

## 第3章 工程地質導論 (工程地質 Goodman)

### 3-1 岩石的分類

#### 火成岩

火成岩的活動即是矽酸鹽岩漿之產生及移動，產生了兩種火成岩 (igneous rocks)；噴出岩 (extrusive rocks)，在火山爆發時形成；而侵入岩或深成岩 (intrusive or plutonic rocks)，則在地下深處緩慢冷卻而形成。流出岩漿 (大約 850°C 至 1200°C) 時釋放氧體，常是猛烈地射出玻璃及岩石到空中。火山岩包含了這些被射出的火山沉積物及固化的熔岩 (lava: 噴出的岩漿) 湖或河，具有來自於它們動態原本之獨特的結構 (structures) 及構造 (textures)。在深度 50 公里或更深的地方，當岩漿緩慢冷卻及固化被迫往上擠時便產生了更多粗糙的晶質的矽酸鹽岩，並有多種大小及形式。其中有一些為整合 (concordant) 的物質，緩和地楔入主岩石的層間 (圖 3-1(a))；其餘的為不整合的 (discordant) 物體，會切過及干擾其週圍的岩石 (圖 3-1(b))；深成岩在世界各地大部份的高山區域被發現，當有表層覆蓋物質遭巨大的侵蝕時便暴露在地表。

深成岩的種類很多，結晶的大小及成份各有不同。世上大部份的深成岩為花崗石成份：通常為淡色、礦物常是長石、石英、雲母、輝石或閃石；以及從中到粗構造的混合物，花崗岩缺少層理 (bedding)，但是常被數個稱為節理 (joints) 的平面所破裂，尤其是與大地平行之蓆狀節理 (sheet joints) (圖 3-2)。花崗岩易於與蓆狀節理平行之平面承受高現地 (in-situ) 應力，這是對工程師相當有利的性狀。花崗岩常發現有軟化的、弱化的及具許多微裂縫的密合的節理情況，是過去風化的結果，有時也因為在地表下 100 公尺深所造成。因此雖然花崗岩是原始型的 (archetype) 基岩 (bedrock) 它卻呈現出困擾工程師的屬性。

火山岩及墻岩 (dike rocks; 岩脈) 位於淺的深度主要包含黑 (深) 的、均質外觀的玄武岩及數種將在稍後討論到的岩石。顯微檢查顯示它們為晶質的，但是顆粒很小以致於看起來缺乏結晶或晶粒 (grains)；然而有一些大得多的晶體叫做斑晶 (phenocrysts)，可在樣本上以肉眼清楚地看到 (圖 3-3)；這種雙型態晶粒大小的特徵稱為斑狀構造 (porphyritic texture)，是火山或淺墻岩成因的可靠關鍵。玄武岩常常

與火山或非火山沉積物互相疊層，因此火山岩的物質可能呈現層狀的 (bedded) 就像沉積的岩石，在火山的沉積物 (叫做火成碎屑沉積 (pyroclastic deposits) 或火山 (tephra)) 中有：火山灰 (volcanic ash) 和火山渣 (cinders) 及凝灰岩 (tuff)，此為火山產出之岩石；以及火山塊 (volcanic blocks) 及火山彈 (bombs)，而且進而產出集塊岩 (agglomerate) 這種火成岩。火山屑沉積偶而會銲接成很硬、像玄武岩的層。所有的火山岩可能高度地破裂且極易透水。有些則極易被侵蝕。

蛇紋岩不常見但確是某些地域常見的火成岩，如先前提過，由早期的氧化矽缺乏經深成變化而形成。通常它們相當破碎及斷裂，包含了縫隙及富蛇紋石的黏土，遂提供了剪移及物體滑移之真正潛勢(圖 3-4)。據信有一些受干擾的蛇紋岩扮演了受水和及剪切的岩石，被運輸甚至於從地函升至海底。

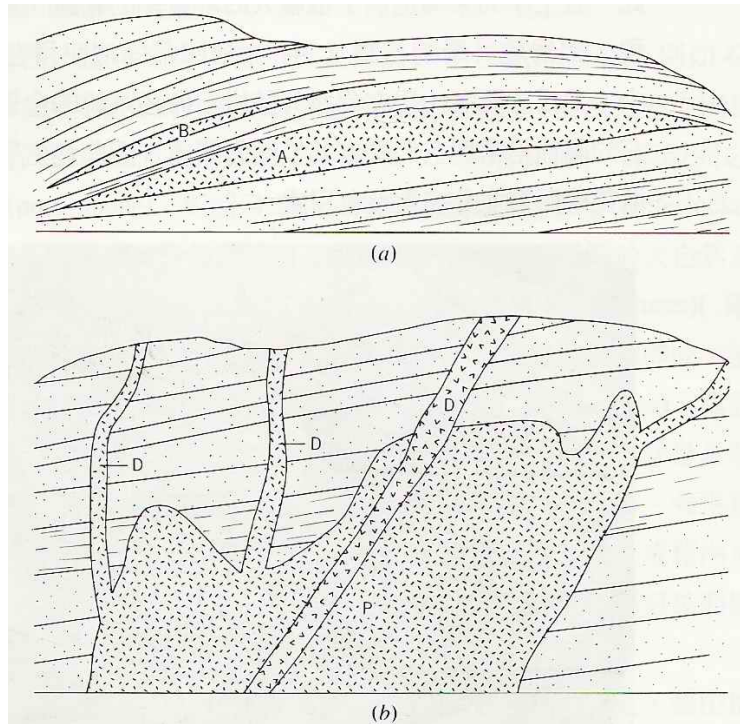


圖 3-1 (a)整合的火成岩體:岩蓋(laccoliths)A 及岩床(sills)B；(b)不整合的火成岩體:深成岩體 P 及岩牆(岩脈)D

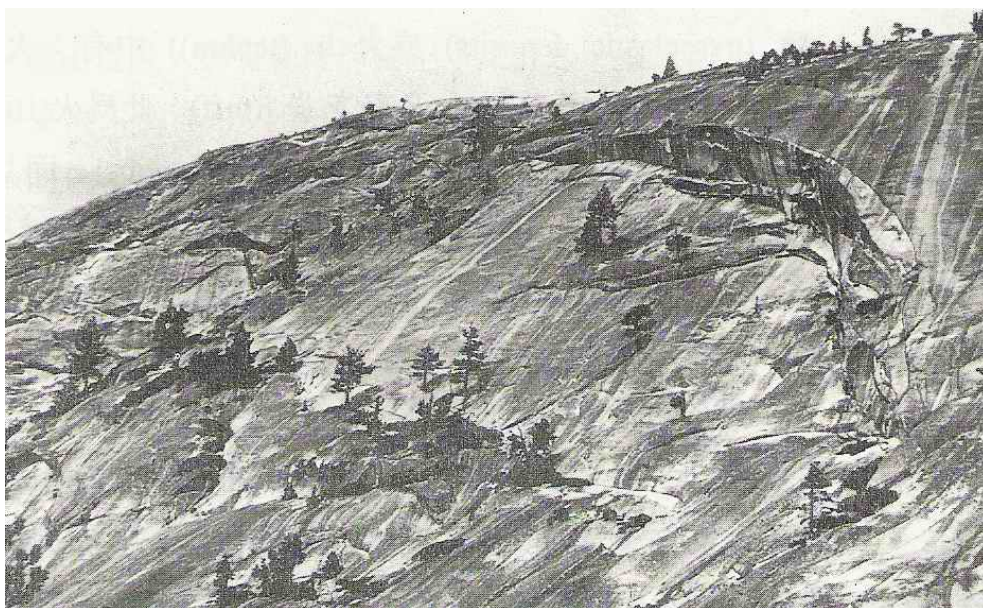


圖 3-2 蓆狀節理的花崗岩，加州的優美地公園(Yosemite Park, California)  
拱形的崖指出了先前黏住但已下滑之蓆狀層之早先的頂部。

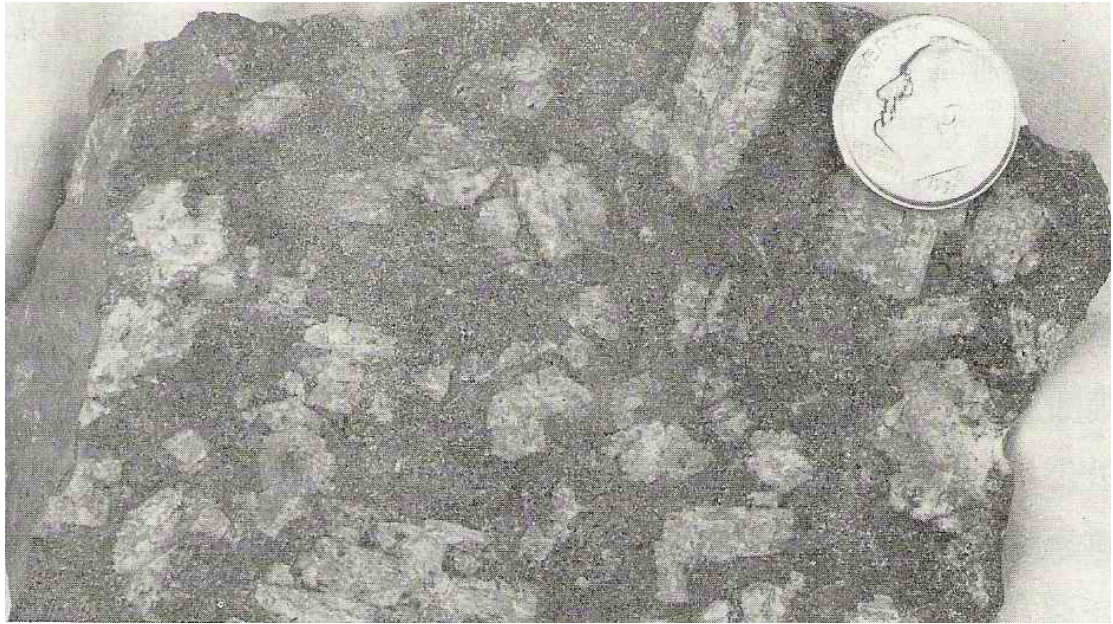


圖 3-3 從淺岩脈而來之斑岩樣本的照片



圖 3-4 在捷克道路挖方所露出之蛇紋岩

## 沉積岩

經由侵蝕，物質剝離而露出了深成岩，被冰河及河流攜入河道，有些更流入海洋。只要有侵蝕，生成物便會在某地積聚，最後經壓實、固化及膠合而就地硬化成沉積岩。岩石風化的可溶產物使地下水、湖泊、海洋有鹽度。隨時間逝去，這些可溶產物由於蒸發或溫度的改變成了過飽和，造成了礦物的沉澱和在底部的堆積。湖泊(lacustrine)的貝殼類及海岸的動物及植物豐富了這些可溶產物之聚集。

沉積物的表層被保存於沉積岩內，藉由沉積的粒徑及成份之突然的順層面 (bedding planes) 移位，可標示出層(beds)或地層(strata; 單數 stratum)之邊界(圖 3-5)。層及層的表面是沈積岩最重要的結構性狀。它們通常總是沉積岩性質之顯著的和有影響之原因。例如圖 3-6 出示一受到很陡的順層面岩石滑移威脅之道路。

在沉積岩中分佈最廣的為頁岩、粉砂岩 (siltstone)、泥岩(mudstone)及黏土岩 (claystone)。都是從最細顆粒的沉積亦即黏土和較粗一些的沉積也就是粉土 (silt) 而衍生。將專門來討論這些物質以及相關的砂岩及礫岩，它們對於工程地質學極為重要。頁岩群 (group) 包含廣泛的壓實過的 (非膠合) 黏土及非常硬的岩石。相似地砂岩的範圍則包含基本上是壓實的砂到太硬而幾乎不能開挖之岩。

石灰岩及白雲灰岩(dolomitic limestone)(或者常稱為白雲岩)也是廣為分佈的。事實上整個美國幾乎全被石灰岩所覆蓋。石膏、岩鹽、硬石膏及其它的蒸發岩(evaporate)沉積物，在沉積的地殼中被發現並非偶然，這些可溶的岩石對於工程而言可能代表了障礙，因為它們可能有地表沉陷 (subsidence) 甚至於是塌陷 (collapse)、水庫漏水以及地下污染等。

煤及相關連的煤系(coal measures)岩石是很被感興趣的礦物燃料，它們有重要的屬性及關連性，在它們對工程師所造成的問題當中有基礎下方所遭遇之未知的礦之開口的危險，地表水被酸性的地下水之排水而污染，以及煤層下黏土 (underclay) 沉積之塌方(landslides); 後者在煤層下方常見。

沉積岩科 (family) 含有其它具有特殊及有趣的性質之東西，例如天然瀝青 (natural asphalt)、鐵礦 (ironstone)、磷酸岩(Phosphate rock)、冰積岩 (tillite) 及岩屑角礫岩 (talus breccia)。

沉積岩尤其是第三紀或更新世者具有介於沉積物本身及岩石之中間的性質。要成為工程意義中之 "岩石"，沉積物必須被不可逆轉地膠合並硬化。但是浸在水中諸如頁岩、泥岩及相關的岩石常常軟化，並且在相當低的剪應力情形下降伏 (yield; 屈服)。有一些砂岩及礫岩會與水泥成不完美的膠合或結合，但是在加水後毀壞或在乾了之後毀壞。其它的岩石可能表現得像土壤一般，係由高密度的破裂、多孔性或者由沒有膠合性的黏土，規則地夾於各層之間的本性所造成。弱岩 (weak rocks) 在開挖及興建基礎時，倘若工程設計師沒有體會到它們真實的像土壤般的本性，常會遭致不可預期的困難。

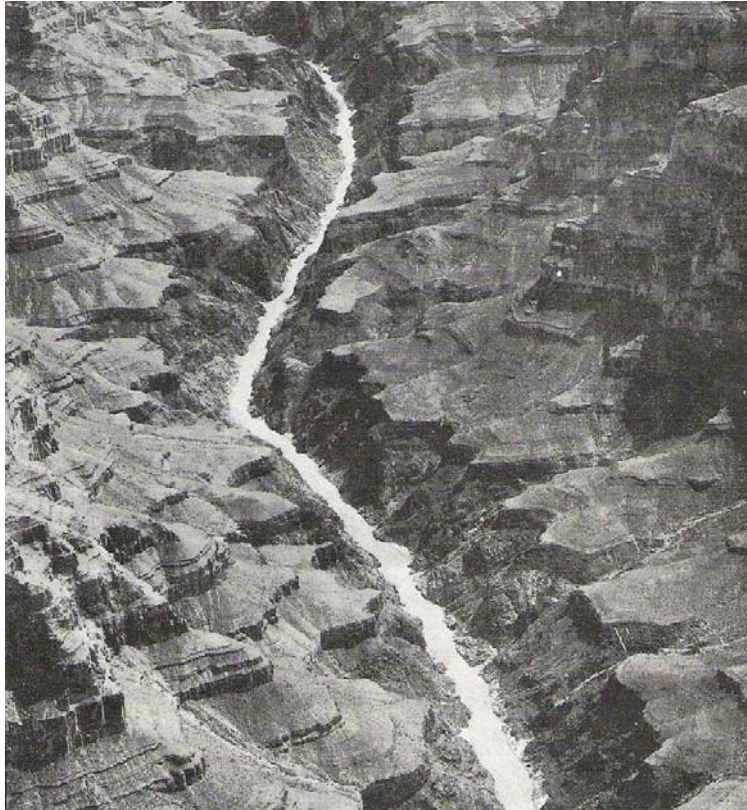


圖 3-5 平地披覆的沉積岩之順層面在大峽谷(the Grand Canyon)暴露出來

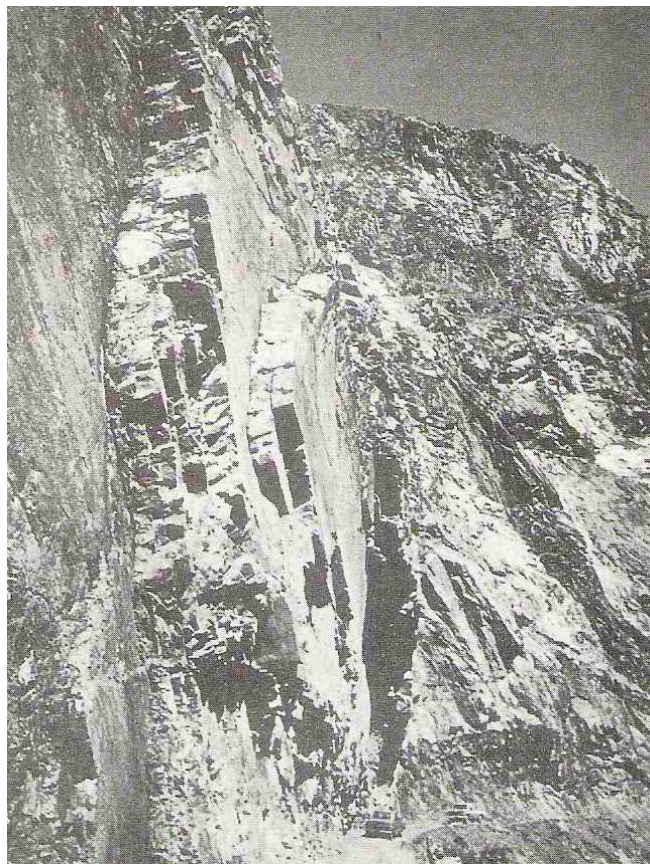


圖 3-6 危險的砂岩及泥岩之順層面沿著祕魯的理歐.聖塔(Rio santa)由道路上的汽車可以了解其大小

## 變質岩

使礦物及岩石的結構轉變 (transformed)的變質作用(metamorphism)之過程包含了熱、變形 (distorsion)，兩者一起或不是同時一起發生。由加熱所轉變的岩石薄帶 (zone)幾乎到了熔點 (melting point)，可以見到是發生在深成岩體的邊緣(但是幾乎絕不發生在火山岩的邊界)。山區大部份的變質岩，常延伸超過數十公里，由深埋於地殼相關連的地域效應或地域的應變所造成。這些岩石之最顯著的性狀之一是裂理 (Parting)的方向，此即等同於層理，此裂理經常在相當的距離中保持了一致的方向。這種性狀亦稱為葉理(foliation)。任何具葉理的變質岩沿著葉理面會較沿其它方向更易於破裂。事實上具葉理的岩石之所有的物理性質均傾向於有高度的方度性。

岩石加熱及變形 (或兩者一起)於一化學的開放系統中卻沒有得到新化合物之混合，可以預期在岩石內會產出很多很多的效應。當岩石受加熱及變形影響時，變質岩中的成份構造及結構幾乎可以有無限多種可能。數種常見的岩石類型為：板岩(Slate)、片岩(chist)、片麻岩(gneiss)、大理岩 (marble)及石英岩。

板岩是高度可劈理(cleavable)，細晶粒岩石，從區域性的頁岩經變質而產出。它是硬的、耐久之岩石，並且可以劈成片狀，薄及輕到可以使用為不透光、防火的屋頂。如果你係將頁岩劈成屋頂板，即使沒有立即破裂，也會在幾次下雨後破碎。

片岩也是頁岩的變質產物，係從黏土長出新的礦物，這些常見的雲母，但是可能有更多的礦物像是綠泥石 (chlorite)、角閃石及滑石。對於雲片岩(mica schists)，雲母的劈理平行於葉理(圖 3-7)稱作片理(schistosity)。這些岩石傾向於沿著葉理的方向滑移，因為此方向常是陡峭地傾斜，並且連續得相當長，可以有大的滑移。因為這種原因，片岩被視為對建設方案具潛在困難的岩石。

片麻岩是硬的具葉理的岩石，可由花崗岩之變質作用產出。片麻岩常有不同的礦物例如雲母及長石隔離成帶狀(夾層)(圖 3-8)。當它們新鮮時通常強度相當高，但卻與深成火成岩不同於其具有極度的方向性行為。

大理石是高度再結晶的石灰岩或白雲石灰岩 (dolomitic limestone)，通常不具有重要的葉理。它可能比石灰岩較密實，但是在其它方面則表現得相似。可溶的岩石性質亦可能暗含洞穴並造成塌陷。由於打光後具有連續性、軟性、強度及美麗、大理石是最重要的裝飾用岩石，用於古代及現代之建築物。另外桌面、牆面及地板均常見大理石的使用。

先前吾人考量了石英岩這種岩石，它是由砂岩經變質作用而產出。(名詞石英岩 (quartzite)也偶而使用於主要包含礦物石英之氧化矽膠合的非變質過的砂岩)。

因為變質岩一般被發現於侵蝕過的山區，它們被使用於主要工程結構的基礎或用為工程材料的例子很常見。



圖 3-7 雲片岩的樣本照片雲母平行於薄片的反射造成了閃亮的光澤

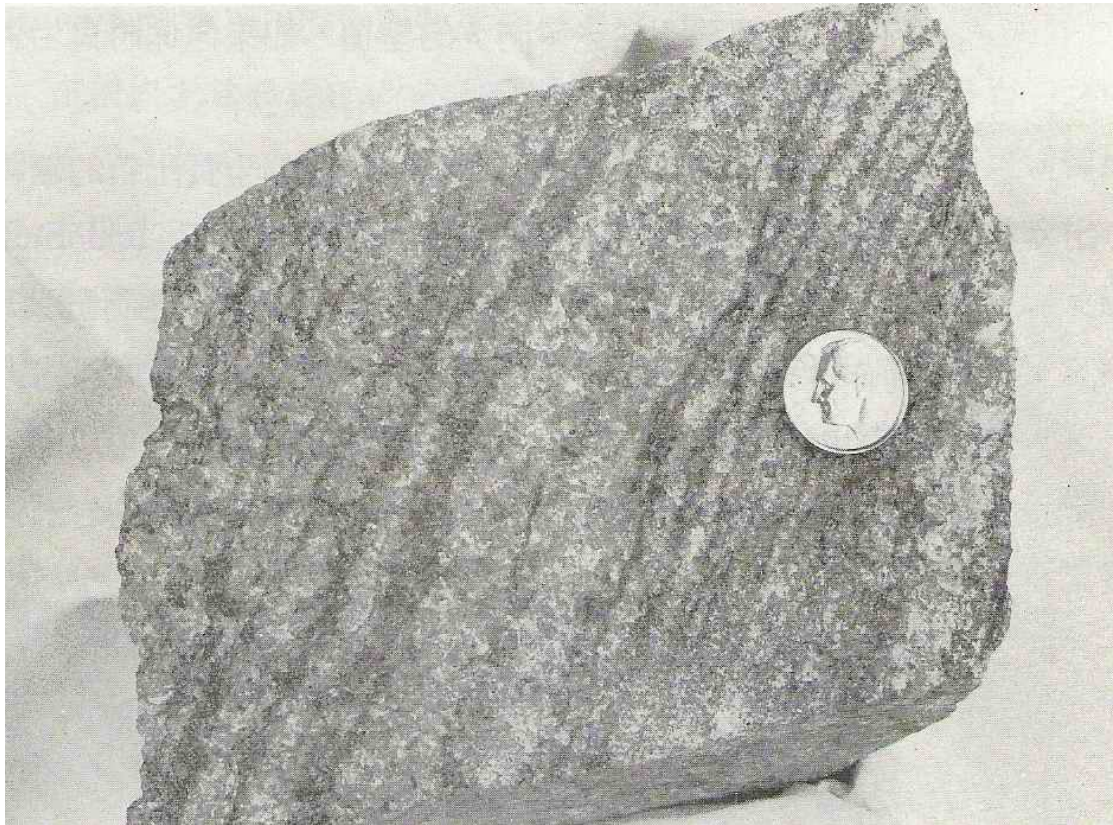


圖 3-8 帶狀片麻岩樣本的照片

## 風化及風化岩

誕生於表土下之岩石由於流水、冰河及拍岸的波浪之侵蝕的結果。而變成暴露於大氣中。大氣會以一種力量及試劑的方式作用於這些岩石，並傾向於將岩石剝開反轉變成土壤，進行吾人稱為風化(weathering)的作用。對於土木工程師此(風化)尤其重要，學習岩石如何應對表面之風化，大部份的土木建物只在表土下，相當淺的深度與岩石交會，此深度仍屬於風化帶(zone of weathering)，因此岩石的性質會有相當的改變。基礎和地基以及道路下淺的挖方和管路均會遭遇風化岩。進而因為對洩洪道和橋墩之挖方而新露暴的岩石，一旦開始了風化作用，結果仍是毀壞；對有些最硬的岩石十分緩慢，但有一些則令人驚訝地快速。因此，風化的效應及過程對於工程體是極有關係的。

轉變岩石成為土壤之自然過程包含物理風化(physical weathering)之破裂及粉末化的過程，以及化學風化(chemical weathering)之摧毀礦物結構。物理風化進行諸如：冰的脹裂和根部的楔裂，結晶成長、加上侵蝕的剝落，以及不均勻的加熱或冷卻肇致的彎曲。破裂於是如此地產生及延伸，藉由如此的交錯及加上化學風化的反應劑之進入次表面，而逐塊的剝蝕岩石，這些反應劑主要是酸，如同雨水溶解大氣中之二氧化碳所生成者，愈多二氧化碳，土壤中有機酸愈多。稀碳及有機酸溶解可溶的方解石、白雲石及石膏，以上這些可能是膠合碎屑岩的，於是寬化的裂隙，通道及空間，留下了不可溶物質於縫隙，經常是黏土狀的殘留物(圖 3-9)。隨時間之逝去，碳及有機酸蝕倒了長石、輝石及角閃石的晶體成為黏土、自由的氧化矽以及可溶鹽，留下了具抵抗力的石英以殘留的砂粒存在黏土或粉土中。

這些過程之合併的效應，依氣候之不同而不同。化學反應在潮溼的熱帶及亞熱帶進行得最快及最完全，在冷及乾的氣候則最不具效力。因此在北極地帶及沙漠，只靠物理風化作用之機械過程，緩慢地逐漸將岩石破碎成為破裂或碎石狀的物質。然而在熱帶於工程方案壽命內，兩種風化作用合併，快速地將新暴露的岩石侵蝕掉。

最適合風化區物料的一個字(word)是 "變(variable)。風化岩可以在任何方向之很短的距離內急刻地改變特質，物質從黏土成為硬岩，從礫狀轉成為土壤，或者從處女岩變成各種方向均產生裂痕的岩石(圖 3-10)。如此，風化帶的材料難以分類，在建設工程中亦易於錯認。往後章節中，吾人將探討風化的特定產物及特定型式之岩石以及它們對建設之衝擊。



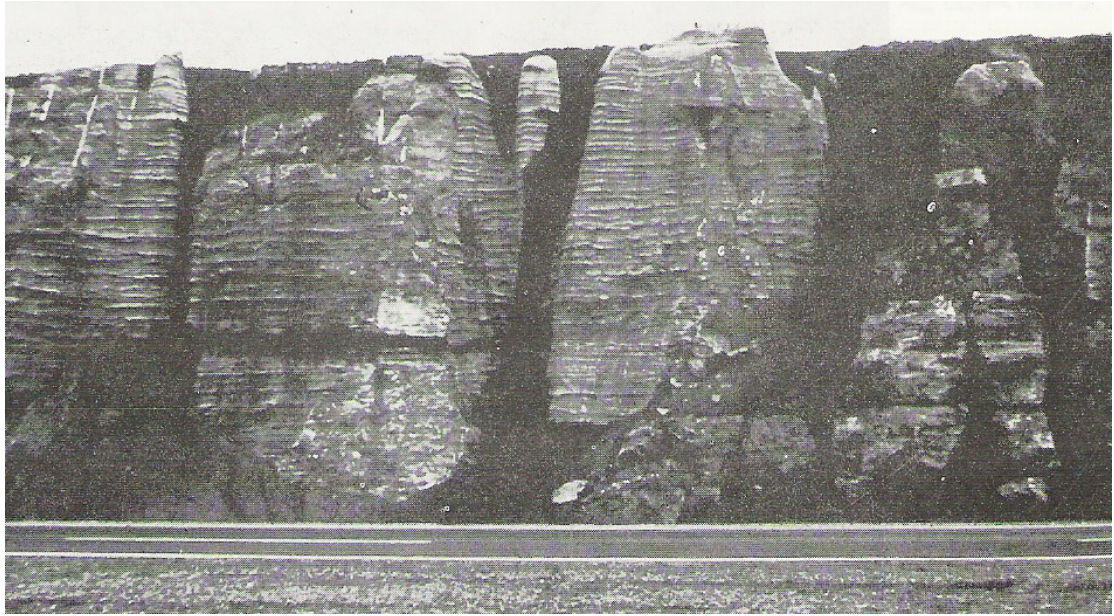


圖 3-9 沿著石灰岩的節理發展出垂直的溝槽，殘留及被輸送的土壤物質聚集在垂直的洞穴內



圖 3-10 風化的花崗岩展現在很短的水平及垂直距離內有硬岩(球狀的大石)至砂狀的土壤

## 3-2 地質結構

當地殼板塊碰撞或相互剪切時發生岩石的變形，並在該碰撞剪切處有深成侵入 (plutonic intrusions)、區域性沉陷(regional subsidence)或上升，並在地球的其它點有應力之生成。變形之機制包括地層的彎曲及皺曲 (bending and buckling ; bending ;因彎矩:buckling 因壓力)，裂隙的延伸，及剪切破裂。不像是在實驗室做實驗，當試片降服或破裂實驗便終止了，大自然的"試片"在地球之變形是連續的，彎曲、破壞、剪切直到應變的極限是工程實驗室所少有的，對地球而言試片最後有可能成為原來之十分之一的長度(變質岩)。層的彎曲產出了褶皺結構 (fold structures)，伸長的斷口(fracture)產生節理(joints)，剪切破裂產出斷層 (faults)。

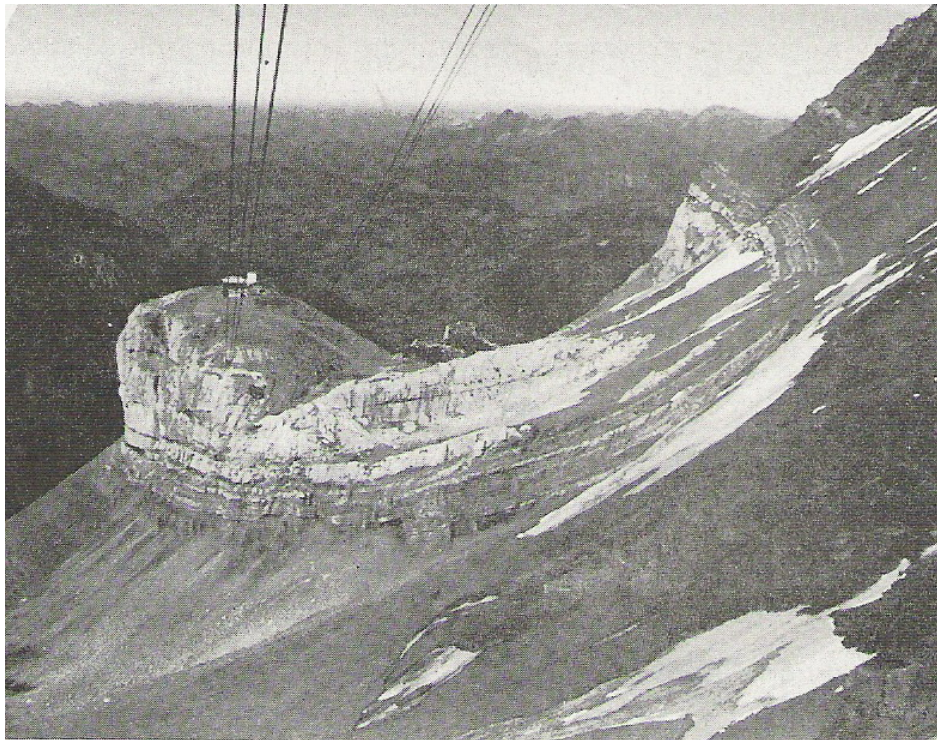
### 褶皺

大部份沉積層係沉積在原本水平或近似水平的沉積平面表面之上。在原野沉積岩的底部常見它們保持著水平，尤其是在大陸的中心。小心測繪這種底部，會揭露出它們之從完美的水平後之四處離開，從而升起穹地 (domes)及拱頂 (arches)，次而成為平埋的盆地(basins)或槽地(troughs)。在山區，從古老完全侵蝕過的山根，可見地層傾 (dip)入地面，傾斜的角度從水平到垂直都有。雖然非原野研究尚不夠清楚，有些地方的地層甚至於倒轉 (overturned)過垂直角度。傾入地層形成褶皺側(flanks)，向上拱成背斜 (anticlines)或向下形成向斜( synclines)褶皺可能是圓錐狀的，其有平順地彎曲側，或者是複平面的(V形褶皺或箱狀褶皺)具有突然改變的曲率，或者複雜得多的輪廓。(圖 3-11)。

褶皺使場址地質學複雜，也暗示投影地質學之高度變數的地質情況，地區結構的形狀連同褶皺可能可以證明詳盡的研究是尤為重要且多具優點;例如褶皺可能造成沿某些地層表面之滑動，顯著地減少它們的剪力。斷口及岩石碎裂可能沿最高曲率的軌跡被增強，而在這些帶風化作用更可能極度地被催化。



(a)



(b)

圖 3-11 (a)沿著英格蘭北迪朋(North Devon England)海岸的褶皺的砂岩及粉砂岩  
(b)瑞士阿爾卑斯山中之被鈣質頁岩披覆之石灰岩之緊緊的皺褶層序

## 斷層

地殼的岩石破壞不只是以褶曲(flexures)的形式發生，也會有伸張式的裂縫及剪力破裂。後者產出在地表稱作斷層 (faults)，隨著它磨損的岩石被拖曳並印上刻痕及凹槽而且沉積岩石粉末，常會改變成黏土，稱為斷層泥(fault gouge)(圖 3-12)，斷層之剪位移可由地質圖確定地層之水平錯斷( offset; 偏移) 的距離，係假定該地層在斷層作用之前原先是連續在一起的(圖 3-13)。小斷層之水平錯斷可能只有以公厘度量的距離，而典型的大斷層可能的剪位移是以公里來論(在地質時間之重覆移動)，沿著剪切作用已發生的表面，若水平錯斷的標示(marker)沒有被發現有位移 (由表面之物理特徵判斷 )則稱為剪動 (shears)。

如同褶皺，斷層使工址之地質學複雜，它們平滑或披覆斷層泥牆之表面強度有限，對於基礎深具危險性，斷層可能引導地下水或產生地下壩而形成地下湖，當進行隧道開挖時，可能引起水的失穩而侵入、(隧道 )，完全地中止了隧道工程。

對於工程位址，斷層有一另外的威脅性被發現，即是活 (active)動性。活 (動 )斷層有再移動的可能。如果發生了，則座落其上之任何工程將可能會破裂。伴隨著它的移動可能是毀滅性的地之振動並改變了地面的海拔高度或者使之傾斜。研究斷層的活動對於重點結構體像醫院、水壩、電廠 (尤其核電廠 )或運河尤其重要，一旦有所破裂會對社會造成嚴重傷害。確定斷層活動的程度包含了藉地層學 (stratigraphy)及地質年代學(geochronology)之運用而知道過去錯動之時間。

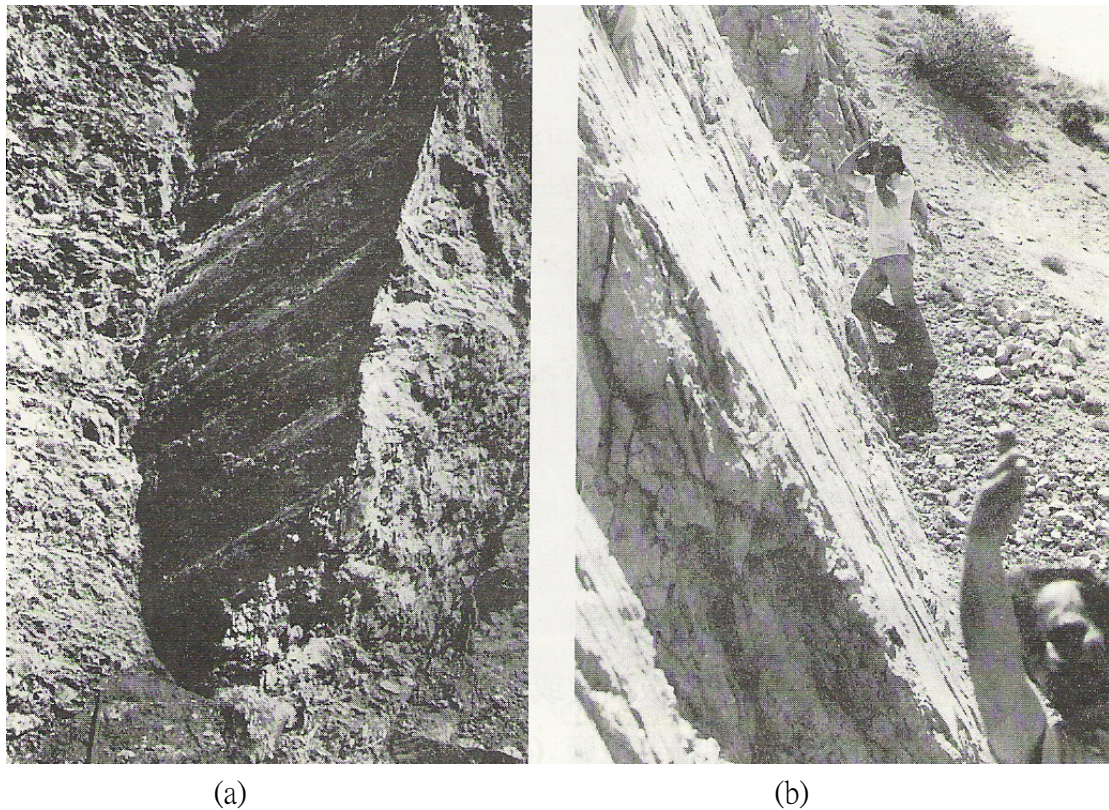


圖 3-12 暴露於近隧道入口的斷層表面；(b)活瓦沙奇斷層(Wasatch Fault)的表面暴露的位置位於猶他州鹽湖城南方的一處石坑



圖 3-13 有二斷層之沉積層的水平錯斷在中間之土地明顯地往上移高於外側者  
**節理**

與斷層和褶皺在結構地質學之動態角色對照，節理毋寧說是岩體中之平常的公民。名詞節理(joint)使用於規則地反覆之破壞表面，通常是平面的，依恆定的指向切過了岩石，其間的平均縫隙從小至(數)公升到數公尺不等。大致平行於一單一平面的節理表面族稱為節理組(joint set)大部份岩石物質具有節理系統(joint system)，具有超過一組，也常見三組節理組 (圖 3-14)。

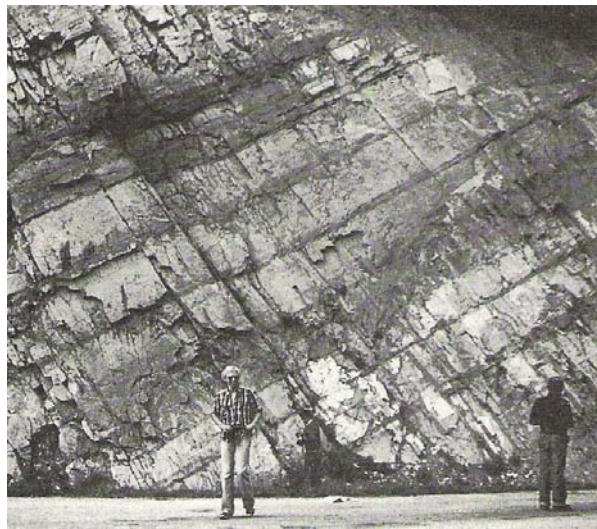
節理系統傾向於在某個有限的體積中保持差不多是恆定及可預測的，稱作結構域 (structural domain)，一工程位址可能座落在一個這種域之內或者包含了幾個域，如果是後者的情形，工程所遭遇之岩體的情形可能在工事的這一部份與另一部份間會有很大的不同。

節理從伸展性的應變 (伸張)，及剪動發生。在後者的情形時，每個節理像似、岩石中小的斷層因為某種原因，可能發生於一或數個表面之錯動會成百成千地分佈。剪節理 (shear joints)傾向於平滑及較密合，然而伸張性的節理通常是粗糙的，並且有相當大的開口(縫隙 (apertures))。不過，大自然運用貫入( wash-in) 沉積物或化學沉澱的方式快速地填封任何孔隙；很多伸張性的節理於是被方解石或其它二次礦物 (secondary minerals)填滿，在岩石誕生以後才產生礦物的沉積。

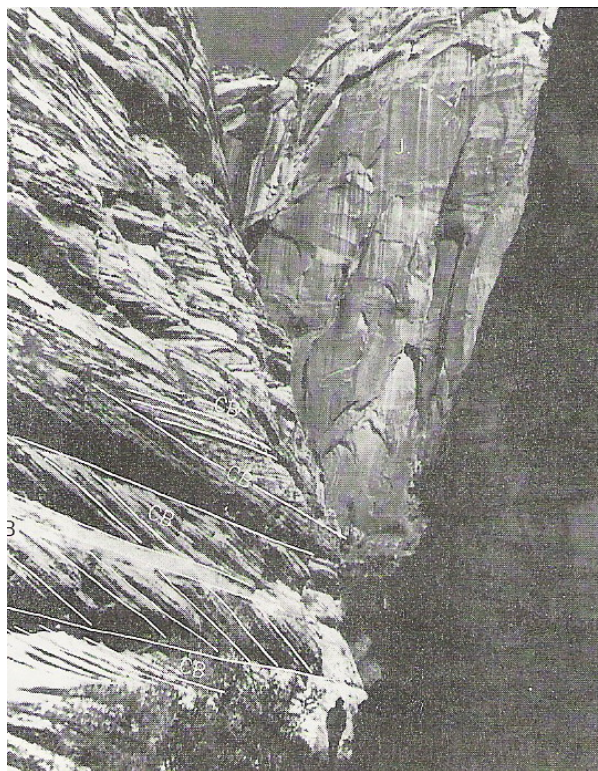
節理組的系統切過了岩石，將岩石劈開成為緊密的岩塊。與開挖面交會之節理組傾向於在開挖邊界產出額外的岩塊。在極端的個案中，岩體像似石砌的結構。在岩塊中進行地下或表面開挖時，可以使用岩塊理論(block theory)找出位於最關鍵的位置與方位之岩塊稱為關鍵岩塊(key blocks)，以便於選擇開挖之最佳的形狀、方位及支撐系統(Goodman and Shi ，1984)。

在某些岩石中，節理極度地重要。即使岩石物質之本身夠強且不滲水 (或者夠強或不滲水僅其一)，節理的系統可能產生顯著的弱化及流體的傳導性。流體進入岩體中的能力提昇了風化作用，接近表面的節理被弱化及改變了。節理影響

採石作業，控制了使用爆破方法可採的岩塊 (件) 之大小，以及採石坡的安全。



(a)



(b)

圖 3-14 (a)具三組節理之岩石物質:1.平行層理 2.形成岩石表面 3.形成垂直於層理之痕跡(蒙大拿州餓馬壩 Hungry Morse Dam Montana)(b)層理(B)交錯層(cross bedding)(CB)及節理(J)此位於猶他州之錫安公園(Zion park)的那亞荷(Nava)之砂岩。

### 3-3 砂岩及礫岩的工程性質

#### 探勘的標的及問題

工程位址之砂岩或礫岩的探勘需要找到工址是如何透水的，亦即它對水的傳

導性為何?砂岩形成之傳導通常較高，即砂岩既導水又儲水，但是當孔隙率小且既乏節理及破裂或則緊緊地壓密時，該岩石可能變成不透水的 (impervious)。在工址進行的觀察及試驗必須確定實情如何，因為岩石的透水性決定 tightness(緊密性) 及破裂的骨架網或岩石結構的開口或兩者兼而有之。野外透水性的量測，顯然是水的儲存 (水庫) 或水的輸送之基本，而且一般也是相關於這些特徵之所有工程特性之指標。其中之一為灌漿 (groutability)。(水泥) 漿是空洞的填充物質，例如波特蘭水泥、砂及水之混合物或快速固化的化學液體；漿注入岩石以形成地下水障礙。有些砂岩可以有效地被灌漿，但是對於透水具有很細顆粒或 argillaceous 的砂岩，或者透水的骨架網部份地填充著黏土者均難以藉灌漿而密封 (seal)。

在評估一砂岩工址時，需要足夠的探勘以確認砂岩及礫岩體的形態學 (morphology)，因為它們可能出乎意料地傾斜或增厚。另一個目的是評估膠合 (cementation) 及它的穩定性以便於建立岩石的耐久性的指標。藉砂岩在野外之自然的含水量，砂岩的強度常被評估，密實不良的岩石呈現高的含水含量，反之也成立。

探勘的問題由一些砂岩的特性產生。硬的、破裂的正石英砂岩的鑽孔十分困難;需要用來冷卻鑽尖之鑽孔水在開放的破裂處流失，使得在孔底必須經常使用波特蘭水泥混合漿劑等鑽頭用的膠合劑去膠合岩石。甚而高石英含量及一些正石英岩的硬度會造成鑽石鑽尖的磨耗，使鑽石粒掉了;如此使鑽孔速率下降並提高了探勘的成本，因為鑽石尖常需更換。

另一組問題來自於砂岩誤認的可能性。先前吾人討論過長石砂岩與花崗岩的相似性以及雜砂岩和其它各種火成岩的相似性。將砂岩誤認為火成岩亦會發生於不常有但有趣的砂岩岩牆的場合，它很像火成岩侵入 (圖 3-15)。砂岩岩脈發生於複層理地體，但是亦可在任何砂岩形成中發現，這是因為在岩化作用以前有地震的緣故。砂可能因為地的搖動而液化，並且獲得流體壓力，沿著節理或經過脆弱未岩化的沉積物，侵入於沉積物之中。此可由未固結的砂質沉積物覆蓋之區域在地震後在地表形成砂沸 (sand boils) 而得證。

露頭的表面硬化 (case hardening) 提供了另一種砂岩性質的錯誤解釋的原因。在年降雨量 25 公分以下乾燥的氣候中，雨水浸透了岩石而回到表面並且蒸發，而將鹽堆積下來。這些鹽可以生成硬化的外殼或地殼，這種岩石的硬度及耐久性會給人錯誤的印象，除非露頭的外殼被打破而揭露較軟之內部。

還有另一種砂岩及礫岩錯誤評估的來源即它們的交錯層理的傾向。交錯層理的指向可能被誤認為主要的層理表面;可能造成工址地圖之堆積物的邊界之繪製錯誤。

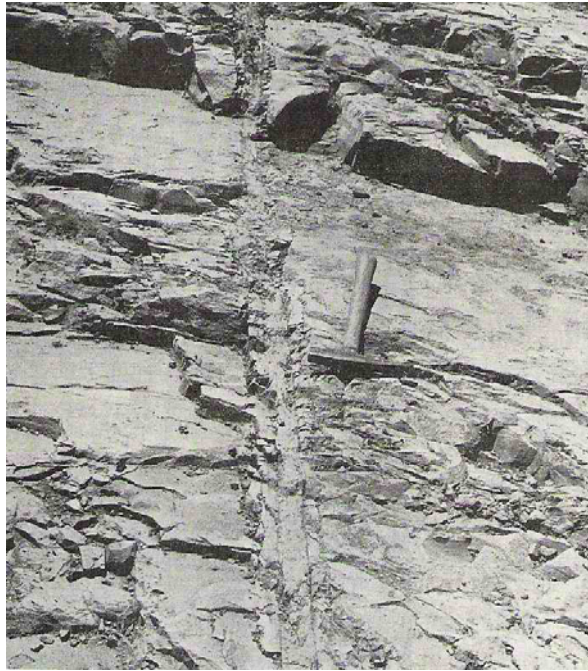


圖 3-15 在 Cachuma Dam(壩)之 Monterey 地層之砂岩岩脈侵入頁岩。此岩脈約十五公尺長，寬度十公分。(Photograph courtesy of the U.S.Bureau of Reclamation)

### 塌方的危險

砂岩及礫岩基岩的塌方不常見，除非這些岩石被較弱的岩石覆蓋。然而暴露於崖之大量的砂岩傾向於平行於谷的側面常發展蓆狀節理(sheet joints)，而將鬆動的岩石板留在危險的位置(圖 3-16 (a))。在仰賴砂岩或礫岩之一體的陡峭壁的工程工事中，常需要安裝支持結構或岩栓骨架以保護工程免於岩石崩落之可能性(圖 3-16(b))。隧道位於淺蓋的砂岩崖中者，可能被這種岩板之掉落所傷或摧毀。



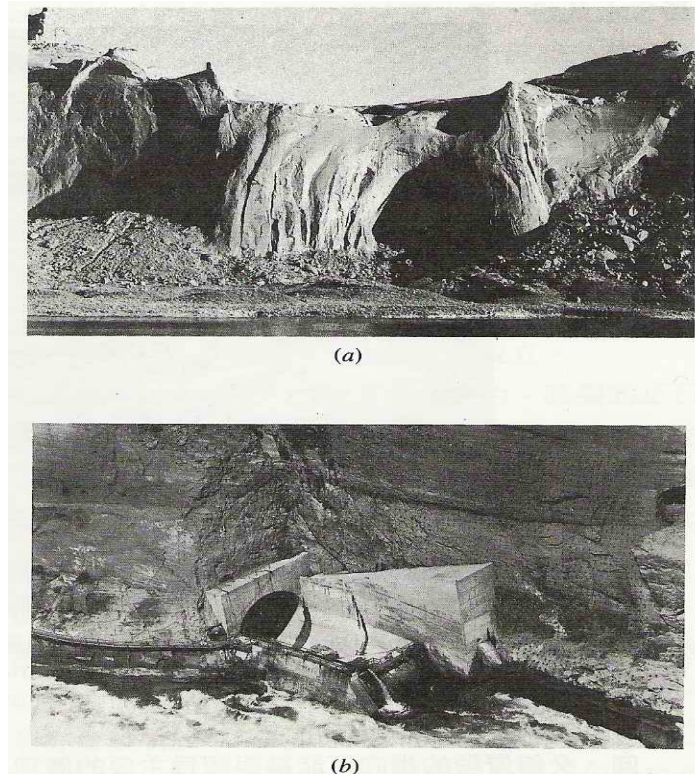


圖 3-16 (a)亞歷桑納州 Lake Powell(包威爾湖；葛蓮峽水庫)岸邊之大塊砂岩上之外節理造成之蓆狀節理及穹形的外觀；(b)葛蓮峽壩左洩洪隧道出口上方的山崖的蓆狀岩石，由岩栓(bolts)安置在稠密的骨架上以防護之。

(Photograph courtesy of the U.S. Bureau of Reclamation)

### 表面開挖

在砂岩或礫岩基岩做表面切割需要與開挖壁板的層性及岩石掉落的問題奮鬥，在較軟的砂岩，侵蝕性可能更是大的問題，然而，雨水從易碎的砂岩急流過可以快速地深刻破壞成侵蝕谷。

在砂岩或礫石中規劃表面開挖需要物質的分類乃至於可裂性(rippability)。有力的曳引車拉著鋼耙可將砂岩耙起，省去了昂貴及不方便的爆破，只要岩石塊層理良好或破裂成體積小於一立方公尺，而且尤其是岩石並非完美地膠合著。膠合良好厚的層理或大的單元正常地不能用分裂的方式。野外的地震速度之量測已經使用為可裂性的指南(caterpillar Inc.,1989)。如果地震壓縮波 (P 波)高於 2150 公尺/秒時，需要用爆破的方式，而低於 1850 公尺/秒時可能可用分裂(耙)的方式 (Geological Society Engineering Group working party,1988)。

在砂岩及礫岩中做爆破可能傷及打算開挖的區域外部之岩石，因為這些岩石傾向於脆性。開挖的現代爆破實務傾向於使開挖完工壁之岩石有最小的傷害，而且有效率地移除岩石。對於砂岩小心地處理，尤其是薄層理及膠合的變化，以使爆發之能量不會造成開口式的破裂及使岩石外表鬆動。

在礫岩進行地表開挖可能在岩石頂之殘留土壤中碰上了漂礫。圖 3-17 顯示出一包含著大得多的漂礫之粗的中礫礫岩，在一些礫岩中，偶而有巨大的漂礫，

直徑三公呎或更大者。這些不好處理。它們只能爆破或以昂貴的特殊技術劈成小塊，而且難以用卡車載走。用劈開的方式開挖時也會碰到這種情況，即硬且膠合的礦脈集成巨大的漂礫。有時候最好的方法是在發現的地點附近找一個建築的用途或者做成非結構的填充物把它埋了，如同洛杉磯之道奇體育館(smoots and Melickian,1966)。



圖 3-17 中礫的礫岩，包含一些漂礫(photograph by R.A.Loney,1961)

### 基礎

易碎的砂岩容易被沖刷，如果它們沒有被適當地保護以防止流水的作用，會造成基礎的下方被淘空。任何非完美地被膠合的砂岩，可能沒有工程方案壽命之耐久性，因此，必須使用適當的披覆方式以防來自於大氣之風化，以便能夠有基礎之功用。許許多多砂岩為點膠合，事實上，在它們裡面為局部非膠合的或不完全膠合的。

所有型式的壩建在砂岩上。圖 3-18(a)顯示出 Theodore Roosevelt Dam(昔亞多·羅斯福水壩)基礎之清理的情形，係一早年的土地改良計劃，奠基在向上游傾斜的前寒武紀砂岩、粉砂岩及泥岩(有一些白雲石)之上於洩洪道的釋水激流下的頁岩狀粉砂岩可能的剝落，由混凝土結構鋪面加以保護(圖 3-18(b))。與這種很堅硬的砂岩形成相反，多孔及易碎的未膠合的砂岩並不很適合混凝土重力壩，而且當然不適合結構的混凝土拱或拱壁壩，除非岩石能顯示在所要加上的環境條件下能充份地耐久。每個個案均要證實所加於岩石而誘發之應力需小於岩石的強度許多。一般易碎的砂岩不會被選為混凝土壩的位址，或者如果無其它位址可選時，以土/岩石壩替代。這些岩石通常比混凝土更容易變形，因為峽中的壩在其長度方向重量會不同，剪力及張應力增加時，混凝土會有沉陷(settlement)的微小差異。拱壩附近之較短的滲流路徑在基岩中有高的滲流梯度(seepage gradients)，因為它的剖面較薄。有了這些梯度之易碎的砂岩將會有內部侵蝕的風險，以及嚴重漏水(leakage)的威脅，或者甚至於有在基岩中形成一條穿孔(水路)的失敗。雖然任何型式的水壩橫過基岩均會產生水頭差(head)，如果水頭有落差，管路自然應運而生，在這替局部所造成的高梯度。砂岩中的穿孔(水路)不能僅從剝落

落來區分，因為失敗之最終產物是岩石中孔的侵蝕。1895年法國 15 公尺高的 Bouzey Dam(水壩)的災難失敗(崩壩)，怪罪剝離，它係建於有變化及未完美地以方解石膠合之白堊紀砂岩上。1933年原址鑽孔，以便建一岩石填壩於先前的基礎上，發現了完全鬆掉了的扁狀砂。於是該位址加以水泥灌漿而建了新壩 (Gignoux and Barbier,1955)。

由於管湧 (piping)造成之基礎剝離也對 1989年 St.Anthony Fall(聖安東尼瀑布)低壩水力電廠(在 Minneapolis 之 Mississippi Rive; 明尼亞波利斯之密西西比河)之失敗負責 (Barr and Heuer, 1989)。在河床下之岩石是易碎的誌留紀 St.Peter(聖彼得)砂岩。雖然在明尼蘇達大學使用它來建地下岩石力學實驗室，它是高度可侵蝕的。此建物存在了 90 年，然後突然垮了。

不良膠合的砂岩具透水的本質，對於混凝土重力壩卻產生了向上浮力的困難。對於一重力壩，由於地下滲漏的上揚水壓，必須藉由排水或灌漿加以控制，使得混凝土向下之淨重量足夠而得以防止滑移或在水庫之水平的壓力下翻倒。一般而言，若透水砂岩延續到重力水壩下之相當的深處，使得水壩下完全的封閉(正截水)滲水成爲困難，此可由灌漿幕 (grout curtain)連結到不透水的地下層而辦到。

在水庫底下之不透水砂岩可能貯存相當大量的水成爲岸邊貯存(bank storage)所以在水庫初進水時需要比原來預測更久的時間進水，而不只是以水庫容量除以進水流量來計算。當年 Aswan Dam(阿斯旺水壩)在易碎的埃及 Nubian 砂岩上連造，其初進水時，尼羅河入水中有三分之一係成爲岸邊貯存。

對於任何型式的壩，硬的及膠合的砂岩單元可達成基礎的使命。然而這些岩石傾向於有開放性的破裂，如果壩址不加以灌漿，可能會威脅到水庫的水密性。

鈣質的砂岩可能產生空洞，或者在風化過的岩石帶留下縫及殘留黏土的凹袋。常常將混凝土壩基下之所有風化過的岩石清除;但是不規則的黏土凹袋及縫，使得清除的工作複雜了。因此鈣質的砂岩對於水壩工程有著類似於石灰岩者之困難。

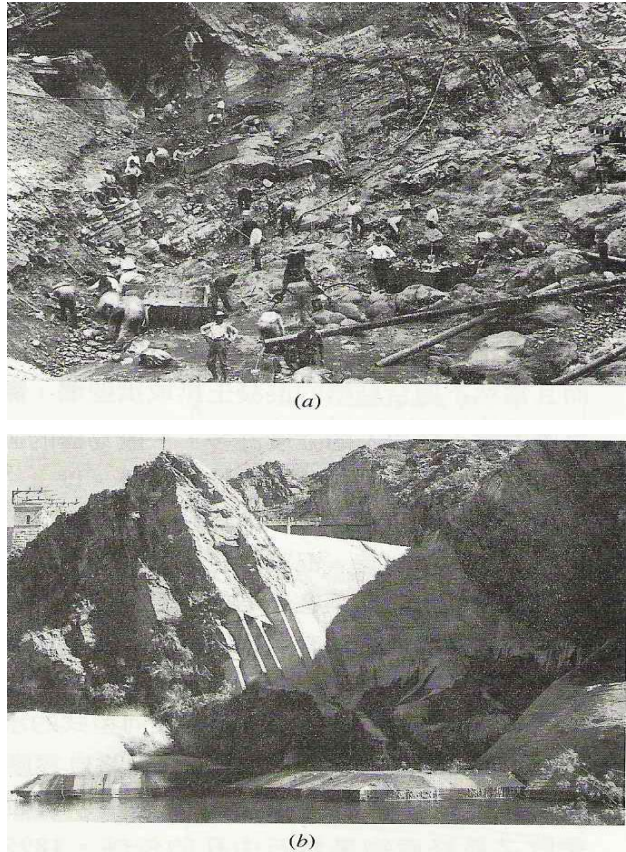


圖 3-18 Theodore Roosevelt Dam 位於和緩傾斜、硬、有節理之砂岩上，該砂岩層間有硬泥岩(a)基礎清理了(完成)(1906)(b)洩洪道釋水槽，並排以防剝裂及侵蝕，注意混凝土肋柱支持懸凸的岩石(Photographs courtesy of the U.S. Bureau of Reclamation .)

### 地下工事

在砂岩內開隧道及地下開挖，大部份是可以施工成功而少有困難。但是問題會發生於具不完美或弱膠合的易碎的砂岩，以及在富石英、良好膠合的正石英岩處有問題。前者的個案中，有機會會挖到地下水每當挖穿了地下水之止水障壁時，水會沖到開挖面；在開挖隧道通過斷層帶時常會發生(Marulanda and Brekke, 1981)。如果隧道機在此種帶慢了下來，並且繼續在一點開挖時，隧道上方可能會形成大的洞穴，在開挖隧道的名詞叫做 **making ground**。在硬的、富含石英的砂岩，由於鑽尖之高磨耗或隧道機械的刀具之高磨耗，開挖成本很高。在非機械開隧道的技術方面。在隧道面上鑽許多孔，並裝上炸藥，斷斷續續地挺進。由於斷斷續續的引起的高昂人工成本，以及所需的鋼材料等額外的物料和其損耗，成本很高昂。另外隧道機的磨耗與停機換修，也是令人很不悅的事。(downtime;停機時間。)

高石英含量的砂岩產生了礦工特殊的健康問題。氧化矽塵有毒性，產生了嚴重的呼吸系統的疾病 (silicosis;矽肺病 )，如果矽塵聚集在肺部足以致命。在這種岩石挖隧道可能觸及法律。

## 砂岩作為物料

運用砂岩為物料，受限於它可能在作為填充石料或骨材時的毀壞。膠合良好的砂岩及雜砂岩做為填充岩石時令人滿意，但是易碎的砂岩一般不能令人滿意。由於它們的高吸水性，多孔的砂岩用為混凝土骨材並不理想。膠合良好的砂岩可以用為混凝土的骨材，但在巨大的混凝土中，熱應力的控制不易，它們會產生較其它骨材為大的熱應力。富石英岩石一般在瀝青混凝土中非為人所需要，因為瀝青傾向於在水的作用下不與石英釋合。

在巨大的岩石的建物中，合適的砂岩被大幅使用為重要的結構石材，以及面材和路邊石。在天候及污染的都市環境下，磨耗抵抗及耐久性需要被評估。藉由檢視石材的來源分類及使用記錄，工程地質學家可以協助上述評估之確定。

## 3-4 頁岩及泥岩的工程性質

### 探勘的標的及問題

在泥岩的位址探勘，不只是一要推論這些岩石的形狀，正如對於其它岩石所做的，並且也必須分辨是夯實的還是膠合的頁岩，並且依據它們的膨脹性和疏鬆化的特性而加以分類。由於剪斷的及鬆掉了的泥岩之性質，在很多方面是個麻煩，所以地質探勘需要去確認在那些地方會有這些情況。

各種形成的層狀的部份之風化效應如何?這種效應延伸得多深?在岩石內有頁岩狀糜稜岩嗎?有斑脫岩層嗎?斑脫岩比起糜稜岩為相當容易定位及繪測，因為前者在剖面為整合地層理的 (conformably bedded)，亦即它們平行於層，並且通常有相當的延伸及連續性於層理面中。雖然頁岩狀的糜稜岩在皺褶的岩石中常常平行於層理，然而它們可能會以幾乎是任何方向交錯過層。

對於地下開挖，因為天然瓦斯可能發生爆炸的危險，甚至於有時也對探勘橫坑及鑽孔有相同的危險，必須要確定方案的地方，泥岩是否可能有瓦斯。糜礫層系列的頁岩伴隨著煤，如同黑頁岩及煙煤頁岩可能有瓦斯;富含黃鐵礦的頁岩可能隱含氣體。當在判定有氣體的岩石開挖隧道時，一系列的預防措施包括由法律規定使用合格的氣體偵測錶，會激發爆炸的設備不準予使用。

Argillaceous 岩石通常是不滲水的，常藉由它們防止地下水的移動。但是由於破裂的構架，一些這種岩石形成在原址成相當透水的。於是頁岩或泥岩的透水性暗示了有構架開口的存在，透水性的破裂及相關的情形的存在，岩石並不緊密，包含有風化過的外皮並且沿著破裂披覆著。頁岩或泥岩的緊密度，不要認為是必然的，而應以探勘證實。

### 探勘的問題

在頁岩及泥岩，問題乃由這些岩石傾向於破裂開及毀壞而造成。如果毀壞由鑽的孔開始，則需要採用最好的設備及技術，例如三管岩心桶，以便得到合格的岩石採樣。在移除了岩心後，它在田野之水份含量必須要用套袋、上膠膜或塗佈岩心的方式予以保存。一旦岩心如果完全乾了，它的田野中的濕度便不能重現。觀察變乾了的岩心樣本常會誤解岩石。

## 塌方的危險

在 argillaceous 岩石，塌方是常有的事，對於工程工事產生了嚴重的危險，大型的塌方處理起來太昂貴了，因此要有謹慎的決策改變工址，甚至於完成了工程的設計後也須變更工址，有時在甚至於清理及評定之後也是。這些塌方分為兩類。對於膠合的頁岩，頁岩塊沿著層理由傾斜坡向開放的空間滑落 (圖 3-19) 下滑背後夾帶其它非頁岩的層。在夯實的頁岩，像典型的黏土土壤，層的向後旋轉滑移 (slumps 滑動沉陷)。兩種個案中藉滑移的動作重塑物料，可能轉變成軟的泥，而由斜坡流得相當遠。在山丘的工址常有殘留的土壤及風化過的岩石之沿著未風化的岩石面上之滑移，常由大雨之地下水壓的上昇所激發，藉由在地質探勘確認在地圖上之既有的滑移地點，藉由辨識最有可能進一步塌方之地質單元，工程師可以將頁岩及泥岩之塌方的危險性減至最小。

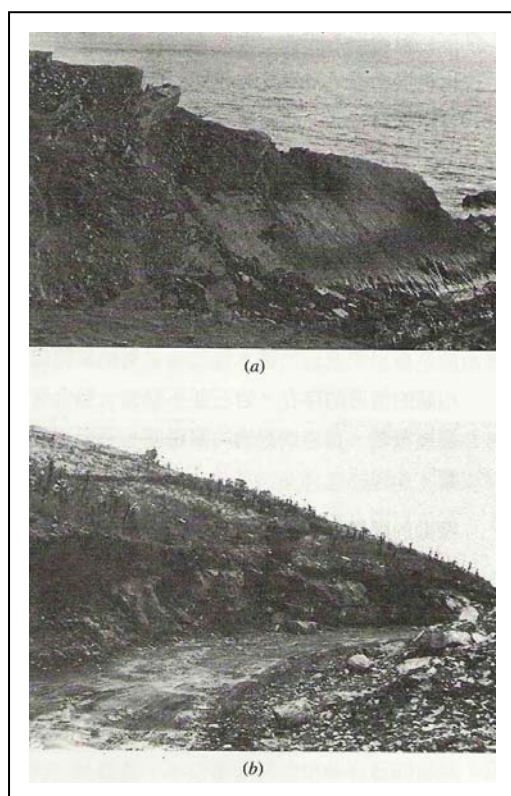


圖 3-19 頁岩及砂岩的層理之岩塊的塌方  
(a)海岸侵蝕的結果英格蘭之北丹蓬(North Devon England)(b)在哥倫比亞新道路挖方之鬆弛層理

## 地表開挖

頁岩的表面開挖係冒著擊發新的岩塊滑移及滑動沉陷。班脫岩的縫及頁岩狀糜稜岩在破壞方面扮演決定性的角色。

當層面傾向著開挖空間，大塊岩塊可能由開挖面、層理、節理及新的破裂 (例如平行岩石面之伸張性裂口)所界定出。這種岩塊於是可以在層面上滑入開挖的空間。如果班脫岩縫或層理面的糜稜岩在岩塊的底下，只要向著開挖空間傾斜 $5^{\circ}$ 便可以在層理面上滑動。

當層理陡峭地傾向著山丘，層可能向前彎，並且以一種稱為 topping(翻倒)(圖 3-20)的方式破壞。對於變質的片岩 (schist)及板岩(slate)翻倒破壞是斜坡破壞之

尤其重要的機制。

對於夯實的頁岩之挖方，疏鬆化是一維護性的問題，因為鬆掉了的岩石之持續侵蝕會招來新的疏鬆化。開挖的底部所聚集之鬆脫的碎片雨，會干擾開挖的用途。避免疏鬆化的頁岩及泥岩之斜坡的保護需要一些覆蓋面這類的保護，例如使用空氣施加的混凝土(shotcrete)施加於整個表面並使用繫於岩樁之繩條。塑膠布及織物亦使用於防止斜坡(邊坡)的毀壞。

對於等著填方或混凝土鋪設、完工的開挖，問題可能來得急劇;岩壁的毀壞，有害地混著頁岩於填方或混凝土，傷害了填方或鋪設的品質，迫使工程師下令工程失敗或替換。或者是將開挖延後到填方、或噴漿、加瀝青或地織覆蓋加到岩石表面的時候。

在膨脹性泥岩做深開挖，如果不很快地以結構或填方加上外加荷配重時，可能會使地面向上隆起。地表開挖受到地面隆起破壞之一個例子是洩洪道挖方，岩石之向上膨脹將洩洪道之混凝土厚板彎曲及破裂。隆起係由於岩石的減少荷重引致岩石的伸張，而在有水存在的情形下膨脹。在膨脹性夯實的頁岩或黑頁岩的變化而導致蒙脫岩的脹水隆起，可以被預期會持續到厚板已經被重置好了為止。在該事件下，設計師可能被迫要加重地補強厚板，並用預張力的錨螺栓穿過厚板而錨定在膨脹帶下方的岩石中。

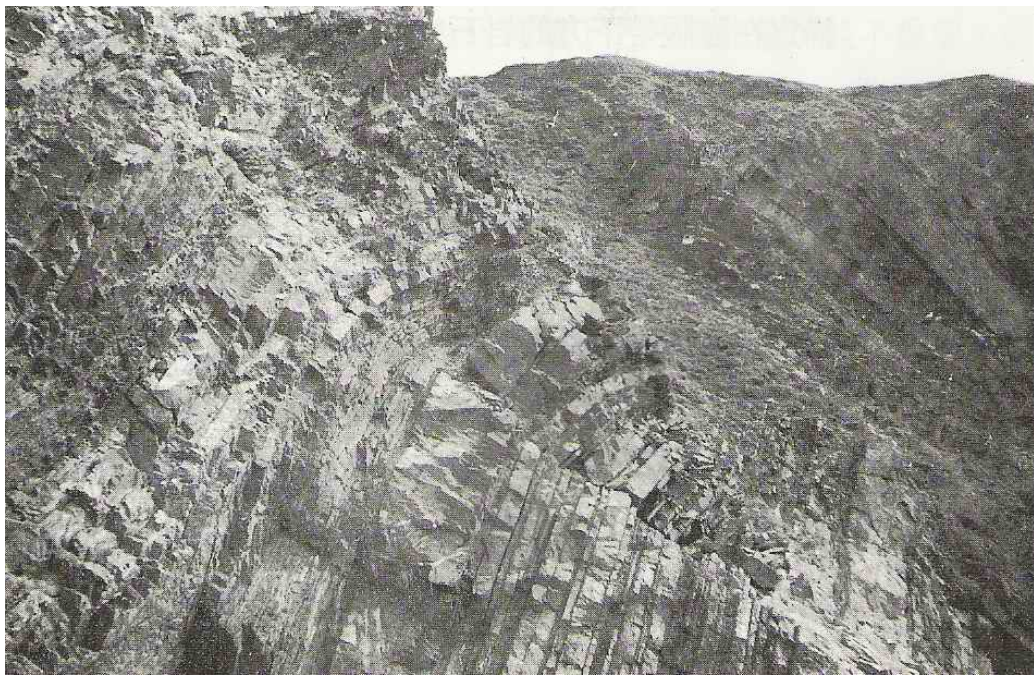


圖 3-20 於具層間節理的砂岩和頁岩之翻倒破壞(Photograph by M.de Freitas)

### 水壩

如果有選擇的餘地，水壩不要置於夯實頁岩基礎之上。但是在密蘇里河谷 the Corps of Engineers 已在膨脹性的夯實頁岩上，成功地建造了許多大型的土壩，其中有一個叫做 Fort Peck Dam 者，在建造期間遭逢在班脫岩層上之基礎的滑移。

混凝土壩應置於良好的岩石上，甚至於膠合良好之頁岩都很少中選然而，有

時別無選擇。雖然這種壩下方之滲流量可能不重要，但是所產生的水壓力則不然，水壩下頁岩之滲漏的上揚力，幾乎無法以灌漿或鑽排水孔加以控制。基礎中層理面的糜稜岩可能的存在或班脫岩縫將主導很完整的探勘，並且通常主導水壩下深的剪斷鍵之建造。而且對於基礎也要檢核由於剪斷、斷層、層理、頁岩狀糜稜岩及葉理之交會所致之可以依附岩塊之可能的存在及穩定性。最後，頁岩的高度變形性會產生設計的問題，尤其是跨在窄谷之水壩。

鈣質頁岩所呈現的問題類似於石灰岩之由於溶解性的洞穴而漏水之可能性。在鈣質頁岩中，開口很小，但可能沿葉理形成連續的管路。從這種岩石移走鈣質的膠合傾向於留下黏土的縫。

### **隧道**

通過夯實頁岩的隧道必須設計得能處理擠壓土塊 (squeezing ground)。squeeze 的意思是隧道的橫截面由於岩石的潛變而逐漸減縮。隧道的支撐可能變形，而且它們的節點損壞 (圖 3-21)。隧道的剖面可能減縮很多，以致於需要重挖及重支撐。如果使用隧道機械，可能會卡住。支撐的結構可能會壓壞，假如岩石加砌太早，襯裡可能損傷或破壞。

擠壓的嚴重性不只於岩石的型式有關，也與在地下的深度有關。當深度達到使隧道壁的應力超過岩石的末束縛的壓縮強度時，即發生擠壓。當深度  $h$  大於一半的末束縛壓縮強度  $q_u$  除以岩石的單位重量  $\gamma$  時，擠壓發生，亦即

$$h \geq 1/2 q_u / \gamma$$

一典型的頁岩或泥岩的密度  $\gamma$  大約 0.025MPa/m(百萬巴斯噶/公尺)或 156 lb/ft<sup>3</sup>(磅/呎<sup>3</sup>)。每 100 公尺深，垂直應力增加了 2.5Mpa，或每 100 呎約 108psi。典型地夯實頁岩之  $q_u$  是 10Mpa(1450psi)數量級，因此只要 200 公尺(660 呎)深便已達到有擠壓的深度了。比此深多了深度使可能問題加重。由於地質調查會揭露沿隧道路線所會遭遇的岩石之型式及狀況，所以探勘員有責任要去估計擠壓可能在何處發生，並確保樣本做寫實驗室試驗之用。

當隧道通過膨脹性的頁岩及泥岩時的問題包含擠壓的可能性，以及所形成之局部膨脹壓力頂著的襯砌。只要有水可抵達岩石的地方即會發生這種事，例如在斷層或破裂的系統而可將地下水帶到隧道者。

由岩石膨脹而失去強度，在這種地方可能出現岩石崩落。進入隧道的水必須用封閉的水管或加襯的壕溝來導水。

對於隧道之頁岩及泥岩之疏鬆化，必須儘快地加以保護暴露的岩石。疏鬆化會使某些形式的支撐困難。例如岩石螺栓承載盤，用以平衡岩石的伸張，可能會鬆掉所連結之岩石，而岩石或鬆動或剝成岩石片:甚而螺栓的錨定不易，這是所鑽之容納螺栓的孔變大了之故。噴漿可能不能黏牢於岩石，造成從隧道頂噴漿塊之掉落。當岩石傾向方疏鬆化，有需要開挖多少便加襯砌多少，而不是打通整個山的隧道後再回頭加襯，可由包商選擇以增進效率。

膠合的頁岩呈現岩塊掉落及岩塊從隧道頂、面及牆，尤其是陡削傾斜的層滑落之可能性。岩塊掉落及滑移對於工作人員造成嚴重的危險，並且可能引起較大



的鬆脫及空穴，而使工程進度停頓。

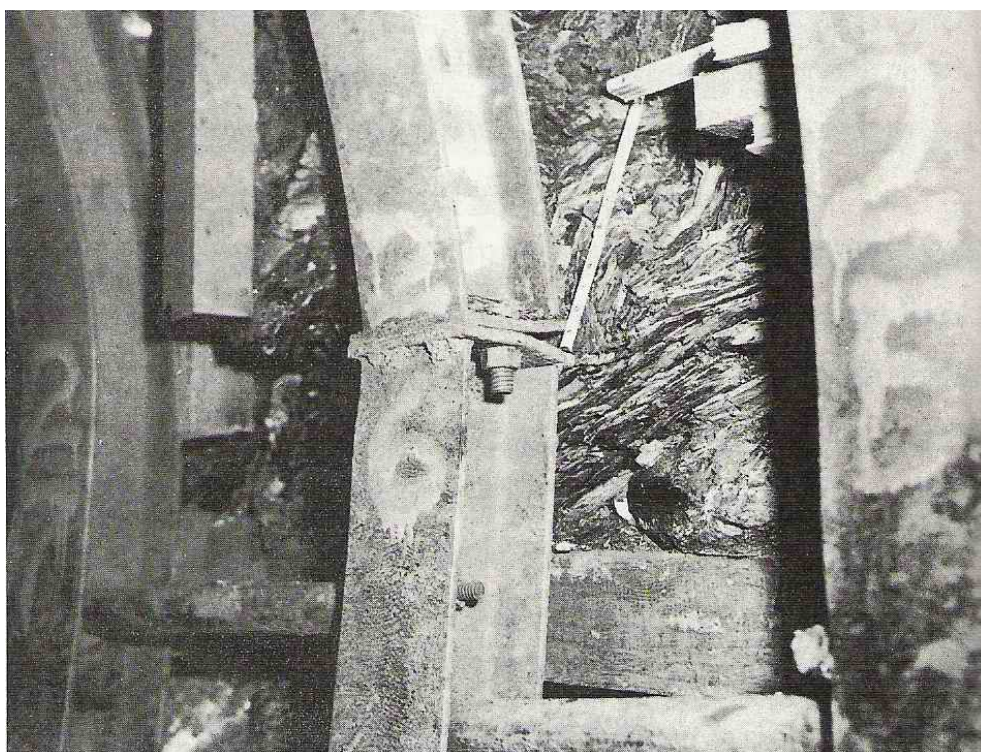


圖 3-21 Franciscan 混雜岩的擠壓造成了加州 Pacheco 隧道壁支撐的變形  
(Photograph courtesy of David Sparks US Bureau of Reclamation)

### 填方及堤防

如果頁岩不具膨脹性，不會疏鬆化得很糟糕，沒有風化過以及易裂的，則堤防可建於頁岩上而不會在服務期間中崩壞。頁岩上的堤防的難題是持續的物質毀壞，而使堤防繼續沉陷，而表面亦會有損傷。含有相當多比例的膨脹性黏土會降低堤防的剪力強度，而邊坡亦可能有崩塌。河堤之頁岩選擇可受助於使用 Franklin 的 slake durability test(疏鬆化持續力試驗)(Franklin and chandra, 1972)，對於頁岩之使用本測試之應用指南已由 the Federal Highway Administration (聯邦公路管理部)發展出(Strohm Bragg and Ziegler 1978)。

### 3-5 砂岩及頁岩的工程性質

在地質工程師們之間有一箴言是說兩種岩石之合併之性質劣於單獨之兩者任一。為何如此呢?頁岩不透水而砂岩傾向於透水。當岩石共存，假定有規律地重覆者一層頁岩一層砂岩如此反覆下去，所有的水會限定於較小的區域，造成高速的水流，而有較大的岩石移動或內部的侵蝕。甚而，兩種型式岩石之不同的剛性合併著較脆的砂岩層，造成後者變得高度地破裂，並且易於透水。

另一個例子是公路切割過礫岩及泥岩交錯層而保持與較破的礫岩成一較陡的交角，而且能保持良好的路況一段長時間。但是斜坡對於泥岩實在太陡，倘若沒有礫岩，則泥岩斷然不能以那樣陡的角度被切割。最後泥岩的疏鬆化及鬆落使礫岩層下方淘空了(圖 3-22)，於是現在成爲懸空的情形，受到剝落折斷及岩石

掉到道路的威脅。

另一個例子是:使用隧道鑽掘機開挖硬砂岩及軟泥岩交錯的地方需要頻頻更改操作程序，造成了相當多的時間損失。當兩種岩石在機器的正面同時出現時，會造成機器不良的振動(a mixed face condition；混合面情況)。必須撤回機器改以人工挖掘。

### **探勘**

在混和的砂岩及頁岩層，如果地層的系列係存在於工址，而且點到點關連著所有不同單元，則探勘是有助益的。因為地下水僅能在砂岩中流動，水體包含著一系列隔開著的單元，如同電冰箱之製冰盤一格一格的，探勘的計劃應考慮及此，並且確定每個獨立的水之單元的邊界與特徵。

頁岩或泥岩單元間的接觸傾向於是剪斷與破裂之軌跡，因為兩種岩石有相當大之變形性之不同，這些接觸需要被檢查及被描述。

位於交錯的砂岩及頁岩層之工址，傾向於有不平均的風化剖面，在 argillaceous 岩的一方有較深的風化，在探勘時工程師要留心這些。

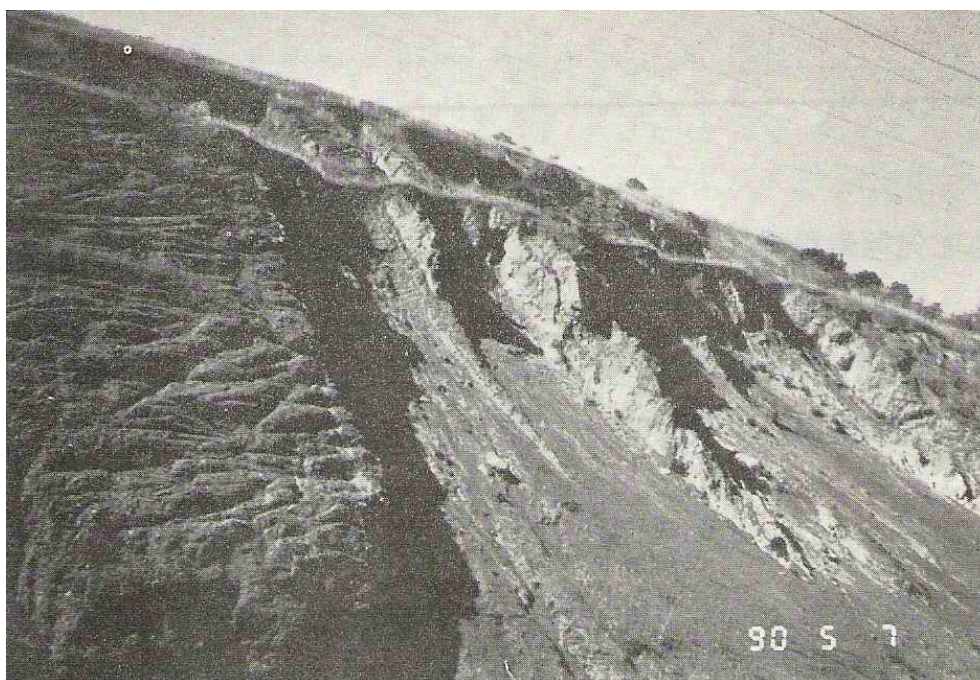


圖 3-22 由於陡峭傾斜的泥岩層之鬆脫，造成道路挖方側毀壞，使緊臨的礫岩層懸空這地方是加州 Orinda 的 Caldecott 隧道的東方。

### **塌方的危險**

岩塊的塌方傾向於砂岩及頁岩 (或黏土岩) 的單元，於此較硬的砂岩從頁岩之上滑移。谷地的兩側可能包含著個別在頁岩之上互相浮筏過的岩塊 (圖 3-23) 這些砂岩塊可能會給人工址是穩定的誤導印象。很軟的膨脹性頁岩可能已被侵蝕而留下了硬的砂岩座落於軟的頁岩之基礎上；這些侵蝕的外層可能係處於一種危險的平衡狀態、或者已經遭受過自然承載力的失敗。

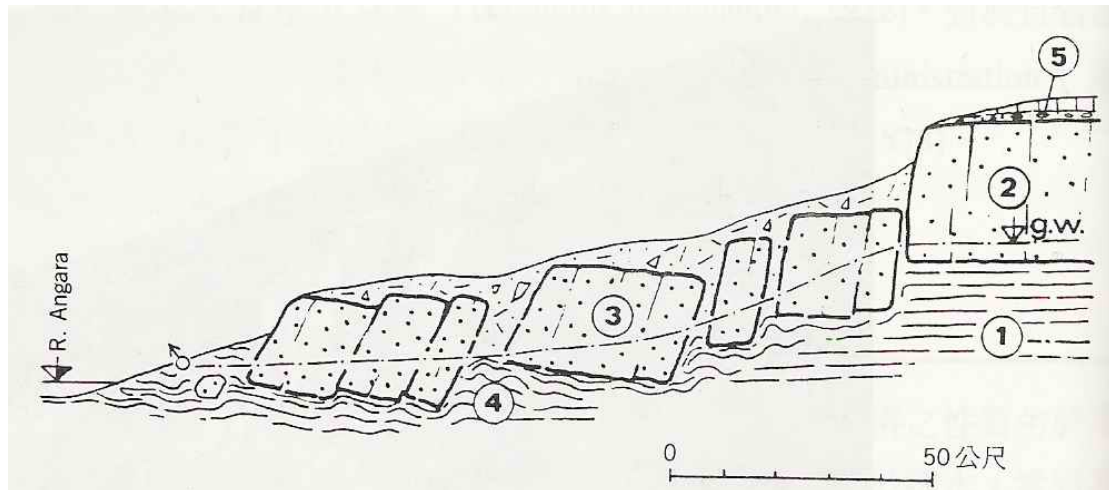


圖 3-23 在黏土岩上之砂岩塊的散佈:1.寒武紀黏土岩:2.奧陶紀砂岩 3.沉沒的砂岩塊:4.風化過及塑變的黏土岩:5.階地(terrace)礫石。

### 開挖

使用爆破開挖入砂岩/頁岩層尤其容易破裂及鬆脫。脆的砂岩及弱且可變形的頁岩之合併，伸張應力會集中於較硬的砂岩層。砂岩塊可能會滑入開挖面，且沿著它們與頁岩之接觸面滑移。

如果岩石是交錯層的砂岩及頁岩，則比較難去分類到底以土壤還是岩石付費。此時，可以使用一特別分類，僅只為了這種混合物為了開挖的目的，"岩石"是由 U.S.Bureau of Reclamation 及其它的機構定義為硬的、岩狀的物料，就地（或者不是就當地時，以大的岩塊或大約大於 1 立方米體積之漂礫）而不能用標準的裂開 (rip) 機器裂開者，當在一短的距離，物料從一種變化到另一種時，很難應用此種定義。

### 基礎

在砂岩 / 頁岩工址之基礎可能面臨兩種不同之可變形的不同岩石之微小差異的沉陷。藉著適合的探勘及岩石的試驗，可能可以適當地補償而設計一建物的基礎。對於連續的結構體如水壩或核能電廠，問題較為複雜。在交錯層的砂岩及頁岩層上之個別的基礎，係在可承載的能力內建於軟的頁岩而非硬的砂岩上。

## 3-6 個案歷史

### 坡梯吉山水壩及發電場

坡梯吉山水壩 (The Portage Mountain Dam) 及發電廠建於加拿大英屬哥倫比亞北方的辟斯河 (the Peace River) 上。該方案為一大的堤壩(200 公尺高 2 公里長) 及一具有很多個機器房之發電場 (27 公尺寬 46 公尺高，長約 300 公尺)，以及很多重要的附屬隧道、道路、採石場及結構。

地質的影響主導著選址 (Dollmage and Campbell, 1963)。辟斯河切割入鈣質的煤承載頁岩及砂岩 (圖 3-24)。有一個地址被拒絕過，因為煤炭火災，地下火自然燃燒了很多年，完全地烘培過 Gething 層，使之成為脆及陶化的岩石，而具

有高度可透水性，這是由於破裂以及可達於超過 1 公尺高的空洞所致。煤層已完全自然地燃燒過，頁岩含有轉石及灰燼。煤縫仍然燃燒著，由熱的岩心及鑽桿、硫酸氣及蒸氣之從探勘孔冒出可以證實。沒有受到燃燒影響的頁岩及厚的砂岩層是適切及不透水的；但是在頁岩單元內之較薄的砂岩有許多開放性的破裂，產生了極大的透水性。在 Gething 層之上，正在其接緊的上方為 Moosebar 形成的黑頁岩，它的露頭是解體並風化中的細岩屑。風化作用可延伸到地表下 70 呎。

壩址就是選擇騎跨在厚層理到巨大不透水的 Dunlevy 層的砂岩和 Gething 層的岩石上。層向下游傾斜 3° 到 6°。兩層均包有頁岩及煤，在砂岩及頁岩均可發現散佈著做為附屬成份的瀝青。頁岩不會膨脹，但是有輕度的疏鬆化，在風化區解體成硬的碎片。Gething 層更薄的具層理之砂岩較 Dunlevy 之較厚的具層理之砂岩更為透水。

在為地下電廠探勘岩石時，有一坑道(adit)發生了爆炸，造成中止了在該處進行之岩石應力的量測。在建設中，地下電廠的屋頂層的一區有相當大的(達 20 公分)撓曲；此事有效地用岩螺栓及灌漿加以支撐。

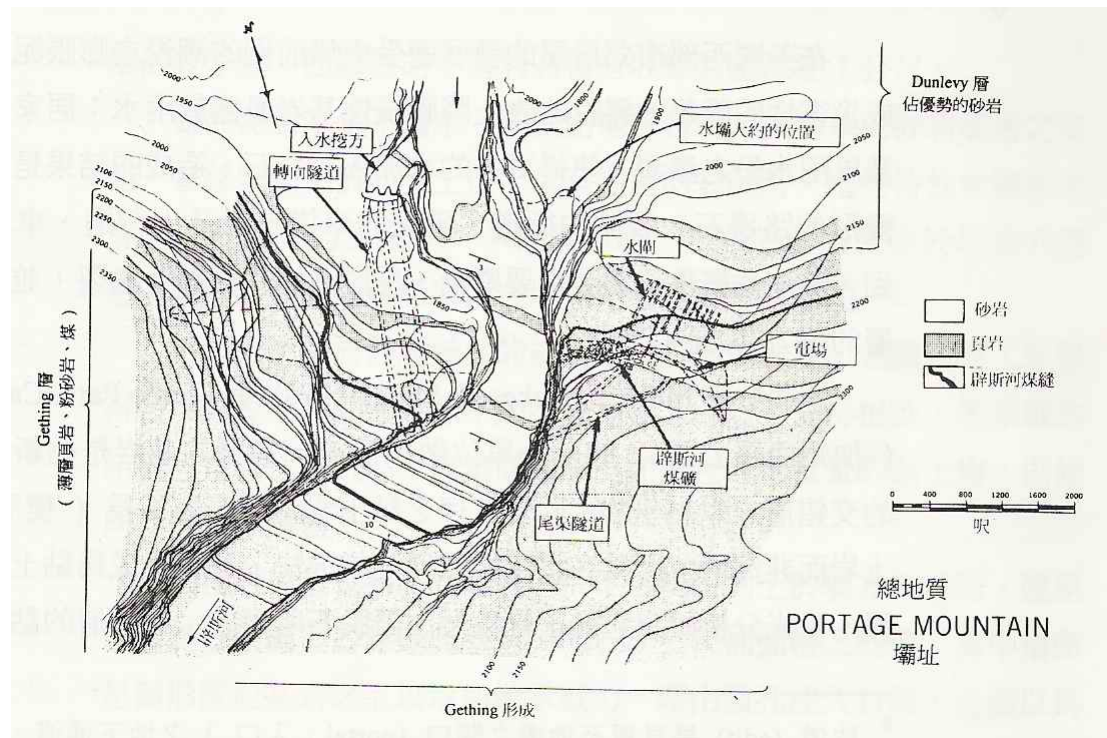


圖 3-24 The Portage Mountain Dam 方案 (from Dolmage and Campbell 1963)

### 泥岩膨脹對房屋發展之傷害

在美國西部市郊房屋的發展遭受史無前例的潮溼之膨脹泥岩，造成災害性的隆起，鬆脫的表土將膨脹性基岩暴露於雨水；居家的灑水及風雨水份之滲漏，使得更多的水加入於岩石。造成的結果是破裂及變形的路邊石、裂開的街道、破裂的車道，以及人行道、車庫門卡到、游泳池嚴重龜裂至需要廢棄、房屋的地基傾斜及龜裂，並時有淺層的塌方(圖 3-25)

這些效應 Meehan, Dukes 及 Shires(1975)對 Menlo Park, California (加州面羅公

園)的一小單位做了描述。進襲的基岩是始新世夯實的交錯層之以黏土岩/砂岩次序之黏土岩。該岩石稱為(變形)黏土岩而非泥岩，因為在浸水後疏鬆化的很快，並轉換成為黏土質的沉澱。X 光分析確定它幾乎是整個由蒙脫石所構成。在表層的黏土質土壤的乾季期，膨脹性的下層岩石得有收縮裂縫深達 1 公尺。

雖然泥岩本身不透水，它緊密地膠合著，與透水的砂岩成層之交錯。當移除黏土質的表土後，或有嚴重的裂縫時，這些特性會將表水導入岩石。開挖至深 2.5 米或更深時，岩石的膨脹反映於地表的隆起。隨著表面岩石移除厚度之增加隆起量亦相對增加。

可以透過對於鼓起鋪面的線追蹤膨脹性的地層。如果任何工址變得被水弄溼了，如被泉水不知不覺地侵入，岩石變得很軟，所承載的結構有差異性的沉陷。建築商的填土如果包含相當量的黏土岩，則傾向於向下坡潛變。

工程的補救包括小心地排水，不可使用黏土於填方及堤防，建屋之基礎及結構立於深達典型的 10 到 15 公尺補強樁上的樑，其中樁頭呈鐘形置於基岩之上以增加端承载力。藉由鑽孔注入石灰，企圖以鈣取代鈉以改善膨脹性，證實並未成功。然而石灰穩定法對道路的級配是有效的，於彼黏土岩或膨脹性的土壤之澈底的混合時，使用石灰是可行的。儘管這些效應是嚴重的，整體之損害成本及修膳成本只佔了 5% 的營建價值。

在地下層是膨脹性的 Pierre 頁岩 (Gipson 1989) 的丹佛地區之市郊的住宅發展計劃亦為相似的另一例子。在營造完成後，這種效應開始，有些個案持續超過 10 年。

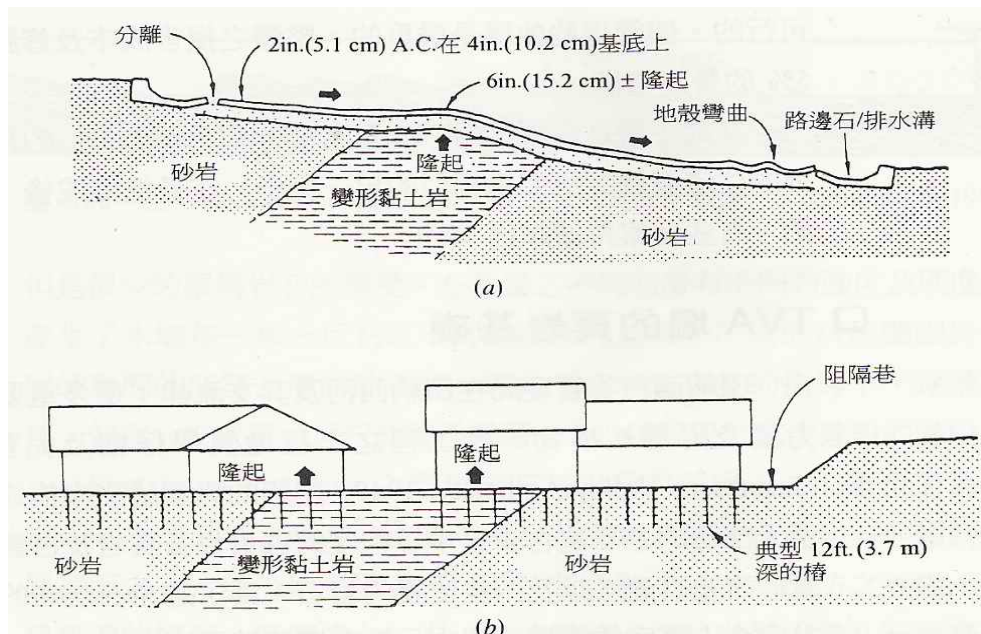


圖 3-25 交錯層的砂岩及黏土岩之差別性隆起(a)典型的鋪面損害(b)對於淺基上的房屋之傷害。

## 混雜岩之基礎

Scott Dam(圖 3-26)是中等高度的混凝土重力壩在 1920 年帶建於北 Coast Ranges of California(北方的加州海岸地帶)。工址的岩石包括 Franciscan 混雜岩，主要是頁岩及雜砂岩，此為可用的河段上一 "可接受"的工址，因為上下游一點即有剪斷的蛇紋岩。探勘以今天的標準而言是還好，但混雜岩的複雜性則令人吃驚。建築由河的東岸開始，而使河流改道繞著建築往左流，當建到河寬的三分之二時，有一個原先認可擬做為左方墩之露頭滑移了。此外貌良好的岩石實則為硬綠石 (變化的火山岩) 的漂浮 (轉石)。它的斜坡高 18 公尺向西並無適合的墩存在，因此壩的方向向著下流一點，向左朝向;較好的岩石發生於軟化的、風化的蛇紋岩及蛇紋石黏土之滑移，被怪罪為在河流改道時的洪水作用，而沖擊河的西岸所致。

由於取得了水壩 the Pacific Gas and Electric Company(太平洋瓦斯暨電力公司)鑽了超過 90 個鑽探孔及無數的豎井及礦坑以研究和確保基礎的安全性。在 1959 年建立一穩定狹道於左墩，以及 1983 年在下游的趾多建了混凝土建於中央的部位。工程師們安置了各種儀器以監視基礎的位移及水壓，並施行了很多次圍束的壓縮 (三軸壓縮)試驗及直接的剪力試驗。發現似乎不像有通過單獨頁岩或進入具層理的面或斷層之連續的破壞面存在，而強度值成比例於頁岩及雜砂岩之間的強度，以沿著水庫下方可能滑移的表面之兩種岩石的比例為準。如此使工程師們可以計算一定範圍的荷重條件下基礎的安全因素 (safety factor)。直到本書撰寫時，該水壩仍在被研究當中。

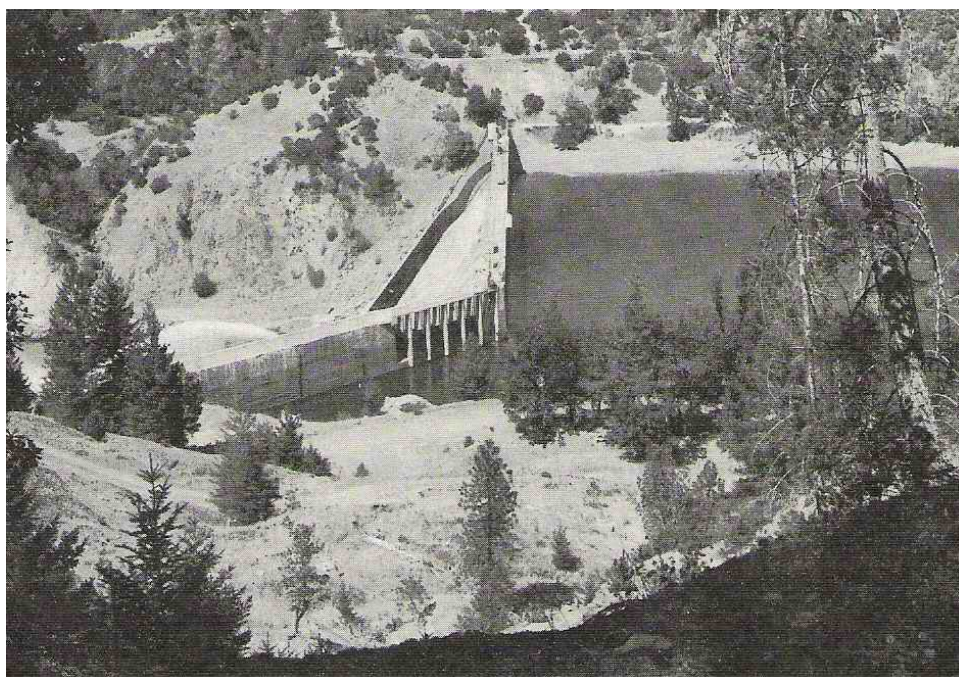


圖 3-26 在加州 Eel River(曼魚河)之司卡特壩(Scott Dam)(Courtesy of Pacific Gas and Electric Company)