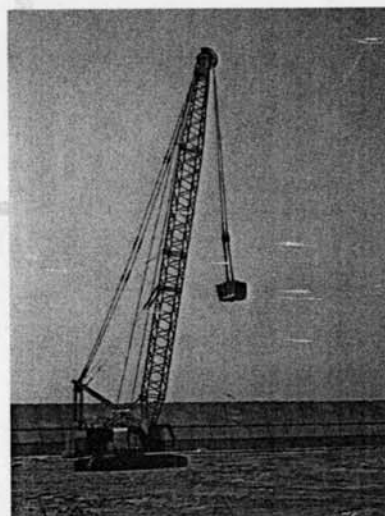
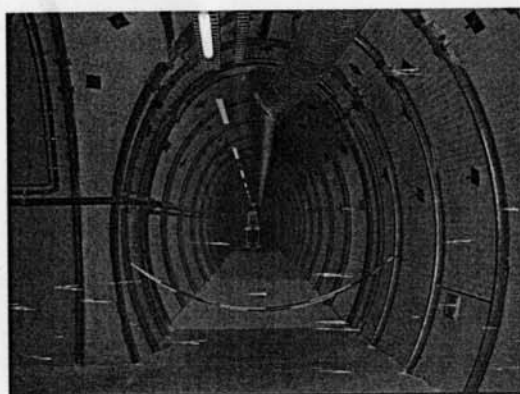


第十屆

大地工程學術研究討論會論文集(二)

PROCEEDINGS OF THE 10TH CONFERENCE ON CURRENT RESEARCHES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING IN TAIWAN



國立中央大學土木工程學系



中華民國大地工程學會



行政院國家科學委員會工程技術發展處工程科技推展中心

堆積土體孔隙水壓變化與土石流發生之相關性研究

蘇苗彬¹ 陳育志² 余俊淵³ 柯建宏³

摘 要

土石流啟動必先經過液化的過程，不論液化來自於水流推擠土石堆積產生剪應力不足抵抗，而後滑動變形產生液化或堰塞土體堆積體內滲流作用產生向源侵蝕或滑動破壞等。其局部液化的現象都必需存在。是以掌握液化的形成可能可以提供作為土石流啟動的時機的監測，並預先可以推測出其啟動是否發生，甚至其規模的大小。

以土石流啟動為監測對象的預警系統，經本研究的理論推導完成並開發完成孔隙水壓力變化及液化移動傾斜的量測機構，加上現場實際裝設與運作，加入現地現況的調查，並依其特性完成分析，則可組成必要的預警系統。

關鍵詞：堆積土體、土石流、啟動、孔隙水壓力。

RELATION BETWEEN POREWATER PRESSURE CHANGE AND OCCURRENCE OF DEBRIS FLOW FOR COLLUVIAL SOIL MASS

Miau-Bin Su Yuh-Jyh Chen Jun-Yuan Yu Jian-Hong Ke

ABSTRACT

Triggering of debris flow is the process of liquefaction. Upward seepage force causes the effective stress inside debris pile to decrease and erosion or landslide occurred. Observation of phenomenon for locally liquefied earth can be applied to the prediction of occurrence of debris flow. In this research, theoretical derivation of liquefaction mechanism and measuring devices for porewater pressure are studied. Three field monitoring system are set simultaneously to verified the theory developed.

Key Words: colluvial soil mass, debris flow, triggering, porewater pressure

一、前言

規劃及檢討土石流的防災體系，應先了解土石流防災的重點實在於土石的部份而非水流，過去過度的注意集中於雨量造成水流的部份，而以降雨為土石流預警最主要的項目，事實顯示，其關鍵實在於堆積的土石，堆積土石的安定條件才是決定土石流發生與否的主要控制因子，從近年桃芝颱風造成的災情來看，雨量的大小是觸發的條件，卻不是關鍵，過去各種來源造成的不安定堆積才是真正的決定因子。光復鄉大興村的大規模開發農業使用及南投 921 災區地震過後大量鬆散的土石堆積，如竹山、鹿谷等地均為土石流的發生提供了充分的條件。新中橫沿線的災害更為集中與明顯，同時活動斷層兩側的相對高程改變，也助長了河道不平衡與土石流的發生。

集水區內土石的不安定堆積可以是天然或人為的土石堆積，存在於一個暫時安定下的條件。邊坡上的土石，其安定性一般可分為三項因素來討論，第一為堆積的幾何形狀，其次為材料本身的剪力強度，最後是外力作用的條件，邊坡穩定性的檢討中，外力的作用為載重、地震力或地下水滲流的作用。土石流的發生為水流帶動堆積的土石以液化的狀態來流動，其外力的作用可以改造成為水流所產生的推移力與剪應力來看。

不安定的土石堆積可能源自：1.原本安定的自然邊坡，因風化等自然因素，漸漸變得較不安定，這是自然地

質的演變，或可稱宿命。台灣地區受此項影響很大，可以說是自然的不可逆變化，所以如何順應自然來做土地的開發利用及保育是一個非常重要的觀念，這應是自然工法的要義；2.人為開發利用，工程設計中，人為的以工程手段修改自然的平衡，雖然有足夠的工程規劃設計，但往往因調查不足，無法充份掌握地質變化，或經驗不足，沒能掌握該有的破壞機制而造成工程的整體或部份失敗，這是土木工程師需要累積對山坡地特性的了解以成功的完成任務；3.各式的棄土石方，開發整地或各式工程，往往產生多餘的土石方，其棄置或堆積，稍有不慎很容易產生二次災害，公路開挖的棄碴場、不當的填方規劃、建築廢棄物、衛生掩埋場等，多採低窪地、山谷地等填築，改變了區域的排水系統，包括了地表及地下水的系統，很容易發生災害，水土保持從業人員應能確實掌握其可能造成的影響，以擬定適當的對策，避免災害的發生。

二、堆積土體的破壞發生機制

崩塌地依其處理的需要，可以界分為自然邊坡及人為邊坡的處理，自然邊坡又可以依其地質材料組成分為岩石邊坡及土壤邊坡，而人為邊坡則可以用施工規劃的差異分填方邊坡及挖方邊坡來討論。

邊坡的穩定性通常由以下三項來決定：1.組成材料本身的特性：地質材料本身的指數、參數及各種強度，如張力強度、壓力強度、抗沖蝕性、抗風化性、剪力強度等。2.

- 1.國立中興大學土木工程學系教授
- 2.國立中興大學土木工程學系博士後研究
- 3.國立中興大學土木工程學系碩士

幾何形狀：地層的結構，弱面的位置及其整體的幾何形狀，幾何形狀決定其重力的作用，包括垂直力、水平力等，也間接影響了外力(如地震力)的作用及邊坡排水的能力。3.外力作用：邊坡內部及其表面所受的動靜態載重，水壓力的變化及側向力，圍壓阻擋等。

一般而言，邊坡不穩定的形成，除了地質、土質條件及其幾何形狀外，外力往往為其主要控制條件，常見之影響邊坡穩定的外力，主要為滲流應力及地震力。在穩定分析中，滲流可區分為垂直方向及水平方向的流動。而地震力可能改變力之平衡外，也有可能造成暫時之孔隙水壓力改變，而造成邊坡之問題。

除了地震引發液化造成土石崩落的情況外，水為土石流發生不可或缺的必要條件，一般以降雨量及其延時為誘發土石流的主要因子，惟降雨條件與土石流發生之間並非單純線性的關係，它還受到了地形、地質、土砂生產方式及速度等諸多環境因素之影響，使得採用降雨因素預測土石流發生的準確性，存在有許多不確定成分，故運用作為土石流預警系統之監測參數，仍無法滿足實際的需求。

由無限長邊坡斜面堆積土體內部的水流特性得知，在足夠的降雨量及延時作用之下，當土體內部達到飽和或近似飽和狀態時，作用於土體推移力，除了水體自重外，沿著斜面方向水流滲流力(seepage force)或堆積體內部的孔隙水壓(pore pressure)是造成土體崩壞的主要原因之一；位處溪流底床或是兩岸邊坡的堆積土體發生破壞，則土石流發生的機率將大為提升。

Casagrande(1936)提出臨界密度的觀念來判斷液化之潛能，若顆粒性土壤之密度小於臨界密度時，在承受剪力作用或強烈地震力時其體積變小，此時若超額孔隙水壓無法迅速排除，則造成液化現象。若土壤密度大於臨界密度，則發生體積膨脹，產生負孔隙水壓的現象。臨界密度的大小與土體之圍壓大小及應力狀況有關。

瞬間孔隙水壓(transient pore water pressure)與重模作用(remolding action)是造成地層破壞的主要原因。對於順向岩坡而言，在其內部材料因風化而呈現鬆散狀態時，若其有局部飽和，則可能因地震力作用下而產生孔隙水壓的瞬間上升與土體的重模作用，因而發生整體大規模的滑動破壞。

三、土石流發生的預警

3.1 土石流的啟動

土石流發生的關鍵，在於土石而不是水流，過去過份的集中在水流的部份，研究與觀測都著重集水區面積與降雨等。事實顯示其要點應在於堆積的土石，土石邊坡的安定條件才是決定土石流是否會發生的主要因子，從桃芝和利奇馬的災情來看，降雨造成逕流是導火線，而九二一造成的不安定堆積才是決定因素。

不安定的堆積起源很多，它是存在的一種暫時安定，其由來包括自然的風化逐漸演變，人為土地開發利用造成現地排水與邊坡內部的應力分佈，平衡條件的改變及工程施工的臨時與永久的堆積等。當大量的水滲入堆積土體中，平衡狀態受到了改變，土體產生變形終至剪力強度不敷抵抗作用力而開始運動。

過去國內對預測土石流臨界發生所使用之理論公式，有從傳統土壤力學觀點出發者，有從流體力學或泥沙力學觀點，推導質量、動量、能量守恒方程而建立土石流臨界發生條件者。

Takahashi(1991)將土石流啟動的過程以三種機制來描述：1.運動的土體在水的作用下，轉換發展成土石流。2.碎屑堆積土體崩解成土石流。3.蝕溝底床在地表水流的作用下，形成不穩定終而發展成土石流。

3.2 土石流啟動的液化過程

土石流啟動必先經過液化的過程，不論液化來自於水流推擠土堆積產生剪應力不足抵抗，而後滑動變形產生液化或堰塞土體經堆積體內滲流作用產生向源侵蝕或滑動破壞等。其局部液化的現象都必需存在。是以掌握液化的形成可能可以提供作為土石流啟動的時機的監測，並預先可以推測出其啟動是否發生，甚至其規模的大小。也就是說土石流的啟動是土結構與水流的一個互制作用產生的行為，不可單從土力或水力的觀點來看，地表水流與地下水(滲流)會相互影響，不存在靜水壓力平衡，應以動水壓力平衡來看(hydrodynamic equilibrium)。

河道內的地表水流對下方河床質的作用力，以地下水滲流的觀點來看，地表水流具有的能量包括位置水頭、壓力水頭及速度水頭。而堆積土體內地下水的能量，依滲流原理，總水頭只包括了位置水頭與壓力水頭，流速太小，故無速度水頭。地表水在流動中能量的損失為速度平方的關係，但滲流的能量損失依達西定律所述則是轉換成滲流應力作用在土壤顆粒上。

能量在移動河床質中消耗完，這是河床質推移理論，但能量在整體堆積體中維持不減，形成作用於河床堆積物底部的不透水界面，沒有考慮到水在孔隙中流動能量的消耗及流速的限制。將河床堆積材料視為具一定滲透係數的土壤材料，則地表水流的能量作用在河床質表面時會形成推移作用，消耗部份的剪力；進入土體後流速降低，能量不平衡中會造成側向(垂直於水流方向)的壓力梯度，造成地下水的向上滲流。從土壤力學的觀點來看，這向上的滲流會使有效應力降低，可能是堆積土體液化的驅動力，也是後續河床沖蝕加大土石流量與濃度的主要機制。

若依土壤力學中地下水滲流的觀點來看，地表水的總水頭與堆積物中地下水的總水頭並不平衡，以一個垂直方向的單元土柱來看，地表沿著斜面方向的水流，其剪應力會隨著流速剖面的梯度(斜率)分佈，而從流體的能量梯度來看，平行於地表的水流會造成堆積體中能量的梯度，其梯度的大小應等於速度水頭的能量減去河床質推移所消耗的能量。

3.3 液化監測的方法

堆積土體的安定性，從土壤力學中有效應力的觀點來看，表面下某點的土壤其受力的狀態受以下三個來源影響，

- 1.由其上方的土壤重量而來。
- 2.由孔隙中液體的壓力而產生。
- 3.由外界載重造成。

所以堆積土體內部應力的改變原因主要為水位變化造成水壓力的改變或為載重情況的改變。

為評定堆積土體的力學行為，依有效應力的觀念，土體所受的總應力可以分為兩部份，一為顆粒之間的接觸作用力，另一為孔隙水壓力。顆粒之間的作用力，由於真正影響土體的結構，定義為有效應力，而由水造成的水壓力，固其作用無方向性，稱為中性力。

在總應力不變的條件下，地下水位的提高或孔隙水壓力的增加，從 Terzaghi 的有效應力觀點來看，會降低顆粒之間(即土體架構)所承受的力，而影響土體安定的剪力強度

參數中，摩擦力與有效應力成正比，降低了有效應力，也降低了土體的安定性。因此，量測堆積體內部的孔隙水壓變化，對評定其安定和預測與預報土石流發生的時機與機率，基本上是可行的方向。

3.4 預警系統的設置

1. 不同深度下堆積土石的孔隙水壓力變化

利用向上滲流會造成垂直線上兩點的水壓力差不等於靜水壓力差的觀測，當河道內水位逐漸上升時，河床內堆積土石的孔隙水壓力亦隨之上升，地表水流持續擴大後，地下水位超過了地表，靜水壓力愈來愈大。當有外在因素發生，地下水體不再呈現靜水壓力平衡(Hydrostatic equilibrium)時，可能產生了向上的滲流，可稱為動水不平衡的狀況，並逐漸變化達動水平衡(Hydro-dynamic equilibrium)。動水平衡狀態下，存在有水因流動損失的水頭轉換成土體的微體力，此時不同深度的土體內部其總水頭是不同的，當存在有向上的滲流時，其水頭的差值除以距離即為其水力梯度，當向上的滲流應力克服了土重時，土壤即呈現了液化的現象，而在地表水的作用下產生了流失，引發了土石流的啟動。

2. 堆積土石的應力隨時間的變化

堆積土石內部的應力狀態可以反應出其強度的變化，一般可以總應力或有效應力的觀點來看。當水位上升時其總應力亦隨之上升，當地表逕流發生土石搬運時，其所受總應力亦隨之改變，若形成土石流啟動則堆積減少，總應力亦隨之降低，若位於堆積段則載重增加，形成總應力增加。設置的位址選擇得當，可以有有效的觀測與預報土石流。

3. 不同位置堆積土石的變形，包括位移及傾斜變化

河道中的堆積土石，在發展成大量搬運的土石流動或移動之前，會先呈現某種程度可資量測的變形，所以可以安裝各種堆積物表面的位移或傾斜感測的裝置，可資運用作為土石流的預警系統，對感應器及記錄器改為用具數位資料處理能力的單元，則可組成預警與記錄的系統。

4. 不同深度間的地下水流動監測

由土石流啟動的液化過程理論推導中可見，液化啟動的關鍵在於向上滲流的發生，可以直接量測堆積體內地下水的流動方向與流速，可以推算其水力梯度大小，進而估算其滲流應力，可以評定其對土體應力的影響，可以利用當作土石流啟動的預警。

四、砂箱模型試驗

本研究的砂箱模型試驗主要是模擬土層受到向上滲流及地表水流模擬時土體發生液化流動的狀態，來進行試驗設計。整個實驗構想規劃為在一次滲流的過程中取得各砂箱中土樣內部孔隙水壓值與各時段流量下的變化，而瞬時水壓之量測，是由PC電腦即時讀取分析探討不同材料達到液化之勢能梯度。

4.1 砂箱模型設置

砂箱模型設備如圖1所示，包括有砂箱模型本身、埋設土樣中之水壓計、CR-10擷取系統、PC個人電腦、水平錨鉤與彈簧秤，及砂箱底部有一可調整轉動頻率的馬達及右側可供控制之儀器錶。砂箱長為2.5m、寬0.6m、高1m，距端點1m處有兩鋼板隔開，及底座有一鋼板區隔，形成三個獨立水槽，鋼板間與砂箱接觸處用防水矽利康黏合，確保各水槽間不會滲水，中間水槽提供試驗土樣置放，右側水槽則提供一較高水位。

水壓計使用波蘭進口的迷你張力計(Laboratory Capillary Water Pressure Miniprobe minitensiometer)，其量測原理是利用跟水接觸時的彼此勢能差來量取，若水之勢能較高，則張力計會調節使其平衡勢能差，反之亦然。而根據實際測量結果，可用來做砂箱內量測水壓值力值。

CR-10為美國Campbell公司出產的資料擷取系統，用來量測及儲存儀器之數據，其可用頻道為16個，透過RS232轉換器接於PC個人電腦之COM1連接埠，經由套裝軟體PC208W即時觀測與量取水壓力值。

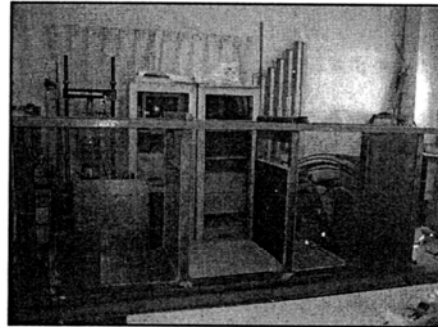


圖1 實驗室砂箱圖

4.2 向上滲流模擬試驗結果

由土壤力學理論得知，孔隙水壓上升，會造成土壤有效應力下降，而當有效應力降為0時，土體便失去所有強度，即形成一液化現象。在本研究過程中，所採用的8種材料中試體1為中砂、試體2為細砂、試體4為停留在#4之礫石、試體5為介於#4與#10間之礫石、試體3、6、7與8則為粗細顆粒混合之材料，其中由試驗過程中明顯的觀察出試體1、試體2與試體3發生液化流動現象，而其五種則在觀察上沒有液化現象發生，而試體6、7與8明顯觀察到土體有細顆粒淘刷現象。

4.3 地表水流模擬試驗結果

由試驗結果可知水壓值變化的趨勢，會隨著坡度與流量之加大而增加。雖然從數值上顯示其滲流梯度都不大且大部分土體發生流動之破壞皆由水流冲刷所致，不過從各階段水頭值之斜率來看，明顯可看出斜率隨著各階段水量增加而有變化且是隨著坡度增加至7度時最大（此時已有部分土體流失），然後在趨於減緩。從數值上顯示只需很少之滲流梯度，就可使土樣產生流動，可見不需要達到臨界水力梯度時，也有可能發生液化流動之破壞現象。

五、現地預警系統的佈置

本研究之現地預警系統已完成三個現場，分別位於嘉義縣阿里山鄉豐山村、南投縣信義鄉豐丘村以及潭南村(見圖2)，目前開始觀測並測試遠端傳輸，以供將來預警指揮用。

5.1 初步觀測結果

由於今年台灣地區的雨量明顯的不若往年豐沛，因此目前還沒有很顯著的觀測成果，不過在幾場雨量較大一點情況下，雖然離造成土石流的雨量還有一段距離，不過在豐山現場卻可觀測到不錯的數據，但是在其它兩個現場目前觀測不到什麼大的變化。將豐山站觀測的土重、水壓力

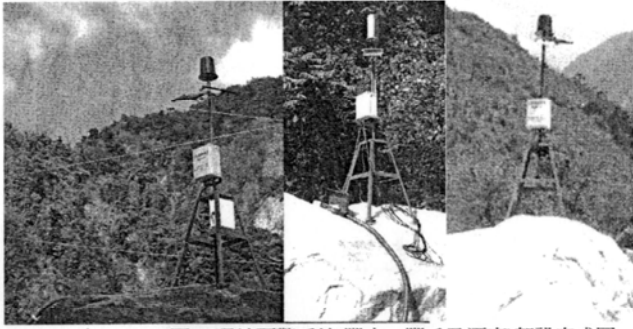


圖 2 現地預警系統(豐山、豐丘及潭南)架設完成圖

與降雨量的關係在時間軸上做成紀錄，另外作水壓力、水力梯度與降雨關係圖，如圖 3 及圖 4 所示，初步判斷可能跟現場的地形、氣候、選址、以及感測器的埋設深度都有關係，從豐山地區觀測到的資料看來，與預期中的情形是相近，因此當雨季慢慢來臨雨量到達預期時一定可以量測到理想的數據，屆時就可以跟實驗室得到的成果來做比較，建立一個完整的土石流預警系統。

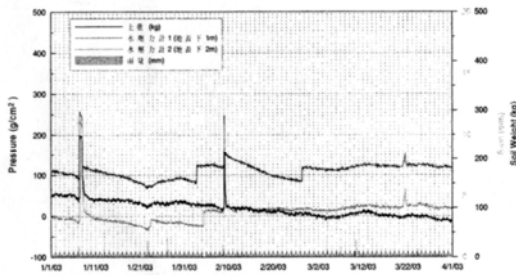


圖 3 豐山站(001-92)土重、水壓力與降雨量關係圖

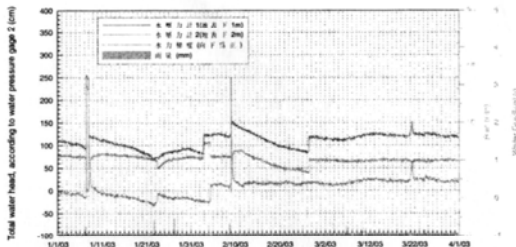


圖 4 豐山站(001-92)水壓力、水力梯度與降雨量關係圖

六、結論

規劃及檢討土石流的防災體系，應先了解土石流防災的重點實在於土石的部分而非水流，過去過度的注意集中於雨量造成水流的部份，而以降雨為土石流預警最主要的項目。事實顯示，其關鍵實在於堆積的土石，堆積土石的安定條件才是決定土石流發生與否的主要控制因子。

不安定的堆積起源很多，它是存在的一種暫時安定，其由來包括自然的風化逐漸演變，人為土地開發利用造成現地排水與邊坡內部的應力分佈，平衡條件的改變及工程施工的臨時與永久的堆積等。當大量的水滲入堆積土體中，平衡狀態受到了改變，土體產生變形終至剪力強度不敷抵抗作用力而開始運動。

經過實驗的設計、過程與結果的分析與討論之後，證明了向上滲流梯度增加使土體內孔隙水壓上升，降低土體

本身強度，當達至土體臨界水力梯度值土體則會發生液化流動。

因此，量測堆積體內部的孔隙水壓變化，對評定其安定和預測與預報土石流發生的時機與機率，基本上是可行的方向。對河床內的堆積土石做液化的監測，可以由以下幾項著手：

- 1.不同深度下堆積土石的孔隙水壓力隨時間的變化。
- 2.堆積土石的總應力隨時間的變化。
- 3.堆積土石的變形，包括位移及傾斜變化。
- 4.不同深度間的地下水流動及滲流應力的監測。

土石流的預警系統應結合上述各液化的機制，由觀測得之參數變化，先由其破壞條件的訂定，反推算預警的基準值，透過集水區土石流發生區的調查與掌握，即可組構成具預警功能的監測系統，可以在土石流即將或可能發生的地點，預先發出警報，達保護居民生命財產之功效。

誌謝

本文承行政院農業委員會 91 農基金-5.1-林-021 補助，特此感謝。

參考文獻

- [1]謝正倫，「土石流預警系統之研究」，國立成功大學水工試驗所研究試驗報告第 139 號 (1993)。
- [2]陳榮河，「土石流之發生機制」，地工技術 74 期，第 21-28 頁 (1999)。
- [3]詹錢登，「土石流及其防治對策」，教育部土木工程防災教育改進計畫，計畫編號：88-土木防災-教材-05 (1999)。
- [4]蘇苗彬，「山坡地緊急災害處理計劃—堆積土體孔隙水壓改變與土石流發生之相關性研究(一)」，國立中興大學土木工程學系 (2001)。
- [5]張石角，「台灣土石流災害」，洪水與泥沙災害學術研究會論文集，第 27-29 頁 (1983)。
- [6]周憲德、廖偉民，「土石流潛勢判定模式及土石壩滲流破壞之研究」，國立中央大學土木工程學系博士論文(2000)。
- [7]何敏龍，「土石流發生機制與流動制止結構物之研究」，國立台灣大學土木工程學系博士論文 (1997)。
- [8]李宗霖，「波浪與海浪土壤交互作用之解析」，國立中興大學土木工程學系博士論文 (1999)。
- [9]林美聆、王幼行，「地表水及地下水對土石流破壞型態之影響」，地工技術，第 74 期，pp29-38 (1999)。
- [10]Ala, S., Mathewson, C. C., "Structural control of ground-water induced debris flow", Hydraulics/Hydrology of Arid Lands, pp.590-595 (1990)。
- [11]Aronne Armanini & Carlo Gregoretti, "Debris-Flow Hazards Mitigation", Balkema, Rotterdam, pp.117-123 (2000)。
- [12]Harry R. Cedergren, "Seepage, Drainage, and Flow Nets - 3rd", A Wiley-Interscience, U.S.A. (1988)。
- [13]Istomina, "Soil Stability to Seepage", V. S. Moscow, (in Russian) (1957)。
- [14]Sitar, N., Anderson, S. A., and Johnson, K. A., "Conditions for initiation of rainfall-induced debris flows", Stability and performance of slopes and embankments: proceedings of a special conference at U.C Berkeley, ASC, pp.834-849 (1992)。
- [15]Takahashi, T. (1991), "Debris flow", Balkema Publishers, Brookfield, pp.63-85。