

地工技術

工程案例回顧

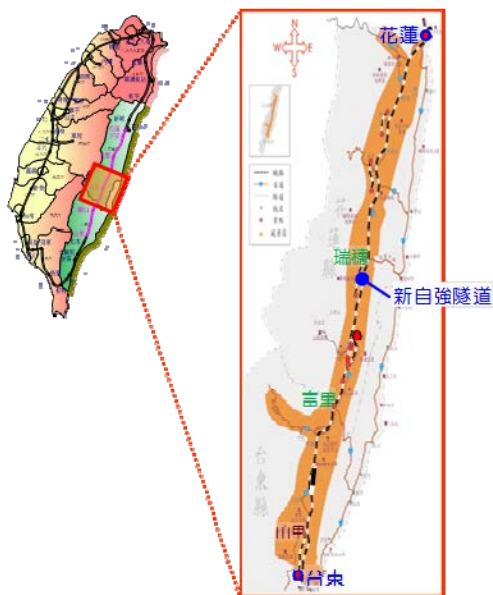
東部鐵路新自強隧道

黃鳳岡* 李怡德** 蔡昆奇**

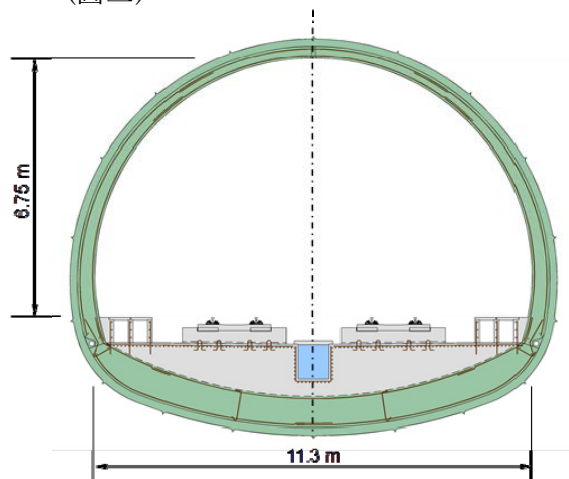
新自強隧道屬花東鐵路電氣化工程之一部分，位於花蓮縣舞鶴台地下方(圖一)，該區域原屬紅葉溪與秀姑巒溪交會處之泛濫沖積平原，密布著埤湖與河道，紅葉溪沖積扇堆積於中央山脈側，後因中央山脈抬升及河川侵蝕，而形成現今之舞鶴台地地形。

新自強隧道全長約2,667m，為雙軌斷面設計，內空斷面最大淨寬為11.3m，頂拱至軌頂高為6.75m(圖二)。

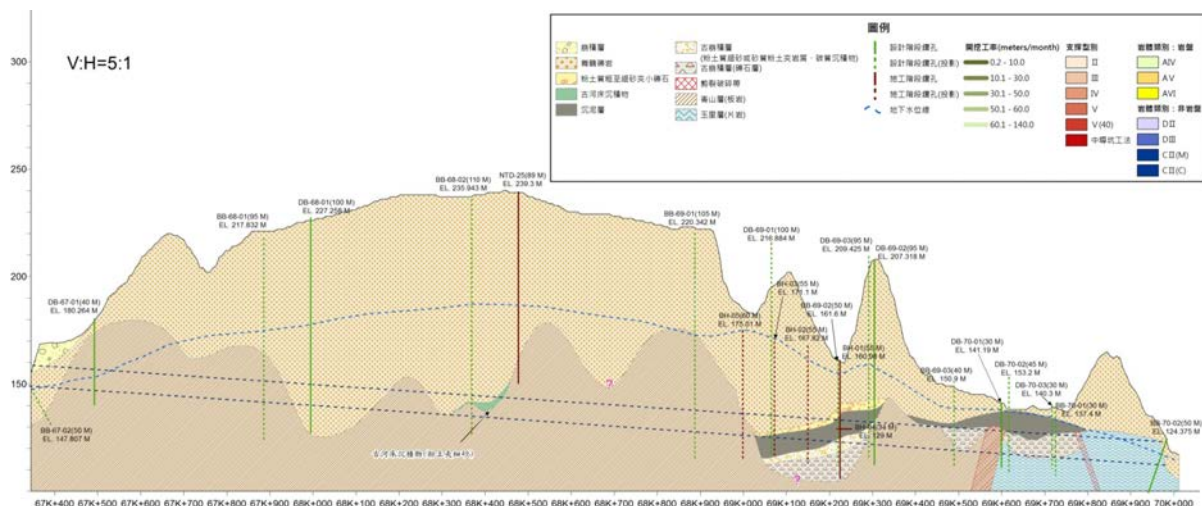
新自強隧道之高程為北高南低，中段岩覆最高約95m，於南側淺覆蓋處僅約10m。該隧道通過東部縱谷地質區，經過之地層由老至新包括玉里層片岩、崙山層板岩、沉泥層及舞鶴礫岩，其中沉泥層約占隧道全長之11%(圖三)。



圖一 新自強隧道平面位置圖



圖二 隧道標準斷面



圖三 新自強隧道地質剖面圖

* 交通部鐵路改建工程局東部工程處

** 中興工程顧問股份有限公司

新自強隧道99年1月16日開工後，於99年6月完成南洞口處理，並進行隧道開挖作業。在一般地質區段，隧道開挖進度順利，曾有一個月開挖100m之紀錄，惟於100年4月進入沉泥層後，已開挖完成之隧道變形增大，而隧道開挖面亦因流泥湧入發生抽坍情事；100年6月，新自強隧道發生高達150公分之擠壓變形(圖四)，使已完成之隧道完全損壞，另於100年7月因抽坍導致隧道上方地表沉陷，雖經修挖仍再度擠壓變形，開挖嚴重受阻。

舊自強隧道於民國68年施工時曾遇到相同地層，發生類似擠壓狀況，並採用灌漿改良工法突破，惟該隧道(單軌)斷面僅36平方公尺，而新自強隧道(雙軌)斷面積達120平方公尺，為舊隧道之3.3倍，困難度倍增。

新自強隧道於遭遇沉泥段後，即嘗試以臨時仰拱、擴挖式加勁支保腳、支保腳加勁岩栓、先撐管幕灌注聚氨酯樹脂、土心加勁低壓灌漿、補強岩栓、水泥漿系管幕灌漿(地盤改良)等輔助工法進行補強，惟成果有限，仍無法有效控制抽坍、擠壓變形、噴凝土受壓破裂等狀況(圖四)。

探究其中原因在於，新自強隧道之上半斷面開挖寬達12.5m，高約6m，開挖支撐作業之輪進時間較長。加以沉泥層為單壓強度低，遇水弱化明顯之高敏感性細顆粒黏性土壤，其受開挖擾動影響所生裂紋形成地下水流路，致使地下水侵入而弱化周圍沉泥層，甚至變成泥漿流失，此導致隧道產生頂拱抽坍、鏡面擠出、支保腳沉陷等異狀(圖五)。

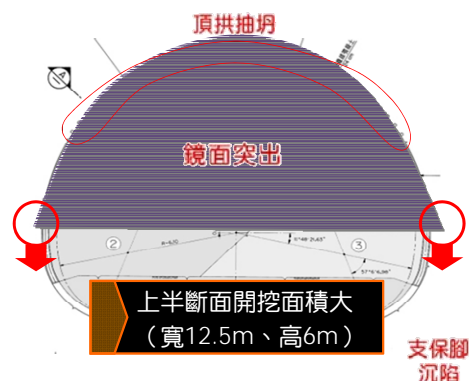
此外，弱化後之沉泥亦使得隧道周圍之鬆動區域擴大，致使支撐承受過大應力，進而導致開挖面附近產生異常變形，並伴隨發生噴凝土開裂與鋼支保挫屈等狀況。為克服沉泥段之困難地質，工作團隊經過縝密的分析檢討，乃嘗試新的施工方法，概述如后。

1. 中導坑工法

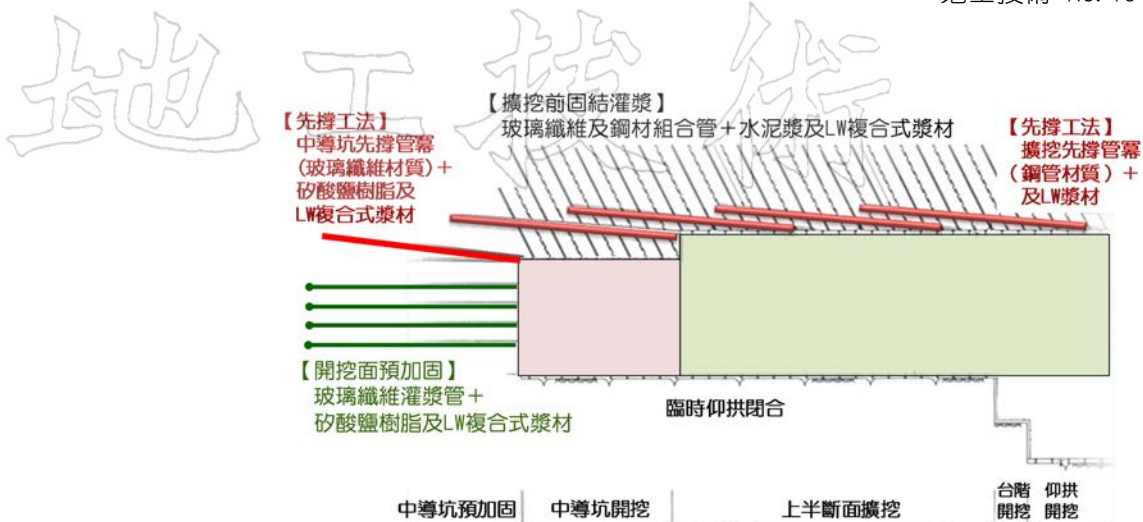
新自強隧道以較小開挖斷面之中導坑工法先進施工(圖六、圖七)，取代原先之上半斷面開挖，主要考量如下：



圖四 沉泥層隧道頂拱大量變形



圖五 新自強隧道沉泥層區段困難遭遇示意



圖六 新自強隧道沉泥層區段中導坑工法示意圖



圖七 新自強隧道沉泥層中導坑工法



圖八 新自強隧道所採用之玻璃纖維灌漿管



圖九 新自強隧道開挖面預加固工法

(1) 避免大斷面開挖抽坍：中導坑之開挖面積較小且形狀較側導坑為佳，具有較佳之穩定性，避免隧道抽坍。

(2) 容許變形先期發生：沉泥因開挖擾動之大量變形應是無可避免，中導坑因斷面較小，故變形量較易控制，且變形可配合於其穩定後在擴挖階段予以處理，提高隧道之安全性。

(3) 進行前進地質探查：藉由中導坑之施工，可預為掌握前方地質條件並進行必要之處理，俾利後續主隧道之施工。

(4) 增加主隧道施工穩定性：中導坑之支撐系統具預加固作用，此對後續擴挖具正面助益，且提供擴挖前再次地質改良空間之機會與效益，可有效控制隧道變形。

(5) 兼顧施工性：承商可採用現有施工機具進行開挖支撐作業，不需另行調派，可節省動員時間。

2. 開挖面預加固

為增加開挖面之穩定性，新自強隧道於開挖面全面打設易切削之玻璃纖維灌漿管(國內首度大量採用)(圖八)，並配合灌注具早強之矽酸鹽樹脂及 LW 等複合式漿材進行地盤改良(圖九)。其中，地盤改良作業係依地質特性及使用目的，採分期鑽灌方式進行，可作為管幕以及鏡面岩栓之功能，增加開挖面之自立時間及穩定性，使隧道開挖作業得以順利進行。

3. 短台階工法

為確保沉泥段台階降挖之施工安全，新自強隧道於降挖前同樣採行複合式地質改良灌漿，並以玻璃纖維管材自已開挖完成之上半斷面向下施灌(圖十)，以同時達到地質改良及預加固之效果。

另配合採用短台階工法(國內首度採用)



圖十 新自強隧道下半部固結灌漿



圖十一 新自強隧道短台階開挖

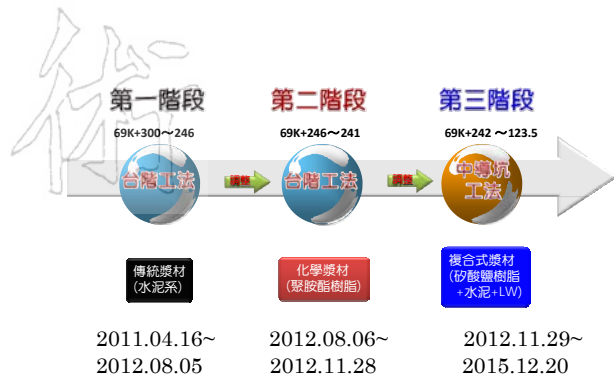


圖十二 新自強隧道短台階開挖及仰拱閉合

進行降挖作業(圖十一)，亦即於隧道下半部斷面台階開挖後，迅速進行永久仰拱支撐工閉合，台階開挖面與仰拱閉合相距僅1~2m(圖六、圖十二)，有效減少沉泥段沉陷變形量。

4. 複合式漿材地盤改良

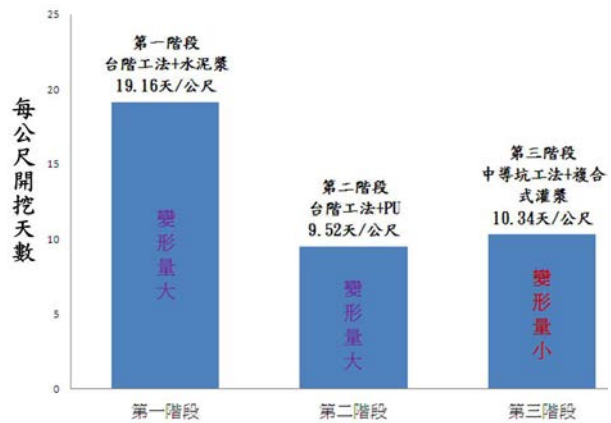
為減少隧道滲水、改善沉泥層自立強度及固結隧道周圍地層，進而形成支撐拱效應，新自強隧道廣泛使用灌漿輔助工法進行地盤改良，包括地表改良灌漿、隧道內固結灌漿、止水灌漿及開挖面預加固等。其中，在灌漿材之選擇方面，大致可分為三階段(圖十三)，概述如後。



圖十三 新自強隧道沉泥層區段工法演進圖



圖十四 沉泥層隧道頂拱大量變形緊急處理



圖十五 沉泥層隧道地盤改良成效比較

(1) 第一階段：配合台階工法採水泥系漿材進行地盤改良，其所需作業時間較長，加以改良後之地盤強度仍顯不足，隧道變形量仍大(圖十四)。

(2) 第二階段：經檢討後，改採聚胺酯樹脂漿材進行地盤改良，其灌漿效率雖大為改善(圖十五)，但成本昂貴，且無法有效控制隧道變形量，並無預期「一次灌漿改良，開挖多輪」之成效。

(3) 第三階段：採複合式漿材灌注進行地盤改良，亦即以水泥系及化學藥液(矽酸鈉、矽酸鹽樹脂或聚胺酯樹脂等)互相搭配使用(圖十六)，終使隧道變形量受到有效控制，抽坍災害發生次數減少，輪進工率明顯提昇。

其中，矽酸鹽樹脂因具有止水及早強效果，可改善隧道滲水並加強沉泥層自立性，在兼顧施工安全性與工期考量下，納為複合式漿材使用。

新自強隧道貫穿舞鶴台地，覆蓋層約90餘公尺，沿途穿越崙山層板岩、舞鶴礫岩、玉里層片岩及十餘公尺厚之沉泥層，地質複雜多變。本工程自可行性研究、路線評選、細部設計及施工階段，皆經詳細縝密規劃，惟國內以往僅有少數軟弱岩盤隧道之施工經驗可供參考，故在遭遇沉泥層時仍發生多次抽坍擠壓變形等災變，施工進度嚴重受阻。

為克服沉泥段之困難地質，工作團隊經過縝密之分析檢討後，乃嘗試新的施工方法，包括中導坑工法、開挖面預加固、短台階工法與複合式漿材地盤改良等，並大量應用新材料(玻璃纖維灌漿管與矽酸鹽樹脂)。經由上述作為，新自強隧道已成功通過沉泥層(圖十七)，並獲致下列具體效益：

1. 增加施工安全，有效減少抽坍災害(減少95%)。
2. 有效控制隧道沉陷變形(150cm→12cm)。

3. 維持施工效率，使位於沉泥層之隧道得以穩定前進開挖。

4. 中導坑及主隧道分別於104.10.20及104.12.20順利完成貫通。

國內以往僅有少數軟弱岩盤隧道之施工經驗可供參考，而在厚達十餘公尺之沉泥層中開挖隧道之案例更是少見。本工程參考國外先進技術，融合台灣工程經驗，在業主(交通部鐵路改建工程局東部工程處)、設計及監造(中興工程顧問公司)與施工(福清營造公司)單位共同努力下，以縮小斷面中導坑搭配複合式灌漿工法克服沉泥層此等特殊軟弱地質狀況，其工程經驗彌足珍貴，值得完整保存。



圖十六 中導坑進行複合式漿材灌注成效



圖十七 新自強隧道中導坑貫通