

## 拾伍 工程地質中之環境因素

洪 如 江\*

### 一、前 言

廣義的工程環境，可以包括：地形和險要，地質，地震和斷層，水，風，氣溫、氣壓、振動、噪音和心理因素、景物、工程後的環境影響，人的精神力量，政治、經濟、國防和社會，以及生態的狀況（虞兆中，民國70年）等十二大項，這十二項工程環境因素，大致可以歸納為三大類：

1. 物理因素
2. 生物因素
3. 人文與社會因素

從上述三大類十二項工程環境因素的名稱，我們大致已經可以了解到：所謂工程環境，是指存在於工程結構物以外的大環境，而這些環境却與工程能發生單向、雙向甚至多向影響者。舉例而言，把大壩或核能電廠建在活斷層之上，則一旦來了一次大地震，這一活斷層可能發生垂直方向或水平方向的錯動而把大壩、核能電廠撕裂，這是環境對工程的單向影響中最重大者。至於工程對環境的影響，1960年代及1970年代的環境學家及生態學家，常喜歡舉埃及的阿斯萬水庫為例：自從新阿斯萬高壩建造之後，尼羅河三角洲每年泛濫一次的洪水不再發生，農田不再有尼羅河洪水所帶來的污泥作為肥料，而灌溉渠中蛇類所傳播的吸血蟲，使得農夫染病者眾多。但是筆者認為阿斯萬水庫對埃及的利大於弊，例如：尼羅河三角洲的居民不必再每年逃避洪水一次，農田可獲得可靠的灌溉水，自來水的普及可消除十種法定傳

染病之中的絕大部份，工業及生活所必需的電力可得到供應，因此，近年來已經少聽到拆壩毀庫之說了。至於雙向影響之例，有義大利VAIONT水庫邊坡坍塌之例，該水庫工程，因左山側崩積土體（二億多立方公尺）滑落水庫（容量亦僅二億多立方公尺）而成廢水庫，但該崩積土體，未嘗不是受水庫蓄水的部份影響（大部份影響為豪雨不停）而降低該一邊坡的安全係數。

近來，有少數自稱環境學家者，其所討論者只限於景觀問題；另有少數自稱環境學家者，反對一切工程建設。其實，工程作業中的開挖工作，有點像外科手術中的開刀工作，在沒有完工、復健（甚至美容）之前，本不宜錄影或拍照去到處展示給外行人看以遂行惡意的攻訐。

但是，工程師也要注意：工程作業不但要重視環境因素對工程的影響以增進工程安全，還要避免工程災害、降低工程對環境的不良衝擊。假使能以工程方法來保持並增進環境品質，使其更適合人類的生活，那才更能夠顯示工程的價值。

與工程有關的環境因素甚多，已如上述。本篇所討論的工程地質中之環境因素，只是物理因素中的一部份，當然不及於生物因素、人文與社會因素。

### 二、地 形

#### 2.1 引 言

地形學本身就是一門很大的學科，當然不

\*國立台灣大學土木工程學系教授

可能在此詳加討論，只能就工程地質的觀點，作簡略介紹。

以我國台灣地區為例，有高山地形、丘陵地（亦即所謂的麓山地帶）、台地、平原、盆地、及縱谷（台東縱谷）。若是在大陸，尚有高原及沙漠。從事工程計畫，首先要知道要在那一種地形中去實施。大型機場，只可能在平原、台地、或高原上去建造，而不可能在高山地形的地區去實施。人們也不至於笨到要在城市以外的平原去實施長途鐵路的全面地下化。換言之，地形大致上已限制了工程種類、規模、及型式等各方面的範疇。同時，什麼樣的地形，會有那些工程地質問題，要採用什麼工程技術去克服地質上及工程上的難題，大致上都有一些準則可尋。

至於地形、地貌與坍方潛勢之關係，參考 Rib & Liang (1978)。本書第七章表6.1示坍方敏感之地貌。

## 2.2 高山地形

在高山地區，岩盤（母岩）雖然較為堅硬，但是却因山高谷深，坡度陡峭，再加侵蝕作用強烈，因而常有大規模岩屑堆、崩積土、崖錘堆積、及落石。中橫公路，在大禹嶺地區、梨山地區，都有大規模崩積土。阿里山鐵路也通過幾片大崩積土地區，這些崩積土有的尚且延伸至河床，河水把崩積土的坡趾沖走一大堆，則崩積土邊坡終將再次滑動，充塞河道的部份或全部，崩積土坡暫時又得穩定至另一次洪水把坡趾沖走前為止，若無人力干預，這種時動時停的循環，必將長年進行。中橫公路的霧社支線因當年選線者採取高線，道路多近嶺線，反而很少坍方。清水溪的草嶺大崩山，坍方體積達數億立方公尺，多度使清水溪積水成潭，潰潭時並曾造成災害。

在高山地區規劃公路，特別注意水系與公路的關係，常可借助適當的地形圖，若水系末梢之一支已接近道路下側，則道路的下側需要保護，以免該一水系繼續發展其向源侵蝕的作用致危害路基；若水系末梢的一支正交道路，則道路之下需有夠大的涵洞，以便排水，涵洞長者，常需在入口之前設置沉沙池以免泥沙或樹枝堵塞涵洞入口。若道路上側已有水系末梢二

支，則道路本身需要小橋以跨越水道。道路橫越之水系，其集水面積大者，水系之流量必大，因而需要長而高之橋樑；若為避免高、長之橋而將道路繞往山側者，則常增加挖方與護坡，若保護不週或將棄方任意拋棄者，則常造成破壞水土保持及景觀之不良後果。

高山地區，除崩積土及溪水的向源侵蝕作用常造成工程難題之外，河谷解壓也值得注意，參閱第五節。

## 2.3 丘陵地帶

台灣地區的丘陵地帶，大部份由砂岩、頁岩、或砂頁岩互層所構成，北部有大屯火山區，西南部有泥岩地區，另有很小部份的礫石層，各呈現不同的地形，而有不同的工程地質重要性。

頁岩，由於風化侵蝕作用快，故地勢極少高突者。砂岩較能抵抗風化侵蝕，常現懸崖。但是在這一地帶最常見者為砂頁岩互層，尤其常見到所謂的豚背構造(Hog-Backs Structure)（早坂一郎，民國二十一年），單斜構造之頂為一厚層砂岩，形成平緩之順向坡；順向坡之另一面為倒插坡（或稱反向坡）。倒插坡之頁岩層，尤其是砂岩下之頁岩層，常因風化及侵蝕皆快於其上方之砂岩層，故呈凹陷狀，造成上方砂岩突出或呈倒懸狀。當砂岩突出或倒懸長度超過節理間距時，即落下堆積於倒插坡面之下方成崖錘堆積之一部份（部份為頁岩受侵蝕而落下者），請參考本書第七章圖4.5。

大屯火山區，主要集塊岩地形，缺乏層理而呈散漫狀，常見巨大孤石，其實一般地盤組織疏鬆。本區外圍，有凝灰岩者（分佈台北市公館、三張犁、及六張犁一帶者最具代表性），風化很深，易於開挖，故多墳場，地勢通常並非高聳險陡。

台灣西南部泥岩地區，多成惡地(Badland Topography)，其地形每個月都有變化，只不過人眼不易察覺而已。表土流失迅速，植生不易（但屬可能）。泥岩地區中之水庫，湖岸多曲折，水域呈珊瑚狀，陸地多遭高度切割、侵蝕及沖刷。

至於小部份礫石層，尤其所謂頭嵛山層，礫石（及卵石）堆積頗緊密，數十公尺高之挖

坡，坡面角大至七、八十度，尚可長期穩定。但有的礫石層下的泥岩受冲刷而脫離時，礫石層迅即坍塌。

## 2.4 台地

本省名曰台灣，實因數百年前乘船初探本島西部海岸及平原者，遙見台地地形不只一處，故稱之。

紅土台地分佈於丘陵地（或稱麓山地帶）以西（請見地工技術雜誌第 2 期第 126 頁），標高大多在三百多公尺以下。台地地勢突出於週圍之河谷及平地，地表平坦但台地邊緣突以陡坡急降，為易蝕易坍之坡。台地又多被侵蝕溝所切割，因此，阻止侵蝕溝之發展，為保持台地之完整所必需。

以林口台地之東北區為例（高速公路以北、五股坑溪以南），其坡度之分配如下（洪如江等，民國 75 年）：

| 坡度 (%) | 面積 (m <sup>2</sup> ) | 面積 (%) | 累積面積 (%) |
|--------|----------------------|--------|----------|
| 0~ 7   | 3,630,000            | 17.686 | 17.686   |
| 7~ 21  | 4,725,000            | 23.020 | 40.706   |
| 21~ 36 | 4,608,750            | 22.454 | 63.160   |
| 36~ 52 | 4,528,125            | 22.062 | 85.222   |
| 52~ 68 | 2,335,000            | 11.376 | 96.598   |
| 68~ 84 | 590,625              | 2.878  | 99.476   |
| 84~100 | 98,125               | 0.478  | 99.954   |
| >100   | 9,375                | 0.046  | 100.000  |

由上表可知：紅土台地相當平坦，坡度 52% 以下之土地，超過總面積的 85%，可以開發利用。

民國 48 年 8 月 7 日艾倫颱風過後，西南氣流挾帶高溫潮濕空氣進犯本省，受阻於中央山脈，致本省中南部十三縣市普降豪雨，造成八七水災，而八卦山台地受到此一豪雨之侵蝕冲刷尤其深刻，產生大量泥石流（或稱土石流），淹沒八卦山麓平地之田舍。民國 72 年之 8 月 11 日，西仕颱風過後，西南氣流所帶來之潮濕空氣受阻於觀音山，致林口台地降下持續性豪雨，造成五股泰山水災（或稱八一一水災）。由此二例可知地形對天然災害之貢獻。

## 三、地體構造(Geotectonics)

工程建設，不建在地上便建在地下（其實是地殼的上層），與地質構造及地質作用（有稱為地質環境者）關係極為密切。而這些地質構造及地質作用，受更大的地體構造所規範。

台灣地區的地體構造，雖然有許多學者早就提出不少大同小異的模式，但比較精確的解釋，一直要等到中央研究院地球科學研究所（尤其是蔡義本所長等氏）以精密儀器（尤其是地震儀）測出台灣東部的地震震源分佈，因而可描繪出菲律賓板塊與大陸板塊相撞的接觸細節、以及菲律賓板塊在花蓮附近（北緯 24 度）向北下插的情形，整個台灣地區（尤其是東部及陸上各山區）的地體構造，逐漸明朗起來，這對地質學研究及應用，都很有價值。

圖 15.1 示台灣地區地體構造之透視圖，係由法國巴黎大學教授 ANGELIER 所繪。雖國內地質學家，也有類似透視圖，但 ANGELIER 所繪，富有法國的藝術感，相當簡明，故採用之；但其所根據者，幾乎全是我中研院地科所及國內眾多前輩地質學家所獲得者，應予說明。

## 四、地震與斷層

### 4.1 引言

地震，在易經之中屬於第 51 卦。

「☳☳ 震：亨。震來虩虩，笑言啞啞。震驚百里，不喪匕鬯。」

初九：震來虩虩後，笑言啞啞，吉。

六二：震來厲，億喪貝躋于九陵，勿逐，七日得。

六三：震蘇蘇，震行无眚。

九四：震遂泥。

九五：震往來厲，億无喪有事。

上六：震索索，視矍矍，征凶。震不于其躬，于其鄰，无咎婚媾有言。」

筆者試譯如下：

「☳☳ 地震：常有的（天災）。弱小地震，有驚無險，百姓笑談地震來時的種種趣事。地震範圍達百里之廣者，就不是國家的小事。」

一、弱小地震：有驚無險，百姓還能談

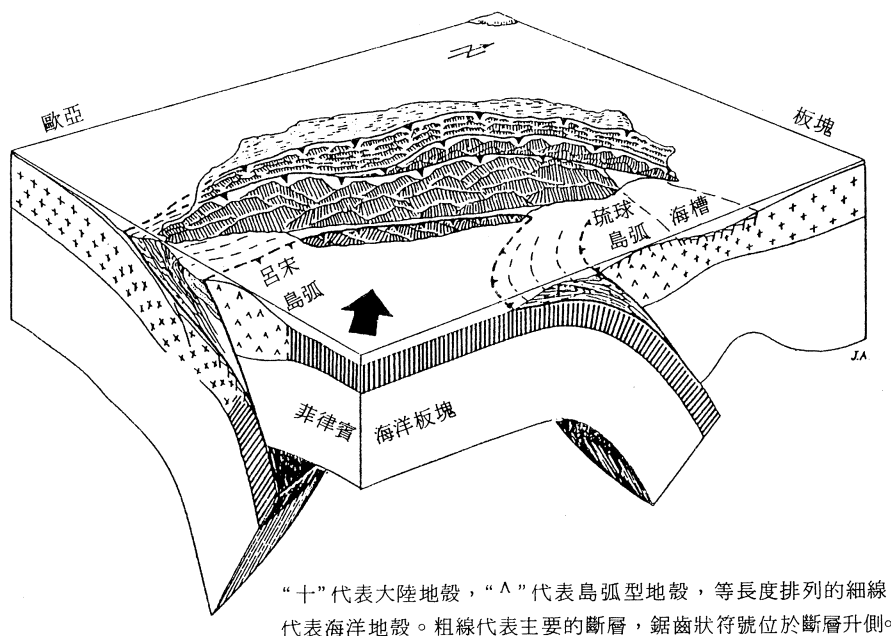


圖15.1 台灣地區之地體構造架構 (摘自 Angelier, 1986)

笑風生者，國家可平安無事。

二、強烈地震：造成許多人命傷亡。別忙，餘震七天。

三、「震蘇蘇」：震動輕微，沒有災害。

四、「震遂泥」：震得物體落地。

五、「震往來厲」：厲害地震，但尚不致危及社稷。

六、「震索索」：震得地表起伏呈波浪狀，百姓目瞪口呆；負征伐之責的（君主），會有凶事。震不到本國（家），震到鄰國（家），沒有災害才能談到婚嫁。」

易經 64卦之中，只有第51卦談到自然災害。第一卦是天（或男性）；第二卦是地（或女性）；其餘的只談人事。

☶☶ 為本卦的符號。震為卦名。卦名之後為卦辭，宣示本卦主旨，其後有六則爻辭，初爻及二爻就本卦主旨作進一步說明；三爻至六爻才是主體，以本爻而言，把地震分成「震蘇蘇」、「震遂泥」、「震往來厲」、及「震索索」等四級。地震到達「震索索」的地步，君主卜「凶」，暗示改朝換代。至於現代地震學家對地震強度及地震規模之分級分等，請見附錄 15.1。

地震破壞力之大，居各種天然災害之首，

1556年元月23日之中國甘肅大地震，死亡人數概估高達83萬之眾；1976年的唐山大地震，地震規模為8.2，死亡人數高達65萬至75萬之多。回去翻閱本國歷史教科書，赫然發現歷史學家把1550年代之後劃為「近代」（其前為「中古」），何其巧合的「換代」大事！而明朝也從此走向敗亡之途。

我國台灣地區，1906年之嘉義地震（地震規模7.1），死亡人數約1300人，至今尚留下梅山斷層，對鄰近地區的重大工程建設（例如核電廠）選址工作構成障礙之一；民國24年（1935年）的新竹台中地震（地震規模7.1），當日死亡人數達3,276人，傷12,000人，住家全毀約18,000戶，災民約26萬人，其餘震續有相當傷亡及損失，至今，獨留下獅潭斷層及屯子腳斷層；民國30年（1941年）之嘉義地震，死亡人數約350人，草嶺大崩山坍方一億立方公尺以上，清水溪積水成潭。

#### 4.2 地震分類

地震，大多發生於10至50公里深之間的外地殼，依其產狀，筆者將其分為a、b、c、d、e及f等五類。

(1)發生於中洋脊(Mid-Ocean Ridge)垂直裂面之間者，例如圖15.2中之a類地震。此類

地震，發生於大洋之中分線附近，對陸地影響很小，偶而會引起海嘯。

- (2)發生於二海洋板塊間之破裂帶，例如圖 15.2 中之 b 類地震。
- (3)發生於海洋板塊與大陸板塊相撞處，例如圖 15.2 中之 c 類地震 (Collision Type Earthquakes)。
- (4)發生於海洋板塊下插帶，例如圖 15.2 中之 d 類地震 (Deep Earthquake)。
- (5)火山爆發所引起之地震，稱之為 e 類地震 (Eruption Type Earthquake)。
- (6)斷層突然錯動所引起之地震，稱之為 f 類地震 (Fault Related Earthquake)。

台東縱谷，為菲律賓板塊與歐亞板塊相撞之接縫處，因此地震(c類)特別多。花蓮(北緯 24°)以北，似有板塊下插帶(圖 15.3)，地震震源較深，屬 d 類地震。雖然也有把台東縱谷視作斷層者，但與板塊相撞關係甚為明顯，故判為 c 類地震。

台灣西部丘陵地帶以西之地震，與斷層關係較密切，故判為 f 類地震，震源較淺。

如把板塊相撞之接縫，例如台東縱谷，也算是大斷層，則絕大部份地震可算是由斷層之活動所引起的。

#### 4.3 地震預測

地震預測，成功之例是有的，但是極少；失敗之例就太多了。因此，地震預測尚停留在“假說”階段，各種假說是否有效，尚待求證，還需要很長的持續研究。

由於衆信(如 4.2 節所說明者)絕大部份地震是因斷層(包括板塊相撞之接縫)之活動所引起，故地震預測集中在活斷層之監測。

每一條活斷層，每天都產生數十次甚至數百次地震，但幾乎全是無感地震，只有精密的地震儀才能測到。由圍繞震央(震源在地表的投影)的許多地震儀，測到同一次地震(有感及無感)之震波到達時間，即可反推震源所在之點，包絡許多地震(尤其是無感地震，其數量才會很多)的面或層，就被假設為地震斷層(產生地震之斷層)或活斷層。

以各種極精密之儀器，監測地震斷層之震波速度變化、微震(絕大部份是無感地震)活

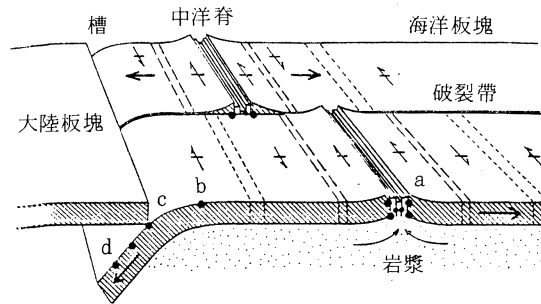


圖 15.2 板塊運動有關之地震

動性之變化、地表之起落、及氡氣(Radon)自斷層深處地下水中逸出之量，或有可能為大地震之來襲提供預兆(圖 15.4)。

#### 4.4 活斷層(Active Fault)

根據 Slemmons & McKinney(1977)，所謂“活動斷層”(Active Fault)，係指在一萬年之內曾經移動一次之斷層；能動斷層(Capable Fault)，在三萬伍仟年之內曾經移動過一次，且在伍拾萬年之內曾經移動過二次或更多次；死斷層(Dead Fault)，為一斷層，在早先之造山運動期中曾經是活動的，但在目前之大地環境中並不活動，因此，在新生代末期之地層中無錯動。

圖 15.5 示地震規模及地震回歸期與斷層位移率之關係圖解。茲舉年位移一公分之主要斷層為例，產生地震規模七之回歸期為二百年；而產生地震規模八之回歸期為一仟年。圖中，活動性極高(AAA, >10cm/yr)者，僅發生於板塊下插帶或海槽處；活動性甚高之斷層(AA, 1~10 cm/yr)，發生於主要板塊之交界上，且明顯可見；活動性高之斷層(A, 0.1~1cm/yr)，活動性常可測得，偶而中斷；活動性中等之斷層(B, 0.01~0.1 cm/yr)，在地形上有中等至明顯之斷層活動證據；活動性低之斷層(C, 0.001~0.01 cm/yr)，在地形上僅有稀少之斷層活動證據；若斷層位移率低於 0.001 cm/yr，則為不活動或活動性極低者。

以上關於活斷層的定義，大致是美國原子能委員會所開始主張的。這種定義，若是照單全收，那麼就必須對國內的每一條活斷層從事大地測量，以求出其位移率，究竟是 10cm/yr？或是 0.001cm/yr？中央研究院地球科學研究

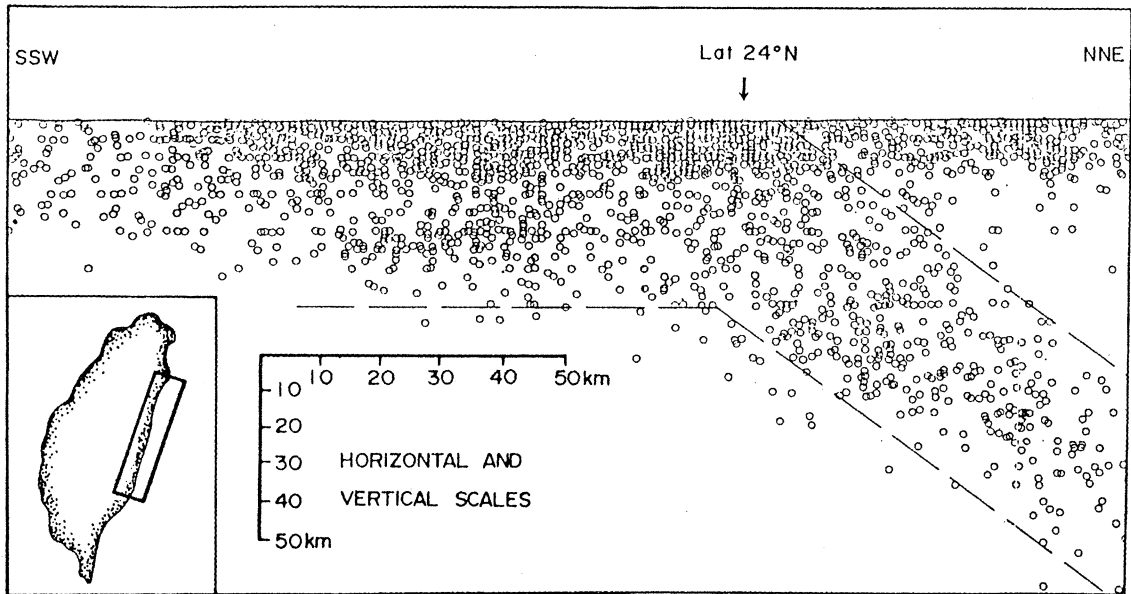


圖15.3 台灣東部海岸一帶地震震源在 NNE—SSW 剖面之投影 (TSAI, et al., 1977, BIQ, 1981)

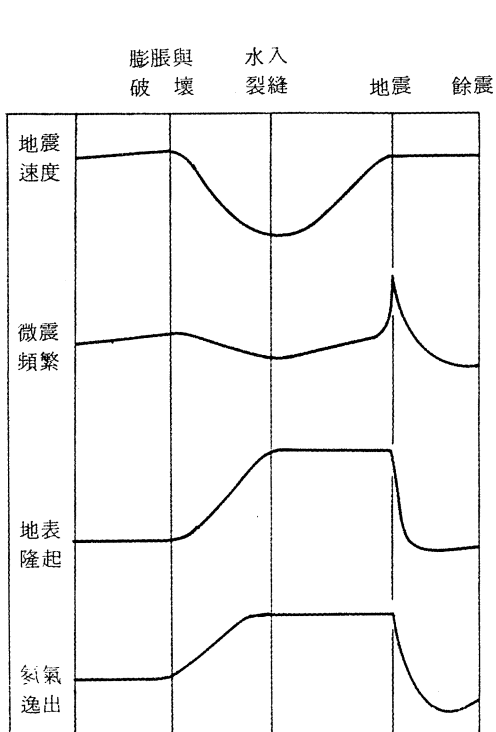


圖15.4 大地震發生前之各種可能預兆 (WALTHAM, 1981)

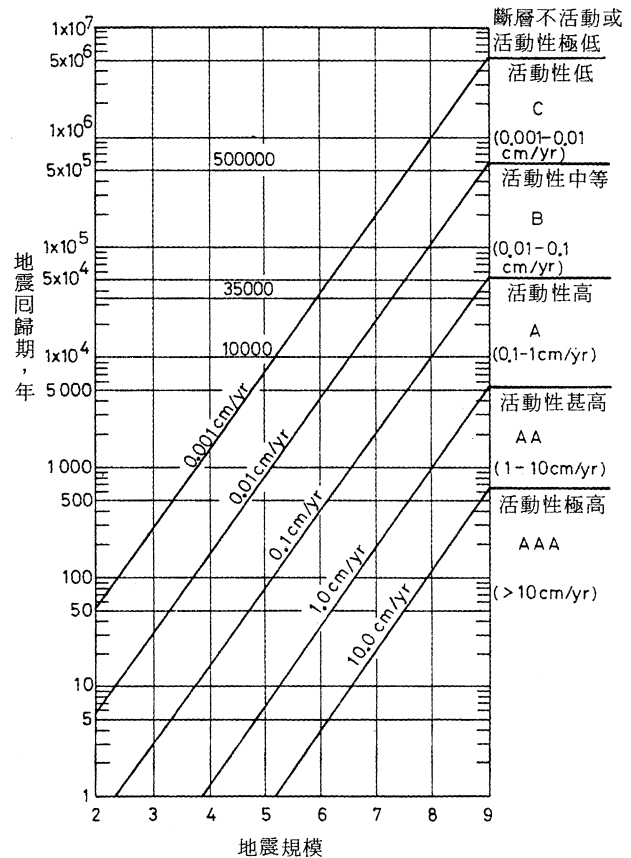


圖15.5 地震規模，地震回歸期與斷層位移率 (斜線上數字所示) 之關係圖解 (SLEMMONE & MCKINEY, 1977)

所正在從事幾條活斷層的位移率測量，余水倍（民國74年）曾經報告了台中縱谷（眾認為產生地震之大斷層）兩側三角點之水平變位（圖15.6），由圖15.6可見：台東縱谷兩側之三角點，每年皆分別向台東縱谷接近了兩公分多，因此，台東縱谷之斷層屬活動性甚高者，為AA斷層。

若是我們還能在遵守上述定義之外，有點思維的話，就可能會有一些疑問。首先，我們的工程時間(Engineering Time)通常是50年，最多是百年；而活動斷層在下定義的時候，却採用地質時間(Geological Time)，起碼是一萬年一算，還有三萬伍仟年及五十萬年者！兩種時間放在一起談，合適嗎？如何證明其合適？其次，有些斷層是一次大地層所產生的，例如，民國24年(1935年)台灣新竹台中大地震（地震規模7.1），曾經產生獅潭斷層及屯子脚斷層（圖15.7）；1906年嘉義大地震（地震規模7.1）曾經產生梅山斷層（圖15.8），這些地震所產生的斷層會反過來產生地震嗎？會產生規模7.1的地震嗎？

斷層，總是比較脆弱，在另一次大地震來襲之時，可能延伸（也可能不延伸），但未必能說大地震所產生的斷層就一定反過來產生大地震。

筆者認為，斷層是不是活動的，要量測其兩側的位移率。位移率高者，未必產生地震，因為其滑動可能是塑性變形，位移率雖快，却不釋放能量。位移率不高者，甚至千年萬年不動者，却突然錯動一大下，產生所謂滯動變形(Stick-Slip)，釋放龐大能量，必產生大地震。因此，什麼叫活斷層？請先量測其位移率，再評估其是否會發生滯動變形，都是的話，就要趕快建立監測網，以多種精密儀器監測之，目前比較多用的監測項目是：

- (1)地震速度的變化
- (2)微震頻繁度的變化
- (3)地表隆起量的變化
- (4)氫氣逸出量的變化

若是有人說台灣有幾百條活動斷層的話，那麼在這個到處都是活動斷層的小島山，幾乎連住宅都沒地方蓋了，因為不少自稱為環境學家者說：活動斷層的幾十或幾公里內不可建

廠，不可建設水庫、不可……；甚至有人想規定斷層兩側幾百或幾十公尺的範圍內不得建築。

筆者把斷層與地震的關係分成下列幾種：

- (1)已經累積極大量應變能，目前測不到位移，但將來可能突然錯動、釋放龐大能量之斷層，產生非常大地震（例如唐山大地震等地震規模在8.0以上者）。這種斷層才是最可怕，最應該早日予以偵查、發現。
- (2)位移率很大（例如每年幾公分至幾十公分者）而且常常有滯動變形、產生大範圍烈震（例如地震規模在6.0以上或7.0以上者）之斷層。這種斷層的確實位置、地震帶寬度、及其他特性，都應早日調查清楚，並以多種儀器嚴密監測之。其對工程及都市的影響必須詳加分析。
- (3)位移率很大但其變形為塑性變形（不少人稱之為潛變，Creep）之斷層。這種斷層，只要工程不接近它（當然更不能跨越其上），就不太危險。
- (4)位移率並不很大，雖有滯動變形並產生大範圍強震（例如地震規模在6.0或5.0以下者）之斷層。這種斷層，當然也不得把工程做得太靠近，但只要工程設計得當，應能安全。
- (5)位移率並不很大，雖能產生地震但規模及範圍皆有限（例如地震規模在4.0以下者）之斷層。這種斷層，或可允許工程接近，但需要特別設計。
- (6)呆斷層：歷史上曾有斷裂（最可能伴同地震發生）記載，但從未再有進一步斷裂或產生有感地震者。這種斷層，應限制建築跨越其上，但線性結構（例如隧道、橋樑等）得穿越之，當然，設計上需有特別考慮。
- (7)死斷層：斷層存在確實，但測不到有位移或微震（無感地震）者。這種斷層，只是力學性質及工程性質比正常岩層差而已，或部份挖除並置換較佳材料、或予以補強加勁、或設計結構對抗之。
- (8)疑似斷層：是否屬於地質構造上的斷層尚難確定者，甚至開挖、監測之後尚難確定者，大致可按正常工程作業方式處理之，但須注意之。

讀者必須注意一事，在從事實際工程規劃

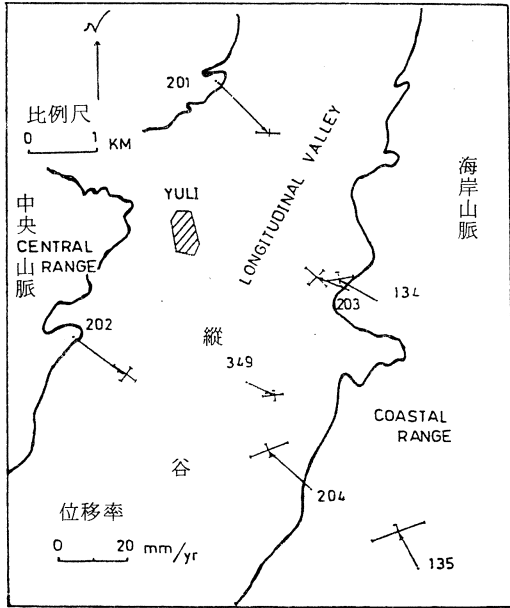


圖15.6 玉里附近各三角點之相對位移  
(余水倍, 1985)

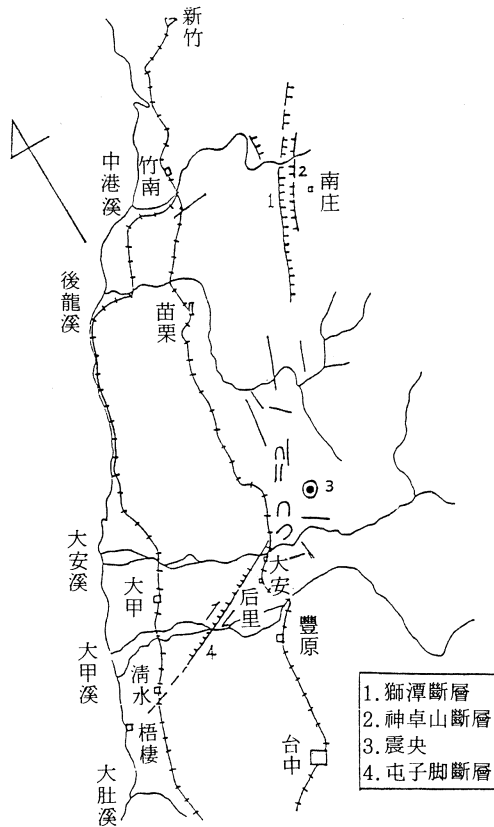


圖15.7 民國二十四年新竹台中大地震所生的斷層  
(顏滄波, 1985)

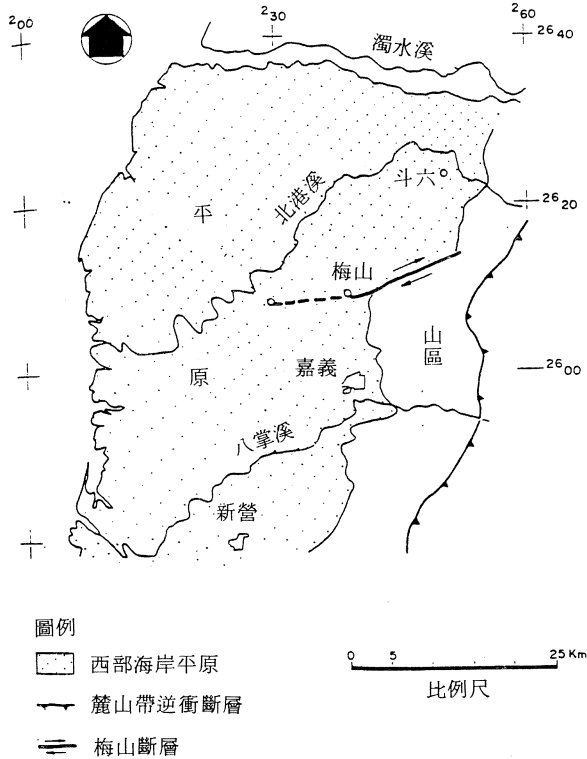


圖15.8 1906年嘉義地震所生的梅山斷層

、設計、及施工之時，首須符合法規要求（尤其指主管官署所頒佈之規則、規範及管理辦法等），但法規也要靠工程經驗及學術研究成果來修訂。對活斷層及地震的考慮也應如此。

### 五、 大地應力

一般營建工程（例如房屋建築、都市公共設施、及公園等）與一般土木工程（例如橋樑、道路、海港、渠道等等），其荷重來自慣性力（工程自重、人車之重、風力、或地震力以工程靜重的10%至20%計），每平方公尺受力不過數噸至數十噸而已。而大地工程，其涉及岩盤者，例如隧道、地下電廠、地下儲油儲氣窖、地下防衛工事、核廢料儲藏窖、大壩基礎、……等等，受大地應力(Tectonic Stresses)之作用，每平方公尺受力常達數百噸以上，因而工程自重（例如R.C.觀砌）、人車之重、甚至地震力，皆可忽略不計。以明湖地下電廠（寬20公尺、高45公尺、長100公尺）為例，作用之大地應力為：

鉛直方向  $P_v = 266$  噸/平方公尺



水平方向  $P_h = 389$  噸/平方公尺

剪 力  $\tau = 29$  噸/平方公尺

這類大地工程，不論在地下（例如隧道）或地表（例如大型拱壩之壩墊），皆宜與岩盤結合為一體，是為安全、妥善與經濟。

人類了解大地應力的過程，並不順利。原因德在基(Terzaghi)根據土壤力學的理论與實證，地表下某一點的土壤（尤其是正常壓密的土壤），在靜止平衡之時，水平應力 $P_v$ 遠小於鉛直應力 $P_h$ ，而

$$P_h = K_o \cdot P_v$$

$K_o$ 為靜止土壓力係數，遠小於1.0，因此而推論岩盤中的情形也大多如此。Terzaghi & Richart(1952)認定 $K_o = 0.25$ 。在此前後，雖然也有幾個實測數據發現 $P_h > P_v$ ，但皆因震於Terzaghi之權威，因而解釋成局部地形因素或量測問題。一直要等到Hast(1967)報告了北歐有計畫實測地中應力之結果： $P_h \gg P_v$ ，其他各國學學者才紛紛出來說他們也量到 $P_h \gg P_v$ 之結果。

但是 $P_h \gg P_v$ 只限於深度3,000公尺以內之岩盤；深度大於3,000公尺者， $P_h = P_v$ ；深度小於500公尺者，常有 $P_h \gg P_v$ 之情形。請參考本書第拾壹章圖11.3。

至於因冲刷解壓而造成 $P_h \gg P_v$ 之推導，請參考本書第五章之3.4節。

大地應力之量測，通常以套鑽法(Over-coring Methods)求之，國內已有不少經驗。

## 六、 河谷解壓

河谷，原是地表脆弱之處，經水流之侵蝕及冲刷而形成。河谷形成之後，河谷之兩岸將因解壓作用而造成種種複雜變形與構造。若地層大致水平，則因河谷解壓所造成之結果示於圖15.9；若河谷狹而深，且兩岸岩石堅硬者，則解壓所造成之結果示於圖15.10。大致而言，河谷解壓所造成之惡果有下列九項(Patton & Hendron Jr., 1974)：

- (1)河床隆起
- (2)河岸內移
- (3)河岸上升
- (4)小型逆斷層
- (5)斷層泥
- (6)河床下空隙及小型背斜
- (7)兩岸之開口節理
- (8)臥倒褶綳
- (9)岩坡之翻倒及滑動破壞

至於因上述九項惡果而進一步演化出倒懸坡、崖錐堆積、崩坍地、落石等等二次惡果，在高山地區相當普遍。

## 七、 颱風與豪雨

颱風與豪雨，本身並非地質材料，但是影響地質材料之重大與頻繁，遠非其他環境因素可比。

颱風必然鼓起大浪，冲刷岸邊土壤與岩石

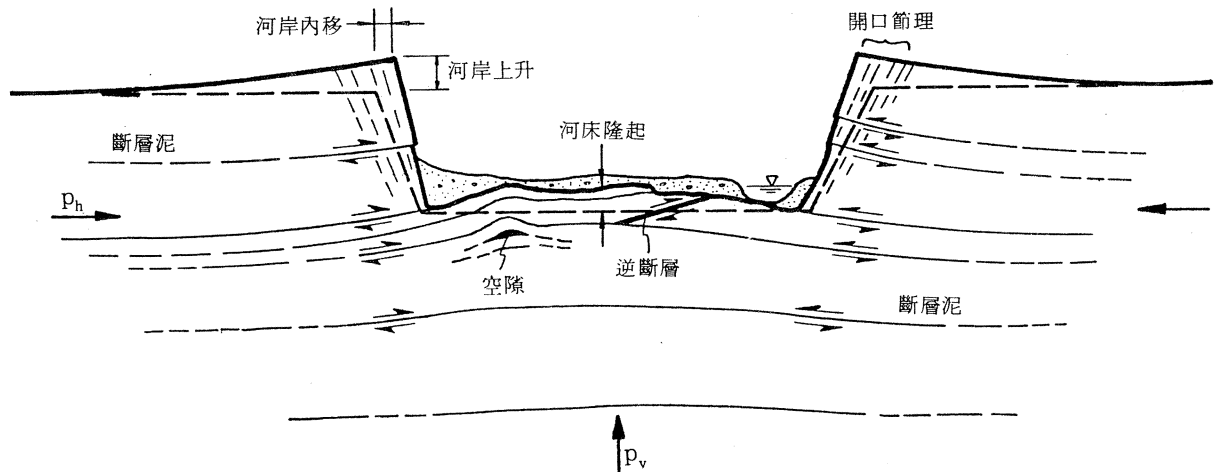


圖15.9 河谷解壓所造成的變形與構造 (PATTON & HENDRON JR., 1974)

，造成侵蝕或坍方。但是對自然邊坡最為不利的，恐怕要算持續性的豪雨了。

台灣地處亞熱帶，年雨量超過2000公厘，但分佈不均，致最大日雨量可超過700公厘，而一小時雨量可以超過100公厘。

民國48年8月7日，艾倫颱風已離開台灣，但西南氣流却帶來了潮濕空氣，因受阻於中央山脈而降下豪雨。8月7日，阿里山降雨超過700公厘為最大，雲林古坑也達708公厘，豐原600公厘，苗栗400公厘，屏東200公厘。8月7日深夜23時30分起，雨勢更猛，北起竹南，南迄屏東普降豪雨，持續至8月8日上午11時許止，共14小時之間，台中、彰化、斗六、豐原、嘉義、東勢、及高雄山區，雨量均在700公厘以上，而以中央山脈山麓地帶雨勢最猛。而8月7日至10日之間，雨量最大達1,100公厘，也就是說半年多的雨水在四天之內下完了，造成重大災害，稱八七水災。而最嚴重的當然是八卦山台地被豪雨沖刷、侵蝕、軟化、甚至坍方，土石流淹沒八卦山台地以西之平原。

民國72年8月11日，西仕颱風走了之後，西南氣流帶來之潮濕氣流受阻於觀音山，林口台地在8月10日至11日之間的八小時之中，降雨238公厘，而8月11日凌晨二時左右，降雨強度可能達一小時100公厘以上，因而產生土石流，造成五股至泰山間的大災害。

由以上討論可知：豪雨造成侵蝕與坍方。脆弱的地質材料因浸水太久而軟化。

## 八、 地下水壓

地下水，號稱坍方（山崩）的第一號大兇手。地下水所產生的壞處之多，遠超過一般人所能數，大致有下列五大罪狀：

- (1) 水壓作用於垂直裂隙（節理或張裂縫），將岩坡或土坡推向下方（圖15.11）。
- (2) 上頂力作用於潛在滑動面，降低了該面的剪阻力（圖15.11）。
- (3) 對頁狀結構之礦物（尤其是黏土礦物）產生潤滑作用。
- (4) 溶解砂岩中的膠結物質。
- (5) 其他物理化學作用，使岩質、土質變壞。

自然邊坡中地下水流之情形示於圖15.12

。由圖可見：在一山坡地中，通常在高位之處為注水區；在低位之處為出水區，故泉水之湧出在於低位之處。但若地下地質特殊，則又當別論，例如均勻崩積層下有一不透水頁岩或泥岩之地層，則泉水之湧出可能在二地層之界面。

崩積土對地下水流及邊坡安定之影響，示於圖15.13。坍方通常使坡度變緩，但崩積土使地下水壓升高，不利於邊坡安定。因此，如屬可行，應將崩積土挖除。有時，挖除崩積土之經費反而少於保坡。保坡若採取結構方案，如擋土工等，皆甚昂貴。

殘留表土通常阻礙積水之自由排洩，可能滑動面通常位於殘留表土與風化岩之界面，圖15.14示其一般情況。

## 九、 崩積層作為一種環境因素

崩積土，在以前曾多次討論過，尤其本書第8章第四節。崩積土堆積範圍廣大者稱崩積層，地勢略比附近山坡平緩，因此頗受歡迎，作為社區開發用地，其實邊坡穩定之安全係數僅在1.2以下。

當公路切過崩積層坡趾時，在崩積層從事

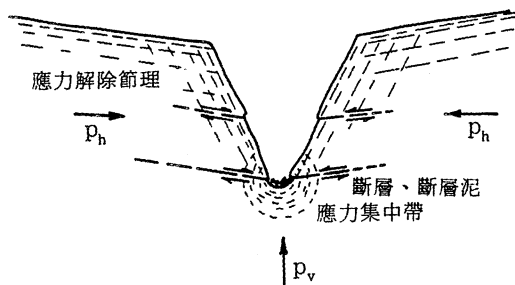


圖15.10 狹而深河谷解壓所造成之結果(資料來源：PATTON & HENDRON JR., 1974)

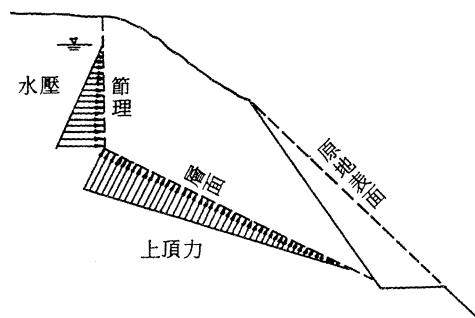


圖15.11 順向坡中之地下水壓

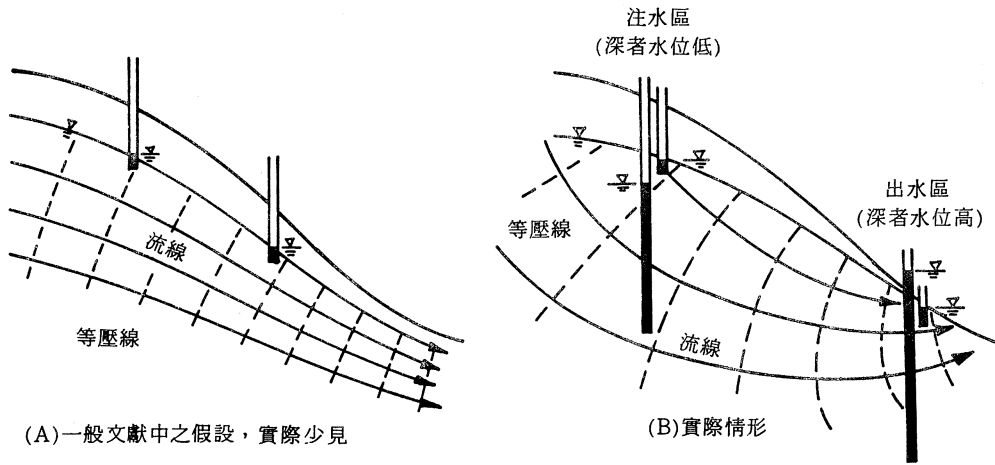


圖 15.12 自然邊坡地下水流之情形  
(資料來源：PATTON & HENDRON JR., 1974)

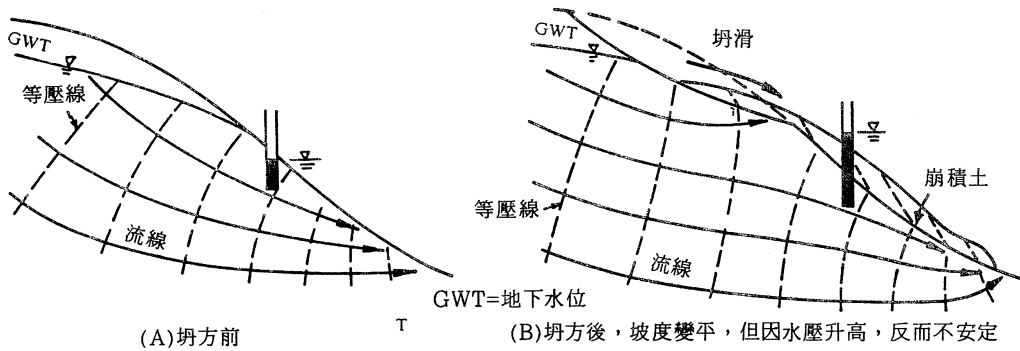


圖 15.13 崩積土對地下水流及邊坡安定之影響  
(資料來源：PATTON & HENDRON JR., 1974)

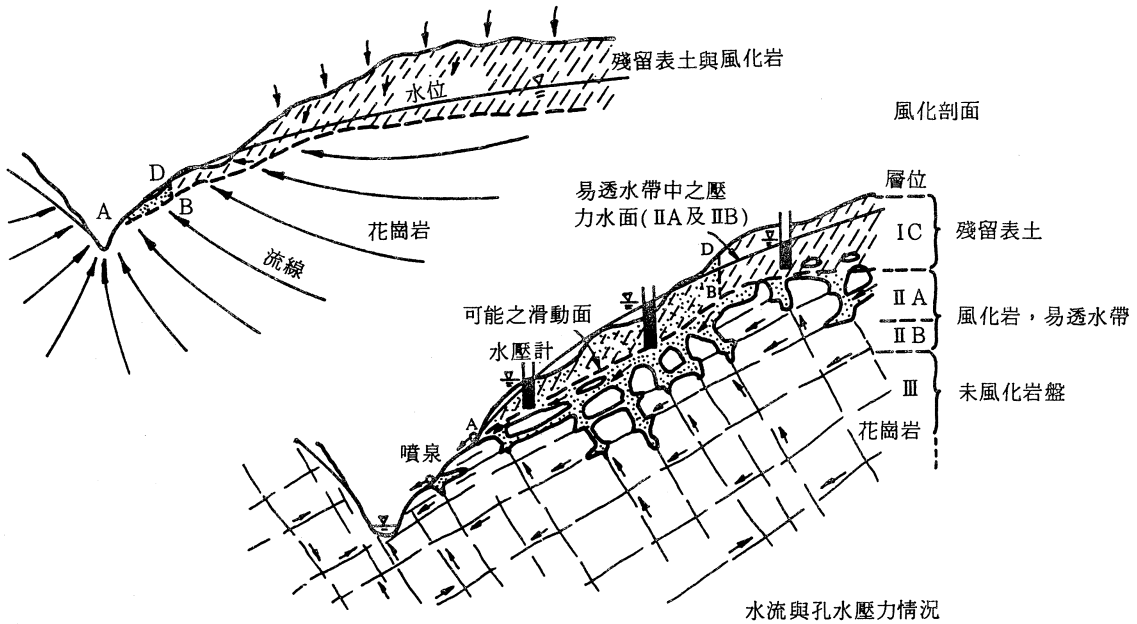


圖 15.14 殘留表土中之可能滑動面與地下水壓  
(資料來源：PATTON & HENDRON JR., 1974)

住宅社區開發時，或者因豪雨持續太久，可能引起崩積層之坍塌。但坍塌常常只是大規模崩積層的一小部份。因此在工程作業之前，必須把崩積層的範圍及特性（地下水壓、組織、強度、壓縮性、透水性等）調查清楚。

崩積層，如屬可能，挖除之。如不挖除而需保坡者，最有效的方法依序是：

- (1)降低地下水位
- (2)在坡趾拋石
- (3)自坡頂開始整坡，例如整修成平台階段，必要時以混凝土版配合岩錨保護之

## 十、風化

1966年，英國南威爾斯的一個平緩山坡地，煤礦所餘之岩渣堆突然在豪雨中崩潰，衝入坡下小學，造成一百多名學童死亡之慘案。事後調查，岩渣堆置之初，強度尚佳，不致坍塌，但多年之後，岩渣因風化而破壞，顆粒變細，甚至有部份頁岩已風化成黏土，剪力強度大為降低，再加上豪雨作用，推力大增而剪力強度大減，終於滑動。

因此，地質材料對抗風化之能力，必須加以研究以確保長期穩定與安全。

## 十一、風力之例

新疆塔里木河之終點湖，羅布泊，在漢代之時，湖水充沛，尚可維持樓蘭之國的存在，為綏道中途站之一。但因羅布泊週圍較濕，沙漠之沙被風吹至該處，易於堆積；而距羅布泊較遠之沙則因缺少水份而甚為乾燥並易被風力刮走，時日一久，羅布泊之地勢竟高於其上游之地，終於晉成帝咸和五年（西曆 330 年），庫穆河改道，另以孔雀河使水流向南方造成新的終點湖，喀喇布蘭及喀喇廓順，羅布泊因而乾枯，樓蘭國成爲廢墟，經此之綏道於是中斷。

同一程序發生於新河道及新終點湖，沙土堆高。而羅布泊乾湖週圍之砂逐漸被刮走，終於使羅布泊一帶之地勢低於孔雀河、喀喇布蘭及喀喇廓順一帶之地，塔里木河之端點湖於民國 10 年（西曆 1921 年）又擺回羅布泊舊地，其週期約一千六百年。

對本案有興趣者，可一讀徐芸書譯斯文赫

定著：羅布淖爾考察記一書。

## 參考文獻

- 早坂一郎監輯(民國 21 年)台灣地質寫真集第一集。  
余水倍(民國 74 年)“地殼變形與地震預測”1935 年大地震紀念研討會論文集，156~177 頁。  
洪如江、郭振泰、陳榮河、陳鴻霞(民國 75 年)“林口台地及鄰近地區洪災及坍塌之研究(一)”行政院國家科學委員會防災科技研究報告 74-43 號，民國 75 年 5 月。  
徐世大(民國 55 年)說易解頤。  
徐芸書譯(民國 44 年)羅布淖爾考察記，中華叢書委員會出版。  
台灣總督府氣象台(民國 30 年)嘉義地方烈震報告。  
台灣總督府台北觀測所(民國 25 年)昭和 10 年 4 月 21 日新竹台中烈震報告。  
台灣總督府(民國 25 年)昭和十年台灣震災誌。  
AIA Research Corporation (1975) *Architects and Earthquake*. U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C.  
ANGELIER, J. (1986) Preface in the Special Issue of The Geodynamics of the Eurasia-Philippine Sea Plate Boundary: *Tectonophysics* Vol. 125: No. 1-3.  
BIQ, Chingchang (1981) “Collision, Taiwan—style”. *Memoir Geol. Soc. China* 4: 91-102.  
HAST, N. (1960) “Rock Pressure Measurements: Horizontal Stresses in the Earth's Crust.” Assoc. Intl. Seismologie Phys. Interieur Terre, 12e Conf., Helsinki, 1960, Compt. Rend., pp. 185-187.  
HAST, N. (1967) “The State of Stresses in the Upper Part of the Earth's Crust”. *Engineering Geology*, 2 (1) (1967) 5-17.  
PETAK, W. J., & ATKISSON, A. A. (1982) *Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy*, Springer-Verlag.  
SLEMMONS, D. B. & MCKINEY, R. (1977) *Definition of Active Fault*, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.  
TSAI, Y. B. et al. (1977) “Tectonic Implications of the Seismicity in the Taiwan Region”. *Memoir Geol. Soc. China* 2: 13-41.  
WALTHAM, A. C. (1981) “Geological Hazards”, A Contribution to *The Cambridge Encyclopedia of Earth Sciences* ed. by SMITH D. G., Cambridge University Press, London.

### 附錄15.1 地震強度與地震規模

地震強度(Intensity)指地表某一點受地震侵襲

而損壞程度。Mercalli(1956)將地震分為12級，以羅馬數字 I、II、……至XII代表之，一般稱之為修正莫卡力強度(MMI)分級，其說明如表 15.1。

表15.1 修正莫卡力地震強度分級(Mercalli, 1956)

| 強度分級 | 說  | 明 |
|------|--|---|
| I    | 無感地震；若屬巨大地震，或有長期及輕微影響。   |   |
| II   | 人類在安靜休息時，在高樓中或在敏感之處，開始有感覺。   |   |
| III  | 人類在室內有感覺；吊燈搖動；振動頗似小卡車通過的程度；歷時多久可概略估計；有人以為不是地震。   |   |
| IV   | 吊燈搖動；類似重型卡車通過；頗似球擊牆壁之搖動；靜止車輛搖動；門窗及餐具發出聲響；玻璃器皿發出叮噠之聲；瓦罐破裂；四級地震之上限附近，木牆及木架搖動生響。  |   |
| V    | 所有的人都感覺到地震；可以判斷地震來襲之方向；震醒睡眠中人；杯中之水搖動或潑出；小型或不穩物體移動或傾斜；門板搖動、自行關閉或張開；百葉窗、掛畫搖動；鐘（指老式有擺錘者）停擺或失準。  |   |
| VI   | 所有的人都感覺到地震；許多人走避至室外空地；行走不穩；玻璃窗戶及餐具破碎；書架中擺飾及書本落地，掛畫落下；傢俱移位或翻倒；石灰及D級圯工開始裂；教堂、學校的小鐘鳴響；樹木搖動明顯可見，甚至發出沙沙之聲。  |   |
| VII  | 人類不易站立；行駛中的車輛司機看出有地震；懸掛物體振動；傢俱破裂；D級圯工破壞或開裂多處；烟囱之弱者，會在地板交界處破壞；粉刷層、鬆磚或石塊、貼牆磁磚、牆頂磚、無撐矮牆及建築裝飾物等脫落。C級圯工有些裂痕；池水出現波浪混濁現象；砂礫渠岸發生小規模坍落或凹陷；大鐘鳴叫；混凝土灌溉渠道受損。 |   |
| VIII | 車行不穩；C級圯工受損或部份倒塌；B級圯工有些損壞；A級圯工不受損傷；灰泥及某些圯工倒塌；烟囱、碑、塔、高架水塔倒塌；剛構房屋若無地錨固定將在基礎之處移動；鬆隔板被拋出；朽樁破斷；樹枝斷脫；泉水及井水之流量與溫度起變化；濕地及陡坡出現裂縫。                         |   |
| IX   | 引起普遍驚慌；D級圯工全毀；C級圯工半毀至全毀；B級圯工嚴重受損；基礎普遍受損；剛構若無地錨固定將自基礎剪脫；構架破損；水庫嚴重受損；暗管破損；地裂明顯可見；噴砂、噴泥、噴水並出現沙坑。  |   |
| X    | 大部份圯工及剛構(連同基礎)全毀；不少精建木結構及橋樑全毀；堤、壩嚴重損壞；發生大規模山崩；渠道、河川及湖泊中之水潑越岸頂；海灘及平地之沙、泥作水平方向漂移；鐵軌輕度彎曲。   |   |
| XI   | 鐵軌嚴重彎曲；地下管線全部不通。   |   |
| XII  | 近乎全面性破壞；巨大岩體移位；視線歪斜；不少物體拋向空中。  |   |

附註：圯工品質分級如下：

- A 級圯工：做工、砂漿及設計皆佳者；由鋼筋、混凝土等結合一體者，側向尤其是加勁者；事先設計抵抗側力者。
- B 級圯工：做工及砂漿皆佳；加勁但事先未設計抵抗側力。
- C 級圯工：做工及砂漿都很平常；無重大弱點（轉角處未加繫件者為重大缺點），但未加勁，亦未設計抵抗側力。
- D 級圯工：材料脆弱，例如採用曬乾土磚；磚縫砂漿不良；做工差；水平縫脆弱。

地震規模(Magnitude)代表一次地震所釋放能

量之大小。李希特(Richter)將地震之大小，分為九個規模。地震規模差一者，能量差31.5倍。若以相當於多重的TNT爆炸所產生之能量來表示地震規模，則地震規模為一者，其所釋於之能量約等於170克TNT爆炸所產生之能量；而地震規模為七者（大致是台灣有記錄之最大地震），其所釋放之能量，約等於十萬噸TNT所產生之能量；於唐山大地震，其規模為8.2，其所釋放之能量，約等於千萬噸TNT爆炸所產生之能量，其關係如表 15.2。

應加說明的是：地震強度與地震規模不一定要有關係，地震規模大者，震央之處的地震強度當然也大，但距離震央甚遠處之地震強度可以很小；地震規模小者，在震央一帶之地震強度可以很大。

表15.2 地震之能量 (AIA Research Corp., 1975)

| 地震規模 | 地震能量(TNT) |
|------|-----------|
| 1.0  | 0.17 kg   |
| 1.5  | 1 kg      |
| 2.0  | 6 kg      |
| 2.5  | 30 kg     |
| 3.0  | 180 kg    |
| 3.5  | 900 kg    |
| 4.0  | 6噸        |
| 4.5  | 32噸       |
| 5.0  | 199噸      |
| 5.5  | 1,000噸    |
| 6.0  | 6,000噸    |
| 6.5  | 31,550噸   |
| 7.0  | 10萬噸      |
| 7.5  | 100萬噸     |
| 8.0  | 627萬噸     |
| 8.5  | 3,155萬噸   |
| 9.0  | 19,900萬噸  |

**勘誤：**

1. 第十三期之技術講座「拾貳 工址調查(中)」應為「拾參 工址調查(中)」。

2. 「拾貳 工址調查(上)」第90頁右欄排版有誤，應更正為：

略向山側平移一、二百公尺或下移數十公尺，即可在良質岩盤中通過，絲毫不影響該一鐵路之目標。某校區、選址於地名為溝子口之山溝出谷之處，每逢山洪暴發，山溝洪流，受阻於該校區，水分兩路，繞校區之外圍而會合於校區之下游，致整個校區為孤島，並受污泥淹浸之苦，本案選址，可能係由毫無工程常識之行政人員所從事。南迴鐵路，原選線擬以長而且深之隧道穿越南大武山（標高二千多公尺），因有岩爆等疑慮，及時改至南方之枋山東進。又活動中之崩坍地、梯田之趾部、地陷區、以及斷層帶附近等，皆為極不利之工址。

**1.2 求得工址特性供設計、施工之用**

所有土木水利工程，皆須建於地上或地下。因此，工址之地形、地質、水文、強度、壓縮性、水力學性質、及工作性皆須明白，始能從事設計及施工。某工程對工址特性瞭解不足，以美金數百萬元購置大型開挖機械二部，開挖速度太慢並受落磐埋沒；又某深開挖工程，在乾季調查，未遭遇地下水，濕季開挖之時，地下水位升高，排水及擋土費用追加不少，這