

技術講座專欄

玖 工程地質在水庫工程之應用 (The Applications of Engineering Geology in Reservoir Engineering)

洪如江*

一、水庫工程的重要工程地質因素

水庫工程的影響因素很多，在非工程地質的技術因素之中，最重要是水文與地形。而技術因素之外，水庫工程常牽涉到政治、經濟、財務、景觀、與集水區開發等問題。

在工程地質方面，最重要的一些因素是：

- 水密性
- 坍方
- 活動斷層與地震
- 壩址位置與壩高
- 施工材料
- 工程地質調查程序與精度
- 淤積與濫墾

建設水庫，自然是為了蓄水，因此，不希望水庫中的水漏走；至於由相鄰流域漏進水庫之水，則多多益善。埃及阿斯萬水庫在改建高壩之後，蓄水經由砂岩河岸大量漏失，最為著名。石灰石地層建設水庫因地下洞穴漏水而致遲疑不前，或完工之後無法滿潭之例，亦非少見。

水庫區內，如有坍方，則減少水庫容量，甚至造成災害。

水庫區內，如有活動斷層，則在地震時，對水庫，尤其是人為結構（例如大壩、溢洪道、電廠、輸水工等等）及邊坡，可能造成損害。而水庫蓄水，是否觸發地震，也是前一、二十年前受到關心的問題。

壩址位置，影響水庫容量、安全、成本、施工方法與工期，因此也是重要因素之一。

水庫工程，必需大量施工材料，其產地、產狀、品質、產量、開挖方法、運距、以及是否需要加工等問題，都影響到整個水庫工程的成本與工期。

淤積是水庫壽命的決定性因素，而淤積與水庫集水區的地質關係極大。至於集水區水土保持不良加速淤積，更使問題嚴重。

水庫工程，規模龐大，關係下游居民生命財產至鉅，因此其工程地質調查，必須配合工程作業程序（探勘、環境評估、可行性分析、規劃、基本設計、發包、細部設計及施工、至營運及維護）達到合理之精度。工程地質調查不足（例如意大利之Vajont水庫、法國之Malpasset水庫），未能考慮某一重要因素，極可能遭遇失敗。因此，水庫工程之地質調查，必須特別慎重，不可忽略作業程序中的任何階段。

以下各節，將對上述各項因素，一一加以檢討。

二、水庫的水密性

2.1 影響水庫水密性的重要因素

要水庫滴水不外漏是不可能的，所能辦到的理想是：漏入大於漏出或漏出微少而可忽略不計者。但是究竟漏出多少，應根據可靠資料，例如水庫兩側及壩址地水下壓力水面狀況（

*臺灣大學土木工程學系教授

Piezometric Condition)及透水性，計算漏水(入及出)量。

水庫區內有無石灰石、地下洞穴、脆裂岩石(砂岩、石英岩等)、斷層或破碎帶、褶皺軸、向下游傾斜之弱面、以及礦坑等等，都與水密性有關。

2.2 水庫水密性受地下水條件之影響

圖9.1示水庫一側地下水位對水密性的影響。圖9.1a，建水庫前山側之地下水位原本就很高，建水庫之後，最高地下水位仍然高於水庫水面，則建水庫之後，即使有漏水，也是不多，可謂漏水問題不大。圖9.1b，建水庫之後，山側最高地下水位僅略高於水庫水面，略有漏水問題。圖9.1c，建水庫之前，山側最高地下水位低於建水庫之後的水庫水面，水庫之水將漏出，其量因透水性之高低而定。圖9.1d，建水庫之前，山側最高地下水位甚低，甚至有低於河床者，則建水庫之後，漏水問題可能甚為嚴重。

但若相鄰流域河床高於水庫河床，則水庫之水不至漏向相鄰流域，但仍須檢討漏水短路，例如水庫之水先入山側再平行河谷漏至下游的可能性。

至於壩址附近之漏水問題，將於另章討論

。但上述原則，也未嘗不可轉用於壩址漏水之檢討。

漏水與否，不可僅憑直覺即下結論，至少應繪出流網(Flow Net)，算出漏水量。

2.3 水庫水密性受地層透水性之影響

水庫漏水量，如地下水條件及地層透水性資料完全，則可以加以計算，方法很多，精度不等。但鑑於地層透水性之數值，難於準確，因此，在初步計算，可採用流網分析之。地層透水性測定不易，結果亦難準確，但並非完全不可靠，合理範圍還是可以求到的。Knill(1970)研究英國牛綠水庫石灰石地層之透水性(圖9.2)，發現該地層在淺處，相當易於透水；在較深之處，透水係數已低至 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec，該一水庫原因透水問題遭受反對，後因透水性調查完善，終得建設完成。

埃及阿斯萬水庫，曾因砂岩透水性高，漏水不少，備受環境學家攻擊。砂岩漏水有兩種可能：砂岩在地表或地表下淺處，受三軸應力系統之作用，發生脆裂，產生二組規則節理(Joint)，極易漏水；砂岩膠結不佳，孔隙大而多，其材質即易透水。

石灰岩層，不但有脆裂之情形，更因易受水之溶解，形成洞穴，通常被認為不宜建水庫

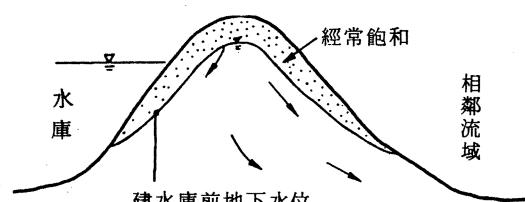


圖9.1a

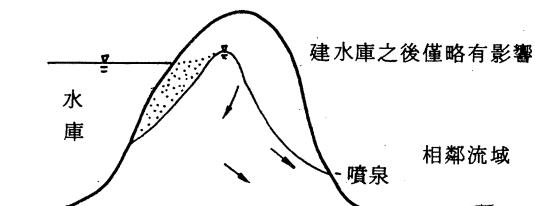


圖9.1b

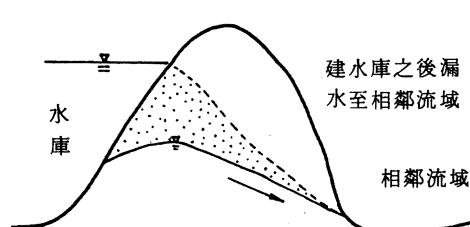


圖9.1c

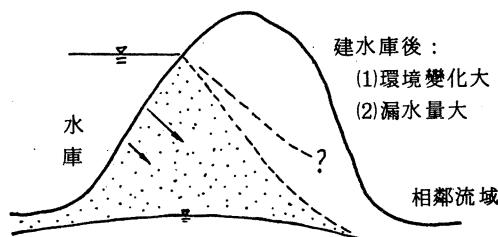
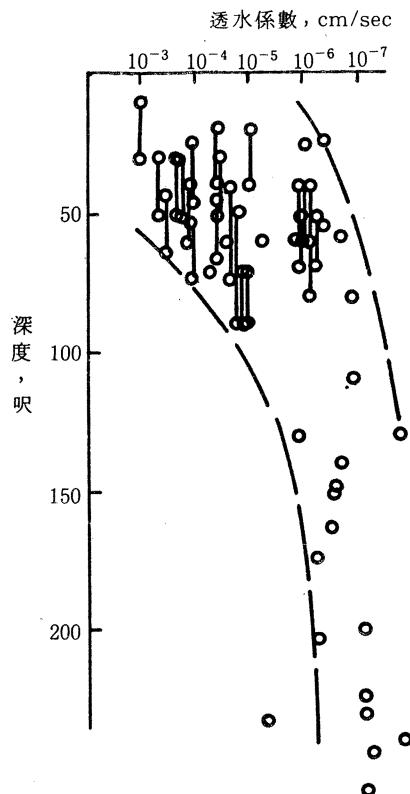


圖9.1d

圖9.1 水庫水密性受山側地下水條件影響情形 (根據 Kill 講義編繪)



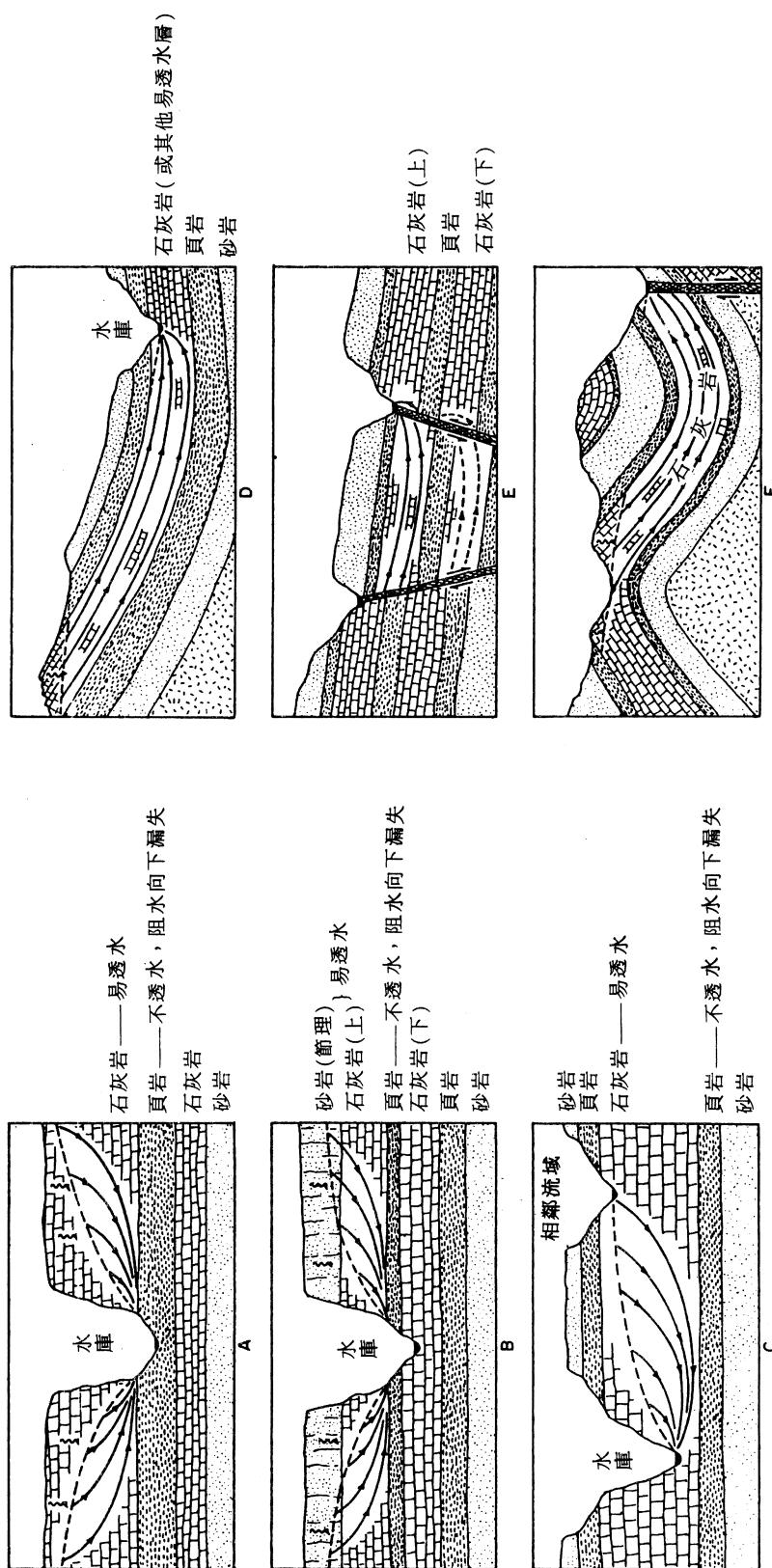


圖 9.3 水庫水密性受地質影響 (Wahlstrom, 1974)

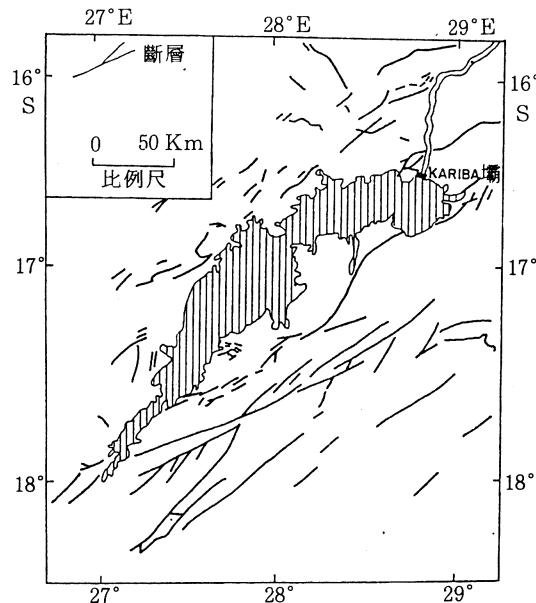


圖9.4 Kariba 水庫及附近之斷層群

至於一般死斷層或呆斷層，為地表重大弱點，雖可以工程技術方法處理，但因其強度低、變形性大、透水性之變異性大，也不受土木水利工程師之歡迎，須詳加調查研究。

4.2 水庫蓄水對水庫下斷層之影響

水庫之下，如有斷層，蓄水之後，必有下列影響：

- (1)使斷層應力增高。
- (2)增高斷層之滲流水壓。
- (3)增高斷層泥之超額孔隙水壓力 u ，如有排水途徑， u 將隨時間而消散。

(1)項可能使斷層剪應力增高，(2)、(3)項使斷層剪力強度降低，凡此，皆使斷層之“抗滑動安全係數”降低，若斷層“抗滑動安全係數僅略高於1.0，則(1)、(2)、(3)之作用可能使安全係數等於1.0或低於1.0，斷層隨之發生滑動。

斷層之滑動，若屬於塑性變形，則可能不釋放能量而不發生地震(圖9.5a)；若屬於滯動變形(Stick-Slip)，則可能釋放能量而發生地震(圖9.5b)。二十年前，不少人在怕水庫蓄引發地震，但是若無活性斷層，或斷層之“抗滑動安全係數”遠高於1.0，則斷層不活動，即無地震。若有活性斷層，或斷層之“抗滑動安全係數”僅略高於1.0，則蓄水有可能使斷層提早滑

動，其屬於滯動變形者，可能發生地震，且可能提早發生多次小地震而消弭一次大地震。果如是，若水庫蓄水能觸發地震，則不但不是一件壞事，反而是一件受歡迎之事。事實如何呢？

事實上，全世界水庫有詳細記錄者，約一萬一千多個，在這之中，水庫蓄水觸發地震有確實證據者，不到二十個，其分佈如下：

	水庫蓄水觸 發地震之有 確實證據者	水庫總數量	比 值
小水庫	6個	10,760 個	0.06 %
大水庫	4個	214 個	1.9 %
極大水庫	6個	26 個	23%

上表，所謂小水庫，蓄水容量在十億立方公尺以下；大水庫，蓄水容量在十至百億立方公尺；極大水庫，蓄水容量高於百億立方公尺。世界上幾個有名的大水庫，次序如下：

	壩高 m	蓄水容積 $10^8 m^3$	蓄水面積 km^2
KARIBA	125	1,750	6,572
HOOVER	176	350	—
KEBAN	63	310	672
NUREK	317	110	74
新灘江	105	105	—

我國台灣地區之水庫，蓄水容量皆達在十億立方公尺之下，比起非洲 Kariba A水庫之一千七百五十億立方公尺，只能算是很小的水庫。常聽有人在反對造大水庫，其實台灣地區河川短促，颱風或豪雨來襲之時，流量可比大陸上大江大河的常流量；平常則水量有限。最大的曾文水庫，今(民國74)年冬天，蓄水量只剩一億多立方公尺。何來大水庫？

又水庫蓄水如能提前觸發地震，則小水庫，除日本 Kurobe 水庫(當地原為地震活動區)之外，從未觸發地震規模M大於四之地震，而由水庫提早觸發之較大規則地震($M > 4$ 者)，只能由極大水庫或大水庫造成，示如圖9.6。

筆者茲以荷重影響圈之觀念解釋大小水庫蓄水荷重之影響，示於圖9.7。小水庫蓄水荷重影響極微；大水庫蓄水荷重之影響深且大。

五、壩址位置與壩高對水庫的影響

壩址本身之工程地質，另章討論。本章在說明壩址位置對水庫工程之影響。

一個在河川主槽的水庫，必需有一座攔水的壩（注意！天下沒有水壩這種東西，土做的壩叫土壩，混凝土做的壩叫混凝土壩，水不能做壩）。有時，一個河谷有幾個可能的壩址待

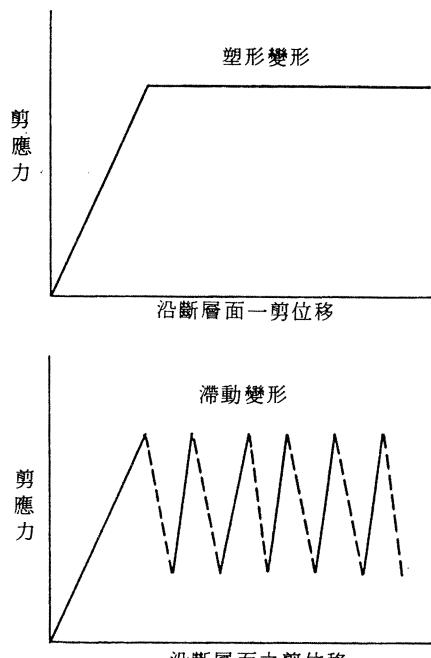


圖9.5 活斷層滑動二式(a)塑性變形(b)滯性變性

選，通常，愈在下游則水庫容量愈大而且愈能收納較多支流之水，但地形及地質未必較佳；上游河谷常常比較狹窄，河岸岩壁高聳堅強。在河谷直段建壩，較不適合建造土石壩，因為土石壩不得建溢流式之溢洪道，亦不宜建排洪隧道穿越壩體，故建混凝土壩。河谷彎道之處，適合建土石壩(也可能可建混凝土壩)而在凸岸建分離式溢洪道。但凸岸常因高度有限而且較為薄弱，壩高受限制，影響水庫容量。

若河川流量不是問題，則壩高每增一公尺，水庫容量增加很大。適建高壩之址，若建了矮壩，損失的容量是沒有辦法可以補救的。

六、施工材料

6.1 材料產地之調查

可利用航照、地質圖、野外地質調查，尋找可能之施工材料，如混凝土所需之砂礫，土石壩所需之壩殼堆石及沙土及壩心之黏土以及濾料。河階地常可找到礫石料；台地，尤是紅土台地，常可找到合用之築壩土石。

6.2 材料產量之調查

可利用地質圖、地球物理探勘、野外地質詳查、以及鑽探結果，估算產量。

6.3 材料品質之調查

可利用野外地質調查、地球物理探勘、鑽探、及試驗，調查材料之風化程度、風化腐朽原因、耐久性、強度、壓縮性、……等性質。

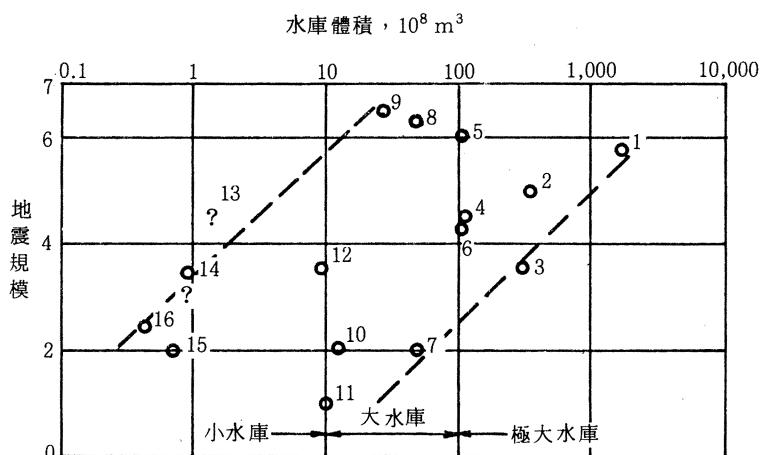
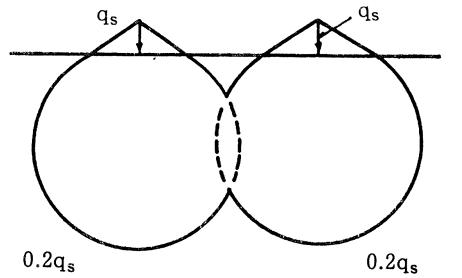
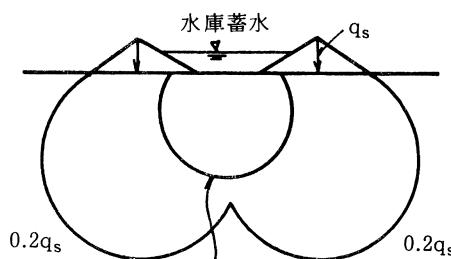


圖9.6 水庫蓄水觸發地震有確實證據者其地震規模與水庫體積之關係



(a) 狹河谷二側山峯荷重影響範圍在河床下淺處已經交會



(b) 小水庫蓄水荷重影響尚未超出二側山峯荷重之影響範圍

圖9.7a 示小水庫蓄水荷重影響極微

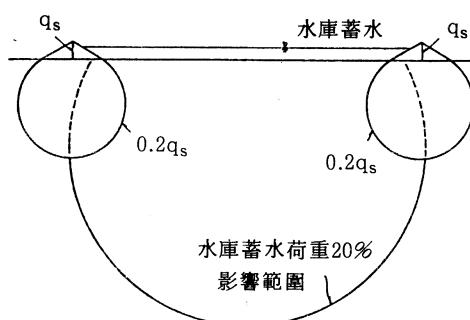


圖9.7b 示大水庫蓄水荷重影響且大

6.4 材料之開挖方法與工具

開挖方法與使用機具與地層之地質構造，尤其是弱面之發達與否、材料之強度及硬度皆有重大關係。凡此，皆可由地質調查及試驗獲得瞭解，進一步規劃開挖方法與工具。

6.5 材料加工問題

開採所得之施工材料，如需加工，例如碎、洗、混合、或曬乾，則費用可能甚為可觀。土石壩材料常希望天然級配正好可直接使用填築。石材則希望開炸後，即為所需之尺寸。

6.6 材料使用後之定性

材料在新環境下是否風化腐朽或分解。許多頁岩、泥岩、或粉質岩，填築作為堤或壩之後，浸水之後，自行破碎，長久之後漸變為黏土，強度大降，壓縮性增加，至堤壩沉陷甚至發裂或滑動。使用之前，宜求知其礦物組成，並行風化實驗。

6.7 材料之運距與搬運方法

運距關係成本，甚至對採用與否有決定性。若需開闢搬運道路，不但費用是問題，坍方也是重要因素。

七、工程地質調查程序與精度

如前所述，水庫工程之安全與否，每受社會大眾關懷；作業是否合理與調查之是否精確，影響工期及造價。因此，水庫工程非有合理之工程作業程序不可，每一作業階段，皆需相當精度之工程地質調查加以配合。鑽探太淺，會引起兩種錯失：

- (1) 某些在過去已滑動過之潛在滑動面，由於鑽探深度不足而未發現者，至少有Vajont水庫慘案。
- (2) 某些深層滲流水，漏至壩址下游頗遠之處，未曾發現。

八、淤積與濫墾

水庫之壽命，決定於淤積速率。而淤積速率決定於集水區地形、地質、被覆、雨量、人文活動、……等情況。

筆者另文（本專欄之柒：工程地質在自然邊坡穩定之應用，民國73年7月）曾指出：砍伐森林之後，山崩急速增加。山崩難免使坍碴流入水庫，加速淤積。

砍伐森林，降低森林含蓄水分之能力，造成逕流增強對集水區之水土保持已經極為不利。但伐林未必除草，遠比濫墾之害為輕。

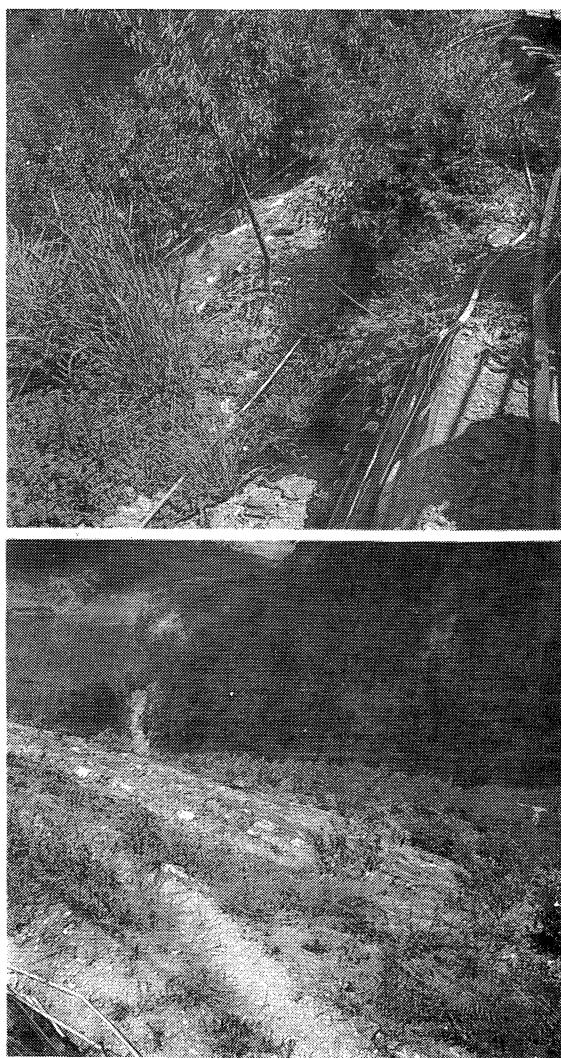


圖9.8 德基水庫集水區邊坡果園地土壤裸露之情形

濫墾，為種植密集果樹，不只除去林木，為果樹爭取光合作用所需之陽照，爭取根部吸收土中水分之地盤；而且鏟除草皮，為免雜草分用所施肥料；翻動土壤，為爭取果樹根脈之舒展。當果樹逐漸老化，果田逐漸流失坍滑之時，即另行施展魔掌於其他處女林地，置原墾果地於不顧，濫墾災害更形擴大。圖9.8為德基水庫集水區邊坡果園地土壤裸露之一景，攝於濫墾惡行最盛之民國67年。其後，由於政府採取各種措施，並於民國69年及72年，分別收回濫墾地，總數約達一百公頃，並從事造林。

參 考 文 獻

洪如江(民國72年及73年)地工技術雜誌技術講座專欄壹至捌。

- GUPTA, H.K. & RASTOGI, B.K. (1976) *Dams and Earthquakes*, Elsevier.
- KNILL, J.L. (1975-1976) *Lecture Notes, Applied Engineering Geology*, Department of Geology, Imperial College, London.
- KNILL, J. L. (1970) "Environmental, Economic and Engineering Factors in the Selection of Reservoir Sites, with Particular Reference to Northern England." *Symposium, Report on Planning in Northern England*. Ed. P. T. WARREN, Yorkshire Geological Society, pp. 124-141.

- WAHLSTROM, E.E. (1974) *Dams, Dam Foundations, and Reservoir Sites*, Elsevier, Amsterdam.