

2014 尼泊爾滿卡村(Mankha)山崩及堰塞湖之探討

呂喬茵¹、張志新¹、林聖琪¹、傅鏗漩¹

1 國家災害防救科技中心坡地洪旱組

摘要

每年 6 至 9 月是尼泊爾(Nepal)的雨季，脆弱的地質環境，加上連場暴雨，常導致大規模的洪水、土石流及山崩的侵襲。2014 年 8 月 2 日凌晨，位於尼泊爾中部辛胡帕疇區(Sindhupalchowk)，距離首都加德滿都約 60 公里的滿卡村(Mankha)，發生了大規模的山崩，總死亡人數達 156 人，是尼泊爾近年來最嚴重的一次災情。山崩後大量土石形成巨大的天然壩體，在桑科西河(Sunkoshi)形成大規模的堰塞湖，對下游聚落造成威脅，山崩發生後第 36 天，壩體承受不住大量水體之壓力，堰塞湖由疏水道處潰堤，所幸無居民犧牲。此次的山崩事件，由歷史影像就可以看到徵兆，坡面已經有崩滑的現象。因此山崩潛勢圖、潛在山崩地區的監測、影響範圍的圈繪，以及山崩所造成堰塞湖的緊急應變處理，對尼泊爾來說都是未來災害防救所需面對與強化的重要課題，以降低天然災害對生命財產所造成的威脅與損失。

一、尼泊爾概述

尼泊爾北邊與中國西藏自治區相接，西、南、東三面則與印度為鄰。尼泊爾版圖呈長方形，東西寬約 850 公里，南北寬約 200 公里，

國土面積約有 147,181 平方公里。尼泊爾的行政區劃分為 14 的專區(zone)(圖 1)，專區又可再分為 75 個縣(district)。根據 2014 年的人口統計資料，尼泊爾總人口數約 2,850 萬人，有 58% 的人口是屬於勞動年齡，全國務農人口占 80%，相較於北部受限於喜馬拉雅山脈，與中國經濟交流上交通極為不便，南部屬平原地形，交通設施發達，與印度經濟交流密切。



圖 1 尼泊爾行政分區圖

(星號為首都加德滿都，三角形為本次滿卡村山崩位置(修改自尼泊爾政府網站))

尼泊爾位於喜馬拉雅山脈南麓，屬印度板塊與歐亞板塊互相碰撞之處，有複雜的地質構造與變質作用，三條主要逆衝斷層線略呈東西向橫跨尼泊爾，山區之岩性以變質岩為主(圖 2)。因此，尼泊爾擁有豐富的地理景觀(圖 3)，主要可分為北部的高山地區，中部的山區和河谷，以及南部的平原區，世界十大高峰有八個在尼泊爾境內，包括全球最高的山峰珠穆朗瑪峰(Mount Everest)(海拔高度 8,848 m)，使尼泊爾成為熱門的登山勝地¹。

¹統計資料顯示，1997 年至尼泊爾山區健行之遊客總人數為 39,988 人(MacLellan et al., 2000)。

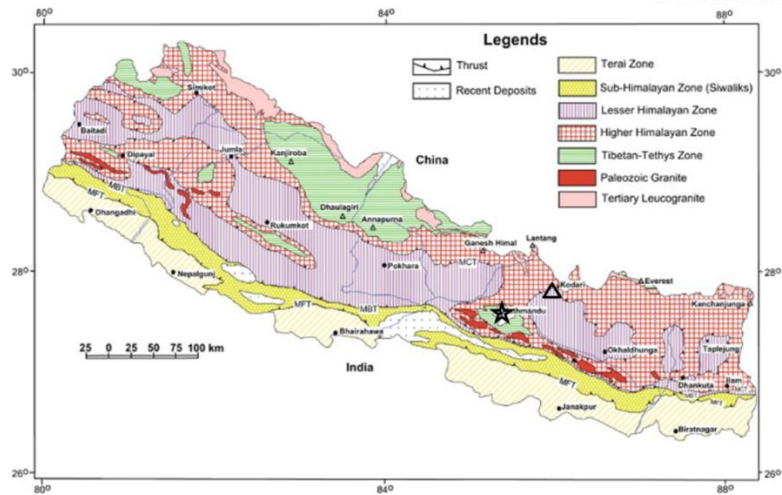


圖 2 尼泊爾地質圖

(星號為首都加德滿都，三角形為本次滿卡村山崩位置(引用自 Dahal and Hasegawa, 2008))

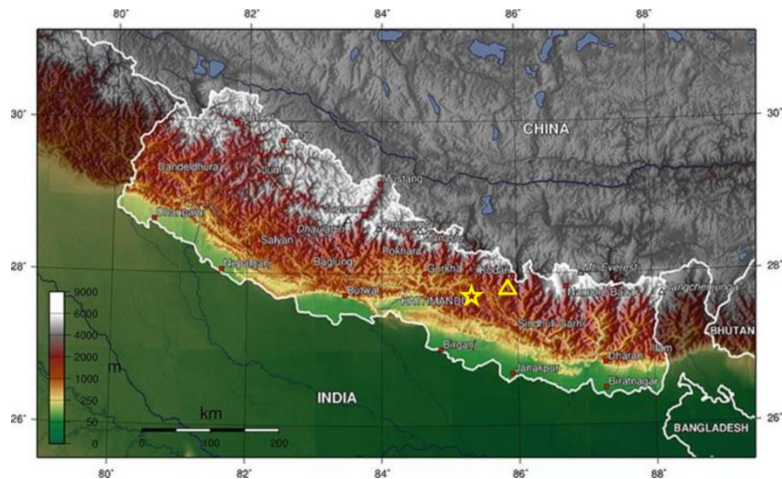


圖 3 尼泊爾地形圖

(星號為首都加德滿都，三角形為本次滿卡村山崩位置(引用自維基百科))

尼泊爾境內的高程變化非常大，從低於海拔 100 公尺的平原到超過海拔 8,000 公尺的高山地形皆有，因此不同區域之氣候也差異很大，包含了熱帶氣候到終年積雪的地區。受到由孟加拉灣來的夏季季風影響，每年 6 至 9 月是尼泊爾的雨季，脆弱的地質環境，加上連場暴雨，導致大規模的洪水、土石流及山崩的侵襲。年降雨量分布通常由東向西遞減(圖 4)，東部累積降雨量約 2,500 mm/yr，西部累積降雨量約 1,000 mm/yr，喜馬拉雅山脈迎風面累積雨量可達 5,500 mm/yr，背風面則僅有 160 mm/yr。

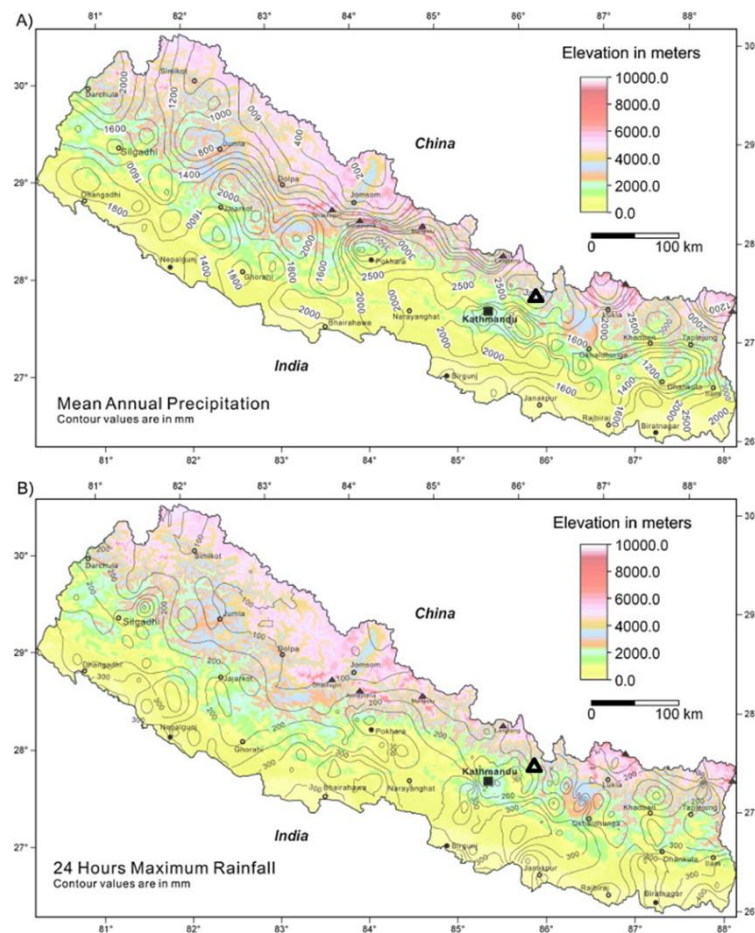


圖 4 (A)尼泊爾年平均累積雨量 (B) 尼泊爾 24hr 最大累積雨量
(三角形為本次滿卡村山崩位置(引用自 Dahal and Hasegawa, 2008))

本次山崩發生在尼泊爾中部的巴格馬蒂專區(Bagmati Zone)辛胡帕疇縣(Sindhupalchowk District)的滿卡村(Mankha)(圖 5)，海拔高度約在 1,500 公尺左右，與首都距離約 60 公里。辛胡帕疇縣擁有豐富的旅遊資源，包含許多文化遺產、熱門的朝聖景點與寺廟等，每年有大量的遊客前往旅遊。根據尼泊爾人口調查結果(Nepal Census Data 2001)，滿卡村人口數約 4,000 人，主要道路中尼公路(Araniko Highway)是加德滿都連接西藏的通道，約五、六個小時便可以從加德滿都到尼泊爾與西藏之邊境，因此旅客通常會在滿卡村稍做休息與用餐，但不會過夜，小村落成為過境西藏的重要補給站。國家災害防救科技中心

(NCDR)所蒐集之統計資料顯示，首都加德滿都累積降雨量約為 1,400 mm/yr，降雨主要在每年的 6 月到 9 月(圖 6)，由圖 4 可知滿卡村的年降雨量大於加德滿都，約為 2,500 mm/yr。

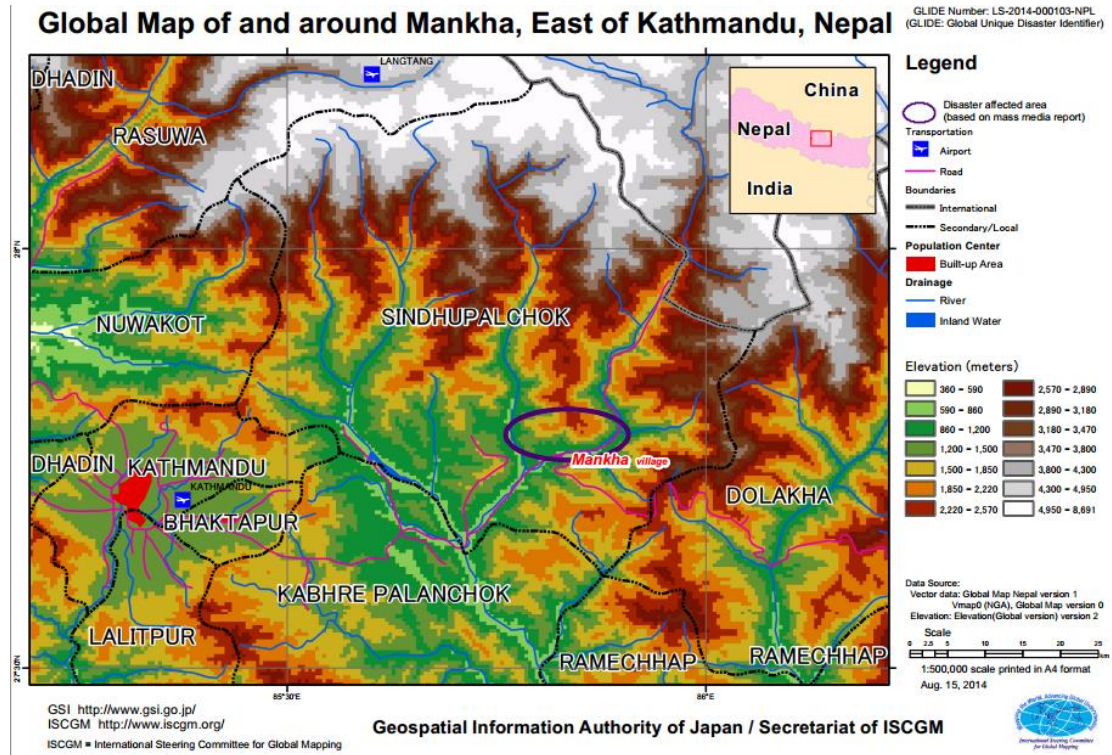


圖 5 滿卡村位置與高程分布圖

(引用自日本國土交通省國家地理院(Geospatial Information Authority of Japan, GSI))

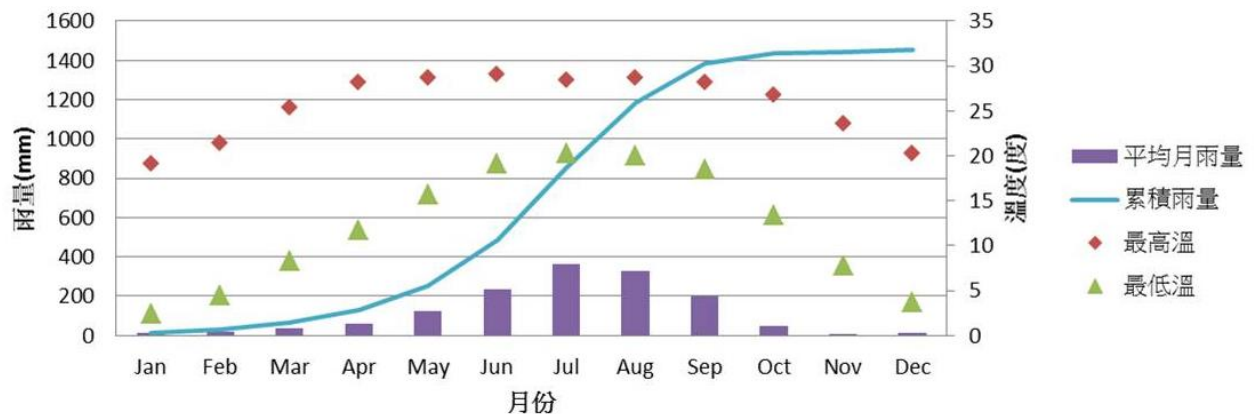


圖 6 尼泊爾首都加德滿都之氣溫及雨量統計資料

(數據來源：尼泊爾環境、科學與科技部)

二、滿卡村山崩事件

8 月 2 日凌晨，距離首都加德滿都約 60 公里的滿卡村，在科西河(Koshi)的主要支流桑科西河(Sunkoshi)右岸，海拔約 1,500 公尺處，發生了大規模的山崩(圖 7)，摧毀了將近 60 間房舍。8 月 6 日政府宣告救援行動結束，總死亡人數為 156，是尼泊爾近年來最嚴重的一次災情。



圖 7 滿卡村山崩空照圖

(照片來源：ekantipur.com)

山崩後大量土石形成巨大的壩體(圖 8)，高約 100 公尺，攔腰截斷桑科西河之河道，形成大規模的堰塞湖(圖 9)。儘管軍方開闢了疏水道 (圖 10)，堰塞湖水位下降的速度依舊非常緩慢，從 8 月 6 日至 8 月 23 日水位幾乎沒有明顯變化(圖 11)。9 月 7 日凌晨，山崩發生後第 36 天，壩體承受不住大量水體之壓力，堰塞湖由疏水道處潰堤，湖水下降約 15-18 公尺，下游約六公里遠之處有一些房子被破壞，所幸並沒有造成居民的犧牲。



圖 8 山崩所造成之堰塞壩
(照片來源：尼泊爾政府網站)



圖 9 崩塌的大量土石所造成之堰塞湖
(照片來源：ekantipur.com)



圖 10 尼泊爾軍方所開闢之疏洪水道
(照片來源：AGU Landslide Blog、尼泊爾軍方網站)



圖 11 不同時間之堰塞湖情況比較，可看到堰塞湖水位並無明顯變化。

(照片來源：AGU Landslide Blog, Photo by Kapil Dhital via Twitter)

利用全球地震觀測網所紀錄的震動訊號，對偏遠地區的大規模山崩事件進行相關分析，可獲得包含山崩發生地點、時間、規模大小、滑動方向、距離以及速度的資訊，三位學者(Colin Stark, Goran Ekstrom and Clement Hibert)從滿卡村山崩所造成之震動訊號，得知山崩發生於當地時間 8 月 2 日凌晨 2 點 36 分左右，並可逆推得崩塌的量體約為 5.5 百萬立方公尺(數據來源：AGU Landslide Blog)。

NCDR 在這邊應用災後航照與 Landsat 8 所拍攝的影像，初步定義出山崩與堰塞湖的影響範圍(圖 12)，整個崩塌長約 1,220 公尺，底部寬約 930 公尺，面積約 83 公頃，堆積範圍約 57 公頃，堰塞湖迴水長度約 2,450 公尺，最寬處約 580 公尺，湖水面積約 56 公頃。配合震動訊號所推估之量體體積，與影像所判釋之崩塌範圍，可推算出此崩塌的平均深度約為 7 公尺。

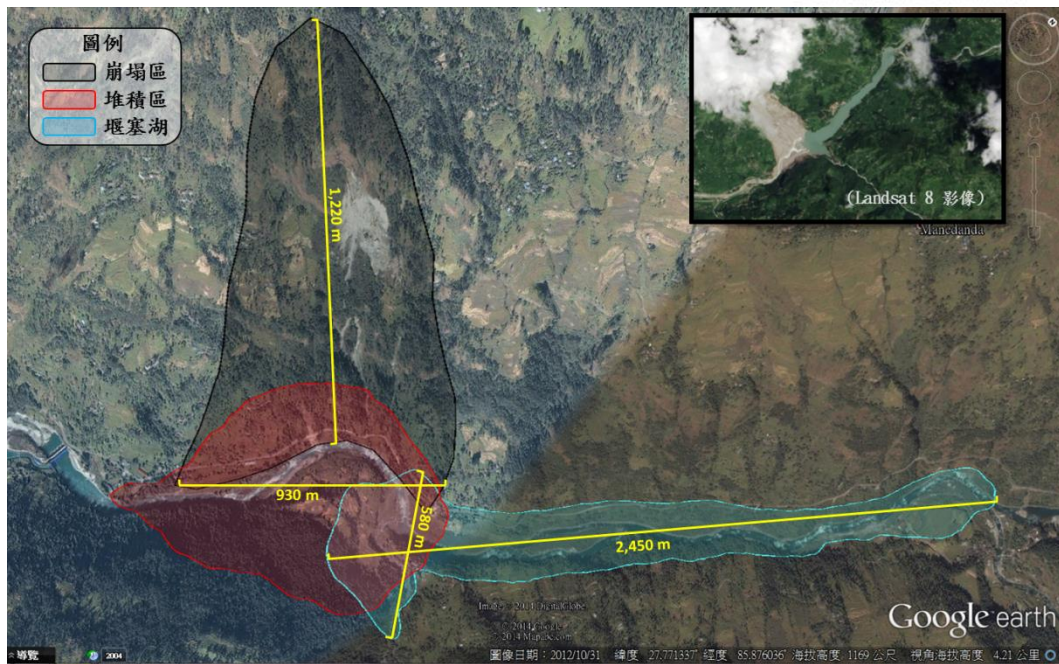
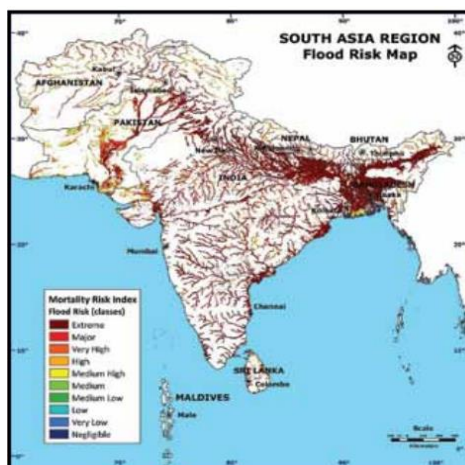


圖 12 滿卡村山崩崩塌區、堆積區與堰塞湖概估之範圍

(Landsat 8 影像來源：美國太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA))

三、致災原因探討

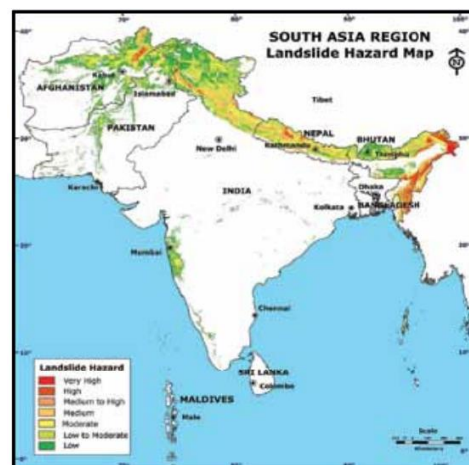
陡峭的坡地、頻繁的地震、每年 6~9 月猛烈地季風降雨，年輕脆弱的地質環境，使得尼泊爾深受山崩、淹水等自然災害的影響(圖 13、圖 14)，常造成嚴重的經濟、財產與性命的損失。此次災害的主要原因我們歸納詳述如下：



Source: RMSI (2010)

圖 13 南亞洲水災風險地圖

(引用自 The World Bank)



Source: RMSI (2010)

圖 14 南亞洲山崩風險地圖

(引用自 The World Bank)

1. 脆弱的地質環境導致災害頻繁

印度板塊至今仍以 5 mm/yr 的速度向北移動，喜馬拉雅山的造山運動持續進行中，是地球上構造運動最活躍的地區之一。高低起伏的複雜地形、不穩定的地質構造、軟弱且破碎的岩層、頻繁的地震，加上印度季風期間強烈且集中的降雨，使尼泊爾山區不但常見小規模的淺層崩塌，亦不少大規模的崩塌事件，由於規模大、速度快、移動距離長的特性，易造成巨大的災害。

崩塌是尼泊爾僅次於傳染病的第二大危害。根據 2011 年尼泊爾政府之統計，過去的 40 年裡，約有四千多人在山崩災害中喪生，每年約有 12,000 次的山崩事件。由 2012 年的歷史影像(圖 15)，我們可以看到此處已有岩屑崩滑的現象，鬆散不穩定的崩積物堆在坡面上，坡面下半部亦有明顯的沖蝕溝存在。2013 年 6 月的照片(圖 16)顯示，表層的崩積物和沖蝕溝皆有增加的趨勢，植生覆蓋減少，邊坡裸露，已是山崩災害的高風險地區，2014 年 8 月便發生了此起彼落慘重的災害事件。

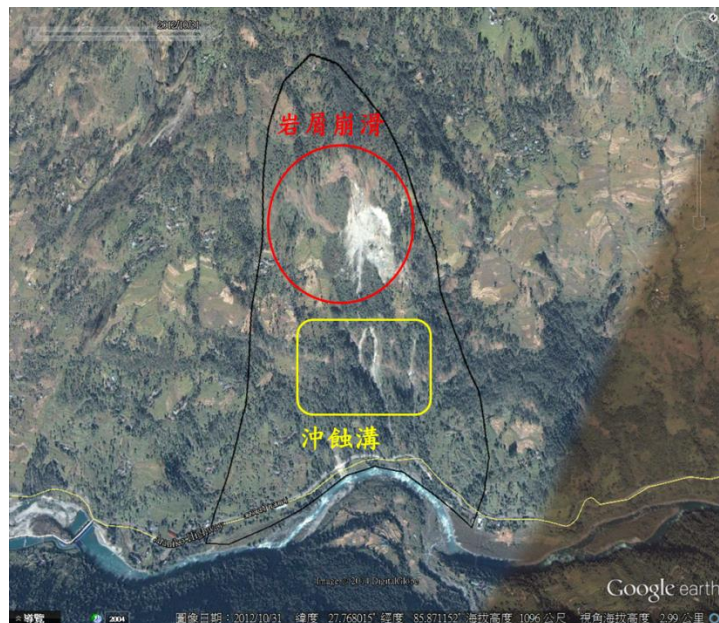


圖 15 滿卡村山崩處 2012 年歷史影像
(黑線所圈繪的是 2014 年本次崩塌的範圍)



圖 16 2013 年六月與 2014 年八月山崩後同地點所拍攝之照片。

(照片來源：ICIMOD、Circle of blue)

2. 坡趾受桑科西河長期沖蝕導致崩塌

在尼泊爾約有 80% 的年降雨集中在 6-9 月的雨季，而雨季中的降雨分布也是非常的不平均，有時候一天的降雨量可達到年雨量的 10% (Alford, 1992)，集中的強降雨是誘發山崩的主要原因之一。圖 17 為 1951-2006 年尼泊爾境內 677 個山崩事件的分布，可以看到多數山崩主要集中在尼泊爾中部以及喜馬拉雅山的前緣，皆是年降雨量與降雨強度(圖 4)較高的地方。

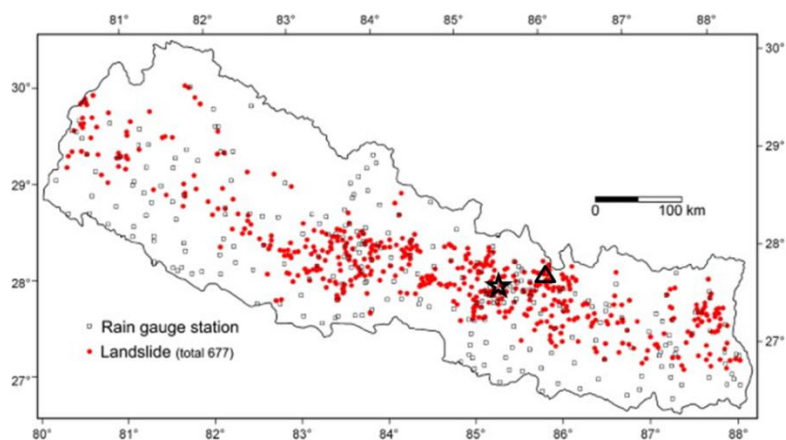


圖 17 1951-2006 年在尼泊爾境內發生的 677 個山崩事件分布圖

(星號為加德滿都、三角形為滿卡村山崩位置。(引用自 Dahal and Hasegawa, 2008))

由於降雨是觸發山崩的主要原因之一，新聞媒體亦報導滿卡村的山崩事件是由於當地 8 月 2 日凌晨的豪大雨所造成，因此 NCDR 在這邊蒐集了滿卡村附近三個雨量測站資料(圖 18)，距離最近的雨量站(Bhote Koshi At Bahrabise)於山崩發生當日凌晨並無降雨紀錄，Nagarkot 雨量站的資料顯示凌晨 2、3 點間最大降雨僅 0.5 mm/hr 左右，推論於山崩發生時應無明顯的降雨現象。然而，雨季期間不穩定塊體之含水量與地下水位皆較平常時高，加上此崩塌位於桑科溪河之攻擊坡(圖 12)，坡趾不斷地被河水沖蝕，當坡腳的侵蝕使坡體潛變的位移達到了臨界狀態，觸發上邊坡坡體下滑之重力作用，最終產生大規模崩塌。

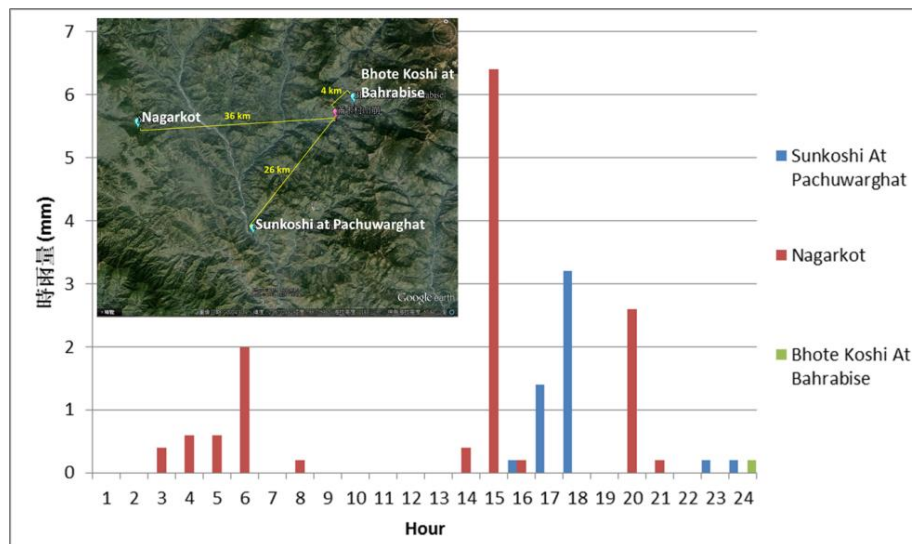


圖 18 滿卡村附近三個雨量測站資料(2014.08.02)與位置距離圖
(數據來源：DHM)

四、堰塞湖之探討與處理

堰塞湖常發生在河岸旁的崩塌事件中，大量的鬆散土石堆積在河道形成不穩定的土石壩體，阻斷溪水引起上游迴水，當壩體無法承受水體壓力時，便會潰堤並可能在下游造成不小的衝擊。過去的研究成果顯示，全球 204 個案例中有 34% 的堰塞湖形成不到一天即潰堤，約 51% 的堰塞湖在形成後一個禮拜內潰堤 (圖 19)(Peng and Zhang,

2011)，由此統計資料可知，堰塞湖形成到潰堤的時間相當短，並將可能引致極大規模的災害與衝擊，因此，由防災的角度而言，堰塞湖天然壩體穩定性的快速分析，以及相關緊急應變處理便顯得格外重要。

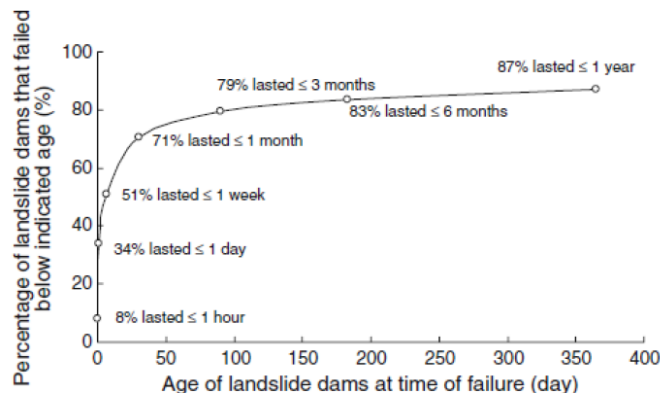


圖 19 堰塞湖形成後之潰壩時間分布圖

(引用自 Peng and Zhang, 2011)

(一) 滿卡村堰塞湖之詳細探討

當山崩發生在深山地區時，堰塞湖的生成不易被發現，沒有預警的潰壩將會造成嚴重的生命財產損失，如 2012 年 5 月，尼泊爾西北部發生大規模山崩，大量土石堵住了塞提河 (Seti)，由於山崩地點位處高山地區，缺乏堰塞湖相關資訊，待壩體潰堤後，產生嚴重的山洪暴發，沖刷至下游幾個村莊，造成 72 人死亡。若崩塌發生在有保全對象的地區，不但山崩事件本身會造成危害，堰塞湖的形成與潰堤，也將對下游地區造成二次威脅。如 2009 年莫拉克颱風在台灣高雄甲仙獻肚山造成大規模山崩，豪大雨將大量土石無情的沖進小林村，造成小林國小以北村落被土石掩埋，並在楠梓仙溪形成一堰塞湖，1 小時後便發生潰堤，使小林國小以南的地區被洪水沖毀，造成二次災害，死亡總人數高達 407 人。

此次滿卡村之山崩在桑科西河亦形成一堰塞湖，滿卡村山崩與小林村山崩之堰塞湖比較如表 1。堰塞湖的壩體越高，壩體的體積越大，則堰塞湖的蓄水時間越長，雖然小林村山崩的崩塌體積遠高於滿卡村之山崩，然而因豪雨使河道的流量增加，崩塌塊體易受河水沖刷流失，導致阻斷河道的材料體積較崩塌量體小許多，加上極高的尖峰流量值，使小林村的堰塞湖在一小時內即溢流沖蝕(overtopping)破壞潰決。滿卡村山崩發生後三小時，可以明顯看到下游地區(距山崩地點約 38 公里處)的水量快速遞減(圖 20)，13 個小時後一個巨大的堰塞湖形成，水體約 7 百萬立方公尺，尼泊爾軍方開鑿疏洪道後，產生人為溢流沖蝕，由於溢流初期壩體土壤尚未飽和，故沖刷速率較緩慢。9 月 7 日堰塞湖潰堤，壽命達 36 天，我們可以從圖 21 看到，在潰壩前幾個小時上游流量快速增加，應是集中的降雨所造成，加上尼泊爾軍方將疏水道拓寬，當溢流之入滲水與雨水使壩體飽和之後，除了溢流沖蝕破壞，壩址亦可能因管湧破壞(piping)，產生淘刷壩體下游坡腳的現象，破壞面往壩頂逐漸發展與沖刷速率的增加，最終導致潰壩。

表 1 台灣小林村與尼泊爾滿卡村堰塞湖相關資訊比較

	崩塌量 體(m^3)	崩塌面 積(ha.)	平均崩塌 深度(m)	壩體 積(m^3)	天然壩 壩高(m)	湖體積 (m^3)	堰塞湖 壽命	平均流入 量(m^3/s)	尖峰入流 量(m^3/s)
小林村 (2009)	23×10^6	70	40	15×10^6	60	9.8×10^6	1 hr	30.14	2974
滿卡村 (2014)	5.5×10^6	83	7	-	100	7×10^6	36 day	155	198

(數據來源：Dong et al., 2011、Tsou et al., 2011、尼泊爾政府網站、NCDR彙整)

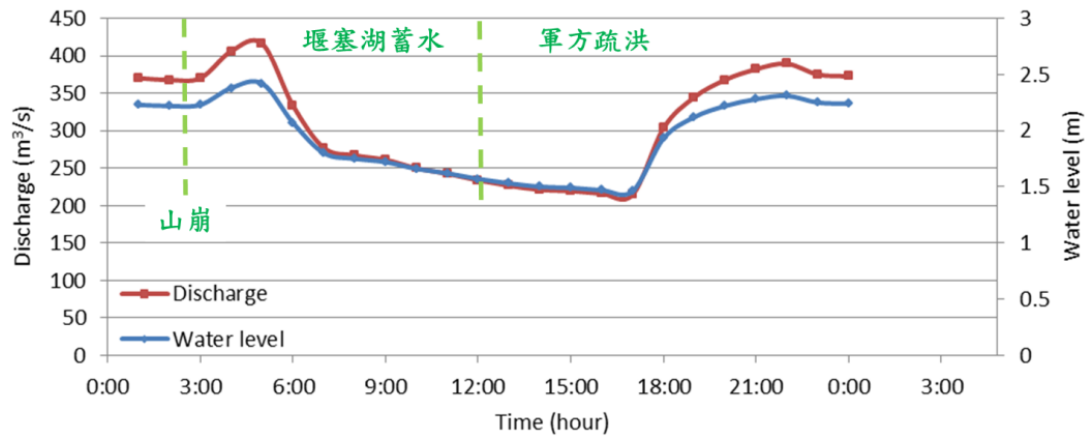


圖 20 2014/8/2 堰塞湖形成前後之下游(Pachuwarghat)流量與水位變化
(數據來源：DHM)

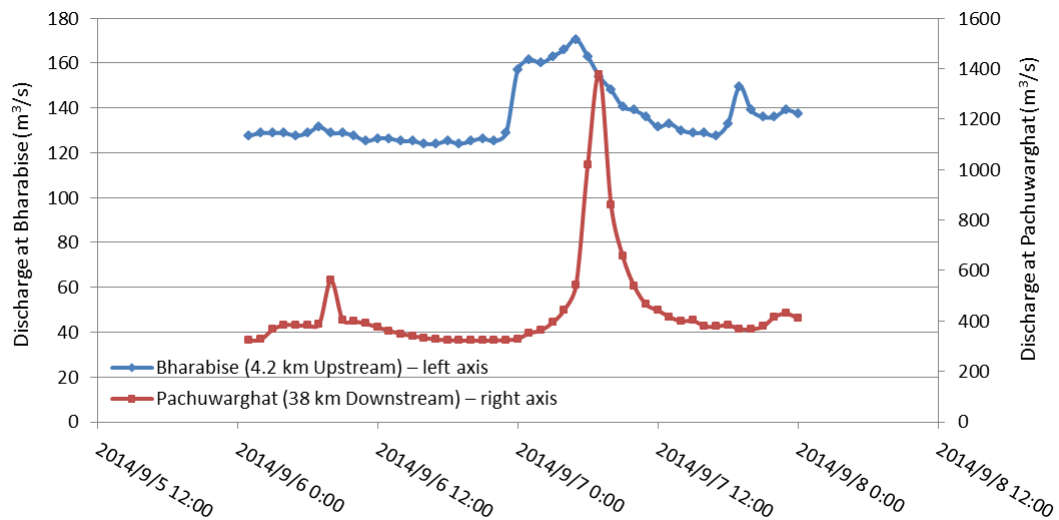


圖 21 2014/9/6 至 2014/9/7 堰塞湖上下游之流量變化圖
(數據來源：DHM)

(二) 尼泊爾政府對堰塞湖之處理

堰塞湖形成後，由於連續的降雨，使迴水不斷擴張，堰塞湖水位高度持續上升，影響上游最接近的城市巴拉拜斯(Barabise)，尼泊爾政府亦對下游洪水風險地區發出警告，當堰塞湖潰堤，大量的水體將直接衝向下游沿岸 11 個區域(Sindhupalchowk, Kavre, Khotang, Dolakha, Bhojpur, Udayapur, Sindhuli, Ramechhap, Dhankuta, Saptari and Sunsari)，對 104 個村落形成巨大的危害(圖 22)，政府第一時間便

疏散了 225 戶居民，亦通知印度的比哈爾邦(Bihar)可能受到洪水影響，印度政府疏散了近 20,000 住在科西河(Koshi river)流域的居民。然而，從崩塌的土石阻斷河流到堰塞湖形成，約 13 個小時的時間，有媒體認為尼泊爾政府並沒有及時控制並釋放一些儲水量，反而對外宣稱堰塞湖水位高度一直在下降，約一兩天後即可解除堰塞湖之威脅，官方過度樂觀但卻錯誤的公告，沒有去正視居民可能面臨的災難和危險，引起民眾的不安與不滿。

為了解決堰塞湖的問題，軍方以爆破的方式開闢了水道，疏通堵塞河道的泥石，但經過多天努力後，堰塞湖水位下降的速度依舊非常緩慢，推測可能是因為連續豐沛的降雨，以及疏洪之水道太過平緩且不夠深所導致。9 月 6 日經由學者之建議，軍方將排洪水道拓寬約 30 公尺。9 月 7 日堰塞湖在沒有預警的情況下潰堤，湖水下降約 15-18 公尺，所幸下游居民已經在第一時間疏散，僅於六公里遠處有一些房子被破壞，並無造成生命的損失。

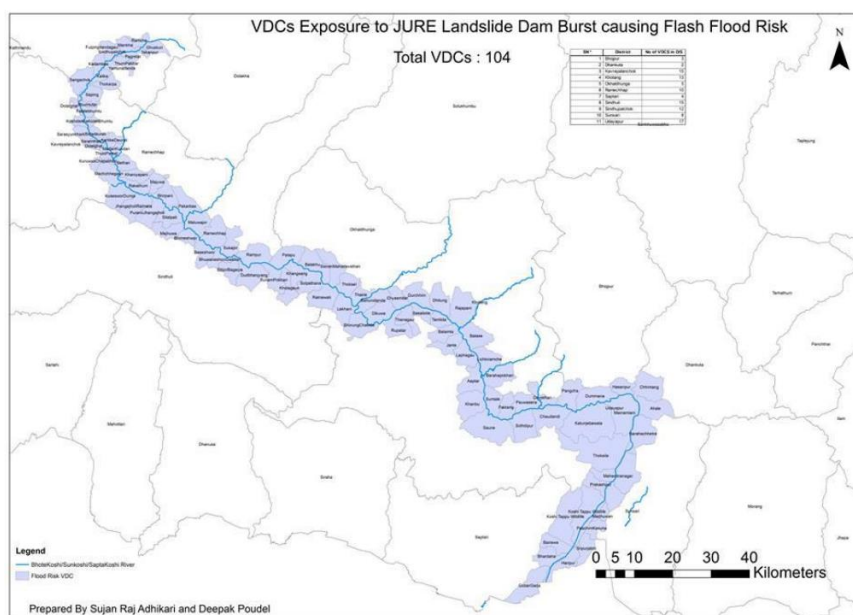


圖 22 堰塞湖可能造成威脅之下游村落分布圖

(引用自 ACT Alliance)



五、結論與建議

2014 年季風期間，尼泊爾已發生了至少 37 個大大小小的山崩、土石流與淹水事件，政府官方統計至少造成了 229 人死亡(至 2014/8/26)。脆弱的地質組成、陡峭的地形、坡地被任意開發，加上頻繁的集中降雨與極端事件的影響，使不同類型的致命天然災害，不斷侵襲尼泊爾。

雖然，我們並無法控制天然災害如山崩、洪水的發生，但如何減少災害對生命、財產等負面的衝擊則是我們必須努力的。此次滿卡村的山崩事件，其實從歷史影像資料就已經可以看到徵兆，雖然事前的監測並無法準確預測山崩發生的時間或大小，但若有這些相關資訊，便可針對可能受影響的保全對象進行評估與撤離，以降低災害的影響衝擊。近年來，尼泊爾政府雖已著手進行即時的雨量監測，提前預警可能遭受淹水之區域並疏散撤離，但在坡地災害部分尚未有完善的資訊、堰塞湖的緊急應變作業亦無標準程序。因此，國際上的經驗交流合作對於尼泊爾而言相當重要，滿卡村的事件中，印度與中國皆有提供技術上的協助，但除了特定事件外，尼泊爾應規劃與鄰國進行長期的災害風險管理合作與學習，規劃完善的土地利用政策、進行監測與分析可能之災害風險、影響範圍的劃設、建立預警系統等，將有助於未來面對災害的應變處理，以減少生命財產的損失。

台灣有近四分之三的區域屬於山坡地，人為不當的坡地開發、土地過度利用、旅館的違規增建，往往是在大自然反撲下，造成生命財產嚴重損失的主要原因之一。因此，除了潛在崩塌地區的監測、崩塌影響範圍的圈繪、山崩風險地圖的建製以及預警系統技術的研究發展外，如何讓民眾正視自然環境的災害，了解其生活環境可能存在之風險，改善過去環境開發不當的情況，並加強山坡地社區的防災應變措施，是台灣防減災所需面對的重要課題。

參考資料

日本國土交通省國家地理院(Geospatial Information Authority of Japan, GSI)

<http://www.gsi.go.jp/>

尼泊爾政府網站

<http://www.nepal.gov.np/>

尼泊爾環境、科學與科技部

<http://www.moste.gov.np/>

尼泊爾軍方網站

<http://www.nepalarmy.mil.np/index.php?>

美國太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)

<http://www.nasa.gov/>

維基百科

http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

ACT Alliance

<http://www.actalliance.org/>

AGU Landslide Blog

<http://blogs.agu.org/landslideblog/>

Alford, D., (1992) Hydrological Aspects of the Himalayan

Region. Occasional Paper, no.18. ICIMOD, Kathmandu, Nepal. 68 pp.

Circle of blue

<http://www.circleofblue.org/>

Department of Hydrology and Meteorology (DHM)

<http://hydrology.gov.np/new/bull3/index.php/hydrology/home/main>

Dong, J.J., Li, Y.S., Kuo, C.Y., Sung, R.T., Li, M.H., Lee, C.T., Chen, C.C., Lee, W.R., 2011. The formation and breach of a short-lived landslide dam at Siaolin village, Taiwan - Part I: Post-event

reconstruction of dam geometry. Engineering Geology, Volume 123, Issues 1–2, p. 40–59

Ekantipur.com

<http://www.ekantipur.com/>

International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)

<http://www.icimod.org/>

MacLellan, L. R., P. U. C. Dieke, and B. K. Thapa. 2000. Mountain tourism and public policy in Nepal. In Godde, P. M., M. F. Price, and F. M. Zimmermann. editors. Tourism and Development in Mountain Regions. Wallingford, United Kingdom CABI Publishing. p. 173–197.

Nepal Census Data 2001

<http://www.digitalhimalaya.com/collections/nepalcensus/>

Peng, M., Zhang, L. M., “Breaching parameters of landslide dams”, Landslide, doi:10.1007/s10346-011-0271-y, 2011.

Dahal R.K., and Hasegawa S. (2008) Representative rainfall thresholds for landslide in the Nepal Himalaya, Geomorphology, Volume 100, Issues 3-4, p. 429-443

Reliefweb

<http://reliefweb.int/updates?search=Nepal>

Tsou, C.-Y., Feng, Z.-Y., Chigira, M., 2011. Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan. Geomorphology, Volume 127, Issues 3–4, 15 April 2011, p. 166–178

The Times of India

<http://timesofindia.indiatimes.com/home>

The World Bank

<http://www.worldbank.org/>

World population review

<http://worldpopulationreview.com/countries/nepal-population/>