

深開挖施工地下水控制
**GROUNDWATER CONTROL FOR
DEEP EXCAVATIONS**

黃立煌，秦中天

L. W. Wong and C. T. Chin

原著載於地工技術雜誌第 63 期
1997 年 10 月，第 15~22 頁

*Reprinted from Sino-Geotechnics
Taipei, Taiwan
October, 1997, No. 63, pp.15~22*

深開挖施工地下水控制

黃立煌 秦中天

亞新工程顧問有限公司

摘要

本文主要以捷運工程案例，說明深開挖工程施工所採取之地下水控制措施，包括抽水，水中施工、地下水補注、截水牆、灌漿隔幕、灌漿筏及地盤冰凍等方法。綜合各案例顯示適當之地下水控制之選擇有賴於對地層及地下水狀況有確切之瞭解。

關鍵字：深開挖、地下水控制、抽水、補注、灌漿隔幕、灌漿筏、地盤冰凍。

GROUNDWATER CONTROL FOR DEEP EXCAVATIONS

WONG L. W. CHIN C. T.

Moh and Associates, Inc., Consulting Engineers

ABSTRACT

This paper reviews various case histories of groundwater control schemes which were adopted at deep excavation sites of mass rapid transit systems situated in soft subsoil and high groundwater pressure conditions. The control methods comprise dewatering, underwater excavation, groundwater recharge, seepage cutoff, grout curtain, grouting mat and ground freezing. These case histories demonstrate that thorough understanding of the subsoil and the groundwater conditions is essential for selection of the proper groundwater control scheme.

KEY WORDS : deep excavation, groundwater control, dewatering, recharge, grout curtain, grouting mat, ground freezing.

一、前言

捷運系統通常由地下結構組成，包括地下車站，明挖覆蓋隧道，鑽掘隧道，通風井及軌道轉轍段，皆需進行深開挖施工。這些地下結構常遭遇軟弱土層及高地下水狀況，加上捷運沿線均已開發，捷運工程緊鄰房屋、橋樑、輸水管線、排水箱涵等現有結構物。深開挖施工需確保捷運工程本身之安全，及鄰近現有結構物之完整性。甚多文獻(Moh, Ju and Hwang, 1997; Duann et al., 1997; 范陳柏及趙際禮，民國86年)報導，地下工程施工之災變，皆可歸咎於地下水之滲漏及高地下水壓。深開挖之安全施工，完善及慎密之地下水控制措施愈形重要。

本文收集多個深開挖案例，以台北捷運地下工程為主，輔以新加坡捷運及香港高樓地下室開挖之案例，說明各種地下水控制措施之設計及施工考慮，供後續深開挖工程參考。

二、深開挖地下水問題

於軟弱土層及高地下水水位狀況進行深開挖施工，需考慮之地下水問題主要有兩項，分別為開挖區之穩定問題及開挖區外之沉陷問題。

針對開挖區之穩定，根據Chin et al.(1992)按土層分佈狀況，而有各種破壞型態。假如開挖面下方高透水性之土層深度大於連續壁深度，需考慮地下水向上滲流之管湧破壞狀況。假如開挖面下方土層屬低透水性，則黏土層上方之土重必需大

於作用黏土層之水壓力，以防止上舉破壞。對維持開挖期間之穩定，有必要於開挖區下方土層進行抽水措施。

對於開挖區外之沉陷問題，鑑於已往台北盆地地下室施工，常因抽水以致基地鄰近範圍地下水位隨之而下降，導致松4層及松5層之壓密沉陷，影響鄰近結構物之安全。在進行開挖區之抽水時，必需估計開挖區外地下水位之下降可能造成之地盤沉陷。假如估計沉陷量高於鄰近結構所能容許之限度，則需考慮施作截水措施，把地下水洩降範圍局限於開挖區內，或採用地下水補注，避免壓密沉陷發生。

綜合上述兩項與深開挖工程有關之地下水問題，地下水控制技術可分為下列三種。

(1)以抽水降低地下水壓：包括深井、點井、消壓井及排水帶等措施。

(2)降低地盤之透水性：深開挖擋土結構本身即為不透水隔幕，例如鋼板樁或連續壁；亦可採用地盤改良設置灌漿隔幕或灌漿筏，達到阻截地下水滲流之目的。

(3)地下水補注：避免開挖區外土層壓密沉陷，地下水補注為一可行方法。

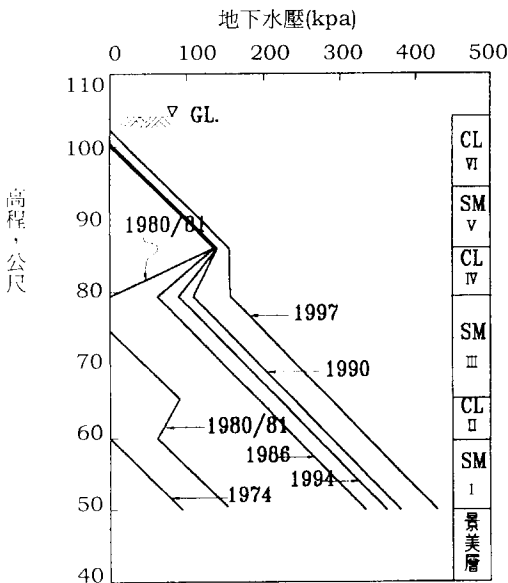
上述各種地下水控制案例，分別於第四及第五節詳細說明。

三、土層及地下水況

台北捷運初期路網位於台北盆地。根據Woo and Moh(1990)台北盆地之土層主要由厚50至70公尺之松山層，覆蓋於厚約150公尺之景美礫石層上。松山層並可由下至上分為6個主要次層。第1、3、5層為粉質砂土層，第2、4、6次層為粉質

黏土層。盆地中央地面高程介於103.5公尺至104.5公尺之間，而新店線南部地面高程約在110公尺。按台北捷運系統以高程100公尺定為海平面高程。

台北盆地自1960年代開始即自景美層抽水，以致松山層及景美層地下水位皆較原有地下水位低。地下水抽取自1970年代中期即已減少，至目前地下水位仍在回升當中。根據1992年至1997年期間水壓計觀測結果，地下水水位分佈隨深度而變化，松5層地下水位在高程100至101公尺之間，松3層地下水位在高程93至95公尺之間，而景美層地下水位在高程90至91公尺之間。松山層地下水壓分佈狀況如圖一所示。



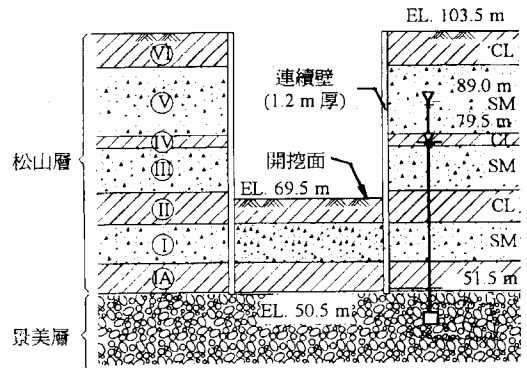
圖一 台北盆地地下水壓分佈

四、抽水措施

4.1 礫石層抽水

台北捷運工程多處地下結構深度大

於28公尺，深開挖時需降低景美層水壓，以維持上舉安全性。板橋線CP261標通風井B開挖深度34公尺，根據邵明忱等(民國84年)之報導，景美層地下水壓需自高程89.0公尺洩降至高程79.5公尺。通風井B之土層及地下水狀況如圖二所示。承商共裝設10個抽水井，其中位於豎井內之2個抽水井深度為72公尺，直徑560公厘，進水管徑300公厘，內裝設功率80hp之抽水機，抽水量280cmh。位於豎井外之8個抽水井，深度為82公尺，井孔直徑660公厘，進水管徑400公厘，內置功率400hp之抽水機，抽水量介於380至400cmh之間。施工抽水時，10個抽水井總抽水量最大為3600cmh。根據黃南輝等(民國85年)報導，景美層降水導致之沉陷不超過10公厘。



圖二 CP261標通風井B土層狀況

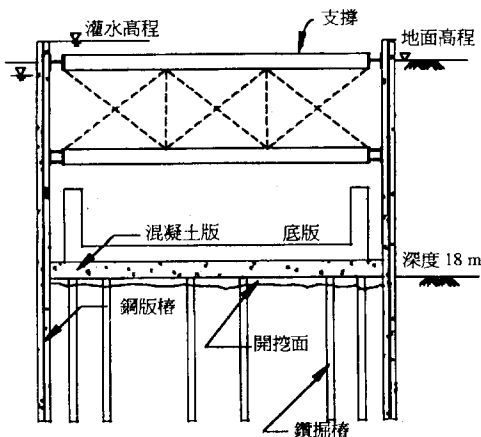
根據CP261標通風井B，CP262標通風井A及CT201F標車站之多井抽水試驗結果，黃南輝等(民國85年)估計景美層之導水係數 T 約為0.18平方公尺/秒，導水係數之定義為 $T=kB$ ， k 為透水係數， B 為含水層厚度，假設含水層厚度為50公尺，則景美層透水係數約為 4×10^{-3} 公尺/秒。

CP261標之案例顯示景美層透水性雖然甚高，但9.5公尺洩降需10個深井，以抽

水作為地下水控制措施十分具有可行性。

4.2 水中施工

深開挖上舉或管湧穩定性除可採用抽水降低地下水壓外，尚可藉開挖區灌水或水中開挖達到內外水壓或土塊自重平衡之方法達成。新加坡捷運曾採用水中開挖方法。根據Hulme et al. (1989)，301標捷運車站及明挖覆蓋隧道之施工，圍堰施作後先開挖7公尺並裝設2層支撐，然後圍堰內灌水至高於地面高程2公尺，再繼續以水中開挖至18公尺深度。如圖三所示，開挖至最後深度後，承商施作直徑1公尺鑽掘樁作為車站基礎，並於水中灌鑄厚1.5公尺之混凝土版後，抽乾圍堰內之水，進行車站結構施工。該1.5公尺厚無筋混凝土功能除作為底部支撐外，並於圍堰抽水後，藉鑽掘樁抵抗底部上舉壓力。對18公尺深之開挖而言，水中開挖除避免抽水外，並可減少大量之臨時支撐費用。



圖三 新加坡捷運301標水中開挖
(Hulme et al. 1989)

4.3 地下水補注

避免抽水引致開挖區外地下水位隨之而下降，可採用地下水補注方法。在香港

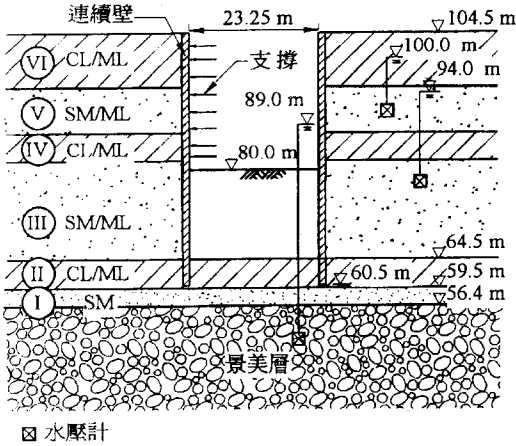
有一深開挖基地曾採用補注方法，減少鄰近結構之沉陷。根據Morton and Tsui(1982)，於香港島北側填海新生地需進行15公尺之深開挖。基地土層由上至下主要為厚度5至15公尺粗砂組成之填土，厚約10公尺黏土層及厚度10至20公尺之完全風化花崗岩，為緊密之粉質砂。地下水面約在4.5公尺深。地下室開挖抽水系統由54個直徑200公厘，深25至35公尺，水平間距6至15公尺之抽水井組成。由於深開挖擋土措施採用之鋼板樁深度19.5公尺，為避免開挖時抽水導致基地外地下水位下降，特別採用地下水補注措施。於長135公尺，寬90公尺之L型地下室開挖區外側，共裝設75個補注井，各井間距最少為5公尺。井徑100公厘，井深25公尺，井內裝設直徑50公厘PVC管，井管及井孔間填充砂及礫石濾料。各補注井與水箱連接並以高於地面2.5公尺之定水頭壓力進行定常補注。最大之總補注量7cmh。水壓計觀測顯示鋼板樁外側地下水位洩降約在3至5公尺之間，而於抽水作業期間緊鄰之獨立基腳結構物沉陷量介於10至20公厘，在容許範圍內。

五、地下水阻截措施

5.1 連續壁

為阻截地下水自開挖區外滲流至深開挖基地，具止水性之擋土結構，例如連續壁或鋼板樁，需增加貫入深度至下方之黏土層。根據Moh et al.(1997)所報導之案例，檢討捷運地下車站開挖深度為24.5公尺。如圖四所示，考慮被動土壓安全時，連續壁深度約35.5公尺或牆趾高程69.0公尺即可足夠。為避免松三層砂層地下水

經由牆底流入，導致地下水壓下降，連續壁底部設計高程加深至高程60.5公尺，貫入松2層黏土層內最少1.5公尺。



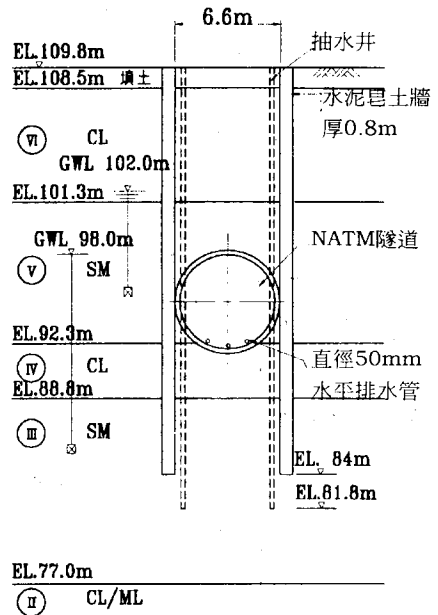
圖四 捷運地下車站標土層狀況
Moh et al.(1997)

開挖區內松三層仍需設置抽水設施，以排除經由松二層向上之滲流。根據捷運工施工經驗，開挖區通常裝設孔徑500公厘之抽水井，內置有篩孔井管及功率約5hp之沉水式抽水機，最大抽水量可達35cmh，抽水井水平間距約50公尺。受連續壁及松二層阻隔，抽水井僅需間歇操作，即可達到預定之松三層洩降水位。

5.2 水泥皂土牆

除了採用高勁度之連續壁外，在適當之情形下地下水阻截效果可採用勁度較低之水泥皂土牆。於CH221標有一長222公尺之雙隧道以NATM方法施工，並採用壓縮空氣作為輔助工法。在NATM展開前，需於地層中施作一長30公尺，及直徑6公尺之無壓氣段隧道，以設置圍阻牆，人員氣閘，醫療閘及材料進出閘。楊國榮等(民國86年)報告此正常氣壓隧道施工前，承商採用水泥皂土牆作為截水措施。如圖五所示，水泥皂土牆由36單元組成，

每一單元厚度0.8或1.0公尺，寬約5公尺。水泥皂土牆深度25.8公尺，主要用以阻截松5層之滲流。同時為確保隧道挖掘時之上舉穩定，承商設置4個抽水井至高程81.8公尺，並於工作井內隧道仰拱處鑽設3支水平排水管，成功將截水牆內松5層及松3層地下水位，洩降至高程約92公尺，以便此段30公尺長之NATM隧道能在安全之情形下挖掘施工。



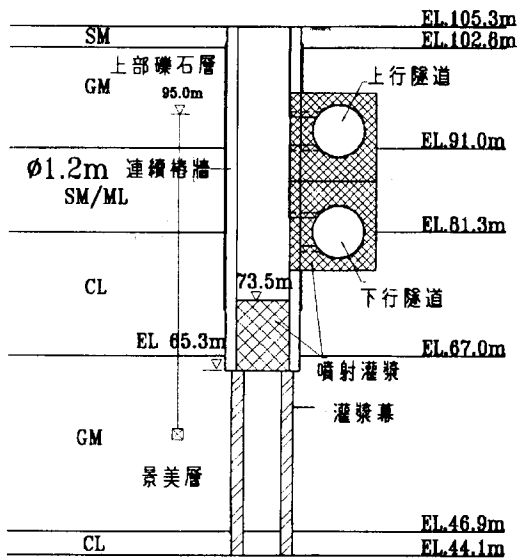
圖五 CH221標NATM隧道段地下水控制措施(楊國榮等，民國86年)

5.3 灌漿隔幕

阻截地下水滲流尚可採用地盤改良方式，降低地盤之透水係數。中和線CC277標有兩處連通道，開挖時需降低景美層之地下水壓，以維持足夠之抗上舉安全。考慮景美層中，止水性擋土結構施工較為困難，承商採用地盤改良方法，施作灌漿隔幕。如圖六所示，CC277標之隧道為上下重疊配置，其連絡道以內徑6公尺之豎井方式連通。豎井採用直徑1.2公

尺，深39公尺之連續樁牆(continuous pile wall)作為擋土結構，樁牆底部貫入景美礫石層中約1公尺。樁牆底部以馬歇管(tube-a-manchette)方法，於高程65.3公尺及44.1公尺間之景美層，注入水泥皂土漿及矽酸鈉溶液，形成阻截滲流之隔幕。另一方面，高程73.5公尺至65.3公尺間黏土層，承商以噴射灌漿，以水泥系列材料施作灌漿筏，除可增加該處黏土之強度，減低樁牆之側位移，並有達到阻截滲流之目的。隔幕灌漿之材料配比及施工參數綜合如表一及表二所示。

CC277標連通道豎井底部之地盤改良完成後，承商於開挖時，需對灌漿隔幕內之地下水位，以抽水井方式，維持於水



圖六 CC277標二號連通道地盤改良情形

壓高程78.4公尺以下，以便達到抗上舉安全係數1.25之要求。

本豎井施工亦為綜合採用截水牆、灌漿隔幕、抽水等多項地下水控制措施之案例。

表一 灌漿材料配比

| 灌漿種類 | 灌漿材料 | | 每立方公尺材料量 | |
|------------|-------|----|--------------|--------------|
| | | | CC277 連絡道 | CH221 通風井 |
| 水泥／ 皂土漿 | 水泥 | kg | 348 | 177 |
| | 皂土 | kg | 43 | 5 |
| | 水 | 升 | 870 | 920 |
| 矽酸鈉 | 矽酸鈉溶液 | 升 | 200 | 250 |
| | 反應劑 | 升 | 10-20 | 50-55 |
| | 水 | 升 | 780-790 | 695-700 |

5.4 灌漿筏

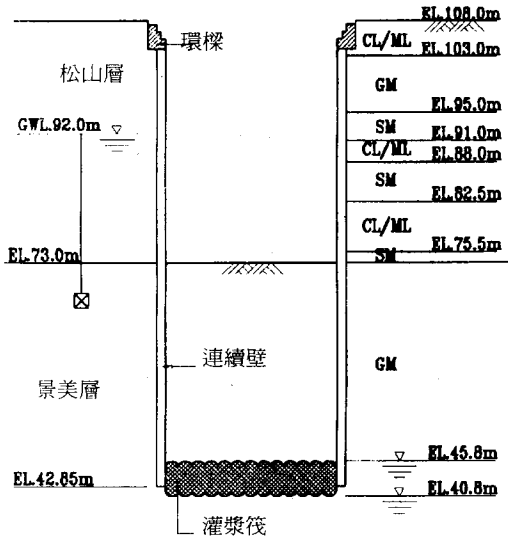
以上所檢討之案例，皆以擋土結構或以灌漿隔幕，貫入至不透水之黏土層內1.5公尺或以上，利用該黏土層作為底部之截水層。在黏土層深度甚大之情況時，此底部之截水層可採用地盤改良方法，於砂土層或礫石層中，施作灌漿筏，以達到阻截滲流之目的。

CH221標通風井深開挖施工，曾採用灌漿筏作為地下水控制之主要措施。此通風井直徑23.6公尺，開挖深度35公尺。根據楊國榮及趙際禮(民國86年)之報導，由於景美層地下水位高程92公尺，為維持開挖期間抗上舉安全，承商把連續壁擋土結構貫入至礫石層內30.1公尺，作為側向之截水措施。如圖七所示，於連續壁趾部，承商以馬歇管工法施作厚5公尺之灌漿筏。

表二 灌漿參數綜合表

| 施工標 | 捷運 結構 | 灌漿孔間距 公尺 | 灌漿孔直徑 公尺 | 灌漿管內徑 公厘 | 最大灌注壓力MPa | | 灌注量升/公尺 | | 膠凝時間 分 |
|-------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------|---------|-----|-----------|
| | | | | | 水泥皂土 | 矽酸鈉 | 水泥／皂土 | 矽酸鈉 | |
| CC277 | 2號連絡道 | 1.4 | 114 | 40 | — | 5-6 | 628 | 314 | — |
| CH221 | 通風井 | 2.0 | 114 | 40 | P 2.7 S 2.5 T 2.1 | 1.6 1.7 1.5 | 324 | 972 | 60 |

註：P,S,T分別代表第一，第二及第三階段灌漿孔。



圖七 CH221標通風井土層狀況

灌漿相關參數詳表一及表二。灌漿筏之止水效果，則以現場抽水試驗予以確認。承商於高程60公尺處裝設30hp之沉水式抽水機，並在19小時內抽水204立方公尺，而灌漿筏上方地下水位自高程92公尺洩降至高程67公尺。抽水機關閉後，該地下水位於6小時內回升至高程72.5公尺，惟於32小時內回升1.14公尺。根據此試驗資料，估計灌漿筏透水係數約為 4×10^{-7} 公尺/秒。與4.1節所述之景美層透水係數比較，透水值降低約一萬倍。

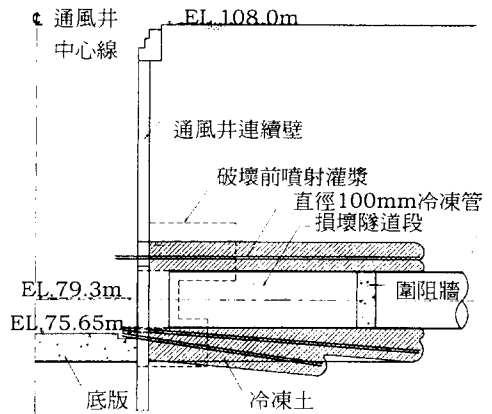
CH221標案例並顯示景美層之上舉穩定性，除抽水方案外，尚可採用其他不同之地下水控制措施。

5.5 地盤冰凍

地盤冰凍(ground freezing)為地盤改良之一種，能改善含水地層之止水性及強度。雖然與一般注入水泥或矽酸鈉材料等地盤改良方法比較，冰凍方法費用高出5至10倍，但在必要情形下，地盤冰凍仍需採用作為地下水控制措施：

- (1).地層內存有空隙。
- (2).地盤改良必需絕對確保止水性。
- (3).噴射灌漿以水平孔施作時，可能難以確保止水性。

地盤冷凍方法曾用於CH221標通風井災變導致已完工隧道破壞之復舊工作。根據范陳柏及趙際禮(民國86年)，CH221標通風井開挖及隧道施工完成後，承商在施作通風井及隧道間柔性接頭時，挖除部份已灌漿之土層，導致管湧破壞。為修復遭損壞之隧道環片，承商採用地盤冷凍方法，沿6公尺直徑之隧道環片外圍鑽孔及裝設冷凍管，冷凍管間距0.8公尺。如圖八所示，在長28公尺之隧道段共裝設水平冷凍管38支及垂直冷凍管36



圖八 CH221標隧道修補段地盤冰凍 (范陳柏及趙際禮，民國86年)

支，管內以最低溫度 -30°C 之冷凍液循環流動。在土層溫度 24°C 之狀況下，溫度觀測結果顯示，在冷凍液流通70天後，距冷凍管1.2公尺半徑範圍之土層已獲凍結，土層之冷凍範圍並有隨時間之增加而擴大之情形。此一地盤改良厚度能「增長」之特性，使冰凍方法可隨時檢討其地盤改良效果，並在必要時予以補強之優點。

隧道周圍冷凍土層形成後，在止水隔幕之保護下，受損環片之修復順利進行。

六、結論

(1). 高地下水壓深開挖工程安全施工，必需充分瞭解土層及地下水狀況，以便選擇適當及可行之地下水控制措施。

(2). 景美層之透水係數對地下水控制措施之選擇有關鍵性之影響。視景美層深度、開挖深度及地下水壓狀況，抽水方案，灌漿筏方案甚至水中開挖方案皆具有可行性。

(3). 以地盤改良形成灌漿隔幕或灌漿筏，必需以抽水試驗確認其止水功效。

(4). 抽水導致鄰近範圍產生壓密沉降之負面影響，可採用地下水補注方法，減輕其衝擊。

誌謝

本文引用之資料為亞新工程顧問公司受台北市政府捷運局所委託大地工程專業顧問服務工作之一。本文承蒙台北市政府捷運局及亞新工程顧問公司惠准發表。

參考文獻

- 邵明忱、黃立煌、馮堯松、劉格非(民國84年)，「礫石層水理參數探討」，國際卵礫石層地下工程研討會，台北，第4-29頁至第4-38頁。
- 范陳柏、趙際禮(民國86年)，「捷運新店線二二一標通風豎井災變復舊」，捷運工程軟土隧道案例研討會，台北，第1至84頁。
- 楊國榮、楊鵬飛、范陳柏、趙際禮(民國86年)，「軟弱地盤新奧工法隧道施工」，第七屆大地工程學術研討會論文集，金山，第1009至1016頁。
- 楊國榮、趙際禮(民國86年)，「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討會論文集，金山，第1017頁至第1024頁。

黃南輝、許先才、林國禎、闕河淵(民國85年)，「降水工法在深開挖之應用」，深開挖與地下施工研討會論文集，台北，第53頁至第80頁。

CHIN, C. T., CHIEH, T. T. & DUANN S. W. (1992), Groundwater Effect on MRT Construction, *Proc., 1st Young Asian Geotechnical Engineers Conference*, Bangkok.

DUANN, S.W., WANG, R.F., WANG, C.H. and LIOU, G. J. (1997), Piping Failure of a Cofferdam in Southern Taiwan, *Proc. Int. Conf. on Foundation Failures*, May, Singapore, pp.209-216.

HULME, T.W., POTTER, L. A. C. AND SHIRLAW, J.N.(1989), Singapore Mass Rapid Transit System: Construction, *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, August, Part 1, pp.709-770.

MOH, Z.C., JU, D. H., AND HWANG, R.N.(1997), A Small Hole Could Become Really Big. Momentous Lecture, *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, September, Hamburg, Germany.

MORTON, K. AND TSUI, P.(1982) Geotechnical Aspects of the Design and Construction of the Basement of the China Resources Building Wanchai, *Proceedings of the Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference*, November, Hong Kong, pp.529-543.

WOO, S.M. AND MOH, Z. C.(1990), Geotechnical Characteristics of Soils in the Taipei Basin, *Tenth Southeast Asian Geotechnical Conference*, April, Taipei, Taiwan.

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10月14日 收稿

86年10月27日 修改

86年10月29日 接受