

物理模型試驗應用於順向坡板岩變形特性之研究

羅佳明^{[1]*} 翁孟嘉^[2] 林雨璇^[1] 劉佩絹^[1]

摘要 本文主要探討臺灣板岩順向坡變形特性，藉由現場調查、地形分析與物理模型試驗說明板岩不同條件下之重力變形特性，並推估板岩變形過程與潛在崩壞機制。結果顯示，坡趾侵蝕透空與降雨入滲機制為板岩變形之關鍵，其將造成板岩材料強度弱化加速發生變形。此外，板岩變形初始發生於崖頂張力區，坡體將沿著高角度葉理滑移，並於侵蝕弱化帶附近形成剪切破壞或複合型破壞。而變形範圍內具有相當多葉理張開之現象，其將有助於地表水與地下水滲入，促使板岩變形區加速變形至崩壞。

關鍵詞：板岩順向坡、物理模型試驗、變形過程、潛在崩壞機制。

Deformation Characteristics of Consequent Slate Slopes through a Physical Model Test

Chia-Ming Lo^{[1]*} Meng-Chia Weng^[2] Yu-Hsuan Lin^[1] Pei-Juan Liu^[1]

ABSTRACT This paper focuses on characterizing the deformation of consequent slate slopes in Taiwan. Onsite surveys, terrain analysis, and a physical model test are used to describe the characteristics of gravity-driven deformation under various conditions and identify the process of slate deformation as well as potential failure mechanisms. Slate deformation is shown to begin in the tension zone at cliff tops, wherein the slope body slips along the highly inclined foliation, contributing to shear failure or composite failure near the eroded zone of weakness. The phenomenon of foliation opening is widespread within the area of deformation, enabling surface water and groundwater to seep in, thereby accelerating deformation and failure in the slate deformation zone.

Key Words : Consequent slate slopes, physical modelling, the process of slate deformation, potential failure mechanism.

一、前言

本研究基於臺北市山坡地防災需求，調查臺北市及新北市鄰近臺北市之雨量站歷史雨量資料，已蒐集大臺北盆地板岩為臺灣中央山脈分佈最為廣泛之岩層，其係由泥岩與頁岩等岩層經由高溫高壓作用所形成之變質岩。板岩本身具有較細緻、細密之葉理，且其材料顆粒較細，較容易順著葉理方向開裂，開裂後所形成的夾縫結構稱為劈理。板岩材料於乾燥狀態下強度甚高，然當板岩材料受到長時間重力及雨水入滲容易造成邊坡材料弱化，並促成板岩邊坡變形、崩壞，進而威脅到當地住戶與用路人生命財產安全。

過去已有相當多研究探討關於板岩邊坡變形之地質現象，Zischinsky 曾於 1966 年觀察阿爾卑斯山邊坡變形特性，發現大規模岩體於不連續面上緩慢移動，且邊坡上之葉理位態亦發生傾向相反之變化，因此推測此為邊坡潛移 (creep) 作用所造成之現象 (Zischinsky, 1966)。Nemcok (1972) 發現變質岩

邊坡變形作用具有以下特徵：變質岩趨向非均質，葉理發達，受重力的作用常使葉理變形呈類似拱彎型的褶皺 (buckling fold) 之型態，變形延伸至坡趾，近地表之岩層被彎曲。在深部的潛移呈現較為塑性的性質，由於岩體為非均質，故大部分不連續變形常沿著近地表之剪力面產生 (Nemcok, 1972)。此外，Nemcok 亦發現潛移岩層變形速度通常很緩慢，每年可能只有數公釐至數公分之間，但最大速度可達 20 cm/day，或每年最大 6 m，而變形深度可達到 250-300 m 深。Radbruch-Hall 於 1978 年認為潛移為山崩類型之一，以非常緩慢之方式往下或往外移動，岩層沒有連續之破裂面，於變質岩區岩坡易受到重力作用而產生傾倒之潛移現象 (Radbruch-Hall, 1978)。而深層之岩體變形作用與岩石之葉理分佈特性具有其關連性，Chigira 曾於 1992 年與 1994 年提出岩體受重力變形作用與葉理分佈之關係類型 (圖 1)：

1. 順向坡之拱彎褶皺型 (buckling folds formed in consequent slopes)：葉理位態較緩，若與坡向呈順向時，葉理層間將

[1] 建國科技大學土木工程系暨土木與防災研究所

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chienkuo Technology University, Changhua, Taiwan, R.O.C.

[2] 高雄大學土木與環境工程學系

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung, Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : cml0@ctu.edu.tw

產生拱彎型之潛移，並在邊坡外側造成凸起變形。該類型為本文主要研究對象，故於物理模型上以第 I 類型之變形特性為試驗設計考量。

2. 逆向坡之拖曳褶皺型 (drag folds formed in obsequent slopes)：葉理位態呈現高角度或與坡向呈逆向時，其邊坡外側葉理產生似拖曳褶皺狀之特徵。
3. 葉理高傾角之折彎褶皺型 (bending folds formed in slopes with steeply dipping foliation)：其葉理位態呈高角度，邊坡外側之葉理向下或向外產生折彎之潛移現象，由剖面來看其葉理常呈現「S」形之特徵。
4. 順向坡之斷層型 (faults formed in consequent slopes)：發生於順向坡且坡度較葉理位態為陡，岩層中大部分斷層面與葉理平行，且於邊坡上產生類似與斷層面平行之潛移現象。
5. 逆向坡之斷層與拖曳褶皺型：於接近水平之葉理位態條件下，於邊坡頂端常因節理或張裂縫發展，導致高角度斷裂面產生，並貫穿至葉理後，其邊坡底部葉理亦可能產生似拖曳褶皺之特徵。

根據朱珍德等 (2004) 與吳秀儀等 (2008) 研究顯示，板岩材料隨著含水率與浸水時間的增加而強度有相當顯著之降低趨勢 (尤其朱珍德等 (2004) 發現板岩浸水 50 天後，強度隨即降低至原來的 1/17 倍)，甚至發生材料軟化、崩解之特性。冒海軍等 (2005) 相關研究成果發現，當葉理傾角在 18.77~82.34 度時，板岩僅會沿葉理面破壞；傾角若小於 11.4 度或大於 82.34 度時，板岩僅產生剪切破壞；傾角若介於 11.4~18.77 度時，板岩則產生複合破壞。潘安士等 (2011) 曾利用有限元素法分析廬山北坡案例之板岩潛移行為，但對於數值模擬之合理性與正確性仍須進一步輔以監測資料驗證。

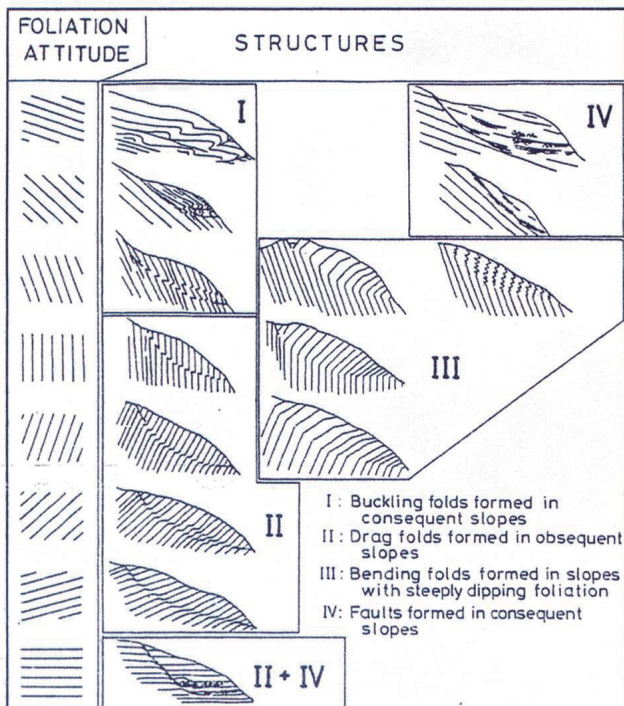


圖 1 葉理位態與岩坡潛移類型 (Chigira, 1992)

Fig.1 Foliation attitude and types of rock slope creep

然而，多數調查結果僅能根據部分地表出露之岩層進行推斷，無法確認板岩變形之規模，且不同的葉理分佈所構成之板岩變形深度與其類型均有所不同，其將可能造成後續不同程度之崩壞規模，目前較少文獻探討此類相關議題，故本研究將探討物理試驗應用於板岩順向坡變形後之潛在崩壞機制。此外，於臺灣高山地區 (如台 14 甲沿線) 板岩順向坡之變形規模與類型，無法經由地表觀察進行推估，因此須簡化至實驗室進行物理模型試驗，藉此簡化探討板岩順向坡變形與其特性，並說明整個板岩順向坡物理模型變形過程。

二、研究方法

本文於板岩物理模型設計上主要採用之球狀研磨石材料，並於球狀材料間加入『樹脂』，以『板狀』黏結方式 (即於每片板之顆粒接合處加入約 1cm³ 之樹脂，而劈理間僅加入約每片板約 1/4 量之樹脂)，描述板岩邊坡『變形』之問題。雖然採用球狀研磨石材料粒徑較大與現實有所差異，但可簡化模擬出降雨入滲至岩石孔隙之問題，尤其板岩材料葉理間仍會有粗糙起伏之現象，亦可藉由顆粒材料組合間的凹凸起伏反應出來 (未來擬改變級配粒料探討坡體變形特性)。此外，真正可反應板岩變形之關鍵材料為樹脂，其可有效反應板岩材料遇水弱化之特性，加上球狀研磨石材料的粒徑主控邊坡模型變形之程度，相對於其他材料 (如黏土、積木、岩石、洋菜粉等) 更能反應板岩邊坡變形特性，故本研究採用顆粒性粒子與樹脂作為物理模型建構之基礎。而本文主要以物理模型方式加以呈現類似板岩的物理模型所形成的邊坡變形過程，在製作不同尺寸、顆粒大小的類板岩的物理模型模型，配合不同邊坡角度，加入降雨與未降雨機制並利用山崩物理模型試驗儀器模擬，觀察物理模型在不同坡度、坡面尺寸、粒徑與有無降雨機制所產生的變形過程，其材料性質與試驗項目如表 1 與表 2。

表 1 物理模型材料性質一覽表

Table 1 The material properties of physical model

研磨石比重	3.65
研磨石單位重	2600 (kg/m ³)
研磨石莫氏硬度	7
研磨石單壓強度	7.46 (MPa)
研磨石彈性模數	3 (GPa)
膠結材料 (樹脂) 強度 (靜置7天)	0.153 (MPa)
膠結材料 (樹脂) 浸水後強度 (連續浸水10分鐘)	0.003 (MPa)

表 2 物理模型試驗項目

Table 2 Physical model Experiment items

編號	坡度 (°)	顆粒尺寸 (cm)	模型尺寸 (cm) (長×寬×高)	降雨機制
I	45	1.2	12×12×20	×
II	45	1.2	12×12×20	✓
III	45	2	12×12×20	✓
IV	45	1.2	12×20×20	✓
V	45	0.5	12×20×20	✓
VI	60	2	12×12×20	✓
VII	60	1.2	12×12×20	✓

1. 研究基本假設

根據順向邊坡變形的基礎，簡化實際複雜的影響因素，本研究物理模型設計主要基本設定如下：

- (1) 影響順向邊坡變形之主要因素以“重力”、“降雨”為主，暫不考慮地震、風化、降雪等影響因素。
- (2) 簡化順向邊坡坡度，採用 45 度、60 度等單一角度邊坡變化為主。暫時不考慮較複雜的坡形與坡面粗糙度。而堆積區則簡化至以平面佈置為主（不變化角度）。
- (3) 固定模型底部前緣處，使其成為試驗時模型之不動點位置。

2. 物理模型設備

室內物理實驗模型分為源頭、運移、堆積等三區整體設計成果如圖 2 所示，其物理模型實驗欲使用之儀器組件分別說明如下：

- (1) 源頭沖蝕區：由模型放置板、降雨模擬器所組成。模型放置板為長 36 公分、寬 20 公分、厚 0.2 公分、底端垂直彎折高度 1.5 公分之鋼板所構成，垂直處設置為固定坡址。源頭區上方降雨模擬器為提供降水之主要設備，每次試驗採 3,000 cc 之總水量進行降雨試驗，以噴霧方式每分鐘噴灑 30 cc 之水量，促使樹脂遇水後逐漸軟化，藉此模擬板岩邊坡遇水弱化而變形之特性。
- (2) 運移區：山崩運移板與角度變換構件。山崩運移板由兩塊長 1 公尺、寬 0.5 公尺、厚 1 公分之鋼板組成，可提供多種坡面模擬材料與不同坡向進行相關物理實驗，而角度變換構件可提供地形坡度 30~60 度之變換進行模擬。
- (3) 堆積區：為長 1.3 公尺、寬 1.3 公尺、厚 0.5 公分之實心木板組成，上方鋪設厚 0.5 公分之耐磨橡膠層。為了清楚觀察不同條件下，板岩物理模型經運動區至平面堆積區堆停，以平面佈置為主。
- (4) 邊坡變形過程觀測設備：主要利用 1 部靜態最高影像解析度 2040 萬畫素攝影機，設置於物理模型之右側，進行板岩邊坡物理模型運動至運移區期間之動態畫面擷取。

3. 物理試驗模型與模擬板岩材料性質

物理模型試驗中為模擬多組不同顆粒組合而成的板岩物理模型（圖 3），採用 0.5、1.2、2cm 尺寸的圓形研磨石。該研磨石係由白色氧化鋁鑄造及切削研磨製成，白色氧化鋁主要化學成份為三氧化二鋁 (Al_2O_3 ，佔總成分 99.6%)，其它成分為二氧化鈉 (Na_2O ，佔總成分 0.15%)、三氧化二鐵 (Fe_2O_3 ，佔總成分 0.03%) 與二氧化矽 (SiO_2 ，佔總成分 0.02%)。白色氧化鋁鑄造過程中混合水泥及水，待凝固成型後進行切削與研磨，使其具有形狀與尺寸相同、高硬度（莫氏硬度為 7）、高強度與耐磨的特性。

為探討物理模型應用於順向坡板岩的研究之相關課題，並且簡化現地複雜多變的各種影響條件，其製作試體過程中以 $1cm^3$ 之樹脂黏結研磨石製作試體，使模型各層顆粒間獲得良

好的鍵結強度。另由調查板岩邊坡時發現，劈理對板岩順向坡變形與崩壞具有相當重要之影響，故為模擬此弱面之影響特性，於上下層間之四個角落使用約 $0.25cm^3$ 之樹脂來固定，增加試體之穩定性以利模擬板岩層間滑移之變形特性。室內板岩邊坡物理模型則初步設計長 2m、寬 1.5m、高 2.2m 之規模，模型與底部鋼板間之摩擦角約為 33 度（初步於模型前端底部位置進行鎖固），儀器上可考量加入降雨及坡度變化之設計，以進一步探討有無降雨與不同坡度、粒徑大小、坡面尺寸變化因素的順向邊坡變形過程。

4. 物理模型試驗項目與試驗步驟

物理模型試驗包含改變顆粒、坡面尺寸、運動坡度及有無降雨機制，列述如下：

- (1) 改變顆粒、坡面尺寸（採用 1.2cm 圓形碎磨石），固定在模型放置板，實驗控制之顆粒量為 1900 顆（長度 20 公分，寬度 12 公分，高度為 12 公分，1.2 公分顆粒）、432 顆（堆置 6 層，高度為 12 公分，2 公分顆粒）、2890 顆（長度 20 公分，寬度 20 公分，高度為 12 公分，1.2 公分顆粒）、38400 顆（長度 20 公分，寬度 20 公分，高度為 12 公分，0.5 公分顆粒）等不同顆粒、坡面尺寸所組合而成的物理模型。

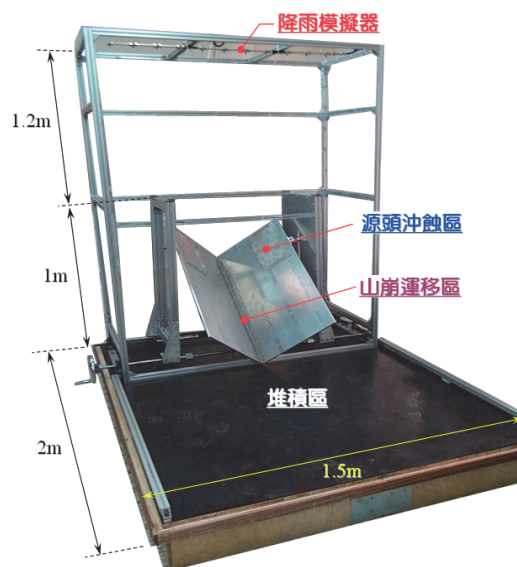


圖 2 山崩物理模型試驗儀

Fig.2 The landslide physical modeling

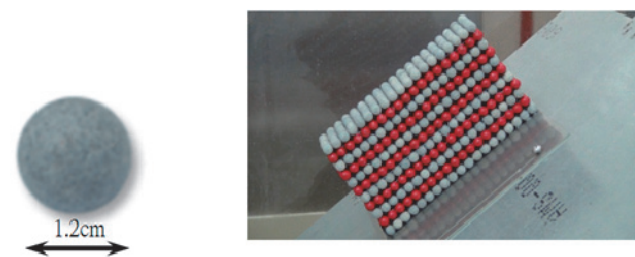


圖 3 板岩邊坡模型材料（左）與堆置配置情形（右）

Fig.3 The material of slate slope modeling (left) and installation (right)

- (2) 改變運動區坡度 (45 度、60 度)，共計 7 組物理實驗。
- (3) 分別試驗有無降雨機制，並利用邊坡變形過程觀測設備觀察不同顆粒、坡面尺寸在不同坡度下對於邊坡變形的影響。

其相關試驗步驟如下：

- (1) 將研磨石以樹脂膠結後靜置 7 日，使其試體上之樹脂發揮強度，而不致任意變形與潰散。
- (2) 將試體放置於山崩物理模型試驗儀之源頭沖蝕區，坡趾位置先以擋板暫時固定，並將試體底部與鋼板接觸位置以樹脂黏結後靜置 1 日。
- (3) 隔日試驗時將坡趾擋板拆除 (假設坡趾已切除透空)，調整邊坡傾斜角度後，靜置約 5 分鐘，並以高解析度攝影機觀察試體變形狀況。
- (4) 於降雨模擬器裝設 3,000 cc 之水量後，以噴霧方式每分鐘噴灑約 30 cc 之水量，其雨水接觸表面樹脂後將使試體逐漸軟化，並於研磨石試體間之孔隙入滲至深處，達到板岩遇水弱化及降雨入滲行為之模擬。

三、物理模型之邊坡變形過程

1. 模型 I 試驗過程

本次試驗模型靜置於 45 度邊坡 (模型中各層球狀研磨石間僅黏結約 0.2cm³ 之樹脂，劈理間則黏接約 1/4 樹脂)，此外坡趾切除，未加入降雨機制，探討利用重力因素造成之邊坡變形過程 (圖 4)。

- (1) 於 0 秒至 30 秒，此時整個模型在 45 度坡度下並無產生

肉眼可辨識之變形，其於 42 秒時模型開始產生些微前傾之跡象，但未產生劈理滑移或分離之情形。而在 1 分鐘後坡趾開始產生隆起變形，並增加整體模型之變形速度。

- (2) 於 1 分 03 秒後模型坡趾加速隆起變形，並於坡面深至 10.8cm 處劈理張開約 0.3cm。
- (3) 於 1 分 07 秒時坡頂開始產生張裂，坡面深至 10.8cm 處之劈理張開範圍增大，促使變形速度增快。約 1 分 10 秒時模型變形已達極限，並在 1 分 11 秒後與 10.8cm 深度發生滑移崩壞。

2. 模型 II 試驗過程

本次試驗模型靜置於 45 度邊坡，此外坡趾切除，加入降雨機制，探討利用降雨入滲對於板岩邊坡變形之過程 (圖 5)。

- (1) 於 0 秒至 3 分 40 秒，此時整個模型在 45 度坡度下並無產生肉眼可辨識的變形 (於 5 分後加入降雨模擬)，加入降雨後約 5 分 22 秒模型開始產生前傾現象，促使整體開始逐漸變形。
- (2) 於 6 分 37 秒時坡趾開始產生些微隆起變形劈理間並無顯著張開情形。
- (3) 於 9 分 48 秒~10 分 28 秒間底層與鋼板接觸位置劈理張開約 0.2cm~0.3cm，坡趾隆起加劇，前傾速度增快。
- (4) 於 11 分 11 秒時坡趾隆起變形更為顯著，其底部劈理張開程度已達 0.3cm 以上。
- (5) 於 12 分 23 秒後隆起變形範圍擴大且變形已達極限，約 13 分鐘後整個模型於底層產生崩滑。

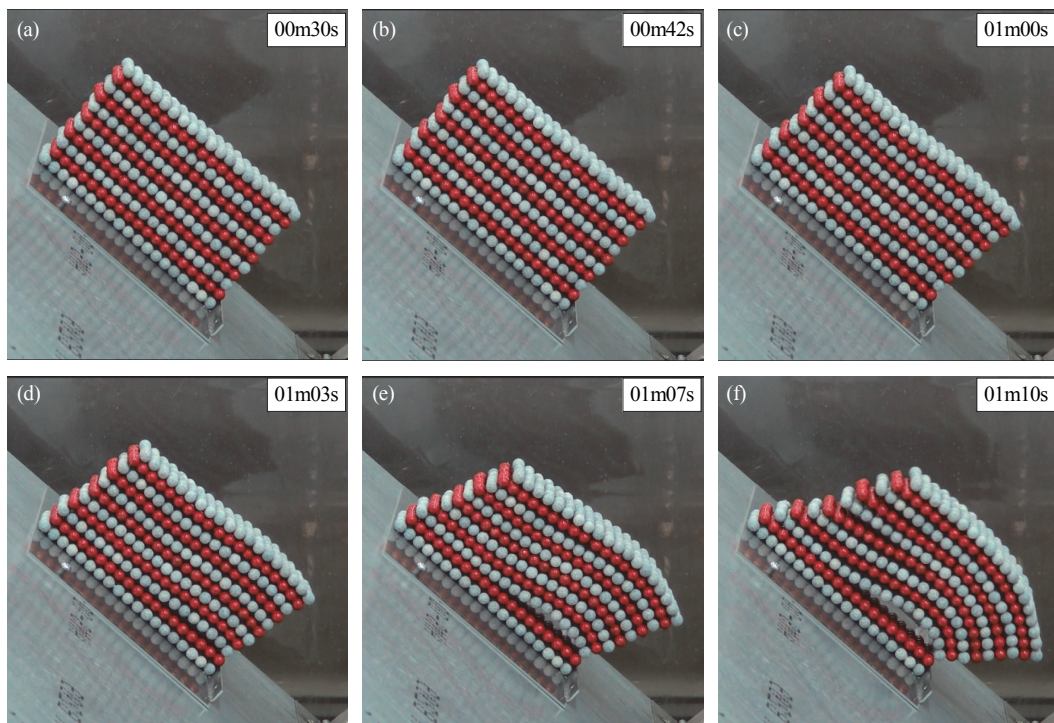


圖 4 物理模型在 45 度邊坡於無降雨條件下之變形過程 (粒徑約 1.2cm)

Fig.4 Deformation process of physical model at 45 slopes (Particle size is about 1.2cm)

3. 模型 III 試驗過程

本次試驗模型靜置於 45 度邊坡，此外坡址切除，加入降雨機制，改變顆粒粒徑為 2cm，探討顆粒粒徑較大（孔隙增加）時對於邊坡變形過程之影響（圖 6）。

- (1) 於 0 秒至 4 分 53 秒，此時整個模型在 45 度坡度下並無產生肉眼可辨識的變形（於 5 分鐘後加入降雨模擬），加入降雨後約 5 分 15 秒開始產生前傾現象，促使整體開始逐漸變形。

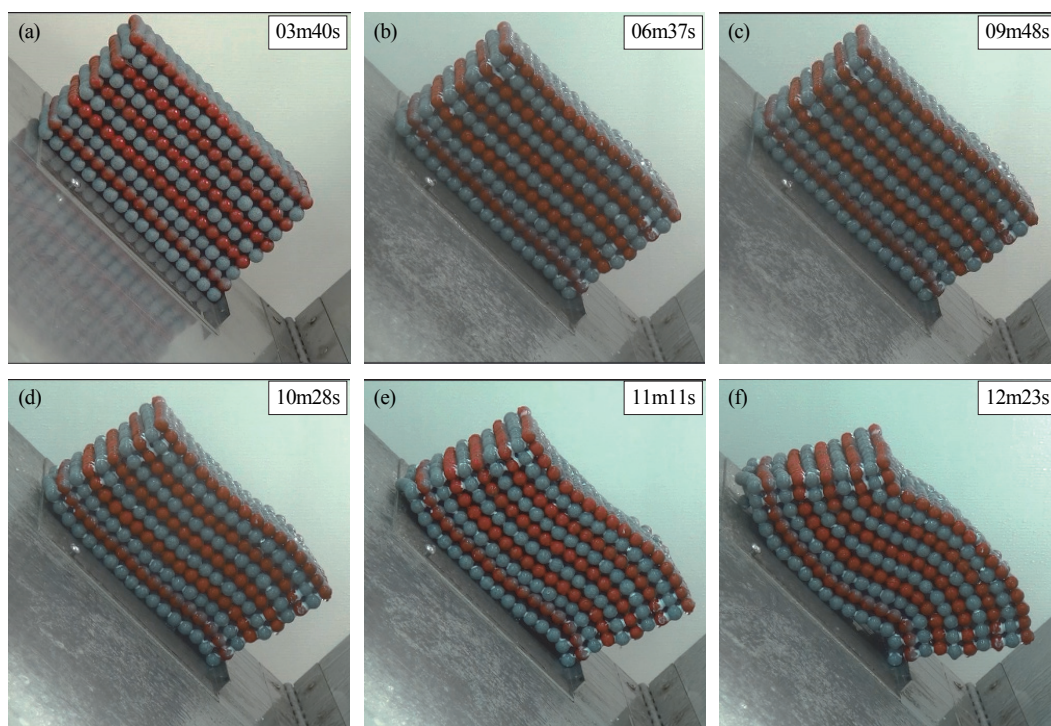


圖 5 物理模型在 45 度邊坡於降雨條件下之變形過程 (粒徑約 1.2cm)

Fig.5 Deformation process of physical model at 45 slopes with rainfall condition (Particle size is about 1.2cm)

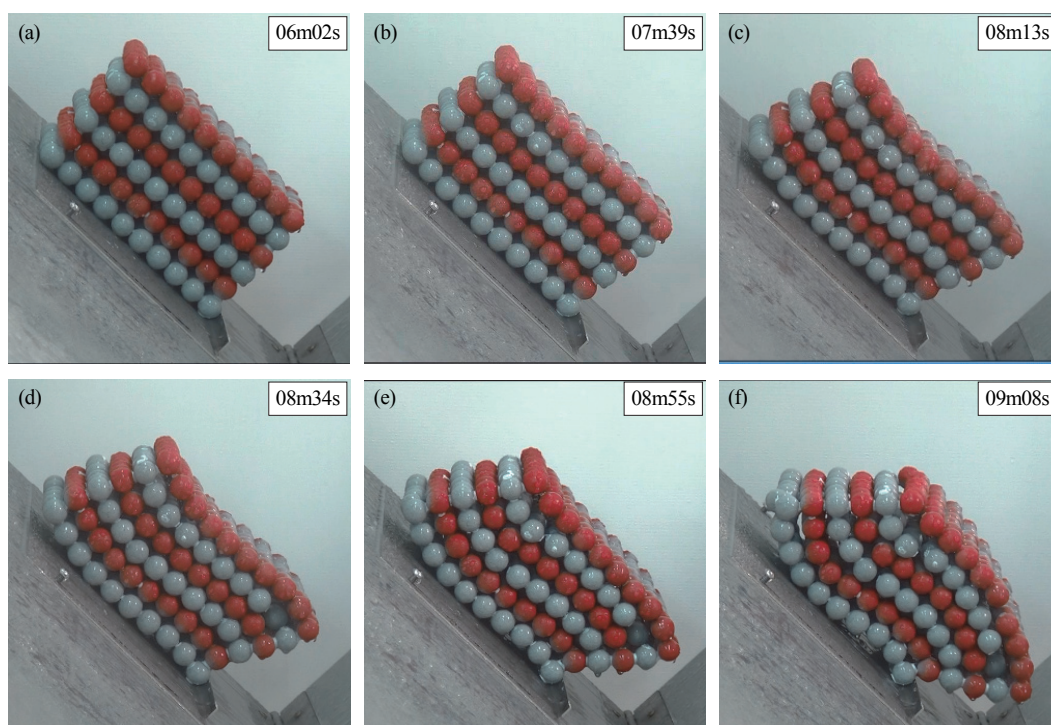


圖 6 物理模型在 45 度邊坡於降雨條件下之變形過程 (粒徑約 2.0cm)

Fig.6 Deformation process of physical model at 45 slopes with rainfall condition (Particle size is about 2.0 cm)

- (2) 於 7 分 39 秒後坡趾開始產生些微變形，模型前傾現象加劇。
- (3) 於 8 分 13 秒~8 分 34 秒間底層與鋼板接觸位置劈理張開約 0.3cm~0.4cm，坡趾隆起變形加劇，前傾速度增快。
- (4) 於 9 分 08 秒隆起變形範圍擴大且變形已達極限，底部劈理張開已超過 0.7cm，約 9 分 17 秒後整個模型於底層位置破壞並產生崩滑。

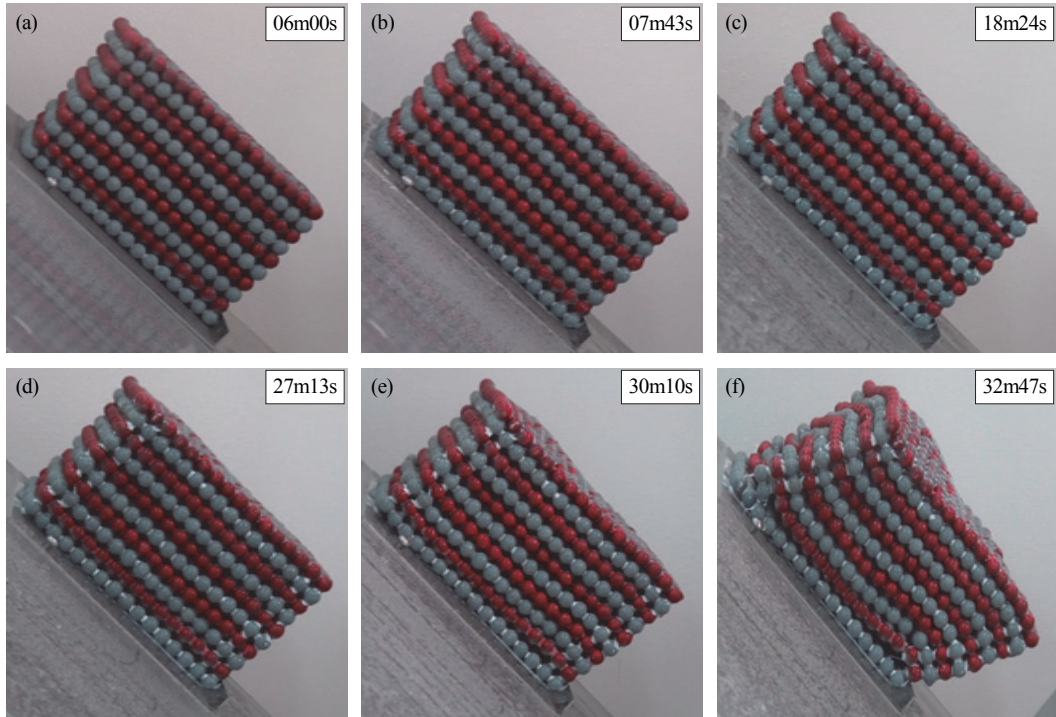


圖 7 物理模型在 45 度邊坡於降雨條件下之變形過程 (粒徑約 1.2cm；坡面面積為 12×20cm²)

Fig.7 Deformation process of physical model at 45 slopes with rainfall condition (Particle size is about 1.2 cm; slope area is 12x20cm²)

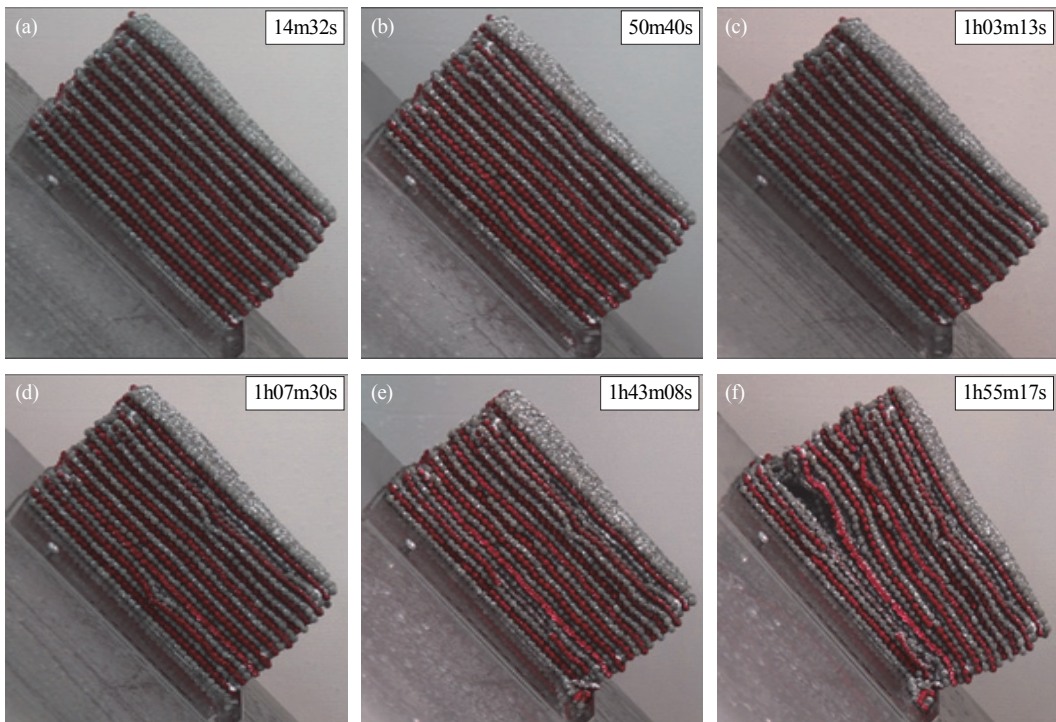


圖 8 物理模型在 45 度邊坡於降雨條件下之變形過程 (粒徑約 0.5cm)

Fig.8 Deformation process of physical model at 45 slopes with rainfall condition (Particle size is about 0.5 cm)

4. 模型 IV 試驗過程

本次試驗模型靜置於 45 度邊坡，此外坡址切除，加入降雨機制，坡面面積改為 $12 \times 20 \text{cm}^2$ ，探討模型加寬時對於邊坡變形過程之影響（圖 7）。

- (1) 於 0 秒至 6 分鐘之間整個模型在 45 度坡度下並無產生肉眼可辨識之變形（於 5 分鐘後加入降雨模擬），加入降雨後於 7 分 43 秒後開始產生前傾之跡象。10 分鐘後試體前傾現象逐漸明顯，至此坡址尚未發生顯著變形。
- (2) 於 18 分 24 秒時模型最高處底部劈理張開約 0.1cm，然其前傾速度較為緩慢，模型尚未發生顯著之變形。
- (3) 於 27 分 13 秒坡面產生些微隆起，原有張裂劈理張裂增加約 0.1~0.2cm。試體於 30 分 10 秒後坡趾底部第 1 層與第 2 層間坡理張開約 0.3cm，坡面隆起現象更為明顯。
- (4) 約 32 分 47 秒後，整個模型變形已達至極限，並於 33 分鐘後在底層劈理張開位置發生崩滑。

5. 模型 V 試驗過程

本次試驗模型靜置於 45 度邊坡，此外坡址切除，加入降雨機制，改變顆粒粒徑為 0.5cm，坡面為 12×20 ，探討模型寬度增加與顆粒粒徑較小時對於邊坡變形過程之影響（圖 8）。

- (1) 於 0 秒至 5 分 20 秒此時整個模型在 45 度坡度下並無產生肉眼可辨識的變形（於 5 分鐘後加入降雨模擬），加入降雨後於 8 分 12 秒後開始產生些微前傾之現象，整體變形並不顯著。
- (2) 於 50 分 40 秒至 1 時 03 分 13 秒之間模型上部開始產生些微變形，範圍集中於坡頂往下算約 3 公分處，模型前傾速度逐漸提升，整體模型尚未產生顯著變形。

- (3) 於 1 時 07 分 30 秒後模型材料逐漸從坡頂至底部 11cm 處發生擠壓變形。
- (4) 於 1 時 43 分 08 秒時模型內部可發現相當顯著之劈理擠壓變形。
- (5) 於 1 時 55 分 17 秒底部劈理因擠壓而張開約 2cm，整個模型內外均可發現顯著之變形現象。

6. 模 VI 試驗過程

本次試驗模型靜置於 60 度邊坡，此外坡址切除，加入降雨機制，改變顆粒粒徑為 2cm，探討坡度較大、顆粒粒徑較大時對於邊坡變形過程之影響（圖 9）。

- (1) 於 5 分鐘後加入降雨模擬至 5 分 12 秒間模型並無產生肉眼可辨識之變形。
- (2) 於 6 分 14 秒後產生些微之前傾現象，整體模型變形並不顯著。
- (3) 於 6 分 35 秒時前傾程度增加，坡趾產生些微隆起。
- (4) 於 6 分 52 秒時坡頂底層第 1 層與第 2 層研磨石接觸位置劈理張開約 0.3cm，其前傾與坡趾隆起變形速度增加。
- (5) 於 7 分 30 秒時底層劈理張開至 0.8~1cm，且於 7 分 43 秒時整體變形與劈理張開（達 1.5cm 以上）至極限，並於 7 分 50 秒後底層第 1 層與第 2 層間發生崩壞滑移。

7. 模型試驗 VII 過程

本次試驗模型靜置於邊坡，此外坡址切除，加入降雨機制，改變坡度為 60 度，探討不同邊坡坡度於邊坡變形過程之影響（圖 10）。

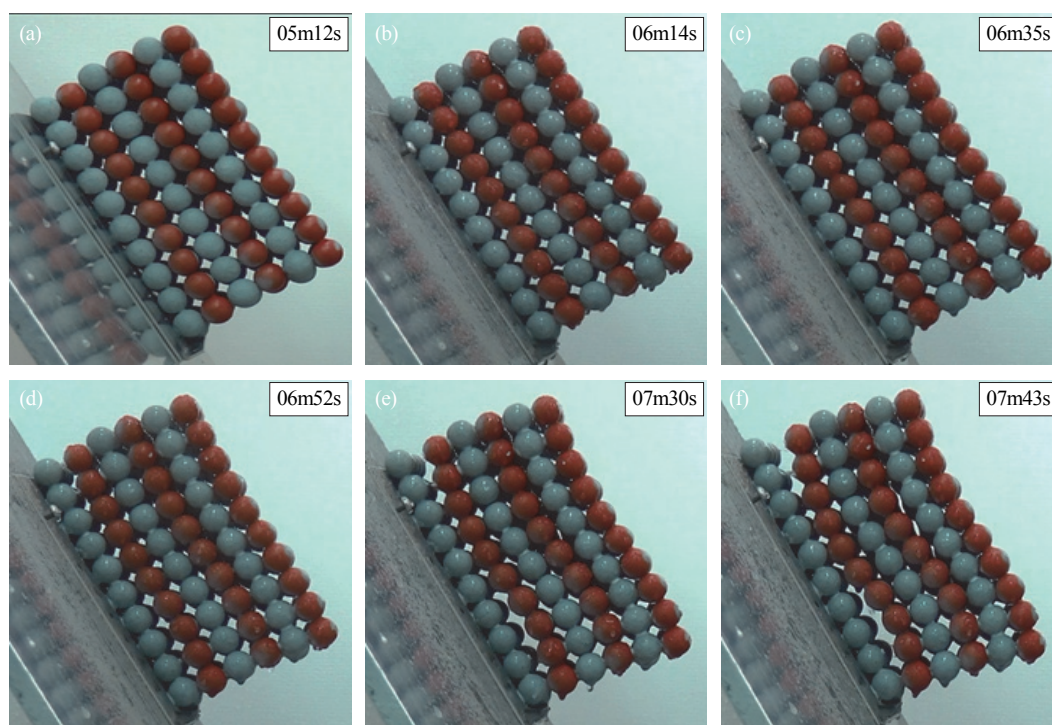


圖 9 物理模型在 60 度邊坡於降雨條件下之變形過程（粒徑約 2cm）

Fig.9 Deformation process of physical model at 60 slopes with rainfall condition (Particle size is about 2.0 cm)

- (1) 於 0 秒至 2 分 52 秒整個模型在 60 度條件下並無產生肉眼可辨識的變形 (於 5 分鐘後加入降雨模擬), 加入降雨後於 5 分 24 秒後開始產生前傾之跡象, 整體模型尚未發生顯著變形。
- (2) 於 5 分 56 秒時坡址產生隆起變形, 且於坡趾底部第 1 層及第 2 層間發生劈理張開跡象。
- (3) 於 6 分 06 秒~6 分 59 秒間坡址變形更為顯著, 其坡趾底部劈理張開約達 0.5cm, 且變形速度增快, 坡頂可發現幾處張裂縫產生。
- (4) 於 7 分 15 後整體變形與劈理張開 (達 1cm 以上) 已達極限, 並於 7 分 20 秒後底層第 1 層與第 2 層間發生崩壞滑移。

8. 地形坡度、材料性質與幾何形狀對於邊坡變形之影響

- (1) 比較模型 I (無降雨) 與模型 II (有降雨) 試驗結果顯示, 模型 I 僅單純利用重力使模型變形, 但由於結構本身未受降雨入滲影響導致整體變形較為均勻, 變形時沿其底部較弱之劈理位置張開, 故其坡面變形呈現較均勻之弧形。而模型 II 因雨水入滲至孔隙內使樹脂由上而下逐漸弱化, 進而導致模型變形過程中各層強度有所不同, 促使整體模型 II 變形相對於模型 I 較不均勻。其樹脂遇水弱化後也導致坡址變形較劇烈, 且模型 II 因降雨影響導致之變形深度亦相對較深, 顯見降雨入滲對於板岩順向坡變形之影響。

- (2) 比較模型 II (顆粒粒徑小) 與模型 III (顆粒粒徑大) 試驗結果顯示, 模型 III 因顆粒間之孔隙較大, 雨水較快速滲入至模型內, 使模型上層材料弱化程度與底層材料弱化程度差異較小, 所以造成底層坡址產生變形較為劇烈、前傾速度亦相對較於模型 II 快; 而模型 II 因顆粒間孔隙較小, 雨水入滲較緩慢使上層與底層樹脂弱化程度有較大差異, 故坡址變形量較小於模型 III, 顯見較大孔隙所組成之板岩邊坡模型發生變形後坡址底層變形量較大, 其變形速率亦相對較快。
- (3) 比較不同葉理傾角 (45 度、60 度) 之試驗結果顯示, 當葉理傾角越高時, 坡址變形之傾斜角度亦隨之增加, 但在坡址變形量相對較 45 度模型為小。當葉理傾斜角度較小時, 坡址變形量相對於高角度葉理為大, 且其變形速度相對於高傾角葉理模型為慢, 顯見葉理傾角於板岩邊坡變形之中佔有相當大之影響因素。
- (4) 比較不同模型 II (模型寬度較小) 與模型 IV (模型寬度較大) 之試驗結果顯示, 尺寸較寬之模型相對於尺寸較窄之模型變形時間較長、坡面變形範圍亦較小。其主要因寬度較大之模型劈理間接觸面積與摩擦阻力相對較高, 且模型表面積增加與顆粒間孔隙增加使雨水較難完全入滲至模型內層, 亦較難弱化整體模型之膠結強度, 進而導致變形速度減緩。顯見板岩順向坡變形程度與其速度, 與現場板岩塊體大小(邊坡侵蝕程度)有其關聯性, 當板岩順向坡上侵蝕溝分布較為密集或沖蝕下切較深時, 其所切割之板岩塊體寬度相對較小, 且邊坡表面較為破碎, 較易見到劇烈變形之潛移特徵。

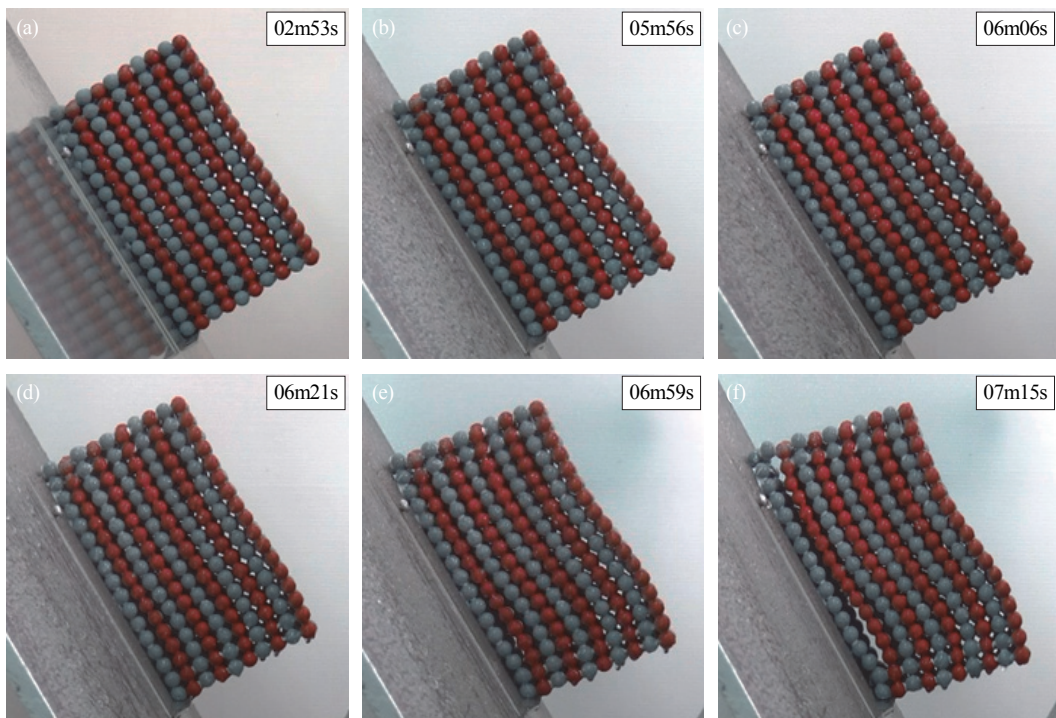


圖 10 物理模型在 60 度邊坡於降雨條件下之變形過程 (粒徑約 1.2cm)

Fig.10 Deformation process of physical model at 60 slopes with rainfall condition (Particle size is about 1.2 cm)

四、結 論

本文主要利用物理模型探討板岩順向坡之變形過程與其特性，故於物理模型設定上主要不改變岩石材料強度（研磨石）與膠結強度（樹脂）等，並設定 45 度、60 度葉理傾角探討其影響特性及變形過程。模擬結果顯示，當模型葉理傾斜角度越高，變形範圍將隨之增加，其坡趾變形範圍之傾角角度亦隨著增加。Chigira (1992) 曾提及葉理傾斜面之差異，將會構成不同型態之岩坡變形規模，由此可證葉理位態為本研究探討板岩順向坡變形之關鍵因素。

在不同顆粒粒徑下所產生之孔隙，因雨水於孔隙中流動，易引起其力學性質之改變。板岩材料隨著含水率與浸水時間之增加而強度有相當顯著之降低趨勢（尤其朱珍德等人發現板岩浸水 50 天後，強度隨即降低至原來的 17 分之一），甚至發生材料軟化、崩解之特性。而物理模型試驗結果亦反應坡體孔隙越大，邊坡變形程度越顯劇烈，顯見岩體孔隙大小對於降雨入滲引致板岩材料遇水弱化程度之差異特性，故對於已發生變形之板岩邊坡，其裂隙發展亦應列為細部調查與治理規劃之重點對象。

五、誌 謝

本文承蒙科技部 MOST 103-2625-M-270-001 計畫之經費補助方克有成，謹致謝忱。

參考文獻

- [1] 朱珍德、邢福東、王思敬、徐魏亞 (2004)，「地下水對泥板岩強度弱化的損傷力學分析」，岩石力學與工程學報，23(2)，4739-4743。(Zhu, Z.D., Xing, F.D., Wang, S.J., and Xu, W.Y. (2004). "Analysis on strength softening of argillite under groundwater by damage mechanics." *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(2), 4739-4743. (in Chinese))
- [2] 吳秀儀、劉長武、趙凱、沈榮喜 (2008)，「板岩遇水崩解的分形模型研究」，四川大學學報。(Wu X.Y., Liu C.W., Zhao K., and Shen R.X. (2008). "Research on Fractal Model of Water-immersed Collapse of Slat." *Journal of Sichuan University*. (in Chinese))
- [3] 冒海軍、陽春和 (2005)，「結構面對板岩力學特性影響研究」，岩石力學與工程學報，24(20)，3651-3656。(Mao, H.J., and Yang, C.H. (2005). "Study on effect of discontinuities on mechanical characters of slate." *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(20), 3651-3656. (in Chinese))
- [4] 潘安士、張光宗、林錫宏、錢滄海 (2011)，「以有限元素法分析板岩邊坡潛移行為」，水土保持學報水土保持學報，43(1)，35-48。(Pan A.S., Chang K.T., Lin H.H., and Chien C.H. (2011). "Application of Finite Element Methods on Creep Behavior of Slate Slopes." *Journal of Soil and Water Conservation*, 43 (1), 35-48.(in Chinese))
- [5] Chigira, M. (1992). "Long-term Gravitational deformation of rocks by mass rock creep." *Engineering Geology*, 32, 157-184.
- [6] Chigira, M. (1994). "Geological and Geomorphological Characteristics of Deep-Seated Catastrophic Landslides Induced by Rain and Earthquakes." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42 (4), 265-278 (2011).
- [7] Nemcok, A. (1972). "Gravitational slope deformation in high mountains." Proc. 24th Int. Geol. Congr., *Montreal, Sect.*, 13, 132-142.
- [8] Radbruch-Hall, D. (1978). Gravitational creep of rock masses on slopes. In: *Rockslides and Avalanches / ed. by B. Voight (Editor). Amsterdam. Natural Phenomena, Elsevier*, 607-657.
- [9] Zischinsky, U. (1966). "On the deformation of high slopes." Proc. 1st Congr. Int. Soc. *Rock Mechanics, Lisbon*, 2, 179-185.

2013 年 12 月 18 日 收稿

2014 年 03 月 09 日 修正

2014 年 06 月 03 日 接受

(本文開放討論至 2015 年 3 月 31 日)