

降雨引發淺層邊坡破壞機制

黃景川^{[1]*} 駱建利^[2] 朱奕璋^[3] 胡立康^[3]
李金龍^[3] 張家薰^[4] 雲世傑^[4]

摘要 豪雨中源頭邊坡之大量崩塌常成為土石流之主要土石來源。對於源頭邊坡破壞機制之了解有助於提昇土石流發生預測準確性。有鑑於國內對於豪雨導致淺層邊坡破壞之實驗研究較有限，本研究進行三個不同尺寸砂土有限邊坡之人工降雨試驗，並量測邊坡破壞伴隨之土砂排出量與邊坡內部含水量及孔隙水壓反應。本研究以邊坡破壞之頭部張力裂縫發展及土砂排出量為邊坡在豪雨中「外部反應」之量化指標；以邊坡內部之含水量與孔隙水壓之消長為「內部反應」之量化指標，嘗試建立邊坡在豪雨滲透與破壞過程中「內部反應」與「外部反應」之關聯性。本研究發現，不透水岩盤與邊坡土壤交界面上之含水量 vs. 時間曲線上之第二個急驟斜率變化點為土壤達到飽和點，且為岩~土界面之側向飽和滲流之開始點。此一側向滲流之開始點與邊坡坡趾破壞，土粒大量流出之開始點極為接近。本研究對於試驗邊坡材料建立土~水特徵曲線與未飽和滲透係數函數，以有限元素分析程式 (SEEP/W) 對中型邊坡進行模擬分析。結果証實，淺層邊坡中，岩~土交界面上一致向外之飽和側向滲流之形成為坡趾附近孔隙水壓急劇昇高之開始，與邊坡之人工降雨試驗觀測之岩~土界面流發生時間相當一致。

關鍵詞：淺層邊坡破壞、降雨、人工降雨試驗、含水量、孔隙水壓、地下滲流、滲流分析。

Mechanisms of Rainfall-induced Shallow Slope Failures

Ching-Chuan Huang^{[1]*} Chien-Li Lo^[2] Yih-Jang Ju^[3] Lih-Kang Hwu^[3]
Jin-Long Lee^[3] Jia-Shiun Jang^[4] She-Chieh Yuin^[4]

ABSTRACT Knowledge of the mechanism of rainfall-induced shallow slope failures is essential for increasing the accuracy of debris flow initiation prediction. This paper presents experimental and analytical results obtained from a series of artificial rainfall tests on sandy slopes with various scales. The responses of water content and porewater pressure are used as the index of 「internal response」 of the slope. The 「external response」 of the slope subjected to rainfall is defined as the volume of discharged sand or the retrogressive development of the tension crack (or scarp). It was found the time of debris discharge initiation is close to that of the formation of a saturated lateral subsurface flow along the soil-bedrock interface, which is signaled by the abrupt transition points of water content and porewater pressure response

[1] 國立成功大學土木工程學系

Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

[2] 樹德科技大學建築與環境設計學系

Department of Architecture and Environment, Shu-Te University, Kaohsiung County, Taiwan, R.O.C.

[3] 國立暨南國際大學地震與防災工程研究所

Institute of Earthquake and Disaster Prevention Engineering, National Chi Nan University Nantou Hsien, Taiwan, R.O.C.

[4] 國立暨南國際大學土木工程研究所

Department of Civil Engineering, National Chi Nan University Nantou Hsien, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : samhcc@mail.ncku.edu.tw

curves measured at the soil-bedrock interface. This observation was supported by numerical analysis using a finite element program with calibrated soil-water characteristic curves and soil permeability functions.

Key Words: shallow slope failure, rainfall, artificial rainfall test, water content, porewater pressure, subsurface flow, seepage analysis.

一、前言

大量源頭邊坡淺層破壞常為激發土石流之要件。在土石流之災害案例中，常見源頭邊坡之淺層崩壞直接轉化為土石流侵襲下游村落之案例。因此，提昇對源頭邊坡在豪雨中淺層破壞機制之了解有助於提昇土石流發生預測之準確性。國內對於土石流發動或淺層破壞機制之實驗研究較少(如：林美玲、王幼行, 1999; Muntohar and Liao, 2009, 2010)。國外之降雨導致淺層邊坡破壞機制研究中，以土壤水份計或孔隙水壓計量測邊坡在降雨中內部水份與水壓消長之觀察不在少數，但普遍缺乏土壤含水量與孔隙水壓消長之定量預測模式，亦缺乏土壤含水量及孔隙水壓反應與邊坡破壞之量化關係。降雨導致地下水位上昇之預測方面，長期以來為大地工程與邊坡穩定相關研究與實務方面甚弱之一環。降雨導致邊坡中水位上昇問題，通常以無限邊坡中降雨入滲率與邊坡之孔隙率來決定，其結果為無限邊坡中平行於坡面之地下水位在鉛直方向上之昇降現象，與現實之飽和或未飽和坡面中發生側向地下水流(lateral subsurface flow)之觀察與理論分析結果，差異相當大(Weyman, 1973; Pilgrim *et al.*, 1978; Weiler and Naef, 2003; Anderson *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2008, 2009; Huang and Yuin, 2010)。以往之淺層邊坡破壞分析大部份採用無限邊坡(infinite slope)之假設(Okimura and Ichikawa, 1985; Pradel and Raad, 1993; Rahardjo *et al.*, 1995; Borga *et al.*, 1998; Crosta, 1998; Enoki, 1999; Collins and Zndarcic, 2004; Kim *et al.*, 2004; Meisina and Scarabelli, 2007; Lu and Godt, 2008; Cho, 2009; Lee *et al.*, 2009; Godt *et al.*, 2009; Montrasio *et al.*, 2009; Muntohar and Liao, 2009, 2010)。但實際上，許多自然邊坡是以有限邊坡之形式存在(Lumb, 1975; Johnson and Sitar, 1990; Jiao *et al.*, 2005; Gercovich *et al.*, 2006; Lacerda, 2007; Cascini *et al.*, 2008)，其特色為在邊坡之坡趾附近存在一自我穩定(self-stabilizing)之坡趾，使邊坡呈現“座椅狀(chair-shaped)”具自我穩定坡趾之有限邊坡亦常被

使用於國際知名之人工降雨邊坡模型試驗中(Orense *et al.*, 2004; Chu-Agor *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2008, 2009; Huang and Yuin, 2010)。基於上述之觀察，本研究聚焦於有限邊坡中鉛直與側向滲流之發展過程及其與邊坡破壞、土石流出之關聯性。

二、邊坡降雨試驗與結果

圖 1(a), (b), (c) 所示為本研究建造之一系列不同尺寸有限邊坡(finite slope)斷面，其覆土厚度各為 0.7 m, 0.48 m 及 0.36 m，長度介於 1.76 m~3.9 m，寬度介於 0.5 m~1.5 m。以下簡稱大型、中型、小型邊坡。此三邊坡所採用的邊坡材料相同，其粒徑分佈曲線示於圖 2。根據 ASTM D2487 (統一土壤分類法)，可分類為粉土質砂(SM)。邊坡之建造過程是預先拌合已知水量於定量之土壤，配合夯實用之木板及橡膠槌在水平薄層(小型與中型：20 mm 厚；大型：100 mm 厚)上輕敲至預訂之密度，並重覆上述之夯實程序，直至邊坡完成。三個系列之邊坡在完成後立即以人工降雨之噴灑裝置，進行一定降雨強度(I)之人工降雨試驗。人工降雨強度與均勻度於試驗前經過調整與測試，使試驗之目標降雨強度之誤差在 ± 0.4 mm/hr。引用范正成、吳明峰(1996)之均勻係數(U_c)定義，本研究之 U_c 值為 81-91%，為良好之實驗條件。本研究之著眼點不在於表面侵蝕(surface erosion)之問題，而在於邊坡歷經雨水入滲，發生邊坡破壞與土石流出(debris discharge 或 mass wasting)問題。因此，本降雨設施無法模擬真正雨滴大小與終端速度，僅為提供邊坡表面一均勻之入滲邊界。本系列試驗有下列特色：

- (1) 邊坡形狀為下端有平坦之自我穩定(self-stabilizing)坡趾，不同於多數以無限邊坡為前提之分析研究。在以往之自然邊坡現場調查案例中，可以常見到與本研究類似之“座椅形 Chair-shaped”邊坡(Lumb, 1975; Jiao *et al.*, 2005; Gercovich *et al.*, 2006; Lacerda, 2007; Cascini *et al.*, 2008)。

(2) 於中型及小型邊坡之坡趾下端設置“資源回收筒”，即流出之土水回收與量測筒（見圖 3）。試驗中，以不定間隔（約 1 分~5 分）回收，並記錄回收時間。於試驗後分別量測筒中之水重與土重以量化邊坡在降雨中之後退式破壞 (retrogressive failure) 程度與土砂排出量（以 P_v 表示， P_v ：排出之土粒體積/邊坡整體之土粒體積），圖 4 為中型邊坡試驗之例。該圖顯示，土粒流出歷程曲線（以 P_v 表示）與降雨強度 (I) 有密切關係。這些曲線皆有斜率急驟變化點（其時間以 t_m 表示）。 I 值愈大， t_m 愈小，且 I 值愈大，土粒排放曲線之斜率愈大。

(3) 邊坡中土壤含水量與孔隙水壓之量測。採用之土壤水份計 (soil moisture sensor, Decagon Devices, 型號 ECH₂O-10) 特點為薄型 (厚度為 1 mm, 長度 102 mm, 寬度 32 mm), 可使水份計之設置對地中滲流之影響可減至最小。孔隙水壓計為日本 Tokyosokki 公司之型號 KPC-200KPA 產品, 其解析度為 10 mm/ μ V 壓力水頭 (0.1 kPa)。本文中, 不同位置之土壤水份計分別以 M1~M11 表示, 孔隙水壓計以 P1-P6 表示, 其埋設位置示於圖 1(a)~(c) 之邊坡斷面圖中。

(4) 邊坡在降雨中之後退式破壞發展狀況以數位相機記錄。圖 5(a)~(d) 為大型試驗中, 邊坡後退式破壞之一例。在 $I = 70 \text{ mm/hr}$ 之試驗條件下, 降雨延時 $t = 70 \text{ min}$ 。僅見輕微之坡趾流失, 其後於 $t = 84 \text{ min}$ 至 104 min 間邊坡破壞迅速發展。崩塌之邊坡範圍愈大, 土石流出之潛勢能 (potential) 愈大。

三、豪雨中邊坡之外部反應

本文將邊坡之「外部反應」定義為降雨中邊坡外表所量測到之破壞程度, 以土粒之流出量或張力裂縫之進展為量化指標。圖 6 為將中型邊坡試驗結果之外反應標示於國際上所熟知之 I-D (intensity-duration) 座標上之一例 (Huang and Yuin, 2009)。圖上之國際知名 I-D 曲線 (Caine, 1980; Cancelli and Nova, 1985; Wiczorek, 1987) 分散極廣, 這說明了邊坡災害或土石流之發生門檻值因時空而異, 不確定性極大。該圖中之三條虛線各為土砂排出曲線上之第一個斜率轉換點對應之時間 (t_m), 土砂排出率 $P_v = 5\%$ 之時

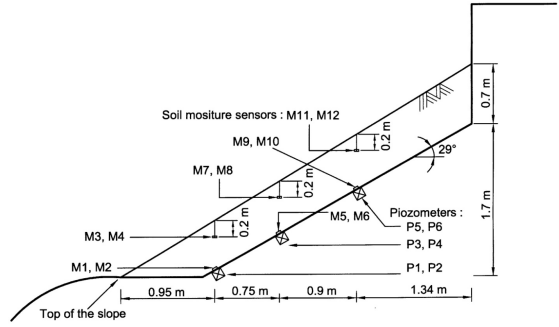


圖 1(a) 大型邊坡斷面與儀器配置圖 (after Huang et al., 2009)

Fig.1(a) Geometries and instrumentation of the large-scale slope

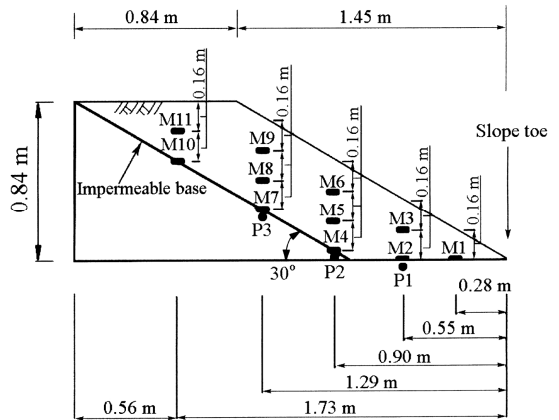


圖 1(b) 中型邊坡斷面與儀器配置圖 (after Huang and Yuin, 2010)

Fig.1(b) Geometries and instrumentation of the medium-scale slope

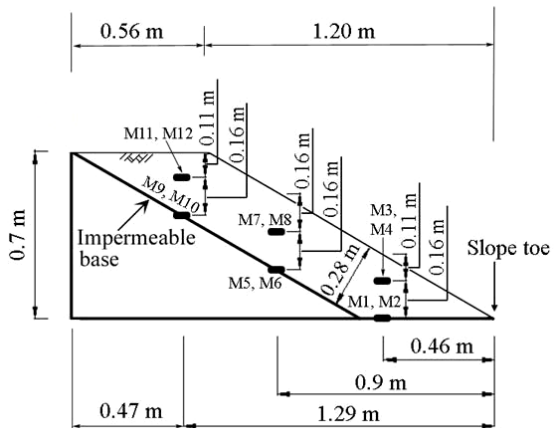


圖 1(c) 小型邊坡斷面與儀器配置圖 (after Huang et al., 2008)

Fig.1(c) Geometries and instrumentation of the small-scale slope

間 ($t_{5\%}$) 及 $P_v = 15\%$ 之時間 ($t_{15\%}$) 所形成之降雨強度 (I) 與降雨延時 (D) 之關係。該圖顯示, 其所形成之門檻 I-D 曲線介於 Wieczorek (1987) 與 Cancelli and Nova (1985) 門檻 I-D 曲線之間, 且隨著 P_v 值之增加, 所對應之 I-D 曲線位置往上移。這種現象暗示, 國際上所發表之災害門檻 I-D 曲線間之差異原因可能為在各個時空環境下引發災害所需之源頭邊坡破壞程度不同所造成。土石流災害發生, 由於地形條件差異, 所需之源頭崩塌土石量不同, 必然導致其災害發生之門檻 I-D 曲線不同。從另一觀點, 各地溪床堆積物存量與存在條件不同, 亦導致土石流發生門檻 I-D 曲線不同。本研究中之其他尺寸邊坡亦同樣適用上述之結論。

四、豪雨中邊坡之內部反應

邊坡之「內部反應」是指降雨中邊坡內部土壤含水量或孔隙水壓在豪雨中之變化。從邊坡內部各定點之含水量或孔隙水壓之變化歷程, 可以推測溼潤前線 (wetting front) 與地下滲流 (subsurface flow) 在邊坡內部發展過程。將此一過程與邊坡外部反應比對, 可幫助建立一正確之淺層邊坡破壞機制之物理模型 (physics-based model)。圖 7 為 $I = 47 \text{ mm/hr}$ 之中型邊坡試驗中, 在距離坡腳 0.9 m 處不同高度之

土壤水份計 M4 (0.9, 0), M5 (0.9, 0.16) 及 M6 (0.9, 0.32) 之含水量變化與時間關係曲線 (水份計編號之括號中第一個數據為距坡腳之距離; 第二數據為距底部不透水岩盤之距離, 皆以 m 為單位)。該圖顯示:

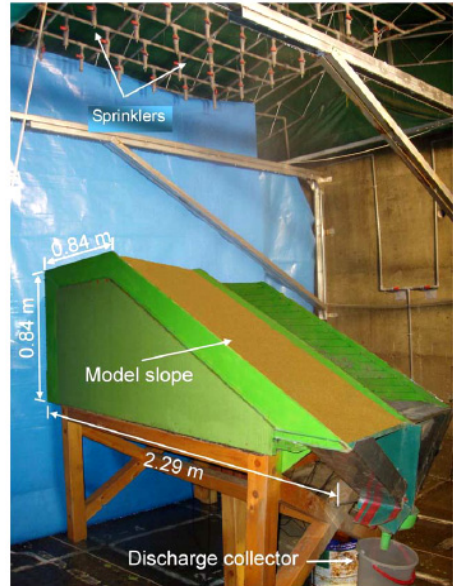


圖 3 中型邊坡之降雨與土石流之收集量測系統
Fig.3 Artificial rainfall and debris discharge collection systems for the medium-scale slope

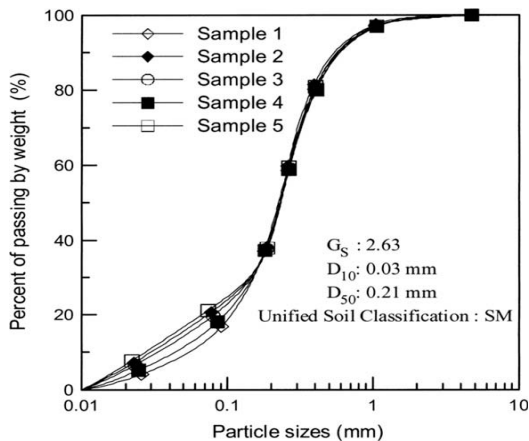


圖 2 本研究用土壤之粒徑分佈曲線
Fig.2 Particle size distribution curves for the soil used in the present study

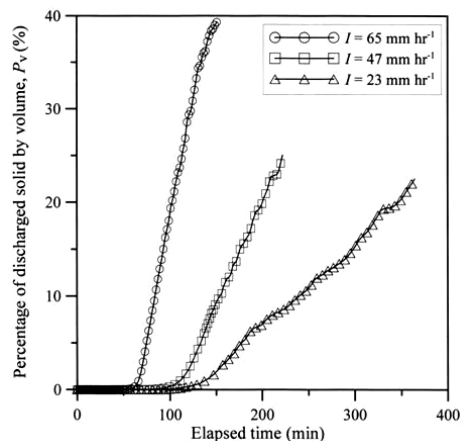


圖 4 中型邊坡試驗之土石排出率 (P_v) 與時間之關係曲線
Fig.4 Time histories of the percentage of total discharged solid volume (P_v) for the medium-scale slope subjected to various rainfall intensities

- (1) 各曲線皆有急驟上昇之斜率變化點，顯示溼潤前線之到達。根據到達之順序可推斷溼潤前線之進行方向為由上而下。
- (2) 位於中間高度之水份計 (M5, M6)，至試驗結束為止，並未達飽和狀態 (飽和度 $S_r = 85\%$)；位於不透水層上方之水份計 (M4)，在第一轉折點之後迅速達到飽和狀態 ($S_r \geq 95\%$)。這顯示飽

和前線一但到達不透水界面，該交界面迅速發展為完全飽和之地中滲流面。

- (3) 土粒排出曲線轉折點 (即 $t_{in} = 103 \text{ min.}$) 對應之 (P_v 值約為 0.5%) 在 M4 之曲線達到第二個斜率變化轉折點 (約 $t = 90 \text{ min.}$) 之不久後發生，顯示地下飽和滲流之形成與邊坡破壞土砂流出有密切關係。

原來坡趾 (S = 0 m) 第一道儀器槽溝 (S = 0.95 m)



圖 5(a) 大型邊坡之試驗前外觀 (I = 70 mm/hr, t = 0 min)

Fig.5(a) A close view on the large-scale slope before rainfall (I = 70 mm/hr, t = 0 min)

原來坡趾 (S = 0 m) 第一道儀器槽溝 (S = 0.95 m)



圖 5(c) 大型邊坡試驗在降雨 84 分鐘後坡趾平占明顯破壞 (I = 70 mm/hr, t = 84 min)

Fig.5(c) A major failure of the slope toe at t = 84 min. for the case of I = 70 mm/hr

原來坡趾 (S = 0 m) 第一道儀器槽溝 (S = 0.95 m)



圖 5(b) 大型邊坡在降雨 70 分鐘後坡趾之液化與流失現象 (I = 70 mm/hr, t = 70 min)

Fig.5(b) A minor liquefaction and wash-away of the slope toe (I = 70 mm/hr, t = 70 min)

第一道儀器槽溝 (S = 0.95 m) 第二道儀器槽溝 (S = 1.7 m)



圖 5(d) 大型邊坡試驗在降雨 104 分鐘後，崩塌土體擴展至坡趾後方約 1.7 m 處 (I = 70 mm/hr, t = 104 min)

Fig.5(d) A retrogressive failure observed at t = 104 min. with a scarp at 1.7m from the slope toe

圖 8 為與圖 7 同一試驗中, 距坡腳 0.55, 0.90 及 1.29 m 處岩-土交界面之孔隙水壓計量測之孔隙水壓力(u) 歷時曲線, 可得到以下結論:

- (1) 比較 P2 與 M4 (圖 7) 之反應, P2 曲線之第一個轉折點, 約發生於 $t = 90$ min. 與 M4 曲線之第二轉折點 (接近飽和含水量) 極為接近。這符合兩種量測儀器之物理特性與有效量測範圍, 即含水量接近飽和時, 恰為毛細現象消失, 或基質吸力 (matrix suction) 為零, 孔隙水壓由負轉為正之時間點。

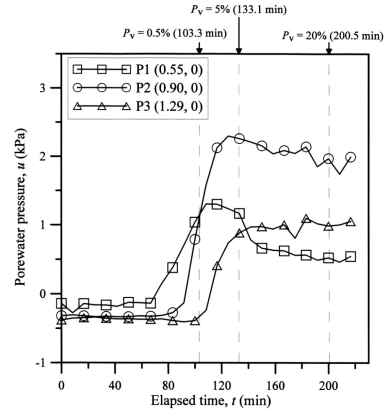


圖 8 以 $I = 47$ mm/hr 之中型邊坡試驗為例, 降雨中, 位於岩~土交界面上之孔隙水壓反應曲線

Fig.8 Typical examples of porewater pressure responses at soil-bedrock interface for the medium-scale slope ($I = 47$ mm/hr)

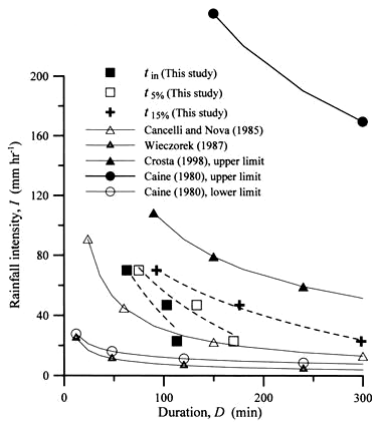


圖 6 以中型邊坡降中試驗為例之 I-D 門檻曲線與目前知名之 I-D 門檻之比較

Fig.6 Typical examples of I-D curves obtained in the medium-scale slope and those reported in the literature

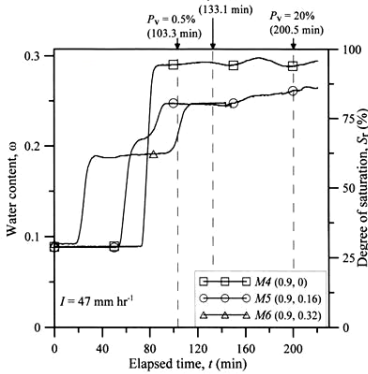


圖 7 以 $I = 47$ mm/hr 之中型邊坡為例, 在降雨中內部土壤水份計量得之含水量反應曲線

Fig.7 Typical examples of internal water content responses obtained in the medium-scale slope ($I = 47$ mm/hr)

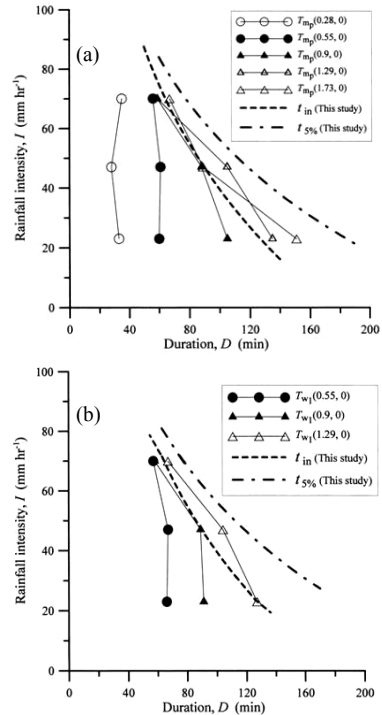


圖 9 以 $I = 47$ mm/hr 之中型邊坡為例之內部反應 I-D 曲線: (a) 含水量(ω) vs. 時間(t) 曲線之第二轉折點時間 T_{mp} , (b) 孔隙水壓 (u) vs. 時間(t) 曲線上第一轉折點時間 T_{w1}

Fig.9 Comparisons of internal and external responses for the medium-scale slope subjected to $I = 47$ mm/hr; (a) T_{mp} from ω vs. t curves, (b) T_{w1} from u vs. t curves

(2) 將孔隙水壓 (u) vs. t 曲線與 $P_v = 0.5\%$, 5% 及 20% 之時間比較, 得知位於斜坡上之岩~土交界面孔隙水壓計, P_2 與 P_3 之 u vs. t 曲線之第一轉折點時間 (介於 $90\sim 100$ min.) 與邊坡急驟破壞之發動時間 ($P_v = 0.5\%$ 之時間) $t_{in} = 103$

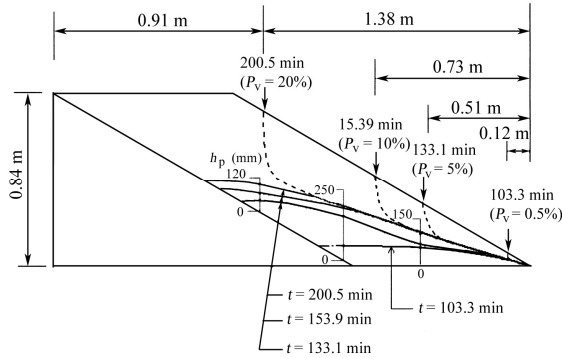


圖 10 $I = 47$ mm/hr 之中型邊坡降雨試驗中量得之岩~土界面上壓力水頭與破壞位置 (或土粒流出率, P_v) 關係

Fig.10 Measured porewater pressures and failure developments for the medium-scale slope subjected to $I = 47$ mm/hr

min. 約略一致。因此, 位於岩~土交界面之 u vs. t 曲線之第一轉折點時間與邊坡破壞之發動有密切關係, 亦為邊坡破壞土石流出開始發動之先期之指標。

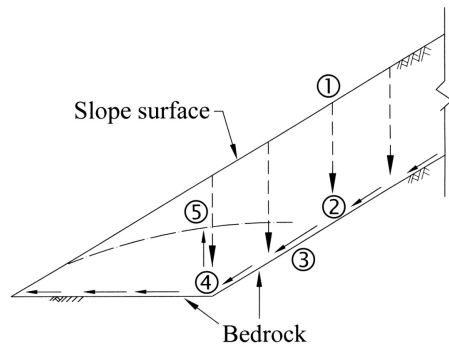


圖 11 根據邊坡降雨試驗之資料引發淺層破壞機制物理模型

Fig.11 A physical model describing the process of rainfall-induced shallow slope failures.3

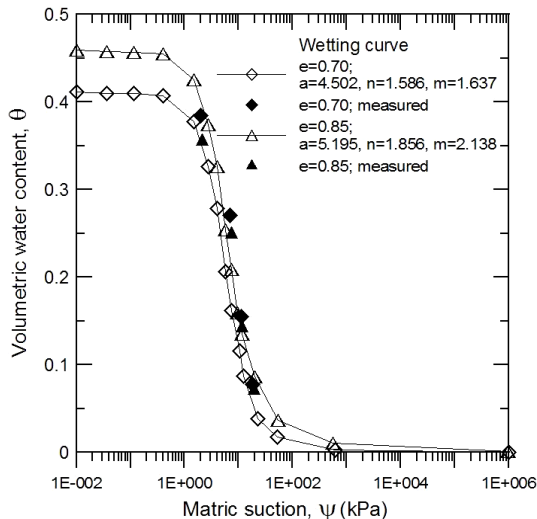


圖 12 根據量測之基質水頭與含水量關係, 以 Fredlund & Xing (1994) 之數學模式建立之土~水特徵曲線

Fig.12 Soil-water characteristic curves for the soil used in the present study based on Fredlund and Xing (1994) model

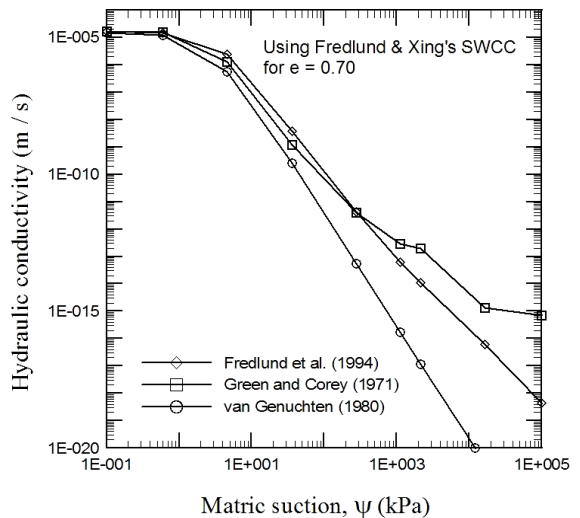


圖 13 以三種模式建立飽和不飽和土壤之滲透係數函數

Fig.13 Soil permeability functions for the soil used in the present study based on three theoretical models

五、邊坡外部與內部反應之關係

將上述之豪雨中邊坡內部反應與外部反應門檻值以 I-D 座標顯示於圖 9(a) 與 (b)。圖 9(a) 之虛線為外部量測所得之 t_{in} 與 $t_{5\%}$ 時之 I-D 曲線 (取自圖 6 之虛線)；各實線為在岩土交界面上不同位置之水份計達到第二個轉折點 (即接近飽和狀態) 之時間與各試驗之 I 值形成之 I-D 曲線。這些 I-D 曲線皆位於 $t_{5\%}$ 曲線之左方, 表示任何一個岩土界面之水份計反應第二轉折時間 T_{mp} 皆可作為邊坡輕微破壞 (流出率 $P_v \leq 5\%$) 之領先指標。其中又以位於 0.9 m, 1.29 m 及 1.73 m 處 (即位於傾斜之岩~土交界面上) 之 T_{mp} 與邊坡破壞與顆粒流出之發動有最緊密的關係。圖 9 (b) 類似於圖 9(a), 僅圖中之實線是根據孔隙水壓計之第一轉折點時間 (T_{w1}) 所形成之 I-D 曲線。結論與圖 9(a) 類似, 即位於 0.9 m 及 1.29 m 處岩土交界之孔隙水壓計反應時間 T_{w1} 可成為邊坡輕微破壞 ($P_v \leq 5\%$) 之領先指標。

圖 10 為與圖 9 相同試驗之邊坡後退式破壞過程與岩土交界面上壓力水頭 (h_p) 發展之相關圖。自 $t = 0$ min. 至 $t = 103.3$ min. 為止, 邊坡破壞極微, 壓力水頭之分佈侷限於坡趾之小範圍。自 $t = 103.3$ min. 至 133 min 間, 壓力水頭之變化非常明顯, 在此期間邊坡之破壞與土粒流出現象亦發生急驟變化 ($t = 103$ min. 為 $I = 47$ mm/hr 試驗土砂排出曲線之斜率變化點, 見圖 4)。自 $t = 133$ min 以後, 壓力水頭之增加並不顯著, 邊坡之後退式破壞速度 (或土石流出) 以一定速率進行。

六、物理模型與數值分析

圖 11 為根據上述之試驗所歸納之豪雨中邊坡破壞過程物理模型。其過程以步驟①至⑤表示: ①為自邊坡表面之鉛直入滲, ②為溼潤前線到達岩土界面, ③為岩土界面形成飽和區引發側向之飽和地中滲流, ④為飽和滲流到達坡趾之平緩處, 流速減緩, ⑤地下水位 (或孔隙水壓) 於坡趾附近累積, 地下水位升高至一穩定高度。根據實驗觀察, ③與④之發生時間極為接近, 且③與④之發生時間亦與土粒流出曲線之第一轉折點 ($P_v = 0.5\%$) 之發生時間 t_{in} 一致。⑤為邊坡以等速率後退破壞, 或等速率釋出土粒狀態。

由於預測邊坡中滲流之發展為建立邊坡破壞物理模型之第一步, 本研究使用土中張力計 (tensiometer,

Soilmoisture Equipment Co., Model: 2725A) 於一校正用砂箱 (0.5×0.5×0.5 m) 中量取不同體積含水量 (volumetric water content, θ) 與基質吸力 (matric suction, ψ) 之關係 (稱為土水特徵曲線, soil-water characteristic curve, SWCC), 將其中孔隙比 $e = 0.70$ 與 0.85 之例示於圖 12。該圖之 ψ 與 θ 關係, 以 Fredlund and Xing (1994) 之數學模型表示為:

$$\theta = C(\psi) \cdot \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\frac{\psi}{a})^n]\}^m} \quad (1)$$

上式中,

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\psi_r})} \quad (2)$$

ψ_r : 殘餘體積含水量 θ_r 所對應之基質吸力 (根據 Fredlund and Xing, 1994 之建議 $\psi_r = 1500$ kPa)。

圖 13 為根據 Green and Corey (1971), van Genuchten (1980) 及 Fredlund *et al.*, (1994) 三種不飽和土滲透係數模型, 對於圖 12 之 SWCC 求得對應之滲透係數函數 (soil permeability function, SPF)。其中經過小型砂箱 (0.5 m 立方) 滲透試驗之驗證, 以 Fredlund *et al.* (1994) 之模型最能適切表現砂箱中之滲透行為。因此, 後續之分析採用 Fredlund *et al.* (1994) 之 SPF, 以下列方程式表示:

$$k_u(\theta) = k_s \cdot \int_{\theta_r}^{\theta} \frac{\theta - x}{\psi^2(x)} dx / \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{\theta_s - x}{\psi^2(x)} dx \quad (3)$$

上式中,

$k_u(\theta)$: 飽和~不飽和滲透係數, 為 θ 之函數

k_s : 飽和滲透係數

(3) 式之積分為以 θ 為變數之積分, 一般將其轉換為以 ψ 為變數之積分較方便, 此時 (3) 式可改寫如下:

$$k_u(\psi) = k_s \cdot \frac{\int_{\ln(\psi_a)}^{\ln(\psi)} \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \cdot \theta' \cdot (e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_a)}^{\ln(\psi_s)} \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \cdot \theta' \cdot (e^y) dy} \quad (4)$$

$k_u(\psi)$: 飽和~不飽和滲透係數, 為 ψ 之函數

b : 常數 ($= \ln 1 \times 10^6$)

ψ_a ：空氣開始進入時之 ψ 值
 e ：自然基底 (= 2.71828)
 y ：積分變數
 θ' ： θ 之導函數

圖 14 為有限元素分析所採用之網格與邊界條件設定。網格之尺寸根據試誤法，以不影響分析結果為考量所設定，降雨之條件設定為等流量 q (constant-flux) 邊界，在 $I = 47 \text{ mm/hr}$ 條件下，考量邊坡之傾斜角換算而成。有限元素分析程式採用 SEEP/W (GeoSlope Co.; Krahn, 2004)，以有限元素法，求解下列滲流方程式：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

上式中，

k_x, k_y ：在 x 與 y 方向之滲透係數
 H ：總水頭 ($= \frac{u}{\gamma_w} + y$ ； u ：孔隙水壓； γ_w ：水單位重； y ：位置水頭)
 q ：邊界流量
 m_w ： θ vs. ψ 曲線 (SWCC) 之斜率
 γ_w ：水單位重

圖 15(a)~(c) 為 SEEP/W 分析，在 $t = 84, 103$ 及 133 min. 之邊坡中流速場 (flow velocity field)。圖 15(a) 顯示在 $t = 84 \text{ min.}$ 時，大部份之岩土界面皆為未飽和狀態 (飽和度 $S_r \approx 80 - 85\%$)。流速場顯示，坡趾部份之滲流方向為自邊坡內部，此時邊坡之破壞極微，幾無土砂流出之現象發生。但上述狀況至 $t = 103 \text{ min.}$ 時有明顯改變，即接近飽和之區域 ($S_r \approx 90\% - 100\%$) 遍佈整個岩~土界面，且全邊坡內部絕大部份區域之流向一致向外，此一分析結果與邊坡降雨試驗中，岩~土界面滲流之發生時間一致。

結 論

本文整理一系列之模型邊坡人工降雨試驗結果，以降雨中邊坡內部之含水量與孔隙水壓之反應為「內部反應」；以崩塌土體範圍之擴展或土顆粒之排出量為「外部反應」。本研究探討豪雨導致淺層邊坡破壞之內、外部反應機制之關聯性，其目標為建立淺層邊坡之破壞機制物理模式，提昇邊坡破壞預測之準確性。本研究獲致結論如下：

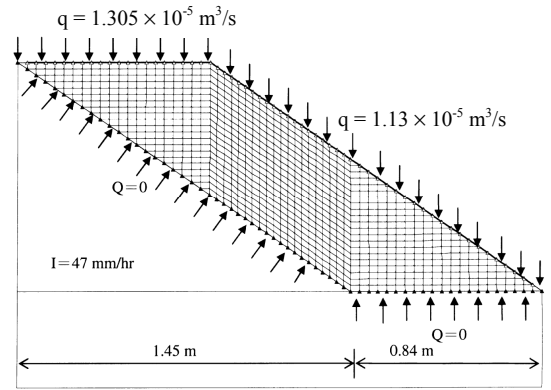


圖 14 本研究對於中型邊坡降雨試驗建立之四節點正方形有限元素網格與邊界條件
Fig.14 Finite element grids and boundary conditions used in the present study

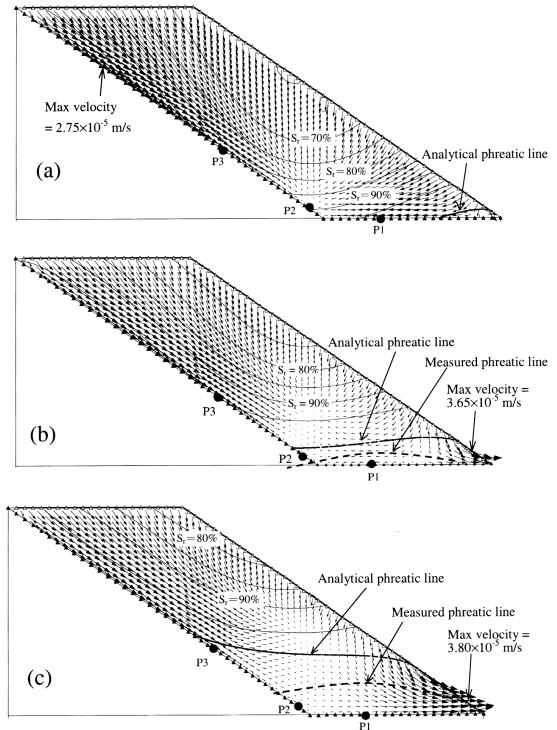


圖 15 以 $I = 47 \text{ mm/hr}$ 之中型邊坡為例顯示不同降雨時間邊坡內部之飽和度分佈飽和度與水位與流速場，(a) $t = 74 \text{ min.}$ (b) $t = 93 \text{ min.}$ (c) $t = 103 \text{ min.}$
Fig.15 Contours of degree of saturation (S_r) and seepage velocity field for the medium-scale slope subjected to $I = 47 \text{ mm/hr}$; (a) at $t = 74 \text{ min.}$, (b) at $t = 93 \text{ min.}$, (c) at $t = 103 \text{ min.}$

- (1) 國際間所發表之邊坡破壞 I-D 臨界 (或門檻) 曲線, 因時空環境不同差異極大, 無法立即使用於防災預警系統中。但若考量邊坡內部之結構與材料特色從內部反應探討邊坡之 I-D 臨界, 則可訂定較準確之對象邊坡 I-D 臨界曲線, 對邊坡之防災預警有所助益。
- (2) 根據系列邊坡試驗之土粒排出率與降雨延時所建立之 I-D 臨界曲線, 可形成類似於國際上知名之 I-D 臨界曲線。暗示臨界曲線間之差異原因之一可能為各種地形與地質條件下, 造成土石流災害所需源頭崩塌量或土石流發動之溪床堆積物量體不同所致。
- (3) 從邊坡內部含水量與孔隙水壓之反應 (即內部反應) 得知, 位於岩~土交界面之含水量 vs. 時間曲線上之第二個斜率急驟變化點 (即含水量達飽和之時間點, T_{mp}) 與孔隙水壓 vs. 時間曲線之第一個斜率急驟變化點 (即 T_{wi}) 時間一致, 且該時間即為沿岩~土交界面之飽和滲流發生時間, 此一時間接近邊坡之坡趾完全破壞, 邊坡土粒大量流出之開始點。
- (4) 根據土中張力計量測之土~水特徵曲線與飽和~不飽和滲透係數函數進行有限元素之邊坡滲流分析結果支持實驗之淺層邊坡破壞機制假說, 即淺層邊坡之破壞造成急驟土石之排出與岩~土界面之飽和側向滲流之發生有密切關係。

參考文獻

1. 范正成、吳明峰 (1996), 「臺灣地區田間人工降雨機之研製、操作、率定及分析」, 中華水土保持學報, 27(1), 1-13. (Fan, J. C. and Wu, M. F. (1996). "Design, Fabrication, Operation, calibration and analysis of a field-scale rainfall simulator in Taiwan," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 27(1), 1-13. (in Chinese))
2. 林美聆、王幼行 (1999), 「地表水及地下水對土石流破壞型態之影響」, 土工技術, 74, 29-38. (Lin, M. L. and Wang, Y. S. (1999). "The effects of surface runoff and ground water on the occurrence of debris flow," *Sing-Geotechnics*, 74, 29-38. (in Chinese))
3. Anderson, A. E., Weiler, M., Alila, Y. and Hudson, R. O. (2009). "Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow," *Water Resources*, 45, W11407.
4. Borga, M., Fontana, G. D., Ros, D. D. and Marchi, L. (1998). "Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data," *Environmental Geology*, 35, 81-88.
5. Cascini, L., Cuomo, S. and Guida, D. (2008). "Typical source areas of May 1998 flow-like movements in the Campania region, Southern Italy," *Engineering Geology*, 96, 107-125.
6. Cho, S. E. (2009). "Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics," *Engineering Geology*, 105, 32-43.
7. Chu-Agor, M. L., Fox, G. A., Cancienne, R. M. and Wilson, G. V. (2008). "Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes," *Journal of Hydrology*, 359, 247-259.
8. Collins, B. D. and Znidarcic, D. (2004). "Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(4), 362-372.
9. Crosta, G. (1998). "Regionalization of rainfall thresholds: an aid of to landslide hazard evaluation," *Environmental Geology*, 35, 131-145.
10. Enoki, E. (1999). "Slope surface failure caused by precipitation," *Tsuchi-To-Kiso. The Japanese Geotechnical Society*, 47(5), 17-20 (in Japanese).
11. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve," *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
12. Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533-546.
13. Gerscovich, D. M. S., Vargas, E. A. and de Campos, T. M. P. (2006). "On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil," *Engineering Geology*, 88,

- 23-40.
14. Godt, J. W., Baum, R. L. and Lu, N. (2009). "Landsliding in partially saturated materials," *Geophysical Research Letters*, 36, L024 03.
 15. Green, R. E. and Corey, J. C. (1971). "Calculation of Hydraulic Conductivity: A further evaluation of some predictive methods," *Soil Science Society America Proceedings*, 35, 3-8.
 16. Huang, C. C., Lo, C. L., Jang, J. S. and Hwu, L. K. (2008). "Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge," *Engineering Geology*, 101 (3-4), 134-145.
 17. Huang, C. C., Ju, Y. J., Hwu, L. K. and Lee, J. L. (2009). "Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures," *Journal of Hydrology*, 370(1-4), 39-51.
 18. Huang, C. C. and Yuin, S. C. (2010). "Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures," *Geomorphology*, 120, 326-338.
 19. Jiao, J. J., Wang, X. S. and Nandy, S. (2005). "Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneous rocks in Hong Kong," *Engineering Geology*, 80, 71-92.
 20. Johnson, K. A. and Sitar, N. (1990). "Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation," *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 789-801.
 21. Kim, J., Jeong, S., Park, S. and Sharma, J. (2004). "Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils." *Engineering Geology*, 75, 251-262.
 22. Krahn, J. (2004). *Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology. 1st edition*, Geo-Slope International, Ltd.
 23. Lacerda, W.A. (2007). "Landslide initiation in saprolite and colluviums in southern Brazil: Field and laboratory observations," *Geomorphology*, 87, 104-119.
 24. Lee, L.M., Gofar, N. and Rahardjo, H. (2009). "A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability," *Engineering, Geology*, 108, 272-285.
 25. Lu, N. and Godt, J. (2008). "Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions," *Water Resources Research*, 44, W11404.
 26. Lumb, P. (1975). "Slope failure in Hong Kong," *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8, 31-65.
 27. Meisina, C. and Scarabelli, S. (2007). "A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils," *Geomorphology*, 87, 207-223.
 28. Montrasio, L., Valentino, R. and Losi, G. L. (2009). "Rainfall-induced shallow landslides: a model for the triggering mechanism of some case studies in Northern Italy," *Landslides*, 6, 241-251.
 29. Muntohar, A. S. and Liao, H. J. (2009). "Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon using a hydrological-geotechnical model," *Environ Geol*, 56(6), 1145-1159.
 30. Muntohar, A. S. and Liao, H. J. (2010). "Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm," *Nat Hazards*, 54, 967-984.
 31. Okimura, T. and Ichikawa, R. (1985). "A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in surface soil layer," *Natural Disaster Science*, 7(1), 41-51.
 32. Orense, R. P., Shimoma, S., Maeda, K. and Towhata, I. (2004). "Instrumented Model slope failure due to water seepage," *Journal of Natural Disaster Science*, 26(1), 15-26.
 33. Pilgrim, D. H., Huff, D. D. and Steele, T. D. (1978). "A field evaluation of subsurface and surface runoff," *Journal of Hydrology*, 38, 319-341.
 34. Pradel, D. and Raad, G. (1993). "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes," *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 315-332.
 35. Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F. and Fredlund, D. G. (1995). "Shear-strength characteristics of a residual soil," *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 60-77.

36. Shelton, C. H., von Bernuth, R. D. and Rajbhandari, S. P. (1985). "A continuous Application Rainfall Simulator," *American Society of Agricultural Engineers*, 28(4), 1115-1119.
 37. Van Genuchten, M. T. (1980). "A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
 38. Weiler, M. and Naef, F. (2003). "Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow," *Journal of Hydrology*, 273, 139-154.
 39. Weyman, D. R. (1973). "Measurements of the downslope flow of water in a soil," *Journal of Hydrology*, 20, 267-288.
-

2011年07月04日 收稿

2011年07月26日 修正

2011年07月30日 接受

(本文開放討論至2012年3月31日)