液化引致土石流啟動的關係探討

蘇苗彬^[1] 陳育志^[2]

摘要 土石流啓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啓動的時機的監測,並預先可以推測 出其啓動是否發生,甚至其規模的大小。

以土石流啓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,及 現地現況的調查,並依其特性完成分析,則可組構成必要的預警系統。 **關鍵詞:**堆積土體、土石流、啓動、孔隙水壓力。

INVESTIGATION ON TRIGGERING OF DEBRIS FLOW INDUCED BY LIQUEFACTION

Miau-Bin Su^[1] Yuh-Jyh Chen^[2]

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 phenomena for locally liquefied earth can be applied to the prediction of occurrence of debris flow. In here, theoretical derivation of liquefaction mechanism and measuring devices for porewater pressure are studied. Three field monitoring systems are set to verified the theory developed.

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

 ^[1] 國立中興大學土木工程學系教授(通訊作者)
 Professor, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C. (Corresponding Author)
 E-mail: mbsu@dragon.nchu.edu.tw

^[2] 國立中興大學土木工程學系博士後研究 Post-doctor researcher, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

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,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。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,其外力的作用可以用水流所產生的推移力與剪應力來看。

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。

二、土石流發生的理論

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、能量守恆方 程而建立土石流臨界發生條件者。

1. 從堆積土體的土壤力學行爲來看

可以 Takahashi(1977) 提出之土石流臨界發生公式為代表:

$$\tan \theta \geq \frac{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w)}{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w \left(1 + \frac{\theta}{2}\right)}$$
。該理論考慮一坡度 θ 之無限長土
石堆積層,有平行坡面之逕流產
生。公式的適用情形為:水位與堆
積層表面齊平(此時,公式將與
Harris(1977)之公式相同)及有地表



圖 1 Takahashi 臨界公式示意圖 Fig. 1 The critical equilibrium for Takahashi's formula

逕流產生之情形。Sidle(1985)則針對無限邊坡中有未飽和區存在時之狀況, 提出土石流臨界發生公式。國內有江永哲(1986)提出之土石流臨界發生公 式,考慮有三種水位的情況分別為:有逕流產生、水位堆積層表面齊平及水 位在堆積層表面以下。而游繁結(1987)以 Takahashi 理論公式為基礎,加入滲 流力之分析,推導出堆積土體發生移動時之臨界公式。

上述的各個公式中,皆以土壤的滲流應力為主要趨動土石流發生的作用力,對地表逕流的作用,以靜水壓力視之,過於保守,推算得之臨界堆積坡度可能過高。

2. 從地表逕流形成的作用力來考量

Takahashi(1991)以三種機制來描述土石流的啓動:1.運動土體在水作用下,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作

用下,形成不穩定終而發展成土石流。三種類型的土石流發生皆為土體在水的作用下,顆粒間的有效應力或剪應力降低形成了液化。

模式中土石移動推動之能量來自於水流之流量,為速度之平方函數,抵抗力之大小則以表面顆粒或自重為函數,以單位顆粒的安定性做比較。也就是說,輸砂的過程為地表水流帶動河床質移動之行為。土石流的行為應將河床質材料視為土壤顆粒之堆積,以地下水滲流的觀點來看水流造成之影響。

三、土石流啓動液化過程

上石流啓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啓動的時機的監測,並預先可以推測出其啓 動是否發生,甚至其規模的大小。也就是說土石流的啓動是土石結構與水流 動的一個互制作用產生的行為,不可單從土力或水力的的觀點來看,地表水

不存在靜水壓力平衡,應以動水壓 力 平 衡 來 看 (hydrodynamic equilibrium)。

流與地下水流(滲流)會相互影響,



圖 2 堆積土體受滲流應力 影響示意圖 Fig. 2 Seepage force acting on soil particle for debris piles

在堆積土體中任一點(圖 2)所受的應力可以表示為:總應力(σ_t)=上方土重 +水重= γ_{sat} ·h; 孔隙水壓力(P)= γ_w ·h; 有效應力($\overline{\sigma}$)=($\gamma_{sat} - \gamma_w$)·h。當地下有水 由下向上湧出則形成了滲流(upward seepage),並產生滲流應力(F)= $i \cdot \sigma \cdot \gamma_w$ = $i \cdot h \cdot A \cdot \gamma_w$,故有效應力 $\overline{\sigma}$ =($\gamma_{sat} - \gamma_w$)· $h - i \cdot \gamma_w$ ·h。當 σ_t =P時 $\overline{\sigma}$ =0,亦即 $h \cdot \gamma =$ $h \cdot \gamma_w \cdot i , i = \gamma / \gamma_w = i_{gc}$,此時流砂現象(Quick Sand)發生,而 i_{gc} 稱為臨界水力 坡降(critical gradient) $_{i_{gc}} = \gamma'_{\gamma_w} = \gamma_w \cdot \frac{(G-1)/(1+e)}{\gamma_w} = G-1/_{1+e}$,通常 $\gamma_{sat} \equiv 2 \cdot \gamma_w$,故 $i_{gc} \equiv 1.0$ °

由上述地層液化的機制,再來檢討土石流啓動時的液化如何形成, Takahashi (1991)對堆積層內土石的應力分佈中,假設地表水流動造成的剪應 力,如同靜水壓力分佈形成一定斜率的直線,且整體受力狀態可以用無限長 邊坡理論來分析,沿著斜面狀態不變,亦即地表水持續以等水深等速流動, 而地下水亦同,以等總水頭降斜率(水力梯度)沿著斜面流動,其滲流應力等 於斜率乘以水的單位重。

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(見圖3及圖4),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。



圖 3 土體內點 A 在地表水流影響下的總水頭變化示意圖 Fig. 3 Change of total water head under the influence of surface water flow



圖 4 不同深度之孔隙水壓力變化,在土體 K 値大時,孔隙 水壓上升等於其地下水面上升



一般考慮土壤的沖蝕現象,多以土壤流失之萬能公式推算,其沖蝕計算 的對象主要為地表面的沖蝕,但堆積的土砂由於鬆散,極易因土壤內部沖蝕 造成細顆粒的流失進而引起後續的災害,以下探討因地下水滲流引起的土體 穩定性改變的問題。

Istomina(1957)提出描述由於滲流引起土壤液態化(Fluidization)結構破壞的型 式:於非凝聚性土壤向上滲流的情況下,液態化的過程中土體變鬆,而體積 增加,一般來說,當土壤均勻係數 C_u<10 時會發生液態化(C_u=D₆₀/D₁₀, C_u愈 大表示顆粒徑分布愈廣)。Zamann 指出液態化有兩種形式:(1)土體一部份會 鬆浮,指局部土體。(2)產生破壞而液化,指全面性。 Istomina(1957)根據數十種材料中歸納出土體在受到向上滲流時,會有兩 種現象發生,分別為土體之液化與淘刷。當 Cu<10 時,土體呈現液化破壞現 象,而當 20<Cu<40 時則會呈現淘刷現象(如圖 5),而當 10<Cu<20 時,則兩 種現象都有可能發生,且 Cu 值越高,其液化破壞所需的水力梯度則越低。至 於發生集中液化破壞的材料其均勻係數 Cu 大多小於 5,而破壞水力梯度則介 於 1.0 與 1.5 間。

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。





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,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。

四、現地觀測系統的佈置

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,其中潭南村之現地預警系統已於 92 年6月中遭暴雨沖毀流失而停止監測,其他二處現地預警系統目前仍運作正 常,並將監測資訊以遠端傳輸 之方式,傳回設於中興大學土 木系地下水工程研究室內之現 地預警系統總站,供作預警研 究用。



圖 6 現地預警系統(豐山、豐丘及潭南)架 設完成圖 Fig.6 Setup pictures of field prewarning system (Fongshang, Fonchou and Tan-nan)

1. 初步觀測結果

現地預警系統設立迄今已

獲得有不著的觀測成果(見圖 7 至圖 9),在幾場降雨量較大之情況下,雖然離 造成土石流的雨量還有一段距離,不過在豐山村現場已可觀測到相當多的數 據,其它現場則尙未觀測到大的變化,從各站觀測到的資料來看,與預期中 的情形相近。

2. 觀測資料的初步探討

首先以豐山站 92 年 5-6 月的資料來說明觀測系統的表現(見圖 10):(1) 雨量顯示與水壓計及土壓計反應正常且時間延遲不大,系統功能可接受。(2) 水壓計與土壓計皆顯示以日爲週期的變化,顯示儀器受氣溫及氣壓的影響。 (3)地表水流造成孔隙水壓力的變化可明顯看出,水壓計的反應皆可分辨是否 有地表水流。(4)地表水流造成土壓力變化的量小於水壓力計的反應,可能爲 滲流應力的作用。



Fig. 7 Records of earth pressure, pore pressure, hydraulic gradient related to rainfall amount for Fongshan station, 2003)



Fig. 8 Records of earth pressure, pore pressure, hydraulic gradient related to rainfall amount for Fongchou station, 2003)



Fig.10 Records of earth pressure, pore pressure, hydraulic gradient related to rainfall amount for Fongshan station, 2003.5-6)

再以豐山站 8 月份的觀測資料(見圖 11),加上水力梯度的推算結果來看: (1)可更明顯看出每日氣象條件的影響。(2)土壓力未隨水壓力變化而同步變 化。(3)將兩個水壓力計的差值換算成水力梯度(*i*) = Δ*P* / Δ*L* = (*P*-*P*_i)/1m,可 以發現暴雨時水力梯度昇高向下滲流及局部的向上滲流發生。(4)觀測得最大 的向上滲流梯度約為 0.5,尚未達到前面理論推估值 *i_{gc}*≈1 液化的階段,而由 退水後土重不變可見並無土石流失的發生。



Fig.11 Records of earth pressure, pore pressure, hydraulic gradient related to rainfall amount for Fongshan station, 2003.8)

五、結論

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,

13

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,反推算預警的基準値,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 90 農基金-3.8-林-07 及 91 農基金-5.1-林-021 補助,特此感謝。研究進行中,蒙水保局張三郎副局長及中興大學水保系游 繁結教授不吝指正研究方向與方法,林務局及水保局同仁協助現場工作之進 行,一併致謝。

參考文獻

- 李宗霖 (1999),「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。
- 2. 何敏龍 (1997),「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。

- 林美聆、王幼行 (1999),「地表水及地下水對土石流破壞型態之影響」, 地工技術,74:29-38。
- 周憲德、廖偉民 (2000),「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。
- 5. 陳榮河 (1999),「土石流之發生機制」,地工技術,74:21-28。
- 6. 詹錢登 (1999),「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。
- 謝正倫 (1993),「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。
- 蘇苗彬 (2001),「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。
- 蘇苗彬 (2002),「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(二)」,國立中興大學土木工程學系。
- 10. Ala, S., and Mathewson, C. C. (1990), "Structural control of ground-water induced debris flow", *Hydraulics/Hydrology of Arid Lands*, pp.590-595.
- 11. Aronne Armanini and Carlo Gregoretti (2000), *Debris-Flow Hazards Mitigation*, Balkema, Rotterdam, pp.117-123.
- 12. Harry R. Cedergren (1988), Seepage, Drainage, and Flow Nets-3rd, A

wiley-Interscience, U.S.A.

- 13. Istomina (1957), Soil Stability to Seepage, V. S., Moscow, (in Russian) •
- 14. Sitar, N., Anderson, S. A., and Johnson, K. A. (1992), "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.
- 15. Takahashi, T. (1991), Debris flow, Balkema Publishers, Brookfield, pp.63-85 °