

台北市崩坍預警基準初期研究

林美聆¹ 陳天健² 林鴻州² 李正利³ 魏水木³ 葉斯元³ 游文輝²
國立台灣大學¹ 防災國家型科技計畫辦公室² 臺北市防災計畫辦公室³

摘要

本文嘗試利用納莉颱風之雨型資料將台北市分成北、中、南三區，此三個分區實際上亦包含了地形與地質特性，再將北市各崩坍點破壞時之降雨參數資料，繪製有效累積雨量及崩坍前一小時時雨量之關係圖，進而利用統計分析方法，並配合近年的災害案例資料，建議各區之崩坍預警基準線，作為災害防救工作時之參考，以期能於颱風期間，減少山坡地崩坍造成的人員與財產的損失。

一、前言

民國 90 年 9 月 16 日 21 時第十六號颱風納莉從台灣東北角登陸，歷經 49 小時後，方由台南安平附近離開台灣。因其行徑弔詭為颱風歷史中少見案例，且直接由台灣北部登陸，給台北市帶來延時長強度高之降雨，依據中央氣象局雨量站記錄顯示，台北市降下高達 500~1000 mm 之累積雨量，造成多處山區發生坡地崩坍災害，範圍更遍佈全台北市山坡地區。

本文嘗試以納莉颱風造成台北市之崩坍案例並輔以近年的災害案例資料，進行初步的降雨預警基準研究，建議判定準則，作為災害防救工作時之決策參考依據，以期能於颱風期間，減少山坡地崩坍造成的人員與財產的損失。

二、前人研究

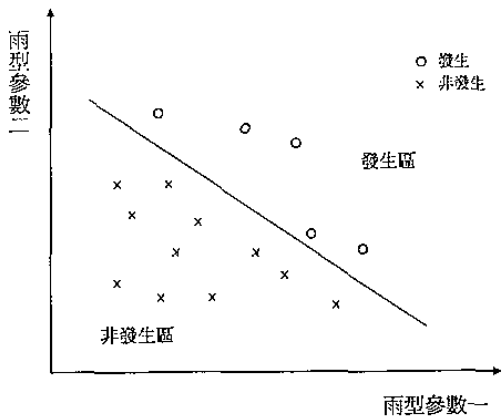
崩坍的預警，常利用雨量資料、音射 (acoustic emission) 參數、位移率等特性來作為崩坍預警之用。然而利用音射或位移率來研判崩坍是否產生的方法，其預警的時間較短且僅適用於當地的預警，對於大範圍或崩坍潛勢區數量較多的地區則顯得不經濟；而雨量預警則可利用自動雨量站來建構一個完整的監測網，且豪雨是誘發大部分崩坍的重要原因。因此，雨量預警則有其便利性、實用性及經濟性等優點。國內外利用降雨參數來預估土石災害發生的研究相當多，以土石流災害預警為例，瀨尾克美與船崎昌繼(1973)分析日本七個縣市中的 178 場土石流災害，以平均土石流降雨量及平均年雨量作為分析基準，並以有效降雨量與有效降雨強度整理得警戒與避難基準。Caine(1980)、Cannon-Ellen(1985)、Wieczorek(1987)、Keefer(1987)以土石流發生雨量資料，用延時和雨量資料作基準，以迴歸分析的方式，求出土石流發生之臨界降雨條件式。謝正倫(1991)根據日本方面的文獻資料，說明土石流危險溪流之

判定及土石流發生臨界降雨條件之設定方法，並以暴雨之有效累積雨量及有效降雨強度為基準，推求花蓮縣土石流發生地區之臨界降雨條件。范正成、高子劍等(2001)以多變量常態分布及特性曲線，研究以機率化的臨界降雨線作為發布警報的依據。表一為上述各學者對於降雨警戒模式的綜合整理。

上述這些雨量預警基準線，大致可分為直線型與曲線型二類，以圖一之直線型範例來看，此分界線的右上方表示發生區而左下方則為非發生區，可作為預警的參考。

表一 各學者土石流發生降雨警戒值模式

研究學者	降雨警戒關係式	相關參數
瀨尾克美與船崎昌繼(1973)	$R_c = a / (I_c + b)$	R_c = 有效累積雨量 I_c = 有效降雨強度
Caine(1980)	$I = 14.82T^{-0.39}$	I = 降雨強度 T = 降雨延時
Cannon-Ellen(1985)	$T = a / (I - b)$	I = 降雨強度 T = 降雨延時
Wieczorek(1987)	$T = 0.9 / (I - 0.17)$	I = 降雨強度 T = 降雨延時
Keefer et al.(1987)	$(I - I_0)T = Q_c$	I = 降雨強度 T = 降雨延時 I_0 = 流失雨量強度 Q_c = 臨界滲透量
謝正倫(1991)	$I_c = aR_c + b$	I_c = 降雨強度 R_c = 總有效累積雨量
范正成等(2001)	$R_c = -11.42T_c - 55.97L_c + 3652$	R_c = 累積雨量 T_c = 降雨延時 (L_c 為常數)



圖一 發生土石災害之直線型基準線示意圖

三、研究方法

由前所述，以雨量值作為土石災害預警的研究方法很多，其所選定的參數主要有：前期雨量、本次累積雨量(一場連續降雨的累積雨量)、當日累積雨量、降雨延時、平均降雨強度、降雨強度等。

這些參數依研究理念而有不同選定，即使是相似概念的參數，其計算方法也不相同，本研究考量災害防救的便利性，決定利用常態分配的預測區間概念，以直線型作為坡地崩坍之預警基準。並選擇有效累積雨量和崩坍前一小時時雨量之關係圖來進行判斷參考，而選用的依據簡述如下：

1. 崩坍的發生，除了累積雨量外，與前期雨量有某種程度上的關聯，依前人研究，前期降雨中各日雨量對崩坍發生的影響，隨時間越久而有衰減的趨勢，因此採用有效累積雨量作為參數之一。
2. 使用崩坍前一小時雨量的原因主要是正確的坡地崩坍之發生時間通常難以準確掌握，其原因主要來自：
 - (1) 當達到誘發崩坍的雨量以後，可能在很短的時間內便會發生崩坍，因而造成居民報案之時間有所延誤。
 - (2) 居民通常在事後安定時，才會注意並回想當時發生的時間；且居民所在位置不同，其觀察到的時間亦不相同。
 - (3) 雨量站至該土石災害位置通常有一段距離，且雨帶的移動速度難以準確預估，因此造成雨量站測得的雨型與溪流的實際降雨存有一時間差。

(一) 研究參數的決定

本研究採用的雨量參數為有效累積雨量與崩坍前一小時時雨量，其計算方式如下：

1. 有效累積雨量(R_w)

有效累積雨量為前期有效累積雨量和累積雨量之和，茲分述如下：

(1) 前期有效累積雨量

一場集中的降雨在其前後有 24 小時沒有降雨，稱之為一場連續降雨，由一連續降雨的起始時刻起算，往前二星期期間之降雨稱為前期降雨。

前期降雨中各日雨量對崩坍發生的影響，有隨其與崩坍發生相距時間的越久而衰減的趨勢，因此前期有效累積雨量之計算係以前期降雨中之各日雨量(共 14 日)乘以一衰減係數後加以累積而得：

$$RWA = \alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2 + \alpha_3 d_3 + \dots + \alpha_{14} d_{14} \quad (1)$$

$$= \sum_{t=1}^{14} \alpha_t d_t$$

$$\text{其中 } \alpha_t = 0.5^{\frac{t}{T}}$$

式中 RWA ：前期有效累積雨量(mm)

α_t ：為衰減係數

t ：一連續降雨起始時間算起前 t 日

T ：為半衰期，此處為一日

d_t ：前第 t 日之日雨量(mm)。

(2) 累積雨量

即崩坍發生後之前的降雨，其累積雨量等於連續降雨開始至崩坍發生時之雨量。

2. 崩坍前一小時時雨量

以消防局災情傳遞系統上登錄的崩坍報案時間點起算前一小時的時雨量。

(二) 預警線基準方法建立

本報告中有效累積雨量及崩坍前一小時時雨量圖之分析步驟如下：

1. 崩坍時間的選取與確認

分析所選取的崩坍，係以消防局災情傳遞系統上所報案的第一時間與位置為主，並以災後現地探勘資料為輔，進行資料篩選。若同一崩坍位置重複報案者，保留報案時間較早者，剔除較後者。

2. 座標點繪

依選取的崩坍點進行座標點繪，主要以現地踏勘時 GPS 定位所轉換的座標為主；若無法取得，則以台北市政府門牌座標系統為輔。以此進行點繪，完成崩坍點座標。

3. 雨量站選擇與雨量資料確認

雨量站之選擇，需考慮其站網密度是否足以有效描述降雨的空間分佈，依世界氣象組織與多數學

者所建議設置標準為 100-250 km²/站。以目前氣象局、經濟部第十河川局於台北市所設置的雨量站，應可描述降雨的空間分佈情形。

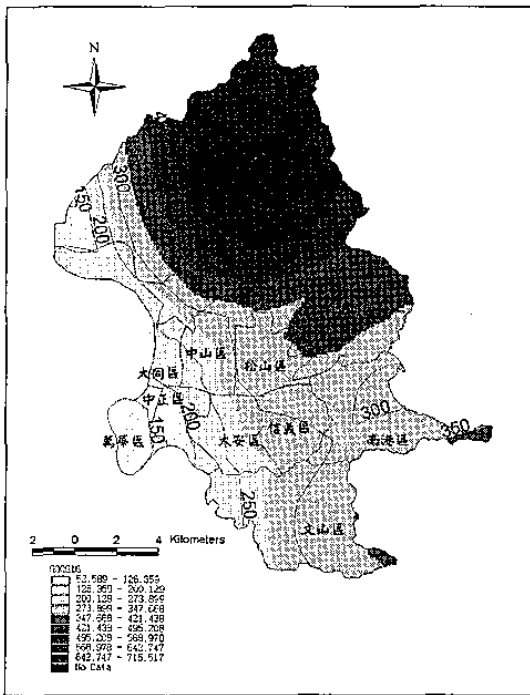
選定雨量站後，分別取得各站的雨量資料並進行判別，剔除異常的測站資料，確認雨量資料的可信度。而雨量站的選擇，應確保各崩塌點的雨量資料能合理以內插方式取得為原則。最後，將選定的雨量站進行座標點繪與建檔。

4. 計算有效累積雨量和崩塌前一小時雨量

針對崩塌點發生的時間，分別統計所選取的雨量站之有效累積雨量和崩塌前一小時雨量；其次配合軟體以克利金內差法繪製出有效累積雨量和前一小時雨量的分佈圖，如圖二為某特定時間下之有效累積雨量示意圖，進而求出崩塌點發生時之有效累積雨量和前一小時雨量。

5. 預警和避難線分析

將前項所得資料以有效累積雨量為橫座標，崩塌前一小時雨量為縱座標繪製成圖，進行預警和避難線分析。



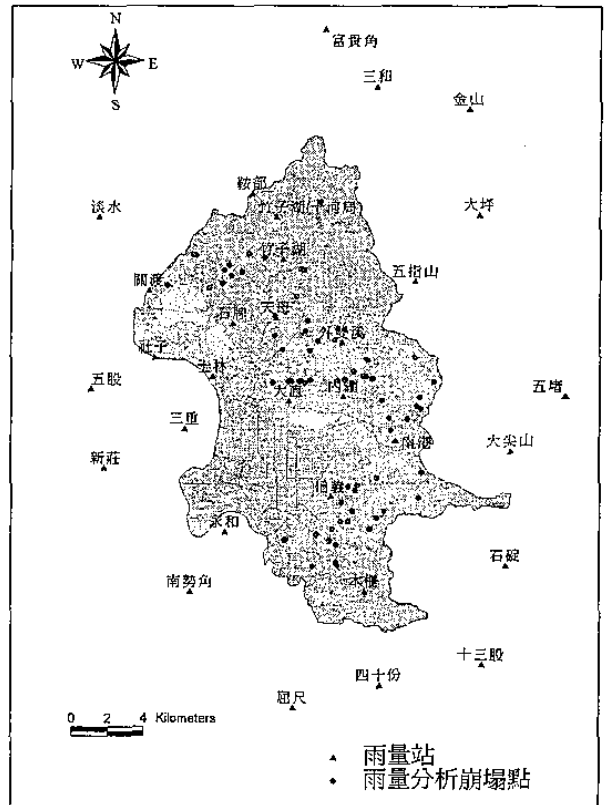
圖二 某特定時間下之有效累積雨量示意圖 (單位:mm)

四、案例雨量資料建立

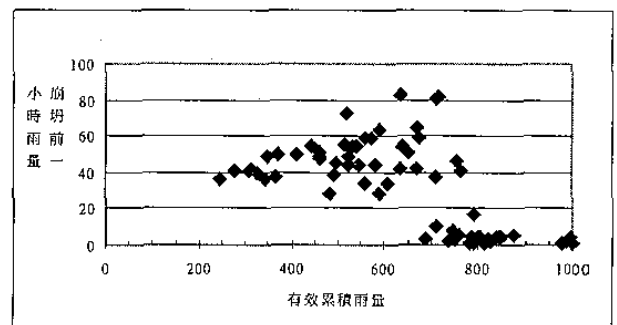
本研究主要以納莉颱風造成的崩塌資料作為初步分析對象，共篩選出有明確發生時間的 73 處崩塌，其分佈於七個行政區，即北投、士林、中山、內湖、南港、信義和文山區，並配合台北市及其周

邊雨量站之雨量記錄，進行克利金內差法分析，崩塌位置與雨量站位置分佈如圖三所示。

依前述方法，分別求出各崩塌點的雨量指標值，並繪於有效累積雨量與崩塌前一小時雨量之座標系統上，如圖四所示。由圖四亦可看出為數不少的崩塌案例(在 73 個崩塌點中有 29 例，約佔 39.7%)，其前一小時的降雨很小或沒有降雨(< 20 mm)，但累積雨量已超過 650 mm，因此就本案例而言，累積雨量亦有相當之影響。



圖三 納莉颱風雨量分析之七十三處崩塌位置圖



圖四 有效累積雨量與時雨量圖(單位:mm)

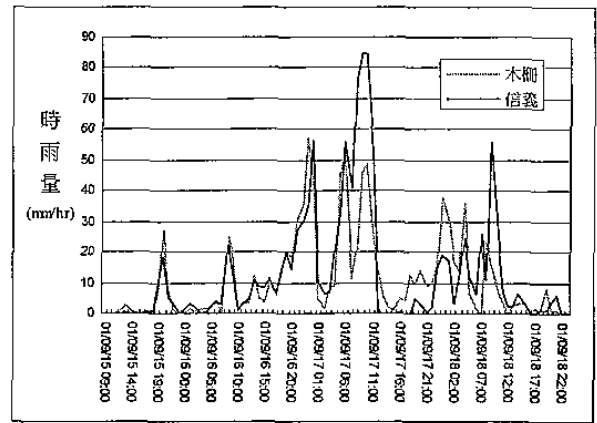
五、崩塌預警分區

由於本研究係以雨量參數作為預警之用，然而不同地區的崩塌潛勢區之地質、地形及土地利用情

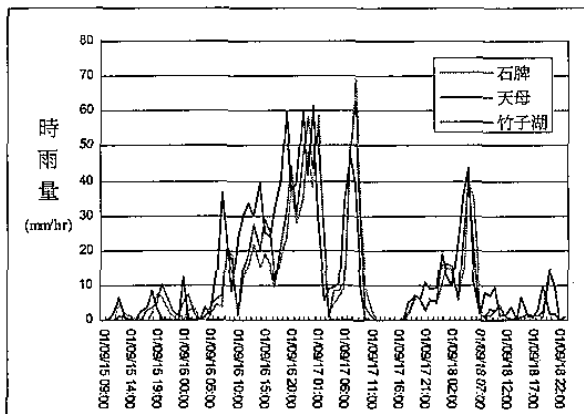
形亦不相同，因而各崩塌潛勢區之力學參數並不相同（即各區崩塌的潛勢亦不相同），且為了考量地形對降雨之影響，因此有必要進行分區，以期能有效地以雨量參數執行防災預警，並能使得防救災資源達到良好的配置。

崩塌預警之分區通常以行政區或地質分佈來作為劃分的依據，然而以行政區來進行劃分，雖然在應用上相對方便，但無法表現出崩塌的特性，且本研究之崩塌案例分散於七個行政區，使得每區分析用的資料筆數稍嫌不足；若以地質進行分區，優點為可表現出崩塌的地質特性，缺點則為應用困難，且針對不同地層進行分析的資料筆數亦仍不足。

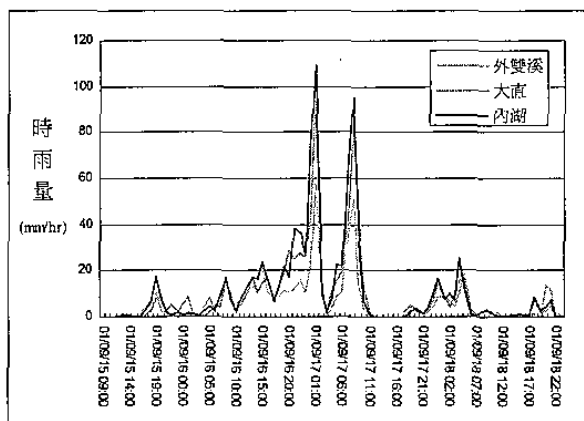
由於以目前所收集到的案例，無法單純以行政區或地質分佈來進行分區，因此本文嘗試觀察台北市鄰近山區的雨量測站之降雨分佈情形，發現可歸納出三種不同的雨型分布形式，如圖五至圖七所示，北區雨型有三個較明顯的相對雨量高峰值，中區雨型有二個，而南區雨型則有較多的相對雨量高峰值。進一步比較雨量站與地質分佈圖，如圖八所示，則可看出這三個分區亦與地形及地質特性分佈一致，因此本研究決定以雨型來做為分區依據。



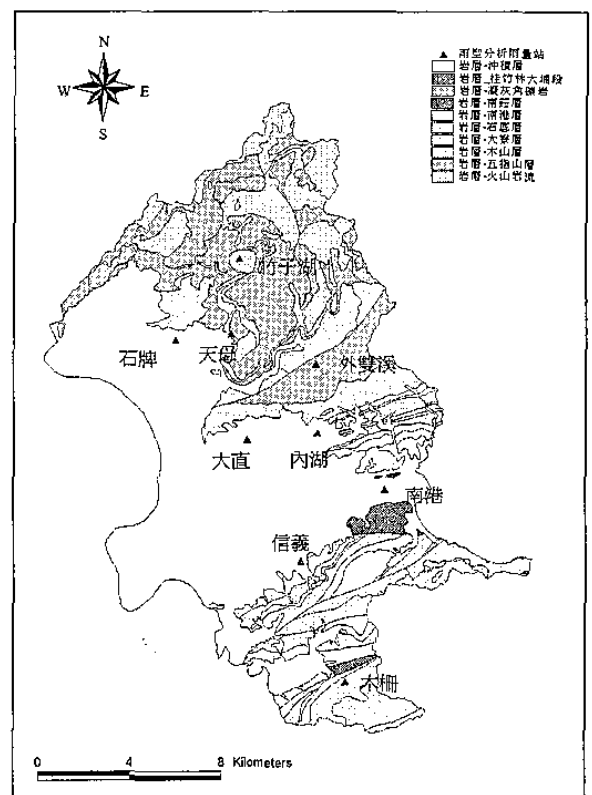
圖七 台北市南區雨型 (單位:mm)



圖五 台北市北區雨型 (單位:mm)



圖六 台北市中區雨型 (單位:mm)



圖八 台北市地質分佈及雨型分析之雨量站位置圖

將此三個分區的特性分別說明如下：

- 1.北區：(雨型一) 外雙溪以北區域的陽明山區，屬於大屯山火山群，為安山岩類，主要為更新世凝灰角礫岩和火山岩流，少部分的五指山層分布於貴子坑溪下游西南方和木山層分布於丹鳳山區。另在貴子坑地區則有金山斷層。此區的特色為噴氣和溫泉的後火山作用相當強烈，使得原來的火山岩層受到熱水蝕變的影響，岩石強度減弱，若加上連續豪雨，使岩層飽含水分，下滑趨動力增加，易發生山崩或土石流。本次崩塌點數共 20 點，

主要位於火成岩區，少部分的崩坍點則位於五指山層與木山層。

2.中區：(雨型二) 外雙溪至基隆河區域，本區有最古老的漸新世五指山層和中新世三個沉積循環岩層，其中五指山層、木山層、石底層、南莊層屬濱海相或陸臺相之地層，大寮層、南港層、桂竹林層屬淺海相地層。此區於士林區內有一崁腳斷層通過，於內湖、中山區內則多順向坡。本次崩坍點數共 30 點，大部分的崩坍點位於木山層，其餘則分散於南港層、五指山層、石底層、南莊層與大寮層等。

3.南區：(雨型三) 基隆河以南區域，本區岩層為中新世三個沉積循環岩層。本區內有多條斷層帶通過，如台北斷層、崙頭斷層、新店斷層；而順向坡也夾雜在其中。本次崩坍點數共 23 點，大部分的崩坍點位於石底層與大寮層，其餘則分散於南港層、桂竹林層與木山層等。

六、崩坍預警雨量線的建立

依上述分區，將資料進行分類與統計，以線性迴歸的方法，則可求出平均線，並提出建議預警基準線，茲就台北市北區加以說明：

針對台北市北區之崩坍案例進行分析，以最小平方原理，求出線性迴歸線，並求出樣本誤差標準差，由常態分配預測區間的概念，選取 68% 預測區間的下界作為預警基準(約下移一個標準差)，這表示有 84% 之崩坍案例的雨量值發生在此基準以上。迴歸分析結果如圖九所示。

由圖九可看出，大部分的崩坍雨量值位於此基準線之上，由於此線為一曲線，為了方便使用，進一步將此基準進行適度的簡化，將預警基準線修正為：

$$Y = (-0.065) X + 60 \quad (2)$$

其中，X：有效累積雨量(mm)，Y：時雨量(mm/hr)。

由民國 48 年至 90 年的災害歷史，整理出發生崩坍的最低累積雨量為 78~343 mm，並依行政區繪於圖十，進一步考慮北中南三區發生崩坍的最小累積雨量，初步選取有效累積雨量 100 mm 作為起始的警戒值，而當有效累積雨量為 100 mm 時，縱距之時雨量約在 50~60 mm，因此選取時雨量 50 mm 為時雨量預警基準。

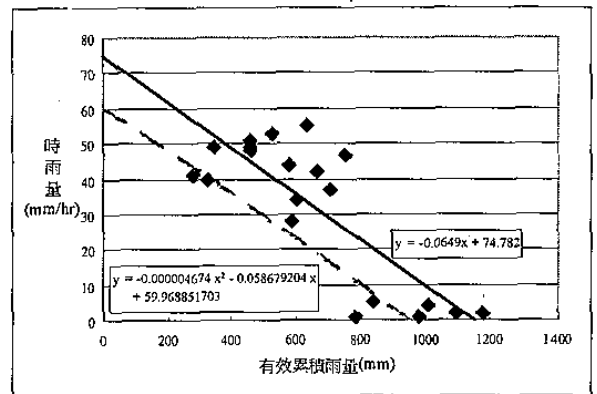
另一方面，前面提到累積雨量對崩坍的影響頗大，這意味著可能存在一臨界累積雨量，由崩坍災害歷史的累積雨量資料，本研究初步選取發生崩坍時的平均累積雨量作為預警基準，並予以簡化，而北區則採用 550 mm，如表二所示。

因此北區的預警基準線如圖十一所示，關係式為：

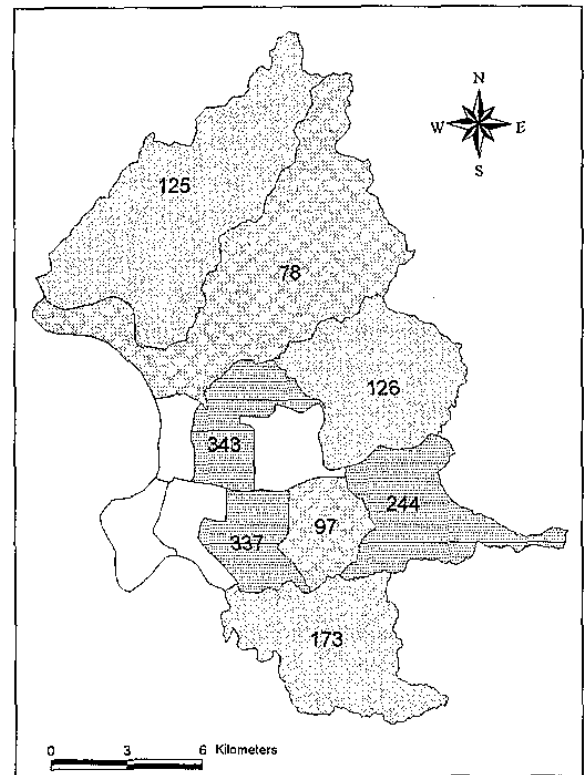
$$\begin{cases} X=100 & \dots\dots\dots\text{左邊界} \\ Y=50 & (50 \leq X \leq 154) \dots\dots\dots\text{上邊界} \\ Y=-0.065X+60 & (154 \leq X \leq 550) \dots\dots\dots\text{上邊界} \\ X=550 & \dots\dots\dots\text{右邊界} \end{cases} \quad (3)$$

其中，X：有效累積雨量(mm)，Y：時雨量(mm/hr)。

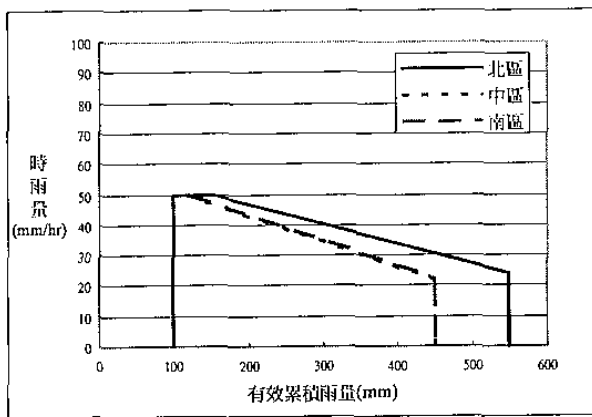
在實際應用上，當一場降雨的有效累積雨量達到 100 mm 時，開始警戒並注意雨量的增加情形，若有效累積雨量和時雨量增加達到預警基準線上方或右側時，表示在此分區內的崩坍潛勢區可能會發生崩坍。而中區與南區的預警基準線亦繪於圖十一。



圖九 台北市北區迴歸分析結果



圖十 台北市各行政區發生崩坍時最小累積雨量值(單位:mm)



圖十一 台北市崩坍預警基準

表二 各分區歷史崩坍地累積雨量平均值(單位:mm)

分區	崩坍數	發生崩坍時的最低雨量	發生崩坍時的最高雨量	發生崩坍時的平均雨量	標準偏差	建議臨界累積雨量值
北區	68	78	1279	559	270	550
中區	48	126	850	466	179	450
南區	54	97	700	463	112	450

七、結語

本文係針對納莉颱風所造成之崩坍案例進行分析，初步將台北市劃分為三區，並建立一套預警方式，以期能提供防颱時決策使用。然而此預警基準係以歷史崩坍資料進行分析而得，並沒有進一步驗證，因此目前僅能作為決策時的輔助參考。

綜合上述分析結果，提出以下幾點建議：

1. 本文係由納莉之降雨特性作雨型分區劃分，對於不同之颱風路徑所導致台北市地區的降雨是否也可利用此三區作為預警分區基準的問題，仍須進行適用性評估。
2. 建議未來應持續增加崩坍災害調查資料，並更新與修正現有資料，以提高預警基準的可靠性。
3. 台北市部分地區可能因礦渣堆積而造成的崩坍問題，因有其獨特性，本報告尚未涵蓋，日後將對此進行討論，以完善台北市的崩坍預警基準。

八、參考文獻

1. 防災國家型科技計畫辦公室, 2001: 九十年九月五日台北縣市暴雨災害現地勘查及災因初步檢討報告, 防災國家型科技計畫辦公室, 台北市

2. 防災國家型科技計畫辦公室, 2002: 納莉颱風災因分析及綜合檢討評估報告, 防災國家型科技計畫辦公室, 台北市
3. 防災國家型科技計畫辦公室及臺北市防災計畫辦公室, 2001: 九十年九月納莉颱風台北市坡地災害及土石流危險溪流勘查報告, 臺北市防災計畫辦公室, 台北市
4. 范正成、吳明峰、彭光宗, 1999: “豐丘土石流發生臨界降雨線之研究”, 土工技術, 第 74 期, 39-46
5. 高子劍, 2001: 機率式土石流臨界降雨線之研究, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文
6. 陳時祖, 1996: “雨量與邊坡崩塌的關係”, 土工技術, 第 57 期, 75-80
7. 臺北市防災計畫辦公室及防災國家型科技計畫辦公室, 2002: 台北市崩坍基準研究報告, 臺北市防災計畫辦公室, 台北市
8. 劉哲欣, 2000: 土石流潛在勢能及預警之研究, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文
9. 謝正倫, 1991: 土石流預警系統之研究, 國立成功大學台南水工試驗所研究報告, No.130, 台南
10. 瀨尾克美、船崎昌繼, 1973: “土砂害降雨量之研究”, 新防砂, 第 88 期, 22-28
11. 瀨尾克美、橫部幸欲, 1978: “土砂害降雨量之研究”, 新防砂, 第 108 期, 14-18
12. Caine, N., 1980: “The Rainfall intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flow”, *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.
13. Cannon, S.H. and S.D. Ellen, 1985: “Rainfall Conditions for Abundant Debris Avalanches in San Francisco Bay California”, *California Geology*, 38(12), 267-272.
14. Keerer, D. K., R.C. Wilson, R. K. Mark, E. E. Brabb, W. M. Brown III, S. D. Ellen, E. L. Harp, G. F. Wiczorek, C. S. Alger, and R. S. Zatkan, 1987: “Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall”, *Science*, 238, 921-925.
15. Wiczorek, G.F. 1987: “Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains”, *California, Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, 7, 93-104.