高雄鐵路地下化地工設計新思維

關鍵詞：鐵路地下化工程、明挖覆蓋工法、圍堰

交通部鐵路改建工程局／南部工程處／處長／彭家德 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／陳聰海 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／技術經理／吳文隆 ❸

摘 要 ABSTRACT

國內鐵路地下化工程一般採明挖覆蓋工法施工，其工程特性為緊鄰營運中之臺鐵軌道，腹地小、施工風險高。經回饋臺北鐵路地下化工程經驗，將工安、施工性及環境保護納入設計，取消標準段中間樁及回撐，達到減少施工界面，縮短施工期程之目的。高雄鐵路地下化工程須穿越寬約75m愛河，過愛河段隧道採用圍堰工法分三階段施工，設計河道板半逆打工法，以利汛期時可持續於河道板下方進行臺鐵隧道施築作業。

壹、前言

為解決都會區塞車夢魘，國內自民國72年起陸續辦理鐵路立體化工程，包括地下化及高架化兩部分，各都會區相關工程執行概況如表1所示。

臺北市區鐵路地下化工程自民國72年開始推動，以臺北車站為核心，分四期推動採漸進方式由市中心往兩端延伸，分段施工分段通車。第一期：臺北車站地下化工程民國72年至78年；第二期：松山專案工程(東延松山計畫)民國78年至83年；第三期：萬板專案工程(西延

表1 臺鐵鐵路立體化工程執行概況

型式	地點	完工期程	備註
地下化	臺北	100.8	已完工
	高雄	106.12	
	臺南	-	尚未施工
高架化	林邊	101.6	已完工
	屏東	105.6	
	員林	105.10	
	臺中	106.3	
	桃園	106.12	

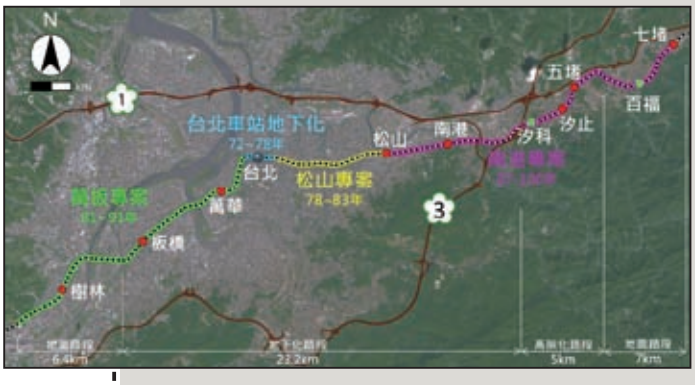


圖1 臺北鐵路地下化工程範圍

圖2 松山專案騰空土地利用情況

圖3 高雄鐵路地下化工程範圍

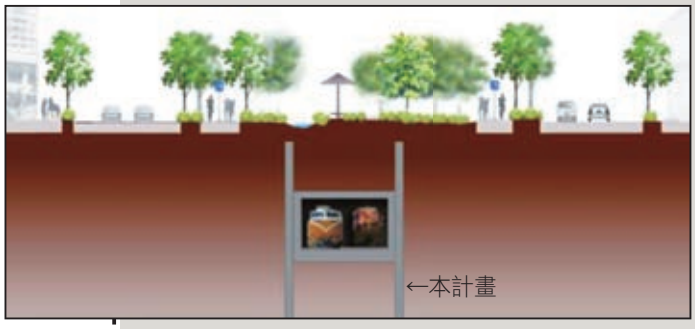


圖4 高雄計畫騰空土地利用構想

板橋計畫)民國81年至91年；第四期：南港專案工程(東延南港計畫)民國87年至100年，全長約42km(詳圖1)，整體工程歷經28年，總經費達1,800億元。

臺北鐵路地下化直接效益為消除原有鐵路對市區之阻隔，促進都市均衡發展；間接效益主要包括騰空土地規劃車站特定區、紓解交通瓶頸，闢建市民大道、艋舺大道、提供地下停車空間等，圖2為松山專案騰空土地利用情況。

高雄鐵路地下化工程分左營計畫、高雄計畫及鳳山計畫執行，預計民國106年同時完工通車，一次切換地下化，工程範圍約15km(詳圖3)，工期12年，工程經費約1,000億元。規劃捷運化方式與高雄捷運系統搭配以增加運能，新增7座通勤車站，平均站距縮短為1～1.5km。鐵路下地後騰空土地規劃為園道、藍色水路、自行車道與人行步道等，提供市民一條悠閒與慢活的廊道，圖4為高雄計畫騰空土地利用構想。

貳、工程簡介

一、工程概述

「高雄計畫」分成東、西兩段及高雄車站工程，其中西段工程(DL01標)範圍為永久軌里程UK400＋040～UK405＋450之間，起自中華一路(中華陸橋)，至鼓山國小附近東轉穿過愛河下方，直至哈爾濱街為止，全長約5.41km，如圖5所示。沿線設置內惟站(因鐵路地下化北延左營，內惟站併入左營計畫)、美術館站、鼓山站及三塊厝站等四處通勤車站，採用明挖覆蓋工法施工，工程所需的擋土壁體主要以連續壁為主。

圖5 高雄計畫西段工程路線

二、地層與水文

本工程路段位於愛河流域之沖積層上，地表地層以未固結之粉土質砂及粉土質黏土互層組成，並覆蓋在古亭坑層之灰色砂質泥岩層上，岩層分布深度由北向南緩降，沿線從中華路與翠華路口約在地表下60m，至九如陸橋穿越愛河一帶降至地表下75m左右，再由西向東緩慢抬升，至高雄車站一帶，約在地表下65m，地層剖面如圖6所示。

沿線地下水位高，分布於地表下2～3m，靠近愛河一帶地下水位則稍微偏高。愛河之常水位(N.W.L)約在EL.0m，高水位(H.W.L)則約為EL.1.33m。

參、深開挖設計

國內現行鐵路地下化工程的施作方式，以明挖覆蓋工法為主，配合內支撐系統設計施工，先於現有軌旁施作臨時軌，再於騰空的現有軌道下方施作永久軌隧道，最後再撥軌下地(詳圖7)。

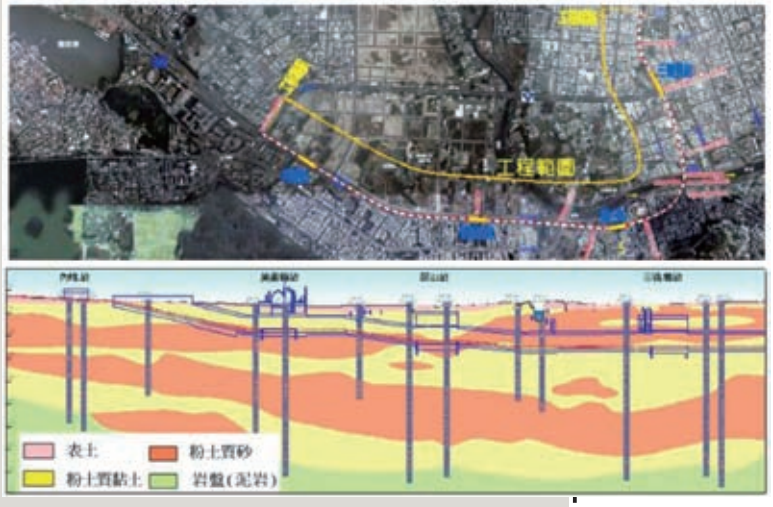


圖6 高雄計畫西段工程地層剖面圖

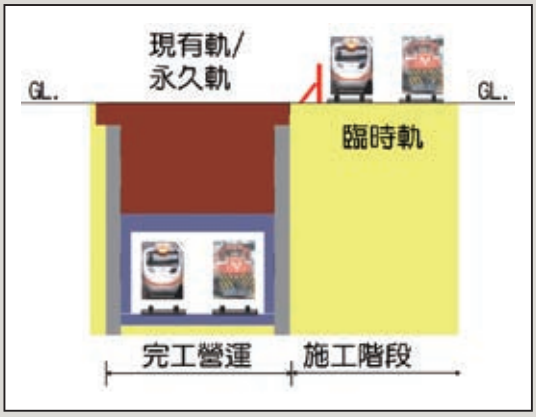


圖7 鐵路地下化兩階段示意圖

圖8 鐵路地下化工程緊鄰營運中臺鐵軌道施工

因緊鄰營運中之臺鐵軌道施工(詳如圖8)，故設計階段須特別考量施工風險，並針對施工困難點及問題點提供有效的解決對策。

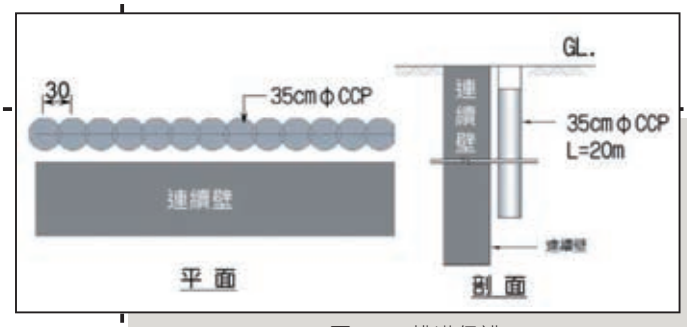


圖9 CCP槽溝保護

圖10 公單元連續壁鋼筋籠吊放安裝帆布

一、工安納入設計

高雄市區地層由砂、泥所組成，具有含水量高、土壤強度容易因擾動影響而降低、地層較軟弱等特性，過去因缺乏深開挖之經驗與案例，故高雄捷運施工時曾發生數起地工災害，究其原因大部分肇因於施工因素，凸顯施工廠商對高雄地區深開挖施工尚未能確實掌握。

鑑於部分案例因連續壁施工包泥，導致後續開挖階段產生湧水、湧砂及損鄰意外，本工程除建議施工時需參酌高雄地區深開挖經驗外，並設計CCP槽溝保護、小單元連續壁、公單元連續壁增設帆布及連續壁超音波檢測等措施，藉以提高連續壁槽溝穩定性並確保連續壁品質。

(一) 提高連續壁槽溝穩定性

工址屬於地下水鹽化之區域，地下水位高、地層條件較為軟弱，參考高雄地區深開挖工程經驗，連續壁施工過程中須特別注意溝壁坍塌，以避免發生周邊地層坍陷及連續壁包泥情況，衍生工安及後續開挖問題，本工程於設計階段採取之對策如下：

1. 設計CCP進行溝壁保護

工址地表下存在標準貫入試驗N≦4與含水量超過液限之軟弱黏土、粉土及N≦10之鬆砂地層，屬於坍塌風險較高之地層。為確保緊鄰之重要建築物及橫交橋梁結構之安全，並維持開挖過程中溝壁之穩定，該區域連續壁外側施作緊密排列之CCP改良樁(詳圖9)貫穿高風險地層進行保護，以期增加溝壁之自立性，俾降低槽溝開挖過程中溝壁坍塌發生之機率。

2. 規劃小單元連續壁施工

本工程連續壁最大開挖深度達47m，如何縮短單元施作時間，不僅關係槽溝之穩定性，也攸關連續壁施工之成敗。本工程設計小單元連續壁(端板接頭型式)，以減少母單元寬度，利於儘速完成連續壁單元之施作，確保施工順遂。

(二) 確保連續壁品質

1. 公、母單元皆包覆帆布

傳統連續壁設計時考量施工需求，於母單元鋼筋籠包覆帆布，除避免水中混凝土溢流外，亦有減少連續壁包泥之功效，故本工程於公單元連續壁鋼筋籠增設帆布包覆(詳如圖10)，以降低連續壁包泥機率，確保壁體品質。

2. 超音波檢測連續壁品質

設計於連續壁內埋設PVC管，並於連續壁混凝土達強度需求後進行超音波檢測，以確認連續壁品質（詳圖11～

圖11 連續壁超音波檢測

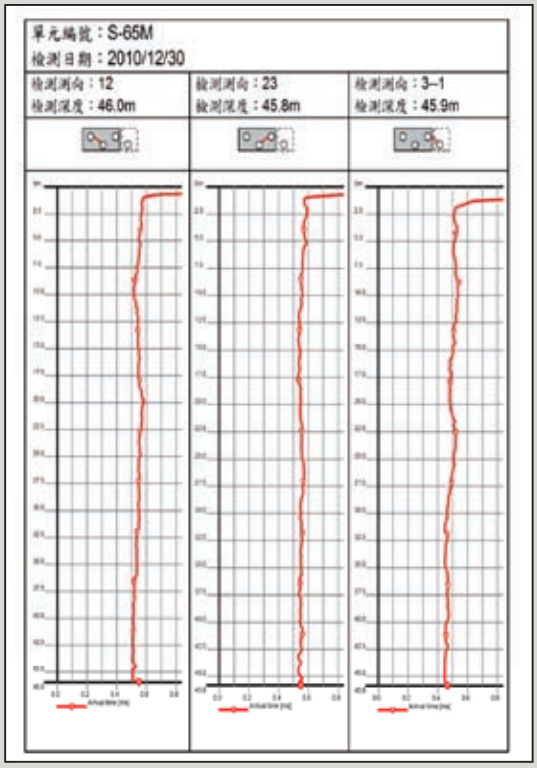


圖12 超音波檢測成果(例)

12所示）。對於超音波檢測結果研判有包泥疑慮或可能造成開挖時漏水漏砂範圍，將在開挖前進行補強及止漏作業。

(三)確保鄰近結構物安全

開挖工區緊鄰營運中軌道及民房建物，設計採用抑制連續壁變位及阻截沉陷槽發展方式，以降低對鄰近構造物之影響。

1. 地中壁

連續壁型式之地中壁，因勁度高、可直接束制兩側連續壁，其減少壁體變位之效果最佳。愛河段穿越隧道為本計畫路線之縱剖面最低點，致相鄰之陸地段隧道開挖深度大，加以工址地盤軟弱、地下水位高，於分析過程若僅採型鋼作為內支撐系統，將導致壁體變形、應力過大之情況(詳圖13)，因此採勁度較高之地中壁來控制壁體變位量及應力，以確保擋土開挖作業之安全性。本工程於UK403＋580～UK404＋260區段設置地中壁，地中壁配置於設計開挖底面下3m範圍，每隔8～9m設置一道。

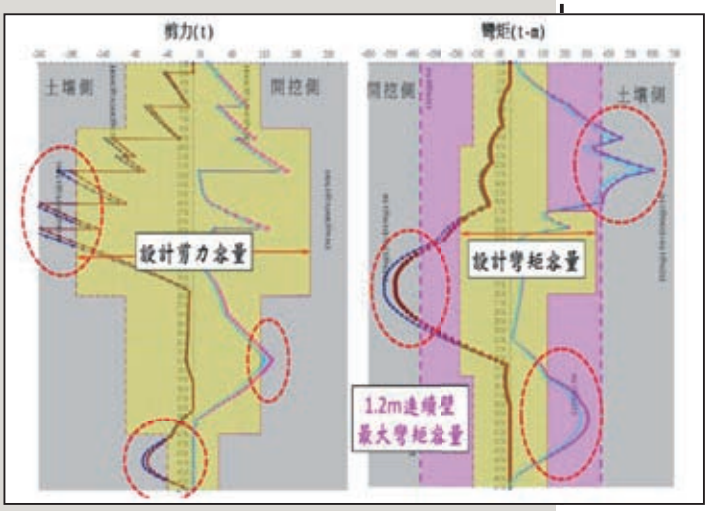


圖13 連續壁應力分析圖

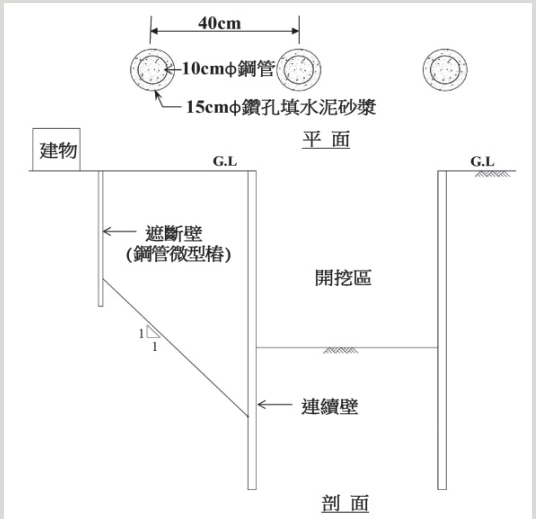


圖14 遮斷壁示意圖

2. 扶壁

因車站之開挖寬度大，考量在車站開挖區設置扶壁，增加開挖側之被動土壓力，對減少壁體變位及壁體應力亦有顯著之效果。扶壁可針對受施工影響之區域(可僅於車站靠鄰房之單側)進行配置，其施作對於既有管線之應變調整較靈活，相對所需之工期亦較短。

經檢討本工程扶壁設置於鼓山站之UK403＋170～UK403＋250，施作深度為設計開挖底面下10m範圍，垂直連續壁方向之扶壁長度6m，每隔9m設置一道。

3. 遮斷壁

針對建築物現況不佳或既有傾斜量較大者，為避免深開挖工程對鄰近建築物造成更嚴重之影響，於工址與鄰產間設置遮斷壁進行保護(詳圖14)，本工程採15cmφ鋼管微型樁以40cm間距施築遮斷壁，藉以阻截地盤位移區域之延伸。

4. 填補道碴

為確保臺鐵營運安全，針對臺鐵軌道採軌道檢查車及沉陷點監測鐵軌高程，必要時可配合補填道碴方式，維持軌道面之平整，以符合鐵路養護規範於10m範圍內軌道頂面高低變位小於7mm之要求。

二、施工性納入設計

國內進行鐵路地下化工程經驗已逾30年，地下車站及隧道採明挖覆蓋工法設計，配合內支撐系統施工，可確保深開挖作業之安全。隨著設計單位對開挖行為的掌握、施工廠商深開挖經驗累積及材料廠商供應大尺寸型鋼，對於影響施工時程之回撐及中間樁(詳圖15)，重新檢討其設置之必要性。

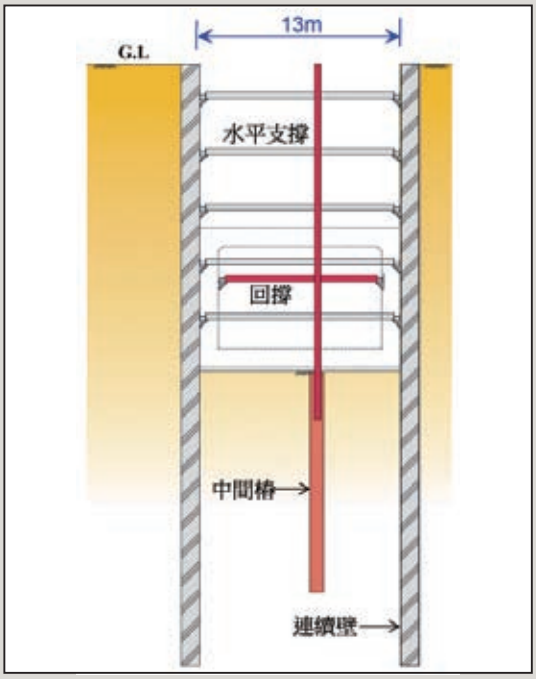


圖15 傳統鐵路地下工程開挖支撐型式

(一) 回撐檢討

以施工之觀點而言，架設回撐除影響工進外，回撐須於上方樓板達規範要求強度後方可進行拆除，其施工空間、施工機具及材料搬運等安排均屬不易(詳圖16)，故臺北鐵路地下化南港專案段施工時，曾有取消部分回撐的案例。取消回撐須連拆最下方兩階支撐，將增加頂板上方支撐之軸力，可能增大該階支撐之型鋼尺寸，惟相對可減省回撐之費用，因此本工程以無設置回撐為原則進行設計。

(二) 中間樁檢討

高雄捷運屬高雄地區首次大規模之深開挖工程，完工後累積在地施工經驗，也使得市場上流通大斷面型鋼(H428、H458)。設置中間樁可減少水平支撐之挫屈長度，減小水平鋼支撐之設計需求斷面；但也增加中間樁施工、切除時間及衍生樓板止水課題，此外將限縮隧道施工之作業空間，影響工進。鐵路地下化隧道工

圖16 臺北鐵路地下化工程回撐系統

圖17 高雄鐵路地下化西段標工程支撐系統

程一般段標準寬度約13m，為避免在有限空間設置中間樁造成施工困擾，故本工程設計階段，即評估取消中間樁之可行性及效益。經評估結果顯示，取消中間樁增加之支撐型鋼費用與設置中間樁費用相當，但不設中間樁可減少中間樁施工、切除時間，且無須處理中間樁與底板、頂板之止水課題，可增加施工作業空間及縮短工期(詳表2～3)。

本工程以不設置中間樁為原則(詳圖17)，但車站段、壁龕段、愛河段因斷面較寬，仍建議設置中間樁。

三、環境保護納入設計

(一) 擋土壁對地下水文影響

鐵路地下化工程為線形結構型態，因為連續壁體具不透水性，可能形成連續性之地下阻水墻，阻隔壁體兩側地下水流

表2 中間樁工期統計

工項	工時(天)
中間樁施作	0.2
底板、頂板止水處理	0.3
中間樁切除、轉換	0.25

表3 取消中間樁縮減工時統計

標別	CL111	CL112	CL113	CL115
取消中間樁數(支)	126	129	145	170
減少工時(天)	95	97	109	128

動，造成地下水無法自由流通與補注，進而導致結構體兩側地下水位不等高，對地下水文環境產生衝擊。

當連續壁上游側地下水位上升，將造成土壤孔隙水壓力升高，結構體上浮力增加、土壤液化潛能增高，且水壓增加將使結構物壁體漏水情況惡化；而下游側地下水位下降，導致土壤有效應力增加，地盤可能產生壓密沉陷，肇致結構物下陷、既有水井水位下降、海水入侵而鹽化地層、濕地消失、地表植生枯萎等環境問題如圖18所示。

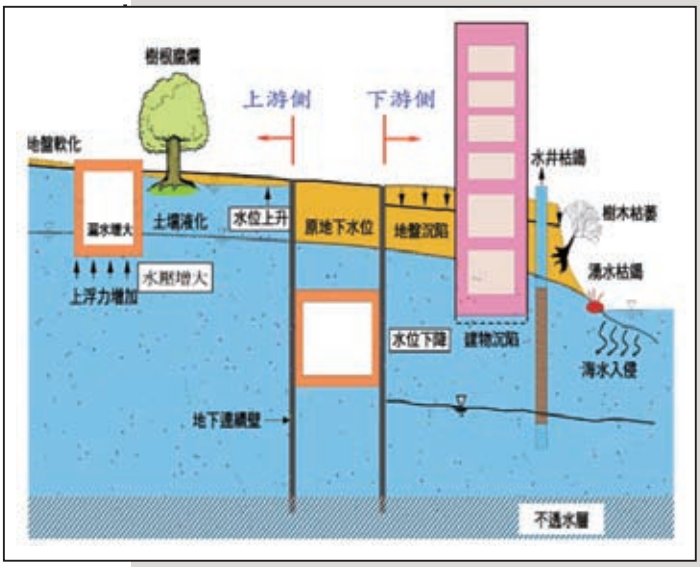


圖18 連續壁阻斷地下水流動對環境之影響

經採用美國地質調查所U.S.G.S.(United States Geological Survey)發展的Modflow 地下水流模擬程式，分別就連續壁施設前後進行地下水環境的數值模擬分析如圖19～20所示。結果顯示連續壁施設前後對於地下水流向及水位並無明顯改變，原因為計畫範圍周邊區域的地下水流向，大致往愛河方向流動，其中一地下水之流向，自連續壁西側的壽山，往連續壁或愛河方向流動；另一地下水流，則是由計畫區東北側大社-大樹丘陵地，往愛河方向流動，可見本工程連續壁設置範圍的地下水補注有兩個方向。

圖19 連續壁施設前等水位線與地下水流向數值分析結果示意圖

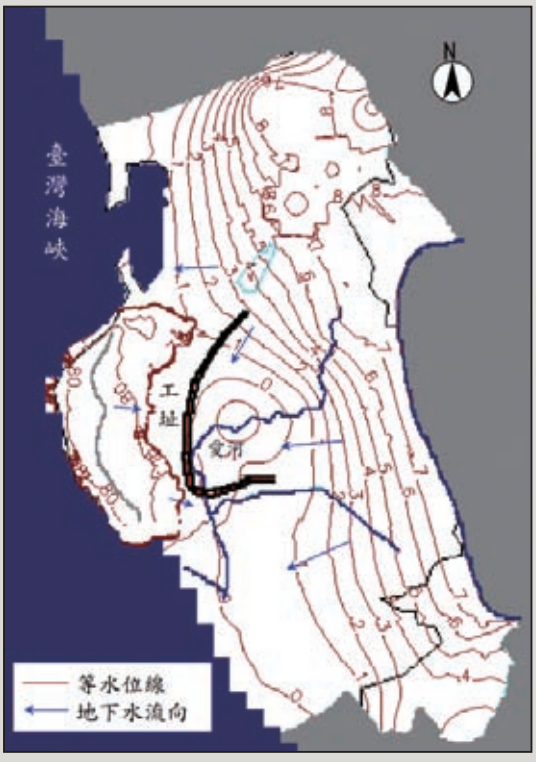


圖20 連續壁施設後等水位線與地下水流向數值分析結果示意圖

(二) 低噪音及低震動工法

因應民眾參與日益熱絡，施工法及機具選擇應思考對環境、居民干擾小的工法，以降低抗爭風險並利於工程推動與執行。因此，本工程設計採用低噪音及低震動工法等敦親睦鄰措施進行施工。

針對舊橋墩、混凝土結構物拆除作業，設計採鏈鋸切割機代替傳統機械敲除方式；以鑽掘式中間樁取代打擊式中間樁，均可有效減少施工造成之噪音、震動及污染問題(詳圖21～22)。

圖21 橋墩切割及搬運

圖22 鑽掘式中間樁施工

肆、過愛河段設計

臺北鐵路地下化工程過新店溪段採圍堰工法配合明挖覆蓋方式施工，屬於工法簡單、技術成熟的施工方式，具施工快、經費低的優點(詳圖23)。因圍堰工法施工將縮減河道通水面積，僅適用於較不受圍堰影響通水斷面之大寬度河川，高雄愛河寬度狹窄僅74m，加上近年來極端氣候頻繁，民國95年6月12日曾發生河水滿溢情況，因此過愛河段施工方式，須特別謹慎考量。

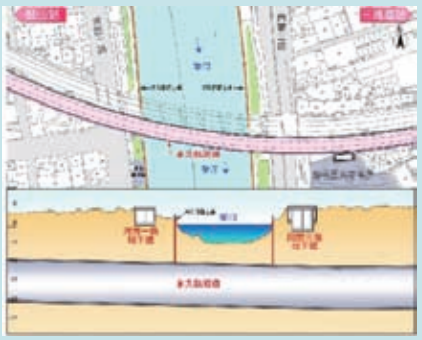
圖23 臺北鐵路地下化工程過新店溪段圍堰施工

一、工法選擇

設計階段依據工址現況、愛河水文資料及周遭環境，檢討並彙整各種可能施工法之優劣點及相關課題，如表4所示，經綜合評估，圍堰工法及潛盾工法同屬較佳方案，但圍堰工法須經地方水利主管機關同意；潛盾工法雖不影響水流，惟須將施作範圍延伸為鼓山站至三塊厝站路段全線採用。經綜合考量施工期程、淨空及禁限建法規頒訂等因素，過愛河段隧道採圍堰工法設計施工。

為縮短圍堰阻水期程及影響，經與水利主管機關協調，獲同意於非汛期採三階段圍堰方式施工，圍堰施工規劃順序如圖24所示。圍堰內僅先施作河道板即可恢復通水，再從河西一路或同盟三路隧道開挖區進行河道板下方之開挖工作，並進行後續臺鐵隧道結構施築作業。

表4 過愛河段施工法比較表

工法	工法示意圖	評估內容	評估
圍堰工法		1. 阻礙通水斷面，河中施工需經主管機關核准 2. 可利用擋土壁抵抗結構上浮力 3. 設置河道板保護隧道結構 4. 施工法較簡單 5. 鋼管樁擋土壁施工快	佳
潛盾工法		1. 需配合調整軌道線形及縱坡 2. 愛河沿岸既有板樁護岸需預先拔昇處理 3. 愛河段覆土不足，需進行地盤改良處理 4. 保留既有鐵路橋，無需新建臨時鐵路橋 5. 國內大斷面潛盾施工經驗尚少 6. 需設聯絡通道銜接緊急出入口 7. 範圍延伸為鼓山站至三塊厝站路段	佳
推管工法		1. 需擴大隧道結構斷面、管冪施作範圍，以因應過河段之曲線段施工 2. 水平鋼管內灌注混凝土，抵抗結構上浮力 3. 設置固床工保護隧道結構 4. 管冪鋼管精度控制困難，止水要求困難度高	次佳
沉埋管工法		1. 預鑄沉埋箱涵可利用綠廊設置預鑄廠或乾船塢，也可利用鐵路載運 2. 為確保隧道結構之止水性，需先沉埋臨時箱涵，再於內部施作隧道結構 3. 需設置固床工保護隧道結構 4. 河道水深不足、國內施工實績少	不適宜

二、圍堰設計

河中圍堰開挖除須滿足深開挖之安全性外，如何降低圍堰施工對愛河影響為考量重點，本工程採取措施包括：

(一)三階段圍堰

為減少圍堰施工對愛河通水斷面的影響，經評估利用非汛期採三階段分期施工，可降低河中作業風險並滿足水利主管機關要求。

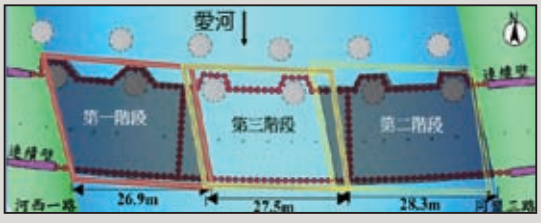


圖24 三階段圍堰示意圖

圍堰安排於非汛期施工，採用5年頻率流量進行水理分析，其中以第三階段圍堰施工影響較顯著水位壅高14cm，符合經濟部水利署「跨河建造物設置審核要點」第七點規定：「二維水理演算分析結果，其墩前壅高

不得超過該河段出水高之百分之二十六」。

(二) 鋼管樁擋土壁

鋼管樁擋土壁具有減少壁體厚度、變形量、施工作業區範圍及施工快速等優點，相鄰鋼管樁間以卡榫公母對接(詳圖25所示)，配合接頭止水灌漿，可確保壁體之止水性能。

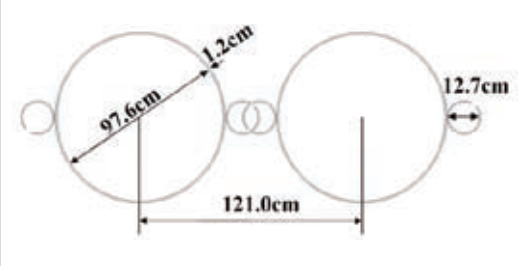


圖25 鋼管樁P-P接頭型式

(三) 設置河道板

為縮短河中作業期程，圍堰於河道板(詳圖26)施築完成即予拆除。圍堰結構採二層鋼板樁間回填不透水性材料，配合內支撐系統，減少河道板開挖過程中鋼板樁之變位。

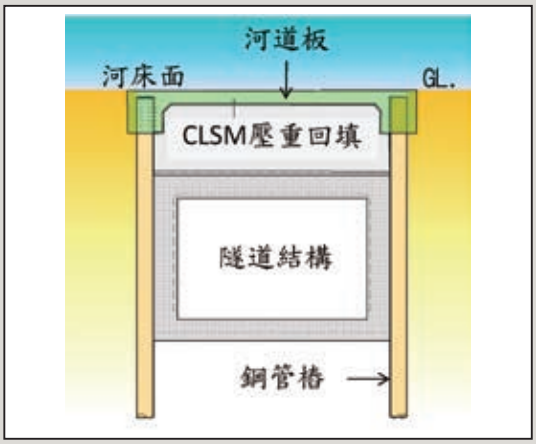


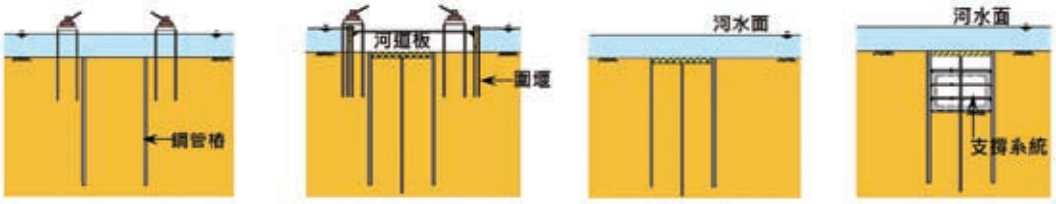
圖26 河道板示意圖

(四) 半逆打方式施築隧道結構

河道板施築完成後，再從河西一路或同盟三路進行河道板下方之開挖施工，以半逆打方式進行臺鐵隧道施築作業。綜整愛河段隧道之施工步驟，如圖27。

三、圍堰施工經驗回饋

過河段工程於民國100年12月至101年4月施作第一階段圍堰及河道板，民國101年12月至102年4月施作第二階段圍堰及河道板，均已順



(1)鋼管樁打設　(2)圍堰及河道板工程　(3)拆除圍堰恢復通水　(4)河道板下臺鐵隧道施工

圖27 過河段第一、二階段臺鐵隧道施工步驟示意圖

(1)圍堰鋼板樁打設　(2)圍堰開挖　(3)河道板鋼筋綁紮　(4)河道板施築

圖28 圍堰河道板施工

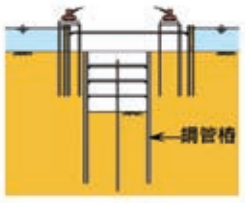
(1)開挖及支撐作業

(2)底板鋼筋綁紮

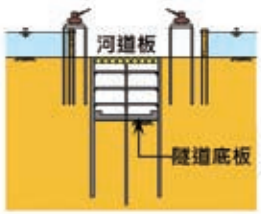
(3)側牆結構施工

(4)隧道結構完成

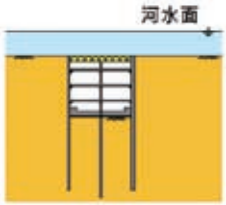
圖29 河道板下方隧道開挖施工



(1)圍堰及隧道開挖



(2)隧道底板及河道板施作



(3)拆除圍堰恢復通水

(4)河道板下臺鐵隧道施工

圖30 過河段第三階段臺鐵隧道施工步驟示意圖

(1)開挖及支撐作業

(2)底板鋼筋綁紮

(3)河道板重型支撐架

(4)河道板完成

圖31 第三階段圍堰施工

利完工，施工過程如圖28所示。民國101年12月開始進行河道板下方隧道開挖作業，已完成隧道結構如圖29。

第三階段圍堰及河道板自民國102年12月開始施工，經累積第一及第二階段圍堰與河道板施工經驗，考量第三階段圍堰與河道板施工可順利於汛期前完成，並仍有餘裕時間。為加速河中施工作業之進行，施工廠商檢討增加第三階段圍堰施工內容，將隧道底板之施工併入，即圍堰完成後分階開挖至設計底面，先施築隧道底板，再構築河道板，待拆除圍堰恢復通水後，進行河道板下方之隧道側牆與頂板施築作業，如圖30及圖31所示。因變更後之隧道開挖、架設支撐及底板施築採傳統明挖方式施工，工率較半逆打工法佳，實際縮短施工期程約40天。

第三階段河道板順利於汛期前完成，接著進行隧道側牆及頂板，過河段隧道結構於民國103年12月順利完成。

伍、結語

國內鐵路地下化工程自民國72年開始推動至今已逾30年，隨著技術的提昇、施工經驗的累積以及社會民情的變遷，公共工程的設計與施工，均應有新的思維及作法，以確保施工安全性並將可能之工程風險與負面影響降至最低。

地下工程及深開挖工程充滿變數與挑戰，期盼藉由高雄鐵路地下化西段標工程經驗分享與交流，進一步提昇國內鐵路地下化工程技術及深開挖工程水準。

參考文獻

1. 交通部(2006)，交通技術標準規範-1067公厘軌距軌道橋隧檢查養護規範。
2. 交通部鐵路改建工程局網站：http://www.rrb.gov.tw/。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2008)，高雄計畫西段工程細部設計技術服務(DL01標)-補充地質調查報告書。
4. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2008)，高雄計畫西段工程細部設計技術服務(DL01標)-大地工程設計報告。
5. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2008)，高雄計畫西段工程細部設計技術服務(DL01標)-水理分析報告。
6. 世久營造探勘工程股份有限公司(2011)，CL114標過愛河段圍堰施工計畫書。
7. 世久營造探勘工程股份有限公司(2013)，CL114標過愛河段第三階段圍堰施工計畫書。
8. 吳文隆、陳聰海、彭家德(2014)，“高雄鐵路地下化地工設計探討～以DL01標為例”，地工技術第140期，P37～P48。
9. 李德河、李振誥、吳建宏、柯武德、蔡百祥、蘇中鈺(2008)，“地下連續壁影響地下水流之評估及對策”，台灣世曦工程顧問股份有限公司研發計畫研究報告。
10. 社團法人地盤工學會(2004)，“地下水流動保全のための環境影響評價之對策－調查・設計・施工から管理まで”。