

大規模崩塌災害防治技術與風險地圖建置

Disaster Prevention Technology and Risk Maps for Large-scale Landslide

張志新¹、劉哲欣¹、林聖琪¹、吳亭燁¹、林忠義²、劉嘉騏²、鳳雷²、
蕭玲鳳²、廖泰杉³、陳銘福³、賴君怡³、陳佑杰³、黃泰綸³、陳怡如³

¹ 國家災害防救科技中心

² 台灣颱風洪水研究中心

³ 儀器科技研究中心

摘要

本整合計畫共分為三個部分，分別為儀器科技研究中心之「崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展」、台灣颱風洪水研究中心之「山區定量降雨短時預報技術與預報系統」、以及國家災害防救科技中心之「大規模崩塌災害防治技術與推動策略研擬」的研究課題。

本年度的技術研發主要包括三個部分，監測、降雨預測、以及風險地圖的產製等。首先，監測技術的研發在於提升資料傳輸、資料分析與取得等，成果包括坡地多點感測器模組與通信架構系統可行性技術發展、坡地崩塌區域之快速取像評估系統開發、以及坡地崩塌近景觀測系統之演算法分析與整合等。降雨預測則是提供更高精度及更短預測區間之降雨資料，成果包括雷達資料同化研究成果與改進，以及極短時定量降雨預報作業化版本等。最後，防災地圖的產製，綜合災害歷史紀錄蒐整與分析，並以示範區域進行大規模崩塌潛勢區防災地圖製作，和災害防治推動策略研擬等。

關鍵詞：儀器、近景、雷達資料同化、定量降雨預報、大規模崩塌、防災地圖。

Abstract

This research includes three parts, which are 1) Development of Assessment Instrument and Early Warning System of Collapse Disaster prevention, by Instrument Technology Research Center, ITRC, 2) very short range quantitative precipitation forecast technique and forecast system for the mountain area by Taiwan Typhoon and Flood Research Institute, TTFRI, 3) Promotion on landslide disaster prevention and risk map technology, by National Science and Technology Center for Disaster Reduction, NCDR.

The important achievements in this year are key references for large-scale landslide disaster prevention work, including technology of monitoring, rainfall forecasting, and risk map production. First, the monitoring technology provides improvements on data communication and image acquirement and analysis, such as evaluation of slope

multi-sensor modules and communication system, fast imager identification system in slope collapse area, and real-time close-range image monitor for potential slope collapse region. The rainfall forecasting technology mainly increases resolution and period of forecasting, including radar data assimilation operational version, and short-term quantitative precipitation forecast. Finally, the risk map production technology includes database for large-scale landslide disasters, methodology for landslide disaster affective area estimation, and the operation framework of large-scale landslide disaster prevention.

Keywords : instrument, close-range image, radar data assimilation, quantitative precipitation forecast, large-scale landslide, risk map

一、前言

本計畫遵循著行政院災害防救應用科技方案所擬定之「大規模崩塌災害防治科技」規劃內容，將三個研究中心之研究課題予以整合，進行技術之研發。共包含了，(1)國家實驗研究院儀器科技研究中心之「崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展」研究課題，(2)國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心之「山區定量降雨短時預報技術與預報系統」研究課題，以及(3)行政法人國家災害防救科技中心之「大規模崩塌災害防治技術與推動策略研擬」研究課題。工作目標為建立防災地圖，以及透過整合之技術研發成果，期望能提供未來國內面對大規模崩塌災害防減災之工作參考。

二、崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展

2.1 坡地多點感測器模組與通信架構系統可行性技術發展

實驗數據的分析上，主要分析資料收集站所接收的封包訊息並將資訊統整於圖1。圖1中我們將節點的資料順利到達資料收集站做為一次成功的傳輸，反之沒收到資料當作失敗，並在封包中夾帶封包編號以利我們統計節點總共傳輸的封包數。我們也加入各個節點總共傳輸次數的直條圖，以便觀察各節點是否正常運作。

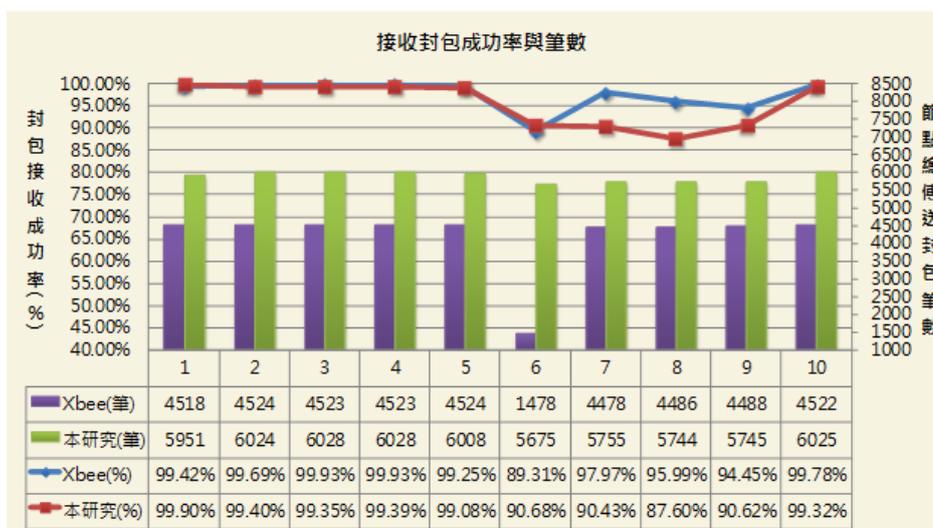


圖1、資料接收站接收的封包成功率與總接收筆數分析圖

從資料接收站接收到封包的成功率來看，我們可以看出在大部分的節點中，節點的傳輸成功率互有高低且差異不到1%，這顯然是很好的現象，因為XBee DigiMesh 模組雖然任意節點皆可以進行低功耗操作，但網路中每隔一段距離後，仍然需要一個節點主動持續監聽網路中是否有新節點要加入，否則網路無法進行擴展；而網路採用新節點被動監聽網路封包的方式來加入網路，這也使得全部的節點進行低功耗，而非XBee DigiMesh的大部分節點進行低功耗。我們認為兼具全節點低功耗功能佔有優勢。

2.2 坡地崩塌區域之快速取像評估系統開發

103年在第二代系統開發上，進一步針對載台強固性、重量及系統性能上，改進與優化；首先是感測器本體選擇部分，由於科技的進步，新型態的全片幅感測器，已經可以捨棄五稜鏡，讓影像直接投射在CMOS上，直接由LCD取景，也就是全片幅式的微單眼相機，不僅把體積縮到極為輕巧，更完整保留了全片幅 DSLR 的專業特性及高ISO畫質表現，跟第一代系統相比，感測器本體重量一口氣從995公克減到416公克，變成一半不到的重量。

機構部分，由於第一代系統四波段感測器部分占了快4公斤的重量，為了減輕系統重量，載台採用鋁管材設計製作，的確是達到了5公斤內的目標，之後經多次的任務執行，在一次的重落地後折損，造成系統損毀，於是在103年的計畫，我們在載台部分採全碳纖維製作，強化剛性，並加上自穩式兩軸穩定雲台，及抗震阻尼，來增進穩定度，如下圖2所示。其系統總重量壓低至2.2公斤，與第一代系統相比減輕了52%的重量，未來在載具的選擇上可以更多元，例如搭載於多旋翼機上使用；以四旋翼為例，在四旋翼機的外尺寸與傳統直升機主旋翼直徑相等的原則下，四旋翼機之載重能力只有傳統單旋翼直升機的一半，但在操控上以四旋翼機較為簡易，在設計及應用上也較有彈性，也是未來應用的主流。



圖2、自穩式兩軸穩定雲台

2.3 坡地崩塌近景觀測系統之演算法分析與整合

在監測小林國小對岸崩塌地之地形變化及有無崩塌現象中，本研究以20131220(冬)與20140625(夏)時隔半年的立體像對，利用本研究提及的方法重建兩時期的數值表面模型，並以差異分析比較是否有崩塌現象發生。圖3中展示兩時期的影像立體對，由影像的變化來看，可發現隔了半年植被生長更為茂密，而這也反映了台灣植物在季節上的變化。另一方面，單純就影像上來看該區域似乎無明顯崩塌現象，因而需透過重建數值表面模型進行差異分析。

透過密匹配得到兩期的視差圖，兩者可說是無明顯變化，但在20140625的視差圖相對粗糙，由其差異亦反應出植被的生長變化。而由表面模型重建及進行差異分析後呈現於圖4，在黑色邊界線之上部呈現許多雜亂現象，這主要是因該地區為天空，其視差值是透過內差得到，因此相當不可靠。而下半部則為主要目標物，可以看到地形上的變化主要是呈現正值，主要也是植被生長造成(紅色區塊)，而在幾個舊有崩塌區(紅圈內，與3(a)紅圈對應)，其地形變化約為零，可說是無崩塌現象之發生。



(a) 20131220 核影像立體對



(b) 20140625 核影像立體對

圖3、前後兩期之核影像立體對

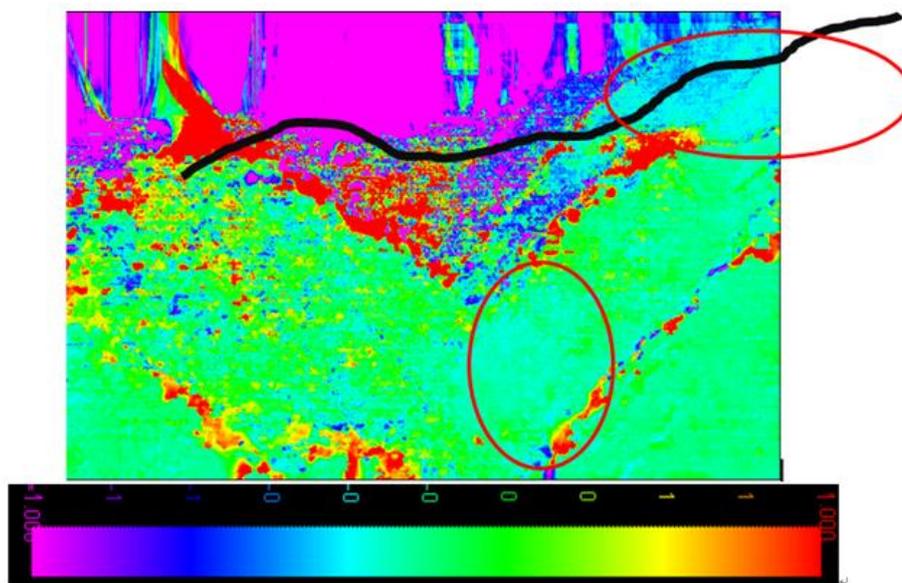


圖4、崩塌地區地形變化

三、山區定量降雨短時預報技術與系統

3.1 雷達資料同化研究成果與改進

本計畫在2013年建置了一套雷達資料同化系統，並透過TAPEX系集實驗平台實際模擬了一整年，並選擇一實驗成員為其對照組，其結果顯示0-6小時之雨量預報，有雷達資料同化的實驗明顯優於無雷達資料同化的實驗，證明雷達資料同化可改進極短期定量降雨預報，但隨著預報時間增加，其優勢逐漸減少。因此在極短時定量降雨預報的需求之下，本計劃在今年度進行了三項主要的研究成果的改進，分別為：(1) 提高模式解析度至3公里；(2) 使用新的背景場誤差協方差矩陣；(3) 修改

同化策略進行快速循環測試。以期能達到極短期定量降雨預報的目的。

首先是提高模式解析度的影響，為符合水文、防災使用端的需求，同時考慮雷達可提供高解析度觀測資料，將模式解析度由三層分別為45/15/5(公里)，提高為二層15/3(公里)。以2010年凡那比颱風為例，在同化雷達回波後，5公里解析度的模式範圍無法立即反映出回波的特徵，而在3公里解析度的模式範圍設定下，可以較快顯示出回波的分佈；5公里模式解析度則要在預報三小時後才會明顯出現回波的特徵。而後進行預報也可以看出預報累積六小時雨量不論是在強降雨的位置或是極值，使用較高模式解析度的雨量預報結果會明顯優於使用較低模式解析度的結果。

本計畫第二項主要的研究內容為，使用新背景場誤差協方差矩陣，原始WRFDA所使用之控制變數，其優點為能透過熱力風關係來建立變數間的相關性，然而在對流尺度下沒有熱力風關係，而其缺點為在求解過程會有邊界條件和平滑的問題。因此本研究使用新的控制變數，其優點為沒有變數轉換的問題，可以透過快速同化循環(rapid update cycle)，使模式在不斷同化觀測資料中達到平衡，而且直接使用u、v作為背景場誤差協方差之控制變數於對流尺度下，可以解析較小尺的觀測擾動，也可避免因為放大長波效應，使得同化雷達資料後，在遠處產生反相位的分析增量，如圖1所示。

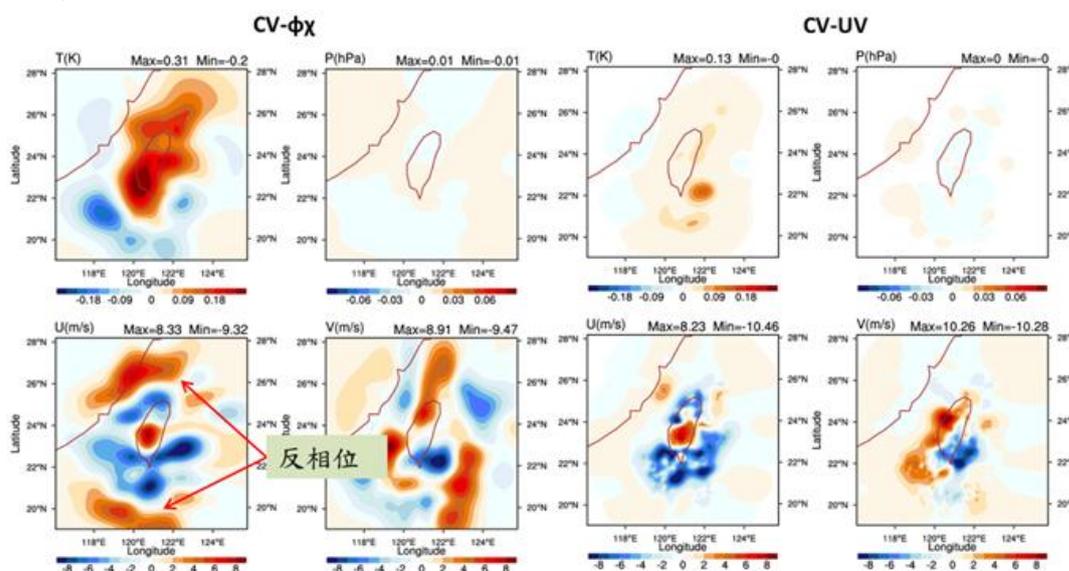


圖1、使用不同背景場誤差變異矩陣之同化分析增量比較圖

第三項研究工作為進行快速循環(rapid update cycle)同化實驗，由於雷達資料可快速進行更新，而且通常對流系統發展相當迅速，因此若可利用多筆雷達資料快速同化進模式中，將有助於分析場的風場和水汽場的調整，本研究分別利用cold start、3小時以及1小時同化策略進行雷達資料同化實驗。利用不同的同化循環策略後的分析場，進行模式的預報，以2012年6月的梅雨個案為例，其預報每小時雨量累積結果如圖3.7所示，從圖中可看出，若能進行快速循環同化，可修正北部的延遲降雨，且對南部降雨預報結果也較佳。

3.2 極短時定量降雨預報作業化版本

本計畫提出修正之雷達資料同化策略，包含改變同化方式由cold start變成30分鐘

快速循環同化，以及逐時進行雷達資料同化，並提供未來1-7小時的定量降雨預報結果，其同化策略示意圖如圖2所示。

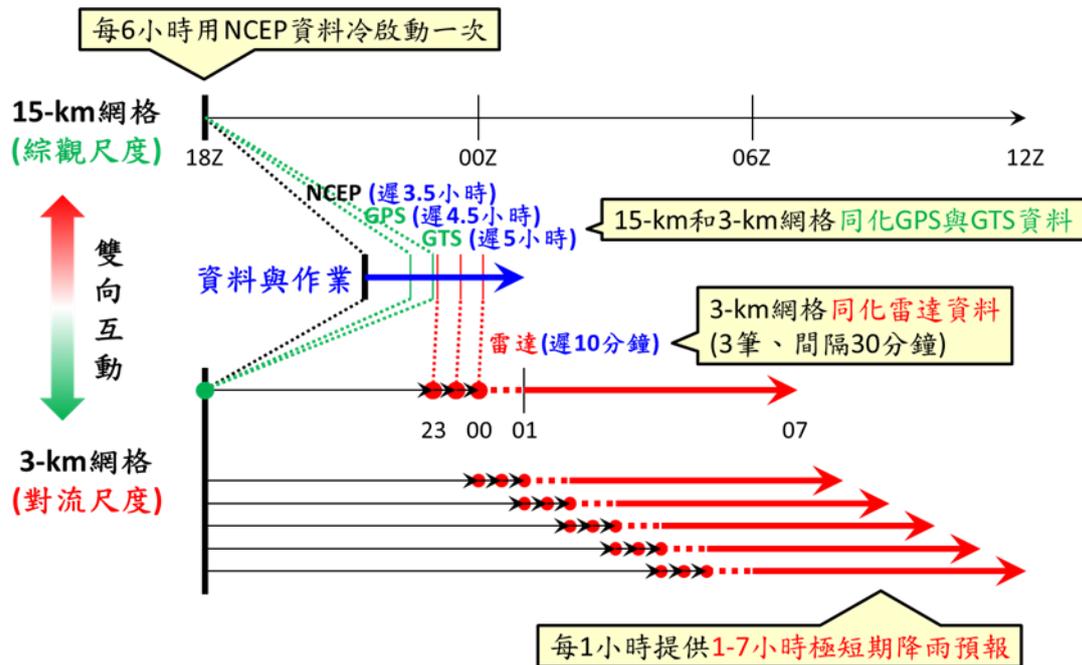


圖2、修正之雷達資料同化策略方案設計示意圖

為配合本總計畫大規模崩塌災害防治技術與風險地圖建置的目的，將研究分析區域選定為小林村區域，然而因為小林村範圍太小，因此本研究選定其附近16個模式網格點，來進行雨量校驗的工作。另外，本計畫為提供下游應用端有關土石流預警及道路安全性評估等研究，也選定了近年來易致災的蘇花公路段，進行模式的預報和校驗。在分析個案的挑選方面，本研究共選定了梅姬、奈格、蘇拉、桑達、南瑪都、蘇力、康芮颱風，以及2012年5月份的梅雨個案，總共預報時間為220個預報時段，進行系統性的評估有無雷達資料同化，對於降雨預報的影響。將每個預報時間之1-7小時累積降雨，與QPESUMS觀測降雨做比較，結果顯示有經過雷達資料同化的降雨預報皆優於無雷達資料同化的結果，尤其在大雨的時候更為明顯。

本計畫已完成新版模式範圍設定，以及同化策略設計，同時也在計算設備上建置完成準作業化系統，逐時提供未來1-7小時的降雨預報資訊。研究成果顯示雷達資料同化的確具有改進極短期定量降雨預報的能力，未來也會持續改進同化技術，並評估使用不同同化方法，例如：系集卡曼濾波、四維變分資料同化等方法，進行系統性的評估和測試，期望能進一步得到更好的定量降雨預報資訊。而本計畫也會將此研究成果，提供給水文端的使用者，做為河道演算、逕流模擬、邊坡穩定分析、都市淹水模擬等等相關的研究工作所需之雨量資訊。

四、大規模崩塌災害防治技術與推動策略研擬

4.1 災害歷史紀錄蒐整與分析

此部分工作最主要的目的有兩項，其一是建立歷史重大崩塌災害蒐整機制，另

外則是有關大規模崩塌基本資料的蒐集與分析。

4.1.1 建立歷史重大崩塌災害蒐整機制

災防科技中心目前對於坡地災害的歷史資料蒐整主要的來源有災防科技中心建置的坡地災害資料庫、水保局的重大土石災情報告、地調所的山崩災害歷史資料庫等。災防科技中心的坡地災害資料庫，最主要是彙整1990-2014年約10,000筆全臺坡地災害紀錄。資料來源包括地質調查報告書、水保局土砂災害記錄、鐵路局與公路局山區交通道路通阻及搶修記錄、消防單位報案記錄、各災害事件專案報告書、以及各報章雜誌記載等資料。其中坡地災害類型分成土石流災害、邊坡崩塌、落石、路基崩塌、橋梁受損及其他等共計六類。除了近期約24年的歷史資料外，也完成彙整及數化國科會早期（民國56年至81年期間），全台251處重大山崩災害事件之詳細資料。

4.1.2 大規模崩塌基本資料蒐集

大規模崩塌基本資料蒐集方面，本年度除地調所提供非莫拉克受災地區潛在大規模崩塌地區圖資外，也彙整年度各單位相關成果，將其年度具體成果分成潛勢評估技術、預警評估技術、即時監測技術、減災管理操作、重點區域評估技術、部會坡地災害管理系統、基礎調查資料、平台建置等8大項技術，共20個細項技術。

4.2 大規模崩塌潛勢區防災地圖製作之示範

4.2.1 防災地圖製作流程

參考內政部（2014）防災地圖繪製流程，對於潛在大規模崩塌災害之防災地圖製作，在使用者、地圖圖元種類、以及適當比例尺決定後，仍需要現地查證，並將目前之地形地貌。2009年莫拉克颱風後，環境變化極大，除河道變寬、河心改變、河道邊坡沖蝕、邊坡上土方運移等各種現象，基本地形資料與災害潛勢圖資產製年份前後，會與現況有所不同。因此，製作潛在大規模崩塌災害之防災地圖流程如圖1所示。

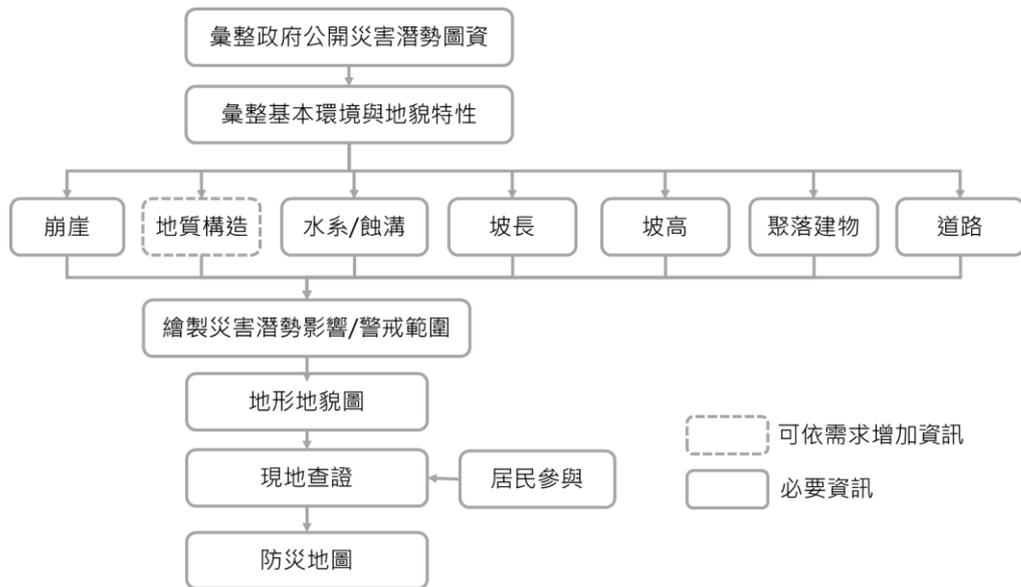


圖1、大規模崩塌災害潛勢區之防災地圖製作流程圖

4.2.2 嘉義縣竹崎鄉文峰聚落示範區操作

文峰聚落位於嘉義縣竹崎鄉，聚落內之聯外道路嘉119-1縣道，因2013年潭美颱風單日累積雨量達300mm以上之雨量，發生嚴重道路將近有1m隆起。同時，雖然道路與建築物已修復，但道路仍有陷落、民宅門窗開裂、以及排水設施破裂損毀與錯移現象。經由現地查證後所編修之現地調查圖，套疊社會經濟圖資，例如建築物、供水系統、避難收容所、道路等資料後，完成文峰聚落防災地圖，如圖2所示。防災地圖保留地貌資訊，但不將地質構造與地層資料納入防災地圖內。另外，文峰聚落經由嘉義縣119-1道即可前往竹崎鄉市區，遠離警戒區域則災害潛勢威脅低，若硬性選擇聚落最近之避難收容所（對岸之金獅社區活動中心），反而所面對環境災害潛勢衝擊較大，未來可進一步可與當地居民針對聚落災害防救災整備計畫，針對避難路線、避難處所與防救災資通訊網路進行確認，以成為真正且適合居民之防災地圖。

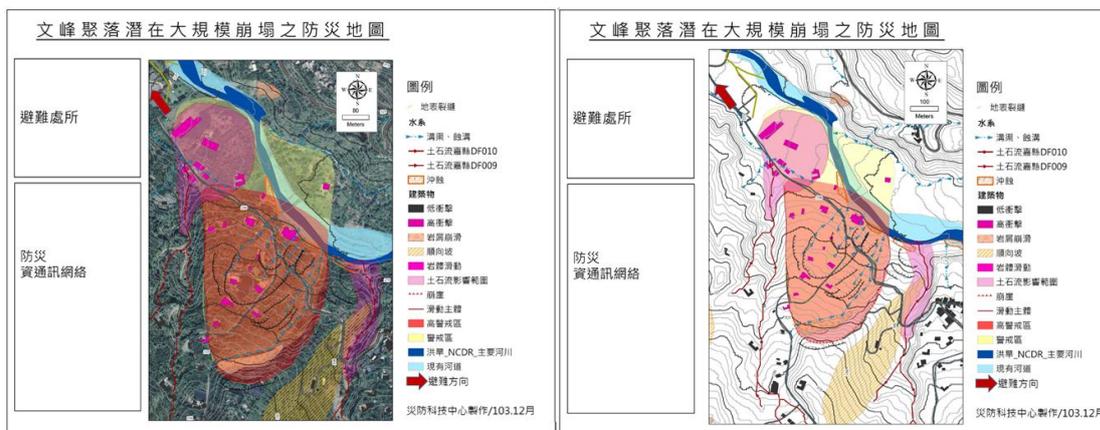


圖2、文峰聚落防災地圖（底圖左為航空照片，右為地形地貌）

4.3 大規模崩塌災害防治推動策略研擬

國家災害防救科技中心於大規模崩塌災害防治議題所負責的相關工作，主要是依據99年10月20日第15次中央災害防救會報決議，「在大規模崩塌災害潛勢調查分析與未來應規劃推動之重點工作項目，請國科會（現為科技部）及國家災害防救科技中心邀集相關單位研商後，提出規劃推動方式。未來政府組織再造後，交由環境資源部辦理。」。因此在環資部成立之前，災防科技中心主要依據第19次中央災害防救會報通過之「大規模崩塌災害防治推動策略規劃」規劃報告（國家災害防救科技中心，2012）中，提出的短、中、長期的重點工作項目，並將推動流程分成全國流域尺度、集水區尺度及山坡地坡面尺度等三個層級來進行。災防科技中心除了積極建立與各相關部會（內政部：建築研究所、營建署；交通部：公路總局、高速公路局、運輸研究所；經濟部中央地質調查所；農業委員會：林務局、水保局；原住民委員會）的聯繫，且召開多次專家學者會議與部會協商會議，以確保相關工作之推動。

本年度（103年）的工作重點主要有3項，分別是6月舉辦「大規模崩塌災害論壇暨研發成果研討會」、8月完成「大規模崩塌災害防治行動綱領」初稿、11月與行政院災害防救辦公室共同主辦「103年莫拉克重建區潛在大規模崩塌地區訪視」等相關工作。

五、結論與建議

5.1 崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展

1.多物理量測型態感測器與感測器網路實驗室與戶外驗證可行,但是長期野外測試多物理量測型態感測器與感測器網路還是需要繼續進行,以累積可靠度與經驗修正。

2.多物理量測型態感測器與感測器網路整合成功,實現一套省電型無線多物理量測型態感測器感測網路系統,其效能與商業化的IEEE 802.15.4 模組做比較有較高之穩定、便宜、低工耗與容易使用。

3.希望藉由多物理量測型態感測器與感測器網路整合,激盪出山裏社區型崩塌災害評估儀器與預警系統技術之防災新策略。

藉由103年儀科中心三項主要成果,希望未來能夠再透過相關計畫持續成果精進與改良,發展更完善之本土化防災儀器與相關實際應用產品,以提昇台灣在防災與儀器產業之優勢。

5.2 山區定量降雨短時預報技術與系統

本計畫在TAPEX系集實驗平台的架構下,執行雷達資料同化一整年的時間,結果顯示有經過雷達資料同化的結果,對於模式預報0-6小時的雨量預報結果,比沒有經過雷達資料同化的結果有改進,然而隨著預報時間的拉長,雷達資料同化優勢漸減。然而在TAPEX的實驗下,模式預報前六小時雨量不足以提供即時預報所需,因此本研究為了改進且提供極短時定量降雨預報的結果,進行了三項主要模式發展的工作。分別為:提高模式解析度至3公里、使用新的背景場誤差協方差矩陣,以及修改同化策略進行快速循環測試。

研究結果顯示此三種更新方法皆能得到極短期定量降雨預報結果的改進，因此本研究利用上述方法，配合有效的計算資源，研擬了一套新的同化策略，目的為逐時提供未來1-7小時之降雨預報結果，同時也考慮了高模式解析度以及快速同化循環的優勢，並選定7個颱風及一場梅雨個案進行大量的評估及測試，在總共220個預報時間的結果之中，有經過雷達資料同化的定量降雨預報明顯比沒有經過雷達資料同化的降雨為佳，尤其在大雨的部分優勢更為明顯。

未來本中心也會持續改進同化技術，並評估使用不同同化方法，例如：系集卡曼濾波、四維變分資料同化等方法，進行系統性的評估和測試，期望能進一步得到更好的極短期定量降雨預報資訊。而本計畫也會將此研究成果，提供給水文端的使用者，做為河道演算、逕流模擬、邊坡穩定分析、都市淹水模擬等等相關的研究工作所需之雨量觀測資訊。

5.3 大規模崩塌災害防治技術與推動策略研擬

本年度大規模崩塌災害防治技術與推動策略研擬之工作項目有災害歷史紀錄蒐整與分析、大規模崩塌潛勢區防災地圖製作之示範及大規模崩塌災害防治推動策略研擬等3項。

在災害歷史紀錄蒐整與分析部分，主要彙整災防科技中心建置的坡地災害資料庫、水保局的重大土石災情報告及地調所的山崩災害歷史資料庫等，建立歷史重大崩塌災害蒐整機制。另外則是蒐集地調所、水保局等單位所產置之大規模崩塌圖層資料，並將其年度具體成果分成潛勢評估技術、預警評估技術、即時監測技術、減災管理操作、重點區域評估技術、部會坡地災害管理系統、基礎調查資料、平台建置等8大項技術，共20個細項技術。

大規模崩塌潛勢區防災地圖製作之示範方面，選定嘉義縣竹崎鄉文峰聚落、高雄市甲仙區小林二村聚落、以及屏東縣霧臺鄉大武部落等，具有大規模崩塌潛勢之聚落為範例，建立大規模崩塌潛勢區之聚落防災地圖流程，利用防災地圖詮釋資料，考量使用者之目的，決定地圖之基本圖元種類。同時，配合政府公開災害潛勢資料之製作比例尺，建議適當之展示地圖比例尺，完成大規模崩塌災害潛勢區之防災地圖。

最後於大規模崩塌災害防治推動策略研擬部分，目前的運作機制主要依據第15次中央災害防救會報決議，於環境資源部成立前，由國科會（現為科技部）及國家災害防救科技中心邀集相關單位研商後，提出規劃推動方式。而災防科技中心的操作方式主要以第19次中央災害防救會報通過之「大規模崩塌災害防治推動策略規劃」規劃報告中，提出的短、中、長期的重點工作項目，定期舉辦專家學者暨部會署的研商會議，藉此蒐整各單位成果及建議各單位的工作項目，進行滾動式的修正，達到各項工作整合的目的。本年度最主要完成舉辦大規模崩塌災害論壇暨研發成果研討會、研擬大規模崩塌災害防治行動綱領、以及舉辦103年莫拉克重建區潛在大規模崩塌地區訪視等工作。而相關工作於短時間內經過各部會署及許多專家學者的努力，部分重點工作及目標已逐漸達成共識，並開始有初步的成果產出。然而有許多

的工作推動仍處於起步階段，許多短、中、長期的工作或階段性的任務尚待完成，希望藉由各界的共同努力，能將大規模崩塌災害防治工作順利的持續推動，將相關坡地災害對於生命財產的衝擊降至最低。

參考文獻

1. 水土保持局 (2008),「97 年全台重大土石災情總報告」。
2. 尹立中、簡連貴、劉哲欣 (2014),「應用定率法推估降雨引致淺層崩塌警戒值之研究-以高屏河流域為例」, 103 年度農業工程研討會, 高雄市。
3. 尹立中、劉哲欣、吳亭燁 (2013),「降雨引致淺層崩塌物理模式分析尺度探討-以高屏溪美輪山子集水區為例」, 102 年水土保持學術研討會, 台中市。
4. 張志新、劉哲欣、吳亭燁、施虹如、尹立中、李欣芳 (2014),「102 年集水區上游坡地模式分析、資料串接與境況模擬」, 國家災害防救科技中心技術報告。(NCDR102-T07)。
5. 劉哲欣、吳亭燁、林欣弘、李宗融、尹立中 (2014),「颱洪期間坡地崩塌警戒值之推估-以高雄市六龜區為例」, 水利署與 NCDR 防減災與氣候變遷合作協議成果發表會, 臺北市。
6. Wei Ye; Heidemann, J.; Estrin, D., An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, INFOCOM (2002). Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE , vol.3, no., pp. 1567- 1576 vol.3.
7. Tijs van Dam and Koen Langendoen. (2003). An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '03). ACM, New York, NY, USA, 171-180.
8. Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson, and Richard Han. (2006). X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '06). ACM, New York, NY, USA, 307-320.
9. Sha Liu; Kai-Wei Fan; Sinha, P.; , CMAC: An Energy Efficient MAC Layer Protocol Using Convergent Packet Forwarding for Wireless Sensor Networks, Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, (2007). SECON '07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on , vol., no., pp.11-20, 18-21.
10. Injong Rhee; Warriar, A.; Aia, M.; Jeongki Min; Sichitiu, M.L.; , Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks, Networking, IEEE/ACM Transactions on , vol.16, no.3, pp.511-524, June 2008
11. Al-Karaki, J.N.; Kamal, A.E.; , Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey, Wireless Communications, IEEE , vol.11, no.6, pp. 6- 28, Dec. 2004.

12. ZigBee Document 053474r17, ZigBee Pro, ZigBee Specification. ZigBee Alliance. 2008.
13. Huang-Chen Lee, Towards a general wireless sensor network platform for outdoor environment monitoring. *Sensors*, 2012 IEEE , vol., no., pp.1,5, 28-31 Oct. 2012
14. D.S.J. De Couto, D. Aguayo, B.A. Chambers, R. Morris, Performance of multihop wireless networks: Shortest path is not enough, in: *Proc. of the First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-I)*, October 2002.
15. D.S.J. DeCouto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris, A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, in: *Proc. of the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2003, pp. 134–146.
16. K.-W. Chin, J. Judge, A. Williams, R. Kermode, Implementation experience with MANET routing protocols, *SIG-COMM Comput. Commun. Rev. (CCR)* 32 (5) (2002) 49–59.