# 遽變式山崩調查與動態模擬之研究

羅佳明 林彦享 鄭添耀 魏倫瑋 林銘郎 董家鈞 李錫堤

<sup>1</sup>中興工程顧問社大地工程研究中心研究員 <sup>2</sup>國立台灣大學土木工程學系教授 <sup>3</sup>國立中央大學應用地質研究所副教授 <sup>4</sup>國立中央大學應用地質研究所教授

# 摘 要

本文以小林村上游獻肚山遽變式山崩為主要研究對象,利用不同時期數值 高程模型與地形圖等加值資訊,搭配分離元素法為基礎之模擬軟體(PFC3D), 進行災前地形分析與災中山崩動態模擬。研究成果顯示,位於支流與主流交 會處之高山聚落(如小林村與達邦部落等)或重大工程(如霧社水庫左岸)範圍 內,其上游均具明顯之多時期崩積層堆積地形;當源頭區岩體滑動發生時, 其運動速度約在 5~10m/sec 之間,接著高陡變之地形將使岩體滑動轉為高速 (>30m/sec)之岩屑崩洩,並以極快之運動速度摧毀下游聚落。

關鍵詞:遽變式山崩、分離元素法、地形分析。

# Kinematic process of the catastrophic landslide through investigation and numerical simulation

# ABSTRACT

This paper presents results of a case study on the Hsiaolin catastrophic landslide, including its kinematic process and the geometry of deposition. Based on geomorphologic analysis, the landslide initiated in thick, multi-aged colluvium soils at the headwaters of a small stream upslope of Hsiolin village. A 3D discrete element program, PFC3D was used to model interaction between the landslide and with the Hsiaolin village. The landslide converted from debris and rock slide to debris avalanche during the kinematic process. The predicted velocity of initial motion was about 5~10m/sec from source area. Then the predicted velocity was higher than 30m/sec on steep terrain, a velocity which permitted and the debris to both reach and cross Qishanxi stream and destroyed downstream village.

Key Words: catastrophic landslide, discrete element method, geomorphologic analysis.

# 一、前 言

2009年8月9日清晨6點多,小林村上游獻肚山因 豪雨誘發大規模山崩,造成整個小林村減村之慘劇 (圖1與圖2)。事件發生後,已有研究針對其山崩機制 進行深入調查與分析(李錫堤等人,2009; Tsou, 2010),藉此釐清獻肚山發生山崩之主因。根據李錫 堤等人現場調查結果(李錫堤等人,2009),此次獻肚 山發生山崩之癥結點有三:(1)地質構造上,滑動區北 側地層層面與南側東西向節理暨小斷層共同形成一 組向西傾斜且呈虛懸狀態之不利岩楔;(2)發生滑動的 溪溝源頭儲積甚厚之老崩積層與新崩積物,有利於地 表水入滲,使新鮮頁岩上方之破碎頁岩與崩積物容易 含水飽和;(3)滑動區坡高太高,衝擊能量太大,擴大 了災害之程度。顯見獻肚山源頭之地形、地質與崩積 層堆積分布等條件,均為此次山崩的重要因素之一。

由於地形影響,獻肚山源頭發生大規模土石滑動 (Rockslide)後,於海拔約1000m之地形陡變區,突然 轉變為高速之岩屑崩洩(Debris Avalanche),並於高階 地發生土石溢流之現象,導致大量土石越過高階地, 瞬間摧毀小林村,故本研究稱此次山崩事件為"遽變 式山崩"(Catastrophic Landslide)。然關於獻肚山與小 林村周緣之地形演育與山崩歷史,甚少文獻進行深入 探討,故為本研究探討的重點之一,並將作為後續研 判同類型遽變式山崩之地形參考依據。

此外,大規模量體與高速運動之遽變式山崩,往 往造成岩體滑動型山崩於運動中破碎成數個塊體,並 轉為岩屑崩洩型山崩,此為相當值得注意之地質現象 (Steven and Simon, 2006)。況且,以遽變式山崩而言, 運動速度是決定山崩破壞潛能之重要參數,往往幾秒 就造成相當大規模之災害(Hungr, 2007)。尤其,遽變 式山崩運動過程中,因地形造成之塊體分離、碰撞交 互作用、運動型態轉變(如由塊體滑動轉為顆粒流)等 特性,對於下游影響範圍之劃設與聚落保全對象之預 警,均為相當重要之評估要素。

然而,關於遽變式山崩之運動過程甚少文獻提 及,對於山崩運動過程之塊體分離、碰撞交互作用、 山崩運動型態轉變等討論,更是相當缺乏。因此本研 究除以歷史地形資料與遙測影像,說明獻肚山地形變 遷歷史與其特徵歸納外。亦將利用分離元素法建構獻 肚山遽變式山崩模型,藉由運動速度之監測,說明整 個運動過程與特性,期能作為同類型遽變式山崩模 擬、運動特性歸納與影響範圍劃設評估之參考。



圖1 研究區域災前後三維航照展示圖



圖2 研究區域災前後地形與重要地標分布圖

# 二、研究方法

本研究工作項目包含現場地質調查、歷史地形分 析、數值模擬分析等。主要將現場調查所得之遽變式 山崩現象,適度簡化建置數值模型,並以數值模擬與 物理模型試驗結果進行比對,待數值模擬比對正確 後,再將此方法應用於全尺度數值模擬,藉此說明遽 變式山崩之動態過程。各方法與分析重點說明如下:

#### 2.1 歷史地形與地貌分析

本研究區域位於高雄市甲仙區(圖2),本文所蒐集 之地形資料包含1904(1/20,000)、1936(1/50,000)、 1996(1/25,000)等年份之地形圖,並蒐集2004與2009 年農林航空測量所,測繪之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)與正射航照(1/10,000),加強地 形與地貌變化之輔助說明。根據災前地形資料(2004 年 DEM),其重要地標由西至東依序為旗山溪 (EL.365m)、小林村(位於低灘地與高階地之間, EL.375-380m)、高階地(EL.450-470m)、590高地(位於 高階地頂端,EL.590m)、獻肚山(EL.1,445m)等。源 頭區與堆積區高程差(坡高)約850m,源頭區至高階地 平均坡度約30度~50度,為造成此次遽變式山崩之重 要關鍵地形。而獻肚山源頭所發育之水系以無名溪A 為主,其次為無名溪B,故兩大支流於本次遽變式山 崩事件中,均扮演著相當重要之角色。

另根據1959年拍攝之三維航照影像(圖3),獻肚山 源頭區呈現相當明顯之反凸地形,而無名溪A上游右 岸水系發展相對於左岸較不明顯,且具有滑動塊體擠 壓上游河道之跡象(如圖3中箭頭指示部分)。590高地 位於高階地之頂端,其可能為早期山崩活動之堆積 體,促使無名溪A河道向西北方向偏轉。無名溪B河 道約略平行無名溪A,其上游水系發展至海拔700m附 近,即可能受到滑動塊體掩蓋而阻斷。

由以上地形說明顯示,獻度山遽變式山崩歷史地 形與地貌分析重點對象應包含無名溪A與590高地 等,藉此釐清獻肚山源頭河谷崩積層堆積發育與支流 河道變遷之關聯性。



圖3 1959年獻肚山三維航照展示圖

## 2.2 現場地質調查

為輔助現場地質調查,故本研究所採用之野外地 質查核底圖,係以李錫堤等人於2009年所繪製之 1/10,000獻肚山新測地質圖(圖4)為主。地質調查之目 的主要藉由現場發現之地質證據,釐清可能之山崩機 制,並適度簡化其山崩特性,做為數值模型建置之參 考。本研究分別於2009年12月、2010年1月及2011年6 月等,進行現地勘查與現場地貌比對,搭配地形分析 結果,輔助說明河道地形變化過程與山崩機制,並依 其堆積分布調查結果,建立數值模型比對之依據。



圖4 獻肚山新測地質圖(李錫堤等人,2009)

2.3 數值模擬分析

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,依其力一位移定律計算 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。

#### 2.3.1 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:

 $k = \frac{k^{[A]}k^{[B]}}{k^{[A]} + k^{[B]}} \dots \vec{t} \ 1$ 

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的設定,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),以結合元素群構成另一種形狀,當所 施加元素之外力大於鍵結力時,其鍵結便會斷裂。

2.3.2 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,

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組 尼,主要係運用Belytschko於1983年所提出之接觸消 能計算方式(式2)。

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

其中,ki+1為計算下一個Time step內時間之正向 或切向勁度;  $\alpha$ 為安全因子(程式中若未設定該參 數,則內定為1);ki為接觸勁度;ci為阻尼比參數;  $\Delta$ t0為元素接觸時,該Time step之時間。

#### 2.3.3 數值模擬比對

由於現場山崩堆積經長期人為或自然等因素擾動下,使其現地堆積與原始堆積型態可能相差甚多,故較難以做為數值模擬之比對依據。故本研究設計室內物理模型進行遽變式山崩試驗,並做為數值模擬比對之依據,檢核數值工具之適用性。本研究依其山崩特性適度簡化其物理模型,整體模型分為源頭、運動、堆積等三大區(圖5)。其模型配置簡述如下:

- (a) 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 6),
   形成 3 組節理之模擬岩體。
- (b) 山崩模擬台尺度:主要組成單元包含源頭區(長、 寬各 30cm,高 70cm)、山崩模擬運動區 100×120cm(長×寬)、堆積區 250×250cm(長×寬)。
- (c) 堆積型貌量測方法:主要利用 1000 萬畫素相機及 300 萬動態畫素攝影機,進行運動期間崖錐堆積形貌之動態畫面擷取,並利用被動式立體成像法(Ni, 2005),進行多段線型雷射(輸出功率 10mW)掃描,以待測點(拍攝之雷射線影像)的二維影像座標系統下之座標值(ρ,γ)及預設控制點,反算透視中心之座標位置及相機相關之參數,即可透過二維影像反求得空間中一點之三維座標值(式3)。後續再進行模擬崖錐 DTM 之製作。關於數值模擬比對項目包含堆積寬度(W)、長度(L)、後堆長度(B)及堆積面的坡角,分別表示為α、β、γ等(圖 7)。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = p + \lambda M \begin{bmatrix} \rho \\ \gamma \\ 1 \end{bmatrix} \dots \dots \bigstar 3$$
(1)

其中,p為透視中心點座標;M代表相機相關參 數;ρ與γ為二維影像座標系統下之座標值;x、y、z 為空間中待求之三維座標值。

## 2.3.4 數值模型參數校正

本研究採用PFC 3D軟體建構獻肚山遽變式山崩 之數值模型,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(取用鹽水坑頁岩樣本)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8),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遽變式山崩運動過 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,以求取最符合山崩堆積現況 之摩擦係數。

表1	現地阻	尼.	參數轉	鼻換一	覽表	(改	自	Giani,	1994
~~ ·		· 🖵 ·	2 3 1	1 125	JT U ~			Olulli,	

	正向回	轉換正向	切向回	轉換切向
	彈係數	阻尼比	彈係數	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



圖5 室內物理模型尺度與實體展示(羅佳明, 2009)











三、歷史地形與地貌分析結果

本節主要依其1904、1936、1996、2009等地形分析結果,探討無名溪A與590高地等之地形與地貌變化,其結果說明如下:

- (a) 1904年:標繪 1904年地形圖之水系分布顯示(圖 9(a)),無名溪A於發源於獻肚山,整個水系發育 呈樹枝狀水系(Dendritic Drainage Pattern)分布。於 此階段,低灘地上尚未有小林村發展跡象,而獻 肚山源頭區內呈反凸之堆積地形特徵較不明顯。
- (b) 1936年:圖9(b)顯示,於1936年無名溪A上游 右岸已不見水系發展,亦可發現明顯之反凸地形 特徵。顯見於這個階段無名溪A上游右岸發生崩 塌之跡象,導致上游右岸水系地形遭到破壞,並 呈現崩積物堆積之反凸地形。另於高階地頂端發 現相當明顯之反凸地形,其可能為1904-1936年 間發生之山崩堆積而成之地形,並造成無名溪A 中游河道方向稍微偏轉(原始河道位置於圖9(b) 之虛線部分)。而小林村聚落於此階段,已於低灘 地開始發展之跡象。
- (c) 1996年:圖 9(c)顯示,獻肚山源頭區於 1996年後,可發現更顯著之反凸堆積地形特徵,且於堆積體上水系發展明顯,使其源頭區堆積體分割成數個區塊。由此得知,獻肚山源頭山崩活動性甚高,使其源頭堆積量體由 1936-1996年間大幅增加,並促使上游水系於崩積體上快速下切發展,形成獻肚山反凸地形之樣貌。而高階地頂端之

590 高地於 1936-1996 年間,反凸地形變化不大, 此時已有部分農墾跡象於高階地上發展。

(d) 2009年:圖9(d)顯示,莫拉克颱風後,獻肚山源 頭已發生大規模岩體滑動(含上覆之崩積層),590 高地亦受到山崩事件之影響而崩潰(損失約 20m 之高程),形成平坦之地形。而小林村因此次山崩 事件而幾乎完全摧毀,多數山崩量體則堆積於無 名溪A之河谷與下游(旗山溪之右岸)。目前獻肚 山源頭區,仍有部分崩積層堆積於河谷上,使其 維持反凸之堆積地形。



圖9(a) 1904年獻肚山地形圖



圖9(b) 1936年獻肚山地形圖



圖9(c) 1996年獻肚山地形圖



(e) 另依據 2004 年與 2009 年 DEM 相減後之高差分 布資料得知(圖 10),此次遽變式山崩事件源頭區 共計損失約 2,5000,000m<sup>3</sup>之土方量,崩滑深度最 大達 84m。整個山崩範圍長約 3km、寬約 1-1.5km,總面積達 109ha。根據 Dong et al (2010) 針對此次山崩引致之天然壩研究成果顯示,其平 均壩高約 70m、寬約 450-750m。而整個山崩運動 距離約(Runout distance)為 3,278m,於旗山溪右岸 之堆積體最高堆積(Run-up height)至475m之高程 範圍,這些資料均將做為數值模擬之比對依據。



圖10 災前後DEM (2009年-2004年)高差分布圖

# 四、現場地質調查結果

現場地質調查主要搭配地形分析結果,釐清獻肚 山發生遽變式山崩之機制,並根據現場調查之證據, 做為數值模型建置與比對之參考。其現場調查之重要 成果說明如下:

- (a) 根據李錫堤等人繪製之地質圖顯示(圖4),本研究 區周緣出露之地層為上新世鹽水坑頁岩及糖恩 山砂岩,主要岩性分別為頁岩與砂岩或泥質砂 岩。此次遽變式山崩主要崩滑材料以鹽水坑頁岩 材料為主,可於旗山溪右岸與無名溪 A 河道上, 發現相當多頁岩質材料之岩塊(圖11)。故於數值 模型建置上,將以鹽水坑頁岩之材料參數做為主 要參數設定之依據。
- (b) 由地質圖上之位態顯示(圖 4),無名溪 A 上游右 岸屬順向坡、左岸為逆向坡,以其獻肚山源頭山 崩機制與堆積地形而言,大致可分為三個階段(圖 12)。第一為河床下切導致兩岸坡趾透空階段:由 於無名溪 A 上游河床下切侵蝕作用劇烈,導致兩 岸邊坡趾部切除透空;第二為兩岸岩體滑動階 段:由於趾部下切透空,導致右岸順向坡平面型 滑動(圖 13),而左岸臨河岸邊坡則沿弱面發生邊 坡滑動(圖 14),並於河床上堆積大量崩積材料, 形成獻肚山反凸地形;第三階段因超大豪雨,導 致整個崩積層往下游運移,而運移過程中由於河 床受到崩積層刮蝕與劇烈之下切,更連帶造成兩 岸再次發生岩體滑動,增加此次山崩之規模。
- (c) 於高階地頂端調查結果得知(圖 15),590 高地由於受到此次山崩強烈撞擊,導致整個 590 高地潰散,形成高程約 570m 之平坦地形。而 590 高地的崩潰,亦造成部分岩屑(約 1/3 總崩塌量體)溢流衝至高階地上,並高速衝至小林村。顯見此次山

Aug. 25-26, 2011 Taoyuan,Taiwan

崩事件由於崩塌量體太大,且受地形坡度與高落 差之影響,導致590高地無法承受遽變式山崩之 衝擊,形成小林村滅村之關鍵。故本研究將590 高地崩潰之情形,考量至數值模型,使其遽變式 山崩運動過程模擬結果更趨合理。



圖11 無名溪A與天然壩堆積狀況(2009年10月拍攝)



圖12 獻肚山源頭崩塌與堆積過程示意圖



圖13 無名溪A上游右岸順向坡滑動情形



圖14 無名溪A上游左岸邊坡滑動情形



圖15 原590高地崩潰造成岩屑溢流至高階地情形

# 五、數值模擬分析結果

本研究於遽變式山崩數值模型建立前,將先進行 物理實驗與數值模擬進行比對,以測試數值工具之可 行性。待模擬行為與實驗結果相符後,再建立全尺度 之數值模型,以輔助說明整個遽變式山崩運動過程。

#### 5.1 數值模擬比對

物理實驗之數值分析工作,係以物理實驗模型配 置為基礎,作為數值模型及參數設定之簡化依據。數 值物理模型主要採三維模擬分析,模擬遽變式山崩運 動時,岩塊間或岩塊與運動地形碰撞及堆積擴散之行 為。數值物理實驗分析主要目的在模擬規劃實驗之觀 察特徵,測定其數值分析參數、元素群運動及堆積行 為等,以檢核數值分析方法之可行性。

物理實驗模型中包含運動區與堆積區部分主要 以牆元素進行模擬,而球元素主要用來模擬落石岩塊 材料(圖16)。其數值模型建立方法與模擬參數,則參 考羅佳明(2009)之建置與設定方式。整個模擬實驗採 用360個、760個與1080個岩塊(51,840個球元素)同時 崩滑,運動地形坡度採用45度與60度兩種,進行小尺 度遽變式山崩模擬比對。整個模擬運動過程中,由於 岩塊群於高角度運動地形作用下,易產生自由落體之 運動情形,故於數值模擬中將Local damping設定為 0,使其元素於未接觸(碰撞)條件時,能量不會隨模擬 時間而消耗,以增加模擬結果之合理性。

以數值模擬與物理實驗比對結果顯示,其水平堆 積長度之模擬平均誤差為7%-10%、水平堆積寬度為 9%-12%、水平後堆長度為8%-12%, $\alpha \times \beta \times \gamma$ 堆積 角度誤差為為13%-22%,而最遠堆積距離(包含縱橫 向)誤差為10%-13%。





圖16(b) 比對數值型與物理實驗過程(右側視比對)



圖16(c) 比對數值型與物理實驗過程(左上視比對)

# 5.2 數值模型建立與參數校正

# 5.2.1 數值模型建立

基於電腦計算能力之限制,因此本研究於滑動面 及運動地形以40x40m之DEM建構而成。案例模擬部 分僅考量由滑動至堆積過程之推測,對於促崩因子 (降雨入滲引致滑動)部分因軟體版本(PFC3D 3.0)功 能之限制,以及獻肚山堆積形成過程(即第四節第b項 所提及前兩個階段部分),於本文均未加入討論。

獻肚山遽變式山崩數值模型之量體損失區,係由 災後(2009年) 40×40Mdem建構而成, 堆積區則由災前 (2004年) 40×40Mdem建構而成。故本研究於程式中共 計設定13,456個牆元素建構地形(圖17),整個數值模 型總長約4300m(由東至西),寬約2300m(由北至南)。 而崩滑體部分,分為主要崩滑體與590高地,分別採 用25,000顆與2,000顆球元素建構而成。主要將崩滑前 地形以牆元素建構後,再將球元素群填入崩滑範圍。 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。球元素半徑為 5-6m, 共計27,000顆, 故總崩塌體積2.47e7m3。另外, 於主要崩滑體上,分成前段、中段、後段等三區進行 速度監測,以輔助說明岩塊群運動過程之交互作用 (圖18)。由於獻肚山遽變式山崩事件係由豪雨所誘 發,且滑動過程中碎解之岩塊表面上,具有風化銹染 之跡象。因此分析時,除了將滑動面上的摩擦係數下 降外,亦將岩石間的鍵結強度弱化,以符合現場觀察 到之岩屑崩瀉運動行為。



圖17 獻肚山遽變式山崩數值模型



圖18 崩滑體速度監測分區示意圖

5.2.2 材料參數選定

(a) 顆粒接觸勁度與鍵結強度:於現場取直徑 10 公 分、高 25 公分之鹽水坑頁岩試體進行單壓實驗, 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(表 2 與圖 8),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元素接觸勁 度與鍵結強度之微觀參數(表 3)。

- (b) 阻尼係數:係參考 Giani(1994)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 設定岩塊碰撞之阻尼係數(Viscous damping)。由 於災前無名溪 A 周緣與獻肚山源頭區,土壤坡面 覆蓋茂密之植生,故於正切向阻尼係數分別選用 0.4 與 0.2,做為本參數設定之參考值。
- (c) 摩擦係數:係於現地量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。而堆積型態 比對項目包含滑動體運移距離(Runout distance)、堆積爬升高度(Run-up height)等。其結 果顯示,當模擬元素間摩擦係數為0.1時,模擬 堆積地形與堆積型態比對項目及災後航照結果 最為吻合(表4與圖19),其最大滑移速度可達70 公尺/每秒(約252公里/小時),並使整個崩塌體堆 積至旗山溪對岸(右岸)邊坡。因此,本研究將選 用此項參數建構之數值模型,說明獻肚山遽變式 山崩動態運移過程。

表2 鹽水坑頁岩試體數值模擬與實際單壓比對結果

	實際單壓結果	模擬單壓結果
	(鹽水坑頁岩)	(鹽水坑頁岩)
單位重	2,600 kg/m <sup>3</sup>	2,600 kg/m <sup>3</sup>
楊氏模數 (Ec)	4.8GPa	4.76GPa
單壓強度	15.8MPa	16.0MPa

表3PFC數值模型參數一覽表

<b>众 赵 石 口</b>	單壓實驗	全尺度數值
<b>参</b> 數項日	模擬參數	模型參數
模擬體積 (m <sup>3</sup> )	2.67e-3	2.47e7
牆元素數量	2	13,456
球元素數量	28,250	27,000
球元素單位重(kg/m <sup>3</sup> )	2,600	2,600
球元素半徑分布範圍(m)	0.0025-0.003	5-6
正向勁度(KN/m)	5e7-6e7	4.8e10-5e10
切向勁度(KN/m)	2.5e7-3e7	4.8e10-5e10
球元素模摩擦係數	0.6	0.05-0.2
牆元素摩擦係數	0.6	0.6
平行鍵結正向勁度(KN/m <sup>3</sup> )	8e11-9.5e11	4e8-4.8e8
平行鍵結切向勁度(KN/m <sup>3</sup> )	4e11-4.8e11	2e8-2.4e8
平行鍵結正向強度(Mpa)	16	16
平行鍵結切向強度(MPa)	8	8
正向阻尼係數	0.4	0.4
切向阻尼係數	0.2	0.2

表4 个问摩擦係數模擬比對結果					
摩擦係數	山崩運移距離(m)	堆積爬升高度(m)			
0.05	3,371	583			
0.1	3,275	474			
0.15	3,041	412			
0.2	2,987	388			
災前後測量成果(DEM)	3,278	475			



圖19 數值模擬成果比對災後航照圖

# 5.3 遽變式山崩運動過程模擬

本研究以2009年莫拉克颱風引致之獻肚山遽變 式山崩為主要模擬對象,探討其山崩運動過程。而為 說明獻肚山遽變式山崩運動過程,除監測前段、中 段、後段等三區之運動速度外,並將分別說明X、Y、 Z等方向之速度變化,藉此釐清整個山崩運動之關鍵 過程。其數值模擬結果,分別說明如下:

- (a) 圖 20 係事先於程式中分別設置前段(藍色)、中段 (黃色)、後段(綠色)、590 高地(紅色)等區不同色 塊,以輔助說明獻肚山遽變式山崩過程中之碰撞 交互作用與堆積行為。圖 21 則將速度變化結果 呈現至三維航照模型中,另搭配圖 22 運動過程 速度監測成果,輔助說明其關鍵運動過程。
- (b) 由圖 21 與圖 22 速度變化與監測成果得知,獻肚山遽變式山崩於 10-15sec 間達到 70m/sec (252km/hr)之最高速度,此時主要崩滑體正由山崩源頭區崩滑至高階地頂端。約 1/3 崩滑體於高階地上方運移,其速度約 32-50m/sec (115-180km/hr);於 30-65sec 階段,多數崩滑體導入無名溪 A 河道內,其速度達 30-62m/sec (108-223km/hr),並於 60-70sec 間衝出旗山溪,撞擊至河床對岸(旗山溪右岸);約 1/10 崩滑體導入無名溪 B,其速度可達 45-68m/sec (162-245km/hr),顯見其地勢陡峻。另於分區速度監測過程中,發現前段、中段、後段、590 高地等區之運動速度均有顯著之差異,代表整個遽變式山崩運動過程中,碰撞交互作用與岩塊之強度喪失,均可能影響其運動速度與能量傳遞。
- (c) 監測 X 方向之山崩運動速度得知,各監測區發生 最高速度分別為 15sec(前段區,達 64m/sec)、 30sec(中段區,達 64m/sec)、39sec(後段區,達

44m/sec) (圖 22a 與圖 22c)。主崩滑體於這些階 段,正好由源頭區崩滑至高階地頂端,且各區分 別於2 sec、5 sec、9 sec 均開始產生較大之速度差 異,表示主崩滑體於初始滑動階段由於陡變地形 影響而開始崩解,並分別以最高速度往高階地方 向崩滑。此項結果反應其獻肚山源頭岩屑與岩體 滑動後(Rock/Debris slide),因地形轉陡,導致主 崩滑體潰散,形成岩屑崩洩(Debris Avalanche)型 態,以極高速度往下游崩滑。約 15sec,前段區 崩滑體撞擊到 590 高地(圖 20c 與圖 21c),導致 590 高地開始崩潰,亦造成前段區之運動速度因 撞擊而逐漸降低(圖 22c 與圖 22d)。約 50-75sec, 主崩滑體與 590 高地突然開始加速(圖 22a-圖 22d)。其可能為 590 高地潰散後,部分崩滑體溢 流至高階地上,並通過高階地終點(小林村後 方),接著高階地與低灘地間的落差,造成崩滑體 再次加速。約 65sec,小林村絕大多數房舍已受 到土石衝擊而摧毀或掩埋,多數殘骸因高速撞擊 而沖至旗山溪右岸。而多數崩滑體撞擊 590 高地 後,多落入無名溪A之河道中,此時前段區受到 後方的崩滑體撞擊與能量傳遞,使其加速衝出河 口(圖 20e、圖 21e 與圖 22c,約 40sec 時加速), 並衝擊至旗山溪右岸。整個數值模擬歷時約 112sec,此時所有元素以停止,並形成天然壩。

- (d) 監測 Y 方向之山崩運動速度得知,其最高速度分別於 26sec(前段區,達 20m/sec)、35sec(中段區,達 22m/sec)、44sec(後段區,達 21m/sec)與27sec(590高地,達 17m/sec)(圖 22e-圖 22h)發生。於此階段,前段區崩滑體已造成 590高地崩潰,促使部分崩滑體加速往高階地南側崩滑(於高階地上快速溢流擴散)。而 Y 方向運動速度最小值則分別發生於 18sec(前段區,達 42m/sec)、35sec(中段區,達 42m/sec)與44sec(後段區,達21m/sec),其代表部分崩滑體落入無名溪 B,並因高陡地形影響而高速往北側崩滑。
- (e) 監測 Z 方向之山崩運動速度得知,崩滑體幾乎以 顯著之負值速度運動,其代表獻肚山高陡之地 形,導致崩滑體高速向下運動(自由落體或往下游 崩滑)(圖 22i-圖 22l)。而正值之乙方向運動速度, 則分別發生於 16-67sec(前段區, 達 5-20m/sec)、 20-53sec(中段區,達 3-18m/sec)、32-68sec(後段 區,達 3-15m/sec)與 17-63sec(590 高地,達 5-19m/sec),其代表岩塊群因顯著之碰撞交互作 用與陡變之地形,造成部分崩滑體岩塊於高階地 上跳動,亦或於旗山溪衝上右岸邊坡(run-up)。而 當前段區崩滑體撞擊 590 高地時,其Z方向之正 值速度則瞬間增加,並促使590高地負值速度提 升(圖 22k-圖 22l)。其表示此時前段區崩滑體因撞 擊而使部分岩塊瞬間躍起,590 高地則因撞擊能 量的傳遞而瞬間崩潰,並於高階地上往小林村方 向快速崩滑。
- (f) 另於模擬過程中,統計元素鍵結斷裂數量(圖 23) 與顆粒接觸數量(圖 24)結果得知,約85%之鍵結於5sec後斷裂,其反映了滑動體於5sec即開始分裂成岩屑,並開始轉換山崩型態。接著由源頭至高階地間之陡變之地形,大幅降低崩滑體間之 接觸數量(僅接觸約 23%),當崩滑體撞擊至590高地後,其接觸數量將增加15%。而15-45sec期間,多數岩屑開始於高階地與無名溪A、B 擴散,造成接觸數量將降低6%。於50sec後,部分岩屑

材料到達旗山溪右岸或停滯於無名溪 A,開始形成天然壩。於105sec後,旗山溪上游之天然壩已 構築完成,其顆粒接觸數量亦趨於穩定。



圖20 獻肚山遽變式山崩運動過程模擬結果





圖22(a)-(d) X方向速度監測結果





# 六、後續應用議題

關於本研究所建立之全尺度數值模型,係針對獻 肚山遽變式山崩為對象進行模型建置,並利用地形分 析方法探討其山崩歷史,歸納此類型山崩之地形、地 質與運動特性,故其後續相關應用規劃如下:

- (a) 同類型山崩區位劃設:由獻肚山遽變式山崩案例 得知,山崩發生前之地質與地形特性有三:(1) 地質構造條件:源頭支流兩岸邊坡具備順逆向地 層構成之楔形河谷;(2)源頭地形條件:源頭楔形 河谷內呈反凸之堆積地形,且堆積體趾部受侵蝕 或崩塌而呈不穩定狀態;(3)河谷地形特徵:支流 河谷受兩岸崩滑體擠壓而轉向或束縮,或下游呈 現崖錐或土石流沖積扇堆積地形。目前本研究已 根據上述條件,於臺灣部分山區聚落與重大工程 設施,進行疑似同類型山崩區位初步劃設。其 中,阿里山鄉達邦部落(圖 25)與霧社水庫蓄水區 左岸(圖 26),均具有相似之地質與地形特性,當 源頭發生遽變式山崩時,均可能造成重大之災 害,為後續建議持續注意之重點區域。
- (b) 山崩潛勢結合影響範圍評估:臺灣都會區與高山 地區山崩潛勢與地質災害敏感區之劃設已執行 近八年時間,然由於過去山崩模擬技術尚未成 熟,故對於這些中高山崩潛勢或地質災害敏感區 之崩塌影響範圍評估,尚未有進一步之研究與具 體成果。因此,本研究所採用之數值模擬方法, 可擬補過去山崩模擬技術之不足,結合山崩潛勢 評估成果作為中高潛勢影響範圍評估之依據。然 目前數值工具尚未加入促崩因子之影響,故為後 續本研究持續精進之重點。
- (c) 災前情境模擬展示:其數值模型亦可搭配邊坡監 測與穩定分析成果(如以 STABLE、FLAC 或 MIDAS-GTS 進行穩定分析),提供災前情境模擬 展示。以遽變式山崩運移之動態方式進行呈現, 除可提供災防單位參考外,亦可將其情境模擬成 果發布至網路平台,增加警示之作用。
- (d) 下游聚落預警系統規劃:根據數值模擬之運動速度與影響範圍,進行預警時機與下游保全對象避難場所規劃,並盡量將預警系統設置區位避開可能發生之影響範圍,增進系統於災中應變與災前預警之可行性。



圖25 阿里山鄉達邦部落上游源頭堆積區位示意圖



圖26 霧社水庫蓄水區左岸源頭堆積區位示意圖

# 七、結論

本研究主要探討遽變式山崩歷史地形演育與其 運動特性,經多時期地形圖與遙測影像輔助判釋地貌 變化,可有助於釐清其山崩機制與地形發育過程;而 藉由分離元素法所建置之數值模型,將有助於了解遽 變式山崩之運動過程與速度變化,作為下游保全對象 安全評估之關鍵參考依據。

歷史地形與地貌分析結果顯示,獻肚山源頭區於 1936年即開始有崩積層覆蓋於河谷上,而源頭兩岸的 持續崩塌與崩積層風化,發育成災前的獻肚山地形。 590高地發跡於1904-1936年之間,其可能為山崩事件 遺留於高階地頂端之堆積地形。其除了造成河道擠壓 與略為偏轉外,亦暗示了早期無名溪A上游山崩活動 性相當活躍。

數值模擬結果顯示,當遽變式山崩由源頭陡變地 形崩滑至較平緩之地形前(如本案例之高階地上),其 運動速度可達30m/sec (110km/hr)以上,此時陡變之地 形與部分塊體碰撞交互作用,將影響遽變式山崩運動 行為,導致岩體滑動轉為岩屑崩洩。而在20-65 sec間, 590 高地已受到獻肚山遽變式山崩撞擊而崩潰(形成 高程約570m之平坦地型),使其岩屑溢流至高階地 上,直接衝擊小林村聚落。於此階段,山崩運動速度 約32-50m/sec (115-180 km/hr),碰撞交互作用與顆粒 流作用為將主控整個遽變式山崩運動行為。小林村約 60-65 sec遭到土石侵襲而幾乎全面摧毀,旗山溪與無 名溪A、B交會河口處之天然壩約在112 sec形成。

最後,本研究以獻肚山遽變式山崩為案例,初步 於臺灣劃設幾個相似之案例,並提出同類型山崩區位 劃設、山崩潛勢結合影響範圍評估、災前情境模擬展 示、預警系統規劃等後續應用議題,期能作為後續防 災規劃之參考。

# 誌 謝

本文承蒙行政院國科會99-2625-M-009-004-MY3 計畫之經費補助方克有成, 謹致謝忱。

# 參考文獻

- [1]李錫堤、董家鈞、林銘郎,「小林村災變之地質背 景探討」,地工技術,第一百二十二期,第87-94 頁。
- [2]Tsou, C.Y., Feng, Z.Y., Chigira, M., "Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Hsiaolin, Taiwan," *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph. 2010.12.013 (2010).

- [3]Steven N.W., Simon, D., "Particulate kinematic simulations of debris avalanches: interpretation of deposits and landslide seismic signals of Mount Saint Helens, 1980 May 18," *International Journal of geophysics*, Vol. 167, pp. 991-1004 (2006).
- [4]Hungr, O., Dynamics of rapid landslides, Progress in Landslide Science, Chapter 4, pp. 47-56 (2007).
- [5]Itasca, Consulting Group Inc., *PFC3D Particle Flow Code in 3 Dimensions. User's Guide.* Minneapolis (2002).
- [6]Ni, W.J., "Ground Water Drainage and Recharge by Geomorphically Active Gullies," Master Thesis of Civil Engineering Department, National Taiwan University (2005).
- [7]Potyondy, D.O., Cundall, P.A., "A bonded-particle model for rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, PP. 1239-1364 (2004).
- [8]Giani, G.P., Migliazza, M. and Segalini, A., "Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 37, PP. 369-389 (2004).
- [9]羅佳明,「落石區崖線崩退與崖錐堆積形態之研究」,博士論文,台灣大學土木工程研究所,台北 (2010)。
- [10]Dong, J.J., Li, Y.S., Kuo, C.Y., Sung, R.T., Li, M.H., Lee, C.T., Chen, C.C., Lee, W.R., "The formation and breach of a short-lived landslide dam at Hsiaolin village, Taiwan - Part I: Post-event reconstruction of dam geometry," *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2011.04.001 (2011).