

# 以分離元素法探討邊坡性質對臨界位移量的影響

沈昇丞<sup>(1)</sup> 張光宗<sup>(2)</sup>

## 摘要

對於山坡地的安全，建立邊坡崩塌預警機制顯得格外重要；本研究透過數值模擬方法探討大規模崩塌的力學行為與潛在預警指標，重點分析不同邊坡性質對穩定性之影響。依據現地資料，本研究建立光華地區三維邊坡數值模型，並結合有限元素法 PLAXIS 3D 與分離元素法 EDEM，模擬邊坡變形與破壞發展歷程。透過折減 EDEM 微觀參數至邊坡崩塌，來探討不同邊坡性質對臨界位移量之影響。模擬結果顯示，深度較深之滑動面的臨界位移大於深度較淺之滑動面，且若於下邊坡設定強度較高的岩層，會提高臨界位移量，顯示邊坡性質為影響崩塌潛勢之關鍵因素。此研究成果可提供未來建立邊坡崩塌預警系統之參考基礎。(關鍵詞:有限元素法、分離元素法、崩塌預警、臨界位移)

## Investigation of the Influence of Slop Properties on Critical Displacement Using the Discrete Element Method

*Yi-Cheng Shen<sup>(1)</sup> Kuang-Tsung Chang<sup>(2)</sup>*

Master <sup>(1)</sup> Professor <sup>(2)</sup> Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

## ABSTRACT

For the safety of hillside areas, establishing an early warning mechanism for slope failure is particularly important. This study investigates the mechanical behavior and potential early warning indicators of large-scale landslides through numerical simulation, focusing on how different slope properties affect stability. Based on field data, a 3D slope model of the Guanghua area was developed, integrating the finite element method (PLAXIS 3D) and the discrete element method (EDEM) to simulate the deformation and failure processes of the slope. By reducing the microscale parameters in EDEM to trigger slope failure, the influence of different slope

---

(1) 國立中興大學水土保持學系 碩士

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

properties on the critical displacement was analyzed. Simulation results show that slopes with deeper slip surfaces exhibit larger critical displacements compared to those with shallower slip surfaces. Additionally, setting stronger rock layers in the lower slope area increases the critical displacement, indicating that slope properties are key factors influencing collapse potential. These findings can serve as a reference for developing future slope failure early warning systems. (**Keywords** : Finite Element Method, Discrete Element Method, Landslide Early Warning, Critical Displacement)

## 一、前言

邊坡崩塌災害為全球廣泛存在的地質問題之一，尤其在山區更具顯著危害性，經常導致嚴重的人員傷亡及經濟損失。臺灣由於地處環太平洋地震帶，加上頻繁的颱風與強降雨事件，使邊坡穩定性問題更為明顯。大部分邊坡穩定性分析如極限平衡分析(LEM)，也有連續體力學方法，如有限元素法(FEM)。極限平衡分析無法分析邊坡的變形，有限元素法可以模擬邊坡的變形，但對大變形邊坡的模擬與破壞機制之呈現仍有一定的限制。

近年來，分離元素法 (Discrete Element Method, DEM) 逐漸受到大地工程界的重視與採用，特別是透過 DEM 能模擬邊坡材料的微觀尺度的接觸行為及非連續性行為，如裂縫生成，顆粒鍵結變化與邊坡的大變形，及模擬邊坡從穩定到崩塌的過程。

本研究旨在結合與有限元素法與分離元素法進行邊坡穩定分析，首先利用有限元素法 PLAXIS 3D 推斷滑動面；接著利用分離元素法 EDEM 探討邊坡崩塌前累積的位移量，即臨界位移量。本研究成果可望提供更真實的邊坡崩塌過程分析，並為邊坡災害防治與預警提供參考。

## 二、研究方法

### 2.1 PLAXIS 3D 光華邊坡參數與模型

光華地區位於桃園市復興區華陵里，地層為巴陵層，岩性為暗灰色至灰色之硬頁岩及板岩組成，地勢由西向東漸低，坡向大致朝東，坡度上緩下陡。光華邊坡具明顯之破碎岩層，為崩塌發生之潛勢區，故選定作為模擬分析案例。本研究參考水土保持局臺北分局 (2023) 111-112 年度雪霧鬧、光華、義興及上巴陵等地區潛在大規模崩塌調查監測計畫中之光華邊坡地形為基礎(圖 1)，建立 Plaxis 三維模型(圖 2)，以探討其滑動面深度。

本研究所使用之破碎岩層材料參數是根據現地調查與實驗結果取得。首先於現場進行地質調查，記錄岩層出露、岩塊破碎程度與節理分布情形(如圖 3 所示)，並利用施密特垂直反彈儀對岩體進行單軸壓縮強度估算，測得單壓強度為 18.4 MPa，再結合 GSI 分級評估，本研究評定該岩層 GSI 為 30 (中等至高度破碎，節理發育，岩塊間接觸不佳)。進一步採用 ROCKLAB 軟體依據 GSI 與 UCS 等資料，推估該岩層之凝聚力、摩擦角與楊氏模數，作為 PLAXIS 3D 模擬所需之力

學參數(表 1)。此流程可有效反映實際破碎岩層的工程性質，並提升模擬準確度與可參考性。

參考報告的滑動體範圍，區分不同材料區域。模型中，黃色區域代表完整岩層，採用線彈性模型(Linear Elasticity)進行模擬；綠色區域則代表潛在滑動區塊，為破碎岩層所構成，選用摩爾-庫倫(Mohr-Coulomb)模型加以描述，以模擬其剪切破壞機制。

最後以強度折減法得到邊坡的三維滑動面(圖 4)。由強度折減的結果中，不同的 Incremental displacement 數值範圍可以定義出一淺和一深之滑動面，滑動面深度分別為 40m 與 70m，如圖 5。

鬧、光華、義興及上巴陵等地區潛在大規模崩塌調查監測計畫)

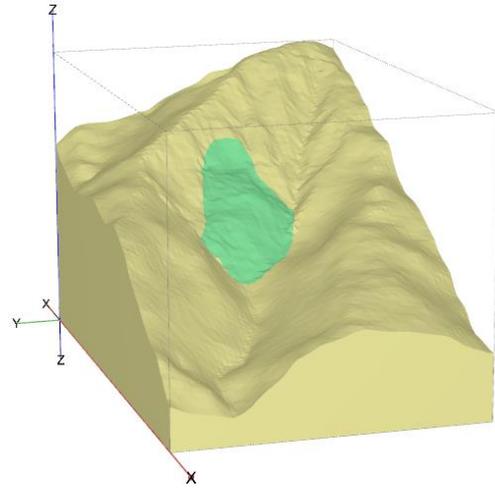


圖 2 本研究 PLAXIS 3D 數值邊坡模型

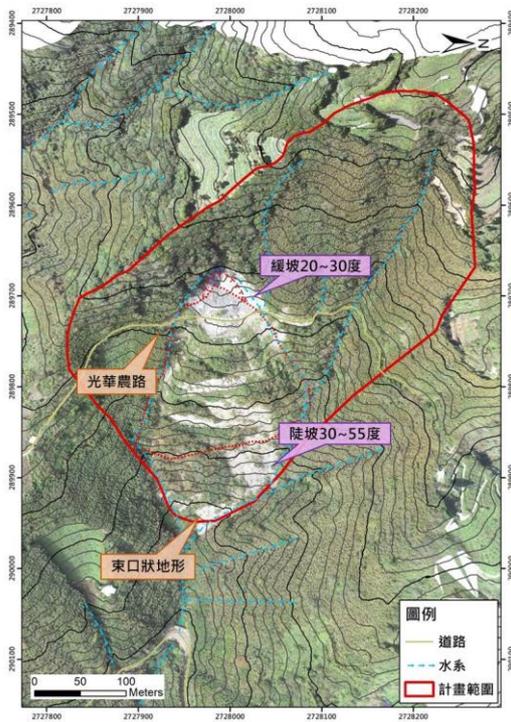


圖 1 光華地區地形圖(參考水土保持局臺北分局 (2023)農村水保署 111-112 年度雪霧



圖 3 現地調查圖(岩層露頭)

表 1 PLAXIS 3D 材料參數

	單位	破碎岩層	完整岩層
組成律模式		Mohr Coulomb	Linear elasticity
孔隙率		0.3	0.3
單位重	kN/m <sup>3</sup>	26.5	26.5
凝聚力	kPa	91	
摩擦角		32.6	
柏松比		0.3	0.3
楊氏模數	kPa	404890	404890

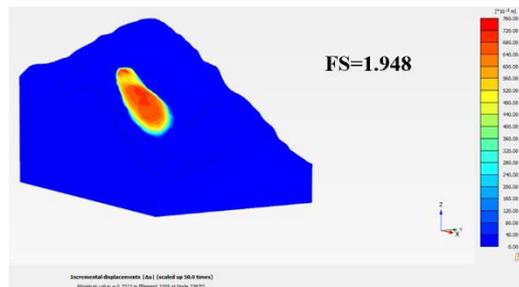


圖 4 PLAXIS 計算出之滑動面

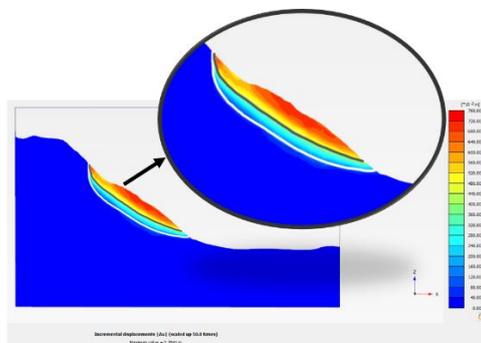


圖 5 PLAXIS 計算出之滑動面剖面圖(黑色為較淺滑動面(深度 40m)，白色為較深滑動面深度 70m)

## 2.2 PLAXIS 3D 單壓試驗

本研究使用有限元素法分析軟體 PLAXIS 3D 進行單軸壓縮試驗數值模擬，以探討材料之應力-應變行為並作為分離元素法參數擬合之基礎。加載方向為軸向壓縮，初始有效側向壓力設為 0 kN/m<sup>2</sup>，最大軸向應變設為 10%，以模擬材料在四周沒有約束、僅受上下壓力作用下的變形情況。模擬過程中透過持續紀錄軸向應力與應變變化，可獲得完整之應力 - 應變關係曲線(圖 7)，進而提供後續分離元素法 EDEM 材料參數擬合的參考依據。

## 2.3 EDEM 單壓試驗

本研究使用 EDEM 分離元素法分析軟體建立單軸壓縮試體模型，以探討顆粒材料之微觀力學行為。如圖 7，模擬試體為一柱狀體，半徑為 15 m，高度為 60 m。顆粒間接觸模型採用 Hertz-Mindlin with bonding (Hertz, 1882; Mindlin, 1949; Mindlin and Deresiewicz, 1953)模型，並於試體上下兩端設置剛性壓板以施加對稱軸向載重，壓板材質模擬金屬材料，並設定高密度與高楊氏模數，以減少壓板本身變形對試體應力分佈與變形量的干擾，確保壓縮行為由顆粒主導。

為準確模擬近似準靜態的單軸壓縮行為，上下壓板皆以固定之初始速度 0.0006 m/s 緩慢向中心推進(圖 8)，使顆粒間應力逐漸累積，接著發生顆粒位移或鍵結破壞(圖 9、

10)，從而觀察試體從彈性階段進入破壞階段的過程。

試體內部所受之應力為壓板施加於顆粒體之總反作用力除以試體橫截面積所得，如下式 1 所示；而軸向應變則定義為試體受壓後之軸向位移與初始長度之比值，亦如公式 2 所示。透過紀錄施壓過程中應力與應變數據，可繪製出應力-應變曲線。為驗證 EDEM 模型參數之合理性，研究中亦將所得曲線與 PLAXIS 3D 有限元素法所得結果進行比對，並藉由調整微觀參數以擬合宏觀力學行為，如圖 6 所示，擬合之 EDEM 微觀參數如表 2。

$$\epsilon_{yy} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

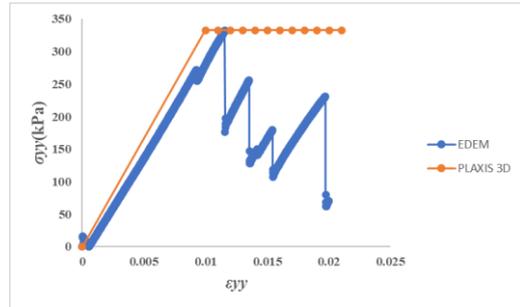


圖 6 擬合有限元素法 PLAXIS 3D 與分離元素法 EDEM 單壓試驗

$$\sigma_{yy} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

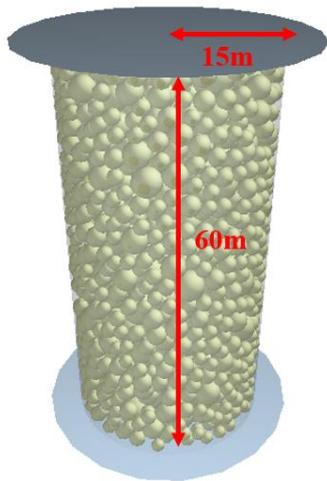


圖 7 單壓試驗模型(圓柱體結構、顆粒分布)

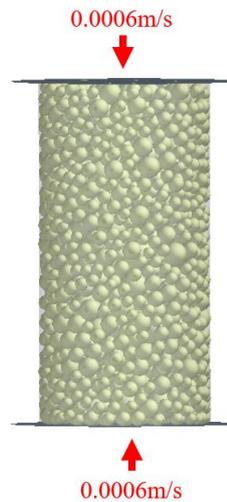


圖 8 壓縮速度示意圖  
(壓縮速率為 0.0006 m/s)

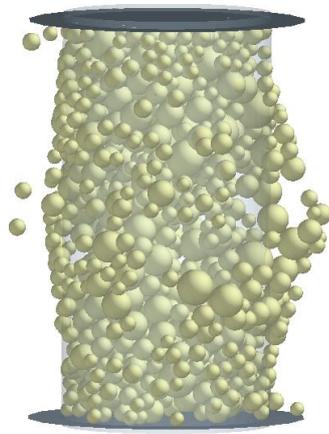


圖 9 壓縮後顆粒破壞示意圖  
(顆粒脫落、位移現象)

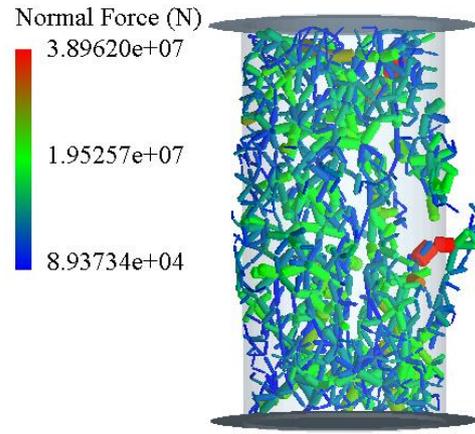


圖 10 壓縮後鍵結破壞示意圖  
(顯示鍵結斷裂路徑與位置)

表 2 EDEM 微觀參數

滑動面			
牆密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2650	鍵結切向勁度 (N/m <sup>3</sup> )	1.0 × 10 <sup>7</sup>
牆有效楊氏模數 (Pa)	3.5 × 10 <sup>9</sup>	鍵結法向強度 (Pa)	2.256 × 10 <sup>6</sup>
牆恢復係數	0.5	鍵結切向強度 (Pa)	2.256 × 10 <sup>6</sup>
牆靜摩擦係數	0.64	<b>下邊坡較高強度材料(自行假設)</b>	
破碎岩層		顆粒密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2700
球型顆粒直徑 (m)	2~6	顆粒有效楊氏模數 (Pa)	3.5 × 10 <sup>9</sup>
孔隙率	0.3	顆粒恢復係數	0.5
顆粒密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2650	顆粒靜摩擦係數	0.7
顆粒有效楊氏模數 (Pa)	3.5 × 10 <sup>9</sup>	鍵結法向勁度 (N/m <sup>3</sup> )	1.0 × 10 <sup>7</sup>
柏松比	0.3	鍵結切向勁度 (N/m <sup>3</sup> )	1.0 × 10 <sup>7</sup>
顆粒恢復係數	0.5	鍵結法向強度 (Pa)	1.0 × 10 <sup>7</sup>
顆粒靜摩擦係數	0.64	鍵結切向強度 (Pa)	1.0 × 10 <sup>7</sup>
鍵結法向勁度 (N/m <sup>3</sup> )	1.0 × 10 <sup>7</sup>		

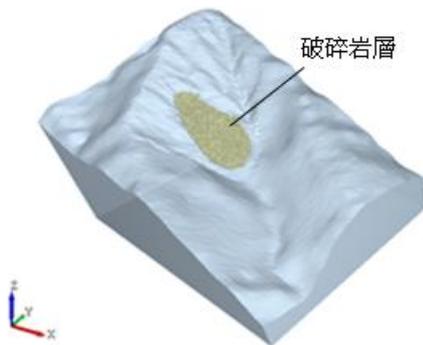
## 2.4 EDEM 邊坡模型

本研究採用 EDEM 分離元素法建立三維顆粒邊坡模型。模型中破碎岩層區域以球形顆粒組成，為圖 11 土黃色顆粒區域，顆粒直徑範圍為 2 至 6 公尺，並在 EDEM 裡選擇隨機分布模式；整體孔隙率設為 0.3，顆粒密度為  $2650 \text{ kg/m}^3$ ，為一般岩石材料常見之比重。顆粒有效楊氏模數設定為  $3.5 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，柏松比為 0.3。

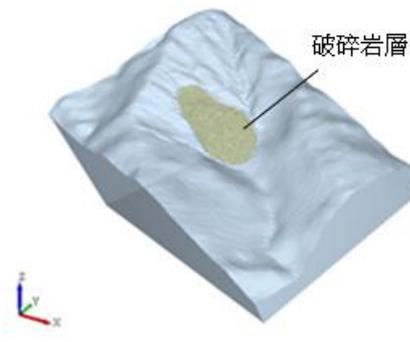
顆粒間接觸行為採用 Hertz-Mindlin with bonding 模型(Hertz, 1882; Mindlin, 1949; Mindlin and Deresiewicz, 1953)，考慮顆粒在接觸時除了彈性外亦具鍵結破壞機制，進而模擬岩體破壞過程。顆粒恢復係數設為 0.5，靜摩擦係數為 0.64 (對應岩層的摩擦角約  $32.6^\circ$ )，以控制顆粒碰撞與滑動行為。鍵結法向與切向勁度皆設定為  $1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ ；鍵結法向與切向強度均為  $2.256 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，確保模型在模擬崩塌與位移累積過程中具有足夠的穩定性與延展性。

此外，滑動體下的滑動面的接觸參數設定與邊坡材料相同，其密度同樣為  $2650 \text{ kg/m}^3$ ，楊氏模數設定與顆粒相同為  $3.5 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，恢復係數與靜摩擦係數亦一致為 0.5 及 0.64。

進一步為探討滑動體下邊坡和上邊坡不同強度對滑動行為之影響，於模型下邊坡配置一較高強度的材料，為圖 11 藍綠色顆粒區域，模擬下邊坡比較堅硬的岩層對整體穩定性的幫助，探討其變形及臨界位移量。假設一組具代表性之高強度材料，以評估其對滑動行為的潛在影響。顆粒有效楊氏模數亦設定為  $3.5 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，但其密度略高，為  $2700 \text{ kg/m}^3$ ，反映更緻密之岩性特質。顆粒間之恢復係數維持為 0.5，靜摩擦係數則提高至 0.7，以增強抗剪滑能力；鍵結法向與切向勁度設定為  $1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ ，鍵結法向與切向強度設定為  $1.0 \times 10^7 \text{ Pa}$ ，以提供更強的結構穩定性。圖 11 所示為上述提到之滑動體與其對應的剖面圖。



(a) 深度 40m 之滑動體(單一材料)



(b) 深度 70m 之滑動體(單一材料)

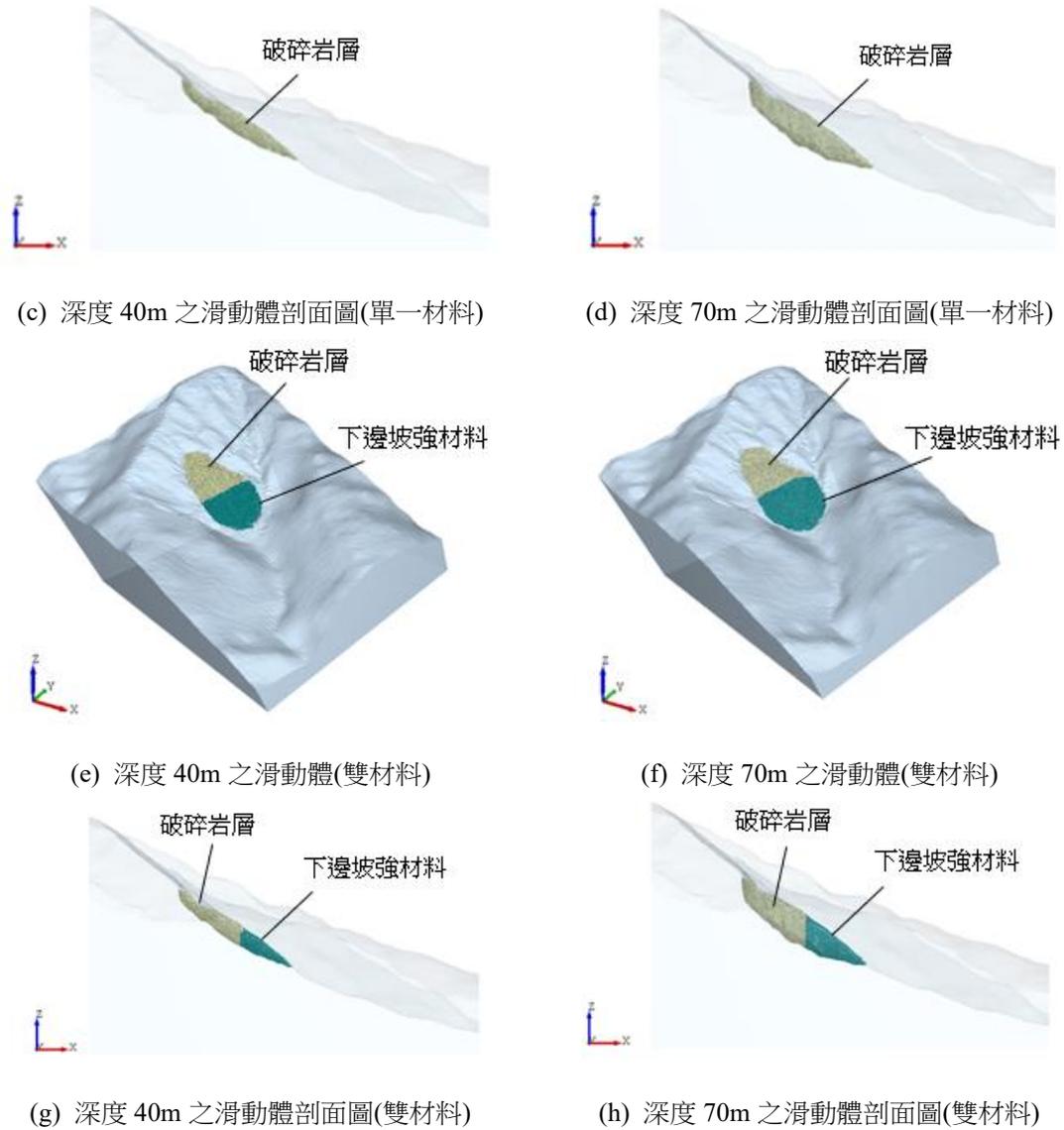


圖 11 EDEM 邊坡模型(單一材料與雙材料)

## 2.5 強度折減過程

確立微觀參數之後，以強度折減的方式逐步降低邊坡材料與牆的靜摩擦係數與鍵結參數，根據 Su et al. (2020) 所提出的

折減係數公式(式 3)，在折減的過程中會給定一個折減係數，將參數降低相同的倍率，並以顆粒的速度來判定是否穩定，若顆粒速度接近 0 m/s 則視為穩定，則繼續降低邊坡強度，直至崩塌。另外，為了更貼近邊坡瀕

臨崩塌時的臨界位移，本研究在邊坡接近崩塌時會以更小的間距遞增折減係數。

$$F_c = \frac{cb}{c_b} = \frac{f}{f'} \quad (3)$$

其中， $cb$  代表鍵結參數， $f$  為靜摩擦係數。

## 2.6 邊坡變形計算

強度折減至邊坡崩塌後，邊坡變形程度的計算參考 Chigira (2009) 量化野外邊坡變形的的方法，修改如圖 12 的邊坡示意圖，並定義邊坡變形區域的平均應變如下式：

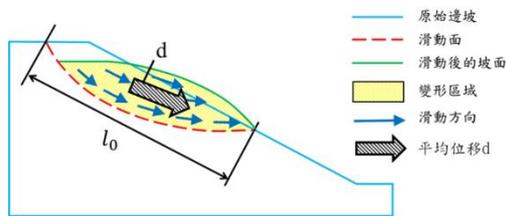


圖 12 平均應變的計算方式  
(王兆譽等, 2021)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{d}{l_0} \quad (4)$$

其中， $\bar{\varepsilon}$  表示滑動體的平均應變(即變形區應變)， $d$  為滑動體的平均位移， $l_0$  表示滑動體沿坡面方向的長度，最後比較不同邊坡狀況的邊坡的臨界位移量。

## 三、結果與討論

折減顆粒靜摩擦係數、牆面靜摩擦係數與鍵結參數，以引發滑動行為並觀察臨界位移量。

在單一材料設定下，模擬結果如圖 13 與圖 14 所示，深層滑動面模型之臨界位移量達 0.49 公尺，平均應變為 0.16%，淺層滑動面臨界位移量為 0.28 公尺，平均應變為 0.09%。此結果說明，當滑動面位於較深位置時，因影響範圍較廣，造成更大結構的連續破壞，進而引發較大幅度的整體位移。相較之下，淺層滑動受限於滑動深度與坡體厚度，破壞範圍較小，臨界位移量亦相對有限。

雙材料配置方面，模擬結果如圖 15 與圖 16 所示，在相同參數折減條件下，深層滑動面模型之臨界位移量大幅提升至 28.35 公尺，平均應變為 9.45%；淺層滑動面之臨界位移量則為 3.89 公尺，平均應變為 1.30%。此結果顯示，滑動體下部強度較上部強的條件下，滑動體變形更集中於邊坡上部破碎區，進而促進大量滑移發生。

此模擬結果亦與水土保持局臺北分局 (2023) 111-112 年度雪霧鬧、光華、義興及上巴陵等地區潛在大規模崩塌調查監測計畫邊坡崩塌觀測現象相符，此現象可能暗示上邊坡滑動面已生成，下邊坡滑動面尚未形成的狀況。整體而言，本研究對不同性質滑動體之行為為進行探討，其臨界狀態判定有助於災害的預警。

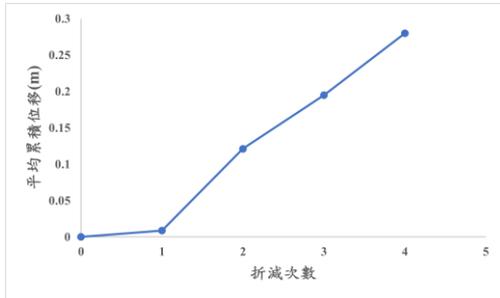


圖 13 40m 滑動體臨界位移量與折減次數關係圖(單一材料)

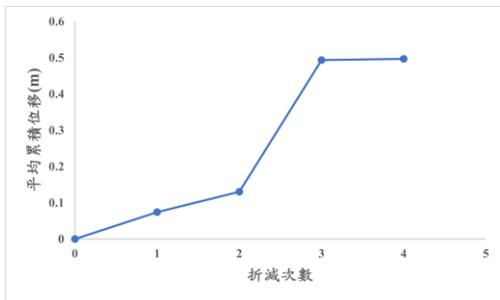


圖 14 70m 滑動體臨界位移量與折減次數關係圖(單一材料)

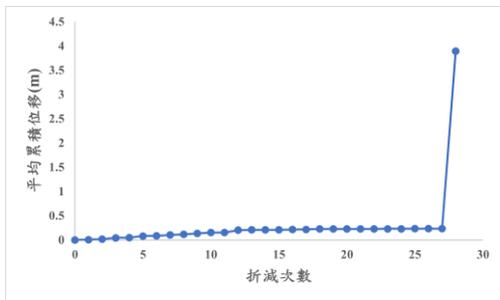


圖 15 40m 滑動體臨界位移量與折減次數關係圖(雙材料)

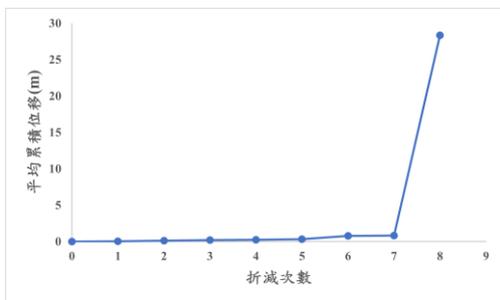


圖 16 70m 滑動體臨界位移量與折減次數關係圖(雙材料)

#### 四、結論與建議

本研究結合有限元素法 PLAXIS 3D 與分離元素法 EDEM，建立光華邊坡三維數值模型，以探討滑動面深度與下邊坡強度較上邊坡強度大對邊坡臨界位移量之影響。模擬結果顯示，在單一材料設定下，深層滑動面 70 m 之臨界位移量與應變均顯著高於淺層滑動面 40 m。進一步於下邊坡設置較高強度材料後，滑動體之位移量大幅提升，上下層材料性質差異，下強上弱促使滑動體能夠承受較大位移量，模擬行為亦與實際觀測之崩塌現象相符。

綜合模擬結果可知，分離元素法對於模擬岩層邊坡之大變形與崩塌行為具良好適用性，可應用於邊坡穩定評估與災害預警系統建置。然而，本研究仍有部分限制，包括下邊坡材料參數未經現地實驗驗證，且模擬過程未考慮地下水變化與降雨等因素。建議後續研究可納入進而提升模擬的現地代表性與崩塌預警應用價值。

#### 參考文獻

1. 水土保持局臺北分局 (2023)，「111-112 年度雪霧鬧、光華、義興及上巴陵等地區潛在大規模崩塌調查監測計畫」。
2. 王兆譽(2021)，「以物理模型探討弱面位態與間距對邊坡變形的影響」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。

3. Hertz, H. (1882). On the contact of elastic solids. *Z. Reine Angew. Mathematik*, 92, 156-171.
4. Mindlin, R. D. (1949). Compliance of elastic bodies in contact. *J. Appl. Mech., ASME*, 16, 259-268.
5. Mindlin, R. D. & Deresiewicz, H. (1953). Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *ASME*, 327-344.
6. Su, H., Fu, Z., Gao, A., & Wen, Z. (2019). Numerical simulation of soil levee slope instability using particle-flow code method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(8), 04019045.
7. Chigira, M. (2009). September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. *Engineering Geology*, 108(1-2), 1-15.

水土保持學報 55(1) : 3473 – 3484 (2025)

Journal of Soil and Water Conservation 55(1) : 3473 – 3484 (2025)

---

114 年 04 月 30 日收稿

114 年 05 月 28 日修改

114 年 06 月 12 日接受