

出國報告（出國類別：進修）

## 複合型土砂災害警戒及疏散決策支援系統研究

服務機關：行政院農業委員會水土保持局

姓名職稱：陳振宇 簡任正工程司

派赴國家：日本

出國期間：100年9月27日至103年9月26日

報告日期：103年11月4日



## 摘要

儘管建立警戒系統並適時疏散民眾已被公認為降低土砂災害風險最重要的方法之一，但由警戒發布後，明顯偏低的疏散率可知，台日現行以雨量為基礎的土砂災害警戒系統並未受到足夠的信任；同時，由近年來連續多起重大天然災害之案例可知，現行僅以單一災害類型作為預測目標的土砂災害警戒系統，已無法因應複合型災害複雜的災害型式。因此，本研究整合降雨－入滲模式、坡面穩定性分析模式、坡面崩塌土體運移模式、洪水及土砂流出模式，以及河床高程變化模式等，提出一全新的複合型土砂災害警戒與疏散決策支援系統，除提供合適且詳盡的警戒資訊以提高地方政府及民眾之疏散意願外，亦能以流域尺度之觀點處理山區複合型土砂災害在時間與空間上的複雜問題。

關鍵詞：複合型災害、崩塌、洪水、模擬、預警、疏散避難



# 目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究主題與目的.....	3
1.3 研究過程.....	4
第 2 章 現行以雨量為指標之土砂災害警戒系統分析.....	7
2.1 前言.....	7
2.2 材料及方法.....	8
2.2.1 日本土砂災害警戒系統簡介.....	8
2.2.2 台灣土砂災害警戒系統簡介.....	10
2.2.3 土砂災害警戒模式成效評估方式.....	13
2.2.4 土砂災害警戒發布機制評估方式.....	15
2.2.5 疏散避難率評估方式.....	15
2.3 研究發現.....	16
2.3.1 台日土砂災害警戒系統評估.....	16
2.3.2 以莫拉克颱風土砂災害警戒發布實例探討.....	23
2.4 小結.....	24
第 3 章 土石流潛勢地區地方政府與民眾之疏散決策因子.....	29
3.1 前言.....	29
3.2 材料及方法.....	32
3.2.1 問卷內容.....	32
3.2.2 問卷調查對象.....	35
3.2.3 AHP 理論與計算方式.....	37
3.2.4 專家意見整合方式.....	37
3.3 研究發現.....	38
3.3.1 地方政府疏散決策因子.....	38
3.3.2 民眾疏散避難決策因子.....	43
3.3.3 現行土石流警戒機制改進建議.....	45
3.4 小結.....	46
第 4 章 以物理模式法進行崩塌及降雨-逕流模擬.....	51
4.1 前言.....	51
4.2 材料及方法.....	53
4.2.1 整合式降雨-入滲-邊坡穩定分析模式.....	53
4.2.2 IRIS 模式應用案例.....	55
4.2.3 簡化坡面模型.....	58
4.2.4 模擬所用相關參數.....	59

4.2.5 土體內初始孔隙水壓條件設定方式.....	60
4.3 研究發現.....	61
4.3.1 基岩位置對降雨逕流關係之影響.....	61
4.3.2 基岩位置對崩塌時間及規模之影響.....	66
4.3.3 土壤性質對崩塌發生時間與規模之影響.....	71
4.3.4 討論.....	72
4.4 小結.....	73
第 5 章 以水含量指標進行集水區尺度之崩塌模擬.....	77
5.1 前言.....	77
5.2 材料及方法.....	79
5.2.1 斜坡單元劃分方式及研究區域.....	79
5.2.2 邊坡穩定分析模式.....	81
5.2.3 崩塌發生時之土體臨界水含量.....	83
5.2.4 使用臨界含水量法進行崩塌預測.....	83
5.2.5 多元迴歸式與其驗證.....	85
5.3 研究發現.....	89
5.3.1 崩塌預測結果.....	89
5.3.2 崩塌可能性.....	92
5.3.3 討論.....	93
5.4 小結.....	95
第 6 章 複合型土砂災害模擬.....	99
6.1 前言.....	99
6.2 材料及方法.....	101
6.2.1 研究區域及流域模型.....	101
6.2.2 崩塌預測模式.....	103
6.2.3 降雨-逕流模式.....	104
6.2.4 土砂流出模式.....	105
6.2.5 崩塌土方流入河道模式.....	108
6.2.6 其它計算條件.....	109
6.3 研究發現.....	110
6.3.1 崩塌模擬結果.....	110
6.3.2 洪水、土砂流出與河道高程變化模擬結果.....	112
6.3.3 討論.....	120
6.4 小結.....	121
第 7 章 複合型土砂災害警戒及疏散決策支援系統.....	127
7.1 前言.....	127
7.2 材料及方法.....	128
7.2.1 警戒模式.....	128

7.2.2 警戒發布機制.....	130
7.2.3 研究區(志津川流域)之避難計畫.....	133
7.3 研究發現.....	135
7.3.1 RIMSH 警戒系統模擬警戒發布結果.....	135
7.3.2 討論.....	137
7.4 小結.....	138
第 8 章 具體政策建議.....	141
附錄：已發表論文明細.....	145





## 圖目錄

圖 1.1 複合型土砂災害型式及其因果關係示意圖 .....	1
圖 2.1 日本土砂災害警戒模式示意圖 .....	8
圖 2.2 日本土砂災害警戒情報範例 (國土交通省等, 2005).....	9
圖 2.3 日本都道府縣之土砂災害警戒系統範例 (Osanai et al., 2010).....	10
圖 2.4 以降雨驅動指標區分土石流發生可能性示意圖(詹錢登、李明熹, 2004).....	11
圖 2.5 台灣土石流警戒發布流程 .....	12
圖 2.6 台灣土石流警戒區預報單樣式 .....	13
圖 2.7 土砂災害警戒模式成效評估指標範例 .....	15
圖 2.8 台灣(2007~2011)歷年土砂災害件數及警戒成效 .....	20
圖 2.9 台灣(2007~2011)土砂災害事件發生時段統計圖 .....	21
圖 2.10 台日土砂災害警戒發布後疏散剩餘時間分布圖 .....	22
圖 2.11 莫拉克颱風期間重大土砂災害發生時段及小林村雨量及災害事件序列 .....	24
圖 3.1 地方政府與民眾疏散避難決策之流程 .....	30
圖 3.2 研究流程圖 .....	32
圖 3.3 本研究採用之 AHP 法分析流程 .....	38
圖 4.1 多裂隙基岩坡面與少裂隙之花崗岩基岩坡面之降雨-逕流關係示意圖(Onda et al., 1999) .....	52
圖 4.2 (a)動態規劃法應用於臨界滑動面求解之路徑節點示意圖(b)相關符號示意 .....	55
圖 4.3 2005 年 14號颱風期間日本大分縣竹田市崩塌模擬結果 .....	56
圖 4.4 2012 年 8 月豪雨日本京都府宇治市崩塌模擬結果 .....	58
圖 4.5 (a)簡化坡面模型 (b)有限元素法網格示意圖 .....	59
圖 4.6 不同類型土壤之土壤水分特性曲線 .....	60
圖 4.7 火山碎屑沉積物坡面之降雨-逕流歷線.....	62

圖 4.8 基岩坡度 14 度之火山碎屑沉積物坡面各時段壓力水頭分布圖(a)t=0h (b)t=56h (c)t=96h (d)t=408h.....	63
圖 4.9 風化花崗岩坡面之降雨-逕流歷線.....	64
圖 4.10 基岩坡度 14 度之風化花崗岩坡面各時段壓力水頭分布圖 (a)t=0h (b)t=56h (c)t=96h (d)t=408h.....	64
圖 4.11 砂頁岩互層坡面之降雨-逕流歷線.....	65
圖 4.12 基岩坡度 14 度之砂頁岩互層坡面各時段壓力水頭分布圖 (a)t=0h (b)t=56h (c)t=96h (d)t=408h.....	66
圖 4.13 降雨-入滲-崩塌模擬所使用之五種不同雨場.....	66
圖 4.14 不同降雨強度下不同基岩坡度之火山碎屑沉積物岩坡面滑動面 .....	67
圖 4.15 不同降雨強度下不同基岩坡度之風化花崗岩坡面滑動面 .....	69
圖 4.16 不同降雨強度下不同基岩坡度之砂頁岩互層坡面崩塌滑動面 .....	70
圖 4.17 相同降雨強度下不同土壤強度之火山碎屑沉積物坡面崩塌滑動面(高保水 性且低透水性土體) .....	72
圖 4.18 相同降雨強度下不同土壤強度之風化花崗岩坡面崩塌滑動面(低保水性 且高透水性土體) .....	72
圖 5.1 (a)斜坡單元 No.376 於 2012 年 8 月 14 日豪雨災後崩塌之航空照片(アシア 航空株式會社, 2012) (b)斜坡單元及其坡向圖(紅點係為該斜坡單元之形心) .....	79
圖 5.2 研究區內之地表高程及單位斜面 .....	80
圖 5.3 應用於後續坡面穩定分析之簡化後斜坡單元模型 .....	81
圖 5.4 斜坡單元 No.376 於 2012 年 8 月 14 日豪雨期間降雨-入滲-崩塌模擬結果 .....	82
圖 5.5 臨界含水量法進行崩塌預測之流程圖 .....	85
圖 5.6 使用 IRIS 模式及多元迴歸式計算之逐時水含量( $W_t$ )結果比較 (a)No.43	

(L=102m, $\alpha=32.8^\circ$ ) (b) No.71 (L=137m, $\alpha=31.4^\circ$ ) (c) No.376 (L=180m, $\alpha=28.4^\circ$ ) (d) No.309 (L=230m, $\alpha=29.2^\circ$ ).....	88
圖 5.7 $W_{cr}$ 法於志津川流域內之崩塌預測結果與實際崩塌情形之比較.....	91
圖 5.8 2012年8月14日豪雨期間志津川流域各時段崩塌可能性圖.....	92
圖 5.9 志津川流域2012年8月14日豪雨事件累積雨量分布情形.....	95
圖 6.1 流域尺度之複合型土砂災害模擬模式.....	101
圖 6.2 流域模型 (a)每一單位河道有2個流入端及1個流出端 (b)每一單位河道均有左右二側之集水面積(單位斜面) (c)每一單位斜面可以依坡向坡度等地形特徵細分為數個斜坡單元，並以斜坡單元作為坡面穩定分析之單位	102
圖 6.3 (a)斜坡單元之示意圖 (b)坡面穩定分析所使用之簡化坡面模型.....	103
圖 6.4 使用節塊法計算單位寬度斜坡單元流入相鄰單位河道之逕流量示意圖	104
圖 6.5 崩塌土方流入相鄰單位河道計算方式示意圖.....	109
圖 6.6 河道及崩塌土砂粒徑分布圖.....	109
圖 6.7 志津川流域內各斜坡單元預測崩塌與實際崩塌位置之比較(北部區域土壤強度採用 $C=0.85 \text{ t/m}^2$ ，其他區域 $C=0.7 \text{ t/m}^2$ ).....	111
圖 6.8 各單位河道集水區內之崩塌土方量及崩塌發生時間.....	112
圖 6.9 研究區內上、中、下游代表河道之流量變化模擬結果.....	112
圖 6.10 單位河道 No.122 之水位變化模擬結果.....	113
圖 6.11 預測發生溢堤之單位河道之水位變化模擬結果.....	114
圖 6.12 單位河道 No.126 淹水之證據 (宇治市，2014).....	115
圖 6.13 單位河道 No.102 鄰近坡面崩塌及淹水情形(修改自アシア航空株式會社，2012).....	116
圖 6.14 單位河道 No.123 河道高程變化之模擬結果.....	117
圖 6.15 單位河道 No.123 上游河道 No.93 之土砂多被宮ノ前橋所阻攔，部份則流入臨近民宅區均，故未能流入單位河道 No.123 (修改自アシア航空株式會	

社，2012).....	117
圖 6.16 (a)模擬期間單位河道 No.93、No.122 及 No.123 之土砂流出量 (b)模擬期間單位河道 No.123 內土砂堆積量之變化.....	118
圖 6.17 表 6.2 所列發生溢堤之單位河道，在災害事件期間，其河床高程變化之模擬結果.....	119
圖 7.1 複合型土砂災害警戒系統(RIMSH warning system)架構圖.....	129
圖 7.2 崩塌相關警戒發布模式示意圖.....	130
圖 7.3 洪水、道路封閉及崩塌警戒之發布流程圖.....	131
圖 7.4 洪水、道路封閉及崩塌警戒之等級調降及解除流程圖.....	133
圖 7.5 研究區內之避難處所及主要疏散避難路線.....	134
圖 7.6 RIMSH 警戒系統發布之警戒類型、時間及真實災害發生時間之時間軸.....	136
圖 7.7 疏散避難決策樹 (Modified from Lindell et al., 2007).....	138

## 表目錄

表 2.1 日本歷年短期及長期雨量指標的發展演變(Osanai et al., 2010).....	9
表 2.2 台灣歷年土石流警戒基準值( $R_c$ )使用範圍.....	11
表 2.3 全台各地土石流警戒基準值及參考雨量站(範例) .....	12
表 2.4 日本與台灣之土砂災害警戒系統及疏散避難決策機制之比較 .....	17
表 2.5 台灣及日本土砂災害警戒成效 .....	19
表 2.6 台灣 2007~2011 年颱風及豪雨事件之土砂災害警戒精度比較 .....	21
表 3.1 地方政府與民眾之疏散避難決策因子相關文獻 .....	33
表 3.2 地方政府疏散避難決策因子層級關係及內容說明 .....	34
表 3.3 土石流潛勢地區民眾疏散避難決策因子層級關係及內容說明 .....	35
表 3.4 台灣土石流潛勢溪流及近年重大土砂災害統計與有效問卷回收統計 .....	36
表 3.5 地方政府疏散避難決策因子權重 .....	39
表 3.6 同區位地方政府疏散避難決策因子權重(層級一) .....	41
表 3.7 不同區位地方政府疏散避難決策因子權重(層級二) .....	42
表 3.8 民眾疏散避難決策因子權重 .....	44
表 3.9 現行土石流警戒機制改進建議項目 .....	45
表 3.10 現行土石流警戒機制優先改進建議調查結果 .....	46
表 4.1 2005 年 14 號颱風期間日本大分縣竹田市崩塌模擬相關參數 .....	57
表 4.2 2012 年 8 月豪雨日本京都府宇治市崩塌模擬相關參數 .....	57
表 4.3 模擬坡面之土壤相關參數 .....	60
表 4.4 各簡化坡面之初始土壤有效飽合度 .....	60
表 4.5 火山碎屑沉積物坡面於不同降雨強度下之崩塌時間、規模及土體水含量 .....	67
表 4.6 風化花崗岩坡面於不同降雨強度下之崩塌時間、規模及土體水含量 .....	68
表 4.7 砂頁岩互層坡面於不同降雨強度下之崩塌時間、規模及土體水含量 .....	70

表 4.8 土壤剪力強度對崩塌時間及規模之影響 .....	71
表 5.1 志津川流域之土壤水力參數及剪力強度等參數 .....	82
表 5.2 簡化坡面在 8 種不同固定強度降雨類型下之臨界水含量及崩塌情形 .....	83
表 5.3 42 組虛擬坡面之代表坡長及坡度 .....	84
表 5.4 $W_{ini}$ 迴歸式之迴歸係數 .....	86
表 5.5 $W_{ini}$ 迴歸式精度之驗證結果 .....	86
表 5.6 $W_{cr}$ 迴歸式之迴歸係數 .....	87
表 5.7 $W_{cr}$ 迴歸式精度之驗證結果 .....	87
表 5.8 $W_i$ 迴歸式之迴歸係數 .....	87
表 5.9 $V_s$ 迴歸式之迴歸係數 .....	89
表 5.10 $V_s$ 迴歸式精度之驗證結果 .....	89
表 5.11 $W_{cr}$ 法崩塌預測結果與實際崩塌處數之比較 .....	90
表 5.12 $W_{cr}$ 法針對 38 處新增裸露地之崩塌預測結果 .....	90
表 5.13 使用 IRIS 模式與 $W_{cr}$ 法預測崩塌之結果比較 .....	91
表 6.1 志津川流域內各斜坡單元預測崩塌與實際崩塌數量之比較 .....	110
表 6.2 現地調查與模擬結果在河道溢堤與否與持續時間之比較 .....	113
表 7.1 崩塌、道路封閉及洪水警戒之發布條件與建議處置措施 .....	131
表 7.2 崩塌、道路封閉及洪水警戒之等級調降與解除條件 .....	132
表 7.3 宇治市三階段土砂災害避難命令發布時機與因應作為 .....	133
表 7.4 RIMSH 警戒系統模擬 2012 年 8 月 14 日志津川豪雨災害期間之崩塌、道路封閉及洪水警戒發布情形 .....	136
表 7.5 RIMSH 警戒系統模擬 2012 年 8 月 14 日志津川豪雨災害期間避難路線上可能因洪水造成橋梁中斷之地點明細 .....	136

# 第1章 緒論

## 1.1 研究背景

山區土砂生產與運移實為自然現象，並造成地表多變的地形與河川樣貌。然而，若土砂移動的路徑及過程與人類活動的空間產生了衝突，便可能造成民眾生命財產的損失、道路橋梁等公共設施的毀損，亦即形成所謂的災害(disaster)。事實上，颱風豪雨期間，山區的災害大多係由於雨水及土砂移動的過程所造成。例如，部份雨水無法滲入土層，隨即轉化成地表逕流，流入河道或低窪地區，如逕流量過大時，即可能造成局部地區淹水，甚至河道流量過大、水位過高時，亦可能衝毀道路、橋梁、護岸，造成嚴重災情(Chen et al., 2011; Kondo et al., 2012; Miyata and Fujita, 2013)。另一方面，部份滲入土層的雨水往往造成土層中孔隙水壓上昇及有效應力減少，導致坡面發生崩塌(Iverson, 2000; Casadei et al., 2003; Vieira and Fernandes, 2004; Tsutsumi et al., 2007)；崩塌後的土砂堆積在坡面或河道，可能又會變成後續土石流的料源，或是阻塞河道影響水流，導致河岸嚴重淘刷或造成淹水，甚至形成堰塞湖迴水造成上游淹水，一旦堰塞湖潰決，更會引起下游嚴重的二次災害。例如 2009 年莫拉克颱風期間發生於台灣高雄縣甲仙鄉的小林村深層崩塌，以及 2011 年塔拉斯颱風期間發生於日本奈良縣的多起深層崩塌即為典型案例(Chen et al., 2011; Chigira et al., 2013)。因此，山區降雨引起的土砂災害一般多為複合型災害形態—亦即單一事件期間所發生的多起災害，由於其複雜的時間、空間及因果關係，可能也會導致另一起或多起災害同時或相繼發生，擴大災害的影響範圍，延長災害的受災時間 (Highland and Bobrowsky, 2008; Kappes et al., 2012a; Kappes et al., 2012b)。圖 1.1 為山區常見的複合型土砂災害型式及其因果關係示意圖。

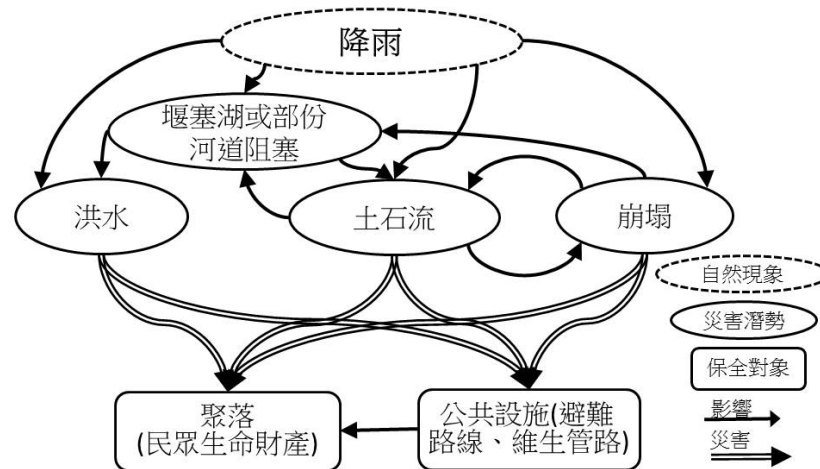


圖 1.1 複合型土砂災害型式及其因果關係示意圖

面對山區土砂災害的威脅，適時發布警戒並疏散危險區內民眾已被認為係有效降低災害風險的方法之一。由於大氣及地理環境的條件，日本與台灣每年防汛期間均飽受因颱風豪雨所導致的土砂災害侵襲，因此均早已建立以雨量為基礎的土砂災害警戒系統，適時發布警戒，並由地方政府進行民眾之疏散避難。儘管台日現行已有十年以上實務操作經驗，且以雨量為評估指標的土砂災害警戒系統，確實能提供一個簡單且易於應用的警戒發布方式，但近年來許多災害案例，卻也逐漸顯露出其不足之處。例如，依據近年來台灣及日本土砂災害警戒發布結果之統計數據顯示，警戒發布的命中率(Warning Hit Rate, WHR)平均僅有約 45~60%，亦即有 40~55%之土砂災害是在警報發布之前或是警報發布區外發生的；而警戒發布之誤報率(False Alert Rate, FAR)則高達 75%以上，亦即如發布 100 個地區為警戒區，實際有發生災害的地區不到 25 區 (Chen and Fujita, 2013)。

此外，現行台日的土砂災害警戒系統亦無法提供較明確的災害位置或類型等詳細資訊。例如日本現行的土砂災害警戒系統係採用 RBFN 模式，其僅能提供 5km 邊長之正方形網格範圍內的土砂災害風險等級，無法明確指出那一個坡面或野溪可能發生那一種災害。因此，即使市町村政府已接獲都道府縣所發布的土砂災害警戒情報，在缺乏明確、詳細資訊的情況下，應針對那一個地區發布「避難指示」，對市町村政府而言，仍是非常困難的決策。同時，對民眾而言，此種過於簡略的警戒資訊，往往也無法使其感受到災害可能帶來的風險，因而拒絕或延遲疏散。

由實際的統計數據來看，以日本 2008 年颱風豪雨期間為例，即使都道府縣已發布了土砂災害警戒，但市町村政府實際配合發布「避難指示」的比例只有 2.2%，且其中半數以上為災害已經發生後才發布；對於民眾而言，經統計，在接獲土砂災害警戒的訊息後，曾經主動進行疏散避難的比例也僅有 2.8% (日本國土技術政策總合研究所，2010)。此結果顯示，不論是第一線負責發布「避難指示」的市町村政府，或是災害潛勢區內的民眾，均對現行以雨量為基礎的土砂災害警戒系統缺乏足夠的信任，或是因現行的警戒發布資訊過於粗略，無法使其感受災害可能帶來的風險，因此造成偏低的疏散率。

另一方面，由於山區的土砂災害多為複合型土砂災害型式，但現行的土砂災害警戒系統多僅針對單一災害去設想，未考慮複合型災害可能造成之影響；由過去的災害案例(例如 2009 年重創南台灣的莫拉克颱風，以及 2011 年重創日本紀伊半島的塔拉斯颱風)發現，如防災計畫只考慮個別災害之影響時，將無法因應複合型災害可能帶來計畫想定外的風險。此外，台日現行以雨量為基礎的土砂災害警戒系統，由於僅簡單地以雨量指標是否超過臨界值作為判斷依據，即便事前已預知降雨的強度及延時，仍無法評估災害可能發生的型式或規模，亦無法推想週遭環境後續可能的變化，例如避難路線沿路的道路是否會因崩塌而阻斷，或是橋梁是否會因水位過高而沖毀，進而影響疏散行動及後續的救災。

綜合上述討論，台日現行以雨量為基礎的土砂災害警戒系統雖然使用上有



其便利性，但仍有下列問題尚待克服：

1. 命中率不足，誤報率偏高。
2. 只能簡單預測廣域範圍內是否可能有土砂災害發生，無法提供明確的災害發生時間、地點、災害類型及災害規模。
3. 僅針對個別土砂災害發布警戒(例如，台灣的土砂災害警戒系統僅針對土石流，日本的土砂災害警戒系統僅針對土石流及淺層崩塌)，無法因應洪水及複合型土砂災害。
4. 缺少情境模擬能力(scenario simulation capacity)，無法用以推估後續災情可能的變化。

## 1.2 研究主題與目的

由前述的背景說明可知，儘管多數人均同意建立警戒系統並適時疏散民眾係為降低災害風險不可或缺的重要方法，但由警戒發布後，明顯偏低的疏散率可知，台日現行以雨量為基礎的土砂災害警戒系統並未受到足夠的信任；亦即，土砂災害警戒發布與否，並非地方政府發布「避難指示」的關鍵因素，也不是地方民眾決定採取自主避難的決定性因子。此外，面對日益複雜的災害型式，現行僅以單一類型災害作為預測目標的土砂災害警戒系統明顯已無法因應。因此，本研究將提出一全新的複合型土砂災害警戒與疏散決策支援系統，除提供合適且詳盡的警戒資訊以提高地方政府及民眾之疏散意願外，亦能以流域尺度之觀點處理山區複合型土砂災害在時間與空間上的複雜問題。

本研究之目的簡單摘述如下：

1. 分析比較台日現有的土砂災害警戒系統，了解其優劣並找出其不足處與其限制，並進一步提出後續防災策略及研究方向之建議。
2. 藉由調查地方政府及災害潛勢區內民眾的疏散決策因子，本研究嘗試找出進行疏散決策時之需求，並提出新一代的土砂災害警戒及疏散決策支援系統應具有那些特性與功能。
3. 發展複合型土砂災害之模擬模式，並據以建立及探索複合型土砂災害之發生機制、過程及後續變化。此結果不僅可作為地區災害防救計畫之驗證平台，並可作為後續開發複合型土砂災害警戒與疏散決策支援系統之基礎。
4. 基於上述相關研究之成果，結合本研究提出的警報發布機制(alert-issuing system)，開發土砂災害警戒及疏散決策支援系統，並以實際的災害案例作驗證。

### 1.3 研究過程

本研究可分為幾個階段，分別以各章節詳述之。各章節之內容概要如下：

第 1 章旨在提供研究之背景及目的，並說明台日現行土砂災害警戒系統之問題與現況。

第 2 章分析了台日現行的土砂災害警戒系統，除比較台日系統在警戒模式(warning model)及警報發布機制(alert-issuing system)之差異與優缺點外，亦提出了評估警戒系統成效的四項指標－警戒命中率(warning hit rate)、警戒誤報率(false alert rate)、警戒涵蓋率(warning cover rate)，以及剩餘避難時間(remaining time for evacuation)。最後，本章藉由實際災害案例的探討，指出現行土砂災害警戒系統之不足處，並提出後續改進的方向。

第 3 章以台灣土石流潛勢溪流所在之縣市、鄉鎮等地方政府防災業務人員及災害潛勢區內之民眾為調查對象，採用成對比較(pair-wise comparison)及階層分析法(analytic hierarchy process, AHP)分析其疏散避難決策因子。結果顯示，對於地方政府而言，不同位階(如縣市及鄉鎮)及不同地理位置(如深山、淺山、都會週邊坡地)的地方政府在進行下達疏散命令時之關鍵決策因子明顯不同；對於民眾而言，有無疏散經驗及不同地理位置之民眾，其疏散決策之關鍵決策因子亦差異甚大。此外，本研究亦由訪談地方政府疏散決策人員，進一步了解如欲發展下一代的土砂災害警戒系統，那些功能或資訊應列為最優先的改進方向，以作為後續開發土砂災害警戒系統之明確目標。

第 4 章說明了大規模崩塌發生多與地質及構造條件有關，其中基岩位置即為因素之一。由於地質構造探勘，大多費時且昂貴，許多研究嘗試由降雨-逕流關係來探索地質構造。本研究使用自行開發的 IRIS 模式模擬降雨、入滲及逕流過程，並預測崩塌發生之時間與規模。結果顯示，如以中間流結束時間作為指標，較能明顯區隔基岩位置與逕流之關係。模擬結果亦指出，崩塌規模主要受土壤剪力強度控制，而土壤保水性及透水性僅影響崩塌時間或崩塌機率。因此，大規模崩塌易發生於土壤摩擦角較小且土層保水性高、透水性較低之地區。本研究亦發現，即使雨場型式不同，同一坡面崩塌時，土層中的水含量幾乎相同，後續應可作為崩塌預警之指標。

第 5 章先介紹了崩塌預測模式可概分為「統計法(statistical model)」及「物理模式法(physically-based model)」二大類，並分析比較其優缺點與使用上之限制。接著，基於第 4 章的研究成果，本研究提出了一個全新的崩塌預測模式－臨界水含量法(critical water content method,  $W_{cr}$  method)，此法係整合了物理模式法及多元迴歸(multiple regressions)，並以斜坡單元(slope unit)為預測標的。由於此法建立於物理模式法的基礎上，因此具有明確的物理意義，同時又因採用之多元迴歸式計算簡便快速，故可應用於流域尺度之各斜坡單元的崩塌預測，除可預測明確的崩塌時間、地點及規模外，亦可用來估計降雨期間坡面上的逕流

量(runoff)。

第 6 章以斜坡單元(slope unit)及單位河道(unit channel)之方式建立了流域模型(basin model)，並整合了降雨-入滲、崩塌預測、崩塌土方運移、洪水預測、土砂流出及河床高程變化預測等相關模組，在流域尺度上建立了全新的複合型土砂災害之模擬模式。此複合型土砂災害之模擬模式除可預測流域內各斜坡單元崩塌發生的時間、地點及規模外，亦已考量崩塌後之土砂可能流入河道造成河床上昇，進而導致排水斷面不足引發淹水等複合型災害等型式，最後並以實際案例之災害調查結果與模擬結果作比對，結果發現模擬結果與實際狀況非常相近。

第 7 章先以第 2 章與第 3 章有關警戒系統改進建議以及避難決策因子調查結果為基礎，確定土砂災害警戒及疏散決策支援系統之發展目標，並整合第 5 章及第 6 章之研究成果，建立了全新的土砂災害警戒及疏散決策支援系統(Rainfall-Induced Multi Sediment Hazards warning system, RIMSH warning system)。此系統可提供坡面崩塌警戒、道路阻斷警戒及洪水水位警戒，每一種警戒均以簡單易懂的方式，以顏色區隔災害風險為黃色警戒及紅色警戒二級，同時並提供明確的災害地點及建議處置措施。本研究使用 2012 年 8 月 14 日發生於日本京都府宇治市志津川流域之災害作為驗證案例。結果顯示，RIMSH 警戒系統於此災害案例，可提供至少 2.5 小時的疏散準備時間，以及至少 1 小時的疏散避難作業時間。同時，RIMSH 警戒系統除可提供民眾簡單、明確、詳細的災害警戒情報外，亦可提供地方政府進行疏散避難指令下達，以及封路、封橋等之決策支援。

第 8 章則依據本研究成果及國內土石流防災警戒與疏散機制之現況，提出具體政策建議。

## 參考文獻

- [1] Casadei, M., Dietrich, W. E., and Miller, N. L. (2003): Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, No. 9, pp. 925-950.
- [2] Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013): An analysis of rainfall-based warning systems for sediment disasters in Japan and Taiwan, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 47-57.
- [3] Chen, Y.S., Kuo, Y.S., Lai, W.C., Tsai, Y.J., Lee, S.P., Chen, K.T., and Shieh, C.L. (2011): Reflection of typhoon Morakot – The challenge of compound disaster simulation, *Journal of Mountain Science*, Vol. 8, No. 4, pp. 571–581.
- [4] Chigira, M., Tsou, C.Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N., Matsuzawa, M.(2013): Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic

- landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, Vol. 201, pp. 479-493.
- [5] Highland, L. M., and Bobrowsky, P. (2008): *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*, U.S. Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia.
- [6] Iverson, R. M. (2000): Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 1897-1910.
- [7] Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., and Glade, T. (2012a): Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review, *Natural Hazards*, Vol. 64, pp. 1925-1958.
- [8] Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., and Keiler, M. (2012b): Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology, *Applied Geography*, Vol. 32, No. 2, pp. 577-590.
- [9] Kondo, S., Kataie, Y., Ota, K. (2012): Disaster Response of Municipal Government at Southern area of Wakayama Prefecture after Flood and Sediment Disaste by Typhoon Talas, *SEISAN KENKYU*, Vol. 64, No. 4, pp. 527-531. (in Japanese)
- [10]Miyata, S., Fujita, M. (2013): Application of X-band Radar and Runoff Model to Debris Flow Frequently Occurred Creeks in Sakurajima Island, *Annuals. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 56, No. B, pp. 457-464 (in Japanese with English abstract).
- [11]Tsutsumi, D., Fujita, M., Hayashi, Y. (2007): Numerical simulation on a landslide due to typhoon 0514 in taketa city, oita prefecture, *Annual Journal of Hydralic Engineering, JSCE*, Vol. 51, pp. 931-936 (in Japanese with English abstract).
- [12]Vieira, B. C., and Fernandes, N. F. (2004): Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity, *Hydrological Processes*, Vol. 18, No. 4, pp. 791-805.
- [13]国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター(2010) , 「土砂災害の警戒避難等における技術的課題について」, 第 23 回(平成 22 年度)砂防研究報告會第 3 分科會。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2010). "Studies of warning system and evacuation for sediment disaster." 23th Sabo research report. (in Japanese))

## 第2章 現行以雨量為指標之土砂災害警戒系統分析

### 2.1 前言

面對土砂災害的威脅，建立警戒系統，即時發布土砂災害警戒，疏散土砂災害潛勢區內的民眾，是降低人員傷亡最直接的方法。國內外已有許多研究嘗試使用不同類型的指標來建立具體可行的土砂災害警戒系統。由於雨量係造成土砂災害的重要誘因，且實務上，雨量資料係較易即時取得的現地監測資訊，故以雨量為警戒指標的土砂災害警戒模式是各類型警戒系統中，最常使用的模式。由於自然環境的影響，日本及台灣每年颱風豪雨期間均飽受土砂災害的威脅，故早已建立以雨量為指標的土砂災害警戒系統，且有多年的實務操作經驗，因此本研究選擇以日本及台灣現行實務操作之土砂災害警戒系統作為探討的案例。

雖然造成土砂災害之誘因包含地震及豪雨，但實務上目前日本及台灣均僅針對因颱風豪雨所造成的土砂災害發布警戒訊息。日本於颱風豪雨期間發布的土砂災害警戒訊息稱為「土砂災害警戒情報」，其範圍則包含崩塌(Slope failure)及土石流(debris flow)，但不包括地滑(Landslide) (Osanai et al,2010)；台灣於颱風豪雨期間發布的土砂災害警戒訊息稱為「土石流警戒區預報」，其範圍僅針對土石流，不包含崩塌及地滑 (陳振宇，2008)。為方便討論起見，本文統稱為土砂災害警戒。

土砂災害警戒模式可概分為直接法(例如使用鋼索檢知器、地聲等，作為警戒指標)，以及間接法(例如使用雨量、地下水位等)。雖然直接法具有準確性高之優點，但考量警戒模式之可操作性及疏散作業所需時間，現階段日本及台灣均以雨量作為警戒指標(國土交通省河川局砂防部，2005；農委會，2010)。目前國內外已有許多研究嘗試建立以雨量為指標的土砂災害警戒模式，例如 Wieczorek and Glade(2005)曾彙整世界各國所發展的土石流警戒之雨量指標模式。惟一個完整的土砂災害警戒系統應包含「警戒模式」及「發布機制」二部份，但現今大部份的研究多僅聚焦於警戒模式的建立，在未考量實務操作(發布機制)可能遇到的各種複雜情境及需求下，多數警戒模式實際應用於颱風豪雨期間之成效有限；且多數警戒模式之驗證僅依據警戒發布時間是否在災害發生之前作為成效評估之標準(國土技術政策總合研究所，2007)，並無法充份檢驗是否滿足地方政府在執行疏避難決策時實際的需求，例如夜間山區疏散不易，能否於入夜前提前發布警戒等。依據日本國土技術政策總合研究所(2010)統計日本 2008 年的資料，由於諸多原因，都道府縣雖已針對所轄市町村的許多地區發布土砂災害警戒，但負責執行疏散避難決策的市町村政府，對於已發布警戒區範圍內之危險區，真正進行疏散避難的比例只有 2.2%，而民眾接獲土砂災害警戒訊息後，採取自主性疏散避難的比例也只有 2.8%，如此偏低的數據顯示現行

的警戒模式在實務上，可能並未獲得充份的信任與認同。

本研究以日本及台灣的土砂災害警戒系統為例，針對現行以雨量為指標的警戒模式及發布機制作完整的分析與探討，並藉由歷年統計數據及災害實例找出現行模式不足之處，同時提出未來可行的改進策略及研究方向。為探討前述這些議題，本研究旨在回答下列問題：

1. 台日現行之土砂災害警戒系統之特性與差異為何？
2. 警戒成效評估應包含那些項目？
3. 影響警戒成效的因素有那些？
4. 現行警戒模式之不足處為何？
5. 未來可行的改進策略及研究方向？

## 2.2 材料及方法

### 2.2.1 日本土砂災害警戒系統簡介

#### (1) 警戒模式

日本早自 1984 年即開始發展以雨量為指標的土砂災害警戒系統，並使用短期雨量指標(Short-term rainfall index)及長期雨量指標(Long-term rainfall index)劃設土砂災害警戒的臨界線(Critical Line, CL)，其中在臨界線左下方為安全區，右上方為危險區。颱風豪雨期間，土砂災害警戒系統定時將實測雨量資料轉換為短期及長期雨量指標，並點繪於圖上形成一連續之蛇曲線(Snake line)，如蛇曲線已超過或即將超過臨界線時，即發布土砂災害警戒(國土技術政策綜合研究所，2001)，如圖 2.1。

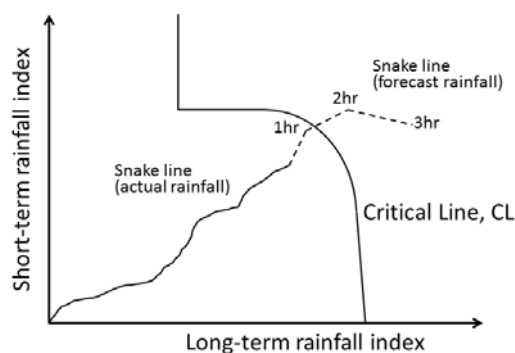


圖 2.1 日本土砂災害警戒模式示意圖

日本歷年短期及長期雨量指標的發展及演變，如表 2.1(Osanai et al,2010)。由於傳統劃設臨界線的方式必須仰賴大量已知發生時間的災例資料，再以人工方式決定臨界線的位置；但在實務上，大部分的地區很難蒐集到足夠的災例資料，且人工劃設臨界線的方式亦無客觀的標準，故日本政府自 2005 年起即開始於部份地區(例如鹿兒島縣等)試用以徑向基底函數網路(Radial Basis Function

Network, RBFN)的方式，並將日本氣象廳自 1988 年起已建置完成的 5km 網格式雷達解析雨量資料(Radar Automated Meteorological Data Acquisition System analytical rainfall, RAMEDAS analytical rainfall)(目前精度已達 1km)轉為 1 小時一筆之 60 分鐘累積雨量及土壤雨量指數作為輸入值，以類神經網路模式直接劃設出臨界線(国土交通省砂防部等，2005；Osanai et al,2010)。由於此種方式具有毋需明確災例資料，即可客觀的定出臨界線的優點。故自 2008 年起，日本全國各都道府縣即已全面使用此種方式劃設土砂災害警戒臨界線，並據以發布土砂災害警戒(Osanai et al,2010)。

表 2.1 日本歷年短期及長期雨量指標的發展演變(Osanai et al., 2010)

Year	Short-term rainfall index	Long-term rainfall index	Method of boundary fitting
1984	60-min accumulated rainfall	AP (half time: 24 h)	By eye
1984	Effective rainfall	AP (half time: 24 h)	By eye
1993	AP (half time: 1.5 h)	AP (half time: 72 h)	By eye
2005	60-min accumulated rainfall	Soil-water index	Radial Basis Function Network

註：AP (antecedent precipitation) 定義為  $AP = \sum \alpha_i R_i$ ，其中  $i$  小時前的折減係數  $\alpha = 0.5^{i/T}$ ， $R_i$  為  $i$  小時前的時雨量， $T$  為半衰期(half time)

## (2) 警戒發布機制

目前日本的土砂災害警戒係由都道府縣的砂防單位及地方氣象台共同發布，發布時間採不定時方式；亦即當預測未來 2 小時後，蛇曲線將超越臨界線時，即發布「土砂災害警戒情報」。發布樣式如圖 2.2(国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部，2005)，發布對象為該都道府縣所轄之市町村。其內容主要是以文字為主，說明警戒範圍包含那些市町村，同時提醒未來 1 至 3 小時最大可能降雨地區及強度等氣象資訊，並輔以簡單圖形說明。此外，各都道府縣的砂防單位亦以網站公開方式，將所轄地區以 5km 網格式呈現各地區的土砂災害危險度等級，以提供市町村執行疏散避難決策人員及一般民眾參考，如圖 2.3 (Osanai et al,2010)。

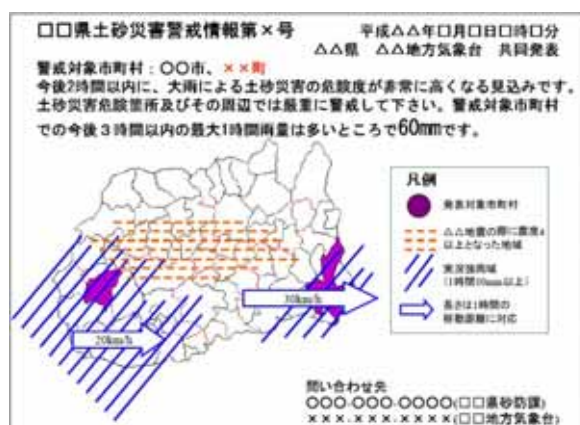


圖 2.2 日本土砂災害警戒情報範例 (國土交通省等，2005)

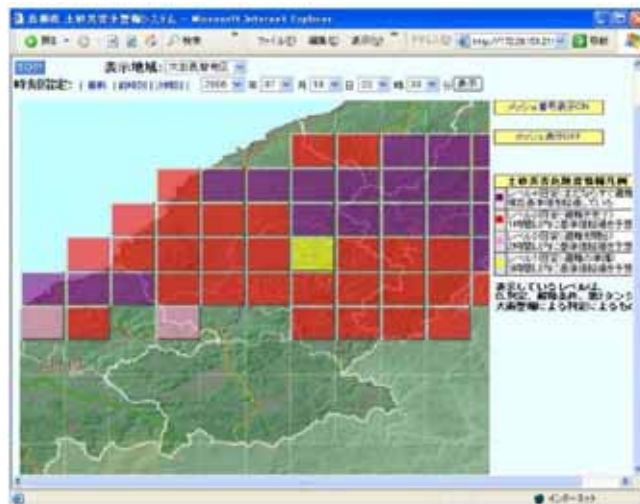


圖 2.3 日本都道府縣之土砂災害警戒系統範例 (Osanai et al., 2010)

### (3) 疏散避難決策機制

依據日本土砂災害防止法(2001)第 7 條，地區的疏散避難決策及發布係由市町村執行。決策時可參考都道府縣所發布的「土砂災害警戒情報」(如圖 2.2)、都道府縣砂防部門早期所訂定的「土砂災害警戒避難基準雨量」、各單位所設置之現地雨量計觀測的結果，以及現地是否已出現災害發生前兆等(國土交通省砂防部，2007)。

## 2.2.2 台灣土砂災害警戒系統簡介

### (1) 警戒模式

台灣以雨量為指標的預警系統，自 1990 年歐菲莉颱風於花蓮縣秀林鄉銅門村造成重大土石流災害後即開始相關研究(詹錢登，2000)，但政府單位正式建立全國性的土石流預警機制始自 2002 年起(陳振宇，2008)。比較特別的是，由於台灣的災害防救法僅明列土石流災害，未含崩塌、地滑等其他坡地災害，故相關的預警機制目前僅針對土石流災害。早期台灣亦參考日本作法，使用短期及長期雨量指標定出每一個鄉鎮(相當於日本的市町村)的土石流災害的警戒臨界線，如蛇曲線超越臨界線時，即發布該鄉鎮為土石流警戒區(陳振宇，2008)。

為滿足地方政府對於警戒區範圍細緻化之需求，以及發展社區及民眾自主雨量觀測與避難機制需要更簡單易懂的參考指標；自 2004 年 12 月起台灣改為以降雨驅動指標(Rainfall Triggering Index, RTI)模式，訂出各鄉鎮的土石流警戒基準值(詹錢登、李明熹，2004)。其計算方式簡述如下：

$$RTI = I \times R_t$$

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i$$



其中  $I$  為 60 分鐘累積雨量(60-min accumulated rainfall)； $R_i$  稱為有效累積雨量(Effective accumulated rainfall)， $R_i$  為前  $i$  日的 24 小時累積雨量(例如  $R_0$  即為目前時間之前的 24 小時累積雨量)， $\alpha^i$  為前  $i$  日的折減係數，其中  $\alpha$  目前採用 0.8。

訂定各鄉鎮警戒指標時，先蒐集該鄉鎮內代表雨量站之歷年降雨資料，配合災例發生時間，以人工方式訂出發生機率約為 70% 之 RTI 值(如圖 2.4)，再將此值除以雨場平均降雨強度 10mm/hr，並取 50mm 為一個級距，即可訂出各鄉鎮之土石流警戒基準值( $R_c$ )。依據 2012 年 4 月公布的結果，目前台灣 159 個轄區內有土石流潛勢溪流的鄉鎮，其土石流警戒基準值之範圍為 200 至 600mm 共 9 個級距，例如高雄市那瑪夏區為 200mm、嘉義縣阿里山鄉為 250mm，花蓮縣玉里鎮為 600mm(水土保持局土石流防災資訊網，2012)。台灣歷年土石流警戒基準值使用範圍之沿革如表 2.2。

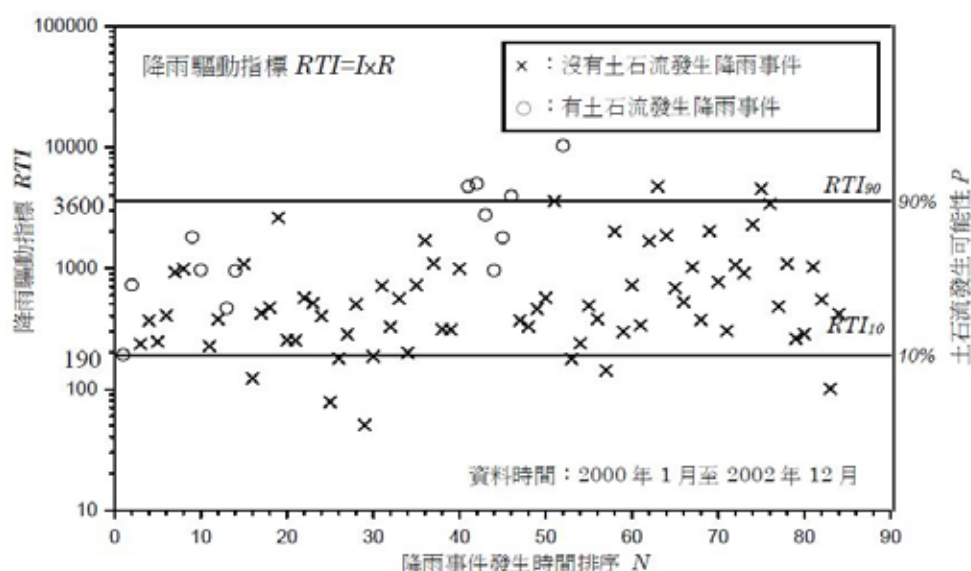


圖 2.4 以降雨驅動指標區分土石流發生可能性示意圖(詹錢登、李明熹，2004)

表 2.2 台灣歷年土石流警戒基準值( $R_c$ )使用範圍

年度	2005	2006	2007~2008	2009	2010~2012	2013~2014
土石流警戒基準值(mm)	200~350	200~450	250~550	250~600	200~600	250~600

警戒分析採用中央氣象局每 10 分鐘定時更新的全台 524 個自動雨量站即時資料(張保亮，2011)，並依集水區、村里界、自動雨量站及土石流潛勢溪流所在位置綜合考量，將每個鄉鎮區分為數個警戒區的範圍，並各有不同的主要參考雨量站及備用參考雨量站，如表 2.3。

表 2.3 全台各地土石流警戒基準值及參考雨量站(範例)

縣市	鄉鎮	警戒區範圍		土石流警戒基準值 (mm)	參考雨量站	
		警戒區座落村里 (土石流潛勢溪流總數)	土石流潛勢溪流數 (條)		代表站 1	代表站 2
宜蘭縣	蘇澳鎮	朝陽里(4)	4	500	南澳	東澳
		南建里(1)、永春里(2)、長安里(1)、永樂里(5)、蘇北里(1)、聖湖里(4)	14		蘇澳	冬山
	三星鄉	集慶村(1)、拱照村(3)、天山村(1)	5	600	三星	寒溪
	大同鄉	寒溪村(2)、復興村(4)	6	550	古魯	寒溪
		崙埤村(3)、松羅村(4)	7		玉蘭	牛鬥
		四季村(6)、南山村(7)	13		南山	思源
		英士村(2)、樂水村(3)	5		牛鬥	太平山
		太平村(2)、茂安村(7)	9		南山	太平山

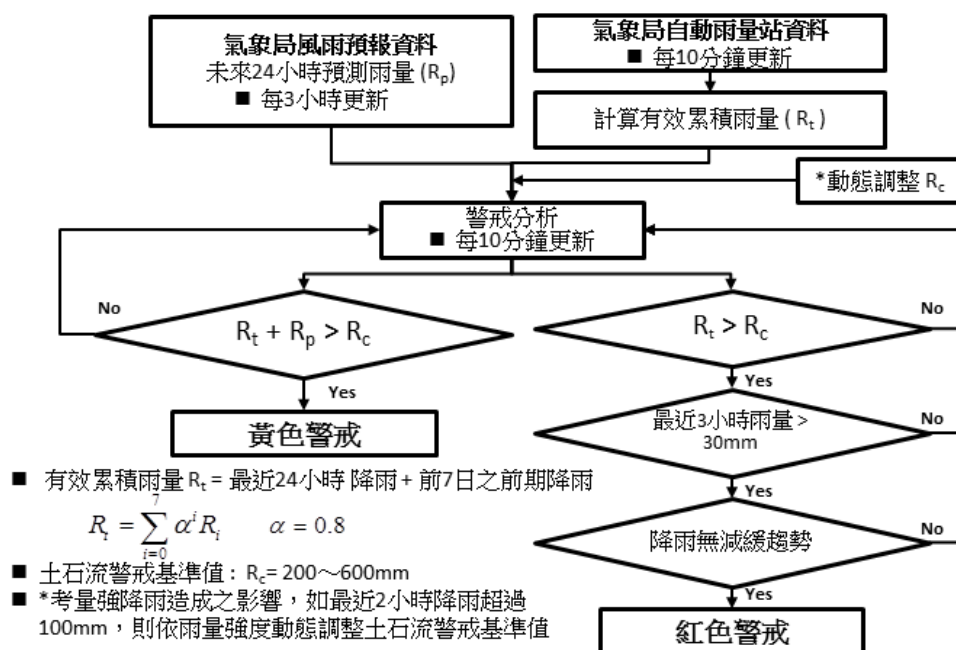


圖 2.5 台灣土石流警戒發布流程

## (2) 警戒發布機制

台灣的土石流警戒目前係由水土保持局統一發布，發布時間為海上陸上颱風警報發布後每日 5、11、17、20、23 時定時發布，必要時則不定時加報；警戒等級分為「黃色警戒」及「紅色警戒」二級，發布流程如圖 2.5。發布之樣式

如圖 2.6，內容主要提供目前已發布的土石流紅色及黃色警戒的範圍以及建議地方政府應進行之相關警戒作為，詳細內容係以表格呈現，並以傳真及網路公開方式發布。此外，前揭資訊亦已整合於 Google Maps 及 Google Earth，將全台所有土石流潛勢溪流之警戒等級以網路方式公開給各地方政府及一般民眾參考(水土保持局，2011)。



圖 2.6 台灣土石流警戒區預報單樣式

### (3) 疏散避難決策機制

依據台灣災害防救法(2000)第 24 條，地區的疏散避難決策及發布係由直轄市、縣（市）政府、鄉（鎮、市、區）公所(以下合稱為地方政府)負責，但實際執行時，往往更仰賴身處現場的村里長。一般而言，地方政府執行疏散避難決策的資訊來源，主要來自中央政府提供的氣象、土石流及淹水警戒，並參考鄉鎮公所或村里長所傳回來的現地狀況(陳亮全等，2008)。

#### 2.2.3 土砂災害警戒模式成效評估方式

由於土砂災害警戒的成效會直接影響地方政府之疏散避難決策，良好的土砂災害警戒系統不僅要能在災害發生前及時發布預警，也不能因為過於保守，頻繁發布後卻沒發生任何災害，造成執行疏散避難決策的地方政府及當地民眾對警戒機制失去信心。一個完整的土砂災害警戒系統，包含警戒模式及發布機制二部份。其中警戒模式之成效評估方式，本研究參酌日本目前採用的「捕捉率」及「空振り率」(日本國土交通省國土技術政策總合研究所，2007)，並考量疏散所需時間(Lindell and Prater, 2007)及災害實際發生與預測位置之差異，

建議使用命中率(Warning Hit Rate, WHR)、誤報率(False Alert Rate, FAR)、涵蓋率(Warning Cover Rate, WCR)及剩餘疏散時間(Remaining Time for Evacuation, RTE)等四項指標來檢視。命中率係評估警戒發布時間是否在災害發生之前，亦即為時間域之成效評估；誤報率則是檢視「假警報」(已發布警戒，但未發生任何災害)是否過於頻繁的依據，亦即地方政府及民眾對於警報信任度的指標；涵蓋率則是評估在同一場颱風豪雨事件中所發出的土砂災害警戒範圍，是否能涵括所有土砂災害所在的空間位置，亦即空間域之成效評估；而剩餘疏散時間則是指自警戒發布後至災害發生，可供民眾進行疏散避難的時間，亦即警戒有效性的指標。

為便於比較日本與台灣在土砂災害警戒模式的成效，本研究對於命中率及誤報率，採用與日本國土交通省國土技術政策總合研究所 2007 年訂定之「土砂災害警戒情報運用結果檢證手法(案)」內「捕捉率」及「空振り率」一致之定義方式。其定義及計算方式如下：

**(1) 土砂災害警戒命中率(Warning Hit Rate, WHR)  $WHR = DEAA/DE$**

**(2) 土砂災害警戒誤報率(False alert rate, FAR)  $FAR = WTND/WT$**

其中 DE 為土砂災害總件數；DEAA 為土砂災害發生在警戒區內，且發生時間晚於或等於土砂災害警戒發布時間之土砂災害總件數；WT 為已發布土砂災害警戒的鄉鎮(市町村)總數；WTND 為已發布土砂災害警戒，但在該次颱風豪雨事件中，實際未發生土砂災害的鄉鎮(市町村)總數。

此外，因部份土砂災害可能發生在土砂災害警戒發布之範圍外，為了解其比例與已發布土砂災害警戒區內之警戒命中率，以及警戒發布後是否有足夠的通報及疏散時間，本研究另定義：

**(3) 土砂災害警戒涵蓋率(Warning Covering Rate, WCR)  $WCR = DEA/DE$**

**(4) 警戒區內警戒命中率(Warning Hit Rate in Warning Areas, WHRWA)  
 $WHRWA = DEAA/DEA$**

其中 DEA 為位於土砂災害警戒區內的災害件數。圖 2.7 為前揭各項指標之定義及計算範例。

**(5) 疏散剩餘時間(Remaining time for evacuation, RTE)**

自警戒發布至災害發生前之時間差，本研究定義為疏散剩餘時間(Remaining time for evacuation, RTE)，依據前揭警戒命中率之定義， $RTE \geq 0$  者即視為成功之警戒發布。但實務上，由於警戒發布後，自警戒訊息之傳遞至民眾完成疏散，須有一定準備時間，本研究定義為「疏散最短剩餘時間(Shortest remaining time for evacuation, SRTE)」，亦即警戒發布的時間必須比災害發生時

間提早至少一個 SRTE，才是有效的預警。不同地區依其交通狀況及人口屬性不同，其 SRTE 值並不一致。依據 Lindell and Prater(2005)針美國德州及路易斯安那州有關颶風來襲民眾疏散的研究，民眾自決定避難到離開住家平均費時 3 小時 16 分。台灣也曾針對土石流潛勢區民眾疏散所需時間作過相關調查。白仁德(2008)針對山區弱勢族群調查，發現實際避難行為準備平均時間為 2 小時 40 分，疏散 90%至少須 3 小時，完全疏散至少需 7 小時；林建元(2007)針對山區商業人口之調查指出，要達到 95%以上的撤離率，需時 8 小時以上；吳杰穎(2009)針對南投縣水里鄉及新竹縣尖石鄉的民眾調查結果，其平均疏散時間分別為 2.62 小時及 3.83 小時；綜合以上結果，警戒發布後至災害發生時間，至少應預留 3 至 8 小時，似較為恰當。本研究建議取 SRTE 為 3 小時。

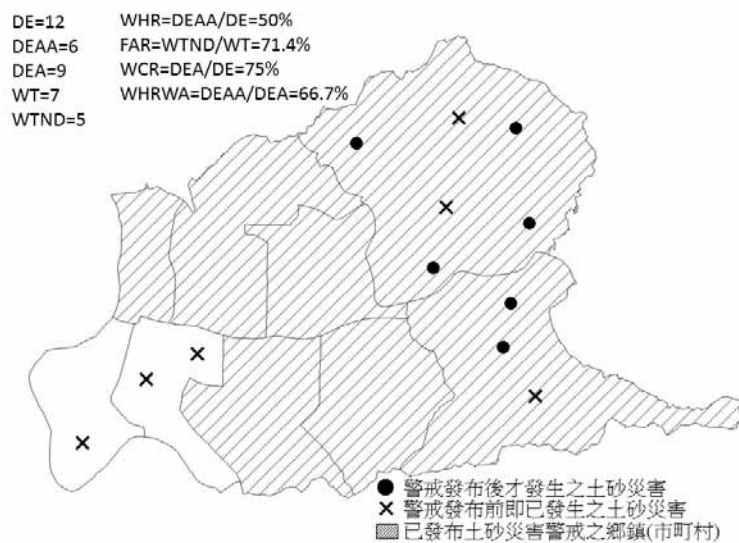


圖 2.7 土石災害警戒模式成效評估指標範例

#### 2.2.4 土石災害警戒發布機制評估方式

由於土石災害警戒之發布機制多涉及國家之防災體系及政府組織運作，較不易有一致之定量評估標準，故本研究採用定性之比較方式進行探討。其項目包含警戒發布之單位、對象、型式、內容、發布頻率及傳達方式等。

#### 2.2.5 疏散避難率評估方式

依據日本及台灣的災害防救體系，疏散避難的決策及執行層級，在日本為市町村，在台灣則為鄉鎮市區公所，故本研究針對土石災害警戒發布後之疏散避難率，係以鄉鎮為評估單元，其定義如下：

##### (1) 疏散避難率(Evacuation Rate, ER) $ER=EWT/WT$

其中，EWT 為已發布土石災害警戒之鄉鎮中，已執行避難勸告(含強制撤離)的鄉鎮數。

## 2.3 研究發現

### 2.3.1 台日土砂災害警戒系統評估

#### 1. 台日土砂災害警戒系統及疏散避難決策機制比較

台灣與日本之土砂災害警戒系統及疏散避難決策機制之比較如表 2.4。其重要差異說明如下：

- (1) 警戒模式：日本採用 RBFN 法定義臨界線 CL 較為客觀，毋需人工判定，且在無歷史災例地區，亦能直接以歷史雨量資料定出 CL。在警戒觀測指標方面，日本使用網格式雷達解析雨量資料，可提高雨量資料的空間解析度，以降低地面雨量站密度不足的問題。台灣目前雖亦有網格式雷達解析雨量資料（即中央氣象局之 QPESUMS 系統），惟限於雷達涵蓋率不足及地形遮蔽等問題，其精度於山區尚無法達到實用階段，故仍以自動雨量站之實測雨量作為警戒觀測指標。
- (2) 警戒發布機制：日本係由都道府縣針對其所轄市村町，採不定時方式發布警戒，並提供 5km 網格式土砂危險度等級資訊（奈良縣已提供 1km 網格式，<http://www1.nara-saboinfo.jp>），可提供市村町了解那個區域土砂災害發生的機率較高。台灣係由中央政府（水土保持局）直接對縣市及鄉鎮發布警戒，發布的單元以村里為單位，並提供以 Google Maps 及 Google Earth 為底圖的警戒發布圖，並採每日定時（5、11、17、20、23 時）發布，必要時另予加報的方式發布警戒；此種定時發布機制 對各級防災單位、媒體及一般民眾而言，較利於主動掌握最新警戒資訊，並降低新舊警戒資訊可能造成混淆之情形。
- (3) 疏散避難決策體制：日本之疏散避難決策及發布係由市町村執行，其避難指示依命令強度等級，由弱至強依序為「避難準備情報、避難勸告、避難指示」三級；台灣則是縣市及鄉鎮均可執行疏散避難決策，惟實務上，縣市仍多會尊重鄉鎮的意見。台灣原於土砂災害避難指示上僅有「避難勸告、強制撤離」二級，但於 2009 年莫拉克颱風造成中南部山區重大災情後，另針對已劃定為「莫拉克颱風災區特定區域」或「安全堪虞地區」等高災害危險潛勢地區，採取預防性疏散避難，亦即於陸上颱風警報發布後，於尚無風雨之情況下，即先行撤離高災害危險潛勢地區民眾（行政院農業委員會，2010）。

表 2.4 日本與台灣之土砂災害警戒系統及疏散避難決策機制之比較

項目		日本	台灣	比較
警戒模式	定義 CL 方式	RBFN	RTI	RBFN 方式較客觀，毋須人工判定；且使用歷史雨量紀錄直接定出 CL，無災例地區亦可使用。
	警戒指標	60 分鐘雨量、土壤雨量指數	有效累積雨量、最近 3 小時雨量	日本方式為雙指標並重，台灣方式以有效累積雨量為主，最近 3 小時雨量為輔
	使用雨量資料類型	1km 網格式雷達解析雨量資料及未來 1~6 小時短期預報雨量資料	自動雨量站即時雨量資料(10 分鐘更新)、颱風未來 24 小時預估雨量	使用網格式雷達解析雨量資料，可提高雨量分布的空間解析度，減少地面雨量站密度不足的問題
	CL 檢討更新單位	都道府縣	中央政府(水土保持局)	-
警戒發布機制	警戒發布單位	都道府縣	中央政府(水土保持局)	-
	警戒發布對象	市町村	縣市政府、鄉鎮公所	-
	警戒發布條件	預測未來 1~3 小時蛇曲線將超過 CL	有效累積雨量(mm)已超過土石流警戒基準值，同時最近 3 小時雨量已大於 30mm，且後續仍有持續降雨趨勢	日本發布條件較為標準化，利於自動化；台灣之發布條件尚須較多之人為經驗判斷
	警戒發布週期	不定時	每日 5、11、17、20、23 時定時發布，必要時另予加報	定時發布可使各級防災單位、媒體及民眾較能主動掌握最新訊息
	警戒發布等級	土砂災害警戒情報(僅一等級，但 5km 網格會另以 4 種顏色表示該網格範圍內土砂災害風險，如圖 3)	黃色警戒、紅色警戒(二等級)	以顏色作為警戒等級，較為直覺
	警戒發布單元	市町村	村里	-
	警戒傳達方式	電話、傳真、簡訊、網路	電話、傳真、簡訊、網路、土石流防災專員	-
	警戒發布格式	文字為主，圖形為輔	表格為主，文字為輔	-
	警戒範圍細部資料呈現方式	5km 網格危險度等級資料	Google Maps 及 Google Earth 呈現	以 5km 網格之危險度等級方式呈現，可顯示不同區域之危險等級差異性；以 Google Maps 方式呈現較直覺
	警戒適用範圍	土石流、淺層崩塌	土石流	-
避難決策體制	疏散決策單位	市町村	縣市、鄉鎮	-
	疏散指示等級	避難準備情報、避難勸告、避難指示	危險區預防性疏散、避難勸告、強制撤離	-

## 2. 現行土砂災害警戒模式成效評估

### (1) 日本土砂災害警戒發布成效評估

依據日本國土技術政策總合研究所之統計，平成 20 年(2008 年)計發生土砂災害 669 件，其中未在土砂災害警戒範圍內，卻發生的土砂災害計有 192 件(多為零星崩塌事件)。當年度歷次颱風豪雨事件，已發布土砂災害警戒情報之市町村數目累計有 1129 個(如有某市町村在三場不同颱風豪雨事件中，均曾被發布土砂災害警戒，則其數目應累計為 3)，其中有發生災害的市町村數有 138 個。在土砂災害警戒區內發生的 477 件土砂災害中，其發生時間在土砂災害警戒情報發布之後者計有 356 件，故：

土砂災害警戒命中率  $WHR=DEAA/DE=356/669=53.2\%$

土砂災害警戒誤報率  $FAR=WTND/WT=(1129-138)/1129=87.8\%$

土砂災害警戒涵蓋率  $WCR=DEA/DE=477/669=71.3\%$

警戒區內警戒命中率  $WHRWA=DEAA/DEA=356/477=74.6\%$

### (2) 台灣土砂災害警戒發布成效評估

台灣目前之土砂災害警戒(土石流警戒區預報)之對象雖然只針對土石流災害，但為利於比較，以下統計仍納入所有之土砂災害。依據水土保持局 2009 年土石流年報之統計資料，2009 年水土保持局調查之重大土石災例計 127 件，扣除單純為淹水災害之事件後，土砂災害共有 117 件(113 件發生於莫拉克颱風)，其中未在土石流警戒區範圍內，卻發生的土砂災害計有 26 件，其原因為該村里未曾劃定有土石流潛勢溪流，故並不在警戒機制監控的範圍內。當年度歷次颱風豪雨事件，已發布土石流警戒預報之鄉鎮數目累計有 72 個，其中有發生土砂災害的鄉鎮數有 30 個。在土砂災害警戒區內發生的 91 件土砂災害中，其發生時間在土砂災害警戒發布之後者計有 85 件，故：

土砂災害警戒命中率  $WHR=DEAA/DE=85/117=72.6\%$

土砂災害警戒誤報率  $FAR=WTND/WT=(72-30)/72=58.3\%$

土砂災害警戒涵蓋率  $WCR=DEA/DE=91/117=77.8\%$

警戒區內警戒命中率  $WHRWA=DEAA/DEA=85/91=93.4\%$

若以近五年(2007~2011 年)水土保持局土石流年報之資料統計，土砂災害警戒命中率平均為 45.4%，土砂災害警戒誤報率平均為 75.2%，土砂災害警戒涵蓋率平均為 62.6%，警戒區內警戒命中率平均為 72.6%，詳如表 2.5

### (3) 警戒誤報率對疏散率之影響

依據台日近年來之土砂災害警戒精度之統計結果可知，警戒之命中率約為 5 成，但誤報率卻高達 7 成 5 以上。以日本 2008 年為例，其誤報率高達 87.8%，亦即發布土砂災害警戒之市町村中，僅有 1 成左右會真正發生土砂災害。事實上，如此偏高的誤報率確實不利於市町村政府及一般民眾對土砂災害警戒情報之信任度(國土交通省河川局砂防部，2007；天野 篤、高山陶子，2006)。依據調查，2008 年日本發布土砂災害警戒的地區，僅有 2.2%的市町村政府有發布避難勸告，甚至其中超過 8 成是在已傳出災情後才發布；同時也僅有 2.8%的地



區，民眾曾依據土砂災害警戒情報進行自主避難(日本國土技術政策總合研究所，2010)。

相較於日本，台灣在土砂災害警戒發布地區之疏散率較高(如表 2.5)，其原因在於中央災害應變中心每次颱風豪雨期間，均會強制要求地方政府必須落實於土石流警戒地區執行疏散之故。

表 2.5 台灣及日本土砂災害警戒成效

	已發警戒之鄉鎮數 (WT)	已發警戒，但未有災害之鄉鎮數 (WTND)	土砂災害警戒誤報率 (FAR=WTND/WT)	土砂災害總件數 (DE)	警戒區內災害件數 (DEA)	發生時間晚於警戒時間之災害件數 (DEAA)	土砂災害警戒命中率 (WHR=DEAA/DE)	土砂災害警戒涵蓋率 (WCR=DEA/DE)	警戒區內警戒命中率 (WHRWA=DEAA/DEA)	已發警戒且已執行疏散之鄉鎮數 (EWT)	避難勸告率 (ER=EWT/WT)
Japan (2008)	1129	991	87.8%	669	477	356	53.2%	71.3%	74.6%	25	2.2%
Taiwan (2009)	72	42	58.3%	117	91	85	72.6%	77.8%	93.4%	46	63.9%
Japan* (Ave. in 2008~2010)	2965	2475	83.4%	2482	-	1460	58.8%	-	-	291	9.8%
Taiwan (Ave. in 2007~2011)	310	233	75.2%	262	164	119	45.4%	62.6%	72.6%	160	51.6%

\*統計資料來源：岡本敦等(2012)

### 3. 影響土砂災害警戒成效因素之探討

為探討實務操作面上可能影響土砂災害警戒成效的因素，本研究分析台灣近 5 年(2007~2011)統計資料，大致可看出幾項趨勢：

- (1) 災害規模(件數)的大小，與警戒命中率、誤報率及涵蓋率有相當程度的關連(如圖 2.8)。亦即現行以雨量為基礎的警戒模式，對於大規模災害有較佳之適用性，例如近年來災害規模最大的莫拉克颱風發生之 2009 年，全年土砂災害警戒命中率高達 72.6%，涵蓋率 77.8%，誤報率只有 58.3%；反之，如當年度較無大規模災情時，相關警戒精度表現則明顯較差。
- (2) 由於 2009 年莫拉克颱風造成的影響，地方政府對於警戒地區的疏散比例，有增加的趨勢(如圖 2.8)，但是否會隨離受災經驗間隔愈久而降低，尚待持續觀察。
- (3) 由於近年來中央政府強力要求已發布警戒的地區，地方政府務必執行疏散，反而對於負責發布警戒的水土保持局形成誤報率必須降低的壓力。由圖 2.8 可看出，誤報率近年似有呈現下降趨勢，但似乎也造成命中率有同時下降的傾向。以 2010 及 2011 年為例，警戒涵蓋率雖均有 6 成以上，但在降低誤報率的前提下，往往警戒發布決策過為謹慎，反而造成警戒發布後剩餘疏散時間不足，甚至警戒發布時間晚於災害發生時間，變成無效的警戒，形成涵蓋率提昇，但命中率反而大幅下降之不合理情形。
- (4) 由於台灣目前的土砂災害警戒發布之對象，僅包含土石流災害，故警戒只會

針對已劃設有土石流潛勢溪流的鄉鎮及村里發布，因此如將崩塌、地滑等災害一併納入警戒精度的統計時，便會造成警戒涵蓋率偏低的現象。惟自 2008 年起水土保持局持續調查及增加土石流潛勢溪流的劃設，警戒涵蓋率已有增加之趨勢，亦即災害潛勢資料調查之完整性，對於警戒發布精度之提昇有一定程度的助益。統計資料亦顯示，台灣目前使用的警戒模式雖然僅針對土石流，但對於較大規模之崩塌災害預測仍有一定的參考價值；惟未來如要真正應用於實際作業，須先完成崩塌潛勢區及其影響範圍的劃設。

- (5) 比較颱風及豪雨二種不同型態的災害事件，可發現二者之誤報率相近，但整體命中率相差 4 倍，涵蓋率相差 2.2 倍，警戒區內之命中率也相差 1.8 倍，如表 2.6。事實上，台灣現行土砂災害警戒模式，對於颱風及豪雨事件並無二致，其警戒成效表現相差甚鉅之主因在於颱風期間，中央氣象局會定時提供總雨量及未來 24 小時預測雨量資料，但豪雨事件時則否。而這些用以評估後續是否仍有降雨趨勢的重要資訊，係為水土保持局決策是否發布土石流警戒的重要環結之一(如圖 2.5)。亦即，預測雨量資訊之完整性，亦會影響土砂災害警戒精度。
- (6) 由表 2.6 之統計亦發現，颱風及豪雨事件中，土砂災害警戒區內地方政府執行疏散之比例亦相差 2.4 倍，其主要原因為多數豪雨事件時，中央災害應變中心並未成立，在中央未強力主導地方政府執行疏散作業時，疏散比例便明顯降低。

由台灣近 5 年的警戒統計資料可看出，災害規模的大小、警戒發布人員的決策傾向、災害潛勢資料之完整性，以及預測雨量資訊完備與否，可能影響現行土砂災害警戒模式之預報成效。而欲提高警戒區內疏散的比例，上級機關的強力主導，可能是較有效的方式。

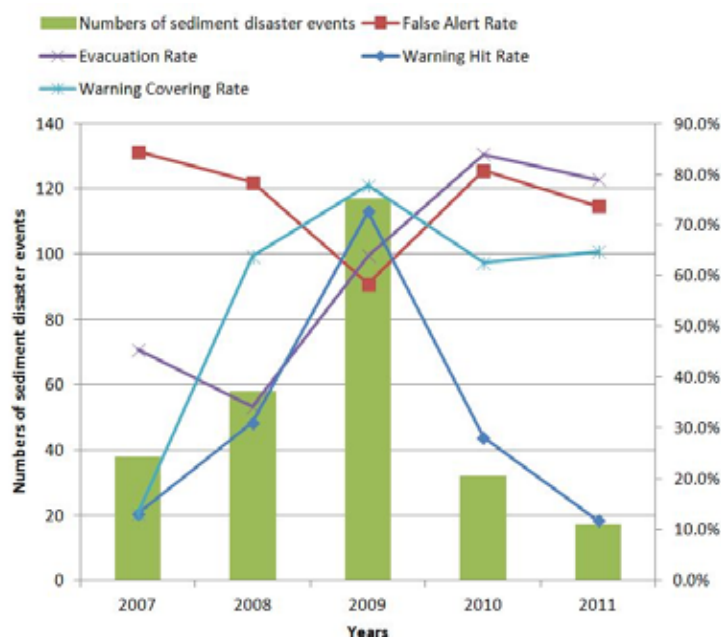


圖 2.8 台灣(2007~2011)歷年土砂災害件數及警戒成效

表 2.6 台灣 2007~2011 年颱風及豪雨事件之土砂災害警戒精度比較

	已發警戒之鄉鎮數 (WT)	已發警戒, 但未 有災害之鄉鎮數 (WTND)	土砂災害警戒誤報率 (FAR= WTND/ WT)	土砂災害總件數 (DE)	警戒區內災害件數 (DEA)	發生時間晚於警戒時間之災害件數 (DEAA)	土砂災害警戒命中率 (WHR= DEAA/ DE)	土砂災害警戒涵蓋率 (WCR= DEA/DE)	警戒區內警戒命中率 (WHRWA=DEAA/ DEA)	已發警戒且已執行疏散之鄉鎮數 (EWT)	避難勸告率 (ER= EWT/ WT)
颱風	272	205	75.4%	223	152	114	51.1%	68.2%	75.0%	222	81.6%
豪雨	38	28	73.7%	39	12	5	12.8%	30.8%	41.7%	13	34.2%

#### 4. 警戒發布時機適當性之評估

##### (1) 災害發生時間分析

災害發生的時間會直接影響疏散之難易程度，依據山區的現況及民眾的作息時間，如災害發生時間為夜間 21 時以後至隔日 7 時以前，本研究定義為「不易疏散時段」(Difficult period of evacuation, DPE)。在此時段內，不論是警戒訊息的通報與傳達，或是要實際執行疏散避難工作，實務上將變得十分困難。依據台灣近 5 年(2007~2011)統計資料(如圖 2.9)，土砂災害事件發生在不易疏散時間內的比率为 45.9%，如只統計颱風期間造成的土砂災害事件，其比例更高達 50%。如以有人員死亡失蹤之案例統計，發生於不易疏散時段內之比例更高達 52.2%。

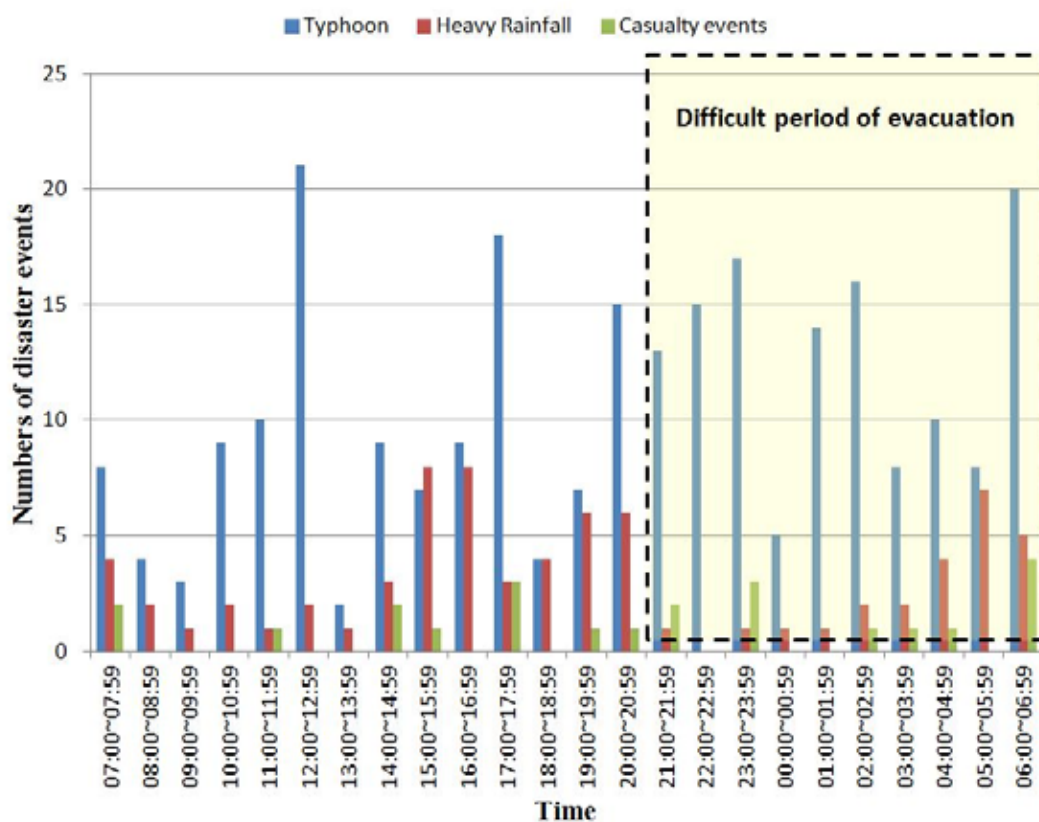


圖 2.9 台灣(2007~2011)土砂災害事件發生時段統計圖

## (2) 警戒發布頻率評估

自 2002 年台灣水土保持局開始發布土石流警戒區預報起，一直比照日本採用不定時預報方式提供警戒訊息，亦即當雨量超過 CL 後即發布警戒。不定時預報方式雖然即時，但也陸續造成一些問題。例如夜間發布不利疏散執行、地方政府及新聞媒體無法確認目前手上掌握的是否為最新的資訊、甚至警戒更新的速度超過電視跑馬燈更新的頻率或是警戒訊息向下傳遞的速度等等不合理現象。日本方面，天野 篤及高山陶子(2006)也曾針對類似的問題提出討論。為解決上述問題，水土保持局自 2009 年起，配合中央氣象局於颱風警報期間，每日 4、10、16、22 時發布之預估未來 24 小時及颱風總雨量預報，將土石流警戒區預報改為定時發布制(每日 5、11、17、20、23 時)，必要時才會採取加報方式不定時更新警戒訊息。

## (3) 疏散剩餘時間(Remaining time for evacuation)評估

依據台灣 2007~2011 年的資料統計，台灣土砂災害警戒發布後疏散剩餘時間(RTE)平均為 21.6 小時，日本 2008 年的資料統計平均為 4.4 小時，均已超過建議之疏散最短剩餘時間 SRTE (3 小時)。其差異主要在於日本採不定時發布，台灣為定時發布(每日 5、11、17、20、23 時)，原則上除實際雨量已達警戒發布標準者外，如預估未來 3~6 小時內會達警戒發布標準者，亦會提前發布；且台灣之發布模式另考量夜間不易疏散時段(DPE)之問題，故於 17 時、20 時發布之土石流警戒區預報均會針對預估未來 12 小時內(夜間)有機會達警戒發布標準者，提前於此二時段發布紅色警戒。

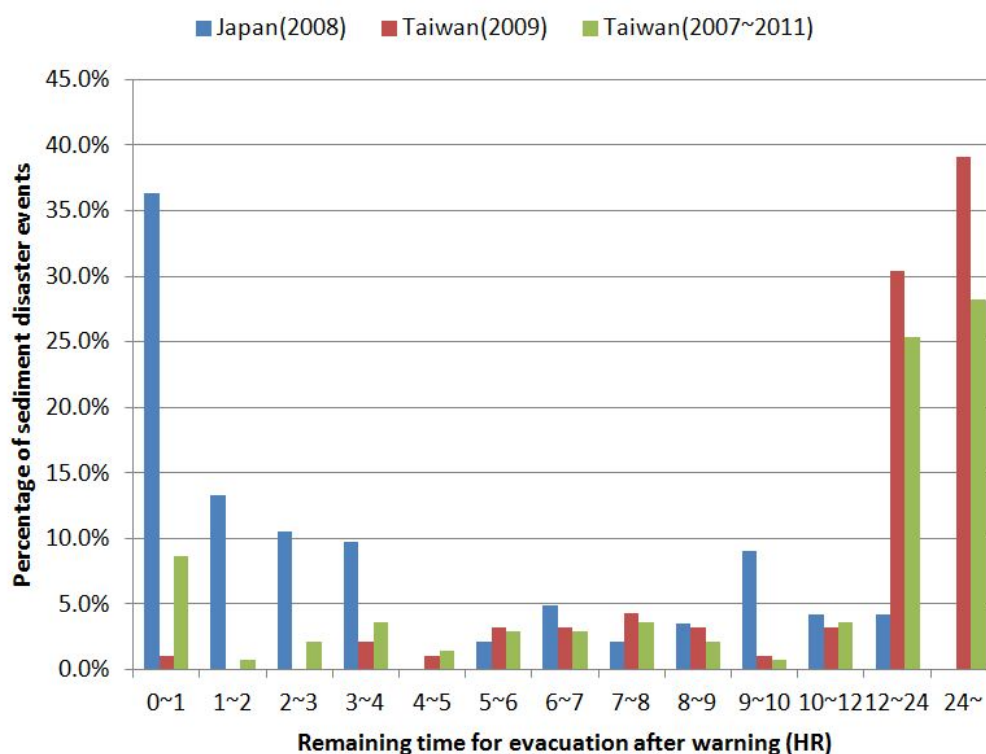


圖 2.10 台日土砂災害警戒發布後疏散剩餘時間分布圖

由圖 2.10 可看出，台灣的警戒發布超過 5 成以上會提前於災害發生前 12 小時以上發布，亦即有較充份的時間可進行疏散避難，日本部份則是 5 成左右是在災害前 2 個小時內發布，相對而言，是否有足夠的時間進行通報及疏散，特別是在山區交通及通訊狀況不佳，且人口多老弱婦孺的情況下，值得探討。此外，目前日本採用的警戒命中率計算方式，並未考量警戒通報及疏散避難所需時間，似不甚合理，宜調整為剩餘疏散時間大於 1 個 SRTE 以上者方為有效之警戒。

### 2.3.2 以莫拉克颱風土砂災害警戒發布實例探討

#### 1. 莫拉克颱風災情概況

2009 年莫拉克颱風係近年來造成台灣最大規模的天然災害，其降雨量具有以下特性：

- (1) 降雨延時長：自 8 月 6 日至 11 日，總降雨延時超過 100 小時。
- (2) 降雨強度高：最大時雨量超過 130mm/hr。
- (3) 累積雨量大：嘉義縣阿里山站累積雨量高達 2965mm。
- (4) 涵蓋範圍廣：台灣近 1/5 的地區其降雨量超過 1000mm 以上。

如此大範圍、高強度與巨量的降雨，造成台灣中南部及東南部地區大規模的水災及各類型坡地災害，死亡人數高達 699 人。此外，山區崩塌 59,490 公頃，集水區崩塌率 5.52%，更甚於 1999 年集集大地震時的 4.70%(行政院莫拉克颱風災後重建推動委員會，2010)。

#### 2. 小林村災例說明

位於高雄縣甲仙鄉的小林村，是莫拉克颱風期間受災最嚴重的地區之一，在 24 小時內，接連遭受淹水、土石流、大規模深層崩塌、堰塞湖、堰塞湖潰決等多重複合型災害。其中 8 月 9 日上午 6 時發生於獻肚山的大規模深層崩塌更直接掩埋小林村 9~18 鄰聚落，造成 462 人死亡。

莫拉克颱風前，水土保持局設定小林村之土石流警戒基準值為 450mm，並依土石流警戒發布程序於 8 月 7 日 17 時發布土石流黃色警戒，7 日 23 時發布紅色警戒。8 日 15 時村內開始淹水，19 時 8 號橋遭土石流沖毀，至此，小林村 9-18 鄰聚落對外交通已完全中斷。9 日 6 時發生大規模深層崩塌埋幾乎完全埋沒小林村 9-18 鄰，包含過去幾年已有數次實際避難經驗的避難處所—小林國小。崩塌後的土石阻斷旗山溪，形成堰塞湖，並於 9 日 7 時潰決(Chen et al,2011)。

#### 3. 現行雨量警戒模式於小林村災例之檢討

依據小林村災害發生之時間序列，自土石流紅色警戒發布至 8 號橋遭土石流沖毀，小林村形成孤島，期間長達 20 小時，足以進行警戒訊息通報及疏散避難工作，故台灣現行以雨量之警戒模式，確實已達成事前提供警戒訊息之功能。惟此案例最終仍造成 462 人死亡的重大災情，似乎顯示台日現行以雨量為基礎的警戒模式，仍有值得討論之不足處：



- (1) 台日現行之警戒模式，只能提供降雨期間某個區域範圍內土砂災害發生的潛勢高低，無法明確指出那一處坡面或是那一處集水區致災機率較高，亦無法明確指出可能發生那一種類型的土砂災害，不利於地方政府執行疏散避難工作。
- (2) 台日現行警戒模式，係以雨量超過事前設定之CL作為警戒發布基準，但是對於雨量大小與災害規模之關係，並無法提供相關資訊。換言之，即使已預知雨量為 1000mm 或是 2000mm，現行警戒模式並無法模擬其差異及危害程度。
- (3) 依據莫拉克颱風的統計資料，約有 60.9%的土砂災害發生於不易疏散的時段(晚上 21 時至隔日 7 時前，如圖 2.11)，故警戒發布時機必須有人夜前提早發布之機制，且須預留足夠的疏散剩餘時間。
- (4) 土砂災害警戒模式只能提供災害發生之可能性，對於實際疏散避難之決策尚須考量其他問題，例如山區交通及通訊狀況、避難處所的位置與距離、危險區內民眾的行動能力與耐災能力等；惟較精確且能提供較長時間預測能力(例如未來 12 小時)的土砂災害警戒模式，將能有效提昇地方政府疏散避難決策之能力，降低人命傷亡的可能性。

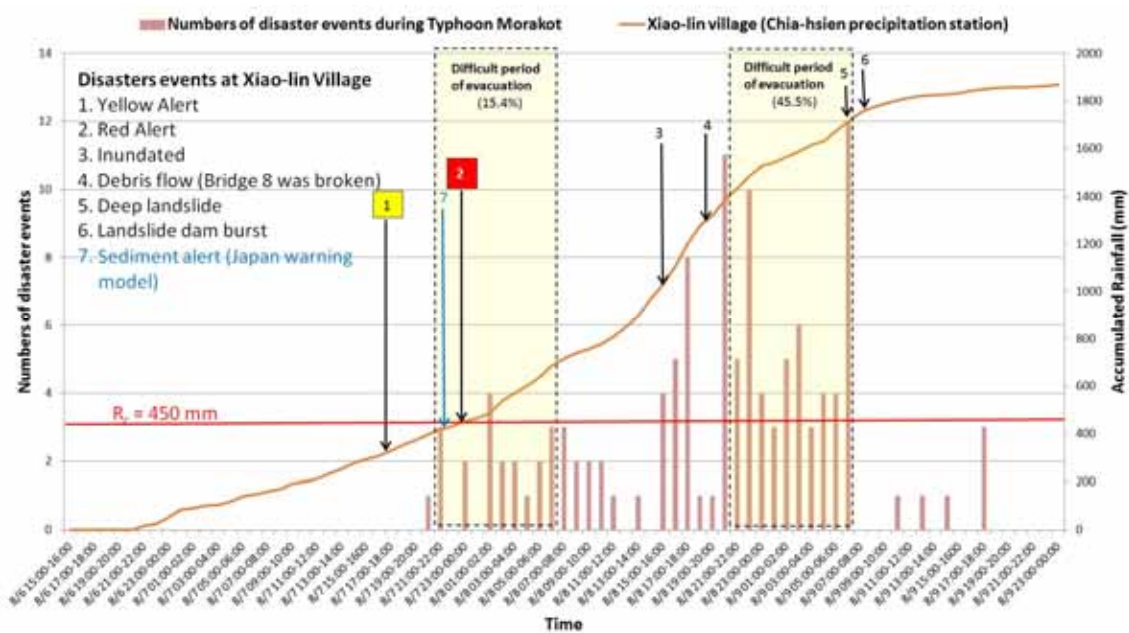


圖 2.11 莫拉克颱風期間重大土砂災害發生時段及小林村雨量及災害事件序列

## 2.4 小結

台日現行的雨量警戒模式，經過多年來的實證，確實對於土砂災害預警上具有一定功效，但因單純只採用雨量作為警戒發布之指標，在警戒之命中率、

誤報率及涵蓋率上仍有不足；同時對於災害可能發生的明確地點、災害可能發生的類型，以及災害可能發生的規模亦無法有效掌握。

本研究已就警戒模式、警戒發布機制及避難決策體制上，分別比較台灣及日本土砂災害警戒系統上的異同之處。在警戒模式上，日本採用 RBFN 劃定 CL 之方式且有減少人工判斷及依賴災例資料的優點，且在雨量資料上，日本採用網格式雷達解析雨量資料，亦能提高雨量資料之空間解析度，降低雨量站密度不足的問題。在警戒發布機制上，台灣採用黃色及紅色作為警戒發布的等級，對於一般民眾較易理解；且台灣採用的定時預報機制，較能解決因資料更新頻率不同，造成新舊資訊混淆的問題。

本研究也由實務面上，分別考量時間域、空間域、信心度及有效度等相關面向，具體提出包含命中率、涵蓋率、誤報率及剩餘疏散時間等四項土砂災害警戒模式的成效評估指標，未來可作為警戒模式改進及檢討方向的評估依據。同時經由台灣近 5 年的警戒資料發現，災害規模、警戒發布人員的決策傾向、災害潛勢資料以及預測雨量資訊的之完整性，均可能影響現行土砂災害警戒模式之成效。一般而言，災害規模愈大，命中率及涵蓋率均會提昇，誤報率亦會下降，而土砂災害潛勢圖劃設之完整性，亦會影響涵蓋率。研究數據也顯示，警戒發布人員企圖降低誤報率，而將警戒發布時機延後時，可能也會降低命中率。此外，由颱風及豪雨事件之警戒成效來看，氣象單位提供之預測雨量資訊，對於警戒發布之決策者而言，影響甚鉅。

對於提高土砂災害警戒區內之疏散比例方面，以台灣近年來的經驗可知，中央政府的強力主導可能是較有效而直接的方式。另一方面，由於警戒資訊之傳達與通報及疏散避難均需一定之時間，故警戒發布至災害發生前之剩餘疏散時間(RTE)亦為警戒成功與否的重要關鍵。依據日本 2008 年的統計資料，約有 5 成左右剩餘疏散時間不到 2 小時，對於交通、通訊條件較差，且人口多老弱的山區而言是否足夠，值得進一步探討。

由於現行的警戒模式僅單純使用空間的雨量分布作為警戒發布之指標，對於不同空間的地形、地質、地文及水文因子的差異並無法明確考量，以致無法提供較明確的災害發生地點、可能的災害類型以及災害規模。未來建議可在現有的警戒發布區域內，選擇以聚落為中心，將可能直接影響聚落的周邊坡面，以及聚落聯外重要的道路、橋樑、維生管線等脆弱點周邊的坡面作監測重點，並發展具地形、地質及水文因子的坡面指標作為下一階段的土砂災害警戒系統。亦即現有以雨量為基礎的警戒模式，可作為廣域的警戒機制；而結合地形、地質及水文因子的坡面指標則可發展為更細緻的坡面尺度警戒機制，以提昇警戒精度，降低人命傷亡。

## 參考文獻

- [1] 水土保持局(2007-2011),「土石流年報」。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2007-2011). *Debris flow annual report*. (in Chinese))

- [2] 水土保持局土石流防災資訊網 <http://246.swcb.gov.tw> (Debris Flow Disaster Information Website, <http://246.swcb.gov.tw> (in Chinese))
- [3] 水土保持局(2011),「土石流災害預報與警報作業手冊」。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2011). *Manual of issuing debris-flow disasters alert.* (in Chinese))
- [4] 天野 篤、高山陶子(2006),「土砂災害と防災情報～台風 0514 号災害の避難に学ぶ～」,日本地すべり学会誌, 43(6),370-375. (Atsushi AMANO and Toko TAKAYAMA (2006). “On the situation of early warning information for sediment-related disasters ~Teachings of evacuation at T0514 disaster~.” *Journal of the Japan Landslide Society*, 43(6), 370-375. (in Japanese))
- [5] 白仁徳(2008),「大規模災害下避難決策需求與支援之研究－子計畫：大規模災害下弱勢族群之避難疏散需求與資源運籌決策支援之研究－以颱風土石流災害為例(II)」,台灣行政院國家科學委員會。(Pai, J.T. (2008). *The study of the evacuation of the disadvantage groups under large-scale disaster*, National Science Council. (in Chinese))
- [6] 行政院農業委員會(2010),「土石流防災疏散避難作業規定」。(Council of Agriculture (2010). *Directions Governing the evacuation for debris flow disaster.* (in Chinese))
- [7] 行政院莫拉克颱風災後重建推動委員會(2010),「莫拉克颱風災滿半年重建成果報告」。(Morakot post-disaster reconstruction council, Executive Yuan (2010). *Report of post-disaster reconstruction in six months after Typhoon Morakot.* (in Chinese))
- [8] 国土交通省河川局砂防部(2007),「土砂災害警戒避難ガイドライン」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC) (2007). *Guidelines of warning system and evacuation.* (in Japanese))
- [9] 国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部、国土交通省国土技術政策総合研究所(2005),「国土交通省河川局砂防部と氣象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and Japan Meteorological Agency (JMA) and National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Manual for the method of setting mass-movement disasters warning criterion based on rainfall indices (Draft).* (in Japanese))
- [10] 国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部(2005),「都道府県と氣象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and Japan Meteorological Agency (JMA), (2005). *Guidelines for the method of issuing sediment disaster warning*



- information to joint prefectures and Meteorological Agency. (in Japanese))*
- [11] 国土交通省河川局砂防部砂防計画課、国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター(2005),「土砂災害ハザードマップ作成のための指針と解説(案)」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC) and National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Guidelines and commentary for sediment disasters Hazard Mapping. (in Japanese))*
- [12] 国土交通省国土技術政策総合研究所(2001),「土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法」。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), (2001). *Manual of setting sediment disasters warning criterion based on rainfall indices. (in Japanese))*
- [13] 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター 砂防研究室(2007),「土砂災害警戒情報運用結果検証手法(案)」。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Manual for the method of verifying sediment disasters warning (Draft). (in Japanese))*
- [14] 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター(2010),「土砂災害の警戒避難等における技術的課題について」,第23回(平成22年度)砂防研究報告会第3分科会。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2010). "Studies of warning system and evacuation for sediment disaster." *23th Sabo research report. (in Japanese))*
- [15] 林建元(2007),「大規模災害下避難決策需求與支援之研究—以颱風土石流易發生地區為例--總計畫暨子計畫—大規模災害下商業人口之避難疏散決策需求與支援之研究(I)」,台灣行政院國家科學委員會。(Lin, C.Y. (2007). *The study of evacuation of commercial population under large-scale disaster, National Science Council. (in Chinese))*
- [16] 吳杰穎(2009),「不同土石流潛勢區居民疏散避難決策與行為之比較」,坡地防災學報,8(1),1-14。(Wu, J.Y. (2009). "The Comparative Study of Residential Evacuation Decision and Behavior for the Vulnerable Debris Flow Areas." *Journal of Slope Land Hazard Prevention*, 8(1), 1-14. (in Chinese))
- [17] 陳振宇(2008),「國內土石流警戒發布機制沿革」,台灣水土保持季刊,63,1-7。(Chen, C.Y. (2008). "The evolution of debris flow warning system in Taiwan." *Soil and Water Conservation Quarterly*, 63, 1-7. (in Chinese))
- [18] 陳亮全、馬士元(2008),「大規模災害下避難決策需求與支援之研究—以颱風土石流易發生地區為例—子計畫—大規模災害下政府避難疏散決策及執行過程之研究(II)」,行政院國家科學委員會。(Chen, L.C. and Mars, S.Y. (2008). *The study of evacuation decision of government under large-scale disaster, National Science Council. (in Chinese))*
- [19] 張保亮(2011),「QPESUMS 產品應用介紹」,中央氣象局氣象衛星中心。

- (Chang, P.L. (2011). *Introduction of QPESUMS*, Central Weather Bureau (CWB). (in Chinese))
- [20] 詹錢登(2000),「土石流概論」,科技圖書股份有限公司,台灣,136-137. (Jan, C.D. (2000). *Introduction of debris flow*, Scientific & Technical Publishing Co., Ltd., Taiwan, 136-137. (in Chinese))
- [21] 詹錢登、李明熹(2004),「土石流發生降雨警戒模式」,中華水土保持學報, 35(3),275-285. (Jan, C.D. and Li, M.H. (2004). "A Debris-Flow Rainfall-Based Warning Model." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(3), 275-285. (in Chinese))
- [22] Lindell, M. K., Lu, J.-C., and Prater, C. S. (2005): Household Decision Making and Evacuation in Response to Hurricane Lili, *Natural Hazards Review*, Vol. 6, No. 4, pp. 171-179.
- [23] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010). "Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network." *Landslides*, 7(3), 325–338
- [24] Wiczorek, G.F. and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M, Hunger O (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Praxis, Springer Berlin Heidelberg, pp. 325-362
- [25] Chen, Y.S., Kuo, Y.S., Lai, W.C., Tsai, Y.J., Lee, S.P., Chen, K.T., and Shieh, C.L. (2011). "Reflection of typhoon Morakot - the challenge of compound disaster simulation." *Journal of mountain science*, 8(4), 571-581.

## 第3章 土石流潛勢地區地方政府與民眾之疏散決策因子

### 3.1 前言

台灣由於地理及環境因素，每年五至十一月防汛期間飽受颱風豪雨之威脅，其中因颱風豪雨所導致的土砂災害，往往是最容易造成人命傷亡的災害類型。面對可能發生的土砂災害，除了採取硬體的治理工程外，建立以雨量為基礎的土砂災害警戒系統，適時疏散災害潛勢區內的民眾，已是世界各國降低土砂災害人命傷亡最直接且重要的方式。然而，每次執行疏散的場合，部份民眾不願意配合疏散，而與負責疏散工作之公職人員發生衝突之畫面也履見不鮮。依據2010年日本全年度的土砂災害統計資料，由於諸多原因，都道府縣雖已針對所轄市町村的許多地區發布土砂災害警戒，但負責執行疏散避難決策的市町村政府，對於已發布警戒之地區，真正執行疏散避難指示的比例只有12%；而民眾接獲土砂災害警戒訊息後，採取自主性疏散避難的比例也只有4%(岡本敦 et al., 2012)。如此偏低的數據顯示日本現行以雨量為基礎的警戒模式，在實務上並未充份獲得市町村政府及民眾的信任與認同。而台灣部份，在中央災害應變中心的強力主導下，土石流警戒發布後，地方政府執行疏散之比例雖遠高於日本，但近五年(2007~2011年)之平均值也僅有51.6%(陳振宇，2012)。

依據災害防救法第24條：「為保護人民生命、財產安全或防止災害擴大，直轄市、縣(市)政府、鄉(鎮、市、區)公所於災害發生或有發生之虞時，應勸告或強制其撤離，並作適當之安置。」台灣現行之疏散決策及執行之權責係在直轄市、縣(市)政府、鄉(鎮、市、區)公所層級(以下簡稱為地方政府)，但實務上，位處第一線的村里長往往也扮演重要角色。

現行的土石流防災疏散避難機制及流程如圖3.1。理想狀況下，在颱風或豪雨造成之危害(hazard)發生前，政府單位依據環境條件之變化依序發布颱風警報(typhoon alert)、土石流黃色警戒(yellow alert)、土石流紅色警戒(red alert)及強制撤離命令(evacuation order)，民眾則依環境現況或前述政府發布之相關警戒資訊，進行疏散準備(evacuation preparedness)、自主疏散(voluntary evacuation)或配合政府之強制撤離命令進行強制疏散(mandatory evacuation)，則可將人命傷亡降至最低。反之，若政府之警報與命令發布時間，或民眾之疏散行動是在危害發生之後，此時極可能造成人命的傷亡，形成災害(disaster)。

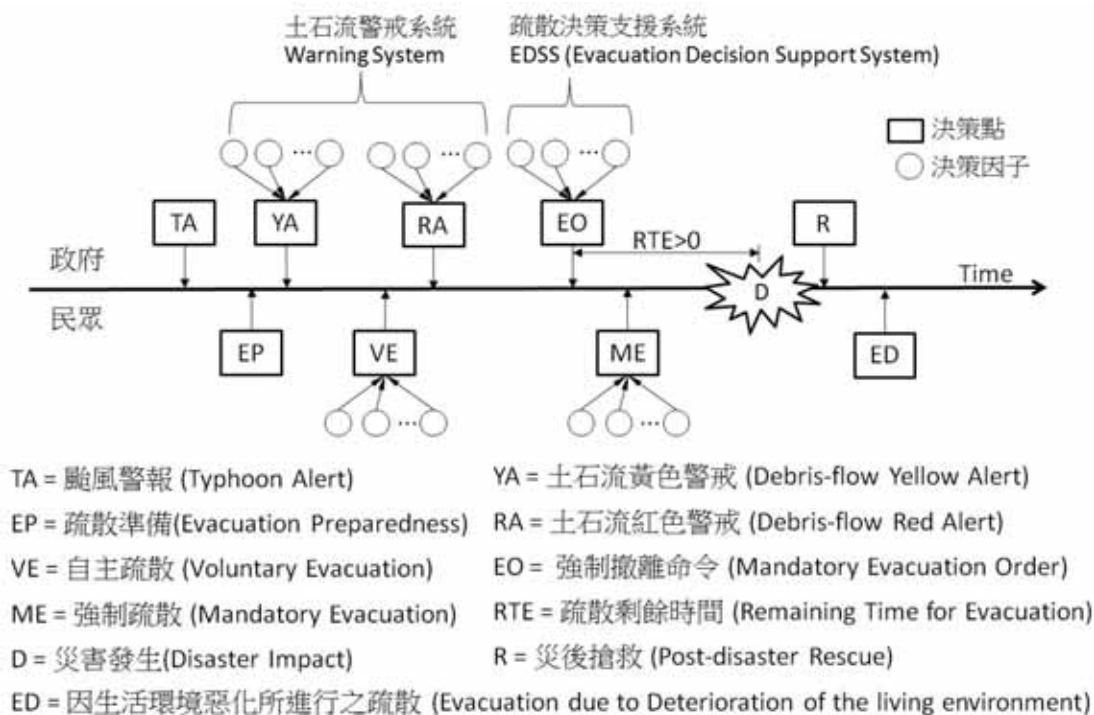


圖 3.1 地方政府與民眾疏散避難決策之流程

然而對政府端所發布的警報而言，由於需考慮與預測未來各種可能發生之情境以作綜合性的研判，實為不確定因素下之決策(decision under uncertainty)，為提高決策之品質，相關理論及工具也陸續被發展。例如，台灣及日本均已發展以雨量為基礎的土砂災害警戒系統(warning system)以作為發布警戒的決策依據(Osanai et al. 2010；陳振宇，2012)；但對於考量因素更為複雜的疏散避難決策而言，台灣及日本目前仍仰賴人為的判斷為主(国土交通省河川局砂防部，2007；陳亮全、馬士元，2008)，尚無具體的疏散決策支援系統(evacuation decision support system, EDSS)可協助地方政府進行相關決策。此外，對於民眾而言，那些因子會影響民眾自主疏散或配合強制疏散的動機，也是許多研究持續關注的焦點。

本研究所探討之地方政府疏散避難決策，係指地方政府依據災害防救法，於颱風豪雨期間經分析研判，強制撤離災害潛勢區民眾之決策，不包含災後搶救(post-disasters rescue)或因生活環境惡化所進行之疏散(evacuation due to deterioration of the living environment)；而民眾之疏散避難決策，係指民眾接獲氣象或災害警戒相關訊息，或發現所處環境有災害前兆時，決定進行自主疏散避難或配合強制疏散之決策。

既往之研究，在地方政府之疏散決策因子方面，Lindell 及 Prater(2007)曾協助美國德州政府建立沿海地區之颶風災害疏散管理決策支援系統(hurricane evacuation management decision support system, EMDSS)，Regnier(2008)建議使用歷年颶風路徑配合隨機模型方式，提昇地方政府疏散決策品質。天野篤及高山陶子(2006)曾對於日本2005年颶風14號期間發生重大土砂災害的鹿兒島縣、

大分縣、宮崎縣等處，詳細調查縣府砂防課與地方氣象台聯合發布土砂災害警戒情報後，市町村政府之避難指示下達過程、考量重點與困難之處；日本國土交通省砂防部(2007)亦曾彙整各市町村對於執行疏散避難決策上所面臨的問題，並編製土砂災害警戒避難指南手冊，供地方政府參考；岡本敦等(2012)則藉由蒐集各地方政府之地域防災計畫內所列之避難指示發布基準，以及訪談決策人員，彙整 2008-2010 年間，日本地方政府發布避難指示的決策依據。台灣部份，陳亮全及馬士元(2008)曾針對土石流易發生地區，分別採用深度訪談及問卷方式，調查中央政府、縣市政府、鄉鎮公所及村里長對於土石流疏散避難決策之依據，並指出愈低層級的政府部門，或是接近災害易發生地區者，多以現地狀況作為疏散決策的考量點。

而在民眾疏散決策及行為方面，Dash 及 Gladwin(2007)曾將歷年美國沿海颶風災害潛勢地區民眾之疏散決策相關研究，分成警戒傳遞、災害認知及疏散行為等三個領域作回顧整理，並建議未來可針對民眾的疏散率(包含自主或強制疏散)、民眾如何運用與解讀颶風預報、如何將時間因子及民眾的疏散行為模式納入疏散決策系統、颶風預報應包含那些資訊等議題作進一步探討。在日本方面，牛山素行等曾調查災害警戒情報對受災地區民眾疏散決策之影響(牛山素行，2012；牛山素行、今村文彥、寶馨，2003)；井良沢道也及遠藤康多佳(2010)曾探討日本 2002 年 7 月豪雨災區內，已疏散及未疏散民眾之決策動機。在台灣部份，陳亮全等(2007)曾分別針對土石流潛勢區民眾之疏散避難消息來源、疏散避難決策因子及避難處所考量因素等三方面進行調查；吳杰穎(2009)曾比較新竹縣尖石鄉及南投縣水里鄉二個不同土石流潛勢區居民之疏散避難決策與行為；白仁德(2008)曾特別針對尖石鄉及水里鄉之土石流潛勢區內弱勢族群，調查其避難決策並以二元羅吉斯回歸方式建立「是否採取避難」、「是否需要協助」及「避難過程所需時間」等三種疏散避難行為模式。林建元(2007)曾挑選轄區內有土石流潛勢溪流的 12 個鄉鎮，特別針對商業人口之疏散避難決策進行調查，並與國外之案例進行比較。

回顧目前國內外對於地方政府及民眾面對土砂災害之疏散避難決策相關研究，大多係採取個別決策因子對於疏散決策影響之統計，缺乏對於各決策因子間相對權重之比較分析，故無法一窺其決策全貌，並建構各項決策因子在整體決策模式上所佔之比例與重要性，不利於釐清後續防災策略之改進方向。本研究採用 AHP(analytic hierarchy process)法，先參考相關文獻建立層級架構之 AHP 問卷，並挑選曾實際參與疏散避難決策之地方政府防災業務人員及位於土石流潛勢區之民眾(以下統稱為專家)進行問卷訪談，再將問卷藉由成對比較方式，分別建立地方政府觀點(包含縣市、鄉鎮、村里層級)及民眾觀點之土石流疏散避難決策模型；同時藉由層級架構的決策模型，清楚呈現各項決策因子在決策過程中所佔之權重，除可作為調整防災策略之重要參考依據外，亦可作為後續改進土砂災害警戒系統及發展山區土砂災害疏散避難決策支援系統之基礎資料。

## 3.2 材料及方法

本研究採用 AHP 法進行疏散決策因子的建構與權重分析,研究步驟分為確定問題、參考相關文獻以建立地方政府疏散決策因子之階層結構、設計問卷並邀請專家填寫以評鑑階層結構、建立成對矩陣並檢核階層一致性、建立各階層因子權重及討論等 6 個階段,研究流程如圖 3.2。

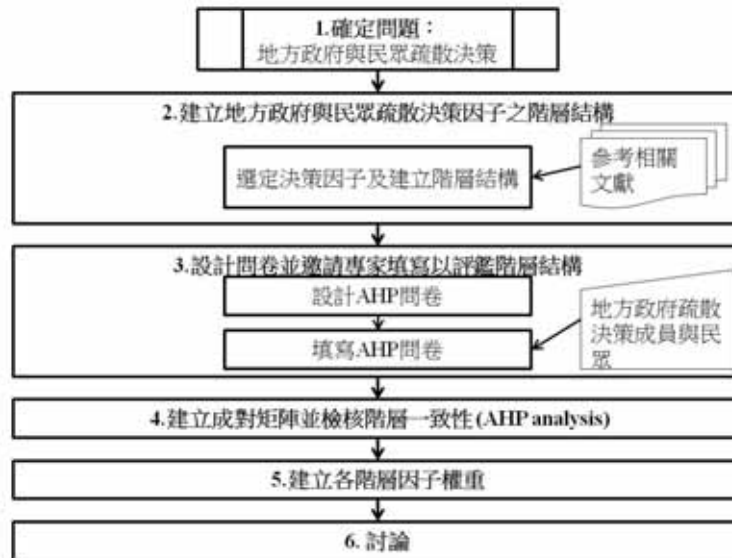


圖 3.2 研究流程圖

### 3.2.1 問卷內容

本研究參酌有關疏散避決策相關文獻(如表 1),考量國內實際疏散決策及執行之現況,依層級結構重新整理各項因子。由於政府與民眾之疏散避難決策之立場不同,本研究分別設計「地方政府疏散避難決策因子」及「土石流潛勢地區民眾疏散避難決策因子」二份 AHP 問卷,其決策因子之層級關係及內容說明如表 2 及表 3。

表 3.1 地方政府與民眾之疏散避難決策因子相關文獻

決策者	決策因子	參考文獻
	災害潛勢區人口規模與分布、家庭人口數、家庭車輛數、旅館數量、流動人口數、事前疏散比例、自主疏散比例、疏散路線及所需時間、避難地點、疏散成本(政府、個人、商業損失)、颶風規模與路徑、歷史災例、發布時間	Lindell and Prater (2007); Regnier (2008); Wolshon et al. (2001) (in English)
地方政 府	土砂災害警戒範圍、警戒命中率與誤報率、災害潛勢、現地雨量與水位資訊、已有災情傳出、現地回報狀況、是否於日落前發布、弱勢族群分布、避難處所距離、避難路線安全性、交通工具、地方自主防災能力、過去經驗、歷年災例、現地環境變化或災害前兆、通訊狀況、道路阻斷情形、民眾災害意識與受災經驗	国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター (2010); 国土交通省河川局砂防部 (2007); 天野篤、高山陶子 (2006); 岡本敦等 (2012) (in Japanese)
	颶風動態、預測雨量、土石流警戒、現地雨量與水位、現地環境狀況、災害潛勢、歷史災例、避難處所位置及條件、高災害潛勢區之預防性疏散、居民人口結構、是否有弱勢族群、社區自主防災能力、警戒發布時機、日間或夜間、上級單位的疏散避難建議、社區居民的疏散避難建議、避難時間是否足夠、過去經驗、過去曾下達強制撤離但無災害發生之經驗、交通中斷、開設避難處所之支出、影響民眾收入或造成財物損失、通訊中斷	行政院農業委員會 (2010); 陳亮全、馬士元 (2008); 陳振宇 (2012) (in Chinese)
	環境因素、個人經驗、社會因素、疏散時可能的阻礙、鄰居開始疏散、人口特性(性別、年齡、教育、收入、種族、婚姻狀況)、過去經驗(含受災經驗及假警報經驗)、風險認知、住家位置、居住地特性、地方政府行動、家屋型式、經濟條件、避難指示之傳達方式、家庭成員(人數、是否有老人或小孩)、接獲警戒訊息、對警戒訊息內容之解讀	M. K. Lindell, Lu and Prater (2005); Flynn (1979); Zeigler and Johnson (1984); Dow and Cutter (1998); Whitehead et al. (2000); Baker (1991); Gladwin and Peacock (1997); Perry (1979) (in English)
民眾	土砂災害警戒情報、警戒情報或撤離指示內容是否明確具體、日間或夜間、避難處所距離與安全性、避難路線安全性、通訊中斷、老弱婦孺疏散不易、災害與風險認知、過去經驗、風雨逐漸增強、災情傳出、交通狀況、預測雨量、現地環境境變化、	牛山素 (2012); 牛山素行、今村文彥、寶馨 (2003); 篤、高山陶子 (2006); 井良沢道也、遠藤康多佳 (2010) (in Japanese)
	風雨逐漸增強、接獲颶風警報、接獲疏散避難勸告、住家環境災害潛勢、鄰居開始避難、對外交通可能中斷、受災經驗、擔心財物損失、過去曾經避難但無災害發生、因避難增加之費用、收入減少、避難處所本身及前往途中是否安全、避難處所距離、避難處所食宿條件、個人風險認知、社經條件(教育程度、年齡、性別)、住所特性、親友影響	陳亮全等(2007); 林建元 (2007); 白仁德 (2008); 吳杰穎 (2009) (in Chinese)

表 3.2 地方政府疏散避難決策因子層級關係及內容說明

層級一 (評估指標)	層級二 (評估項目)	評估項目內容說明
一、警戒資訊	1. 颱風警報	考量該地區是否位於颱風警報範圍
	2. 氣象局預測雨量值	依據氣象局發布之總雨量預測及 24 小時雨量預測，評估該地區受災之風險
	3. 目前實際雨量值	依據鄰近該地區之氣象局自動雨量站之觀測值，或以當地土石流防災專員以簡易雨量筒觀測之現地雨量作為參考
	4. 水保局土石流警戒	依據水土保持局是否已針對該地區發布之土石流黃色警戒或土石流紅色警戒
	5. 水利署淹水警戒	依據水利署是否已對該地區發布淹水警戒
	6. 公路局封路封橋資訊	考量該地區周邊的重要道路、橋梁是否已被或可能被列入封路封橋範圍
	7. 基層單位現地回報之狀況與建議	依據鄉公所或村里長回報現地的風雨及災情狀況，以及對於啟動疏散與否之建議
二、環境現況	1. 已有明顯風雨	該地區已有明顯的風雨
	2. 已有災情傳出	該地區附近已有災情傳出(淹水、土砂災害)
	3. 部份道路或橋梁已中斷	該地區已有部份交通要道中斷，若不先行疏散，擔心後續變為孤島
	4. 通訊是否容易中斷	考量如通訊中斷，聯絡不易，故先行疏散
	5. 擔心入夜後發生災害	考量災害可能於入夜後發生，不易通報及疏散，故先行疏散
三、過去經驗	1. 警戒誤報率	考量該地區過去已有多次發布警戒，甚至已疏散民眾，但多未發生災害之情形
	2. 警戒命中率	考量該地區曾經有警戒發布後，確實發生災害之情形
	3. 有多次災害記錄	考量該地區災害發生之頻率較高
四、災害潛勢	1. 位於災害潛勢區	考量該地區是否位於土石流潛勢溪流、淹水潛勢區或地質敏感區
	2. 交通易中斷，形成孤島	考量該地區是否易因交通中斷，形成孤島
五、社區現況	1. 人口結構	考量該地區是否有較多的弱勢族群，災時需較多的資源與協助
	2. 是否有自主防災能力	該地區是否有自主防災組織及充足物資，可因應短期災害或受災第一時間能自助自救等
	3. 避難處所位置	考量該地區之避難處所是在社區內，或必須至外地避難，涉及所需動員之人力物力及是否在風雨來臨前即作預防性撤離
六、行政考量	1. 上級機關要求疏散	中央或縣市政府下令疏散
	2. 疏散民眾及開設避難處所之費用與人力	考量每次疏散鄉公所或村里所需耗費的人力與經費
	3. 當地民眾對疏散之配合度	考量民眾是否願意配合疏散，亦即落實執行疏散之困難度



表 3.3 土石流潛勢地區民眾疏散避難決策因子層級關係及內容說明

層級一 (評估指標)	層級二 (評估項目)	評估項目內容說明
一、接獲警報	1.颱風警報	依據本村是否位於颱風警報範圍
	2.水保局土石流警戒	依據水土保持局已否已針對本村發布之「土石流黃色警戒」或「土石流紅色警戒」
	3.水利署淹水警戒	依據水利署是否已對本村發布淹水警戒
	4.撤離通知	接獲包含鄉公所、村里長、親友等通知之避難勸告或強制撤離通知
	5.社區有災害潛勢	考量本村範圍有政府公布的土石流潛勢溪流、淹水潛勢區或地質敏感區
二、過去經驗	1.曾經受災	依據自身或鄰居的受災經驗判斷
	2.曾疏散,但無災害發生	依據過去曾經多次疏散,但事後並未發生災害的經驗作判斷
	3.易成孤島	依據過去颱風豪雨本村是否曾形成孤島,出入不便,甚至無法外出就學、就醫、工作或補給糧食
	4.防災演練或宣導	曾經參與防災演練或宣導,了解災害之風險及可能性
	5.與以往颱風比較	依據以往颱風的風雨狀況及本村之受災情形,感覺本次風雨可能帶來的風險
三、環境現況	1.風雨增強	風雨已有明顯增強,感到一定的風險性
	2.災情傳出	附近已有災情傳出,擔心災情比想像中嚴重
	3.鄰居已疏散	附近鄰居已經疏散,擔心災情比想像中嚴重
	4.日間或夜間	例如因目前是夜間,在山區交通不便,打算等到明天天亮再疏散或是提早疏散
四、避難處所	1.距離遠近	例如考量避難處所之路程、所需時間之長短,以及自己是否有交通工具可抵達
	2.食宿條件	例如考量避難處所是否有供餐、生活機能、住宿條件、是否與熟人同住等
	3.安全性	包含前往避難處所路途之安全性,以及避難處所之安全性
五、家庭與經濟	1.家庭成員	因家中成員有老弱婦孺,疏散不易或需他人協助
	2.影響收入	考量如去避難將無法工作,影響收入
	3.財物損失	擔心疏散期間,家中遭竊或農作家畜無人照料等造成損失

### 3.2.2 問卷調查對象

#### (1) 地方政府部份

本研究係以行政院農業委員會水土保持局公開之土石流潛勢溪流分布地區作為問卷調查範圍,調查時間為 2012 年 5 月至 8 月。依據水土保持局 2012 年公開之資料,目前台灣地區共有 1660 條土石流潛勢溪流,分布於 17 縣市 159 鄉鎮 680 村里,而近年(2007-2011 年)發生之重大土砂災害事件計有 327 件,如表 3.4(水土保持局 2012)。問卷調查對象,係針對前揭近年曾發生重大土砂災害之縣市、鄉鎮、村里之地方政府防災業務人員。因考量縣市政府相較於鄉鎮公所分工較細之情形,其中縣市政府之問卷調查對象涵蓋負責土石流防災業務之水土保持相關承辦人員,以及負責執行疏散工作的消防局人員;鄉鎮公所部份則以實際辦理土石流防災疏散業務之單位為主,村里部份則為村里長或村里

幹事。扣除問卷填答不完整或經 AHP 法一致性檢測結果差異過大之問卷，列為本研究有效問卷之回收情形如表 3.4。

表 3.4 台灣土石流潛勢溪流及近年重大土砂災害統計與有效問卷回收統計

	土石流 潛勢溪 流數 (2012)	重大土 砂災害 事件數 (2006- 2011)	有 效 問 卷 數	縣市 (決策經驗)		鄉鎮 (決策經驗)		村里 (決策經驗)		民眾 (疏散經驗)	
				有	無	有	無	有	無	有	無
宜蘭縣**	142	49	3	-	-	-	1	1	-	-	1
基隆市*	34	2	2	1	-	-	-	-	-	-	1
台北市*	50	2	2	1	-	1	-	-	-	-	-
新北市*	220	6	9	1	-	1	5	-	-	-	2
桃園縣**	51	4	2	-	1	-	-	-	-	-	1
新竹縣**	76	3	1	-	-	-	-	1	-	-	-
苗栗縣**	78	13	5	1	-	-	1	-	-	1	2
台中市*	106	10	4	-	-	-	1	-	-	1	2
彰化縣*	7	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1
南投縣***	247	54	17	2	2	2	4	-	-	2	5
雲林縣**	12	13	0	-	-	-	-	-	-	-	-
嘉義縣***	80	37	7	2	-	2	-	-	-	1	2
台南市**	48	16	3	1	-	-	-	-	-	1	1
高雄市***	109	67	3	1	-	-	-	-	-	-	2
屏東縣***	70	34	2	1	-	-	-	1	-	-	-
台東縣**	165	8	2	2	-	-	-	-	-	-	-
花蓮縣**	165	8	15	1	1	4	-	2	1	3	3
合計	1,660	327	78	14	4	10	12	5	1	9	23

註 1：依調查區位之交通狀況概分為 \*都會周邊坡地 \*\*淺山地區 \*\*\*深山地區

註 2：部份縣市範圍廣大，則依轄區內主要災害地點作為分類依據，例如高雄市主要土石流災區為桃源區、那瑪夏區等，故列為深山地區

其中由於鄉鎮公所人員之高流動性，本次問卷發送對象雖已鎖定近年曾發生重大土砂災害之鄉鎮為主，但回傳問卷者仍有逾一半之比例係初接土石流防災業務之新手，為確保問卷結果能確實反映實務作業情形，本研究對於後續決策因子之分析，僅採用承辦防災業務 2 年以上且具有疏散決策或執行經驗之問卷作為分析對象。

## (2) 土石流潛勢區民眾部份

有關土石流潛勢地區民眾之疏散決策因子問卷調查對象，則以土石流潛勢溪流所在之村里民眾為主，其中部份曾有疏散避難經驗，部份則無，本研究將分別統計分析，以作為比較。

### 3.2.3 AHP 理論與計算方式

AHP 法為 Thomas L. Saaty 所發展出來的多屬性決策分析方法(multiple attribute decision analysis, MADA)，其目的在利用層級結構將複雜問題系統化，並逐步分解成多個小的子問題後，經由相關決策人員針對兩兩因子進行成對比較評估後，以建立各項因子或方案之權重，如此可使複雜的問題較易進行決策(簡禎富 2005)。

在進行兩兩因子重要性之成對比較時，Saaty(1980)建議使用 1-9 之比較尺度，其中 1 代表該兩個因子之重要性相同(equal importance)，9 代表一個因子相較於另一個因子為絕對重要(extreme importance)。如假設共有  $n$  個因子將進行比較，其中  $a_{ij}$  代表  $i$  因子相對於  $j$  因子之相對重要性，則所有因子兩兩比對結果可以寫成一成對比較矩陣(pair-wise comparison matrix)  $A$ ，如式(3.1)。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

若此  $n$  個因子之權重(weight)為已知，其中  $i$  因子之權重為  $w_i$  而  $j$  因子之權重為  $w_j$ ，則  $a_{ij} = w_i/w_j$ ，亦即

$$a_{ij}w_j = w_i \quad \text{for } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}w_j = nw_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

$$\text{或 } Aw = nw \quad (3.4)$$

其中  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  稱為權重向量，亦即為矩陣  $A$  的特徵向量(eigenvector)，且當矩陣  $A$  之元素滿足  $a_{ik}a_{kj}=a_{ij}$  之關係時，即稱矩陣  $A$  具有一致性(consistent)。由於式(4)實為一個矩陣求解特徵值的問題，且矩陣  $A$  的每一列元素均可視為第一列元素乘上一定值，故矩陣  $A$  之秩(rank)為 1，亦即矩陣  $A$  的  $n$  個特徵值中，只有一個不為零(記作  $\lambda_{max}$ )，且其值為  $n$ 。

但實際上，由於權重向量  $w$  是未知數，且成對比較矩陣  $A$  的元素  $a_{ij}$  僅是填寫問卷者對於各項因子兩兩比較的估計值，故矩陣  $A$  可能不具一致性(inconsistent)。因此這個不具一致性矩陣之特徵值問題可改寫為

$$Aw = \lambda_{max}w \quad (3.5)$$

其中  $\lambda_{max}$  為矩陣  $A$  的最大特徵值，如矩陣  $A$  的一致性愈佳，其值將近似於  $n$ ，其他的特徵值則近似於零。因此 Saaty(1980)定義一致性指數(consistent index)

$CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$  作為判斷矩陣  $A$  是否具有一致性的評估標準，並建議  $CI < 0.10$  即可視為滿足一致性。

### 3.2.4 專家意見整合方式

本研究為確保每一份問卷均符合一致性，係以每一層級之成對比較矩陣的一致性指數  $CI < 0.1$  作為合格問卷之判斷條件。同時，為提醒受訪專家注意填答

問卷時之一致性，每層級進行成對比較前，均要求受訪專家依重要性排列該層級內的所有因子後，再進行兩兩因子的成對比較；此外，在進行每層級之一致性分析時，如發生  $CI$  大於 0.1 之情況，亦可依前揭因子之排列順序，配合 Saaty 開發的 Super Decisions 免費軟體(<http://www.superdecisions.com>)計算後所提出之建議，微調成對比較值，直到所有層級之  $CI$  值均小於 0.1 後，再以 Super Decisions 軟體計算出各問卷之決策因子權重向量。

由於每一份 AHP 問卷實為反應每一個受訪專家的決策模式，故每一份問卷分析出之各項決策因子權重均不同，而在統合群體意見時，一般常使用算術平均數法(arithmetic mean method)或幾何平均數法(geometric mean method)(Chen et al. 2008)。由於幾何平均數法相對於算術平均數法而言，其受極端值的影響較小，故本研究採用幾何平均數法整合各專家問卷所得的各項決策因子權重值，再將整合後之決策因子正規化，使整合後之同一層級決策因子權重總和為 1，分析流程如圖 3。

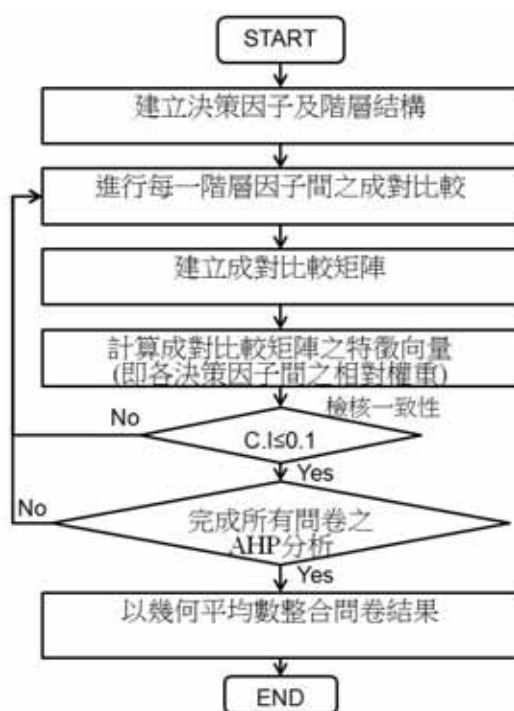


圖 3.3 本研究採用之 AHP 法分析流程

### 3.3 研究發現

#### 3.3.1 地方政府疏散決策因子

依據前節所述方式分析地方政府疏散避難決策因子問卷之結果，如表 3.5。其中在層級一的決策因子權重上，縣市、鄉鎮、村里統計結果大致相同，主要以「警戒資訊」及「環境現況」為最重要的二項決策因子，其合計權重合計已逾 50%。值得注意的是，愈基層的單位，對警戒資訊之信賴度似乎愈低，但對

環境現況之信賴度則愈高，此結果與陳亮全及馬士元(2008)調查結果一致。

表 3.5 地方政府疏散避難決策因子權重

層級一	層級二	整體	縣市	鄉鎮	村里
警戒資訊		<b>0.236</b>	<b>0.311</b>	0.190	<b>0.209</b>
環境現況		<b>0.272</b>	<b>0.238</b>	<b>0.244</b>	<b>0.329</b>
過去經驗		0.107	0.101	0.114	0.100
災害潛勢		0.146	0.110	<b>0.221</b>	0.120
社區現況		0.157	0.145	0.140	0.179
行政考量		0.083	0.095	0.091	0.062
	颱風警報	0.053	0.056	0.068	0.038
	氣象局預測雨量值	0.091	0.067	0.103	0.102
	目前實際雨量值	<b>0.269</b>	0.192	<b>0.289</b>	<b>0.333</b>
警戒資訊	水保局土石流警戒	0.172	<b>0.202</b>	0.183	0.131
	水利署淹水警戒	0.095	0.104	0.084	0.094
	公路局封路封橋資訊	0.086	0.124	0.075	0.065
	鄉公所或村里長現地回報狀況與建議	<b>0.233</b>	<b>0.256</b>	<b>0.198</b>	<b>0.236</b>
	已有明顯風雨	0.125	0.123	0.114	0.136
	已有災情傳出	<b>0.309</b>	<b>0.353</b>	<b>0.289</b>	<b>0.283</b>
環境現況	部份道路或橋梁已中斷	<b>0.251</b>	<b>0.213</b>	<b>0.252</b>	<b>0.291</b>
	通訊是否容易中斷	0.155	0.152	0.158	0.155
	擔心入夜後發生災害	0.159	0.159	0.187	0.135
	警戒誤報率	0.111	0.144	0.114	0.082
過去經驗	警戒命中率	0.300	0.305	0.300	0.291
	有多次災害記錄	<b>0.589</b>	<b>0.551</b>	<b>0.586</b>	<b>0.627</b>
	位於災害潛勢區	0.499	0.464	<b>0.505</b>	<b>0.527</b>
災害潛勢	交通易中斷，形成孤島	<b>0.501</b>	<b>0.536</b>	0.495	0.473
	人口結構	0.227	0.276	0.228	0.178
社區現況	是否有自主防災能力	<b>0.530</b>	<b>0.413</b>	<b>0.554</b>	<b>0.620</b>
	避難處所位置	0.243	0.311	0.217	0.202
	上級機關要求疏散	0.315	0.399	0.299	0.257
行政考量	疏散及開設避難處所之費用與人力	0.198	0.174	0.209	0.210
	當地民眾對疏散之配合度	<b>0.486</b>	<b>0.427</b>	<b>0.492</b>	<b>0.533</b>

註：本表以各層級群組因子間之相對權重表示，黑體字為相對重要因子(權重和已逾或已接近50%)。

在層級二的決策因子部份，警戒資訊方面仍以「目前實際降雨值」與「基層單位現地回報之狀況與建議」為主要考量，合計權重已逾 50%，且愈基層單位，且二者合計所佔之比重愈高，統計結果似可反應目前的警戒系統對於小尺度地區適用性較差的問題(陳振宇 2012)，亦即地方政府相關決策仍偏重現地資訊。即便是針對調查區(土石流潛勢區)所發布的土石流警戒，調查結果亦顯示，愈基層的單位對其信賴度愈低。

在環境現況方面，「已有災情傳出」及「部份道路或橋梁已中斷」合計權重約 56%，而「通訊是否容易中斷」及「擔心入夜後發生災害」等預防性考量僅各佔 16%，似乎反應目前地方政府之防災作為，仍著重於災害發生後的應變，較少考量防範未然的措施，此部份應可列入後續強化基層防災教育訓練之具體改進方向。

在過去經驗方面，影響疏散決策的因子主要為「有多次災害記錄」，其比重約佔 59%；另值得注意的是，地方政府對於「警戒命中率」之重視遠高於「警戒誤報率」，故未來如欲提高警戒發布後之疏散率時，似可優先針對提高土砂災害警戒之命中率作為改進目標，並於警戒發布時，同時提供當地歷史災例資訊，以滿足地方政府決策時之需求。

在災害潛勢方面，由於近年多起大型災害期間，許多重要山區道路及橋梁損毀，造成後續疏散及搶救災之困難，故調查結果顯示，「位於災害潛勢區」及「交通易中斷，形成孤島」此二項決策因子所佔之權重相當。

在社區現況方面，調查結果顯示，社區是否具有自主防災能力(例如是否有自主防災組織及充足物資)，係地方政府考量是否下達強制撤離的重要因素，且愈基層的單位愈重視此項因素。故如欲減少動輒下達強制撤離所耗費的人力、物力以及民怨的反彈，強化社區自主防災能力，似為一可行之方向。

在行政考量方面，「當地民眾對疏散之配合度」約佔了一半的權重，且愈基層、愈直接面對民眾與實際執行疏散之層級，對此部份考量之權重愈大；反之「疏散民眾及開設避難處所之費用與人力」其權重不到 2 成，似乎顯示疏散的直接成本遠低於間接成本，亦即對地方政府而言，直接成本只是單純地耗費預算及相關費用，但執行「強制撤離」後續可能引發的民怨等間接成本，才是行政單位無法承受之重。同時，此部份亦反映目前民眾之防災教育及宣導，應將配合疏散等觀念列為優先執行目標。此外，由於目前中央災害應變中心運作時，經常以防災視訊會議或多種管道，對於分析研判有災害發生之虞之地區，強烈建議或要求縣市政府進行疏散，故由調查結果亦顯示「上級機關要求疏散」此項因子於縣市層級所佔權重高達 4 成，惟愈往基層其所佔權重愈低，恰與「當地民眾對疏散之配合度」之趨勢相反。此部份除突顯目前縣市政府缺乏災害潛勢分析研判能力之現況外，亦顯示基層疏散決策者，面對災害潛勢分析結果(理論)與實際操作面上衝突時，所面臨之難處。

此外，為瞭解不同地理區位對於地方政府疏散決策的影響，本研究進一步將問卷依填寫人所負責之地區分成「都會周邊」、「淺山」及「深山」三類，其

分類原則如表 3.4 說明，調查統計結果如表 3.6 及表 3.7。

由統計結果顯示，對於層級一之疏散決策因子，愈基層的單位在不同不同地理區位的分類下，其決策因子權重之差異性愈明顯，亦即目前各級政府在進行疏散避難決策時，已有因地制宜之考量。

在層級二之疏散決策因子部份，則有地理區位愈位處深山，愈仰賴現地資訊之趨勢。例如在「現地回報狀況」，以及「已有災情傳出」部份，大致上愈接近深山區者，其所佔權重愈高。其他決策因子，則無明顯變化之趨勢。

表 3.6 同區位地方政府疏散避難決策因子權重(層級一)

層級一	縣市			鄉鎮			村里		
	都會 周邊	淺山	深山	都會 周邊	淺山	深山	都會 周邊	淺山	深山
警戒資訊	<b>0.330</b>	<b>0.388</b>	<b>0.205</b>	0.101	0.202	<b>0.232</b>	-	<b>0.257</b>	0.074
環境現況	0.192	<b>0.223</b>	<b>0.263</b>	<b>0.369</b>	<b>0.274</b>	0.148	-	<b>0.303</b>	<b>0.370</b>
過去經驗	0.061	0.086	0.145	0.140	0.093	0.122	-	0.099	0.085
災害潛勢	0.101	0.120	0.128	0.147	<b>0.215</b>	<b>0.270</b>	-	0.133	0.065
社區現況	<b>0.209</b>	0.080	0.175	<b>0.170</b>	0.129	0.129	-	0.142	<b>0.367</b>
行政考量	0.107	0.103	0.085	0.074	0.087	0.099	-	0.066	0.040

註：本表以各層級群組因子間之相對權重表示，黑體字為相對重要因子(權重和已逾或已接近 50%)。

表 3.7 不同區位地方政府疏散避難決策因子權重(層級二)

層級一	層級二	縣市			鄉鎮			村里		
		都會 周邊	淺山	深山	都會 周邊	淺山	深山	都會 周邊	淺山	深山
警戒 資訊	颱風警報	0.051	0.064	0.056	0.053	0.078	0.072	-	0.034	0.047
	預測雨量	0.116	0.070	0.048	0.059	0.125	0.085	-	0.135	0.024
	實際雨量值	0.166	<b>0.256</b>	0.184	<b>0.283</b>	<b>0.297</b>	<b>0.233</b>	-	<b>0.343</b>	<b>0.220</b>
	土石流警戒	<b>0.195</b>	0.195	<b>0.210</b>	<b>0.211</b>	0.116	<b>0.251</b>	-	0.139	0.077
	淹水警戒	0.164	0.108	0.066	0.153	0.081	0.066	-	0.113	0.034
	封路封橋資訊	0.084	0.112	0.122	0.094	0.078	0.065	-	0.052	0.119
	現地回報狀況	<b>0.223</b>	<b>0.196</b>	<b>0.315</b>	0.145	<b>0.224</b>	0.229	-	<b>0.184</b>	<b>0.479</b>
環境 現況	已有明顯風雨	0.175	0.133	0.108	0.117	0.089	0.132	-	0.112	<b>0.195</b>
	已有災情傳出	<b>0.226</b>	<b>0.329</b>	<b>0.423</b>	<b>0.323</b>	<b>0.252</b>	<b>0.293</b>	-	<b>0.214</b>	<b>0.586</b>
	部份交通中斷	0.152	<b>0.261</b>	<b>0.185</b>	<b>0.291</b>	0.181	<b>0.405</b>	-	<b>0.338</b>	0.107
	通訊容易中斷	<b>0.223</b>	0.145	0.135	0.118	<b>0.254</b>	0.084	-	0.192	0.043
	擔心入夜後發生災害	<b>0.223</b>	0.132	0.149	0.151	0.224	0.085	-	0.144	0.068
過去 經驗	警戒誤報率	0.168	0.172	0.116	0.090	0.118	0.123	-	0.082	0.081
	警戒命中率	0.201	<b>0.428</b>	0.261	<b>0.584</b>	0.275	0.295	-	0.321	0.188
	多次受災記錄	<b>0.631</b>	0.400	<b>0.623</b>	0.326	<b>0.607</b>	<b>0.582</b>	-	<b>0.597</b>	<b>0.731</b>
災害 潛勢	位於潛勢區	<b>0.757</b>	0.242	<b>0.594</b>	0.255	<b>0.527</b>	<b>0.589</b>	-	0.465	<b>0.750</b>
	易形成孤島	0.243	<b>0.758</b>	0.406	<b>0.745</b>	0.473	0.411	-	<b>0.535</b>	0.250
社區 現況	人口結構	<b>0.397</b>	0.233	0.313	0.225	0.161	0.288	-	0.186	0.088
	自主防災能力	0.265	<b>0.444</b>	<b>0.420</b>	<b>0.648</b>	<b>0.598</b>	<b>0.555</b>	-	<b>0.684</b>	0.243
	避難處所位置	0.338	0.323	0.267	0.127	0.241	0.157	-	0.131	<b>0.669</b>
行政 考量	上級要求疏散	0.372	<b>0.489</b>	0.411	0.153	0.272	0.392	-	0.319	0.088
	疏散及開設避難處所之成本	0.114	0.201	0.169	0.246	0.228	0.170	-	0.220	0.139
	當地民眾對疏散之配合度	<b>0.514</b>	0.309	<b>0.420</b>	<b>0.601</b>	<b>0.500</b>	<b>0.438</b>	-	<b>0.461</b>	<b>0.773</b>

註：本表以各層級群組因子間之相對權重表示，黑體字為相對重要因子(權重和已逾或已接近50%)。



### 3.3.2 民眾疏散避難決策因子

#### (1) 有疏散避難經驗之民眾調查結果

由調查結果顯示，對有疏散避難經驗之民眾而言，層級一之整體決策因子中「避難處所」及「環境現況」是最重要的二項決策因子，合計約佔 50%(如表 3.8)。但經由區位的比對分析則發現，不同區位之民眾疏散避難決策因子差異甚大。例如，都會周邊地區的民眾最重視「避難處所」及「家庭與經濟」，合計高達 65%；淺山地區的民眾則較重視「環境現況」及「避難處所」；深山地區之民眾則較仰賴「環境現況」及「過去經驗」。故相關單位如欲進行防災相關教育訓練時，宜考量其差異，方能達到事半功倍的效果。此外，「過去經驗」與「環境現況」此二項所佔之權重，呈現愈深山之區域愈高；而「避難處所」及「家庭與經濟」此二項則呈現愈往都會周邊方向，其所佔權重愈高。

在層級二「接獲警報」決策因子項下，「撤離通知」及「土石流警戒」為民眾最重視的二項警戒資訊；而在「過去經驗」項下，「曾經受災」及「防災演練或宣導」則為影響民眾疏散決策最重要的經驗因素，其中「曾經受災」此項因子，呈現愈往山區其所佔權重愈大，但「防災演練或宣導」此項因子則反之。此結果是否代表目前的防災演練及宣導固然已具有一定成效，但尚未滿足山區環境的某些防災特殊需求，值得進一步探討。在「環境現況」部份，「災情傳出」、「日間或夜間」為民眾主要之考量，此外在「鄰居已疏散」此因子，亦佔有相當之比例。對避難處所之考量上，安全性為民眾之最優先考量，但對深山地區之民眾而言，「距離遠近」所佔之權重明顯高於其他地區。在「家庭與經濟」方面，「家庭成員」是否有老弱婦孺為主要之考量，但愈接近都會周邊地區，「影響收入」及「財物損失」之考量所佔權重愈大。

#### (2) 無疏散避難經驗之民眾調查結果

調查結果顯示，無疏散經驗民眾在層級一之疏散避難決策因子權重，與有疏散避難經驗民眾之調查結果幾乎完全一致，在不同區位之比對分析下，亦與有疏散經驗民眾之調查結果相似，呈現地域性的差異。

在層級二「接獲警報」之決策因子項下，調查結果與有疏散經驗之民眾相似，「撤離通知」及「土石流警戒」亦為民眾最重視的二項警戒資訊。在「過去經驗」此項目下，「易成孤島」及「防災演練或宣導」為主要的二項決策因子，此部份為有疏散經驗民眾之調查結果略有不同，可能與無疏散經驗民眾多數亦無受災經驗有關；另較特別的是，都會周邊之無疏散經驗民眾反而比山區民眾更重視「易成孤島」此決策項目，或許與其職業或工作型態有關，導致對於交通中斷時間之忍受度較低。在「環境現況」方面，無疏散經驗民眾較重視「鄰居已疏散」及「災情傳出」此二項決策因子，且愈往山區「鄰居已疏散」此項決策因子所佔之權重愈高；此外，「日間或夜間」此決策因子，對於有無疏散經驗民眾之調查結果差異較大，尤其是在淺山區域調查結果相差接近 3 倍，此部份可能也是後續進行社區防災教育宣導時加強的重點區域。在「避難處所」及

「家庭與經濟」方面，整體來說大致與有疏散避難經驗民眾之調查結果類似。

表 3.8 民眾疏散避難決策因子權重

層級一	層級二	有疏散避難經驗				無疏散避難經驗			
		整體	都會 周邊	淺山	深山	整體	都會 周邊	淺山	深山
接獲警報		0.173	0.121	0.172	0.177	0.172	0.135	0.145	<b>0.250</b>
過去經驗		0.223	0.164	0.212	<b>0.250</b>	0.220	0.142	0.227	0.231
環境現況		<b>0.239</b>	0.061	<b>0.261</b>	<b>0.273</b>	<b>0.284</b>	0.149	<b>0.305</b>	<b>0.308</b>
避難處所		<b>0.258</b>	<b>0.393</b>	<b>0.243</b>	0.233	<b>0.230</b>	<b>0.249</b>	<b>0.251</b>	0.148
家庭與經濟		0.107	<b>0.260</b>	0.111	0.066	0.094	<b>0.325</b>	0.073	0.062
接獲警報	颱風警報	0.140	0.064	0.155	0.134	0.132	0.103	0.156	0.092
	土石流警戒	<b>0.256</b>	<b>0.328</b>	<b>0.241</b>	<b>0.259</b>	<b>0.273</b>	<b>0.304</b>	<b>0.275</b>	<b>0.215</b>
	淹水警戒	0.108	0.081	0.094	0.157	0.158	0.242	0.156	0.105
	撤離通知	<b>0.329</b>	<b>0.360</b>	<b>0.314</b>	<b>0.339</b>	<b>0.273</b>	<b>0.267</b>	0.206	<b>0.458</b>
	社區有災害潛 勢	0.167	0.167	0.196	0.110	0.164	0.084	<b>0.207</b>	0.130
過去經驗	曾經受災 曾疏散，但無 災害發生	<b>0.315</b>	<b>0.219</b>	<b>0.296</b>	<b>0.386</b>	0.227	0.129	<b>0.256</b>	0.222
	易成孤島	0.102	0.109	0.087	0.135	0.081	0.089	0.089	0.055
	防災演練或宣 導	0.222	0.137	0.259	0.169	<b>0.255</b>	<b>0.391</b>	0.195	<b>0.321</b>
	與以往颱風比 較	<b>0.261</b>	<b>0.432</b>	<b>0.261</b>	<b>0.207</b>	<b>0.255</b>	<b>0.284</b>	<b>0.230</b>	<b>0.268</b>
		0.101	0.102	0.096	0.104	0.182	0.106	0.230	0.134
環境現況	風雨增強	0.150	0.200	0.123	0.195	0.191	<b>0.446</b>	0.173	0.102
	災情傳出	<b>0.311</b>	<b>0.308</b>	<b>0.278</b>	<b>0.370</b>	<b>0.322</b>	<b>0.227</b>	<b>0.418</b>	0.166
	鄰居已疏散	0.256	<b>0.357</b>	0.239	<b>0.245</b>	<b>0.328</b>	0.193	<b>0.281</b>	<b>0.506</b>
	日間或夜間	<b>0.283</b>	0.135	<b>0.360</b>	0.189	0.160	0.135	0.128	<b>0.226</b>
避難處所	距離遠近	0.234	0.200	0.189	0.359	0.256	0.388	0.269	0.159
	食宿條件	0.132	0.200	0.097	0.206	0.157	0.224	0.146	0.134
	安全性	<b>0.634</b>	<b>0.600</b>	<b>0.714</b>	<b>0.435</b>	<b>0.587</b>	<b>0.388</b>	<b>0.585</b>	<b>0.708</b>
家庭與經濟	家庭成員	<b>0.477</b>	0.143	<b>0.489</b>	<b>0.588</b>	<b>0.548</b>	<b>0.536</b>	<b>0.648</b>	0.316
	影響收入	0.229	<b>0.429</b>	0.231	0.161	0.210	0.271	0.150	0.325
	財物損失	0.293	0.429	0.280	0.251	0.242	0.194	0.202	<b>0.359</b>

註：本表以各層級群組因子間之相對權重表示，黑體字為相對重要因子(權重和已逾或已接近50%)。

### 3.3.3 現行土石流警戒機制改進建議

為探討現行土石流警戒機制之優先改進方向，本研究亦於地方政府疏散決策因子之問卷中，請受訪者依其建議之優先順序排列，最後再採用序位法(即累積序位數目愈小者愈優先)評估優先順序。其問卷選項內容及說明如表 3.9，調查結果如表 3.10。

調查結果發現，對於縣市政府及鄉鎮公所而言，「提高警戒命中率」及「縮小警戒發布範圍」是最重要的二項改進方向，亦即對於地方政府而言是否能夠較精確地預測可能發生土砂災害的時間與位置，對於後續執行疏散避難等相關防災作為，是最迫切需要的資訊。而對於村里長而言，可能因其不易主動取得較詳細之警戒資訊，故其將「提供更詳細的警戒發布資訊」列為第一優先改進建議，未來相關單位進行基層防災教育訓練時，應可列為重點。

此外，許多研究指出的「狼來了」效應(假警報，亦即已發布土砂災害警戒，但未有災害發生)，在本次的調查中，似乎呈現影響不大的情形。例如，在表 3.5 地方政府疏散避難決策因子中，「警戒誤報率」之權重在「過去經驗」該層級下，僅佔 1 成，且對愈基層的單位而言，其權重愈小。同時，在表 3.8 民眾疏散避難決策因子中「曾疏散，但無災害發生」同樣也在「過去經驗」該層級中僅佔 1 成，對照表 3.10 之調查結果，「降低警戒誤報率」之優先順序也僅在第 4 位，是故未來在改善或評估警戒模式時，應以提高命中率为優先考量，以符實際需求。

表 3.9 現行土石流警戒機制改進建議項目

項目	說明
降低警戒誤報率	(1) 警戒誤報率=已發布警戒但無災害發生之鄉鎮數/已發布警戒之鄉鎮數 (2) 日本 2008 年之警戒誤報率約 87.8%，台灣歷年平均約 75.2%
提高警戒命中率	(1) 警戒命中率=位於警戒區內且警戒發布後才發生之災害件數/災害總件數 (2) 日本 2008 年之警戒命中率約 53.2%，台灣歷年平均約 45.4%
縮小警戒發布範圍	(1) 日本目前土砂災害警戒發布之最小單元為市町村(等同於台灣的鄉鎮)，但另提供 5KM 大小的網格式風險地圖，提醒那一個區塊災害發生風險較高 (2) 台灣目前土石流警戒發布之最小單元為村里，但以 Google 地圖方式提供每一條土石流潛勢溪流之紅、黃警戒等級
增加土石流災害警戒的適用範圍	(1) 日本目前土砂災害警戒適用範圍為土石流及淺層崩塌，不含地滑及深層崩塌 (2) 台灣目前僅有土石流警戒
提供更詳細的警戒發布資訊	例如除提供紅、黃警戒之等級外，另提供目前雨量、該地區歷年災例之雨量及災情狀況、後續預測雨量、附近地區之淹水及封路封橋資訊等。
其他	請填列明確需求：

表 3.10 現行土石流警戒機制優先改進建議調查結果

建議優先改進順序	縣市				鄉鎮				村里			
	整體	都會			整體	都會			整體	都會		
		週邊	淺山	深山		週邊	淺山	深山		週邊	淺山	深山
降低警戒誤報率	4	6	4	2	4	3	5	4	4	-	5	2
提高警戒命中率	1	5	1	1	2	2	3	1	2	-	2	4
縮小警戒發布範圍	2	3	2	2	1	1	1	1	4	-	4	5
增加土石流災害警戒的適用範圍	5	4	5	5	5	5	4	5	3	-	3	3
提供更詳細的警戒資訊	3	1	3	4	3	3	2	3	1	-	1	1
其他	6	2	6	6	6	6	6	6	6	-	6	6

### 3.4 小結

儘管疏散避難已被公認為降低土砂災害的有效方式，但不論對於地方政府或是民眾而言，疏散避難決策實為一複雜的「不確定情況下之決策」。其困難在於，如何在時間壓力及諸多不確定因素的情況下，兼顧民眾安全及疏散成本(包含疏散時須增加的費用，以及因經濟活動停止造成的損失)作出適當的決策。

本研究經由歸納整理，已分別建立地方政府及民眾之疏散避難決策因子層級架構，並利用問卷訪談目前實際負責疏散避難決策之地方政府業務人員及已有疏散避難經驗之民眾，再以成對比較方式及 AHP 理論分析擷取各決策因子在前揭人員決策過程中所佔之權重，已初步建構地方政府及土石流潛勢地區民眾之疏散避難決策模型。研究結果顯示，不同層級(縣市、鄉鎮、村里)地方政府之疏散決策因子明顯不同，而不同區域(都會周邊、淺山、深山)之地方政府及民眾之疏散決策因子亦有顯著差異。研究結果亦發現，不論地方政府或是民眾，皆認為提高現行警戒模式之命中率，比降低誤報率來得重要。

經由本研究所建構之地方政府及土石流潛勢地區民眾疏散避難決策模型，除可清楚呈現各項決策因子之重要性，亦能從中發現現行防災工作尚待加強之處，例如現行土石流警戒系統對於小區域之適用性不足，造成愈基層單位對於土石流警戒資訊之參考度愈低；而不同區域民眾疏散避難決策之差異，亦可作為後續推動防災工作改進之方向。

此外，由於 AHP 法實為反映在現況條件下之決策因子，若現況條件有所改變時(例如，土砂災害警戒系統之精度已大幅提昇，或是已採取新的防災策略與作為)，各決策因子之權重應會有所改變。故有關決策因子之問卷調查，應定期

更新，同時也可檢視經過調整後之防災策略是否已達成預期目標。

事實上，研究結果亦顯示，山區土砂災害疏散避難決策所考量的重點，不僅只有警戒資訊，尚包括時間、空間及社區現況等多重複雜因素，故若僅單純發展災害警戒系統(如土石流、水災、道路橋梁警戒等)，並不足以協助地方政府或民眾在災害期間作出正確的疏散避難決策。因此，面對山區日趨複雜的災害型態(例如莫拉克颱風期間發生的複合型土砂災害)，建立土砂災害疏散避難決策支援系統應是未來防災的重點工作之一，而本研究所建構的疏散避難決策模式亦可作發展初期之基礎資料。此外，國外目前有關颶風災害之疏散避難決策支援系統，大多僅考量沿海地區民眾疏散問題；相對而言，國內面臨之颶風豪雨期間山區民眾疏散決策所需考量之狀況更為複雜。同時，由本研究結果亦可看出，山區疏散決策受地理環境差異之影響甚大，故未來發展疏散避難決策支援系統時，建議宜以村里為單元，並依不同地方政府層級作不同之規劃。

### 參考文獻

- [1] 水土保持局(2012)，土石流防災資訊網，上網日期：2012/11/3。檢自：<http://246.swcb.gov.tw>。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2012). *Debris flow disaster prevention website*. (<http://246eng.swcb.gov.tw>) (2012/11/3))
- [2] 天野篤、高山陶子(2006)，「土砂災害と防災情報～台風 0514 号災害の避難に学ぶ～」，日本地すべり学会誌，43(6)，370-375。(AMANO, A. and TAKAYAMA, T. (2006). "On the situation of early warning information for sediment-related disasters ~Teachings of evacuation at T0514 disaster~." *Journal of the Japan Landslide Society*, 43(6), 370-375. (in Japanese))
- [3] 牛山素行、今村文彦、寶馨(2003)，「颱風 0206 号接近時の住民の災害對應の實態と課題」，京都大学防災研究所年報，46(B)，249-262。(Ushiyama, M., Imamura, F., and Takara, K. (2003). "Investigation of people's behavior in the highly flood disaster information ago – A case study on the typhoon No.0206 July, 2002." *Annals of Disaster Prevention Research Institute Kyoto University*, 46(B), 249-262. (in Japanese))
- [4] 牛山素行(2012)，「情報による土砂災害犠牲者の軽減可能性について」，平成 24 年度砂防学会研究発表會概要集，138-139。(Ushiyama, M.(2012). "The possibility of reducing sediment disaster victims based on information." *Proceedings of Conference of Japan Society of Erosion Control Engineering 2012*, 138-139 (in Japanese))
- [5] 井良沢道也、遠藤康多佳(2010)，「2002 年 7 月豪雨により発生した釜石市土砂災害の住民意識調査」，岩大演報，41，259-272。(Irasawa, M., and Endo Y. (2010). "An opinion poll administered to Kamaishi City residents about at sediment disaster generated by rainfall in July 2002." *Journal of Iwate*

- University*, 41, 259-272. (in Japanese))
- [6] 白仁德(2008),「大規模災害下避難決策需求與支援之研究—大規模災害下弱勢族群之避難疏散需求與資源運籌決策支援之研究—以颱風土石流災害為例(ii)」,行政院國家科學委員會,台灣。(Pai, J.T. (2008). *The study of the evacuation of the disadvantage groups under large-scale disaster*. National Science Council, Taiwan. (in Chinese))
- [7] 行政院農業委員會(2010),「土石流防災疏散避難作業規定」。(Council of Agriculture (COA) (2010). *Directions Governing the evacuation for debris flow disaster*. (in Chinese))
- [8] 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター(2010),「土砂災害の警戒避難等における技術的課題について」,第23回(平成22年度)砂防研究報告會第3分科會。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2010). "Studies of warning system and evacuation for sediment disaster." *23th Sabo research report*. (in Japanese))
- [9] 国土交通省河川局砂防部(2007),「土砂災害警戒避難ガイドライン」,日本。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC) (2007). *Guidelines of warning system and evacuation. Japan*. (in Japanese))
- [10] 岡本敦、富田陽子、水野正樹、林真一郎、西本晴男、石井靖雄(2012),「土砂災害警戒避難に関するデータ解析共同研究」,国土技術政策総合研究所,日本。(Okamoto, A., Tomita, Y., Mizuno, M., Hayashi, S., Nishimoto, H., Ishii, Y., and Chiba, S. (2012). *The data analysis regarding the warning and evacuation information against sediment-related disaster*. National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Japan (in Japanese))
- [11] 林建元(2007),「大規模災害下避難疏散決策需求與支援之研究—以颱風土石流易發生地區為例—總計畫暨子計畫:大規模災害下商業人口之避難疏散決策需求與支援之研究(I)」,行政院國家科學委員會,台灣。(Lin, C.Y. (2007). *The study of evacuation of commercial population under large-scale disaster*. National Science Council, Taiwan. (in Chinese))
- [12] 吳杰穎(2009),「不同土石流潛勢區居民疏散避難決策與行為之比較」,坡地防災學報, 8(1), 1-14。(Wu, J.Y. (2009). "The Comparative Study of Residential Evacuation Decision and Behavior for the Vulnerable Debris Flow Areas." *Journal of Slope Land Hazard Prevention*, 8(1), 1-14. (in Chinese))
- [13] 陳亮全、吳杰穎、劉怡君、李宜樺(2007),「土石流潛勢區內居民疏散避難行為與決策之研究—以泰利颱風為例」,中華水土保持學報, 38(4), 325-340。(Chen, L.C., Wu, J.Y., Liu, Y.C. and Lee, I.H. (2007). "A study of residential evacuation behavior and decision-making in a vulnerable debris flow area: The case of typhoon Talim." *Journal of Chinese Soil and Water*

- Conservation*, 38(4), 325-340. (in Chinese))
- [14] 陳亮全、馬士元(2008)，「大規模災害下避難決策需求與支援之研究－以颱風土石流易發生地區為例－子計畫－大規模災害下政府避難疏散決策及執行過程之研究(II)」，行政院國家科學委員會，台灣。(Chen, L.C. and Mars, S. (2008). *The study of evacuation decision of government under large-scale disaster*. National Science Council, Taiwan. (in Chinese))
- [15] 陳振宇(2012)，「以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估－以台灣及日本為例」，中華水土保持學報，44(1)，49-64。(Chen, C.Y. (2012). "Evaluation of Rainfall-Based Sediment Disaster Warning System: Case Study in Taiwan and Japan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(1), 49-64. (in Chinese))
- [16] 簡禎富(2005)，「決策分析與管理」，雙葉書廊有限公司，台灣。(Chien, C.F. (2005). *Decision making and management*, Yen Yen Book Gallery Co. Ltd., Taiwan. (in Chinese) )
- [17] Baker, E. J. (1991). "Hurricane evacuation behavior." *International journal of mass emergencies and disasters*, 9(2), 287.
- [18] Chen, S. C., Ferng, J. W., Wang, Y. T., Wu, T. Y., and Wang, J. J. (2008). "Assessment of disaster resilience capacity of hillslope communities with high risk for geological hazards." *Engineering Geology*, 98(3-4), 86-101.
- [19] Dash, N., and Gladwin, H. (2007). "Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household." *Natural Hazards Review*, 8(3), 69-77.
- [20] Dow, K., and Cutter, S. L. (1998). "Crying wolf: Repeat responses to hurricane evacuation orders." *Coastal Management*, 26(4), 237-252.
- [21] Flynn, C.B.(1979). *Three Mile Island Telephone Survey*, Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-1093, Washington D.C .
- [22] Gladwin, H., and Peacock, W. G. (1997). "Warning and Evacuation: A Night of Hard Choices." *Hurricane Andrew: Gender, Ethnicity and the Sociology of Disasters*, W. G. Peacock, B. H. Morrow, and H. Gladwin, eds., Routledge, London, 52-73.
- [23] Lindell, M., and Prater, C. (2007). "A hurricane evacuation management decision support system (EMDSS)." *Natural Hazards*, 40(3), 627-634.
- [24] Lindell, M. K., Lu, J.-C., and Prater, C. S. (2005). "Household Decision Making and Evacuation in Response to Hurricane Lili." *Natural Hazards Review*, 6(4), 171-179.
- [25] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010). "Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network." *Landslides*, 7(3), 325-338.

- [26] Perry, R. W. (1979). "Evacuation decision-making in natural disasters." *Mass Emergencies*, 4, 25-38.
- [27] Regnier, E. (2008). "Public Evacuation Decisions and Hurricane Track Uncertainty." *Management Science*, 54(1), 16-28.
- [28] Sataty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, John Wiley, New York.
- [29] Whitehead, J. C., Edwards, B., Van Willigen, M., Maiolo, J. R., Wilson, K., and Smith, K. T. (2000). "Heading for higher ground: factors affecting real and hypothetical hurricane evacuation behavior." *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 2(4), 133-142.
- [30] Wolshon, B., Urbina, E., and Levitan, M. (2001). *National review of hurricane evacuation plans and policies*, LSU Hurricane Center.
- [31] Zeigler, D. J., and Johnson, J. H. (1984). "EVACUATION BEHAVIOR IN RESPONSE TO NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENTS." *The Professional Geographer*, 36(2), 207-215.



## 第4章 以物理模式法進行崩塌及降雨-逕流模擬

### 4.1 前言

由於全球氣候變遷，由颱風豪雨所誘發之大規模崩塌，其發生頻率有日漸增加的趨勢，所造成的災害風險也日益升高。例如 2009 年莫拉克(Morakot)颱風期間發生於高雄縣甲仙鄉小林村的大規模崩塌，其產生的崩塌土方量高達  $2.7 \times 10^7$  m<sup>3</sup>(Wu et al., 2011)，造成小林村 9-18 鄰遭到掩埋，死亡人數高達 462 人。此外，2011 年侵襲日本的 12 號颱風塔拉斯(Talas)，除造成紀伊半島嚴重的風水災外，許多山區發生的大規模崩塌也造成了十幾個堰塞湖，並引發多起二次災害(Yamakoshi et al., 2012)。

造成大規模崩塌等地質災害的原因，大致可分為基因與誘因二大類。基因即該地區的地質、地形等條件；而誘因則主要為颱風豪雨以及地震。近期許多研究指出，颱風豪雨所誘發的大規模崩塌大多發生於降雨的後期，且發生的誘因多可歸因為高累積雨量所致(Fujita and Tsutsumi 2008; Dahal 2012)。

為降低大規模崩塌帶來的災害風險，一般會先以地質及地形條件來研判那些地方具有大規模崩塌的發生潛勢，後續才能進行相關防災規劃與避災、減災措施。例如 Chigira(2009)曾藉由實際的案例，探討深層崩塌潛勢區的特徵，Uchida et al.(2011)等曾利用地形及地質條件定出集水區尺度的深層崩塌潛在地區。此外，大規模崩塌發生的另一條件則與地質構造相關。一般而言，基岩位置往往是一個重要因子，例如：基岩的位置較深，則崩塌的規模可能將隨之增加；反之，如基岩位置較淺，則即使發生崩塌，其規模可能有限。然而，由於地質構造的探勘，大多費時且價格昂貴，因此許多研究試圖由地下水的流動，以及降雨-逕流之關係，去探索地底下的地質構造，亦即所謂的水文地質學(hydrogeology)。由於觀測之可行性及資料取得之便利性，降雨與逕流的變化，最常作為觀測及分析使用的資料。例如 Katsuyama et al.(2008)等曾比較花崗岩及沉積岩地區之逕流特性，以及森林年代對逕流之影響；結果發現森林年齡在沉積岩地區對逕流造成的差異，遠小於不同地質(花崗岩與沉積岩)對該地區逕流造成的影響，因而推論地質條件係影響逕流特性的重要因素。Onda et al.(2004)曾長期針對不同地質區域之降雨-逕流作持續性的觀測與分析，發現在中生代頁岩為主的集水區，其地中逕流(Sub-surface runoff)之排水強度與頻率明顯比以花崗岩為主的集水區為低，並推論中生代頁岩集水區相對而言比較容易發生深層崩塌。此外，Onda et al.(2006)亦比對多個暴雨事件之降雨-逕流之觀測結果，推論在花崗岩為主的集水區，其逕流多來自土壤間的滲流(subsurface storm flow)，但頁岩為主的集水區，其逕流多來自基岩岩縫間的水流(bedrock flow)。

由於地層中水份的流動，對於坡面的穩定有重要的影響，因此亦有部份研究嘗試由降雨-逕流之關係建立崩塌預警之可行性。例如，恩田裕一等(1999)曾

使用 4 年半的觀測資料，比較不同地質區域降雨-逕流延遲時間之差異，以及崩塌、土石流發生時間，發現在基岩含有許多裂隙導致逕流峰值明顯晚於降雨峰值的安山岩地區(圖 4.1)，多起土砂災害發生時間均在降雨峰值之後，故建議此類區域未來應考量將逕流納入崩塌及土石流之預警指標。然而，對於降雨-逕流與崩塌規模、時間之具體關連性之相關研究，則少有文獻探討。

儘管如前揭所提，利用長期現地觀測方式之研究具有重要意義，但現地觀測往往耗時且所費不貲，且實務上亦容易受限於現地環境之限制，故如能先以數值模擬方式初步掌握相關變因之關聯性與其變化趨勢，對於後續研究與觀測設施之佈建將有莫大助益；例如 Hopp and McDonnell (2009)曾以有限元素法模擬在坡面尺度下，將坡面坡度、土壤厚度、雨場規模及基岩滲漏性設為變因，配合現地實測資料，探討這些變因之交互作用對之土壤水分移動與逕流生成之影響。因此，本研究藉由數值模擬方式，進行基岩位置對降雨-逕流及崩塌規模影響之探討，後續並以模擬結果為基礎，嘗試提出初步評估大規模崩塌發生潛勢之建議。

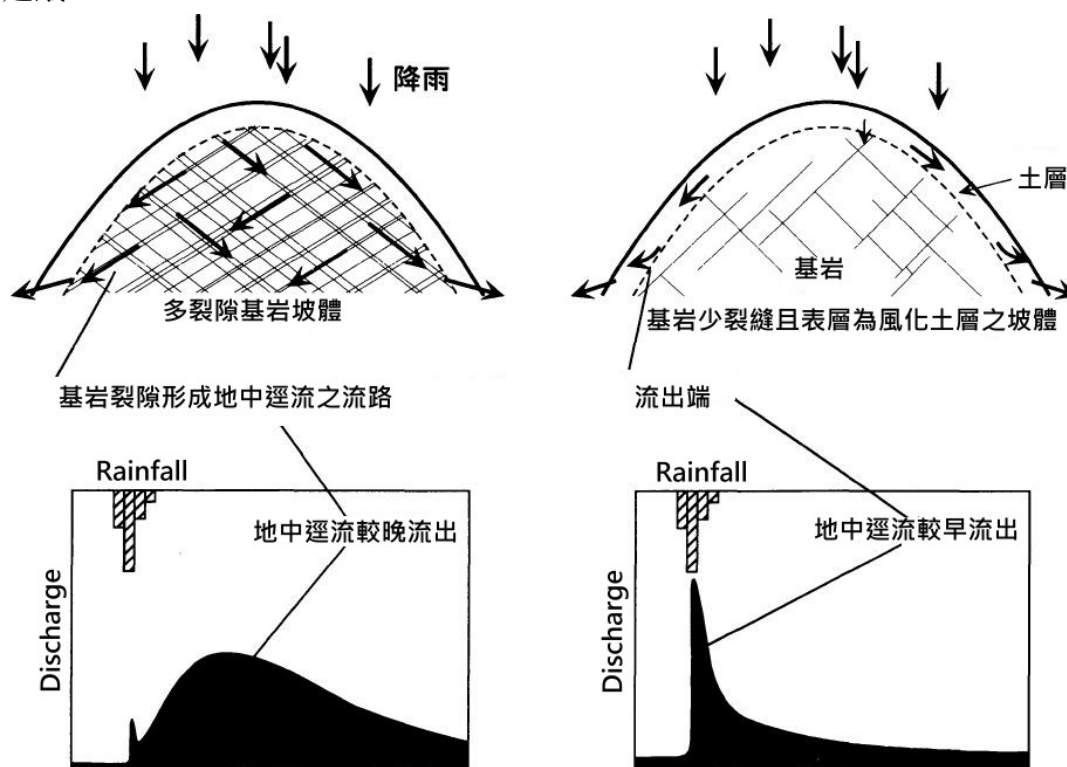


圖 4.1 多裂隙基岩坡面與少裂隙之花崗岩基岩坡面之降雨-逕流關係示意圖 (Onda et al., 1999)

## 4.2 材料及方法

### 4.2.1 整合式降雨-入滲-邊坡穩定分析模式

本研究使用自行發展的 IRIS(Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model, IRIS model)模式進行後續模擬與分析。此模式係由堤大三等(2007)發展，並整合降雨、入滲及邊坡穩定分析等多個模組，其所使用之相關理論與方式簡述如下：

#### (1) 降雨-入滲模組

本模組係使用 3 維 Richard's equation 來模擬土層中水含量之變化如式(4.1)：

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot \{K(\psi)[\nabla(\psi + z)]\} \quad (4.1)$$

其中  $C(\psi)$  為土層之水容量(water capacity)， $K(\psi)$  為水力傳導度(hydraulic conductivity)，土壤水分特性曲線則採用 Kosugi(1996)所提出的 LN 模式(lognormal model)，此模式係假設土壤孔隙半徑為對數正規分布，依此模式在不飽和土層中( $\psi < 0$ )，有效飽和度  $S_e$ (effective saturation)，以及  $C(\psi)$  與  $K(\psi)$  可表示為式(4.2)至式(4.4)：

$$S_e \left( \equiv \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = Q \left( \frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right) \quad (4.2)$$

$$C(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\sqrt{2\pi}\sigma(-\psi)} \exp \left\{ -\frac{[\ln(\psi/\psi_m)]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (4.3)$$

$$K(\psi) = K_s \left[ Q \left( \frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right) \right]^{1/2} \left[ Q \left( \frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} + \sigma \right) \right]^2 \quad (4.4)$$

其中  $\theta_s$  [ $m^3/m^3$ ] 為飽和水分含量(saturated soil water content)， $\theta_r$  [ $m^3/m^3$ ] 為殘餘水分含量(residual soil water content)， $\psi_m$  [m] 為土壤孔隙半徑中位數(the median soil pore radius)所對應之壓力勢能(pressure potential)， $\sigma$  為描述土壤孔隙半徑分布範圍的無因次參數， $K_s$  [m/s] 為飽和土壤之水力傳導係數， $Q(x)$  稱為餘正規分布函數(residual normal distribution)，並可表示如式(4.5)：

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{u^2}{2} \right) du \quad (4.5)$$

如土壤為飽和狀態時( $\psi \geq 0$ )，則令  $K(\psi) = K_s$  且  $C(\psi) = 0$ 。由於上述關係式具有高度非線性，不易有解析解，故本 IRIS 模式使用有限元素法求解(Istok, 1989)。

## (2) 邊坡穩定分析模組

上述由有限元素法求解之降雨-入滲分析結果，可計算出土層中每個有限元素法分析網格上之土壤孔隙水壓，此結果將被用來進行邊坡穩定分析之計算。本模組採用可分析任何形狀滑動面之簡易 Janbu 法進行計算，先將滑動土體分割成諸多垂直切片，再據以計算其應力平衡結果。由此法所計算出之邊坡穩定安全係數  $F_s$  可表示為式(4.6)及(4.7)：

$$F_s = \frac{\sum \left[ \left\{ c_i' l_i \cos a_i + (W_i - u_i l_i \cos a_i) \tan \phi_i' \right\} \right] / m_a}{\sum \tan a_i} = \frac{\sum A_i}{\sum B_i} \quad (4.6)$$

$$m_a = \cos^2 a_i \left( 1 + \frac{\tan a_i \tan \phi_i'}{F_s} \right) \quad (4.7)$$

其中下標  $i$  為滑動面上每一個垂直切片之編號， $c_i'$  為土壤凝聚力， $\phi_i'$  為土壤之內摩擦角， $W_i$  為滑動土體之垂直切片重量， $a_i$  為垂直切片面之滑動面角度， $l_i$  為垂直切片面之滑動面長度， $u_i$  為垂直切片滑動面上之孔隙水壓，此處即使用前階段由有限元素法求解之降雨-入滲分析結果。因此，式(4.6)之  $A_i$  部份即為抵抗力， $B_i$  部份即為滑動力。

## (3) 臨界滑動面分析模組

由於前述簡易 Janbu 法或 Spencer 法等切片分析方法，均需先自行假設多個可能之滑動面，分別計算安全係數後，再取安全係數最小之滑動面為臨界滑動面；然而，在此過程中缺少一客觀及標準程序，往往不易找到真正之臨界滑動面。為此，本模式採用動態規劃法(Dynamic Programming method, DP)結合變分法方式計算出安全係數最小之臨界滑動面(久保田哲也、中村浩之，1991；Yamagami and Ueta, 1986；Baker, 1980)。

事實上，動態規劃法只能用於滿足加法性之函數(additive functions)，而式(4.6)之型式並不符合此條件，故 Baker(1980)參考古典變分理論之作法，定義一輔助函數  $G$  如(4.8)式，並證明求解式(4.8)輔助函數  $G$  之最小值與求解式(4.6)安全係數  $F_s$  之最小值為等價(equivalent)。亦即如能解出輔助函數  $G$  之最小值路徑，該路徑即代表此坡面安全係數最小之滑動面；如此時  $F_s$  小於 1 時，則此路徑即為坡面崩塌之臨界滑動面(critical slip surface)。

$$G = \sum_{i=1}^n (A_i - F_s \cdot B_i) \quad (4.8)$$

其中  $n$  為分析滑動面之切片數， $F_s$  為安全係數；由於在計算  $A_i$  及  $B_i$  之式(4.6)中，亦含有  $F_s$ ，故須以疊代方式計算；同時，由於初次計算時，此值尚未知，故可先任意設定一初始值，例如  $F_s=1$ 。

為將動態規劃法導入此求解臨界滑動面問題，須先將坡面適當分成  $n+1$  階(stage)，如圖 4.2(a)之垂直線。同時，每一階均可再適當分成若干層(state)，如

圖 4.2(a)之圓點。如圖 4.2(b)，若 $(i, j)$ 及 $(i+1, k)$ 為任二相鄰階的節點，則線段 $jk$ 即可視為滑動面的其中一段，亦即四邊形 $abkj$ 即可視為該滑動面的其中一塊切片，並可依式(4.6)及(4.7)計算其相應的 $A_i$ 及 $B_i$ 值。因此，由節點 $(i, j)$ 至節點 $(i+1, k)$ 之 $G$ 的變量 $DG_i(i, k)$ 可表示為：

$$DG_i(j, k) = A_i - F_s \cdot B_i \quad (4.9)$$

同時，若定義函數 $H_i(j)$ 為由第一個 stage 至節點 $(i, j)$ 之輔助函數 $G$ 之最小值，則其可表示為：

$$H_{i+1}(k) = \min_{j=1 \sim S_{n+1}} [H_i(j) + DG_i(j, k)]_{k=1 \sim S_{i+1}}^{i=1 \sim n} \quad (4.10)$$

且邊界條件為，在路徑起點：

$$H_1(j) = 0, \quad j = 1 \sim S_1 \quad (4.11)$$

在路徑終點，則為

$$G_m = \min G = \min_{j=1 \sim S_{n+1}} [H_{n+1}(j)] \quad (4.12)$$

其中 $S_i$ 為第 $i$ 階的總層數。

藉由上述之方式，即可逐步求出 $F_s$ 最小之滑動面，再將此滑動面所對應之各段路徑之 $A_i$ 及 $B_i$ 值代回(4.6)式，即可計算出該滑動面之 $F_s$ 值。如前所述，本研究取 $F_s < 1$ 時代表坡面已崩塌，其所對應之滑動面即為臨界滑動面。

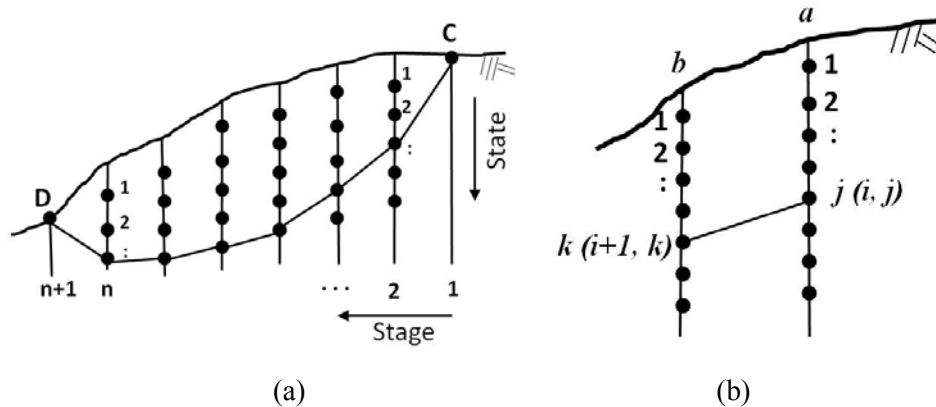


圖 4.2 (a)動態規劃法應用於臨界滑動面求解之路徑節點示意圖(b)相關符號示意

#### 4.2.2 IRIS 模式應用案例

為驗證本研究使用之 IRIS 模式之適用性，本研究挑選二處不同類型之崩塌型式進行模擬。其中一處為 2005 年發生於日本大分縣竹田市之深層崩塌，一處為 2012 年發生於日本京都府宇治市之淺層崩塌案例。

##### (1) 竹田市深層崩塌案例

2005 年 9 月 14 號颱風期間，日本大分縣竹田市瀬の口地區發生一深層崩塌案例 該處坡面主要係由壤土及火山碎屑沉積物所組成，最大崩塌深度約 18m。

儘管這次颱風降雨期間該地區之最大時雨量僅有 32mm/h，但降雨延時逾 48 小時，總雨量達 536mm，遠超過當地 9 月份平均雨量 228mm，約為年平均雨量 (1826mm) 之 30%。此處之模擬採用自 8 月 1 日至 9 月 3 日之降雨作為前期雨量，正式模擬期間為 9 月 4 日至 6 日，並採用 10 分鐘為模擬時間間距。模擬所使用之土壤相關參數係由現地取樣後(上層取樣位置約為地表下 10cm，中層為滑動體土體，下層為滑動面處)，經室內土壤水分特性曲線及直接剪力試驗所得(堤大三等, 2007)，其值如表 4.1，模擬結果如圖 4.3。圖 4.3 結果顯示，IRIS 模式之模擬結果與實際崩塌發生時間與規模非常接近；同時，圖 4.3 結果亦展示，IRIS 模式不僅能計算邊坡穩定之安全係數，並求出崩塌發生時間及規模，也能同時計算土層中之水含量(water content)之變化，以及地表及地中逕流量。

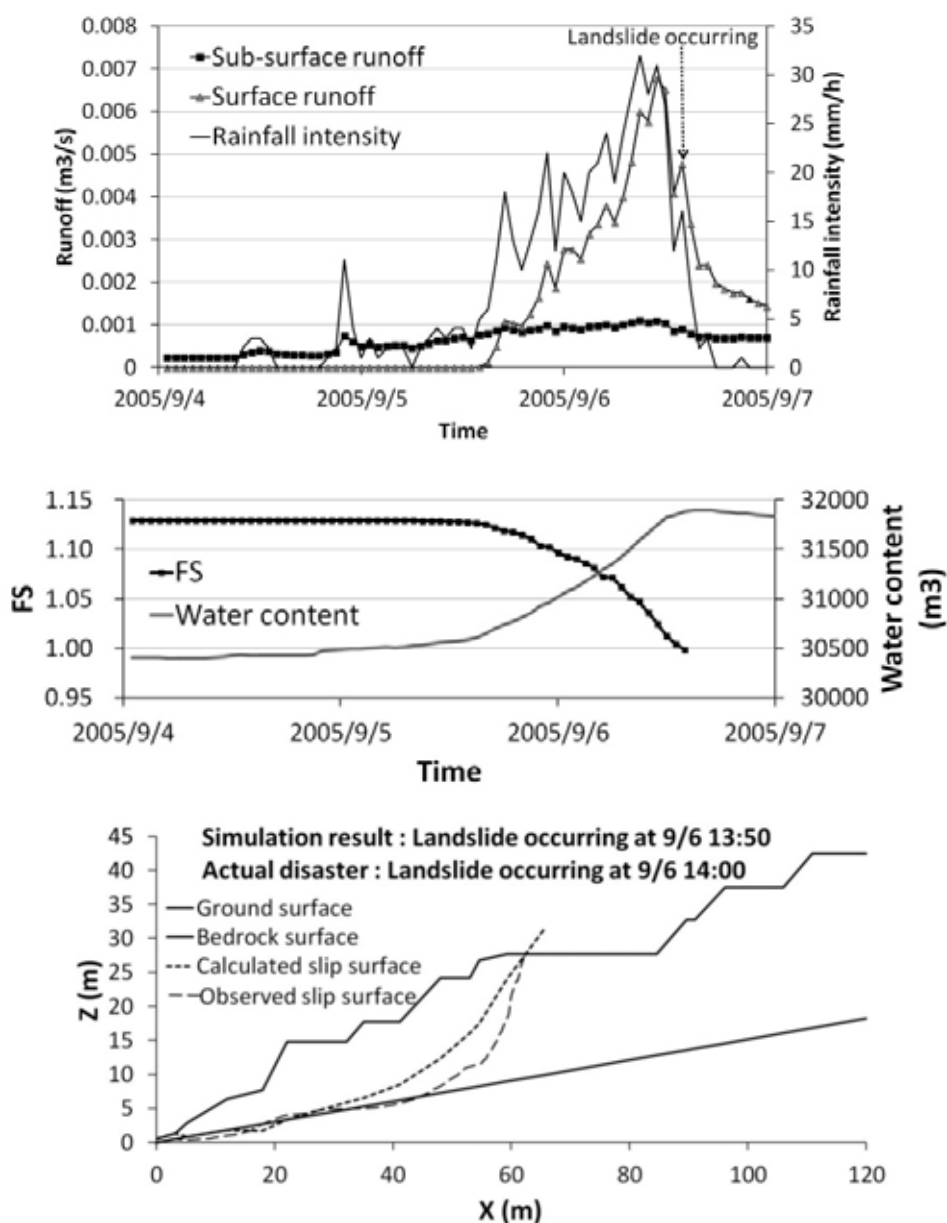


圖 4.3 2005 年 14 號颱風期間日本大分縣竹田市崩塌模擬結果

表 4.1 2005 年 14 號颱風期間日本大分県竹田市崩塌模擬相關參數

Hydraulic parameters	$K_s$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\psi_m$	$\sigma$
	cm/s	$m^3/m^3$	$m^3/m^3$	cm	-
Surface	$2.42 \times 10^{-2}$	0.646	0.477	-792	0.875
Middle	$3.32 \times 10^{-3}$	0.595	0.441	-595	1.36
Lower	$5.69 \times 10^{-4}$	0.682	0.577	-797	1.02
Soil strength	$\gamma_{sat}$	C		$\phi$	
	t/m <sup>3</sup>	tf/m <sup>2</sup>		degree	
	1.92	2.0		17	

## (2) 宇治市淺層崩塌案例

本案例發生於 2012 年 8 月 13-14 日豪雨期間之宇治市志津川流域，由於該處並無地面雨量站，惟依據國土交通省之 X-band 雷達解析雨量資料，其最大時雨量高達 153.5mm/h，累積雨量亦達 347mm，係典型之高強度短延時之強降雨類型，並引發多起淺層崩塌。此處坡面以砂頁岩互層為主，最大崩塌深度約 3m。在此案例，本研究使用 7 月 1 日至 8 月 12 日之雨量為前期雨量，正式模擬期間為 8 月 13 日至 14 日，並採用 1 分鐘為模擬時間間距。模擬所使用之土壤相關參數係由現地取樣後，經室內試驗所得，詳如表 4.2，模擬結果如圖 4.4。模擬結果之崩塌發生時間與實際情形非常接近，但崩塌規模則較實際為小，推測差異來源應為模擬係採安全係數小於 1 時即停止模擬，但實際崩塌則可能為多階段崩塌導致崩塌規模擴大所致。因此，由前揭竹田市及宇治市此二案例可顯示，IRIS 模式可同時適用於深層及淺層崩塌之分析。

表 4.2 2012 年 8 月豪雨日本京都府宇治市崩塌模擬相關參數

Hydraulic parameters	$K_s$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\psi_m$	$\sigma$
	cm/s	$m^3/m^3$	$m^3/m^3$	cm	-
Surface	0.132	0.467	0.240	-31.2	1.40
Middle	0.0035	0.468	0.270	-23.7	1.17
Soil strength	$\gamma_{sat}$	C		$\phi$	
	t/m <sup>3</sup>	tf/m <sup>2</sup>		degree	
	1.64	1.1		31	

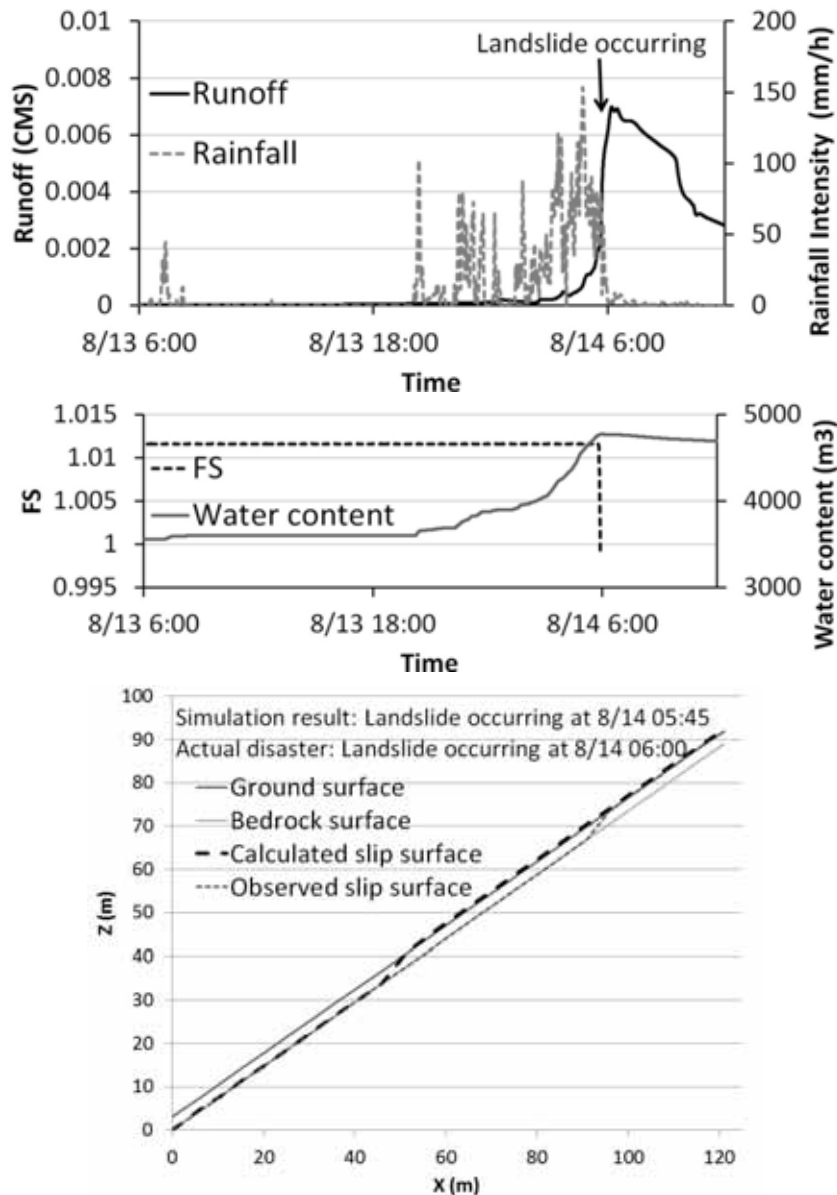


圖 4.4 2012 年 8 月豪雨日本京都府宇治市崩塌模擬結果

### 4.2.3 簡化坡面模型

為簡化分析，本研究採用四個參數定義簡化坡面模型，如圖 4.5(a)。其中  $\alpha$  為地表坡度， $L$  為坡面之水平長度， $\beta$  為基岩坡度， $n_s$  為下游端流出土壤層厚度，並假設基岩為不透水層。為探討基岩位置對於大規模崩塌之規模與發生時機之影響，本研究採用  $\beta=10^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $18^\circ$  三種基岩坡度建構簡化坡面模型，而地表坡度  $\alpha$  則均設為  $25^\circ$ ，坡面水平長度  $L$  均設為 100m，下游端流出土壤層厚度  $n_s$  均設為 1m，坡面寬度則取單位寬度(1m)。本研究採用三維之四面體元素建構有限元素法之分析網格，所有的網格在  $x$  方向之最大間距為 5m， $z$  方向之最大間距為 2.14m (如圖 4.5(b))。為降低網格尺寸對估算地表面之直接逕流(包含 surface runoff 及 interflow)及下游端截面流出之基流(base flow)的影響，此三種簡化坡面模型於地表最上層及最下游端截面層，係採用相同之網格尺寸。而在降雨入



滲地表面之入滲率邊界條件方面，本模式假設地表層土體尚未飽和時，所有降雨均滲入土體；土體一旦飽和後，則降雨全數轉為地表逕流(surface runoff)。此外，計算過程中，當表層土體之網格節點壓力水頭大於零時，則設定其為飽和狀態，先計算該節點所在之四面體元素朝向地表之通量(flux)，並將此通量值設為該處地面滲出之 interflow 量後，再將該節點壓力水頭設為零。

#### 4.2.4 模擬所用相關參數

本研究為突顯基岩位置對於降雨-逕流關係之影響，故假設基岩面上方之土壤均為單一材料，同時假設基岩為不透水層，並參考堤大三等(2007)、藤田正治等(2010)及 2012 年宇治市豪雨崩塌災害模擬所使用的水力傳導參數及土壤力學參數，分別採用火山碎屑沉積物、風化花崗岩，以及砂頁岩互層等三種材料進行模擬，相關參數如表 4.3，土壤水分特性曲線如圖 4.6。其中，火山碎屑沉積物具有高保水性，但透水性較低；風化花崗岩則透水性較高，但保水性差；砂頁岩互層則保水性介於前二者之間，但透水性與火山碎屑沉積物相同。此外，為便於說明與比較各個案例，本研究使用「VB10」此符號代表基岩坡度為  $10^\circ$  之火山碎屑沉積物坡面，「GB14」代表基岩坡度為  $14^\circ$  之風化花崗岩坡面，「SSB18」代表基岩坡度為  $18^\circ$  之砂頁岩互層坡面。

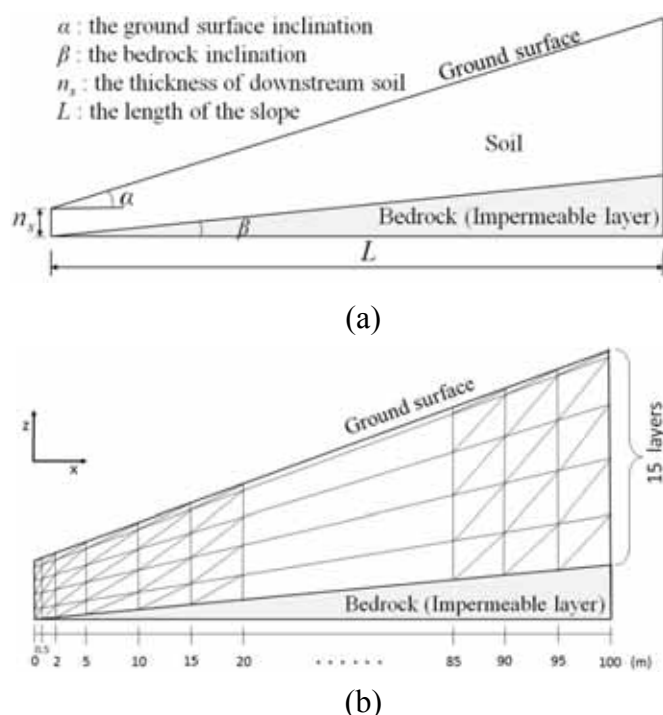


圖 4.5 (a)簡化坡面模型 (b)有限元素法網格示意圖

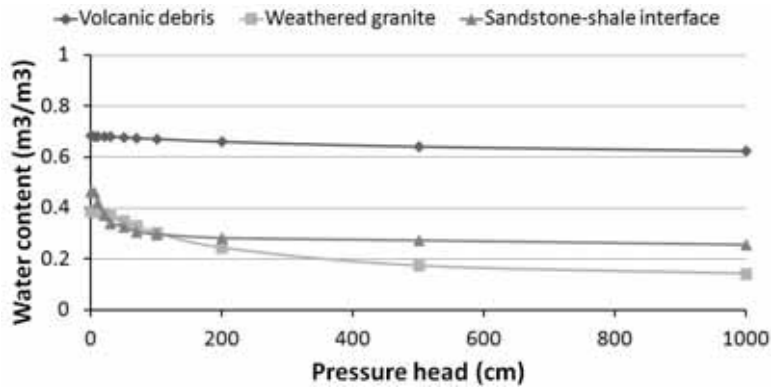


圖 4.6 不同類型土壤之土壤水分特性曲線

表 4.3 模擬坡面之土壤相關參數

Hydraulic parameters	$K_s$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\psi_m$	$\sigma$
	cm/s	$m^3/m^3$	$m^3/m^3$	cm	-
Volcanic debris	$3.50 \times 10^{-3}$	0.684	0.577	-797.4	2.53
Weathered granite	$6.71 \times 10^{-3}$	0.387	0.128	-91.38	2.27
Sandstone-shale interface	$3.50 \times 10^{-3}$	0.468	0.270	-23.7	1.17
Soil strength	$\gamma$	C		$\phi$	
	t/m <sup>3</sup>	tf/m <sup>2</sup>		degree	
Volcanic debris	1.92	2.3		17	
Weathered granite	2.0	0.5		30	
Sandstone-shale interface	1.64	0.8		31	

#### 4.2.5 土體內初始孔隙水壓條件設定方式

本研究為模擬自然情況下，坡面內土壤水份分布情形，並消除土體內不同起始孔隙水壓條件對後續模擬之影響，乃先設定所有坡面內全部土壤之初始壓力水頭均為  $-0.01m$ ，再給予強度為  $0.1mm/h$  之固定降雨，持續進行模擬，使其土壤內之水份自然流動分布與排放，直至其降雨入滲量與下游端自然排出之基流(base flow)流量完全相等，且土體之總含水量維持不變逾 30 天以上時，取其土體內之孔隙水壓分布為該坡面之初始孔隙水壓。經前述過程後，各坡面土體進行後續正式模擬時之初始有效飽合度  $S_e$  如表 4.4。其中，保水性高，透水性低之火山碎屑沉積物坡面之初始有效飽和度最高，保水性低但透水性高的風化花崗岩坡面次之，而保水性中等，但透水性低之砂頁岩互層坡面之初始有效飽和度最低。

表 4.4 各簡化坡面之初始土壤有效飽合度

	VB10	VB14	VB18	GB10	GB14	GB18	SSB10	SSB14	SSB18
$S_e$ (%)	76.1	76.5	77.4	61.6	62.0	62.5	28.9	29.6	30.6

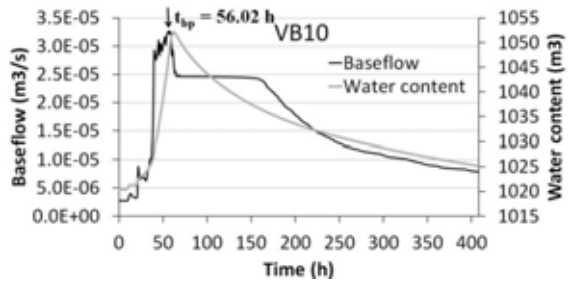
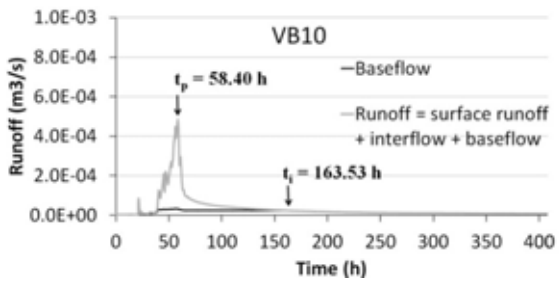
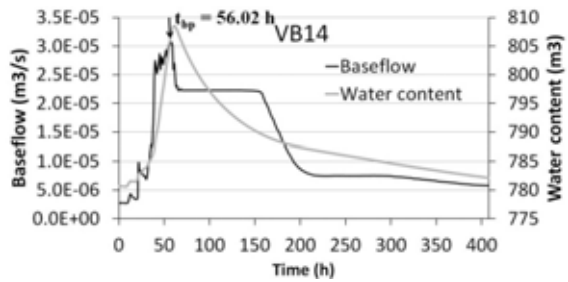
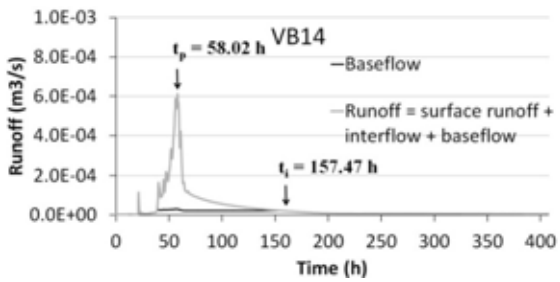
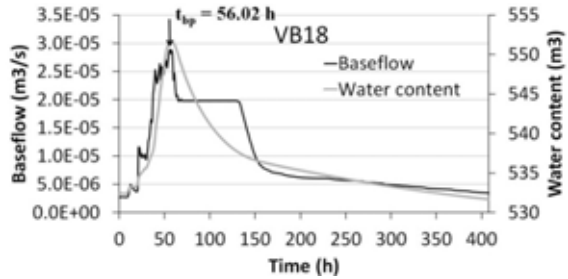
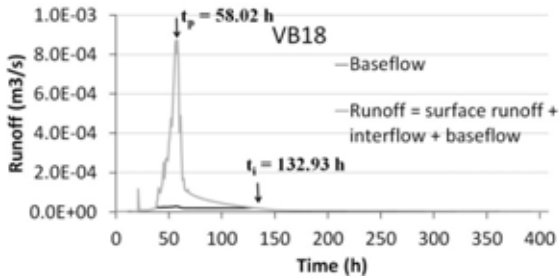
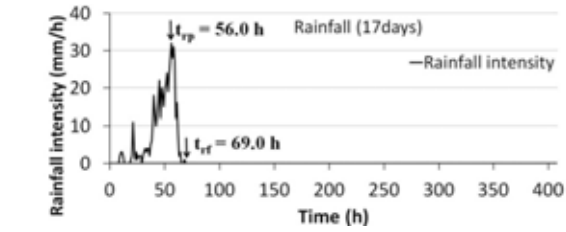
## 4.3 研究發現

### 4.3.1 基岩位置對降雨逕流關係之影響

將4.2.5節模擬土壤水份自然分布，且已消除初始條件影響所得的9種坡面，進行為期17日之降雨-逕流及邊坡穩定分析模擬，模擬所得結果包括下游端截面流出之基流量、地表面之直接逕流量(包含 surface runoff 及 interflow)，以及土層之水含量(water content)等數據。正式模擬期間之降雨資料，採用竹田市2005年9月4日至6日之實際降雨資料再加上14日無降雨之資料所組成，共計17日。所有的模擬時間間距採用1分鐘。模擬期間，所有坡面之穩定安全係數 $F_S$ 均大於1，亦即均未發生崩塌。

#### (1) 火山碎屑沉積物坡面

圖4.7為三種不同基岩坡度之火山碎屑沉積物坡面，於模擬降雨期間之歷線圖(hydrograph)。由圖4.7(a)可知，對於具有高保水性，且滲透性較低的火山碎屑沉積物坡面，基岩位置愈淺者，其總逕流量(包含 surface runoff、interflow 及 base flow)之峰值愈大，且總逕流量之峰值發生時間及中間流(interflow)結束之時間( $t_i$ )大致愈早。此外，如圖4.7(b)所示，基岩位置愈深者，基流峰值愈大，惟差異不大，且基流峰值發生時間完全相同；在水含量(water content)部份，則呈現基岩位置愈深者，在上昇階段及下降階段變化均較大之現象。圖4.8為基岩坡度14度之火山碎屑沉積物坡面(VB14)於模擬期間，各時段之壓力水頭變化，相較於另二類坡體之案例，如圖4.8(b)在降雨期間，火山碎屑沉積物坡面明顯比較容易蓄積水份，不利於坡面安定性。



(a)

(b)

圖 4.7 火山碎屑沉積物坡面之降雨-逕流歷線

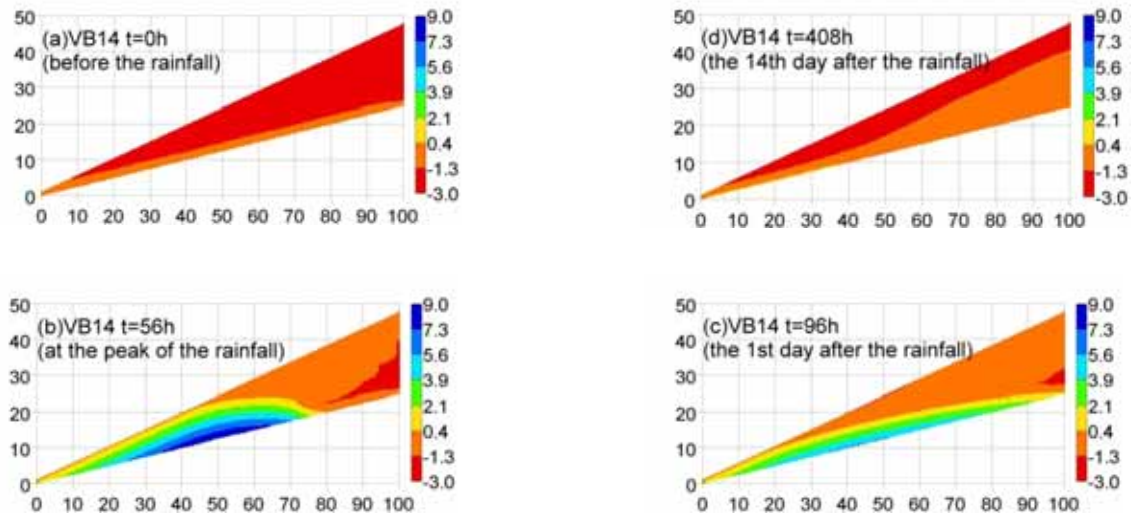


圖 4.8 基岩坡度 14 度之火山碎屑沉積物坡面各時段壓力水頭分布圖(a)t=0h  
(b)t=56h (c)t=96h (d)t=408h

## (2) 風化花崗岩坡面

圖 4.9 為三種不同基岩坡度之風化花崗岩坡面，於模擬降雨期間之歷線圖。由圖 4.9(a)可知，對於保水性較差，透水性較高的風化花崗岩坡面，基岩位置愈深者，其總逕流量之峰值愈大，且總逕流量之峰值發生時間及中間流結束之時間愈早，此結果恰與火山碎屑沉積物坡面恰相反。此外，如圖 4.9(b)所示，在基流部份，亦為基岩位置愈深者，基流峰值愈大，但基流峰值發生時間則大致愈晚。值得注意的是，模擬期間 GB18 之坡面，其基流出現多峰之現象。由於此處之基流來源單純係由上層土壤水份向下入滲而來，故可知在透水性較高、保水性較低之風化花崗岩坡面內，單純的入滲現象亦可能為雙峰或多峰逕流之成因之一。另，在水含量變化部份，則為基岩位置愈深者，其上昇及下降階段均變化較小，此部份亦與火山碎屑沉積物坡面相反。圖 4.10 為 GB14 於 17 日之模擬期間各時段土體內之壓力水頭分布圖，由各時段壓力水頭之變化，可清楚呈現土體內水份移動之情形。

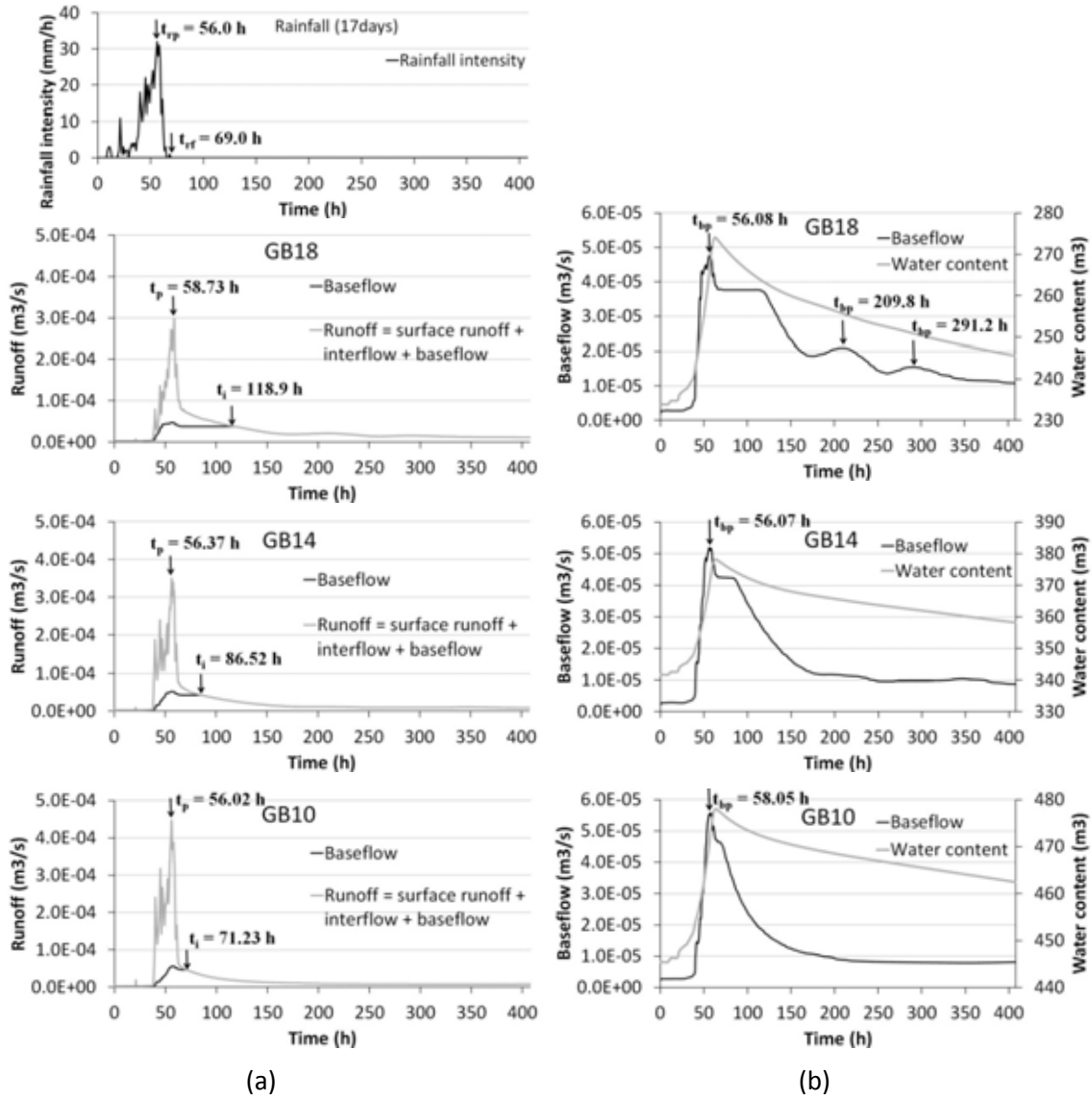


圖 4.9 風化花崗岩坡面之降雨-逕流歷線

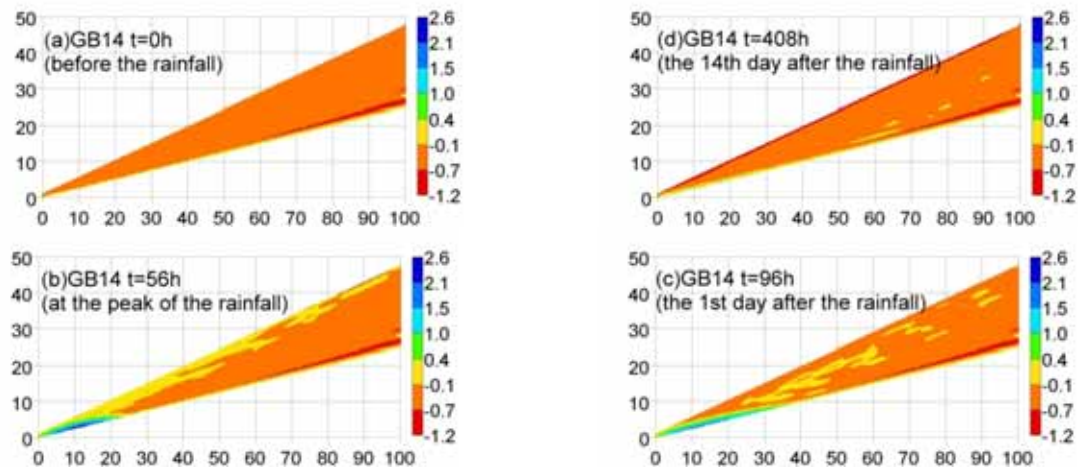


圖 4.10 基岩坡度 14 度之風化花崗岩坡面各時段壓力水頭分布圖 (a)t=0h (b)t=56h (c)t=96h (d)t=408h

### (3) 砂頁岩互層坡面

圖 4.11 為三種不同基岩坡度之砂頁岩互層坡面，於模擬降雨期間之歷線圖 (hydrograph)。由圖 4.11(a)可知，對於具有中等保水性，且滲透性較低的砂頁岩互層坡面，基岩位置愈淺者，其總逕流量之峰值愈大，且總逕流量之峰值發生時間愈早，此趨勢與火山碎屑沉積物坡面一致。但中間流結束之時間，卻完全相反，亦即基岩位置愈淺者，結束時間愈晚。且差異甚大。此外，如圖 4.11(b)所示，在基流部份變化之趨勢，則與火山碎屑沉積物坡面大致一致，亦即基岩位置愈深者，基流峰值愈大，但基流峰值發生時間大致較晚；另，與前二類坡面不同的是，在水含量部份，呈現基岩位置愈深者，在上昇階段變化較大，但在下降階段反而變化較小。圖 4.12 為基岩坡度 14 度之砂頁岩互層坡面(SSB14)於模擬期間，各時段之壓力水頭變化。

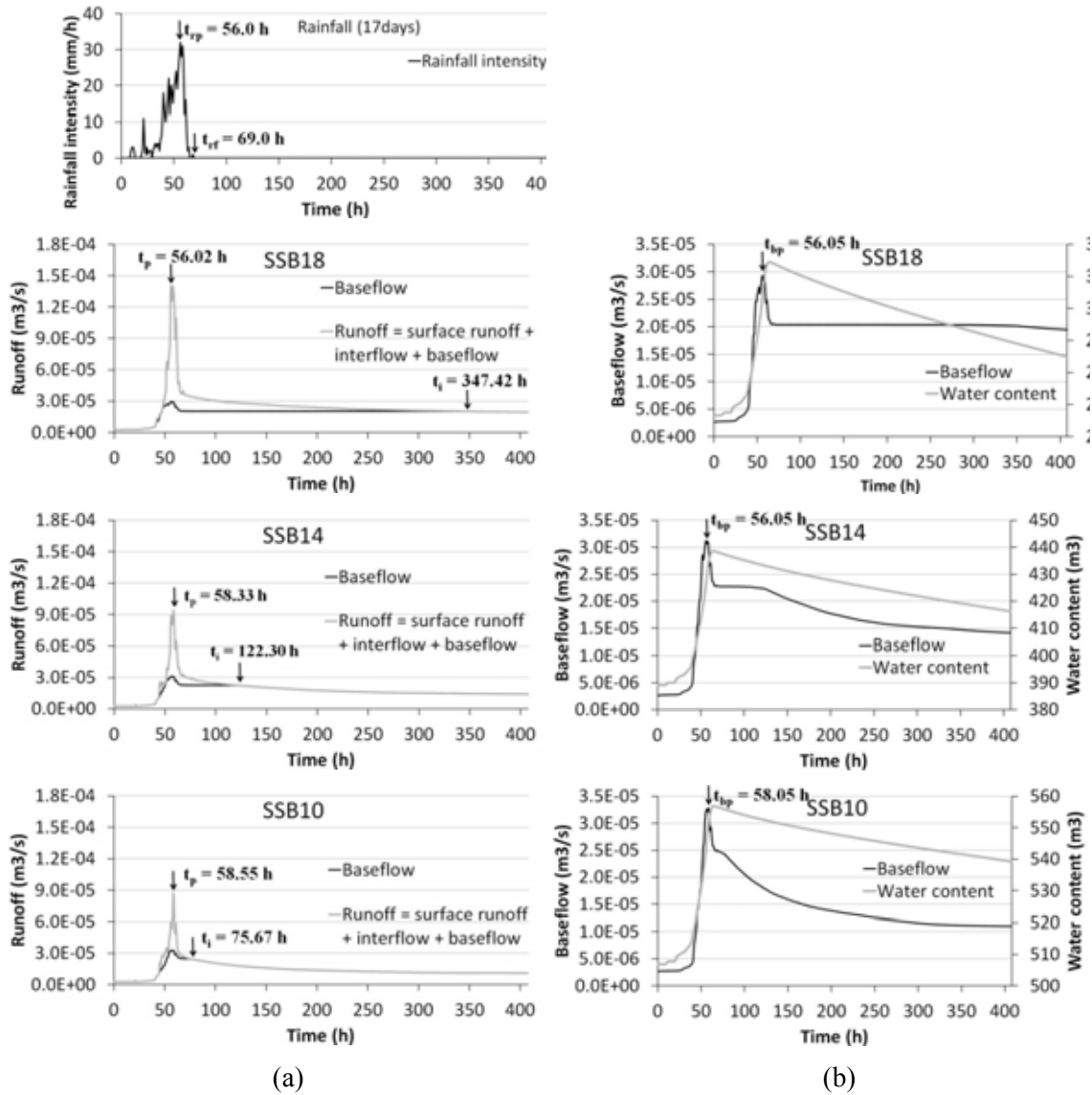


圖 4.11 砂頁岩互層坡面之降雨-逕流歷線

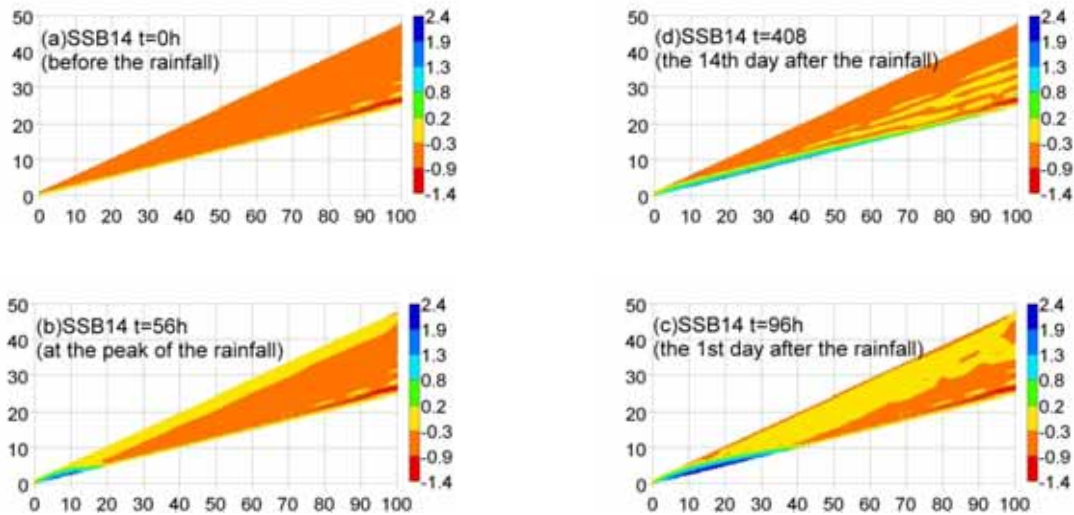


圖 4.12 基岩坡度 14 度之砂頁岩互層坡面各時段壓力水頭分布圖 (a)t=0h (b)t=56h (c)t=96h (d)t=408h

### 4.3.2 基岩位置對崩塌時間及規模之影響

為探討不同基岩坡度對於崩塌規模及發生時間之影響，本研究分別使用五種不同降雨強度及延時，但總累積雨量相同之雨場(如圖 4.13)，測試每一種坡面。各雨場分別以其最大時雨量(I=20,40,60,80,100 mm/h)命名之。

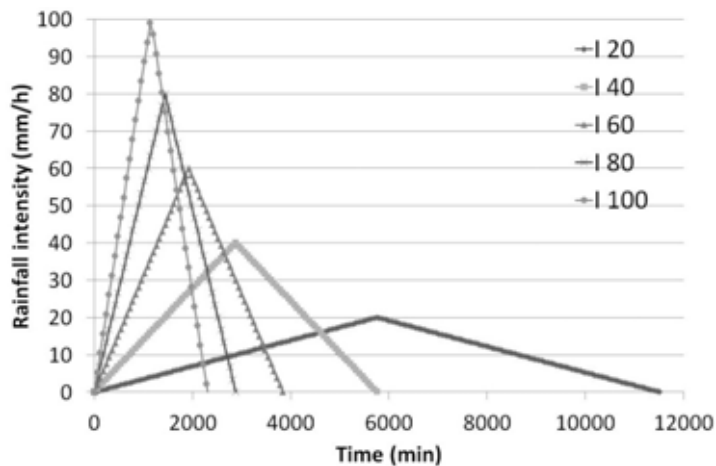


圖 4.13 降雨-入滲-崩塌模擬所使用之五種不同雨場

#### (1) 火山碎屑沉積物坡面

針對火山碎屑沉積物坡面分別給予所述五種雨場，其崩塌時間、規模及崩塌時土體之水含量如表 4.5，崩塌時臨界滑動面剖面如圖 4.14。模擬結果顯示，在相同降雨強度下，基岩位置愈深者，其初始安全係數愈低，崩塌發生時間愈早，滑動面長度愈長，規模愈大；此外，所有的案例均呈現，當降雨強度愈大時，崩塌時間愈早，但崩塌規模相同。值得注意的是，在此火山碎屑沉積物坡



體之三個案例中，均呈現不論降雨強度多寡，崩塌發生時，土體內的水含量幾乎一致，且雨量強度愈大，崩塌時土體水含量低愈之現象。

表 4.5 火山碎屑沉積物坡面於不同降雨強度下之崩塌時間、規模及土體水含量

	VB10				VB14				VB18			
Fsi	1.008				1.046				1.123			
	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> /m)	Difference rate of water content (%)	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> /m)	Difference rate of water content (%)	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> /m)	Difference rate of water content (%)
I=20	2419	1130.7	1031.0	0.39	2709	926.6	797.2	0.61	2865	634.2	548.5	0.29
I=40	1013	1130.7	1027.7	0.06	1271	926.6	793.4	0.13	1401	645.0	547.7	0.15
I=60	655	1130.7	1026.1	-0.09	854	926.6	791.4	-0.12	937	645.0	546.6	-0.05
I=80	487	1130.7	1025.4	-0.16	649	926.6	790.2	-0.28	721	645.0	546.0	-0.16
I=100	392	1130.7	1025.0	-0.20	531	926.6	789.6	-0.34	593	645.0	545.6	-0.23
	Mean	1027.0			Mean	792.4			Mean	546.88		

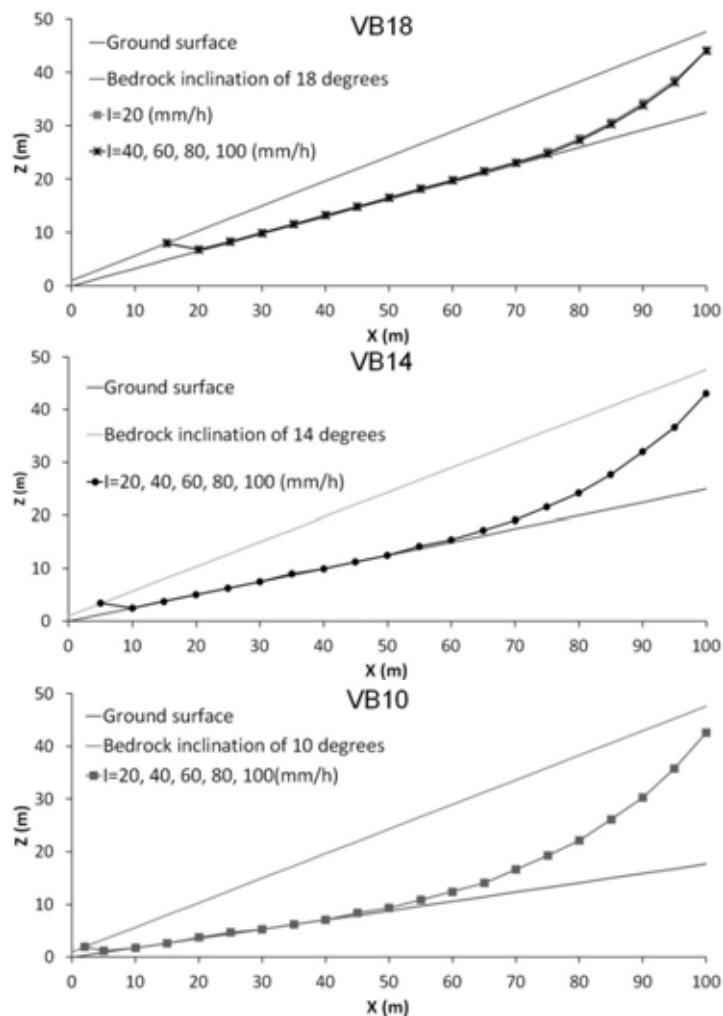


圖 4.14 不同降雨強度下不同基岩坡度之火山碎屑沉積物岩坡面滑動面

## (2) 風化花崗岩坡面

風化花崗岩坡面在五種雨量作用下，其崩塌時間、規模及崩塌時土體之水含量如表 4.6，崩塌時臨界滑動面剖面如圖 4.15。由於風化花崗岩坡體之滲透性較佳，保水性不佳，土體內之水分可快速排除，故容易造成土體失穩之高壓力水頭多分布在下游處，也因此不論基岩角度為何，破壞滑動面均分布在下游端。模擬結果顯示，在相同降雨強度下，基岩位置愈深者，其初始安全係數愈低，但崩塌發生時間卻愈晚；同時，在雨量強度不大時，滑動面長度反而愈短，規模愈小，但差異不大。此外，所有的案例亦同火山碎屑沉積物坡面，當降雨強度愈大時，崩塌時間愈早，但崩塌規模愈小。在崩塌時土體之水含量方面，同樣出現不論降雨強度多寡，同一基岩深度之坡體崩塌發生時，土體內的水含量很接近之現象，且雨量強度愈大，崩塌時之土體水含量低；惟相較於火山碎屑沉積物坡面，此部份差異略大。

表 4.6 風化花崗岩坡面於不同降雨強度下之崩塌時間、規模及土體水含量

	GB10				GB14				GB18			
Fsi	1.365				1.370				1.384			
	Occurrin g time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> )	Differenc e rate of water content (%)	Occurrin g time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> )	Differenc e rate of water content (%)	Occurrin g time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> )	Differenc e rate of water content (%)
I=20	5880	63.5	518.6	5.35	5125	81.3	400.5	5.63	4544	82.5	281.4	5.69
I=40	2905	63.5	496.7	0.90	2399	78.6	382.9	0.98	2093	82.5	270.4	1.56
I=60	2014	63.5	488.0	-0.86	1623	55.3	374.3	-1.27	1378	60.6	262.4	-1.43
I=80	1620	63.5	481.6	-2.15	1285	55.3	370.9	-2.18	1047	60.6	259.4	-2.55
I=100	1288	63.5	476.2	-3.25	1042	55.3	367.2	-3.16	886	60.6	257.5	-3.27
	Mean	492.2			Mean	379.2			Mean	266.2		

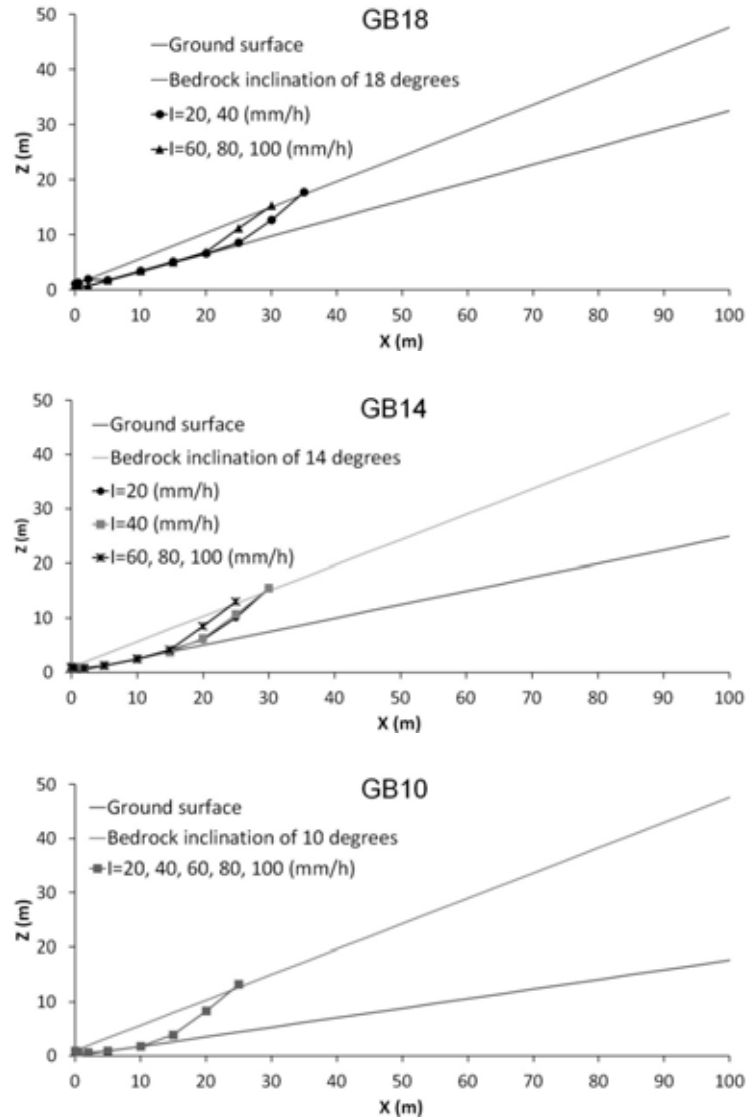


圖 4.15 不同降雨強度下不同基岩坡度之風化花崗岩坡面滑動面

### (3) 砂頁岩互層坡面

砂頁岩互層坡面在五種雨量作用下，其崩塌時間、規模及崩塌時土體之水含量如表 4.7，崩塌時臨界滑動面剖面如圖 4.16。模擬結果顯示，在相同降雨強度下，基岩位置愈深者，其初始安全係數愈低，但崩塌發生時間卻愈晚(與風化花崗岩坡面相同)，且滑動面長度反而愈短，規模愈小，但差異不大；此外，所有的案例亦同前二種坡體，當降雨強度愈大時，崩塌時間愈早，崩塌規模愈小。在崩塌時土體之水含量方面，同樣出現不論降雨強度多寡，同一基岩深度之坡體崩塌發生時，土體內的水含量非常接近之現象，且雨量強度愈大，崩塌時之土體水含量愈低。

表 4.7 砂頁岩互層坡面於不同降雨強度下之崩塌時間、規模及土體水含量

	SSB10				SSB14				SSB18			
Fsi	1.493				1.501				1.534			
	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> )	Difference rate of water content (%)	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> )	Difference rate of water content (%)	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Water content (m <sup>3</sup> )	Difference rate of water content (%)
I=20	8090	133.8	636.5	2.93	6588	143.8	489.6	1.90	5721	137.7	342.6	0.85
I=40	3550	93.7	622.3	0.64	3057	109.1	480.9	0.09	2767	132.8	339.8	0.05
I=60	2288	93.7	615.1	-0.52	2024	109.1	479.0	-0.30	1840	128.4	339.3	-0.11
I=80	1721	93.7	610.0	-1.35	1521	109.1	476.9	-0.73	1373	128.4	338.3	-0.40
I=100	1421	93.7	607.9	-1.69	1240	109.1	475.8	-0.96	1106	128.4	338.3	-0.40
	Mean	618.4			Mean	480.4			Mean	339.7		

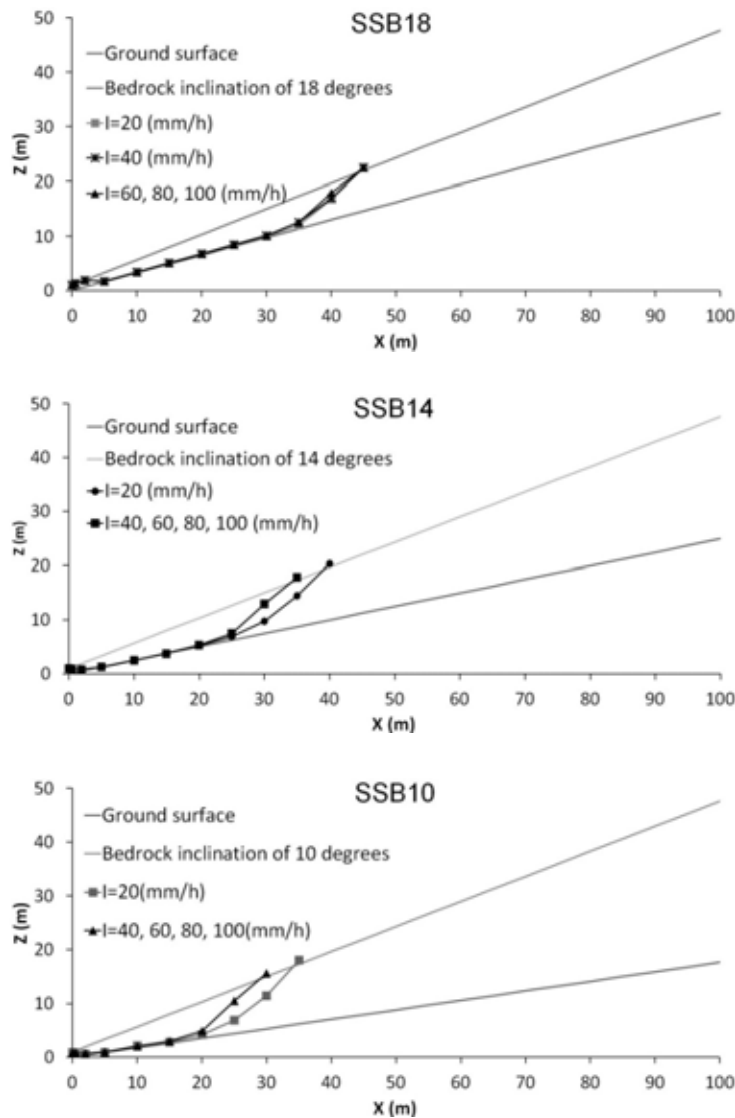


圖 4.16 不同降雨強度下不同基岩坡度之砂頁岩互層坡面崩塌滑動面

### 4.3.3 土壤性質對崩塌發生時間與規模之影響

由前節討論發現，對於火山碎屑沉積物坡面而言，當基岩位置愈深時，崩塌規模愈大；但對風化花崗岩及砂頁岩互層坡面卻反而出現基岩位置愈深時，崩塌規模愈小之相反結果，似乎顯示由降雨-入滲形成之大規模崩塌，土壤摩擦角與凝聚力等剪力強度參數，或保水性、透水性等水力參數，才是影響崩塌規模之主要因素。為釐清造成大規模崩塌之關鍵因素，本研究採用前揭火山碎屑沉積物及風化花崗岩等二種水力參數差異甚大土層(VB10 及 GB10)，分別給予相同的剪力強度參數，在相同的雨量強度下(I=100)，進行降雨-入滲-崩塌模擬，其結果如分別如表 4.8 及圖 4.17 與圖 4.18。由模擬結果可看出，對保水性及透水性差異甚大的 VB10 及 GB10 二個坡面，在相同土壤剪力強度下，其崩塌規模幾乎一致，僅崩塌時間為 VB10 明顯早於 GB10；且土壤剪力強度愈小時，尤其是土壤摩擦角愈小時，崩塌規模愈大。因此，似可推論影響土壤剪力強度才是影響坡體崩塌規模的主要因素，土壤保水性等水力參數主要是影響崩塌發生之時間，亦即保水性愈大、透水性愈小之土體，發生崩塌之機率愈高。

表 4.8 土壤剪力強度對崩塌時間及規模之影響

Soil strength		VB10			GB10			
C (tf/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	Fsi	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	Fsi	Occurring time (min)	Slip surface area (m <sup>2</sup> )	
1.8	20	1.08	670	1000.1	1.08	2067	976.9	
1.5	20	1.04	525	1013.6	1.04	1243	1013.6	
1.2	20	1.00	169	1018.5	1.00	508	1018.5	
1.5	23	1.18	733	231.1	1.18	No collapse		
1.2	23	1.14	634	181.9	1.14	No collapse		
0.9	23	1.09	520	103.5	1.10	1275	103.5	
0.6	23	1.04	406	43.4	1.05	972	72.8	
0.9	26	1.23	600	136.7	1.24	No collapse		
0.6	26	1.19	473	67.1	1.19	1158	67.1	
0.3	26	1.14	634	181.9	1.13	785	43.3	

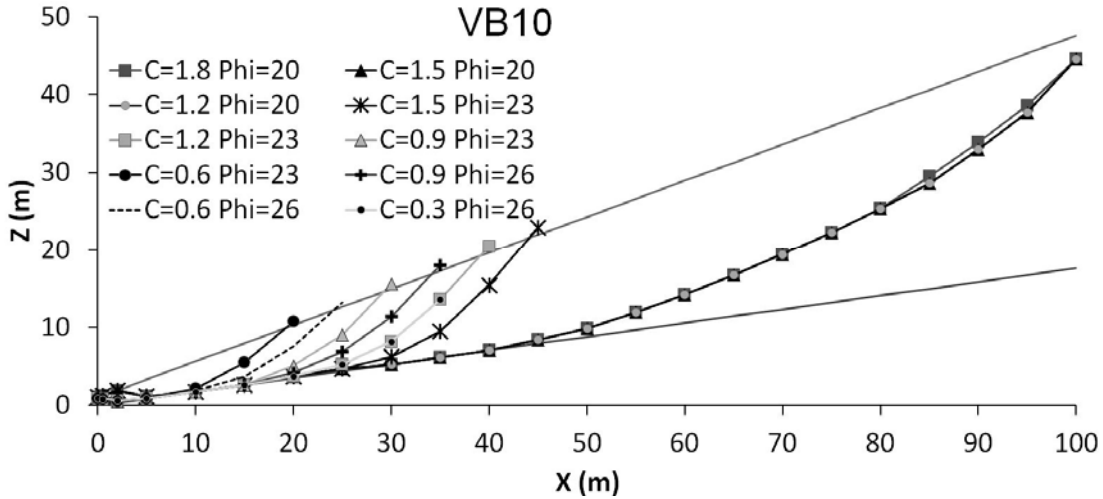


圖 4.17 相同降雨強度下不同土壤強度之火山碎屑沉積物坡面崩塌滑動面(高保水性且低透水性土體)

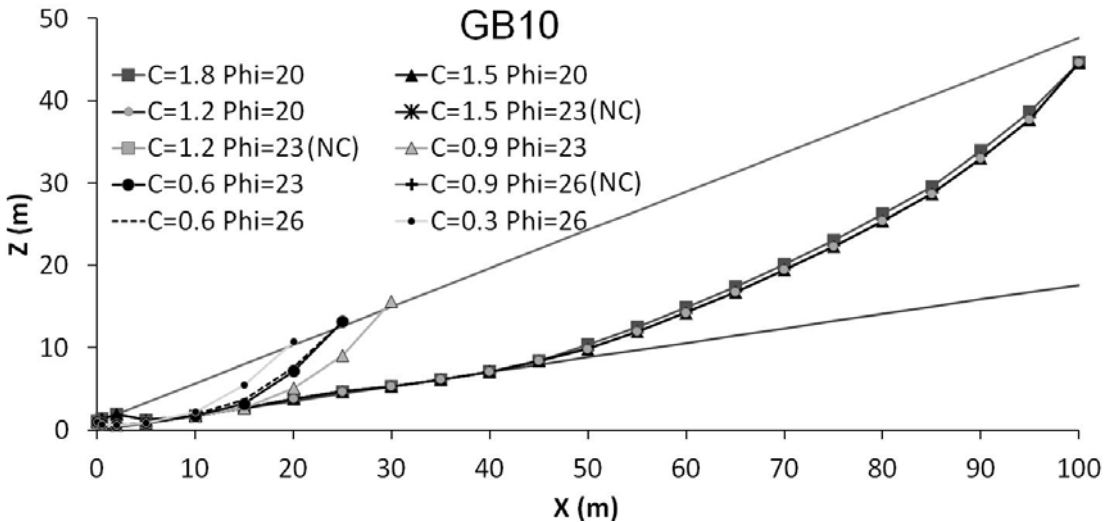


圖 4.18 相同降雨強度下不同土壤強度之風化花崗岩坡面崩塌滑動面(低保水性且高透水性土體)

#### 4.3.4 討論

比較火山碎屑沉積物坡面、風化花崗岩坡面及砂頁岩互層坡面之模擬結果，此三者在地中逕流變化型式上完全不同。經由 4.3.1(2)節之模擬結果可發現，風化花崗岩基岩坡度  $18^\circ$  之坡面(GB18)，其地中逕流出現多峰值的現象。對於雙峰或多峰值現象，過去已有文獻提及在實際觀測案例中確實發現這種情形 (Weyman,1974; Anderson and Burt, 1978; 日原高志、鈴木啓助，1988)，且多發生於地形起伏較小，同時有較厚崩積層，亦即透水性較大的坡地。一般認為這種雙峰現象係由坡體內之滲流 (a hill slope through flow) 所造成(Onda al et., 2001)，本研究之模擬結果，僅透水性較佳，保水性較低，亦即降雨-入滲作用較顯著之風化花崗岩出現多峰值現象，似亦驗證此推論。

儘管不同的土體組成之坡面其降雨-逕流型態明顯不同，但在模擬的結果中，清楚顯示不同的基岩坡度將直接影響地中逕流之流量與衰減型態。因此，如能長期穩定監測坡體之降雨與逕流資料，建立基岩坡度與降雨-逕流之關係，未來也許有機會發展成為初估基岩位置的簡易方式。一般監測逕流變化的資料多以流量與峰值發生之時間為主，在本研究之模擬發現，似乎採用中間流結束之時間較能明顯區隔不同基岩深度之地層構造條件。儘管中間流結束時間無法直接由監測資料獲得，但藉由逕流歷線之基流分離方式，仍可間接獲得(Linsley et al., 1988)。

有關基岩深度對降雨-入滲形成的大規模崩塌之影響，由模擬結果可看出，僅土壤摩擦角較小( $\phi=17^\circ$ )之火山碎屑沉積物坡面，會產生大規模崩塌，且在基岩位置愈深時，崩塌規模愈大；對於土壤摩擦角較大的風化花崗岩及砂頁岩互層( $\phi=30^\circ$ 、 $\phi=31^\circ$ )則不易發生大規模崩塌，且基岩深度對崩塌規模影響不大。同時，本研究模擬也發現，土壤透水性及保水性等水力參數雖不影響崩塌規模，但對於崩塌發生之機率則有明顯影響。亦即對土層保水性較佳且透水性較低之地區，由於降雨期間容易蓄積水份，較易造成大規模崩塌。關於此現象，Onda et al.(2004)長期觀測不同地質條件集水區之降雨-逕流結果，也有相同的結論，其研究指出在中生代頁岩為主的集水區，其地中逕流之排水強度與頻率明顯比以花崗岩為主的集水區為低，並推論中生代頁岩集水區相對而言比較容易發生深層崩塌。

許多研究已指出降雨-入滲造成土體中孔隙水壓上昇之現象，是導致崩塌發生的主要原因(Iverson, 2000; Casadei et al., 2003; Vieira and Fernandes, 2004; 堤大三等, 2007)。本研究的模擬進一步發現，對於保水性較佳或透水性較差的土體，即使在不同的雨場作用下，其崩塌發生時土體內的水含量均十分接近，且土層愈薄(基岩位置愈淺)時，其差異愈小。因此，未來如能事前以模擬方式求出該坡面崩塌時之土體臨界水含量，同時於降雨期間持續模擬該坡面土體水含量之變化，並與臨界水含量相比較，如水含量大於臨界水含量時，即表坡面可能發生崩塌，據此應可發展出以水含量為指標之新型崩塌警戒方式。

經比對實際災例之現場調查結果，以及集水區降雨-逕流觀測相關之研究，本研究使用之 IRIS 模式對於各別坡面之降雨-入滲、地中與地表逕流計算、崩塌時間及規模預測等，均有良好結果。惟因 IRIS 模式在計算降雨-入滲階段使用有限元素法，其計算時間較長，實際應用時，無法針對集水區尺度內所有坡面作即時運算，故只能用於事後之個別案例檢測，或是針對特定坡面作即時運算或警戒，無法用於集水區尺度之大範圍坡地崩塌預警。

#### 4.4 小結

大規模崩塌相對於其它類型的土砂災害，雖然發生機率較低，可是一旦發生後，所造成的災害規模及可能衍生的二次災害等影響，卻遠高於其他災害。

由於大規模崩塌發生機制較為複雜，目前各種潛勢評估與預測模式等的相關研究，相較於其他類型的土砂災害明顯不足。

事實上，大規模崩塌或深層崩塌發生的原因，除降雨-入滲造成之影響外，亦與地質構造、解理、裂縫或岩體長期變形有關(Tsu et al, 2011)，惟本研究目前僅就降雨-入滲造成土層崩塌部份進行探討。模擬結果指出崩塌規模的大小，與土壤摩擦角高度相關，土壤摩擦角愈小之坡面，一旦發生崩塌，其崩塌規模愈大；至於土壤之保水性與透水性等特性，主要影響到崩塌發生之時間，亦即保水性愈高之土壤，由於土體內之水份愈容易積蓄，故愈容易發生崩塌(或說發生崩塌機率愈高)，此二特性未來應可作為判識大規模崩塌潛勢地區之指標之一。同時，本研究之模擬發現，對於易發生大規模崩塌之地區，基岩位置確實會影響崩塌規模，但傳統探測基岩位置的方式，大多過於耗時及昂貴。本研究經由「降雨-入滲-邊坡穩定」之模擬方式已初步探索降雨-逕流與基岩位置之關係，並建議可嘗試採用中間流之結束時間作為評估指標，後續如有實際觀測資料作為驗證，或可進一步發展簡易推估基岩位置與評估大規模崩塌潛勢之方式。

此外，經由本研究之模擬結果亦發現，對於土層保水性較佳或透水性較差之坡面，不論降雨強度多寡，崩塌發生時土體內之水含量幾乎相同，未來應可用利用此一特性發展以水含量為指標之崩塌警戒方式。

### 參考文獻

- [1] 久保田哲也、中村浩之(1991)，「臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法」，地すべり，27(4)，18-25。(Kubota, T., and Nakamura, H. (1991). "Landslide Susceptibility Estimation by Critical Slip Surface Analysis combined with Reliable Analysis." *Landslide*, 27(4), 18-25. (in Japanese))
- [2] 日原高志、鈴木啓助(1988)，「丘陵地源流域における降雨による流量のふたつのピークについて」，地理学評論，61(11)，804-815。(Hihara, T., and Suzuki, K. (1988). "The double-peaked hydrograph during storm events in a small watershed of the tama hills, west of Tokyo." *Geographical Review of Japan*, 61(11), 804-815.(in Japanese))
- [3] 恩田裕一、小松陽介、辻村真貴、藤原淳一(1999)，「降雨流出ピークの遅れ時間の違いからみた崩壊発生時刻予知の可能性」，砂防学会誌，51(5)，48-52。(Onda, Y., Komatsu, Y., Tsujimura, M., and Fujihara, J. (1999). "Possibility for Predicting Landslide Occurrence by Analyzing the Runoff Peak Response Time." *Sabo Gakkaishi*, 51(5), 48-52. (in Japanese))
- [4] 堤大三、藤田正治、林雄二郎(2007)，「2005年台風14号により大分県竹田市で発生した斜面崩壊に関する数値シミュレーション」，水工学論文集，51，931-936。(Tsutsumi, D., Fujita, M., and Hayashi, Y. (2007). "Numerical simulation on a landslide due to Typhoon 0514 in Taketa city, Oita



- prefecture.”*Proceedings of hydraulic engineering*, 51. 931-936. (in Japanese))
- [5] 藤田正治、大塩清太郎、堤大三(2010)、「気候変動に伴う流域内の斜面崩壊危険度の変化」、京都大学防災研究所年報、53(B)、515-525。(Fujita, M., Ohshio, S., and Tsutsumi, D. (2010). “Effect of climate change on slope failure risk degree in river basin.”*Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*,53(B), 515-525.(in Japanese))
- [6] Anderson, M. G., and Burt, T. P. (1978). “The role of topography in controlling throughflow generation.”*Earth Surface Processes*, 3(4),331-344.
- [7] Baker, R. (1980). “Determination of the critical slip surface in slope stability computations.”*International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 4(4), 333-359.
- [8] Casadei, M., Dietrich, W. E., and Miller, N. L. (2003). “Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes.”*Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9), 925-950.
- [9] Chigira, M. (2009). “September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan.” *Engineering Geology*,108(1-2),1-15.
- [10] Dahal, R. K. (2012). “Rainfall-induced landslides in Nepal.”*International Journal of Erosion Control Engineering*,5(1), 1-8.
- [11] Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2008). “Several important issues from field and model investigations on landslides.”*Proceedings of hydraulic engineering*, 52, 9-12.
- [12] Hopp, L., and McDonnell, J. J. (2009). “Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth.”*Journal of Hydrology*, 376(3-4), 378-391.
- [13] Linsley, R.K., Kohler, M. A., and Paulhus, J.L.H. (1988). *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- [14] Istok, J. (1989).*Groundwater Modeling by the Finite Element Method*, Washington DC, American Geophysical Union.
- [15] Iverson, R. M. (2000). “Landslide triggering by rain infiltration.” *Water Resources Research*, 36(7), 1897-1910.
- [16] Kosugi, K. I. (1996). “Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties.”*Water Resource Research*, 32(9),2697-2703.
- [17] Katsuyama, M., Fukushima, K., and Tokuchi, N. (2008). “Comparison of rainfall-runoff characteristics in forested catchments underlain by granitic and sedimentary rock with various forest age.”*Hydrological Research Letters*, 2, 14-17.
- [18] Onda, Y., Komatsu, Y., Tsujimura, M., and Fujihara, J. (2001). “The role of

- subsurface runoff through bedrock on storm flow generation.” *Hydrological Processes*, 15(10), 1693-1706.
- [19] Onda, Y., Tsujimura, M., and Tabuchi, H. (2004). “The role of subsurface water flow paths on hillslope hydrological processes, landslides and landform development in steep mountains of Japan.” *Hydrological Processes*, 18(4), 637-650.
- [20] Onda, Y., Tsujimura, M., Fujihara, J., and Ito, J.I. (2006). “Runoff generation mechanisms in high-relief mountainous watersheds with different underlying geology.” *Journal of Hydrology*, 331(3-4), 659-673.
- [21] Tsou, C.Y., Feng, Z.Y. and Chigira, M. (2011). “Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan.” *Geomorphology*, 127(3-4), 166-178.
- [22] Uchida, T., Yokoyama, O., Suzuki, R., Tamura, K., and Ishizuka, T. (2011). “A new method for assessing deep catastrophic landslide susceptibility.” *International Journal of Erosion Control Engineering*, 4(2), 32-42.
- [23] Vieira, B. C., and Fernandes, N. F. (2004). “Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity.” *Hydrological Processes*, 18(4), 791-805.
- [24] Weyman, D. (1974). “Runoff processes, contributing area and streamflow in a small upland catchment.” In: Gregory, K. and Walling, D. (eds.) *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds*. UK: Institute of British Geographers Special Edition No. 6.
- [25] Wu, C.H., Chen, S.C., and Chou, H.T. (2011). “Geomorphologic characteristics of catastrophic landslides during typhoon Morakot in the Kaoping Watershed, Taiwan.” *Engineering Geology*, 123(1-2), 13-21.
- [26] Yamagami, T., and Ueta, Y. (1986). “Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes-An application of dynamic programming to the Janbu method.” *Landslides*, 22(4), 8-16.
- [27] Yamakoshi, T., Ishizuka, T., Kaji, A., Ito, Y., Osaka, S. and Nakagome, A. (2012). “Quick monitoring tool for landslide dam outburst debris flow and its application to the actual disaster”, *EGU*, 6882.

## 第5章 以水含量指標進行集水區尺度之崩塌模擬

### 5.1 前言

台灣每年均飽受颱風豪雨侵襲，伴隨而生的土砂災害往往造成民眾生命財產的重大損失。因雨量造成的土砂災害的類型大致可分為崩塌、地滑、土石流三類；其中崩塌部份，近年來依其崩塌之規模及深度，又可分為「淺層崩塌」(shallow landslide)及「深層崩塌」(deep-seated landslide)。儘管深層崩塌一旦發生，其災害規模可能超乎想像，但考量災害發生的頻率及分布範圍，淺層崩塌可能致災及造成人命傷亡的風險往往更無法忽略。此外，由於台灣的災害防救法，僅明列土石流災害為法定天然災害，所以目前國內的土砂災害警戒系統僅針對土石流發布警戒，尚未將崩塌警戒一併納入考量，因此，如何建立可應用於實務作業上的崩塌預測及警戒模式，係未來防災工作之重要課題。

一般對於土砂災害的預測及警戒模式，大致可分為統計模式(statistical model)法與物理模式(physically-based model)法二大類。其中統計模式法大多使用雨量等易於量測及取得的現地資料作為指標，經由歷史災例與雨量資料之統計，訂定崩塌或土石流發生之臨界雨量，例如 Wieczorek and Glade(2005)曾蒐集世界各國以雨量為警戒指標的土石流警戒模式，以及日本與台灣現行的土砂災害警戒模式(陳振宇，2013a)。統計模式法之優點為計算快速，可應用於降雨期間即時的廣域土砂災害警戒；但缺點為無法明確預測災害的類型、可能發生時間、地點及其規模(陳振宇，2013a)。相對而言，物理模式法，則可明確提供災害可能發生的時間、地點及其規模的預測(Xie et al., 2006; Tsutsumi and Fujita, 2008)；但缺點則是限於其計算費時，且現地參數蒐集困難等條件，一般只能使用於少數特定邊坡的警戒或災後分析，無法應用於流域尺度內的每一個坡面。

與台灣情況相似，日本每年颱風豪雨季節亦飽受土砂災害威脅，且早在1984年即以統計模式建立以雨量為指標的土砂災害警戒系統，並以降雨造成的土石流(debris flow)及淺層崩塌(slope failure/shallow landslide)為警戒標的，惟不包含地滑(landslide)(Osanai et al., 2010)。在警戒模式方面，日本使用徑向基底函數網路(Radial Basis Function Network, RBFN)，配合解析度1km的網格式雷達解析雨量資料(Radar Automated Meteorological Data Acquisition System analytical rainfall, RAMeDAS analytical rainfall)以統計模式建立警戒臨界線，並以邊長5km之網格呈現該地區之土砂災害風險等級，以提供市町村政府進行疏散決策。儘管，日本現行的土砂災害警戒系統應用範圍較台灣的土石流警戒系統為廣，但在實務操作上，以2008至2010年的統計結果為例，由於警戒命中率(Warning Hit Rate, WHR=警戒發布於災害發生前之次數/警戒發布之總次數)僅58.8%，但警戒誤報率(False Alert Rate, FAR=已發布警戒但實際未發生災害之市町村數/已發布警戒之市町村總數)卻高達83.4%；同時，該系統僅提供邊長

5km 網格內的土砂災害風險等級資訊，對於第一線負責疏散決策的市町村政府而言，實務作業上確實難以決定應疏散之區域，因此當市町村政府接獲土砂災害警戒情報時，真正會下達疏散指令的比例僅有 9.8%，且其中 58.9%是災害已經發生後才下達(岡本敦等，2012)。

由日本近年來土砂災害警戒發布與實際疏散比例的落差來看，現行僅以雨量為基準的統計模法式，並未能滿足第一線負責疏散決策的市町村政府於實際作業上之需求，亦即此警戒系統並未獲得地方政府防災決策單位之信任。為了解台灣土石流警戒系統之現況，陳振宇(2013a)曾統計 2007-2011 年之資料，結果顯示台灣土石流警戒系統之警戒命中率為 45.4%，警戒誤報率 75.2%，警戒區之疏散率為 51.6%。相較台日二國之統計結果，警戒命中率以日本較高，警戒誤報率則以台灣較低，而在警戒發布後的疏散率方面，台灣則明顯高於日本甚多，其原因在於台灣的中央災害應變中心會強制要求地方政府針對已發布土石流警戒之地區進行疏散作業，但日本則完全尊重地方政府自己的判斷與決策。為了解台灣地方政府及警戒區內民眾進行疏散避難之決策因子，陳振宇(2013b)使用 AHP 問卷訪談方式進行調查；結果顯示，不論是地方政府或是警戒區內之民眾，土石流警戒均非未被列入疏散決策時最重要的前三項因子內，亦即現行以雨量資料進行統計模式所建立的土石流警戒系統亦未獲得足夠之信任。同時，該研究亦發現對於地方政府而言，「提高警戒命中率」及「縮小警戒發布範圍」被認為是未來如要改進現行土石流警戒機制時，最重要的二項改進方向；亦即是否能較精確地預測土砂災害可能發生的時間與位置，對於後續執行疏散避難等相關防災作為，是最迫切需要的資訊。

因此，由台日二國現行土砂災害警戒系統已逾 10 年以上實務操作的現況來看，以統計模式法建立之土砂災害警戒系統，在實務應用上確實已遭遇瓶頸。所以近年來，亦有不少研究利用簡化的降雨入滲模式，結合無限邊坡穩定分析理論，建立以物理模式為基礎的流域尺度之崩塌預測模式；其中許多研究常使用格網(grid-based)作為分析單元(Casadei et al., 2003; Chang and Chiang, 2009; Lee and Ho, 2009)，此法雖然具有較易建構與管理地形模型，以及演算法較為快速、程式撰寫簡便等的優點，但同時也造成無法保留原地質、地形及其他環境等邊界條件特性的缺點(Xie et al., 2004)；所以近年來已有部份研究採用斜坡單元(slope unit)為分析單元，針對各個斜坡單元進行崩塌危害評估(Carrara et al., 1991; Crosta et al., 2006)及崩塌預測(Kubota and Nakamura, 1991; Wang et al., 2006; Xie et al., 2004)。

為解決現行統計模式之土砂災害警戒系統警戒命中率較低，且警戒分析與發布範圍太大的問題，本研究嘗試以物理模式為基礎，並以斜坡單元為崩塌分析單元，採用流域尺度發展一新型態之土砂災害警戒模式。為此，本研究提出一個新的警戒指標－臨界水含量(Critical water content,  $W_{cr}$ )作為降雨期間，快速評估流域集水區內各斜坡單元是否會發生崩塌的基準。此指標衍生於物理模式法之演算結果，並配合多元迴歸分析(multiple regression analysis)模式，不但保

有物理模式法之明確物理意義，亦具有高速即時運算能力，除可用以模擬降雨期間流域內各斜坡單元之崩塌發生時間、地點及規模外，並可作為後續發展土石災害警戒系統之基礎。

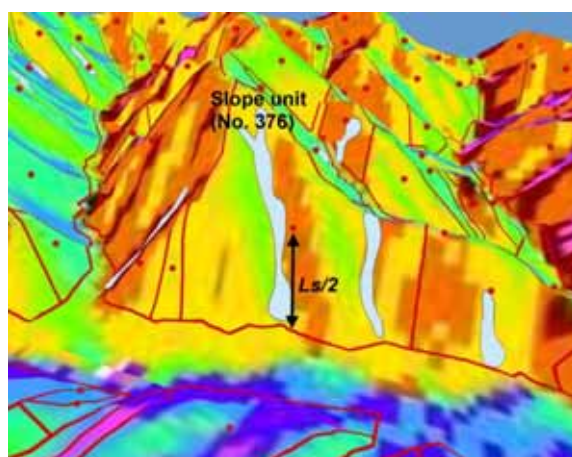
## 5.2 材料及方法

### 5.2.1 斜坡單元劃分方式及研究區域

由於流域尺度內，斜坡單元之數量相當龐大，如以人工方式逐一劃設，恐曠日費時，因此本研究參考 Xie et al.(2004)所提出的「集水區重疊」法，先以 GIS 軟體配合 DEM 數值地形資料，自動劃出一級河左右二側之斜坡單元；同時，本研究假設緊鄰河道且地表坡度小於  $15^\circ$  處，不會發生崩塌，因此先以 GIS 軟體將此部份切除後，再依據坡向及修正後斜坡單元之形心位置的合理性決定是否再細切為數個較小的斜坡單元。其中，斜坡單元形心位置距相鄰河道垂直距離的二倍，將被用來代表該斜坡單元之斜面長度(如圖 5.1(b))。



(a)



(b)

圖 5.1 (a)斜坡單元 No.376 於 2012 年 8 月 14 日豪雨災後崩塌之航空照片(アジア航空株式會社，2012) (b)斜坡單元及其坡向圖(紅點係為該斜坡單元之形心)

本研究之研究地區位於日本京都府宇治市志津川流域，流域面積為 10.8 km<sup>2</sup>，地質主要為砂頁岩互層，並依前述斜坡單元之劃分方式，使用 15m 之 DEM 將該流域劃分為 435 個斜坡單元(如圖 5.2)。本研究假設所有的崩塌均侷限於基岩上方之土層，不會深入基岩，為便於後續崩塌之模擬與分析，每一個斜坡單元之土層均簡化為以  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $L$ 、 $n$  等 4 個獨立參數代表之簡化坡面(如圖 5.3)，其中  $\alpha$  為該斜坡單元之地表平均坡度， $\beta$  為基岩平均坡度、 $L$  為坡面之水平投影長度， $n$  為坡面下游端土層厚度。所有斜坡單元的  $\alpha$  及  $L$  均可由 GIS 軟體配合 DEM 資料自動計算出。此外，由現地調查發現，該地區之崩塌均為淺層崩塌，平均深度約為 2m，因此本研究設定研究區內所有斜坡單元  $\alpha=\beta$ ，且  $n=2m$ 。

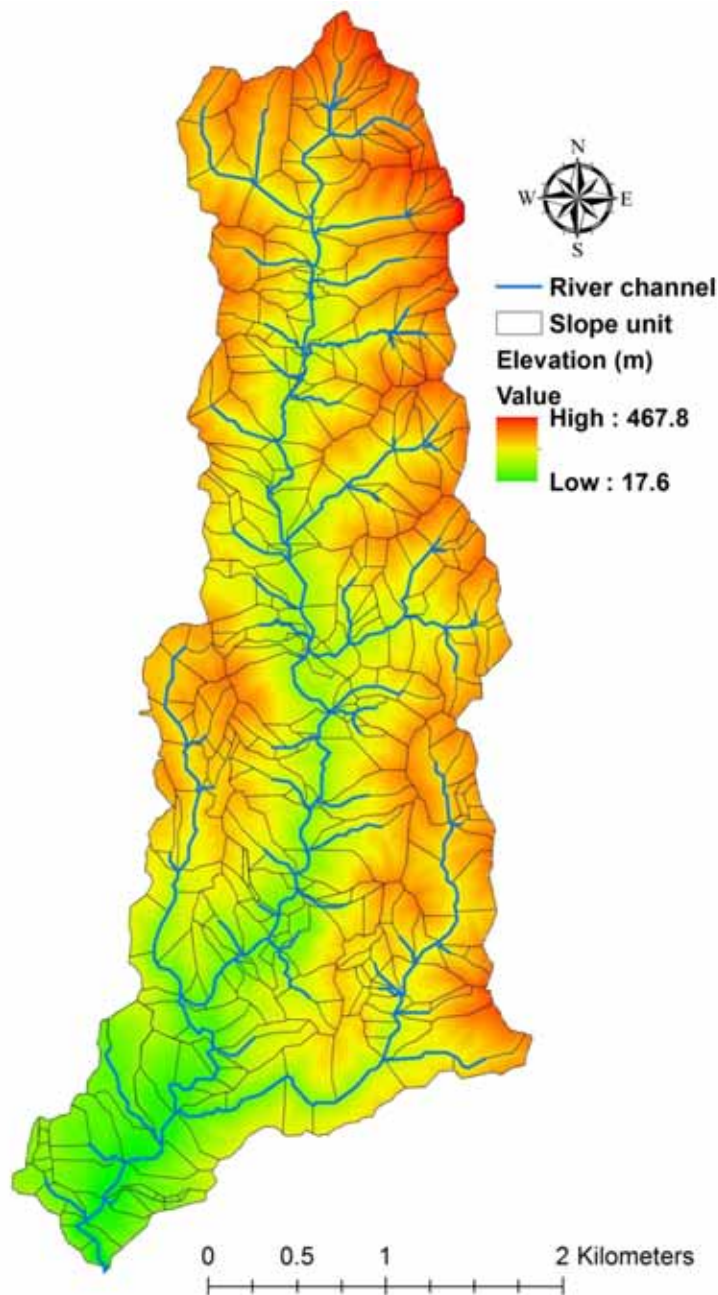


圖 5.2 研究區內之地表高程及單位斜面



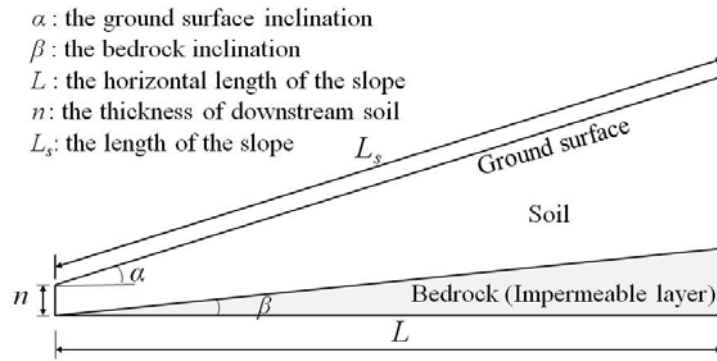


圖 5.3 應用於後續坡面穩定分析之簡化後斜坡單元模型

本研究模擬之案例為 2012 年 8 月 14 日發生於志津川之豪雨災害，依據架設於宇治市役所之雨量站資料，降雨期間為 8/13 19:00~ 8/14 07:00，累積雨量 307mm，最大時雨量為 74mm/h，其中最大連續三小時雨量為 186mm(約為歷年最高紀錄的 1.6 倍)，為一典型強降雨類型(京都府，2013)。由於研究區內並無地面雨量站，故本研究採用日本國土交通省之 X-BAND 雷達降雨資料，其空間解析度為 285m，資料間距為 1 分鐘。依據災後現場調查(京都大學防災研究所，2012)、空拍影像(アシア航空株式會社，2012)，以及 2012/09/26 拍攝的 RapidEye 衛星影像判識結果，435 處斜坡單元中疑似有災後新增裸露地者計 38 處。同時，根據災後現場訪談當地民眾之調查結果，多數崩塌發生時間大約在 8/14 04:30~6:00 之間。

### 5.2.2 邊坡穩定分析模式

本研究使用自行發展的 IRIS(Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model, IRIS model)模式進行邊坡穩定模擬與分析(陳振宇等，2014)。此模式分為降雨-入滲模擬、邊坡穩定分析及臨界滑動面分析等三個模組。其中降雨-入滲模擬模組採用 3 維 Richard's equation 來模擬土層中孔隙水的入滲與流動，並使用有限元素法計算土層中每個有限元素法分析網格上之土壤孔隙水壓。接著邊坡穩定分析模組依據降雨-入滲模擬模組所求得的孔隙水壓，利用可分析任何形狀滑動面之簡易 Janbu 法進行計算，先將滑動土體分割成諸多垂直切片，再由應力平衡結果計算出邊坡穩定安全係數  $F_s$ 。由於簡易 Janbu 法或 Spencer 法等切片分析方法，均需先自行假設多個可能之滑動面，分別計算安全係數後，再取安全係數最小之滑動面為臨界滑動面；然而，在此過程中缺少一客觀及標準程序，往往不易找到真正之臨界滑動面。為此，本模式採用動態規劃法(Dynamic Programming method, DP)結合變分法方式計算出安全係數最小之臨界滑動面。

為驗證 IRIS 模式對於單一邊坡降雨-入滲-崩塌之模擬成效，本研究選取研究區內斜坡單元 No.376 進行降雨-入滲-崩塌模擬(如圖 5.1(a))，依據現地調查結果，此坡面段崩塌時間約為 8/14 05:00 左右。模擬過程採用 X-band 雷達降雨資

料，並取 7/1~8/12 期間之降雨資料為前期雨量，主要模擬期間為 8/13~8/14，模擬採用之時間間距為 1 分鐘。此外，模擬所使用之土壤相關參數係由現地取樣後，經室內土壤水分特性曲線及直接剪力試驗所得，其值如表 5.1，其中  $\theta_s$ [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]為飽和水分含量(saturated soil water content)， $\theta_r$ [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] 為殘餘水分含量(residual soil water content)， $\psi_m$ [m]為土壤孔隙半徑中位數(the median soil pore radius)所對應之壓力勢能(pressure potential)， $\sigma$  為描述土壤孔隙半徑分布範圍的無因次參數， $K_s$  [m/s]為飽和土壤之水力傳導係數(Kosugi, 1996)。模擬結果(圖 5.4)顯示，模擬之崩塌時間非常接近真實崩塌發生時間，但崩塌規模則略小於實際崩塌規模，推測應為模擬時係採安全係數小於 1 時即停止模擬，但實際崩塌可能是多階段崩塌所致。

表 5.1 志津川流域之土壤水力參數及剪力強度等參數

Hydraulic parameters	$K_s$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\psi_m$	$\sigma$
	cm/s	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	cm	-
Upper layer	0.0035	0.467	0.240	-31.2	1.40
Lower layer	0.0005	0.468	0.270	-23.7	1.17
Soil strength	$\gamma_{sat}$	C	$\psi$		
	t/m <sup>3</sup>	tf/m <sup>2</sup>	degree		
	1.64	0.7	31		

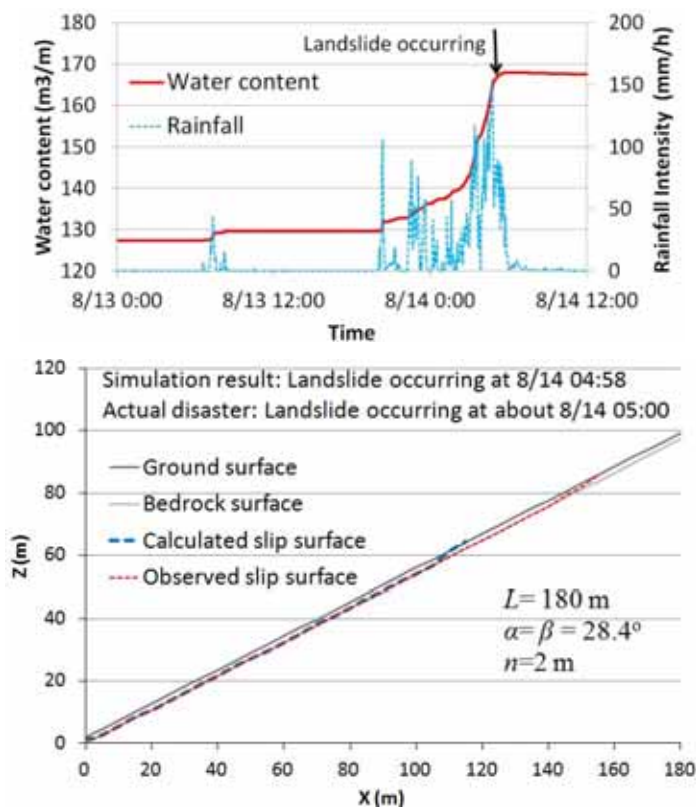


圖 5.4 斜坡單元 No.376 於 2012 年 8 月 14 日豪雨期間降雨-入滲-崩塌模擬結果



### 5.2.3 崩塌發生時之土體臨界水含量

在使用 IRIS 模式模擬多種不同土層之降雨-入滲-崩塌案例過程中，陳振宇等(2014)發現同一坡面在不同降雨型態作用下，即使崩塌發生時間差異甚大，但崩塌發生時坡面土體內之水含量卻幾乎相同，因此建議未來可嘗試發展以水含量為指標的崩塌預警方式。為驗證此一想法之可行性，本研究採用研究區內 435 個斜坡單元之地形參數的中值，製成如圖 5.3 所示之簡化坡面(其中  $L=154\text{m}$ ,  $\alpha=31^\circ$ ,  $\beta=31^\circ$ ,  $n=2\text{m}$ )，並分別在 8 種固定強度之降雨類型( $I=10\sim 100\text{mm/h}$ )作用下，進行降雨-入滲-崩塌模擬，其崩塌發生時間、崩塌時之臨界水含量(Critical water content,  $W_{cr}$ )及崩塌規模如表 5.2。結果顯示，在不同降雨強度下，即便崩塌發生時間及規模差異甚大，崩塌發生時之臨界水含量卻相當接近；且模擬結果亦呈現降雨強度愈大，崩塌發生時間愈早，臨界水含量及崩塌規模愈小之趨勢。亦即使用臨界水含量作為崩塌發生與否之指標，應為可行。

表 5.2 簡化坡面在 8 種不同固定強度降雨類型下之臨界水含量及崩塌情形

Rainfall (mm/h)	$W_{cr}$ ( $\text{m}^3/\text{m}$ )	Landslide occurring time (min)	Profile of the slip surface ( $\text{m}^2$ )
I=10	140.84	1359	123.25
I=20	140.77	809	77.42
I=30	140.45	638	68.25
I=40	140.06	556	68.25
I=50	139.74	509	68.25
I=60	139.41	479	68.25
I=80	138.84	445	57.42
I=100	138.20	427	57.42
mean	139.79	652.75	73.56
Standard deviation (SD)	0.936	311.16	21.11
SD/mean (%)	0.670	47.67	28.69

### 5.2.4 使用臨界含水量法進行崩塌預測

儘管 IRIS 模式可以有效模擬單一坡面之崩塌發生時間與規模，但由於採用有限素法計算土壤孔隙水壓變化時，相當耗時費力，實務上無法應用於流域尺度，因此本研究以 IRIS 模式先模擬出大量案例，再應用多元迴歸分析(multiple regression analysis)建立坡面土體之臨界水含量、初始水含量、水含量變化及崩塌規模之迴歸式，並據以判定降雨期間各斜坡單元是否會發生崩塌。本研究將此法簡稱為「臨界水含量法」( $W_{cr}$  method)，其作法簡述如下：

- (1) 將集水區內之 435 個斜坡單元，依其坡面水平投影長度  $L$ ，分成 8 個群組，每個群組選擇 1 個代表坡長(representative slope length)，且每個群組依其實

際之地表平均坡度分布之範圍，分別選取數個代表坡度(representative slope)，間距為  $1^\circ$ 。其中第 7 及第 8 個群組因其斜坡單元數量較少，故直接選用實際斜坡單元之坡度作為代表坡度。最後以代表坡長及代表坡度之組合，製成 42 個虛擬坡面(virtual slope)，如表 5.3。

- (2) 將此 42 個虛擬坡面分別以 8 種不同固定強度之降雨型態(如表 5.2)進行降雨-入滲-崩塌模擬，所有虛擬坡面之土壤相關參數同表 1。
- (3) 將上述模擬結果進行多元迴歸分析，分別獲得多元迴歸式 I、II、III、IV，並用此四式分別計算降雨期間的初始水含量( $W_{ini}$ )、臨界水含量( $W_{cr}$ )、逐時水含量( $W_t$ )，以及崩塌土方量( $V_s$ )。
- (4) 降雨期間，即時由多元迴歸式 I、II、III 計算水含量之變化，當某斜坡單元之水含量大於臨界水含量時( $W_t > W_{cr}$ )，則判定該斜坡單元發生崩塌，並以多元迴歸式 IV 計算出崩塌規模(崩塌之臨界滑動面縱剖面面積)。由於 IRIS 模式僅採用二維動態規劃法計算臨界滑動面位置，故 IRIS 模式及多元迴歸式 IV，均只能推估崩塌之臨界滑動面縱剖面面積。經現地調查及衛星影像判識之結果發現，本研究區之崩塌寬度多在 10~30m 之間，本研究參考現地調查結果，假設所有崩塌寬度均為 20m，並據以計算出崩塌土方量。臨界水含量法預測斜坡單元是否崩塌之流程，詳如圖 5.5。

表 5.3 42 組虛擬坡面之代表坡長及坡度

	Distribution of slope length (m)	Number of slope units	representative slope length (m)	representative slope (degree)
1	15.0~54.8	96	42	30~35 (6 sets)
2	54.9~94.5	138	74	30~37 (8 sets)
3	94.6~ 134.3	102	114	29~37 (9 sets)
4	134.4~174.0	44	154	29~34 (6 sets)
5	174.1~213.8	29	194	29~33 (5 sets)
6	213.9~ 253.5	18	234	29~32 (4 sets)
7	253.6~ 293.2	5	258, 259	28.7, 31.9(2sets)
8	293.3~333.0	3	299, 311	27.9, 31.8(2sets)

\* Total are 42 virtual slope units

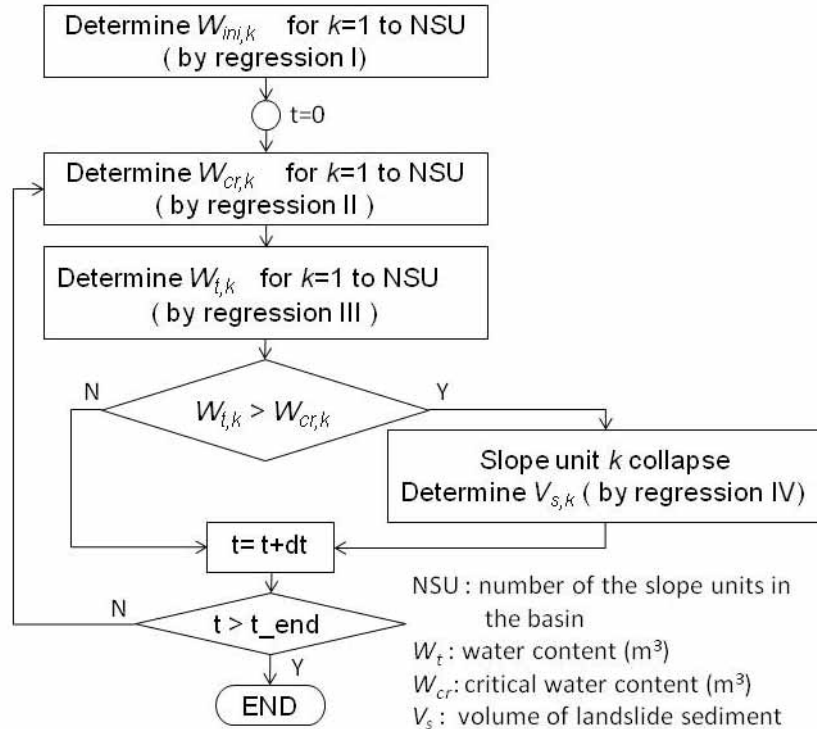


圖 5.5 臨界含水量法進行崩塌預測之流程圖

### 5.2.5 多元迴歸式與其驗證

#### (1) 初始水含量 $W_{ini}$ (Regression I)

由於不同初始水含量將會影響坡面穩定分析之結果，本研究為模擬自然狀況下，坡面土體水份分布情形，在使用 IRIS 模式進行崩塌模擬前，須進行初始含水量及前期雨量之設定，其設定步驟簡述如下：設定整體坡面土體之初始壓力水頭均為-0.01m，以三維 Richard's equation 進行 900 天的自然狀況降雨入滲模擬。為避免排水過程中，土壤過份乾燥，900 天的模擬過程中均持續給予強度為 0.1mm/h 之降雨。接著再給予研究區內實際之前期雨量 (2012/07/01~2012/08/12)，進行降雨入滲模擬。所有進行 IRIS 模式之崩塌分析的坡面(例如 42 個虛擬坡面及驗證用的真實坡面)，均需經過上述的初始含水量及前期雨量之設定後，方進行 IRIS 模式之降雨-入滲-崩塌分析。

由於同一坡面土體之初始水含量與土體體積及坡度相關，故初始水含量之多元迴歸式可表示為式(5.1)及式(5.2)。並將前揭 42 個虛擬坡面之初始水含量模擬之結果進行多元迴歸，以求出其迴歸係數(如表 5.4)。

$$\theta_{ini} = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha \quad (5.1)$$

$$W_{ini} = \theta_{ini} \cdot V \quad (5.2)$$

其中  $c_1 \sim c_3$  為迴歸係數， $L$  為斜坡單元之水平長度(m)， $\alpha$  為斜坡單元之平均坡度(deg)， $\theta_{ini}$  為初始水含量比( $m^3/m^3$ )， $W_{ini}$  為該斜坡單位單位寬度之初始水含量( $m^3/m$ )， $V$  為該斜坡單元於單位寬度上的土層體積( $m^3/m$ )。為提高迴歸式

之精度，迴歸係數依斜坡單元之水平長度分成四組不同數據。例如，當  $L \leq 95\text{m}$  時，此組迴歸係數係由 14 個虛擬坡面 ( $L=42\text{m}$  及  $L=74\text{m}$ ) 在 8 種不同固定降雨強度下，進行降雨-入滲-崩塌模擬結果，執行多元迴歸分析而得。為驗證初始水含量  $W_{ini}$  迴歸式(Regression II)之精度，本研究於研究區內選取 6 個實際的斜坡單位分別使用 IRIS 模式及  $W_{ini}$  迴歸式進行初始水含量模擬，其結果如表 5.5。結果顯示，使用  $W_{ini}$  迴歸式所求得之初始水含量與使用 IRIS 模式求得之初始水含量，二者誤差低於 0.1%，因此使用  $W_{ini}$  迴歸式取代 IRIS 模式之作法應屬可行。

表 5.4  $W_{ini}$  迴歸式之迴歸係數

	$L \leq 95\text{ m}$	$95 < L \leq 185$	$185 < L \leq 255$	$L > 255\text{ m}$
$c1$	0.318859	0.332008	0.336314	0.342907
$c2$	0.00027	7.47E-05	9.19E-05	0.000124
$c3$	0.000209	0.000319	6.26E-05	-0.00041

表 5.5  $W_{ini}$  迴歸式精度之驗證結果

No. slope	$L$ (m)	$\alpha$ (deg)	$W_{ini}$ ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) (by IRIS)	$W_{ini}$ ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) (by Regression)	error (%)
31	29	34.3	19.35	19.36	0.09
192	71	33.3	49.01	48.99	-0.04
71	137	31.4	96.54	96.52	-0.02
413	165	29.5	116.70	116.74	0.03
406	214	32.2	153.12	153.23	0.07
136	299	27.9	220.70	220.52	-0.08

## (2) 臨界水含量 $W_{cr}$ (Regression II)

由於土體內之水含量與土體體積及坡度有關，且由表 5.2 可看出，崩塌時之臨界水含量會受降雨強度影響，因此，臨界水含量之多元迴歸式可表示如式 (5.3) 及式 (5.4)，並將前揭 42 個虛擬坡面分別以 8 種不同固定強度之降雨進行降雨-入滲-崩塌模擬之結果進行多元迴歸，以求出其迴歸係數(如表 5.6)。

$$\theta_{cr} = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_{60} \quad (5.3)$$

$$W_{cr} = \theta_{cr} \cdot V \quad (5.4)$$

其中  $I_{60}$  為 60 分鐘降雨強度 ( $\text{mm/h}$ )， $\theta_{cr}$  為臨界水含量比 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )。為驗證臨界水含量  $W_{cr}$  迴歸式(Regression I)之精度，本研究於研究區內選取 6 個實際的斜坡單位分別使用 IRIS 模式及  $W_{cr}$  迴歸式進行降雨-入滲-崩塌模擬，其結果如表 5.7。

表 5.6  $W_{cr}$  迴歸式之迴歸係數

	$L \leq 95 \text{ m}$	$95 < L \leq 185$	$185 < L \leq 255$	$L > 255 \text{ m}$
$c1$	0.54789	0.522459	0.553529	0.776762
$c2$	-0.00029	-3.1E-05	-8.2E-05	-2.5E-05
$c3$	-0.00212	-0.0019	-0.0026	-0.01065
$c4$	-9.3E-05	-0.0001	-0.00033	-0.00029

表 5.7  $W_{cr}$  迴歸式精度之驗證結果

No. slope	$L$ (m)	$\alpha$ (deg)	$I$ (mm/h)	$W_{cr}$ ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) (by IRIS)	$W_{cr}$ ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) (by Regression)	error (%)
31	29	34.3	40	26.87	26.87	0.00
192	71	33.3	40	64.36	64.38	0.03
71	137	31.4	40	124.55	124.55	-0.00
413	165	29.5	40	150.42	150.90	0.32
406	214	32.2	40	188.97	188.68	-0.16
136	299	27.9	40	277.34	275.38	-0.70

### (3) 逐時水含量 $W_t$ (Regression III)

由於土體中的水含量變化，不僅與土體體積(坡長)及坡度有關，也與降雨強度及當時的土體飽和度有關，因此逐時水含量之多元迴歸式可表示為式(5.5)及式(5.6)，並將 42 個虛擬坡面在降雨延時為 60 小時的代表雨場作用下，以 IRIS 模式分別進行降雨-入滲-崩塌模擬所得的逐時水含量結果(時間間距 1 分鐘)，進行多元迴歸分析，以求得迴歸係數(如表 5.8)。

$$d\theta_t = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_t + c_5 \cdot \theta_{t-1} \quad (5.5)$$

$$W_t = (\theta_{t-1} + d\theta_t) \cdot V \quad (5.6)$$

其中  $I_t$  為時間為  $t$  時的降雨強度(mm/h)， $\theta_t$  為時間為  $t$  時的土壤水含量比( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )， $\theta_{t-1}$  為時間為  $t-1$  時(即前一個時間間距)的土壤水含量比( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )， $d\theta_t$  為水含量比的變化( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )， $W_t$  為時間為  $t$  時在單位寬度的斜坡單元土體內的水含量( $\text{m}^3/\text{m}$ )。圖 5.6 顯示，使用 IRIS 模式及多元迴歸式計算之水含量( $W_t$ )，二者結果非常接近。

表 5.8  $W_t$  迴歸式之迴歸係數

	$L \leq 95 \text{ m}$	$95 < L \leq 185$	$185 < L \leq 255$	$L > 255 \text{ m}$
$c1$	7.87E-05	8.22E-05	8.23E-05	9.05E-05
$c2$	9.33E-09	-1.5E-10	-7.4E-09	-9E-09
$c3$	1.12E-08	-4.2E-09	1.62E-08	5.44E-08
$c4$	6.37E-06	5.61E-06	5.22E-06	4.74E-06
$c5$	-0.00023	-0.00022	-0.00022	-0.00023

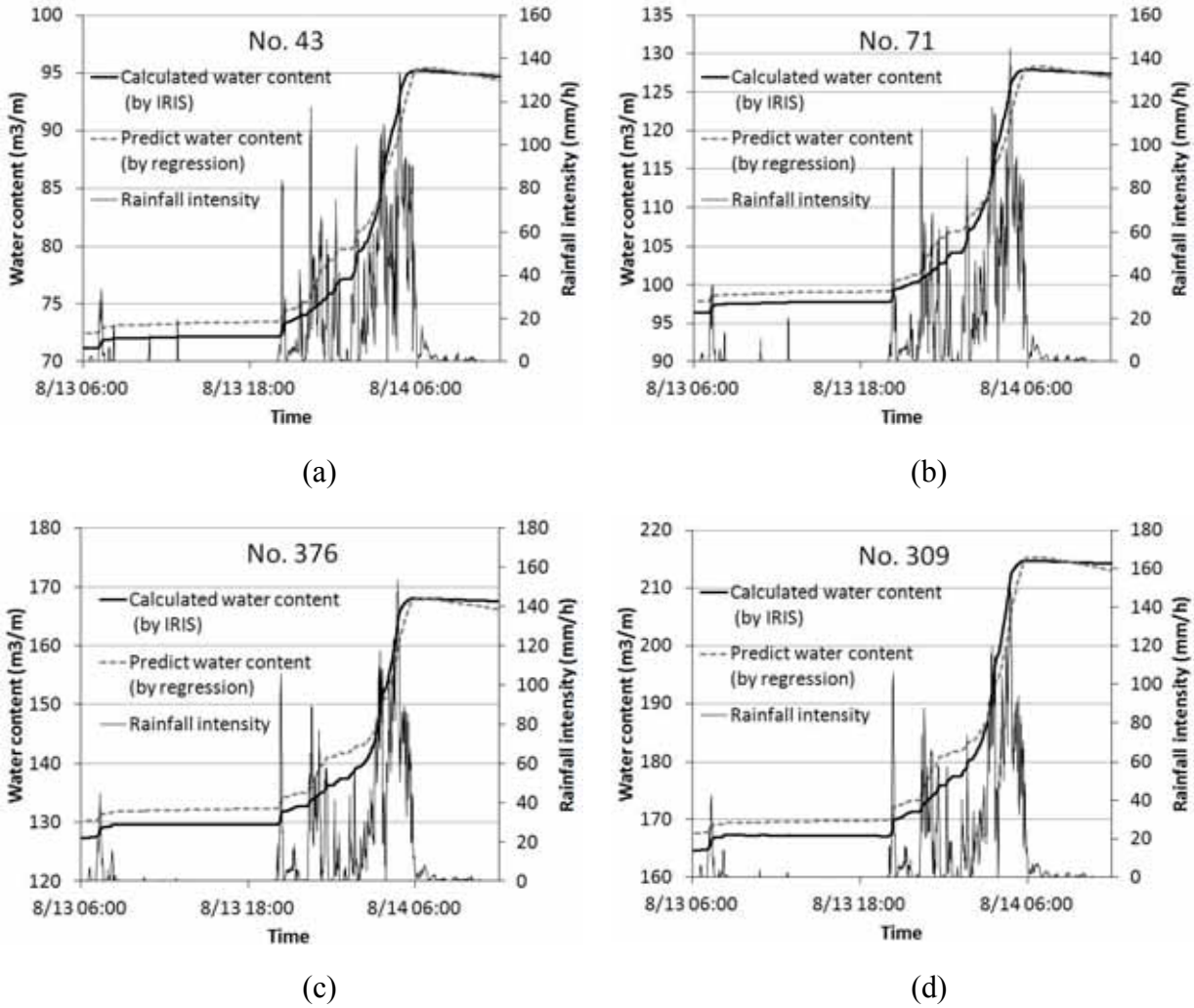


圖 5.6 使用 IRIS 模式及多元迴歸式計算之逐時水含量( $W_t$ )結果比較 (a)No.43 ( $L=102\text{m}$ ,  $\alpha=32.8^\circ$ ) (b) No.71 ( $L=137\text{m}$ ,  $\alpha=31.4^\circ$ ) (c) No.376 ( $L=180\text{m}$ ,  $\alpha=28.4^\circ$ ) (d) No.309 ( $L=230\text{m}$ ,  $\alpha=29.2^\circ$ )

#### (4) 崩塌土方量 $V_s$ (Regression IV)

表 5.2 顯示，崩塌規模(滑動面剖面面積)似乎與降雨強度成反比。事實上，降雨強度及延時將直接影響土體內孔隙水壓的分布情形，進而造成崩塌規模的差異，例如 Fujita and Tsutsumi (2008)及 Dahal(2012)之研究均指出長延時且高累積雨量之降雨型態易導致大規模崩塌。因此，估算崩塌土方量之多元迴歸式可表示為式(5.7)及式(5.8)。同前，將前揭 42 個虛擬坡面分別以 8 種不同固定強度之降雨進行降雨-入滲-崩塌模擬之結果進行多元迴歸，即以求出其迴歸係數，如表 5.9。

$$R_s = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_{60} \quad (5.7)$$

$$V_s = R_s \cdot V \quad (5.8)$$

其中為  $R_s$  崩塌體積比( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )， $V_s$  為該斜坡單元在單位寬度上的崩塌土方量

( $m^3/m$ )，亦即滑動面之縱剖面面積。為驗證崩塌土方量  $V_s$  迴歸式(Regression IV)之精度，本研究於研究區內選取 6 個實際的斜坡單元分別使用 IRIS 模式及多元迴歸式推估崩塌土方量  $V_s$ ，其結果如表 5.10。

表 5.9  $V_s$  迴歸式之迴歸係數

	$L \leq 95$ m	$95 < L \leq 185$	$185 < L \leq 255$	$L > 255$ m
$c1$	2.580216	1.726502	0.646846	3.204391
$c2$	-0.00816	-0.00214	0.000756	0.00284
$c3$	-0.0467	-0.03181	-0.01912	-0.12285
$c4$	-0.00169	-0.00253	-0.00129	-0.00038

表 5.10  $V_s$  迴歸式精度之驗證結果

No. slope	$L$ (m)	$\alpha$ (deg)	$I$ (mm/h)	$V_s$ ( $m^3/m$ ) (by IRIS)	$V_s$ ( $m^3/m$ ) (by Regression)	error (%)
31	29	34.3	40	40.25	39.09	-2.9
192	71	33.3	40	54.17	53.65	-1.0
71	137	31.4	40	64.40	64.38	23.5
413	165	29.5	40	70.00	110.14	57.3
406	214	32.2	40	50.25	61.55	22.5
136	299	27.9	40	433.25	365.36	-15.7

## 5.3 研究發現

### 5.3.1 崩塌預測結果

使用前揭四組多元迴歸式，並採用 2012/08/12~08/14 之 X-band 雷達降雨資料， $W_{cr}$ 法預測志津川流域在此降雨期間計有 187 處斜坡單元發生崩塌(表 5.11)。與由衛星影像等判識為新增的 38 處裸露地相比，此 38 處新增裸露地中，有 28 處已被  $W_{cr}$ 法預測為會發生崩塌，10 處則被預測為不會發生崩塌(如表 5.11、表 5.12)。 $W_{cr}$ 法預測之結果與 38 處裸露地之空間位置，詳如圖 5.7。此外，由  $W_{cr}$ 法預測之崩塌時間集中在 8/14 04:34~05:39，此時段與災後調查訪談的結果非常接近。為便於與現行台灣及日本之土砂災害警戒系統比較，此處暫將警戒命中率(Warning Hit Rate, WHR)及誤報率(False Alert Rate, FAR)之定義修改如下：

$$WHR = PCAC/AC \times 100\% \quad (5.9)$$

$$FAR = PCAN/PC \times 100\% \quad (5.10)$$

其中  $PCAC$  為預測為崩塌且實際也發生崩塌之斜坡單元數目(此處  $PCAC=28$ )， $AC$  為實際發生崩塌之斜坡單元數目( $AC=38$ )， $PCAN$  為預測崩塌但實際未崩之斜坡單元數目( $PCAN=159$ )， $PC$  為預測崩塌之斜坡單元數目( $PC=187$ )。故此案例之警戒命中率( $WHR$ )為 73.7%，警戒誤報率( $FAR$ )為 85.0%。

此外，為呈現整體預測精度，此處定義崩塌預測精度(the accuracy of landslide prediction, *ALP*)如下：

$$ALP = (PCAC + PNAN)/NSU \times 100\% \quad (5.11)$$

其中 *PNAN* 為預測不會崩塌且實際也未崩塌之之斜坡單元數目 (*PNAN*=238)，*NSU* 為全部斜坡單元數目(*NSU*=435)。因此，此案例中崩塌預測精度(*ALP*)為 61.2%。

表 5.11  $W_{cr}$  法崩塌預測結果與實際崩塌處數之比較

Number of slope units		Prediction	
		Collapsed	Non-Collapsed
Actual	Collapsed	28	10
Event	Non-Collapsed	159	238

表 5.12  $W_{cr}$  法針對 38 處新增裸露地之崩塌預測結果

No.	<i>L</i>	$\alpha$	No.	Predict collapse time	No.	<i>L</i>	$\alpha$	No.	Predict collapse time		
slope	(m)	(deg)	channel		slope	(m)	(deg)	channel			
1	384	259	31.9	109	03:34	20	389	156	28.7	111	05:17
2	322	190	32.5	87	03:59	21	153	134	28.3	40	05:24
3	134	228	30.8	36	04:34	22	332	120	26.7	89	05:24
4	309	230	29.2	84	04:38	23	127	82	25.9	35	05:25
5	366	200	31.8	101	04:40	24	165	124	29.2	42	05:26
6	301	258	28.7	80	04:43	25	151	86	26.4	40	05:28
7	367	121	36.3	102	04:43	26	373	96	26.7	103	05:30
8	392	223	31.8	113	04:43	27	378	124	25.2	106	05:34
9	68	86	32.5	19	04:49	28	173	113	25.9	44	05:39
10	328	209	27.5	88	04:53	29	199	58	29.3	50	-
11	181	211	29.4	46	04:55	30	330	126	20.4	88	-
12	64	118	32.3	18	05:01	31	93	118	21.1	27	-
13	73	108	32.0	21	05:01	32	119	77	23.7	32	-
14	376	180	28.4	105	05:03	33	385	63	25.5	109	-
15	63	140	29.2	18	05:10	34	303	278	25.5	81	-
16	271	161	28.4	70	05:10	35	213	150	26.2	55	-
17	85	126	28.8	25	05:11	36	169	78	27.4	43	-
18	65	128	29.2	18	05:13	37	398	152	28.8	116	-
19	114	80	27.3	32	05:17	38	430	225	18.3	126	-

為驗證  $W_{cr}$  法是否確實能取代耗時費力的 IRIS 模式，以全面應用於流域內所有斜坡單元的崩塌預測，本研究選取了 8 個研究區內的真實斜坡單元(其中 4 個為降雨事件中確實有發生崩塌者，另外 4 個則否)，分別進行 IRIS 模式及  $W_{cr}$  法的崩塌預測，結果比較如表 5.13。結果顯示，使用  $W_{cr}$  法預測之崩塌發生位置與 IRIS 模式完全一致；在崩塌時間之預測方面，則與 IRIS 模式相當接近，僅在崩塌規模之預測上差異較大。



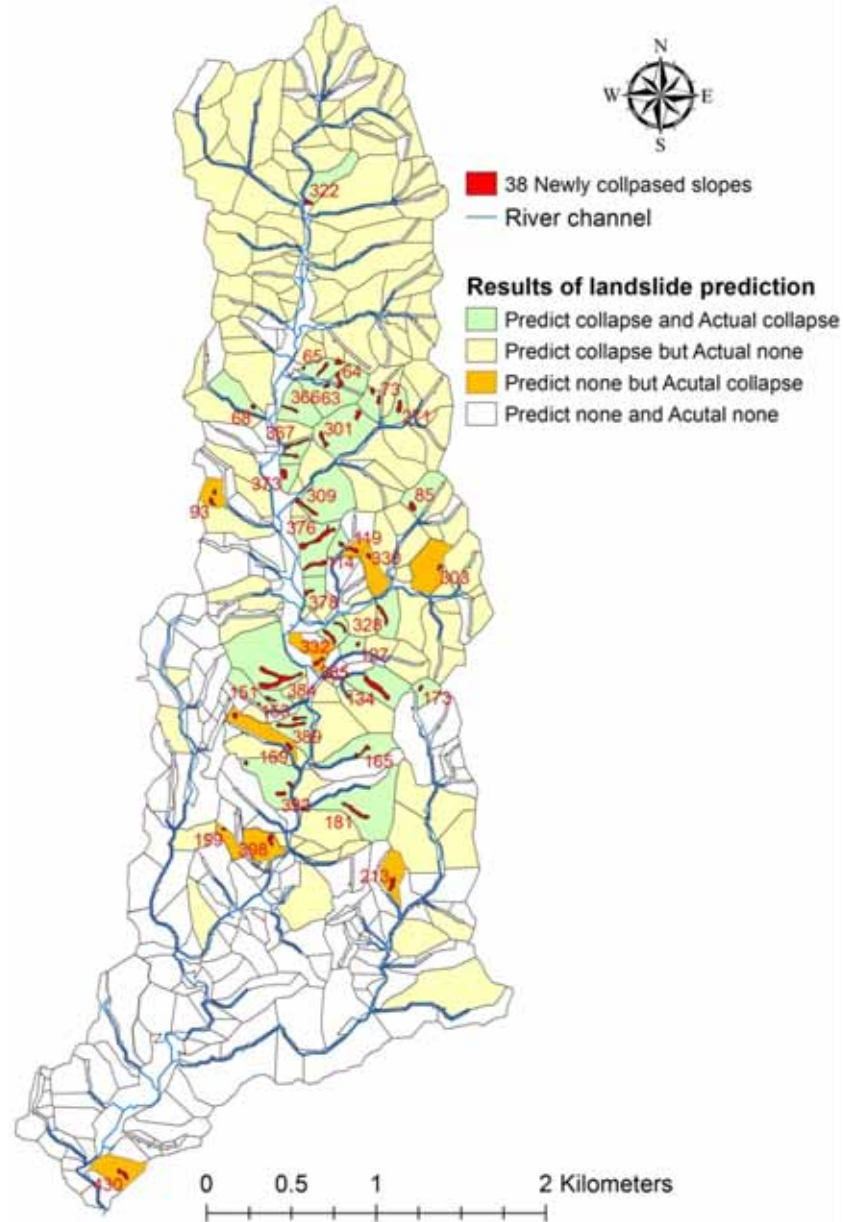


圖 5.7  $W_{cr}$  法於志津川流域內之崩塌預測結果與實際崩塌情形之比較

表 5.13 使用 IRIS 模式與  $W_{cr}$  法預測崩塌之結果比較

Case	No. Slope	L(m)	$\alpha$ (deg)	Actual collapse	Calculated by IRIS model		Predict by regression		Difference of occurring time (min)	Difference Slip surface area (%)
					Occurring time	Slip surface area (m <sup>2</sup> /m)	Occurring time	Slip surface area (m <sup>2</sup> /m)		
1	367	121	36.3	Y	8/14 4:31	23.5	8/14 4:43	31.8	12	35.0
2	366	200	31.8	Y	8/14 4:31	51.3	8/14 4:40	64.4	9	25.5
3	134	228	30.7	Y	8/14 4:42	74.8	8/14 4:34	73.8	-8	-1.4
4	309	230	29.2	Y	8/14 4:41	115.4	8/14 4:38	101.9	-3	-11.7
5	192	71	33.3	N	8/14 5:35	54.2	8/14 5:30	42.5	-5	-21.6
6	43	102	32.8	N	8/14 4:46	44.0	8/14 5:02	60.4	16	37.5
7	71	137	31.4	N	8/14 4:43	63.1	8/14 5:00	66.6	17	5.4
8	424	248	28.4	N	No collapse		No collapse		same	

### 5.3.2 崩塌可能性

由於崩塌與土體內之水含量多寡有直接關係，因此各斜坡單元於降雨期間任意時間  $t$  之崩塌可能性(Probability)可表示為式(5.12)

$$Risk = (\theta_t - \theta_r) / (\theta_{cr} - \theta_r) \quad (5.12)$$

其中  $\theta_t$  為時間為  $t$  時的土壤水含量比( $m^3/m^3$ )。由於  $\theta_t$  及  $\theta_{cr}$  均可利用多元迴歸式快速計算，故降雨期間流域內所有的斜坡單元均可即時計算出其崩塌可能性。如將此結果以圖形方式即時展示於 GIS 平台，將可作為地方政府防災單位進行疏散決策的重要參據。圖 5.8 為 2012 年 8 月 14 日豪雨期間志津川流域 04:00~12:00 間各時段的崩塌可能性圖。

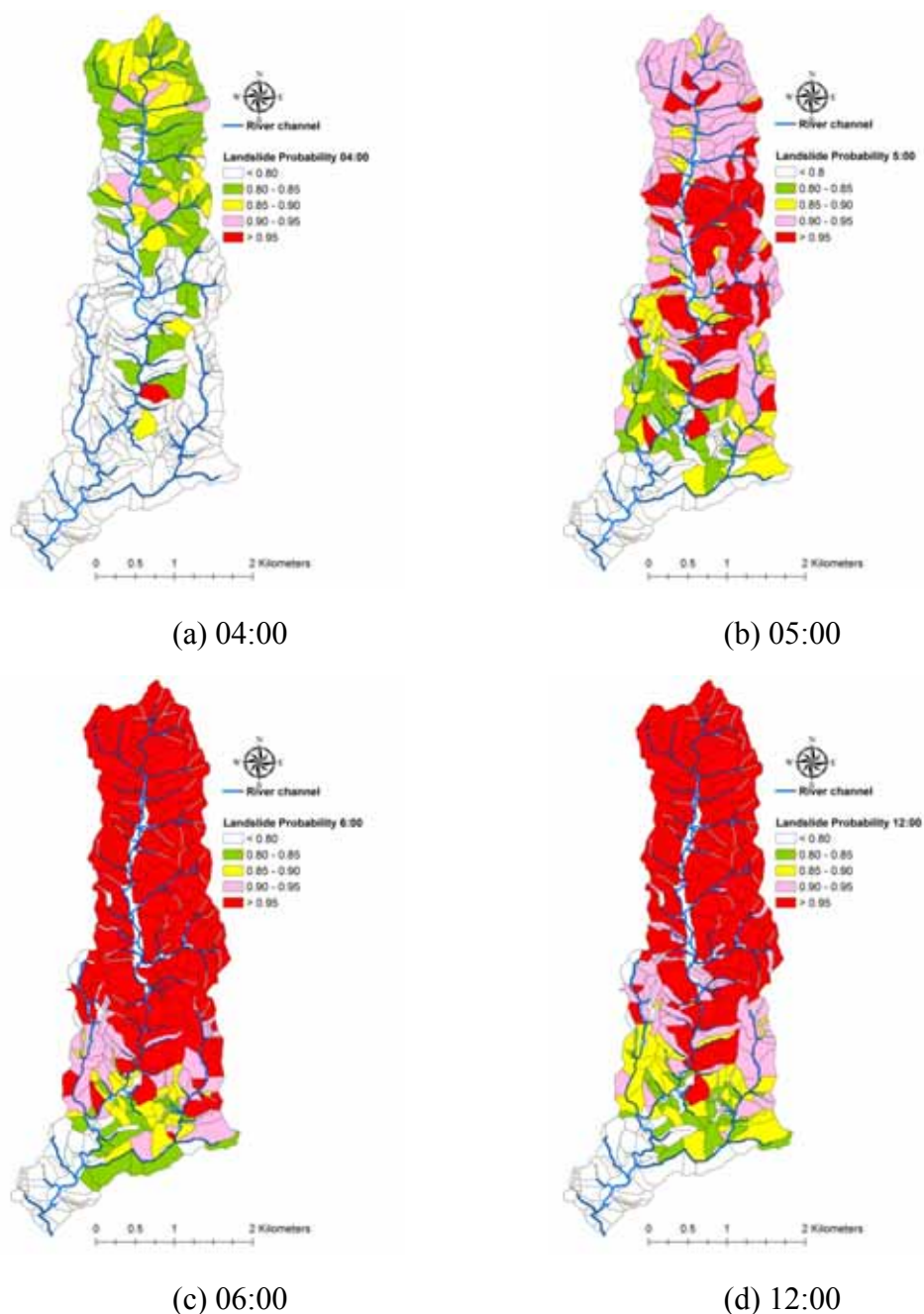


圖 5.8 2012 年 8 月 14 日豪雨期間志津川流域各時段崩塌可能性圖

### 5.3.3 討論

一般以物理模式為基礎的流域尺度崩塌預測模式，常使用格網(grid-based)作為分析單元，但此種分析模式因採用無限邊坡穩定分析法，因此只能用於淺層崩塌的分析。相對而言，IRIS 模式則不但可分析淺層崩塌，亦可分析深層崩塌(陳振宇等，2014)。然而，由於 IRIS 模式之計算費時，不易應用於流域尺度之崩塌預測，因此本研究藉由整合 IRIS 模式及多元迴歸分析，同時採用土層之臨界水含量作為崩塌評估指標，提出了一個流域尺度的新型態崩塌預測模式—臨界水含量( $W_{cr}$ )法。此法具有以下優點：

- (1) 此法係針對流域內每一塊斜坡單元分別模擬其水含量之變化，如土體內水含量大於臨界水含量即判定為發生崩塌，並評估其崩塌土方量。因此，此法可即時預測流域尺度內之崩塌位置、時間及規模。
- (2) 相較於一般以雨量為指標的統計模式法，此法係由物理模式法(IRIS 模式)衍生而來，且以坡面內土壤水含量為指標，仍保物理模式法之優點，具有明確之物理意義。
- (3) 本法由於計算時僅使用簡單的多元迴歸式，因此計算快速，可直接應用於流域尺度之崩塌預測。
- (4) 由於土體內之水含量多寡與坡面安定性關係密切，因此非常適合使用水含量表示崩塌風險；如以 GIS 平台直接圖形化展示流域內每一塊斜坡單元之崩塌風險，將有助於地方政府防災單位進行疏散決策及相關應變措施。
- (5) 一般而言，如使用統計模式法來劃定某地區之土砂災害降雨臨界線(critical line)時，除大量的雨量資料外，尚需較多歷史災例資料才能劃定。然而，實務上並非每個地區都能蒐集到歷史災例資料。相對而言，此法僅需少數災例資料用以驗證預測結果，即使對於沒有歷史災例資料的地區，也能直接以現場調查或室內試驗所得的結果，設定土壤相關參數，進行模擬與預測。因此，此法可輕易地應用於任何地區。

然而，僅管  $W_{cr}$  法具有上揭眾多優點，但後續仍有一些問題，尚待進一步研究：

- (1) 雖然 Xie et al. (2004)已提出自動化劃設斜坡單元的「集水區重疊」法，但對於地質或地形較複雜的地區，人工切割或調整斜坡單元仍是無法避免的工作。因此，如何降低人工作業比例，並維持成果的一致性，值得進一步探索。
- (2) 一般而言，因降雨造成之崩塌規模多與土體內之孔隙水壓分布型式有關。而降雨入滲過程中，影響土體內孔隙水壓分布情形的原因十分複雜，不單與地質、地形、坡長及坡度有關，也與降雨強度、降雨延時等有密切關連。本研究目前僅以 60 分鐘雨量強度  $I_{60}$  作為崩塌土方量預測迴歸式的雨量參數，相較於其他三個多元迴歸式，此部份之預測精度明顯不足，尚待進一步研究。
- (3) 由於本研究使用二維動態規劃法計算臨界滑動面位置，故 IRIS 模式及多元

迴歸式 IV，均只能推估崩塌之臨界滑動面縱剖面面積，在崩塌寬度方面係採用現地調查結果之平均值(20m)，因此崩塌土方量之估算結果與實際情形恐有落差，此部份仍待後續改進。

一般而言，當警戒系統使用較大的預報發布單元(例如台日現行之土砂災害警戒系統分別使用村里及鄉鎮為預報發布單元)，其警戒命中率(WHR)及警戒誤報率(FAR)較易達成較佳之結果。本研究在使用較小的預測單位(斜坡單元)之情況下，以  $W_{cr}$  法預測崩塌之警戒命中率(WHR=73.7%)仍遠高於台日現行土砂災害警戒系統近年來之平均值(45.4~58.8%)，而警戒誤報率(FAR=85.0%)則與台日現行土砂災害警戒系統近年來之平均值(75.2~83.4%)相近，因此， $W_{cr}$  法在崩塌預報精度方面，係優於台日現行之土砂災害警戒模式，此部份須再藉由增加降雨事件案例及增加不同區域案例進行驗證。

此外，由於本研究將所有斜坡單元均簡化為四個獨立參數的簡化坡面模型(如圖 5.3)，且基於研究區內均為淺層崩塌及土層厚度相等的假設( $\alpha=\beta$ ，且  $n=2m$ )，進一步化簡為坡長  $L$  及地表坡度  $\alpha$  等二個獨立參數，亦即已忽略坡面之地表起伏、不同地區之土層厚度與地表植生差異等的細部特性，此部份勢必會造成一些誤差，影響預測結果。例如，由圖 5.7 可看出，造成警戒誤報率偏高(亦即預測會發生崩塌，但實際未發生)的斜坡單元，大多集中在流域的北部地區，其原因係本次事件之降雨量係由北而南逐漸遞減(如圖 5.9)，但本研究對於整個流域採用相同的土壤強度參數及土壤厚度，因此當流域中部之預測結果與實際崩塌情形大致相符時，降雨量較大的北部地區則易出現警戒誤報率偏高之情形。針對此種情形，如果先將流域分成數個區域，分別設定不同的土壤強度及土層厚度等參數，應可進一步降低警戒誤報率。

另一值得注意的是，本次模擬案例中，在 38 處由衛星影像或空拍影像等判識而得的災後新增裸露地中，有 10 處未能被  $W_{cr}$  法判定為發生崩塌。進一步分析此 10 處斜坡單元之地形資料，發現多為平均坡度小於  $27.5^\circ$  的緩坡(8 處)，或是坡面水平長度僅 58m 的小坡面(1 處)。由於這 9 處新增裸露地之位置，並無解析度較高的空拍影像，均係由解析度 5m 之 RapidEye 衛星影像判識而來，因此推測此 9 處亦有可能僅為坡面土壤沖蝕，而非崩塌，此部份尚需進一步現勘或取得高解析度之影像方能確認。此外，另有一處未能被  $W_{cr}$  法判定為發生崩塌的新增裸露地，則位於流域最南端，雷達解析之累積雨量僅 134mm 處，此部份經現勘確認其崩塌位置位於志津川區民運動場旁之坡面，可能與人為開發有關。

多數研究在模擬流域之坡面降雨-逕流時，常使用計算簡便之動力波(kinematic wave)法(Takasao and Shiiba, 1988; Egahsira and Matsuki, 2000)。動力波法雖易於藉由調整各層土厚及透水係數等參數，達到與預期洪峰一致之模擬結果。惟其缺乏明確之物理意義，且多僅適用於降雨期間之模擬。相對而言，本研究提出之  $W_{cr}$  法係直接由土壤水份曲線模擬所有斜坡單元土層內之水含量變化，如利用水平衡之概念(降水量-流出量=儲留量)，即可間接計算出降雨

期間之坡面逕流量(runoff)，，即使於非降雨期間，也能合理描述坡面逕流，同時亦兼具計算快速之特性，應為另一可行方向。

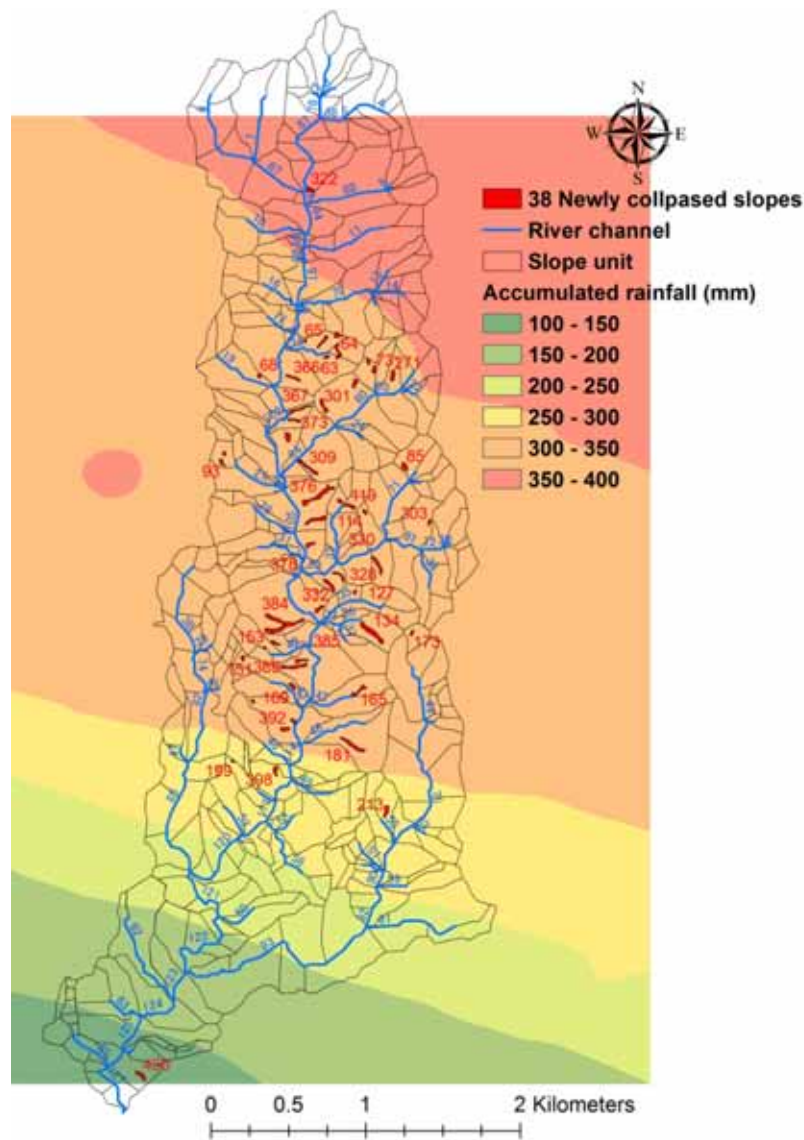


圖 5.9 志津川流域 2012 年 8 月 14 日豪雨事件累積雨量分布情形

## 5.4 小結

儘管災害發生前適時發布預警，並執行民眾之疏散避難，已被公認為降低災害衝擊之最重要的對策之一，但如何在不擾民與維護民眾安全的前提下，適時作出疏散避難決策，卻是一直困擾地方政府決策單位與當地民眾的難題。台灣及日本現行之土砂災害警戒系統，由於直接使用短期及長期雨量指標作為警戒發布之依據，並未考量地質、地形、水文等因素，故僅能提供廣域之警戒訊息，無法明確告知災害可能發生之時間與地點，在實務上，不論對地方政府或

是當地居民而言，在疏散避難之決策上助益不大，此點也反映在近年來土砂災害警戒發布後，實際進行疏散行動比例偏低之事實。本研究所提流域尺度之崩塌預警模式－臨界水含量( $W_{cr}$ )法，由於已納入地質、地形及水文條件，且能預測各斜坡單元之崩塌發生時間、地點、規模，甚至模擬坡面之降雨-逕流過程，後續如能整合流域內之崩塌土方運移模式、河道流量估算模式、河道內土砂流出模式、河床高程變化評估模式、河道水位估算模式等，即可進一步發展為流域尺度之複合型土砂災害預測模式。後續如再加入民宅或公共設施位置、道路、橋梁等空間資訊，即可作為發展流域尺度之複合型災害警戒系統之基礎，除可提供災害期間之警戒發布與疏散決策之依據外，亦可作為平時防災疏散計畫驗證之模擬平台。

### 參考文獻

- [1] アシア航空株式會社(2012)「平成 24 年 8 月近畿豪雨災害斜め空中写真」。(Asia air survey co., LTD (2012). The aerial photos on the Shizugawa basin, Uji, Kyoto Prefecture after heavy rainfall event on August 14, 2012. (<http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID4T3J5OYFD/>))
- [2] 江頭進治、松木敬 (2000)「河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法」, 水工学論文集, 44, 735-740。(Egahsira, S., and Matsuki, K. (2000). "A method for predicting sediment runoff caused by erosion of stream channel bed." *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 44, 735-740. (in Japanese with English abstract))
- [3] 京都大學防災研究所(2012)「2012 年 8 月宇治水害調査速報(流域災害研究センター)」。(Disaster Prevention Res. Inst (DPRI), Kyoto Univ. (2012). Investigation report for the heavy rainfall disaster on August 13-14, 2012. (in Japanese)). ([http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web\\_j/saigai/disaster\\_report.html](http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/disaster_report.html))
- [4] 京都府(2013)「平成 24 年 8 月 13~14 日京都府南部豪雨災害被害の状況」, 木津川・桂川・宇治川圏域河川整備計画検討委員会第 11 回資料。(Kyoto Prefecture (2013). Disaster report for the heavy rainfall on August 13-14, 2012. ([http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/1\\_nambugouu.pdf](http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/1_nambugouu.pdf))(in Japanese))
- [5] 岡本敦、富田陽子、水野正樹、林真一郎、西本晴男、石井靖雄(2012)「土砂災害警戒避難に関するデータ解析共同研究」国土技術政策総合研究所, 日本。(Okamoto, A., Tomita, Y., Mizuno, M., Hayashi, S., Nishimoto, H., Ishii, Y., and Chiba, S. (2012). *The data analysis regarding the warning and evacuation information against sediment-related disaster*. National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Japan (in Japanese))
- [6] 陳振宇(2013a)「以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估—以台灣及日本為例」, 中華水土保持學報, 44(1), 50-64. (Chen, C.Y. (2013a). "



- Evaluation of Rainfall-Based Sediment Disaster Warning Systems: Case Studies in Taiwan and Japan." *Jour nal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (1), 50-64. (in Chinese))
- [7] 陳振宇(2013b),「土石流潛勢地區地方政府及民眾之疏散決策因子」,中華水土保持學報,44(2),166-179. (Chen, C.Y. (2013b). " The Factors of Evacuation Decisions for Local Governments and Inhabitants in Debris-Flow Potential Areas." *Jour nal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (2), 166-179. (in Chinese))
- [8] 陳振宇、藤田正治、堤大三(2014),「基岩位置及土層特性對降雨逕流與大規模崩塌之影響」,中華水土保持學報,45(4),預定2014/12刊出。(Chen, C.Y., Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2014). " The Influence of Bedrock Location and Soil Characteristics on Rainfall-Runoff and Large-Scale Landslides." *Jour nal of Chinese Soil and Water Conservation*, 45 (3), accepted. (in Chinese))
- [9] Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., and Reichenbach, P. (1991). "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard." *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5), 427-445.
- [10] Casadei, M., Dietrich, W. E., and Miller, N. L. (2003). "Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes." *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9), 925-950.
- [11] Chang, K.T., and Chiang, S.H. (2009). "An integrated model for predicting rainfall-induced landslides." *Geomorphology*, 105(3-4), 366-373.
- [12] Crosta, G. B., Chen, H., and Frattini, P. (2006). "Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches." *Engineering Geology*, 83(1-3), 236-253.
- [13] Dahal, R. K. (2012). "Rainfall-induced landslides in Nepal." *International Journal of Erosion Control Engineering*, 5(1), 1-8.
- [14] Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2008). "Several important issues from field and model investigations on landslides." *Proceedings of hydraulic engineering*, 52, 9-12.
- [15] Kosugi, K. I. (1996). "Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties." *Water Resource Research*, 32(9), 2697-2703.
- [16] Kubota, T. and Nakamura, H. (1991). "Landslide susceptibility estimation by critical slip surface analysis combined with reliable analysis." *Journal of Japan Landslide Society*, 27(4), 18-25.
- [17] Lee, K. T., and Ho, J.Y. (2009). "Prediction of landslide occurrence based on slope-instability analysis and hydrological model simulation." *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 489-497.
- [18] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010).

- “Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network.” *Landslides*, 7(3), 325–338
- [19] Takasao, T., and Shiiba, M. (1988). "Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping." *Journal of Hydrology*, 102(1–4), 301-322.)
- [20] Wang, C., Esaki, T., Xie, M., and Qiu, C. (2006). "Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata–Hougawachi area, Japan." *Environ Geol*, 51(1), 91-102.
- [21] Wiczorek, G.F. and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M, Hunger O (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Praxis, Springer Berlin Heidelberg, pp. 325-362
- [22] Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004). "GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model." *Natural Hazards*, 33(2), 265-282.



## 第6章 複合型土砂災害模擬

### 6.1 前言

台灣及日本每年都面臨許多颱風及豪雨災害的侵襲，其中山區部份最常見的災害包含崩塌、洪水及土石流等，往往造成民眾生命財產的損失以及公路、橋梁等重要公共設施的毀損。事實上，山區於颱風豪雨期間所造成的災害，大多均與降雨產生的洪水及土砂的移動有關。例如：降雨時，部份雨水未及滲入土壤直接轉成地表逕流並匯集至河道，導致下游河川水位暴漲，造成道路橋梁沖毀及淹水災情；部份雨水滲入土壤中，造成土壤之有效應力降低，進而導致崩塌發生，而崩塌之土體，又可能因地表逕流造成土石流擴大災情，或是土砂直接進入河道，造成通洪斷面減少，進而惡化淹水情形，甚至形成堰塞湖，造成後續一連串的二次災害。因此，颱風豪雨期間發生於山區的災害，往往在各別災害事件之發生時間、地點及前後因果關係上均有直接與間接的複雜關連 (Highland and Bobrowsky, 2008; Kappes et al., 2010; Kappes et al., 2012)，如相關的防災計畫與預警系統僅以個別災害類型(如崩塌、水災、土石流)分別設計與規劃，往往無法因應大規模天然災害事件，甚至造成整體防災系統的失效。例如，2009 年重創台灣南部的莫拉克颱風，以及 2011 年重創日本紀伊半島山區的塔拉斯颱風即是一典型案例(Chen and Fujita, 2013; Chigira et al., 2013)。

儘管山區的災害多為同時涉及水及土砂問題的複合型的土砂災害，但限於政府防災體系之分工及問題的複雜性，現行的山區防災預警系統大多仍只有針對單一災害類型去設計與因應，缺乏對於區域整體狀況及如何因應複合型災害之考量，因此僅能提供簡單的災害可能發生與否的預警訊息(如土砂災害警戒情報、河川水位警示等)，無法提供災害可能發生的規模、較明確的發生時間與地點、以及後續影響疏散避難行動之周邊環境可能之變化。同時，對於位處災害潛勢區內的民眾而言，由於現行單一災害預警系統所能提供的資訊過於粗略，不易使其感受可能受災之風險，因此降低了主動配合與事前疏散的意願，也增加地方政府執行疏散避工作的困難度(Chen and Fujita, 2013)。此外，對於負責發布避難指示的地方政府而言，現行單一災害類型的預警系統，也容易造成見樹不見林之狀況，導致時有發生疏散避難指示下達時，對外聯絡道路卻早已沖毀或因水位太高而封閉，造成預警與疏散計畫失靈之窘境。同時，現行之單一災害類型預警系統，由於缺乏情境模擬的功能，因此警戒發布後，即使降雨仍在持續，卻無法提供後續可能演變狀況之推估，以及後續可能的直接或間接之影響，自然也無法協助地方政府作出適當之防救災資源配置與應變決策(Chen and Fujita, 2013; Chen and Fujita, 2013)。

因此，對於山區豪雨災害之防災計畫與預警系統，實應以一流域為主體，並同時考量降雨、入滲、崩塌、洪水及土砂流動之發生時間與交互影響，亦即

宜以一複合型土砂災害之觀點整體觀之。但，不論是災前之防災計畫的擬定，或是災中應變時所需的預警與疏散避難決策系統，均需先建立一複合型土砂災害之模擬機制，以作為防災計畫可行性之驗證依據，並作為地方政府第一線之防災作業人員進行相關應變措施(如指引民眾疏散避難、封路、封橋等作業)時之決策支援系統的基礎。

近年來，在流域尺度的降雨與逕流量模擬方面，單位斜面及單位河道之組合用以模擬流域狀態的方法，已被廣泛使用(Lee et al., 2011; Tachikawa et al., 2004; Takasao and Shiiba, 1988)。同時，整合降雨-逕流以及河道土砂流出的模式，亦曾有相關研究進行探討(市川温 et al., 1999; 江頭 and 松木, 2000; 高橋保 et al., 2000)，但在整合流域整體之降雨-逕流、坡面崩塌與土砂流出之複合型土砂災害模擬之相關研究則少有人探討。

而在崩塌之預測模式上，一般而言，大致可分為統計法與數值模式法二大類。其中統計法大多使用雨量等易於量測及取得的現地資料作為指標，經由歷史災例資料之統計，訂定崩塌發生之臨界雨量(Caine, 1980; Osanai et al., 2010)；此法之優點為計算快速，可應用於災時的廣域土砂災害警戒系統，但缺點為無法提供災害可能發生的地點、時間及其規模之預測(Chen and Fujita, 2013)。相對而言，數值模式法則可明確提供災害可能發生的地點、時間及其規模的預測(Tsutsumi and Fujita, 2008; Xie et al., 2006)，但其缺點則是限於計算量龐大及現地參數蒐集困難等條件，一般只能使用於少數特定邊坡的警戒或事後分析，無法應用於流域尺度內的每一個坡面。因此，本研究導入一新的崩塌預測模式—土壤含水臨界指標法(Critical water content indicator, Wcr)(Chen and Fujita, 2014)，此模式係整合數值法及多元迴歸方式，除保有數值模式法之明確物理意義外，亦能快速計算，以應用於流域尺度之崩塌發生時間、地點及規模之預測。同時，本研究更進一步將此模式應用於降雨-入滲-逕流之模擬，以取代一般常用但較為粗略的動力波模式(Kinematic wave method)(Takasao and Shiiba, 1988)。

本研究整合降雨、入滲、逕流與崩塌預測、土砂流出與河床變動等模式，初步建立流域尺度之複合型土砂災害模擬模式(如圖 6.1)。其成果不僅可提供地方政府檢視地方防災計畫之依據，亦可作為後續發展流域尺度複合型土砂災害警戒系統之基礎。

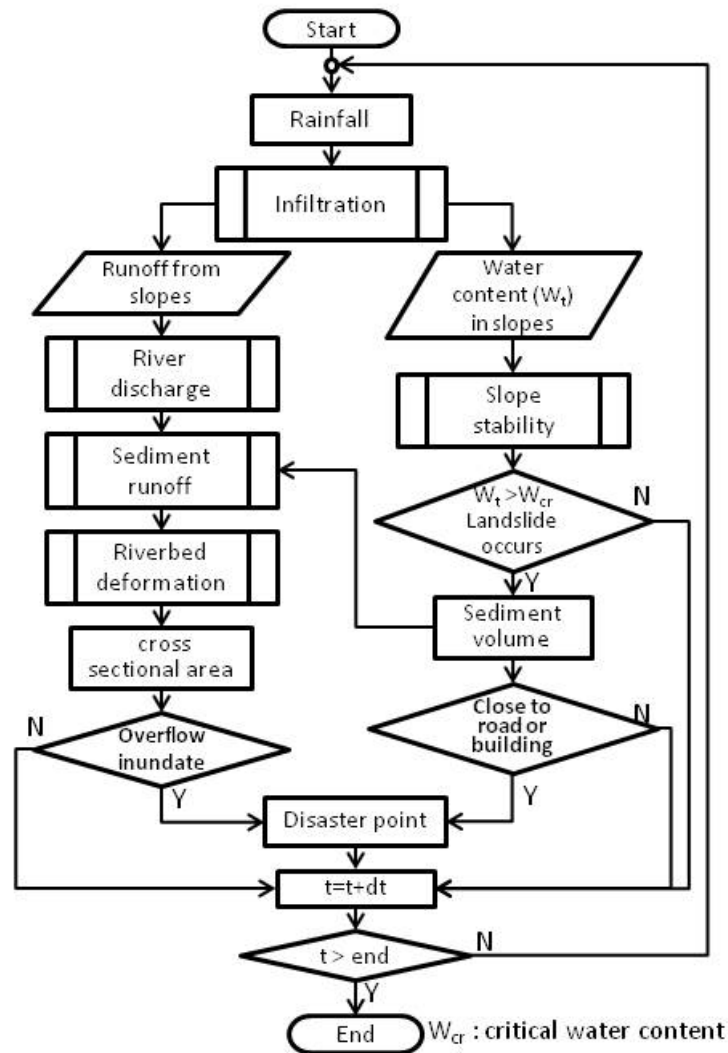


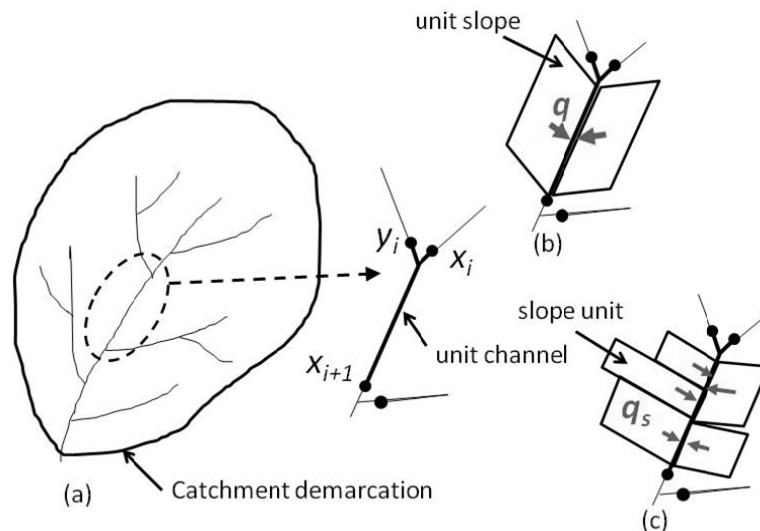
圖 6.1 流域尺度之複合型土砂災害模擬模式

## 6.2 材料及方法

### 6.2.1 研究區域及流域模型

一般對於流域尺度之邊坡穩定分析，大多採用演算法及管理上較易簡單之格網式的分析單元(Casadei et al., 2003; Chang and Chiang, 2009; Lee and Ho, 2009)。此種方法雖然具有較易建構地形模型及演算法較為快速簡便的優點，但同時也造成無法保留原地質、地形及其他環境等邊界條件特性的缺點(Xie et al., 2004)；因此近年來已有部份研究改以斜坡單元方式，針對各個完整坡面進行崩塌危害評估(Carrara et al., 1991; Crosta et al., 2006) 及預測(Kubota and Nakamura, 1991; Wang et al., 2006; Xie et al., 2004)。本研究配合所使用的崩塌分析數值模式，採用斜坡單元(slope unit)作為流域尺度之崩塌分析單元，並使用斜坡單元與單位河道之組合方式，作為流域尺度之降雨與逕流量模擬元素，取代一般常用但較為粗略的單位斜面及單位河道之組合方式(如圖 6.2)。所有的斜

坡單元及單位河道，及其面積、坡度、長度等之地形參數，均可藉由 GIS 軟體，由 DEM 資料製作而得。



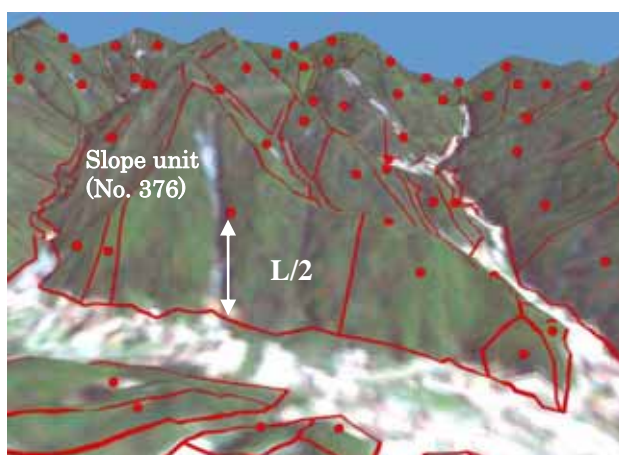
- $q$  is the discharge from runoff of unit slopes into the unit channel
- $q_s$  is the discharge from runoff of each slope unit into the unit channel

圖 6.2 流域模型 (a)每一單位河道有 2 個流入端及 1 個流出端 (b)每一單位河道均有左右二側之集水面積(單位斜面) (c)每一單位斜面可以依坡向坡度等地形特徵細分為數個斜坡單元，並以斜坡單元作為坡面穩定分析之單位

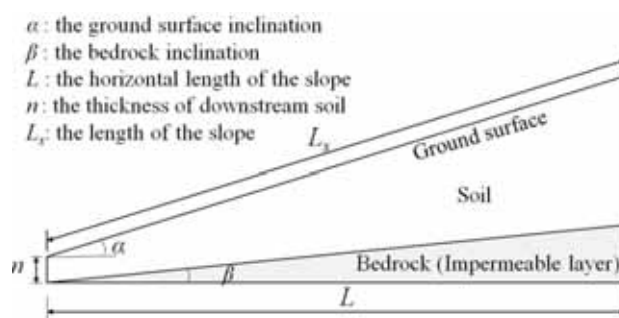
本研究選定之研究地區位於日本京都府宇治市志津川流域，流域面積為 10.8 km<sup>2</sup>，地質主要為砂頁岩互層，並依集水區邊界、坡度、坡向及各斜坡單元形心位置之合理性等條件，使用 15m 之 DEM 將該流域劃分為 127 條單位河道及 435 個斜坡單元(如圖 6.3(a))。為便於後續崩塌模擬與分析，每一個斜坡單元均簡化為以  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $L$ 、 $n$  等 4 個獨立參數代表之簡化坡面，其中  $\alpha$  為該斜坡單元之地表平均坡度， $\beta$  為基岩平均坡度、 $L$  為坡面之水平長度， $n$  為坡面下游端土層厚度(如圖 6.3(b))。由於現地調查發現，該地區之崩塌均為淺層崩塌，平均深度約為 2m，因此本研究設定  $\alpha = \beta$ ，且  $n = 2m$ 。

本研究模擬之案例為 2012 年 8 月 13-14 日發生於志津川之豪雨災害，分析時使用 X-BAND 之雷達降雨資料，其空間解析度為 285m，資料間距為 1 分鐘。依據災後 2012/09/26 的 RapidEye 衛星影像判識之結果，435 處斜坡單元中疑似災後新增裸露地者計有 38 處，經現地訪問當地居民得知崩塌發生時間約在 8/14 04:30~06:00 之間；此外，依據京都府之災害調查報告(京都府，2013a；京都府，2013b)在下游單位河道(No.122)處，約於 8/14 04:30~05:30 河水溢堤，河道水面最大上升約 3m，除造成淹水外，大水亦沖毀河道旁之 1 棟民房及 1 座便橋，造成 2 人死亡，估計災害期間該河道之最大流量約為 80CMS。此外，位於流域最下游之單位河道(No.127)之最大流量估計約為 100CMS。本研究將

以前揭調查之崩塌發生時間、地點及洪峰量與發生時間作為模擬結果之驗證標的。



(a)



(b)

圖 6.3 (a)斜坡單元之示意圖 (b)坡面穩定分析所使用之簡化坡面模型

### 6.2.2 崩塌預測模式

本研究使用第 5 章所提出的臨界水含量法(critical water content method,  $W_{cr}$  method)進行流域尺度內之坡面崩塌發生時間、地點及其規模之模擬。根據第 5 章之模擬結果，若整個志津川流域使用相同的土壤剪力強度參數，則其北部區域會發生過度預測之情形，亦即許多斜坡單元被預測為會發生崩塌，但實際卻無。在第 5 章之討論中，曾建議先將流域分成數個區域，分別設定不同的土壤強度及土層厚度等參數，應可進一步降低警戒誤報率。因此，本研究對北部地區之斜坡單元設定其土壤強度參數  $C=0.85 \text{ t/m}^2$ ，其它參數則完全同表 5.1。

此外，由於臨界水含量法係基於 IRIS 模式(詳第 5 章)之模擬結果進行多元迴歸分析而得，而 IRIS 模式在進行崩塌滑動面模擬時，係使用 2 維平面分析，亦即無法模擬崩塌滑動面之寬度。因此，本研究參考現地調查結果，假設所有的崩塌寬度均為 20m，並據以進行崩塌土方量之計算。

### 6.2.3 降雨-逕流模式

本研究採用單位河道及斜坡單元之組合建構流域模型，並假設每一個斜坡單元上之逕流( $q_s$ )均先流入其相鄰單位河道後，再匯集至下游單位河道(如圖 6.2(c))。儘管許多研究使用計算較為簡便的動力波法來計算單位斜面之降雨-逕流，但此法較為粗略，且缺乏明確之物理意義。由第 5 章可知，(5.5)式及(5.6)式可以快速估算出土層中水含量之變化，因此由質量守衡的觀點，將降雨量減去土體內之含水量變化即為坡面之逕流量，如式(6.1)。本研究假設各單位時間內斜坡單元之逕流量為平均分布在坡面上，並以漫地流方式流入相鄰之單位流道。各斜坡單元之漫地流之集流時間使用美國水土保持局公式[1986]計算之(式(6.2))，並取集流時間為至少為 1 分鐘之整數，再採用節塊法(Segmental Approaches，如圖 6.4)，由式(6.3)計算每分鐘各斜坡單元流入單位河道之逕流量。

$$O_t = R_t - \Delta W_t \geq 0 \quad (6.1)$$

$$t_c = L_s / (60 \cdot k \cdot S_o^{1/2}) \quad (6.2)$$

$$q_s(t) = \sum_{t-t_c}^t \frac{O_t}{t_c} \quad t = t_c + 1, t_c + 2, t_c + 3, \dots \quad (6.3)$$

其中  $O_t$  為  $t$  時間之地表逕流量， $R_t$  為降雨量， $\Delta W_t$  為土體含水量增加量， $t_c$  為各斜坡單元之漫地流集流時間(min)， $L_s$  為坡面長度， $k$  為漫地流速度常數 ( $k=0.21$  (m/s)，地表為茂密矮樹叢)， $S_o$  為平均坡度(m/m)， $q_s$  為單位寬度之斜坡單元流入相鄰單位河道之逕流量(m<sup>3</sup>/m)。

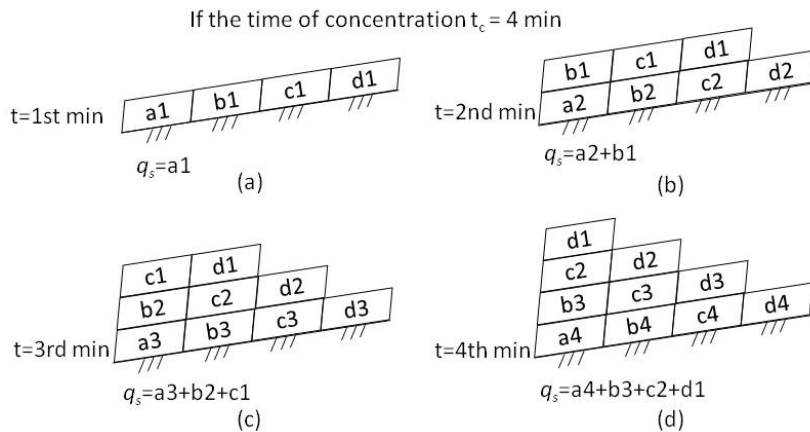


圖 6.4 使用節塊法計算單位寬度斜坡單元流入相鄰單位河道之逕流量示意圖

本研究假設所有的單位河道均為矩形斷面，且其連續方程式可表示為：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{BL_c} \{Q(x_i) + Q(y_i) - Q(x_{i+1})\} + \frac{1}{B} q \quad (6.4)$$

$$Q(x_i) = \frac{1}{n_m} B I^{\frac{1}{2}} h^{\frac{5}{3}} \quad (6.5)$$

其中  $h$  為水深， $B$  為單位河道之寬度， $L_c$  為單位河道之長度， $Q(x_i)$  及  $Q(y_i)$  為上游單位河道流入之水量， $Q(x_{i+1})$  為流入下游單位河道之水量， $n_m$  為曼寧係數， $I$  為單位河道河道坡度， $q$  為單位斜面之單位寬度逕流量(如圖 6.2(b))。

#### 6.2.4 土砂流出模式

依據質量守衡定理，單位河道內土砂流出之連續方程式可表示如下 (Egahsira and Matsuki, 2000)：

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{BL_c} (Q_b(x_i) + Q_b(y_i) - Q_b(x_{i+1}) + Q_l(x_i)) + D_s - E_s + D_w - E_w \quad (6.6)$$

其中  $z$  為河床高程， $\lambda$  為土砂孔隙率， $Q_b(x_i)$  及  $Q_b(y_i)$  為上游單位河道流入之推移質 (bed load) 量， $Q_b(x_{i+1})$  為流入下游單位河道之掃流砂量， $Q_l(x_i)$  為流入單位河道內之崩塌土方量， $D_s$  及  $E_s$  為懸移質 (suspended load) 之沉積率 (deposition rate) 及侵蝕率 (erosion rate)， $D_w$  及  $E_w$  為流洗載 (wash load) 之沉積率 (deposition rate) 及侵蝕率 (erosion rate)。其相關之方程式詳細說明如下：

##### (A) 推移質 (Bed load)

河道內推移質之流量可以下式估算：

$$Q_b = B \sum_{k=1}^n q_{bk} \quad (6.7)$$

$$q_{bk} = 17 \frac{\rho u_{*e}^3}{(\rho_s - \rho)g} \left[ 1 - \sqrt{K_c \frac{u_{*ck}}{u_*}} \right] \left[ 1 - K_c \frac{u_{*ck}^2}{u_*^2} \right] f_{bk} \quad (6.8)$$

其中  $n$  表土砂粒徑分布階數， $\rho$  為水密度， $\rho_s$  為土砂密度， $u_{*e}$  為有效摩擦率，且其可以下式估算：

$$u_{*e}^2 = \frac{[Q/(Bh)]^2}{\left[ 6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right]^2} \quad (6.9)$$

其中  $d_m$  為河床之混合層(mixed layer)土砂之平均直徑；此外，第  $k$  階土砂粒徑之臨界摩擦速度(threshold friction velocity)可以由下式計算：

$$u_{*ck}^2 = u_{*cm}^2 \left[ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10}(19d_k/d_m)} \right]^2 \frac{d_k}{d_m} \quad d_k/d_m \geq 0.4 \quad (6.10-1)$$

$$u_{*ck}^2 = 0.85u_{*cm}^2 \quad d_k/d_m \leq 0.4 \quad (6.10-2)$$

而土砂平均粒徑之臨界摩擦速度(threshold friction velocity)，則可以由下式計算：

$$u_{*cm}^2 = 0.89d_m \quad d_m \geq 0.303 \quad (6.11-1)$$

$$u_{*cm}^2 = 134.6d_m^{31/22} \quad 0.118 \leq d_m < 0.303 \quad (6.11-2)$$

$$u_{*cm}^2 = 55.0d_m \quad 0.0565 \leq d_m < 0.118 \quad (6.11-3)$$

$$u_{*cm}^2 = 8.41d_m^{11/32} \quad 0.0065 \leq d_m < 0.0565 \quad (6.11-4)$$

$$u_{*cm}^2 = 226d_m \quad d_m < 0.0065 \text{ (Unit : cm)} \quad (6.11-5)$$

$K_c$  為河床坡度修正函數，其值可以下式求得：

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} + 1 \right) \tan\theta_x \right] \quad (6.12)$$

其中  $\mu_s$  為靜摩擦係數， $\theta_x$  為單位河道之河床坡度，亦即

$$\tan\theta_x = I \quad (6.13)$$

此外，懸移質之沉積率  $D_s$ ，以及其侵蝕率  $E_s$  可以下式表示：

$$D_s = \sum_{k=1}^n D_{sk} \quad (6.14)$$

$$D_{sk} = c_{sbk} w_{fk} \quad (6.15)$$

$$E_s = \sum_{k=1}^n E_{sk} \quad (6.16)$$

$$E_{sk} = c_{sbek} w_{fk} \quad (6.17)$$

## (B) 懸移質(Suspended load)



第  $k$  階粒徑之懸移質濃度之輸送方程式可表示如下：

$$\frac{\partial c_{sk} h}{\partial t} = \frac{1}{BL} \left( c_{sk, x_i} Q(x_i) + c_{sk, y_i} Q(y_i) - c_{sk, x_{i+1}} Q(x_{i+1}) \right) + E_{sk} - D_{sk} \quad (6.18)$$

其中  $c_{sk}$  為該單位河道內懸移質之平均濃度， $c_{sk, x_i}$  及  $c_{sk, y_i}$  為上游河道流入之懸移質之平均濃度， $c_{sk, x_{i+1}}$  為流出至下游河道之懸移質之平均濃度。此外， $w_{fk}$  為土砂之沉降速度，其值可由下式計算：

$$w_{fk} = \left[ \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_k^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_k^3}} \right] \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_k} \quad (6.19)$$

在基準面上第  $k$  階粒徑之平衡懸移質濃度( $c_{sbek}$ )，可以下式計算：

$$c_{sbek} = 5.55 \left[ \frac{1}{2} \frac{u_*}{w_{fk}} \exp\left(-\frac{w_{fk}}{u_*}\right) \right]^{1.61} f_{bk} \quad (\text{unit: ppm}) \quad (6.20)$$

其中  $f_{bk}$  為推移質第  $k$  階粒徑所佔之比例。此處，本研究假設懸移質濃度在垂直方向係為指數型式分布，且令第  $k$  階粒徑在不同水深處之平均懸移質濃度為  $c_{sk}$ ，且第  $k$  階粒徑在基準面上之懸移質濃度為  $c_{sbk}$ ，因此  $c_{sk}$  及  $c_{sbk}$  之關係可表示如下式：

$$c_{sk} = \frac{c_{sbk}}{\beta_{sk}} \left( 1 - e^{-\beta_{sk}} \right) \quad (6.21)$$

$$\beta_{sk} = \frac{w_{fk} h}{D_h} \quad (6.22)$$

其中  $D_h$  為懸移質在水深方向之擴散係數，為簡化表示式，此處可以  $\nu$  取代  $D_h$ 。  $D_w$  及  $E_w$  為流洗載(wash load)之沉積率及侵蝕率，可以下式計算之：

$$D_w = c_w w_f \quad (6.23)$$

$$E_w = -(1 - \lambda) f_w \frac{\partial z}{\partial t} \quad \left( \frac{\partial z}{\partial t} \leq 0 \right) \quad (6.24-1)$$

$$E_w = 0 \quad \left( \frac{\partial z}{\partial t} \geq 0 \right) \quad (6.24-2)$$

其中  $f_w$  為流洗載所佔之比例， $f_w$  及  $f_{bk}$  必滿足下列關係式。

$$f_w + \sum_{k=1}^n f_{bk} = 1 \quad (6.25)$$

### (C) 流洗載(Wash load)

第  $k$  階粒徑之流洗載濃度之輸送方程式可表示如下：

$$\frac{\partial c_w h}{\partial t} = \frac{1}{BL} (c_{w,x_i} Q(x_i) + c_{w,y_i} Q(y_i) - c_{w,x_{i+1}} Q(x_{i+1})) + E_w - D_w \quad (6.26)$$

其中  $c_w$  為該單位河道內流洗載之平均濃度， $c_{w,x_i}$  及  $c_{w,y_i}$  為上游河道流入之流洗載平均濃度， $c_{w,x_{i+1}}$  為流出至下游河道之流洗載平均濃度。

### (D) 河床材料之連續方程式( The continuity equation of the riverbed material)

河床沉積土砂之粒徑分布可藉由交換層之體積控制條件進行計算，且假設同一條單位河道內的水與土砂條件均相同。依據質量守恆定理，河床交換層之連續方程式可表示如下：

$$(1 - \lambda) E_b \frac{\partial f_{bk}}{\partial t} + (1 - \lambda) F_{bk} \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{BL} (Q_{bk}(x_i) + Q_{bk}(y_i) - Q_{bk}(x_{i+1}) + Q_l(x_i)) + D_{sk} - E_{sk} + D_w - E_w$$

$$\begin{cases} F_{bk} = f_{dk}, & \partial z / \partial t \leq 0 \\ F_{bk} = f_{bk}, & \partial z / \partial t \geq 0 \end{cases} \quad (6.27)$$

其中  $f_{dk}$  為沉積層之粒徑分布比例， $f_{bk}$  為河床粒徑分布比例。此外，本研究假設模擬計算時，每分鐘(即一個時間間距，time-step)沉積層增加之厚度不得起過 1 個沉積層厚(即 0.4m)。

### 6.2.5 崩塌土方流入河道模式

一般而言，河道內新增土砂可能來自於崩塌、土石流、河道與河岸侵蝕等。本研究目前僅考慮崩塌，暫未考量其他之料源。由於估算崩塌土方流入單元河道之問題十分複雜，本研究基於以下假設提出一簡化估算模式：

- (1) 崩塌土方流入相鄰單位河道之比例，與斜坡單元之坡度有關。亦即，坡度愈陡，流入土方比例愈高。
- (2) 崩塌土方之移動係由坡面上之漫地流所驅動，且漫地流流量可由(6.3)式計算(如圖 6.4)。同時，崩塌土方流動之寬度假設與崩塌寬度相同(即 20m)。
- (3) 假設流入相鄰單位河道之崩塌土方量，可使用前述之渠道內土砂流出公式

[Egahsira and Matsuki, 2000]計算，且假設自斜坡單元坡趾處流出之土砂量，即為流入相鄰單位河道之崩塌土方量。

(4) 流入相鄰單位河道之崩塌土方量，假設係均勻分布於整條單位流道之河床上，如圖 6.5。

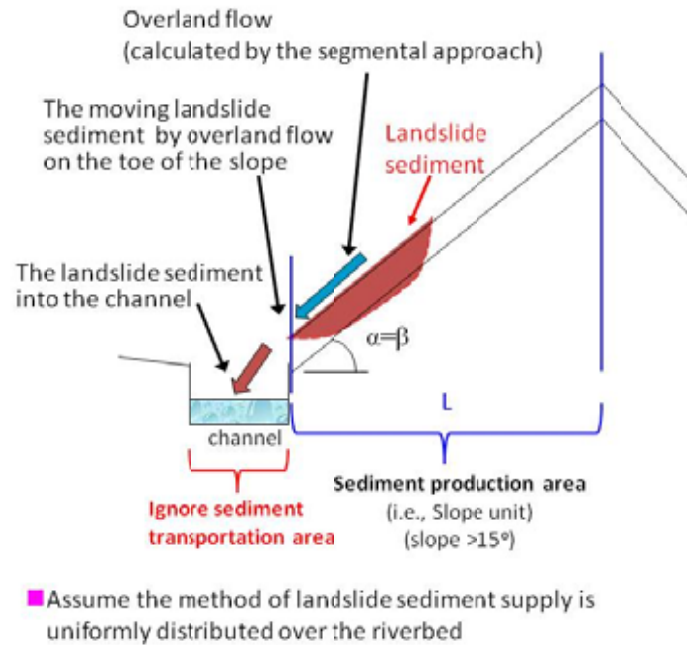


圖 6.5 崩塌土方流入相鄰單位河道計算方式示意圖

### 6.2.6 其它計算條件

本研究假設所有單位河道之曼寧係數均為  $0.03(m-s)$ ，若河道二側均有混凝土護岸，且此單位河道之寬度則依實際量測結果設定之；如否，則依  $B = 3.5\sqrt{QA'/A}$  此式估算之，其中  $B$  為單位河道之寬度， $A$  為整個流域面積， $A'$  為該河道以上所有上游河道集水區面積之總和。 $Q$  此處設為  $100\text{ CMS}$  (亦即最下游河道於此災害期間最大洪水流量)。在土砂粒徑分布方面，本研究假設所有河道均相同，如圖 6.6。

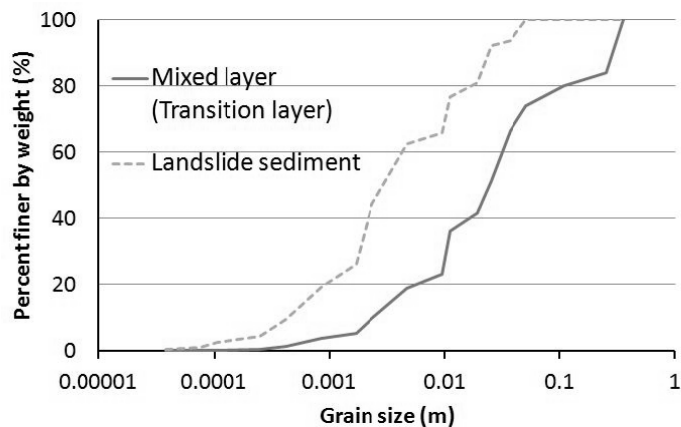


圖 6.6 河道及崩塌土砂粒徑分布圖

## 6.3 研究發現

### 6.3.1 崩塌模擬結果

本研究使用之  $W_{cr}$  法預測計有 131 個斜坡單元發生崩塌，其中預測之發生時間介於 8/14 03:34~05:47，但 98.5%之崩塌集中於 04:34~05:47，與居民訪談結果相近。而在災後衛星影像中出現的 38 處新生裸露地當中，有 28 處可被正確預測會發生崩塌，另有 10 處則被未被預測發生崩塌(如表 6.1)。依據第 5 章之定義，本研究之崩塌警戒命中率(warning hit rate, WHR)亦為 73.7%。然而，由於本研究對研究區之北部採用不同的土壤強度參數，減少了過度預測(over-prediction)之情形，因此警戒誤報率(false alert rate, FAR)降低為 78.6%，而崩塌預測精度(accuracy of landslide prediction, ALP)則提昇為 74.0%。志津川流域內各斜坡單元預測崩塌與實際崩塌數量之比較如表 6.1；各斜坡單元預測崩塌與實際崩塌位置之比較如圖 6.7 (其中，北部區域土壤強度採用  $C=0.85 \text{ t/m}^2$ ，其他區域  $C=0.7 \text{ t/m}^2$ )。各單位河道集水區內之崩塌土方量及崩塌發生時間，如圖 6.8。

表 6.1 志津川流域內各斜坡單元預測崩塌與實際崩塌數量之比較

Number of slope units		Simulation results	
		Collapsed	Non-Collapsed
Actual	Collapsed	28	10
Event	Non-Collapsed	103	294

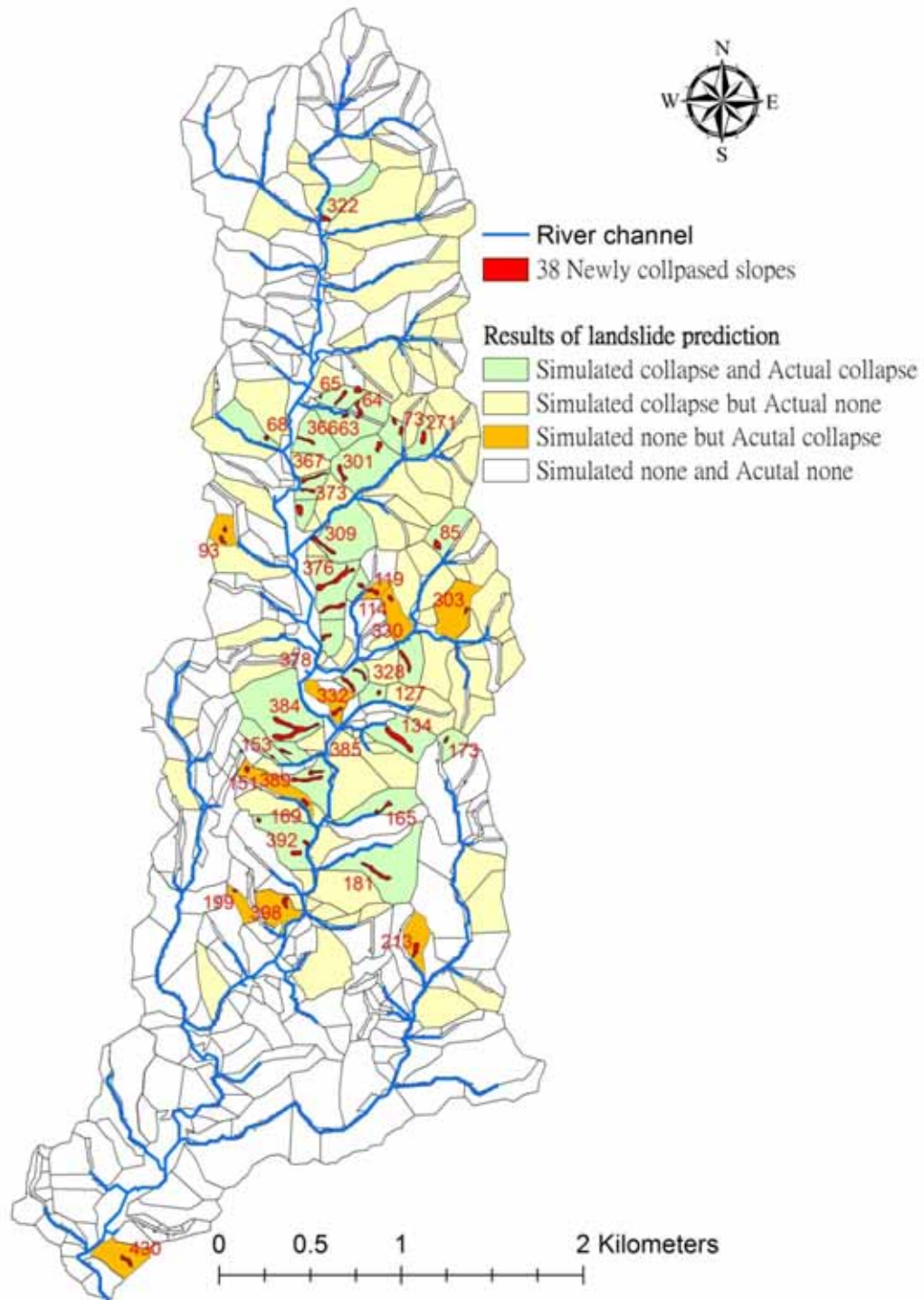


圖 6.7 志津川流域內各斜坡單元預測崩塌與實際崩塌位置之比較(北部區域土壤強度採用  $C=0.85 \text{ t/m}^2$ ，其他區域  $C=0.7 \text{ t/m}^2$ )

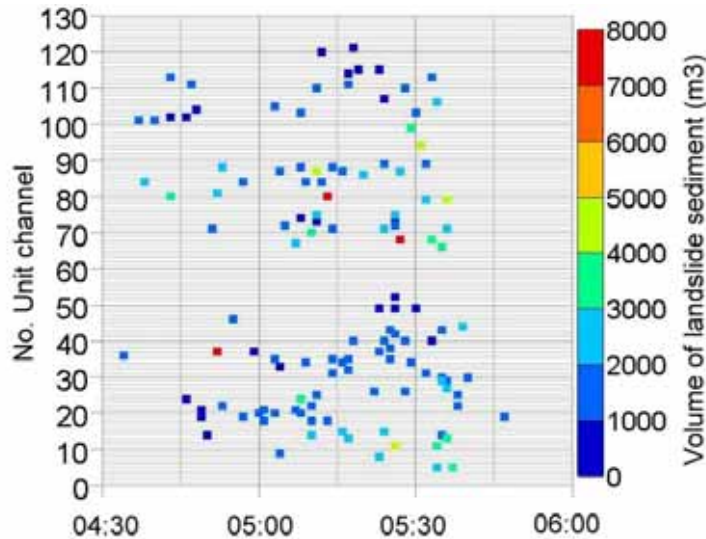


圖 6.8 各單位河道集水區內之崩塌土方量及崩塌發生時間

### 6.3.2 洪水、土砂流出與河道高程變化模擬結果

#### (1) 最大洪峰量之模擬結果

在洪水預測方面，此研究區內上、中、下游代表河道之流量變化如圖 6.9。依據京都府的災害調查報告(京都府,2013a)以及災害復建計畫(京都府,2013a)，單位河道 No.122 於災害期間之最大洪峰量約為 80CMS，而最下游之單位河道 No.127 則約為 100CMS 模擬結果。此外，單位河道 No.122 之水位最大上昇高度約為 3m，且河道溢堤時間約在 8/14 4:30~6:00 之間。

本研究之模擬成果顯示單位河道 No.122 於災害期間之最大洪峰量約為 82.3CMS，且最大水位上昇高度為 2.96m，溢堤時間為 8/14 03:37~03:48 及 04:31~05:32 之間(如圖 6.10)，此結果與前揭之災害調查結果相當一致。此外，單位河道 No.127 之最大洪峰量之模擬結果( $Q_{max}=105.3CMS$ )，亦與調查結果相當接近。

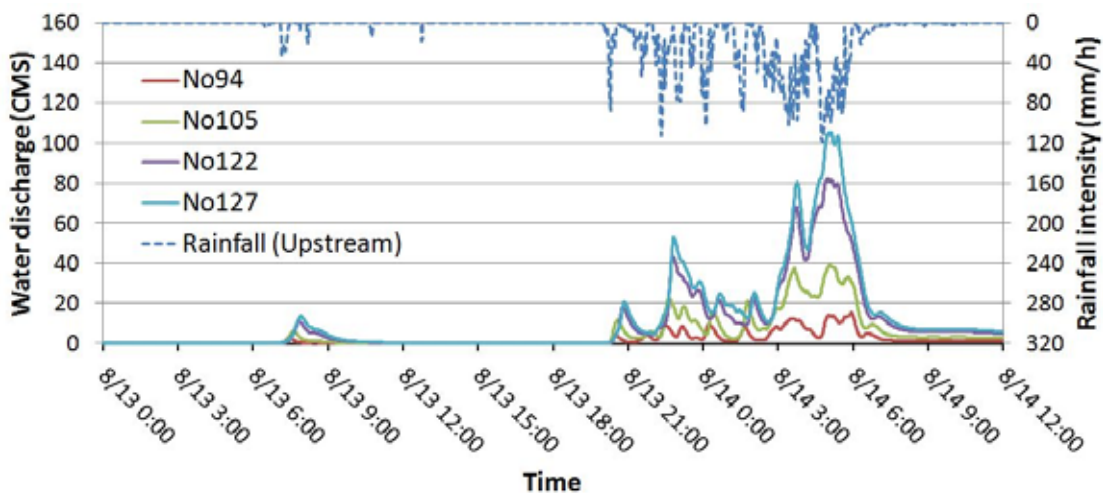


圖 6.9 研究區內上、中、下游代表河道之流量變化模擬結果

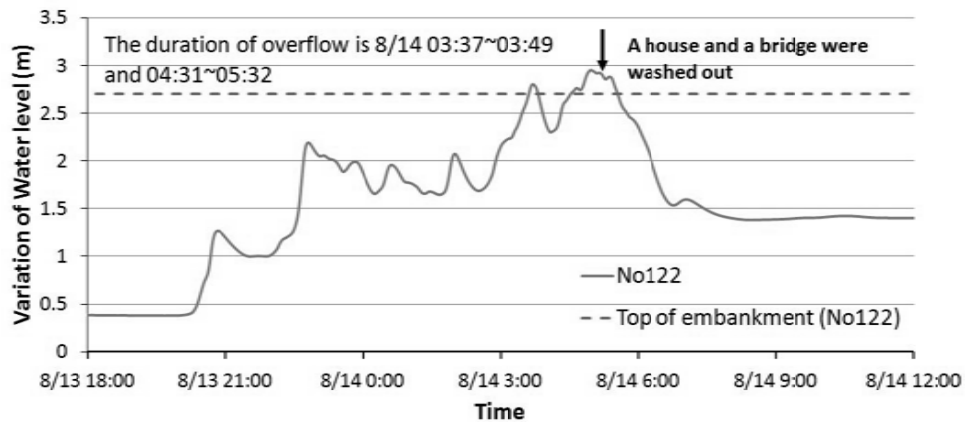


圖 6.10 單位河道 No.122 之水位變化模擬結果

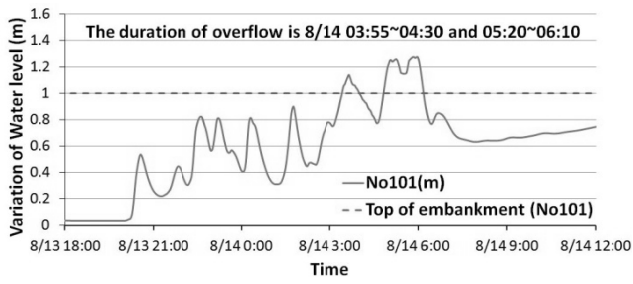
## (2) 河道溢堤之模擬結果

一般而言，由於山區野溪或河道斷面之設計容量通常較低，且易因暴雨產生山洪暴發之情形，河道溢堤(overflow)係最常見之洪水災害類型，除了可能造成道路與橋梁之毀損外，亦常造成週邊社區淹水。本研究假設所有的河道斷面均為矩形斷面，且同一單位河道之寬度設為相同，因此由各單位河道之流量配合河床高度之變化，即可求出水位高。如水位高程已大於河堤高度，即判定該單位河道已發生溢堤。

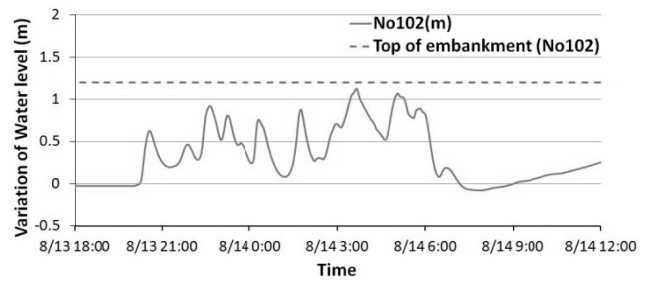
本研究之模擬結果顯示，災害期間志津川流域內共有 9 條單位河道發生溢堤，其中各單位河道之水位變化模擬結果如圖 6.11(不含 No.122，已繪於圖 6.10)；表 6.2 為現地調查與模擬結果在河道溢堤與否與持續時間之比較。

表 6.2 現地調查與模擬結果在河道溢堤與否與持續時間之比較

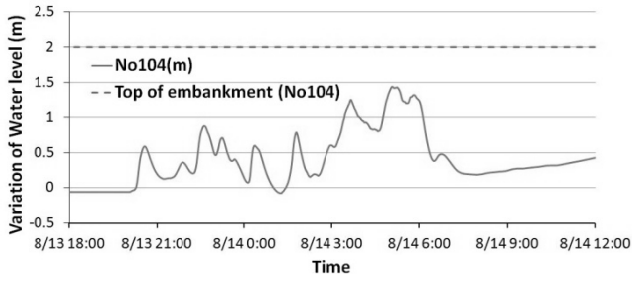
Unit channel	Length of unit channel (m)	Slope of riverbed (%)	Revetment height (m)	Duration of overflow (Simulation results)	Duration of overflow (Investigation results)
1 No.101	314.4	1.29	1.0	8/14 03:55~04:30 8/14 05:20~06:10	8/14 about 4:30~06:00
2 No.102	396.5	1.75	1.2	Pass	8/14 about 4:30~06:00
3 No.104	96.2	2.33	2.0	Pass	8/14 about 04:00~6:00
4 No.105	321.4	1.15	1.7	8/14 03:23~06:11	8/14 about 04:00~6:00
5 No.118	183.5	1.01	1.2	8/13 22:34~8/14 02:20 8/14 02:44~06:50	Overflow (but occurring time is unknown)
6 No.121	432.9	2.36	3.0	8/14 04:28~06:02	Unknown
7 No.122	680.3	4.32	2.7	8/14 03:37~03:49 8/14 04:31~05:32	8/14 about 04:30~05:30 (A house and a bridge were washed out)
8 No.123	192.2	1.32	2.7	8/14 02:59~ continued	8/14 about 04:30~06:00
9 No.124	295.1	2.41	3.0	8/14 05:20~05:37	8/14 about 04:30~06:00
10 No.125	250.3	1.82	3.0	8/14 03:41~03:50 8/14 04:27~06:16	8/14 about 04:30~06:00
11 No.126	164.6	1.83	3.0	8/14 04:36~05:40	Overflow (but occurring time is unknown)



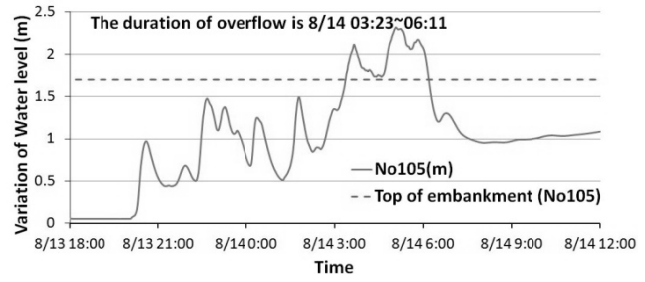
(a) No. 101



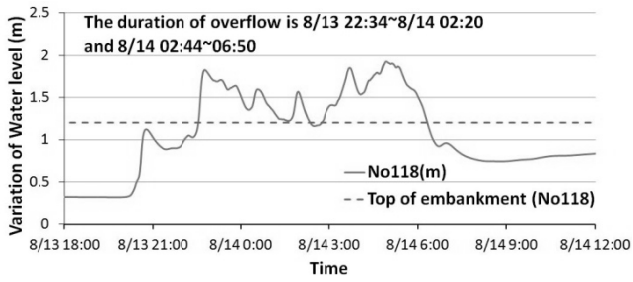
(b) No. 102



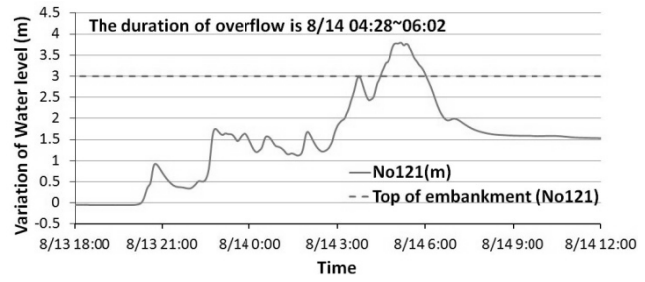
(c) No. 104



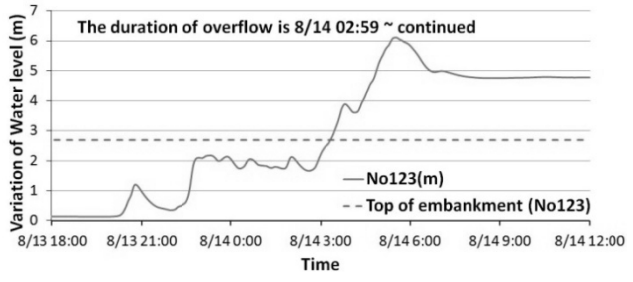
(d) No. 105



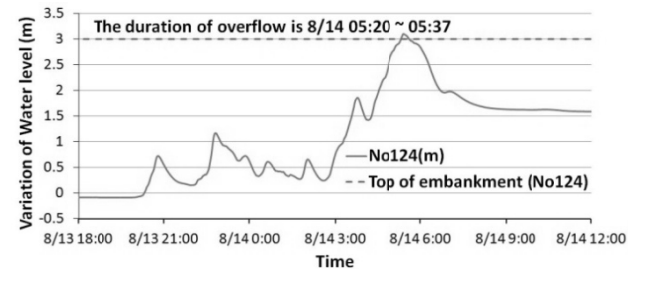
(e) No. 118



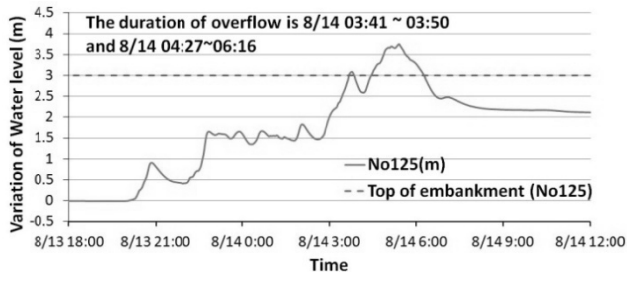
(f) No. 121



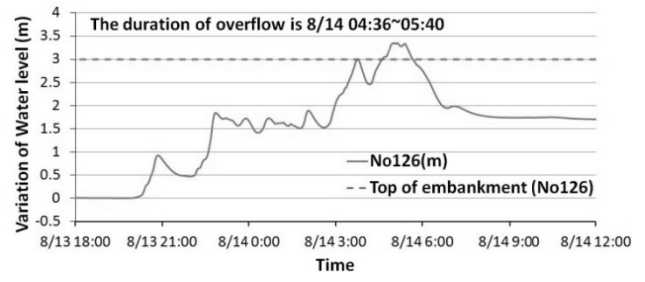
(g) No. 123



(h) No. 124



(i) No. 125



(j) No. 126

圖 6.11 預測發生溢堤之單位河道之水位變化模擬結果

註\* 縱坐標為零處，係為模擬初始時間(8/12 0:00)之河道高程處



整體而言大部份的模擬結果均與現地調查結一致，部份單位河道因位於無人居住地區(例如，No.118、No.121 及 No.126)，因此實際溢堤淹水時間無從得知，但由現地狀況仍可確認該處確實曾經淹水。如圖 6.12 即為單位河道 No.126 淹水之證據。



圖 6.12 單位河道 No.126 淹水之證據 (宇治市，2014)

然而，由表 6.2 可發現，仍有三條單位河道(No.102、No.104 及 No.123)之模擬結果明顯與現地調查結果不符，例如 No.102、No.104 災害期間均發生溢流情形，但模擬結果卻顯示不會發生；No.123 則是模擬結果顯示，即使降雨結束後，河道因土砂淤積造成河床高程高於護岸之情形仍然持續，但實際情形則否。

依據現地調查結果，與單位河道 No.102 相鄰的斜坡單元 No.367 於 8/14 04:30~05:00 間發生崩塌，由於崩塌土砂直接滑入河道，造成河道阻塞溢流及其週邊與上游單位河道 No.101 淹水(如圖 6.13)。而該處之模擬結果則顯示，與單位河道 No.102 相鄰之二斜坡單元 No.367 及 No.368 分別在 8/14 04:43 及 04:46 發生崩塌，且計有  $678.1 \text{ m}^3$  的崩塌土砂流入河道 No.102。儘管此模擬結果在崩塌發生位置、時間及規模上，似乎與實際狀況相近，但由於本研究在土砂流入河道之模擬方式，係假設流入之土砂為均勻地分布在河床上，因此在此案例中，河道高程僅會上升 0.34m (單位河道 No.102 之長為 396.5m，寬為 5m)，確實不足以阻塞河道或造成溢流。因此，模擬結果僅在護岸高度較低的單位河道 No.101 造成溢流，而 No.102 則否。另一個模擬結果與現地調查結果不符的單位河道 No.104，其原因亦與 No.102 之情況相似。



圖 6.13 單位河道 No.102 鄰近坡面崩塌及淹水情形(修改自アジア航空株式會社，2012)

### (3) 土砂流出與河床高程變化之模擬

另一個模擬結果與實際狀況不符之地點在單位河道 No.123，此處之模擬結果呈現洪水結束後河道高程仍高於護岸堤頂(如圖 6.11(g)及圖 6.14)，此與實際狀況不符。此外，由於單位河道 No.123 週邊並未有坡面崩塌情形，亦即會造成河床高程上昇之土砂料源僅來自於上游河道 No.93 及 No.122(如圖 6.15)。依據現地調查結果，上游河道 No.93 之河道土砂大部份已被宮ノ前橋所阻攔，部份則流入臨近民宅區均，故未能流入單位河道 No.123(如圖 6.15)，然而，本研究模擬時並未考慮此種因素，亦即本研究係假設上游河道 No.93 之土砂均會全部流入其下游的單位河道 No.123。圖 6.16(a)顯示模擬期間單位河道 No.93、No.122 及 No.123 之土砂流出量，圖 6.16(b)則顯示模擬期間單位河道 No.123 內土砂堆積量之變化。由圖 6.16(a)可估算由單位河道 No.93 流入 No.123 之總土砂量約為  $8557\text{m}^3$ ，亦即若模擬時已考量橋梁或防砂壩等阻攔土砂之狀況，則最終之結果可能會與實際較為接近。圖 6.17 為表 6.2 所列發生溢堤之單位河道，在災害事件期間，其河床高程變化之模擬結果(不含 No.123，因其已列在圖 6.14)。

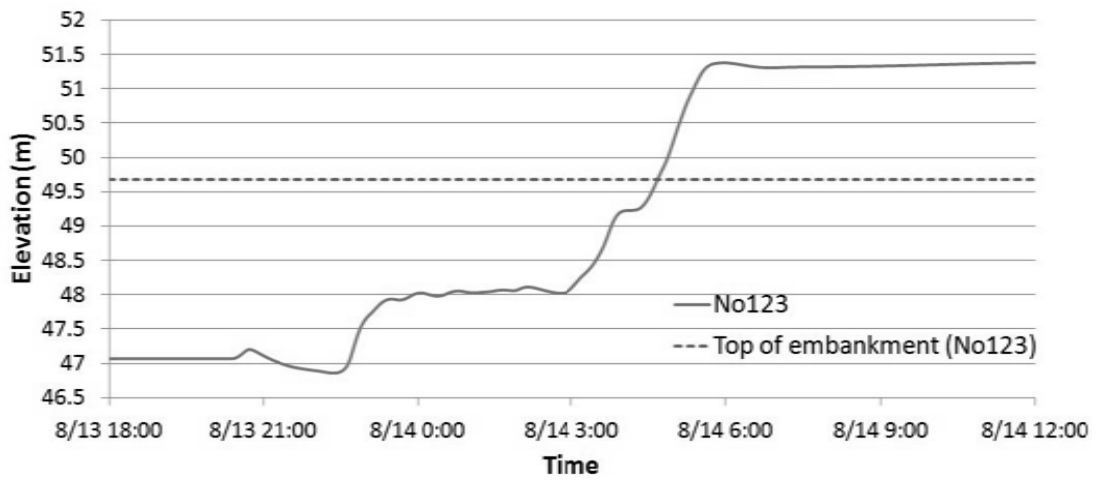


圖 6.14 單位河道 No.123 河道高程變化之模擬結果

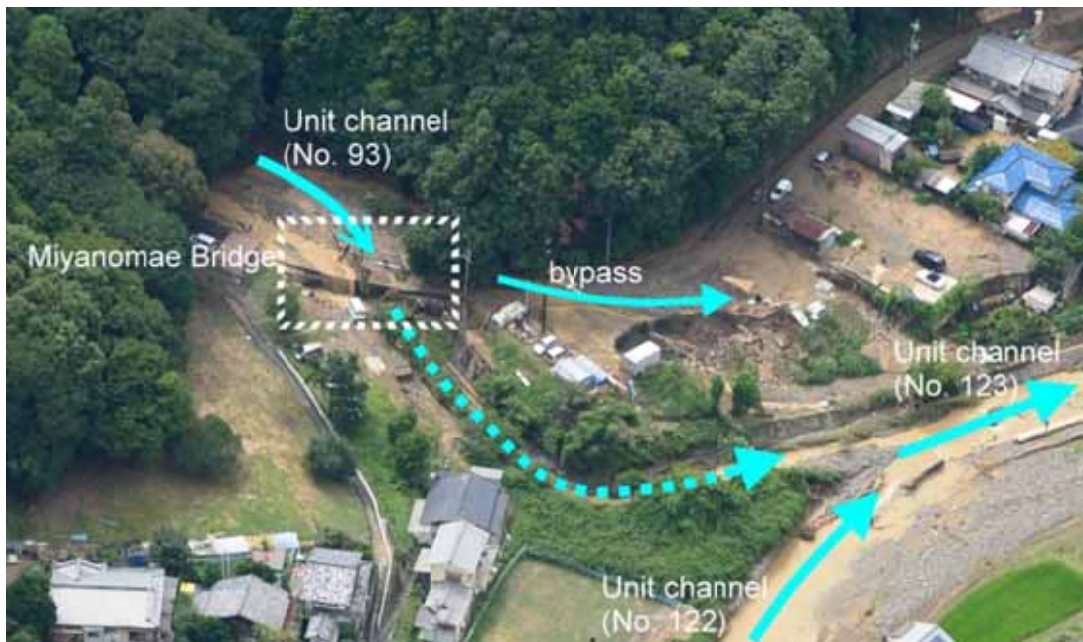
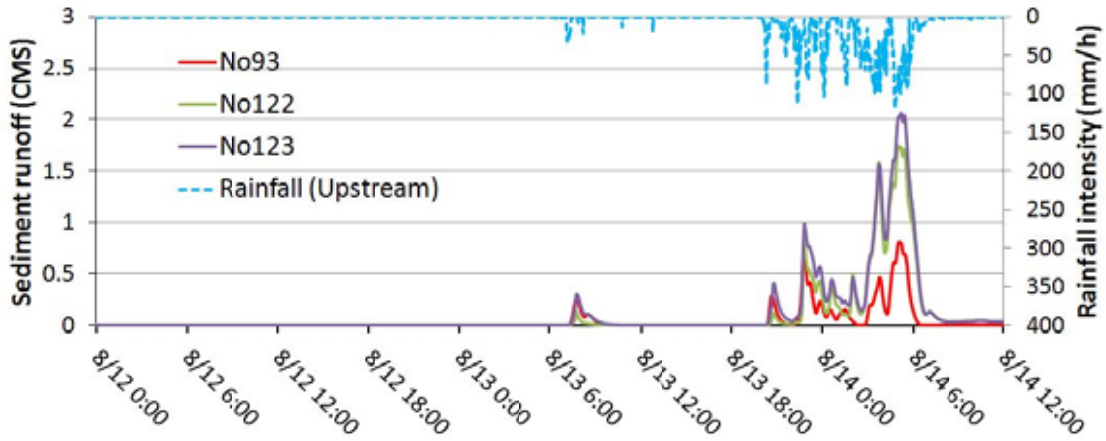
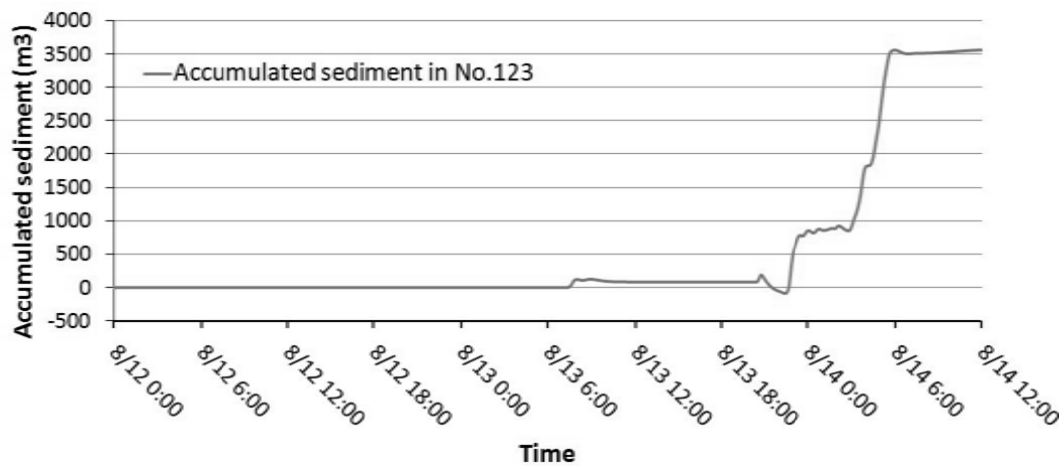


圖 6.15 單位河道 No.123 上游河道 No.93 之土砂多被宮ノ前橋所阻攔，部份則流入臨近民宅區均，故未能流入單位河道 No.123 (修改自アシア航空株式會社，2012)



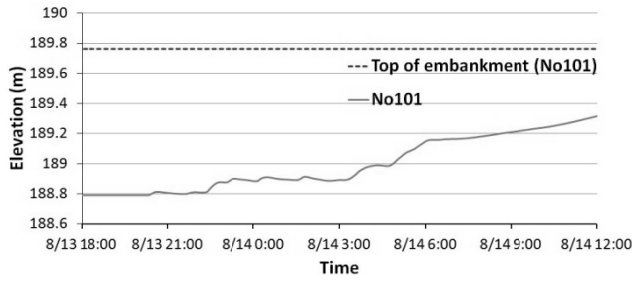
(a)



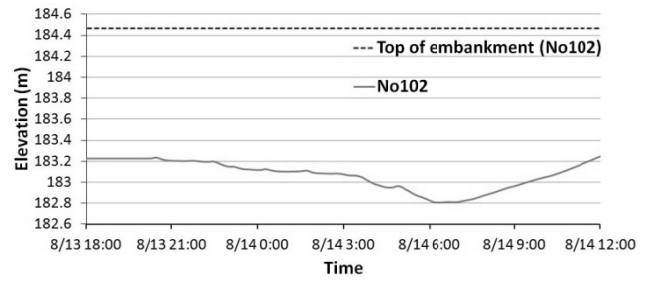
(b)

圖 6.16 (a)模擬期間單位河道 No.93、No.122 及 No.123 之土砂流出量 (b)模擬期間單位河道 No.123 內土砂堆積量之變化

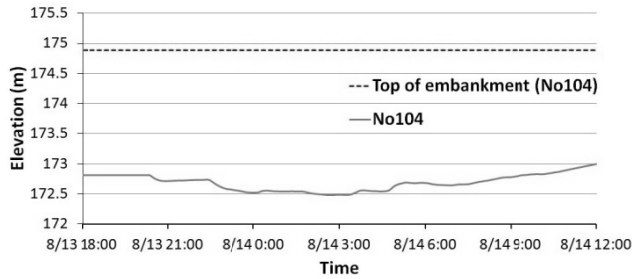




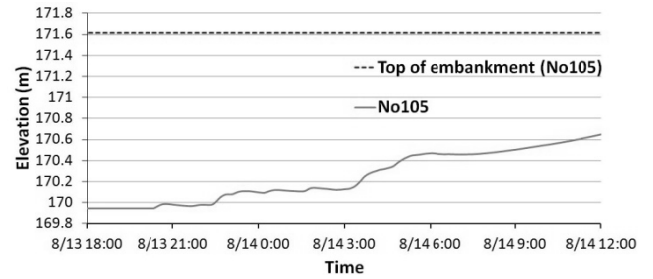
(a) No.101



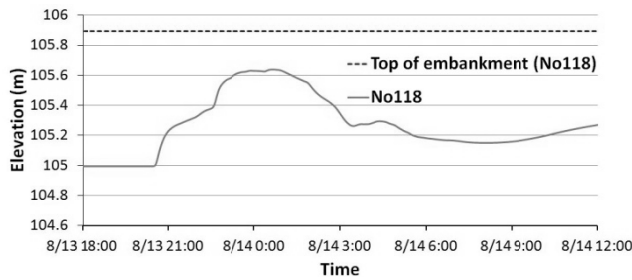
(b) No.102



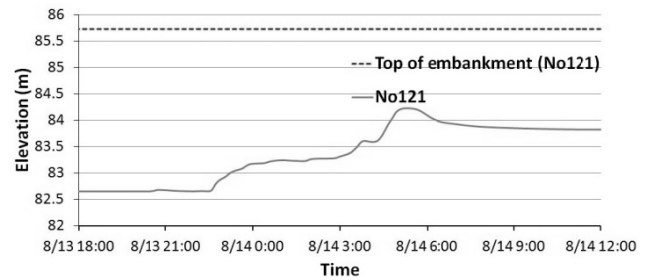
(c) No.104



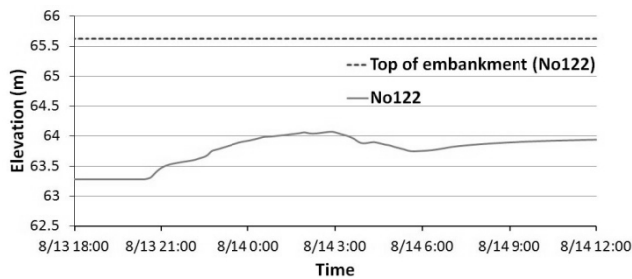
(d) No.105



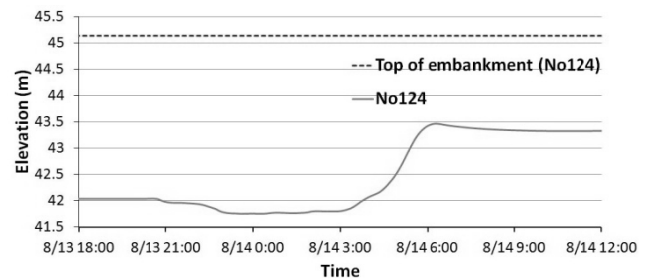
(e) No.118



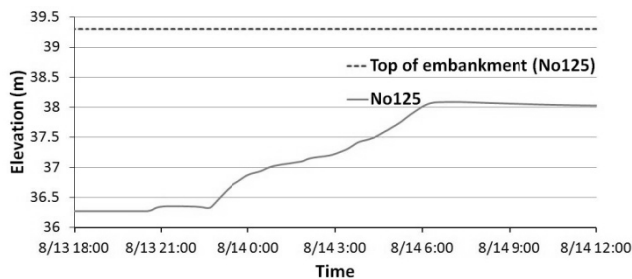
(f) No.121



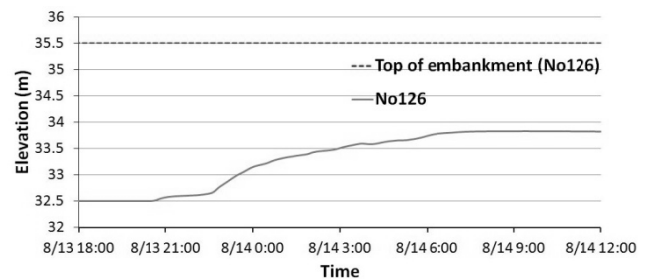
(g) No.122



(h) No.124



(i) No.125



(j) No.126

圖 6.17 表 6.2 所列發生溢堤之單位河道，在災害事件期間，其河床高程變化之模擬結果

### 6.3.3 討論

相較於第 5 章之崩塌模擬結果，本章在研究區的北部採用較大的土壤凝聚力進行崩塌預測，結果在崩塌誤報率(FAR)及崩塌預測精度(ALP)上均有明顯改善，因此適當地將研究區依不同地質、土壤形式等條件分區進行模擬與預測，係提昇精度之方式一，惟分區愈多，亦表示建構模式之過程愈繁複冗長。

在溢堤、土砂流出及河床高程變化等模擬方面，本研究大部份的模擬結果與現地調查結果符合度相當高。此外，由於崩塌後坡面上之土體流入河道之過程，所涉及之變因相當複雜，因此，本研究基於一些簡化的假設，採用漫地流及渠道土砂流出模式模擬降雨期間崩塌土體流入河道之情形。然而，土砂在坡面上之移動特性，應與在渠道內移動有所不同，且坡面上土砂之移動，除漫地流所驅動之形式外，亦可能由土石流所造成，甚至崩塌土體係因重力作用直接落入河道，此部份之模擬方式尚待進一步之研究與改進。

由於本研究使用一維河床高程變化與水量及土砂流出模式之限制，本研究假設崩塌土體流入河道後，係均勻地分布在河床上，且所有流出的土砂將直接進入下游河道。然而，上述假設之作法，並無法適當模擬出崩塌土體直接落入河道造成河道阻塞之情形(如單位河道 No.102)，或是上游土砂被橋梁或防砂壩等攔阻，未流入下游河道之情形(如單位河道 No.123)。此外，當河道發生溢流時，河道之斷面形式勢必與原假設之矩形斷面大不相同(Tanaka et al., 2014)，但由於本研究在河道溢堤段仍假設在溢堤部份之河道斷面仍維持原矩形斷面，因此，本研究模擬之溢堤段水位高度及其下游河道流量應有高估之情形。為解決上述問題，採用二維模式模擬似乎是必要的。然而，由於考量二維模式之計算相當費時，且本研究之重點係著重在災害警戒，現階段採用一維河道輸砂模式建構集水區尺度之複合型土砂災害模擬應為較佳之選擇。

多數研究在模擬流域之坡面降雨-逕流時，常使用計算簡便之動力波法。此法雖易於藉由調整各層土厚及透水係數等參數，達到與預期洪峰一致之模擬結果。惟此法缺乏明確之物理意義，且多僅適用於降雨期間之模擬。相對而言，本研究採用之方法，係直接由土壤水份曲線推估而來，即使於非降雨期間，也能合理描述坡面逕流之，同時亦兼具計算快速之特性，應為另一可行方向。

儘管災害發生前民眾之疏散避難，已被公認為降低災害衝擊之最重要的對策之一，但如何在不擾民與維護民眾安全的前提下，適時作出疏散避難決策，卻是一直困擾地方政府決策單位與當地民眾的難題。台灣及日本現行之土砂災害警戒系統，由於直接使用短期及長期雨量指標作為警戒發布之依據，並未考量地質、地形、水文等因素，故僅能提供廣域之警戒訊息，無法明確告知災害可能發生之時間與地點，在實務上，不論對地方政府或是當地居民而言，在疏散避難之決策上助益不大，此點也反映在近年來土砂災害警戒發布後，實際進行疏散行動比例偏低之事實。本研究所提流域尺度之複合型土砂災害模擬模式，由於已納入地質、地形及水文條件，且已能初步預測各斜坡單元之崩塌發生時間、地點、規模，坡面之降雨-逕流、河道土砂流出量、河床高程及河道水量、

水位等變化情形，後續如再加入民宅或公共設施位置、道路、橋梁等空間資訊，即可作為發展流域尺度之複合型災害警戒系統之基礎，除可提供災害期間之警戒發布與疏散決策之依據外，亦可作為平時防災疏散計畫驗證之模擬平台。

## 6.4 小結

儘管降雨期間山區之災害型態多為洪水、土砂移動，與其交互影響所造成的等複合型災害，但現行的防災計畫及災害預警模式卻多僅針對個別災害分開考量，如此作法，恐無法因應因氣候變遷及人為環境開發所造成日趨頻繁的大規模災害。評估及預測複合型災害之影響，不能僅將個別災害之災害潛勢圖分別套疊，尚須考量不同災害之發生時間、空間及其可能造成之交互影響。例如，山區的疏散避難行動常會受限於道路與橋梁之耐災條件與現況，亦即即使只是局部地區的道路、橋梁或維生管路的受損或中斷，亦可能影響疏散行動之進行，甚至危及民眾生命財產的安全。因此，若各級防災單位在擬定疏散避難計畫(包含避難時機、路線、避難處所、交通工具等)時，僅考量個別災害之影響，不僅可能作出不適宜之疏散決策，甚至可能導致整個防災計畫的失敗。

本研究已使用斜坡單元及單位河道方式建構山區流域模型，並整合山區降雨-入滲-逕流、坡面崩塌、土砂流出、河床高程變化及河道水位預測等模式，初步提出山區複合型災害之模擬平台。此外，本研究所提出使用土壤含水量變化快速預測坡面崩塌及降雨-逕流之方法，經實際災害案例之驗證，亦有不錯成效。未來可嘗試將納入土石流、堰塞湖等其他土砂災害類型納入此模擬平台，並在此複合型土砂災害模式之基礎上，設定相關警戒門檻，進一步發展為複合型土砂災害警戒系統。

## 參考文獻

- [1] アシア航空株式會社(2012)「平成 24 年 8 月近畿豪雨災害斜め空中写真」。(Asia air survey co., LTD (2012). The aerial photos on the Shizugawa basin, Uji, Kyoto Prefecture after heavy rainfall event on August 14, 2012. (<http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID4T3J5OYFD/>))
- [2] 立川康人、永谷言、寶馨(2004)「飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積關係式の開發」，水工学論文集，48，7-12。(Tachikawa, Y., Nagatani, G., and Takara, K. (2004): Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism, Annual Journal of Hydraulics Engineering, JSCE, Vol. 48, pp. 7-12 (in Japanese with English abstract))
- [3] 田中智大、立川康人、萬和明(2014)「分布型流出モデルをネスティングする流出・氾濫一体型モデルの構築」，土木學會論文集 B1，70(4)，

- I\_1495-I\_1500。(Tanaka, T., Tachikawa, Y., and Yorozu, K. (2014): Development of a flood-inundation model nesting a distributed rainfall-runoff model, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 70, No.4, pp.I\_1495-I\_1500. (in Japanese with English abstract))
- [4] 江頭進治、松木敬 (2000), 「河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法」, 水工学論文集, 44, 735-740。(Egahsira, S., and Matsuki, K. (2000): A method for predicting sediment runoff caused by erosion of stream channel bed, Annual Journal of Hydraulics Engineering, JSCE, Vol. 44, pp. 735-740. (in Japanese with English abstract))
- [5] 宇治市(2013), 「宇治市地域防災計画」。(Uji City. (2013): Uji regional disaster prevention plan. (in Japanese))  
(<http://www.city.uji.kyoto.jp/0000010399.html>)
- [6] 宇治市(2014), 「平成 24 年 8 月 13 日・14 日京都府南部地域豪雨災害記録集」。(Uji City. (2014): The heavy rainfall disaster record collection in Kyoto southern region on August 13-14, 2012. (in Japanese))  
(<http://www.city.uji.kyoto.jp/0000012774.html>)
- [7] 京都大学防災研究所(2012), 「2012 年 8 月宇治水害調査速報(流域災害研究センター)」。(Disaster Prevention Res. Inst (DPRI), Kyoto Univ. (2012): Investigation report for the heavy rainfall disaster on August 13-14, 2012. (in Japanese)) ([http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web\\_j/saigai/disaster\\_report.html](http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/disaster_report.html))
- [8] 京都府(2013a), 「平成 24 年 8 月 13～14 日京都府南部豪雨災害被害の状況」, 木津川・桂川・宇治川圏域河川整備計画検討委員会第 11 回資料。(Kyoto Prefecture (2013a): Investigation report for the heavy rainfall disaster on August 13-14, 2012. (in Japanese))  
([http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/1\\_nambugouu.pdf](http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/1_nambugouu.pdf))
- [9] 京都府(2013b), 「宇治川圏域整備計画の目標と実施内容<修正案>」, 木津川・桂川・宇治川圏域河川整備計画検討委員会第 11 回資料。(Kyoto Prefecture (2013b): Disaster rehabilitation plan for the heavy rainfall disaster on August 13-14, 2012. (in Japanese))  
([http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/2\\_mokuhyou.pdf](http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/2_mokuhyou.pdf))
- [10] 芦田和男、道上正規(1972), 「移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究」, 土木学会論文報告集, 1972(206), 59-69。(Ashida, K., and Michiue, M. (1972): Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, Vol. 1972, No. 206, pp. 59-69. (in Japanese))
- [11] 近藤伸也、片家康裕、太田和良(2012), 「2011 年台風 12 号豪雨水害における和歌山県紀南地方の市町の対応」, 生産研究, 64(4), 527-531。(Kondo,



- S., Kataie, Y., Ota, K. (2012): Disaster Response of Municipal Government at Southern area of Wakayama Prefecture after Flood and Sediment Disaste by Typhoon Talas, SEISAN KENKYU, Vol. 64, No. 4, pp. 527-531. (in Japanese))
- [12] 堤大三、藤田正治、林雄二郎(2007)、「2005年台風14号により大分県竹田市で発生した斜面崩壊に関する数値シミュレーション」水工学論文集，51，931-936。(Tsutsumi, D., Fujita, M., and Hayashi, Y. (2007). “Numerical simulation on a landslide due to Typhoon 0514 in Taketa city, Oita prefecture.”*Proceedings of hydraulic engineering*, 51. 931-936. (in Japanese))
- [13] 藤田正治、大塩清太郎、堤大三(2010)、「気候変動に伴う流域内の斜面崩壊危険度の変化」，京都大学防災研究所年報，53(B)，515-525。(Fujita, M., Ohshio, S., and Tsutsumi, D. (2010). “Effect of climate change on slope failure risk degree in river basin.”*Annuals ofDisas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*,53(B), 515-525.(in Japanese))
- [14] Caine, N. (1980): The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 62A, pp. 23-27.
- [15] Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., and Reichenbach, P. (1991): GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 16, No. 5, pp. 427-445.
- [16] Casadei, M., Dietrich, W. E., and Miller, N. L. (2003): Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, No. 9, pp. 925-950.
- [17] Chang, K.T., and Chiang, S.H. (2009): An integrated model for predicting rainfall-induced landslides, *Geomorphology*, Vol. 105, No. 3–4, pp. 366-373.
- [18] Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013a): An analysis of rainfall-based warning systems for sediment disasters in Japan and Taiwan, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 47-57.
- [19] Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013b): Evacuation Decision-Making Factors for Local Governments and Inhabitants in Debris-Flow Potential Areas in Taiwan, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 37-46.
- [20] Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014): A method for predicting landslides on a basin scale using water content indicator, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 70, No.4, pp.I\_13-I\_18.
- [21] Chen, C. Y., Ikkanda, S., Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2013): A study on mechanism of large-scale landslides and the prediction, 12th International Symposium on River Sedimentation, pp. 41.
- [22] Chigira, M., Tsou, C.Y., Matsushi, Y., Hiraishi, N., and Matsuzawa, M. (2013):

- Topographic precursors and geological structures of deep-seated catastrophic landslides caused by Typhoon Talas, *Geomorphology*, Vol. 201, pp. 479-493.
- [23] Crosta, G. B., Chen, H., and Frattini, P. (2006): Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches, *Engineering Geology*, Vol. 83, No. 1–3, pp. 236-253.
- [24] Highland, L. M., and Bobrowsky, P. (2008): *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*, U.S. Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia.
- [25] Kampf, S. K., and Burges, S. J. (2007): A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models, *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 5, pp. W05423.
- [26] Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., and Glade, T. (2012a): Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review, *Natural Hazards*, Vol. 64, pp. 1925-1958.
- [27] Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., and Keiler, M. (2012b): Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology, *Applied Geography*, Vol. 32, No. 2, pp. 577-590.
- [28] Kubota, T., and Nakamura, H. (1991): Landslide susceptibility estimation by critical slip surface analysis combined with reliable analysis, *Journal of Japan Landslide Society*, Vol. 27, No. 4, pp. pp.18-25.
- [29] Lee, G., Kim, S., Jung, K., and Tachikawa, Y. (2011): Development of a large basin rainfall-runoff modeling system using the object-oriented hydrologic modeling system (OHyMoS), *KSCE J Civ Eng*, Vol. 15, No. 3, pp. 595-606.
- [30] Lee, K. T., and Ho, J.-Y. (2009): Prediction of landslide occurrence based on slope-instability analysis and hydrological model simulation, *Journal of Hydrology*, Vol. 375, No. 3–4, pp. 489-497.
- [31] Maki, N. and Hayashi, H. (2014): The 2012 South Kyoto Flooding and Disaster Response of City of Uji; Essential Contents for a post-Tohoku Earthquake Disaster Response Plan, *Journal of Social Safety Science*, No.22.
- [32] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010): Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network, *Landslides*, Vol. 7, No. 3, pp. 325-338.
- [33] Soil Conservation Service. (1986): *Urban Hydrology of Small Watersheds*, Technical Release 55, Washington, D.C.
- [34] Takahashi, T., Inoue, M., Nakagawa, H., and Satofuka, Y. (2000): Prediction of sediment runoff from a mountain watershed, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 44, pp. 717-722 (in Japanese with English abstract).
- [35] Takasao, T., and Shiiba, M. (1988): Incorporation of the effect of concentration

- of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping, *Journal of Hydrology*, Vol. 102, No. 1–4, pp. 301-322.
- [36] Wang, C., Esaki, T., Xie, M., and Qiu, C. (2006): Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata–Hougawachi area, Japan, *Environ Geol*, Vol. 51, No. 1, pp. 91-102.
- [37] Xie, M., Esaki, T., Qiu, C., and Wang, C. (2006): Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis, *Computers and Geotechnics*, Vol. 33, No. 4–5, pp. 260-274.
- [38] Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004): GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model, *Natural Hazards*, Vol. 33, No. 2, pp. 265-282.



## 第7章 複合型土砂災害警戒及疏散決策支援系統

### 7.1 前言

一般而言，山區因降雨而衍生的災害通常係由洪水及土砂之移動及其交互影響的結果所造成，亦即降雨期間山區的災害應以複合型災害之觀點作整體性的考量。在第1章，本研究已定義複合型災害係為「由於其複雜的時間、空間及因果關係，可能也會導致另一起或多起災害同時或相繼發生，擴大災害的影響範圍，及延長災害的受災時間」。

就空間屬性而言，災害的保全對象可分為聚落及公共設施二類。一般而言，前者因涉及民眾之生命及財產安全，在防災策略上，通常被列為最優先考量之目標。然而，若公共設施(例如，道路、橋梁、維生管路等)因災害造成毀損，其結果亦可能影響民眾之疏散避難行動，或造成生活環境的不便與惡化，甚至進一步危及民眾生活與生命。另一方面，如以移動性來分類，保全對象可分為二類：一類是靜態標的，例如公共設施及建物；另一類則為可移動標的，例如民眾及汽車等動產。面對土砂災害的威脅，前者只能仰賴硬體工程來保護或降低災損；而後者除了採取硬體工程防護措施外，建立預警機制與即時疏散災害潛勢區內民眾亦已被公認為降低災害風險的重要方式之一。然而，值得注意的是，發布警報只能催促民眾及時撤離災害潛勢區，並無法阻止災害的發生(Hübl, 2000)，亦即警戒系統無法實質降低公共設施及不動產的損失。

依據聯合國國際減災策略組織(UNISDR)的定義，早期預警系統可以定義為「能及時發布及傳遞有意義的警戒資訊，使民眾、社區及組織能感受災害之威脅，俾能在時間充份的情況下採取適當的準備與行動，以降低受災的可能性」(UNISDR, 2009)。因此，一個好的預警系統必須能辯識及估計出災害風險，並提供明確易懂的警戒訊息，以促使民眾作出主動避難的反應(Thiebes, 2012)。

在第2章，本研究已說明一個完整的災害警戒系統必須由二個部份所組成：警戒模式與警戒發布機制。然而，由於大部份的研究通常僅專注於警戒模式之建立，並未考量警戒發布機制及實際運作時可能遭遇的複雜情境，因此這些研究往往無法落實到實際應用面。亦即，所有的預測結果及預警資料，必須先轉換為適當的警戒訊息，並以合宜的途徑傳送至保全對象(Thiebes, 2012)。Kunz-Plapp(2008)指出，警戒訊息應該具有值得信賴、清楚明確、依族群屬性採取不同傳遞管道與內容，以及包含應採取何種保護措施的明確指示。

此外，儘管過去十幾年來，許多國家已建立土砂災害警戒系統，但多數僅能因應單一類型的災害，且僅設置於個別坡面，或是整體區域。同時，大多數整體區域型的警戒系統僅能提供非常且簡略的警戒訊息，例如「警戒區內發生崩塌的機率為70%」，並無法明確提供那一個坡面可能發生崩塌(Wieczorek and Glade, 2005)。

在第 6 章，本研究使用斜坡單元及單位河道建構集水區模型，同時藉由整合降雨-入滲、崩塌預測、洪水與土砂流出，以及河床變形等模式建立了複合型土砂災害之模擬平台。基於第 2 章及第 3 章有關警戒系統及疏散避難決策模式之探討結果與建議，本研究將整合第 4、5、6 章之成果，建立一個新的複合型土砂災害警戒系統(the Rainfall-Induced Multi Sediment Hazards warning system, RIMSH warning system)。此 RIMSH warning system 不僅包含警戒模式，也已涵蓋警戒發布機制。

本研究採用 2012 年 8 月發生於京都府宇治市志津川流域之豪雨災害事件作為研究驗證案例。本研究應用 RIMSH warning system 預測每分鐘環境變化的情形，並使用預測結果協助地方政府防災業務人員進行民眾疏散及封路與封橋的決策。亦即，使用 RIMSH warning system 之預測結果，地方政府可評估何處及何時之災害發生機率較高，以利於進行疏散及災害相關緊急應變之決策。此外，這些較現行警戒系統更為詳盡的警戒資訊，亦能協助民眾感受災害可能發生的風險，以提昇自主或配合疏散的比例。

## 7.2 材料及方法

### 7.2.1 警戒模式

本研究使用第 6 章所建立的複合型土砂災害模擬模式，進行崩塌(包含發生時間、地點及規模)、洪水(包含流量、水位)、土砂流出及河床高程變化之預測及模擬，除可預測那一個斜坡單元可能發生崩塌，亦能預測那一條單位河道可能發生溢流。同時，此警戒模式將提供三種警戒資訊－崩塌警戒、道路封閉警戒及洪水警戒，以協助地方政府及民眾採取適當的防護措施。其中，崩塌警戒係為區域型的警戒，其可提供集水區範圍內整體的崩塌風險評估，不過，其主要的焦點還是著重在聚落所在的區域。道路封閉警戒主要是依據疏散路線沿線之坡面崩塌預測結果進行發布，其可作為地方政府考量道路何時應予封閉之基本參考資訊。由於河道水位與淹水情形及橋梁安全性具有高度關連性，因此洪水警戒可以提供主要河道是否會發生溢流並導致淹水或橋梁沖毀等的風險評估依據，其不但對於封橋時機之決策大有助益，亦有助於洪水防災措施之決策。圖 7.1 為本研究所建構之複合型土砂災害警戒系統(RIMSH warning system)架構圖。

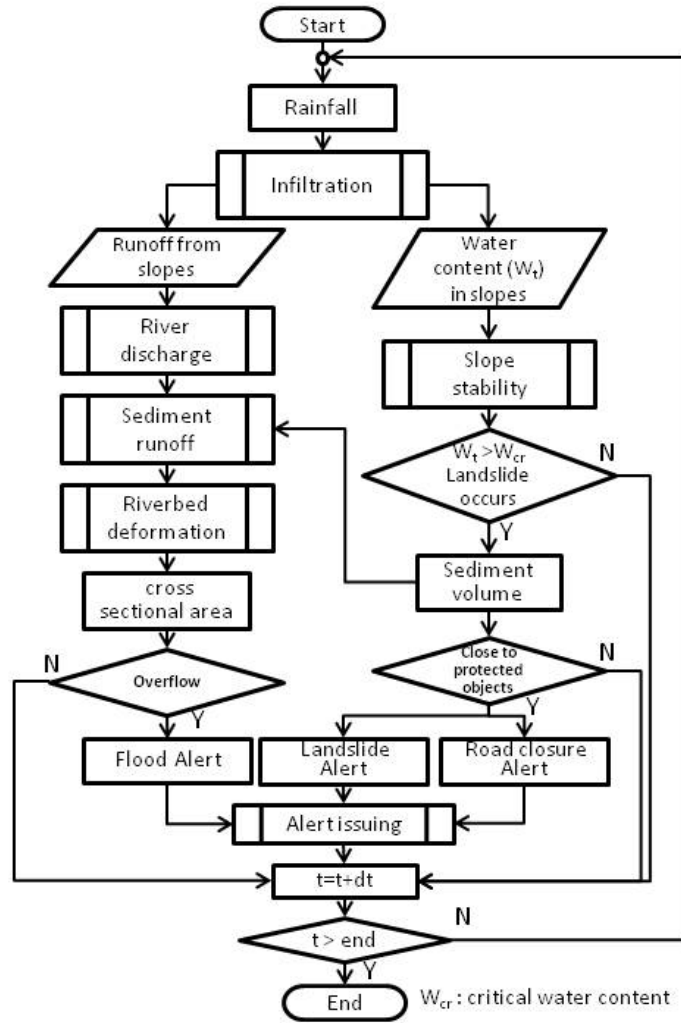
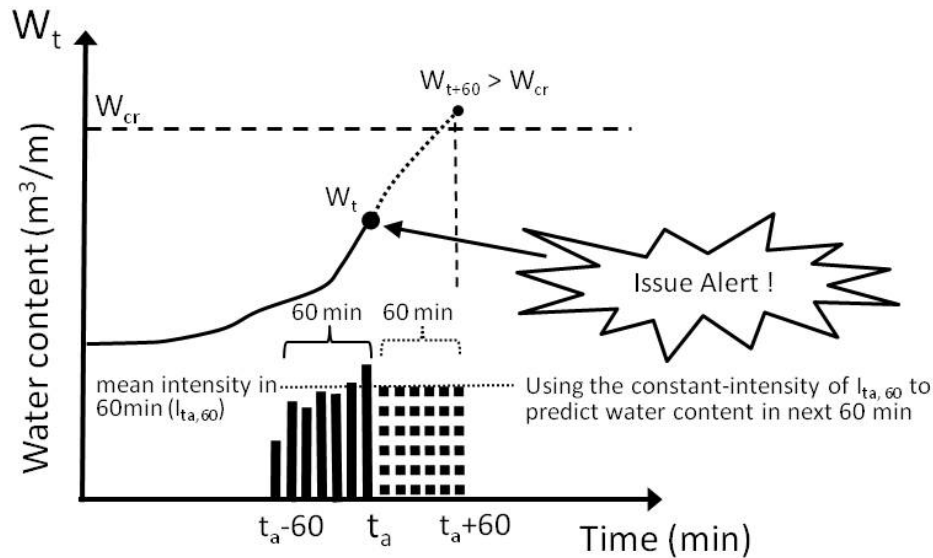


圖 7.1 複合型土砂災害警戒系統(RIMSH warning system)架構圖

由於自警戒發布、訊息傳遞、疏散決策以及完成民眾疏散，每個階段均需耗費時間，因此在第 2 章，本研究定義 RTE(remaining time for evacuation, 剩餘疏散時間)為自警戒發布後至災害發生時，所剩餘的時間。所以，由於交通條件、社經環境、人口結構等的差異、不同地區之最短疏散時間(SRTE, the shortest remaining time for evacuation)勢必不同。儘管在第 2 章根據台灣的統計資料，本研究建議台灣地區之 SRTE 為 3 小時，但由於本研究之試驗區(宇治市志津川)與宇治市政府(宇治市役所)所在地非常接近，亦即不論是疏散決策之溝通或是警戒訊息之傳遞均相對容易，故本研究於此研究區之 SRTE 設為 1 小時。為確保此警戒系統有足夠的 SRTE，本研究使用預測 60 分鐘後的土壤水含量指標 ( $W_{t+60}$ )作為崩塌相關警戒(包含崩塌警戒及道路封閉警戒)之發布依據;亦即若預測 60 分鐘後之土壤水含量指標( $W_{t+60}$ )已超過臨界水含量，即發布崩塌相關警戒，如圖 7.2。其中  $W_{t+60}$  可以(5.5)式及(5.6)式計算之，但(5.5)式中的  $I_t$  須以固定強度雨量  $I_{t_a,60}$  取代之。此處之  $I_{t_a,60}$  係代表在時間  $t_a$  時，60 分鐘之平均雨量強度值(如圖 7.2)。



■ The landslide-related alert will be issued when the  $W_{cr}$  is predicted to be exceeded by the expected water content in the following 1 hour

圖 7.2 崩塌相關警戒發布模式示意圖

相較於預警時間較短，且發生時較無明顯徵兆的崩塌相關警報，洪水警戒之預警發布相對而言是比較容易的；因為河道水位之變化明顯可見，故民眾能直接感受其威脅，促使其進行疏散避難作為。因此，本研究採用相對水位作為洪水警戒發布之指標。

### 7.2.2 警戒發布機制

聯合國國際減災策略組織(UNISDR)指出，一個有效的早期預警必須包含四個關鍵因素：

- (1) 了解威脅社區的風險為何
- (2) 監測及提供這些風險之預警
- (3) 以大眾能夠理解的方式傳遞與溝通預警訊息
- (4) 相關民眾對於預警訊息的反應能力

為滿足上述關鍵因素，本研究中所提供的三種警戒訊息，均採用相同的警戒等級與代表顏色；亦即，所有的警戒均以一般極易識別風險高低的顏色，分為黃色警戒及紅色警戒二個等級。各種警戒之等級定義、發布時機及建議處置措施詳如表 7.1。由於警戒發布後，何時可以調降甚至解除亦為警戒避難過程中的重要議題，因此本研究亦定義各種警戒等級之調降時機，詳如表 7.2。整體警戒發布及調降或解除之流程圖，詳如圖 7.3 及 7.4。



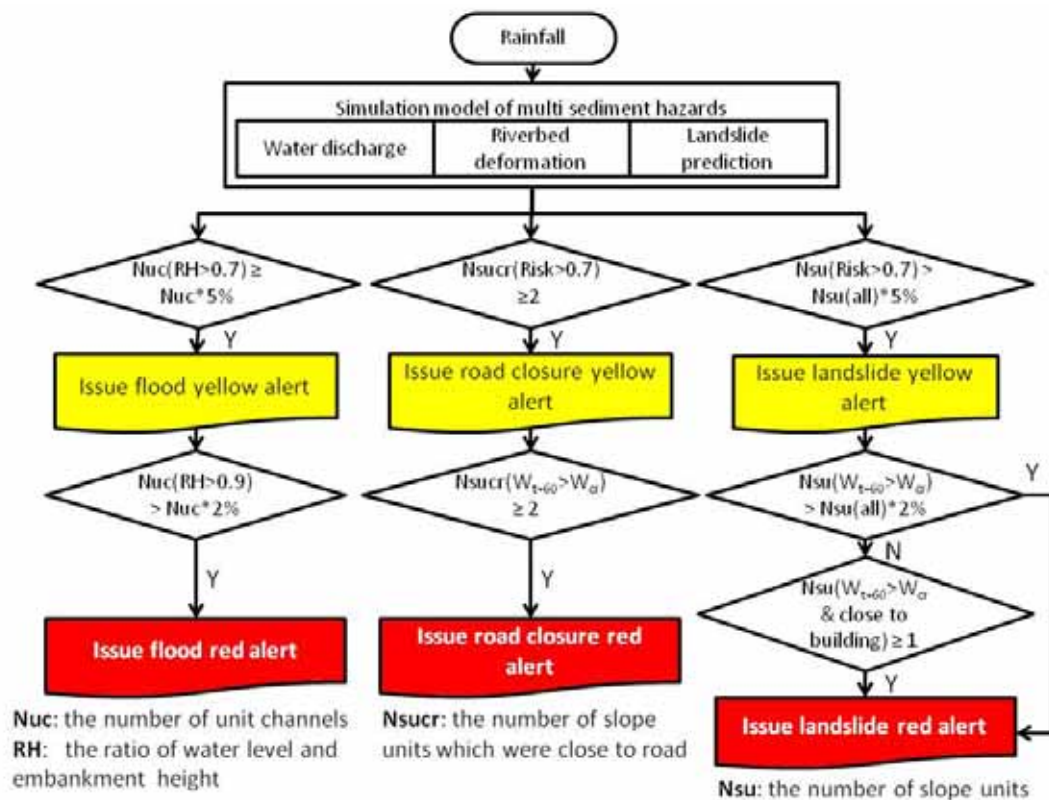


圖 7.3 洪水、道路封閉及崩塌警戒之發布流程圖

表 7.1 崩塌、道路封閉及洪水警戒之發布條件與建議處置措施

類型	等級	發布條件	建議處置措施
崩塌警戒	黃色	崩塌風險 Risk*值大於 0.7 之斜坡單元數目超過斜坡單元總數的 5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 一般民眾：避難準備</li> <li>■ 弱勢族群：預防性疏散</li> </ul>
	紅色	(1) 任一鄰近建物之斜坡單元，其預測 60 分鐘後之土壤水含量指標(W <sub>t+60</sub> )已超過臨界水含量。 或 (2) 預測 60 分鐘後之土壤水含量指標(W <sub>t+60</sub> )大於臨界水含量之斜坡單元數目，已超過斜坡單元總數的 2%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 疏散至避難處所</li> </ul>
道路封閉警戒	黃色	鄰近主要避難路線且崩塌風險 Risk*值大於 0.7 之斜坡單元數目超過 2 處(含)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 道路封閉準備</li> <li>■ 避難計畫再檢核(確認如道路封閉是否會影響後續之疏散作為)</li> </ul>
	紅色	鄰近主要避難路線且其預測 60 分鐘後之土壤水含量指標(W <sub>t+60</sub> )已大於臨界水含量之斜坡單元數目超過 2 處(含)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 道路封閉</li> <li>■ 必要時調整避難計畫</li> </ul>
洪水警戒	黃色	水位高於堤頂高度 70%之單位河道數目超過單位河道總數的 5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 橋梁封閉準備</li> <li>■ 洪水防護措施準備</li> </ul>
	紅色	水位高於堤頂高度 90%之單位河道數目超過單位河道總數的 2%。	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 橋梁封閉</li> <li>■ 洪水防護措施</li> <li>■ 民眾居家垂直避難或疏散至避難處所</li> </ul>

\* Risk 之計算方式，詳如(5.12)式

表 7.2 崩塌、道路封閉及洪水警戒之等級調降與解除條件

類型	等級	警戒等級調降或解除條件
崩塌	紅降黃	(1) 崩塌風險 Risk*值低於 0.95 之斜坡單元數目超過斜坡單元總數的 80%。 且 (2) 為避免等級調降過於頻繁，崩塌紅色警戒發布後二小時內，不允許降為黃色警戒
	解除警戒	(1) 崩塌風險 Risk*值低於 0.7 之斜坡單元數目超過斜坡單元總數的 95% 且 (2) 為避免解除警戒過於頻繁，崩塌黃色警戒發布後一小時內，不允許解除警戒
道路封閉	紅降黃	(1) 鄰近主要避難路線且崩塌風險 Risk*值大於 0.95 之斜坡單元數目低於 2 處(含) 且 (2) 為避免等級調降過於頻繁，道路封閉紅色警戒發布後二小時內，不允許降為黃色警戒
	解除警戒	(1) 鄰近主要避難路線且崩塌風險 Risk*值大於 0.7 之斜坡單元數目低於 2 處(含)；或流域內之崩塌警戒已解除時，亦配合直接解除道路封閉警戒。 且 (2) 為避免解除警戒過於頻繁，道路封閉黃色警戒發布後一小時內，不允許解除警戒
洪水	紅降黃	(1) 水位低於堤頂高度 70%之單位河道數目超過單位河道總數的 95% 且 (2) 為避免等級調降過於頻繁，洪水紅色警戒發布後一小時內，不允許降為黃色警戒
	解除警戒	(1) 水位低於堤頂高度 30%之單位河道數目超過單位河道總數的 80%。 且 (2) 為避免解除警戒過於頻繁，洪水黃色警戒發布後一小時內，不允許解除警戒

\* Risk 之計算方式，詳如(5.12)式

由於所有的警戒均已簡化成清楚、簡單且格式化的內容，並包含明確的應變處置措施，故可輕易地將之轉化為適當的警戒訊息(例如，警報器、手機簡訊、傳真、電子郵件或智慧型手機 APP)，並傳遞至保全對象與社會大眾。此外，詳細資訊與預測結果，也可即時展示在指定的防災網頁上。

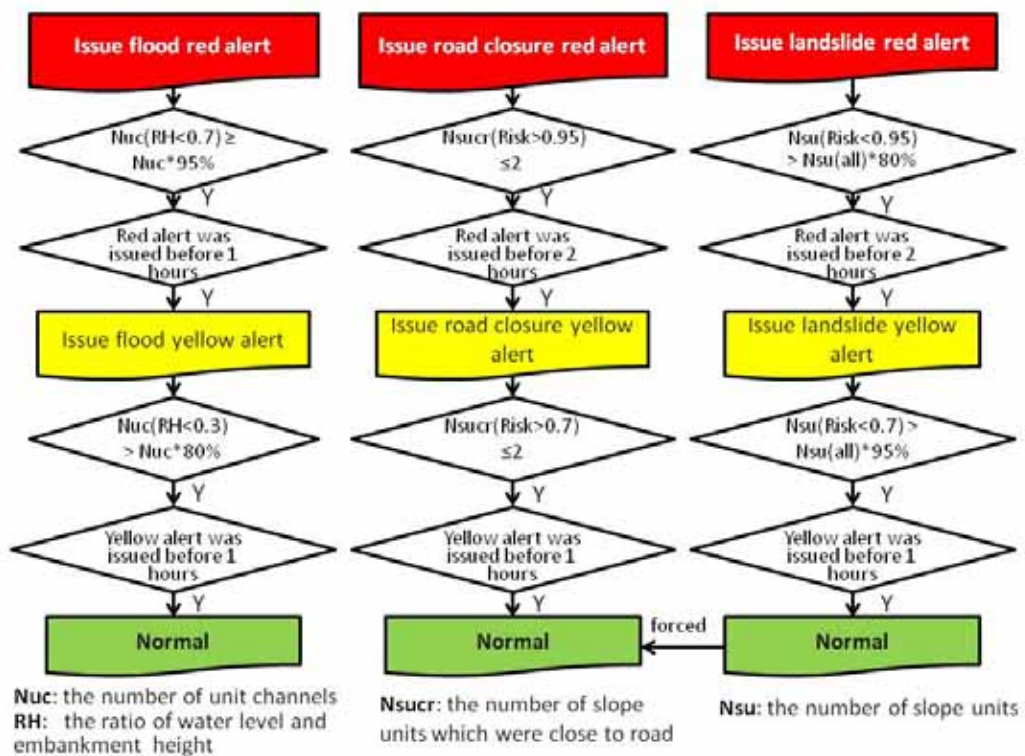


圖 7.4 洪水、道路封閉及崩塌警戒之等級調降及解除流程圖

### 7.2.3 研究區(志津川流域)之避難計畫

研究區內之聚落主要分布在二個區域－炭山區與志津川區，如圖 7.5。依據宇治市之地域防災計畫(宇治市，2009；宇治市，2013)，研究區內之避難處所及主要疏散避難路線標示如圖 7.5。其中，對於土砂災害之避難計畫可分為三階段，其避難命令發布時機及因應作為整理如表 7.3。

表 7.3 宇治市三階段土砂災害避難命令發布時機與因應作為

階段	發布條件	因應作為
避難準備	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 大雨警報已發布</li> <li>■ 土砂災害警戒情報已發布</li> <li>■ 京都府土砂災害警戒系統已達 Level 1 等級</li> <li>■ 已有災害前兆</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 弱勢族群開始疏散</li> <li>■ 居民進行避難準備</li> </ul>
避難勸告	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 京都府土砂災害警戒系統已達 Level 2 等級</li> <li>■ 已有災害前兆</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 居民開始避難</li> </ul>
避難指示	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 京都府土砂災害警戒系統已達 Level 3 等級</li> <li>■ 災害已經發生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 危險區內民眾強制疏散</li> </ul>

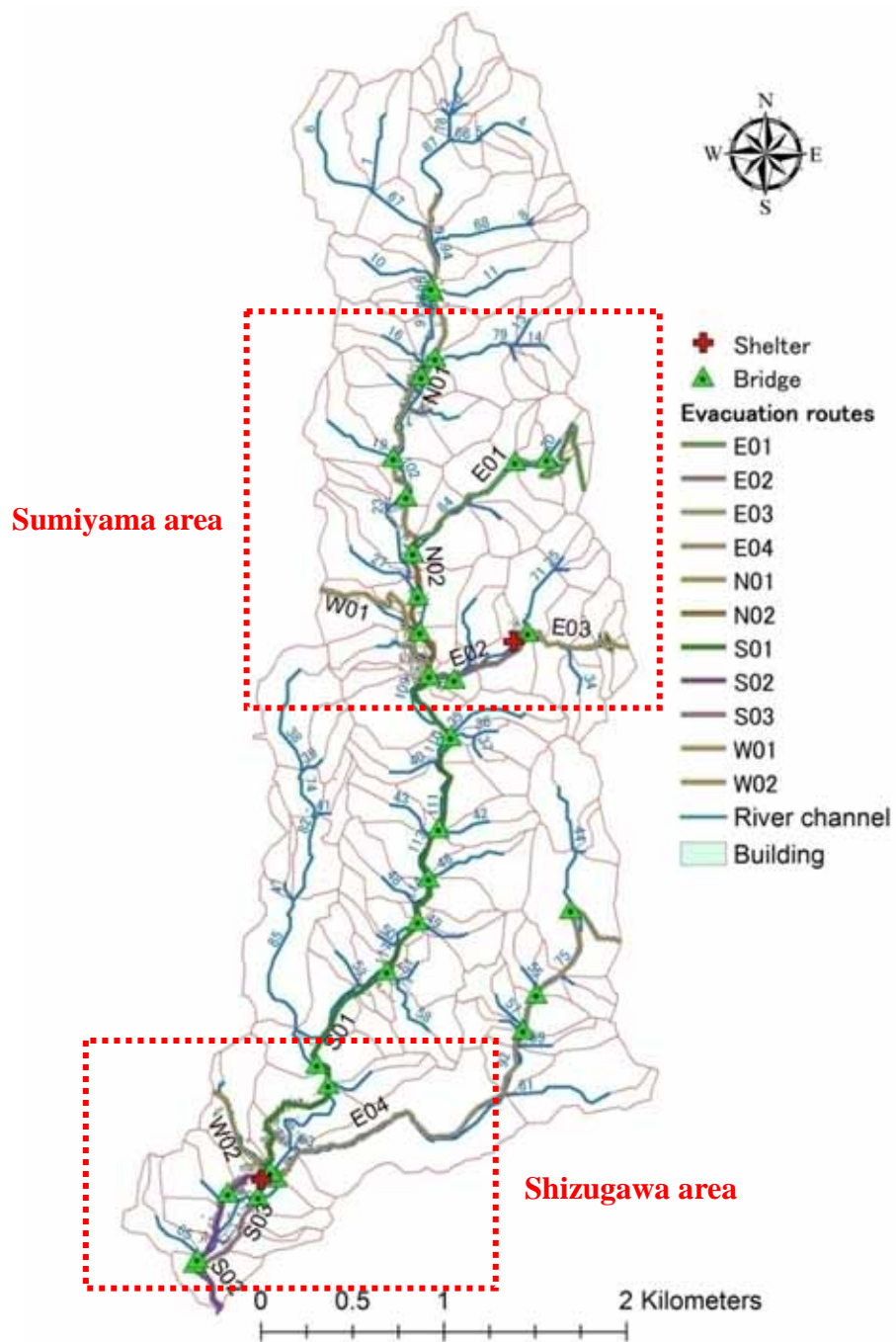


圖 7.5 研究區內之避難處所及主要疏散避難路線

## 7.3 研究發現

### 7.3.1 RIMSH 警戒系統模擬警戒發布結果

整合第 6 章之複合型土砂災害模擬結果與前節所提之警戒模式與警戒發布機制，針對 2012 年 8 月 14 日發生於宇治市志津川之豪雨事件，本研究所提出之 RIMSH 警戒系統其警戒發布情境模擬之結果如表 7.4、表 7.5 及圖 7.6。

表 7.4 顯示崩塌警戒、道路封閉警戒及洪水警戒之發布過程。根據災後現場調結果，該地區之崩塌發生時間大致在 8/14 04:30~06:00 之間，而 RIMSH 警戒系統發布崩塌黃色警戒之時間為 8/14 02:06，崩塌紅色警戒為 8/14 03:21；亦即，RIMSH 警戒系統已提供至少 2.5 小時的時間進行疏散準備，以及至少 1 小時的時間針對警戒區內的民眾進行疏散避難。此警戒發布結果確實已達到早期預警的目標，且提供足夠的疏散時間。此外，RIMSH 警戒系統亦可依據流域內崩塌風險提供道路封閉之建議。事實上，山區降雨期間如何適時地封閉道路，以避免人車進入高危險路段，係為山區防災工作中不可或缺的一環。同時，對於地方政府或民眾進行疏散決策時，以及地方政府檢視與驗證地區防災計畫時，道路封閉警戒亦為不可或缺且不可取代的關鍵因子。在實務操作面上，已發布的警戒何時方可調降警戒等級或是解除警戒，經常也是困擾地方政府相關業務人員的問題之一，而 RIMSH 警戒系統則提供一個客觀的評估準則，協助相關人員進行調降警戒等級或是解除警戒之決策依據。

在驗證避難計畫之可行性時，橋梁在洪水期間的安全性也是另一個必須考量的重要因素。表 7.5 顯示在此豪雨事件期間，因河道水位過高可能導致交通中斷或危及人車安全的橋梁明細。對照前述之道路封閉警戒、洪水警戒及避難處所的位置，N02、E01、E02、E03 及 S01 等 5 條主要避難路線可能會在此豪雨事件期間中斷。亦即，依據 RIMSH 警戒系統模擬的結果，志津川流域內的炭山地區在此豪雨事件期間可能會變成孤島；事實上，根據災後的調查報告，炭山地區確實在此豪雨事件期間變成孤島(牧紀男、林春男，2014; 宇治市，2014)。

有關 RIMSH 警戒系統發布之警戒類型、時間及真實災害發生時間時間軸關係已標示於圖 7.6。此類以時間軸標示的圖形，對於檢討警戒發布的過程與應變措施非常有用。同時，若能結合空間資訊與 GIS 平台，RIMSH 警戒系統亦可作為防災業務新進人員的訓練及演練的教育平台。

表 7.4 RIMSH 警戒系統模擬 2012 年 8 月 14 日志津川豪雨災害期間之崩塌、道路封閉及洪水警戒發布情形

Alert types	Issue yellow alert	Issue red alert	Lower from red to yellow alert	Lift from yellow to normal
Landslide	8/14 02:06	8/14 03:21	8/14 15:33	8/17 15:08
E01	8/14 02:01	8/14 04:00	8/14 15:33	8/17 15:08
E02	8/14 03:13	8/14 04:41	8/14 14:51	8/17 07:03
E03	8/14 03:22	8/14 04:43	8/14:14:00	8/17 00:01
E04	8/14 02:52	8/14 05:00	8/14 07:01	8/17 06:33
Road closure				
N01	8/14 01:34	-	-	8/17 15:08
N02	8/14 03:27	-	-	8/16 23:44
S01	8/14 02:47	-	-	8/17 15:08
S02	-	-	-	-
S03	-	-	-	-
W01	8/14 03:47	-	-	8/16 06:37
W02	-	-	-	-
Flood	8/13 22:30	8/14 03:17	8/14 06:34	8/14 07:35

**Note:** According to the investigation results, the occurring time of landslides was between 04:30~6:00 on August 14; the occurring time of floods was between 04:00~06:00 on August 14.

表 7.5 RIMSH 警戒系統模擬 2012 年 8 月 14 日志津川豪雨災害期間避難路線上可能因洪水造成橋梁中斷之地點明細

	Unit channel	Duration of overflow (Simulation result)	Duration of overflow (Investigation results)	No. Bridge	Evacuation Road
1	123	8/14 02:59~ continued	8/14 04:30~06:00	about 15	E04
2	105	8/14 03:23~06:11	8/14 04:00~06:00	about 7	N02
3	122	8/14 03:37~03:49 8/14 04:31~05:32	8/14 04:30~05:30 (A house and a bridge were washed out)	14	S01
4	121	8/14 04:28~06:02	Unknown	13	S01
5	124	8/14 05:20~05:37	8/14 04:30~06:00	about 14	S01

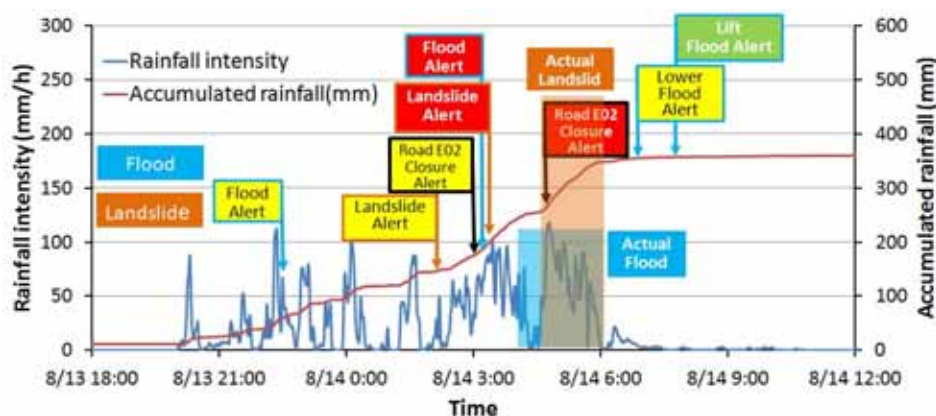


圖 7.6 RIMSH 警戒系統發布之警戒類型、時間及真實災害發生時間之時間軸



### 7.3.2 討論

由於本研究並未取得災害事件期間之預測降雨資料，故採用  $I_{t_a,60}$  (時間  $t_a$  時，60 分鐘之平均雨量強度值) 去預估一小時後土壤內之水含量  $W_{t+60}$ ，並據以評估各坡面是否發布崩塌紅色警戒，以 2012 年 8 月 14 日志津川豪雨災害事件為例，模擬結果可提供至少 2.5 小時的時間進行疏散準備，以及至少 1 小時的時間針對警戒區內的民眾進行疏散避難，此結果顯示本研究所提之預估方式應屬可行。此外，在第 2 章之 2.3.2 節提到，由於實際疏散避難之決策尚須考量如山區交通及通訊狀況、避難處所的位置與距離、危險區內民眾的行動能力與耐災能力等時間與空間等複雜關係，因此若新一代的警戒模式應具備較長時間的預測與境況模擬功能(例如未來 12 小時)，以提昇地方政府疏散避難決策之能力。事實上，後續如能即時獲得未來 12 小時的預測雨量，本研究所發展的 RIMSH 警戒系統即可達成此目標。

儘管宇治市役所在災前已於其地域防災計畫中，明確定義了「避難準備、避難勸告、避難指示」等三階段避難命令的發布時機與因應作為，但由於實務操作上，日本現有的土砂災害警戒系統仍有許多盲點與不明確處，導致市町村政府在進行相關避難決策上仍遭遇許多困難。事實上，以 2012 年 8 月 14 日之豪雨事件為例，災害期間宇治市役所並未發布任何避難命令，直到 8 月 14 日 14:10(亦即豪雨結束後 8 小時)因炭山地區已成孤島且維生管線中斷造成生活環境惡化，才直接發布避難指示(牧紀男、林春男，2014; 宇治市，2014)。本研究提出之崩塌、道路封閉及洪水等三種警戒，每種均分為黃色與紅色二階段；其中，黃色警戒部份建議可作為「避難準備」的發布依據，而紅色警戒則可作為「避難勸告」的發布條件。依據本研究針對本案例之模擬結果，RIMSH 警戒系統不但確實能協助地方政府進行避難決策，也能提供封路、封橋等相關決策意見。

檢視 RIMSH 警戒系統發布與解除警戒之過程，相對而言，崩塌與道路封閉之黃色警戒的解除時間似乎太晚。其原因係本研究目前在警戒發布與解除均採用相同的標準。事實上，如依據氣象預報已明確預知未來 12~24 小時不會有任何的降雨，或許解除時間可予提前。此外，由於部份單位河道之河道淤積模擬結果超過實際狀況(如 No.123)，造成洪水警戒無法解除，此時仍需仰賴現地觀測結果進行調整，以符合實際現況。另一方面，在災害過後，相關單位通常會立即進行河道疏通及清除土砂等工作，因此，如欲使用 RIMSH 警戒系統進行長期連續災害事件之持續模擬時，應先針對河道土砂淤積現況進行調查後，將河床高程值進行必要之調整。

Lindell 等(2007)在先前的研究已建立，並以人命傷亡、經濟損失及政府公權力的信任度為評估因子，建立疏散避難決策之評估模式，如圖 7.7。其中，Outcome A 及 D 為最佳決策結果；相對而言，Outcome B 則為次佳決策結果(a “false positive”)，因其雖未造成人命傷亡，但也因執行了不必要的疏散避難，衍生出經濟上直接或間接的損失，並可能導致民眾對政府公權力的信任度下降，

增加下次執行疏散避難任務的困難度。最後，Outcome C 則為最糟的決策結果 (a “false negative”)。事實上，警戒誤報(亦即已發布警戒，但未發生災害)一直是個難解的問題，因為它會危及警戒系統的公信力。儘管，預防性疏散已經被公認是降低災害風險的最佳方案之一，但執行預防性疏散也勢必會造成 Outcome B 的比例增加，除了可能打擊政府的公信力外，亦會增加疏散成本與造成未來防災工作的困難度上昇，因此，往往使地方政府在進行疏散決策上陷入兩難。因此，發展警戒及疏散決策支援系統，以標準化的準則及規範協助地方政府進行疏散避難決策係強化地方政府防災能力的重要工作。

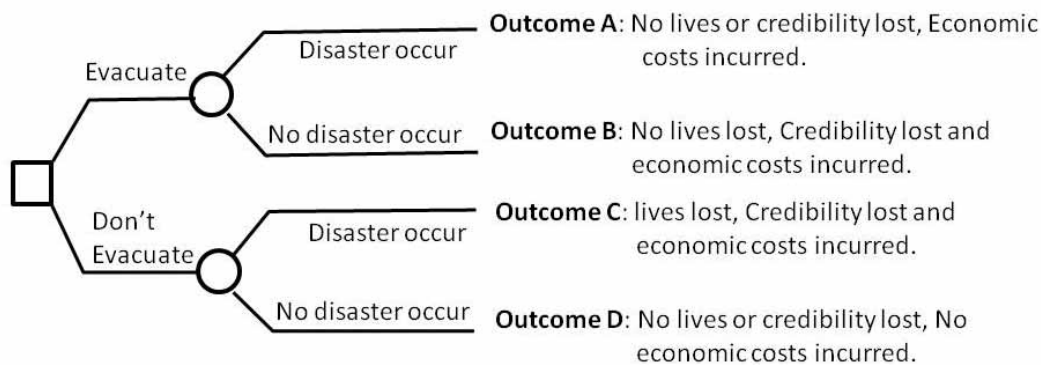


圖 7.7 疏散避難決策樹 (Modified from Lindell et al., 2007)

## 7.4 小結

建立預警系統並及時疏散危險區內的民眾，已被公認為降低災害風險最有效的方法之一。然而，一個有效的警戒系統應具備辨識及評估災害風險的能力，並能有效且正確地將警戒訊息傳遞給民眾，以促使民眾能主動進行防災反應。此外，警戒訊息應該具有值得信賴、清楚明確、依族群屬性採取不同傳遞管道與內容，以及包含應採取何種保護措施的明確指示。因此，一個完整的警戒系統應由警戒模式及警戒發布機制二部份所組成。

本研究所提出的崩塌、道路封閉及洪水等三種警報，每一種警報均分為黃色及紅色警戒等二個等級。其中，每一種警戒均有簡單易懂的內容、明確的發布條件及相應的防災措施。此外，藉由整合了複合型土砂災害的模擬與警戒模式，以及警戒發布機制，本研究建立了一個新的複合型土砂災害警戒系統(the Rainfall-Induced Multi Sediment Hazards warning system, RIMSH warning system)。此 RIMSH 警戒系統不僅能提供民眾詳細的警戒資訊，也能協助地方政府適當地作出疏散避難或與封路、封橋等的決策。



## 参考文献

- [1] 宇治市(2009)、「宇治市地域防災計画」°Uji City (2009): The regional disaster prevention plan of Uji City, pp.3-44 - 3-45.
- [2] 宇治市(2013)、「宇治市地域防災計画」°(Uji City. (2013): Uji regional disaster prevention plan. (in Japanese))  
(<http://www.city.uji.kyoto.jp/0000010399.html>)
- [3] 宇治市(2014)、「平成 24 年 8 月 13 日・14 日京都府南部地域豪雨災害記録集」°(Uji City. (2014): The heavy rainfall disaster record collection in Kyoto southern region on August 13-14, 2012. (in Japanese))  
(<http://www.city.uji.kyoto.jp/0000012774.html>)
- [4] 牧紀男、林春男(2014)、「2012 年京都府南部豪雨災害時の宇治市の災害対応－地域防災計画に求められる内容と災害対策本部業務への示唆－」°地域安全学会論文集，22 °(Maki, N. and Hayashi, H. (2014): The 2012 South Kyoto Flooding and Disaster Response of City of Uji; Essential Contents for a post-Tohoku Earthquake Disaster Response Plan, Journal of Social Safety Science, No.22.(in Japanese))
- [5] Lindell, M. and Prater, C. (2007): A hurricane evacuation management decision support system (EMDSS), *Natural Hazards*, Vol. 40, No. 3, pp. 627–634.
- [6] Kunz-Plapp, T. (2008): Vorwarnung, Vorhersage und Frühwarnung. In: *Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Grundlagen und Herausforderungen der Gefahren- und Risikoforschung*. Felgentreff, C., T. Glade (eds.), Elsevier, Heidelberg, pp. 213-233.
- [7] Hübl, H (2000): Frühwarnsysteme als passive Schutzmaßnahmen in Wildbacheinzugsgebieten. In: *Wildbach und Lawinenerverbauung* (ed) Jahresbericht 2000 des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Forst, Wasser und Umwelt, pp. 46.
- [8] UNISDR (2006): Global survey of early warning system. UN/ISDR.  
(<http://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf>)
- [9] UNISDR (2009): Terminology on Disaster Risk Reduction. UN/ISDR.  
([http://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologyEnglish.pdf](http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf)).
- [10] Thiebes, B. (2012): *Landslide Analysis and Early Warning Systems: Local and Regional Case Study in the Swabian Alb, Germany*. Springer Berlin Heidelberg.
- [11] Wieczorek, G.F. and Glade, T. (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob, M. and Hunger, O. (eds), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena, Praxis*, Springer Berlin, pp. 325–362.



## 第8章 具體政策建議

京都大學防災研究所成立已逾一甲子，在防災相關的研究方面，早已是世界知名的研究重鎮，其中在砂防相關研究上更是首屈一指，遠近馳名。筆者有幸獲得行政院的支持前往京都大學攻讀博士學位，除進行複合型土砂災害警戒與決策支援系統之研發外，亦持續關注日本在土砂災害防救相關法令之變革與最新趨勢，同時亦於每次颱風豪雨期間就近觀察日本在土砂災害警戒與避難等相關行政措拖與應變情形，並藉由參與日本土木學會、砂防學會及相關國際研討會等的機會，進一步探究砂防與防災領域最新的研究進展，可謂收獲良多。其中，相關的心得與紀錄均已藉由撰寫 blog 方式，公開與機關同仁及國內相關研究人員分享，三年期間累計分享已逾 160 篇(<http://cychen59.blogspot.tw>)。

以下針對三年來在日本所見及所學之心得，擇要提出相關建議：

1. 以鄉鎮或集水區為單元，進行複合型土砂災害警戒與疏散決策支援系統之本土化參數調整及後續研發。

國內現行已以雨量為指標的土石流警戒機制，係屬於廣域型的土砂災害警戒系統，經多年實際應用，其實用性已獲肯定。惟囿於此模式先天之限制，現行的土石流警戒模式僅能提供廣域範圍內土石流是否發生之可能性，無法預測災害可能發生的明確地點、時間、類型及規模，對於第一線負責疏散決策的地方政府而言，尚無法滿足其決策所需資訊之需求。同時，現行土石流警戒模式因無法考量區域地質、局部地形等差異，其預測精度較難再有提昇的空間。因此，以鄉鎮或集水區為單元，建立複合型土砂災害警戒與疏散決策支援系統，以協助地方政府及民眾可以獲得更細緻與精確的警戒資訊，係日本相關研究單位正在努力的方向。

本研究所發展的複合型土砂災害警戒系統(the Rainfall-Induced Multi Sediment Hazards warning system, RIMSH warning system)，已使用 2012 年 8 月 14 日發生於日本京都府宇治市之豪雨災情進行模式驗證，初步驗證成果良好，未來有進一步發展為縣市或鄉鎮層級之複合型土砂災害警戒與疏散決策支援系統的潛力。建議後續可先於國內選定數個代表地點進行本系統之本土化參數調整與驗證，必要時可採產官學合作方式加速測試期程。

2. 推動使用 QPESUMS 等網格式雨量資料，逐步取代現行以現地自動雨量站資料作為土石流警戒模式輸入之雨量資料。

現行土石流警戒發布模式係使用氣象局整合各單位佈建於全台共約 500 處的現地自動雨量站之 10 分鐘即時雨量資料，作為警戒模式計算與發布依據，惟囿於山區電力及通訊之設置與維護困難等限制，山區雨量站之佈設密度實無法滿足土石流警戒分析之需求，也限制了土石流警戒精度提昇的可能性。日本現行的土砂災害警戒模式，自 2005 年起開始使用掃描範圍已遍及全日本的 C-band 雷達作為警戒分析所需之降雨資料來源，一舉將雨量分析

之空間解析度由數十公里提昇至 1 公里，且每 10 分鐘更新一次，有效提昇分析精度。

國內現行已有 QPESUMS 雷達降雨評估系統，可提供 1.3 公里的降雨空間解析度，以及 10 分鐘間距之更新頻率，惟目前由於雷達掃描的範圍仍未遍及全島，特別是在部份山區由於地形遮蔽問題，雷達降雨資料之準確性仍受質疑。由於國內目前已有雷達站之增設計畫，勢必可改善部份地區雷達降雨資料的準確度問題。在提昇土石流警戒模式精度的前提下，降雨資料之空間解析度未來勢必成為改善的焦點之一，因此，建議現行土石流警戒模式可推動使用 QPESUMS 等網格式雨量資料，逐步取代現行以現地自動雨量站資料作為土石流警戒模式輸入之雨量資料。推動方式可先以 QPESUMS 雷達降雨資料較精確的地區開始試辦，先與現行使用現地自動雨量站 10 分鐘即時雨量資料進行雙軌運作，配合相關改善 QPESUMS 雷達降雨評估系統精度的研究計畫，分區分期逐步驗證，以期達成提昇雨量資料空間解析度的目標。

### 3. 強化災害潛勢資訊公開，加速災後調查及空拍等資訊之分享。

日本由於天然災害頻繁，對於災害潛勢之調查與資訊公開等工作向來非常重視。以災害潛勢資料為例，各都道府縣調查之災害潛勢資料除於其自身及其所屬之市町村政府網站上均可查詢外，中央的國土交通省亦整合全國各地資料，製成災害潛勢地圖入口網站(國土交通省ハザードマップポータルサイト，<http://disapotal.gsi.go.jp/>)，並提供電子地圖等應用工具。同時，前述之災害潛勢資料亦開放給民間應用加值，故市面上也可見相關出版物及產品之公開販售(<http://www.mapple.co.jp/mapple/news/2013/02/2883.html>)。此外，在災害期間，國土交通省相關單位(如國土地理院、砂防部、地方整備局等)之相關調查及空拍等災情資訊均會即時主動上網公開並提供媒體報導，除避免災情遭不當渲染，並展現政府積極之作為外，亦可提供相關防救災單位現場應用，及後續研究單位進行案例分析使用。以 2013 年 10 月 16 日凌晨 02:50 發生於東京伊豆大島之土石流災情為例，16 日當日國土地理院即已完成空拍並上網公開，17 日即完成影像正射、災區範圍數化及前後期影像比對等工作，對後續地方政府進行搶救災工作之規劃上大有助益([http://cychen59.blogspot.tw/2013/10/blog-post\\_22.html](http://cychen59.blogspot.tw/2013/10/blog-post_22.html))。

國內的災害潛勢資料已由科技部行政法人國家災害防救科技中心彙整製成災害潛勢地圖，並建置入口網站(<http://satis.ncdr.nat.gov.tw/Dmap/102news.aspx>)。但在可加值應用的數值資料分享方面，目前僅提供公務單位申請下載使用。此外，在災情空拍影像方面，目前中央災害應變中心雖已有相關連繫與分享機制，但仍僅限於幾個公務單位交流使用。以水土保持局為例，每次發生重大土砂災害，均會委由專業廠商進行無人載具空拍、購置災後衛星影像進行災區判識，並進行相關災情調

查。這些資料如能持續累積與分享，對於災害緊急搶救、災後復建與規劃，以及後續災害潛勢範圍劃設方式及警戒值的相關研究均大有助益。因此，建議應強化此部份之資訊公開與分享，並結合政府現正推動之 Open data 政策與平台，增加資料之能見度與擴大其應用面。

4. 選派具潛力之年輕工程師，參與每年 5 月的日本砂防學會研究發表會，廣泛且快速地學習日本砂防界最新的研究成果及工程實務經驗，並擴大台日砂防技術交流。

日本砂防學會為日本在土砂災害防治方面最重要的學術與實務交流組織，其中每年 5 月辦理的砂防學會研究發表會更是日本砂防界年度的最大盛事。此發表會之議程，每年均包括 2 天的論文發表，以及 1 天的工程現地觀摩。其發表領域包含砂防事業、構造物、土石流、土砂流出、警戒避難、管理與遙測、火山、地震、生態系、地滑、邊坡穩定、砂防計畫及崩塌預測等，內容已涵蓋所有的日本砂防界目前最熱門的議題。每年發表之口頭及海報論文均超過 350 篇以上，規模盛大。此外，發表之內容除最新的學術成果外，亦包含產官學界對於工程與防災實務上之經驗分享交流，非常值得參考。

我國與日本砂防界之交流過去僅透過中華水土持學會與中華防災學會，每年與日本全國治水砂防協會進行技術交流與人員互訪，此外 2010 年台日雙方進一步簽定「亞東關係協會與財團法人交流協會於 2010 年之強化台日交流合作備忘錄」，以增進台日雙方在共享地震、颱風等相關災害防治、災後復建經驗，更致力強化雙方專家於防災及減災策略、應變對策與災後復建等領域合作。惟目前台日交流部份，現階段僅維持雙方每年各 10 位互訪的形式，而議題選定方面也受限於時間及參與人員領域，未能廣泛了解日本砂防相關領域最新的成果。因此，建議未來可固定編列預算，每年選派 5~10 位具潛力之年輕工程師，參與每年 5 月的日本砂防學會研究發表會，廣泛且快速地學習日本砂防界最新的研究成果及工程實務經驗，並擴大台日砂防技術交流。



## 附錄：已發表論文明細

- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014): A Warning and Evacuation System by means of a Multi Sediment Hazards Simulation Model on a Basin Scale, Proceeding of International Debris-Flow Workshop 2014. (Accepted)
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014): A Multi-modal Sediment Disaster Simulation on a Basin Scale, Proceeding of INTERPRAEVENT International Symposium 2014. (Best student paper award)
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014): Simulation of Sediment Disasters Due to Slope Failures and the Following Sediment Runoff, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 19-31.
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014): A prediction model of landslide occurrence and its scale using numerical-regression equations, Proceeding Annual Meeting of Japan Society of Erosion Control Engineering, JSECE Publication, No.72, pp. B-308-309.
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2014): A method for predicting landslides on a basin scale using water content indicator, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 70, No.4, pp.I\_13-I\_18.
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013): An analysis of rainfall-based warning systems for sediment disasters in Japan and Taiwan, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 47-57.
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013): Evacuation Decision-Making Factors for Local Governments and Inhabitants in Debris-Flow Potential Areas in Taiwan, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 37-46.
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013): Simulation of Sediment Disasters Due to Slope Failures and the Following Sediment Runoff, International symposium on sediment disasters under the influence of climate change and tectonic activity (3rd).(Best paper award)
- Chen, C. Y., Ikkanda, S., Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2013): A study on mechanism of large-scale landslides and the prediction, Proceeding of 12th International Symposium on River Sedimentation, pp. 41.
- Chen, C.Y., and Fujita, M. (2013): Simulation of Landslides and the Following

Sediment Runoff in a Basin Scale, Proceeding Annual Meeting of Japan Society of Erosion Control Engineering, JSECE Publication, No. 69, pp. A-232-233.

Chen, C.Y., and Fujita, M. (2012): The Evacuation Decision-Making Factors for Local Government and Inhabitants in Debris-Flow Potential Areas in Taiwan, Proceeding of the 3rd International Workshop on Multimodal Sediment Disasters, pp. D.3.1-D.3.11.

Chen, C.Y. (2012): Evaluation of rainfall-based warning systems for debris flows and slope failures in Japan and Taiwan, Proceeding Annual Meeting of Japan Society of Erosion Control Engineering, JSECE Publication, No. 66, pp. 286-287.