

高雄壽山的古巨型地滑研究

齊士崢¹，呂政豪^{2,5}，任家弘¹，何立德¹，陳永森¹，
周漢文³，林淳惠¹，薛忞侑⁴

¹高雄師範大學地理學系；²澎湖科技大學觀光休閒系；³武漢地質大學地球科學學院；
⁴威騰有限公司；⁵通訊作者 E-mail: luch816@gmail.com

[摘要] 高雄市壽山西側，由中山大學至桃源里柴山舊部落之間地區，是目前地滑發生最為廣泛且頻仍的地區。經研究發現，這個地區整體極可能同屬於一個早期大規模崩塌的塊體，推測這個崩塌活動應發生於更新世末次冰期晚期的低海水位時期，目前有一大部分的崩塌塊體已經沒於海面之下。主要證據包括劇場型的主崩崖，以上坡凹、下坡凸為主的坡型和崎嶇不平的地表地形，坡面散布的都是崩積物和石灰岩崩積碎屑再膠結形成的巨型岩塊，而且這些巨型岩塊常夾有洞穴岩碎塊，並於下邊坡形成階狀平台。由再膠結石灰岩中採取較均質、白色之於原岩體縫隙中化學沈澱的洞穴岩碎塊進行碳十四定年，年代大約距今 28,034 至 28,387 年，據此概略推論古崩塌發生的最早年代。因為目前主崩崖高差超過殘存的主崩塌塊體，故推測有一大部分的崩塌塊體已經沒於海面之下。至於目前小規模的個別活動崩塌與整個巨型崩塌塊體關係如何，值得持續觀察。

關鍵字：巨型地滑、壽山、晚更新世

A Study of the Late Pleistocene Shoushan Megaslides in Kaohsiung City, Taiwan

Shyh-Jeng Chyi¹, Cheng-Hao Lu^{2,5}, Chia-Hung Jen¹, Lih-Der Ho¹, Yung-Sen Chen¹,
Han-Wen Zhou³, Chun-Huei Lin¹ and Min-Yu Hsueh⁴

¹National Kaohsiung Normal University; ²National Penghu University of Science and Technology;
³China University of Geosciences; ⁴Weiteng Technology Co., Ltd; ⁵Corresponding author E-mail:
luch816@gmail.com

ABSTRACT Located between Taoyuan Village and Shoushan Settlement, Western Shoushan of Kaohsiung City is one of the areas with the highest and most extensive occurrence of landslides in Taiwan. The landslides are possibly part of a late Pleistocene megaslides taking place during the last glacial period and is largely now below sea level. Evidence of this megaslides include an amphitheater-shaped or horseshoe-shaped head scarp, concave-convex slope profile, hummocky topography, and a big limestone block of colluvial hillslope deposits origin embedded with many speleothem fragments. An approximate age of less than 50 ka for this megaslides is derived based on the date of a speleothem fragment. Further studies on whether or not the megaslides will move again and the relationship between isolated active landslides and the entire slide mass are suggested.

Keywords: megaslides, Shoushan, late Pleistocene

前言

西壽山地區是「壽山國家自然公園」目前地滑發生最廣泛且頻仍的危險區，因為牽涉聚落安全，地方民眾屢屢陳情，希望完成海堤工程，以保護邊坡不再滑動。近年對於西壽山崩塌的主要研究包括幾類，其一是地表移動速率與方向的監測，依據張榮輝(2005)利用全球衛星定位系統(GPS)，自 2004 年 7 月至 2005 年 2 月，對西壽山南側地區進行 9 個點共 5 次監測，顯示地表向西南方滑動 3 至 12 公分，稍高於高雄市政府 2002 年 9 月至 2004 年 3 月 4 次觀測得的每年位移 5 至 11 公分。其二是應用福衛二號衛星影像自動化判釋，自動化萃取壽山邊坡崩塌區，但這樣的判釋常有崩塌地與建物、裸露地混淆而無法降低誤判的問題(蔡光榮、謝正倫、陳昆廷 2010)。其三是利用已有社區崩塌災害資料，以類神經網路分析法劃定坡地社區邊坡崩塌潛感區，結果亦有樣本數量不足之憾(蔡光榮等 2010)。

依據學者推測(王文能、潘國樑 1982)，西壽山目前的地表滑動現象，只是更大規模之古崩塌的一部分，由滑動面露頭所在高度與臺灣平均抬升速率推測，古崩塌可能老於距今 1,800 年。不過臺灣不乏更古老的崩山紀錄，小林村地滑即是晚更新世地滑再度滑動的實例(Hsieh *et al.* 2012)；海岸地帶面臨更新世末期快速的海水面抬升，世界其他地區也有在海水面變動過程中發生古地滑的案例(Jibson 2005, Michael *et al.* 2007, Gurrola *et al.* 2010)，由這些文獻指出大規模地滑的地形特徵為劇場型崩崖(amphitheater-shaped scarp)、平坦階地、波狀地形且趾部呈凸坡型態。地質的特徵則為分布崩積物且岩層位態雜亂。此外，巴布亞紐幾內亞的東北海岸則是發現在晚第四紀時期曾發生頻繁的地滑現象(Yoko *et al.* 1997)。也就是，遍布再度滑動之重新膠結石灰岩巨型岩塊的西壽山海岸地帶，已顯示其崩塌歷史過程的複雜性可能遠較我們理解的高。目前對地表位移的觀測或劃定崩塌地、潛

感區的等等研究，恐無法與自然地勢區吻合，無法釐清個別邊坡崩塌與古崩塌之間的關係，或無法解釋當代海岸侵蝕與地表滑動的關係、當代地表滑動與整體地勢的關係，更無法說明當代的崩塌是孤立現象抑或是古崩塌延續與衍生的現象。

因此，故本研究擬應用像片基本圖及建置的數值地形模型(DEM)進行地勢分析，配合崩塌相關現象的野外調查，嘗試明瞭崩塌整體結構、空間範圍、機制與崩塌地的歷史發展過程，釐清影響西壽山崩塌的特定的地質、地形條件，以提供當代防災與坡地經營、管理更進一步的建議。因為西壽山廣大，大部分都位於軍事管制區，故本研究的範圍是中山大學文學院與桃源里之柴山部落之間(圖 1)，目前觀測顯示崩塌較明顯的區域。



圖 1. 壽山與研究區位置圖

材料與方法

一、地質與地形特徵

構成壽山的地層是上新世晚期至更新世早期形成的古亭坑層(表 1)，和覆蓋其上的不同時期石灰岩體，包括早更新世中期的高雄石灰岩、與晚更新世的壽山石灰岩(陳華玟、謝凱旋、何信昌 1998)。

1. 古亭坑層

根據化石研究，古亭坑層的年代屬於晚上新世至早更新世，下部岩性為青灰色泥岩偶夾薄層砂岩，上部則是青灰色泥岩夾高雄石灰岩透鏡體和半屏山石灰岩透鏡體。壽山和半屏山

表 1. 高雄地區的地層層序與年代

時代	壽山地區	半屏山地區
全新世	沖積層	沖積層
晚更新世	無沈積物覆蓋 壽山石灰岩	無沈積物覆蓋
早更新世		
上新世	未出露	未出露

資料來源：陳華玟、謝凱旋、何信昌(1998)五萬分之一臺灣地質圖幅(圖幅第六十一號)暨說明書—高雄；經濟部中央地質調查所

地區，出露的是本層的上部，地質圖上標示壽山南段東側地層走向大約呈東北西南向，向東南傾斜大約 20°至 30°，與覆於本層之上的壽山石灰岩間不整合接觸。

2. 高雄石灰岩

是古亭坑層中的一個石灰岩透鏡體，年代屬於早更新世的中期，分布於壽山地區，最大厚度約 500 公尺，向南北遞減至百餘公尺。主層厚度約 60 至 100 公尺，呈緻密塊狀，夾有不規則之砂質頁岩，多裂隙及洞穴。走向北偏東約 10°至 20°，向東南傾斜，傾角在 30°至 40°之間，但在壽山頂部則較緩。

3. 壽山石灰岩

分布於壽山東南側，與下伏的古亭坑層為不整合接觸，其上無任何地層覆蓋，年代約是晚更新世，岩性以含珊瑚的石灰岩岩塊為主，厚度約 20 公尺。

壽山斷層通過研究區南端邊界附近，斷層線呈東北西南向穿過壽山，屬於高角度逆斷層。此斷層並未穿過覆於古亭坑層之上的沉積物，由其鑽井所得之腐木定年資料得知八千多年來壽山斷層尚未再活動過(張徽正等 1998, 林啟文等 2000, 許中立、郭玉麟、王杰俊 2005)。

壽山山體南北長約 6 公里，東西寬約 2 公里，最高點是三角山，高約海拔 356 公尺。稜線位於山塊中央，西側是斷崖，斷崖以東是單面山地形，以西是波狀起伏的地形。依高度、坡度、坡向、水系發育等地勢特徵，壽山可以區分為：

1. 盆地狀的北壽山

北壽山四周是較耐侵蝕的石灰岩體，構成的高地圍繞著以泥岩為主的古亭坑層構成的水系發達的丘陵。地層層理的走向大約東北西南向，向東南傾斜大約 25 度。因丘陵地呈現相當明顯的獨立單面山或同斜脊地形。

2. 臺地狀的中壽山

中央為石灰岩體構成的平坦高地，海拔高度在 350 公尺以上，周邊以大約 100 公尺的陡坡與南、北壽山為界。整體地形呈現臺地狀，鼓山的地名由來也是由於這樣似臺地的地形。

3. 階地狀的南壽山

南壽山地區整體呈現由石灰岩構成的階段狀大型平台地形，壽山公園、動物園都位於這樣的平坦面上，最低階平坦面最下部露出泥岩。

4. 以陡坡為主的西壽山區域

西壽山地區目前崩塌活動性最高，尤其其中、南段高差較大的區域，坡頂是石灰岩陡崖，下坡是覆蓋崩積石灰岩的泥岩斜坡，上陡、下緩，上凹、下凸的崩塌地形比比皆是，地形組合複雜，也顯示可能歷經較為複雜的地形發育過程。

二、研究方法

本研究為有效判釋本區的崩塌地的範圍、分布與類型，除了進行研究區地表地質特徵的調查與採樣外，並將透過以下方法與程序，分析研究區的崩塌特徵，推測崩塌發生的過程。

1. 數化地形圖

數化 2002 年測製 1/5,000 第四版像片基本圖的等高線，再透過克利金(kriging)內插演算法，製作解析度 5*5 公尺的數值地形模型。建立數值地形模型後，即可以繪製坡度分級圖、地形分區圖、地形剖面圖，再據以進行地勢分析。

2. 三維立體影像疊圖

運用「Arcgis」軟體內的「Arcscene」模組功能，即可以將相關影像、圖資與數值地形模型套疊，以三維立體形式進行呈現，進行研究區內崩塌範圍、類型的整體性判釋。

3. 地勢分析

特定的崩塌類別發生後，形成不同的地形組合(landforms assemblage)。因此，本研究進行地勢分析(terrain analysis)，依「簡確法」(張石角 1987、1992、1993)繪製坡度、坡向、切割程度相似的「土地單元」。土地單元大致上相似於地形系統製圖(land-system mapping)(Cooke and Doornkamp 1990)中的土地元素(land element)，接著再分析、整合土地元素形成土地單元(land unit)和土地系統(land system)。然後進行野外實地調查，並在崩積物中採取可定年物質的樣本、交付定年。最後綜合研判、解釋研究區過去發生的崩塌類型、空間範圍與可能的發生過程。

結果

一、地形組合

研究區的坡度分級圖如圖 2，主要地形剖面圖如圖 3，「土地單元」或「土地元素」劃分如圖 4。由圖 2 可見，研究區目前的整體地形大約可以區分為較陡峻的上邊坡，和平均坡度較緩的下邊坡兩個部分。上邊坡坡頂是高雄石灰岩構成的內凹圓弧狀劇場形(amphitheater-shaped)陡峻懸崖，下部為覆蓋崩積石灰岩的泥岩陡坡，整體高差大約接近 200 公尺，剖面呈現凹坡(concave slope)。下坡為覆蓋大、小崩積石灰岩碎塊的泥岩坡面，緩陡

相間，整體平均坡度較緩，臨海則多為陡坡，整體高差約 150 公尺，剖面與平面形狀大致呈現凸坡(convex slope)。也就是，如圖 3 剖面 B、C 所示，研究區整體是上陡、下緩的凹凸坡(concave-convex slope)地形，是典型弧形地滑(slump)的地形組合，這個大規模弧形地滑的主崩崖(main scarp)、崩塌塊體(main body)即標示於圖 4。以下就分 A、B、C、D、E、F 六個土地單元，分別說明研究區海岸地帶目前的地形、地質特徵。

圖 5 之中，海岸與紅線圍繞的區域是推測研究區的古崩塌地範圍，藍線圍繞的區域是推測的殘餘古崩塌主塊體的範圍，照片 A 至 F 分別是濱海各土地單元中典型的崩塌特徵。A 單元是自中山大學方向進入柴山部落前的道路位移問題最嚴重，或位移速率最快的路段，平均每年均向下坡位移量可達數公分至十餘公分，屬於活動的弧形地滑(slump)。B 單元是再膠結的古崩積石灰岩碎塊構成的巨大岩塊，因下坡受侵蝕而曾經發生平面型地滑(translational slide)。C 可分為 C₁、C₂ 兩個單元，是再膠結石灰岩塊構成的階狀平台下坡，因海岸侵蝕的下伏的泥岩，泥岩發生弧形地滑，上方的膠結較差的石灰岩塊崩解，發生翻轉型滑動(toppling)，未來這樣的滑動會持續進行。D 的近景屬於 C 單元階狀平台的下邊坡，海灣中段是 D 單元，下邊坡露出泥岩，上邊坡亦屬含較多泥質物質而膠結不良的石灰岩碎塊發生崩塌。E 單元是崩積石灰岩塊構成的階狀平台的下邊坡，因海岸侵蝕造成崩積灰岩塊崩解，發生翻轉型滑動。F 單元可以分為三部分，北段 F_n 的海岸露出再膠結的棕黃色石灰岩與泥岩間界面的露頭，中段 F_c 散布崩積的石灰岩巨礫與石灰岩碎屑，南段 F_s 亦露出再膠結的棕黃色石灰岩與泥岩間的界面。這些區域中，D、E、F 均出現滲水現象，除了顯示泥岩上覆之石灰岩較易透水，地下水沿著與泥岩的界面附近滲出外，亦顯示泥岩上覆的石灰岩未來可能沿著泥岩界面再發生滑動。圖 6 是 A 單元的下邊坡，坡腳露出的都是以風化

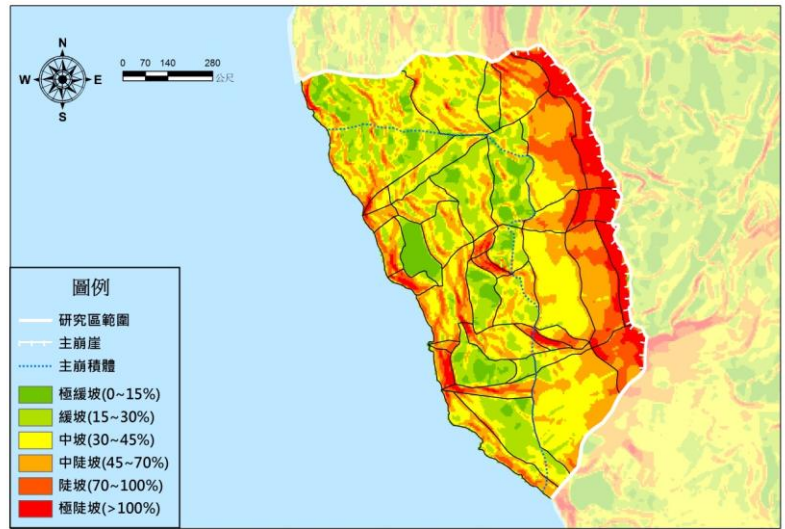


圖 2. 研究區坡度分級、分布圖

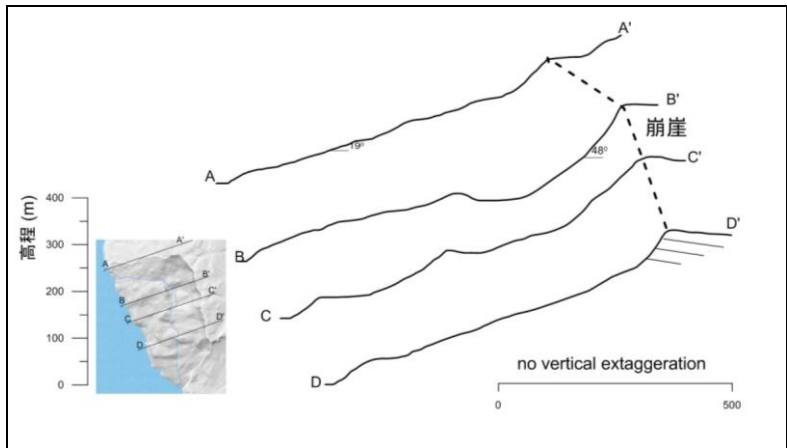


圖 3. 研究區的地形剖線

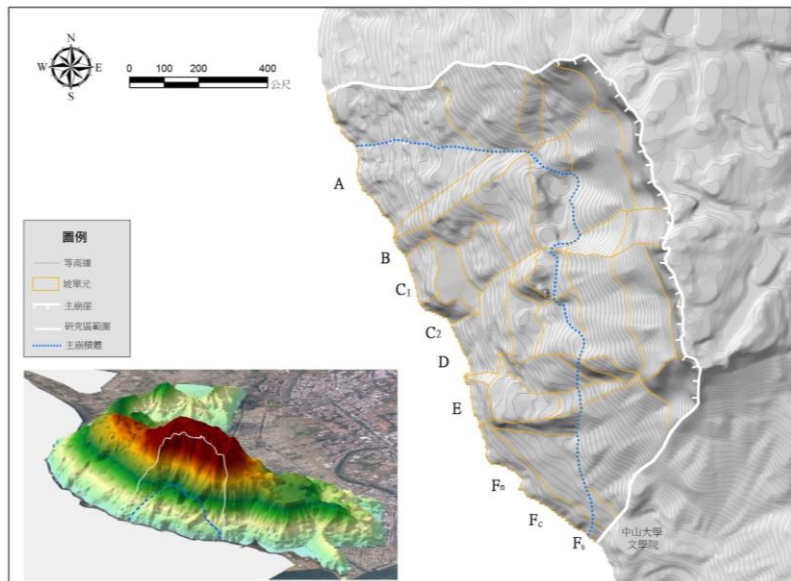


圖 4. 西壽山古崩塌地土地單元圖

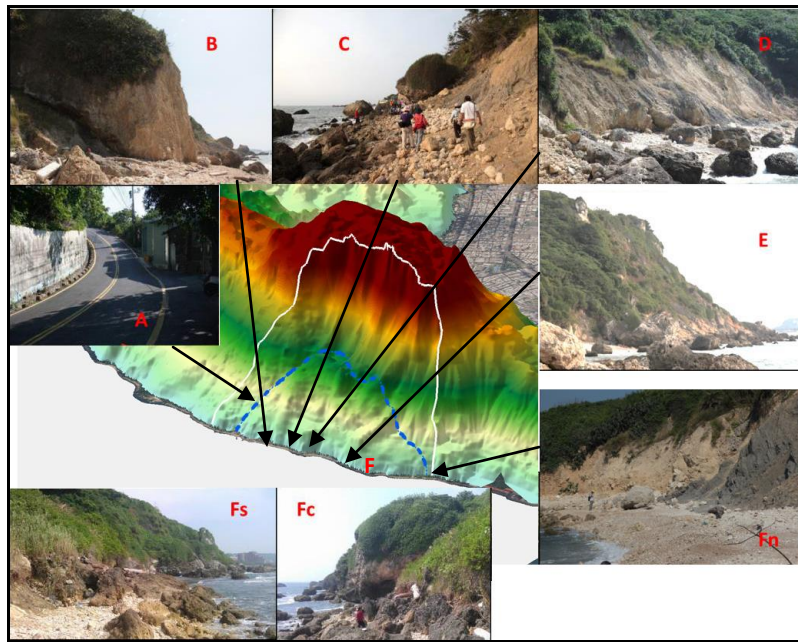


圖 5. 西壽山中山大學校區與聚落間的古崩塌地於海岸的主要露頭



圖 6. 柴山部落港口南側 A 單元的下邊坡



圖 7. 似順向坡發生平面型地滑的 B 單元

泥岩碎屑為主的崩積土，巨大的石灰岩礫石分布於濱線附近及海中。由圖 2、圖 3 可見，這個單元的地形剖面呈現凹—凸坡，上陡、下緩，是典型弧形地滑崩塌地的地形組合。因此，這個單元屬於持續活動的崩塌地。柴山部落位於本單元的上邊坡，由近年觀測顯示其向下坡移動速率最高，平均每年位移量有數公分至十餘公分。

圖 7 左上照片是膠結良好之崩積石灰岩碎屑構成之巨型岩塊，過去曾經發生平面型地滑，左下照片是滑動面的露頭，不過由右下照片可見，濱海陡崖目前雖受海浪侵蝕，但尚無新的自由端產生，坡腳亦無滲水現象，故目前應暫時處於穩定狀態。右上照片可見再膠結石灰岩中含有洞穴岩(speleothem)碎塊，洞穴岩的化學沉澱面未受明顯破壞，故顯示這巨型岩塊的生成過程必須經過以下四個階段，第一階段是高雄石灰岩露出水面後，發育洞穴或裂隙，石灰岩溶蝕與沈澱形成洞穴岩，第二階段是石灰岩體發生崩塌與崩積岩石碎屑的再膠結，第三個階段是再膠結的石灰岩再度崩塌，發生平面型地滑，第四個階段是在當代海岸侵蝕下，巨型石灰岩體邊緣崩塌，形成臨海的陡崖。本研究採取這個洞穴岩較均質而未分層、呈現純淨白色的部分送交碳十四定年，年代為距今 28034 至 28387 年，這個年代雖然表面上似可以代表上述第一階段的時間，不過其中仍隱含許多問題，這個問題後續將再討論。

圖 8 是階狀平台下邊坡的 C₁ 單元，左上可見單元下部露出泥岩積盤。右上照片顯示，這個區域受當代海岸侵蝕影響，發生弧形地滑，左下照片是單元上坡，構成階狀平台(圖 5 剖面 C)的石灰岩陡崖，也是活動弧形地滑的主崩崖，因石灰岩中含有洞穴岩的小碎塊，故它也是過去崩塌的石灰岩塊，經再膠結作用後形成的巨型岩塊，此處再膠結石灰岩的膠結程度較差，可能是其中含有較多泥質的緣故，右下照片即可見其中所夾的泥質細粒層。因此，這表示目前的地形應與相鄰的 B 單元相似，至少必須經過相似的四個階段，第一、第二階段

與 B 單元相同，第三階段是形成平台地形，然後石灰岩下伏泥岩體受海浪侵蝕而發生弧形地滑，引起上邊坡石灰岩塊發生翻轉型滑動，或大量碎裂岩塊崩落並覆蓋在泥岩斜坡，這樣造成邊坡後退的作用一直持續到當代，是為第四階段。

圖 9 顯示位於更高階狀平台下坡的 D 單元，因位於上邊坡的公路路基下陷的現象，故此區目前屬弧形地滑活動崩塌地，崩塌的物質多為含有巨型岩塊的再膠結崩積石灰岩碎塊。不過崩積石灰岩膠結不良，崩塌後多崩解、破碎，分離成大小不等的碎塊。小海灣中央部分坡腳地區露出泥岩(圖 9 左下角照片)，泥岩體與石灰岩界面有滲水現象。因為泥岩破碎，其中混有大、小石灰岩碎塊，因此，除了顯示沿著界面曾經發生相對移動外，泥岩體之中應該還存在更深的滑動面，崩塌塊體的足部可能沒於海水面之下。又因為這個區域的地形組合與地表地質特徵與 C 單元相似，明顯的差別是沒有在巨型石灰岩岩塊中發現洞穴岩碎塊，故推測有類似的地形發育過程。

E 單元海岸(圖 10)亦屬階狀平台的下邊坡，階狀平台靠近上邊坡處，堆積許多高雄石灰岩體崩積的巨礫，坡腳的海岸地帶則分布混雜巨礫的崩積石灰岩碎屑，膠結度不良，泥岩僅在本區中段坡腳出露，且露頭規模非常小，無滲水現象。海岸地帶在近期海岸侵蝕下，崩積的石灰岩持續發生崩塌，過去的海防哨所的基礎受海浪侵蝕崩塌，已經毀損。由這些地形、地質特徵，推測 E 單元應該也和 C 單元具有類似的地形發育過程。

圖 11 至圖 13 分別是 F 單元的北、中、南段海岸。

圖 11 的中央照片是 F 單元北段海岸(Fn)再膠結石灰岩與泥岩界面露頭，照片右側是古亭坑泥岩體，左側為崩積的石灰岩，崩積石灰岩目前已經再膠結，但膠結程度不均，膠結程度較差的部份，受海浪侵蝕容易發生崩塌。上方兩張照片顯示石灰岩碎塊與泥岩的接觸面，界面大約呈東北西南走向，向西北傾斜，

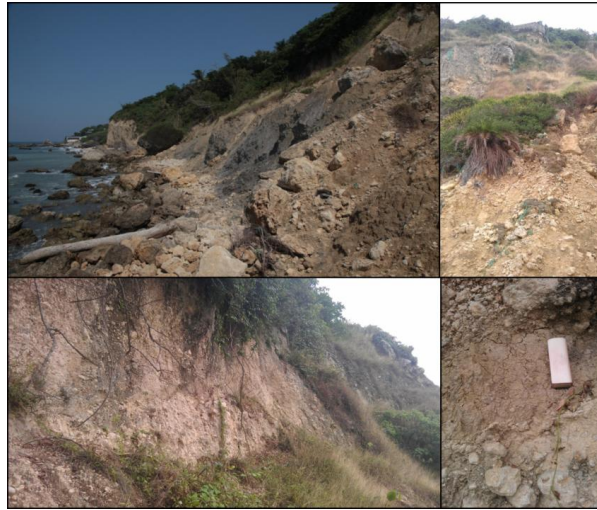


圖 8. 階狀平台下坡的 C₁ 單元



圖 9. 自 C₂ 單元至 D 單元的海岸地帶，近景是 C₂ 單元，左下照片顯示海灣中段的 D 單元下邊坡，右下照片即可見崩積碎屑再膠結形成的石灰岩覆蓋於泥岩上



圖 10. 階狀平台下坡的 E 單元



圖 11. 位於 F 單元北段(Fn)海岸再膠結石灰岩與泥岩界面露頭



圖 12. 分布的主要是崩積石灰岩的 F 單元中段(Fc)海岸



圖 13. 位於 F 單元南段(Fs)海岸再膠結石灰岩與泥岩界面露頭

沒入沙灘下的部分目前有水滲出；下方兩張照片則顯示石灰岩碎塊已經捲入泥岩之中。因為本區泥岩體局部有成棕黃色、含沙較多岩層，故可以概略度量泥岩層的位態，不過位態多變，岩層並出現小規模褶曲現象，故推測岩體整體都位於一個更大規模的崩塌塊體上，在泥岩體深部應該存在更深的滑動面。本段海岸上邊坡公路有明顯下陷現象，因此推測海岸侵蝕持續造成上邊坡崩塌。

圖 12 是 F 單元海岸中段(Fc)，坡腳露出膠結不良的崩積碎屑構成的石灰岩，和其中混雜的大量崩積石灰岩巨礫，未見泥岩出露。本區以北的沙灘多以石灰岩碎屑或近代珊瑚、貝殼碎屑為主，本區南側開始轉變為以黑板岩碎屑為主的黑色沙灘。

圖 13 是 F 單元南段(Fs)的海岸，坡腳再度露出再膠結程度較差的崩積石灰岩(右下照片)，和石灰岩與泥岩之間的界面(左下照片)，亦散布少量石灰岩巨礫。泥岩與石灰岩界面有滲水現象(下中照片)，形成湧泉，據野外觀察，此處滲水最明顯，經常在海岸活動的人並築水池蓄水供沖洗之用。泥岩位態不明，不過上邊坡的公路有明顯下陷現象，故推測與北段海岸相似，目前地表發育滑動面較淺的弧形地滑崩塌，但地下較深部應存在更深的滑動面，崩塌地足部沒於海面之下。

由上述 F 單元三段海岸特徵推測，這個單元的地形發育過程至少應該經歷以下兩個階段，第一階段是高雄石灰岩發生深層弧形地滑崩塌，第二階段是發生當代的海岸崩塌。

二、古崩塌年代

古崩山發生的年代可以由崩積物中含有的可定年物質，如崩塌發生同時埋藏的含碳植物，送交碳十四定年得知，但目前野外工作均位於崩積土中發現任何可定年物質。故本研究於圖 7 右上採得呈現均質白色的化學沈澱(再結晶)石灰岩塊，送交台大貴重儀器中心進行碳十四定年，獲得年代結果為距今約 28,034 至 28,387 年(表 2)。

將這樣的標本送交定年，存在著兩個問題。其一是一般將溶解後再化學沈澱的石灰岩，例如本研究將高雄石灰岩溶解後再結晶形成的石灰岩進行碳十四定年，年代通常較化學沈澱年代更年輕，而非一般常被認為含有「死碳」(dead carbon)而較年老(Holmgren *et al.* 1994)，這是因為化學沈澱形成的石灰岩，會受到水與大氣中更年輕的碳十四交換的影響，若年代年輕於距今 20,000 年，影響較少，若年代早於距今 20,000 年，影響較嚴重，依據 (Holmgren *et al.* 1994)的研究，碳十四年代大約距今 30,000 年的洞穴岩，若用鈾系定年得到的年代大約距今 30,000 至 50,000 年。故一般洞穴岩的定年，多用鈾系不平衡定年法(The Uranium-series disequilibrium dating method)。其二是即使得到的碳十四年代接近實際化學沈澱發生的年代，或將這樣的標本送交鈾系定年，這個年代代表的也不是發生崩塌的年代，化學沈澱至崩塌發生的年代差異仍不可知。故本研究將化學沈澱的石灰岩送交定年的目的僅在於推測概略的古崩塌發生最早年代，並不在於了解其相對較精確的年代。

三、崩塌模式

雖然目前西壽山地區地滑的活動性高，但基於以下六點，推測目前發生的崩塌活動，都屬於更新世低海水位時期，發生的更大規模崩塌地的一部分，而這個古崩塌塊體，大部分都沒於目前的海平面之下。

1. 由濱海坡腳地形單元的地形、地表組成物質的特徵觀之，尤其是局部露出崩積石灰岩與泥岩的界面，大多有滲水現象，有滲水現象的上邊坡道路則多有下陷現象，故目前的海岸地帶基本上都屬於目前活動中的崩塌地，且當代的崩塌活動都發生於古崩積層之上，也就是之前應曾經發生過更廣泛的崩塌活動。

2. 研究區整體地形呈現上坡為凹坡、坡度陡，下坡為凸坡，坡度較緩且緩陡相間的地形。且下坡的平坦面均是由古崩積的石灰岩碎屑，經再膠結成為巨型的岩塊構成的。也就是

表 2. 洞穴岩定年結果

地點				¹⁴ C 年代			
地點	東經	北緯	海拔高度 (m)	年代 (yr BP)	校正範圍 ^a (cal yr BP)	δ ¹³ C (‰)	實驗室編號 ^b
西壽山	120°15'13"	22°38'31"	2	23400±110	28034-28387	3.1±0.1	NTU-5766

a. 以軟體 CALIB 6.0 校正(Reimer et al. 2009)，並以校正後 1δ 範圍表示

b. NTU 為臺灣大學

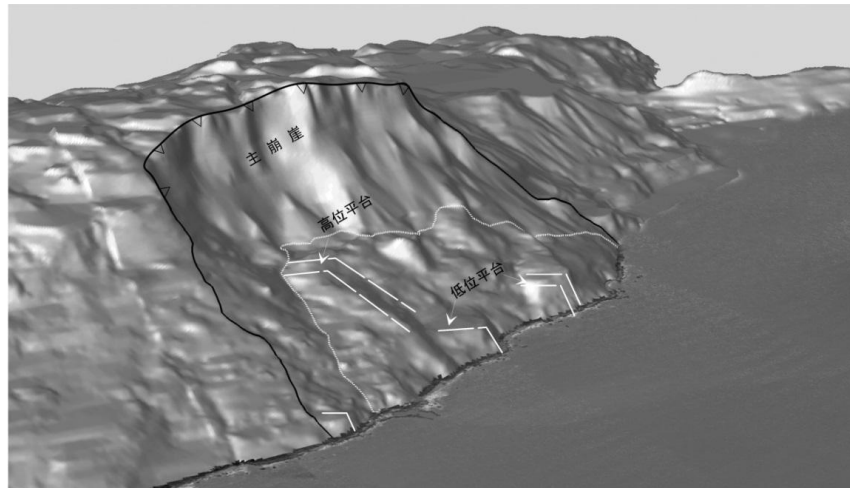


圖 14. 研究區模擬立體模型與主崩崖、主崩塌塊體範圍

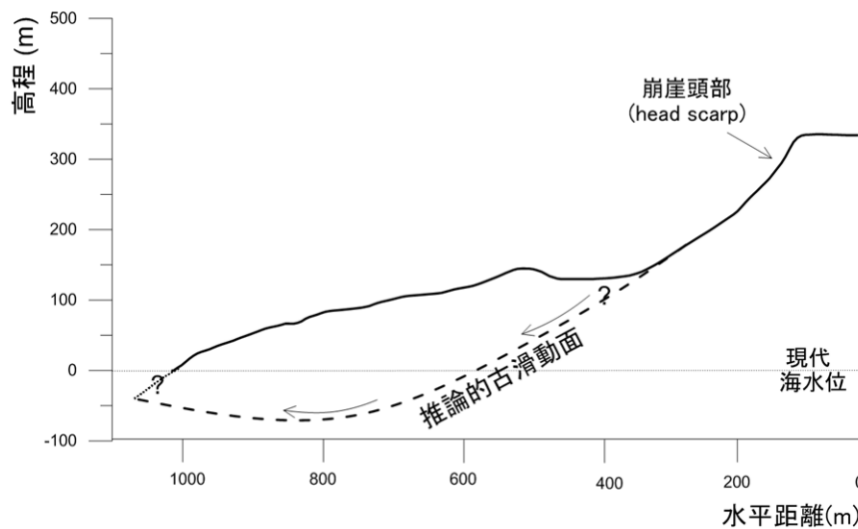


圖 15. 推測的古崩塌體剖面圖

過去的崩塌極可能為一個大規模弧形地滑，形成典型的弧形地滑的地形(圖 14)。又因為上坡陡坡的高差大約 200 公尺，大於高差大約 150 公尺的緩陡相間的下坡，故推測這個深層弧形地滑的足部很可能沒於海水面之下(圖 15)。

3. 因為 B 區由古崩積石灰岩碎屑再膠結石灰岩塊中的洞穴岩化學沉澱面保存良好，故

其崩塌後應未再受流水搬運作用影響，也就是相鄰 C 區臨海的階狀平坦地形應該不是如海階等的地形。其次，B、C、D、F 單元出露較大規模的泥岩體，不過泥岩體破碎，尤其是 F 單元泥岩體位態混亂，應可推測這些泥岩體都是位於早期崩塌塊體之中，在更深部有早期滑動面，濱海與較高處上坡的這些階狀地的成因

均與早期、滑動面更深的崩塌作用有關。

4. 形成 B、C、E 單元目前的地形，均必須經過四個階段。相同的是第一階段是高雄石灰岩隆起並露出水面，形成洞穴岩；第二階段是含有洞穴岩的岩體崩塌並再膠結；第四階段發生當代的崩塌作用。不同的是第三階段，B 單元發生稍早於當代海岸崩塌而目前處於亞穩定狀態的平面型地滑，C、E 單元發生形成階狀地形的作用，也就是滑動面較深的大規模弧形地滑。在 A、D、F 單元，大致也可見第一、第二和第四階段過程留下的證據。也就是說，形成研究區目前的地形，至少經歷五個主要階段，第一是泥岩斜坡覆蓋由頂面崩塌的石灰岩碎屑，第二是形成平坦面的崩塌作用，第三是例如 B 區石灰岩體平面型地滑的古崩塌作用，最後是當代海岸侵蝕造成的崩塌作用。

5. 研究區地形發育過程最少包括以下五個階段，首先是位於坡頂的高雄石灰岩露出水面、發育洞穴或裂隙，並形成洞穴岩；之後發生高雄石灰岩發生崩塌與崩塌碎屑的再膠結，其間並未混入大量伏於其下的古亭坑層泥岩；然後西壽山發生或重複發生大規模弧形地滑，形成弧形主崩崖，較高處覆蓋崩落的壽山石灰岩並微向上坡傾斜的階狀平台，和覆蓋再膠結石灰岩的較低階狀平台；接著這個崩塌塊體在長時間海岸侵蝕下，發生較早期的崩塌，如 B 單元的平面型地滑，使主崩塌塊體逐漸因為這些局部模崩塌作用而分離成為數個單元，最後就是最近期海岸侵蝕引起的各種崩塌作用。

6. 由 B 單元再膠結石灰岩中取得之較均質、呈現純淨白色的化學沈澱洞穴岩碎塊，經碳十四定年為距今約 28,034 至 28,387 年，雖然可以推測洞穴岩的確定沉澱年代可能是距今 30,000 至 50,000 年(Holmgren *et al.* 1994)，但這個年代的問題仍然極多，不僅無法代表最初洞穴岩首次崩塌的時間，或者得知崩塌過程的任何時間特徵，不過據此應仍可推測主要的古崩塌活動極可能發生於末次冰期晚期(MIS 2)的低海水位時期(趙希濤 1984)。

討論

綜合以上討論，推測研究區崩塌地發育的過程如下(圖 16)：

1. 第一階段

隨著壽山抬升的過程，西側泥岩斜坡覆蓋大量由頂面崩塌的石灰岩碎屑。這時期的崩塌以高雄石灰岩的落石為主，故崩塌石灰岩碎屑中常含有許多巨型岩塊和化學沉澱的洞穴岩碎塊，且這些碎屑物均有再膠結現象，僅部分混有較多泥岩碎屑而膠結較差。由巨型岩塊中的洞穴岩碳十四年代推測，此時期極可能是於末次冰期的低海水位時期(如圖 16a 所示)。

2. 第二階段

推測在末次冰期晚期的低海水位時期，發生最大規模的弧形地滑主崩塌，形成上坡凹坡、坡度陡，下坡凸坡、呈階狀地形且平均坡度緩的整體地形。下坡較高的階狀地平坦面地表覆蓋大量崩積的高雄石灰岩巨型岩塊，較地的階狀地平坦面覆蓋含有高雄石灰岩巨礫的再膠結石灰岩。崩塌地的足部、趾部應該都在目前的海平面之下(如圖 16b 所示)。

3. 第三階段

由更新世冰期結束到當代，海水面快速上升至相對穩定的過程中，除了最上坡高雄石灰岩持續發生落石崩塌外，波浪侵蝕坡腳，造成主崩塌體不斷發生各式次崩塌，形成目前相對彎曲的海岸線(如圖 16c 所示)。次崩塌主要類型包括：

(1)坡腳露出泥岩或含有大量泥質崩積碎屑物的斜坡，受海浪侵蝕後發生的弧形地滑，其中以 A 單元最典型；

(2)上覆再膠結石灰岩塊之平台，下坡泥岩海崖崩塌後，上邊坡再膠結石灰岩塊的平面型地滑，或者翻轉型地滑，最典型的的就是 B、C 單元；

(3)較小規模的落石和岩屑滑落，多發生於由巨型石灰岩塊構成之陡崖(如 B 單元)，或大量岩屑覆蓋的邊坡。

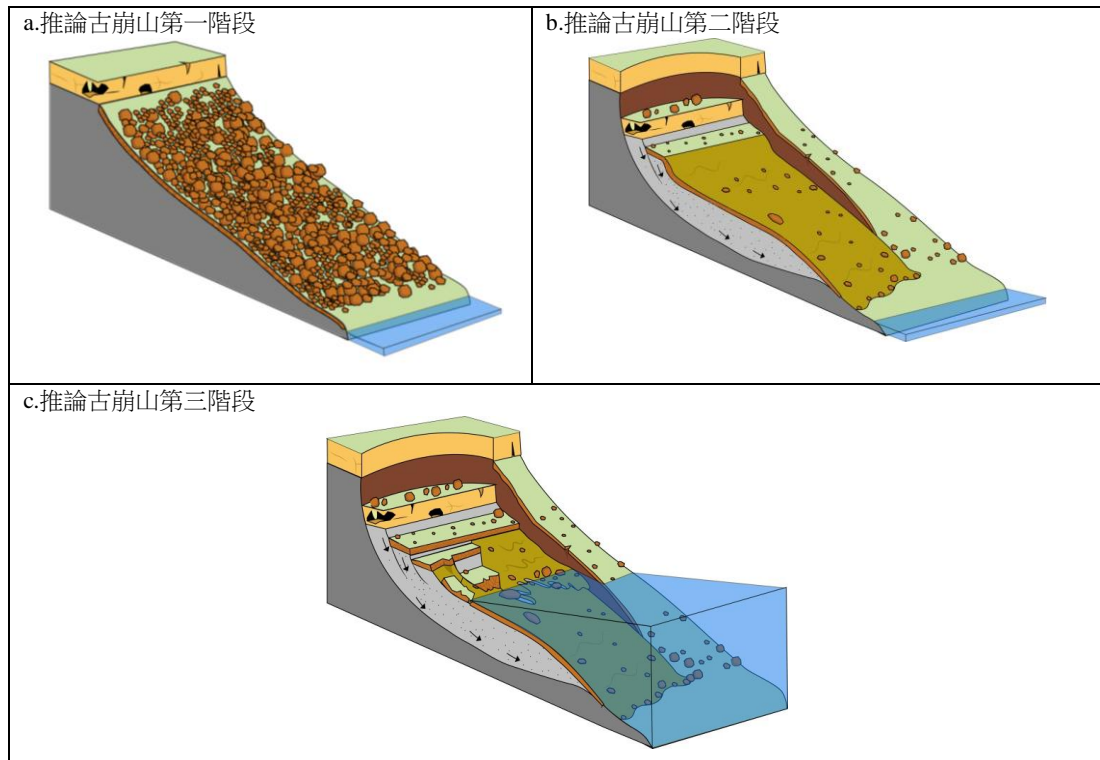


圖 16. 推測西壽山的崩塌發生三階段

結論

西壽山的主要崩塌可能是發生於更新世末次冰期的低海水位時期，規模非常大，且崩塌塊體應有一大部分沒於目前海平面之下，在海水面上升過程中，主崩塌體再發生許多不同類型的次崩塌，形成目前所見的地形。也就是西壽山崩塌歷史非常長，崩塌機制較目前想像的複雜，並非單純的只屬於目前海浪侵蝕坡腳，導致上邊坡失去支撐而發生滑動的問題。目前海岸地帶發生的弧形地滑、翻轉型地滑、平面型地滑、落石，均只是大規模崩塌活動中的小現象。雖然保護坡腳、降低海浪侵蝕，可以降低目前正進行之崩塌作用的機率，但整體而言，目前廣泛分布的小型崩塌與主崩塌的關係如何，仍有待進一步研究。

誌謝

本研究承壽山國家自然公園委託計畫「壽

山國家自然公園地景資源調查暨地表變形監測計畫」補助完成，特此致謝。

引用文獻

- 王文能、潘國樑。1982。高雄壽山崩場地之地質與地形。礦業技術 20(3):195-204。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正。2000。臺灣活動斷層概論(第二版)暨五十萬分之一臺灣活動斷層分佈圖說明書。經濟部中央地質調查所。
- 紀立民。1989。高雄壽山南部石灰岩之沈積學研究。國立中山大學海洋地質研究所碩士論文。
- 張石角。1987。山坡地潛在危險之預測及其在環境影響評估之應用。中華水土保持學報 18:41-62。
- 張石角。1992。臺灣地質分區邊坡崩塌類型及其預測方法 - 技術轉移講習班講義。台北：臺灣大學地理學系。
- 張石角。1993。山坡地調查規劃、評估及其崩

- 塌預測與治理。台北：行政院農業委員會專題研究。
- 張榮輝。2005。利用 GPS 監測高雄柴山地區地區地表變形。成功大學地球科學研究所碩士論文。
- 張徽正等。1998。臺灣活動斷層概論—五十萬分之一臺灣地區活動斷層分布圖及說明書。中央地質調查所特刊 10。
- 許中立、郭玉麟、王杰俊。2005。高雄市哨船街邊坡崩塌整治之探討。坡地防災學報 4(2):71-82。
- 陳華玟、謝凱旋、何信昌。1998。五萬分之一臺灣地質圖幅(圖幅第六十一號)暨說明書—高雄。經濟部中央地質調查所。
- 趙希濤。1984。中國東部 20000 年來的海平面變化。中國海岸演變研究。中國：科技出版社。
- 蔡望生。2003。臺灣晚更新世洞穴碳酸鈣之銣同位素初步研究。成功大學地球科學研究所碩士論文。
- 蔡光榮、謝正倫、周士傑、曾皇銘、陳昆廷。2010。類神經網路分析法應用於高雄壽山坡地社區邊坡崩塌潛感區之劃定。臺灣鑛業 62(3):35-42。
- 蔡光榮、謝正倫、陳昆廷。2010。高雄壽山地區邊坡崩塌災害自動化萃取系統建置之研究。中興工程季刊 108:77-84。
- Cooke RU and JC Doornkamp. 1990. *Geomorphology in environmental management: a new introduction*. USA: Oxford University Press.
- Gurrola LD, DE DeVecchio and EA Keller. 2010. Rincon Mountain megaslide: La Conchita, Ventura County, California. *Geomorphology* 114: 311-318.
- Holmgren K, SE Lauritzen and G Plssnert. 1994. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{14}C dating of a late Pleistocene stalagmite in Lobatse II cave, Botswana. *Quaternary Science Reviews* 13:111-119.
- Hsieh ML, SH Lai, DJ Lin, Hsu CH, IW Chen, HH Chen, SJ Kang, CY Chou and BH Shyu. 2012. Late Quaternary landscape evolution and genesis of the 2009 catastrophic landslide in the Hsiaolin area, southwestern Taiwan. *Western Pacific Earth Sciences* 12(1):115-128.
- Jibson RW. 2005. Landslide hazards at La Conchita, California. *Open File Report 2005-1067*. In U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Michael PL, DH Alan, ED William and P Taylor. 2007. Formation of amphitheater-headed valleys by waterfall erosion after large-scale slumping on Hawai'i. *Geological Society of America Bulletin* 119:805-822.
- Reimer PJ, MGL Baillie, E Bard, A Bayliss, JW Beck, PG Blackwell, CB Ramsey, CE Buck, GS Burr, RL Edwards, M Friedrich, PM Grootes, TP Guilderson, I Hajdas, TJ Heaton, AG Hogg, KA Hughen, KF Kaiser, B Kromer, FG McCormac, SW Manning, RW Reimer, DA Richards, JR Southon, S Talamo, CSM Turney, J van der Plicht and CE Weyhenmeyer. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51(4):1111-1150.
- Sun SC. 1963. The reef limestones and the geologic structures in the vicinity of Kaohsiung City, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan* 2:47-64.
- Yoko O, C John, B Kelvin and O Yuki. 1997. Late Quaternary paleolandslides on the coral terraces of Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Geomorphology* 19:55-76.