

應用有限元素法之暫態流模式探討堰塞壩潰壩時間

陳宥序⁽¹⁾ 游繁結⁽²⁾ 張光宗⁽³⁾ 馮正一^{(4)*}

摘要

本研究以建立減災工法之數值分析流程為主要目的，使用有限元素分析軟體 PLAXIS 2D 建立壩體與減災工法之分析流程，並對條件參數控制狀態下進行模擬，對減災工法提升壩體安全性進行分析與評估。此研究參考於惠蓀林場之人造壩建立數值模型，模擬之模式採用暫態流 (transient flow) 之方式，能觀察出滲流隨時間的變化。土壤應力模式依據 Bishop 公式，此公式考慮未飽和區的負孔隙水壓，較一般常用的 Terzaghi 應力模式更適合用在未飽和土壤的情況。壩體、河床之滲透係數採用 PLAXIS 程式內依據 USDA 與 Van Genuchten 所建議的參考值。本計畫對堰塞壩、河床之滲透係數做參數影響分析，顯示堰塞壩與河床之滲透係數皆會對堰塞壩之穩定性產生影響，滲透係數越高，壩體之穩定性越低。在減災方面採用防滲牆之工法，模擬在不同位置、深度的防滲流功效，得到防滲牆的貫入深度需貫入至河床以下、貫入位置應盡量靠近壩頂上游端之結論。

(**關鍵詞**：堰塞壩、防滲牆、有限元素法、暫態流)

Finite-Element and Transient Flow Modeling of the Landslide Dam Failure Time

You-Hsu Chen⁽¹⁾ *Fan-Chieh Yu*⁽²⁾ *Kuang-Tsung Chang*⁽³⁾ *Zheng-Yi Feng*^{(4)*}

Graduate Student ⁽¹⁾, Professor ⁽²⁾, Associate Professor ⁽³⁾, Professor ^{(4)*}, Department of Soil and Water conservation National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The purpose of this project is to find suitable engineering measures for disaster prevention. The software of PLAXIS 2D of the finite element method is adopted to evaluate the performance of the engineering measures and to do the parametric study. The numerical model simulates the artificial dam at Huisun using the transient flow

(1)國立中興大學水土保持學系研究生

(2)國立中興大學水土保持學系教授

(3)國立中興大學水土保持學系副教授

(4)*國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 email：tonyfeng@nchu.edu.tw)

analysis. The seepage takes negative pore pressure into account with Bishop's equations, which are superior to Terzaghi's equations for the unsaturated soil conditions. The parameters of the dam and the riverbed are chosen according to USDA and Van Genuchten. The results show that the permeability of the dam and riverbed influence the stability of the dam. The higher the permeability, the lower stability the dam. The seepage prevention structures are used to improve the dam stability. The simulated results show that the seepage prevention should penetrate into the riverbed and be positioned as close to the upstream side of the dam as possible.

(**Keywords** : landslide dam、seepage prevention structure、finite element method、transient flow)

前言

堰塞湖常為地震、降雨等因素造成河岸崩塌，形成自然堆積之天然壩後所蓄積而成，不同的成因機制造成複雜的壩體組成與結構特徵，其材料組成通常較不緊密，容易鬆動，抗沖刷與防滲能力較差，也容易因外力影響壩體的整體穩定性，造成潰壩，因而容易產生二次災情。由於不同破壞機制所呈現的徵兆差異很大，且所需之處置方式亦有所不同，因此需經由評估與檢討以大幅度地減少重大災害產生的機會。

本研究應用 PLAXIS 2D 數值分析軟體，對於堰塞壩之穩定性作分析探討。對堰塞壩滲透係數作參數影響分析，最後再對防滲牆的施工位置、深度做比較，以期可以判斷效果較佳之防滲流措施。

研究方法與步驟

A. 有限元素分析軟體簡介- PLAXIS

近幾年來由於電腦計算速度的快速演進，工程之數值分析領域發展越來越完善，目前有限元素法 (Finite Element Method,

FEM)為目前廣泛使用的數值分析模式。此方法主要是將欲分析的連續區域離散成一組有限單元的組合體，經由建立個別元素節點上之力與位移關係，求出元素之勁度矩陣，進而組成整個求解區域之總勁度矩陣，最後配合已知節點之邊界條件，求取任意點應力、應變與變位之分析方法。目前有許多數值分析軟體皆採用這種概念，本研究所使用之分析軟體-PLAXIS 即為其中之一。

PLAXIS 為荷蘭 Delft 大學於 1987 年所開發研究之二、三維有限元素分析軟體，該軟體目前廣泛應用於工程界，對於模擬各式工程問題，包含土壩穩定性、邊坡穩定、滲流問題、加勁擋土牆結構、路堤、壓密與潛變分析等皆具有相當優良的成效。軟體中具有多種分析元素、材料模式與邊界條件選項，PLAXIS 並提供 ϕ - c 值折減模式 (Phi-C Reduction)計算安全係數 (Safety Factor)，以利使用者進行整體安全性評估。

由於 PLAXIS 於模擬工程問題的優勢與便利的操作介面，本計畫將以此軟體為主要的分析工具，規劃減災工法之數值模型，進行變因控制分析，評估壩體之安全性。此外，並以研擬之減災工法數值模型為基礎，提供

工程實務界處理堰塞壩問題之參考。

B. 減災工法數值模型規劃

本研究之數值模型規劃區分為壩體與防滲流減災工法兩部分。堰塞壩體的部分選用梯形為堰塞壩體形狀，土壤材料模式設為彈塑性，並滿足莫爾-庫倫破壞準則 (Mohr-Coulomb Failure Criterion)，此外由於堰塞湖壩體與底部之河道具有明顯的不連續狀態，本計畫以不同材料模擬之，配置情形詳見圖 1。

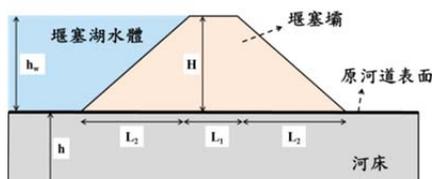


圖 1 堰塞壩示意圖

Figure 1 Section of landslide dam

減災工法部分，將以防滲流工法進行數值模擬規劃，應用 PLAXIS 軟體建構合理的減災工法分析流程。分析配置示意詳見圖 2。

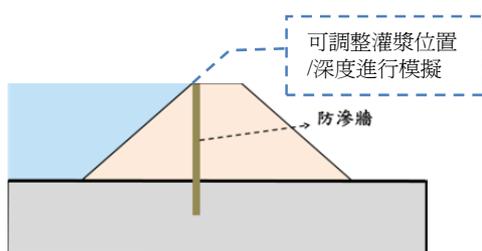


圖 2 減災工法：防滲流工法-帷幕灌漿示意圖

Figure 2 Mitigation of prevent seepage

C. 變因控制模擬

本研究除建置減災工法數值分析模式外，亦針對各種條件變因進行定性定量模擬，將

先由防滲流工法進行影響性分析，對壩體之材料參數與工法的佈設位置進行模擬。

D. 減災工法與壩體安全性之影響性分析

完成數值分析後，可觀察到模型的應力、應變變化分布狀態，若欲更直觀的了解壩體的安全狀態，計畫中將使用 PLAXIS 提供的 ϕ -c 值折減模式 (Phi-C Reduction) 計算模型整體的安全係數。此計算主要是依據 Brinkgreve (1991) 所提出的土壤強度折減法，是對模型的土壤強度 (凝聚力 C 及內摩擦角 $\tan\phi$) 進行連續折減，直至土壤之抗減強度無法承受自重以致於發生破壞。此時折減係數 ΣMsf 可定義如下：

$$\Sigma Msf = \frac{C_{input}}{C_{reduce}} = \frac{\tan\phi_{input}}{\tan\phi_{reduce}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中 C_{reduce} 為折減後之凝聚力、 C_{input} 為土壤有效凝聚力、 ΣMsf 為折減係數。 ΣMsf 於計算初始時訂為 1.0，隨後逐步增加 ΣMsf 值進行分析，土體亦逐漸變形，直到 ΣMsf 微量增加但土體產生大量變形時，即為此模型之安全係數，亦即如下式：

$$FS = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \Sigma Msf \text{ at failure} \quad \dots\dots\dots(2)$$

本研究應用 PLAXIS 的計算功能將變因控制模擬之各種狀態安全係數求得，依據此對各種變量之相互影響性進行定量，尋求可能的關係模式，並將各式分析結果作為應用模式之基礎。

E. 研究流程

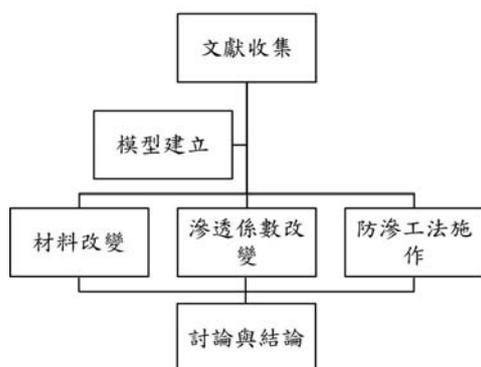


圖 3 研究流程示意圖

Figure 3 The flow chart of the study

堰塞壩破壞之相關文獻回顧

Costa and Schuster (1988)曾針對 55 處堰塞壩潰決案例進行分析，認為 73.2%堰塞壩潰決主因是洪水溢流過頂 (overtopping)，其餘 2.8%則分別因為管湧 (piping)及堆積土體滑動 (slip failure)而潰決，亦有 21.2%經由其他方法控制而並未潰決 (physically controlled)，本研究並非模擬洪水溢流過頂，因此視堰塞壩之破壞係由管湧及堆積土體滑動所導致。江宏晟 (2012)以實驗方式觀察土體破壞過程，結果顯示壩體發生破壞時間長短主要是隨入流流量而改變；在流量相當的情況下改變大小粒徑組成對壩體發生破壞的開始時間影響不大。嚴祖文 (2009)對滲流破壞形式作判別，認為均質無凝聚力土壤的滲流破壞形式只有滑動型一種，非均質土壤的滲流破壞形式有管湧和滑動兩種形式，這主要取決於細料填充粗料孔隙的程度。細料填滿粗料孔隙的土，滲流破壞形式為滑動型，否則為管湧型。嚴祖文 (2009)認為無凝聚力土壤的滲流破壞形式的判別方法及判別標準如表 1。 D_0 為土壤孔隙平均直徑 (mm)； n 為

土壤的孔隙率。 D_0 可以下式決定：

$$D_0 = 0.63 \times n \times d_{20}$$

表 1 無凝聚力土壤滲流破壞形式經驗判定
Table 1 empirical of cohesionless soil failure form

	土壤顆粒組成特性	判別方法	滲流破壞形式	
1	均勻	均勻係數 $Cu \leq 5$	滑動型	
2	不均勻	細料含量法 (P)%	$P > 35\%$ $P < 25\%$ $P = 25\% \sim 35\%$	滑動型 管湧型 過渡型
		孔隙直徑法 $D_0(\text{mm})$	$D_0 < d_3$ $D_0 > d_5$ $D_0 = d_3 \sim d_5$	滑動型 管湧型 過渡型
		滲透係數法(k)	$k < 0.003$ $k > 0.03$ $k = 0.003 \sim 0.03$	滑動型 管湧型 過渡型

堰塞湖減災工法之數值模型建立、分析結果與討論

A、數值模型建立

本研究之堰塞湖模型依中興大學實驗林場—惠蓀林場中位於蘭島溪的一座人工試驗壩，尺寸配置為壩頂長 2 公尺、壩底長 11 公尺、河床厚度 3 公尺、總長度 17 公尺，如圖 4，數值模型尺寸如圖 5 示。

本研究假設堰塞壩底部會與原河床表面有明顯的不連續面，因此將堰塞壩材料方面分為上部的人工壩與下部的河床（圖 5），壩體土石材料皆滿足摩爾-庫倫破壞標準 (Mohr-Coulomb Failure Criterion)。顆粒之粒徑分佈採用 PLAXIS 內建之土壤模式，其中本研究選用 U.S Department of Agriculture (USDA)分類系統，土壤之類型與滲透係數如表 2 所示，其他材料性質參數如表 3 所示。

B、模擬之步驟

數值模擬運算模式選用 PLAXIS 之“Advanced mode”，是依 Bishop 所定義的土壤

應力模式 ($\sigma = \sigma' + S_e \cdot \sigma_w$)，其中 σ 為總應力、 σ' 為有效應力、 S_e 為有效飽和度梯度、 σ_w 為水之單位重。模式也考慮了未飽和區的負孔隙水壓狀況。分析過程採用「分階方式」模擬，假設初始階段水位面位於河床表面，模擬河水受堰塞壩體阻擋而導致水位上升之情況。本研究採用於惠蓀林場之人工壩潰壩試驗中水位上升之時間，水位在 10 分鐘上升 4 公尺。此過程於 PLAXIS 中分為 8 個階段，每 1.25 分鐘水位上升 0.5 公尺，因此在第八階段時達到滿水位，再利用 PLAXIS 內之 Transient flow 功能做運算，直到堰塞壩破壞無法再繼續運算為止。PLAXIS 對於水壓力以



圖 4 (a)破壞前-由下游面往上游面拍攝 (b)破壞後-由左岸向壩軸之方向拍攝 (c)破壞後-由左岸上游面向下游拍攝 (d)破壞後-由左岸下游面向上游拍攝 (由陳樹群提供)

Figure 4 (a) view from downstream to upstream before failure (b) view from left riverine to right riverine after failure (c) view from left of upstream to downstream after failure (d) view from left of downstream to upstream after failure. (by Chen Su-Chin)

表 2 USDA 土壤分類類型與其參考滲透係數

Table 2 The soil classification and default Permeability

USDA Type	Sandy loam	Loam	Sandy clay loam	Silt loam
Permeability (m/sec)	1.23×10^{-5}	0.289×10^{-5}	0.364×10^{-5}	0.125×10^{-5}

表 3 土石材料相關參數

Table 3 The parameters of material

Parameters	Dam material	Bed material
Moist unit weight, γ_{sat} (kg/m ³)	2000	2100
Unit weight, γ_{unsat} (kg/m ³)	1571	1669
Young's modulus, E (pa)	5.05E+07	5.05E+07
Bulk modulus, K (pa)	4.90E+07	4.90E+07
Shear modulus, G (pa)	1.90E+07	1.90E+07
Poisson ratio, ν	0.33	0.33
Cohesion, C (pa)	1000	3000
Friction angle, ϕ	35°	38°
Void ratio, e	0.7	0.6

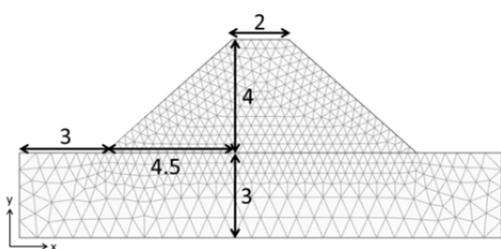


圖 5 堰塞壩之數值模型 (單位：m)

Figure 5 Numerical model of landslide dam

負號表示 (圖 6)，對於負孔隙水壓力以正號表示。以下之水壓力皆依 PLAXIS 表示的方

式呈現。可以觀察人工壩的壩趾滲流狀況與最後利用 PLAXIS 的 c 、 ψ 強度折減法得到之潛在滑動面如圖 7，壩體未達到穩流就發生破壞。

C、不同材料配置之探討

1. 比較不同之粒徑分佈對於破壞時間的影響

在 PLAXIS 數值模型中，材料之設定有一項是粒徑分佈，對於堰塞壩之材料將依其預設之參考值做配置 (表 4)，壩體之滲透係數則採用 PLAXIS 依粒徑分佈所給的參考值。堰塞壩之顆粒粒徑一般較河床之顆粒粒徑為大，因此本研究對壩體粒徑大小之皆設定比河床大。由於 PLAXIS 中之粒徑分佈並無大於 2mm 以上之礫石部分，此設定會與實際狀況不符，此為程式之限制，因此本研究先以顆粒之粒徑為主要探討之參數，對於其他參數如 c 、 ψ 、 E 、 γ 、 k 等設為定值。假設河床之滲透係數較壩體之滲透係數小 10 倍。由表 5 可看出在材料參數固定、邊界條件固定的情況下顆粒之粒徑分佈對於安全係數沒有顯著的影響。表示壩體之穩定性主要是由力學性參數 c 、 ψ 、 E 、 γ 、 k 等控制。在之後的模擬將忽略粒徑分佈與滲透係數的關係，直接以滲透係數為變數來做探討。而滲透係數的部分因為 PLAXIS 之設定值皆屬於粒徑小於 2mm 的土石材料，所以滲透係數的建議值會比實際狀況來得低，本研究暫不考慮滲透係

數是否合乎現地情況，僅針對滲透係數的變動對堰塞壩穩定性造成的影響作探討。

2. 滲透係數之參數影響分析

單就滲透係數的改變作探討，取 sandy loam、sandy clay loam 之組合對於其建議之滲透係數分別放大 10 倍與縮小 10 倍來做模

擬。模擬所得之結果如表 6，滲透係數－破壞時間、時間－安全係數如圖 8 所示。由表 6、圖 8 結果可知，滲透係數越大壩體達到破壞之時間就越短且幾乎呈等比的關係。在滲流過程中壩體的安全係數沒有太大的變化，無論滲流係數較大或較小。而當壩體達到破壞時安全係數產生快速的下降。

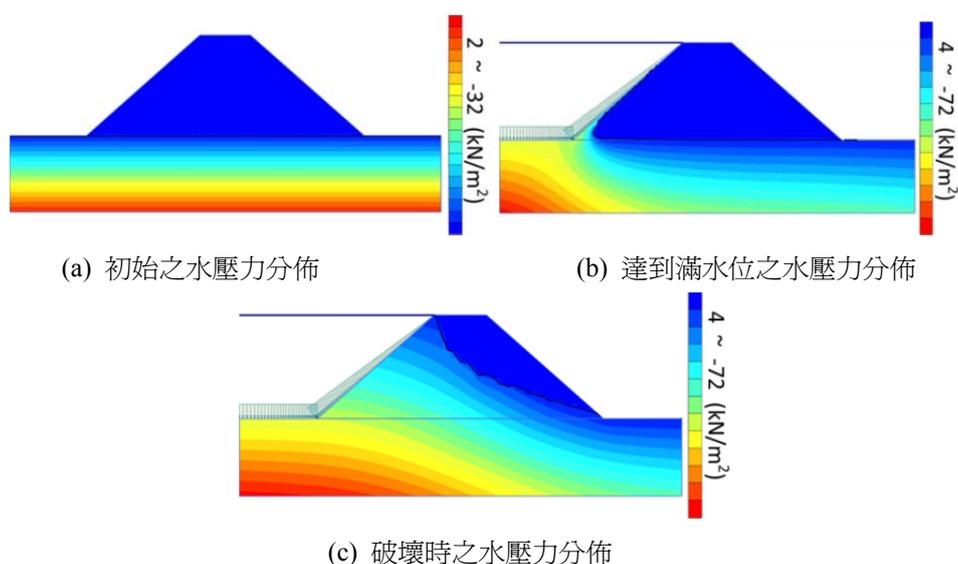


圖 6 堰塞壩內部水壓力示意圖

Figure 6 Pore pressure of the landslide dam

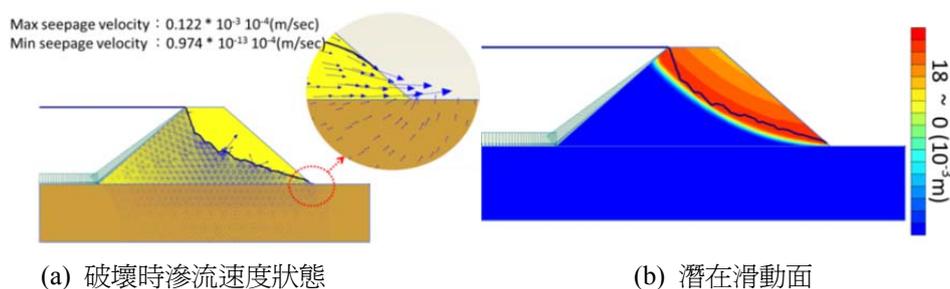


圖 7 壩址滲流、潛在滑動面示意圖

Figure 7 seepage velocity in the toe of landslide dam and potential failure surface

3. 河床滲透係數對破壞時間的影響

比較在不同之河床材料上堰塞壩達到破壞時間的探討，此階段堰塞壩的部分固定為

sandy loam，四種河床材料 sandy loam、loam、sandy clay loam、silt loam，滲透係數皆採用 PLAXIS 中的參考值，由前述可知單就顆粒之

表 4 土壤類型之粒徑分佈

Table 4 Different types of particle-size distribution

Distribution	Sandy loam	Loam	Sandy clay loam	Silt loam
< 2 μ m	11%	20%	28%	14%
2 μ m~50 μ m	26%	40%	12%	65%
50 μ m~2 mm	63%	40%	60%	21%

表 5 不同之粒徑分佈下壩體破壞的時間

Table 5 Failure time in different types of particle-size distribution

Case	Dam type	kx = ky (m/sec)*10 ⁻⁵	Bed type	kx = ky (m/sec)*10 ⁻⁵	Failure time (hr)
1	Sandy loam	1.23	Sandy loam	0.123	30
2	Sandy loam	1.23	Loam	0.123	30
3	Sandy loam	1.23	Sandy clay loam	0.123	31.6
4	Sandy loam	1.23	Silt loam	0.123	31.3

表 6 不同滲流係數之破壞時間

Table 6 Failure time of different permeability

Case	Dam type	kx = ky (m/sec)*10 ⁻⁵	Bed type	kx = ky (m/sec)*10 ⁻³	Failure time (hr)
Baseline case	Sandy loam	1.23	Sandy clay loam	0.123	31.58
Case 1	Sandy loam	12.3	Sandy clay loam	1.23	3.35
Case 2	Sandy loam	0.123	Sandy clay loam	0.0123	318.17

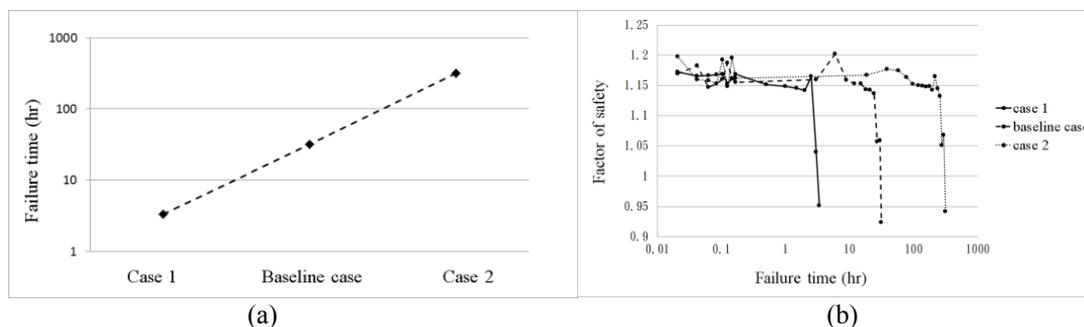


圖 8 (a)滲流係數對破壞時間 (b)安全係數之影響

Figure 8 (a) Failure time of different permeability (b) influence of safety factor

表 7 河床滲透係數對壩體破壞時間的影響

Table 7 Comparative with permeability and safety factor

Cases	Dam type	$k_x = k_y$ (m/sec)* 10^{-5}	Bed type	$k_x = k_y$ (m/sec)* 10^{-5}	Failure time (hr)
1	Sandy loam	1.23	Sandy loam	1.23	22
2	Sandy loam	1.23	Loam	0.364	27
3	Sandy loam	1.23	Sandy clay loam	0.289	28.78
4	Sandy loam	1.23	Silt loam	0.125	31.3

粒徑分佈的改變對壩體穩定性並無顯著影響，所以在此階段雖然河床的類型不同但不將其視為變數，其主要變數為河床的滲透係數。模擬結果如表 7、圖 9，結果顯示當河床之滲透係數越小，壩體達到破壞之時間越長，表示滲流之路徑不單由坡面滲入也透過河床滲入。

D、減災工法的配置探討

減災工法採用貫入黏土防滲牆之防滲流工法，對其貫入位置、深度做模擬比較。黏土防滲牆遵守摩爾-庫倫破壞標準-未排水 (Mohr-Coulomb Failure Criterion – undrained)

條件，寬度設為 15 公分，其力學性參數如表 8。施作位置於分為壩頂之上游端與下游端、貫入深度分為未達河床深度 (3 公尺深)、貫入達河床 (4 公尺深)、貫入至河床以下 (5 公尺深)，總共 6 種形式 (圖 10)。模擬結果如表 9，破壞時的水壓力分佈、滲流狀況、地下水水頭、潛在滑動面如圖 11。由表 9、圖 11 結果可看出防滲牆貫入深度達河床面或在河床面以上，效果明顯比貫入深至河床以下的情況來的低，因滲流必須通過滲流係數較低之河床，增加了滲流的時間也減少作用在潛在滑動面的滲流力。防滲牆貫入位置如接近壩頂下游端對於壩體的穩定性沒有太大作

用，因為使得更多的水累積在壩體內部，向上滲流產生的滲流力位置接近潛在滑動面，使其有效應力下降。由潛在滑動面也可看出置於兩處產生的滑動型態不同，防滲牆置於上游端屬於管湧破壞，而置於下游端則會是土體滑動破壞。

表 8 黏土防滲牆之力學參數

Table 8 Mechanical parameter of prevent seepage structure

Parameter	Clay material
Moist unit weight, γ_{sat} (kg/m^3)	1800
Unit weight, γ_{unast} (kg/m^3)	1600
Young's modulus, E (pa)	1.5E+06
Bulk modulus, K (pa)	1.67E+06
Shear modulus, G (pa)	5.56E+05
Poisson ratio, ν	0.35
Undrained shear strength, Su (pa)	5000
Friction angle, ϕ	0 ⁰
Void ratio, e	0.5

結論

本研究利用在惠蓀林場所施作之人工堰塞壩，作為模擬壩體穩定情況之目標，以 PLAXIS 2D 進行數值模擬分析，探討堰塞壩內部之滲流狀況對其穩定性的影響，對於防災工法採用貫入一不易透水的黏土層做為防滲牆的方法，經過模擬分析後，得出以下結

論：

1. 在 PLAXIS 限制顆粒粒徑分佈之下，固定 c 、 ψ 、 E 、 k 等參數時壩體之粒徑分佈對於穩定性並無顯著的影響。
2. 壩體、河床之滲透係數越高，達到破壞的時間就越短。
3. 黏土防滲牆之深度需貫入至河床以下才有明顯之效果。
4. 黏土防滲牆貫入位置應盡量接近壩頂之上游端。

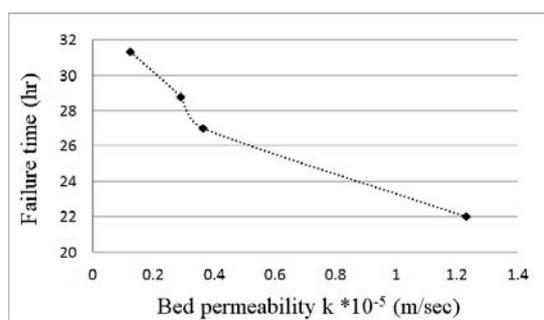


圖 9 河床滲透係數對破壞時間之影響

Figure 9 Effect of failure time to riverbed permeability

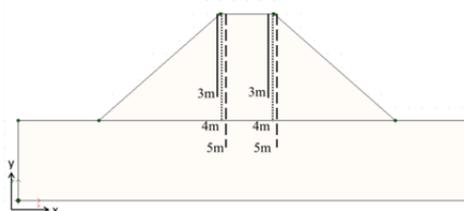


圖 10 黏土防滲牆施作位置、深度之配置示意圖

Figure 10 Location and depth of the assumed seepage prevention material/wall

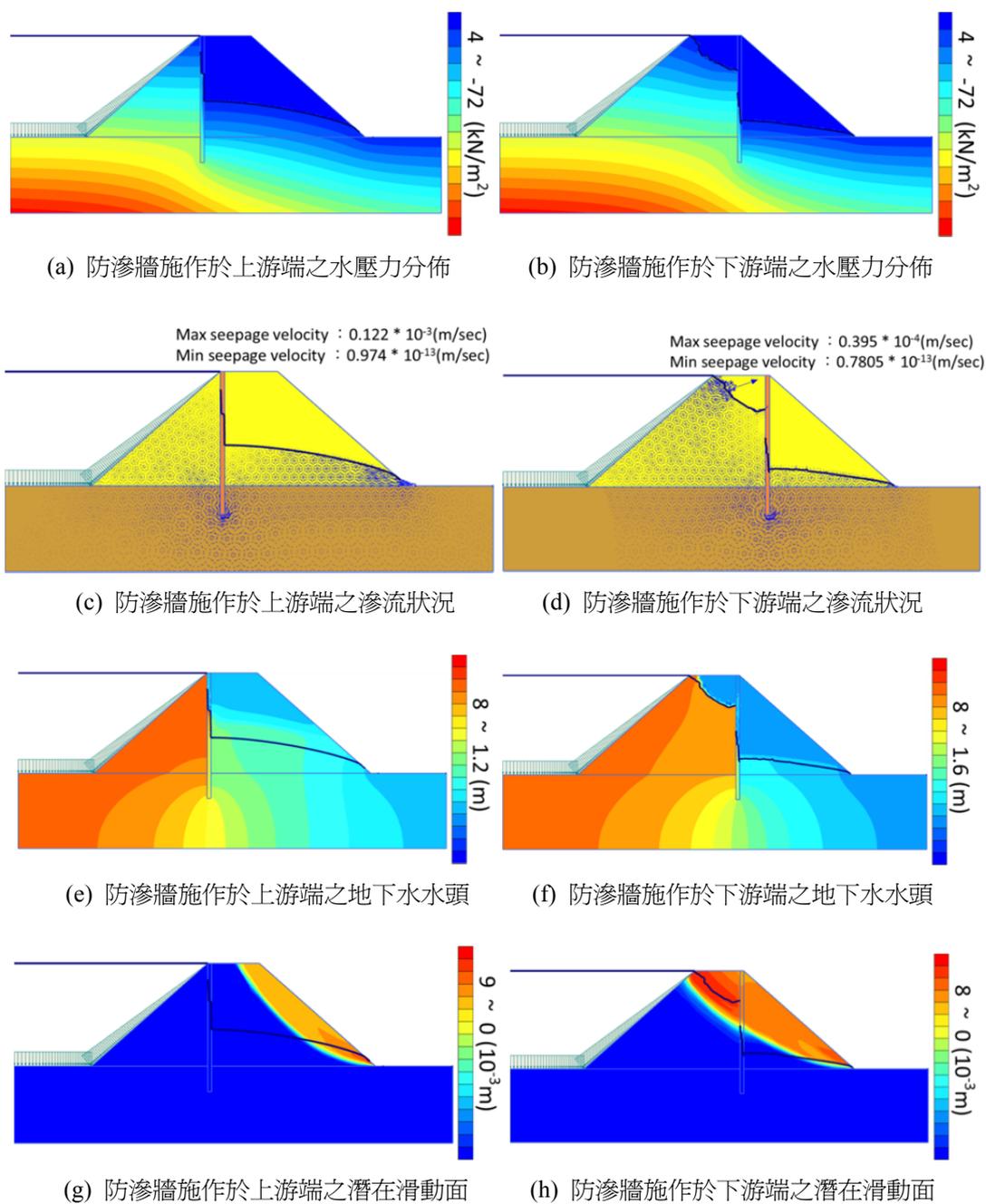


圖 11、破壞時之水壓力分佈、滲流狀況、地下水水頭、潛在滑動面

Figure 11 Distribution of pore pressure, seepage, groundwater head, Potential failure surface at failure time. (a) and (b) comparative with pore pressure and position. (c) and (d) comparative with seepage and position. (e) and (f) comparative with groundwater head and position, (g) and (h) comparative with potential surface and position

表 9 施作位置與其破壞時間

Table 9 Comparative with position and failure time

Location of seepage prevention structure	Upstream - 3m	Upstream - 4m	Upstream - 5m	Downstream - 3m	Downstream - 4m	Downstream - 5m
Failure time (hr)	39	59.6	325	27.4	32	32.5

致謝

本研究承蒙國科會計畫補助，計畫編號：99-2625-M-005-009-MY3，在此致謝。

參考文獻

1. 江宏晟(2012)，「土體破壞過程之實驗觀察」，台灣大學土木工程學研究所學位論文。
2. 嚴祖名、魏迎奇、蔡紅(2009)，「堰塞壩滲透穩定性評估」，長江科學院院報，第26卷。
3. R.B.J. Brinkgreve, W.M. Swolfs, E. Engin, PLAXIS 2D 2011 manuals。
4. Brinkgreve, R.B.J., Bakker, H.L. (1991).

Non-linear finite element analysis of safety factors. In Proc. 7th int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechanics. Cairns, Australia, 1117-1122。

5. Costa, J.E., and R.L Schuster (1988), "The formation and failure of natural dams," Geological Society of America Bulletin, 100 : 1054-1068。

101年 05月 28日收稿

101年 06月 04日修改

101年 08月 10日接受