bangkok Clay, *Proc., 15th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul

方永壽、潘明德、林國濬，「台北市衛生下水道 - 撫遠街擠壓式潛盾施工引致之地表沉陷」，第四屆大地工程學術討論會，9月，天祥〔1991〕

朱介平、崔澎生、高蔚明、虞尚仁，「捷運中和線 275 標過新店溪潛盾施工」，捷運工程軟土隧道案例研討會，台北捷運局十週年局慶工程研討會，7月 3-4 日，台灣科技大學，台北，429-456 頁〔1997〕

朱旭，「潛盾發進鏡面湧水意外排除與建物扶正-板橋線 CP261 標實例」，捷運技術報告文集之一，12月〔1996〕

朱旭，「明挖隧道湧水意外搶救及復舊 - 南港線 CN252 標實例」，捷運技術文集之二，12月〔1997〕

朱旭、宮能文、馮堯松、郭耀程、范世亮，「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 3~4 日，台灣科技大學，台北，263-284 頁〔1997a〕

朱旭、陳鴻濤、宋立民、段紹璋，「河底隧道災變搶救及復舊」，捷運工程軟土隧道案例研討會，7月 3~4 日，台灣科技大學，台北，91-230 頁〔1997b〕

朱旭、宮能文、段紹璋，「台北盆地流木分佈對地下工程之影響」，第七屆大地工程學術研究討論會，金山〔1997c〕

亞新工程顧問公司，「復興北路穿越松山機場地下道工程細部規劃及初步設計報告」〔1992〕

吳建民，「台北盆地地盤沈陷問題之研究(上)」，土木水利，第四期〔1967〕

吳建民，「台北盆地地盤沈陷問題之研究(下)」，土木水利，第四期：pp 53-81〔1968〕

吳國安、莊復盛、王復國，「粘土層潛盾施工引致之地表沉陷」，大地工程研討會，8月 29~30 日，金山，1025~1032 頁〔1997〕

范陳柏、趙際禮，「捷運新店線 221 標通風豎井災變復舊」，捷運工程軟土隧道案例研討會，7月 3~4 日，台灣科技大學，台北，1-90 頁〔1997〕

青木建設/新亞建設，「Basic & Schematic Design Examination for Vent Shaft Slurry Wall」〔1991〕

崔澎生，「捷運中和線 CC275 標地底沼氣對潛盾隧道施工之安全探討」〔1996〕

黃南輝、許先才、林國楨、關河淵，「降水工法在深開挖之應用」，深開挖與地下水研討會，4月 26~27 日，台灣科技大學，台北〔1996〕

黃南輝、張培義、王復國、簡敏忠，「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，四月 23 日，台灣科技大學，台北，1~36 頁〔1999〕

黃南輝，「國內應用實例 - 台北捷運潛盾施工和鄰房保護地盤改良案例」，捷運工程地質改良輔助工法講習班，2月，高雄應用科技大學〔2001〕

黃敏祥，「卵粒石層多邊形豎井連續壁施工」，台北都會區捷運系統工程研討會，捷運六周年慶，3月 17~18，劍潭青年活動中心，621~625 頁〔1993〕

楊國榮、王勝男、范陳柏，「潛盾隧道施工所導致之地表沉陷」，大地工程學術研討會(第六屆)，8月 18~20 日，阿里山，1083~1090 頁〔1995〕

楊國榮、黃立煌、王勝男，「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 23~24 日，台北〔1995a〕

楊國榮、楊慕泉、趙際禮，「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〔1996〕

楊國榮、趙際禮，「台北捷運系統新店線 CH221 標通風豎井施工」，第七屆大地工程研討會，8月 29-30 日，金山，1017~1024 頁〔1997〕

賴慶和、余明山、吳建閻、吳偉康，「以二次注入灌漿控制潛盾施工引起之沈陷」，地工技術，第 60 期：83~96 頁，4月，〔1997〕

熊谷鑑，「台北市復興北路穿越松山機場地下道之規劃與設計」，海峽兩岸城市規劃與建設學術會議，九月 23~25 日，福州大學〔1997〕

劉平妹，「花粉化石分析子題初步結果報告」，「台灣之第四紀」第五次研討會，中壢，中央大學〔1994〕

劉聰桂、陳于高、吳文雄、羅嘉轍、魏谷，「台北盆地沉積物與地下水之年代與水質研究」，「台灣之第四紀」第五次研討會，中壢，中央大學〔1994〕