

莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建 —以小林村深層崩塌為例

李鎮洋^[1] 賴文基^[2] 陳振宇^[1] 黃效禹^{[1]*} 郭力行^[1]

摘要 莫拉克颱風所帶來的豐沛雨量，造成了五十年來颱風災害中最嚴重的人員死傷。此次莫拉克風災中，包括洪水、土石流、崩塌及堰塞湖等災害同時發生，形成複合式的災害危害型態。本文藉由莫拉克風災引發的小林村複合型土砂災害時間、空間發生歷程及情勢演變的調查與重建，以及深層崩塌災例的細部調查資料，說明複合型災害的特性以作為後續因應對策的參考。針對複合型災害，未來應積極發展複合型災害的調查、模擬及預警等方法，以因應極端氣候下發生頻度增、規模大及影響鉅之未來土砂災害演變情勢。

關鍵詞：莫拉克颱風、複合型災害、重建、崩塌。

The Reconstruction of the Processes of Catastrophic Disasters Caused by the 2009 Typhoon Morakot

Chen-Yeng Lee^[1] Wen-Chi Lai^[2] Chen-Yu Chen^[1] Hsiao-Yu Huang^{[1]*} Li-Hsing Kuo^[1]

ABSTRACT Typhoon Morakot was the deadliest typhoon in Taiwan in the last 50 years. Different kinds of disasters resulting from Typhoon Morakot occurred simultaneously. These disasters, including flood, landslides, and landslide dams, are briefly explained in this paper. Simultaneous occurrences of these disasters resulted in composite hazards. The devastation of Siaolin village is an example of composite hazards and is described in this paper. Some of these disasters occurred simultaneously or consecutively in one place. Such disasters are defined as a compound hazard in this paper. It is concluded the current warning system for single disasters is perhaps insufficient to handle such composite hazards. It is necessary to develop a comprehensive system for decision makers to handle composite hazards.

Key Words: Typhoon Morakot, composite hazards, reconstruction, landslide.

一、前言

因極端降雨所引發災害型態，已由過去單純局部區域的洪水、土砂災害，轉變為大規模區域的洪水與土砂複合型災害的同步發生。2009年8月8~10日的莫拉克風災，颱風及其後續之西南氣流挾其長延

時、高強度及大範圍的特性，在台灣中南部地區連續四天創下近3,000公釐左右的降雨紀錄，同時誘發了淹水、淺層與深層崩塌、土石流及堰塞湖等不同類型的災害。這些災害同時或先後侵襲同一區域，不僅造成受災區域之重大災害，也使得現有的土石流警戒、預報與應變機制面臨考驗，需積極尋求新的思維與新

[1] 行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C.

[2] 國立成功大學防災研究中心
Disaster Prevention Research Center, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: shiaoyue@mail.swcb.gov.tw

的機制，以減低類似莫拉克颱風所誘發之複合型土砂災害導致的嚴重災情。

二、莫拉克颱風特性

民國 98 年 8 月侵襲台灣的莫拉克颱風 (國際命名：Morakot)，因颱風引進旺盛之西南氣流，在台灣南部地區降下廣區域、高強度、長延時的降雨。其中 8 月 6 日至 8 月 9 日期間，因莫拉克颱風所伴隨而來的大量雨勢，更打破台灣氣象史諸多降雨記錄，造成台灣中南部及東南部嚴重的災害。依據經濟部水利署針對此次颱風所完成「莫拉克颱風水文分析報告」成果，莫拉克颱風期間最大 48 小時降雨強度 2361 毫米已接近世界紀錄 (2467 毫米、Aurere, La Réunion；1958/4/7-1958/4/9) 造成台灣南部及東部嚴重的災情。莫拉克風災 (或稱為八八水災) 的災情亦為台灣地區八七水災 (1959 年) 以來最嚴重的水患。

莫拉克颱風最顯著的特徵為其所帶來的降雨。該颱風的強度雖僅為中度颱風，但所帶來的雨量卻超乎眾人的預期。如圖 1 所示，莫拉克颱風期間，暴雨籠罩全台，而降雨中心位在南部山區。以御油山站 (表 1) 為例，莫拉克颱風的累計雨量在 91 小時內達到驚人的 2583 mm。本文蒐集了過去曾發生重大災情的颱風的雨量紀錄，列於表 1 (Shieh, *et al.*, 2009)。將表 1 所列之各雨量站紀錄的累計降雨深度繪於圖 2，可知莫拉克颱風期間的累計降雨深度為最大。不僅如此，莫拉克颱風的降雨強度在整個颱風期間的變化較其他颱風為小，這個事實意味著莫拉克颱風期間的降雨強度穩定、持續累積長達 91 小時。而其他颱風的降雨強度則隨著延時的增加，在 24~36 小時後均逐漸減小。由以上說明可知，莫拉克颱風期間的降雨特性為長延時、高強度及大範圍。

將莫拉克颱風期間幾個雨量站的紀錄進行頻率分析，可以發現有許多雨量站的 24、48 及 72 小時累計雨量的重現期距均超過 200 年。這對於未來各種水利及水保工程的設計帶來了極為重大的影響。如何將莫拉克颱風的降雨特性納入工程設計的考量，將是台灣所必須要面臨的重大課題。

三、莫拉克風災的土砂災害特性

莫拉克颱風期間，台灣中、南部降下廣區域、長延時、高強度的降雨，而暴雨中心又位於集水區上游地區，由於集水區上游地區地形陡峭，加上高山地區

表 1 不同年份的選定最大降雨紀錄

Table 1 The information of the selected hyetographs

颱風名稱	年度	雨量站	累計降雨深度(mm)	延時 (小時)	備註
莫拉克	2009	御油山	2583	91	
卡玫基	2008	新發	1043	57	
艾利	2004	觀霧	1223	60	崩塌；15人死亡。
桃芝	2001	大農	433.5	21	
溫妮	1997	五堵	354	48	崩塌；28人死亡。
賀伯	1996	阿里山	1986.5	44	
伊勢灣 (日本)	1959	諸家 (旧)	490.1	57	超過 5000 人死亡



圖 1 莫拉克颱風期間各雨量站等雨量線

Fig. 1 Isohyets of Taiwan during typhoon Morakot. Isohyets are in mm depth of total rainfall

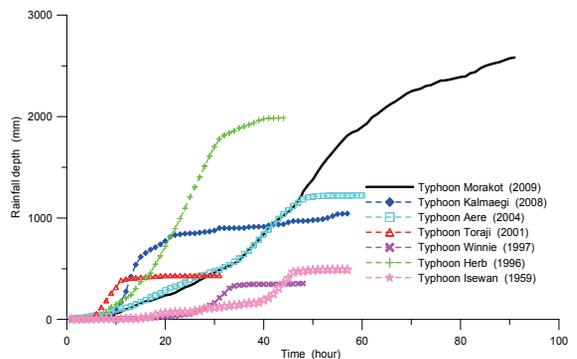


圖 2 各雨量站之累計降雨深度曲線

Fig.2 Comparison of curves of the accumulated rainfall depth of seven typhoons

地質破碎，以致在莫拉克颱風中發生多處土石災害，造成嚴重的災害與傷亡。由於台灣中、南部如曾文溪、高屏溪、東港溪、林邊溪等集水區內仍有多處大規模崩塌、堰塞湖及土石堆積河道等情況，各集水區未來的土砂危害威脅仍鉅。

莫拉克颱風對於台灣帶來的災害包含多種不同種類的土砂災害類型。以下依序說明崩塌及堰塞湖災害的分布特性。

1. 崩塌

經判釋莫拉克颱風後台灣地區的衛星影像，並將崩塌地套繪如圖 3。可知大多數的崩塌地均發生於南部山區之降雨中心一帶，且將累計降雨深度大於 800 mm 的地區圈繪出來，如圖黑色線包圍區域，可知莫拉克颱風期間的崩塌地均發生在累計降雨深度大於 800 mm 的地區。

2. 堰塞湖

莫拉克颱風期間，以衛星影像判釋得出的 15 處堰塞湖，其位置如圖 4 所示。由堰塞湖存在之狀況可以概略分為：(A) 仍存在且未破壞；(B) 仍存在，曾局部破壞；(C) 曾存在，現已破壞等三種堰塞湖。其中 (A) 仍存在且未破壞者共計 1 座，(B) 仍存在，曾局部破壞者共計 8 座，(C) 曾存在，現已破壞者共計 6 座。若將堰塞湖與累計降雨深度比對，如圖 4。可以發現有 12 個堰塞湖發生在累計降雨深度介於 1,000 mm 到 2,500 mm 的區域。

綜合上述莫拉克風災所造成的土砂災害有以下特性：

(1) 面積廣：廣大區域受災、維生設施脆弱

廣域型災害的特性主要在廣大的面積受災，其空間規模大，造成區域全面性（無論上、中、下游，山地或是平原區）的癱瘓。以此次莫拉克颱風為例，整個臺灣的中南部大部份地區均位於災區，防災動線也受到影響，受災面廣大，相對而言未受災區少，緩衝及復原能力差。加上山區聚落與聚落間，或與平地城鎮間之交通，因地形崎嶇陡峭易於阻斷，其維生設施或交通路網在後續颱風期間，仍可能隨時中斷，造成孤立無援。

(2) 類型多：不同危害型態、不同致災條件

莫拉克風災由於雨量具有廣區域、高強度、長延時的特性，故造成濁水溪、曾文溪、高屏溪、

林邊溪及太麻里溪流等地區因劇烈嚴重受災，災害型態亦由過去單純為洪水或土砂災害，轉變為因大量瞬時降雨所導致沖蝕、大規模崩塌、堰塞湖及洪水的災害類型（圖 5），加以大規模水、砂、土、石之混合流動，形成河道嚴重沖刷或淤積等災害現象。

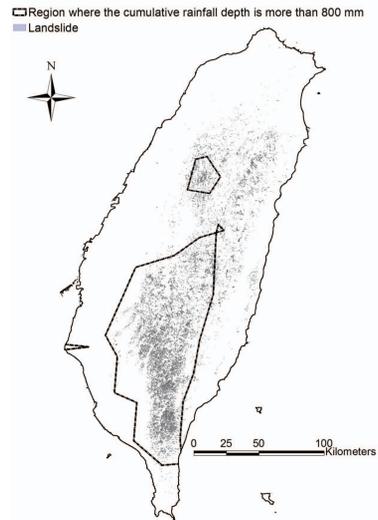


圖 3 莫拉克颱風期間崩塌地分佈圖

Fig.3 Landslides within regions where the cumulative rainfall depths are more than 800 mm

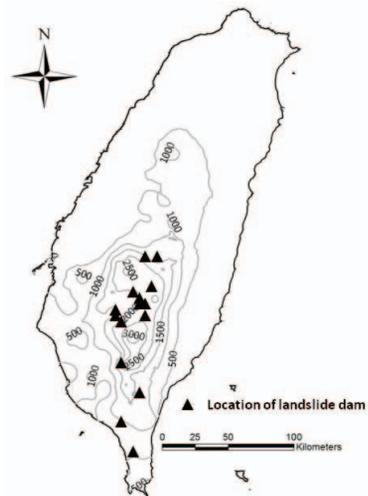


圖 4 莫拉克颱風期間形成之堰塞湖位置

Fig.4 Locations of landslide dams formed during Typhoon Morakot

(3) 規模大：不穩定土砂量體大、治理條件嚴峻

也由於莫拉克風災所帶來的異常雨量，導致深層崩塌發生頻度增加，因而造成崩塌土砂量的生產量增加、土石流等影響範圍擴大。各集水區上游的土砂生產量均前所未見，如單單高屏溪上游集水區崩塌面積就廣達一萬五千公頃，而此次風災的土砂生產量逾兩億六千萬立方公尺，未來的土砂災害治理條件異常嚴峻。

(4) 影響鉅：易衍生二次災害、穩定恢復期長

莫拉克風災所造成的災害規模面積廣、類型多及規模大，其後續影響時程將有別於一般單點型的土砂災害，有鑒於民國 88 年 921 地震造成後續中部山區崩塌及土石流等衍生災害、民國 90 年的桃芝颱風造成受創嚴重災區的後續影響、民國 93 年艾利颱風對北台灣造成的嚴重土砂災害，導致石門水庫集水區原水濁度飆昇造成停水的不便。由於這些災害後的土砂演變觀測基期尚短，不易做為長期恢復期評估的根據。在國外的案例中，較具參考價值的案例為日本 1923 年關東地震，導致神奈川縣中津川集水區崩塌發生率直到 1960 年後才恢復震前基準。雖然地震之影響可能較颱風豪雨災害為烈，但莫拉克風災所產生的大量不穩定土砂後續影響勢必較桃芝、艾莉颱風的影響規模大、強度烈且恢復期更長。

表 2 小林村複合性災害發生時間軸

Table 2 Timeline of the disaster devastated Siaolin village

日期	時間	事件	御油山站累計降雨深度 (mm)	楠峰橋水位站水位 (m)	資訊來源
2009/8/6	08:30	颱風警報發布	1	368.9	中央氣象局
2009/8/7	17:00	黃色土石流警報發布；淺層崩塌發生。	359.5	371.0	水保局
	23:00	紅色土石流警報發布	506.5	371.4	水保局
2009/8/8	19:00	10 號橋遭洪水淹沒；小林村北向交通中斷。8 號橋斷裂，南向交通亦中斷。	1529	374.0	居民訪談
	23:00	小林村南部淹水，淹水深度約為 60 公分。	1761.5	375.5	居民訪談
2009/8/9	05:20	小林村南部淹水，淹水深度升為約 200 公分。	1992	375.7	居民訪談
	05:30	43 個居民移動至山後小屋避難。	1992	375.6	居民訪談
	06:20	深層崩塌發生；堰塞湖隨即形成；楠峰橋毀損。	2023	水位站損壞	居民訪談
	07:40	堰塞湖堰塞壩潰決。	2060.5	水位站損壞	Feng (2011)
2009/8/10	05:30	颱風警報解除。	2515.5	水位站損壞	中央氣象局
2009/8/11	-	43 個生還者獲救，以直升機後送。	2808	水位站損壞	居民訪談

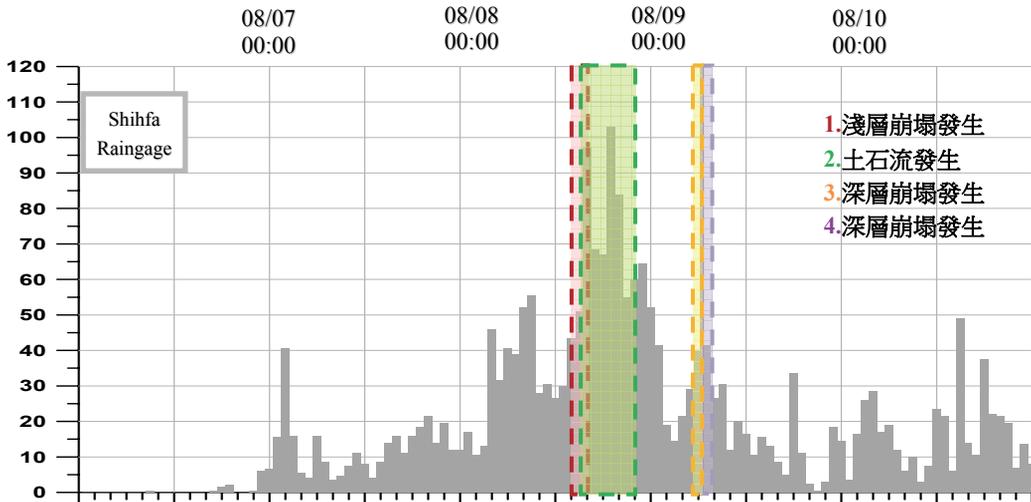


圖 5 莫拉克風災土砂災害發生歷程 (新發雨量站)

Fig.5 Incremental rainfall hyetograph and timeline of the compound disasters (Shihfa rain gage)

四、複合型災害案例一 小林村深層崩塌災害

高雄縣甲仙鄉小林村因受莫拉克颱風所引進的西南氣流造成的劇烈降雨，參考中央氣象局甲仙雨量站觀測資料，其累積總雨量達 1911 毫米，最大時雨量為 94.5 毫米/小時，單日最大雨量達 1072.5 毫米，為設站有史以來最高的紀錄；此外依據經濟部水利署「莫拉克颱風水文分析資料」，甲仙測站在莫拉克颱風期間降雨延時 24 小時雨量 1077.5 毫米、降雨延時 48 小時雨量 1601 毫，都超過 200 年的重現期，以致於造成當地嚴重的災情。

在本次莫拉克颱風後，經由與現地民眾訪談，在崩塌發生之前兩條土石流潛勢溪流均已發生土石流災害，並分別造成八號橋及楠峯橋中斷，部落已無法對外交通，亦無法對外進行疏散避難。為了解小林村災害發生過程，經由以下之小林村淹水探討、角埔溪土石流探討、獻肚山地滑探討及小林村堰塞湖探討等四項，將各個探討之災害結果與小林村災害發生時間序列表 (表 2) 進行比對，以評估災害過程及災情影響。

五、小林村深層崩塌歷程 調查與解析

1. 淹水災害

於小林村淹水探討中，災害發生時間序列表各個時間點如下：

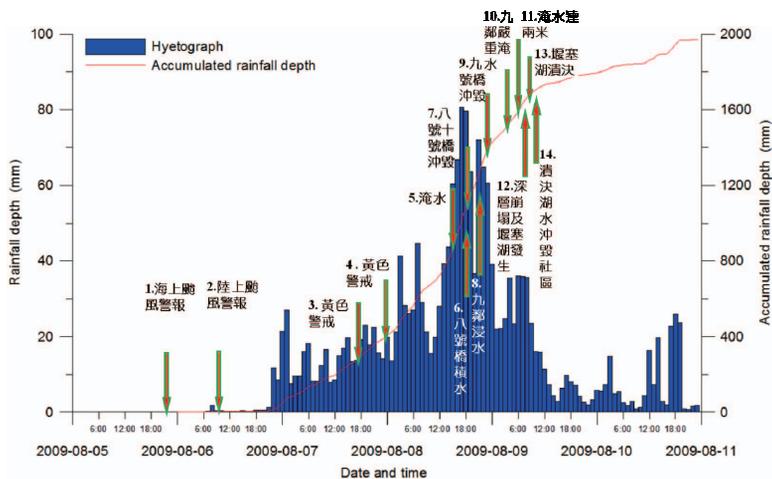


圖 6 災害時間與累積雨量對照圖

Fig.6 Incremental and accumulated rainfall hyetograph of the Siaolin village with stages of the compound disasters

(1) 災民訪談

翁瑞琪表示第 9 鄰之淹水約於 2009 年 8 月 8 日 15:00 左右發生；姚茂雄表示 2009 年 8 月 8 日 21:00 時，第 9 鄰旁之台 21 線已成一條河流且屋內開始淹水，2009 年 8 月 8 日 03:30 第 9 鄰屋內淹水已達腰部。

(2) 調查報告

李錫堤等人 (2009) 表示 2009 年 8 月 8 日 18:00 第八號橋開始淹水；Shieh *et al.* (2009) 表示 2009 年 8 月 8 日 19:00 第 10 號橋遭洪水淹沒，造成道路中斷；李錫堤等人 (2009) 表示 2009 年 8 月 8 日 21:00 第 9 鄰旁之台 21 線，因猛烈雨勢，形成了一條河流；Shieh *et al.* (2009) 表示 2009 年 8 月 8 日 23:00 第 9 號橋附近淹水約達 60cm；李錫堤等人 (2009) 表示 2009 年 8 月 9 日 03:30 大部分村落已遭洪水吞噬，屋內積水及腰；Shieh *et al.* (2009) 表示 2009 年 8 月 9 日 05:20 第 9 號橋附近淹水約達 200cm。

於災害過程及災情影響過程初步重建中，在各事件雨量之模擬結果，其水位皆未達小林村第 9 鄰旁之台 21 線 (圖 7)，參酌李錫堤等人 (2009) 之現勘研判，小林村後方之地層具有地下出水管，在豪雨來臨時，其地下水層呈現飽和狀態，因此而造成小林村後方野溪流量增大，最後造成第 9 鄰淹水達一層樓高，推測第 9 號橋下方涵洞阻塞，致使溪水漫流至第 9 鄰地區。

2. 土石流災害

小林村自南側至北側，共有三條土石流溪流 (圖 8)，分別為八號橋角埔溪、九號橋野溪 (高縣 DF007) 與十號橋野溪。角埔溪為旗山溪支流野溪，集水區面積約 1059 公頃，海拔 400~1200 m 之間，位於小林村南方 200 公尺處，下游河道有台 21 線八號橋橫跨。角埔溪於 1996 年賀伯颱風開始，集水區即有零星崩塌現象發生，在經歷多次颱風後崩塌地面積逐漸增加，此區之崩塌地並於 88 水災後大幅擴大，同時在莫拉克風災期間亦造成土石流大量土砂，並且在與楠梓仙溪匯流口產生河道擠壓，造成鄰近之道路及住宅產生淹水現象，就角埔溪處之土砂災害過程，亦為多型態之土石流沖淤現象 (圖 9 及圖 10)。

在角埔溪土石流探討中，因無從得知角埔溪之源頭崩塌於何時發生，而莫拉克颱風所挾帶之雨量所造成之逕流極大。因此，溪內之逕流具有挾帶土石流之最大泥沙體積含量之能力。本次調查中僅對第 9 鄰遭角埔溪所發生之土石流掩蓋範圍、第 8 號橋遭沖毀作

一確認；角埔溪之土石流掩蓋範圍圖示於圖 13；第 8 號橋遭沖毀時間應於角埔溪流量較大之時間點內遭沖毀，其時間點為 2009 年 8 月 8 日 17:00~19:00，由調查資料判斷該橋於 18:00 時可能已遭沖毀 (該時間點為角埔溪於事件內之尖峰流量)。

表 3 小林村鄰近地區土石流溪流基本資料表

Table 3 Information of debris flows of the Siaolin village

溪流名稱	溪流長度 (公里)	集水區面積 (公頃)	溪流平均坡度 (度)	崩塌率 (莫拉克前)	崩塌率 (莫拉克後)
八號橋角埔溪	5.8	1,059	9.0	2.6%	10.7%
九號橋野溪* (高縣 DF007)	1.7	78	13.3	1.0%	13.1%
十號橋野溪	4.6	676	14.4	1.1%	16.2%

*表示為水土保持局公開之土石流潛勢溪流

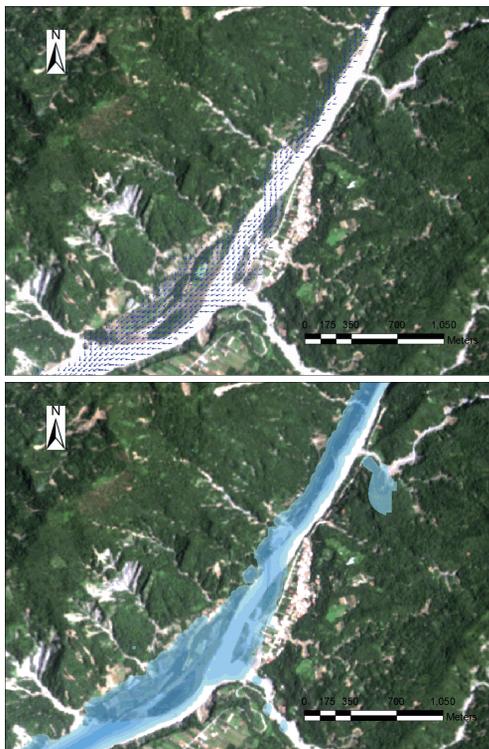


圖 7 楠梓仙溪角埔溪段淹水模擬圖 (2009 年 8 月 9 日 5:00)

Fig.7 Simulation of the flooding in Siaolin village (2009/8/9 AM 5:00)

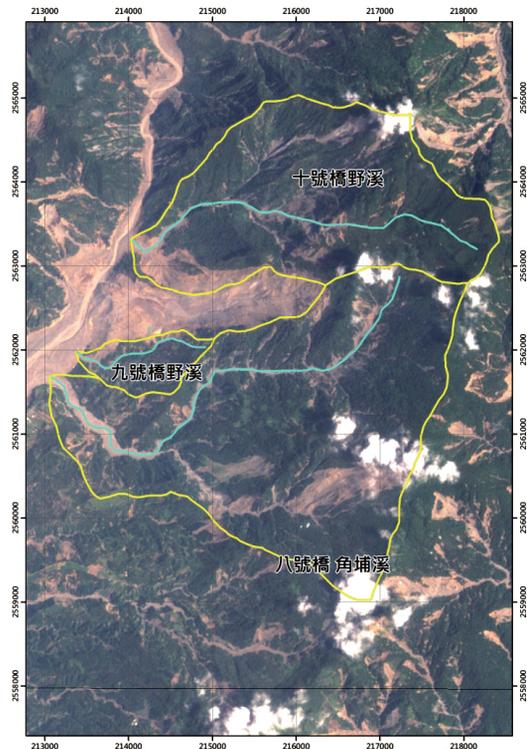


圖 8 小林村附近土石流溪流位置圖 (莫拉克災後衛星影像)

Fig.8 The debris flows of Siaolin village after typhoon Morakot (FORMOSAT-2)

3. 深層崩塌災害

從小林村災區及對岸的空拍影像 (圖 14), 可以發現崩塌的土體幾乎掩埋了整個聚落的原址, 原聚落緊鄰的後山幾乎被崩落的土體、岩塊填平, 崩塌土體形成的崩崖, 崩崖下方以約 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的安息角形成崖錐堆積。崩塌的土方包含風化的土壤 (黃褐色) 及岩盤 (青灰色), 以細顆粒為主, 部分地表則殘留滾落的巨礫。河岸右側顯然為崩落土石, 由於距離崩塌地較遠, 故以較小粒徑的土石為主。表層覆蓋了一層崩落的表土, 表土可能來自大竹溪山坡面崩落的土石。崩塌地的邊緣相當平整, 外型類似一五角形, 崩塌地平整的外型, 是典型楔形破壞的特徵, 代表崩塌是以包含岩塊的平行滑動形式破壞, 脫離的岩塊與殘留的岩塊以節理面等平整的不連續面為界, 才能留下平整的邊界, 加上崩塌地底部的岩盤層面已出露, 左右兩側邊界近乎平行等特徵, 都佐證崩塌地源頭區是以岩體的楔形破壞為主。崩塌源頭區的坡趾, 有大量土石堆積, 且有殘留水池, 顯示大量雨水冲刷, 乃至於蓄積成潭, 坡趾處有明顯冲刷痕, 水流方向都流向崩崖邊緣, 再順坡面流下。

崩塌地源頭區的近觀 (圖 15), 顯示邊坡屬於一順向坡, 在崩塌地左側殘留的岩盤厚度約為 100 公尺, 出露的岩層層面也平行目前出露的坡面。出露的滑動面上有明顯滑動痕, 較特殊的是即使是出露的深部岩盤面上, 仍可見因地下水浸染所造成的黃褐色氧化鐵, 顯示岩盤深部仍有裂隙提供地下水流動, 因而殘留下氧化鐵浸染的黃褐色痕跡, 而深部岩盤的裂隙, 也是此次順向坡滑動的主要關鍵。

在小林村災變現場主要被大量崩落的土石掩埋, 崩落的土石主要來自聚落獻肚山形成的崩崖處, 再次崩落形成的崖錐堆積所提供。崩塌材料主要為: (1) 原河階堆積的礫石: 特徵為礫石外形較圓, 呈層狀堆積, 且有明顯淘選及粒級層等堆積特徵、(2) 上邊坡崩落的岩塊: 主要由堅硬、緻密的砂岩塊所組成, 這些砂岩塊可能由節理所切割, 外型多呈楔形, 因為重力滾落, 故呈散落狀, 巨礫間未受壓密及排列, 所以極易脫落, 再向下滾落。(3) 崩落的表土: 以挾有殘存植被為特徵, 多呈薄層狀脫落, 因直接覆蓋於其他崩落土石之上, 故表面極不平整 (圖 16), 且常呈現因重力滑移造成的鬆散張力裂隙。(4) 崩塌土石引發的二次土石流堆積: 僅侷限於坑溝內及坑勾出口處形成的小型沖積扇 (圖 17)。



圖9 卦埔溪 (八卦橋) 土石流河道淤積及沖積扇 (2009/9/11 拍攝)

Fig.9 The debris flows and alluvial fan in Jiaopu creek (No. 8 bridge)



圖10 卦埔溪 (八卦橋) 土石流河道淤積情形 (2009/8/19 拍攝)

Fig.10 The debris flows and sediments in Jiaopu creek (No. 8 bridge)



圖11 卦橋溪谷口沖積扇及河道堆積物 (2009/8/31 拍攝)

Fig.11 The debris flows and alluvial fan in creek of No.9 bridge

目前堆積在獻肚山坡腹的崩落土石中，以表土及後期因坡腹崩塌，導致坡頂處失穩的塊狀砂岩為主。表土層(圖 18)多依附在整個坡面岩塊上，一起產生重力崩滑，由於坡面及土體是以整體平行滑動，故土體及岩體本身受創並不嚴重，可見到表土層之結構尚稱完整。國外亦有房舍及人員隨同崩壞土體崩滑近公里，人員卻安全存活的例子。相反的，坡頂處崩落的塊狀砂岩，則是以岩塊脫離，滾落的方式，由於坡高達 500 公尺以上，岩塊的動能甚大，堅硬的砂岩塊自坡頂直衝而下，沿著先前崩落的土石表面，以滾落及彈跳的方式，可以產生相當遠的運動距離，加上此次崩塌產生了至少兩階的平台，可見到相當多的巨礫堆疊於平台邊緣(圖 19)，最遠甚至可達小林村的聚落處。

最值得注意的是，從小林村聚落緊鄰的崩崖表面所見，後山由崩塌土石所填平造成的平台，崩塌土石並不厚，原本地形即有近 50 公尺的落差，崩崖邊緣所見此次崩塌土石的厚度於平台處約為 3~5 公尺。此次崩塌土石堆積於黃褐色河階堆積層之上，且河階堆積層下伏之青灰色粉砂節理相當發達，後山邊坡除了由河階堆積及青灰色粉砂岩盤組成之外，於小林村北側原有即有一崩崖地形，且由崩崖的露頭所見，可見此坡面由舊崩積土所組成，比較原地形及災害前之航空照片，此一舊崩崖地形明顯(弧狀破壞的崖頂)，此一地形於災後仍可辨認出來，是地形比對的參照指標。

於深層崩塌探討中，崩塌發生之時間點以 Shieh *et al.* (2009) 根據中央研究院之寬頻地震儀量測資料中發現於 2009 年 8 月 9 日 06:16 時，小林村地區有非地震之異常震動訊號；陳建志 (2010) 2009 年 8 月 9 日 06:16 起，以每秒 50 公尺的速度向下崩移，33 秒後跨越位在山腰的 590 高地，60 秒後崩移土體開始於楠梓仙溪(旗山溪)中堆積，掩埋小林村北側聚落，整個山崩過程僅約 110 秒，累積了 2300 萬立方公尺土石，約 3000 萬噸重量。

行政院公共工程委員會 (2010) 致災調查報告中經由地球物理調查佐證，指出第 10~18 鄰為地滑之土石所掩埋；而該地滑之崩移方向示意圖如圖 20 左圖所示，本次調查以衛星影像與 DEM 套疊之崩移方向示意圖如圖 21 右圖所示。

4. 堰塞湖災害

圖 21 為原楠峰橋附近河道災害發生當時崩落土石堵塞溪流的可能位置，從獻肚山崩落的土石有相當多的體積堆積於此處，相較於上、下游其他位置，此

處的河岸較緩且低，容納的土石體積也較多。而在目前堆積土石的上方約 10~20 公尺處，有一明顯的原生坡面與裸露地邊界，此一邊界平行崩落土石的外形，推測應為當初從獻肚山崩落土石直衝而下到達的邊界，後因動量消失，崩落土石才又滑落淤積在目前的



圖 12 十號橋溪谷口沖積扇及河道堆積物(2010/4/21 拍攝)

Fig.12 The debris flows and alluvial fan in creek of No.10 bridge



圖 13 楠埔溪發生土石流之掩蓋範圍圖

Fig.13 The simulation result of effected area by debris flow in Jiaopu creek



圖 14 小林村空拍影像-原橋址橋位置 (A 點), 崩塌土體堆積嚴重, 為莫拉克颱風期間土體堆積而導致河道阻塞而形成堰塞湖。

Fig.14 The aerial photograph of the original landslide dam location of the Siaolin village



圖 17 小林村原聚落位置之二次土石流堆積及崩塌下邊坡的崖錐堆積

Fig.17 The transported slump sediments in the foothill of the Siaolin village



圖 15 小林村崩塌地的空拍影像, 顯示崩塌地的邊緣幾乎到達稜線, 崩塌地底部的岩壁已經出露。

Fig.15 The aerial photograph of dip-slip landslide of the Siaolin village



圖 18 獻肚山坡腹所見的崩塌表土層

Fig.18 The slump soil layer in the foothill of the dip-slip landslide



圖 16 小林村災變崩塌地上邊坡坡面堆積之崩塌土石

Fig.16 The accumulated slump sediments in the foothill of the dip-slip landslide



圖 19 崩塌邊緣所堆疊的巨礫均由灰色堅硬砂岩塊所組成

Fig.19 The big boulders of the sandstone accumulated in the edge of the terrace

位置。從下游往上游拍攝的空拍影像，更容易瞭解獻肚山崩塌地，崩落至此原楠峰橋附近，堵塞河道，形成堰塞湖，後再因溪流冲刷，導致堰塞土體被衝出溢流口，後再持續沖蝕，造成目前兩側形成高陡小峽谷的景象。

從分佈的位置及崩塌土石的疊置關係來判斷，獻肚山山腹的舊崩積土的崩塌（青灰色細塊粉砂及黃褐色砂岩塊），應為最早發生，崩塌的土體及岩塊，沿小林村原楠峰橋的坑溝處衝出，衝至對岸近 20 公尺處後，因動量消失再滑落至現今淤落處（圖 22），目前對岸之崩落土石主要受高度剪裂甚至磨碎的岩塊（類似斷層角礫作用）為主，其厚度從河床以上出露的部分約 18 公尺（圖 23），其上層則可能為殘存的鬆散表土所覆蓋，表土厚度較薄，均小於 1 公尺。

小林村楠峰橋處殘存之邊坡崩塌，可說明此次災

變的部份過程，因為大竹溪山山腹的崩塌位置與聚落所位處的高差超過 1000 公尺，大量土石直衝而下，除於原楠峰橋產生堰塞湖的土體外，因崩落土體堵塞原坑溝，後續因雨水冲刷的土石，則自坡腹的趾部開始產生溢流，將原聚落後山逐漸填平堆成一平台，溢漫的土石自後山的低處溢出，繼續流向下方的九號橋溪坑溝及聚落緊鄰的山溝，由於後續與水造成的表面逕流多半將崩塌土體中的細泥冲刷而出，並以漫地流形式流出平台，並沿崩崖直衝而下，造成下方聚落、道路及原楠梓仙溪沖積平原的淤埋。後續因堰塞湖遭楠梓仙溪沖毀，潰壩造成的大量溪水除造成下方廣大的冲刷平原外，也冲刷崩塌形成的崩崖坡腳，崩塌土石再形成下方的崖錐堆積。部份的崩崖，於莫拉克後的午後雷陣雨，再次造成二次的土石流堆積，最後形成目前所見的地形外觀。

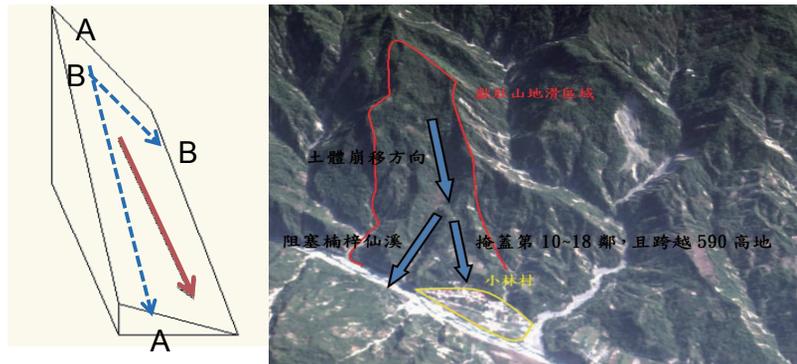


圖 20 小林村地滑崩移方向的示意圖（左：李錫堤等，2010；右：行政院公共工程委員會，2010）

Fig.20 A sketch map of dip-slip landslide of the Siaolin village (Lee et al., 2010)



圖 21 崩塌土體堆積旗山溪河道阻斷溪流可能位置

Fig.21 The vertical aerial photograph of the original landslide dam location of the Siaolin village



圖 22 旗山溪小林村崩塌土體堆積河道阻斷溪流上游河道情形

Fig.22 The oblique aerial photograph show the location of original landslide dam and barrier lake beside the Siaolin village

小林村堰塞湖探討中, 根據陳宏宇等 (2010) 指出該天然壩之形成時間為 2009 年 8 月 9 日 06:18 於楠峰橋位置形成, 並阻斷楠梓仙溪 (旗山溪) 之水流, 並於 50 分鐘內蓄滿、潰決, 引發含沙濃度高達 38% 的泥流, 掩埋小林村南側聚落, 即小林村第 9 鄰地區。

5. 小林村複合型災害時間及空間過程

總結上述之綜合比較結果, 於小林村淹水事件中, 造成第 9 鄰淹水達一層樓高, 原因之一為小林村上方獻肚山與大竹溪山廣大集水區, 使野溪流量增大所致, 非楠梓仙溪(旗山溪)之溪水所致, 原因之二為 8 號橋及 9 號橋上方淺層崩塌產生之土石, 沿野溪流出, 並於第 9 鄰台 21 線公路及橋樑下方形成沖積扇, 使溪水無法匯流至旗山溪, 進而回淤並漫流至第 9 鄰之區域; 於獻肚山地滑事件中, 發生時間為 2009 年 8 月 9 日 06:16, 於 33 秒時崩移土體到達 590 高地, 於 60 秒後崩移土體掩埋小林村第 10~18 鄰住戶及阻斷楠梓仙溪(旗山溪)之水流, 崩移土體自地滑源頭直至掩埋房舍、於楠梓仙溪中形成天然壩共 110 秒, 即於 06:18 之時; 於小林村堰塞湖事件中, 自 06:18 開始蓄水, 該天然壩應於 2009 年 8 月 9 日 07:40 時潰決 (Feng, 2011), 且潰決後之泥流沖毀第 9 鄰, 接連之災害使小林村遭受重大影響。

六、小林村深層崩塌的省思

在莫拉克颱風之前, 以土石流潛勢溪流及其保全對象為基礎的警戒、預報與應變機制, 尚能有效針對單一型態的土石流災害, 進行預報與應變工作, 其成功率仍在四成左右。雖有不夠完善之處, 但基本上已達到事前預防的積極效果。然而莫拉克颱風所誘發之複合型土砂災害, 卻超出現有的警戒、預報與應變機制所能處理的範疇, 其原因主要有下列三點;

1. 每一部落或保全對象所面臨之土砂災害複合型態不同, 有的是淺層崩塌與土石流, 有的是深層崩塌與堰塞湖, 各種不同災害的複合發生方式將導致警戒對象失焦與警戒基準無所適從的困境。
2. 同一區域在短時間內遭受不同類型之土砂災害侵襲, 就算可以掌握災害的複合型態, 卻也無法掌握這些不同災害的發生時間順序, 這使得複合型土砂災害之預報成為極度困境。
3. 如莫拉克颱風般的廣域降雨, 導致大範圍的交通中斷, 也造成疏散避難執行的困境, 以現有的避難路線及避難處所的規劃概念來看, 所選定之路

線與避難所似乎都含括在災區範圍內, 無法達到真正安全避難的要求。

基於上述三點原因, 莫拉克颱風所誘發之複合型土砂災害, 超出現有應變機制所能處理的範疇, 應發展以下技術:

1. 複合型災害調查方法(複合型災害發生的潛勢地點): 從聚落的影響範圍內是否有深層崩塌, 是否有形成堰塞湖的地形及水文條件, 維生道路是否易受阻斷成為孤島。
2. 複合型災害模擬的方法 (複合型災害發生的臨界基準): 各類型災害的模擬, 瞭解災害發生的地形條件、材料特性與水文條件。



圖 23 小林村原楠峰橋處堆積的大量土石其表面殘存的表土

Fig.23 The remnant part of the landslide dam after the dam breakage in the Typhoon Morokot



圖 24 小林村原楠峰橋處堆積的土石為受剪裂嚴重的深灰色粉砂及薄層土壤

Fig.24 The outcrop of the landslide dam composed by high shearing gray shale and dark gouge material

3. 複合型災害預警的方法 (聚落及維生線承災能力診斷)：針對聚落、道路等維生線受災境況，進行承災能力 (位置、類型及發生條件等) 的診斷，以納入複合型災害考慮下的避災及預警因應作為。

小林村在莫拉克颱風期間發生的複合型災害為近年來僅見，相關的綜合性研究尚少，其重要性不言而喻。本文之主要目的在於透過複合型災害的調查、分析與境況模擬，以旗山溪集水區的小林村為例，分析及重建各類型災害之發生過程與機制，以建立複合型災害過程時序列，瞭解各種災害的發生機制與條件，從中吸取教訓與經驗，作為提升未來對於複合型災害應變能力的根基，以增進複合性災害的預警及監測技術。

七、結 論

針對淺層崩塌、深層崩塌、土石流、洪水及堰塞湖等單一天然災害發生時之避難預警對策及警報發佈時機已有許多學者進行研究。然而，面對如小林村複合型災害，防救災人員並無針對複合型災害之避難與預警對策。本文雖然未提出完整之複合型災害避難預警方案，但針對小林村災害調查、分析及災害歷程重建所獲得的寶貴資料，檢討災害過程中各項災害發生的時間、影響的位置及衝擊程度，及對後續災情連鎖反應之影響，提出因應類似小林村複合型災害之維生診斷與避難預警基準擬定之做法。

參考文獻

1. 中央災害應變中心統計，莫拉克颱風災害應變中心處置報告第 73 報，2009 年 9 月 7 日。(National disasters prevention and protection commission, R.O.C. (2009). *Typhoon Morakot Disaster Responses Reports 73th Report*. (in Chinese))
2. 經濟部水利署，「莫拉克颱風暴雨量及洪流量分析」，2009 年 9 月。(Water resource agency (2009). *Dreading and restoration after Typhoon Morakot*, Water resource agency, Ministry of economic affairs, Taiwan. (in Chinese))
3. 李錫堤、董家鈞、林銘郎 (2009)，「小林村災變之地質背景探討」，*地工技術*，122，87-94。(Lee, C. T., Dong, J. J. and Lin, M. L. (2009). "Geological Investigation on the Catastrophic Landslide in Siaolin Village, Southern Taiwan," *Sino-Geotechnics*, 122, 87-94. (in Chinese))
4. 行政院公共工程委員會，莫拉克颱風高雄縣甲仙鄉小林村及那瑪夏鄉、桃源鄉致災原因調查報告，2010 年 1 月。(Public Construction Commission Executive Yuan (2010). *The report of the investigation of the hazardous area of the Jiasian, Namasia and Taoyuan villages of Kaohsiung county*. (in Chinese))
5. 曾文孝、徐郁超、賴文基、詹錢登、謝正倫 (2011)，土石流沖淤模式應用於小林村角埔溪災害模擬，*中華水土保持學報*，42(3)，175-183。Tseng, W. H., Hsu, Y. C., Lai, W. C., Jan, C. D. and Shieh, C. L. (2011). "The debris flow numerical model with erosion and deposition effects: an application in Jiaopu Creek, Hsiaolin Village," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(3), 175-183. (in Chinese))
6. Feng, Z. Y. (2011). "The seismic signatures of the surge wave from the 2009 Xiaolin landslide-dam breach in Taiwan," *Hydrological Processes*, doi: 10.1002 / hyp.8239.
7. Shieh, C. L., Wang, C. M., Lai, W. C., Tsang, Y. C. and Lee, S. P. (2009). "The composite hazard resulted from Typhoon Morakot in Taiwan," *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 62, 4, 61-65.

2011 年 05 月 24 日 收稿

2011 年 09 月 29 日 修正

2011 年 10 月 11 日 接受

(本文開放討論至 2012 年 6 月 30 日)