

臺灣地區重大岩體滑動案例之土方量分析

劉哲欣 吳亭燁 陳聯光 林聖琪*
林又青 陳樹群 周憲德

摘要 本研究是針對臺灣地區大規模岩體滑動之案例與岩體滑動量體之推估方法，討論各種推估方法的適用性。以過去重要五個大規模岩體滑動案例之滑動面積、體積及土方量等調查資料，以面積-深度或面積-體積幂次關係等兩種方法推估滑動體之體積，發現均有低估的現象。有鑑於此，本研究重新定義大規模岩體滑動之規模，利用案例之滑動土方量及崩塌面積資料發展一新面積評估法。其結果顯示新面積評估法呈現二次多項迴歸式，且 $R^2=0.97$ ，可作為未來對於滑動面積 30 公頃至 400 公頃岩體滑動之簡易體積評估方法。

關鍵詞：大規模岩體滑動、面積評估法、土方量。

Evaluation of Large-Scale Rock Slides in Taiwan

Che-Hsin Liu Tingyeh Wu Lien-Kuang Chen Sheng-Chi Lin*
Yu-Ching Lin Su-Chin Chen Hsien-Ter Chou

ABSTRACT This study focuses on landslide volume evaluation methods and their applicability to large-scale landslides. Historical data from six large-scale landslides were used to estimate landslide volumes by power-law formulas (area versus depth or area versus volume). The results show the estimated volumes are undervalued. A new landslide volume evaluation method was carried out to improve the precision of the landslide volume evaluation. This method was created by landslide area and volume from the historical records and is shown in terms of a polynomial regression equation with an R-squared value of 0.97. The landslide areas among 30 ha and 400 ha were verified to properly fit this equation and will be utilized as the simple estimation method.

Key Words: large-scale rock slide, Area-Assessment method, landslide.

一、前言

2009 年 8 月莫拉克颱風帶來超大豪雨，高雄縣甲仙鄉小林村引發大規模岩體滑動事件；2010 年 4 月國道三號邊坡因順向坡滑動，大量土體下移掩埋雙向車道，造成道路中斷以及四人死亡事件；2010 年凡那比颱風襲台，南部山區降下豪雨，大量溪水挾帶土石順

流而下，掩埋了來義東部落 (水土保持局，2010)。伴隨颱風或豪雨導致大規模岩體滑動致災的發生，並不僅是近幾年才發生的災害，依據過去災害記錄顯示，雲林縣古坑鄉草嶺在近一百多年來先後因地震或降雨發生過五次大崩規模崩塌事件 (紀宗吉，2010)。1999 年九二一集集大地震發生之後，中部山區發生多場崩塌事件，特別的是由於九份二山臨近震央，震爆造成

大規模岩體滑動的發生 (防災國家型科技計畫辦公室, 1999)。大規模岩體滑動事件所引發的災害, 不單是土石大規模移動可能造成的掩埋, 同時也可能因土石堵塞河道引發堰塞湖、或同時導致坡面形成土石流以及洪水發生等複合型災害 (行政院經濟建設委員會, 2010)。根據數據統計顯示, 近年來因崩塌災害事件造成的生命財產損失總數和頻率都有上升的趨勢, 顯示降低崩塌災害的發生日趨重要 (內政部消防署, 2010); 另一方面, 由於氣候變遷的影響之下, 降雨型態改變和以往大不相同, 在短時間內強降雨事件頻率增加, 可預測到的是未來大規模岩體滑動事件發生機率將比過去增加許多 (日本國土交通省, 2010)。然而, 對於這樣大規模岩體滑動事件可能引致的複合型災害, 目前尚無一套完整且詳細的研究, 甚至諸如相關名詞定義、內容包含範疇、規模設定、乃至於分析研究方法架構等, 仍在起步的階段, 各方學者尚無一明確共識。

而有關崩塌災害之減災工作, 目前所使用的方法不外乎工程或是非工程手段, 其中尤以工程手段較為直接且有效。然而, 有效的工程規劃取決於對於現地災害資訊之掌握, 特別是崩塌地規模大小, 因此精確的崩塌量體的推估技術可說是相當的重要。目前國內外已有相當多研究篇幅描述有關崩塌地量體推估, 例如利用災前災後衛星影像、航照圖判釋等, 精確核對

計算崩塌量體是為有效的方法。然而, 礙於影像資料取得的諸多限制, 再加上往往崩塌災害前的資料闕如, 因此必須以其他方式加以推估, 例如北水局利用航照圖和現地調查方式, 分析探討石門水庫 1968、1972、1976、1986、和 1998 年的崩塌深度和坡度的關係, 爾後選取集水區內數個單一崩塌地, 考量不同時期之體積變遷, 迴歸計算其與崩塌斜面積、崩塌坡度、以及累積雨量之關係式 (經濟部水利署北區水資源局, 2008); 三浦弘之 (2007) 套疊 IKONOS 影像在地震前後的資料, 計算可能的崩塌土方量; 田村等人 (2009) 考量因地震引發之崩塌, 其地震的最大加速度、崩塌與震源距離和崩塌土方量的關係; 另外針對單一崩塌地, 假設其原來坡面起伏後, 套疊災後 DEM 資料求得可能崩塌土方量 (Marchesini et al., 2009; Derron et al., 2005)。然而, 由於缺乏實際資料驗證, 無從知悉推估值與實際真正崩塌土方量值的誤差之外, 也無法針對各種推估方法之優劣比較其差異。因此為了解推估各種分析方法的精確度以及為選擇較為適合之模式, 本研究以實際現地測量計算而得之崩塌土方量與各種不同推估方法求得之結果進行比較; 同時考量過去較大規模岩體崩滑事件之面積和土方量, 以了解在不同規模岩體崩滑事件條件下, 影響崩塌土方量變化之因子, 由此分析評估不同規模之崩塌土方量。

表 1 邊坡破壞的型式 (Varnes, 1978)

Table 1 The types of landslides

移動類型 Type of Movement		材料種類 (Type of Material)		
		基岩 (Bedrock)	工程土壤 Engineering Soils	
			粗粒為主	細粒為主
墜落 Falls		岩石墜落 Rock fall	岩屑墜落 Debris Fall	土墜落 Earth Fall
	傾覆 Topples	岩石傾覆 Rock Topple	岩屑傾覆 Debris Topple	土傾覆 Earth Topple
滑動 Slides	轉動 Rotational	岩石崩移 Rock Slump	岩屑塊崩移 Debris Slump	土崩移 Earth Slump
	移動 Translational	岩體滑動 Rock Block Slide	岩屑塊滑動 Debris Block Slide	土塊滑動 Earth Block Slide
		岩石滑動 Rock Slide	岩屑滑動 Debris Slide	土滑動 Earth Slide
側落 Lateral Spreads	岩石側落 Rock Spread	岩屑側落 Debris Spread	土側落 Earth Spread	
流動 Flows	岩石流動 (深潛移 Deep Creep) Rock Flow	岩屑流動 Debris Flow	土流動 Earth Flow	
複合運動 Complex	複合兩種或兩種以上之運動方式			

二、研究方法

1. 大規模岩體滑動的定義

國內外對於坡地土砂災害類型的分類方法眾多，端視所需求之目的而選擇適當的分類方法，只要能根據系統化之分類標準，有效、簡單且清楚的分類，大多能符合各界的觀點。表 1 為國內外常用的 Varnes (1978) 分類方法，此分類方式是依據移動材料的移動類型給予分類的名稱。台灣中央地質調查所(地調所)所從 2008 年起將常見於臺灣坡地災害的山崩與土石流，依據移動材料與移動類型的差異，區分為「落石 (Rock Fall)」、「岩體滑動 (Rock Slide)」、「岩屑崩滑 (Debris Slide)」與「土石流 (Debris Flow)」等四類，其中「岩體滑動」及「岩屑崩滑」等分類名詞，即參照 Varnes 標準的雙名詞命名法則所制訂，相關名詞定義如表 2 說明。

由表 2 可知岩體滑動的定義是屬於滑動面深、滑動具有較大厚度與規模的山崩或地滑均屬之。崩滑範圍較大者，可達數十公頃以上，而滑動體仍多能保持岩體的完整性，依據移動的方式可分為平面型、圓弧型或複合型等。在國內大規模的岩體滑動多由順向坡地形產生的平面型滑動，如草嶺及九份二山的崩塌即是 (費立沅, 2009)。因此對照大規模岩體滑動的破壞類型，大多深度已達坡面較深的岩盤，加上大範圍的滑動面積，所產生的移動類型大多包含兩種以上的複合型移動類型，故本文中所提及的大規模岩體滑動，應是屬於表 1 中材料種類為基岩的各式單一或複合之運動類型。

日本國土交通省砂防部依據此類災害規模大小分為「深層崩壞」及「表層崩壞」兩類。其中「表層崩壞」定義為滑動深度介於 0.5 至 2 公尺之間，反之則屬「深層崩壞」的範圍 (南哲行, 2010)。而地調所所訂出之「岩屑崩滑」及「岩體滑動」兩大類別的分類，其實與日本的定義相似，有設定不同滑動面深度的構想，然而對於明確的深度區分不同分界，目前因各界未達共識故尚無統一標準，但實質上此兩種分類還是有深淺的內涵差異。即便如此，地調所在以航照判釋滑動規模時，仍有一面積的判釋條件可遵循，就是以航遙資料觀察標準山崩地貌的特徵，滑動面積在一公頃以上，即歸類為「岩體滑動」。這與日本篩選深層崩塌潛在危險溪流的建議，關於深層崩塌的規模建議以面積一公頃以上為對象的結論一致 (土木研究所, 2009)。

因此由前述說明，本文對於大規模岩體滑動的定義和案例的蒐集與分析，均參照前述標準，以岩體滑動的面積大於一公頃、滑動面較深且深入岩盤為原則。

2. 研究案例分析

依據前述對於大規模岩體滑動的定義，研究中蒐集台灣歷年發生的重大案例進行分析。案例蒐集的原則以相關文獻資料中有詳盡說明其岩體滑動面積、體積及其量體估算的方法為主，使其岩體滑動量體的數值能具有代表性，以利後續的分析及比較。依據此原則，找出有五個具有代表性的案例如表 3 所示。岩體滑動面積由小至大依序排列為廬山溫泉北坡地滑區岩體滑動事件的 30.0 公頃，至草嶺大崩塌約 400.0 公頃左右；統計土方量及分析案例數量結果顯示，滑動土方量超過 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的案例共有 5 件，比較日本統計自 1868 年來因降水所引發的深層崩塌土方量在 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上案例記錄，日本共有 10 件記錄， $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上的案例約有 60 件， $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 以上的案例約有 175 件 (南哲行, 2010)，與台灣之案例數量相距不大。而各個案例的特性說明如表 4 及其下說明。

(1) 廬山

廬山溫泉北坡地滑區位於南投縣仁愛鄉菁英村廬山溫泉區上方，此區域數十年來每逢豪大雨即有滑動破壞現象發生。1994 年道格颱風之後，本區陸續又受到賀伯颱風及九二一集集大地震等災害影響，其中更以 2005 年馬莎及海棠颱風

表 2 地調所對於山崩與土石流的分類名詞與定義(Fe, 2009)

Table 2 The definitions of landslides by Central Geological Survey, MOEA, Taiwan

分類名詞	定義
落石 (Rock Fall)	指岩塊或岩體自岩壁上分離後，以自由落體、滾動或彈跳等方式快速向下運動之現象
岩屑崩滑 (Debris Slide)	為風化土層、岩屑、崩積層或鬆軟破碎等地質材料之崩落或滑動現象
岩體滑動 (Rock Slide)	指滑動面深入新鮮岩體中之滑動現象
土石流 (Debris Flow)	係指土石與水混合，在重力作用下，沿山溝或溪谷流動之現象

風和 2006 年 0609 豪雨災情最為嚴重, 2007 年柯羅莎颱風及 2008 年卡玖基與辛樂克颱風亦均產生輕微的滑動破壞 (紀宗吉與林錫宏, 2010), 不僅對依賴本公路進出的部落居民生計危害甚大, 並且對下方的廬山溫泉觀光區安全構成威脅。滑動區範圍為母安山至塔羅灣溪河岸, 高差約 400.0 公尺、橫向寬度約 600.0 公尺與縱向長度約 800.0 公尺, 估計岩體滑動區域達 34.0 公頃, 深度達 80.0 公尺以上 (林俐玲等, 2009)。

(2) 小林村

小林村大規模岩體滑動區位於高雄縣甲仙鄉小林村, 2009 年 8 月 5 日莫拉克颱風來襲時在此區域降下平均雨量約 1,998.0 mm, 強降雨於 8 月 9 日 5 時左右引發獻肚山崩塌災害, 導致小林村 (含村內避難處所) 遭致崩落土石掩埋, 造成 400 人以上死亡, 也是國內因降雨引發土石災害造成最多死亡人數之案例。陳樹群、吳俊鉉 (2009) 依據災害發生前 (內政部) 與災害發生後 (林務局) 5 公尺乘 5 公尺數值高程地形 (DEM) 進行岩體滑動前後的地形變遷分析, 將獻肚山總滑動區域分為 A、B 兩區, A 區滑動源頭面積約為 48.5 公頃, 總土方量約為

$25.5 \times 10^6 \text{m}^3$, 岩體滑動型態主要為順向坡崩塌, 爾後轉為土石流及土砂堆積; B 區滑動源頭面積約為 10.7 公頃, 總土方量約為 $1.6 \times 10^6 \text{m}^3$, 岩體滑動型態以順向坡崩塌為主, 研判引致岩體滑動崩塌的主因為降雨引發入滲在糖恩山砂岩及上方堆積層間形成滑動面, 進而引發大規模岩體滑動。

(3) 紅葉坪

紅葉坪滑動區位於南投縣中寮鄉永祿溪東南岸, 此區位於九份二山的西側, 同屬九二一集集大地震之坡地災害。因區域廣且滑動機制複雜, 於地表上不易觀察, 故較少受到關注。而李錦發、魏正岳 (2003) 利用多時期航遙影像進行山崩立體判讀與影像標的物座標變化判釋, 顯示地震後岩體滑動範圍達 100.0 公頃, 滑動土方量在 $50 \times 10^6 \text{m}^3$ 以上, 其水平最大位移量約 24.0 公尺。因此除航遙影像分析外, 並進行鑽探及岩石力學與試驗和監測、地形與地質調查、邊坡穩定與變形分析和地滑預警值界定等作為, 持續監測此區域的滑動情形。

(4) 九份二山

九份二山滑動區位於南投縣國姓鄉南港村, 於九二一集集大地震時, 鄰近南投縣集集鎮

表 3 分析案例參考資料及來源

Table 3 References and sources of studying cases

編號	案例名稱	滑動面積 (ha)	土方量 (10^6m^3)	土方量的估算方式	資料來源
1	廬山	30.0	14.37	鑽孔資料概算平均深度	林俐玲等 (2010)
2	小林村	59.2	25.51	災害前後 DEM 相減	陳樹群等 (2009)
3	紅葉坪	100.0	50.00	航遙影像與座標變化判釋	李錦發等 (2003)
4	九份二山	102.5	32.85	87 年與 91 年之地形推估	水土保持局 (2008)
5	草嶺	400.0	120.00	---	洪如江等 (2000)

表 4 分析案例特性說明

Table 4 Landslide characteristics of studying cases

編號	案例名稱	發生時間	誘發因素	備註
1	廬山	1994 年道格颱風至 2009 年莫拉克颱風共發生 10 次滑動	颱風及豪雨	著名觀光景點的地滑案例
2	小林村	2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風	颱風	國內傷亡人數最多的案例 (順向坡)
3	紅葉坪	1999 年 9 月 21 地震	地震	集集大地震所導致的著名地滑案例
4	九份二山	1999 年 9 月 21 地震	地震	集集大地震所導致的著名崩塌地 (順向坡)
5	草嶺	1862 年至 1999 年 921 地震期間共發生 5 次大規模崩塌	颱風及地震	國內崩塌規模最大案例 (順向坡)

震央的國姓鄉南港村崁斗山東南山麓一帶，發生大規模順向坡岩體滑動的情形，崩塌破壞與土石堆積區域的總面積達 195.0 公頃，總計 39 人遭土石掩埋，崩滑而下的土石亦堵塞北山坑溪（木屐欄溪）支流韭菜湖溪及澀仔坑溪，分別形成韭菜湖溪與澀仔坑溪兩處堰塞湖。依據崩塌前後的地形變化（1998 年與 2002 年），測得滑動區面積為 102.5 公頃，平均深度為 34.0 公尺，滑動土方量為 $32.8 \times 10^6 \text{m}^3$ （農委會水土保持局，2008）。

(5) 草嶺

草嶺滑動區位於雲林縣古坑鄉草嶺村，此滑動區為國內過去大規模岩體滑動中發生歷史最早，規模也最大的案例，範圍大致位於草嶺村春秋斷崖向南滑動至清水溪及對岸嘉義縣梅山鄉之倒交山。草嶺岩體滑動自 1862 年至 1999 年九二一集集大地震，由於地震或豪雨因素共發生的災情如表 5 所示，因崩塌直接或間接（草嶺潭潰堤）致災者，總計死傷約 170 人。九二一集集大地震時，草嶺快速崩滑而下，土石運移距離長達 3、4 公里，滑動面積約 400.0 公頃，影響範圍近 500.0 公頃，滑動土方量約為 $120 \times 10^6 \text{m}^3$ ，造成 36 人罹難並形成堰塞湖，屬國內外極為罕見的大規模岩體滑動案例。

3. 滑動土方量的分析方法

一般常用於集水區岩體滑動土方量的推估方法有分為實測法和經驗公式法等。實測法為量測岩體滑動災害前後實際地形高程變化而得到滑動範圍內實際的利用多時期航遙影像製作高解析度的數值地形 (DEM) 土方量，常用的方式有空載或地面的光達 (LIDAR) 或資料。雖然以此方法推估岩體滑動土方量有精度高的優點，然而早期因為受限於量測技術或無法掌握實際發生災害的地點，因此要用這類的分析方法往往欠缺災害前的量測資料，無法進一步的分析。而近年來受惠於量測技術及工具的進步，各單位也開始對於高致災地區展開區域性的測繪工作，大量建置不同區域高精度地形高程資料，一旦地質災害發生時，能有更充足且精度高的地形資料進行分析。

經驗公式法則利用分析不同岩體滑動土方量案例的資料，建立滑動面積與深度、滑動坡度與深度等之關係式，或直接調查坡面的土壤厚度建立坡度與覆土厚度的經驗公式等，評估潛在的滑動土方量。當岩體

滑動災害發生時，這些方法能迅速推算出滑動的經驗深度，將此深度乘上滑動的實際面積，就能很快的推估出岩體滑動土方量。雖然此方法的推估成果常常有誤差過大的情形，但能夠在災後短時間內以不高成本粗估概略土方量，提供後續災後的各項處置參考，是為一個可供應用的方法，亦為現階段常用的推估方式。國家災害防救科技中心 (2005) 指出經驗公式法於應用時常見的名稱有平均深度法、坡度深度法及面積深度法等。其中平均深度法為對於估算範圍內的滑動區域給定一個固定的平均深度來推估；坡度深度法則假設坡面之剪應力等於抗剪力時，為坡面滑動發生之臨界情形，因此可推估深度與坡度之關係，針對估算範圍內的滑動區域進行評估時，依照不同的坡度範圍給定代表性的深度，即可推算出滑動區域的體積；面積深度法為考量滑動規模與深度之關係，此方法亦為地調所於現地調查時常用的坡面滑動深度推估公式，若為淺層一般滑動面積小時，深度約 0.5 公尺至 2 公尺，面積大者深度約 2 公尺至 10 公尺，規模更大更深的岩體滑動，滑動深度可達 10 公尺以上（如表 6）。除了面積深度法外，還有利用歷史崩滑案例的面積及體積資料直接迴歸出關係式，在應用上只需利用航遙資料求出滑動的面積，即可得到滑動土方量，表 7 為陳樹群等 (2010) 依照不同地區之滑動面積與體積，分析後所得到之面積體積法估算式。本文將其面積深度法及面積體積法等以面積直接推估深度或體積的方式稱為面積評估法，而前述各項方法的適用性比較如表 8 所示。

表 5 草嶺崩塌災情歷史表 (洪如江等，2000)

Table 5 Historic records of the Tsaoling Landslide Area

崩塌時間	颱風、豪雨、地震	災情
1862/06/06	嘉南地區大地震	清水溪積水成潭
1941/12/17	嘉義地震	順向坡滑動約 $1.0 \times 10^9 \text{m}^3$ ，造成數人傷亡房屋毀損
1942/08/10	豪雨	再度滑動 $150 \times 10^6 \text{m}^3$ ，清水溪積水成潭
1951/05/18	豪雨	堰塞湖潰堤，導致一連工兵部隊失蹤
1979/08/15	豪雨	順向坡滑動約 $5 \times 10^6 \text{m}^3$ 清水溪積水成潭
1979/08/24	---	堰塞湖潰堤，下游橋梁二座沖失，交通中斷數週
1999/09/21	集集地震	草嶺順向坡滑動約 $120 \times 10^6 \text{m}^3$

平均深度法因不考慮滑動區域範圍大小及所在的坡度, 均假定一個相同的深度進行估算, 所造成誤差最大, 故此方法較少使用於實際土方量的評估。坡度深度法主要考量坡面的覆土厚度, 不同坡度之覆土厚度不同, 因此針對不同坡度所建議之深度也有所不同, 然而此概念並不適用於大規模(大範圍且深度深)岩體滑動案例分析, 因為為大部分大規模岩體滑動的滑動面分布於坡面下較深層的岩盤, 表面的覆土厚度並不是考量的重點, 因此坡度深度法比較適用於淺層岩層崩塌土方量的估算。故由表 8 及前述說明, 本文所篩選的大規模岩體滑動分析案例將以面積評估法進行分析及討論。

面積評估法除地調所 (如表 6) 所建議的滑動深度外, 水利署 (2010) 於高屏流域選擇六個深層 (平均深度大於 2 公尺) 崩塌地及五個淺層崩塌地, 以全站儀 (total station) 進行崩塌地的災後現地量測, 加上行政院公共工程委員會 2010 年對於高雄小林村崩塌地的調查結果, 總共 12 個案例資料, 迴歸出滑動面積與體積的關係式如式 1 所示。

$$V=0.2A^{1.3} \quad (R^2=0.84) \quad (1)$$

其中 A : 滑動面積 (平方公尺, m²) ;
V : 滑動體積 (立方公尺, m³)

三、結果與討論

今將研究中所蒐集五個大規模岩體滑動案例實際的滑動體積與地調所及水利署之面積評估法比較結果 (如表 9 及圖 1), 於表 6 (地調所) 及式 1 (水利署) 所推估出之滑動土方量有明顯低估之情形, 且地調所經驗公式的誤差率分別達 66.7%至 80.0%之間, 而水利署經驗公式誤差率則有 36.2%至 81.6%。因此將各文獻中所推估之土方量迴歸二次多項關係式 (判定係數為 0.97) 列於式 2 及圖 1, 藉此推估出適合於大規模岩體滑動使用之簡易土方量推估公式。

$$V = -0.0004A^2 + 0.4547A \quad (R^2=0.97) \quad (2)$$

其中 A : 滑動面積 (公頃, ha) ;
V : 滑動體積 (百萬立方公尺, 10⁶m³)

現以式 2 之簡易土方量推估公式對於本研究中探討之案例進行土方量的估算, 評估結果如表 10 所示。由表 10 結果顯示編號 1 (面積 30.0 公頃) 至編號 5 (面積 400.0 公頃) 的案例其誤差率大幅降低為 1.8%至 29.1%之間, 因此建議岩體滑動面積在 30.0 公頃至

400.0 公頃的案例, 可採用此簡易土方量推估公式進行土方量之分析。

表 6 滑動面積與代表性深度對照表 (地調所)

Table 6 The relationship of the sliding area and versus depth

滑動面積 (ha)	平均代表深度 (m)
0-0.1	1
0.1-1	2
1-10	5
>10	10

表 7 不同地區之面積體積法估算式

Table 7 The regression formula of landslide area and volume form related references

研究來源	研究區域	適用面積範圍 (m ²)	土方量 (m ³)
Simonett (1976)	新幾內亞	2 < A < 10 ⁵	V = 0.24 A ^{1.368}
Hovius et al. (1997)	紐西蘭	10 < A < 10 ⁶	V = 0.05 A ^{1.50}
Korup (2005)	紐西蘭	A > 10 ⁶	V = 0.02 A ^{1.95}
Guzzetti et al. (2008)	義大利	2 < A < 10 ⁹	V = 0.0844 A ^{1.4324}
陳樹群等 (2010)	臺灣-石門水庫	102 < A < 10 ⁵	V = 0.04 A ^{1.368}
陳樹群等 (2010)	臺灣-大甲溪	102 < A < 10 ⁵	V = 1.92 A ^{1.10}

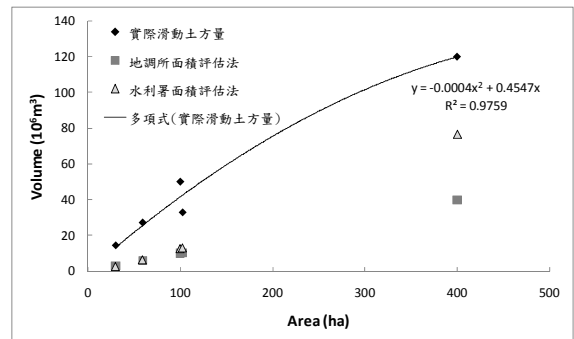


圖 1 面積評估法計算滑動體積與實際滑動土方量之差異比較圖

Fig.1 The difference between actual landslide volume and estimated by other references

表 8 不同經驗公式法應用於土方量體推估的適用性

Table 8 Applicability of different empirical formulas for landslide volume evaluation

名稱	推估方式	適用性分析
平均深度法	依據經驗於滑動範圍內給定一固定深度乘上滑動面積	計算為最簡便、快速的推估方法，但誤差也最大
坡度深度法	由坡面覆土的下滑力及抗滑力來分析不同坡度的建議深度乘上滑動面積	適用於規模較小、淺層的岩屑崩滑，因大規模岩體滑動面較深，考慮表層覆土厚度較無意義；且崩滑面積太大的案例，計算出的平均坡度在應用上誤差大
面積深度法	依據滑動面積越大深度越深的歷史經驗，建議不同面積所對應之深度乘上滑動面積	相較於坡度深度法計算較為簡便，適用於現地調查及一般的分析，較無滑動面積大小的使用限制
面積體積法	依據歷史案例迴歸出滑動面積與體積關係式，故計算出滑動面積即可得土方量體	如面積深度法般使用上較簡便，惟公式在使用上大多有地域性及適用面積範圍等限制

表 9 面積評估法計算土方量與實際土方量之差異

Table 9 The difference between actual landslide volume and estimated by other references

編號	案例名稱	滑動面積 (ha)	土方量 (10^6m^3)	地調所面積評估法計算之體積 (10^6m^3)	地調所誤差率 (%)	水利署面積評估法計算之體積 (10^6m^3)	水利署誤差率 (%)
1	廬山	30.0	14.37	3.00	-79.1	2.64	-81.6
2	小林村	59.2	27.12	4.85	-78.2	4.93	-76.5
3	紅葉坪	100.0	50.00	10.00	-80.0	12.62	-74.8
4	九份二山	102.5	32.85	10.25	-68.8	13.03	-60.3
5	草嶺	400.0	120.00	40.00	-66.7	76.51	-36.2

註：誤差率= $[(\text{經驗公式求得之體積}-\text{實際土方量})/\text{實際土方量}]\times 100$ ；正值代表求出之體積量為高估；負值代表求出之體積量為低估

表 10 本研究面積評估法計算土方量與實際土方量之差異

Table 10 The difference between actual landslide volume and estimated by Area-Assessment in this study

編號	案例名稱	滑動面積 (ha)	土方量 (10^6m^3)	本研究面積評估法計算之體積 (10^6m^3)	本研究誤差率 (%)
1	廬山	30.0	14.37	13.28	-7.6
2	小林村	59.2	27.12	25.52	-5.9
3	紅葉坪	100.0	50.00	41.47	-17.1
4	九份二山	102.5	32.85	42.40	29.1
5	草嶺	400.0	120.00	117.88	-1.8

註：誤差率= $[(\text{經驗公式求得之體積}-\text{實際土方量})/\text{實際土方量}]\times 100$ ；正值代表求出之體積量為高估；負值代表求出之體積量為低估

四、結論與建議

本研究蒐集臺灣地區大規模岩體滑動案例，並由各案例滑動土方量的角度分析常用土方量推估方法的經驗公式之適用性。結果顯示在平均深度法、坡度深度法及常用的面積評估法中，面積評估法較適用於推估大規模岩體滑動的滑動土方量。由地調所及水利署所推估的面積評估法經驗公式中，所估算之滑動土方量均有低估的情形，且有一定的差距程度，其誤差率分別可達 66.7%至 80.0%及 36.2%至 81.6%。由於本研究蒐集的案例大多對於滑動面積、體積及土方量估算方式有詳盡的說明，因此直接以各文獻彙整的五個案例中提及之滑動面積和土方量進行迴歸分析，所得到之二次多項關係式，重新推估一個簡易的面積評估法經驗公式，以期在類似大規模岩體滑動災害發生時，能在短時間用滑動面積推估出一個精度較佳的滑動土方量。

而以前述方式推求一個新的面積評估法經驗公式之後，進行各個案例的驗證，其驗證編號 1 (面積 30.0 公頃)至編號 5 (面積 400.0 公頃) 的案例的結果顯示誤差率下降至 1.8%至 29.1%。因此建議將此新的面積評估法經驗公式設定為適用於滑動面積 30.0 公頃至 400.0 公頃之土方量計算用，而在 30.0 公頃以下規模的岩體滑動案例，建議須重新推求一適用的經驗公式。

參考文獻

- 內政部消防署 (2010), 「歷年天然災害損失統計」, <<http://www.nfa.gov.tw/Show.aspx?MID=1024&UID=1029&PID=1024>> (2010.11.17). (National Fire Agency, Ministry of the Interior (2010) "Statistics of natural disaster losses over the years," <<http://www.nfa.gov.tw/Show.aspx?MID=1024&UID=1029&PID=1024/>> (2010.11.17) (in Chinese))
- 行政院經濟建設委員會 (2010), 「氣候變遷調適政策綱領 (草案)」, 行政院經濟建設委員會. (Council for Economic Planning and Development (2010) *Climate change adaptation policy framework, draft*, Council for Economic Planning and Development, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
- 行政院農業委員會水土保持局 (2008), 「九份二山崩塌地成果觀測計畫成果彙編」, <http://140.96.175.55/9f2s/a_1.htm/> (2010.11.17). (Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture (2008). "A Summary of the Observation Results of the Jiufengershan Landslide," <http://140.96.175.55/9f2s/a_1.htm/> (2010.11.17). (in Chinese))
- 行政院農業委員會水土保持局 (2010), 「重大土石災情報告」, <<http://246.swcb.gov.tw/DebrisPage/ImpNewsDisaster.asp> (2010.11.17). (Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture (2008). "Reports of major sediment disaster," <<http://246.swcb.gov.tw/DebrisPage/ImpNewsDisaster.asp> > (2010.11.17). (in Chinese))
- 防災國家型科技計畫辦公室 (1999), 「九二一大地震水利設施震災調查報告」, 國家地震工程研究中心, 台灣. (National Science & Technology Program for Hazards Mitigation (1999) *The Chi-Chi earthquake survey of water conservancy facilities*, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan. (in Chinese))
- 李錦發、魏正岳 (2003), 「紅葉坪地滑研究」, 經濟部中央地質調查所 92 年度研究發展專題. (Li, J. F., and Wei, Z. Y. (2003). *Study on Landslide in Hong-Cai-Ping Watershed, Technical Report 2003*, Central Geological Survey MOEA, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- 林俐玲、黃振全、顏呈仰、黃貞凱、鄭裕適、張益通 (2010), 「深層岩體潛移邊坡滑動行為研究—以廬山地滑為例」, 中華水土保持學報, 42 (1) : 1-14. (Lin, L. L., Huang, C. C., Yen, C. Y., Huang, J. K., Cheng, Y. S. and Chang, Y. T. (2010) "Deep Seated Creep Deformation of a Slate Rock Slope – A Case Study of Landslide in Lushan Area," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(1):1-14. (in Chinese))
- 洪如江、李錫堤、林美聆、林銘郎、鄭富書、陳正興 (2000), 「天塹可以飛渡、崩山足以斷流 (草嶺潭順向坡滑動)」, 土工技術, 77 : 5-18. (Hung, J. J., Lee, C. T., Lin, M. L., Lin, M. L., Jeng, F. S. and Chen, C. H. (2000) "A Flying Mountain and Dam-up Lake(Taso-Ling Rockslides)," *Sino-Geotechnics*, 77:5-18.

- (in Chinese))
9. 紀宗吉 (2010), 「岩體滑動潛勢調查與判釋」, 國家災害防救科技中心電子報, 62, <<http://www.ncdr.nat.gov.tw/Epaper/Epaper.aspx?id=71>> (2010.11.17). (Ji, Z. J. (2010) "Investigation of Rock Slide Interpretation of Potential," *National Science and Technology Center for Disaster Reduction-Disaster Prevention Newsletter*, 62, Taiwan, <<http://www.ncdr.nat.gov.tw/Epaper/Epaper.aspx?id=71>> (2010.11.17) (in Chinese))
 10. 紀宗吉、林錫宏 (2010), 「廬山溫泉北坡調查與監測」, 99 年度土石流災害防救業務講習. (Ji, Z. J. (2010) "Investigation and monitoring of Lushan Hot Springs Mountain," *99 Annual Workshop on landslide disaster prevention and rescue operations*, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
 11. 財團法人台灣水利環境科技研究發展教育基金會 (2008), 「石門水庫集水區產砂量推估與數位式集水區綜合管理研究計畫」, 經濟部水利署北區水資源局. (Taiwan International Institute for Water Education (2008) *Study on Estimating the Sand Production and Digital Integrated Management of Watershed in Shih-Men Watershed*, Northern Region Water Resources Office of Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan. (in Chinese))
 12. 陳樹群、吳俊鉉 (2009), 「高雄縣小林村獻肚山巨型深層崩塌引致之地形變遷特性」, 中華水土保持學報, 40(4): 359-376. (Chen, S. C. and Wu, C. H. (2009) "The Geomorphological Variation Triggered by Catastrophic Deep Landslide in Siaolin Village," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 40(4):359-376. (in Chinese))
 13. 陳樹群、吳俊鉉、王雁平 (2010), 「地震或降雨誘發崩塌之崩塌特性探討」, 中華水土保持學報, 41(2): 147-158. (Chen, S. C., Wu, C.H., and Wang, Y. P. (2010). "Discussion of the Characteristic of Landslides Caused by Rainfall or Earthquake," *Journal of Chinese*, 41(2): 147-158. (in Chinese))
 14. 國家災害防救科技中心 (2005), 「石門水庫土砂災害問題分析報告」. (National Science and Technology Center for Disaster Reduction (2005) *Study on Sediment Disaster in Shih-Men Watershed*, Technical Report NCDR94-T11, National Science and Technology Center for Disaster Reduction, Taiwan. (in Chinese))
 15. 費立沅 (2009), 「臺灣坡地災害與地質敏感區的關係」, 地質, 28(1): 16-22. (Fe, L. Y., (2009). "Landslides in Taiwan's relations with the sensitive areas of geological," *Geology*, 28(1):16-22. (in Chinese))
 16. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2010), 「氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例(1/2)」, 成果報告書. (Water Resources Planning Institute (2010) *Under climate change in the sediment treatment measures in southern river basins - A Case Study Kaoping Watershed (1/2)*, Water Resources Planning Institute of Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan. (in Chinese))
 17. 三浦弘之、翠川三郎 (2007), 「高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた 2004 年新潟県中越地震での斜面崩壊地の検出」, 日本地震工學會論文集 7(5): 1-14. (Miura, H., and Midorikawa, S. (2007) "Detection of Slope Failure Areas due to the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake Using High-Resolution Satellite Images and Digital Elevation Model," *Annual of Japan Association for Earthquake Engineering*, 7(5):1-14.(in Japanese))
 18. 土木研究所 (2009), 「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案)」に関するよくある質問と答え」, 日本獨立法政法人土木研究所土砂管理研究部火山土石流組. (Civil Engineering Research (2009) *The FAQs of the Manual of deep seated slope failure susceptibility evaluation*, Erosion and sediment control research group, Volcano and debris flow research team, PWRI, Japan. (in Japanese))
 19. 日本國土交通省河川局 (2010), <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/deep_landslide.html> (2010.11.17). (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2010), Japan. <<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/>

- deep_landslide.html/> (2010.11.17))
20. 田村圭司、山越隆雄、内田太郎、武澤永純、清水武志 (2009), 「地震動による山地流域の安全度評価手法に関する研究」, 土木研究所成果報告書. (Tamura, K., Yamakoshi, T., Uchida, T., Takezawa, N., and Shimizu, T. (2009) "Study on seismic resistance evaluation for evaluation for sabo dam using earthquake observation records," *The 2006-2009 project report by Erosion and Sediment Control Research Group*, PWRI, Japan. (in Japanese))
21. 南哲行 (2010), 「深層崩壊及行政的措施」, 2010年國際坡地災害技術交流會議. (Minami, N. (2010) "Deep-seated Landslide and administrative measures," *International Symposium on Slope Land Disaster Mitigation*, SWCB et al., Taichung, Taiwan. (in Chinese))
22. Derron, M. H., Blikra, L. H. and Jaboyedoff, M. (2005) "High resolution digital elevation model analysis for landslide hazard assessment (Akerneset, Norway)," *11th International Conference and Field Trip on Landslide (ICFL)*.
23. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P. and Rossi, M. (2008) "Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy," *Geomorphology*, 96: 105-122.
24. Hovius, N., Stark, C. P. and Allen, P. A. (1997), "Sediment flux from a mountain belt derived by landslides mapping." *Geology*, 25(3), 231-234.
25. Korup, O. (2005) "Distribution of landslides in southwest New Zealand," *Landslides*, 2:43-51.
26. Marchesini, I., Cencetti, C. and Rosa, C. (2009) "A preliminary method for the evaluation of the landslides volume at a regional scale," *Journal Geoinformatica*, 13(3):277-289.
27. Simonett, D. S. (1967) "Landslide distribution and earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains," *New uinea. In: Jennings, J.N., Mabbutt, J.A. (Eds.), Landform Studies from Australia and New Guinea*. Cambridge University Press, Cambridge, pp.66-84.
28. Varnes, D. J. (1978) "Slope movement types and processes: In Landslides, Analysis and Control," *Nat. Acad. Sci. Spec. Rep.*, 176:11-35.
-

2010年11月26日 收稿

2011年02月08日 修正

2011年03月05日 接受

(本文開放討論至2011年12月31日)