

地震山崩快速潛勢評估 建立與應用

柯明淳／國家災害防救科技中心助理研究員

黃明偉／國家災害防救科技中心副研究員

林聖琪／國家災害防救科技中心助理研究員

大規模地震發生後，各類型災害發生迅速且影響的層面廣泛，災害應變作業需於震後短時間內了解災情可能集中之區位，藉以佈署災後的防救災資源。然而相較於結構物與維生管線等具有標準設計與規範之設施而言，崩塌因受控於現地環境差異，現階段發生位置仍無法百分之百有效預警，管理單位因此常處於被動而延誤救援契機。本研究以500公尺 × 500公尺網格為單元，以岩性、坡度以及地質構造等環境條件繪製地文敏感網格資料庫，並利用1999年921集集大地震的崩塌紀錄及地表加速度記錄為基礎資料，透過地文環境、強震區地表加速度與崩塌事件之關聯性，分別建立地震崩塌的加速度警戒值與強震區影響特性，以矩陣方式評估地震後崩塌分布的潛勢等級，希望於地震後短時間內提供崩塌潛勢範圍資訊，給予相關單位作為安全查報的參考資料。

This study tries to build a rapid potential assessment model of earthquake landslides to help people knowing where landslides occurred after earthquake happened. The mode is based on the database, such as geo-susceptibility database, the record of landslides occurred by Chi-Chi Earthquake and ground motions of Chi-Chi Earthquake and is with the square grids by 500 meter. The model is started by the results for analysis of ground motions, geo-susceptibility database and the record of landslides. This model has been on-line since 2013. Its effectiveness could be achieved the original objectives. But its accuracy may still be upgrade after testing by earthquake events. Then it could be provided a more accurate forecasting information to managers as reference for earthquake emergency operation.

前言

崩塌的發生往往因其位置的不確定性而無法於短時間內有效預估，但當發生時其威脅到包含道路安全、救援避難以及生命傷亡等各種層面。然以臺灣地區的崩塌事件而言，除受重力影響外，主要誘發的原因多為降雨事件或地震事件所導致，其中更以因季風與颱風等季節性之降雨所引致的崩塌致災事件為多，故現階段針對於降雨誘發型崩塌的研究其成果相當顯著與豐碩，除常見的坡地現地監測系統外，透過歷史災害與降雨紀錄，利用雨量警戒值監測方式，或者是模擬影響範圍推估等方式，皆可於各降雨事件發生時，及時提供管理單位作為減災或是疏散避難時使用參考資料（林等人^[1]）。

然而對於的地震引致的崩塌事件，臺灣地區因相關崩塌紀錄有限，相對的預警模式也就少於針對降雨型崩塌各種預警與評估模式。除因紀錄較少外，大規模地震發生後，相較於如結構物倒塌損毀與倒塌、維生管線損壞等各種面向災害不同之處，結構物設計與管線鋪設時皆有其相關設計規範與確定地座落位置，震後較易於進行查報檢核或災損模擬，而崩塌發生與否主要受控於其環境條件，即使鄰近兩個環境相似之區域，受到相同外力衝擊其發生位置仍無法有效標定，再加上地震本身所具備地突發性，使得地震型崩塌的預防作業更加難以防範。

現階段地震崩塌的研究主要仍利用 1999 年 921 集集大地震所引致臺灣中部地區的崩塌事件進行探討。根據相關研究結果，認為地震後影響崩塌發生的主要條件為地表震動強度、震央距離、斷層破裂位置距離、岩層性質以及坡地坡度等五項 (Edwin *et al.* [2]; Keefer [3]; Sassa *et al.* [4]; Tibaldi *et al.* [5]; Wieczorek *et al.* [6]; 洪等人 [7]; 廖 [8]; 林等人 [9])。然而相對變動性較小的地質地形條件，地表震動的分析便為各研究討論之標的，但由於分析者分析之方式之差異，研究結果也出現不同之處，廖 [8] 利用衛星影像判釋 921 集集地震的崩塌分布，發現受地表加速度 250 gal (PGA) 以上區域內的崩塌面積，佔總面積的 96.8%。林等人 [9] 針對 921 集集大地震後所發生的崩塌與土石流進行研究，根據崩塌紀錄所推估結果，地震誘發地崩塌紀錄，其發生多在受地表加速度值逾 400 gal 或以上之區域。林等人 [10] 則利用 921 地震後大地工程破壞紀錄以及遙測判釋結果，引致崩塌發生最低門檻應在水平地表加速度 (PHGA) 100 gal，垂直向加速度 (PVGA) 則在 70 gal。Huang 等人 [11] 根據分析 921 地震崩塌資料則認為易導致崩塌發生處為地表加度為垂直地表加速度超過 150 gal，水平地面加速度超過 250 gal 之坡面。而在國外對於地表震動強度引致崩塌研究也有不太相同之看法，Keefer [12] 利用 40 個地震的崩塌紀錄進行分析，顯示規模大於 $M_L 4.0$ 以上之地震才有崩塌之可能性，Mousavi 等人 [13] 針對伊朗地區因地震所導致地崩塌行為，推斷地震導致當地崩塌的地表加速度臨界值約在 370 gal。

而本研究主要之目的，為建立一個能於短時間內能針對震後的崩塌影響範圍的評估方法，能於地震發生之初期提供中央應變中心協助評估影響公路、聚落等安全性查報作業與研判災情時所需的參考資訊，減少災害未明時期的過渡期，提升避難疏散與救援之速率。

模式建置規劃與資料採用

本研究所建立地震崩塌快速評估模式，其目的為於地震事件發生能夠於短時間內提供中央災害應變中心相關參考資料，為使地震發生時程式能於短時間內演算完成，本研究將評估模式分為的模式建置、環境

條件影響與誘發強度門檻等部分，皆必須加以規劃，以達到短時間及時運算之效能，本章節則對模式各項工作內容進行說明：

模式建置說明

為達到地震發生 5 至 10 分鐘的短時間內能有效說明崩塌的高風險或發生高潛勢區域，同時在時間限制下，且不遺失現地環境條件對於崩塌發生的影響性。故本研究設定以網格作為模式進行分析之基本單元，希望藉由網格有效呈現現地之條件同時增加模式演算之速率。本研究中所採用網格單元大小，主要為採用林等人 [1] 以及柯等人 [14] 針對崩塌預警系統研究時，整理目前地質、地形、地震與氣象等相關資料解析度後 (表 1)，認為現階段適合資料的網格尺度，應為長寬為 500 公尺之網格。而這些網格在然後結合地文環境資料、地震崩塌目錄以及強地動等資料，便可針對歷史災害事件與地文環境、強地動的相關性進行分析，以作為地震引致崩塌的基礎分析資料庫 (圖 1)。

表 1 各項資料現有之精度與產製單位

資料種類	資料名稱	範圍或比例尺	產製單位
氣象	劇烈降雨系統 (QPESUMS)	1.25 公里網格	交通部中央氣象局
地震	地表加速度演算	2.5 公里網格	國家災害防救科技中心
地形	數位地形資料 (DTM)	1 公尺、5 公尺、30 公尺、40 公尺	內政部國土測繪中心
地質	地質圖	1 : 25000 1 : 50000 1 : 250000	經濟部中央地質調查所

而考量地震發生的時間不確定性，再者由於應變作業人員也無法長時間持續進行監控或有足夠的時間餘震後進行分析評估，因此地震山崩快速潛勢評估模式也需朝自動化演算為方向，透過程式自動化監控與運算，於每一次的地震發生後地震崩塌之潛勢分布。此外，為使應變作業相關人員更能有效使用模式所產出之分析資料，在模組程式中除初步自動化的地圖繪製功能外，更能產出符合現階段兩大地理資訊系統 (ArcGIS 與 MapInfo) 以及 Google Earth 所能使用的 shp、tab 以及 kml 等檔案格式 (圖 2)，以提供災害管理機關或單位進行救災部屬或他項工作時所需資料的加值與應用。

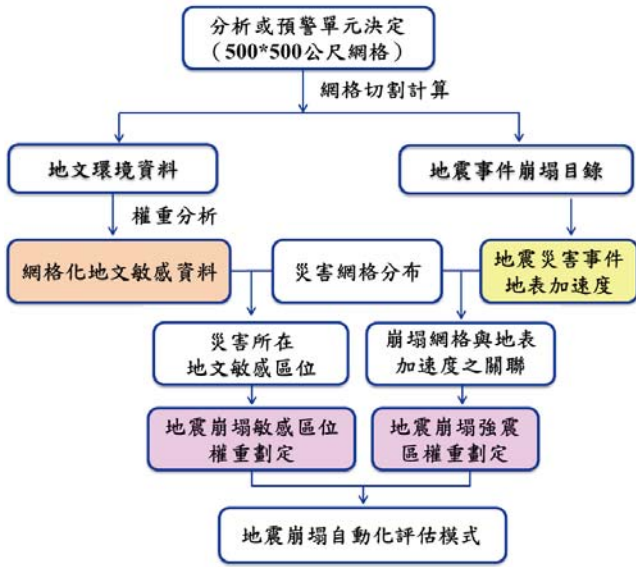


圖 1 本研究資料分析與研究流程

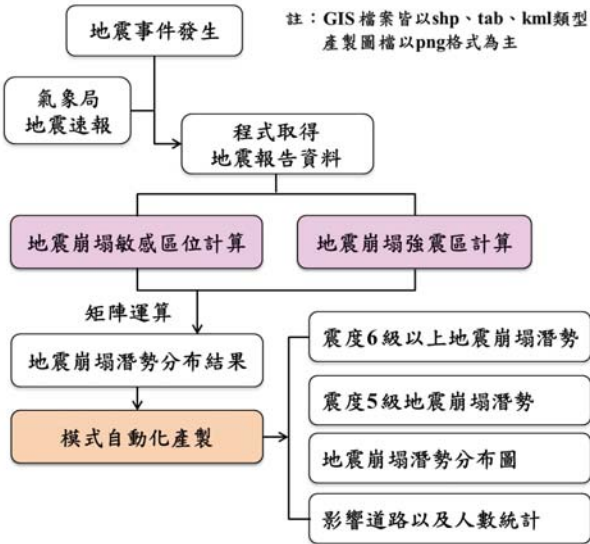


圖 2 地震崩塌快速潛勢評估模式的演算流程與產出

地文環境條件選擇與分析方法

地文環境條件的選擇，主要由林^[15]、李等人^[16]以及溫^[17]針對崩塌評估的 50 多項影響因子中，選擇常用的岩石性質、地形坡度以及地質構造分布等條件，優先作為代表現地環境之評估資料。本節中則分別說明本研究對於各因子之選用因素以及相關分析方式。

岩石性質

岩石性質之資料主要以中央地質調查所出版的地質圖幅內的岩層資料為主，但受限於現階階段的調查進度，故暫以大比例尺的 1：25,000 環境區域地質圖為底，結合比例尺 1：50,000 的區域地質圖、流域地質圖

與 1：250,000 的台灣地質圖陸續將未涵蓋之區域補足，故本研究中共接合 157 幅比例尺 1：25,000 環境區域地質圖、56 幅比例尺 1：50,000 區域地質圖以及 18 幅比例尺 1：50,000 流域地質圖（柯等人^[14]）（圖 3），為有效反映岩石於現地之情況，再依中央地質調查^[17]所訂定的岩體強度分級分類（圖 4）分別給予強至弱，1 至 7 分的配分（岩體越完整強度越強者，分數越低），利用面積透過加權平均進行各網格岩體強度資料計算。然而由於本研究參考岩性資料，為岩層的空間分布以及岩體強度資料，故在不同圖幅邊界的地層延續、分層等條件的合理性則暫不作考慮與要求。

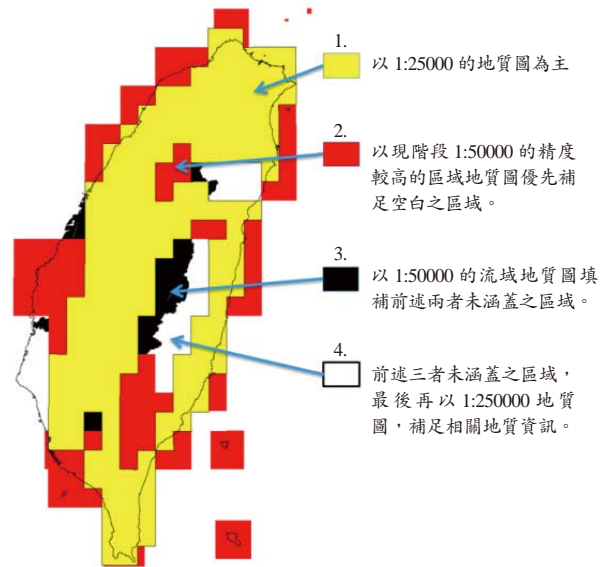


圖 3 各比例尺地質圖使用分布說明

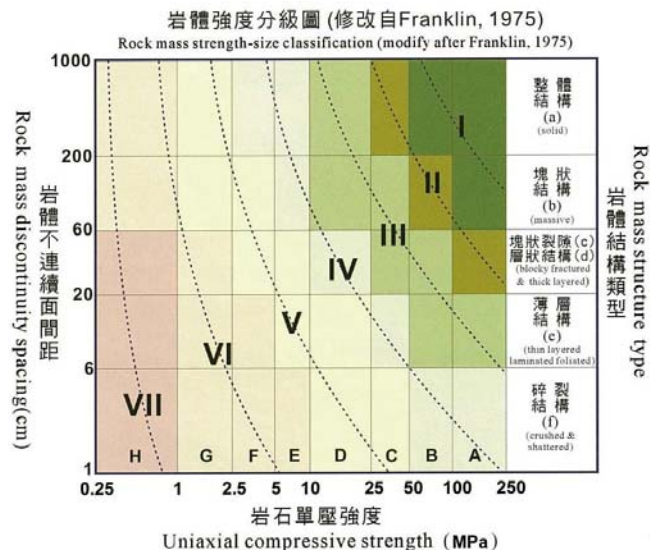


圖 4 岩體強度分級圖（中央地質調查所^[18]）

岩體弱面資料分析

出露於坡面的岩體由於受風化侵蝕作用或受到斷層與褶皺等構造生成時之影響，常發育出節理、劈理等弱面發育，使得岩體原始強度減弱，受外力影響而易於造成崩塌，然而再進行相關評估時，詳細的弱面資料除特定目的或細部區域於研究所繪製大比例尺地圖外，大多數比例尺地質圖的弱面資料多無呈現。故在地文敏感資料建置過程時，增加兩個條件暫以表示岩石弱面的影響程度（柯等人^[14]），此條件分別為：

1. 考量因溪流沖蝕邊坡坡腳後，易造成上邊坡岩石出現解壓節理（林^[19]），故本研究中將溪流資料與網格進行計算溪流比值（式(1)），藉以代表溪流所造成的解壓節理現象，而其相關權重分數便以其溪流比值作為評分分數之來源；

$$D \frac{\sum L}{A} \tag{1}$$

式中， D 為溪流密度； $\sum L$ 為溪流總長度； A 為單位面積。

2. 斷層以及褶皺等地質構造生成時，岩體因擠壓、張裂而出現弱面，故再詳細的地質資料時，構造分布也可作為弱面資料的參考來源，然而地質圖中地質構造線所代表為構造於地表上之所在位置與延伸方向，但地質構造影響範圍應為一個帶狀的破壞範圍，本研究以地質構造 1 公里影響範圍進行環域分析（柯等人^[14]、陳^[20]）；而每一個地質構造在本研究中皆視為獨立事件，若網格內含有多條地質構造線時，則視為多次事件之影響。評分依據以各網格內地質構造影響面積與各網格面積比值作為分數並進行累加，所得分數越高代表區域內弱面影響性較高。為避免構造線之區位因比例尺大小差別而造成位置差異過大，地質構造資料以中央地質調查所已出版的 1：50,000 比例尺區域地質圖為主，對於未調查之區域暫時為無地質構造經過區域，爾後待新調查完成並取得時資料再進行修正。

地形坡度資料分析

崩塌現象於地質學上之意義實屬於塊體運動，其主要原因來自於重力持續不斷的牽引，後因地震與降雨所誘發，然而根據相關研究（Anbalagan^[21]；Brunsdan^[22]；Donati and Turrini^[23]；Guzzetti *et al.*，

[24]；Varnes^[25]；Zhou *et al.* [26]）坡度平緩或陡峭則為應為地形上影響崩塌發生要素之一。（林等人^[11]）則利用過去所收集的災害資料，配合臺灣地區的 DTM 資料所分析的地形資料，與崩塌事件和坡度間進行比對，由相關結果顯示，崩塌發生率（特定坡度區間之崩塌面積與網格面積比率）在坡度 40° 以上有明顯增加之趨勢，而坡度介於 60° ~ 70° 間之邊坡位置，崩塌發生之頻率則較高（圖 5）。而由於地震崩塌發生之規模通常較小以及崩塌發生的重複性，本研究選擇以崩塌數量之結果為參考依據，將坡度分為 0° ~ 30°、30° ~ 50°、50° ~ 60° 以及 60° ~ 90° 等給予 1 至 4 級別分數並於各網格中進行加權之運算。

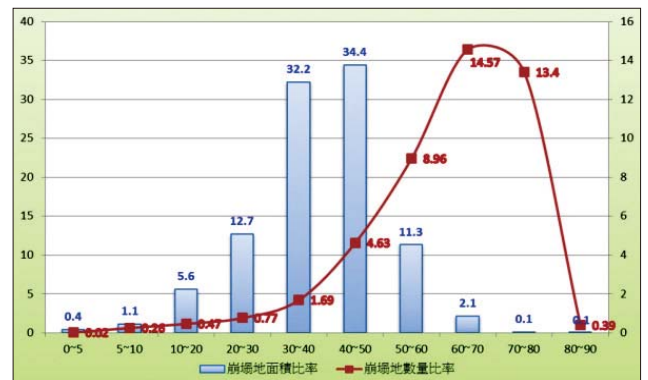


圖 5 各坡度與歷史崩塌紀錄之關係

環境的地文敏感分級

透過地理資訊系統中空間疊合功能，將各網格所涵蓋的岩體強度、溪流密度、弱面評估以及地形坡度等條件，利用權重分析個別計算網格之評估分數（式(2)），後依其之值劃分為低敏感、中低敏感、中敏感、中高敏感以及高敏感等五等級，建置相關地文敏感資料庫，同時繪製全台崩塌地文敏感值圖（圖 6）。

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{A_j}{A_{grid}} \times S_j \right) \tag{2}$$

式中， P 為網格所得所有崩塌地文敏感總分數； P_i 為第 i 項因子敏感值； n 為因子項目數； m 為 i 因子分組項目數； A_j 為 i 因子之 j 分組面積； A_{grid} 為網格面積； S_j 為 i 因子 j 分組敏感值。

地震崩塌的歷史記錄

地震引致崩塌事件主要仍以 921 集集大地震後所導致的紀錄為主，本研究嘗試收集地震後判釋崩塌相關

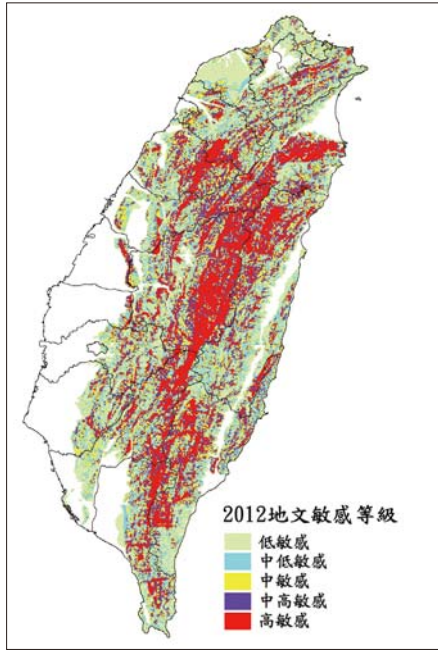


圖 6 本研究所使用的地文敏感圖 (引用柯等人 [14])

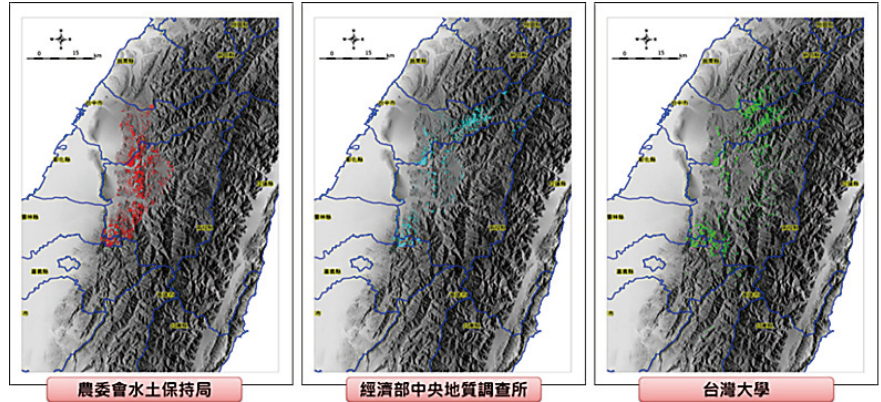


圖 7 921 集集大地震地震山崩紀錄，由左至右為農委會水土保持局、中央地質調查所、台灣大學。

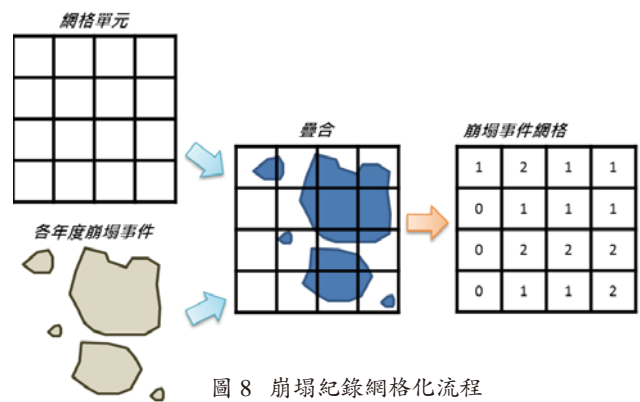


圖 8 崩塌紀錄網格化流程

資料，相關資料中，以農委會水土保持局、中央地質調查所與台灣大學土木工程系所判釋資料較為完整，但可能因為各種判釋原則或方法的不同，再加上地震後降雨事件的影響，崩塌分布也呈現不相同之分布結果 (圖 7)。本研究建構的分析模式以網格主要分析單元，為避免崩塌紀錄受到遺漏，本研究將所收集的 921 集集地震後的各崩塌紀錄與網格進行整合，透過具崩塌資料的網格 (圖 8) 結合 921 集集地震的地表加速度紀錄、地文敏感等資料，建立模式運算時所需的強地動與震後崩塌分布、地文敏感與震後崩塌分布之關係。

崩塌快速評估模式的條件設定

崩塌與強震區

將具崩塌紀錄的網格資料與 921 集集大地震的地表加速度 (PGA) 計算後，便可了解各崩塌網格當時所受的最大地表加速度值，故利用累進百分比之統計方式，探討影響震後崩塌的地表加速度範圍，藉其結果設定導致崩塌產生的地震分區，區別在不同受震範圍內崩塌發生的程度差異，最後在給給予各分區域不同之權重以利分析模式之運算。

根據相關結果 (圖 9)，在 $PGA \geq 40$ gal 時，已有零星之崩塌事件產生；當 $PGA \geq 240$ gal 以及 $PGA \geq 460$ gal 分別則出現快速累積之情況； $PGA \geq 600$ gal

後，崩塌累積數量則已趨近於百分之百。故本研究將崩塌強震區以 PGA 為小於 240 gal、介於 240 gal 至 460 gal 以及大於 460 gal 等三個區域，然而崩場所占網格數量，地震加速度 240 gal 至 460 gal 區間雖多於地震加速度大於 460 gal 區域之數量，但根據崩塌數量統計，地震加速度大於 460 gal 區域仍為主要崩塌集中之區域 (表 2)，因此權重分數的配分上仍以地震加速度大於 460 gal 區域為最大的影響範圍，各分區的權重上分級則暫以等比數列方式，個別給予 1、2、4 的權重，以強調各強震區對崩塌事件所帶來之影響。

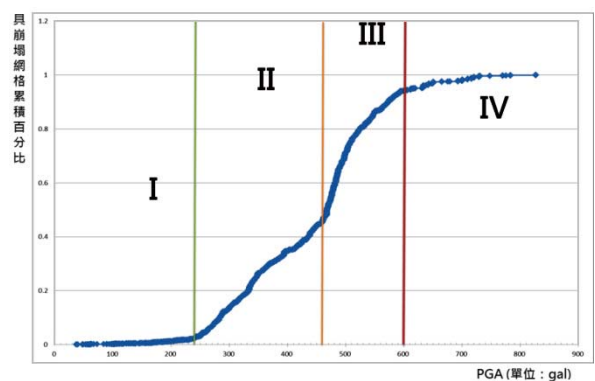


圖 9 具崩塌網格與地表加速度累積百分比圖

表 2 劃分崩塌強震區後的分析結果

PGA 分組 (gal)	崩塌所占 網格數量 (個)	比例 (%)	涵蓋崩塌 數量	比例 (%)	權重初步 設定
PGA < 240	937	9.1%	979	2.3%	1
240 ≤ PGA < 460	5040	48.7%	17972	43.0%	2
PGA ≥ 460	4370	42.2%	22847	54.7%	4

地文條件的影響

本研究另將具崩塌紀錄網格債與地文敏感資料進行比對，主要目的為希望透過地文敏感資料，使得未來在進行震後崩塌評估時分析之結果能貼近於實地發生情況。故根據 921 集集地震後之崩塌紀錄結果顯示，各地文敏感等級在 921 集集地震發生時所釋放能量影響下，皆有崩塌事件紀錄的存在，但若轉換為網格資料，同時透過各網格的地文敏感分級，便可了解震後崩塌與其周遭地文敏感之情況。根據前段地表加速度分區結果，各等級的地文敏感在受到不同大小的地表加速度皆有崩塌紀錄，但地文敏感等級較高之區域受到較小的地表加速度影響，較多崩塌紀錄（圖 10），在總量的比較結果中，地文敏感等級較高之區域也較敏感度低之區域多，故在權重設定部分，則以各群組分級，以 1 至 5 分作為其配分（表 3）。

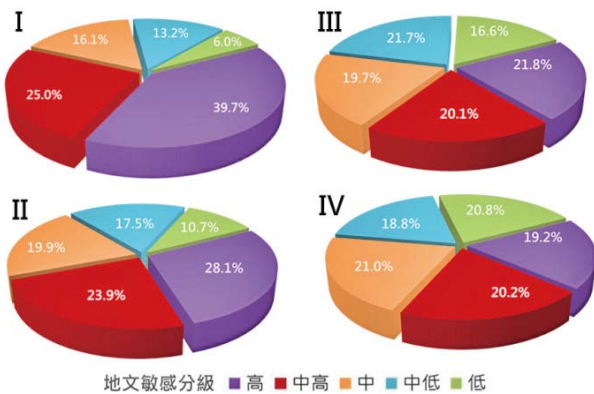


圖 10 各地文敏感等級於地表加速度累積崩塌分區內所占百分比

表 3 具崩塌紀錄網格之地文敏感等級分布狀況

地文敏感 等級	崩場所占 網格數量 (個)	比例 (%)	涵蓋崩塌 數量	比例 (%)	權重設定
低	1314	12.7	5202	9.9	1
中低	1935	18.7	9141	17.4	2
中	2031	19.6	10000	19.0	3
中高	2347	22.7	12431	23.6	4
高	2720	26.3	15898	30.2	5

地震引致山崩潛感值與快速演算模式之建立

在本研究中盡量將各項條件於先前所提之引致崩塌強震區以及地文敏感中於網格方式進行權重評分所得之 G 與 S 兩值以矩陣方式進行計算（式 (3)），後再利用所得之積分 P ，劃分出震後的崩塌高潛勢區、中潛勢區與低潛勢區（圖 11）。

$$P = G \times S \tag{3}$$

P 為潛勢分級之總分； G 為崩塌地文敏感之權重； S 為崩塌強震區之權重。

		地文敏感 (G) (低-----高)						
震區 PGA(S)	配分	1	2	3	4	5	震後崩塌潛勢分級	
100~240 gal	1	1	2	3	4	5	高潛勢區	
240~460 gal	2	2	4	6	8	10	中潛勢區	
≥460 gal	4	4	8	12	16	20	低潛勢區	

圖 11 潛勢分級與權重配分

快速評估模式之應用

地震事件即時監控之應用

以 2013 年 6 月 2 日 13 時 43 分的南投縣仁愛鄉規模 $M_L 6.3$ 之地震為例，根據中央氣象局資料。臺灣各地震度以雲林縣草嶺 6 級最為強烈，雲林縣古坑、四湖、南投縣日月潭、埔里、名間、彰化縣二水、彰化市、嘉義縣阿里山、嘉義市、臺中市大肚以及臺南市則皆達震度 5 級。本快速評估模式於接收到中央氣象局的地震速報資料後，計各網格單元便會依照其所所在位置地表加速度分布 (PGA) 與地文敏感分級，計算震後崩塌潛勢分布之可能情況（圖 12）。根據評估結果，本次地震崩塌高潛勢區主要位於南投縣竹山鎮以及雲林縣古坑鄉交界帶，中潛勢與低潛勢區則涵蓋南投縣仁愛鄉、信義鄉、魚池鄉、水里鄉、竹山鎮、鹿谷鄉以及雲林縣古坑鄉、嘉義縣阿里山鄉、竹崎鎮、梅山鄉等鄉鎮。而根據實際公路紀錄本次事件共造成 21 起震後崩塌事件，7 起崩塌事件發生於中潛勢區；14 起發生於低潛勢區，主要崩塌類型主要為淺層崩塌與零星落石為主（圖 13）。

而 2016 年 2 月 6 日高雄美濃規模 $M_L 6.4$ 之地震（同

南投仁愛地震地表加速度分布



依據中央氣象局地震報告繪製

崩塌潛勢的自動演算結果



為避免資料數過多使Google Earth無法展示結果
自動演算程式預設不展示低潛勢區之評估結果

圖 12 20130602 南投仁愛地震 ($M_L 6.3$) 地震事件地震崩塌快速評估結果



圖 13 2013 年 6 月 2 日震後崩塌預估結果與實際崩塌案例之對照

年 3 月 6 日上修至 $M_L 6.6$), 其中雲林縣草嶺、高雄市旗山、台南市楠西、嘉義縣草山與嘉義市等地區皆於震度五級 ($250 \text{ gal} \geq \text{PGA} \geq 80 \text{ gal}$) 之範圍內, 本研究模式本文中以高雄美濃地震於 0206 報告為分析基礎 (圖 14), 配合公路總局所提供資料 (含路面落石清掃出動紀錄) 成 11 起崩塌事件, 2 起崩塌事件分別位於高潛勢區與中潛勢區, 其餘 9 起則位於崩塌低潛勢之區域 (圖 15)。

區域性地震災害強化之提醒

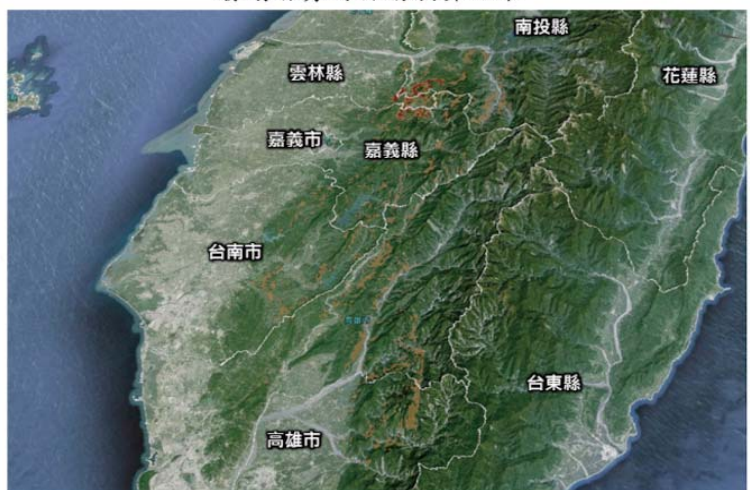
除支援應變時潛勢區分析使用外, 本評估模式也可協助強化地方地震防災力之進行, 現階段雖無法明確表定震後崩塌物理運動行為, 但暫時仍可地震規模提供應注意震後崩塌潛勢範圍, 提醒各地區應注意可能因震後

高雄美濃地震地表加速度分布



依據中央氣象局2月6日地震報告繪製

崩塌潛勢的自動演算結果



為避免資料數過多使Google Earth無法展示結果
自動演算程式預設不展示低潛勢區之評估結果

圖 14 2013020 高雄美濃地震 ($M_L 6.4$) 地震事件地震崩塌快速評估結果



圖 15 2013 年 6 月 2 日震後崩塌預估結果與實際崩塌案例之對照

崩場所造成之影響，本模式現階段已使用於花蓮地區可能出現最大規模地震（吳等人^[28]）、山腳斷層錯動（柯等人^[29]）、2013 年與 2014 年兩次 921 國家防災日等區域性地震災害強化之規畫。

以大台北都會區周緣坡地地震崩塌潛勢評估為例，參考山腳斷層的斷層參數，假設山腳斷層錯動時可能導致地震規模大小。初步評估台北都會區周遭坡地於地震後所可能出現的崩塌潛勢，而這些成果希望相關資料可以協助地方政府或相關權責單位，針對位於崩塌潛勢區域加強地震防護工作與教育宣導，降低地震可能所帶來災害規模，大台北都會區事件震後崩塌潛勢評估之結果如圖 16 至圖 18 所示。

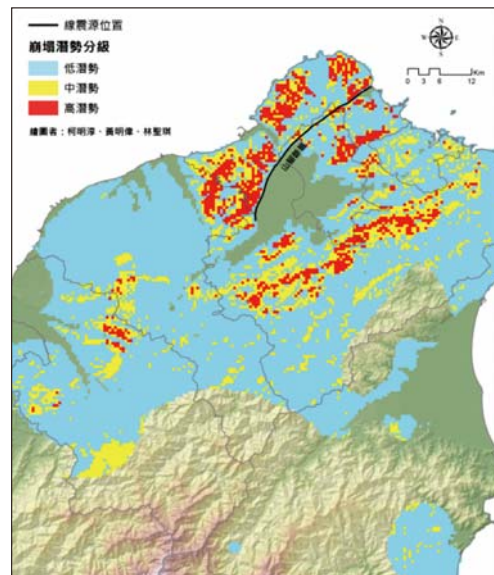
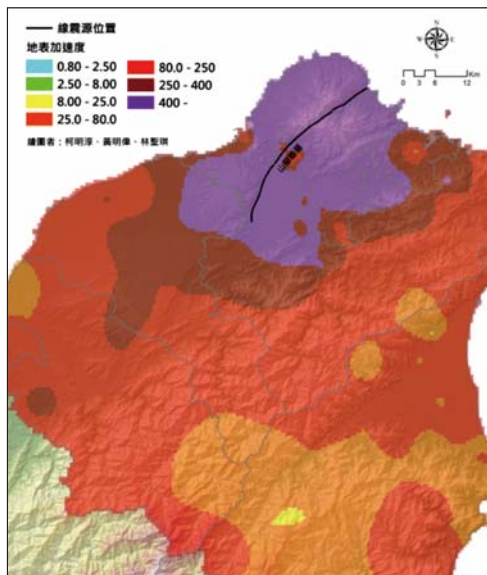


圖 16 (左) 模擬山腳斷層全段錯動，地震規模 M7.1 地表加速度圖、(右) 地震崩塌潛勢圖

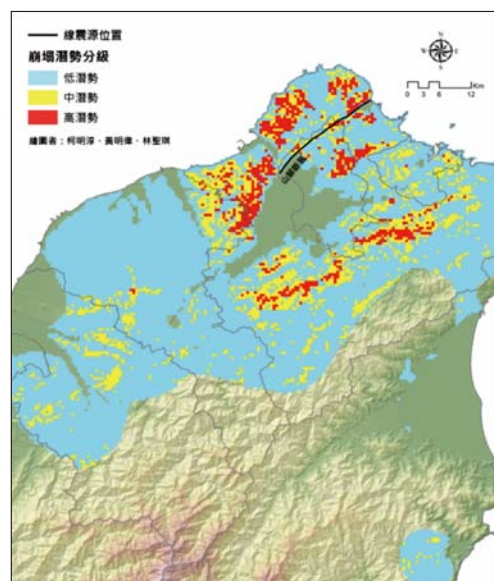
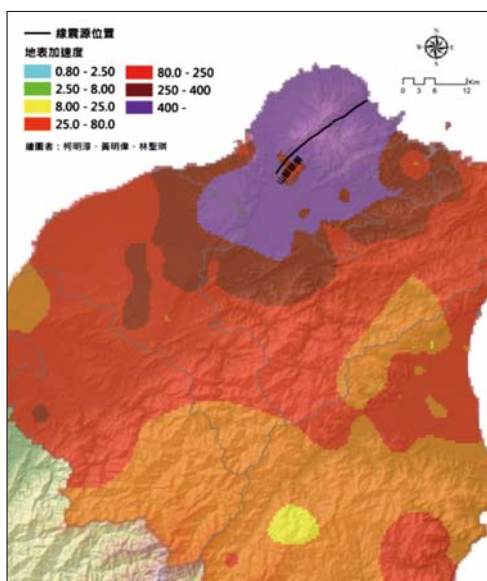


圖 17 (左) 模擬山腳斷層北段錯動，地震規模 M6.9 地表加速度圖、(右) 地震崩塌潛勢圖

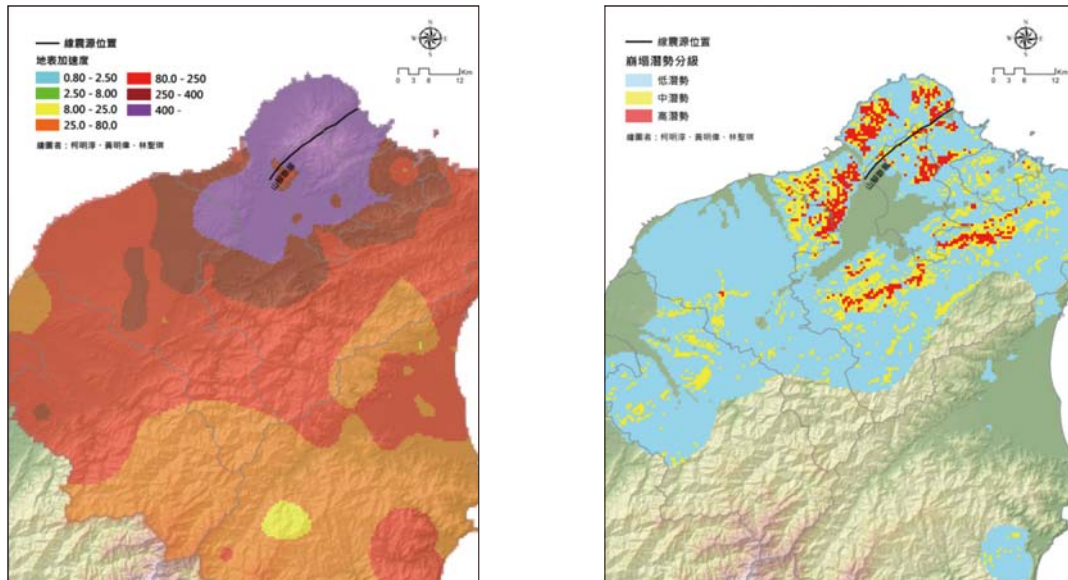


圖 18 (左) 模擬山腳斷層南段錯動，地震規模 M6.3 地表加速度圖、(右) 地震崩塌潛勢圖

表 4 震後崩塌潛勢結果

模擬事件名稱	強震區主要位置 註 1	崩塌高潛勢區內影響人口 (單位: 人) 註 2	崩塌高潛勢區影響鄉鎮 (依照影響範圍大小排列) 註 3
山腳斷層全段錯動 地震規模 M7.1	台北市 新北市 基隆市 桃園縣	200,259	新北市淡水區、桃園縣龜山鄉、新北市新店區、石碇區、三峽區、石門區、林口區、五股區、台北市士林區、新北市萬里區、金山區、三芝區、泰山區、新竹縣關西鎮、新北市平溪區、土城區、深坑區、桃園縣蘆竹鄉、新北市汐止區、八里區、台北市文山區、北投區、新北市新莊區、桃園縣楊梅鎮、新北市瑞芳區、台北市內湖區
山腳斷層北段錯動 地震規模 M6.9	台北市 新北市 基隆市 桃園縣	150,155	新北市淡水區、五股區、石碇區、台北市士林區、桃園縣龜山鄉、新北市新店區、金山區、石門區、泰山區、三峽區、三芝區、林口區、萬里區、平溪區、八里區、台北市北投區、新北市深坑區、新莊區、土城區、汐止區
山腳斷層南段錯動 地震規模 M6.3	台北市 新北市 桃園縣	34,316	新北市三峽鎮、桃園縣龜山鄉、新北市泰山區、新店區、林口區、新莊區、土城區、五股區、八里區、台北市士林區

註 1：強震區為震度 6 級以上或 $PGA \geq 250gal$ 所涵蓋之範圍。

註 2：人口資料為 2010 年災放科技中心利用鄉鎮市人口資料與土地使用結合 500 公尺 500 公尺網格計算之結果。

註 3：採取鄉鎮市為說明單元，在於配合防災業務推動之便利性。

輔助其他決策之需求

而本快速評估模式所產出之結果，隨原有之設定會透過系統轉換為可符合 GIS 或 Google Earth 所用之 shp 檔或是 kml 檔，藉以提供各位使用。就目前為止，支援災害應變作業管理之相關單位，使用對象雖仍以國家災害防救科技中心針對中央以及地方政府所建立的災害情資網與決策支援輔助系統為主，近期配合公路防災之需求，透過網路即時傳輸，提供震後崩塌潛勢評估資料至交通部公路總局 SafeTaiwan 系統使用，以協助公路總局針對其管轄山區道路震後道路通行之安全評估作業。

結論與建議

本研究中所快速評估模式所設立之目的在短時間內能夠提出震後崩塌可能影響之範圍，以利相關單位進行震後災害防救的應變措施，然而現階段成果已能初步符合當時所設立之目標，但仍然需要再考量其他條件，就 2013 年 6 月 2 日南投仁愛地震 ($M_L 6.3$) 與 2016 年 2 月 6 日高雄美濃地震 ($M_L 6.6$)，雖然震後經通報的崩塌災害事件皆在範圍內，但仍有需要再加以精進之處，其中包含：

1. 實際崩塌災害發生位置分布與崩塌潛勢等級仍有預估之誤差，未來如何透過不同地震事件加以修正模式。

2. 舊有崩場地之存在，由於崩場地具有原處在崩場地重複性，藉由此次地震，可發現如：水里郡坑等地區曾發生崩塌之位置，在南投仁愛地震事件中，因受地震地表震動而再發生土石崩落情況，故為要提升評估精度，舊有崩場地實需另設為一特殊別條件，藉以表明舊崩場地對於崩塌潛勢之影響。
3. 由於地表震動會因地形場址效應而有所放大或延長時間，來如何有效反映此條件對於崩塌事件之影響也需再加研討。

未來希望藉由上述條件之增加，可再提升震後崩塌的分析精度，以提供各管理單位較高精度之分析結果，作為震後應變以及協助區防災力之參考資料。

參考文獻

1. 林聖琪、柯明淳、陳韻如、陳聯光、周憲德 (2008), 「崩塌及土石流預警精進研究」。國家災害防救科技中心編號 NCDR 97-T18 技術報告。
2. Edwin L. Harp, David K. Keefer, Hiroshi P. Sato, Hiroshi Yagi, (2011), Landslide inventories: The essential part of seismic landslide hazard analyses, "Engineering Geology," Vol. 122, pp. 9-21.
3. Keefer, D. K. (2000), "Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution — the 1989 Loma Prieta, California event," Engineering Geology Vol. 58, pp. 231-249.
4. Sassa, K. H. Fukuoka, G. Scarascia - Mugnozsa, K. Irkura and T. Okimura (Japan). (1995), "The Hyogoken - Nanbu Earthquake and the distribution of triggered Landslide," Landslide News.
5. Tibaldi, A., Ferrari, L. and Pasquaer, G. (1995), "Landslides trigger by earthquakes and their relations with faults and mountain slope geometry - An example from Ecuador," Geomorphology, 11, 3, pp. 215-226.
6. Wiczorek, Gerald F. and David K. Keefer, (1987), "Earthquake - triggered landslide at La Honda, California Earthquake of April 24, 1984. Seena N. Hoose, ed.," U.S. Geological Survey Bulletin 1639, 73-79.
7. 洪如江、林美聆、陳天健、王國隆 (2000), 「921 集集大地震相關坡地災害、坡地破壞特性與案例分析」。地工技術, 第 81 期, 第 17 至 32 頁。
8. 廖軒吾 (2000), 「集集地震誘發之山崩」。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
9. 林慶偉、謝正倫、王文能 (2002), 「集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響」。2002 臺灣之活動斷層與地震災害研討會。
10. 林美聆、黃紀禎、高贈智、王國隆 (2009), 集集地震邊坡滑動門檻條件。地工技術 121 : 5-14。
11. Ming-Wey Huang, Chien-Yuan Chen, Tzu-Hsiu Wu, Chi-Ling Chang, Sheu-Yien Liu, Ching-Yun Kao, (2012), "GIS-based Evaluation on the Fault Motion-Induced Coseismic Landslides," Journal of Mountain Science, Volume 9, Issue 5, pp. 601-612.
12. Keefer, D. K. (1984), "Landslides caused by earthquakes," Geol. Soc. Amer. Bull., 95, pp. 406-421.
13. S. Mostafa Mousavi, Babak Omidvar, Fereydon Ghazban and Reza Feyzi, (2011), "Quantitative risk analysis for earthquake-induced landslides — Emamzadeh Ali, Iran," Engineering Geology, ENGEO-03242; No of Pages 13.
14. 柯明淳、林聖琪 (2012), 崩塌地文敏感圖之更新與應用。第十三屆海峽兩岸三地環境資源與生態保育學術研討會 (花蓮), 編號第 183 號。
15. 林彥享 (2003), 以類神經網路進行地震誘發山崩之潛感分析。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
16. 李錫堤、潘國樑、林銘郎 (2005), 「山崩調查與危險度評估 — 山崩潛感分析之研究」。經濟部中央地質調查所報告第 94-18 號。
17. 溫振宇 (2004), 結合地震與颱風因子之山崩模式分析。成功大學地球科學系碩博士班碩士論文。
18. 行政院經濟部中央地質調查所 (2008), 「都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖及說明書」。行政院經濟部中央地質調查所出版。
19. 林銘郎 (1992), 河谷解壓節理的研究 — 以太魯閣大理岩峽谷為例。國立台灣大學土木工程研究所博士論文。
20. 陳崇華 (2004), 「台 11 線海岸公路沿線邊坡崩塌災害分析」。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。
21. Anbalagan, R. (1992), "Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain," Engineering Geology, Vol. 32, pp. 269-277.
22. Brunsden, D. (1996), "Mass movement, the research frontier and beyond: a geomorphological approach," Geomorphology, Vol. 7, pp. 85-128.
23. Donati, L. and M.C. Turrini (2002), "An objective method to rank the importance of the factors predisposing landslides with the GIS methodology - application to an area of the Apennines (Valneria; Perugia, Italy)," Engineering Geology, Vol. 63, pp. 277-290.
24. Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali, and P. Reichenbach (1999), "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy," Geomorphology, Vol. 31, pp. 181-216.
25. Varnes, D.J. (1978), "Slope Movement Types and Process In: landslides, analysis and control." Transportation Research Board Special Report, Vol. 176, pp.11-33.
26. Zhou, C.H., C.F. Lee, J. Li, and Z.W. Xu (2002), "On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong," Geomorphology, Vol. 43, pp.197-207.
27. 吳子修、蘇昭郎、柯明淳、劉淑燕、柯孝勳、李中生 (2013), 「花蓮潛勢地震情境分析」。國家災害防救科技中心編號 NCDR 102-T16 技術報告。
28. 柯明淳、黃明偉、林聖琪 (2013), 地震引致崩塌即時評估之初步研究, 2013TGA 聯合研討會。
29. 李馨慈 (2004), 「應用累積位移法於地震引起之山崩潛勢分析」。國立成功大學資源工程研究所碩士論文。
30. 柯明淳、黃明偉、柯孝勳、林聖琪、王安翔、李維森 (2010), 「發展網格化災害預警系統之初步研究」, 2010 台灣災害管理研討會。
31. 柯明淳、黃明偉、林聖琪 (2010), 「地震導致崩塌災害範圍評估之初步研究」。兩岸第一屆地震工程青年學者研討會論文集。
32. 柯明淳、黃明偉、林聖琪 (2014), 「台北都會區周緣坡地地震崩塌潛勢評估」。2014 中華民國地質學會與中華民國地球物理學會學術聯合發表會。
33. 黃春銘 (2005), 「運用模糊類神經網路進行山崩潛感分析 — 以台灣中部國姓地區為例」。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
34. 彭文飛 (2008), 「地震引起山崩之潛勢圖製作 — 考慮地形放大效應與土體滑動堆積行為」。國立成功大學資源工程研究所博士論文。
35. 廖啟雯 (2006), 「機率式地震誘發山崩危害度分析 — 以國姓地區為例」。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
36. 謝寶珊 (2008), 「台灣地區愛氏震度衰減式之研究」。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
37. J. Delgado, J. Garrido, C. López-Casado, S. Martino and J.A. Peláez, (2011), "On far field occurrence of seismically induced landslides," Engineering Geology, Vol. 123, pp. 204-213. 