

出國報告（出國類別：研習）

土石流潛勢區地形特性及
現場觀測之研究
（農業菁英計畫）

服務機關：行政院農業委員會水土保持局

姓名職稱：尹孝元科長

派赴國家：美國

出國期間：97年9月18日至98年3月10日

報告日期：98年6月30日

目 次

壹、目的	3
貳、行程及內容	6
一、美國加州大學柏克萊分校	6
二、Richmond Field Station	9
三、Hayward Fault	13
四、柏克來山丘地滑及 InSAR 之應用	15
五、美國地球物理學會 (AGU) 2008 年秋季年會	20
1、全球氣候變遷議題	24
2、土石流觀測系統	26
3、地表震動訊號之應用	31
4、光纖感測技術之應用	33
5、LiDAR 之應用	37
6、美國防砂壩拆除實例	40
六、美國南加州森林大火遺跡現場調查	49
1、Santa Barbara 近郊森林大火遺跡	50
2、現場土砂運移觀測系統	55
3、森林大火災區土石流早期預警系統	61
4、Big Sur 消能網	66
七、美國地質調查局 (US Geological Survey) 參訪	69

1、CVO-USGS 討論會	70
2、大型土石流試驗水槽	75
參、心得與建議	83
肆、參考文獻	86

壹、目的

由於全球氣候變遷，各地降雨紀錄屢創新高，加上民國 88 年台灣發生 921 大地震，大量鬆散的土方堆積在坡面或山谷間，造成 90 年桃芝颱風後台灣地區土石流災害發生的次數急遽上升，導致人民生命財產的重大損失。基本上土石流的發生主要有三個要素，即充足的降雨、豐富的土石材料與適當的溪流坡度；由於台灣位於環太平洋地震帶，其構造運動相當頻繁，因此地勢陡峭及河流劇烈的下切作用提供了適當的溪流坡度，地質材料脆弱提供了豐富的土石材料，而季節性颱風豪雨則帶來了豐沛的雨量，上述台灣特有之地質、地形及氣象條件均符合土石流的發生要素，顯示台灣本島仍處於激烈的地形演化階段，而土石流的危害在大地震後也將進入一段高峰期，其影響層面正逐步擴大，甚至牽動山坡地生態體系的平衡與發展。

由於台灣土石流問題日益嚴重，因此個人服務的行政院農業委員會水土保持局自民國 80 年起即陸續委託學術研究單位進行土石流潛勢溪流的調查工作，並於民國 91 年根據土石流發生之自然環境潛在因素及所造成之保全對象危害兩部分，分階段完成全台土石流潛勢溪流調查工作，調查結果顯示全台共有 1503 條土石流潛勢溪流，由於現行調查式並未對於現場環境等狀況進行詳細查核，因此僅可提供各級防災單位和社會大眾在定性上之參考，而在發生土石流事件前後仍

不足以進行土石流相關特性量化之估算。另外相關重要的研究包括對土石流潛勢溪流進行初步發生潛勢的探討，但對於土石流潛勢區細部地形、地質及地貌等特性，仍需要借重國外現場調查的經驗及方法，另外亦需參考國外遙測相關應用科技，尤其是近年來應用相當廣泛的空載光達（airborne LiDAR、亦即 airborne laser swath mapping）技術等，以便能確實掌握易致災的土石流潛勢地區其在地形上的特徵（如上游崩塌的發生、中游河床向下及向兩側侵蝕及下游扇狀堆積區），再配合相關防治措施即可達到減低土石流災害之目標。

除了上述 1503 條土石流潛勢溪流的調查外，個人亦針對水土保持局於全台設置的 13 處土石流觀測站進行現場土石流觀測工作，各站現行的觀測儀器為雨量計、CCD 攝影機、鋼索檢知器、地聲檢知器及超音波水位計等 5 項，雖然在過去幾年間觀測到數場土石流事件，但對於土石流之發生機制仍無法確實掌握。另外一個重要的課題是關於土石流發生警戒的方式，一般而言，土石流的警戒方式主要可分為接觸式及非接觸式兩大類。台灣現行的土石流警戒主要是利用中央氣象局十分鐘即時雨量資料配合土石流警戒分區訂定其發生基準值，以非接觸的方式進行大區域土石流警戒發佈作業，但其準確率仍有待提升。

由於台灣本島每年 5 月到 11 月防汛期間，常遭到颱風豪雨的侵

襲而引發嚴重的土石流及崩塌等坡地災害，因此藉由出國進行博士後研究的機會，獲取國外的寶貴經驗，透過現場參訪調查了解各種坡地災害的發生及運動機制，掌握崩塌及土石流潛勢區地形特性，提供未來台灣在執行坡地防災任務時的參考依據。

貳、行程及內容

一、美國加州大學柏克萊分校

柏克萊加州大學創立於 1868 年，為紀念英國哲學家柏克萊先生而命名，位於舊金山東灣柏克萊市的山丘上，是加利福尼亞大學（加州大學）中最老的一所，同時也是美國大學協會的創始者。柏克萊加州大學為世界學術知名學府，在眾多權威的大學排名裡名列前茅，於 2005 年，英國的 The Times Higher World University Rankings 評柏克萊加州大學為世界第六好的大學，其於 2007 年度則有公立大學第一的美稱。柏克萊加州大學師資完備，研究成果優異，深受國際上同領域學者的肯定並獲得許多國際重要學術獎項，也培育無數國際水準的科學家及數學家，目前共有 61 位諾貝爾獎得主，23 位美國國家科學獎章得主，其中包括我國前中研院院長李遠哲。柏克萊加州大學地球及行星科學系在該領域佔有非常重要的地位，由於該係研究的對象十分廣泛且複雜，因此涵蓋了許多不同學門的專業研究人才，包括地質學、地球物理學、地球化學、地球生物學、海洋物理學與海洋化學和行星科學等，柏克萊加州大學地球及行星科學系在上述學門中都擁有世界級的學術資源和研究成果，因此在全世界相關系所中都擁有其獨特的地位，由於該系聚集了來自各個學科領域的專家與學者，並且擁有豐富的圖書期刊與最先進的儀器設備，因此可提供博士後研究人員

紮實的專業訓練。另外，在柏克萊後方山坡上有一個世界知名的勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)，是美國第一具迴旋加速器的誕生地，其主要執行多項自然科學領域的大型研究計畫，至今已經培育多孕育出多位諾貝爾獎得主，其中最著名的是在美國參與二次大戰後，曼哈頓計畫中廣島原子彈的核心鈾 235 以及製造長崎原子彈的新元素鈾，都是在這個實驗室提煉出來。筆者漫步在柏克萊校區時，甚至假日也可看到許多學生到校做實驗，在草地或樹蔭都可看到或坐或躺的學生在看書，其研究風氣之盛，是筆者生平從未見過的；另外值得一提的是柏克萊加大的圖書館及學校的地標薩瑟塔 (Sather Tower，如圖 1-2)，薩瑟塔高 307 英尺，是全世界排名第三高的鐘塔，其為仿威尼斯聖馬可廣場鐘樓所建造，登上瞭望台可眺望 360 度的景觀。

此次筆者前往的研究機構是地球及行星科學系中由 William E. Dietrich 教授 (圖 1-1) 所帶領的研究群。Dietrich 教授是華盛頓大學地質學系博士，自 1981 進入柏克萊加州大學的地球及行星科學系任教迄今，其教授的課程包含「地球水文循環」、「地形學」、「河川地形學」及「地質現場調查研究」等，其在地形及地貌變遷相關領域有非常豐富的學識與經驗。Dietrich 教授研究專長主要是針對地貌隨時間及全球氣候變遷的過程進行深入的探討，包括河道泥砂的運移機制、

河川地形的演化、地形變遷造成環境生態變化的關係、人類土地利用對地貌變化的影響及全球氣候變遷造成地形的改變等，近年來並積極針對崩塌、地滑及土石流等坡地災害現象進行深入的研究，其在進行研究的過程中，主要是以現場實況調查為主，另外再配合發展數值模式來模擬，同時注重物理現象的理論推演，以便從各方面來瞭解地貌變遷時真正的機制為何。此外，Dietrich 教授的研究團隊亦利用遙測資料及地理資訊系統（GIS）開發不同的工具，例如其將空載光達（airborne laser swath mapping、亦稱 airborne LiDAR）技術應用於即時偵測地形變化的研究上，可作為邊坡破壞的警戒及土石流潛勢區辨識之用。Dietrich 教授曾發表過上百篇學術期刊論文，亦曾獲選為美國國家科學院院士（2003）、美國人文與科學學院院士（2003）及其它許多大大小小的研究獎項。

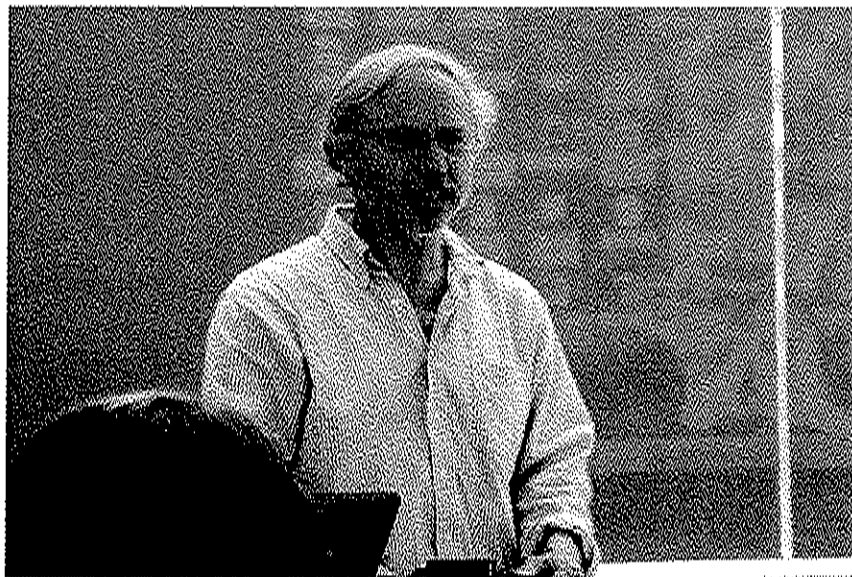


圖 1-1、William E. Dietrich 教授上課情形

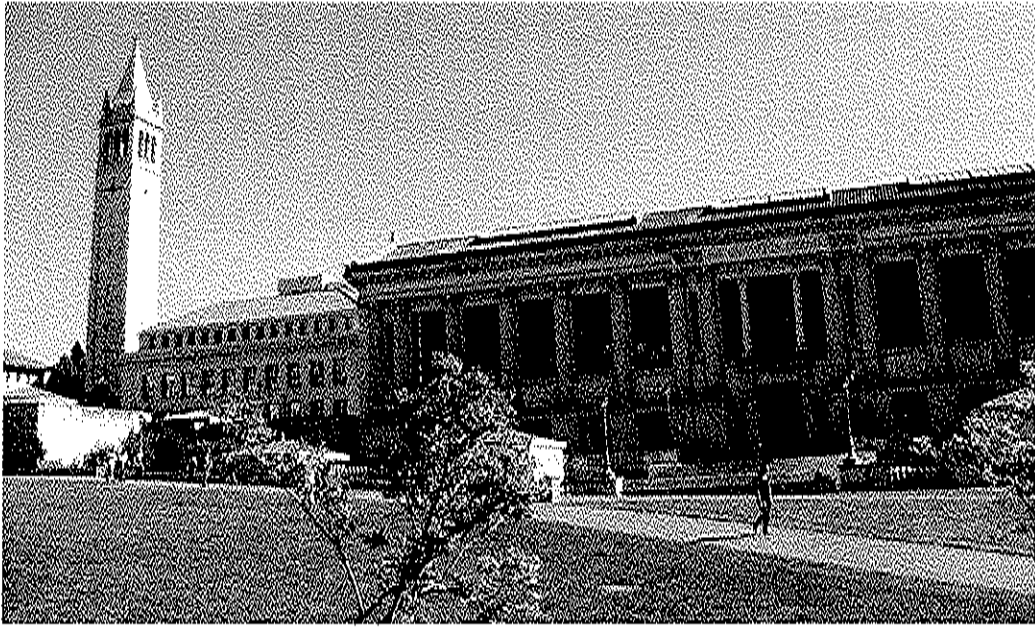


圖 1-2、柏克來加大圖書館及薩瑟塔 (Sather Tower, 照片左方)

二、Richmond Field Station

在筆者抵達柏克萊加大後，平時除了修習數門地球行星科學系及外系所開的研究所相關課程及每周數次的討論會 (seminar) 外，亦參與了 Dietrich 教授進行中的土石流室內試驗，試驗的地點是於舊金山灣區的 **Richmond Field Station**，該試驗場屬於柏克萊加大的校地，場區面積甚大，有十數個系所的實驗場都在此區。

筆者主要參與的試驗係使用一個到目前為止是全世界最大的滾筒型水槽，俗稱「大輪子」(big wheel, 圖 2-1)，其直徑達 4 公尺，這個試驗水槽設置的目的為提供土石流 (debris flow) 或顆粒流 (granular flow) 的相關實驗，尤其探討土石流粒徑大小的特性、顆粒和底床間剪應力的交互作用及土石流流動過程中顆粒對底床所造

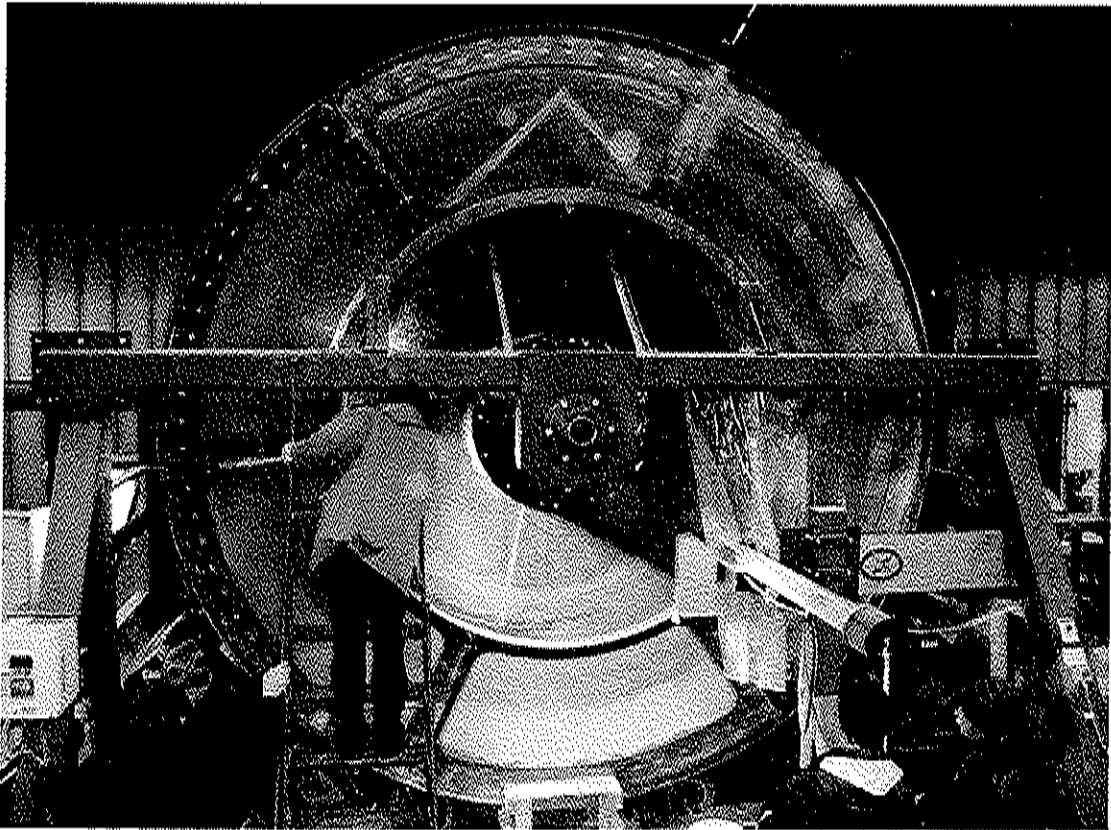


圖 2-1、直徑達 4 公尺的滾筒型試驗水槽 (big wheel)

成的侵蝕作用。由於水槽直徑達 4 公尺，因此實驗所採用的粒徑不需要依模型相似定律縮小，而可以採用和自然界土石流粒徑相同的土石材料進行實驗；因為當土壤中的坩土 (silt) 或粘土 (clay) 的顆粒變小後，其含水時的土壤物理化學行為會有相當大的差異，因此透過和自然界實際尺寸之土砂顆粒所得到的試驗結果其可信度較經過縮小的實驗高很多。

圓筒型水槽設計時的動機來自現場土石流溝渠的觀察，由現場觀測得知，很多 V 型或向下切割很深的蝕溝除了本身地質條件不同外，推測有很大一部分的成因是因為土石流所造成的，因土石流本身含有

礫石成份，再加上其運動時具有直進性，當土石流在河道中流動時，其向下及向兩側的侵蝕力甚強，可能是造成上述 V 型蝕溝的主要原因。由於 big wheel 是圓筒型的設計，因此當其轉動時可模擬土石流不停的流動以探討土石運動對底床侵蝕的機制及特性，如圖 2-2。另 big wheel 中央有一組雷射伸裝置，可快速掃描（每秒 20 次）測量土石表面的高低起伏隨時間的變化，而水槽底部有塊 225 平方公分的區域裝置荷重計（load cell），另有部分區塊放置石膏，其目的為量測實驗結束後由於土石流動所造成的底床磨蝕程度；水槽最大切線轉動速度為 3 公尺/秒，每次實驗時需放入 2000 磅的土石材料。由於實驗水槽的尺寸夠大，因此邊界對土石流動的影響相對較小，其側面係採用透時硬樹脂製成，便於從側面觀測土石顆粒的流動情形。

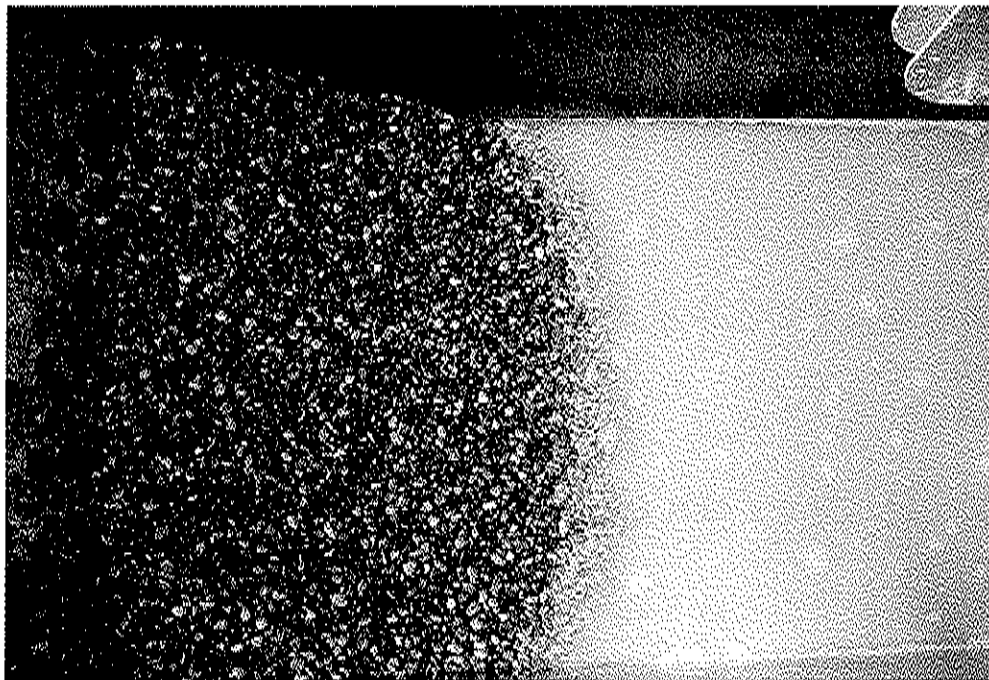


圖 2-2、滾筒型試驗水槽中進行的土石流試驗

另外在實驗的過程當中，筆者有位同學是來自美國地質調查所 (US Geological Survey) 的博士後研究員，其設計出一款稱為「聰明石頭」(clever cobble) 的感應器，如圖 2-3。感應器內置三軸方向加速

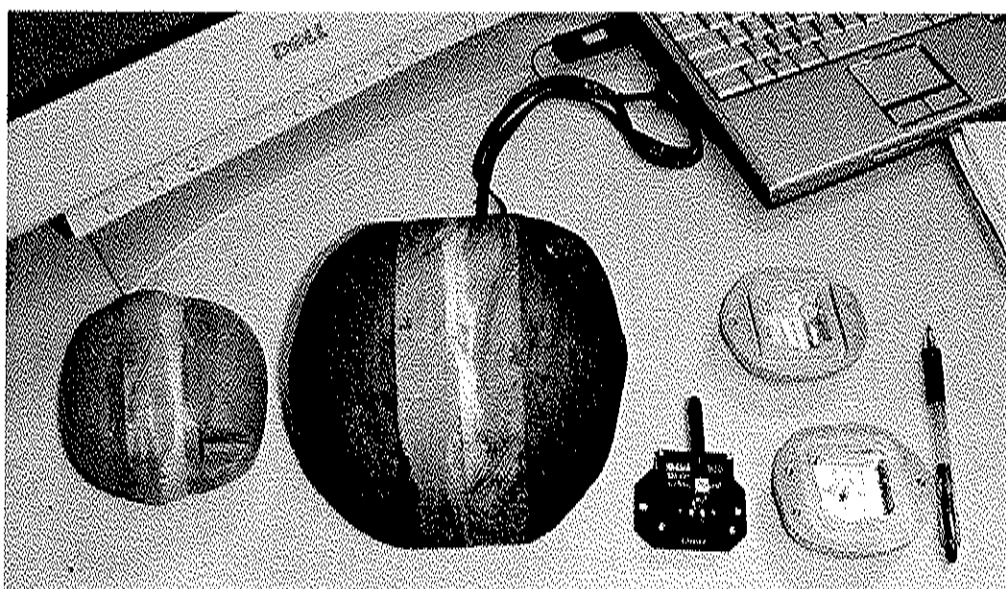


圖 2-3、聰明石頭 (clever cobble) 感應器

度計，其量測範圍為正負 10 倍重力加速度，取樣頻率為 2000Hz，感應器外表是使用鋁製成的，將加速度計包在其中，由於鋁的密度大約 2.7 公克/立方公分，和天然的礫石相近，因此將其放入 big wheel 中進行實驗時，可充份混在土石材料當中，模擬實際的土石運動狀態，並紀錄其旋轉速度、移動軌跡及受到撞擊的程度，基本上將加速度對時間積分可得到速度值，再將速度對時間積分即可得到 clever cobble 的位移變化量，上述三項探討的主題受到實驗中的土石流之土石材料顆料影響甚大，初步結果顯示在卵石含量少(cobble poor)的土石流中，clever cobble 通常較穩定的在土石流中段，加速度計則多顯示類

似靜力平衡時的一個重力加速度值，另顆粒間的交互作用多為磨擦所產生的；反之在卵石含量多(cobble rich)的土石流中，clever cobble 則會出現在土石流前端 (snout) 及土石流中間，加速度計則多顯示為零，表示其多受到撞擊而處於自由落體的狀態中。上述初步結論可提供建構土石流數直模式的學者參考，尤其是土石顆粒間交互作用的關係，另外藉由了解土石流中其內部顆粒位置隨時間的變化也可嘗試求出土石流流動時其流速剖面的分佈。

三、Hayward Fault

在筆者修習的地球科學相關課程當中，許多的研究是和地震科學有關的，尤其是預測地震可能發生的相關研究報告，引起了社會上普遍的重視；在舊金山灣區隨處可見防震的宣導，當地的房子大多是防震的結構，可知居民對地震災害相當重視，最主要的原因是舊金山在 20 世紀共發生了 2 次大地震，分別為 1906 年 04 月 18 日芮氏規模 8.1 級與 1989 年 10 月 17 日的芮氏規模 7.1 的大地震，其中 1906 年的地震造成的損失最為慘重，在長達 2 分 40 秒的地震中引發了規模非常大的火災，造成整個舊金山毀損三分之二，總計死亡人數達數千人及 30 萬人無家可歸。另外根據美國最近的科學研究資料顯示加州在未來 30 年內發生規模 6.7 級以上地震的機率超過 99%，而未來 30 年內發生規模 7.5 級以上地震的機率則超過 46%，再再都提醒了人們地震

的可怕及事先預防的重要性。

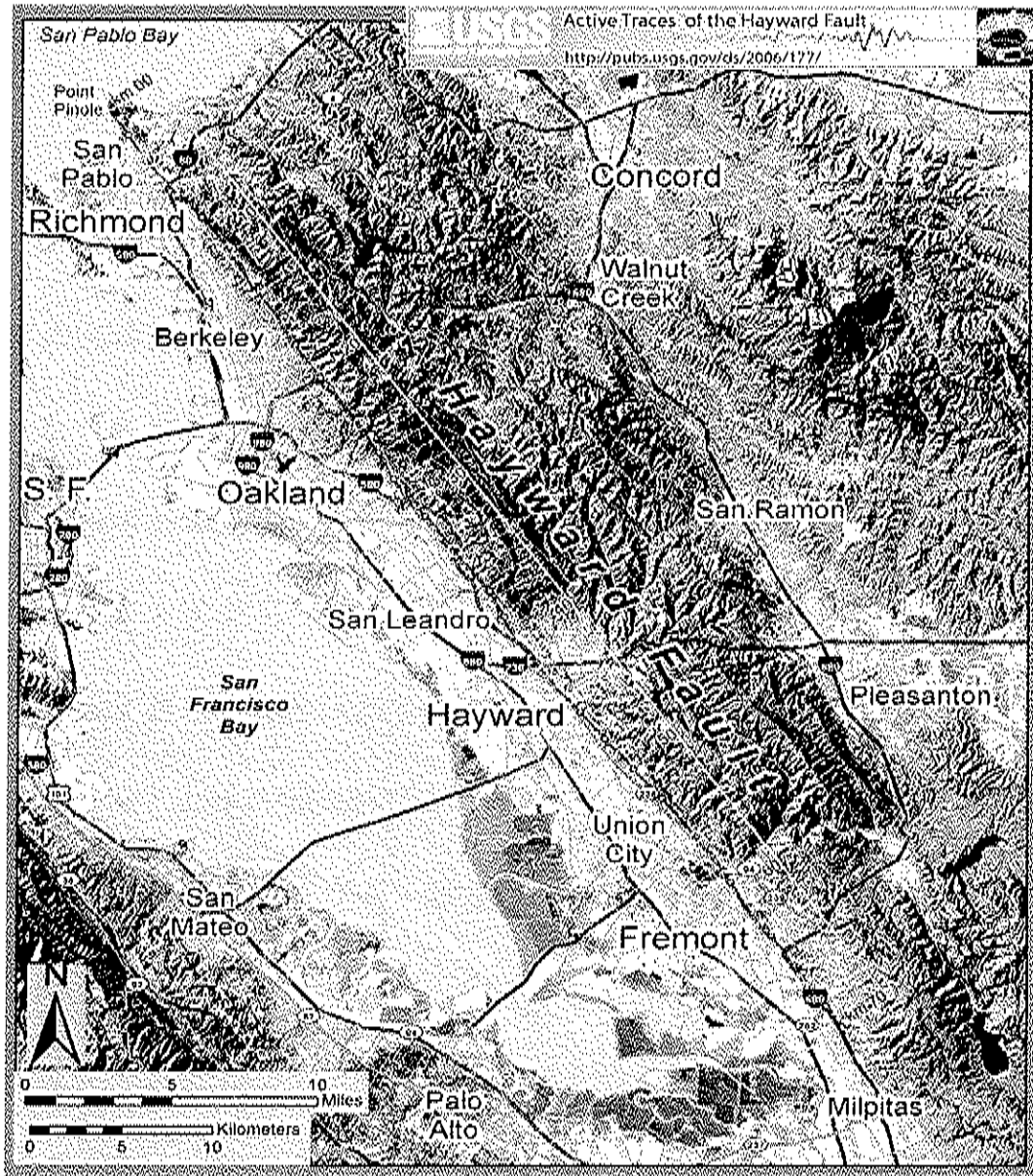


圖 3-1、海沃斷層 (Hayward fault, 摘自 USGS 網頁 <http://www.usgs.gov/>)

一般而言地震的發生多集中在斷層附近，在柏克萊加大附近即存在一條非常著名的海沃斷層 (Hayward Fault)，如圖 3-1。由於地層中能量的累積，海沃斷層就像一顆不定時炸彈，其隨時可能發生規模達

6.8 至 7 級的強震。反觀台灣民眾對 1999 年 921 大地震的記憶猶新，但防震的宣導教育方面，似乎還未像美國加州一樣普及，因此期望未來台灣在地震防災的社會教育方面能有所進步。

四、柏克來山丘地滑及 InSAR 之應用

筆者研修的過程中，全程參與了指導老師 Dietrich 教授所開設的地形學 (geomorphology) 課程，課程中有數次野外現場勘查行程，筆者參與的過程當中，發現柏克萊加大的研究生 (graduate student) 非常的認真，尤其是當野外勘查時，有幾次在下午 3 點後才在河邊或山脊上吃午餐，或是一群人穿梭在幾乎沒有路的叢林中，甚至是爬行於大崩塌現場不穩定的斜坡面上，同學求知的精神再加上 Dietrich 教授努力認真的教學態度，讓筆者深受感動。其中有堂課的主題是有關柏克來山丘地滑 (Berkeley hill landslide) 的探討，柏克來山丘可說是柏克萊加大的後山花園，其交通便利，環境優美，站在山丘上可遠眺舊金山灣的金門大橋 (Golden gate bridge)，因此該區房子的價位都非常的高，每戶的售價都是以百萬美元起跳的。基本上 landslide 可區分為 2 大類，一種是淺層滑崩 (shallow landslide)，就像在山區公路邊常看到的崩塌情形，在大雨過後受重力作用下，其發生的速度相當快，要預測其發生的時間及地點非常困難；另一種是深層的滑動 (deep landslide)，通常其速度較為緩慢 (slow moving landslide)，除了豪雨

發生過後外，長時間的小雨亦會使得土壤濕潤而造成其滑動速度增加，常在山坡社區造成房屋傾斜及地面龜裂的情形，柏克來山丘的地滑就是屬於後者，如圖 4-1。



圖 4-1、克來山丘地滑造成的房屋裂縫

最初造成柏克萊山丘地滑的主要原因可能是由於海沃斷層通過，因此常有地震所造成的影響，一般來說規模 5 級以上的地震極易在坡地造成地滑的現象，近年來由於柏克萊市政府在柏克萊山丘上針對地滑進行了防治措施，包括地滑地調查、擋土設施、地下排水系統等，另外亦完成了柏克萊山丘地滑潛勢圖，如圖 4-2，向社會大眾公佈，讓當地居民了解並宣導其應有的對策等。

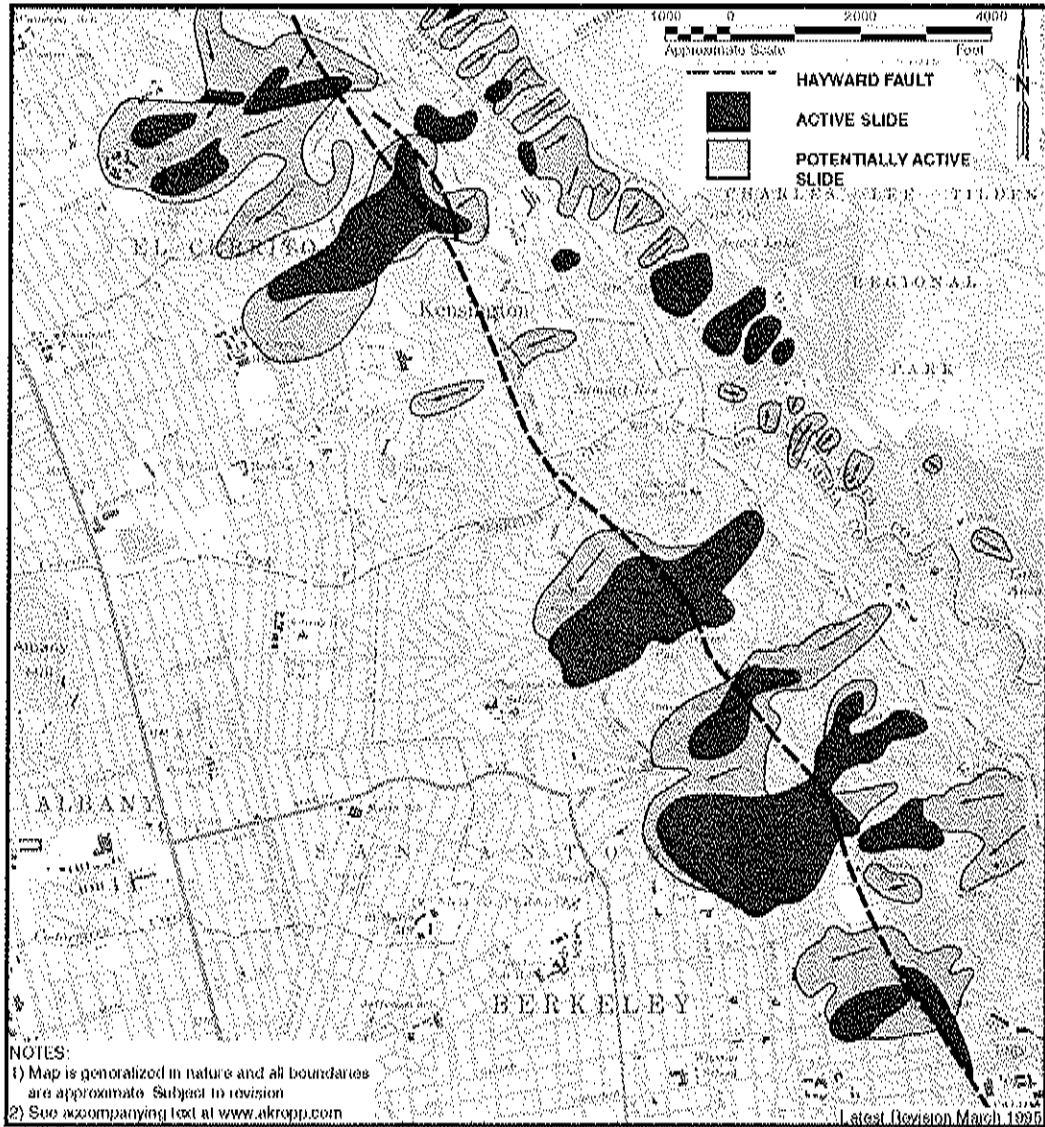
此外，近年來有柏克萊加大有部分學者利用衛星雷達的技術，針對柏克萊山丘較為慢緩的滑動進行監測。衛星雷達以電磁波束掃描地表，能快速提供可能發生變形區域的面狀資訊，衛星合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）干涉量測（Interferometry）簡稱 InSAR，其技術主要是利用雷達回波相位資訊以獲取地表三維的變化資訊；其原理如下：干涉雷達可通過兩天線同時觀測或兩次近乎平行的觀測，獲取地面同一地區影像，由於目標與兩天線位置的幾何關係，在雷達影像上產生相位差，形成干涉條紋，干涉條紋中包含了斜距上的點與兩天線位置之精確資訊，因此利用感測器高度、雷達波長、入射角及天線的基線之間的幾何關係，可以精確的計算出影像上每一點的三維位置和變化資訊。

干涉雷達研究主要是從 20 世紀 90 年代後期開始迅速發展，應用的領域不斷擴展，成為 SAR 遙測研究重點發展方向，衛星干涉量測主要以重複軌道(Repeat Pass)的方式實施，於不同時間獲取同一地區的 SAR 影像，經干涉處理而得，而干涉的過程包含兩張複數影像的精確套合及套合影像中相對應像元的共軛複數相乘得到相位差值，相同的相位差值會形成干涉圖像中的干涉條紋，若在兩影像獲取的時段內，發生地表的移動，則干涉圖像中的干涉條紋則主要由地形效應 (Topographic Effects)和地表移動所組成，因此為了從原干涉圖像中獲

得地表移動資訊，可以移除地形效應產生的差分干涉圖像；基本上 InSAR 的精密度可達到公分級以下，因此非常適合針對人口密集地區—如柏克萊山丘進行地表變形的量測，因為都會區即使微量的地表變形都可能造成相當嚴重的災情。

由衛星電達量測的結果顯示，柏克萊山丘通常在經過降雨量特別多的雨季時期後（柏克萊每年冬天為其雨季，約 11 月到隔年 4 月），會發現明顯的滑動，其滑動程度達到每年 11 mm，其滑動機制主要是當過多的雨水滲入地表中時，會造成土體中孔隙水壓（pore-water pressure）上升，有效應力降低，使得滑動面基礎的強度降低，因重力作用而向下滑動，此外滑動程度亦和地下水的分佈和流動有密切的關聯性。在柏克萊山丘的地滑例子中，InSAR 非常成功的扮演了地表微量位移的監測角色，因此國內部分著名的地滑地區如台中縣和平鄉梨山地區、南投縣國姓鄉九份二山及南投縣仁愛鄉廬山地區等，除了在現場裝設傳統的監測設備（傾斜儀、伸縮計、GPS...等）外，或許未來 InSAR 的應用亦是一個值得研究推廣的方向。

LANDSLIDES OF THE BERKELEY HILLS



ALAN KROPP & ASSOCIATES, INC.

Geotechnical Consultants

2140 Shattuck Avenue, Berkeley, CA 94704
(510) 841-5095

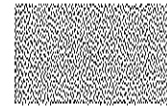


圖 4-2、柏克萊山丘地滑潛勢圖 (摘自 Alan Kropp & Associates, Inc. 網頁 <http://www.akropp.com/>)

五、美國地球物理學會（AGU）2008 年秋季年會

美國地球物理學會（American Geophysical Union, AGU）是一個成立於 1919 年的非營利性組織，總部在美國華盛頓特區，其在全球的地球科學界相當著名，有超過來自全世界 135 個國家的 5 萬位以上的國際會員，其涵蓋的領域主要是地球物理及有關地球及空間的科學，包括大氣及海洋科學、固態地球科學、水文學及太空科學 4 大領域。美國地球物理學會出版了許多世界著名的論文期刊，其中為人所熟知的是 Journal of Geophysical Research (JGR)。另外，學會在每年秋季（12 月份）都會在美國舊金山舉辦年會（AGU Fall Meeting），AGU 秋季年會是目前全世界規模最大的國際研討會，以 AGU 2008 年的秋季年會為例，來自全球各地的學參與的人數高達 16,000 人，更打破以往的紀錄（2007 年為 14,000 人），來自全球各地的學者專家共聚一堂，和相同及不同研究領域的人互相交換意見，對促進國際學術交流有非常正面的意義。由於筆者在博士後研究期間的指導教授柏克萊加大的 Dietrich 教授在筆者赴美前即以電子郵件鼓勵筆者投稿，因此筆者有幸在 2008 年的秋季年會參與這全球最大的盛會。

AGU 2008 秋季年會共同研討的主題相當豐富，包括大氣科學（Atmospheric Sciences）、大氣及太空電子（Atmospheric and Space Electricity）、生物地球科學（Biogeosciences）、冷圈科學（Cryosphere）、

地球及太空科學資訊 (Earth and Space Science Informatics)、教育及人類資源 (Education and Human Resources)、測地學 (Geodesy)、地磁學及古地磁學 (Geomagnetism and Paleomagnetism)、全球環境變遷 (Global Environmental Change)、水文學 (Hydrology)、礦物及岩石物理學 (Mineral and Rock Physics)、近地表地球物理學 (Near Surface Geophysics)、非線性地球物理學 (Nonlinear Geophysics)、海洋科學 (Ocean Sciences)、行星科學 (Planetary Sciences)、公共事務學 (Public Affairs)、地震學 (Seismology)、太空物理及超高層氣流物理學 (Space Physics and Aeronomy)、太陽物理學 (SPA-Solar Physics Division - AAS)、磁圈物理學 (SPA-Magnetospheric Physics)、深層地球科學 (Study of Earth's Deep Interior)、地殼構造物理學 (Tectonophysics)、火山、地化及岩石學 (Volcanology, Geochemistry and Petrology) 等 24 個主題，共計超過 1 萬篇以上的口頭及海報發表，因此在同一時間就分了許多個超大型的會場同步進行，雖然人數眾多，但由於主辦單位非常有經驗，因此大會報到及海報展覽場地及各種行政流程井然有序，值得未來國內辦理大型國際研討會參考學習 (如圖 5-1、圖 5-2 及圖 5-3)。

值得一提的是，筆者在柏克萊加大的指導教授，地球行星科學系的 William E. Dietrich 教授應大會邀請進行專題演講，講題為地形學：

令人驚訝的相似性 (Geomorphology : the Shock of the Familiar)，主要談到地球上不同尺度間地貌的相似性，地形學近年來的演進及重大的研究，甚至探討美國太空船拍攝到火星地表的高解析度照片，顯示出火星地表有蜿蜒的沖蝕溝，表示液態的水曾經存在這顆火紅色星球的表面等，Dietrich 教授深入淺出的生動演說，吸引上千名的聽眾到場聆聽，令人印象非常深刻。

由於筆者的研究主要以水土保持及坡地災害為主，而在大會議程的分類中，包括水土保持、水利工程、水文循環、坡地災害、土石流...等相關課題，全都涵蓋在水文學 (Hydrology) 這個子議程中，光是水文學這個議程，已包括了上千篇的口頭 (oral presentation) 及海報 (poster presentation) 展示。另外，在水文學 (Hydrology) 子議程中，由美國地質調查局的資深研究員 Richard M. Iverson 博士及其它相關學者所組成的一個研究議題為「地滑、土石流及崩塌」(Landslides, Debris Flows, and Avalanches)，其包含 32 篇口頭報告，36 篇海報展示，是筆者花最多時間聆聽的議題，相關報告主題分述如後。



圖 5-1、美國地球物理學會 (AGU) 2008 年秋季年會



圖 5-2、美國地球物理學會 (AGU) 2008 年秋季年會報到處



圖 5-3、美國地球物理學會 (AGU) 2008 秋季年會海報展場

1、全球氣候變遷議題

筆者全程參與的過程中發現了一個現象，亦即許多水文事件及其相關研究都在探討全球氣候變遷的議題，全球變遷指主要指全球環境的變化，包括氣候，陸地及海洋生物、大氣成份、水資源及生態系統等，到目前為止造成這些變遷的原因尚無定論，但其中人類的活動被認為是主要的原因之一；此外，全球氣候變遷所造成的影響包括 (1) 溫度上升，例如二氧化碳對地球能產生溫室效應，是一種溫室氣體 (greenhouse gas)，使地表的溫度上升。有不少長期氣溫觀測資料似乎顯示地球在過去一百年來，平均溫度上昇了大約 0.6°C 。台灣地區似乎也有這個現象。(2) 雨量變化，許多研究指出本世紀以來，全球

可能有一因氣候變化引起降水區移動的趨勢，在北半球溫帶和極區降水增加，而熱帶地區有降水減少的趨勢，在南半球卻是不分高低緯度有降水增加之趨勢，台灣的降雨型態亦有延時縮短，降雨強度增強的趨勢。(3) 颱風頻率及強度的增加及受災區之地點移動，根據氣象學家統計，近 100 年來全球颱風出現的頻率有增多的趨勢，對台灣而言，近年來侵台的颱風數量從以往的平均數 4-5 個增加到 8 個甚至以上。(4) 極端氣候事件的增加，近數十年來世界各地出現極端天氣狀況的頻率似乎有增加的趨勢，許多地區的最高溫及最低溫紀錄紛紛被打破，以筆者留美的時間為例，2008 年底至 2009 年初，美國東岸出現不少數十年難得一見的大風雪，而美國西北部（華盛頓州）遭到創紀錄的大雪覆蓋，隨後天氣回暖，加上豪雨，導致洪水氾濫、雪崩和土石流，並且迫使好幾條高速公路關閉，華盛頓州西部有 8 到 10 條河流出現大洪水，而水利單位的預測水位則創下新紀錄，因此華盛頓州當局下令超過 2 萬 6 千人撤離家園。此外海平面的上升，生態系統的改變等，都是全球氣候變遷造成的影響。有趣的是在 Landslides, Debris Flows, and Avalanches 研究議題中有一篇論文引起筆者的注意，題目為「Initiation of Recent Debris Flows on Mount Rainier, Washington: A Climate Warming Signal?」，作者是 Copeland, E A 等人，主要是探討最近 2006 年 11 月的一場豪雨，造成延伸在華盛頓州及奧

勒岡州的 Cascade 山脈多處爆發土石流，在華盛頓州的 Rainier 山區在 36 小時內下了 457mm 的驚人雨量，造成了該區百年難見的洪水及土砂災害，另外由於該山區存在不少冰河，歷史資料顯示可能是由於全球氣候暖化的影響，造成雪線（freezing level）向高海拔移動及冰河融解的現象，而融雪造成的水量加上充沛的豪雨在火山地形區的 Rainier 山區發生土石流災害。

基本上全球氣候變遷對台灣山坡地之可能影響如下：由於海面溫度上升、極端氣候及颱風頻率強度的增加，導致落石、山崩、地滑及土石流災害增加，並造成較以往嚴重的土壤流失（沖蝕）問題。因此筆者認為未來應持續加強國際交流合作，將山坡地環境議題國際化，透過各國合作共同面對山坡地資源之維護與保存及生態危機之處理；此外亦需加強跨學門及跨領域之整合研究，包括水保、水文、地質、森林、生態、大氣、海洋、太空、地理、經濟、法律、政策及環境工程等各學門之共同研究，並加強各領域之基礎研究，結合實務經驗與理論依據，解決山坡地環境系統之各項問題。

2、土石流觀測系統

筆者在 Landslides, Debris Flows, and Avalanches 研究議題中獲選一篇論文進行口頭報告，簡報題目為「Development of fixed and mobile debris flow monitoring system in Taiwan」，主要係針對行農委會水土

保持局建置的土石流觀測站相關研發技術進行深入的探討，水土保持局自 2002 年起開始進行土石流現場觀測工作，最初在土石流潛勢溪流現場以建置固定式土石流觀測站為主，期間為了提升現場土石流事件捕捉率、擴大觀測範圍及降低儀器故障率，同時積極投入行動式土石流觀測站及觀測系統模組化的研發工作，行動站主要可機動派遣至颱風預測路徑上土石流發生潛勢較高的地點進行現場土石流觀測任務，而模組化系統則可大幅降低整體維運成本並提升現場觀測效能，至目前為止水土保持局已完成 13 座固定式及 2 組行動式土石流觀測站，各站主要架構可分為觀測儀器、現場儀器屋(行動站為車裝儀器平台)、資料傳輸系統及後端資料處理展示系統四大部分，如圖 5-4。

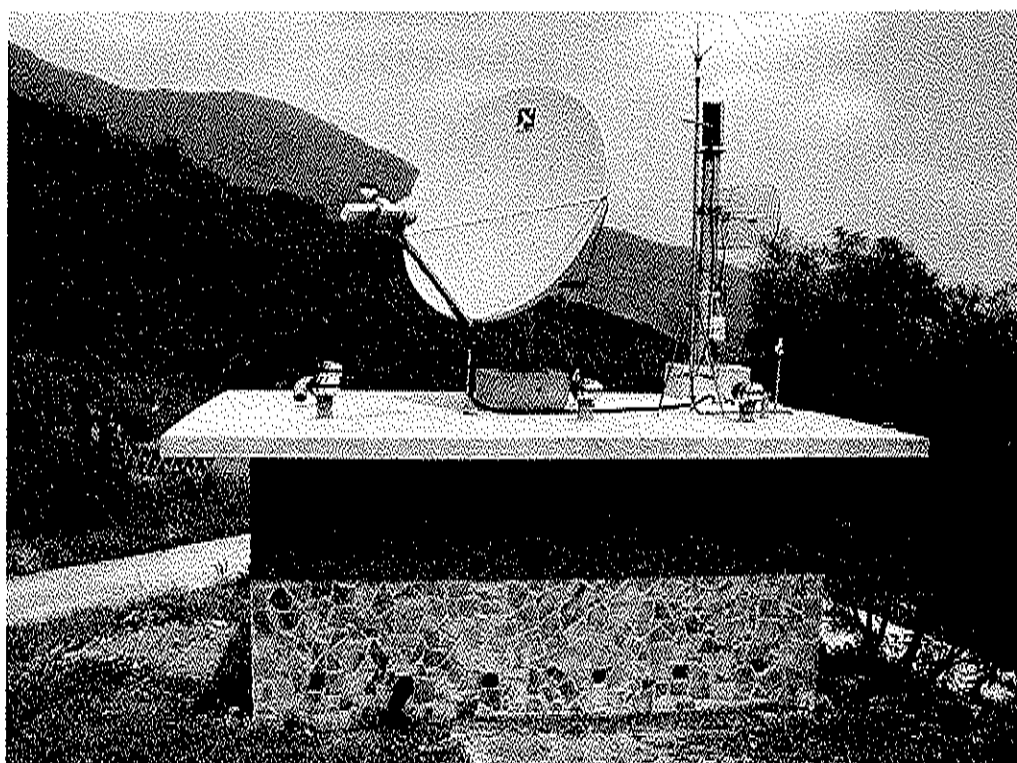


圖 5-4、花蓮縣鳳林鎮鳳義坑土石流觀測站

基本上土石流觀測站設置目的為蒐集本土化之現場土石流觀測資料，瞭解土石流運動過程中各項行為機制，除了可提昇現行以雨量為指標的土石流警戒模式精確度，亦可提供防砂工程設計、應變措施擬定及學術研究的參考。另外筆者及相關學者在海報展示中亦有另一篇論文發表「Research on Rainfall Data of Debris Flow Monitoring Station via WSN Technique and Spatial Analysis」，該論文主要以克利金（Kriging method）地理統計的方法探討台灣本島在2007年Krosa颱風期間，土石流觀測站所蒐集的雨量和鄰近中央氣象局雨量站資料間的關聯性，並嘗試提出以無線感測網路（Wireless Sensor Network, WSN）為基礎的低成本自動氣候測站（Automatic Weather Station, AWS）之概念，以提升未來雨量資料在空間的解析度和即時分析量測效率。上述研究主題論文摘要如下：

H42C-01

Development of Fixed and Mobile Debris Flow Monitoring System in Taiwan

* Yin, H sammya@mail.swcb.gov.tw, Soil and Water Conservation Bureau, No.6,Guang-Hua Rd., Chung-Hsing New Village, Nantou County, Nantou, 540, Taiwan

Huang, C cjhuang@mail.ncku.edu.tw, National Cheng Kung University, No.1, University Road, Tainan, 701, Taiwan

Yeh, C yehlori@mail.swcb.gov.tw, Soil and Water Conservation Bureau, No.6,Guang-Hua Rd., Chung-Hsing New Village, Nantou County, Nantou, 540, Taiwan

Chen, C n8893111@ccmail.ncku.edu.tw, National Cheng Kung University, No.1, University Road, Tainan, 701, Taiwan

Fang, Y frankfang@gis.tw, Feng Chia University, No. 100, Wenhwa Rd., Seatwen, Taichung, 407, Taiwan

Lee, B bjlee@fcu.edu.tw, Feng Chia University, No. 100, Wenhwa Rd., Seatwen, Taichung, 407, Taiwan

Chou, T jimmy@gis.tw, Feng Chia University, No. 100, Wenhwa Rd., Seatwen, Taichung, 407, Taiwan

This study introduces the debris flow monitoring system established by the Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) in Taiwan. The purpose of the system is to collect real-time debris flow information in the field. The information may help us to understand the physical mechanism of debris flows and to improve the accuracy of the current debris flow warning system based on rainfall thresholds. Besides, it also can be utilized as references for sabo engineering design, countermeasures of landslide disaster mitigation and academic research. So far, the SWCB has established 13 fixed and 2 mobile debris flow monitoring stations around Taiwan island. The frame of the debris flow monitoring system consists of the observation sensors, the instrumental cabin (mobile instrument platform for mobile monitoring station), the transmission system and the real-time display system. In each fixed monitoring station, several observation instruments including rain gauges, CCD cameras, wire sensors, geophones, and water level meters are installed while the mobile station only has rain gauges, CCD cameras and geophones. Compared to the fixed station, the mobile one can enhance the monitoring probability of debris flow events because it can be immediately sent to the high potential spot to detect the possible debris flow events according to the prediction route of incoming typhoon warning issued by Central Weather Bureau. The module observation sensors are also developed by integrating the wireless transmission technology into sensors. Both the fixed and mobile debris flow monitoring systems can extend the monitoring capability using the module observation sensors especially in the rugged mountainous areas.

H51F-0902

Research on Rainfall Data of Debris Flow Monitoring Station via WSN Technique and Spatial Analysis

* Fang, Y frankfang@gis.tw, Geographic Information Systems Research Center, Feng Chia University, 100 Wen- Hwa Rd., Taichung, 407, Taiwan

Lee, B bjlee@fcu.edu.tw, Geographic Information Systems Research Center, Feng Chia University, 100 Wen- Hwa Rd., Taichung, 407, Taiwan

King, C king@cs.nthu.edu.tw, Computer and Communication Research Center, National Tsing Hua University, 101, Sec. 2, Kuang Fu Road, Hsinchu, 300, Taiwan

Chen, M minghsien@mail.swcb.gov.tw, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, No.6, Guang-Hua Rd., Chung-Hsing New Village, Nantou, 540, Taiwan

Lien, J jungchie@mail.swcb.gov.tw, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, No.6, Guang-Hua Rd., Chung-Hsing New Village, Nantou, 540, Taiwan

Yin, H sammya@mail.swcb.gov.tw, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, No.6, Guang-Hua Rd., Chung-Hsing New Village, Nantou, 540, Taiwan

Wang, H st_vita@gis.tw, Geographic Information Systems Research Center, Feng Chia University, 100 Wen- Hwa Rd., Taichung, 407, Taiwan

Rainfall record is one of the most important Hydrological data. While analyzing the rainfall data, the integrality of the rainfall materials can't be neglected. There are correct rainfall materials that can just offer an intact hydrology analysis. In 2007, Taiwan suffered Krosa typhoon and caused debris flow disasters. This research discusses the Soil and Water Conservation Bureau's (SWCB) debris flow station's rainfall data with Central Weather Bureau's (CWB). Based on CWS's rainfall materials, remove the effect or terrain and then utilize ArcGIS9.1 of GIS software interpolation methods such as Kriging methods to estimate the debris flow station's rainfall value. In addition, we propose a wireless sensor network (WSN) based automatic weather stations (AWS), which takes advantage of the low-cost, real-time and infrastructure-free characteristics of WSN. We can therefore extend the scale of weather monitoring without increasing the number of telecommunication equipments.

This WSN-based AWS is able to cover a plane and gather multiple sets of weather measurements in real-time at a better data resolution.

3、地表震動訊號之應用

土石流是泥、沙礫及巨石混合成的流動體，受到重力作用常常沿著溝谷由上游向下游快速流動。從事土石流現場調查的人都知道，當土石流發生時，除了會聽到巨大的低鳴聲外，還可以感覺到地表微微的振動，此種地表振動稱為土石流地聲（underground sound）。基本上土石流地聲是把土石流看成是一震動源，當土石流動時會摩擦、撞擊和侵蝕溝道而產生振動波，此種振動波大部份的能量都是沿著岩層中傳播，基本上藉由量測土石流地聲可以探測土石流的發生現象。一般而言，發生地表振動的因素很多，除了前面提到的土石流外，如地震、火山爆發、崩塌及落石等，都會產生地表振動訊號。整理歷年來土石流地聲相關研究發現土石流地聲有下列特性：(1)、土石流地聲頻率約在 10Hz—100Hz 之間，但部分現場觀測亦發現超過 100Hz 的訊號。(2)、土石流發生時，巨礫常集中土石流前端（波湧），因此產生的地聲頻率較低，約介於 10Hz—30Hz 之間，而土石流尾流的顆粒則較前端小，因此相對於前端而言，尾流產生的地聲頻率較高，約介於 60Hz—80Hz 之間；另外筆者過去在進行現場試驗時發現，土石流顆粒愈大，其和地表撞擊時產生的地聲頻率則愈低。(3)、土石流的規模（流量）愈大，土石流地聲訊號的振幅就愈大，亦即地聲訊號的

強度和土石流流量有正相關性。

由於筆者博士論文的研究係有關以地表振動探測土石流發生的研究，因此在 AGU 期間特別注意相關的研究議題。筆者發現了 2 篇有關以地震儀量測的方式監測落石及土石流的發生，其中一篇題目為「Seismic Monitoring of Rock Falls in Yosemite National Park」，作者為 Zimmer, V L 等人，其監測落石主要是在美國加州的優勝美地（Yosemite）國家公園進行現場研究，監測儀器主要是地聲探測器（Geophone，主要是量測地表振動訊號的速度）及加速度計（Accelerometer，主要是量測地表振動訊號的加速度），地聲探測器如圖 5-5，研究人員發現落石所產生的地聲訊號頻率主要介於數個 Hz 到 150Hz 之間。此外，另一篇題目為「Seismic Detection of Debris Flow in the Himalayas and Their Spatiotemporal Characteristics」，作者為 Burtin, A 等人，其量測土石流地聲的研究則是法國學者在喜馬拉雅（Himalayas）山區進行的現場試驗，他們發現該區的土石流產生頻率介於 2Hz—22Hz 的高強度地聲訊號（達 30dB），土石流地聲訊號可持續達到數小時之久。

傳統上土石流防治工作主要是利用不同的工程構造物達到抑制、攔阻、淤積或疏導土石流，以減少可能發生的災害，但工程構造物的費用昂貴且施作期程長，在保全對象較少的地區並不經濟，因

此，上述以地表振動探測土石流發生等準確性較高之事發型土石流觀測系統不失為一種土石流防治的先期措施，目前筆者服務的水土保持局，其在全台各地加設的 13 座固定式土石流觀測系統中，皆有裝設地聲探測器 (geophone)，希望能藉由蒐集土石流發生時的現場地聲資料，建立國內的土石流地聲聲紋資料庫，透過對上述現場資料的分析與研判，將不同類型的土石流地聲加以辨識並分類，再參考國內外相關的研究成果，以土石流地聲的強度、頻率範圍和延續時間這三個要素為指標，作為國內發展土石流地聲警戒系統的基礎，提供各項學理、治理、避難及減災等土石流防治工作之參考。



圖 5-5、三軸地聲探測器

4、光纖感測技術之應用

在 Landslides, Debris Flows, and Avalanches 議題中，筆者注意到一篇有關光纖感測元件應用在崩塌監測的口頭報告——「Rockslide

Monitoring with Fiber Optic Strain Sensors : Installation and First Results 』，作者為 Moore, J R 等人，此篇研究是由一群瑞士的學者所進行的，主要是 1991 年在瑞士的 Randa 鎮上方附近有處大崩塌發生，產生了約 3 千萬立方公尺不穩定的土砂，對下方 Randa 鎮的居民造成很大的威脅，因此在崩塌區附近架設以光纖應變感測的系統，針對可能移動的土砂進行即時監測及預報。由於筆者服務的水土保持局亦正進行有關光纖感測器相關科技研究，因此對這方面的應用研究非常有興趣。

光纖在本質上是一種對稱圓柱結構的介質光波導 (Optical Waveguide)，由軸心往徑向，大致上可依折射率的不同分成纖核 (Core)、纖殼 (Cladding) 及外層作為保護的纖衣 (Coating) 三層，如圖 5-6。其中纖核的直徑，依光纖種類的不同，約略為 8~62.5 μm ，而纖殼大小的範圍則在 100~200 μm 間。事實上，纖核和纖殼為光纖傳遞光線的基本要件。但為能應用於各種不同的嚴苛環境中，故光纖一般除了在纖殼外層塗佈上約 200~1000 μm 不等的聚合物材質作為保護外，最後再使用尼龍製成的外皮包覆做成商用光纖，或依使用上的需求，將八、十六甚至三十二蕊的光纖製成光纜。纖核部分的折射率略高於纖殼部分，由司乃耳定律 (Snell's Law) 得知，當光由光密介質射向光疏介質時，折射光會偏離法線，即偏向界面。如果增加入

射角度使其達到臨界角時，折射光會沿著界面傳播，當入射角度大於臨界角度時，折射光會全部返回光密介質，此種現象即稱為全反射 (Total Reflection)。光纖即是利用全反射的原理，將光線侷限在光纖纖核中傳播，當光線由纖核射向纖殼時，在界面處會產生全反射，光線會全部再返回纖核中，如此反覆的利用全反射即可將光線傳播至遠方，如圖 5-7。

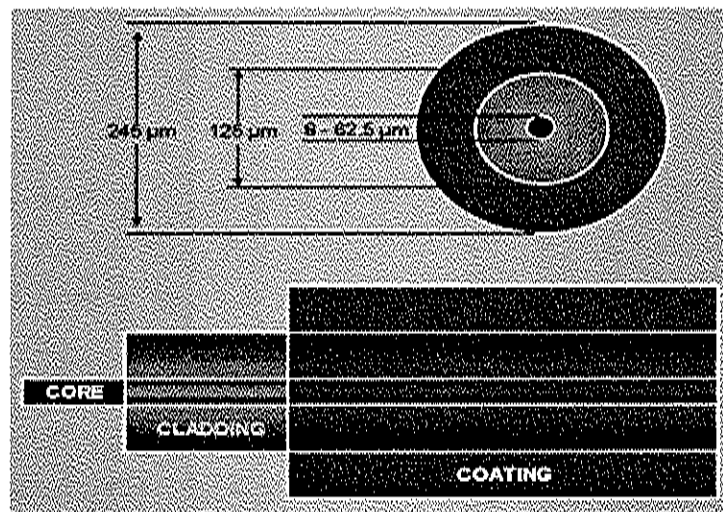


圖 5-6、光纖構造圖 (<http://www.corning.com/>)

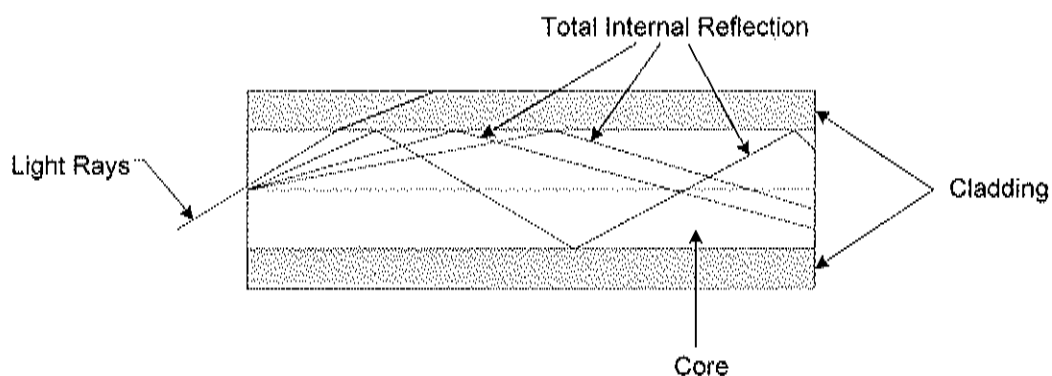


圖 5-7、光線於光纖中傳播示意圖

光纖感測器基本原理乃是利用光纖作為光訊號的傳輸介質，光源所產生的光波經光纖導引至待測區，待測區中物理量，如應力-應變、溫度、折射率等的變化將造成光波特性的變化，分析光波特性的改變，即可推得待測區中物理量之變化。光纖感測器優點包括裝設簡便、質地輕巧、訊號經遠距離傳輸後之衰減非常低、耐高溫、抗腐蝕，而且它不受雷、電力線的電流突波，或由鄰近的線路等的電磁干擾，對於土石流現場之監測尤為重要，此點為傳統感測器所欠缺的優點；

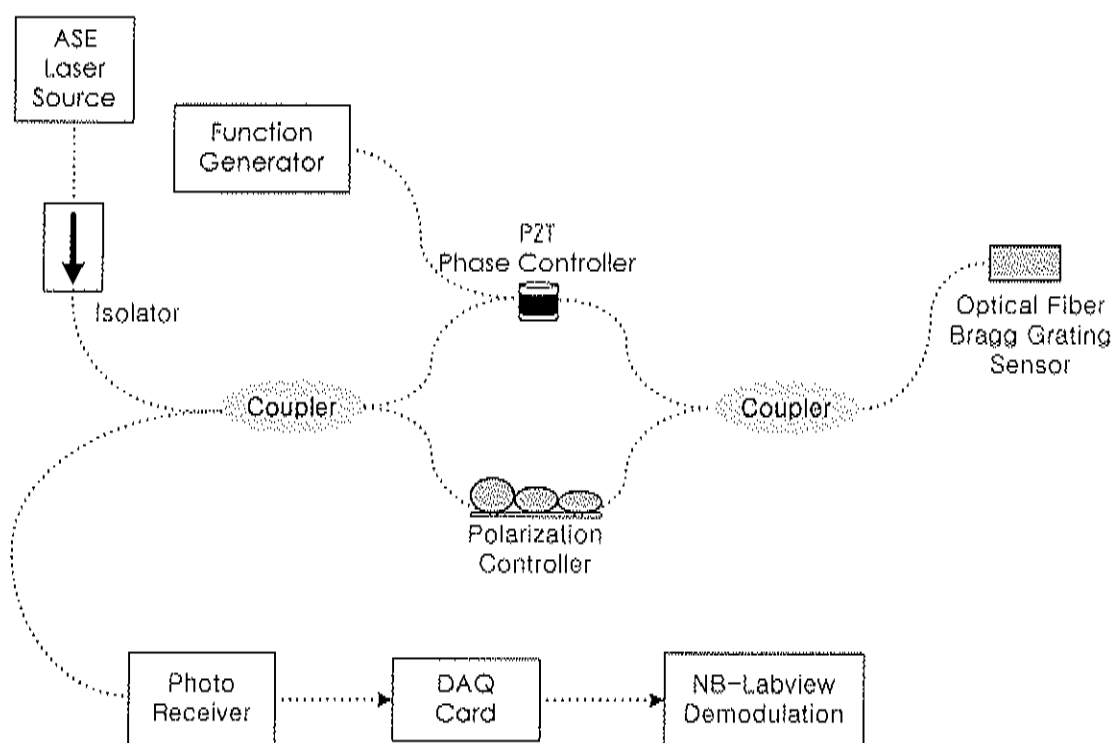


圖 5-8、光纖光柵土石流地聲量測系統架構圖

此外，光纖之可撓性佳，最小折彎曲率半徑可低達 2mm，因此，可以延伸至較遠或地形複雜之待測區域內進行量測，因此應可將其發展調整適用於土石流發生之偵測，達到早期警戒之目的。目前筆者服

務的水土保持局和國內學術機構合作利用桑克干涉儀的原理及繞軸式光纖感測頭成功研發出量測土石流地聲之光纖感測系統，如圖 5-8，經由現場測試顯示其可以有效的偵測地聲訊號。

5、LiDAR 之應用

LiDAR (Light Detection And Ranging) 的廣義定義係指雷射光對目標物進行量測的技術。目前所稱的 LiDAR 係指利用雷射光，對目標物進行高密度的掃描以獲取目標物三維形貌的技術，大致可分為三種：空載 LiDAR (Airborne LiDAR)、測深 LiDAR (Bathymetric LiDAR) 及地面型 LiDAR (Terrestrial LiDAR)，其中發展最快及用途最廣乃以飛機為載具進行地表之掃描測繪之空載 LiDAR 技術（空載雷射掃描技術），而空載雷射掃描技術的發展，源自 1970 至 1980 年代美國太空總署 (NASA) 研發，早期的系統只是簡單的用來測量飛行器與地面的單點距離，不適合製作地形圖。其後，因應全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 及慣性導航系統 (Inertial Navigation System, INS) 發展，使得精確即時定位姿態付諸實現。近年來空載雷射測距掃描系統的發展愈趨成熟，特別是在建立高解析度與高精度數值高程模型上並能透過資料處理，可將樹木資料點及房舍等建築物全部移除，獲取實際地面之數值高程模型。

筆者在工作上亦有接觸 LiDAR 方面的研究應用，例如在 1999 年

921 地震後，即針對地震爆發點南投縣國姓鄉九份二山產生的崩塌地（約 200 公頃）進行多期的 LiDAR 掃描，期望能得到崩塌地隨時間的變遷。另外 LiDAR 高精度數值地形資料，可進行前後兩期間之地形高程變化相減以計算土砂體積變化量，因製作數值地形精度優於 50cm，可獲得地形微量之起伏變化，除反應崩塌、土石流、河床沖淤以及土砂運移行為與趨勢外，亦可顯示治理前後地形貌差異，因此水土保持局亦將 LiDAR 應用在石門水庫集水區進行坡面及河道的土砂運移量監測探討地貌的變化歷程。本次在 AGU 研討會中，亦有多篇論文係針對應用 LiDAR 在集水區土砂運移量的估計研究，如「Valley-Bottom Sediment Storage Volumes Determined From LiDAR-Derived Digital Elevation Models and Channel Substrate Mapping」，作者為 Frueh, W T 等人，其使用 LiDAR 產生之精度 1mX1m 的前後數值地形相比較，找出河床中土砂的沖淤變化，現場調查測量的數據作比較，以驗證數值地形的準確性。

一般而言，當坡地災害發生時，區域性的地形會改變，因此如何儘快分析監測崩塌或土石流災區的地形變化，獲得新的地形資訊，甚至預測二次崩塌災害的發生，就顯的非常重要。而空載 LiDAR 可在短時間內獲得精度在數十公分內的地形變化資料，是目前大面積數值高程模型 (DEM) 資料製作的主流趨勢，具有取代傳統航測產生 DEM

資料的潛力。此外由於土石流發生前，常出現崩塌地範圍擴大、溪谷或人工結構物阻擋的土石量明顯增加，若遇到降雨量大且集中時，常常會誘發嚴重的土石流災害，因此在土石流發生前，可利用空載 LiDAR 系統定期監測掃描，以獲取高精度的資料，並建立高密度網格與低間距等高線 DEM 資料，藉以分析潛勢溪流地區的地形變化，提供未來高程差異比對的基礎，亦可結合高密度 DEM 資料及衛星影像協助研判崩塌地分布（如圖 5-9）。

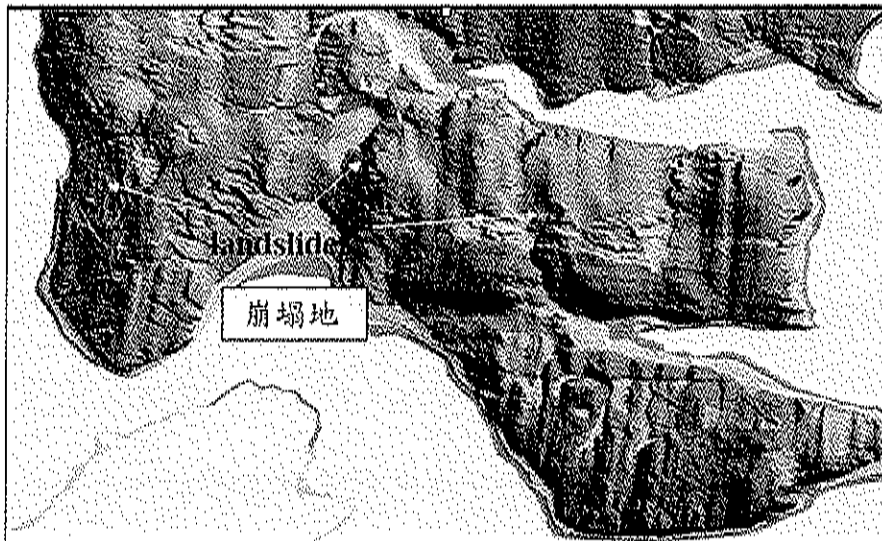


圖 5-9、空載 LiDAR 資料協助研判崩塌地分布（九份二山）

另外由 LiDAR 資料顯示之崩塌區源頭到溪谷或河道間的地形變化，除了可探討土石流防災之定期監測成果分析外，亦可針對土砂之侵蝕與堆積量化估算之用。目前國外已將 LiDAR 推廣應用到大面積之地表地形測繪（如圖 5-10，石門水庫集水區 LiDAR 之 DEM 成果）、災害測量、礦業開發與環境景觀回復、森林監測、海岸線監控、沙洲

變化、GIS 底圖及路廓測量等多目標應用，在未來 LiDAR 在環境資源調查的領域勢必扮演相當重要的角色。

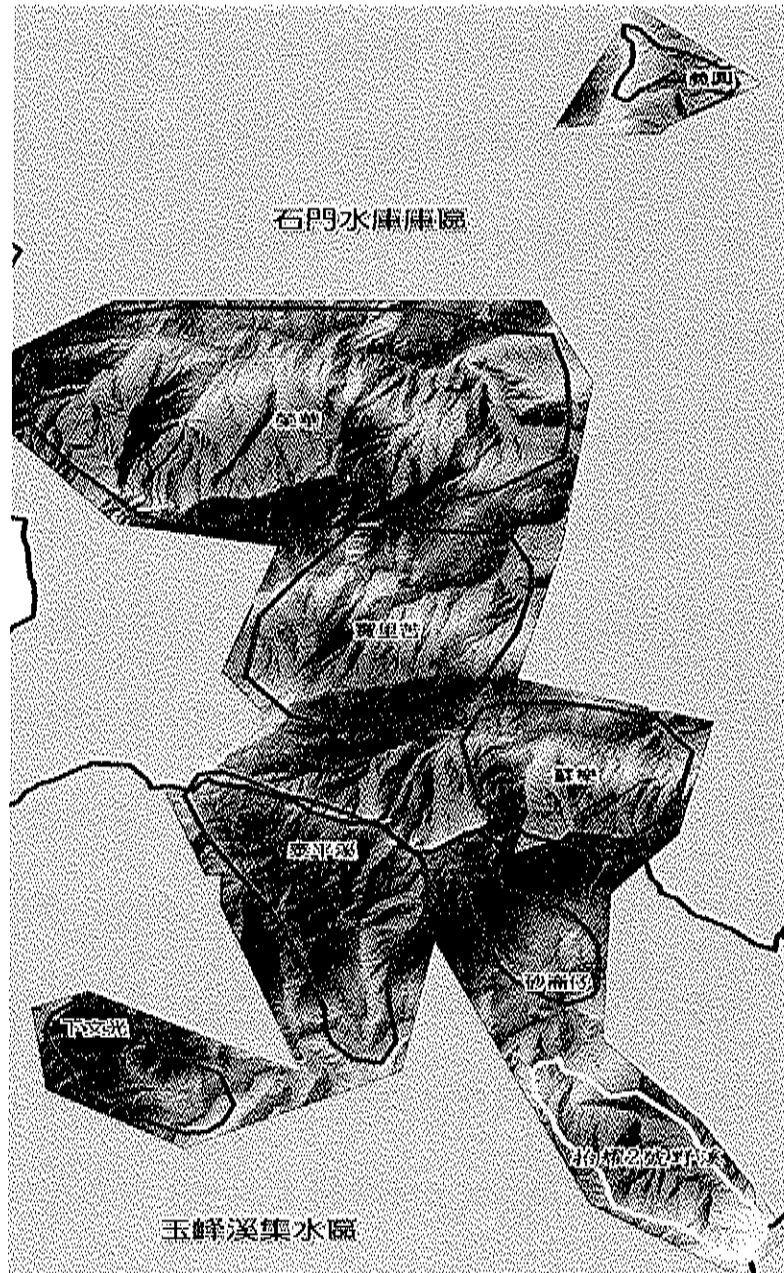


圖 5-10、石門水庫集水區空載 LiDAR 之 DEM 成果

6、美國防砂壩拆除實例

筆者在參加 AGU 期間，巧遇現任國際土石流研討會大會主席 Jon J. Major 博士，Major 博士服務於美國地質調查所 (US Geological

Survey)，和 Richard M. Iverson 博士一樣皆為資深研究員，筆者 2007 年在中國成都舉辦的第四屆國際土石流研討會中和 Major 博士第 1 次見面，其研究專長為水文學領域，Major 博士在本次 AGU 發表了數篇論文並主持了數場不同主題的討論會，其中有一個討論會引起筆者高度的興趣，會中主要是探討在美國奧勒岡（Oregon）州有一座防砂壩以人工方式將其拆除之後續效應。

近年來由於人類對生態的重視，拆除防砂壩變成了恢復河溪生態原貌的工作之一，而拆除後對整個河道上下游的影響，包括河床輸砂平衡的變化、河川水域及附近生態系統的改變、河川及兩岸地貌的變化等等，都是值得深入探討的課題，本次在 AGU 提出的案例，是位於美國奧勒岡（Oregon）州的沙河（Sandy River、主流長 80 公里）的 Marmot 壩，為一混凝土之引水壩（diversion dam），Marmot 壩建於 1913 年，壩高 14 公尺，寬 50 公尺，主要的功用為水利發電，上游形成一水庫，在 2007 年 10 月拆除時，其上游的水庫的淤砂量超過 750,000 立方公尺。決定拆除的主要原因有二項，一是由於淤砂情形嚴重，因此每年維護的費用暴增很多，另一原因是由於該水庫屬於私人電力公司（Portland General Electric），一定期間內需辦理水壩執照的換證工作，由於換證過程中政府要求其增設更多的魚道相關設施（fish passage facilities），以維護水中魚類的生態環境，但由於水壩已

相當老舊，因此增設更多的魚梯所需的費用相當昂貴，電力公司在考量投資的成本和發電的效益不成比例下，因此決定以人工方式將其拆除，相關照片如圖 5-11 至圖 5-14。

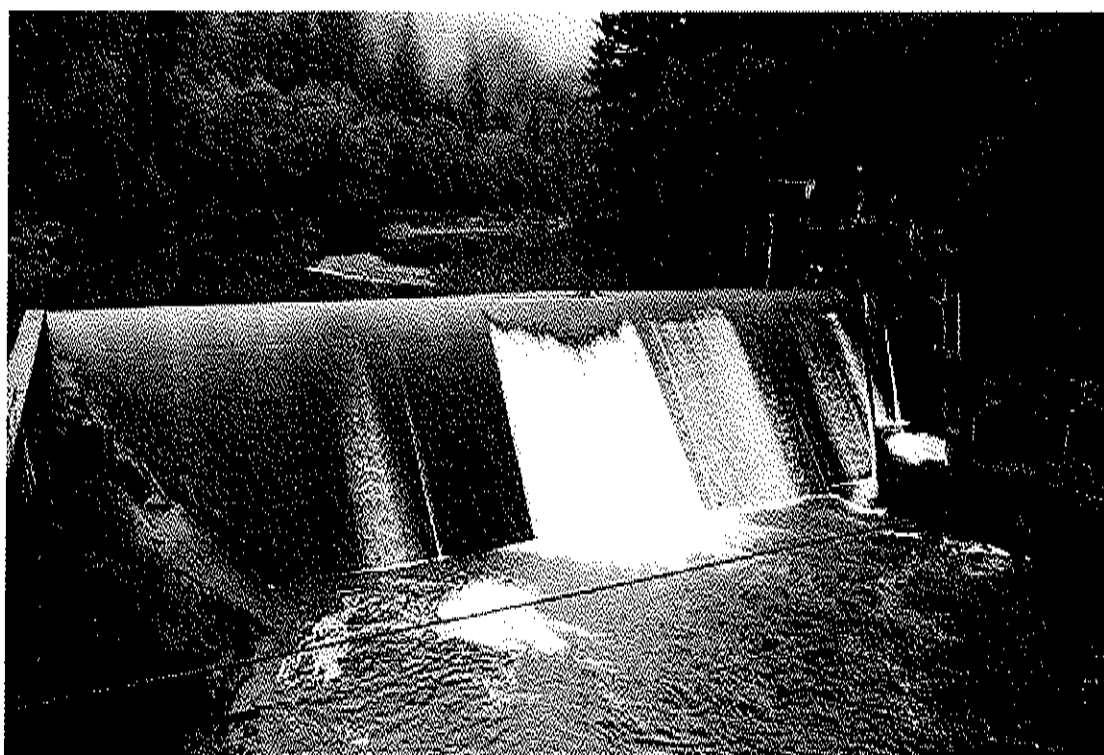


圖 5-11、Marmot 壩（2007 年夏天、<http://www.fsl.orst.edu/wpg/>）



圖 5-12、Marmot 壩上游 Bull Run Powerhouse 發電場
(<http://www.portlandgeneral.com>)

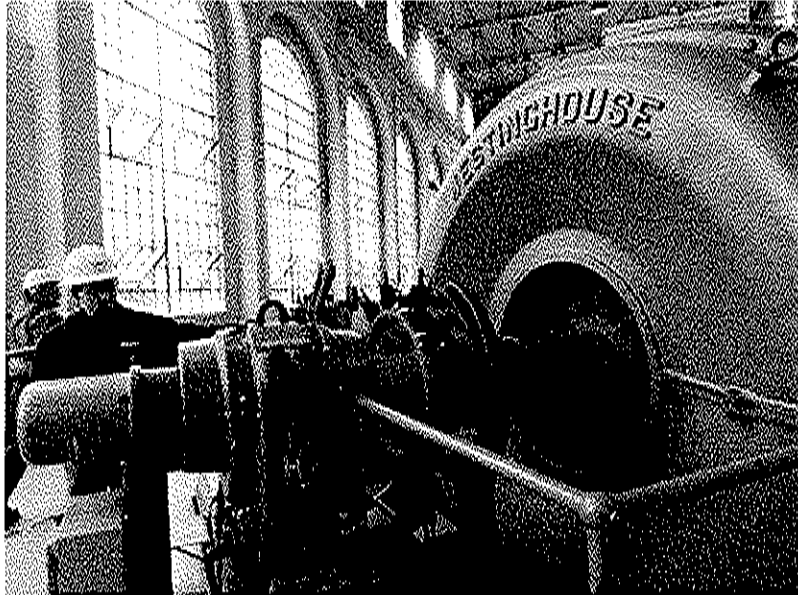


圖 5-13、Bull Run 發電機組 (<http://www.portlandgeneral.com>)

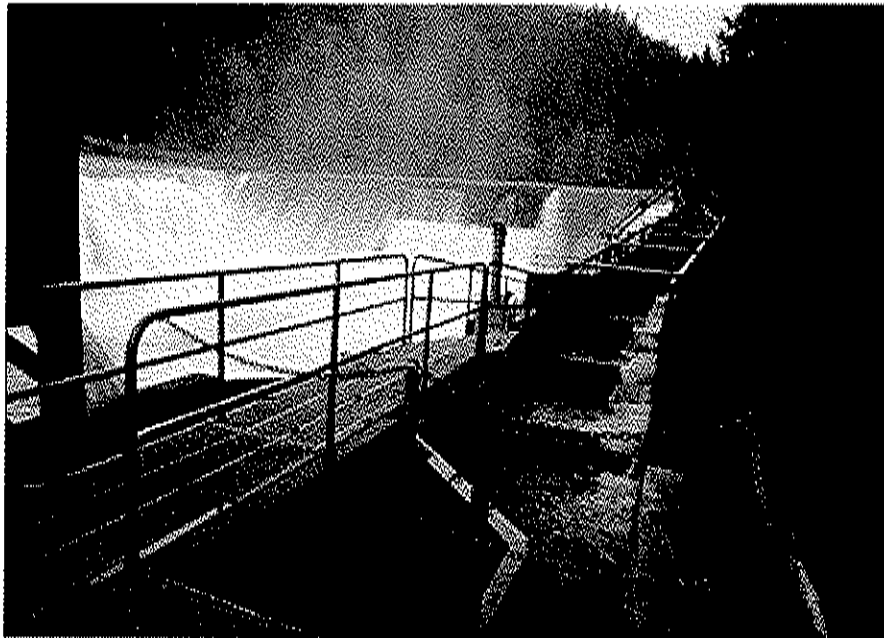


圖 5-14、Marmot 壩之魚梯 (fish ladder)
(<http://www.portlandgeneral.com>)

在拆除前 Marmot 壩前先在上游約 70 公尺處設置一座臨時性的擋水壩 (temporary coffer dam)，為一攔水之臨時性堆土壩，讓下游的 Marmot 壩址區域完全乾燥以利施工拆除，拆除的過程先以 4,400 磅之硝酸氫炸藥在壩頂爆破，將鋼筋混凝土結構破壞，再以怪手將剩下的混凝土壩體破碎部分逐一挖除，將 Marmot 壩完全清除乾清後，最後再以重機具將上游臨時性土壩挖開，使得河水能順流而下，成功完成 Marmot 壩的拆除工作，相關照片如圖 5-15 至圖 5-20。



圖 5-15、上游臨時性之擋水土壩 (<http://www.portlandgeneral.com>)



圖 5-16、攔水後之 Marmot 壩 (<http://www.portlandgeneral.com>)

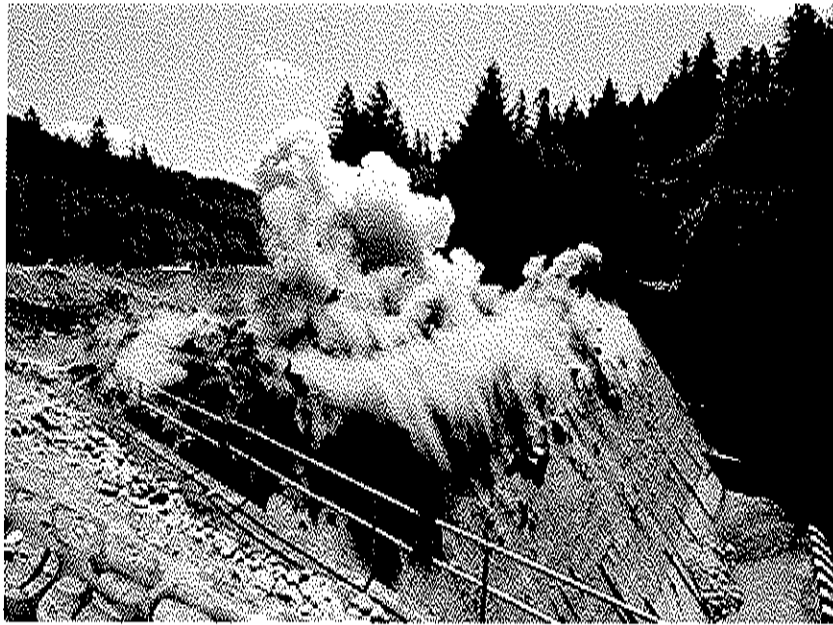


圖 5-17、從上方爆破 Marmot 壩 (<http://www.portlandgeneral.com>)

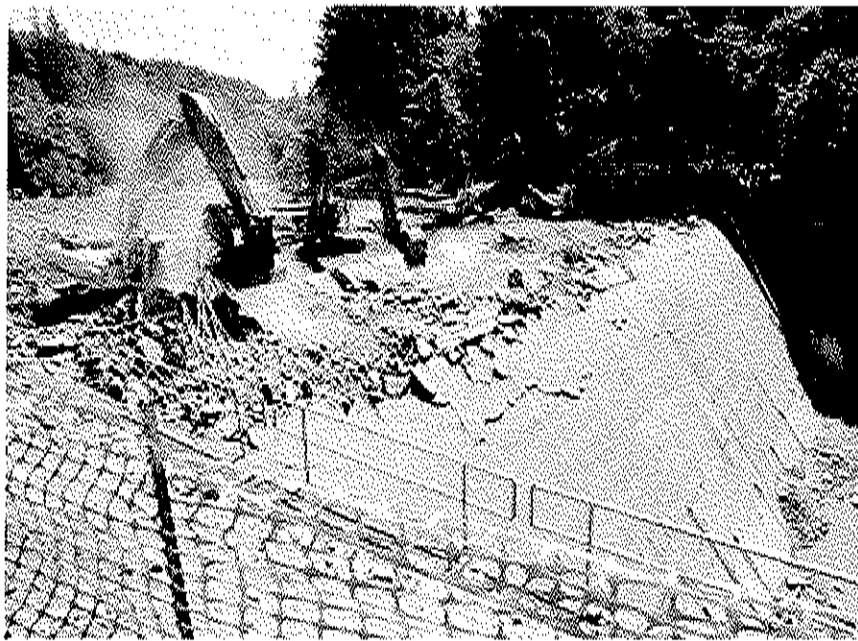


圖 5-18、以怪手挖除 Marmot 壩體 (<http://www.portlandgeneral.com>)



圖 5-19、以機具移除上游臨時性土壩
(<http://www.portlandgeneral.com>)



圖 5-20、Marmot dam 拆除後 (2007 年 10 月，
<http://www.fsl.orst.edu/wpg/>)

在拆除 Marmot 壩的同時，由多個不同研究機構組成聯合研究團隊，包括 US Geological Survey、US Forest Service、Oregon State University、Johns Hopkins University、Stillwater Sciences...等，針對水壩拆除前後進行上下游數十公里的監測及研究工作，其中有一篇論文題目為「Event-Based Monitoring of Sediment Flux Following Removal of Oregon's Marmot Dam」，作者為 Major, J J 等人，其探討防砂壩移除後河道輸砂率（sediment flux）的改變，配合數值模式進行預測和分析，並以 LiDAR 針對河道地形的三維變化進行多次的掃描；現場則在原 Marmot 壩址上游 10 公里、及下游 0.5 至 18 公里處設多個觀測點，進行河床中的懸浮質（suspended load）及推移質（bed load）的採樣監測。

由美國拆除 Marmot 壩的例子，筆者想到國內相關的 2 個案例，第一個是為了保育武陵地區附近七家灣溪、高山溪及其它支流內的國寶魚櫻花鉤吻鮭，因此雪霸國家公園管理處針對高山溪流防砂壩進行改善工程，降低其壩高，減少對環境生態的衝擊，後續追綜在原本拆除的防砂壩間櫻花鉤吻鮭後，發現有迴游的跡象，整個溪流棲地樣貌改變甚大，有助櫻花鉤吻鮭的生存。另一個例子是 96 年韋帕颱風為石門水庫區之大漢溪帶來豐沛降雨，造成石門水庫原水濁度過高，其上游巴陵壩右壩座因基礎沖刷淘空，造成右壩體沖毀約 60 公尺，巴

陵壩完工於民國 66 年，位於石門水庫上游 35.5 公里處（約為榮華壩上游 11 公里處），其功能為攔砂及穩定水流，減少砂石下移至石門水庫，原來攔砂總容量為 1,047 萬立方公尺，主壩採格籠式混凝土重力壩（自由溢流），壩高 38 公尺，壩長 80 公尺，迄損毀前已淤滿，已發揮其攔砂功能。巴陵壩遭洪水沖毀後，經濟部水利署評估未來主要有三個思考方向，包括原地重建、在在巴陵壩下方興建一座新壩、或是不再建壩使其成為自然的河道，雖然上述不同想法仍未定案，但在未作成決定之前，筆者認為可參考美國拆除 Marmot 壩的例子，把握住這個機會，整合政府部門及學術研究單位，儘快展開對大漢溪河道上下游流域進行監測的工作，尤其是河道輸砂的情況及生態環境的改變，以建立相關資料庫，對未來後續河溪整治的方向提供參考的依據。

六、美國南加州森林大火遺跡現場調查

筆者在美國期間和過去曾經訪問台灣的 Suan H. Cannon 博士聯絡，Cannon 博士服務於美國地質調查所（US Geological Survey）位於科羅拉多州（Colorado）的分部，其專長研究有關森林火災後造成之土石流（post-wildfire debris flow），剛好筆者博士後研究所在的地方是美國森林大火發生最頻繁的地方——加州，尤其是南加州，在乾旱的季節常發生大規模森林大火，由於風勢猛烈和天氣乾燥，造成不少嚴重的傷亡和損失的著名森林火災事件，其中大火延燒的慘狀甚至曾

被英國媒體形容成，像「聖經啟示錄一樣的災難」。就在筆者想去科羅拉多州拜訪 Cannon 博士之際，剛好 Cannon 博士和其數位同事將會同另外 2 位來自澳洲（Australia）的學者到南加州森林大火後的土石流遺跡進行現場調查，加上 Cannon 博士熱情的邀請筆者加入此國際研究團隊，因此筆者有幸能參與其中，到南加州現場踏勘並和國際學者進行面對面的研討。

1、Santa Barbara 近郊森林大火遺跡

筆者一行人從 LA 出發，第 1 站是到 Santa Barbara 近郊森林大火遺跡現勘，如圖 6-1 及圖 6-2。一般而言，森林大火後的土石流發生原因有 2：第 1 是豪雨先形成地表逕流後，造成地表嚴重沖蝕（surface erosion）而引發土石流；第 2 是雨水入滲到地表土體中形成滑崩（landslide）而引發土石流。大多數森林大火後的土石流都是第 1 項原因造成的，因為基本上森林大火將森林地表燒焦後，會造成地表不透水層的存在，使得水雨入滲土體的能力大為降低，因此產生大量地表逕流的機會非常大，也直接造成表土嚴重的沖蝕現象。除非是在長時間的豪雨作用下，才有可能增加森林大火後雨水滲入表土的機會，最後才因濕潤土體（或飽和土壤）的崩解而產生滑崩或土石流的現象。雖然森林大火後，土石流發生高潛勢區域並無特定的地質條件，但一般而言，最常發生在沈積岩及變質岩發達的區域，尤其是當該區

超過 65%的面積為中度或重度的火燒程度時，更容易發生土石流，此外土石流多發生在坡度大於 20 度且充滿破碎土石材料的封閉集水區中。上述森林大火火燒程度一般是使用衛星影像進行「常態化差異植生指標」（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）分析：

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

其中 IR 為近紅外光輻射值，R 為紅光輻射值（可見光部分），由於綠色植物有吸收藍光、紅光及強烈反射近紅外光之特性，因此，學界研究結果發現可使用 NDVI 監測植生的變化，NDVI 一般介於-1 到 1 之間，NDVI 小於 0 時通常屬非植生之像元，如水域、道路及建築物等；當綠色植物生長非常旺盛時，其吸收之紅光（R）愈多，反射之紅外光（IR）愈強，NDVI 植就愈大，森林大火時火燒程度嚴重，剩下的植生愈少，NDVI 就愈小，故可由 NDVI 判別火燒程度。

關於森林大火後土壤不易入滲的特性，其中 2 位來自澳洲的學者非常有研究精神，他們立刻在現場（Wylie Canyon, Santa Barbara 近郊）進行了簡單的水滴試驗，說明如下：首先挖一個約 2—3 公分深的平底坑，然後打開隨身的水壺在上面滴了數滴飲用水，筆者很驚異的發現水會在土壤表面形成圓形的水珠，就像清晨露水在荷葉表面

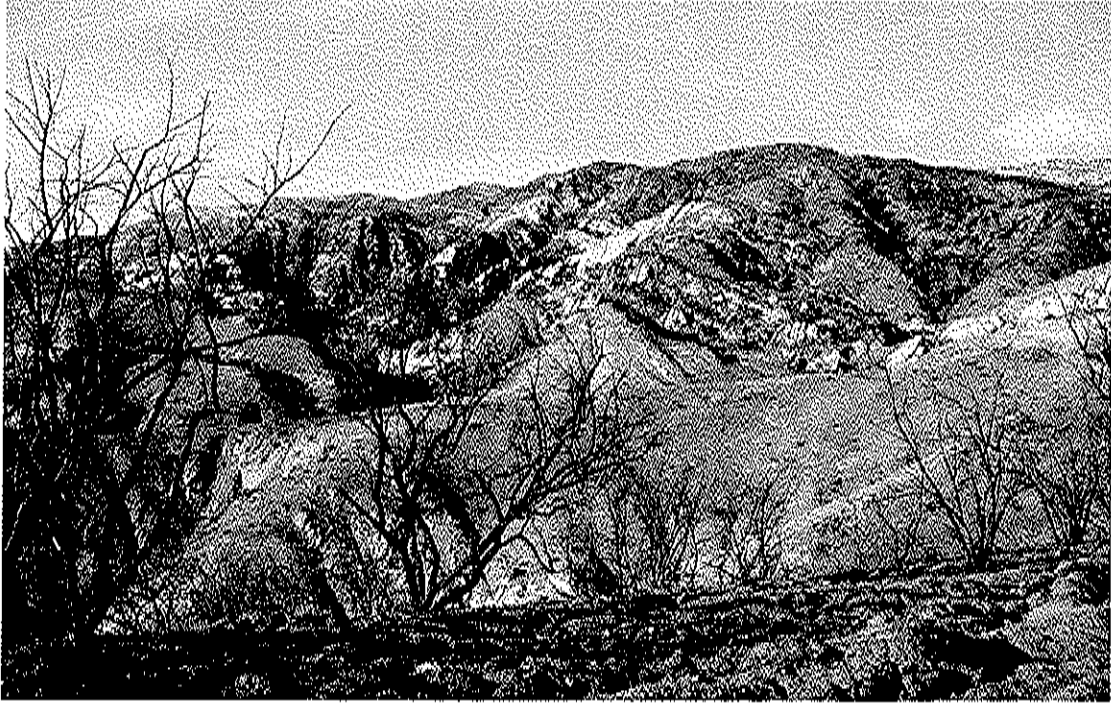


圖 6-1、美國南加州 Santa Barbara 近郊森林大火遺跡



圖 6-2、美國南加州 Santa Barbara 近郊森林大火遺跡（近照）

形成圓形的水珠一樣，靜置十多分鐘後依然為圓形的水珠；接著再將剛才的平底坑向下挖到 6—7 公分深，同樣在上面滴了幾滴水，但此時水不但不會形成水珠，而是直接滲入土體中，表面一圈濕濕的水痕。上述對照試驗顯示森林大火後表土的滲透性非常差，因此形成圓形的水珠不易入滲，反之未受大火影響(較深)的土壤則較易入滲，如圖 6-3 及圖 6-4。另外，在大火後的現場地表可發現白色粉狀物質覆蓋表土，經 Cannon 博士解釋，白色物質為 Hydromulch，有點類似台灣水土保持局在進行邊坡植生噴植的材料，包括粘著劑、不同種類的纖維質、草種、染料等，主要的功用是噴在森林大火後的裸露地表達到快速植生的目的，以減緩並控制表土沖蝕的情形，但由於該地區大火過後土地肥力不足，造成植物生長不易，現場看起來成效並不是十分顯著，僅部分纖維質在地表面覆蓋著，草種發芽的狀況不佳，如圖 6-5。



圖 6-3、水滴試驗—在大火後地表形成水珠（2—3 公分深）

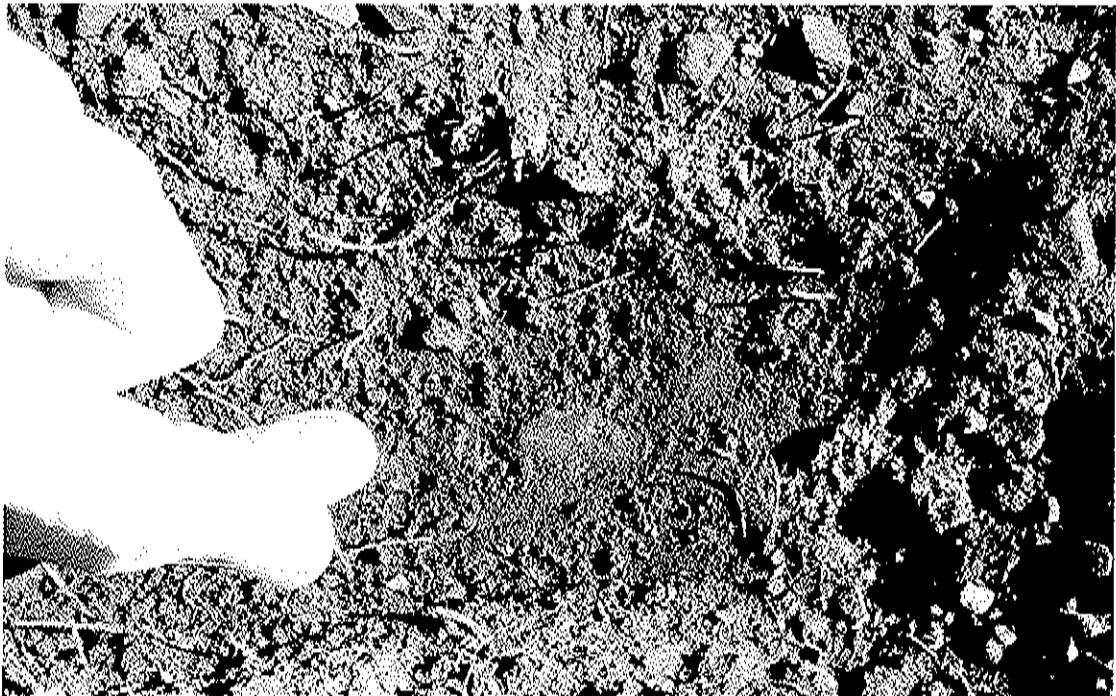


圖 6-4、水滴試驗—水滴直接滲入土壤（6—7 公分深）



圖 6-5、類似台灣坡面噴植工法的 Hydromulch

2、現場土砂運移觀測系統

為了能更深入了解森林大火後坡面表土及河道沖蝕的情形，Cannon 博士所帶領的研究團隊從 2008 年中起在 Santa Barbara 近郊的 Wylie Canyon 新設立現場沖蝕觀測系統，坡面的部分包括地表逕流量測計、雨量計、沖蝕釘及資料記錄器等，地表逕流量測計其原理是當地表逕流增加時，水流深度變高，此時兩根導電基腳間之電阻會改變，利用電阻的改變來推估地表逕流的高度，如圖 6-6 至圖 6-10。

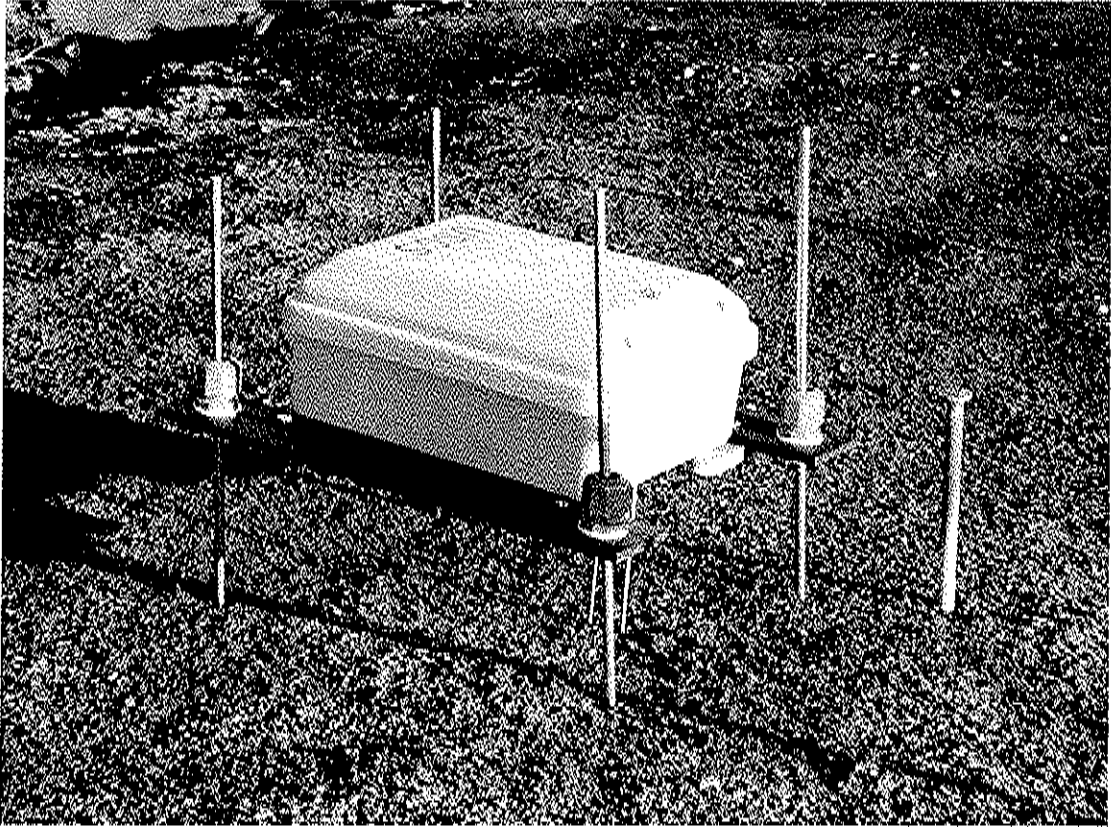


圖 6-6、地表逕流量測計



圖 6-7、地表逕流量測計及沖蝕釘

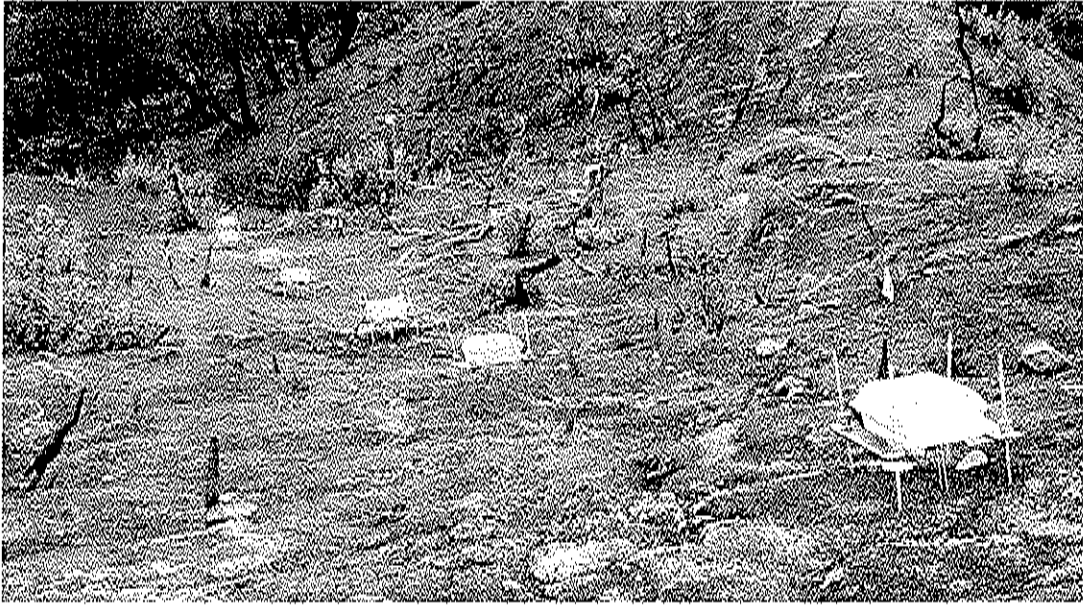


圖 6-8、由坡面上向下排列之地表逕流量測計



圖 6-9、雨量計



圖 6-10、地表逕流量測計、雨量計及太陽能資料記錄器（由近而遠）

除了坡面觀測之外，該區域河道沖蝕的觀測系統主要是在沖蝕溝上方架設一橫跨兩岸的鋁製長條型行架，上方架設攝影機（CCD camera）、雷達波及超音波水位計（radar and ultrasonic water level meter）；另外在地表面上亦架設雨量計（rain-gauge）、地表逕流量測計（overland flow meter）、土壤水份計（soil moisture probe）及孔隙水壓力計（pore-pressure meter）等觀測儀器，由於為新設立系統，故筆者參訪時仍在調校當中，並無實測資料可參考，系統所量測的原始資料全部儲存在現場的資料記錄器（data-logger）當中，受限於頻寬，僅少部分的觀測資料利用行動通訊系統傳輸至後端展示系統中，美國

地質調查所的研究員可透過網際網路展示系統進行即時查詢，整個系統並未像台灣的土石流觀測系統一樣經由衛星通訊大量傳輸資料；另外值得一提的是，由於此系統的經費有限，因此是由美國地質調查所 2 位同仁自行購買材料組裝而成，雖然他們的研究背景並非機電方面，但為了完成工作卻非常努力的研究跨領域的儀器機電部分，其敬業認真的精神令筆者相當感佩，如圖 6-11 至圖 6-14。



圖 6-11、主要沖蝕溝之觀測系統

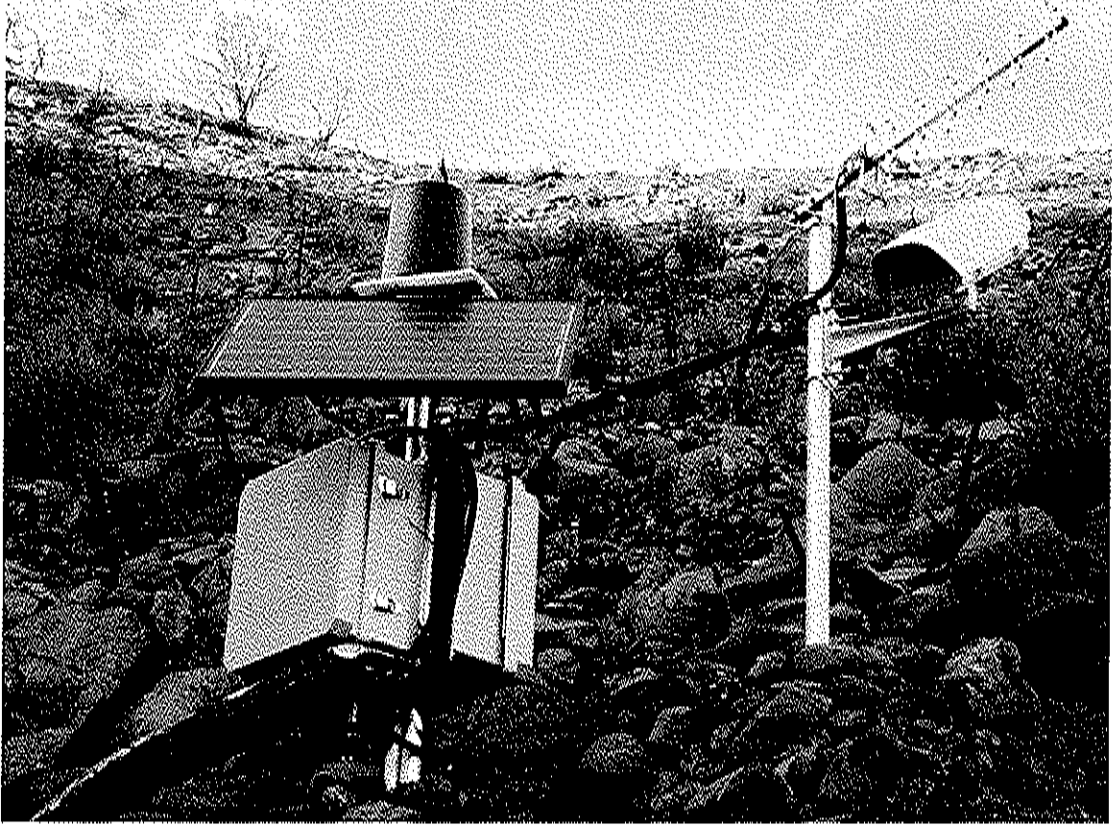


圖 6-12、太陽能板及雨量計（左上方）、攝影機（右上方）

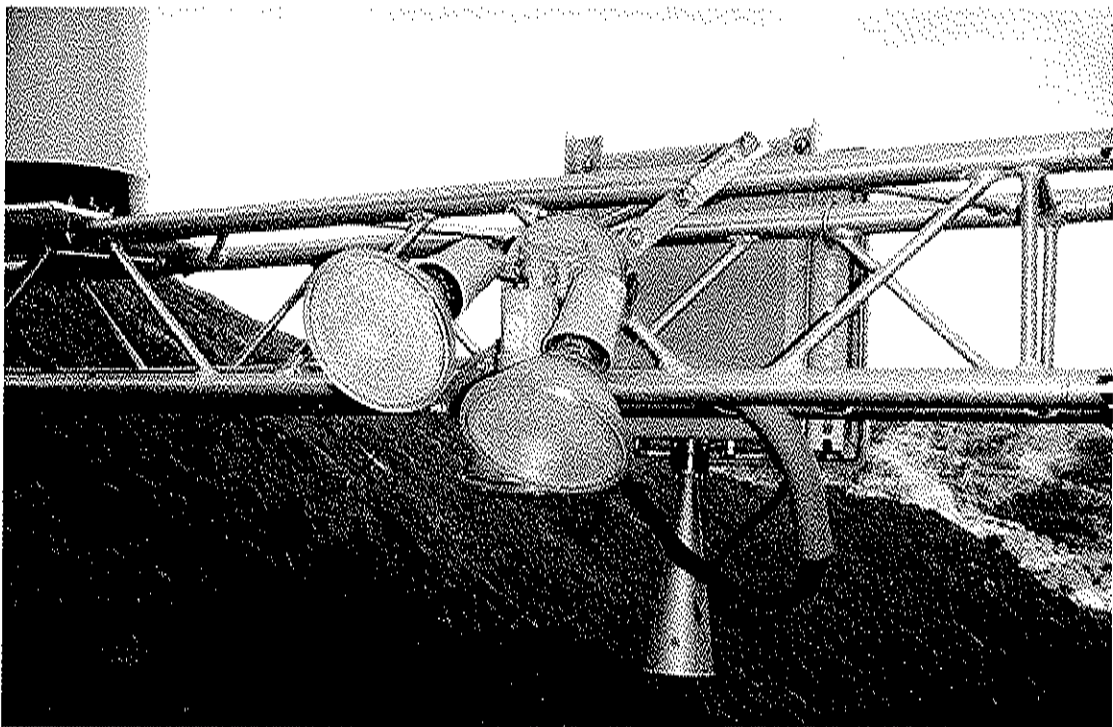


圖 6-13、超音波及雷達水位計、探照燈

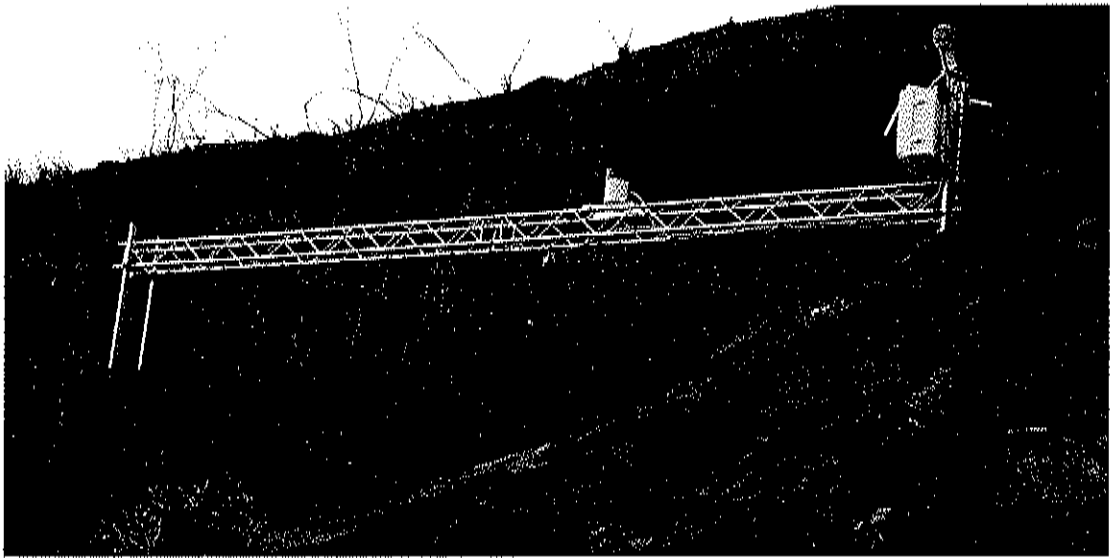


圖 6-14、支流沖蝕溝之觀測系統（較為簡易）

3、森林大火災區土石流早期預警系統

由於降雨量誘發土石流最重要的因素，因此在土石流的研究領域中，有很大一部分研究是針對土石流發生的臨界降雨條件，當找出土石流發生的臨界降雨條件時，就能針對土石流高潛勢區進行土石流災害的警戒及預報，保障山區居民的生命財產安全。根據美國西半部歷史紀錄顯示，森林大火誘發之土石流通常會在火災後 2 年內達到高峰，而且大規模的土石流多在大火後第一個雨季（多為火災後第一場暴雨所誘發）來臨時發生，其餘亦會在第二個雨季發生，之後則是因入滲減少且地表逕流增加而產生的洪水災害為主。以美國加州過去的資料而言，有些時候降雨強度甚至小到 7mm/30 min 都會引發土石流，一般來說，只要當降雨強度超過 10mm/hr 時，就會有發生土石

流的可能性。雖然降雨誘發土石流最主要的因素之一，但現場地文的狀況亦扮演非常重要的角色，若集水區內所包含的鬆散土石量不多，土壤厚度較薄，河道內堆積土石材料較少時，通常森林大火後只會在第一場暴雨時引發一場土石流；但反之若集水區內不管是坡面或是河道中都充滿大量鬆散的土石，加上地表土甚層，因為土石材料供應充足，因此通常會在整個雨季中因連續豪雨而誘發數場土石流事件。此外，森林火災後土石流的規模（總流出體積）隨不同地點的狀況亦有相當大的差異，小至 600 立方公尺，多至 300,000 立方公尺。

為了針對森林大火後受災區可能發生的洪水及土石流災害進行早期預警，因此美國海洋及大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）及美國地質調查所（USGS）合作建立了洪水及土石流示範預警系統（demonstration flash-flood and debris-flow early-warning system）。上述系統主要是基於土石流發生時的降雨情形，根據現場架設的雨量站網（rain gauge network）、都卜勒雷達（doppler radar）回波以及衛星遙測估計降雨等方法，配合歷史洪水及土石流事件，以統計分析的方法，訂出不同地區火災後的洪水及土石流發生的警戒基準值，如圖 6-16；當該地區的降雨超過預先設定的警戒基準值時，美國氣象局（National Weather Service, NWS）即會對該地區發佈警戒，警戒一般分為三級，包括前期公告（Advisory

Outlook)、注意 (Watches) 及警戒 (Warnings) 等，提供地方防救災單位及社會大眾後續緊急防災應變作為的參考依據。



圖 6-15、南加州 Big Sur 火災後土石流現場堆積物(照片上方為 USGS 的 Cannon 博士)

美國 USGS 發展的降雨警戒基準值的訂定主要是以縱軸—尖峰

暴雨量 (peak storm rainfall, 以 inches 為單位) 及縱軸—降雨延時 (rainfall duration, 以 hour 為單位) 為警戒指標所繪製出來的 2 維警戒基準圖, 如圖 6-17; 其和台灣現行的以降雨為基礎的黃色及紅色土石流警戒基準值相當類似, 不同之處是台灣目前主要是採用降雨強度與有效累積雨量作為警戒評估指標, 並採用發生機率 70% 時之雨量作為警戒基準值, 再依據中央氣象局雨量資料定某地區的降雨是否大於警戒值, 警戒的發佈分為黃色及紅色 2 級, 分述如下: 黃色警戒—當氣象局發布某地區預測雨量大於土石流警戒基準值時, 將發布該區為二級(黃色警戒)土石流警戒區, 地方政府應進行疏散避難勸告; 紅色警戒—當某地區實際降雨已達到土石流警戒基準值時, 將發布該地區為一級(紅色警戒)土石流警戒區, 地方政府得指示撤離或強制疏散。由於目前雨量預報仍有其不確定性, 因此目前已引進中央氣象局劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor, QPESUMS) 系統, 參考五分山、花蓮、七股及墾丁等 4 座都卜勒雷達觀測的回波場, 如同美國加州使用雷達回波訊號估計降水量一樣, 提高土石流預報精度。

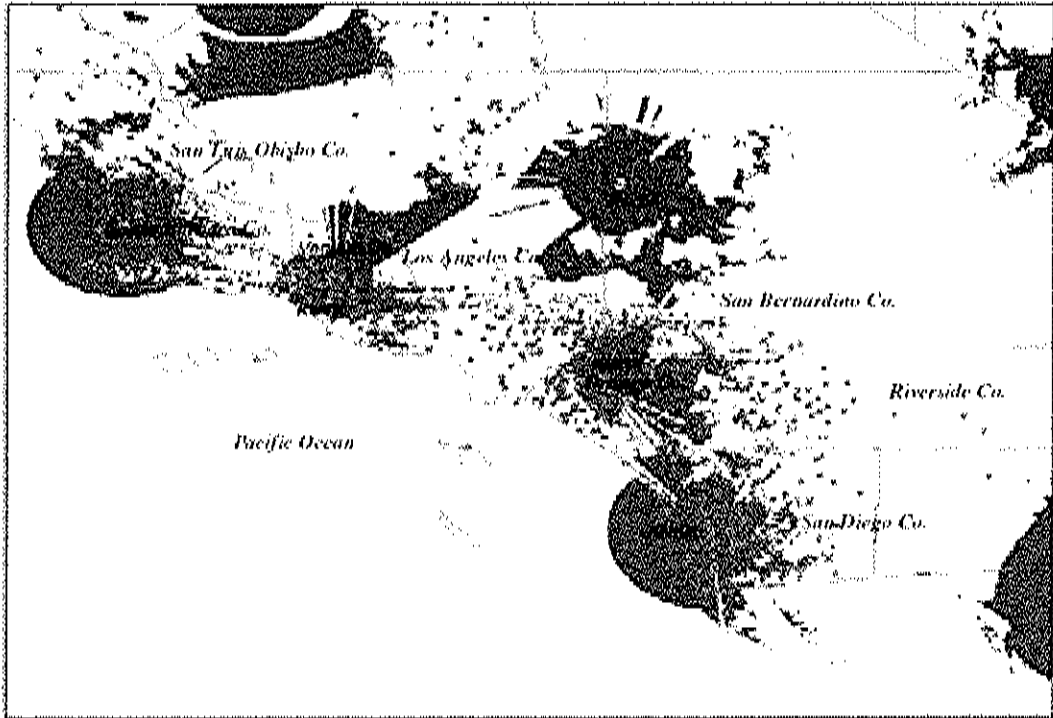


圖 6-16、南加州雷達站涵蓋範圍（藍色）與即時雨量站址（紅色）（取自 USGS 網站）

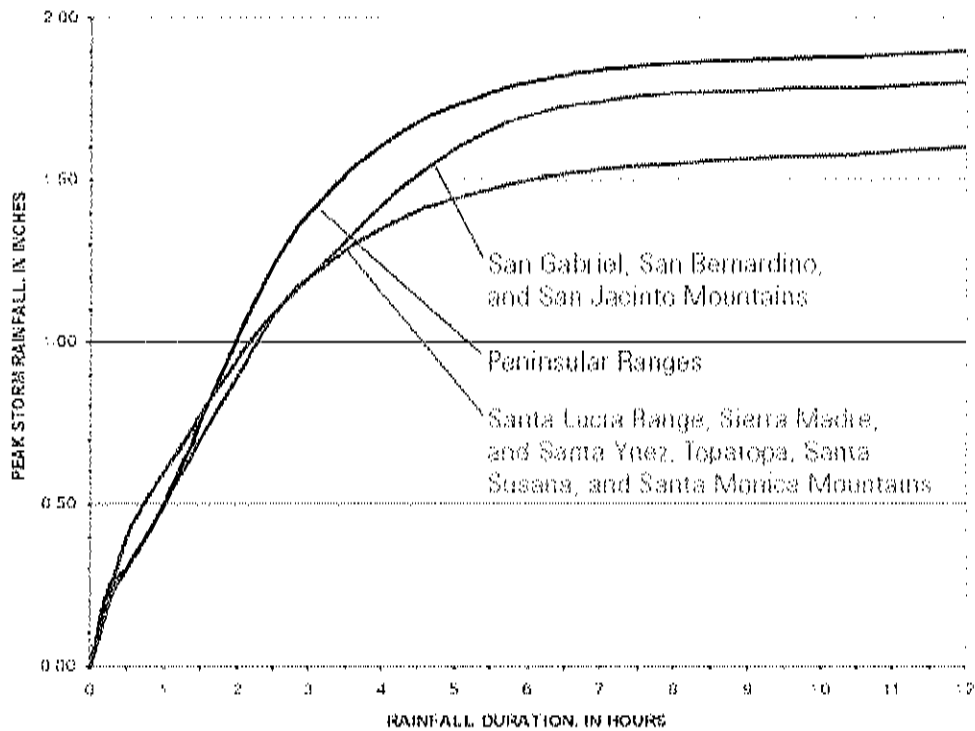


圖 6-17、南加州森林火災後洪水及土石流發生降雨警戒基準圖（取自 USGS 網站）

4、Big Sur 消能網

就在筆者與 USGS 的 Cannon 博士沿著南加州 1 號濱海公路由南向北進行現場調查森林大火後之土石流痕跡之際，筆者在偶然在南加州 Big Sur 附近公路邊看到了多年前在瑞士及日本看到的消能網。消能網(energy-dissipation wire rope net)最早以應用於公路邊坡落石防護為主。消能網的原理為當消能網的網目受撞擊時會產生大量的變形，此變形可以抵銷由落石或土石流撞擊消能網的過程中所產生之能量，因而將其阻擋下來，故消能網亦可稱為柔性擋土結構物 (flexible barriers)。此外土石流流經消能網攔阻後會很明顯地產生土石材料脫水停積現象，因此經過適當設計的鋼索及鋼圈的柔性阻礙物，除了可防落石外，亦可以有效減緩小規模的土石流衝擊，如圖 6-18 至圖 6-21。

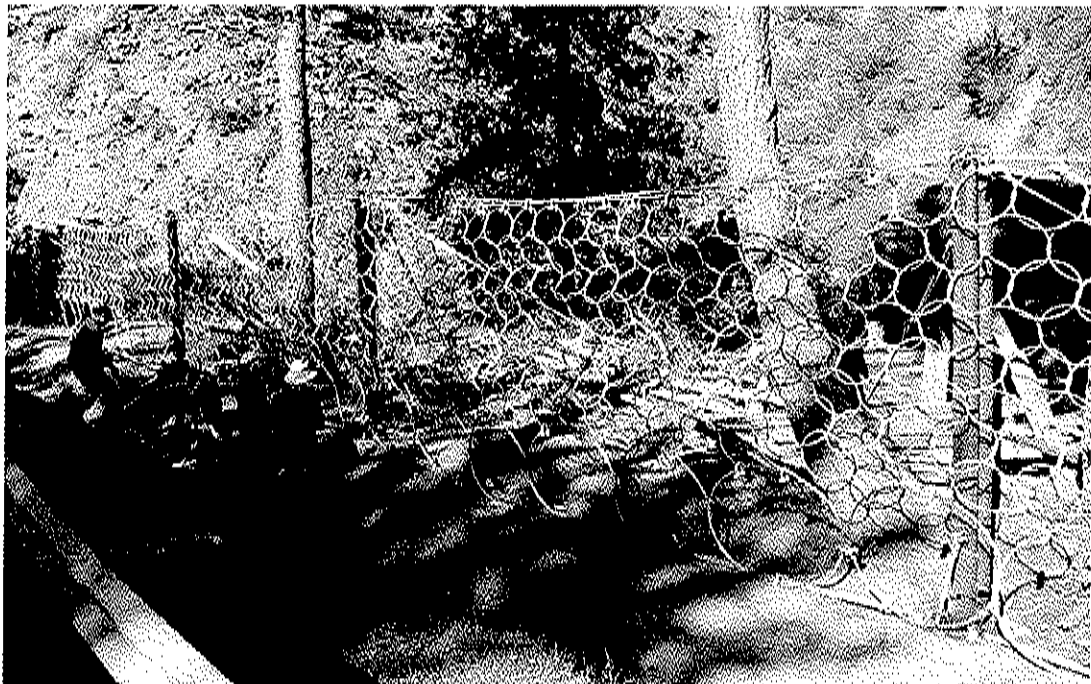


圖 6-18、南加州 Big Sur 公路邊之消能網



圖 6-19、消能網之骨架—鋼軌錨釘於地面

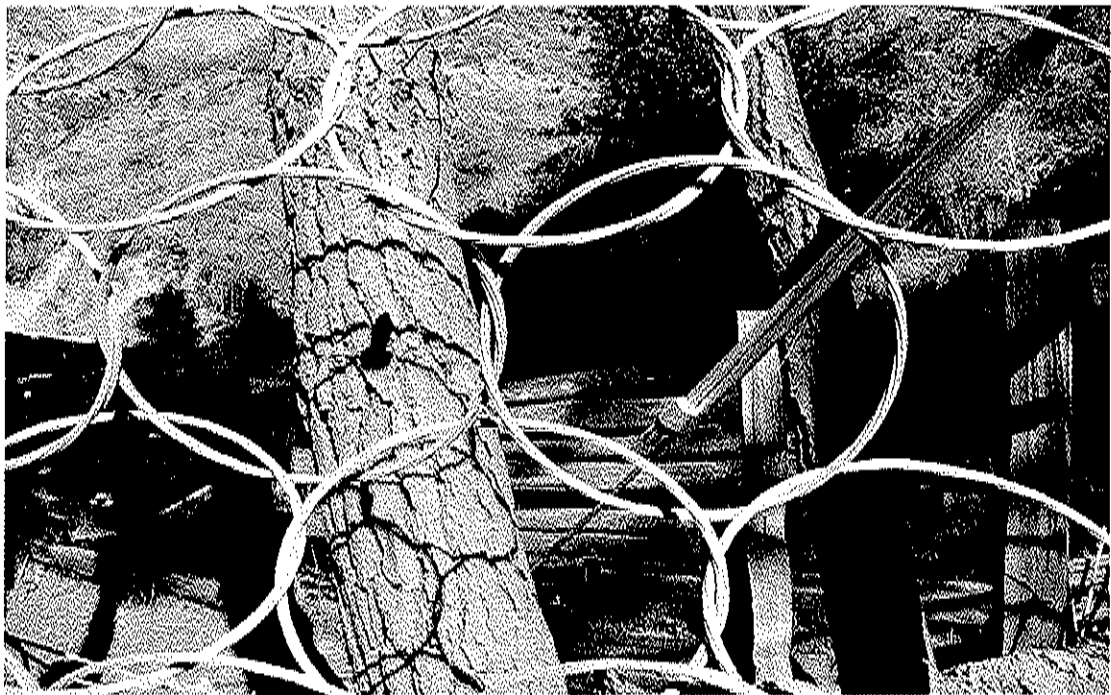


圖 6-20、藉由網目之變形吸收土石衝擊力

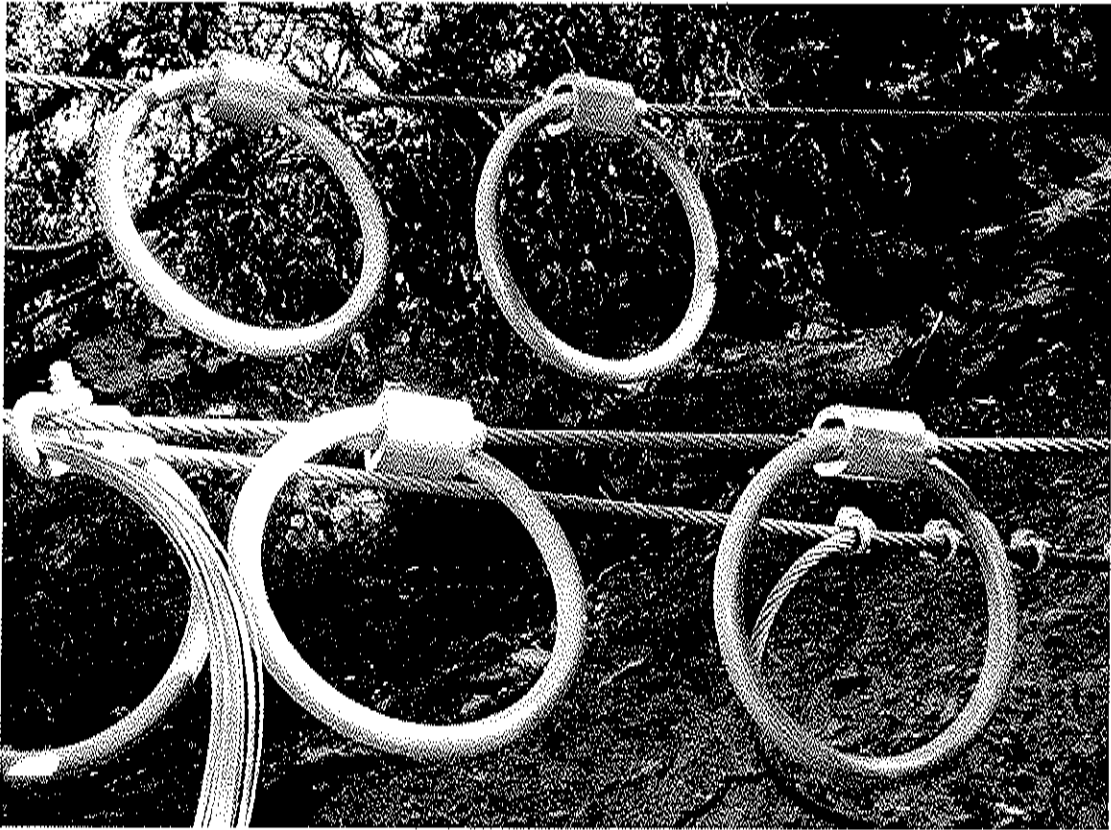


圖 6-21、另一種形式之消能網之網目

目前消能網在市場上已經是量產化的商品了，最主要的研發製造商是瑞士的 Geobrugg 公司，其應用的範圍包括邊坡落石、邊坡穩定、土石流及漂流木防治、雪崩防治及礦區安全防護網等方面，筆者對其在土石流防治的應用方面相當感興趣，使用在土石流方面的消能網 Geobrugg 公司稱其為 Flexible ring net barriers，其攔阻土石流的功能和傳統的梳子壩工法非常類似，將土石流中的大顆粒留下，而小顆粒及水則可順利通過，經濟層面和維護方面，均具價廉簡便之特點，可行性相當高，是未來值得台灣引進嘗試的土石流防治新工法，如圖

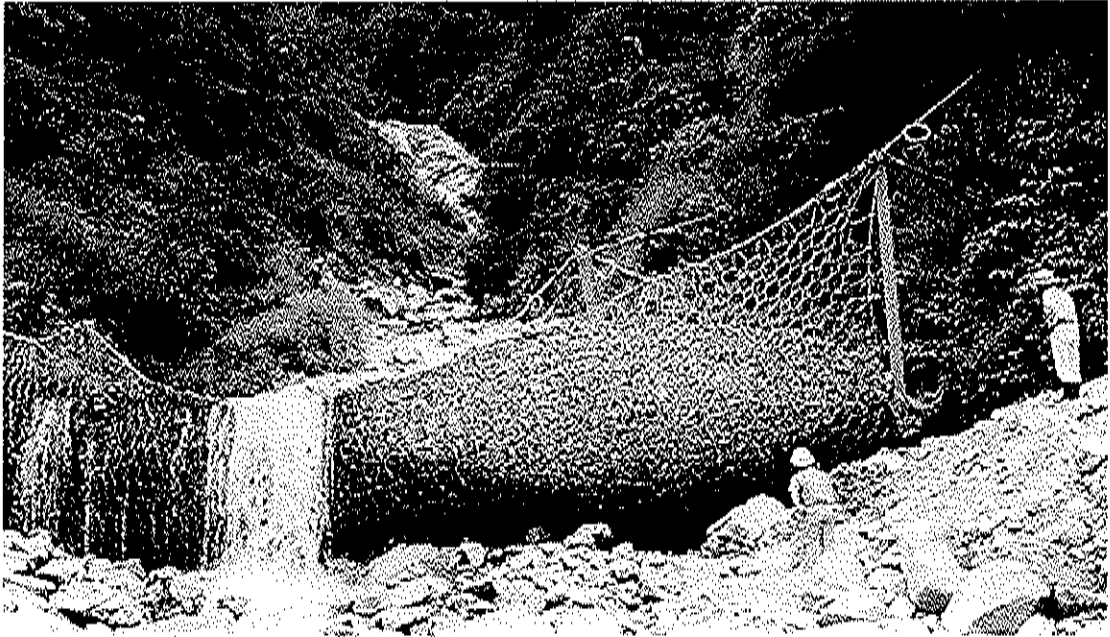


圖 6-22、消能網成功攔阻土石流（摘自 Geobrugg 公司網站
<http://www.geobrugg.com/>）

七、美國地質調查局（US Geological Survey）參訪

美國地質調查局（US Geological Survey，USGS）隸屬美國政府內政部（US Department of Interior）的官方科學研究單位，於 1879 年根據美國國會相關法案成立，其主要研究方向為生物（biology）、地理（geography）、地質（geology）、水（water）以及自然災害（natural disasters）的科學課題，在上述領域的研究成果相當豐碩，多位於全球領先的地位，此外，USGS 有一個很大的特色是相關研究成果對外公開，除了可在其網站上找到包羅萬象的各項研究成果之外，其也提供消費者付費購買各種形式之地圖、資料解說及相關出版品。

1、CVO-USGS 討論會

由於筆者在美國研究期間參加 AGU 時發表有關台灣土石流觀測系統研發的相關論文，引起該場討論會主席美國地質調查局 (USGS) 資深研究員 Richard M. Iverson 博士高度的興趣，再加上筆者本身在赴美國前一直想拜訪 Iverson 博士的研究團隊，因此在 AGU 結束後的一個月內，經由 Iverson 博士的悉心安排，筆者啟程前往美國西北角的華盛頓州的 Cascades 火山觀測站 (Cascades Volcano Observatory, CVO) 參訪。CVO 的全名為 U.S. Geological Survey David A. Johnston Cascades Volcano Observatory，其中 David A. Johnston 博士是一位在 USGS 進行火山研究長達 30 年的資深研究員，由於美國華盛頓州有一個非常著名的火山為聖海倫火山 (Mount St. Helens)，因此在 30 多年前當聖海倫海山有活動跡像時，Johnston 博士是第一位到聖海倫火山現場進行近距離研究的 USGS 研究員，但不幸的是他在 1980 年 5 月 18 聖海倫火山爆發時遇難，為了紀念 Johnston 博士，後來 CVO 成立時其全名即冠上 David A. Johnston 博士的名字。

在筆者參訪同時，Iverson 博士邀請筆者介紹台灣的水土保持工作，筆者簡報的主題是「台灣土石流監測及災害防治」(Debris flow monitoring and disaster mitigation in Taiwan)，簡報會議當天全場超過 30 位 CVO 的研究員參與討論，氣氛非常熱烈，尤其對目前水土保持

局發展的行動式土石流觀測站及利用無人飛機空拍的技術特別感興趣，此外他們對水土保持局土石流防治工程結合農村發展的成就亦非常推崇，簡報完畢後甚至有不少研究人員向筆者表示，他們直到今天才知道原來台灣也有產高品質的咖啡豆（筆者簡報過程中提及雲林古坑華山的成功經驗）。

基本上行動式土石流觀測站最初研發的構想是為了能更精準掌握現場土石流發生時的動態，其派遣運作的過程主要是當水土保持局接收到中央氣象局發佈的颱風警報時，會依據颱風可能侵台的路徑，研判最容易發生土石流的地區，機動的派遣行動式土石流觀測站至現場進行即時觀測任務，行動式土石流觀測站觀測儀器包括雨量計、紅外線攝影機、地聲檢知器、智慧型電力系統等，其電力系統能確保行動式土石流觀測站在土石流現場獨立運作至少 72 小時以上。此外，再配合後續研發的模組化觀測儀器，運用無線網路科技將觀測儀器探測的資訊傳送至行動式土石流觀測站，再利用衛星通訊將現場土石流影像等資訊即時傳送至水土保持局土石流防災應變小組，提供各級防災單位警戒參考，可以有效的延伸行動式土石流觀測站之觀測範圍。

此外，水土保持局為提昇山坡地防災監測與應變成效，引進具有高機動性、高時空解析度等優點遙控無人載具技術，遙控無人載具系統主要包括遙控直升機、數位攝影機、高解析度相機、即時監控系統

及微波影像傳輸器五大部分，透過遙控無人載具技術拍攝之影像，經處理後可與地形圖、航空照片及衛星影像等圖形整合，不但可在短時間內瞭解災區災害狀況，更可簡省調查所需之人力與物力，並有利於具危險性或人力無法到達之地區進行任務，除了平時可有效掌握山坡地資源利用現況，災時更可快速取得災害量化資訊，並可提供災後即時空拍監測，復建工程之成效評估及坡地環境規劃與管理之參考。

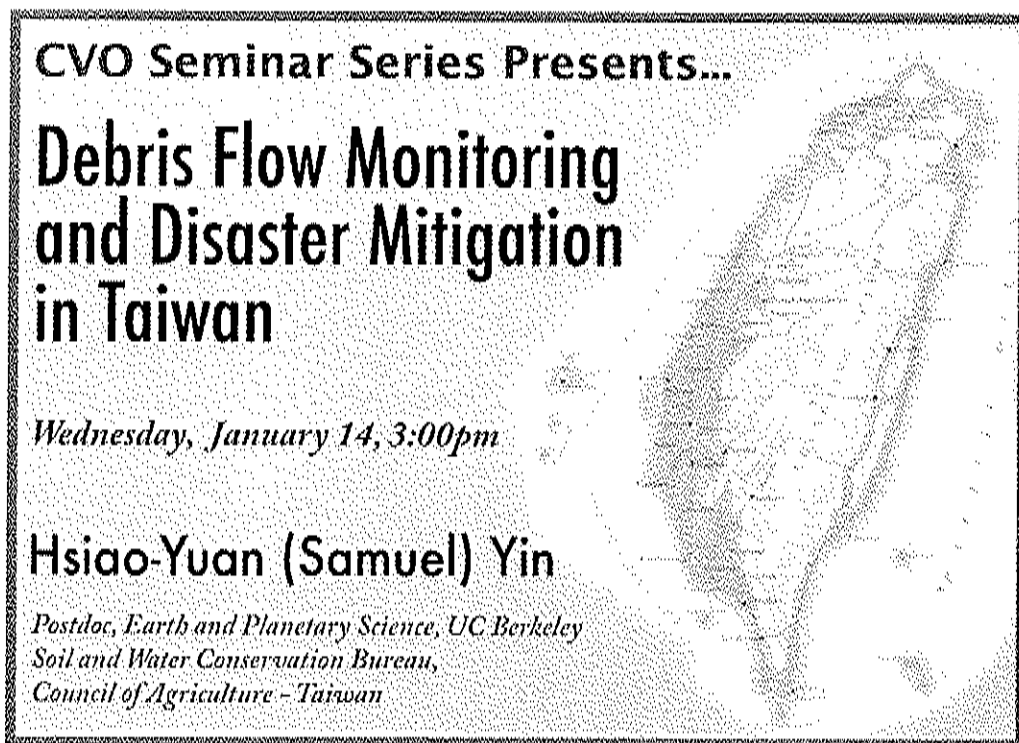


圖 7-1、筆者至 CVO-USGS 專題討論的海報



圖 7-2、行動式土石流觀測站



圖 7-3、遙控無人直升機（空拍設備）

在討論過程中，Iverson 博士表示近年來 USGS 和 NOAA 共同推動多項合作計畫，尤其是在應用 NOAA 下轄的劇烈風暴實驗室

(National Severe Storm Laboratory, NSSL) 發展出的行動式都卜勒雷達站方面，上述行動式都卜勒雷達站的名稱為「行動式大氣研究教學雷達」(Shared Mobile Atmospheric Research and Teaching Radar, 簡稱 SMART-R)，相關規格如下：載具是 4700 International dual-cab diesel truck，長約 10 公尺，高 4.1 公尺，重 11.8 公噸，具有電腦控制的油壓支撐架，系統的電力供應為 10 KW 的柴油發電機；雷達所使用的電磁波頻率為 5635 MHz(波長 5.5 公分, C-band)，碟形天線直徑 2.54 公尺，旋轉速度為 0-33 deg/s；目前美國類似的行動式雷達站在洪水或土石流預報方面應用的很廣，因為降雨是洪水或土石流最主要的誘發因子，只要能掌握降雨特性，尤其是未來 3 小時之降水量及降雨區域等，即可大幅提供土石流警戒發佈的精確度。雖然目前台灣的中央氣象局、農委會水土保持局、經濟部水利署及美國 NSSL 自 2002 年起已整合多重觀測資料並結合地理資訊發展劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor, QPESUMS)，提供劇烈天氣監測資訊，尤其是定量降水估計資料，但是在土石流高潛勢的山地坡地或集水區，QPESUMS 的降水估計的精度或是量測實際降雨的雨量站數目仍然不足，此時行動式都卜勒雷達站就可以補足這方面不足的降水資訊，故其對於土石流高潛勢地區進行監測及預報的工作有相當大的助益。



圖 7-4、美國 NOAA 研發的行動式雷達站 SMART-R (摘自 <http://www.nssl.noaa.gov/smartradars/>)

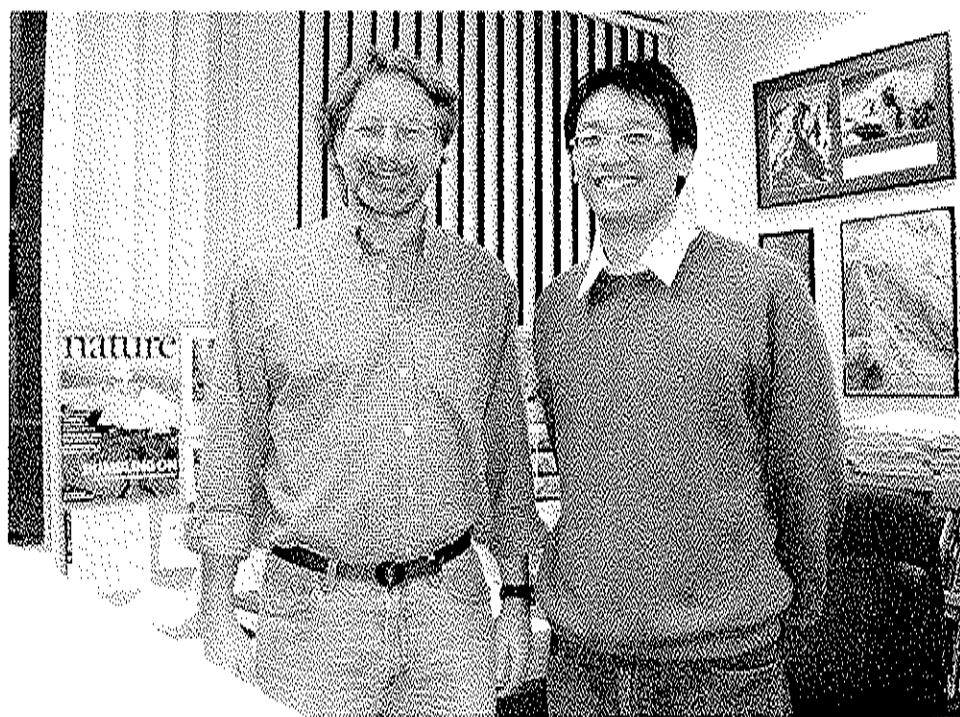


圖 7-5、Richard M. Iverson 博士與筆者

2、大型土石流試驗水槽

CVO 最初成立主要是為因應火山爆發產生的災害而設立的，研

究的主題除了針對火山研究之外，還有其它與火山相關的天然災害，包括地震（earthquake）、滑崩（landslide）及土石流（Debris flow），近年來 CVO 除了在火山研究相當著名外，特別是在土石流相關的研究成果相當豐碩，其在全球土石流研究領域處於領導的地位，其中最具有代表性的人物即是 Richard M. Iverson 博士，據筆者在柏克萊加大的美國同學表示，筆者的指導老師 Dietrich 教授和 USGS 的 Iverson 博士在土石流研究領域中都可稱為「大師」（Master）級的人物，2 位學者投稿的學術刊物都是世界頂尖的，包括「自然」（Nature）及「科學」（Science）期刊等。

在進行土石流的研究過程中，為了瞭解土石流的各項運動特性和機制，因此現場觀測流動中的土石流就顯的非常重要，但由於土石流的發生非常突然，發生的時間及地點亦不易預測，加上土石流具有強大的破壞力，故在現場觀測時危險性亦相當高，因此現階段進行土石流的研究中，水槽試驗就顯得非常重要，一般水槽試驗的尺寸都不大，超過 10 公尺長的水槽並不多見，這些小型水槽在實驗同時，預考慮各項縮小模型的相似定律，但要能真正反應出現場實際土石流的特性仍為一相當困難的挑戰。Iverson 博士所領導的研究團隊中，有一項全球知名的試驗，就是在超大型土石流試驗水槽中（Experimental Debris-Flow Flume）進行的各項土石流實驗。此大型試驗水槽是 1991

年 USGS 和美國林務局 (US Forest Service) 合作建造的，地點在奧勒岡 (Oregon) 州 Eugene 東方 45 英哩處的 H.J. Andrews 實驗林場 (Experimental Forest)；水槽長 95 公尺、寬 2 公尺、深 1.2 公尺，其坡度為 31 度 (60%) 之固定坡度，係採用一般土石流發生區之坡度，整體結構用強化混凝土建造而成，水槽的側邊設置可移動的玻璃窗，便於實驗進行中拍照及觀測，水槽底部渠道有 18 個預先設計的孔洞，可埋不同的設感應器，主要是以量測土石流流動過程中土石撞擊和滾動造成之壓力及剪力隨時間的變化情形。

筆者在現場參訪時由於前幾天才下大雪，因此水槽渠道及旁邊的樓梯還堆了不少殘雪在其中，由於帶領筆者到現場的 USGS 的 Matthew Logan 研究員非常熱心，因此我們還是排除萬難爬到渠道頂端，根據 Matthew Logan 研究員指出，基本上土石流的產生有 2 種方式，其一是在渠道最上端有道鋼製的電動閘門，每次準備進行土石流實驗前，先將閘門關上，在其後方堆置體積約 20 立方公尺 (約 40 公噸) 的土石材料，再灑水使土體達到飽和，最後電動閘門在瞬間開啟形成土石流向快速流動；另外，亦可以將土石堆積在渠道上方處，堆積土石下方設置一類似擋土牆的結構物，因為土石材料和底床間摩擦力的關係使土石不致潰決，接著不斷供給水份使土體逐漸達到飽和，最後土體因飽和液化而造成類似潰壩的機制形成土石流向流

動。土石流向下游快速流動直到水槽下方漸變緩坡段速度會慢下來，當其到達接近平面的渠道出口處時，會產生土石淤積的行為。基本上整個水槽的設計可以讓研究人員同時觀測到土石流發生、流動到停積三個不同階段的行為，甚至在渠道最上端亦可模擬邊坡崩壞的機制；此外，利用不同粒徑組合的土石材料亦可模擬不同形態的土石流實驗（例如礫石型、泥流型及一般型土石流），探討不同顆粒大小的土石材料在土石流行為中扮演的角色，所有實驗完畢的土石流材料最後都會以推土機回收，作為一下次實驗之用。

為了更了解土石流流動過程中表流深的變化，因此渠道在 33 公尺、66 公尺及 90 公尺處都有架設跨過渠道的橫向支架，其上方設置雷射感測器，用以量測土石流表面高度（流深）隨時間的變化，另其正下方則設置壓力計（basal force sensor）及孔隙壓力計（pore-pressure sensor）用以量測土石流流動時對渠底造成之力量及孔隙水壓力的變化情形。實驗發現土石流前端之土體並非飽和，因此產生的孔隙水壓力很小，經過約數秒孔隙水壓力才逐漸上升，顯示土石流中段之後才逐漸達到飽和的情況。

據 Matthew Logan 研究員表示，設置土石流大型水槽最主要有 2 項目的：第 1 是驗證現行的土石流數學模式並發展新模式，以解釋土石流運動現象並嘗試預測土石流的行為；第 2 是改良並發展有關土石

流防治的相關技術，例如筆者在南加州看過的消能網，亦曾在此大水槽進行實驗，此外有關土石流防治新工法亦常在此水槽進行試驗。一般而言在大水槽中量測土石流的項目包括前端波湧的速度、表面流速、流深、垂直流速剖面、及土石流對底床造成的正向力和剪應力，上述的參數對建構土石流模式中動量和能量的傳遞非常重要。另外有關土石流堆積部分的研究亦是大型水槽的一個研究重點，一般而言在現場土石流堆積區多會造成當地居民的生命財產威脅，因此，研究土石流堆積長度、深度及範圍可對土石流潛勢溪流可能致災的區域進行預測及評估，有助於現場土石流防災工作的推動。

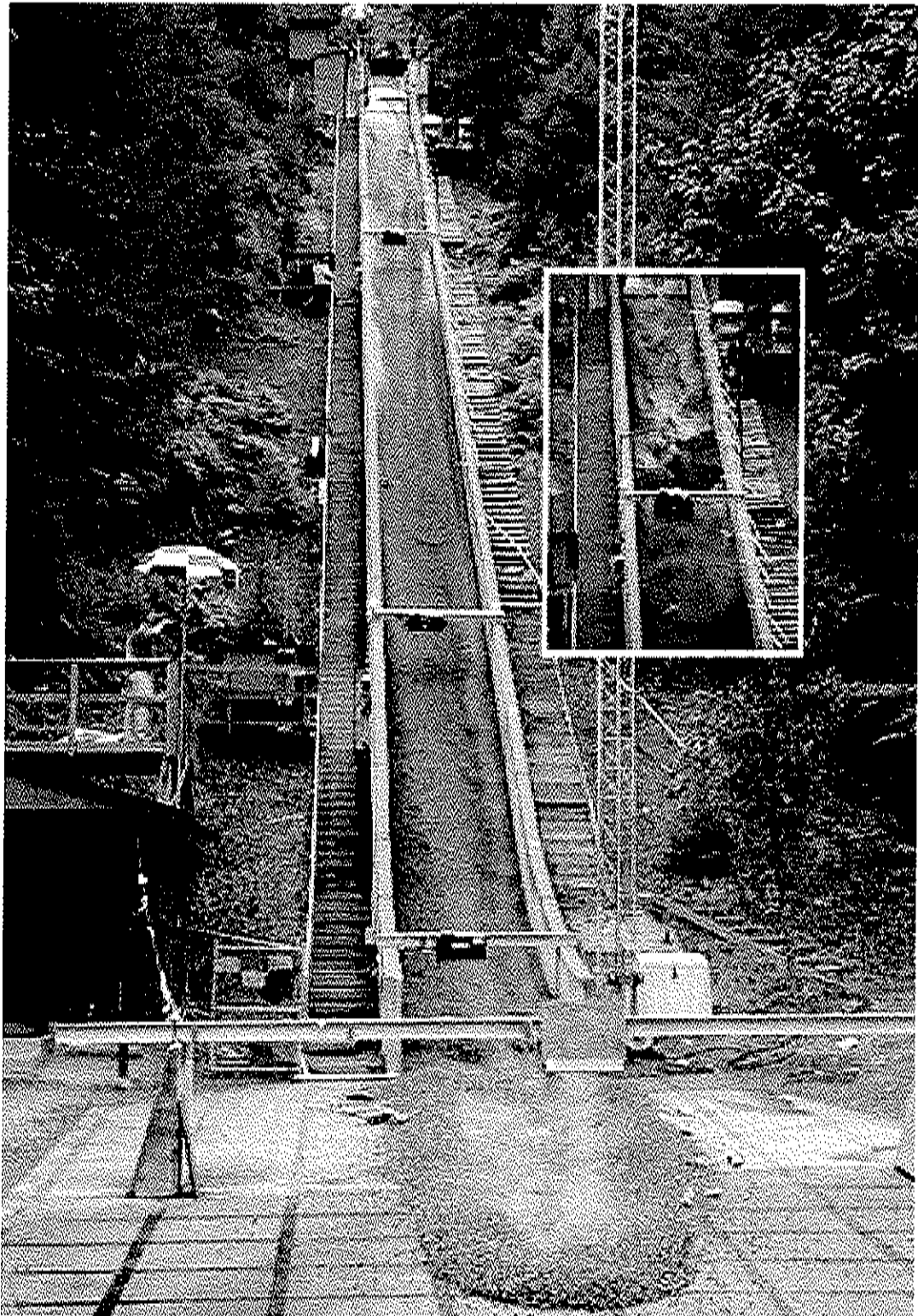


圖 7-6、USGS 大型土石流試驗水槽（摘自 CVO-USGS 網頁
<http://vulcan.wr.usgs.gov/>）

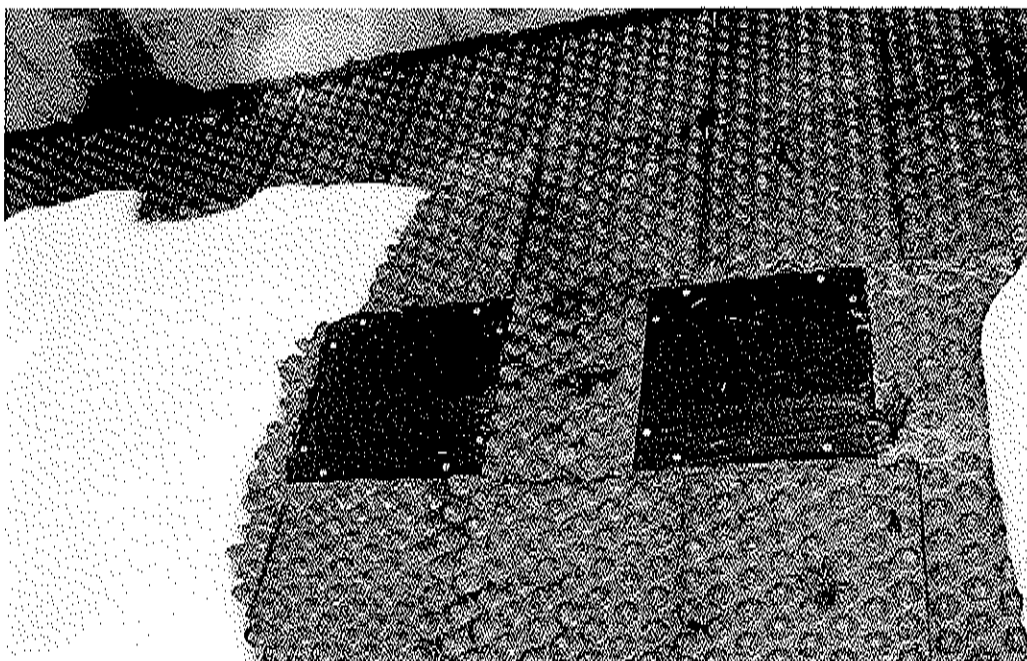


圖 7-7、水槽底部預留埋設感應器之空間，平時以橡皮封住防塵

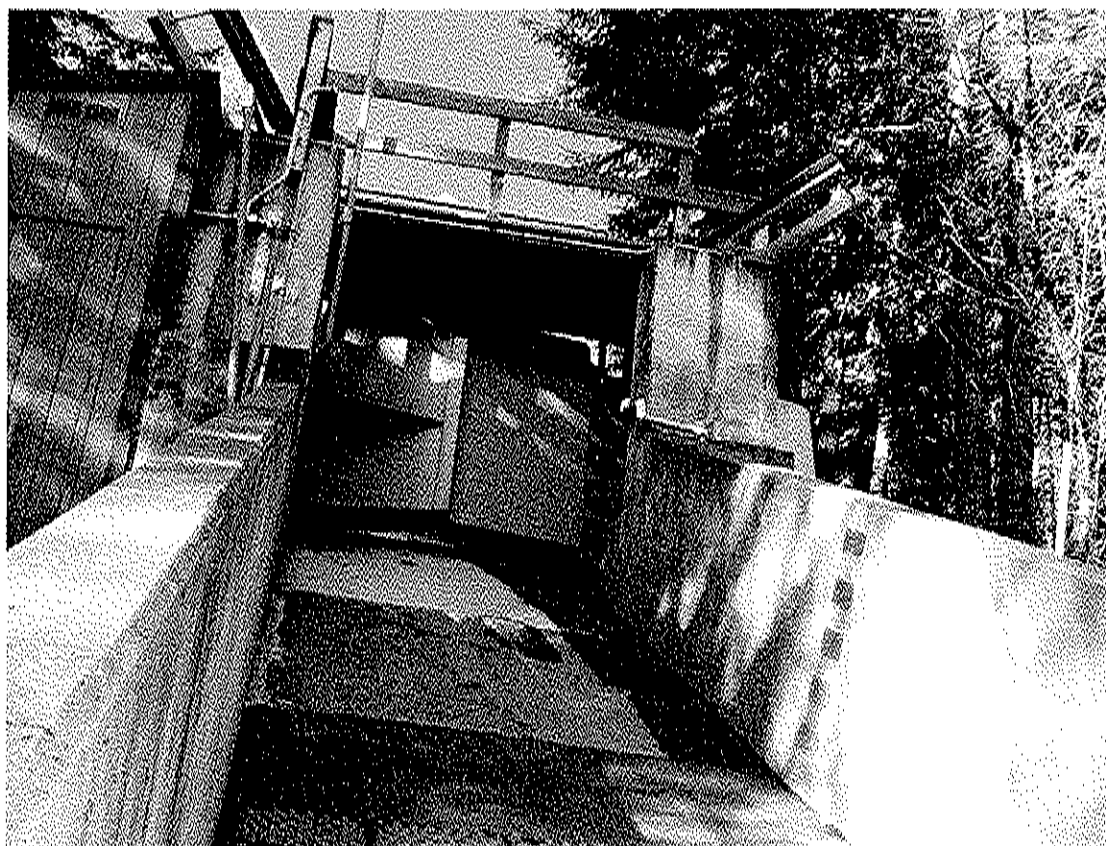


圖 7-8、試驗水槽上方的電動閘門，可瞬間開啟

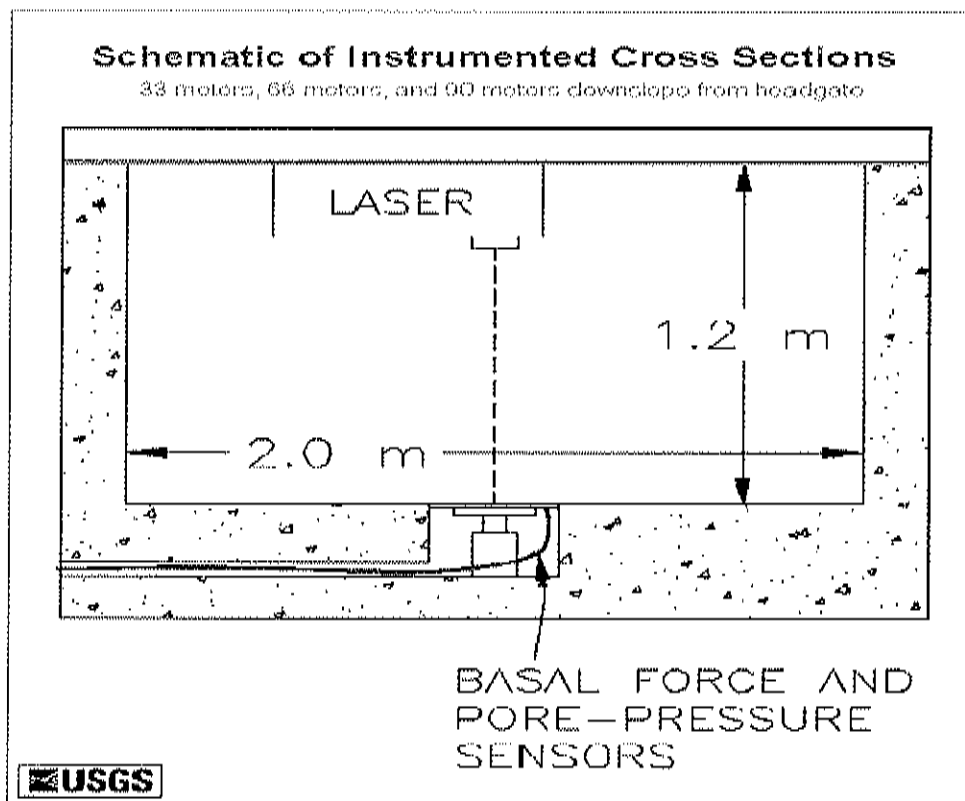


圖 7-9、渠道上方橫向量測機構示意圖（摘自 CVO-USGS 網頁 <http://vulcan.wr.usgs.gov/>）

AERIAL PHOTOGRAPH OF Contoured Deposit of Sept. 13, 2001 Debris Flow Generated by Sudden Release of 9.4 Cubic Meters of Water-Saturated Sand/Gravel/Loam Mixture (~ 6% silt and clay by dry weight)

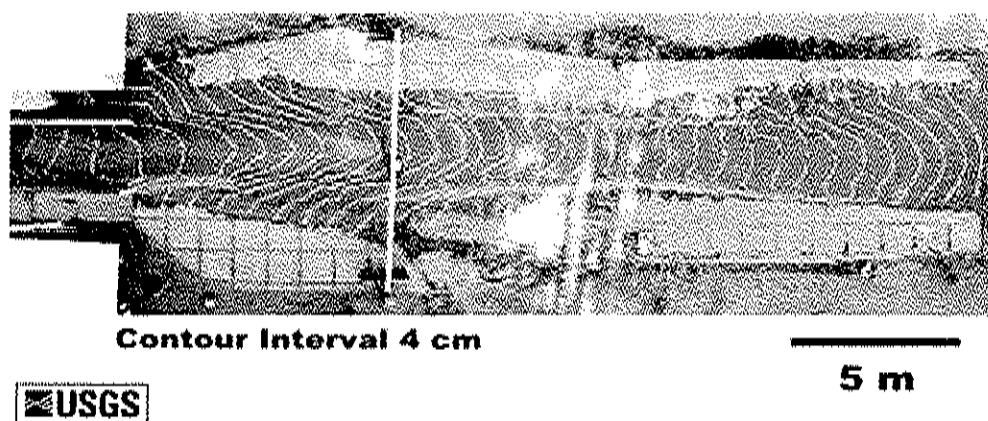


圖 7-10、土石流實驗淤積段空拍圖（摘自 CVO-USGS 網頁 <http://vulcan.wr.usgs.gov/>）

參、心得與建議

一、台灣由於地形及地質條件特殊，因此山坡地常發生崩塌地滑的災害，上述現象在英文中可統稱為 landslide，主要可區分為 2 大類，一種是淺層滑崩（shallow landslide），就像在山區公路邊常看到的崩塌情形，在大雨過後受重力作用下，其發生的速度相當快，要預測其發生的時間及地點非常困難；另一種是深層的滑動（deep landslide），通常其速度較為緩慢（slow moving landslide），除了豪雨發生過後外，長時間的小雨亦會使得土壤濕潤而造成其滑動速度增加，常在山坡社區造成房屋傾斜及地面龜裂的情形，在台灣像台中縣和平鄉梨山地區、南投縣國姓鄉九份二山及南投縣仁愛鄉廬山地區的地滑就是最典型的例子；除了使用現場儀器量測的方式外，目前美國使用衛星合成孔徑雷達干涉量測（InSAR）的方式針對地滑地進行定期監測，由於其精密度可達到公分級以下，非常適合針對人口密集地區如坡地社區進行遙測，目前國內 InSAR 的技術已漸漸開始推廣，是未來值得嘗試的一項坡地監測的新技術。

二、筆者在參加美國地球物理學會 2008 年秋季年會過程中，許多研究主題都和全球氣候變遷的議題有關，全球氣候變遷對台灣山坡地可能的影響是颱風頻率強度的增加和極端降雨事件的產生，可

能導致落石、山崩、地滑及土石流災害增加，並造成較以往嚴重的土壤流失（沖蝕）問題。因此未來需特別加強跨學門及跨領域之整合研究，包括水保、水文、地質、森林、生態、大氣、海洋、太空、地理、經濟、法律、政策及環境工程等各學門之共同研究，並加強各領域之基礎研究，結合實務經驗與理論依據，解決山坡地環境系統之各項問題，認因應全球氣候變遷的衝擊。

三、在台灣現階段 LiDAR 的應用愈來愈廣泛，空載 LiDAR 可在短時間內獲得精度在數十公分內的地形變化資料，是目前大面積數值高程模型（DEM）資料製作的主流趨勢；而 LiDAR 高精度數值地形資料，可進行前後兩期間之地形高程變化相減以計算土砂體積變化量；此外因其製作數值地形精度佳，故可獲得地形微量之起伏變化，除反應崩塌、土石流、河床沖淤以及土砂運移行為與趨勢外，亦可顯示治理工程前後地形貌差異，是未來非常有潛力的一項工具。

四、為了針對森林大火後受災區可能發生的洪水及土石流災害進行早期預警，因此美國海洋及大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）及美國地質調查所（USGS）合作建立了洪水及土石流示範預警系統（demonstration flash-flood and debris-flow early-warning system）。上述系統主要

是基於土石流發生時的降雨情形，根據現場架設的雨量站網（rain gauge network）、都卜勒雷達（doppler radar）回波以及衛星遙測估計降雨等方法，配合歷史洪水及土石流事件，以統計分析的方法，訂出不同地區火災後的洪水及土石流發生的警戒基準值，如圖 6-16；當該地區的降雨超過預先設定的警戒基準值時，美國氣象局（National Weather Service, NWS）即會對該地區發佈警戒，警戒一般分為三級，包括前期公告（Advisory Outlook）、注意（Watches）及警戒（Warnings）等，提供地方防救災單位及社會大眾後續緊急防災應變作為的參考依據。

五、由於土石流流經消能網攔阻後會很明顯地產生土石材料脫水停積現象，目前消能網在市場上已經是量產化的商品了，其應用的範圍包括邊坡落石、邊坡穩定、土石流及漂流木防治、雪崩防治及礦區安全防護網等方面，筆者對其在土石流防治的應用方面相當感興趣，另其攔阻土石流的功能和傳統的梳子壩工法非常類似，將土石流中的大顆粒留下，而小顆粒及水則可順利通過，經濟層面和維護方面，均具價廉簡便之特點，可行性相當高，是未來值得台灣引進嘗試的土石流防治新工法。

肆、參考文獻

1. 維基百科 (Wikipedia) 網頁, <http://www.wikipedia.org/>。
2. 美國地質調查局 (U.S. Geological Survey, USGS) 網頁, <http://www.usgs.gov/>。
3. Alan Kropp & Associates, Inc. 公司網頁 <http://www.akropp.com/>。
4. Corning Incorporated 網頁, <http://www.corning.com/>。
5. Watershed Processes Group 網頁, <http://www.fsl.orst.edu/wpg/>。
6. Portland General Electric 公司網頁, <http://www.portlandgeneral.com>。
7. Geobruigg 公司網頁, <http://www.geobrugg.com>。
8. 美國海洋及大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 網頁 <http://www.nssl.noaa.gov/smartradars/>。
9. 美國 CVO (Cascades Volcano Observatory) -USGS 網頁 <http://vulcan.wr.usgs.gov/>。
10. 尹孝元、黃清哲、連秉乾、連榮吉 (2006) 台灣地區土石流場觀測技術發展現況, 地工技術, 110 期, 土石流防治專輯, 65-76 頁。
11. 尹孝元、黃清哲、連惠邦、李秉乾、周天穎、王晉倫 (2006) 自動化土石流觀測系統之發展及應用, 中華水土保持學報, 第三十七卷第二期, 91-109 頁。
12. 水土保持局 (2008) 光纖感測技術於坡地監測之應用, 水土保持

局研究報告書，SWCB-98-088。

13. 水土保持局 (2008) 石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究，水土保持局研究報告書，SWCB-98-007。
14. 水土保持局 (2008) 九份二山崩塌地地表變動觀測分析及成果展示，水土保持局研究報告書，SWCB-98-113。
15. Hsu, L., Dietrich, W. E., Sklar, L. S. (2008) Experimental study of bedrock erosion by granular flows, *J. Geophys. Res.*, VOL 113, F02001.
16. Copeland, E. A., Kennard, P., Nolin, A. W., Lancaster, S. T., Grant, G. E. (2008) Initiation of Recent Debris Flows on Mount Rainier, Washington: A Climate Warming Signal, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
17. Yin, H., Huang, C., Yeh, C., Chen, C., Fang, Y., Lee, B., Chou, T. (2008) Development of Fixed and Mobile Debris Flow Monitoring System in Taiwan, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
18. Fang, Y., Lee, B., King, C., Chen, M., Lien, J., Yin, H., Wang, H. (2008) Research on Rainfall Data of Debris Flow Monitoring Station via WSN Technique and Spatial Analysis, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
19. Huang, C.J., Yin, H.Y., Chen, C.Y., Yeh, C.H., and Wang, C.L. (2007) Ground vibrations produced by rock motions and debris flows, *J. Geophys. Res. – Earth Surface*, 112, F02014, doi:10.1029/2005JF000437, pp. 1-20 (SCI index, IF=2.839) (*Geophysical Science*:

- Rank Factor 6/128).
20. Huang, C.J., Shieh, C.L., and Yin, H.Y. (2004) Laboratory study of the underground sound generated by debris flows, *J. Geophys. Res. – Earth Surface*, 109, F01008, doi:10.1029/2003JF000048, pp. 1-11 (SCI index, IF=2.839) (Geophysical Science: Rank Factor 6/128).
 21. Zimmer, V. L., Stock, G. M., Sitar, N. (2008) Seismic Monitoring of Rock Falls in Yosemite National Park, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
 22. Burtin, A., Bollinger, L., Vergne, J., Cattin, R. (2008) Seismic Detection of Debris Flow in the Himalayas and Their Spatiotemporal Characteristics, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
 23. Moore, J. R., Button, E. A., Loew, S., Gischig, V. (2008) Rockslide Monitoring With Fiber Optic Strain Sensors: Installation and First Results, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
 24. Frueh, W. T., Coyote, S., Lancaster, S. T. (2008) Valley-Bottom Sediment Storage Volumes Determined From LiDAR-Derived Digital Elevation Models and Channel Substrate Mapping, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.
 25. Major, J. J., O'Connor, J. E., Spicer, K. R., Bragg, H. M., Wallick, J. R., Kittleson, R. L., Lee, K. K., Cushman, D., Piatt, D., Tanner, D., Hale, T., Uhrich, M. A., (2008) Event-Based Monitoring of Sediment Flux Following Removal of Oregon's Marmot Dam, American Geophysical Union Fall Meeting 2008, San Francisco, U.S., 15-19 December.

26. Cannon, S. H., C. Gartner, J. E., Michael J. A. (2007) Methods for the Emergency Assessment of Debris-Flow Hazards from Basins Burned by the Fires of 2007, Southern California, USGS open-file report 2007-1384.
27. Iverson, Cosca, LaHusen (1992) Debris-Flow Flume at H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon, USGS open-file report 92-483.
28. Duffy J. D. (2008) Debris Flow Mitigation Using Flexible Barriers, the 58th Highway Geology Symposium, May 2008.