

# 地盤改良與新奧工法

黃序輝、王復麟  
亞新工程顧問股份有限公司

郭國雄、陳奕耿  
台北市政府捷運工程局

## 摘要

台北都會區捷運系統南港線CN256B標之隧道係位於忠孝東路與基隆路口下方，西側銜接CN256標潛盾隧道，穿越基隆路車行地下道下方後，自東與CN257標之市政府站(BL13)西端連續壁銜接，上下行隧道全長共約98m，開挖直徑為6.4m，中心深度約於地底下13.5m，兩隧道中心距約20m，採新奧工法施工。因所處地層多屬軟弱粘土層，故以地盤改良為穩定地層輔助工法。本文中依序說明基地地層與地下水壓狀況、施工概況、地盤改良、隧道開挖及安全監測系統等。由觀測資料得知南側(上行)隧道開挖構築期間，因開挖區地層之地盤改良效果佳，施工引致之最終地面沉陷僅約30mm，北側(下行)隧道則因該區地下管線縱橫密佈，地盤改良作業施工不易，致其地盤改良效果不佳，於鏡面破除及隧道開挖初期，地層曾一度有明顯沉陷情形，頂拱及支撐基腳亦相繼有過量下陷，隧道有淨空不足現象發生。後於原支撐間各增設一對臨時性支撐補強，並沿開挖面前方土緣，及兩側支撐腳底部打設鋼管加勁，以阻隔滑動面及提高支撐支撐力。淨空不足部份則於支撐間依序進行刻槽、架設支撐、噴漿而後再挖除侵入部份，經採上述補強措施後，本隧道得以安全、順利完成開挖及內襯砌構築作業，並且地面最大沉陷量控制在240mm以內。

**關鍵字：**隧道、新奧工法、地盤改良、監測系統、頂拱、支撐、沉陷。

## GROUND IMPROVEMENT FOR NATM TUNNELING IN SOFT GROUND

**HWANG R. N.    WANG F. G.    CHENG K. C.    CHEN Y. K.**

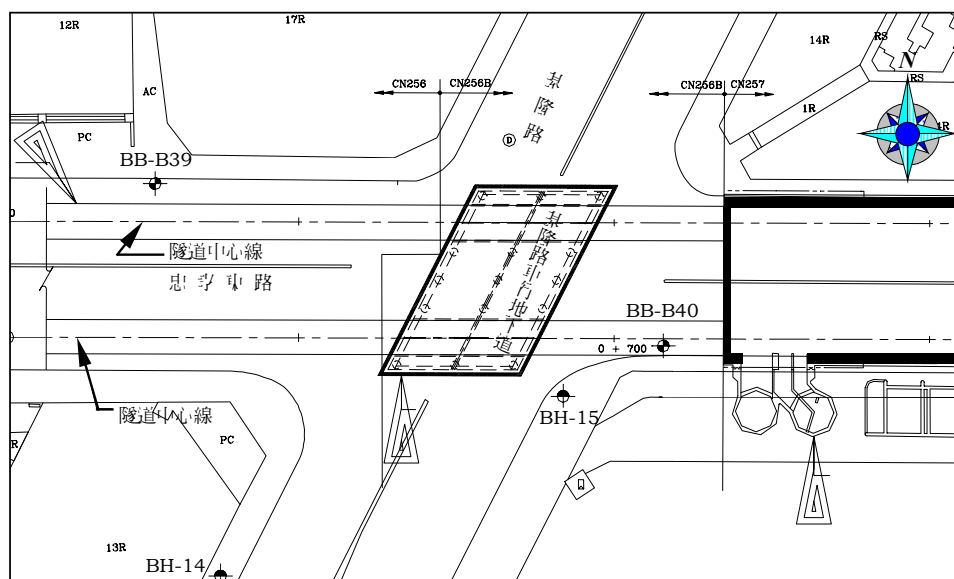
Moh and Associates, Inc.

Dept. of Rapid Transit Systems, Taipei Municipal Government

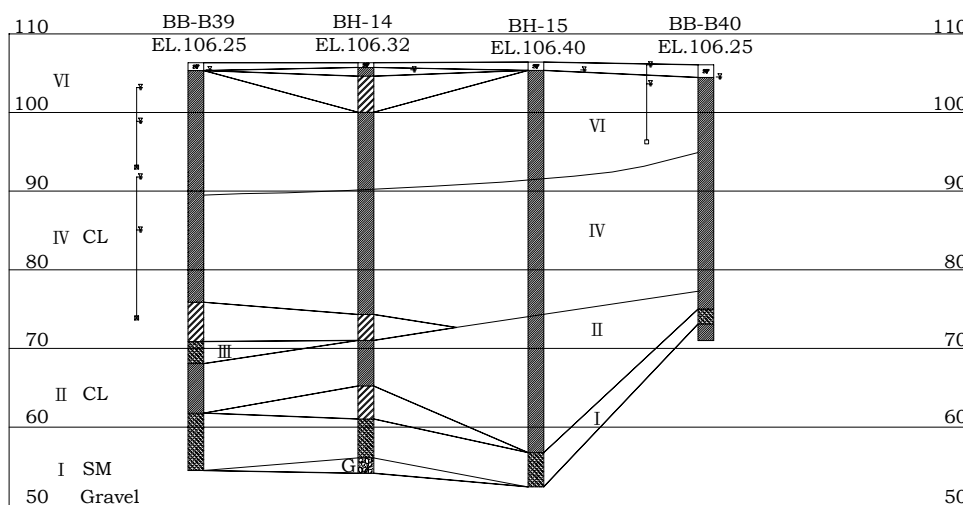
## ABSTRACT

A section of twin tunnels, with a diameter of 6.4m and a total length of 98m, in the Nankang Line of the Taipei Rapid Transit Systems was constructed using the NATM method. The subsoils in which the tunnels are buried are young sediments and are very weak in strength. Ground treatment was necessary for maintaining the face stability during tunneling. Jet grouting was applied and the performance of the two tunnels was quite different because of the different conditions encountered. For the up-track tunnel,





平面圖



剖面圖

圖一 CN256B標沿線地層分佈狀況圖

### 2.3 工程概述

本標於設計初期曾提出三個構築方案：(1)基隆路車行地下道下方隧道採人工挖掘，其他則採明挖覆蓋方式施工，(2)全段隧道採人工挖掘(新奧工法)，(3)潛盾

隧道方式施工。其中方案(1)因施工過程對該路口交通衝擊甚鉅而未採行，方案(3)則因考量現場無足夠空間可供構築迴轉(到達)井，且隧道總長度不長，不符潛盾施工經濟效益。因此本工程最後採用方案(2)，以地盤改良工法來增加隧道周邊

土壤強度，全段隧道採用新奧工法之施工概念進行施工。由於冰凍工法及壓氣工法需高額動員費，且施工條件不適當，經評估後不予考慮。

以開挖面之穩定性而言，新奧工法因缺乏如潛盾工法所能提供鋼殼及面鉸之保護而有較高之風險，加之地盤改良作業易受地下管涵影響而不易落實，然就長期使用服務性能而言，本工法提供雙層襯砌系統及地下水隔離層，故比預鑄環片有較佳之防水性能及結構強度。

本標隧道包含下行隧道(北側)長度約44m，上行隧道(南側)長度約54m，以水平並列方式排列，中心線間距約20m，隧道中心軸深度變化自13.0m至13.5m。隧道開挖直徑約為6.4m，其方式為採人工、挖土機、碎石機等併用方式，分5階段每公尺輪進一次，內襯砌採自定式鋼模，每4.5m施作一次，其內外襯砌均為25cm厚。

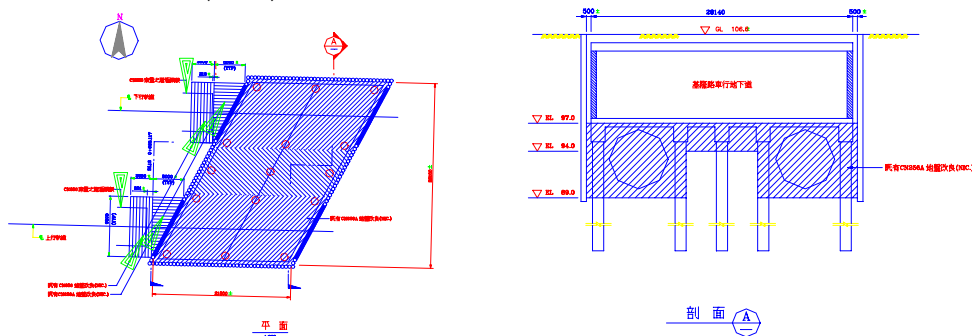
### 三、地盤改良

#### 3.1 施作概況

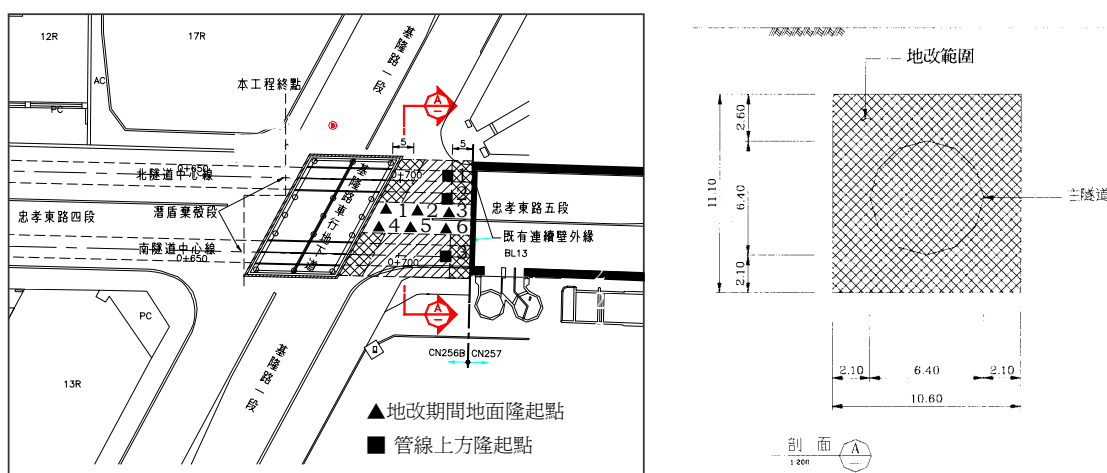
在基隆路車行地下道興建時，廠商即計畫其下方施作地盤改良，標號為CN256A標，改良範圍詳如圖二所示，CN256B標廠商僅施作車行地下道至BL13站間之地盤改良(圖三)，兩標均採相

同之超高壓噴射灌漿工法(JSJ工法)，以 $280\sim 300\text{ kg/cm}^2$ 之超高壓力將摻有水泥系硬化劑及 $5\sim 7\text{ kg/cm}^2$ 高壓氣流之雙重管以沖碎周圍土壤，鑽桿以15 RPM迴轉速度及 $5\text{cm}/28\text{sec}$ 上昇速度徐徐上升至需處理深度，使土層與硬化劑拌合而固結成圓柱體，以增加地層深度，有關本工程高壓灌漿施工參數如表二所示。硬化劑配比為每立方公尺漿液包含760 kg水泥及760 L水。廠商施作改良成形樁徑為120cm，採等三角形配置，各改良樁中心距為100cm，設計改良強度為 $\geq 10\text{ kg/cm}^2$ ，各樁施作原則上以採跳樁方式進行，以避免在沖水洗孔時將鄰近樁體中尚未完成凝結之硬化漿液洗出，而影響先行樁體之強度及完整性。

位於基隆路車行地下道及市政府站端牆5m範圍內，為考量高壓灌漿作業可能對既有地下結構物造成損壞，故於施作高壓噴射灌漿時採於緊沿結構牆，每2m間距打設 $2''\phi$ 蜂巢管，作為灌漿壓力解壓引，以降低地盤改良對連續壁體的壓力至 $1.5\text{ kg/cm}^2$ 以下，於實際施作觀察了解，蜂巢管設置功效僅於先行改良樁施作時有效，其後因該管內受先行灌樁漿液浸入固化阻塞，故後行樁施作時均無法發揮解壓作用。



圖二 CN256A標地盤改良範圍剖面示意圖(基隆路車行地下道下方)



圖三 CN256B標地盤改良範圍剖面示意圖(基隆路車行地下道以東)

表二 本工程高壓灌漿作業Φ120CM (JSG)施工參數

項目	規格
使用材料	水、水泥
高壓泵吐出量	90λ/min
高壓泵吐出壓力	280~300 kg/cm <sup>2</sup>
空氣壓縮機吐出量	5 m <sup>3</sup> /min
空氣壓縮機吐出壓力	5~7 kg/cm <sup>2</sup>
噴嘴內徑	2.8mm
鑽機迴轉數	10~15 RPM
提升高度/次	5cm
噴射時間/次	28秒(含鑽桿上升)
鑽桿迴轉數	30~60 RPM
每米水泥使用量	15 t/m



照片一 大量管線妨礙地盤改良作業

### 3.2 監測儀器之變化與改良土心取樣試驗成果

基地東北側下行隧道距鏡面約15m範圍內，有1.5m~2.0m寬之高壓電力人、可孔箱涵及眾多管線(照片一)跨越，或因無法遷移及鑽孔破壞管涵垂直灌漿，故在管線周圍區域改以施灌2m直徑改良樁小角度(1°)斜灌，及加长每次鑽桿提升時間至5cm/35sec方式因應。北隧道初期開挖過程中本區域地面曾發生甚大之沉陷變化，開挖面地層露頭檢視發現此區域以樁管之改良並未達到預期成果。

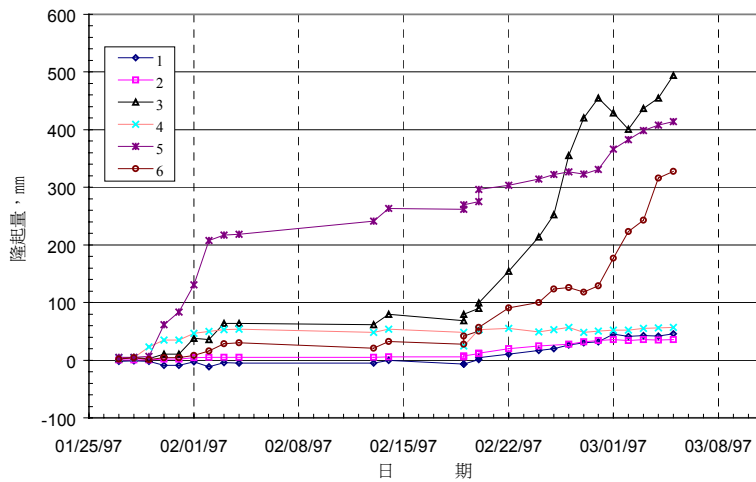
為瞭解地盤改良施工期間對鄰近工區地面的影響，承包商於施工地盤改良前曾先行裝設地面型沉陷點(配置如圖三所示)，觀測結果如圖四所示，地盤改良過程曾測得地面最大隆起量約50cm左右，唯經現場檢視該隆起區域未波及鄰近建物。前述地層過量隆起曾一度使電力人孔箱涵受損，經承包商拆除後重新構築電力人孔箱涵。另為掌握對排水管涵R.C.P的影響，在管線上方佈設三點地面型沉陷點(配置詳如圖三)，地盤改良過程最大隆起量約60cm(詳如圖五所示)，顯示施工期間曾因

迴漿控制不當、壓力洩洩不易，致地層中積蓄過大壓力致使R.C.P管隆起，接頭部份鬆脫。

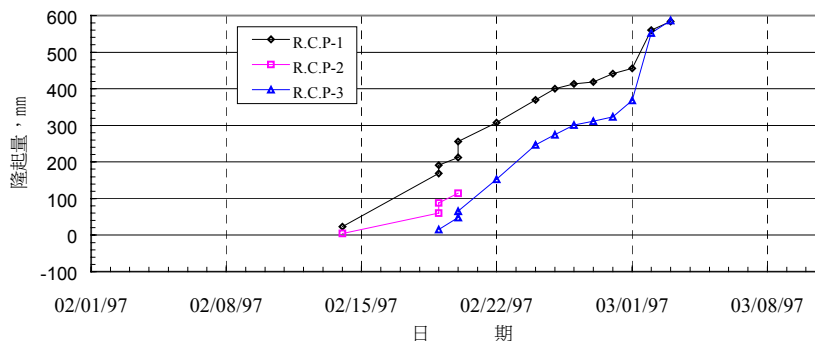
為驗證地盤改良效果，規範規定每100支改良樁即須取一支樁進行驗證取樣，取樣位置係於兩支樁搭接處進行岩心連續取樣，深度至改良深度底，每支連續取樣孔須取米取一試體送公倍單位進行單軸強度試驗，每支樁鑽心試樣需記錄取樣率及RQD值，在改良範圍內28天改良體之單軸抗壓強度須達20 kg/cm<sup>2</sup>以上，如未達前述強度情形，該批改良樁應即補作直至符合強度要求為止。由試驗結果顯示改良體強度約介於40~160 kg/cm<sup>2</sup>，取樣率

及RQD值則大於90，均符合設計要求。

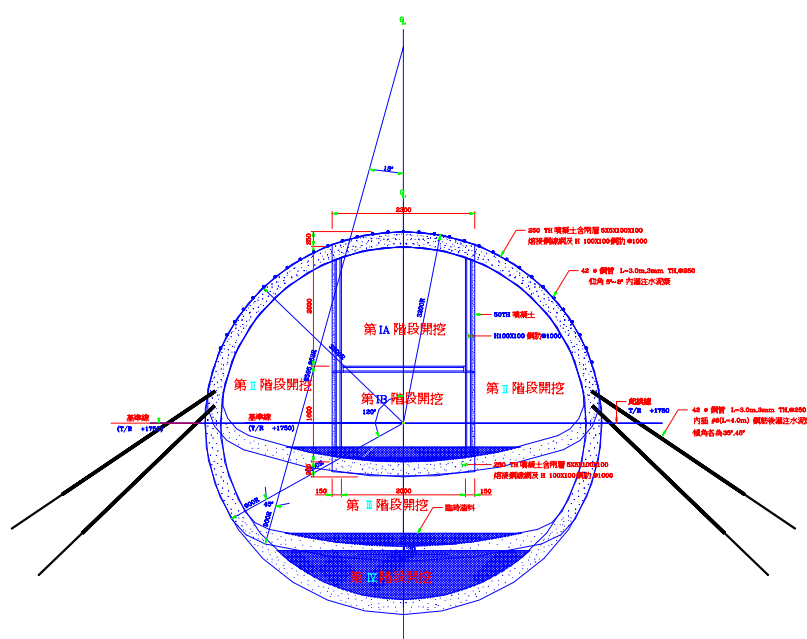
為避免隧道開挖地下滲水造成人員、機具危害，本工程於連續壁鏡面破除前進行透水試驗，其方法為於鏡面開挖首管內之上下及左右各施鑽一支管2.5英寸、深2.0m之孔洞，測試其透水係數(K)是否小於設計要求K=10<sup>-6</sup>cm/sec，如小於K值表示安全可進行隧道開挖，如大於K值，則須再觀察24小時，必要時須進行藥液型止水灌漿，以確保改良體之止水性，前述透水管埋值為每3小時，出水量在1公升以內，本工程經透水試驗結果，其透水係數K均小於10<sup>-6</sup>cm/sec。



圖四 CN256B標地盤改良期間鄰近地面沉陷點歷時曲線圖



圖五 CN256B標地盤改良期間公共管線上方地面沉陷點歷時曲線圖



圖六 CN256B標隧道分階開挖示意及補強措施示意圖

### 四、隧道開挖

本工程以CN257標西側BL13站體空間作為發進工作井由南側之上行隧道先開挖，向西挖至CN256標潛盾隧道殼位置。隧道開挖方式分成IA、IB、II、III、IV等5個階段，並以1m為單位依序呈台階狀向前進行開挖及支撐，隧道分階開挖剖面示意如圖六所示，每輪進一公尺即安裝初期支撐，內含間距一公尺之H100mm×100mm×6mm×8mm鋼肋、兩層5mm×5mm—100mm×100mm搭接鋼絲網，及三層總厚25cm之噴凝土。依上述施工順序進行下階之開挖、鋼筋組裝、鋼絲網鋪設、噴凝土等作業，以硬木質墊塊將鋼肋墊高至設計高程，再以繫桿與前一輪之鋼肋相連接，增加鋼肋結構之穩定性，有關各階段開挖施工照片如照片二至照片七所示。

本標隧道開挖期間，工區南側隧道(上

行線)自1997年7月下旬自工作井出發，於1998年3月上旬隧道開挖完成，而北側隧道(下行線)自1997年10月下旬開挖掘進，至1998年5月下旬貫通。

北側下行隧道於開挖初期曾造成路面有明顯下陷、開挖面滲水及上方地層侵入致淨空不足等問題，經採取於兩側各以俯角35°及45°向下打設一長3m、直徑4.2cm之上釘補強處理措施後(如圖六所示)，為早日完成地層不穩定區域之內襯砌構築，特修正內襯砌施工程序，改為先全力攢趕北隧道內襯砌直至進入基隆路車行地下道下方為止。

在基隆路車行地下道下方隧道開挖過程中，因該區地盤改良成效甚佳，地層頗為堅硬，常需配合碎石機來進行開挖作業，此顯示無地下管線及兩側有擋土壁等限制情形下，所進行之地盤改良作業，應可獲致良好成效。



照片二 隧道IA階段開挖



照片五 隧道III階段開挖



照片三 隧道IB階段開挖



照片六 隧道IV階段開挖



照片四 隧道II階段開挖



照片七 隧道噴凝土施工

### 三、隧道構築

內襯砌活動鋼模長度為4.5m，原規劃全斷面向前進13.5m即上下行隧道及五各分三次施築內襯砌。其施工程序可分為防水膜鋪設、仰拱、活動鋼模構築上部襯砌(含頂拱)等，待此階段結構體完成後

恢復進行向前輪進開挖、支撐等作業。然由於南隧道初期之15m長之開挖監測資料顯示地層十分穩定，為縮短工期，其程序改為南隧道全部挖掘完成後，再構築內襯砌。北隧道於車行地下道段下方地層同南隧道般穩定，故亦採一次挖通後再構築全段內襯砌之方式。

內襯砌分成上、下二部份構築，先以人工施作下部內襯砌，而後施作仰拱（詳照片八、九），待完成上部內襯砌鋼筋組立後，於仰拱面上鋪設鋼軌，再使用活動式鋼模混凝土澆置以構築上部襯砌，於內部襯砌及仰拱完成後，即依設計圖進行步道及排水施作。俟內襯砌結構完成後再行施作低壓(<3kg/cm<sup>2</sup>)背填灌漿，以填補襯砌與噴凝土之間的縫隙。施工情形如照片十~照片十一所示，全隧道工程於1998年7月結構體全部完成。

## 六、地盤反應

### 6.1 監測系統儀器裝設配置概要

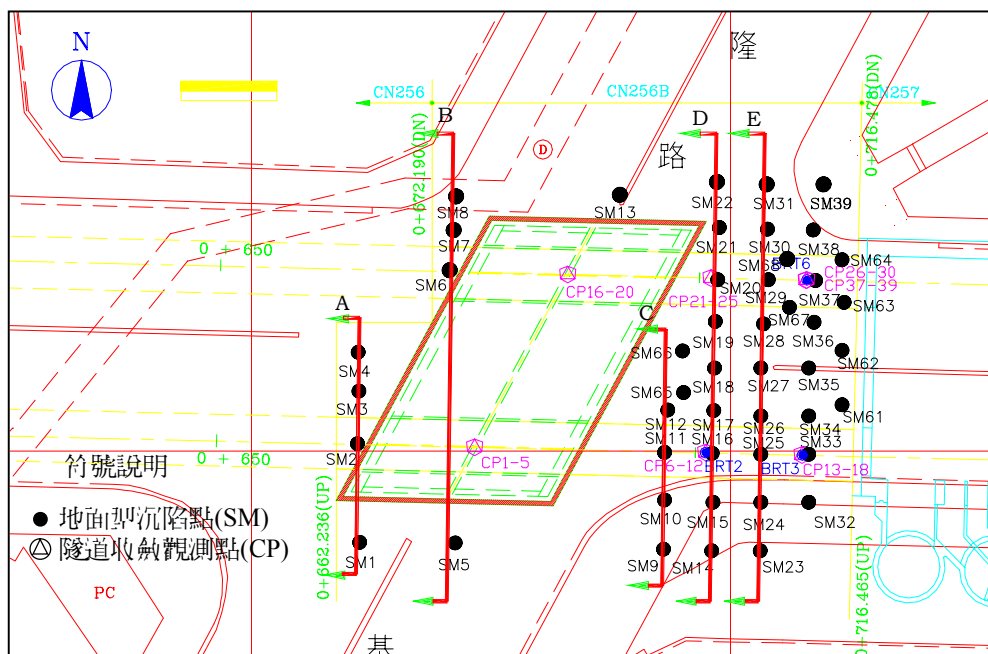
本工程監測儀器計配置有地面型沉陷點(SM)、隧道收斂觀測點(CP)及頂拱沉陷點(BRT)等。為了瞭解隧道開挖對鄰近工區的影響，於南北隧道各配置六個收斂

點量測斷面，同時亦於地面佈設密集的地面沉陷點，以量測施工期間地頭沉陷變化，有關各項監測儀器之平面配置情形如圖七所示，有關本標收斂觀儀(CP)及頂拱沉陷觀測點裝設斷面配置如圖八所示。

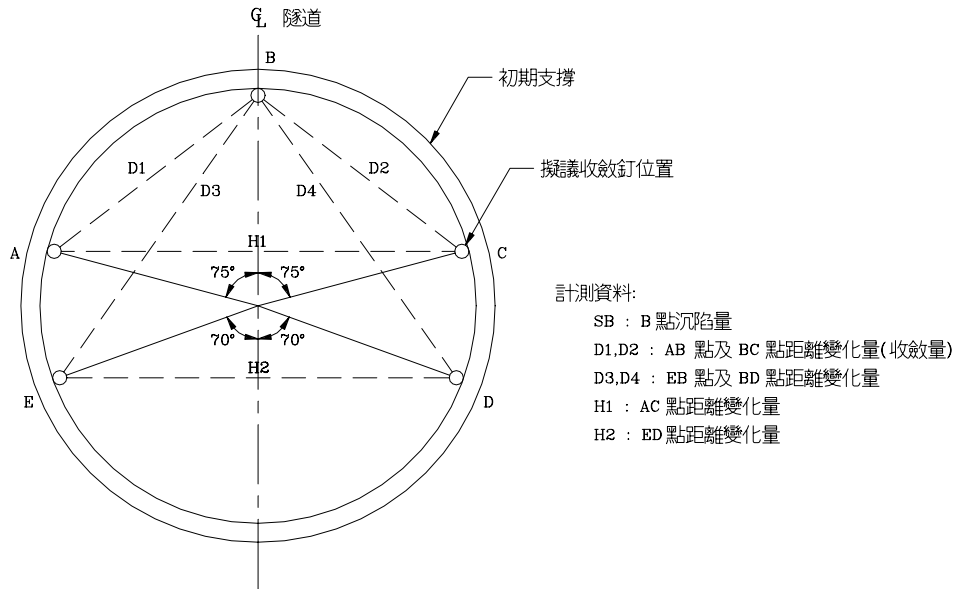
茲針對地面型沉陷點與隧道收斂點等監測儀器觀測結果與隧道開挖施工之關連性彙整說明如次節。

### 6.2 基地周圍沉陷觀測結果

如圖七所示，本工程於北側及南側分別佈設了三個及四個地面沉陷監測斷面，今於兩隧道各取一監測橫斷面繪示地面沉陷點歷時變化趨勢，與隧道開挖施工进度之相互關係（詳如圖九~圖十所示）；有關兩隧道於不同挖掘進度之隧道橫向地面沉陷槽變化趨勢詳如圖十一所示；有關兩隧道掘進對隧道正上方縱向地面沉陷之影響詳如圖十二~圖十三所示。



圖七 地面監測儀器配置斷面圖



圖八 本工程隧道收斂觀測儀(CP)兼測頂拱沉陷觀測點(BRT)配置示意圖



照片八 隧道仰拱構築



照片十 內襯砌預留背填灌漿孔



照片九 隧道上部內襯砌構築

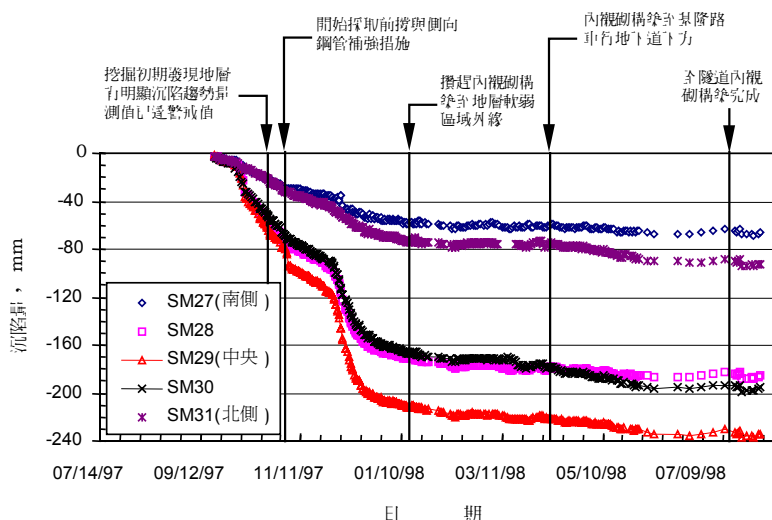


照片十一 內襯砌背填灌漿施工

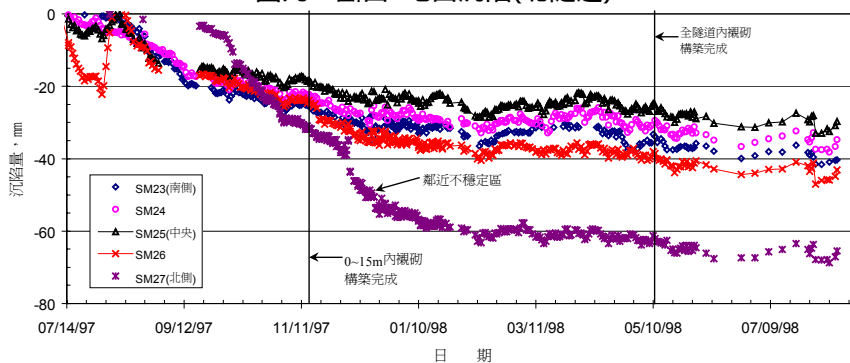
圖九、圖十及圖十三顯示北側下行隧道於1997年10月下旬在鏡面破除與開挖初期，曾造成基隆路車行地下道與南港線BL13站之間路面有明顯下陷情形，且開挖面有滲水及上方地層侵入致淨空不足等問題，地面曾明顯沉陷達60mm，究其原因為：(1)最大沉陷位置係於大量管線下方，研判係因路面管線錯綜複雜，致地層地盤改良效果不佳。(2)於連續壁壁體鏡面破除時之震動使管線下方回填土壤受擾動，造成土壤沉陷。(3)因沉陷引致RCP管涵接頭鬆脫滲水，進一步軟化周圍地層所致。

後經數次召集相關單位開會研商討論，決定採取下列行動：(1)於IA、II階掘

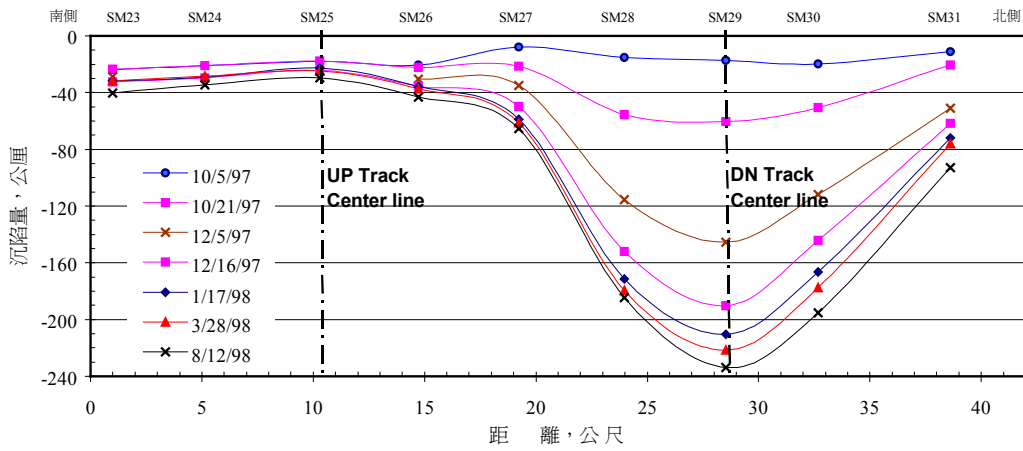
進面鋼肋上方以25cm間距、仰角 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ，打設長3m、直徑4.2cm之鋼管，並拉長各開挖階段間距離，以穩定開挖面前方地層。(2)開挖階段如因故暫停挖掘時，則僅於開挖面(含兩旁)採取噴凝土及鋼絲網封面保護避免開挖面裸露軟化。(3)提高支撐腳支撐力，則於II階兩側下方角落，各以俯角 $35^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 打設3.0m長、4.2cm之鋼管(與支撐鋼肋相銜接)，其內再插入一長4.0m、6#鋼筋，管內並施以灌漿，以增加鋼肋支撐力。經採用前述補強措施後地面沉陷已趨穩定，最大沉陷量約為240mm。



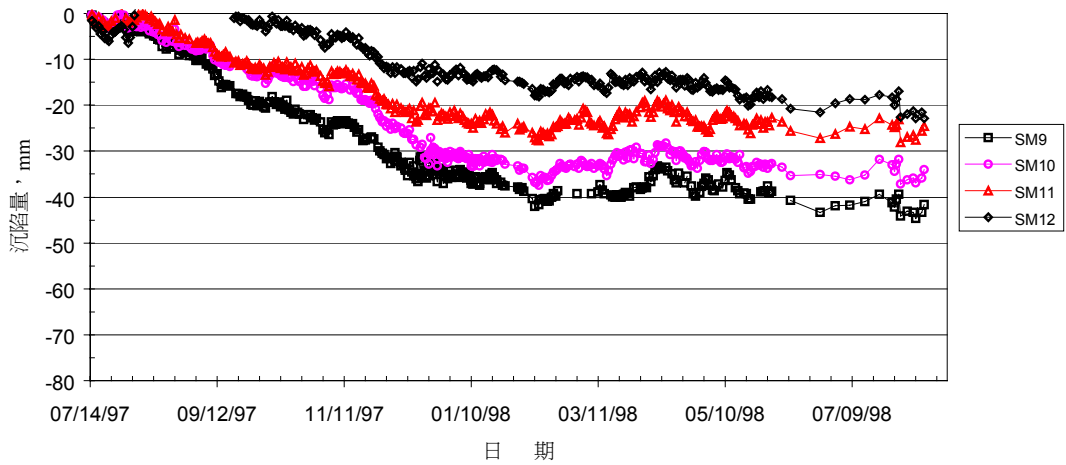
圖九 斷面E地面沉陷(北隧道)



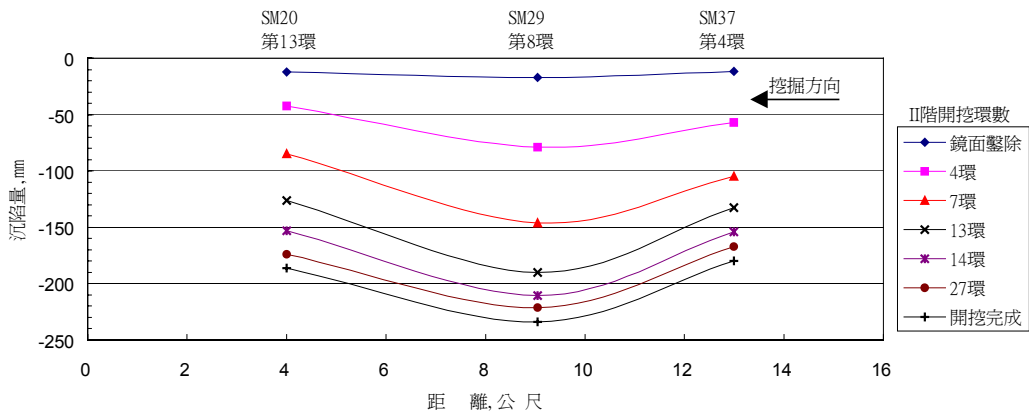
圖十 斷面E地面沉陷(南隧道)



圖十一 斷面E地表沉陷槽



圖十二 斷面C地面沉陷(南隧道)



圖十三 北隧道縱向上方地面沉陷點變化趨勢圖

南側隧道(上行線)於開挖期間，由開挖面檢視地層地盤改良發覺較北側隧道為佳，目視平均改良率(面積比)約在35%以上，部份地層之改良率甚至可達50%以上，基隆路車行地下道下方區域改良率更可達70%，故南側隧道開挖對地面沉陷的影響不大，北側隧道(下行線)上方地面即沉陷點有明顯沉陷，開挖露頭顯示地盤改良成效約在10%~25%，局部開挖區域經目視發現局部區域甚至有未改良情形如照片十二~十三所示(第四環至第十三環之間)，經研判其主要原因為該區域上受地下管涵限制，無法有效改良，此外承包商採傳統之灌漿機具無法施作2m直徑之改良樁，由此可得驗證，另外斜灌的效果亦不理想，再加以施作期間於沉陷點SM29下方之R.C.P管接頭破裂，而致使北側隧道西側上方大量含水，降低了土壤強度。此應為地面沉陷點SM29之沉陷變化，較他處為大之原因之一。

### 6.3 隧道收斂、頂拱沉陷觀測結果

本工程隧道收斂及頂拱沉陷之觀測作業，常因施工空間受限，隧道開挖施作機具的活動空間不足、開挖土方的臨時堆置等因素干擾，隧道內的監測儀器常常無法於第一時間安裝，裝設後常遭施工機具損毀，雖一再補設，可供參考之資料仍屬有限，有關頂拱沉陷點於施工期間變化情形詳如圖十四~圖十五所示，而隧道收斂變化觀測結果詳如圖十六~圖十七所示。

由頂拱沉陷點資料顯示，南側隧道(上行線)於開挖過程中隧道頂拱沉陷約在4~8mm左右，且隧道開挖完成後似乎皆有上浮之現象。而北側隧道(下行線)除BRT6外，其餘沉陷量亦在4~6mm左右，

BRT6因位處北側隧道開挖過程之最軟弱區域，故其沉陷量曾達46mm。



照片十二 北隧道開挖面地改成效(淺色部份為改良體，深色為原狀土)

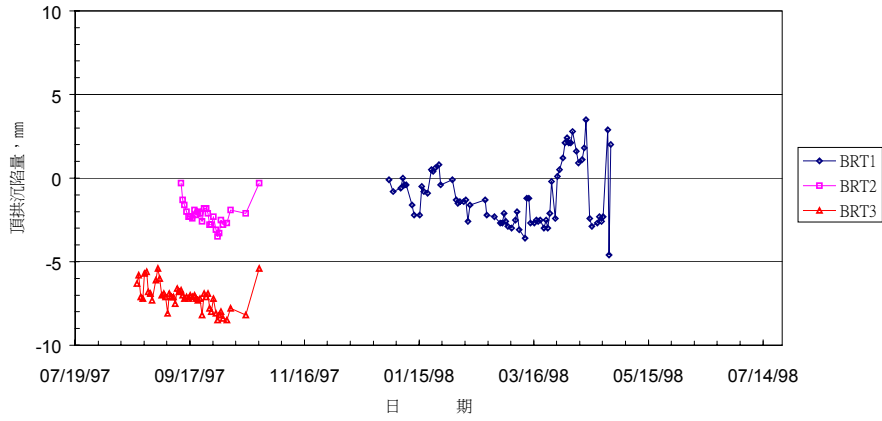


照片十三 北隧道開挖面地改成效(淺色部份為改良體，深色為原狀土)

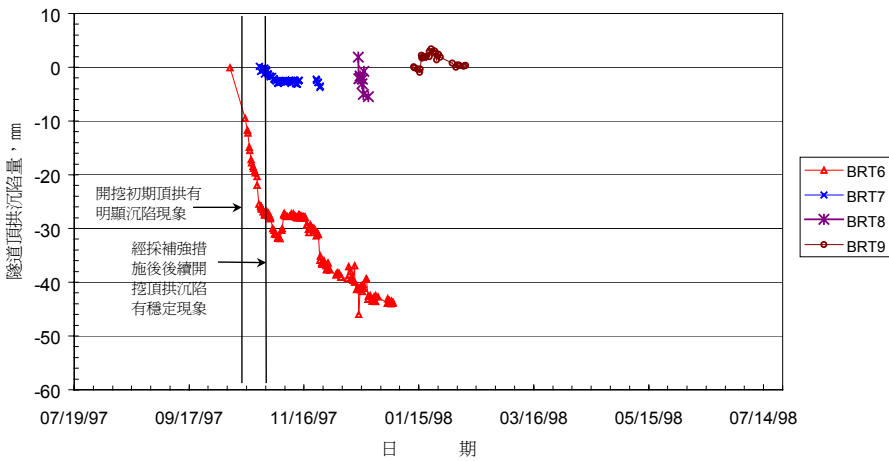
## 七、結論與建議

綜合本工程各項施工過程現場觀察與大地工程監測系統觀測與分析結果，作成以下結論與建議：

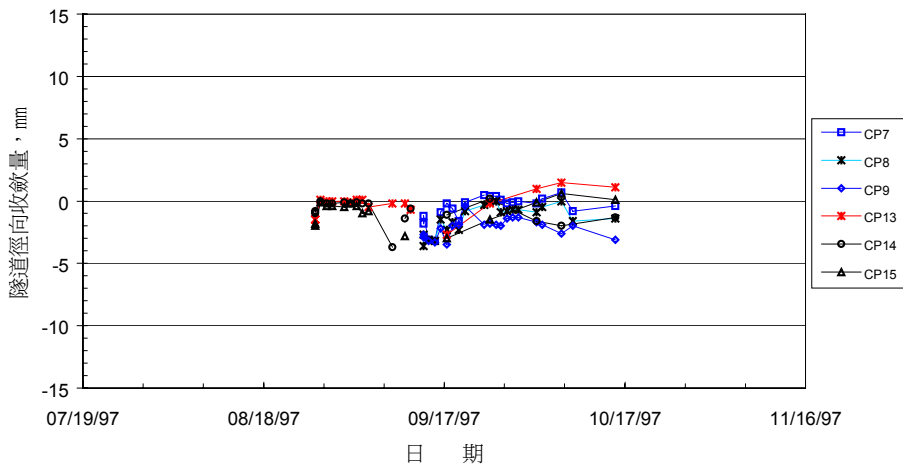
(1) 基隆路車行地下道下方區域及其與BL13站間南側上行隧道地盤改良作業由於較無地下管涵障礙，故改良成效較佳，由開挖面目測地層地盤改良成效大都可達50%以上，隧道開挖期間測得地面沉陷量均小於30mm，隧道收斂與預拱沉陷量均小於10mm，故本工程採新奧工法尚



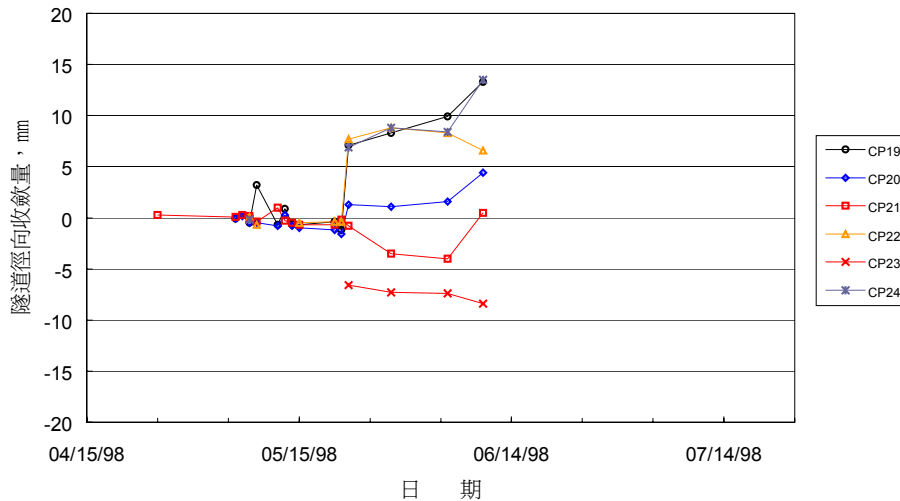
圖十四 南隧道開挖與隧道頂拱沉陷變化關係圖



圖十五 北隧道開挖施工與隧道頂拱沉陷變化關係圖



圖十六 南隧道內收斂觀測斷面變化圖



圖十七 北隧道內收斂觀測斷面變化圖

都市軟弱地層中進行隧道開挖，輔以地盤改良方式強地層強度設計，應為成功且可行之施工案例。

(2) 北側下行隧道於地盤改良作業期間由於有電力人、穿孔箱涵障礙，部份地層無法有效改良，故於隧道鏡面裂隙與開挖初期隧道上方地頭曾一度有顯著沉陷變化情形，開挖面亦有滲水情形發生，目測地層地盤改良率甚低(10%以下)，後經廠商採用補強措施後，隧道得以順利完成貫通，本區地面沉陷量最大約為240mm。

(3) 於設計採以地盤改良輔助之新奧隧道工法時，地下管涵種類與分佈應詳細調查，並需評估該地下設施對地盤改良作業之影響程度，如遇有重大地下管涵無法執行地盤改良作業時，應重新評估採其他替代工法或其他輔助工法(如本工程所採補強措施)，方能安全前題下克竟全功。

(4) 本工程地盤改良作業為因應電力人、穿孔箱涵障礙而改採2.0m改良樁施作，由實際隧道開挖面目測部份地改區改良成效均低於10%，顯示前述JSG成形樁

管採用傳統灌漿機具無法達致所預期之2.0m樁管。

(5) 本工程所採用之監測儀雖僅有地面沉陷點與隧道收斂觀測點兩類，但由地面監測儀器反映出隧道開挖所呈現之影響，可充分反應地層變形趨勢，有效發揮監測儀器應有之預警功能。

## 八、誌謝

本文為亞新工程顧問公司從事台北捷運工程局大地工程專業顧問工作成果之一，撰述期間承蒙亞新顧問公司莫總經理苦楨不吝指正及黃俊青、林國楨兩位先生協助資料搜集及彙整，併致最大敬意。

## 參考文獻

- 台北市政府捷運工程局，南港線CN256B標某階路車行地下道以東至三三七標間隧道工程，工程圖說。
- 亞新工程顧問公司(1992)，台北都會區大眾捷運系統大地工程設計審查報告，施工標CN256B標。
- 呂孫、江光建、劉希岳(1998)，NATM工法在都市捷

運工程之應用，台北捷運南港線車段施工研討會論文集。

中興工程顧問公司(1996)，基隆路車行地下道以東至CN257標間隧道變更設計及施工標CN256B設計報告。

亞新工程顧問公司(1998)，台北都會區捷運系統南港線CN256B標基隆路車行地下道以東至三九標間隧道工程地工程專業顧問最終報告。

DEPARTMENT OF RAPID TRANSIT SYSTEMS,  
TAIPEI MUNICIPAL GOVERNMENT,  
REPUBLIC OF CHINA (1990), Taipei  
Metropolitan Area Rapid Transit Systems  
Nankang Line Project DL173, Contract  
CN258 Final Review Submission Vol.3-4  
~4-4 Design Calculations, Taipei.

WOO, S.M. AND MOH, Z.C. (1990),  
"Geotechnical Characteristics of Soils in  
the Taipei Basin", Proc. 10<sup>th</sup> Southeast  
Asian Geotechnical Conference, Taipei,  
Taiwan.

BOWLES, J. E. (1988), "Foundation Analysis  
and Design", 4<sup>th</sup> Edition, Mc Graw-Hill.