

極端氣候的挑戰 —大規模崩塌災害之預警

蔡元融 國立成功大學防災研究中心 / 創新育成組組長

一、前言

2009 年 8 月莫拉克颱風導致小林村獻肚山崩塌造成 491 人死亡（圖 1），此事件不但在國內受到矚目與重視外，亦對國際社會造成衝擊。



圖 1 莫拉克颱風小林村大規模崩塌災害（農村水保署，2011）

本事件在臺灣中南部地區連續四天創下總雨量 3,000 公釐的降雨紀錄（圖 2），不但是前所未見之極端紀錄，也是誘發大規模崩塌、複合型災害等不同型態土砂災害（圖 3）之主要原因。

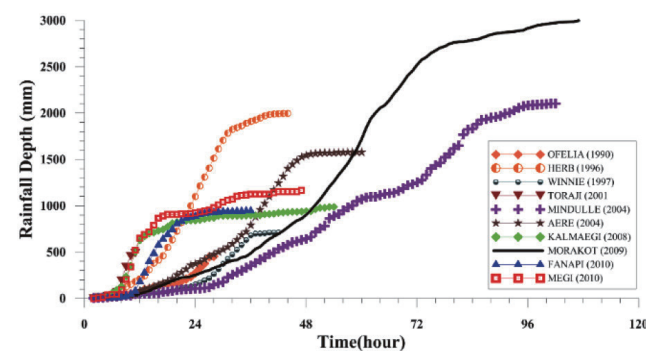


圖 2 莫拉克颱風與其他重大事件累積雨量比較（Chen *et al.* 2011）



圖 3 莫拉克颱風誘發之大規模崩塌及衍生災害（農村水保署，2015）

像小林村大規模崩場所造成的土砂災害情勢，不僅造成該區域之重大災害，也使得現有的土石流警戒、預報與應變機制面臨考驗，未來恐對臺灣山地及坡地聚落造成嚴重的災害威脅，實有必要及早研擬因應對策，以降低災害可能發生之衝擊。

農村發展及水土保持署（時為水土保持局）根據莫拉克風災後地質調查及礦業管理中心（時為地質調查所）調查資料為基礎，提出「氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫」（圖 4），計畫以軟體防災策略為主，針對可能之大規模崩塌災害，提出影響範圍劃設、雨量警戒基準訂定及疏散避難計畫研擬等風險避免手段，希冀在發生機率不確定的情形下，透過危險區之劃設與颱風豪雨期間的疏散撤離或是交通管制等手段，讓民眾遠離可能的災害風險。

二、大規模崩塌災害預警機制

大規模崩塌造成的嚴重災情，在於崩塌開始發生後的一瞬間，整個村落，連同原本預計安

全的避難場所，全部都毀於一旦，幾乎沒有任何逃生及營救的機會，因此事先掌握可能受大規模崩塌災害影響之範圍與對象，並訂定合適之警戒基準值，是預警機制之前置工作。而如何取得影響範圍劃設成果以及警戒基準值則是預警機制中重要工作。以下分別說明。

2.1 大規模崩塌影響範圍劃設

大規模崩塌區之影響範圍係指在該崩塌發生後，其崩塌現象可能對坡地或保全對象有衝擊致災之虞的區域，一般包含潛勢區及影響範圍（圖 5），其中保全對象包含人員、建築物、橋梁及公共設施等。當大規模崩塌發生後，依影響範圍之堆積型態可分為重力堆積型、土石流型以及堰塞湖型等三類（圖 6），其劃設方法可參考「大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設作業流程與方法」（農村水保署，2023）進行。

2.2 大規模崩塌雨量警戒基準值訂定

當坡面受到重力影響後，會逐漸產生變形，在邊坡表面會開始出現各類微地形特徵，這

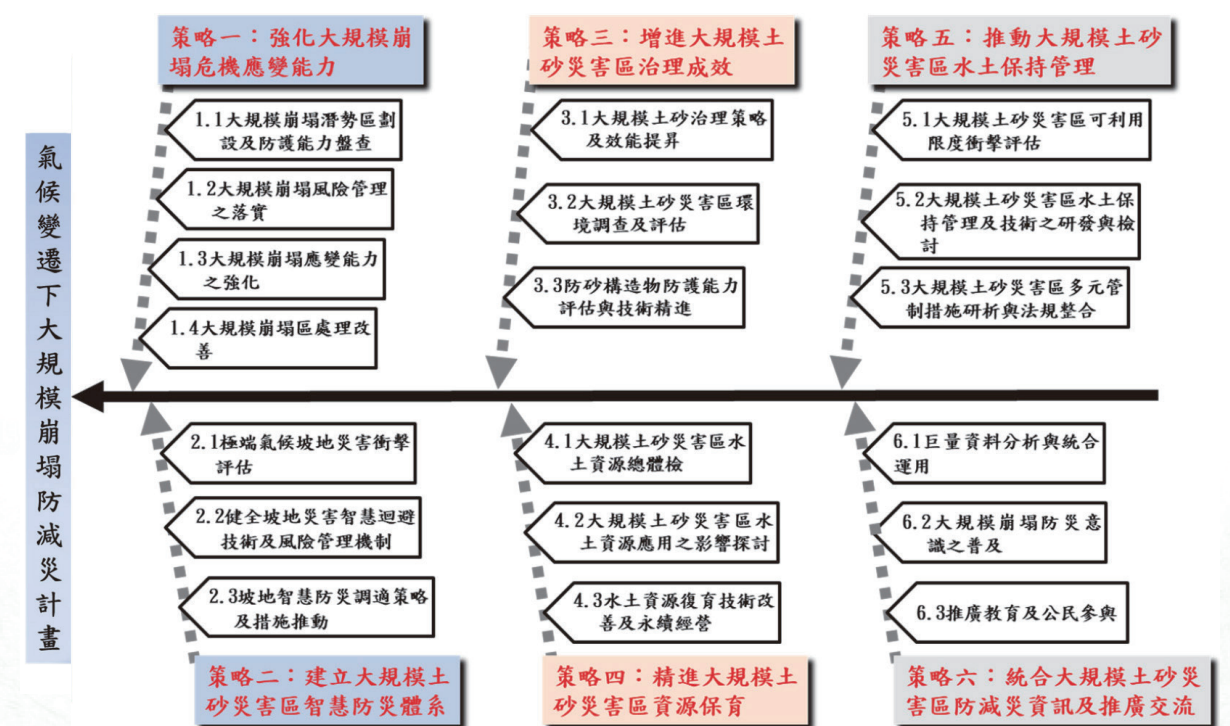


圖 4 氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫（農村水保署，2016）



圖 5 大規模崩塌影響範圍示意圖

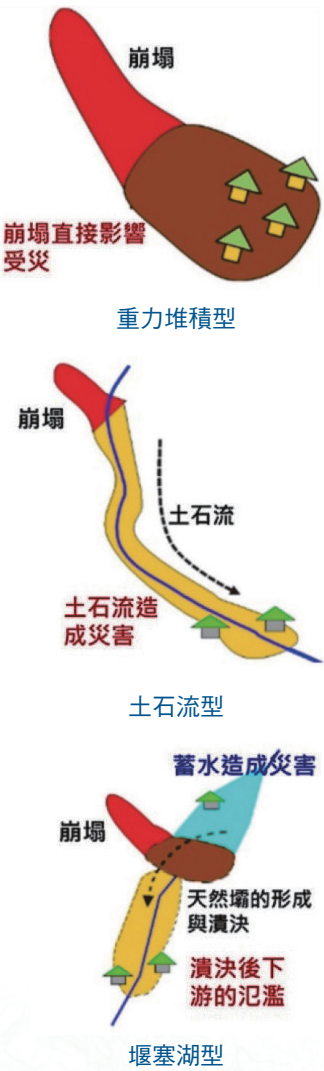


圖 6 大規模崩塌堆積型態示意圖

之增加（變形狀況），這個過程一般會用應變—時間曲線來表示（圖 7）。其中變形量之變化可依照變形速度分為減速變形、等速變形及加速變形等階段。

因此警戒系統之建立應針對啟動以及持續變形等不同階段進行考慮，一般來說啟動條件之判定，可透過強降雨或地震事件進行評估，主要是做為事件發生與否之判斷指標。而後續變形則可利用各類長期現場監測方法來量化潛勢區內變形狀況，提供警戒發布之參考，為變形狀況之評估往往需要較長之觀測時間較能有明確之判斷依據。因此在實務可操作性之考量下，農村水保署現階段以雨量做為警戒發布之主要參考。

大規模崩塌發生雨量分析，主要係根據既有發生案例統計資料進行分析，農村水保署利用寬頻地震網得到之訊號進行分析，從民國 90 ~ 105 年期間之降雨事件找出 28 筆具體知道發生時間的新生大規模崩塌案例（表 1），蔡等人利用其發生時刻對應之累積雨量（圖 8 藍點）進行分析，建立大規模崩塌發生臨界雨量線（圖 8 藍線），做為評估潛勢區發生條件依據。其中規模崩塌發生臨界雨量線之橫軸為無因次坡度（ ϕ/θ ， ϕ 為等價摩擦角、 θ 為平均坡度），縱軸為無因次雨量（ R/D ， R 為累積雨量、 D 為平均厚度）。這兩組無因次參數主要係參考邊坡穩定分析使用之安全係數（S.F., Safety Factor，再進行無因次分析後求得 (Tsai *et al.* 2021)。

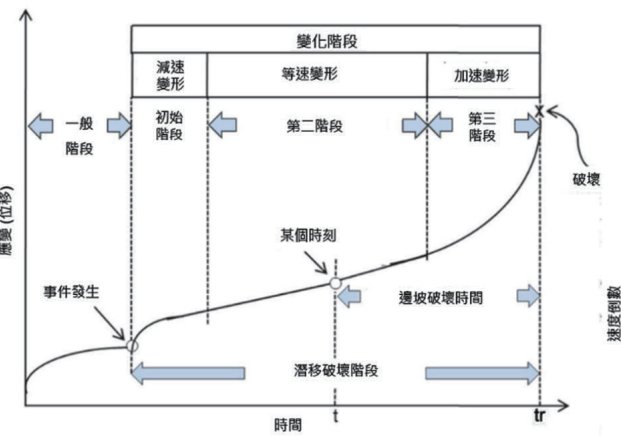


圖 7 坡面破壞應變時間曲線（修改自 齊藤與上澤，1966）

些特徵也是目前潛勢區調查的重要參考因子。當坡面有潛變出現後，持續受到外力作用下，變形量將持續增加，而邊坡內破壞面亦開始發育。在重大事件發生時（啟動條件）都會誘發其變形量

表 1 已知發生時間之大規模崩塌案例

流水號	X 坐標	Y 坐標	崩塌面積 (公頃)	發生時間	流水號	X 坐標	Y 坐標	崩塌面積 (公頃)	發生時間
1	221,038	2,527,655	18.0	2005/7/21 14:33	15	226,572	2,503,010	15.0	2009/8/9 07:00
2	267,391	2,668,919	12.0	2006/6/10 00:53	16	223,892	2,576,310	15.0	2009/8/9 07:00
3	249,909	2,666,416	89.0	2008/9/18 02:50	17	239,647	2,594,840	15.0	2009/8/9 05:00
4	250,651	2,635,009	10.0	2008/7/19 05:30	18	237,754	2,564,220	14.0	2009/8/9 00:00
5	230,045	2,496,130	19.0	2009/8/9 17:00	19	226,070	2,568,150	351.0	2009/8/9 10:00
6	230,879	2,495,500	238.0	2009/8/9 17:00	20	214,723	2,562,650	249.0	2009/8/9 06:00
7	225,368	2,578,330	142.0	2009/8/10 12:00	21	226,036	2,569,920	81.0	2009/8/9 10:00
8	220,761	2,511,210	130.0	2009/8/9 02:00	22	216,424	2,566,150	61.0	2009/8/9 09:00
9	227,997	2,600,900	88.0	2009/8/9 02:00	23	221,391	2,555,820	52.0	2009/8/9 06:00
10	222,484	2,498,510	74.0	2009/8/9 04:00	24	216,291	2,545,210	15.0	2009/8/9 04:00
11	241,026	2,580,720	40.0	2009/8/8 16:00	25	216,996	2,534,220	11.0	2009/8/8 10:00
12	227,011	2,501,960	32.0	2009/8/9 07:00	26	214,726	2,567,890	10.0	2009/8/9 09:00
13	226,436	2,500,800	26.0	2009/8/9 07:00	27	288,268	2,694,855	19.0	2012/8/3 09:02
14	219,644	2,545,590	23.0	2009/8/8 15:00	28	244,524	2,626,270	25.0	2012/8/3 03:00

利用已知發生時間案例建立臨界雨量線後，並蒐集 79 筆大規模崩塌案例（圖 8 紅點）進行驗證，確定臨界雨量線之合理性。同時配合疏散避難準備之考慮，將發生臨界雨量轉換為大規模崩塌發生警戒雨量線，提供雨量警戒值設定之參考（圖 9）。

2.3 大規模崩塌災害警戒發布機制

大規模崩塌警戒發布採雨量為主、現地監

測為輔，經綜合研判後適時發布紅黃色警戒。有關雨量警戒為避免與現行土石流應變方式差異過大，造成民眾誤解，增加災害管理成本，考量現行土石流防災應變管理方法，依據大規模崩塌潛勢區與土石流潛勢溪流空間位置關聯性以及保全對象重疊性，將大規模崩塌潛勢區分成兩類（圖 10），警戒發布方式依類型實施。

其中第 1 類型為大規模崩塌保全對象與土石流潛勢溪流保全對象有重疊者，警戒之發布採與

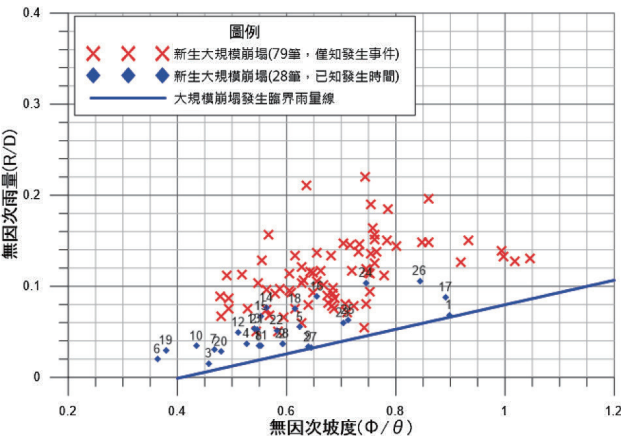


圖 8 大規模崩塌發生臨界雨量線

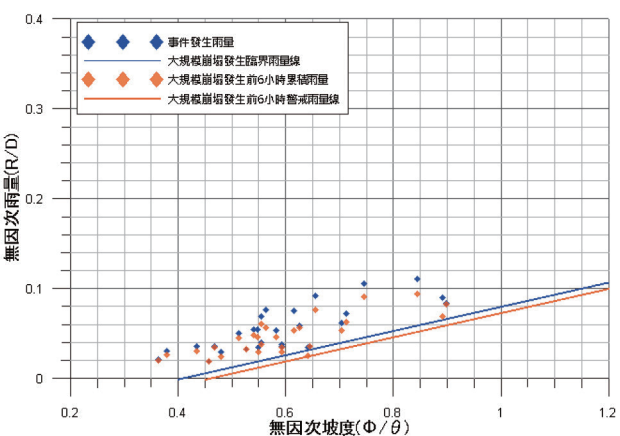
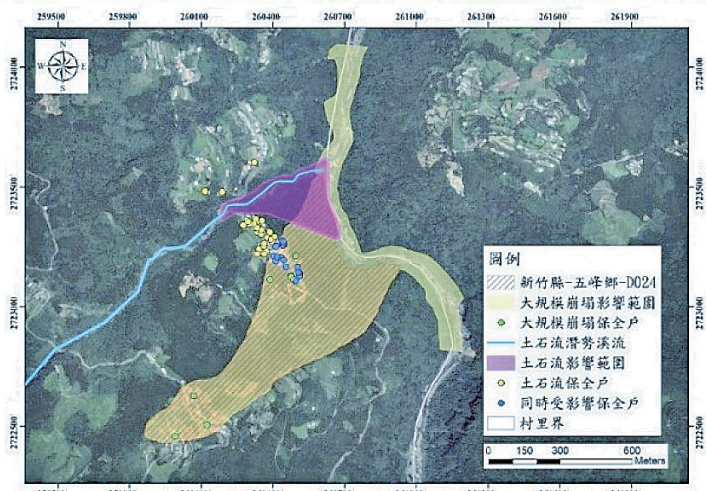
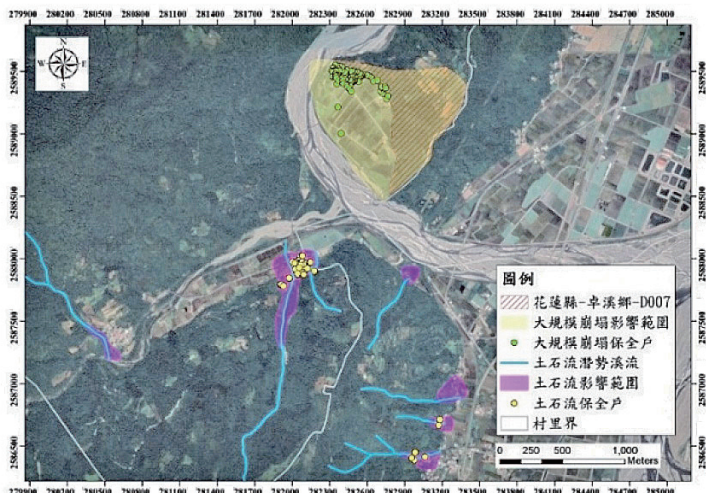


圖 9 大規模崩塌警戒雨量線



第 1 型大規模崩塌警戒



第 2 型大規模崩塌警戒

圖 10 大規模崩塌警戒分類

土石流一併發布紅黃警戒；第 2 類型為大規模崩塌保全對象與土石流潛勢溪流保全對象無重疊者，以各處大規模崩塌雨量警戒值並參考其現地監測值綜合考量研判後，發布紅黃色警戒。雨量警戒發布機制如圖 11。

三、大規模崩塌雨量警戒發布紀錄

3.1 歷年警戒發布紀錄

自 110 年農村水保署將大規模崩塌災害納入警戒發布機制後，逐年增加警戒發布區數量，至 112 年共有 13 場颱風事件發布警戒，各年度警戒發布情形說明如下。

110 年共有 6 場事件發布大規模崩塌警戒，在 12 處優先辦理區均有警戒發布（表 2），其中有 3 處發布黃色警戒、9 處發布紅色警戒，其中屏東縣 - 來義鄉 -T001 發布次數最多，共發布紅色警戒 2 次、黃色警戒 1 次，也是最早發布大規模崩塌警戒之地區。

111 年則有 3 場事件發布大規模崩塌警戒，共有 4 個潛勢區接收到警戒資訊（表 3），分別為新竹縣尖石鄉秀巒村（秀巒）、新竹縣尖石鄉梅花村、新竹縣五峰鄉

表 2 民國 110 年大規模崩塌警戒發布紀錄

事件名稱	警戒發布情形	潛勢區名稱	警戒類型	疏散避難狀況
0621 豪雨 (06/21 ~ 06/23)	黃色警戒 1 處	屏東縣 - 來義鄉 -T001	1	無
烟花颱風 (07/21 ~ 07/24)	紅色警戒 2 處	新竹縣 - 尖石鄉 -D052	1	有
		新竹縣 - 五峰鄉 -D024		
0731 豪雨 (07/31 ~ 08/03)	黃色警戒 1 處	嘉義縣 - 竹崎鄉 -T003	1	無
	紅色警戒 2 處	高雄市 - 茂林區 -D048	1	有
		屏東縣 - 來義鄉 -T001		
盧碧颱風暨 0806 水災 (08/04 ~ 08/09)	紅色警戒 4 處	嘉義縣 - 竹崎鄉 -T003	1	無
		臺中市 - 和平區 -D016	1	有
		南投縣 - 國姓鄉 -T002		
		高雄市 - 茂林區 -D048		
		屏東縣 - 來義鄉 -T001		
燦樹颱風 (9/11 ~ 9/12)	黃色警戒 2 處	臺東縣 - 大武鄉 -D021	1	有
		臺東縣 - 大武鄉 -D022		
1013 豪雨 (10/13 ~ 10/14)	紅色警戒 3 處	臺東縣 - 延平鄉 -T002	1	有
		臺東縣 - 延平鄉 -T001		
		花蓮縣 - 卓溪鄉 -D007		

表 3 民國 111 年大規模崩塌警戒發布紀錄

事件名稱	警戒發布情形	潛勢區名稱	警戒類型	疏散避難狀況
軒嵐諾颱風 (09/02 ~ 09/04)	黃色警戒 3 處	新竹縣 - 尖石鄉 -T001	1	有
		新竹縣 - 五峰鄉 -D024	1	有
		桃園市 - 復興區 -T002	2	－
	紅色警戒 1 處	新竹縣 - 尖石鄉 -D052	1	有
梅花颱風 (09/11 ~ 09/13)	紅色警戒 2 處	新竹縣 - 尖石鄉 -T001	1	有
		桃園市 - 復興區 -T002	2	－
尼莎颱風 (10/15 ~ 10/18)	黃色警戒 1 處	新竹縣 - 尖石鄉 -T001	1	無
	紅色警戒 1 處	桃園市 - 復興區 -T002	2	－

大隘村、以及桃園市復興區華陵里（光華），秀巒村因有局部崩塌發生狀況，因此在軒嵐諾颱風時雖然僅發布黃色警戒，還是進行疏散撤離作業。

112 年計共有 4 場颱風事件包含杜蘇芮、卡努、海葵以及小犬颱風（表 4），其中 18 處潛勢區有大規模崩塌警戒發布紀錄，杜蘇芮颱風有 3 處潛勢區發布紅色警戒，5 處黃色警戒；卡努颱風共有 5 處潛勢區發布警戒，1 處紅色警戒，4 處黃色警戒，其中較值得關注是南投縣 - 仁愛鄉 -D066 為第一起發布紅色警戒的第 2 類型潛勢區；海葵颱風共計有 14 處潛勢區發布警戒，其

中 2 處有到達紅色警戒發布之標準；小犬颱風共有 8 處潛勢區發布黃色警戒。

3.2 潛勢區狀況記錄

除前開警戒發布狀況記錄外，也針對各崩塌潛勢區之活動狀況進行記錄，其中桃園市 - 復興區 -T002 及新竹縣 - 尖石鄉 -T001 兩處潛勢區有明顯活動發生，且發生時間均未有明顯降雨。

首先為桃園市 - 復興區 -T002（光華）潛勢區，潛勢區面積 12.3 公頃，本地區長期有邊坡滑動問題，本區自民國 107 年啟動調查，並投入

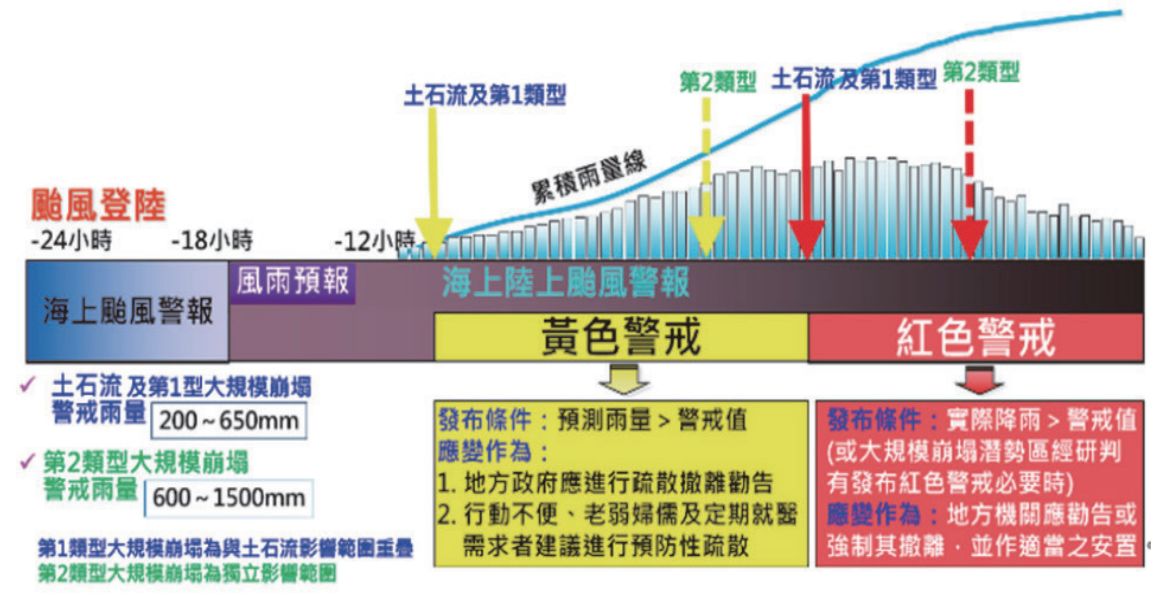


圖 11 大規模崩塌雨量警戒發布示意圖

表 4 民國 112 年大規模崩塌警戒發布紀錄

事件名稱	警戒發布情形	潛勢區名稱	警戒類型	疏散避難狀況
杜蘇芮颱風 (07/26 ~ 07/29)	黃色警戒 5 處	屏東縣 - 來義鄉 -T001	1	有
		臺東縣 - 金峰鄉 -D002	1	有
		臺東縣 - 大武鄉 -D021	1	有
		臺東縣 - 大武鄉 -D022	1	有
		花蓮縣 - 卓溪鄉 -D010	1	有
	紅色警戒 3 處	臺東縣 - 延平鄉 -T001	1	有
		臺東縣 - 延平鄉 -T002	1	有
		花蓮縣 - 富里鄉 -T004	1	有
卡努颱風 (08/03 ~ 08/05)	黃色警戒 4 處	臺中市 - 和平區 -D016	1	無
		高雄市 - 六龜區 -T001	1	無
		嘉義縣 - 竹崎鄉 -T002	1	無
		嘉義縣 - 竹崎鄉 -T003	1	無
	紅色警戒 1 處	南投縣 - 仁愛鄉 -D066	2	有
海葵颱風 (09/06 ~ 09/05)	黃色警戒 12 處	新北市 - 汐止區 -D003	2	有
		桃園市 - 復興區 -T002	2	無 (主要影響為道路)
		新竹縣 - 尖石鄉 -T001	1	有
		高雄市 - 六龜區 -T001	1	無
		高雄市 - 茂林區 -D048	1	有
		屏東縣 - 來義鄉 -T001	1	有
		臺東縣 - 延平鄉 -T001	1	有
		臺東縣 - 延平鄉 -T002	1	有
		臺東縣 - 金峰鄉 -D002	1	有
		臺東縣 - 大武鄉 -D021	1	有
		臺東縣 - 大武鄉 -D022	1	有
		花蓮縣 - 玉里鎮 -D018	2	無
	紅色警戒 2 處	花蓮縣 - 卓溪鄉 -D010	1	有
		花蓮縣 - 富里鄉 -T004	1	有
小犬颱風 (10/04 ~ 10/06)	黃色警戒 8 處	屏東縣 - 來義鄉 -T001	1	有
		臺東縣 - 延平鄉 -T001	1	有
		臺東縣 - 延平鄉 -T002	1	有
		臺東縣 - 金峰鄉 -D002	1	有
		臺東縣 - 大武鄉 -D021	1	無
		臺東縣 - 大武鄉 -D022	1	無
		花蓮縣 - 卓溪鄉 -D010	1	有
		花蓮縣 - 富里鄉 -T004	1	有

相關治理工程。本次滑動範圍 1.8 公頃，潛在崩塌量體 9.2 萬方。

第二個案例為新竹縣 - 尖石鄉 -T001（秀巒）潛勢區，劃設面積約 24.7 公頃，本區於 110

年發生滑動，發生滑動範圍約 4.2 公頃。此潛勢區在 105 年即有蝕溝發育且在坡趾處有小規模的滑動情形，至 106 年 5 月坡面有較大規模的滑動，區內有調查、監測與坡面處置工程。

從這兩個案例發生紀錄狀況來看，這類非降雨期間之局部破壞情形，並非現有大規模崩塌雨量警戒值可以涵蓋之狀況。

以桃園市 - 復興區 -T002 來說，從現場設置之地表伸張計觀測成果，可以觀察到坡面有經過 1 次等速運動階段、1 次加速運動階段，最後則是回到減速階段。這樣的觀測成果，應該是要回饋現有警戒發布機制。

四、大規模崩塌災害警戒之精進建議

4.1 雨量警戒基準值調整機制建立

從大規模崩塌警戒發布歷程來看，大規模崩塌潛勢區確實不易發生一次性崩塌情形，但近年極端天氣與重大地震之發生頻率明顯增加，但部分潛勢區多有局部活動或是活動性變化樣態發生，這些事件對於現有雨量警戒值之影響為何，又或是雨量警戒基準值是否可以因應這些事件之發生調整，應開始納入考量。

4.2 潛勢區活動狀態分級與量化

目前在各潛勢區多設有地表變形觀測設備，如伸張計、傾斜計、GNSS 紀錄設備等，都可提供即時且連續之現場資訊，若能透過這些觀測成果進行潛勢區活動性之量化，將可大幅提高活動性分析之時間精度，應積極進行相關分析方法之研究與開發。

4.3 大規模崩塌防災意識提升

考慮大規模崩塌屬於新興災害，且其發生頻率較低，因此多數坡地管理相關人員均未有相關經驗，加上大規模崩塌警戒之發布推動時程甚短，因此第一線人員未能掌握足夠資訊是必然的，在這樣的情況下，教育訓練、課程講座將會是提高對於大規模崩塌災害認知的重要手段，因此建議後續應定期舉辦說明會與教育訓練課程，提供各式最新大規模崩塌案例與相關防減災之作

法，除提升政府部門同仁對於大規模崩塌災害之認識外，亦可讓民眾參與，理解政府部門相關防減災手段之運作。

參考文獻

1. Yu-Shu Kuo, Yuan-Jung Tsai, Yu-Shiu Chen, Chjeng-Lun Shieh, Kuniaki Miyamoto,and Takahiro Itoh (2012). Movement of deep-seated rainfall-induced landslide at Hsiaolin Village during Typhoon Morakot, Landslides 10:191– 202 DOI 10.1007/s10346-012-0315-y.

2. Yuan-Jung Tsai, Fang-Tsz Syu, Chjeng-Lun Shieh, Chi-Rong Chung, Shih-Shu Lin, Hsiao-Yuan Yin (2021, Mar). Framework of emergency response system for potential large-scale landslide in Taiwan. Water, 13.

3. 行政院農業委員會水土保持局，複合型災害調查、分析與境況模擬，2011。

4. 行政院農業委員會水土保持局，坡地崩塌防減災策略先期研析計畫，2014。

5. 行政院農業委員會水土保持局，105 年大規模崩塌區影響範圍調查與劃設，2016。

6. 農業部農村發展及水土保持署，大規模崩塌潛勢區影響範圍劃設作業流程與方法，2023。

7. 齊藤迪孝、上澤弘（1966）斜面崩壊時期の予知（坡面崩塌的預測），地滑，Vol.2，No.2，pp.7-12。

8. 行政院農業委員會水土保持局，110 年大規模崩塌潛勢區雨量警戒發布及疏散避難資料整備，2021。

9. 行政院農業委員會水土保持局，111 年大規模崩塌潛勢區影響範圍與災害潛勢資料公開及精進，2022。

10.農業部農村發展及水土保持署，112 年大規模崩塌防災整備與動態雨量警戒基準值調整機制建立，2023。