

壩工與地質

謝敬義*

2.3 各類壩型之特性

2.3.1 堤壩類之壩體與基礎之力學特性：

如前所述，堤壩為一由龐大之未固結土石材料堆積而成，因此，壩體之穩定性主要與壩址基礎之地質條件、組成壩體之材料特性以及施工過程中：材料處理等息息相關。對於堤壩類之規劃與設計要求，主要之考慮因素包括：

- (1) 壩體材料之強度、壓縮性以及孔隙水壓力問題
- (2) 壩體內以及基礎接觸面間因滲流(Seepage)而引起之上揚力與基腳管湧問題
- (3) 壩體材料在地震時，可能產生之液化問題
- (4) 壩體與基礎面之抗滑問題
- (5) 壩體上、下游坡面之穩定性問題
- (6) 壩基礎（尤以基礎為未固結沈積物）以及壩體本身之穩定性問題。

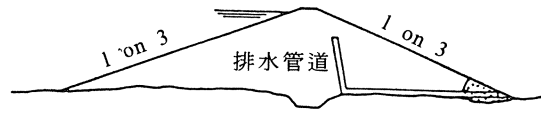
基於以上設計上之考慮以及壩址獲取材料之方便性，堤壩類大致上又可分為(1)均質土石壩(Homogeneous Embankment)以及(2)層狀土石壩。均質之土石壩，顧名思義，壩體係由均勻之土石材料所組成。因此土石材料之粒徑較為細小，以防止石壩體內發生漏水現象。同時壩體材料與基礎之間須有周全之壓密過程，以避免水流沿土石材料與基礎之接觸面發生滲流。土壤

材料經壓密後，在飽和狀態下須有足夠之抗剪強度，並能確保在地震時不發生液化現象。為獲得下游坡面之穩定性，壩體下游部份應儘可能減少其滲透性，故常在壩體內設置一排水系統，將壩體內之地下水導引至此一排水帶以保持下游壩體完全乾燥，如圖六所示為一似煙囪型之排水帶，其位置及傾斜方位依壩體組成材料特性而定。為防止壩體材料因滲入排水帶阻礙排水功能，排水帶之兩側常須有過濾層之設置。若壩址基礎之透水性較大或壩體材料粒徑較大時，則在壩體中央需有一不透水石心(Core)以及一止水牆(cut-off)之設計。不透水石心及止水牆可利用不透水之黏土土壤或混凝土或瀝青等材料所構成，或在壩體填築前以灌漿遮幕(grouting curtain)方式為之。在某些情況下，亦可自不透水石心底部向上游作一不透水底版(clay blanket)（圖七），以減輕下游面之孔隙水壓力，防止管湧之可能性。由於均質土石壩之土方多於石方，加以壩體內常有滲透(Seepage)之情形應加控制。故一般而言，其穩定性較差。故壩高通常較低。目前最被採用的土石壩屬於層狀土石壩。此類土石壩一般概可分為三種不同材料之壩體（圖八）。最內一層為壩心(core)，由不透水材料所組成，此種不透水材料多依據建壩時材料之取得或經濟性加以選擇，大部份為水庫地區或壩址附近可供採集之黏土質壤土，其透水係數應低於 10^{-5} cm/sec，

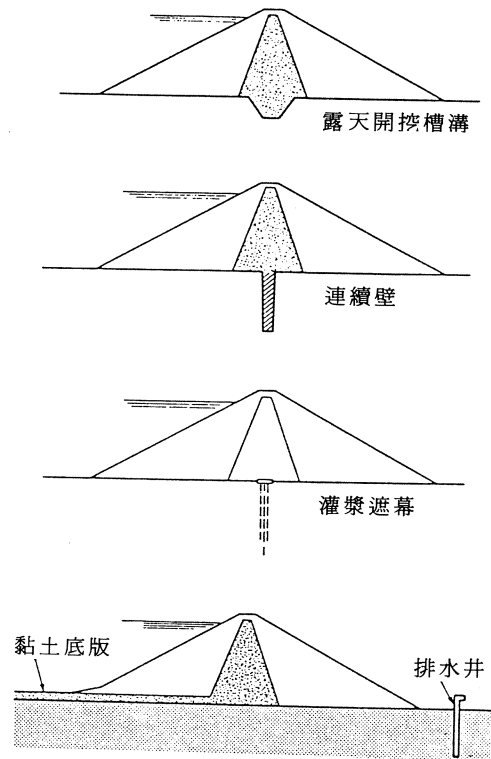
*台灣電力公司專業地質工程師

經壓密夯實後，可達 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/vc}$ 。壩心之寬度設計依取得材料之密緻性以及基礎情況而定。壩心之位置通常均位於壩體之中心，亦可向上游傾斜。此外，壩心之材料亦可採用瀝青混凝土或混凝土，甚至金屬或橡膠等物質。在壩心之兩側有一層過濾層(Filter or Transition zone)。此一過濾層之存在，具有穩定壩心，防止壩心細料在水庫水位降低時流入上游外圍壩殼(Shell) 以及水庫常水位時，由於壩體內上下游不同孔隙水壓力產生之滲流而將壩心細料滲入下游壩殼之作用。過濾層之寬度一般均依材料以及施工機具之可工性(Workability) 而定，原則上愈寬愈佳。第三層稱之為壩殼，大多為塊石之石方材料，為壩體穩定之主要部份。壩殼之塊石材料必須具有足夠之抗壓強度，以避免在夯實過程中，塊石被壓碎之慮。同時，塊石層在垂直方向應有較佳之透水性。為防止上游面在水庫水位上下變動以及水平波浪作用之侵蝕。上游面多具有防止沖蝕之防範措施，如表面為堅實新鮮之巨石塊(又稱之為拋石，riprap) 或混凝土、瀝青混凝土鋪面等。此種保護措施除防止壩體表面被沖蝕之功能外，亦可提高壩體坡面之穩定性，因而減少壩體之材料。

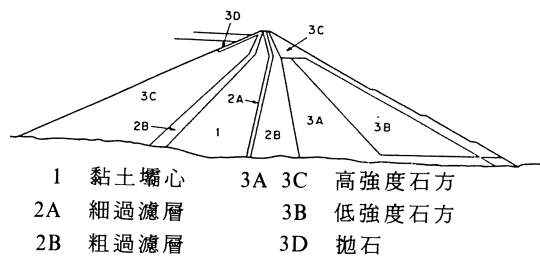
一般而言，土石壩基礎之要求條件並不高，但由於壩體體積龐大，尤以壩體材料之不同，各種材料之壓縮性均有差異，若處理失當，常易產生不均勻沈陷，引起壩體之龜裂。由於前述壩體中心在不透水壩心大多為較軟弱之黏土質壤土，故壩心部位之基礎不允許在水庫蓄水後，由於高壓水流滲透而引起被淘空之情況發生，故壩心部位之基礎，任何斷層破碎帶或開口節理內之填充物均需加以適當之處理，以防範壩心材料沿此斷層破碎帶或開口節理、裂隙等發生漏失之現象。壩心與其基礎面間應完全密接，尤其在兩翼壩座斜面上



圖六 均質土石壩壩體內之排水設施



圖七 土石壩中壩心及止水牆之各種型態



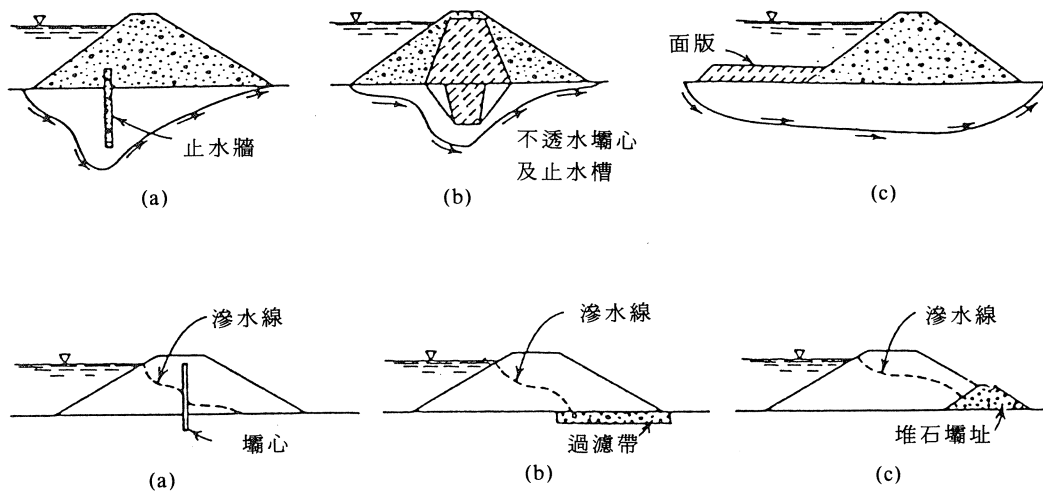
圖八 層狀土石壩剖面圖

更需具有同樣之基礎處理與施工技術。任何壩基面上之滲透水流均須在嚴密控制之下，以避免產生因滲透壓力而對壩體下游產生上揚力(uplift)並進而發生管湧之現象(Piping)。因此，對於各種不同地質條件之基礎，需有不同之處理方式。若土石壩之基礎座落在沖積層等未固結沈積物或風化分解之軟弱地盤上，則在土石開始填築前，應將基礎表面所有有機質部份或鬆軟之表土等完全挖除，以減少將來填築後之沈陷量。若開挖後基礎表面為不透水之沖積層，則經表面整修後，即可填築土石材料，並分層夯實。若開挖後之基礎面為透水性之沈積物時，則應在不透水壩心之下方，開挖一止水槽，止水槽之深度依壩高及壩體材料特性所需安全水力坡降而定。在止水槽內再回填不透水材料。另一種設計係在基礎面上鋪設一層不透水層底版(Impervious blanket)。上述各種基礎處理以及壩體材料分層填築之主要目的為防止沿壩體本身或沿基礎接觸面在下游基腳發生管湧現象而危及壩體之穩定性，各項措

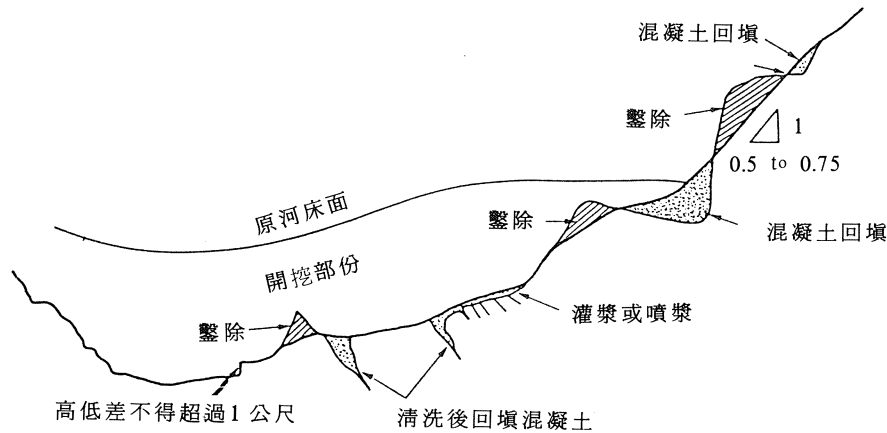
施乃著眼於增加水流路徑，減少水力坡降，並控制壩基可能之滲漏，圖九為其簡易之原理示意圖。

對於岩盤基礎，則必須將基礎開挖至新鮮之岩盤面。基礎表面不可具有凹洞或開口節理之存在。在壩心及過濾層下方之基礎更不可有突出之岩塊。因此，到達基礎面之最後一公尺左右，應儘可能以人工開挖，並以高壓氣流清除表面之岩屑。在壩心兩翼之壩座斜面上，應將岩盤上不規則之表面加以處理(圖十)。坡面上突出之岩塊或窪陷均應挖除或回填，基礎面上有開口節理或局部破碎剪切帶則須予以混凝土鑲補或表面以水泥砂漿加以處理。對於泥質沈積岩之基礎或花崗岩類之岩盤基礎，由於開挖後暴露空氣時易發生風化崩解現象(Air slaking)，故開挖後應即時以水泥砂漿鋪面或以瀝青質膠乳劑噴灌在基礎表面以保護之。

對於土石壩而言，沈陷量亦為一相當不易掌握的工程問題，沈陷量之預測往往與理論計算有一相當大之差異，土石壩之



圖九 土石壩壩體及壩基滲流控制設計



圖十 土石壩岩盤基礎處理圖

基礎為堅實之岩盤，則壩體經確實分層填築與壓密後，其沈陷量均可加以控制，惟對於未固結沈積物基礎之沈陷，則基礎本身即為主要之來源。如前所述，其沈陷量之預測不易掌握，但壩體填築前，可利用預壓方式以加速其沈陷量。根據目前台灣現有之土石壩，其基礎大多座落在堅實之岩盤上，故尚未發現有嚴重之沈陷問題存在。

2.3.2 混凝土壩之基礎特性

混凝土壩與前述之堤壩為兩種截然不同的結構物，除了本身組成材料不同外，壩體與基礎間之力學特性亦大異其趣。由於混凝土壩之體積較堤壩為小，故壩體與基礎間之接觸面積亦遠較堤壩者為小，因此，混凝土壩之穩定性常須考慮壩體與基礎間之剪力破壞以及壩體之翻覆破壞。從整體結構觀點而言，混凝土壩之基礎應視為壩體結構之一部份。壩基礎必須在壩體結構物以及水庫之荷重下，不致超過設計容許之變形量。對於混凝土壩而言，壩基礎岩體之變形模數(Modulus of deformation)對混凝土之彈性係數之比值甚為重要，尤

其在混凝土壩軸部份，兩者間之差異大小常為決定混凝土壩可行性之重要指標。雖然一般岩盤之單軸抗壓強度均可達到混凝土壩基礎強度之要求($8\text{kg/cm}^2 \sim 50\text{kg/cm}^2$) (洪如江, 1985)，但對於泥質沈積岩如泥岩、頁岩類，以及台灣第三紀晚期之上新世或更新世等固結不良沈積岩如卓蘭層以及頭嵙山層中之香山相砂泥質沈積岩等，由於岩質鬆軟，膠結不良，新鮮之岩石樣品(Intact rock sample)，其單軸抗壓強度在試驗室雖可達 15kg/cm^2 以上，但此類之沈積岩，在受持續性之荷重下(Sustained loading)以及在長期飽和情況下，因風化作而易崩解，其剩餘強度(Residual strength)甚小，最重要的是此類沈積岩之變形模數均在混凝土彈性模數之30%以下，故具有此類岩質之壩址不適於混凝土壩之基礎。

一般而言，混凝土壩基礎之力學強度，主要須考慮下列幾個重要參數：

- (1) 岩石之抗壓強度
- (2) 岩體之抗剪強度
- (3) 岩體之變形特性
- (4) 大地應力
- (5) 岩體之透水係數

岩石之抗壓強度常指堅實岩石材料 (Intact rock material) 之單軸抗壓強度或無圍壓縮強度 (Uniaxial compressive or unconfined compressive strength)，其強度值係指由岩心在試驗室中施加單軸壓應力直到岩石破壞為止之最大應力值。但岩體之抗剪強度係指會有不連續面或弱面岩體之強度。因含有弱面之岩體樣品不易採集，故不易在試驗室中求出。因此多以現場直接剪力試驗求取剪力係數 C 值與 ϕ 角。對於岩石或岩體之變形性常有所謂的彈性模數與變形模數之分。一般情況下，岩石之彈性模數 (或係數) 可自上述岩心單軸抗壓強度試驗時，在加壓過程中同時量測其變形量，由應力應變關係曲線中，在破壞強度之 50% 時之應力應變比值而得。而變形模數係指岩體 (包含不連續面) 在變形過程中包含彈性變形，塑性變形以及潛變等在內之變形特性。通常可利用現場載重試驗或孔內變形試驗所得之應力與應變關係曲線中計算而得，如圖十一所示。上述試驗中，加減壓循環三次所得之應力應變曲線。其中：

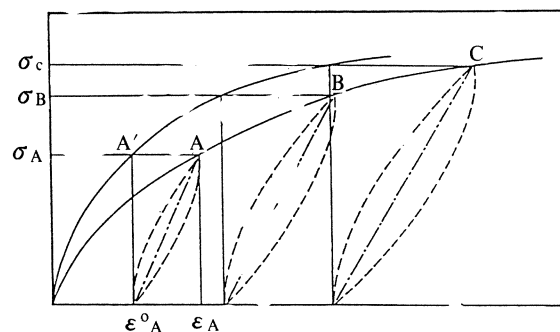
$$E_1 = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A - \varepsilon_{A_0}} \quad \text{為第一循環之彈性模數}$$

$$E_s = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} \quad \text{為第一循環之割線模數}$$

(Secant modulus of deformation)

同理可得各循環之之彈性模數與割線模數。若求取圖中 A、B、C 三點之平均切線即為總體變形模數 (Modulus of Total deformation)

由以上之說明可知，彈性模數為不包含塑性變形或潛變之變形比值，通常係指試驗室中堅實岩心所求得之彈性範圍之變形特性。而變形模數因包含岩體內弱面之閉合，潛變等塑性變形故通常多指現場岩體之變形特性。



圖十一 變形試驗中應力應變曲線

由於板塊運動之結果，地殼內部即產生大地應力，尤其在板塊境界部份，因相互擠壓之造山運動，使得地表以下之水平應力較垂直應力為高。水平應力增加之結果，對於深谷基礎開挖將產生不利的影響。在高壩基礎開挖時，因開挖移除載重，垂直應力之減少而產生應力解壓狀態，開挖面將可能產生向上隆起現象 (Heave)。同時在近開挖面附近更引起水平向之龜裂 (Sheeted joint)。發生龜裂之基礎因強度降低，除了增加其透水性外，在壩體及基礎間因而大幅減少與混凝土間之抗剪強度，影響壩體之穩定性。

此外，壩基礎之透水性關係將來壩體上下游間孔隙水壓力所引起之基礎上揚力問題，對壩體之穩定性相當重要。因此沿壩軸部份均需有足夠深度之止水帶，以減少下游壩趾部之孔隙水壓力。

如前所述，混凝土壩依壩體結構之不同，各類型混凝土壩之設計理念亦稍有差異，茲分別討論如下：

2.3.2.1 重力式混凝土壩

基本上，重力式混凝土壩之穩定性主要有兩個可能因素應加考慮。一為壩體受水平應力而沿壩體本身或與基礎面之間產生之剪力破壞；另一因素為壩體受水庫水

平推力而壩體本身與基礎接觸面間產生翻覆破壞。從重力式混凝土壩之結構特性觀之，壩體與基礎所受之應力可分為水平與垂直兩個方向，如圖十二所示：

水平應力：

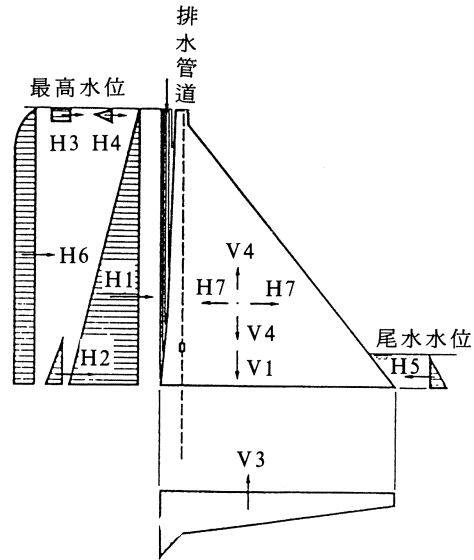
- (1) 壩上游所受之靜水壓力 (Hydrostatic pressure) H_1 ；
- (2) 水庫內淤砂之水平壓力 H_2 ；
- (3) 冬季結冰時體積膨脹時之水平壓力 H_3 ；
- (4) 水庫波浪之水平壓力 H_4 ；
- (5) 下游面尾水 (Tailwater) 之水平壓力 H_5 ；
- (6) 地震時，水庫容量體積之水平慣力 (Inertia force of water) H_6 ；
- (7) 壩體壓地震時之水平慣力 H_7 ；

垂直應力：

- (1) 壩體混凝土及其附屬結構物如閘門等之自重 V_1 ；
- (2) 水庫容量對壩體上游面之垂直載重 V_2 ；
- (3) 壩基平面上之上揚力 V_3 ；
- (4) 地震時壩體之垂直慣力 V_4 ；

基於以上重力式混凝土之力學特性，此類壩型規劃設計時應注意下列因素：

- (1) 壩址基礎所受之垂直應力應遠在基礎岩盤岩體強度之降伏點以下；
- (2) 壩體基礎之變形量應在可預測之範圍內；
- (3) 壩址基礎之力學特性應具有較佳之均勻性，其特性或變形性，沿壩軸應具均一性，因之，在水庫蓄水後，基礎之變形量均可在設計前獲得正確之予估；
- (4) 對於地震時之擬靜態或靜態分析，水平與垂直方向均應考慮。因此，在強震區，此類壩型之選擇應特別慎重；
- (5) 壩址兩岸及基礎內之不連續面或弱面，尤其具有泥質夾層 (Clay seam) 而向



圖十二 重力壩之應力分佈

下游傾斜之層縫，以及斷層物質等均應加以改良處理。

由於重力式混凝土壩之設計與施工較為單純，因此，對較寬廣河谷（弦高比大於 3 以上）之壩址，若混凝土骨材來源充足，壩址地質良好，此類壩型最受壩工結構專家之偏愛，故對混凝土壩而言此類型最為普遍。

2.3.2.2 拱壩

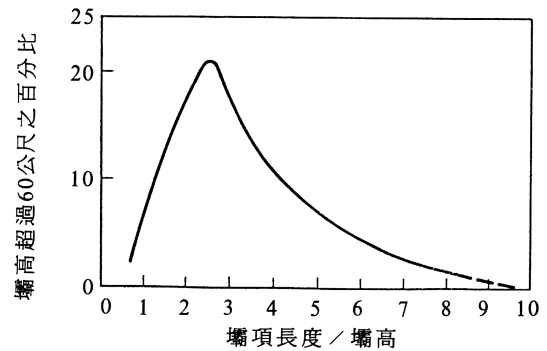
拱壩為壩體超薄之混凝土結構物。與重力式混凝土壩相比，其體積隨河谷寬度而異。一般而言，僅約為重力壩之 30% 至 70% 左右（圖三）。基本上，拱壩壩體之受力來源與前述重力混凝土壩並無不同，但受力時，壩體之力學行為 (Mechanical behavior) 卻與重力壩甚為不同。因為拱壩之設計理念主要係將壩體所受之應力，以拱形壩體之水平拱作用傳導至兩翼壩座上，而垂直方向之壩體與基礎之間則呈一懸

臂作用關係。因此，對於拱壩壩址地質條件之要求、壩體設計，以及施工時混凝土品質之控制等較重力壩更為嚴格。為使壩體混凝土以及基礎地盤之受力情況保持在設計之彈性範圍內，拱壩壩址基礎之地質條件，其岩質及力學強度之均勻性較重力壩之要求為高。基礎岩體之力學特性應儘可能接近混凝土之強度特性，尤其對基礎（包括兩翼壩座基礎）之岩體變形模數應接近混凝土之彈性模數。因為壩址基礎力學上之不均勻性，在水庫完工蓄水後，由於長期持續受力下，低變形模數之岩盤，其變形較大而使得壩體之應力分佈不均而產生局部張力集中之現象。對於雙曲線之超薄拱壩而言，由於壩體之厚度僅及壩高之15%至30%之間，故壩體所受之壓應力與張應力應控制在混凝土可允許之抗壓及抗張強度範圍內。必要時，拱壩壩體局部地帶亦有配置鋼筋之案例。為減少壩體受到額外之張應力，理想之拱壩壩址之地形，其弦高比（Chord height ratio）應小於2.5左右。圖十三所示為壩高60公尺以上採用拱壩百分比與弦高比之統計，由該圖中可知，壩高60公尺以上之高壩，弦高比為2.5時，採用拱壩之比例最高約為22%左右。此外，對於高拱壩而言，較薄之混凝土亦可能產生第二次之張力情況，在內陸或高山地區，由於溫度之變化以及混凝土冷凝過程中之水解作用，對壩體均可能引起張應力而使壩體混凝土發生龜裂。

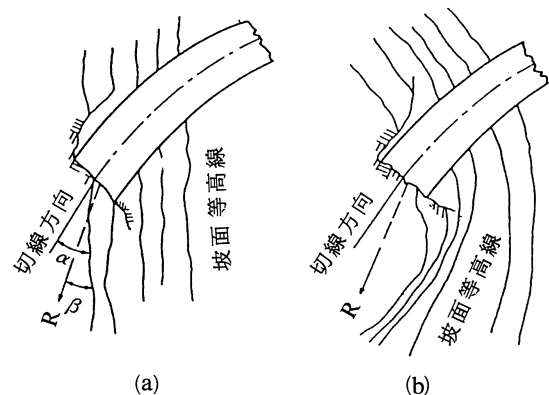
如前所述，拱壩之設計概念係將壩體之受力情況由拱作用傳遞到兩翼之壩座上，因此拱壩兩翼壩座與岩盤基礎之接觸面甚為重要。因拱壩係呈向上游穹起之弧面，兩翼壩體之方向不可能與壩座兩岸之坡面呈垂直狀態，因此設計時，壩體拱作用之推力(Thrust)方向應與兩翼壩座之坡面

走向呈至少 30° 以上之交角(β)，接近壩頂部份更應達 40° (圖十四a)。由於河谷地形之局部變化，壩址之地形調查應注意突起之地形，圖十四b為不理想之拱壩壩址地形。此外，因拱壩兩翼為主要之受力區，故兩翼壩座之開挖面應與拱壩推力方向呈近 90° 之交角(圖十五)。兩翼壩座岩盤之節理或弱面之存在亦影響壩座邊坡在受力後之穩定性。圖十六所示為拱壩壩座因節理存在所形成楔型體之分析模式。

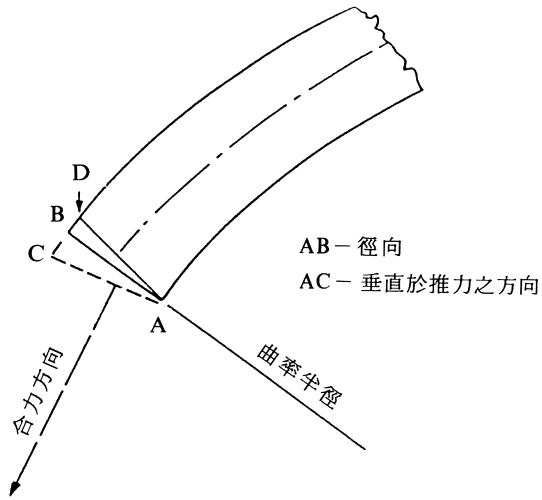
由於上之說明可知，理論上，拱壩較重力壩節省相當數量之混凝土體積，若壩址之地形與地質條件良好且設計與施工得宜，拱壩之安全性並不比重力壩為小，故目前因電腦之發展，100公尺上之高壩多採用拱壩。



圖十三 採用拱壩之統計曲線



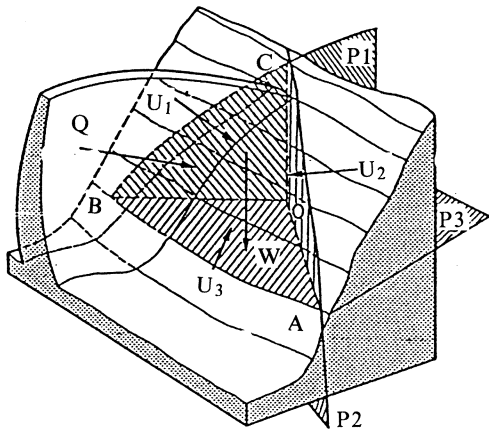
圖十四 拱壩壩座與地形之關係



圖十五 拱壩壩座之受力情況

2.3.2.3 垛壩(Buttress dam)

基本上，垛壩為重力壩與拱壩之混合體，為減少混凝土之數量，一般之垛壩為一鋼筋混凝土版(Reinforced concrete deck)由所謂之垛結構體來支撐或在垛與垛之間以拱形混凝土結構相連。此種壩型結構複雜、施工不易，故大多在混凝土骨材極度缺乏或土石來源獲取不易之地區，且人工便宜方可能考慮之壩型，此類壩型之壩高大多不超過100公尺。迄至目前為止，本省尙未有此類壩型之建造，故對此壩型之設計與施工亦無經驗，本文不擬深入討論。



- 1 OABC 由P1 P2 P3 三弱面圍成之楔型體
- 2 W 重量
- 3 Q 推力
- 4 U₁ U₂ U₃ 水壓力

圖十六 拱壩邊坡穩定分析楔型模式