

弱面位態對邊坡破壞前變形行為的影響

王兆譽⁽¹⁾ 張光宗⁽²⁾

摘要

岩石邊坡的穩定性受到弱面性質的影響，在促崩因子作用下不同弱面位態之邊坡的變形行為有所不同。本研究以實驗室小尺度物理邊坡模型進行試驗，對邊坡模型在承受荷重下的變形行為進行分析。邊坡模型的材料是將石英砂、石膏、水依配比混合製作成的塊體，將塊體堆疊成弱面傾角分別為 30° 與 60° 、坡面傾角 30° 之順向坡與逆向坡，用壓力機在邊坡模型坡頂位置施加荷重使邊坡模型產生變形行為。我們使用 Particle image velocimetry (PIV) 分析邊坡變形區域，實驗結果顯示在弱面傾角的影響下，邊坡在破壞前(滑動面產生但未切穿)累積變形量為逆向坡 60° 最大、順向坡 60° 最小，邊坡滑動面切穿時的累積變形量為順向坡 60° 最大、順向坡 30° 最小，而滑動面切穿代表邊坡完全崩塌，由實驗可知順向坡 30° 若有不穩定或滑動情況其崩塌可能性較大。本實驗中邊坡滑動面切穿皆在荷重尖峰值的時間點之後，我們發現可以利用下、上邊坡平均位移速率比值的變化推算邊坡承受尖峰荷重的時間即滑動面產生但未切穿的時間，進而推測邊坡在此時間後可能有完全崩塌的危險。

(**關鍵詞**：弱面、物理模型、邊坡變形)

The influence of the weak planes orientations on slope deformation

Chao-Yu Wang⁽¹⁾, Kuang-Tsung Chang⁽²⁾

Graduate Student⁽¹⁾, Professor⁽²⁾ Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

Abstract

With different orientations of weak planes, the deformation behaviors of slopes before failure are different. This study aims to examine how the orientation of weak planes influences the slope

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系 碩士生

⁽²⁾ 國立中興大學水土保持學系 教授 (通訊作者 email: changkt@nchu.edu.tw)

deformation behavior. A small-scale physical model is used for laboratory experiments. We analyzed the deformation behavior of slope models under loading conditions. The piece materials used in the slope models were made of quartz sand, gypsum, and water according to the mixing ratio. The 30 ° slope models were composed of stacked pieces, and the dip angles of weak planes are 30 ° or 60 °. The slope models were loaded on the top to induce failure. We used particle image velocimetry(PIV) to analyze the deformation area. The results showed that for the accumulated deformation of slope models at failure, the anaclinal 60° and cataclinal 60° slopes showed the greatest and least, respectively. For the accumulated deformation before total collapse or completed formation of a sliding surface, the cataclinal 60° and cataclinal 30° slopes showed the greatest and least, respectively. This study reveals that if the cataclinal 30° slope is unstable or sliding, the probability of collapse is higher. The experiments showed that the completed formation of a sliding surface is later than the occurrence of peak loading. It was found that the change of the displacement rates ratio of the bottom to top slopes can be used to assess the initiation of sliding surfaces, which may lead to total collapse of the slope afterwards.

(Keywords : weak planes, physical model, slope deformation.)

前言

綜觀邊坡崩塌事件可發現當邊坡處於不穩定狀態時會發生變形或完全崩塌，邊坡的變形與崩塌行為受很多因素影響，其中弱面性質應是重要的因素，因此岩石邊坡的穩定性應受弱面的傾角、間距及持續性的影響，使得有些邊坡崩塌事件可以經歷多次的變形而未完全崩塌，有些邊坡崩塌事件卻可能沒出現明顯變形特徵而發生崩塌。

邊坡破壞機制的研究可利用現地試驗或實驗室物理模型試驗，然而現地大型試驗雖可較貼近現地邊坡狀況，但是花費龐大且環境因素控制不易。相較之下實驗室試驗於過程中可較精準控制環境因素及材料參數，能準確量測物理量之變化及量化趨勢。因此縮小尺寸的邊坡物理模型實驗常被用來研究邊坡的破壞行為。朱澄偉(2018)建立岩坡塊體傾覆破壞模型並使用極限平衡法，進行逆向岩坡穩定分析研究。Lo & Weng (2017) 進行現場調查與物理模型試驗模擬，探討台灣中部順向坡在產生滑動破壞前的變形特徵，並推導變形過程與破壞特徵。Yang et al. (2017)提到當模型邊坡的尺寸為原形全尺寸邊坡縮小的某個比例時，模型邊坡和原全尺寸邊坡間的相似關係具有一比例關係，而我們的邊坡模型雖然並非是要模擬某個特定邊坡，但邊坡模型的人造材料的摩擦角應近似野外岩石邊坡材料，凝聚力則應加以折減。

邊坡模型試驗常以人造材料取代天然材料，目的是為了控制材料因素以反覆進行試驗，以探討其它因素的影響，人造材料常以石

英砂、水泥、石膏等依不同配比及養護時間製作(Indraratna, 1990; 朱澄偉, 2018; 曾泰源, 2019)。Indraratna (1990)提到石膏試體養護溫度高於 65°C 時，試體單壓強度會減少25-50%，故參考此文獻將人造試體放入烘箱以 65°C 烘乾，製作較符合本實驗所需之人造材料。

Zhang et al. (2018)透過監測現地邊坡的位移量變化並結合數值模型，分析邊坡的變形特徵與機制。Bois et al. (2018)以一實際野外邊坡作為依據，以五種案例進行實驗室物理模型試驗，討論斷層對岩石邊坡變形的影響，將不同的邊坡模型的產生的位移量作歸一化，用以比較不同案例的差異。Jaboyedoff et al. (2012)提出一量化野外邊坡變形的的方法，相較於位移量能更準確的描述邊坡變形行為與特性。

本研究並非模擬某一特定邊坡的崩塌機制，而是探討弱面位態對邊坡的影響，因此我們建立一物理邊坡模型，將人造試體依不同角度堆疊以模擬不同的弱面傾角，於坡頂位置加載荷重使邊坡產生變形或崩塌，以Particle image velocimetry(PIV)分析實驗過程，並就邊坡變形區域的平均位移速率的變化與邊坡變形區域累積的變形量探討弱面位態對邊坡變形行為的影響。

研究方法與步驟

1. 邊坡模型尺寸與邊界條件

本研究簡化邊坡模型，不考慮較複雜之坡面地形，討論坡面傾角 30° 之邊坡(圖1)，將人造試體堆疊成順向坡與逆向坡，塊體之間

僅堆疊接觸並無填充其他材料，為避免模型底部在實驗過程中滑動，於模型底部加裝一鋸齒狀底板，底板與模型箱間以砂紙增加摩擦力防止滑動。

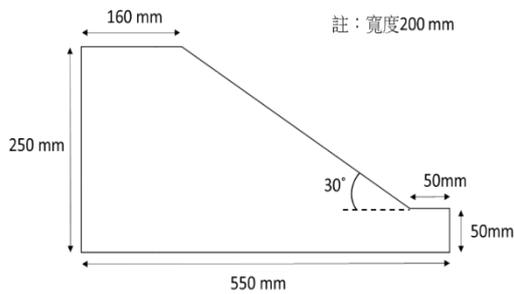


圖1 邊坡模型尺寸

Figure 1 The configuration of slope model

2. 人造材料製作

邊坡模型使用之材料為膠結砂，一個邊坡模型需使用約90塊人造材料，為使製作容易，我們製作150 mm x 200 mm、厚20 mm之塊體並切成三等份供實驗使用(圖2)，人造材料製作方式為將 ASTM C190/C778渥太華砂、石膏與水依重量比1:0.038:0.218之比例拌合均勻後填入模具，等待一段時間讓試體形狀固定且尚未完全凝固時切成3等分並脫模，送至烘箱以65°C烘兩天以加速試體內多餘水分排出，烘乾後即用做實驗。使用的 ASTM C190/C778渥太華砂的顆粒粒徑有97%落在

0.6~0.85 mm 之間，製作出的人造試體密度為 1.68 g/cm³，經單軸壓縮試驗與三軸壓縮試驗得到人造試體的單軸壓縮強度約為90 kPa，摩擦角約為24.6°，凝聚力約為34.8 kPa。

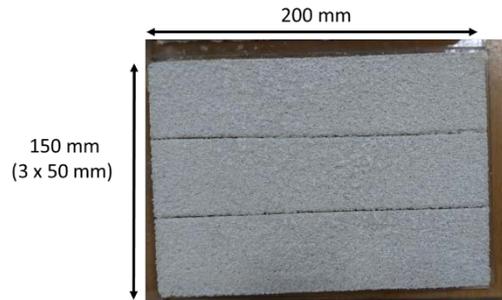


圖2 人造材料

Figure 2 The artificial materials

3. 坡體內部的應力

實驗以加載「荷重」的方式使邊坡產生變形行為，不考慮其他如降雨、風化、地震、坡趾透空等因素。邊坡破壞模式應與邊坡內部應力分布有關，因此本實驗荷重的加壓方向將考慮實際邊坡內部主應力方向，參考 Chang et al. (2015)所用之參數，以 PLAXIS 模擬坡度30°、坡高400 m的邊坡所受應力分布(圖3)，取數值模型中對應邊坡模型之深度0~100 m位置的主應力方向平均值作為新的荷重加壓方向，其值約為與垂直方向夾30°。

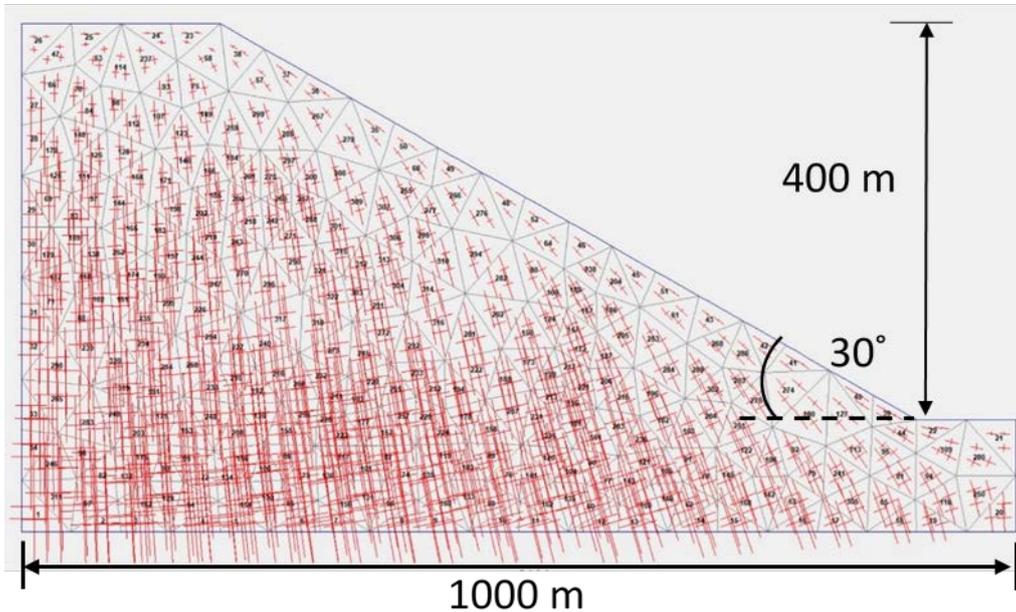


圖3 PLAXIS 模擬坡體內主應力方向

Figure 3 The directions of the principal stresses in the slope simulated by PLAXIS

4. 荷重加載方式

為給與邊坡一傾斜荷重，我們藉由傾斜塊體改變加壓方向(圖4)，兩塊體間則用針車油潤滑，大量降低兩塊體間摩擦力。本研究以壓力機於坡頂施加荷重(圖5)，壓力機檯座以 1.5 mm/min 之速率上升，由壓力機對邊坡模型坡頂施加荷重使邊坡模型產生變形，實驗全程錄影並以一定時間間隔紀錄壓力機之讀數，實驗進行至邊坡模型有完整滑動面出現或至實驗儀器極限後停止。

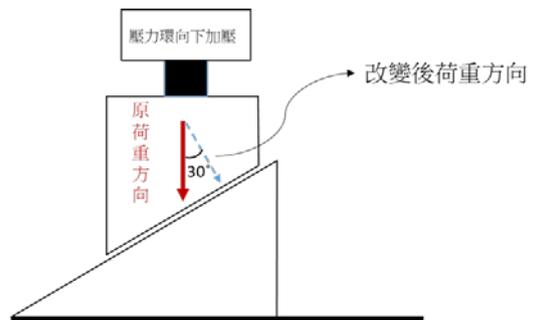


圖4 藉由傾斜塊體改變荷重方向

Figure 4 The wedge used to change the the loading direction

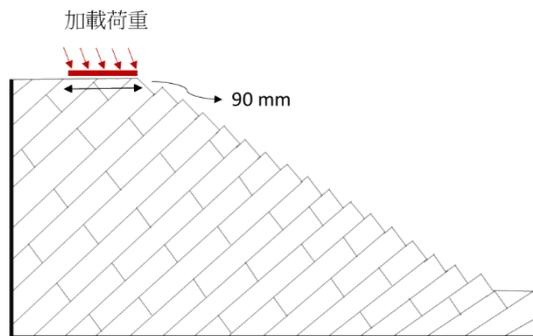


圖5 荷重分佈

Figure 5 The distribution of loading

5. PIV 分析之邊坡變形計算

我們將實驗過程的影片以每分鐘擷取一次照片，按時間順序將每兩張照片用質點影像測速(Particle Image Velocimetry, PIV)程式分析邊坡每分鐘的變形行為，本研究主要討論邊坡變形區域(圖6)的變形行為，為討論滑動面發展的過程，我們需要一個指標，而在本研究的實驗配置下滑動面應是由上往下發展，我們將邊坡模型變形區域分成上方1/3部分(Top)與下方1/3部分(Bottom)，由滑動體下方1/3部分的位移速率(以位移速率 Bottom 稱之)與滑動體上方1/3部分的位移速率(以位移速率 Top 稱之)的比值變化討論滑動面發展的情形。

我們藉由 PIV 得到變形區域的平均位移速率，由平均位移速率計算出每分鐘的位移增量，我們使用圖7的方法進行分析，其中 d 表示滑動體內部的平均位移， l_0 表示滑動體沿著坡面方向的長度， $\bar{\epsilon}$ 表示邊坡的平均變形，用以比較不同弱面位態的邊坡間之差異。

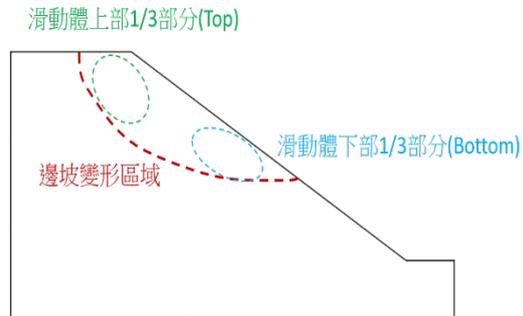
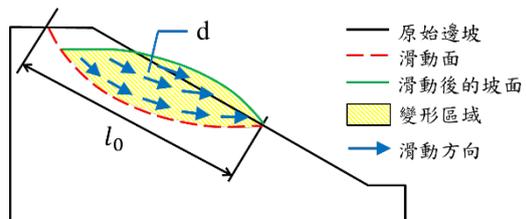


圖6 PIV 分析變形區域

Figure 6 The deformation area analyzed in PIV program



其中，
 $\bar{\epsilon} = \frac{d}{l_0}$
 d ：滑動體內部的平均位移，
 l_0 ：滑動體沿著坡面方向的長度，
 $\bar{\epsilon}$ ：邊坡的平均變形

圖7 以滑動體內平均位移計算邊坡平均變形

Figure 7 The average displacement used to calculate the deformation of slopes

結果與討論

1. PIV 分析邊坡變形

我們以實驗開始、邊坡有部分開始出現裂痕或錯動、滑動面切穿邊坡、實驗結束四個時間點的照片展示實驗過程(圖8)，再與 PIV 分析的結果做比較。邊坡有承受荷重的極限，當邊坡受到超過自身所能承受最大荷重時，邊坡就可能發生破壞，因此我們將邊坡承受荷重到達尖峰荷重之時間點定義為破壞之時間點。此小節將討論實驗過程、邊坡平均位移

速率的變化及邊坡變形區域下、上部分位移速率比值的變化，討論不同弱面位態的邊坡變形行為的影響。

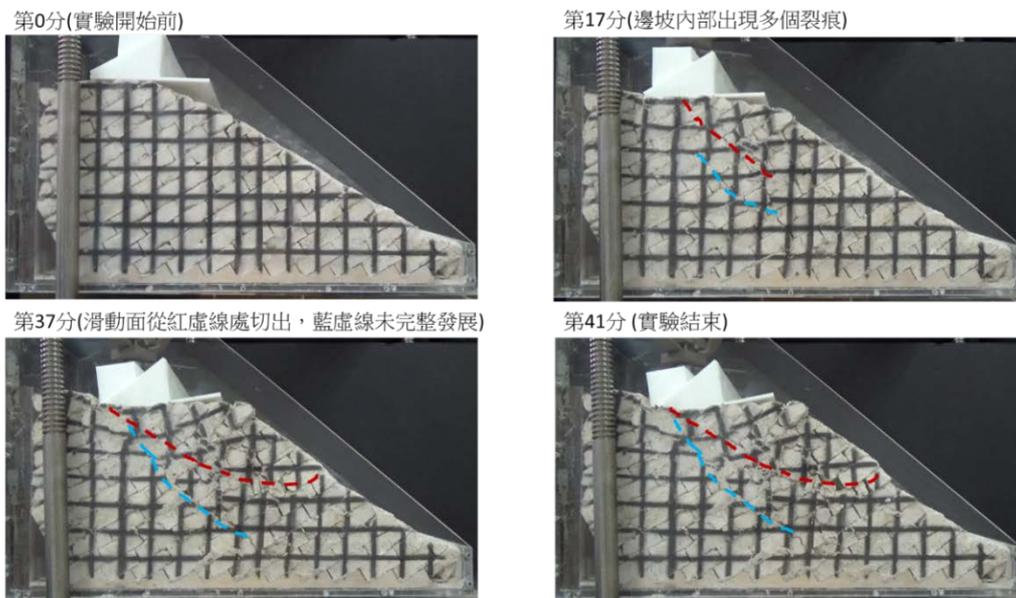
逆向坡 30° 之邊坡模型(圖8(a))，在第17分鐘時可以看到邊坡內部出現多個裂縫(分別以紅、藍虛線標示)，隨著實驗進行，紅色裂縫往邊坡中段發展而藍色裂縫則往更深的地方發展，到了第37分鐘時紅色裂縫已經發展完成，滑動體也沿著紅色滑動面滑出，而藍色虛線的錯動面則無切穿，後續 PIV 分析時滑動面以紅色虛線為主要分析的對象。

逆向坡 60° 之邊坡模型(圖8(b))，第28分鐘時可以看到邊坡上半部有明顯變形出現，箭頭處部分開始有些為裂痕，第36分鐘之後可由實驗影片觀察到滑動體滑出。

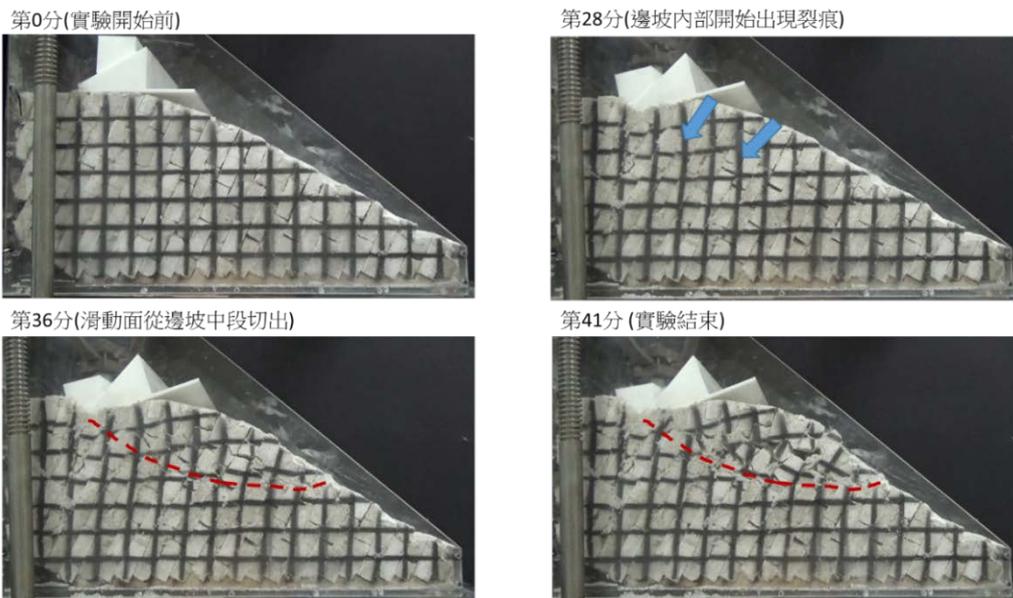
順向坡 30° 之邊坡模型(圖8(c))，第12分鐘時第一層的塊體有明顯錯動以及裂痕，到了

第18分鐘時滑動面形狀已經大致固定，與實驗結束(第21分鐘時)的滑動面形狀相差不遠，因此我們認為第18分鐘時，滑動片已完整形成。可以由圖片觀察到滑動體明顯沿著弱面滑動。

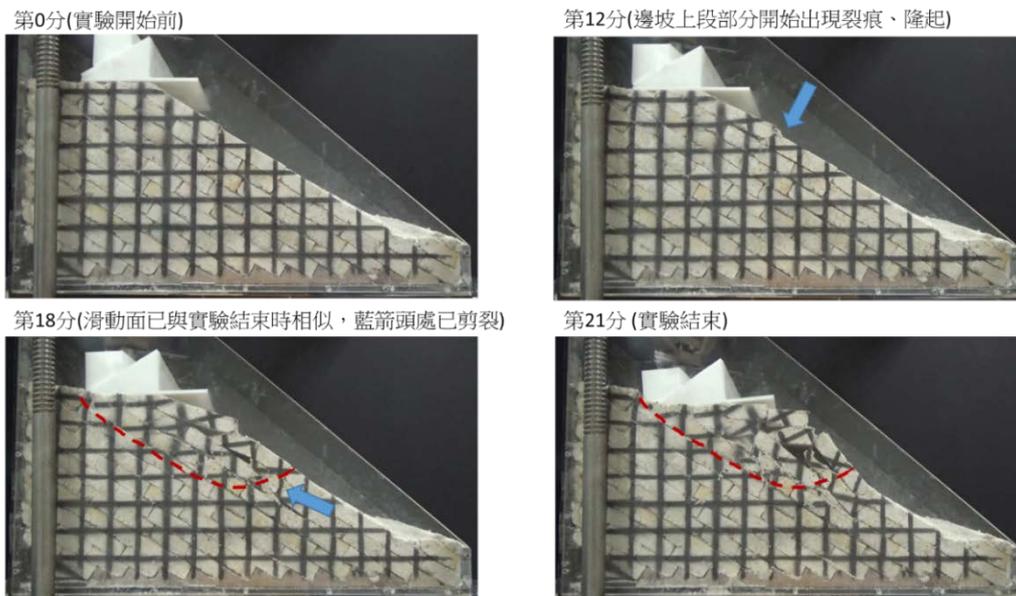
順向坡 60° 之邊坡模型(圖8(d))可以看到第7分鐘的時候邊坡內部出現明顯裂痕，內部塊體沿著弱面方向向下滑動發展，而邊坡內部靠近坡面部分，則被內部塊體頂起而出現類似傾倒的現象，經觀察實驗過程發現這是因為建置邊坡模型時僅將塊體疊放在一起，塊體間的變形行為是獨立的，加上排列方式與塊體較厚的關係使外層塊體較容易被推開而不易被切穿，另一方面是與其他三種位態相比，加載的荷重沒有直接壓在外層塊體上，而是由內部塊體傳遞應力到外層，造成外層塊體不容易破壞，而產生這樣的實驗結果。



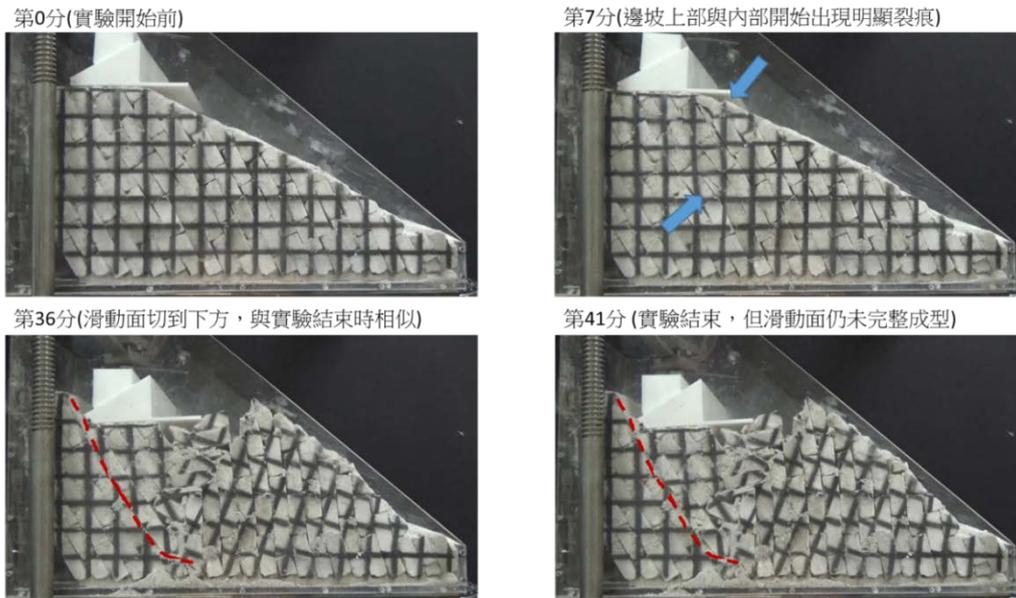
(a) 逆向坡 30°



(b) 逆向坡60°



(c) 順向坡30°



(d) 順向坡60°

圖8 邊坡變形過程 (a) 逆向坡30° (b) 逆向坡60° (c) 順向坡30° (d) 順向坡60°

Figure 8 The deformation processes of the slopes with weak planes of different orientations (a) the anaclinal 30° slopes (b) the anaclinal 60° slopes (c) the cataclinal 30° (d) cataclinal 60° slopes

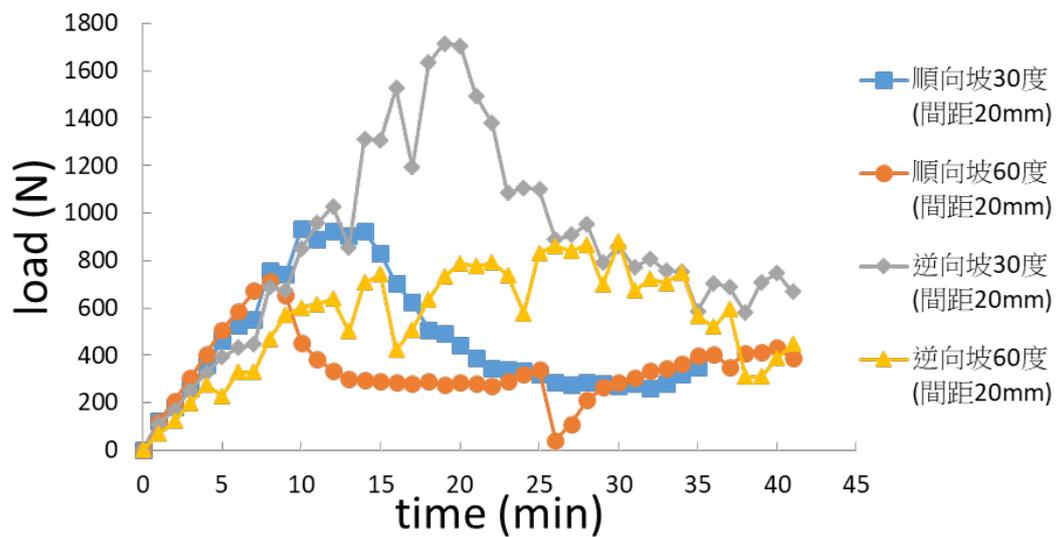


圖9 邊坡垂直荷重-時間曲線

Figure 9 The relationships between vertical loading and time

邊坡實驗過程所施加的荷重是將垂直的荷重通過傾斜塊來改變荷重的方向，荷重數值為壓力機給與的垂直荷重，實際上邊坡模型受到的荷重會比這個數值還小。不同弱面位態的邊坡承受垂直荷重的變化如圖9，邊坡所能承受最大垂直荷重大小排序為逆向坡30°>順向坡30°>逆向坡60°>順向坡60°。邊坡承受尖峰荷重的時間點，得出的邊坡破壞時間依逆向坡30°、逆向坡60°、順向坡30°及順向坡60°的順序分別為19 min、30 min、11 min及8 min。

我們先平均位移速率的變化進行分析，圖10為邊坡滑動體平均位移速率的變化，紅色虛線表示壓力機加壓速率之值2.5E-5 m/s (=1.5 mm/min)，圖中有些值超過加壓速率是

因邊坡變形過程中，內部產生滑動面使滑動體中部分位置的速率比加壓速率大而影響平均位移速率的值。我們將圖8的邊坡開始有部分破壞或錯動的時間點對照到圖10，逆向坡30°、逆向坡60°、順向坡30°及順向坡60°的時間分別為17 min、28 min、12 min及7 min，可以發現相對應時間的邊坡平均位移速率有明顯加速的現象，邊坡應在此時發生破壞，再觀察邊坡滑動面切穿邊坡的時間點，但其中順向坡60°的滑動面未完整切穿邊坡，因此先以逆向坡30°、逆向坡60°及順向坡30°做討論，時間分別為37 min、36 min及18 min 對照到圖10，可以發現對應該時間點的平均位移速率約與加壓速率相同，意指壓力機壓縮多少位移，滑動體就產生多少位移，符合滑動面切穿邊坡的現象。

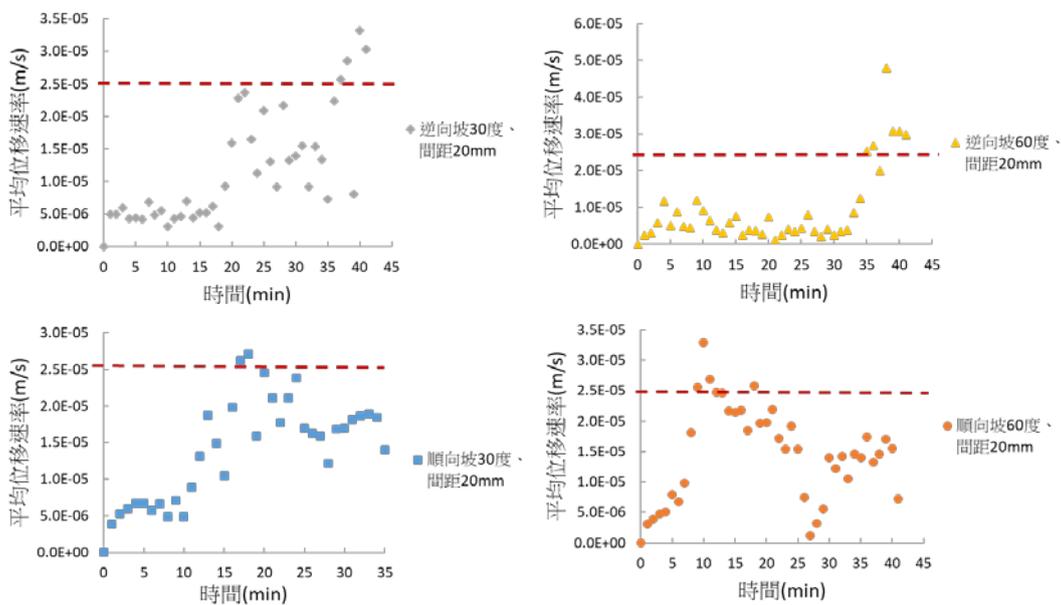


圖10 邊坡平均位移速率

Figure 10 The relationships between the displacement rate and time

我們再以滑動體下邊坡部分的位移速率(位移速率 Bottom)與上邊坡部分的位移速率(位移速率 Top)的比值分析滑動面發展的過程，圖11展示平均位移速率的比值隨時間變化的關係，原本我們預期若是邊坡破壞時此值會接近1，但是由前文提及 PIV 分析滑動體平均位移速率的結果，發現滑動體的速率可能因內部產生滑動面而受影響，而觀察速率比值分布發現其中在某個時間點之後分布會有所變化，這個時間點對應圖10的平均位移速率發現有開始加速的趨勢，其中因順向坡60°破壞模式與其他弱面位態不同，先以逆向坡30°、逆向坡60°及順向坡30°的邊坡進行討論，時間點分別取20 min、32 min 及 13 min，與圖9比較後發現大致與邊坡承受尖峰荷重之時

間點相同，可以得出平均位移速率比值產生變化的時間點與邊坡承受尖峰荷重的時間點及平均位移速率開始有明顯加速的時間點大致上都是相同的。

實驗中可看到順向坡60°的變形行為中其滑動面並未切穿邊坡，因此平均位移速率比值的概念不適用在順向坡60°，我們將從直接觀察實驗過程與 PIV 分析平均位移速率明顯加速的時間點來看，從實驗照片中邊坡有部分破壞的時間(圖8)、尖峰荷重時間點(圖9)及平均位移速率有明顯加速的時間(圖10)做比較，分別為7 min、8 min 及 8 min，時間幾乎一致，因此順向坡60°在尖峰荷重的時間點發生破壞。

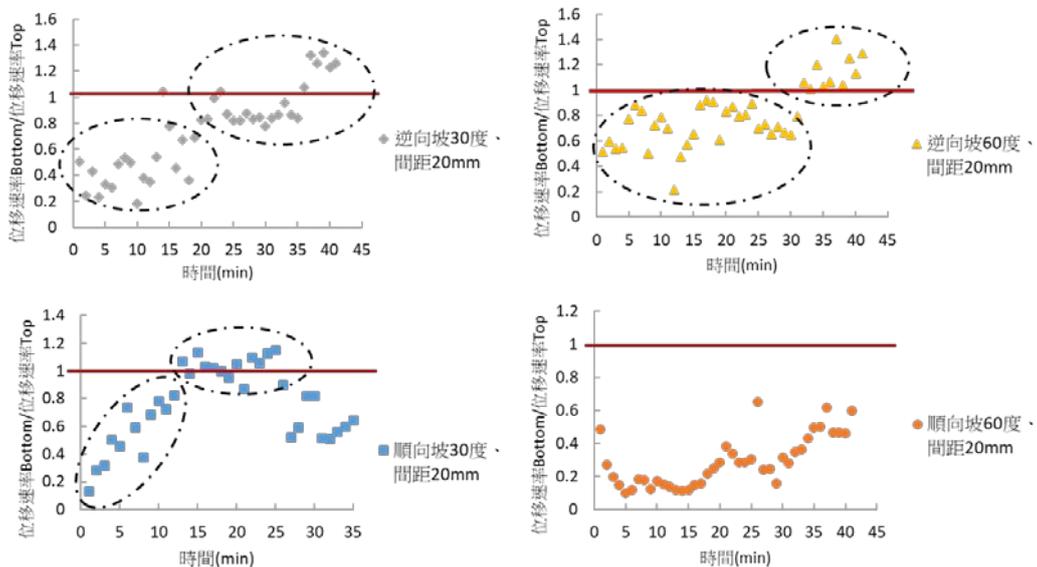


圖11 邊坡平均位移速率之比值(位移速率 Bottom/位移速率 Top)

Figure 11 The ratio of the displacement rate at bottom to top

我們發現下邊坡與上邊坡位移速率比值發生變化的時間點與邊坡承受尖峰荷重的時

間大致一樣，因此在實際應用上應可作為邊坡穩定性的其中一個參考方式。我們將不同弱面位態的邊坡其發生破壞時間點(下邊坡與

上邊坡位移速率比值發生變化的時間點，順向坡60°則為承受尖峰荷重之時)以實線標示在圖12上，對應到的縱座標的值是不同位態的邊坡破壞前所累積的變形，我們也將不同位態的邊坡的滑動面切出的時間點以虛線標示出來，而順向坡60°則因為直到實驗結束時，滑動面仍未切穿邊坡故未標示於圖上，但其在滑動面切穿時所累積的變形應是最大，逆向坡30°、逆向坡60°及順向坡30°滑動面切穿的時間分別為37 min、36 min及18 min。圖12中以順向坡30°為例，變形區累積變形量是0.0237，表示當邊坡累積位移量達到滑動面

沿坡面的長度的0.0237倍時邊坡發生破壞。不同弱面位態的邊坡破壞前所能承受的累積變形量大小排序為：逆向坡60°(0.0335)>逆向坡30°(0.0273)>順向坡30°(0.0237)>順向坡60°(0.0101)。不同弱面位態的邊坡滑動面切穿時的累積變形量大小排序為：順向坡60°(滑動面未切穿，因此累積變形應是最大)>逆向坡30°(0.0933)>逆向坡60°(0.0492)>順向坡30°(0.0473)。

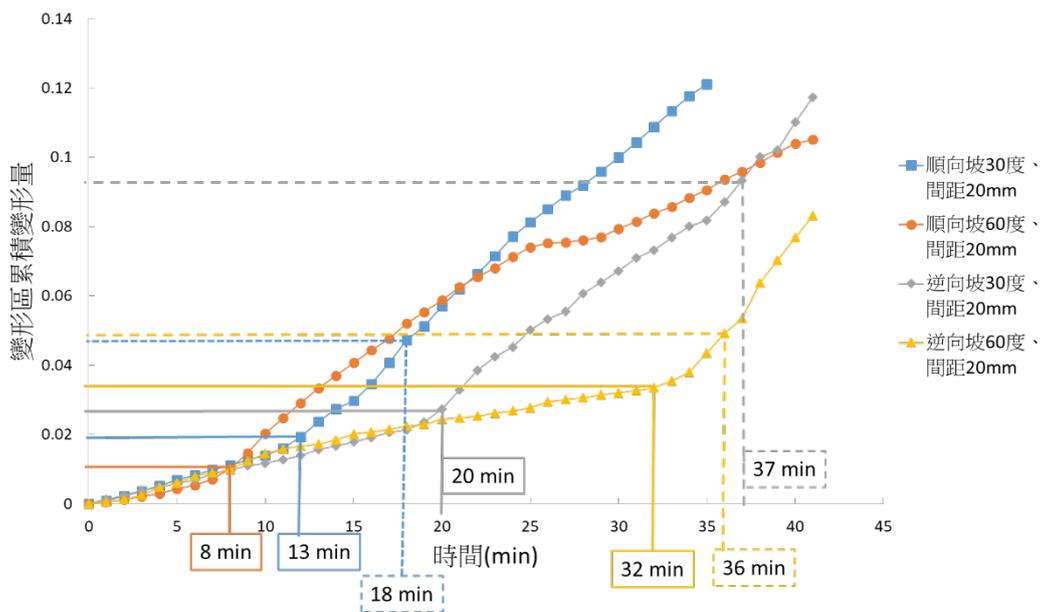


圖12 邊坡累積變形

Figure 12 The accumulated deformation of slopes

2. 邊坡破壞與滑動面的切穿

邊坡何時發生破壞可以由實驗影片過程得知邊坡滑動面產生但未切穿的時間，我們藉由其他指標來協助定義破壞條件，我們從實驗結果發現可以從三個方法定義破壞條件。

滑動面切穿邊坡則是發生在邊坡破壞後，因為滑動面開始發展到切穿邊坡需要一段時間，實驗中可以由兩個方法觀察到切穿的時間點。

(1) 邊坡破壞

一、邊坡有承受荷重的極限，當邊坡受到

超過自身所能承受最大荷重時邊坡就可能破壞，因此我們可以將邊坡承受荷重到達尖峰荷重之時間點定義為破壞之時間點。

二、本研究觀察由質點影像測速(PIV)得到的邊坡平均位移速率發現會有明顯加速後發生破壞的現象，因此我們可以開始有明顯加速的時間點定義為破壞的時間點(圖13)。

三、本實驗是由坡頂加載荷重，因此邊坡變形應是從上往下發展，下邊坡部分的位移速率(位移速率 Bottom)應是由慢轉快直至與上邊坡部分的位移速率(位移速率 Top)相近，因此我們可以由滑動體下邊坡部分與上邊坡部分的位移速率比值突然變大(圖14)的時間點協助推算出邊坡破壞的時間點。

因實際野外邊坡不像邊坡模型受到荷重加載，邊坡平均位移速率可能也不易得到，但速率比值可推算邊坡是否已達承受尖峰荷重(邊坡發生破壞)，是一個參考的指標可用於預警。

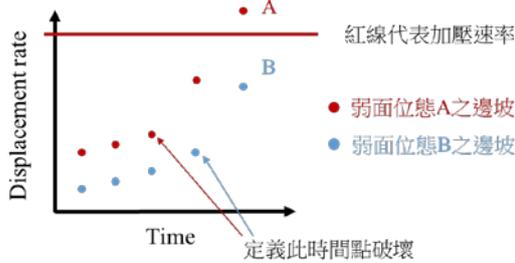


圖13 邊坡平均位移速率之變化

Figure 13 The variations of the displacement rates of slopes

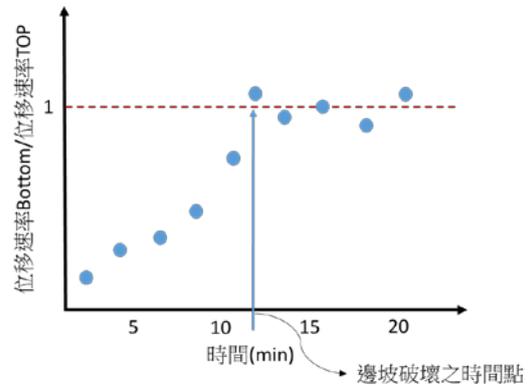


圖 14 下邊坡(Bottom)與上邊坡(Top) 位移速率比值之變化

Figure 14 The variations of the ratio of the displacement rate at bottom to top

(2) 滑動面的切穿

我們可以由兩種方法得知來邊坡滑動面切穿的時間，其一為觀察實驗過程，但實際野外邊坡很難直接觀察到滑動面形成的過程，其二為邊坡平均位移速率與實驗加壓速率差不多相等時，如圖13所示意，觀察弱面位態 A 之邊坡的速率變化，其最後有達到實驗加壓速率，所以此時弱面位態 A 的邊坡其滑動面應已切穿，但實際野外邊坡不像邊坡模型受到一荷重加載，所以可能較難定出一個基準做為預警。

結論

本研究藉由給與邊坡模型荷重的方式誘發邊坡破壞，來討論不同位態的邊坡變形行為。其中不同弱面位態的邊坡在破壞前(滑動面產生但未切穿邊坡)所累積變形由大到小依序為逆向坡60°最大，再來是逆向坡30°、順向坡30°，順向坡60°最小。不同弱面位態的邊坡的滑動面切穿邊坡時所累積的變形由

大到小為順向坡 60° 最大、再來是逆向坡 30° 、逆向坡 60° ，順向坡 30° 最小，而滑動面切穿代表邊坡完全崩塌。不同弱面位態的邊坡承受最大荷重由大到小依序為逆向坡 30° 最大、再來為順向坡 30° 、逆向坡 60° ，順向坡 60° 是最小的。由實驗可知順向坡 30° 若有不穩定或滑動情況，發生完全崩塌的可能較大。本實驗中邊坡滑動面切穿皆是在荷重尖峰值的時間點之後，因此可以利用下、上邊坡位移速率比值的變化推算承受尖峰荷重或滑動面產生的時間點，進而推測之後可能有切穿的危險。

誌謝

本研究承蒙科技部計畫補助，計畫編號：MOST 108-2625-M-005-008，在此致謝。

參考文獻

1. 朱澄偉(2018)「逆向坡之傾覆破壞物理模型分析研究」，國防大學理工學院環境資訊及工程學系碩士學位論文。
2. 曾泰源(2019)「弱面位態對邊坡模型的變形行為之影響」，國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。
3. Bois, T., Bouissou, S., & Guglielmi, Y. (2008), "Influence of major inherited faults zones on gravitational slope deformation: a two-dimensional physical modelling of the La Clapière area (Southern French Alps)," *Earth and Planetary Science Letters*, 272(3-4), 709-719.
4. Chang, K. T., Ge, L. and Lin, H. H. (2015), "Slope creep behavior: observations and simulations," *Environmental Earth Sciences*, 73 (1), 275-287.
5. Lo, C. M., and Weng, M. C. (2017), "Identification of deformation and failure characteristics in cataclinal slopes using physical modeling," *Landslides*, 14(2), 499-515.
6. Indraratna, B. (1990), "Development and applications of a synthetic material to simulate soft sedimentary rocks," *Geotechnique*, 40(2), 189-200.
7. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012), "Use of LIDAR in landslide investigations: a review," *Natural hazards*, 61(1), 5-28.
8. Yang, G., Qi, S., Wu, F., and Zhan, Z. (2017), "Seismic amplification of the anti-dip rock slope and deformation characteristics: A large-scale shaking table test," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 907-916.
9. Zhang, S. L., Zhu, Z. H., Qi, S. C., Hu, Y. X., Du, Q., & Zhou, J. W. (2018), "Deformation process and mechanism analyses for a planar sliding in the Mayanpo massive bedding rock slope at the Xiangjiaba Hydropower Station," *Landslides*, 15(10), 2061-2073.

109年 10月 26日收稿

109年 11月 17日修改

109年 11月 24日接受