

地質構造與大型崩塌之關係－以阿里山公路為例

黃筱婷^[1] 楊哲銘^[1] 曹孟真^[2] 董家鈞^{[1]*} 劉家男^[3]
王泰典^[2] 李維峰^[4] 謝有忠^[5]

摘 要 邊坡滑動除與降雨、地震以及人為因素等誘因外，地質構造如層面、節理系統、褶皺、斷層等，均直接或間接影響邊坡的穩定性。因此，詳細野外地質調查與構造判釋對山崩機制研判相當重要。為了解地質構造與邊坡破壞之相關性，本研究針對阿里山公路（台 18 線）除頂至石桌之間沿線進行地表地質調查以及地形、構造分析，並選定公路上、下邊坡之崩塌地，為重點調查區域。經航照判釋、野外調查、層面與不連續面位態統計以及構造分析，本研究於 1/5000 比例尺之地形圖標示出影響山崩之褶皺構造，並決定其傾沒方向，藉由地質構造調查與山崩圈繪成果，本研究說明地質構造如何控制研究區多處山崩之破壞機制。結果顯示研究區受構造控制之大型山崩共分四類：(a) 雙斗狀地形受層面與節理控制之岩楔破壞；(b) 褶皺軸部通過、地層破碎而重複發生之岩屑崩移；(c) 緊密褶皺、層面呈曲面狀而滑動規模受限之非典型順向坡滑動；(d) 向斜與背斜構造間受褶皺軸傾沒方向與傾角控制之平面型滑動。綜而言之，邊坡穩定與否受構造及地形影響甚巨，大型山崩潛勢分析應審慎考量構造因素。

關鍵詞：邊坡、破壞機制、地質構造、順向坡。

On the Relationship between Geological Structures and Mechanisms of Large Landslides in the A-Li Mountain Highway, Taiwan

Hsiao-Ting Huang^[1] Che-Ming Yang^[1] Meng-Zhen Cao^[2] Jia-Jyun Dong^{[1]*}
Chia-Nan Liu^[3] Tai-Tien Wang^[2] Wei-Feng Lee^[4] Yu-Chung Hsieh^[5]

ABSTRACT In order to find the relationship between geological structures and mechanisms of large landslides, a field investigation of topography, geology, and geological structures between Shi-zhou and Xi-ding was conducted along the Ali Mountain highway (T18 route) where landslides are triggered frequently. The aerial photos of the study area after Typhoon Morakot were interpreted to recognize landslides which were later verified in the field to form a landslide map. The character-

[1] 國立中央大學應用地質研究所
Institute of Applied Geology, National Central University, Taoyuan, Taiwan, R.O.C.
[2] 國立台北科技大學材料及資源工程系
Department of Materials Science and Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan, R.O.C.
[3] 國立暨南國際大學土木工程學系
Department of Civil Engineering, National Chi Nan University, Nantou, Taiwan, R.O.C.
[4] 國立台灣科技大學
National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan, R.O.C.
[5] 經濟部中央地質調查所
Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail : jjdong@geo.ncu.edu.tw

istics of structures, such as orientations of discontinuities and vectors of fold axes, were identified from aerial photo interpretation and field investigation. Accordingly, the identified folds axes and fold plunges, which would influence the mechanisms of landslides, were marked on a 1/5000 geology map. Through interpreting the landslide map and the 1/5000 geology map, four landslide patterns which were strongly correlated with geological structures were observed: (1) wedge failure in iron shape topography is controlled by bedding and joints; (2) fragmented landslides usually occur in the vicinity of a fold axis; (3) for untypical dipslope failure, the occurrence and the scale are dominated by series of tightly spaced folds; (4) translational landslides are controlled by the vector of the fold axis. In conclusion, the geological structures and topography significantly control the mechanisms of large landslides.

Key Words: Slope, Failure Mechanism, Geological Structure, Dip Slope.

一、前言

台灣地處環太平洋地震帶的西側，地震活動相當頻繁，且因位於菲律賓海板塊及歐亞板塊的碰撞帶，長期抬升速率可達 $5 \sim 7 \text{ mm/yr}$ (Lin, 1999; Chen and Liu, 2000)。同時，台灣年平均降雨量高達 2500mm，且每年平均有四個颱風侵襲 (Shieh, 2000)，並經常引致高強度降雨。受構造活動劇烈以及集中降雨特性影響，台灣山崩發生頻繁並導致每年平均侵蝕率高達 $3 \sim 6 \text{ mm/yr}$ (Dadson *et al.*, 2003)。除了山崩頻率高之外，台灣山崩之規模亦相當驚人，Guthrie and Evans (2007) 整理出全世界二十世紀三十七個最大的山崩事件 (體積介於 $20 \sim 2000 \times 10^6 \text{ m}^3$)，結果顯示這三十七個大型山崩事件位於台灣的就有五件，其中包括草嶺地區從 1979 年至 1999 年間發生的四次大規模崩塌，最大的一次為 1999 年伴隨著集集地震所發生，崩塌體積約 $125 \times 10^6 \text{ m}^3$ ；另一件為九份二山順向坡滑動，其崩塌體積約為 $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，同樣也是由集集地震所誘發。由統計數據顯示台灣特殊的地質構造與氣候條件，確實有利於深層崩塌之發育。

台灣除了草嶺與九份二山兩個屬世界級規模的大型山崩外，還有很多大型的深層崩塌，如 2010 年 4 月 25 日於國道三號 3.1 公里處發生之順向坡破壞，崩塌體積約 $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，快速移動之土石造成 4 人罹難與國道中斷 (大地工程學會, 2011)；而合計近兩百公頃的梨山地滑地則是另一個重要的例子，1990 年 4 月 15 日梨山因連續降雨發生大規模地層滑動，造成梨山賓館、國民旅舍、公路局車站等重要建物嚴重受損，為了抑制塊體潛移，水土保持局長期投入鉅額經費進行整治，自 84 年至 89 年六個年度投入經費即高達 12

億 5 仟餘萬元 (詹連昌, 1999)。這兩個例子足以說明深層崩塌確實對台灣造成嚴重的威脅。

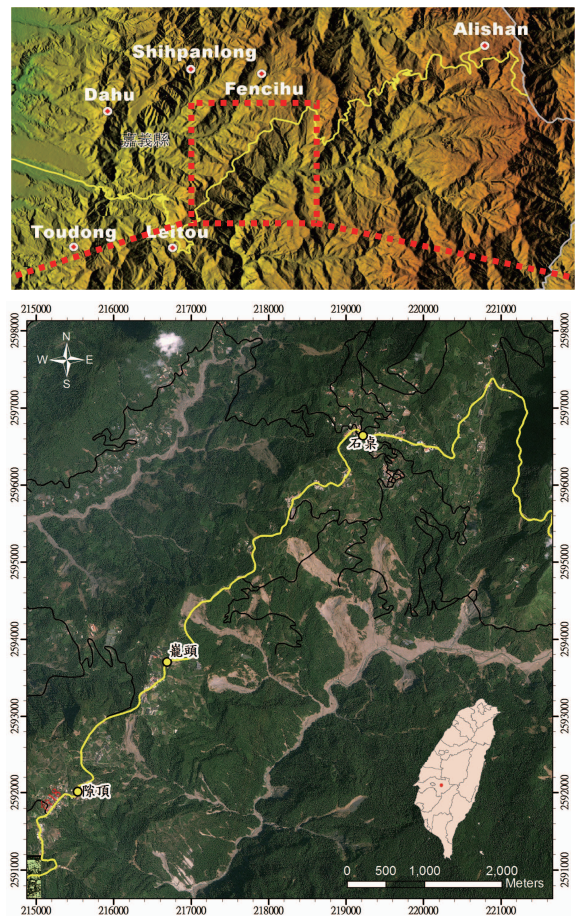


圖 1 阿里山公路研究區以及沿線雨量站分佈。航照拍攝時間為 2009 年 8 月

Fig.1 The ail mountain highway and distribution of precipitation stations in the study area. Air photo is taking in september, 2011

2009 年莫拉克颱風引致了 22705 個總面積約 274km² 之山崩，大於 60 公頃、推測屬於深層崩塌的山崩就有 22 處 (Lin *et al.*, 2011)，其中以小林村崩

塌最受矚目，小林山崩面積達 248 公頃，約有五百人死亡，近兩百戶民宅被掩蓋。雖然地質構造與深層崩塌關係密切為眾所周知 (張雲翔, 2004)，但是除了超大型山崩以外，絕大多數的深層崩塌與地質構造關係文獻中卻討論的並不够充分 (Chigira and Yagi, 2006)，顯示深層崩塌與地質構造間之關係仍有進一步研究之必要。

阿里山地區於莫拉克颱風期間亦有不少崩塌面積達數公頃或十數公頃之大型崩塌發生，受創嚴重。根據災後初步現勘結果發現，阿里山公路部分嚴重崩塌路段因受褶皺以及斷層帶等地質構造影響，造成材料強度弱化，同時，地質構造亦影響了水文地質特性，進而降低邊坡之穩定性 (莊光澤, 1993；高申錡, 1994；董家鈞等, 2009)。由區域地質角度，局部構造如小型褶皺或破碎帶位置與其延伸有不同的解釋相當常見，然而，局部構造卻有可能對山崩造成重要影響。以阿里山公路為例，現有的區域地質圖至少有三個版本 (劉桓吉等人 (1989)；地調所中埔地質圖 (2009)；岩性組合圖 (2007))，三個版本地質圖對於構造的解釋並不相同，其差異性或許由區域地質角度而言並不大，然而卻足以影響山崩發生的機制研判以及山崩潛勢預測 (如順向坡潛勢區的判定)。因此，針對特定山崩密集區域，進行詳細的野外調查與構造判釋有其重要性。

為進一步了解大型崩塌與地質構造間關係，本研究以阿里山公路隙頂至石桌路段為調查區 (圖 1)，雖然研究區山崩崩塌深度不一，然由現地研判，崩塌面積超過 3 公頃者，深度多超過十公尺，因此，雖未能確定崩塌深度超過十公尺即能歸類於深層崩塌，本研究仍以崩塌面積 3 公頃為山崩調查門檻，利用莫拉克風災後航照正射化影像進行面積超過 3 公頃之山崩判釋，並透過地表地質調查，詳細記錄公路上、下邊坡之岩層位態與構造，用以檢核不同版本地質圖之地質構造分布，同時探討邊坡崩塌機制與地質構造間之關係。

二、研究區地質背景與莫拉克颱風期間降雨紀錄

1. 地質背景

根據劉桓吉等人於 1989 年出版的觸口-塔塔加地質圖，研究區位於一系列重要東北-西南走向之逆衝斷

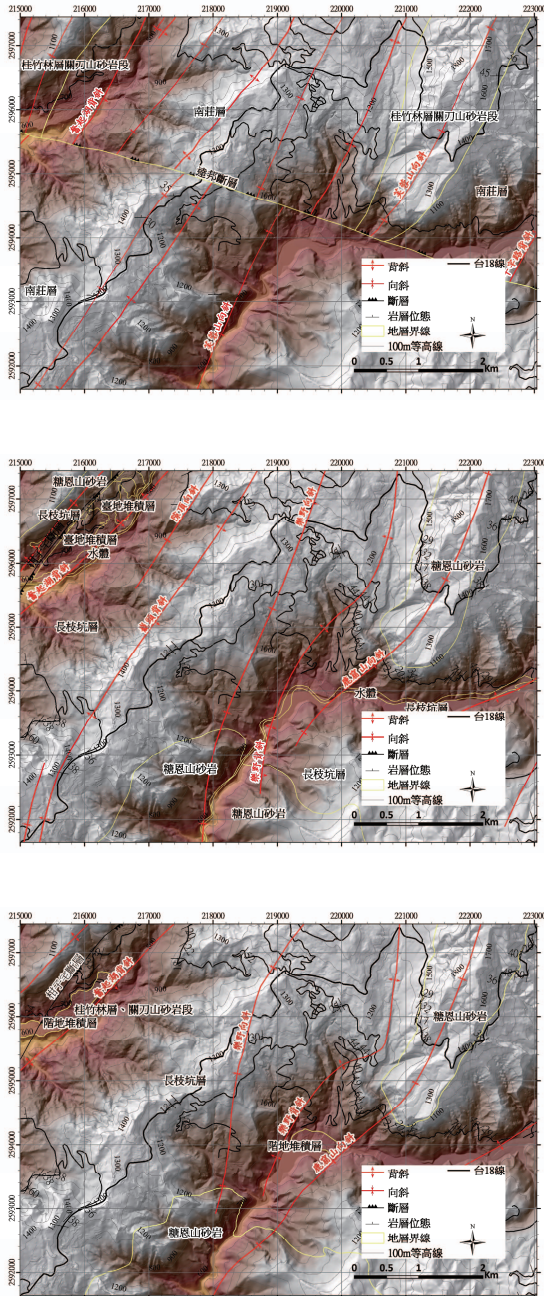


圖 2 研究區不同版本之地質圖：(a) Liu *et al.*, (1989) (b) Zhongpu sheet, (2009) (c) Lithological assemblage map, (2006)

Fig.2 Different geologic map of the study area

層 (包括觸口斷層、鹿窟斷層與公田斷層) 東側, 出露地層主要為中新世關刀山砂岩與南莊層。研究區分布一系列東北-西南走向之褶皺構造, 褶皺軸為一近西北-東南向、右移的達邦斷層所切截 (圖 2(a))。

地調所另外出版了兩幅包含研究區的地質圖 (圖 2(b) 與 (c)): 分別為五萬分之一區域地質圖的中埔圖幅 (2009) 及兩萬五千分之一的岩性組合圖 (2007)。此兩幅地質圖於研究區內地層分布並無太大差異, 因不同地質圖採用地層單位命名系統不同, 為統一地層名稱, 本研究採地調所中埔圖幅所始用之台灣南部的地層單位。研究區除了鹿窟山向斜軸兩側及樂野向斜南段出露的糖恩山砂岩外, 其餘多為中新世晚期的長枝坑層, 此兩地層分別可對比至阿里山-塔塔加地質圖中的關刀山砂岩及南莊層。以下簡述研究區出露地層特性:

- (1) 糖恩山砂岩主要由淡青灰色細粒砂岩所組成, 砂岩呈塊狀, 常形成陡崖或深谷, 砂岩常夾有厚層深灰色頁岩與灰色砂質頁岩, 全層厚度約為 450 至 500 公尺。研究區鹿窟山向斜軸兩側以及曾文溪靠近樂野向斜之陡峭的岩壁即出露糖恩山砂岩。
- (2) 長枝坑層以青色或青灰色細粒砂岩或泥質砂岩與黑色頁岩所形成之帶狀互層為主, 本研究區的崩塌位置均位於長枝坑層出露區域。

如同劉桓吉等人 (1989) 之地質圖, 地調所出版之兩張地質圖顯示研究區內的主要構造線大致上為東北-西南走向。中埔圖幅顯示由西向東分別有奮起湖背斜、隙頂向斜、龍頭背斜、樂野向斜、樂野背斜及鹿窟山向斜 (芙蓉山向斜); 而岩性組合圖中則少了隙頂向斜與龍頭背斜。受緊密的背斜、向斜構造影響, 沿台 18 線及其上、下兩側邊坡位態變化劇烈, 惟大致上走向仍以東北-西南為主。

仔細比較圖 2(b) 與 (c) 兩張地質圖之褶皺構造, 中埔圖幅中之樂野向斜為近乎直線的構造, 一直向南延伸至研究區外, 而岩性組合圖中, 則在石桌向西彎曲, 且向斜軸進入糖恩山砂岩後約 300 公尺便停止, 並未向南延伸超出研究區外, 兩圖幅中之樂野向斜軸位置相差約 1.3 公里。再往東的樂野背斜在兩版地質圖中段都有明顯的轉折, 比較中埔及岩性組合圖發現, 岩性組合圖的樂野背斜轉折幅度較大, 而中埔圖幅在其南段則標示為“存疑”。更東邊的鹿窟山向斜在中埔圖幅中僅向南繪製至曾文溪左岸糖恩山砂岩與長枝坑層地層界線附近, 並無穿越糖恩山砂岩, 而

岩性組合圖中則將鹿窟山向斜一直往南延伸超出本圖幅範圍。

相較於地調所中埔圖幅 (2009) 及岩性組合圖 (2007), 劉桓吉等人 (1989) 繪製之觸口-塔塔加地質圖, 除鹿窟山向斜外, 於研究區之構造解釋有明顯之不同。劉桓吉等人 (1989) 之地質圖, 有一西北西-東南東的達邦斷層通過研究區, 此一走向滑移斷層將所有褶皺構造截切成南北兩段, 並且錯動了褶皺軸。由區域地質角度, 對於構造之解釋有所不同並不少見。另外, 劉桓吉等人 (1989) 之地質圖重點在於針對大區域調查成果說明和地史解釋, 五萬分之一中埔圖幅 (2009) 為區域地質概況的描述, 而岩性組合圖 (2007) 測繪於兩萬五千分之一的工作底圖, 可用於特定崩塌地分析 (範圍約為數十公尺至數百公尺), 比例尺與目的不同, 結果有所不同亦相當自然。為解決如山崩與地質構造間關聯性的課題, 更仔細的地質調查仍有其必要性。舉例而言, 褶皺存在與否以及其位置對確認順向坡區位即相當重要。本研究利用遙測影像、地形分析、地表地質調查與構造分析等方法, 更仔細的確認研究區之地質構造, 並藉以探討研究區大型山崩之特性。

2. 降雨紀錄

阿里山公路沿線共計有六個氣象局之雨量測站, 測站位置如圖 1 所示, 由西往東分別為頭凍 (Toudong)、大湖 (Dahu)、瀨頭 (Leitou)、石磐龍 (Shihpanlong)、奮起湖 (Fencihu) 以及阿里山 (Alishan) 測站, 距研究區較近之雨量站為位於研究區西南側的瀨頭站與位於研究區東北側的奮起湖站, 此兩測站於莫拉克颱風來襲期間之降雨資料示於圖 3 (高申錡, 1994)。颱風降雨事件雨場分割方法以時雨量大於 4mm 時為有效降雨開始時間, 以時雨量連續 6 小時均小於 4mm 時為有效降雨結束時間, 降雨開始至降雨結束為降雨延時, 累積雨量則為該雨場於降雨延時內所累積之總雨量 (李明熹, 2006)。根據雨場紀錄得知, 兩個測站降雨延時都超過 100 小時, 奮起湖 (Fencihu) 測站最大時雨量約為 110mm/hr, 累積雨量總計 2827mm, 特別值得一提的是此一測站紀錄到接近持續 24 小時約 75mm/hr 的高強度降雨。瀨頭 (Leitou) 測站最大時雨量近 74.5mm/hr, 累積雨量為 2386.5mm, 累積雨量與降雨強度均略小於奮起湖雨量站的紀錄。

三、山崩及地質構造調查

1. 山崩判釋與地形分析

為探討大型崩塌與地質構造之關聯性，本研究僅圈繪山崩裸露總面積大於 1.8 公頃之山崩。首先利用阿里山地區災前 5 公尺數值地形模型 (DTM)、莫拉克風災後 (2009.08 ~ 2010.01) 正射化航空照片與 GIS 平台於室內進行山崩與構造判釋作業。透過災後航空照片套疊 DTM 產生之立體影像可清楚辨認出莫拉克風災於研究區發生之山崩崩崖位置與堆積區。透過影像三維展示功能，本研究仔細圈繪出莫拉克颱風期間造成之山崩崩崖 (圖 4；淺綠色細線、短線指示崩塌側) 以及崩塌堆積區 (綠色範圍)。同時，本研究亦圈繪出古崩塌地崩崖 (深綠色粗線、短線指示崩塌側) 與老崩積層堆積 (紅色範圍)，在此，我們將莫拉克風災期間及之後發生的崩崖或崩塌堆積區稱為「現生」，反之，則歸類為古崩崖及老崩堆積區。指示順向坡之變斗狀地形 (flatiron structure) 亦於數值地形清晰可見 (圖 4 中之黑色方框)，判釋成果呈現於圖 4。

為確認崩塌及堆積區圈繪的正確性，本研究進行詳細之現地檢核，除了現生崩塌堆積外，對於部分已經長滿植生的老崩塌堆積區或河階地，亦於現場進行詳細紀錄。另一野外調查重點則是岩盤不連續面位態的量測及紀錄，以瞭解岩盤不連續面對山崩發生之影響以及崩塌機制。除此之外，因山崩產生許多露頭，故現地調查時詳細測量地層位態，特別是褶皺軸附近，增加之地層位態資料，有助於地質構造解釋。為方便後續成果說明，本研究根據山崩所在位置將研究區再細分為 A~G 七區 (圖 4)。

2. 層面位態量測與褶皺軸位置分析

山崩之崩塌機制、成因、發生位置、範圍及活動性與地質構造有高度的相關性，除此之外，順向坡圈繪亦需要地質構造資料，特別是層面位態。透過詳細的野外調查，可根據位態資料分析褶皺軸傾沒方向與角度。由於本研究區的構造複雜，許多局部性小型構造常常會造成大區域的構造解釋困難，因此地表地質調查時，需謹慎排除局部構造之位態。

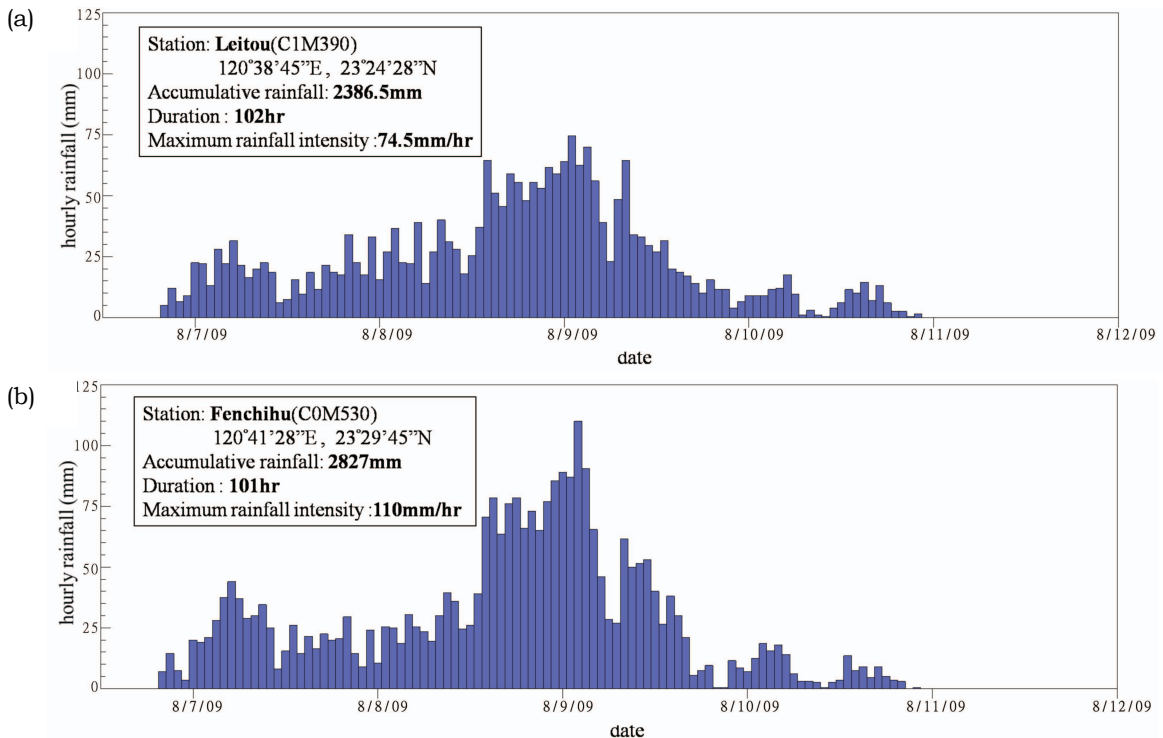


圖 3 (a) 溝頂 (Leitou) 測站與 (b) 奮起湖 (Fenchihu) 測站莫拉克颱風期間降雨紀錄

Fig.3 The rain fall duration from Morakot typhoon. (a) Leitou station and (b) Fenchihu station

本研究參考地質調查所公佈的中埔地質圖，於褶皺軸附近進行較密集之層面位態量測，同時，A—G 區中，山崩裸露處亦進行較詳細之層面位態量測，本研究將野外量測資料數化，並與其它地質圖層面位態量測結果進行比對與確認之工作，位態量測結果詳見圖 5。

根據 A 區及大華產業道路的位態資料，大致可以確定龍頭背斜軸部位置，根據調查結果發現，龍頭背斜軸部位置與地調所出版之中埔圖幅顯示之位置差異不大；根據 B、D 及 E 區位態資料則可定位出樂野向斜軸部位置，本研究所繪製的樂野向斜，大致位於中埔圖幅顯示之樂野向斜西側 200~800 公尺，愈往北邊，軸部位置差異愈大；根據 F、G 及曾文溪沿岸位態則可確定樂野背斜軸部位置，其與中埔圖幅也有微幅的差異。另有兩條小構造線之存在與位置則分別由 C 及 D 區的位態資料確定。

根據上述現地調查成果，研究區可繪製出 5 個主要的褶皺構造，由西向東分別為龍頭背斜、樂野向斜、樂野背斜以及介於龍頭背斜與樂野向斜間的 2 個小褶皺。利用現地詳細地質調查結果，不但可以更加確定構造線的位置，用以解釋山崩的成因，更可做為順向坡分布評估之探討。

值得一提的是，為確認褶皺構造分布，除層面位態量測外，岩性紀錄與褶皺軸兩翼地層比對亦相當重要，惟因本研究未進行沿線之岩性紀錄，因此未能進行褶皺兩翼地層比對。

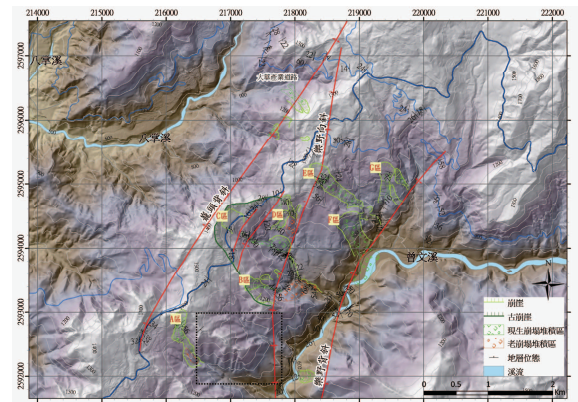


圖 4 研究區域山崩位置繪釋、層面位態資料 (共計 297 筆) 量測以及構造線位置研判成果

Fig.4 Landslides in the study area are recognized from DEM, aerial photos and satellite images. The 297 sets of dip-strike and structure location are obtained from field work

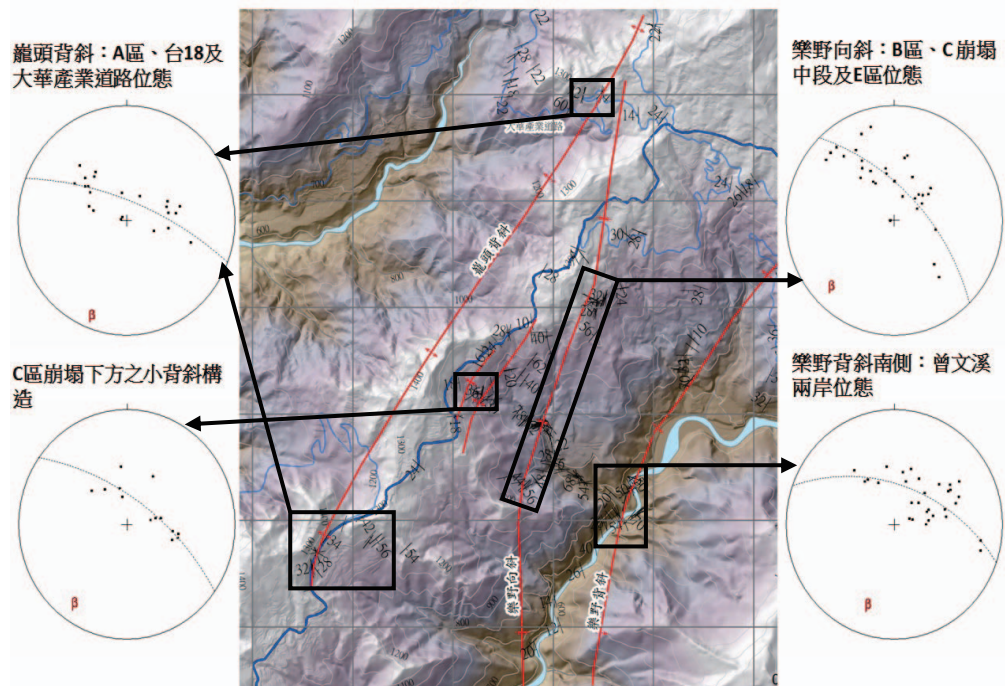


圖 5 研究區褶皺軸傾角分析

Fig.5 Analyze the strike-slip and outcome of the fold axis in study area

3. 褶皺軸傾沒方向及傾角分析

除利用現地層面位態決定褶皺軸軸部位置以外，本研究亦透過立體投影分析以決定褶皺軸傾沒方向(圖 5)。本研究利用 GEOrient 軟體分別將量測所得之不同褶皺軸兩翼之層面極點標示於立體投影圖上，即可由極點形成之大圓法線向量(立體投影圖上之 β)決定褶皺軸之傾沒方向(trend)及傾角(plunge)，根據立體投影分析顯示，龍頭背斜之傾沒方向為 201° 、傾角為 14° ；樂野向斜之傾沒方向為 226° 、傾角為 20° ；樂野背斜之傾沒方向為 200° 、傾角為 28° ，另外，樂野向斜與龍頭背斜間之小背斜構造之傾沒方向為 216° 、傾角為 18° ，由各區域的分析結果確認本區之褶皺軸大致為北東-西南向且向西南傾沒，傾角約為 14° - 28° 間。

四、構造與大型山崩 分析結果與討論

根據山崩圈繪、現地調查與構造分析，本研究發現山崩除了受到岩性與地形控制外，也深深受到地質構造的影響。以下個別說明 A-G 七個地區山崩與構造之關係：

1. A 區

A 區有一處大型崩塌(圖 6(a))，連同堆積區，裸露面積約為 15 公頃，大部分之崩塌堆積物仍停留於坡趾溪溝中。此區位於龍頭背斜的東南翼、樂野向斜西北翼，根據現地調查，崩塌區附近屬單斜構造，裸露區出露屬長枝坑層之砂頁岩互層，層面平均位態為 $N43^\circ E/SE41^\circ$ ，本區有一組發達之節理，位態為 $N20^\circ W/SW60^\circ$ 。根據立體投影分析(圖 6(b))結果可發現，破壞邊坡原地形之邊坡傾向，恰與前述層面與節理面之交線一致，因此，相當確定此區之地形主要受到上述之層面與節理面構造控制，由崩塌後之地形亦可清楚看出此一崩塌屬楔型破壞。

另外，由圖 5 可發現崩塌區東南側一直至曾文溪溪谷有明顯的熨斗狀地形(曾文溪溪谷出露糖恩山砂岩之厚層塊狀砂岩)，顯示該區為順向坡地形，也確認該區地質構造為單斜構造，亦即造成 B-D 區構造相對複雜之兩條褶皺，並未延伸至本區。同時，相當有趣之處在於，此一崩塌恰顯示了熨斗狀地形之發育過程。因 A 區地形坡面與層面大致平行，若邊坡坡趾受曾文溪侵蝕或人工開挖持續下切，本區極可能發生具

順向坡潛動。

2. B 區

A 區清楚觀察到之熨斗狀地形特徵往東北延伸至 B 區便不再明顯(圖 5)。B 區崩塌面積(含堆積區)約為 5 公頃，根據現地調查，樂野向斜通過 B 區，亦即向斜軸東南翼應已屬逆向坡。同時，經地形判釋發現 B 區附近具崩崖以及堆積等地形特徵，研判本區位於大型古山崩崩塌區內，向斜西北翼就算原先存在熨斗狀地形，也可能因大型古山崩事件而遭破壞。本研究於崩塌區坡趾溪溝之詳細調查發現，樂野向斜軸部附近構造複雜，軸部可發現許多小斷層，推測岩盤破碎加上水文地質條件有利於崩塌地發育，因此導致山崩重覆發生。

3. C 區

本區一處大型崩塌曾於莫拉克颱風期間造成台 18 線中斷，約 300 公尺之路基流失，崩塌區(不含堆積區)面積合計約 10 公頃，緊臨之明隧道北側，亦因受小規模之岩屑墜落造成下陷及傾斜。董家鈞等人(2009)根據劉恒吉等人(1989)繪製之地質圖，推測此一大型山崩之所以未產生快速遠距滑移之順向坡滑動，可能與坡趾存在小型而緊密之褶皺有關，因層面之延伸較接近曲面，故滑動塊體相對較小，穩定性也較層面為平面者稍高。本研究根據現勘結果(圖 7)發現，此區大型崩塌坡趾確實存在向斜與背斜構造，雖然此兩褶皺構造延伸僅約 1 公里左右，然而因緊密褶皺造成層面呈曲面，進一步使得滑動規模受限，因此對於崩塌地崩塌型態、規模、運動方式均產生莫大之影響。相對而言，A 區鄰台 18 線之單斜坡面若坡腳持續下切而產生之典型順向坡滑動，有可能較本區於莫拉克颱風期間所造成之非典型順向坡滑動崩塌規模更大。

4. D 區

D 區坡度比其他分區較為平緩，地形起伏與坡向變化亦較為複雜，同時，本區崩塌面積相對較小，約為 3 公頃(不含堆積區)、深度普遍較淺。根據現地勘查結果，D 區之溝谷中常見相當厚(20-30 公尺)的崩積層堆積(圖 7)，另外，崩塌處地層層面位態多受樂野向斜通過影響而劇烈變化，此一地質特性，可解釋本區崩塌深度較淺之原因。雖然 D 區以及 D 區東南側為平緩區，然因堆積大量老崩積層，極易因坡趾侵蝕而發生潛移，另因部分崩積層直接堆積於傾斜之層面上，亦不排除可能發生岩屑平面型快速滑動。

5. E 區

E 區崩塌面積約 4.5 公頃 (不含堆積區)，崩塌冠部因樂野向斜通過，岩層位態受到嚴重擾動 (圖 8)，冠部露頭可見多處剪裂帶。崩塌區樂野向斜東南翼之地層位態走向從東北—西南向到接近東西向，傾向朝南。與 D 區崩塌相同，因褶皺軸部地層破碎，研判 E 區大型山崩屬岩屑崩移。E 區崩塌產生的土石仍留存於山崩形成的谷溝之中，堆積範圍將近 7 公頃，因堆積物相對鬆散，未來若再有豪大雨，極可能沿坡面繼續往下移動。

6. F、G 區

F、G 兩區均位於樂野背斜的西北翼，崩塌面積 (不含堆積區) 分別約為 5 公頃及 4 公頃，背斜軸部通過兩崩塌區趾部。根據地表調查結果，兩處大型崩塌均受層面控制 (圖 9 與圖 10)，然背斜西北翼傾斜向南的邊坡為何還會沿層面滑動？從構造地質的角度原因其實很單純。事實上，樂野背斜是一個往西南傾沒的褶皺，再加上褶皺兩翼並不開闊，因此，這兩個邊坡層面位態其實幾乎均為東西向、傾斜向南，導致坡面向南的 F、G 大型崩塌，仍受層面控制，屬於向斜與背斜構造間受褶皺軸傾沒方向與傾角控制之平面型滑動。因 F、G 區位於兩褶皺構造間，褶皺軸傾沒方向影響了層面位態，而使得部分坡面具有順向坡滑動之潛勢，然因受褶皺影響，順向坡規模將受限而使得危害程度較單斜構造發育之順向坡小。

7. 綜合討論

根據現地調查結果發現，本研究區之大型崩塌深受地質構造影響，因而各有其獨特性，以下進行綜合說明與討論：

A 區崩塌主要受層面及節理面控制，為一典型的楔型破壞，對岩坡穩定分析，並無獨特性。但若放大關心範圍，即可發現該崩塌區東南側地形呈熨斗狀，而崩塌的發生恰說明了熨斗狀地形發育過程。同時，A 區屬單斜構造，B、C 區緊密之褶皺並未延伸至本區，且坡面大致與層面平行，若坡趾持續下切，則此一區域發生順向坡滑動之可能性將持續增加。

B~D 區受到一系列緊密褶皺的影響，位態變化劇烈，同時，褶皺軸附近地層破碎，常見小斷層。特別值得一提的是，B~D 區均位於一大型古山崩崩塌範圍內，推測古崩塌與現生崩塌均受控於緊密之褶皺構造。其中 C 區雖於莫拉克風災期間發生大型崩塌，但受趾部兩個小型緊密排列的褶皺影響，使得沿著層面之滑動面接近曲面，而未發生更大規模之順向坡滑動，Dong *et al.* (2009) 亦曾推論褶皺造成之滑動曲面可能控制了深層滑動之運動特性，因此，縱使是小型褶皺亦可能影響深層崩塌之崩塌與運動特性，此類沿呈曲面之層面滑動之非典型順向坡破壞值得進一步深入研究。至於 E 區之崩塌則與樂野向斜通過其冠部息息相關，因向斜軸部地層破碎，故研判崩塌應屬岩屑崩移。



圖 6 (a) A 區楔型破壞之野外照片；(b) A 區崩塌立體投影分析；此一崩塌區層面、節理面交線與地面相當一致，顯示該區地形主要受岩層面與節理面交線之楔型滑動所控制

Fig.6 (a) The photo of the wedge failure at area A. (b) spherical projection of area A. The bedding, joint and slope plane could identify that the area is affected by the discontinuous planes

F、G 區崩塌均為沿層面滑動之平面型破壞，特別之處在於此兩崩塌所在之南向坡面，深受通過坡趾、東北西-南向走向、軸傾沒向西南之背斜影響，顯示除了軸部位置及其走向以外，褶皺軸之傾沒方向與角度對於深層崩塌亦有其重要性。

相對而言，斷層對山崩之影響文獻探討相對較多且深入 (Kellog, 2001; Lan *et al.*, 2004; Korup, 2004; Sato *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008; Yagi *et al.*, 2009; Kincal *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010)，然而，褶皺對山崩影響之文章相對較少。綜而言之，研究區褶皺對大型崩塌之影響包括：(1) 褶皺軸部地層破碎、常見小斷層，影響材料強度及水文地質特性；(2) 緊密褶皺可能影響沿層面滑動之岩塊規模，亦可能影響運動特性；(3) 褶皺位置、傾沒方向與傾沒角度對於順向坡位置研判有其重要性。由以上說明可知，大型山崩與地質構造的分佈與特性有密切之相關性，因此

山崩調查時，必須針對構造進行詳細測繪，方能有效瞭解崩塌機制，也才能進一步利用構造特徵作為大型山崩 (包括順向坡) 之潛勢分析。

此外，前述莫拉克颱風誘發之 22 個大型山崩中，僅有 7 處為新生成的山崩，其他 15 處過去即曾發生過山崩，亦即此 15 處山崩屬重覆發生。Chigira and Yagi (2006) 根據日本約 100 個深層滑動調查結果，指出深層滑動具有重覆發生之特性。本研究區可發現部分現生崩塌集中分布於古崩塌區範圍內，而此一範圍恰為緊密褶皺通過處，顯示大型崩塌之重複發生與地質構造關係密切。

值得一提的是，本研究區域部分大型崩塌之堆積材料尚未完全運移進入曾文溪，將來可能因豪雨而持續下移，目前於坡面上堆積之材料仍可能對研究區安全產生相當大的威脅。



圖 7 D 區之溝谷中常見相當厚的崩積層堆積
Fig.7 Very thick Colluvial Deposit in the ditch at area. D



圖 8 E 區崩塌岩層層位態劇烈變化
Fig.8 Strongly disturb bedding plane at landslide area E



圖 9 E、F 與 G 區崩塌照片，F 與 G 區崩場地主要受層面控制

Fig.9 Photos of area E, F and G. The landslide in area F and G The landslide F and G is controlling by fold axis plunge



圖 10 G 區崩場地照片，滑動面主要受層面控制
Fig.10 Photo of the area G. the slide plane is controlling by bedding plane

五、結 論

透過本研究對阿里山公路巔頭至石桌路段上、下邊坡的崩塌及地質調查，提出以下幾點結論：

- (1) 道路邊坡穩定及其破壞機制深受地質與地形條件影響，如：岩性、褶皺軸位置、褶皺緊密程度、褶皺軸傾沒向量與坡向關係等，因此，地質資料是研究山崩，特別是大型山崩必要且關鍵的資訊。
- (2) 固於地質解釋之不同，檢視不同人測繪之區域地質圖，於大比例尺角度觀察可發現明顯的不同。以本研究區為例，不同地質圖測繪者（比例尺 1/25,000-1/50,000）針對構造解釋即有相當大之差異。對於山崩調查，若無更加精確的地質調查資料，僅依賴既有小比例尺區域地質資料進行研判，極有可能對崩塌機制造成誤判。
- (3) 於山崩大比例尺（1/1,200）詳細地質調查進行前，應先利用比例尺大於 1/5,000 之工作底圖進行區域性地質覆核，透過野外調查更精確的決定地層與構造分布。本研究利用莫拉克颱風災前地形資料，可判斷順向坡地形、古崩崖以及古崩積層堆積區，再透過災後現地地質調查，確定影響本區山崩之褶皺構造位置及褶皺軸傾沒向量。惟因本研究並未進行岩性紀錄，未來若能進一步測繪崩塌區大比例尺岩性地質圖，不但可進一步確認褶皺構造，更可探討岩性對深層崩塌之影響。
- (4) 研究區受構造控制之大型山崩共分四類：(a) 熨斗狀地形受層面與節理控制之岩楔破壞；(b) 褶皺軸部通過、地層破碎而重複發生之岩屑崩移；(c) 緊密褶皺、層面呈曲面狀而滑動規模受限之非典型順向坡滑動；(d) 向斜與背斜構造間受褶皺軸傾沒方向與傾角控制之平面型滑動。褶皺構造特性對深層崩壞之分布以及運動特性之定量影響，值得進一步探討。
- (5) 根據莫拉克颱風災後之山崩與地質調查結果，可定性針對此區大型山崩潛勢進行分析：(a) A 區為研究區熨斗狀地形特徵最明顯處，此處若邊坡坡趾持續下切，即具順向坡崩塌潛勢；(b) B 區與 C 區坡度較陡峭，且均位於古崩塌區範圍內，由莫拉克颱風後可發現多處崩塌位於古崩塌區域內，因此，B 區與 C 區為研究區中較容易發生大規模岩塊或岩屑崩移之地區；(c) D 區以及

D 區東南側地形平緩區，堆積大量古崩積層，這些崩積層堆積平緩區，極易因坡趾侵蝕而發生潛移，另因部分崩積層直接堆積於層面上，亦不排除可能發生岩屑平面型快速滑動；(d) F、G 區位於兩褶皺構造間，褶皺軸傾沒方向影響了層面位態，而使得部分坡面具有順向坡滑動之潛勢，然因受褶皺影響，順向坡規模將受限而使得危害程度較單斜構造發育之順向坡小。

六、誌 謝

本研究感謝國科會 100 年度計畫：大型山崩之發生、機制與地形演育—大型山崩之規模與遠距運移及其發生機制 (NSC99-2116-M008-028) 以及地質調查所 100 年度計畫：經濟部地質調查所「國土保育之地質敏感區調查分析計畫-莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析」(案號：100-02-035)。

參考文獻

1. 大地工程學會 (2011)，「國道3號3.1公里崩塌事件原因調查工作總結報告」，交通部調查報告。(Taiwan Geotechnical Society (2011). *The investigation report of landslide at Taiwan highway No.3, Ministry of Transportation and Communications investigation report.* (in Chinese))
2. 中埔地質圖 (2009)。(Central Geological Survey (2009). *Geologic map of Zhongpu sheet.* (in Chinese))
3. 岩性組合圖 (2007)。(Central Geological Survey (2007). *Lithological assemblage map.* (in Chinese))
4. 李明熹 (2006)，「土石流發生降雨警戒分析及其應用」，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。(Lee, M. H. (2006). *A Rainfall-Based Debris-Flow Warning Analysis and Its Application, Doctoral dissertation, National Cheng Kung University, Taiwan, R.O.C.* (in Chinese))
5. 高申錡 (1994)，「阿里山公路沿線公路邊坡崩塌與雨量關係之研究」，國立成功大學資源管理研究所碩士論文。(Gao, S. Q. (1994). *Relationship between stability of the slope and rainfall along the Ail Mountain road, Master thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, R.O.C.* (in Chinese))
6. 莊光澤 (1993)，「阿里山地區道路邊坡穩定性因子之探討」，國立成功大學地球科學系研究所碩

- 士論文。(Chuang, K. T. (1993). *A Study of Factors on the Slope Stability along the New Mid-Cross Highway in the Alishan Area*, Master thesis, National Chen Kung University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
7. 張雲翔 (2004), 「大坑地區地滑之研究」, 國立中央大學應用地質所碩士論文。Chen, Y. X. (2004). *Landsliding Potential Analysis on Takeng Area, Taichung*, Master thesis, National Central University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))。
 8. 詹連昌 (1999), 「梨山地區地滑之整治」, 水土保持學報, 31(2), 91-98。(Chan, L. C. (1999). "Landslide Control in Lisan Area," *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(2), 91-98. (in Chinese))
 9. 董家鈞、劉家男、李維峰 (2009), 「莫拉克颱風引致之阿里山公路邊坡崩塌與機制」, 土工技術, 122, 31-40。(Dong, J. J., Liu, C. N. and Lee, W. F. (2009). "Typical landslides and related mechanisms in Ali Mountain Highway Induced by Typhoon Morakot," *Sino-Geotechnics*, 122, 31-40. (in Chinese))
 10. 劉桓吉、方中權、莊德永 (1989), 「台灣新中橫公路嘉義觸口至塔塔加鞍部沿線地質」, 經濟部中央地質調查所彙刊, 5, 19-29。(Liu, H. C., Fong, C. K. and Chuang, T. Y. (1989). "Geology Along The Chukou-Tataka Section, New Cross-Island Highway, Central Taiwan," *Bulletin of the Central Geological Survey*, 5, 19-29. (in Chinese))
 11. Chen, Y. G. and Liu, T. K. (2000). "Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan," *Quaternary Science Reviews*, 19, 923-930.
 12. Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Hsieh, M. L., Willett, S. D., Hu, J. H., Horng, M. J., Chen, M. J., Stark, C. P., Lague D. and Lin, J. C. (2003). "Links between erosion, runoff variability, and seismicity in the Taiwan orogen," *Nature*, 426, 648-651.
 13. Dong, J. J., Lee, W. R., Lin, M. L., Huang, A. B. and Lee, Y. L. (2009). "Effects of seismic anisotropy and geological characteristics on the kinematics of the neighboring Jiufengershan and Hungtsaiping landslides during Chi-Chi earthquake," *Tectonophysics*, 466(3-4), 438-457.
 14. GEOrient 9.x was compiled under Visual Basic 6 and released in 2001. (<http://www.holcombe.net.au/software/>)
 15. Guthrie, R. H. and Evans, S. G. (2007). "Work, persistence, and formative events: The geomorphic impact of landslides," *Geomorphology*, 88, 266-275.
 16. Kellog, K. S. (2001). "Tectonic controls on a large landslide complex: Williams Fork Mountains near Dillon, Colorado," *Geomorphology*, 41(4), 355-368.
 17. Kincal, C., Akgun, A. and Koca, M. Y. (2009). "Landslide susceptibility assessment in the Izmir (West Anatolia, Turkey) city center and its near vicinity by the logistic regression method," *Environmental Earth Science*, 59(4), 745-756.
 18. Korup, O. (2004). "Geomorphic implications of fault zone weakening; slope instability along the Alpine Fault, South Westland to Fiordland," *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 47(2), 257-267.
 19. Lan, H. X., Zhou, C. H., Wang, L. J., Zhang, H. Y. and Li, R. H. (2004). "Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China," *Engineering Geology*, 76(1.2), 109-128.
 20. Lee, C. T., Huang, C. C., Lee, J. F., Pan, K. L., Lin, M. L. and Dong, J. J. (2008). "Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility," *Engineering Geology*, 100(1.2), 43-58.
 21. Lin, J. C. (1999). "Morphotectonic evolution of Taiwan," *Geomorphology and Global Tectonics*, 135-146.
 22. Lin, C. W., Chang, W. S., Liu, S. H., Tsai, T. T., Lee, S. P., Tsang, Y. C., Shieh, C. L. and Tseng, C. M. (2011). "Landslides triggered by the 7 August 2009 Typhoon Morakot in southern Taiwan," *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo. 2011.06.007
 23. Chigira, M. and Yagi, H. (2006). "Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan," *Engineering Geology*, 82, 202-221.
 24. Shieh, S. L. (2000). *Users' Guide for Typhoon Forecasting in the Taiwan Area (VIII)*. Central Weather Bureau, Taipei.
 25. Sato, H. P., Hasegawa, H., Fujiwara, S., Tobita, M., Koarai, M. and Une, H., Iwahashi, J. (2007). "Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery," *Landslides*, 4(2), 113-122.

26. Yagi, H., Sato, G., Higaki, D., Yamamoto, M. and Yamasaki, T. (2009). "Distribution and characteristics of landslides induced by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008 in Tohoku District, Northeast Japan," *Landslides*, 6(4), 335-344.
27. Yin, J., Chen, J., Xu, X., Wang, X. and Zheng, Y. (2010). "The characteristics of the landslides triggered by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake from Anxian to Beichuan,"

Journal of Asian Earth Sciences, 37(5-6), 452-459.

2011 年 07 月 15 日 收稿

2011 年 09 月 13 日 修正

2011 年 09 月 20 日 接受

(本文開放討論至 2012 年 6 月 30 日)