

壩工與地質

謝敬義*

三、壩工程有關之重要附屬水工結構物

築壩的主要目的是蓄水以供利用。另一方面為了壩體的安全以及水庫營運與維護上之需要，除了壩體之穩定性外，亦需配合其他安全措施以確保壩體以及水庫周圍安全以及使用壽命。基本上，與壩工程有關之重要附屬水工結構物約有如下數項：

3.1 進水口（或取水口）(Intake)

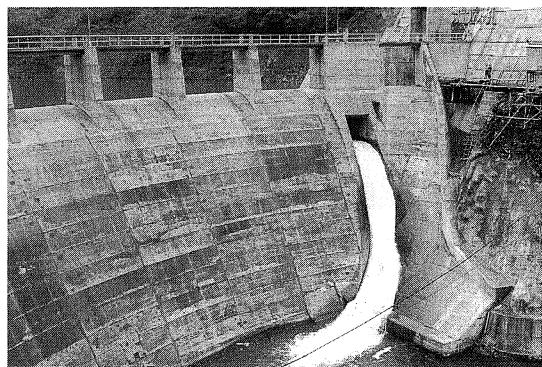
進水口係將水庫之水經過一可控制之閘門以調節進水量之裝置。其位置均配合排砂道設在靠近壩體兩側之一。如圖四德基大壩之進水口設在大壩之左岸。

3.2 排砂道或沈砂池

(Flushway or desiltation basin)

為防止水庫長期累積之淤砂，影響水庫之壽命或阻塞進水口，必須定期排砂。排砂道有時位於進水口附近由一閘門控制。排砂時將閘門開啟後，淤砂即由閘門經排水道直接排放於下游河谷中。如圖十七為銑櫃溪壩之排砂道。亦有將排砂閘門與沈砂池同屬於一結構體。為防止水中之懸浮砂粒太多而影響水輪機或其他機件之耗損，在取水後另設一沈砂池，將水中之砂粒先行沈澱後再引流至下游利用之。沈砂

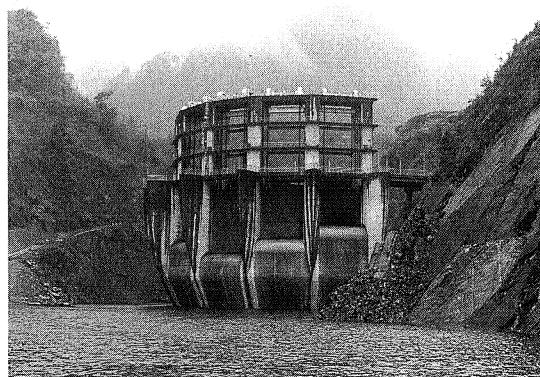
池中即另設排砂門以排除池中之積砂。



圖十七 台電銑櫃溪引水壩之排砂孔

3.3 溢洪道(Spillway)

在長期或密集性之豪雨下，水庫中之水量若無法完全引入下游利用或在緊急情況下，如壩體龜裂或損壞以及颱風來襲前，欲達到防洪的目的，必須將水庫之水位緊急降低至某一水位時，即由溢洪道將水庫之水量排除。溢洪道為高速水流之通道，因此均為混凝土結構。依不同的設計、其型式變化甚多。一般多設在壩體內（必須是混凝土壩），由閘門控制，亦有不需閘門、直接由壩頂溢流之設計，如圖二之谷關壩。亦有在水庫內另設溢洪隧道，由溢洪隧道進口另設閘門加以控制。圖十八為德基大壩溢洪隧道之進水口。圖四中德基大壩壩體內尚有五道溢洪閘門。溢洪道之佈置對堤壩之選擇甚為重要。



圖十八 台電德基大壩溢洪隧道之進水口

3.4 頭水隧道與尾水隧道 (Headrace tunnel and tailrace tunnel)

對水力電廠而言，其水路隧道在進入壓力鋼管前之一段稱之為頭水隧道。發電後再排出下游之隧道段則稱之為尾水隧道。若屬地面電廠，則可能無尾水隧道。這兩種隧道依隧道高程與水庫水位之關係又分為壓力式隧道與重力式隧道兩種。隧道之高程較水庫之水位為低時，該隧道呈滿管狀態，隧道結構除了受隧道周圍之岩壓外，亦受隧道內淨水頭之內壓，此種隧道稱之為壓力隧道。若隧道之高程與水庫之水位約同高時，隧道內水流非滿管，則該隧道結構體所受之壓力僅為外圍之岩壓，此種隧道並未承受內壓稱之為重力隧道。一般傳統之水力電廠之尾水隧道均屬重力式隧道，但抽蓄電廠之尾水隧道則仍屬壓力隧道。而頭水隧道可為壓力式或重力式隧道。

3.5 平壓塔(Surge tank)

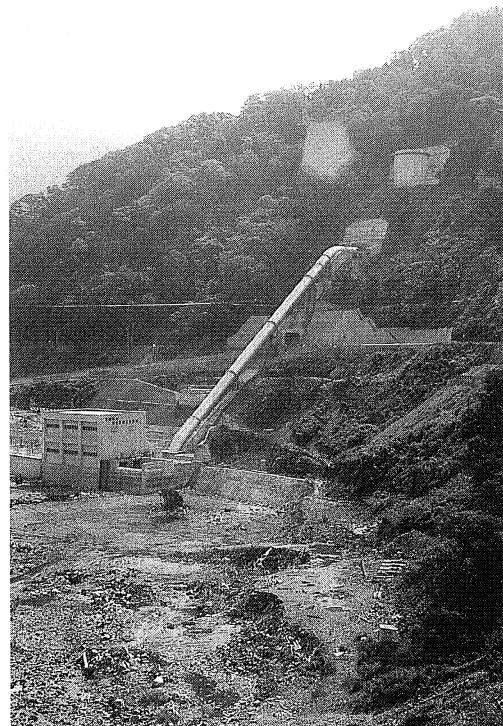
在壓力隧道之途中，常設有一平壓塔以調節因電廠停機或起動運轉時隧道內瞬間壓力之變化。此一安全措施在停機時可減少壓力隧道內壓之瞬間衝擊。在開機時

可加速啟動之效率。兩個平壓塔應有兩個壓力隧道。此一安全措施在壓力隧道中方有需要。

3.6 壓力鋼管與電廠

(Penstock and Power House)

頭水隧道進入電廠發電前，因水頭壓力大，故需採用鋼板結構所構成之圓形鋼管以承受龐大之水壓與流速，此一鋼管與水輪機相接並帶動發電機而發電。一般而言，壓力鋼管大多埋設在45度以上之斜坑內。但地面電廠則與地面鋼管相連，高角度之斜坡主要著眼於縮短鋼管以及施工時石碴之搬運。電廠則為發電之主要場所，包括水輪機室、發電機室及變電所等。根據設置之地點有地下式、半地下式及地面發電廠等。（圖十九）



圖十九 壓力鋼管及地面電廠

四、壩址與壩型選擇所應考慮之因素

壩址與壩型選擇攸關整個築壩工程計劃成敗之關鍵。因此在初期規劃以及可行性研究階段，壩址調查以及壩型選擇為這兩個階段中最重要的工作項目。

4.1 壩址選擇所考量之因素

基本上、壩址的選擇有兩個重要的問題必須加以考慮。一為築壩的目的或功能；二為築壩工程有關的工程地質問題。茲分別說明如下：

4.1.1 築壩的功能與目的

很多地質師誤以為壩址選擇的最重要因素為地質條件、此一想法只對50%。事實上任何築壩計劃中選擇壩址最先考慮的事項為築壩計劃之目的或功能。首先由整體工程佈置之安排，由地形上選擇幾處適當之壩址，或在某一河流根據工程計劃之需要性指定某一高程範圍內選擇適當之壩址、而最理想地質條件的壩址並不一定為築壩工程計劃所需的壩址。例如為水力開發為目的的築壩計劃大多選擇在河流的中上游地帶。壩址的選擇必須考慮與壩體相關附屬水工結構物之佈置，水庫之容量、以及上下游之間將來其他水資源開發以及環境影響或天然資源如礦產利用等其他因素，若築壩目的為蓄水以供農業灌溉或都市飲水或工業利用時，則壩址應考慮在距離農業開發區以及人口集中區附近之河流段來選擇適合的壩址。若築壩的目的為攔砂或防洪，則需在河流的中下游地帶尋找壩址。因為防洪為目的之壩址若設在上游區，則其集水面積小而達不到防洪的目的。而攔砂壩則應在崩山帶之下游方能達到

攔砂的目的。因此，在工程規劃階段、並非在某一河流中漫無限制尋找壩址。

4.1.2 築壩工程有關的地質問題

根據前述所規範之規劃條件，在某一河流之限定範圍內考慮理想壩址的地質問題。因為壩址的地質條件與將來築壩時壩型的選擇，結構物設計以及工程成本等具有相當密切的關係，由此可知所謂良好的壩址係在工程開發規範中就最佳之地質條件中加以選擇。

從工程地質的觀點，理想的良好壩址應具有下列各項共同之特性：

(1)壩址之地形

一般而言，壩址之河谷愈窄愈好，因所需壩體之材料愈少。壩址之地形條件通常均採用所謂弦高比(Chord-height ratio)來加以評估，而弦高比對壩型之選擇相當重要。

(2)壩址兩翼壩座的穩定性

壩址兩側壩座以及上下游邊坡之穩定性關係將來施工時，壩座開挖深度以及其他進水口等附屬水工結構物之佈置。

(3)壩址河床堆積物之厚度

對於低壩而言，壩體雖然亦可直接座落在河床堆積物上，但對於60公尺以上之高壩，壩體仍需座落在堅實之岩盤上。因此若壩址河床堆積物厚度達20公尺以上時則將增加施工上之困難。

(4)壩址基礎之岩體強度

一般而言，壩址基礎之岩體強度，除非屬於膠結不良之頁岩或泥岩，在台灣地區第三世紀以前之岩層，其承載力均足夠需要，但岩體強度之均勻性與變形性則與壩型選擇具有密切關係。

(5)壩址之地質構造特性

壩址基礎之地質構造及岩體內所含不

連續面或斷層破碎帶等均可能產生水庫沿壩基漏水之現象，1974年Wahlstrom 曾列出各種可能發生壩基漏水及危及壩體穩定性之地質構造（洪如江1985）。

(6) 壩址上游水庫之容量

前述壩址河寬愈窄愈好之原則，僅係針對壩體體積工程材料數量之觀點而言。理想之壩址除符合此一條件外，壩址上游水庫地區並需具有寬廣河谷與平緩之坡度；因此理想壩址常位於河谷地形呈喇叭型頸口部份。

(7) 壩址上游水庫地區之水密性

水庫地區之水密性與地下水位，岩層之透水性，地質構造特性以及地形等因素有直接與間接之關係。水庫地區因水庫蓄水後，山谷兩側之地下水位隨水位上下而發生變化。因此，水庫地區山谷兩側地下水位變化之條件受地下水文地質情況之因素所左右（洪如江1985，Zaruba，1976）。水庫地區岩層之透水性，尤其對於石灰岩地區常造成水庫大量漏水現象。台電之龍溪水庫，台灣高雄地區之鳳山水庫即屬此類型之案例。此外，地形上之因素如水庫附近相鄰河谷之高低相差太大亦可能造成水庫漏水之潛在性，上述台電龍溪水庫漏水現象，主要雖肇因於水庫地區石灰岩之透水性，但其相鄰之木瓜溪，水平距離僅1公里，其高差即達900公尺，此一地形之差異亦造成水位向水庫外流之因素。

4.2 壩型之選擇

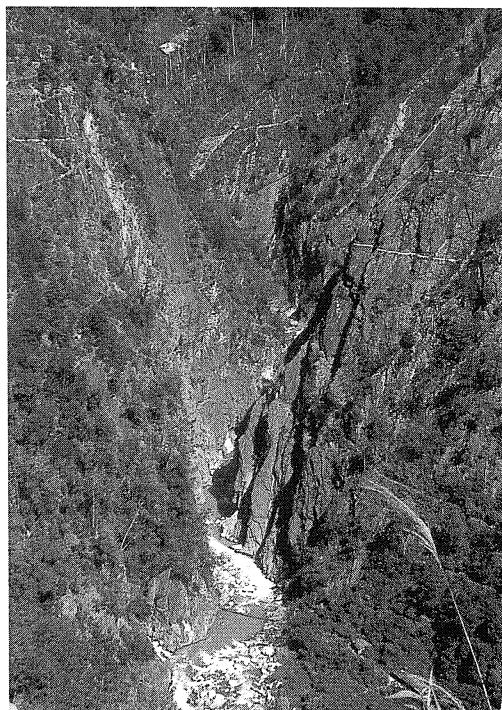
壩型選擇基本上應考慮下列因素：

4.2.1 壩址河谷地形

根據前述之弦高比(Chord-height ratio)河谷概可分為四類、即峽谷(Gorge)其弦高比小於3；狹谷(Narrow Valley)，弦高比

為3-6；寬谷(Wide Valley)弦高比為大於6；以及平緩河道(Flat country)等。對於築壩工程而言，在平緩河道上建壩之實例多屬低壩。如台灣東勢附近之石岡壩即屬此類。

一般而言，弦高比小於3之峽谷型較適合拱壩，如台電之谷關與德基壩，其弦高比僅分別為1.2及1.6，圖二十為德基大壩未施工前之壩址地形，而意大利之Vaiont 拱壩弦高比僅0.7。對於弦高比為3至6之間之狹谷，則多採用重力式混凝土壩或重力式拱壩，對於弦高比大於6之寬谷，則除可考慮混凝土重力壩與樑壩之外，堤壩類之壩型亦可加以考慮。其取擇端視其他因素之配合而定，以下將再加說明。值得指出的是對於河谷平直之峽谷或狹谷地形之壩址，則鮮少選擇堤壩之壩型。主要原因為



圖二十 德基大壩未施工前壩址之河谷地形

堤壩係由土石材料堆積壓密後所構成。因在堤壩本體內無法建造溢洪道，而直線峽谷或狹谷地形大多無適當之地點可供溢洪道之佈置。另一原因為施工上之考慮，因峽谷或狹谷地形不利於大量機械施工之需求。

4.2.2 壩址基礎之力學強度

一般而言，任何基礎均可建造堤壩，甚至在河床堆積層上亦無問題。但對於混凝土壩，則其基礎必須座落在堅實之岩盤上。雖然混凝土壩壩型之選擇對其岩盤基礎之力學強度有其基本之要求（洪如江 1985），但基本上岩盤基礎之強度愈高愈適合拱壩。或壠壩，因此兩類型之混凝土壩，基礎受力面積小，故對於高壩而言，常有應力集中之現象。

4.2.3 壩址岩體不連續面之特性

對於拱壩之設計，因藉拱作用將水庫大部份之靜態壓力經壩體傳遞到兩翼之壩座上(Abutment)，因此若壩址兩翼壩座之不連續面若具有與拱作用之推力方向平行者，則因拱作用之推力(Thrust)而產生位移時，壩體將引發張應力之情況而使壩體產生龜裂，另一方面若垂直於拱作用推力方向之不連續面中含有填充物(Fillings)，則因推力(Thrust)方向使此類填充物發生壓縮變形，壓縮變形(Yield)亦將使壩體受到張應力之作用而發生龜裂。如圖15為拱壩兩翼中與壩座接觸之情況箭頭為推力方向，AC為垂直推力方向，前者位移與後者因壓縮均將使壩體產生張應力。由以上之分析，在節理發達之岩體尤其在節理內含有填充物之岩體較不適合於拱壩之壩型。

4.2.4 材料之供應

壩體材料供應之便利性亦為壩型選擇

考慮之因素之一。混凝土所需之骨材或堤壩所需之土石材料以及壩心不透水黏土與濾材等均可能影響建壩之工程成本。

4.2.5 氣候因素

氣候因素為影響選擇堤壩與否的重要因素之一。因堤壩不管係土石壩或堆石壩，壩體材料均為未膠結之土石材料經歷實後所構成。因土石材料在壓密過程中均需在最佳含水量(Optimal moisture-content)之情況下，方能獲得最佳之壓密效果。因此，對某一計劃壩址，其年平均降雨天數太多，或在該壩址之年平均洪峰(Flood discharge)太大時，均不利堤壩之選擇。

4.2.6 地震因素

一般而言，堤壩類之土石材料較適合於強震區或頻震區。因土石材料雖然強度較低，但具有較大之可塑性，故能承受較大之位移。反之，混凝土材料雖具有較大之強度但因屬剛性材料，一旦混凝土內發生龜裂，混凝土內因龜裂而發生漏水後，將影響混凝土壩之安定性。

目前正施工中之三義附近鯉魚潭水庫計劃，因位於台中附近之強震區。其壩型選擇土石壩，地震因素亦為重要因素之一。

根據以上之分析，壩型之選擇主要係基於壩體之安全性，施工性以及經濟性等綜合評估後所得之最佳選擇。

五、築壩工程地質調查之要項

對於築壩工程有關之工程地質調查，在可行性以及設計階段應包括如下幾個要項：

5.1 壩址調查

一般而言，壩之工程地質調查應涵蓋壩軸上下游各約200公尺範圍內地表與地下精密周詳之探查計劃。若考慮堤壩，則其涵蓋範圍更應擴大至上下游各300公尺左右。

壩址調查通常係以計劃壩軸為中心，調查項目包括：

- (1)壩址河床堆積物之厚度。
- (2)兩翼壩座(Butment)之岩盤特性。
- (3)壩址基礎之透水情況。
- (4)壩址附近之斷層與不連續面。
- (5)壩址兩岸邊坡之穩定性。

以上壩址調查之項目主要係提供壩高，壩型選擇以及壩基開挖深度評估分析之基本地質資料。

5.2 水庫地區水密性及邊坡穩定性之調查

築壩工程中最易被忽視的二項調查為水庫地區之水密性與邊坡穩定性，壩體完工後除了石灰岩地質因可能含有地下溶蝕洞而漏水外，因蓄水而使河谷水位上升。對於高壩計劃由於水位大幅升高，水庫地區兩岸之地層構造與相鄰河谷間之地形關係均可能造成漏水現象。

在台灣地區目前已發現之水庫滲漏主要為石灰岩地區與兩岸因台地堆積物位於水位以下兩種情況最為常見。以本省地區而言，對於像國外因舊河道或冰積層而引起之漏水則較為罕見。

對於水庫邊坡穩定性調查係緣於意大利Vajont 壩左岸大崩山所造成之災害而引起嚴重之關切。水庫地區之邊坡穩定性調查除了與壩體以及下游之安全有關外，對於水庫淤積之預測以及水庫壽命之評估亦

可提供相當重要之資料。

5.3 材料調查

壩體之材料與築壩成本關係密切，亦為壩型選擇重要考慮因素之一。材料之調查應包括材料之產地、產量、品質以及運輸或加工等問題之研究與評估。

5.4 其他與壩工程有關附屬結構物之調查

如前所述，築壩工程計劃中，除了單純防砂之攔砂壩，僅需有溢洪措施外，其他因其目的不同均有其附屬之水工結構物。

其中最重要者為進水口與溢洪道之調查，尤以溢洪道之配置為選擇堤壩壩型相當重要之關鍵性因素。其他水力發電所需之平壓塔，水路隧道，壓力鋼管、地下或地上電廠等均需加以調查，此外其他施工前之導洪隧道，上下游圍壩壩址，以及溢洪道出口，水流衝擊地區等亦為工程地質調查之重要範圍。

六、結語

過去大壩崩潰，主要係肇因於規劃時未能經過詳細之地質調查所造成之結果。壩工之設計雖有理論上之根據，但設計時所依據之地質條件與力學參數常包含甚多不可知之變數。因此，在進行壩工計劃時，從壩址選擇、壩高與壩型之決定，以及施工中壩基之處理等，工程地質師均應充分與結構工程師以及其他相關之工程師密切合作，瞭解整體壩工計劃之需求，進行詳細之地質調查與試驗。正確而詳細之地質資料與力學參數，為壩體安全水庫應用成功之重要關鍵。

參考文獻

洪如江(民國74年)；工程地質在水庫之應用，
地工技術雜誌，第9期，P122~129。

洪如江(民國74年)；工程地質在壩工之應用，
地工技術雜誌，第10期，P109~121。

傅重俊(民國75年)；工程地質在壩工基礎之應用，工程地質講習會，榮民工程事業管理處。

HENRY H. THOMAS, 1976 ; The Engineering of Large Dams, Part 1, John Wiley and Sons, 376 PP.

KRYNINE and JUDD, 1965 ; Principles of Engineering Geology and Geotechnics , PP 730.

P.B. ATTEWELL and I.W. FARMER, 1974 ; Principles of Engineering Geology , London Chapman and Hall PP 1045.

QUIDO ZARUBA, VOITECH MENCL 1976 ; Engineering Geology, Czechoslovak Academy of Sciences, PP 504.