

降雨對細粒土砂流失及土石流發生之影響

李苑菱⁽¹⁾ 游繁結⁽²⁾

摘 要

本研究以砂箱試驗模擬不同供水情形下，滲透進入土壤之水分，對邊坡土體之細顆粒物質沉降變化之影響，藉以了解此行為與土石流發生之關係。

試驗研究結果顯示，土體中之細顆粒物質受水流之重力作用，沿著顆粒間孔隙往下移動而流失，隨著供水量之增加，此等細粒流失之現象也隨之擴大。但土體中細粒含量與土體保水能力有正相關性。隨著土體上層之細粒流失，其孔隙增大，推測其孔隙壓力相對增加，而降低土體之抗剪強度，以至於土石流發生之臨界坡度也隨之降低；而土體中、下層之土壤結構則因細粒含量之增加改變其堆砌密度，反有阻截滲流水之下滲作用，使之沿斜坡方向流動，增加滲流力之作用，提高上層土體之不穩定性而流動。土體每層深度為5.51cm。

（**關鍵詞：**細粒流失、土石流）

Study on the Influence of Rainfall on the Soil Loss of Fine Particles and Debris-Flow

Yuan-Ling Li⁽¹⁾ *Fan-Chieh Yu*⁽²⁾

Graduate Student⁽¹⁾ Professor⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

ABSTRACT

To analyze the influence of the infiltration of water into soil on the fine particles, we used five kinds of water to imitate rainfall in different conditions to observe the behavior of the fine particles. By the results of the test, the fine particles of sand mixtures were washed away along the pores by gravitational water. The soil loss of fine particles increased as we added more water. The fine particles of sand mixtures and the capacity of water of the soil were positive related. The soil strength

(1)國立中興大學水土保持學系碩士生

(2)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail: fcyu@dragon.nchu.edu.tw)

and the critical slope of occurring debris-flow of the top layer of the soil were decreasing when the fine particles of sand mixtures were washed away. The soil strength and the critical slope of occurring debris-flow of the middle and the bottom layer of the soil were increasing when the fine particles of sand mixtures were washed away. The depth of each layer is 5.51 cm.

(**Keywords** : soil loss of fine particles, debris-flow)

前言

台灣地區受地形環境影響，加上地震、颱風及人為開發不當等外力因素，使得崩塌、地滑、土石流等土石災害頻傳。特別在921集集大地震後，山區地形、地貌驟變，邊坡崩塌帶來的大量鬆散土方，每遇豪雨，都能引發規模不一的土石流現象，常為致災的原因。

但有關土石流發生之原因眾多，目前對其機制之瞭解仍屬有限，故有繼續研究發展之必要。本研究擬針對滲透造成土粒流失，是否亦為引發土石流發生之原因加以探討。由於滲透進入土壤之水分可藉本身之重力穿越孔隙而流動，土壤中之細顆粒物質易受此透水作用脫離原位順著水分流失，使得邊坡土體產生結構性之改變而趨於不穩定，此等細粒流失之現象一旦擴大，極可能發生土體崩壞，進而產生土砂災害。故本研究擬以特定供水條件進行室內模擬試驗，探討水分在土體中之流動現象對於土砂粒沉降變化及其對於邊坡土體崩壞之影響。

理論分析

土石流為水與土石混合成一流體，因本

身運動力所引起之集體搬運。土石流發生之力學特性，主要為堆積土體沿斜面之推移力大於堆積土體本身之抵抗力，而發生土體之集體運動現象。本研究擬從土壤力學特性解析土體之安定著手，探討其發生土石流之可能性。

一、摩爾-庫倫破壞準則

摩爾認為一材料之破壞是因為正向應力與剪應力之組合達到一臨界狀態，所以破壞面上之正向應力與剪應力之關係可表示為：

$$\tau = f(\sigma) \quad (1)$$

τ 與 σ 之關係屬於物體內部抗剪強度，類似物體間滑動摩擦之庫倫定律，故此一函數關係可以寫成：

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

其中， τ ：剪力強度， σ ：破壞面上之正向應力， c ：凝聚力， ϕ ：摩擦角

二、土石流發生之臨界坡度(不考慮滲流力之作用)

高橋(1977)忽略水流流速之影響，考慮一坡度為 θ 之無限邊坡，有平行於斜面水深 h 之逕流產生，如圖1所示。在不考慮土體之凝聚力下，則土體之推移力為

$$T = g \sin \theta [c_{vs}(\rho_s - \rho_w)a + \rho_w(a + h)] \quad (3)$$

土體之阻抗力為

$$R = g \cos \theta [c_{vs}(\rho_s - \rho_w)a] \tan \phi \quad (4)$$

式中， g 為重力加速度， c_{vs} 為泥砂體積濃度， ρ_s 為土粒密度， ρ_w 為水之密度， a 為堆積層表面下發生剪力破壞之深度， ϕ 為土砂之內摩擦角。

當土體發生剪力破壞之臨界條件為 $T \geq R$ ，則

$$\tan \theta \geq \frac{c_{vs}(\rho_s - \rho_w)}{c_{vs}(\rho_s - \rho_w) + \rho_w(1 + \frac{h}{a})} \tan \phi \quad (5)$$

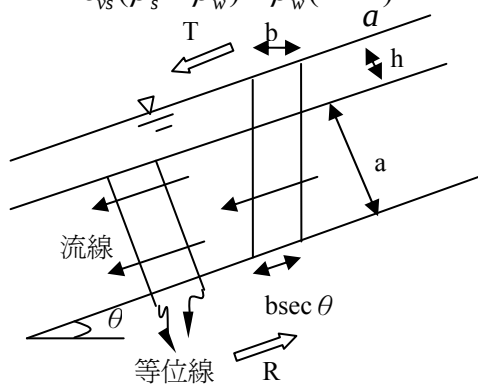


圖1 不考慮滲流力之土石流發生理論示意圖

Figure 1. Diagram of initiation of debris flow without considering the seepage force

三、土石流發生之臨界坡度(考慮滲流力之作用)

游繁結(1987)加入滲流力之觀念，假設一坡度為 θ 之無限邊坡，其堆積土體厚度為 H ，

水位為 h ，如圖2所示。在考慮任意水位之情況下，推導出：

土體之推移力為

$$T = \gamma_{sat} H \sin \theta + (1 - n) \gamma_w h \sin \theta \quad (6)$$

土體之阻抗力為

$$R = (\gamma_{sat} H - n \gamma_w h) \cos \theta \tan \phi \quad (7)$$

式中， γ_{sat} 為飽和土砂之單位體積重， γ_w 為水之單位體積重， n 為土體之孔隙率， ϕ 為土砂之內摩擦角。

在臨界條件 $T \geq R$ 時，則

$$\tan \theta \geq \frac{\tan \phi}{1 + \left[\frac{\gamma_w h}{(\gamma_{sat} H - n \gamma_w h)} \right]} \quad (8)$$

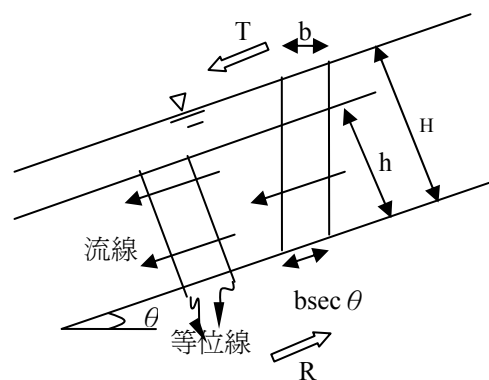


圖2 考慮滲流力之土石流發生理論示意圖
Figure 2. Diagram of initiation of debris flow considering the seepage force

材料與方法

一、試驗設備

本試驗設備為厚度1cm之壓克力板所製成之觀測砂箱，長度18cm、寬度18cm、高度30cm。砂箱分為二個部份，上部為堆砂區，下部為排水區，中間隔板打有均勻分布之洞孔，並置濾紙於其上，以防止土壤流失。試驗設備如圖3所示。

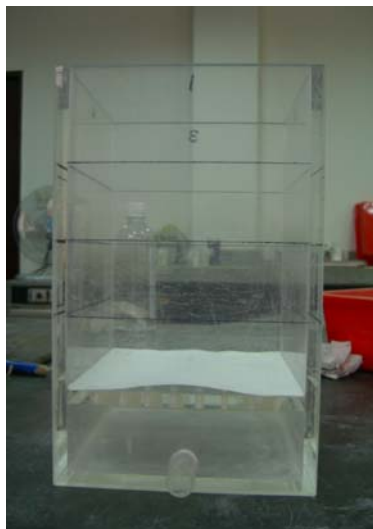


圖3 試驗設備

Figure 3. Experimental equipment

二、試驗材料

本試驗採用砂土與壤質砂土兩種不同質地之土壤依重量比例為四比一混合而成為試驗材料，試驗材料之粒徑分布曲線與基本物理性質分別如表1與圖4所示。為明顯區分本

試驗之粗、細顆粒材料，取壤質砂土之最大粒徑以下，即140號篩(粒徑0.105mm) 以下，視為細粒料。由表1與圖4顯示砂土為均勻粒徑之粗粒料，壤質砂土為均勻粒徑之細粒料。

表1 試料之基本物理性質

Table 1. Physical properties of experimental soils

基本性質	砂土	壤質砂土	試驗土體
中值粒徑 (d_{50} , mm)	1.42	0.075	1.28
特徵粒徑 (d_{90} , mm)	1.88	0.178	1.86
總體密度 (gm/cm^3)	1.31	1.39	1.59
顆粒密度 (gm/cm^3)	2.6	2.65	2.63
細粒含量(%)	2.66	100	22.13
孔隙度 f	0.46	0.49	0.4

三、試驗方法與步驟

1. 將試驗材料充分攪拌後加入砂箱內，以達到粗細材料均勻分布之目的。試驗材料係以乾燥狀態進行填置。開始供水直至試驗土體達到充分飽和為止。同時觀

2. 測砂箱內試驗材料受水流重力作用下之土砂粒沈降變化。

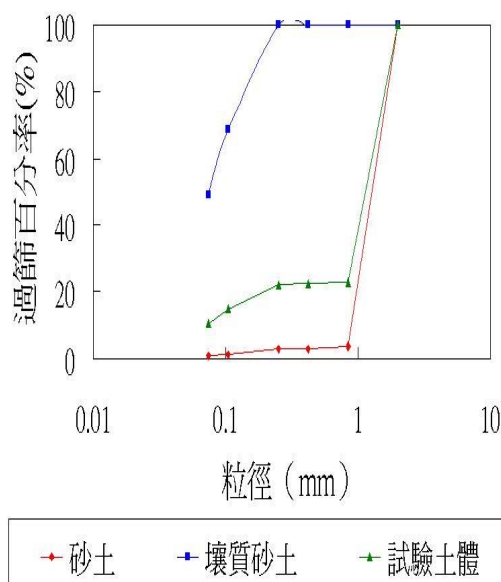


圖4 粒徑分佈圖

Figure 4. Particle size distribution of experimental soils

3. 將試驗土體分為三等分，依序為上、中、下層由砂箱中取出後，分別進行直接剪力試驗，並採取少許土樣進行含水量分析。
4. 最後將上、中、下層之試驗土體置於烘箱內烘乾 24 小時(溫度 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$)後取出，當溫度降至室溫時，分別進行篩分析試驗。
5. 改變加水量重複進行 1~4 之步驟。水量填加分別為 1100 ml、2200 ml、3300 ml、4400 ml、5500 ml。

一、土砂粒之沉降變化

為了解水流作用對於土砂之沉降變化之影響，以土體之供水量 $W(\text{Water})$ 為X軸，且以細粒含量 P_{fs} (Percentage of fine sand)為Y軸繪製關係圖(如圖5所示)。並經迴歸分析分別獲得上、中、下三層細粒料隨水分之變化關係如下：

$$P_{fs1} = -0.7064W_1 + 21.545 \quad (9)$$

$$R_1^2 = 0.7132^*$$

$$P_{fs2} = 0.2827W_2 + 22.545 \quad (10)$$

$$R_2^2 = 0.8727^{**}$$

$$P_{fs3} = 0.3336W_3 + 23.049 \quad (11)$$

$$R_3^2 = 0.9708^{**}$$

(*代表該式達10%之顯著水準，**代表該式達5%之顯著水準)

由式(9)知，其判定係數0.7132，達10%之顯著水準。由式(10)知，其判定係數0.8727，達5%之顯著水準。由式(11)知，其判定係數0.9708，達5%之顯著水準。顯示細粒土砂之含量在土體上、中、下三層中皆受供水量之影響，存在正相關之關係。

由圖5可知，隨著依次供水量的增加，土體內之細粒料含量由土體上層逐漸往下層增加。由於細顆粒土砂大多為細粒尺度之顆粒，遇水濕潤而降低其凝聚力與顆粒間摩擦力，且砂粒不具收縮性及膨脹性之特質，較利於水分流通，因此經由水分之重力作用下，細顆粒物質易沿著顆粒間孔隙往下流失。

結果與討論

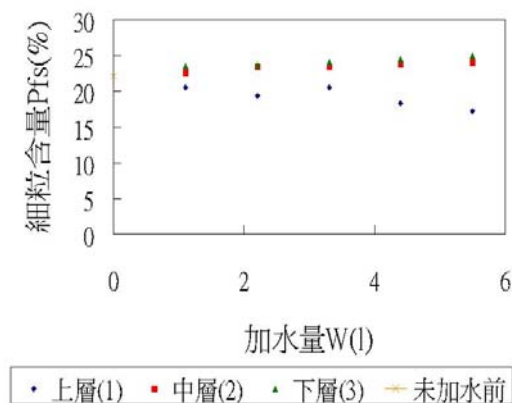


圖5 供水情形與細粒含量之關係

Figure 5. The correlation between water and the percentage of fine sand

另土體內部細顆粒物質受重力淋洗之情形，以土體上層沈降至中層為主，其上層細粒料含量之流失，隨著供水量之增加，最高可達4.86%，最小為1.68%；而於土體中層沈降至下層之過程中，土體下層之細粒料含量之增加，隨著供水量之增加，最高可達2.88%，最小為1.26%。因中層土壤接受由上層沈降而來之細顆粒物質，使得較小顆粒經由水分作用而充填於較大顆粒之中間，增加其堆砌密度，影響其整體滲透性而較上層土壤為差；且細顆粒物質受透水作用後，顆粒間之排列狀態產生改變，可能造成顆粒間之孔隙發生阻塞；此外，黏粒表面對水分之強親和力易產生水合作用，並隨時間而膨脹，導致土壤孔隙阻塞更減低其通透性。是以土體中層之洗出作用不如土體上層發達。

二、不同細粒含量之土壤抗剪強度探討

一般支配土體穩定之主要條件在於土體內部凝聚力與內摩擦特性之抵抗作用。為進一步探討細粒料含量對土壤抗剪強度之影

響，以細粒料含量 P_{fs} 為X軸，內摩擦角 ϕ 為Y軸，繪製關係圖(如圖6所示)。因砂土的凝聚力極微，故忽略凝聚力之影響，僅討論細粒料含量與內摩擦角之關係。

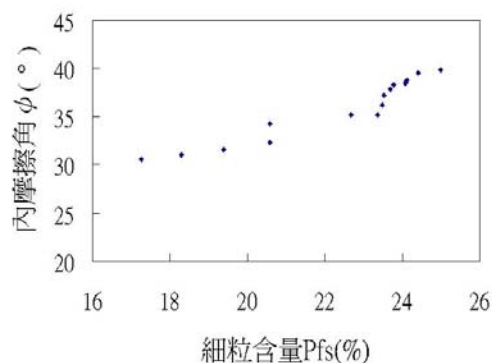


圖6 細粒含量與內摩擦角之關係

Figure 6. The correlation between the percentage of fine sand and the angle of internal friction

將此資料進行迴歸分析，得其關係式為：

$$\phi = 1.2447P_{fs} + 8.0042$$

$$R^2 = 0.9095***$$

(12)

(***代表該式達1%之極顯著水準)

由式(12)知，判定係數0.9095，達1%之極顯著水準，顯示細粒土砂之含量與內摩擦角有正相關之關係。由圖6可知，細粒料含量 P_{fs} 愈大，內摩擦角 ϕ 愈大；表示細粒料含量 P_{fs} 愈大之土體，其土體抗剪強度較大，土體穩定性較高。由於細顆粒物質受透水作用而能夠進入大顆粒中間，細粒料含量較多之土體方能獲致較土體成緊密構造，土粒互相密

接，增加其土體抗剪強度。另細粒土壤之團粒化亦增加土體內部結合強度及安定性。

三、土體保水能力之探討

為了解細顆粒物質對於土體保水能力之影響，依各組試驗所得之細粒料含量 P_{fs} 與其含水量 ω 繪製關係圖(如圖7所示)。並經迴歸分析得其關係式為：

$$\omega = 0.903P_{fs} - 8.326 \quad (13)$$

$$R^2 = 0.6416 ***$$

(***代表該式達1%之極顯著水準)

由式(13)知，判定係數 0.6416，達 1%之極顯著水準，顯示細粒土砂之含量與含水量有正相關之關係。

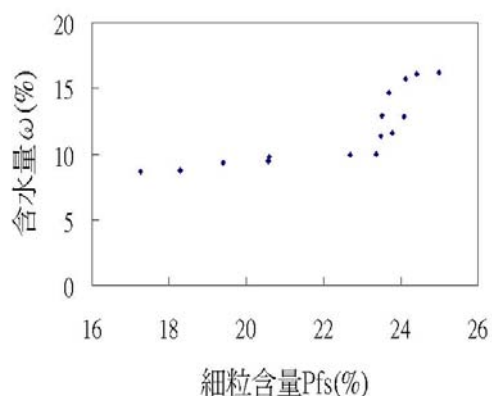


圖7 細粒含量與含水量之關係

Figure 7. The correlation between the percentage of fine sand and water content

由圖 7 可知，土體之含水量大致隨著細顆粒含量增多而變大。在細粒料含量達 23.37%以前之土體含水量差異不大，在細粒料含量達 23.37%以後之土體含水量則有較明

顯之變化趨勢，顯示當土體細粒料含量愈多時，其含水量受細粒之影響愈大。在粗、細顆粒相混之土體，粗孔隙中常被細顆粒所充填，因此細粒含量較多之土體結構較緊密，導水能力較差，擁有較高之保水能力，能將水分有效吸著於土壤孔隙中，而不易排放掉。此外，當土體結構中的孔隙小到一定的程度以後，充填於空隙中在重力作用下可以排去之自由水，可能轉化為禁閉自由水，而使得土體保水能力增強。

由圖 7 發現，在細粒料含量達 23.48%以前之土體含水量，隨著細粒料含量之增加亦緩慢增加。在細粒料含量達 23.48%以後之土體含水量，隨著細粒料含量之增加大至亦呈現增加之趨勢，然此段關係曲線有振盪現象發生，由於在此段範圍內之土體均屬於中層或下層土體，推測是因為細顆粒物質沉降至土體中層或下層時，導致該層土壤中粗、細顆粒分布不均，近而影響其土體含水量，造成細粒料含量相差不多之土體，其含水量卻有明顯差距。粗、細顆粒分布不均之土壤保水能力不如粗、細顆粒分布均勻之土壤。

四、土石流發生之臨界坡度分析

依高橋(1977)之土石流發生臨界條件之理論推導結果(如式(5)所示)，本研究由試驗結果之資料，分別推算不同供水情形下土壤各層之土石流發生臨界坡度 θ ，並與其量測到之細粒含量 P_{fs} 繪於圖8。將此資料進行迴歸分析得其關係如下：

$$\theta = 0.8192P_{fs} + 1.3836 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.9011 ***$$

(***代表該式達1%之極顯著水準)

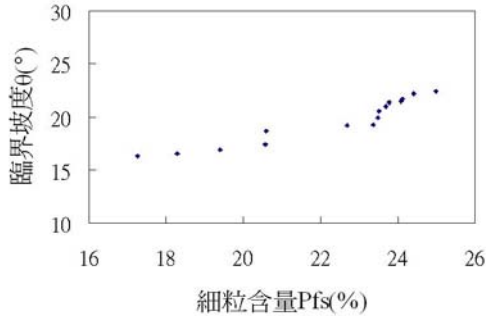


圖8 細粒含量與土石流臨界坡度之關係

Figure 8. The correlation between the percentage of fine sand and the critical slope

由式(14)知，判定係數 0.9011，達 1%之極顯著水準，顯示細粒土砂之含量與土石流發生之臨界坡度有正相關之關係。

由圖8可知，細粒料含量 P_{fs} 愈大，土石流發生之臨界坡度 θ 愈大；表示細粒料含量愈大之土體，其發生土石流之條件為坡度必須較陡；亦即坡度愈大之土體，在較小之細粒料含量時較為可能發生土石流。

砂粒通常為非凝聚性，所以對於施加應力之阻抗只有土粒間之摩擦阻抗，由式(5)知土石流發生之臨界坡度 θ 受土體內摩擦角 ϕ 之影響，且由前述說明已知土體內摩擦角 ϕ 受細粒料含量 P_{fs} 之影響。因此，土石流發生之臨界坡度 θ 間接受到細粒料含量 P_{fs} 之影響。是以隨著細顆粒物質之增加，土體發生土石流之臨界坡度亦隨之增加。

五、透水作用對土石流發生之影響

降雨入滲作用可影響土壤之結構改變，進而影響其穩定機制，因此沉積土或崩積土

等堆積土體在長期之降雨入滲作用下，細小土粒的運動可使土體產生分層特性，導致每一層之密度、滲透性、儲水量、傾斜度、入滲量與出流量並不相同，以致各土層會有不同之穩定程度，進而造成各土層之破壞條件有所差異。為了解滲流水之滲透作用對於各土層之影響，以土體供水量 W 為 X 軸，以土石流發生之臨界坡度 θ 為 Y 軸繪製關係圖(如圖9所示)。

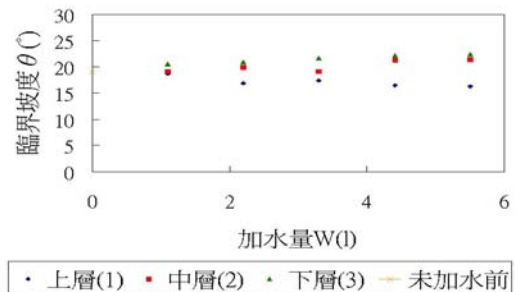


圖9 供水情形與土石流臨界坡度之關係

Figure 9. The correlation between water and the critical slope

將此資料經迴歸分析分別獲得上、中、下三層之土石流發生之臨界坡度隨水分之變化關係如下：

$$\begin{aligned}\theta_1 &= -0.4527W_1 + 18.644 \\ R_1^2 &= 0.746^*\end{aligned}\quad (15)$$

$$\begin{aligned}\theta_2 &= 0.5436W_2 + 18.41 \\ R_2^2 &= 0.7226^*\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}\theta_3 &= 0.44W_3 + 20.1 \\ R_3^2 &= 0.9801^{**}\end{aligned}\quad (17)$$

(*代表該式達10%之顯著水準，**代表該式達5%之顯著水準)

由式(15)知,其判定係數0.746,達10%之顯著水準。由式(16)知,其判定係數0.7226,達10%之顯著水準。由式(17)知,其判定係數0.9801,達5%之顯著水準。顯示土石流發生之臨界坡度在土體上、中、下三層中皆受供水量之影響,存在正相關之關係。

由圖9可知,未加水前之土體,即其細粒含量22.13%未受透水作用改變之原土體,其發生土石流之臨界坡度為 19.06° 。在不同供水條件下,土體上層之臨界坡度均小於 19.06° ,且隨著供水量之增加,土體上層之臨界坡度隨之下降。土體中層與下層之臨界坡度則均大於 19.06° ,且隨著供水量之增加,土體中層與下層之臨界坡度亦隨之增加。顯示透水作用降低了土體上層之土石流發生臨界坡度,增加土壤之不穩定性。而土體中層與下層之土壤則由於透水作用的緣故,土體穩定性較高,擁有較大之土石流發生臨界坡度。

結論與建議

本研究以砂箱試驗觀測不同供水情形下,透水作用對於邊坡土體之細顆粒物質沉降變化之影響,藉以了解此行為與土石流發生之關係,由試驗結果與討論可獲得以下之結論:

一、隨著供水量的增加,土體內之細粒料含量由土體上層逐漸往下層增加。土體內部細顆粒物質受重力淋洗之情形,以土體上層沉降至中層為主,每層土體深度為5.51cm。

二、細粒料含量 P_{fs} 愈多之土體,可增加土體抗剪強度,土體穩定性較高。

三、隨著細顆粒物質之增加,土體所能承受之土石流發生之臨界坡度亦隨之增加。

四、隨著供水量之增加,土體上層之土石流發生臨界坡度隨之下降,土體中層與下層之土石流發生臨界坡度則隨之增加。每層土體深度為5.51cm。

參考文獻

1. 萬鑫森譯(1987)「基礎土壤物理學」,國立編譯館,台北。
2. Braja M. Das(2002), Principles of Geotechnical Engineering 5E, a division of Thomson Learning, Inc.
3. 高橋保(1977),土石流の發生と流動に關する研究,京大防災研究所年報,第20卷,第B2期,第405-435頁。
4. 游繁結(1987),土石流之基礎研究(一):土石流發生機制之研究,中華水土保持學報,第18卷,第2期,第28-40頁。
5. 游繁結(1990),崩落型土石流之機制研究,行政院國家科學委員會防災科技研究報告,NSC-78-0404-P005-06B。

99年05月28日收稿

99年06月08日修改

99年06月11日接受

水土保持學報 42(3) : 305-314 (2010)

Journal of Soil and Water Conservation , 42 (3) : 305-314 (2010)