

簡易公式研究不同滲流方向對邊坡和土石流力學之影響

蕭達鴻*

摘要 本文利用土壤重力和滲流力分析滲流方向對於邊坡水力坡降、安全係數和滑動面水壓力之影響，對於四種滲流方向包括水平滲流、平行邊坡滲流、垂直滲流和垂直邊坡滲流等進行討論，結果發現水平滲流安全係數最低是因其較高孔隙水壓力所致，本文也舉一案例說明滲流對有限邊坡安全性之影響。至於土石流滲流方向對於土石流趨動角度亦有顯著影響，結果並與 Takahashi 公式 (1977、1982) 進行討論與比較。

關鍵詞：邊坡穩定、土石流、滲流、簡易公式。

Investigating the Effect of Various Seepage Directions on the Mechanism of Slope and Debris Flows by Using Simplified Formulas

Darn-Horng Hsiao*

ABSTRACT Firstly, the soil gravity force and seepage force are used to study the effect of seepage direction on the slope hydraulic gradient, safety factor and the excess pore water pressure existing on the failure plane. Four seepage directions including horizontal seepage, parallel to slope surface, vertical seepage and perpendicular to slope surface are considered. A series of related formulas is developed. It is found that the safety factor of horizontal seepage direction is lower due to the pore water pressure generated within the failure plane. In addition, a case study on the finite slope is analyzed to describe the importance of seepage direction. The initiated driving angle of debris flow is also affected significantly by seepage direction, especially when the seepage direction is near the slope angle. Finally, the results are compared with those found by Takahashi (1977, 1982).

Key Words : Slope stability, debris flow, seepage, simplified formulas.

一、前言

Das (2010) 對於邊坡力學分析有詳盡說明，特別對於邊坡滑動面水壓力公式之推導，Anderson and Sitar (1995) 曾利用應力路徑 (stress path) 圖說明水壓力上升產生土石流破壞情形，蘇苗彬 (2004) 提到滲流水平流出邊坡，可能造成邊坡趨於不穩定，故許多堆積小於理論臨界坡度仍然會發生土石流個案，Collins and Znidarcic (2004) 推導出未飽和土壤和飽和土壤之間遭

受下雨時滲流對於邊坡穩定之分析方法。Chen (2006) 研究 1990 至 2000 年三颱風對台灣東、北、中三地區 Tungmen、Chonho、Hoser 土石流，其利用航空照片、地形學變化、不連續面和大地工程力學分析邊坡穩定與否，最後提出典型台灣土石流破壞機制 (failure mechanism)，其特別在結論提到孔隙水壓力增加 (the increase of pore water pressure) 導致剪力強度 (shear resistance) 降低，可能也是土石流產生之主因。Gabet and Mudd (2006) 為研究南加州一處淺層山崩，使用三

軸 CSD (constant shear drain) 試驗儀瞭解有效應力的降低 (decrease of effective pressure) 趨使土壤發生液化, 即使緊密土壤亦會發生破壞。Wang et al. (2003) 研究 1999 年日本 Hiroshima 下雨後土石流, 發現當地地下水水位迅速暴漲, 隨後飽和土壤因液化使大批土石往下流動。Phillips (2006) 使用微地形學 (micro-morphology) 調查蘇格蘭地區土石流移動時基底 (flow base) 產生剪應變 (basal shearing)、液化 (liquefaction)、扭轉變形 (rotational deformation) 等。Capra et al. (2003) 提到墨西哥一火山灰形成山谷因大雨造成山崩使下游居民傷亡慘重, 原因可能是火山灰形成一層似黏土層不透水層, 而上方棲止水 (perched water) 水壓力上升 (increase pore water pressure) 使土石流發生, 然而黏土層不透水層誘使土石流發生之機理仍不明確。Horta and Ohta (2000) 利用 Egashira 土石流公式推導出超額孔隙水壓力公式, 並以一簡易試驗方法予以証實。至於 Wang and Sassa (2003)、Okada et al. (2003) 分別提到山崩產生水壓力和使用環剪進行礫石砂粒不排水剪力試驗之探討, Musso et al. (2004) 說明多孔介質快速滑動孔隙水壓力上升模式, 最近 Chen et al. (2010) 使用水槽研究不同黏土含量之土石流砂粒破壞機制, 並量測到水壓力之變化, D'Agostino et al. (2010) 先進行現地調查, 再以實驗室模擬, 並修正參數回歸現場分析。Ilstad et al. (2004) 試驗探討土石流滑動面水壓力變化情形。事實上邊坡和土石流現場量測到水壓力有其困難度, 原因有可能是土石流或邊坡發生破壞時水壓計儀器已損害, 或埋測地點不對等。

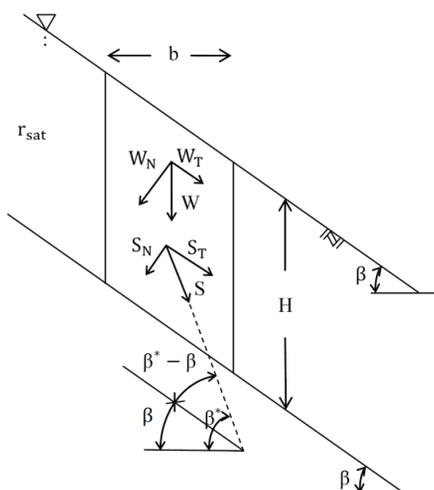


圖 1 無限邊坡分析示意圖

Fig.1 Diagram for analyzing infinite slope

由過去的研究可以瞭解邊坡或土石流下雨過後可能在滑動面產生一水壓力, 而過去研究發現要正確求取或量測並不容易, 本文目的係推導一系列簡易分析公式求得不同滲流方向對於邊坡孔隙水壓力或土石流趨動角度之影響, 而簡易公式可以瞭解水壓力變化值, 並可提供現地量測之比對, 除此之外, 就邊坡而言對於分析結果則將進行水力坡降、安全係數和滑動面處激發水壓力討論, 並應用於有限邊坡案例, 至於土石流則與 Takahashi 成果進行比較, 並延伸其研究成果。

二、無限邊坡公式推導與分析

1. 無限邊坡分析

圖 1 為無限邊坡分析示意圖, 假設邊坡為一無限長度且均質性邊坡, 坡度與水平線夾角為 β , 破壞平面距邊坡表面處高度為 H , 取一切片 (slice) 進行分析, 切片寬度為 b , 並設切片土體飽和土壤單位重為 γ_{sat} , 由於水流為滲流狀態而非靜止情形, 將切片內部受力分為土壤重量 (已扣除水浮力) W , 和滲流力 S 二者, 其中 W 方向朝下, 但 S 方向假設與水平線夾一角度為 β^* , 再將二者分成與破壞面平行和垂直二分量, 其中 W 分成 W_T 和 W_N , 而 S 分為 S_T 和 S_N , 各力公式分別如式 (1) 至式 (6)。

$$W = \gamma' bH \quad (1)$$

$$W_T = \gamma' bH \sin \beta \quad (2)$$

$$W_N = \gamma' bH \cos \beta \quad (3)$$

$$S = i \gamma_w bH \quad (4)$$

$$S_T = i \gamma_w bH \cos(\beta^* - \beta) \quad (5)$$

$$S_N = i \gamma_w bH \sin(\beta^* - \beta) \quad (6)$$

上述六式, γ' = 浸水土壤單位重, i = 水力坡降 (hydraulic gradient), γ_w = 水單位重, 至於 b 、 H 、 β 和 β^* 如前面定義。

圖 2 為分析水力坡降示意圖, 圖中有二組流線 (flow lines) 和等勢能線 (equi-potential lines), 取一邊坡 AB 線段其長為 l , 則此線段 A 和 B 二點總水頭 h 分別為 $l \sin \beta$ 和 0 , 圖中 B 和 D 總水頭 h 相同; 即 $h = 0$ 。並由圖中指出 A 和 D 二點距離為 $l \cos(\beta^* - \beta)$, 則其水力坡降如式 (7) 示。

$$i = \frac{\sin \beta}{\cos(\beta^* - \beta)} \quad (7)$$

圖 3 為四種不同滲流方向，分別是 (1) 水平滲流、(2) 與邊坡表面平行滲流、(3) 垂直滲流和 (4) 與邊坡表面垂直滲流。而各者 β^* 依圖 1 分別為 0° 、 β 、 90° 和 $90^\circ + \beta$ 。將此四者代入式 (7) 可求出各情形下水力坡降 i 值。

(1) 水平滲流 $i = \tan \beta$ (8a)

(2) 與邊坡平行滲流 $i = \sin \beta$ (8b)

(3) 垂直滲流 $i = 1$ (8c)

(4) 與邊坡垂直滲流 $i = \infty$ (8d)

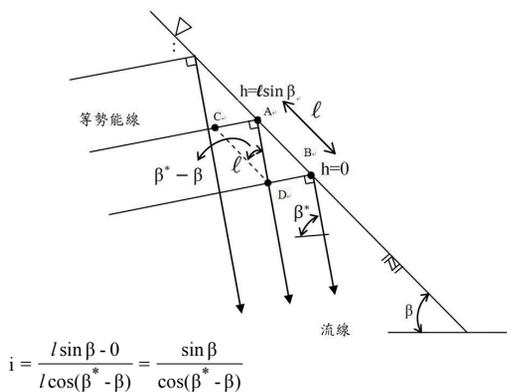
圖 4 利用流線和等勢能線求得上述四者水力坡降，其結果與式 (8) 相同。其中圖 4(d) 當流線方向很靠近與坡面垂直時，雖然表面 A 和 B 二點總水頭 h 仍然是 $l \sin \beta$ 和 0，前後二條等勢能線 h 差值為 $l \sin \beta$ ，但因距離接近 0，因此 i 值仍為 ∞ 。

一般土壤剪力強度可利用 Mohr-Coulomb 理論 $\tau_f = C + N \tan \phi$ ，若 C =凝聚力 (cohesion force)、 N =正向力 (normal force)、 T =剪力 (shear force) 和 ϕ =內摩擦角 (internal friction angle)，當計算邊坡安全係數時，則可使用式 (9)。

$$FS = \frac{C + N \tan \phi}{T} \quad (9)$$

如果不考慮土壤凝聚力； $C=0$ ，則上式化為

$$FS = \frac{\{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta - [\gamma_w H \cos^2 \beta - \gamma_w H \cos \beta \sin \beta \tan(\beta^* - \beta)]\}}{\gamma_{sat} H \sin \beta \cos \beta} \tan \phi \quad (17)$$



$$i = \frac{l \sin \beta - 0}{l \cos(\beta^* - \beta)} = \frac{\sin \beta}{\cos(\beta^* - \beta)}$$

圖 2 無限邊坡流線與等勢能線示意圖
Fig.2 Flow lines and equi-potentials for infinite slope

$$FS = \frac{N \tan \phi}{T} \quad (10)$$

而正向力和剪力分別如式 (11) 和 (12)。

$$N = W_N + S_N \quad (11)$$

$$T = W_T + S_T \quad (12)$$

將上二式代入式 (10) 得下式。

$$FS = \frac{(W_N + S_N) \tan \phi}{W_T + S_T} \quad (13)$$

將各項參數代入式 (13) 得出式 (14)。

$$FS = \frac{[\gamma' b H \cos \beta + i \gamma_w b H \sin(\beta^* - \beta)] \tan \phi}{\gamma' b H \sin \beta + i \gamma_w b H \cos(\beta^* - \beta)} \quad (14)$$

再將式 (7) 水力坡降值代入式 (14)，整理得出

$$FS = \frac{[\gamma' b H \cos \beta + \gamma_w b H \sin \beta \tan(\beta^* - \beta)]}{\gamma_{sat} b H \sin \beta} \tan \phi \quad (15)$$

圖 3 四種滲流情形以式 (15) 計算得出下列各式。

(1) 水平滲流 $FS = \frac{\gamma' - \gamma_w \tan^2 \beta}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$ (16a)

(2) 與邊坡平行滲流 $FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$ (16b)

(3) 垂直滲流 $FS = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$ (16c)

(4) 與邊坡垂直滲流 $FS = \infty$ (16d)

至於圖 1 斜坡面孔隙水壓力，可利用式 (15) 分母和分子各項參數乘上 $\frac{\cos \beta}{b}$ 得到式 (17)。

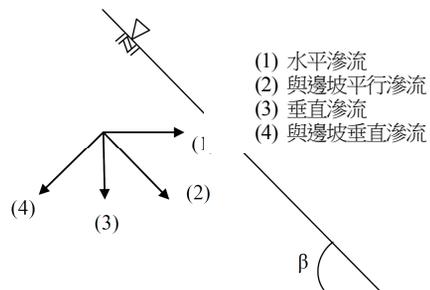


圖 3 四種不同滲流方向
Fig.3 Four various seepage directions in the slope

式 (17) 分子為有效應力乘上 $\tan\phi$ ，利用有效應力觀念 $\sigma' = \sigma - u_w$ ，上式 [] 值就是孔隙水壓力 u_w ，其值如式 (18)。

$$u_w = \gamma_w H \cos^2 \beta - \gamma_w H \cos \beta \sin \beta \tan(\beta^* - \beta) \quad (18)$$

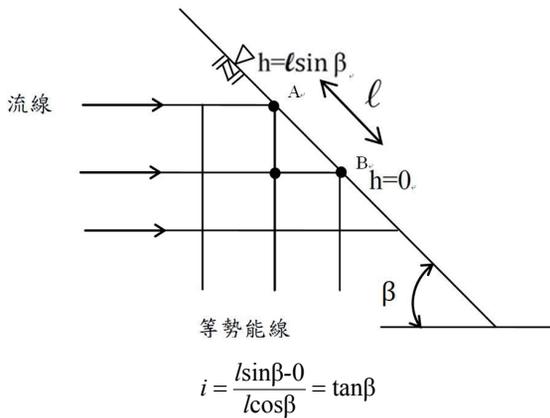
圖 3 係滲流方向四種情形其孔隙水壓力可利用式 (18) 求得下式。

(1) 水平滲流 $u_w = \gamma_w H$ (19a)

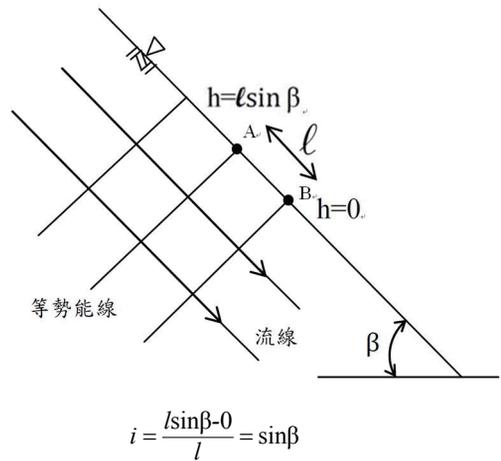
(2) 與邊坡平行滲流 $u_w = \gamma_w H \cos^2 \beta$ (19b)

(3) 垂直滲流 $u_w = 0$ (19c)

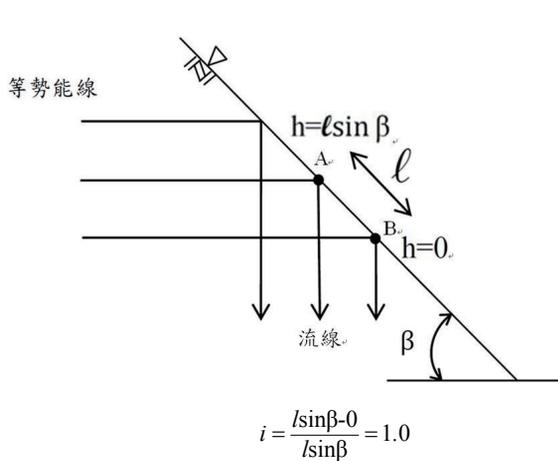
(4) 與邊坡垂直滲流 $u_w = -\infty$ (19d)



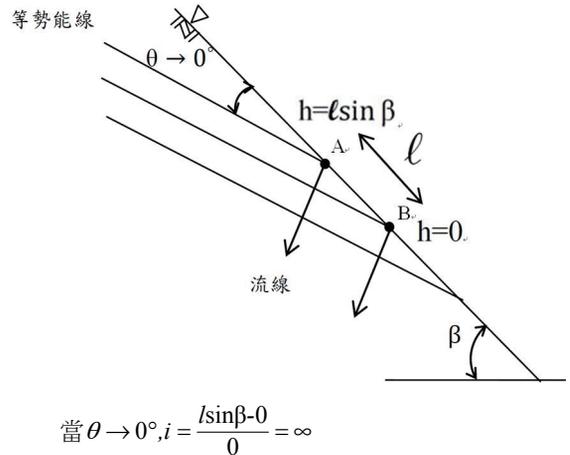
(a) 水平滲流 ($\beta^* = 0^\circ$)



(b) 與邊坡坡面平行滲流 ($\beta^* = \beta$)



(c) 垂直滲流 ($\beta^* = 90^\circ$)



(d) 與邊坡坡面垂直滲流 ($\beta^* = 90^\circ + \beta$)

圖 4 四種不同滲流方向的流線網和水力坡降

Fig.4 Four various seepage directions and their flow net and hydraulic gradients

2. 結果與討論

舉一無限邊坡進行不同滲流方向的討論，其中邊坡坡度和滑動面坡度 β 皆為 30° ，土壤內摩擦角 ϕ 為 35° ，飽和土壤單位重 γ_{sat} 為 $2t/m^3$ ，且邊坡滑動面距地表面 H 為 $2m$ 。

圖 5 為使用式 (8) 計算出水力坡降 i 與滲流力方向 β^* 之關係圖。圖中指出水平滲流 i 為 0.577 ，而水平滲流 i 為 0.5 、與邊坡平行滲流垂直滲流 i 為 1.0 與邊坡垂直滲流 i 為 ∞ 。圖中①至④分別表示四種滲流方向，依序包括水平滲流、與邊坡表面平行滲流、垂直滲流和與邊坡表面垂直滲流。

圖 6 為使用式 (16) 計算出安全係數 FS 與滲流方向 β^* 之關係圖。圖中指出 β^* 增加安全係數 FS 隨而增大。圖中指出水平滲流 FS 為 0.4，而水平滲流 FS 為 0.6、與邊坡平行滲流垂直滲流 FS 為 1.21 和與邊坡垂直滲流 FS 為 ∞ 。由此可說明蘇苗彬 (2004) 提出滲流方向若往外，其 FS 將降低。

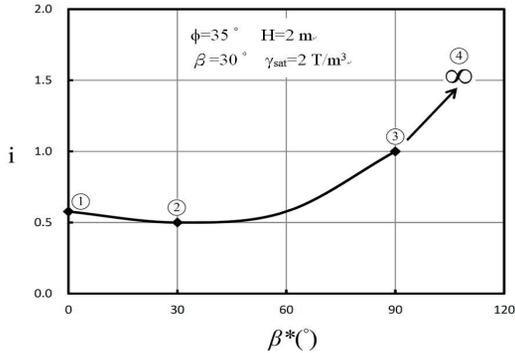


圖 5 不同滲流方向對水力降比之影響

Fig.5 Effect of seepage direction on hydraulic gradient

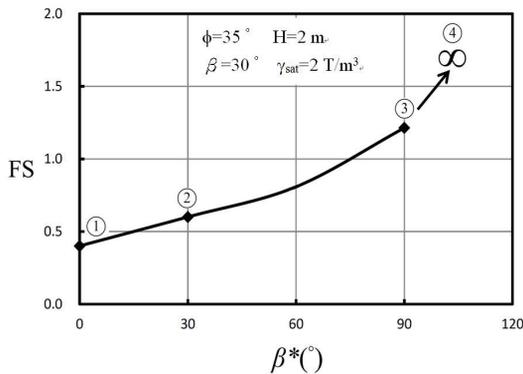


圖 6 不同滲流方向對安全係數之影響

Fig.6 Effect of seepage direction on safety factor

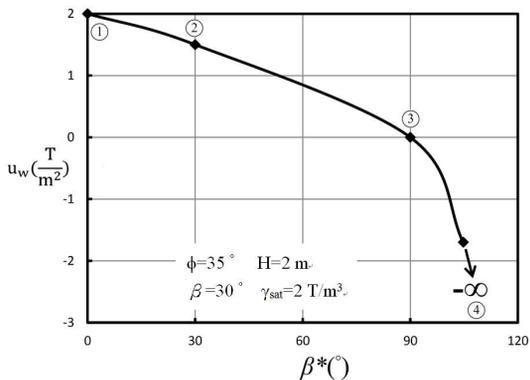


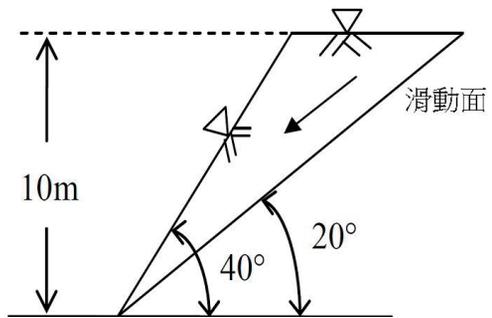
圖 7 不同滲流方向對滑動面水壓力之影響

Fig.7 Effect of various seepage directions on the water pressure existing on failure plane

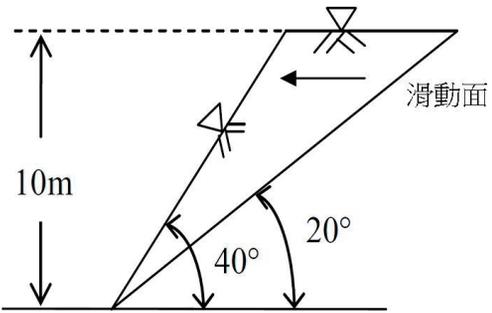
圖 7 為使用式 (19) 計算出斜坡面孔隙水壓力 u_w 與滲流方向 β^* 之關係圖，圖中指出 β^* 增加孔隙水壓力 u_w 隨而降低。圖中指出水平滲流 u_w 為 $2t/m^2$ ，而水平滲流 u_w 為 $1.5t/m^2$ 、與邊坡平行滲流垂直滲流 u_w 為 $0t/m^2$ 與邊坡垂直滲流 u_w 為 $-\infty$ 。由圖 6 和圖 7 可說明因滲流方向改變，由於水壓力的減少會使邊坡安全係數增加。

再將上述公式應用在有限邊坡工程，地下水位在地表面處，如圖 8 所示，已知飽和土壤單位重 $\gamma=2t/m^3$ ，邊坡坡面為 40° ，滑動面角度 $\beta=20^\circ$ ，土壤凝聚值 $c=0$ ，內摩擦角 $\phi=30^\circ$ 。其中圖 8(a) 係假設滲流方向與滑動面同，但圖 8(b) 滲流方向為水平向。

圖 8(a) 邊坡滑動面上方塊體利用公式 (1) 至 (6) 求出 $W_T=26.59t/m$ ， $W_N=73.06t/m$ ， $S_T=26.59t/m$ ， $S_N=0t/m$ ，則代入公式 (13) 求得安全係數 FS 為 0.791。如前面相同計算方式，圖 8(b) 中 $W_T=26.59t/m$ ， $W_N=73.06t/m$ ， $S_T=26.59t/m$ ， $S_N=-9.68t/m$ ，則代入公式 (13) 求得安全係數 FS 為 0.688，二者計算結果，圖 8(b) 因滲流方向為水平向而使計算結果較小，原因為滲流往外致使滑動面正向有效應力降低所致。



(a) 有限邊坡但滲流方向與滑動面相同



(b) 有限邊坡但滲流方向為水平向

圖 8 不同滲流方向有限邊坡分析示意圖

Fig.8 Diagram to analyze the finite slope when considering different seepage direction

三、土石流公式推導與分析

1. 土石流分析

再將上述方法應用在土石流，圖 9(a) 為一土石流示意圖，假設邊坡為一無限長度且均質性，其富多孔隙且地表有逕流現象，邊坡坡度為 β ，地表逕流高度為 h_0 ，土石流高度為 h_d ，總高度為 h ，並設土體泥沙含量體積濃度為 C^* ，土石流單位重為 σ ，水單位重為 ρ ，寬度為 b ，圖 9(b) 將土石流內部受力分為土壤重量（已扣除水浮力） W ，和滲流力 S 二者，其中 W 方向朝下，但 S 方向假設與水平線夾一角度為 β^* ，再將二者分成與破壞平面平行和垂直二分量，其中 W 分成 W_T 和 W_N ，而 S 分為 S_T 和 S_N ，圖中各力公式分別如式 (20) 至式 (25)。

$$W = C^*(\sigma - \rho)h_d b \quad (20)$$

$$W_T = C^*(\sigma - \rho)h_d b \sin \beta \quad (21)$$

$$W_N = C^*(\sigma - \rho)h_d b \cos \beta \quad (22)$$

$$S = i p h b \quad (23)$$

$$S_T = i p h b \cos(\beta^* - \beta) \quad (24)$$

$$S_N = i p h b \sin(\beta^* - \beta) \quad (25)$$

i 值如式 (7) 所示，當考慮土石流運動界面時，剪應力 τ 和剪力強度 τ_L 分別如式 (26) 和 (27)，其中剪力強度不考量凝聚力； $C=0$ 。

$$\tau = W_T + S_T \quad (26)$$

$$\tau_L = (W_N + S_N) \tan \phi \quad (27)$$

當 $\tau = \tau_L$ 時土石流開始流動， $W_T + S_T = (W_N + S_N) \tan \phi$ 並代入式 (7) 水力坡降公式推導得下式。

$$\begin{aligned} & C^*(\sigma - \rho)h_d \sin \beta + \rho h \sin \beta \\ & = C^*(\sigma - \rho)h_d \cos \beta \tan \phi \\ & + \rho h \sin \beta \tan(\beta^* - \beta) \tan \phi \end{aligned} \quad (28)$$

再將 $h = h_0 + h_d$ 代入上式，並除上 $h_d \cos \beta$ 得出下式。

$$\begin{aligned} & C^*(\sigma - \rho) \tan \beta + \rho \left(1 + \frac{h_0}{h_d}\right) \tan \beta \\ & = C^*(\sigma - \rho) \tan \phi \\ & + \rho \left(1 + \frac{h_0}{h_d}\right) \tan \beta \tan(\beta^* - \beta) \tan \phi \end{aligned} \quad (29)$$

上式將 $\tan \beta$ 整理在公式左側，可得式 (30)。

$$\begin{aligned} \tan \beta = & \frac{C^*(\sigma - \rho)}{C^*(\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{h_d}\right) [1 + \tan(\beta - \beta^*) \tan \phi]} \cdot \tan \phi \end{aligned} \quad (30)$$

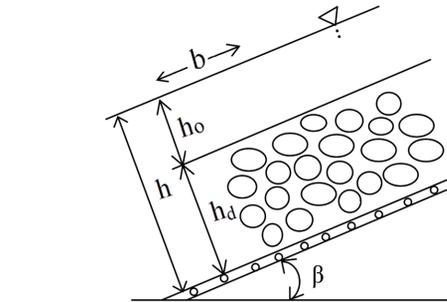
2. 結果與討論

Takahashi 進行土石流研究，在不考慮凝聚力之狀況下，曾提出四公式如式 (31) 至 (34)。其中式 (31) 是無逕流且無地下水，式 (32) 是考慮圖 10(a) 模式一當 $d\tau/dh > d\tau_L/dh$ 所推導公式，式 (33) 是考慮圖 10(b) 模式二當 $\tau > \tau_L$ 並且 $a_L = h_d$ 時所推導公式，至於式 (34) 為實驗室結果，一般 κ 介在 0.7-1.0 之間。

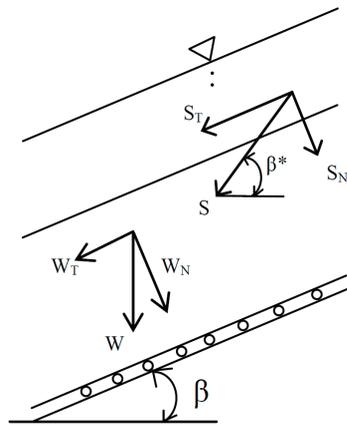
$$\theta = \phi \quad (31)$$

$$\tan \beta = \frac{C^*(\sigma - \rho)}{C^*(\sigma - \rho) + \rho} \tan \phi \quad (32)$$

$$\tan \beta = \frac{C^*(\sigma - \rho)}{C^*(\sigma - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h_0}{h_d}\right)} \tan \phi \quad (33)$$



(a) 分析示意圖



(b) 各作用力方向

圖 9 土石流分析示意圖與各力之方向

Fig.9 Diagram to analyze the debris flow and the direction of each separated exerting force

當 $\beta^*=\beta$ 時, 式 (30) 和式 (33) 是相同的。下式則為 Takahashi 實驗結果。

$$\tan\beta = \frac{C^*(\sigma-\rho)}{C^*(\sigma-\rho)+\rho(1+\kappa^{-1})} \tan\phi \quad (34)$$

舉一例說明上述公式, 各項參數假設如下, $C^*=0.7$, $\sigma=2.65\text{g/cm}^3$, $\rho=1.0\text{g/cm}^3$, $\kappa=0.7$, $\tan\phi=0.8$, $h_0=1\text{m}$, $h_d=2\text{m}$, 圖 11 為式 (30) 至 (34) 計算結果, 其中式 (30) 其滲流方向 β^* 分別為 0° 、 β 和 20° , 圖中說明式 (31)、(32) 和 (34) 為與 y -軸平行之直線, 本文所推導式 (30) 和 Takahashi 式 (33) 其中 h_0/h_d 與 β 關係為一曲線, 但結果會因 β^* 而有差異。圖 11 無法說明更細微數據, 再利用表 1 說明, 表 1 為 β^* 為 0° 、 β 和 20° 三者, 當 $\tan\beta/(\sigma/\rho-1)=0.162$ 、 0.1 、 0.01 和 0.001 各者 h_0/h_d 的結果, 發現滲流方向如與滑動面不一致, 結果會有較大分歧, 以 $\beta=15^\circ$ 為例; 即 $\tan\beta/(\sigma/\rho-1)=0.162$, 依式 (33) 其 h_0/h_d 為 1.301 , 但滲流方向水平時 $\beta^*=0^\circ$, 其 h_0/h_d 為 0.895 , 如果 β^* 為 20° 則為 1.475 , 其中 h_0/h_d 越小表示相同條件下, 土石流滲流高度 h_0 須較小, 否則將趨動土石流。

四、結 論

本文利用土壤重力和滲流力分開計算方法, 分析滲流方向對於邊坡和土石流之影響。

1. 當不考慮凝聚力 and 滲流速度頭時, 本文發展出不同滲流方向力學公式, 可應用在無限邊坡和土石流。
2. 無限邊坡並就滲流力水力坡降、安全係數和滲流時滑動面水壓力進行討論, 其中滲流力為水平方向時, 安全係數最低, 當滲流方向垂直直邊坡表面

表 1 β^* 為 0° 、 β 和 20° 三者分析結果

Table 1 Results if β^* equals to 0° 、 β and 20° respectively

		$\beta^*=0^\circ$			
$\tan\beta/(\sigma/\rho-1)$	0.162	0.100	0.010	0.001	
h_0/h_d	0.895	2.926	53.125	557.052	
		$\beta^*=\beta$			
$\tan\beta/(\sigma/\rho-1)$	0.162	0.100	0.010	0.001	
h_0/h_d	1.301	3.445	53.845	557.845	
		$\beta^*=20^\circ$			
$\tan\beta/(\sigma/\rho-1)$	0.162	0.100	0.010	0.001	
h_0/h_d	1.475	4.229	74.776	785.694	

時, 安全係數將達 ∞ 。並舉一有限邊坡案例分析不同滲流方向對安全係數之影響, 其中考慮部份滲流力為水平方向時, 其安全係數將會較滲流方向平行邊坡時為低。

3. 當公式應用在土石流時, 本文結果延伸 Takahashi 之成果, 以 $\beta=15^\circ$ 為例, 當滲流方向為水平方向時, 其 h_0/h_d 將較小, 表示其滲流高度 h_0 須較小, 否則將更易發生土石流。

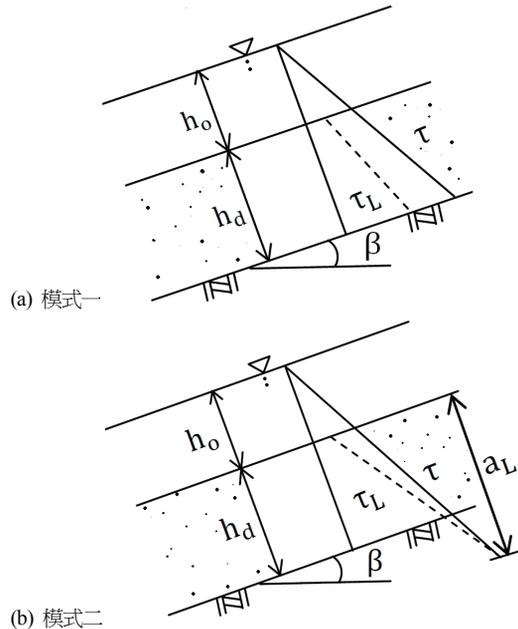


圖 10 二種分析土石流驅動角度模式 (摘自 Takahashi, 1977)

Fig.10 Two models to analyze debris flow (from Takahashi, 1977)

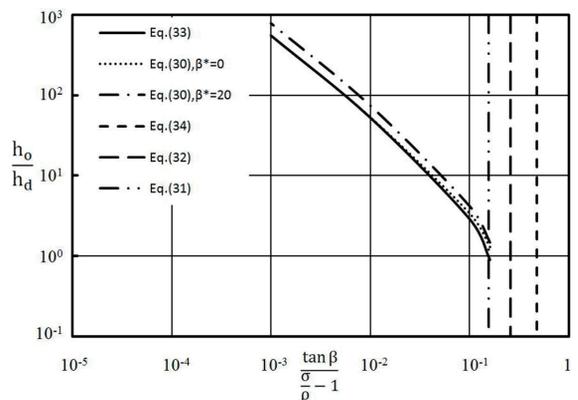


圖 11 各種土石流分析模式 $\tan\beta/(\sigma/\rho-1)$ 和 h_0/h_d 關係圖

Fig.11 The relation between $\tan\beta/(\sigma/\rho-1)$ and h_0/h_d for each formula for analyzing debris flow

參考文獻

- [1] 高橋保 (1977), 「土石流の発生と流動に関する研究」, 京都大學防災研究所年報第 20 號, B-2, 405-435。(Takahashi, T. (1977). *A Mechanism of Occurrence of Mud-Debris Flows and Their Characteristics in Motion*. Annual Report of Prevention Research Disaster Institute, Kyoto University, 20(B-2), 405-435. (in Japanese))
- [2] 高橋保 (1982), 「土石流の停止・堆積機構に関する研究(3)--土石流扇状地の二次侵食」, 京都大學防災研究所年報第 25 號, B-2, 327-348。(Takahashi, T. (1982). *Study on the Deposition of Debris Flows (3)-Erosion of Debris Fan*. Annual Report of Prevention Research Disaster Institute, Kyoto University, 25 (B-2), 327-348. (in Japanese))
- [3] 蘇苗彬 (2004), 「水力類土石流發生模式之研究—文之討論」, 中華水土保持學報, 35(1), 89-94。(Su, M.B. (2004). Discussion on "Occurrence model of Debris Flows Triggered by Water Power," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(1), 89-94. (in Chinese))
- [4] Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of Rainfall-induced Debris Flow." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(7), 544-552.
- [5] Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). "Stability Analysis of Rainfall Induced Landslide." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(4), 362-372.
- [6] Chen, H., Dadson, S., and Chi, Y.G. (2006). "Recent Rainfall-induced Landslides and Debris Flow in Northern Taiwan." *Geomorphology*, 77, 112-125.
- [7] Capra, L., Lugo-Hubp, J., and Borselli, L. (2003). "Mass Movements in Tropical Volcanic Terrains: the Case of Teziutla'n (Me'xico)." *Engineering Geology*, 69, 359-379.
- [8] Chen, N.S., Zhou, W., Yang, Ch.L., Hu, G.Sh., Gao, Y. Ch., and Han, D. (2010). "The Processes and Mechanism of Failure and Debris Flow Initiation for Gravel Soil with Different Clay Content." *Geomorphology*, 121, 222-230.
- [9] D'Agostino, V., Cesca, M., and Marchi, L. (2010). "Field and Laboratory Investigations of Runout Distances of Debris Flow in the Dolomites (Eastern Italian Alps)." *Geomorphology*, 115, 294-304.
- [10] Das, B.M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th Ed., Cengage Learning Co.
- [11] Gabet, E.J., and Mudd, S.M. (2006). "The Mobilization of Debris Flows from Shallow Landslides." *Geomorphology*, 74, 207-218.
- [12] Hortta, N., and Ohta, T. (2000). "Pore-Water Pressure of Debris Flows." *Phys. Chem. Earth (B)*, 25(4), 381-385.
- [13] Ilstad, T., Marr, J.G., Elverhøi, A., and Harbitz, C.B. (2004). "Laboratory Studies of Subaqueous Debris Flow by Measurements of Pore-Fluid Pressure and Total Stress." *Marine Geology*, 213, 403-414.
- [14] Musso, A., Federico, F., and Troiano, G. (2004). "A Mechanism of Pore Pressure Accumulation in Rapidly Sliding Submerged Porous Blocks." *Computers and Geotechnics*, 31, 209-226.
- [15] Okada, Y., Sassa, K., and Fukuoka, H. (2004). "Excess Pore Pressure and Grain Crushing of Sands by Means of Undrained and Naturally Drained Ring-shear Tests." *Engineering Geology*, 75, 341-359.
- [16] Phillips, E. (2006). "Micromorphology of a Debris Flow Deposit: Evidence of Basal Shearing, Hydrofracturing, Liquefaction and Rotational Deformation during Emplacement." *Quaternary Science Reviews*, 25, 720-738.
- [17] Wang, G., Sassa, K. and Fukuoka, H. (2003). "Downslope Volume Enlargement of a Debris Slide—debris Flow in the 1999 Hiroshima, Japan, Rainstorm." *Engineering Geology*, 69, 309-330.
- [18] Wang, G., and Sassa, K. (2003). "Pore-pressure Generation and Movement of Rainfall-induced Landslides: Effects of Grain Size and Fine-particle Content." *Engineering Geology*, 69, 109-125.

2011年11月25日 收稿

2012年05月23日 修正

2012年06月18日 接受

(本文開放討論至 2013 年 6 月 30 日)