

利用滲透試驗探討雙層土壤之滲流沖蝕行為及其數值模擬

蘇郁婷* 林銘郎

摘要 滲流沖蝕係指土壤中的細顆粒因地下水流驅動通過較大顆粒間之孔隙，被帶離坡面後，會由坡面向坡體內部發展出漸進式破壞，進而引發邊坡問題，故對邊坡滲流沖蝕行為的瞭解有其必要性。因此，本研究根據現地調查結果，於室內利用滲透試驗儀器進行滲流沖蝕試驗，以了解不同情形下各試體之沖蝕行為。而後，為了解數值軟體用於模擬滲流沖蝕行為之可行性，故嘗試採用有限差分法軟體—*FLAC5.0* 進行模擬，以期能作為未來用於滲流沖蝕模擬之參考。

關鍵詞：飽和水力傳導係數、雙土層、滲流沖蝕、有限差分法。

A Study on Seepage Erosion Behavior within Two Layers using Permeability Tests and FDM

Yu-Ting Su* Ming-Lang Lin

ABSTRACT Seepage erosion occurs when finer particles are dragged out from other soil particles by water. This type of erosion causes progressive failure inward into the slopes and slope instabilities. Therefore, it is necessary to explore the behavior of seepage erosion in order to prevent such failure in slopes. According to results of field investigations, we do seepage erosion experiments in a laboratory to understand the erosion behavior. After that, we utilize FEM soft-ware – *FLAC5.0* in order to determine the feasibility of numerical analysis in simulating seepage erosion behavior.

Key Words : Hydraulic conductivity, two layers, seepage erosion, FEM.

一、前言

林口台地位於台北縣西北部，西鄰台灣海峽，北為觀音山，東西分別有新莊斷層及南崁斷層通過並與台北盆地與桃園台地相鄰。林口台地出露的岩層多由近乎水平的林口層及大南灣層組成。大南灣層主要由細粒砂岩、頁岩和泥岩的互層所組成，呈中厚至厚層或塊狀，岩層中沉積物膠結物不佳，岩石易破裂，且顆粒易分離為砂、粉砂或黏土（莊釗鳴，2010）。

就過去發生滲流沖蝕之破壞案例進行分析瞭解，此一破壞類型曾於林口台地地區多次發生，並造成附近居民財產安全之損失。而進一步針對林口台地之災害案例進行現地調查後發現，該地區易發生滲流沖蝕破壞其主要原因在於礫石層與下方微水層間夾有一膠結不良之細砂層。一旦滲流沖蝕開始發生，將使土體開始變形，最終導致邊坡發生由坡面向坡體內部發展之漸進式破壞。因此，為僅少滲流沖蝕引發之邊坡穩定問題對民眾之影響，不單需認識單一土層之滲流沖蝕行為，亦需對雙土層之滲流沖蝕行為有一定認識。

二、研究方法

1. 現地調查

為了解礫石台地滲流沖蝕之重要案例，本研究就近前往過去曾發生滲流沖蝕破壞之嘉寶村進行案例實地勘查。藉由現地觀察既有案例之地質條件、水文條件、地質材料特性、關鍵問題地層及破壞後情形等條件之相互關係，以作為室內試驗配置之依據與參考。

2. 室內試驗

依據現地調查結果，林口台地地區之問題地層是為大南灣層中之細砂層，該細砂層由級配不良且膠結不良之砂所組成，受水流作用後極易開始出現沖蝕情形。因此，依現地地層之實際情形，又為方便於室內進行試驗以作後續討論，故將現地實際情形簡化為礫石層及細砂層之雙層試體，且於現地就該問題砂層採取足量樣本。同時，因試驗儀器限制，無法直接使用現地礫石層作為試體材料來源，因而於實驗室內混合不同粒徑之

石英砂與高嶺土模擬一滲透係數較細砂層為大之土壤，以利試驗之進行。試驗分為兩部分，一為滲透試驗（定水頭試驗），一則為滲透沖蝕試驗。透過滲透試驗除了解土壤之滲透係數外，亦可了解礫石層中基質材料對下方細砂層之影響；透過滲流沖蝕試驗則可瞭解單一土層與複土層彼此間，其滲流沖蝕行為之異同。相關儀器配置及試體如圖 3~圖 5 所示。

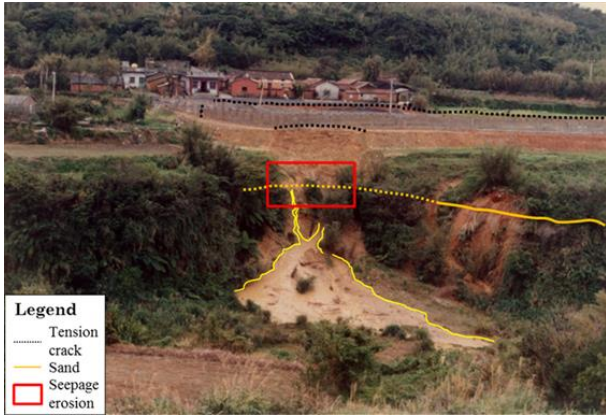


圖 1 滲流沖蝕破壞案例照片 (改繪自陳忠銘, 1986)
Fig.1 A slope failure case caused by seepage erosion

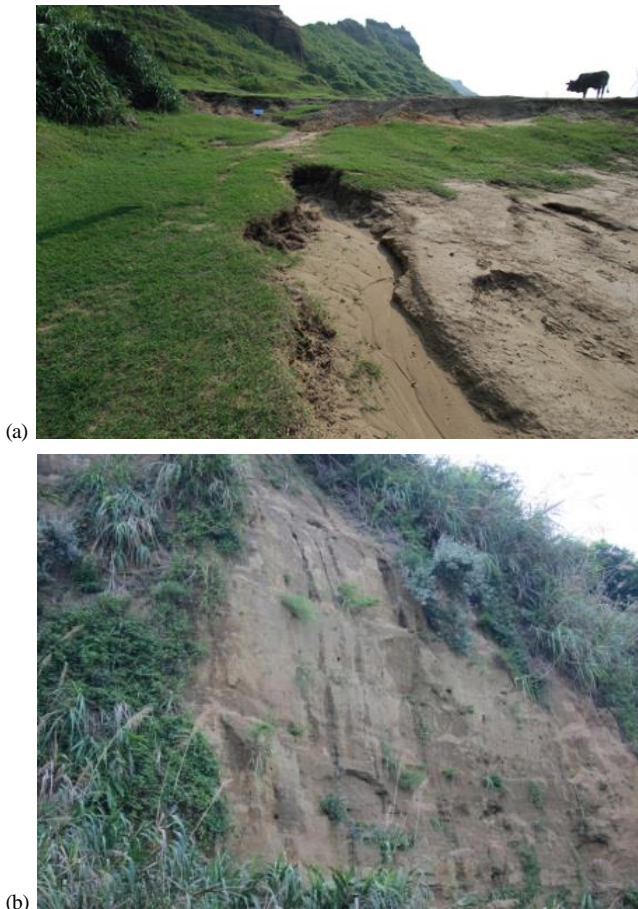


圖 2 林口台地現地滲流沖蝕情形：(a) 細砂層與泥岩層互層；(b) 邊坡上之蝕洞。
Fig.2 Situations of seepage erosion on Lin-Kou tableland: (a) between sands and muds; (b) erosion holes on slopes

3. 數值模擬

數值分析模擬之目的除為了解室內試驗和理論上之異同外，亦為了解水流於試體內之流動情形，故嘗試使用有限差分法軟體—*FLAC* 進行滲透試驗及滲流沖蝕實驗之模擬。為此，利用該程式中之（地下）水模組（groundwater flow model，可模擬水流在不同時間下（以秒為單位）於飽和土壤中之流動情形）模擬定水頭滲透試驗；結合水模組與力學模組（mechanic model）進行滲流沖蝕實驗之模擬。

於定水頭滲透試驗之實際試驗過程中，是透過調整滲透室之進/出水閥門（inlet/outlet）來調整流量，進而使水力梯度改變，為於數值分析中模擬此一過程，除建立試體（soil）本身之模型外，於試體模型下方亦同時建置濾層模型（filter），且透過調整濾層模型之飽和水力傳導係數（ k_f ）模擬實際情形中，進/出水閥門兩者決定流量大小之過程，並與實驗數據進行比較，模型及模擬流程如圖 6、圖 7 所示。其中，因礫石層之單位面積流量與水力梯度二者間之關係是採用 Bakhtiarian (2012) 所描述之二次項關係，為獲得數值程式所需參數，就滲透試驗成果以切線法與割線法求得不同水力梯度情形下，礫石層之可能飽和水力傳導係數以作為程式輸入值，並就此二方法所獲之數值模擬結果進行討論。

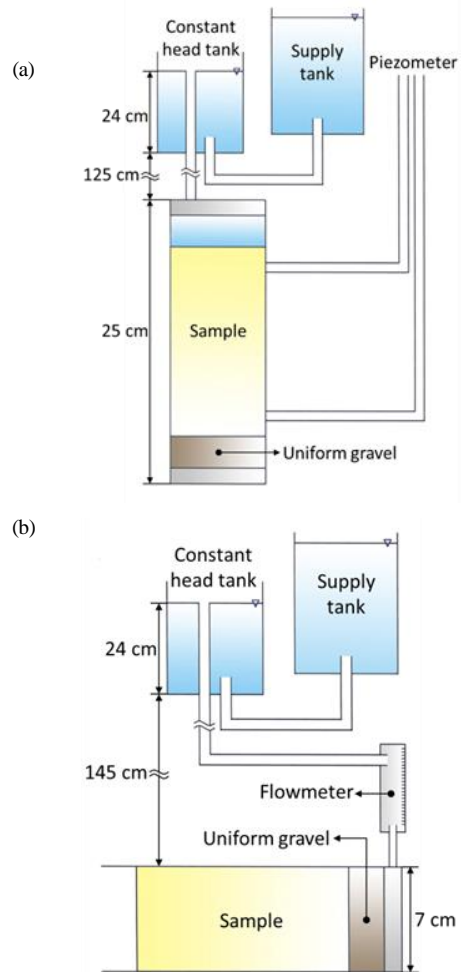


圖 3 儀器配置示意圖：(a) 滲透試驗；(b) 滲流沖蝕實驗。
Fig.3 Setup diagrams: (a) permeability tests; (b) seepage erosion experiments

模擬滲流沖蝕實驗時，為能呈現出滲流沖蝕行為受水流與重力影響之過程，透過力學模組與水模組兩者不斷交替循環分析，同時於程式分析過程中寫入滲流沖蝕發生條件（水力梯度大於臨界水力梯度， $i \geq i_c$ ）與試體破壞條件（最大剪應變率（shear strain rate, ssr ）大於門檻值， $ssr > threshold$ ），來移除網格以作為蝕洞出現時之模擬，進而達到模擬滲流沖蝕行為之目的，其輸入參數、分析流程與模型如表 1、圖 8 與圖 9 所示。其中，臨界水力梯度計算是根據 Chu-Agor *et al.* (2008) 提出之安全係數計算公式，代入相關參數後如式 1、式 2；試體破壞條件之訂定，因於本研究中尚缺少相關試驗數據，僅以數值模擬與實驗兩者間之試體情形作為判斷依據，透過試誤法決定試體破壞條件之門檻值。

$$\text{細砂層} : 1.33i_x + i_y \geq 2.50 \quad (1)$$

$$\text{礫石層} : 1.59i_x + i_y \geq 892.2 \quad (2)$$

三、結 果

1. 室內試驗

根據試驗結果顯示，現地細砂層之滲透係數為 0.0116 cm/s，如圖 10(a)；礫石層之滲透係數則隨水力梯度增加而改變，如圖 10(b)，推測造成此一現象之原因是由於礫石層內之高嶺土（基質材料）隨水流向下移動而致使水力梯度增大。雙土層於固定水力梯度之水平滲流流場下，其試驗之流速數值較理論值（依達西定律計算： $v=ki$ ， $k=(k_1h_1+k_2h_2)/H$ ， k_i ：土壤之飽和滲透係數， h_i ：各土層厚度， H ：土壤總厚度）為大，形成該現象之原因可能為：於夯實試體之過程中，因土壤移動導致水壓計之探針未確實位於此二土層之界面中央，又探針周圍土壤難以確實夯實之故，如圖 11(a) 所示；於垂直滲流之情形下（即細砂層位於礫石層下方，當礫石層中之高嶺土開始進入細砂層，將使細砂層滲透係數改變，並造成該雙土層試體其等值係數小於理論值（ $k=H/(h_1/k_1+h_2/k_2)$ ），如圖 11(b) 所示。

表 1 滲透沖蝕實驗之數值模擬參數

Table 1 Parameters of seepage erosion experiments for numerical analysis

	單位重 (kg/m ³)	凝聚力 (Pa)	摩擦角 (°)	總體模數 (MPa)	剪力模數 (MPa)	滲透係數 (cm/s)
細砂層	1497	0	36.9	432.10	284.55	0.012
礫石層	1709	13734	32.2	532.10	300	0.023
濾層	1800	0	50	666.67	400	—
備註	強度與變形性參數之資料來源為陳忠銘 (1986)、八里區域性垃圾掩埋場安全體檢報告 (1999)、鄭斯元 (2012)。					

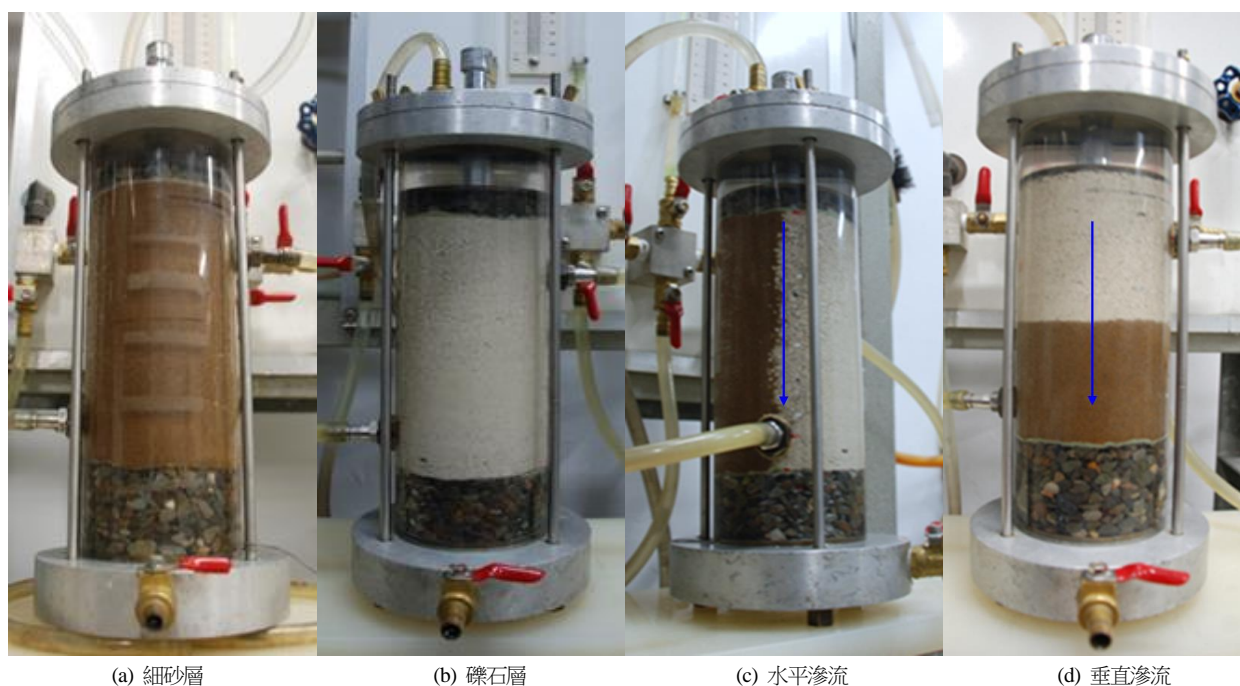
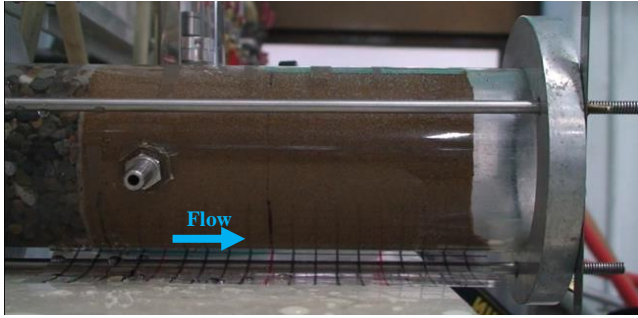
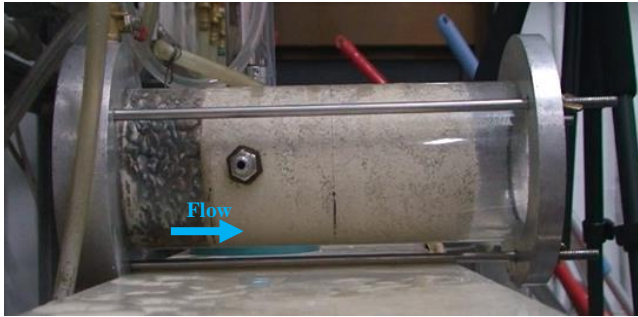


圖 4 滲透試驗試體：(a) 細砂層；(b) 礫石層；(c) 水平滲流：水流方向與界面水平；(d) 垂直滲流：水流方向與界面垂直（藍色箭頭表水流方向）

Fig.4 Specimens for permeability tests:(a) the sand;(b) the gravel;(c) two layers under parallel seepage;(d) two layers under perpendicular seepage



(a) 細砂層



(b) 礫石層



(c) 雙土層

圖 5 滲流沖蝕實驗試體：(a) 細砂層；(b) 礫石層；(c) 雙土層

Fig.5 Specimens for seepage erosion experiments:(a) the sand; (b) the gravel; (c) two layers

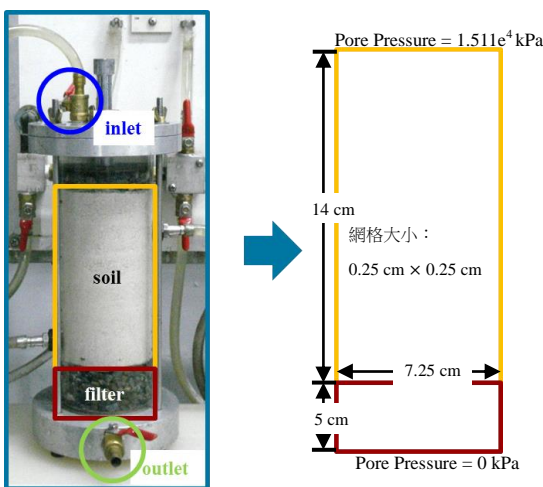


圖 6 滲透試驗之數值模擬概念及其邊界條件設置

Fig.6 The concept of permeability tests of numerical analysis and its boundary conditions

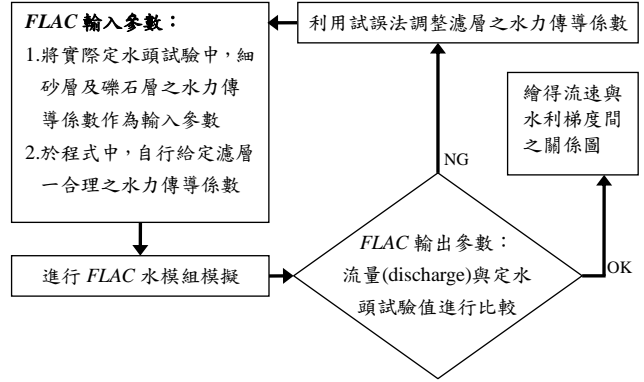


圖 7 滲透試驗之數值模擬流程

Fig.7 The flow chart of permeability tests of numerical analysis

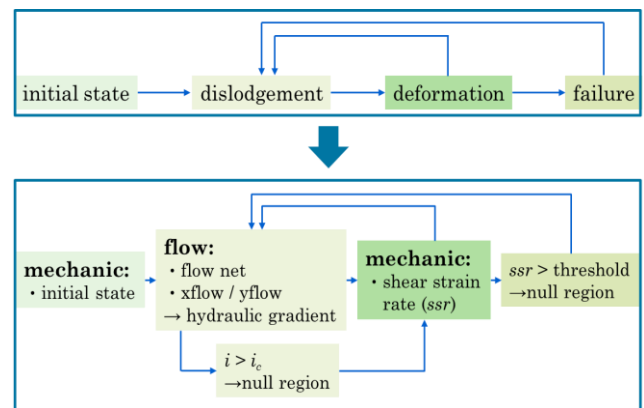


圖 8 滲流沖蝕實驗之數值模擬流程

Fig.8 The flow chart for seepage erosion experiments of numerical analysis

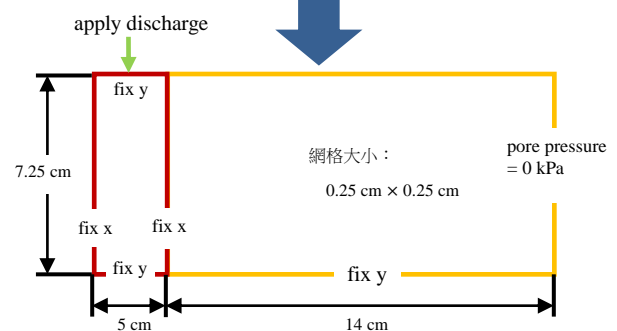
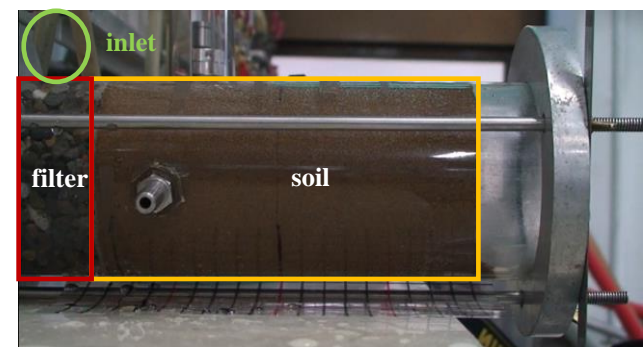


圖 9 滲流沖蝕實驗之數值模型及其邊界條件設置

Fig.9 The concept of seepage erosion experiments of numerical analysis and its boundary conditions

由滲流沖蝕試驗結果則發現,一旦單一細砂層試體中之水流遇到微水層,水體將逐漸匯集並浸潤細砂層中之土壤顆粒,並呈流體狀開始向試體外部流動。而此一現象之持續發生,則會造成試體出現後退式之破壞行為。於礫石層,其沖蝕行為為始於高嶺土隨水體沿微水層流出,而滲流行為持續發生將使試體趾部出現流動 (flowage) 及變形等行為,並於試體上部形成張

裂縫。同時,因試體下部持續受水流作用影響,最終導致試體沿張裂縫崩落。於雙土層試體,其滲流沖蝕行為同時具有單一細砂層與礫石層之沖蝕特徵,惟礫石層於單、雙土層試體中之水流條件之差異,使其沖蝕行為為有些微差異,相關實驗結果則如圖 12 所示。

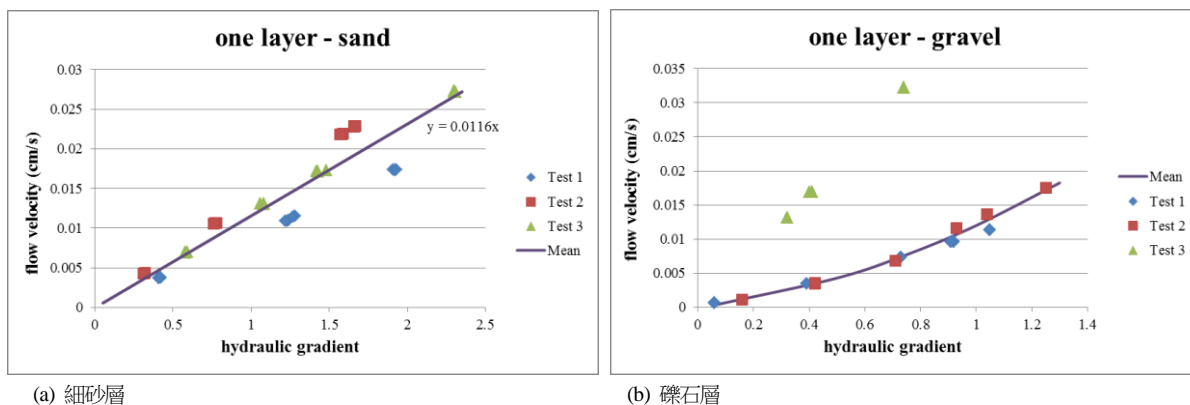


圖 10 單一土層滲透試驗數據：(a) 細砂層；(b) 礫石層

Fig.10 Experiments data of permeability tests within one layer: (a) sand; (b) gravel

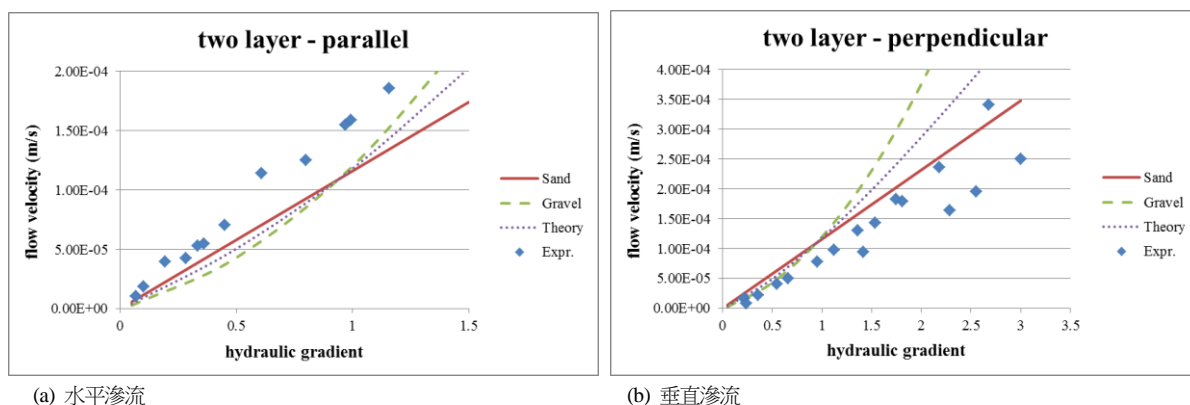


圖 11 雙土層滲透試驗數據：(a) 水平滲流；(b) 垂直滲流

Fig.11 Experiments data of permeability tests within two layers under different seepage directions: (a) parallel; (b) perpendicular

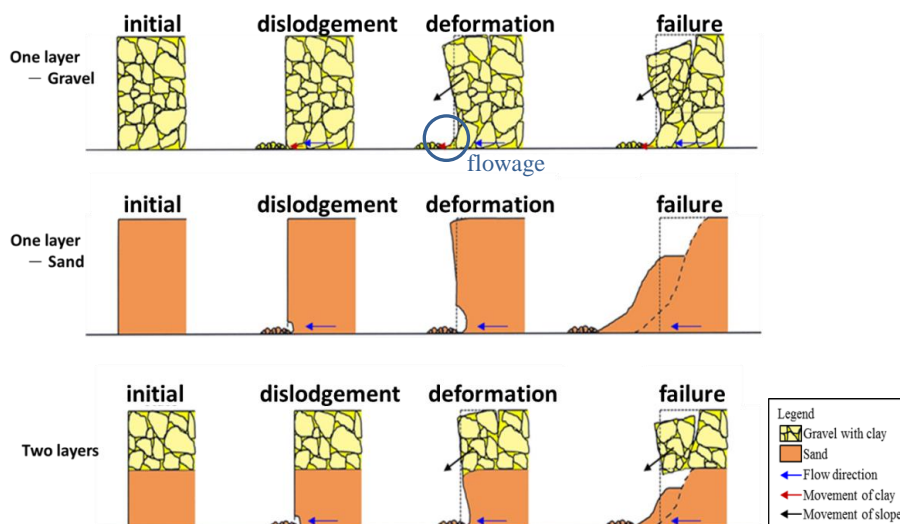


圖 12 滲流沖蝕破壞過程示意圖 (試體剖面圖)

Fig.12 Sketch of process of seepage erosion (cross-section of specimen)

2. 數值模擬

根據滲透試驗之數值模擬結果發現，單一土層試體於相同流量下，其數值結果之水力梯度皆大於試驗值，且當水力梯度越大時，兩者間之差值越大，如圖 13 及圖 14 所示，造成此一現象之原因為：於實際試驗中，水流係由定水頭水庫經由進水閘門流入滲透室，故此過程中即有能量損失，但數值模擬中則是直接給予一等同於定水頭水庫總水頭之水壓值於模型邊界上。因此，當水力梯度較大，經過閘門之總流量越大，又能量損失為可持續累積之過程，故導致數值結果與試驗值在水力梯度越大時，兩者間之梯度差越大，雖因此而導致數值模擬之平均飽和水力傳導係數稍小於試驗平均值，但此二者之飽和水力傳導係數大致上是相近的。

於平行滲流狀態下，於填充試體過程中可能因夯實而使探針位置偏移，又考慮進水閘之水頭損失，導致數值模擬結果於相同流量下，其水力梯度會與試驗值有所差異。其中，因切線法所得之飽和水力係數大於割線法，使模型中之孔隙水壓較易消散，故於相同流量下，經切線法所獲得之水力梯度值小於割線法，且與試驗結果相近，如圖 15。同時，將數值模擬成果之飽和等值水力傳導係數與理論值進行比較可發現：割線法之結果與理論值差異較大，且小於單一細砂層之水力傳導係數(圖 16)；切線法之結果與理論值較為相近，而比流量與水力梯度此二者關係則呈線性分佈(圖 17)。

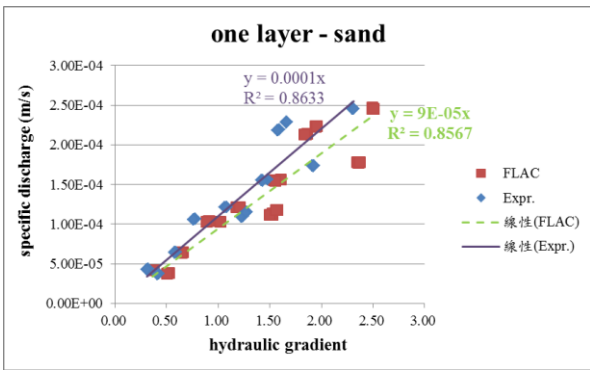


圖 13 單一細砂層數值模擬與試驗結果之比較
Fig.13 Compare the result of numerical analysis to experiments for sand only

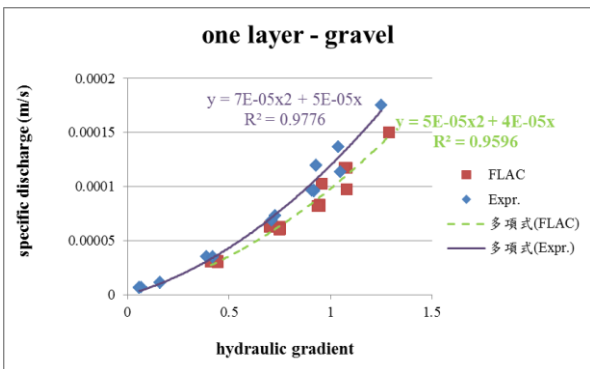


圖 14 單一礫石層數值模擬與試驗結果之比較
Fig.14 Compare the result of numerical analysis to experiments for gravel only

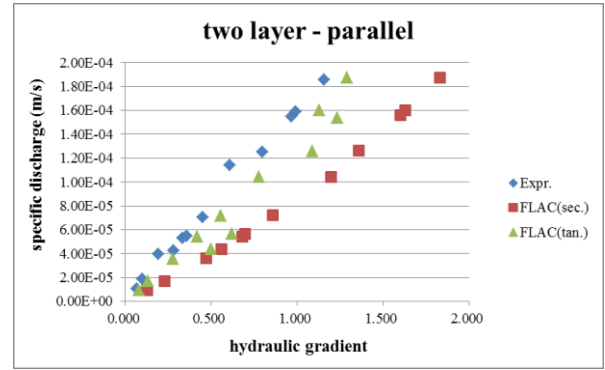


圖 15 平行滲流之數值結果與試驗結果比較
Fig.15 Compare the result of numerical analysis to experiments under parallel seepage

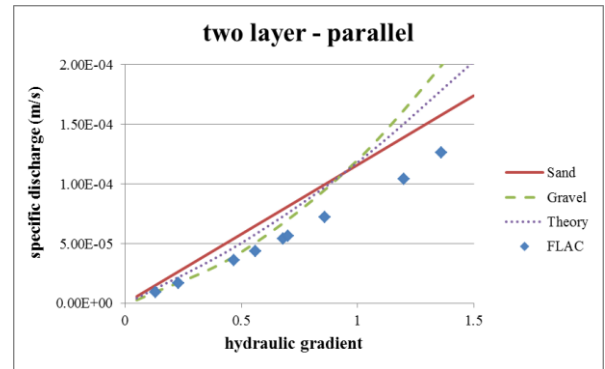


圖 16 平行滲流—割線法與理論值之比較
Fig.16 Compare to the result of numerical analysis to experiments under parallel seepage by secant

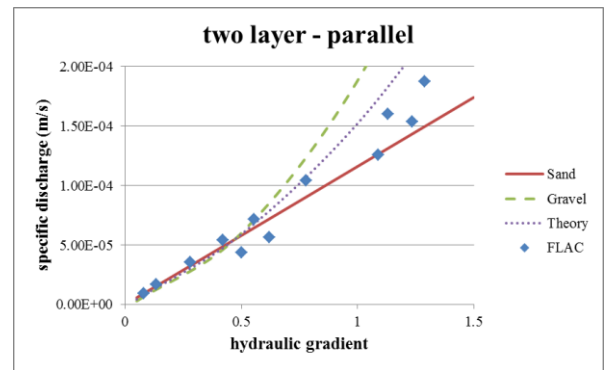


圖 17 平行滲流—切線法與理論值之比較。
Fig.17 Compare the result of numerical analysis to experiments under parallel seepage by tangent

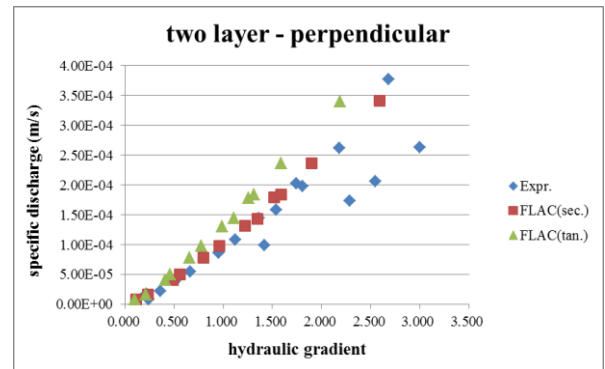


圖 18 垂直滲流之數值結果與試驗結果比較
Fig.18 Compare the result of numerical analysis to experiments under perpendicular seepage

於垂直滲流實際試驗中, 當水力梯度超過 0.7, 便會使礫石層中之高嶺土隨水流向下移動而進入細砂層內, 導致細砂層之滲透係數改變, 惟於數值模擬中並未就此現象針對細砂層之飽和水力傳導係數進行調整, 仍是直接採用細砂層原始之水力傳導係數, 故導致數值模擬於相同單位面積流量下, 模型之水力梯度小於試驗值, 如 圖 18。爾後, 將數值模擬結果與理論值進行比較發現: 當礫石層之飽和水力傳導係數大於細砂層時, 割線法與切線法之結果皆落在理論值與細砂層之間, 但兩者結果與理論值之差異會隨著水力梯度增加而有所區別。於水力梯度小時, 兩者結果皆與理論值相符合; 於水力梯度增加後, 割線法之飽和等值水力傳導係數會較靠近細砂層之飽和水力傳導係數 (圖 19), 而切線法則仍落於理論值附近 (圖 20)。根據數值模擬結果, 分別就單一土層模型與雙土層之水力梯度 (Δi) 進行比較 (圖 21、圖 22) 發現: (1) 細砂層於相同水力條件下, 會使水流出口處之水力梯度增加, 此現象之發生是因細砂層之飽和水力傳導係數小於礫石層, 導致模型內水位面升高

而使滲流面之水力梯度增加; (2) 礫石層之滲透性較細砂層佳, 模型內較不易蓄積孔隙水壓, 導致其水力梯度較雙土層中之細砂層小。因此, 綜合以上所獲結果, 可知當礫石層下方有一滲透性較差之砂層時, 會造成該土體下方之水力梯度上升。此外, 一旦當礫石層中之基質材料進入細砂層時, 亦會造成細砂層滲透性質改變, 使孔隙水壓不易消散。同時, 因該砂層為一膠結不良且級配不良之土層, 故該土層抵抗地下水流沖蝕之能力較差, 而易發生滲流沖蝕現象, 進而造成邊坡破壞情形發生。

此外, 因首次使用有限差分法軟體模擬土體受滲流引致之沖蝕行為與瞭解其影響, 故二模組間之轉換尚需針對其門檻條件進行了解, 以符合實際情形。又於雙土層試體之數值模擬時, 因礫石層及細砂層之飽和水力傳導係數未依據實際試驗情形而進行調整, 為能分別瞭解於複土層試體中, 礫石層及細砂層各自所扮演之角色及其影響, 故尚需嘗試不同之飽和水力傳導係數, 以供未來相關分析之參考。

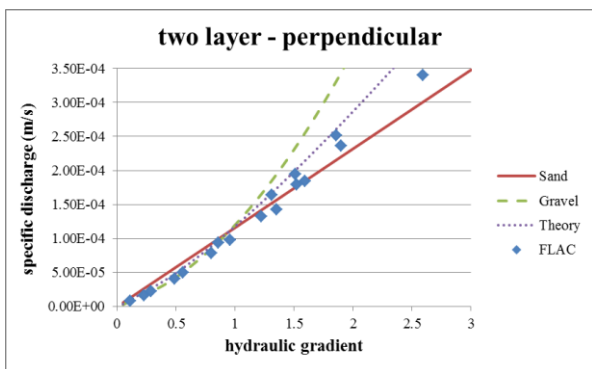


圖 19 垂直滲流－割線法與理論值之比較

Fig.19 Compare the result of numerical analysis to experiments under perpendicular seepage by secant

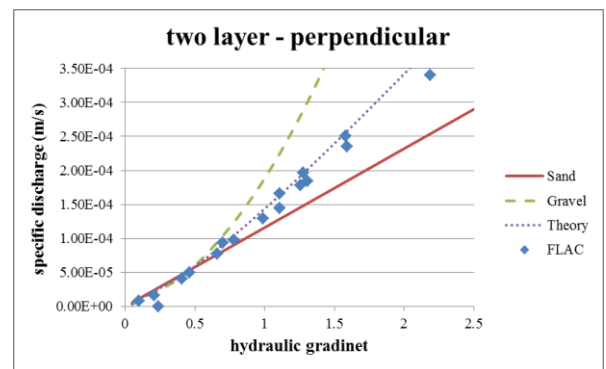


圖 20 垂直滲流－切線法與理論值之比較

Fig.20 Compare the result of numerical analysis to experiments under perpendicular seepage by tangent

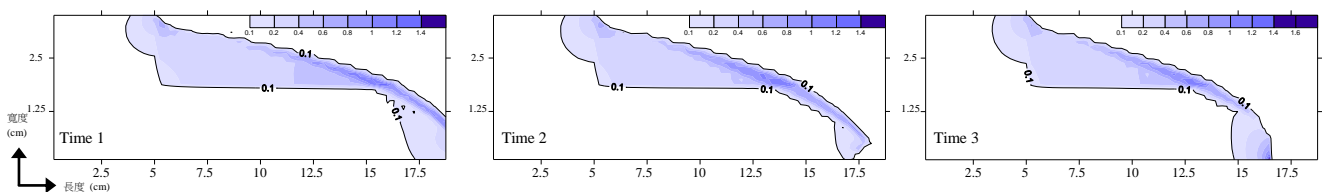


圖 21 細砂層與雙土層之水力梯度比較

Fig.21 Compare the hydraulic gradient between the sand and the two-layers

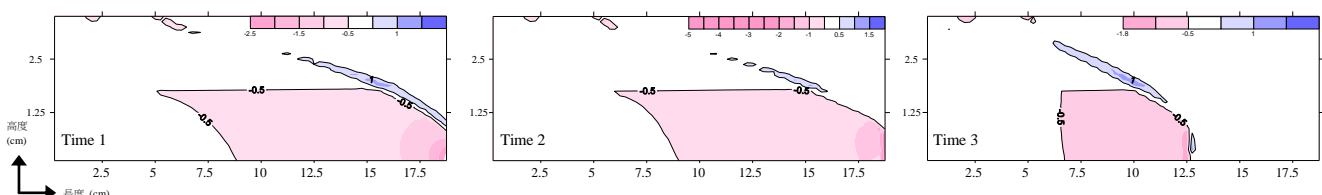


圖 22 礫石層與雙土層之水力梯度比較

Fig.22 Compare the hydraulic gradient between the gravel and the two-layers

誌 謝

本研究承蒙國科會專題研究計畫：「降雨引致紅土礫石台地坡地崩塌機制之探討」（編號 NSC 101-2221-E-002-110-MY2）之經費補助，致使本研究得以順利完成。期間，亦由衷感謝林銘郎教授、周英豪先生、陳榮河教授、張光宗教授與黃文昭教授等人之指導。

參考文獻

- [1] 「土壤力學實驗手冊」，國立台灣大學土木工程學系，台灣。(Manual of soil laboratory testing, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 莊釗鳴 (2010)，「林口台地大南灣層的沉積環境」，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。(Chuang, C.M. (2010). *Depositional environment of Tanawan Formation, Lin-Kou Tableland*, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 陳文福 (1987)，「林口台地第四系沈積環境之初步研究」，國立台灣大學地質學系學士論文。(Chen, W.F. (1987). *A preliminary study of Quaternary depositional environments on Lin-Kou tableland*, Thesis (b.s.), National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 陳忠銘 (1986)，「林口鄉嘉寶村坵方之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。(Chen, Z.M. (1986). *The study of slope failure in Jiabao*, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 鄭斯元 (2012)，「降雨引致基質吸力變化對紅土台地異質性邊坡穩定性之影響」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。(Cheng, S.Y. (2012). *Influence of Matric Suction on Slope Instability of Stratified Laterite Gravel Tableland Induced by Rainfall*, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [6] 鄭富書、林銘郎 (1999)，「八里區域性垃圾掩埋場安全體檢報告」，台北縣環保局。(Jeng, F.S., and Lin, M.L. (1999). *The safety report of Bali Landfill Site*, Environmental Protection Department, Taipei county, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [7] ASTM Destination D422-63 (2007). "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils."
- [8] ASTM Destination D2434-68 (2007). "Stand test method for permeability of granular soils (constant head)."
- [9] Bakhtiaran, A. H., and Shokri, M. (2012). "A review on non-linear unsteady one dimensional flow in coarse porous media." *6th International Symposium on Advances in Science and Technology*.
- [10] Chu-Agor, M.L., Fox, G.A., Cancienne, R.M., and Wilon, G.V. (2008). "Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes." *Journal of hydrology*, 359, 247-259, Elsevier.
- [11] Crosta, G., and di Prisco, C. (1999). "On slope instability by seepage erosion." *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 1056-1073.
- [12] Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris
- [13] Dunne, T. (1990). "Hydrology, mechanics, and geomorphic implications or erosion by subsurface flow." *Groundwater geomorphology: Role of subsurface water in earth-surface processes and landforms*, C. G. Higgins and D. R. Coates, eds., Geological Society of America Special Paper 252, Boulder, Colo.
- [14] Ghiassian H., and Ghareh, S. (2008). "Stability of sandy slopes under seepage conditions." *Landslides*, November 2008, Volume 5, Issue 4, 397-406.
- [15] Head, K.H. (1982). *Manual of soil laboratory testing, vol 2, second edition*. London, Pentech Press.
- [16] Klute, A. (1965). "Laboratory Measurements of Hydraulic Conductivity of Saturated Soil." In: ed. C.A. Black *et al.*, *Methods of Soil Analysis*. ASA Monograph No. 9.
- [17] Klute, A., and Dirksen, C. (1986). "Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods." In: *Methods of Soil Analysis. Part I*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- [18] Mitchell, J.K., and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior, third edition*, John Wiley & Sons, INC..
- [19] Philip, J.R. (1985). "Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil." *Water Resource Research*, 21(7), 1025-1033.
- [20] Reynolds, W.D., and Elrick, D.E. (1986). "A method for simultaneous in-situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the conductivity-pressure head relationship." *Ground Water Monitoring Review*, 6: 84-95.
- [21] Stephens, D.B., Tyler, S., and Watson, D. (1984). "Influence of entrapped air on field determination of hydraulic properties in the vadose zone." In: Proc., Confer, on characterization and monitoring in the vadose zone, National Water Well Association, Washington, 57-76.

2013 年 10 月 25 日 收稿

2014 年 01 月 02 日 修正

2014 年 03 月 19 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 12 月 31 日)