

曾文水庫防淤隧道工程 消能池及出水口隧道段設計及施工規劃

朱晃葵／黎明工程顧問股份有限公司工程師

黃世偉／經濟部水利署南區水資源局局長

黃貞凱／黎明工程顧問股份有限公司總經理

摘要

曾文水庫為台灣容量最大之水庫，亦為嘉南地區最主要之水源，自 1974 年營運至今飽受壩前庫床淤積之困擾影響蓄水總量，由於缺乏庫底排砂設施因而規劃新建一防淤隧道於水庫左壩座，利用蓄清排渾之操作來減緩水庫淤積以延長水庫壽命；由於本工程受限於防淤隧道出水口河道並無足夠腹地提供渾水消能，必須將消能設施建置於山體內（底長 90 公尺、淨寬 18 公尺、最大淨高 41.69 公尺）。本文針對曾文水庫防淤隧道消能池及出水口隧道範圍進行案例探討，分規劃設計及施工現況等部份所遭遇之挑戰進行說明，並利用三維數值模型檢核設計需求之穩定性，來確保地下洞室開挖之安全，文中亦針對該區域遭遇之關鍵課題進行說明，其中包含：閘室頂拱兩翼岩盤承载力、隧道分岔區域岩盤處理對策、邊坡淺覆蓋偏壓處理對策等項目。

Abstract

The Tseng-wen Reservoir is the largest reservoir in Taiwan and also the most significant water resource in Chianan plain area. However, its capability keeps decreasing by the increasing of sediment deposition since operating in 1974. Due to the lack of sediment trap facilities, a new sediment bypass tunnel is planned on the left side of the dam base to extend the service life of the reservoir. As being short of the area to allow energy dissipation at the outlet into the

river, an underground energy dissipation facility is to be built in the cavern with 90m long, 18m wide and 41.69m at the highest section. In this study, a 3-D numerical model analysis was used to check the design and stability to ensure the safety of underground excavation. The paper also targeted the encountered critical issues with the region which includes: rock mass bearing capacity at the top of the tunnel arch, the bifurcation region treatment measures of the cavern, and tunneling asymmetry pressure of slope treatment measures, etc.

前言

曾文水庫為台灣容量最大之水庫，亦為嘉南地區最主要之水源，兼具灌溉、給水、發電及防洪功能。水庫集水區面積約 481 平方公里，設計總容量 7.127 億立方公尺。2009 年莫拉克颱風降下超大豪雨，南部地區主要水庫均嚴重受創。曾文水庫增加約 9 千萬立方公尺之淤積量，有效容量驟降為 4.91 億立方公尺，嚴重威脅永久河道放水口及電廠之正常運轉使其面臨嚴厲考驗。由於曾文水庫缺乏庫底排砂設施，於颱風期間僅能開啟高程較高之溢洪道洩洪，造成水庫蓄渾排清導致淤積嚴重惡化，故而規劃新建一防淤排砂隧道於水庫左壩座，適時將入庫之異重流及渾水排放，進行蓄清排渾之操作，以達到減緩水庫淤積，延長水庫壽命之目的，圖 1 為本文計畫之工程平面位置圖，工程於 2012 年完成基本設計，2013 年迄今為細部設計及

施工階段。本文係針對此工程消能池及出水口隧道段部份，釐清該區域地下洞室開挖可能遭遇問題，透過水力、開挖支撐、結構穩定模擬分析進行檢核，並透過施工期間的檢討，來確保工程進行之安全。

曾文防淤隧道消能池及出水口 隧道段工程概述

消能池閘室工程係指：提供水庫防淤操作於出水口範圍進行渾水消能之空間，除需滿足水力功能需求及設計圖之規定外，尚需考量施工性與地質處理，再進行消能池之開挖與支撐作業，圖 2 為消能池及出水口隧道平縱斷面圖。

消能池及出水口段由工程里程 $0k + 862.82 \sim 1k + 073.93$ ，於隧道一般段末端設置投潭消能池，長 168.3 公尺（底板長 90 公尺），淨寬 18.0 公尺，池底高程 EL. 94.0 公尺，堰頂高程 EL. 110.0 公尺，工程與曾文溪銜接處，佈置兩階跌水工，第一階跌水工池底高程 EL. 102.0 公尺，堰頂高程 EL. 108.0 公尺，第二階跌水工池底高程 EL. 98.0 公尺，堰頂高程 EL. 103.5 公尺。另考量隧道結構與邊坡互制之安全，開挖淨寬 30 公尺之隧

道於第一座溢流堰後分為 2 孔寬 12 公尺之隧道出洞，其中可分為 2 區域，設計原則分區說明如後：

(1) $0k + 862.82 \sim 1k + 008.12$ (圖 3)

消能池閘室範圍，該區域頂拱岩覆深度隨里程增加由 107 公尺降至 35 公尺，圖 6 為閘室開挖 $0k + 862.82 \sim 1k + 008.12$ 支撐標準圖，其頂拱覆土深度約為 80 公尺；施工開挖順序由起拱線之上斷面為側導坑兩階段開挖，上斷面完成後進行 3 公尺為一階進行降挖，開挖面底部高程為 EL. 91.0 公尺，頂拱主要支撐系統型式為直徑 36 公厘先撐鋼棒、30 公分厚鋼纖維噴凝土、H200 × H200 型鋼支保及直徑 25 公厘預力岩栓，閘室側壁支撐系統為 60、45 及 30 公噸之預力地錨。

(2) $1k + 008.12 \sim 1k + 073.93$ 洞口區域 (圖 4)

此區域皆為隧道頂拱岩覆深度小於一倍隧道直徑的淺覆蓋區，圖 8 為 $1k + 026.12 \sim 1k + 038.12$ 支撐標準圖，上斷面支撐系統與消能池閘室相同，惟上邊坡淺覆蓋處需在隧道開挖前施作四排 60 公噸預力地錨及邊坡混凝土培厚，而隧道北側頂拱淺覆蓋範圍則進行岩栓對拉穩固以避免隧道淺覆蓋區域抽坍破壞；施工開挖順序

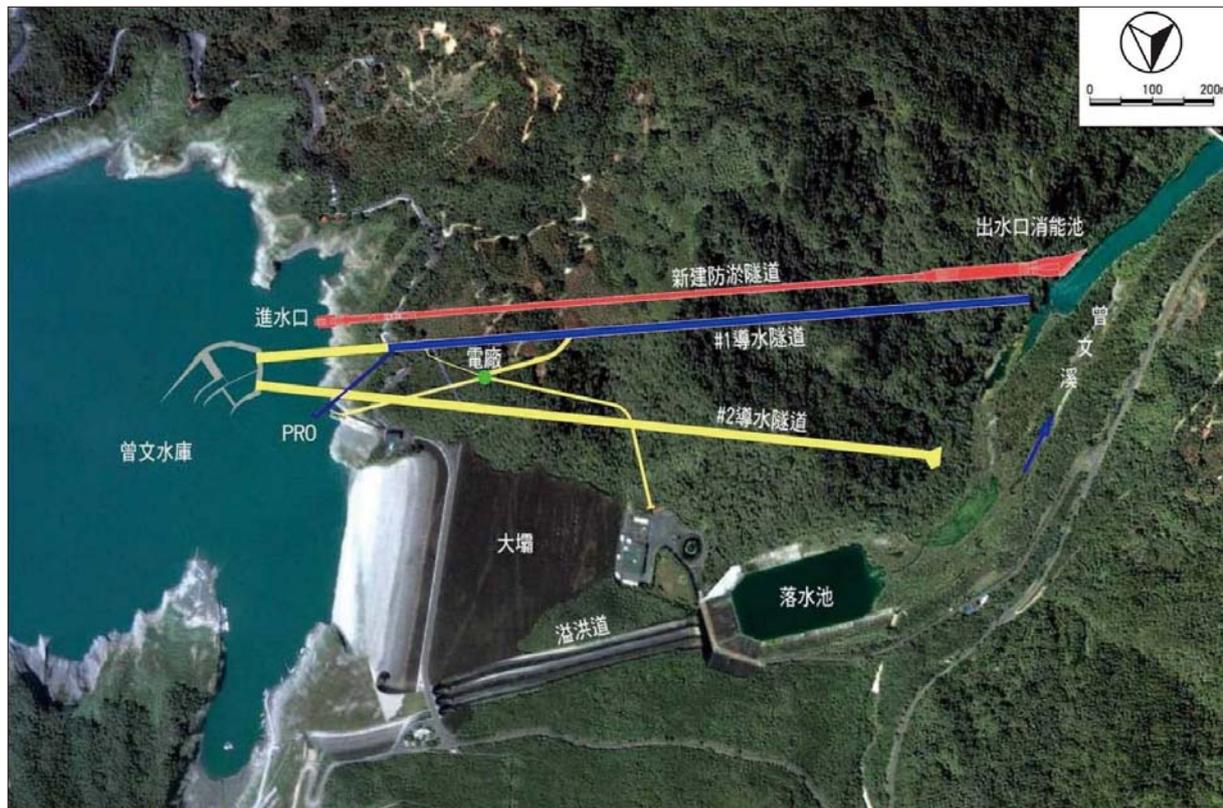


圖 1 計畫工程平面位置圖

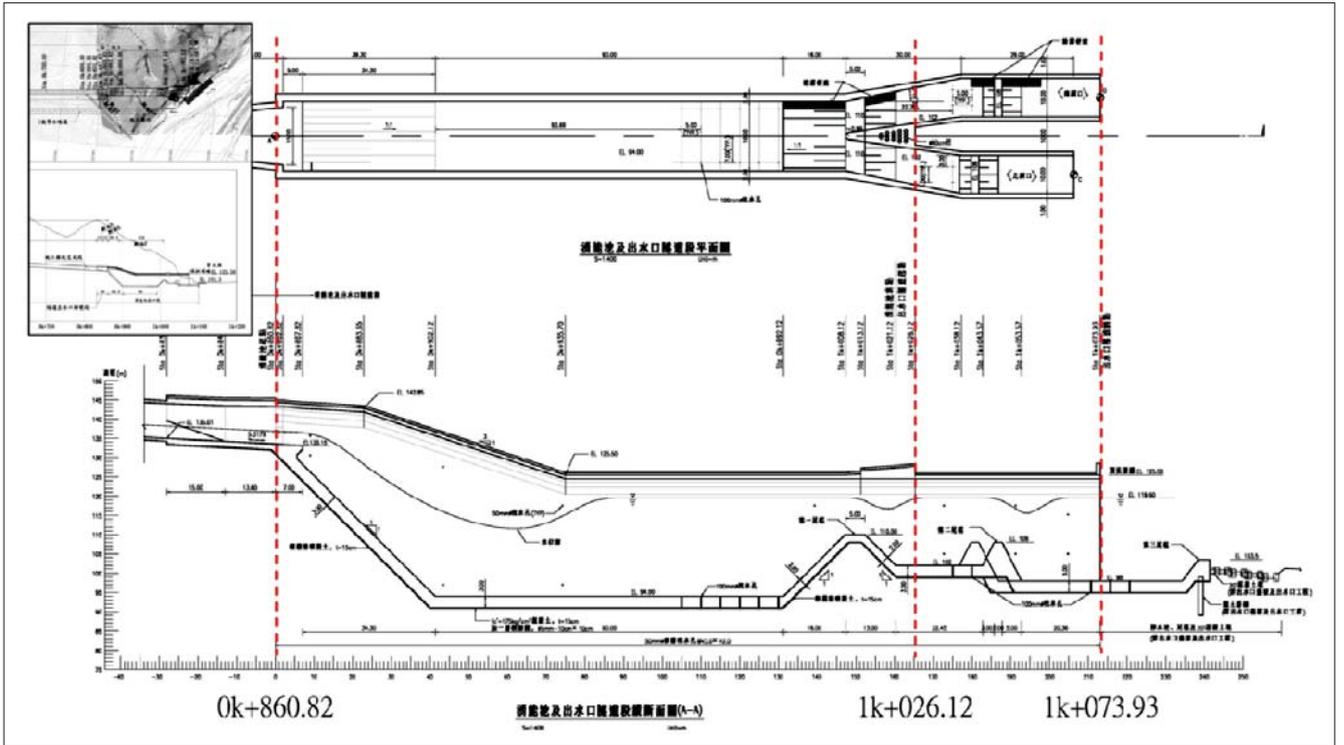


圖 2 消能池及出水口隧道段平縱斷面圖

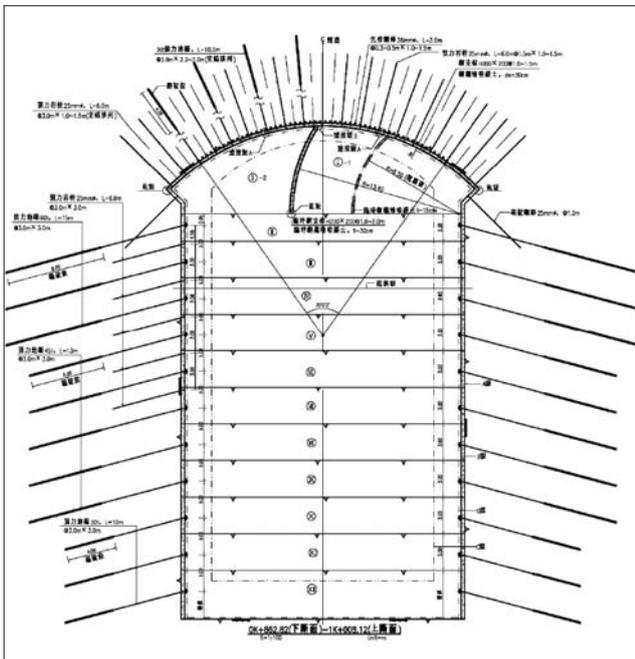


圖 3 消能池室標準斷面圖

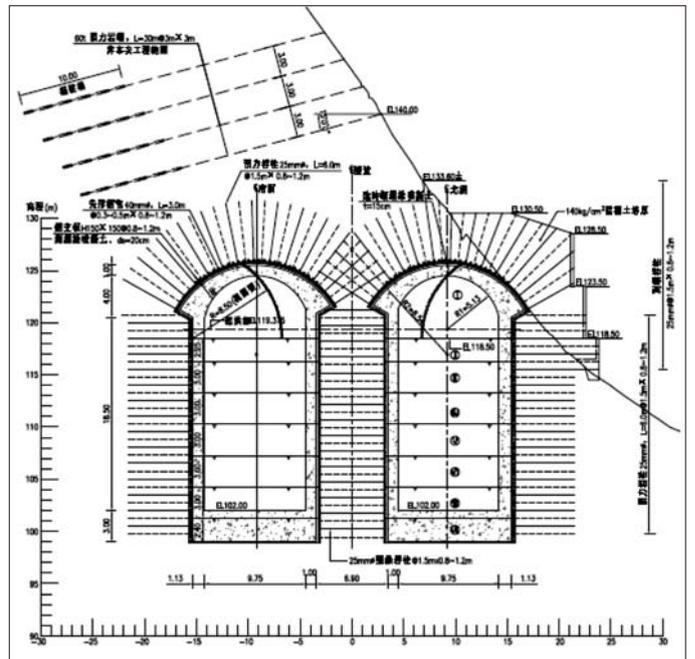


圖 4 水口隧道淺覆蓋段斷面圖

由起拱線之上斷面為側導坑兩階段開挖，爾後進行 3 公尺為一階段進行降挖，於里程 0k + 026.12 斷面由單孔分為雙孔，隧道開挖前同樣進行預力地錨及邊坡混凝土培厚穩固，隧道頂拱主要支撐系統型式為直徑 40 公厘先撐鋼管、20 公分厚鋼纖維噴凝土、H150 × H150 型

鋼支保及直徑 25 公厘預力岩栓，起拱線之下則為南北兩洞以 3 公尺一階輪流降挖，雙孔側壁支撐系統為直徑 25 公厘預力岩栓，北側斷面淺覆蓋處則與坡面進行對拉，此里程開挖面底部高程為 EL. 98.9 公尺。

設計分析考量

水工模型試驗與水理分析成果比較

為與消能池修改案設計水庫洪水水位 EL. 230.0 公尺之流況進行比較，並將曾文溪水水位及修正座標系統條件納入考量，本文摘述消能池調整佈置後之試驗成果，其條件設定為：弧形閘門全開，上游水庫水位 EL. 230 公尺，下游河川水位 EL. 115.40 公尺；試驗過程照片如圖 5 所示，試驗所量測之水理成果整理成如圖 6 所示。

由上述水工模型試驗成果作為參數驗證，以二維及三維水理模式分別計算工程水理分析。二維水理分析具有計算速度快及成果演算容易收斂之優點，因此在計算三維水理之前，先行演算二維水理分析，主要目的為彌補水工模型試驗不足，先行確認溢洪道洩洪對出水口流況無不良影響，本工程採用 SRH-2D 進行

防淤隧道內之流場演算之用，該模式為經濟部水利署與美國墾務局合作開發之重點模式；三維水理分析主要目的為瞭解細部設計方案之水理流況情形，因此分析工作以水工模型試驗成果作驗證分析，再辦理設計方案之水理計算，以 ANSYS CFX 模式進行三維流場模擬，該模式對於自由液面之處理方式，具有體積分率權重法及等位函數法之功能，因此可針對隧道內不同水位高程進行模擬分析。

水工模型試驗成果驗證比對成果顯示，消能池三維水理分析結果與水工模型試驗之實測成果比較如圖 7 所示，數值模擬與水工模型之趨勢大致相符，數值模式模擬曾文溪河道流量發生 10,000 cms（莫拉克颱風之最大放流量約 8,367 cms 及防淤隧道 1,075 cms，取整數 10,000 cms）時，出水口之河道水位高程約 EL. 115.40 公尺，由分析成果可知，消能池內水位並不受



圖 5 消能池水工模型放水情況

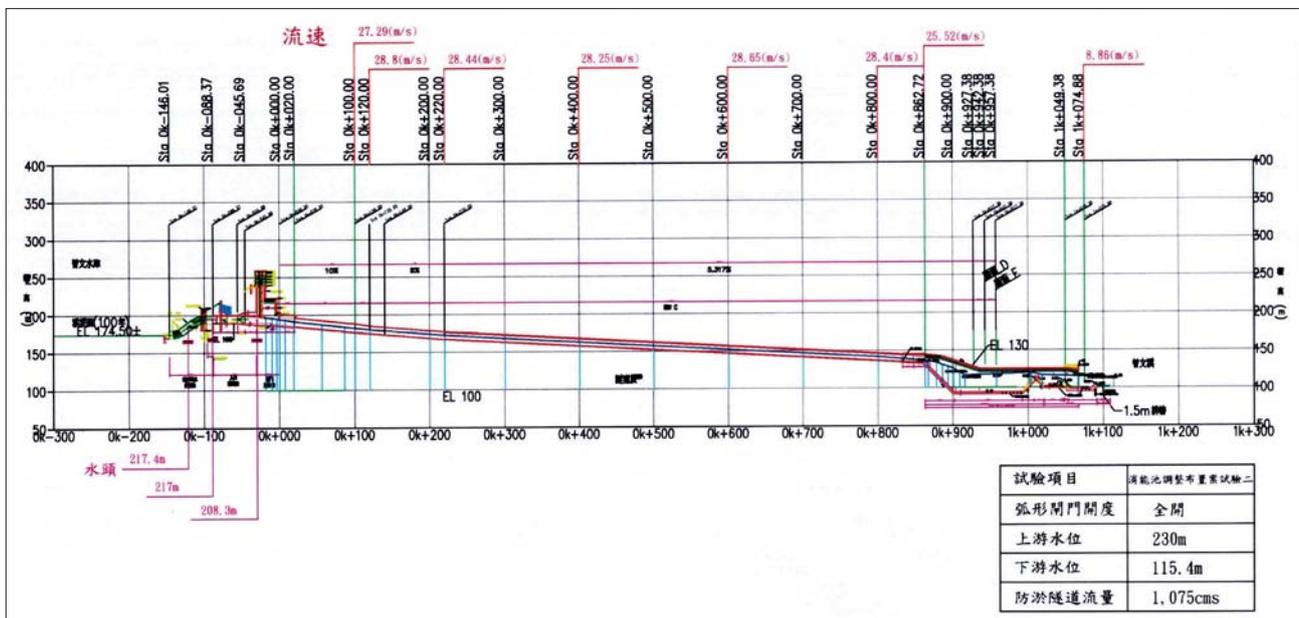


圖 6 消能池水工模型試驗流速分佈圖

曾文溪之迴水影響，溢流堰頂水位高程 EL.119.78 公尺（與溢流公式推估之水位 EL. 119.9 公尺相當），距頂拱尚有約 4.7 公尺之距離，惟數值模擬之流速在部份位置略有低估，但整體趨勢與水工模型結果相符；數值模擬之水位高程於隧道一般段與水工模型試驗吻合，於下游消能池段略有高估，惟數值模擬與水工模型之趨

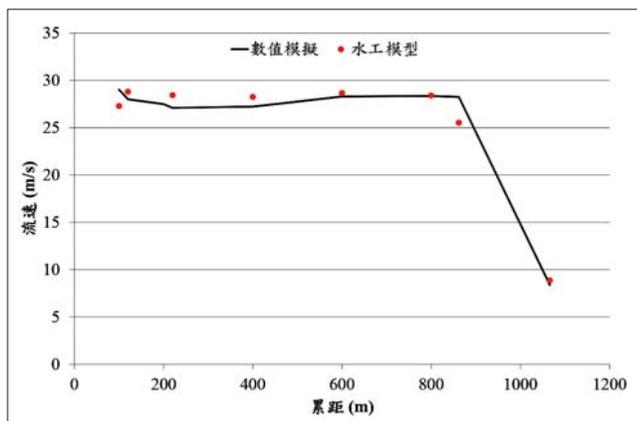
勢大致相符，顯示分析條件及參數設定應屬合理；消能池室經過水工模型試驗後（經濟部水利署南區水資源局，2014），最終尺寸為最大淨高 41.69 公尺，淨寬 18.0 公尺，池底長 90.0 公尺之地下洞室。

地下洞室開挖支撐及襯砌結構分析

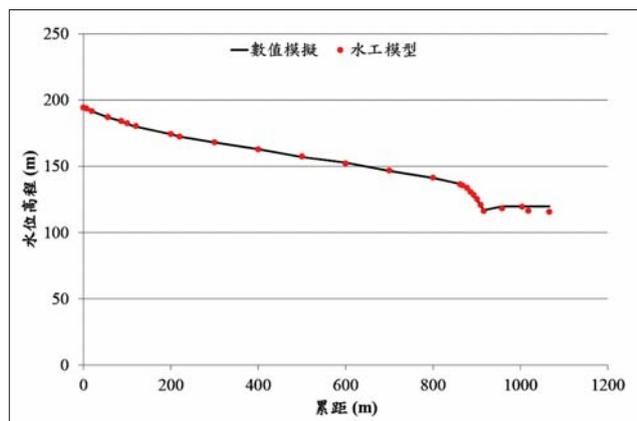
消能池及出水口隧道段與邊坡斜交出洞，考量出水口範圍可能遭偏壓影響，故在開挖及支撐系統，需採用三維數值模擬分析成果進行設計；分析所需岩體材料參數，主要依據鄰近工址鑽探取樣試驗及本計畫先行完成之開挖資料（施工橫坑）進行設定，分析針對整體工程進行最可能遭遇之第 IV 類岩體參數進行分析，以符合隧道開挖代表性。

開挖支撐分析成果檢核部份，藉由建立與邊坡斜交出洞具偏壓影響之地下洞室，可釐清消能池及出水口隧道於開挖時不對稱的應力分佈及其對變形行為的影響程度，分析針對各開挖支撐階段，檢核岩體及支撐位移、塑性區發展狀況皆能符合安全需求。

圖 8（右）消能池及出水口隧道段開挖支撐完成時之岩體位移量分佈圖，頂拱轉折處（0k + 935.70）沉陷量由初期的 5.94 公分發展至 7.48 公分，最大位移量則發生在仰拱轉折處（0k + 860.82），隨著消能池室的降挖完成，最大隆起位移量為 8.98 公分，而 1k + 026.12 垮度最大斷面及中間柱區域，頂拱支撐系統採加密配置，最大沉陷量為 5.4 公分，而 1k + 026.12 ~ 1k + 072.93 中間岩柱位移分佈圖如圖 8（左）僅靠近地表之培厚區域及鄰近消能池區域產生約 5.4 公分之位移量，說明透過預



(a) 分析流速成果比較



(b) 分析水位成果比較

圖 7 三維水力分析與水工試驗成果比較圖

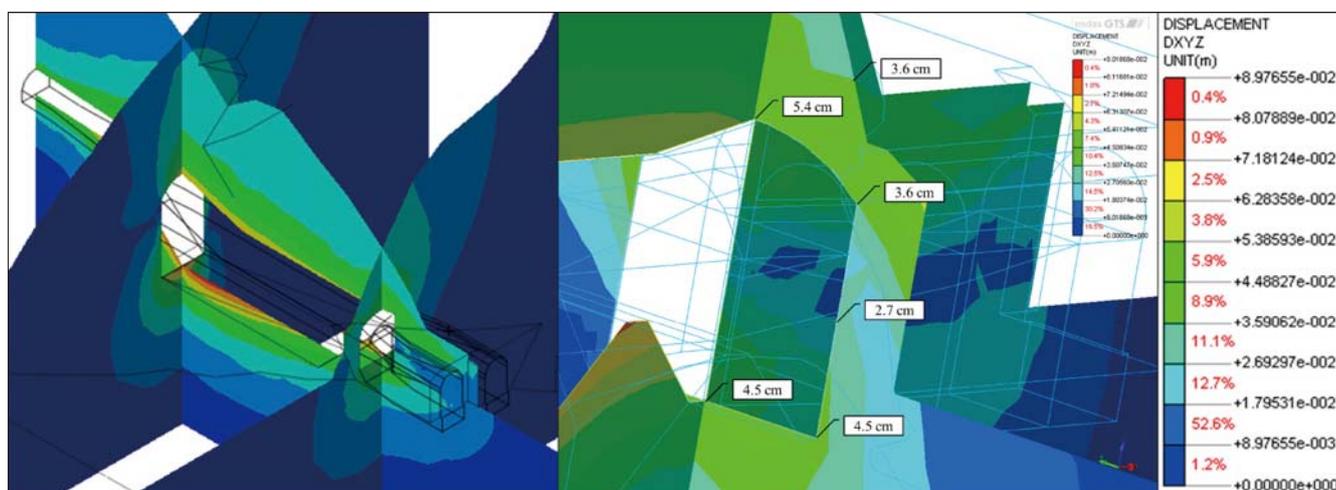


圖 8 消能池開挖支撐完成階段岩體位移量分佈圖

力地錨及岩栓對拉等支撐對策，可有效抑制中間岩柱之變位，經分析成果顯示，消能池室周圍岩盤變形量皆小於變形寬容量 20 公分；支撐系統受力部份，且由於地形偏壓影響的關係，消能池室靠山側之塑性區發展範圍較大，而出水口北洞口隧道陪厚段由於較靠近山壁，隧道頂拱上緣塑性區發展也較明顯，於開挖面周圍之塑性區範圍大於 6 公尺，透過支撐系統在受偏壓影響靠山側區域頂拱加設 10 公尺長地錨可穿過受擾動的影響範圍。

襯砌結構分析部份，分別以靜態及動態進行分析，仰拱固接以模擬邊界條件，作用於消能室襯砌上之載重包括自重、岩壓力、地震力等，動態分析採用韌性折減之加速度反應譜係數及動力分析之調整係數計算設計地震反應譜及最大考量地震反應譜，再將自重及各種載重轉換為質量，使其於動態分析階段依照反應譜作用於結構模型上，以模擬於動態載重（地震）時襯砌之結構應力情形；襯砌結構經此分析後，再根據 ACI318-02 規範採用 U.S.D. 設計法進行結構設計，圖 9 為 1k + 008.12 ~ 1k + 026.12 中間柱區域受震分析位移成果示意圖，顯示消能池最大跨距範圍受震時約產生 0.12 公分之位移，圖 10 為該區域側壁受力分佈圖，顯示最大受力位置皆位於底版角隅處，襯砌結構配筋再依此受力行為進行設計。

施工規劃

由於消能池及出水口隧道段位於隧道出口區域，鄰近邊坡地表覆蓋深度不足；因此，消能池室末端改以雙孔隧道出洞，使隧道最大開挖寬度由 18 公尺縮減為 10 公尺，提升隧道開挖穩定性。

雖然消能池室之構造皆佈置於山體內部，已適度減輕淺覆蓋之不利影響，但終究此一大型地下洞室仍然位於邊坡岩覆不深之山體內，而隧道線型與邊坡坡向未呈正交，對於洞室開挖而言，其地形上產生的偏壓效應，因開挖有相當不利的影響。

因此，在消能池室設計與施工時，必須針對以下困難問題加以解決：

- 因地形造成的淺岩覆及偏壓問題。
- 因大型洞室開挖所產生的關鍵岩塊問題。
- 出水口隧道分岔處岩心過薄，無自持穩定性。
- 施工順序上，消能池室為上游一般隧道段之動線出口，消能池室開始降挖後，上游一般隧道段將喪失進出動線需完成隧道開挖始能降挖消能池室，形成施工要徑。

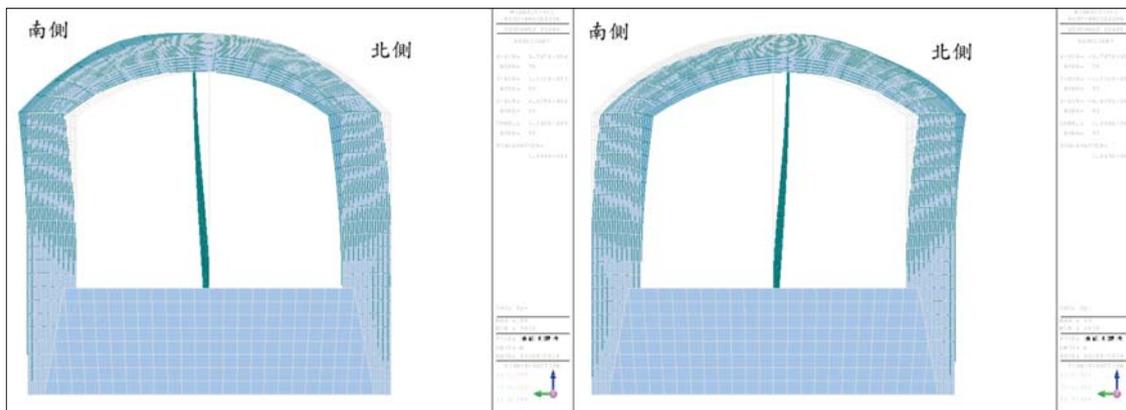


圖 9 消能池襯砌結構受震水平位移分析成果圖

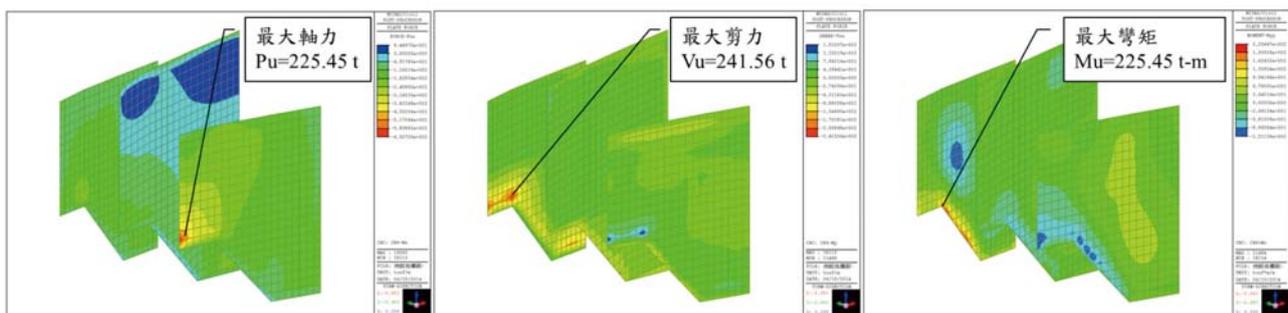


圖 10 1k + 008.12 ~ 1k + 026.12 襯砌側壁受力分佈圖

基於以上瞭解，規劃消能池室施工方式如下：

- 自消能池室出口打設施工橫坑通達一般隧道段與消能池室銜接處，解決施工動線問題並由施工橫坑開挖記錄提前瞭解消能池室開挖可能遭遇地質，此橫坑完工後將留作消能池通氣隧道。
- 根據三維數值開挖支撐分析計算結果，消能池室南側頂拱及上半部側壁因地形偏壓導致岩體應力較大，採不對稱支撐方式加以設計。
- 雙孔之出水口隧道段淺覆蓋地形，以洞口邊坡混凝土培厚配合對鎖岩栓固定，並在邊坡淺覆蓋部位預先施打預力地錨，以減緩鑽炸法開挖過程中震波傳遞至地表而衍生不可預期之邊坡破壞。
- 出水口隧道分岔處岩心過薄無法自持部份，於頂拱開挖完成後，施作基樁及立柱上頂頂拱岩體，以替代過薄岩心無法提供之支撐力。

以下針對施工過程遭遇的關鍵議題及施工處理對策進行說明：

(1) 開室頂拱兩翼岩盤承载力

在大垮度地下洞室開挖相關工程實例中，開挖過程階段頂拱穩定性實為關鍵，一般會採用圓弧形頂拱設計使其產生足夠之拱效應行為，來確保開室降挖之穩定，另亦常採用「蘑菇頭」之造型，可藉由拱效應及兩翼之設計將隧道正上方圍岩之應力傳遞至隧道兩側岩體分散作用力。

而地下洞室頂拱區域設計主要關鍵係：(1) 兩翼之岩盤是否可承載頂拱傳遞支應力；(2) 頂拱鋼筋混凝土材料之設計是否可符合載重作用之條件；本工程消能池施工步驟如圖 11（左）所示：(1) 消能池頂拱以側導坑

先行開挖支撐，待頂拱區域支撐完畢且計測數據穩定後；(2) 進行頂拱鋼筋混凝土襯砌澆置；(3) 以 3 公尺為階進行消能池地下洞室降挖；此設計理念目的係提供消能池降挖過程圍岩應力持續發展階段，隧道頂拱之穩定。經分析，岩盤承载力及鋼筋混凝土配筋檢核無虞，可確保此方案後續施工之穩定，圖 11（右）為消能池頂拱襯砌完成，洞室降挖支撐尚未襯砌之狀況。

(2) 隧道分岔區域岩盤施工處理對策

本工程於里程 1k + 026.12，由垮度 30 公尺之大斷面分岔為二，縮減為單一隧道垮度為 12 公尺之雙孔隧道，其相鄰開挖面最小距離約為 5.8 公尺，僅為隧道開挖直徑之 1/2，故須考慮鄰近隧道於施工過程之影響。

鄰近隧道開挖的關鍵係：(1) 保持合理的分階開挖及平順的開挖輪廓線，故採用機械式開挖以減少圍岩的擾動；(2) 及時進行初期支護，並使其及早閉合，控制圍岩變形，其中後進隧道開挖時，對於先進隧道之稱系統將產生約 10 ~ 40% 支應力或彎矩增量；(3) 加強對圍岩和初期支護的監控量測，進行資訊化管理。

而本計畫設計依據地形、地質與施工等條件，考量重點包括 (1) 中央岩體或混凝土支柱作用荷重；(2) 中央支撐（噴凝土、鋼支保、對拉岩栓）型態；(3) 輔助工法的配合施作。針對 0k + 862.82 ~ 1k + 038.12 區域之對策說明如後：(1) 開挖階段之外支撐，採用直徑 25 公厘、垂直間距 1.5 公尺交錯排列之對鎖岩栓提供中央岩體柱之穩定，以 0.8 ~ 1.2 公尺小輪進機械式開挖進行處理；(2) 於開挖支撐完成後進行內襯砌混凝土澆置階段，除施作 1.2 ~ 1.4 公尺之混凝土側牆外，於中央岩體柱較單薄區域（1k + 0173 ~ 1k + 023.7）進行

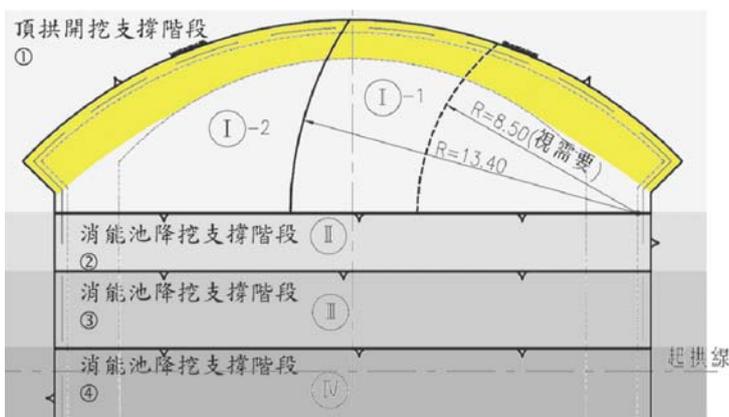


圖 11 消能池頂拱配置圖



圖 12 消能池 1k+008.12 中間柱區域施工流程圖

5 排直徑 0.8 公尺之基樁設置，採用置換鋼筋混凝土的方式來克服中央岩體細長柱可能因挫曲破壞 (buckling failure) 之疑慮。圖 12 為 1k+008.12 附近區域施工流程照片，至截稿前已完成該區域的降挖支撐施作。

(3) 近邊坡淺覆蓋偏壓處理

消能池出水口隧道線形與邊坡斜交約呈 42 度，於消能池開挖支撐後，近邊坡受開挖擾動應力重新分佈之狀況，其特點包含 (1) 靠山側之隧道側壁由於岩覆較深故初始應力較大之關係，可看出靠山側側壁支撐系統相較於臨邊坡側將承受較大之受力 (如 0k+902.12 里程斷面)；(2) 一般針對覆蓋小於 2 倍隧道直徑之區域定義為隧道淺覆蓋區域，以斷面 1k+038.12 為例，分析成果顯示雙孔隧道開挖後隧道圍岩之應力分佈較大且延伸至地表面。

圖 13 針對有上述淺覆蓋及偏壓疑慮之關鍵里程斷面進行說明：(1) 1k+026.12 (單孔大斷面代表區域)：A. 於隧道開挖前，進行消能池頂拱邊坡區域，設置長度 30 公尺、60 公噸預力地錨提供消能池上方岩盤之穩定；B. 靠山側現地應力較大之偏壓區域，於頂拱及側

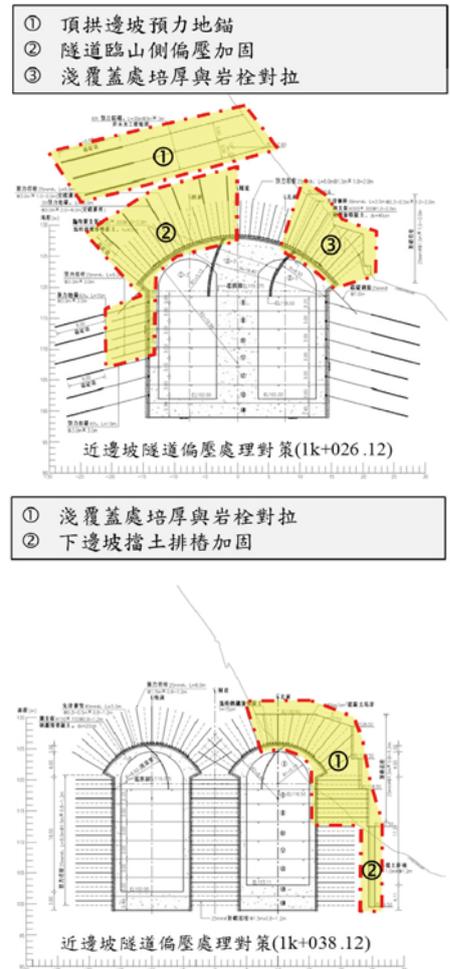


圖 13 近邊坡隧道偏壓處理對策設計說明

壁設置預力地錨；C. 靠邊坡側進行坡面地表混凝土培厚及培厚段與隧道頂拱岩栓對拉設置。(2) 1k+038.12 (雙孔小斷面代表區域)：A. 靠邊坡側進行坡面地表混凝土培厚及培厚段與隧道頂拱岩栓對拉設置；B. 下邊坡設置抵抗主動土壓力 (active earth pressure) 之 1 公尺直徑擋土排樁。

經上述原則，進行出水口邊坡整體區域設計，透過圖 14 消能池出水口工程配置立體示意圖與工區現況進一步說明，有淺覆蓋疑慮區域，工程對策包含：(1) 上邊坡預力地錨；(2) 頂拱區域混凝土分階段培厚；(3) 北側邊坡以排樁工程作為擋土設施；(4) 南側邊坡採用降階方式明挖，其邊坡工程包含擋土排樁、預力地錨及地錨面板之設置等，以確保消能池出水口區域之穩定。

消能池室於 2014 年 5 月開始開挖，由北洞頂拱先行入洞，採小斷面先向前開挖，再以 2 階段或 3 階段擴挖至頂拱全寬，初期以完成高程 EL. 118.5 公尺以上頂拱

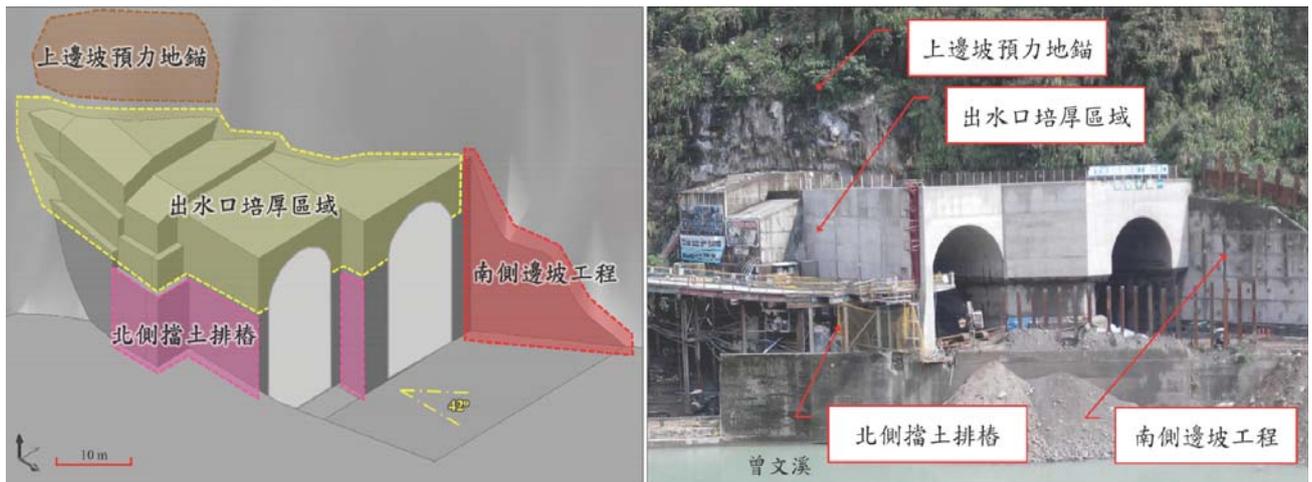


圖 14 防淤隧道出水口工程配置示意圖

部份開挖，待完成所有頂拱襯砌後，再逐階向下降挖。

北洞與消能池頂拱部份於 2014 年 11 月完成開挖，其中在完成里程 1k + 024 附近消能池頂拱最後階段擴挖時，北洞於里程 1k + 035 處發生噴凝土開裂及少數岩栓斷裂現象，經推斷為擴挖完成後，因偏壓地形導致岩體應力重新分配所致。

南洞頂拱於 2015 年 1 月入洞，其中於 2015 年 3 月與消能池貫通時，北洞與中間岩柱噴凝土再次發生開裂現象，顯示出水口隧道偏壓地形確實影響周邊岩盤應力分佈。

由於消能池及地下閘室均係大型洞室，為嚴密監控隧道岩體變位情形，本工程除傳統隧道計測外，另採行三維雷射掃描（又稱光達技術，Lidar）快速評估，提供傳統計測無法全面性偵測盲點，現場作業主要藉由三維雷射掃描儀獲得測區範圍內的圍岩 3D 空間資訊，藉此提供後續研判分析用，因此掃描時需考慮到計畫需求的點雲密度與精度，掃描作業前置準備工作勘察現場測站所需架設距離位置與數量，依序架設測站進行掃描作業。且由於現場易受遮蔽物影響點雲資料全面性，當掃描現場遮蔽物影響範圍過大，視現場情況適時增加掃描測站數目。

現場掃描作業受到開挖輪進位置、範圍影響地面光達儀器架設位置以及控制點的佈置方式而作業方法有所改變。結果顯示三維雷射掃描更能掌握變位，對於回饋分析研判更有助益，量測誤差可控制在公分以下，並且對於距離掃描儀器 30 公尺以內的施工開挖面變形均能適時掌握，對分析研判相當有所助益，圖 15

為消能池室雷射掃描點雲分佈圖。

至截稿前，針對消能池室及出水口隧道段計測成果部份，隨著消能池持續降挖，側壁圍岩受開挖後擾動影響有些許變位，隨開挖台階遠離後趨於穩定，中間柱呈現類似單壓行為模式，目前消能池段左右側壁預警等級及變形寬容量皆為綠燈；而頂拱內襯砌有產生整體沉陷跡象，襯砌沉陷量未達 10 公厘，需持續觀察後續隧道開挖圍岩變位情況。

結語

台灣南部地區因受地質條件影響，為水庫淤積高潛勢區域，各水資源設施均賴水庫管理單位盡心維護，尤其以曾文水庫為區域水資源運用之樞紐地位，因此莫拉克颱風後政府積極投入曾文水庫設施改善工作，而曾文防淤隧道即為其中重要之一環；本文主要針對由設計階段及施工階段現況進行綜整，檢討設計分析資料、關鍵課題及對策研議，並透過施工計測內容回饋檢討，來確保施工過程之經濟性與安全性；將本工程消能池室規劃、設計與施工特性說明如下：

- (1) 依據水理消能需求，於山體內設置一地下洞室，在大垮度斷面開挖過程，除採用導坑先行及分階開挖之方式減少單次開挖面積，亦透過頂拱混凝土襯砌施作後再行閘室降挖之方式，以將頂拱圍岩自重透過拱效應傳遞至兩翼岩盤，來抑制閘室側壁應力持續發展；後續在消能池室降挖過程中透過持續計測紀錄作業，可確保頂拱襯砌與側壁支撐系統之穩定。

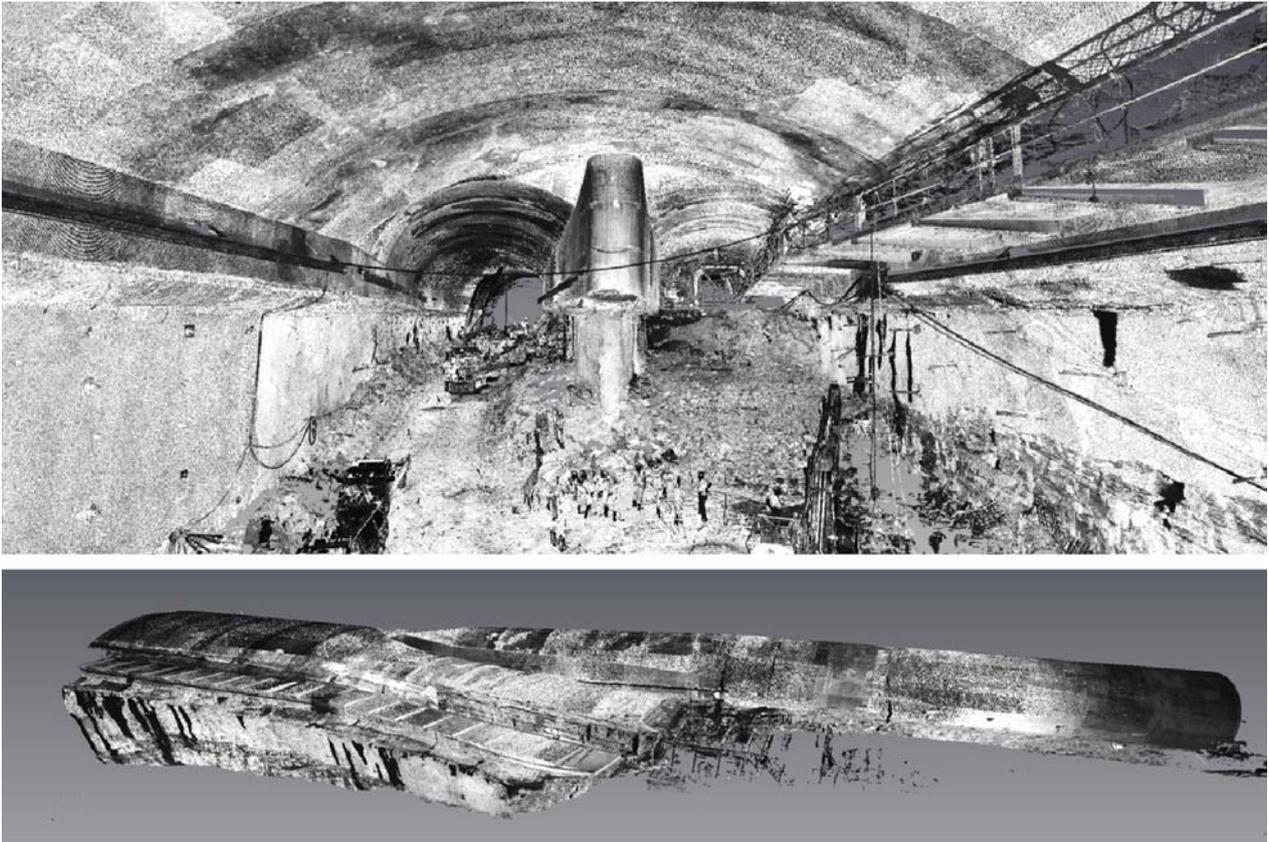


圖 15 消能池室雷射掃瞄點雲分佈成果圖

- (2) 平行雙孔隧道因互制影響，導致圍岩鬆弛範圍進一步擴大及變形加劇，而其互制行為與隧道間距及圍岩岩盤強度比有關，在圍岩強度需提供足夠強度之條件下，本工程隧道分岔段採用將中間柱換置為強度較佳之混凝土排樁，採用機械式分區降挖降低開挖過程之擾動，並利用對拉岩栓維持雙孔隧道側壁之穩定。
- (3) 隧道洞口岸之設計需考量地形與地質等先天條件，以及洞門結構、開挖方式、輔助支撐工法等工程對策，本文透過三維數值模擬評估隧道出洞與斜交邊坡淺覆蓋偏壓區域，說明設計處理對策之適宜性。

誌謝

經濟部水利署南區水資源局為辦理本項工程，由聯合大地工程顧問股份有限公司及巨廷工程顧問股份有限公司完成基本設計，並編列於「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫」內執行，由中華工程股份有限公司、國統國際股份有限公司及黎明工

程顧問股份有限公司組成統包團隊後續執行，感謝謝敬義教授等各界先進顧問對本計畫之關心與指導，本團隊將持續努力與精進，俾使工程如期、如質完工，以達到延續水庫壽命之目標。

參考文獻

1. 經濟部水利署南區水資源局 (2012)，曾文水庫防淤隧道工程 — 基本設計報告。
2. 經濟部水利署南區水資源局 (2013)，曾文水庫防淤隧道工程 — 補充地質調查及地形測量作業成果報告。
3. 經濟部水利署南區水資源局 (2013)，曾文水庫新建防淤隧道工程水工模型試驗。
4. 連上堯、張世賢、顏呈仰 (2015)，「曾文水庫防淤隧道工程大地工程設計及施工」，地工技術，No. 146，第 69-80 頁。
5. 黃世偉、張世賢、顏呈仰、陳逢時 (2015)，「曾文水庫防淤隧道工程設計及施工規劃」，第 22 屆水利工程研討會論文集。
6. 朱晃葵、張世賢、陳逢時、顏呈仰、歐陽永強 (2014)，「近邊坡地下洞室設計分析及處理對策 — 以曾文水庫防淤隧道消能室為例」，隧道建設，第 34 卷，增刊，第十三屆海峽兩岸隧道與地下工程學術及技術研討會，第 203-212 頁。