

降雨參數對堰塞壩穩定之影響分析

蔡佩勳^[1] 馮正一^{[2]*} 林建翰^[1] 游繁結^[2]

摘要 本文以 FLAC 有限差分軟體之二相流模式進行非飽和土壤暫態滲流分析，計算不同時間下所假設之堰塞壩的飽和度與孔隙水壓分布。假設之堰塞壩穩定性則以強度折減法計算其安全係數。由結果顯示，壩體材料滲透性增加，壩體破壞之時間越早。坡度較小的堰塞壩之邊坡穩定影響時間較慢，但從穩定到滑動破壞之時間比坡角大者短。尖峰降雨強度越大，壩體越趨不穩定。

關鍵詞：堰塞壩、穩定性、入滲、非飽和。

Influence of the Rainfall Parameters on the Stability of Landslide Dams

Pei-Hsun Tsai^[1] Zheng-Yi Feng^[2] Jian-Han Lin^[1] Fan-Chieh Yu^[2]

ABSTRACT This study investigates transient seepage using a two-phase flow scheme in finite difference code, FLAC. The saturation of pore water pressure distribution and the stability of the assumed landslide dams are calculated. The safety factors of the assumed landslide dams are evaluated using the strength reduction technique. The results show that when we increase the saturated permeability of the dam materials, dam failure occurs earlier than those dams with smaller saturated permeability. When the slope angles of the dams are small, the timing of failure is slower than those dams with large slope angles. However, the durations of the failure process of dams with smaller slope angle are shorter than those of dams with larger slope angles. When the peak intensity of rainfall is higher, dams are less stable.

Key Words : Landslide dam, stability, infiltration, unsaturate.

一、前言

在集中降雨後往往造成許多天然災害，例如容易發生山崩及土石流，而這些流下來的土石阻塞河道，使溪水無法向下流動，因此溪水將慢慢蓄積在崩塌地的上游而形成堰塞湖。這些形成的堰塞湖通常都是相當不穩定且危險，很容易在豪雨時發生再次崩滑，此將使堰塞湖大量湖水夾雜堰塞壩之土石材料而流向下游，造成下游居民生命財產上的重大損失。堰塞壩破壞的模式一般可分為溢頂、滑動或管湧破壞，本研究將只針對滑動破壞的型式進行討論。堰塞壩形成後，由於壩體土壤呈非飽和狀態，而上游邊坡土壤之飽和度與孔隙水壓力因水位之上升而增加，這些情況不僅讓壩體之含水量上升與土體重量增加，土壤之負孔隙水壓的大小與範圍也逐漸減少，造成壩體內有效應力下降，因剪力強度之降低而產生邊坡滑動破壞。若在因雨水下滲壩體內部，更將助長此趨勢之發展。因此，不同降雨的因素對堰塞壩之穩定性及可能滑動破壞時間之影響程度是一個重要的課題。

堰塞壩在上游側水位上升以及雨水入滲壩體的分析是一個非飽和土壤之暫態滲流問題，亦即壩體內部之飽和度與孔隙水壓隨時間而異，因此本研究採用 FLAC 5.0 之二相流模式進行暫態滲流模擬，以獲得在不同時間下壩體之飽和度與孔隙水壓分布，再利用力學分析模式，以強度折減法分析堰塞壩穩定之安全係數，以了解壩體在不同影響參數下之穩定性。本研究探討堰塞壩穩定之影響參數包括土壤之飽和滲透係數、邊坡坡度、兩型分佈及降雨強度。

依據 Schuster and Costa (1986) 針對 83 個已知破壞的堰塞湖進行統計，發現 44% 的堰塞湖只維持了一個禮拜或更少時間就潰決，能維持超過一年之堰塞湖不到 9%。由此可知，堰塞壩因結構不佳，潰堤時間通常較短，因此評估堰塞壩之可能壽命是相當重要。Tsaparas et al. (2002) 以有限元素法模擬分析降雨強度及飽和滲透係數對均質土壤邊坡之穩定性，其結果顯示降雨強度越強，邊坡越容易發生滑動；當土壤之飽和滲透係數較低時，水分不易入滲土體，致入滲量就越低。陳主惠等 (2004) 研究結果發現，無限邊坡在無地表逕流的情況下，降

[1] 朝陽科技大學營建工程系
Department of Construction Engineering Chaoyang University of Technology, Taichung, Taiwan.

[2] 國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan.

* Corresponding Author. E-mail : tonyfeng@nchu.edu.tw

雨過後之土壤邊坡，坡度為控制土壤邊坡穩定之主要參數。當坡度略大於土壤摩擦角時，土壤將處於臨界破壞狀態（即 F.S.=1）。在有地表逕流的情況下，將發生浸潤線以上之淺層滑動破壞，受土層表面因逕流所產生孔隙水壓之影響。Zhang, et al. (2004) 利用有限元素程式 SEEP/W 分析非飽和土壤邊坡之穩定，他們認為雨水入滲將影響邊坡之負孔隙水壓消散 (dissipate)，也影響非飽和土壤邊坡之穩定性。但如果土體儲水能力夠大且飽和滲透係數很小，即使入滲率大於等於土壤飽和滲透係數，負孔隙水壓之消散時間可能大於地表降雨延時，則此非飽和土壤邊坡之穩定性較不受降雨入滲之影響。Awal et al. (2007) 利用有限差分法預測壩體滲流破壞之時間及上邊坡水位入滲壩體過程中，量測不同位置的飽和度隨時間變化之情況，數值結果並與水槽試驗結果做比較，在飽和度歷時曲線上兩者之結果相符。然而，在預測壩體破壞時間上有些許差異。Tsai (2008) 利用 Iverson (2000) 水文地質模式結合無限邊坡分析，討論在暴雨的情況下不同雨型對邊坡淺層滑動之影響，結果顯示前峰雨型發生滑動所需的降雨延時最短。Dahal et al. (2009) 利用有限元素法進行邊坡穩定分析，結果發現土壤性質、水文條件及人為開發是影響當地邊坡穩定之主要因素。許嘉鳳 (2009) 利用有限元素軟體 GeoStudio 分析新店市的山坡地社區之邊坡穩定分析，由其結果得知颱風過後的安全係數有較明顯變化。在強度折減法中，有效凝聚力 c' 值之折減與邊坡破壞前的安全係數之變化大致呈線性關係， c' 值之每 10% 折減率對應 3.5% 安全係數的降低率。Huang et al. (2009) 利用有限差分法分析堰塞壩上游水位急速洩降時對壩體安全性之影響，由結果得出堰塞壩在急速洩降時安全係數會隨著上游水位高度之降低而提高。Rahimi et al. (2011) 以有限元素法模擬前期降雨及不同降雨雨型對邊坡穩定之影響，結果顯示尖峰降雨強度越大時，對邊坡穩定之影響也越大。在降雨雨型的影響中，後峰雨型對邊坡穩定影響較大，但發生邊坡不穩定的時間較長。楊宏慶 (2012) 利用有限元素軟體 GeoStudio 分析台北金山鄉三河溪與高雄甲仙小林村邊坡之破壞，探討不同的邊坡材料、坡角、坡高、地下水水位及降雨類型等影響，其結果顯示坡角、坡高、水力傳導係數及降雨強度越高時，邊坡越容易產生破壞。而在降雨強度高的情況下，地下水水位面的深度對邊坡穩定之影響較不顯著。

堰塞壩可能因豪雨等因素產生二次潰壩現象，因此降雨可能影響壩體之安全性，因此研究堰塞壩在不同降雨參數下壩體邊坡滑動的「門檻時間點」，有利於堰塞壩防救災上，利用降雨量之監測來評估堰塞壩的安全性。

二、研究方法

1. 二相流理論 (two-phase flow)

FLAC (Itasca, 2005) 之二相流模式對非飽和土壤中水與氣體之流量方程式，可以達西定律表示如下：

$$q_i^w = -k_{ij}^w \kappa_r^w \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{P}{\rho_w g} - x_k \right) \quad (1)$$

$$q_i^g = -k_{ij}^g \frac{\mu_w}{\mu_g} \kappa_r^g \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{P}{\rho_g} - x_k \right) \quad (2)$$

式中， q 為流量； k_{ij}^w 為飽和滲透係數； κ_r 為相對滲透係數，為有效飽和度 (S_e) 之函數； μ 為動力黏度； P 為孔隙壓力； ρ 為密度。上標的 g 表示氣體、 w 表示水。相對飽和度 S_e 與相對滲透率 κ_r 之關係公式如下：

$$\kappa_r^w = S_e^b [1 - (1 - S_e^{1/a})^a]^2 \quad (3)$$

$$\kappa_r^g = (1 - S_e)^c [1 - S_e^{1/a}]^2 a \quad (4)$$

式中， a 、 b 和 c 為經驗常數，有效飽和度 S_e 之定義為：

$$S_e = \frac{S_w - S_r^w}{1 - S_r^w} \quad (5)$$

上式中， S_r^w ：殘餘浸潤流體飽和度， S_w 為水之飽和度。毛細壓力 P_c 與有效飽和度 S_e 之關係公式如下：

$$P_c(S_w) = P_o (S_e^{-1/a} - 1)^{1-a} \quad (6)$$

式中， P_o 為與土壤材料相關之參數。

飽和度與孔隙壓力對土壤孔隙體積應變之組成律關係公式如下所示：

$$n \left[\frac{S_w}{K_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} + \frac{\partial S_w}{\partial t} \right] = - \left[\frac{\partial q_i^w}{\partial x_i} + S_w \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right] \quad (7)$$

$$n \left[\frac{S_g}{K_g} \frac{\partial P_g}{\partial t} + \frac{\partial S_g}{\partial t} \right] = - \left[\frac{\partial q_i^g}{\partial x_i} + S_g \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right] \quad (8)$$

上式中， n 為土壤孔隙率 (porosity)， ε 為體積應變， K_w 與 K_g 分別為水與氣體之體積模數， S_g 為氣體之飽和度，它與 S_w 之和等於 1。

2. 數值模型尺寸與邊界條件之設定

本研究建立 FLAC 數值分析模型時，將堰塞壩座落於一個河床上方，河床尺寸為長度 36 m，厚度 6 m 之飽和土層，河床下方假設為不透水岩層；堰塞壩長度 28 m，高度 6 m，壩頂寬度 2 m，坡角 α ，地下水水位假設在河床表面。共分割成 7650 個元素，元素長度約 0.2 m，如圖 1 所示。邊界條件分為力學條件與滲流條件兩種，邊界條件之說明如圖 2 所示：

(1) 力學邊界條件：

為了防止河床在加載時不會發生整體位移，因此假設河床左右邊界節點之水平方向位移為零，河床底部邊界之節點則水平及垂直方向位移為零。

(2) 滲流邊界條件

滲流之邊界條件分為三種，(1) 非浸潤邊界 (airy boundary)、(2) 浸潤邊界 (saturation boundary) 及 (3) 入滲邊界 (seepage boundary)。非浸潤邊界主要假定該邊

界的土壤為非飽和；浸潤邊界主要是假定此邊界的土壤為飽和狀態（地下水水位以下或是堰塞壩上游被淹沒於水中的土壤）；入滲邊界主要假定當此邊界上的節點之孔隙水壓力為負值時土壤之水分無法從該邊界流出。因地下水位於河床表面，所以在河床左右邊界與其上表面設定為浸潤邊界條件，固定孔隙水壓及飽和度，而河床底面假設為不透水邊界條件。為了堰塞壩上游側坡面的湖水可入滲至壩體，堰塞壩上游側坡面的邊界設定為浸潤邊界，固定孔隙水壓及飽和度，堰塞壩下游側坡面的邊界設定為入滲邊界邊界。堰塞壩湖水位以上與堰塞壩頂面之邊界設為非浸潤邊界。上游側之湖水位上升是模擬崩落土石堵塞河道形成堰塞壩，本文假設河道因受堵塞使得上游水位上升，為簡化起見，不考慮降雨強度影響到上游水位上升速度，因此假設上游水位之上升速度固定為每分鐘上升 0.4 m。為了探討堰塞壩在滑動破壞模式之穩定性，湖水上漲至壩頂後水位將保持固定於此位置。湖水位之位置因其上升速度而改變，此點之模擬即將在滲流分析過程中。依水位的位置調整上游側浸潤邊界與非浸潤邊界的範圍與對應之邊界值。本文假設降雨後無地表逕流發生，即降雨皆入滲於土壤中，因此在非浸潤邊界與入滲邊界上，加上一個入滲流量，其值為降雨強度乘以此邊界坡角之餘弦值。堰塞壩暫態滲流分析之邊界條件示意圖，如圖 2 所示。暫態滲流分析主要目的是要獲得在不同時間下壩體之飽和度與孔隙水壓分布，然後再進行力學分析模式，以強度折減法分析堰塞壩穩定之安全係數，以了解壩體在不同影響參數下之穩定性。

本研究參考林煥軒 (2011) 統計荖濃溪在莫拉克颱風時的平均降雨強度 86.4 mm/h 作為尖峰降雨強度，在兩型之影響分析中，假設降雨延時為一天，參考石棟鑫 (2011) 之三種日雨量兩型，分別為 (1) 尖峰降雨強度發生在開始處的前峰

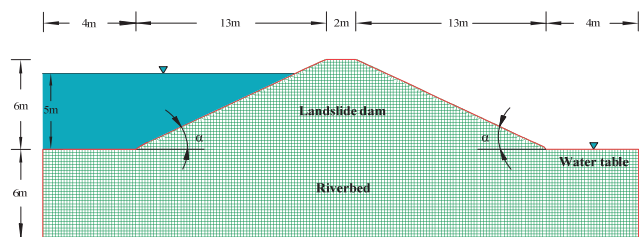


圖 1 模型尺寸示意圖
Fig.1 The dimension of the numerical model

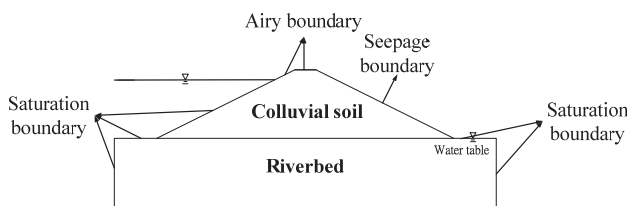
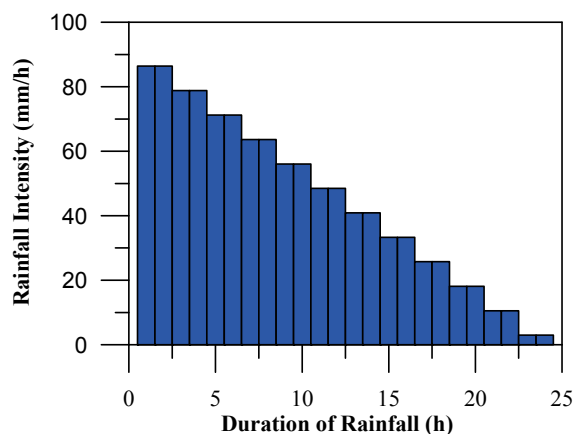


圖 2 壩體滲流邊界條件設定示意圖
Fig.2 The assumption of the flow boundary conditions for the numerical model

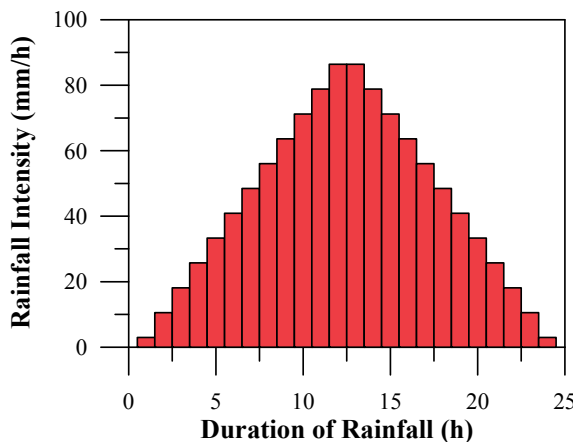
式；(2) 尖峰降雨強度發生在中間延時處的中央式與 (3) 尖峰降雨強度發生在結束處的后峰式等三種日雨量兩型對堰塞壩滑動穩定之影響，如圖 3、表 3 所示。本研究假設壩體適當溢洪道可排出溢流的水，且不至於產生壩體表面沖蝕。

3. 參數設定

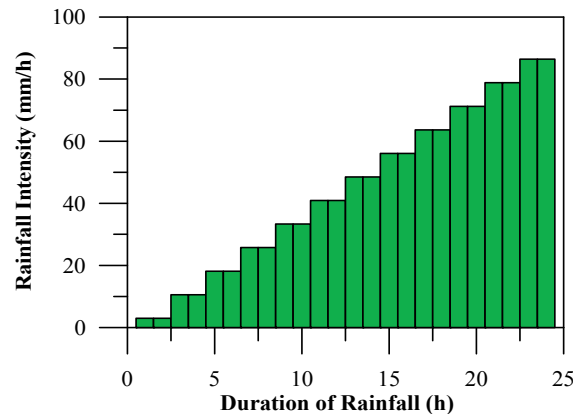
本研究在力學分析上，假設堰塞壩與河床沉積土壤為彈塑性材料，滿足摩爾庫倫組成律，其對應之參數，如表 1 所示。在暫態滲流分析中，堰塞壩假設為非飽和土壤以二相流模式模擬其滲流場之分布，分析所用之非飽和土壤材料參數如表 2 所示。



(a) 前峰式兩型 Rainfall peak at the first section



(b) 中央式兩型 Rainfall peak at the center section



(c) 後峰式兩型 Rainfall peak at the last section

圖 3 三種日雨量兩型示意圖 (石棟鑫, 2001)
Fig.3 The three rainfall patterns assumed (Shih, 2001)

4. 參數影響分析

在探討各影響參數對堰塞壩穩定之分析中，影響參數包括土壤飽和滲透係數、降雨雨型、堰塞壩坡角與尖峰降雨強度。在分析其中一個參數之影響分析時，其他三個參數值將保持固定，其相關參數值，如表 4 所示。

三、分析結果與討論

1. 土壤飽和滲透係數之影響

當堰塞壩阻斷河道後，上游湖水位上升再加上中央式設計兩型的降雨，雨水從堰塞壩表面入滲於壩體中，本研究將以滑動穩定之安全係數小於或等於 1 作為堰塞壩發生滑動破壞之判斷準則。三個土壤飽和滲透係數被假設，其滑動穩定之安全係數隨滲流時間之關係，如圖 4 所示。由圖 4 可看出，當飽和滲透係數等於 8.57×10^{-2} m/s 時，安全係數等於 1，即滑動破壞的時間為 16.6 min，而飽和滲透係數等於 8.57×10^{-3} m/s 與 8.57×10^{-4} m/s 之滑動破壞時間分別為 75 min 與 244.5 min。可見土壤飽和滲透係數越大，壩體滑動破壞的時間越快。且從上述數據來看，壩體滑動破壞的時間與土壤飽和滲透係數約成一個比例關係。由結果顯示，土壤飽和滲透係數之不同，影響著非飽和土壤之流動性，即影響著雨水入滲及上游湖水入滲在壩體內部之流動速率。從圖 4 也可看出，安全係數急遽降低約只發生在破壞前之 20~30 min 左右，在此之前安全係數之變化不大。為了瞭解土壤飽和滲透係數對壩體內部滲流場之影響，繪製圖 5 分別在不同時間下壩體內部之孔隙水壓分布圖。由圖 5 可見，飽和滲透係數等於時 8.57×10^{-3} m/s 時，在 75 min 時水已滲流至下游側，負值孔隙水壓的範圍也只剩下下游側之頂部，堰塞壩下游側之底部已呈現正值孔隙水壓力，因此助長滑動破壞之發生。然而，飽和滲透係數等於 8.57×10^{-4} m/s 之堰塞壩的下游側在同一時間之孔隙水壓仍與初始的情況相似，因此安全係數與初始情況差異不大。圖 6 為分別在不同時間下壩體

內部之飽和度分布圖，由圖 6 可看出在 75 min 時，飽和滲透係數等於 $k=8.57 \times 10^{-3}$ m/s 之堰塞壩內的飽和土壤範圍已延伸至壩的下游側，且飽和度小於 0.5 者只剩下下游側頂部之小區域範圍。而飽和滲透係數等於 $k=8.57 \times 10^{-4}$ m/s 之堰塞壩內飽和度小於 0.5 者，涵蓋了下游側的區域範圍。由此可知，土壤之滲透性影響著非飽和土壤的滲流場之含水量、飽和度與孔隙水壓分布，連帶著也影響壩體重量與有效應力之分布，因此滑動破壞發生之時間與土壤飽和滲透係數有關，隨著飽和滲透係數之增加，堰塞壩壩體發生滑動破壞之時間也越早。圖 7 為分別在不同時間下壩體滑動穩定之安全係數與經強度折減後對應之剪應變變化率之分布圖，剪應變變化率大的地方為土壤滑動破壞之位置。(註：此圖 7 之剪應變變化率為以強度折減法計算安全係數與辨識滑動面的過程產物，並非為該時間下真正的剪應變變化率。) 由圖 7 可看出在初始 30 min 內，兩者之安全係數皆為 2.32 且屬於下游面坡趾滑動破壞模式。飽和滲透係數等於 $k=8.57 \times 10^{-3}$ m/s 之堰塞壩在 75 min 後的安全係數已下降至 1.00。

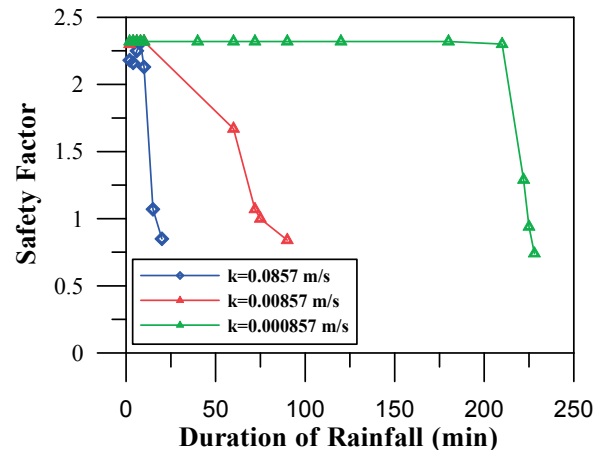


圖 4 飽和滲透係數，安全係數與降雨延時之關係

Fig.4 Influence of permeability and rain fall duration on safety factor

表 1 數值模型參數

Table 1 Material parameters for numerical model

	Density (kg/m ³)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Cohesion (kPa)	Friction (deg)	Porosity	Saturated mobility coefficient (m/sec)
Dam	1571	0.049	0.019	1	35°	0.412	8.57×10^{-4}
Riverbed	1669	8.81	4.3	3	38°	0.412	8.57×10^{-5}

表 2 二相流相關材料參數

Table 2 VG Model parameters for the two-phase flow simulations

Zone	FLAC Parameters			Capillary Pressure P _o (Pa)	Van Genuchten parameter β	Residual Saturation S _r ^w
	a	b	c			
Dam	0.334	0.5	0.5	9810	1.5	0.045

2. 堰塞壩坡角之影響

堰塞壩坡角之影響分析中, 假設壩高為 6 m 與壩頂寬度 2 m 為固定, 而調整不同上游與下游側邊坡坡角 α 分別等於 20°、25°與 30°。所以堰塞壩也因此有不同之壩長。圖 8 為堰塞壩兩側邊坡之坡角 α 對壩體滑動穩定的影響關係曲線。由圖 8 可看出, 這些曲線都呈現兩個階段, 初期安全係數之變化不大, 幾乎為定值。在此階段邊坡坡角越大, 安全係數越小。當時間超過「門檻時間點」(threshold time) 安全係數急遽降低。三者之「門檻時間點」各不相同, 坡度較小之邊坡的「門檻時間點」較晚, 此可能是因為坡度較小的堰塞壩相對的壩長也較大, 使水從上游滲流至下游之時間較長, 因此影響下游側邊坡穩定之時間也較晚。圖 8 顯示, 坡角越小安全係數下降段的時間越短, 亦即從穩定到發生滑動破壞的時間越短。但由於雨水入滲率為坡角之餘弦值, 所以坡角較小, 雨水入滲率較大, 當時間達到「門檻時間點」之後, 降雨入滲影響堰塞壩穩定性將增大, 使從穩定到發生滑動破壞之時間比坡角大者要短。由圖 8 可看出, 當 $\alpha=20^\circ$ 時滑動破壞時間 (F.S.=1) 約為 236.1 min, $\alpha=25^\circ$ 時滑動破壞時間約為 224.5 min, 坡度在 30° 時滑動破壞時間約為 213.5 min。所以, 坡角較大其滑動破壞時間也較快。

3. 雨型分佈之影響

討論在尖峰降雨強度等於 86.4 mm/h 時, 不同雨型分布對滑動破壞時間之影響, 由圖 9 可看出前峰式雨型之滑動破壞時間 (F.S.=1) 為 11.6 min, 中央式雨型之滑動破壞時間為 244.5 min, 在後峰式雨型之滑動破壞時間為 303.4 min。由於前峰式雨型在初始已達尖峰降雨強度因此其發生滑動破壞時間比其他兩者要早, 中央式雨型與後峰式雨型達到尖峰降雨強度之時間分別為 720 與 1440 min, 以上兩者皆尚未達到尖峰降雨強度即產生滑動破壞。如果以開始降雨至滑動破壞之累積總雨量來比較, 後峰式雨型之累積總雨量最大, 其次是中央式, 最小是前峰式。因此, 累積總雨量與滑動破壞時間之關係呈正相關, 即後峰式雨型之累積總雨量最大, 且其滑動破壞的時間也最晚。由於三種雨型之滑動破壞時間有差異明顯, 因此降雨入滲對滑動破壞有明顯之影響, 堰塞壩之穩定性並非僅受上游側水位上升之影響, 若同時伴隨降雨入滲之水量也將影響堰塞壩之滲流場, 連帶影響其有效應力之分佈, 導致滑動破壞之時間也各不相同。

表 3 不同雨型之降雨強度

Table 3 Rainfall pattern assumption for the parametrial study

	開始分析之降雨強度	分析結束之降雨強度	最大降雨發生時間	尖峰降雨強度
前峰式雨型	86.4mm/h	2.97mm/h	0min	86.4mm/h
中峰式雨型	2.97mm/h	2.97mm/h	720min	86.4mm/h
後峰式雨型	2.97mm/h	86.4mm/h	1440min	86.4mm/h

表 4 參數影響分析表

Table 4 Parameter list of the parametrial study

	堰塞壩坡角	土壤飽和滲透係數 (m/s)	降雨雨型	降雨強度 (mm/h)
飽和滲透係數之影響	25°	8.57×10^{-2} m/s	中央式	86.4
	25°	8.57×10^{-3} m/s	中央式	86.4
	25°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	86.4
邊坡坡度之影響	20°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	86.4
	25°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	86.4
	30°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	86.4
雨型分佈之影響	25°	8.57×10^{-4} m/s	前峰式	86.4
	25°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	86.4
	25°	8.57×10^{-4} m/s	後峰式	86.4
尖峰降雨強度之影響	25°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	43.2
	25°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	86.4
	25°	8.57×10^{-4} m/s	中央式	172.8

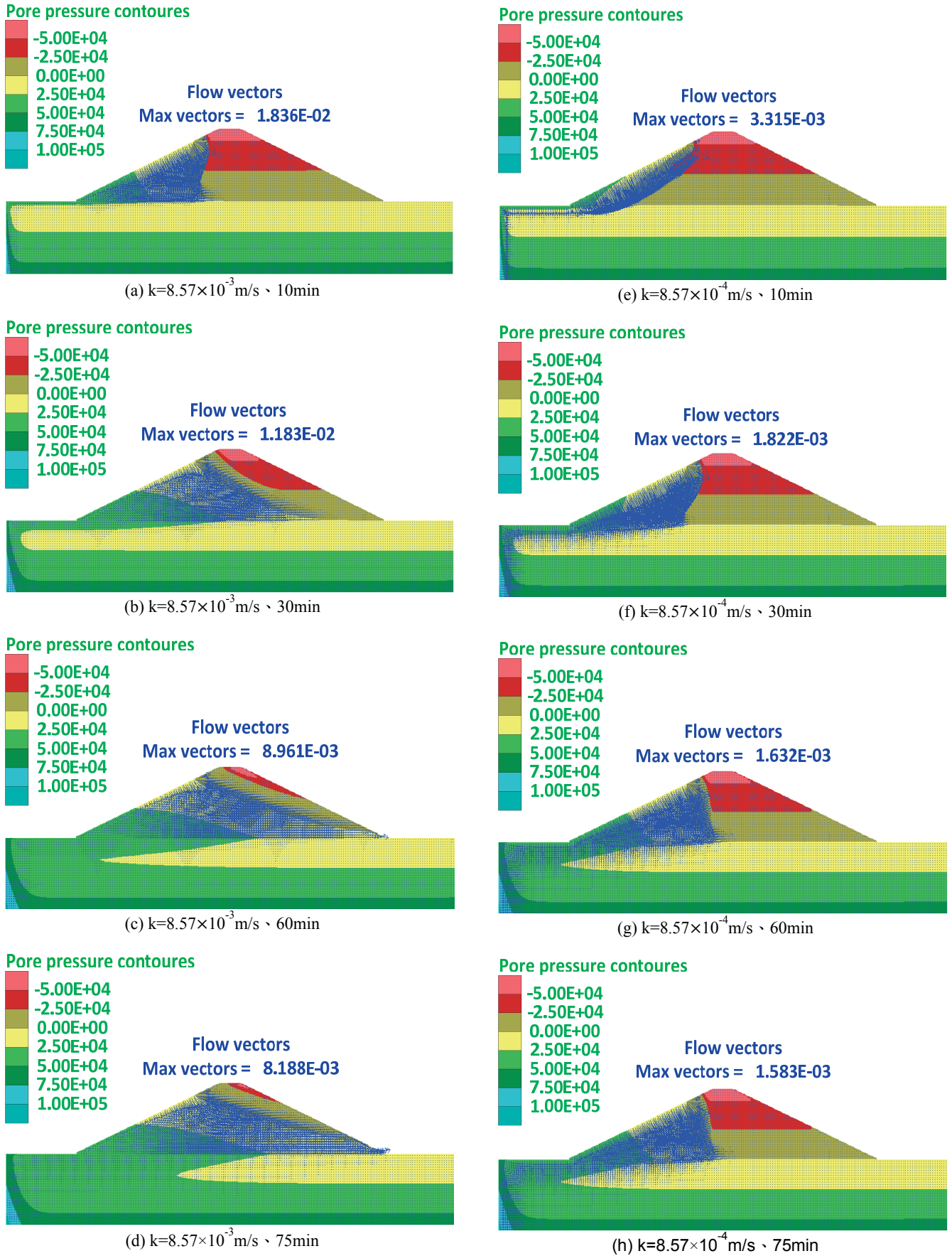


圖 5 不同的飽和滲透係數與降雨延時下之孔隙壓力分析圖

Fig.5 Pore pressure distributions under different material permeability and rainfall duration

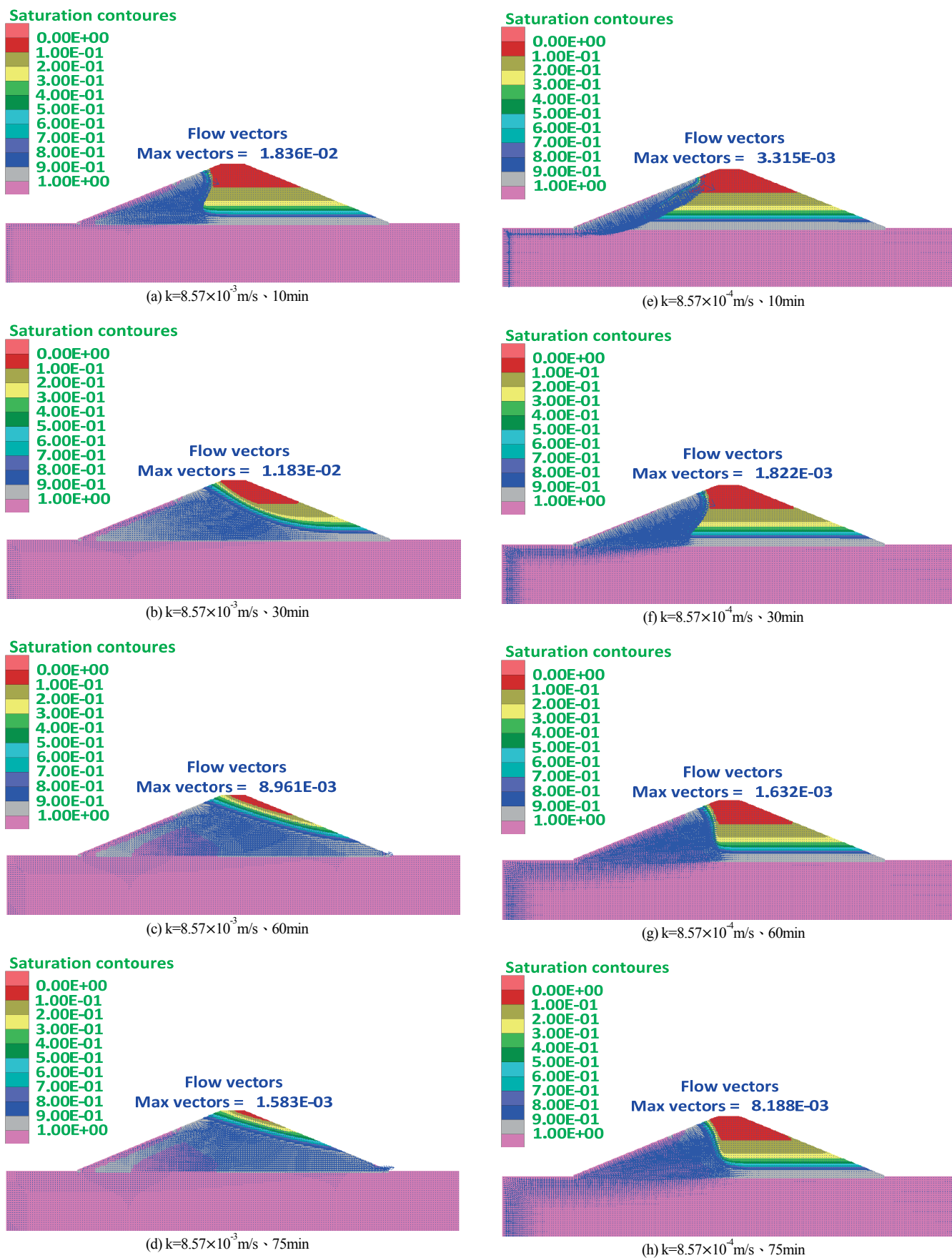


圖 6 不同飽和滲透係數與降雨延時之飽和度分布圖

Fig.6 Saturation distributions under different material permeability and rainfall duration

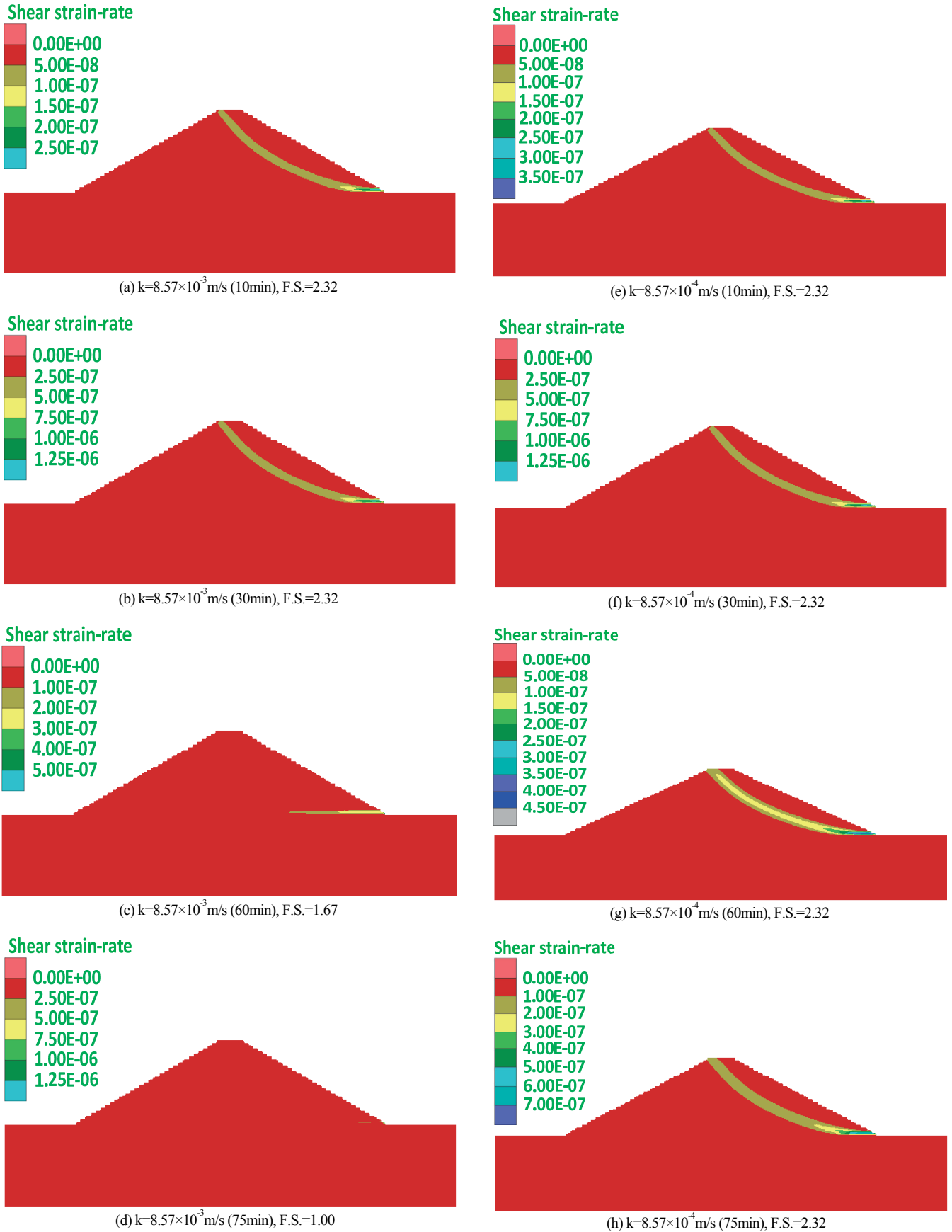


圖 7 不同飽和滲透係數與降雨延時下之安全係數響應變化率分析圖

Fig.7 Shear strain distributions under different material permeability and rainfall duration

4. 尖峰降雨強度之影響

在中央式設計兩型分布下,不同尖峰降雨強度對滑動破壞時間之影響,如圖 10 所示。當尖峰降雨強度等於 43.2 mm/h 時,堰塞壩之滑動破壞時間 (F.S.=1) 為 311.6 min,尖峰降雨強度等於 86.4 mm/h 之滑動破壞時間為 244.5 min,而尖峰

降雨強度等於 172.8 mm/h 之滑動破壞時間為 158.3 min。由以上數據得知,尖峰降雨強度增加一倍,滑動破壞時間近乎為原來之 0.6~0.8 倍。因為尖峰降雨強度越大時,雨水入滲壩體的速率也越快,雨水入滲的深度也越深,致壩體含水量與孔隙水壓增加,壩體不穩定性也隨之增加。

四、結 論

本研究以有限差分 FLAC 軟體分析堰塞壩穩定性隨時間之關係與可能破壞之時間 (F.S.小於 1 時),分別討論土壤飽和滲透係數、邊坡坡度、雨型分佈及尖峰降雨強度對壩體穩定性之影響。現將討論結果歸納整理後,提出以下幾點結論:

1. 土壤之滲透性影響著非飽和土壤的滲流場,連帶著也影響壩體重量與有效應力之分布,因此滑動破壞發生之時間與土壤飽和滲透係數有關,隨著飽和滲透係數之增加,堰塞壩壩體發生滑動破壞之時間也越早。
2. 安全係數歷時曲線呈現兩個階段,初期安全係數之變化不大幾乎為定值,當時間超過始降點安全係數急遽降低。
3. 因為坡度較小的堰塞壩相對的壩長也較大,因此影響下游側邊坡穩定之時間也較晚。由於坡角較小,雨水入滲率較大,使從穩定到發生滑動破壞之時間比坡角大者要短。
4. 累積總雨量與滑動破壞時間之關係呈正相關,即後峰式雨型之累積總雨量最大,且其滑動破壞的時間也最晚。
5. 尖峰降雨強度越大時,壩體不穩定性隨之增加。尖峰降雨強度增加一倍,滑動破壞時間近乎為原來之 0.6~0.8 倍。

致 謝

本文感謝國科會 (計畫編號 NSC99-2625-M-005-009-MY3 與 NSC99-2625-M-005-004-MY3) 支持研究經費,使本文得以順利完成,特此致謝。

參考文獻

- [1] Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomuram, A., Yamanaka, M., Masuda, T., and Nishino, K. (2009). "Failure characteristics of rainfall-induced shallow landslides in granitic terrains of Shikoku Island of Japan," *Environmental Geology*, 56(7), 1295-1310.
- [2] Huang, M., and Jia, C.Q. (2009). "Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage." *Computers and Geotechnics*, 36, 93-101.
- [3] Schuster, R.L., and Costa, J.E. (1986). "A perspective on landslide dams." *Landslide Dams, Processes, Risk and Mitigation* (Schuster), 1-20.
- [4] Itasca Consulting Group, Inc. (2005). *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, User's Manual*, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [5] Iverson, R.M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration." *Water Resources Research*, 36(7), 1897-1910.
- [6] Rahimi, A., Rahardjo, H. and Leong, E. (2011). "Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope fail-

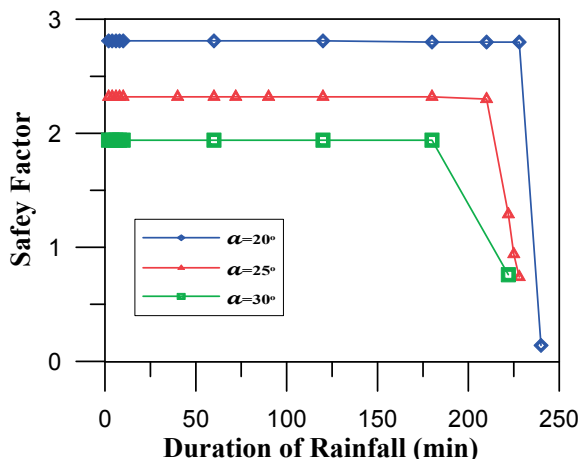


圖 8 邊坡坡度之影響曲線圖
Fig.8 Influence of slope angle on safety factor

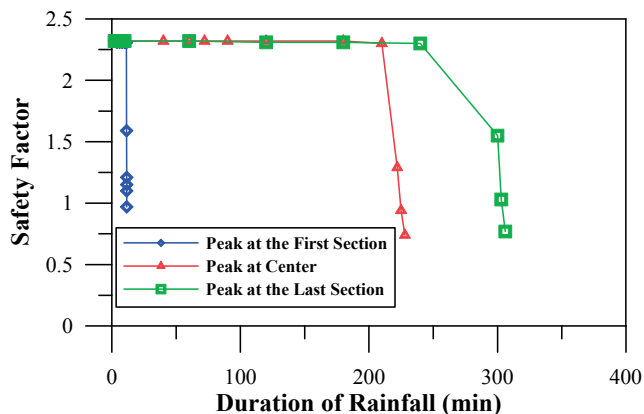


圖 9 三種降雨型分佈之影響曲線圖
Fig.9 Influence of rainfall pattern on safety factor

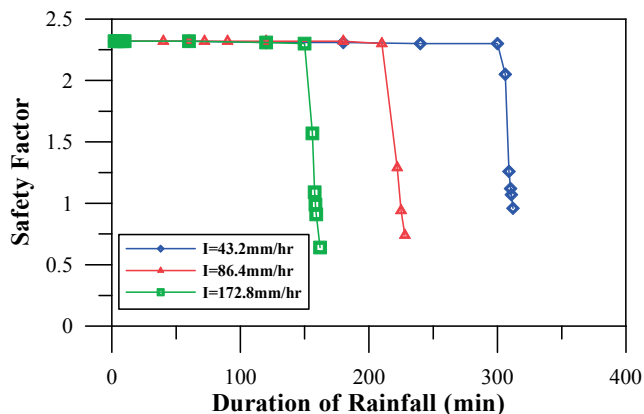


圖 10 降雨強度之影響曲線圖
Fig.10 Influence of rainfall intensity on safety factor

- ure.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 483-491.
- [7] Tsai, T.L. (2008). “The influence of rainstorm pattern on shallow landslide.” *Environmental Geology*, 53(7), 1563-1569.
- [8] Awal, R., Nakagawa, H., Baba, Y., Sharma, R.H., and Ito, N. (2007). “Study on landslide dam failure by sliding.” Annual Report of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No. 50 (B), 653-660.
- [9] Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D., and Leong, E.C. (2002). “Controlling parameters for rainfall-induced landslides.” *Computers and Geotechnics*, 29(1), 1-27.
- [10] Zhang, L.L., Fredlund, D.G., Zhang, L.M., and Tang, W.H. (2004). “Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained.” *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), 569-582.
- [11] 石棟鑫 (2001), 「台灣地區颱風雨降雨型態之分析研究」, 中央大學土木工程研究所碩士論文。(Shih, D.S. (2001). *A comprehensive study for design rainfall pattern of typhoon events in Taiwan*, Master Thesis, National Center University. (in Chinese))
- [12] 陳主惠、張守陽、周憲德、李伯亨 (2004), 「入滲對非飽和邊坡淺層崩塌發生機制之研究」, 中華水土保持學報, 35(1), 69-77。(Chen, C.H., Chang, S.Y., Chou, H.T., and Lee, B.H. (2004). “An unsaturated slope shallow failure triggered by infiltration.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(1), 69-77. (in Chinese))
- [13] 楊宏慶 (2012), 「降雨強度與邊坡特性對邊坡穩定分析影響之研究」, 國立成功大學資源工程學系碩士論文。(Yang, H.C. (2012). “*Influence of rainfall intensity and slope characteristics on slope stability analysis*.” Master Thesis, National Cheng Kung University. (in Chinese))
- [14] 許嘉鳳 (2009), 「颱風引致降雨入滲對邊坡穩定分析之探討」, 國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文。(Hsu, C.F. (2009). “*Discussion of typhoon induced rainfall infiltration on the analysis of slope stability*.” Master Thesis, National Taiwan Ocean University. (in Chinese))
- [15] 林煥軒 (2011), 「高屏溪集水區土砂災害降雨特性之研究－以莫拉克颱風為例」, 國立屏東科技大學水土保持學系碩士論文。(Lin, H.H. (2011). “*Study on rainfall characteristics of sediment disaster in Kao-Ping stream watershed during typhoon Morakot*.” Master thesis, National Pingtung University of Science and Technology. (in Chinese))

2013年03月06日 收稿

2013年05月06日 修正

2013年12月10日 接受

(本文開放討論至 2014 年 9 月 30 日)