

新武界隧道引水工程地利斷層處理

李慶龍¹、黃偉光²

台灣電力公司抽蓄施工處，南投¹處長²經理

摘要

台灣電力公司「新武界隧道及栗栖溪引水工程」係由台灣南投縣武界壩以長隧道越域引水至日月潭，隧道總長約16.5公里，其中近日月潭之下游段隧道通過寬約136公尺地利斷層，最大湧水量達110公升/秒，其間發生2次抽坍。經採近灌遠排及隧道分階開挖等處理下，歷經8個月始安全順利通過。本文簡要說明工程及其地質、湧水抽坍災害、斷層處理及履約爭議等，並提出檢討，希對爾後設計施工有所助益。

關鍵字：地利斷層、近灌遠排、湧水抽坍、履約爭議、管幕工法。

一、前言

台灣中部南投日月潭係為明湖、明潭等五座總裝置容量達277萬瓩之抽蓄與傳統水力發電廠發電水源，以及具有供應其周邊鄉鎮所需民生與灌溉之用水等多項功能。然日月潭為一離槽水庫，其水源主要仰賴於西元1934年興建武界壩攔引濁水溪上游水流並經長約15.1公里之原有武界隧道越域引水。既有隧道已使用近70年，其襯砌混凝土已嚴重龜裂剝落，為確保及增加水源，經負責管理維護之台灣電力公司評估後，於1994年決定興建一條新武界引水隧道，並將濁水溪上游支流栗栖溪之溪水一併引入日月潭統合運用，即本文之「新武界隧道及栗栖溪引水工程」（以下簡稱「本工程」），完工後日月潭之年平均引水量可達8億3千萬立方公尺，每年亦可增加7千6百萬度發電量。

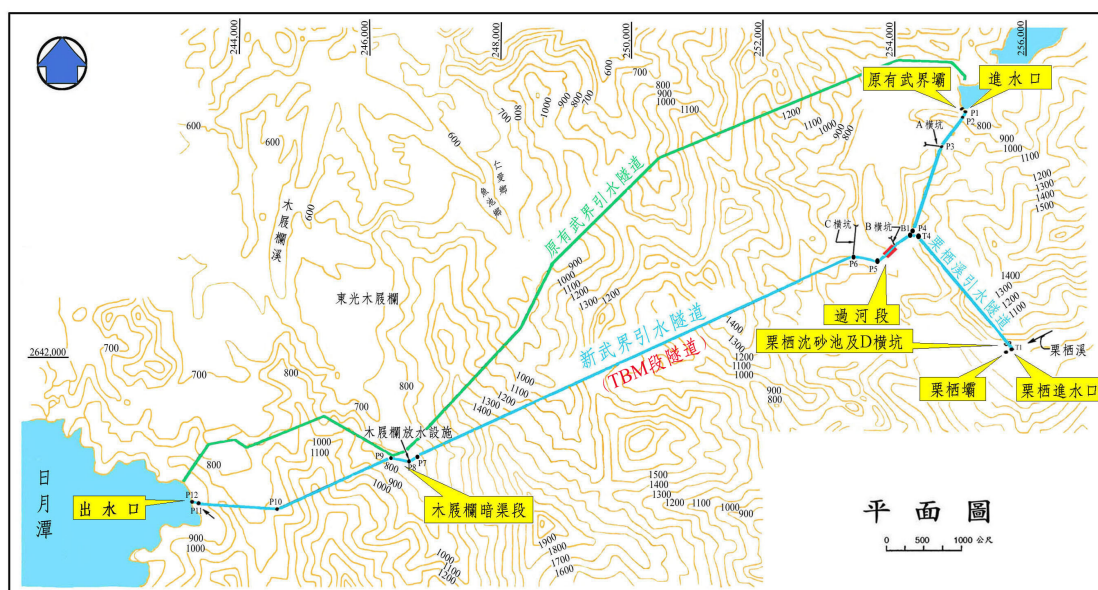
本工程係自現有武界壩新建進水口，以引水隧道將水北引至下游約3.5公里處，並以跨距120公尺長過河段拱橋跨越濁水溪，再經約10公里之隧道引水至日月潭；並為增加本工程之經濟效益，於栗栖溪興建一混凝土壩及長2.4公里之引水隧道（稱為「栗栖引水隧道」），再匯入新武界引水隧道後引至日月潭統合運用，總引水量為為45.6秒立方公尺。土木結構物包括新武界進水口及引水隧道、過河段拱橋、木屐欄暗渠段、日月潭出水口、以及栗栖壩、栗栖溪引水隧道等，平面佈置圖如圖一所示。本工程先期工程於1997年11月開工，主體工程1999年1月開工，2006年6月工。

二、工程地質

2.1 區域地質

新武界引水隧道位於台灣中部南投縣，位處中央山脈西翼地質區之雪山山脈帶與脊樑山脈帶之西緣，兩者間大致以濁水溪主流劃分，濁水溪以東為脊樑山脈帶，地勢自東向西陡降；濁水溪以西則屬雪山山脈帶。

本工程區域內出露之地層自東而西依序為廬山層、眉溪砂岩、佳陽層、達見砂岩、十八重溪層及白冷層，平面地質圖詳圖二及表一所示。岩性以砂岩及板岩為主，板岩劈理與砂岩層面位態差距不大，大致均呈北北東至東北走向，向東南傾斜（約40至80度）。區內主要地質構造為梨山構造、地利斷層及武界斷層。茲僅就與本文有關之十八重溪層及白冷層地質特性分述如下：



圖一 新武界隧道及栗栖溪引水工程佈置圖

2.1.1 十八重溪層

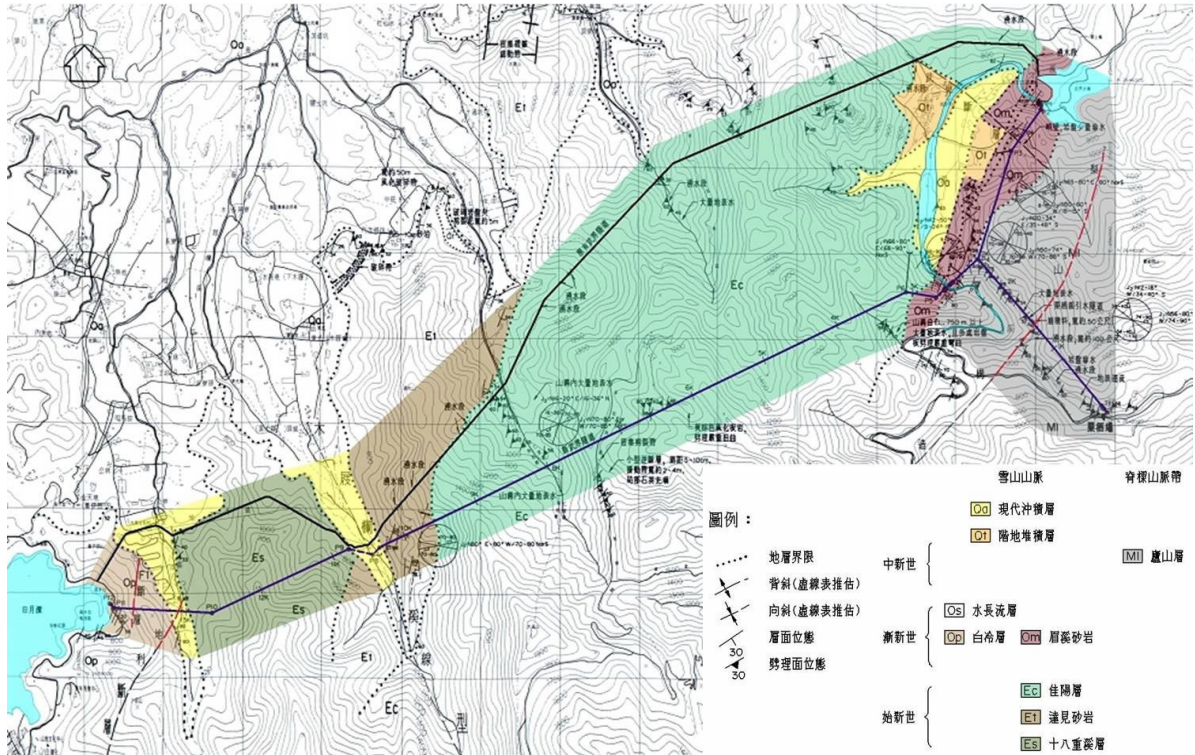
十八重溪層 (Op) 為雪山山脈帶中出露之最老地層。本層在本工程範圍內分佈於濁水溪支流-木屐欄溪以西，並於九族文化村附近為地利斷層所截，推估其厚度至少可達2,150公尺，其岩性則以板岩夾薄層變質砂岩為主。

2.1.2 白冷層

白冷層 (Es) 為廣佈在台灣中部大甲河流域谷關一帶之漸新世白色厚層變質砂岩。本層在本工程範圍內隧道最下游段至日月潭出水口間均屬本層出露範圍，其岩性以灰色中粒變質砂岩為主，風化程度較高。

2.2 地利斷層

地利斷層又稱荳野斷層（王文能等，1981），北起北港溪南岸荳野附近向南延伸，經虎子山至地母廟後向西南延伸穿越魚池盆地及地利西側附近，並向南延伸至陳有蘭溪一帶，為白冷層與十八重溪層之分界。九族文化村谷地東側出露岩盤以十八重溪層之板岩為主，局部夾砂岩，岩層傾角約30~40度向東。



圖二 新武界及栗栖溪引水隧道平面地質圖

表一 工程範圍地層一覽表

| 地質年代 | 雪山山脈帶中部及南部 | | 脊樑山脈帶 |
|--------|---------------------------|-------------------|---------|
| 中新世 | | | 廬山層（板岩） |
| 漸新世 | 白冷層 (Es) | 眉溪砂岩 (石英砂岩夾板岩) | |
| 漸新至始新世 | (砂岩) | 佳陽層 (板岩或砂質板岩) | |
| 始新世 | 達見砂岩 (石英砂岩與板岩薄互層) | | |
| | 十八重溪層 (Op) (板岩夾薄層變質砂岩) | | |

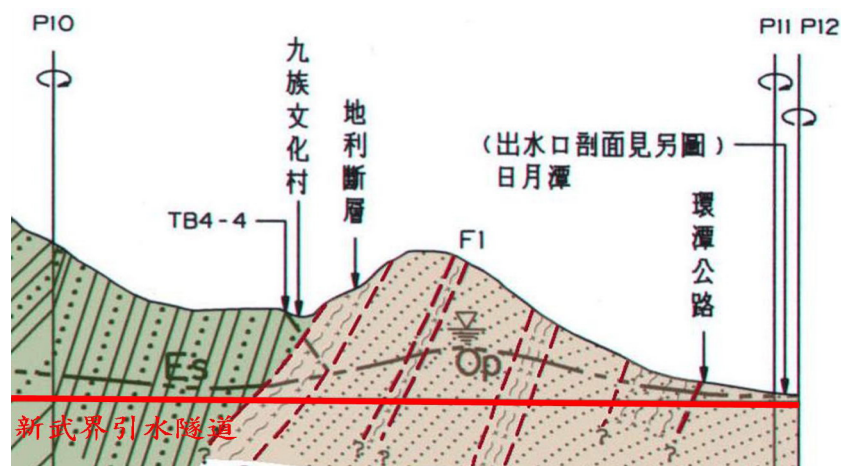
(摘錄自台灣地質圖幅說明書，經濟部中央地質調查所，1986)

2.2.1 地質探查

地表調查顯示，推估地利斷層可能於九族文化村附近通過。地利斷層及其伴生斷層可能於九族文化村附近與隧道線相交。

再依施工前之可行性研究報告（台灣電力公司，1994）及基本設計階段所施

作之震測結果發現一處波速1.98km/sec之低速帶，僅達周圍岩盤波速之70~80%。地質鑽探顯示，地表30.9公尺以下進入岩盤後至孔底均為破碎岩盤，嚴重銹染，岩盤內經常可見斷層泥及角礫，剪裂面有明顯擦痕，岩盤裂隙間常見石英脈充填，顯示岩盤曾受強烈之應力作用，並產生相對位移，推估寬度可能達70公尺以上，地質剖面圖如圖三所示（台灣電力公司，2000）。



圖三 地利斷層地質剖面圖

2.2.2 開挖地質

依新武界引水隧道開挖地質紀錄顯示，地利斷層位於新武界引水隧道 Sta. 13^k+061與Sta. 12^k+925（距日月潭出水口約900公尺）之間，全長136公尺。初遭遇地利斷層時，開挖面岩盤節理非常發達且破碎，銹染嚴重，石英脈充填岩盤，裂隙厚度為3~5公分，有劇烈褶皺現象，顯示擾動異常並有錯移現象，後陸續出現斷層泥及角礫，岩盤呈高度破碎、粉碎夾砂、泥，並伴隨大量湧水，進入斷層帶主體。由西與白冷層、東與十八重溪層出露位置及擦痕比對，地利斷層應為高角度向東傾斜之逆斷層。

三、隧道開挖支撐設計

3.1 隧道開挖支撐設計

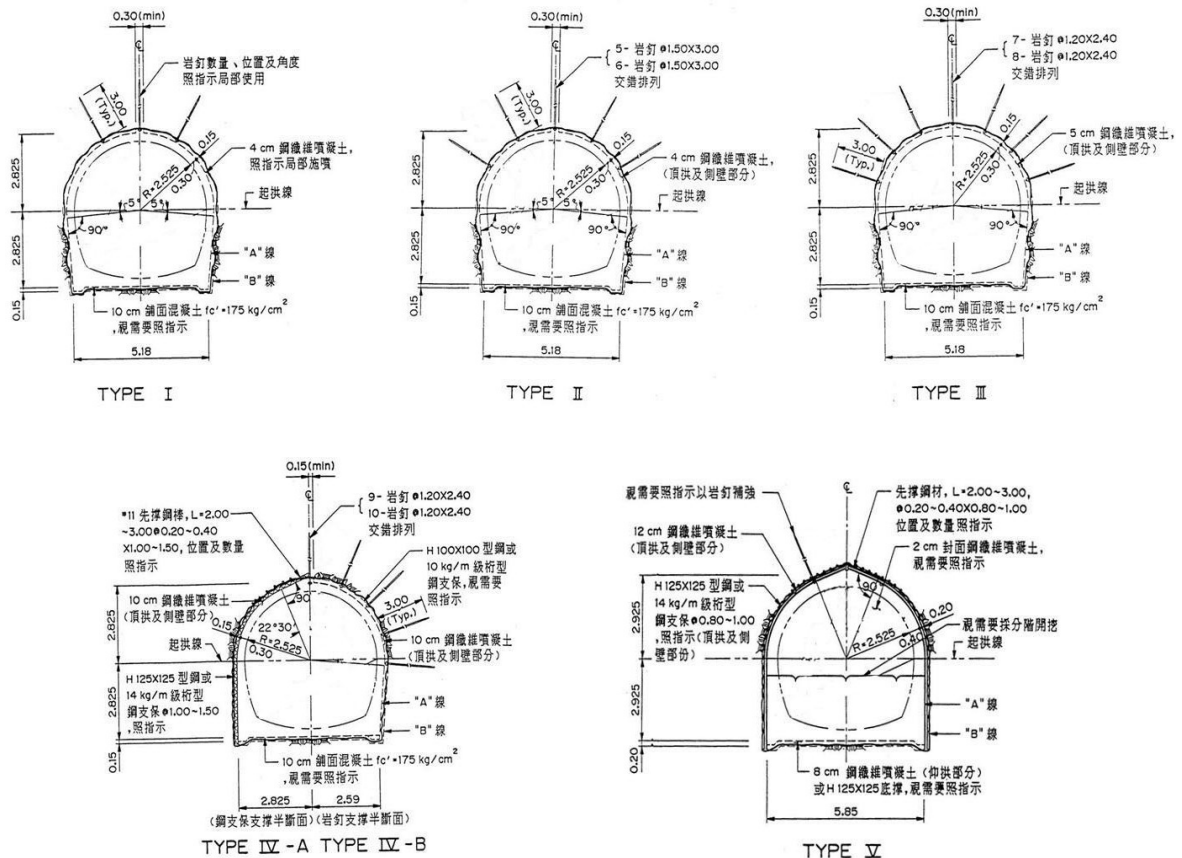
新武界引水隧道為重力式馬蹄型輸水隧道，隧道開挖支撐工設計是先以類似經驗法擬定各型支撐之配置，續以調查或推估所得之岩體參數為依據，再應用數值分析法檢核各種支撐材料受力與變形情形，若有不足或過量再調整支撐量（台灣電力公司，2002）。本工程以NGI-Q及CSIR/RMR定量分類法將岩體評分為五種等級，如表二所示。並據此設計隧道之支撐工，其開挖與支撐設計如圖四所示。同時考量承商的自主性與施工習性，在支撐型式與材料方面提供較具彈性方式供承商選用，在支撐型式方面，特別於第IV型支撐細分為IV-A與IV-B型，前者主要支

撐材料為鋼支保與鋼纖維噴凝土，後者為岩釘與鋼纖維噴凝土。在支撐材料方面，岩釘型式以SN岩釘或樹脂岩釘為主，然亦可經業主同意，採用膨脹管岩釘、開縫管岩釘或自鑽式岩釘；鋼纖維噴凝土亦可依設計圖厚度對照表，經業主同意以噴凝土與鋼線網替代；鋼支保型式可採用H型或桁型鋼支保；先撐鋼材種類應亦業主同意後採用#11先撐鋼棒、40mmΦ先撐鋼管、注膠先撐鋼管及自鑽式岩釘等。

現場隧道開挖程序則由承商地質師應依據實際地質情況，辦理岩體級別評分，選定適當支撐類型，經業主複核確認後，依照複核評定之結果辦理支撐施工。惟視開挖後實際地質構造，業主得隨時作必要之調整。

表二 隧道支撐類型選用表

| 類 型 | I | II | III | IV-A | IV-B | V |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 岩體等級 | 佳至甚佳 | 尚可 | 差 | 甚差 | | 極差 |
| NGI 岩質指數 Q | ≥ 10 | 4~10 | 1~4 | 1~0.1 | 1~0.1 | ≤ 0.1 |
| 對應之 CSIR/RMR 值 | ≥ 65 | 64~57 | 56~44 | 43~23 | 43~23 | ≤ 22 |
| 附註：本工程採用 NGI 或 CSIR 岩體分類法選擇隧道支撐型式 | | | | | | |



圖四 新武界隧道標準斷面開挖與支撐設計圖

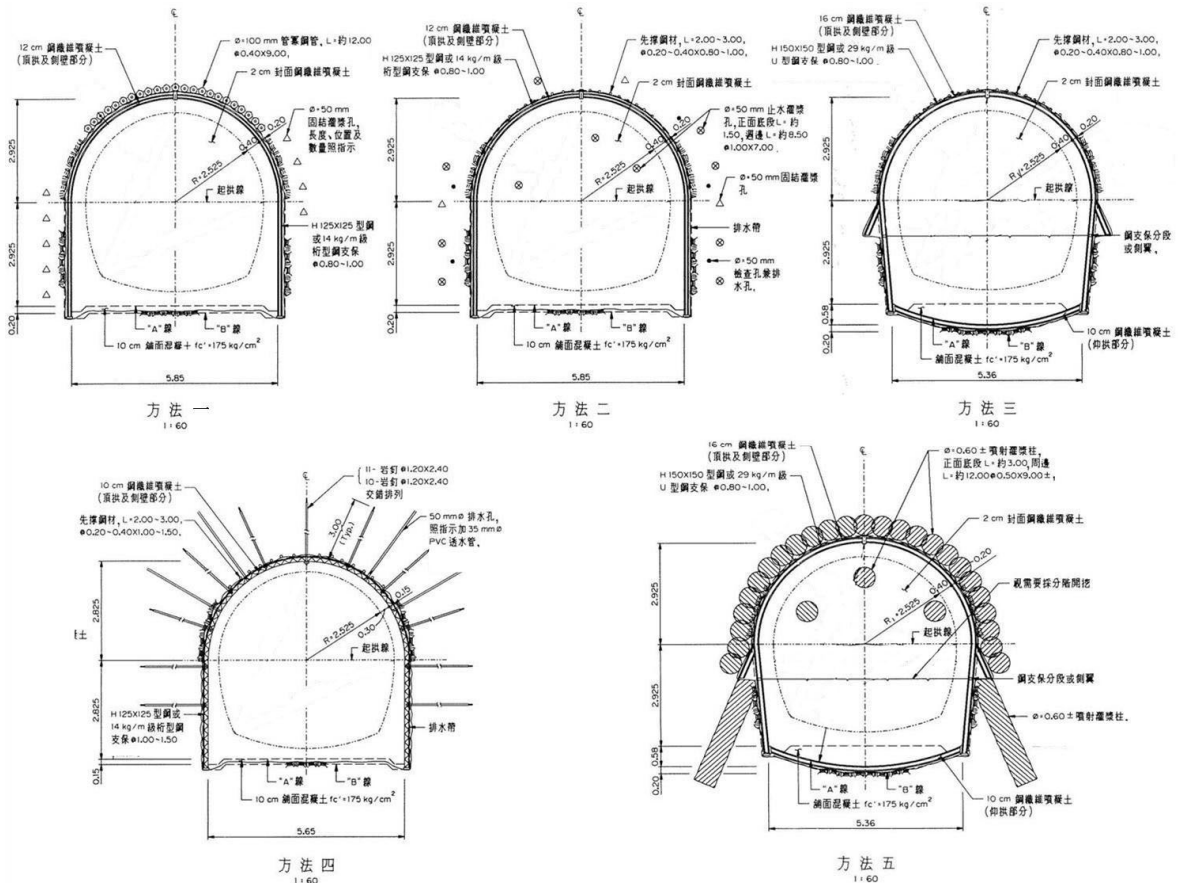
3.2 特殊困難地質開挖支撐設計

隧道開挖如遇下列任何一種情況，經確證依圖示標準斷面開挖各種支撐無法

有效開挖支撐並經業主會勘認定為特殊困難後，應採取特殊方法謹慎處理之。

1. 通過破碎、無粘性或具有異常壓力之擠壓性物質，致採用設計圖示各型岩級分類支撐無法生效者。
2. 隧道開挖工作面須施行地盤改良或在工作面外另挖導坑方能進行工作者。
3. 工作面滲出之流量大於每秒100公升，且其壓力使工作無法正常進行者。
4. 隧道內散發瓦斯或有害之天然氣體，其濃度經測定足以嚴重危害工作人員之健康或施工安全，經採取疏導等措施及加強其通風設備仍無法改善者。

針對上述特殊困難段經認定為「特殊困難」後，除承商應即提出施工計畫外，於設計階段亦建議五種組合施工方法，如圖五所示，承商可依所遭遇特殊地質特性，選擇適當處理方法相互搭配組合。惟若經業主認可，承商得另提包括諸如開挖處理導坑或迂迴隧道，或擴挖斷面等特殊處理方法之施工計畫書（含圖）送請認可。圖五設計重點除加強主要支撐材料外，另增加數項輔助工法，例如管幕鋼管、先撐鋼材、止水灌漿、固結灌漿、檢查孔兼排水孔、封面鋼纖維噴凝土、分階開挖或保留土心、鋼支保增加側翼及噴射灌漿柱等。最後承商須依認可方式及指示謹慎處理及開挖支撐。



圖五 新武界隧道特殊困難段開挖與支撐設計圖

四、湧水抽坍災損

地利斷層開挖湧水災害發生在新武界引水隧道最下游段之木屐欄至日月潭間隧道 (Sta. 10^k+820~13^k+955)，該隧道自西元1999年1月開工，係採鑽炸工法施作，分上、下游兩工作面對向開挖。

4.1 第一次抽坍

2001年1月下游側隧道前進至Sta. 13K+069，岩盤已趨高度風化破碎且自持力甚差，改以破碎機即可開挖，並以標準斷面Type V進行開挖及支撐，惟當開挖前進至Sta. 13K+064至13K+063時，開挖面及頂拱部位發生小規模岩楔坍落，壓毀原已施作之先撐鋼棒，如照片一，遂於開挖面進行噴凝土封面保護，逐輪保護並謹慎開挖。但持續至Sta. 13K+061時開始發生大規模抽坍，坍落之土石極為破碎且無黏性，如照片二所示，形成一寬約4公尺，長約12公尺、高約2公尺之空洞，惟此時湧水量不大，經研判本段隧道已進入地利斷層之伴生擾動範圍。



照片一 小規模岩楔坍落



照片二 第一次抽坍

4.2 第二次湧水抽坍

復於4月前進至Sta. 12K+973時，地質似乎有轉好趨勢，恢復標準斷面Type V開挖及支撐，惟4月前進至Sta. 12K+956時，開挖面再度發生嚴重抽坍，如照片三所示，並伴隨大量湧水，經量測此時湧水量達到每秒約110公升，如照片四所示，經研判本段已進入地利斷層。直至8月前進至Sta. 12K+925始恢復標準斷面開挖及支撐。

五、抽坍處理

本工程於規劃階段地質鑽探時，即已發現本段隧道之地下水豐沛，並探查有地利斷層之存在，因此於設計階段即將可能遭遇之地質情況列有完整之支撐處理設計圖如前述，以因應實際施工之需；其後再依據現場狀況彈性適用之工法作立即處理，如加強支撐、管幕工法、近灌遠排等，以維隧道安全順利。



照片三 第二次抽坍



照片四 地利斷層湧水

5.1 先期穩定措施

先將開挖面以碴料（由棄碴場載運）回填，如照片五所示，以穩定開挖面及附近已完成之區段，回填之長度（仰拱）視抽坍程度約8~12公尺，並於回填過程中以鏟裝機滾壓夯實。回填完成後使用5~10公分之噴凝土將回填面加以封面封堵，並視現場情況採一次或多次重複施噴之方式封面，以確保回填面穩定。

5.2 支撐保護

於距開挖面5~8公尺，即回填面前方施作9~21支 ϕ 100mm，每支12公尺之管幕鋼管（Pipe roofing），視地質情況每6~9公尺施作一輪，如照片六所示。視開挖面情形，以先撐鋼棒或先撐鋼管配合，做為第二層（內層）之支撐保護，並在每支管幕鋼管之管口設置止水閘門。

5.3 近端灌漿

施作管幕鋼管水泥漿灌漿，灌漿時除施灌孔外，將其餘孔位之管口閘門打開，視有無濃漿漏出後，再將該孔位之閘門關閉。施灌之漿液以水泥漿為主，水灰比為1~0.6，終灌壓力為 10kgf/cm^2 ，視湧水情形，配合施灌懸濁型化學漿（LW漿）。其配比為水泥漿水灰比1:1（重量比），水玻璃與水配比1:1（體積比），水泥漿液:水玻璃溶液=1:1（體積比），如照片七、八所示；同時視情況施作固結灌漿固結鬆軟之地質，以輔助管幕鋼管灌漿之不足。簡言之，灌漿材料配比、壓力變化及施灌過程控管對隧道周圍斷層之固結、止水成效具關鍵因素。

5.4 遠端排水

於距開挖面8~10公尺左右側壁，起拱線以上附近施鑽 $50\text{mm}\phi$ ~ $100\text{mm}\phi$ 之排水孔，其方向為向隧道軸線外側 30° 向上方 15° ~ 20° 輻射，長度約30~50公尺，以排除開挖面上方外緣周遭之地下水，如照片九所示，本項工作視湧水情形，可提前於管幕鋼管鑽孔前進行。

5.5 分階開挖

採分階開挖（原則上採上下二階）分階保護原則，以破碎機小心開挖，保留土心以穩定開挖面，如照片十所示，再予以噴凝土施噴厚度15公分，採雙層鋼線網，鋼支保架設間距50~100公分，上半部開挖12公尺後，改施作下半部開挖，先單側開挖並完成鋼支保銜接及噴凝土保護後，再換側進行，以50~100公分輪距逐步前進。經統計新武界隧道（Sta. 13K+061~12K+925）遭遇地利斷層及伴生斷層長度為136公尺。



照片五 礫料回填穩定開挖面



照片六 管幕鋼管施工



照片七 開挖面灌漿中



照片八 管幕及灌漿完成



照片九 深排水孔遠端排水



照片十 保留土心架設鋼支保

六、履約爭議

6.1 投標及契約說明

本工程招標時已提供本工程「調查及岩石力學評估報告」供投標承商閱覽，該報告指出隧道應於Sta. 13K+050附近穿越地利斷層，推估其影響範圍約100公尺。同時依據可行性階段地質調查，隧道可能於Sta. 13K+280附近穿越該伴生斷層，推估斷層性質與地利斷層性質相同，影響範圍約40至60公尺。隧道開挖應考慮遭遇軟弱地層時之擠壓與變形。此外，依隧道工程以往之施工經驗顯示，再阻水斷層後方及岩覆較低之隧道洞口段，均可能遭遇大量之湧水，並加強施工期間之隧道襯砌與排水，同時隧道開挖亦應隨時慎防湧水造成之施工災害。故以業主立場而言，已善盡告知承商有地利斷層存在之地質風險。

本工程承攬契約內亦列有「特殊困難」規定，一經會同業主認定，承商即可依核定施工計畫書內容施作，各項工作數量均可按實做數量計價。至於「排水」規定，其設計量水量依各隧道上下游所需開挖長度以每公里隧道0.1秒立方公尺為準，本項排水其有關費用除沉澱池部分已列入工業安全衛生及環境保護之計價外，已包括在契約之開挖單價內，不另計價。

6.2 承商提出履約爭議

承商於2002年10月提出履約爭議調解，所持意見摘要如下：

1. 施作木屨欄至日月潭段工程時，於13k+061處遭遇地利斷層，岩盤破碎，地質極不穩定，且無預期遭遇巨量湧水，致施作本段工程時極為困難費時。
2. 本工程於13k+061至12k+925之間實際施工所遭遇之地質情況除異常困難外，亦與契約所述之地質情況有顯著差異，且為一般有經驗之承包商所不能事先預料，致本巨量湧水段施作期間，施工成本大幅增加。
3. 地利斷層實際長度約136公尺，與合約地質資料所述斷層寬度100公尺，有相當之差異，差異比率達36%，為一般有經驗之承包商無法事先可以預料。
4. 地利斷層之開挖工作條件與內容與非巨量湧水段顯然不同，應構成合約新增項目，由雙方協議補充單價，而不得仍按合約「隧道開挖」單價計價。

6.3 調解結案

經歷四次專家及技術委員調解會議，及雙方三次協商會議，終至2003年10月完成履約爭議調解結案如下：

1. 地利斷層遭遇大量湧水，超過100公升/秒，係事實。故在大量湧水狀況下施工，須加設抽水機及增加用電，此成本增加並未在「隧道開挖」工項或其他給付項目予以給付，難謂公平合理。

2. 最後雙方僅就施工材料、額外電費同意應依實際施工成本，由業主給付。
3. 其他有關增加人工成本、機具設備增設費用、設備分攤等項目，雙方差異仍大，但礙於招標條件已告知且契約明訂，無法再合意調處。

七、檢討與建議

7.1 檢討

7.1.1 斷層處理困難費時

地利斷層及其東側伴生斷層全長1356公尺，處理過程中最困難為大量湧水，鬆軟之岩層伴隨大量湧水，除造成隧道連續抽坍形成大的空洞外，並增加灌漿、噴凝土施工上的困難，尤其灌漿工作極為耗時，造成處理時程的延長。整個處理過程中曾發生前述2次抽坍，另亦有2次小抽坍，幸賴工程人員採用先撐後挖、近灌遠排、分階開挖等處理原則謹慎施作，終能克服困難，安全通過，總計處理時程共耗時7個月（平均19m/月）。

7.1.2 灌漿工法與材料

為加速固結破碎地質，本次地利斷層處理過程中，曾嘗試採用注膠工法，唯由於地下水豐沛，造成固結效果不佳，最後不得不放棄，推究其原因乃注膠發泡時程難以掌握所致，發泡時間短使得漿液無法深入岩盤，且極易造成塞管；發泡時長則漿液易被大量湧水帶出，形成材料及時間之浪費。

7.1.3 鑽灌設備與技術

本項因素為斷層處理快慢之關鍵，鑽機與灌漿機設備容量是否足夠，零件備品是否充足，是否具備維修能力及操作鑽灌設備之技術都影響進度至鉅；承商為節省人力成本，往往僅向灌漿專業廠商購買材料及租借機具，現場實際操作人員對灌漿作業毫無經驗，缺乏漿液配比調配、灌漿壓力控制與堵漏等實務技術，承商現場主辦工程師亦無法有效靈活指導灌漿施作，後經要求承商檢討改善後，復要求灌漿專業廠商派員全程駐場施作，始順利通過地利斷層，為本次斷層處理受延宕之主要原因。

7.1.4 爭議調處冗長

履約爭議案之資料蒐集、整理及意見書之撰寫等均頗費人力及時間，涉及民法部分，甚至須委聘律師辦理，且須出席調處會議或須辦理會前協商會議等，故履約爭議案除所需花費之行政及人力費外，備妥資料、多次會議等期間冗長。同時爭議期間可能衍生之摩擦，因而影響雙方工作團隊和諧。

7.2 建議

7.2.1 確實掌握地質特性

台灣因位處板塊衝撞帶，地質複雜多變，多斷層、褶皺等地質構造，且大都伴隨地下水，故隧道施工困難度頗高。隧道設計前之地質探查須精細，以確實掌握破碎帶組成、範圍及地下水狀況，擬訂地質風險之預防措施；施工中必要水平探查亦不可少，更可立即排水及因應處理，才可使開挖安全順利。

7.2.2 設計彈性工法

除事先地質的掌握與地下水多寡是影響開挖順利與否之關鍵外，配合地質特性妥適之設計，以及訂具彈性之施工方法，否則須採用不同於原約工法，以克服現地困難時，再辦理相關工務手續，勢必影響工程進展及隧道安全。

7.2.3 慎選機具材料

工欲善其事，必先利其器，故合用的施工機具及合宜的材料，亦是施工有效之必要條件。因此管幕鑽機性能、坍孔處理，不但是可供順利埋設鋼管達到支撐功能，且是後續灌漿成效之利器。而因應破碎湧水漿材選用，亦是開挖安全的保障。

7.2.4 擬訂公平合理契約

本工程契約已依過去經驗擬訂頗具彈性，然本次履約爭議重點不在工法選用或執行，而是承商對部分工項單價有不同意見，如特殊困難處理部分之隧道開挖、排水等，因施工困難度高，相關費用相對提高，認為不應與一般隧道開挖計價相同。故為符合實際及公平合理，實有必要另設「特殊困難處理開挖、排水等」單價，以避免衍生履約爭議。

八、參考文獻

1. 王文能、余焯雲 (1981)，「台灣中部埔里地區地質」，礦業技術，第十九卷，第12期。
2. 台灣地質圖幅說明書(1986)，經濟部中央地質調查所。
3. 台灣電力公司(1994)，「新武界隧道及栗栖引水工程計畫可行性研究報告」。
4. 台灣電力公司(2000)，「新武界隧道及栗栖溪引水工程地質調查及岩石力學試驗評估報告」。
5. 台灣電力公司、中華民國隧道協會(2002)，「新武界及栗栖溪引水隧道工程規劃及設計探討，新武界引水隧道工程TBM及D&B開挖工法研討會及現地研討」。