

天瀨水庫增建排洪隧道與曾文水庫增建排砂隧道 設計內容異同評論

林 得 志

水利技師、黎明工程顧問(股)公司董事長

摘 要

既有水庫的營運，長久之後，隨著時代經濟的變遷，水文的異常等等因素，為了延長使用壽命，不得不更新改善。更新改善以增加排洪與排砂為主要目的，因為要在水庫正常營運之中進行增建，而增建的流入部卻需在水位面下，如何圍堰來施工，是設計上最大課題。

日本京都宇治川上的天瀨水庫，正在加建排洪隧道，其規模與布置與曾文水庫增建快完成的排砂隧道極為相似，本文將兩者做比較，兩者最大不同是流入部，前者是鋼管圍堰，後者是預鑄象鼻形鋼管，費用更省，工期更短，實顯台灣水利工程的技術不輸日本。

一、 前言

水利技師公會全國聯合會組團參訪日本琵琶湖水庫水利工程，筆者參加參訪團，於2017年3月29日視察天瀨水庫再開發工程現場施作情形。天瀨水庫位於京都府，琵琶湖下游，淀川水系宇治川上，水壩建於1964年，有效庫容20,000仟 m^3 ，以防洪、供自來水與發電為目的。

由於上游琵琶湖的洪患問題，天瀨水庫為了加強保護宇治川及淀川流域內洪水安全洩洪，同時為了提升琵琶湖蓄存洪水向下游排放的速度，增強下游洩洪能力，而興辦「天瀨水庫再開發工程」。該工程主要是開鑿一條排洪隧道，經現場了解，其設計內容與規模和台灣曾文水庫新建排砂隧道類似。而曾文排砂隧道是黎明顧問公司所設計，所以撰此文，將兩工程的異同做比較，並予以評論。

二、 工程內容比較

茲以表列方式比較如下表：

表1 天瀨水庫增建排洪隧道與曾文水庫增建排砂隧道工程內容比較表

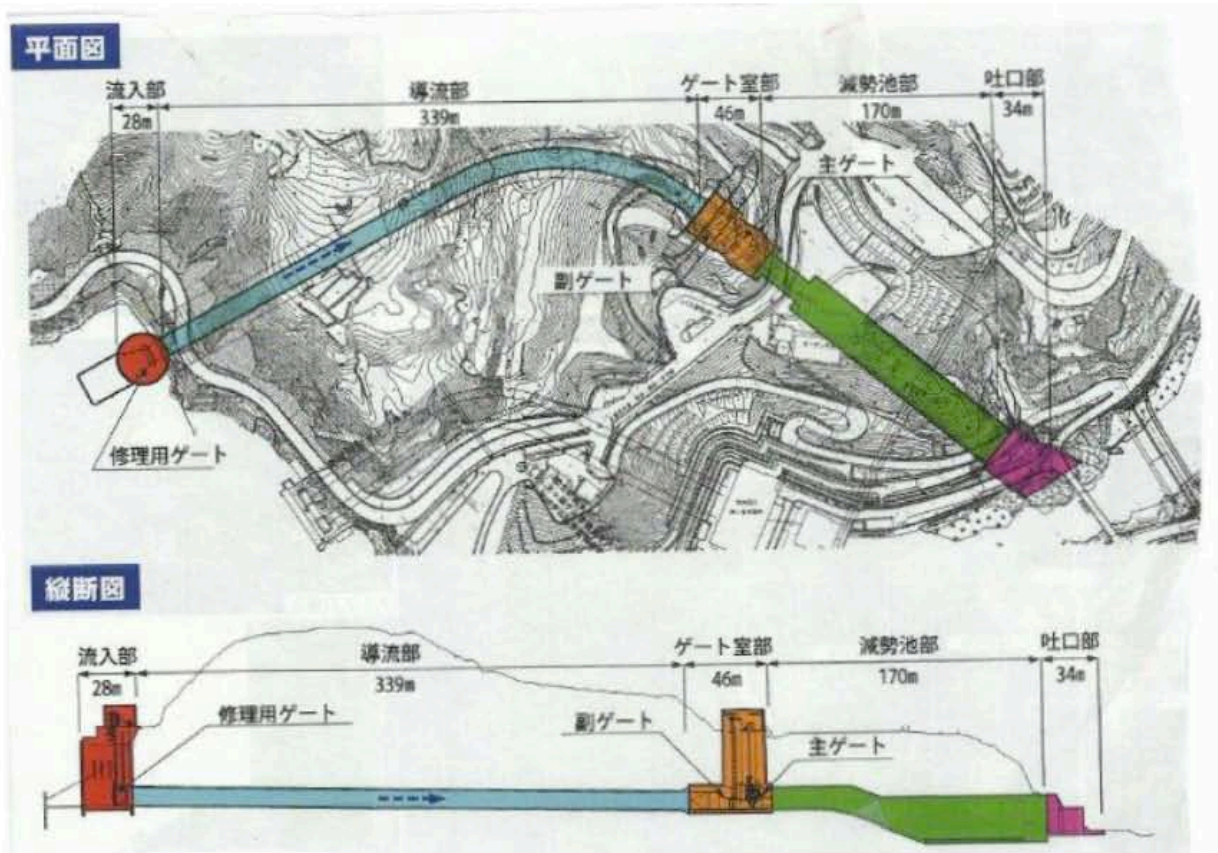
計畫項目	天瀨水庫 增建排洪隧道計畫	曾文水庫 增建排砂隧道計畫	差異及說明
工程地點	日本京都府宇治市(圖 A1)	台灣嘉義縣大埔鄉(圖 B1)	
既有水庫 完成日期	1964 年	1973 年	天瀨水庫已超過 50 年，比曾文水庫老 9 年
既有水壩 規格	混凝土拱壩，壩高 73m，壩長 254m 總庫容 26,280 千 m ³ 有效庫容 20,000 千 m ³ 壩體排洪道 Q=840CMS	滾壓式土石壩，壩高 133m，壩長 400m 總庫容 712,700 千 m ³ 有效庫容 595,500 千 m ³ 壩體排洪道 Q=9,470CMS	天瀨是 RC 拱壩，曾文是土石高壩，曾文的庫容是天瀨的 30 倍
增建目的	1.增加排洪量至 Q=1,140CMS 2.增加自來水供水容量 3.增加發電容量	1.將入庫之異重流及渾水排放，進行蓄清排渾之操作 2.減緩水庫淤積速率以延長水庫壽命	天瀨是增加排洪，曾文是增加排砂
增建工程 平面佈置	隧道式排洪道，佈置於左岸，繞過壩體(圖 A2)	隧道式排砂道，佈置於水庫左壩座，1 號導水隧道左側(圖 B2)	兩者相似
增建工程 縱斷佈置	總長 617m，分為流入部、導流部、主閘閥室及減勢池與出口部(圖 A3)	總長 1266.27m，分為象鼻引水鋼管段、隧道進水口漸變段、隧道閘室段、隧道一般段、消能池及出水口段(圖 B3)	曾文長約 1 倍大，主要不同為流入部，天瀨為喇叭口，曾文為象鼻鋼管
導流隧道 φ	φ 10.30m	控制閘門上游 φ 10m，下游 φ 9m	天瀨稍大
設計流量	600CMS	995CMS	曾文大 66%
流入部	前庭及喇叭口漸變入隧道，裝有維修閘門，直提式 10.3m×12.30m-一門(圖 A4)	象鼻引水鋼管段引水進入隧道進水口漸變段(圖 B4)	天瀨的流入部是傳統式，曾文的象鼻鋼管是世界獨創
主閘閥室	豎坑 φ 24m，高 34m 主閘門-弧形閘門 3.6m×4.9m-2 門 副閘門-直提式閘門 3.6m×6m-2 門(圖 A5)	豎井 φ 10m，高 50m 控制閘門-弧形閘門 6.8m×6.8m-1 門 緊急/維護閘門-直提式閘門 6.8m×7.7m-1 門(圖 B5)	形狀相似，曾文的閘門較大
消能池	水躍式消能池設於山腹內，寬 23m，高 28m，號稱日本最大之隧道(圖 A6)及(圖 A7)	水躍式消能池設於山腹內，寬 18m，高 30.5m (圖 B6)及(圖 B7)	形狀相同，曾文的更大
出口部	矩形雙孔(圖 A7)	雙孔寬 10m 之隧道(圖 B7)	相同
開工日期	2014 年 1 月	2013 年 3 月	-
預定完工日期	2020 年	2017 年 10 月	曾文的工期較短
工程預算	約台幣 150 億	台幣 40 億 9 仟 8 佰萬	曾文較便宜



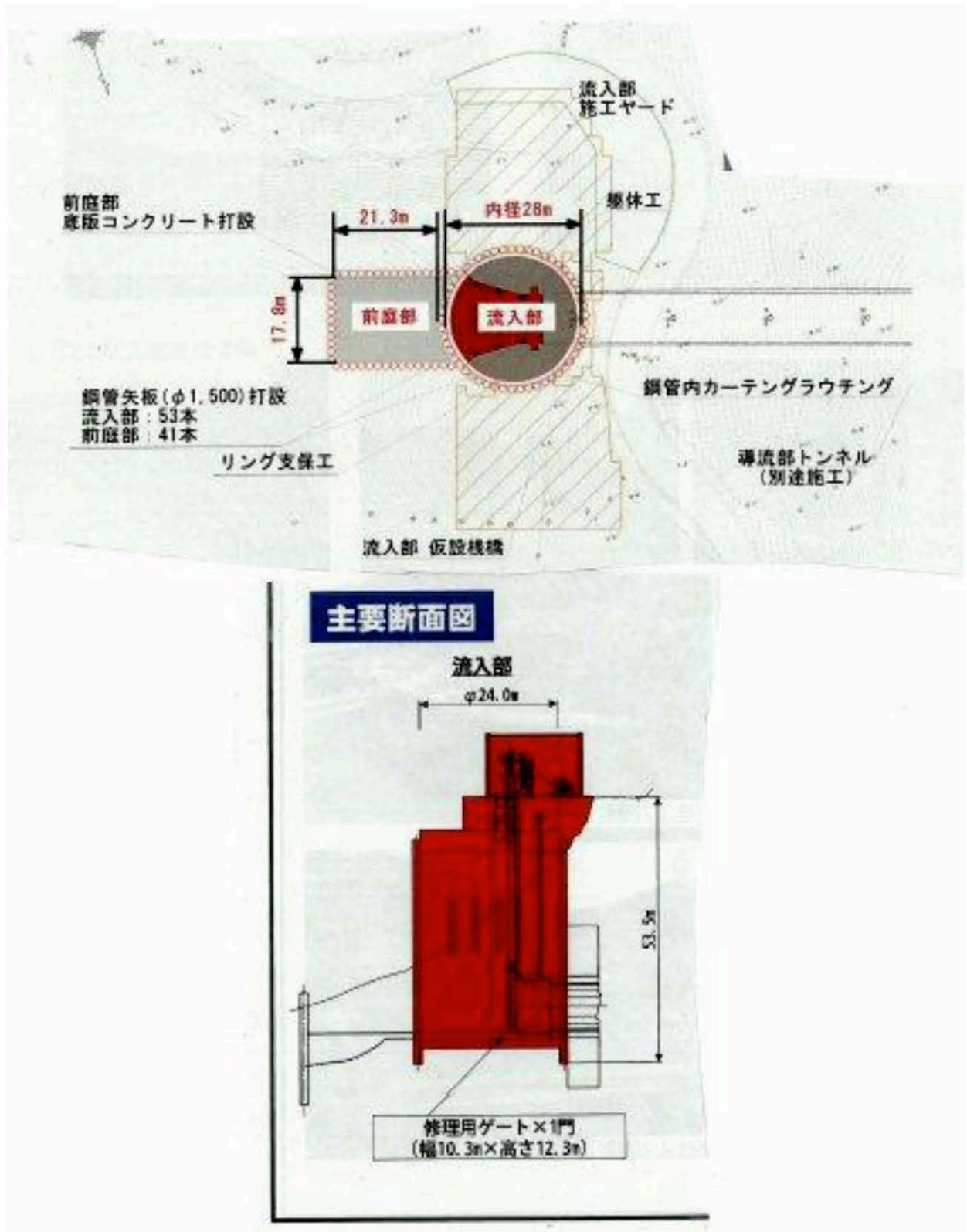
圖A1 位置圖



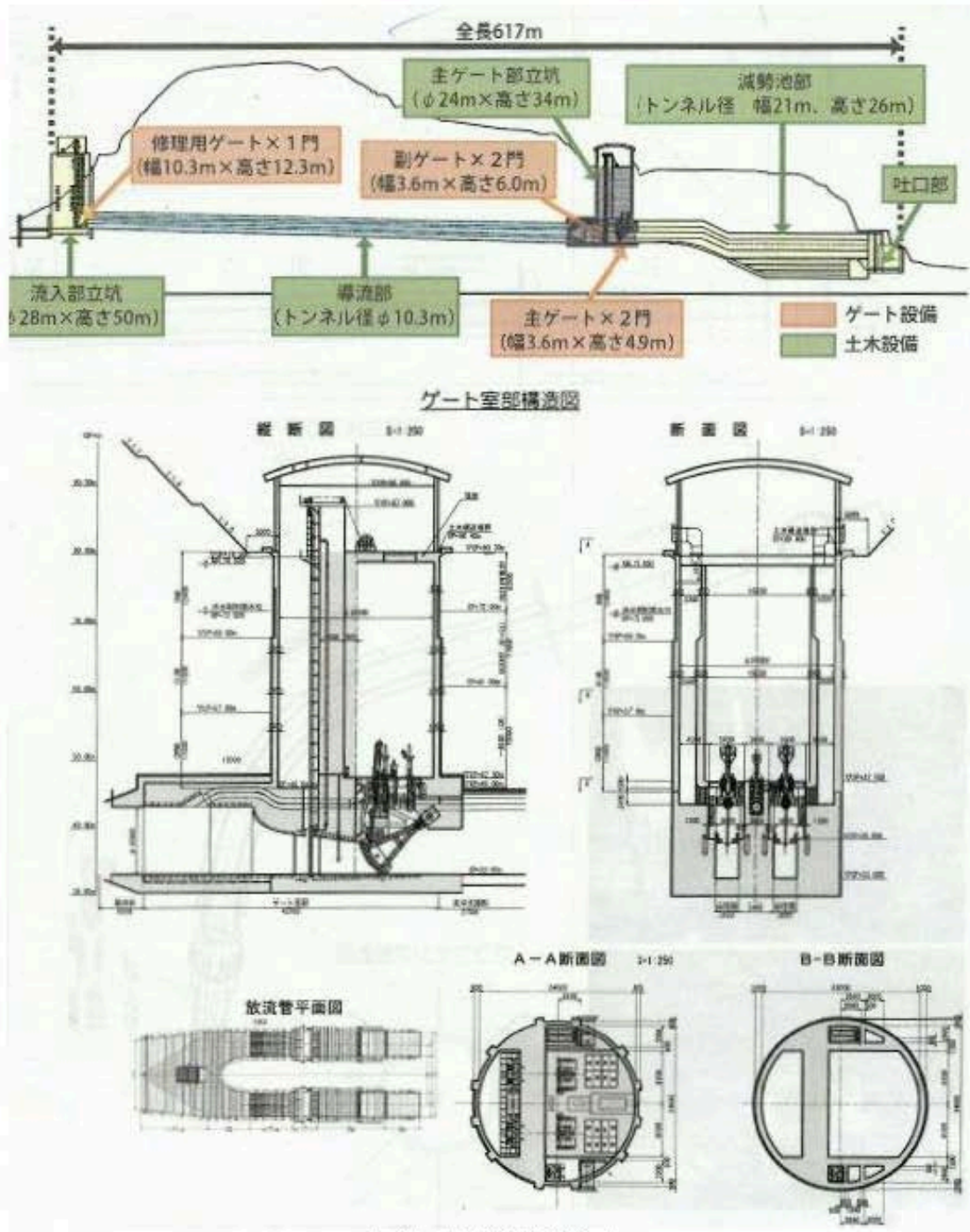
圖A2 平面佈置圖



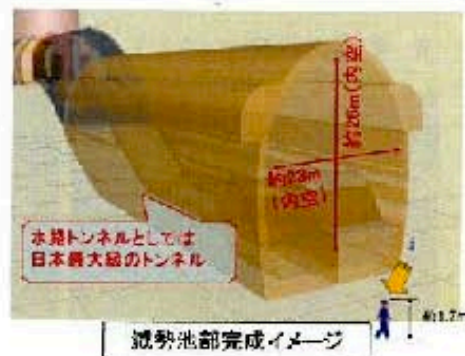
圖A3 平面及縱断面圖



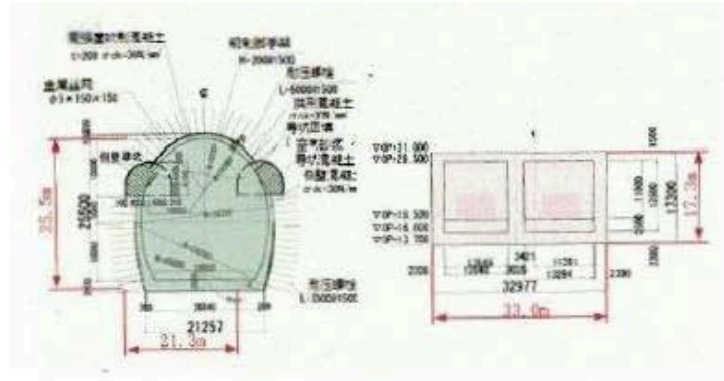
圖A4 流入部平面及縱断面圖



圖A5 主閘門構造圖



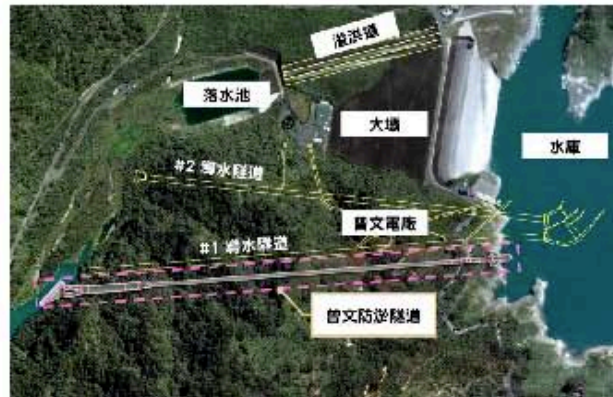
圖A6 消能池示意圖



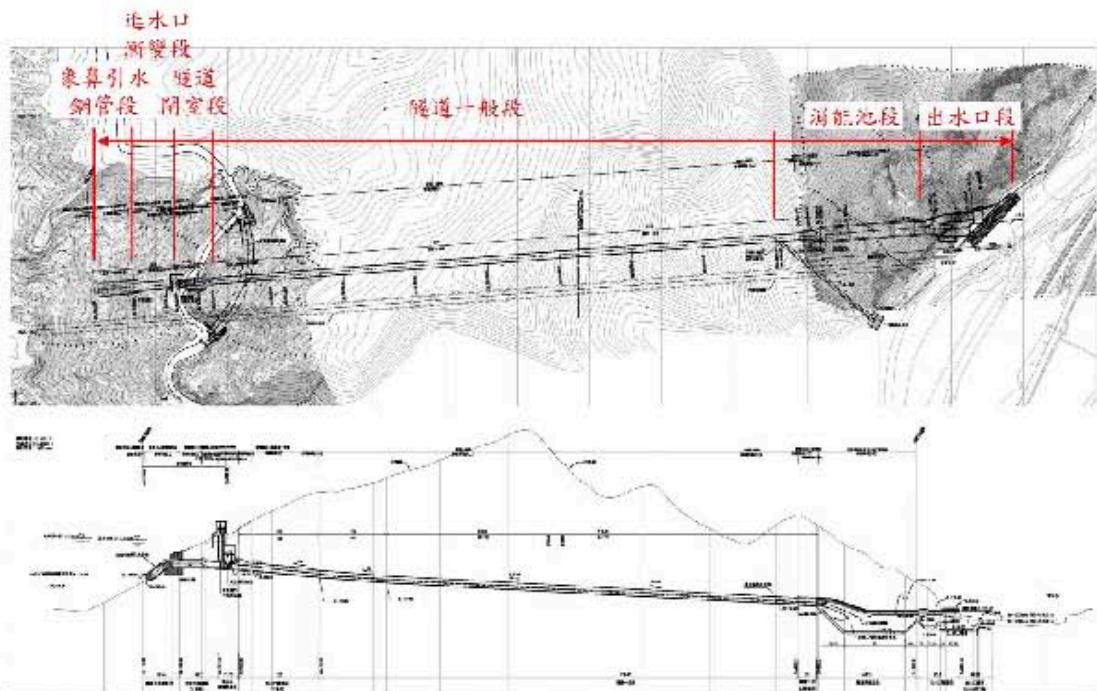
圖A7 消能池斷面及出口部斷面圖



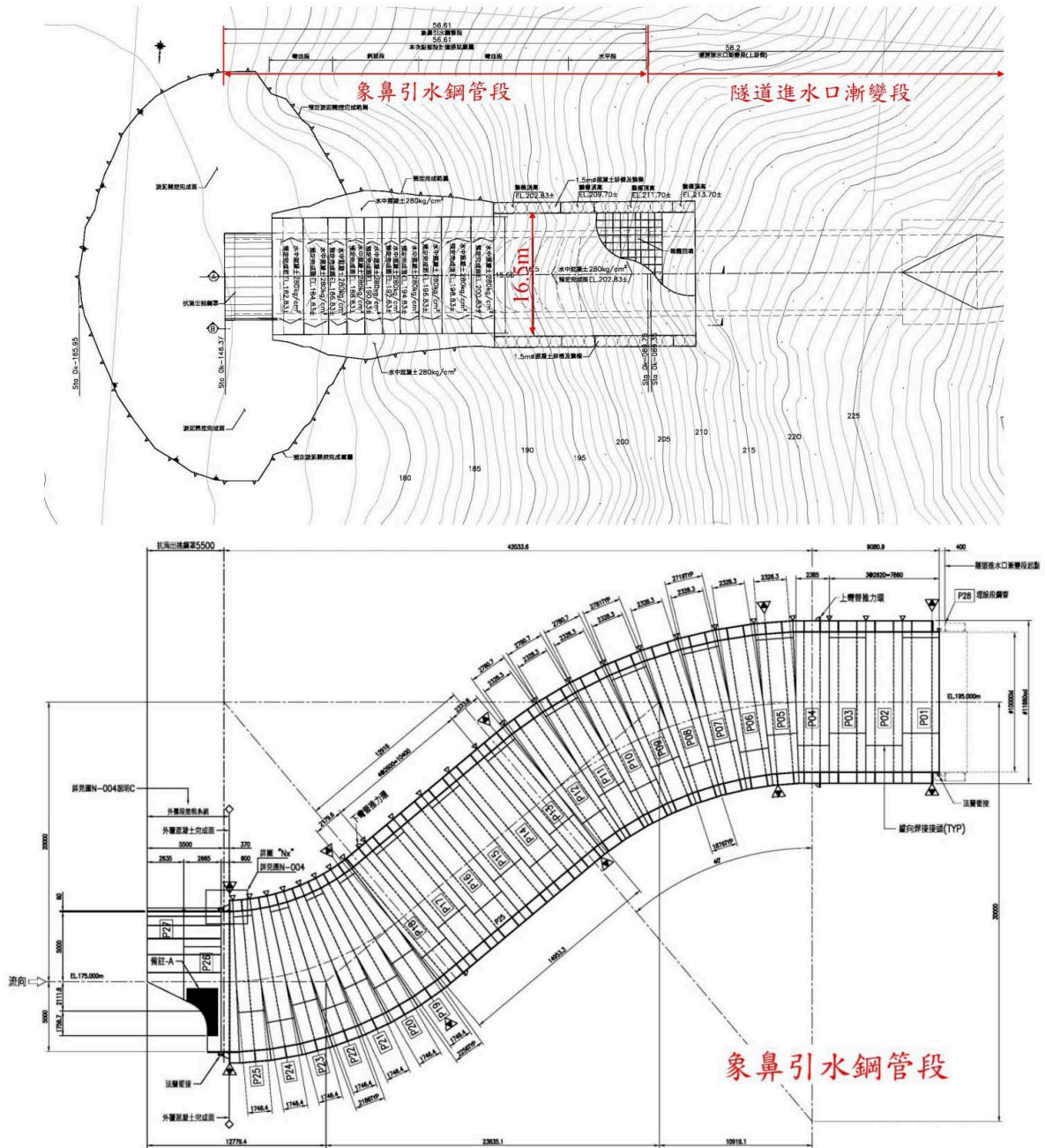
圖B1 位置圖



圖B2 平面佈置圖



圖B3 平面及縱斷面圖



圖B4 流入部平面及縱斷面圖

曾文水庫增建排砂隧道工程全體圖(全長 1266.27m)

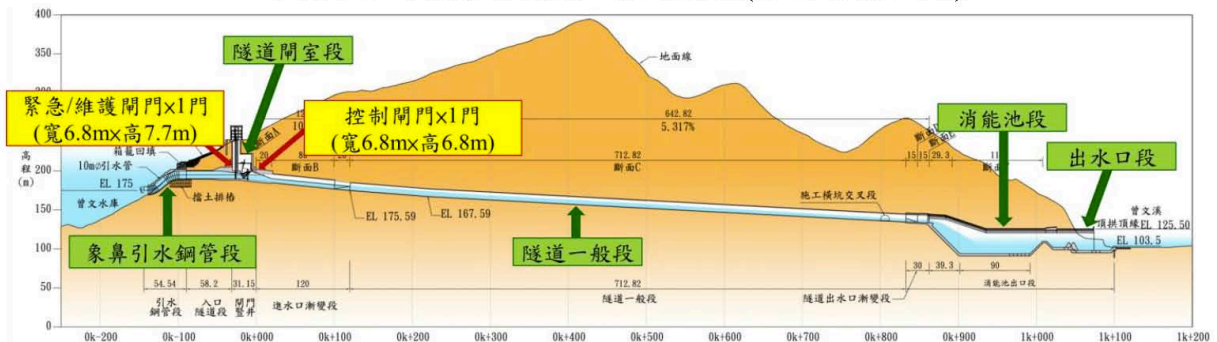
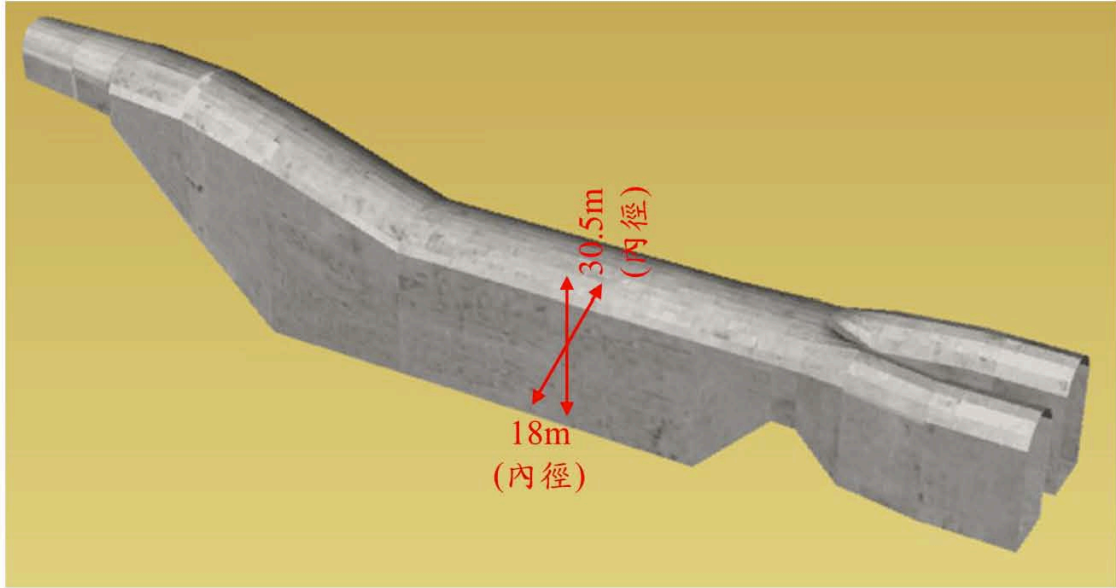
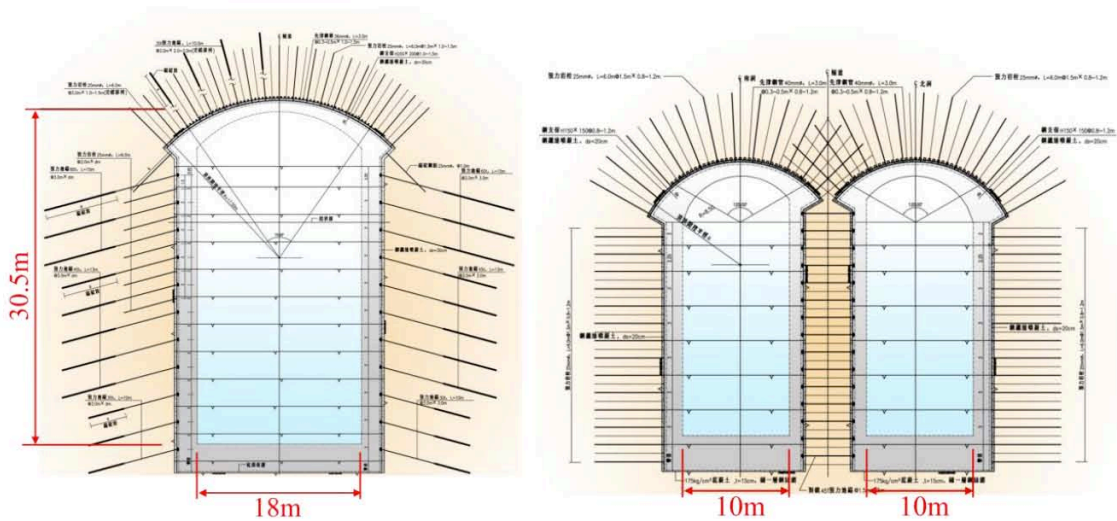


圖 B5(a) 隧道開室段構造圖



圖B6 消能池示意圖



圖B7 消能池斷面及出口部斷面圖

三、 不同的設計內容評論

(一) 流入部

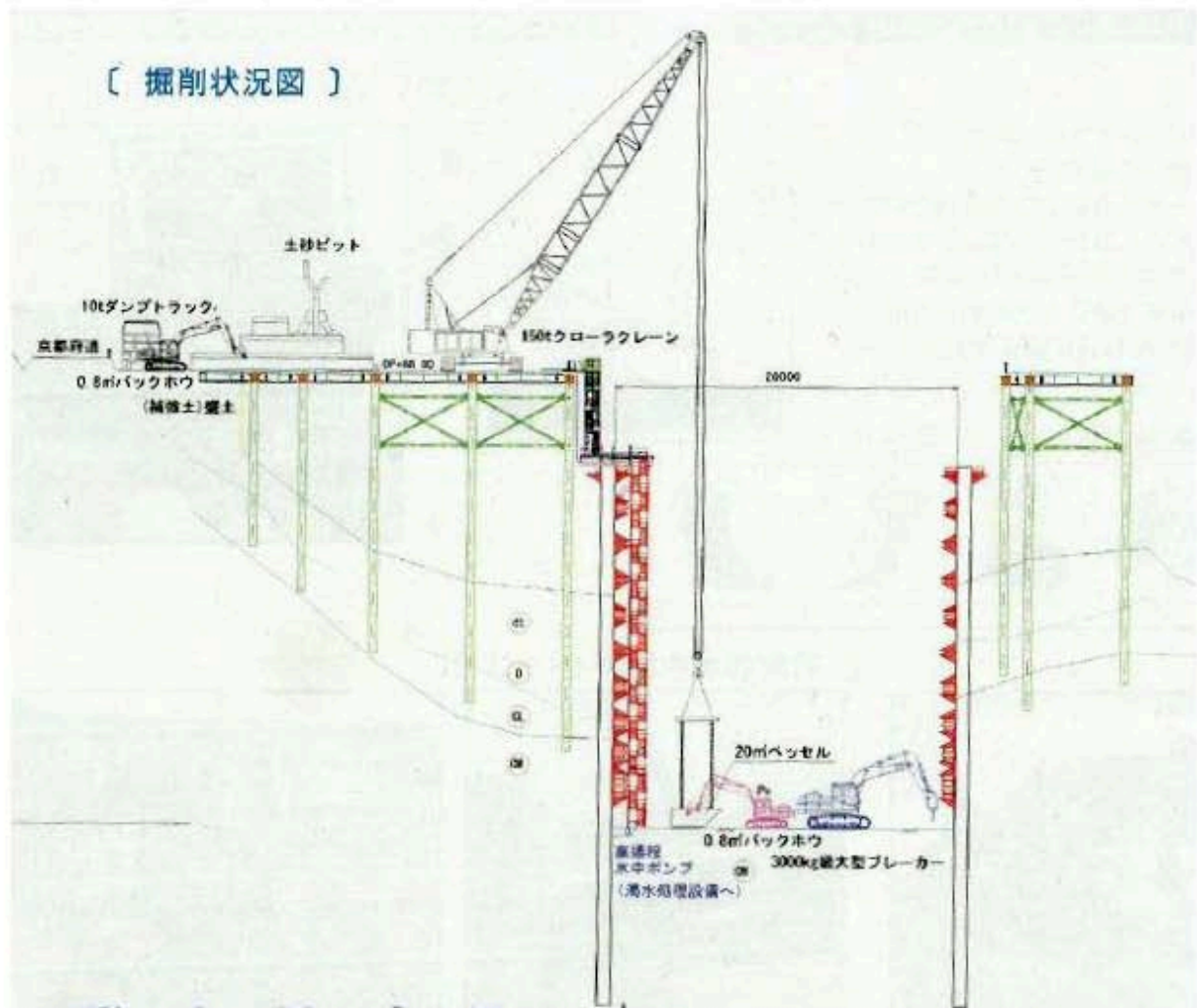
既有水庫加建放流設備，流入部面臨的最大困難是水庫無法放乾，在正常的運作之下，來施作流入部。茲將兩水庫之放流流入部之設計內容敘述如下：

1. 天瀨水庫

營運最高水位EL. 78.50m，設計流入部底EL. 41.20m，即在水中施工高37.3m，採用圍堰方式，圓形圍堰 ϕ 28m，井圈以 ϕ 1.50m鋼管打入，長50m共57支。鋼管與鋼管之間燒焊如同鋼板樁之子母接頭，做為防水。

鋼管樁打設完成，圓型閉合後，在內挖方與吊出土跟隨開挖面下降，架設環狀H鋼支保工。

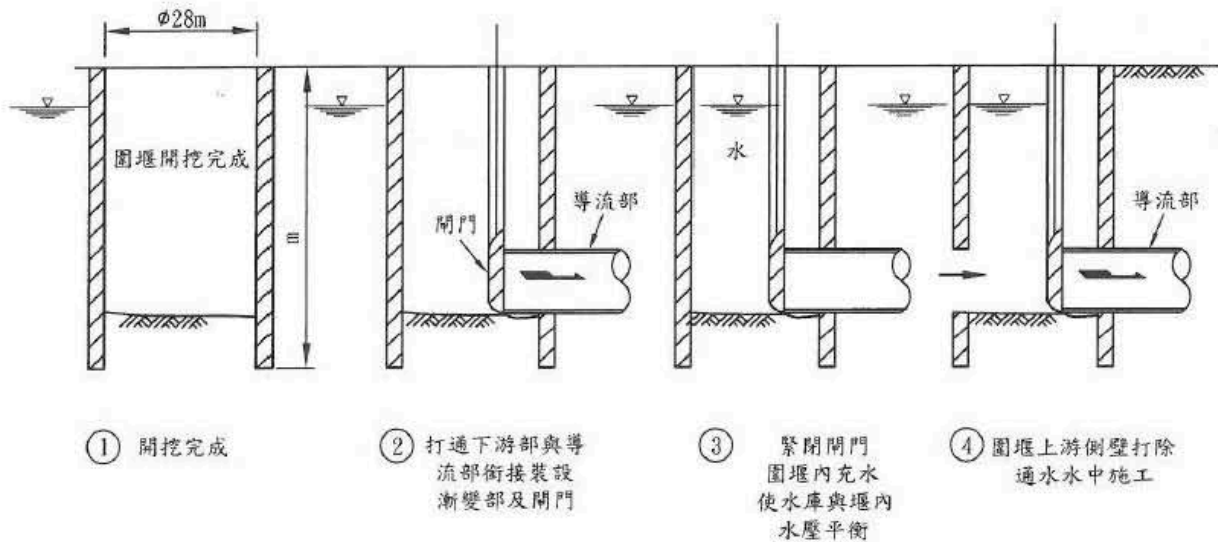
開挖至設計高程後，在其內裝設閉門並完成貫通，其程序如下示意圖：



圖A8 圓型副堰內挖方



圖A9 挖方及環狀H鋼支保工架設



圖A10 流入部施工示意圖

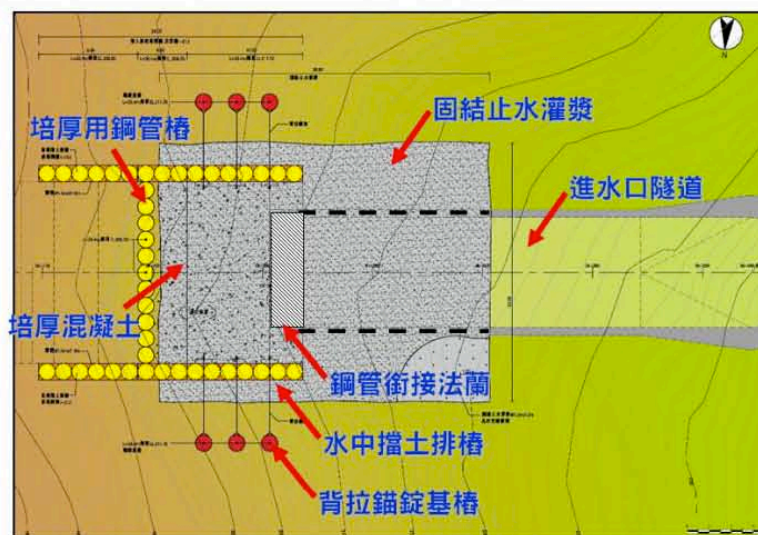
2. 曾文水庫

本工程係於營運中水庫施工，不可能配合施工需要影響供水。因此必須在水庫不放空或調降水位等先決條件下施工，若採傳統施工圍堰方式，則水庫滿水位深達50餘公尺，對於圍堰規模形成嚴苛考驗，需要考量適當方式來減小圍堰深度，遂有本工程獨創之象鼻引水鋼管之發想。

象鼻引水鋼管的設計原意在提高進水口隧道洞口的高程，在以鋼管向下延伸吸取水庫底部的積泥，目前設計管底高程EL. 190.0m往下延伸至進水口管底高程EL. 170.0m，當水庫蓄水浸沒管體後，藉蓄水壓力即可引底層渾水上流，據此，隧道進水口可上提至EL. 190.0m，大幅減小圍堰所需深度。

雖然象鼻鋼管可減小圍堰規模，但圍堰頂部開口仍可能受異常洪水侵襲而有溢淹之疑慮，因此，針對象鼻引水工法再予精進，使其不受水庫水位昇降之影響，其主要構想在於利用前一、二年枯水期期間，利用水庫低水位時期預先由地表施作擋土排樁及固結止水灌漿、縫地工法等邊坡加固工程；待工程後期，進水口隧道開挖至預定破鏡段時，隧道開挖已於前述邊坡加固保護範圍內施工，大幅提升施工安全；隧道開挖完成後，從上游端往下由依序安裝破鏡處的鋼管銜接法蘭、隧道襯砌、地下閘室結構體以及安裝水工機械閘門，並完成試運轉作業。藉此，在隧道破鏡段開挖時，進水口隧道及控制閘門、閘室均已完工，進水口開挖將不受當時水位高低影響，亦無水庫自本工程開挖中隧道潰決之風險。

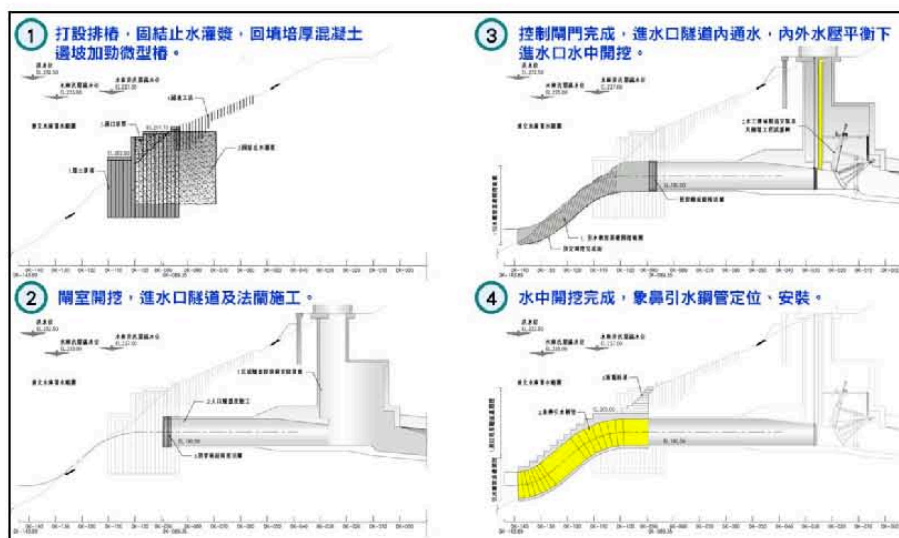
相關工程佈置及施工程序如以下示意圖所示：



圖B8 流入部工程佈置圖



圖B9 流入部工程施工圖

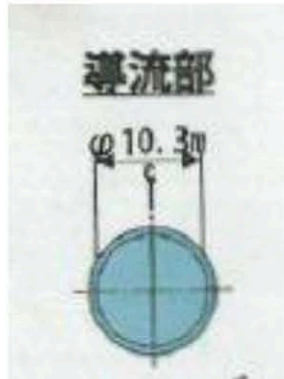


圖B10 流入部工程施工程序圖

(二) 導流部

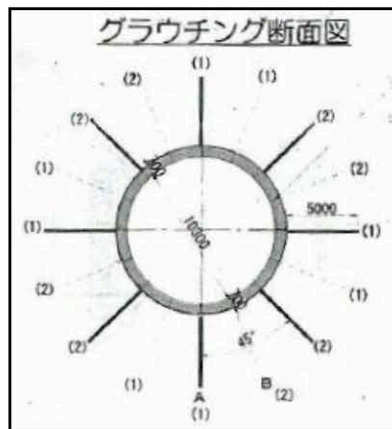
1. 天瀨水庫

圓形斷面 $\phi 10.3\text{m}$ ，滿管流，設計流量 $Q=600\text{CMS}$ ，流速約 $V=600/(\frac{\pi}{4} \times 10.3^2) = 7.2\text{m/s}$ ，襯砌RC厚70cm，採用 420kg/cm^2 混凝土，排洪非排砂，假設庫水是清的所以沒有耐磨層之設計。

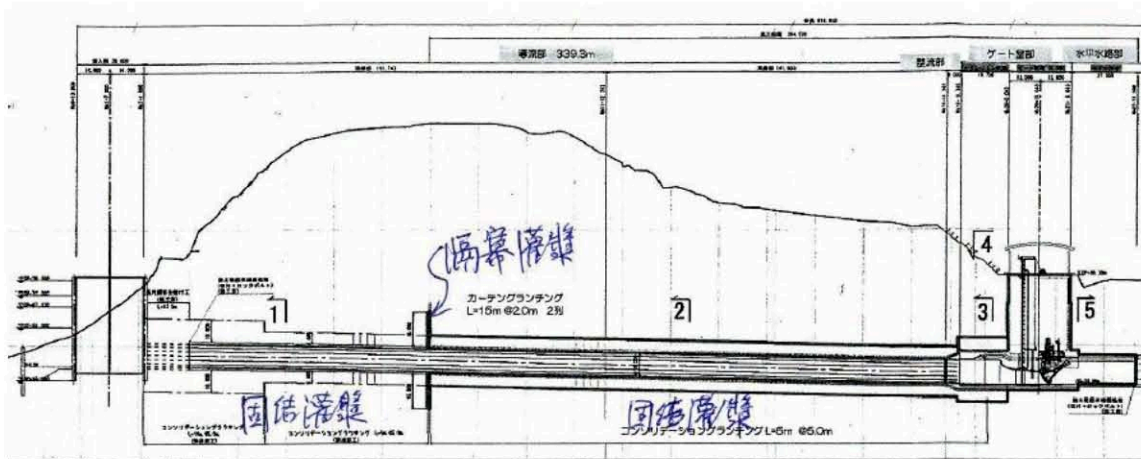


圖A11 導流部斷面圖

導流隧道是滿管流壓力隧道，所以有設計壓力灌漿。



圖A12 導流隧道壓力灌漿斷面圖



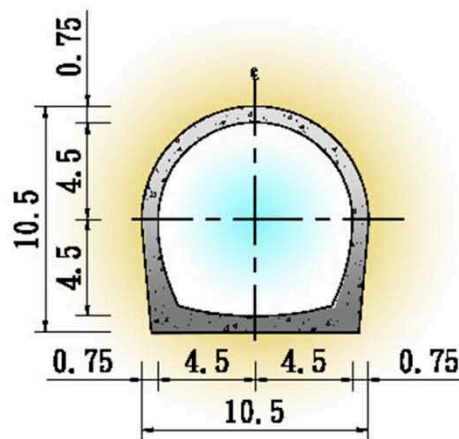
圖A13 導流隧道壓力灌漿斷面圖

2. 曾文水庫

本段全長862.82m，各里程如下：

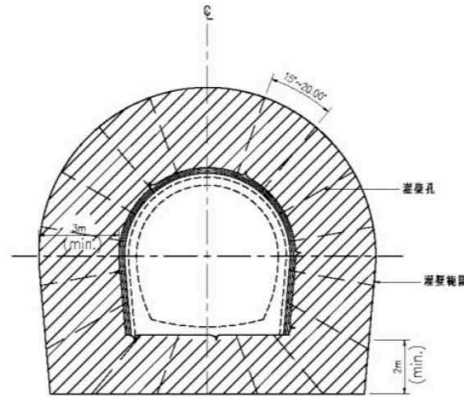
- (1)Sta. 0k+000~Sta. 0k+020.00：8.00m(W)×10.00m(H)矩型隧道，漸變為下半部6.00m高，上半部R=4.00m之門型隧道，坡度10.00%。
- (2)Sta. 0k+020.00~0k+100.00：下半部6.00m高，上半部R=4.00m之門型隧道，坡度10.00%。
- (3)Sta. 0k+100.00~0k+120.00：由門型隧道漸變為外三心圓隧道 $\phi=9.00\text{m}$ ，坡度10.00%。
- (4)Sta. 0k+120.00~0k+220.00：外三心圓隧道 $\phi=9.00\text{m}$ ，坡度8.00%。
- (5)Sta. 0k+220.00~0k+832.82：外三心圓隧道 $\phi=9.00\text{m}$ ，坡度5.317%。
- (6)Sta. 0k+832.82~0k+862.82：外三心圓隧道 $\phi=9.00\text{m}$ 漸變為12.00m(W)×9.24m(H)門型隧道，再漸變為15.00m(W)×9.91m(H)門型隧道，坡度5.317%，隧道仰拱高程EL.133.41m。

隧道內水深比 $y_0/D \leq 0.75$ (y_0 ：正常水深，D：隧道直徑)。正常滿水位EL.230.0m，流量約995cms；最高洪水位EL.232.5m，流量約1,030CMS；流速約 $V=28\text{m/s}$ 。襯砌RC厚75cm，採用 350kg/cm^2 混凝土。由於本工程為高壓洩水構造物，高速含砂水流對於混凝土面或鋼板表面均有可能造成嚴重磨損，因此採運用於黃河治理之改性環氧樹脂砂漿為抗磨材料塗附於水流接觸面上。

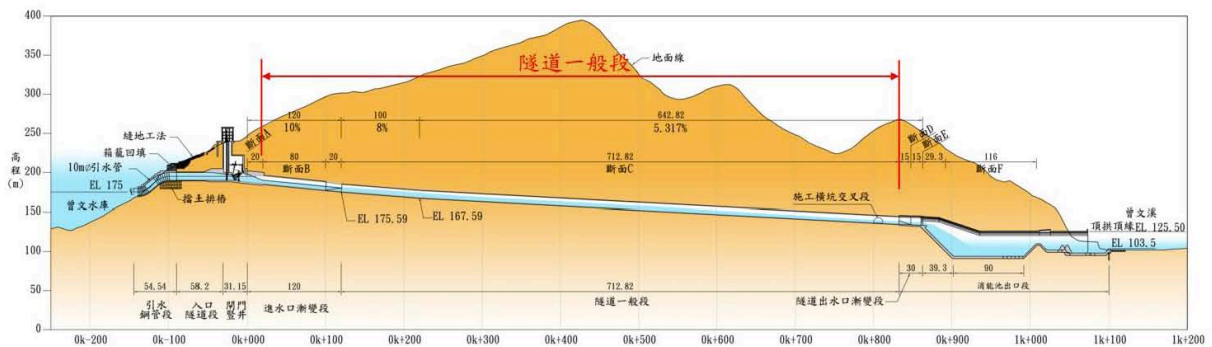


圖B11 導流部斷面圖

排砂隧道通過斷層破碎段及湧水處理，亦有施作地盤改良及錐體灌漿工法。



圖B12 排砂隧道地盤改良斷面圖



圖B13 導流隧道縱斷面圖

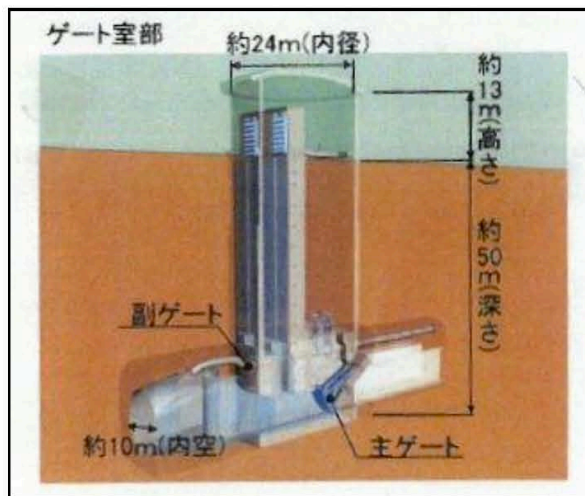
(三) 主閘門部

1. 天瀨水庫

豎坑 $\phi 24\text{m}$ ，深63m(含明挖13m)，如圖A14之示意圖，構造見圖A5。

主閘門3.6m \times 4.9m-2門，弧形閘門，油壓操作。

副閘門3.6m \times 6.00-2門，直提高壓閘門，捲揚機操作。



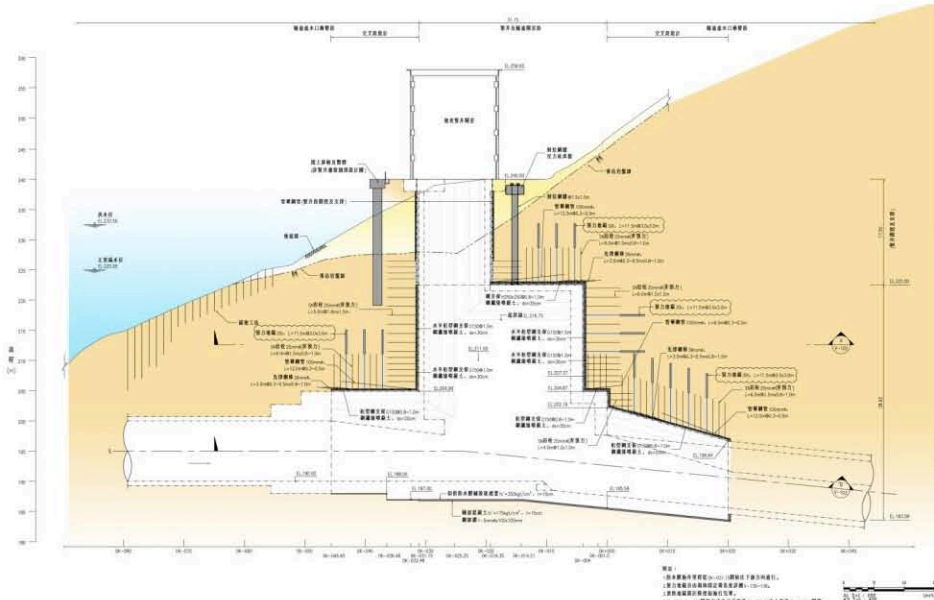
圖A14 主閘門部示意圖

2. 曾文水庫

豎井 $\phi 10\text{m}$ ，深50m(含土層開挖段12.5m)，如圖B14之示意圖，構造見圖B5。

控制閘門6.8m \times 6.8m-1門，弧形閘門，油壓操作。

緊急/維護閘門6.8m \times 7.7m-1門，直提式高壓閘門，捲揚機操作。

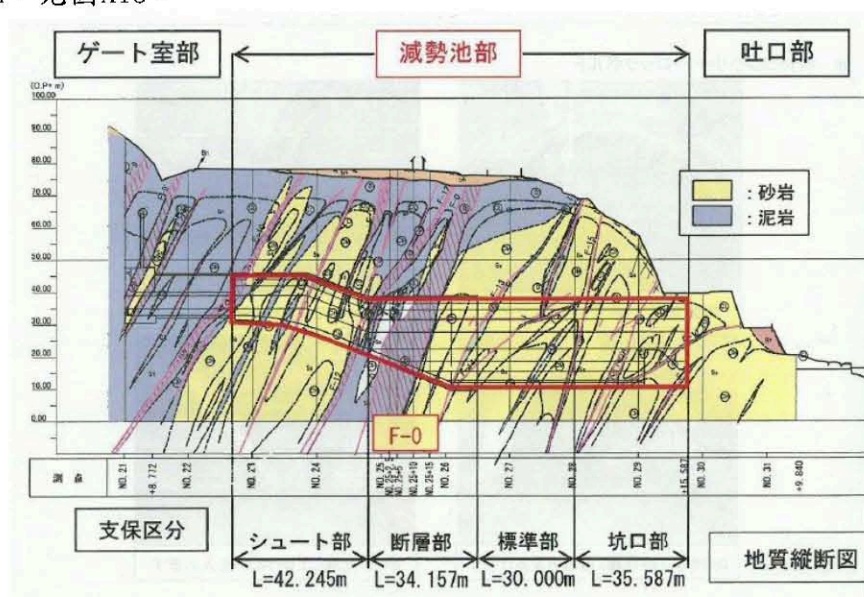


圖B14 主閘門部開挖支撐示意圖

(四) 消能池部

1. 天瀨水庫

消能池，馬蹄型斷面，單孔，高26m，寬23m。地質為砂岩與泥岩互層，有斷層帶長34m，見圖A15。



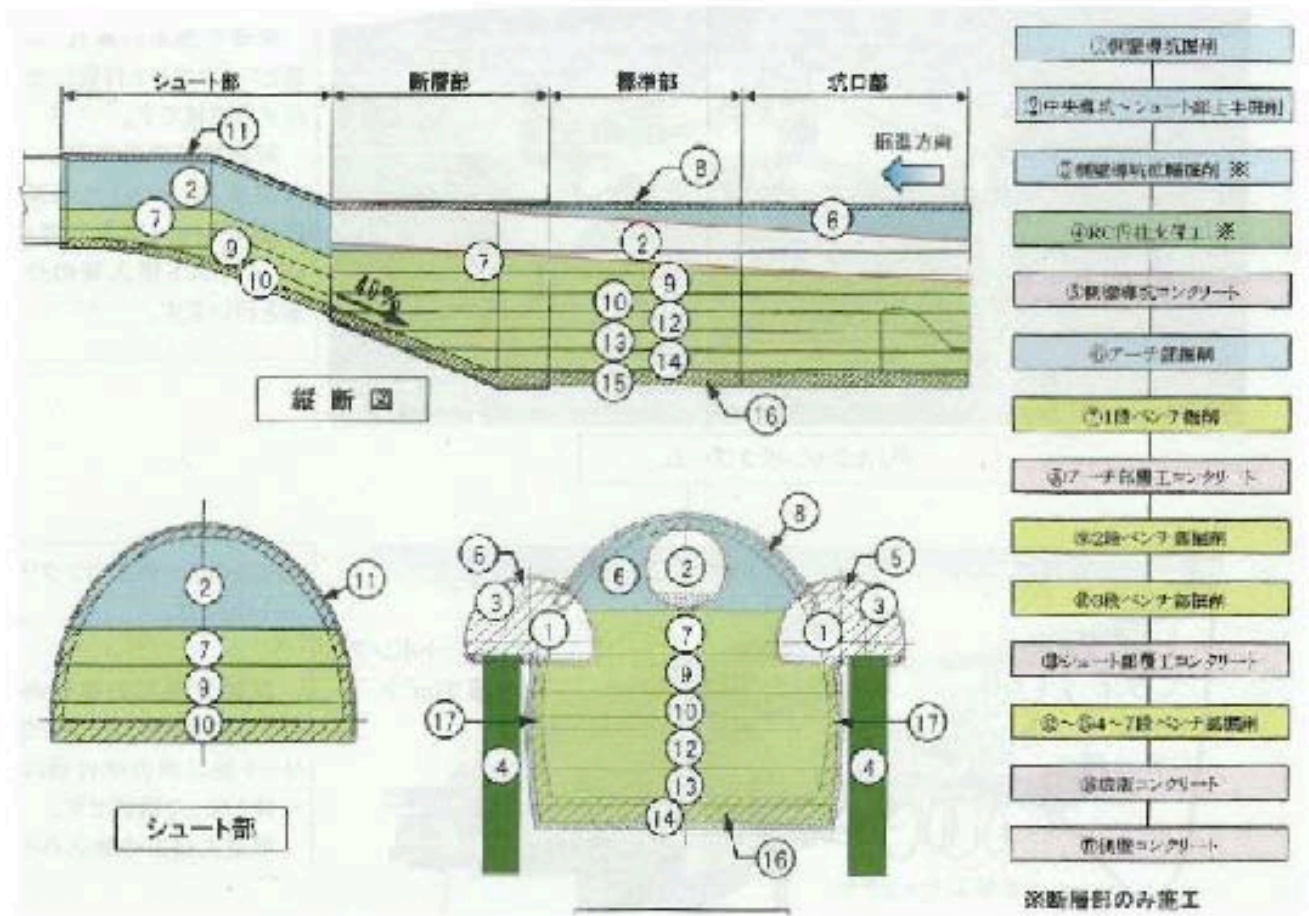
圖A15 消能池縱斷面地質圖

水躍式消能池，有做水工模型試驗水躍情形，見圖A16。



圖A16 消能池水工模型試驗情形

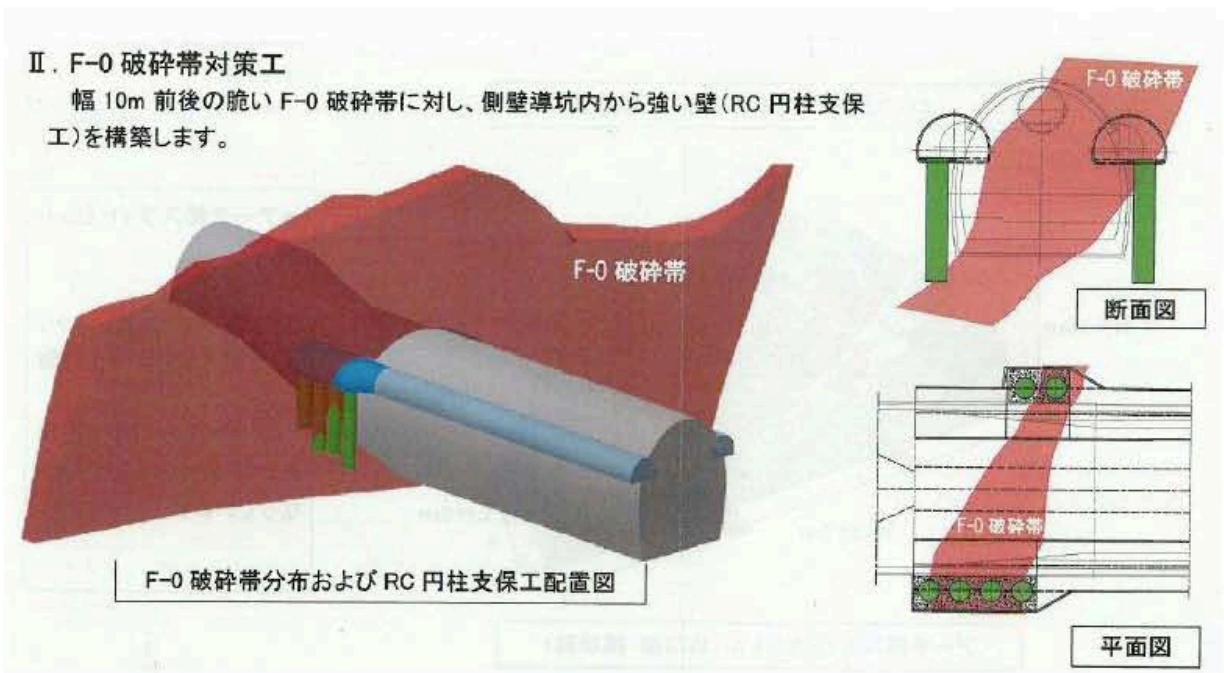
施工開挖順序，見圖A17。



圖A17 消能池開挖順序圖

断層破碎帶之対策：

從兩邊導坑打RC圓柱支保工，右邊四支、左邊二支，見圖A18。



圖A18 破碎帶由隧道兩側打設全套管樁示意圖

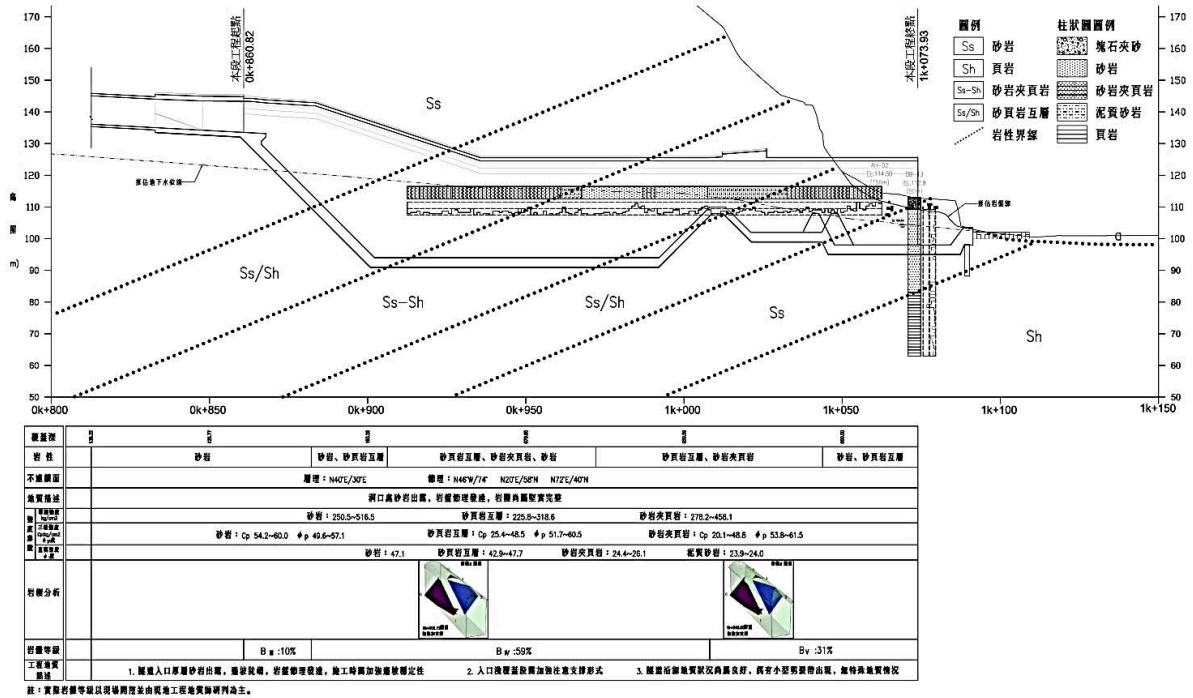
2. 曾文水庫

(1)Sta. 0K+860.82~Sta. 1K+120.81：為有效消能，自隧道末端設置投潭消能池，長168.3m，淨寬18.0m，池底高程EL. 94.0m，堰頂高程EL. 110.0m；為與曾文溪銜接，布置兩階跌水工，第一階跌水工池底高程EL. 102.0m，堰頂高程EL. 108.0m，第二階跌水工池底高程EL. 98.0m，堰頂高程EL. 103.5m。

(2)考量隧道結構安全，原淨寬18m之隧道於第一座溢流堰後分為2孔寬10m之隧道出洞。

(3)出水口段末端(Sta. 1K+067.12)寬度往下游漸擴至為65.83m，降低單寬流量，出口溢流堰底並設置 $\phi = 1.5\text{m}$ ， $L=10\text{m}$ 之排椿，溢流堰上游至下游20m範圍內拋放混凝土塊及塊石作為河床及基腳保護工。

參考地質鑽探及試驗成果為主要參考依據，其中施工橫坑開挖面地質展開圖紀錄於里程0k+020~0k+035與0k+075~0k+100兩區段存有寬度約1~2m之岩盤破碎帶，但未發現明顯錯動跡象，縱斷面地質圖如圖B15所示。



圖B15 消能池縱斷面地質圖

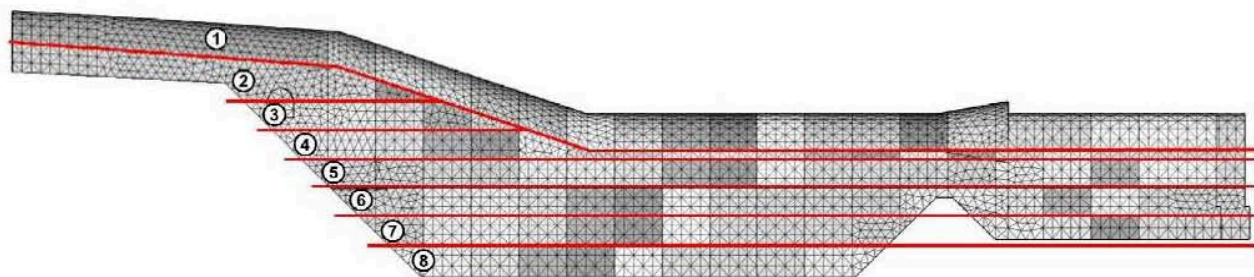
水工模型試驗以新建排砂隧道為主體，模擬現場上游曾文水庫大壩左側局部地形及下游曾文溪局部地形，水躍情形見圖B16。



圖B16 消能池水工模型試驗情形

圖B17為開挖支撐步驟示意圖，條列說明如下：

- 第一階段：大地自重平衡；
- 第二階段：施工隧道開挖及支撐；
- 第三階段：降挖6公尺開挖及支撐；
- 第四階段：降挖12公尺開挖及支撐；
- 第五階段：降挖18公尺開挖及支撐；
- 第六階段：降挖24公尺開挖及支撐；
- 第七階段：降挖30公尺開挖及支撐；
- 第八階段：降挖36公尺開挖及支撐；
- 第九階段：完成消能池開挖及支撐。



圖B17 消能池開挖與支撐順序圖

本工程受限於曾文溪河道狹小之限制，必須將消能設施建置於山體內，待高速水流消能完成後，再排入曾文溪河道。因此，在出水口端必須開挖一大型地下洞室作為消能，由於消能池室位於隧道出口，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18.0公尺縮減為10.0公尺，提升隧道開挖穩定性。

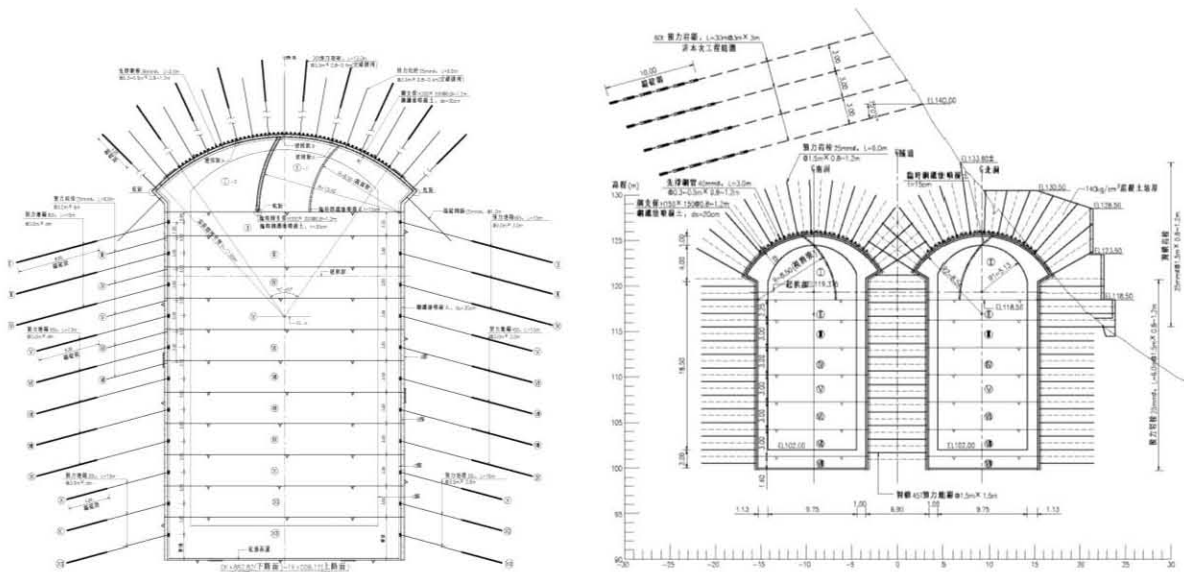
雖然消能池室向山體內佈置，已適度減輕淺覆蓋之不利影響，但終究此一大型地下洞室仍然位於邊坡岩覆不深之山體內，而隧道線型與邊坡坡向未呈正交，對於洞室開挖而言，其地形上產生的偏壓效應，因開挖有相當不利的影響。因此規劃消能池室施工方式如下：

(1)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，採不對稱支撐方式設計。

(2)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邊坡破壞。

(3)出水口隧道分岔處岩心過薄無法自持部分，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。

相關工程佈置及斷面如圖B18所示。



圖B18 消能池及出口淺覆蓋段斷面圖

四、 總評論

1. 從整體佈置來看，天瀨水庫排洪道的主副閘門放在偏下游處，可能是要使閘門室的豎坑不要太深，但是卻使閘門室上游之導流隧道變成壓力隧道，需要全面固結灌漿，更做一道截水牆做融幕灌漿。另外為了將來導流部的維修，在流入部裝設維修閘門，閘門寬10.3m高12.3m，是大型的高壓閘門，工程費不少。主閘門室下游之徒槽、消能池與出口與曾文相似，曾文的主副閘門放至上游端，緊接流入部。閘門出口即自由流，佈置較單純。

2. 曾文在主閘門由下游輸水隧道，因流速大於10m/sec，且排放含泥砂水流，預期RC有磨損的問題，襯砌RC抗壓強度350kg/m²外，再塗佈厚8mm之環氧樹脂類之抗磨損材料，天瀨水庫RC用420kg/m²，因設計排清水，無抗磨損設施。

3. 流入部：天瀨水庫只需引入庫水排放，所以儘量靠岸佈置，採用圍堰方式，圓形圍堰以鋼管打設成圓筒形。鋼管 ϕ 1.50m打入深50m，是先架設施工平台，以利打設機與挖掘機作業，工程艱鉅費用也很高，但是特殊的是圍堰打設後，圍堰內的開挖與出土是用遠方遙控操作。流入部含前庭水中開挖及閘門機電等工程費以台幣估價要4億之以上。

曾文的流入部，因為目的是排砂，因此深入水庫泥積層內較有利，不適合佈置

在岸邊。常水位EL. 225m，流入口處EL. 170m，相差55m，如果以天瀨水庫鋼管圍堰方式，連貫入深度須70m深，比天瀨的更深20m，水中架設工作平台，是超大的工程，結果採用象鼻狀的鋼管，伸入水庫中，另一端與主副閘門室前之漸變段連接，象鼻狀鋼管內徑 ϕ 10m，結構上是兩層管中間有加強鈹。在附近岸上加工成型總長62.4m，總重達1,526T，此龐然大物的安裝，是先水中挖槽溝，趁水庫高水位時推入水中，整體像鋼殼船(兩端暫時封堵)拖曳定位後，封堵段拆除，然後下沉定位，再以混凝土固定，此工法應是世界首創僅需3.6億元工程費，如果以天瀨之工法可能要5億元以上，且施工快速，工期的安排不在緊要路線上。

4. 消能池同樣在山腹內，天瀨的宣稱是日本最大的，但是曾文的更大，而且位在出口中心與等高線斜交，即隧洞的兩邊土壓力極不平衡，且出口岩層較破碎，處在非常危險的施工環境中，結果設計施工予以克服，已經安全的完成，天瀨的消能池才完成導坑，正在施工中。

5. 整體來看，曾文排砂隧道的規模比天瀨的排洪道規模大，工程費便宜，工期更短。台灣的水利工程技術已經不會輸日本。

投稿 106.04.21
校稿 106.04.24
定稿 106.04.26