



以預報可靠度為考量之豪雨期間坡地淺崩塌 即時預警報架構研擬與作業化平台開發

成果報告書

行政院農業委員會水土保持局
與您一起打拼

以預報可靠度為考量之豪雨期間坡地淺崩塌即時預警報架構研擬與作業化平台開發

成果報告書

105
年度



行政院農業委員會水土保持局
54044 南投市中興新村光華路 6 號
<http://www.swcb.gov.tw>

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 105 年 12 月

行政院農業委員會水土保持局

以預報可靠度為考量之豪雨期間坡地淺崩塌即時
預警報架構研擬與作業化平台開發

**Development of a Reliability-Based Shallow
Landslide Early-Warning Framework during
Rainstorm Event**

執行單位：國立交通大學

執行期間：105 年 4 月 1 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：張胤隆 約聘助理研究員

共同主持人：湯有光 講座教授

張哲豪 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 105 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

以預報可靠度為考量之豪雨期間坡地淺崩塌即時預警報架 構研擬與作業化平台開發

摘要

本計畫以坡地淺崩塌數值模式為工具，提出可考慮坡地重要參數與降雨之不確定性，不同預報可靠度之坡地淺崩塌警戒曲線製作方法，使管理者能以預報可靠度為依據，利用此曲線進行坡地淺崩塌即時預報作業。本計畫首先利用整體敏感度分析探討各項坡地潛在因素不確定性對崩塌模擬之影響，分析發現水力傳導係數、土壤摩擦角、凝聚力、以及初始地下水位等為最重要之參數，因此本計畫發展回歸誤差分析以及優選等兩種方法，考慮降雨以及上述四項參數之不確定性對預報正確性之影響，建立在設定預報可靠度下之崩塌前 N 小時警戒曲線。本計畫以嘉義縣阿里山鄉美寮道路做為應用區域，製造 49 場降雨事件，其中 35 場事件用於建立警戒曲線，結果顯示回歸誤差分析法與優選法兩者所得警戒曲線近似，因此建議可採用計算效率高之回歸誤差分析法；另以剩餘之 14 場事件進行驗證，結果顯示預報可靠度相當接近設定之值，證明本計畫所提警戒曲線分析方法之正確性與適用性。為增加預警報作業之效率，本計畫同時利用 FEWS 開發自動化作業平台，可依設定之排程自動針對選定之坡地進行崩塌預報作業，而該平台更可整合其他天然災害預報模式，成為一整合性之天然災害預報系統。

關鍵詞：坡地淺崩塌、定率模擬法、不確定性、預報可靠度

Development of a Reliability-Based Shallow Landslide Early-Warning Framework during Rainstorm Event

Abstract

This project aims to develop a framework to construct the rainfall threshold curves for shallow landslide under specified forecast reliability. We used the global sensitivity analysis to determine the effects of the uncertainties of hydrologic and soil properties on the landslide simulation. The results indicates that the hydraulic conductivity, friction angle, cohesion, and initial groundwater level have great influences on the landslide forecasting. To incorporate the uncertainties from rainfall and the four parameters mentioned above into landslide forecasting, we developed the regression error analysis and the optimization methods to construct the rainfall threshold curves for specified lead time and forecast reliability. The Mei-Liao Road located in Alishan Township, Chiayi County was the study site. We generated 49 hyetographs among which 35 hyetographs were used to construct the threshold curve. The results showed that the regression error analysis method is preferred owing to its high computation efficiency. We used the remaining 14 hyetographs to validate the accuracy of the rainfall threshold curves. The forecast reliabilities for the 14 hyetographs are very close to the pre-specified reliabilities which indicates that the framework proposed is applicable. To improve the efficiency of landslide forecasting operation, we also developed an automatic operational platform based on the FEWS system. This platform enables the automatic landslide forecasting for selected slopes based on pre-specified schedules. Moreover, it can incorporate other natural disaster forecast models.

Keywords: shallow landslide, deterministic, uncertainty, forecast reliability

目次

摘要	I
Abstract	II
目次	III
表次	V
圖次	VI
第一章 前言	1-1
第一節 計畫緣起與目的	1-1
第二節 工作項目與內容	1-1
第二章 降雨引發坡地崩塌預報技術相關文獻蒐集評析	2-3
第一節 坡地崩塌分析方法	2-3
第二節 坡地崩塌預報方法	2-8
第三章 降雨條件與坡地潛在因素對坡地穩定性影響分析	3-1
第一節 坡地潛在因素對坡地穩定性之敏感度分析	3-2
第二節 降雨條件對邊坡穩定性之影響	3-18
第四章 豪雨期間坡地淺崩塌即時預報架構與警戒曲線研擬	4-1
第一節 坡地崩塌警戒曲線研擬	4-1
第二節 坡地崩塌警戒曲線實例應用	4-9
第五章 預警報作業化平台開發與案例應用	5-1
第一節 降雨門檻曲線整合平台的應用	5-1
第二節 整合平台介接警戒曲線工作概要	5-2
第三節 介接整合平台工作流程	5-5
第四節 坡地淺崩塌即時預警報作業化平台成果展示	5-8
第六章 結論與建議	6-1
第一節 結論	6-1

第二節 建議	6-1
參考文獻	參-1
附錄	附錄-1
附錄一 期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二 期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-2

表次

表 3-1	模式參數統計特性整理表	3-15
表 3-2	崩塌時間與各項不確定性輸入條件之相關係數	3-17
表 3-3	降雨條件對邊坡穩定影響崩塌模擬參數表	3-22
表 4-1	分析降雨事件總雨量列表	4-11
表 4-2	美寮道路參數統計特性整理表	4-12
表 4-3	不同方法所分析之門檻曲線參數值	4-13
表 4-4	警戒曲線參數彙整.....	4-14
表 4-5	警戒曲線驗證結果.....	4-15
表 5-1	平台設定檔功能說明表	5-8

圖次

圖 2-1	石門水庫集水區打荻氏分析圖	2-5
圖 2-2	統計法繪製之邊坡崩塌降雨門檻曲線	2-9
圖 2-3	九份二山龍南道路上邊坡崩塌降雨門檻曲線	2-11
圖 3-1	一維降雨引發坡地淺崩塌數值模式計算流程圖	3-2
圖 3-2	一維坡地地下水流示意圖	3-3
圖 3-3	石門水庫集水區砂崙仔崩塌地位置	3-11
圖 3-4	艾利颱風期間三光站時雨量組體圖	3-12
圖 3-5	石門水庫集水區坡度與土壤厚度現場量測資料	3-14
圖 3-6	石門水庫集水區坡度與土壤厚度線性回歸誤差常態分布檢核 ...	3-14
圖 3-7	安全係數與各項不確定性輸入條件之相關係數圖	3-18
圖 3-8	孔隙水壓之期望值與標準差	3-18
圖 3-9	孔隙水壓與各項不確定性輸入條件之相關係數圖	3-18
圖 3-10	破壞面切片作用力示意圖	3-20
圖 3-11	降雨條件對邊坡穩定影響分析案例示意圖	3-22
圖 3-12	總降雨量 300 mm 下不同降雨延時安全係數變化圖	3-24
圖 3-13	總降雨量 400 mm 下不同降雨延時安全係數變化圖	3-24
圖 3-14	總降雨量 500 mm 下不同降雨延時安全係數變化圖	3-25
圖 3-15	概念化降雨雨型分佈圖	3-26
圖 3-16	總降雨量 400 mm 前進型雨型不同降雨延時安全係數變化圖 .	3-26
圖 3-17	總降雨量 400 mm 中央型雨型不同降雨延時安全係數變化圖 .	3-27
圖 3-18	總降雨量 400 mm 後退型雨型不同降雨延時安全係數變化圖 .	3-27
圖 4-1	坡地崩塌即時預報警戒曲線分析方法	4-2
圖 4-2	預警報準確率概念.....	4-4
圖 4-3	災害風險關聯圖.....	4-4

圖 4-4	不同型二錯誤風險門檻曲線示意圖	4-5
圖 4-5	降雨門檻曲線回歸公式示意圖	4-6
圖 4-6	型二錯誤發生風險 α 之降雨門檻曲線回歸公式示意圖.....	4-7
圖 4-7	優選法降雨門檻曲線示意圖	4-9
圖 4-8	美寮道路位置圖.....	4-10
圖 4-9	美寮道路崩塌地現況照片	4-10
圖 4-10	試驗點位與地質分布套圖	4-12
圖 4-11	型二錯誤發生風險為 30%與 50%之崩塌時刻門檻曲線	4-14
圖 4-12	崩塌前一小時警戒曲線	4-15
圖 4-13	崩塌前二小時警戒曲線	4-16
圖 4-14	崩塌前三小時警戒曲線	4-16
圖 5-1	平台 FEWS_Taiwan 介接資料與模式之功能架構	5-2
圖 5-2	通用模式銜接技術.....	5-3
圖 5-3	General Adapter 運作流程共通性.....	5-4
圖 5-4	模式介接至平台標準工作階段	5-5
圖 5-5	FEWS_Taiwan PI XML 檔案格式	5-7
圖 5-6	執行計算匯入流程.....	5-9
圖 5-7	坡地淺崩塌即時預警報作業化平台執行範圍	5-9
圖 5-8	警戒值搭配降雨量的資料展示	5-10
圖 5-9	以地圖搭配多邊形顏色的方式進行資料展示	5-10

第一章 前言

第一節 計畫緣起與目的

台灣屬於地質年代年輕之島嶼，地質條件本即脆弱，而在地狹人稠之情形下，致使山坡地開發成為無可避免之途徑。山坡地開發之行為可能會降低邊坡穩定性，加以 921 地震後土石普遍有鬆動跡象，因此比鄰或位處山坡地之道路、公共建物或是聚落等皆面臨不可忽視之坡地崩塌災害風險。

坡地崩塌之主要觸發因素有降雨與地震兩類，而台灣坡地天然災害中發生頻率較高者為降雨引致之崩塌，例如民國 90 年桃芝颱風、民國 93 年敏督利與艾利颱風、以及民國 98 年莫拉克颱風等，歷年來造成無數起道路建物損壞與人命損失。

為有效避免或降低降雨引致之邊坡崩塌災害，除了必須事前針對重要邊坡進行崩塌潛勢分析外，於豪雨期間亦應結合即時預警作業，針對特定邊坡即時預測其穩定性以及可能發生崩塌之時間，以適時進行疏散或封路等之應變作為。目前台灣在坡地相關災害之預警方面僅有水土保持局針對土石流研擬警戒雨量值，而坡地崩塌則尚未有通行之預警報方法。由於降雨引致邊坡破壞之過程為複雜之物理現象，必須探討影響邊坡穩定性之各項因子其與邊坡穩定性間之關連性，緣此本計畫將藉由理論基礎嚴謹之邊坡穩定分析模式解析降雨引致邊坡崩塌之機制，探究水文、地文、地質等條件與崩塌四者間之交互關係，並依此關係提出可靠且具實用性之坡地崩塌即時預報架構與警戒值研擬方法，而為增進災害預警報作業之效率，本計畫亦將開發一可整合多種天然災害預報之作業化平台，如此始有助於未來山坡地之防災應變工作。

第二節 工作項目與內容

本計畫包含以下四項工作項目：

一、降雨引發坡地崩塌預報技術相關文獻蒐集評析

廣泛蒐集國內外與降雨引發坡地崩塌相關之研究，包含崩塌潛勢分析方法、預報技術以及應用實例等，以做為後續計畫執行之參考資料。

二、降雨條件與坡地潛在因素對坡地穩定性影響分析

利用敏感度分析方法，探討具不確定性且對邊坡穩定分析有重要影響之潛在因素；另一方面亦將設計不同之降雨條件，評估在不同降雨量、降雨延時與雨型下，邊坡崩塌潛勢與時間之變化。

三、豪雨期間坡地淺崩塌即時預報架構與警戒曲線研擬

依據國內外文獻與敏感度分析結果，提出可考慮坡地潛在因素與降雨不確定性，並以預報可靠度為預警決策依據之坡地崩塌即時預報架構與警戒曲線分析方法。

四、預警報作業化平台開發與案例應用

發展天然災害預警報作業化平台，將氣象局即時降雨資訊與前項工作所建立之降雨門檻曲線整合於平台，並以此平台進行實際案例之應用。

第二章 降雨引發坡地崩塌預報技術相關文獻蒐集評析

第一節 坡地崩塌分析方法

廣義的崩塌泛指地表經風化作用而破碎的岩屑及土壤，在重力影響下，向下運動的各種作用，一般山坡地、丘陵地或台地，其坡面的一部份，由於土塊失去平衡，向下方或側面移動的現象，皆稱為崩塌。崩塌的型式依其移動方式可分為墜落(fall)、傾翻(topple)、滑動(slide)、側滑(spread)與流動(flow)等五種，而豪雨所造成之崩塌大多以淺層滑動為主。

Dai et al. (2002)指出影響邊坡穩定性之因素可概分為兩大類，即潛在因素與驅動因素。潛在因素使邊坡處於易崩之狀態，包含土壤強度、地下水分布、植被狀況、坡度、邊坡幾何以及風化情形等水文、地文與地質條件；而驅動因素則使處於易崩狀態之邊坡開始發生崩塌，例如降雨或地震等，其中又以降雨所引發之邊坡破壞較常見於臺灣之崩塌災害中。van Western et al. (1997)與 Dai et al. (2002)綜整坡地崩塌分析相關研究後指出其可概分為四種方法，即歷年崩塌資料目錄(landslide inventory)、經驗法(heuristic)、統計法(statistical)與定率模擬法(deterministic)等。歷年崩塌資料目錄之方法係藉由建立歷年坡地崩塌破壞之資料庫，包括航照圖判釋與現址考察之詳細紀錄與相關資料等，用以研判分析區域坡地發生崩塌之密度與頻率，Wieczorek (1984)曾指出使用此方法時，需建置一資料庫，內容包含各項基本資料如崩塌地之活動情形、活動範圍、崩塌機制、土壤厚度與日期等。目前歷年崩塌資料目錄法為量化災害與風險分析所普遍使用之前置作業，許多相關研究著眼於推求崩塌範圍、體積、頻率與時空(spatial-temporal)之關係，例如經濟部水利署南區水資源局(2013)即利用民國 93 年至 101 年之衛星與航照影像，配合高精度之地形測量資料，分析曾文水庫集水區歷年崩塌地生成、擴大與縮減等活動情形，並建立重點崩塌地之資料庫。由於歷年崩塌資料目錄法僅依據過往資料紀錄崩塌活動情形，因此該方法並無法定量地評估坡地是否

發生崩塌，此外亦無法分析過去未曾發生過崩塌之地區其崩塌潛勢高低，然該方法通常是災害研究最直接之方式，並作為以其他方法進行進一步分析之基礎。

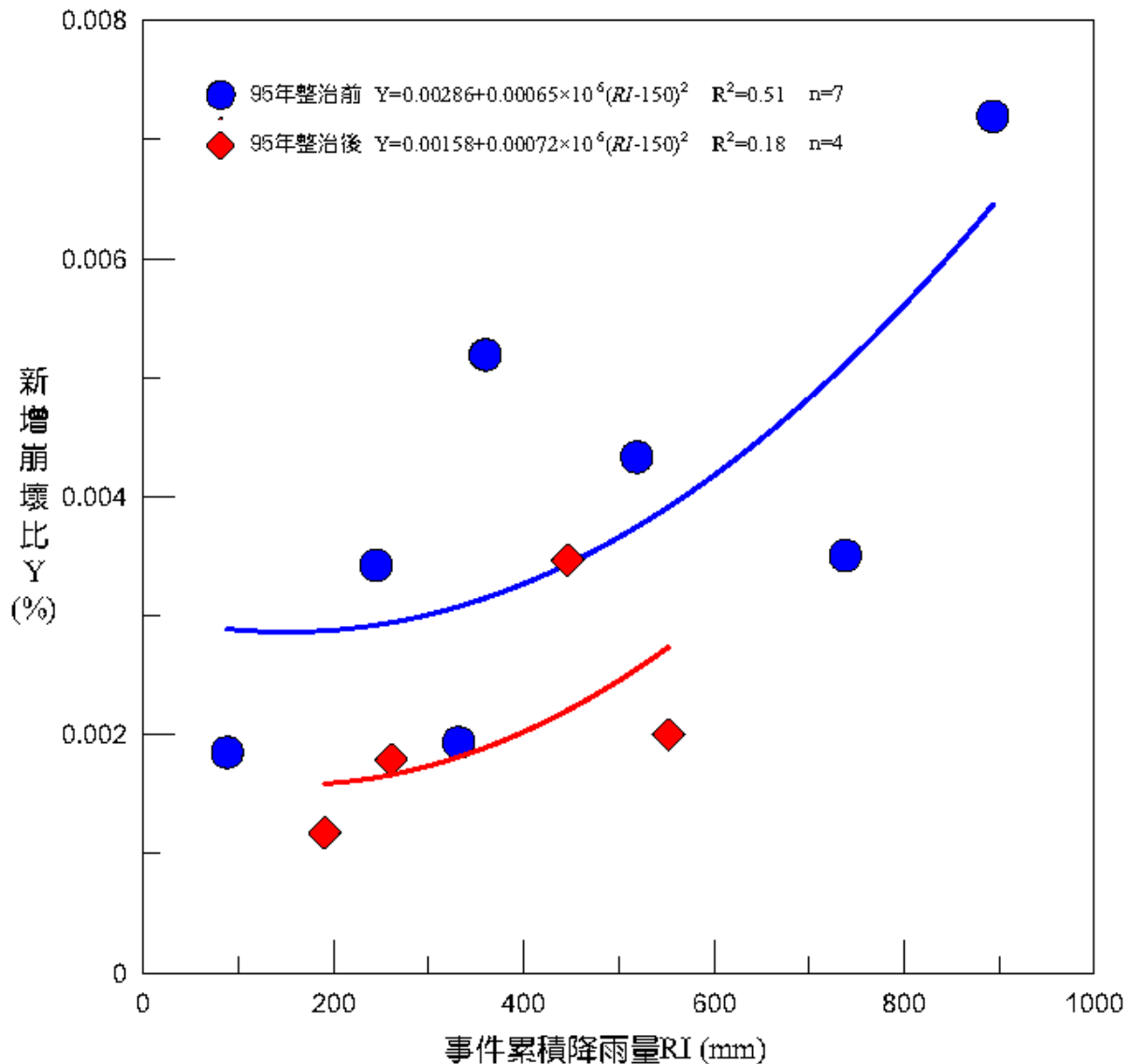
經驗法是指依據專家自身之專業經驗，利用研究地區過去之崩塌資料目錄建構邊坡崩塌可能性與潛在因素間之直接關係，所考慮之潛在因素可能因不同研究者而有差異，而直接關係可能為簡易之圖表區分何種潛在因素之組合會使坡地處於不穩定之狀態，亦可能是簡單之代數式描述潛在因素與崩塌發生之關係。經驗法固然簡單，但因此方法係仰賴主觀之意識，故其存在嚴重之再現性問題，亦即不同之專家針對相同之邊坡可能會產生截然不同之結果，甚至同一位專家在既有資料不變之情形下，前後二次之分析結果亦可能有所差異。

統計法係指利用統計學之概念，例如多變量分析法、模糊理論、類神經網路或貝氏分析(Bayesian)等，針對過去曾經崩塌之邊坡，探討發生崩塌當下之影響因素組合，以建立同經驗法類似之邊坡穩定分析公式，而此公式即可用於尚未發生崩塌但與已崩塌邊坡具有類似條件之地區，國外相關之研究包含 Carrara (1988)、Carrara et al. (1992)、Lee and Choi (2004)、Ermini et al. (2005)以及 Wang et al. (2009)等；而在國內方面則以打荻氏公式(打荻珠男，1971)最為廣泛應用，其目的在建構集水區新增崩塌面積與降雨量之回歸公式，例如圖 2-1 即為行政院農業委員會水土保持局(2011)所分析石門水庫集水區在「石門水庫及其集水區整治計畫」施行前後之打荻氏公式，而其公式可表示如下：

$$Y = \frac{C_a}{A} = K \times 10^{-6} (R - r)^2 \quad (2-1)$$

式中 Y 為新增崩塌面積率(%)； C_a 為新增崩塌面積； A 為集水區面積； K 為地文係數； R 為暴雨降雨量(毫米)； r 為崩塌臨界降雨量(毫米)。打荻氏公式

僅能估算一場降雨事件中整個集水區之新增崩塌面積，並無法針對個別坡地判斷其崩塌潛勢，亦不能知道新增崩塌面積位於何處。統計法主要依據客觀之統計理論，因此其分析成果具有重現性，然此方法主要缺點在於其泛用性可能受限，當影響因素發生變化時(土地利用改變、氣候變遷或不同分析區域)，過去之分析成果將可能失去代表性。



圖片來源：行政院農業委員會水土保持局(2011)

圖 2-1 石門水庫集水區打荻氏分析圖

相較於經驗法與統計法係分別依據主觀意識與統計理論進行分析，定率模擬法則是利用以物理基礎所建立之數學模式模擬邊坡穩定性，而其分

析概念乃是依據塊體破壞面型態，將其分為平面或圓弧之破壞面，再參照邊坡穩定理論架構，以莫爾-庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb failure criterion)建立破壞面剪應力與剪力強度之關係，並依據土體的抗剪力與驅動力分析穩定性，其輸出通常為安全係數(factor of safety, FS)，安全係數大於 1 與小於 1 分別代表邊坡處於穩定與崩塌狀態，而安全係數等於 1 表示邊坡處於將要崩塌之臨界狀況。van Western et al. (2006)指出在邊坡穩定性分析中，定率模擬法可提供最佳之量化資訊，而此資訊更可直接做為工程設計之依據，因為此方法並不受限於影響邊坡穩定性因素之現況條件，故可用以預測當研究區域之觸發與潛在因素發生變化時，邊坡穩定性會有何改變。

在定率模擬法中，目前大多數之工程實務係利用 Stabl 或 Flac 等兩種數學模式以計算邊坡之安全係數，其中前者係採用極限平衡法(limit equilibrium method)，而後者則採用土體變形法(deformation analysis method)，但兩者皆無法直接計算地下水流對於邊坡穩定之影響。對於以降雨為觸發因素之邊坡崩塌機制而言，降雨會入滲至邊坡土壤中，進而改變地下水與孔隙水壓之分布，而此變化會進一步影響土體之有效應力，促使邊坡趨向不穩定之狀態，但因 Stabl 與 Flac 模式並無法直接考慮降雨入滲與地下水流之機制，因此當其應用於分析降雨為觸發因素之崩塌課題時，無論是崩塌潛勢預測或即時預警，皆會受到極大之限制。

為詳實模擬前段所述降雨入滲與邊坡穩定間之機制，Iverson (2000)假設土壤入滲能力等於飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)，利用垂向一維近似飽和理查方程式(Richard's equation)之簡單解析解，計算不考慮超滲降雨作用下斜坡之地下水入滲，再利用無限邊坡穩定分析(infinite slope stability analysis)，模擬地下水上升引致飽和層坡地淺崩塌。Baum et al. (2002)以 Iverson (2000)所發展之模式為基礎，進一步結合地理資訊系統(geographic information system, GIS)，發展 TRIGRS (Transient Rainfall

Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Analysis)模式。TRIGRS 由於具備 GIS 處理能力，廣為相關研究所採用，惟其土壤入滲能力等於飽和水力傳導係數之假設常會過分高估孔隙水壓，有鑑於此，Tsai and Tang (2006) 發展一維近似飽和降雨引發坡地淺崩塌風險評估模式，經由引入非線性地面入滲邊界條件，修正 TRIGRS 模式中無法考慮窪蓄(ponding)效應所造成降雨入滲量高估及模擬孔隙水壓過大之不合理現象；另一方面，Tsai et al. (2008)亦同時發展一維未飽和降雨引發坡地淺崩塌風險評估模式，除了與近似飽和模式相同可考慮窪蓄效應外，藉由求解完整一維理查方程式，可同時模擬未飽和層因基質吸力消散或飽和層因地下水位上升而引發之兩種不同淺崩塌機制。

定率模擬法最主要之缺點為需要詳細之土壤特性相關參數資料以獲得正確之模擬結果，例如水力傳導係數(hydraulic conductivity)、摩擦角(friction angle)、凝聚力(cohesion)與保水曲線(water retention curve)等，而此類參數往往難以詳細獲得，導致分析結果具有高度之不確定性。除了參數取得性外，計算效率亦為定率模擬法之潛在問題，故早期定率模擬法之應用多僅針對特定之邊坡。近年來在計算機效能日亦突破下，以垂向一維崩塌模式針對集水區尺度分析崩塌潛勢分布之研究如雨後春筍，例如 Burton and Bathurst (1998)、Salciarini et al. (2008)以及 Sorbino et al. (2010)等，經濟部水利署(2008)為國內首先將定率模擬法應用於水庫集水區尺度之研究，該計畫分析石門水庫集水區在不同重現期降雨條件下之崩塌潛勢空間分布，並進而估算集水區整體崩塌土砂產量，國內將定率模擬法應用於集水區尺度之研究尚有 Chen et al. (2005)以及 Lee and Ho (2009)，其分別針對新北市田寮山以及基隆河支流之集水區探討崩塌潛勢分布。

一維模式由於僅考慮垂向之孔隙水壓與安全係數變化，故具有計算效率高之優點，適宜應用於集水區尺度之分析，然因其不能考量側向邊界條件

與側向水流，故無法模擬地表或地下水側方向流動引致之崩塌行為，有鑑於此，陳弘恩(2014)發展二維未飽和坡地崩塌模式，同時考慮垂向與縱向(坡頂至坡趾)，該模式耦合求解一維地表漫地流與二維理查入滲方程式，最後再利用切片法分析潛在滑動面及其安全係數。

第二節 坡地崩塌預報方法

前節已說明目前國內外對於邊坡穩定性分析之常見方法，包含經驗法、統計法與定率模擬法等，其中定率模擬法更可達到推估崩塌時刻之功能。以此三種方法為基礎，配合進一步之分析，即可應用於坡地崩塌即時預報之工作。對於以降雨為觸發因素之邊坡即時預報而言，目前多數研究皆是以降雨特性(總降雨量、降雨延時與降雨強度)做為預報研判之依據，即降雨門檻值或降雨門檻曲線。

早期邊坡預警之降雨門檻研究係以統計法為基礎，即針對一特定區域，蒐集歷年來造成該區域發生崩塌之降雨事件其總降雨量與降雨延時，再利用統計理論描繪出降雨門檻曲線，如圖 2-2 所示。圖 2-2 為三個不同研究針對不同區域所繪製之降雨強度與延時門檻，其中橫軸代表降雨延時，縱軸則代表平均降雨強度，當一場降雨事件其降雨延時與平均降雨強度位於圖中曲線之左半邊時，代表該區域不會發生崩塌，而若位於曲線右半邊，則表示崩塌將會發生。因此若配合即時雨量觀測技術，即可逐時將觀測到之雨量資訊點繪於圖 2-2 中，達到即時預警報之功能。雖然與圖 2-2 類似之研究其發展迄今已達 30 年以上，且分別應用於 local (Giannecchini, 2005; Zêzere et al., 2005; Rosi et al., 2012)、regional (Aleotti, 2004)、national (Brunetti et al., 2010) 以及 global (Caine, 1980; Guzzetti et al., 2008) 等不同空間尺度，但台灣目前則僅有行政院水土保持局將其實際應用為山區之土石流警戒，且僅考慮累積降雨量單一因子做為警戒判斷，忽略其他降雨特性之影響。

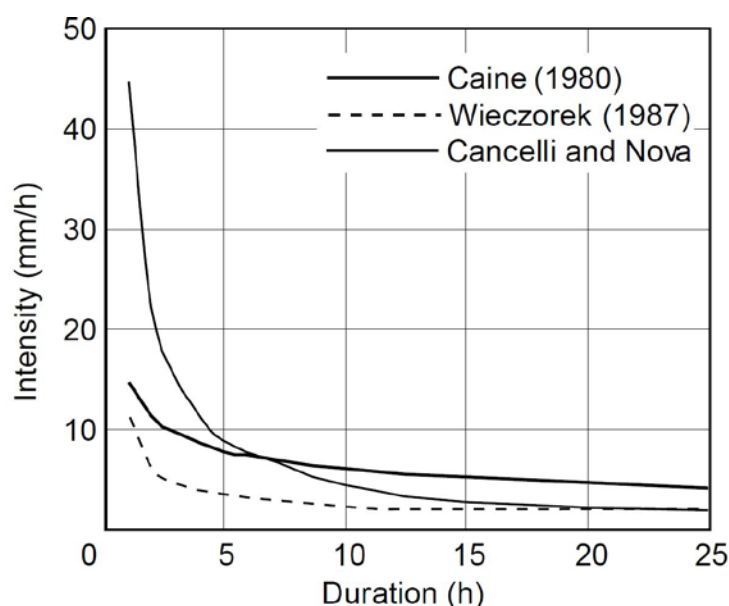


圖 2-2 統計法繪製之邊坡崩塌降雨門檻曲線

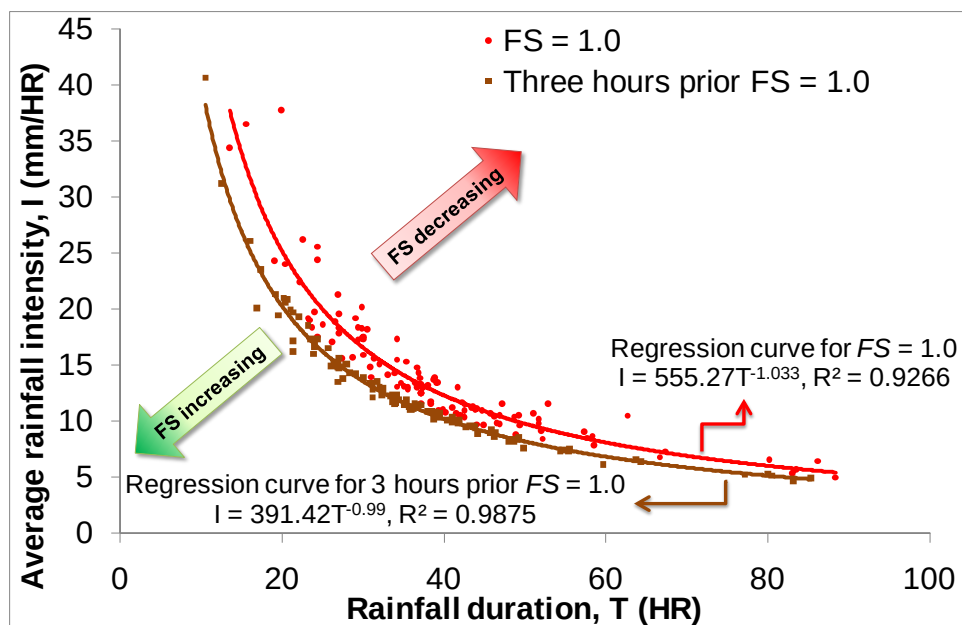
以統計法為基礎所推估之降雨門檻在實際應用上可能遭遇之限制包含：

1. 以統計法繪製特定區域之降雨門檻曲線須仰賴過去大量之崩塌調查資料，因此無法用於調查資料相對較少之區域。
2. 當影響邊坡穩定性之潛在因素改變時，所繪製之降雨門檻曲線將失去效用。
3. Guzzetti et al. (2008)蒐集全球於 1917 至 2005 年間所發生之 2,626 件降雨引發崩塌災害資料，記錄顯示其中僅有 133 件(5.1%)有記載崩塌發生之時刻，而僅有記載崩塌發生日期之記錄則有 691 件(26.3%)，顯示崩塌調查資料通常無法精細到詳細記錄發生崩塌之時刻，因此在繪製降雨門檻曲線時，係以造成崩塌之降雨事件其總降雨量與總降雨延時為分析依據。然崩塌實際發生時刻之累積降雨量可能尚遠小於該場事件之總降雨量，因此所推估之降雨門檻曲線可能有過於樂觀之情形。
4. 承上，因缺乏崩塌實際發生時刻之記錄，因此只能繪製崩塌發生與否之門檻曲線，如此將造成並無客觀之依據以決定何時發出預警，亦即將即時觀測雨量點繪於圖 2-2 時，決策者需依其主觀意識判斷當觀測降雨繪點與降雨門檻曲線接近到何種程度時，始能或必須發出預警報並進行相

關措施。

由於上述之限制，近年來部分與即時預警報相關之研究改採定率模擬法為基礎以推估降雨門檻曲線，圖 2-3 即為行政院農業委員會水土保持局(2010)針對南投縣九份二山龍南道路之上邊坡，利用 Tsai and Yang (2006)所發展之一維飽和坡地穩定分析模式，分析可能造成該邊坡發生崩塌以及崩塌前三小時之降雨延時與平均降雨強度組合，即圖 2-3 中之點位，待獲得大量之降雨組合點位後，行政院農業委員會水土保持局(2010)利用回歸分析繪製發生崩塌以及崩塌前三小時之降雨門檻曲線，因此若配合實際觀測降雨資料，決策者即可客觀地依據預警報發布後至完成應變做為所需之時間，利用圖 2-3 決定預警報發布之時刻。圖 2-2 與圖 2-3 在即時預警報上具有相同之功能，差別在於後者繪製降雨門檻曲線係依據數學模式模擬結果而非過去實際崩塌調查資料，因此依前段所述統計法限制之順序，茲說明以定率模擬法繪製降雨門檻曲線之優點如下：

1. 繪製降雨門檻曲線之資料主要以數學模式模擬而得，僅需少量之過去崩塌資料做為模式檢定驗證之用，因此可適用於調查資料相對較少之區域。
2. 當影響邊坡穩定性之潛在因素改變時，所繪製之降雨門檻曲線雖然失去效用，但可藉由改變模式相應參數之設定並重新模擬，以獲得潛在因素改變後之降雨門檻曲線。
3. 在繪製降雨門檻曲線時，係以模擬發生崩塌時刻之累積降雨量與降雨延時為分析依據，因此所推估之降雨門檻曲線能更正確地表達降雨與崩塌間之關係。
4. 由於可藉由模擬獲得邊坡發生崩塌之時刻，配合逐時之降雨資料，即可繪製崩塌發生前數小時之降雨門檻曲線。



圖片來源：行政院水土保持局(2010)

圖 2-3 九份二山龍南道路上邊坡崩塌降雨門檻曲線

第三章 降雨條件與坡地潛在因素對坡地穩定性影響分析

依據對國內外常見之坡地崩塌潛勢研判與即時預警報分析方法回顧可知，多數研究雖仍採用歷史崩塌資料之統計結果，以降雨延時與平均降雨強度為參數繪製降雨門檻曲線，但因電腦計算能力進步以及對降雨引致邊坡破壞物理機制瞭解之增加，目前已有偏向以定率模擬法進行繪製降雨門檻曲線工作之趨勢，惟實務應用上仍存在以下限制：

1. 定率模擬法係以數學模式模擬邊坡安全係數，而以物理基礎所建立之數學模式常包含大量之參數以描述現地之潛在因素(地文與地質)，然土壤因本身異質性(heterogeneity)之特質，使得有限之現地試驗資料不足以描述坡地完整之土壤特性分布，而坡度之計算準確性又可能受數值高程模型(DEM)之誤差所影響，因此在模式參數具有不確定性(uncertainty)之情形下，模式之輸出自然也隱含了不確定性。
2. 目前繪製降雨門檻曲線多是以降雨延時與平均降雨強度做為考慮因子，但在相同延時與平均降雨強度之條件下，降雨組體圖可能會有不同之形狀，例如均勻、前進、中央、後退與雙峰等多種雨型，不同雨型可能引發不同之降雨入滲過程，導致差異極大之邊坡穩定性變化，如此則當使用降雨門檻曲線進行即時預警時，其預警報發布時間可能存在高度之不確定性。

綜上所述，本章首先將利用 Tsai and Yang (2006)所發展之一維降雨引發坡地淺崩塌數值模式，配合敏感度分析方法，探討具不確定性且對邊坡穩定分析有重要影響之潛在因素；接著再利用陳弘恩(2004)所發展二維坡地崩塌數值模式配合設計之不同降雨條件，評估在不同降雨量、降雨延時與雨型下，邊坡崩塌潛勢與時間之變化。

第一節 坡地潛在因素對坡地穩定性之敏感度分析

一、採用分析模式簡介

本計畫採用 Tsai and Yang (2006)所發展之一維降雨引發坡地淺崩塌數值模式進行坡地潛在因素之敏感度分析，以下說明該模式之理論基礎。

Tsai and Yang (2006)利用有限元素法建立坡地降雨入滲模擬方法，並考量地表窪蓄效應之影響，再將各時刻模擬結果之孔隙壓力分佈，引入無限邊坡穩定分析之用，計算坡地是否崩塌，模式整體計算流程如圖 3-1。

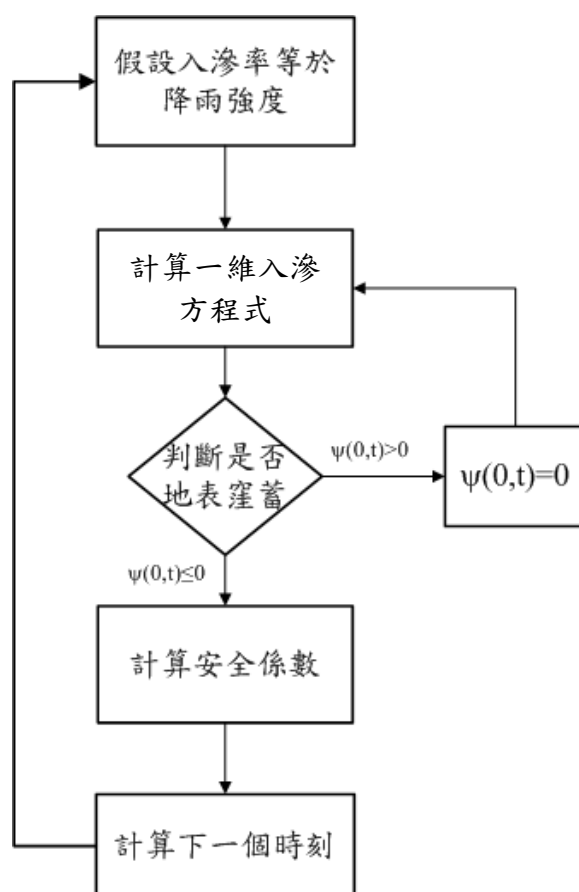


圖 3-1 一維降雨引發坡地淺崩塌數值模式計算流程圖

(一) 坡地降雨入滲模擬

根據 Richards 方程式，三維坡地地下水流之控制方程式(Hurley and Pantelis, 1985)可表示為

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (3-1)$$

式中， θ 為含水量(moisture content)； ψ 為壓力水頭(pressure head)； α 為坡地之坡度； t 表示時間； x 、 y 及 z 表示空間座標； K_L 與 K_z 分別表示在 x 、 y 及 z 方向之水力傳導係數，且為壓力水頭之函數。

在降雨引發淺崩塌(shallow landslide)之假設下，若坡地可能發生崩塌之深度遠小於坡地之長度與寬度，且降雨延時遠小於孔隙水在 x 、 y 方向之傳輸時間(Iverson, 2000)，(3-1)式可簡化為：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos(\alpha) \right) \right) \quad (3-2)$$

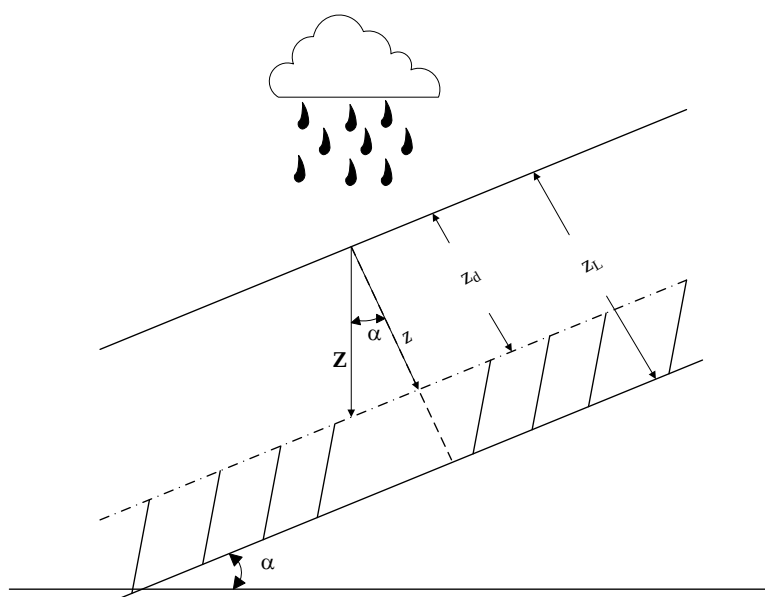


圖 3-2 一維坡地地下水流示意圖

若進一步假設土壤在降雨前處於濕潤近似飽和之狀態，則式(3-2)可進一步簡化為：

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D_0 \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} \quad (3-3)$$

其中 $D_0 = K_{sat} / C_0$ ； C_0 為 $C(\psi) = d\theta / d\psi$ 之最小值； $C(\psi)$ 表示含水量與壓力水頭之比值； K_{sat} 為飽和水力傳導係數。

求解(3-3)式需要適當之初始條件(initial condition)以及邊界條件(boundary condition)。如圖 3-2 所示，初始時，坡地之穩態水流平行坡面，且地下水位距離坡面下 Z_d 處，則初始之壓力水頭可表示為

$$\psi(Z, 0) = (Z - Z_d) \cos^2 \alpha \quad (3-4)$$

因為假設土層厚度 Z_L 之坡地，若底部與堅硬不透水之土層或岩石相接，則坡地土層底部之邊界條件為

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(Z_L, t) = \cos^2 \alpha \quad (3-5)$$

此外，坡地表面處，在窪蓄效應(ponding effect)尚未影響降雨入滲時，也就是降雨完全入滲進入土壤，則坡面之邊界條件可表示為

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0, t) = -I_z / K_{sat} + \cos^2 \alpha \quad t \leq T \quad (3-6)$$

其中 I_z 表示降雨強度； T 為降雨延時。然而當降雨入滲受窪蓄效應影響後，在不考慮窪蓄深度下，也就是忽略坡面地表逕流(overland flow)之水深，則坡面之邊界條件為

$$\psi(0, t) = 0 \quad (3-7)$$

降雨過後，坡面再無水流入滲，所以坡面之邊界條件變為零流邊界

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0, t) = \cos^2 \alpha \quad t > T \quad (3-8)$$

(二) 無限邊坡穩定分析

利用前述一維入滲方程式獲得之壓力水頭，經由無限邊坡穩定

分析(infinite slope stability analysis)，即可估計降雨入滲是否引發崩塌。無限邊坡穩定分析可表示如下

$$FS(Z,t) = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} - \frac{\psi(Z,t)\gamma_w \tan \phi}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{c}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (3-9)$$

式中， FS 表示安全係數，若小於 1 則發生崩塌，大於 1 則否； ϕ 為土壤內摩擦角(friction angle)； c 為土壤之凝聚力(cohesion)； γ_w 與 γ_{sat} 則分別表示水與飽和土壤之單位重(unit weight)。

(三) 模式限制

以下列出所採用一維降雨引發坡地淺崩塌模式之主要限制：

1. 本模式假設土壤特性為等向(isotropic)與均值(homogeneous)，因此若土壤特性在垂直方向有明顯之非等向(anisotropic)與非均值(nonhomogeneous)現象，則模擬結果可能會有較大之誤差。
2. 對於短延時(1 至 3 天)之暴雨而言，土壤孔隙水壓之變化主由入滲所影響，而本模式在計算孔隙水壓變化方面僅考慮一維垂向入滲，因此模式僅適用於短延時暴雨之情境。
3. 本模式採用無限邊坡理論計算坡地之穩定性(安全係數)，由於無限邊坡理論係假設邊坡之坡度、厚度與土壤參數為均勻值，且孔隙水壓之變化僅與深度以及時間有關，因此較適合應用於容易發生平面破壞型態之邊坡，而平面破壞則常發生於表層風化較均勻，且土壤厚度遠小於邊坡長與寬之坡面。而若將本模式應用於可能發生非平面破壞之邊坡，則計算出之安全係數通常將小於其他採用更複雜理論可計算非平面破壞之模式(Duncan, 1996)，亦即本模式之結果較為保守。
4. 模式計算結果與水文地質參數息息相關，因此相關參數之給定必須審慎且經過率定與驗證。

二、敏感度分析方法說明

水利工程中常必須了解可能造成災害之各種物理量或行為，例如坡地崩塌之可能性、崩塌面積、崩塌土砂量、河川水位變化、地層下陷量以及淹水深度等致災因子，而這些致災因子又受多種自然或人為條件所影響，例如坡地崩塌可能受降雨、土壤強度與坡度等影響，而河床沖刷深度則受流量、河床質與形狀、泥砂濃度以及河中構造物等影響。為了事先研擬防災與減災策略，吾人常藉由建立所謂之分析模式，以瞭解上述各項致災因子之可能規模或大小，分析模式之輸入條件即為各項影響致災因子之自然與人為條件，而輸出則是致災因子之規模或大小。上述之分析模式其建立方法可採用統計之概念，例如依據調查之輸入與輸出資料，利用統計原理建立模式輸入與輸出間之關係式，即所謂之黑盒(black box)分析；另外亦可採用物理之概念，將大自然複雜之物理現象以控制方程式簡化，如此亦可建立模式輸入與輸出間之關係，例如前節所介紹之降雨引至坡地崩塌分析模式。藉由以上說明可知，分析模式之概念實可以下列方程式表達：

$$y = f(x) \quad (3-10)$$

式中 x 與 y 皆為向量，即 $x = [x_1, x_2, \dots, x_I]$ ， $y = [y_1, y_2, \dots, y_J]$ ，分別包含模式之輸入與輸出； f 為函數，代表不同之分析模式。

然而無論是以統計或物理概念建立之模式，在實際使用模式以分析致災因子時，往往因為調查困難、資料不足或測量誤差等等因素，使得模式輸入條件具有程度不等之不確定性，例如坡地崩塌可能性分析中，土壤因本身異質性(heterogeneity)之特質，使得實測資料不足以描述坡地完整之土壤特性分布，而坡度之計算準確性又可能受 DEM 誤差所影響，因此在模式輸入條件具有不確定性之情形下，模式之輸出自然也隱含了不確定性，若忽略此不確定性逕自進行防災與減災策略之研擬，則有可

能因為模式輸出與真實情況差異太大，導致不預期之災害。

在模式應用上，敏感度分析(sensitivity analysis)與不確定性分析(uncertainty analysis)是兩個常被同時提起之概念，但兩者之目的並不相同。敏感度分析之目的在分析個別模式輸入條件之不確定性對模式輸出不確定性之影響，以找出對模式輸出不確定性最具影響性之輸入條件；而不確定性分析之目的則在定量計算模式輸出之統計特性，例如各項動差(moment)或是機率密度函數(probability density function, PDF)等。

依據 Saltelli et al. (2008)，敏感度分析主要在進行以下兩種影響因子特性之判別，即：

- (一) 重要影響因子篩選(factor prioritization)：目的在判斷哪些影響因子(或模式輸入條件)之不確定性對模式輸出之變異性具有重要之影響，亦即哪些影響因子當固定於其真值後，模式輸出之變異性可大幅降低。此資訊除了可據以判斷不確定性分析所需考慮之影響因子外，亦有助於瞭解須針對哪些影響因子進行率定或投入更深入之調查，以更有效率地減少模式輸出之不確定性。
- (二) 低影響因子篩選(factor fixing)：目的在判斷哪些影響因子在其可能範圍內自由變動時，並不會使模式輸出產生太大變異，亦即並不需要考慮這些影響因子之不確定性。須注意的是，若一影響因子並不屬於重要影響因子，並不能保證其必為低影響因子，因為該影響因子在分析模式中可能與其他影響因子具有交互作用(interaction)。

傳統之敏感度分析係以局部(local)之觀點進行，其方法為逐次改變某一影響因子之值，其餘影響因子則維持基值(base value，通常採平均值)，以評估每一影響因子在一定變化程度內對模式輸出(以本計畫而言即為安全係數或崩塌時間)之影響，然局部敏感度分析並無法考慮以下

兩點現象：

- (一) 模式輸入與輸出間之非線性關係：若某一輸入條件對模式輸出之影響具有高度之非線性關係，則輸入條件不同基值之選擇將對敏感度分析結果產生顯著之影響。
- (二) 無法考慮輸入條件實際可能變化範圍：在進行局部敏感度分析時，通常每一輸入條件之變化程度皆保持相同，且此變化程度係人為加以決定，因此可能造成輸入條件實際之變化範圍(即不確定性)遠超過(或遠小於)人為給定之變化程度。

為避免上述兩項限制，本研究將採用整體敏感度分析中之取樣法(sampling based)進行敏感度分析，茲說明如下。

取樣法整體敏感度分析之概念係根基於若某一影響因子(或模式輸入)之不確定性對模式輸出之變異性具有重要之影響，則該影響因子與模式輸出間應具有較強之相關性，該方法之主要步驟為：

(一) 影響因子統計取樣(sampling)

針對一維降雨引發坡地崩塌模式中各項可能影響邊坡穩定計算之潛在因子，依據其統計特性隨機取樣 N 組資料。

(二) 蒙地卡羅模擬

依據前步驟所獲得具不確定性影響因子之 N 組取樣資料，配合其他不具不確定性之模式輸入條件，執行 N 次崩塌模式以模擬 N 個模式輸出。

(三) 相關係數計算

利用 N 組之輸入值以及 N 個模擬之模式輸出，計算每一個具不確定性影響因子與模式輸出間之相關係數，而相關係數包含以下數種：

1. 簡單線性相關係數

即統計分析中最常見之 Pearson product-moment correlation coefficient，適用於當所有影響因子間均為互相獨立不具相關性時，其公式如下。

$$r_{y,xi} = \frac{\sum_{n=1}^N (x_{ni} - \bar{x}_i)(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_{ni} - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2}}, \quad (3-11)$$

其中 $r_{y,xi}$ 表示模式輸出 y 與第 i 個模式輸入 x_i 間之簡單線性相關係數； x_{ni} 為第 i 個模式輸入於第 n 次取樣之值； y_n 為利用第 n 次取樣之模式輸入所計算之模式輸出樣本值； $\bar{x}_i$ 與 $\bar{y}$ 則分別為第 i 個模式輸入與模式輸出之平均值。

簡單線性相關係數之範圍介於-1 與 1 之間，在模式輸入彼此互相獨立之條件下， $r_{y,xi}$ 之平方代表模式輸出之變異性中肇因於第 i 個模式輸入不確定性之比例，因此 $r_{y,xi}$ 之絕對值越大，代表第 i 個模式輸入之不確定性對於模式輸出之變異性具有越大之影響。

若模式輸入與輸出間具有顯著之非線性關係，則簡單線性相關係數將無法確實反應模式輸入對輸出之影響程度，然當模式輸入與輸出間雖為非線性但屬於單調函數(monotonic function)時，則可針對一模式輸入，依據數值大小分別將取樣獲得之 N 個模式輸入值轉換為其在該 N 個數值中之等級(rank)，同樣地亦可依據數值大小將 N 個模擬之模式輸出值轉換為等級，如此即可利用下式計算 Spearman's rank correlation coefficient：

$$R(r_{y,xi}) = \frac{\sum_{n=1}^N [R(x_{ni}) - \overline{R(x_i)}][R(y_n) - \overline{R(y)}]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [R(x_{ni}) - \overline{R(x_i)}]^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N [R(y_n) - \overline{R(y)}]^2}}, \quad (3-12)$$

其中 $R(r_{y,x_i})$ 為模式輸出 y 與第 i 個模式輸入 x_i 間之 Spearman's rank correlation coefficient； $R(x_{ni})$ 為第 i 個模式輸入於第 n 次取樣之值在所有 N 個取樣值之等級； $R(y_n)$ 為利用第 n 次取樣之模式輸入所計算之模式輸出樣本值在所有 N 個輸出值之等級； $R(\bar{x}_i)$ 與 $R(\bar{y})$ 則分別為第 i 個模式輸入與模式輸出轉換為等級後之之平均值。若一模式輸入與模式輸出間之簡單線性相關係數以及 Spearman's rank correlation coefficient 具有顯著之差異，代表該模式輸入與輸出間具有顯著之非線性關係。

2. 偏相關係數(partial correlation coefficient)

適用於當模式輸入彼此間具有相關性之情況，其公式如下。

$$r_{y,xi \bullet V \setminus \{x_i\}} = \frac{-c_{xi,y}}{\sqrt{c_{xi,xi} c_{y,y}}}, \quad (3-13)$$

其中 $r_{y,xi \bullet V \setminus \{x_i\}}$ 為模式輸出 y 與第 i 個模式輸入 x_i 間之偏相關係數； $V \setminus \{x_i\}$ 代表除第 i 個模式輸入 x_i 外其餘之模式輸入； $c_{xi,y}$ 、 $c_{xi,xi}$ 與 $c_{y,y}$ 則為矩陣 $\mathbf{C}$ 內之元素，矩陣 $\mathbf{C}$ 之定義為：

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} r_{x1,x1} & \cdots & r_{x1,xp} & r_{x1,y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{xp,x1} & \cdots & r_{xp,xp} & r_{xp,y} \\ r_{y,x1} & \cdots & r_{y,xp} & r_{y,y} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{x1,x1} & \cdots & c_{x1,xp} & c_{x1,y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{xp,x1} & \cdots & c_{xp,xp} & c_{xp,y} \\ c_{y,x1} & \cdots & c_{y,xp} & c_{y,y} \end{bmatrix}, \quad (3-13)$$

其中 $r_{xi,xj}$ 表示第 i 個模式輸入 x_i 與第 j 個模式輸入 x_j 間之簡單線性相關係數， p 為進行敏感度分析之影響因子數目。

(四) 影響因子敏感度判別

無論是簡單線性相關係數或是偏相關係數，其值皆介於-1 與 1 間，相關係數大於 0 代表影響因子與模式輸出間具有正相關，反之則為負相關。取樣法整體敏感度分析可用於重要影響因子之篩選，

相關係數之絕對值越高，代表該影響因子之不確定性對模式輸出之影響越大。然此方法並無法進行低影響因子篩選，因其未考慮影響因子間在分析模式中可能具有之交互作用。

三、敏感度分析參數選取與設定

本計畫以石門水庫集水區內之砂崙仔崩塌地做為敏感度分析案例，其位置如圖 3-3，本小節將說明欲進行敏感度分析參數之選擇及其設定。在降雨資料方面係採用石門水庫集水區內三光雨量站所量測之民國 93 年艾利颱風 48 小時降雨歷線，如圖 3-4；地形資料則選用工研院製作之 5 m DEM；而土壤參數資料則選用經濟部水利署所辦理「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究」(經濟部水利署，2008)所完成相關土壤試驗之數據。

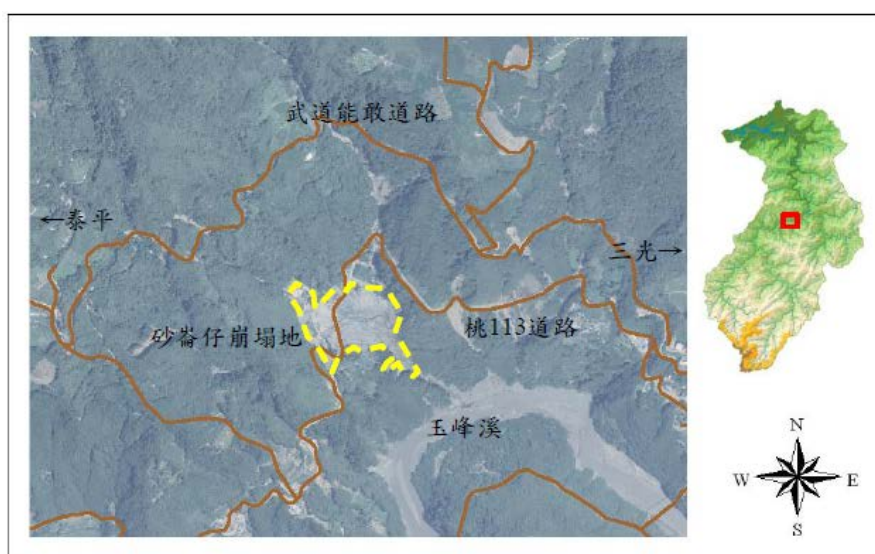


圖 3-3 石門水庫集水區砂崙仔崩塌地位置

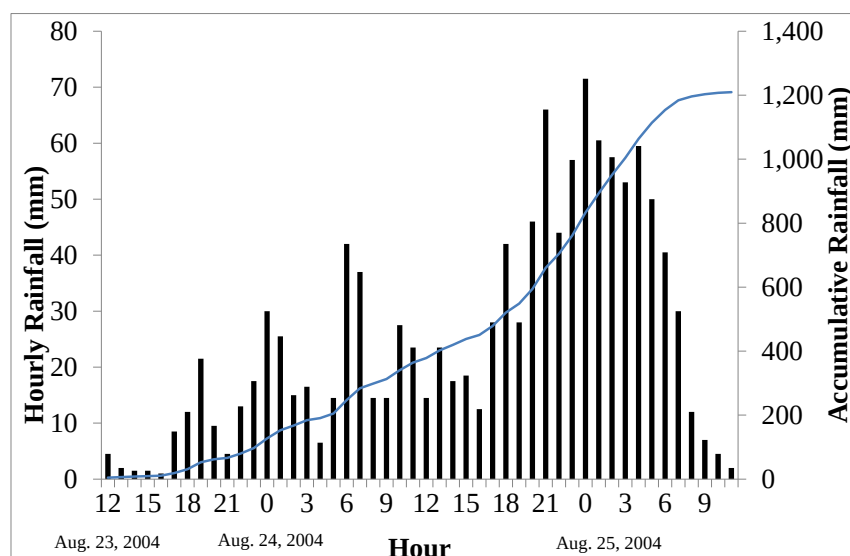


圖 3-4 艾利颱風期間三光站時雨量組體圖

崩塌模式之輸入條件可分為驅動因子(降雨)與潛在因子(坡度、土壤厚度、初始地下水位、飽和水力傳導係數、凝聚力、摩擦角與飽和土壤單位重)，以下將詳細說明模式參數之資料及其統計特性。

(一) 不進行敏感度分析之參數

不考慮敏感度之參數包含有降雨條件、水之單位重(γ_w)、以及坡度等。降雨條件如前所述採用民國 93 年艾利颱風期間之豪雨事件，降雨時間為 8 月 23 日 12 時至 25 日 11 時，共計 48 小時，坡度則依據 DEM 分析為 31° 。

(二) 進行敏感度分析之參數

1. 初始地下水位(d_z)

相較於地質參數或是土壤厚度等，降雨臨前之初始地下水位往往更難藉由現地調查加以獲得，尤其在山坡地或林地相關資料更極度缺乏。初始地下水位不似地質參數般可依據土壤分類加以概略地估算，其深受地形、氣候季節變化、人為開發(如抽地下水)、植被狀況、與水系距離以及臨前降雨等特性所影響，因此並無法依據過往相關文獻匯整集水區初始地下水位之不確

定性。有鑑於此，本計畫初步假設初始地下水位之機率密度函數符合均勻分布(uniform distribution)，且變動範圍介於地表下 1 m 至 3 m 間，亦即期望值為地表下 2 m、標準差為 0.577 m、變異係數則為 0.289。

2. 土壤厚度(d_{LZ})

陳本康(2005)利用 11 處現場量測之土壤厚度資料，點繪出土壤厚度與坡度之分布如圖 3-5 所示。依據圖 3-5，土壤厚度與坡度之關係可嘗試利用下列線性迴歸公式加以推求：

$$\tilde{d}_{LZ} = a + b \times \alpha + \varepsilon \quad (3-14)$$

其中 $\tilde{d}_{LZ}$ 為推估之土壤厚度； a 與 b 為迴歸係數； ε 則為隨機之誤差項。若忽略誤差項之存在，則依據 11 處崩塌深度與坡度之調查資料，利用最小平方法(least squares)吾人可計算迴歸係數 a 、 b 以及判定係數 R^2 分別為 5.6563、-0.0716 以及 0.9371，如圖 3-5 所示，顯示土壤厚度與坡度之關係應可合理地以式(3-14)表示。

為估算土壤厚度之不確定性，依據現地量測之 11 組資料(d_{LZ})以及式(3-14)所計算之 11 組崩塌深度($\tilde{d}_{LZ}$)，吾人可獲得 11 組誤差項資料(ε ，即 $d_{LZ} - \tilde{d}_{LZ}$)及其平均值(0.0)與標準差(0.3076)，進一步利用此 11 組誤差項資料可對其進行常態分布之檢定如圖 3-6 所示。圖 3-6 中實線代表依據誤差項平均值與標準差所繪製之累積常態分布曲線，而實心點位則代表 11 組誤差項資料，因此可知誤差項可合理假設為具有常態分布之特性。綜合以上所述，吾人可建立土壤厚度與坡度之關係如下所示：

$$d_{LZ} = -0.0716\alpha + 5.6563 + \varepsilon_d; \varepsilon_d \sim N(0, 0.3076^2) \quad (3-15)$$

其中 ε_d 為屬於常態分佈之隨機誤差項(平均值為 0，標準差為 0.3076)。誤差項 ε_d 與坡度或土壤厚度互為獨立無相關性，因此土壤厚度可透過計算好的坡度，在考慮迴歸誤差下，經由(3-15)式求得。

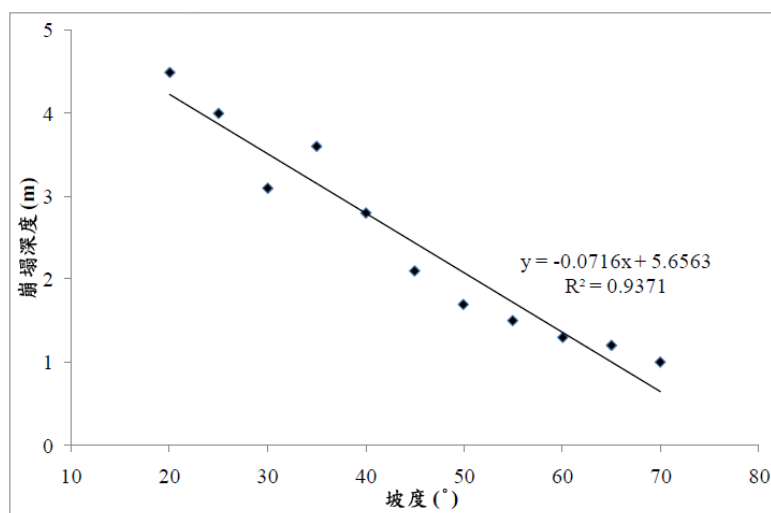


圖 3-5 石門水庫集水區坡度與土壤厚度現場量測資料

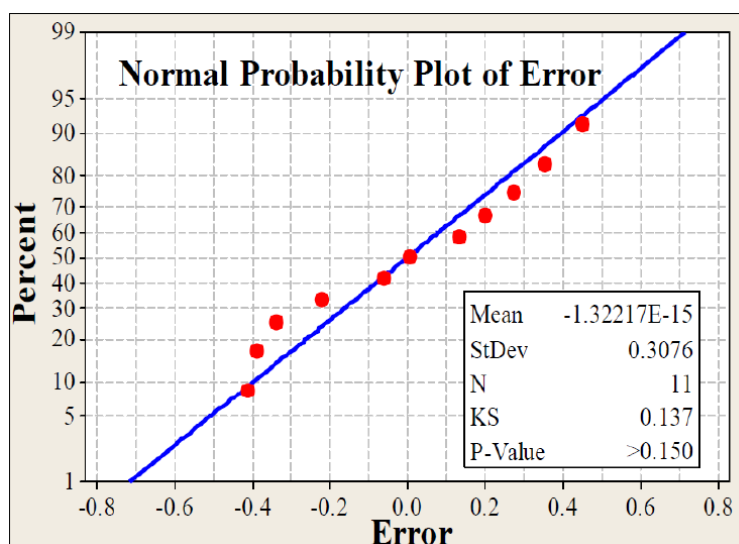


圖 3-6 石門水庫集水區坡度與土壤厚度線性回歸誤差常態分布檢核

3. 土壤強度參數

包含土壤比重、有效摩擦角與有效凝聚力，其平均值選用「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究」(經濟部水利

署，2008)所獲得之土壤試驗值，而各參數之機率密度函數則根據 Refice and Capolongo (2002)以及 Harr (1987)假設為常態分佈，其餘詳細之統計特性皆整理於表 3-1。

Christian et al. (1992)與 Husein Malkawi et al. (2000)皆指出摩擦角、凝聚力與土壤單位重彼此間相關性相當微小而可加以忽略，因此本計畫假設摩擦角、凝聚力與土壤比重間彼此互相獨立而無相關性存在。

4. 飽和水力傳導係數

依據 Gelhar (1993)所整理過往相關文獻之調查資料，水力傳導係數之機率密度函數可近似為對數常態分布(log-normal)，且在不同土壤下，其平均值差異甚大，例如砂土(sand)、粉土(silt)與黏土(clay)之水力傳導係數平均值分別約為 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ m/sec、 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ m/sec 與 $10^{-8} \sim 10^{-11}$ m/sec，本計畫依據調查資料設定水力傳導係數之平均值為 7.3×10^{-6} m/s；另對數水力傳導係數之標準差則依不同土壤性質而有不同之範圍，例如沖積平原之含水層(alluvial basin aquifer)其對數水力傳導係數標準差約為 0.4~2.1，而以本計畫之應用區域而言，土壤性質較屬於砂、礫與風化後壤土之混和型態，對數水力傳導係數標準差約介於 0.4~0.8 間 (Luxmoore et al., 1981)，為保守考量本計畫假設對數水力傳導係數標準差為 1.0。

表 3-1 模式參數統計特性整理表

模式參數	平均值	標準差	機率密度函數
初始地下水位(d_z)	2.0 m	0.577 m	均勻分布
土壤厚度(d_{Lz})	3.44 m	0.31 m	常態分布
土壤單位重(γ_{sat})	20.7 kN/m ³	1.45 kN/m ³	常態分佈
有效摩擦角(ϕ)	30.9°	9.27°	常態分佈
有效凝聚力(c)	12 kN/m ²	6 kN/m ²	常態分佈

模式參數	平均值	標準差	機率密度函數
飽和水力傳導係數(K_{sat})	7.3×10^{-6} m/s	1.0 ($\ln K_{sat}$)	對數常態分布
水單位重(γ_w)	9.81 kN/m ³	0	
坡度(α)	31°	0	

四、敏感度分析結果

依據表 3-1 之統計特性，本研究製造了 5,000 組輸入樣本，並計算艾利颱風期間(事件 I)安全係數與輸入條件間之 Spearman's rank correlation coefficient 如圖 3-7 (a)所示。圖中顯示相關係數會隨著累積降雨量之增加而變化，因此本研究額外考慮一個降雨事件 II，並分析其安全係數如圖 3-7 (b)，事件 II 之總降雨量與事件 I 相同，但雨型則與事件 I 前後相反。由圖中可發現，凝聚力與摩擦角之相關係數最高，代表此二參數對安全係數之估算最為敏感；相反地，飽和土壤單位重因為不確定性程度低，對安全係數則不敏感。安全係數與摩擦角間之相關係數在降雨初期無顯著變化，但隨著降雨量增加，相關係數稍微降低，最後在降雨後期又呈穩定狀態。安全係數與摩擦角間相關係數之時變性與孔隙水壓變化(圖 3-8)及安全係數計算式有關，圖 3-8 中，因為事件 I 屬延後型降雨，孔隙水壓在降雨初期(8 月 23 日 21:00 前)僅微幅增加，而在降雨中後期(23 日 21:00 至 24 日 21:00)則隨著降雨顯著增加而快速上升，最後當土壤已達飽和後(24 日 21:00 後)，孔隙水壓呈穩定狀態。由式(3-9)可知，由於孔隙水壓不是摩擦角之函數，故安全係數對摩擦角之偏微分可表示為：

$$\left. \frac{\partial FS}{\partial \phi} \right|_{\phi=\phi^*} = \left(\frac{1}{\tan \alpha} - \frac{\psi \gamma_w}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha} \right) \sec^2 \phi^*, \quad (3-16)$$

式(3-16)代表摩擦角每單位變化對安全係數之變化率。由式(3-16)可知隨著孔隙水壓增加，安全係數變化率則減少，顯示安全係數與摩擦角間相關係數之時變性與孔隙水壓變化有關。以上現象可進一步由事件 I

與事件 II 間之比較加以證明，因為事件 II 屬前進型降雨，孔隙水壓快速增加並達到穩定之時間點將較事件 II 早，故可發現安全係數與摩擦角間之相關係數開始減少之時間發生在 23 日 18:00，最後抵達穩定之時間則為 24 日 15:00。

安全係數與初始地下水位以及飽和水力傳導係數間之相關係數亦會隨降雨量變化，圖 3-9 顯示孔隙水壓與初始地下水位以及飽和水力傳導係數間之 Spearman's rank correlation coefficient，在事件 I 之降雨初期，因為降雨強度尚低，降雨入滲對孔隙水壓之影響尚不顯著，因此孔隙水壓之推估主受初始地下水位影響，與飽和水力傳導係數無關；然而當降雨強度與累積降雨量逐漸增加後，入滲機制開始扮演影響孔隙水壓變化之主角，導致飽和水力傳導係數之相關係數顯著增加；而在事件 I 之降雨後期，因土壤已達飽和，孔隙水壓之期望值趨於穩定且標準差降低，故無論是初始地下水位或飽和水力傳導係數其相關係數皆趨近零。

前段皆是探討模式輸入不確定性對安全係數計算結果之敏感度，此處進一步分析模擬崩塌時間與各項不確定性輸入條件之 Spearman's rank correlation coefficient 如表 3-2 所示，由表可知初始地下水位、摩擦角、凝聚力、以及飽和水力傳導係數等之不確定性皆對崩塌發生時間有顯著影響，其中初始地下水位、摩擦角、以及凝聚力等與崩塌時間呈正相關，而飽和水力傳導係數則與崩塌時間呈負相關。

由敏感度分析結果顯示，摩擦角與凝聚力是計算邊坡穩定中最重要之參數，而飽和土壤單位重則不重要；另一方面初始地下水位、飽和水力傳導係數與土壤厚度等則對崩塌時間有所影響。

表 3-2 崩塌時間與各項不確定性輸入條件之相關係數

初始地下水位	土壤厚度	飽和土壤單位重	摩擦角	凝聚力	飽和水力傳導係數
0.41	-0.18	-0.04	0.68	0.65	-0.6

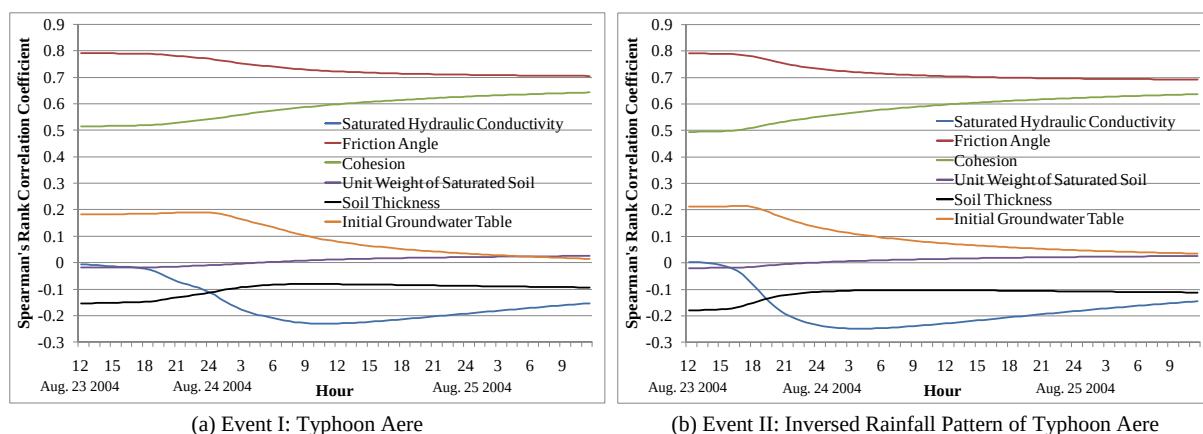


圖 3-7 安全係數與各項不確定性輸入條件之相關係數圖

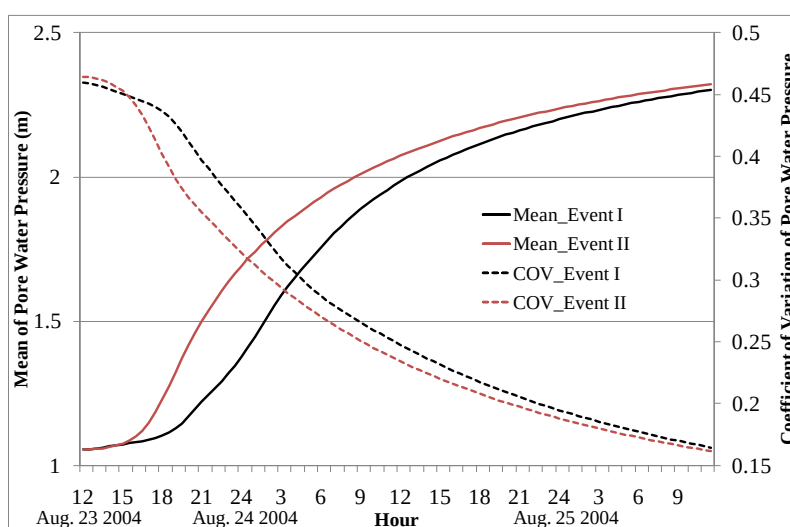


圖 3-8 孔隙水壓之期望值與標準差

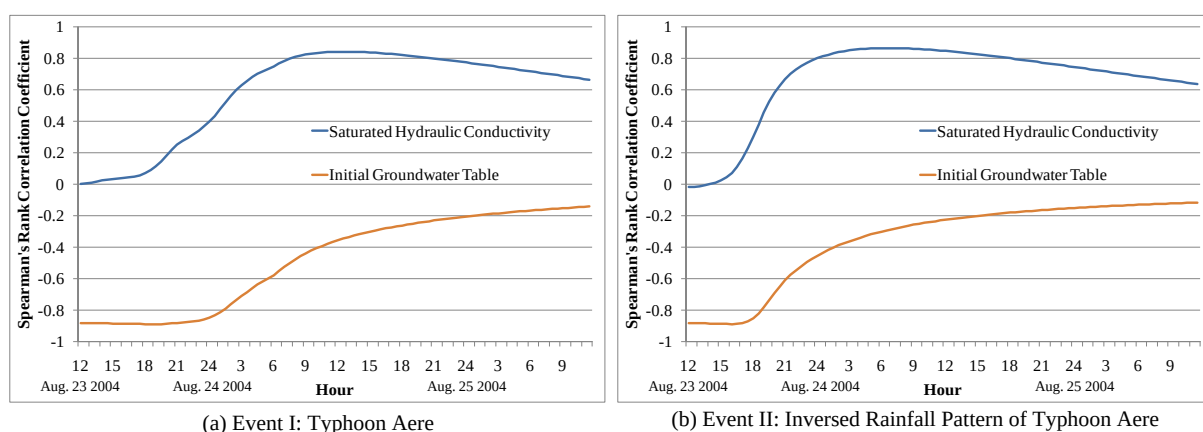


圖 3-9 孔隙水壓與各項不確定性輸入條件之相關係數圖

第二節 降雨條件對邊坡穩定性之影響

前節已利用敏感度分析探討邊坡潛在因素之不確定性對邊坡穩定性之

影響，並篩選出重要須考慮不確定性之潛在因素，然而外在降雨條件為改變邊坡穩定性之主要驅動因素，因此本節將設計不同降雨條件(雨量、延時與雨型)，利用二維降雨引發坡地崩塌模式模擬邊坡之穩定性，以探討不同降雨條件對邊坡穩定之影響。

一、採用分析模式簡介

本計畫將採用陳弘恩(2014)所發展之二維降雨引發坡地崩塌模式以探討降雨對邊坡穩定之影響，該模式中涵蓋坡地力平衡計算以及地表水與地下水流耦合運算，以下說明相關理論基礎。

(一) 坡地崩塌分析理論

該模式採用極限平衡法(limited equilibrium analysis)中之切片分析法(slices analysis)進行邊坡穩定性計算，切片作用力與破壞示意如圖 3-10，其破壞面為一弧形剪切破壞。假設切片間的剪力合力為零，並且利用力矩平衡的方式做分析，滿足整體力矩平衡，其安全係數如下式表示

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n - (W_n - u_n b_n) \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \cdot \sin \alpha_n} \quad (3-17)$$

式中， b_n 為各切片寬度； W_n 為各切片重力； u_n 為各切片破壞圓弧上壓力水頭。因式(3-17)不滿足靜力平衡，其推估值略低於正確方法所得值之 10%~15%左右，若為高孔隙水壓之坡地，則誤差將高達 50%。Bishop (1954)改善式(3-17)中無法滿足垂直力平衡之缺點，其安全係數滿足垂直力及整體力矩平衡，如下式表示

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n - (W_n - u_n b_n) \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \cdot \sin \alpha_n} \quad (3-18)$$

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS} \quad (3-19)$$

式(3-18)中安全係數存在方程式之兩邊，因此須利用試誤法找出安全係數之數值，當安全係數小於 1 即代表破壞。Bishop 修正分析法以簡單之方法應用於坡地穩定度分析上，結合電腦數值計算，目前已於工程上受到廣泛之應用。

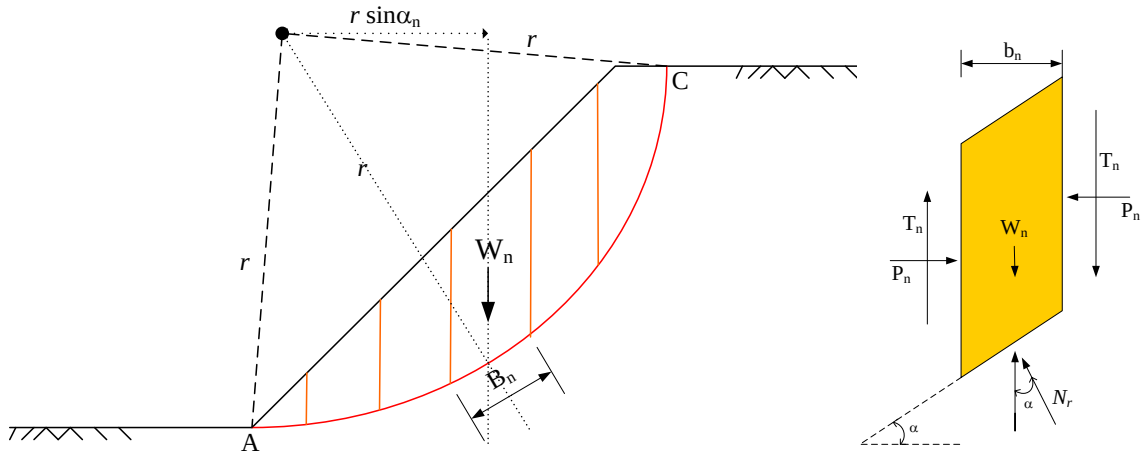


圖 3-10 破壞面切片作用力示意圖

(二) 地下水流模擬

在式(3-18)壓力水頭計算方面，依據式(3-1)理查方程式，在不考慮坡地側向(y 方向)水流下，二維地下水流入滲控制方程式可表示為

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3-20)$$

式中， θ 為含水量(moisture content)； K_x 與 K_z 分別表示在 x 與 z 方向之水力傳導係數，且為壓力水頭之函數。

若底部與堅硬不透水之土層或岩石相接，則坡地土層底部之邊

界條件為

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 1 \quad (3-21)$$

求解(3-20)式需要土壤含水量與壓力水頭之關係，即 θ - ψ 關係，也就是保水曲線(water retention curve)。本模式採用 van Genuchten (1980)所提出之飽和度與壓力水頭和水力傳導係數間的關係式，如下所示：

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\xi \psi)^N} \right)^M \quad (3-22)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{M}} \right]^M \right\}^2 \quad (3-23)$$

其中， θ_s 為飽和含水量(saturated moisture content)， θ_r 為殘餘含水量(residual moisture content)， K_s 為飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)， ξ 為進氣潛能因子(empirical parameter of air entry value)， N 為孔徑指數(pore index)， M 為曲線密合因子(curve fitting parameter)， M 、 N 之關係為 $M = 1 - 1/N$ 。

二、模擬案例與參數設定

本計畫將以一假設之坡面及土壤參數探討降雨條件對該假設坡面穩定性之影響。考慮一坡度為 31° 之坡面，坡面形狀大小如圖 3-11，地下水位位於地表下方 4 公尺處，土壤參數如表 3-3，考量坡面不受其他坡面逕流與地下水位之影響，因此，假設土層左側為固定地下水位邊界，右側與下方為不透水邊界。

表 3-3 降雨條件對邊坡穩定影響崩塌模擬參數表

參數	採用值
土壤比重	2.65
凝聚力	0.5 Kpa
內摩擦角	26°
飽和水力傳導係數	75 cm/day
N	2.0
M	0.5
飽和含水量	0.47
殘餘含水量	0.17
進氣潛能因子	0.01

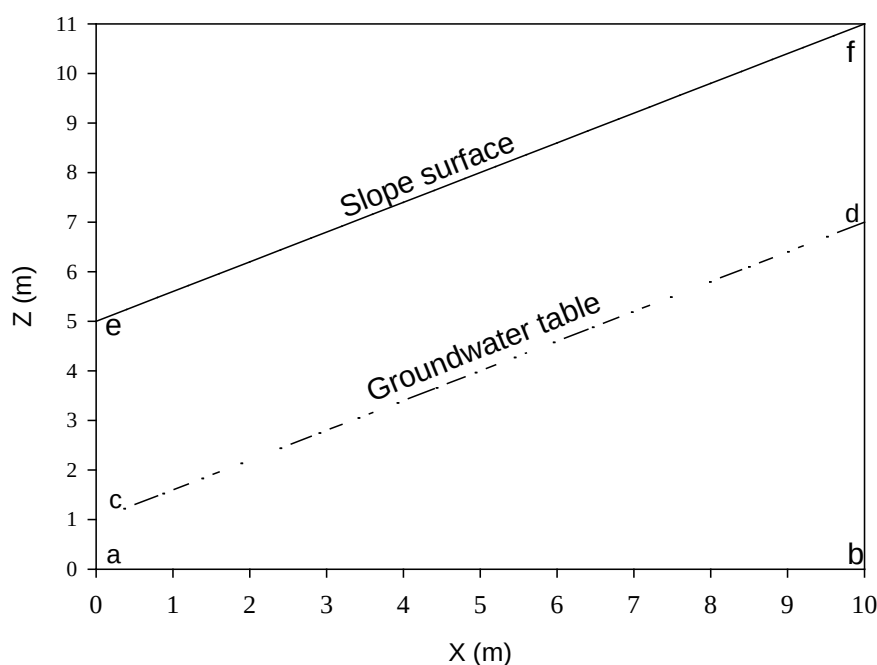


圖 3-11 降雨條件對邊坡穩定影響分析案例示意圖

三、降雨條件影響分析結果

(一) 雨量與延時對邊坡穩定性分析

為探討降雨量與降雨延時對邊坡穩定性之影響，本計畫設計 300 mm、400 mm 與 500 mm 等三個不同之總降雨量以及 6、12、24、36、48 與 60 小時等六個不同之降雨延時，採用均勻型雨型並交叉組合後共計有 18 個不同之降雨條件，利用二維降雨引發坡地

崩塌模式可計算此 18 個降雨條件下坡地安全係數之變化如圖 3-12 至圖 3-14 所示。由分析結果可知，安全係數隨降雨過程下降，在降雨過後安全係數隨時間上升。在總降雨量 300 mm 下，不同總降雨延時皆未發生崩塌，總降雨延時 12 小時在降雨第 12 小時過後具最小安全係數；在總降雨量 400 mm 下，總降雨延時 12 小時、24 小時及 36 小時之案例皆發生崩塌，總降雨延時 24 小時在降雨第 24 小時過後具最小安全係數；在總降雨量 500 mm 下，總降雨延時 12 小時、24 小時、36 時及 48 小時之案例皆發生崩塌，總降雨延時 24 小時在降雨第 24 小時過後具最小安全係數；由結果可了解，安全係數雖然隨降雨強度愈大而下降速率愈快，但崩塌僅發生於特定雨量與延時之組合下，此因為崩塌發生與地表入滲量相關，相同總雨量下，總降雨延時短，降雨強度大，雖會造成安全係數急遽下降，但降雨強度過高時多數雨量將沿地表逕流，造成總入滲量愈少，愈不易發生崩塌；另在側邊界地下水流出之設定下，總降雨延時愈長，側邊界地下水流出愈多，致使長延時低強度降雨事件不易發生崩塌。由以上之分析可知總雨量與總降雨延時明顯影響坡地破壞是否發生以及破壞之時間點。

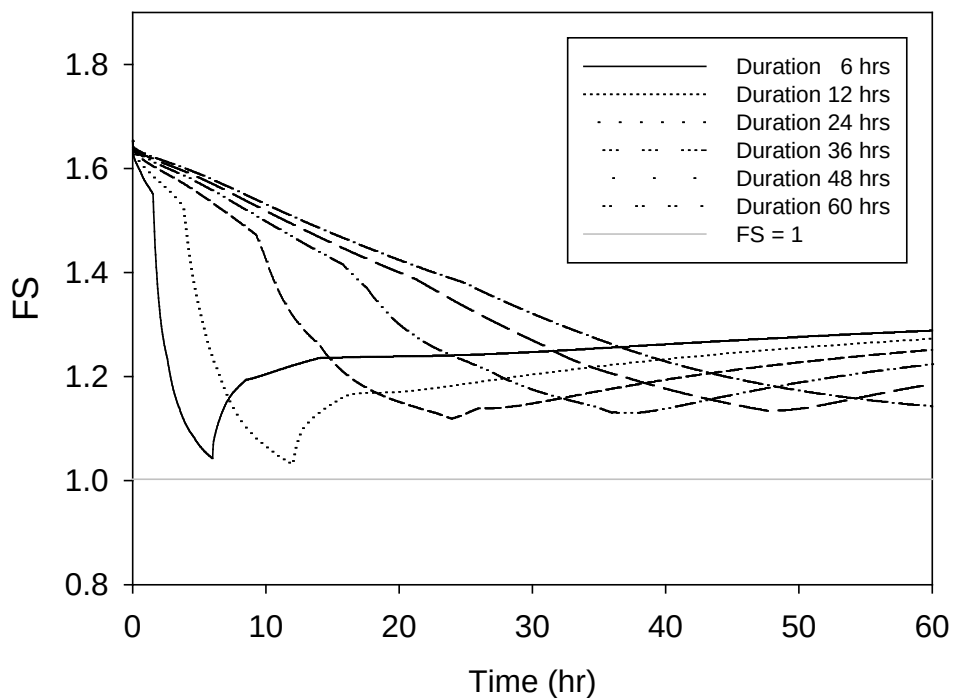


圖 3-12 總降雨量 300 mm 下不同降雨延時安全係數變化圖

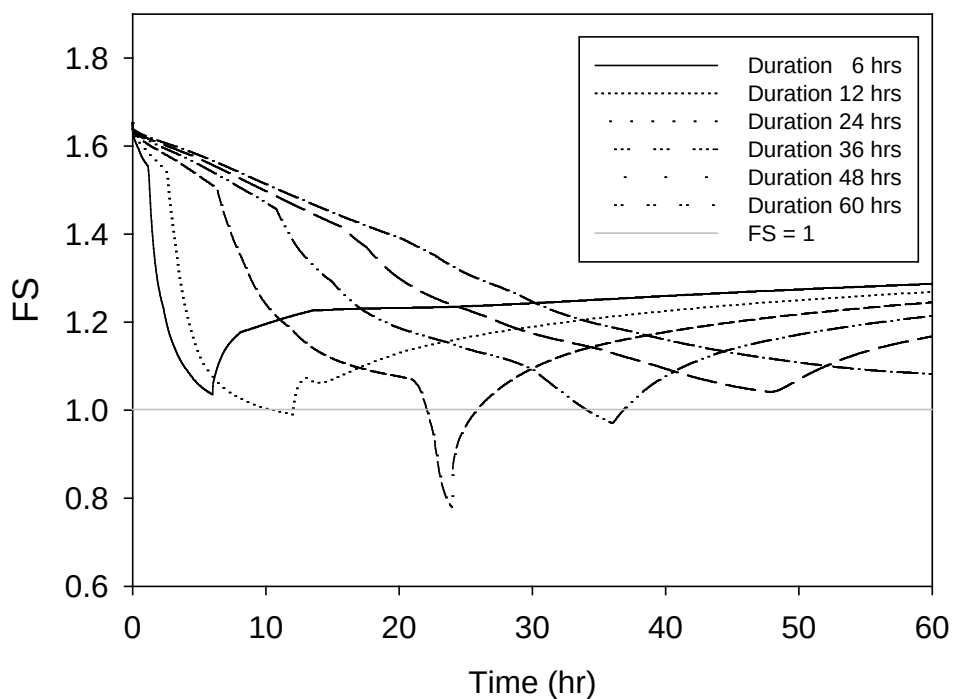


圖 3-13 總降雨量 400 mm 下不同降雨延時安全係數變化圖

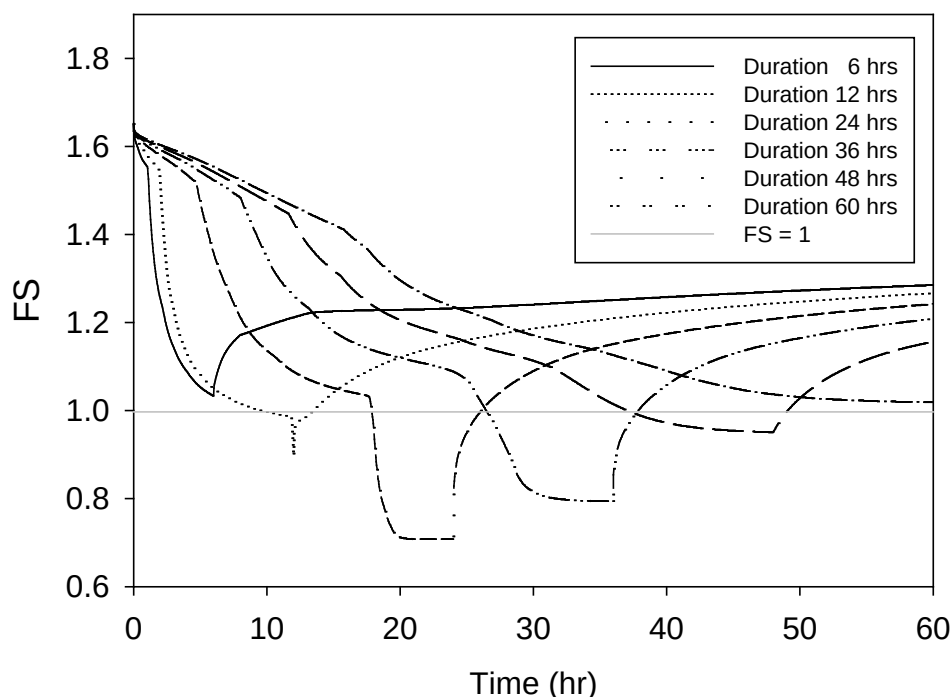


圖 3-14 總降雨量 500 mm 下不同降雨延時安全係數變化圖

(二) 雨型對邊坡穩定性分析

進一步探討雨型對邊坡穩定之影響，將雨型概念化如圖 3-15 所示，圖 3-16 至圖 3-18 分別為前進型、中央型與後退型雨型在總降雨量 400 mm 下，不同總降雨延時與坡地安全係數變化之模擬結果，而均勻型雨型之結果則可參考圖 3-13。由圖可知，在總降雨延時 24 小時之案例，前進型未發生破壞，中央型於降雨第 20 小時發生破壞，後退型於降雨第 21.5 小時發生破壞；而在總降雨延時 48 小時之案例中，前進型與中央型均未發生破壞，後退型則於第 44 小時發生破壞。由分析結果可發現，除了降雨量與降雨延時外，雨型亦對坡地是否破壞以及破壞發生時間有顯著影響。

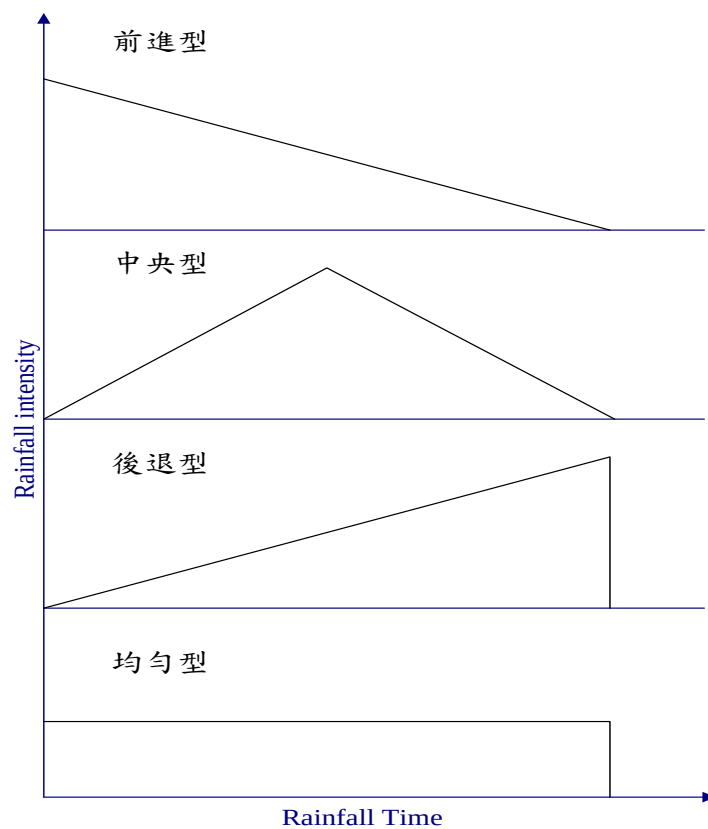


圖 3-15 概念化降雨雨型分佈圖

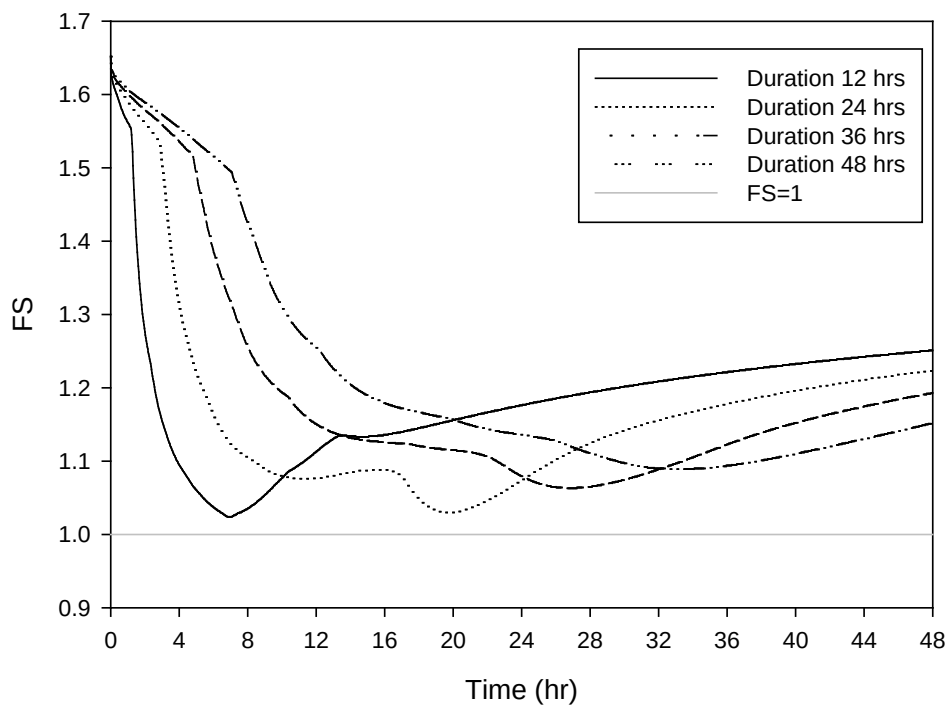


圖 3-16 總降雨量 400 mm 前進型雨型不同降雨延時安全係數變化圖

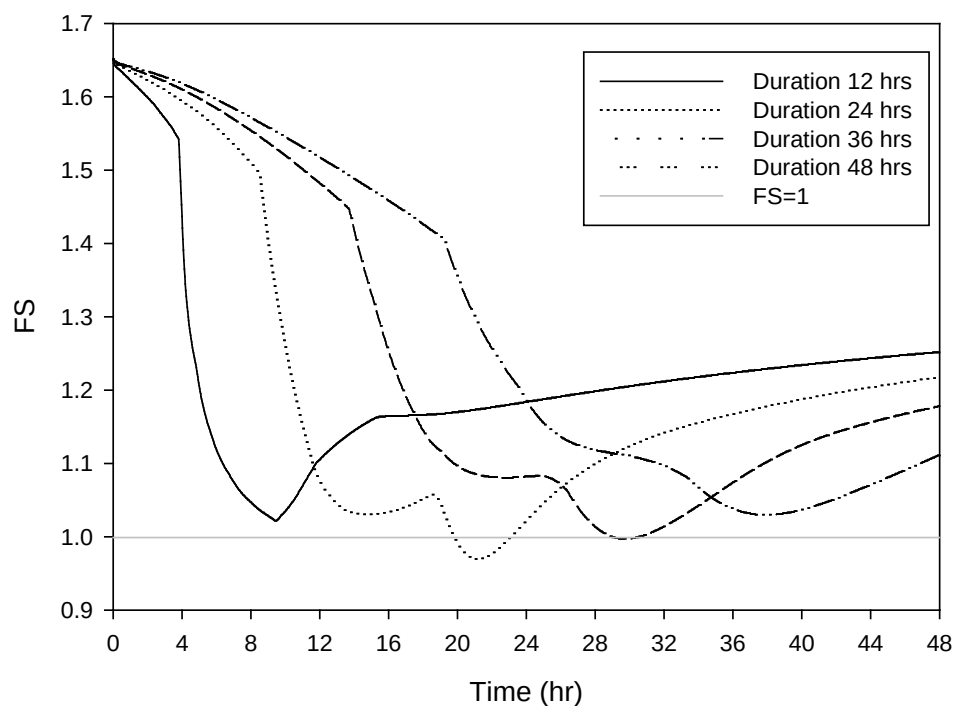


圖 3-17 總降雨量 400 mm 中央型雨型不同降雨延時安全係數變化圖

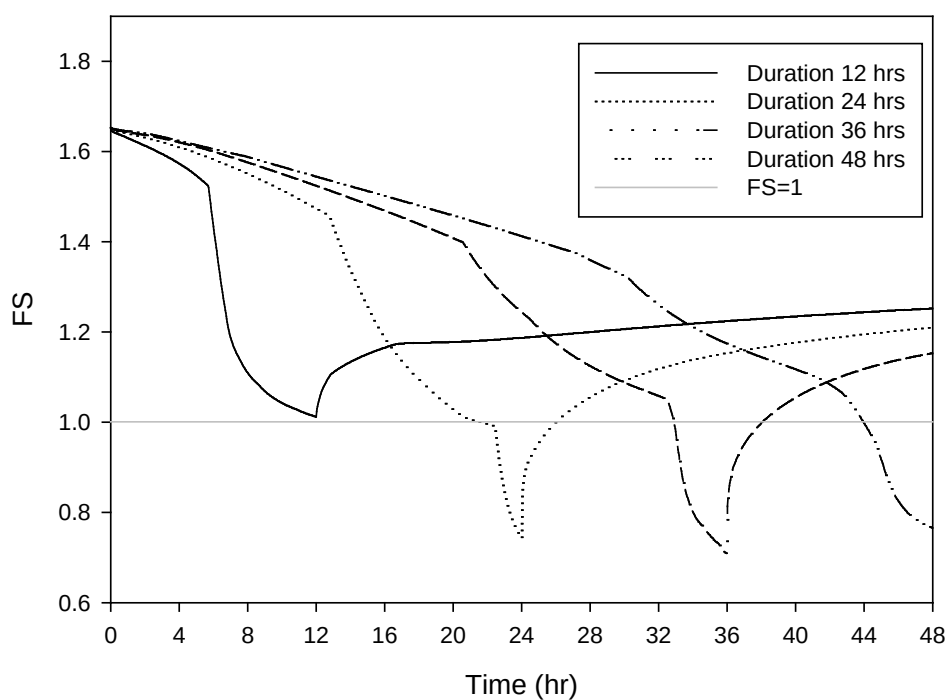


圖 3-18 總降雨量 400 mm 後退型雨型不同降雨延時安全係數變化圖

第四章 豪雨期間坡地淺崩塌即時預報架構與警戒曲線研擬

第一節 坡地崩塌警戒曲線研擬

第三章中本計畫曾指出目前以定率模擬法製作降雨門檻曲線仍面臨(1)未考慮模式參數不確定性對模擬結果之影響；以及(2)未考慮不同雨型對崩塌發生與否與崩塌發生時間之影響等問題，因此受潛在(地文與地質)與驅動(降雨)因素隱含不確定性之影響，以定率模擬法所繪製之降雨門檻曲線亦具有不確定性，導致實際應用時預報結果與實際現象間存在差異，而現有分析降雨門檻曲線之方法並無法在分析過程即量化因參數或雨型不確定性而可能導致之誤報率或預報可靠度，更遑論以預報可靠度為依據繪製不同之降雨門檻曲線，因此本章將以定率模擬法與降雨門檻曲線概念為基礎，進一步研擬可考慮參數與降雨不確定性，並以預報可靠度為預警決策依據之坡地崩塌即時預報架構與警戒曲線製作方法，以解決前述問題，同時亦將應用研擬之架構於研究區域，製作研究區域之降雨門檻曲線。

本計畫提出圖 4-1 之分析流程，以建立可考慮坡地潛在因素與降雨不確定性，並以預報可靠度為預警決策依據之坡地崩塌即時預報警戒曲線。圖 4-1 之分析流程係以降雨門檻曲線與定率模擬法為核心，並配合不確定性分析法中之蒙地卡羅模擬技巧。

蒙地卡羅模擬主要是利用以樣本(sample)推估母體(population)統計特性之概念所發展而來，若一分析模式具有 K 個輸入變數，且其機率密度函數為已知，則利用統計取樣(sampling)之技巧，可製造出 NP 組之模式輸入變數樣本，將此 NP 組樣本依次輸入分析模式並加以模擬，則可獲得 NP 組之模式輸出樣本，因此模式輸出之各階動差乃至機率密度函數即可利用此 NP 組輸出樣本加以估計。依循此概念，茲說明圖 4-1 各步驟如下：

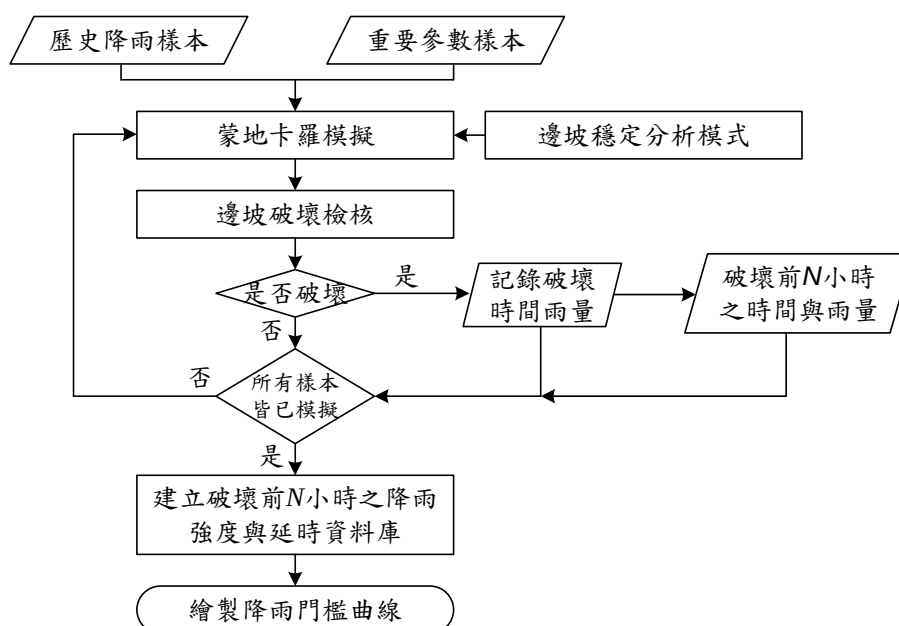


圖 4-1 坡地崩塌即時預報警戒曲線分析方法

一、蒐集歷史降雨資料並製造降雨事件與重要參數樣本

由前段蒙地卡羅模擬之概念可知，第一步在產生大量之模式輸入樣本，而模式輸入樣本包含降雨(驅動因子)與其他參數(潛在因子)等。在降雨方面，應蒐集應用區域之多場歷史豪雨資料，再依據所蒐集降雨事件之特性製造 NP 個合成之降雨歷線樣本；另一方面由第三章敏感度分析可知土壤凝聚力、摩擦角、水力傳導係數、以及初始地下水位等潛在因素對邊坡穩定性具有重要影響，因此亦應蒐集上述潛在因子之相關資料，利用統計取樣方法製造 NP 組參數樣本。分別製造出 NP 個降雨歷線與 NP 組重要參數樣本後，即可互相隨機配對衍生出 NP 組之坡地崩塌模式輸入樣本。

二、蒙地卡羅模擬

依據前步驟所衍生之 NP 組輸入樣本，利用坡地崩塌模式模擬邊坡在不同輸入樣本下安全係數之逐時變化。

三、建立邊坡破壞時與破壞前 N 小時之降雨強度與延時資料庫

前步驟針對所有 NP 組輸入樣本進行模擬後，即可挑選出模擬結果

邊坡有發生崩塌之樣本，並建立一資料庫記錄邊坡發生崩塌之時刻(降雨延時)以及至該時刻為止之平均降雨強度；相同地，吾人亦可建立一資料庫記錄邊坡發生崩塌前 N 小時之時刻以及至該時刻為止之平均降雨強度，例如若邊坡崩塌由預警發布至應變完成需時三小時，則可選擇 N 等於 3。

四、繪製以預報可靠度為依據之降雨門檻曲線

預報之準確率或可靠度是決定警戒曲線(平均降雨強度與降雨延時)之關鍵，而其概念可以圖 4-2 加以說明，圖中實際情形有邊坡未崩塌與邊坡有發生崩塌兩種，而預警發布情形亦有兩種，即無發布與有發布，故交叉組合共計有四種情境，分別是(1)無崩塌與無發布；(2)有崩塌與有發布；(3)無崩塌與有發布；以及(4)有崩塌與無發布，情境(1)與(2)表示預警報結果是正確地，而情境(3)一般稱為型一錯誤(type I error)，意指發布了假警報訊息，至於情境(4)則稱為型二錯誤(type II error)，代表預警報應報而未報。警戒曲線之決定必須依據型一與型二錯誤之發生機率，不同警戒曲線會導致不一樣之型一與型二錯誤發生率，而在災害預警實務應用方面，型二錯誤屬於應避免之情境，故理論上其發生機率應越低越好，但若警戒曲線設定太過保守，則將大幅增加型一錯誤發生機率，容易導致在地居民之不信任感，故較周延決定警戒曲線之流程尚需進一步綜合考慮(1)應變所需時間；以及(2)邊坡崩塌後影響程度等二項因子，如圖 4-3 所示。應變所需時間意指相關單位發布預警報並完成相關應變措施所需之時間，若應變所需時間為 3 小時，則在決定邊坡崩塌前 4 小時或大於 4 小時之警戒參考值時，可適度放寬型二錯誤之發生機率，以換取降低假警報與避免不必要勞動之效果，但在決定邊坡崩塌前 3 小時之警戒參考值時，則必須盡量降低型二錯誤之發生率，至於該降低多少則需考慮邊坡崩塌後之影響程度，以風險之角度審慎決定。前步驟已建

立一資料庫記錄邊坡破壞前 N 小時之平均降雨強度與降雨延時，由此即可依據事先擬定之可接受型二錯誤發生風險決定降雨門檻曲線，如圖 4-4 所示意，圖 4-4 中繪製崩塌前三小時不同型二錯誤發生風險之降雨門檻曲線，以 20% 風險曲線為例，當豪雨期間某一時刻降雨延時與平均降雨強度首次接觸該曲線時，代表有 20% 之機率該邊坡會在三小時內崩塌，亦即若應變所需時間為三小時且在該時刻發出預警報，則型二錯誤之發生機率為 20%，若該時刻不發出預警報，則往後時刻所發出之預報其型二錯誤發生風險都將大於 20%。由以上說明可知，本計畫所繪製不同預報可靠度(或型二錯誤發生風險)之降雨門檻曲線，管理者可依據前段所述客觀或主觀面之考量設定要求之預報可靠度，從而選擇符合此可靠度之降雨門檻曲線進行邊坡崩塌預報之作業。

		實際情形	
		無崩塌	有崩塌
預警發布	無	正確	型二錯誤
	有	型一錯誤	正確

圖 4-2 預警報準確率概念



圖 4-3 災害風險關聯圖

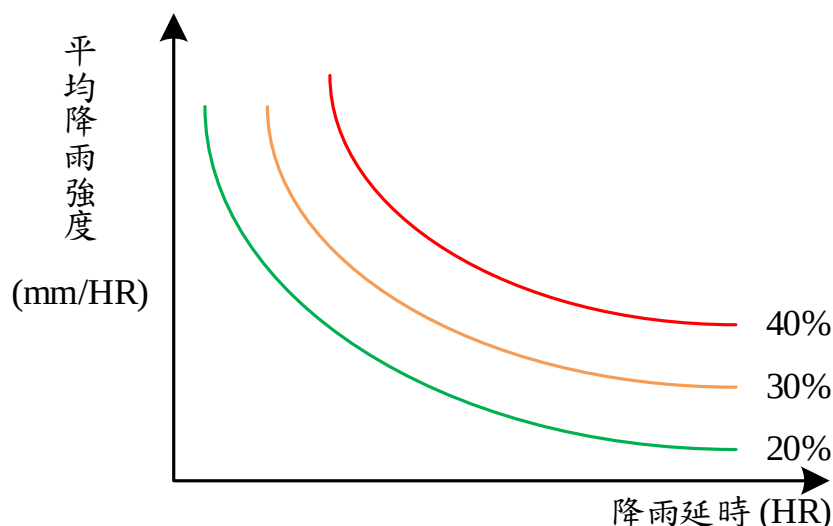


圖 4-4 不同型二錯誤風險門檻曲線示意圖

圖 4-1 為一整體性之分析流程，至於如何依據邊坡破壞前 N 小時之平均降雨強度與降雨延時資料庫推估不同型二錯誤發生風險之降雨門檻曲線，本計畫依循過往相關研究，假設降雨門檻曲線可表示為：

$$I_N = a \times T_N^b \quad (4-1)$$

式中， a 與 b 為待定係數； I_N 與 T_N 分別為崩塌前 N 小時之平均降雨強度 (mm/hr) 與累積降雨延時 (hr) 且 $N \geq 0$ ，並提出(1)回歸誤差分析法；以及(2)優選法等兩種方法推估不同型二錯誤發生風險之 a 與 b ，以下說明其內涵。

一、回歸誤差分析法

將式(4-1)等號兩邊皆取對數後，可得到如下之線性方程式：

$$\ln I_N = \ln a + b \times \ln T_N \quad (4-2)$$

依據利用蒙地卡羅模擬所獲得之邊坡破壞前 N 小時平均降雨強度與降雨延時資料點，可利用線性回歸推估待定係數 a 與 b ，並可以下式表示：

$$\ln \tilde{I}_{N,i} = \ln \tilde{a} + \tilde{b} \times \ln T_{N,i} + \varepsilon_i \quad (4-3)$$

式中 $T_{n,i}$ 為資料庫中第 i 個降雨延時； $\tilde{I}_{N,i}$ 為以線性回歸公式所計算之平均降雨強度； $\tilde{a}$ 與 $\tilde{b}$ 為利用線性回歸所推估待定係數 a 與 b 之值； ε_i 為第 i 筆資料之誤差項，其值等於 $I_{N,i} - \tilde{I}_{N,i}$ ； $I_{n,i}$ 為資料庫中第 i 個平均降雨強度。式(4-3)之概念可以圖 4-5 表示，圖中資料點為蒙地卡羅模擬所獲得之邊坡破壞前 N 小時平均降雨強度與降雨延時，而粗黑線條則為依據藍色資料點利用線性回歸所得之回歸公式，即式(4-3)，對每一資料點 i 而言可獲得一個 ε_i ，因此 ε 可視為一個隨機變數，如圖 4-5 中曲線所示，該曲線為 ε 之機率密度函數(probability density function, PDF)，且屬於期望值等於零、標準差等於 σ_ε 之常態分布。

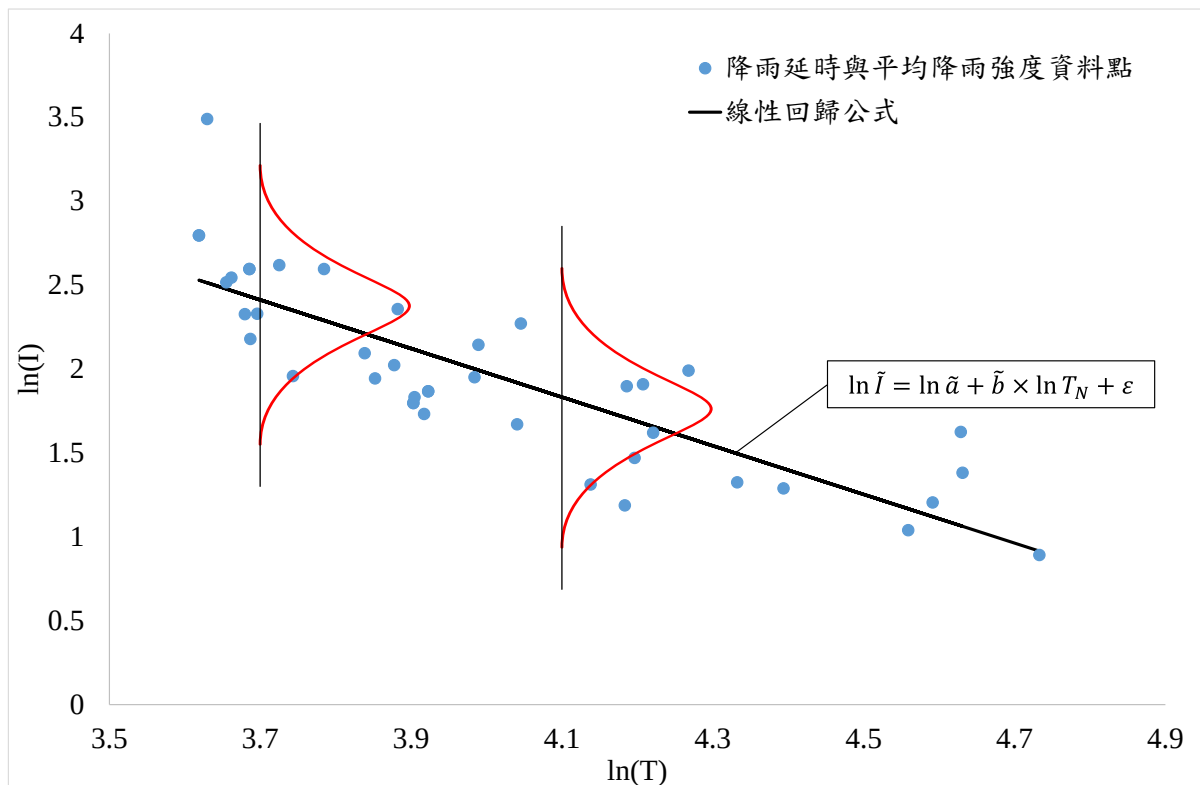


圖 4-5 降雨門檻曲線回歸公式示意圖

由型二錯誤風險概念可知，對 α ($0 < \alpha < 1$) 型二錯誤發生風險之崩塌前 N 小時降雨門檻曲線而言，代表崩塌前 N 小時之降雨延時與平均降雨強度資料點有 α 之機率位於門檻曲線左方，位於門檻曲線右方之機率則為 $(1 - \alpha)$ ，因此若圖 4-5 中共有 NP 個資料點，則理論上應有 $NP \times$

α 之資料點位於門檻曲線左方，而位於門檻曲線右方之資料點則有 $NP \times (1 - \alpha)$ 。由於資料點位於門檻曲線之左方或右方係取決於 $\varepsilon = I_N - \tilde{I}_N$ 之值，若 ε 小於零代表資料點位於門檻曲線左方，反之則為門檻曲線右方，因此下式之門檻曲線可將所有 NP 個資料點切割為以 $\alpha : (1 - \alpha)$ 之比例分布於門檻曲線之左方與右方：

$$\ln \tilde{I}_N(\alpha) = \ln \tilde{a} + \tilde{b} \times \ln T_N + z_\alpha \times \sigma_\varepsilon \quad (4-4)$$

式中， z_α 為滿足 $Z \leq z_\alpha$ 之機率等於 α ； Z 為屬於標準常態分布之隨機變數。式(4-4)之概念可以圖 4-6 示意，由於 ε 為常態分布，因此 $z_\alpha \times \sigma_\varepsilon$ 即為可使圖 4-6 中灰色斜線面積等於 α 之 ε ，而藍色線條即為型二錯誤發生風險 α 之降雨門檻曲線。由式(4-4)與圖 4-6 可知，式(4-3)所分析之門檻曲線代表型二錯誤發生風險為 50%，亦即若 α 等於 0.5，則圖 4-6 中黑線與藍線將重合。

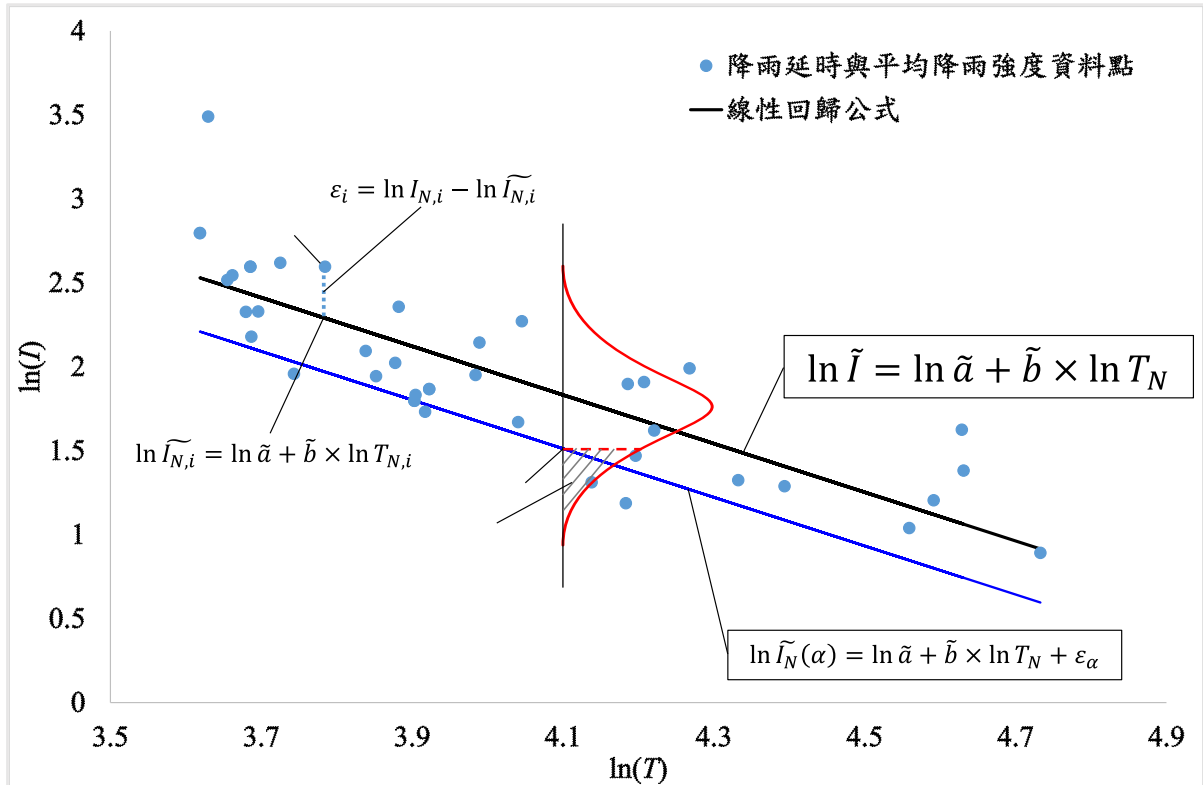


圖 4-6 型二錯誤發生風險 α 之降雨門檻曲線回歸公式示意圖

二、優選法

優選法與回歸誤差分析法目的相同，皆在尋找一條門檻曲線使得崩塌前 N 小時之降雨延時與平均降雨強度資料點分別有 α 與 $(1 - \alpha)$ 之機率位於門檻曲線之左方與右方，差別在於後者係由回歸誤差之機率函數著手，而前者則將直接利用優選概念，尋找可使回歸誤差最小，並滿足前述條件之門檻曲線，並可以下列之優選模式表示：

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^{NP} (I_{N,i} - a \times T_{N,i}^b)^2 \quad (4-5)$$

$$\text{Subject to} \quad m_i = \begin{cases} 1 & \text{if } I_{N,i} - a \times T_{n,i}^b \leq 0 \\ 0 & \text{if } I_{N,i} - a \times T_{n,i}^b > 0 \end{cases} \quad \forall i \quad (4-6)$$

$$(\alpha - \delta) \times NP \leq \sum_{i=1}^{NP} m_i \leq (\alpha + \delta) \times NP \quad (4-7)$$

式(4-5)為目標函數，代表最小化實際與回歸曲線所推估平均降強度間之差值，式(4-6)與式(4-7)之意義在限制位於回歸曲線左半部之資料點數僅能介於 $(\alpha - \delta) \times NP$ 與 $(\alpha + \delta) \times NP$ 間， δ 等於零時代表限制位於回歸曲線左半部之資料點數僅能等於 $\alpha \times NP$ 個，惟此時優選模式可能不存在可行解。式(4-5)至式(4-7)屬於混合整數非線性規劃(MINLP)之優選問題，其概念可以圖 4-7 表示，圖中紅色與藍色點位代表蒙地卡羅模擬所獲得之邊坡破壞前 N 小時平均降雨強度與降雨延時資料點，黑色曲線則為優選所得 a 與 b 而繪製之降雨門檻曲線，若所有資料點計有 NP 個，代表紅色與藍色點位數量分別約為 $\alpha \times NP$ 個與 $(1 - \alpha) \times NP$ 個，且所有資料點至黑色曲線距離(圖 4-7 中黑色虛線)之平方合為最小。

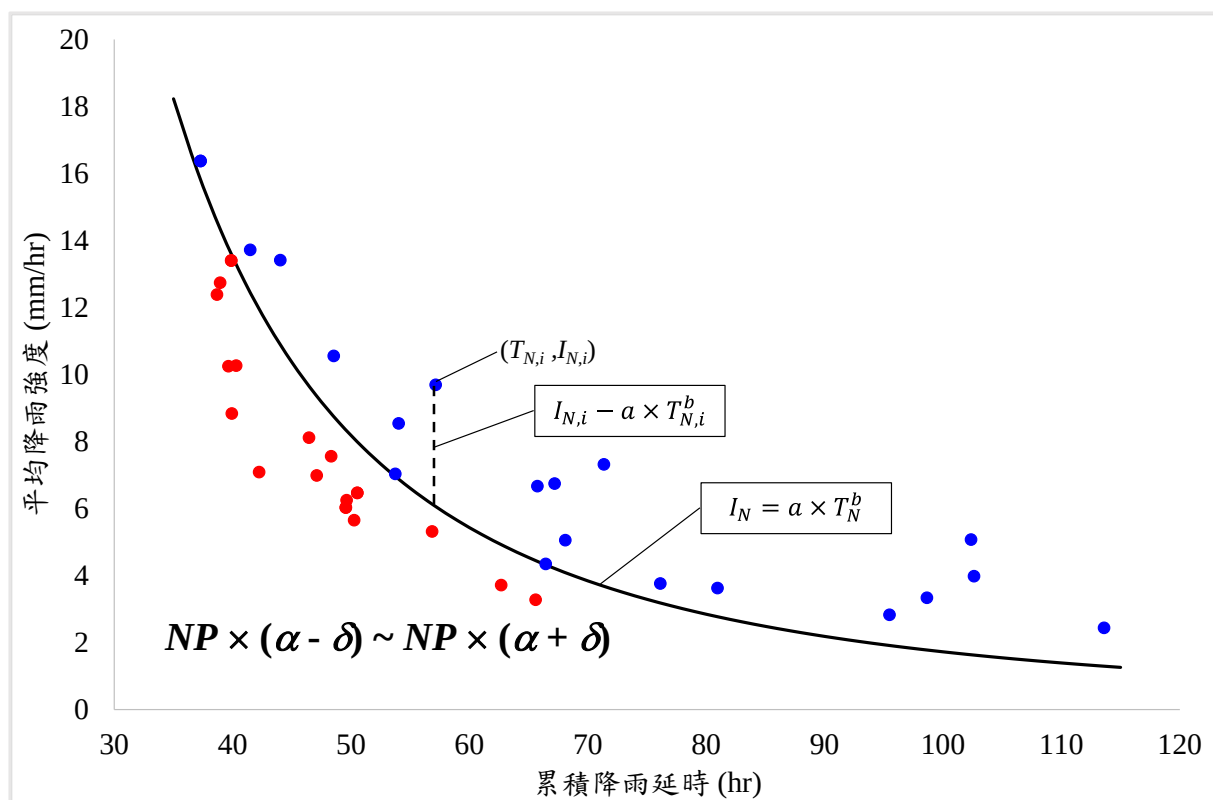


圖 4-7 優選法降雨門檻曲線示意圖

第二節 坡地崩塌警戒曲線實例應用

一、應用區域簡述

本計畫選擇嘉義縣阿里山鄉美寮道路做為研究區域，該道路位於曾文水庫集水區內，隔曾文溪與茶山部落相望，其位置如圖 4-8 所示。美寮道路連絡大埔與新美之重要道路，惟圖 4-8 中箭頭所指位置於颱風期間常發生崩塌，該崩塌地現況如圖 4-9 所示，圖中白色虛線為美寮道路。



圖 4-8 美寮道路位置圖



圖 4-9 美寮道路崩塌地現況照片

二、崩塌模式參數設定與取樣

依據圖 4-1 之流程，本計畫首先進行降雨事件以及坡地重要參數之取樣。在降雨事件方面，與美寮道路崩塌地距離最近之雨量站為氣象局所屬之表湖，因此本計畫依據該站民國 77 年至 103 年共 27 年之時雨量資料，製造 49 場降雨事件，其總雨量如表 4-1 所列；另外在重要參數取樣方面，須考慮不確定性並進行取樣之參數包含水力傳導係數、土壤摩擦角、凝聚力、以及初始地下水位等，經濟部水利署南區水資源局(2016)曾於曾文水庫集水區內 12 處點位進行土壤取樣與室內試驗，並依據試驗結果分析水力傳導係數、土壤摩擦角與凝聚力之統計特性，12 處取樣位置如圖 4-10 所示，圖中編號 TWLS044 之點位即為美寮道路崩塌地，因此本計畫在水力傳導係數、土壤摩擦角與凝聚力之統計特性方面係採用經濟部水利署南區水資源局(2016)之分析結果，至於初始地下水位由於缺乏記錄，因此本計畫假設其位於地表下 2－6 公尺內並屬於均勻分布。表 4-2 所列為美寮道路參數之統計特性，其中坡度係採用 103 年數值高程計算而得，土壤厚度則是依據經濟部水利署南區水資源局(2016)之鑽探成果。

表 4-1 分析降雨事件總雨量列表

編號	總雨量(mm)	編號	總雨量(mm)	編號	總雨量(mm)	編號	總雨量(mm)	編號	總雨量(mm)
1	301	11	344	21	897	31	402	41	639
2	702	12	1,518	22	309	32	491	42	331
3	330	13	308	23	872	33	625	43	473
4	333	14	610	24	985	34	532	44	336
5	636	15	516	25	377	35	658	45	317
6	306	16	749	26	402	36	329	46	331
7	548	17	504	27	309	37	553	47	424
8	650	18	669	28	872	38	556	48	986
9	620	19	669	29	985	39	1,468	49	304
10	333	20	449	30	377	40	462		

表 4-2 美寮道路參數統計特性整理表

模式參數	平均值	標準差	機率密度函數
初始地下水位	4.0 m	1.15 m	均勻分布
飽和水力傳導係數	7.47×10^{-7} m/s	1.08×10^{-6} m/s	對數常態分布
有效摩擦角	33.0°	3.63°	常態分佈
有效凝聚力	3.5 kN/m ²	2.07 kN/m ²	常態分佈
坡度	29°	0.0°	無不確定性
土壤單位重	19.0 kN/m ³	0.0 kN/m ³	無不確定性
土壤厚度	1.4 m	0.0 m	無不確定性



圖 4-10 試驗點位與地質分布套圖

依據表 4-2 之設定，本計畫採用 LHS (Latin Hypercube Sampling) 取樣法製造 50 組參數，而降雨方面則在 49 場事件中隨機選取 35 場，並與 50 組參數交叉配對成 $35 \times 50 = 1,750$ 組模式輸入，至於剩餘之 14 場事件則將於後續做為驗證用途。

三、警戒曲線分析方法比較

將 1,750 組模式輸入代入 Tsai and Yang (2006) 所發展之崩塌模式進

行蒙地卡羅模擬後，其中有 641 組模擬結果美寮道路發生崩塌，亦即有 641 個 (T_N, I_N) 之資料點， I_N 與 T_N 分別為崩塌前 N 小時之平均降雨強度與累積降雨延時且 $N \geq 0$ ，由此即可利用回歸誤差分析法或優選法分析型二錯誤發生風險為 α 之崩塌前 N 小時警戒曲線。

本計畫首先探討不同方法所分析警戒曲線之差異，在此設定 N 等於零，而 α 則考慮 0.3 與 0.5 兩種條件，亦即型二錯誤發生風險為 30% 或 50%之崩塌門檻曲線，641 個 N 等於零(崩塌時)之累積降雨延時與平均降雨強度之分布如圖 4-11 中灰色點所示。表 4-3 整理不同方法所分析之門檻曲線參數值，表中亦列出位於門檻曲線左半部之資料點數佔總資料點數之比例，而不同方法所得之門檻曲線則繪於圖 4-11 中。比較表 4-3 與圖 4-11 可發現，兩種方法所得之門檻曲線皆可準確地將資料點切割為曲線左半部佔 α 以及曲線右半部佔 $1-\alpha$ 之比例，顯示所提出方法之正確性，而雖然不同方法所推估之門檻曲線係數 a 與 b 差異甚大，但門檻曲線則幾乎重疊，考量優選法係求解混合整數非線性規劃(MINLP)之問題，不僅需要高度之計算能力且可能不易收斂，因此本計畫後續將採用回歸誤差分析法進行應用。

表 4-3 不同方法所分析之門檻曲線參數值

	型二錯誤風險 0.5			型二錯誤風險 0.3		
	a	b	左半資料比例 (%)	a	b	左半資料比例 (%)
回歸誤差	117.92	-0.739	49.0	92.89	-0.739	29.6
優選	94.22	-0.674	50.4	68.1	-0.659	30.4

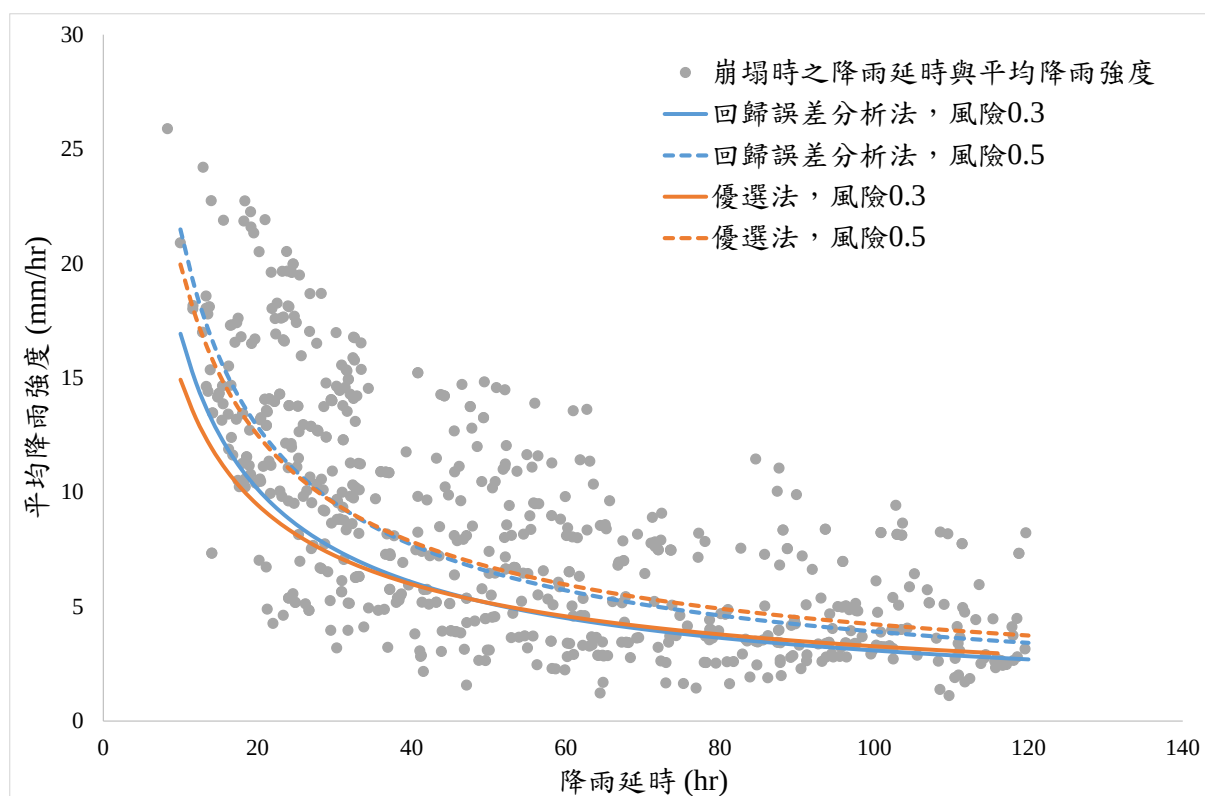


圖 4-11 型二錯誤發生風險為 30%與 50%之崩塌時刻門檻曲線

四、不同時間與型二錯誤風險警戒曲線建立與驗證

依據 641 個模擬結果美寮道路有發生崩塌之案例，圖 4-12 至圖 4-14 所示為利用回歸誤差分析法所繪製崩塌前一小時至崩塌前三小時之警戒曲線，圖中型二錯誤發生風險再區分為 0.3、0.5 與 0.7 等三種，因此合計共有 9 條警戒曲線，而 9 條警戒曲線之參數 a 與 b 則列於表 4-4。

表 4-4 警戒曲線參數彙整

型二錯誤風險	崩塌前一小時			崩塌前二小時			崩塌前三小時		
	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
a	83.53	106.70	136.28	73.41	94.54	121.75	61.42	79.92	103.99
b	-0.72	-0.72	-0.72	-0.70	-0.70	-0.70	-0.66	-0.66	-0.66

本計畫共製造 49 場降雨事件，而圖 4-12 至圖 4-14 之 9 條警戒曲線係依據 35 場降雨 $\times$ 50 組參數 = 1,750 組模擬結果所建立，因此本計畫另比較剩餘 14 場降雨 $\times$ 50 組參數 = 700 組模擬結果與警戒曲線間之差異，計算該 700 組模擬結果之型一與型二錯誤，結果如表 4-5 所示。

表中最大允許型二錯誤風險即為建立警戒曲線時所設定之 α 。由表 4-5 可知，在 700 組模擬結果中，警戒曲線發生型二錯誤之風險相當接近建立曲線時所給定之值，顯示本計畫所提出之警戒曲線分析方法具有正確性，另觀察表 4-5 可發現當要求之型二錯誤風險越低時，型一錯誤風險將相對增加。

表 4-5 警戒曲線驗證結果

最大允許 型二風險	崩塌前一小時		崩塌前二小時		崩塌前三小時	
	型二風險	型一風險	型二風險	型一風險	型二風險	型一風險
30%	29.7%	0.0%	29.7%	7.2%	29.0%	22.3%
50%	49.1%	0.0%	49.5%	0.0%	47.3%	0.0%
70%	64.0%	0.0%	64.0%	0.0%	65.4%	0.0%

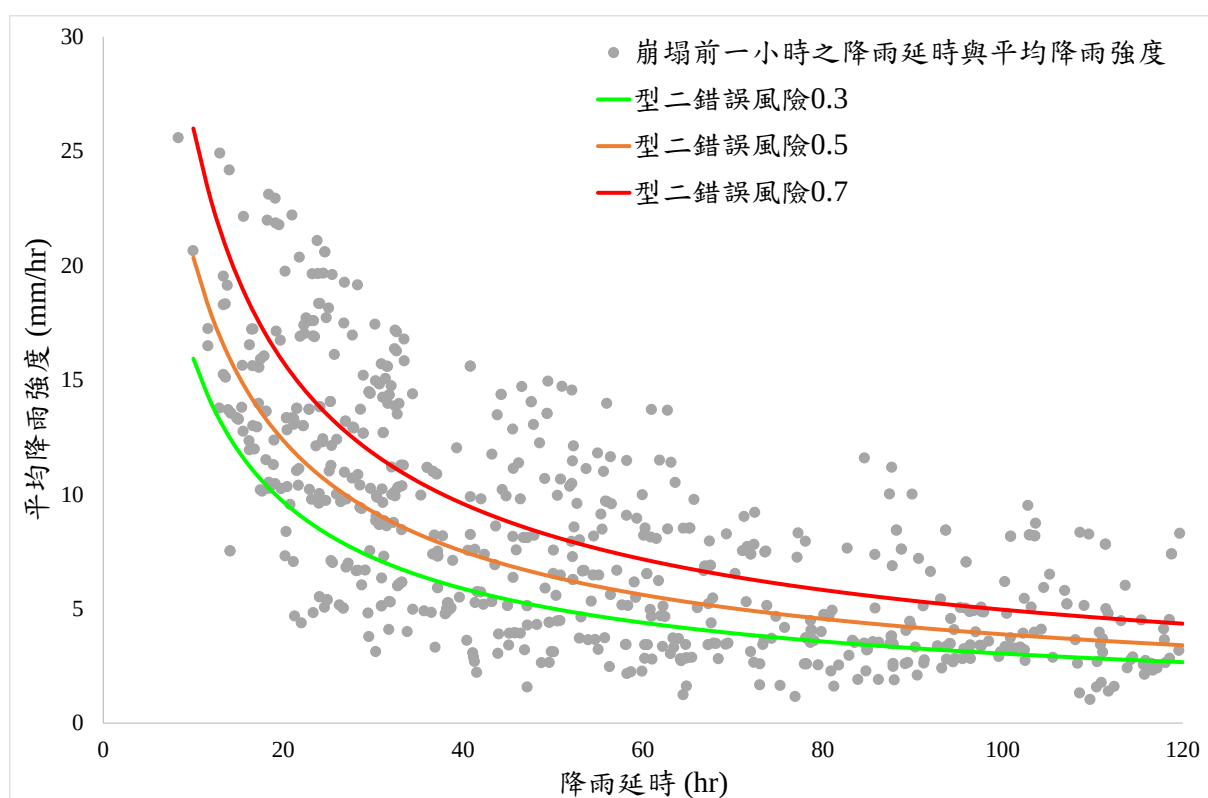


圖 4-12 崩塌前一小時警戒曲線

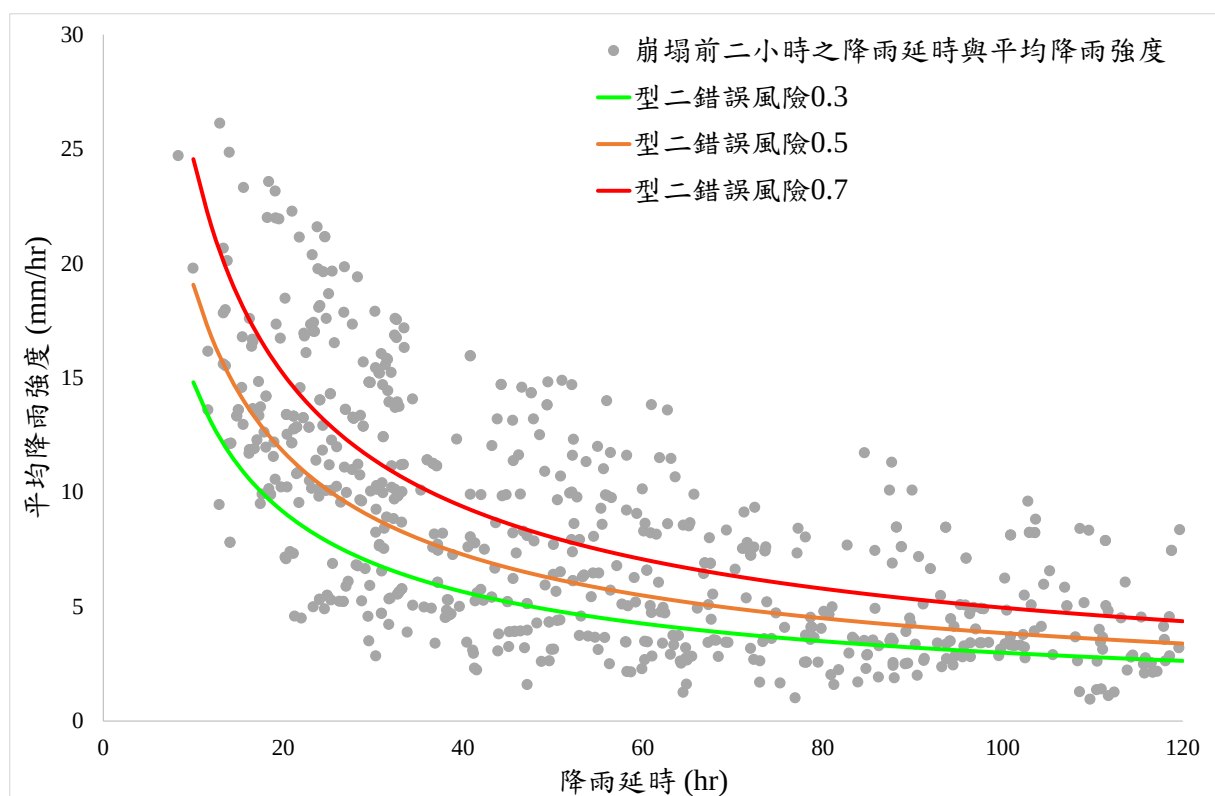


圖 4-13 崩塌前二小時警戒曲線

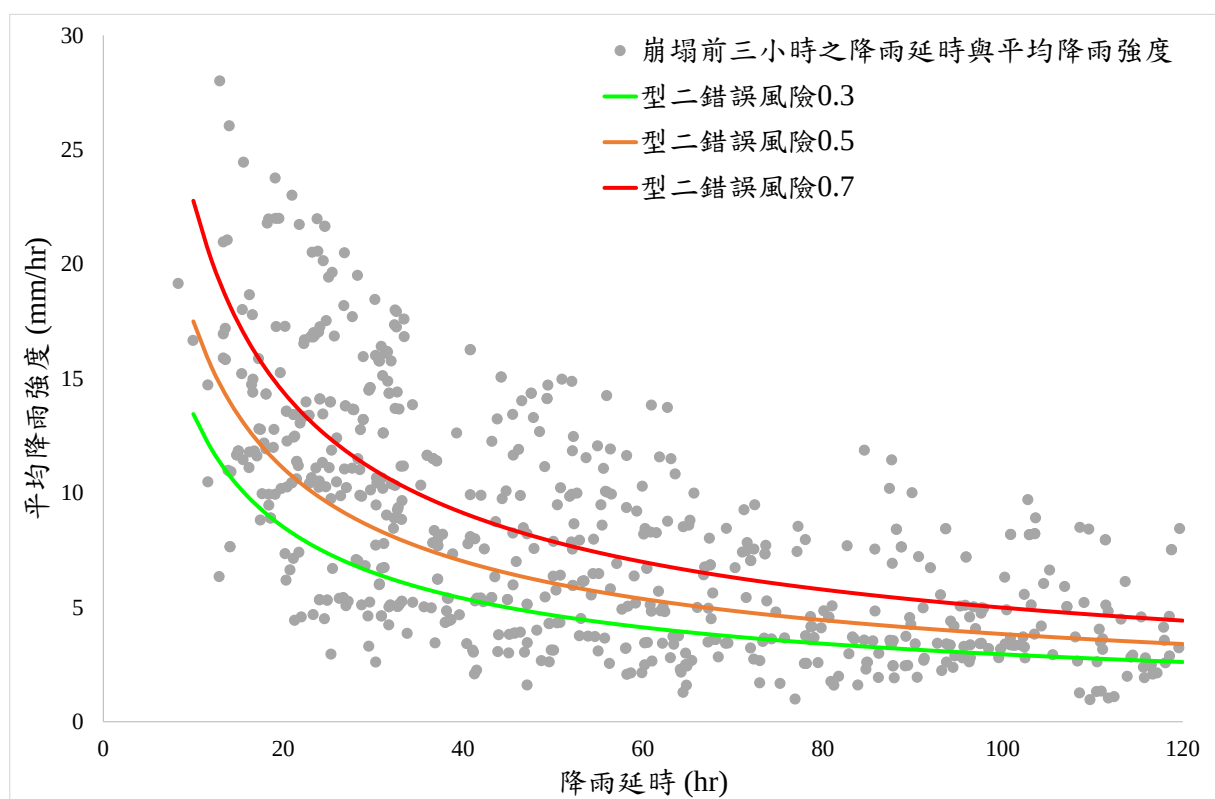


圖 4-14 崩塌前三小時警戒曲線

第五章 預警報作業化平台開發與案例應用

定率模擬法之優點為可針對單一邊坡繪製降雨門檻曲線，理論上準確性會高於統計法所繪針對大區域之曲線，惟每個邊坡將擁有專屬之降雨門檻曲線，亦須配合 QPESUMS 之網格式降雨觀測資料，故此一優點亦可能增加實務作業上之複雜度。緣此本計畫除研擬可考慮參數與降雨不確定性，並以預報可靠度為預警決策依據之坡地崩塌即時預報警戒曲線分析方法外，亦將以 FEWS 技術架構，開發一可整合多種降雨資料來源與天然災害預報之作業化平台，期望藉由此平台大幅增進災害預警報作業之效率，以解決上述之問題。

第一節 降雨門檻曲線整合平台的應用

FEWS 的發展概念，即是透過資料與模式連結的共通技術，建構一個開放整合平台，以彙整各界研發成果。如同組合積木的概念，將不同模式與不同資料內容加以拼接與應用，朝向多模式多資料庫建置之目標邁進。從 2002 年起，台灣正式導入 FEWS 平台，一系列的發展下來，透過各式雛型分析、資料與模式連接，以及各項測試發展與分析，充分協助水利署在氣象與水文資料上的有效整合，並藉由導入經驗與加值資料，回饋於於災防相關業務單位提供參考。

目前水利署所使用的「FEWS_Taiwan」平台，除了整合氣象局與水利署等單位的資訊與模式，透過平行運算與作業排程的發展，已能夠持續每日 24 小時不間斷，在固定時間完成作業性質的模式運轉。從 2009 年迄今，FEWS_Taiwan 加入水利署颱風應變值勤的資料提供，可完成全台中央管河川、跨縣市河川（淡水河），以及縣市管河川等 26 條，定期定時運轉自動水情預報模式，並採用多維度氣象資料，搭配水利署所屬單位提供之水情資料內容，定時提供全台鄉鎮降雨資訊、河川洪水水位預報、水庫流量預報、即

時數據分析處理、水情報表輸出等功能。

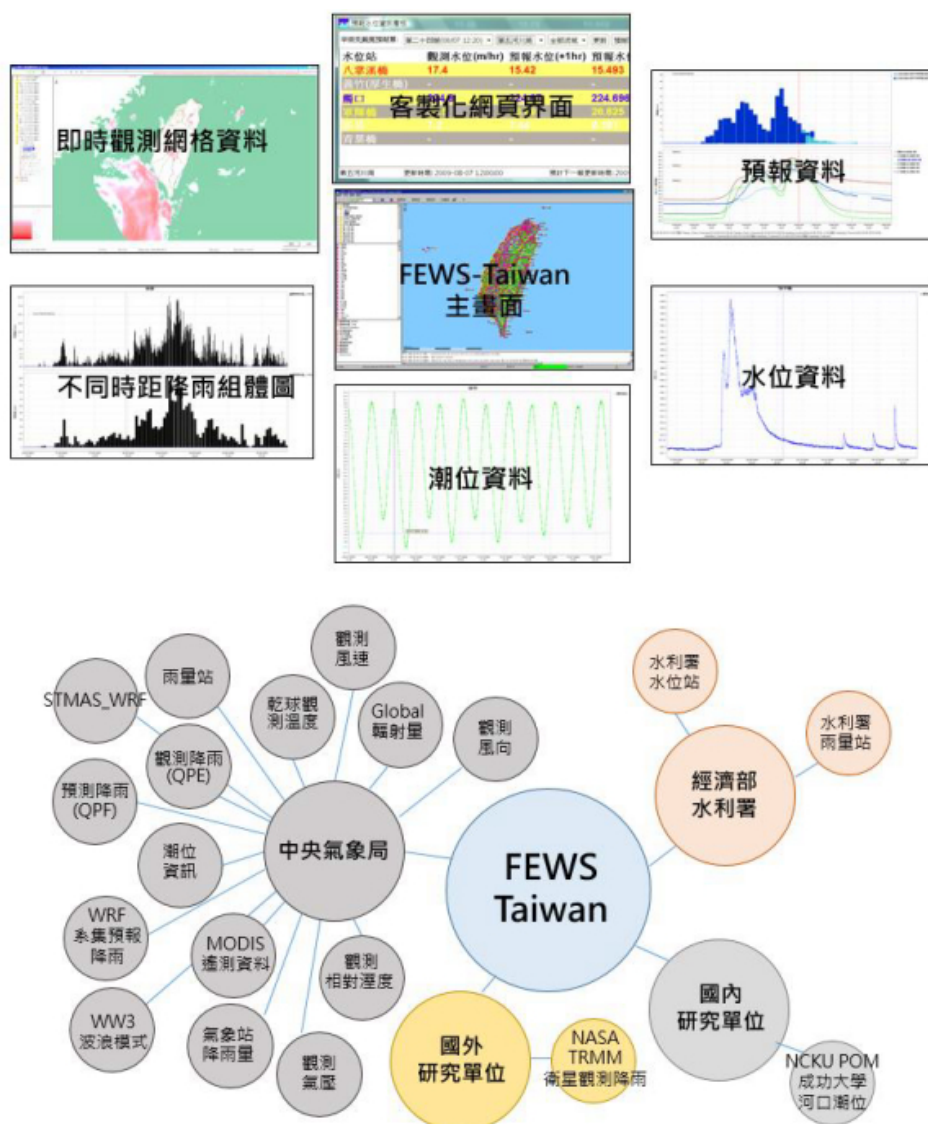


圖 5-1 平台 FEWS_Taiwan 介接資料與模式之功能架構

第二節 整合平台介接警戒曲線工作概要

對於平台而言，整合不同模式與資料，實屬軟體工程之範疇，目前研究團隊在介接規劃上，首先應從需求項目及作業流程來著手。介接需求項目主要分為「模式介接」與「資料介接」兩項目：當銜接自身發展產品至平台時，僅需依照此需求項目準備相關資料，再依循平台介接標準作業流程，即可透過低時間、花費成本，將自身發展產品介接至 FEWS_Taiwan 平台。此外，只要銜接完成，未來即可將自身發展產品透過流程組合之方式重複利用，而

非當使用需求改變時，又重新開發整合系統之方式。

以下就 FEWS_Taiwan 平台在銜接不同模式與資料的情況時，針對介接需求項目進行內容說明。

FEWS_Taiwan 整合平台介接模式方面，主要訴求在於模式開發人員無須修改數值模式本身，僅需依靠少量調整模式專案，甚至無須調整專案本身設定。藉由資料交換共同標準化之方式，使數值模式為其元件關係整合至平台內。此種介接方式主要仰賴 FEWS 平台內「General Adapter」模組達成，其運作方式如圖 5-2 所示之運作架構。因此 FEWS 平台在整合外部模式時，藉由 General Adapter 模組執行流程共同性，以軟體工程角度檢視介接整合之可行性，並評估介接模式之標準作業程序。

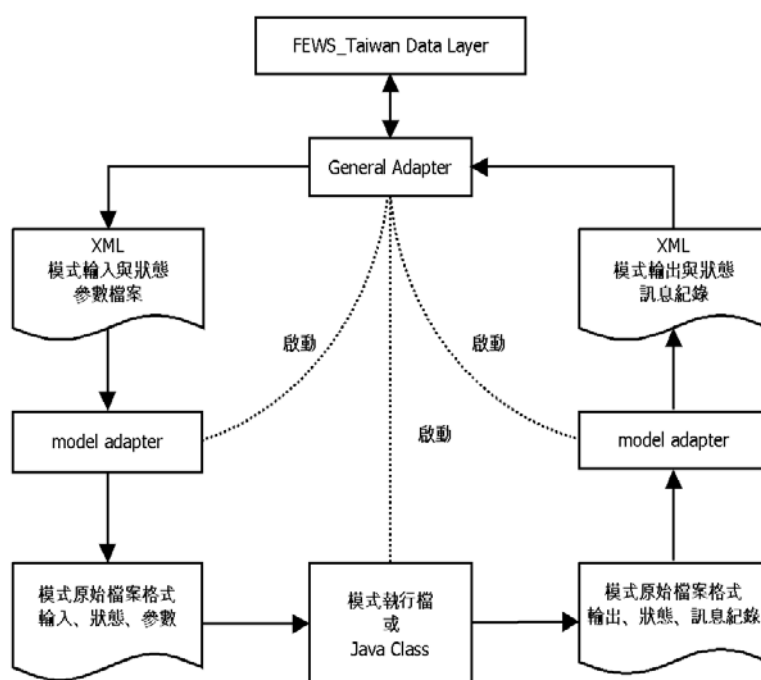


圖 5-2 通用模式銜接技術

實際 General Adapter 模組執行流程共同性如圖 5-3 所示，主要分成三大部分：

- 一、模式前處理部分，其包含模式各參數定義、所需邊界條件及其輸入檔案格式轉換等；

二、模式執行部分，其包含模式如何啟動、啟動環境需求及其執行方式等；

三、模式後處理部分，其包含模式輸出資料及其輸出檔案格式轉換等。



圖 5-3 General Adapter 運作流程共通性

綜合上述前處理、模式執行與後處理之內容，會發現：

- 一、介接外部模式過程中，FEWS 平台本身並不需要了解這些模式本身結構、模式如何運行，甚至不需要傳統模式在整合時，可能需配合平台介接修改模式原始碼，以因應整合等項目。
- 二、FEWS_Taiwan 主要關注部分為模式執行時，其所需邊界條件檔案位置、邊界條件檔案格式及其資料內容，平台本身是否能夠提供外部模式相關邊界條件，模式本身是否可依靠外部呼叫啟動，其模式輸出檔案位置、模式輸出檔案格式及其資料內容。因此，如能詳盡闡述模式上述部分相關資料並提供文件，即能將外部模式介接至 FEWS_Taiwan 平台。

因此，就上述依據 General Adapter 模組執行流程共同性，其所提模式前處理、模式執行、模式後處理部分，須歸納出銜接降雨門檻曲線整合時，其所應該交付之模式介接文件需求項目。而 FEWS 平台開發團隊，當取得依照此模式介接文件需求項目之相關資料，同時依據 General Adapter 模組執行流程共同性，有助於釐清銜接降雨門檻曲線對於本研究的呈現方式。

第三節 介接整合平台工作流程

藉由前述以軟體工程的角度，提出模式與平台介接概念與需求項目。並藉由其概念，對照實務上平台介接模式之標準工作階段可展開如圖 5-4 所示，其說明如下：

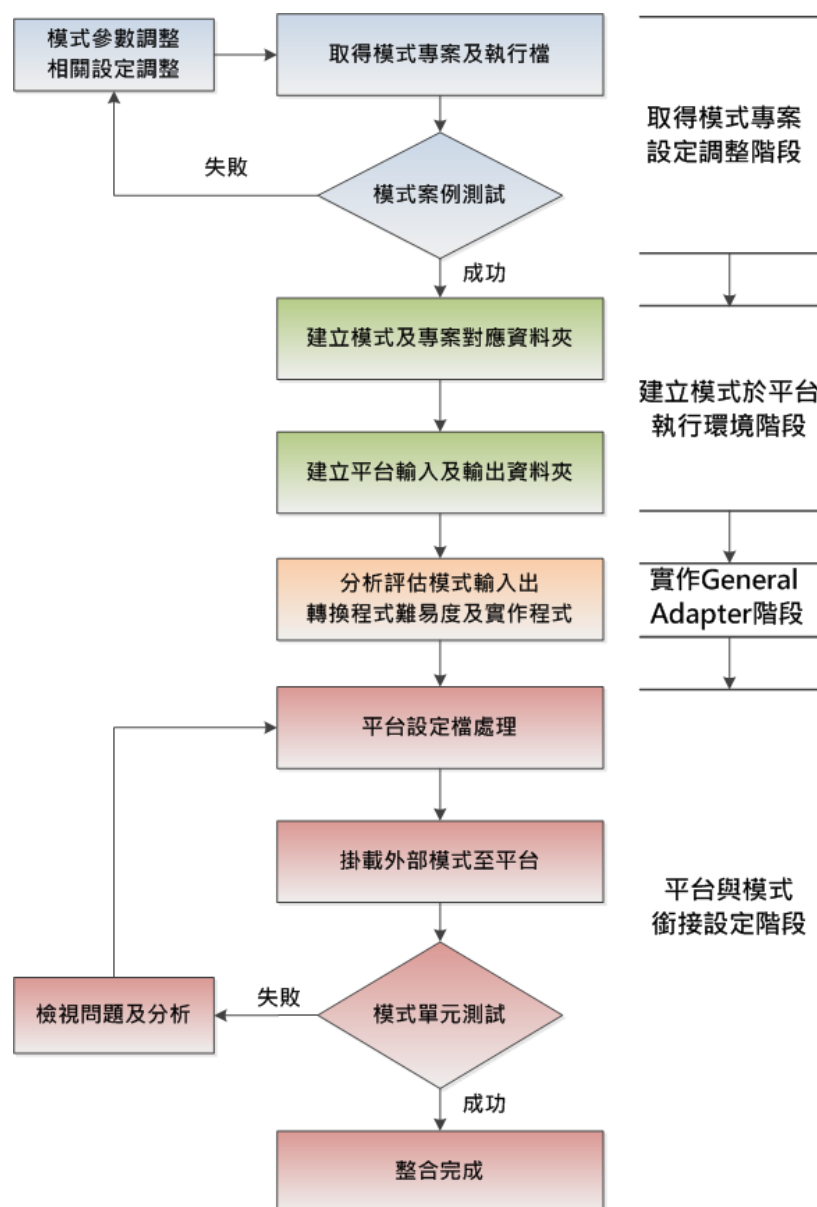


圖 5-4 模式介接至平台標準工作階段

一、取得模式專案及設定調整階段

在此工作階段，必須取得外部模式專案及模式標準氣象資料，並透過測試案例檢視模式於執行過程中是否出現錯誤，確保模式為可使用狀

態。在確認模式可正常獨立執行後，可協助判斷後續進行模式整合工作時，不會誤判錯誤是由外部模式導致問題，讓整合工作迅速進行。當模式無法成功模擬原先案例時，即向模式專案提供者諮詢，透過調整模式相關參數等模式內部設定，解決模式執行問題。同時，此工作階段會因應介接至 FEWS 平台，調整相關模式設定，如模式輸入檔路徑、內容及建立模式狀態檔等方面，並完成調整後之模式執行測試工作。

二、建立模式於平台執行環境階段

在此工作階段，必須建立模式可執行環境，例如安裝模式軟體或相關程式，確保模式可正常獨立執行完畢。同時，尚須建立不同外部模式及其專案，所對應 FEWS 平台執行資料夾，以分別不同模擬狀況。同時建立平台輸入與輸出資料夾，以方便平台輸出邊界條件、匯入資料至平台內及日後管理與維護，並將外部模式專案及執行相關檔案，複製進專案資料夾，並測試模式在此資料夾環境中，模式仍然可獨立正常執行。

三、實作模式 General Adapter 階段

除了就模式輸入資料來源進行確認，並根據模式資料需求，了解 FEWS 平台能提供外部模式所需之邊界條件相關設定，例如：雨量、流量及水位等資訊，同時確認模式所需檔案格式。因各水文水理模式所使用之輸入檔案格式並不相同，FEWS 針對此項提供一個標準資料格式，稱為交換介面 PI(Published Interface)，其檔案格式如圖 5-5 所示。平台匯出資料及匯入平台資料格式，皆需遵循 PI 規範之檔案格式。在確認平台端輸出資訊已滿足外部模式之需求後，必須針對外部模式的輸入與輸出格式，撰寫 General Adapter 格式轉換程式，或使用現有的配套措施，將平台 PI 格式檔案轉換為模式所需格式之過程。例如使用 PreAdapter 將 FEWS_Taiwan 平台所提供之 PI 格式檔案，轉換至符合外部模式之檔案需求。經模式計算後，將其成果透過 PostAdapter 轉換至

符合 PI 規範之檔案格式。在程式開發上，需評估轉換格式之開發、時間成本以及效率。

```
<TimeSeries xmlns="http://www.wildelft.nl/fews/PI" xmlns:xsi="http://www.w3.
  <timeZone>0.0</timeZone>
  <series>
    <header>
      <type>accumulative</type>
      <locationId>k-16</locationId>
      <parameterId>Rainfall</parameterId>
      <timeStep unit="second" multiplier="3600"/>
      <startDate date="2011-11-26" time="15:00:00"/>
      <endDate date="2011-11-27" time="10:00:00"/>
      <missVal>-999.0</missVal>
      <stationName>牛稠溪</stationName>
      <units>mm</units>
    </header>
    <event date="2011-11-26" time="15:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="16:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="17:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="18:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="19:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="20:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="21:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="22:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-26" time="23:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-27" time="00:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-27" time="01:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-27" time="02:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-27" time="03:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-27" time="04:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
    <event date="2011-11-27" time="05:00:00" value="-999.0" flag="8"/>
```

圖 5-5 FEWS_Taiwan PI XML 檔案格式

四、平台與模式銜接設定階段

在此工作階段，透過建立平台相關設定檔，將崩塌即時預報架構與警戒曲線介接至平台內，即能啟動執行。其中，在設定檔部分，包含外部模式輸入輸出啟動設定檔、外部模式與平台 ID 對照檔、外部模式邊界條件前處理設定檔、平台工作流程檔等設定檔案。在這些檔案設定完成後，即能將相關設定檔案註冊至 FEWS 平台，當設定無誤並成功啟動模式模擬成功情況下，方可將外部模式之模擬成果展示於 FEWS 平台。

表 5-1 為分別針對設定檔項目逐項說明其功能。最後外部模式銜接完畢後，需經過單元測試，確認外部模式於平台內執行狀況無任何問題，同時必須比對平台啟動模式所獲得的計算結果，是否與單獨執行外部模式的結果一致；反之，則表示介接過程中仍存在錯誤，須逐一檢視前述

工作上是否有相關錯誤，將其排除之以順利完成模式銜接。

表 5-1 平台設定檔功能說明表

平台設定檔項目	平台對應 資料夾名稱	功能說明
外部模式 啟動演算模組	ModuleConfigFiles	用以輸出模式邊界條件，啟動模式格式轉換程式 General Adapter 進行格式轉換後，呼叫外部模式進行演算，最後將模式輸出同樣進行格式轉換，並將其成果匯入平台之動作控制設定檔。
外部模式與平台 ID 對照檔	IdMapFiles	用以將平台內相關 ID 名稱，轉換至模式雨量站名稱，進行空間上對應之設定檔。
時空間轉換模組 設定檔	ModuleConfigFiles	將水文氣象等相關資料作時間轉換、空間轉換、內插補遺，將其轉換為模式所需邊界條件之控制設定檔。
平台工作流程檔	WorkflowFiles	用以讓平台依照指定順序，啟動所指定設定檔之工作流程檔。

第四節 坡地淺崩塌即時預警報作業化平台成果展示

若要計算豪雨期間坡地淺崩塌即時預報架構與警戒曲線的動態影響，除了的平台介接前，需定義曲線的趨勢與參數，更重要的是，透過平台自動計算降雨延時時間，以及降雨強度。本研究的研發成果，首先利用歷史雨量資料的匯入，作為此整合平台的資料基礎。

在匯入流程(圖 5-6)後，可在指定時間(T_0)起，針對所選坡地如圖 5-7 所示(以本計畫而言為阿里山鄉的美寮道路)，計算未來 120 小時範圍的警戒值。而警戒結果除了可以用歷線的方式，亦可同時瀏覽降雨雨型與警戒值歷線變化的關係，如圖 5-8 所示。此外在展示上，可利用地圖搭配多邊形範圍的方式，來觀看警戒值在時間序列上的變化。從圖 5-9 來看，綠色顯示為未達到警戒標準，黃色則顯示在目前之降雨延時與平均降雨強度剛好位於警戒曲線上，而紅色則為已超過警戒標準。

坡地淺崩塌即時預警報作業化平台 NCTU Version 11.00, Set. 2015 (Stand alone)

流程
美寮崩塌警戒曲線分析 1-資訊

狀況
無 2-資訊

預報敘述

行程安排選項

☒ 單一預報 (yyyy-MM-dd HH:mm GMT+08:00)

T0 2009-08-06 20:00

☐ 擴大預報 (yyyy-MM-dd HH:mm GMT+08:00)

起始 T0 2016-11-22 15:10

結束 T0 2016-11-22 15:10

時段 日 1

狀態選取

☐ 選定初始狀態

☐ Cold 狀態

形式 Cold States(Default)

相對起始時間 2009-08-05 20:00

☒ Warm 狀態

搜尋時段

起始時間 2009-08-04 20:00

結束時間 2009-08-06 20:00

☒ 允許

☐ Run for selected locations

優先順序 Forecasting shells 預報長度

圖 5-6 執行計算匯入流程

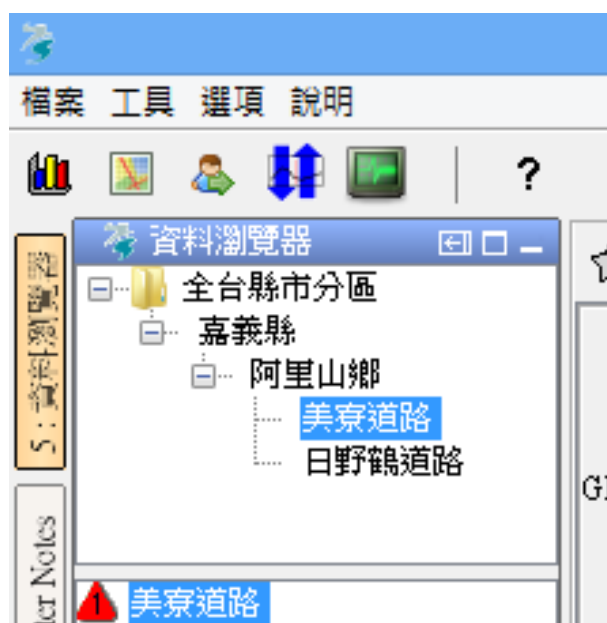


圖 5-7 坡地淺崩塌即時預警報作業化平台執行範圍

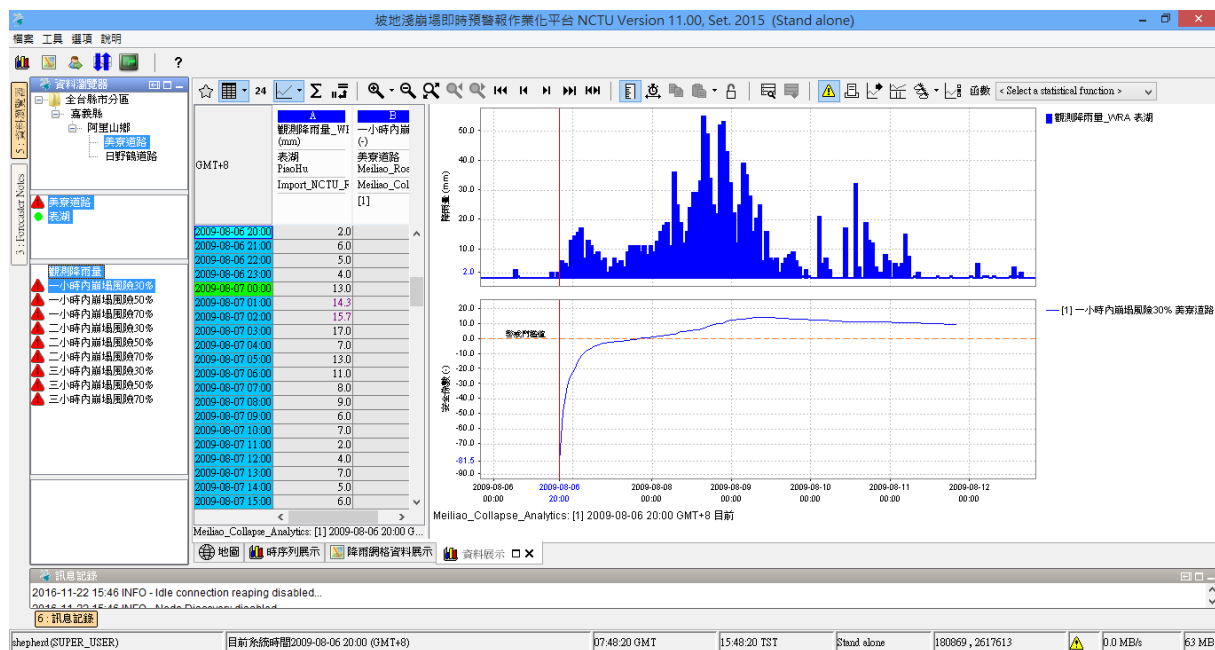


圖 5-8 警戒值搭配降雨量的資料展示

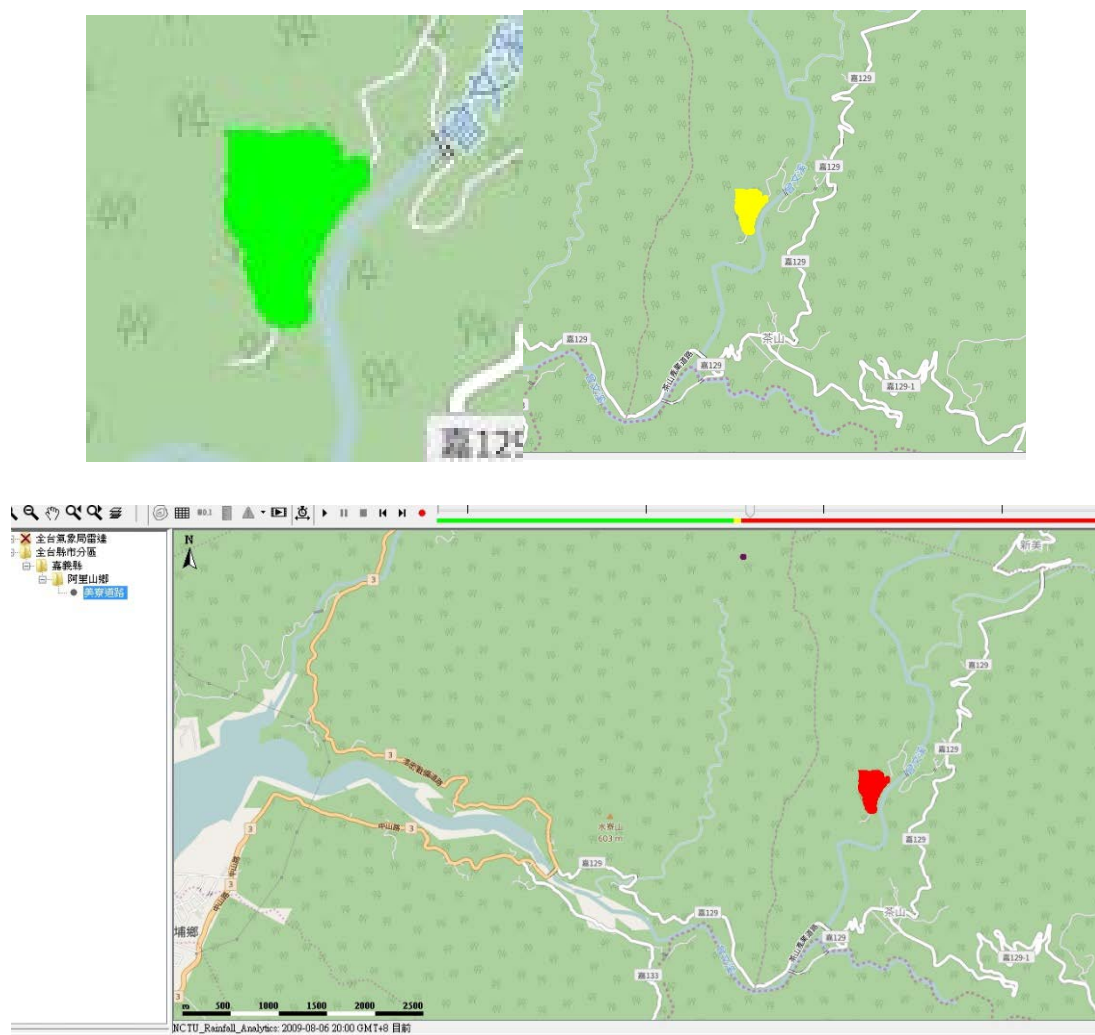


圖 5-9 以地圖搭配多邊形顏色的方式進行資料展示

第六章 結論與建議

第一節 結論

坡地崩塌之預警為降低山坡地災害之重要手段，本計畫首先利用整體敏感度分析歸納水力傳導係數、土壤摩擦角、凝聚力、以及初始地下水位等為變異性高且顯著影響崩塌模擬結果之重要參數，接著提出可針對單一邊坡，考慮坡地重要參數與降雨之不確定性，不同預報可靠度(或型二錯誤發生風險)之坡地崩塌警戒曲線製作方法。依循此方法，在颱風期間管理者可在事先擬定之預報可靠度下，依據累積降雨延時與平均降雨強度進行坡地崩塌預警，再配合本計畫所建立之 FEWS 作業化平台，即可達兼顧小區域、短延時、自動化以及具風險概念之精緻化預報成果。

第二節 建議

針對本計畫之研究成果，茲提出相關建議如下：

- 一、本計畫係採用一維近似飽和崩塌模式進行降雨門檻曲線之分析，建議後續可依循相同分析流程，改採理論架構更完整之一維或二維未飽和崩塌模式，以更準確模擬崩塌發生時間。
- 二、本計畫係針對單一坡地進行崩塌預警，因此對大區域而言，要全面獲得土壤參數之條件可能會造成實務應用之困難，惟提升預警準確度之關鍵即在對土壤特性之掌握程度，建議本計畫成果在應用上可設定為針對具有重要保全對象之坡地，並進行必要之鑽探與試驗。
- 三、呈上，對重要坡地之崩塌預警而言，亦可輔以地下水位即時觀測井之建置，掌握初始地下水位狀態，如此即可去除初始地下水位之不確定性，增加預警報之可靠度。
- 四、預報可靠度之擬定須考量多種面向，目前本研究初步提出可參考崩塌

預警時間以及崩塌後災害規模等因子，建議後續以風險管理之思維，進行預警報分級與預報可靠度研訂之相關研究。

參考文獻

1. 打荻珠男,「ひと雨による山腹崩壊について」,新砂防,1971。
2. 行政院水土保持局,「九份二山崩塌地觀測及警戒機制整合平台建立」,2010。
3. 行政院農業委員會水土保持局,「石門水庫集水區土砂災害歷程分析」,2011。
4. 陳本康,「石門水庫集水區崩塌特性及潛勢評估研究」,國立中興大學水土保持系博士論文,2005。
5. 陳弘恩,「考量降雨及逕流影響之坡地崩塌模擬分析」,國立交通大學土木工程系博士論文,2004。
6. 經濟部水利署,「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究(3/3)」,2008。
7. 經濟部水利署南區水資源局,「曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測」,2013。
8. 經濟部水利署南區水資源局,「曾文水庫集水區坡地崩塌風險與治理成效評估」,2016。
9. 趙衛君,「應用高斯過程建立分階式山區道路邊坡崩塌預測模式之研究-以阿里山公路為例」,國立臺灣科技大學營建工程系碩士論文,2004。
10. Aleotti, P. "A warning system for rainfall-induced shallow failures," *Engineering Geology*, 73(3-4), 247-265, 2004.
11. Baum, R. L., Savage, W. Z., Godt, J. W. *TRIGRS-a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis*, Virginia, US Geological Survey Open file report 02-424, 2002.
12. Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., and Guzzetti, F. "Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 447-458, 2010.
13. Caine, N. "The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows," *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography*, 62(1-2), 23-27, 1980.
14. Carrara, A. "Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation. A Black Box Approach," Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries, Perugia, Italy, 205-224, 1988.
15. Carrara, A., Cardinali, M. and Guzzetti, F. "Uncertainty in Assessing Landslide Hazard and Risk," *ITC Journal*, 2, 172-183, 1992.
16. Dai, F. C., Lee, C. F. and Ngai, Y. Y. "Landslide Risk Assessment and Management: an Overview," *Engineering Geology*, 64(1): 65-87, 2002.
17. Ermini, L., Catani, F. and Casagli, N. "Artificial Neural Networks Applied to Landslide

- Susceptibility Assessment," *Geomorphology*, 66(1-4): 327-343, 2005.
18. Giannecchini, R. "Rainfall triggering soil slips in the southern Apuan Alps (Tuscany, Italy)," *Adv. Geosci.*, 2, 21-24, 2005.
 19. Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update," *Landslides*, 5(1), 3-17, 2008.
 20. Iverson, R. M. "Landslide Triggering by Rain Infiltration," *Water Resources Research*, 36(7): 1897-1910, 2000.
 21. Lee, S. and Choi, J. "Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and the Weight-of-Evidence Model," *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8): 789-814, 2004.
 22. Rosi, A., Segoni, S., Catani, F., and Casagli, N. "Statistical and environmental analyses for the definition of a regional rainfall threshold system for landslide triggering in Tuscany (Italy)," *Journal of Geographical Sciences*, 22(4), 617-629, 2012.
 23. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, John Wiley & Sons Ltd, England, 2008.
 24. Tsai, T. L. and Yang, J. C. "Modeling of Rainfall-Triggered Shallow Landslide," *Environmental Geology*, 50(4): 525-534, 2006.
 25. Tsai, T. L., Chen, H. E. and Yang, J. C. "Numerical Modeling of Rainstorm-Induced Shallow Landslides in Saturated and Unsaturated Soils," *Environmental Geology*, 55(6): 1269-1277, 2008.
 26. van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J. and Soeters, R. "Prediction of the Occurrence of Slope Instability Phenomena Through GIS-Based Hazard Zonation," *Geologische Rundschau*, 86(2): 404-414, 1997.
 27. van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J. and Soeters, R. "Landslide Hazard and Risk Zonation – Why is it Still so Difficult?" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2): 167-184, 2006.
 28. Wang, W. D., Xie, C. M. and Du, X. G. "Landslides Susceptibility Mapping Based on Geographical Information System, GuiZhou, South-West China," *Environmental Geology*, 58(1): 33-43, 2009.
 29. Wieczorek, G. F. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In: Costa JE, Wieczorek GF (eds) Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation. Reviews in Engineering Geology 7. Geological Society of America, Boulder, Colo., pp 23-104, 1987.

30. Zezere, J. L., Trigo, R. M., and Trigo, I. F. "Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3), 331-344, 2005.

附錄

附錄一 期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

審查意見	辦理情形
1. 肯定工作團隊研提之工作構想與計畫執行之方法與流程。	1. 感謝委員肯定。
2. 建議工作團隊參考地調所委託中興工程顧問社之淺層崩塌發生預警計畫之相關成果。	2. 感謝委員寶貴意見，中興工程顧問社亦是採用定率模擬法進行崩塌預警分析，差別在其僅考慮總降雨量做為預警指標，且未考慮模式參數之不確定性，而本研究同時採用降雨量與降雨強度做為預警指標，且考慮地文參數之不確定性，因此分析結果具有可靠度之概念且理論上較為準確。
3. 建議期末報告時針對本研究之模式在大區域進行崩塌預警之適用性加以討論與說明。	3. 感謝委員寶貴意見，已於結論與建議中補充說明。
4. 降雨強度為控制淺層崩塌之重要因子，模式未來是可能納入降雨強度做為預警評估之因子？	4. 本研究之降雨門檻曲線同時包含降雨量與降雨強度等兩項因子。
5. 本計畫宜先敘明研究結果之不確定性來源及使用上應行注意或限制，避免誤用。	5. 感謝委員寶貴意見，關於使用模式之不確定性來源以及限制皆已於模式介紹中說明。
6. 預警報準確率之定義為何，本研究預警模式追求之目標為何，究為高準確率或型二錯誤（有崩塌與無發布）最少，建議先行討論確立。	6. 預警之最理想目標為高準確率，亦即不發生型一與型二錯誤，但因水文與地文不確定性影響，預報不會有完全正確之情形，因此本研究針對較為嚴重之型二錯誤發生風險妳定警戒參考曲線。
7. 本計畫擬提出預警報之分級方式（分幾級）及其應用，建請補充。	7. 感謝委員寶貴意見，本計畫目的在提出如何依據設定之可靠度建立預警曲線，至於警報分級方法則未探討，惟當分級方法確定後，即可以本計畫所提方法建立各分級下不同可靠度之警戒曲線。
8. 本計畫嘗試探討出兩型對即時預報之影響，但災中能否及如何得知雨型，建請補充。	8. 本計畫所提警戒曲線僅需降雨開始至預報時間為止之累積雨量與平均降雨強度，不需預先得知雨型。
9. 簡報中，P8，分 A、B、C 等 3 種 events (Giannecchini, 2005)有何不同，請說明。	9. 三種 event 代表三種特定降雨量區間之事件。
10. 淺層崩塌和地下水的關係似乎相關性不高，模式中如何應用調整？	10. 依據本計畫敏感度分析結果，初始地下水位對崩塌發生時間具有顯著影響性，惟其值難以準確獲得，因此本計畫

	採用統計取樣方式製造初始地下水位。
11. 各地區之土壤參數差異甚大，如何取得相關參數(IC 或 BC)回饋模式運算，達到一定的預測準確性？	11. 建議可針對具有重要保全對象之坡地進行鑽探與試驗，取得相關土壤參數。
12. 面對預報時，如何進行兩型分類，達到預警之目的？	12. 本計畫所提警戒曲線僅需降雨開始至預報時間為止之累積雨量與平均降雨強度，不需預先得知雨型。
13. 本計畫建立降雨門檻曲線，導入可靠度概念，未來預警如何選定發生風險之基準如何訂定？	13. 可靠度或風險之訂定牽涉多種面向，建議可從災害預警時間與崩塌造成災害兩者切入，詳細可參考圖 4-3 之概念。
14. 結合 QPESUMS 之網格式降雨觀測資料，為目前趨勢，但其網格資料約 1.3 公里*1.3 公里一筆資料，是否能符合淺崩塌預警之 R 度需求？	14. 感謝委員寶貴意見，預警可同時參考雨量站與雷達降雨等不同觀測資料，而以 QPESUMS 來說已可提供高度之空間解析度。

附錄二 期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

審查意見	辦理情形
1. 本計畫須取得不同地區之不同土壤參數，有實用上之困難。	1. 災害預警報之目標為追求準確率，為提高準確率勢必須將預警針對範圍縮小，例如雨量預報由縣市等級縮小至鄉鎮等級，當範圍縮小時就必須掌握土壤參數在空間上之差異性；而在實用上可先針對具有重要保全對象之坡地進行鑽探試驗，獲得土壤參數，如此即可針對這些具重要保全對象之坡地採用較準確之預警報方法。
2. 大部分案例分析資料為統計產生，其所得之崩塌臨界曲線難讓人信服。	2. 本計畫模式輸入資料係依據現場降雨與土壤試驗資料，再考慮不確定性利用統計取樣方法產生。
3. 本計畫是否可應用於大規模崩塌。	3. 本計畫所採用之模式僅適用於淺層崩塌，惟預警可靠度之概念以及分析流程則不僅限於淺層崩塌。
4. 對於數值模式引用之參數比重，可以再與實際案例現地之參數值比對修正。	4. 本計畫所採用之土壤參數係於現地進行土壤取樣與試驗所獲得。
5. 雨量及地文資料都用模擬，是否恰當，強度參數如何決定？	5. 本計畫模式輸入資料係依據現場降雨與土壤試驗資料，再考慮不確定性利用統計取樣方法產生。