

三維落石災害分析技術發展

顧承宇¹ 冀樹勇² 譚志豪²

¹國立台灣海洋大學河海工程學系

²財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

摘要

台灣之自然環境特性多為地形陡峻、地質破碎、節理發達，再加上民國88年間之921大地震後與民國99年之88水災後，使得岩坡表面之開裂節理鬆動，在颱風、地震或豪雨過後常發生落石災害。因此本研究利用集塊質量法發展可直接應用於工程規劃設計之整合性三維落石分析技術，同時本研究之落石分析可結合高精度測量資料或是地表雷射測距儀技術所製作之高精度DTM地形資料，針對落石問題提供完整之分析評估技術以供工程實際應用。

關鍵字：落石，集塊質量法，回彈係數，三維分析，數值高程模型。

一、前言

台灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處，地處造山運動之板塊邊緣，因此台灣之自然環境特性多為地形陡峻、地質破碎、節理發達，再加上民國88年間之921大地震後與民國99年之88水災後，使得岩坡表面之開裂而致節理鬆動，在颱風、地震或豪雨過後常發生落石災害。尤其是北部濱海公路、中部橫貫公路、南部橫貫公路、東部蘇花公路、與國家公園管理區等，或是規劃中之蘇花替代道路等，這些公路之路線有許多路段穿越陡峭之邊坡地形、岩質河岸或海岸等。因此在維護與設計穿越山區之道路時，相關單位均要求進行沿線落石問題之調查與防災規劃工作，以減低落石危害。同時道路營運維護單位由於落石災害頻繁，對既有道路邊坡落石之整治工作亦愈受重視。由於台灣地區每年均發生大小不一之落石災害導致人民生命財產之損失，如何準確劃定落石災害影響範圍之地質敏感區以降低落石危害，或是解決落石問題所衍生之相關工程設計與分析技術上之發展應有其相當之必要性。

落石分布之位置廣泛且不確定，每逢地震事件或颱風豪雨季節常引致山區落石災害，尤其近年來受全球氣候變遷影響，台灣地區之極端降雨事件日益頻繁，山區落石災害所可能發生之頻率亦可能隨極端降雨而在頻率與規模上遞增。由於落石災害位置多呈三維空間分布，對於廣域大範圍之落石分析技術因需考慮真實之三維數值地形資料與大量之數值運算，受限於廣域大範圍之尺度效應與數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)資料所能提供之精度，若需再行加以考慮落石塊體形狀等接觸碰撞等力學機制，其電腦運算之時間將大幅增加至無法符合實際之應用需求，且可考慮不規則塊體接觸碰撞之三維落石力學分析技術在國內外均尚屬發展階段，目前尚無可同時考慮力學運算與廣域尺度DTM之實務分析理論與程式。

考量國內現階段之落石分析工具多侷限於二維分析，或在三維分析部分尚無法整合DTM，另採用二維分析方法僅能提供特定斷面之落石分析結果，對於規劃設計階段所需之道路沿線落石分布情形與危害潛能評估無法提供進一步之資訊，因此，本研究利用集塊質量法發展可直接應用於工程規劃設計之整合性三維落石分析技術，模式中考慮落石質點與三維地表間之拋射、彈跳、滾動與滑動等落石運動機制，另彈跳過程中之消能機制也可藉由正向與

切向消能係數進行模擬，除此之外，落石運動軌跡之計算將由落石之運動方程式加以計算。此外，本研究之落石分析可結合高精度測量資料或是地表雷射測距儀技術所製作之高精度DTM地形資料，進行分析評估，本研究所發展之技術將可針對落石問題提供一完整之分析評估技術以供工程實際應用。

二、三維落石分析理論

三維落石分析主要關鍵技術包含三方面，分別為：三維分析網格之建立、三維計算模式與三維立體落石分析計算結果之呈現。三維落石計算模式部分，將利用集塊質量法(Lumped mass approach)發展三維質點落石計算模式，模式中將考慮落石質點與三維地表間之拋射、彈跳、滑動與滾動等落石運動機制，另彈跳過程中之消能機制也可藉由正向與切向消能係數進行模擬，除此之外，落石運動軌跡之計算將由落石之運動方程式加以計算。以下則針對三維落石之理論與相關公式推導進行介紹。

2.1 集塊質量法簡述

集塊質量法在 1976 年由 Piteau 與 Clayton 首先提出，程式名稱為 Computer Rockfall Model，其將落石模擬成一無限小之質點，考慮速度並加上回彈係數，以模擬碰撞後之速度折減，忽略它的形狀及尺寸的貢獻，可處理自由落體、彈跳、滾動及滑動四種運動模式。之後有許多學者與相關研究單位利用集塊質量法發展落石分析程式，如 SASS-MASSI (Bozzolo and Pamini, 1986), CADMA (Azzoni et al., 1995), RocFall (Steven, 1998), CRSP (Pfeiffer and Bowen, 1989), Mobyrock (Paronuzzi and Artini, 1999) 與 CRSP 4.0 (Jones et al., 2000)等，相關研究可參閱表 1。這些分析模式中又以 Rockscience 公司所發展之商程式 RocFall 及美國科羅拉多州州政府於公路落石分析所使用之 CRSP 程式為發展較成熟之程式。上述模式採用集塊質量法進行落石分析，集塊質量法考慮落石為單一質點並利用自由落體之運動方程式模擬落石行進之軌跡，故落石間之相互接觸、碰撞及落石形狀影響等之力學機制無法考慮。

上述之落石分析模式多侷限於二維分析，有鑑於二維分析方法模擬落石三維空間分布之限制，加上目前衛星影像數值地形製作技術之進步，因此國際上落石分析模式之研發已漸朝向三維分析模式進行，如落石嚴重之歐洲國家(像是英國、義大利與西班牙等國)便成立一跨國研究計畫(DAMOCLES)進行落石與土石流方面之研究，其於 2003 年發表之研究成果 STONE 即為三維落石分析模式，受限於DTM資料之精度，STONE 程式僅適用於大範圍之分析。國內學界亦有基於集塊質量法之三維落石分析程式發展(葛德治等, 2006)，惟仍侷限於簡單之邊坡形狀之落石定率性(無統計模式)分析應用，尚無實務工程上之應用，對於如工程計畫道路沿線之落石分布情形等，與實際工程所需之落石防護結構設計等並無法提供更進一步之資訊。

若欲考慮落石形狀與落石間之相互接觸、碰撞關係，程式需採用較為複雜之不連續體分析理論，如：分離元素法(Distinct Element Method, DEM)或是不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)等。分離元素法最早是由 Cundall 於 1971 年所創，屬於顯式法，可模擬眾多塊體間互制行為，基本原理基於牛頓第二運動定律，可考慮岩塊大小、形狀、材質、坡面粗糙度及運動中的轉動慣量，惟目前大多數文獻均以此方法用於節理岩體之分析模擬，DEM 法現雖已發展到三維模式，但尚無較為成熟之落石分析模式，商程式有 ITASCA 公司所發展之 PFC-3D，該程式可分析三維球形顆粒之接觸運動，國內亦有使用 PFC-3D 於落石災害相關研究(羅嘉明, 2008)，惟因三維顆粒力學之計算量龐大，對於複雜邊坡之幾何考量與數值地形模型資料之結合，尚無法處理，故有關三維落石模式之理論與實務應用目前國內外文獻顯示，研究領域仍多以集塊質量法為主。

表1 利用集塊質量法於落石問題之相關研究

年代	作者	程式名稱	維度	方法	機率考慮
1976	Piteau and Clayton	Computer Rockfall Model	2-D	Lumped mass	Partly
1982-86	Bozzolo and Pamini	SASS—MASSI	2-D	Hybrid	Yes
1985	Bassato et al.	Rotolamento Salto Massi	2-D	Lumped mass	No
1987	Descouedres and Zimmermann	Eboul	3-D	Rigid body	No
1989-91	Pfeiffer and Bowen Pfeiffer et al.	CRSP	2-D	Hybrid	Yes
1990	Kobayashi et al.	NA	2-D	Rigid body	No
1991-95	Azzoni et al.	CADMA	2-D	Hybrid	Yes
1991	Scioldo	Rotomap	3-D	Lumped mass	No
1998	Stevens	RocFall	2-D	Hybrid	Yes
1999	Paronuzzi and Artini	Mobyrock	2-D	Lumped mass	Yes
2000	Jones et al.	CRSP 4.0	2-D	Hybrid	Yes
2002	DAMOCLES project	STONE	3-D	Lumped mass	Yes

2.2 回彈係數

落石在移動區與坡面發生撞擊行為，導致能量的消耗，為了有效顯示出能量耗損的程度，因而定義出回彈係數 (Coefficient of restitution)。回彈係數以碰撞後沿坡面法向及切向之速度分量除以碰撞前之沿坡面法向及切向之速度分量，當此值趨於 1 時，表示為完全彈性體碰撞，在碰撞的過程中沒有能量的損失。一般而言，地質材料的回彈係數值均落於 0 與 1 之間。

三、三維落石數值程式發展

3.1 質點演算法流程

集塊質量法之質點演算法流程主要包含以下三部分分別為：(1) 拋射演算模式、(2) 彈跳演算模式、與 (3) 滑動演算模式。拋射演算主要係計算落石於空中運動時之軌跡，落石因重力作用而以拋物線運動行進，於拋射演算主要計算拋物線與線段(二維)或平面(三維)之交點，當計算出落石撞擊交點後，再利用回彈係數計算反彈速度，重複此步驟直至落石之速度小於初始設定之最小速度。當落石速度小於最小速度時，落石之運動模式由拋射演算進入滑動演算。滑動演算主要計算落石於一直線段(二維)或平面(三維)上進行滑動移動，於滑動演算模式中，需考慮邊坡之傾角(θ)與滑動面之摩擦角(ϕ)，而滑動演算模式則分為向下邊坡滑動與向上邊坡滑動等兩種情形。質點演算法流程說明如下：

(1) 拋射演算模式

拋射演算主要係計算落石於空中運動時之軌跡，取決於落石有或是無初始速度，若無初始速度時，則落石因重力作用以直線掉落；若是有初始速度時，則落石以拋物線運動行進。一般而言，三維空間中落石之軌跡可以 $[x(t), y(t), z(t)]$ 表示，而拋射演算模式主要係計算落石之拋物線軌跡，其軌跡之計算方程式如下式所示：

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{x0}t + x_0 \\ V_{y0}t + y_0 \\ -\frac{1}{2}gt^2 + V_{z0}t + z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 為落石質點之初始位置， t 為落石質點之運動時間，而 $(V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0})$ 為落石質點分別於 x 、 y 與 z 方向軸之初始速度， g 為重力加速度 (9.8 m/sec^2)。

(2) 彈跳演算模式

落石因重力作用而以近拋物線運動於三維空間中行進，當落石與坡面接近時，需計算拋物軌跡線與三維平面之碰撞點，一般而言，有兩種方法可用以計算碰撞點，分別為直接以數學方程式計算拋物線(二次方程式)與三維平面交點。或是假設拋物軌跡線為一直線，再行計算直線與三維平面交點，惟後者之方法，運動學分析之時間步長需假設較小以符合拋物軌跡線為一直線之假設。本研究落石由拋射演算模式進入彈跳演算模式之偵測係利用落石於空間中與三維平面之垂直距離行之，若垂直距離小於臨界值時，即進入彈跳演算模式，而臨界值之設定與分析問題之尺度有關，目前係設定為分析問題長寬高最大值之千分之 1.5 左右。落石與三維平面之垂直距離計算則可採下公式行之。

$$\text{Distance} = \frac{|Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

其中，三維平面方程式定義為 $Ax + By + Cz + D = 0$ ，落石於空間中之座標為 (x_1, y_1, z_1) 。而三維平面方程式之係數若寫為向量，可表為 (A, B, C) ，其亦為平面方程之法向量。

(3) 滑動演算模式

當落石於局部座標系統之法向速度小於最小速度時，落石之運動模式由拋射演算進入滑動演算，滑動演算模式係考慮落石於坡面上之滑動，若邊坡之傾角(θ)與滑動面之摩擦角(ϕ)相同時，落石將於三維平面上進行滑動移動，其滑動速度維持不變，直至滑動至另一三維平面。惟若初始滑動速度趨近於 0 時，落石則停止運動。

若邊坡之傾角(θ)大於滑動面之摩擦角(ϕ)，落石將於三維平面上進行滑動移動，其滑動速度持續增加，速度增量公式可以下公式計算之。

$$\begin{bmatrix} V_x^{out} \\ V_y^{out} \\ V_z^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{V_{x0} + 2s_x gk} \\ \sqrt{V_{y0} + 2s_y gk} \\ V_z^{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $k = \pm \sin(\theta) - \cos(\theta) \tan(\phi)$ ，「+」為落石向下邊坡滑動之初始速度符號表示，「-」為落石向上邊坡滑動之初始速度符號表示。 (V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}) 為落石質點分別於 x 、 y 與 z 方向軸之初始速度。而 g 為重力加速度， θ 為邊坡之傾角， ϕ 為滑動面之摩擦角。 s_x 為落石質點於三維平面 x 方向軸投影至局部座標系統之滑動距離。而 s_y 為落石質點於三維平面 y 方向軸投影至局部座標系統之滑動距離。當進入滑動演算模式後落石之速度向量 $(V_x(t), V_y(t), V_z(t))$ 需先轉換為局部座標系統之進入速度向量 $(V_x^{in}, V_y^{in}, V_z^{in})$ ，當速度向量轉換為局部座標系統後，再利用速度增量(或減量)公式計算落石質點之滑動速度，而滑出速度向量為 $(V_x^{out}, V_y^{out}, V_z^{out})$ 。

由於實際三維邊坡平面之摩擦角於實務上無法加以進行現地試驗取得參數，為可合理運用本研究所發展之三維分析數值程式進行分析，於數值程式中，坡面摩擦角之輸入可配合實際數值地形模型或是使用者自訂網格利用機率分布加以輸入，輸入方式僅需考量分析邊坡之最大與最小可能摩擦角，程式即自動利用隨機方式自動產生每個網格之坡面摩擦角，程式內定之坡面摩擦角最大為 50 度最小為 20 度，圖 1 則為利用上述利用隨機方式所產生之每個網格之坡面摩擦角。

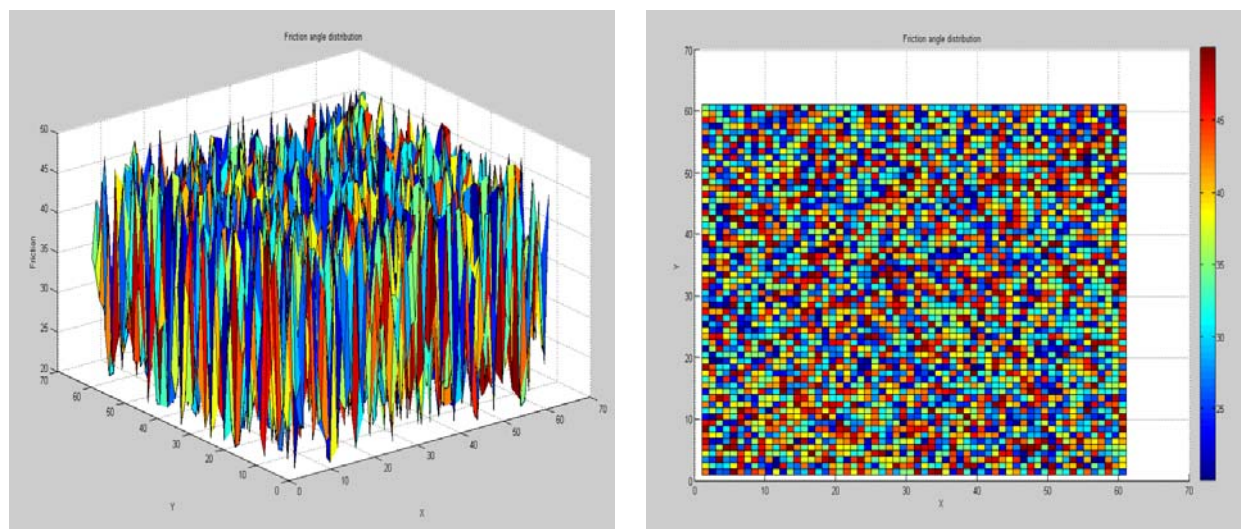


圖 1 利用隨機產生坡面摩擦角結果(左: x 與 y 方向右: z 方向透視)

3.2 三維分析數值程式驗證

3.2.1 驗證例一

對於落石質點具質量 m 進行空間中之拋射運動，落石質點之初始位置為 (x_0, y_0, z_0) ， t 為落石質點之運動時間，而 $(V \cos 45, 0, V \sin 45)$ 為落石質點於 x ， y 與 z 方向軸之初始速度，運動方程式可寫為下式。

$$m \frac{d^2}{dt^2} (x, y, z) = (0, 0, -mg) \quad (4)$$

上式為常微分方程式，分別對 x ， y 與 z 方向軸對時間進行積分，代入初始速度條件，可得落石質點運動方程式之解。利用本研究所發展之三維分析數值程式，同樣考量相同之落石質點之初始位置，落石質點之運動時間為 7 秒，分析網格為 x 與 y 方向為 60×60 之網格， x 與 y 之座標範圍為 -150 至 150 ， z 之座標範圍設定為 100。分析所用之參數詳表 2 所示。比較本研究三維分析數值程式之落石質點拋物線軌跡與常微分方程式之解，可得圖 2 之結果，於圖 2 可發現本研究所計算之軌跡線與解析解計算之結果完全一致，可確認拋射演算模式之正確性。

3.2.2 驗證例二

對於落石質點具質量 m 進行空間中之彈跳運動，主要係驗證彈跳演算模式對於撞擊交點之偵測，同時驗證回彈係數之計算。

利用本研究所發展之三維分析數值程式，首先進行落石質點沿 x 方向軸進行彈跳演算，分析網格為 x 與 y 方向為 60×60 之網格， x 與 y 方向之座標範圍分別為 -150 至 150 ， z 之座標範圍設定為 100。分析所用之參數詳表 2 所示。觀察本研究三維分析數值程式之落石質點拋物線軌跡可發現，本研究可正確偵測落石與坡面撞擊交點之位置，並進行完全彈性回彈運動，由於本案例之法向與切向回彈係數均假設為 1，且未考慮任何空氣摩擦損失，故落石質點可正確的回彈到初始拋射高度，如圖 3 所示。由圖 3 可發現本研究經過多次彈跳模式演算，均可正確反應前述之設定條件，而由圖 3 分析結果可發現在回彈係數均設定為 1 之情形下，落石質點之彈跳可回到原拋射前之正確高度，可確認彈跳演算模式之正確性。

表2 分析參數值

驗證例一		驗證例二	
項目	數值	項目	數值
演算時間	7 秒	演算時間	20 秒
落石質點之初始位置 (x_0, y_0, z_0)	(-150, 0, 102)	落石質點之初始位置 (x_0, y_0, z_0)	(150, 0, 150)
落石質點初始速度 ($V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$)	($50 \cos 45, 0, 50 \sin 45$)	落石質點初始速度 ($V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$)	(10, 0, 0)
坡面摩擦角	0	坡面摩擦角	0
法向回彈係數(R_n)	1.0	法向回彈係數(R_n)	1.0
切向回彈係數(R_t)	1.0	切向回彈係數(R_t)	1.0

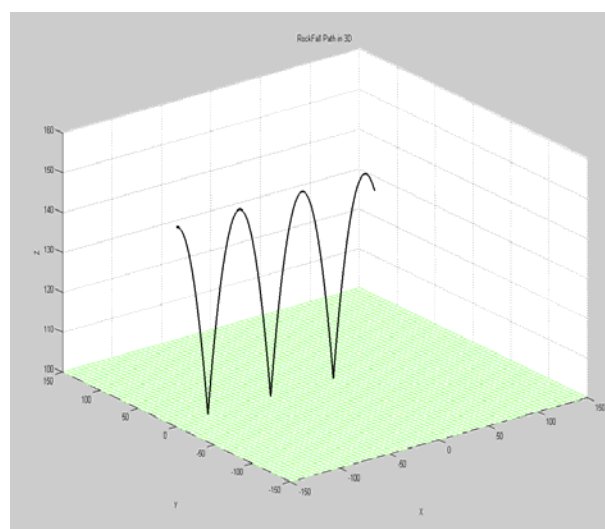
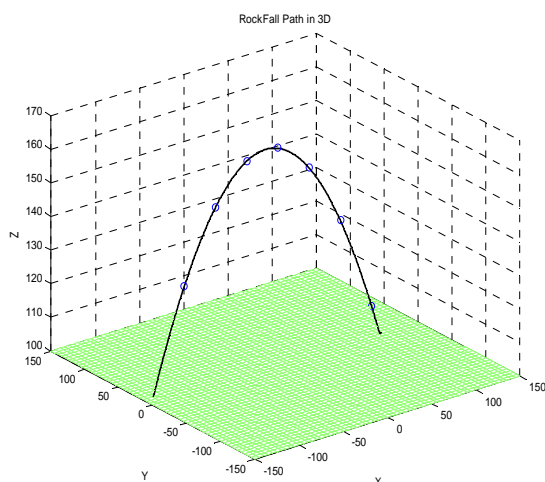


圖 2 拋射演算模式與解析解驗證結果 (實線為計算結果，圓圈為解析計算結果)

圖 3 沿 x 方向彈跳演算模式驗證結果

四、案例分析

本研究於台八線(中橫公路)往德基壩方向約 1.7 公里處之一大型落石崩塌邊坡進行三維雷射地面測量以獲取 DTM。圖 4 為該處落石崩塌之現地照片與三維雷射掃描結果之 DTM。由於三維雷射地面測量係以儀器發射近紅外光雷射，量測對於測定對象物的往返時間及發射角度，據此計算待測點之坐標位置，故三維雷射地面測量之 DTM 為不規則間距取樣之 DTM，若直接轉換為三維分析數值分析網格，則可能發生網格大小不一致，且易造成數值分析誤差，故需將不規則間距取樣之 DTM 轉換為規則間距取樣之 DTM。三維雷射地面測量所得之 DTM 需先經由數值處理將原先不規則間距取樣之 DTM 轉換為固定間距之規則網點取樣，取樣間距並無限制，不過多仍依據原 DTM 之解析度加以重製成數值地形模型。圖 5 則為重製後之三維落石分析網格與高程圖，由圖 5 之分析網格可發現，本研究所採用之 DTM 對於現地地形之描繪係目前各種方法中最高精細之幾何地形，應可充分掌握現地地形之變化。

表3 結合衛星影像DTM案例之分析參數

項目	數值
演算時間	50 秒
落石質點之初始位置 (x_0, y_0, z_0)	(2682100, 266950, 2000)
落石質點初始速度 ($V_{x_0}, V_{y_0}, V_{z_0}$)	V_{x_0} 為利用均勻分布於 5 m/sec 至 10.0 m/sec 速度間距內，隨機產生。 V_{y_0} 為利用均勻分布於-6 m/sec 至-1.0 m/sec 速度間距內，隨機產生。 V_{z_0} 為 2.0 m/sec。
坡面摩擦角	隨機產生，利用均勻分布產生坡面摩擦角 20 至 50 度。
法向回彈係數 (R_n)	隨機產生，利用均勻分布產生，最小值與最大值介於 0.6~0.8 間。
切向回彈係數 (R_t)	隨機產生，利用均勻分布產生，最小值與最大值介於 0.7~0.9 間。

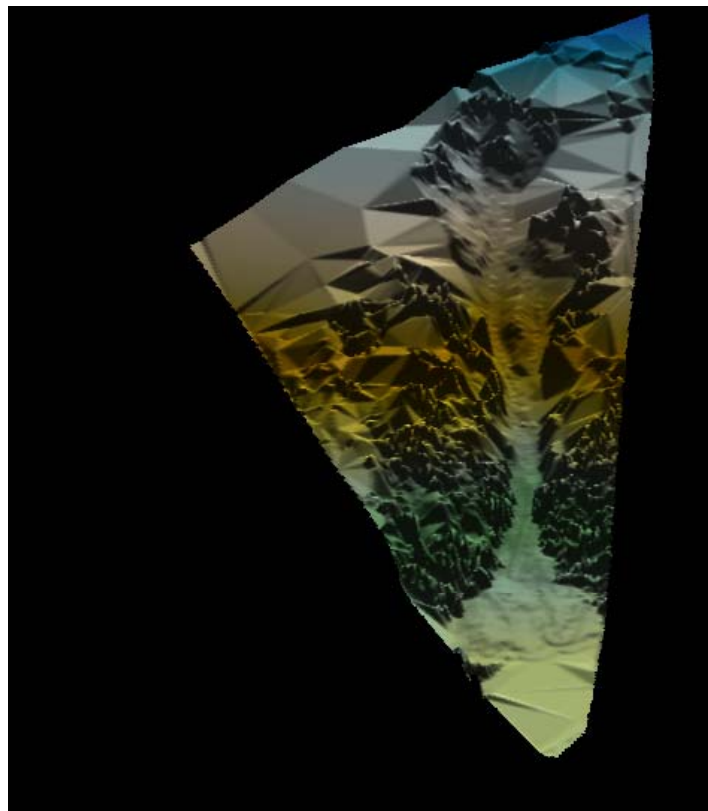


圖4 研究案例現地照片與三維雷射地面測量DTM

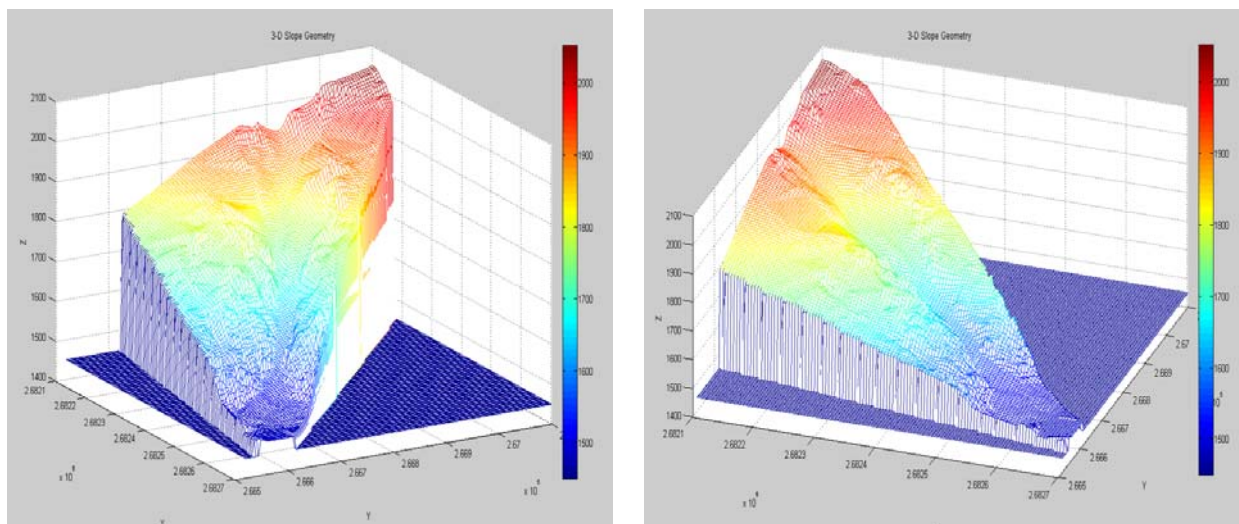


圖 5 結合雷射地面測量 DTM 之三維落石分析網格圖(不同視角)

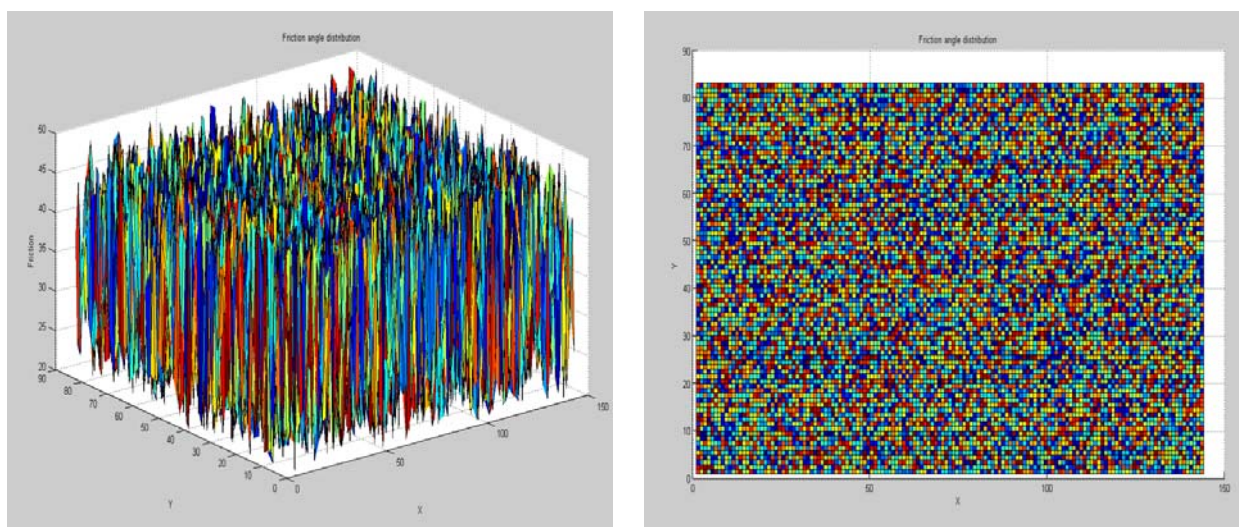


圖 6 隨機產生坡面摩擦角結果(左：x與y方向透視，右：z方向透視)

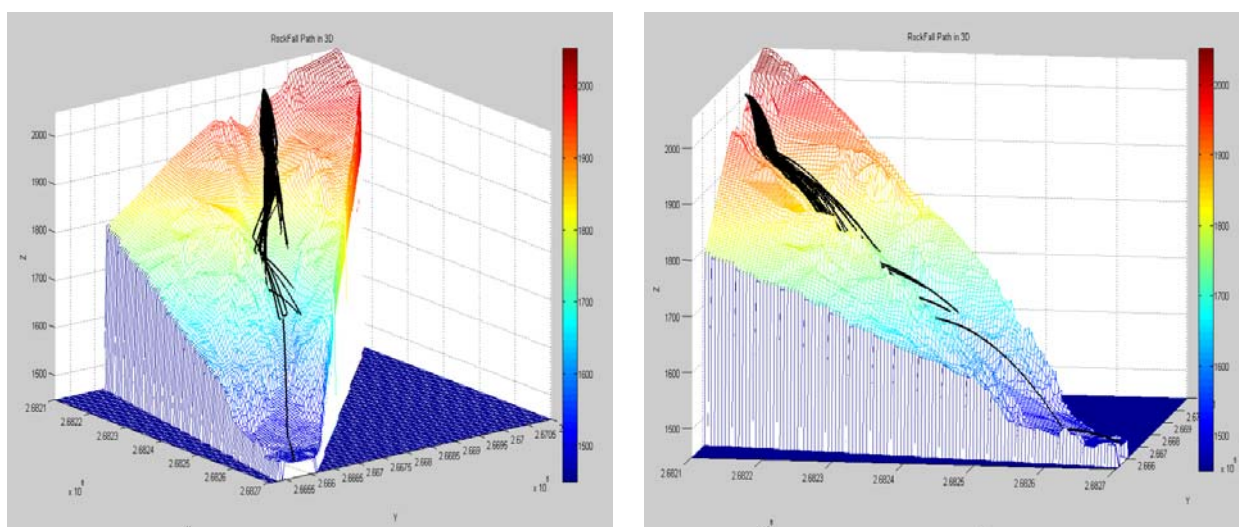


圖 7 衛星影像 DTM 之三維落石分析結果(不同視角)

利用本研究所發展之三維分析數值程式，首先讀取三維雷射掃描 DTM 並建立一 121×121 之網格，由於三維雷射地面測量所量測之範圍並非為方陣，分析網格中非邊坡範圍內之網格以 z 之座標為 1450 表示之。 x 之座標範圍為 2,682,100 至 2,682,700， y 之座標範圍為 2,665,000 至 2,671,000， z 之座標範圍為 1450 至 2200 公尺。本案例分析所用之參數詳表 3 所示，由於本例之數值地形相當細緻，每個鄰近格網均有不同坡度坡向分布，因此利用統計方式進行蒙地卡羅模擬分析，案例分析總計產生 50 次落石質點，每次分析時落石質點初始速度為隨機產生， x 方向速度係利用均勻分布，於 5 m/sec 至 10.0 m/sec 之速度間距內，隨機產生。 y 方向速度係利用均勻分布，於 -6 m/sec 至 -1.0 m/sec 之速度間距內，隨機產生。 z 方向速度係設定為 2.0 m/sec。

由於坡面摩擦角亦無法透過試驗方式取得，針對坡面摩擦角參數本研究亦透過統計方式隨機產生，惟依據大地工程材料之坡面摩擦角可能範圍設定最小值與最大值分別為 20 與 50 度，並利用均勻分布產生分析格網上各個 cell 之坡面摩擦角，如圖 6 所示。切向與法向回彈係數之設定為法向回彈係數介於 0.6 至 0.8 之間，而切向回彈係數介於 0.7 至 0.9 之間。經 50 次蒙地卡羅模擬分析後，觀察落石質點之運動軌跡，如圖 7 所示可發現，落石質點之運動軌跡主要受地形影響，多沿山谷凹地前進，與本案例現勘情形之落石之分布情形相似，多堆積於河谷野溪河床中下部區段，另落石質點之停留範圍亦與現地之落石位置接近。本案例之分析成果顯示，本研究所開發之三維落石分析程式結合雷射地面測量數值地形模型，可適切掌握實際極高解析度之地形地貌，進行單一邊坡之落石分析評估，整合高精度地形後可大幅提高落石分析之準確度，具實際應用之潛能。

五、結論

落石分布之位置廣泛且不確定，且多呈三維空間分布。然而國內外現階段之落石分析工具均侷限於二維分析，採用二維分析方法僅能提供特定斷面之落石分析結果，對於規劃設計階段所需之道路沿線落石分布情形與危害潛能評估無法提供進一步之資訊，因此本研究進一步發展三維落石問題分析技術，以期對落石問題提出更全面性之解決方案。後續研究可進一步結合 DTM 利用三維落石分析技術進行落石災害影響範圍之評估，劃定出落石警戒範圍以降低落石災害損失。

參考文獻

1. Azzoni, A., Barbera, G. L., and Zaninetti, A., (1995), Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *Int., J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, v. 32, no. 7, p.709~724.
2. Bozzolo, D., Pamini, R. and Hutter, K., (1988), Rockfall analysis - a mathematical model and its test with field data. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, v. 1, p. 555~560.
3. Cundall, P. A. (1971), "A computer model for simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems," *Proceedings Symposium, International Society of Rock Mechanics*, Nancy 2, No. 7.
4. Paronuzzi, P., (1989), Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 22, p. 175~183.
5. Stevens W. RocFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rock falls. M.A.Sc. thesis. Department of Civil Engineering, University of Toronto. Ontario, Canada, 1998. 105pp.

6. Piteau, D. R. and R. Clayton(1977), "Discussion of Paper on Computerized Design of Rock Slope Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data by P. A. Cundall, M. D. Voegele and C. Farihurst," Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics, Univ. of Minnesota, Minneapolis, pp. 62-63.
7. Pfeiffer T, Bowen T. Computer simulation of rock falls. Bull Assoc Eng Geol 1989;26(1):135 - 46.
8. The DAMOCLES European project, <http://damocles.irpi.cnr.it/>.
9. 紀宗吉，陳宏宇（1997）落石運動軌跡之現地調查與模擬分析案例介紹，地工技術，第64期，第59-68頁。
10. 羅佳明，林銘郎，李宏輝，（2007）"三維落石模擬於明隧道載重問題之應用，第9屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
11. 葛德治，"Development of Rockfalling Simulation Program - ROCKPATH I," 中華民國第三屆岩盤工程研討會論文集，新竹，台灣: 355-364 (1998)。
12. 顧承宇，陳錦清 (1997), "岩坡落石問題之數值分析", 中興工程，第五十七期，pp. 1-19，台灣，台北。
13. 顧承宇、翁孟嘉、陳建忠、李怡先、高憲彰，「三維雷射掃描技術於岩坡落石分析之應用」，2006 岩盤工程研討會論文集，pp.397-406，July 26~27，2006.

ABSTRACT

Taiwan is an active mountain belt created by the oblique collision between the northern Luzon arc and Asian continental margin. These inherent geological complexities naturally created numerous rock mass discontinuity in this area, which exist in many forms such as fissures, cleavages, beddings, joints, and even faults. In past decades, rockfall hazards triggered by earthquake activity and heavy rainfall frequently occurred in Taiwan, especially after the 921 earthquake in 1999 and the Morakat typhoon in 2009. Considerable rockfall hazard damage in major traffic corridors, such as Northern Coast Highway, Central Cross-Island Highway, and Southern Cross-Island Highway etc., which connect eastern and western Taiwan, have increased dramatically and become a major obstacle for engineers. In this study, a 3-D numerical rockfall model based on the lumped mass method which treats the falling block as a point mass and allows mass free fall, impact and rolling motions in a 3-D framework is developed. It is hope that the 3-D rockfall analysis program could be useful for analyzing regional scale rockfall problems with the combination of DTM from the aerial photo, satellite imaginary, or the ground Lidar.

Keywords: rockfall, lumped mass method, coefficient of restitution, 3-D analysis, DTM.