

氣候變遷下極端降雨引致廣域坡地災害評估技術之研究

顧承宇^{[1]*} 陳建忠^[2] 張怡文^[2] 許世孟^[3] 陳耐錦^[3] 溫惠鈺^[3]

摘 要 本研究針對基隆河流域於極端降雨事件下山坡地社區災害之影響進行研究以了解氣候變遷之極端降雨事件對廣域山坡地社區災害所可能之影響，研究首先蒐集雨量資料，統計研究區域雨量於時空之分布特性，之後利用定率法建立廣域淺層坡地崩塌模式，進而探討基隆河流域內之降雨與坡地社區崩塌之關係，並瞭解區域內颱風豪雨事件造成坡地社區環境災害特性。另本研究以降雨延時 24 小時之不同重現期雨量預測研究區域內不同極端降雨條件下之崩塌潛勢分布，研究成果可用以瞭解高潛勢區域分布情形，而有效降低災害發生時生命財產之損失。

關鍵詞：坡地災害、極端降雨、邊坡穩定、廣域、氣候變遷。

Study on the Assessment of Regional Rainfall-Induced Landslide Hazards under Extreme Climate Conditions

Cheng-Yu Ku^{[1]*} Chien-Jung Chen^[2] I-Wen Chang^[2] Shih-Meng Hsu^[3]
Nai-Chin Chen^[3] Hui-Yu Wen^[3]

ABSTRACT To understand the possible influence of extreme rainfall events due to climate change on hillside disasters, this study on the assessment of regional rainfall-induced landslide hazards under extreme climate conditions in Keelung river watershed was conducted. First, rainfall data were collected to examine the spatial and temporal characteristics of rainfall in the study area. Then, the regional rainfall-induced landslide model was established based on the deterministic approach and used to simulate the extreme rainfall induced landslides in the study area. Finally, the prediction of landslide susceptibility could then be made using different return periods of 24-hour rainfalls. The results demonstrate this study could provide useful information for predicting the spatial distribution of areas susceptible to landslides and may mitigate hazards.

Key Words : Landslide hazards, extreme rainfall, slope stability, regional scale, climate change.

一、前 言

全球暖化可能是造成氣候變遷的主要因素，依據 Liu et al. (2009) 研究成果顯示，全球溫度每增加 1 度，台灣前 10 % 強降雨就會增加約 140 %，而前 10% 小雨

則會減少約 70 %。強降雨的增加可能導致山崩與土石流發生更加頻繁、嚴重。近年來受全球氣候變遷影響，台灣地區氣候也頻頻出現異常現象，2004 年至 2008 年（薔蜜、辛樂克、卡玫基颱風）台灣地區出現單日近 1000 公厘、3 日近 2000 公厘降雨量，2009 年（莫拉克颱風）

[1] 國立臺灣海洋大學河海工程學系

Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung City, Taiwan, R.O.C.

[2] 內政部建築研究所

Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior, Taiwan, R.O.C.

[3] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : chkst26@mail.ntou.edu.tw

88 水災屏東縣更發生單日超過 1400 公厘降雨量，2010 年豪雨造成蘇花公路全面性坡地災害，接連幾次極端降雨，均在台灣北中南各地造成坡地社區嚴重之崩塌與土石流災害。山崩常是造成山坡地社區災害之主因，台灣地區潛藏之天然環境諸如地震與颱風降雨係為坡地災害之外在的促發因子。由全球其他地區氣象資料顯示，未來異常氣候所造成之大量降雨恐將成為常態，而台灣地區地形特殊，高山林地及法定山坡地即佔全島面積 74%，極易因氣候異常變遷而產生崩塌災害，不僅危及山坡地社區居民安全，更可能導致下游都市環境災害。為了解氣候變遷之極端降雨事件對廣域坡地災害所可能之影響，同時整合坡地防災資訊技術，故進行氣候變遷下極端降雨事件引致廣域坡地災害評估技術之研究工作。

本研究針對基隆河流域於極端降雨事件下山坡地社區災害之影響進行研究以了解氣候變遷之極端降雨事件對廣域山坡地社區災害所可能之影響，首先蒐集雨量資料，進行降雨頻率分析，統計研究區域雨量於時空之分布特性，降雨頻率分析結果可獲得各雨量站不同重現期距降雨趨勢，進而提供氣候變遷下極端降雨事件（颱風豪雨事件）之雨量預測值。之後蒐集研究區域內之崩塌地資料製作成 GIS 分析圖層，利用定率法建立廣域淺層坡地崩塌模式，進而探討基隆河流域內之降雨與坡地社區崩塌之關係，並瞭解區域內颱風豪雨事件造成坡地社區環境災害特性。另本研究以降雨延時 24 小時之不同重現期雨量預測研究區域內不同極端降雨條件下之崩塌潛勢分布，研究成果可用以瞭

解高潛勢區域分布情形，而有效降低災害發生時生命財產之損失。

二、研究區域降雨特性

台灣地區雨量豐沛而且集中，山崩的發生和降雨及降雨入滲量皆有著密切關係。影響降雨之因素很多，包括：坡度、高程、風向、地形與水源距離等，因大氣循環關係，緯度越高，雨量越少；海拔越高，雨量越多，但達到某一高程後，雨量有下降趨勢；風則可攜帶大量水氣，又颱風常帶來豪雨；地形因素造成迎風面降雨量較大，背風面降雨量少；越靠近水源區如湖泊、海洋，則降雨量越大。受到這些氣候與地理環境因素影響，降雨在時間與空間分布上變得相當不平均，以台灣地區為例，雨量多集中在 5 月至 10 月間，佔年平均總雨量 78%，各地區的雨量分布也不一樣。因此若能釐清研究流域內降雨條件，分析出流域內降雨特性的變化，就能利用降雨特性進行山坡地災害發生關聯性研究。

Liu et al. (2009) 研究成果指出，氣候變遷對強降雨(於本文中以極端降雨事件稱之)之發生頻率已造成嚴重之影響，因此本研究首先針對極端降雨事件進行研究，並嘗試定義極端降雨事件。過去對於極端降雨事件之研究有以日雨量為基礎，如 Zhai et al. (2005) 對中國 740 個測站作了總體降雨以及極端日降雨發生頻率的趨勢分析，所謂的極端降雨是指在 95% 以上的日降水量。而 Kunkel et al. (1999) 根據日雨量資料統計延時為 3 日與 7 日的降雨事件分析了美加地區極端降雨的

表 1 基隆河流域雨量站站況表

Table 1 Rainfall gauging stations

站號	站名	所屬單位	高程 (m)	紀錄年份	年數	縣市
01A200	火燒寮	經濟部水利署	380	1958~1982,1984~1994,1996~2009	48	台北縣
01A380	瑞芳 (2)	經濟部水利署	101	1973~1974,1976~1976,1978~1982,1984~1992,1994~1994,1996~2009	28	台北縣
01B030	五堵	經濟部水利署	16	1965~1966,1968~1978,1980~1982,1984~2009	42	基隆市
C0A590	大尖山	中央氣象局	326	2000~2009	10	台北縣
C0A990	大崙尾山	中央氣象局	454	1997~2009	13	台北市
C0A870	五指山	中央氣象局	685	1993~2009	17	台北縣
C0A650	火燒寮	中央氣象局	9	1987~1991,1993~2009	22	台北縣
C0A660	瑞芳	中央氣象局	95	1987~1991,1993~2009	22	台北縣
C0A9A0	大直	中央氣象局	49	1997~2009	13	台北市
C0A9F0	內湖	中央氣象局	20	1997~2009	13	台北市
C0A9G0	南港	中央氣象局	42	1997~2009	13	台北市
C0A9H0	信義*	中央氣象局	51	1997~2009	13	台北市

*註：截至 2009/3/31 已撤站。資料來源：水利署水文年報、中央氣象局

長期趨勢,然後以 1931-96 年共 66 年的歷年最大值決定 1 年與 5 年重現期距的分級值並以此為極端降雨的判定標準。因此分析降雨資料再按事件發生機率決定何為氣候上的極端事件係可用以決定極端降雨事件之方法。

降雨頻率分析在許多相關水文分析之研究中是基本的工作項目,目前由政府單位出版較新之降雨頻率分析成果為水利署報告「颱風時期雨量頻率分析」(經濟部水利署, 2006),該報告採用之分析雨量站為水利署與氣象局雨量站,機率分布則採皮爾遜 III 型與對數皮爾遜 III 型,降雨延時部分有 1、3、6、12、24、48 及 72 小時,雖然該研究已有許多成果可供參考,但並未涵蓋本階段計畫範圍各流域所有可採行之雨量站,此外,既有資料之紀錄年限完整性仍有不足,因此考量計畫的需求將重新針對計畫範圍之降雨資料進行頻率分析。本研究將蒐集基隆河流域集水區雨量站資料進行降雨頻率分析及蒐集長時間的流量站資料進行地下水補注量分析,相關成果除了可獲得基隆河流域之降雨分布、地下水補注量與長期穩定入滲量外,另可提供山崩潛勢預測模式分析之基本輸入資料。

本研究將所蒐集到之各雨量站雨量資料(如表 1 所示),進行各站之年平均雨量值計算,可得知流域內各測站年平降雨量介於 2,190 mm 至 4,650 mm 之間,其基隆河流域歷年平均年降雨量等值圖,如圖 1 所示。另外套疊崩塌地地圖層(水保局, 2002)可以發現,主要之崩塌地位置落於平均雨量介於 3,750 mm 至 4,500 mm 之間,可見的崩塌地的產生與降雨量之大小有明顯的關連。

1. 降雨頻率分析

「降雨頻率分析」係應用統計方法,分析在某一地區大於或等於某一特定大小之水文事件,在一定期間內會發生之機率。一年內該大小水文事件發生之機率,亦可稱為頻率;其中所指之水文事件,可包含如洪水流量、暴雨量、特枯流量等。而頻率分析之目的,係根據實測記錄以各種方法計算不同再發生年(即重現期)之水量值,以預測未來可能會發生之結果。頻率分析之內容包括機率分布之選用、參數之計算及機率分布模式之檢定,茲將頻率分析之方法及分析結果說明如後(Chow 等, 1988)。

頻率分析之通用方程式為:

$$X_T = \mu + \sigma \times K_T \quad (1)$$

式中, X_T 為重現期 T 年之水量; μ 為選用 n 年資料之平均值; σ 為選用資料之標準偏差; K_T 為頻率因子,視機率分布及重現期而定,為重現期 T 及機率分布之函數。一般工程水文分析上,是以所蒐集到之水文紀錄平均值代入 μ , 以水文紀錄之標準偏差代入 σ 。

對於某特定重現期而言,不同的機率分布會有不同的頻率因子,所以(1)式可應用於水文紀錄分別隸屬於不同機率分布之上。不同機率分布之頻率因子與相對應重現期之關係,可以表示為數學方程式或以列表方式呈現;因此若確認水文紀錄之機率分布並知其統計特性參數,則當給定一重現期後,即可利用(1)式計算出 X_T 之大小。

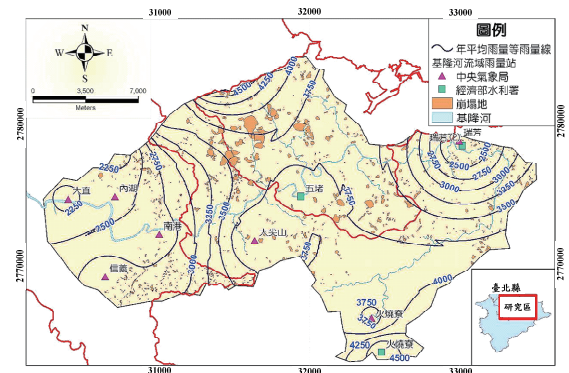


圖 1 基隆河流域歷年平均年降雨量等值圖

Fig.1 Annual rainfall contour for the Keelung river watershed

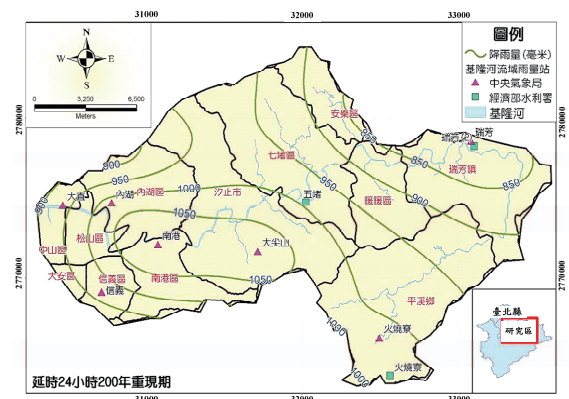


圖 2 基隆河流域延時 24 小時 200 年重現期降雨量等值圖

Fig.2 Accumulated rainfall contour with 24 hours duration and 200 years return period for the Keelung river watershed

降雨延時 24 小時之 200 年重現期降雨量等值圖如圖 2 所示；由圖可知，於延時 24 小時之降雨強度下，降雨量最大可接近 1050mm 之間，降雨中心約為南港至汐止大尖山區域。而重現期之降雨量分析成果顯示降雨分布多為由北往南遞增。

2. 設計雨型

雨型是指降雨在某一時段內之分布情形，降雨強度－延時－頻率曲線上的數值是特定降雨延時內之平均降雨強度（或降雨總量），因此需應用設計雨型（design hyetograph）理論，將降雨總量分布至所指定的延時之內。雨型設計過程需將歷年降雨紀錄予以整理分類，應用統計方法分析最可能產生之雨型分布。本研究應用序位法區域雨型設計計算方式，獲得延時 24 小時不同重現期之設計暴雨，說明如下。本研究將每個雨量站分別選取 5 場颱風或豪雨事件之時雨量紀錄，進行研究區域內共 10 個雨量站之設計雨型分析。

三、廣域坡地災害分析評估

1. 廣域坡地災害分析評估方法

針對大尺度集水區範圍之坡地災害分析模式，依據現有研究 (Ayalew and Yamagishi, 2005) 大致可劃分為統計法 (如採多變量分析法、類神經網路法等) 與定率法 (例如極限平衡法) 兩類，統計法假設坡地之水文歷程與降雨為輸入值，而發生山崩則為輸出值。其需藉由分析已發生崩塌區域之各項影響因子組合，諸如過去山崩歷史資料與降雨特性資料，以統計學方式推估山崩時之臨界降雨特性。統計法亦需要大量之歷史資料進行分析與趨勢預測。對於極端降雨事件所需之坡地災害評估分析而言，統計法所面臨之窘境多為無極端降雨事件之歷史資料，另統計法之分析亦非基於物理模型之系統，分析結果有可能與降雨事件之關聯性不高而造成結果之誤判。另一方面，定率法基於傳統之極限平衡法分析降雨與山崩之關係，利用物理與力學模型計算不同降雨條件下各邊坡單元之穩定性 (或安全係數)，將降雨入滲的歷程輸入邊坡穩定分析模式中，模擬降雨期間邊坡安全係數隨地下水壓之變化 (Terlien, 1998)。接著可應用該整合模式計算邊坡達臨界穩定時 (即安全係數等於 1 時) 之臨界降雨條件 (Wilson and Wiczorek, 1995)。隨著地理資訊系統之發展，Montgomery and Dietrich 1994 與 Baum et al., 2005 等人將水文-邊坡穩定模式結合地理資訊系統進行相關

的山崩潛勢分析與山崩降雨警戒值的研究，此研究方法特色是具物理與力學基礎，惟此法需建立各邊坡單元之代表性力學與水文地質參數，在無充足試驗數目或調查規模時，需輔以參數反算率定方能獲得合理的成果。

為評估極端降雨事件對廣域山坡地社區災害所可能之影響，需收集颱風災害事件之降雨量做為分析之雨量條件，而颱風災害所產生之極端降雨即為造成廣域坡地災害之促崩因子。考量未飽和層地下水壓力水頭隨時間之變化可以理查方程式 (richards equation) 表示，對於三維暫態非均質非等向理查方程式可寫為下：

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (2)$$

式中， ψ 為地下水壓力水頭， θ 為土壤含水量； K_x 、 K_y 、 K_z 分別為 x 、 y 、 z 軸方向之透水係數； t 為時間， α 為坡角。上述方程式經 Iverson 於 2000 年對其簡化為一維情形下解得線性解，其線性解是由穩態解及暫態解疊加而成，穩態為長期地下水水位的情況，地下水壓力水頭取決於長期穩態的入滲率及邊坡坡度。而暫態解則假設地下水為一維垂直向下流動，降雨及入滲隨時間而改變壓力水頭之值。因此本研究之地下水壓力水頭計算，乃包含上述穩態與暫態解之成果。另結合上述地下水壓力水頭計算成果與無限邊坡穩定分析理論，可計算一邊坡之穩定性，若考量數值高程模型 (digital elevation model, DEM)，對每一個 DEM 網格分別進行安全係數計算，則可得廣域集水區內山坡地社區受極端降雨事件，暫態情形下坡地崩塌之時空分布。本研究分析模式中各網格邊坡穩定安全係數之公式如下：

$$F_s = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{c' - \psi(Z, t) \gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (3)$$

上式中 c' 為土壤凝聚； ϕ' 為有效摩擦角； γ_w 為水的單位重； γ_s 為土壤的單位重； $\psi(Z, t)$ 為不同時間 t 及深度下之地下水壓力水頭。本研究考量極端降雨事件之坡地穩定計算，並利用理查方程式得近地表之地下水壓力水頭，模式較適用於淺層坡地之崩塌分析。分析前之前置作業需透過地理資訊系統建立分析所需之概念模式，概念模式係結合水文、地文、雨量與廣域淺層坡地崩塌模式以進行不同極端降雨條件下之崩

塌潛勢分析。而概念模式之建置則包含分析區域劃分、數值地形模型、遙測影像資料、地層材料參數建置、幾何參數建置、促崩因子參數建置，分別說明如后。

2. 地文參數圖層

本研究於模式分析上採用精度 40m×40m 數值地形資料製作分析網格，而整個基隆河流域分析區域共計有 232108 個網格數。本研究坡度計算是以內政部提供之 40m×40m 精度之數值高程資料 (圖 3) 為分析依據，製作 40m×40m 之坡度分布圖層，坡度成果如圖 4 所示。圖 4 是根據水保局坡度分級標準，可將坡度分類為一級坡至七級坡之分級結果；由結果可知，基隆河集水區坡度分布大多屬一級坡至六級坡。

本研究所建立之廣域坡地災害分析方法係採用無限邊坡理論針對淺層崩塌進行評估，故山坡地之淺層土壤覆蓋層厚度係重要之輸入資料，由於無法獲得基隆河流域進行山區土壤覆蓋層厚度實際調查之資料，本研究採用臺灣地區土壤覆蓋層厚度最新調查成果 (中央地質調查所，民國 97 年) 之統計迴歸公式，如下式 (4) 所示：

$$\ln Depth = -0.0266 \times slope \text{ angle} + 1.31 \quad (4)$$

其中 $Depth$ 為山區土壤覆蓋層厚度 (m)， $slope \text{ angle}$ 為坡地的平均坡度 (°)，其值範圍為 $0 < slope \text{ angle} < 90$ 。基隆河流域土壤厚度計算，分析結果如圖 5 所示。

3. 水文地質參數圖層

分析中除考量地文參數外，同時亦需加入研究區域水文地質參數，如初始地下水位、地層材料等。由

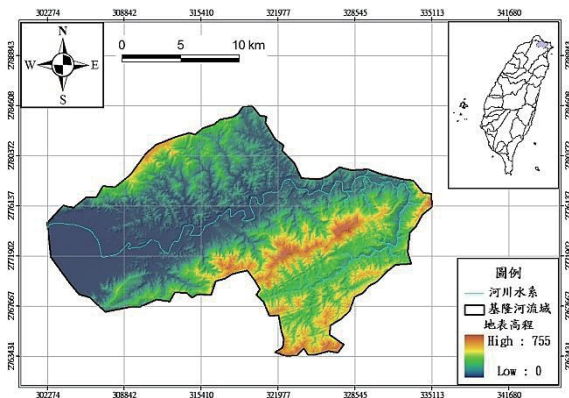


圖 3 基隆河流域 40m×40m 數值高程資料
Fig.3 40m×40m DEM for the Keelung river watershed

於研究區域廣闊，模式無法以單一均質化方式給定各項參數，因此本研究根據經濟部中央地質調查所 1/250,000 地質圖之地層分區作為模式分區劃分之依據，並依地層分區指定各項參數。參數給定則配合以往相關的文獻資料做為地層參數初始值給定之依據，以對參數進行初步給定之工作。圖 6 即為地質分區之結果，可分為 6 類，以砂岩及頁岩為主，沿著河岸分布的沖積層則次之。

由於本研究並無於基隆河流域進行地下水位鑽孔，故利用 SINMAP 模式計算土壤層內之初始飽和度，如圖 7 所示，其利用比集水面積配合坡度作為推估土層內飽和水位線之依據 (Saulnier et al., 1997)。水文地質參數為估算土壤內地下水壓之重要參數，包括水力傳導係數 Kz (m/sec)、擴散係數 D (m²/sec) 及初始入滲率 Iz (m/sec)。其中各地質分區之水力傳導係數 Kz 初始值可透過現地水力試驗成果或既有參數資料庫加以概估，之後再透過模式率定方式進行參數率定。由於擴散係數 D 不易由既有試驗獲得，乃改參考前人研究成果，透過水力傳導係數之經驗比例關係予以推估，比例範圍約在水力傳導係數的 10~400 倍左右 (Iverson, 2000; Chen et al., 2005)。初始入滲率 Iz 則為該地層分區之地下水長期平均入滲率，依據 Iverson (2000) 之研究指出，集水區之穩定基流量，可視為集水區長期穩定入滲量。因此本研究針對基隆河流域五堵流量站及介壽橋流量站分析地下水基流量，分析方法採用 Rutledge 於美國地質調查所提出之基流估計方法，經由分析河川流量資料與流量歷線，利用基流分離技術將基流量由河川流量中分離出來，並依據地下水水平衡概念模式，以此推估基隆河流域長期穩定入滲量分別為 2.4×10^{-8} m/s 及 3.1×10^{-8} m/s，並以此分析成果配合地層劃分，並參考文獻 (Baumet al., 2005) 進行率定。

4. 參考雨量站圖層

本研究針對歷史颱風災害事件之降雨量做為分析之雨量條件，並選用該颱風對基隆河流域所造成新增崩塌地，進行模式建立、率定與驗證工作。本研究收集流域內共計 12 處雨量站之時雨量資料，各雨量站影響範圍以徐昇氏多邊形法計算每個雨量站之控制範圍，如圖 8 所示。

5. 新增崩塌地目錄圖層

在建立降雨促崩潛勢分析模式時，主要透過反算方式率定研究範圍各地質分區之主要力學參數與水文

地質參數，分析結果須與過去現地發生歷史崩塌之區域進行比對，以瞭解模式分析之準確度。依據經濟部中央地質調查所之 1/250000 地質圖之數值圖層以及財

團法人工業技術研究院能源與資源研究所之 95 年度崩塌地範圍圖資加以套疊，可得基隆河流域內之地質、斷層及崩塌地分布如圖 9 所示。

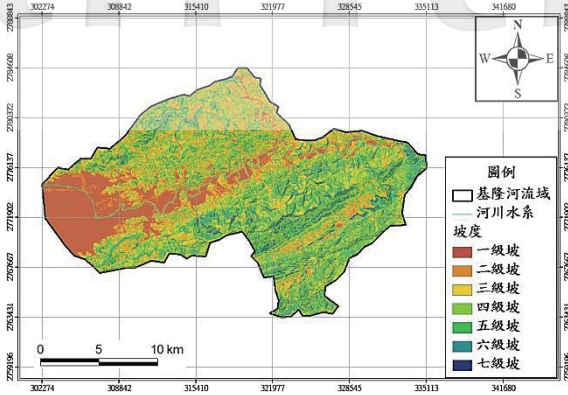


圖 4 基隆河流域 40m×40m 坡度資料
Fig.4 Slope map for the Keelung river watershed

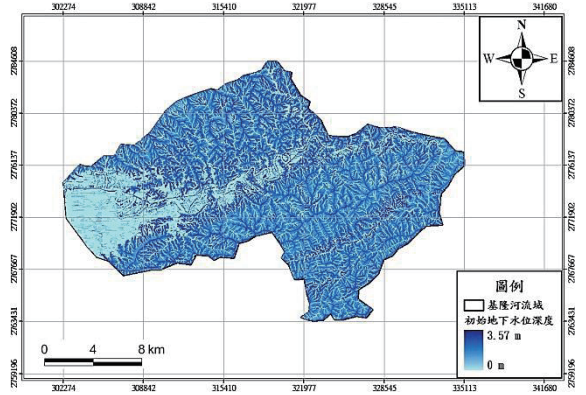


圖 7 基隆河流域初始地下水水位分布
Fig.7 Groundwater spatial distribution for the Keelung river watershed

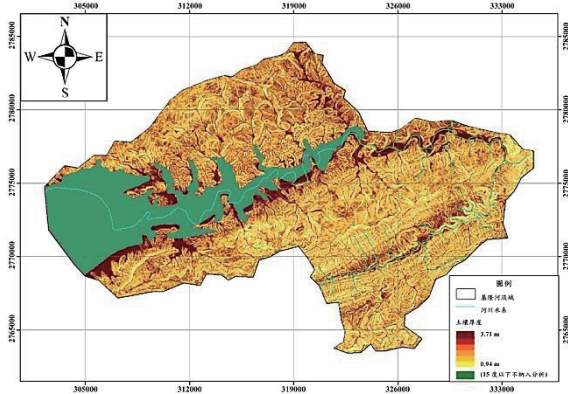


圖 5 基隆河流域土壤覆蓋層厚度圖層
Fig.5 Soil thickness for the Keelung river watershed

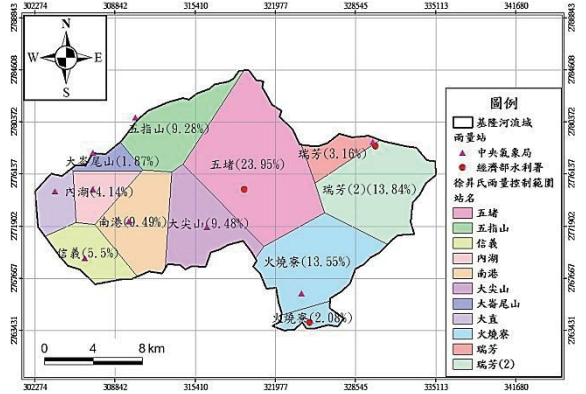


圖 8 基隆河流域徐昇氏雨量站控制範疇
Fig.8 Thiessen polygons for the Keelung river watershed

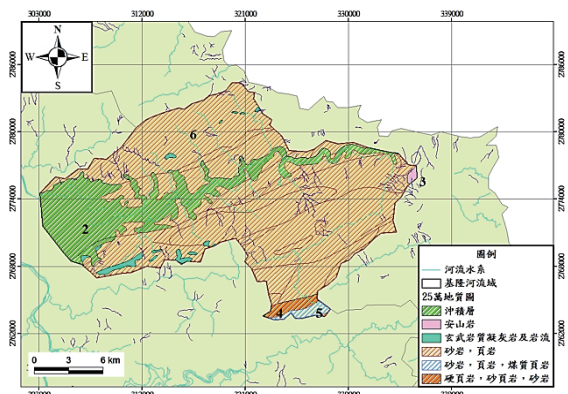


圖 6 基隆河流域地質分區
Fig.6 Geological map for the Keelung river watershed

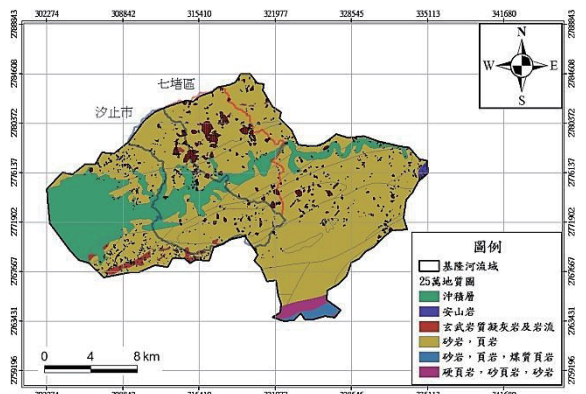


圖 9 基隆河流域崩塌地分布範疇
Fig.9 Landslide spatial distribution for the Keelung river watershed

四、模式率定及驗證

本研究針對歷史颱風災害事件之降雨量做為分析之雨量條件，並選用象神颱風、納莉颱風與艾利颱風對基隆河流域所造成新增崩塌地，進行模式建立、率定與驗證工作。本研究收集流域內共計 12 處雨量站之時雨量資料，各雨量站影響範圍以徐昇氏多邊形法計算每個雨量站之控制範圍，研究中則以 12 處雨量站及徐昇氏多邊形範圍，利用颱風期間之時雨量資料，共計 120 小時，推求流域內雨量之時間及空間分布，以作為廣域坡地災害評估模式之輸入資料。

1. 正確率之評估

一般而言，利用分布式格點模式計算崩塌率，可將結果分為兩類，一類為不穩定格點（安全係數 ≤ 1.0 ），另一類為穩定格點（安全係數 > 1.0 ）。若是與實際山崩目錄比對可獲得四種類型之結果，第一類（Type 1）為實際上發生崩塌格點被預測為不穩定格點，第二類（Type 2）為實際上發生崩塌格點被預測為穩定格點，第三類（Type 3）為實際上未發生崩塌格點被預測為不穩定格點，第四類（Type 4）為實際上未發生崩塌格點被預測為穩定格點；Type 1 及 Type 4 可認定是模式正確之判定情況，而 Type 2 及 Type 3 則是模式誤判之情況。本研究正確率評估方式，如表 2 所示，是利用正確預測的網格點為計算對象以進行總正確率之評估（Stehman, 1997）。

$$\text{總正確率} = \left(\frac{N_{\text{type1}} + N_{\text{type4}}}{N_{\text{type1}} + N_{\text{type2}} + N_{\text{type3}} + N_{\text{type4}}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

2. 模式率定

基隆河流域在模式率定過程中主要以颱風降雨事件做為災害分析事件，以反算出基隆河流域之合理參

數範圍。為確保分析結果均是因豪雨引起的不穩定狀況（安全係數小於 1.0），需確定反算出之參數在未發生降雨之前研究區域內之安全係數均大於 1.0；且各地質分區率定所獲得之崩塌率應與實際崩塌率相近，若同時滿足上述兩條件則可進行正確率之評估，本研究訂定 80% 為模式正確率之判斷準則，若正確率達 80% 則將進入模式之驗證程序，反之則需重新調整土層參數或水文參數，以達到最佳模式參數之率定成果。本研究分別利用象神颱風、納莉颱風與艾利颱風事件之降雨資料，配合模式參數之初始設定，進行基隆河流域模式參數之率定。表 3 為本研究模式參數之率定成果。

本研究利用表 2 計算方式確認分析成果之準確程度，分析基隆河流域內三場颱風事件崩塌與非崩塌之網格數，計算各分區正確率範圍為 78.8~100%，而基隆河流域總正確率則為 92~95%，此率定結果已符合本研究所制定之率定原則。

五、極端降雨條件下降雨引致坡地分析成果

本研究利用上述已建立 GIS 圖層資料，進行模式之參數敏感度分析，以及藉由模式參數率定流程進行模式參數之率定工作，建立分析與預測廣域淺層崩塌模式之技術，進而探討山坡地社區坡地災害之評估。

表 2 基隆河流域正確率之評估準則表

Table 2 Criterion for the computational accuracy

實際崩塌狀況	模式預測結果	
	安全係數 ≤ 1.0	安全係數 > 1.0
已崩塌	N_{type1}	N_{type2}
未崩塌	N_{type3}	N_{type4}

註：Ntype1、Ntype2、Ntype3、Ntype4 為各條件下格點之累計個數

表 3 基隆河流域模式參數率定成果

Table 3 Parameter calibration for the study area

岩性分區	凝聚力 (kPa)	摩擦角 (degree)	土壤單位重 γ_s (N/m ³)	水力傳導係數 Kz (m/s)	擴散係數 D (m ² /s)	初始入滲率 Iz (m/s)
Zone 1	2	31	2.2×10^4	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	$2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$
Zone 2	3.5	27	2.2×10^4	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}	$2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$
Zone 3	4.5	29	2.2×10^4	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	$2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$
Zone 4	7	34	2.2×10^4	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-5}	$2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$
Zone 5	7	34	2.2×10^4	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-5}	$2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$
Zone 6	5	27	2.2×10^4	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-5}	$2.4 \times 10^{-8} \sim 3.1 \times 10^{-8}$

註：Zone 1 為玄武岩質凝灰岩及岩流；Zone 2 為沖積層；Zone 3 為安山岩；Zone 4 為硬頁岩、砂頁岩、砂岩；Zone 5 為砂岩、頁岩、煤質頁岩；Zone 6 為砂岩、頁岩，而上表參數係指岩盤上方風化土壤之參數值。

1. 極端降雨事件定義

氣候變遷是為大自然的現象之一，然而全球暖化造成全球氣候變遷加劇，使得極端降雨事件頻頻發生，也造就了災害頻率及強度的增加。過去對於極端降雨事件之研究有以時雨量、日雨量或一日暴雨為基礎，如陳佳正與盧孟明 (2007) 以臺北、台中、台南、台東、花蓮五個測站 1951.2005 年的時雨量資料，並計算超越機率為 1%、5%、10% 的雨量閾值，作為判斷氣候極端降雨事件的標準。又 Zhai et al. (2005) 對中國 740 個測站作了總體降雨以及極端日降雨發生頻率的趨勢分析，所謂的極端降雨是指在 95% 以上的日降水量。而 Kunkel et al. (1999) 根據日雨量資料統計延時為 3 日與 7 日的降雨事件分析了美加地區極端降雨的長期趨勢，然後以歷年最大值決定 1 年與 5 年重現期距的分級值並以此為極端降雨的判定標準。因此分析降雨資料再按事件發生機率決定何為氣候上的極端事件係可用以決定極端降雨事件之方法。

本研究則考慮極端雨量進行頻率分析計算不同重現期雨量，故以不同降雨頻率分析成果定義為極端降雨事件。一般水文頻率分析理論係假設水文極端事件之發生乃遵循其特定機率分布，亦即利用機率分布來描述極端事件的特性；故可將降雨重現期轉成機率值的概念，例如 200 年發生的機率為 1/200 (=0.5%)。由莫拉克颱風暴雨頻率分析成果顯示 (水利署, 2009)，多站降雨量重現期超過 200 年以上，甚至有高達 2000 年重現期以上，因此不同重現期可反應不同極端降雨事件之雨量值。

本研究以不同降雨延時不同重現期雨量條件作為極端降雨事件輸入資料，降雨頻率分析成果如前所述，並使用模式參數率定之結果進行基隆河流域災害評估模式分析，以提供研究區域內不同極端降雨條件下之崩塌潛勢分布預測。利用率定後之參數進行不同極端降雨事件 (降雨延時為 24 小時之 2 年、10 年、50 年、100 年、200 年重現期) 崩塌潛勢之分析，在降雨條件上首先將各重現期累積雨量，(如圖 10 所示)，利用設計雨型百分比分配至 24 小時 (如圖 11 所示)，以製作不同 1 至 24 小時之降雨空間分布圖；接著則以模式參數率定成果 (如表 3 所示) 設定參數，以進行基隆河流域不同極端降雨事件崩塌潛勢之分析。圖 12 為本研究針對不同極端降雨事件在降雨延時 24hr 之模擬結果，其中紅色部分為安全係數小於 1.0 的區域，表示這些區域在極端降雨事件作用下產生破壞情形，同時得出本模式計算 24hr 降雨延時，隨空間分布之不同造成破壞

區域的時空變化，有效分析出降雨引發之暫態地下水位變化對區域邊坡穩定之影響。

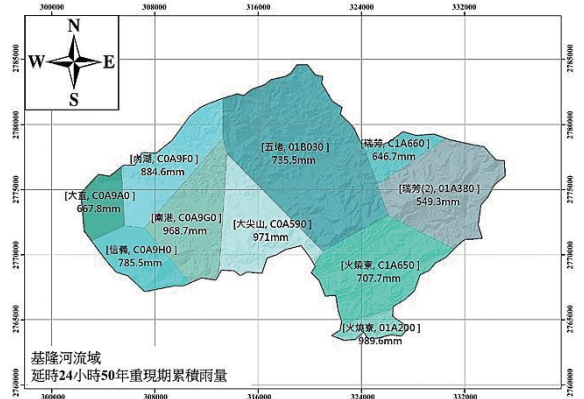


圖 10 200 年重現期 24 小時累積雨量 (徐昇氏 邊形 柵網)

Fig.10 Accumulated rainfall with 24 hours duration and 200 years return period

2. 基隆河流域崩塌潛勢分析成果

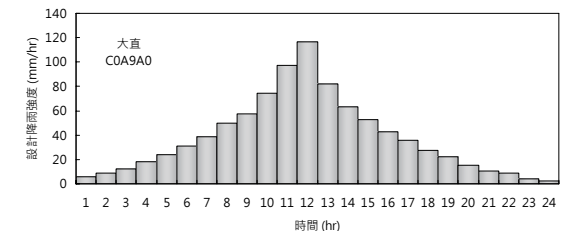


圖 11 200 年重現期 24 小時設計雨量組態圖 (以大直 站為例)

Fig.11 Design hyetograph for rainfall with 24 hours duration and 200 years return period

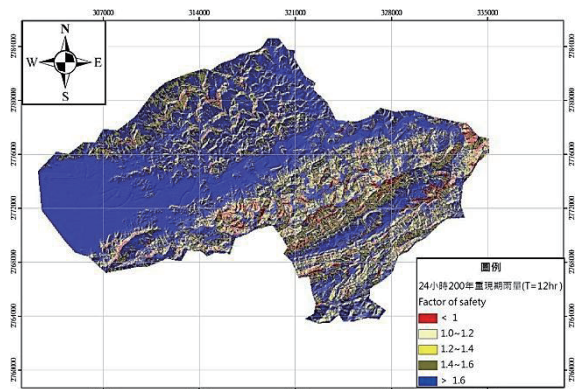


圖 12 200 年重現期 24 小時累積雨量之降雨促崩潛勢圖

Fig.12 Landslide susceptibility map for rainfall with 24 hours duration and 200 years return period

六、結 論

過去傳統邊坡穩定分析方法多係針對單一邊坡利用極限平衡法進行穩定分析，依據邊坡材料與滑動面之可能形態，採用圓弧型或是平面型滑動之理論方法進行分析，在極限平衡法中，對於地下水之考慮多係以直接指定地下水位面之方式進行分析。為進一步分析極端降雨與廣域坡地災害時空分布，本研究整合降雨分析並考量氣候變遷之極端降雨事件利用定率法結合 Richards 未飽和流動方程式成功建立氣候變遷下極端降雨引致廣域坡地災害分析與預測評估技術。

研究成果顯示，基隆河流域內之年平降雨量介於 2,190 mm 至 4,650 mm 之間，套疊崩塌地圖層可發現，主要之崩塌地位置落於平均雨量介於 3,750 mm 至 4,500 mm 之間，極端降雨係影響崩塌發生之重要因素，因此，本研究中針對雨量資料，統計研究區域雨量於時空之分布特性，利用定率法建立廣域淺層坡地崩塌模式，進而探討基隆河流域內之降雨與坡地社區崩塌之關係，並瞭解區域內颱風豪雨事件造成坡地社區環境災害特性。於 200 年重現期 24 小時累積雨量之降雨促崩潛勢顯示，基隆河流域於汐止之南北區域崩塌潛勢較高，對於坡地社區環境災害影響程度較大。另本研究同時考慮降雨延時 24 小時之不同重現期雨量預測研究區域內不同規模極端降雨條件下之崩塌潛勢分布，研究成果可用以瞭解不同規模降雨條件下之高潛勢區域分布情形，進而可加強防制對策之研擬以有效降低災害發生時生命財產之損失。

參考文獻

1. 經濟部水利署 (2009), 「河川治理規劃及河川區域劃定水文分析報告審查作業須知」, 台北。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. (2009). *Operation directions on report review of hydrology analysis in river management plan and river area delineation*. Taipei. (in Chinese))
2. 中興工程顧問社 (2007), 「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置 (第 1 期 96 年度) - 集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」成果報告, 經濟部中央地質調查所。(Sinotech Engineering Consultants, Inc. (2007). *Geological investigation and database construction in the upstream watershed of flood prone areas - the investigation and assessment report about the influence of hydrogeology on slope stability of the watershed*. Central Geological Survey, MOEA, research report. (in Chinese))
3. 張石角 (1987), 「山坡地潛在危險之預測及其在環境影響評估之應用」, 中華水土保持學報, 第 18 卷, 第 2 期, 第 41-62 頁。(Chang, S. C. (1987). "The prediction of potential geological hazards of slope land and its applications in environmental impact assessment." *Journal of The Chinese Soil And Water Conservation*, 18(2), 41-62. (in Chinese))
4. 陳佳正、盧孟明 (2007), 「臺灣極端降雨氣候事件判定方法」, 大氣科學, 第 35 期, 第 2 號, 第 105-117 頁。(Chen, C.J., and Lu, M.M. (2007). "Detection of the Climatic Extreme Rainfall Events in Taiwan." *Atmospheric Sciences*, 35(2), 105-118. (in Chinese))
5. 行政院農業委員會水土保持局電腦數化資料 (2002), 「崩塌地圖資料」。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2002). *landslide map*. (in Chinese))
6. Ayalew, Lulseged, Yamagishi, Hiromitsu. (2005). "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kaku-da-Yahiko Mountains." *Central Japan, Geomorphology*, 65, 15-31.
7. Baum, R.L., Coe, J.A., Godt, J.W., Harp, E.L., Reid, M.E., Savage, W.Z., Schulz, W.H., Brien, D.L., Chleborad, A.F., McKenna, J.P., and Michael, J.A. (2005). "Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington." *Landslides*, 2, 266-279.
8. Chen, C.Y., Chen, T.C., Yu, F.C., and Lin, S.C. (2005). "Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide." *Environmental Geology*, 48, 466-479.
9. Iverson, R.M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration." *Water Resources Research*, 36(7), 1897-1910.
10. Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*, McGRAW-HILL Book Company.
11. Kunkel, K.E., Andsager, K., and Easterling, D.R. (1999). "Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada." *J. Climate*, 12, 2515-2527.
12. Liu, S.C., Fu, C. Shiu, C.J., Chen, J.P., and Wu, F. (2009). "Temperature dependence of global precipitation extremes." *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17702,

13. Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (1994). "A physically based model for the topographic control on shallow landsliding." *Water Resources Research*, 30, 83-92.
14. Rutledge, A.T. (1992). "Methods of Using Stream-flow Records For Estimating Total and Effective Recharge in the Appalachian Valley And Ridge, Piedmont, and Blue Ridge Physiographic Provinces." in W.R. Hotchkiss and A.I. Johnson, eds, *Regional Aquifer Systems of the United States, Aquifers of the Southern and Eastern States*. American Water Resources Association Monograph Series.
15. Saulnier, G.M., Obled, C., and Beven, K. (1997). "Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, 202, 158-172.
16. Stehman, S.V. (1997). "Estimating standard errors of accuracy assessment statistics under cluster sampling." *Remote Sensing of Environment*, 60, 258-269.
17. Terlien M.T.J. (1998). "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds." *Environmental Geology*, 35 (2-3), 125-130.
18. Wilson, R.C., and Wiczorek, G.F. (1995). "Rainfall thresholds for the initiation of debris flow at La Honda, California." *Environmental and Engineering Geoscience*, 1 (1), 11-27.
19. Zhai, P., Zhang, X. Wan, H., and Pan, X. (2005). "Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China." *J. Climate*, 18, 1096-1108.

2010年11月30日 收稿

2011年07月27日 修正

2011年09月16日 接受

(本文開放討論至2012年9月30日)