

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

運用永久散射體雷達干涉技術建立崩塌潛勢評估模型

及邊坡變位門檻值-以布唐布納斯溪沿岸邊坡地區為例

Landslide Susceptibility Assessment and Slope Displacement  
Threshold based on Persistent Scatterer InSAR - Case Study of  
Landslides along Pu-Tun-Pu-Nas River Area

張乃軒

Nai-Hsuan Chang

指導教授：楊國鑫 博士

Advisor: Kuo-Hsin Yang, Ph.D.

中華民國 110 年 7 月

July, 2021

# 國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書



運用永久散射體雷達干涉技術建立崩塌潛勢評估模型  
及邊坡變位門檻值-以布唐布納斯溪沿岸邊坡地區為例

Landslide Susceptibility Assessment and Slope Displacement  
Threshold based on Persistent Scatterer InSAR – Case Study of  
Landslides along Pu-Tun-Pu-Nas River Area

本論文係張乃軒君 (R08521109) 在國立臺灣大學土木工程學系  
完成之碩士學位論文，於民國110年7月29日承下列考試委員  
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

楊國鑫

(指導教授)

楊國鑫

韓仁毓

韓仁毓

鐘志忠

鐘志忠

王國隆

王國隆

系主任

謝尚賢

謝尚賢

## 誌謝



兩年的碩士生活，看似漫長，卻轉瞬即逝，感謝這兩年間幫助過我的人們，令我過得很充實，亦將當初所訂下的目標都逐一完成了。

首先，感謝我的父母，使我能衣食無憂的完成學業，尤其是我的母親，總能尊重我的決定，並在背後給我幫助及支持，當我迷茫時，總讓我知道「家，是我一輩子的避風港」。

接著要感謝我的恩師-楊國鑫教授，總是能提供許多研究上的建議，並激發我在研究上的靈感，也時常分享自身的經驗及給我許多鼓勵，透過您細心且嚴謹的指導及訓練，我才有完成這份研究及論文的能力。另外，亦要感謝我的口試委員-韓仁毓教授、鐘志忠教授及王國隆教授，亦曾於我研究過程中提供我許多幫助，並在論文上也給予許多寶貴的建議，使本論文能更加完善。

兩年的碩士生活中，有甘有苦，感謝一起度過的 R08 夥伴們，是你們打造了一個歡樂的學習及研究環境，令不擅交際的我也能融入其中，除了能互相學習砥礪，也能一起歡笑談心，為我的碩士生活增添了一抹色彩。特別感謝負責同一計畫的楊門夥伴-筱穎，有工作經驗的你比我們成熟不少，是位值得信賴且認真負責的好夥伴，總是能幫我解決許多問題，在課業及計畫上亦受妳許多幫助，也讓我從妳身上學到很多社會經驗。同時，也要感謝楊門的其它夥伴、學長姐及學弟妹們，在我研究上給予我的幫助與建議，及一起度過的點滴。

最後，要感謝我的女朋友-采璇，兩年的忙碌時光，考試及研究幾乎壓的我喘不過氣，但你總在我身邊帶給我歡樂，因為有妳的陪伴及鼓勵，使我能更有信心去面對重重困難，並一一度過。

畢業了，一個階段的結束，是另一個階段的開始，期許自己永保初心，在充滿未知的人生新階段上，也能自信、開心的面對。與所有我所愛及幫助過我的人們共勉之，且情誼長存。

謹以此論文獻給我所愛的家人及朋友。

張乃軒 謹誌

國立臺灣大學土木工程學系大地組

## 摘要



臺灣為於板塊交界帶及副熱帶季風氣候區，導致臺灣的地形、地質及氣候狀況均非常複雜多變，這些原因造成臺灣山坡地頻繁有崩塌發生。因此，監測系統對臺灣而言是非常重要的。

永久散射體雷達干涉技術 (PSInSAR) 是一種新興的地表變形測量技術，其具有許多優點，如覆蓋面積大、不受天氣影響、取樣間隔一致、高空間解析度及達公分甚至毫米等級的精度，令 PSInSAR 技術成為一種適合用於監測崩塌前地表變形之方法。

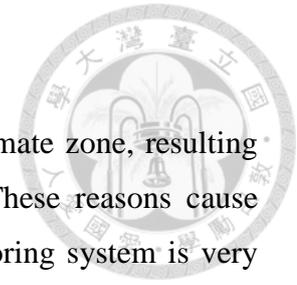
本研究以高雄市桃源區布唐布納斯溪沿岸邊坡地區為研究區域，分析區域內的 12 項會影響邊坡崩塌發生可能性的潛感因子，透過相關性分析，找出與崩塌具顯著相關的顯著因子，並以這些顯著因子利用邏輯斯迴歸建立崩塌潛勢評估模型。

除此之外，本研究使用 Sentinel-1 衛星之雷達影像，運用 SNAP 及 StaMPS 兩款軟體進行 PSInSAR 解算，以 PSInSAR 計算所得之地表變形計算地表變位速度，並透過優化分析，找出與崩塌最具相關性的地表變位速度之計算條件，並以此地表變位速度制定邊坡變位門檻值及修正崩塌潛勢評估模型。

根據研究結果，證明邊坡是否會發生崩塌並非受單一因子所控制，而是眾多因子綜合影響的結果。其中，篩選出 8 項顯著因子-事件累積降雨量、坡度、坡向、地形粗糙度、剖面曲率、植生指標、水系距及岩體強度。並找出時間間距為六個月時之沿坡面方向的地表變位速度  $v_{slope}$  與崩塌最具相關性，最能偵測到崩塌發生前之地表變形行為。並以地表變位速度  $v_{slope}$  制定邊坡變位門檻值及建立潛感值修正模型，其中，注意值為 3.8 mm/6-months，警戒值為 23.0 mm/6-months；而潛感值修正模型利用  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值後，模型的整體預測準確率提升約 3%，達到 82%；並透過僅分析有 PS 點之斜坡單元來觀察  $v_{slope}$  之貢獻，發現利用  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值後，模型的預測準確率提升約 6%，高達 85%，證明利用地表變位速度  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值可以有效提升崩塌潛勢評估模型之崩塌預測準確性。

**關鍵字：**潛感因子、永久散射體雷達干涉技術 (PSInSAR)、邏輯斯迴歸、邊坡變位門檻值、崩塌潛勢評估模型

## ABSTRACT



Taiwan is in plate junction zone and subtropical monsoon climate zone, resulting the terrain, geology and weather in Taiwan are very complex. These reasons cause common landslides happening in mountainous area. So the monitoring system is very important in Taiwan.

PSInSAR is a new technology to monitoring the ground deformation. It has many advantages, such like wide area coverage, not affected by the weather, good temporal sampling, high spatial resolution and millimetric or centimetric precision. So PSInSAR is a good method to detect the pre-landslide ground deformation.

The study area is located on Pu-Tun-Pu-Nas river area in Kaohsiung City. I choose 12 susceptibility factors which may affect the occurrence of landslides, and do the correlation analysis to get significant factors. Then using significant factors to build the landslide susceptibility assessment model by logistic regression.

Besides, I use Sentinel-1 SAR imagery to calculate PSInSAR by SNAP and StaMPS software. Then using the ground deformation calculated by PSInSAR to calculate the velocity and doing optimization analysis to get the velocity which has a higher correlation to landslides. Then finding the slope displacement threshold of velocity and using velocity to refine the landslide susceptibility model.

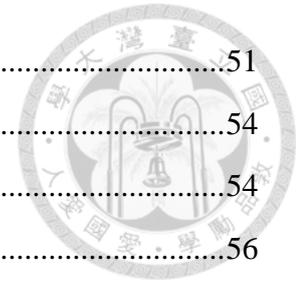
In the results, landslides are affected by many factors was confirmed. I find 8 significant factors – accumulated rainfall of the event, slope, aspect, terrain roughness, profile curvature, planting index, distance to river and rock strength and find the velocity along the slope surface  $v_{slope}$  calculated by 6 months of deformation data has the highest correlation. Then I establish attention value of  $v_{slope}$  is equal to 3.8 mm/6-months and warning value of  $v_{slope}$  is equal to 23.0 mm/6-months and use  $v_{slope}$  to build the susceptibility refinement model. Through using  $v_{slope}$  to refine the landslide susceptibility, the predictive accuracy increases about 3% and the refined model's predictive accuracy is 82%. If we just focus on the units which has PS points to see the contribution of  $v_{slope}$ , the accuracy increment is about 6%, and the accuracy of the refined model is up to 85%. It shows that using  $v_{slope}$  to refine the landslide susceptibility can increase the accuracy of the landslide susceptibility model.

**Keywords:** Susceptibility factors, PSInSAR, Logistic regression, Slope displacement threshold, Landslide susceptibility assessment model

# 目錄

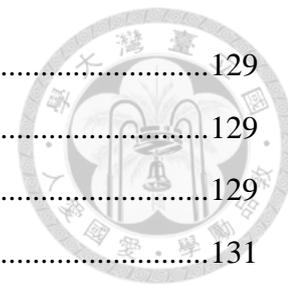


誌謝 .....	I
摘要 .....	II
ABSTRACT .....	III
目錄 .....	IV
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XI
第 1 章 序論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究方法.....	2
1.3 研究架構與流程.....	3
第 2 章 文獻回顧.....	5
2.1 傳統監測方法.....	5
2.1.1 監測方式與儀器.....	5
2.1.2 監測管理值.....	14
2.2 崩塌潛勢評估分析.....	16
2.2.1 測繪單元.....	16
2.2.2 分析方法.....	19
2.3 合成孔徑雷達干涉技術.....	22
2.3.1 DInSAR.....	25
2.3.2 PSInSAR.....	28
2.4 PSInSAR 技術於崩塌研究之應用 .....	32
第 3 章 潛感因子與相關性分析.....	35
3.1 研究區域概述.....	35
3.2 斜坡單元辨識.....	36
3.3 潛感因子分析.....	39
3.3.1 促崩因子-事件累積降雨量 .....	41
3.3.2 地貌因子.....	43
3.3.3 區位因子.....	50



3.3.4	地質因子.....	51
3.4	相關性分析.....	54
3.4.1	Spearman 相關性.....	54
3.4.2	分析結果.....	56
第 4 章	PSInSAR 解算與優化分析.....	65
4.1	PSInSAR 原理.....	65
4.1.1	PS 選點.....	65
4.1.2	相位解纏.....	68
4.1.3	空間相關之誤差估算.....	69
4.2	解算方法.....	70
4.2.1	SNAP.....	70
4.2.2	StaMPS.....	75
4.2.3	GPS 校正.....	79
4.3	優化分析.....	81
4.3.1	選取時間間距分析.....	81
4.3.2	地表變位速度方向分析.....	81
4.3.3	分析結果.....	83
第 5 章	邊坡變位門檻值與崩塌潛勢評估模型.....	91
5.1	邊坡變位門檻值.....	91
5.1.1	分析資料.....	91
5.1.2	門檻值建立.....	99
5.2	崩塌潛勢評估模型.....	102
5.2.1	分析資料.....	102
5.2.2	邏輯斯迴歸.....	107
5.2.3	崩塌潛感值修正.....	109
5.2.4	模型準確性評估.....	114
5.3	模型結果與討論.....	116
5.3.1	邏輯斯迴歸模型.....	116
5.3.2	潛感值修正模型.....	120
5.3.3	模型預測準確性比較.....	124

第 6 章	案例分析與驗證.....	129
6.1	臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例 .....	129
6.1.1	案例概述.....	129
6.1.2	因子分析.....	131
6.1.3	崩塌潛感值分析結果.....	134
6.2	陽金公路邊坡崩塌案例.....	136
6.2.1	案例概述.....	136
6.2.2	因子分析.....	138
6.2.3	崩塌潛感值分析結果.....	142
第 7 章	結論與建議.....	147
7.1	結論.....	147
7.2	建議.....	149
參考文獻	.....	151
口試問答	.....	159
A.	鐘志忠教授.....	159
B.	韓仁毓教授.....	161
C.	王國隆教授.....	163



# 圖目錄



## 第 1 章

圖 1-1、研究流程圖.....4

## 第 2 章

圖 2-1、插入式傾斜儀安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....9

圖 2-2、定置型孔內傾斜儀安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....9

圖 2-3、地表伸縮計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....10

圖 2-4、孔內伸縮計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....10

圖 2-5、地表傾斜計安裝示意圖 (摘自陳德天及蘇苗彬, 2002).....11

圖 2-6、地錨荷重計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....11

圖 2-7、裂縫計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....12

圖 2-8、水位觀測井安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....12

圖 2-9、水壓計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則).....13

圖 2-10、雨量計安裝示意圖 (摘自陳德天及蘇苗彬, 2002).....13

圖 2-11、邊坡崩壞過程各階段示意圖 (摘自廖瑞堂等人, 2013).....15

圖 2-12、臺灣案例之邊坡最大位移速率圖 (摘自廖瑞堂等人, 2013).....15

圖 2-13、網格單元及斜坡單元示意圖 (摘自 Xie et al., 2004).....17

圖 2-14、合成孔徑雷達干涉技術幾何示意圖 (修改自 Zebker et al., 1992)....24

圖 2-15、DInSAR 技術示意圖 (修改自 Chang et al., 2004).....27

圖 2-16、雷達差分干涉技術幾何示意圖 (修改自 Zebker et al., 1994).....27

圖 2-17、相位分布示意圖 (摘自 Hooper et al., 2007) .....29

圖 2-18、應用 PSInSAR 技術監測舊金山灣地區之地表變位速度場 .....29

圖 2-19、應用 PSInSAR 技術監測於柏克萊山丘崩塌之地表變位速度場 .....30

圖 2-20、應用 PSInSAR 技術監測加州長谷地區之火山變位速度 .....30

圖 2-21、應用 PSInSAR 技術監測加州長谷地區之火山變形量時間序列 .....31

圖 2-22、應用 PSInSAR 技術監測加拉巴哥群島阿爾賽多火山之變位速度 ..31

## 第 3 章

圖 3-1、研究區域圖.....35

圖 3-2、斜坡單元示意圖.....37

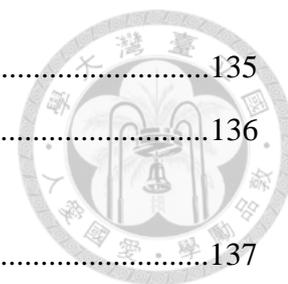
圖 3-3、集水區重疊法示意圖 (修改自 Xie et al., 2004).....	37
圖 3-4、斜坡單元劃分流程圖 (修改自林彥享等人, 2012).....	38
圖 3-5、研究區域斜坡單元成果圖.....	38
圖 3-6、研究區域周圍雨量站.....	43
圖 3-7、3 × 3 單窗示意圖.....	44
圖 3-8、坡向分類圖.....	46
圖 3-9、不同單窗之網格示意圖.....	47
圖 3-10、剖面曲率與坡面關係示意圖.....	48
圖 3-11、區位因子計算示意圖.....	50
圖 3-12、岩體強度分級圖 (摘自中央地質調查所, 2016).....	51
圖 3-13、褶皺示意圖 (摘自臺大地質科學數位典藏博物館).....	52
圖 3-14、順向坡判釋示意圖.....	53
圖 3-15、2015 年崩塌單元.....	59
圖 3-16、環境因子圖 (以 2012 年 DEM 產製).....	60
圖 3-17、顯著因子與崩塌相關性圖.....	62
圖 3-18、2015 年坡向之崩塌比統計圖.....	63
圖 3-19、2015 年岩體強度之崩塌比統計圖.....	63

#### 第 4 章

圖 4-1、相位解纏示意圖.....	68
圖 4-2、雷達影像前處理流程圖.....	73
圖 4-3、Sentinel-1 衛星之雷達影像.....	73
圖 4-4、刪除條帶接縫 (deburst) 後之雷達影像.....	74
圖 4-5、干涉圖.....	74
圖 4-6、解纏後相位時間序列示意圖.....	77
圖 4-7、地表變形速度計算示意圖.....	78
圖 4-8、GPS 校正流程圖.....	80
圖 4-9、 $v_{LOS}$ 及 $v_{slope}$ 幾何示意圖.....	82
圖 4-10、2017 年不同時間間距之衛星視線方向上的地表變位速度 $v_{LOS}$ .....	86
圖 4-11、2017 年不同時間間距之沿坡面方向上的地表變位速度 $v_{slope}$ .....	88

圖 4-12、優化分析結果相關性圖 (以 2017 年資料為例).....	90
第 5 章	
圖 5-1、崩塌單元圖.....	94
圖 5-2、雷達影像覆蓋範圍示意圖.....	96
圖 5-3、地表變位速度 $v_{slope}$ 圖.....	97
圖 5-4、崩塌單元之 $v_{slope}$ 散布圖.....	100
圖 5-5、崩塌單元之 $v_{slope}$ 直方圖.....	101
圖 5-6、監測管理值比較圖.....	101
圖 5-7、潛感因子圖.....	104
圖 5-8、邏輯斯分布函數曲線圖.....	109
圖 5-9、基因演算法運算步驟.....	112
圖 5-10、輪盤法示意圖.....	113
圖 5-11、均勻交配法示意圖.....	113
圖 5-12、突變示意圖.....	113
圖 5-13、崩塌潛感圖 (邏輯斯迴歸模型).....	118
圖 5-14、崩塌潛勢圓餅圖 (邏輯斯迴歸模型).....	118
圖 5-15、崩塌預測結果圖 (邏輯斯迴歸模型).....	119
圖 5-16、基因演算法計算結果圖.....	121
圖 5-17、崩塌潛感圖 (潛感值修正模型).....	122
圖 5-18、崩塌潛勢圓餅圖 (潛感值修正模型).....	123
圖 5-19、崩塌預測結果圖 (潛感值修正模型).....	123
圖 5-20、有 PS 點單元之崩塌預測結果圖 (邏輯斯迴歸模型).....	127
圖 5-21、有 PS 點單元之崩塌預測結果圖 (潛感值修正模型).....	127
第 6 章	
圖 6-1、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌災害位置圖.....	129
圖 6-2、臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡崩塌災害現場照片.....	130
圖 6-3、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例潛感因子圖.....	132
圖 6-4、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例 $v_{slope}$ 圖.....	133
圖 6-5、臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡崩塌潛感圖	

	(底圖為 Google Earth).....	135
圖 6-6、	陽金公路邊坡崩塌災害位置圖.....	136
圖 6-7、	陽金公路 8K+335 處之下邊坡崩塌災害現場照片 (摘自新北市政府工務局).....	137
圖 6-8、	陽金公路 11K 處之上邊坡崩塌災害現場照片 (摘自臺北市政府工務局).....	137
圖 6-9、	陽金公路邊坡崩塌案例潛感因子圖.....	139
圖 6-10、	陽金公路邊坡崩塌案例 $v_{slope}$ 圖.....	141
圖 6-11、	陽金公路 8K+335 處之下邊坡崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth).....	144
圖 6-12、	陽金公路 11K 處之上邊坡崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth).....	145
圖 6-13、	陽金公路所經斜坡單元崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth).....	146



# 表目錄



## 第 2 章

表 2-1、常見的邊坡滑動監測儀器 (修改自廖瑞堂等人, 2013).....	8
表 2-2、監測計畫執行初期之位移監測管理值建議 (修改自廖瑞堂等人, 2013).....	14
表 2-3、不同測繪單元之優缺點比較表 (修改自 Guzzetti, 1999).....	18
表 2-4、崩塌潛勢評估分析方法比較表 (修改自中央地質調查所, 2009).....	21

## 第 3 章

表 3-1、研究區域斜坡單元統計表.....	36
表 3-2、潛感因子統整表.....	40
表 3-3、2015 年至 2018 年上半年降雨量最多之降雨災害事件統整表.....	42
表 3-4、相關係數之關聯程度分級表.....	55
表 3-5、相關性分析崩塌及環境因子資料來源表.....	57
表 3-6、環境因子與崩塌相關性表 (以 2015 年資料為例).....	58

## 第 4 章

表 4-1、SNAP 工具箱功能表.....	72
表 4-2、StaMPS 重要參數表.....	76
表 4-3、Sentinel-1 衛星基本資訊及角度參數表.....	84
表 4-4、優化分析雷達影像資訊表.....	84
表 4-5、優化分析地表變位速度計算時間表.....	85
表 4-6、優化分析結果相關性表 (以 2017 年資料為例).....	85

## 第 5 章

表 5-1、各年度雷達影像資訊表.....	92
表 5-2、 $v_{slope}$ 計算資料時間表.....	93
表 5-3、監測管理值比較表.....	100
表 5-4、各年度潛感因子資料來源表.....	103
表 5-5、分類誤差矩陣示意表.....	115
表 5-6、崩塌預測誤差矩陣 (邏輯斯迴歸模型).....	117
表 5-7、崩塌潛感值修正係數表.....	120

表 5-8、崩塌預測誤差矩陣 (潛感值修正模型).....	122
表 5-9、崩塌預測結果比較表.....	124
表 5-10、有 PS 點單元之崩塌預測誤差矩陣 (邏輯斯迴歸模型).....	125
表 5-11、有 PS 點單元之崩塌預測誤差矩陣 (潛感值修正模型).....	126
表 5-12、有 PS 點單元之崩塌預測結果比較表 .....	126

第 6 章

表 6-1、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例潛感因子及地表變位速度資料來源表 .....	131
表 6-2、臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值表 .....	134
表 6-3、陽金公路邊坡崩塌災害潛感因子資料及地表變位速度來源表.....	139
表 6-4、陽金公路案例兩處崩塌邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值表.....	143

# 第1章 序論



## 1.1 研究動機與目的

臺灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊的板塊交界帶，造山運動頻繁，造就了臺灣複雜的地形及地質條件，依據行政院農委會水土保持局之統計 (2021)，臺灣山坡地面積約為 2,683,770 公頃，共佔臺灣土地總面積的 74%；臺灣亦位於副熱帶季風氣候區，平均年雨量高達 2,500 毫米，且降雨量在時間與空間上的分布極不均勻，多集中於每年五、六月之梅雨事件及七至九月之颱風事件；基於地形、地質及氣候等條件，使得臺灣山區頻繁有崩塌事件發生，時常造成嚴重的災害，危及人民的財產及生命安全。因此，崩塌事件的監測、預警及預測在臺灣山區邊坡是重要且不可或缺，為山坡地災害防治之重要課題。

傳統邊坡監測儀器種類繁多，依據不同的監測目的、破壞型態可選用不同的監測儀器，雖然這些監測儀器能直接且準確地監測出山坡地的變形資料，但受儀器布設之數量及位置限制，僅能針對特定邊坡進行監測，有著無法進行大範圍監測的缺點。而近年來，永久散射體雷達干涉技術 (PSInSAR) 因有著大範圍、高精度、不受天氣影響及良好的取樣間距等優點，被廣泛運用於地表變形監測，已成功被應用於監測地層下陷、火山運動、邊坡滑移等案例。利用 PSInSAR 技術進行臺灣山區邊坡之地表變形監測，應可以彌補傳統監測儀器之不足。

而在崩塌潛勢評估及預測的研究中，通常結合多種可能影響邊坡崩塌的促崩因子 (如降雨量及地震等) 及環境因子 (如水文因子、地形因子、區位因子及地質因子等) 進行綜合評估，建立崩塌潛勢評估模型，藉由分析各邊坡之崩塌潛感值，預測邊坡發生崩塌的可能性。然而，在考量的因子中，除促崩因子外，均為如坡度、坡向等描述邊坡特性之靜態因子，缺乏能描述邊坡現況之動態因子。藉由 PSInSAR 技術，可以測得崩塌前的地表變形行為，將其作為動態因子納入模型考量，進而更精確地描述邊坡的崩塌潛感值。

綜合上述，本研究具兩個目的，一、利用 PSInSAR 技術之監測資料與歷史崩塌資料，透過統計分析，建立在 PSInSAR 監測下，地表變位速度之邊坡變位門檻值；二、建立崩塌潛勢評估模型，並利用 PSInSAR 技術之監測資料對崩塌潛感值進行動態修正，使崩塌潛感值更精確，提升模型預測崩塌的準確性。



## 1.2 研究方法

本研究選擇布唐布納斯溪沿岸邊坡地區作為研究區域，以斜坡單元為測繪單元進行分析。首先分析研究區域內的 12 種潛感因子，利用 Spearman 相關性分析各潛感因子與崩塌之相關性，篩選出與崩塌具顯著相關的顯著因子；並以 PSInSAR 技術測得區域內的地表變形，透過優化分析，找出最能偵測崩塌前地表變形行為的時間間距及速度方向之條件，以計算地表變位速度。

而後利用 2015 年至 2017 年共三年資料，以統計方法統計發生崩塌前 PSInSAR 測得之地表變位速度，制定地表變位速度之邊坡變位門檻值；並利用三年資料以邏輯斯迴歸訓練崩塌潛勢評估模型，分析研究區域內的崩塌潛感值，再以 PSInSAR 所測得之地表變位速度透過基因演算法找出最佳的修正係數，以修正崩塌潛感值，進而提升模型的預測成果。並利用 2018 年的資料驗證崩塌潛勢評估模型的崩塌預測準確性，討論以 PSInSAR 所測得之地表變位速度修正崩塌潛感值對崩塌預測結果之影響及效益。

本研究亦進一步挑選瑞芳-猴硐崩塌及陽金公路崩塌兩個實際崩塌案例進行分析，驗證所建立之崩塌潛勢評估模型是否能預測到崩塌發生。並比較發生崩塌之邊坡的崩塌潛感值於修正前、後之差異，討論以 PSInSAR 所測得之地表變位速度修正崩塌潛感值於兩個案例分析中之影響及效益。



## 1.3 研究架構與流程

本研究之研究流程圖如圖 1-1 所示，論文內容共分為七個章節，各章節之內容簡述如下：

### 第1章 序論

說明本研究之動機、目的、方法及研究架構與流程。

### 第2章 文獻回顧

首先介紹傳統監測方法，包含各種監測儀器及建議之監測管理值，而後統整與比較崩塌潛勢評估分析時不同測繪單元及分析方法之優缺點，並介紹合成孔徑雷達干涉技術的原理及發展，最後整理過去 PSInSAR 技術於崩塌研究之應用。

### 第3章 潛感因子與相關性分析

首先簡介本研究所選之研究區域及單元的分析方法與辨識成果，而後介紹各潛感因子之分析方法，包含促崩因子、地貌因子、區位因子及地質因子，並探討各潛感因子與崩塌間之相關性。

### 第4章 PSInSAR 解算與優化分析

首先針對 PSInSAR 技術之原理進行介紹，而後說明本研究解算 PSInSAR 時所使用之軟體及解算流程，包含 SNAP 軟體、StaMPS 軟體及 GPS 校正，並對 PSInSAR 解算之地表變位速度進行優化分析，探討最適合分析崩塌的地表變位速度之條件。

### 第5章 邊坡變位門檻值與崩塌潛勢評估模型

首先介紹運用統計分析方法，制定基於 PSInSAR 之地表變位速度的邊坡變位門檻值，而後介紹崩塌潛勢評估模型的分析方法及利用 PSInSAR 速度修正崩塌潛感值之方法，最後對崩塌潛感值修正前、後之成果進行驗證及比較，並討論利用 PSInSAR 速度進行崩塌潛感值修正之效益。

### 第6章 案例分析與驗證

針對臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡及陽金公路邊坡之三起崩塌案例的地理位置及概況進行介紹，並利用本研究建立之崩塌潛勢評估模型分析當地的崩塌潛感值，以驗證模型之預測準確性，並比較及討論崩塌潛感值修正於案例分析中之影響及效益。

### 第7章 結論與建議

針對本研究之成果進行歸納及統整，提出結論，並對未來研究方向提供可行之建議。

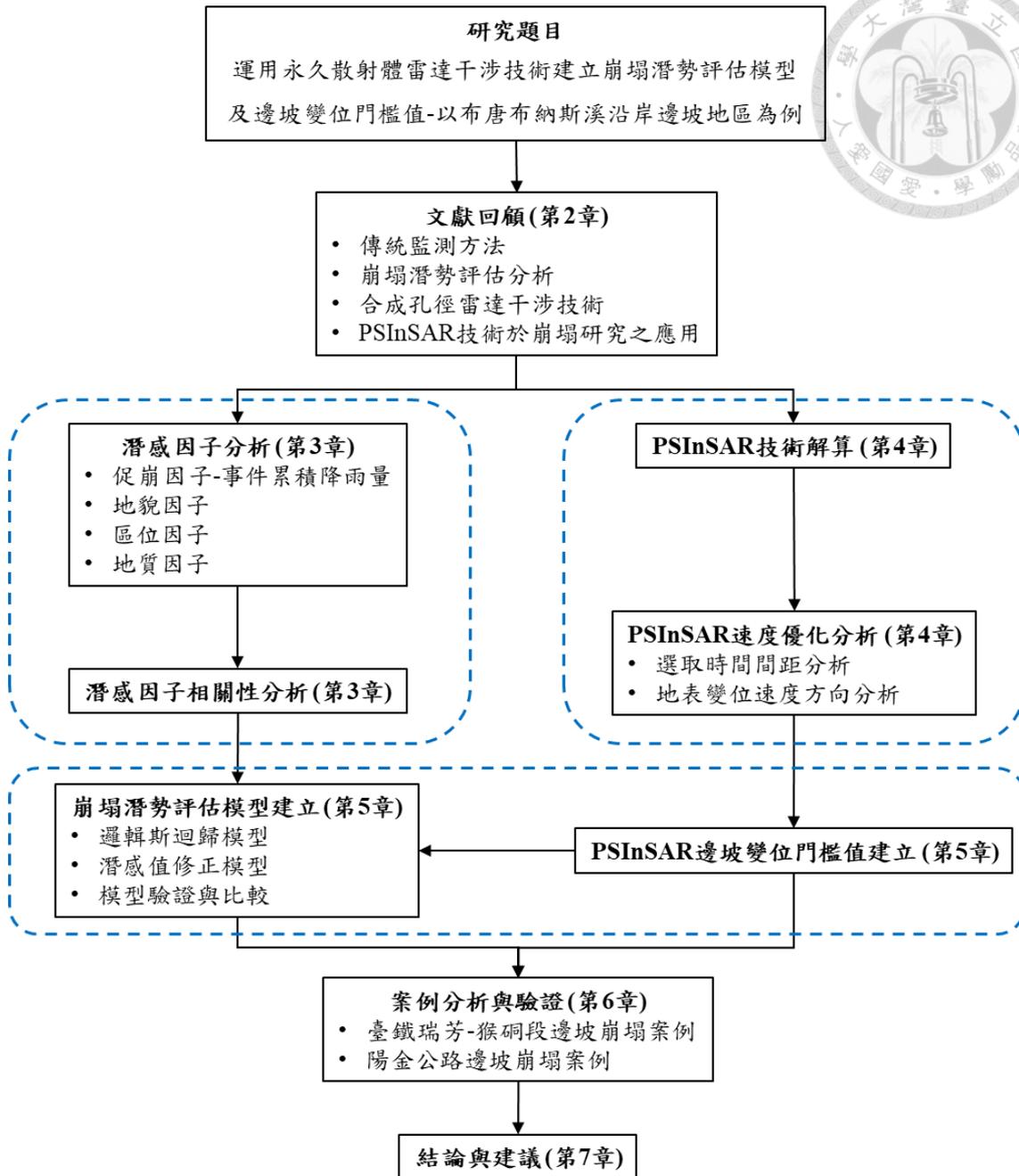


圖 1-1、研究流程圖

## 第2章 文獻回顧



本章介紹與本研究相關之國內外文獻資料，分為四個部分，首先介紹國內邊坡傳統監測方法及建議之監測管理值；第二部分介紹建立崩塌潛勢評估分析時，不同的測繪單元及分析方法，並比較其優缺點；第三部分介紹合成孔徑雷達差分干涉技術及其衍生而成的 DInSAR 技術與 PSInSAR 技術之原理及發展；最後介紹國內外應用 PSInSAR 技術於崩塌分析之研究成果。

### 2.1 傳統監測方法

臺灣位於環太平洋地震帶，造成臺灣的地質與地質條件複雜，且地震活動頻繁；又臺灣亦位於副熱帶季風氣候區，也造成臺灣時常有豪雨或颱風等天災發生。使得臺灣山坡地時常有崩塌發生，這些崩塌對山坡地的環境、交通、居民安全時常造成嚴重且不可逆的危害。因此，邊坡的變形監測對臺灣的山坡地而言是非常重要的，臺灣傳統的監測方法如以下介紹。

#### 2.1.1 監測方式與儀器

根據山坡地監測準則 (TGS-SLOPEM106)，臺灣傳統的監測系統依量測方式可分為三種，人工手動方式、半自動方式及全自動方式，可綜合考量邊坡的危害性、經費及現地環境等因素，選擇適宜的監測方式。一般而言，危害性越高的邊坡，所需的自動化要求越高。三種監測方式的說明如下：

1. 人工手動方式：固定時間頻率，以人工攜帶量測儀器至現場手動量測、紀錄資料，再將成果攜回以進行後續分析。
2. 半自動方式：在現地設置資料擷取器，其會以固定頻率自動量測、紀錄資料，再以人工至現場下載監測資料，再將成果攜回以進行後續分析。
3. 全自動方式：在現地設置資料擷取器，從量測、紀錄、傳輸、整理、繪圖等分析均由監測儀器自動化處理，管理人員可於非現地地點，就可即時了解現地監測成果。

而邊坡的監測儀器種類繁多，包含量測氣候、水文、變形及應力等各類儀器，可根據規劃時研判邊坡可能發生的災害類型，設計欲量測的物理量，來選擇不同的監測儀器。

根據廖瑞堂等人(2013)，一般針對邊坡滑動常見的監測儀器有傾斜觀測管 (Inclinometer)、地表伸縮計 (Surface Extensometer)、地表傾斜計 (Surface Tiltmeter) 及裂縫計 (Crackmeter) 等儀器，詳見表 2-1。依據山坡地監測準則，各儀器的原理及功能簡述如下：

#### 1. 插入式傾斜儀 (Inclinometer)

插入式傾斜儀之安裝目的為監測邊坡內各深度地層之水平位移，其成果可用以分析邊坡的滑動速率、滑動深度等。其原理為在地表鑽孔後，於孔內設置傾斜觀測管，以人工手動方式將插入式傾斜儀放入管內，每 50 公分量測一次其傾斜角度，透過其角度變化推算各深度地層相對於孔底不動點之水平位移，安裝方式如圖 2-1。插入式傾斜儀為實務上最常用且有效的監測儀器，但因其需以人工手動方式進行監測，故難以取得即時監測資料。

#### 2. 定置型孔內傾斜儀 (In-place Inclinometer)

定置型孔內傾斜儀之安裝目的為監測邊坡內某深度範圍內地層之水平位移。其原理是在地表鑽孔後，於孔內設置傾斜觀測管，將定置型孔內傾斜儀固定於管內欲量測之深度，以達自動監測的目的，透過量測其傾斜角度的變化推算該深度地層之水平位移，安裝方式如圖 2-2。定置型孔內傾斜儀之安裝間距會影響其量測經度，故量測經度較插入式傾斜儀差，但優點為可自動監測。

#### 3. 地表伸縮計 (Surface Extensometer)

地表伸縮計之安裝目的為監測地表兩點間之相對位移。原理為將地表伸縮計一端設置於滑動塊體上，另一端設置於不動之地表上，當塊體滑動時，地表伸縮計之鋼索會受伸張作用，量測其伸張量可求得兩點間之相對位移，安裝方式如圖 2-3。

#### 4. 孔內伸縮計 (Borehole Extensometer)

孔內伸縮計之安裝目的為監測邊坡滑動所產生之相對位移。原理為將孔內伸縮計一端設置於滑動層下方之錨定區，另一端設置於地表，當邊坡滑動時，鋼腱會因變形而在頭部產生相對位移，藉由量測鋼腱頭部之相對位移，透過合理的換算可推得邊坡之相對位移，安裝方式如圖 2-4。可用以克服地表伸縮計常兩點均坐落於同一滑動塊體上之問題。



#### 5. 地表傾斜計 (Surface Tiltmeter)

地表傾斜計之安裝目的為監測地表傾斜方向及角度之變化。原理為將地表傾斜計裝設於構造物表面或埋設於淺層地面，利用內部的雙軸水準儀器量測地表傾斜之方向及角度，安裝方式如圖 2-5。

#### 6. 地錨荷重計 (Anchor Load Cell)

地錨荷重計之安裝目的為監測地錨於完工後之預力變化，以確保地錨能發揮設計時之預期功能。使用上會將地錨荷重計安裝於地錨之錨頭處，由其監測值了解地錨預力變化情形，並可用以推斷地錨功能及邊坡變形行為，安裝方式如圖 2-6。

#### 7. 裂縫計 (Crackmeter)

裂縫計之安裝目的為監測邊坡上構造物裂縫寬度之變化。原理為將裂縫計安裝於構造物裂縫兩端，裂縫計會因裂縫寬度發生變化而受拉伸作用，量測其拉伸量即可求得裂縫之寬度變化，安裝方式如圖 2-7。

#### 8. 水位觀測井 (Water-level Observation Well)

水位觀測井之安裝目的為監測邊坡之地下水位及其變化。原理為在地面鑽孔後，插入開孔之 PVC 材質豎管，使地下水為平衡水壓而流入管中，待水壓平衡後，管內之水位面即為地下水位，再利用水位計量測該邊坡地下水位深度，安裝方式如圖 2-8。

#### 9. 水壓計 (Piezometer)

水壓計之安裝目的為監測邊坡於某深度範圍內之孔隙水壓力及其變化。原理為在地面鑽孔後，將水壓計放置於欲監測深度，水壓計周圍以透水性材料回填，監測深度範圍上、下方以皂土阻絕封層，其餘位置以一般回填材填滿，如此便可監測邊坡於該深度之孔隙水壓力，安裝方式如圖 2-9。

#### 10. 雨量計 (Rain Gauge)

雨量計之安裝目的為監測邊坡於某段時間內之降雨量。原理為將雨量計安裝於選定位置，於降雨時，利用雨量計之盛雨口盛接雨水，直接量測該段時間內之降雨量，安裝方式如圖 2-10。一般而言，雨量計之安裝位置，應選擇盛雨口以上以 45° 延伸的範圍內，無任何遮蔽物阻礙之空曠地點，才能使雨量計之監測成果具代表性。

表 2-1、常見的邊坡滑動監測儀器 (修改自廖瑞堂等人, 2013)

監測儀器名稱	量測之物理量	適用性	監測方式
插入式傾斜儀 (Inclinometer)	邊坡水平位移量	◎	M
定置型孔內傾斜儀 (In-place Inclinometer)	邊坡水平位移量	○	A
地表伸縮計 (Surface Extensometer)	地表相對位移量	◎	M、A
孔內伸縮計 (Borehole Extensometer)	邊坡相對位移量	○	A
地表傾斜計 (Surface Tiltmeter)	地表傾斜量	◎	M、A
地錨荷重計 (Anchor Load Cell)	地錨預力	◎	M、A
裂縫計 (Crackmeter)	裂縫寬度變化量	○	M、A
水位觀測井 (Water-level Observation Well)	地下水位	◎	M、A
水壓計 (Piezometer)	地下水壓力	◎	M、A
雨量計 (Rain Gauge)	降雨量	◎	A

◎：經常使用 ○：偶爾使用 M：手動監測 A：自動監測

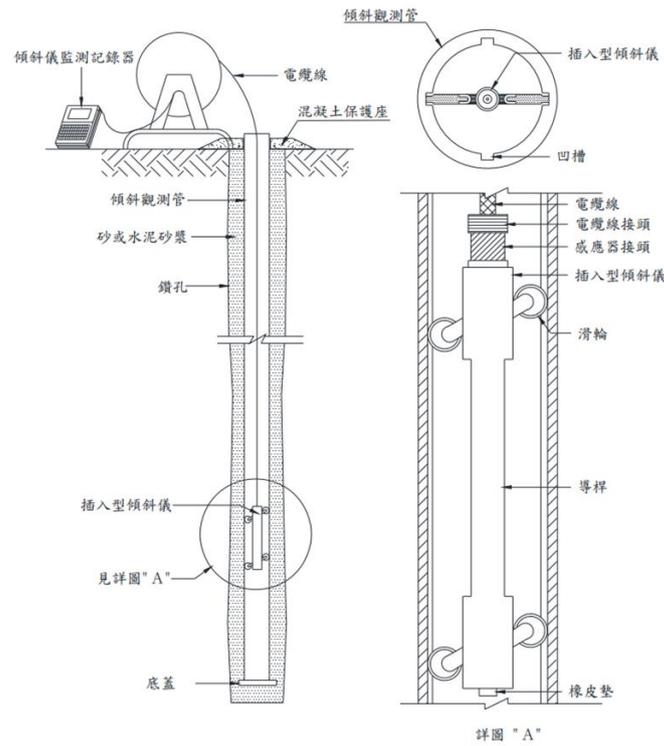


圖 2-1、插入式傾斜儀安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

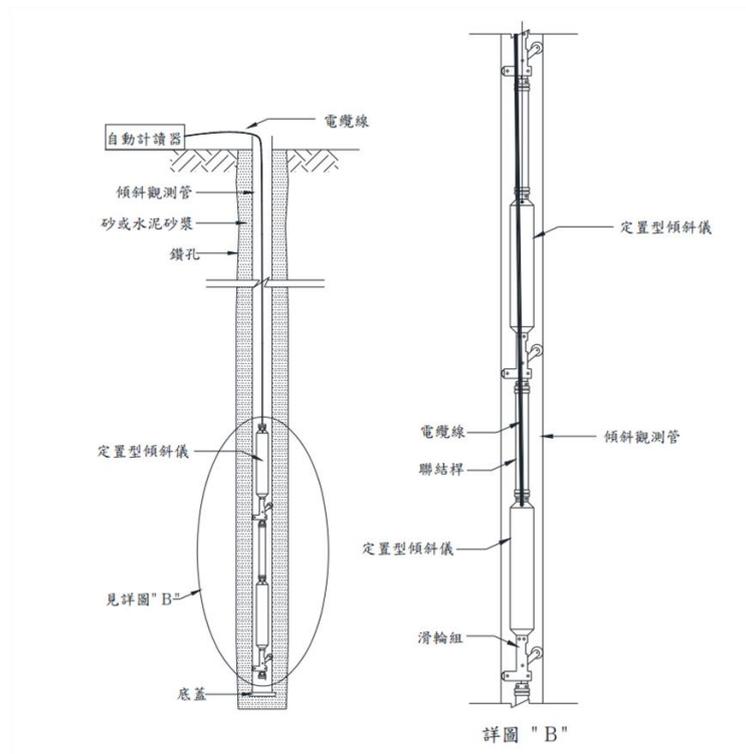


圖 2-2、定置型孔內傾斜儀安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

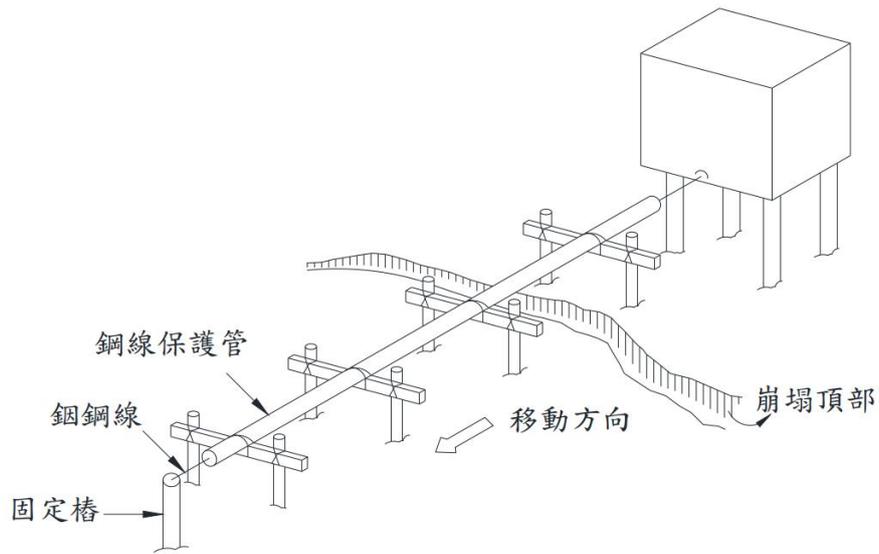


圖 2-3、地表伸縮計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

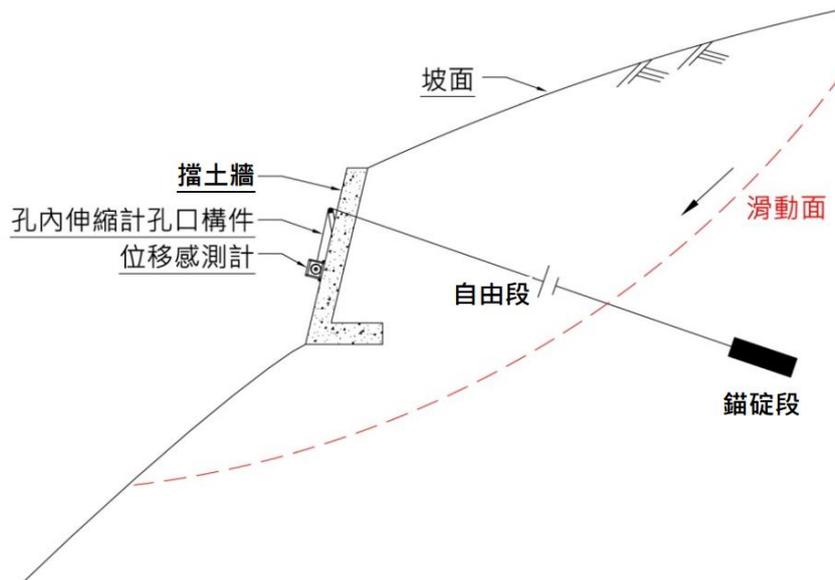


圖 2-4、孔內伸縮計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

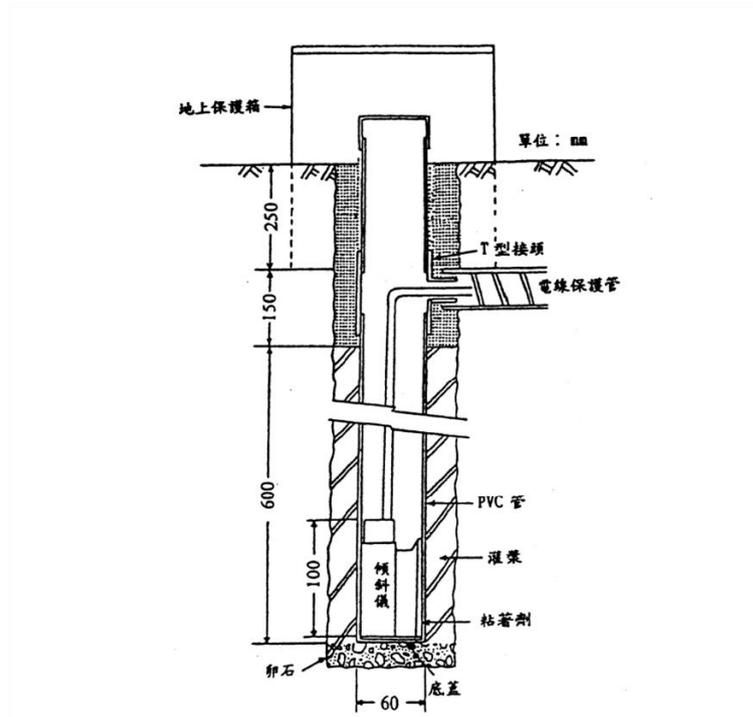


圖 2-5、地表傾斜計安裝示意圖 (摘自陳德天及蘇苗彬, 2002)

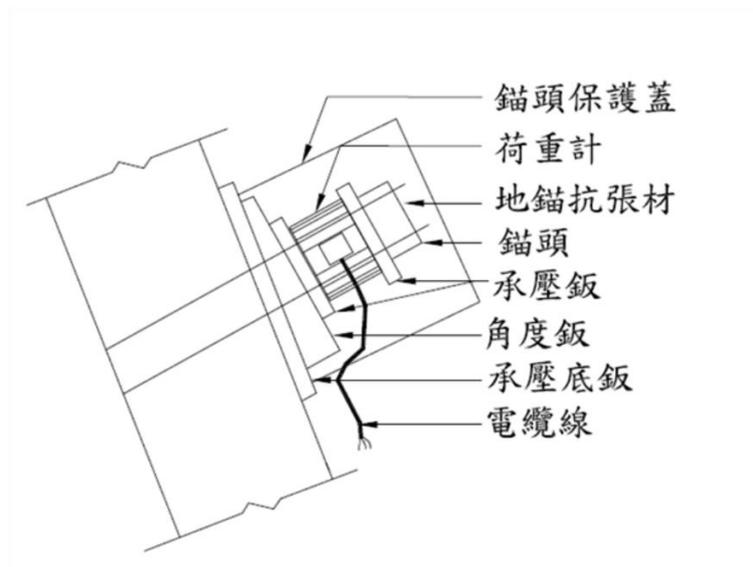


圖 2-6、地錨荷重計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

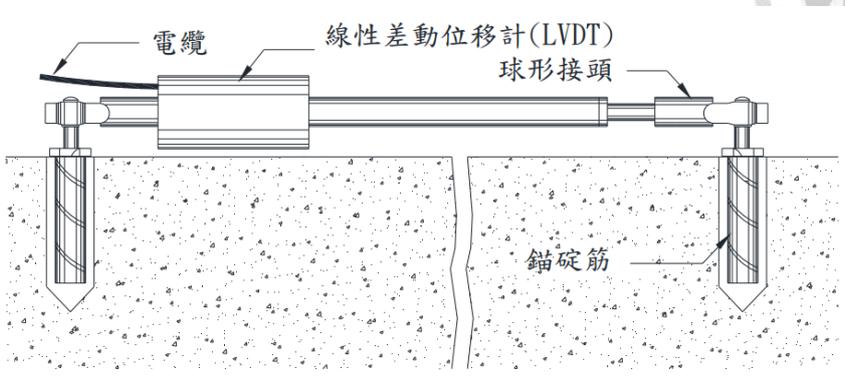


圖 2-7、裂縫計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

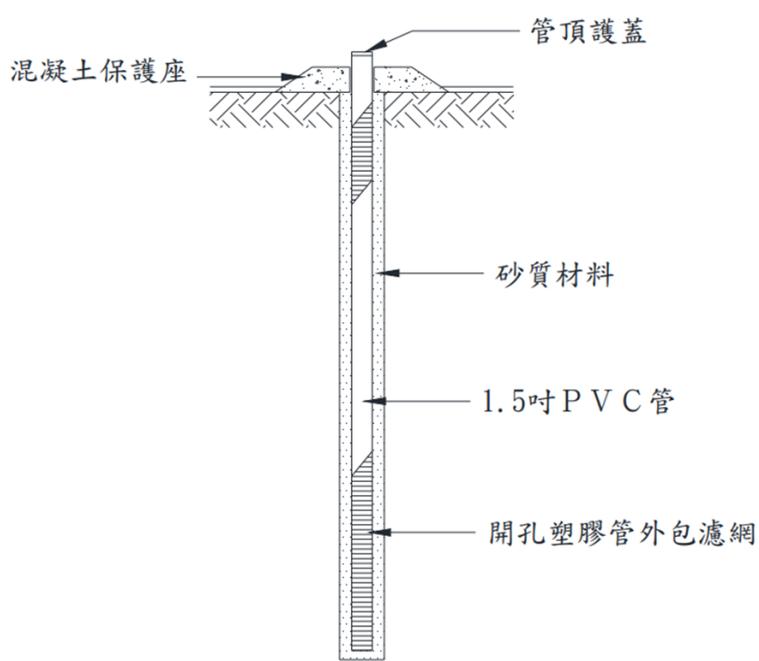


圖 2-8、水位觀測井安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

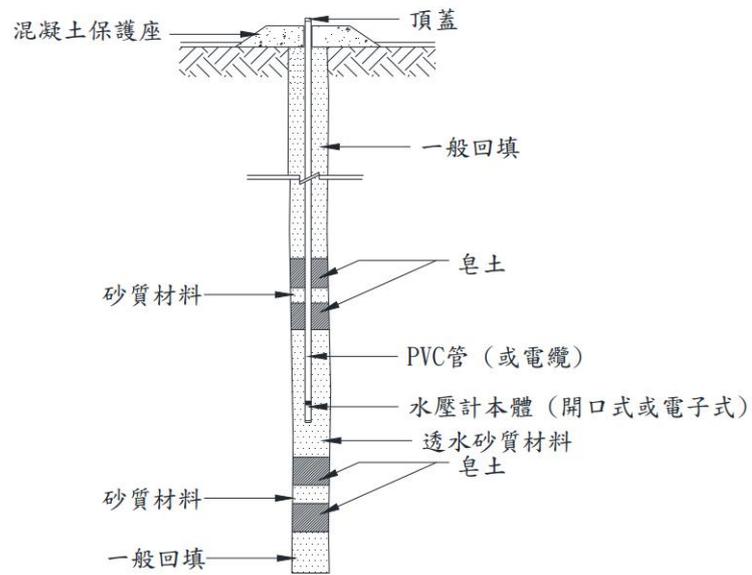


圖 2-9、水壓計安裝示意圖 (摘自山坡地監測準則)

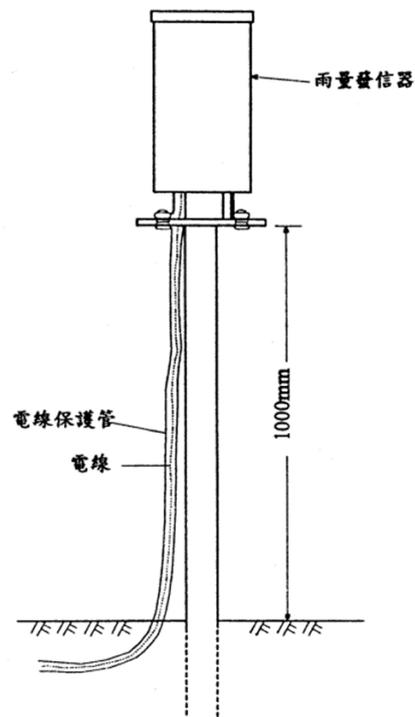


圖 2-10、雨量計安裝示意圖 (摘自陳德天及蘇苗彬，2002)



## 2.1.2 監測管理值

根據廖瑞堂等人 (2013) 之研究，他們蒐集臺灣 12 處及國外 9 處之邊坡案例，觀察各崩塌案例邊坡從滑動到發生崩壞之過程，統整後發現邊坡位移行為可分為三個階段，如圖 2-11 所示。

1. 一次位移階段：邊坡位移走走停停的黏彈性變形之階段，又稱初始潛變。
2. 二次位移階段：邊坡等速率位移的黏性流動之階段，又稱定速率潛變。
3. 三次位移階段：邊坡位移加速至破壞之階段，又稱加速潛變。

根據邊坡變形行為的三個階段，統整臺灣的案例經驗，針對國內深層滑動及回填土滑動邊坡訂定注意值、警戒值及行動值，如圖 2-12，提出監測管理值建議，使臺灣監測單位在監測計畫執行初期，缺乏前期監測成果時，可作為監測管理之參考依據，現已被大地工程學會編入於山坡地監測準則中，如表 2-2。

表 2-2、監測計畫執行初期之位移監測管理值建議 (修改自廖瑞堂等人，2013)

滑動型態	深層滑動或填土邊坡		
	注意值	警戒值	行動值
管理值建議	2 mm/month	0.5 mm/day	10 mm/day
代表意義	邊坡已開始滑移或走走停停緩慢移動	邊坡等速率滑移中	邊坡滑移速率加速，瀕臨崩壞
監測對策建議	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 檢查監測系統有無異常</li> <li>2. 加強目視檢視及監測</li> </ol>	加強自動化監測頻率	採嚴密之監測頻率及回傳
因應對策建議	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 進行邊坡穩定調查及評估</li> <li>2. 提出補強改善規劃</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研擬緊急應變對策</li> <li>2. 進行邊坡緊急補強</li> <li>3. 長期補修同時進行</li> </ol>	人員車輛必須疏散撤離

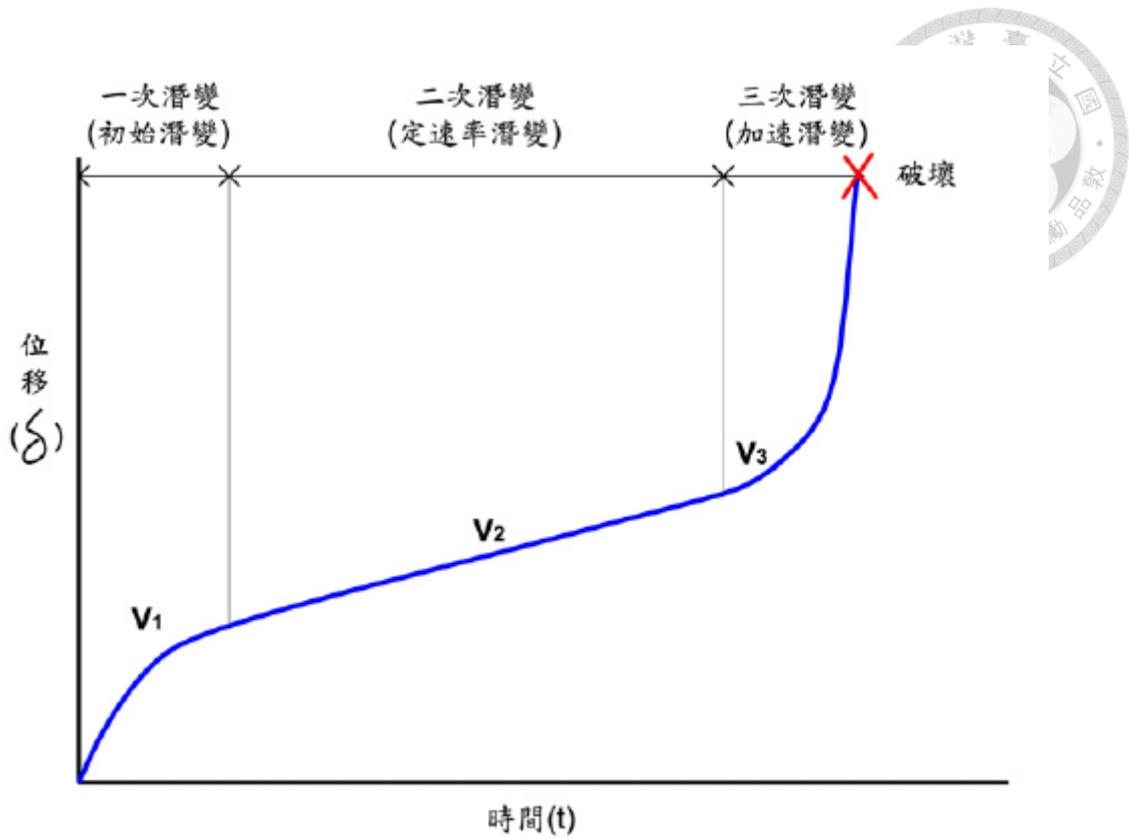


圖 2-11、邊坡崩壞過程各階段示意圖 (摘自廖瑞堂等人, 2013)

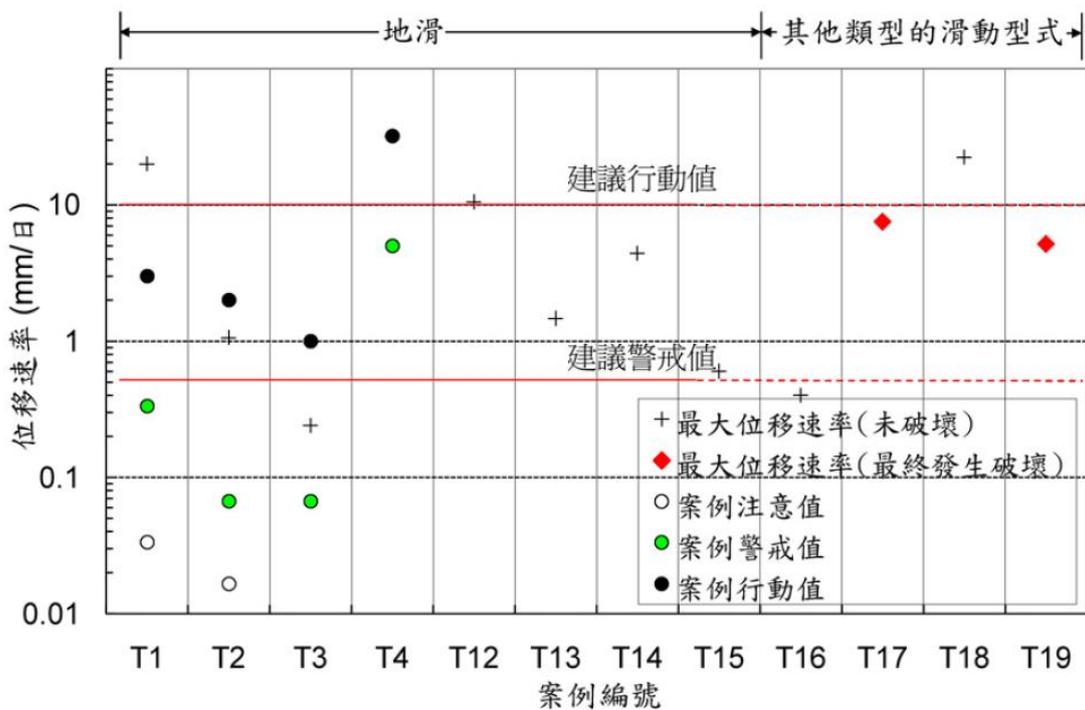


圖 2-12、臺灣案例之邊坡最大位移速率圖 (摘自廖瑞堂等人, 2013)



## 2.2 崩塌潛勢評估分析

崩塌潛勢評估分析為結合地形、區位、地質及水文等因子，找出一組可以區別崩塌發生的因子組合，以這些因子建立崩塌潛勢評估模型，以計算崩塌潛感值及繪製崩塌潛感圖。藉由了解各邊坡的崩塌潛感值，可應用於工程規劃、選址及防災治理等。崩塌潛勢評估模型建立時，需先選擇欲使用的測繪單元及分析方法，根據所選擇的測繪單元及分析方法之不同，會影響崩塌潛勢評估模型的品質，進而影響崩塌潛感值之分析成果。以下針對不同的測繪單元及分析方法進行介紹。

### 2.2.1 測繪單元

在研究分析中，測繪單元 (mapping unit) 的選擇會對其結果的品質造成影響，選擇適合的測繪單元，對研究的成果有著正向的幫助。根據 Guzzetti et al. (1999)，測繪單元可分為五種，說明如下。各測繪單元均有著不同的適用時機及優點，其比較統整如表 2-3。

1. 網格單元 (grid cells)：網格單元受以網格為基礎的地理資訊系統 (GIS) 使用者喜愛。將區域劃分為所定義大小的等大正方形，即為網格單元 (Carrara, 1983; Bernknopf et al., 1988; Pike, 1988; Van Westen, 1993, 1994; Mark and Ellen, 1995)。
2. 地域單元 (terrain units)：地域單元以土地系統分類方法為基礎，利用自然環境中，物質隨時間會有狀態的改變，其相互作用會產生之邊界繪製。地域單元能反應出地貌及地質之差異，亦受許多地形學家青睞而廣泛應用於土地資源調查 (Cooke and Doornkamp, 1974; Speight, 1997; Verstappen, 1983; Burnett et al., 1985; Meijerink, 1988; Hansen et al., 1995)。
3. 特別條件單元 (unique-condition units)：特別條件單元藉由將每個邊坡中不穩定因子分類，並選出最具影響性之類別，將這些類別套疊後，將同樣性質的區域 (特別條件) 劃分而成的測繪單元。根據特別條件的數量、大小及性質等標準可再用以分類輸入的因子 (Bonham-Carter, 1994; Chung et al., 1995)。

4. 斜坡單元 (slope units)：斜坡單元最初為利用地理資訊系統 (GIS) 所自動分割而來，其概念為分割出排水路徑與分水嶺間的集水區 (Carrara,1988; Carrara et al., 1991)。根據過去對不同類型的崩塌調查，其範圍均能對應子集水區或斜坡單元邊界。
5. 地貌單元 (topographic units)：地貌單元是由斜坡單元依水文、地形及岩性等因子，進一步劃分而成的單元 (O'Loughlin, 1986)，其單元內部的特性會更為均質。

目前於坡地災害分析中，最普遍被使用的測繪單元為網格單元及斜坡單元，兩種單元劃分之比較如圖 2-13。左圖為網格單元，為大小一致的正方形單元，各單元邊界與地形特徵無關；右圖為斜坡單元，各單元之邊界與地形、地貌特徵相互吻合，可代表邊坡的特性。

而根據 Guzzetti et al. (1999) 之研究，其使用判別分析法比較五種不同測繪單元對於崩塌潛勢分析之效果，其結果顯示斜坡單元最適合使用於崩塌潛勢之研究。

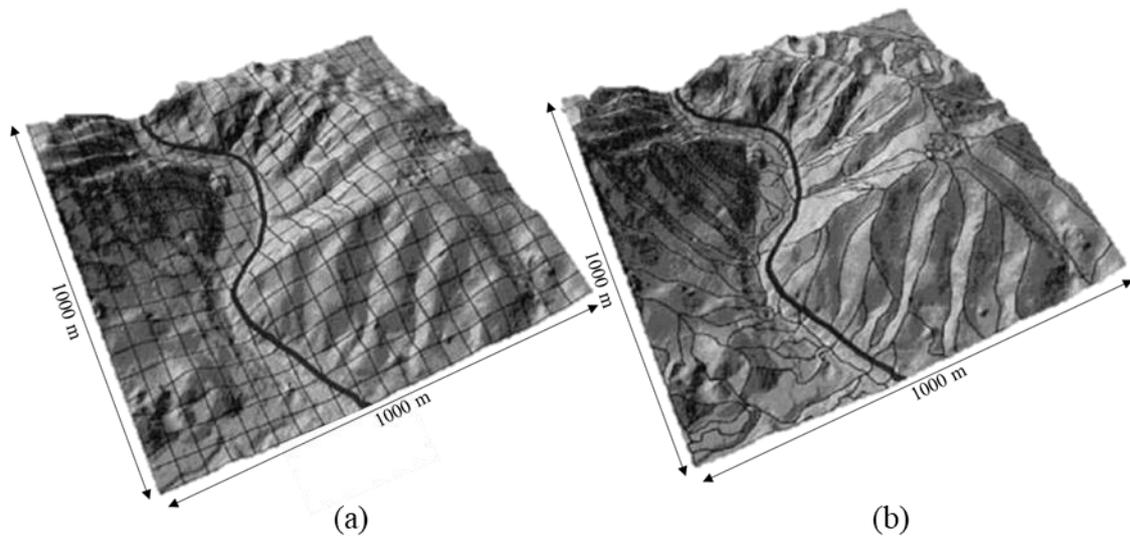


圖 2-13、網格單元及斜坡單元示意圖 (摘自 Xie et al., 2004)

(a)網格單元；(b)斜坡單元

表 2-3、不同測繪單元之優缺點比較表 (修改自 Guzzetti, 1999)

測繪單元	優點	缺點
網格單元 (grid cells)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 結構簡單，易使用</li> <li>2. 製作簡單快速，大小一致</li> <li>3. 可依使用者需求決定網格大小</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 無法詳細呈現連續之地形面</li> <li>2. 電腦需有足夠記憶體及處理速度，才能處理廣域及大量的分析單元</li> </ol>
地域單元 (terrain units)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 為土地系統劃分的基礎</li> <li>2. 適用於土地資源的調查</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 較具主觀性</li> <li>2. 較適合小比例尺有限範圍的評估</li> </ol>
特別條件單元 (unique-condition units)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 特別適用於向量型態的資料</li> <li>2. 易懂且易上手</li> </ol>	<p>易產生大量的測繪單元，導致分析困難</p>
斜坡單元 (slope units)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 所得之參數能代表整個單元</li> <li>2. 較具地形上的連續意義，適用於崩塌潛勢的研究</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 小型岩屑崩塌難以呈現</li> <li>2. 流域界線不一定符合地貌、地質或土地利用分界</li> </ol>
地貌單元 (topographic units)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 單元內地形及地質特性皆相近</li> <li>2. 單元間特性有所區別</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 需以斜坡單元為基礎，進一步依水文、地形及岩性等因子劃分出更均質的單元</li> <li>2. 需大量時間及精確的地質資料，僅能針對小範圍執行</li> </ol>



## 2.2.2 分析方法

根據過去的文獻，崩塌潛勢評估分析之方法可分為兩大類-定性法及定量法 (Guzzetti et al., 1999；李錫堤及黃健政，2005)。

定性法通常為缺乏歷史資料佐證之狀況下進行，依靠專家的經驗及判斷為依據進行預測的方法。又可分為地形判釋法及專家評分法兩種，但因其有著需要專家靠經驗判斷評分，使所得結果不夠客觀，且難以比較與更新等缺點，故在近年來的研究中已較少被使用。

定量法是在蒐集充足的歷史資料，量化後利用資料建立模型用以預測的方法，其結果較定性法客觀，且較能反應崩塌地特徵。在近年來，地理資訊系統與遙測技術日趨成熟，各種資料取得相對容易，使得定量法廣泛使用於崩塌潛勢評估之研究。曾被使用於崩塌潛勢評估研究之定量法約可分為三類-定值分析法、統計分析法及機器學習法，分別介紹如下。

### 1. 定值分析法 (Deterministic method)

定值分析法為一種力學模型，基於無限邊坡理論及 Newmark 位移理論，透過計算邊坡穩定的之安全係數代表崩塌潛感值，其分析時需要大量的工程參數，如土壤凝聚力、土壤摩擦角、滑動深度及地下水深度等。

Akgun and Erkan (2016) 使用定值分析法分析土耳其北方的 Kurtun 大壩水庫區之崩塌潛感值，並與其它方法進行比較；Hsu et al. (2018) 使用定值分析法結合歷史降雨事件資料，建立崩塌發生時之降雨量閾值，用以評估邊坡的穩定性。

### 2. 統計分析法 (Statistical method)

統計分析法是根據已知的崩塌區域，結合各種可能影響崩塌之因子進行分析，得出能辨別是否發生崩塌的因子組合及參數，建立模型計算崩塌潛感值，如判別分析法、不安定指數法及邏輯斯迴歸。

穆婧及林昭遠 (2013) 使用判別分析法分析臺灣高雄市旗山溪集水區的崩塌潛感值，並繪製崩塌潛感圖；Yang (2017) 使用判別分析法分析臺灣中部的崩塌潛感值，並用所建立的崩塌潛勢評估模型預測降雨所引起的淺層滑坡；葉柏村及張光宗 (2019) 利用邏輯斯迴歸建立臺灣南投縣陳有蘭溪集水區的崩塌潛勢評估模型，以預測崩塌的發生，並分析影響潛感值的關鍵因子；

陳俞瑾等人 (2013) 利用不安定指數法分析臺灣臺中市大安溪流域的崩塌潛感值；詹勳全等人 (2014) 利用邏輯斯迴歸分析臺灣南部南橫公路周圍的崩塌潛感值，並分析降雨量這項因子對崩塌潛勢之影響；Shou et al. (2018) 使用不安定指數法及邏輯斯迴歸分別建立臺灣屏東縣隘寮溪集水區的崩塌潛勢評估模型，並比較兩種方法所建立之模型預測能力之優劣。

### 3. 機器學習法 (Machine learning method)

機器學習法是利用電腦自動學習的演算法，分析出各因子與崩塌區域的關係，並評估崩塌發生的可能性，即崩塌潛感值，如支撐向量機、類神經網路及隨機森林等方法。

由於機器學習技術逐漸成熟，越來越多學者使用機器學習法進行崩塌潛勢之研究，如 Lee et al. (2003) 使用類神經網路分析韓國報恩郡的崩塌潛勢，並繪製崩塌潛感圖；詹勳全等人 (2015) 使用支撐向量機建立臺灣苗栗縣景山溪集水區的崩塌潛勢評估模型，並評估其模型準確度；Ciampalini et al. (2016) 使用隨機森林分析義大利莫西拿省的崩塌潛勢，並使用 PSInSAR 技術以邊坡位移速度修正崩塌潛勢。

上述方法中，定值分析法由於需要大量的工程參數進行運算，這些資料通常取得不易，常需仰賴強度參數之反算分析及水文參數之評估分析，故常因資料不足導致預測準確性通常較其它方法略低 (李錫堤及黃健政，2005；中央地質調查所，2009；Akgun and Erkan, 2016)，必須透過詳細的現地調查取得精確的工程參數，才能獲得穩定且準確的預測成果，故較適於小範圍分析；機器學習法通常具有相對於另兩種方法較佳的預測準確性，但其運算時間較長，且模型參數難以解釋，較難進行成果的整合 (中央地質調查所，2009)；統計分析法的預測準確性介於另兩種方法之間，但其分析成果穩定且唯一，且能合理解釋因子間的權重 (李錫堤及黃健政，2005；中央地質調查所，2009)。各方法之優缺點統整如表 2-4 所示。

在統計分析法中，判別分析法具有輸入自變量僅能使用連續變量的缺點，在崩塌潛勢評估分析中，許多重要因子無法用以建立模型，如坡向及岩性等類別變量 (詹勳全等人，2015)。而邏輯斯迴歸通常具有比不安定指數法更佳的預測準確性 (詹勳全等人，2015；Shou et al., 2018)，故本研究選擇使用統計分析法中的邏輯斯迴歸進行崩塌潛勢評估模型之建立。

表 2-4、崩塌潛勢評估分析方法比較表 (修改自中央地質調查所, 2009)

分析方法	優點	缺點
定值分析法 (Deterministic method)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可將工程參數引入力學模型, 以安全係數描述崩塌潛感值</li> <li>2. 對大比例尺之精度需求時可以採用</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 廣域的工程參數難以取得</li> <li>2. 常需仰賴強度參數之反算分析及水文參數之評估分析, 導致模型成果較差</li> <li>3. 較適於小範圍分析</li> </ol>
統計分析法 (Statistical method)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 模型成果佳</li> <li>2. 適於廣域分析</li> <li>3. 分析結果穩定且唯一, 獲得參數可以解釋</li> <li>4. 分析成果易整合</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 僅能找出一組線性組合計算崩塌潛感值</li> <li>2. 模型成果較機器學習法略差</li> </ol>
機器學習法 (Machine learning method)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 模型成果極佳</li> <li>2. 適於廣域分析</li> <li>3. 具有高度非線性學習能力, 擬合結果佳</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 計算時間長</li> <li>2. 運算過程及獲得參數難以解釋</li> <li>3. 分析成果難以整合</li> </ol>



## 2.3 合成孔徑雷達干涉技術

合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 是利用衛星裝載之攝像雷達以獲取雷達影像，由雷達影像中的複數資料，透過干涉處理方法，計算地表三維資訊的一種技術，目前已被廣泛運用於遙測與地圖測繪。

最早實際運用合成孔徑雷達干涉技術 (InSAR) 之研究於 1974 年由 Graham 提出，其提出以衛星影像的良好解析度，運用干涉技術來獲得地表的高程資料，以達到描繪地形圖的目的。並於 1986 年，Zebker 與 Goldstein 證實 InSAR 技術可用於估計地形起伏。

InSAR 技術是利用不同時間或不同位置所獲得之一對影像，藉由相位差以獲取地表三維資訊。根據 Zebker 等人 (1992)，雷達干涉技術幾何示意圖如圖 2-14，其中， $O_1$ 、 $O_2$  為獲取地表資訊時雷達天線之位置， $B$  為空間基線 (兩次獲取地表資訊時雷達天線之距離)， $H$  為雷達天線之高程， $\theta$  為雷達天線之入射角， $\alpha$  為基線與水平線之夾角， $r$  為第一次雷達天線至地表觀測點  $P$  之距離， $\delta$  為兩次雷達天線至地表觀測點  $P$  之距離差， $P$  為地表觀測點， $z$  為地表觀測點之高程。

假設兩張影像所獲得之相位分別為  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ ，相位可由雷達天線與地表觀測點之距離及波長  $\lambda$  表示，如式(3.1)及式(3.2)，則此兩幅影像之相位差  $\phi$  可表示為式(3.3)。

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r \quad (3.1)$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (r + \delta) \quad (3.2)$$

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta \quad (3.3)$$

則距離差  $\delta$  可表示為式(3.4)。

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi \quad (3.4)$$

由圖 2-14， $\angle O_2O_1P = 90^\circ - \theta + \alpha$ ，則依據餘弦定理，可得式(3.5)。

$$(r + \delta)^2 = B^2 + r^2 - 2Br \cdot \cos(90^\circ - \theta + \alpha) = B^2 + r^2 - 2Br \cdot \sin(\theta - \alpha) \quad (3.5)$$

經推導與移項整理，可得式(3.6)。



$$\begin{aligned}\sin(\theta - \alpha) &= \frac{(r + \delta)^2 - B^2 - r^2}{2Br} \\ &= \frac{2r\delta + \delta^2 - B^2}{2Br} \\ &= \frac{\delta}{B} + \frac{\delta^2 - B^2}{2Br}\end{aligned}\quad (3.6)$$

由式(3.6)，可得第一個雷達天線至地表觀測點  $P$  之距離  $r$  如式(3.7)，將式(3.4)帶入，可得式(3.8)。

$$r = \frac{\delta^2 - B^2}{2[B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \delta]} \quad (3.7)$$

$$r = \frac{\left(\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi\right)^2 - B^2}{2\left[B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi\right]} \quad (3.8)$$

由圖 2-14，依據三角函數關係，可知地表觀測點之高程  $z$  可表示為式(3.9)，將式(3.8)帶入，可得式(3.10)。

$$z = H - r \cdot \cos \theta \quad (3.9)$$

$$z = H - \frac{\left(\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi\right)^2 - B^2}{2\left[B \cdot \sin(\theta - \alpha) - \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi\right]} \cdot \cos \theta \quad (3.10)$$

透過式(3.10)，只要知道軌道之參數（雷達天線之高程、入線角、基線及基線與水平線之夾角）與雷達波長，即可計算地表觀測點  $P$  之高程  $z$ 。

隨著 InSAR 技術持續發展，其也被運用於地表變形監測，並發展了許多不同的分析技術，如雷達差分干涉技術 (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR) 及永久散射體雷達干涉技術 (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PSInSAR) 等。

相對於傳統測量方法，InSAR 技術運用於地表變形測量有許多優點，如覆蓋面積大、不受天氣影響、取樣間隔一致、高空間解析度及高精度等。其空間解析度可達公尺等級，依據使用的雷達影像而有所不同，如 ALOS 影像的空間解析度約 7 公尺、Sentinel-1 影像的空間解析度約 10 公尺。而其量測精度受雷達衛星發射之雷達波波長影響，波長短則量測精度較高，但穿透植生覆蓋的能力較低，因雷達波一般具有公分等級的波長，故其對地表變形的量測精度可達釐米甚至毫米

等級。也因此使得 InSAR 測量技術逐漸被廣泛使用。

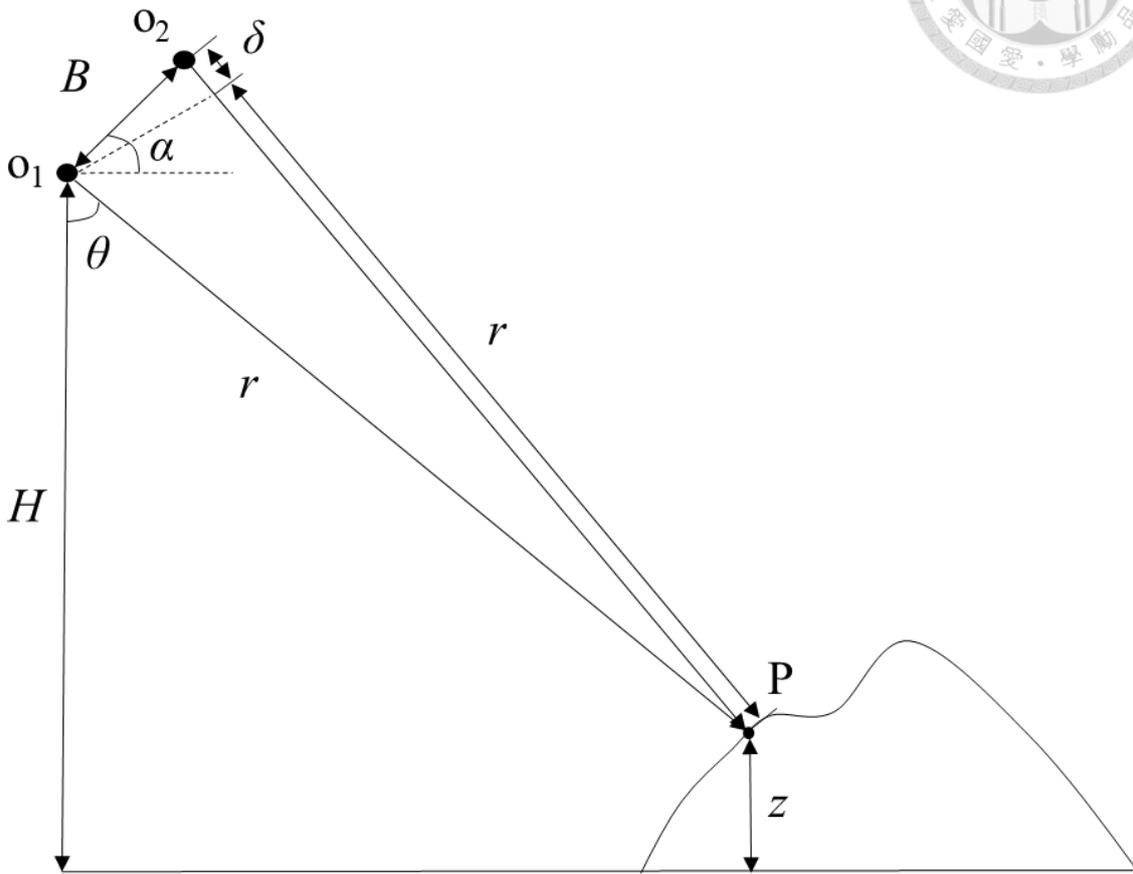


圖 2-14、合成孔徑雷達干涉技術幾何示意圖 (修改自 Zebker et al., 1992)



### 2.3.1 DInSAR

雷達差分干涉技術 (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR) 是利用不同時間、相同區域的雷達影像之相位訊息，經干涉後並去除地形效應，以量測地表微小變形的遙測技術。Gabriel (1989) 利用 DInSAR 技術量測美國加州的因皮里爾谷 (Imperial Valley) 中農田因灌溉而引起土壤膨脹、收縮所造成之地表變形，並提出此技術應可應用於火山變形、冰河運動、地表抬升等地表變形之監測，也是最早證實 DInSAR 技術可應用於監測地表變形之研究。

在 DInSAR 技術的差分干涉結果中，可以獲得兩個時間內地表變形之相位變化，再經由相位回復的過程，即可得到地表在該時間區間內沿衛星視線方向 (line of sight, LOS) 之地表變形量，DInSAR 技術示意圖如圖 2-15。

根據 Zebker 等人 (1994)，DInSAR 技術原理的幾何示意圖如圖 2-16。其中， $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$  為獲取地表資訊時雷達天線之位置， $B_{12}$ 、 $B_{13}$  為空間基線 (兩次獲取地表資訊時雷達天線之距離)， $H$  為雷達天線之高程， $\theta$  為雷達天線之入射角， $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{13}$  為基線與水平線之夾角， $r$  為第一次雷達天線至地表觀測點  $P$  之距離， $\delta_{12}$ 、 $\delta_{13}$  為兩次雷達天線至地表觀測點  $P$  之距離差， $P$  為地表觀測點， $P'$  為發生地表變形後之地表觀測點， $dr$  為地表變形。

由  $O_1$ 、 $O_3$  所獲得之雷達影像形成第一張干涉圖，且在兩張影像的時間區間內，地表觀測點  $P$  因變形而移動至  $P'$ ，產生地表變形  $dr$ 。根據 Zebker 等人 (1994) 之雷達干涉技術 (InSAR) 原理，其相位差  $\phi_{13}$  可表示如式(3.11)。

$$\phi_{13} = \phi_3 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} [(r + \delta_{13} + dr) - r] = \frac{4\pi}{\lambda} (\delta_{13} + dr) \quad (3.11)$$

式(3.11)中， $\phi_{13}$  為還原後的相位差，可知其由地表變形產生之相位差  $(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot dr)$  與地形效應所產生之相位差  $(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta_{13})$  所組成。經移項處理，地表變形  $dr$  可表示成式(3.12)。

$$dr = \frac{\lambda}{4\pi} (\phi_{13} - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta_{13}) \quad (3.12)$$



為了移除地形效應所產生之相位差  $(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta_{13})$ ，假設  $O_1$ 、 $O_2$  所獲得的影像間無地表變形，利用此兩張雷達影像生成第二張干涉圖，其所產生之相位差  $\phi_{12}$  即為單純由地形效應所產生之相位差，如式(3.13)。

$$\phi_{12} = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta_{12} \quad (3.13)$$

其中， $\delta_{12}$ 、 $\delta_{13}$  經推導可表示為式(3.14)及式(3.15)，其約等於基線沿衛星視線 (LOS) 方向之分量  $(B_{12})_{//}$  及  $(B_{13})_{//}$ 。

$$\delta_{12} \approx B_{12} \cdot \sin(\theta - \alpha_{12}) \approx (B_{12})_{//} \quad (3.14)$$

$$\delta_{13} \approx B_{13} \cdot \sin(\theta - \alpha_{13}) \approx (B_{13})_{//} \quad (3.15)$$

由式(3.13)、式(3.14)及式(3.15)，可得式(3.16)。

$$\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta_{13} = \frac{(B_{13})_{//}}{(B_{12})_{//}} \cdot \phi_{12} \quad (3.16)$$

將式(3.16)代入式(3.12)，則可式(3.17)。

$$dr = \frac{\lambda}{4\pi} (\phi_{13} - \frac{(B_{13})_{//}}{(B_{12})_{//}} \cdot \phi_{12}) \quad (3.17)$$

如此，若  $\frac{(B_{13})_{//}}{(B_{12})_{//}}$  可求得，則地表變形  $dr$  即可計算得到。而由式(3.14)及式

(3.15)， $\frac{(B_{13})_{//}}{(B_{12})_{//}}$  可由式(3.18)計算得出。

$$\frac{(B_{13})_{//}}{(B_{12})_{//}} = \frac{B_{13} \cdot \sin(\theta - \alpha_{13})}{B_{12} \cdot \sin(\theta - \alpha_{12})} \quad (3.18)$$

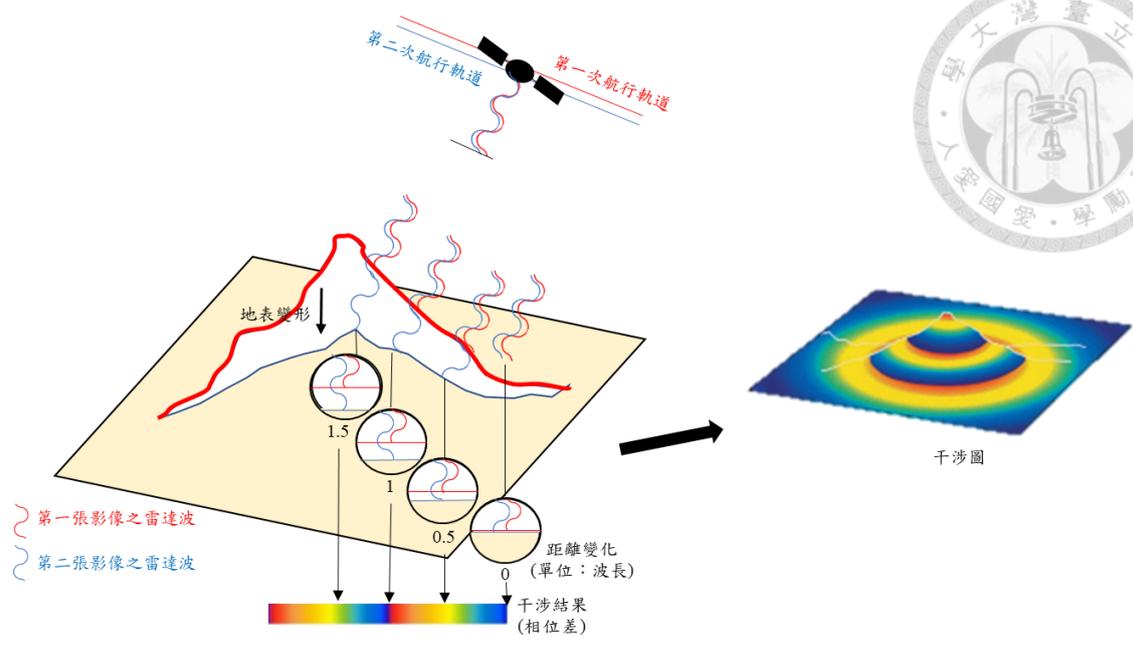


圖 2-15、DInSAR 技術示意圖 (修改自 Chang et al., 2004)

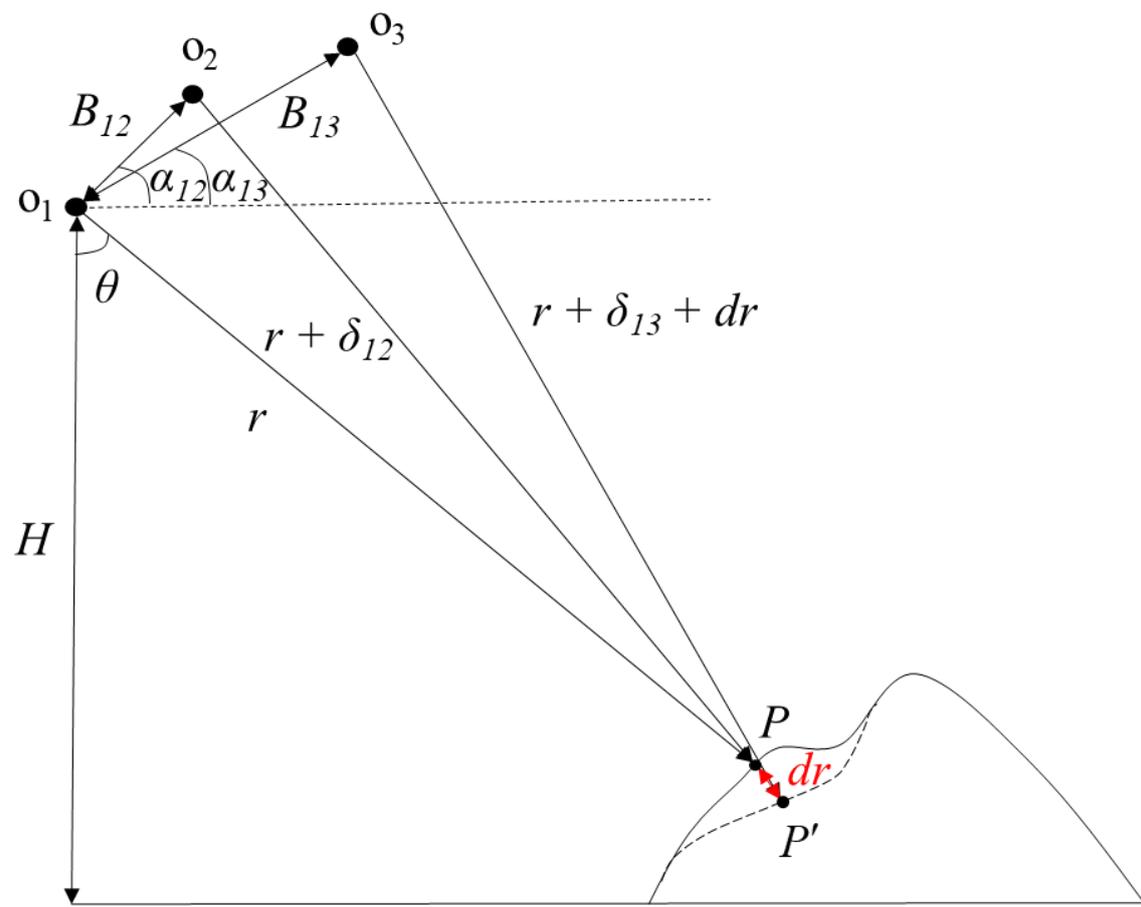


圖 2-16、雷達差分干涉技術幾何示意圖 (修改自 Zebker et al., 1994)



### 2.3.2 PSInSAR

永久散射體雷達干涉技術 (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PSInSAR) 由 Ferretti 等人於 2000 年提出，是以 DInSAR 技術為基礎衍生而出。PSInSAR 技術是 Ferretti et al. (2000) 考量傳統 DInSAR 技術，可能受時間相關的誤差 (如大氣效應造成之誤差) 或空間相關的誤差 (如地形效應造成之誤差) 影響，產生非相關性 (decorrelation) 而使結果不準確，因此提出永久散射體之概念。藉由使用多張雷達影像，尋找每張影像中共同存在之相關性較高的反射點，稱永久散射點 (persistent scatterer)，如圖 2-17 所示，可以發現永久散射點具有較穩定的反射特性。

透過分析永久散射點上的相位，以一時間序列中的相位進行相位解纏 (unwrapping)，得到長時間的地表變形，可以有效降低傳統 DInSAR 技術所造成之非相關性，並具有更高的可信度。根據 Ferretti et al. (2004)，亦證實永久散射體雷達干涉技術在干涉圖上干涉條紋不明顯的地區，亦可成功獲得地表變形，如圖 2-18 及圖 2-19。

然而，Ferretti et al. 所提出之 PSInSAR 技術必須在運算時加入當地線性的平均地表變形場，才可求得非線性的地表變形量。因此，Hooper et al. 於 2004 年提出了另一種 PSInSAR 技術，不需加入線性的平均速度場，即可計算地表變形量，故在地表變形非常不規則的地區，亦可有效求出地表變形，Hooper et al. (2004, 2007) 就使用此技術來監測火山運動所造成之地表變形量，如圖 2-20、圖 2-21 及圖 2-22。

永久散射點的原理是利用雷達波對地面各點的反射波做檢測，挑選影像中較穩定之點位，這些點位可能是建築物、裸露的岩石或基座等物體，此類物體的表面特性及其對雷達波的散射特性較不易隨時間改變，故所獲得的反射波的訊噪比較高，具較高之可信度。獲取永久散射點於時間序列上的相位後，藉由衛星基線與地形效應誤差的相關性及對一特徵尺度範圍內大氣效應相似的假設，可以消除 DInSAR 成果中最具影響力的兩種因素所造成的誤差，以達到相對於 DInSAR 技術更精密的監測。且一般而言，永久散射點相對於 GPS 站、水準點等監測點位，有著更高的觀測資料密度，使得永久散射體雷達干涉技術對於地表變形監測有著良好的適用性。

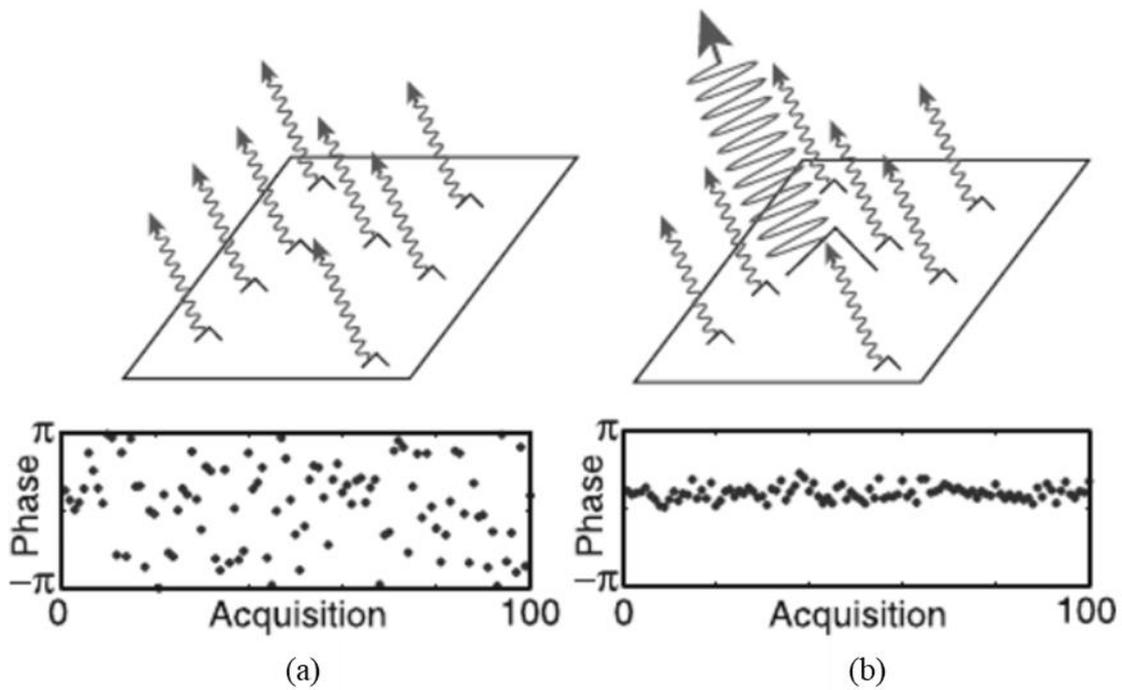


圖 2-17、相位分布示意圖 (摘自 Hooper et al., 2007)

(a) 分布散射體 (distributed scatterer) ; (b) 永久散射體 (persistent scatterer)

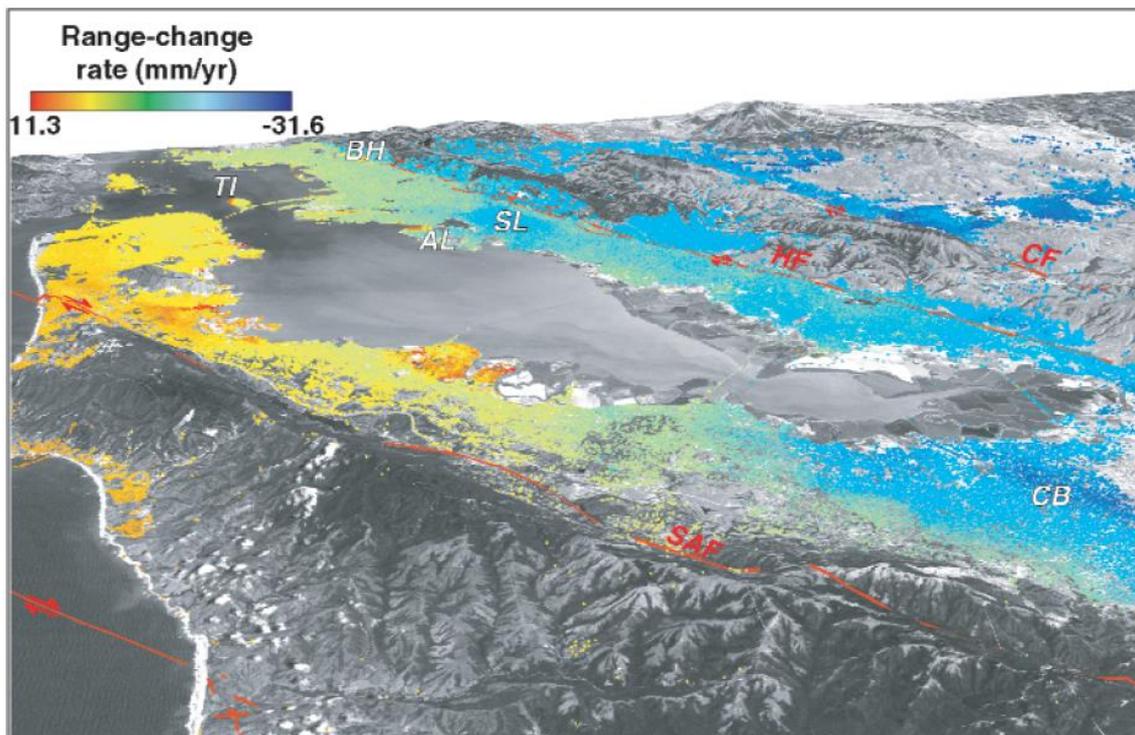


圖 2-18、應用 PSInSAR 技術監測舊金山灣地區之地表變位速度場

(摘自 Ferretti et al., 2004)

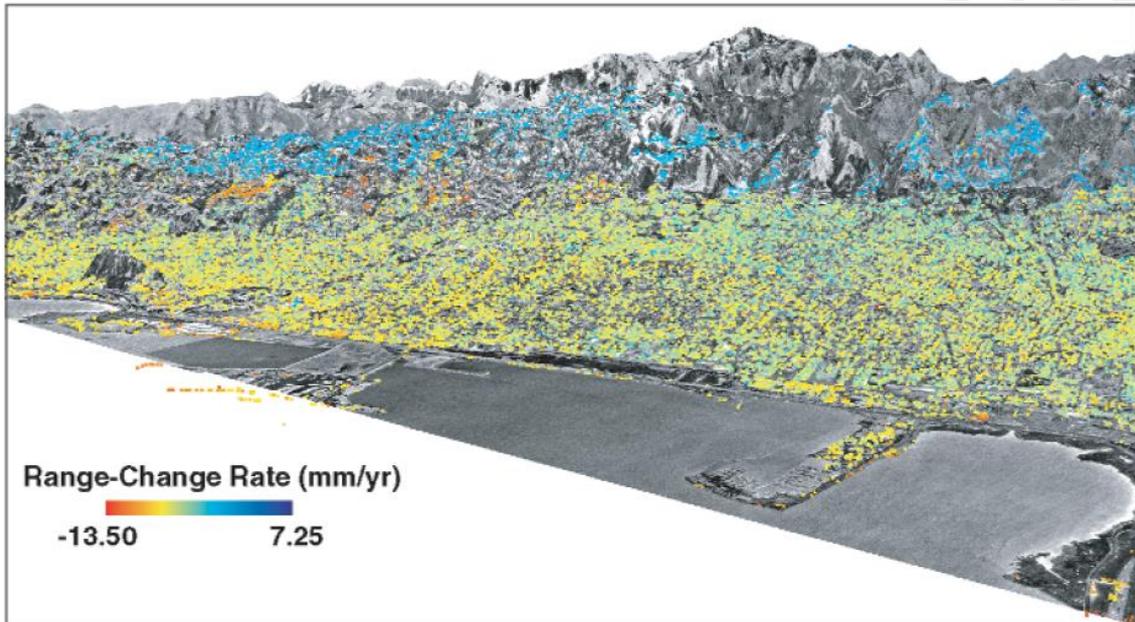


圖 2-19、應用 PSInSAR 技術監測於柏克萊山丘崩塌之地表變位速度場  
 (摘自 Ferretti et al., 2004)

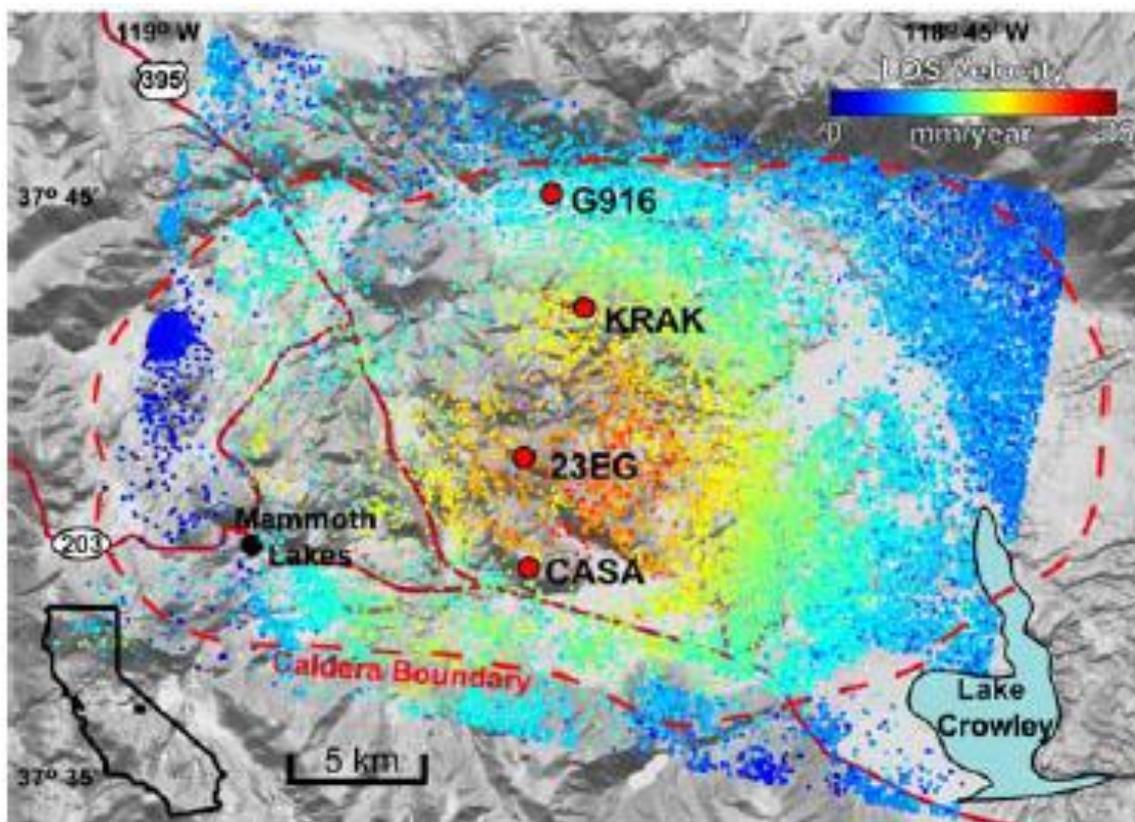


圖 2-20、應用 PSInSAR 技術監測加州長谷地區之火山變位速度  
 (摘自 Hooper et al., 2004)

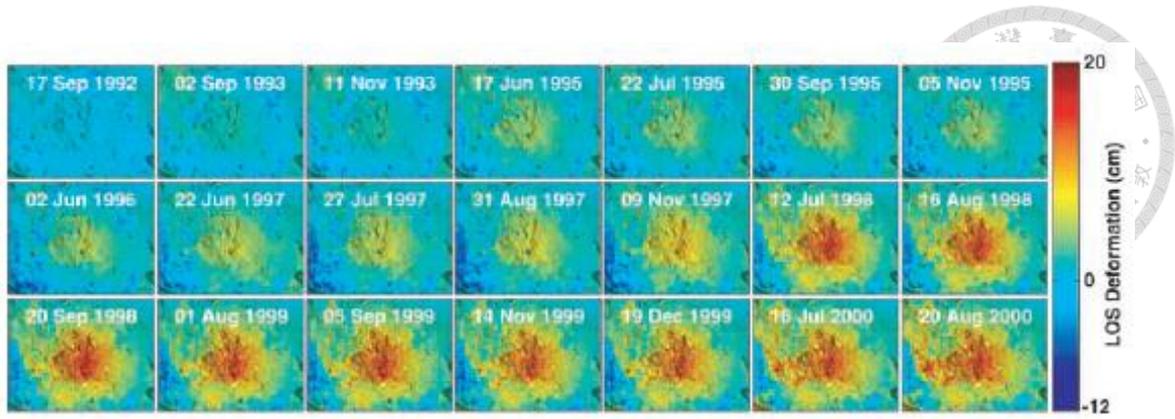


圖 2-21、應用 PSInSAR 技術監測加州長谷地區之火山變形量時間序列  
(摘自 Hooper et al., 2004)

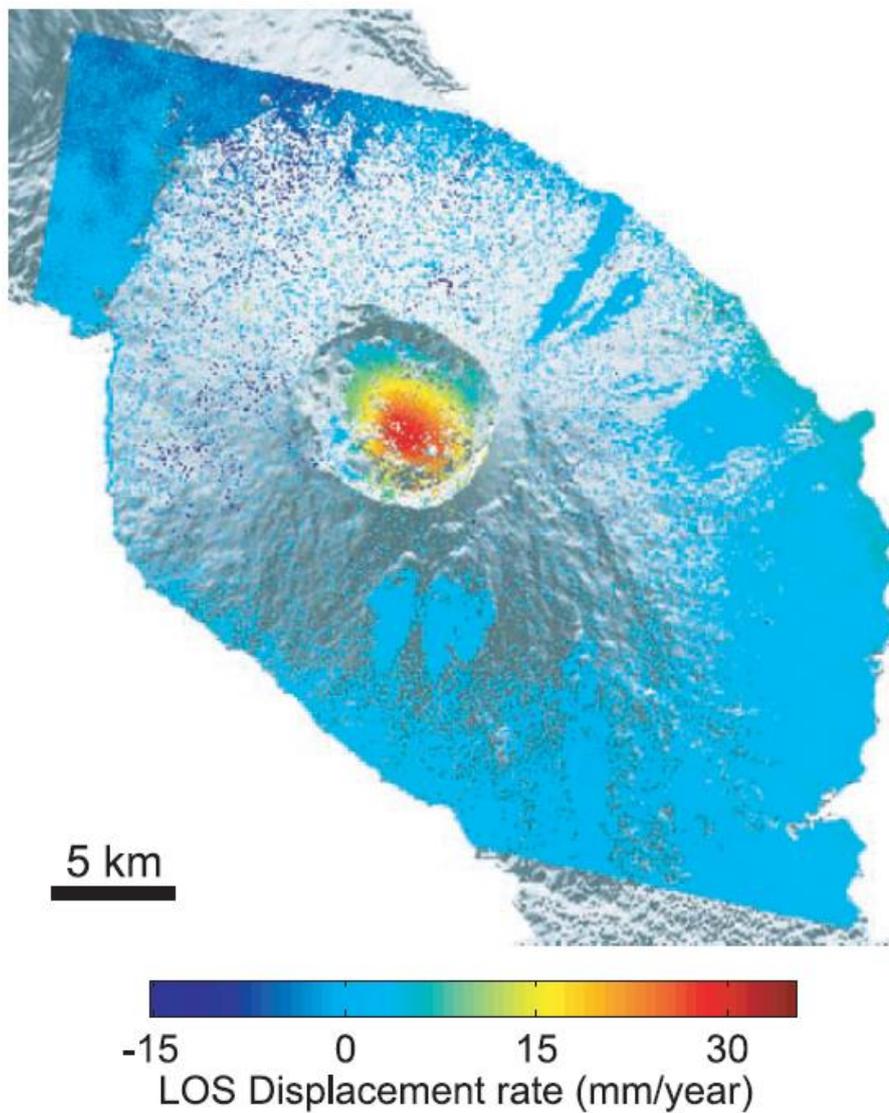


圖 2-22、應用 PSInSAR 技術監測加拉巴哥群島阿爾賽多火山之變位速度  
(摘自 Hooper et al., 2007)



## 2.4 PSInSAR 技術於崩塌研究之應用

透過 PSInSAR 技術計算地表變形時間序列，可以得到各 PS 點上的地表變形並計算其地表變位速度，就如同於現地設置許多監測儀器一般。且因其有著大範圍、高精度、不受天氣影響及良好的取樣間距等優點 (Bianchini et al., 2013)，近年來，許多研究提出利用 PSInSAR 技術來分析山坡地的變形量及穩定性。

Bianchini et al. (2013) 使用 ALOS 衛星之升軌影像計算西班牙特拉蒙塔納山脈 (Tramuntana Range) 的地表變位速度，轉換為沿坡面方向的速度後，結合崩塌目錄繪製崩塌活動圖 (Landslide Activity Map) 及地表活動圖 (Ground Motion Activity Map)，用以更新現有的崩塌目錄並劃分出潛在的危險區域。並利用災害目錄及崩塌目錄，對其可信度進行分級，以作為在環境規劃時的參考依據。

Ciampalini et al. (2016) 針對義大利墨西拿省 (Messina Province)，先使用隨機森林演算法繪製出該區域的崩塌潛感圖，並結合 COSMO-SkyMed 衛星之升、降軌影像計算之地表變位速度，轉換為沿坡面方向的速度後，繪製地表變形圖，用以修正崩塌潛感圖。其研究成果指出，透過 PSInSAR 速度修正後的崩塌潛感圖，能有效降低偽陰性 (false negative) 誤差，提升模型在慢速滑坡預測之可靠度。此方法亦有助於規劃及決策機關繪製更可靠的崩塌潛感圖。

Shen et al. (2019) 選擇大陸貴州省畢結市為研究區域，當地位處喀斯特地形，採礦工業興盛，時常因採礦擾動引致地表變形而發生崩塌，故提出以 PSInSAR 速度更新崩塌潛感圖的概念。其利用支撐向量機法繪製當地的崩塌潛感圖，並結合 RADARSAT-2 衛星之升軌影像及 Sentinel-1 衛星之降軌影像所計算的地表變位速度，轉換為沿坡面方向的速度，用以監測當地因採礦工業而造成的地表變形行為，以此更新崩塌潛感圖。其研究成果提出此方法能提升崩塌潛感圖的準確性，且能產出更可靠且及時的崩塌潛感圖。

Rajaneesh et al. (2021) 針對印度西高止山脈 (Western Ghats) 的淺層滑坡進行分析，利用 Sentinel-1 衛星之降軌影像計算的地表變位速度，並透過在監測前、監測時、監測後三種情況發生崩塌之案例，驗證利用 PSInSAR 技術監測的合理性。並利用 GIS-TISSA 計算邊坡穩定的安全係數，將崩塌潛感值分為穩定、臨界及不穩定三個等級，結合 PSInSAR 所計算之地表變位速度，修正崩塌潛感值。其研究成果顯示，傳統邊坡穩定分析偏於保守，易導致許多偽陽性 (false positive) 誤報

產生，而使得在防災應用上常需花費過多的資源；而透過此方法，可以有效減少模型的誤報率，能更精準的識別關鍵的不穩定區域，提供機關作為進行監測及治理規劃之參考依據，進而達到節省成本之目的。





### 第3章 潛感因子與相關性分析

本研究以高雄市桃源區布唐布納斯溪沿岸邊坡地區為例，並以斜坡單元作為測繪單元，分析各潛感因子與崩塌間之相關性，篩選出與崩塌具顯著相關性之顯著因子，以利於崩塌潛勢評估模型之建立。本章簡介研究區域及斜坡單元的辨識方法與成果，並針對各潛感因子及相關性分析之分析方法進行說明，最後依據相關性分析之結果進行討論及篩選出顯著因子。

#### 3.1 研究區域概述

本研究的研究區域為布唐布納斯溪沿岸邊坡地區，位於臺灣高雄市桃源區，約涵蓋東經 120 度 43 分至東經 120 度 49 分及北緯 23 度 10 分至北緯 23 度 15 分之範圍，如圖 3-1 所示，研究區域總面積約為 6,142 公頃。

根據中央地質調查所之調查，此區域內有眾多邊坡均被劃分為山崩與地滑地質敏感區，且曾於 2009 年莫拉克颱風事件下，發生大規模崩塌，造成嚴重災害。於事件後，雖在當地進行了許多整治工程，以防止重大災害發生，然此地區仍是崩塌的高風險區。近年來，每逢梅雨事件或颱風事件，當地均會有崩塌事件發生，也使此地區成為適於進行崩塌研究之區域。

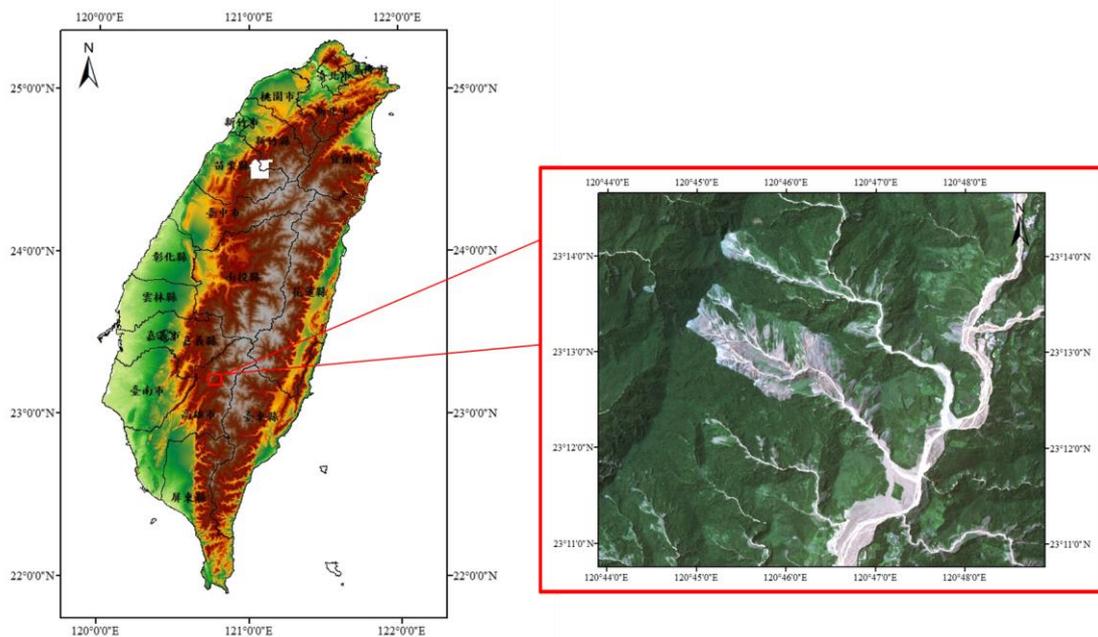


圖 3-1、研究區域圖

(底圖為內政部 2019 年 20m DEM 及中央大學太空及遙測中心 2014/08/28 衛星影像)



### 3.2 斜坡單元辨識

本研究為保留完整邊坡地形特性，故選擇斜坡單元為分析單元進行分析，做為分析邊坡崩塌潛感值之基礎。斜坡單元之示意圖如圖 3-2，其概念為利用山稜線、山谷線及水系劃分出一完整邊坡，視為一分析單元。

斜坡單元之分割方法，參考 Xie et al. (2004) 所提出之「集水區重疊法」的分割概念，如圖 3-3，圖中區域 1 表示 DEM 所繪製之集水區，區域 2 及區域 3 表示反轉 DEM 所繪製之集水區，將兩集水區重疊，即可繪製出斜坡單元。本研究利用 ArcMap 的 Hydrology 分析模型進行分析，首先利用數值高程模型劃分出各水系之集水區，可得山稜線；接著將數值高程模型反轉，此時，原有的山稜線與山谷線將會互換，使得山稜線變為山谷，如此再進行一次集水區分析，即可得到山谷線或水系，接著將正、反集水區進行合併，則所切割出之單元，即為斜坡單元。由於斜坡單元自動劃分之成果存在誤差，常有不合理之單元產生，尚須進行人工編修，才能得到符合地形之斜坡單元。故使用陰影圖、坡向圖、坡度圖、水系圖及衛星正射影像輔助進行人工編修，去除不合理單元後，並檢核各單元之間是否重疊或密合及各單元之面積。斜坡單元之切割流程如圖 3-4 所示。

本研究利用內政部 2012 年所產製之 20m×20m 數值高程模型，以自動判釋輔以人工編修之方法切割斜坡單元，產製之成果如圖 3-5，斜坡單元之人工編修原則如下所示：

1. 斜坡單元須符合地形特徵，故單元邊界不可跨越山稜線、水系等。
2. 為避免斜坡單元大小導致崩塌特徵不顯著或過於顯著，故編修時斜坡單元面積以 3 至 30 公頃 (ha) 為原則。

於研究區域內，依上述方法產製斜坡單元，產製成果之資訊統計如表 3-1，共劃分為 353 個斜坡單元，平均面積為 16.7 公頃。

表 3-1、研究區域斜坡單元統計表

使用 DEM	研究區域總面積 (ha)	斜坡單元數目 (個)	最大面積 (ha)	最小面積 (ha)	平均面積 (ha)
20m DEM (2012 年)	6,142	353	29.8	5.1	16.7

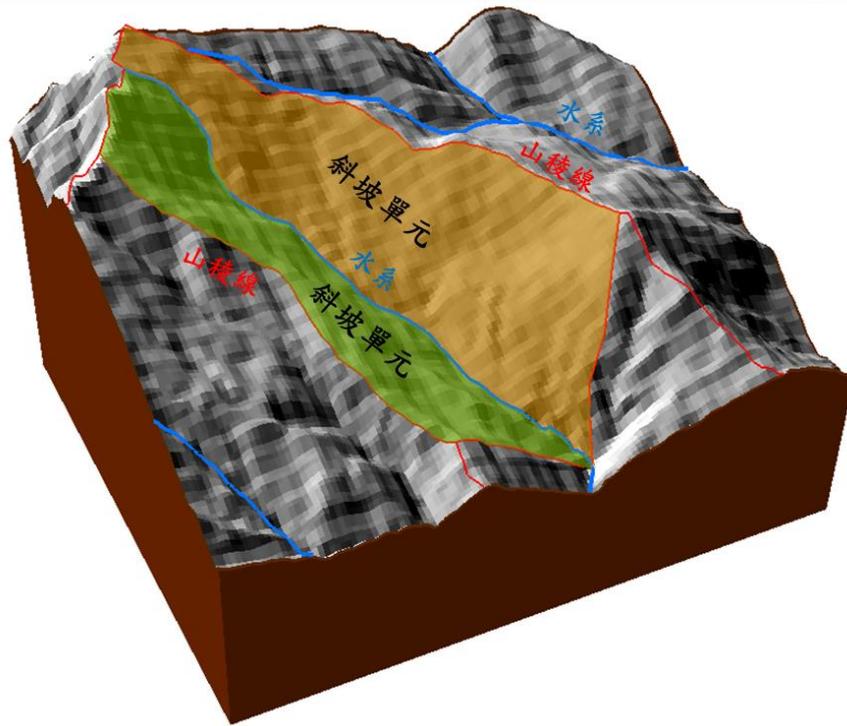


圖 3-2、斜坡單元示意圖

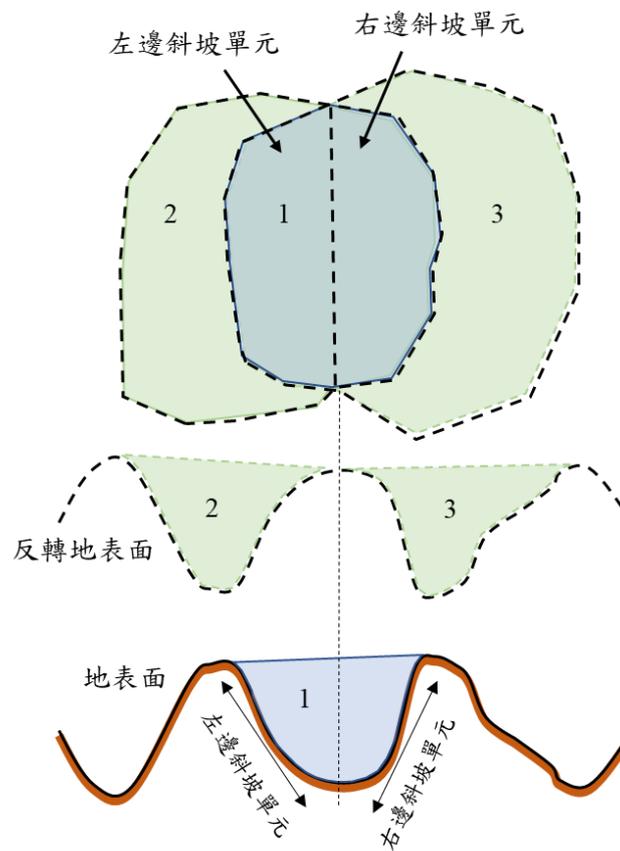


圖 3-3、集水區重疊法示意圖 (修改自 Xie et al., 2004)

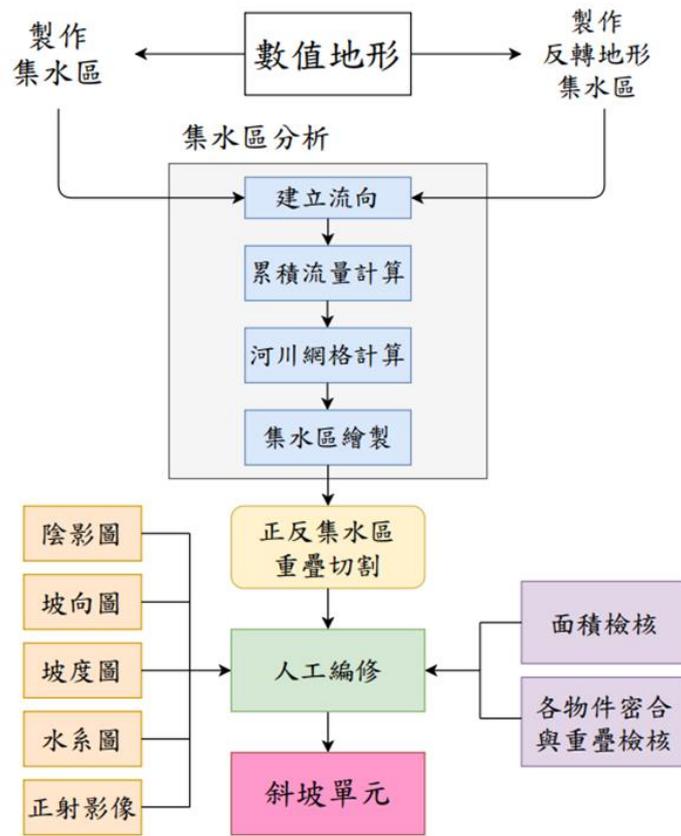


圖 3-4、斜坡單元劃分流程圖 (修改自林彥享等人, 2012)

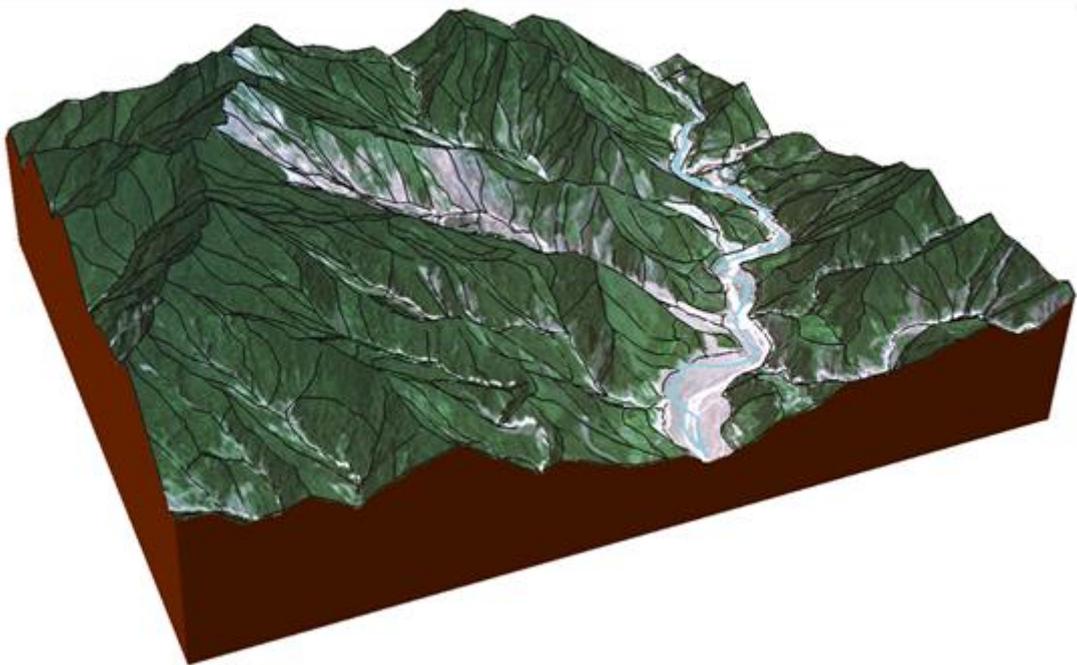


圖 3-5、研究區域斜坡單元成果圖

(底圖為中央大學太空及遙測中心 2014/08/28 衛星影像)



### 3.3 潛感因子分析

臺灣的地形及地質結構複雜，又時常受地震、降雨等事件影響，造成臺灣山區邊坡時常有崩塌事件發生。影響崩塌事件發生的因素眾多，絕非受單一因素所控制，而這些影響崩塌事件發生之因素，即稱為潛感因子。潛感因子又可分為促崩因子及環境因子，促崩因子為災害事件中造成崩塌發生之因子，如地震、降雨等；環境因子則是環境中會影響崩塌事件發生可能性之因子，如坡度、坡向等。而潛感因子的種類眾多，如 Shou et al. (2018) 使用了坡度、高程、坡向、斷層距、水系距、道路距、順向坡指標及崩塌降雨指標等 8 種因子；Yang (2017) 使用了總累積雨量、古地滑指標、岩石強度、坡度、高程、岩體結構、地形粗糙度及坡度粗糙度等 8 種因子；葉柏村及張光宗 (2019) 使用了最大降雨強度、總累積雨量、集水面積、坡度、岩性、坡類、弱面傾角及邊坡狀態等 8 種因子；Anis et al. (2019) 使用了高程、岩性、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、水系距、斷層距、年平均雨量、NDVI 及土地利用情形等 11 種因子，過去約有數十種潛感因子曾被使用。

本研究統整前人研究，找出於前人研究中對崩塌影響性較高之潛感因子。其中，促崩因子選擇降雨事件之累積降雨量，環境因子則選擇了 11 項候選因子，並依其特性分為三類-地貌因子 (Terrain factor)、區位因子 (Location factor) 及地質因子 (Geological factor)，各因子及其來源如表 3-2 所示。其中，地貌因子包含坡度、坡向、高程、地形粗糙度、剖面曲率及植生指標；區位因子包含水系距及道路距；地質因子包含岩體強度、褶皺度及順向坡指標。在環境因子中，將會對 11 項候選因子進行相關性分析，以找出與崩塌具顯著相關性的因子予以保留，以供後續模型建立使用。以下針對所選擇的潛感因子及其分析方法進行說明。

表 3-2、潛感因子統整表

類別	因子名稱		資料來源	
促崩因子 (Triggering factor)	事件累積降雨量		中央氣象局 觀測資料查詢系統	
環境因子 (Environmental factor)	地貌因子 (Terrain factor)	平均坡度	內政部 20m 數值高程模型	
		平均坡向		
		高程		單元內平均
				單元內最大
		地形粗糙度		
		剖面曲率		單元內平均
	單元內最小			
	植生指標		中央大學太空及 遙測中心衛星影像	
	區位因子 (Location factor)	水系距	距單元形心	水利地理資訊 服務平台 全島河流圖資
			距單元邊界	
		道路距	距單元形心	交通部公路總局 省道公路路線圖資
距單元邊界				
地質因子 (Geological factor)	岩體強度	單元內多數	中央地質調查所 岩體強度分級 分布圖	
		單元內最弱		
	褶皺度		中央地質調查所	
	順向坡指標		五萬分之一地質圖	



### 3.3.1 促崩因子-事件累積降雨量

本研究利用研究區域周圍共 5 處雨量站，包含達卡努瓦、梅山、復興、高中及小關山，如圖 3-6 所示。蒐集各雨量站中單一事件下之累積降雨量，並以反距離權重法 (inverse distance weighting, IDW) 內插得到研究區域內各位置之事件累積降雨量，並以斜坡單元內之平均雨量作為後續分析使用。

本研究根據水土保持局定義雨場之方法，將一降雨時間序列中，以時雨量大於 4 毫米時視為本次降雨事件開始，並以未來連續六小時時雨量小於 4 毫米時視為本次降雨事件結束，而從降雨事件開始至降雨事件結束所經時間為本次事件之降雨延時，以此定義為一場降雨事件。

反距離權重法為雨量內插常用的方法之一，其假設各點對已知雨量站之水平距離越遠，則與雨量之關係越小。故此方法以距離倒數之  $p$  次方為權重進行加權平均，來內插計算各點之雨量。其模型如式(4.1)及式(4.2)所示。

$$z = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (4.1)$$

$$\lambda_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^p}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_j}\right)^p} \quad (4.2)$$

其中， $z$  為降雨量、 $\lambda_i$  為雨量站  $i$  與欲求點之降雨量內插權重， $d_i$  為雨量站  $i$  與欲求點之水平距離， $p$  為介於 1.0 至 3.0 之指數 (一般使用 2.0)，若  $p$  越大，則欲求點與鄰近雨量站關係越大， $n$  為用以內插之總雨量站數。

並將內插之雨量成果與斜坡單元進行套疊，計算各斜坡單元中的平均雨量，以代表該斜坡單元之事件累積降雨量。

本研究使用行政院農委會林務局所判釋之崩塌地圖資，其時間解析度為一年，故假設各年度崩塌均發生於當年度上半年 (一至七月) 降雨量最多之降雨災害事件，分析該事件之雨量。2015 年至 2018 年上半年降雨量最多之降雨災害事件資訊統整如表 3-3。

表 3-3、2015 年至 2018 年上半年降雨量最多之降雨災害事件統整表

降雨災害事件	雨量站	降雨延時 (hr)	累積降雨量 (mm)
2015/05/24 豪雨事件	達卡努瓦	19	455.5
	梅山	23	416.5
	復興	23	397.0
	高中	33	491.5
	小關山	56	698.5
2016/06/13 梅雨事件	達卡努瓦	14	145.5
	梅山	14	125.5
	復興	14	155.5
	高中	13	184.5
	小關山	13	212.0
2017/06/01 豪雨事件	達卡努瓦	71	1057.0
	梅山	72	1167.5
	復興	71	884.0
	高中	50	554.0
	小關山	75	1127.5
2018/06/19 豪雨事件	達卡努瓦	34	233.5
	梅山	34	184.5
	復興	34	202.5
	高中	35	285.0
	小關山	35	290.0



圖 3-6、研究區域周圍雨量站

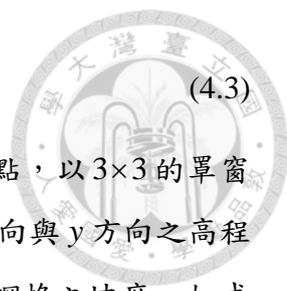
(底圖為中央大學太空及遙測中心 2014/09/06 之衛星影像)

### 3.3.2 地貌因子

地貌因子為描述邊坡樣貌及其在三度空間下的位置與變化之因子，包含坡度、坡向、高程、地形粗糙度、剖面曲率及植生指標等 6 種地貌因子，除高程外，其餘 5 種因子分析方法分述如下：

#### 1. 坡度

坡度為邊坡之坡面傾斜程度，坡度 ( $S$ ) 定義為坡面上之高程變化 ( $\Delta h$ ) 與水平移動距離 ( $\Delta L$ ) 之比值，即高程於空間上的變化程度。若以角度的方式表示，可以三角函數之正切函數計算，如式(4.3)，亦可用坡度百分比之方式表示。坡度低代表該處地形較平坦，而坡度大則代表該處地形較陡峭。陡峭的邊坡會導致邊坡下滑趨動力越大，而導致邊坡較不穩定，較容易發生崩塌。



$$S = \tan \alpha = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (4.3)$$

坡度之計算可利用數值高程模型 (DEM) 之網格中心點，以 3×3 的單窗 (如圖 3-7) 搜尋鄰近之 8 個網格，分別計算中心網格在 x 方向與 y 方向之高程變化，再依加權平均方式計算其平均高程變化，即為中心網格之坡度，如式 (4.4)、式(4.5)及式(4.6)。

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(z_c + 2z_f + z_i) - (z_a + 2z_d + z_g)}{8} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(z_g + 2z_h + z_i) - (z_a + 2z_b + z_c)}{8} \quad (4.5)$$

$$S = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (4.6)$$

其中， $z$  為高程， $S$  為坡度， $z_a$  為左上方網格之高程， $z_b$  為上方網格之高程， $z_c$  為右上方網格之高程， $z_d$  為左方網格之高程， $z_f$  為右方網格之高程， $z_g$  為左下方網格之高程， $z_h$  為下方網格之高程， $z_i$  為右下方網格之高程。

並將 DEM 所計算之坡度成果與斜坡單元進行套疊，計算各斜坡單元中的平均坡度，以代表該斜坡單元之坡度。

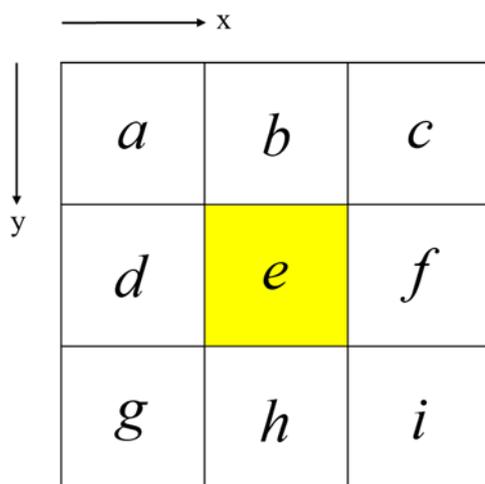


圖 3-7、3×3 單窗示意圖



## 2. 坡向

坡向為邊坡坡面之法線在水平面上的投影方向，其計算可利用數值高程模型 (DEM) 之網格中心點，以 3×3 的單窗 (如圖 3-7) 搜尋鄰近之 8 個網格，計算其高程數值變化最大之方向，如式(4.4)、式(4.5)及式(4.7)，此時計算所得是在直角座標下之坡向，並將其轉換為方位角，如式(4.8)。本研究中坡向之分類，以正北定義為 0 度，順時鐘方向旋轉增加至 360 度，將其依每 45 度，劃定為同一方向，共分為 8 個方向，如圖 3-8 所示。

$$\theta = \begin{cases} \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) / - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right], & \text{if } - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) > 0 \\ \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) / - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + 180^\circ, & \text{if } - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) < 0 \text{ and } \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) \geq 0 \\ \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left[ \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) / - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] - 180^\circ, & \text{if } - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) < 0 \text{ and } \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) < 0 \\ 90^\circ, & \text{if } - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0 \text{ and } \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) > 0 \\ -90^\circ, & \text{if } - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0 \text{ and } \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) < 0 \\ 0^\circ, & \text{if } - \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0 \text{ and } \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$A = \begin{cases} 90^\circ - \theta, & \text{if } \theta \leq 90^\circ \\ 360^\circ - \theta + 90^\circ, & \text{if } \theta > 90^\circ \end{cases} \quad (4.8)$$

其中， $\theta$  為直角座標下之坡向， $A$  為方位角之坡向。

並將 DEM 所計算之坡向成果與斜坡單元進行套疊，計算各斜坡單元中的平均坡向，以代表該斜坡單元之坡向。

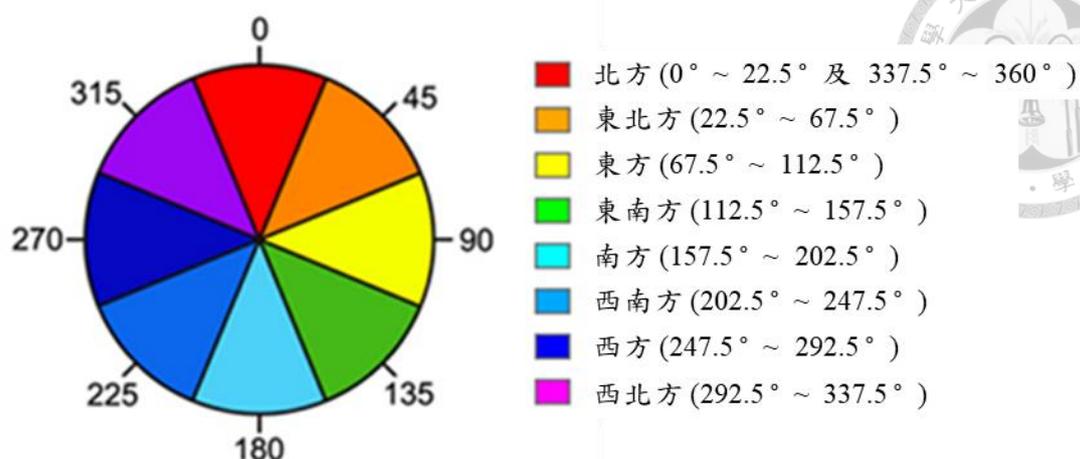


圖 3-8、坡向分類圖

### 3. 地形粗糙度

地形粗糙度為描述邊坡上高程變化的因子，其值大小代表該處高程起伏的變化情形。地形粗糙度越大，代表該處的地形起伏變化越崎嶇；地形粗糙度越小，代表該處的地形起伏變化越平緩。地形起伏大之邊坡，可能導致邊坡材料不穩定時，所受重力作用越大，抵抗力越小，使邊坡發生崩塌的可能性提高。

根據 Wilson and Gallant (2000)，其提出利用圓形單窗計算單窗範圍內網格的高程標準差，可用以量化中心網格之高程變化程度。穆婧及林昭遠 (2013) 則提出以利用 3×3 單窗，計算單窗範圍內網格的高程標準差，定義為中心網格之地形粗糙度，以衡量中心網格之地形起伏變化情形。本研究因以斜坡單元作為分析單元，故提出以斜坡單元內各網格之高程標準差，代表該斜坡單元所代表之邊坡的地形起伏變化情形，如圖 3-9 所示，定義為該斜坡單元之地形粗糙度，如式(4.9)，標準差之計算如式(4.10)。

$$\text{地形粗糙度} = \text{斜坡單元內高程之標準差} \quad (4.9)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (4.10)$$

其中， $n$  為單元內網格總數， $z_i$  代表  $i$  網格之高程， $\bar{z}$  代表單元內各網格高程之平均值。

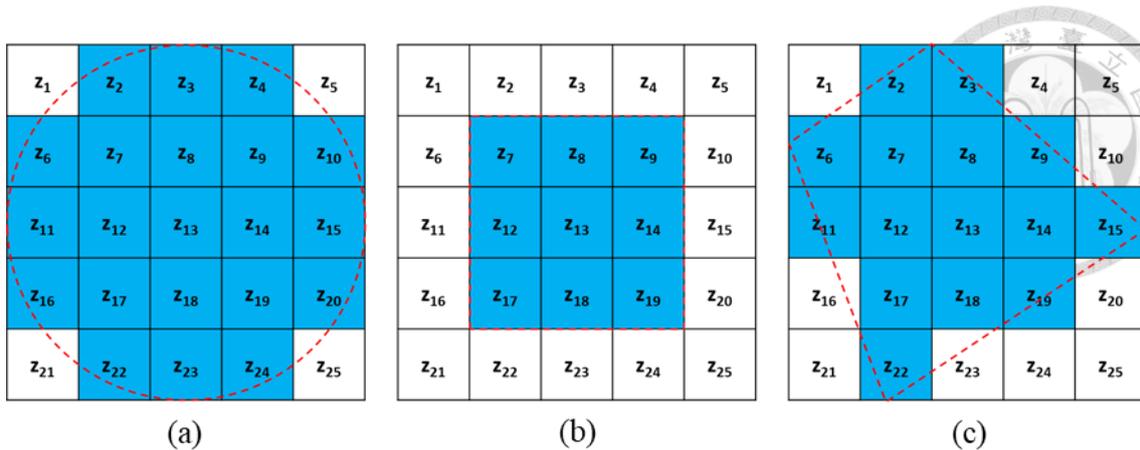


圖 3-9、不同單窗之網格示意圖

(a)圓形單窗 (修改自穆婧與林昭遠, 2013); (b) 3×3 單窗; (c)斜坡單元

#### 4. 剖面曲率

剖面曲率為描述邊坡坡度沿邊坡坡面方向上的變化程度，即邊坡的急緩程度，正值代表凹坡，負值代表凸坡，如圖 3-10 所示，剖面曲率的絕對值越大，代表邊坡的彎曲程度越大，剖面曲率接近 0，代表邊坡趨於平坦。剖面曲率會對邊坡的侵蝕與堆積造成重要的影響，進而影響邊坡崩塌的可能性，尤其凸坡具有較高之崩塌可能性。

剖面曲率的計算，以 3×3 的單窗 (如圖 3-7) 搜尋周圍 8 個網格，以計算其中心網格之剖面曲率，計算方法如式(4.11)、式(4.12)及式(4.13)。

$$\kappa_{pr} = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2}{pq^{3/2}} \quad (4.11)$$

$$p = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$q = 1 + p \quad (4.13)$$

其中， $\kappa_{pr}$  代表剖面曲率， $z$  代表高程。

並將 DEM 所計算之剖面曲率成果與斜坡單元進行套疊，計算各斜坡單元中的平均剖面曲率及最小剖面曲率 (負值)，以代表該斜坡單元之剖面曲率。

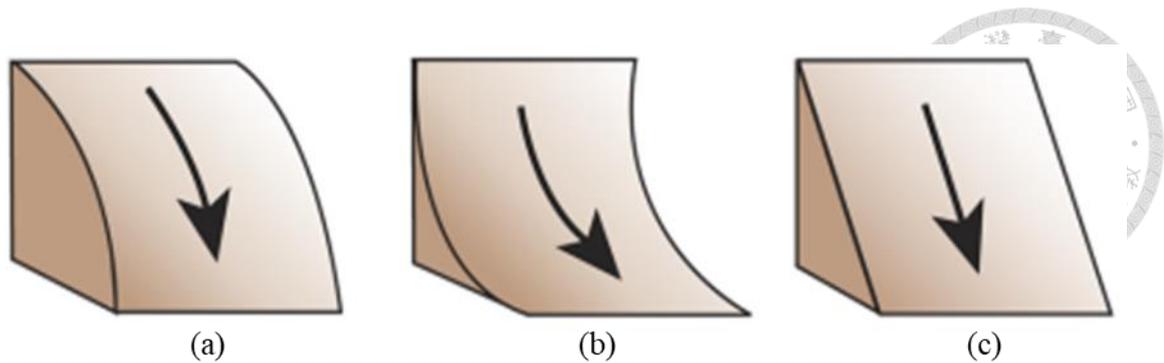


圖 3-10、剖面曲率與坡面關係示意圖

(a)剖面曲率為負 (凸坡)；(b)剖面曲率為正 (凹坡)；(c)剖面曲率為零 (坡面平坦)  
(修改自 ArcMap 使用說明)

## 5. 植生指標

植生指標用以描述邊坡上的植生狀況，植生指標越大，代表邊坡上的植生越茂密；植生指標越小，代表邊坡上的植生越稀疏。植生於邊坡上的功用，不但可以減少地表逕流，其根系亦可以抓住邊坡土壤，提高邊坡穩定性，故植生較少的邊坡，發生崩塌的可能性較高。

本研究先利用衛星影像進行影像分類，因可以明確選取分類樣本，故採用監督式分類法，且根據 Lillesand et al. (2004) 選擇了能提供較高分類精度的最大似然分類法 (Maximum Likelihood Classifier) 將影像分類為植生地及裸露地。

最大似然分類法以貝氏統計為基礎，假設訓練樣區之各類分布函數為多維常態分布，以向量方式估計各類別光譜反應值之變異數與相關係數，接著利用平均向量與共變異矩陣作為各類別的分類特徵，並計算各未知像元分類於特定類別之機率，以作為分類之依據。

最大似然分類法的演算步驟如下：

### (1) 決定分類種類

選定影像欲分類之種類，如式(4.14)， $\omega_i$ 代表欲分類的類別， $n$ 代表欲分類的類別數目。

$$\omega_i, i=1,2,\dots,n \quad (4.14)$$

### (2) 選擇具代表像元為訓練樣區

### (3) 計算各類別 $\omega_i$ 出現未知像元值 $x$ 之機率

依貝氏公式，未知像元值  $x$  屬於各類別之機率  $P(\omega_i | x)$  如式(4.15)。

$$P(\omega_i | x) = \frac{P(x | \omega_i)P(\omega_i)}{P(x)} = \frac{P(x | \omega_i)P(\omega_i)}{\sum_{j=1}^n P(x | \omega_j)P(\omega_j)}, \begin{cases} i \neq j \\ i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4.15)$$

其中， $P(\omega_i)$  為分類影像中類別  $\omega_i$  出現之機率， $P(x)$  為分類影像中未知像元值  $x$  出現之機率， $P(x | \omega_i)$  為類別  $\omega_i$  中出現未知像元值  $x$  之機率。

又最大似然分類法假設樣本屬於多維常態分布，故類別  $\omega_i$  中出現未知像元值  $x$  之機率  $P(x | \omega_i)$  可表示為式(4.16)。

$$P(x | \omega_i) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} |\Sigma_i|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x - \mu_i)\right] \quad (4.16)$$

其中， $N$  為波段數， $\Sigma_i$  為類別  $\omega_i$  之協方差矩陣， $\mu_i$  為類別  $\omega_i$  之光譜平均值。

#### (4) 判斷未知像元值 $x$ 所屬類別

依據式(4.17)，根據各類別中出現未知像元值  $x$  之機率最高者，對未知像元值  $x$  進行類別歸類。

$$\begin{cases} x \in \omega_i, & \text{if } P(x | \omega_i)P(\omega_i) > P(x | \omega_j)P(\omega_j) \\ x \in \omega_j, & \text{if } P(x | \omega_j)P(\omega_j) > P(x | \omega_i)P(\omega_i), \text{ for all } i \neq j \end{cases} \quad (4.17)$$

透過影像分類，即可得知區域內植生地及裸露地之分布情形。本研究植生指標之計算，則依據影像分類之結果，定義為斜坡單元內植生地所佔面積與斜坡單元總面積之比值，如式(4.18)，以表示在邊坡上植生的疏密程度。

$$\text{植生指標} = \frac{\text{斜坡單元內植生地所佔面積}}{\text{斜坡單元總面積}} \quad (4.18)$$



### 3.3.3 區位因子

區位因子為描述邊坡在空間上與水系、道路的水平距離之因子。本研究使用之區位因子為水系距及道路距。區位因子之計算，又可區分為至斜坡單元邊界之距離及至斜坡單元形心之距離兩種，如圖 3-11。其分析方法分述如下：

#### 1. 水系距

水系距為描述邊坡至水系之距離，距水系較近之邊坡，受水系的侵蝕作用影響，產生侵蝕溝，進而使邊坡表面受到切割，導致邊坡強度及穩定性降低，而更容易發生崩塌。

本研究將臺灣本島河流圖資與斜坡單元進行套疊，計算水系距離各斜坡單元之最短直線距離，定義為水系距，如式(4.19)，並分別計算至斜坡單元邊界之水系距及至斜坡單元形心之水系距。

$$\text{水系距} = \text{水系至斜坡單元 (邊界或形心) 之最短直線距離} \quad (4.19)$$

#### 2. 道路距

道路距為描述邊坡至道路之距離，坡地若受人為開發，開發時的擾動可能影響邊坡之穩定性，尤其當道路開發時，容易有砍坡腳之問題發生，故距道路越近之邊坡，越容易因道路開發而受到擾動，使得邊坡之穩定性降低，更容易發生崩塌。

本研究將臺灣省道圖資與斜坡單元進行套疊，計算道路距離各斜坡單元之最短直線距離，定義為道路距，如式(4.20)，並分別計算至斜坡單元邊界之道路距及至斜坡單元形心之道路距。

$$\text{道路距} = \text{道路至斜坡單元 (邊界或形心) 之最短直線距離} \quad (4.20)$$

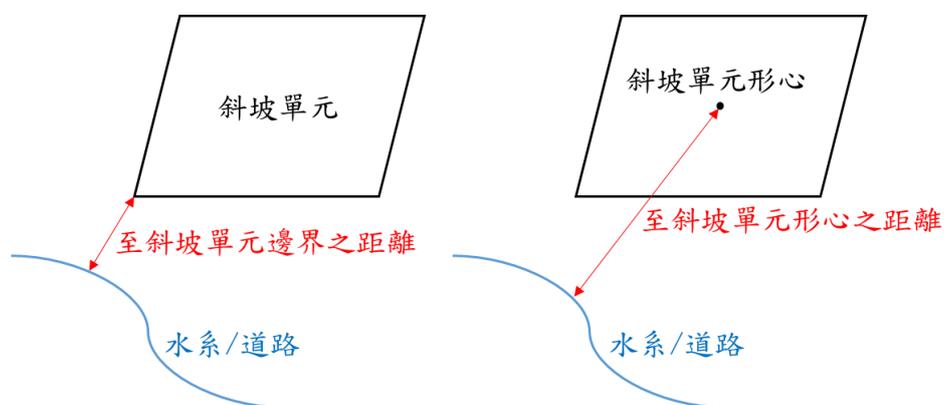


圖 3-11、區位因子計算示意圖



### 3.3.4 地質因子

地質因子為描述不同地質材料特性之因子，不同的地質狀況，包含岩性、沉積年代、沉積狀況及破碎程度等，均會導致邊坡特性不同，影響邊坡崩塌之可能性。其中又以地層的強度、地層傾向與坡向之關係、地層的破碎程度等對邊坡的穩定性影響甚大，故本研究選定三種地質因子進行分析，包含岩體強度、褶皺度及順向坡指標。其分析方法分述如下：

#### 1. 岩體強度

岩體強度的強弱，可視為其抵抗外力擾動的能力。若邊坡的岩體強度越弱，則邊坡抵抗外力擾動的能力越低，發生崩塌的可能性越高。根據 Franklin (1975)，利用岩體結構的破碎程度及岩石的單壓強度大小，將岩體強度由大至小分為 I 至 VII 類，共七種強度類別，如圖 3-12 所示。

本研究利用二萬五千分之一環境地質圖的岩體強度分級分布圖資，與斜坡單元進行套疊，計算各斜坡單元中的多數岩體強度及最弱岩體強度，以代表該斜坡單元之岩體強度。

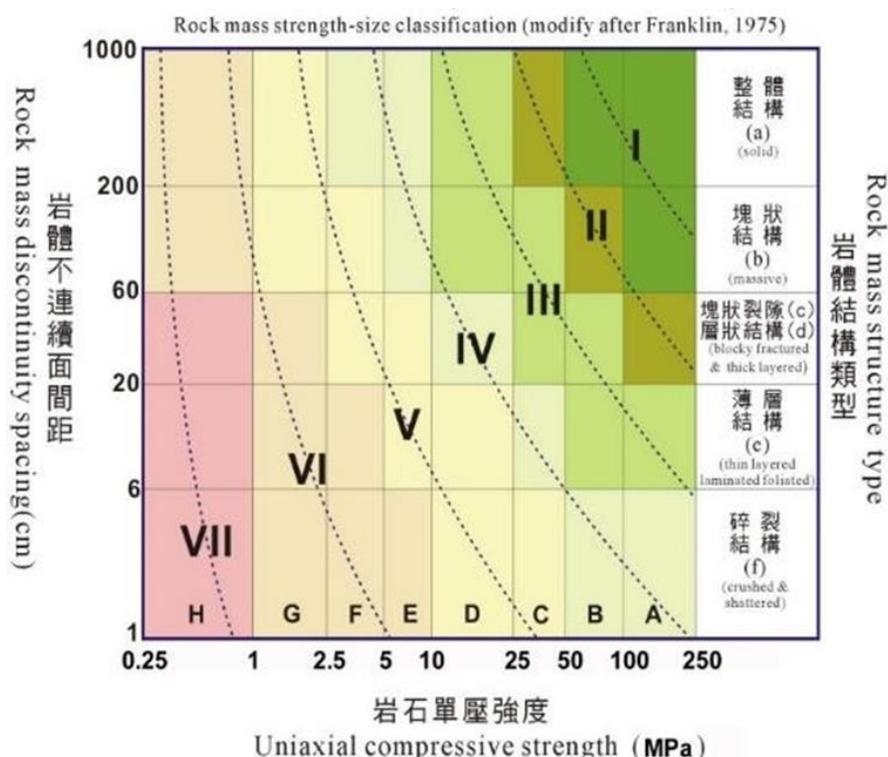
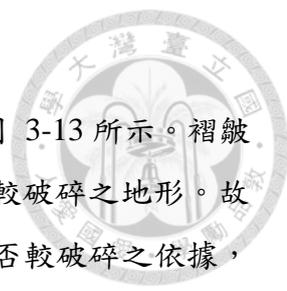


圖 3-12、岩體強度分級圖 (摘自中央地質調查所，2016)



## 2. 褶皺度

褶皺為地層受力作用後，呈現波浪狀彎曲的狀態，如圖 3-13 所示。褶皺所經的地方，代表其曾受複雜且劇烈之應力作用，可能具較破碎之地形。故可利用褶皺於斜坡單元中之分布，作為判斷該邊坡地層是否較破碎之依據，破碎之地層可能導致邊坡抵抗外力的能力減少，造成邊坡發生崩塌的可能性提高。

本研究將斜坡單元中，所經過的褶皺數目，定義為褶皺度，如式(4.21)。

$$\text{褶皺度} = \text{斜坡單元中經過之褶皺數} \quad (4.21)$$

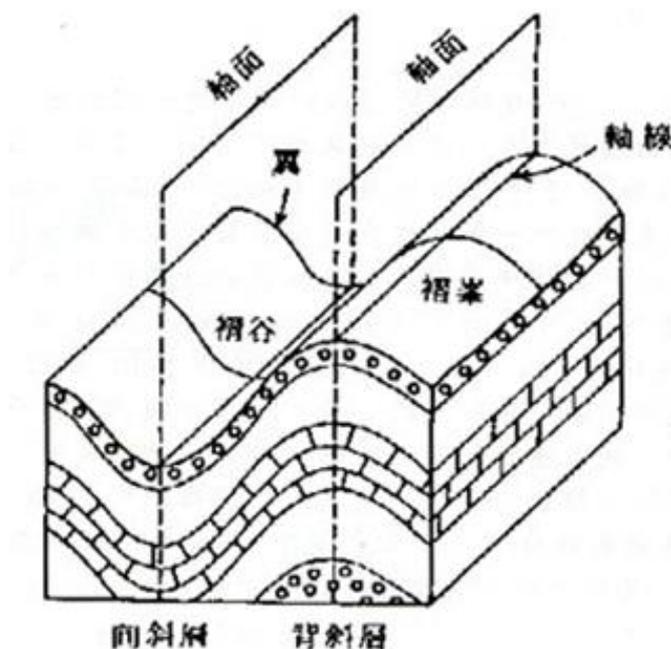


圖 3-13、褶皺示意圖 (摘自臺大地質科學數位典藏博物館)



### 3. 順向坡指標

依據水土保持技術規範定義，當坡面與層面之走向大致平行（或兩面走向之交角在  $20^\circ$  以內），且坡面傾向與層面傾向一致者，稱為順向坡。由於順向坡之坡面與層面走向一致，故邊坡之坡體容易沿層面滑動，導致邊坡發生崩塌的可能性提高。

順向坡的判釋可以利用五萬分之一與二十五萬分之一地質圖，得到各地層的傾向，繪製地層傾向圖，並依據水土保持技術規範定義，計算各網格中坡向與層面傾向之差值，交角差小於  $20^\circ$  或大於  $340^\circ$  者，定義為順向坡，如式(4.22)，以求出順向坡分布圖，如圖 3-14。將所得之順向坡分布圖與斜坡單元進行套疊，計算各單元內順向坡所佔面積與斜坡單元總面積之比值，定義為順向坡指標，如式(4.23)。

$$\text{順向坡} \equiv \begin{cases} |\text{地層傾向} - \text{坡向}| < 20^\circ \\ |\text{地層傾向} - \text{坡向}| > 340^\circ \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\text{順向坡指標} = \frac{\text{斜坡單元內順向坡所佔面積}}{\text{斜坡單元總面積}} \quad (4.23)$$

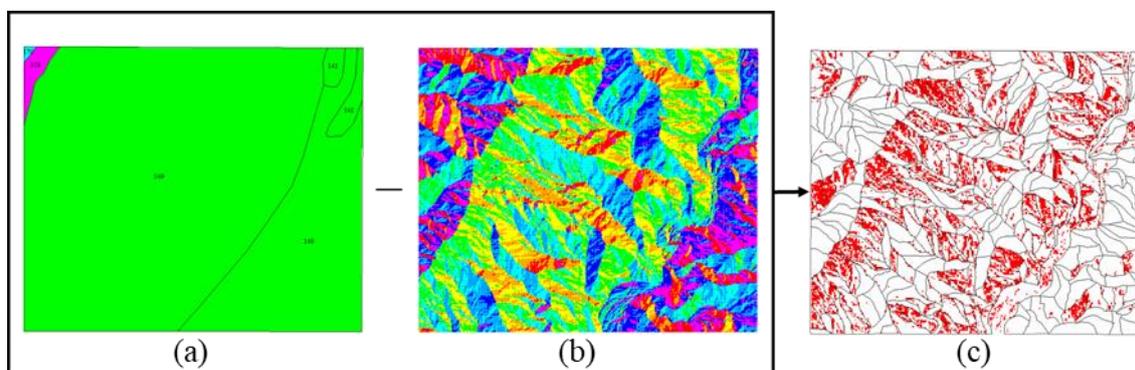


圖 3-14、順向坡判釋示意圖

(a)地層傾向圖；(b)坡向圖；(c)順向坡分布圖



### 3.4 相關性分析

相關性分析之主要目的，為透過統計指標了解兩變量間之相依程度。由於崩塌潛勢評估模型訓練時，必須將與崩塌無關之因子剔除，否則，這些無關之因子會導致訓練出的模型品質不佳，進而使崩塌預測之準確性下降。故必須先篩選出與崩塌具顯著相關之潛感因子，以作為模型之訓練資料。

#### 3.4.1 Spearman 相關性

本研究為了探討所選用之潛感因子對崩塌之相關程度，因此針對這些因子進行相關性分析，得到各因子與邊坡崩塌之相關性，以篩選出與崩塌具顯著相關之顯著因子。考量本研究各因子間分布情形差異甚大，且未必所有因子均能滿足參數統計法之嚴格假設，故本研究選擇使用 Spearman 等級相關進行相關性分析，Spearman 等級相關為一種非參數統計法，即無資料分布假設之統計方法，其具有以下三大優點：

1. 資料可為非線性相關
2. 資料不需符合常態分布
3. 資料中有離群值亦可使用

Spearman 等級相關可應用於有序變數之相關性描述，其計算上，先將變量依順序轉換為等級 (rank)，再依此等級計算兩變量之相關性，其定義如式(4.24)。

$$\gamma_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4.24)$$

其中， $\gamma_s$  為 Spearman 相關係數， $d_i$  為兩變量間之等級差異， $n$  為樣本數。

Spearman 等級相關係數  $\gamma_s$  之值域介於 1 至 -1 之間，正值代表正相關，負值代表負相關，若等級相關係數  $\gamma_s = 0$ ，代表兩變量間無相關性，即兩變量獨立。參考吳明隆 (2012)，相關係數之關聯程度分級如表 3-4。

並依據等級相關係數  $\gamma_s$ ，進一步檢定兩變數間是否具顯著相關。首先定義虛無假設為兩變數獨立 (即  $\gamma_s = 0$ )，並依據其相關係數  $\gamma_s$  計算統計檢定量  $t$ ，如式 (4.25)，而後由統計檢定量  $t$  計算雙尾檢定下之  $p$  值。 $p$  值可視為符合虛無假設之機率，本研究利用  $p$  值進行檢核，若  $p < 0.05$ ，代表可以拒絕虛無假設，表示該因子與崩塌之相關性在 95% 之信心水準下，如此便認定該因子為具顯著相關之因子。

$$t = \gamma_s \sqrt{\frac{n-2}{1-\gamma_s^2}} \quad (4.25)$$

其中， $t$  為統計檢定量， $\gamma_s$  為 Spearman 相關係數， $n$  為樣本數。



表 3-4、相關係數之關聯程度分級表

Spearman 等級相關係數	變量間關聯程度
$ \gamma_s  \geq 0.8$	完全相關
$0.6 \leq  \gamma_s  < 0.8$	高度相關
$0.4 \leq  \gamma_s  < 0.6$	中度相關
$0.2 \leq  \gamma_s  < 0.4$	低度相關
$ \gamma_s  < 0.2$	微弱或無相關



### 3.4.2 分析結果

為了篩選出與崩塌具相關性之環境因子，用於後續模型訓練之用，本研究利用林務局判釋的 2015 年之崩塌資料，劃分出崩塌單元，將其與 2012 年 DEM 產製之環境因子為代表進行崩塌與環境因子間的相關性分析。2015 年之崩塌單元及環境因子如圖 3-15 及圖 3-16 所示，共分析了坡度（單元內平均）、坡向（單元內平均）、高程（單元內平均及單元內最大）、地形粗糙度、剖面曲率（單元內平均及單元內最小）、植生指標、水系距（至單元邊界及至單元形心）、道路距（至單元邊界及至單元形心）、岩體強度（單元內多數及單元內最弱）、褶皺度及順向坡指標等 16 項因子，其資料來源如表 3-5 所示。

分析結果如表 3-6，透過顯著性檢定，以  $p < 0.05$  之因子為顯著因子，可得坡度（單元內平均）、坡向（單元內平均）、地形粗糙度、剖面曲率（單元內最小）、植生指標、水系距（至單元邊界及至單元形心）及岩體強度（單元內最弱）共 8 項顯著因子。其中，水系距（至單元邊界）的相關性高於水系距（至單元形心），故保留前者作為水系距之代表。

根據相關性分析結果，篩選出除了促崩因子（事件累積降雨量）外，共 7 項顯著的環境因子，即在研究區域內與崩塌具顯著相關性之環境因子，包含 5 項地貌因子-坡度、坡向、地形粗糙度、剖面曲率及植生指標；1 項區位因子-水系距；1 項地質因子-岩石強度。此 8 項潛感因子將作為崩塌潛勢評估模型之訓練資料。圖 3-17 顯示此 8 項潛感因子與崩塌之相關性，得知顯著因子中，地形粗糙度、坡度及事件累積降雨量與崩塌呈現正相關，而植生指標、水系距、剖面曲率、坡向及岩體強度呈現負相關。其中，植生指標與邊坡是否發生崩塌之相關性最大，為中度相關；水系距及地形粗糙度次之，相關性分居第二、三名，並與剖面曲率及坡度均為低度相關，坡向、事件累積降雨量及岩體強度則為微弱相關。

其中，坡向及岩體強度為類別變量，雖然相關性分析之結果具顯著相關，但相關係數難以清楚描述類別變量中何種類別與邊坡是否崩塌的影響性較大，故輔以統計坡向及岩體強度中各類別的崩塌比，以探討不同坡向及岩體強度對崩塌之影響性，崩塌比之定義如式(4.26)。崩塌比統計結果如圖 3-18 及圖 3-19 所示，明顯觀察到坡向於東北方、東方及南方最容易導致邊坡崩塌發生，於西南方至西北方最不容易導致邊坡發生；而岩體強度於第 IV 類最容易導致邊坡崩塌發生，於第

VI 類最不容易導致邊坡崩塌發生。

$$\text{崩塌比} = \frac{\text{該類別崩塌斜坡單元數}}{\text{該類別總斜坡單元數}} \quad (4.26)$$

透過相關性分析，發現除了植生指標與崩塌相關性為中度相關外，其餘顯著因子均為低度或微弱相關，亦證明邊坡是否會發生崩塌並非受單一因子所控制，而是受眾多潛感因子交互影響而成，故必須結合這些不同的潛感因子，才能準確描述邊坡是否穩定之特性。

表 3-5、相關性分析崩塌及環境因子資料來源表

分析資料		資料來源
崩塌單元		林務局 2015 年全島判釋崩塌地
環境因子	坡度	2012 年 DEM
	坡向	
	地形粗糙度	
	剖面曲率	
	植生指標	2014/08/28 衛星影像
	水系距	全島河流圖資
	岩體強度	岩體強度分級分布圖

表 3-6、環境因子與崩塌相關性表 (以 2015 年資料為例)

環境因子		Spearman 相關係數	<i>p</i> 值	顯著因子
地貌因子	坡度 (單元內平均)	0.22	0.00	√
	坡向 (單元內平均)	-0.12	0.02	√
	高程 (單元內平均)	-0.05	0.39	
	高程 (單元內最大)	-0.02	0.74	
	地形粗糙度	0.25	0.00	√
	剖面曲率 (單元內平均)	0.04	0.49	
	剖面曲率 (單元內最小)	-0.23	0.00	√
	植生指標	-0.47	0.00	√
區位因子	水系距 (至單元邊界)	-0.27	0.00	√
	水系距 (至單元形心)	-0.16	0.00	√
	道路距 (至單元邊界)	0.00	0.94	
	道路距 (至單元形心)	0.01	0.81	
地質因子	岩體強度 (單元內多數)	-0.06	0.25	
	岩體強度 (單元內最弱)	-0.10	0.05	√
	褶皺度	0.05	0.31	
	順向坡指標	-0.08	0.15	

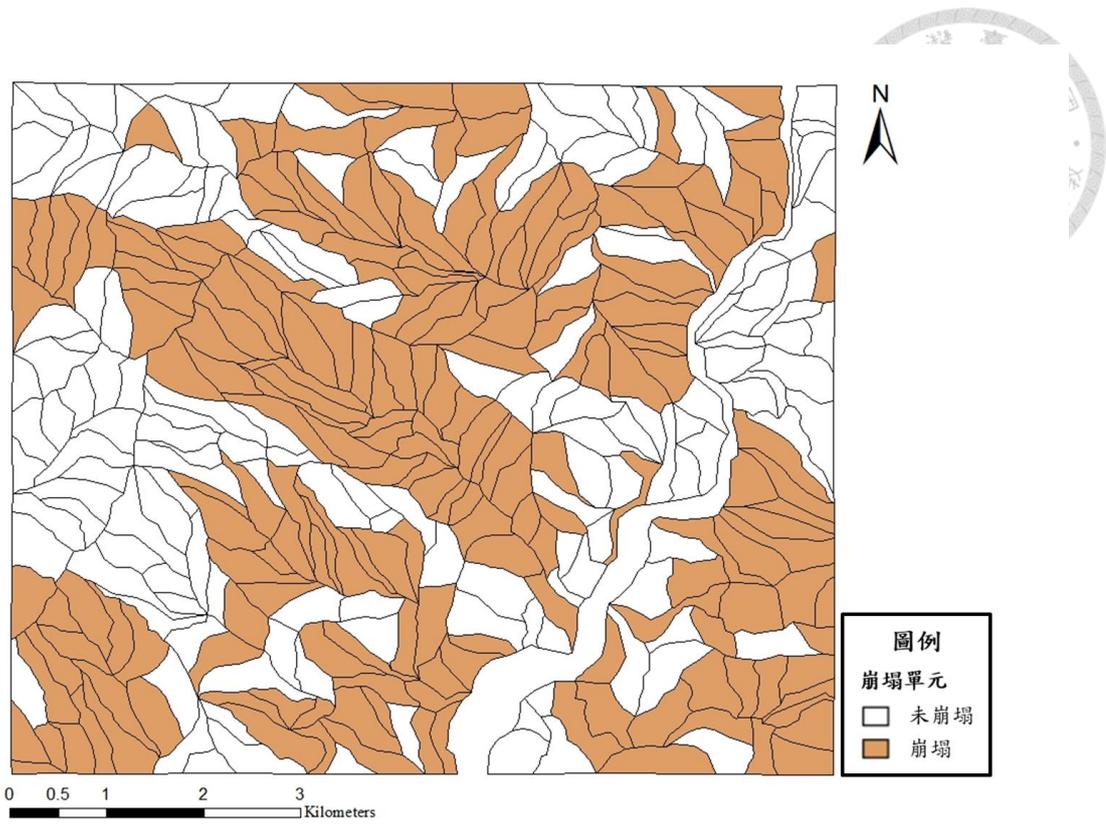
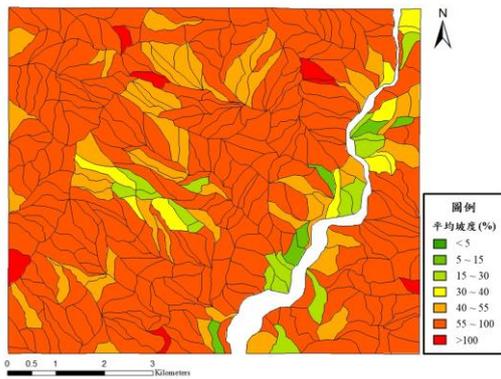
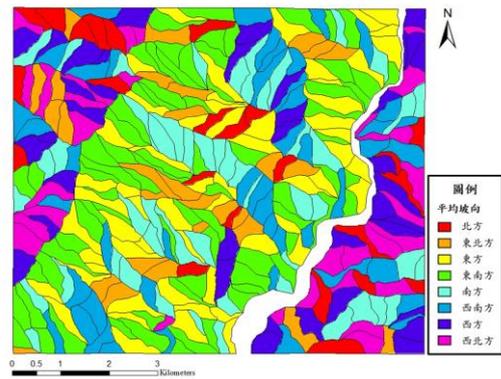


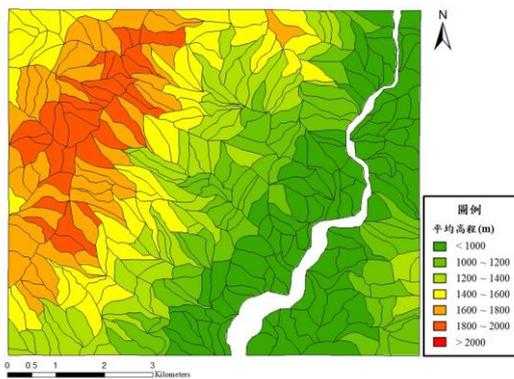
圖 3-15、2015 年崩塌單元



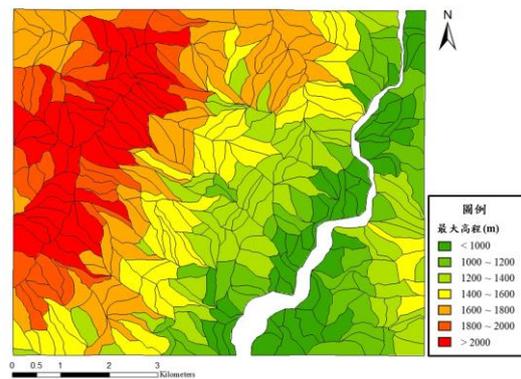
(a)坡度 (單元內平均)



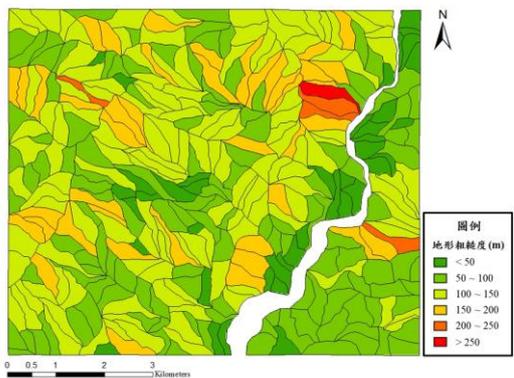
(b)坡向 (單元內平均)



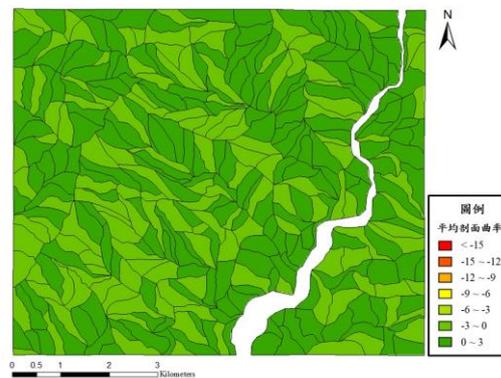
(c)高程 (單元內平均)



(d)高程 (單元內最大)

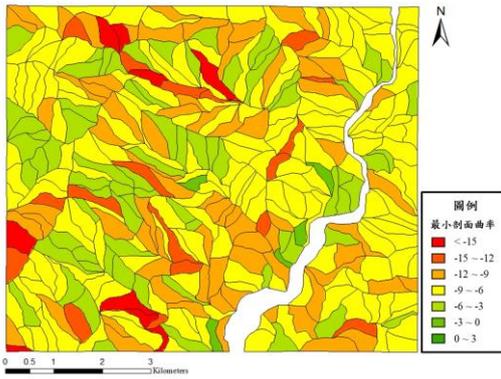


(e)地形粗糙度

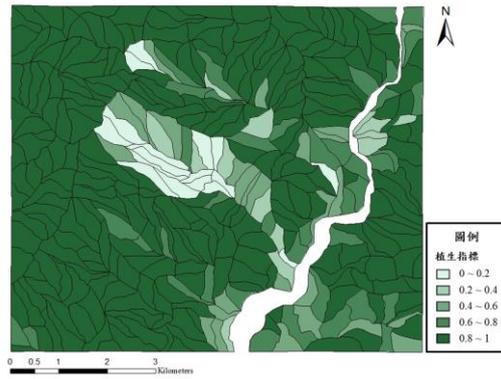


(f)剖面曲率 (單元內平均)

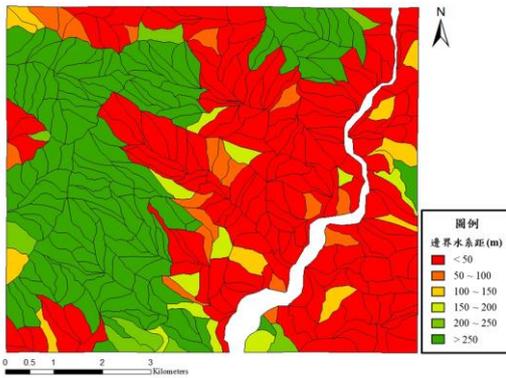
圖 3-16、環境因子圖 (以 2012 年 DEM 產製)



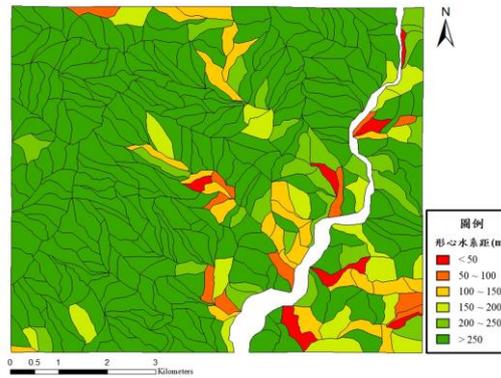
(g)剖面曲率 (單元內最小)



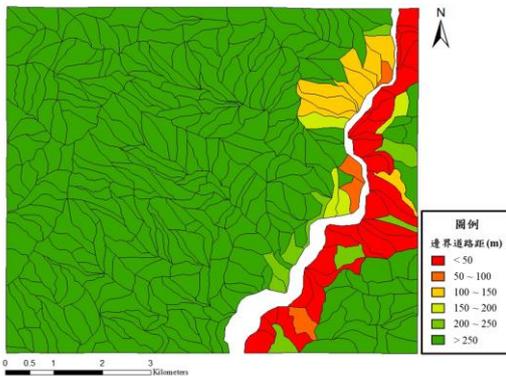
(h)植生指標 (2014/08/28 衛星影像)



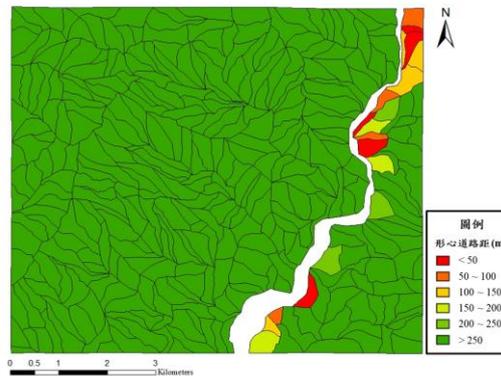
(i)水系距 (至單元邊界)



(j)水系距 (至單元形心)

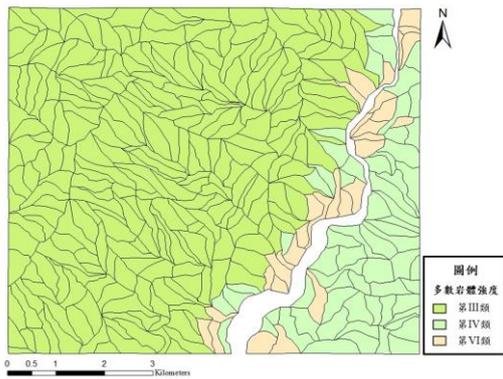


(k)道路距 (至單元邊界)

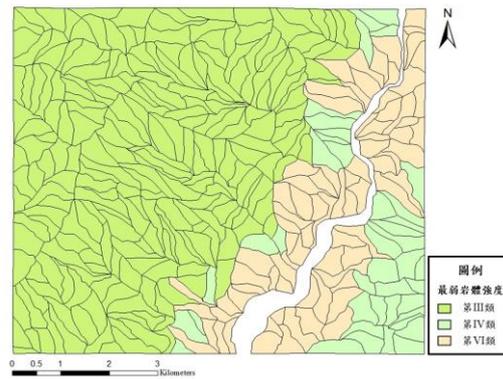


(l)道路距 (至單元形心)

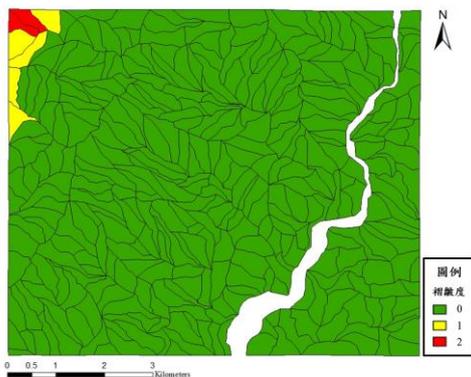
圖 3-16、環境因子圖 (以 2012 年 DEM 產製)(續)



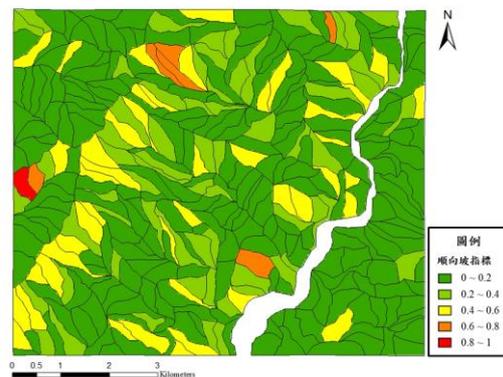
(m)岩體強度 (單元內多數)



(n)岩體強度 (單元內最弱)



(o)褶皺度



(p)順向坡指標

圖 3-16、環境因子圖 (以 2012 年 DEM 產製)(續)

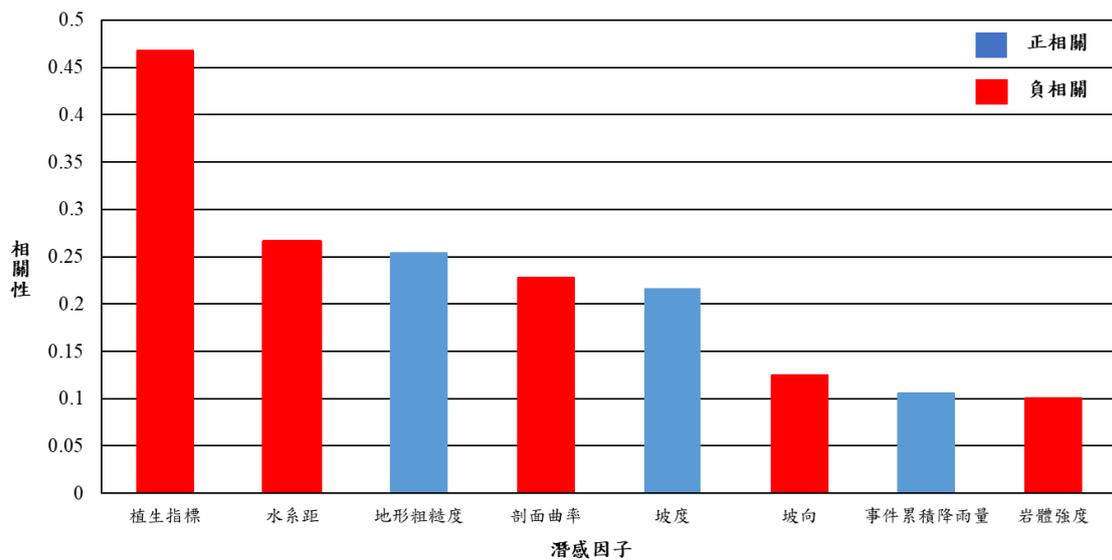


圖 3-17、顯著因子與崩塌相關性圖

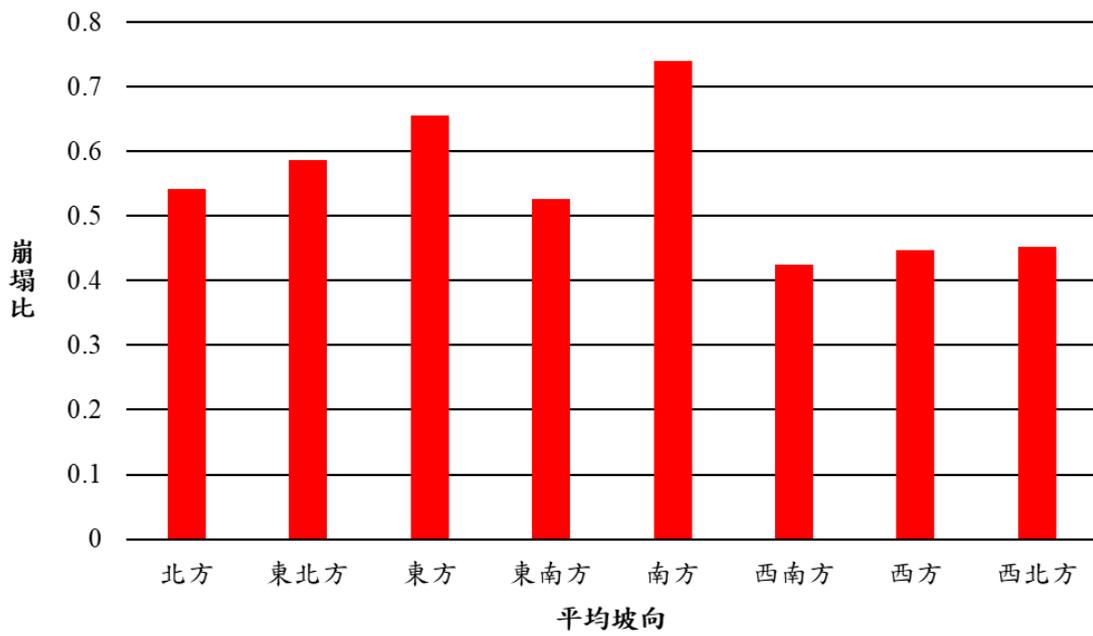


圖 3-18、2015 年坡向之崩塌比統計圖

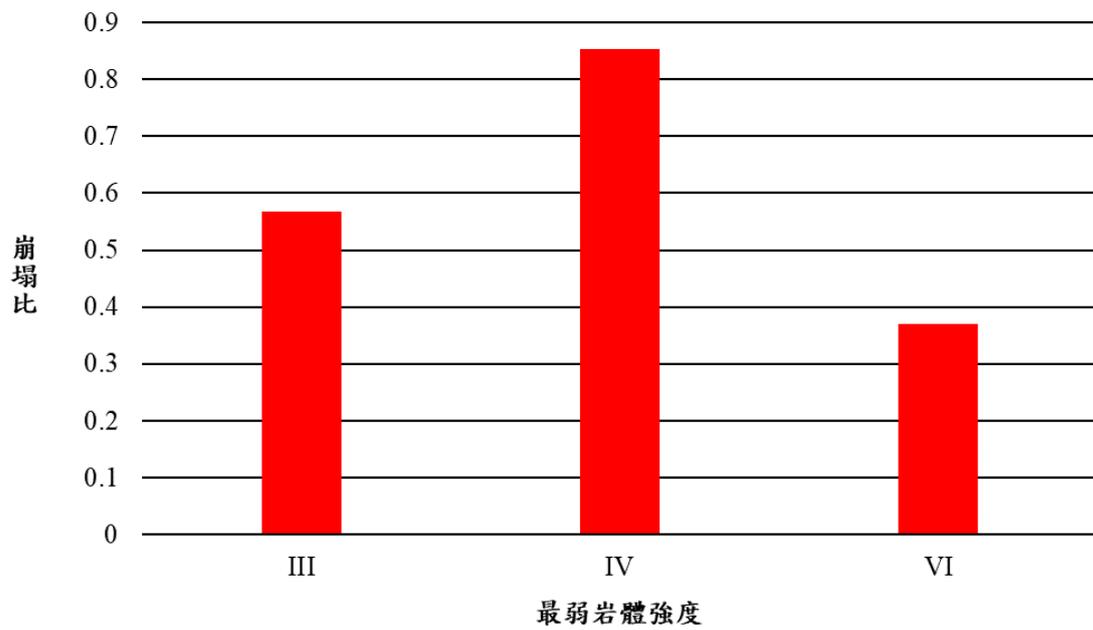


圖 3-19、2015 年岩體強度之崩塌比統計圖



## 第4章 PSInSAR 解算與優化分析

在本研究中，使用永久散射體雷達干涉技術 (PSInSAR) 來監測地表變形，並計算地表變形的平均速度，以監測在崩塌事件發生前邊坡的變形行為，作為崩塌潛勢評估模型中的動態潛感因子。雷達影像的處理與永久散射體雷達干涉技術的解算，分別運用 SNAP 及 StaMPS 軟體進行分析，並利用 GPS 測站之觀測資料進行校正。且為了令永久散射體雷達干涉技術監測所得之地表變位速度，能更有效的監測到邊坡崩塌前之地表變形行為，本研究對地表變位速度進行優化分析，包含選取時間間距分析及地表變位速度方向分析，於本章進行說明。

### 4.1 PSInSAR 原理

根據 Hooper et al. (2004, 2007)，PSInSAR 技術之解算原理主要可分為三個步驟-PS 選點、相位解纏及空間相關之誤差估算，分別於以下進行說明。

#### 4.1.1 PS 選點

PSInSAR 解算的首要步驟就是篩選出永久散射點 (PS)，雷達影像經過干涉處理後，可以得到強度影像、同調性影像及相位影像三項影像資料，而 PS 點可以透過這三種影像資料篩選而出。

根據 Hooper et al. (2004)，PS 點是選擇影像中相位較穩定的點位，相位的穩定性又與回波強度及同調性具有正相關關係，故可先從強度影像及同調性影像中分別挑選 PS 候選點 (PS candidate, PSC)，並做點位交集的動作及相位分析，篩選出於時間序列上相對穩定的點位。

為了從強度影像中挑選適合的 PSC，可以根據 Ferretti et al. (2001) 提出的強度分布指標  $D_A$  進行篩選，如式(5.1)。

$$D_A \equiv \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (5.1)$$

其中， $D_A$  為影像中像素之強度分布指標， $\sigma_A$  為各像素在時間序列上強度的標準差， $\mu_A$  為各像素在時間序列上強度的平均值。

藉由訂定一門檻值，若像素之強度分布指標  $D_A$  小於門檻值，代表此像素在時

間序列中屬於強度較強且相對穩定之像素，便定義此點為 PSC。一般而言，建議 0.4 至 0.42 之間，本研究使用 Hooper et al. (2004) 建議之標準值 0.4。並將同調性影像作相同之分析，找出於時間序列中，同調性較高且相對穩定之像素，可得另一組 PSC。將利用強度影像與同調性影像所篩選出之兩組 PSC 進行交集，挑選出 PSC 點位，並透過後續的相位穩定度分析，以得到 PS 點。

接著可從所有相位影像中擷取出各 PSC 上的相位資訊，但此干涉成果之相位資訊不僅包含地表變形之相位，還包含大氣效應、軌道誤差、視角誤差等所造成之相位，可以式(5.2)表示 (Hooper et al., 2007)，必須於後續處理中將這些誤差消除。

$$\phi_{x,i} = W \left\{ \phi_{def,x,i} + \phi_{\alpha,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \phi_{n,x,i} \right\} \quad (5.2)$$

其中， $\phi_{x,i}$  為第  $x$  像素在第  $i$  幅影像上之相位， $\phi_{def,x,i}$  為衛星視線 (line of sight, LOS) 方向上的地表變形所代表之相位， $\phi_{\alpha,x,i}$  為大氣效應所代表之相位， $\Delta\phi_{orb,x,i}$  為軌道誤差的殘差所代表之相位， $\Delta\phi_{\theta,x,i}$  為視角誤差的殘差所代表之相位， $\phi_{n,x,i}$  為其它雜訊， $W$  代表將各分量轉換至  $\pm 2\pi$  間的運算子。

根據 Hooper et al. (2007)，其將干涉圖重新網格化，利用二維傅立葉轉換至頻率域後，利用帶通濾波及低通濾波決定各網格內的主頻波段及通過區段，得到具空間相關性之相位  $\tilde{\phi}_{x,i}$ ，並將式(5.2)減去  $\tilde{\phi}_{x,i}$  得到非空間相關的殘餘相位，如式(5.3)。其中， $\phi_{def,x,i}^u$ 、 $\phi_{\alpha,x,i}^u$ 、 $\Delta\phi_{orb,x,i}^u$  非常小，故將其合併為  $\delta_{x,i}$  表示，可得式(5.4)。

$$W \left\{ \phi_{x,i} - \tilde{\phi}_{x,i} \right\} = W \left\{ \phi_{def,x,i}^u + \phi_{\alpha,x,i}^u + \Delta\phi_{orb,x,i}^u + \Delta\phi_{\theta,x,i}^u + \phi_{n,x,i}^u \right\} \quad (5.3)$$

$$W \left\{ \phi_{x,i} - \tilde{\phi}_{x,i} \right\} = W \left\{ \Delta\phi_{\theta,x,i}^u + \phi_{n,x,i}^u + \delta_{x,i} \right\} \quad (5.4)$$

其中，視角誤差  $\Delta\phi_{\theta,x,i}$  又稱為地形殘差，是因兩幅影像拍攝時衛星的軌道位置不同，經干涉處理時扣除地形效應後未能完全移除的量，根據 Hooper et al. (2007)，可表示為式(5.5)。

$$\Delta\phi_{\theta,x,i} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot B_{\perp}(\theta) \cdot \Delta\theta \quad (5.5)$$

其中， $\lambda$  為雷達波長， $B_{\perp}$  為與視線垂直之基線長， $\theta$  為衛星視角， $\Delta\theta$  為衛星視角差異造成之誤差，此誤差可表示為式(5.6)。

$$\Delta\theta = \frac{\Delta h \cdot \sin(\theta_i) + \zeta \cdot \cos(\theta_i)}{r} \quad (5.6)$$



其中， $\Delta h$  為高程誤差， $\zeta$  為相位中心與中央像素於測距方向之水平距離， $\theta_i$  為第  $i$  幅影像的衛星視角， $r$  為主影像中衛星與地表的視線距離。

將式(5.5)及(5.6)之概念，代入式(5.4)，可得式(5.7)。

$$W\{\phi_{x,i} - \tilde{\phi}_{x,i}\} = W\left\{\frac{4\pi}{\lambda} \cdot B_{\perp,x,i} \cdot \Delta\theta_i^u + \phi_{n,x,i}^u + \delta_{x,i}\right\} \quad (5.7)$$

因  $\phi_{x,i}$ 、 $\tilde{\phi}_{x,i}$  及  $B_{\perp,x,i}$  可由相位資料、衛星軌道資訊中獲得，且  $B_{\perp,x,i}$  與  $\phi_{n,x,i}^u$ 、 $\delta_{x,i}$  無相關性，因此可利用最小平方法估算出  $\Delta\hat{\theta}_i^u$ ，進而計算出  $\Delta\phi_{\theta,x,i}^u$  的估計值  $\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u$ ，並將式(5.7)減去  $\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u$ ，可得式(5.8)，其中  $\delta'_{x,i}$  如式(5.9)。

$$W\{\phi_{x,i} - \tilde{\phi}_{x,i} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u\} = W\{\phi_{n,x,i}^u + \delta'_{x,i}\} \quad (5.8)$$

$$\delta'_{x,i} = \delta_{x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^u - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u \quad (5.9)$$

將式(5.8)代入 Hooper et al. (2004) 所提出用以量化此殘差之公式如式(5.10)。

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp\left\{\sqrt{-1}(\phi_{x,i} - \tilde{\phi}_{x,i} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u)\right\} \right| \quad (5.10)$$

其中， $\gamma_x$  代表第  $x$  像素的相位於時間序列中的穩定程度， $N$  為干涉圖數量。

假設  $\phi_{n,x,i}^u \approx \phi_{n,x,i}$  且  $\delta'_{x,i} \approx 0$ ，計算各像素的  $\gamma_x$ ，可作為選取 PS 點之標準。以強度分布指標  $D_A$  計算各 PSC 為 PS 點之機率，利用強度分布指標之平均值  $\hat{D}_{A,x}$  選擇像素量大於  $10^4$  之區域，並將  $\gamma_x$  每次提高 0.01，得到機率分布  $p(\gamma_x, \hat{D}_{A,x})$ 。並估計各  $\hat{D}_{A,x}$  區域中的像素比  $\alpha$ ，每個  $\hat{D}_{A,x}$  可以找到一個  $\gamma^{threshold}(\hat{D}_{A,x})$ ，透過積分得到非 PS 點的像素量  $1 - \alpha(\hat{D}_A) \int_{\gamma^{threshold}}^1 p_B(\gamma_x) d\gamma_x$ ，則假陽性比 (fraction of false positive)  $q$  值可定義如式(5.11)，其中  $p_B(\gamma_x)$  為隨機相位的機率分布。

$$q = \frac{1 - \alpha(\hat{D}_A) \int_{\gamma^{threshold}}^1 p_B(\gamma_x) d\gamma_x}{\int_{\gamma^{threshold}}^1 p(\gamma_x, \hat{D}_A) d\gamma_x} \quad (5.11)$$

其中  $\gamma^{threshold}$  與  $\hat{D}_A$  呈線性相關，透過最小平方法計算式(5.12)，以求得  $\kappa$  的最佳解，如此便可定義  $\gamma_x > \kappa \hat{D}_A$  之像素作為 PS 點，並透過迭代計算可以取得精度更高之 PS 點。

$$\gamma^{threshold} = \kappa \hat{D}_A \quad (5.12)$$



### 4.1.2 相位解纏

篩選完 PS 點後，可由影像中獲取各 PS 點的相位資訊，但由於干涉圖僅會獲得  $\pm\pi$  範圍內之相位，故需進行相位解纏 (phase unwrapping)，以獲得真實變形所造成的相位，相位解纏的概念示意如圖 4-1。在解纏前，需先刪除會對結果造成嚴重影響的無關相位，包括非空間相關的視角誤差代表之相位  $\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u$  (於 PS 選點時已估計) 及主影像的非空間相關之相位  $\hat{\phi}_x^{m,u}$ ，之後相位可表示為式(5.13)。其中， $\Delta\phi_{\theta,x,i}^c$  代表  $\Delta\phi_{\theta,x,i}$  中與空間相關的部分， $\Delta\phi_{n,x,i}$  代表非空間相關之雜訊的殘差，如式(5.14)。

$$W\{\phi_{x,i} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u - \hat{\phi}_x^{m,u}\} = W\{\phi_{def,x,i} + \phi_{\alpha,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^c + \Delta\phi_{n,x,i}\} \quad (5.13)$$

$$\Delta\phi_{n,x,i} = \phi_{n,x,i} - \hat{\phi}_x^{m,u} \quad (5.14)$$

根據 Hooper et al. (2004)，將 PS 點間建立 Delaunay 三角網以建立點與點間的關係，並利用三維的相位解纏方法進行解纏，解纏後之相位  $\hat{\phi}_{x,i}$  可表示為式(5.15)。

$$\hat{\phi}_{x,i} = \phi_{def,x,i} + \phi_{\alpha,x,i} + \Delta\phi_{orb,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^c + \Delta\phi_{n,x,i} + 2k_{x,i}\pi \quad (5.15)$$

其中， $k_{x,i}$  為無法估計的整數模糊度 (ambiguity)，若解纏結果正確，則  $k_{x,i}$  在同一干涉圖下的各像素  $x$  中會為一定值。

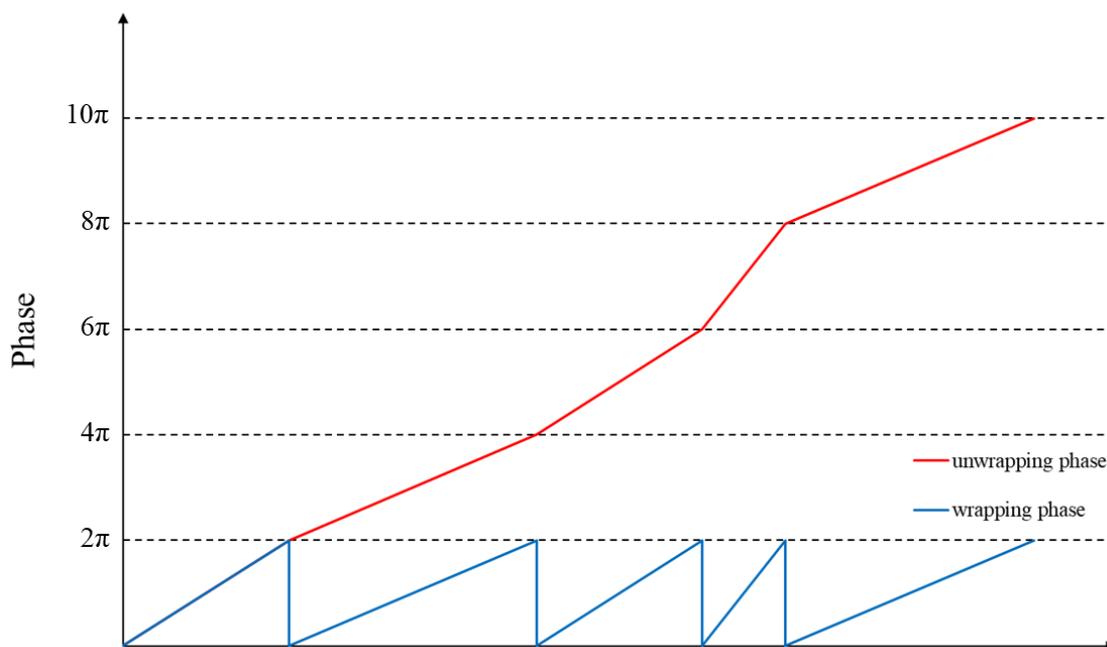


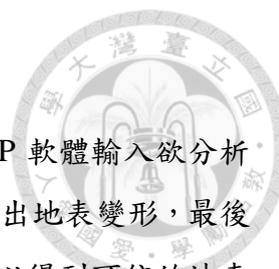
圖 4-1、相位解纏示意圖



### 4.1.3 空間相關之誤差估算

解纏後的相位  $\hat{\phi}_{x,i}$  如式(5.15)所示，尚存在許多誤差項 ( $\phi_{\alpha,x,i}$ 、 $\Delta\phi_{orb,x,i}$ 、 $\Delta\phi_{\theta,x,i}^c$ 、 $\Delta\phi_{n,x,i}$  及  $2k_{x,i}\pi$ )，其中，與空間相關之誤差影響較大，須進行刪除。因為  $2k_{x,i}\pi$  為一定值，可利用周圍像素間的關係進行消除。而剩餘的空間相關之誤差可分為兩部分，分別為由主影像造成的大氣誤差及軌道誤差 ( $\phi_{\alpha,x,i}^m$ 、 $\Delta\phi_{orb,x,i}^m$ )，其與時間亦具相關性，可藉由將解纏後相位  $\hat{\phi}_{x,i}$  於時間域進行低通濾波，去除高頻雜訊以估計此誤差並刪除；另一部分為由副影像造成的大氣誤差、軌道誤差及空間相關之視角誤差的殘差 ( $\phi_{\alpha,x,i}^s$ 、 $\Delta\phi_{orb,x,i}^s$ 、 $\Delta\phi_{\theta,x,i}^c$ )，其與時間不相關，可藉由將解纏後相位  $\hat{\phi}_{x,i}$  於時間域進行高通濾波得到高頻雜訊後，再於空間域進行低通濾波得到與空間相關之低頻訊號以估計此誤差並刪除。

最後，可再透過對所有影像於空間域進行低通濾波，保留低頻訊號以消除高頻雜訊  $\Delta\phi_{n,x,i}$ ，如此便可得到各 PS 點在衛星視線 (LOS) 方向上的真實地表變形所造成之相位  $\phi_{def,x,i}$ ，並可用以計算地表變形。



## 4.2 解算方法

本研究中，PSInSAR 解算可分為三個部分，首先利用 SNAP 軟體輸入欲分析的雷達影像產製干涉圖，接著將干涉圖輸入至 StaMPS 軟體解算出地表變形，最後以研究區域周圍的 GPS 測站對所得的地表變位速度進行校正，以得到可信的地表變位速度結果。以下針對 SNAP 軟體、StaMPS 軟體及 GPS 校正的操作與分析流程進行說明。

### 4.2.1 SNAP

SNAP (Sentinel Application Platform) 是由歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 所開發用以分析 Sentinel 衛星影像之數據處理平台，是一款開源且容易操作之軟體，且支援將資料輸出至其它不同軟體進行運算，為衛星影像處理上頻繁被使用的軟體。SNAP 軟體中共分成三種不同的工具箱，Sentinel-1 工具箱、Sentinel-2 工具箱及 Sentinel-3 工具箱，分別擁有不同的功能，可分別處理不同的衛星影像資料，如雷達影像、光學影像等，其功能統整如表 4-1。

本研究主要處理 Sentinel-1 衛星之雷達 (SAR) 影像資料，故使用 SNAP 軟體中之 Sentinel-1 工具進行處理及分析。利用 SNAP 軟體，可以完成在永久散射體干涉技術 (PSInSAR) 解算前之所有雷達影像的前處理工作，參考 Blasco et al. (2019) 之處理流程，其前處理流程共可分成三個階段，如圖 4-2 所示，詳細處理流程如下說明：

#### 1. 影像拆分

##### (1) 拆分影像 (Split)

Sentinel-1 衛星之雷達影像是由許多不同的條帶 (bursts) 組成，如圖 4-3，此步驟根據欲分析區域，拆分雷達影像，僅保留需要之條帶以供後續分析。

##### (2) 匯入精密軌道資料 (Apply orbit file)

衛星軌道資料為雷達影像拍攝時衛星的位置訊息。由於雷達影像原始資料中，僅有較不準確之預測軌道資料，透過此步驟，將精密軌道資料匯入雷達影像中，以回復軌道資料及獲得精確的軌道星歷表。



## 2. 影像套疊及干涉處理

### (1) 影像套疊 (Back-geocoding)

從欲分析的影像中，選擇一張主影像，運用前述步驟所匯入之精密軌道資料與數值高程模型，將其它影像與主影像進行套疊形成影像對，以供後續進行干涉處理。

### (2) 刪除條帶接縫 (Deburst)

如前述說明，Sentinel-1 衛星之雷達影像由許多條帶 (bursts) 組成，故條帶間會有接縫，透過此步驟，可以將這些條帶接縫刪除 (deburst)，使影像成為一張完整無接縫之影像，如圖 4-4。若僅使用一個條帶之影像，則可略過此步驟。

### (3) 影像切割 (Subset)

如所選取之條帶範圍大於欲分析之區域，則可利用此功能切割影像，僅保留欲分析之區域，供後續分析。

### (4) 生成干涉圖 (Interferogram)

將切割好的影像對進行干涉處理，形成干涉圖，如圖 4-5，可得到各影像對之相位差。

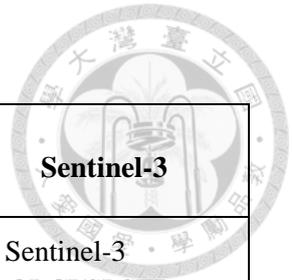
### (5) 去除地形誤差 (Topo phase removal)

藉由衛星軌道資訊及 DEM 刪除地表相位及地形相位，將原始相位中的部分誤差刪除。

## 3. 影像輸出 (StaMPS export)

將影像資訊及干涉成果等所需資訊輸出成二元網格資料，以利使用 StaMPS 軟體進行後續 PSInSAR 之計算。

表 4-1、SNAP 工具箱功能表



工具箱	Sentinel-1	Sentinel-2	Sentinel-3
支援影像	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sentinel-1</li> <li>2. ENVISAT ASAR</li> <li>3. ERS-1/2</li> <li>4. RADARSAT-2</li> <li>5. ALOS-1/2</li> <li>6. Cosmo-Skymed</li> <li>7. TerraSAR-X/ TanDEM-X</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sentinel-2 L1B/L1C/ L2A/L3</li> <li>2. Landsat-8</li> <li>3. Spot 1 ~ Spot 7</li> <li>4. Spot4 Take5</li> <li>5. Spot5 Take5</li> <li>6. RapidEye</li> <li>7. Deimos</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sentinel-3 OLCI/SLSTR</li> <li>2. ENVISAT MERIS/AATSR</li> <li>3. Landsat-4 ~ 8</li> <li>4. Proba CHRIS</li> <li>5. Spot VGT</li> <li>6. MODIS/SeaWiFS/ VIIRS</li> <li>7. ALOS AVHRR</li> </ol>
功能種類	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 所有一般地球觀測資料處理</li> <li>2. 影像校正</li> <li>3. 多視處理及濾波</li> <li>4. 精確軌道處理</li> <li>5. 複數影像套疊</li> <li>6. Sentinel-1 TOPS 影像的干涉、條帶去除及影像合併</li> <li>7. 都卜勒地形校正</li> <li>8. 地形校正時輻射標準化</li> <li>9. SAR 模擬、重疊及陰影遮罩</li> <li>10. SAR 地形校正模擬</li> <li>11. 橢球校正、重新投影、鑲嵌</li> <li>12. 海洋工具：基於 SAR 資料的漏油檢測、船舶偵測及風場評估</li> <li>13. InSAR 處理器</li> <li>14. 四極及雙極矩陣轉換、斑點濾波、分解及分類器</li> <li>15. 與 PolSARpro 工具箱兼容</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 大氣校正</li> <li>2. 時空合成底部的大氣校正後 Sentinel-2 2a 等級影像</li> <li>3. 輻射處理器的反射</li> <li>4. L2B 生物物理處理器</li> <li>5. 輻射指數(植生指數、土壤指數、水指數)</li> <li>6. MCI 處理器：透過特定基線的高度測量獲取最大葉綠素指標</li> <li>7. OTB 工具</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 視覺化像素光譜</li> <li>2. 波段運算</li> <li>3. 不確定性的視覺化</li> <li>4. 波段運算中不確定性的傳播</li> <li>5. 連接現地資料庫</li> <li>6. 像素萃取工具</li> </ol>

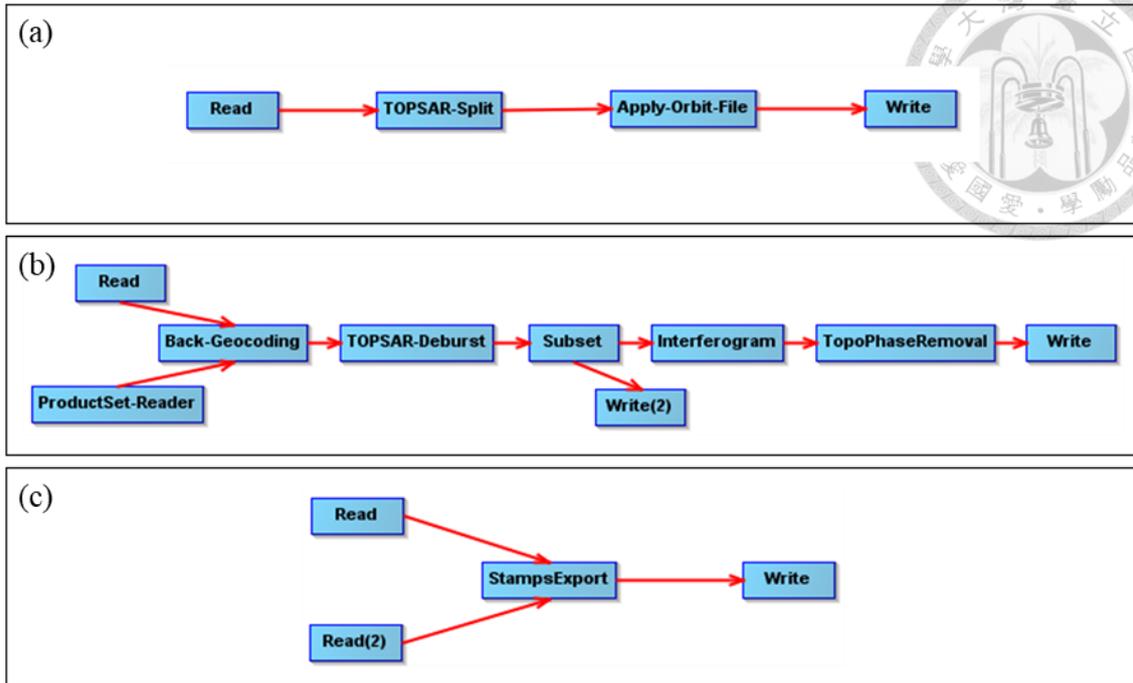


圖 4-2、雷達影像前處理流程圖

(a)影像拆分；(b)影像套疊及干涉處理；(c)影像輸出

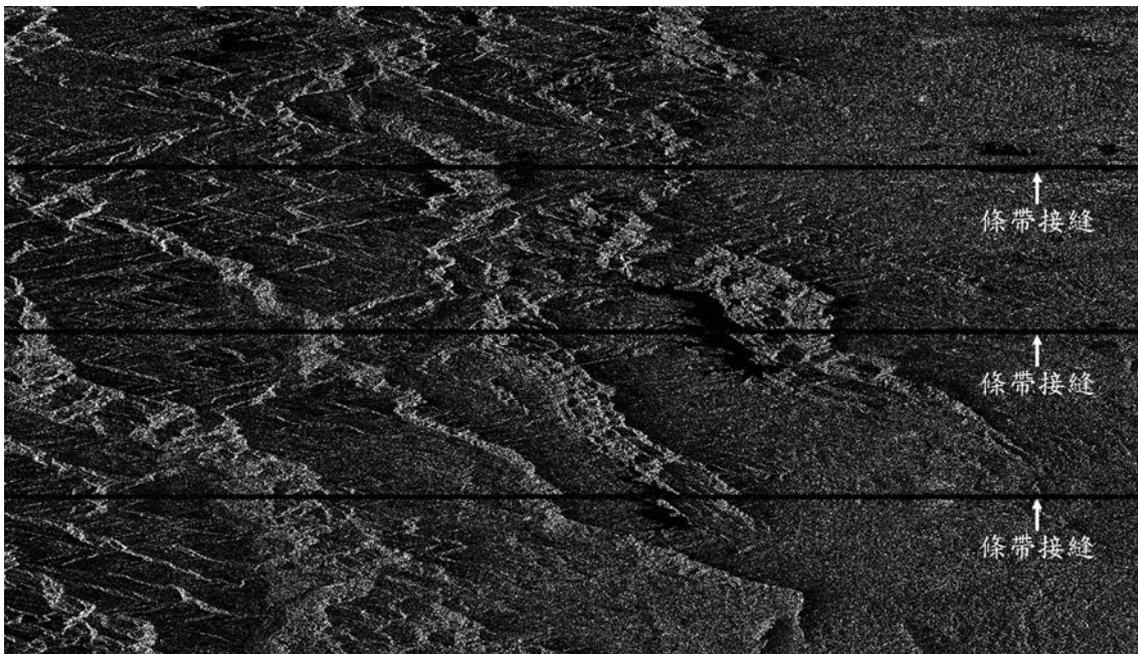


圖 4-3、Sentinel-1 衛星之雷達影像

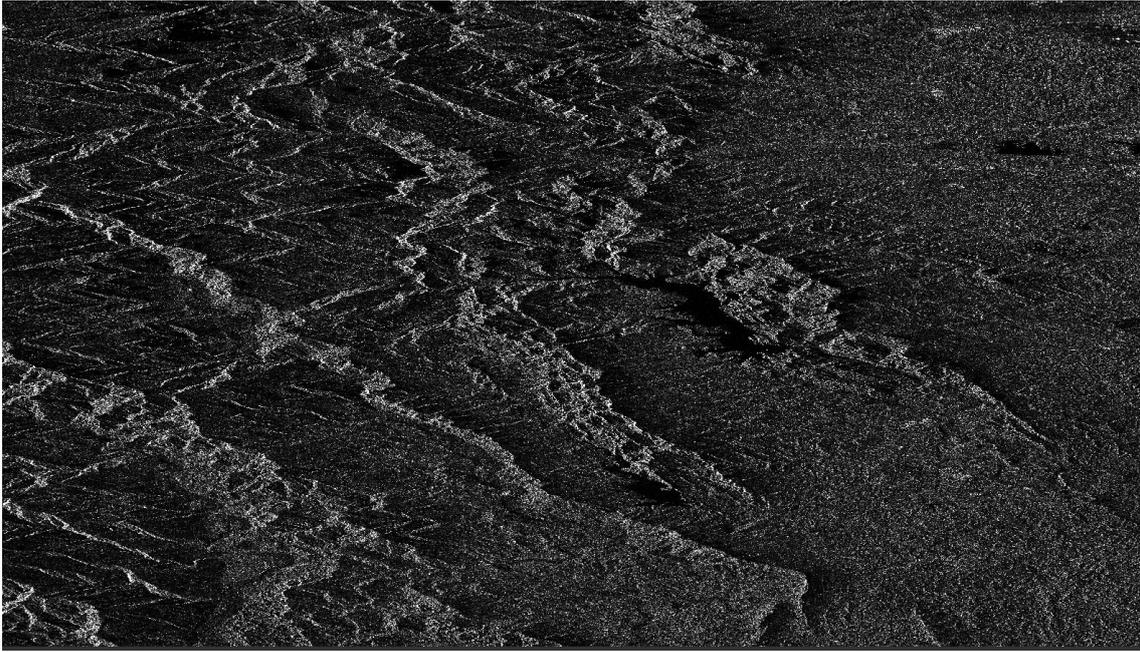


圖 4-4、刪除條帶接縫 (deburst) 後之雷達影像

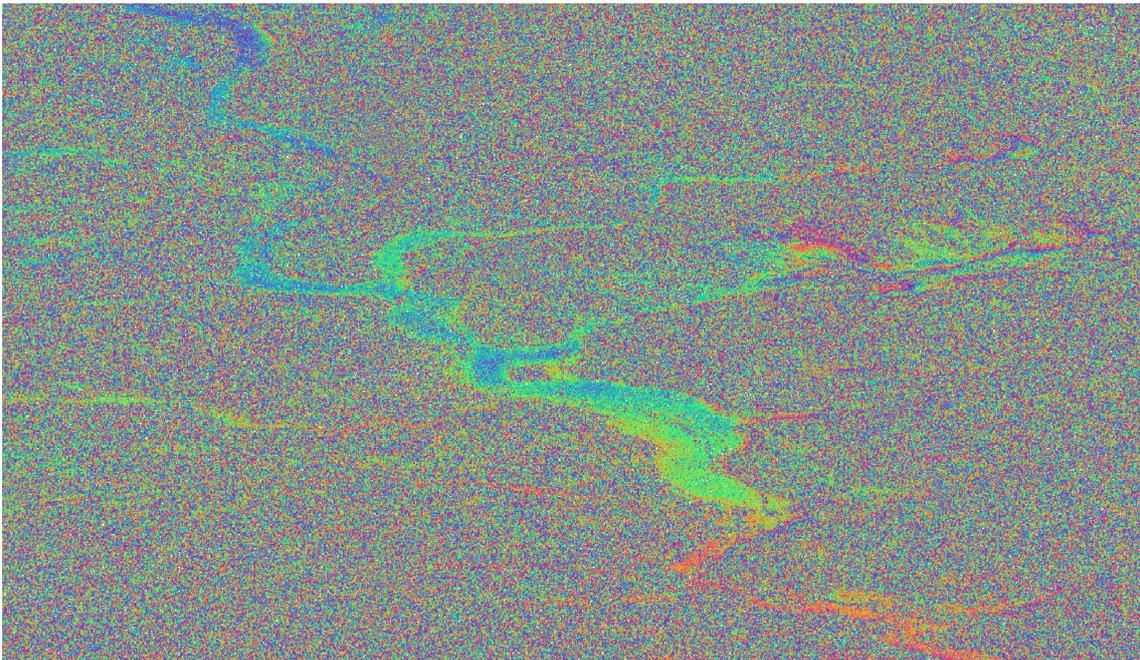


圖 4-5、干涉圖



## 4.2.2 StaMPS

StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) 是由 Hooper et al. (2012) 所開發的一款開源軟體，能夠用以進行 PSInSAR 之運算。此軟體僅能在 LINUX 環境下運行，同時必須搭配 MATLAB 軟體輔助運算及 SNAP 程式進行相位解纏。

PSInSAR 的解算原理已於 4.1 節介紹，本節介紹 StaMPS 軟體的運行步驟，根據 StaMPS 的使用手冊 (Hooper et al., 2018)，PSInSAR 的解算可分為以下八個步驟：

1. 載入 PSC：將 SNAP 軟體所輸出之影像資訊及干涉成果載入 StaMPS 軟體中，並依強度分布指標  $D_A$  篩選出 PSC。
2. 估算相位中之雜訊：估算相位中空間相關的相位，並予以刪除，並估算每張干涉圖中各 PSC 的雜訊。
3. PS 點選擇：利用雜訊對 PSC 進行篩選，以找出 PS 點。
4. PS 點篩選：對所選出之 PS 點再進行一次篩選，以去除可能因鄰近像素或雜訊訊號影響而被誤認為 PS 點之點位，以獲得真實的 PS 點。
5. 相位校正：將各 PS 點中之相位去除非空間相關的視角誤差。
6. 相位解纏：利用 SNAP 程式進行相位解纏，以獲得真實相位。
7. 估算空間相關之視角誤差：估算空間相關之視角誤差造成的相位，並予以刪除。
8. 大氣校正：估算大氣效應造成的相位，並予以刪除。

在 StaMPS 軟體分析 PSInSAR 的過程中，共有數十種參數可供調整，根據分析的案例不同，可能須使用不同的參數。本研究參考過往使用 PSInSAR 分析崩塌之案例，綜合 Höser (2018) 及 Lazecký (2011) 所建議之重要參數值，將重要參數進行修改。其中，max\_topo\_err 為挑選像素時，所能容許的非空間相關之視角誤差的最大值，單位為公尺；clap\_win 為濾波時所使用的單窗大小，取決於所期望像素間保持空間相關的距離；weed\_standard\_dev 為相位雜訊標準差的閾值，用以對 PS 點進行再次篩選；unwrap\_grid\_size 為相位解纏時，網格重新取樣的間距，單位為公尺；unwrap\_gold\_alpha 為相位解纏時，濾波器的參數值；unwrap\_gold\_n\_win 為相位解纏時，濾波時所使用的單窗大小；unwrap\_time\_win 為估算相鄰像素間相位雜訊分布的平滑單窗大小，單位為天；scla\_deramp 代表是否估算並刪除 phase ramp，適合用於觀測現地的訊號；scn\_time\_win 為於時間域進行低通濾波時的單窗

大小，單位為天。各重要參數之預設值及使用值如表 4-2，其餘參數則依 StaMPS 軟體之預設值進行 PSInSAR 解算。

PSInSAR 解算完成後，可以獲得解纏後相位的時間序列，如圖 4-6 所示，透過運算獲得沿衛星視線 (LOS) 方向上的地表變形時間序列。並定義沿衛星視線方向上的地表變位速度  $v_{LOS}$  為地表變形率，即地表變形時間序列之斜率，可以最小平方方法 (least squares method) 計算之，示意圖如圖 4-7 所示。其中， $v_{LOS}$  為正代表地表沿衛星視線方向靠近衛星變形， $v_{LOS}$  為負代表地表沿衛星視線方向遠離衛星變形。

表 4-2、StaMPS 重要參數表

參數	預設值	使用值	參考文獻
max_topo_err	20	10	Lazecký (2011)
clap_win	32	16	
weed_standard_dev	1	1.5	
unwrap_gold_alpha	0.8	5	
unwrap_grid_size	200	10	Höser (2018)
unwrap_gold_n_win	32	8	
unwrap_time_win	730	24	
scla_deramp	n	y	
scn_time_win	365	50	

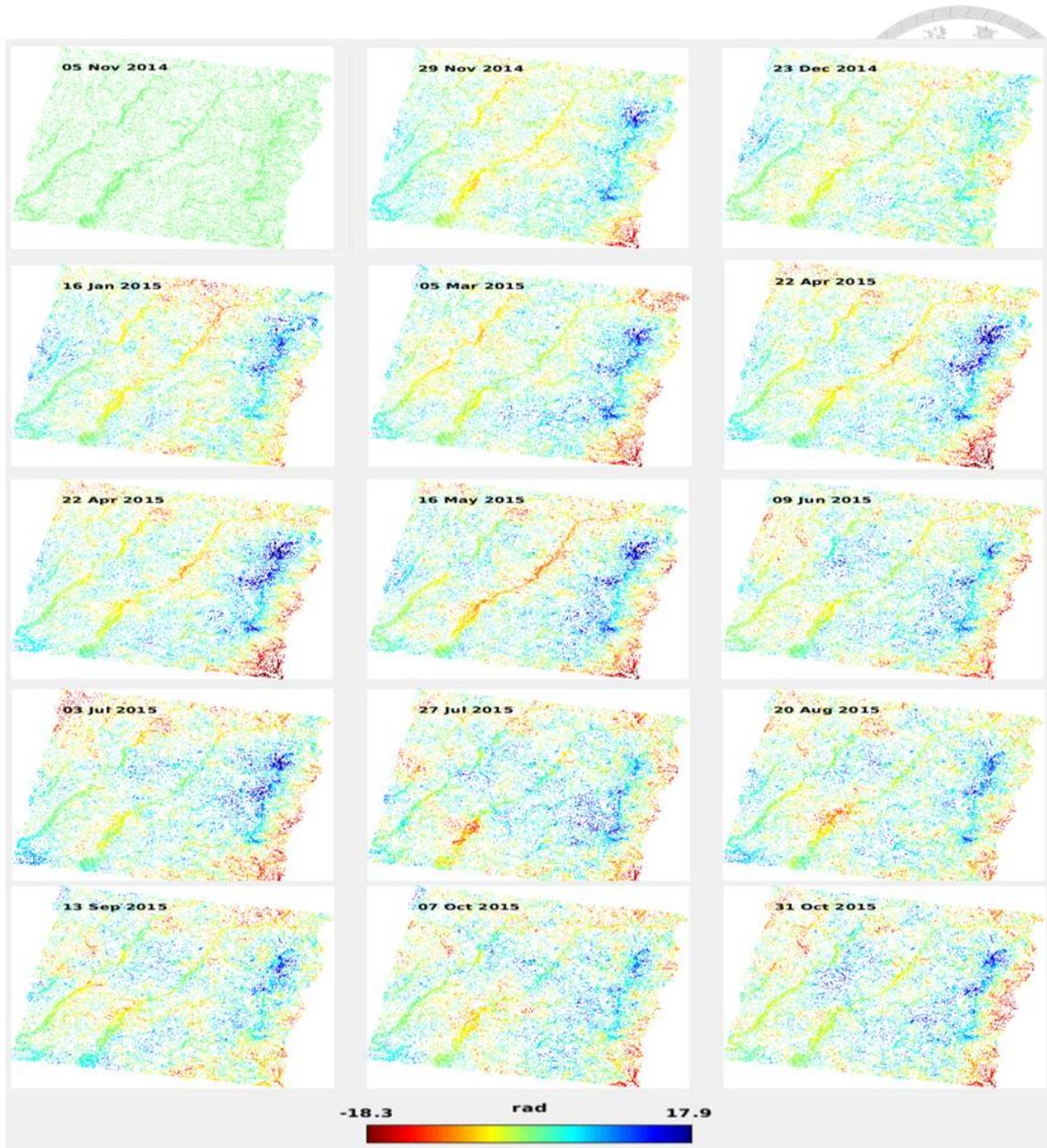


圖 4-6、解纏後相位時間序列示意圖

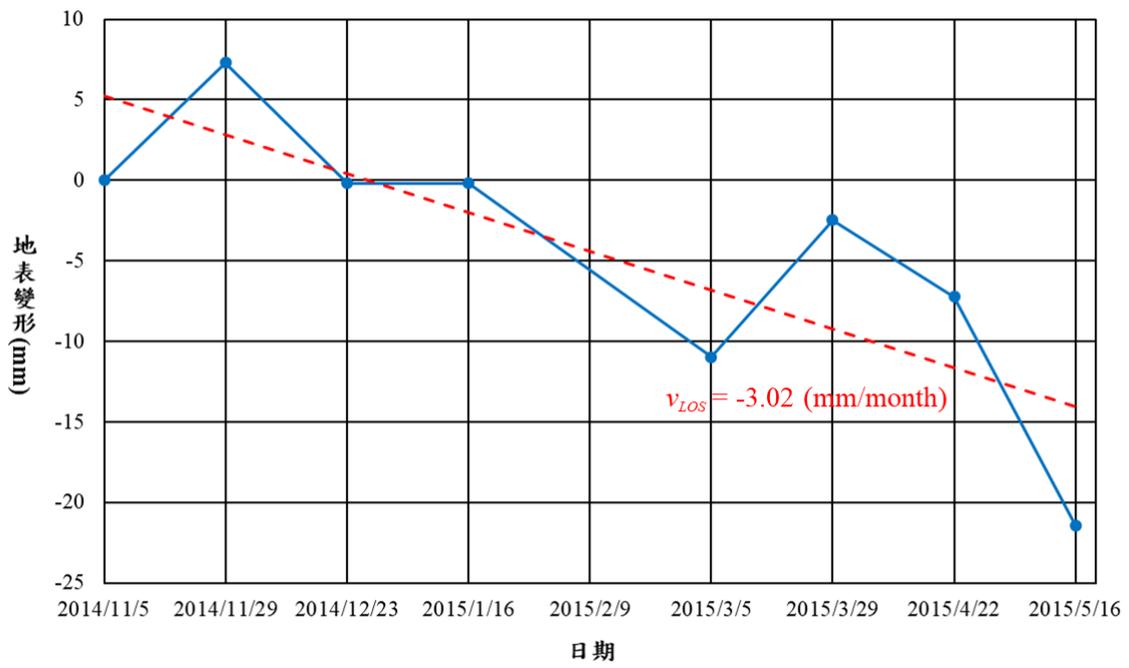


圖 4-7、地表變形速度計算示意圖



### 4.2.3 GPS 校正

然而，PSInSAR 所得之地表變位速度  $v_{LOS}$  可能尚有無法消除的誤差存在，故透過利用研究區域周圍 GPS 站的觀測資料，對地表變位速度進行校正，以得到更可信的地表變位速度。

GPS 校正流程參考 Hung et al. (2011) 之方法，利用 GPS 測站測得之三維觀測資料，計算出 LOS 方向上的地表變位速度，藉由將 PS 點上的地表變位速度內插至 GPS 測站，以求得誤差，再將誤差內插到各 PS 點進行校正，校正流程如圖 4-8 所示，共使用研究區域周圍共四處 GPS 測站 (MINS 測站、MESN 測站、MAYA 測站及 TAYN 測站) 之觀測資料進行校正，詳細步驟說明如下。

1. 選取研究區域周圍 GPS 測站，利用測站之觀測資料，計算 LOS 方向上之地表變位速度  $v_{LOS,GPS}$ ，如式(5.16)。其中， $\alpha$  代表衛星視線の入射角， $\gamma$  代表衛星視線的方位角， $v_{V,GPS}$ 、 $v_{N,GPS}$  及  $v_{E,GPS}$  分別代表 GPS 測站所觀測到的垂直向、南北向及東西向上之平均速度。

$$v_{LOS,GPS} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\cos \gamma \cdot \sin \alpha & -\sin \gamma \cdot \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{V,GPS} \\ v_{N,GPS} \\ v_{E,GPS} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

2. 將 PSInSAR 計算所得的 LOS 方向上之地表變位速度  $v_{LOS,PS}$  進行內插，覆蓋所選之 GPS 站。
3. 擷取各 GPS 站位置上  $v_{LOS,PS}$  之內插值，計算 GPS 觀測資料及 PSInSAR 結果間之地表變位速度誤差  $\Delta v_{LOS}$ ，如式(5.17)。

$$\Delta v_{LOS} = v_{LOS,GPS} - v_{LOS,PS} \quad (5.17)$$

4. 將誤差  $\Delta v_{LOS}$  進行內插，覆蓋研究區域。
5. 擷取研究區域內各 PS 點位置上  $\Delta v_{LOS}$  之內插值，經計算後，可得校正後 LOS 方向上之地表變位速度  $v_{LOS,PS\_revised}$ ，如式(5.18)。

$$v_{LOS,PS\_revised} = v_{LOS,PS} + \Delta v_{LOS} \quad (5.18)$$

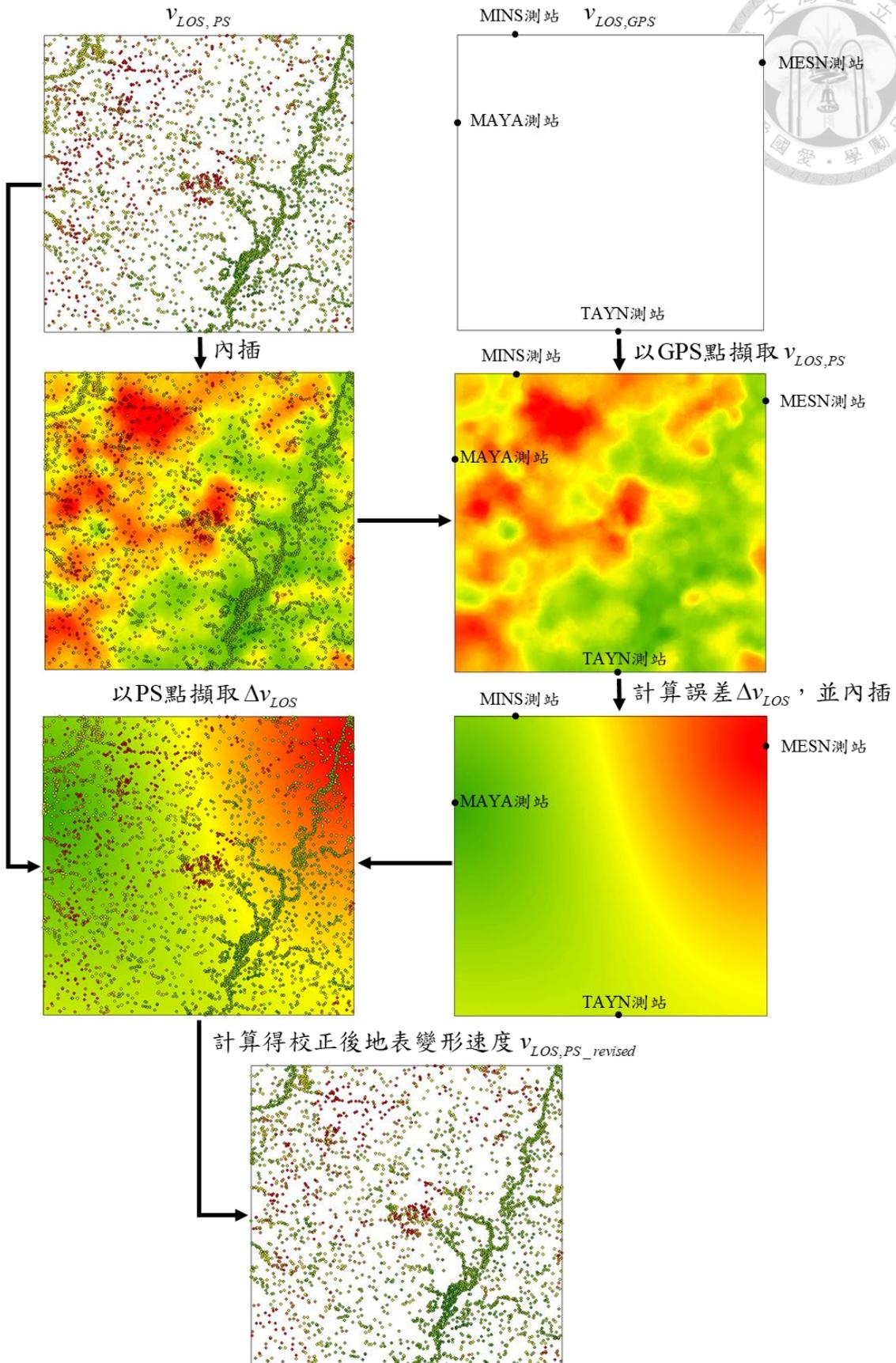


圖 4-8、GPS 校正流程圖



## 4.3 優化分析

本研究利用 PSInSAR 計算出之各 PS 點上的地表變形時間序列，並利用地表變形時間序列以最小平方法計算出地表變位速度，為使地表變位速度能有效地偵測邊坡崩塌前的地表變形行為，故對地表變位速度進行優化分析。優化分析包含選取時間間距分析及地表變位速度方向分析，分析不同條件下地表變位速度與崩塌之相關性，找出與崩塌相關性最高之地表變位速度下的時間間距及速度方向條件。

### 4.3.1 選取時間間距分析

此分析之目的為探討時間間距之選取原則。由於 Sentinel-1 衛星的重返周期為 12 天，利用最小平方法計算地表變位速度時，若選取時間間距過短，可能因資料數過少，造成所計算之地表變位速度誤差過大；若選取時間間距過長，則可能因資料數過多，造成所計算之地表變位速度無法有效反應出崩塌前的地表變形行為。

本研究分析時間間距為兩個月、四個月、六個月及一年時的地表變位速度與崩塌之相關性，找出最能描述崩塌前地表變形行為之 PSInSAR 地表變位速度的時間間距。

### 4.3.2 地表變位速度方向分析

此分析之目的為探討地表變位之合理性。由於利用 PSInSAR 結果所計算出之地表變位速度為衛星視線 (LOS) 方向上的速度，可能無法準確描述邊坡崩塌前的地表變形行為，故速度方向分析利用衛星視線方向上的地表變位速度  $v_{LOS}$  計算出沿邊坡坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$ ，並分析  $v_{slope}$  對崩塌是否具有比  $v_{LOS}$  對崩塌更好的相關性，更能代表邊坡崩塌前的地表變形行為。

根據 Aslan et al. (2020)，利用衛星視線的幾何關係及邊坡的幾何關係，可以將衛星視線方向上的地表變位速度  $v_{LOS}$  轉換成沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$ ，其轉換公式如式(5.19)。

$$v_{slope} = \frac{v_{LOS}}{C} \quad (5.19)$$

其中，係數  $C$  代表真實沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  若投影至 LOS 方向

時所占的比例，可利用衛星視線的幾何關係與斜坡單元的幾何關係計算，如式(5.20)至式(5.23)。

$$C = N \cdot [\cos(S) \cdot \sin(A - 90^\circ)] + E \cdot [-\cos(S) \cdot \cos(A - 90^\circ)] + H \cdot \sin(S) \quad (5.20)$$

$$N = \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \cos(180^\circ - \gamma) \quad (5.21)$$

$$E = \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \cos(270^\circ - \gamma) \quad (5.22)$$

$$H = \cos(\alpha) \quad (5.23)$$

其中， $A$  代表斜坡單元的坡向， $S$  代表斜坡單元的坡度， $\alpha$  代表衛星視線的入射角， $\gamma$  代表衛星視線方向的方位角，幾何示意圖如圖 4-9 所示。

又根據 Kalia (2018) 之建議，特定的邊坡與衛星視線的幾何關係會造成  $C$  很小或趨近於 0，則所計算出的  $v_{slope}$  會趨近於無限大，導致不合理的結果，故若  $-0.3 \leq C < 0$  或  $0 \leq C < 0.3$  時，則  $C$  以 -0.3 及 0.3 替代，如式(5.24)所示。

$$C = \begin{cases} C, & \text{if } C > 0.3 \\ C, & \text{if } C < -0.3 \\ 0.3, & \text{if } 0 \leq C < 0.3 \\ -0.3, & \text{if } -0.3 \leq C < 0 \end{cases} \quad (5.24)$$

其中，位於斜坡單元坡度小於 5 度之 PS 點不計算  $v_{slope}$ ，且於計算完成後，刪除  $v_{slope}$  為正的 PS 點，因其代表沿斜坡單元坡面向上變形，可能與我們所關心的邊坡崩塌無關，故刪除之。

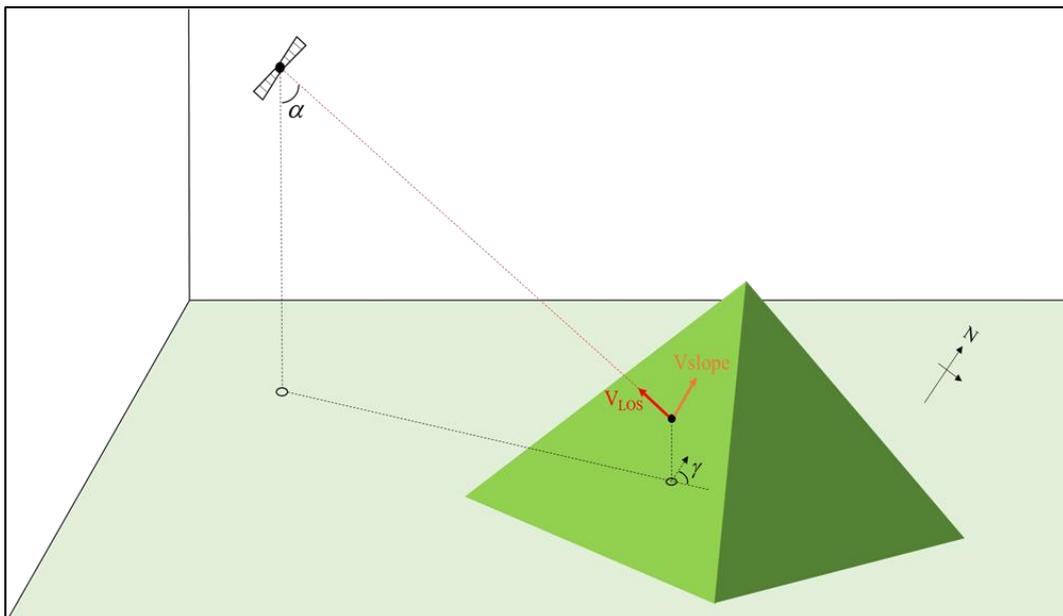


圖 4-9、 $v_{LOS}$  及  $v_{slope}$  幾何示意圖



### 4.3.3 分析結果

本研究使用 Sentinel-1 衛星之雷達影像，其基本資訊及其於研究區域的角度參數如表 4-3。優化分析以 2017 年崩塌資料為代表，並假設 2017 年之崩塌均發生於當年度上半年降雨量最多之降雨災害事件 (2017/06/01 豪雨事件)，利用 2017 年降軌影像之 PSInSAR 解算成果分析崩塌發生前的地表變位速度，找出與崩塌最具相關性，最能代表崩塌前地表變形行為的時間間距及速度方向，所使用的雷達影像資訊及各時間間距地表變位速度的計算時間分別如表 4-4 及表 4-5 所示。

不同時間間距下之衛星視線 (LOS) 方向上的地表變位速度  $v_{LOS}$  如圖 4-10 所示， $v_{LOS}$  為正代表地表沿 LOS 方向靠近衛星變形， $v_{LOS}$  為負代表地表沿 LOS 方向遠離衛星變形。由圖 4-10 可以觀察發現，時間間距為六個月時，多數崩塌地上均有 PS 點監測到負的  $v_{LOS}$ ，代表監測到邊坡有往下邊坡移動的趨勢，較能偵測出崩塌前的地表變形行為；而時間間距為兩個月、四個月及一年時，則無法觀察到此趨勢。

不同時間間距下之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  如圖 4-11 所示。透過將  $v_{LOS}$  轉換成  $v_{slope}$ ，可以刪除許多無關的 PS 點，找出監測到地表沿坡面向下變形的 PS 點。由圖 4-11 可以觀察發現，時間間距為六個月時，監測到沿邊坡向下變形的 PS 點多數位於崩塌地上，且 PS 點監測到地表變位速度較大處均有崩塌發生；而時間間距為兩個月及一年時，雖亦可以觀察到相同的趨勢，但相對於時間間距為六個月時較不明顯；而時間間距為四個月時，則難以觀察到此趨勢。

並以斜坡單元內 PS 點所監測到之地表變位速度的平均值代表該斜坡單元的地表變位速度，以 3.4 節之方法與斜坡單元是否崩塌進行相關性分析，結果如表 4-6。從結果可得知，與上述觀察結果相同，時間間距為六個月時之  $v_{LOS}$  與崩塌呈負相關，而時間間距為兩個月、四個月及一年時之  $v_{LOS}$  與崩塌呈正相關，代表沿衛星視線靠近衛星之地表變位速度越大，則越容易發生崩塌，此結果不太符合邊坡之運動行為，可能因各坡面與 LOS 方向之幾何關係差異大，導致  $v_{LOS}$  難以直接描述邊坡的之運動行為。而  $v_{slope}$  與崩塌之相關性均為負相關，代表沿坡面方向向下之地表變位速度越大，則越容易發生崩塌，較符合邊坡的運動行為；且時間間距為兩個月、六個月及一年時之  $v_{slope}$  的相關性  $p$  值均小於 0.05，代表其與崩塌均為顯著

相關，其中，又以時間間距為六個月時的  $v_{slope}$  具有最高的相關性，其 Spearman 相關係數為-0.202。

故後續將會依據此優化分析之結果，以時間間距為六個月時之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  進行邊坡變位門檻值及崩塌潛勢評估模型之建立。



表 4-3、Sentinel-1 衛星基本資訊及角度參數表

衛星	Sentinel-1 A	
平均航高 (公里)	693	
波段	C	
波長 (公分)	5.6	
重返週期 (天)	12	
空間解析度 (公尺)	5×20	
軌道	升軌	降軌
航行方向方位角 (度)	350	190
視線方向方位角 (度)	80	280
入射角 (度)	33.8	39.2

表 4-4、優化分析雷達影像資訊表

衛星	Sentinel-1 A
衛星軌道 (orbit path)	降軌
起始影像 (first image)	2016/05/10
終止影像 (last image)	2017/05/29
衛星路徑 (track)	105
影像數目	16

表 4-5、優化分析地表變位速度計算時間表



時間間距	降雨災害事件 (復興雨量站降雨量)	時間	資料數
兩個月	2017/06/01 豪雨事件 (884.0 mm)	2017/04/11 ~ 2017/05/29	3
四個月		2016/01/29 ~ 2017/05/29	5
六個月		2016/12/12 ~ 2017/05/29	7
一年		2016/06/03 ~ 2017/05/29	14

表 4-6、優化分析結果相關性表 (以 2017 年資料為例)

時間間距	速度方向	$v_{LOS}$	$v_{slope}$
	兩個月	Spearman 相關係數	0.162
$p$ 值		0.002	0.039
四個月	Spearman 相關係數	0.110	-0.101
	$p$ 值	0.038	0.058
六個月	Spearman 相關係數	-0.094	-0.202
	$p$ 值	0.076	0.000
一年	Spearman 相關係數	0.079	-0.126
	$p$ 值	0.137	0.018

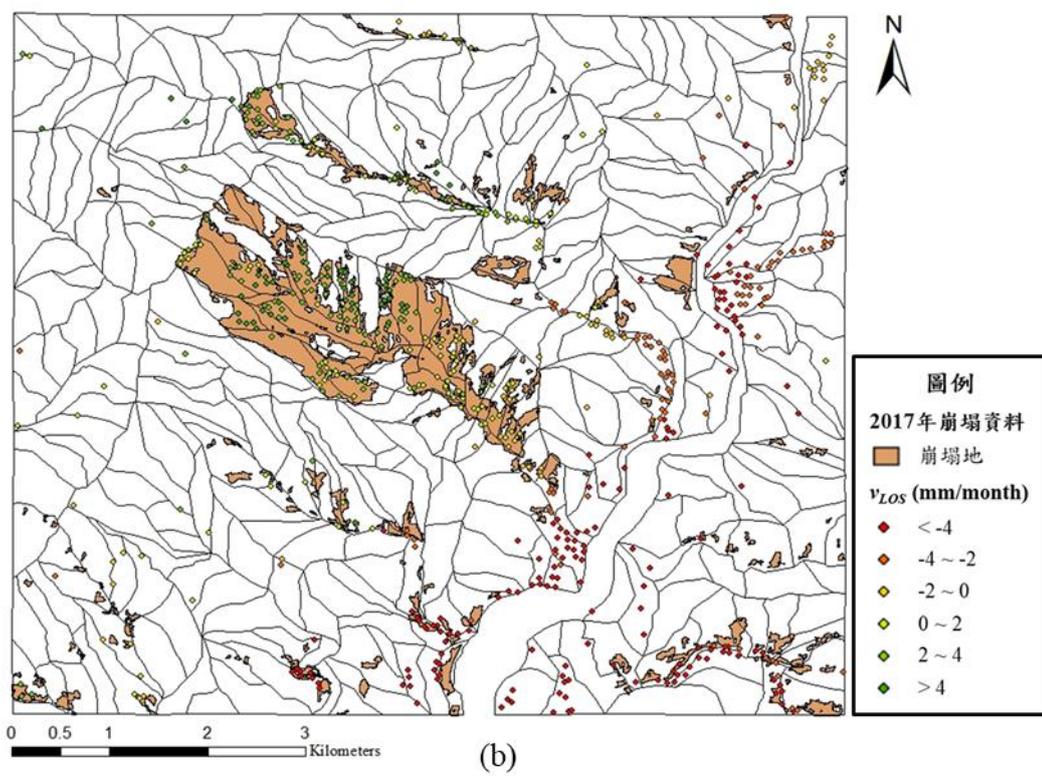
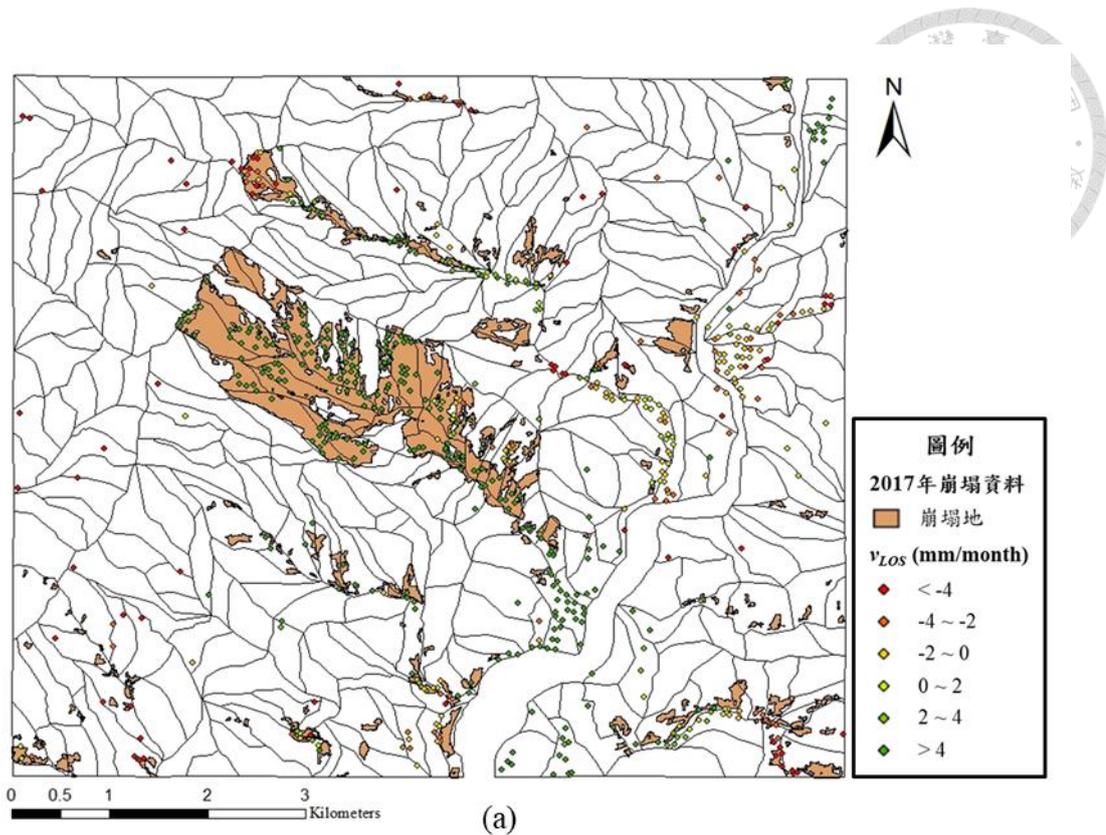


圖 4-10、2017 年不同時間間距之衛星視線方向上的地表變位速度  $v_{LOS}$

(a)兩個月；(b)四個月；(c)六個月；(d)一年

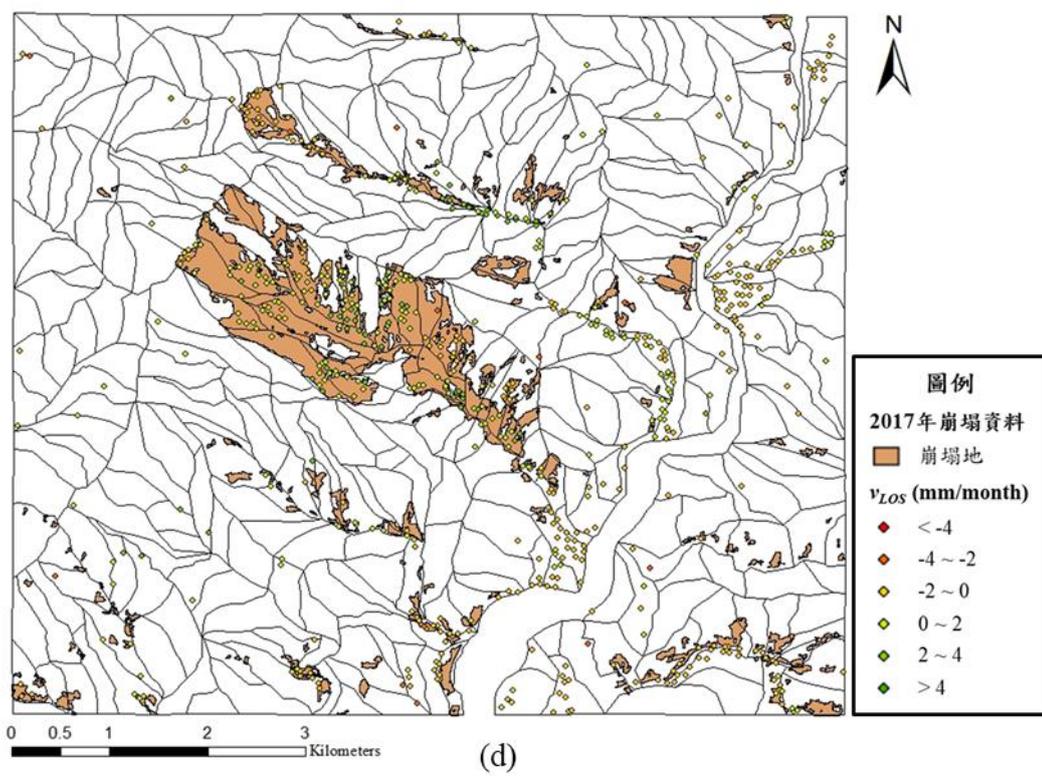
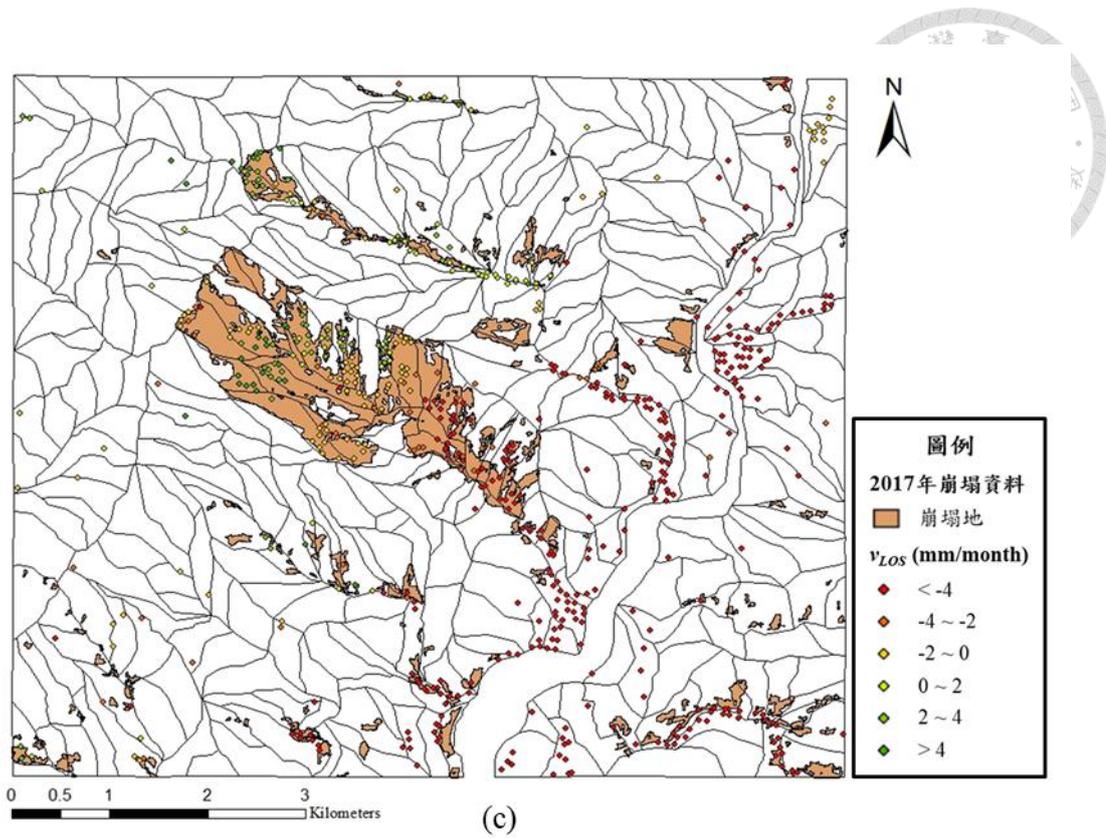


圖 4-10、2017 年不同時間間距之衛星視線方向上的地表變位速度  $v_{LOS}$  (續)

(a)兩個月；(b)四個月；(c)六個月；(d)一年

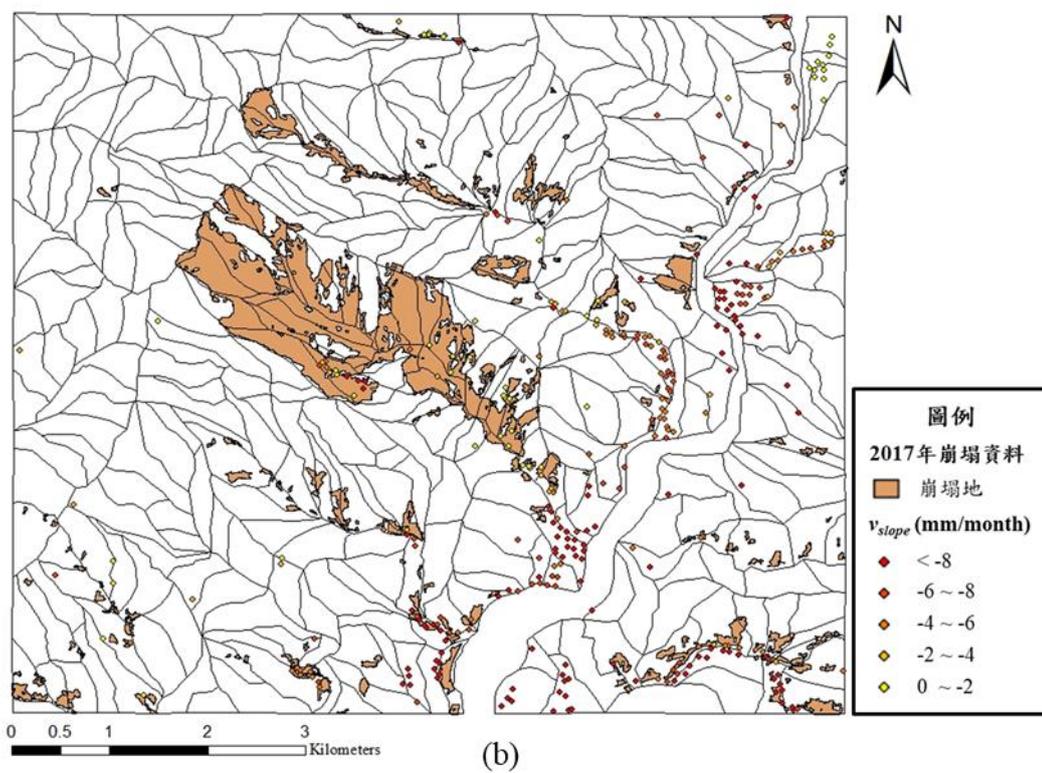
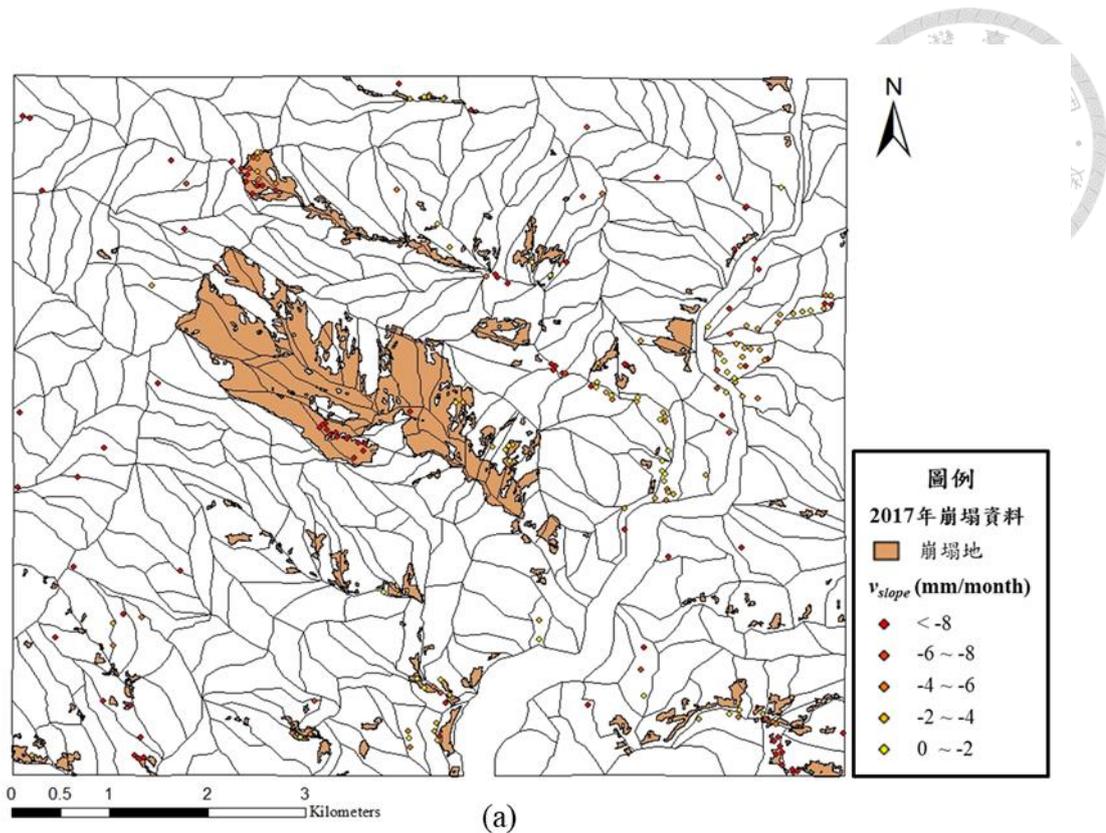


圖 4-11、2017 年不同時間間距之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$

(a)兩個月；(b)四個月；(c)六個月；(d)一年

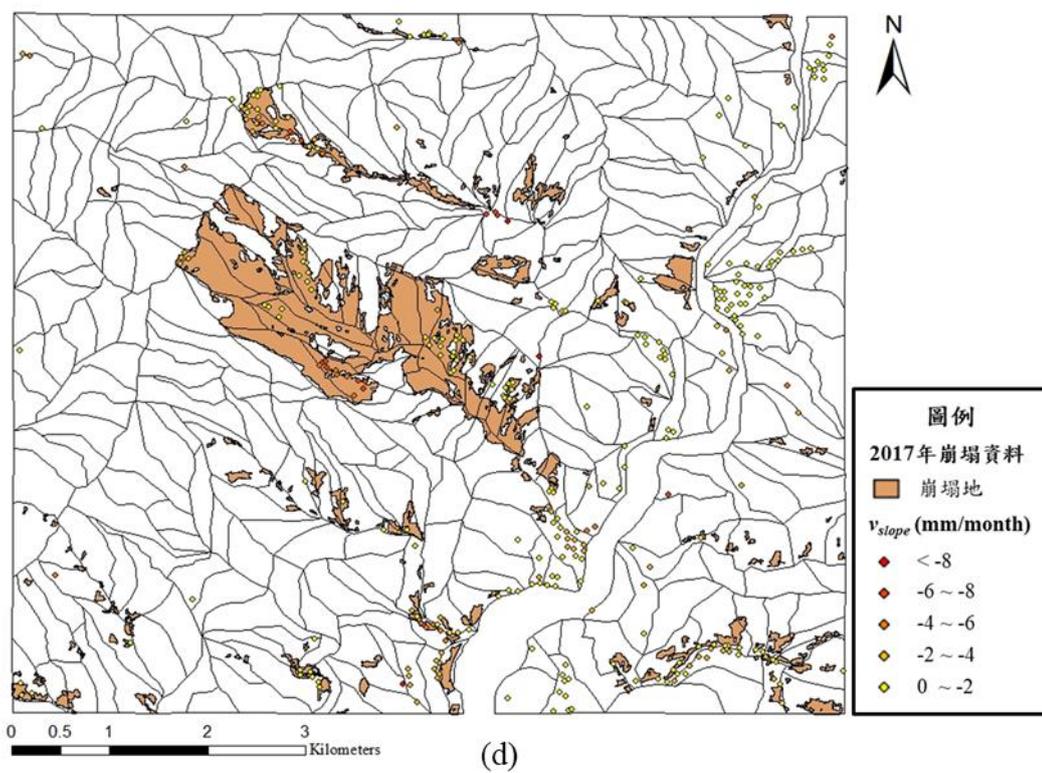
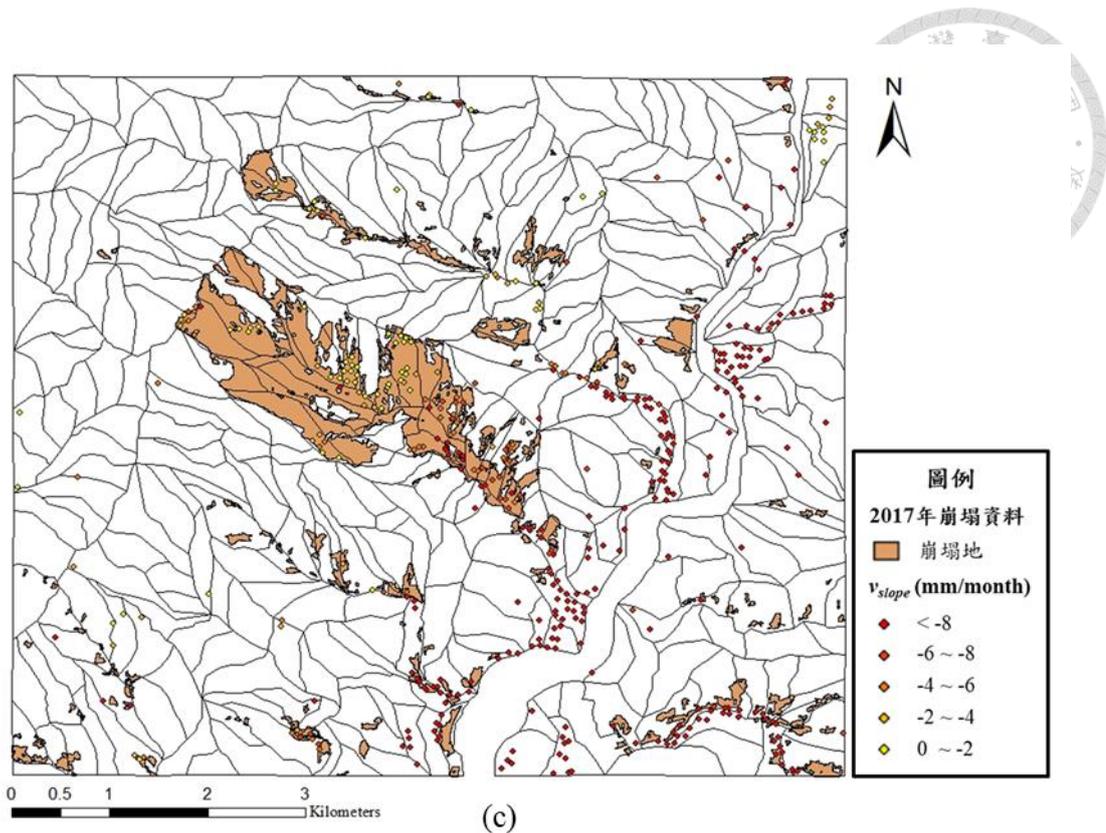


圖 4-11、2017 年不同時間間距之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  (續)

(a)兩個月；(b)四個月；(c)六個月；(d)一年

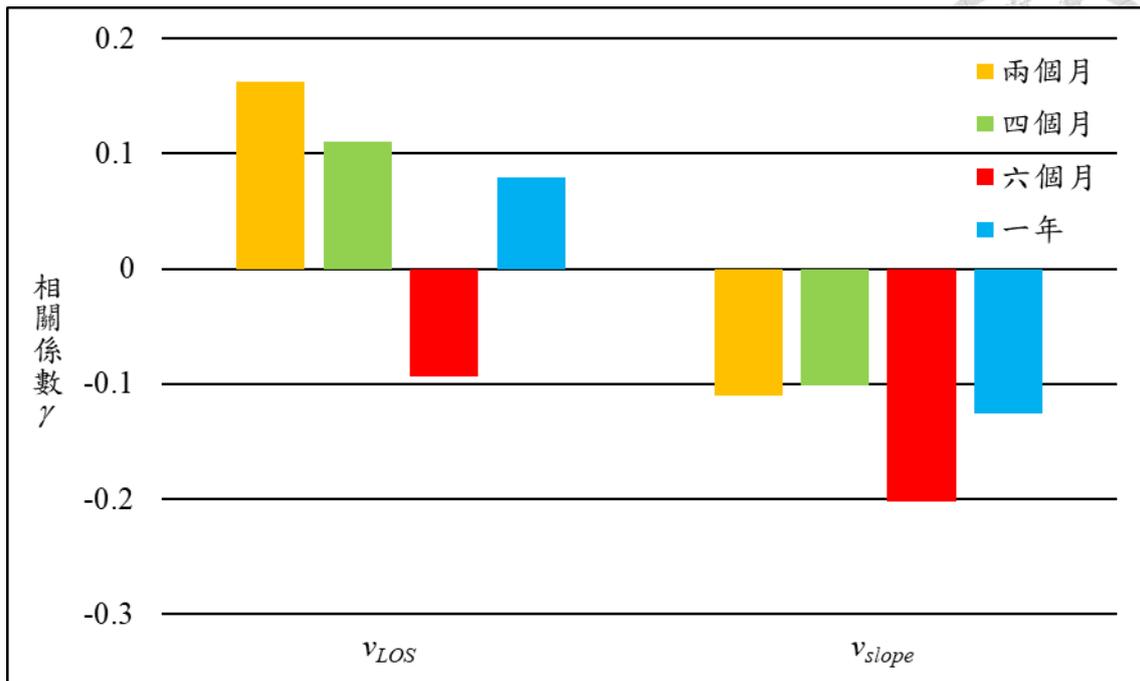


圖 4-12、優化分析結果相關性圖 (以 2017 年資料為例)

## 第5章 邊坡變位門檻值與崩塌潛勢評估模型

本章分為三個部分，首先根據第 4 章之方法利用 PSInSAR 技術計算地表變位速度，並透過統計分析，統計崩塌發生時之地表變位速度，建立地表變位速度之邊坡變位門檻值；接著根據第 3 章之結果，利用顯著因子以邏輯斯迴歸法建立崩塌潛勢評估模型，並基於所建立之邊坡變位門檻值及地表變位速度，對崩塌潛感值進行修正，建立潛感值修正模型；最後針對潛感值修正前、後崩塌潛勢評估模型之結果及其崩塌預測準確性進行比較與討論。

### 5.1 邊坡變位門檻值

本節介紹以 PSInSAR 技術監測所得的地表變位速度制定邊坡變位門檻值之分析方法，分為分析資料及門檻值建立兩個部分進行說明。

#### 5.1.1 分析資料

本研究蒐集了研究區域內 2015 年至 2018 共四年林務局判釋的崩塌地圖資，分析各年度發生崩塌的斜坡單元，如圖 5-1 所示；並蒐集研究區域在四年間的 Sentinel-1 衛星升、降軌之雷達影像，以 PSInSAR 技術監測各年度之地表變形，所使用的雷達影像之覆蓋範圍如圖 5-2 所示，A69 為升軌之影像、D105 為降軌之影像，時間資訊如表 5-1 所示。

根據 4.4.3 節之結果，於崩塌發生前時間間距為六個月左右之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  最能代表崩塌發生前的邊坡變形行為。由於崩塌地資料的時間解析度為一年，故假設各年度崩塌均發生於當年度上半年降雨量最多之降雨災害事件，並計算事件發生前六個月之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$ ，資料時間詳如表 5-2 所示， $v_{slope}$  之計算結果如圖 5-3，由於使用六個月之資料計算  $v_{slope}$ ，故將其單位定為 mm/6-months。

將 2015 年至 2017 年  $v_{slope}$  之結果與斜坡單元進行套疊，計算各斜坡單元內 PS 點的平均  $v_{slope}$  代表該單元的地表變位速度，並透過與崩塌地圖資套疊，篩選出三年間發生崩塌的單元進行後續分析。共選出 294 個具 PS 點的崩塌單元作為後續分析之樣本。

表 5-1、各年度雷達影像資訊表



年份	2015		2016		2017		2018	
衛星	Sentinel-1 A							
衛星軌道 (orbit path)	升軌	降軌	升軌	降軌	升軌	降軌	升軌	降軌
起始影像 (first image)	2014/10/22	2014/11/05	2015/10/29	2015/10/31	2016/11/04	2016/10/25	2017/10/30	2017/10/20
終止影像 (last image)	2015/10/29	2015/10/31	2016/10/23	2016/10/25	2017/10/30	2017/10/20	2017/10/25	2018/10/15
衛星路徑 (track)	69	105	69	105	69	105	69	105
影像數目	16	15	14	16	16	15	16	14

表 5-2、 $v_{slope}$  計算資料時間表

年份	2015	2016	2017	2018
降雨事件日期 (復興雨量站降雨量)	2015/05/24 (397.0 mm)	2016/06/13 (155.5 mm)	2017/06/01 (884.0 mm)	2018/06/19 (202.5 mm)
升軌 $v_{slope}$ 計算時間 (資料數)	2014/11/03 ~ 2015/05/02 (8)	2015/12/16 ~ 2016/06/01 (7)	2016/11/28 ~ 2017/05/15 (8)	2017/12/17 ~ 2018/06/03 (8)
降軌 $v_{slope}$ 計算時間 (資料數)	2014/11/29 ~ 2015/05/16 (7)	2015/12/18 ~ 2016/06/03 (8)	2016/12/12 ~ 2017/05/29 (7)	2017/12/31 ~ 2018/06/17 (7)

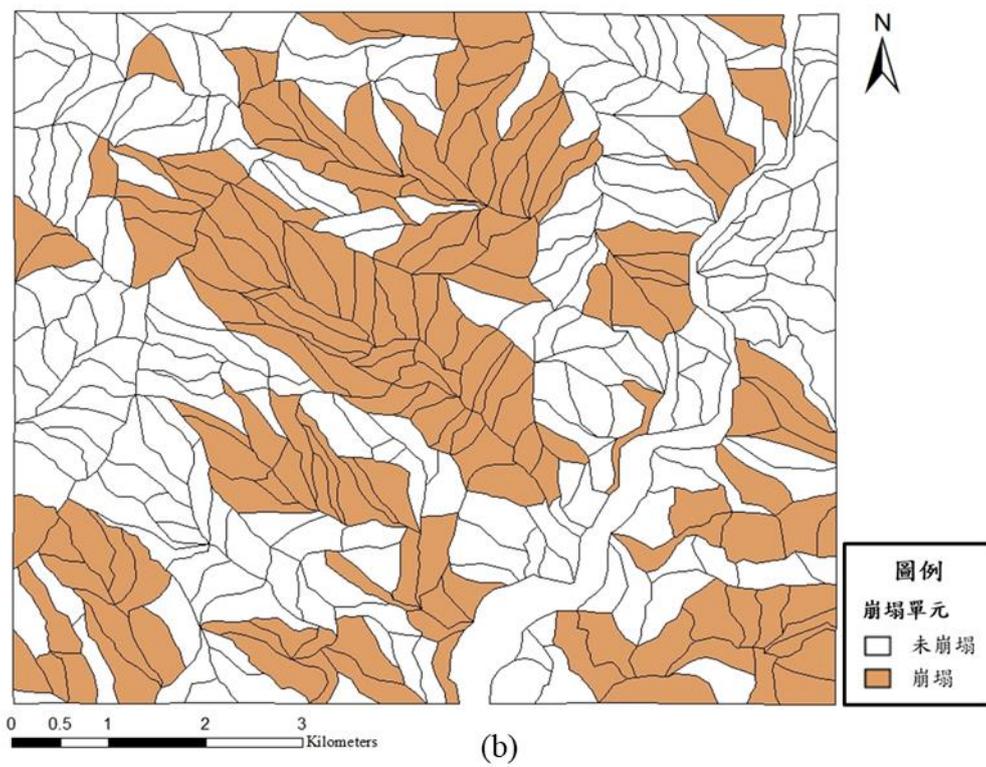
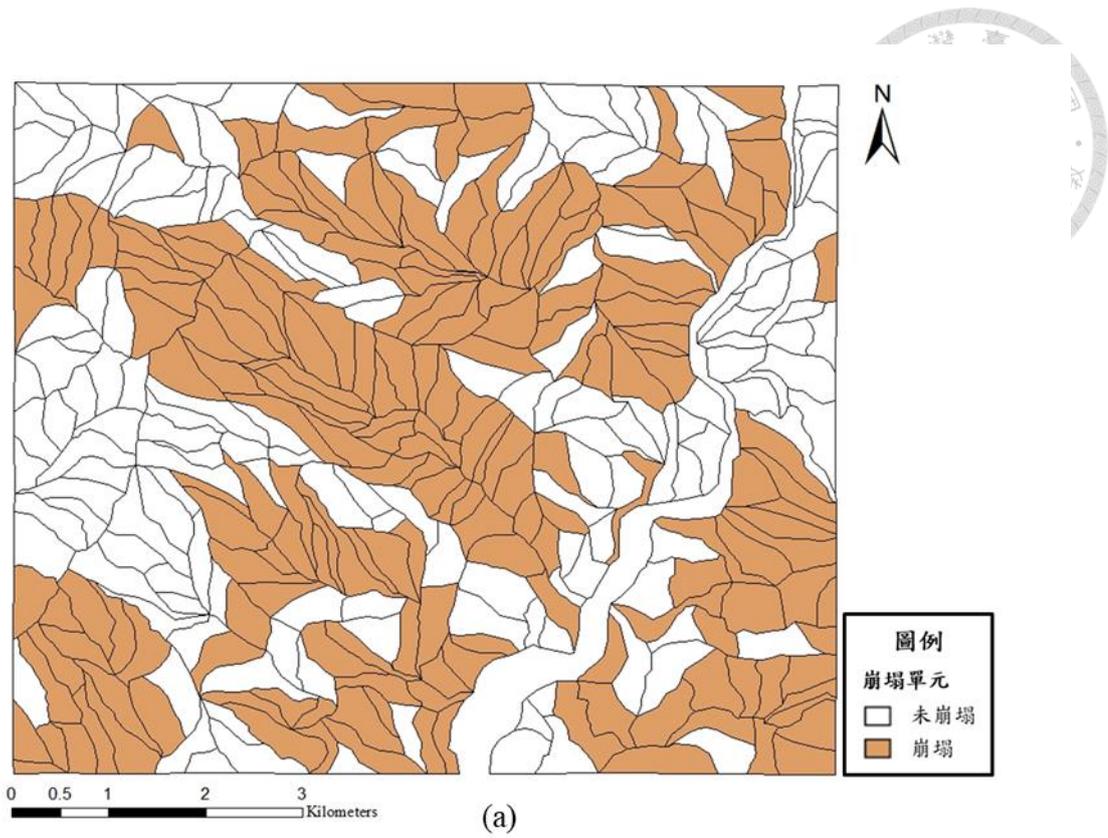


圖 5-1、崩塌單元圖

(a)2015 年；(b)2016 年；(c)2017 年；(d)2018 年

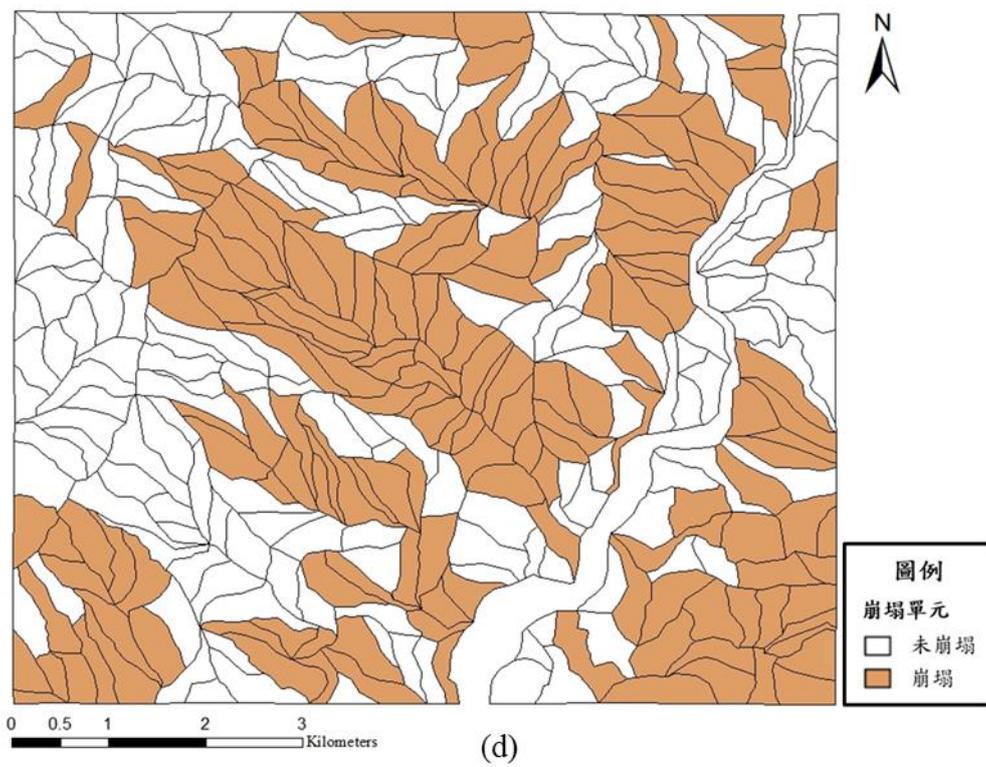
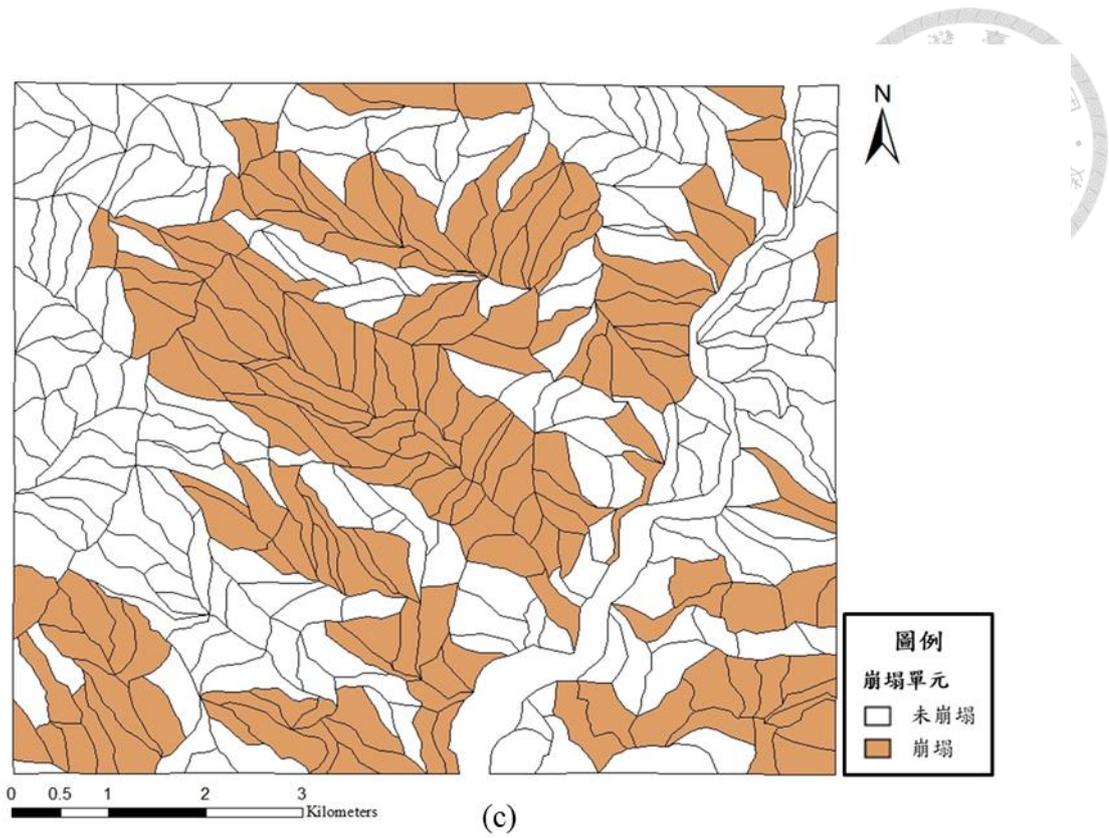


圖 5-1、崩塌單元圖 (續)

(a)2015 年；(b)2016 年；(c)2017 年；(d)2018 年

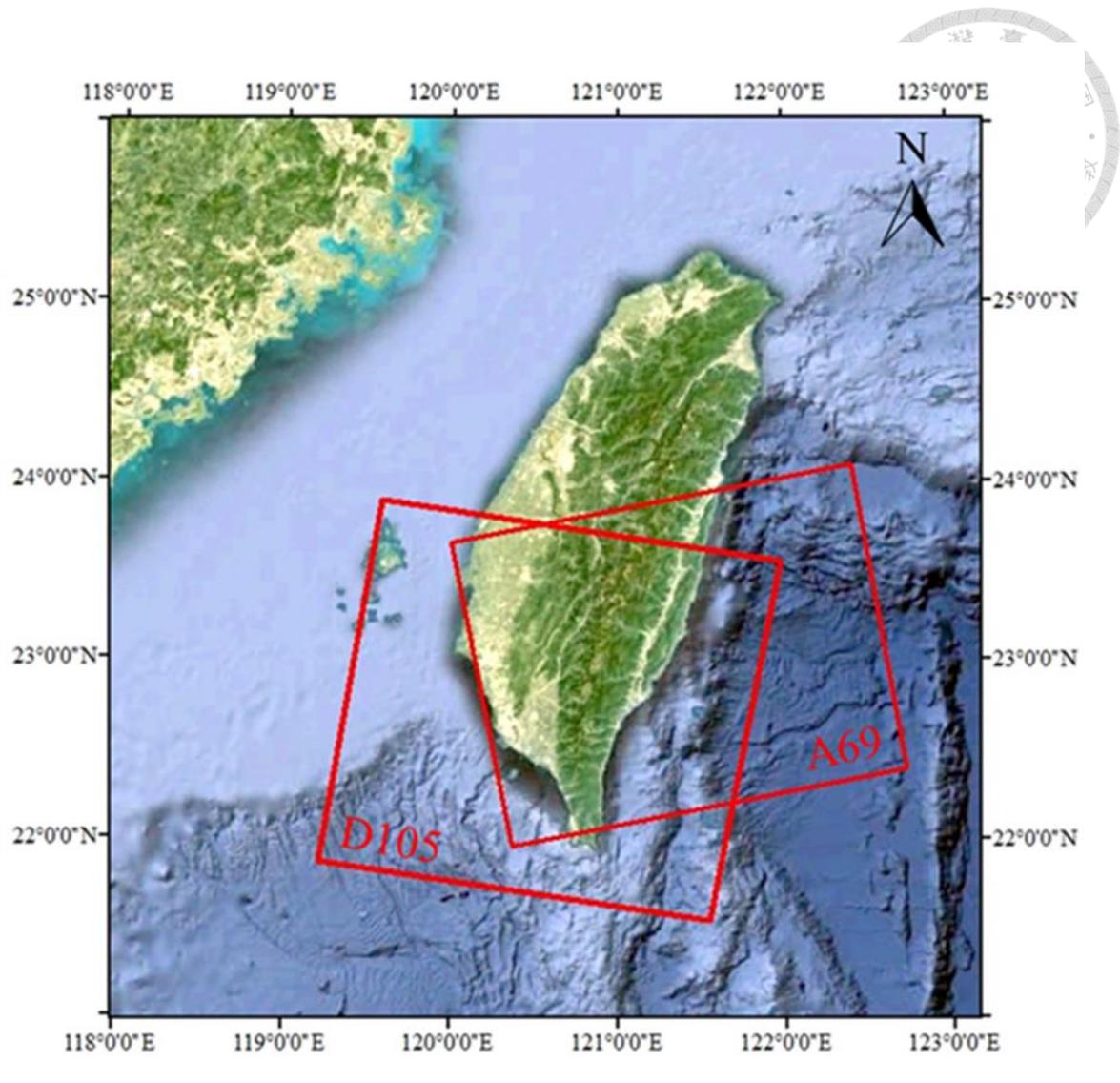


圖 5-2、雷達影像覆蓋範圍示意圖

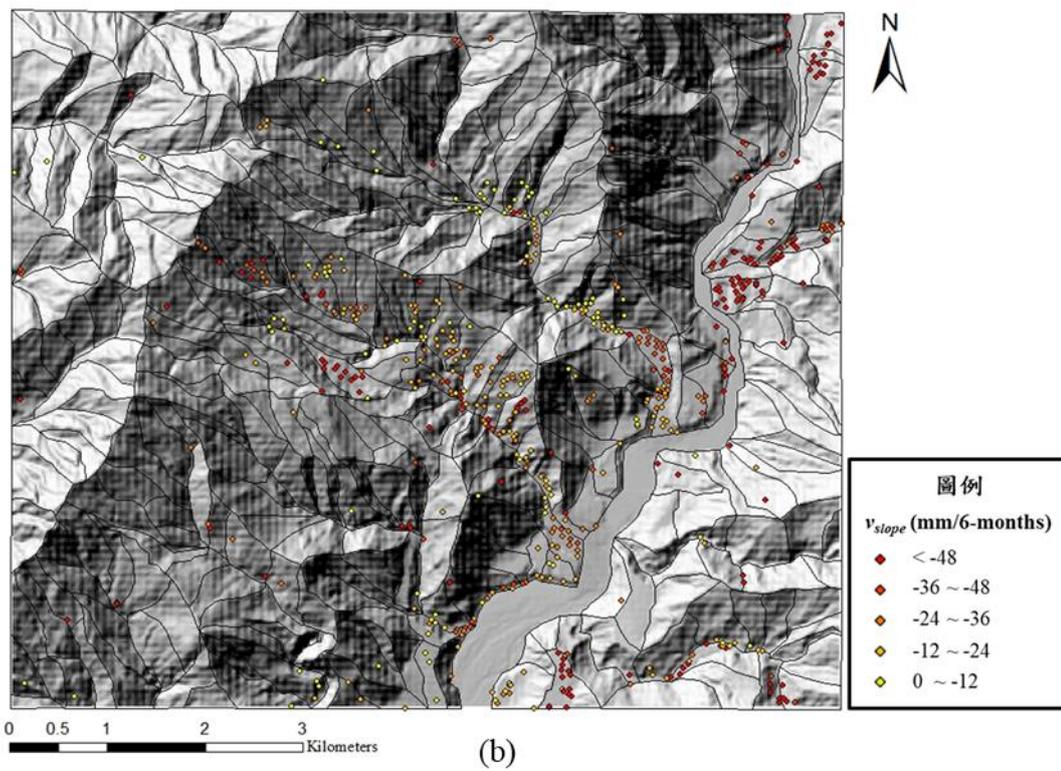
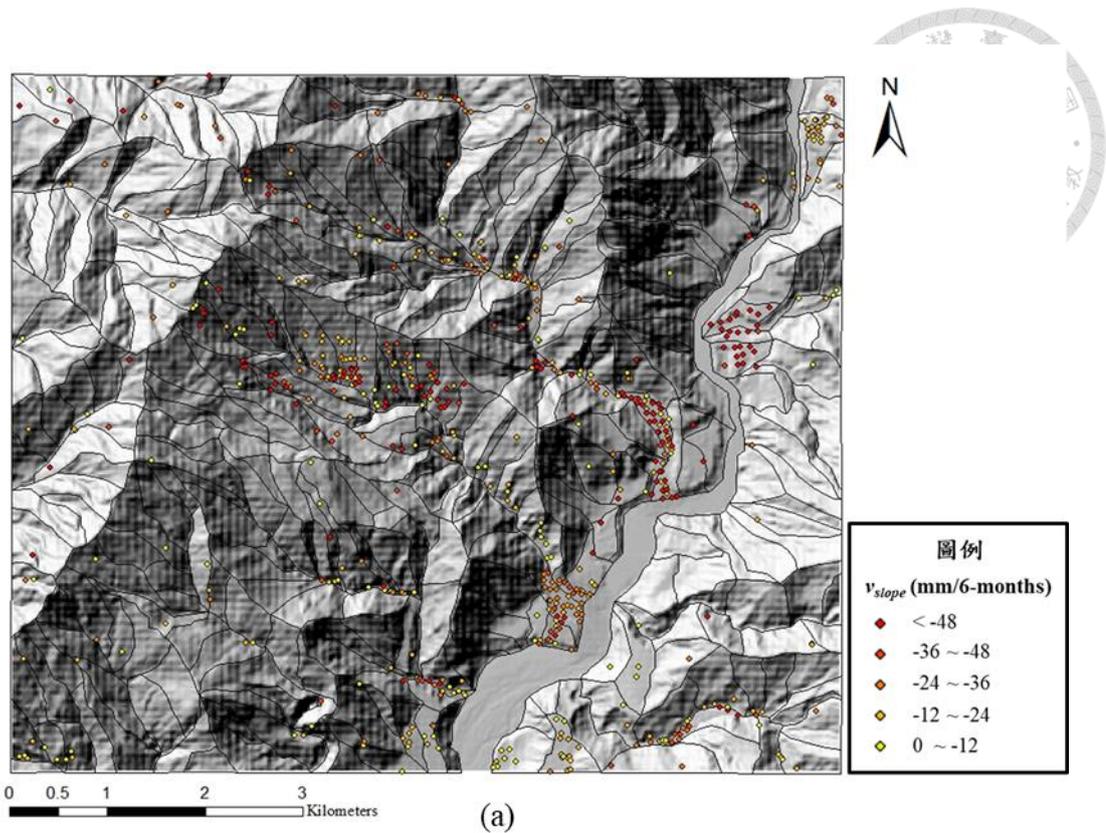


圖 5-3、地表變位速度  $v_{slope}$  圖

(a)2015 年；(b)2016 年；(c)2017 年；(d)2018 年

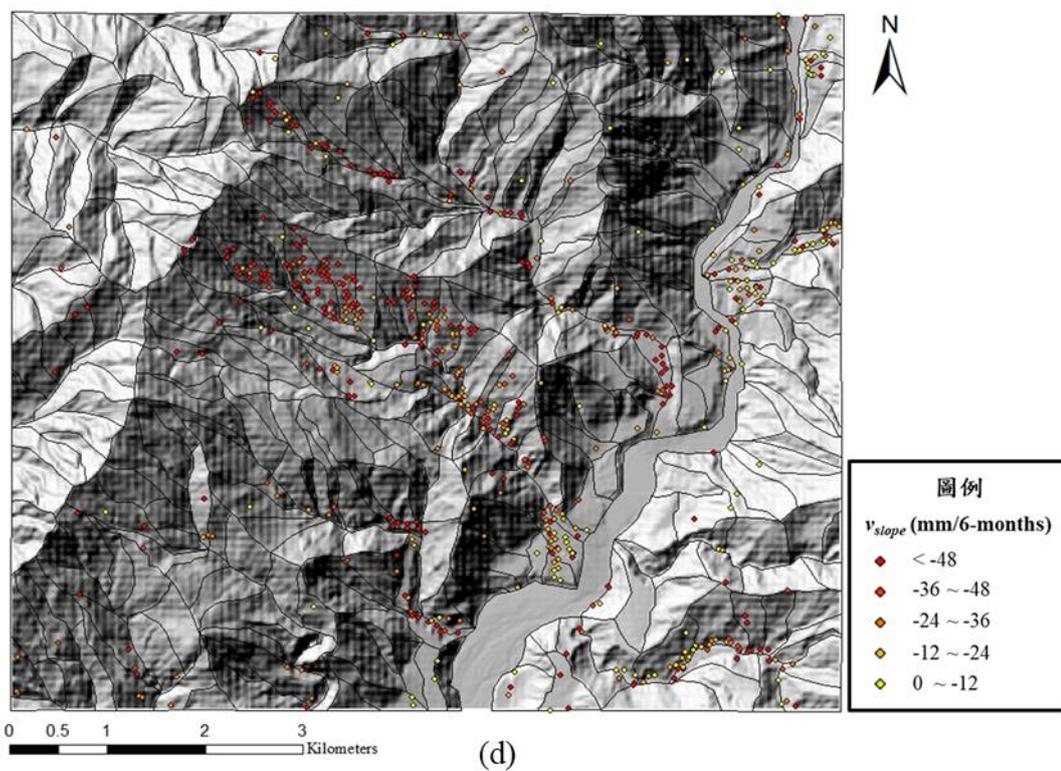
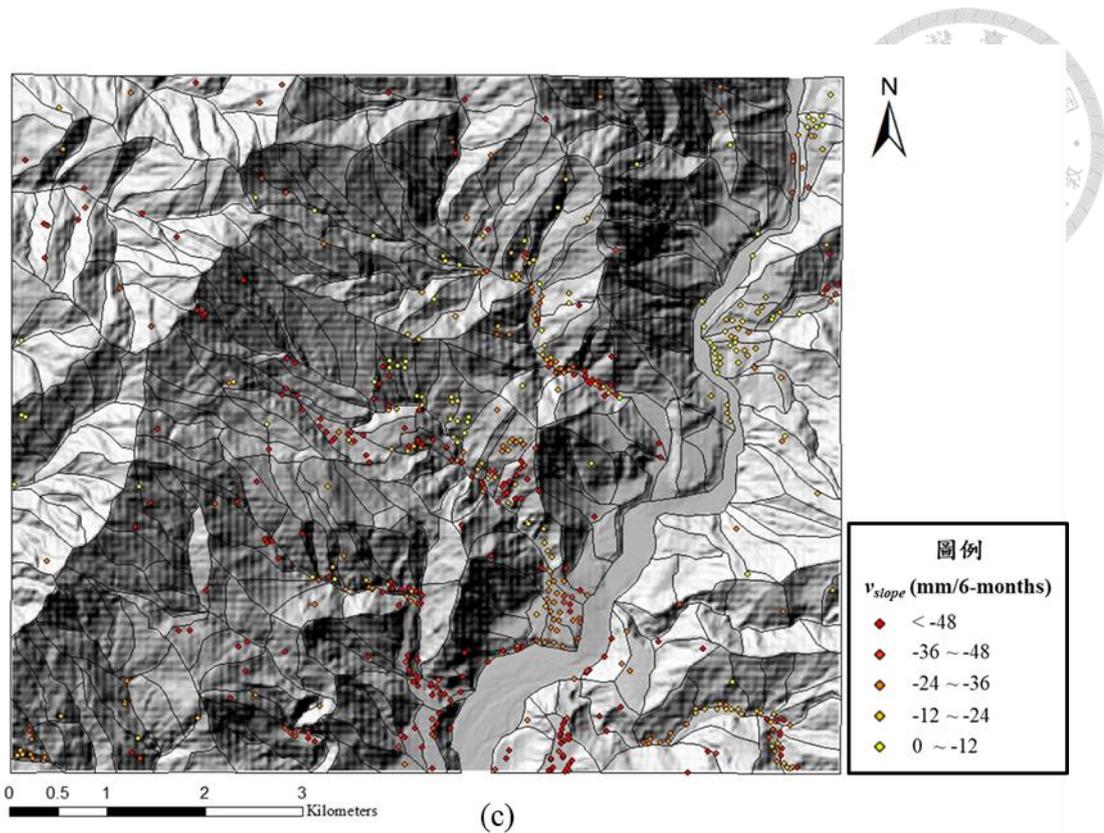


圖 5-3、地表變位速度  $v_{slope}$  圖 (續)  
 (a)2015 年；(b)2016 年；(c)2017 年；(d)2018 年

### 5.1.2 門檻值建立

將 2015 年至 2017 年共 294 個崩塌單元及其平均地表變位速度  $v_{slope}$  統計如圖 5-4 及圖 5-5 所示。圖 5-4 為散布圖，其橫軸為斜坡單元之編號，縱軸為地表變位速度，用以呈現三年間崩塌單元的地表變位速度的分布情形；圖 5-5 為直方圖，其橫軸為地表變位速度，縱軸為百分比，用以呈現崩塌單元的地表變位速度於各區間的機率分布。兩圖中藍線為 95% 區間下界，即三年崩塌單元之  $v_{slope}$  的平均值減去兩倍的三年崩塌單元之  $v_{slope}$  的標準差，其值為 3.8 mm/6-months；黃線為三年崩塌單元之  $v_{slope}$  的平均值，其值為 23.0 mm/6-months。

95% 區間下界（藍線）所代表的意義為當崩塌發生時，約有百分之九十七發生崩塌的斜坡單元之  $v_{slope}$  均大於此數值，代表當斜坡單元的地表變位速度等於 3.8 mm/6-months 時，邊坡可能處於極緩慢滑移的狀態，發生崩塌的可能性不高，但若大於此速度，則須開始注意邊坡的穩定性，故定義 3.8 mm/6-months 為注意值；平均值（黃線）所代表的意義為當崩塌發生時，發生崩塌的斜坡單元之  $v_{slope}$  的平均速度，代表當斜坡單元的速度等於 23.0 mm/6-months 時，邊坡開始有明顯滑移，可能接近安全範圍之臨界值，若大於此速度，則邊坡趨於不穩定的狀態，此時發生崩塌的可能性高，故定義 23.0 mm/6-months 為警戒值。

將本研究所建立的  $v_{slope}$  邊坡變位門檻值與廖瑞堂等人 (2013) 建議之監測管理值進行比較，如表 5-3 及圖 5-6 所示，其建議注意值為 2 mm/month、警戒值為 0.5 mm/day，約為本研究建立的邊坡變位門檻值之 3 至 4 倍。其可能原因有二：1. 本研究使用崩塌前六個月之地表變形計算平均地表變位速度  $v_{slope}$ ，因平均之影響僅能監測到地表緩慢或等速運動之情形，而無法監測到地表短時間內大變形之加速運動情形。2.  $v_{slope}$  所監測的是地表變位速度，可能與臺灣實務上常使用之插入式傾斜儀 (Inclinometer) 所監測的地中變位速度有所不同。又根據廖瑞堂等人 (2013) 所統計的臺灣案例中地表型伸縮計及孔內型伸縮計之監測管理值，注意值界於 0.5 mm/month 至 1 mm/month 之間，警戒值界於 2 mm/month 至 10 mm/month 之間。本研究所建立的  $v_{slope}$  邊坡變位門檻值（注意值為 3.8 mm/6-months、警戒值為 23.0 mm/6-months）亦界於此範圍內，故認定本研究根據統計分析所建立的  $v_{slope}$  邊坡變位門檻值應屬合理。

表 5-3、監測管理值比較表



比較項目 \ 管理值	注意值	警戒值
本研究建立之 $v_{slope}$ 邊坡變位門檻值	3.8 mm/6-months	23.0 mm/6-months
監測管理值建議 (廖瑞堂等人, 2013)	2 mm/month	0.5 mm/day
臺灣案例之伸縮計 管理值訂定範圍 (廖瑞堂等人, 2013)	0.5 ~ 1 mm/month	2 ~ 10 mm/month ; 20 mm/week ; 0.5 mm/day
臺灣案例之傾斜觀測管 管理值訂定範圍 (廖瑞堂等人, 2013)	0.5 ~ 2 mm/month	2 ~ 20 mm/month

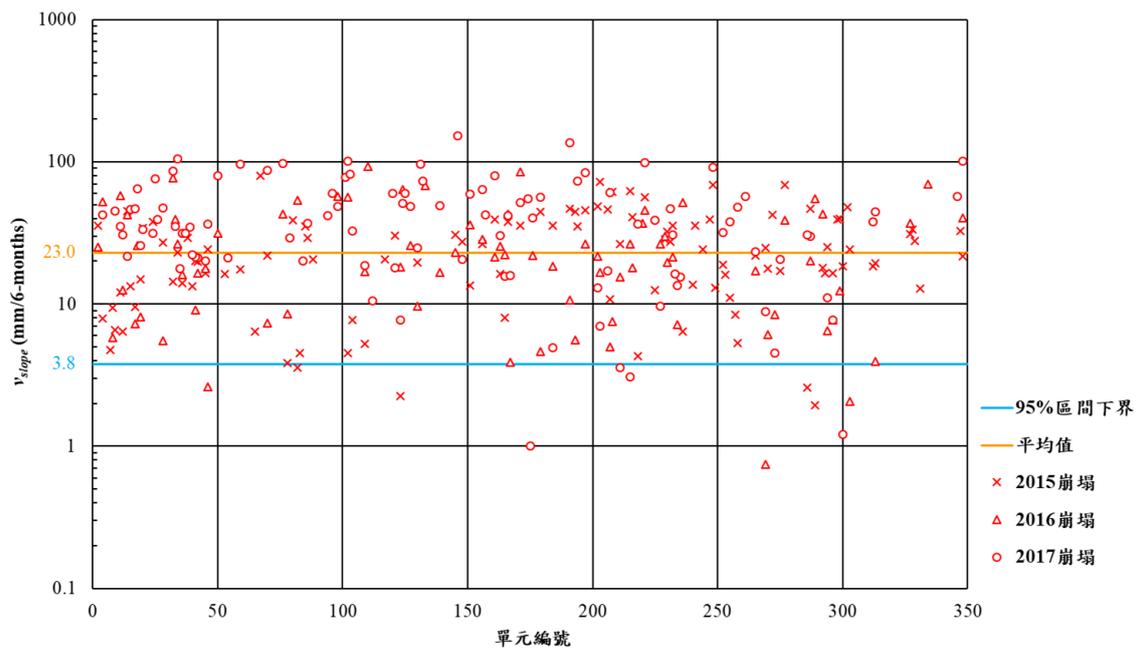


圖 5-4、崩塌單元之  $v_{slope}$  散布圖

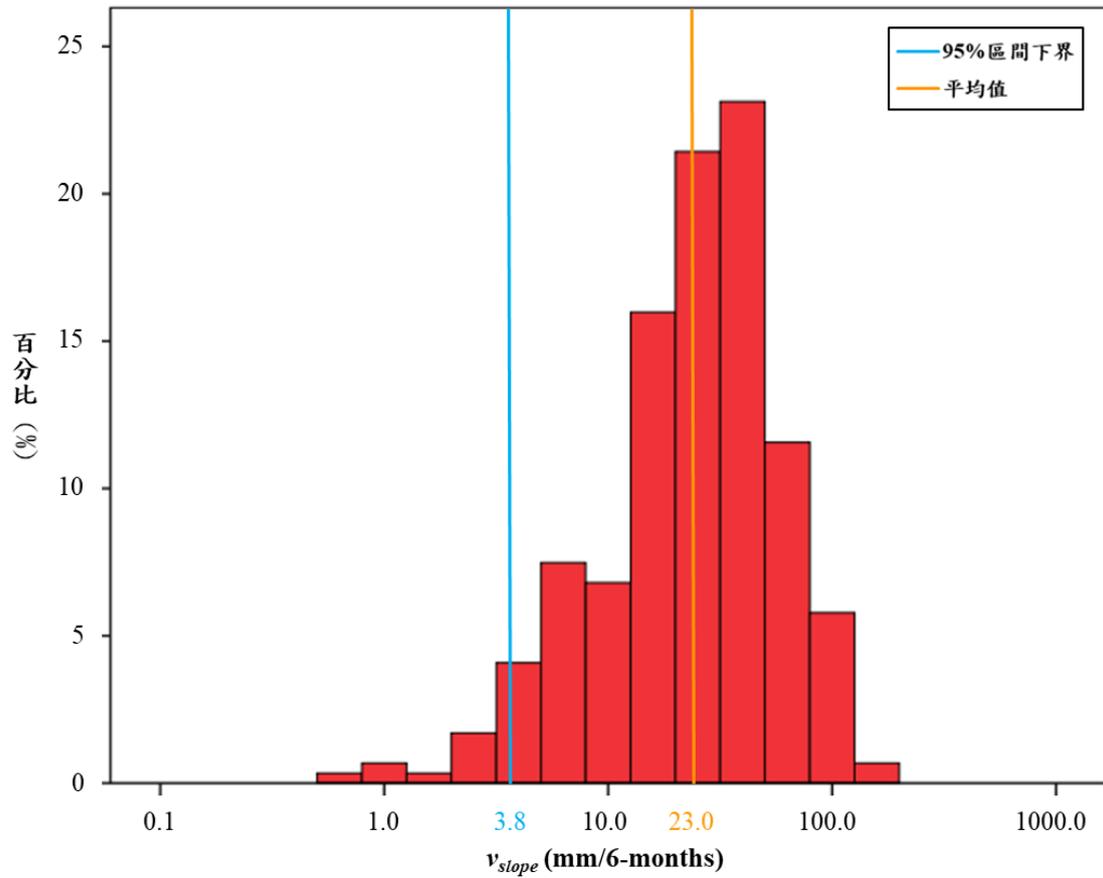


圖 5-5、崩塌單元之  $v_{slope}$  直方圖

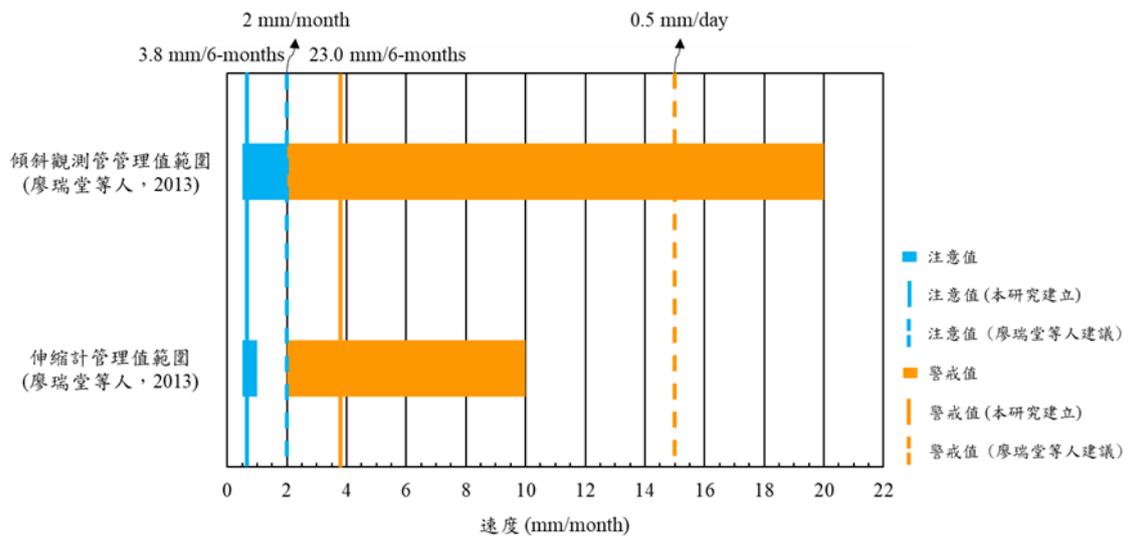


圖 5-6、監測管理值比較圖



## 5.2 崩塌潛勢評估模型

本節介紹崩塌潛勢評估模型之建立方法，依據模型建立步驟，分為分析資料、邏輯斯迴歸、崩塌潛感值修正及模型準確性評估四個部分進行說明。

### 5.2.1 分析資料

本研究根據 3.4 節之相關性分析結果，使用與崩塌具顯著相關性之潛感因子建立崩塌潛勢評估模型，分別為事件累積降雨量、坡度、坡向、地形粗糙度、剖面曲率、植生指標、水系距及岩體強度共 8 項潛感因子。其中，使用 2015 年至 2017 年共三年的崩塌地及潛感因子資料進行訓練，並使用 2018 年的崩塌地及潛感因子資料進行驗證，各年度潛感因子之資料來源統整如表 5-4。各年度崩塌單元及潛感因子如圖 5-1 及圖 5-7 所示。

由於所使用的因子中，各連續變量的值域及單位不一致，且差異極大，故須先對連續變量進行標準化，才能比較分析各因子間之影響性及權重關係。標準化的方法眾多，本研究參考葉柏村及張光宗 (2019) 之研究，使用 z-score 對連續變量進行標準化處理，z-score 標準化公式如式(6.1)。

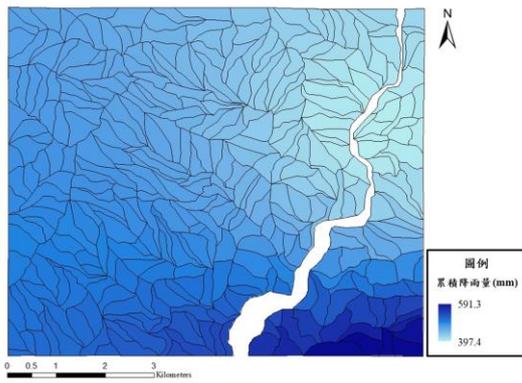
$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_{x_i}} \quad (6.1)$$

其中， $x_{ij}$  為樣本原始值， $\bar{x}_i$  為樣本之平均值， $s_{x_i}$  為樣本之標準差。

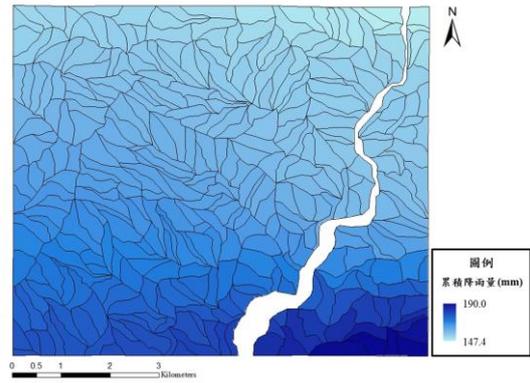
崩塌潛勢評估模型建立後，利用 5.1 節所述之 2015 年至 2017 年的  $v_{slope}$  資料進行崩塌潛感值修正之訓練，找出最佳的修正係數建立潛感值修正模型，並使用 2018 年的  $v_{slope}$  資料進行驗證，使用之雷達影像資訊及  $v_{slope}$  計算資料時間如表 5-1 及表 5-2 所示。

表 5-4、各年度潛感因子資料來源表

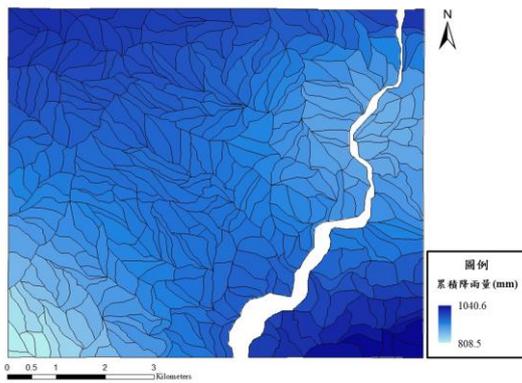
年份 潛感因子	訓練資料			驗證資料
	2015	2016	2017	2018
事件累積降雨量 (復興雨量站降雨量)	2015/05/24 豪雨事件 (397.0 mm)	2016/06/13 梅雨事件 (155.5 mm)	2017/06/01 豪雨事件 (884.0 mm)	2018/06/19 豪雨事件 (202.5 mm)
坡度	2012 年 DEM		2017 年 DEM	
坡向				
地形粗糙度				
剖面曲率				
植生指標	2014/08/28 衛星影像	2016/03/03 衛星影像	2017/01/28 衛星影像	2018/01/15 衛星影像
水系距	全島河流圖資			
岩體強度	岩體強度分級分布圖			



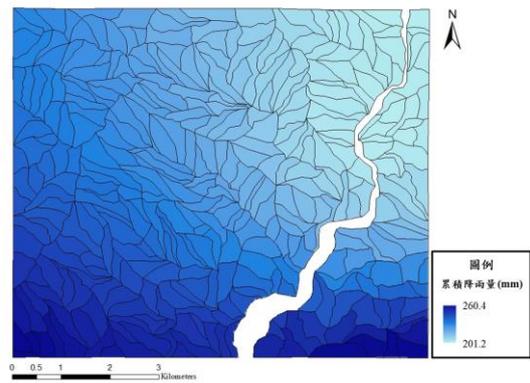
(a)事件累積降雨量 (2015/05/24)



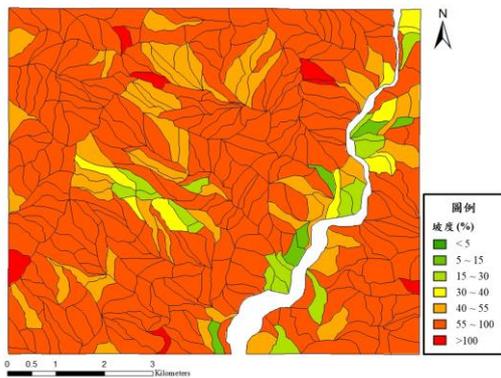
(b)事件累積降雨量 (2016/06/13)



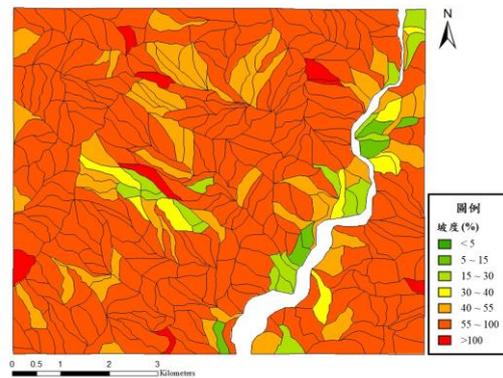
(c)事件累積降雨量 (2017/06/01)



(d)事件累積降雨量 (2018/06/19)

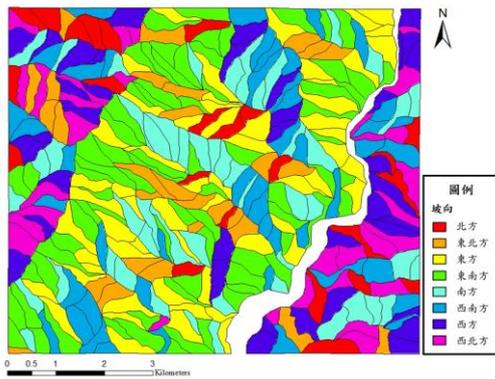


(e)坡度 (2012 年 DEM)

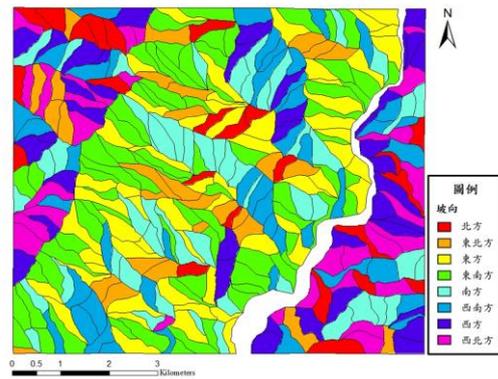


(f)坡度 (2017 年 DEM)

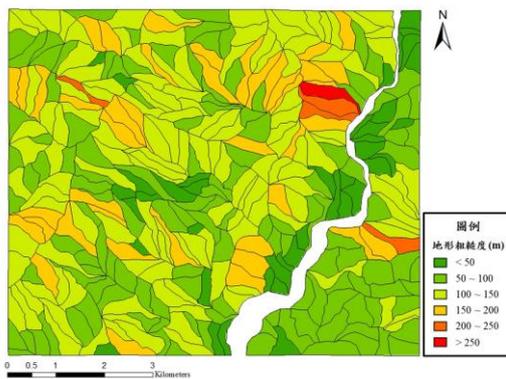
圖 5-7、潛感因子圖



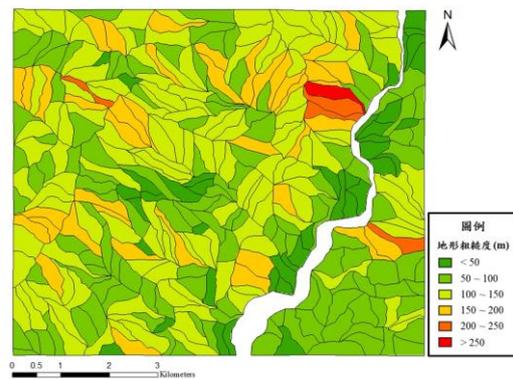
(g)坡向 (2012 年 DEM)



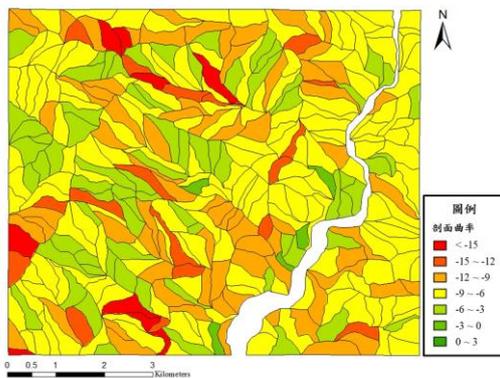
(h)坡向 (2017 年 DEM)



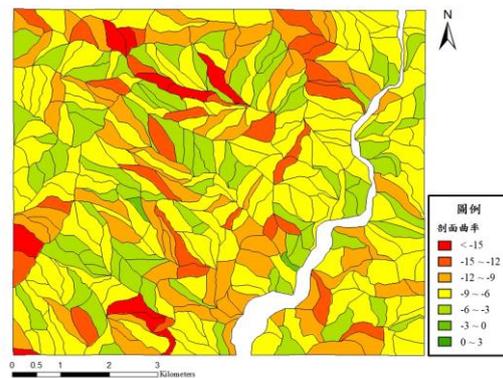
(i)地形粗糙度 (2012 年 DEM)



(j)地形粗糙度(2017 年 DEM)

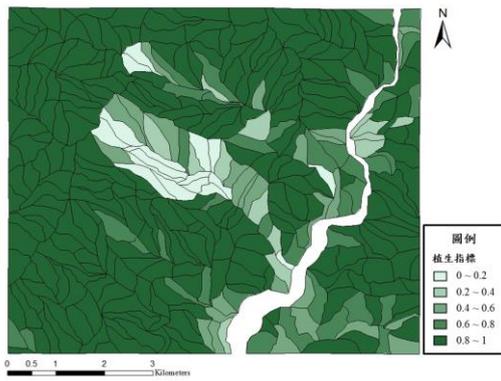


(k)剖面曲率 (2012 年 DEM)

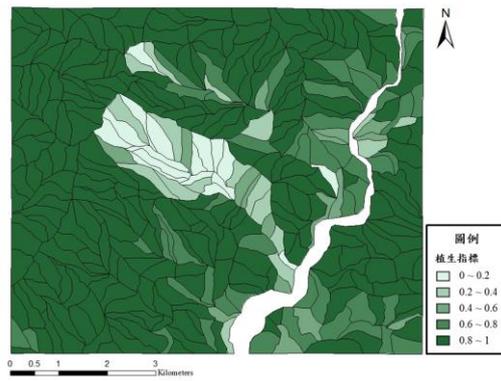


(l)剖面曲率 (2017 年 DEM)

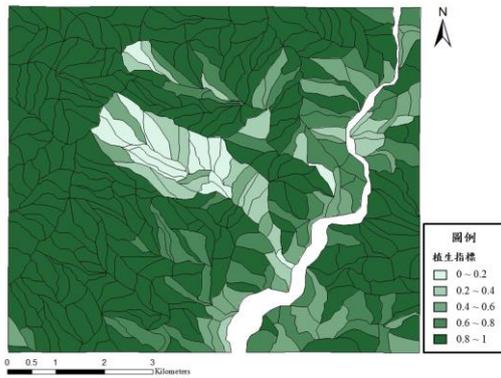
圖 5-6、潛感因子圖 (續)



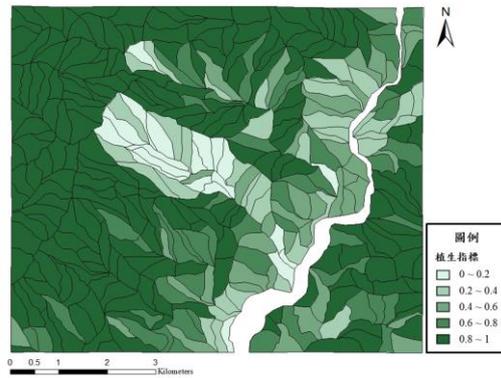
(m) 植生指標 (2014/08/28)



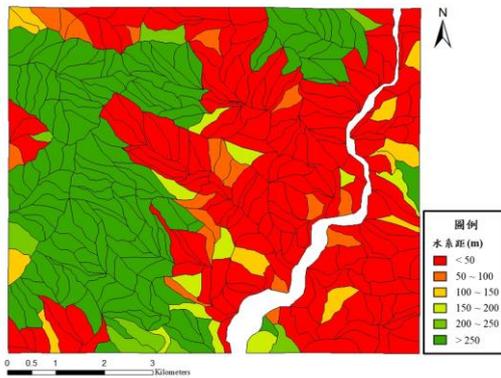
(n) 植生指標 (2016/03/03)



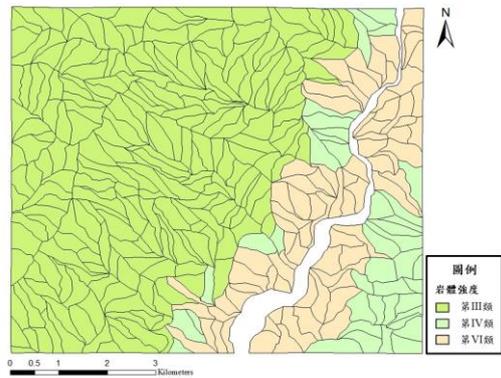
(o) 植生指標 (2017/01/28)



(p) 植生指標 (2018/01/15)



(q) 水系距



(r) 岩體強度

圖 5-6、潛感因子圖 (續)



## 5.2.2 邏輯斯迴歸

由於本研究所使用之依變數為二元變量（崩塌、未崩塌），自變數為連續變量及類別變量，故使用統計分析法中的邏輯斯迴歸 (logistic regression) 建立崩塌潛勢評估模型。

邏輯斯迴歸模型為二元分類中常用的一種模型，為對數線性模型的一種特殊形式 (Feinberg, 1985; Agresti, 2002)，其原理為透過統計迴歸方法，找出一組具判別崩塌與未崩塌能力之迴歸式。

邏輯斯迴歸模型是根據邏輯斯分布函數 (logistic distribution function) 而來，為一 S 型函數，其曲線如圖 5-8 所示，值域介於 0 到 1 之間，類似於一個隨機變數的累積分布曲線。

假設存在一連續應變數  $y_i^*$  代表崩塌發生的可能性，值域為負無限至正無限，當  $y_i^*$  超過某一臨界點  $c$  時，則導致崩塌發生。假設  $c=0$ ，則當  $y_i^* > 0$  時，實際觀察到之應變數  $y_i=1$ ，代表崩塌發生；而其餘情況下，實際觀察到之應變數  $y_i=0$ ，代表崩塌未發生。若假設應變數  $y_i^*$  與自變數  $x_i$  存在線性關係，如式(6.2)，其中  $\varepsilon_i$  為誤差，則由此關係可得式(6.3)。

$$y_i^* = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (6.2)$$

$$P(y_i = 1 | x_i) = P[(\alpha + \beta x_i + \varepsilon_i) > 0] = P[\varepsilon_i > -(\alpha + \beta x_i)] \quad (6.3)$$

又為了取得累積分布函數 (cumulative distribution function)，須改變式中不等號之方向，故可改寫為式(6.4)。

$$P(y_i = 1 | x_i) = P[\varepsilon_i \leq \alpha + \beta x_i] = F(\alpha + \beta x_i) \quad (6.4)$$

其中， $F(\alpha + \beta x_i)$  為誤差  $\varepsilon_i$  的累積分布函數。假設誤差  $\varepsilon_i$  為邏輯斯分布，則此函數稱為邏輯斯分布函數，可表示為一簡單的形式，如式(6.5)。

$$P(y_i = 1 | x_i) = \frac{1}{1 + e^{-\varepsilon_i}} \quad (6.5)$$

根據邏輯斯分布函數，邏輯斯迴歸模型可以表示成以下形式 (Gregory and John, 2003)，如式(6.6)。

$$P(y_i = 1 | x_i) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta x_i)}} \quad (6.6)$$

上式中， $P(y_i = 1 | x_i)$  為自變數為  $x_i$  時崩塌發生的條件機率， $x_i$  為自變數， $\alpha$ 、 $\beta$  分別為迴歸截距及迴歸係數。同理，亦可應用於多元迴歸，當有  $k$  個自變數時，則式(6.6)可以擴展成式(6.7)。

$$P(y_i = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki})}} \quad (6.7)$$

其中， $P(y_i = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$  為給定一系列自變數  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$  時崩塌發生的條件機率， $\beta_k$  為自變數  $x_k$  的迴歸係數。若定義  $P_i = P(y_i = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$ ，則邏輯斯迴歸模型可表示為一線性方程式如式(6.8)，而每組自變數代入模型所得崩塌發生之機率  $P_i$  如式(6.9)。

$$Z = \ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki} \quad (6.8)$$

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \quad (6.9)$$

本研究使用 Real Statistics Resource Pack 軟體進行邏輯斯迴歸分析，是一款由 Charles Zaiontz 所研發的開源軟體，透過這個軟體，可以實現在 Excel 環境下進行統計分析。藉由將崩塌資料作為應變數，8 種潛感因子作為自變數，以邏輯斯迴歸訓練可得崩塌潛勢評估模型。透過此模型，僅須輸入斜坡單元中各潛感因子之觀測值，便可分析得出該斜坡單元發生崩塌之機率，即崩塌潛感值。崩塌潛感值的值域為 0 至 1 之間，本研究以 0.5 作為閾值，若崩塌潛感值大於 0.5，則代表該斜坡單元為崩塌；若崩塌潛感值小於 0.5，則代表該斜坡單元為未崩塌。

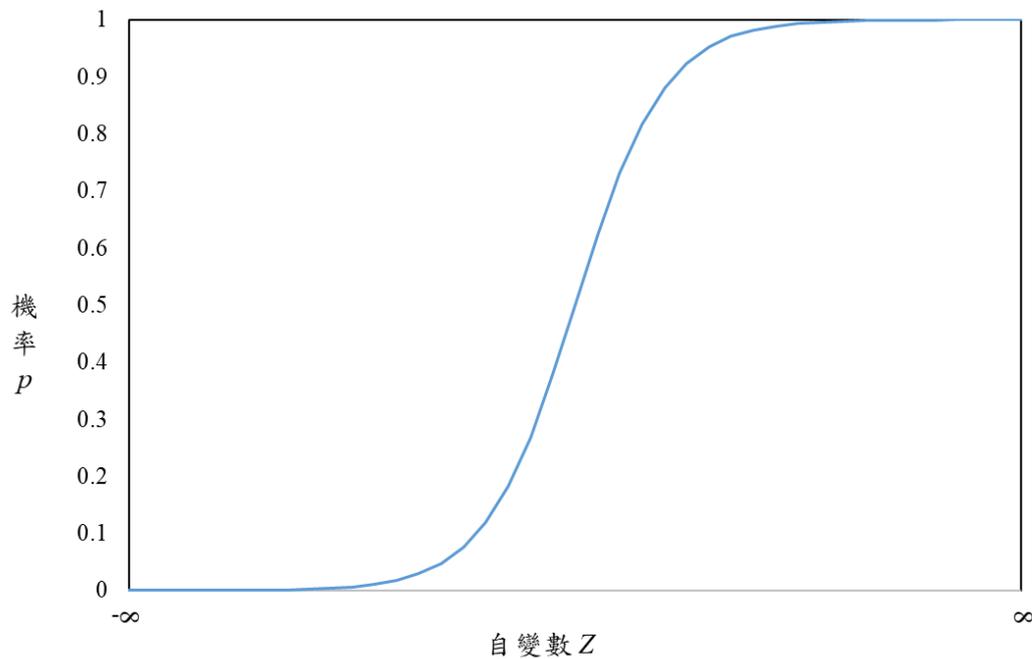


圖 5-8、邏輯斯分布函數曲線圖

### 5.2.3 崩塌潛感值修正

潛感值修正模型是藉由監測崩塌前的地表變形行為，藉此動態修正邏輯斯迴歸模型所得的崩塌潛感值，以獲得更精確的崩塌潛感值。本研究以 PSInSAR 技術監測所得的沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  修正各斜坡單元的崩塌潛感值，建立潛感值修正模型。透過  $v_{slope}$  修正後的崩塌潛感值，可以對現地邊坡穩定性有更準確的評估，進而提升模型預測崩塌的準確性。

潛感值修正模型基於 5.1 節所建立的邊坡變位門檻值作為  $v_{slope}$  的閾值，並使用基因演算法求得不同  $v_{slope}$  範圍下最佳的潛感值修正係數。潛感值修正模型可表示為式(6.10)及式(6.11)。

$$P_{refined, i} = c \cdot P_i \leq 1 \quad (6.10)$$

$$c = \begin{cases} c_1, & \text{if } v_{slope} < 3.8 \text{ mm} / 6\text{-months} \\ c_2, & \text{if } 3.8 \text{ mm} / 6\text{-months} < v_{slope} < 23.0 \text{ mm} / 6\text{-months} \\ c_3, & \text{if } v_{slope} > 23.0 \text{ mm} / 6\text{-months} \end{cases} \quad (6.11)$$

其中， $P_{refined, i}$  為修正後的崩塌潛感值， $c$  為潛感值修正係數， $P_i$  為邏輯斯迴歸模型所得之崩塌潛感值。

基因演算法 (Genetic Algorithms, GA) 是效法達爾文「物競天擇」理論發展而成的演算方法，常用於求解最佳化問題 (陳怡睿，2010；王美齡，2010)。其概念為將欲求解的變數或參數進行二進位制的編碼，編碼後的二進位碼字串，就如同生物學中的染色體 (chromosomes)，並在運算過程中，仿照自然界中生物物競天擇、適者生存的理念，以篩選 (selection)、交配 (crossover) 及突變 (mutation) 三大法則為演算法的核心進行計算。首先對於隨機生成之原始染色體 (母代) 進行篩選，篩選出較優良的基因 (gene) 予以保留，並透過交配及突變生成新的染色體 (子代)，最後再解碼求得最佳化的變數或參數，以達到避免陷入局部最佳解，找出全域最佳解的目的。

基因演算法的運算步驟如圖 5-9，主要可分為產生初始族群、計算適應函數、篩選、交配及突變，以下進行說明。

#### 1. 產生初始族群 (Initialize population)

定義染色體的長度及數量，並隨機生成染色體作為初始解。本研究設定初始染色體數量為 60 個。

#### 2. 計算適應函數 (Fitness calculation)

將染色體進行解碼後得到變數或參數，代入適應函數計算函數值。適應函數值可作為染色體是否適合繼續存在於族群的依據，越符合適應函數，表示該染色體適應能力高，生存機會越大；反之，表示該染色體適應能力低，則淘汰的機會越大。適應函數值亦可作為基因演算法的終止條件之一。

#### 3. 篩選 (Selection)

篩選的目的在於透過適應函數值篩選出優良的染色體，以演化出更優良的染色體，組成下一代族群。篩選的方法眾多，本研究使用較常被使用的輪盤法 (Roulette wheel) 進行篩選。其原理為假設有一轉動的輪盤，輪盤上方標記所有的染色體，並依據適應函數值決定各染色體在輪盤上佔有的面積，代表其被選中的機率，再以隨機轉輪盤的方式挑選染色體進入下一子代，示意圖如圖 5-10 所示。

#### 4. 交配 (Crossover)

篩選完成後，便進入交配的步驟，透過交配將原染色體的優良基因保留，演化出更優良的染色體。交配步驟為先定義交配率，從染色體中隨機選取兩

個染色體，然後以均勻分布隨機生成一機率值，若此機率小於交配率，則染色體便進行交配，產生新的兩個染色體；反之，則不進行交配。本研究交配率設定為 0.8，並使用均勻交配法 (uniform crossover) 進行。其原理為以亂數生成一個與染色體長度一樣的二進位制遮罩 (mask)，依據遮罩上的數值，若為 0，則相對應的母代基因保留；若為 1，則相對應的母代基因進行交換，均勻交配法示意圖如圖 5-11 所示。

#### 5. 突變 (Mutation)

突變為演化過程中的最後一個步驟，其目的為增加染色體的多樣性，避免運算過程中過早收斂而陷入局部最佳解，而無法求得全域最佳解。突變步驟為先定義突變率，並對染色體以均勻分布隨機生成一機率值，若此機率小於突變率，則染色體便進行突變，隨機對染色體中的一個基因進行 0 與 1 的互換；反之，則不進行突變。本研究突變率設定為 0.01，突變示意圖如圖 5-12 所示。

本研究使用 MATLAB 軟體之 ga 函式實現基因演算法運算，求得潛感值修正模型中各  $v_{slope}$  範圍下最佳的潛感值修正係數，以建立崩塌預測準確性更高的崩塌潛勢評估模型。

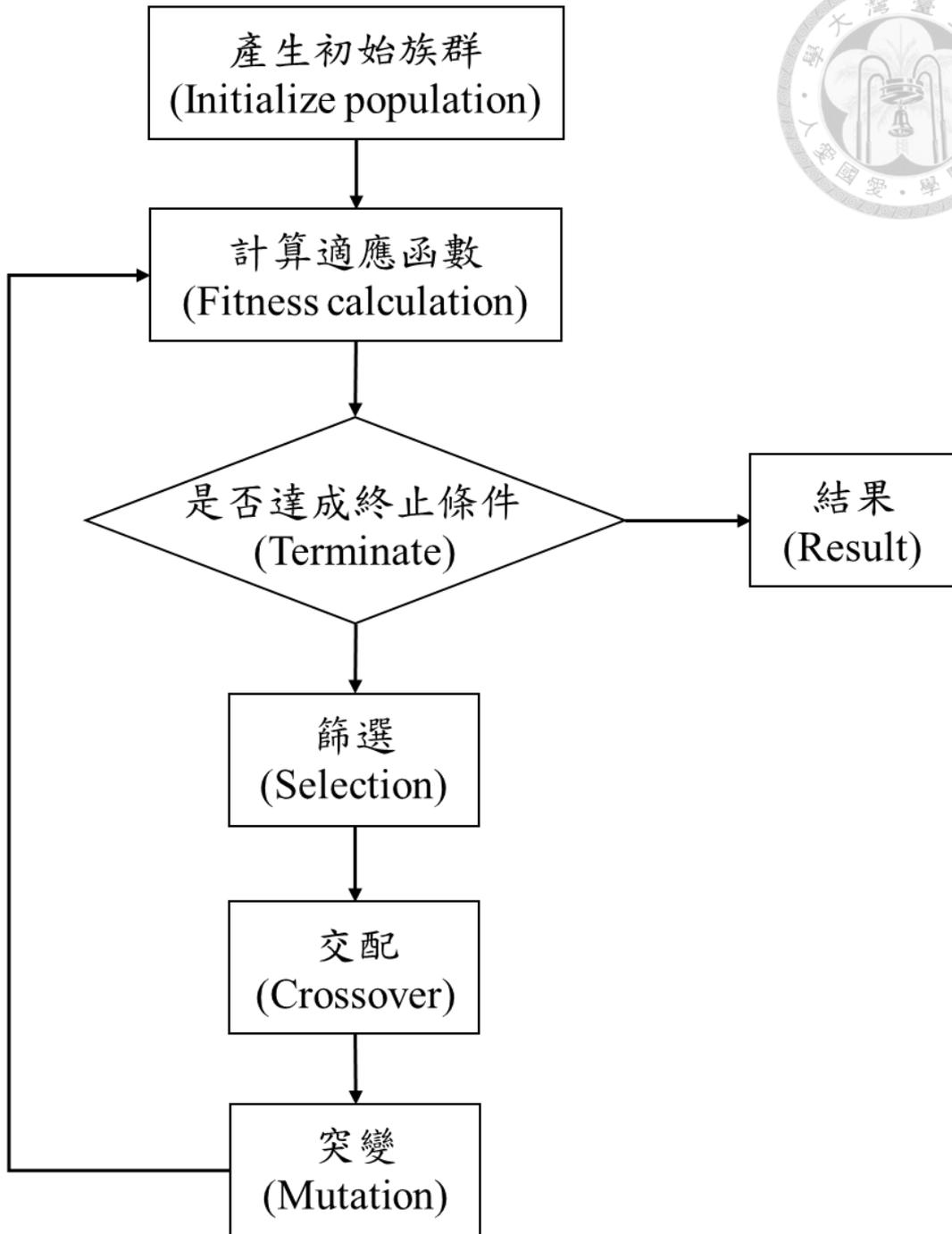


圖 5-9、基因演算法運算步驟

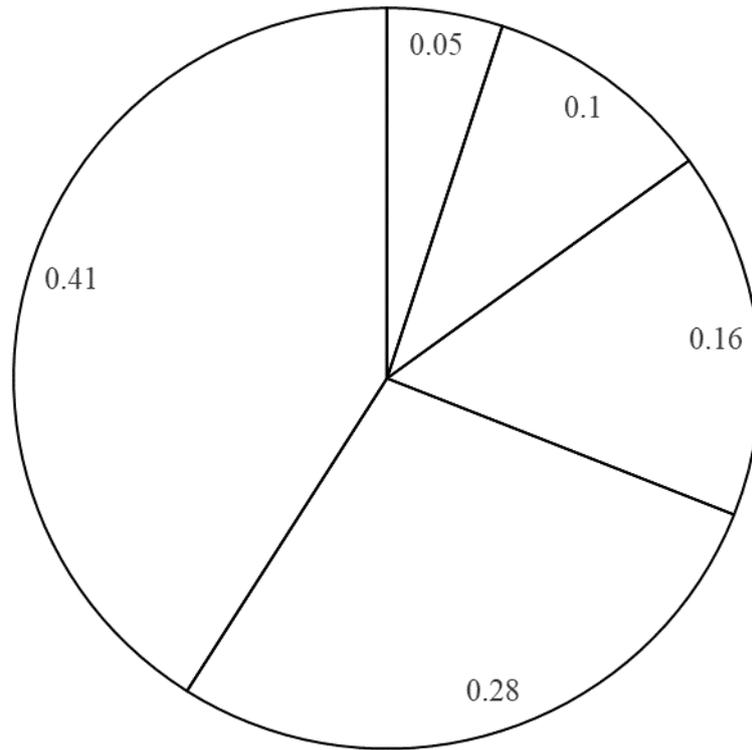


圖 5-10、輪盤法示意圖

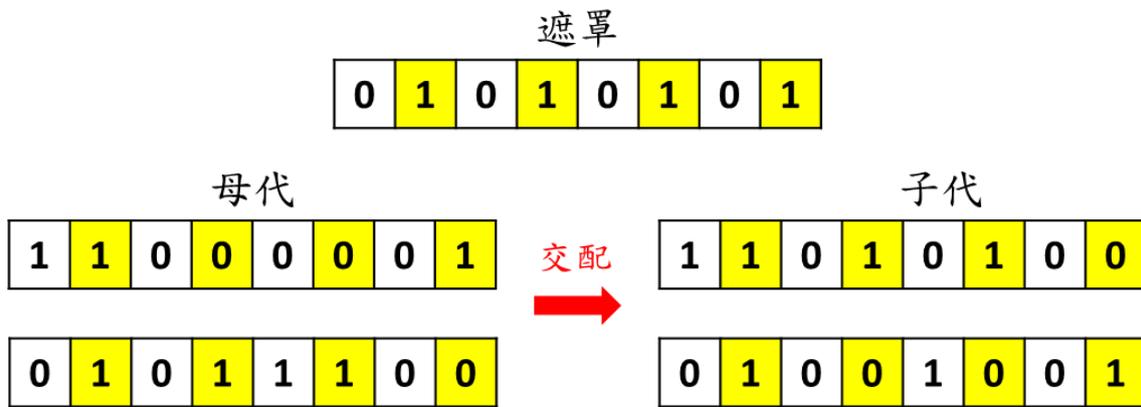


圖 5-11、均勻交配法示意圖



圖 5-12、突變示意圖



## 5.2.4 模型準確性評估

本研究透過計算斜坡單元的崩塌潛感值，並將崩塌潛感值以 0.5 作為閾值，預測崩塌是否發生。若崩塌潛感值大於 0.5，則預測為崩塌；若崩塌潛感值小於 0.5，則預測為非崩塌。

分類誤差矩陣 (classification error matrix) 常被用於驗證模型的預測準確性，其概念為統計實際為崩塌與未崩塌的斜坡單元個數及預測為崩塌與未崩塌的斜坡單元個數，形成一個  $2 \times 2$  的矩陣，如表 5-5 所示。誤差矩陣中可分為四種情況，實際為崩塌且預測亦為崩塌，稱真陽性 (True Positive, TP)；實際為崩塌但預測為未崩塌，稱偽陰性 (False Negative, FN)；實際為未崩塌但預測為崩塌，稱偽陽性 (False Positive, FP)；實際為未崩塌且預測亦為未崩塌，稱真陰性 (True Negative, TN)。

根據何瑞益等人 (2017, 2019)，可利用誤差矩陣計算下列四種指標評估崩塌潛勢評估模型應用於崩塌預測之適用性。

### 1. 可偵測率 (Probability of Detection, POD)

可偵測率描述崩塌事件被正確預測的比例，其計算如式(6.12)。可偵測率的值域介於 0 至 1 之間，當可偵測率越接近 1，代表模型的預測崩塌的能力越佳。然而可偵測率僅考慮真陽性 (TP) 及偽陰性 (FN)，忽略了偽陽性 (FP)，故對實際崩塌發生較少的案例，可偵測率會偏高，故使用時應同時考慮誤報率綜合分析。

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6.12)$$

### 2. 誤報率 (False Alarm Ratio, FAR)

誤報率描述被錯誤預測為崩塌事件的比例，其計算如式(6.13)。誤報率的值域介於 0 至 1 之間，當誤報率越接近 0，代表模型的預測崩塌的能力越佳，越不會發出假警報。

$$FAR = \frac{FP}{TP + FP} \quad (6.13)$$



### 3. 預兆得分 (Threat Score, TS)

預兆得分同時考量偽陽性 (FP) 及偽陰性 (FN)，可視為描述模型預測崩塌的正確率，其計算如式(6.14)。預兆得分的值域介於 0 至 1 之間，當預兆得分越接近 1，代表模型的預測崩塌的能力越佳；若預兆得分為 0，則代表模型無預測崩塌的能力。

$$TS = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (6.14)$$

### 4. 準確率 (Accuracy, ACC)

準確率同時考量誤差矩陣中的所有情況，綜合考量模型整體正確預測崩塌及非崩塌的比例，其計算如式(6.15)。準確率的值域介於 0 至 1 之間，當準確率越接近 1，代表模型的整體預測能力越佳；若準確率為 0，則代表模型完全無預測能力。

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (6.15)$$

表 5-5、分類誤差矩陣示意表

		實際	
		崩塌	未崩塌
預測	崩塌	真陽性 (TP)	偽陽性 (FP)
	未崩塌	偽陰性 (FN)	真陰性 (TN)



## 5.3 模型結果與討論

本節介紹邏輯斯迴歸模型及潛感值修正模型之建立成果，並利用 2018 年之資料進行驗證，分析及比較模型的崩塌預測能力。

### 5.3.1 邏輯斯迴歸模型

以 2015 年至 2017 年共三年之崩塌及潛感因子為訓練資料，透過邏輯斯迴歸建立的崩塌潛勢評估模型如式(6.16)。

$$\begin{aligned}
Z = \ln \frac{P}{1-P} = & -2.212 + 0.548 \cdot x_{slope} + 0.603 \cdot x_{aspect(northeast)} + 1.453 \cdot x_{aspect(east)} \\
& + 1.153 \cdot x_{aspect(southeast)} + 1.724 \cdot x_{aspect(south)} + 0.657 \cdot x_{aspect(southwest)} \\
& + 0.638 \cdot x_{aspect(west)} + 0.365 \cdot x_{aspect(northwest)} + 0.334 \cdot x_{terrain\ roughness} \quad (6.16) \\
& - 0.111 \cdot x_{profile\ curvature} - 1.702 \cdot x_{planting\ index} - 0.439 \cdot x_{distance\ to\ river} \\
& + 1.898 \cdot x_{rock\ strength(III)} + 2.466 \cdot x_{rock\ strength(IV)} - 0.046 \cdot x_{rainfall}
\end{aligned}$$

其中， $P$  代表崩塌發生之機率（崩塌潛感值）， $x_{slope}$  代表坡度， $x_{aspect(northeast)}$  代表向東北之坡向， $x_{aspect(east)}$  代表向東之坡向， $x_{aspect(southeast)}$  代表向東南之坡向， $x_{aspect(south)}$  代表向南之坡向， $x_{aspect(southwest)}$  代表向西南之坡向， $x_{aspect(west)}$  代表向西之坡向， $x_{aspect(northwest)}$  代表向西北之坡向， $x_{terrain\ roughness}$  代表地形粗糙度， $x_{profile\ curvature}$  代表剖面曲率， $x_{planting\ index}$  代表植生指標， $x_{distance\ to\ river}$  代表水系距， $x_{rock\ strength(III)}$  代表第三類之岩體強度， $x_{rock\ strength(IV)}$  代表第四類之岩體強度， $x_{rainfall}$  代表事件累積降雨量。

將 2018 年之潛感因子資料輸入模型，驗證模型預測崩塌的能力。2018 年各斜坡單元的崩塌潛感值如圖 5-13 所示，依崩塌潛感值可將崩塌潛勢歸納為四類：低潛勢（潛感值界於 0 至 0.25）、中低潛勢（潛感值界於 0.25 至 0.5）、中高潛勢（潛感值界於 0.5 至 0.75）及高潛勢（潛感值界於 0.75 至 1.0），研究區域內的崩塌潛勢統計如圖 5-14。並以崩塌潛感值為 0.5 作為閾值預測崩塌是否發生，預測結果如表 5-6 及圖 5-15 所示，圖中填滿部分表示預測正確（真陽性及真陰性）之斜坡單元，斜線部分表示預測錯誤（偽陽性及偽陰性）之斜坡單元。結果顯示模型的可偵測率高達 83.32%，代表模型成功預測崩塌發生的能力極佳，但誤報率有 24.08%，代表預測為崩塌發生的單元中約有四分之一為錯誤預測，預兆得分為 66.21%，準確率達 79.04%，整體預測的表現良好，但尚有精進空間。

透過觀察發現預測結果為偽陽性（實際為未崩塌但預測為崩塌）之斜坡單元，則多為水系周圍的斜坡單元，可能因水系距為影響性較高的潛感因子之一，導致水系距小的斜坡單元容易被誤判為崩塌發生；而預測結果為偽陰性（實際為崩塌但預測為未崩塌）之斜坡單元，皆為崩塌面積較小、佔單元總面積極小的單元，可能因其崩塌面積小導致以斜坡單元難以預測其崩塌發生。

表 5-6、崩塌預測誤差矩陣（邏輯斯迴歸模型）

			實際	
			崩塌	非崩塌
			173	180
預測	崩塌	191	145	46
	非崩塌	162	28	134
可偵測率 (POD)			83.82%	
誤報率 (FAR)			24.08%	
預兆得分 (TS)			66.21%	
準確率 (ACC)			79.04%	

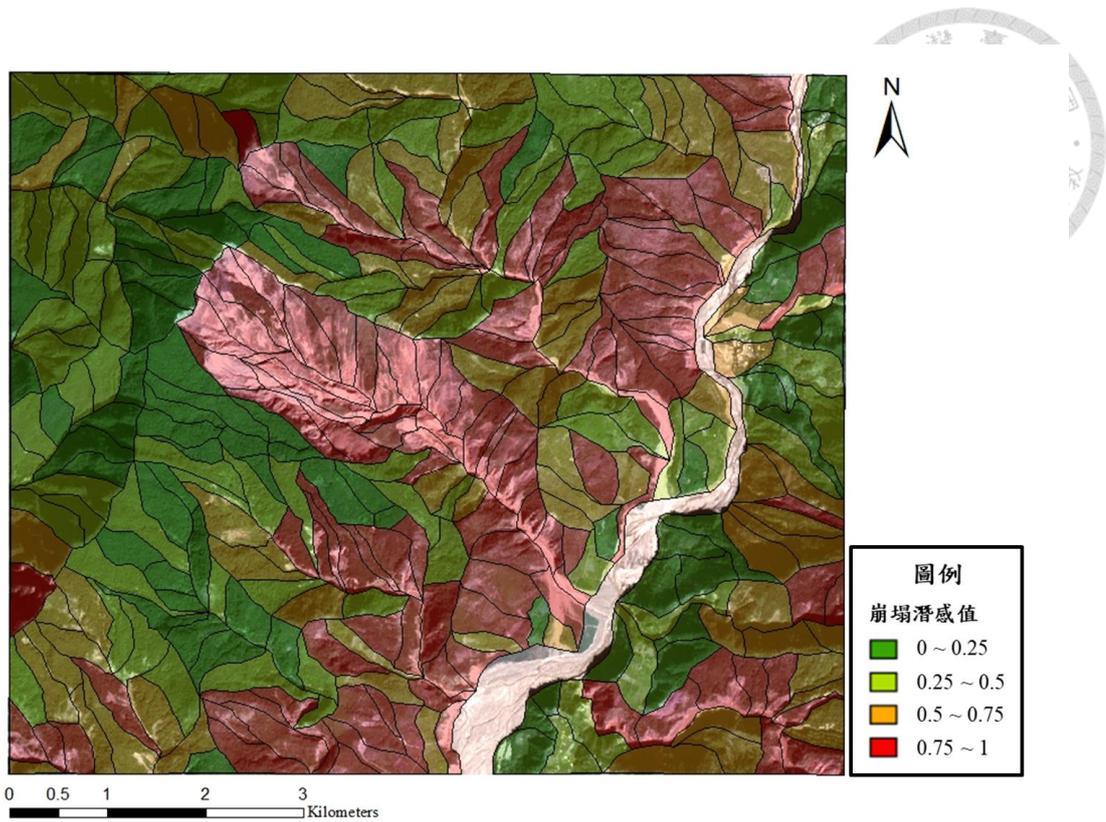


圖 5-13、崩塌潛感圖 (邏輯斯迴歸模型)

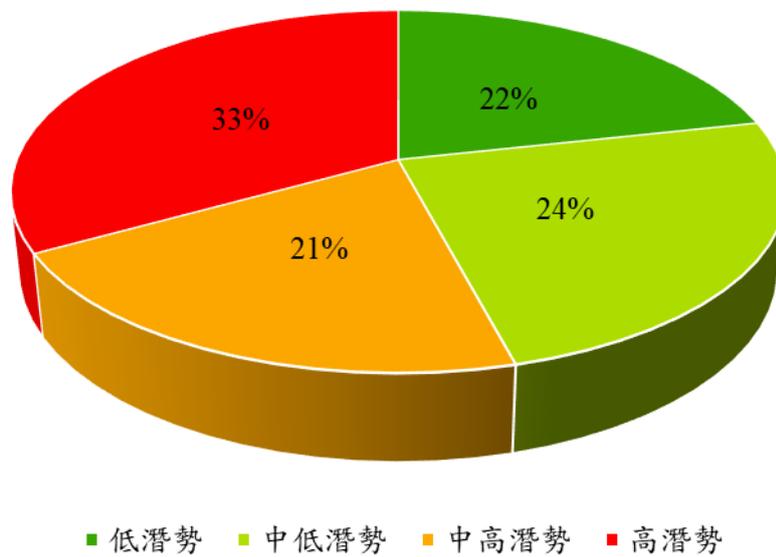


圖 5-14、崩塌潛勢圓餅圖 (邏輯斯迴歸模型)

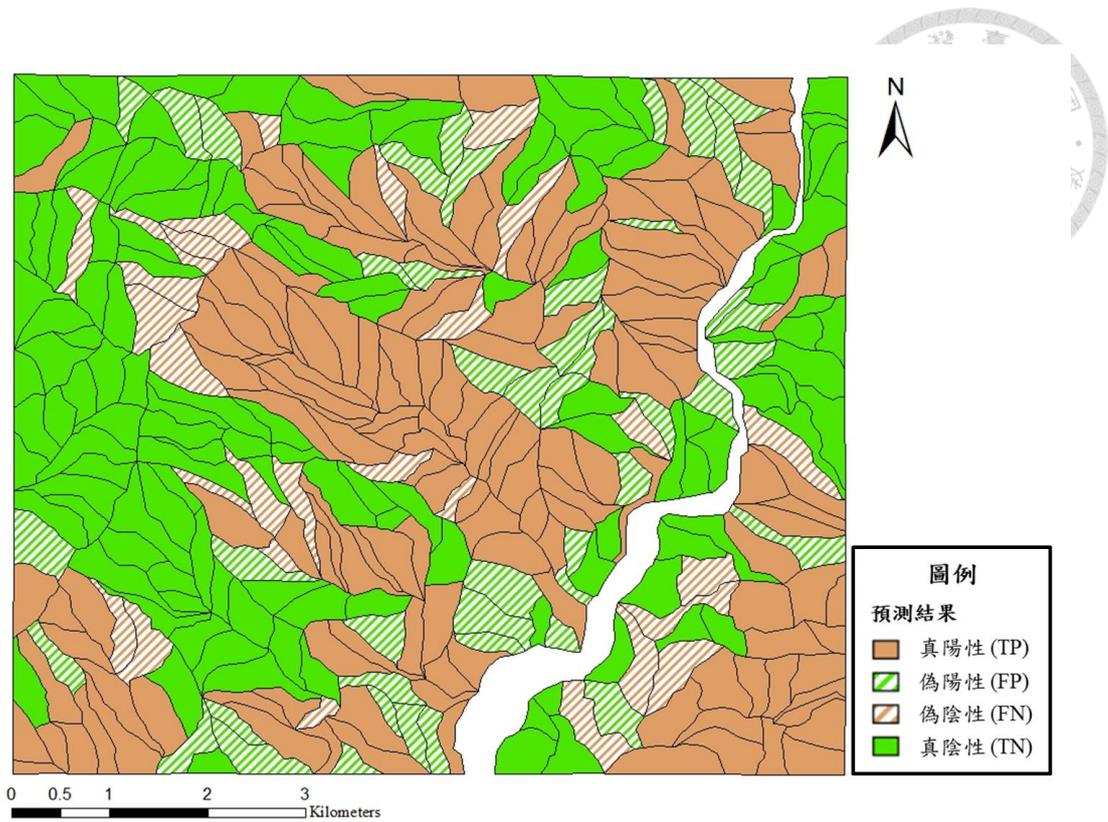


圖 5-15、崩塌預測結果圖 (邏輯斯迴歸模型)



### 5.3.2 潛感值修正模型

以 2015 年至 2017 年共三年之沿坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$  為訓練資料，以模型擬合訓練資料的預測準確率為適應函數，透過基因演算法找出各  $v_{slope}$  範圍下最佳的潛感值修正係數。計算結果如圖 5-16 所示，約在第 20 世代時趨於收斂，並於第 60 世代時確認為收斂，計算終止，潛感值修正係數之結果如表 5-7 所示，所建立之潛感值修正模型如式(6.17)。

$$P_{refined} = \begin{cases} 0.67P, & \text{if } v_{slope} < 3.8 \text{ mm / 6-months} \\ 0.82P, & \text{if } 3.8 \text{ mm / 6-months} < v_{slope} < 23.0 \text{ mm / 6-months} \\ 1.10P, & \text{if } v_{slope} > 23.0 \text{ mm / 6-months and } 1.10P < 1 \\ 1.00, & \text{if } v_{slope} > 23.0 \text{ mm / 6-months and } 1.10P \geq 1 \end{cases} \quad (6.17)$$

其中， $P_{refined}$  為修正後崩塌發生之機率（崩塌潛感值）， $P$  為邏輯斯迴歸模型所得的崩塌發生之機率（崩塌潛感值）。

根據 5.1 節邊坡變位門檻值的定義， $v_{slope}$  小於注意值時，代表邊坡處於相對穩定的狀態，其修正係數小於 1，為 0.67； $v_{slope}$  界於注意值及警戒值之間時，須開始注意邊坡的穩定性，但尚在安全範圍內，其修正係數較大但仍小於 1，為 0.82； $v_{slope}$  大於警戒值時，代表邊坡可能趨於不穩定的狀態，其修正係數大於 1，為 1.10。綜合上述，潛感值修正係數  $c$  均設定在合理的範圍內。

表 5-7、崩塌潛感值修正係數表

邊坡變位門檻值	注意值		警戒值
$v_{slope}$ (mm/6-months)	3.8		23.0
	< 3.8	3.8 ~ 23.0	> 23.0
修正係數 $c$	0.67	0.82	1.10

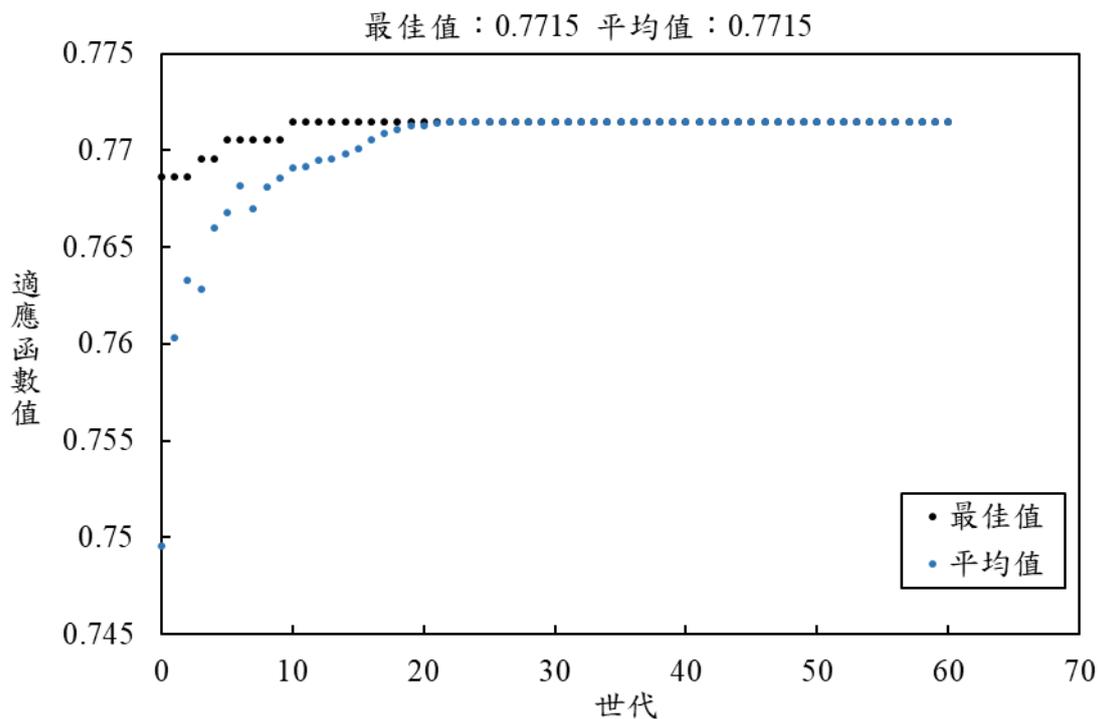


圖 5-16、基因演算法計算結果圖

並將 2018 年之  $v_{slope}$  資料輸入模型，驗證潛感值修正模型預測崩塌的能力。修正後 2018 年各斜坡單元的崩塌潛感值如圖 5-17 所示，研究區域內修正後之崩塌潛勢統計如圖 5-18，發現於崩塌潛感值修正後，各崩塌潛勢所佔的百分比變化不大。潛感值修正模型的預測結果如表 5-8 及圖 5-19 所示，結果顯示模型的可偵測率高達 85.55%，代表模型成功預測崩塌發生的能力極佳，且誤報率僅有 20.43%，代表模型錯誤預測為崩塌發生的可能性較低，預測為崩塌發生的單元中僅約有五分之一為錯誤預測，預兆得分為 70.14%，準確率亦高達 82.15%，整體預測的表現佳。

根據預測結果，透過修正崩塌潛感值後，各崩塌潛勢所佔的百分比雖變化不大，但卻使崩塌預測誤差矩陣中偽陽性及偽陰性數量均有明顯下降，證明潛感值修正模型將地表變位速度  $v_{slope}$  當作動態因子納入考量，能有效修正斜坡單元的崩塌潛感值，使崩塌潛感值更精確，進而提升崩塌預測的準確性。

表 5-8、崩塌預測誤差矩陣 (潛感值修正模型)

			實際	
			崩塌	非崩塌
			173	180
預測	崩塌	186	148	38
	非崩塌	167	25	142
可偵測率 (POD)			85.55%	
誤報率 (FAR)			20.43%	
預兆得分 (TS)			70.14%	
準確率 (ACC)			82.15%	

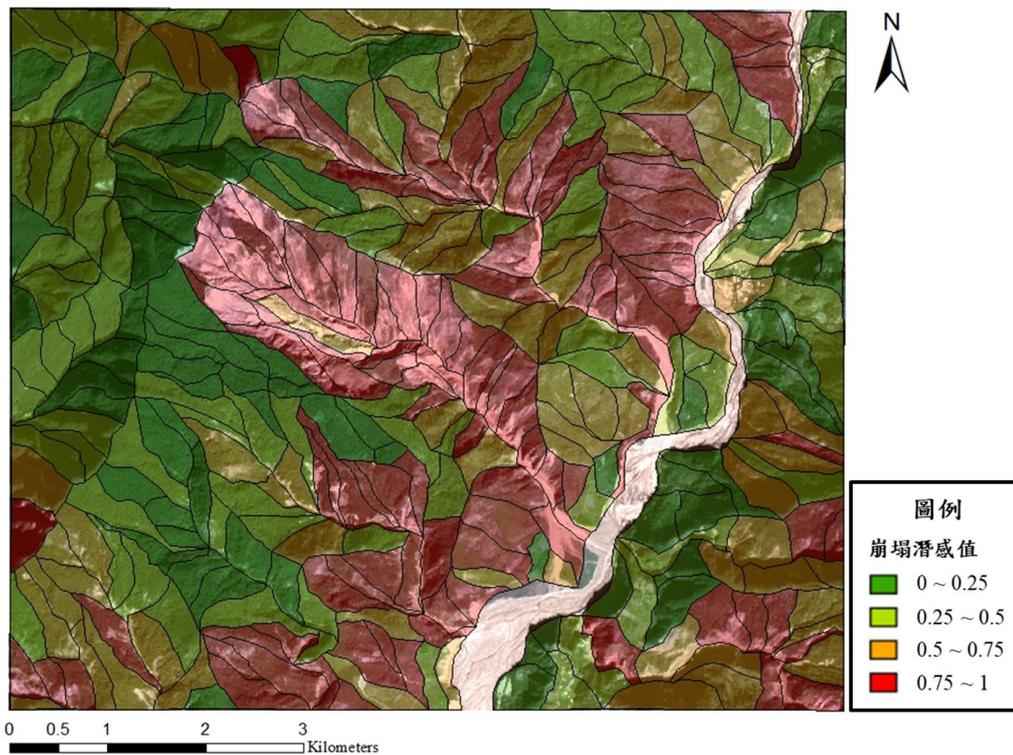
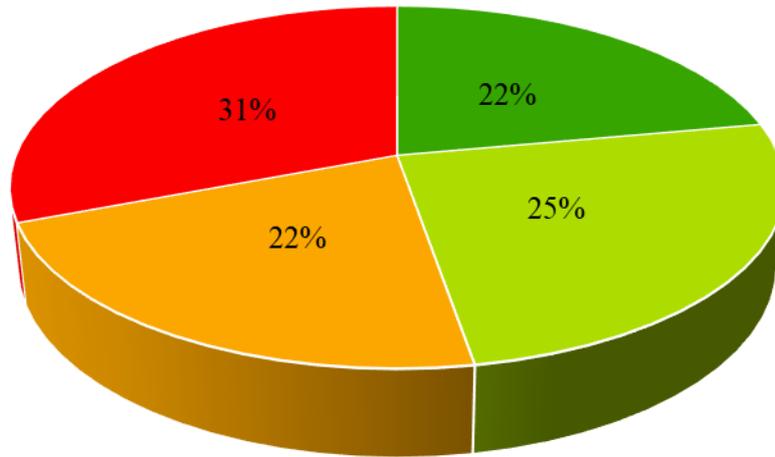


圖 5-17、崩塌潛感圖 (潛感值修正模型)



■ 低潛勢 ■ 中低潛勢 ■ 中高潛勢 ■ 高潛勢

圖 5-18、崩塌潛勢圓餅圖 (潛感值修正模型)

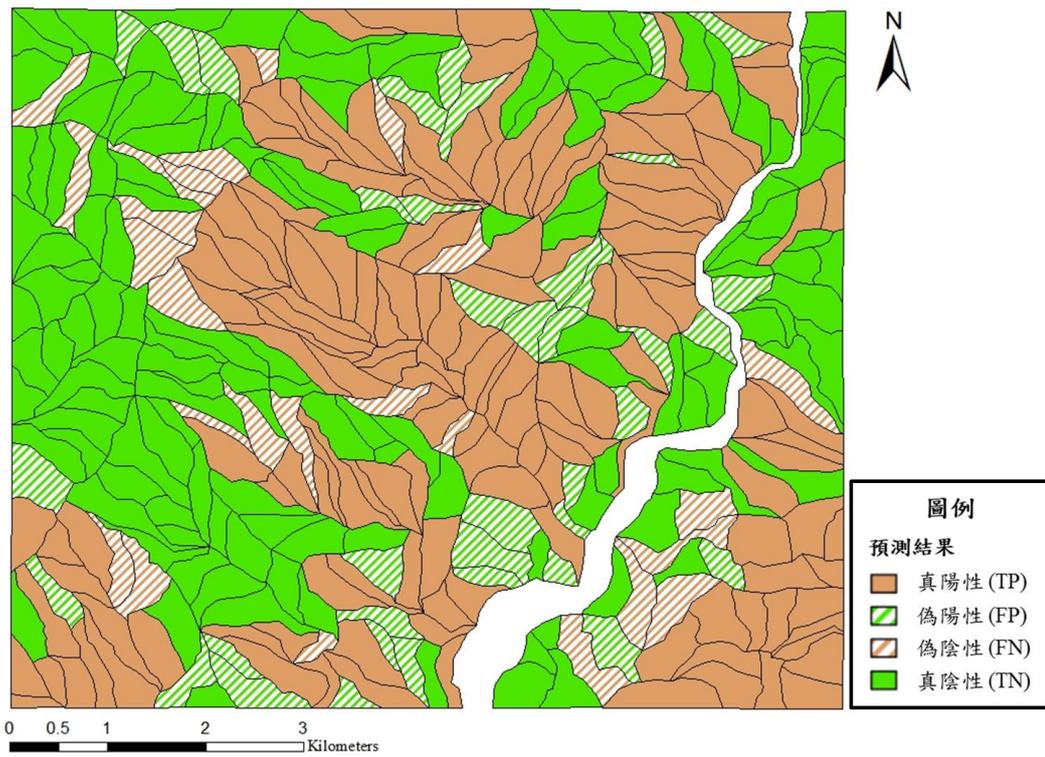


圖 5-19、崩塌預測結果圖 (潛感值修正模型)



### 5.3.3 模型預測準確性比較

將邏輯斯迴歸模型及潛感值修正模型於 2018 年之崩塌預測結果進行比較，其結果統整如表 5-9 所示。其中，潛感值修正模型相對於邏輯斯迴歸模型可偵測率上升 1.73%、誤報率下降 3.65%、預兆得分上升 3.93%，顯示潛感值修正模型在各方面均具有比邏輯斯迴歸模型更佳的崩塌預測能力，且潛感值修正模型的整體預測準確率高達 82.15%，相較於邏輯斯迴歸模型上升 3.11%。

表 5-9、崩塌預測結果比較表

模型 評估指標	邏輯斯迴歸模型	潛感值修正模型	變化量
可偵測率 (POD)	83.82%	85.55%	+1.73%
誤報率 (FAR)	24.08%	20.43%	-3.65%
預兆得分 (TS)	66.21%	70.14%	+3.93%
準確率 (ACC)	79.04%	82.15%	+3.11%

由於 PSInSAR 技術是藉由使用多張雷達影像，尋找每張影像中具穩定反射特性之永久散射點以監測地表變形，並非所有的斜坡單元上均能找到永久散射點。為了更準確地描述潛感值修正模型相對於邏輯斯迴歸模型的崩塌預測能力，本研究篩選出 2018 年中有 PS 點的斜坡單元進行模型崩塌預測能力之分析，有 PS 點單元之崩塌預測結果如表 5-10、表 5-11、圖 5-20 及圖 5-21 所示，並將兩種模型之預測結果統整如表 5-12。

其中，邏輯斯迴歸模型的可偵測率為 87.39%、誤報率為 19.83%、預兆得分 71.85%，均顯示模型具有極佳的崩塌預測能力，其整體預測準確率為 78.53%。而潛感值修正模型的預測能力在各方面表現均有顯著提升，其可偵測率上升 2.70%，高達 90.09%，代表模型可以成功預測約九成的崩塌發生；誤報率下降 6.04%，僅 13.79%，代表模型錯誤預測為崩塌發生的可能性非常低；預兆得分上升 6.89%，為

78.74%，顯示模型預測崩塌的能力極佳；整體預測準確率亦提升 6.22%，高達 84.75%，亦證明潛感值修正模型在預測崩塌及非崩塌上具極佳的表現。

綜合上述分析，顯示邏輯斯迴歸模型考量了動態的促崩因子（事件累積降雨量）及會影響邊坡崩塌發生可能性的環境因子等靜態的潛在因素，已具有優良的崩塌預測能力。亦證明潛感值修正模型透過以 PSInSAR 技術監測所得之地表變形計算沿坡面方向的地表變位速度  $v_{slope}$  作為動態因子輸入模型，可以將實際監測所得之邊坡運動行為納入考量，更精確的描述斜坡單元之崩塌潛感值。將原本評估為較安全的斜坡單元因監測到較大的地表變位速度  $v_{slope}$  而提升其崩塌潛感值，並將原本評估為較危險的斜坡單元因監測到地表變位速度  $v_{slope}$  小而降低其崩塌潛感值，可以有效降低崩塌預測時偽陽性及偽陰性的數量，進而提升崩塌預測的能力及準確性。透過以  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值，整個研究區域的崩塌預測準確率可達 82%，而針對有 PS 點單元之崩塌預測準確率可高達 85%，約可為模型的崩塌預測準確率提供 6% 的效益。

表 5-10、有 PS 點單元之崩塌預測誤差矩陣（邏輯斯迴歸模型）

			實際	
			崩塌	非崩塌
			111	66
預測	崩塌	121	97	24
	非崩塌	56	14	42
可偵測率 (POD)			87.39%	
誤報率 (FAR)			19.83%	
預兆得分 (TS)			71.85%	
準確率 (ACC)			78.53%	

表 5-11、有 PS 點單元之崩塌預測誤差矩陣 (潛感值修正模型)

			實際	
			崩塌	非崩塌
			111	66
預測	崩塌	116	100	16
	非崩塌	61	11	50
可偵測率 (POD)			90.09%	
誤報率 (FAR)			13.79%	
預兆得分 (TS)			78.74%	
準確率 (ACC)			84.75%	

表 5-12、有 PS 點單元之崩塌預測結果比較表

評估指標 \ 模型	模型		變化量
	邏輯斯迴歸模型	潛感值修正模型	
可偵測率 (POD)	87.39%	90.09%	+2.70%
誤報率 (FAR)	19.83%	13.79%	-6.04%
預兆得分 (TS)	71.85%	78.74%	+6.89%
準確率 (ACC)	78.53%	84.75%	+6.22%

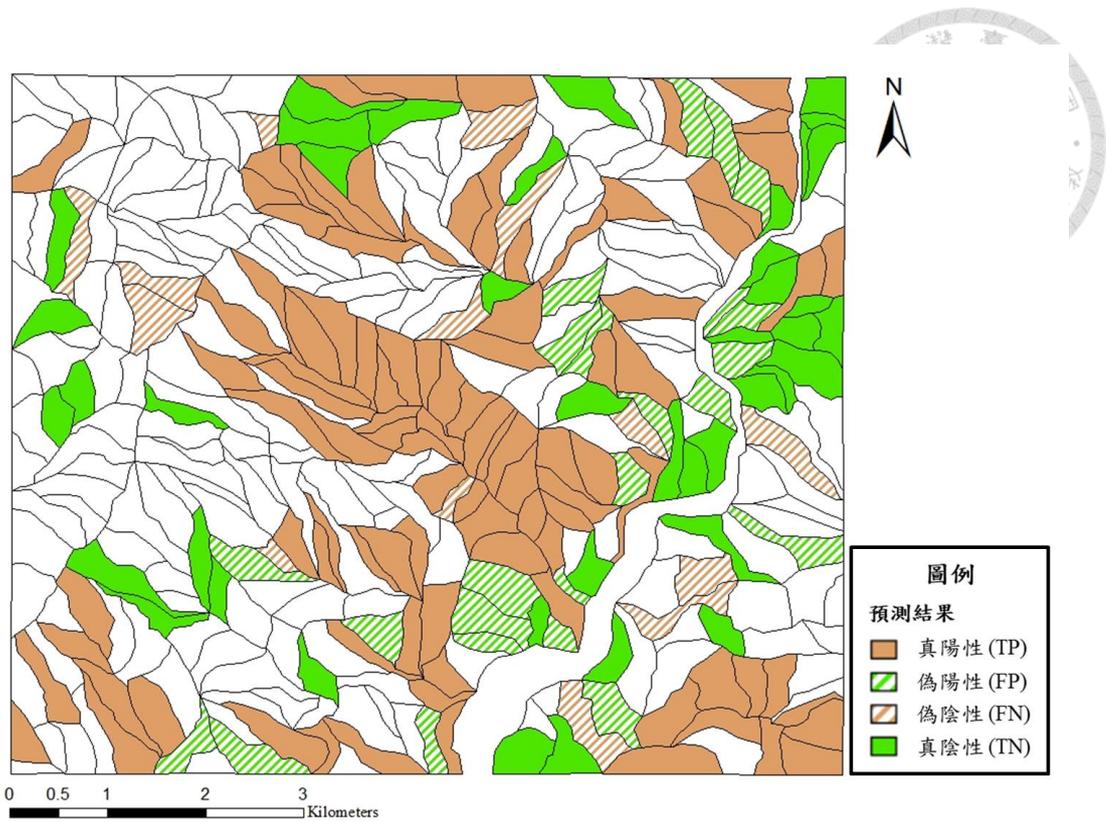


圖 5-20、有 PS 點單元之崩塌預測結果圖 (邏輯斯迴歸模型)

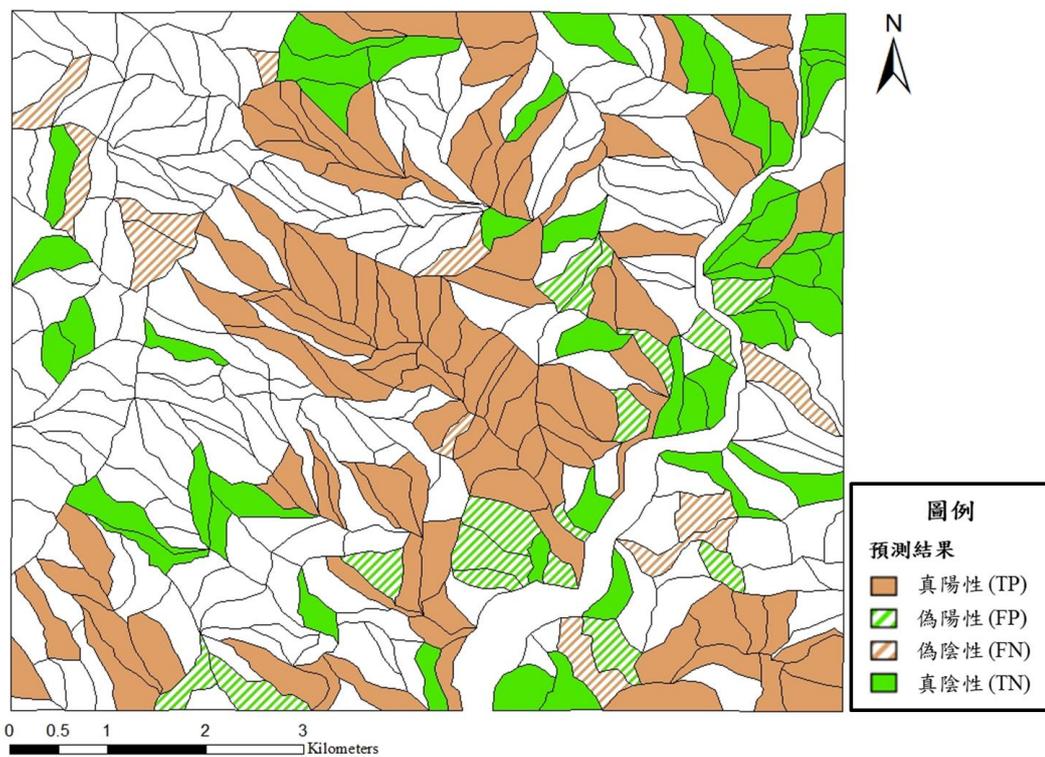


圖 5-21、有 PS 點單元之崩塌預測結果圖 (潛感值修正模型)



## 第6章 案例分析與驗證

本章以臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡及陽金公路邊坡之三起實際崩塌案例為代表，實際運用本研究所建立之崩塌潛勢評估模型分析當地的崩塌潛感值，進而驗證模型之預測準確性，並比較及討論崩塌潛感值修正於實際案例分析中之影響及效益。

### 6.1 臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例

#### 6.1.1 案例概述

此案例發生於臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡，位於新北市瑞芳區基隆河西岸，鄰近鐵路，對面為猴硐國小，災害地點如圖 6-1 所示。

此處邊坡因連日豪雨，造成地表逕流沖刷及使土壤含水量因地表水入滲而上升，於 2020 年 11 月 30 日已有土石滑落等不穩定現象發生，並於 2020 年 12 月 4 日上午 8 時 30 分發生大規模崩塌，崩塌的土石覆蓋鐵路軌道，使得臺鐵宜蘭線東西向正線全線中斷，現場災害情形如圖 6-2 所示，崩塌範圍長約 60 公尺、高約 30 公尺，崩塌土石方約 10,000 立方公尺。

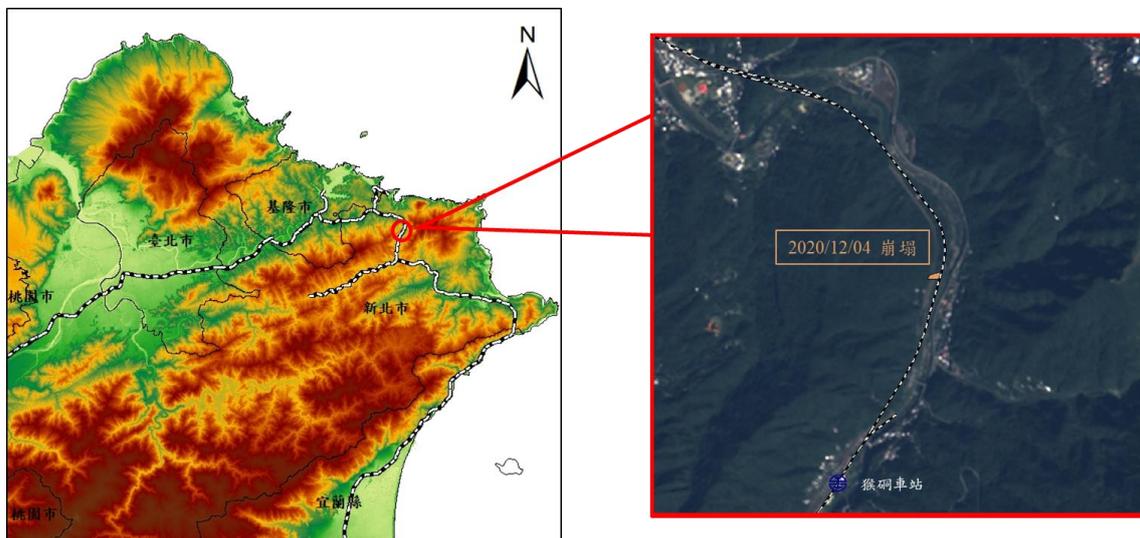


圖 6-1、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌災害位置圖

(底圖為內政部 2019 年 20m DEM 及中央大學太空及遙測中心 2020/11/19 衛星影像)



(a)



(b)

圖 6-2、臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡崩塌災害現場照片

(摘自交通部臺灣鐵路管理局)

(a)俯視圖；(b)側視圖



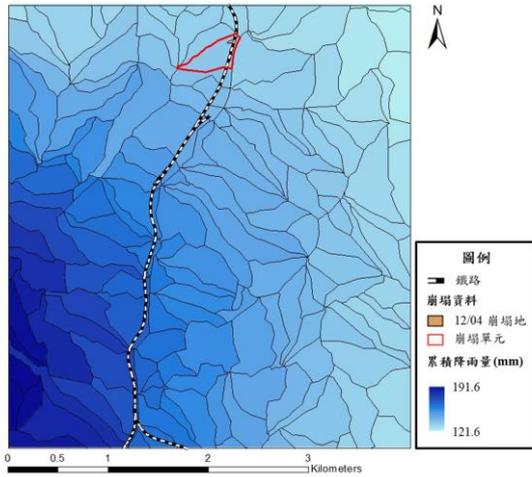
## 6.1.2 因子分析

依據本研究建立之方法，分析臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡所屬斜坡單元之潛感因子及地表變位速度  $v_{slope}$ ，使用資料如表 6-1 所示。其中，由於缺少此案例處之岩體強度分級分布圖，根據中央地質調查所出版之五萬分之一地質圖，此災害地點之地層為中新世大寮層，主要岩性為砂岩、頁岩及砂頁岩互層，與本研究之研究區域類似，故假設其岩體強度為第 III 類岩體。

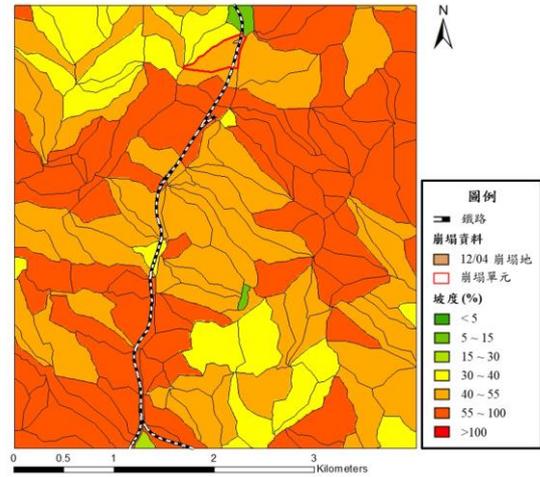
潛感因子及  $v_{slope}$  分析結果如圖 6-3 及圖 6-4 所示。臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡所屬斜坡單元的事件累積降雨量約 135 mm，坡向為東方，岩體強度為第 III 類，地形粗糙度及剖面曲率均較小，植生指標大（植生覆蓋狀況好），但坡度大（屬於五級坡），水系距為零（鄰近水系），且監測到該段時間有較大的地表變位速度  $v_{slope}$ ，單元內的平均  $v_{slope}$  為 23.3 mm/6-months，已大於警戒值。

表 6-1、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例潛感因子及地表變位速度資料來源表

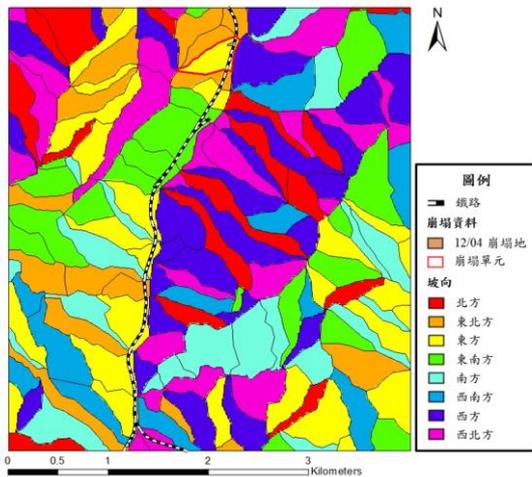
潛感因子	資料來源
事件累積降雨量	2020/12/04 降雨事件 (崩塌單元累積降雨量為 134.1 mm)
坡度	2019 年 DEM
坡向	
地形粗糙度	
剖面曲率	
植生指標	2020/11/19 衛星影像
水系距	全島河流圖資
岩體強度	假設為第 III 類岩體
地表變位速度 $v_{slope}$	Sentinel-1 A 降軌雷達影像 (計算時間為 2020/06/18 ~ 2020/12/03)



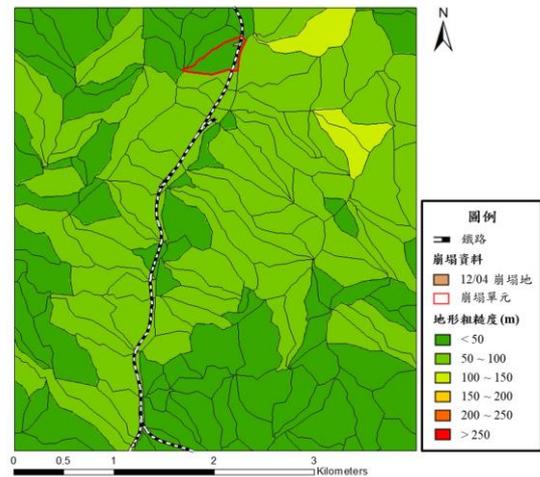
(a)事件累積降雨量



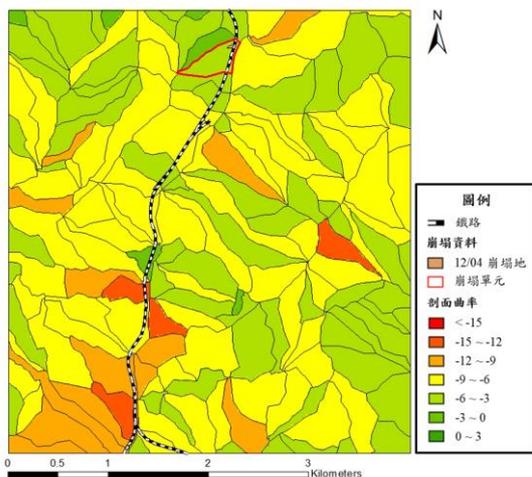
(b)坡度



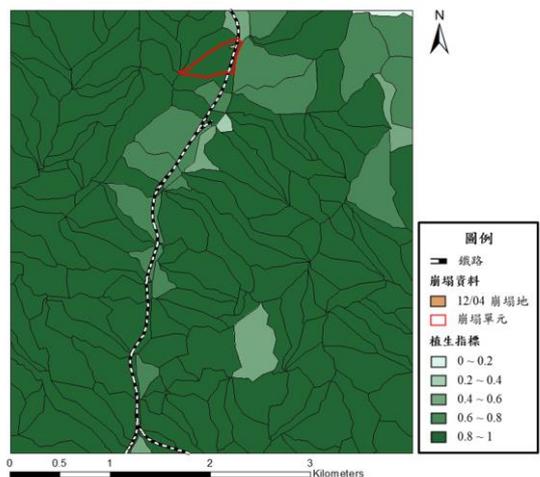
(c)坡向



(d)地形粗糙度

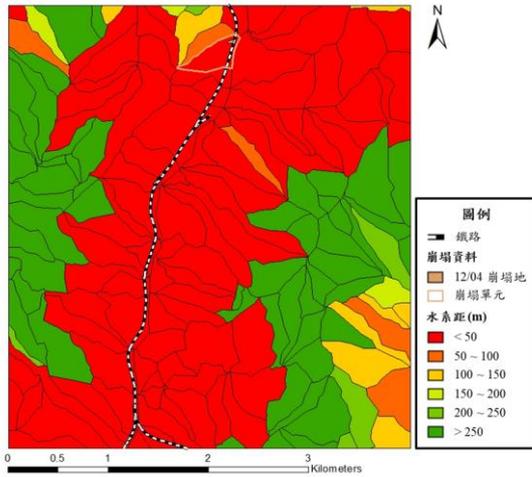


(e)剖面曲率

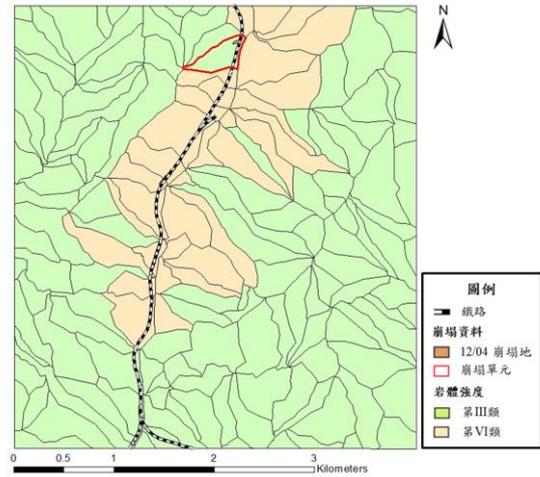


(f)植生指標

圖 6-3、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例潛感因子圖



(g) 水系距



(h) 岩體強度

圖 6-3、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例潛感因子圖 (續)

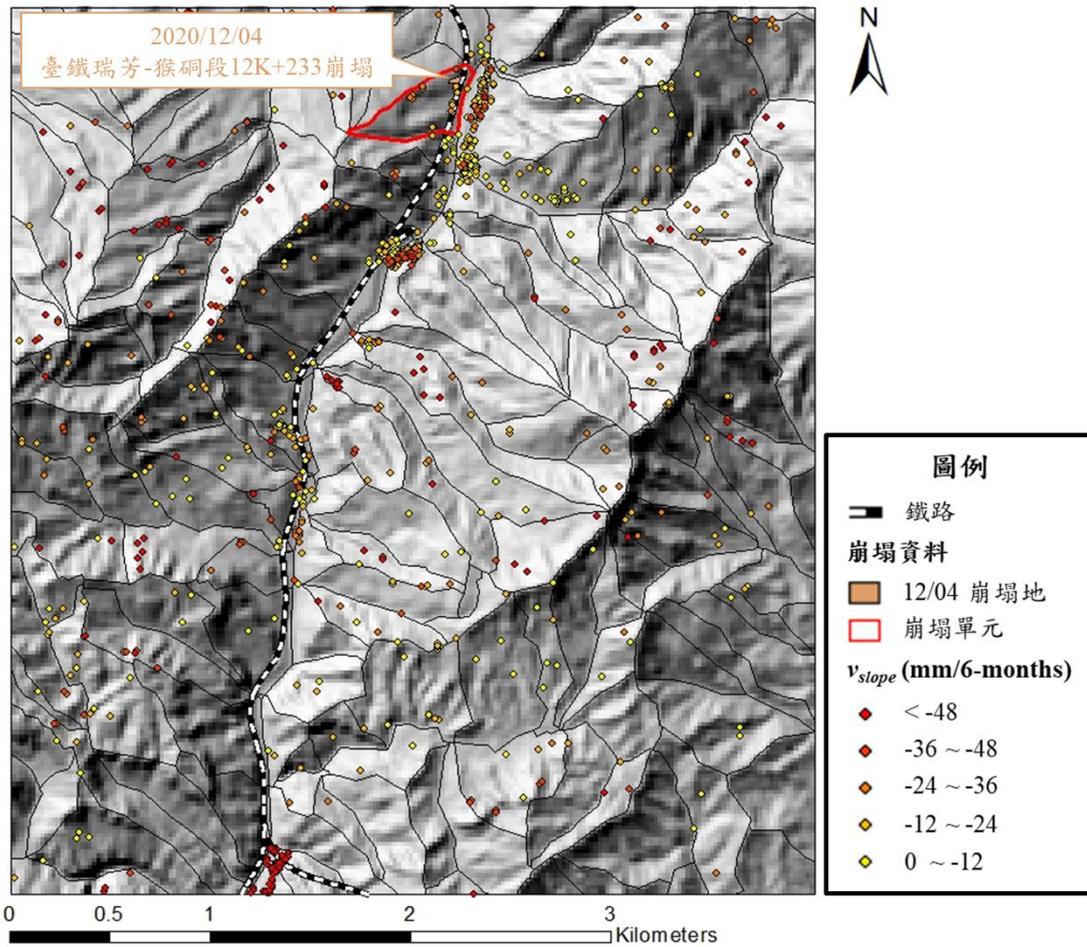


圖 6-4、臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡崩塌案例  $v_{slope}$  圖



### 6.1.3 崩塌潛感值分析結果

利用本研究所建立之崩塌潛勢評估模型分析臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值，分析結果如表 6-2 所示，並以 3-D 圖展示如圖 6-5。

其結果顯示，邏輯斯迴歸模型計算所得該單元之崩塌潛感值為 0.64，屬於中高潛勢；而潛感值修正模型藉由地表變位速度  $v_{slope}$  修正後所得該單元之崩塌潛感值為 0.70，屬於中高潛勢。

由於在此斜坡單元的坡向為東方、坡度大且水系距小，使此斜坡單元在邏輯斯迴歸模型之分析結果中，屬於中高潛勢，代表此斜坡單元具有較易發生崩塌的因子條件，使其發生崩塌的可能性大；而在此斜坡單元上監測到其平均  $v_{slope}$  大於警戒值（此單元平均  $v_{slope}$  為 23.3 mm/6-months），故透過潛感值修正模型修正後，其崩塌潛勢雖同樣屬於中高潛勢，但有提升之現象，使斜坡單元發生崩塌的可能性變的更大，且已達本研究判定為會發生崩塌之標準。

此結果證明本研究建立之崩塌潛勢評估模型適用於此實際崩塌案例，可以成功預測該單元會發生崩塌。雖然於潛感值修正前後，均能成功預測到該單元崩塌的發生，但透過潛感值修正模型修正崩塌潛感值後，該單元的崩塌潛勢有所提升，更加凸顯該邊坡發生崩塌的可能性極高，亦證明以地表變位速度  $v_{slope}$  能有效修正崩塌潛感值，使崩塌預測成果更加準確。

表 6-2、臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值表

	崩塌潛感值	崩塌潛勢
邏輯斯迴歸模型	0.64	中高潛勢
潛感值修正模型	0.70	中高潛勢

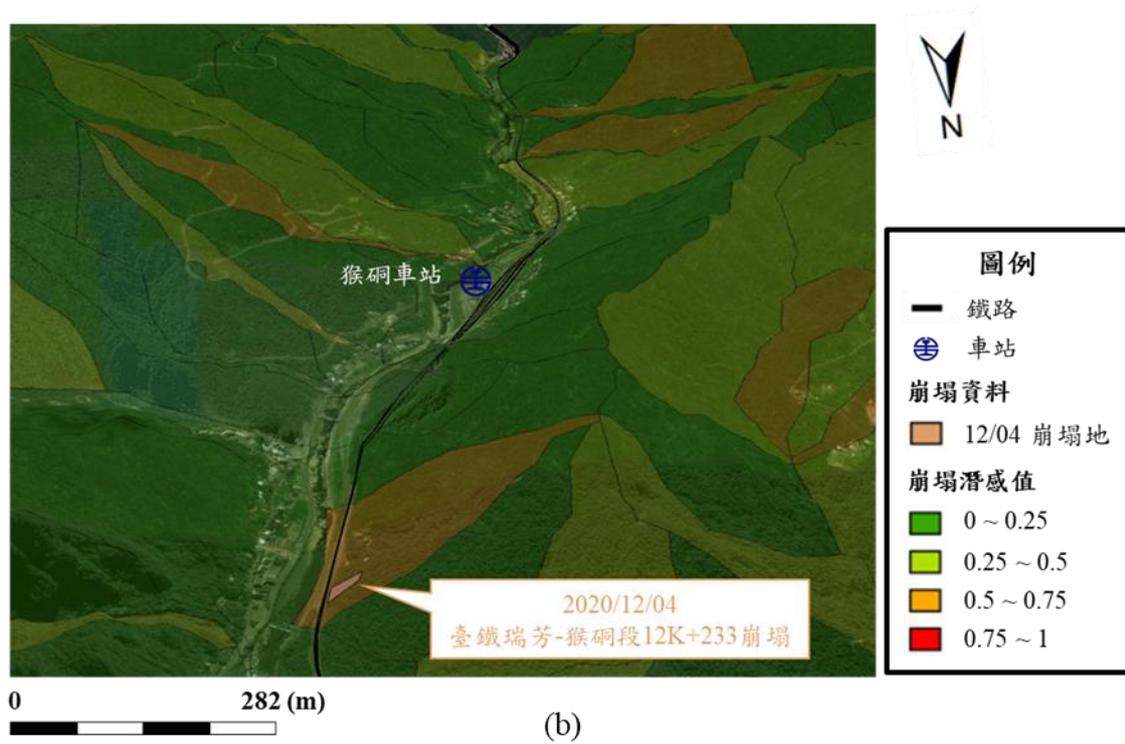
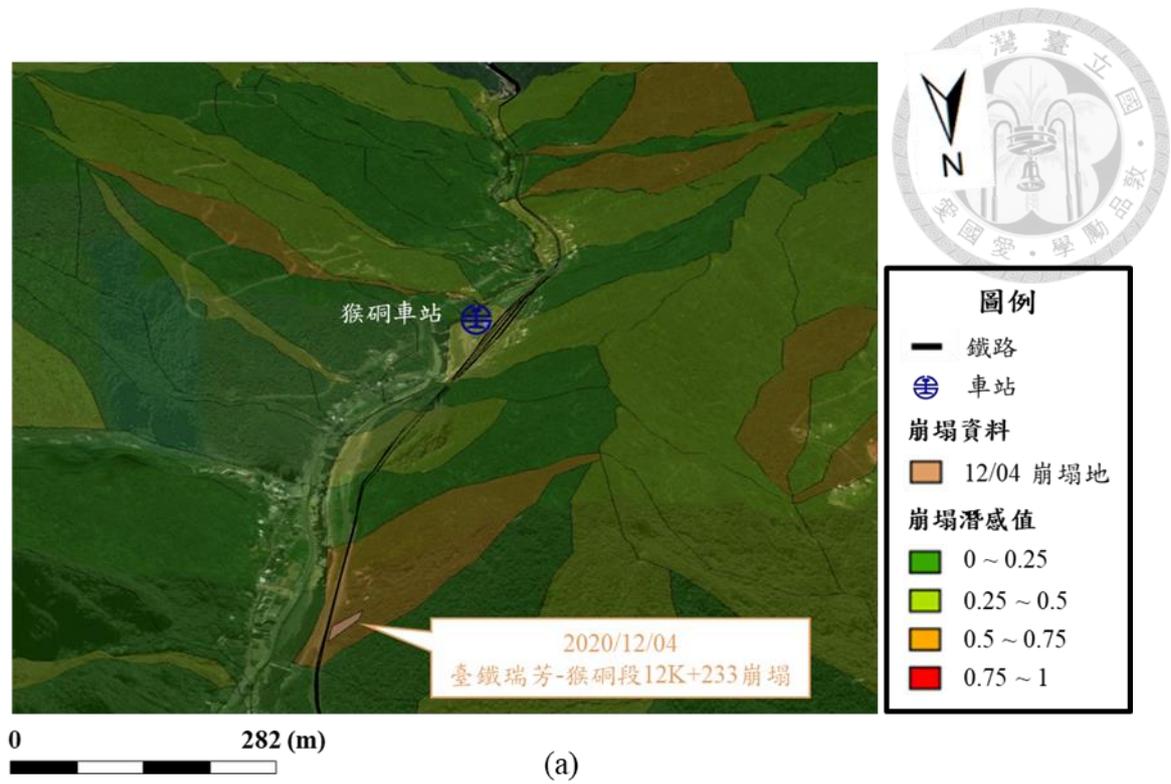


圖 6-5、臺鐵瑞芳-猴硐段 12K+233 處之上邊坡崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth)

(a)邏輯斯迴歸模型；(b)潛感值修正模型



## 6.2 陽金公路邊坡崩塌案例

### 6.2.1 案例概述

此案例共包含兩起崩塌災害事件，均為位於陽金公路旁之邊坡，災害地點如圖 6-6 所示。

其一崩塌事件發生於新北市金山區陽金公路 8K+335 處之下邊坡，因長延時降雨造成地表逕流沖刷及土壤含水量因地表水入滲使而上升，導致邊坡及擋土牆產生明顯位移，並於 2020 年 12 月 20 日下午 1 時 30 分發生崩塌，擋土牆及其上方道路亦隨邊坡一同陷落，導致交通雙向中斷，現場災害情形如圖 6-7 所示，崩塌範圍長約 100 公尺、高約 50 公尺，崩塌土石方約 5,000 立方公尺。

另一崩塌事件發生於臺北市士林區陽金公路 11K 處之上邊坡，因長延時降雨造成地表逕流沖刷及土壤含水量因地表水入滲使而上升，且坡頂有張力裂縫形成，導致邊坡向下陷落滑移，並於 2021 年 2 月 13 日上午 4 時 40 分發生崩塌，使自由格框護坡受破壞，並導致交通雙向中斷，現場災害情形如圖 6-8 所示，崩塌範圍長約 22 公尺、高約 17 公尺，崩塌土石方約 2,000 立方公尺。

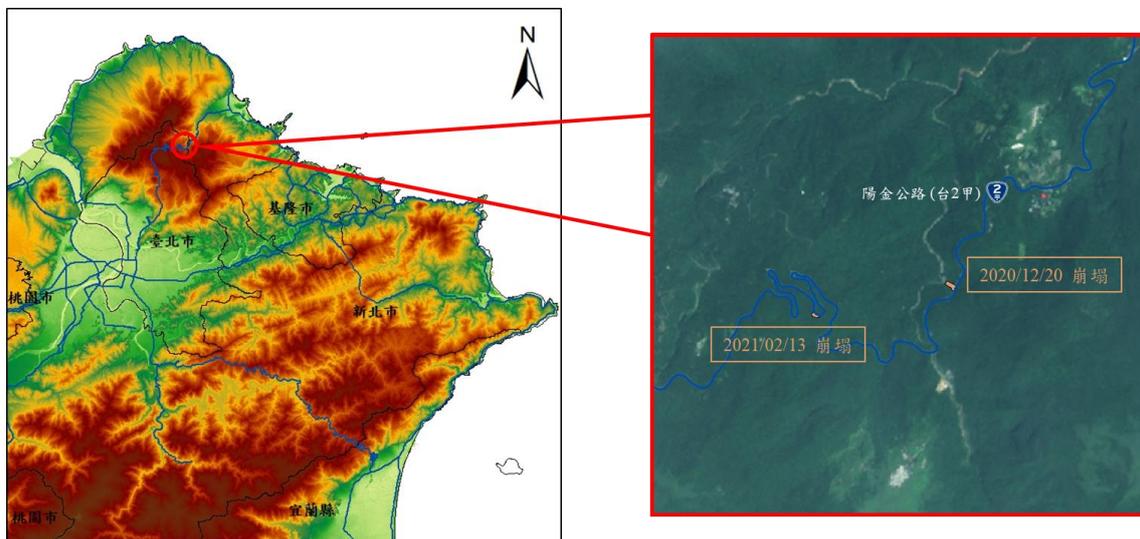


圖 6-6、陽金公路邊坡崩塌災害位置圖

(底圖為內政部 2019 年 20m DEM 及中央大學太空及遙測中心 2020/06/05 衛星影像)



圖 6-7、陽金公路 8K+335 處之下邊坡崩塌災害現場照片 (摘自新北市政府工務局)

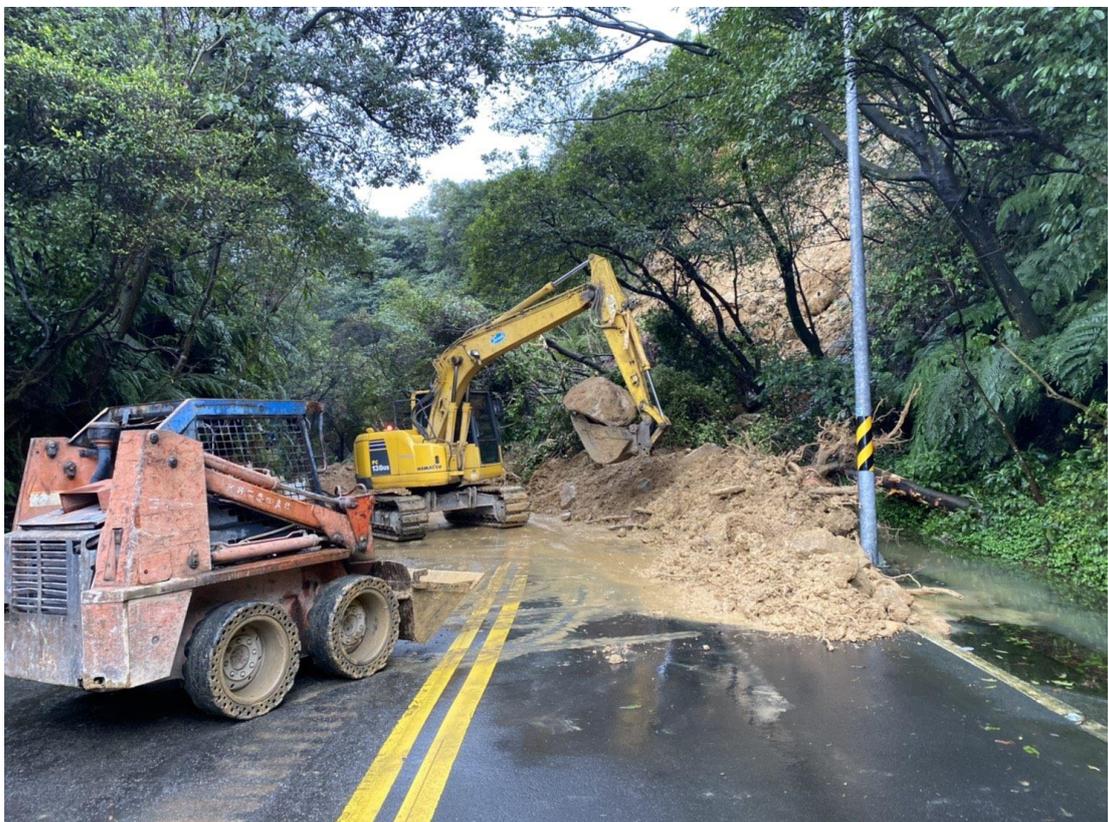


圖 6-8、陽金公路 11K 處之上邊坡崩塌災害現場照片 (摘自臺北市政府工務局)

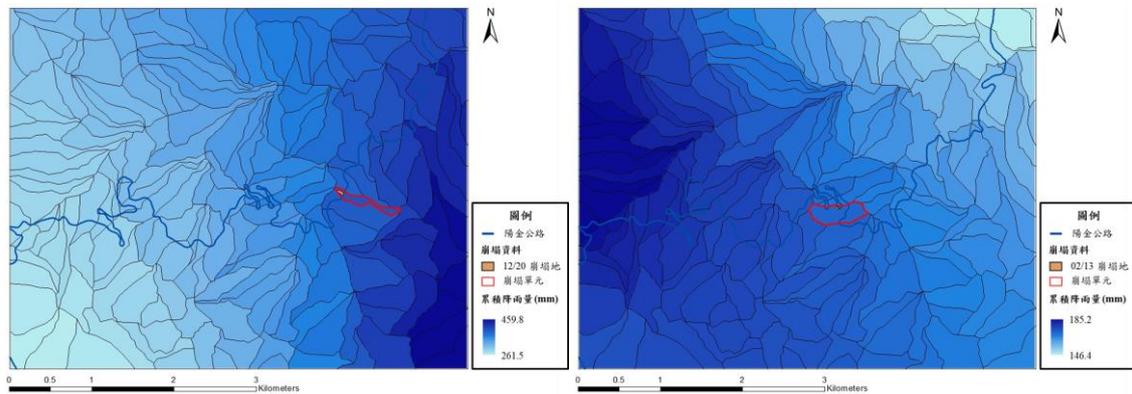
## 6.2.2 因子分析

依據本研究建立之方法，分析陽金公路 8K+335 處之下邊坡及陽金公路 11K 處之上邊坡所屬斜坡單元之潛感因子及地表變位速度  $v_{slope}$ ，使用資料如表 6-3 所示。其中，由於缺少此案例處之岩體強度分級分布圖，根據中央地質調查所出版之五萬分之一地質圖，此兩處災害地點之地層均為更新世火山岩流，以角閃石二輝安山岩為主要岩性，為一種高強度的火成岩，故保守假設其岩體強度為第 III 類岩體；而由於災害時間附近此區域的衛星影像之雲覆蓋率均極高，難以準確辨識邊坡植生情形，故使用 2020/06/05 之衛星影像計算植生指標。

潛感因子及  $v_{slope}$  分析結果如圖 6-9 及圖 6-10 所示。陽金公路 8K+335 處之下邊坡所屬斜坡單元的事件累積降雨量約 390 mm，坡向為西方，岩體強度為第 III 類，剖面曲率偏小，植生指標大（植生覆蓋狀況好），但地形粗糙度偏大（約 125 m），坡度大（屬於五級坡），水系距為零（鄰近水系），且監測到該段時間有較大的地表變位速度  $v_{slope}$ ，單元內的平均  $v_{slope}$  為 27.5 mm/6-months，已大於警戒值。而陽金公路 11K 處之上邊坡所屬斜坡單元的事件累積降雨量約 170 mm，坡向為東南方，岩體強度為第 III 類，剖面曲率及地形粗糙度均較小，植生指標大（植生覆蓋狀況好），但坡度大（屬於五級坡），水系距小（約 75 m），且監測到該段時間有較大的地表變位速度  $v_{slope}$ ，單元內的平均  $v_{slope}$  為 33.8 mm/6-months，已大於警戒值。

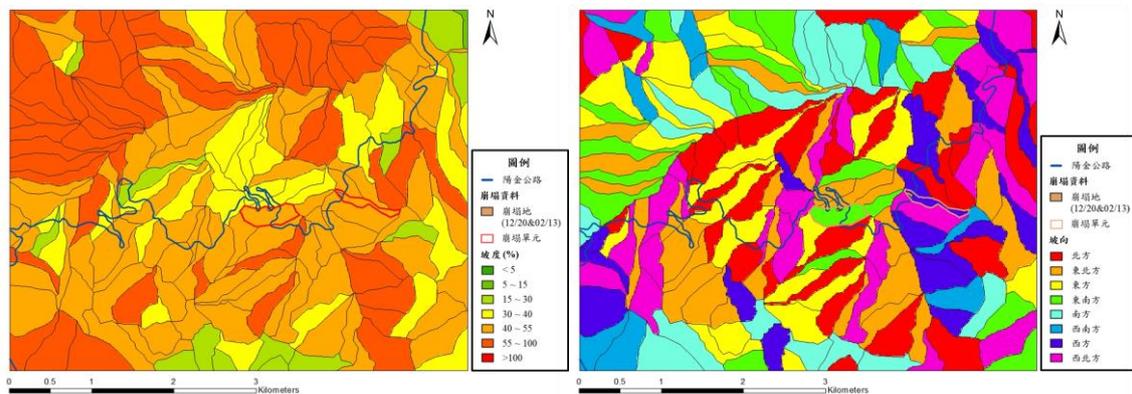
表 6-3、陽金公路邊坡崩塌災害潛感因子資料及地表變位速度來源表

潛感因子	資料來源	
	陽金公路 8K+335 之下邊坡	陽金公路 11K 處之上邊坡
事件累積降雨量	2020/12/20 降雨事件 (崩塌單元累積降雨量為 387.9 mm)	2021/02/13 降雨事件 (崩塌單元累積降雨量為 169.1 mm)
坡度	2019 年 DEM	
坡向		
地形粗糙度		
剖面曲率		
植生指標	2020/06/05 衛星影像	
水系距	全島河流圖資	
岩體強度	假設為第 III 類岩體	
$v_{slope}$	Sentinel-1 A 降軌雷達影像 (計算時間為 2020/06/30 ~ 2020/12/15)	Sentinel-1 A 降軌雷達影像 (計算時間為 2020/08/29 ~ 2021/02/01)



(a)事件累積降雨量 (2020/12/20)

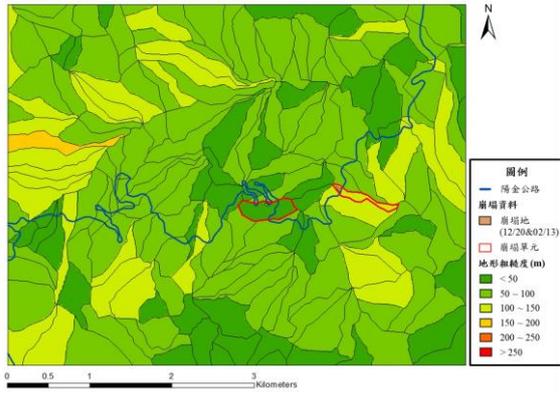
(b)事件累積降雨量 (2021/02/13)



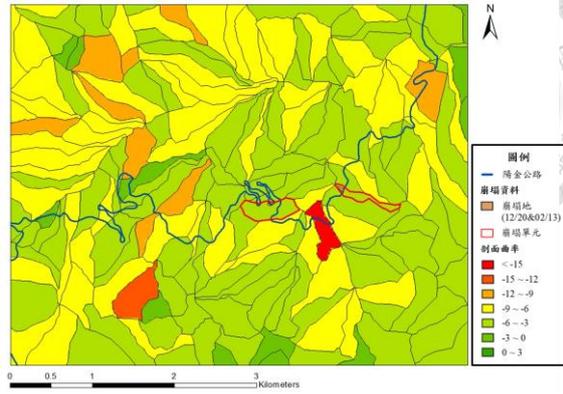
(c)坡度

(d)坡向

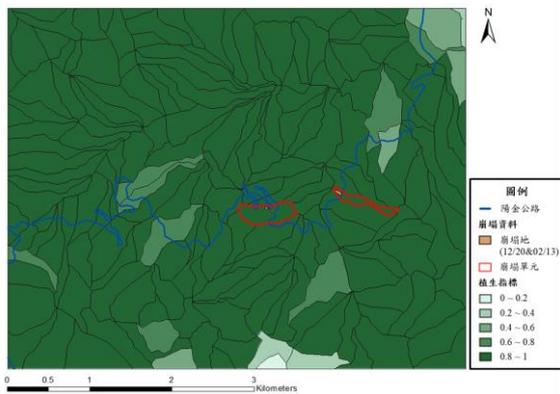
圖 6-9、陽金公路邊坡崩塌案例潛感因子圖



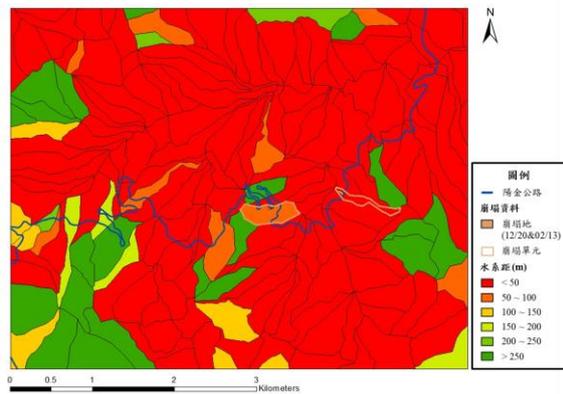
(e)地形粗糙度



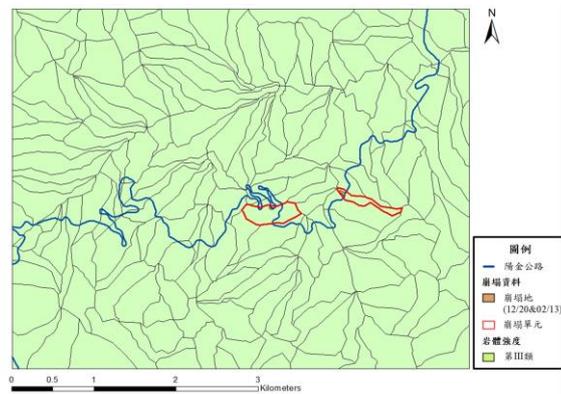
(f)剖面曲率



(g)植生指標

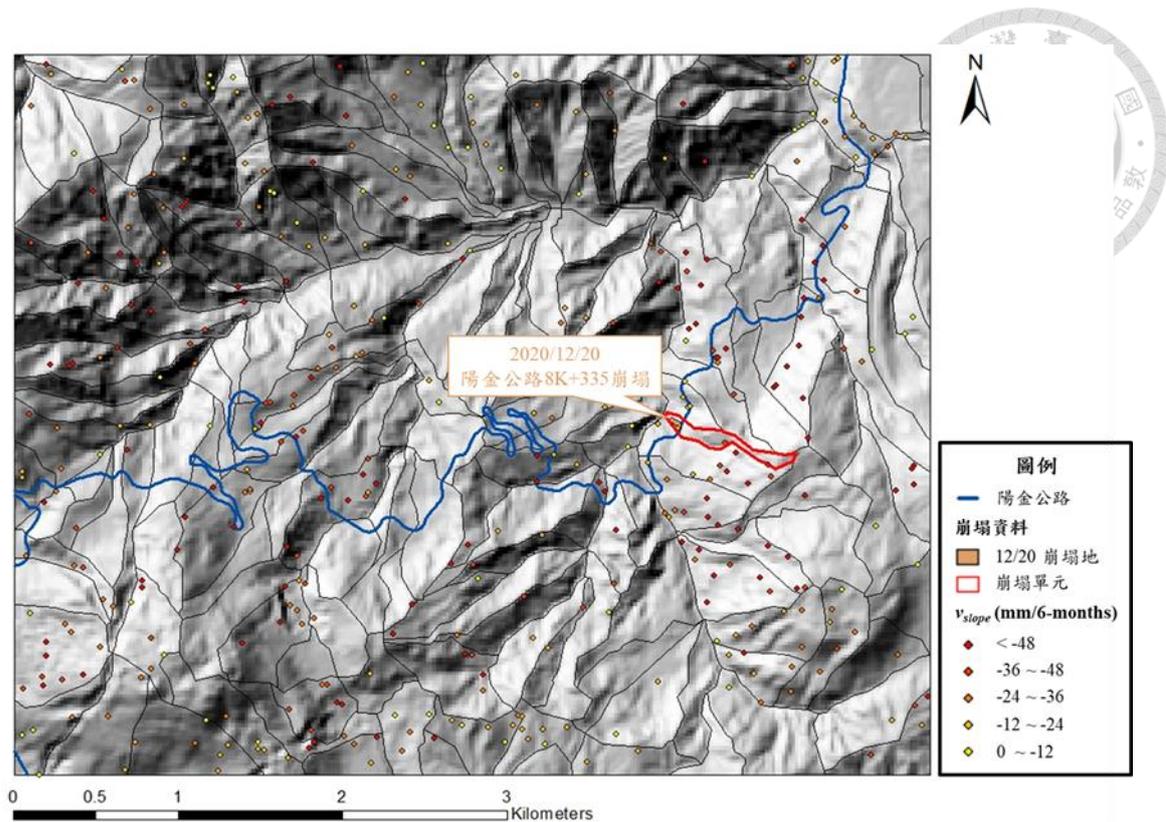


(h)水系距

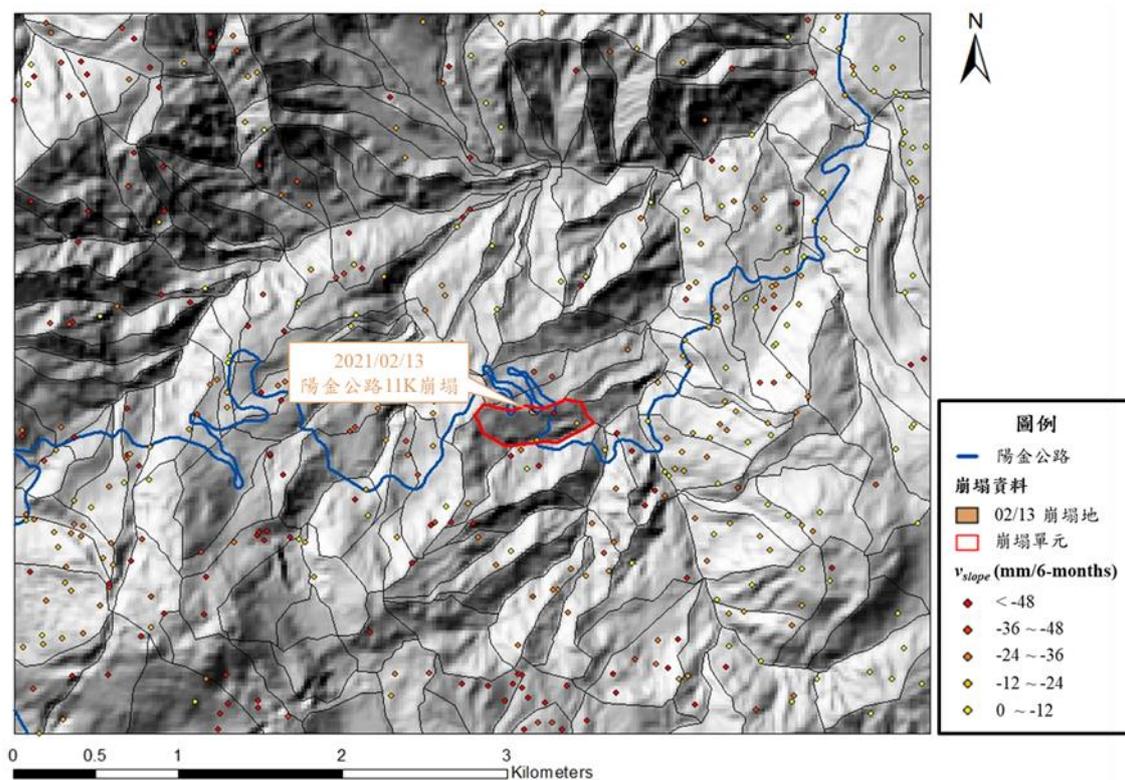


(i)岩體強度

圖 6-9、陽金公路邊坡崩塌案例潛感因子圖 (續)



(a)



(b)

圖 6-10、陽金公路邊坡崩塌案例  $v_{slope}$  圖

(a)2020/12/20 ; (b)2021/02/13



### 6.2.3 崩塌潛感值分析結果

利用本研究所建立之崩塌潛勢評估模型分析兩個崩塌邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值，分析結果如表 6-4 所示，並以 3-D 圖展示如圖 6-11 及圖 6-12。

2020 年 12 月 4 日陽金公路 8K+335 處之下邊坡所屬斜坡單元於修正前之崩塌潛感值為 0.51，屬於中高潛勢；而藉由地表變位速度  $v_{slope}$  修正後之崩塌潛感值為 0.57，亦屬於中高潛勢。由於在此斜坡單元的地形粗糙度大、坡度大且水系距小，使此斜坡單元在邏輯斯迴歸模型之分析結果中，屬於中高崩塌潛勢，而在此斜坡單元上監測到其平均  $v_{slope}$  大於警戒值（此單元平均  $v_{slope}$  為 27.5 mm/6-months），故透過潛感值修正模型修正後，雖同樣屬於中高潛勢，但其崩塌潛感值有上升的現象，且已達本研究判定為會發生崩塌之標準。

2021 年 2 月 13 日陽金公路 11K 處之上邊坡所屬斜坡單元於修正前之崩塌潛感值為 0.46，屬於中低潛勢，未達本研究判定為會發生崩塌之標準；而藉由地表變位速度  $v_{slope}$  修正後之崩塌潛感值為 0.51，屬於中高潛勢，已達本研究判定為會發生崩塌之標準。由於在此斜坡單元的潛感因子除坡度及水系距外，均屬於較不易發生崩塌之數值，使此斜坡單元在邏輯斯迴歸模型之分析結果中，屬於中低潛勢，代表其為較安全的斜坡單元；但在此斜坡單元上監測到其平均  $v_{slope}$  大於警戒值（此單元平均  $v_{slope}$  為 33.8 mm/6-months），故透過潛感值修正模型修正崩塌潛感值後，其崩塌潛勢由中低潛勢上升至中高潛勢，已達本研究判定為會發生崩塌之標準。

上述結果亦證明本研究建立之崩塌潛勢評估模型亦適用於這兩處實際崩塌案例，均可以成功預測此兩處斜坡單元會發生崩塌。且於兩起案例中均顯示以  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值對崩塌預測之效益，修正後兩處崩塌邊坡所屬之斜坡單元的崩塌潛感值均有上升的現象，證明以地表變位速度  $v_{slope}$  能有效修正崩塌潛感值。其中，陽金公路 11K 處之上邊坡所屬斜坡單元的崩塌潛勢在修正後由中低潛勢上升至中高潛勢，從被判定為不會發生崩塌之單元成為會發生崩塌之單元，證明透過潛感值修正，可以減少崩塌預測時偽陰性（實際崩塌但預測為未崩塌）的數量，進而使崩塌預測成果更加準確。

分析此案例的兩處崩塌邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值時，發現沿陽金公路 11K 處往士林方向上有一處陽金公路所經之斜坡單元其崩塌潛勢為高潛勢，如圖 6-13 (a) 所示，代表該斜坡單元發生崩塌的可能性非常大。觀察該斜坡單元之潛感因子發現，其可能因坡度大 (五級坡)、坡向為東方、剖面曲率較大 (剖面曲率為 -7.4)、植生指標較小 (植生指標為 0.73) 及水系距為零 (鄰近水系) 等因子影響而導致其崩塌潛勢為高潛勢，為發生崩塌之可能性高的斜坡單元；且透過比對歷年的崩塌資料發現，該斜坡單元內確實曾於 2017 年發生過崩塌，崩塌位置標示如圖 6-13 (b) 紅色圓圈處。此結果證明本研究所建立之崩塌潛勢評估模型能有效區分出較易發生崩塌之斜坡單元。

表 6-4、陽金公路案例兩處崩塌邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值表

		崩塌潛感值	崩塌潛勢
陽金公路 8K+335 處 之下邊坡	邏輯斯迴歸模型	0.51	中高潛勢
	潛感值修正模型	0.57	中高潛勢
陽金公路 11K 處 之上邊坡	邏輯斯迴歸模型	0.46	中低潛勢
	潛感值修正模型	0.51	中高潛勢

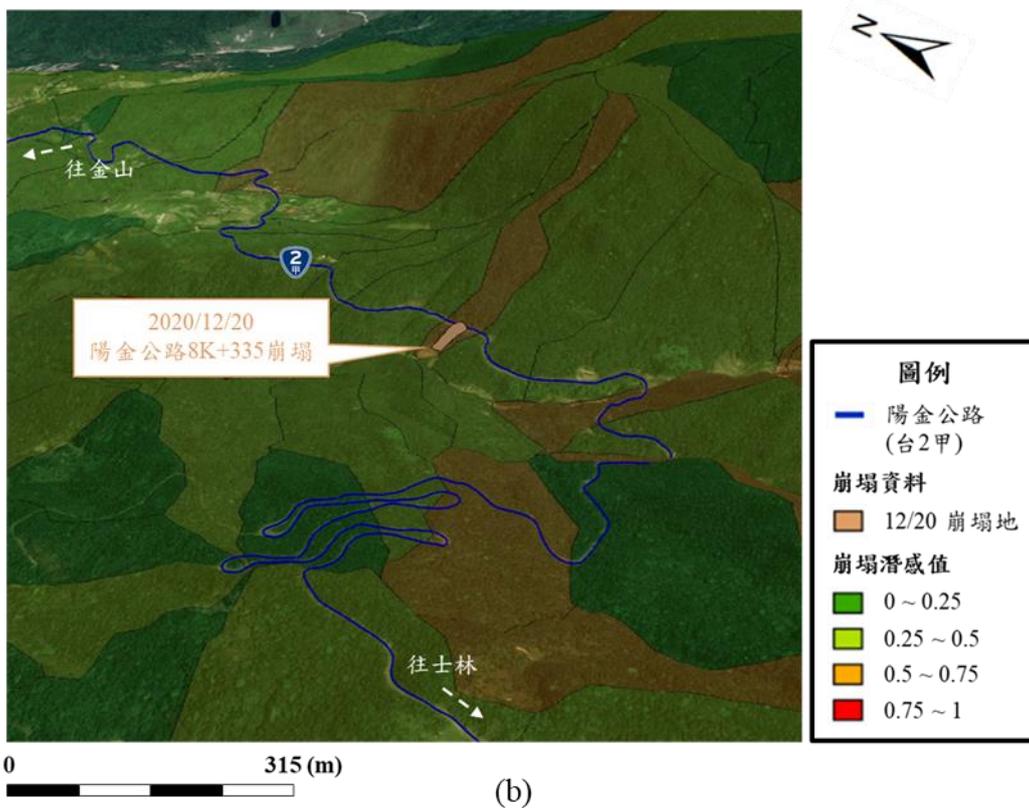
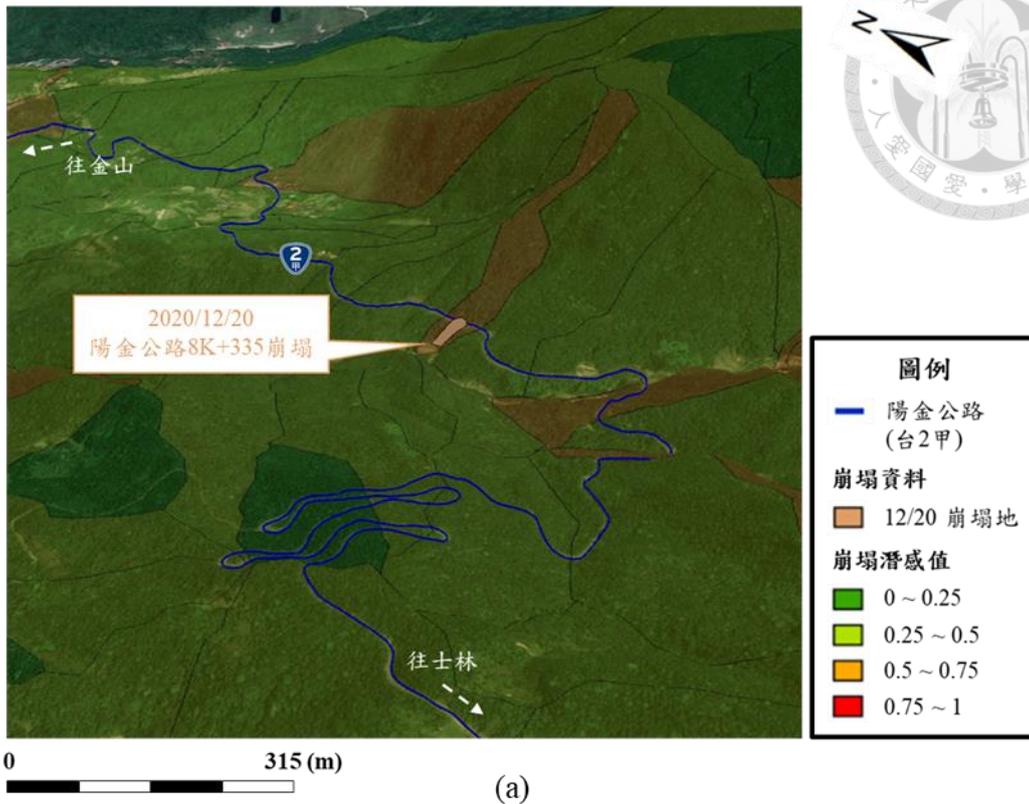


圖 6-11、陽金公路 8K+335 處之下邊坡崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth)

(a)邏輯斯迴歸模型；(b)潛感值修正模型

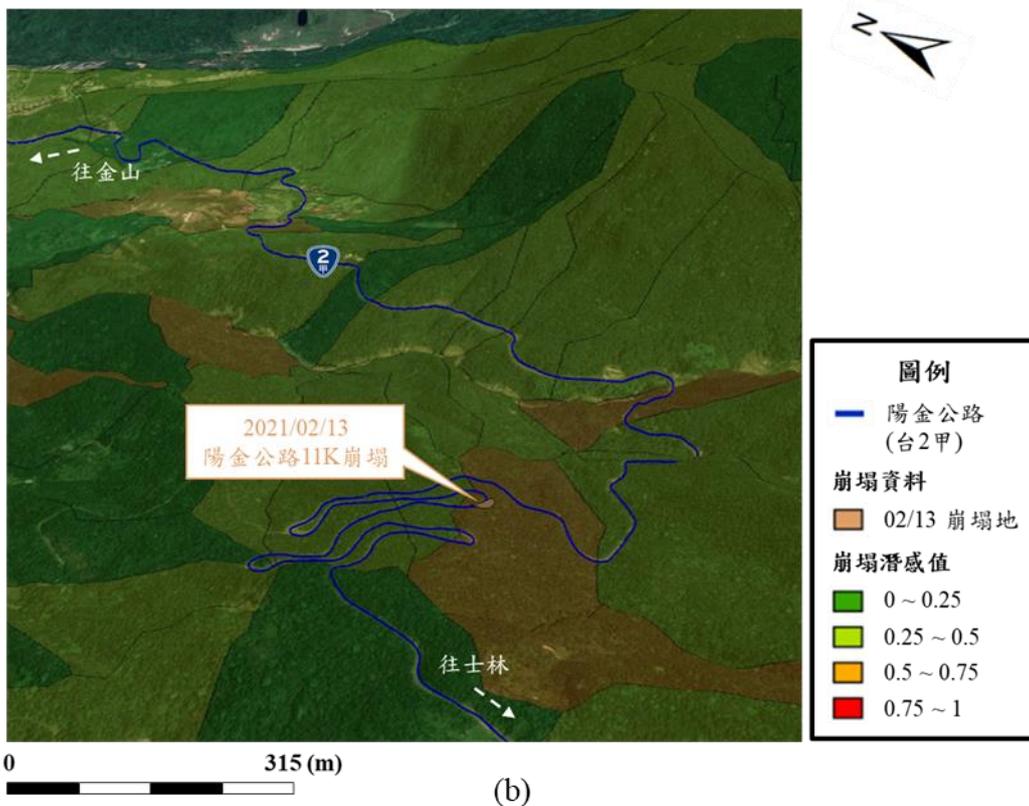
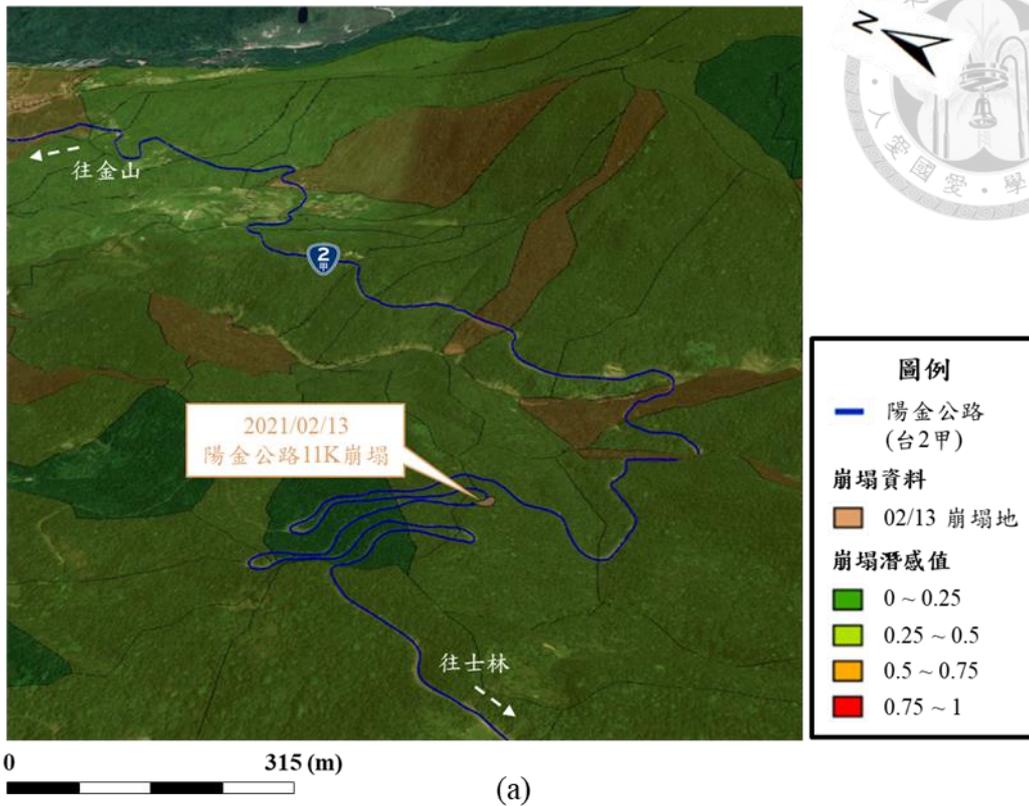


圖 6-12、陽金公路 11K 處之上邊坡崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth)

(a)邏輯斯迴歸模型；(b)潛感值修正模型

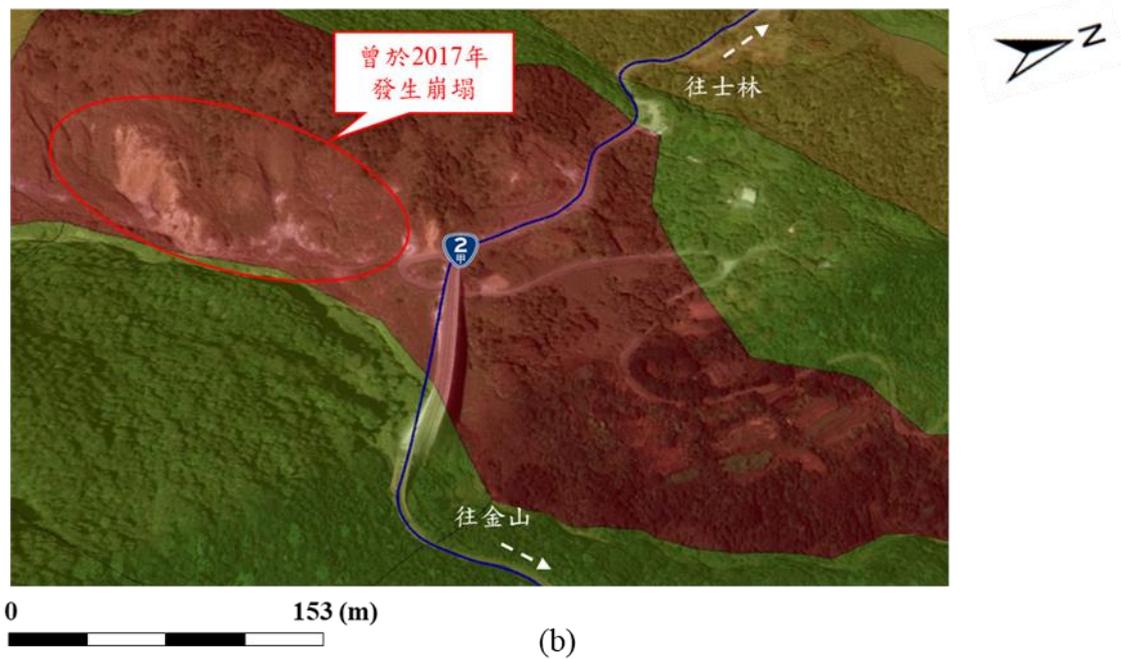
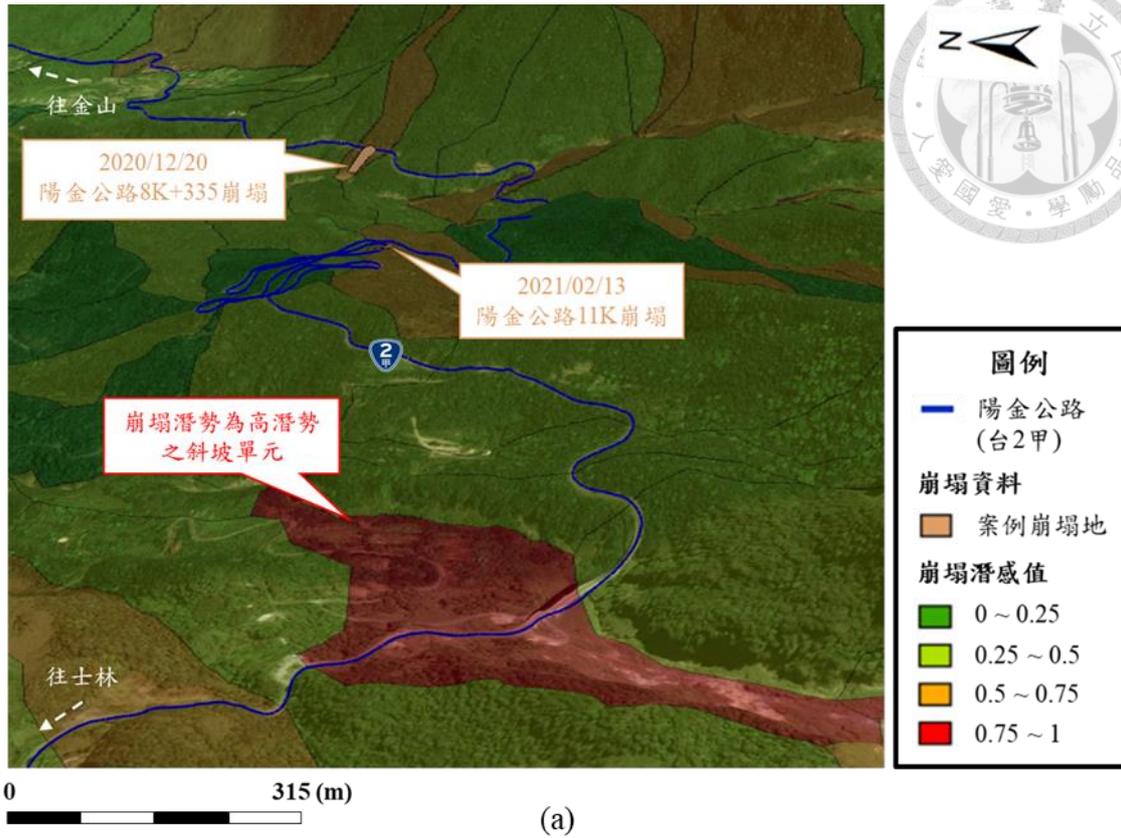


圖 6-13、陽金公路所經斜坡單元崩塌潛感圖 (底圖為 Google Earth)

(a)陽金公路周圍斜坡單元；(b)高潛勢斜坡單元

## 第7章 結論與建議



### 7.1 結論

本研究透過相關性分析，找出與崩塌具有顯著相關性之潛感因子；並透過優化分析，得到以 PSInSAR 所得之地表變形計算地表變位速度時，最能代表邊坡崩塌前的地表變形行為之時間間距及速度方向條件。利用潛感因子及地表變位速度建立崩塌之邊坡變位門檻值及崩塌潛勢評估模型，比較崩塌潛勢評估模型中邏輯斯迴歸模型及潛感值修正模型於崩塌預測之表現及準確性，並分析以地表變位速度  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值對崩塌預測之效益。最後以臺鐵瑞芳-猴硐段及陽金公路之三起實際邊坡崩塌案例，驗證本研究所建立之崩塌潛勢評估模型的崩塌預測準確性。根據以上研究成果進行歸納及統整後，得出以下結論：

1. 根據相關性分析之結果，從影響邊坡崩塌可能性的潛感因子中篩選出與崩塌具顯著相關的顯著因子，分別為事件累積降雨量、坡度、坡向、地形粗糙度、剖面曲率、植生指標、水系距及岩體強度共 8 項顯著因子。
2. 根據相關性分析之結果，除了植生指標為中度相關外，其餘因子均為低度相關及微弱相關，代表無法以單一因子描述邊坡是否會發生崩塌之行為，證明邊坡是否會發生崩塌並非受單一因子所控制，而是眾多因子綜合影響之結果。
3. 根據優化分析之結果，將利用 PSInSAR 監測所得之地表變形計算的 LOS 方向上之地表變位速度  $v_{LOS}$  轉換成沿邊坡坡面方向上的地表變位速度  $v_{slope}$ ，可以篩選出沿邊坡向下變形的 PS 點，更能代表邊坡崩塌前的地表變形行為，與崩塌亦具更高之相關性。
4. 根據優化分析之結果，利用崩塌前時間間距為六個月的 PSInSAR 監測所得之地表變形計算地表變位速度  $v_{slope}$ ，最能代表邊坡崩塌前的地表變形行為，其與崩塌具顯著相關，且相關性較其它時間間距（兩個月、四個月、一年）高。
5. 透過統計分析，本研究以 PSInSAR 技術監測所得的地表變位速度  $v_{slope}$  制定之邊坡變位門檻值，注意值為 3.8 mm/6-months，地表變位速度大於注意值代表須開始注意其穩定性；警戒值為 23.0 mm/6-months，地表變位速度大

於警戒值代表邊坡趨於不穩定狀態，有發生崩塌之可能性。

6. 根據崩塌潛勢評估模型之預測結果，錯誤預測中偽陽性（實際為未崩塌但預測為崩塌）多發生於水系周圍的斜坡單元，可能因水系距為影響性較高的潛感因子之一，導致水系距小的斜坡單元容易被誤判為崩塌發生；而錯誤預測中偽陰性（實際為崩塌但預測為未崩塌）多發生於崩塌面積較小、佔單元總面積極小的斜坡單元，可能因其崩塌面積小導致以斜坡單元整體特性難以描述該崩塌地特性，而導致錯誤預測。
7. 根據崩塌潛勢評估模型之預測結果，本研究所建立之潛感值修正模型提出以地表變位速度  $v_{slope}$  動態修正崩塌潛感值之方法，能有效修正崩塌潛感值，減少邏輯斯迴歸模型崩塌預測時錯誤預測（偽陽性及偽陰性）的數量，使模型的預測能力在各指標上均有明顯提升。經潛感值修正後，整體的崩塌預測準確率約可提升 3%，達 82%；若僅針對有 PS 點之單元進行分析，則潛感值修正後崩塌預測準確率約可提升 6%，高達 85%。
8. 藉由臺鐵瑞芳-猴硐段邊坡及陽金公路邊坡之三起實際崩塌案例，證明本研究所建立之崩塌潛勢評估模型可以成功預測到崩塌發生。且三處崩塌邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛感值於潛感值修正後均有上升的現象，其中陽金公路 11K 處之上邊坡所屬斜坡單元之崩塌潛勢從中低潛勢提升至中高潛勢，使其從錯誤預測變為正確預測，亦證明以地表變位速度  $v_{slope}$  修正崩塌潛感值能有效減少錯誤預測，進而提升崩塌預測之準確性。

## 7.2 建議

根據上述結論及研究限制，針對未來崩塌潛勢評估之相關研究上可精進之方向提供以下建議：

1. 本研究以解析度 20m 的數值高程模型切割斜坡單元，並根據建議將斜坡單元面積控制在 3 至 30 公頃，於分析時可以發現，有些崩塌雖然發生於斜坡單元內，但崩塌面積非常小與斜坡單元差異甚大，導致以斜坡單元分析之潛感因子難以預測該崩塌發生，因而造成錯誤預測。若為了預測小範圍之崩塌，建議可以使用解析度較高 (5m 或 1m) 的數值高程模型以切割出更細緻之斜坡單元，可以更精確地描述發生小範圍崩塌的邊坡特性。
2. 本研究所使用的崩塌地資料時間解析度為一年，故需假設每年度崩塌均發生於當年度上半年 (一至七月) 降雨量最多之降雨災害事件，並使用該事件之降雨量進行分析。建議後續之相關研究可以使用衛星影像自行判釋崩塌地，提高崩塌地資料的時間解析度，並可以針對崩塌發生時間選擇更合適之降雨事件進行分析；並且於崩塌分類時，將崩塌分為舊有崩塌地、舊有崩塌地擴大及新生崩塌地等進行訓練，而非單純使用二元分類。
3. 本研究使用 Sentinel-1 衛星之雷達影像進行 PSInSAR 分析，Sentinel-1 衛星的雷達波為 C 波段，波長較短，不易穿透植生，故研究區域內許多斜坡單元上並未找到 PS 點。建議後續之相關研究可以使用其它波長較長的衛星 (如 L 波段的 ALOS-2) 之雷達影像，對於植生覆蓋率高的臺灣山坡地能分析出更好且完整的地表變形資訊。
4. 建議後續可以使用不同地區之崩塌進行研究，分析於不同崩塌特性下，潛感因子之影響性是否存在差異。並透過蒐集不同特性之案例增加模型訓練之樣本，以訓練出預測能力更優秀的崩塌潛勢評估模型。



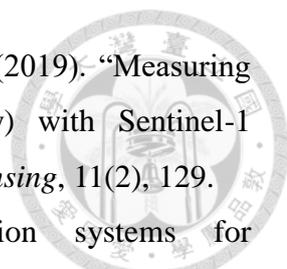


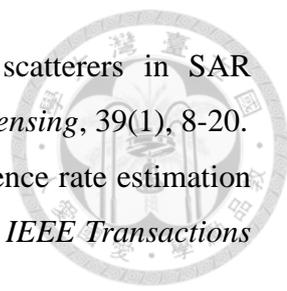
## 參考文獻

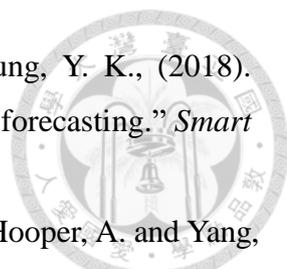


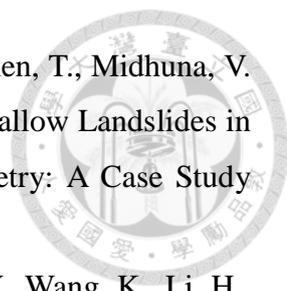
- [1] 王美齡、馮正一、張育瑄，(2010)。「基因演算法於邊坡穩定分析之初步應用」，*水土保持學報*，42(1)，65-82。
- [2] 中華民國大地工程學會，(2017)。「山坡地監測準則」。
- [3] 何瑞益、李光敦、黃琇蔓、李清勝，(2017)。「結合系集降雨預報之淺層崩塌預警模式」。 *農業工程學報*，63(4)，79-95。
- [4] 何瑞益、林郁峰、林忠義、黃琇蔓、蕭玲鳳、李光敦，(2019)。「雷達資料同化技術之極短期定量降雨預報於淺層崩塌預警應用研究」。 *臺灣水利*，67(2)，9-20。
- [5] 陳怡睿、謝舜傑、陳景文、倪柏寧，(2010)。「基因演算法自動演化類神經網路應用於山崩災害之評估」。 *中華水土保持學報*，41(1)，95-110。
- [6] 陳俞瑾、黃璿宇、陳文福，(2013)。「應用不安定指數法分析大安溪流域崩塌潛勢之研究」。社團法人中華水土保持學會 102 年度年會。
- [7] 陳德天、蘇苗彬，(2002)。「梨山地區地層滑動整治計畫之二 監測系統與資料庫」。 *梨山地區地層滑動整治計畫成效評估研討會*，37-120。
- [8] 吳明隆、涂金堂，(2014)。SPSS 與統計應用分析，五南圖書出版股份有限公司。
- [9] 李錫堤、黃健政，(2005)。「區域性山坡穩定分析之回顧與展望」。 *土工技術*，104，33-52。
- [10] 林彥享、鄭錦桐、魏倫瑋、林錫宏、紀宗吉、楊坤霖，(2012)。「豪雨引致山崩之 Web-GIS 災情預警系統發展」。台灣地理資訊學會年會暨學術研討會，台北。
- [11] 葉柏村、張光宗，(2019)。「山崩潛感模型的逐步建構與決策分析-以陳有蘭集水區為例」。 *中華水土保持學報*，50(2)，49-62。
- [12] 經濟部中央地質調查所，(2009)。「地質敏感區災害潛勢評估與監測-都會區及周緣坡地山崩潛勢評估計畫(3/4)」。
- [13] 經濟部中央地質調查所，(2016)。「地質敏感區基地地質調查及地質安全評估手冊」。

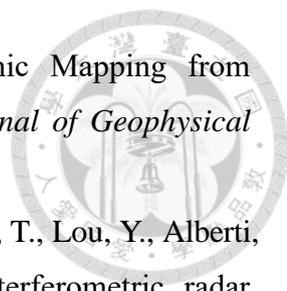
- 
- [14] 詹勳全、卓佳駿、張嘉琪、洪雨柔，(2014)。「降雨對南橫公路50至110K沿線山崩潛勢之影響」。《中華水土保持學報》，45(3)，184-197。
- [15] 詹勳全、陳柏安、溫祐霆，(2015)。「以地理資訊系統搭配羅吉斯回歸、不安定指數及支撐向量機建立山崩潛感之比較分析」。《中華水土保持學報》，46(4)，213-222。
- [16] 廖瑞堂、陳昭維、紀宗吉、林錫宏，(2013)。「由台灣監測案例探討邊坡位移量之管理值」，《土工技術》，136，59-70。
- [17] 穆婧、林昭遠，(2013)。「集水區崩塌地環境指標分析與崩塌潛感推估」。《中華水土保持學報》，44(2)，121-130。
- [18] Abdelfattah, R. and Nicolas, J. M., (2002). "Topographic SAR Interferometric Formulation for High-Precision DEM Generation." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2415-2426.
- [19] Agresti, A. (2002), "Categorical Data Analysis (2nd ed.)." *John Wiley & Sons*.
- [20] Akgun, A. and Erkan, O., (2016). "Landslide susceptibility mapping by geographical information system-based multivariate statistical and deterministic models: In an artificial reservoir area at Northern Turkey." *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 165.
- [21] Anis, Z., Wissem, G., Vali, V., Smida, H. and Essghaier, G. M., (2019). "GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia." *Open Geosciences*, 11(1), 708-726.
- [22] Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., De Michele, M., Bernardie, S. and Cakir, Z., (2020). "Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French Alps." *Remote Sensing*, 12(8), 1305.
- [23] Bernknopf, R. L., Campbell, R. H., Brookshire, D. S. and Shapiro, C. D., (1988). "A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation." *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 25(1), 39-56.
- [24] Bianchini, S., Herrera, G., Mateos, R. M., Notti, D., Garcia, I., Mora, O. and Moretti, S., (2013). "Landslide activity maps generation by means of persistent scatterer interferometry." *Remote Sensing*, 5(12), 6198-6222.

- 
- [25] Blasco, J. M. D., Foumelis, M., Stewart, C. and Hooper, A., (2019). “Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry.” *Remote Sensing*, 11(2), 129.
- [26] Bonham-Carter, G. F., (1994). “Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS.” *Computer methods in the geoscientists*, 13, 398.
- [27] Braun, A., Veci, L., (2020). “TOPS Interferometry Tutorial.” *Sentinel-1 Toolbox*, Retrieved from <http://step.esa.int>
- [28] Burnett, A. D., Brand, E. W. and Styles, K. A., (1985). “Terrain classification mapping for a landslide inventory in Hong Kong.” *4<sup>th</sup> International Conference and Field Workshop on Landslides*, Tokyo, 63–68.
- [29] Carrara, A., (1983). “Multivariate models for landslide hazard evaluation.” *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3), 403-426.
- [30] Carrara, A., (1988). “Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models.” *Quantitative analysis of mineral and energy resources*, Springer, Dordrecht, 581-597.
- [31] 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.
- [32] Chang, C. P., Chen, K. S., Wang, C. T., Yen, J. Y., Chang, T. Y. and Lin, C. W., (2004). “Application of space-borne radar interferometry on crustal deformations in Taiwan: A perspective from the nature of events.” *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3), 523-544.
- [33] Chung, C. J. F., Fabbri, A. G. and Van Westen, C. J., (1995). “Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation.” *Geographical information systems in assessing natural hazards*, Springer, Dordrecht, 107-133.
- [34] Ciampalini, A., Raspini, F., Lagomarsino, D., Catani, F. and Casagli, N., (2016). “Landslide susceptibility map refinement using PSInSAR data.” *Remote Sensing of Environment*, 184, 302-315.
- [35] Cooke, R. V. and Doornkamp, J. C., (1990). “Geomorphology in environmental management: a new introduction.” *Oxford University Press (OUP)*.
- [36] Ferretti, A., Novali, F., Bürgmann, R., Hilley, G. and Prati, C., (2004). “InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San Francisco Bay area.” *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85(34), 317-324.

- 
- [37] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., (2001). “Permanent scatterers in SAR interferometry.” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.
- [38] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., (2000). “Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry.” *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38(5), 2202-2212.
- [39] Fienberg, S. E. (2007). “The analysis of cross-classified categorical data.” *Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge and London*.
- [40] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A., (1989). “Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry.” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191.
- [41] Graham, L. C., (1974). “Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping.” *Proceedings of the IEEE*, 62(6), 763-768.
- [42] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., (1999). “Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy.” *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- [43] Hansen, A., Franks, C. A. M., Kirk, P. A., Brimicombe, A. J. and Tung, F., (1995). “Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong.” *Geographical information systems in assessing natural hazards*, 273-298.
- [44] Hooper, A., Bekaert, D., Hussain, E. and Spaans, K., (2018). “StaMPS/MTI Manual Version 4.1b.” *University of Leeds*.
- [45] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. and Arikan, M., (2012). “Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation.” *Tectonophysics*, 514, 1-13.
- [46] Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H., (2007). “Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos.” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- [47] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B., (2004). “A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers.” *Geophysical research letters*, 31(23).
- [48] Höser, T. (2018). “Analysing the capabilities and limitations of InSAR using Sentinel-1 data for landslide detection and monitoring.” *University of Bonn*.

- 
- [49] Hsu, Y. C., Chang, Y. L., Chang, C. H., Yang, J. C. and Tung, Y. K., (2018). “Physical-based rainfall-triggered shallow landslide forecasting.” *Smart Water*, 3(1), 1-16.
- [50] Hung, W. C., Hwang, C., Chen, Y. A., Chang, C. P., Yen, J. Y., Hooper, A. and Yang, C. Y., (2011). “Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan.” *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 957-967.
- [51] Kalia, A. C., (2018). “Classification of landslide activity on a regional scale using persistent scatterer interferometry at the Moselle valley (Germany).” *Remote Sensing*, 10(12), 1880.
- [52] Lazecký, M., (2011). “Monitoring of terrain relief changes using Synthetic Aperture Radar Interferometry: Application of SAR Interferometry Techniques in a specific undermined Ostrava-Karviná district.” *Dissertation Thesis, VSB-Technical University of Ostrava*.
- [53] Lee, S., Ryu, J. H., Lee, M. J. and Won, J. S., (2003). “Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea.” *Environmental Geology*, 44(7), 820-833.
- [54] Lillesand, T., Kiefer, R. W. and Chipman, J. (2015). “Remote sensing and image interpretation.” John Wiley & Sons.
- [55] Mark, R. K. and Ellen, S. D., (1995). “Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard.” *Geographical information systems in assessing natural hazards*, Springer, Dordrecht, 93-106.
- [56] Meijerink, A. M. J., (1988). “Data acquisition and data capture through terrain mapping units.” *ITC journal*, 1, 23-44.
- [57] Notti, D., Herrera, G., Bianchini, S., Meisina, C., García-Davalillo, J. C. and Zucca, F., (2014). “A methodology for improving landslide PSI data analysis. International journal of remote sensing.” 35(6), 2186-2214.
- [58] O'loughlin, E. M., (1986). “Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis.” *Water Resources Research*, 22(5), 794-804.
- [59] Pike, R. J., (1988). “The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models,” *Mathematical geology*, 20(5), 491-511.

- 
- [60] Rajaneesh, A., Logesh, N., Vishnu, C. L., Bouali, E. H., Oommen, T., Midhuna, V. and Sajinkumar, K. S., (2021). “Monitoring and Mapping of Shallow Landslides in a Tropical Environment Using Persistent Scatterer Interferometry: A Case Study from the Western Ghats, India.” *Geomatics*, 1(1), 3-17.
- [61] Shen, C., Feng, Z., Xie, C., Fang, H., Zhao, B., Ou, W., Zhu, Y., Wang, K., Li, H., Bai, H., Mannan, A. and Chen, P., (2019). “Refinement of Landslide Susceptibility Map Using Persistent Scatterer Interferometry in Areas of Intense Mining Activities in the Karst Region of Southwest China.” *Remote Sensing*, 11(23), 2821.
- [62] Shou, K. J., Wu, C. C. and Lin, J. F., (2018). “Predictive analysis of landslide susceptibility under climate change conditions – a study on the Ai-Liao watershed in southern Taiwan.” *Journal of GeoEngineering*, 13(1), 13-27.
- [63] Speight, J. G., (1977). “Landform pattern description from aerial photographs.” *Photogrammetria*, 32(5), 161-182.
- [64] Tsai, H. Y., Tsai, C. C. and Chang, W. C., (2019), “Slope unit-based approach for assessing regional seismic landslide displacement for deep and shallow failure.” *Engineering Geology*, 248, 124-139.
- [65] Van Westen, C. J., (1993). “Application of geographic information systems to landslide hazard zonation, ITC Publication No 15.” *International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey*, Enschede, The Netherlands, 245.
- [66] Van Westen, C. J., (1994). “GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia.” *Mountain environments & geographic information systems*, 135-166.
- [67] Verstappen, H. T., (1983). “Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development.” *Elsevier Scientific Publishing Co.*, Amstrerdam.
- [68] 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.
- [69] Yang, S. R., (2017). “Assessment of Rainfall-Induced Landslide Susceptibility Using GIS-Based Slope Unit Approach.” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(4), 04017026.
- [70] Zaiontz, C., (2020). Real Statistics Using Excel. [www.real-statistics.com](http://www.real-statistics.com)

- 
- [71] Zebker, H. A. and Goldstein, R. M., (1986). “Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations.” *Journal of Geophysical Research*, 91(B5), 4993-4999.
- [72] Zebker, H. A., Madsen, S. N., Martin, J., Wheeler, K. B., Miller, T., Lou, Y., Alberti, G., Vetrella, S. and Cucci, A., (1992). “The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 933–940.
- [73] Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. and Werner, C. L., (1994). “On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake.” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10), 19617-19634.



## 口試問答



### A. 鐘志忠教授

問題與建議	答覆
1. 研究目的中，提出希望以 PSInSAR 技術使崩塌潛感值更具「即時性」，可能會與監測上的即時性混淆，用語不夠恰當。	感謝口委的建議，已於論文中進行修改。
2. 分析潛感因子所使用的軟體為何？	感謝口委的提問，本研究使用 ESRI 開發的地理資訊系統軟體 ArcMap 10.7 進行分析。
3. 如何運用岩體強度分布圖分析各斜坡單元的岩體強度？	感謝口委的提問，如文中 3.3.4 節所述，本研究將中央地質調查所繪製的岩體強度分布圖與斜坡單元進行套疊，分別計算各斜坡單元中的「多數岩體強度」及「最弱岩體強度」。
4. 相關性分析中，相關係數為負值所代表的意義為何？在各因子中，以植生指標與崩塌具最大的相關性，原因為何？	感謝口委的提問，相關係數為負值代表該因子與崩塌呈現負相關，表示該因子的數值越小越容易發生崩塌。 植生指標與崩塌具最大的相關性可能與研究區域的崩塌特性有關，由於裸露地相較於植生地較容易受侵蝕，導致邊坡更不穩定，且透過比較歷年的崩塌資料，可以發現研究區域中常有裸露地再次發生崩塌的現象，使植生指標與崩塌具最大的相關性。
5. GPS 校正時，GPS 測站與 PS 點不會剛好在相同的位置，如何找到與 GPS 測站契合的點位	感謝口委的提問，如文中 4.2.3 節所述，本研究參考 Hung et al. (2011) 所提出的

<p>進行校正?所使用的週期為何?</p>	<p>校正流程，利用 PS 點上測得的 <math>v_{LOS}</math> 進行內插，再以 GPS 測站的點位擷取該位置 <math>v_{LOS}</math> 的內插值計算誤差，再將各 GPS 測站的誤差值內插至研究區域中，以 PS 點擷取該位置誤差的內插值進行 <math>v_{LOS}</math> 的校正。校正時所使用的 GPS 資料的時間及週期均與 PS 點計算 <math>v_{LOS}</math> 時相同，如校正時間間距六個月時的，則 GPS 測站亦使用相同時間且時間間距為六個月的資料進行校正。</p>
<p>6. 優化分析結果中，以時間間距六個月的速度相關性最大，原因為何?</p>	<p>感謝口委的提問，從 PSInSAR 解算的成果中可以發現，其地表變形時間序列仍有週期性的跳動，可能受乾季、雨季的變化或樹葉的生長及掉落等原因造成，故以時間間距六個月的 PSInSAR 資料分析較能觀察到地表的變形趨勢，導致時間間距六個月時的速度與崩塌距最大的相關性。</p>
<p>7. 建議後續研究於崩塌分類時，嘗試將崩塌分為舊有崩塌地、舊有崩塌地擴大及新生崩塌地等，而非單純使用二元分類。</p>	<p>感謝口委的建議，已於論文第 7.2 節進行補充。</p>
<p>8. 為何使用 95%的區間下界作為注意值?</p>	<p>感謝口委的提問，根據統計的原理，平均值<math>\pm 2</math> 倍標準差的範圍內會包含 95%的資料，本研究統計三年間崩塌單元的速度，95%的區間下界（平均值-兩倍標準差）表示有 97.5%的崩塌單元速度均大於 0.63 mm/month，故定義 0.63 mm/month 為注意值。</p>

## B. 韓仁毓教授

問題與建議	答覆
1. 建議清楚說明資料的來源、年代及解析度等資訊。	感謝口委的建議，已於論文中進行補充。
2. 建議針對 PSInSAR 計算時所使用的參數進行說明。	感謝口委的建議，已於論文第 4.2.2 節進行補充。
3. 是否可以透過坡向及 LOS 入射方向的关系，對 PS 點進行篩選？	<p>感謝口委的提問，根據前人文獻，一般多使用坡向與 LOS 入射方向的幾何關係計算 R-index (Bianchini et al., 2013; Notti et al., 2014) 來描述幾何狀況是否適合衛星觀測，其公式如下：</p> $R-index = -\sin(S \cdot \sin(A - \alpha + 90^\circ) - \theta)$ <p>其中，<math>S</math> 代表邊坡坡度，<math>A</math> 代表邊坡坡向，<math>\alpha</math> 代表衛星軌道的方位角，<math>\theta</math> 代表衛星視線的入射角。</p> <p>本研究亦針對各 PS 點進行 R-index 的計算，發現經過本研究優化分析篩選後，所有 PS 點的 R-index 均大於 0.33，代表其幾何狀況均適合衛星觀測 (Bianchini et al. 2013)，故不須再透過坡面及 LOS 入射方向之幾何關係對 PS 點進行篩選。</p>
4. 建議針對崩塌潛勢的分級標準進行說明或修改。	感謝口委的建議，崩塌潛勢的分級標準依據崩塌潛感值以四分法進行分級，分為低潛勢 (潛感值界於 0 至 0.25)、中低潛勢 (潛感值界於 0.25 至 0.5)、中高潛勢 (潛感值界於 0.5 至 0.75) 及高潛勢 (潛感值界於 0.75 至 1.0) 四類。

<p>5. 以防災的角度，四項準確性評估指標中何種指標最為重要？</p>	<p>感謝口委的提問，若以防災的角度，當以可偵測率 (POD) 最為重要，模型應要能預測到崩塌發生，才能達到預警的效果。但又如文中所述，應同時考慮誤報率 (FAR)，避免發出過多的假警報，導致資源浪費的情形發生。</p>
<p>6. 經潛感值修正後，崩塌潛感值可能會大於 1.00，如何解釋？</p>	<p>感謝口委的提問，由於崩塌潛感值的值域為 0 至 1 之間，故若修正後潛感值大於 1.00 則將其視為 1.00，代表該崩塌單元具有相當高的崩塌潛勢，發生崩塌的可能性非常大。</p>

### C. 王國隆教授

問題與建議	答覆
1. 說明本研究的目標 (土石流、淺層崩塌或深層崩塌) 為何?	感謝口委的提問，本研究由於使用林務局判釋的崩塌地，其為利用衛星影像進行判釋所得，故目標涵蓋深層崩塌、淺層崩塌及淺層沖蝕。
2. 為何剖面曲率使用單元內最小值?而非最大值?	感謝口委的提問，根據剖面曲率的定義，其值為正代表凹坡，其值為負代表凸坡。從地工的角度上，一般認為上緩下陡的凸坡，受重力作用較大，受擾動後較容易導致邊坡崩塌發生。因此選擇以斜坡單元中最危險的剖面曲率，即最小剖面曲率代表該單元的剖面曲率。
3. 各種 PSInSAR 參數調整的目的及意義應說明。	感謝口委的建議，已於論文第 4.2.2 節進行補充。
4. 進行速度方向轉換後，若出現沿坡面方向向上的 $v_{slope}$ 為不合理的現象，如何處理?	感謝口委的提問，本研究參考 Aslan et al. (2020) 的轉換方法將 $v_{LOS}$ 轉換成 $v_{slope}$ ，的確會出現沿坡面向上 (正值) 的 $v_{slope}$ ，此結果明顯不合理，不符合邊坡的運動行為，故會將該 PS 點視為誤差並刪除，僅保留沿坡面向下 (負值) 的 $v_{slope}$ ，以進行後續分析。
5. 將升、降軌影像解算的結果直接合併進行分析是否不太合適?	感謝口委的提問，本研究為參考，將升、降軌影像所得的 PSInSAR 結果，利用升、降軌時衛星 LOS 方向與坡面的幾何關係計算 $v_{slope}$ 後，再將其合併，故所有 PS 點上均為沿坡面向下的速度，不會產生升、降軌影像 LOS 方向不同導致其速度難以

	比較的問題。
6. PSInSAR 解算時各年度是一起解算還是分別解算?原因為何?	感謝口委的提問，本研究四個年度的 PSInSAR 為分別解算，由於 PS 點為從多張影像中找距穩定反射特性的點位，故當地表發生大變形或崩塌前後，該位置應無法偵測到 PS 點。若四年影像一起解算，可能難以得到地表發生大變形的 PS 點，因此本研究將四年的影像分別解算，一年解算一次。
7. 研究中建立的門檻值單位設定為 mm/month，且其數值很小，在 PSInSAR 分析時有可能因一個跳動的誤差使當月的位移即超過該數值，建議可以將時間間距拉長。	感謝口委的建議，因本研究使用時間間距六個月的地表變形計算之地表變位速度建立邊坡變位門檻值，避免造成誤解使用一個月的變形進行分析，故將門檻值之單位修改為 mm/6-months。
8. 建議論文中於優化分析時應先介紹所使用的雷達影像資料。	感謝口委的建議，已於論文第 4.3.3 節進行補充。