

斷層活動機制與山地災害

以集集大地震為例

國立成功大學防災研究中心 / 賴文基、劉彥求、翁燈景、王旭彬、林慶偉

國立成功大學水利及海洋工程學系 / 謝正倫

「921集集大地震」由於所造成的地震地表斷層清楚，提供了對於地震地表斷層特性探究的機會。根據此次的調查結果發現，地表地震斷層的位移量隨著地點的不同而有明顯的差異，其位移形式則因為呈現鋸齒狀的外型而在不同方位的斷層上有不同型式的位移比例。於豐原北部所測得高達10公尺的地形落差為文獻記錄上僅見的記錄，而台灣地區如此的地表斷層特性也值得在研擬防震措施時，重新調整思考的方向。此次的地震地表斷層及地表面的震動，也造成了山地地區包括了崩塌、地滑、土石流等許多直接及可能衍生出的二次災害，這些可能災害地點特性及位置的掌握，亦是現階段最重要的治山防治工作。除此之外，地震地表斷層還可能影響到排水系統的重新区劃，下游河道抬昇後形成堰塞通水的自然堤壩，造成河道改道對於跨越河道上的結構物及活岸造成沖刷等等，都是包括震後的重建工作以及未來作為防治因地震引發的山地災害應該注意的重點工作。

前言

1999年9月21日凌晨1時47分，台灣地區發生芮氏7.3規模之烈震，其震央位於北緯23.85°，東經120.81°，也就是在日月潭西方12公里左右之位置，震源深度在地表下6.99公里。本次地震除造成至少2千2百人死亡，7千餘人受傷及數萬間房屋損毀之外，並於地表產生長達百餘公里之地表斷層，不僅

其長度為世上罕見，斷層上下盤間之高差可達近10公尺亦為世上罕有。由於此次地震地表斷層的出露及其斷層所造成的地面錯移，造成斷層沿線及其鄰近地區落石、崩滑、河道阻斷、排水失效、道路中斷等各類型的山地災害；除了這些由主震及餘震引發的直接災害外，地震斷層所造成的山地災害，也將會因為將來的颱風、豪雨所帶來的雨量，形成二次災害造成災情的擴大。本文藉由地

表出露的地震斷層調查結果，並配合斷層出露沿線所見的山地災害，用以說明地表地震斷層所引發的山地災害特性；除此之外，此次地震中亦有許多的防災工程遭受到損壞，本文亦藉由地表斷層對這些工程設施的危害，進而說明這些設施將來的功效及影響，以供後續相關研究與防災工程規劃整治時之參考。

地震成因與地表斷層分佈位置

本次集集大震起因於車籠埔斷層活動，於地表造成過去地震文獻中少見的明顯地表斷層錯移，地表斷層出露的總長度超過105公里以上。此斷層南以古坑斷層（大致為古坑—草嶺一線）為界，由古坑經竹山、民間、南投、草屯、霧峰、豐原等城鎮，約略以南—北走向向北延伸83公里，斷層延至豐原—神岡一帶斷層軌跡轉折呈東北東—西南西走向，豐原—內灣段長約15.5公里，斷層延至苗栗縣卓蘭鎮內灣村附近以後，斷層以一系列約略呈西北—東南走向至南—北走向之正斷層（長約6.5公里）向東與雙冬—大茅埔斷層相接（圖1）。本次所見之地表斷層其全線之地表軌跡均呈鋸齒狀，其中古坑至豐原一段之斷層位置與原本認知之車籠埔斷層很近，豐原以北之斷層則未見於以往之相關文獻資料，以下就各段之斷層分佈特性加以說明。

地表斷層造成的位移

地震斷層於地表的出露多由鋸齒狀，呈現平行或次平行的地裂所組成。

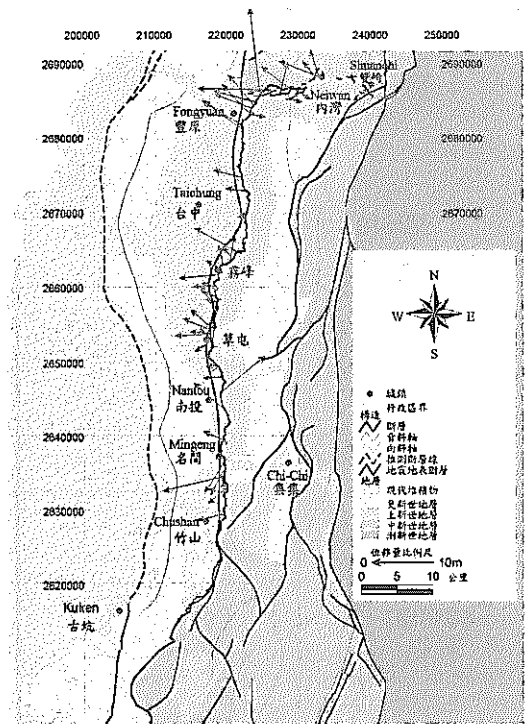


圖1 921集集地震地表斷層軌跡及斷層位移量圖

與一般因為坡地路造成的張力裂縫所不同的是，這些地裂具有明顯的垂直或水平位移，且其分佈方位就區域的尺度而言具有相當一致的延伸性。這些地裂分佈的寬度由數公尺至數百公尺均有，其中位移量最大，延伸性最長的地裂可視做主要的地震地表斷層（照片1）。以斷層分佈的方位特性而言，儘管地表斷層延伸的方位常隨著局部地形而有變化，但就區域的尺度而言可將此次地震的地表斷層區分成由古坑至豐原以南北方向延伸的南北段（圖2），以及由豐原至雙崎呈東西走向的東西段（圖3），而這兩段顯現於地表的許多特性也頗有差異。

由古坑至豐原的南北段部分，所造成的地表斷層其斷面兩側之垂直落差由南邊之數10公分向北漸增至竹山附近的

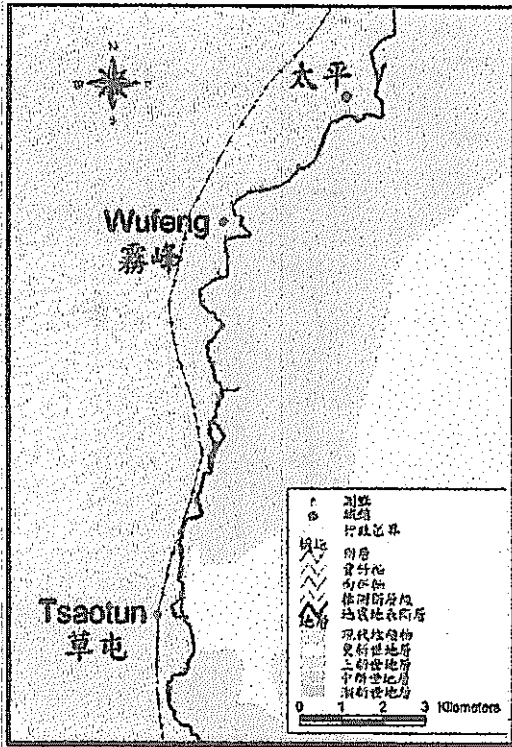


圖2 太平至草屯地表斷層分佈位置圖

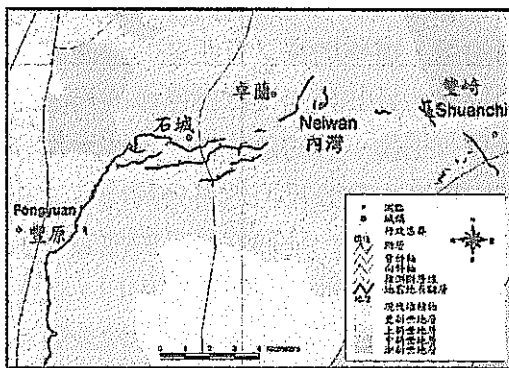


圖3 豐原至雙崎段地表斷層分佈位置圖

與垂直位移量相同，水平位量亦隨著地點的不同而有變異，出現頻率較高約在1~2公尺間，其中又以左移形式的位移較右移為多。最大的水平位移出現在圓山新村及豐原北部的豐勢路，位移量幾乎達到8公尺。

由豐原至雙崎的東西段部分，斷層所造成的垂直位移如於石崗壩附近及苗栗縣之內灣地區可見多達6~8公尺的地表斷層落差，但由埤豐橋至石岡壩段由於屬於舊溪床的礫石層及河床堆積物，由於缺乏明顯的地表指準(Marker)，所以無法詳細計算出其垂直及水平位移量，但從地形面所形成的落差，最大的垂直落差可達到11公尺(照片2)。在水平位移量部分，亦隨著地點的不同而有相當大的差異，由於此段中部分斷層位置落於山區及溪床，由於無其他地上物及標示，所以這些地點無法求出其位移值。在位移量上儘管量得的數值較南北段為小，但由地形面的變動及導致的坡面破壞來看，其位移值應不小於南北段，如苗栗內灣地區水平位移達到5公尺。由內灣至雙崎地區在單一斷層上下盤之高差最多可達2公尺，拉張量可達50公分，除傾向滑移分量外，部位斷層具有明顯右移分量，單一斷層所量得最大右移分量可達2.5公尺。

在變形帶的寬度方面，南北段的地裂顯得較為集中，在地表形成的斷層帶(變形帶)寬度方面，於古坑—豐原段之斷層帶寬度較窄，於南部地區斷層帶僅寬約數公尺至10來公尺，位移量主要透過主要的逆衝斷層面來完成，東西段

→ 3公尺，而後遞減至中興新村附近的1公尺左右，至霧峰、太平一帶再度遞增至2~3公尺間，此後往北位移量逐漸增加，在豐原市北部達到6.7公尺最大。在水平位移部分由於斷層軌跡呈現鋸齒狀外型(Zigzag)，導致於不同方位上的地裂呈現左移及右移不同形式的位移。

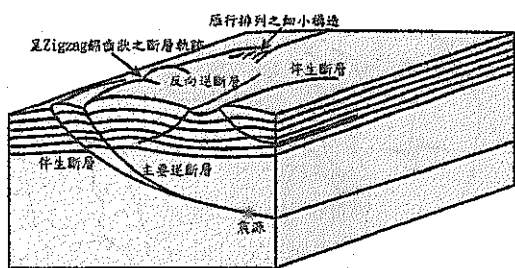


圖4 典型地震地表斷層出露之地表現象及構造
(修改自池田安隆等人, 1996)

較發達的反向逆斷層 (Backtrust) 及呈平行位移量較小的逆斷層 (圖4)，則僅在如烏溪橋及豐原市中正公園等地形較平坦處出現。而於烏溪橋以北開始變寬且主斷層開始產生分叉，斷層帶寬度可達數百公尺，其間出現3~4條之斷層，以朝東傾斜之逆衝斷層為主，偶夾朝西傾斜之逆衝斷層。斷層東西段出露的情形則較為複雜，除了主要的逆衝斷層之外，還包括了因為體積調整產生的反向逆衝斷層，及與主斷層平行位移量較小的逆斷層，斷層變形帶的寬度也因為這些伴隨的構造在石岡、石城一帶幾乎達到3公里寬，但大部分的地裂仍集中於主要構造之附近而非均勻分佈。

地表斷層引發的 山地災害類型與分佈

根據此次地震所引發的山地災害以下之類型：

一、地震引發的崩塌

地震發生的同時，由於地震波的傳遞導致地表面產生搖晃、震動，常會觸發原本即具有崩塌潛感地區的崩塌。根據歷次巨震後的崩塌災害顯示 (治山研究技術會, 1998)，影響崩塌的原因可

能包括了地震本身的性質 (誘因) 以及崩塌位置的地文、水文及氣象等條件 (潛因, Dieter Weichert et al., 1994)。

地震本身的性質又可分成震源的性質部分及地表的震動兩部分，震源的性質包括了震源的位置、地震規模、地殼破壞的形式 (地震斷層、初動分佈、餘震活動以及地殼變動) 等；地表的震動部分包括有：地面加速度 (加速度及變位)、週期特性 (卓越週期及最大振幅之週期)、持續時間及其振幅大小。崩塌地點的潛在原因部分對其影響程度較大的有地質 (地盤強度, R.W. Jibson et al., 1994)、地形 (坡度、標高、坡向、坡面形狀)、地盤的振動特性 (固有週期)、地盤構造、地震前後之降雨狀況。

此次集集大地震所引發的崩塌包括了斷層沿線上，因為地表抬昇造成部分坡腳遭斷層截切，以致於造成邊坡失穩。其中又以一江橋東山坡之大規模崩塌最具代表地震地表斷層截切過邊坡坡腳，因為斷層東側的抬昇引發大規模的地滑。根據由太平至卓蘭地區斷層沿線上的崩塌分佈 (圖5)，計有26處，這些崩塌多半因為斷層截切造成的地形落差觸發舊崩塌的再活動，崩塌的組成多由風化土壤、部分風化嚴重之岩盤以及舊崩塌堆積，大部分的崩塌地面積均小於3公頃，從崩塌發生的坡度來看大部份均大於25°，這些崩塌出現的位置直接受到斷層出現位置的影響，特別是斷層線切入山區時，經常在這些坡面上造成一系列平行且延伸良好之張力裂隙，除了增加地表水入滲外，更提供崩塌地良

→ 好的不連續面，增加崩塌的機會。

遠離斷層線的崩塌主要是受到地震波傳遞時造成地面震動，進而觸發原本即具有崩塌潛感之地點產生邊坡之失穩、破壞。根據農委會水土保持局所提供的南投縣921地震後衛星變異點資料及本中心藉由921地震後拍攝的航照判釋後的崩塌地分佈圖結合後，再將崩塌地的分佈圖與中央氣象局所測得的921地震主震等震圖(Shin, 1999)套疊的結果(圖6)，由於地表面的震度受到地形、地質及地下構造的影響，所以震度的分佈並不平均，震度中以草嶺、名間、霧峰及地利附近地區最高，這些地區的山區部分也可以看出崩塌密度較大與國外相關結果相符(Edwin et., 1996)，

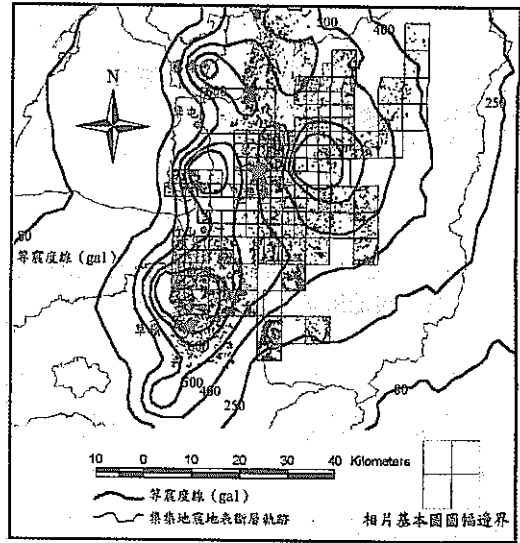


圖6 921集集地震南投縣部分崩塌及等震度分佈圖

(崩塌資料來源：農委會水土保持局衛星遙測變異點及成大防災中心航照判釋結果，等震度圖來源：中央氣象局921震測資料)

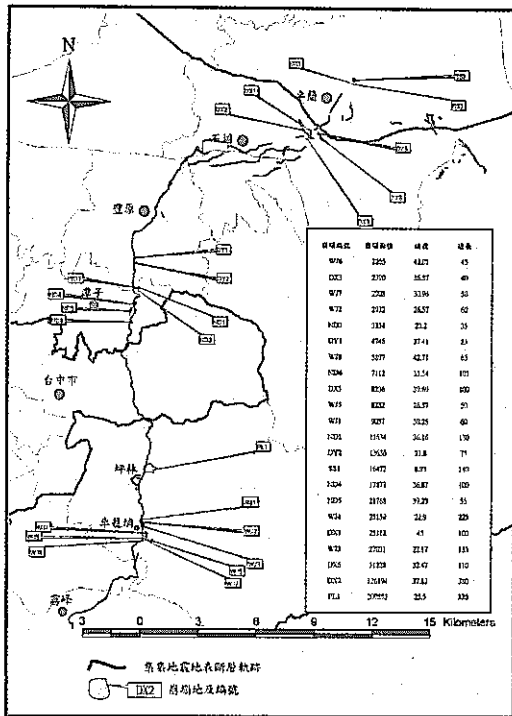


圖5. 921集集地震地表斷層霧峰至卓蘭段，斷層沿線崩塌分佈圖

亦為將來崩塌災害需持續觀測之地點。地震造成的崩塌與由豪雨所造成的崩塌最大的差別，是由於標高越高的位置地表加速度有加大的作用，以致於地震引發的崩塌多半產生於地形稜線附近(照片3)。崩塌的物質多由坡面的風化土壤以及風化較嚴重的部分岩盤所組成，部分土壤因地震散落坡面而會有大面積崩塌的錯覺，特別對於岩盤所組成的邊坡而言，除了屬於舊崩塌再觸動的地點會有較大的崩塌深度外，其它多屬於深度小於1公尺較淺層的崩塌。

二、地震衍生之坡地災害

因為地震衍生出的坡地災害，主要以土石流及地滑兩種形式對於人民的生命財產威脅最大，下面就這兩項分別說明。

(一) 土石流

因地震而造衍生出的二次災害包括了土石流、地滑以及崩塌災情的擴大，這些災害多半源自於地震造成的崩塌或者是造成大規模土體的鬆動，而由地震後的其他觸因，如豪雨、颱風或人為不當的干擾，引發堆積於河谷中的土石或坡面上的土體再次驅動向下運動而造成災害。

此次地震所產生的崩塌以南投縣靠近震央附近的集集鎮、中寮鄉、水里鄉、埔里鎮、國姓鄉及雲林縣的草嶺附近地區最為嚴重，目前尚在針對這些地區進行土石流危險溪流的清查工作，在調查的工作中發現部分非原先劃定之危險溪流，因為此次地震之緣故，上游區產生土石堆積，極有可能成為土石流的料源（照片4）。這些溪流其溪流多有大量的崩塌，而這其中又以埔里盆地周緣的紅土台地及南投縣西緣的紅土礫石層的問題為最烈。由土石流產生的3個條件：足夠的溪床坡度、豐富的土石料源及豐沛的雨量中，就可以看出這些紅土台地及礫石層問題的嚴重性。首先這些紅土礫石層都由鬆散的礫石及表層的風化紅土所組成，其組成提供了土石流豐富的料源；在地形坡度方面，台地頂端地形較為平坦，然而其邊緣容易形成落差及坡度大的陡坡崖，在部分地區形成的坡度甚至較堅硬的岩壁來得大，最嚴重的問題在於這些台地通常分佈於沖積平原或盆地的周緣，住宅及土地利用經常瀕臨這些台地陡坡下緣，再加上這些地區之溪溝多屬非常流水的坑溝，更不

易引起注意。如埔里鎮的枇杷里一帶的野溪溝，由於上游已有多處崩塌，且住戶居住的位置又離坡腳不遠，須於雨季來臨前做好充分的防範。

然而因為地震而可能衍生的土石流問題尚不止如此，部分因為斷層截切過的河道，因為下游段溪床的抬昇造成河道堰塞，並形成自然堤壩。由於這些自然堤壩多由河道中鬆散的堆積物所組成，一旦因為上游降雨造成流量增大，堤後蓄積水體產生的推力造成潰堤，則因為瞬間潰堤造成的巨大水流可能挾帶大量溪床堆積物，亦有造成土石流、土砂流或泥流的可能。

(二) 地滑

此次地震造成多處地區的地滑，但除了於地震當時造成嚴重傷亡的九份二山、草嶺潭等地滑外，尚有一些已經開始產生張裂隙，甚至已經產生滑動的位置，如南投縣中寮鄉清水村的紅茶坪地區，坡頂已產生多處的開張裂隙，坡面所種植的檳榔也有大量傾倒，整個坡面都有在向下運動之傾向。由於地滑的徵兆較不明顯，又空照及衛星影像之植生完整也較不易被發現，因此目前地震對於地滑的影響尚難以評估，一但雨季來臨，地下水位升高可能會觸發更多的地滑面，其所可能造成的災情亦不得輕忽。

地表斷層造成的防災工程 損壞及其影響

除了以上所提的崩塌、土石流及地滑的問題之外，此次所受到最嚴重的問 一

一 題莫過於許多地區排水系統的失效。由於局部地區因為地震地表斷層造成地形的隆昇，致排水路的流向及斷層線以上排水系統劃分的改變，使原本地勢較低窪或平坦的地區，突然因為地震斷層造成的垂直落差形成陡坡，積水不退。部分的排水溝則因為地面之振動或斷層截切而產生斷裂（照片5），導致原本應導出的排水反而沿著排水溝斷裂的部分流出，進而淹漫附近地區或滲入地下。一般平地的污水排水道則由於污水淹漫影響生活品質，坡面的排水工程則有可能因為地表水入滲至土體內，影響邊坡穩定及整治工程的成效。

一些坡地社區坡面的擋土牆也因為地震的緣故而損毀，喪失原本護坡的功能。部分坡地社區填方邊坡由於受到地震振動的效應產生沉陷及表面的張力裂隙，挖方部分則因為坡腳的保護工不足或因為上邊坡的荷重，造成下滑，這在台中太平、霧峰等地的坡地社區均為常見的坡地破壞形式。

位於主要河川兩岸的堤防或橫越河道的壩體，亦可能因斷層的截切或因為基礎不均勻的抬昇造成斷裂（照片6），而喪失調節水量及阻止洪水溢散的功能。部分崩塌的土石堵塞河道後，倘若未充分做好河道疏浚，在上游水量增大時亦會造成河流流向的改變，進而加深對於跨越河道結構物（如橋樑、堰壩）以及河岸的沖刷。這些都是此後業務相關人員，在檢測這些工程設施功能是否正常，以及加強維護及加固必須考量的重點。

結語

台灣位處活躍之聚合板塊邊界的年輕造山帶上，地震之發生是本島與生俱來之宿命，雖然本次烈震對本島造成本世紀來最大之災害，但其亦適時警示我們需對所處環境有更多之認識。以台灣目前活斷層之調查研究而言，經濟部中央地質所彙編之台灣活斷層分佈圖及其說明書中，列有51條活斷層或存疑性活斷層，而就活斷層之相關資料中，因資料之欠缺及精度之不足，目前國人尚無法利用既有之活斷層分佈圖進行任何之工程或國土規劃之相關工作，以避免因為工程選址或國土規劃之不當，因此如何記取本次烈震之經驗，謀劃妥善之地震防救災體系之當務之急，就是需先確認本島活斷層之確切位置與其特性。

此次集集地震因為地震引發的山地災害，以及即將因為颱風、豪雨等外在觸因衍生出更多的二次災害都有可能造成災情的擴大。農委會水土保持局能夠及早投入人力、物力進行各地崩塌及土石流危險溪流地點的清查，當能有效掌握這些可能衍生災害的位置及危險程度，並寄望能於雨季及颱風季節前做好萬全的準備，並喚起這些危險地點附近居民的警覺心，以免我們正在重建的家園再次受到無情災害的打擊。更希望歷經此次巨震的打擊，無論是在學術以及實務部分的相關工作者能再一次提昇對未來災害的抗災能力，以免辜負這2千多位犧牲性命喚起我們注意的民衆，並得以和我們週遭的自然環境和諧共處。



照片1 地震地表斷層以具有良好延伸性，並有一致且明顯的地表錯移為特徵（台中縣霧峰鄉光復國中）



照片2 此次地震地表斷層造成的落差高達10公尺，為斷層沿線房屋毀壞及工程構造物損害嚴重的主要原因（台中縣石岡鄉埤頭橋旁）



照片3 地震引發的崩塌主要分佈在稜線附近情形（南投縣國姓鄉南港村）



照片4 崩塌產生的崩落土石蓄積於河谷，待大雨降臨造成流量增加時，容易成為土石流的料源（台中縣東勢鎮吊神山區）



照片5 斷層造成的地面錯移造成排水溝斷裂，也嚴重威脅到排水的正常功能（台中縣東勢鎮泰興里）



照片6 橫越河道的蓄水壩因為斷層之截切造成壩體受損情形（台中縣石岡鄉石岡壩）