

國道 3 號七堵順向坡滑動過程之動態模擬

羅佳明^{[1]*} 鄭添耀^[1] 林彥享^[1] 蕭震洋^[1]
魏倫璋^[1] 黃春銘^[1] 冀樹勇^[1] 林錫宏^[2] 林銘郎^[3]

摘要 本文主要探討國道 3 號七堵順向坡滑動過程與最終堆積結果，利用三維分離元素軟體 (PFC3D)，針對平面型滑動之動態過程進行數值模擬。由數值模型分析結果顯示，當模擬元素間摩擦係數為 0.03 時，堆積地形與空拍及相關地形量測結果最為吻合，其最大滑移速度可達 23.6 公尺/每秒 (約 85 公里/小時)，並使整個崩塌體堆積至高速公路對面邊坡。另外，由模擬結果發現，於 2-4 秒時，滑動體平均速度達 10.2 公尺/每秒 (約 36.7 公里/小時)，其高速公路與 3 部小客車均已遭掩埋，而模擬至 7.5 秒後，整個塊體將停止運移，並於高速公路及兩側邊坡形成低破碎度之堆積體。

關鍵詞：平面型滑動、動態過程、數值模型。

A Kinematic Model of the Translational Slide at the Cidu Section of Formosan Freeway

Chia-Ming Lo^{[1]*} Tien-Yao Cheng^[1] Yen-Hsiang Lin^[1] Cheng-Yang Hsiao^[1]
Lun-Wei Wei^[1] Chuen-Ming Huang^[1] Shu-Yuon Chi^[1] Hsi-Hung Lin^[2] Ming-Lang Lin^[3]

ABSTRACT This paper presents the results of a case study on the translational slide at the Cidu section of Formosan freeway, including its kinematic process and the deposition geometry. Numerical modeling of the slides interaction was carried out using a 3D distinct element program, PFC3D (Itasca, 1999). When the friction coefficient of each particle was about 0.03, the predicted maximum velocity was about 23.6m/sec (about 85km/hr) and the debris reached the other side of Formosan freeway. Simulations showed the three cars and Formosan freeway were buried at 2-4sec (the predicted average velocity was about 10.2m/sec) and the translational slide stopped all motions to form the low fragmentation deposit at 7.5sec.

Key Words: translational slide, kinematic process, numerical modeling.

[1] 中興工程顧問社大地工程研究中心

Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Taipei, Taiwan, R.O.C.

[2] 中央地質調查所環境與工程地質組

Environmental and Engineering Geology Division, Center Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan, R.O.C.

[3] 台灣大學土木工程學系

Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : ppb428@yahoo.com.tw

一、前言

順向坡滑動所造成之災害普遍發生於全臺都會區與高山聚落區，往往造成相當嚴重之傷亡與財產損失。順向坡 (dip slope) 係指一自然邊坡，尤其是岩坡，其坡面之傾斜方向 (dip direction) 與其岩層中主要弱面之傾斜方向一致或大致相同者 (坡面傾斜方向與弱面傾斜方向相差不超過 15 度者; 洪如江, 2002)。以運動類型區分，順向坡歸類為平面型滑動 (translational slide)，此類型山崩滑動所造成的災損之所以嚴重，主要因滑動事出突然且滑動速度極快 (可能超過每小時 100 公里，或每秒 28 公尺)，難以預知、不易逃避，故常造成重大災害 (洪如江, 2010)。

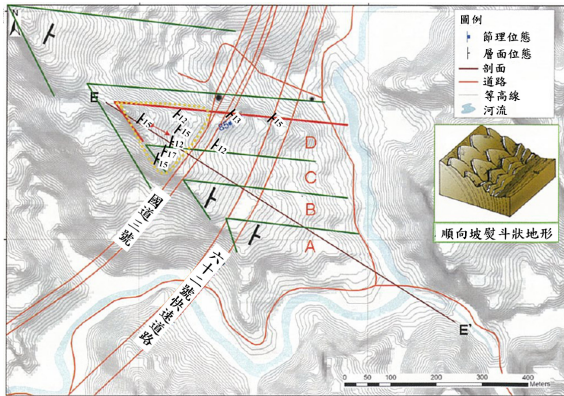


圖 1 事件地點災前地形判釋成果 (Hsi-Hung Lin *et al.*, 2010)

Fig.1 Result of the geomorphologic interpretation before the disaster

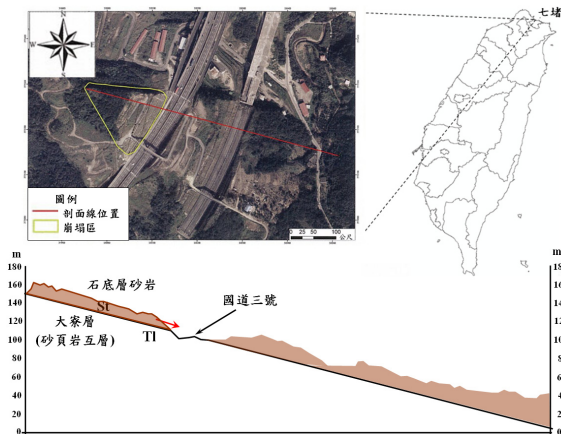


圖 2 事件地點災前航照及地質剖面示意圖 (modified from Mien-Min Chen *et al.*, 2010)

Fig.2 Aerial photo and geological cross-section before the disaster

國道 3 號七堵順向坡滑動事件發生於民國 99 年 4 月 25 日下午 2 點左右，發生地點位於國道 3 號 3.1k 處 (地名為師格格山)，大量土石瞬間掩埋 190 公尺長、35~43 公尺寬之雙向車道，並造成 3 輛小客車掩埋之慘劇。根據林錫宏等人 (2010) 於災後地形判釋與地質調查結果顯示，本區崩塌前具有相當明顯之楔形坡體，尖端凸向西北方向。其師格格山一帶呈現 4 階鬚斗狀之順向坡地貌 (圖 1)，圖 1 所標示之 A 為最上一階之岩段，可能為順向坡滑動後形成之緩坡地形；而最下一階岩段 (圖 1 所標示之 D) 即為本次滑動事件之岩段。該岩段經由陳勉銘等人 (2010) 研判應為石底層 (St) 底部之砂岩段 (SS)，其厚度約 15-20 公尺；而崩塌後該岩段下方方露之地層屬大家層 (TI)，岩性以厚層頁岩偶夾薄砂紋層為主，其與石底層底部砂岩段交界處，研判可能為此事事件之主要滑動面 (圖 2)。

事件發生後，已有相關單位與部分研究針對本區順向坡滑動進行機制調查，並加強國道周邊順向坡穩定性調查、監測與預警。然而，對於國道周緣之順向坡預警仍有進一步加強之空間，尤其對於滑動塊體速度與影響範圍之掌握，實為相當關鍵之重點課題，亦為當前國內外研究之發展重點。因此，本研究將利用分離元素軟體 (PFC3D 3.0)，建立國道 3 號七堵平面型滑動之數值模型，經由相關量測資料與模擬後之堆積形態比對後，釐清整個滑動過程之動態行為。

二、研究方法

本研究工作項目主要分為危險弱面與影像判釋分析、材料參數模擬及全尺度數值模擬分析等三大項，主要蒐集現場調查與影像判釋成果，簡化建置成數值模型，並以數值模擬相關力學試驗參數及比對最終堆積成果，待數值模擬堆積範圍與運移行為合理後，再依此說明整個七堵順向坡滑動之動態特性。

1. 弱面線理與影像判釋分析

本研究所採用之影像包含 2008 年拍攝之正射航照影像、數值高程模型 (5m*5m 精度之 DEM) 與崩塌前後空拍資料等。方法上主要利用各影像之地貌特徵與地形起伏變化，進行冠部弱面線理發展之特徵判釋，並搭配現場調查所量得之原次生弱面位態，初步釐清師格格山一帶之弱面發展，做為數值模型建置之參考。

本研究所指之弱面線理主要具備以下三大特徵：

- (1) 影像所反映之線理具備陰影特徵者：表示該線理具備高差地形之陡崖特徵，尤以深層崩塌之冠部、反斜崖與單面山兩側崩崖等最為顯著。
- (2) 影像所反映之線理兩側地貌具差異特徵者：表示該線理可能為既有滑動體冠部之張裂縫，當滑動體崩滑後，其崩滑範圍內之地貌將與周緣差異甚大，即使經過數年的復育，其崩塌與非崩塌側之植被特徵仍會有相當程度之差異。
- (3) 影像所反映之線理以成組方式出現：表示該線理可能為區域內普遍出露之弱面特徵，往往導致邊坡沿其弱面崩壞。

2. PFC 3D 原理

離散元素法 (discrete element method) 係為針對材料性質或非連續問題而開發之數值分析法，適用於分析任何具不連續面及顆粒性質之材料力學行為。以離散元素法為理論基礎之三維顆粒流分析軟體 PFC3D (particle flow code, 簡稱 PFC) 係由 Itasca 公司於 1999 年發展出之分離元素分析程式 (Itasca, 2002)，主要利用外顯有限差分法 (explicit finite difference method) 計算每一時階之系統變化。每個運算時階，均先計算顆粒位置及重疊量或相對位移，依其力-位移定律計算接觸力後，根據牛頓第二運動定律，可得到新的顆粒速度與位置。

(1) 接觸組成模式

PFC 藉由每一接觸點之接觸組成模式模擬材料之基本力學行為，提供三種接觸組成模式包含接觸勁度模式、滑動模式及連結模式等。而 PFC 在計算接觸勁度時，假設兩相鄰物體之勁度係以正向或切向彈簧串聯方式接觸，則正向接觸勁度 (kn) 與切向接觸勁度 (ks) 如下式：

$$k = \frac{k^{[A]}k^{[B]}}{k^{[A]} + k^{[B]}} \quad (1)$$

其中，[A]與[B]表示接觸之兩物體； k 代表正向接觸勁度 (kn) 或切向勁度 (ks)。

另外，滑動模式係採用摩擦係數之設定，當元素接觸介面間滑動力大於摩擦阻力時，元素便會產生滑動 (即當切向接觸力大於摩擦力，且接觸力等於摩擦力時，則發生滑動行為)。而連結模式則於顆粒元素間加入平行鍵結 (parallel bond)，以結合元素構成一種形狀，當所施加元素之外力大於鍵結力時，其鍵結便會斷裂。

(2) 消能阻尼

真實環境中，物體經由碰撞、摩擦等作用都會產生能量消散 (energy dissipation) 之現象，因此在 PFC3D 模型中亦增加了 viscous damping 之設定，使元素間接觸時才產生消能作用，改善山崩模擬時之實際接觸消能問題。而 PFC 於每個時階 (time step) 運算時，其接觸產生之正向與切向阻尼，主要係運用 Belytschko 於 1983 年所提出之接觸消能計算方式 (式 2)。

$$k_{i+1} = \alpha \frac{k_i}{\left(\sqrt{1 + \left[\frac{c_i}{2 \times k_i \times \Delta t_0} \right]^2} - \frac{c_i}{2 \times k_i \times \Delta t_0} \right)^2} \quad (2)$$

其中， k_{i+1} 為計算下一個 time step 內時間之正向或切向勁度； α 為安全因子 (程式中若未設定該參數，則內定為 1)； k_i 為接觸勁度； c_i 為阻尼比參數； Δt_0 為元素接觸時，該 time step 之時間。

3. 數值模型建置與堆積形態比對

(1) 材料參數模擬

本研究採用 PFC 3D 軟體建構國道 3 號七堵順向坡滑動之數值模形，其優勢在於可模擬物件鍵結與分離、延弱面破裂及碰撞交互作用後之大位移行為。PFC 3D 程式主要需輸入之材料強度參數包含正向與切向之接觸勁度 (normal stiffness 與 shear stiffness)、元素間連結之鍵結勁度與強度 (bonding stiffness 與 bonding strength) 等，其主要反映岩坡之強度與變形特性，然其輸入值屬於微觀參數 (指各顆粒元素之輸入參數值)，甚少可利用力學試驗方法直接求得。因此，本研究參考 Potyondy (2004) 建議之材料參數設定方法，以現場取樣之單壓或三軸試驗等結果做為比對依據。另以 PFC 模擬其力學實驗過程與結果，初步進行巨觀與微觀參數之轉換，以實際單壓實驗及模擬實驗比對 (圖 3)，進行巨觀與微觀參數轉換公式修正，進而得到模擬材料之微觀參數。

關於模擬材料碰撞消能方面，本研究參考 Giani 於 1994 年現場試驗之回彈係數進行阻尼參數轉換 (表 1)，以設定較符合現場狀況之阻尼參數。另於摩擦係數設定上，由於動摩擦係數大

小為順向坡滑動過程之關鍵，故於此參數設定上尤為重要。然動摩擦係數量測上極為不易，故本研究將以不同摩擦係數模擬後之堆積形態進行比對，以求取最符合崩塌堆積現況之摩擦係數。

(2) 全尺度數值模型建置

國道3號七堵順向坡滑動之 PFC 3D 全尺度數值模型主要由球與牆兩種元素構成，建構方式說明如下：

- ① 地形部份：主要係以牆元素建立而成，其原始地形三維座標主要來自於以非常規攝影量測 (unconventional photogrammetry) 方法 (其相關方法與結果，請參閱蕭震洋等人於2011所發表之相關文獻) 所建立之災前後數值高程模型 (digital elevation model, 簡稱 DEM)。如欲模擬國道3號七堵順向坡滑動事件，首先將後期已滑動之源頭區進行等高線數化，再數化前期運動區與堆積區部分，並結合兩期等高線輸入 ERDAS 軟體中轉換成 DEM。另將 DEM 高程值轉換成文字檔，輸入至 Matlab 程式中賦予其三維座標值，並撰寫成 PFC3D 程式環境中可讀取之指令格式，即可將三維地形建構成牆元素。
- ② 滑動體部份：為考量電腦運算效能，順向坡滑動體部份係以 3 公尺直徑之球元素群建構而成，並依其層面分布，以每層 2 個球元素正向排列方式，由下而上依序建構 4 層單面山岩體。主要將崩滑前地形以牆元素建構後，再將球元素群填入源頭區。待球元素群穩定後，再於球元素間接觸位置給予鍵結強度，使其有如崩滑前固結之岩體。另於數值環境中加入節理 (Joint 指令) 分佈，各節理間接觸部分不給予鍵結強度，僅設定摩擦係數。模擬時將崩滑源頭區牆元素拆除，使其球元素群以滑動方式向國道運動(由西北往東南方向滑動)，當球元素群與運動區碰撞時，岩體將順著節理分離成岩塊群，並於交互碰撞運動後堆停於堆積區。
- ③ 顆粒接觸勁度與鍵結強度：於現場鑽取直徑 10 公分、高 25 公分之岩心試體進行單壓實驗，求取其單壓強度與彈性模數，並根據 Potyondy (2004) 所建議之轉換公式，初步進行巨觀與微觀參數之轉換。並以實際單壓實驗及模擬實驗比對，進行巨觀與微觀參數

轉換公式修正，進而得到數值模擬環境中岩塊之微觀參數 (表 2)。

- ④ 阻尼係數：係參考 Giani (1992) 於現場之回彈係數實驗進行阻尼參數轉換，初步於數值模擬環境中設定岩塊碰撞之回彈係數 (viscous damping)，使其更符合實際山崩運動之物理現象。
- ⑤ 摩擦係數：係於現地應用地質羅盤，求取現場堆積岩塊間或岩塊與坡面間之靜摩擦係數，作為程式初始設定值。另以數值分析進行模擬比對，以求取數值模擬環境中，不同摩擦係數設定下，其堆積形態之差異，進而比較出最適合模擬之參數。

表 1 現地阻尼參數轉換-覽表 (modified from Giani, 1994)

Table 1 Relationship of the damping ratio and restitution coefficient in the field

	正向回彈係數	轉換正向阻尼比	切向回彈係數	轉換切向阻尼比
基岩坡面	0.50	0.21	0.95	0.02
基岩坡面覆蓋破碎岩塊	0.35	0.32	0.85	0.05
坡面覆蓋岩屑及土壤	0.30	0.36	0.70	0.11
土壤坡面覆蓋茂密之植生	0.25	0.40	0.55	0.20

表 2 PFC 數值模型參數-覽表

Table 2 The numerical parameters of PFC modeling.

微觀參數	數值模擬參數
顆粒密度	2.6*103 kg/m ³
顆粒接觸勁度	正向: 2*108KN/m 切向: 2*108 KN/m
顆粒間鍵結強度 (採用 Parallal Bond)	正向勁度: 2*108 KN/m ³ 切向勁度: 2*108 KN/m ³ 正向強度: 8.5*106 KN/m ² 切向強度: 4.25*106 KN/m ²
模擬地形(Wall)勁度	正向: 1*109 KN/m 切向: 1*109 KN/m
摩擦係數	球元素: 0.01~0.3 牆元素: 0.01~0.3

三、研究結果

1. 弱面線理與影像判釋分析結果

- (1) 根據國道 3 號七堵順向坡滑動前之航空照片與數值地形線理分析成果顯示 (圖 4), 整個研究區周緣可發現四組線理發展特徵, 其走向分別約為北 44 度東 (A 組)、北 65 度東 (B 組)、北 53 度西 (C 組)、北 32 度西 (D 組) 等 4 組。其中, A 組線理走向與此次崩滑事件之層面走向大略一致, 亦可能為滑體內高傾角張裂縫之走向; 而 B~D 組則可能為區域內之節理弱面走向。
- (2) 由空警隊於空中所拍攝之崩滑後照片亦顯示 (圖 5), 崩滑體內確實具有四組線理特徵, 尤其順向坡滑動後, 整個塊體沿弱面分離之狀況甚為明顯。
- (3) 另根據崩滑後現場節理位態調查結果 (圖 6), 崩塌範圍內可量得 Joint A-1、Joint A-2、Joint B、Joint C、Joint D 等 5 組弱面分佈, 代表性露頭量測點合計量測 22 個量測點。其 Joint A-1 屬順向坡之層面, 位態為 N45E/15E (15 個量測點); 而 4 組節理位態分別為 N44E/45E (3 個量測點)、N67E/60E (2 個量測點)、N55W/55N (2 個量測點)、N26W/50S (3 個量測點)。各位態走向均與影像判釋之線理特徵一致, 其弱面分佈將可能影響整個順向坡滑動、塊體分離、堆積分佈等要素之關鍵, 故本研究將依此分析及調查結果設定於數值模型之中, 進而提升模擬結果之合理性。

2. 全尺度數值模擬結果比對

根據力學試驗模擬比對與弱面調查判釋結果建置之數值模型 (圖 7), 本研究另將於數值模型中輸入不同摩擦係數, 以比對最接近堆積型態之結果。堆積型態比對項目包含滑動體運移距離 (run-out distance)、堆積長度 (deposition length)、堆積寬度 (deposition wide) 等。其結果顯示, 當模擬元素間摩擦係數為 0.03 時, 堆積地形與堆積型態比對項目、空拍及非常規攝影量測結果最為吻合 (表 3 與圖 8), 其最大滑移速度可達 23.6 公尺/每秒 (約 85 公里/小時), 並使整個崩塌體堆積至高速公路對面邊坡。因此, 本研究將選用此項參數建構之數值模型, 說明國道 3 號七堵順向坡之動態運移過程。

3. 國道 3 號七堵順向坡動態運移過程

圖 9 與圖 10 分別為摩擦係數為 0.03 時之動態模擬結果, 其中圖 10 係將順向坡依其程序分成 4 層進行速度監測, 分別探討各元素速度變化之差異。本研究依其動態模擬結果, 將其各時間動態過程說明如下:

- (1) 0.0-0.5 秒: 其崩滑體右翼趾部(往台北方向, 靠近天橋側) 速度瞬間達 8.2 公尺/每秒 (約 29.5 公里/小時), 而整個崩滑體平均速度為 2.9 公尺/每秒 (約 10.4 公里/小時)。此時, 該區最上層之速度僅達 2.5 公尺/每秒 (約 9 公里/小時), 而 2-4 層速度可達 4.3 公尺/每秒 (約 15.5 公里/小時)。顯見整個順向坡滑動因趾部之底層一開始受到後面岩層之碰撞推擠, 導致能量傳遞至趾部, 使其速度大幅增加 (約為整個崩滑體速度之 2-3 倍)。
- (2) 0.5-2.0 秒: 整個崩滑體上層最大速度達到 22.5 公尺/每秒 (約 81 公里/小時) 以上之高速狀態, 此時崩滑體移運移置台北方向之三車道上, 而崩滑體之下部三層平均速度均維持在 9.6 公尺/每秒 (約 34.6 公里/小時) 之穩定狀態, 且無岩塊分離之情形, 其將導致此車道之車輛受到撞擊, 並快速推移至往基隆方向之車道。
- (3) 2.0-3.0 秒: 其崩滑體右翼趾部已撞擊到對向車道之邊坡, 並呈現減速之狀態。此時, 右翼趾步之塊體已沿 C 組弱面發生分離之現象, 並開始停置於車道上, 而主要崩滑體則繼續往對向車道滑動。

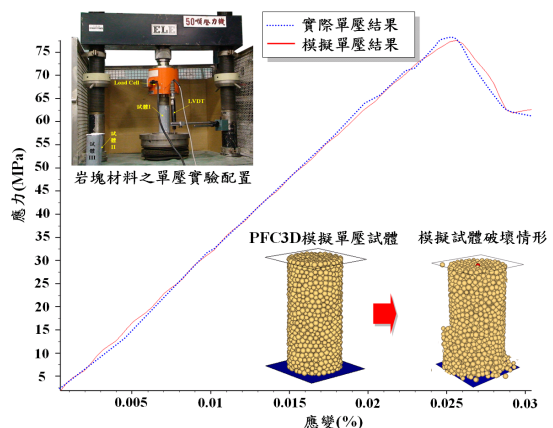


圖 3 模擬單壓試驗比對實際單壓試驗結果圖

Fig.3 The comparison result of real and simulation uniaxial compressive test.

- (4) 3.0-5.0 秒：崩滑體右翼趾部分離之岩塊已停止運移，且潰散於兩個車道之間，而主崩滑體則撞擊到對向車道邊坡後，往邊坡上持續滑移。此時，主崩滑體之速度達到最高（最高速可達 23.6 公尺/每秒），而滑體右翼趾部速度已驟降至 2.3 公尺/每秒（約 8.3 公里/小時），並造成 2-4 層速度於模擬 3 秒後明顯出現上下兩區域之速度分佈。
- (5) 5.0-8.0 秒：主崩塌體約於 6 秒爬上對向車道之邊坡，並於 7.5 秒後，整個塊體將停止運移。

- (6) 綜合分析：比較崩滑體四層速度監測模擬分析的結果得知，其底部 3 層之運動速度，相較於最頂層之崩滑體而言較為一致；而頂層速度於整個運移過程中差異情形較為顯著，其將導致上層因滑移而變形之特性較為明顯。顯見，國道 3 號七堵順向坡滑動時，行經於崩滑體趾部之車輛，將直接被推移至往基隆端方向的車道邊坡，接著上層之崩滑體覆蓋其上，並於高速公路及兩側邊坡形成低破碎度之堆積體。

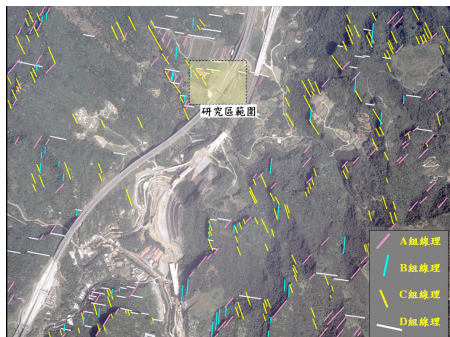


圖 4 國道 3 號七堵區域線理分析成果
Fig.4 The orientation of lineation at the Cidu area of Formosan freeway

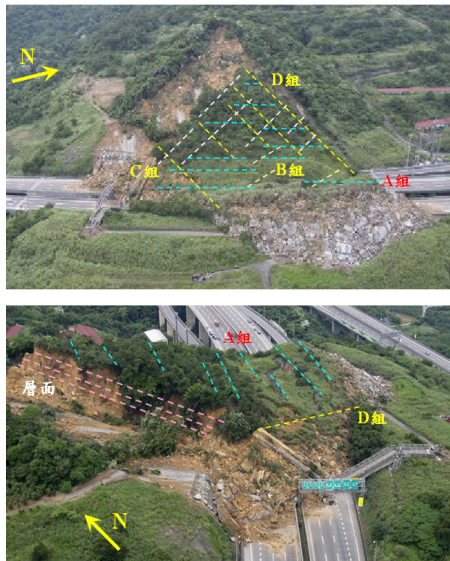


圖 5 國道 3 號七堵順向坡滑動空拍照片與線理判釋結果 (Ministry of Transportation and Communications, 2010)

Fig.5 Aerial photo of the translational slide and result of the lineation interpretation at the Cidu section of Formosan freeway

表 3 各摩擦係數之模擬結果比較表

Table3 The comparison result of different friction coefficients modeling

摩擦係數	滑動與否	運移距離	堆積長度	堆積寬度
0.3	NO	0	0	0
0.2	NO	0	0	0
0.1	NO	0	0	0
0.05	NO	0	0	0
0.04	YES	185.64	170.21	144.47
0.03	YES	253.23	182.65	173.51
0.02	YES	263.58	189.25	176.76
0.01	YES	326.45	201.63	253.97
量測結果	--	259.78	187.78	174.17

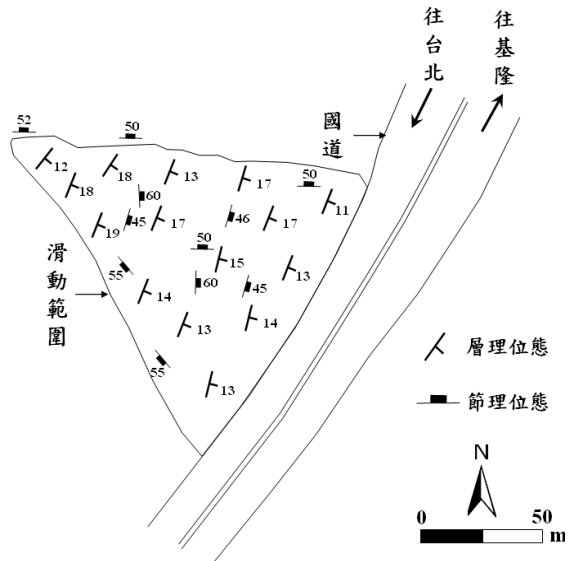


圖 6 國道 3 號七堵順向坡滑動後層理與節理位態分析圖

Fig.6 The orientation of bedding plane and joints at the Cidu section of Formosan freeway

四、後續應用方向

關於本研究所建立之全尺度數值模型，係針對國道周緣坡為對象進行模型建置，其後續相關應用如下：

- (1) 順向坡滑動之危害範圍劃設：可針對國道周緣坡腳切除透空之順向坡為對象，進行堆積影響範圍模擬。藉此劃設可能之危害影響範圍，再參考國外相關道路邊坡落石危害範圍評估方法 (Jaboyedoff *et al.*, 2005)，以數值模擬之順向坡運移速度、動能、運動路徑、堆積範圍等，區分危害範圍內之高、中、低潛能。
- (2) 災前情境模擬展示：除順向坡危害範圍劃設外，其數值模型亦可搭配邊坡監測與穩定分析成果 (如 STABLE 或 FLAC3D 穩定分析成果)，提供災前情境模擬展示。以順向坡運移之動態方式進行呈現，除可提供防災單位參考外，亦可將其情境模擬成果發布至網路平台，增加山區道路封路前警示之作用。

- (3) 預警系統規劃：關於道路邊坡之即時預警，應審慎考量行車停止所需之反應時間 (此一反應時間為考慮人、車通過淨空區、煞車區加上前置警示區合計長度所需之時間)。崩壞時間之預測若逐漸接近反應時間時，即可考慮發布交通管制或疏散之措施。因此，對於順向坡監測與邊坡穩定

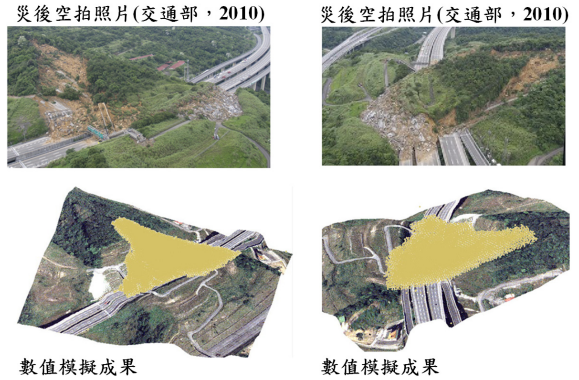


圖 8 數值模擬成果比對空拍照片
Fig.8 Compaction of the numerical simulation and aerial photo at the Cidu translational slide of Formosan freeway

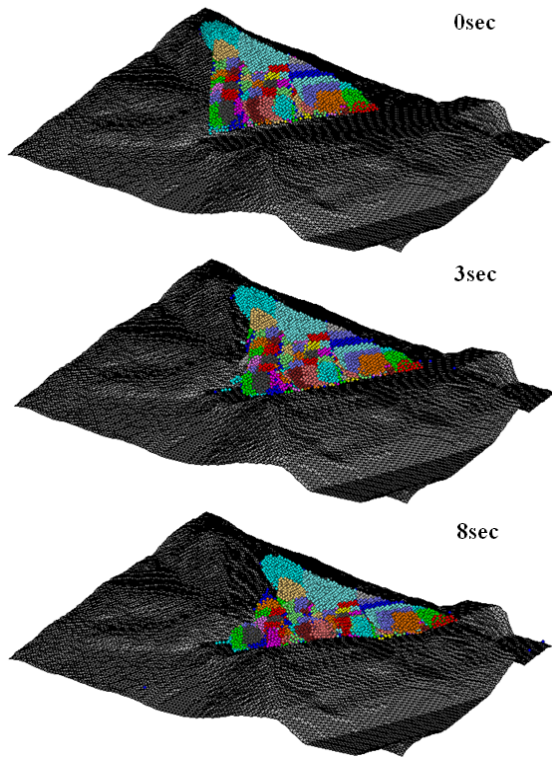


圖 7 國道 3 號 C 壩順向坡數值模型
Fig.7 Numerical modeling at the Cidu translational slide of Formosan freeway

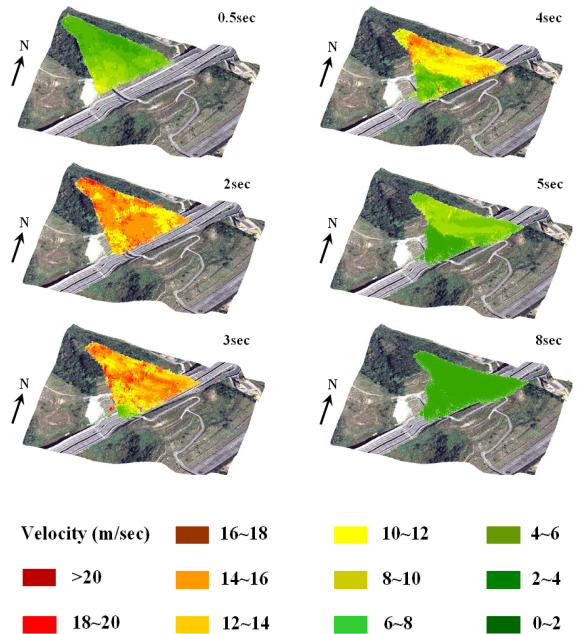


圖 9 國道 3 號 C 壩順向坡滑動之動態過程
Fig.9 Diagrams kinematic process of the translational slide at the Cidu section of Formosan freeway

分析所訂定之崩壞門檻，若能加入順向坡崩壞時之運移速度及影響範圍（包含堆積寬度與運移距離），可更精準估算其反應時間與煞車距離。再者，對於預警儀器之布設範圍選定上，可更合理規劃其布設位置，不至使儀器於落入滑動危害範圍，導致預警效能的喪失。

五、結 論

本文以分離元素法模擬國道3號七堵順向坡滑動之動態行為，並加入弱面分布與力學參數等建構數值

模型，藉此釐清平面型滑動於高速運移下之運動特性。其結果顯示，於2-4秒時，滑動體平均速度達10.2公尺/每秒（約36.7公里/小時），其高速公路與3部小客車均已遭掩埋。而模擬至7.5秒後，整個塊體將停止運移此時，其3部小客車可能已被崩滑體推移至往基隆端的車道，其崩滑體於高速公路及兩側邊坡形成低破碎度之堆積體。最後，本研究之數值模擬分析結果，除可提供災前情境模擬展示之外，亦有助於後續國道周緣順向坡滑動之危害範圍劃設與預警系統規劃之參考。

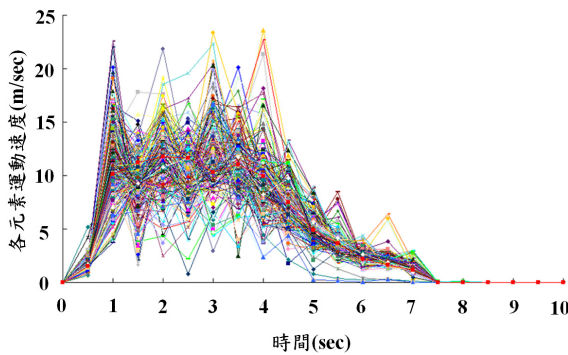


圖 10a 國道3號七堵順向坡第1層（最頂層）滑動速度圖

Fig.10a Diagrams the velocity of the first layer (the upper layer) at the Cidu translational slide of Formosan freeway

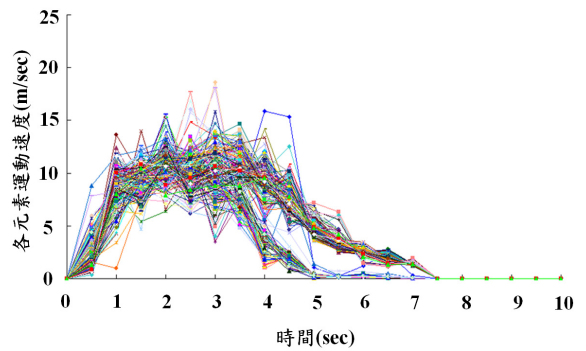


圖 10c 國道3號七堵順向坡第3層滑動速度圖

Fig.10c Diagrams the velocity of the third layer at the Cidu translational slide of Formosan freeway

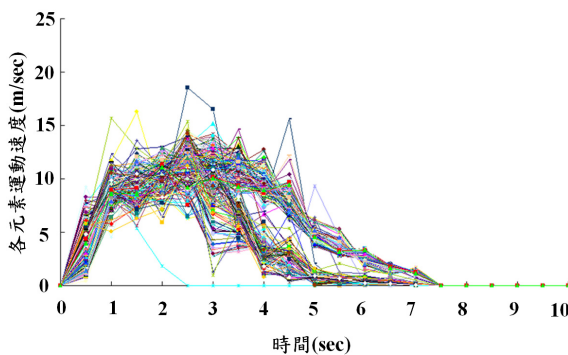


圖 10b 國道3號七堵順向坡第2層滑動速度圖

Fig.10b Diagrams the velocity of the second layer at the Cidu translational slide of Formosan freeway

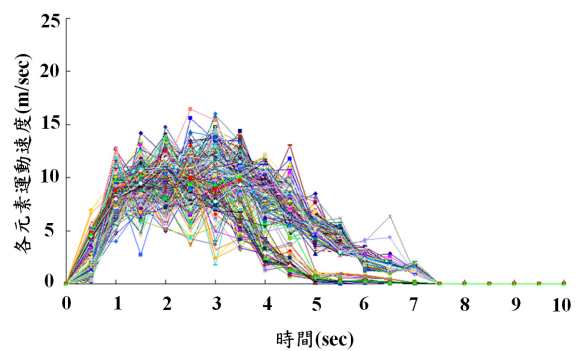


圖 10d 國道3號七堵順向坡第4層（最底層）滑動速度圖

Fig.10d Diagrams the velocity of the fourth layer (the bottom layer) at the Cidu translational slide of Formosan freeway

參考文獻

1. Belytschko, T. (1983). "An overview of semidiscretization and time integration procedures," in *Computational Methods for Transient Analysis*, Ch. 1, 1-65.
2. Cundall, P. A. and Strack, O. D. (1979). "A discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, 29, 47-65.
3. Giani, G. P. (1992). "Rock slope stability analysis," *Balkema. Rotterdam*, 361.
4. Giani, G. P., Migliazza, M. and Segalini, A. (2004). "Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37, 369-389.
5. Itasca Consulting Group Inc. (2002). "PFC3D (Particle Flow Code in three Dimensions) Theory and Background, Version 3.0," *Minneapolis*, 1-26.
6. Jaboyedoff, M., Dudt, J. P. and Labieuse, V. (2005). "An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 621-632.
7. Potyondy, D. O. and Cundall, P. A. (2004). "A bonded-particle model for rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 1239-1364.
8. 交通部 (2010), 「國道 3 號 3K+100 邊坡坍塌事件-邊坡初步檢測評估報告」交通部報告。(Ministry of Transportation and Communications R.O.C. (2010). "Translational slide at the Cidu section (3K+100) of Formosan Freeway preliminary examination report," *Ministry of Transportation and Communications R.O.C. Report*. (in Chinese))
9. 林錫宏、沈振勝、紀宗吉 (2010), 「國道 3 號七堵路段順向坡地貌判釋分析」, 地質, 29(2), 20-23。(Lin, H. H., Chen, Z. S. and Chi, Z. C. (2010). "Interpretation geomorphologic of dip slope at the Cidu section of Formosan Freeway," *Geology*, 29(2), 20-23. (in Chinese))
10. 洪如江 (2002), 「順向坡之破壞與穩定」, 地工技術, 94, 5-18。(Hung, J. J. (2002). "A study on the failure and stability of dip slopes," *Journal of Sino-Geotechnics*, 94, 5-18. (in Chinese))
11. 洪如江 (2010), 「台灣順向坡滑動災害的回顧與災害防治的原則」, 土木水利, 37(3), 5-18。(Hung, J. J. (2010). "A study on the failure and disaster prevention of dip slopes," *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, 94, 5-18. (in Chinese))
12. 陳勉銘、魏正岳、費立沅 (2010), 「國道 3 號順向坡滑動的地質解析」, 地質, 地質, 29(2), 12-15。(Chen, M. M., Wei, Z. Y. and Fei, L. Y. (2010). "Analysis geology of dip slope at the Cidu section of Formosan Freeway," *Geology*, 29(2), 12-15. (in Chinese))
13. 蕭震洋、謝寶珊、冀樹勇 (2011), 「應用非常規攝影量測評估國道 3 號 3.1 公里崩塌事件之土方量」, 中華水土保持學報, 審查中。(Hsiao, C. Y., Hsieh, P. S. and Chi, S. Y. (2010). "Preliminary Study of Using Unconventional Photogrammetry to Evaluate the Earthwork Volume - a Case Study of the Landslide Occurred on the Cidu Section of Formosan Freeway," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, (Under review). (in Chinese))
14. 羅佳明 (2010), 「落石區崖線崩退與崖錐堆積形態之研究」, 台灣大學土木工程學系博士論文。(Lo, C. M. (2010). *Cliff Recession and Talus Deposition Pattern in Rockfall Area*, Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering College of Engineering, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C.)

2011 年 04 月 29 日 收稿

2011 年 05 月 24 日 修正

2011 年 07 月 11 日 接受

(本文開放討論至 2012 年 3 月 31 日)