

急洩降作用下水庫邊坡之暫態滲流行為

蘇苗彬⁽¹⁾ 郭鴻基⁽²⁾

摘 要

地下水是影響邊坡穩定的主要因素之一，尤其對抽蓄發電式的水庫，因營運操作，水庫水位每天循環升降，而引起邊坡地下水滲流面升降，造成水壓力變化，將是誘發邊坡崩坍的主要因素。本研究旨在探討水庫沖積層邊坡在急速洩降時，邊坡暫態滲流情形，並藉由坡面淺層排水的方法，來降低地下水位，改變滲流方向，達到穩定邊坡的可行性。

本研究現場實地之對象，每日水庫水位最大高差可達 20.5 公尺。現場以具有較高崩坍潛能之沖積層邊坡為研究探討的對象。設置地下水位監測系統，並採取土樣，攜回實驗室，探討其力學及滲透特性。同時以微量抽水試驗(Slug Test) 求取現場邊坡的滲透係數。淺層排水所需的過濾排水材料級配，則以細溝試驗(Slot Test) 來驗證其適用性。並配合砂箱模型試驗來探討坡面鋪設淺層排水措施的效果，及不同的洩降速率下，觀察邊坡之暫態滲流。

(關鍵字：急洩降、水庫邊坡、滲流)

The Study on the Transient Seepage in the Reservoir Slopes during Rapid Drawdown

Miau-Bin Su

Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
National Chung-Hsing University

Hong-Gee Kow

Engineer, Resource Protection Center, Tai-Power Company

⁽¹⁾ 中興大學土木系副教授

⁽²⁾ 台灣電力公司電源保護中心工程師

ABSTRACT

In the pumped storage reservoir, cyclic rising and falling of the water level every day will bring about slope failures as the result of seepage. The purposes of this study is to measure the transient flow in the alluvium slopes of the reservoir during rapid drawdown.

The experimental site is in Minghu lower reservoir located at shuilivil lage in Nantou county in which the maximum differences in the water level could be as high as 20.5m per day. A monitoring well system is set up in an alluvium slope. Soil specimen is took back to the laboratory to test its mechanical properties and permeability. Field coefficient of permeability of the test site is gained from slug test. The gradations of filter proposed for the surface drainage is tested by slot test. Through the sand box model test the effect of the surface drainage paved on the slopes and the behavior of transient flow under the different rate of drawdown are studied.

From this study, the soil structure plays a major influence on its permeability, consequently, it is more suitable to gain the coefficient of permeability on the spot. The differences of the soil permeability are more than one order and their influence on the slopes stability are greater than the rate of drawdown.

(Keywords : rapid drawdown, Reservoir slope, seepage)

壹、研究目的

水庫營運良窳，影響水資源品質及水庫的使用年限，對於是項工作除了全面做好集水區的水土保持工作，水庫邊坡穩定與否，也是主要因素之一。水庫邊坡的穩定由於其所在位置與功能，與一般邊坡穩定之考慮有所不同，它可能由於水位的急速升降，波浪沖刷等作用，造成特殊的破壞機制，引起邊坡整體或部分的破壞，如

未加以保護，終究引起邊坡的持續不穩定；一則造成水土資源流失，一則增加水庫淤砂量，縮短水庫營運年限。由於臺灣適於建造水庫的地點已不易尋覓，此種損失未來將須付出相當的代價，本研究希望對誘發水庫邊坡崩坍的因子—急洩降，做進一步的探討與研究，以期有效的掌握其破壞機制，而有助於水庫邊坡破壞之預防及災害後之處理工作。

水庫邊坡的穩定與地下水位有密切的關係，尤其是抽蓄發電式的水庫，由於營運操作，水位最大高差每日可達數十公尺，造成邊坡地下水滲流，將是邊坡破壞的主要誘因。

本研究旨在探討水庫沖積層邊坡在急速洩降時，邊坡暫態滲流行為，並以砂箱模型試驗探討以坡面淺層排水的方法來降低地下水位、改變滲流方向，達到穩定邊坡的可行性。

貳、基本理論

一、洩降所引起的滲流問題

Cedergren(1948)以流線網(Flow Nets)來分析暫態滲流行為，可以很容易的估計自由水面移動情形。

Browzin (1961)，基於下述假設：瞬間完全洩降；基礎不透水的均勻土填；填下游面趾部有排水措施。建立一個描述自由水面的方程式，並將式中的係數製成圖表以便使用，理論計算值與平行板黏性流體模型試驗結果比較除了在初期階段外，有很好的相合關係。Desai(1971)以有限差分 ADEP 法分析水位上升或洩降所引起邊坡自由水面與滲出面的變化情形並與平行板模型試驗值比較。

Morgenstern(1963)假設邊坡是由單一均質的土壤構成，且邊坡的基礎是不透水層，而最初的水位使邊坡處

於完全浸沒的狀況(Full Submergence)，瞬時洩降孔隙壓力比 $B = 1$ (Pore-Pressure Ratio)，且孔隙水壓沒有消散的現象，而以洩降比(Drawdown Ratio), $C'/\gamma H$ ，摩擦角 ϕ ，坡度 β ，為參數發展出洩降穩定圖表(Drawdown Stability Charts)。設計者可依水位洩降的情形，土壤參數，邊坡幾何形狀，迅速的由圖表查出邊坡的安全係數。

Cedergren(1977)指出水降低邊坡穩定的主要原因為：(1)凝聚力的降低或消失。(2)有效應力的降低，減弱了剪力強度。(3)當產生微量初始移動時，水對破壞面有潤滑作用。(4)地震造成液化破壞。(5)滲流應力所增加的水平分力及傾倒力矩(Overturn Moment)。因此控制地下水及其滲流情形是改善土壤邊坡穩定最有效的方法之一，尤其在改變滲流方向後，使其垂直方向分量增加；非但沒有因滲流應力造成邊坡破壞的問題，反而增加邊坡的穩定力量。

Kenney 等人(1977)對均質、等向的材料在穩定滲流下，以不同的邊坡寬度，不透水基層位置，排水管長度，排水管間距等條件進行水箱模型試驗，探討水平向排水對穩定邊坡的效果。試驗結果顯示排水管長度愈長，間距愈小，安全係數可提高 40%；若

單位坡寬排水管密度一定時，以間距大，排水管長者效果較佳。

二、研究區現場

大觀發電二廠是臺灣地區第一座抽蓄式發電廠，白天引用上池—日月潭的水發電，深夜則利用剩餘電力，將下池的水抽回至上池。下池位於濁水溪水系中游支流—水里溪的上游段，其有效容量祇有七佰九十萬立方公尺，因此水庫每天的最高水位 EL.448.5 公尺與最低水位 EL.428 公尺有 20.5 公尺的高差，變化相當大。下池自大埧區溯至尾水處大約有 2 公里的距離，其兩岸的岩盤屬漸新世至中新世之外車埕岩系；外車埕岩系主要為淺灰色至白灰色，中粒層理明顯且相當堅硬的砂岩，其中大部分變質為石英砂岩，間夾有粉砂岩層及煤質頁

岩層等。

研判以沖積層邊坡具有較高的崩塌潛能，因此本研究以沖積層邊坡做為研究探討的對象。沖積層邊坡主要由長徑數公分的砂頁岩礫石及黃壤土所組成。試區地形圖如圖 1。

三、土壤特性試驗

為探討試區土壤之特性，除了在現場挖掘明坑做現地密度試驗及直徑 25.4mm 以上粒徑之篩分析，並攔回部分土壤在實驗室進行下列試驗，一般物理性質試驗，包括含水量、比重、液塑限與粒徑分佈曲線等試驗。有關直接剪力試驗及滲透試驗，由於所含顆粒最大粒徑太大，因此縮小現地最大粒徑、調整土壤級配，製成重模試體。土壤一般物理性質如表 1。

表 1 土壤一般物理性質試驗結果

試驗項目 土樣	含水量 W (%)	統體密度 γ_m (g/cm ³)	乾土單位重 γ_d (g/cm ³)	比重 G (#10 以下)
I 明坑	17.79	2.13	1.81	2.71
II 明坑	20.94	2.06	1.70	2.69
平均值	19.37	2.10	1.75	2.70

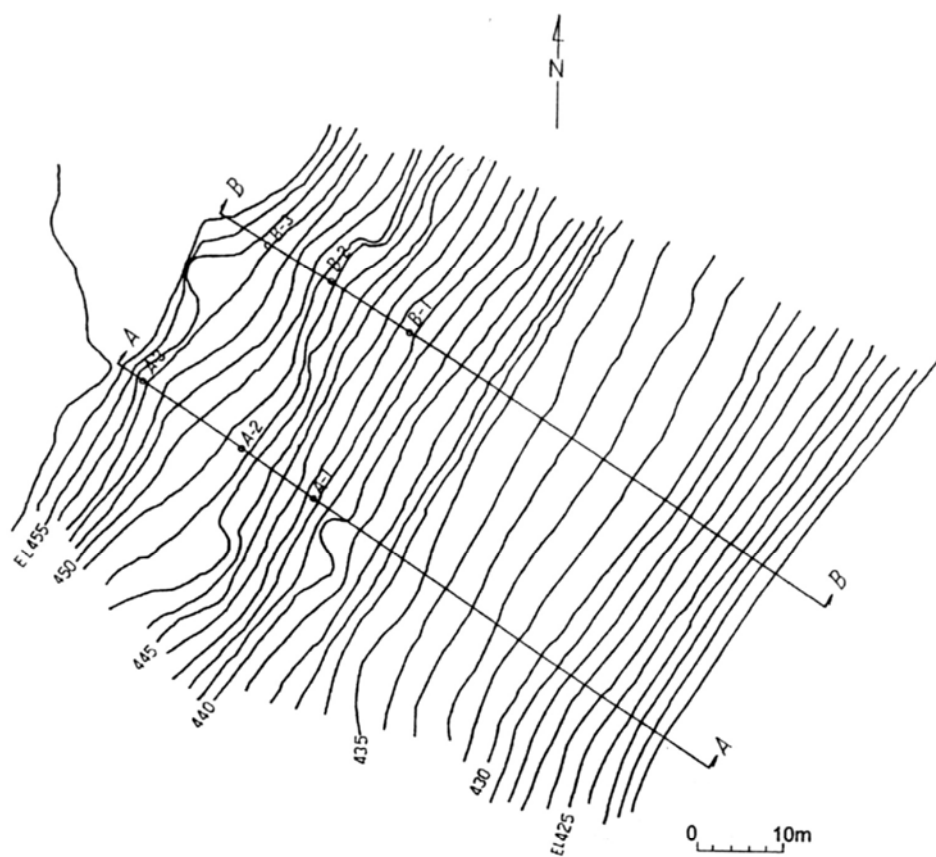


圖1 現場試區地形圖

參、現場監測

一、水位觀測井鑽設

在選定的試區中，測定二處斷面，相距約 20m，分為標註為 A(下游)及 B(上游)斷面。每一斷面分別鑽設 3 孔直徑 5cm 的觀測井編號為 A-1~3 及 B-1~3 (如圖 1) 井底均達水庫最

低水位 EL 428m 以下，深度分別為 14.1m~27.1m。有關觀測井的詳細資料見表 2。其中 A-1 及 B-1 位於水庫最高水位以下 6m 左右，必須搭設工作台，台面高於最高水位以上，將鑽探設備置於工作台上，方能施工。

表 2 水位觀測井高程資料

觀測井 項目	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
井口保護蓋 標高(m)	442.44	448.55	453.28	442.06	448.31	453.01
井底標高(m)	426.85	427.33	426.48	427.18	426.78	425.93

觀測井透水管採用直徑 5 cm 的 B 型塑膠管，管壁間隔 15cm 鋸成槽狀透水孔，並包覆不織布。當鑽探至預定深度時，提出鑽桿，將塑膠管放入孔內，拔出套管，用粗砂以水填法回填透水管與鑽孔之間隙。塑膠管高出地面約 30cm，套上直徑 1.5cm，頂蓋可上鎖的鋼管，基部澆置混凝土，做為保護套管。

地下水位監測系統是由水壓計與資料記錄器(Logger Mate)組成。水壓計所能量測的壓力範圍為 2 kg/c m²，20m 的水頭，其對應的應變讀數約 2,000。水壓計放置現場前均經過率定。

二、監測資料分析

明湖下池水位在電廠平時正常的運轉情形下，在晚上 10 點達到最高水位。此時停止發電，轉而利用夜間剩餘電力，將下池的水抽回至上池一日月潭。一般以 10 個小時的時間，於早上 8 點降至最低水位。

根據目前所獲得的監測資料，綜合分析，可得出下列幾點結果：

(一)水庫水位與地下水位關係密切且穩定，由圖 2 及 3 每天水庫最高水位與各觀測井水頭的變化情形可看出。

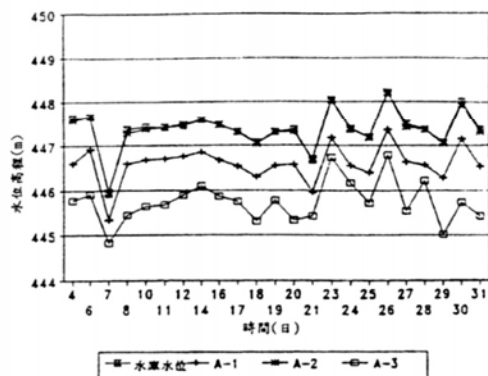


圖2 水庫最高水位與A剖面觀測井水位關係圖(81年3月)

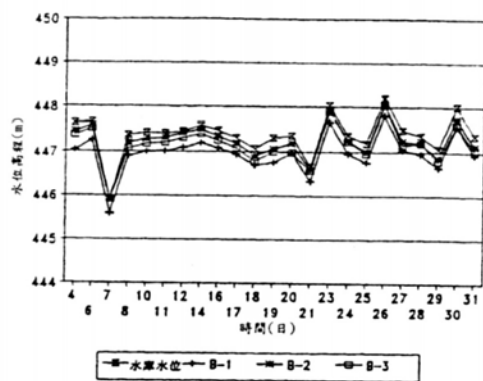


圖3 水庫最高水位與B剖面觀測井水位關係圖(81年3月)

(二)在晚間最高水位至翌日早上 10 點時滲流是由邊坡向水庫方向進行，對邊坡穩定有不利影響。之後，水庫水位漸升，滲流方向則由水庫向邊坡內進行，則對邊坡穩定有正面的作用。如圖 4 及 5。

(三)對 A 剖面而言，當水庫開始向邊坡回滲至水位 EL.440，一般約在下午 3 點，此段時間因為 A - 3 觀測井的水位也正逐漸下降，故

地下水應有側向流動產生；B 剖面則無此種現象。

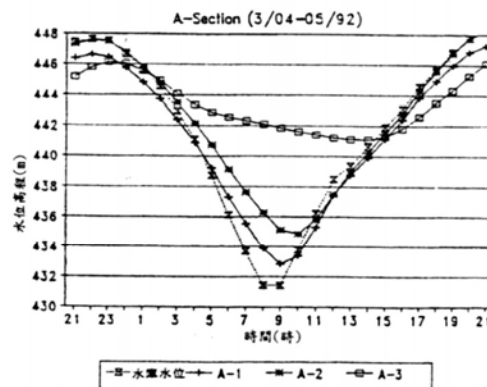


圖4 水庫水位循環洩降與A剖面觀測井水位關係變化圖

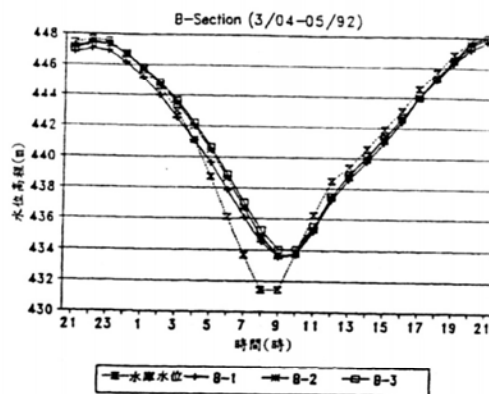


圖5 水庫水位循環洩降與B剖面觀測井水位關係變化圖

(四)由圖 4 及 5，除了 A-3 觀測井外，各觀測井在水庫水位到達最低水位 1~2 小時後即達到其最低水頭，亦即含水層排水的延遲時間在 1~2 小時；而 A-3 的最低水頭經常維持在 EL.441m ~ 442m 之間，如圖 3 上所示。

三、過濾排水材料的選取

對於邊坡的穩定，在大部分的情況下，最安全、經濟且能解決問題的方法是一排水。設計過濾排水系統必須符合下列兩項要求：

(一)防止管湧(Piping)的要求

過濾排水材料的孔隙要小至能夠防止被沖蝕的土壤，其顆粒不致被帶入或洗出濾料。

(二)滲透性的要求

過濾排水材料的孔隙必須大至有足夠的滲透性，來減小及控制滲流應力。

以石英砂及試區土壤為基土，各進行三組不同級配的濾料，第二次採取水樣時，所排出水已逐漸澄清，所含顆粒極微。因此對石英砂及試區土壤而言，這三組過濾料均為適當的級配，若考慮排水量，則可選擇粒徑較大的一組。試驗結果建議如圖 6。

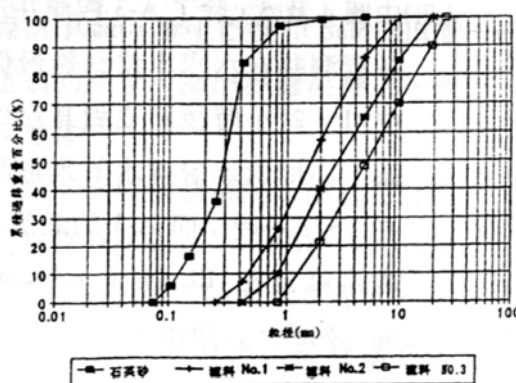


圖6 Slot Test石英砂及過濾排水材料級配圖

肆、砂箱模型試驗

一、模型相似律

小尺寸模型被廣泛的用來研究複雜的工程問題，它的主要功能是用來解決複雜的邊界問題及獲得有關於原型特性的定量資料，除了經濟上的考量因素，其結果更有助於研究人員對問題的瞭解。

在使用模型試驗結果預測現場之行爲時，必須先建立模型與現場原型間之尺度關係(Scaling Relationship)，此關係必須滿足相似律之要求，主要有三種基本相似型態必須要考慮。

(一)幾何相似

本研究採用模型與原邊坡高度比“ λ ”為定值，以滿足幾何相似律之要求。

$$\lambda = H_p / H_m$$

H_p, H_m 分別為現場與模型的邊坡高度或水位

(二)運動相似

在滿足運動相似方面，本研究只考慮對應的速度比為定值，在模型尺寸固定的情況，影響速度比值的因素為試驗時間。由於土壤滲透係數之大小可直接控制試驗時間之長短，所以控制滲透係數的比值 N 為常數，來滿足運動相似律之要求。

$$N = \frac{K_p}{K_m}$$

K_p, K_m 分別為現場邊坡與模型所用石英砂的滲透係數。

(三)動力相似

一般在大地工程模型上，相似律的考慮，主要以幾何相似律及運動相似律保持固定比值來滿足之，對於動力相似律，目前除了離心機模型能夠達到外，一般的縮小模型由於重力無法放大的關係，所以均予忽略。

有關砂箱模型試驗所需考慮的各項滲流參數，林美聆(1991)曾提出因次分析結果，其中模型之控制洩降時間 T_m ，可由現場水庫之洩降時間 T_p 計算如下

$$T_m = T_p \cdot \frac{N}{\lambda}$$

二、模型製作

砂箱是以不鏽鋼板和強化玻璃製造，尺寸為長 250cm× 高 100cm× 寬 60cm，左右兩側各 50cm 為水箱，設

置數個洩水孔，可控制水位洩降速率，中間部分 150cm 為模型製作區，詳見圖 7。

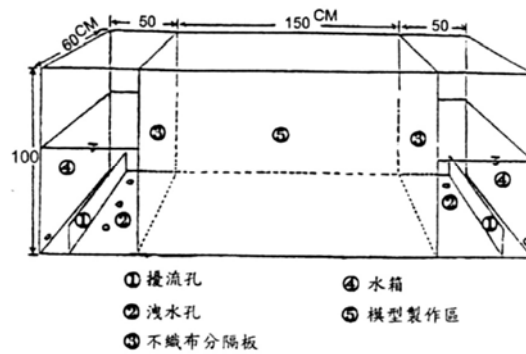


圖7 砂箱模型示意圖

模型與現場邊坡高度比為 1:72，以石英砂為模型材料，高度 50cm，分四層夯實，坡度為 30°。在模型兩處縱斷面各放置九支水頭量測管，高度分別為 10cm—4 支，20cm—3 支，30cm—2 支，配置情形如圖 8。量測管是由外徑 1.5mm 的鋼管接續外徑 2.5mm 之透明塑膠管所構成，塑膠管由模型頂部外延，黏附於砂箱外壁，以虹吸原理量測水頭。

模型邊坡表面鋪設一層不織布，以防止洩降造成邊坡表層沖蝕破壞。

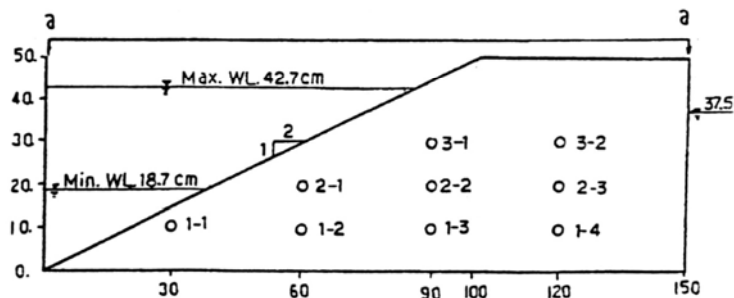


圖8 量測管配置位置圖

三、試驗方法

邊坡地下水的暫態滲流情形與水位洩降速率及土壤的滲透性質有關。石英砂所構成的模型邊坡其滲透係數為定值，因此本研究以四種不同的水位洩降速率來探討其滲流情形，洩降

速率以水箱中的三個洩水孔外加潛水馬達的組合來控制。

試驗結果加以分析得以下五組不同時間之等勢能線變化圖(見圖 9~圖 13)。

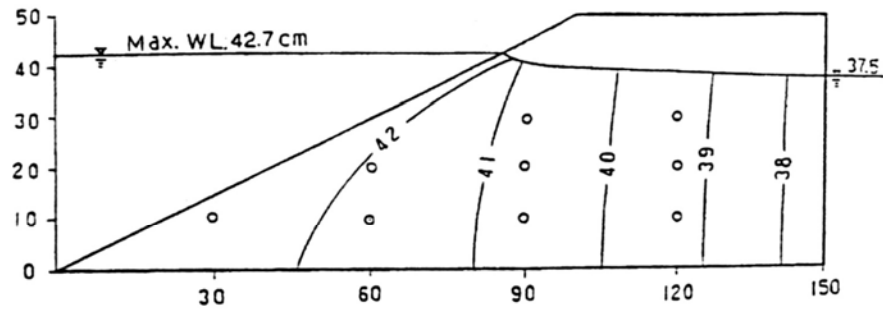


圖9 T_4 洩降速率下邊坡等勢能線變化情形(WL. 42.7cm)

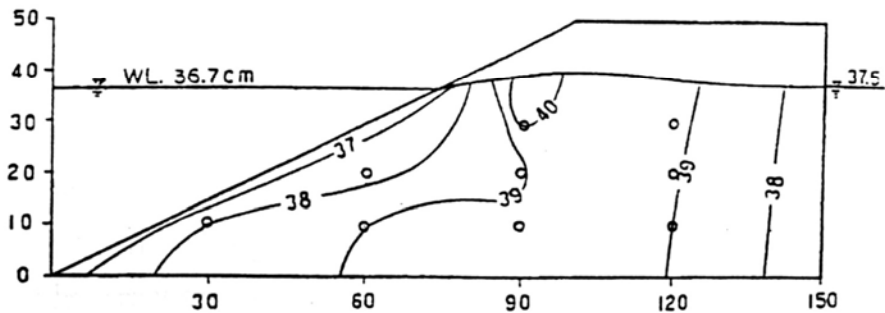


圖10 T_4 洩降速率下邊坡等勢能線變化情形(WL. 36.7cm)

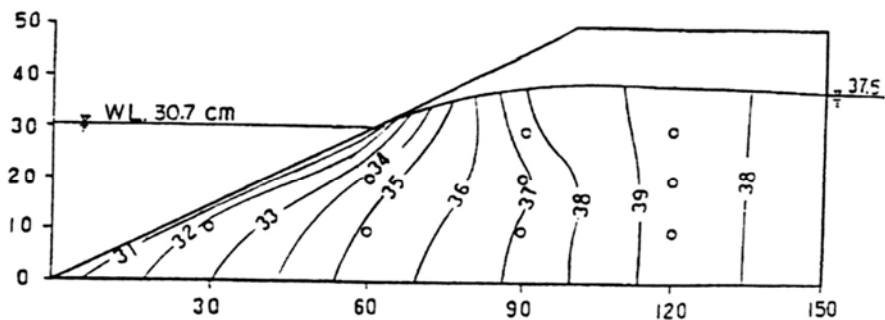


圖11 T_4 洩降速率下邊坡等勢能線變化情形(WL. 30.7cm)

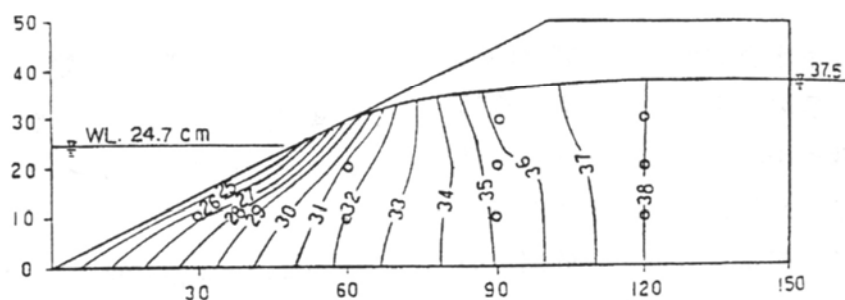


圖12 T_4 洩降速率下邊坡等勢能線變化情形(WL. 24.7cm)

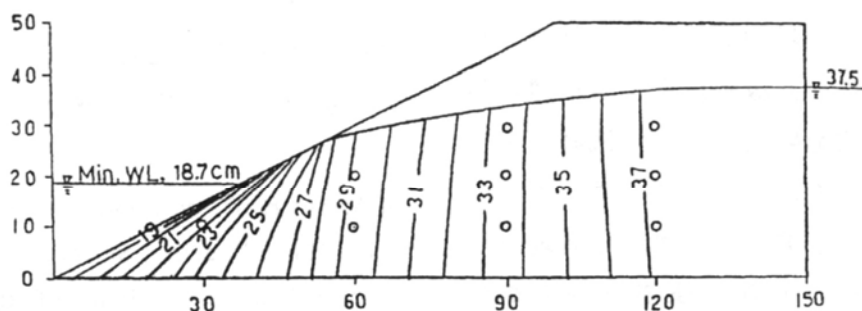


圖13 T_4 洩降速率下邊坡等勢能線變化情形(WL. 18.7cm)

四、坡面鋪設排水措施

對於抽蓄發電式的水庫，其水位每天約 20m 的升降，限制了處理邊坡地下水的施工方法。因此鑽設深層排水管，降低邊坡地下水位的方法有其施工上的困難；因此嘗試以砂箱模型探討，以過濾排水材料鋪設於坡面當做淺層排水的效果。淺層排水措施是在水位洩降範圍等間距挖掘四條橫向三角形截水溝槽深約 2 cm，及一條縱向倒梯形集水溝槽深寬各約 3 cm，溝槽內再鋪滿過濾排水粒料。

五、試驗結果

砂箱模型試驗以四種水位洩降速率及兩種模型材料狀況，組合成八種

不同的試驗條件，綜合其試驗所得的數據分析如下：

- (一)坡面鋪設排水措施前後各量測管的水頭與水位的對應變化關係，可知坡面鋪設排水措施有降低邊坡地下水位的效果。
- (二)排水的效果與洩降速率並無明顯的關係。
- (三)排水的效果不祇局限於邊坡表層附近。

伍、結 論

- 一、由砂箱模型試驗結果顯示，對於具有石英砂滲透能力(10^{-2} cm/sec)的邊坡而言，水庫水位洩降速率對

於地下水位的變化並無顯著的影響。現場試區邊坡含水層的滲透係數為 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/sec，以電廠日常的水位操控，地下水滲流不致於引起試區邊坡大量的崩坍破壞，但仍需注意坡面管湧沖蝕的情形。

- 二、現場土壤滲透能力的差異性，往往在一個級數以上，其對邊坡穩定的影響大於水位的洩降速率。試區 A 斷面的滲透性為 B 斷面的 1 ~ 3 倍，然因邊坡原有地下水位較高且與水庫滿水線距離較近，由現場水位監測資料顯示，A 斷面滲流具有較大的勢能梯度。
- 三、以不同滲透性的材料，進行砂箱模型試驗，並進而構築非均勻性質的模型邊坡，能較真實反應出現場實際地質狀況，解決更複雜的滲流問題。滲流應力影響邊坡穩定的程度，尚須進一步的分析、探討。
- 四、坡面鋪設淺層排水措施的效果，能經由現場實際施工、監測來應證。邊坡含水層不同的滲透性，洩降速率，對地下水滲流行為的影響，尚可進一步的探討研究

參考文獻

- 1.王智澤(1990)，地下水延散係數之推估研究，國立中興大學碩士論文，PP.32-34。
- 2.台電抽蓄工程處(1986)，台灣電力公司明湖抽蓄水力發電工程竣工報告，PP.17-29。
- 3.張雲竹(1991)，泥岩及紅土之過濾材料選定研究，國立中興大學碩士論文。
- 4.Arthur H. Dvinoff and Milton E. Harr (1971), Phreatic Surface Location after Drawdown, Jour. of the Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C .E., Vol.97, No. SMI, January 1971, PP.47-58。
- 5.Bertram,G.E.(1940), An Experimental Invertigation of Protective Filters, Publications of the Graduate School of Engineering, Harvard University, No.267, January。
- 6.Cedergren, Harry R. (1977), Seepage, Drainage, and Flow Nets, John Wiley & Sons, Inc., New York.