

技術講座專欄

柒 工程地質在自然邊坡穩定之應用 (力學因素除外)

The Applications of Engineering Geology in Slope Stability (Except Mechanics)

洪 如 江*

一、引 言

自然邊坡穩定問題，雖然只是各種邊坡穩定問題的一大類（另有二大類為人為填方、及棄方），但是它最常發生，造成的災害也最為廣大，因此特別受到注意。

當一個自然邊坡不穩定而開始有下坡運動（Down Slope Movement）之時，土木工程師稱之為坍方，其他學者稱之為山崩或崩山，英文稱之為 Slope Failure 或 Landslides。

坍方之規模相差極大，小者如一般落石，幾部卡車就可以將之清理完畢；大者達一億立方公尺以上，例如草嶺大崩山（洪如江，民國69年、71年）。下坡運動的速率，自每年幾公分至每秒100公尺，對人命財產的影響也有很大差別。單從坍方的規模及下坡運動速率，已經可以發覺坍方問題的複雜性；再從坍方的型態、坍方的原因去探討，更會看出坍方的變化多端。

力學方面的學者，慣以土壤力學與岩石力學理論分析邊坡之穩定性，以安全係數或坍方機率作為邊坡穩定之指標。筆者本人，在實際從事幾次自然邊坡穩定分析之後，才真正體會出土壤力學與岩石力學分析的主要功用，在於考量客觀因素與主觀因素的變化，例如岩坡張裂縫中或崩積土中水位的變化、排水系統之暢通或堵塞、剪力強度參數的精度、等等，引起安全係數的變化究竟有多大？

自然邊坡穩定性之力學計算，其精確度的次序大致如下：

(1)初步坍方 (Initial Landslides) 已經發生，邊坡已經緩慢下移或時動時停者：安全係數近於1.0，只要坍方的幾何形狀（地形、滑動面、地下水位）已知（由測量、野外地貌地質調查、或加上鑽探等工作求之），則可倒算 (Back Analysis) 滑動面的剪力強度，並可應用於相近的個案。

(2)古老崩積層 (Colluvium)：曾有滑動證據，但目前無滑動現象，判斷其安全係數為1.0至1.2，滑動面位置較(1)之情形難予推定或查明，其穩定性分析自然較為困難。

(3)邊坡無崩坍證據者：此種邊坡之穩定性計算最難精確，尤其是在地質條件複雜之岩坡。有些岩坡，看似安全，却突然以高速滑動；有些危岩（甚至被稱為風動石者），獨立數十年之久，却仍在原地。近年來，力學計算能力大有進步，輔以高速計算機之應用，精密度 (Precision) 很高，但若對邊坡的複雜情況尚未充分瞭解，則縱使有精密的計算，準確度 (Accuracy) 仍然很差。

從以上的討論，大致上可以瞭解，自然邊坡穩定性的分析，欲求其精密與準確，有待努力的重點，恐怕不在力學分析與計算。當然，筆者樂見力學分析與計算有更大進步，可以對邊坡穩定的研究與處理有更大貢獻。但是，力學分析與計算以外的部門，尚難並駕齊驅，因此筆者以本文專門討論邊坡穩定的非力學因素。

*國立臺灣大學土木工程學系教授

力學因素，對邊坡穩定的重要性，可能不下於力學以外的因素。但是，只考慮力學因素，只從事力學分析與設計，有時會花費太多的工程費，有時甚至花費甚多而未必安全。

二、自然邊坡穩定之有關因素

影響自然邊坡的因素很多，各因素的影響值究有多大，尚難採用岩體分類法（應用於隧道工程則已經相當成功）予以評估。

Voight & Pariseau(1978) 指出全世界最大規模的一些山崩，幾乎全發生在板塊接縫附近。板塊運動使地層高高隆起，造成山脈與高原，但是由於板塊運動推擠的力量是持續不斷的，當高山愈來愈高之後，山崩似乎是必然的。台灣中央山脈受到菲律賓板塊由東向西的推擠，南北向的脊線距離西部平原不超過一百公里，有的地方甚至不超過50公里，最高峯之玉山已近四千公尺，因此，向西方的大崩山，恐怕不是人力所能阻擋的。至於向西爬坡不成功而滑回東方者，也有可能。

筆者（洪如江，民國68年）曾主張山崩之重要因素包括了下列四大項：

- (1)地質材料 (Geologic Materials)
 - (2)地質構造 (Geologic Structures)
 - (3)地形與環境因素 (Topography & Environmental Factors)
 - (4)工程因素 (Engineering Factors) 及其他人為因素 (Human Activities)
- 茲就上述四大因素，逐項加以討論。

三、地質材料之影響

3.1 引言

筆者在另文（洪如江，民國72年③）曾討論了工程地質中之材料因素。該文並非專注於邊坡穩定之討論，因此，雖然討論了礦物、風化、及含水量的影響，但是，尚未討論到應用於邊坡穩定之情況。

3.2 地質材料之膠結物質

我國華北之黃土，含相當多之膠結材料，甚至於形成薑狀結核（俗稱薑石），致黃土在乾燥時具有相當良好之凝聚力（Cohesion），可維持相當高之直立坡；但浸水之後，膠結材料被水溶解，即易於崩坍，有如黃河之崩岸者。

我國台灣地區之紅棕土台地，可能由於其特殊

之組織、土壤構造、或其氧化鐵及氧化鋁之膠結作用，乾燥之時尚稱穩定，充分浸水之後，氧化鐵之膠結作用破壞，即易崩坍或流散。民國48年八卦山台地之八七水災及民國71年之八一水災，就是紅土台地因豪雨之持續近兩天，使紅土充分浸水所引起。

台灣地區西南部之泥岩，不耐風化及侵蝕，地表成惡地地形。按泥岩之生成，筆者之意見，認為係由膠結作用而成，壓密作用之成分不顯著，故其崩坍，較少受弱面之控制而造成之方向性。根據筆者（洪如江，民國66年）檢查中油公司所鑽取之台灣一號井岩心樣品，自地表至接近5,000公尺深之泥岩，性質相差不大。因此，筆者判斷泥岩風化深度不大，其深處之強度不高是因為膠結作用還不足以使其成為堅硬岩石（而非風化已近數千公尺深），而侵蝕速度大且普遍，故成惡地地形。

砂岩之各種性質，受其膠結物質的影響極大。膠結不良者，不但強度低，而且因易於透水，增加風化速度，增高地下水壓，尤其當下接不透水頁岩或泥岩者，更易於崩坍。

綜上所述，膠結不良或膠結物質易於受到水的溶解、淋洗、軟化、或流失者，皆對邊坡穩定不利。

3.3 材料粒度之影響

坍方，若發生於土石堆，例如崩積土、崖錐堆積、工程棄方、或礦渣，其崩滑速率與粒度之關係很大。岩屑較多之塊狀土堆或粗粒土堆，崩滑之時，速率極高，Shreve (1968) 曾估計六個大規模崩滑之速率，其值高達100至300km/hr.。英國南威爾斯Aberfan慘案之礦渣，滑動之時速亦在15至30公里左右。Hsu(1975)在討論瑞士Elm大坍方，也強調其驚人的崩滑速率。

細粒土壤，因為具有凝聚力，可以有相當高的免擋土直立坡。

3.4 地質材料之組織對坍方的影響

有幾種材料，因其組織特殊，而對崩方有重大影響。首先要指出的是崩積土，其次是紅土礫石層。

崩積土的組織極不規則，其成分，大者如屋，細者為沉泥、黏土，甚至含有機物，其性質變化極大且又難測定，取樣困難極大。其內部，甚為疏鬆，極易聚集流水；其表面，因風化及植物之生長，難於透水，因此易於產生較高水壓，不利於邊坡之穩定。筆者將崩積土，視為複合土之一種（洪如江等，民國67年）。因此，其粒徑分配為一重要因

素。若粗粒料佔75%以上者，則粗粒料各顆粒已相互接觸，而其所構成之孔隙，由細粒料填充，則此一崩積土之性質（尤其指抵抗坍方或滑動之阻力），由其粗粒料成分所決定；若細粒料佔30%以上者，則粗粒料各顆粒已難於相互接觸，則此一崩積土之性質由細粒料成分所決定。為求其顆粒之級配，筆者建議挖明坑，最好一立方公尺以上，加以篩析。但須注意的是：上述75%及30%之數字，為一般情形，不同崩積土，可能略有出入。

紅土礫石層，也可以用複合之觀念處理。礫石粒皆已互相接觸者（大致須佔75%以上），紅土礫石層之強度及壓縮性，由礫石成分決定；若礫石粒大部份已不相互接觸（大致須礫石粒少於70%至75%）則紅土礫石層之強度及壓縮性，由細粒紅土決定。因此，若紅土礫石層之級配，已經使礫石粒不相互接觸，則在下列情況之一，其邊坡必易於崩坍，甚至造成泥石流之災：

- (1)紅土凝聚力不大者。
- (2)紅土易於膨脹者。
- (3)紅土浸水軟化者。

任何其他具有上述複合土特性之土壤或地層，皆有相類似之特性。大致上，集塊岩、斷層屑、人工拋棄之土石堆、等等，都可算是複合土。

四、地質構造

在Voight & Pariseau(1978)所指出的那些大崩山，逐一檢討其影響因素，地質構造皆為最重要因素，次要因義為：風化、地震、滑動之前科、飽和、豪雨、溫度變化、及採礦。在這些大崩山之中，Frank 岩石滑動頗值得介紹。此一滑動，最初判斷為一種單斜(Monocline)構造，傾斜向西，滑動則沿向東傾斜之節理發生(圖4.1)；其後，由於

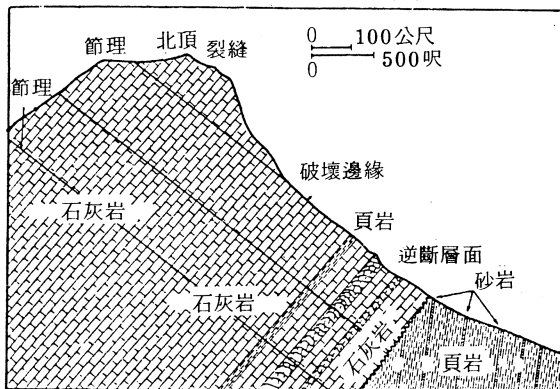


圖4.1 加拿大 FRANK 岩石滑動最早所作之錯誤判斷 (DALY et al, 1912, 31 用自 CRUDEN & KRAHN, 1978)

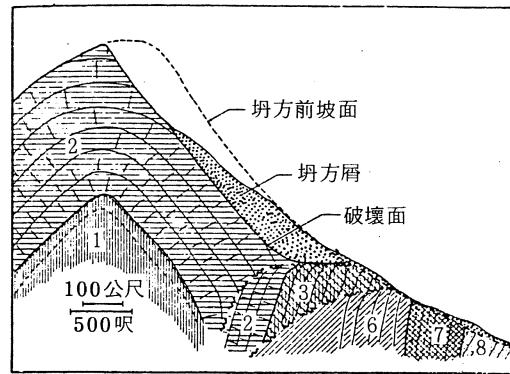


圖4.2 加拿大 FRANK 岩石滑動之正確判斷 (CRUDEN & KRAHN, 1978)

許多學者的研究，發現滑動係沿背斜(Anticline)構造東翼的層面滑脫，且滑動坡趾正好有一逆斷層，較為軟弱，接續上方之層面，共同構成一滑動面(圖4.2)。正交於層面之節理也使滑動更易於發生。層面含擦痕，顯示此一背斜構造形成之時，曾發生層間滑動(Flexural-Slip)，其剪力強度遠低於未擾動層面或節理面之剪力強度。台灣許多大型背斜之層面，亦曾發生層間滑動，致層面之處夾有軟泥或碎屑，參考作者另文(洪如江，民國73年)之照片。

Richard et al (1978) 選出弱面傾角 θ 、弱面凝聚力 c 、弱面摩擦角 ϕ 、水壓 P_w 、及密度等五項因素，比較其對三種坡高 ($H=10m$ 、 $100m$ 、 $1000m$) 的順向坡(Dip Slope)之重要性次序，示如表4.1及圖4.3

表4.1 順向坡岩坡影響因素的重要性次序

(Richards et al, 1978)

坡 高	重 要 性 次 序				
	1	2	3	4	5
10m	θ	c	γ	ϕ	P_w
100m	θ	ϕ	c	P_w	γ
1000m	θ	ϕ	P_w	c	γ

順向坡(Dip Slope)，指地層(或滑動弱面)的傾斜方向與坡面傾斜方向一致者。Wahlstrom(1974)曾舉出一些水庫兩岸岩坡滑落可能之例的示意圖(圖4.4)，大部份為順向坡滑動，少部為材料脆弱之影響大於或等於弱面之影響。

台灣地區之坍方，順向坡滑動之例甚多，規模大者如草嶺大崩山(洪如江，民國69年)，規模中

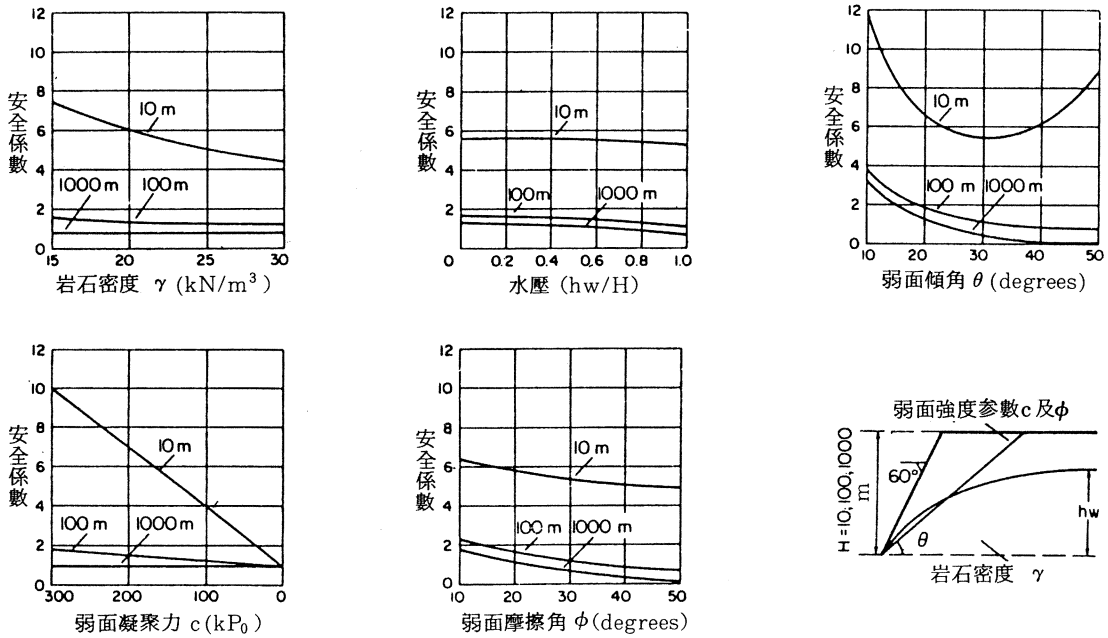
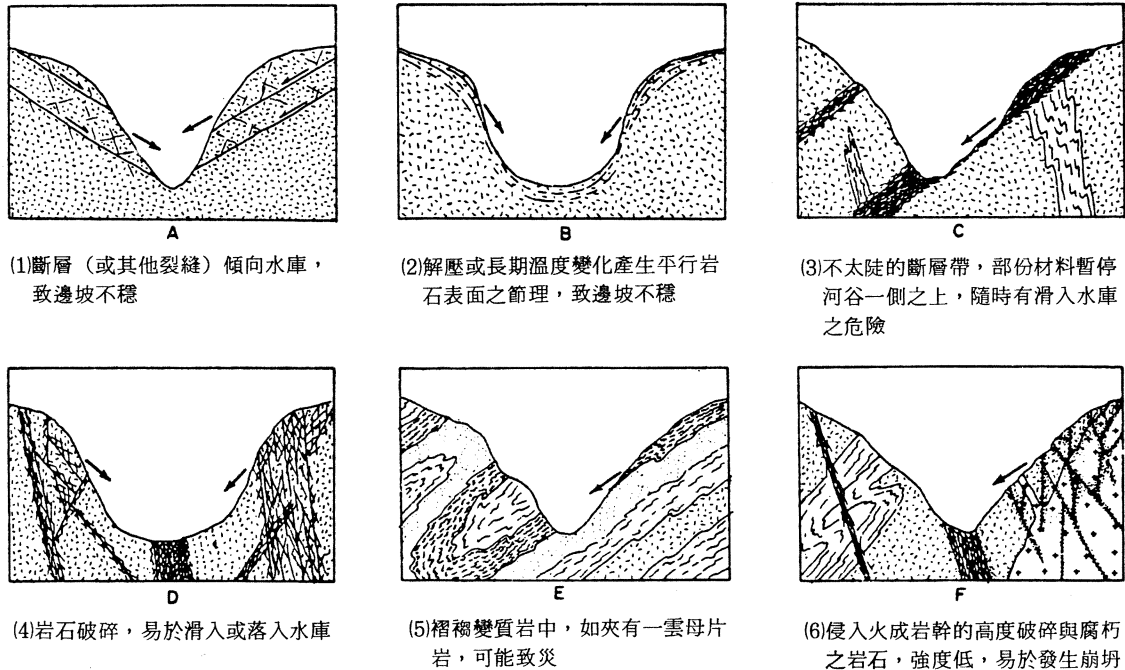


圖4.3 順向坡岩坡穩定計算中之敏感度分析 (RICHARDS et al. 1978)



(1) 斷層 (或其他裂縫) 傾向水庫, 致邊坡不穩

(2) 解壓或長期溫度變化產生平行岩石表面之節理, 致邊坡不穩

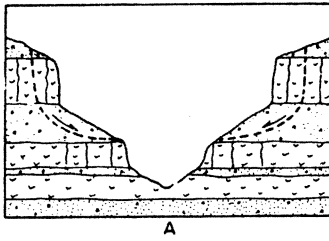
(3) 不太陡的斷層帶, 部份材料暫停河谷一側之上, 隨時有滑入水庫之危險

(4) 岩石破碎, 易於滑入或落入水庫

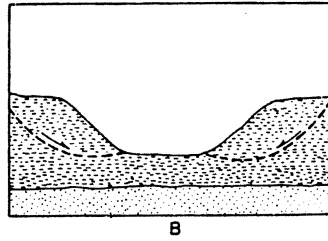
(5) 褶皺變質岩中, 如夾有一雲母片岩, 可能致災

(6) 侵入火成岩幹的高度破碎與腐朽之岩石, 強度低, 易於發生崩塌

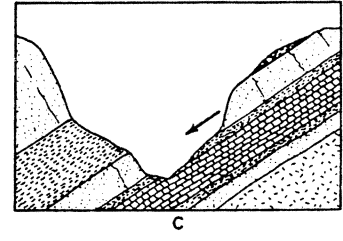
圖4.4 岩坡滑落示意圖 (WAHLSTROM, 1974; 洪如江譯)



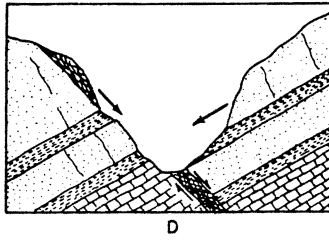
(7) 岩漿冷凝之火成岩與火山灰互層，火成岩之垂直節理為一明顯弱面，火山灰之強度亦低



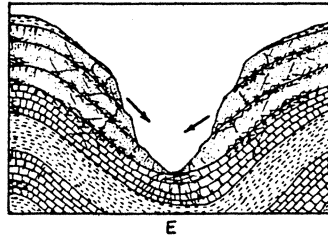
(8) 水平頁岩層，尤其已風化者，可能破壞如上圖所示



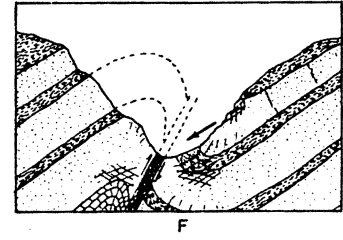
(9) 單斜河谷，岩層走向平行水庫，若砂岩（通常有節理且材質透水性高）下有頁岩或泥岩，則砂岩不穩定



(10) 斷層通過之傾斜沉積岩，易於崩滑



(11) 層間滑脫，脆性岩石之例



(12) 褶皺與斷層使山坡易崩

圖 4.4 岩坡滑動示意圖 (WAHLSTROM, 1974; 洪如江譯)

等者如高速公路八堵坍方，沱止坍方（洪如江，民國70年）、半屏山坍方。

在單斜構造，一邊易於發生順向坡滑動，另一邊稱為倒插坡（Escarment Slope，有譯為逆向坡者）。倒插坡通常易於產生崖錐堆積（Talus Deposit）或崩積土（Colluvium），如圖4.5所示。

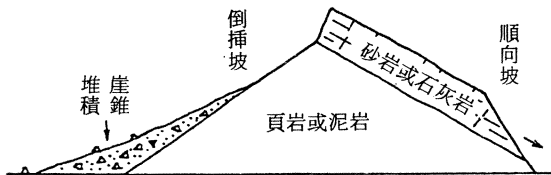


圖 4.5 單斜構造中常見之順向坡滑動及倒插坡崖錐堆積

順向坡，當傾角（Dip Angle）介於 40° 至 70° 之間，最易發生，圖4.6示Hoek & Bray (1974)所示之例。但沱止坍方（洪如江，民國70年），傾角不過二十多度，照樣發生順向坡滑動，是另一因素強力介入，即：豪雨使砂岩垂直節理積水並使滑動面上頂水壓升高。

根據以上討論可知，地質構造，若非邊坡穩定的最重要因素，必定是最重要因素之一。而在各種

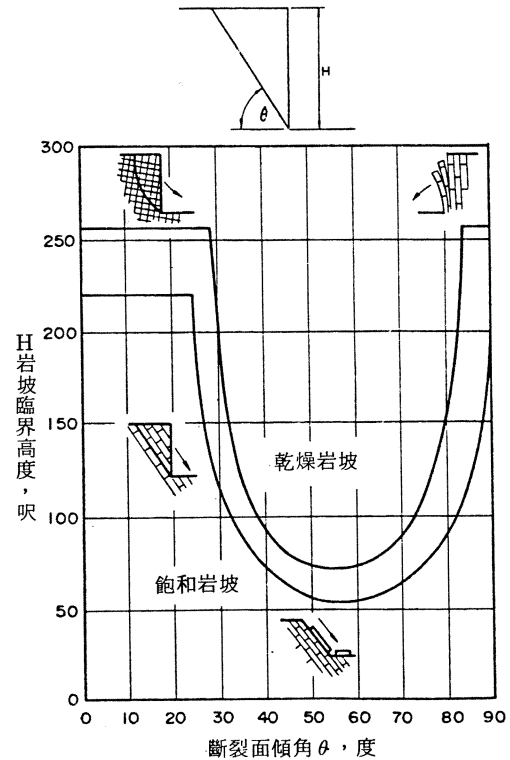


圖 4.6 岩坡臨界高度斷裂面影響之情形 (HOEK and BRAY, 1974)

地質構造之中，弱面之方位（走向、傾角）與坡面之關係（順向坡、倒插坡、及斜交坡）、以及弱面之其他性質，極為重要。

岩坡穩定與弱面之關係，可用立體投影分析之，由於需佔相當篇幅，難於包含在本文之內。

五、環境因素

環境因素，包括：大地應力、區域性斷層與地震、河谷解壓、地下水壓、崩積土與殘留表土對地下水壓之影響、暴雨與颱風、以及風化與侵蝕等。筆者（洪如江，民國70年）已有另文加以討論，不在此重複。但應在此促請注意者，雖然Richards et al(1978)並未把水壓列為首要因素，但是被列為首要因素之弱面傾角 θ （可歸入地質構造項內）已經天生注定，非人力所能改變，也不是自然力在人類時段內易於改變的，最多僅能以地工技術（Geotechnical Processes）予以補強。而地下水壓 P_w 則可以在極短的時段（例如一天，甚至數小時）內，因自然力（例如豪雨）或人力，予以改變。此外，水對凝聚力 c 、摩擦角 ϕ 、及單位重，也有不利影響，因此，地下水壓反而更常成為坍方的決定性因素，為邊坡穩定的第一號大殺手。

六、地形與地貌

地形常是地質的表徵，對於地形的瞭解，有助於對地質及邊坡穩定之瞭解。不過，目前看到的地形的年紀常遠小於其下的地質年代，因為某地的地質（尤其指地質構造）形成之後，地表再受到河川、氣候、甚至地震之作用，會有不少變化，終成今日之地形與地勢。

地形學本身就是一門很大的學問，自然不可能詳加討論。此處僅作必需的簡略說明。

在傳統的地形劃分上，把沖積地形分成幼年期（Youth Topography）、成年期（Maturity Topography）、及老年期（Old Age Topography），而坍方最易發生於幼年期地形、及幼年至成年的過渡時期地形。幼年河川下切及向源切蝕力大，易使河岸趾部消失而引起山崩。

Rib & Liang(1978)曾列表說明地形地貌與坍方潛勢之關係，請參閱表6.1

表6.1 坍方敏感之地貌(Rib & Liang, 1978)

地形	地貌或地質	坍方※ 潛勢
I 平坦地勢		
	A 非隆起者	洪水平原 3
	B 隆起者	
	1. 均勻地貌	台地、湖床 2
	2. 表面凹凸不平，急變懸崖	玄武岩高原 1
	3. 互層—易透水層下接不透水層	湖床、海濱平台、沉積階地 1
	II 山岳地勢	
	A 地表水系不規則	
	1. 不相通水系	石灰岩地區 3
	2. 紊亂水系，相疊山丘，且有湖沼（限冰川地區）	冰川堆積 2
	B 地表水系規則	
	1. 平行山脊	
	a 平行水系、暗調	玄武岩山丘 1
	b 格狀水系、峯谷交替地形、帶狀山丘	傾斜沉積岩 1
	c 羽狀水系，溝岸直立	黃土 2
	2. 分叉山系，山頂等高	
	a 羽狀水系，溝岸直立	2
	b 樹枝狀水系	
	(1) 坡面呈帶狀	水平沉積岩層 2
	(2) 坡面無帶狀	
	a. 中度至高度切割山脊，均勻斜坡	泥頁岩 1
	b. 矮山脊，海岸特徵	切割海岸平原 1
	c. 蜿蜒山脊連接錐狀山丘，植被稀少	蛇紋岩 1
	3. 散漫山脊或山丘	
	a 樹枝狀水系	
	(1) 矮圓丘，蜿蜒溪流	泥頁岩 1
	(2) 蜿蜒山脊連接錐狀山丘，植物稀少	蛇紋岩 1
	(3) 厚層、均勻、圓至A形山丘	花崗岩 2

(4)顛簸地形 (冰川地區)	冰川堆積土	2
III 平坦至山岳之過渡地勢		
A 陡坡	崖錐、崩積土	1
B 中等至緩坡	冲積扇, 三角洲	3
C 崖頭下之斜坡作波浪起伏狀者	老崩坍地	1

※1=崩方潛勢大; 2=坍方潛勢視情況而定;

3=坍方潛勢低, 於特殊不利地點或可能發生坍方

台灣島上, 紅土台地屬 I B1 之地形, 地表大致平坦, 坍方潛勢為 2, 大致合理, 但台地邊緣之坡面突轉陡, 坍方潛勢應為 1; 西南部泥岩地區, 應屬 II B2b(2)(a) 地形及 II b3a(1) 之地形, 坍方潛勢為 1; 順向坡滑動屬於 II B1b, 坍方潛勢為 1; 各崩坍地、崩積土地區及崖錐堆積屬 III A, 坍方潛勢為 1。

七、工程及其他人爲因素

7.1 開挖作業

開挖次序不當者, 易於製造坍方。邊坡開挖次序, 應由上而下, 如圖 7.1 所示, 而且, 最好挖一段擋一段, 上段擋土工、護坡或排防水措施完成之後, 再挖下一段。近年來成功之例為: 台北淡水公路拓寬工程之關渡岩錨幕牆工程 (趙基盛、周功台, 民國 72 年)。

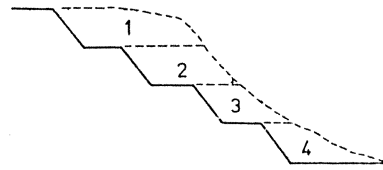


圖 7.1 合理之開挖次序: 由上而下 (洪如江, 民國 68 年)

7.2 開挖方法

開挖方法不當, 例如使用炸藥過量或引爆型式不佳者, 皆留下不穩定殘坡。近年來最佳之岩坡開挖, 應推翡翠水庫之填址之開挖, 曾應用預裂法 (Presplitting) 開挖, 示如圖 7.2。

7.3 伐林及濫墾

伐林之後, 山崩面積迅速加大, 山崩次數亦大量增加, 許茂雄 (民國 68 年) 曾作理論分析並舉實例證明之, 見圖 7.3。至於濫墾, 則為伐木加除草加鬆土種植, 情形更嚴重。

7.4 水庫蓄水

美國大苦力堤水庫蓄水當年 (1941) 坍方 160 次, 第 2 年坍方 80 次, 至 1953 年共坍方 500 次 (Jones et al, 1961), 示於圖 7.4。由圖可見, 水庫水位若少變化, 則每年坍方 10 至 15 次, 如有較大洩降, 坍方次數大增, 但皆少於蓄水期者。



圖 7.2 優秀之岩坡開炸開挖 (洪如江攝)

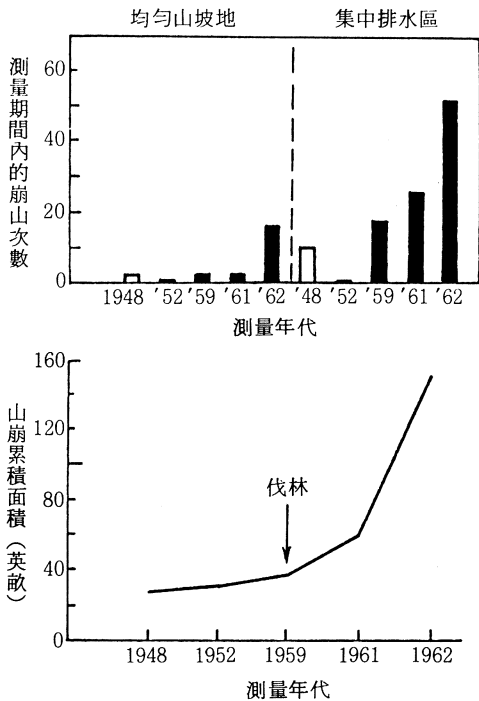


圖7.3 阿拉斯加某山區伐林後山崩增加之情形 (許茂雄, 民國68年)

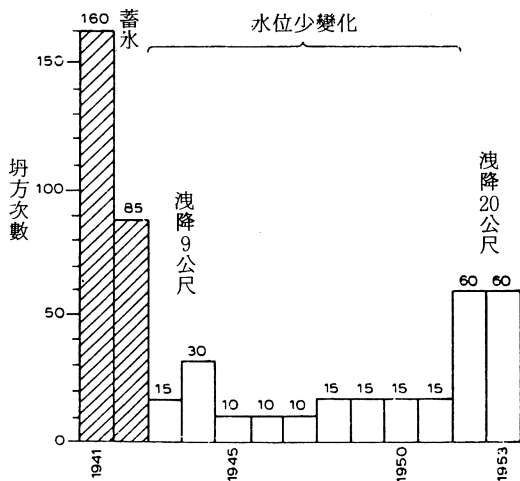


圖7.4 水庫蓄水與坍方關係 (JONES et al. 1961)

參考文獻

洪如江 (民國 66 年) 「以X-光繞射法研究顆粒方位與地質壓密」, 國立臺灣大學工程學刊 22 期, 17-28 頁。
 洪如江等 (民國 67 年) 「複合土工程性質初步研究」, 國立臺灣大學工程學刊 23 期, 1-12 頁。
 洪如江 (民國68年) 「土工技術在臺灣山崩中之應用」, 中國土木水利工程學會 68 年邊坡穩定與坍方研討會論文專集, 147-172 頁。

洪如江 (民國69年) 「草嶺大崩山之探討」, 工程環境會刊第一期, 29-39 頁。
 洪如江、林美聆、劉梅玲、李宗德、詹崑祥、謝百鍾 (民國 71 年) 「草嶺崩塌地工程地質之調查: 岩石力學試驗報告」, 行政院農業發展委員會 71 農建-1.3-源-12(3)。
 洪如江 (民國 70 年) 「環境因素在山崩中之作用」, 工程環境會刊第二期, 63-72 頁。
 洪如江 (民國 72 年) 「工程地質中之材料因素」, 土工技術雜誌第 3 期, 109-116 頁。
 洪如江 (民國 73 年) 「地質作用的動力與岩石之褶皺」 土工技術雜誌第 5 期, 60-70 頁。
 許茂雄 (民國 68 年) 「山坡開發地於砍伐樹林後之山崩預測模式」, 土木水利季刊, 五卷四期, 5-24 頁。
 趙基盛、周功台 (民國 72 年) 「山坡地開發擋土工法 (巴西工法) 之設計及其實際應用」, 土工技術雜誌第 1 期, 33-41 頁。
 CRUDEN, D. M. and KRAHN, J. (1978) "Frank Rockslides, Alberta, Canada." A Contribution to *Rockslides and Avalanches, 1 Natural Phenomena*, ed. VOIGHT
 HOEK, E. and BRAY, J. (1974) *Rock Slope Engineering*, IMM, London
 HSU, Kenneth J. (1975) "Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls." *Geological Society of America Bulletin*, 86: 129-140, Jan. 1975
 JONES, F. O. et al (1961) "Landslides along the Columbia River Valley, Northeastern Washington." *U. S. Geol. Surv., Prof. Paper*, 367, 73 pp.
 RIB, H. T. and LIANG, Ta (1978) "Recognition and Identification." in *Landslides Analysis and Control*, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
 RICHARDS, L. R. et al (1978) "Appraisal of Stability Conditions in Rock Slopes." A Contribution to *Foundation Engineering in Difficult Ground*, ed. BELL. Newnes-Butterworths, London pp. 449-492.
 VOIGHT, B. & PARISEAU, W. G. (1978) "Rockslides, and Avlanches: An Introduction." A contribution to *Rockslides and Avalanches, 1 Natural Phenomena*, ed. VOIGHT, pp. 1-67
 WAHLSTROM, E. E. (1974) *Dams, Dam Foundations, and Reservoir Sites*, Elsevier, Amsterdam