

# 拾 工程地質在壩工之應用 (The Applications of Engineering Geology in Dam Engineering)

洪 如 江 \*

## 一、壩工的重要工程地質因素

在壩工之中，壩址的選擇、壩高的決定、壩型之決定、以及壩基的處理，都是重大問題。而這些問題，受到許多因素的影響，即使從純技術因素而言，也常常要在水庫工程中加以整體考慮，而不單純是壩工設計與施工問題。

壩址的選擇，不在本章討論，已在前章討論，主要因為壩址的選擇在水庫工程的整體考慮上，甚為重要。

純就壩工的工程地質而言，最重要的一些因素是：

- 地形
- 地質構造與弱面
- 壩基及壩翼之力學性質
- 地震與活性斷層
- 施工材料

一條河川雖然很長，但是未必處處都是建壩的地形。通常，適合建壩的地形，最好兩翼的高度要相稱，至少不能相差太大。

河谷，是地表上的弱點。水流要在地表上冲刷出一條河道，必然找最脆弱的地方。而河谷形成之後，因解壓而使兩岸發生開口節理及倒懸現象，使河床隆起而發生空洞，……等等惡果（洪如江，民國70年），使原本為地表弱點的河谷更形惡化，而我們却要在河谷建造一座對下游衆多生命財產安全有重大影響的大壩。因此，壩址的地質構造與弱面，對大壩安定、壩基及壩翼的水密性及水壓，都有決定性的影響。

至於壩基及壩翼岩石或土壤的力學性質，例如強度、變形性、水力學性質，對壩體、壩基及壩翼的設計、施工、及造價，關係重大。

若瞭解不夠、設計不妥、或施工不良，都可能引起大壩的破壞，其中，尤其是瞭解不夠所引起的災變最多。

岩盤或土層中的任何一個小單元（岩石或土壤材質、軟弱夾心中的成分），如易於風化、易於消散、或易於擴散者，則在壩址開挖之後或水庫蓄水之後，可能發生基礎破壞。

至於壩體本身之施工材料，若屬混凝土壩，需要大量的礫石材及砂料；若屬土石壩，所需要的土方更為龐大，以NUREK磊壩而言，壩體土石方堆置之後，體積多達五千六百萬立方公尺。因此，土石材的數量、品質、以及分佈，對壩型之選擇及造價，都有關係。

## 二、壩型之影響因素

### 2.1 河谷之形狀對壩型之影響

#### 2.1.1 河谷形狀之分類

Walter(1962)將河谷分成峽谷(Gorges)、狹谷(Narrow Valleys)、寬谷(Wide Valleys)、及平緩河道(Flat Country)等四大類，並以“弦 / 高”比為 $<3$ 、 $3\sim6$ 、 $>6$ 為前三類之定量分類標準。但河谷形狀，只宜用寬 / 高比，不宜用弦 / 高比或弧 / 高比，因此，河谷既沒有弦長，也沒有弧長。只有在談到壩的時候，才有弦長(Chord Length)、弧長(Arc Length)的問題。曲線之壩，壩頂弦長等於或大致等於谷寬。因此，Walter(1962)所謂弦 / 高比，實應為寬 / 高比。

不少有關壩工之文獻，在談到壩頂長(Crest Length)之時，若為曲面之壩，常指壩頂弧長。

河谷之寬 / 高比，對壩型的選擇非常重要

\* 臺灣大學土木工程學系教授

。舉例而言，寬/高比太大(例如大於6者)之河谷，建拱壩就比建其他型之壩不經濟。

有人或許在想：河谷並無一定寬度，其寬度因高程而異。一般而言，水流所冲刷而成之河谷，常呈V型，其寬/高比大致一定。何況，水資源寶貴，宜建高壩之址，若是建了矮壩，難於加高。因此，建壩之時，常儘量利用難得之壩址，建造高壩，尤其是為自來水所建之水庫，益本比不應對壩高造成太大的限制。在這種情況之下，壩的弦/高比與河谷的寬/高比，常常被混為一談。

### 2.1.2 峽谷之壩

“寬/高”比小於3之峽谷，適建薄拱壩(Thin Arch Dam)或薄穹形壩(Cupola 或 Dome Dam)。穹形壩又稱雙曲拱壩，其“厚/高”比常小於蛋殼者。意大利之 Vajont 拱壩，壩高超過260m，壩頂弦/高比約0.7；我國德基拱壩之“弧/高”比為1.6。

### 2.1.3 狹谷之壩

“弦/高”比在3至6之間的狹谷，適建厚拱壩、重力式拱壩、或重力式壩(Gravity Dam)。某些重力式壩，甚至採用平面曲線式，以增強勁度，但不考慮拱作用。翡翠拱壩之“弧/高”比為4.3。美國奧本(Auburn)拱壩，壩頂長1220m，高約209m，“弧/高”比已近6，於基礎開挖後停工。重力壩之“弦/高”比有低至4者。

### 2.1.4 寬谷之壩

“弦/高”比大於6之寬谷，除單拱壩之外，適建之壩型有重力壩、垛壩(Buttress)、複拱壩(Multiple Arch)、土石壩 Earth、磊壩(Rockfill)，由地形以外之因素決定壩型。

埃及尼羅河之阿斯萬壩(Aswan)，重力壩長500m，垛壩長1400m，高約46m，長/高比達42之多。

垛壩，較為節省材料，英國蘇格蘭多座垛壩，弦/高比7至15；意大利之 Fedaia 壓，垛壩與重力壩複合，高度不過12m，長達610m。

複拱壩，常為垛、拱壩相間連成長壩，拱之側向推力由垛壩承受。此種垛、拱複合之壩最忌不均勻沉陷。

寬谷而基礎較為軟弱者適建土壩或磊壩。

閘(Barrages)，建於具有航行價值之河道(如聖羅倫斯水道 St. Lawrence Waterway)，

可調節水位及流速，以適於航行。尤其是在某些大河，某些地段河床具有突出之岩灘，水流湍急，不適大船航行，建閘克服之。

平原上河道，有時為逼高水位引水灌溉，建造有閘門之長壩、閘、或堰。

## 2.2 壩型受河谷形狀以外因素影響之情形

### 2.2.1 重力壩(Gravity Dam)

岩盤至少能承載 $8\sim10\text{kg/cm}^2$ 之壓力。河床表面軟弱或破碎之地質材料不宜超過10m厚。壩底之上頂水壓對抗滑及抗傾皆極為不利。砂石料用量大，運距不宜太長。

重力壩壩頂長度超過壩高5倍以上者，優點特別顯著。

### 2.2.2 垛壩(Buttress Dam)

岩盤至少能承載 $20\sim30\text{kg/cm}^2$ 之壓力。垛壩所需混凝土僅為重力壩之三分之一至三分之二，但模板及技術工人要求高於重力壩。壩高超過15m，垛壩開始具有競爭力。結構分析較重力壩複雜。在強震區較為不利。

### 2.2.3 複拱壩(Multiple Arch Dams)

岩盤至少能承載 $20\sim30\text{kg/cm}^2$ 而不產生10mm以上之沉陷。比垛壩更省材料、更怕不均勻沉陷。

### 2.2.4 厚拱壩(Thick Arch Dam)

適建於弦/高比介於3至6之間之河谷。岩盤至少能承受 $30\text{kg/cm}^2$ 之壓力。除採理論及數值方法分析之外，常佐以模型試驗。

### 2.2.5 薄拱壩(Thin Arch Dam)

河谷之弦/高比在3以下者適建薄拱壩。岩盤，尤其是兩翼之岩盤，至少能承受 $50\sim70\text{kg}/\text{cm}^2$ 之拱壩推力。

薄拱壩，其壩體上下游面之水位差很大，壩之厚度很小，因此壩基及壩翼岩盤滲流水之水力坡降極大，尤其是在壩翼與河床交會點附近最嚴重，必須特別注意。

由於推力及水力坡降都很大，岩盤之堅強及水密性，都極為重要。建壩材料之品質要求水準高。

### 2.2.6 磊壩(Rockfill Dam)

磊壩適建於下列條件或情況：

- (1)壩基承載混凝土壩之能力可疑或變異性大。
- (2)建壩材料可就近取材，通常部分取自溢洪道挖方材料。建壩材料，浸水或暴露空氣中、

- 或在乾濕循環之情況下，皆能長期安定者。
- (3)若採用黏土作為壩心材料，不但材料來源充足，當地天氣也要合適。例如，翡翠水庫每年下雨約200天，土壤難於乾燥至最佳含水量，且工期太短。惟近年來有採用瀝青混凝土或其他材料，覆於磊壩上游以防漏水者。
- (4)工址適於重型機械施工作業。

### 2.2.7 土石壩(Earth Dam)

在中文裡，有人把土石壩稱為土壩者，並無不可，因為我們中國人所謂的“土”，實包括土與石。但為避免有人把土壩倒譯為Soil Dam，故採用土石壩以作為Earth Dam之中譯。此外，一般土石壩，石方常多於土方。

土石壩及磊壩，相當於橋樑工程中之簡支樑結構，適於較差之壩基及地震區。但止水塹(Key Trench)周圍岩盤之灌漿必須完善；如屬土質或軟岩基礎，須防膨脹性黏土(Expansive Clay)及擴散性黏土(Dispersive Clay)引起裂隙或管湧之害。

### 2.2.8 複合壩

有的壩址，半邊堅強者建混凝土重力壩，半邊軟弱者建土石壩，加以適當連接成複合壩，如英國牛綠壩。此外，美國Boone壩，由混凝土重力壩、磊壩、及土堤壩連接而成(Walter, 1963)。

## 三、地質構造與壩基之漏水及破壞

### 3.1 引言

本節討論到壩基的許多問題，大部份適用於壩翼。

漏水及基礎不安定，常因地質構造上的弱面或弱帶而致之。弱面或弱帶本身及其周圍之岩石，裂縫或裂隙常較為密集，水密性及強度較差。此外，膠結不佳之砂岩、空洞及孔隙較多之石灰岩，也易於漏水。

漏水及強度，雖然可以用地工技術（例如灌漿）加以處理，但一來效果可疑之處尚不在少；二來費時、費錢。因此，能避免漏水及不穩定之址最好。萬一不能避免，則應小心從事，詳加調查，妥為處理。

### 3.2 地質構造與壩基漏水

圖10.1示壩基下的一些典型地質構造，易於發生垂直於壩軸的漏水。

### 3.3 地質構造與壩翼漏水

圖10.2示壩翼的一些典型地質構造，易於發生垂直於壩軸的漏水。

### 3.4 地質構造與壩基破壞

圖10.3示壩基的兩種破壞模式。圖10.3(a)示壩基受壩體垂直荷重作用之破壞模式；圖10.3(b)示壩基受壩體及水庫水壓(或泥壓)合成斜向荷重作用之破壞模式。若壩基地質構造(弱面)之幾何圖形與此二模式相同或相似，則壩基易於發生剪力破壞。圖10.4示一些合乎壩基破壞模式的地質構造，建議在這類地質構造的基礎上，須要特別注意分析其安定，通常，若無妥善處理，滑動機會極大。

須注意者，圖10.4中之弱面(或弱帶)，固然剪力強度低，易於滑動；而且壓縮性也較大，部份基礎變形將造成壩體及壩跟岩盤之應力集中，甚至裂開。

## 四、地質材料與壩基

### 4.1 引言

某些壩基，地質構造上的弱面並不發達，則壩基之力學與工程特性，由地質材料之性質控制。此類地質材料之例為泥岩、礫岩、集塊岩、冰磧、崩積土、硬黏土層、某些風化岩石、及部份石灰質岩石。

### 4.2 膨脹性黏土礦物與壩基安定

某些岩盤，雖然弱面或弱帶發達，甚至含有軟弱夾心(Soft Infillings，例如泥質層縫、斷層泥等)、堅硬充填物(Hard Infillings例如方解石、石英等)、或已固結之磨爛岩(Mylonite)及壓破岩(Cataclasite)等。此等夾心或斷層岩石(Fault Rocks，指磨爛岩及壓破岩)，如含有膨脹性黏土，一旦受水庫蓄水之高水頭作用，致原來不與水份接觸之膨脹性黏土礦物受到水份之滲透，因而發生膨脹，其兩壁之岩盤因而被膨脹壓力所擠開。

至於弱面不發達之岩石，如含有膨脹性黏土礦物，受高壓之水滲入，強度大降、壓縮性大增，壩基安定可能發生問題。

### 4.3 擴散性黏土與壩基安定

弱岩壩基或土壤壩基，如含有擴散性黏土

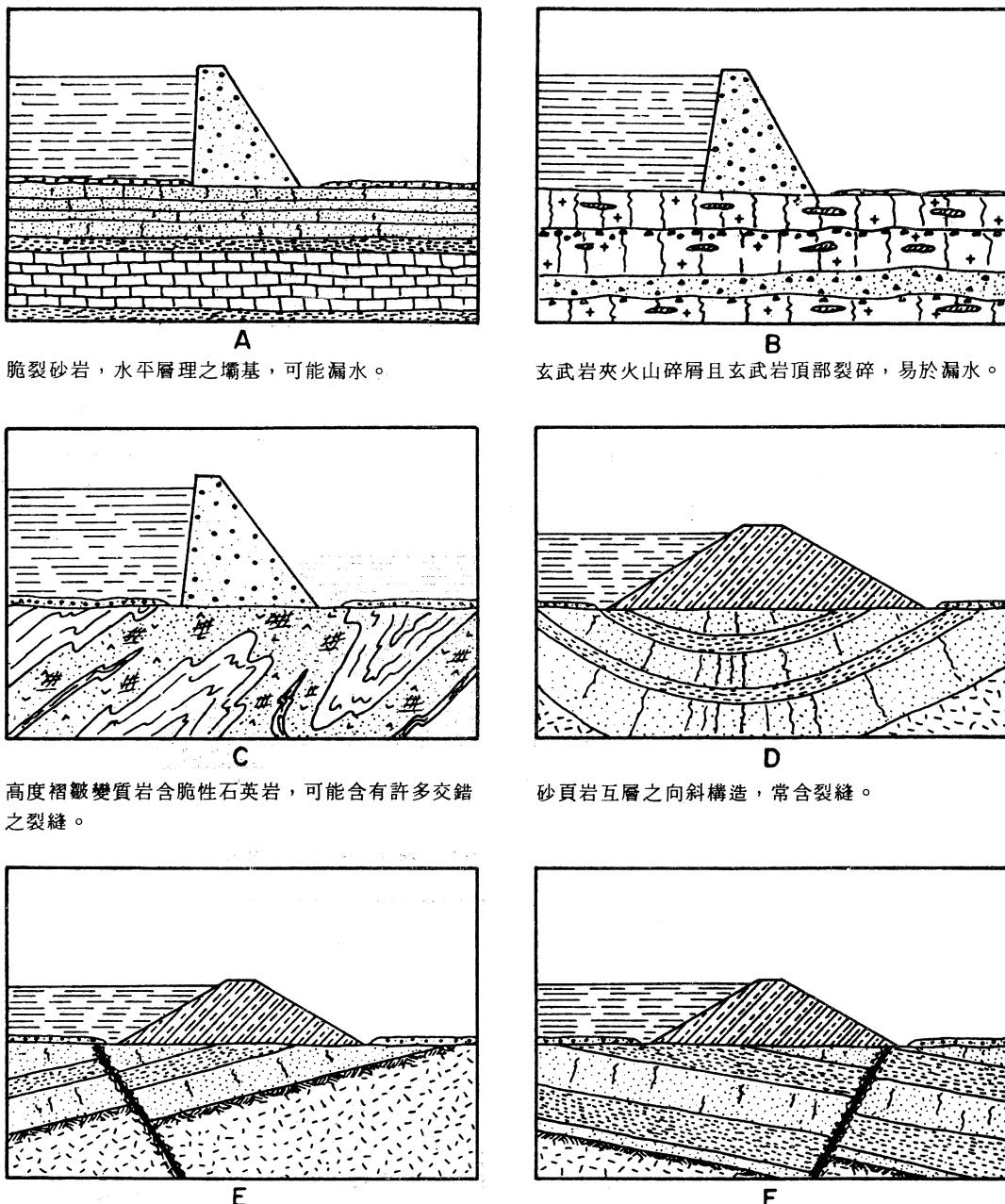


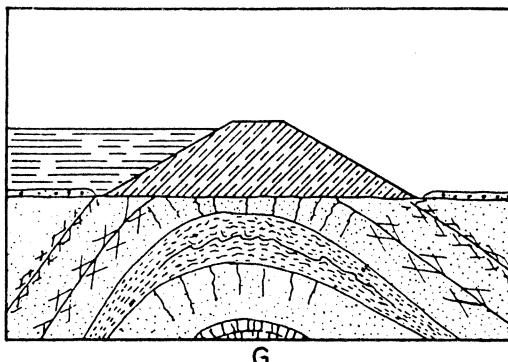
圖10.1 壩基下的一些易於漏水之地質構造 (Wahlstrom, 1974, 洪如江譯)

(Dispersive Clays), 則此類黏土，易在靜水中解凝(Deflocculate)、易受低速水流之冲蝕（當然更易受高、中速水流之冲蝕），形成冲蝕管道而終成管湧(Piping)。

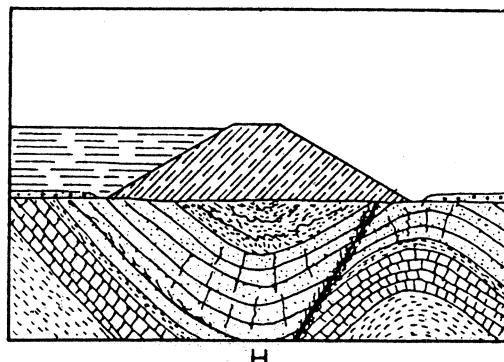
#### 4.4 地質材料之風化與壩基開挖

壩基及壩翼開挖之後，若不立即施工，則

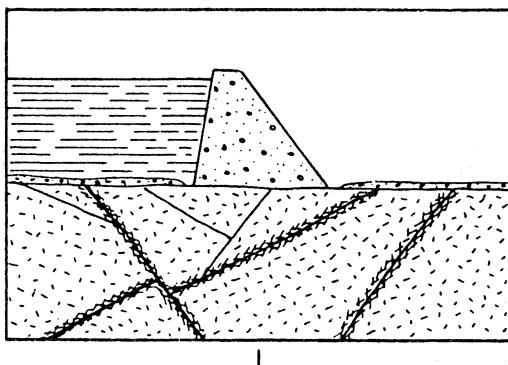
易於風化之弱岩，應保留一公尺左右至建壩開始（指澆鑄混凝土或填黏土於止水壘）時再予挖除，或挖至預定高程或深度後立即噴以可防止風化之噴凝土30cm保護之。開挖之壩基絕對不得有浸水、滲水等情事發生，以其必然引起弱岩之軟化、砂岩膠結材料之溶解流失。如有浸水、滲水之可能，應在上游(水之來源)灌漿



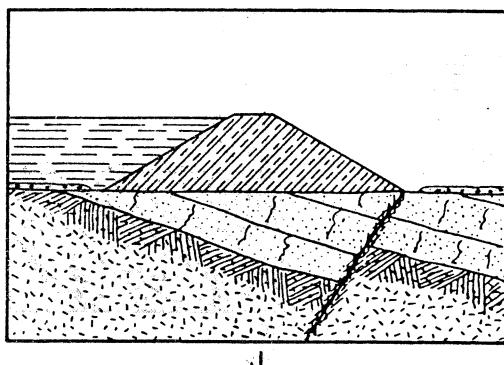
G 建壩於背斜軸上，尤其是脆性砂岩，常有密集裂縫發生於樞線附近，使層面及張裂縫活動。



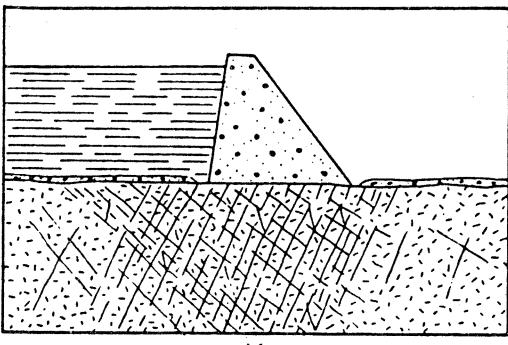
H 建壩於向斜之上，原可使層面閉合，但砂岩層易透水且脆裂，斷層提供經砂岩之漏水的出路。



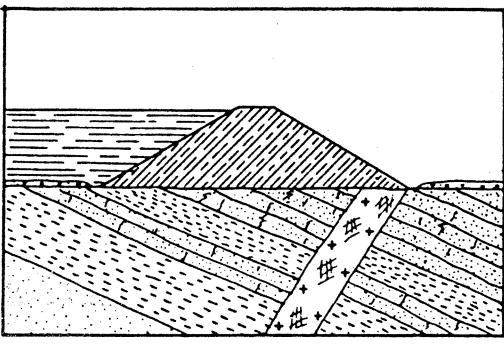
I 脆性結晶岩石之斷層多條使水庫之水與地下水流通



J 建壩於傾向下游之脆性砂岩，若其下為風化花崗岩且有一斷層，則地下水易流通。



K 結晶岩石如節理密集，則易透水。



L 向下游傾斜之沉積岩，如有火山岩脈切斷，且岩脈已裂，則易漏水。

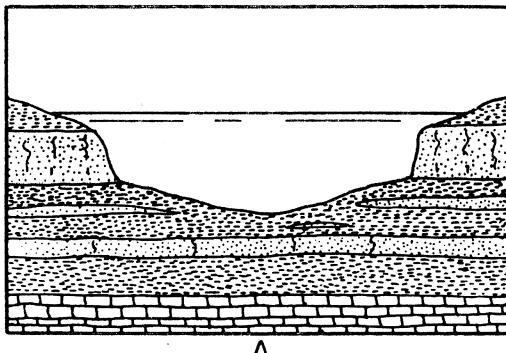
圖10.1 (續) 壩基下的一些易於漏水之地質構造 (Wahlstrom, 1974, 洪如江譯)

阻水，在暴露之岩盤處排水，在下游導水迅速遠離工址。

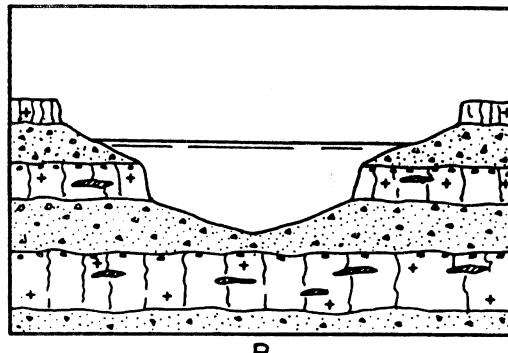
#### 4.5 St. Francis 拱壩破壞分析

在談到壩基漏水或破壞之時，大家都把注

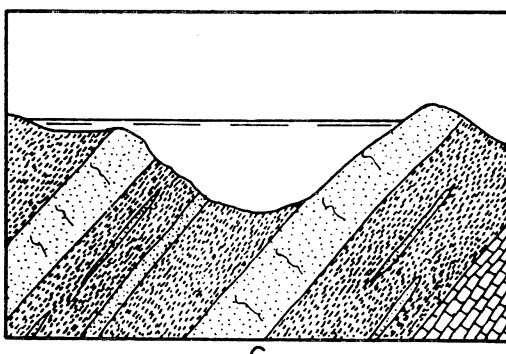
意力放在地質構造與弱面，但最早引起一般大眾及壩工專家注意的壩基破壞（並引起大壩破壞），問題却發生在壩基的地質材料。那就是1927年發生在美國加州的St. Francis壩破壞。St. Francis壩為一高61公尺之混凝土壩，中央



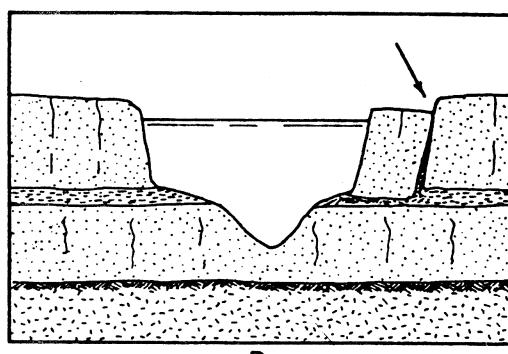
A  
壩翼之節理發達砂岩，有漏水可能。



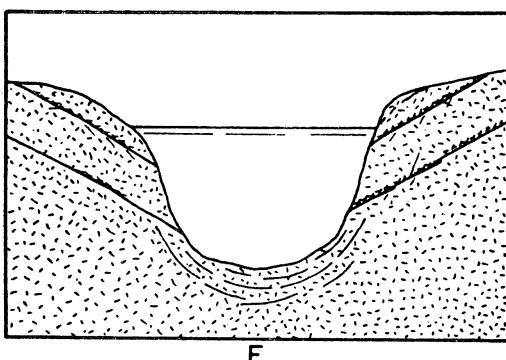
B  
玄武岩夾火山碎屑且玄武岩頂部裂碎，易於漏水。



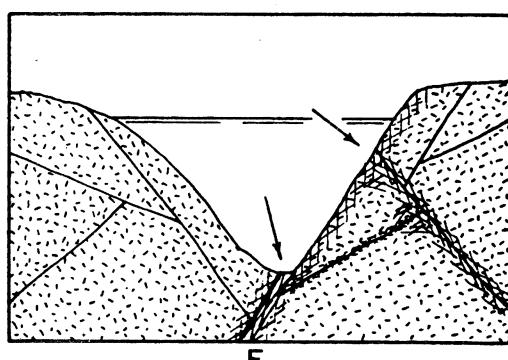
C  
破裂砂岩平行河谷，水易漏失。



D  
水平厚層砂岩，如有一塊下陷，則產生漏水開口。



E  
重力滑動斷層及解壓破壞有漏水可能



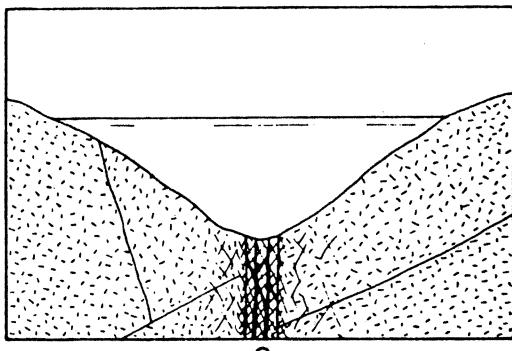
F  
結晶岩石之斷層群使一側易於漏水。

圖10.2 壩翼的一些易於漏水之地質構造 (Wahlstrom, 11074, 洪如江譯) 1974

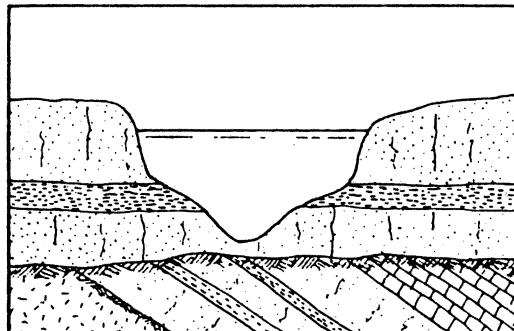
部份為重力壩，左、右兩部份皆為半徑152m之拱壩。重力壩部份，壩基砌置深度9m多，岩石品質較佳；右邊拱壩部份建於礫岩上，砌置深度約3m；左邊拱壩部份建於片岩上，砌置深度亦在3m之內。該壩破壞之初，右壩基礫岩潰散沖失，致右邊拱壩基礎被淘洗一空，右拱壩體被沖至下游。左壩基被來至右方潰潭之洪

流回捲，片岩壩基岩盤發生滑動，拱壩翻撲在前方。中央重力壩部份大致未動，左、右之拱壩體沿伸縮縫與重力壩分離，下游居民400人喪生。

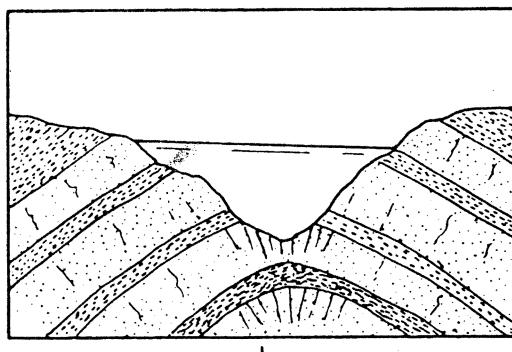
發生問題之右壩基礫岩，抗壓強度僅 $35\text{ kg/cm}^2$ ，掌大之礫岩塊浸於水中後，立即吸水逸出氣泡，碎片及顆粒紛紛散落，致容器內之水



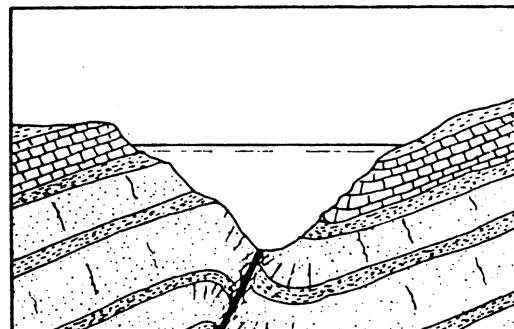
寬廣斷層帶，壩基下漏水深遠。



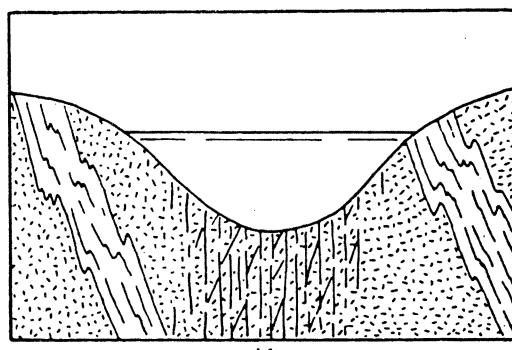
破裂砂岩及不整合面之風化易漏水



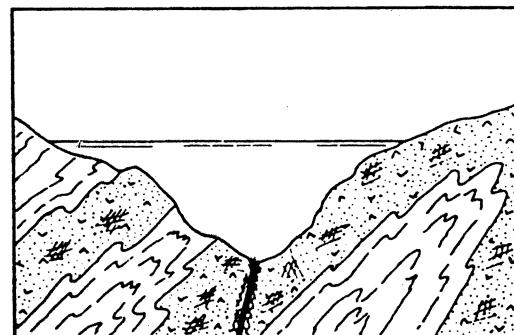
背斜頂破裂砂岩，產生平行河谷之漏水層。



褶皺及一嚴重斷層，產生地下水水流之可能



結晶岩石之板狀節理產生一透水帶



脆性石英岩節理及一斷層產生地下水通道

圖10.2 (續) 壩翼的一些易於漏水之地質構造 (Wahlstrom, 11074, 洪如江譯) 1974

浮懸衆多黏土微粒而變濁，在15分至一小時之內，岩塊已完全分散為鬆砂、碎片、及泥水。

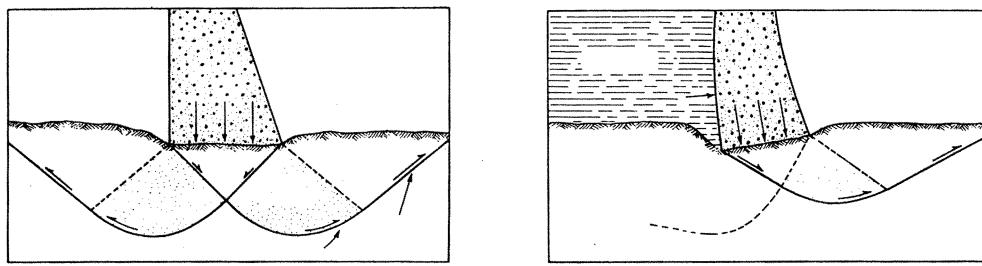
這是壩基地質材料品質及耐久性不佳之一例。

### 五、地質對壩基變形之作用

岩石或土壤，其強度與變形原是一件事，

將強度與變形分開計算，只是人為的，為求簡化分析與設計工作。

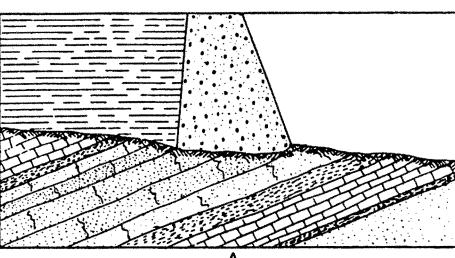
岩石與土壤，受荷重之後，必然變形。拱壩施於壩翼之推力相當高(約 $50\sim70\text{ kg/cm}^2$ )，已如前述，壩翼之變形必然不小。以剪位移而言，超過10 cm，在這麼大位移量，弱面上的微起伏(或稱二次起伏)必然被剪脫。



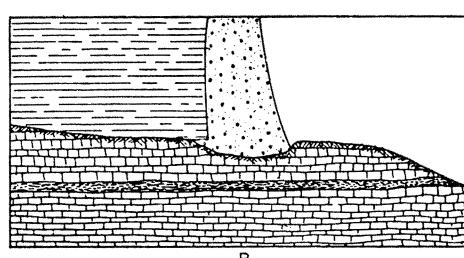
(a) 垂直荷重作用下壩基破壞模式

(b) 斜向荷重作用下壩基破壞模式

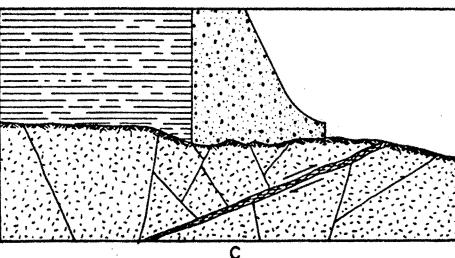
圖10.3 壩基的兩種破壞模式(Wahlstrom, 1974,  
洪如如江譯)



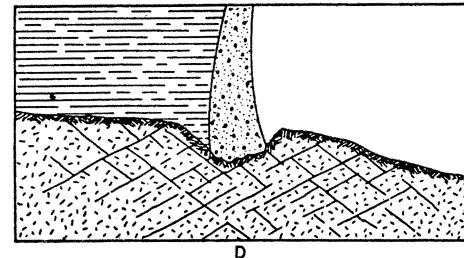
破裂之脆性砂岩及下接之弱質頁岩皆傾向上游



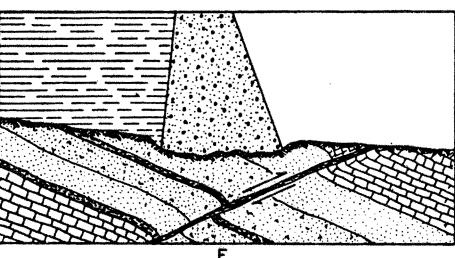
水平之石灰岩層下接延伸至下游河床陡坡之弱質頁岩



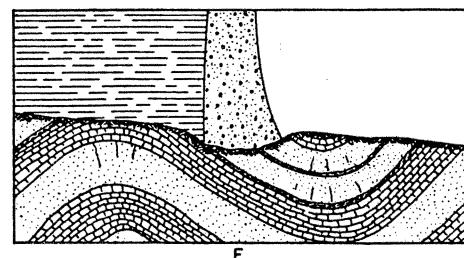
破裂之結晶岩石下接合低強度斷層泥之平順斷層



二組共軛節理具有促進岩體剪動滑脫之危險



沉積岩傾向下游被一含有低強度材料且傾向上游之斷層所切斷



褶皺岩石含有薄層弱質頁岩層，可能產生壩基破壞

圖10.4 一些合乎壩基破壞模式的地質構造(Wahlstrom, 1974, 洪如如江譯)

拱壩原可承受相當變形量，但若有差異變形或兩岸勁度不相近，則拱壩可能發生應力集中。因此，若純就壩基變形性而言，拱壩最好建於對稱谷形與對稱地質構造的壩址。若拱壩建於單斜構造之河谷而且層面之走向平行於河流者，例如翡翠壩址，右岸(由上游向下游看)為一倒插坡，左岸為一順向坡，左岸之變形量可能大於右岸者，因此，清洗軟弱夾心(如層縫之縫泥、破碎帶等)並灌漿回填之，除了改良剪力強度之外，也增進左岸之勁度使之與右岸接近，為保證效果，除了事先之地質調查、試驗、及研判必須力求正確，施工之品質力求優越之外，尚需安裝監測儀器，加以驗證。

除了上述左、右變形性之差異，尚可能有上、下游之差異。美國擬建之奧本(Auburn)拱壩，地表岩石之變形模數僅 $28,100\text{ kg/cm}^2$ ，而

較深之岩石則達 $105,500$ 至 $210,900\text{ kg/cm}^2$ ，但壩基岩盤中尚有不少弱面，尤其是斷層帶及滑石帶，其變形模數只有 $2,300\text{ kg/cm}^2$ 至 $70,300\text{ kg/cm}^2$ 。原設計者採用厚拱壩，並以有限單元法(FEM)分析，將壩體、各岩層、及各弱面，作整體計算(Frei, 1976)，使各處不同之變形性皆獲得考慮(圖10.5)。惜該壩開工之後不久，即行叫停。在較寬的河谷及斷層多處的壩基上擬建奧本拱壩，可見拱壩專家的信心十足；而以有限單元法處理變形性差別極大的基礎，顯示了數值分析及電腦之威力。但本案終於取消，主要原因是設計者對大環境的認識不夠，因為該壩址位於地震頻繁之斷層群中(規模遠大於壩基下之斷層)；其次，如此複雜之壩址地質條件，真能由有限單元法及電腦計算加以模擬嗎？也不無疑問。

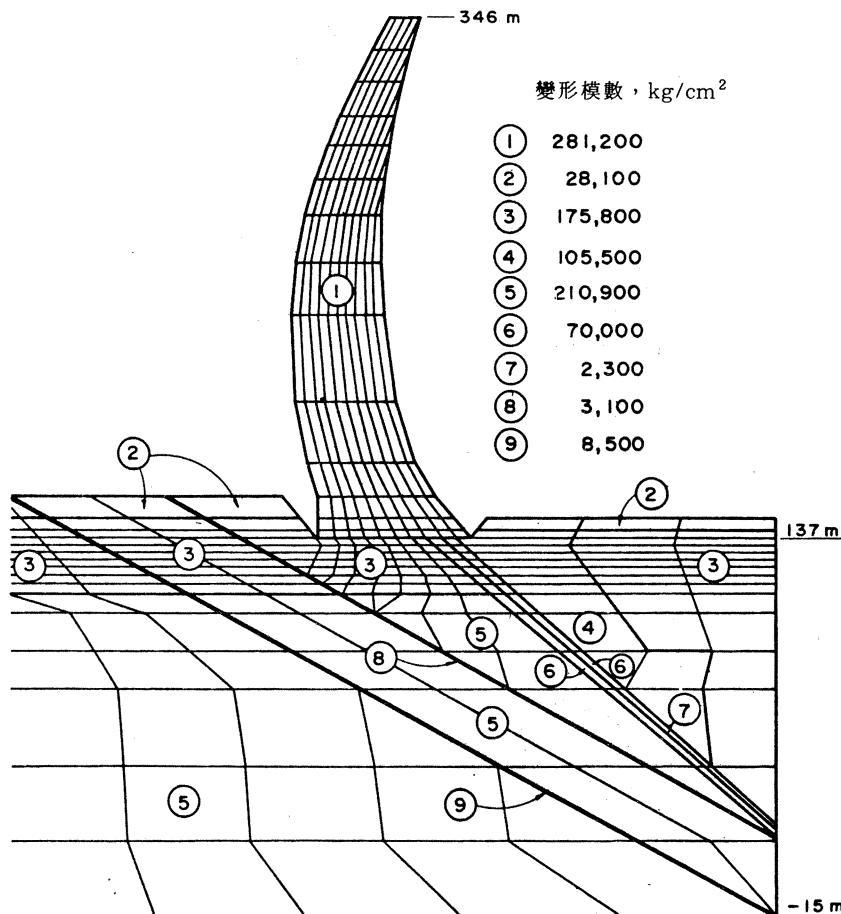


圖10.5 美國AUBURN拱壩及基礎以有限單元法模擬各部份變形性之作用(Frei, 1976)

## 六、地震與活性斷層

壩，在人工結構物之中，其造價以及對人類安全之潛在危險，僅次於核能電廠，因此，不但本身之結構設計必須受到注意；其外在環境也應受到重視。

在所有的天然環境因素之中，對大壩威脅最大者莫過於地震與活性斷層。不少人把地震與活性斷層當作同義之詞，錯！雖然地震幾乎(幾乎而已)全由活性斷層所引起，但有些活性斷層面(或帶)雖然經常有錯動，但若錯動是屬於塑性變形或所謂之潛變(Creep)，則未必產生地震，至少不產生有感地震。

若一混凝土壩跨於活性斷層之上，當斷層發生錯動，即使不發生地震，壩體也有可能被撕裂。

震央太接近壩址之大規模地震，對壩體及壩基，可能造成之不良影響如下：

- (1) 壩體結構本身被震而破壞。
- (2) 壩基被震而破壞。
- (3) 壩基土壤發生液化(Liquefaction)。

在這種情況之下，筆者認為：若非建壩不可(最好不建)，宜根據複合土理論(洪如江等，民國67年)，採用礫石或卵石與黏土之複合材料築壩，礫石或卵石粒皆互相接觸而其間之空隙由黏土充填者，上游面覆以柔性之不透水層如瀝青混凝土者。此種複合土，即使被震而發生錯動，也還能保持密合，並易於維修。

## 七、施工材料

壩之施工材料，數量龐大，品質要求又高。因此在從事大壩可行性分析階段，即應調查各種可能壩型所需施工材料之來源、品質、開採、加工方法(碎、洗、混)、搬運方法(運輸道路及道路)、儲存方法及地點、使用方法及使用後之安定性等等問題。在規劃階段，對各項問題作更深入了解，以支持壩型之選定；並於定案之後，規劃施工材料之開採、加工、搬運、儲存、及使用之地點、路線、及進度。在設計階段，對各材料從事配比試驗，確定各種材料之力學性質，供設計之用；並編訂各材料之各種(開採、加工、搬運、儲存、施工)規範及檢驗制度。在這許多階段中的許多工作中，工程地質師基於對地質之瞭解，扮演了非常重要的

角色。例如在考慮拱壩之時，地質師首先就在附近河床或河階地尋找礫石。若礫石材料之機會不大，就要從地質圖上以及野外地質工作調查堅硬岩盤(花崗岩、石英岩、砂岩等)之地點及其產狀，並進一步估計其產量及品質。而在考慮土石壩之時，就要尋找壩殼之石料及砂料、壩心之黏土、濾層之砂礫及上下游壩面之大圓石等。在施工階段，開採作業，如對地質構造，尤其是弱面，有充分之瞭解，則可利用弱面進行開採，以節省開炸費用並得到合用之尺寸；若採得之石料過大則需作進一步加工；若石料碎成片狀者太多，則不適用。

## 八、各種類型大壩之安全關鍵

不論那一類型之壩，壩體之設計及施工皆屬重要，再加壩基及材料之考慮，我們列出引言中的五項重要因素，但是由於各型大壩的構造不同、與壩基的互相反應不同，因此，其安全關鍵(重要因素中最重要的一項)也不相同，而在以上的討論，可能尚未完全說明，必須在此強調。

土石壩之安全關鍵在於止水塹(Key Trench)，也就是黏土壩心深入壩基內的部份。止水塹內黏土之填築，必須嚴格控制其品質；止水塹兩側(上、下游)及其下方岩盤之開挖以及灌漿也要特別注意；其開挖，若採用炸藥，須採用預製法或溫和開炸，不得使開挖面破裂，如有倒懸部份，必須修平之，否則黏土與岩面接觸不密。止水塹開挖期中及期後，其週圍必須

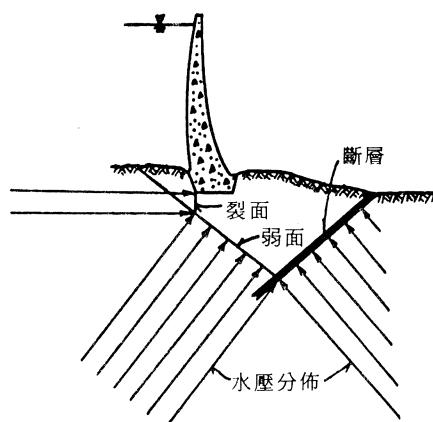


圖10.6 法國MALPASSET拱壩基礎



圖10.7(a) 翡翠壩址開挖，照片重點：左岸順向坡坡面



圖10.7(b) 翡翠壩址開挖，照片重點：河床及右岸



圖10.8(a) 榮華壩址，照片重點：谷形及開挖



圖10.8(b) 榮華壩址，照片重點：河床及右岸

充分排水，開挖面不得受烈日曝曬，更絕對不可使止水塹浸水以免軟化。灌漿工作（固結灌漿及隔幕灌漿）必須確實並嚴密檢驗合格才可進行黏土之填築。為同時達到此目的，常將止水塹開挖分兩段辦理：首先開挖至尚餘約一公尺之時，先行灌漿作業，待灌漿完成後，再修至設計開挖面，立即進行黏土之填築。美國 Teton 土壩，止水塹上下游岩盤灌漿不確實，滲水侵蝕止水塹中黏土致發生水力破裂(Hydraulic Fracturing)，終使土壩破壞崩潰成災。

拱壩之安全關鍵在於壩翼接近河床之處的岩盤強度、變形性、及水密性。法國 Malpasset 拱壩，壩基太淺，尚在較弱之表層內，斷層與由壩跟向下之裂面交會，致拱壩暫停在一岩楔之上，該一斷層受拱壩推力而發生較大變形，致其左側壩基因應力集中而發生較大之變形，且該一岩楔之下承斷層剪力強度不高，水庫中之水，沿壩跟向下滲至該岩楔之背後弱面、及斷層，岩楔於是被推動。茲以 Carlier(1974) 報告之斷面，加上筆者之水壓解釋，示於圖 10.6。圖中之水壓，為筆者之一種解釋，實際情形，應埋水壓計量測之(但本案省略之)。基本上，本案之壩基應放深或移至較佳岩盤內，或改為重力式拱壩並加強灌漿及排水。各種監測儀器不可省略。

混凝土重力壩，最怕兩件事，一為沿壩底面之滑動，一為以壩趾為轉動中心而向前翻覆。這兩種破壞模式，壩底之上頂水壓(Uplift)最為有害，一來使壩底面與岩盤間之有效應力降低，剪力強度因之降低；二來上頂壓力作用於寬廣之壩底面，增加了翻覆作用力。因此，在混凝土重力壩基之調查重點，在其透水性；而改良之方法，除加強灌漿之外，壩基之排水、消壓最為重要。

## 九、結語

壩工之設計，經驗的成份還是很高；以學

術觀點而言，大地應力(Tectonic Stresses)對拱壩之影響就還不清楚。而歐、美對拱壩之設計觀念也不盡相同。但壩體之失敗，遠少於壩基之失敗；岩石力學性質確定之誤差，又遠小於工程地質調查之不足及判斷之錯誤。但地質條件變化多端，本章所討論者，不過一些簡單原則。進一步之學習與研究，似乎應該注重個案分析。

圖 10.7 及圖 10.8 分別示榮華壩址及翡翠壩址之照片。

## 參考文獻

- 洪如江等九人(民國67年)「複合土工程性質之初步研究」台大工程學刊, 23:1-12。
- ASCE (1974) *Foundations for Dams*, ASCE, N.Y.
- ASCE/USCOLD (1975) *Lessons from Dam Incidents, USA*, ASCE, NY
- ATTEWELL, P. B. and FARMER, I.W. (1976) *Principles of Engineering Geology*, Chapman and Hall, London
- CARLIER, M. A. (1974) "Causes of the Failure of the Malpasset Dam" *Foundations for Dams*, ASCE.
- CHADWICK, W. L., et al (1976) *Failure of Teton Dam* U.S. Government Printing Office, Washington D. C.
- Department of Agriculture France (1960) *Final Report of the Investigating Committee of the Malpasset Dam*.
- FREI, L. R. (1975) "Auburn Dam Foundation Investigation, Design and Construction" *Field Trip Guide Book of the Asso. of Engg. Geolts.*, 18th Annual Meeting, Lake Tahoe, Calif.
- WALTERS, R. C. S. (1962) *Dam Geology*, Butterworths, London
- ZARUBA, Q. and MENCL, V. (1976) *Engineering Geology*, Elsevier, Amsterdam