落石型山崩危害範圍劃設之應用

羅佳明* 鄭錦桐** 冀樹勇*** 紀宗吉**** 林銘郎*****

摘要

本文主要以落石區危害範圍劃設與應用進行探討,而崩崖後退機制、崩退率、崖錐堆積發展均 與其危害範圍有關。然而,落石源頭區之崩落量甚難估算,且落石區之崖錐堆積與其影響範圍均曾 受人為擾動,故不易建置其影響範圍評估模式。鑒於此,本研究選取人為開發甚低之紅菜坪落石區 為研究區域,藉由多期地形圖與航照了解其崖線與堆積地形、影響範圍之變化;並設計物理模型進 行落石群堆積試驗,進而深入瞭解崖線崩退機制與崖錐堆積發展之關聯性,作為數值模擬比對之依 據。再以分離元素模擬軟體(PFC3D)進行物理試驗模擬比對與紅菜坪落石事件全尺度案例模擬, 藉此建立其影響範圍之形狀函數,期能作為後續國土規劃及落石防護工程設計之參考。 關鍵字:崩崖後退、崖錐堆積、物理模型、數值模擬、形狀函數

一、前言

構成陡坡之節理岩塊受到重力作用,於邊坡 上以自由落體、跳動、滾動等運動型態,最終停 置於坡腳之過程,稱為落石(Rockfall)。落石 常因重力或運動碰撞作用,使岩石沿節理弱面分 離成數個岩塊,並逐次崩落於坡腳形成半錐狀堆 積地形,稱之為崖錐(Talus);而與崖錐周緣分 離較遠之岩塊堆積範圍,即為落石影響範圍。近 年來台灣地區大規模落石群災害事件頻繁(羅佳 明等人,2007),諸如中橫馬陵隧道、花蓮長春 祠、基隆市麥金路等落石災害事件(圖 1),導 致山區重要聯外道路中斷及多處落石防護工程嚴 重毀損。尤以於台東知本、龍泉溪大量落石崩塌 形成堰塞湖與台北四獸山、紅菜坪源頭區大規模 崖錐堆積等事件,亦間接嚴重威脅下游保全對象 生命財產之安全。顯見台灣大規模落石崩塌所引 致之災害與威脅實不容忽視。

過去幾年許多研究曾針對既有崖錐地形進行 調查及量測,並進一步推估可能形成崖錐地形之 堆積過程及堆積趨勢(Blikra et al, 1998; Hinchliffe et al., 1999; Curry et al, 2004)。然經現地自然或 人為長期的擾動,已甚難推估其實際堆積地形之 變化過程。亦有研究曾探討崩崖後退之機制與行 為 (Hutchinson et al., 2001; Obanawa and Matusukura, 2008),並建立二維幾何關係式,計算其崩退後 之堆積地形。然落石群力學機制、落石運動過程 等相關因素極為複雜,故甚難單純以幾何數學模 式表示。另外, Scheidegger (1973)、Evans 與 Hungr(1993)曾以崖頂落石崩落最高位置至落 石運動最遠距離點間之水平夾角定義為 Fahrboschung 角度(F角),由此量測並推估現地落石 運動堆積範圍。然其堆積影響範圍往往隨著崩落 量體、運動地形而有所變化,故無法單從 F 角推

^{*} 中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員

^{**} 中興工程顧問社大地工程研究中心防災科技組組長

^{***} 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

^{****} 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組科長

^{*****} 台灣大學土木工程研究所教授



估其實際影響範圍。

就應用面而言,國內外落石影響範圍之推估 多以電腦模擬程式進行運動軌跡模擬。其理論基 礎大致可分為集塊質量法(Lumped Mass Approach, LMA) 、 剛 性 塊 體 法 (Rigorous Approach, RA)、非連續體變形法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA) 及分離元素 法 (Discrete Element Method, DEM) 等。CRSP 與 Rockfall 程式,為最早問世之落石模擬軟體。 而歐美應用最廣泛之落石模擬程式(STONE3D), 其程式具有易操作及廣域運算之優點,適合作為 廣域落石邊坡風險評估分析(Guzzetti 等人, 2003)。然 LMA 主要以質點為基礎而忽略其落 石形狀及尺寸影響,故對於落石堆積模擬結果仍 有許多待驗證之處。國內則由顧承宇等人 (1996)以 DDA 模擬落石運動行為而開始,爾 後葛德治等人運用 RA 撰寫 ROCKPATH 模擬程 式,至今已發展至 3D 剛體版。然其程式尚難以 模擬落石群之碰撞消能、破碎及側向堆積擴散等 運動行為。另外,國內外分離元素模擬多採用 PFC (Particle Flow Code) 軟體,程式中可模擬 岩體沿弱面分離成落石群、碰撞消能、破碎至側 向堆積之行為,其已可滿足模擬多項落石模擬條 件,故為本研究之主要模擬工具。

有鑑於此,本研究選擇崖錐地形保持完整、 人為擾動極小之紅菜坪源頭區為研究區域(如圖 2 所示,位於紅菜坪南投縣中寮鄉清水村)。搜 集 1904、1936、1977、1984、1991、1998、 1999、2003 年等地形圖與 1962、1998、1999、 2001、2002、2004、2005 年等航空照片(表 1),藉此輔助現場地質調查,推估各時期崖線 之崩退型式。另以室內物理模型試驗簡化其落石 運動行為,進而搭配地形分析結果深入瞭解崖線 崩退與影響範圍發展之關係。最後,進行全尺度 數值模擬,建立其影響範圍形狀函數,以作為後 續落石區國土規劃及落石防護工程設計之參考。

表 1 紅菜坪區域蒐集圖幅及影像類別一覽表

圖幅及 影像類別	圖資 日期	像元尺寸 (m/pixel)	製作單位	比例尺	幾何校 正誤差 (RMS)
中寮地形圖	1904	2.0	遠流出版公司	1:20000	16.85m
(日據時期)	1936	2.0	上河文化	1:50000	5.24m
頂水窟與 月桃湖地形圖 (相片基本圖)	1977	0.6		1:5000	0.79m
	1984	0.6	林教已曹林		0.65m
	1991	0.6	航空测量所		0.71m
	1998	0.4	则王俱重用		0.42m
	1999	0.3			0.35m
國姓地形圖	2003	0.5	上河文化	1:50000	1.55m
航空照片	1962	1.0	工研院能資所	1:5000	4.49m
	1998	0.4	林務局農林 航空測量所		0.68m
	1999	0.4			0.32m
	2001	0.5			0.45m
	2002	0.5			0.53m
	2004	0.5			0.49m
	2005	0.25			0.42m



圖 1 中橫沿線、基隆市麥金路(摘自蘋果日報 2006)及花蓮長春祠等落石災害情形



24

工程技術

二、研究方法

本研究工作項目包含現場地質調查與室內影 像分析、室內簡化物理試驗、數值模擬分析與形 狀函數建置等,各方法分別說明如下:

(一) 地質調查與崖線崩退分析

1. 地質調查

圖 2 顯示,紅菜坪與九份二山分別位於觀音 石背斜之西東兩翼,其背斜軸距東側落石區崖線 約 500m,全長約 1.6km,平均坡度約 55~80 度, 屬逆向坡型態(C1 區);西側落石區崩崖全長 約 2.6km,平均坡度約 35~55 度,為順向坡型態 (C2 區)。本研究主要調查 C1 及 C2 兩區崩崖 (全長約 4.2km),於崩崖沿線量測其弱面位 態、張裂縫、侵蝕溝等方位。另以 GPS 定位堆積 分布位置,以供後續相關成果比較之參考。

2. 崖線崩退型式分析

崖線崩退型式主要參考各期地形圖比對後之 地形變化,並參考 Schumm(1956)所提出之兩 種常見之崩退型式:(1)平行崩退型式,即崩 崖固定某個角度向後平均移動,並逐次往上平行 崩退;(2)減坡崩退模式,即崩退時崖面角度 逐漸衰減。崩退程度分析主要利用兩期地形圖或 影像進行疊圖分析,並加入誤差考量,以定量描 述崩退程度,其包含有效崩退量(即當崩退量大 於誤差時,為有效崩退量)及有效崩退率(有效 崩退量/時間)。

(二)室內物理模型試驗

1. 物理模型設計原理

依現地設計比例尺 1:100 之物理模型,並分 為源頭、運動、堆積等區(圖 3)。其配置簡述 如下:

(1)模擬材料:採用長、寬各 3.2 cm、高 2.8 cm
 之菱形柱狀岩塊,以每層 90 顆排列至源頭
 區(圖 4),形成 3 組節理之模擬岩體。

中興工程季刊·第112期·2011年7月·PP. 23-33 http://www.sinotech.org.tw/journal/

 (2) 堆積型貌量測方法:主要利用 1000 萬畫素 相機,並參考被動式立體成像法(Ni, 2005), 進行多段線型雷射(輸出功率 10mW)掃 描,再進行模擬崖錐 DTM 之製作。觀察 項目包含堆積寬度(W)、長度(L)、後 堆長度(B)及α、β、γ等堆積角(圖5)。







- 2. 主要試驗項目
 - (1)落石量體之影響:其試驗控制之物理量為 360顆、720顆、1080顆等落石量。
 - (2)地形坡度之影響:根據 1904~1977 年地形 圖估計之紅菜坪 C1 區(約 35-55 度)與 C2 區(約 55-80 度)之平均坡度,故設計 試驗之地形坡度為 45~90 度。
 - (3)崩退型式之影響:圖 6 顯示實驗上為符合 實際紅菜坪崖線崩退行為,故採用全面崩 退、分次減坡崩退、分次平行崩退等三種 不同之崖線崩退型式。



回 0 二裡崖稼朋返空八小息回

(三) PFC 3D 數值模擬

PFC3D 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 顯有限差分法計算每一時階(Time Step)之系統 變化,並根據牛頓第二運動定律,求得顆粒元素 於每一時階之速度與位置。

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,提供接觸勁度、滑動及連結 等接觸組成模式。其中,PFC 計算兩元素之接觸 勁度時,係假設其接觸勁度為正向勁度(kn)與 切向勁度(ks)之串聯;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;而連結模式則於顆粒 元素間加入平行鍵結(Parallel Bond),以結合 元素群構成其它形狀,當施加外力大於鍵結力 時,其鍵結便會產生斷裂行為。

2. 消能阻尼

消能參數設定方面, PFC3D 軟體提供 Viscous Damping 之設定,使元素間接觸時才產 生消能作用。而各時階運算時,係由 Belytschko 於 1983 年所提出之接觸消能計算方式,計算阻 尼比參數。

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

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. 模擬物理試驗微觀參數設定

本研究於 PFC 各參數選取方法如下:

- (1) 岩塊密度:模擬岩塊材料密度為 2500kg/m³。
- (2) 正向與切向勁度:以實際單壓試驗及模擬

比對,得到相關岩塊之微觀參數(圖 7; 表 2)。





b	-		
微觀參數	物理模型實驗數值模擬	落石區全尺度 案例數值模擬	
顆粒單位重	2.6*10 ³ kg/m ³	2.5*10 ³ kg/m ³	
顆粒接觸勁度	正向: 1*10 ³ KN/m 切向: 1*10 ³ KN/m	正向: 1*10 ⁸ ~2*10 ⁸ KN/m 切向: 1*10 ⁸ ~2*10 ⁸ KN/m	
模型邊界接觸勁度 (地形部分採用牆元素)	正向: 1*10 ⁸ KN/m 切向: 1*10 ⁸ KN/m	正向: 1*10 ¹¹ ~2*10 ¹¹ KN/m 切向: 1*10 ¹¹ ~2*10 ¹¹ KN/m	
顆粒間鍵結強度 (採用 Parallel Bond)	正向勁度: 1.0*10 ¹² KN/m ³ 切向勁度: 1.0*10 ¹² KN/m ³ 正向強度: 1.0*10 ¹² KN/m ² 切向強度: 5.0*10 ¹¹ KN/m ²	正向勁度: 1.63*10 ⁷ KN/m ³ 切向勁度: 1.63*10 ⁷ KN/m ³ 正向強度: 8.5*10 ⁶ KN/m ² 切向強度: 4.25*10 ⁶ KN/m ²	
模擬地形(Wall)勁度	正向: 1*10 ⁸ KN/m 切向: 1*10 ⁸ KN/m	正向: 1*10 ⁸ KN/m 切向: 1*10 ⁸ KN/m	
摩擦係數	球元素: 0.5 牆元素: 0.7	球元素: 0.6 牆元素: 0.6	

表2 模擬微觀參數一覽表

- (3)顆粒間及坡面摩擦係數:經摩擦試驗得到 顆粒間、顆粒與坡面摩擦係數各為 0.6 與 0.8。
- (4)阻尼比參數:利用兩部 300 萬動態畫素攝 影機拍攝並計算系統碰撞之回彈係數,搭 配 PFC 手冊提供之阻尼比參數轉換公式, 推算其參數。而現地則參考 Giani 於 1992 年於義大利阿爾卑斯山現地之落石回彈係 數試驗,進行組尼參數轉換(表3)。

表3 現地阻尼參數轉換一覽表(改自 Giani, 1992)

	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

(四)全尺度數值模擬與形狀函數建置

本研究參照前述模擬物理模型實驗之數值方 法,將模擬尺度放大至全尺度案例模型,進而消 除尺度效應之問題。故於紅菜坪 C1 及 C2 區各選 1 處代表性之落石區,並進行堆積區粗糙起伏程 度、坡度、落距、崩退量、節裡間距等因子之模 擬,藉此歸納各因子與落石影響範圍之關係。再 由結果組構基本半圓錐形函數(式 2、式 3,圖 8),建立其三維堆積形貌與影響範圍。形狀函 數中各輸入參數可於現地地形觀察及量測獲得 (圖 9),以期作為後續落石區國土規劃之參考。



圖 8 半圓錐形函數於各方向之展示圖



圖 9 蘭雅里落石區形狀函數之參數示意圖

$$\begin{cases} X = F \times Z \times \sin(\theta) + \frac{B}{Z_{max}} \times Z \\ Y = \frac{F}{2} \times Z \times \cos(\theta) \\ Z_{max} = X_1 \times \tan(\alpha) + X_2 \times \tan(\beta) + X_3 \times \tan(\gamma) \end{cases}$$

式中,X 值為崖錐之縱向堆積長度(X=L+ B);Y 值為橫向堆積寬度(Y=W);Z 值則為 崖錐堆積高度或崖頂至堆積區之高度; $X_1 \cdot X_2 \cdot$ $X_3 為崖錐堆積體角度(<math>\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$)分段變化所 對應之距離,其各距離主要根據現地模擬結果, 回歸出 $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ 與縱向總堆積長度(X)之倍 數關係求得。

 $F = \frac{a_n \times f(t) + c_n \times f(b) + d_n \times f(h) + e_n \times f(H) + f_n \times f(JS) + g_n \times f(S)}{Z_{max}}$ $\overrightarrow{T}_{v} 3$

邊界條件:Z=0~-Z; $\theta = 0 \sim \pi$

T

程

中興工程季刊·第112期·2011年7月·PP. 23-33 http://www.sinotech.org.tw/journal/

式中,h為源頭高度;t為源頭厚度;b為源 頭寬度;H為落距;JS為源頭區平均節裡間距; S為堆積區平均起伏程度;a_n、c_n、d_n、e_n、f_n、 g_n為各參數之權重係數,主要係利用模擬結果, 回歸出適合之函數,再求其割線斜率進行比較, 求出各權重係數。

三、研究結果

(一) 崖線崩退型式歸納

本研究選定背斜軸以東之 7 處落石區(圖 10 右上側,位於 C1 區),以及背斜軸以西之 9 處落石區(圖 10 左下側,位於 C2 區),為代表 性剖面分析區。經 1962~2006 年地形與判釋結果 顯示,研究區範圍內崖下地形受永祿溪侵蝕作用 劇烈,加以背斜構造所伴生之伸張與剪切節理等 弱面影響,其崩退型態區分為減坡後退、平行後 退轉為減坡後退等兩種形態。



(二) 崖線崩退率分析

 E線崩退率分析:若依其 1962 到 2006 年各期 地形及影像區分成 10 個時期來看(圖 11), 其結果顯示各時期平均崩退率以 1998-1999 年 最甚(達 4.71 m/year),其次為 1999-2001 年 崩退率達 1.06 (m/year),第三為 1977-1984 年崩退率達 0.95 (m/year)。推測其與集集地 震或歷年颱風、豪雨事件導致落石崩塌有關。



2. 由各剖面區位平均崩退率比較結果顯示(圖 12),編號4及11剖面平均崩退率最高,分 別為1.24(m/year)及1.36(m/year);其次 為編號5(0.92 m/year)、1(0.87 m/year)及 10(0.87 m/year)等剖面。其中編號10、11 剖面依其層面位態分布屬於傾角較緩之順向坡 型態,而編號4、5 屬於逆向坡型態,推測可 能受到褶皺軸部之伸張節理影響,導致其崩退 速率較高。編號1剖面位於永祿溪向源侵蝕發 展最活躍之區位,加上伸張節理影響,因此導 致其崩退速率較高。另外,其他區位剖面受到 向源侵蝕及節理影響,平均崩退率範圍約 0.3~0.73(m/year)。



(三)室內物理模型試驗與數值模擬試驗比對結果

- 1. 全面崩退型式: (源頭區全部岩塊群同時崩落)
 - (1)比較 45~90 度落石試驗發現(圖 13),地 形坡度越緩其堆積寬(W)、後堆長度 (B)與影響範圍(Runout Area)將較陡 坡者為大,堆積長(L)則由坡度陡者較坡 度緩者為高。

■財團法人中興工程 原問社 ■ SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS,INC.

- (2) 地形坡度陡者 α 及 β 角較坡度緩者為高,γ
 角則反之。當隨著量體增加,W、B、L、
 α、β、γ 將隨之提高,而 45、60 度條件下
 γ 角則較 75、90 度為高。
- 減坡崩退型式:(源頭區落石群由下而上逐次 改變落距並固定墜落位置之方式崩落)
 - (1)比較 45~90 度落石試驗得知(圖 14),於 45 度試驗之 B 隨累積次數而逐次增加之程 度,相較於 60 度以上運動地形為高;而 L、W 及影響範圍則未隨著崩落量體累積 次數增加而顯著提昇。
 - (2)隨著累積堆積次數的增加, α 角將隨之增加, 然 γ 角於 45 及 60 度條件下將隨之降低, 反之於 75 及 90 度則呈增加之趨勢。 另於 45 度條件發現,隨著減坡崩退次數增加, β 角具大幅增加之趨勢。
 - (3)由以上結果得知,減坡崩退條件下,坡度 緩者其堆積地形較寬,堆積角呈上緩下陡 之趨勢;當於陡坡時堆積地形較狹長,上 坡段堆積角則隨之增加;而相較於全面崩 落結果,其影響範圍則無顯著之變化。
- 平行崩退型式:(源頭區落石群以固定高度及 固定平行後退距離方式分次崩落)
 - (1)比較 45~90 度落石試驗發現(圖 15),於 緩角度試驗之 B 相較於其他崩退型式而 言,隨著倒退次數而顯著增加,高角度地 形則反之。而由各角度地形試驗結果顯 示,L 於第一次倒退後,後續兩次倒退均 未向前發展,仍向後方持續堆積,使 W 隨 倒退次數而逐漸增加。另外,堆積影響範 圍隨著平行崩退次數的增加,其兩翼影響 範圍之變化相較於縱向來得顯著。
 - (2)顯見高角度平行崩退將呈狹長狀之堆積地形,若崩退至坡面後,則易形成狹長且高角度之地形。而緩角度平行崩退易形成W較L大之堆積地形,且逐次向後發展成上坡緩、下坡陡之堆積型態。











中興工程季刊·第112期·2011年7月·PP. 23-33 http://www.sinotech.org.tw/journal/

(3)以 PFC3D 模擬 44 組實驗進行比對,其模 擬之 W、L、B 誤差為 8%~15%,而堆積 角誤差為 15%~20%(圖 16),顯見物理 實驗模擬準確度已可達至八成。



圖 16 PFC 3D 模擬一次墜落試驗過程與誤差比對

(四)紅菜坪崖線崩退與崖錐堆積形態之關聯性

比對實驗所歸納之堆積類型與特性,將其堆 積形態歸納為緩坡區:I(全面崩退)-45~60 度、II(減坡崩退)-45~60度、III(平行崩退)-45~60度;次陡坡區:I-60~75度、II-60~75度、 III-60~75度;陡坡區:I-75~90度、II-75~90度、 III-75~90度等型態。根據統計結果顯示,C1 區 崩崖下之堆積計有17處,C2 區崖下堆積計有16 處;其中弱面位態偏逆向坡或斜交坡者計有27 處,發展較偏向長寬比(L/W)較大之高角度崖 錐堆積,且逐步朝崖線發展之趨勢;而弱面位態 偏順向坡者計有6處,堆積發展偏向長寬比 (L/W)較小,且呈現上坡段緩、中坡段陡、下 坡段緩之堆積趨勢。

(五)全尺度數值模擬及形狀函數建置與應用

 模擬結果顯示,縱向落石影響範圍隨著源頭高 度(h)、源頭厚度(t)、落距(H)等參數 增加而提昇;而當平均節理間距(JS)、堆積 區平均起伏程度(S)等參數增加時,縱向影 響範圍則隨之降低;源頭寬度(b)對於縱向 影響範圍則無顯著之影響。顯見縱向及垂直向 岩塊群數量之增加,將有助於縱向岩塊群碰撞

财團法人中興工程顾問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS.INC

交互作用,增加縱向影響範圍;而落距增加則 有助於位能的提昇,並增加其岩塊群運動能 量,然當落石數量有限時,將降低其碰撞交互 作用與能量傳遞,使其落距之影響逐漸降低。

- 橫向落石影響範圍模擬結果顯示,其隨著 h、 b、H、S 等參數增加而提昇;而 JS 增加時, 橫向落石影響範圍則隨之降低;t 對於橫向落 石影響範圍則無顯著之影響。顯見側向及垂直 向岩塊數量增加,亦有助於側向碰撞交互作 用;而增加堆積區平均起伏程度則會抑制落石 群縱向發展,並將能量轉往兩側傳遞,增加其 橫向落石影響範圍。
- 3. 形狀函數建置
 - (1)全面崩退型式:當平均坡度大於 60 度時, 其崖錐堆積形狀函數(圖 17)將呈現上、 中坡段緩及下坡段陡之堆積形態;而平均 運動坡度小於 60 度時,隨著落石量增加, 其崖錐堆積形狀函數(圖 18)將呈現上坡 段陡、中坡段緩、下坡段陡之堆積形態。







- (2)減坡崩退型式:以紅菜坪 1~3 號剖面 為例(平均坡度達 60 度以上),其 歷史上曾發生 4 次減坡崩退。故代入 形狀函數後得知,隨著崩退次數增 加,其形狀函數呈上、中坡段緩及下 坡段陡之堆積形態(圖 19),然堆 積範圍並未顯著增加。另以 10~13 號 剖面落石區為例(平均坡度 40~60 度),其函數反應了堆積形狀隨著崩 退次數呈上坡段緩、中坡段陡、下坡 段緩之堆積形態(圖 20)。
- (3)平行崩退型式:以 4-4'剖面為例(平 均坡度達 60 度以上),隨崩退次數 的增加,其形狀函數將由初始的上 緩、下陡之堆積形態,轉為上陡、下 緩之堆積形態(圖 21)。而平行崩 退則偏向後方發展為主,且崖錐兩翼 具小幅度增加之趨勢。另由 10-10'剖 面分析得知,其函數呈上、中坡段 陡、下坡段緩之堆積型態,然下坡段 隨著落石群累積而逐漸縮減,促使堆 積面轉為均匀坡(圖 22)。
- (4)影響範圍形狀函數(平均坡度達 60 度 以上):如圖 23 所示,紅菜坪 4-4'剖 面落石區崖線自 1962-1999 年發生 3 次顯著之平行崩退,2003-2004 年則 發生 1 次顯著之減坡崩退。經估算得 知,本區縱向落石影響範圍約 334 公 尺,橫向約 126 公尺,縱橫向比約 2.65。根據現地調查結果顯示,目前 崖頂張裂縫分布僅為前次崩退範圍之 1/10,顯見其崖線崩退情形已逐漸趨 於穩定,故未來落石影響範圍多分布 到上、中坡段,超過最大縱向影響範 圍之可能性甚小。

中興工程季刊·第112期·2011年7月·PP. 23-33 http://www.sinotech.org.tw/journal/



中興工程季刊·第112期·2011年7月·PP. 23-33 http://www.sinotech.org.tw/journal/









圖 23 4-4'剖面各期落石影響範圍形狀函數圖

(5)影響範圍形狀函數(平均坡度 40~60 度):如圖 24 所示,紅菜坪 10-10' 剖面 落石區崖線自 1977-1998 年曾發生 2 次平 行崩退,1998-2001 年則發生 2 次減坡崩 退。經形狀函數估算後,得到本區縱向影 響範圍約 181 公尺,橫向約 141 公尺,縱 橫向比約 1.28。其範圍與崖下農舍及經濟 作物相距仍有 50 公尺之距離,然崖頂仍有 相當顯著且大範圍之張裂縫發展,且多數 已發展成約 2~3 公尺深之侵蝕溝。當更大 量落石群崩退時,其崖線崩退型式將可能 由減坡崩退轉變為全面崩退,再次擴大落 石群影響範圍,嚴重威脅崖下保全對象之 財產安全。



圖 24 10-10'剖面各期落石影響範圍形狀函數圖

(6)以上有關紅菜坪落石區之分析比對結果, 誤差為 5%~15%。當分析其它相似落石區時,應可採用相同之函數納入分析設計之 考量。而當崩退型式、地形坡度等相差甚 大時,建議以相同模擬方法重新建置其函 數,並歸納其崩退型式與堆積形態,以供 後續相關落石區規劃設計之參考。

四、結論

- (一)本文以現地調查、地形與航照影像分析不同時期紅菜坪之崖線崩退與崖錐地形變化,並進行室內物理模型實驗,藉此釐清崖線崩退與堆積形態之關係。
- (二)總合崖線崩退率、崖線崩退型式與崖錐堆積 形態等歸納結果,其崖線崩退率與次數反應 了各時期落石崩落量與各區位之落石潛勢; 崖線崩退類型則對應了落石群之崩退特性; 而不同的落石群崩落方式與運動地形坡度將 產生不同之崖錐堆積形態與影響範圍。故本 研究歸納了兩種主要崖線崩退類型(減坡崩 退與平行轉減坡崩退型式)、三種崩退型式 (全面崩退、減坡崩退、平行崩退)及九種 崖錐堆積形態。其可作為沉積岩區背斜構造 所形成之落石區崖線崩退潛勢、型式及影響 範圍之研判。

_____财圈法人中興工程顾問社

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC

中興工程季刊·第112期·2011年7月·PP. 23-33 http://www.sinotech.org.tw/journal/

- (三)以工程應用層面而言,以形狀函數建置落石 堆積形態與影響範圍,除可藉由現地觀察與 量測結果推估落石群影響範圍外。亦可經由 形狀函數將數值模擬結果快速反映於廣域範 圍,降低數值模擬所花費之分析時間。崖錐 堆積形狀函數應用上,可供相關區域(如中 橫沿線)快速估算上游集水區之落石崩塌體 積,迅速掌握落石型崩塌引致堰塞湖之規 模;而影響範圍形狀函數則可搭配落石型山 崩潛勢結果,估算各落石區之影響範圍,並 有助於後續落石型山崩風險評估之發展。
- (四)未來工程應用上,落石群衝擊明隧道、落石 網、落石柵配置與強度設計等,均可用分離 元素軟體(PFC3D)進行更精進之研究。

參考文獻

- Belytschko, T. (1983) An Overview of Semidiscretization and Time Integration Procedures, in Computational Methods for Transient Analysis, Ch. 1, pp.1-65
- Blikra, L. H. and Nemec, W. (1998) Postglacial Colluvium in Western Norway: Depositional Processes, Facies and Palaeoclimatic Record, Sedimentology, 45, pp.909-959
- Curry, A. M. and Morris, C. J. (2004) Lateglacial and Holocene Talus Slope Development and Rockwall Retreat on Mynydd Du, UK, Geomorphology, 58, pp.85-106
- Evans, S. G. and Hungr, O. (1993) The Assessment of Rockfall Hazard at the Base of Talus Slopes, Canadian Geotechnical Journal, 30, pp.620-636
- Giani, G. P. (1992) Rock Slope Stability Analysis, Balkema. Rotterdam, pp.361

- Guzzetti, F., Reichenbach, P. and Wieczorek, G. F. (2003) Rockfall Hazard and Risk Assessment in the Yosemite Valley, California, USA, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, 491-503
- Hinchliffe, S., and Ballantyne, C. K. (1999) Talus Accumulation and Rockwall Retreat, Trotternish, Isle of Skye, Scotland, Scottish Geographical Journal, 115, pp.53-70
- Hutchinson, J. N., Millar, D. L. and Trewin, N. H. (2001) Coast Erosion at a Nuclear Waste Shaft, Dounreay, Scotland, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 34, pp.245-268
- Itasca Consulting Group Inc. (2002) PFC3D Theory and Background, Version 3.0, Minneapolis, pp.1-26
- Ni, W. J. (2005) Ground Water Drainage and Recharge by Geomorphically Active Gullies, Master Thesis of Civil Engineering Department, National Taiwan University
- Obanawa, H. and Matsukura, Y. (2008) Cliff Retreat and Talus Development at the Caldera Wall of Mount St. Helens: Computer Simulation Using a Mathematical Model, Gomorphology, 97, pp.697-711
- Scheidegger A. E. (1973) On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides, Rock Mechanics, 5, pp.231-236
- Schumm, S. A. (1956) The Role of Creep and Rainwash on the Retreat of Badland Slopes, American Journal of Science, 254, pp.693-706
- 李濬易(2002) ROCKPATH 程式剛體版之試驗驗證與應 用,中原大學土木工程所碩士論文,第3-1-3-14頁
- 顧承宇,陳錦清,王銘德(1996)落石問題之數值模擬,岩盤工程研討會論文集,第243-252頁,台北
- 羅佳明、林銘郎、李偉竹、李宏輝(2007)物理模型結 合顆粒力學模擬於崖錐堆積形態之研究,台灣公共工 程學刊,第3卷,第1期,第33-40頁
- 羅佳明(2009)落石區崖線崩退與崖錐堆積形態之研 究,台灣大學土木工程所博士論文,第3-1-7-60頁

應用程式 公開發售

 結合 ETABS 之位移法耐震性能設計及評析程式

 售價:新台幣 9, 190 元/套(含報告)

 訂購電話: (02)2769-2131 轉 21406 馬小姐

 傳 真: (02)2766-9184

 E-MAIL: pony@sinotech.org.tw