

機場捷運台北站及聯開共構大樓地下工程施工

周家瓊 李守原 何樹根

富國技術工程股份有限公司

黃一昌 林建宏

互助營造工程股份有限公司

陳鴻濤 林聿羣

台北市政府捷運工程局

摘 要

臺北市的都市發展遇到最大的瓶頸是建築用地不但取得困難且非常昂貴，大型的建築工程已非常少見，位於臺北車站特定專用區C1及D1用地的雙塔結構，為桃園國際機場聯外捷運系統臺北車站之聯開共構大樓，是近年少見的大面積開發，預計興建56層及76層之大樓各一棟，地下室跨越重慶北路東西兩側的街廓，開挖面積達25,775m²，深度27.1m。本案因為開挖面積大因而大量採用分區橫置連續壁、地中壁及扶壁；地下結構則採用鋼骨混凝土，開挖採用順打內支撐工法，因而地下鋼構需在層層支撐及分區連續壁的阻隔中吊裝；又因用地交付之時程不同，C1及D1之開挖時程不相同，增加了施工的複雜性及困難度。本文介紹本計畫地工設計之構想及實際施工時遭遇的挑戰及克服方法，而地下室開挖過程中地表監測量得有隆起的特殊現象，因而本文一併介紹前述隆起之各項監測成果。

關鍵字：橫置連續壁、地中壁、扶壁、祛水、隆起。

Underground Construction of Taipei Twin Tower

C. C. Chou S. Y. Lee S. K. Ho

Sinogeotechnology, Inc.

E. C. Huang C. H. Lin

Futsu Construction Co.

H. T. Chen Y. C. Lin

DORTS, Taipei City Government

Abstract

In Taipei City, a large area underground structure construction is seldom seen recently. The Twin Tower project is the one. Two high rise buildings, one is 56 floors and the other is 76 floors, were planned. They were planned to use one basement which has 4 floors underground. This underground structure is also the starting station of Taoyuan airport rapid transit system and it has been constructed before the two towers. Because of the large excavation area, 25,775m², the excavation and construction met a different problems from ordinary underground structure. This paper introduced the design and construction ideas. The hydraulic pressure released via dewatering in the Chingmei Gravel Layer are also introduced. When large amount of soil were removed in this case, monitoring data indicated that heavings occurred. This data was also introduced in this paper.

Key Words : cross wall, butress wall, dewatering, heave.

一、前 言

臺灣桃園國際機場聯外捷運系統臺北車站(A1站)之共構大樓(本文略稱C1D1聯開大樓)，位於臺北車站特定專用區C1及D1用地(位置如圖一所示)，北臨市民大道(與鄭州路地

下街共構)，南側鄰台高鐵隧道，西至延平北路，東鄰台北車站地下停車場。C1及D1各規劃一棟超高層大樓，C1基地面積13,078m²預計興建樓高56層(高約243m)之大樓，D1基地面積18,515 m²預計興建樓高76層(高約322m)之大樓；C1D1聯開大樓地下室有四層並跨越重慶北路(寬30m)兩側之街廓相連通(如圖二

地下工程

所示)，地下開挖面積達 25,775m²，深度 27.1m，為近年在台北市區內少見之大面積的深開挖工程。由於開挖面積大又跨越交通繁忙的重慶北路，鄰近又有重要結構物，使開挖要處理的問題比一般基地來的複雜，因而設計單位處理地工問題亦異於傳統，本文介紹整個地工設計之構想及實際施工時的挑戰及克服方法，地下室施工過程的監測資料顯示在連續壁施工時引致了地表沉陷，但在開挖過程中地表卻有隆起的現象，C1及D1區在不同的時間施工連續壁及開挖均發生了類似的現象，此現象解釋為大範圍開挖解壓引致了地表的彈性回脹。



圖一 臺北車站特定專用區C1及D1位置

此開挖時景美礫石層內的地下水抽降量需要加大。

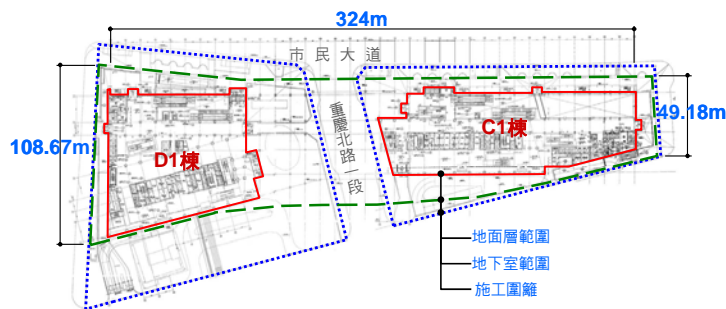
二、地層狀況

2.1 地層

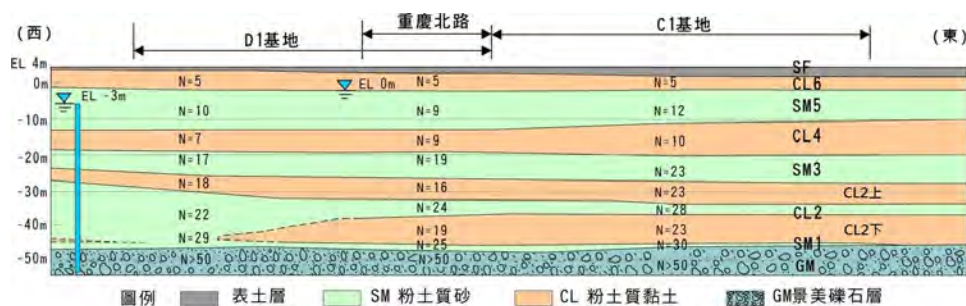
本基地地層主要為松山層的六個次層及景美礫石層，景美礫石層約位於地表下 49~52m(地層簡化剖面如圖三所示)。由地層剖面圖中可知C1區之松二層(CL2黏土層，厚約14m)中間夾有一砂層，將黏土層分為上下二層，下層底部約位於地表下47.2m，而下層在D1區由東向西逐漸變薄並尖滅，此地層變化對工程最主要的影響為在D1區之景美礫石層的地下水壓可直接傳導到松二層(CL2)的上半層，致使水壓上舉隆起之安全係數減小，因

2.2 地下水位

本基地地表高程約為EL+4.0m，在松山層內之淺層地下水位高程約為EL.+1.0m(約地表下3m)；而景美層水位因早期超抽地下水的關係，水壓呈洩降狀態，其後因自來水日益普及管制地下水抽取後水位逐步回升，根據水利署台北(S)測站近40年所測景美層地下位的變化狀況如圖四所示，1970年代景美層水位高程最低曾達到EL.-40m，之後水位每年約回升1~2m，其間有幾次的降低主要為捷運等工程施工時的抽降水所致。景美礫石層依據設計時的調查，水位採用EL.-3m，但在C1區開挖初期(2010年初)景美層水位已回升至EL.-2m。



圖二 C1D1聯開大樓預定平面



圖三 基地簡化地層剖面

地工技術

三、地工設計

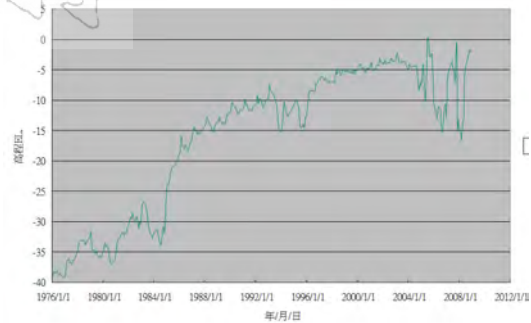
本基地屬於超大面積之開挖，不但橫跨二個街廓且有重要地下及地上結構緊臨，因而開挖及地下擋土結構的規劃成為地工最重要的工作，臺北市捷運工程局(2011)及蘇丁福等(2013)整理設計時之重要地工考量及其相對應的對策，以下摘要說明之。

3.1 分區開挖及支撐加勁

開挖規劃最主要的構想是利用橫置連續壁將大面積的開挖分割成較小的範圍，東西向切割成四區塊，長度約85m一區，由於D1基地之西側南北向寬度較大，因而再切成南北兩區。整個基地開挖分為五個區(如圖五所示)。由於C1及D1區用地交付之時間相差很久，開挖時程不同，經由前述之分區，工區可獨立開挖，不會互相牽制。

另外因為南北兩側均有重要地下結構物，為控制連續壁變位避免鄰損，除了前述分區連續壁外另外配置地中壁及扶壁，地中壁及扶壁主要為南北向，開挖面以上採用無筋混凝土，開挖面以下採用鋼筋混凝土，配置配合柱位兼作高樓的基礎，深度也均進入景美礫石層3~4m。經由地中壁的再分割，在整個基地已被分為非常多個小區域，因而實際開挖前擋土壁已受到相當強的側向支持，可有效控制側向變位。

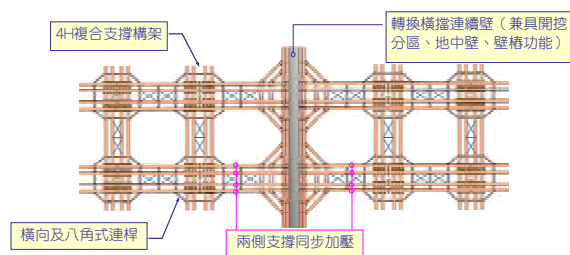
開挖設計採用順打工法採九挖八撐，連續壁厚度1.3m，深度約為53m均進入景美礫石層3~4m，由於地下結構為SRC(鋼骨混凝土)，鋼柱及鋼梁需在支撐間吊裝，為使吊裝空間加大，支撐之間距配合邊柱採用9m，第二層以下採四支H型鋼，以水平展開方式配置，再利用聯結構件組合成複合型鋼支撐構架，在中間柱水平支撐交會處設置橫向、斜向等繫桿形成穩定八角式構架，如圖六所示。另外因為基地經分隔連續壁分區後，每一區均仍約呈梯形，東西向部份支撐無法完全對撐，此局部區域以斜撐取代。



圖四 景美礫石層水位變化



圖五 基地連續壁、地中壁扶壁之配置



圖六 支撐系統示意圖

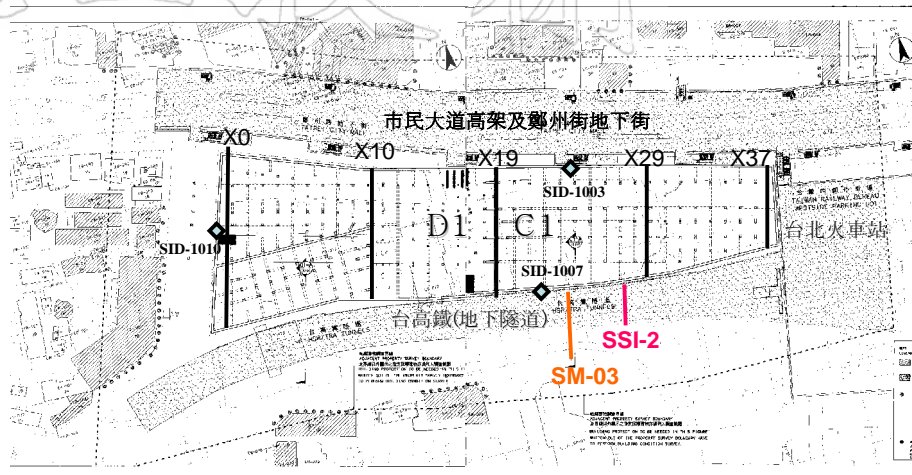
3.2 基礎型式

C1D1聯開大樓基礎工程經設計單位評估，基地內已配置之分隔連續壁、地中壁及扶壁皆作為基礎使用。開挖時之臨時中間樁，因為支撐間距達9m，且與構台柱共用，構台因應鋼構吊裝之需求要能承受400T吊車及其吊重，所以採用A572材質之H458型鋼，其下則以基樁承載其荷重，基樁工法考量密集的地中連續壁已使地層產生擾動，為避免使用反循環工法坍孔或再次擾動地層，採用D=1.5m之全套管，並貫入卵礫石層3m，中間樁之鋼柱因全套管樁施工採用後插法。原本為臨時性的分區連續壁、地中壁及全套管樁均作為永久性之樁基礎。

3.3 抽降水

由於開挖深達27.1m，因而不論松山層及

地工技術

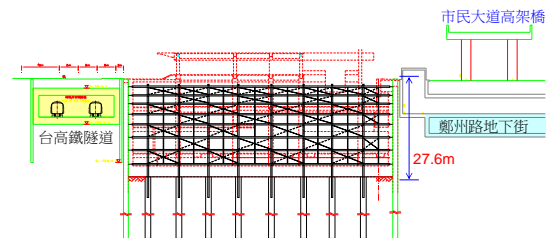


圖七 周邊環境及部份監測儀器位置

景美層之水壓均使開挖時水壓上舉的安全係數不足，經評估抽降水引致之地表沉陷量仍可接受，周邊之排水系統亦可承受全部的抽水量，檢討各種可行之方法後，決定採用抽降水工法。設計時進行抽水試驗據以作原則性的配置，在連續壁、地中壁施工時預埋足夠數量之鋼管，抽水井在連續壁內的鋼套管中施作，兼顧安全及進度；在施工階段並規劃數次之抽水試驗，允許承商依實際抽水試驗成果檢核最佳的抽水井數量及配置，在計價時抽水井以實作計算，但電費則由捷運局提供。

3.4 建物保護

基地周圍之現有之結構物，東側有台鐵地下停車場；西側隔延平北路為舊有鐵路局辦公室等老舊歷史建物；南側則為台鐵、高鐵共構之地下隧道及鐵路警察局；北側則為市民大道高架橋、鄭州路地下街(如圖七，圖上標示部份代表性監測儀器位置)，南北向之基地地下開挖與鄰近結構的相關性如圖八所示。有鑑於本基地開挖範圍廣大、鄰近建築物結構差異性相當大，而且台鐵、高鐵隧道之容許變位要求非常嚴謹，因而開挖區內利用大量的地中壁、扶壁減少擋土壁之變位(兼作承載壁樁用)，重慶北路下方因交通需求，無法施作地中壁，另以超高壓地盤改良樁取代。開挖區外鄰台高鐵側採可重複施灌之雙環塞低壓灌漿，固結基礎下方土層，兼具預防及抑制變形之雙重功能。



圖八 南北向剖面

四、地下工程施工

本案因為時程上的要求，連續壁先行發包施工，地下工程則另外為一標，又因用地交付之時程不同，C1及D1不論連續壁施工及開挖時程均不相同，增加了施工的界面；另外為開挖之安全而大量採用之分區橫置連續壁、地中壁及扶壁，除了因為密集配置而使施作難度增高外，引伸出如何拆除及何時拆除的問題；同時為傳遞超高大樓之荷重，地下結構則採用SRC，因開挖採用順打內支撐工法，地下鋼構需在層層支撐及分區連續壁的阻隔中吊裝，施工上也是一個挑戰。由於南側有台高鐵之地下隧道緊臨，其對於變位之要求相當嚴格，施工過程中如何減少對其影響也是一個重要課題。前述各項問題不但挑戰了設計團隊，也挑戰了施工團隊，在同心協力的工作下，各項困難一一克服，以下參考臺北市捷運工程局(2011)及互助營造之施工計畫說明施工時遭遇的主要問題及克服方法。

4.1 舊樁拔除

連續壁施作導溝時，挖掘到 $\phi 80\text{cm}$ 基樁共計 7 支，先以鑽心取樣確認基樁長度為 12m，經評估可以拔樁之方式加以排除，拔樁前先利用高壓噴射水柱擾動基樁四周之土壤，再使用 H 型鋼於樁周上下振動分離樁周與土壤以吊車拔除。基樁拔除後因地層已擾動，為避免連續壁施工產生問題，在影響範圍內之導溝旁施作 $\phi 40\text{cm}$ CCP 樁以防止坍塌。

4.2 連續壁施工

本工程因時程緊湊，採連續壁先行發包施工，又因 D1 用地取得時程較晚，必需分區施工，共規劃四區施工，分別為 C1 區、D1 北區、重慶北路段及 D1 南區等，因而當 D1 區施作連續壁時 C1 區已經開挖。

連續壁、地中壁及扶壁深度均為 52m~53m、厚 1.3m，總共分割為 649 個單元，平面長度總共 3,241m，施工機具採用 MHL(油壓式長臂掘削機)，抓斗寬度有 2.7m 及 3.2m 兩種。這些連續壁密布於基地內，在軟土工區內，土體若經多次密集開挖切割，近鄰重複施工擾動，對於連續壁槽溝開挖穩定極為不利，可能會經常發生坍塌意外。為克服前述問題連續壁施工初期即規劃施工動線、避免機具載重過度集中而造成地層失穩，並妥善安排施工工序、開口部分儘速回填、減少暴露時間，並嚴格控制穩定液品質與槽溝內外水位差(特別是遇滲漏地層時)，雖然遭遇不少困難，最終均加以克服。惟後續若有相類似設計，在多重切割部位建議應施作地盤改良補強或解壓祛水輔助，增加地盤之穩定性。

4.3 台高鐵隧道之地盤改良保護

由於 C1 區連續壁施工已導致台高鐵隧道最大有 30mm 之沉陷(差異沉陷量仍在允許範圍)，規劃地盤改良時分為較大變位區(A 區)及一般變位區(B 區)兩部份，A 區為沉陷監測值超過 50% 警戒值之位置，佈孔間距平均 3.0~5.0m；B 區平均 5.0~12.0m，改良深度均至地表下 35m。GL-15m 以上採補充灌漿方式補償因連續壁施工擾動所產生之空隙(注入率 A 區 20%、B 區 10%)，而在 GL-15~-35m 範圍

預計主要變形區域，採固結改良方式灌注(注入率 A 區 20%、B 區 10~20%)。灌漿材料採用水泥皂土漿。灌漿範圍示意如圖九，因為連續壁鄰台高鐵隧道之淨寬僅約 1.1m~5.0m，除施作垂直孔外，尚需採斜孔貫穿原有台高鐵開挖時之擋土壁(SMW)型鋼之間隙，以確保隧道下方之灌漿效果。

由於二擋土壁過於接近，灌漿時為確認是否會對連續壁推擠造成過大變位，或造成台高鐵隧道之損壞，正式灌漿前先進行試灌，試灌共經五階段，在總灌注量不變之情狀下，測試各項參數，包括壓力增量、每次提升高度、同步灌漿孔數及間距、皂土配比等，各次試灌之參數如表一所示。

第一次試灌二孔同時施作由深度 GL-35m 往上灌至約 GL.-17m~-19m 時，連續壁最大變位已達 7mm 以上，故暫時停止灌漿，採單孔施作並減少灌漿壓力、減少每次提升高度及單次灌注量作第二次試灌，連續壁變位無明顯變化。第三、四、五次之試灌為測試多組機具同時施工及皂土配比之影響。試灌之結論是減少單次灌注量、增加水平間距、降低皂土配比均可減小對連續壁之擠壓，但均會增長施工時間。

表一 試灌漿參數

灌漿次	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
皂土配比 (kg/m^3)	50	50	40	30	30
灌漿流量 (L/min)	10~12	10	10	10	10
提升@100cm 灌漿深度	35~17±	-	-	-	-
提升@66cm 灌漿深度	-	35~20±	35~20±	35~20±	-
提升@33cm 灌漿深度	-	20±~5	20±~5	20±~5	17±~5
壓力增量 (kg/cm^2)	< 3	< 2	< 2	< 2	< 2
同步灌漿 孔數(孔)	2	1	4	4	2
同步灌漿 間距(m)	10	-	15~20	>30	-
跳階灌漿 (隔日灌)	-	-	-	-	分兩階

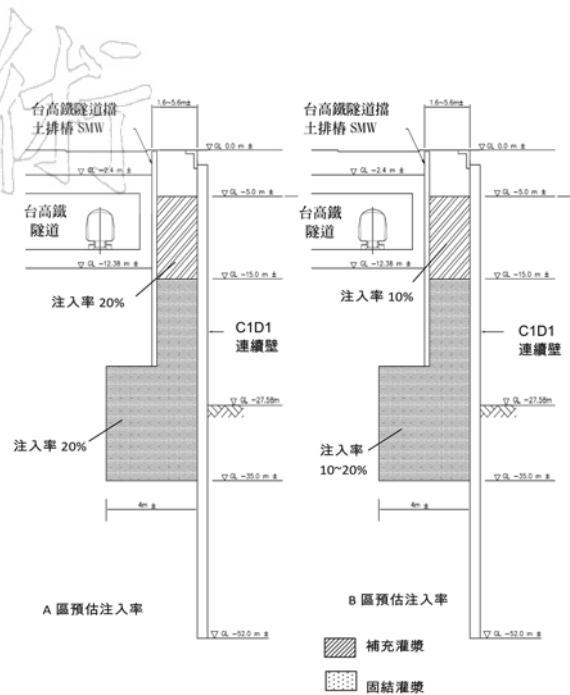
4.4 鐵道遺構發掘

當 C1 基地第一階開挖時發現有大型石砌構造物，經通報文化局邀請學者專家會勘，發現有二處鐵道遺構。經由張崑振(2010)的調

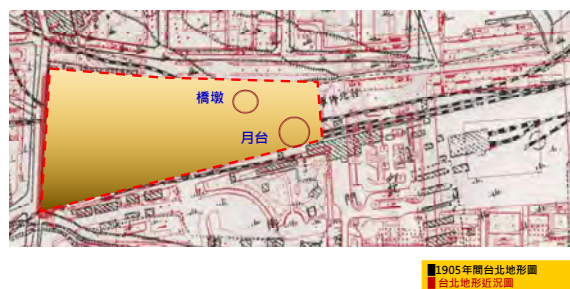
查，研判為清朝劉銘傳時期鐵道橋墩及日據時代台北車站月台。其中橋墩共有二座，套繪日治初期之地圖(圖十，黑色為1905年，紅色為現況)，橋墩所在位於鐵道上，該位置並有河流通過，橋墩西南側(河流上游)並挖掘出大量引流之木樁及減低水流能量的海漫石構造，由張崑振之研究這些都是清代橋墩保護常用的形式，因而研判為清朝劉銘傳所建鐵道之橋墩，經考據當時的鐵路橋梁為廣東籍的美國華僑張家德所設計施工。二橋墩長寬約為4.6m、1.9m，橋墩基礎不對稱的往外擴展，每側約30~90cm不等，基礎砌石下方鋪設有40cm之混凝土，下方為黏土層。月台遺構位於日治時期第二代台北驛西北側，為條狀排列的砌石，砌石基礎為厚度不一的混凝土，緊臨月台砌石的是由鋼軌襯混凝土預鑄版之排水溝，旁邊則為厚約40cm之道碴，道碴下有20cm之黑砂。這二處遺構均已挖掘、編號、保存，等待日後以新面貌重見世人。

4.5 雙順打及斜撐回撐

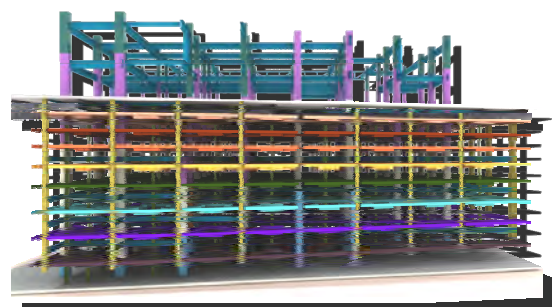
本工程雖採順打工法，但地下結構為SRC，因而在支撐未拆除前鋼構必需穿過各層支撐吊裝，同時分區連續壁在吊裝時尚未拆除，因而分區連續壁上必需先開孔使鋼梁可以橫跨連續壁吊裝，工地人員戲稱好像在組立瓶中船一般費工。為使鋼構順利吊裝，吊裝前先以3D模擬各桿件與支撐、中間柱之關係(如圖十一及圖十二)，也因為地下結構為SRC，提供了採用雙順打的條件。因為軌道標為主要徑，為配合其鋪軌時程要求，經檢討決定C1區採用雙順打工法構築結構體以縮短工期。地下室構築時在B4F版完成後先吊裝B1F的鋼梁並鋪設平版型鋼承版施作B1樓版，之後將第三、二階支撐拆除，吊裝B3F鋼梁並施作B3樓版，如此便有二個工作面，可同時施作B2及1F樓版，但要施作B2F及1F版前需先拆除第六及第一階支撐，因拆除後垂直向支撐間距太大，因而設計有回撐，回撐原設計為水平支撐，因地下空間已非常狹小，要再吊裝施作水平支撐有實際上的困難，因而回撐採用斜撐設置在周邊地帶(互助營造，2009)，斜撐及雙順打示意如圖十三。



圖九 台高鐵灌漿保護示意圖



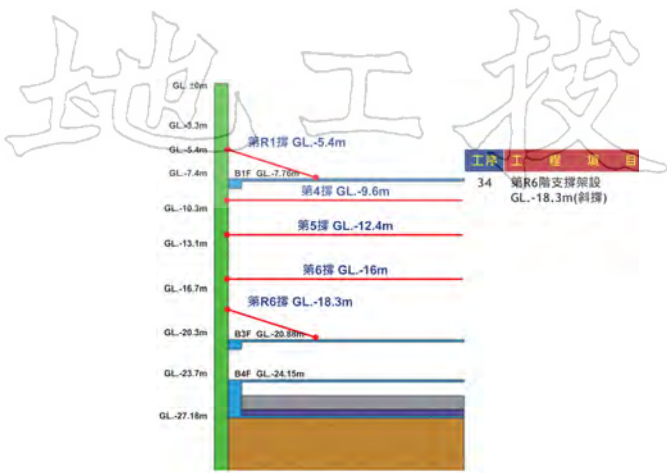
圖十 台北車站1905年與現況套繪圖



圖十一 地下室鋼構吊裝之3D模擬



圖十二 地下鋼構吊裝照片



圖十三 雙順打及斜撐回撐示意圖

4.6 C1D1開挖界面處理

由於受國道客運轉運站拆遷，D1區用地交付較慢之影響，C1區開挖至預定開挖面後，D1區方才進行開挖，需考慮後挖的D1區在開挖後支撐未架設完成前，C1區支撐已存在之軸力作用在連續壁之影響，經分析既有之連續壁可以承受此外力。另外當C1區拆撐時，D1區仍布滿了支撐，任一支撐拆除將造成D1區有二道以上支撐之集中力作用於分區橫置連續壁上，經分析C1區如無設置適當之回撐，分區橫置連續壁將無法承受D1區支撐之作用力。由於C1區已採雙順打，回撐同4.5節一樣只要在B3及B1版各施作一臨時斜撐即可，其中在B3版的斜撐因軸力較大版下方需配合施作臨時支柱以承受斜撐之垂直分力，而B1版之臨時斜撐受力較小，其垂直分力經檢討可由B1F樓版及梁承受。

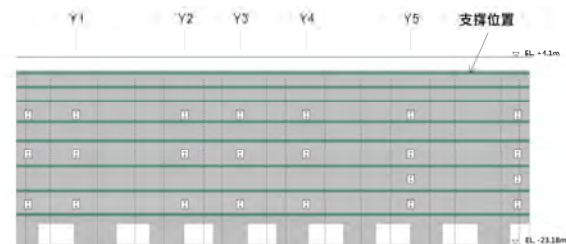
4.7 分區橫置連續壁之拆除

4.7.1 拆除工序

基於設計上安全之需求，基地開挖區內配置有分區連續壁、地中壁及扶壁，其中地中壁及扶壁開挖面以上為無筋混凝土，隨開挖而逐階挖除，但分區連續壁(共有四道)將地下開挖及支撐完全區隔分開，因而在開挖完成後構築地下室時成為地下結構施工之障礙物，因尚有支撐存在不能拆除，必須在適當的時機點以適當的工法將之拆除。

由於橫置連續壁為南北向，基礎版在南北向沒有被阻隔，但東西向便無法連貫，因而開挖至基礎底時在橫置連續壁上局部開孔，使基

礎版在東西向得以連貫而可以傳遞力量，未開孔部份則用以支撐上方之連續壁重量。筏基礎施工完後先吊裝鋼構，但東西向之鋼梁被橫置連續壁阻隔，因而需在橫置連續壁開孔(為避免空中作業，在開挖時即已預先開好孔，開孔位置如圖十四)使鋼梁可以吊裝。鋼構吊裝完成接下來施作樓版，東西向之樓版亦為橫置連續壁所分隔，本部份樓版先不施作，但採臨時性植筋與橫置連續壁結合，使整個樓版可以傳遞力量，也確保橫置連續壁有側撐可以保持穩定。依上述工序施作地下結構完成後，橫置連續壁除局部有開孔外完整穩固的站立於結構體之間，此時再將橫置連續壁由上往下完全拆除，拆除後原先被橫置連續壁阻隔之基礎版、樓版及側牆再一一接續補滿。



圖十四 橫置連續壁之開孔位置

4.7.2 拆除方法

分區連續壁的存在，導致整體工程增加許多界面，結構的施作亦必須分區，首先是在開挖階段，必須配合各階土層開挖，在分區連續壁上依梁位進行開孔(圖十四)，以利後續位於分隔壁兩側的鋼構進行鋼梁的接合，此時由於支撐均頂在分區連續壁上，若採用傳統之機具直接敲除，則將造成整體支撐系統發生破壞，而有極大之風險，因此有必要採用低震動之工法進行開孔。當地下結構體完成，分區連續壁進行拆除時，若採用傳統之機具直接敲除，將造成噪音、粉塵及震動等問題，震動之傳遞更可能影響與基地相鄰之台高鐵路內監測儀器之判讀，因此以低震動進行分區連續壁的拆除。低震動工法有水刀切割、水鑽排孔、無聲炸藥(膨脹劑)、盤鋸及鑽石鏈鋸等各種技術，經分析後認為因分區連續壁內有密度極高之鋼筋配置，水鑽排孔技術雖然可將鋼筋切割，但工率過低；盤鋸技術則因現有最大切割深度約為73cm，不符需求(連續壁厚度為1.3m)；

最後採用鑽石鏈鋸工法。鏈鋸在臺北捷運工程雖非第一次引進使用，但尚無如此大量體的切割案例，本工程之使用經驗說明如下：

1. 鑽石鏈鋸切割工法之切割原理，係利用鑽石鏈條裝設在預定路徑，藉由專業鏈鋸切割機的動力牽引及引導，達到切割鋼筋混凝土之目的。

2. 本工法之施工特性為低震動、低噪音(約73dB)且有相對的高工率(6m²/天)，且施工過程不產生粉塵。採用鑽石鏈條，可作複合材料之切割，包括高鋼筋量的混凝土基材，甚至可切割純鋼結構。

3. 由於鑽石鏈鋸切割工法之主要耗材「鑽石鏈條」單價甚高，為免花費過鉅，造成成本負擔，故於切割時應儘量規劃採用最經濟之切割路線，亦即在吊運能量得以負荷之前提下，將每切割塊放大，使工進加速。

4. 切割塊之吊運處理上應事先妥善安排，考慮樓版開孔大小、水平及垂直動線、吊車及運棄卡車之能量，規劃切割後的體積及重量，使用吊車吊出後直接裝載於卡車上外運處理。

4.8 跨重慶北路之施工

由於重慶北路橫跨C1D1聯開大樓之地下室，又不與建築之南北向軸線平行，因其為交通要道，無法封閉，在道路下方若配置地中壁及扶壁則無法施工，因而邊路下方區域之地中壁及扶壁採高壓噴射樁取代，減少對道路改道需求之衝擊。

交通維持方案原先採保留原道路線形分區開挖，因路形與支撐夾有角度，分區開挖時中間樁並沒有沿線形方向布設，因而覆工版無法整區鋪設，交維改道困難度相當大；另由於地下採SRC，因道路與柱線不平行，若依道路線形分區施工，鋼構無法整區吊裝，會嚴重影響地下室施工，同時地下室頂版可施作之範圍將呈鋸齒狀，而無法進行整區之頂版澆注。最後解決之方案，採用將重慶北路改道成與東西向建築軸線垂直方向，雖然道路在進入忠孝東路前需要轉回原線形增加些微的不便，但並不影響整個交通，並使整個重慶北路段可以順利進行。

五、景美礫石層之抽水管控

5.1 短期群井抽水驗證試驗

黃南輝(2002)以亞新公司在捷運之施工案例(板橋線之CP261、CP262標以及淡水線之CT201F標，降水期間皆達數月)，依據降水期間洩降資料分析所得之水理參數如表二A1~A4，前項參數為台北盆景美層抽水之重要參考資料。本工程設計時進行抽水試驗所得之水理參數如表二參數B，計算所需抽水量，介於參數A2及A3之間，若以每口井抽水量6CMM(m²/min)計算，C1區需18口井。

連續壁施工完成後及C1區抽水井完成14口後，為瞭解開挖期間所需開啟之井數及抽水量，於2010年4月進行第一階段群井試驗，考量試驗時程及用電需求，規劃每4小時開啟一口抽水井，各井抽水量以閥門控制於6CMM，直到14口抽水井全部啟動後持續抽水(約12小時因故停止)，抽水試驗共歷時約2天20小時。此抽水試驗數據以Jacob修正不平衡方程式(Modified Non-equilibrium Equation)進行線性疊加分析，符合水理參數B，需有18口井抽水方能符合需求，故增設4口井。

5.2 長期群井驗證試驗

C1區長期群井試驗於2010年6~7月間進行，初期同時開啟18口抽水井，各井以閥門控制抽水量在6 CMM，抽水約十天洩降量便已達最大管控值，因而再逐步降低抽水井數，以觀察符合最大管控值之最少井數，群井抽水共歷時26天整，以s-log(t)曲線之後期直線段斜率所求得之水理參數如表二C1及C2，與水理參數A1所計算之理論洩降歷時亦有甚高的對比吻合度，因而依本階段之抽水試驗15口井應可符合抽降水之需求(互助營造，2010)。

5.3 開挖階段抽水管控

C1區規劃第七階開挖起開啟4口抽水井，至第九階開挖開啟井數15口，另留設3口備用井，為有效掌控景美層抽水營運作業，以維持水壓之穩定性，抽水期間管控措施如下：

1. 每日定期抄錄各抽水井水錶讀數，以評估長期抽水量之變化與洩降量關係外，並可

檢測該抽水井系統(抽水馬達、抽水管、排水管、水錶、閘門等)是否功能異常。

2. 以自動化監測系統記錄開挖區內景美層水壓變化趨勢，並針對各水壓計設定管控值(警戒值及行動值)，當水壓計數值超出設定之管控值，位於工務所辦公室之監控電腦警報響起，同時發送簡訊予相關人員，進行緊急處置措施。此外，各抽水井內亦投置電子式水壓計，倘抽水井故障，井內水位回升至特定管控值自動通報緊急處置。

3. 每3~4口井對應至一個配電盤體，各配電盤皆連接一部發電機，以ATS不斷電系統控制市電停止時於一分鐘內之發電機自動啟動程序，並啟動備用井，待水壓回降後再由人工逐步關閉備用井。

4. 日間由機電組輪班監控，夜間則輪派工程師專職留守，遇電力管控系統或水壓計之警報啟動時，立即通報並進入緊急處置程序，追蹤確認發電機自動啟動程序是否正常運作、備用井是否投入抽水、水壓變化趨勢及數值是否符合管控需求等。

5.4 長期抽水監測資料之回饋

C1區開挖期間，長期大水量抽水使景美層水位洩降影響範圍持續擴大，且基地內洩降量緩增，因而減少抽水井數量，最後C1區以9口井進行抽水，期間達5個月，洩降量約達12m，反算水理參數如表二(參數D)，依此數據用以預估D1區抽水井數量，由於D1區松二黏土層下層尖滅，其最大抽水洩降量需達19m(需低於EL.-22m)，估計第九階開挖需開啟18口井，加上備用井共施作22口抽水井(互助營造，2011)。D1區第九階開挖初期以18口井抽水(總抽水量約110CMM)，洩降達管控水位後即逐漸減抽，最後以15口井穩定抽水約4個月(總抽水量約98~100CMM)，洩降量約達20~21m，顯示表二中之水理參數均仍偏保守。由以上之經驗顯示，短時間、較低水量之抽水試驗，因受部分貫入井及松山層滲漏補注之影響，無法準確模擬長時間、大水量抽水及盆地邊界效應影響，所得之水理參數，若應用於長時間之抽水有偏保守之現象。

表二 各試驗推求之水理參數及估算之總抽水量

抽水試驗及實際抽水(抽水時間)	水理參數 編號：T / S (T : m ² /sec)	C1區估算 總抽水量 (抽水井數)	D1區估算 總抽水量 (抽水井數)
水頭洩降需求 (管控水頭)		11.5m (EL.-14.5m)	19m (EL.-22m)
亞新三處案例	A1 : 0.12 / 0.001 A2 : 0.12 / 0.004 A3 : 0.18 / 0.001 A4 : 0.18 / 0.004	81 CMM 92 CMM 117 CMM 132 CMM	135 CMM 153 CMM 198 CMM 222 CMM
D1單井、雙井 抽水試驗	B : 0.12 / 0.02	108 CMM (18口)	180 CMM (30口)
C1第一階段 14口群井試驗 (約3天)	B : 0.12 / 0.02	108 CMM (18口)	180 CMM (30口)
C1第二階段 18口群井試驗 (26天整)	C1 : 0.135 / 0.0003 C2 : 0.15 / 0.0001 A1 : 0.12 / 0.001	90 CMM (15口)	141 CMM (24口)
C1實際抽水 (定量5個月)	D1 : 0.1 / 0.0005 (反算參數)	實際抽水 63~66 CMM (9口)	108 CMM (18口)
D1實際抽水 (定量4個月)	-	-	實際抽水 98~100 CMM (15口)

註：1. 景美礫石層初始水頭DDC設計顧問設定為EL.-3m。
2. 抽水井數以單井6CMM估算。

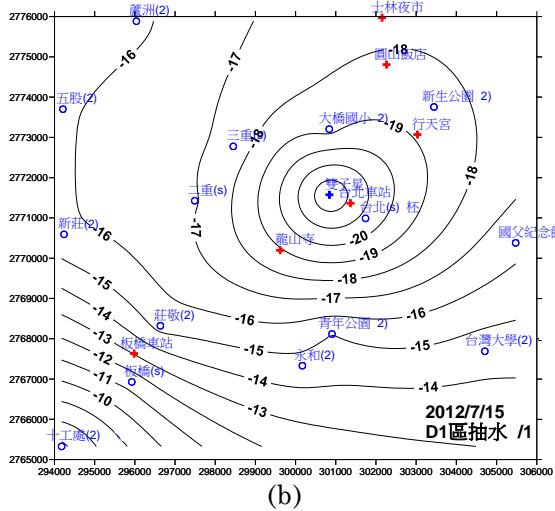
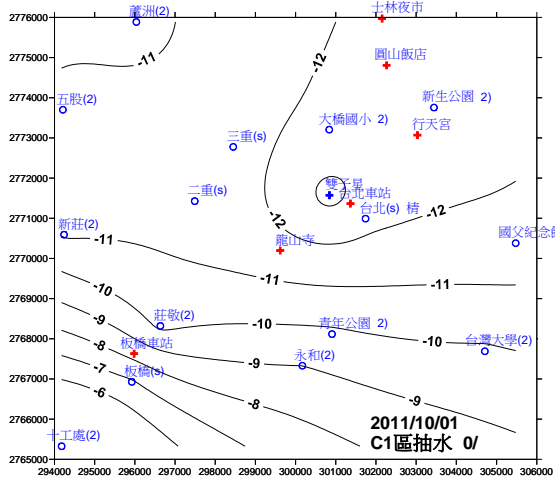
5.5 鄰近基地抽水互制

施工期間鄰近松山線CG590A標G14車站亦打設24口景美層深井，各井抽水量約6~8CMM，自2010年11月底起正式抽水，使C1基地之水壓下降約5~6 t/m²，施工單位據以減少C1區抽水井開啟數量，至2011年1月底C1基地與G14車站分別維持6及3口井抽水即可符合抽水管控需求。由於景美層之抽水影響範圍很大，自G14車站開始抽水，捷運局即協調兩標每周互通抽水管控資訊，包含抽水井運作數量及水壓洩降觀測數值，並於抽水營運調整前通報對方，使雙方能及早因應，避免發生非預期性之水壓大幅升降變化，共同維持景美礫石層水壓之穩定性。

5.6 景美層抽水之影響範圍

依據水利署於台北盆地內之景美層水位觀測井監測資料，比對C1區開挖前台北盆地內之景美層水位普遍已回升至EL.-1~-2m，盆地內高水位面頗為一致。於C1區抽水期間水位洩降範圍涵蓋台北盆地，影響半徑約達6~9公里(如圖十五)，由圖中景美層之水位洩降量上下游並不對稱，計算之洩降分布僅適用於西南方之上游側。於D1區抽水之洩降量比C1區

大，台北盆地內分布之水位洩降錐更為明顯，計算之洩降分布亦僅於上游側合理，研判可能為盆地邊緣補注之狀況不同所致。



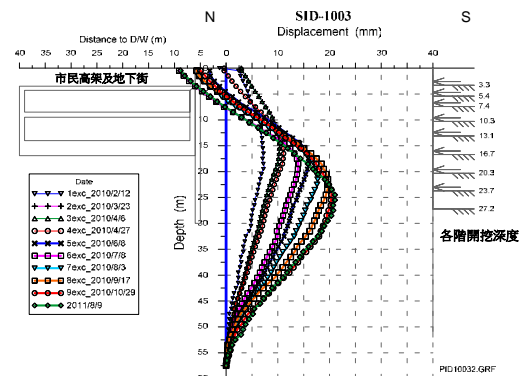
圖十五 C1及D1區開挖抽水期間台北盆地之景美層水位高程分布(EL.+m)

六、地下工程施工引致地層之變位

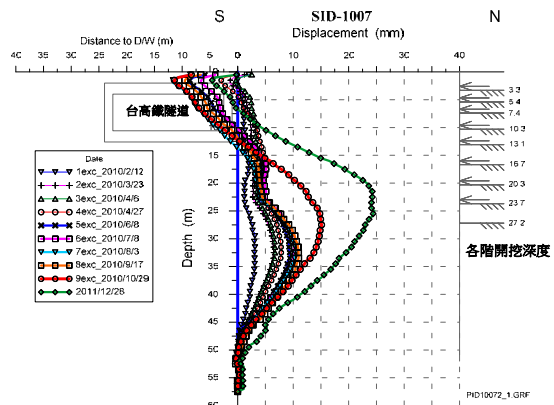
本工程開挖範圍相當大，附近有相當多重要的結構物，鄰近結構相關位置如圖七，由於佈設有人工及自動化監測儀器相當多，為方便監測成果的說明，僅將主要建築軸線及部份儀器位置標示於圖七。主要工序C1區先開始施工，C1區開挖時D1工區尚在施作連續壁，C1之底版完成後方開始D1工區之開挖，C1及D1開挖之時程標註於圖十六至圖十八，舉代表性監測結果說明如後。

6.1 連續壁之變位

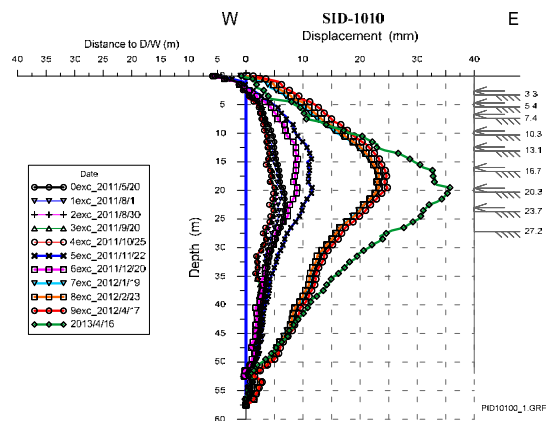
開挖引致之連續壁變位以三個不同位置及不同狀況之壁內傾度管編號加以說明(位置如圖七)，其中SID1007(圖十七)正對地中壁，壁外則為台高鐵之地下隧道；SID1003(圖十六)則於扶壁之間，壁外為市民大道高架及地下街，SID1010(圖十八)位於延平北路側無地下結構物。開挖完成後及地下結構施工時之最大變位SID1007約為15及25mm；SID1003則約為20及22mm；SID1010則為25及35mm，其



圖十六 C1開挖時程及SID1003變位



圖十七 C1區開挖時程及SID1007變位



圖十八 D1開挖時程及SID1010變位

地工技術

中有5mm發生在連續壁施工期間(2011/5開挖之前)。圖中連續壁頂有外推現象，由於本案採用之壁內傾度管皆採預埋鐵管方式，再鑽入壁底下卵礫石層5公尺，其底部應為不動點。研判隨開挖深度加深，當深層開挖時之變形使連續壁產生往外傾斜，同時因上半部為局限土體其土壓力較小，致頂部呈逐漸外推現象，此時淺層支撐有軸力下降至0之情形，支撐之橫擋亦與連續壁有開縫分離之現象，因而前述之連續壁外推研判為實際發生之狀況。

6.2 地表沉陷(隆起)變化

圖十九為C1區連續壁施工完成(2009/7/14)之地表沉陷分布，由圖中可發現連續壁施工後地表發生沉陷最大達20mm。圖二十為C1區開挖完成後地表變位(2011/06/08)，圖中紅色表示沉陷，綠色表示隆起，在靠近C1開挖區均有大小不一的隆起現象，最大隆起量達15mm，最大隆起發生在開挖周邊；C1區開挖時D1區正進行連續壁之挖掘，因而在D1區周圍則有沉陷之現象，最大沉陷量達25mm，隨後D1區開始開挖周圍亦有地表隆起之現象，開挖完成(2012/12/21)之沉陷分布如圖二十一，圖中D1區大部份連續壁挖掘引致之沉陷均已因隆起而抵消。地表沉陷取C1區SM-03剖面(位置見圖七)作為代表，本剖面位於台高鐵隧道上方，在C1區開挖時不同時間之沉陷剖面如圖二十二，在第一階開挖之前有連續壁施工及淺開挖與地盤改良，因而第一挖完成後呈沉陷狀態，但第二階開挖以後則隨時間有隆起之現象。

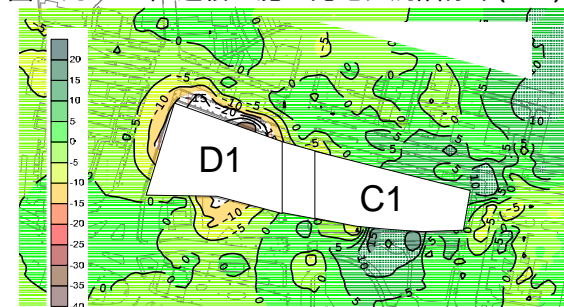
上述資料雖顯示開挖有引致隆起現象，但監測期間中間柱卻沒有測得顯著的隆起，檢討原因中間柱之隆起量乃以連續壁為基準點，因而可能連續壁亦已產生隆起，經引測連續壁基準點之高程變化，在C1開挖完成時測得連續壁隆起在軸線X22有29mm、X30為32mm及X35為26mm。由於連續壁均進入景美層，且壁頂之隆起受開挖側向變位之影響不大，因而其隆起量評估為最接近最大隆起量之數值。

6.3 高鐵隧道之沉陷與隆起

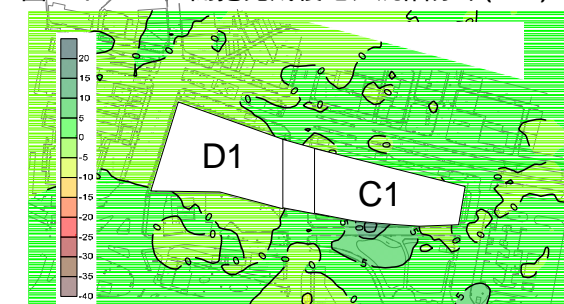
台高鐵隧道位於基地之南側為台鐵與高



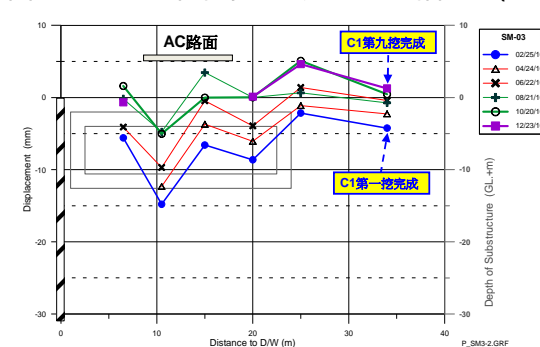
圖十九 C1區連續壁施工完地表沉陷分布(mm)



圖二十 C1區開挖完成後地表沉陷分布(mm)



圖二十一 D1區開挖完成後地表沉陷分布(mm)



圖二十二 台高鐵隧道頂地表沉陷剖面

鐵共構之隧道，台鐵在高鐵之北側較為靠近基地，台高鐵隧道內裝有相當多儀器，其中沿著台鐵及高鐵軌道版上縱向均布設有沉陷點，高鐵軌道佈設較長(約450m每15m一點)，因而以其作為代表說明其隧道底版變位情形，圖二十三為C1區開挖過程中隧道之底版沉陷狀況(由於開挖前方開始施測，因而並沒有計入連續壁施工引致之變位)，圖二十三之沉陷分布(點位之相對位置可由圖上之軸線比對圖七之

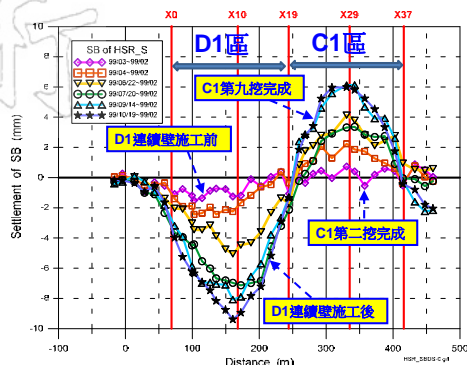
建築軸線)大致以軸線X19(C1D1之分界)為界,在C1區隧道底版隨著開挖有隆起現象,此時D1區正施作連續壁因而有沉陷發生。但當D1區開挖時則在開挖範圍附近的沉陷點由沉陷轉而隆起,圖二十四為D1區開挖前後之底版沉陷變化,最大的隆起量約有9mm,C1區部份點位也受到影響。另台高鐵隧道頂裝設有由地面鑽孔至隧道頂之沉陷點,可代表隧道橫向之沉陷,取其中SSI-2為代表(位置見圖七),隧道頂橫向之變位如圖二十五,由圖中可知開挖過程中台高鐵隧道靠近開挖面之隆起量較大,整個隧道有外傾現象,此現象與地表沉陷相似。

高鐵隧道底版之量測(有高鐵公司及施工單位之測量隊定時量測及會測),且量測具一致性可靠度極高,由其監測成果在C1區開挖時隆起最大位置在軸線X29附近約為C1區之中央,D1區最大沉陷則位於軸線X8附近(距X9軸線9m)。當D1區開挖時隆起最大位置約在X9附近,隆起往東影響約至X31,距開挖範圍(X19)約110m,往西影響距離與開挖範圍(X0)約90m,若以開挖27m計算影響之距離為3.3至4倍的開挖深度。

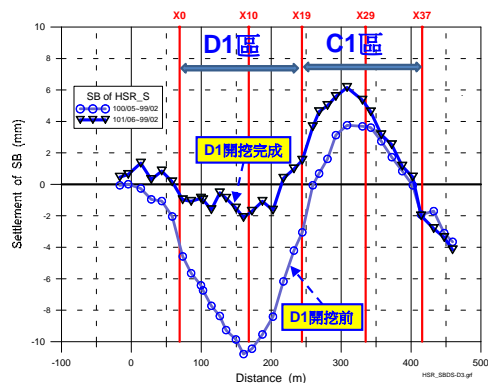
七、結論與建議

大區域之地下工程,不論開挖及地下結構之構築均可能遭遇與一般地下工程不同的挑戰,實有賴設計及施工團隊放棄成見,共同尋找最佳之解決方法。本工程雖然遭遇很多困難,但在各方努力下順利完成,業主、設計及施工團隊各自發展出有創意的方法解決問題,本文限於篇幅只能舉其主要部份說明。這些設計及施工經驗均為工程界寶貴的資料,臺北市捷運局已出版專書,對於未來相類似工程極具參考價值。

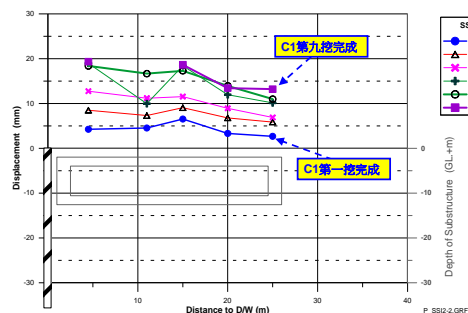
另外在本工程中由監測資料發現,大區域的開挖可能引致地表的隆起,這方面的資料在工程界尚不多見,建議未來在大面積的開挖均能注意此問題,要量得是否有隆起的問題,以本工程之經驗量測連續壁頂之垂直變位不失為簡易可行的方法。



圖二十三 C1開挖時高鐵隧道底版之沉陷



圖二十四 D1開挖前後高鐵隧道底版之沉陷變化



圖二十五 SSI-2隧道頂之橫向沉陷狀況

參考文獻

- 互助營造股份有限公司(2009),臺灣桃園國際機場聯外捷運系統CA450B標工程--開挖支撐及臨時覆蓋版施工計畫書。
- 互助營造股份有限公司(2010),臺灣桃園國際機場聯外捷運系統CA450B標工程--C1基地群井抽水試驗成果報告書。
- 互助營造股份有限公司(2011),臺灣桃園國際機場聯外捷運系統CA450B標工程--D1基地抽水施工計畫書。
- 黃南輝(2002),“深開挖降水工法之探討”,亞新工程顧問股份有限公司網站。
- 張崑振(2010),台北城北側鐵道橋墩遺構調查計畫正式結案報告書。
- 臺北市捷運工程局(2011),捷運工程大區域開挖施工實務。
- 蘇丁福等(2013),“毗鄰軌道結構物之大區域深開挖工程-以機場捷運台北站工程為例”,2013海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會。