

新武界引水隧道工程

李慶龍¹ 蔡仁俊² 黃偉光³

臺灣電力公司萬松施工處 處長² 副處長³ 技術經理

選錄自“濁水溪流域水庫建設之回顧與展望研討會文稿及多媒體簡報”，2011年5月

摘要

日月潭水庫具有發電、供水、灌溉及觀光等多項功能，惟其是離槽水庫，係仰賴濁水溪上游舊武界引水隧道越域引水而來，考量該隧道使用已逾 60 年，局部劣化磨損，亟須再建新隧道，以茲因應。為此臺灣電力公司於 2006 年興建完成一條新武界引水隧道，以維正常穩定供水，進而達到水資源多元化永續利用，完工後每年可增加 7,600 萬度（呎時）發電量。本文簡要說明該工程之興建與施工，藉供爾後水利建設及水力發電工程參考。

前言

台灣地區河川坡陡流急，水資源不易蓄存利用，且降雨豐枯差異明顯，集水區涵蓄水資源能力降低，水資源運用須經由蓄水設施（例如水庫、壩、堰、圳、調整池等）調節供應，水庫的興建可掌握豐水期可用水源，汛期防洪與調節排洪，並於可以供水情況下儘量蓄存水源，待枯水期之用，如此才

能達到穩定供水之目標。在水庫排放水源供應下游需求時，如能有效利用地形落差，建設水力電廠提供發電功能，同時亦能成為當地觀光景點，因此，水庫及電廠建設完成後，將兼具供水、灌溉、發電及觀光等多項功能，達到水資源永續經營及多元化目標利用。

濁水溪水力發電系統

濁水溪全長約 187 km，是台灣最長的河川，流域面積達 3,157 km²，加上中部地區降雨量充沛，濁水溪流域係台灣水力發電蘊藏最豐富之河流。基於此台電公司早自 1934 年起已興建日月潭水庫、武界壩及大觀一廠等水力發電設施，至目前濁水溪水力發電之電廠裝置容量總計約 280 萬 kW，佔全國水力發電裝置容量 430 萬 kW 之 65%，由此可見濁水溪發電系統之重要性；其中又以日月潭水庫為主要調控濁水溪水力發電系統之核心，如圖 1 所示。

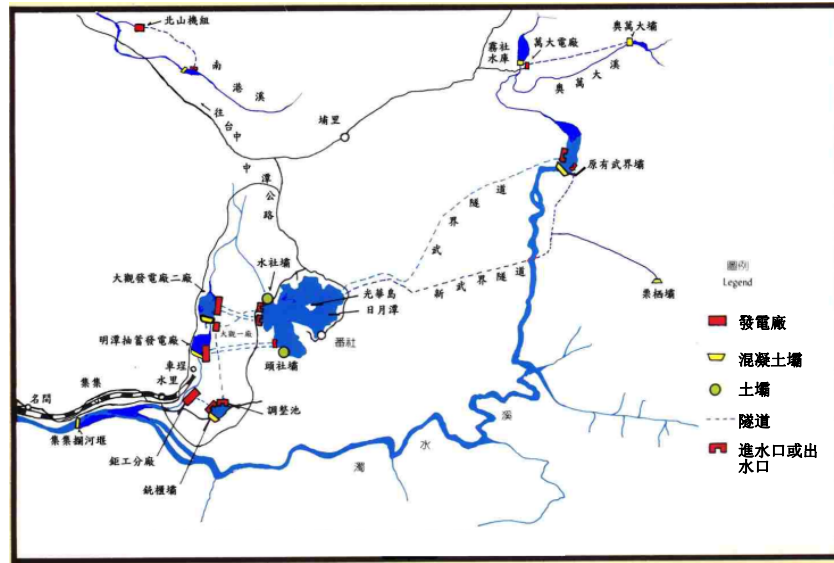


圖 1 濁水河流域水力電廠分佈圖

新武界引水隧道工程

如前所言，日月潭之水具有供應其下游抽蓄與傳統水力發電廠發電，以及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 1934 年完工之舊武界隧道引取濁水溪上游溪水。而該隧道完工迄新建（1988 年）已逾 60 年，其襯砌混凝土已嚴重龜裂磨損，為確保水源，經負責該隧道管理維護之台灣電力公司評估後，決定增建一條新武界引水隧道，同時將濁水溪上游支流栗栖溪之溪水一併越域引入日月潭統合運用，增加效益。預計完工後日月潭之年平均引水量可由原來 7 億 6,000 萬 m^3 增加為 8 億 3,000 萬 m^3 ，每年亦可增加 7,600 萬度發電量，不但每年可增加約 1.6 億元效益，且可減少 50,000 噸 CO_2 排放量。

上述日月潭引水隧道興建工程名為「新武界隧道及栗栖溪引水工程」（以下簡稱「新

武界引水隧道工程」），係自武界壩起新建引水隧道至下游之日月潭，上游隧道內匯入新建栗栖溪引水隧道（含栗栖壩），將武界壩上游濁水溪及其支流栗栖溪溪水越域引入日月潭，本工程之隧道總長約 16.5km，工程佈置平面圖如圖 2 所示。

工程設施

本文介紹重點為眾多讀者關注的新武界隧道 TBM 施工部份，即濁水溪過河段至木屐欄暗渠段間約 7.8 km 長之大部分隧道段約 6.5km。因地質均勻且長度斷面適中，採 TBM 開挖施工，亦有縮短工期及符合環保功效。而其上游段地質差及下游之 TBM 起動段仍採鑽炸法施工。復因 TBM 開挖面平順未超挖，且無橫坑之長隧道，需採「望遠鏡式伸縮鋼模」（Telescopic Form）作隧道襯砌混凝土施工，以控制品質及縮短工期。

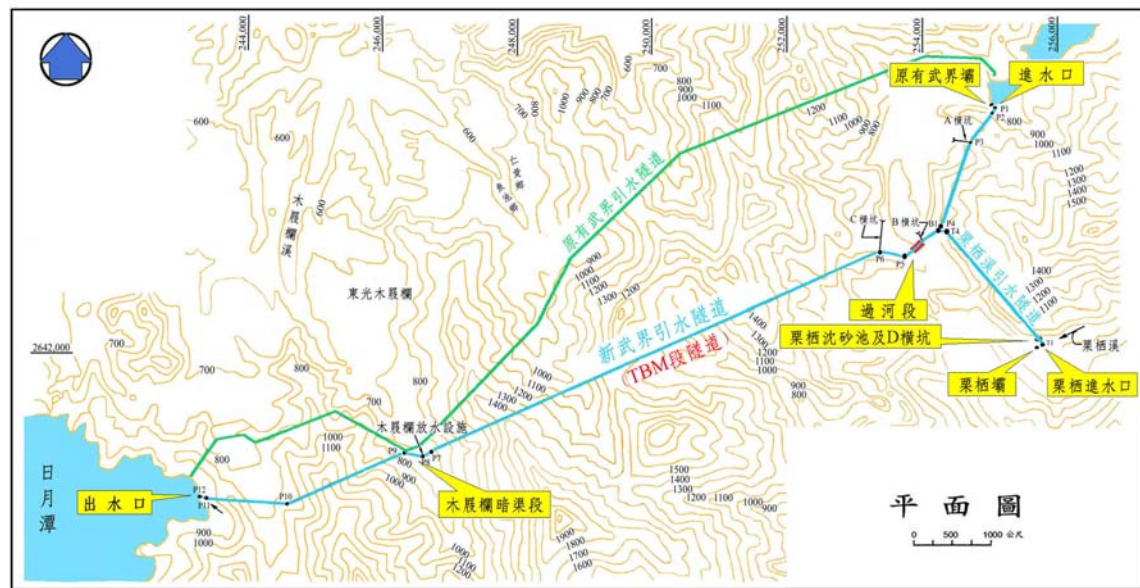


圖2 新武界引水隧道工程佈置平面圖

1. 工程地質

工程範圍內出露之岩層屬始新世至中新世，自東（上游）而西（下游）依序為廬山層（以板岩為主）、眉溪砂岩（以石英質砂岩為主，夾板岩）、佳陽層（以板岩為主）、達見砂岩（以石英質砂岩為主，夾板岩或硬頁岩）、十八重溪層（以板岩為主，夾變質砂岩）及白冷層（以砂岩為主），平面地質圖如圖 3 所示。其中，依地質文獻及現場地質探查資料推估，新武界引水隧道下游段及栗栖溪引水隧道將分別遭遇地利斷層及梨山構造，隧道開挖需謹慎施工。

2. 規劃設計

(1) 新武界進水口

位於武界壩左岸，為一鋼筋混凝土喇叭口鐘型結構物，設計取水量為 41.6 m³/s。進水口正面設置閘墩三道，將喇

叭口分成四個進水道，各佈置有擋水閘板及攔污柵，俾利開門維修及攔阻漂流木、垃圾。

(2) 新武界引水隧道

新武界引水隧道主要為重力式引水隧道，總長為 13.9km。其中新武界隧道中游段 Sta.2^K+547 至 10^K+354 之間，全長約 7.8km，除地質較均質且無明顯剪裂帶、斷層帶或大破碎帶等地質構造通過外，長度及斷面亦符合經濟性，故採全斷面鑽掘機（Tunnel Boring Machine，簡稱「TBM」）開挖。隧道鑽炸（D&B）工法與全斷面鑽掘機工法比較如下表 1。

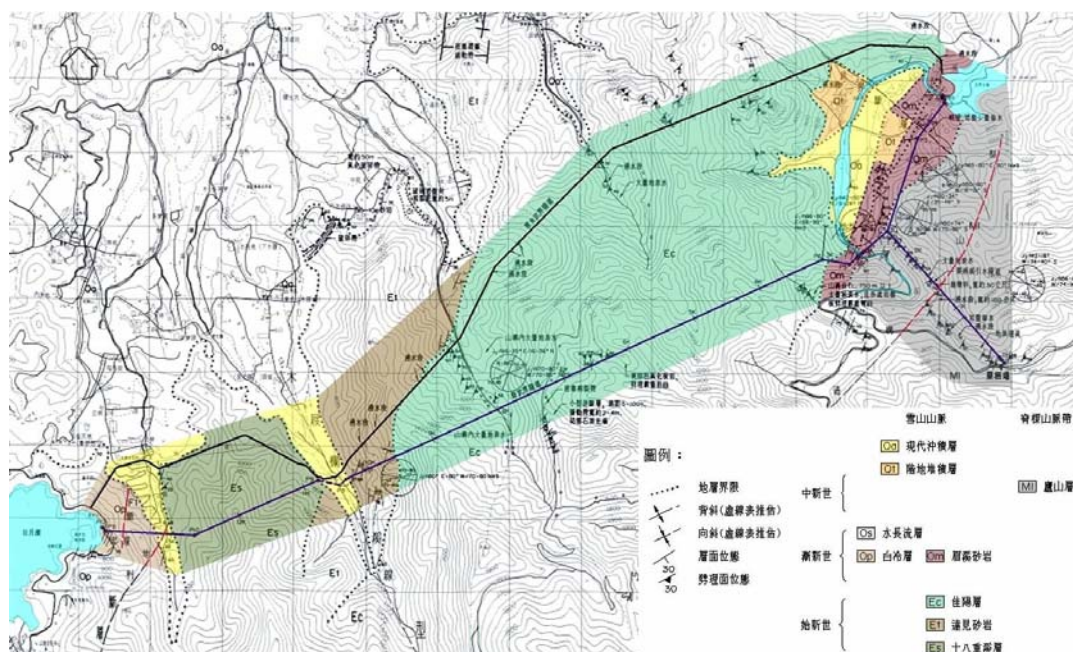


圖 3 新武界引水隧道工程平面地質圖

表 1 D&B 工法與 TBM 工法綜合比較表

項目	方案		D&B 工法	TBM 工法+D&B 工法	TBM 工法
			二段伸縮鋼模襯砌	伸縮鋼模襯砌	預鑄環片襯砌
1. 隧道長度			8,862m	7,807m (TBM-6,302m/月) (D&B-1,505m/月)	
2. 橫坑長度			2,053m (3 處)	470m(1 處)	
3. 開挖速率			60M/月	TBM-240m/月 D&B-60m/月	200m/月
4. 襯砌速率			230M/月	TBM-450m/月 D&B-230m/月	
5. 預估工期			50.5	46.5 月	49 月
6. 直接工程費			新台幣 29.21 億元	新台幣 26.74 億元	新台幣 28.28 億元
7. 工地取得			3 條施工道路 4 個隧道洞口 4 個棄渣場	2 條施工道路 2 個隧道洞口 2 個棄渣場	1 條施工道路 1 個隧道洞口 1 個棄渣場
8. 施工環境			較差(廢氣、振動)	較優(噪音)	較優(噪音)
9. 工安事件			發生機會較高	發生機會較低	發生機會較低
10. 居民抗爭			機會較多	機會較小	機會較小

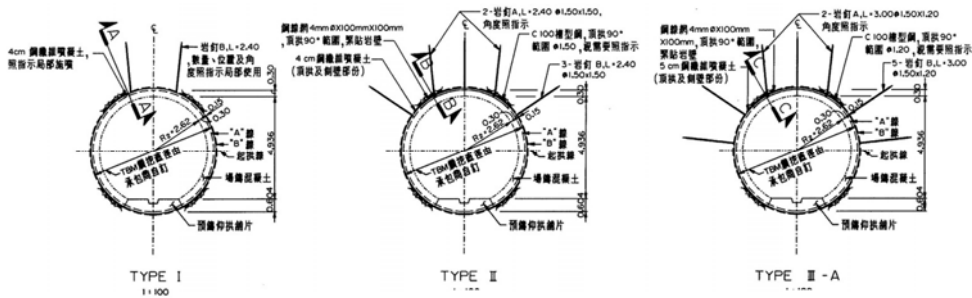


圖4 TBM段隧道開挖支撐設計圖 (例)

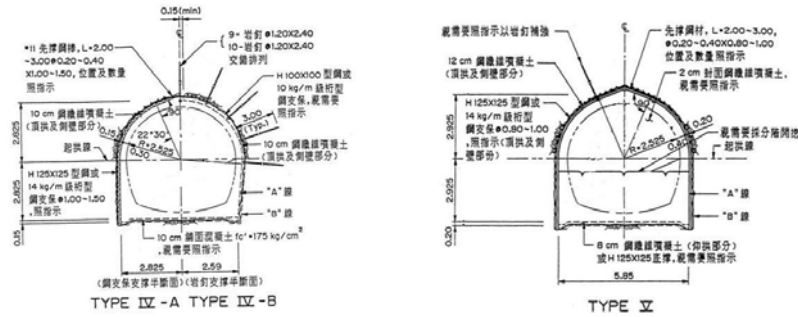


圖5 鑽炸段(內徑 5.05m)隧道標準斷面開挖與支撐設計圖 (例)

因而在地形上，TBM 工法可克服若採鑽炸工法開挖隧道，需新闢施工道路及橫坑均長及需較長工期問題，亦大幅降低對環境之衝擊。TBM 開挖段為圓型斷面，圍岩應力均勻，地質本就均質且擾動甚少，故開挖支撐採輕型設計（如圖 4）；而上、下游鑽炸段分別為內徑 4.7、5.05 m 之馬蹄型隧道(如圖 5)，斷面不同處再以漸變段相銜接。

(3) 日月潭出水口

位於舊武界引水隧道出水口東方約 300m，臨日月潭環湖公路之潭側坡面，並以洩槽方式將水引入日月潭，設置消能塊交錯排列以利用消能。同時邊坡並予以植

生綠化，以融入周邊景觀。

3. 施工

新武界引水隧道工程土木標以新武界引水隧道 3K+089 為界，分二標施工，上游（含栗栖溪引水工程部分）為 I-A 標土木工程由太平洋建設公司承攬，下游為 I-B 標土木工程則由新亞建設及日商熊谷組聯合承攬，II 標水工機械工程由一鼎工程公司負責。自 1999 年 1 月開工，2006 年 3 月完工通水，施工期間更遭遇 921 集集大地震，不僅施工道路中斷，更提高施工困難度。以下簡要說明施工過程如後：

(1) 新武界進水口

本項工作困難點在於既有水庫區施

作圍堰，以確保進水口施作安全，故考量現有地質、地形、水文以及避免影響武界壩結構安全與排洪安全，於枯水期先將武界水庫放空，採用雙排鋼板樁圍堰施作擋水、導水及祛水工，並配合止水灌漿施作；其次進行進水口結構物混凝土澆置，並於昇層中埋設閘門及擋水閘板門框等預埋件，當完成至進水口平台後始進行門框安裝及以二次混凝土固定之，之後始安裝閘門及擋水閘板等；最後拆除圍堰，同樣亦須將武界水庫放空，以利施作安全，完成情形如照片 1。

(2) 新武界引水隧道

a. 開挖

隧道全長 13.9 km，上、下游馬蹄型隧道係採傳統鑽炸工法施工，惟有中游隧道採 TBM 施工較具挑戰性。承商考量地質尚佳情況下，選用開放型 TBM+場鑄混凝土襯砌方式施作，TBM 機型為美國 Robbins 公司製造之開放型 TBM（直徑 6.2 m），該 TBM 為民國 1994 年製造，曾使用於瑞士及香港之隧道鑽掘，本 TBM 設備經承商於香港改裝後，於 2000 年 4

月運抵工地，5 月開始組裝，如照片 2，6 月下旬推進至開挖位置，並於 7 月進行初期開挖，9 月初開始全功能鑽掘開挖，TBM 開挖後情形如照片 3 所示。施工期間雖曾遭遇桃芝颱風之暴雨肆虐成災等多項挑戰，然於採取適當應變、措施及處理得宜下，TBM 仍順利鑽掘施工，終於在 2002 年 6 月 7 日順利貫通，成為台灣隧道採用 TBM 工法施工首次成功貫通實例，如照片 4 所示，為台灣隧道施工技術立下一新里程碑。

經統計 TBM 施工 20.7 個月的進度（不含 2001 年 8、9 月），平均月進度為 315 m，平均日進度 10.5 m，並在 2000 年 11 月份創下最大月進度 659.3 m，2001 年 1 月 8 日最大日進度是 44.3 m，以及最大鑽掘長度（6,523 m）皆是台灣當時以 TBM 鑽掘之最佳紀錄。TBM 開挖進度圖如圖 6 所示。

b. 混凝土襯砌

為確保混凝土品質及提高施工效率，以達縮短工期，進而節省成本，隧道



照片 1 新武界進水口完成



照片 2 TBM 組裝



照片 3 TBM 開挖完成



照片 4 隧道貫通後工作人員從 TBM 人孔步出

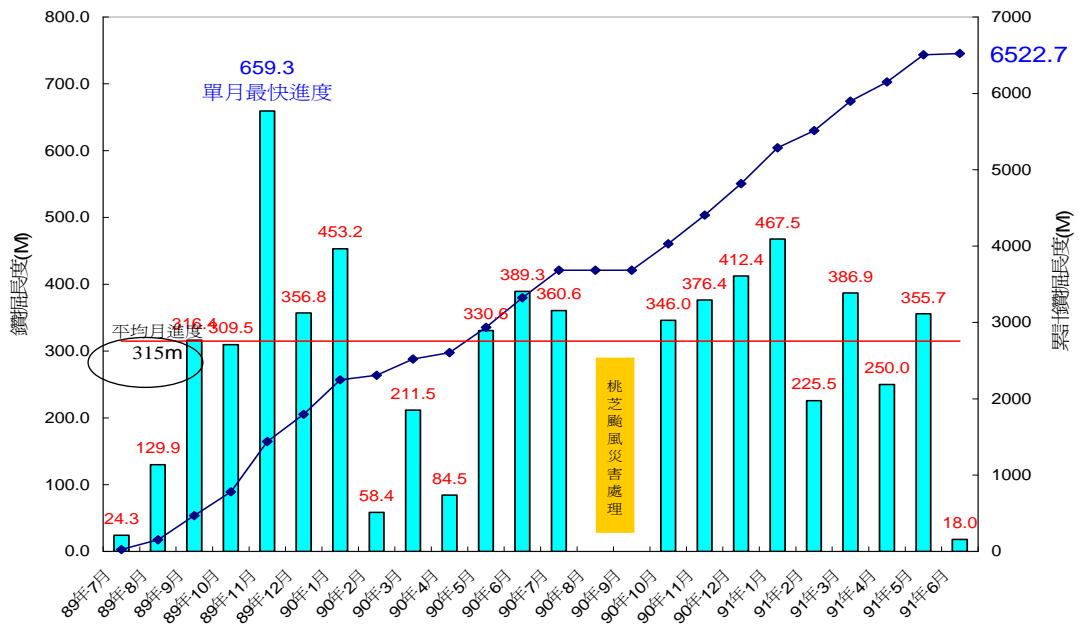


圖 6 TBM 隧道開挖進度圖

襯砌採用望遠鏡式伸縮鋼模工法施工，本套鋼模工法係繼士林水力發電工程頭水隧道後第二個使用之工程，以每一節塊 6 m 長，共 9 個節塊，組成 2 組各長 27m 之鋼模。並於 2002 年 9 月進行隧道第一模襯砌，共澆置 205 模次，於 2004 年 8 月完成，經統計歷經 23 個月餘，平均月進度為

278.4m，其中，總襯砌長度 6,683.4m，最大月進度 475m，係為台灣當時最佳襯砌進度紀錄，襯砌月進度圖如圖 7 所示。

TBM 隧道襯砌

鋼模型式：望遠鏡式伸縮鋼模 (telescopic form)

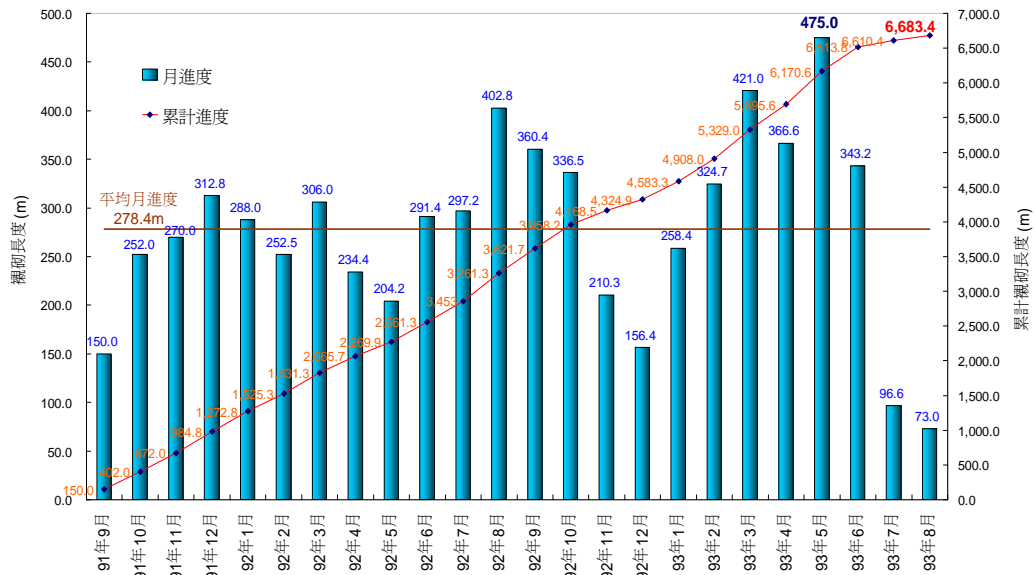


圖 7 TBM 隧道襯砌進度圖

使用原理：以伸縮方式移動鋼模，各單元鋼模利用移模車內之油壓缸將其收縮後，穿越前方未收縮之鋼模，並移至下一循環襯砌位置定位。

鋼模全長 600 m，分成 2 組，每組 30 m。(每組 5 單元，每單元 6 m)

以二組鋼模交替進行隧道混凝土澆置工作，縮短工期。

(3) 日月潭出水口

出水口為本引水隧道之最末端，東側上方為台 21 線，乃環繞日月潭之觀光要道，西側緊鄰日月潭湖濱，為避免影響觀光取消施工便道施作，所有施工機具及材料運輸均需由隧道進出，是為施工上較不方便之處。同時考量開挖邊坡因靠近日月潭環湖公路，為避免開挖期間造成交通安全顧慮，因此於公路上設置 9 處沉陷觀測點及 2 組測傾儀導管等監測系統，以監控施工期間對公路之影響。施工順序上先進

行邊坡開挖及保護工施作，其次進行出水口圍堰施工，圍堰係採填築土堤加高壓噴射樁方式，以達擋水及祛水之功效，接續施作出水口及其洩槽與護坦混凝土等結構物，最後始進行植生綠化工作，完成照片如照片 5。

4. 工程執行檢討

新武界引水隧道採用 TBM 快速鑽掘，於 2002 年 6 月順利貫通，成為台灣隧道採用 TBM 工法施工首次成功貫通實例。



照片 5 日月潭出水口完成遠眺

而隧道襯砌則採用望遠鏡式伸縮鋼模隧道襯砌施工，最大進度達 475 m，為台灣當時最佳襯砌進度紀錄。

結語

台灣 99%以上能源當時需仰賴進口，石油、煤、天然氣等均有耗盡的一天，核能發電雖是最便宜，但核能安全及核廢料之處理，社會大眾疑慮仍未完全克服。惟有再生能源生生不息，且無碳潔淨，是現階段最符合安全之綠色能源，其中又以水力發電效益最佳，是為最物美價廉之自產能源，故應有效維持與開發；且完工後之設施均成為當地觀光景點，帶動地方發展，一舉數得。因此在台灣地狹人稠及先天不佳之地形條件下，如能妥善運用水源，興建必要水利設施，不僅可兼顧水源調配，亦能作為水力發電，進而達到供水、灌溉及發電等多項功能，尤其對日形重要之觀光具有形、無形重大效益。

濁水河流域水資源豐沛及發電運藏量，不僅居全台之冠，也是中部地區居住生活所不能或缺之水源，其中日月潭水庫更有如人類之心臟般重要，加上周遭上下游之電廠同時也是台電公司水力發電之重鎮，上游之霧社水庫水源之貢獻亦不能忽視。台電公司陸續興建新武界引水隧道及萬松水力發電工程，就是要充份利用水資源，發揮永續再生自產能源最大功能與效益。

惟霧社水庫與日月潭水庫現況與台灣地區其他水庫在經營多年後所面臨之問題一樣，淤積明顯，相對庫容減少，水庫截豐濟枯能力降低，抗旱能力不足，且影響觀光

功能，如何改善淤積現象已成為台灣目前最迫切之課題。

參考文獻

- 1.李慶龍、黃偉光，民國 99 年 12 月，萬松水力發電工程進水口及濁水溪段隧道施工探討，地工技術雜誌，第 99 期，第 73~82 頁。
- 2.李慶龍、黃偉光、賴郁仁，民國 98 年 11 月 23~24 日，「日月潭水資源發電永續利用」，第十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會，第 99~105 頁。
- 3.Lee,Home-Joe、Lee, Ching-Lung、Huang, Hsien-Neng、Huang, Wei-Kuang，民國 94 年 11 月，A Study on Tunnel Construction Technology Using TBM for New Wuchieh Project，Internation Symposium on Design, Construction and Operation of Long Tunnels，Vol.1，第 315~328 頁。
- 4.李明雄、李鴻洲、李慶龍、鄭建和、黃偉光、劉欽正，民國 93 年 3 月，新武界隧道工程 TBM 施工技術探討，地工技術雜誌，第 99 期，第 51~62 頁。
- 5.蔡英久、李明雄、李慶龍、黃偉光，民國 92 年 10 月，TBM 鑽掘隧道自動化開挖工法，台灣營建研究院叢書，營建工程自動化科技發展研討會，第 121~158 頁。
- 6.蔡英久、李明雄、李鴻洲、李慶龍、鄭建和、黃偉光，民國 92 年 8 月，台灣地區隧道用 TBM 開挖首次成功貫通案例，土木水利第三十卷第四期，第 50~52 頁。