計畫編號：109 保發-11.1-保-01-06-001(30)

高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究

Application of the high-resolution digital elevation model in an integrated numerical method for the occurrence mechanism and post-failure behavior of the landslide

執 行 單 位：財團法人成大研究發展基金會

執 行 期 間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：蔡元融 博士

行政院農業委員會水土保持局委託研究

中華民國 109 年 12 月

（本報告內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究

摘要

近年全球在氣候變遷影響下，大規模崩塌災害現象頻傳，以台灣為例，在民國 98 年 8 月莫拉克颱風帶來廣區域、高強度、長延時的降雨，並造成中南部及東南部嚴重的災害，尤其係在高雄縣甲仙鄉小林村大規模崩塌。

大規模崩塌造成的嚴重災情，且後續需要的復建與恢復期也相當長，為降低未來相似災害的衝擊與損失，水土保持局依據災害風險管理相關業務的需求，開始推動長期的大規模崩塌防減災計畫，包含潛勢區活動性監測、影響範圍調查劃設、發生雨量分析等防減災工作推動所需要之關鍵課題。但從目前相關計畫執行成果來看，因為缺乏大規模崩塌區的規模資料，在分析上僅能利用調查之潛勢區範圍進行分析，而此範圍通常偏大，因此各類分析成果多有高估之現象，為目前相關計畫推動之瓶頸。

為改善分析成果之高估現象，將潛在大規模崩塌區進行分區分塊為首要工作，本研究希望透過邊坡穩定分析，配合 UAV 光達產製之多期高精度地形，對潛勢區進行分區分塊之分析。再針對分區分塊分析之塊體，利用本計畫開發之整合型數值模擬方法，評估崩塌之發生與流出過程，提供未來防減災工作推動所需之發生門檻與影響範圍之參考。

關鍵詞：大規模崩塌、崩塌發生、崩塌流出

Application of the high-resolution digital elevation model in an integrated numerical method for the occurrence mechanism and post-failure behavior of the landslide

Abstract

Under climate changing, large-scale landslide has occurred frequently. In August 2009, Typhoon Morakot brought wide-area, high-intensity, and long-attenuation rainfall in the central, southern, and southeastern of Taiwan. It also caused a severe disaster, especially the large-scale landslide in Shiaolin village, Jiaxian Dist., Kaohsiung City.

The Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) has promoted a national project for the prevention work of large-scale landslide. These works are including with the investigation of potential area, the design of monitoring system, and the design of warning system … etc. Accordingly, the potential area has been investigated and the number is about 2,103 sites. However, the records of monitoring system pointed out that the potential area could failure entirely and partially. It casuses difficulty in follow-up works.

In order to enhance the analysis of slope failure, this project provides two methods to investigate the scenario of slope failure. One is based on the limited equilibrium method. It will be used to investigate the unstable slope in the potential area, and then it can use to estimate the scenario of slope failure. Another one is based on the continuum mechanic and numerical model. It will be used to simulate an entire landslide process, which is from landslide occurrence to post-failure. Therefore, it will be applied to predict the possible process of slope failure.

Keywords：Large-scale landslide, landslide occurrence, landslide post-failure

目次

摘要 I

Abstract..... II

目次 i

表次 iii

圖次 v

參數表 xi

第一章 緒論 1-1

第一節 計畫緣起與目的 1-1

第二節 計畫工作項目與內容 1-2

第三節 計畫工作進度與執行架構 1-3

第二章 潛在大規模崩塌分區分塊方法建立 2-1

第一節 坡面穩定曲線建立 2-1

第二節 穩定性公式驗證 2-3

第三章 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發 3-1

第一節 流固耦合理論 3-1

第二節 材料質點法及其計算流程 3-7

第三節 PLAXIS 和 Anura 的模擬結果比較與驗證 3-13

第四章 研究區域基本資料蒐集 4-1

第一節 研究區域基本資料.....4-1

第二節 研究區域影像資料.....4-5

第三節 研究區域地形資料.....4-12

第五章 研究區域分區分塊分析.....5-1

第一節 研究區域不安定區域分析.....5-1

第二節 研究區域不安定邊坡分析.....5-2

第三節 研究區域不安定邊坡地形變化分析.....5-7

第六章 研究區域發生條件與影響範圍分析.....6-1

第一節 香港柴灣翡翠路崩塌事件.....6-2

第二節 台灣高雄寶來里茗濃溪右岸之坡面.....6-4

第七章 結論與建議.....7-1

參考文獻.....參-1

附錄.....附錄-1

附錄一、期初審查意見回覆.....附錄-1

附錄二：期中審查意見回覆.....附錄-3

附錄三：期中審查意見回覆.....附錄-3

附錄四：模式中材料常用參數對照表.....附錄-7

表次

表 1-1 計畫執行進度查核表.....1-4

表 1-2 計畫執行成果查核表.....1-5

表 3-1 Anura 與 PLAXIS 模擬使用材料參數表 3-14

表 4-1 研究區域地形分析成果表 4-3

表 4-2 總計畫以 UAV 產製研究區域數值地形之各期時間表.....4-12

表 6-1 各種材料的土壤保水曲線參數和水力傳導係數 6-7

圖次

圖 1-1 近年世界各地發生之大規模崩塌災害 1-1

圖 1-2 計畫執行架構圖.....1-3

圖 2-1 邊坡穩定分析示意圖 (modified from Yoshino and Uchida 2019) 2-2

圖 2-2 長殿地區穩定性分析使用剖面 (Yoshino and Uchida 2019).....2-3

圖 2-3 長殿地區穩定性分析成果(Yoshino and Uchida 2019).....2-4

圖 2-4 赤谷地區崩塌地形比對 (Yoshino and Uchida 2019).....2-5

圖 2-5 赤谷地區崩塌穩定性分析成果 (Yoshino and Uchida 2019).....2-5

圖 3-1 連續體力學以固液汽三相表示未飽和土壤之示意圖 3-1

圖 3-2 摩爾庫倫破壞準則概念圖 3-5

圖 3-3 材料質點法計算概念圖(modified from Hamad, 2014).....3-7

圖 3-4 Anura 與 PLAXIS 比較模擬條件設計 3-13

圖 3-5 Anura 與 PLAXIS 之土壤水分特性曲線和相對水力傳導係數 3-14

圖 3-6 Anura 與 PLAXIS 模擬未飽和入滲比較-頂部邊界條件孔隙水壓..3-16

圖 3-7 Anura 與 PLAXIS 模擬未飽和入滲比較-頂部邊界條件入滲速率..3-16

圖 4-1 研究區域範圍圖.....4-1

圖 4-2 研究區域地形分布圖.....4-2

圖 4-3 研究區域坡度分布圖.....4-2

圖 4-4 研究區域坡向分布圖.....4-3

圖 4-6 研究區域地質分布圖.....4-4

圖 4-7 研究區域 2004 年衛星影像 4-5

圖 4-8 研究區域 2005 年衛星影像 4-6

圖 4-9 研究區域 2006 年衛星影像 4-7

圖 4-10 研究區域 2007 年衛星影像 4-8

圖 4-11 研究區域 2008 年衛星影像 4-9

圖 4-12 研究區域 2009 年衛星影像 4-10

圖 4-13 研究區域 2017 年衛星影像 4-11

圖 4-14 研究區域 40 公尺精度數值地形 4-13

圖 4-15 研究區域 40 公尺精度陰影圖 4-13

圖 4-16 研究區域 5 公尺精度數值地形 4-14

圖 4-17 研究區域 5 公尺精度陰影圖 4-14

圖 4-18 研究區域 1 公尺精度數值地形 4-15

圖 4-19 研究區域 1 公尺精度陰影圖 4-15

圖 4-20 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20080818).....4-16

圖 4-21 研究區域 UAV 產製數值地形(20080818)陰影圖 4-16

圖 4-22 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20150201).....4-17

圖 4-23 研究區域 UAV 產製數值地形(20150201)陰影圖 4-17

圖 4-24 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20151109).....4-18

圖 4-25 研究區域 UAV 產製數值地形(20151109)陰影圖 4-18

圖 4-26 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20160606).....4-19

圖 4-27 研究區域 UAV 產製數值地形(20160606)陰影圖 4-19

圖 4-28 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20161118).....4-20

圖 4-29 研究區域 UAV 產製數值地形(20161118)陰影圖 4-20

圖 4-30 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20170708).....4-21

圖 4-31 研究區域 UAV 產製數值地形(20170708)陰影圖 4-21

圖 4-32 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20170924).....4-22

圖 4-33 研究區域 UAV 產製數值地形(20170924)陰影圖 4-22

圖 4-34 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20171115).....4-23

圖 4-35 研究區域 UAV 產製數值地形(20171115)陰影圖 4-23

圖 4-36 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20181222).....4-24

圖 4-37 研究區域 UAV 產製數值地形(20181222)陰影圖 4-24

圖 4-38 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20200308).....4-25

圖 4-39 研究區域 UAV 產製數值地形(20200308)陰影圖 4-25

圖 5-1 潛在大規模崩塌區之地形特徵 5-1

圖 5-2 研究區域內不安定區域分布圖 5-1

圖 5-3 研究區域不安定區分析剖面分布圖 5-2

圖 5-4 區域 1 不安定區分析剖面分析成果 5-3

圖 5-5 區域 2 不安定區分析剖面分析成果 5-3

圖 5-6 區域 3 不安定區分析剖面分析成果 5-4

圖 5-7 區域 4 不安定區分析剖面分析成果 5-4

圖 5-8 區域 5 不安定區分析剖面分析成果 5-5

圖 5-9 研究區域內不安定區空間分布圖 5-5

圖 5-9 研究區域內不安定區空間分布圖(底圖 2011 年影像).....5-6

圖 5-10 研究區域內不安定區空間分布圖(底圖 2017 年影像).....5-6

圖 5-11 區域 1 和 2 於 2008 年坡面裸露情況和 2015 年植生覆蓋情況圖 .5-7

圖 5-12 區域 1 和區域 2 於 2015 年間地表高程變化圖 5-8

圖 5-13 區域 1 兩期地形剖面切取位置(上)及其地形剖面變化(下)圖 5-9

圖 5-14 區域 1 和區域 2 從 2015- 2016 年中之間地表高程變化圖 5-10

圖 5-15 區域 1 地形剖面從 2015 年底至 2016 年中之間變化圖 5-10

圖 5-16 區域 1 和區域 2 從 2016 年中至 2016 年底間地表高程變化圖 ...5-11

圖 5-17 區域 1 地形剖面從 2016 年中至 2016 年底之間變化圖 5-11

圖 5-18 區域 1 和區域 2 從 2016 - 2017 年中之間地表高程變化圖 5-12

圖 5-19 區域 1 地形剖面從 2016 年底至 2017 年中之間變化圖 5-12

圖 5-20 區域 1 和區域 2 從 2017 年之間地表高程變化圖 5-13

圖 5-21 區域 1 地形剖面從 2017 年中至 2017 年底之間變化圖 5-13

圖 5-22 區域 1 多期地形剖面(2015 年至 2017 年)比較圖.....5-14

圖 5-23 農林航測所(AFASI 圖台)顯示區域 1 最新之航空照片圖 5-15

圖 5-24 區域 1 地質構造假設圖 5-15

圖 6-1 整合型崩塌發生與流出數值模擬及後續應用流程圖 6-1

圖 6-2 香港翡翠路崩塌發生前後地形比較圖 (knill 1996) 6-2

圖 6-3 Anura 建置香港翡翠路崩塌事件模型圖 6-2

圖 6-4 Anura 模擬香港翡翠路崩塌過程體積應變分布變化圖 6-3

圖 6-5 Anura 模式建置研究區域的過程圖(1).....6-4

圖 6-6 研究區域地質構造情境一之概念圖 6-5

圖 6-7 研究區域地質構造情境二之概念圖 6-5

圖 6-8 研究區域地質構造情境三之概念圖 6-6

圖 6-9 地質構造情境一之邊界條件 6-8

圖 6-10 地質構造情境二之邊界條件 6-8

圖 6-11 地質構造情境三之邊界條件 6-8

圖 6-12 研究區域假設地下水面位置圖 6-9

圖 6-13 研究區域網格配置圖.....6-10

圖 6-14 地質構造情境一模擬結果圖 6-11

圖 6-15 地質構造情境二模擬結果圖 6-12

圖 6-16 地質構造情境三模擬結果圖 6-13

參數表

m_s 固相質量	g 重力常數
m_l 液相質量	K_l 液體彈性模數
ρ_s 固相密度	s 吸力
ρ_l 液相密度	$\mathbf{I}$ 單位相量矩陣
ρ_m 混合物密度	$\mathbf{D}$ 剛性矩陣
V 孔隙介質總體積	$\boldsymbol{\varepsilon}$ 體積應變量
V_s 固相體積	P_0 進氣壓值
V_l 液相體積	λ 非線性未飽和模式經驗係數
V_{void} 孔隙體積	S_{min} 殘餘飽和度
n 孔隙率	S_{max} 最大飽和度
S_l 飽和度	S_e 有效飽和度
$\boldsymbol{a}_l$ 液相加速度	N 形狀函數
$\boldsymbol{a}_s$ 固相加速度	x 空間上的位置
p_l 孔隙水壓	$\boldsymbol{M}_s$ 離散化的固相質量
$\boldsymbol{\sigma}$ 混合物總應力	$\boldsymbol{M}_l$ 離散化的液相質量
$\boldsymbol{\sigma}'$ 混合物有效應力	$\boldsymbol{F}^{int}$ 內部力
μ_l 液體動黏滯係數	$\boldsymbol{F}^{ext}$ 外部力
k_l 固有水力傳導係數	$\boldsymbol{Q}_l^n$ 滲流拖曳力
$\boldsymbol{v}_l$ 液相速度	t^k 某個模擬時刻
$\boldsymbol{v}_s$ 固相速度	Δt 時間增加量
$\mathbf{b}$ 物體力	ε_s 固相體積應變量
$\boldsymbol{w}$ 液相達西流速	ε_l 液相體積應變量
k_l^{unsat} 未飽和水力傳導係數	ϕ 摩擦角
k_l^{sat} 飽和水力傳導係數	c 凝聚力
k_r 相對水力傳導係數	a_v 線性未飽和模式經驗係數
	r 線性未飽和模式經驗係數

第一章 緒論

第一節 計畫緣起與目的

近年全球在氣候變遷影響下，大規模崩塌(深層崩塌)災害現象頻傳(圖1-1)，以台灣為例，在民國98年8月莫拉克颱風帶來廣區域、高強度、長延時的降雨，並造成中南部及東南部嚴重的災害，尤其係在高雄縣甲仙鄉小林村大規模崩塌。大規模崩塌造成的嚴重災情，且後續需要的復建與恢復期也相當長，為降低未來相似災害的衝擊與損失，水土保持局依據災害風險管理相關業務的需求，開始推動長期的大規模崩塌防減災計畫，包含潛勢區活動性監測、影響範圍調查劃設、發生雨量分析等防減災工作推動所需要之關鍵課題。但從目前相關計畫執行成果來看，因為缺乏大規模崩塌區的規模資料，在分析上僅能利用調查之潛勢區範圍進行分析，而此範圍通常偏大，因此各類分析成果多有高估之現象，為目前相關計畫推動之瓶頸。

為改善分析成果之高估現象，將潛在大規模崩塌區進行分區分塊為首要工作，本研究希望透過邊坡穩定分析，配合UAV光達產製之多期高精度地形，對潛勢區進行分區分塊之分析。再針對分區分塊分析之塊體，利用本計畫開發之整合型數值模擬方法，評估崩塌之發生與流出過程，提供未來防減災工作推動所需之發生門檻與影響範圍之參考。



（氣候變遷下大規模崩塌防減災，水土保持局，2015）

圖 1-1 近年世界各地發生之大規模崩塌災害

第二節 計畫工作項目與內容

一、 潛在大規模崩塌分區分塊方法建立

以 Yoshino 和 Uchida (2019)的邊坡穩定分析方法做為潛在大規模崩塌區域內坡面穩定性的評估方法，然後使用單期數值地形(DEM)來取得潛在大規模崩塌區域內坡面的幾何參數，依據所提出的方法來找出潛在大規模崩塌區域內不穩定的坡面。

二、 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發

以材料質點法來建立崩塌從發生到流出的模擬方法，並做為整合型崩塌發生與流出數值模式(Anura)開發的基礎。然後，以 PALXIS 模式做為 Anura 模式的驗證。

三、 研究區域分區分塊分析

選定一個潛在大規模崩塌區域做為示範區域，然後應用第一項工作所建立的方法來評估示範區域內的不穩定坡面，並對示範區域進行分區分塊。

四、 研究區域發生條件與影響範圍分析

模擬示範區域不穩定坡面從崩塌發生到流出過程，然後依據模擬結果來進行發生條件與影響範圍的分析。

第三節 計畫工作進度與執行架構

一、 計畫執行架構

本計畫執行首先為方法論之建立，方法論則包含分區分塊方法與發生、流出模擬方法之建立與開發。方法論完成後，即可利用歷史案例檢視方法論之可行性。確認可行後，開始蒐集研究區域基本資料，包含研究區域之地形、影像及歷史案例等內容，然後針對研究區域進行分析，並可得到分區分塊分析、發生條件及影響範圍之分析等具體成果。

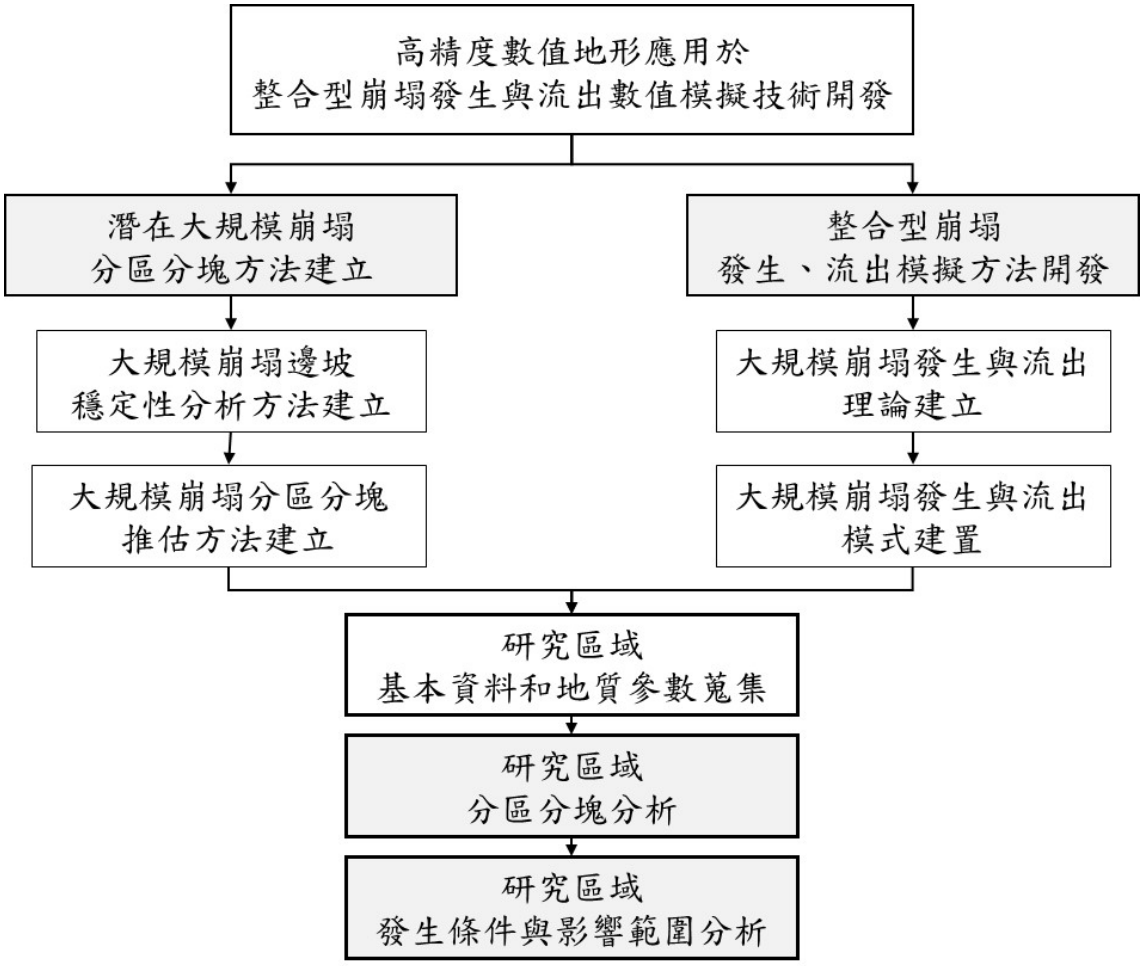


圖 1-2 計畫執行架構圖

二、 計畫工作進度檢核

依水土保持局創研計畫相關規定，本計畫已於 109 年 4 月 14 日繳交期初工作執行計畫書，並於 7 月 31 日繳交期中報告書，將於 11 月 13 日繳交期末報告書和 12 月 25 日繳交成果報告書，計畫執行進度如表 1-1，本次報告繳交為期末報告書，符合計畫進度。

表 1-1 計畫執行進度查核表

工作項目	年	109 年									工作比重
	月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	
1. 潛在大規模崩塌分區分塊方法建立	預定進度										25
2. 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發	預定進度										25
3. 研究區域分區分塊分析	預定進度										20
4. 研究區域發生條件與影響範圍分析	預定進度										20
5. 階段報告	預定進度										10

三、 計畫重要工作執行檢核

表 1-2 計畫執行成果查核表

工作項目	期末查核工作	執行狀況查核	對應章節
1. 潛在大規模崩塌分區分塊方法建立	(1) 分析理論建立 (2) 既有案例驗證	已完成	第二章
2. 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發	(1) 模式建構 (2) 既有案例分析	已完成	第三章
3. 研究區域分區分塊分析	● 研究區域多期資料比對。	已完成	第五章
4. 研究區域發生條件與影響範圍分析	● 研究區域數值模擬。	已完成	第六章

第二章 潛在大規模崩塌分區分塊方法建立

為評估邊坡穩定與否，近代大地工程常用邊坡穩定分析來探討崩塌發生機制之方法，其概念係透過作用於邊坡上的剪應力(Shear stress or driving force, τ_D) 是否超過邊坡的抗剪強度 (Shear strength or resistance force, τ_R) 來做為判斷基準，其指標常以安全係數 (Safety of Factor, $SF = \tau_R / \tau_D$)來做為量化的判斷基準，當安全係數超過 1 即代表邊坡進入到不穩定的狀態，也就是說針對每一個邊坡塊體進行穩定性分析，從理論上可以透過安全係數之比較來找出較不穩定之塊體。針對這樣的分析，Yoshino 和 Uchida (2019) 提出利用單期數值地形(DEM)來評估潛在大規模崩塌區內分區分塊的方法，該方法以極限平衡法分析邊坡穩定性，發現可以透過坡面高度(H)和坡面坡度(θ)來判斷任意特定剖面是否處於安定狀態，本計畫延續此方法，並納入多期數值地形進行分析，嘗試追蹤邊坡不穩定區域之時間變遷情形。

第一節 坡面穩定曲線建立

Yoshino 和 Uchida (2019)透過坡面幾何和材料參數等數據，以極限平衡法來判斷潛勢區域內不安定的剖面。圖 2-1 為邊坡塊體之示意圖，圖中之邊坡高程差為 H_i，不穩定塊體底寬為 D_i，坡面投影長度為 L_i，原坡面角度為θ_i，滑動面角度為β_i。透過邊坡高程差、不穩定塊體底寬和坡面投影長度等幾何條件，得以推估滑動面角度為

$$\beta_i = \tan^{-1}\left[H_i / \left(L_i + D_i \right) \right]. \qquad (2\text{-}1)$$

圖中之塊體受力包含重力 W_i、驅動力和摩擦力，其重力可以表示為 $W_i = H_i D_i \gamma / 2$，γ 為單位材料重。其驅動力為重力沿著滑動面上的分力，因此可以表示為$W_i \sin\beta_i$。其摩擦力則為重力垂直滑動面上的分力，和扣掉孔隙水壓作用造成的浮力，及其與材料凝聚力的合力，所以摩擦力可以表示為 $C_i + \left(W_i \cos\beta_i - U_i \right) \tan\varphi$，其中$\varphi$為摩擦角，$C_i$為破壞面上凝聚力總和，$U_i$為塊體受孔隙水壓總和。$C_i$和$U_i$分別可透過下列兩式來推估，式中$c$和

u 分別為凝聚力和孔隙水壓，

$$C_i = c\left[\left(L_i + D_i\right)^2 + H_i^2\right]^{1/2}, \tag{2-2}$$

$$U_i = u\left[\left(L_i + D_i\right)^2 + H_i^2\right]^{1/2}. \tag{2-3}$$

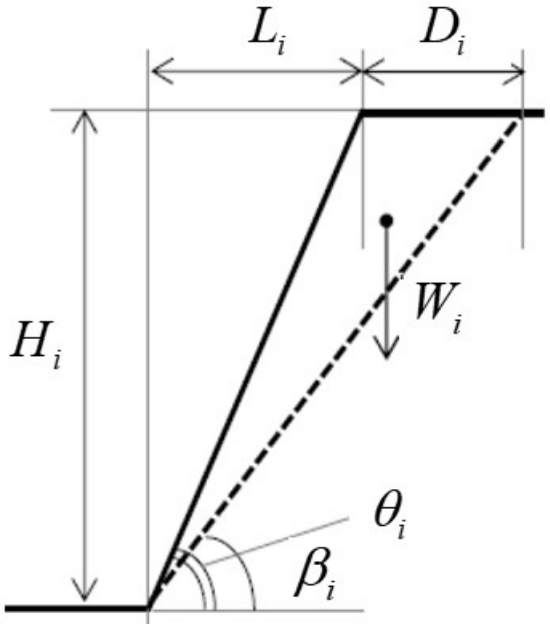


圖 2-1 邊坡穩定分析示意圖 (modified from Yoshino and Uchida 2019)

塊體之穩定與否可透過安全係數進行評估，公式如下

$$SF = \frac{C_i + \left(W_i \cos\beta_i - U_i\right)\tan\varphi}{W_i \sin\beta_i}, \tag{2-4}$$

當塊體達臨界條件時，即 $SF = 1$，此時將各受力帶入安全係數公式後，整理可得

$$H_c = \frac{4c}{\gamma}\frac{\sin\theta_i \cos\varphi}{\left[1 - \cos\left(\theta_i - \varphi\right)\right]}, \tag{2-5}$$

即坡面之破壞高度 H_c 可由凝聚力 c、材料比重 γ、邊坡坡度 θ 及材料摩擦角 φ 之推得。這個公式因考慮了凝聚力、材料比重及材料摩擦角，因此在不同地區會有不同分析成果，使用上可依照各地區之岩層參數進行設定。

第二節 穩定性公式驗證

一、 不穩定區域之尋找

得到地區的穩定關係式後，即可將地形資料帶入公式來評估坡面之穩定性，圖 2-2 即為 Yoshino 針對日本長殿地區的大規模崩塌案例分析成果，圖中左側為真實崩塌之發生位置，右側則為現場地形取得之剖面位置，其中崩塌區域(白線)取崩塌高度為 H_i，未崩塌區(黑線)則取現場坡面之最大高差為 H_i，將各坡面之計算成果(發生前地形)點繪於關係式上，得到圖 2-3。

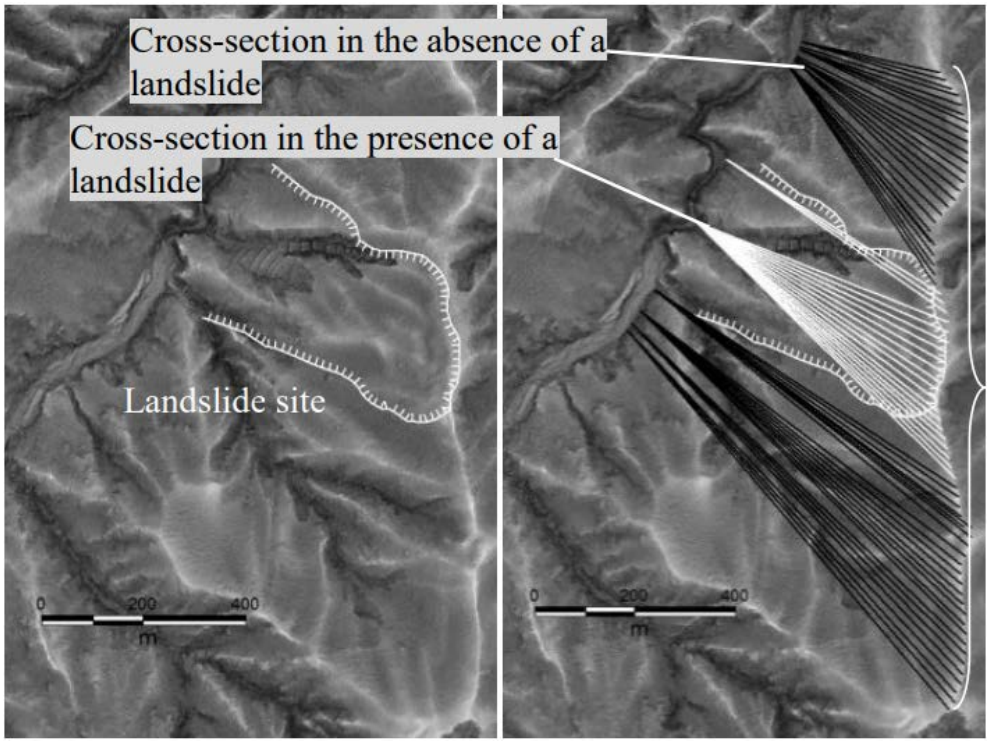


圖 2-2 長殿地區穩定性分析使用剖面空間分布 (Yoshino and Uchida 2019)

在圖 2-3 中，白點為前述崩塌區剖面之資料，黑色十字則為未崩塌區之剖面資料，可以看到白點多未於臨界線上，則黑點則多遠於臨界線，也就是說當取得剖面資料後，即可知道取得之剖面位置繪落於關係式上方或是下方，以長殿地區來看，位於關係式上方者屬於崩塌區域，而位於關係式下方者屬於未崩塌區。

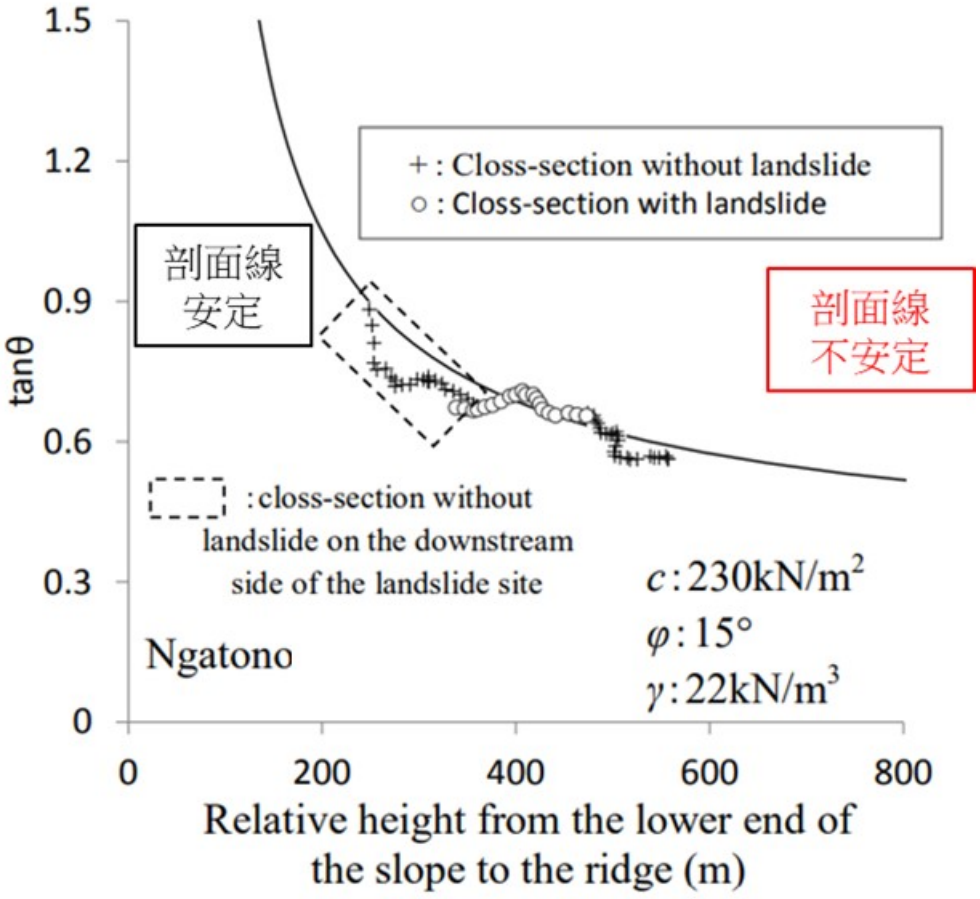


圖 2-3 長殿地區穩定性分析成果(Yoshino and Uchida 2019)

二、 不穩定塊體之尋找

除了不安定塊體區域之尋找外，若利用不同時期之地形，亦可利用穩定關係來找出不穩定塊體之所在位置，舉例來說圖 2-4 為赤谷地區的崩塌區前後地形，其中細虛線為崩塌前地形，粗虛線為崩塌後地形，此時改將地形剖面上的點帶入公式，即可得到圖 2-5，崩塌前地形資料以白點表示，崩塌後地形以黑點表示，可以看到在崩塌前之地形，在坡高較小時，點位均位於關係式下方，即屬於穩定區域，一直到高程差超過 400 公尺後資料點開始出現在關係式上方，即不穩定之區域，這樣的成果可以對應到真實的崩塌前後地形比對，即邊坡在地表高程約 800 公尺處開始為主要崩塌區，本計畫後續將以台灣案例進行分析，評估本方法之可行性。

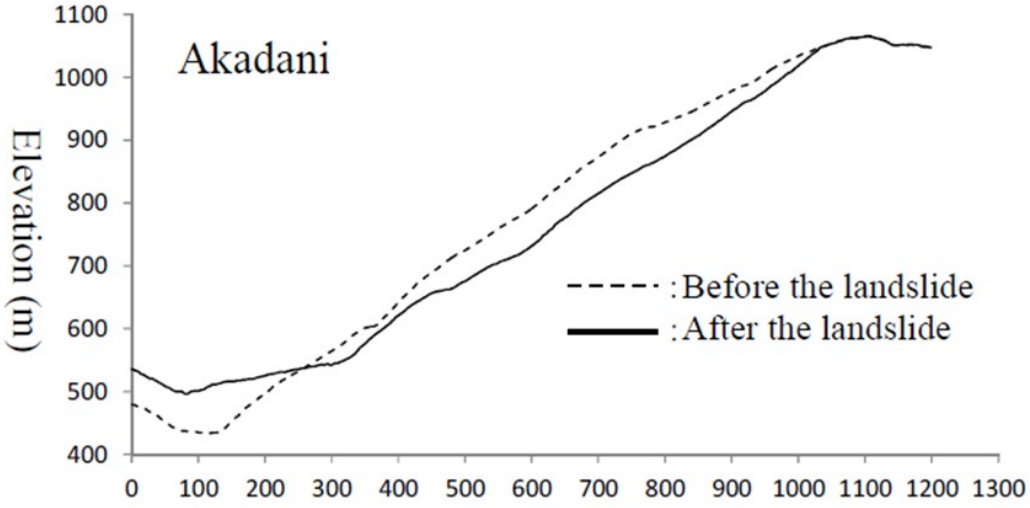


圖 2-4 赤谷地區崩塌地形比對 (Yoshino and Uchida 2019)

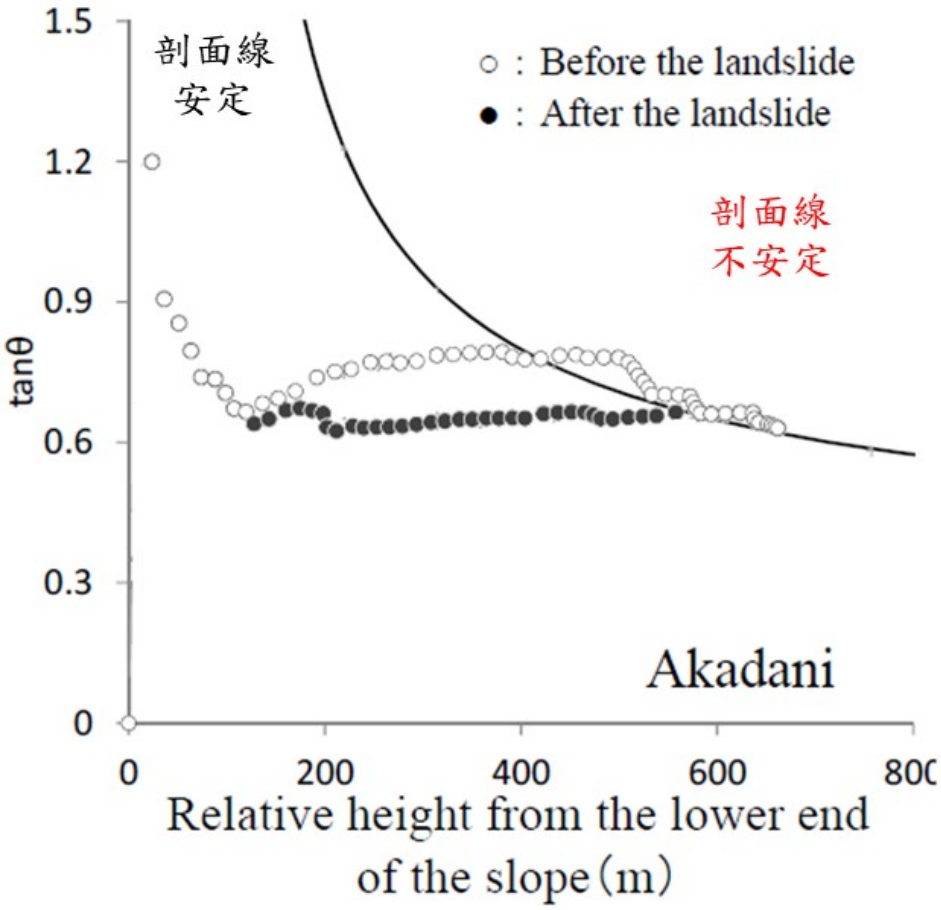


圖 2-5 赤谷地區崩塌穩定性分析成果 (Yoshino and Uchida 2019)

第三章 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發

本研究所提適用於整合型大規模崩塌發生與流出階段的模式，係以流固耦合理論為基本方程式，然後以材料質點法(Material point method, MPM)為數值方法來開發的模式。模式之發展與應用，係成大防災研究中心自2017年開始與荷蘭三角洲研究機構於降雨促崩現象的研究成果(Lee et al. 2019a; Lee et al. 2019b; 李威霖 2020)。本節後續將各別說明模式所採用之流固耦合理論與數值方法。

第一節 流固耦合理論

回顧 Bandara 等人(2016)和 Wang 等人(2018)以材料質點法應用於降雨引致崩塌的理論，本研究以固液耦合理論做為模式發展的基本方程式。其理論不考慮孔隙氣壓對固相與液相的影響，所以孔隙介質中氣相的壓力變化和質量傳輸不予以考慮。於固液耦合理論中，物理量下標所指為連續體的相(ph)，其連續體可分為固相(solid)和液相(liquid)，當物理量對應到不同相時，其下標非別以 s 和 l 代表固相和液相，而當連續體為混合物時，其物理量下標為 m。

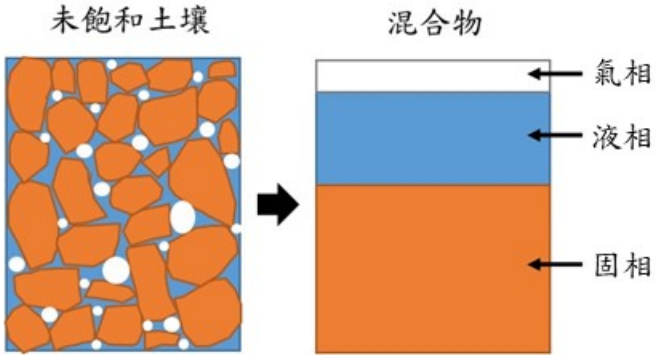


圖 3-1 連續體力學以固液汽三相表示未飽和土壤之示意圖

本研究假設孔隙介質的總體積為 V，並以 V_s 和 V_{void} 來分別表示固相體積和孔隙體積，其總體積可以表示為

$$V=V_s+V_{void}. \tag{3-1}$$

當孔隙內的液相體積為 V_l 時，其孔隙率 n 和飽和度 S_l 可以分別定義為

$$n=\frac{V_{void}}{V_s+V_{void}};\ S_l=\frac{V_l}{V_{void}}. \tag{3-2}$$

當各相的密度 ρ_{ph} 已知時，孔隙介質的總質量將為各相密度和體積乘積的總和值，其式表示為

$$m=\sum_{ph} m_{ph}=\sum_{ph}\rho_{ph}V_{ph}. \tag{3-3}$$

由於孔隙介質係由固液混合而成，其混合物質密度 ρ_m 定義為

$$\rho_m=(1-n)\rho_s+nS_l\rho_l. \tag{3-4}$$

本研究所提之固液耦合理論係基於以下幾點假設

(一)孔隙介質的溫度不隨時空改變(isothermal condition)

(二)固液兩相間的質量不互相交換

(三)孔隙介質的固相係由顆粒堆積而成，顆粒體積本身不可壓縮

(四)孔隙介質中孔隙率空間導數(∇n)假設很小

(五)孔隙介質中液相質量空間導數($\nabla nS_l\rho_l$)假設很小

基於上述定義與假設，固液耦合理論中，其液相和混合物的動量守恆方程式可以分別表示為

$$\rho_l\boldsymbol{a}_l=\nabla p_l-\frac{nS_l\mu_l}{k_lk_r}(\boldsymbol{v}_l-\boldsymbol{v}_s)+\rho_l\mathbf{b}, \tag{3-5}$$

$$(1-n)\rho_s\boldsymbol{a}_s+nS_l\rho_l\boldsymbol{a}_l=\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}+\rho_m\mathbf{b}, \tag{3-6}$$

其中 $\boldsymbol{a}_l$ 和 $\boldsymbol{a}_s$ 分別為液相和固相的加速度，$\boldsymbol{v}_l$ 和 $\boldsymbol{v}_s$ 分別為液相和固相的真實速度，p_l 則為孔隙水壓，$\boldsymbol{\sigma}$ 則為孔隙介質的總應力，μ_l 為液相的動黏滯

係數(dynamic viscosity)，k_l 為液相的內在滲透係數(intrinsic permeability)，k_r 為相對水力傳導係數以及 **b** 為物體力(body force)。基於(3-5)式，達西流速 $\boldsymbol{w}$ 定義如下

$$\boldsymbol{w} = S_l n(\boldsymbol{v}_l - \boldsymbol{v}_s) = \frac{k_l^{unsat}}{\rho_l g}(\nabla p_l + \rho_l \mathbf{b} - \rho_l \boldsymbol{a}_l), \tag{3-7}$$

式中的未飽和水力傳導係數為 $k_l^{unsat} = k_l^{sat} k_r$，其定義為飽和水力傳導係數 k_l^{sat} 和相對水力傳導係數 k_r 的乘積，其中飽和水力傳導係數的定義為 $k_l^{sat} = \rho_l g(k_l/\mu_l)$，$g$ 為重力常數。

固液耦合理論中，固相和液相的質量守恆方程式可以分別表示為

$$\frac{\partial(1-n)\rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot \left[(1-n)\rho_s \boldsymbol{v}_s\right] = 0, \tag{3-8}$$

$$\frac{\partial n S_l \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (n S_l \rho_l \boldsymbol{v}_l) = 0. \tag{3-9}$$

基於假設條件(四)，式(3-8)可以改寫為

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1-n)\nabla \cdot \boldsymbol{v}_s. \tag{3-10}$$

本研究假設液相為弱壓縮流體，流體密度的時間導函數可以表示為

$$\frac{1}{\rho_l}\frac{\partial \rho_l}{\partial t} = -\frac{1}{K_l}\frac{\partial p_l}{\partial t}, \tag{3-11}$$

其 K_l 中為液體的彈性模數。另外，本研究定義飽和度時間導函數與孔隙水壓時間導函數之間的關係為

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} = \frac{\partial S_l}{\partial s}\frac{\partial p_l}{\partial t}, \tag{3-12}$$

式中為 s 吸力(suction)，基於孔隙氣壓影響予以忽略的假設下，吸力為孔隙水壓的負值。當土體達全飽和條件時，飽和度對吸力的梯度($\partial S_l/\partial s$)將為零值。最後將(3-10)、(3-11)和(3-12)式代入式(3-9)中，並納入假設條件(五)，可得到孔隙水壓時間導函數

$$\frac{\partial p_l}{\partial t} = \frac{K_l}{\left(1 - \frac{K_l}{S_l}\frac{\partial S_l}{\partial s}\right)}\left[\frac{(1-n)}{n}\nabla \cdot \boldsymbol{v}_s + \nabla \cdot \boldsymbol{v}_l\right]. \tag{3-13}$$

孔隙介質的彈塑性構成法係用來描述材料彈塑性應變行為與作用力之間的關係式。本模式係採用 Bishop(1959)對未飽和土壤有效應力的概念，當對孔隙氣壓影響予以忽略的假設，其孔隙介質的有效應力$\boldsymbol{\sigma}'$可表示為

$$\boldsymbol{\sigma}'=\boldsymbol{\sigma}-S_l p_l \mathbf{I}, \tag{3-14}$$

其中 **I** 為單位向量矩陣。本研究假設崩塌發生前，邊坡土體變形遵守線性應力應變關係(彈性變形條件)，此時有效應力增加量$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}'$與應變增加量$\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}$的關係為

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}'=\mathbf{D}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}, \tag{3-15}$$

其中 **D** 為孔隙介質的剛性矩陣(the tangent matrix)。當崩塌發生後，邊坡土體變形將處於非線性的應力應變關係(本研究使用 Jaumann rate，Bandara et al. 2016)，此時有效應力增加量$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}'$與應變增加量$\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}$的關係則為

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}'=\mathbf{D}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{\sigma}'\mathbf{W}^{\mathrm{T}}-\mathbf{W}\boldsymbol{\sigma}', \tag{3-16}$$

式中第一項為孔隙介質變形導致的應力增加量，其第二和三項則為孔隙介質旋轉導致的應力增加量。式(3-16)中 **W** 為速度梯度張量，$\mathbf{W}^{\mathrm{T}}$則為速度梯度張量的轉置矩陣。

本研究以摩爾庫倫破壞準則(mohr coulomb criterion)做為崩塌發生與否的判斷依據。摩爾庫倫破壞準則的概念如圖 3-2，圖中藍線為破壞條件，此線的函數可以表示為

$$F=\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\sigma}_1'-\boldsymbol{\sigma}_3'\right)-\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\sigma}_1'+\boldsymbol{\sigma}_3'\right)\sin\phi+c\cos\phi, \tag{3-17}$$

其中c為凝聚力、ϕ為摩擦角。所以，當孔隙介質軸向應力條件$(\boldsymbol{\sigma}_1',\boldsymbol{\sigma}_2',\boldsymbol{\sigma}_3')$和材料性質已知的情況下，將其帶入式(3-17)，當 $F>0$ 代表其此時的應力條件已經達破壞條件，此時應力應變為非線性關係，必須透過(3-16)來計算有效應力，反之，則應力應變為線性關係，其有效應力係透過(3-15)來計算。

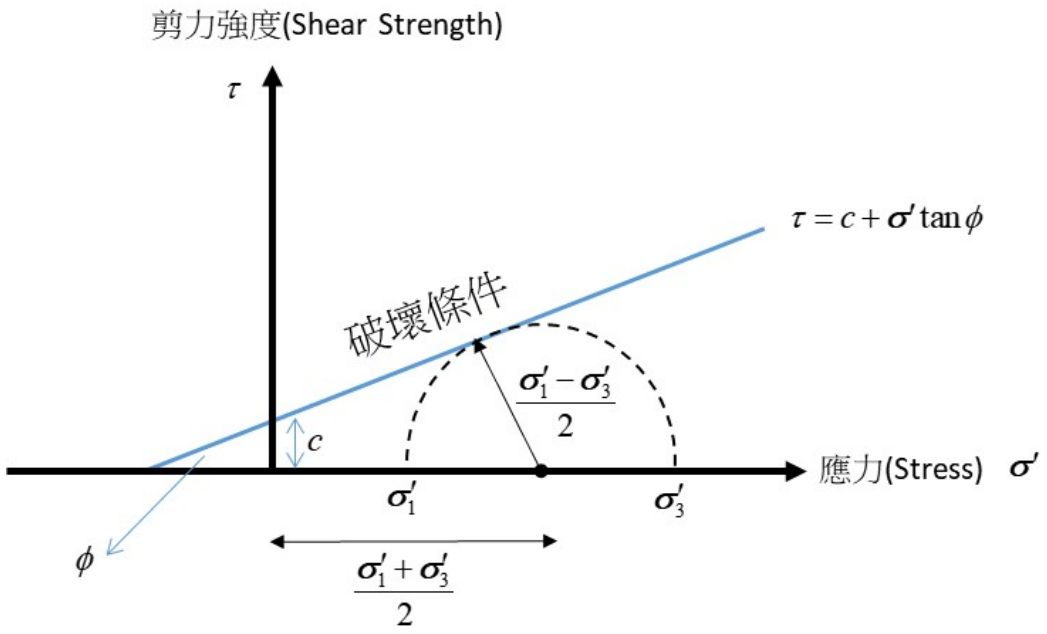


圖 3-2 摩爾庫倫破壞準則概念圖

未飽和水力傳導方程式係用來描述土壤吸力、飽和度與相對水力傳導係數等三者間變化的關係。本研究使用 van Genuchten 關係式(Genuchten, 1980)來描述土壤吸力與飽和度之間的關係，其式表示為

$$S_l = S_{min} + \left(S_{max} - S_{min}\right)\left[1+\left(\frac{s}{P_0}\right)^{\frac{1}{1-\lambda}}\right]^{-\lambda}, \qquad (3\text{-}18)$$

其中 P_0 為進氣壓(單位：公尺, m)，λ 為經驗參數，S_{max} 和 S_{min} 分別為飽和含水量和殘餘含水量。因為液相連續方程式求解時(式 3-13)需要用到飽和度對吸力的梯度($\partial S_l/\partial s$)，其函數即可依據式(3-18)求得為

$$\frac{\partial S_l}{\partial s} = \left(S_{max} - S_{min}\right)\left(\frac{-\lambda}{1-\lambda}\right)\left(\frac{1}{p_0}\right)\left[\frac{|s|^{\left(\frac{\lambda}{1-\lambda}\right)}}{p_0}\right]\left[1+\left(\frac{|s|}{p_0}\right)^{\left(\frac{1}{1-\lambda}\right)}\right]^{(-\lambda-1)}. \qquad (3\text{-}19)$$

而在飽和度與相對水力傳導係數之間關係的部分，本研究使用 Mualem 關係式(Mualem, 1976)，其式表示為

$$k_r\left(S_l\right) = \left(S_e\right)^{0.5}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{\lambda}}\right)^{\lambda}\right]^2, \qquad (3\text{-}20)$$

$$S_e = \frac{S_l - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}, \tag{3-21}$$

其 S_e 為有效飽和度。上述式(3-18)-(3-21)又可稱為 van Genuchten-Mualem 模式，為典型常用的非線性未飽和水力傳導方程式。本研究另外建置有線性未飽和水力傳導方程式，以利模式參數校正及特殊情境的探討，其線性未飽和水力傳導方程式組表示如下

$$S_l = 1 - a_v s, \tag{3-22}$$

$$\frac{\partial S_l}{\partial s} = -a_v, \tag{3-23}$$

$$k_r\left(S_l\right) = S_l^r; \quad r = 2 \sim 4, \tag{3-24}$$

其中，式(3-24)為 Hillel 的飽和度與相對水力傳導係數關係式(Hillel, 1971)。

第二節 材料質點法及其計算流程

一、 材料質點法的離散方法

材料質點法(Material Point Method, MPM)的概念係於背景網格(mesh)中配置材料點(material points, MPs)，如圖 3-3 所示。計算開始前，先說明背景網格節點與材料點之間的轉換方法。首先，依據背景網格節點的位置和網格內材料點的位置，得以計算一系列的形狀函數(linear shap fuction, $N^i(\mathrm{x})$)，其 i 為形狀函數數量的編號其 i 為形狀函數數量的編號。當材料點上的物理量要轉換到節點上時，或是節點上的物理量要轉換到材料點上時，其形狀函數為空間內插所需使用的函數。節點和材料點之間互相轉換的表示式為

$$\mathrm{x}^n\left(\mathrm{x}^n,t\right)=\sum_{i=1}^{N^p}\mathrm{x}^i N^i\left(\mathrm{x}^p,t\right), \tag{3-25}$$

$$\mathrm{x}^p\left(\mathrm{x}^p,t\right)=\sum_{i=1}^{N^n}\mathrm{x}^i N^i\left(\mathrm{x}^p,t\right), \tag{3-26}$$

其中的上標 n 和 p 分別為節點和材料點的總數量。

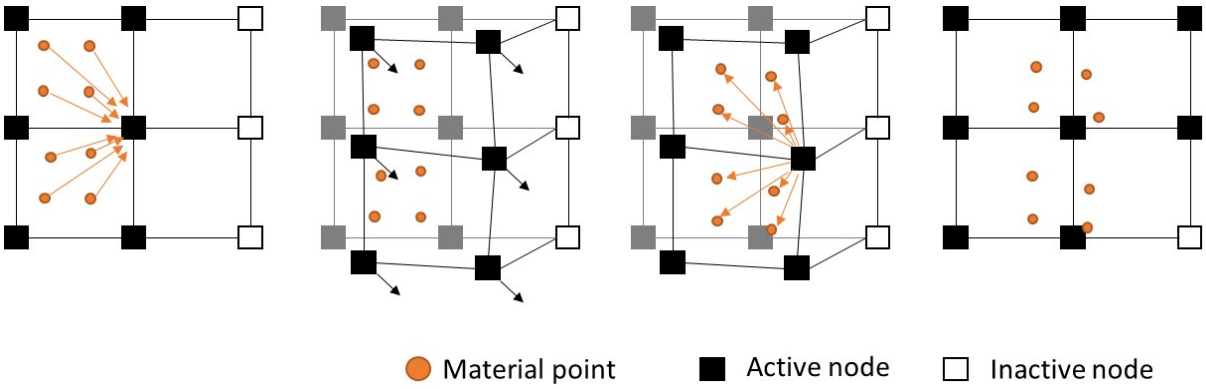


圖 3-3 材料質點法計算概念圖(modified from Hamad, 2014)

依據式(3-25)，當使用鄰近材料點上的速度來計算節點的速度時，其固相和液相速度的計算式分別為

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^n\left(\mathrm{x}^n,t\right)=\sum_{i=1}^{N^p}\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^i(t)N^i\left(\mathrm{x}^p,t\right), \tag{3-27}$$

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}^{n}\left(\mathrm{x}^{n},t\right)=\sum_{i=1}^{N^{p}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}^{i}\left(t\right)N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right), \tag{3-28}$$

同理，節點上各相的質量也係依據鄰近材料點上的各相質量來計算，其各相的計算式為

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}^{n}\left(\mathrm{x}^{n},t\right)=\sum_{i=1}^{N^{p}}\left[1-n^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)\right]\rho_{\mathrm{s}}N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)V^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right), \tag{3-29}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{l}}^{n}\left(\mathrm{x}^{n},t\right)=\sum_{i=1}^{N^{p}}n^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)S_{\mathrm{l}}^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)\rho_{\mathrm{l}}N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)V^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right). \tag{3-30}$$

透過式(3-25)-(3-30)的算式，計算開始時，即能將材料點上的固液相速度與質量轉換到節點上。上述即為節點和材料點之間的轉換方式。

材料質點法中，液相動量方程式(3-5)的離散係透過殘餘權重法，其離散式為

$$\tilde{\boldsymbol{M}}_{w}^{n}\cdot\boldsymbol{a}_{w}^{n}=\boldsymbol{F}_{w}^{ext}+\boldsymbol{F}_{w}^{grav}-\boldsymbol{F}_{w}^{int}-\boldsymbol{Q}_{w}^{n}\cdot\left(\boldsymbol{v}_{w}^{n}-\boldsymbol{v}_{s}^{n}\right), \tag{3-31}$$

式中，$\tilde{\boldsymbol{M}}_{w}^{n}$為液體的質量，$\boldsymbol{F}_{w}^{grav}$為液體的物體力，$\boldsymbol{F}_{w}^{ext}$和$\boldsymbol{F}_{w}^{int}$分別液體的外部力和內部力，$\boldsymbol{Q}_{w}^{n}$為液體的滲流拖曳力。各別可以表示如下：

$$\tilde{\boldsymbol{M}}_{w}^{n}\left(\mathrm{x}^{n},t\right)=\sum_{i=1}^{N^{p}}\rho_{w}N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)V^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right), \tag{3-32}$$

$$\boldsymbol{F}_{w}^{ext}=\int_{S^{p}}p_{w}^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)dS, \tag{3-33}$$

$$\boldsymbol{F}_{w}^{grav}=\sum_{i=1}^{N^{p}}\rho_{w}V^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)\cdot\mathbf{b}, \tag{3-34}$$

$$\boldsymbol{F}_{w}^{int}=\sum_{i=1}^{N^{p}}\nabla N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)p_{w}^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)V^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right), \tag{3-35}$$

$$\boldsymbol{Q}_{w}^{n}=\sum_{i=1}^{N^{p}}n^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)S_{w}^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)\left[\frac{k_{r}^{w,i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)k^{w}}{\rho_{w}g}\right]^{-1}N^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right)V^{i}\left(\mathrm{x}^{p},t\right). \tag{3-36}$$

同理，混合物動量方程式(3-6)經代入式(3-5)和式(3-14)可得到的離散式為

$$\boldsymbol{M}_{s}^{n}\cdot\boldsymbol{a}_{s}^{n}=\boldsymbol{F}_{s}^{ext}+\boldsymbol{F}_{s}^{grav}-\boldsymbol{F}_{s}^{int}+\boldsymbol{Q}_{m}^{n}\cdot\left(\boldsymbol{v}_{w}^{n}-\boldsymbol{v}_{s}^{n}\right), \tag{3-37}$$

式中，$\boldsymbol{F}_{s}^{grav}$為混合物的物體力，$\boldsymbol{F}_{m}^{ext}$和$\boldsymbol{F}_{m}^{int}$分別混合物的外部力和內部力，

$\boldsymbol{Q}_m^n$為混合物的滲流拖曳力。各別可以表示如下：

$$\boldsymbol{F}_m^{ext} = \int_{S^p} \left\{ \boldsymbol{\sigma}_s^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) + \left[1 - n^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \right] S_w^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) p_w^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \right\} N^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) dS , \tag{3-38}$$

$$\boldsymbol{F}_s^{grav} = \sum_{i=1}^{N^p} \left[1 - n^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \right] \rho_s V^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) N^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \cdot \mathbf{b} , \tag{3-39}$$

$$\boldsymbol{F}_m^{int} = \sum_{i=1}^{N^p} \nabla N^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \left\{ \boldsymbol{\sigma}_s^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) + \left[1 - n^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \right] S_w^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) p_w^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \right\} V^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) , \tag{3-40}$$

$$\boldsymbol{Q}_m^n = \sum_{i=1}^{N^p} \left[n^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) S_w^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) \right]^2 \left[\frac{k_r^{w,i} \left(\mathrm{x}^p, t \right) k^w}{\rho_w g} \right]^{-1} N^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) V^i \left(\mathrm{x}^p, t \right) . \tag{3-41}$$

材料質點法對時間項離散處理，係顯示歐拉法(Explicit Euler Method)，任一新的時間可表示為$t^{k+1} = t^k + \Delta t$，其中t^k和Δt分別表示計算時間和時間距。因此，固液相任一新時間的速度和位置可透過下式計算

$$\boldsymbol{v}_\mathrm{l}^{k+1} = \boldsymbol{v}_\mathrm{l}^k + \boldsymbol{a}_\mathrm{l}^k \Delta t, \boldsymbol{v}_\mathrm{s}^{k+1} = \boldsymbol{v}_\mathrm{s}^k + \boldsymbol{a}_\mathrm{s}^k \Delta t , \tag{3-41}$$

$$\mathrm{x}_\mathrm{l}^{k+1} = \mathrm{x}_\mathrm{l}^k + \boldsymbol{v}_\mathrm{l}^{k+1} \Delta t, \mathrm{x}_\mathrm{s}^{k+1} = \mathrm{x}_\mathrm{s}^k + \boldsymbol{v}_\mathrm{s}^{k+1} \Delta t . \tag{3-42}$$

二、 材料質點法的計算流程

當節點和材料點之間的轉換方法與基本方程式的離散方法確認後，本研究參照 Sulsky 等人(1994, 1995, 2007)所提之材料質點法的計算流程，說明本研究所提模式的計算流程：

(一)當計算開始時，$t = 0$，將初始物理量配置在材料點上，初始物理量包括位置、速度、應力、孔隙水壓、飽和度等等。

(二)依據材料點的位置($\mathrm{x}^{p,k}$)和背景網格的形狀，形狀函數($N^{p,k}$)和形狀函數梯度($\nabla N^{p,k}$)得以計算。形狀函數為 0 到 1 的函數。

(三)接著，依據液相動量方程式的離散式(3-31)求解節點上液相的加速度($\boldsymbol{a}_\mathrm{l}^{n,k}$)。其中，節點上固相速度($\boldsymbol{v}_\mathrm{s}^{n,k}$)和液相速度($\boldsymbol{v}_\mathrm{l}^{n,k}$)可分

別以式(3-27)和式(3-28)求得。以及節點上液體的質量、外部力、物體力、內部力和滲流拖曳力可分別以式(3-32)、(3-33)、(3-34)、(3-35)和(3-36)求得。

(四)然後，依據混合物動量方程式的離散式(3-37)求解節點上固相的加速度($\boldsymbol{a}_{\mathrm{s}}^{n,k}$)。其中，節點上固相速度($\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^{n,k}$)和液相速度($\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}^{n,k}$)可分別以式(3-27)和式(3-28)求得。其中，節點上固體質量可以式(3-29)求得，而混合物的外部力、物體力、內部力和滲流拖曳力分別可透過式(3-38)、式(3-39)、式(3-40)和(3-41)求得。

(五)材料點上新一個時刻(k+1)的液固體速度可透過液固體的加速度和式(3-41)求解，其計算如

$$\boldsymbol{v}_w^{p,k+1}=\boldsymbol{v}_w^{p,k}+\Delta t\sum_{i=1}^{N^n}\boldsymbol{a}_w^{i,k}N^{p,k},\ \boldsymbol{v}_s^{p,k+1}=\boldsymbol{v}_s^{p,k}+\Delta t\sum_{i=1}^{N^n}\boldsymbol{a}_s^{i,k}N^{p,k}, \tag{3-43}$$

此時，節點上新一個時刻(k+1)的液固體速度可透過材料點上新一個時刻(k+1)的液固體速度轉換得到，計算式分別為

$$\boldsymbol{v}_w^{n,k+1}=\frac{1}{\boldsymbol{M}_w^{n,k}}\sum_{i=1}^{N^p}n^{p,k}S_w^{p,k}\rho_w V^{p,k}N^{p,k}\boldsymbol{v}_w^{p,k+1}. \tag{3-44}$$

$$\boldsymbol{v}_s^{n,k+1}=\frac{1}{\boldsymbol{M}_s^{n,k}}\sum_{i=1}^{N^p}\left(1-n^{p,k}\right)\rho_s V^{p,k}N^{p,k}\boldsymbol{v}_s^{p,k+1}. \tag{3-45}$$

(六)接著，材料點上固相體積應變率($\dot{\varepsilon}_s^{p,k}=\Delta\varepsilon_{\mathrm{s}}^{p,k}/\Delta t$)，係依據新一個時刻節點上的固相速度來計算，計算式為

$$\frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{s}}^{p,k}}{\Delta t}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N^n}\nabla N^{p,k}\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{i},k+1}+\left(\nabla N^{p,k}\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{i},k+1}\right)^T. \tag{3-46}$$

同理，材料點上液體體積應變率可透過以下求得

$$\dot{\varepsilon}_w^{p,k}=\frac{\Delta\varepsilon_w^{p,k}}{\Delta t}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N^n}\nabla N^{p,k}\boldsymbol{v}_w^{\mathrm{i},k+1}+\left(\nabla N^{p,k}\boldsymbol{v}_w^{\mathrm{i},k+1}\right)^T. \tag{3-47}$$

(七)此時，可將已知的應力條件代入摩爾庫倫破壞條件，式(3-17)，判釋此時邊坡是否達崩塌的破壞條件。若為崩塌發生前(應力應變遵循彈性變形)，新一個時刻材料點上的有效應力計算式為

$$\boldsymbol{\sigma}'^{p,k+1} = \boldsymbol{\sigma}'^{p,k} + \mathbf{D} : \Delta\varepsilon_{\mathrm{s}}^{p,k}. \tag{3-48}$$

若為崩塌發生後(應力應變遵循非線性變形)，新一個時刻材料點上的有效應力計算式為

$$\boldsymbol{\sigma}'^{p,k+1} = \boldsymbol{\sigma}'^{p,k} + \Delta t\left(\boldsymbol{\sigma}'^{p,k}\cdot\mathbf{W}^{p,k} - \mathbf{W}^{p,k}\cdot\boldsymbol{\sigma}'^{p,k}\right) + \mathbf{D} : \Delta\varepsilon_{\mathrm{s}}^{p,k}. \tag{3-49}$$

式中 $\mathbf{W}^{p,k}$ 為材料點的速度梯度張量，其計算依據新一個時刻節點上的固相速度求得，其式為

$$\mathbf{W}^{p,k} = \sum_{i=1}^{N^n} \nabla N^{p,k}\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{i},k+1} - \left(\nabla N^{p,k}\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{i},k+1}\right)^T. \tag{3-50}$$

(八)然後，依據液相連續方程式(3-13)，材料點上孔隙水壓的增加量可以下式求得

$$\Delta p_{\mathrm{l}}^{p,k} = \Delta t\frac{K_{\mathrm{l}}}{\left(1-\dfrac{K_{\mathrm{l}}}{S_{\mathrm{l}}^{p,k}}\dfrac{\partial S_{\mathrm{l}}^{p,k}}{\partial s^{p,k}}\right)}\left[\frac{\left(1-n^{p,k}\right)}{n^{p,k}}tr\left(\dot{\varepsilon}_s^{p,k}\right) + tr\left(\dot{\varepsilon}_w^{p,k}\right)\right]. \tag{3-51}$$

因此，新一個時刻材料點的孔隙水壓計算為 $p_{\mathrm{l}}^{p,k+1} = p_{\mathrm{l}}^{p,k} + \Delta p_{\mathrm{l}}^{p,k}$ 。

(九)當新一個時刻材料點的孔隙水壓($p_{\mathrm{l}}^{p,k+1}$)已知時，將可依據其來推估新一個時刻材料點的飽和度($S_{\mathrm{l}}^{p,k+1}$)。依據式(3-19)和(3-21)，新一個時刻材料點的有效飽和度為

$$S_e^{p,k+1} = \left[1+\left(\frac{p_{\mathrm{l}}^{p,k+1}}{P_0}\right)^{\frac{1}{1-\lambda}}\right]^{-\lambda} \quad \text{for } p_{\mathrm{l}}^{p,k+1} > 0. \tag{3-52}$$

新一個時刻材料點飽和度為 $S_{\mathrm{l}}^{p,k+1} = S_e^{p,k+1}\left(S_{\max} - S_{\min}\right) + S_{\min}$ 。依據式(3-20)，新一個時刻材料點的相對水力傳導係數為

$$k_r^{p,k+1} = \left(S_e^{p,k+1}\right)^{0.5}\left[1-\left(1-S_e^{p,k+1\frac{1}{\lambda}}\right)^{\lambda}\right]^2. \quad (3\text{-}53)$$

所以，新一個時刻材料點的飽和度與吸力導數據式(3-19)可寫為

$$\frac{\partial S_l^{p,k+1}}{\partial p_l^{p,k+1}} = \left(S_{\max}-S_{\min}\right)\left(\frac{-\lambda}{1-\lambda}\right)\left(\frac{1}{p_0}\right)\left[\frac{p_l^{p,k+1}\left(\frac{\lambda}{1-\lambda}\right)}{p_0}\right]\left[1+\left(\frac{p_l^{p,k+1}}{p_0}\right)^{\left(\frac{1}{1-\lambda}\right)}\right]^{(-\lambda-1)} \quad (3\text{-}54)$$

(十)再來，依據固相連續方程式(3-9)來計算材料點的孔隙率增加量，其式為

$$\Delta n^{p,k} = \Delta t\left(1-n^{p,k}\right)tr\left(\dot{\varepsilon}_s^{p,k}\right). \quad (3\text{-}55)$$

所以，新一個時刻材料點的孔隙率為$n^{p,k+1} = n^{p,k} + \Delta n^{p,k}$。新一個時刻的固相體積 ($V_s^{p,k+1}$)則依據固體積應變率來計算，其式為

$$V_s^{p,k+1} = V_s^{p,k}\left(1+tr\left(\Delta\varepsilon_s^{p,k}\right)\right). \quad (3\text{-}56)$$

以及新一個時刻材料點的位置可依據節點的固體速度來計算

$$\mathrm{x}^{p,k+1} = \mathrm{x}^{p,k} + \Delta t\sum_{i=1}^{N^n} \boldsymbol{v}_s^{i,k+1} N^{p,k}. \quad (3\text{-}57)$$

(十一) 最後，回到步驟(一)做下一輪的計算，此時新一個時刻材料點上的所有物理量將做為下一個時刻計算的初始條件。

透過上述的離散方程式與計算流程，即能以材料質點法來發展是用於大規模崩塌發生與流出階段的整合型模式。

第三節 PLAXIS 和 Anura 的模擬結果比較與驗證

一、 模擬條件設計

本研究設定高度為 1.05m 和寬度 0.05m 的計算區域，並配置三角形網格，且網格最大長度設定為 0.05m，計算網格與配置如圖 3-4-(A)。未飽和入滲過程中，假設土體僅有垂直方向的變形，因此兩側給定 x 方向位移固定的邊界條件，和於底部給予 x 與 y 方向位移固定的邊界條件，如圖 3-4-(B)。頂部的入滲邊界條件有兩種，第一種為孔隙水壓固定為零的邊界條件，第二種為入滲速率固定的邊界條件，入滲速率為 $5x10^{-4}$ m/s，如圖 3-4-(C)。初始條件部分，假設底部孔隙水壓的初始值皆為 0 kPa，且初始狀態下孔隙水體為靜止，此時砂柱的吸力以孔隙水壓的負值做表示，且其分布呈靜水壓分布，於頂部得到吸力的最大值 -9.876 kPa，如圖 3-4(D)。

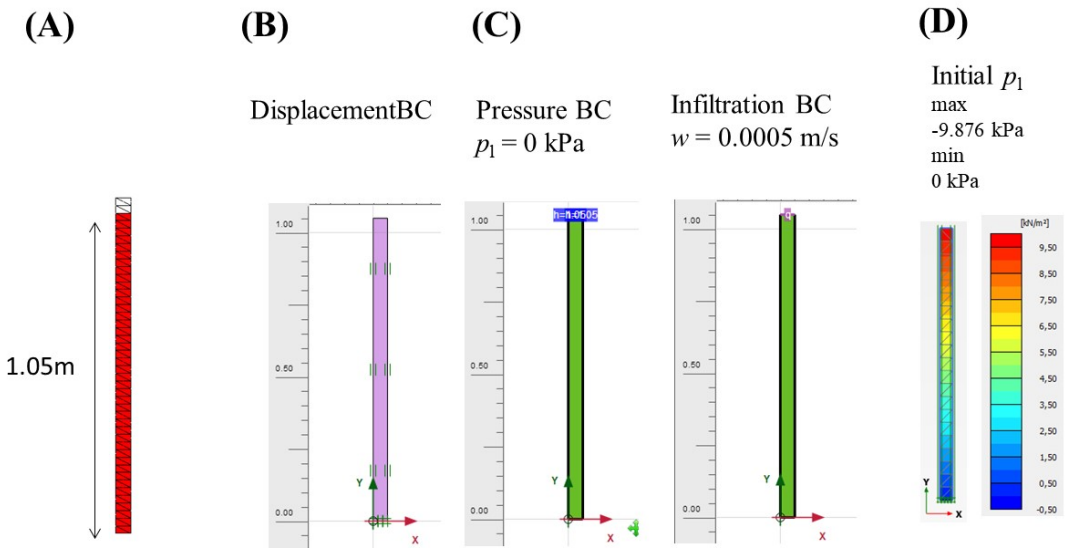


圖 3-4 Anura 與 PLAXIS 比較模擬條件設計：(A)計算網格、(B)應變邊界條件、(C)滲流邊界條件和(D)孔隙水壓初始條件

Anura 與 PLAXIS 模擬使用假設的材料參數，於 van Genuchten (1980) 的土壤水分特性曲線參數中，給定 $S_{min}=0.23$、$S_{max}=1$、$P_0=22.295$ kPa 和 $\lambda=0.671$。因為相對水力傳導係數和氣體相對水力傳導係數所需的參數 λ 一致，因此也給定 0.671，土壤水分特性曲線和相對水力傳導係數曲線繪製結果如圖 3-5。孔隙率、比重、楊氏模數(E)和柏松比(ν)則分別為 0.33、2.7、5000 kPa 和 0。最後，將模擬使用的材料參數彙整如表 3-1 所示。

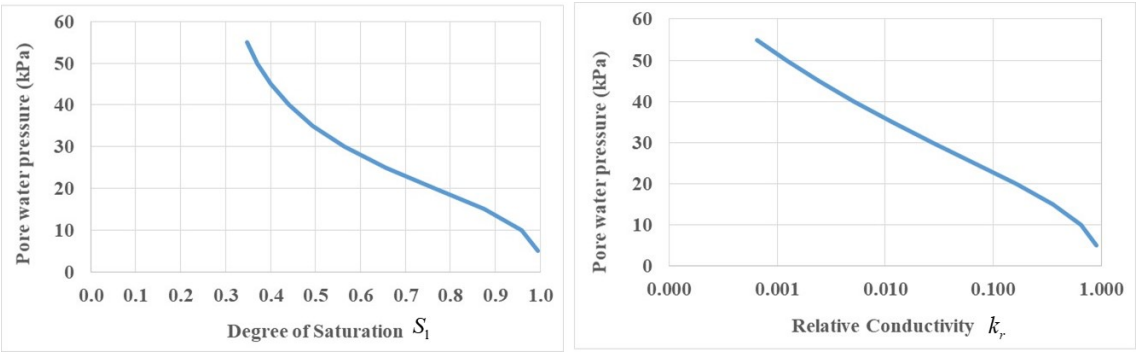


圖 3-5 Anura 與 PLAXIS 模擬之土壤水分特性曲線和相對水力傳導係數

表 3-1 Anura 與 PLAXIS 模擬使用材料參數表

材料參數			
殘餘飽和度 S_{min} (m^3/m^3)	0.23	孔隙率 n	0.33
全飽和飽和度 S_{max} (m^3/m^3)	1	比重 ρ_s/ρ_w	2.7
進氣壓 P_0 (kPa)	22.295	楊氏模數 E (kPa)	5000
實驗迴歸參數 λ	0.671	柏松比 ν	0
飽和水力傳導係數 k_l^{sat} (m/s)	2×10^{-4}		

二、 模擬結果比較與驗證

本研究透過 PLAXIS 來率定 Anura 模式對未飽和入滲現象的模擬。首先係以固定孔隙水壓為頂部邊界的模擬結果，分別取高度 0.1m、0.3m、0.5m、0.7m 和 0.9m 處孔隙水壓隨時間變化的歷線，並繪製如圖 3-6，如圖以實線來表示 PLAXIS 的模擬結果，和以中空圓圈來表示 Anura 的模擬結果，於此圖中孔隙水壓的正值代表吸力，意即土體的模擬初始狀態為未飽和條件。模擬可以看出，一開始就出現快速的孔隙水壓下降，這係因為邊界入滲速度的變化由一開始的快然後逐漸轉變至定值，此時吸力下降的現象先從土體較高處發生。隨著入滲濕鋒的發展，底部吸力大約於第 6s 開始下降，隨著孔隙水壓從正值轉為負值，代表土體處於填水階段，地下水位開始持續上升，直到約 30s 處，土體達到全飽和條件，因此各觀測點得到靜水壓力值。從 Anura 和 PLAXIS 的比較，兩者之間有相當的一致性。

以固定入滲速度做為邊界條件的模擬結果如圖 3-7，同樣係取高度 0.1m、0.3m、0.5m、0.7m 和 0.9m 處孔隙水壓歷線做比較，圖中實線代表 PLAXIS 和中空圓圈代表 Anura。與固定孔隙水壓邊界的模擬結果比較，因為邊界的入滲速度已被控制為定值，因此孔隙水壓下降的速度較為緩和，且各位置的下降斜率相似。孔隙水壓從正值轉為負值的時間較晚，大約發生在第 12s，然後一樣進入填水階段，相同地孔隙水壓隨著地下水上升而增加，直到約 40s 處，土體達到全飽和條件，因此各觀測點得到靜水壓力值。從 Anura 和 PLAXIS 的比較，使用入滲邊界條件也能得到相當一致性的結果。

邊坡降雨入滲現象的模擬，孔隙水壓和入滲速度是兩個最常用到的邊界條件，孔隙水壓條件常用於邊坡兩側的地下水位條件，或是地表的積水條件(Ponding condi-tion)，而入滲速度條件則常用來反應邊坡坡面的降雨歷程。因為 Anura 可得到與 PLAXIS 近似的結果，本研究亦可期待 Anura 於降雨誘發邊坡現象的模擬結果。

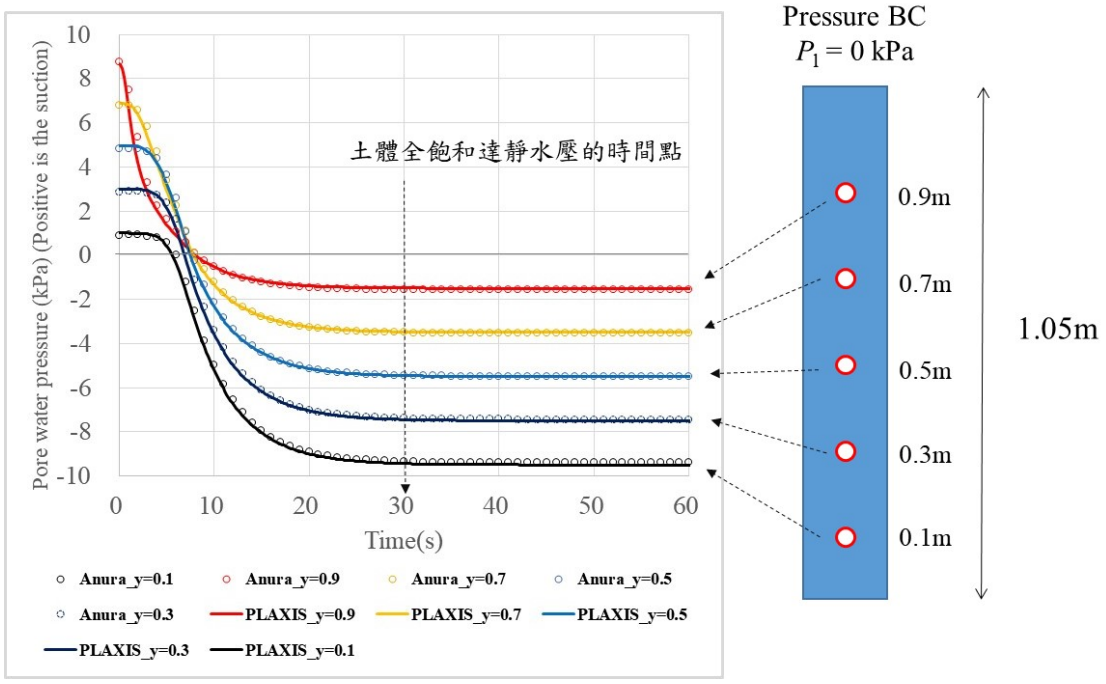


圖 3-6 Anura 與 PLAXIS 模擬未飽和入滲比較-頂部邊界條件為孔隙水壓

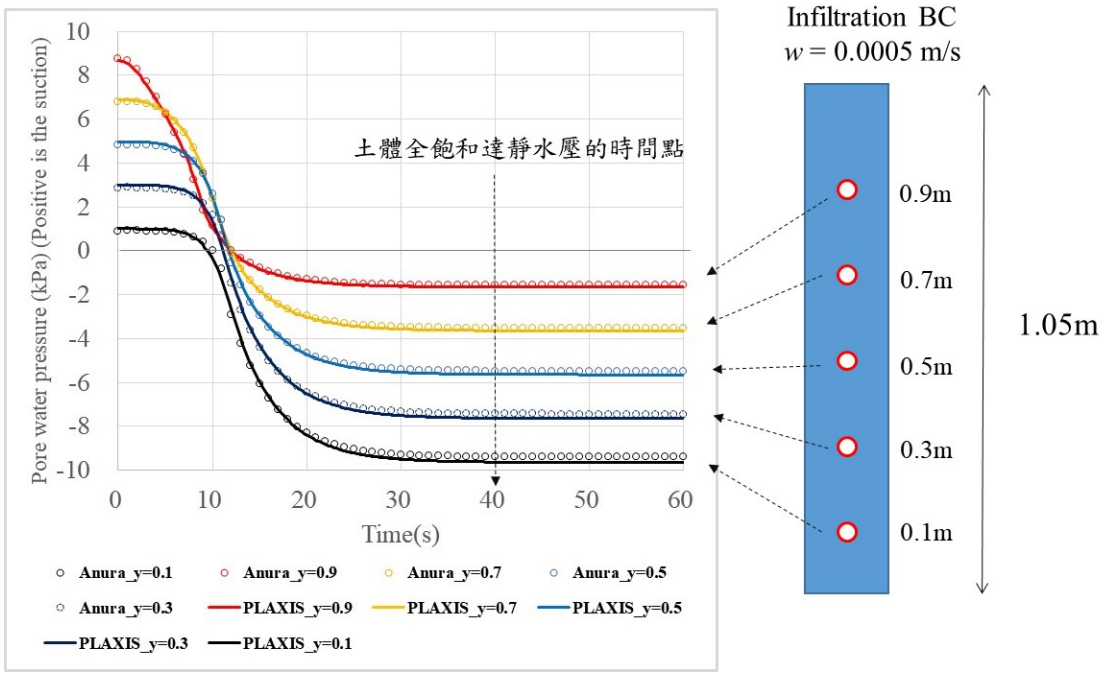


圖 3-7 Anura 與 PLAXIS 模擬未飽和入滲比較-頂部邊界條件為入滲速率

第四章 研究區域基本資料蒐集

第一節 研究區域基本資料

本研究選定位於高雄市桃源區寶來里之荖濃溪右岸之坡面為研究區域(圖 4-1)，分析面積約 252 公頃。

研究區域高程分布於 371 公尺到 1269 公尺(圖 4-2)，主要坡度為六級坡(55%-100%)，佔研究區域 54.02%(表 4-1)，從坡度分布圖(圖 4-3)可以看到，區域內除部分為河階地坡度較緩外，幾乎都在五級坡以上，根據李宗聯、陳天健(2014)分析成果，大規模崩塌區之發生坡度至少 20 度以上，本研究區符合此基本條件。而坡向則以東、東南向為主，所佔比例超過 50%，坡向主要朝向荖濃溪河道。

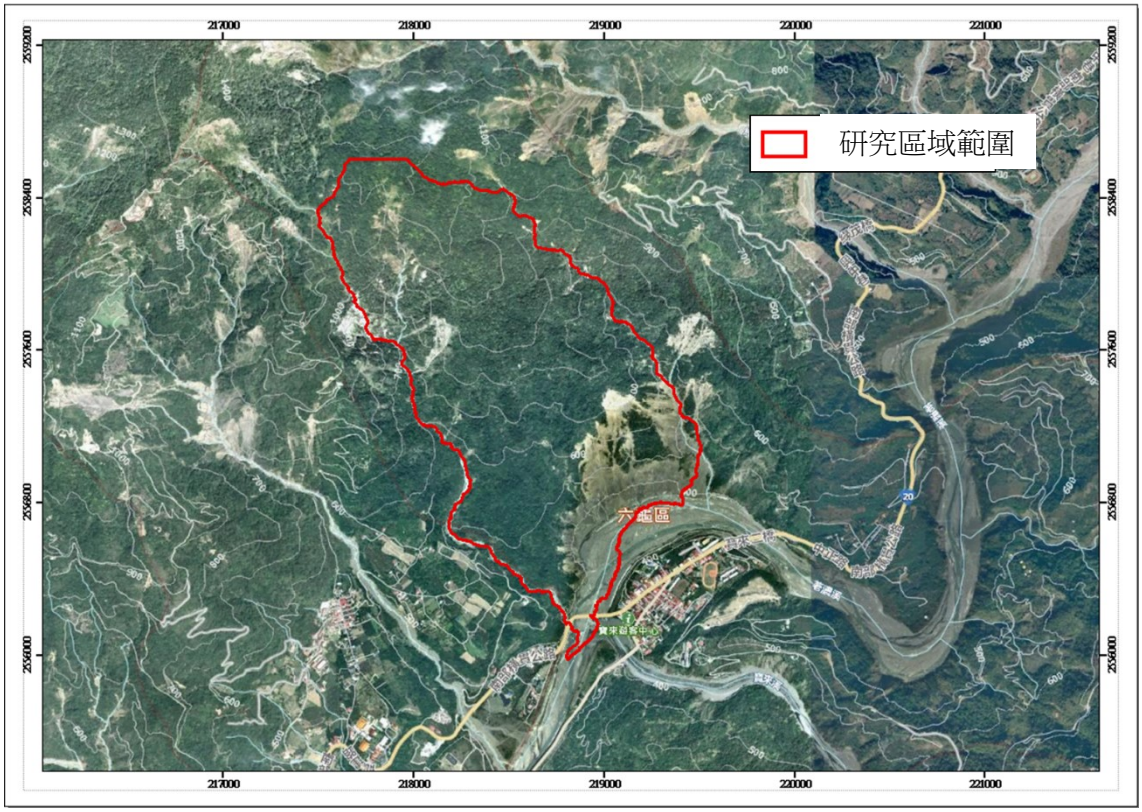


圖 4-1 研究區域範圍圖

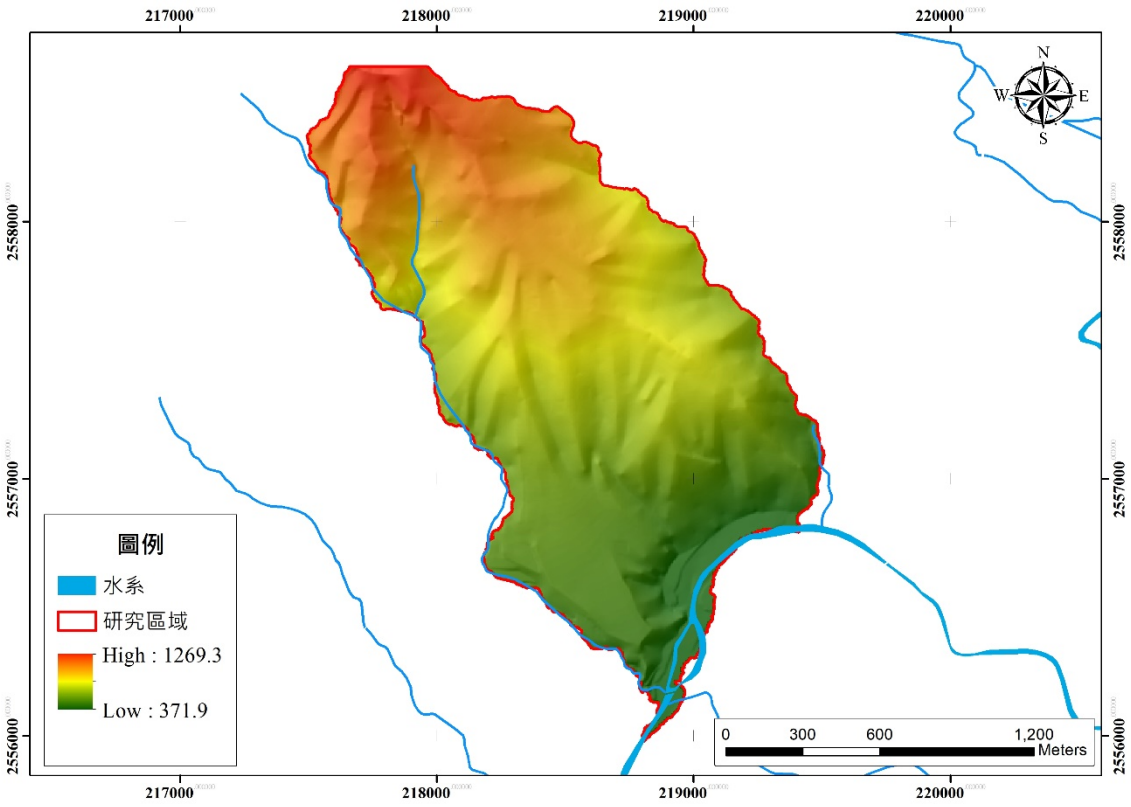


圖 4-2 研究區域地形分布圖

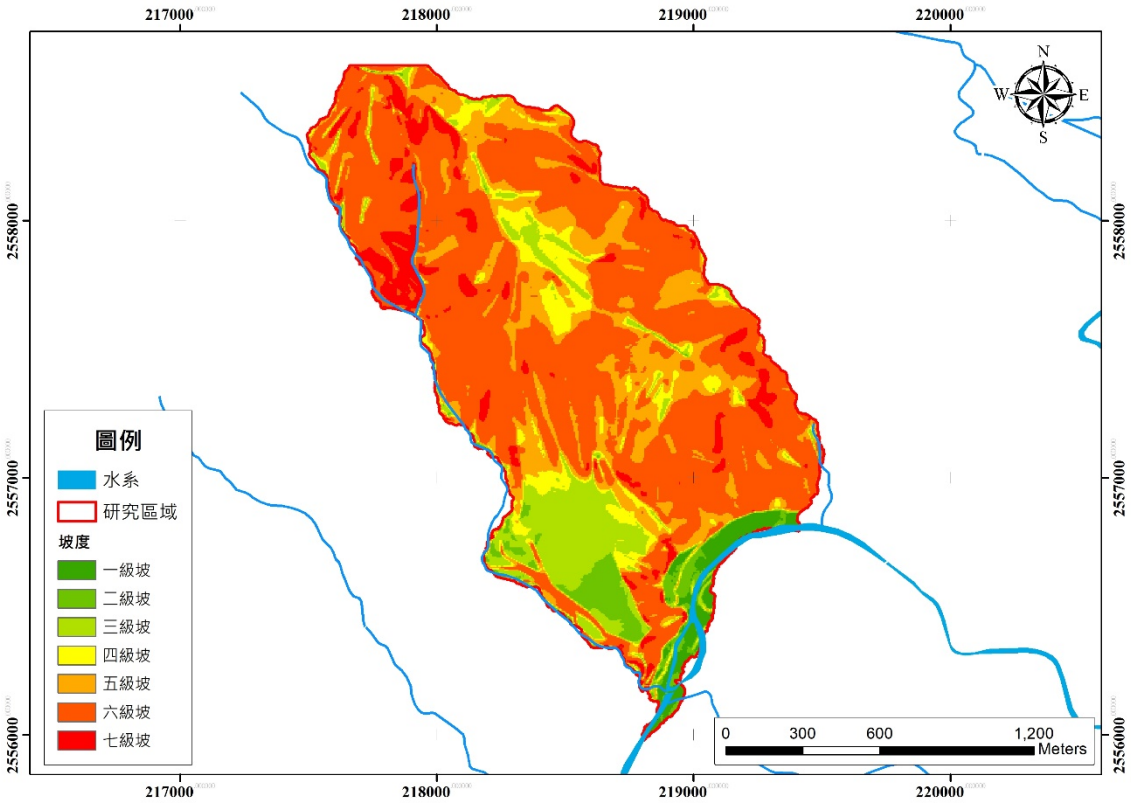


圖 4-3 研究區域坡度分布圖

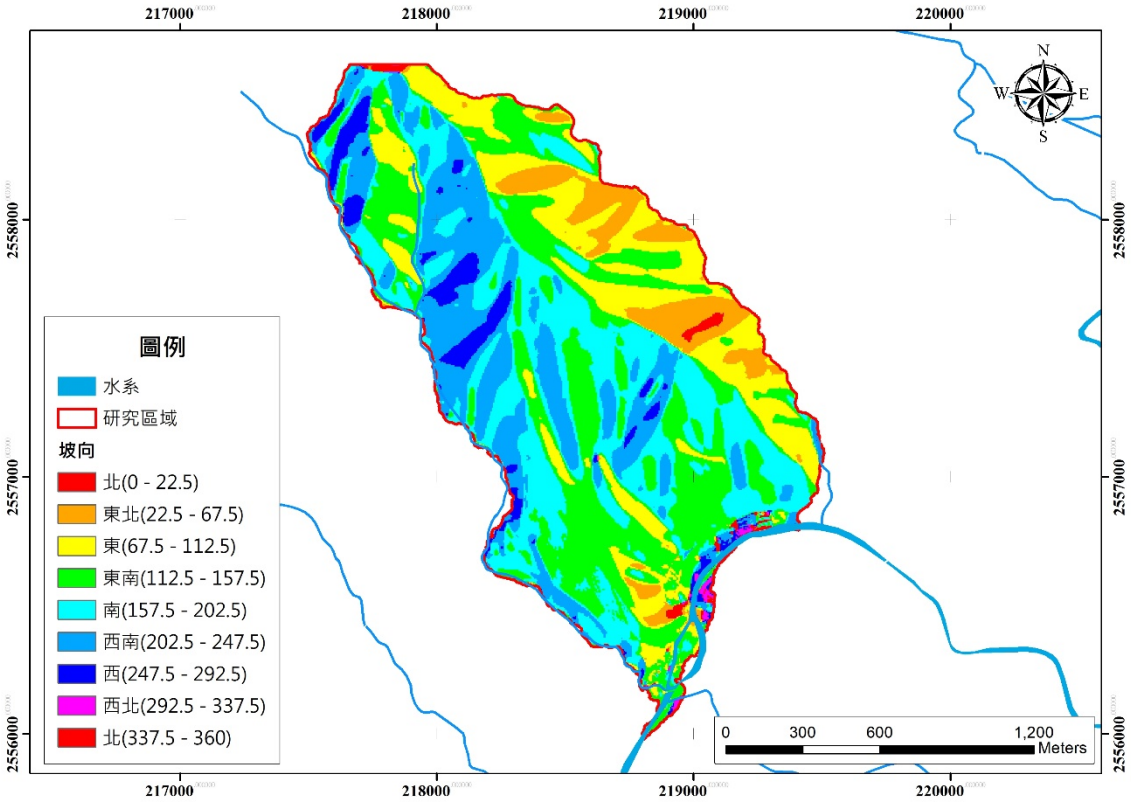


圖 4-4 研究區域坡向分布圖

表 4-1 研究區域地形分析成果表

坡度分級(%)	面積(公頃)	所佔百分比(%)	坡向	面積(公頃)	所佔百分比(%)
一級坡(0-5)	7.41	2.93	北	1.82	0.72
二級坡(5-15)	9.20	3.64	東北	17.26	6.82
三級坡(15-30)	23.07	9.12	東	43.41	17.16
四級坡(30-40)	17.17	6.79	東南	68.89	27.23
五級坡(40-55)	44.74	17.69	南	62.44	24.68
六級坡(55-100)	136.66	54.02	西南	47.21	18.66
七級坡(100 以上)	14.72	5.82	西	11.01	4.35
			西北	0.93	0.37
合計	**252.97**	**100**	**合計**	**252.97**	**100**
(資料來源:本計畫統計)					

而本區之地質分區(圖 4-6)，以長枝坑層為主，長枝坑層以青色或青灰色細粒砂岩或泥質砂岩與黑色頁岩所形成之帶狀互層為主，細粒砂岩厚約 10~80 公分較厚者常具有圓丘狀之交錯層理，成巨波外型之透鏡體，砂岩體側向之連續性不佳。在互層中偶爾夾有數公尺至十公尺後之厚層細砂岩，且具有平行紋理，常見漣痕、生痕化石、交錯層理侵蝕面、褐色鐵質結核及碳化物之細片。長枝坑層因屬淺海沉積，砂頁岩之介面較為模糊，常見圓丘狀交錯層理。而本區坡趾有土壟灣斷層及高中斷層通過。

而長枝坑層因屬砂頁岩互層為主，其比重約 2.60~2.61，凝聚力 0.15-0.45kgf/cm²，靜摩擦角 27.5 度至 32.5 度之間，透水係數則為 1.12×10^{-6} m/sec 到 5.0×10^{-6} m/sec 間。

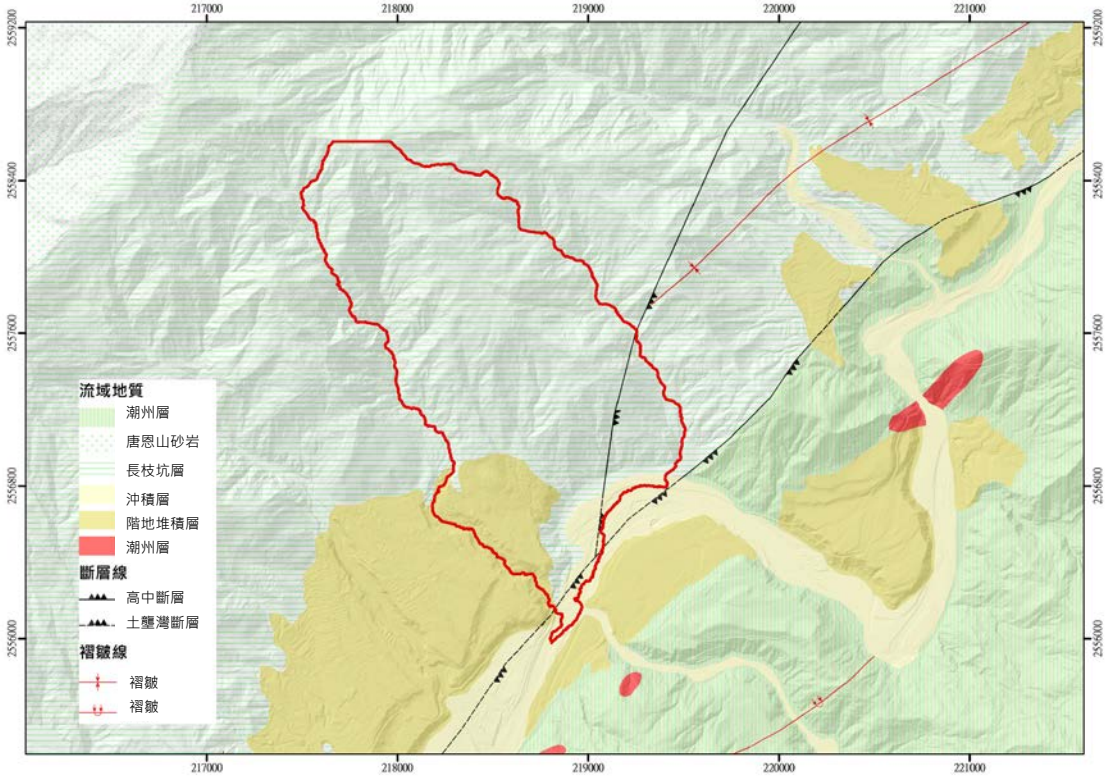


圖 4-6 研究區域地質分布圖

第二節 研究區域影像資料

針對研究區域進行歷史影像資料之蒐集，透過影像來追蹤其變化情形，目前已蒐集研究區域各期影像，包含 2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2009 年及 2017 年，成果如圖 4-7 至圖 4-13 所示，各期影像變化說明如下

一、 2004年研究區域狀況

在 2004 年時，研究區域內並無明顯裸露區，僅研究區右側河道出口處有一處崩塌發生，而荖濃溪主深槽距離研究區域坡趾尚有距離。



圖 4-7 研究區域 2004 年衛星影像

二、 2005年研究區域狀況

而到了 2005 年坡面靠坡趾處開始出現零星崩塌，荖濃溪河道主深槽開始往坡趾處靠近，由於本區為河道相對較寬處，因此可以觀察到深槽在此區的蜿蜒現象。



圖 4-8 研究區域 2005 年衛星影像

三、 2006年研究區域狀況

2006 年時，坡面本身差異不大，但可以看到研究區域坡趾處受到荖濃溪主深槽靠近之影響，出現多處側岸崩塌，同時也可以看到荖濃溪河道在研究區域坡趾段甚至有辮狀水系的出現。



圖 4-9 研究區域 2006 年衛星影像

四、 2007年研究區域狀況

2007 年時可以看到坡趾側岸侵蝕的持續發育，而荖濃溪主深槽的向下切割更為明顯，灘地上已無明顯洪水痕跡。



圖 4-10 研究區域 2007 年衛星影像

五、 2008年研究區域狀況

2008 年受到卡梅姬颱風之影響，可以在影像上看到坡趾側岸侵蝕區的擴大，未崩塌區域也可看到多處蝕溝之發展。荖濃溪主河道辮狀水系亦相對明顯。



圖 4-11 研究區域 2008 年衛星影像

六、 2009年研究區域狀況

2009 年的莫拉克颱風造成研究區內大量崩塌發生，同樣的在為崩塌區也可看到明顯的蝕溝發育，而荖濃溪帶來大量的上游土砂在此區堆積，荖濃溪主深槽幾乎貼齊研究區域坡趾，持續影響坡趾處，進而影響坡面之穩定性。



圖 4-12 研究區域 2009 年衛星影像

七、 2017年研究區域狀況

從 2017 影像來看，研究區域內坡趾側岸侵蝕區域明顯擴大，且多處都已有相連現象，而受到河道清疏工程之影響，荖濃溪主深槽已遠離研究區域坡趾位置，看在坡面上可以看到仍有多處蝕溝之發育，未來若在逢豪大雨事件，可能再次誘發坡趾處崩塌的再擴大。

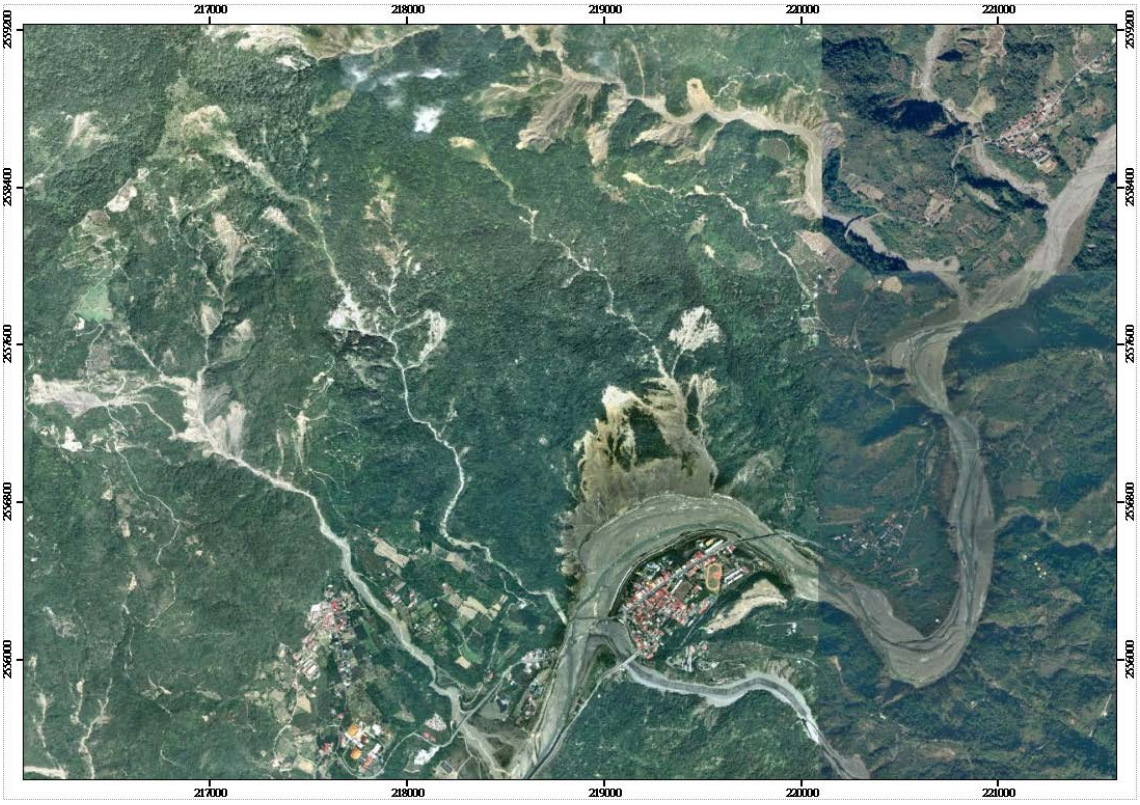


圖 4-13 研究區域 2017 年衛星影像

第三節 研究區域地形資料

因本計畫希望能夠過現地地形資料搭配穩定性分析進行可能破壞區域之判斷,因此除區域內地質與逐年變化外,另需蒐集地形資料,目前共蒐集三期數值地形資料，分別為 1989 年與 2005 年利用航遙測技術產製之全國 40 公尺及 5 公尺數值地形，以及莫拉克颱風後地質調查所進行之 1 公尺精度之空載光達產製之數值地形，上述數值地形和其所轉換成之陰影圖如圖 4-14 至 4-19。

本計畫亦彙整總計畫以 UAV 所產製之數值地形資料，同樣所得之數值地形資料轉換成陰影圖之形式，其所提供的各期資料如圖 4-20 至 4-39 所示。總計畫提供共計有 10 期的 UAV 產製數值地形資料，各期的產製時間彙整如表 4-2。

表 4-2 總計畫以 UAV 產製研究區域數值地形之各期時間表

編號	產製時間	編號	產製時間
1	2008/8/18	6	2017/7/8
2	2015/2/1	7	2017/9/24
3	2015/11/9	8	2017/11/15
4	2016/6/6	9	2018/12/22
5	2016/11/18	10	2020/3/8

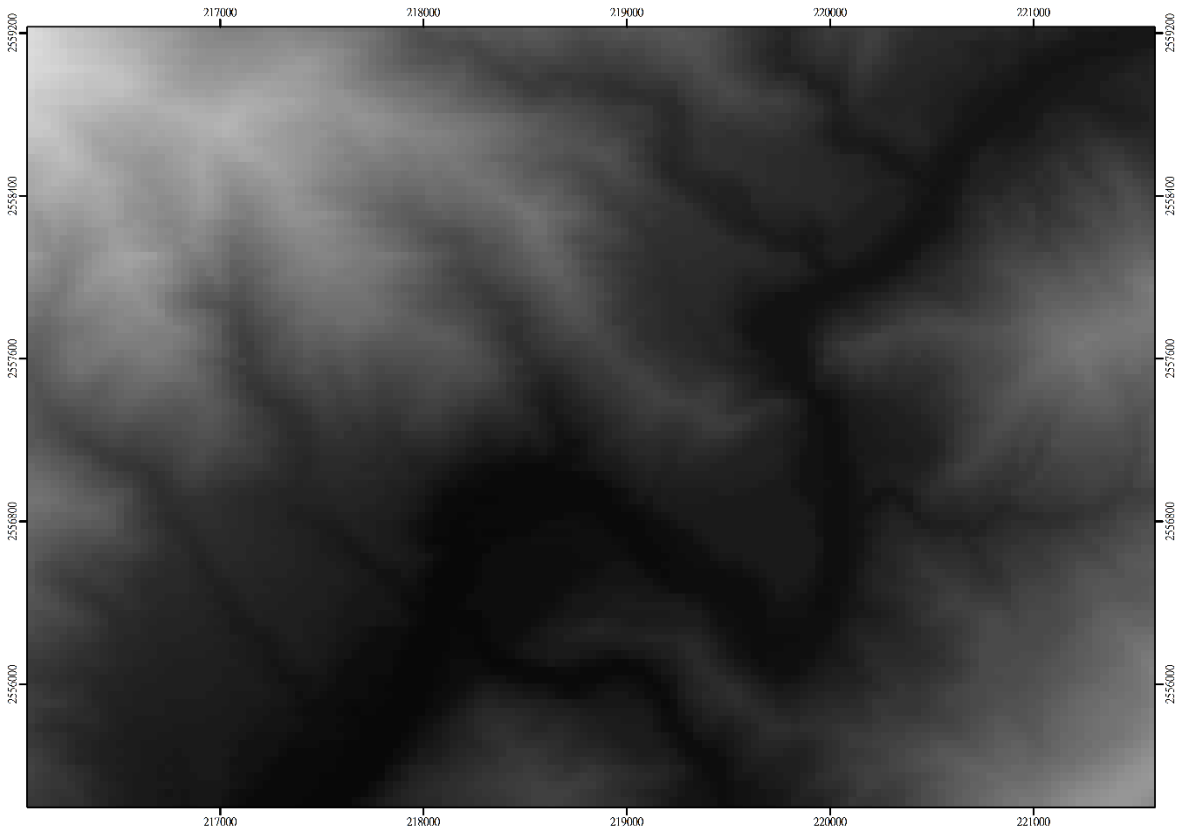


圖 4-14 研究區域 40 公尺精度數值地形

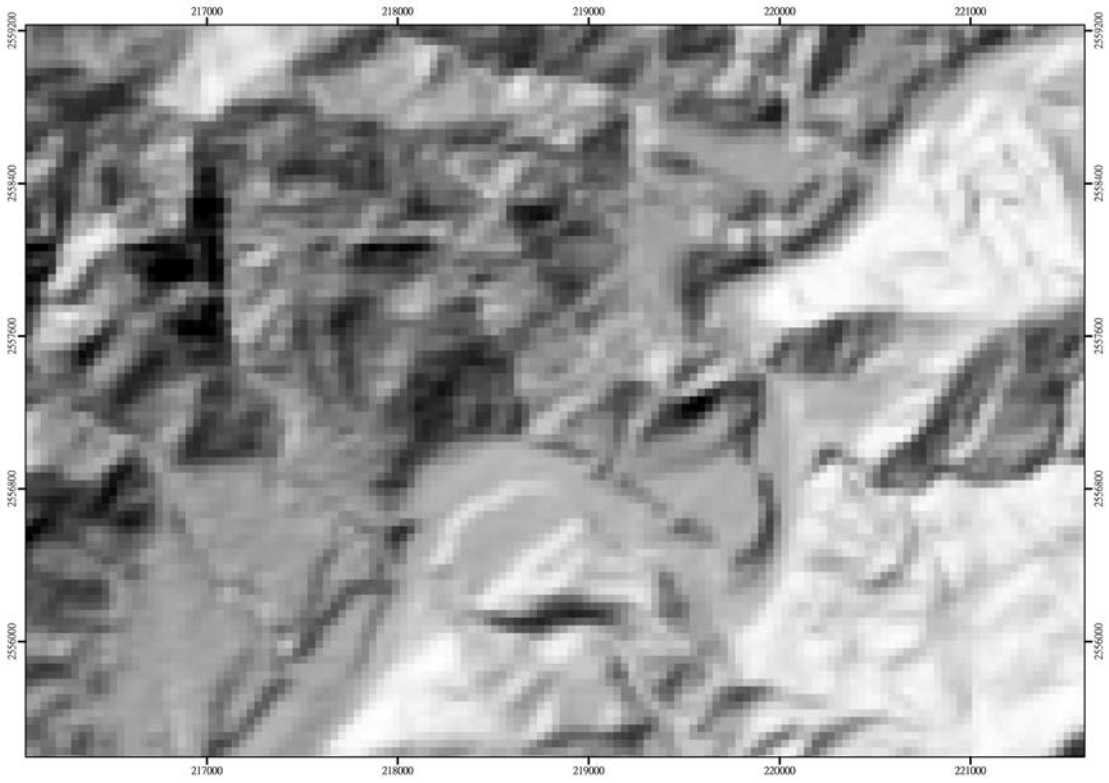


圖 4-15 研究區域 40 公尺精度陰影圖

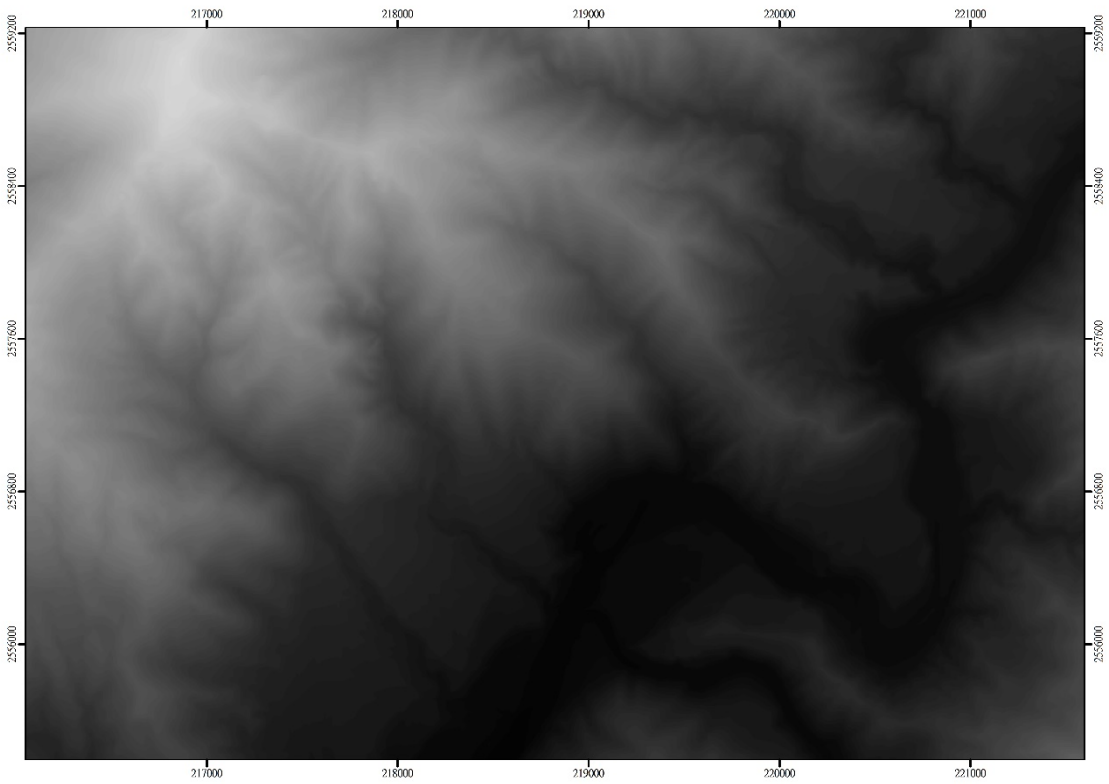


圖 4-16 研究區域 5 公尺精度數值地形

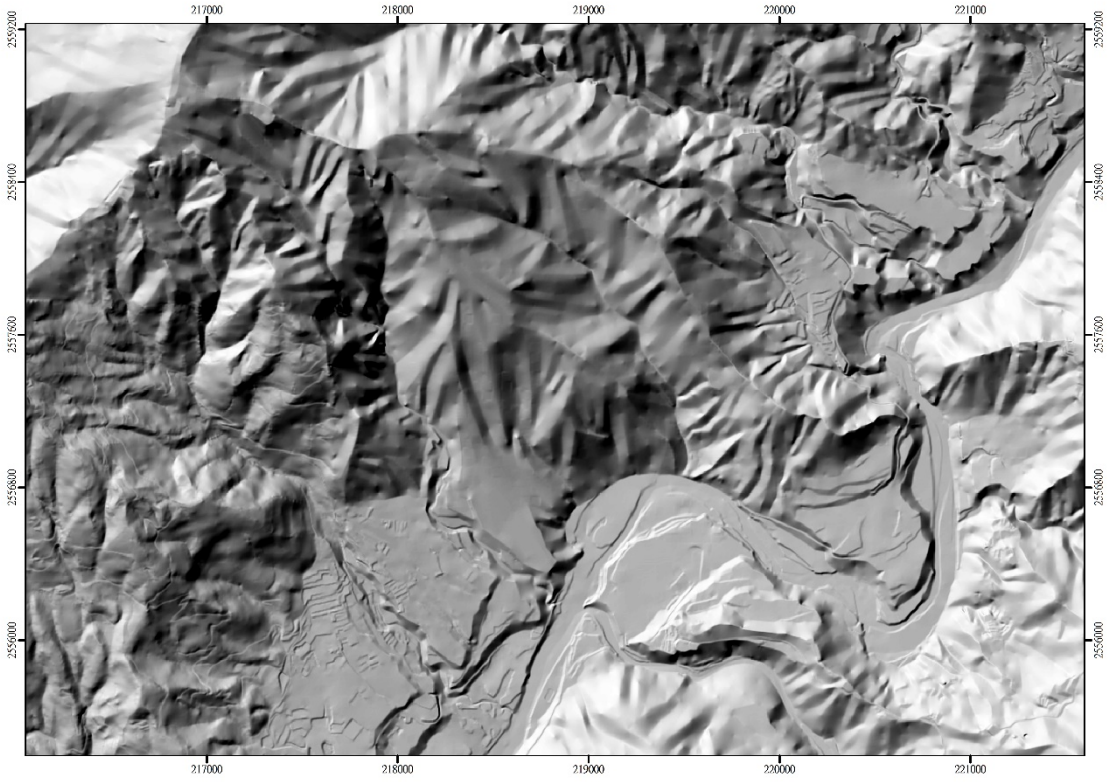


圖 4-17 研究區域 5 公尺精度陰影圖

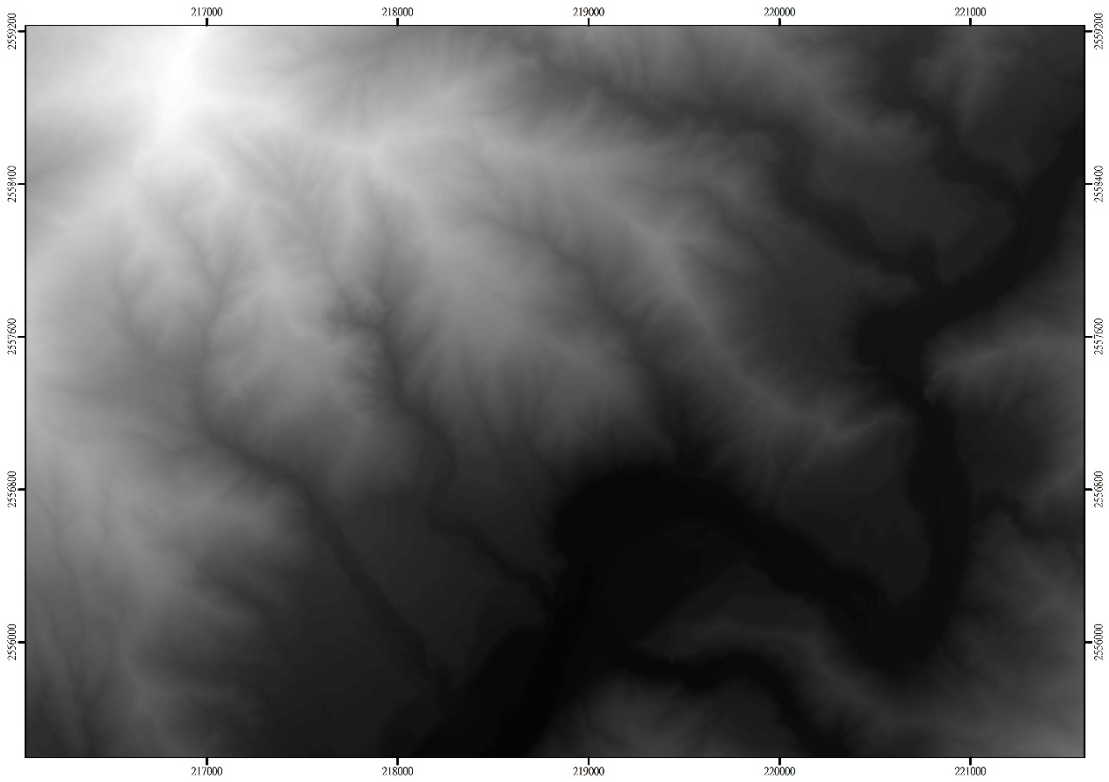


圖 4-18 研究區域 1 公尺精度數值地形

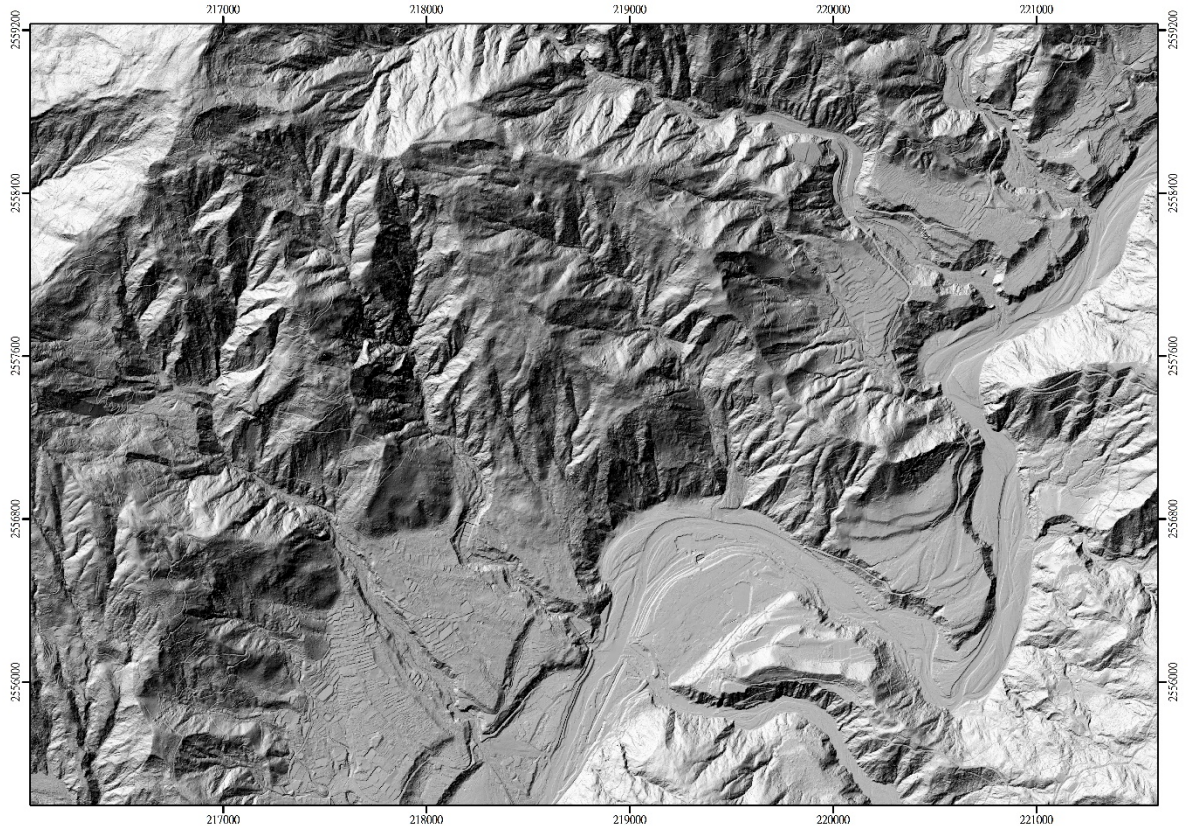


圖 4-19 研究區域 1 公尺精度陰影圖

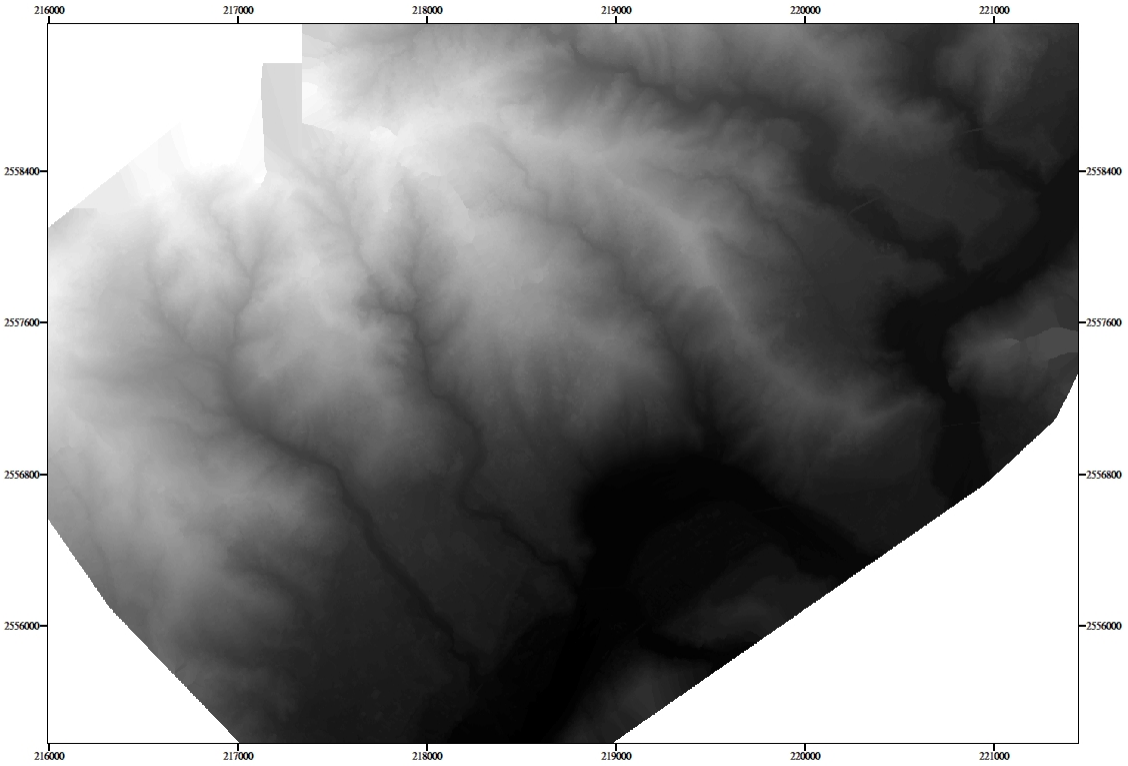


圖 4-20 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20080818)

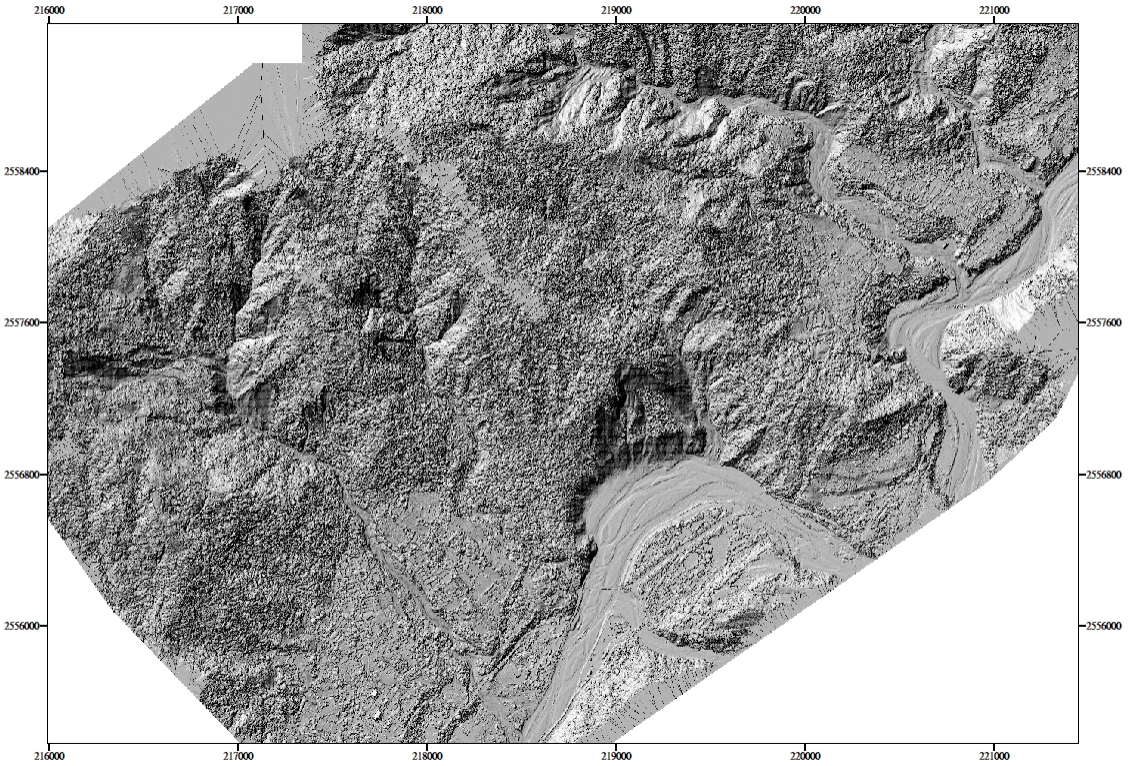


圖 4-21 研究區域 UAV 產製數值地形(20080818)陰影圖

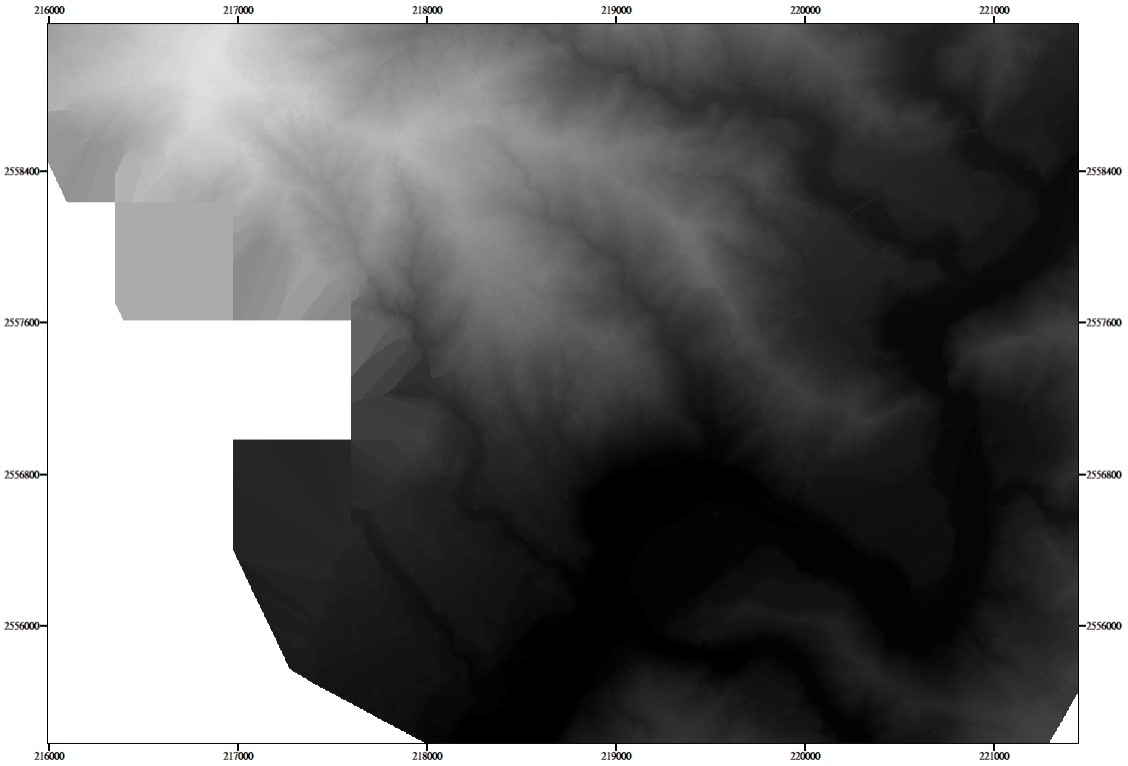


圖 4-22 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20150201)

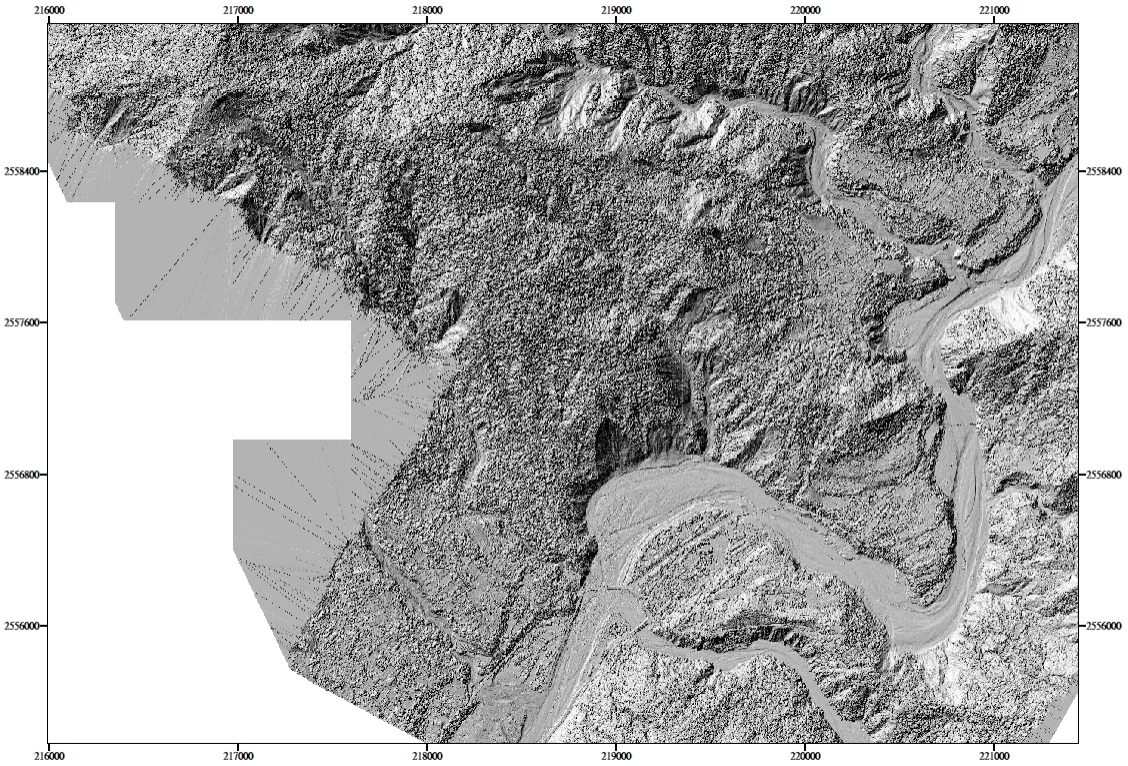


圖 4-23 研究區域 UAV 產製數值地形(20150201)陰影圖

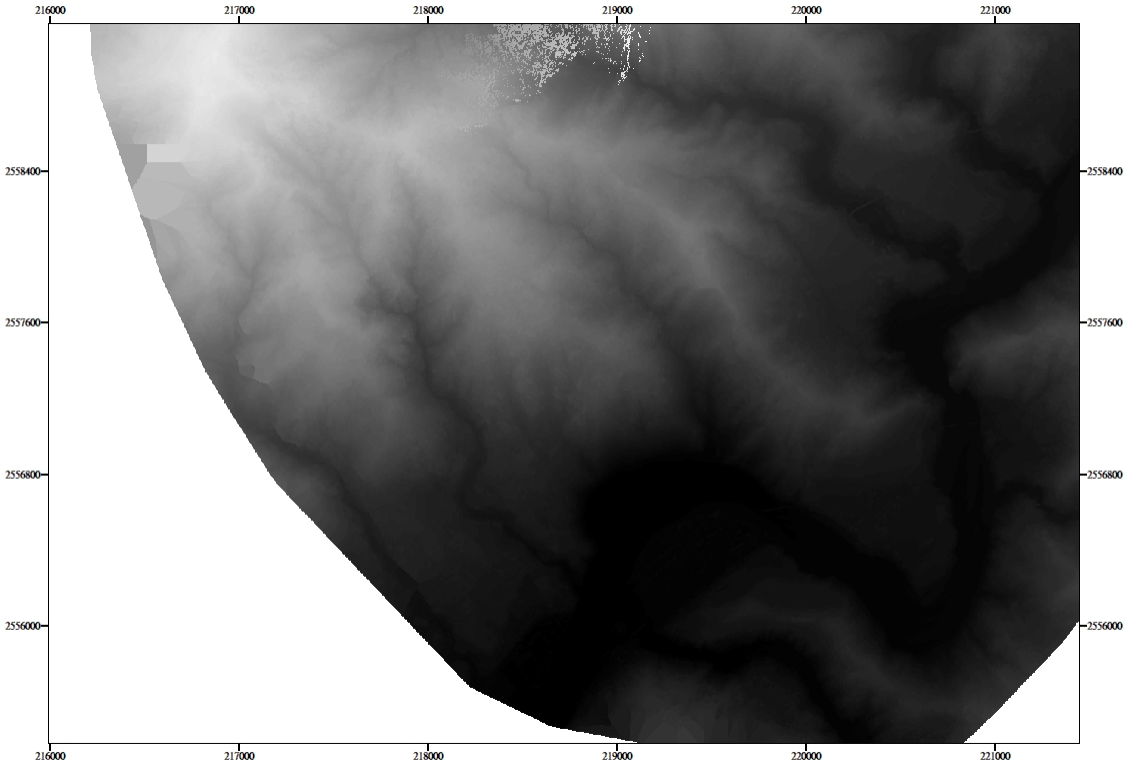


圖 4-24 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20151109)

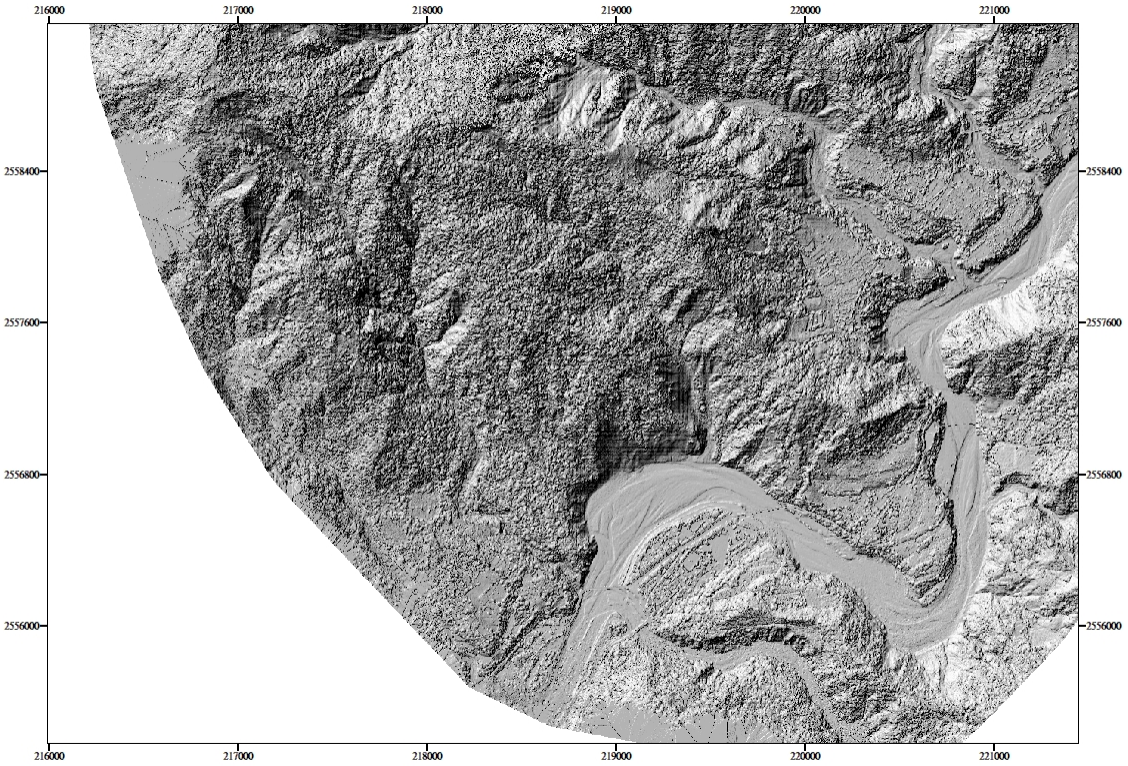


圖 4-25 研究區域 UAV 產製數值地形(20151109)陰影圖

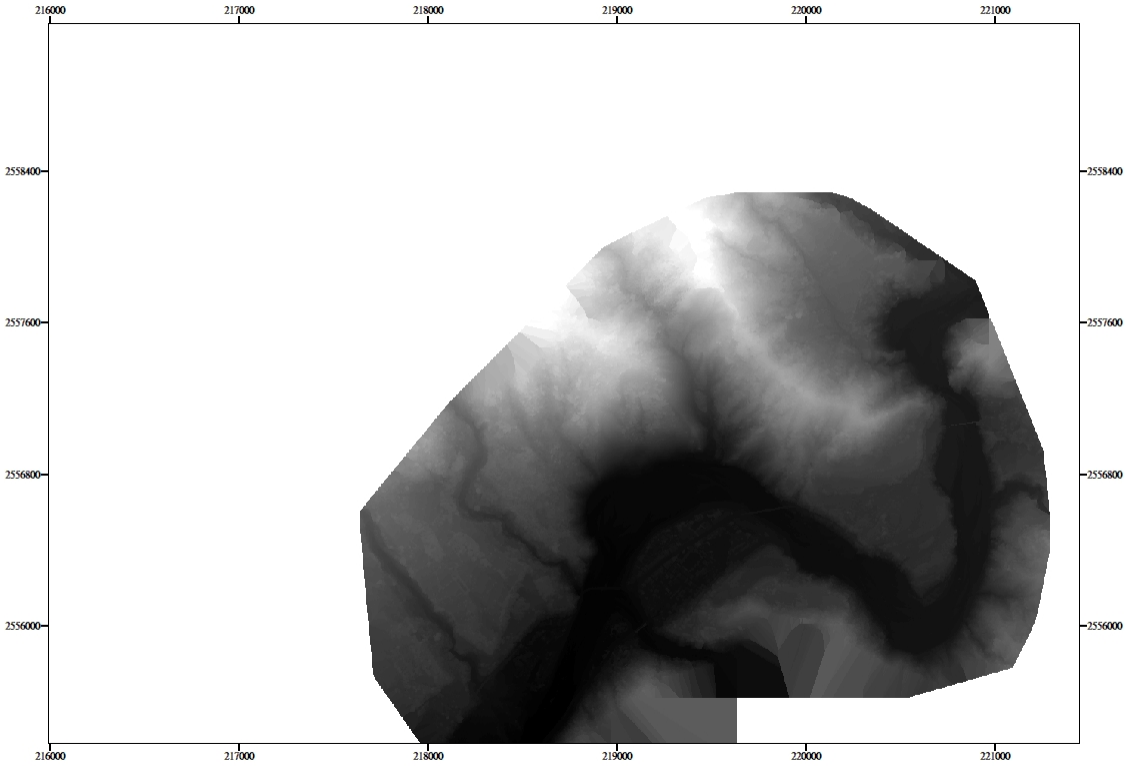


圖 4-26 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20160606)

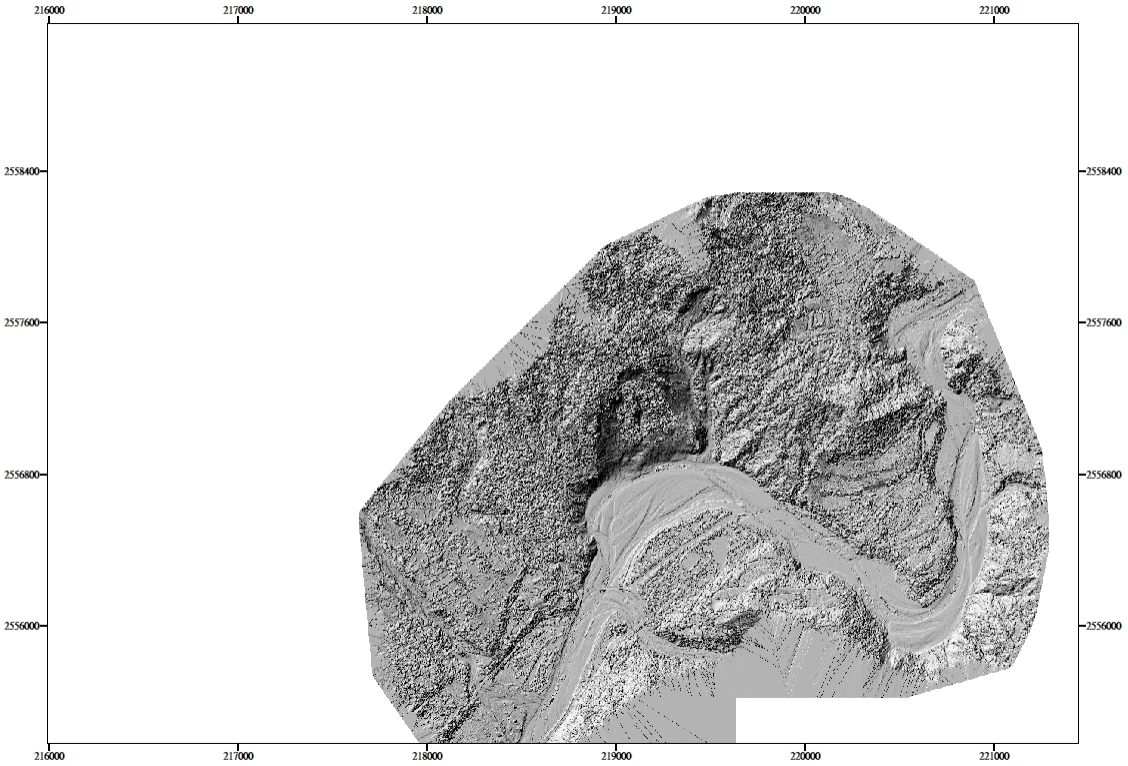


圖 4-27 研究區域 UAV 產製數值地形(20160606)陰影圖

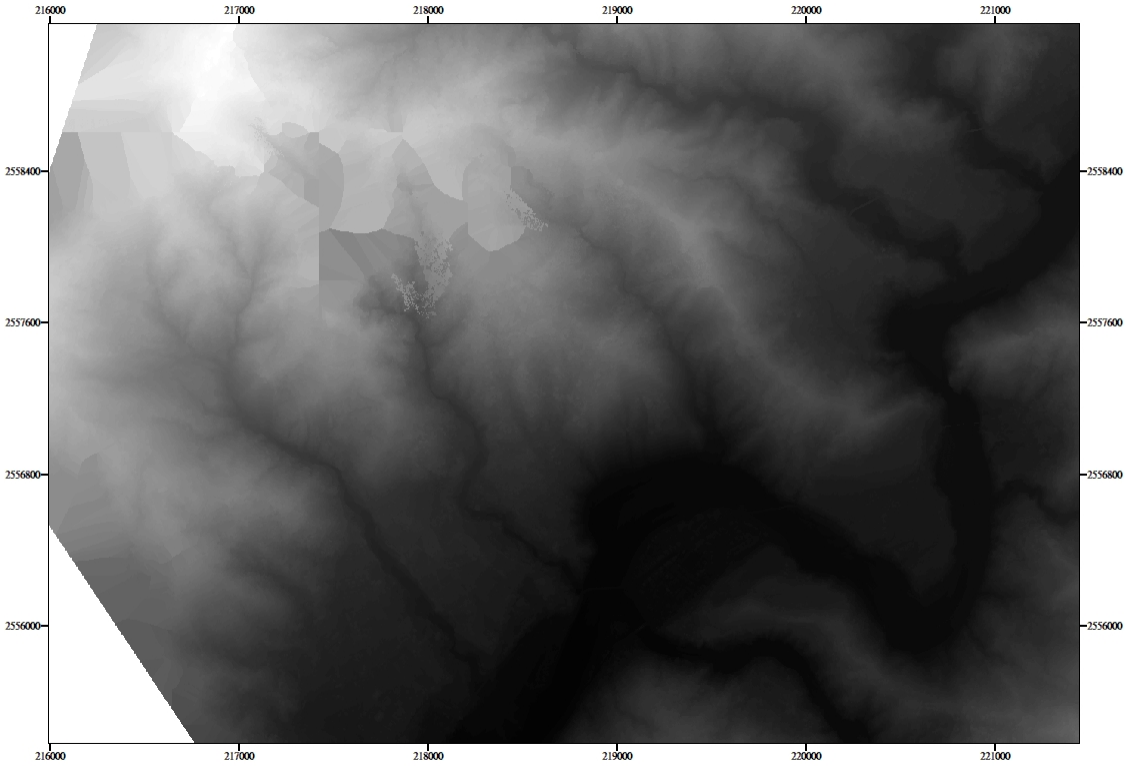


圖 4-28 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20161118)

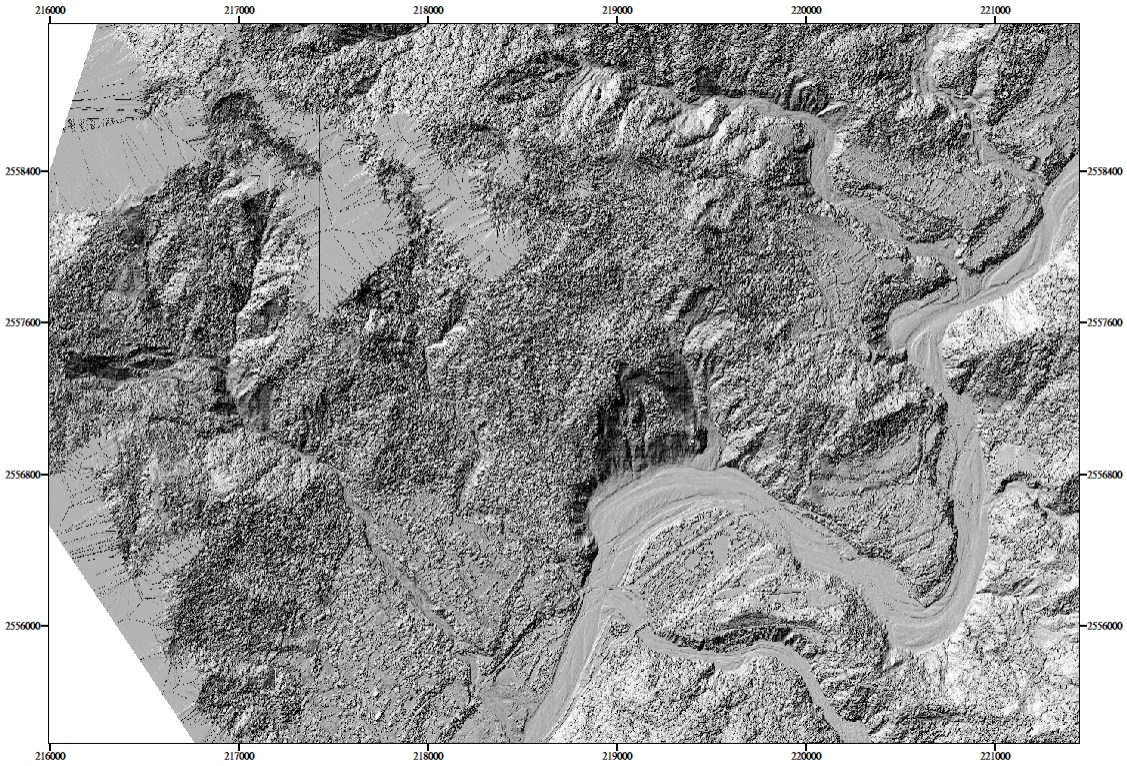


圖 4-29 研究區域 UAV 產製數值地形(20161118)陰影圖

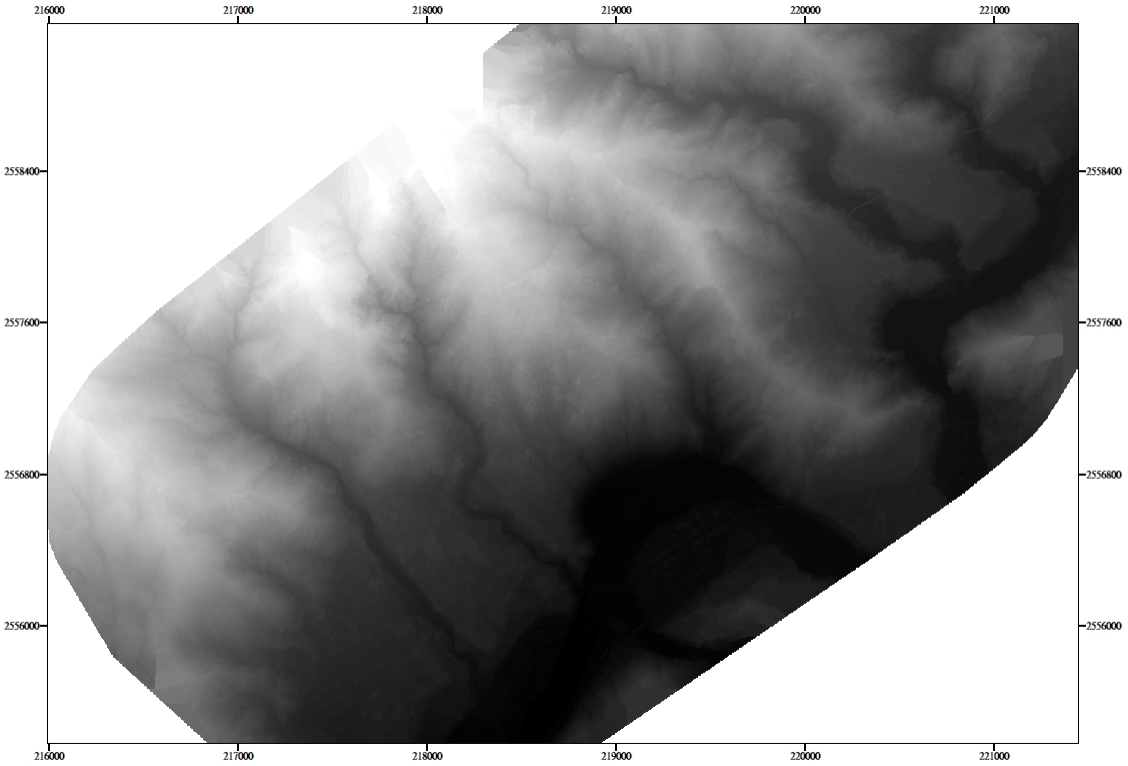


圖 4-30 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20170708)

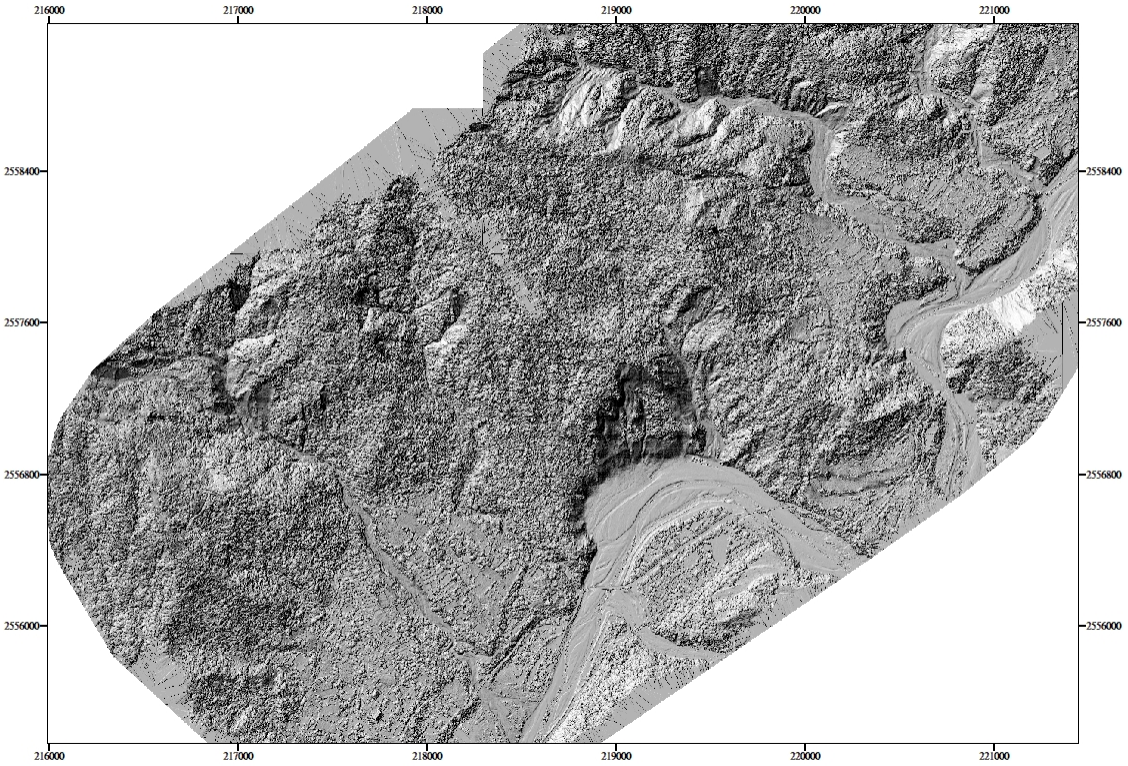


圖 4-31 研究區域 UAV 產製數值地形(20170708)陰影圖

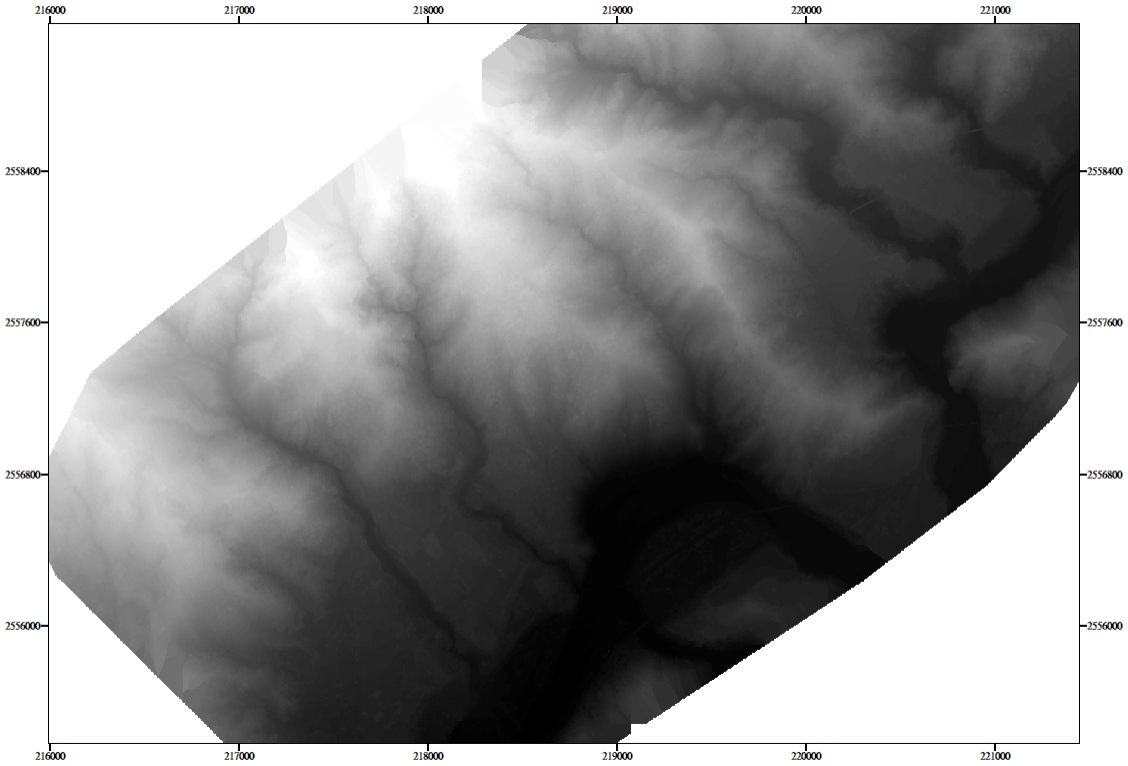


圖 4-32 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20170924)

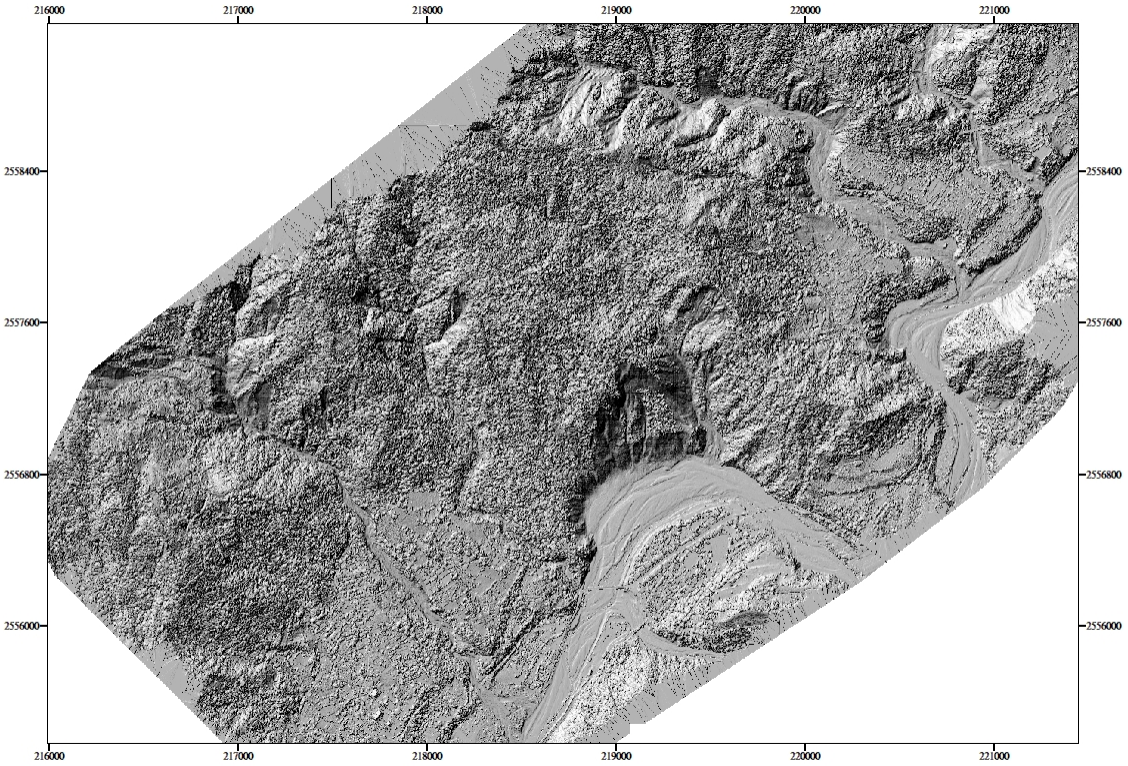


圖 4-33 研究區域 UAV 產製數值地形(20170924)陰影圖

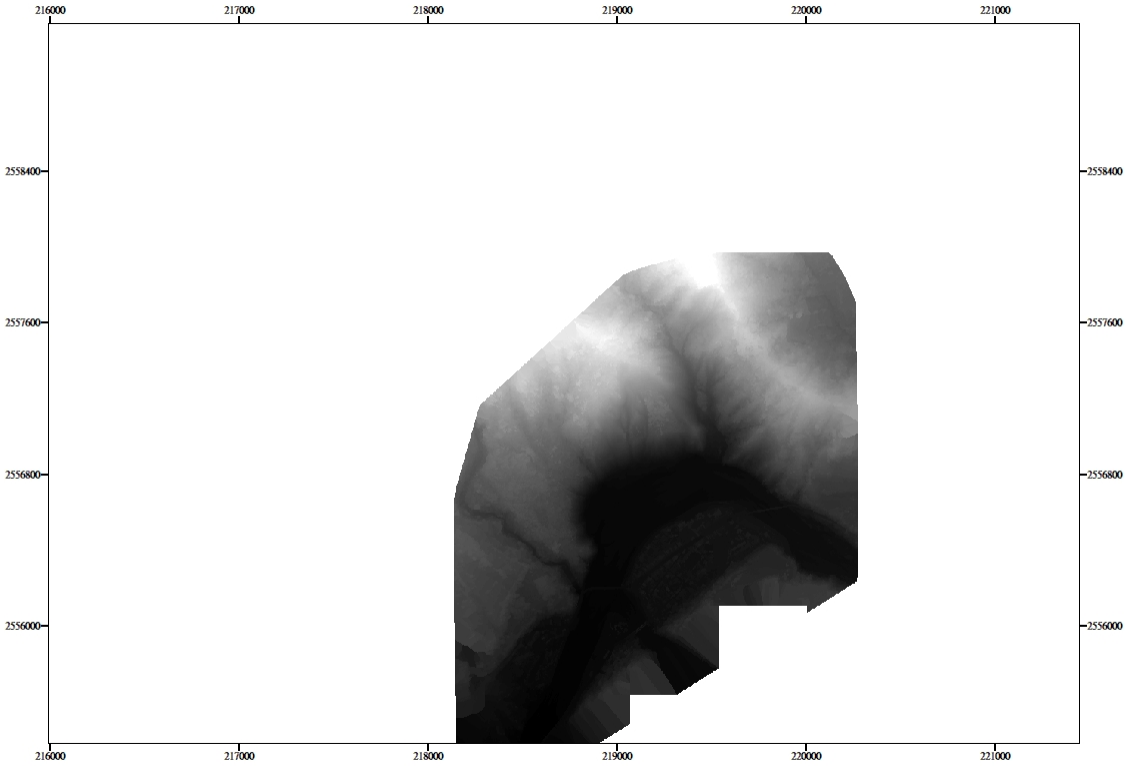


圖 4-34 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20171115)

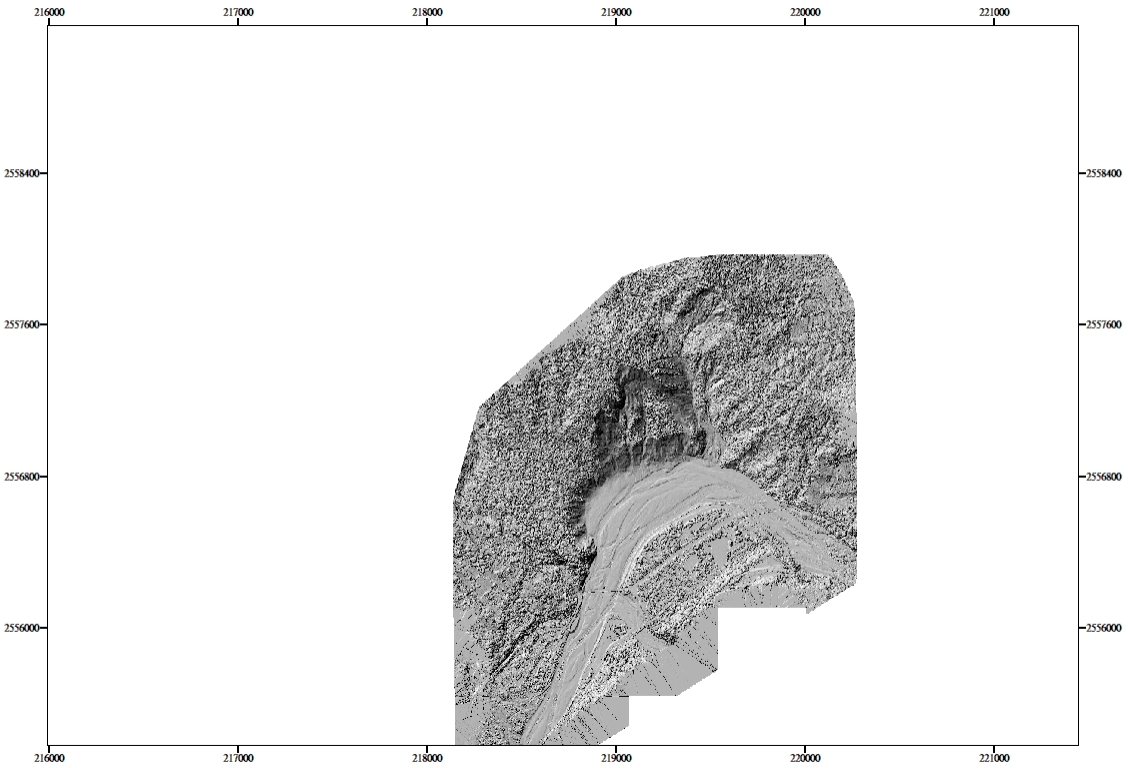


圖 4-35 研究區域 UAV 產製數值地形(20171115)陰影圖

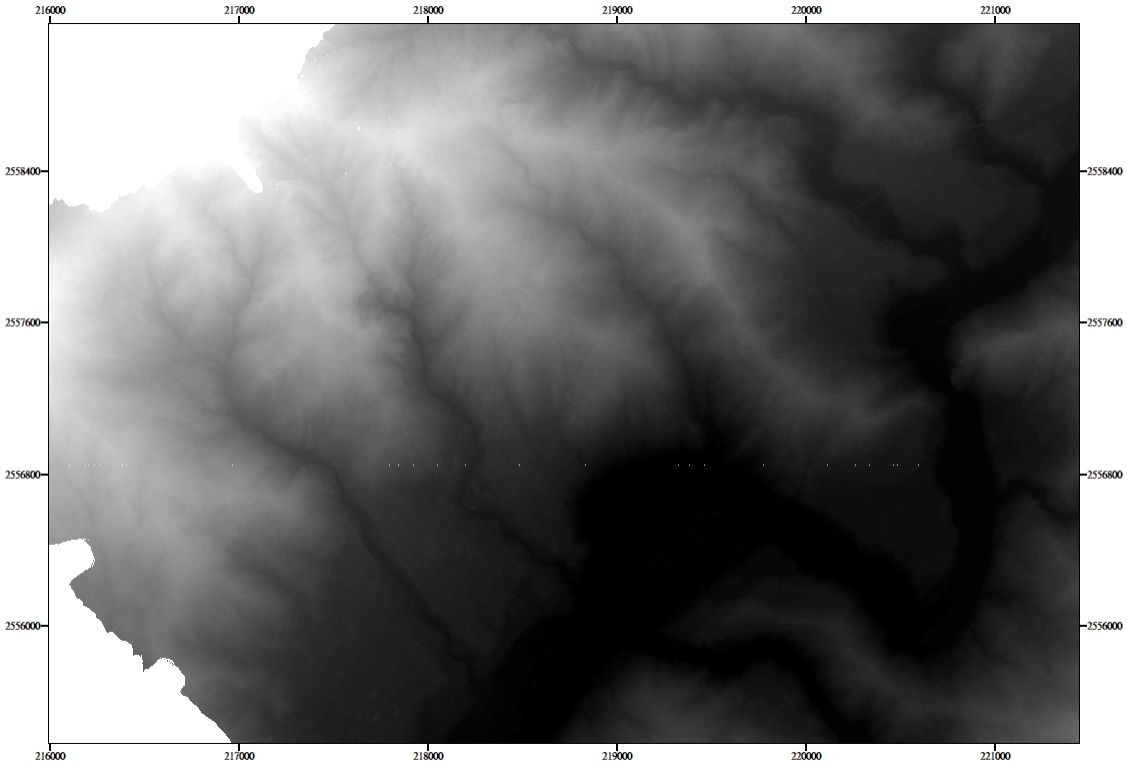


圖 4-36 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20181222)

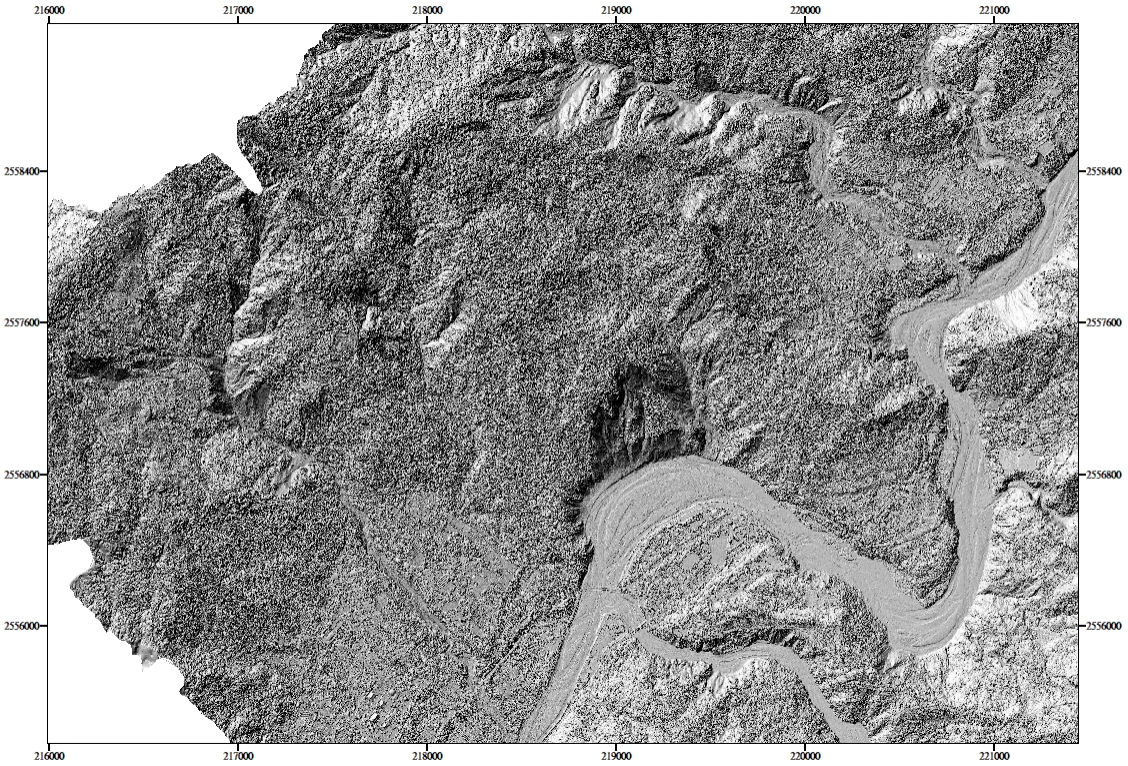


圖 4-37 研究區域 UAV 產製數值地形(20181222)陰影圖

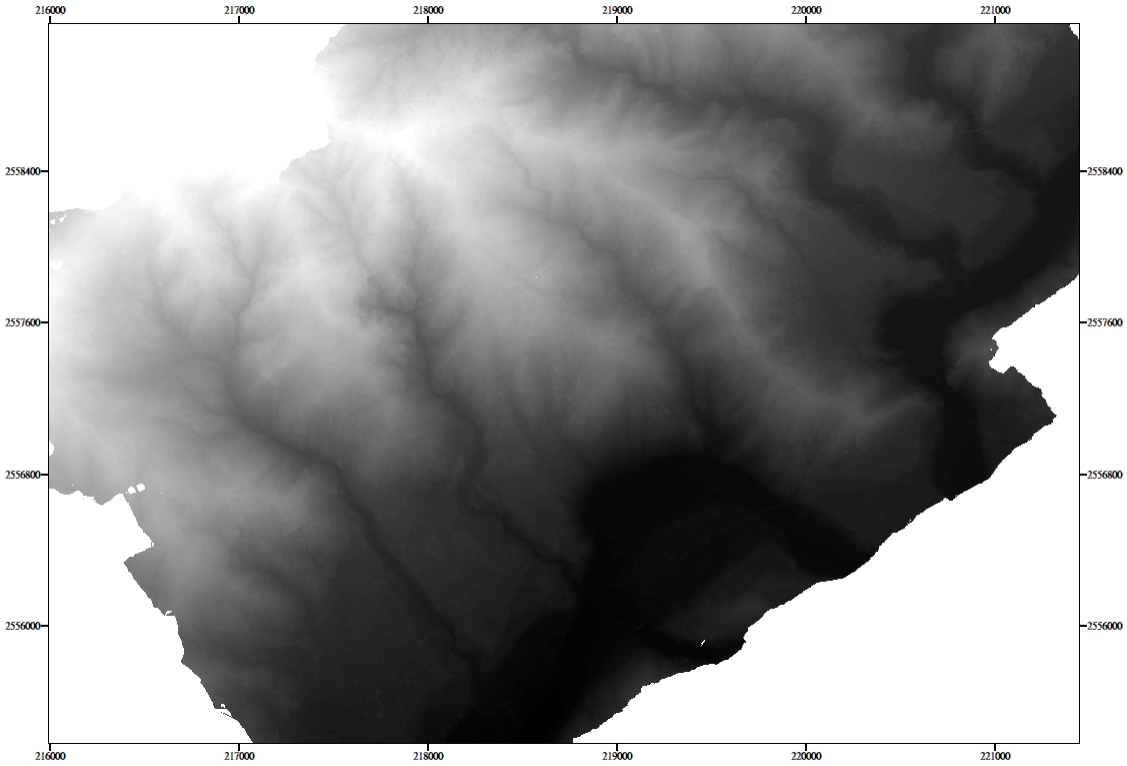


圖 4-38 研究區域 UAV 產製高精度數值地形(20200308)

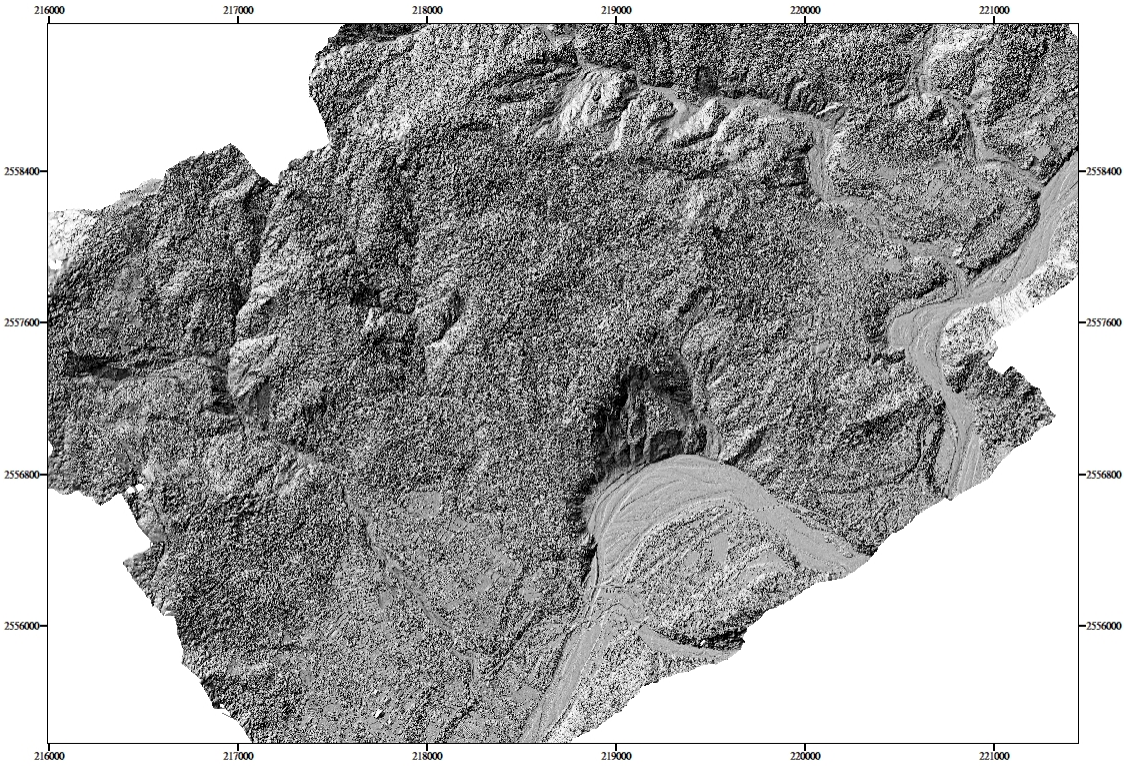


圖 4-39 研究區域 UAV 產製數值地形(20200308)陰影圖

第五章 研究區域分區分塊分析

第一節 研究區域不安定區域分析

目前中央地質調查所，利用「莫拉克與非莫拉克國土保育之地質敏感區調查分析計畫」及「強化坡地環境地質與防災應用」等計畫，進行潛勢地區判釋及重點地區監測等相關工作，其中潛勢地區之判釋工作，主要係利用光達（LiDAR）數值地形資料、航照影像，輔以既有地質圖之地層與構造資料、合併地形坡向資料進行綜合判釋(圖 5-1)。

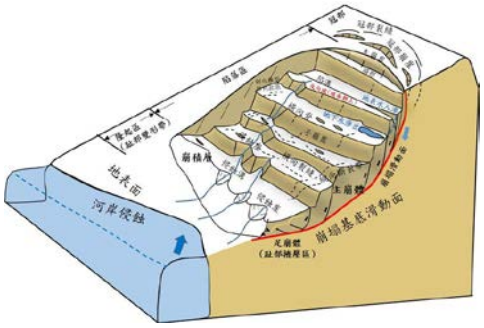


圖 5-1 潛在大規模崩塌區之地形特徵

因本研究計畫已取得區域內之光達資料，因此針對研究區域進行潛勢區之分析工作，結果顯示本區內共可分為 5 個區域，其中 I 區及 IV 區為已崩塌區，II 區、III 區與 V 區屬於未崩塌區。

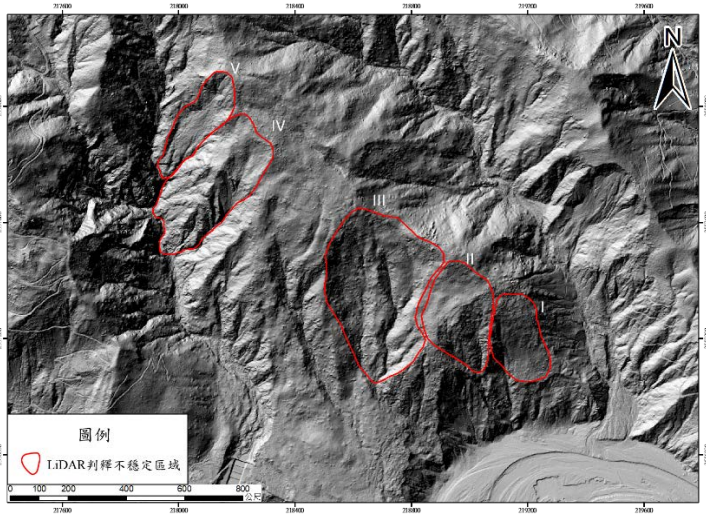


圖 5-2 研究區域內不安定區域分布圖

第二節 研究區域不安定邊坡分析

針對判斷為不安定地區進行剖面分析，剖面之分布位置如圖 5-3 所示，而各剖面之分析成果則彙整如圖 5-4 至圖 5-8，從剖面分析成果可以看到在各區域內均有不穩定之區域，將各剖面之不安定位置點繪於陰影圖上，如圖 5-9，可以看到不安定位置與可能滑動區域之相對關係，主要多發生在可能滑動區域之頂部位置，顯示本區主要是受重力影響而有變形現象。

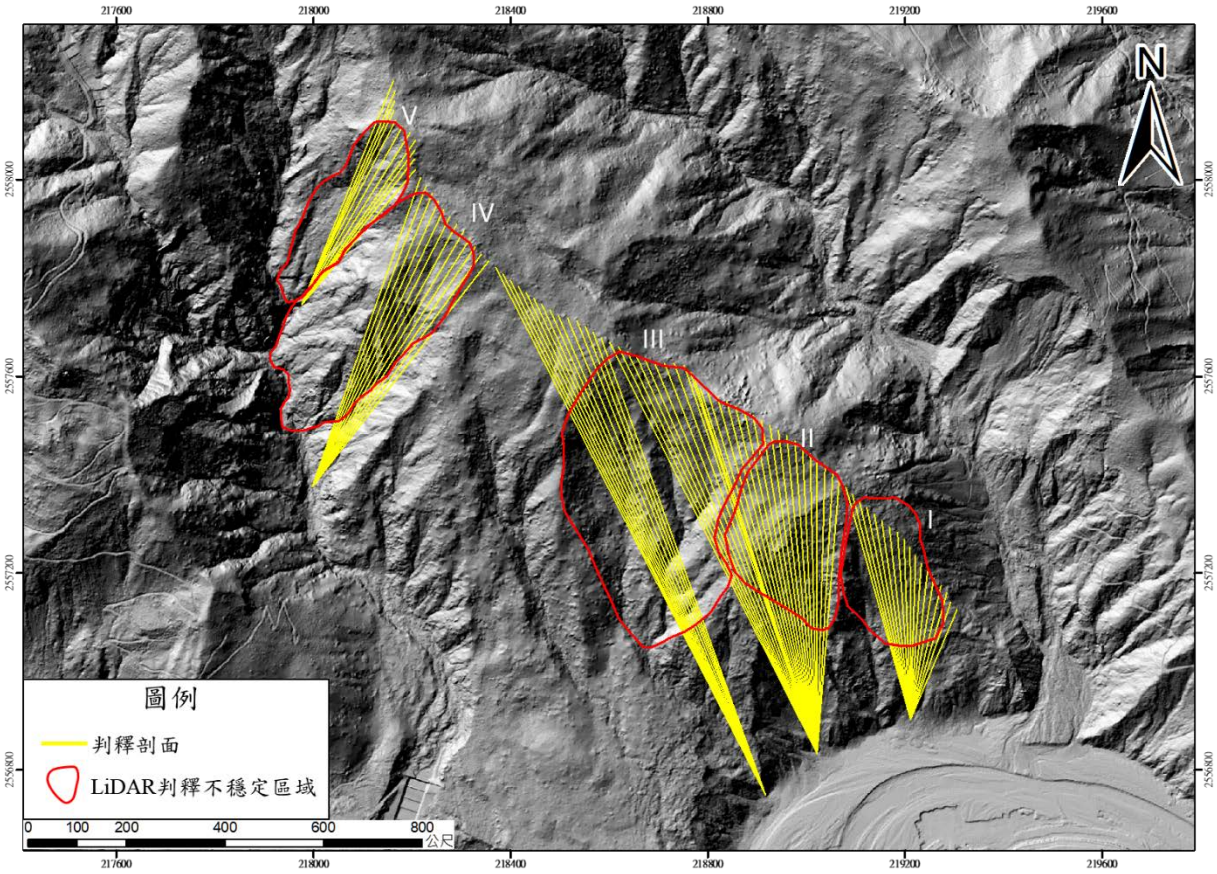


圖 5-3 研究區域不安定區分析剖面分布圖

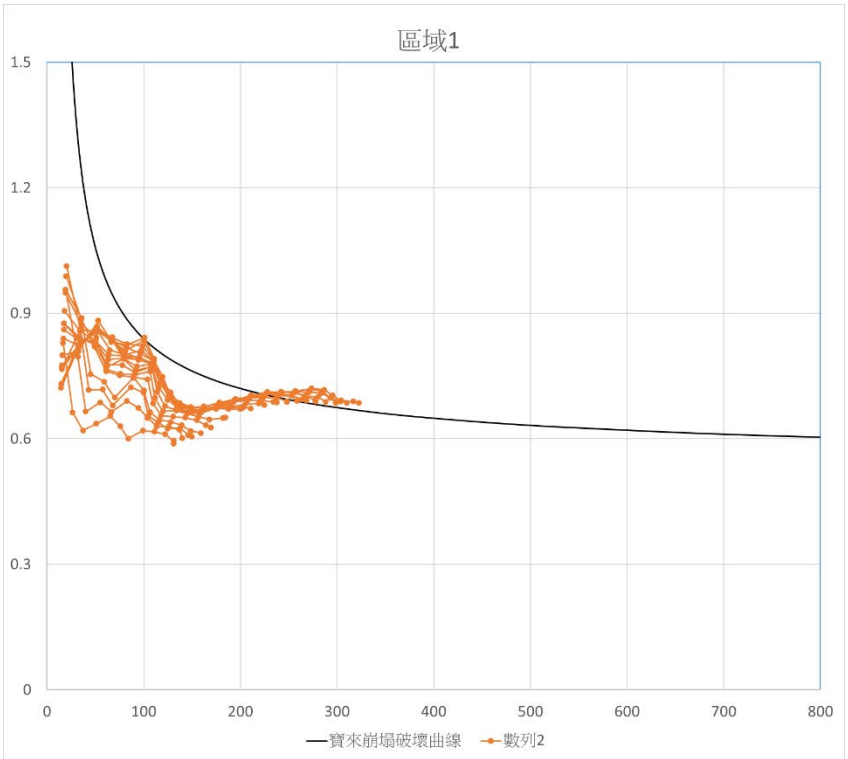


圖 5-4 區域 1 不安定區分析剖面分析成果

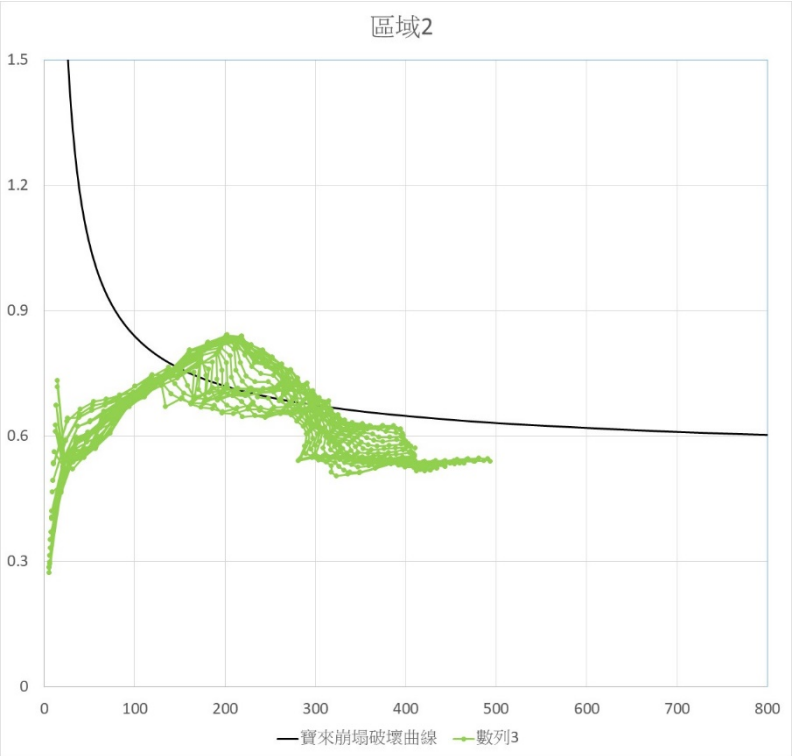


圖 5-5 區域 2 不安定區分析剖面分析成果

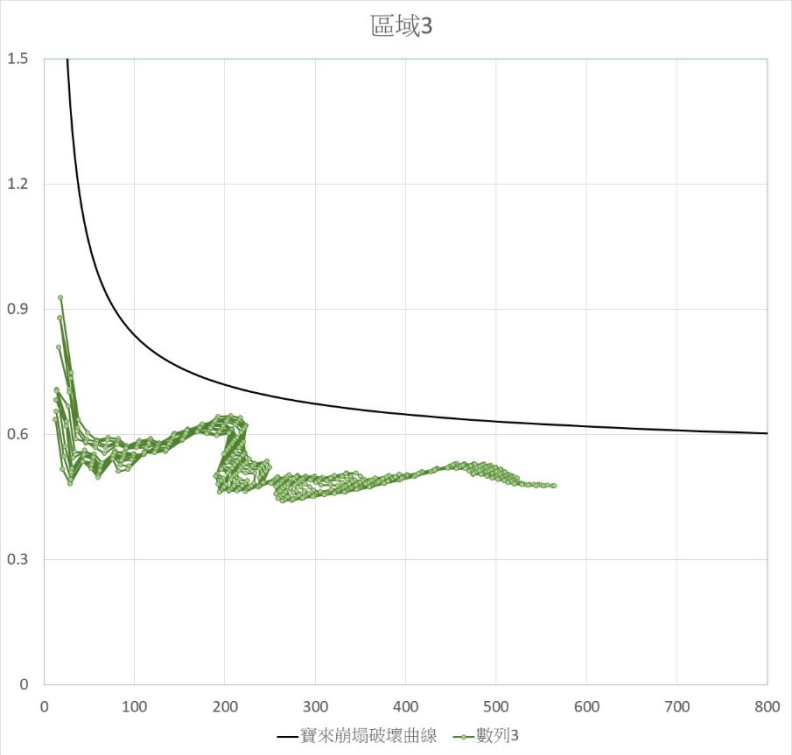


圖 5-6 區域 3 不安定區分析剖面分析成果

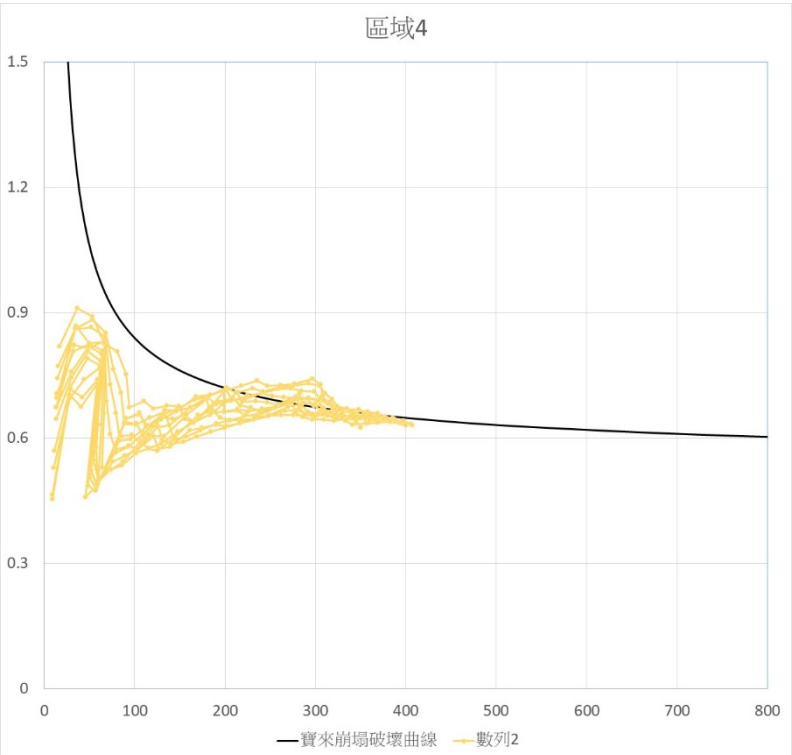


圖 5-7 區域 4 不安定區分析剖面分析成果

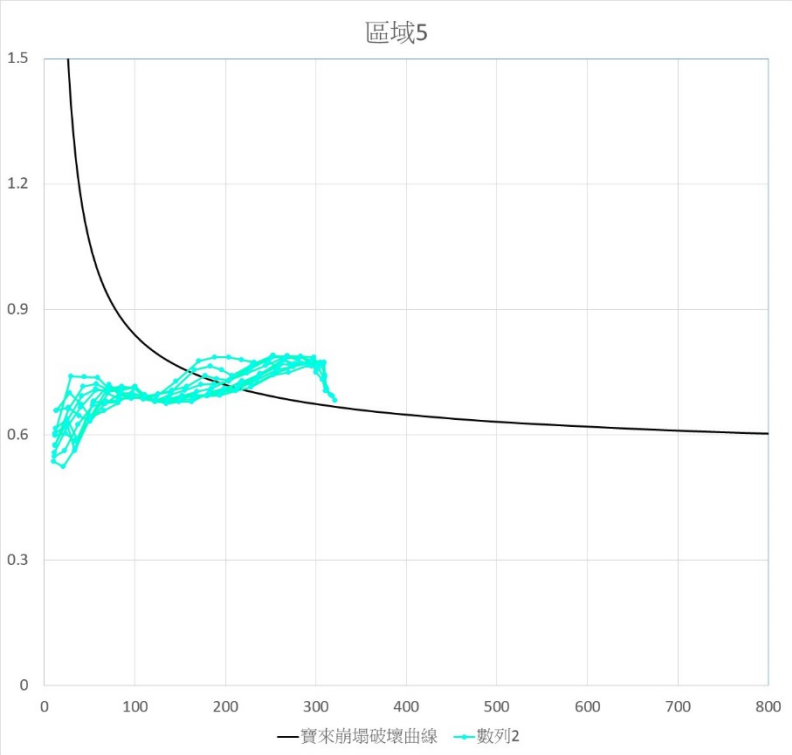


圖 5-8 區域 5 不安定區分析剖面分析成果

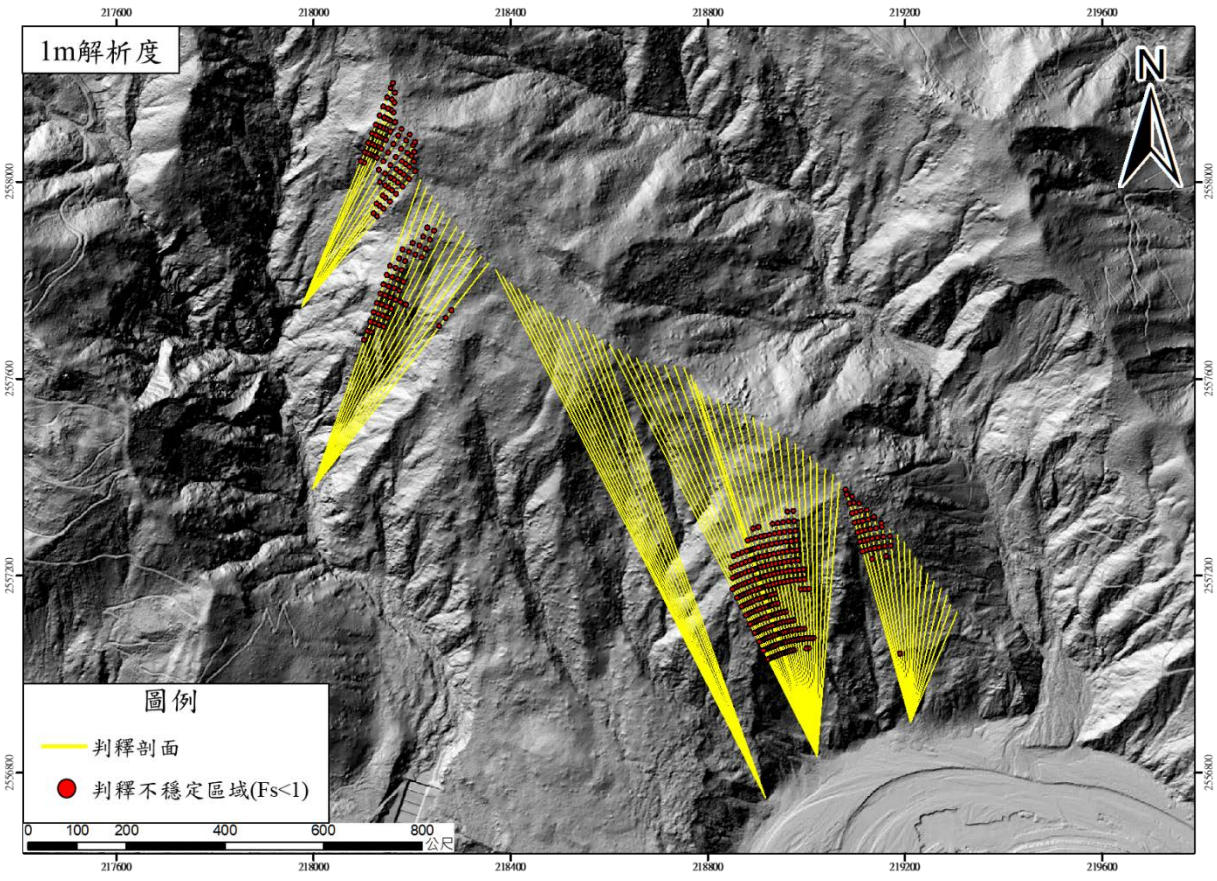


圖 5-9 研究區域內不安定區空間分布圖

另因分析使用之數值地形為 2011 年之成果，其成果應視為該時期不安定區域(圖 5-10)，將分析成果套疊 2017 衛星影像(圖 5-11)，可以發現不安定點位多數落於崩塌擴大區域內，顯示本分析方法確實可透過地形資料找出相對之不安定區域，其結果顯示區域 1 和區域 2 為不穩定坡面。

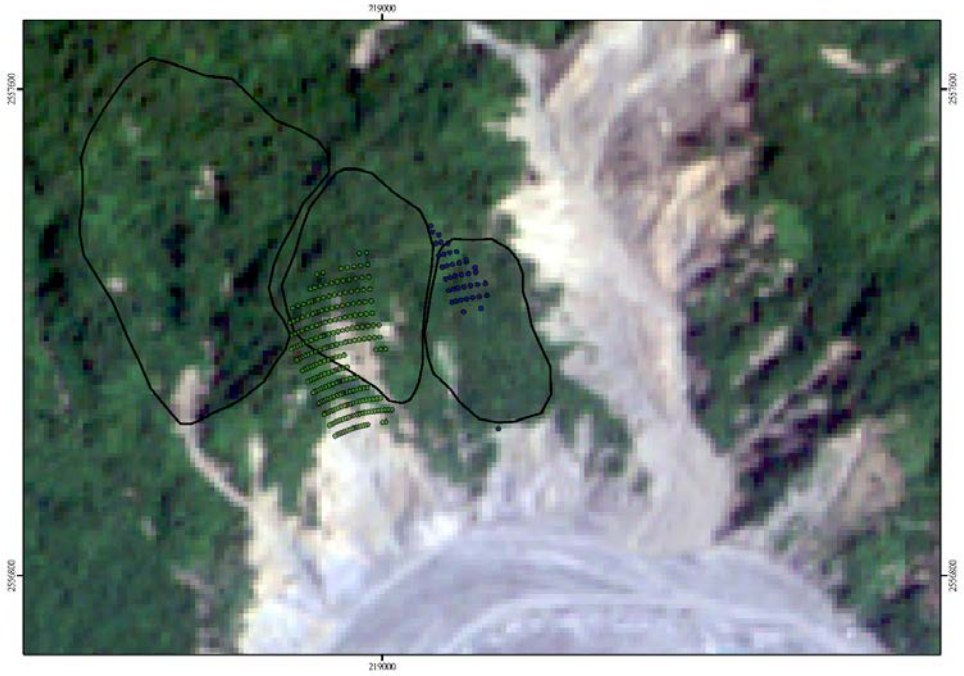


圖 5-10 研究區域內不安定區空間分布評估(底圖 2011 年影像)

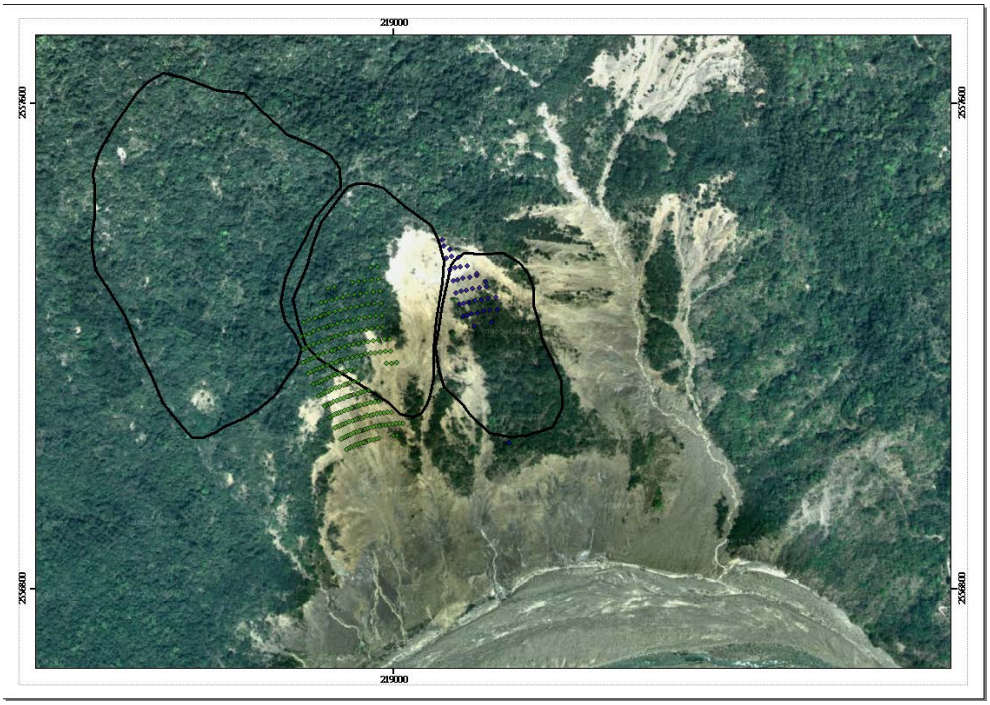


圖 5-11 研究區域內不安定區空間分布評估(底圖 2017 年影像)

第三節 研究區域不安定邊坡地形變化分析

透過本計畫所提之不安定分析之方法,可知道研究範圍內之區域 1 和區域 2 為主要的不穩定坡面。因此，本計畫針對上述區域，進一步利用 UAV 所產製之數值地形資料，檢視從 2008 年至今區域 1 和區域 2 的地形變化。透過多期 UAV 產製數值地形和多期影像等資料地比較，可以發現 2008 年後區域 1 和區域二的裸露地已經有顯著之植生復育，如圖 5-12。

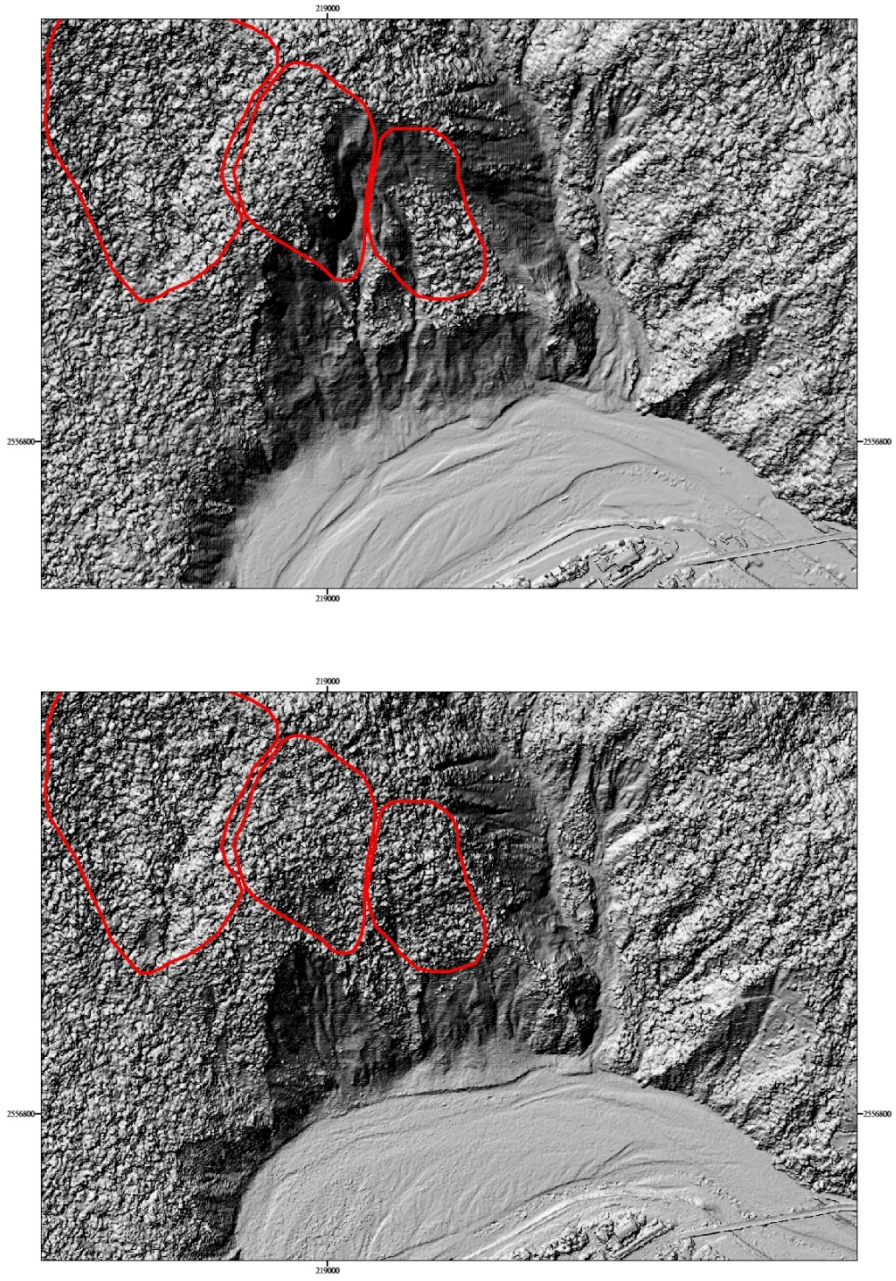


圖 5-12 區域 1 和 2 於 2008 年坡面裸露情況(上)和 2015 年植生覆蓋情況(下)圖

接著，透過 2015 年 2 月 1 日和 2015 年 11 月 9 日兩期 UAV 產製數值地形比較，如圖 5-12，可見目標區域有顯著之地形變化。更進一步取得區域 1 之地形剖面，如圖 5-13，可發現區域 1 內土體發生顯著之滑動，且區域 1 外坡面高程較低處則是出現明抬升現象，此為典型崩塌塊體滑動的地形變化特徵。根據經濟部水利署設置之高中(2)雨量站(編號 1730P146，距離研究區域 3 km)的 2015 年水文觀測紀錄，於兩期數值地形產製之期間，觀察到最大一日降雨值為 538 mm/day，其事件發生之時間為 2015 年 8 月 8 日，其第二大一日降雨值為 261 mm/day，其時間為 2015 年 5 月 24 日。因此，本計畫假設最大一日降雨為誘使崩塌發生的主要降雨事件。

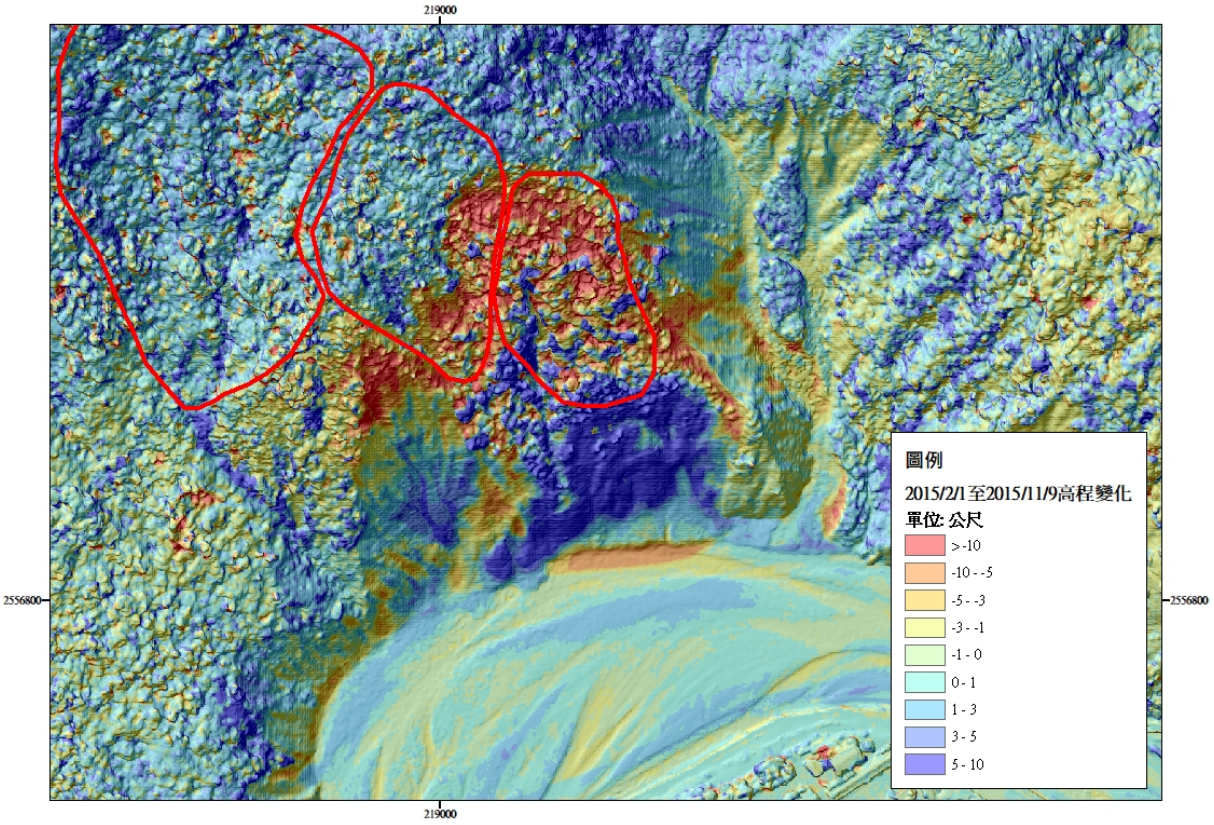
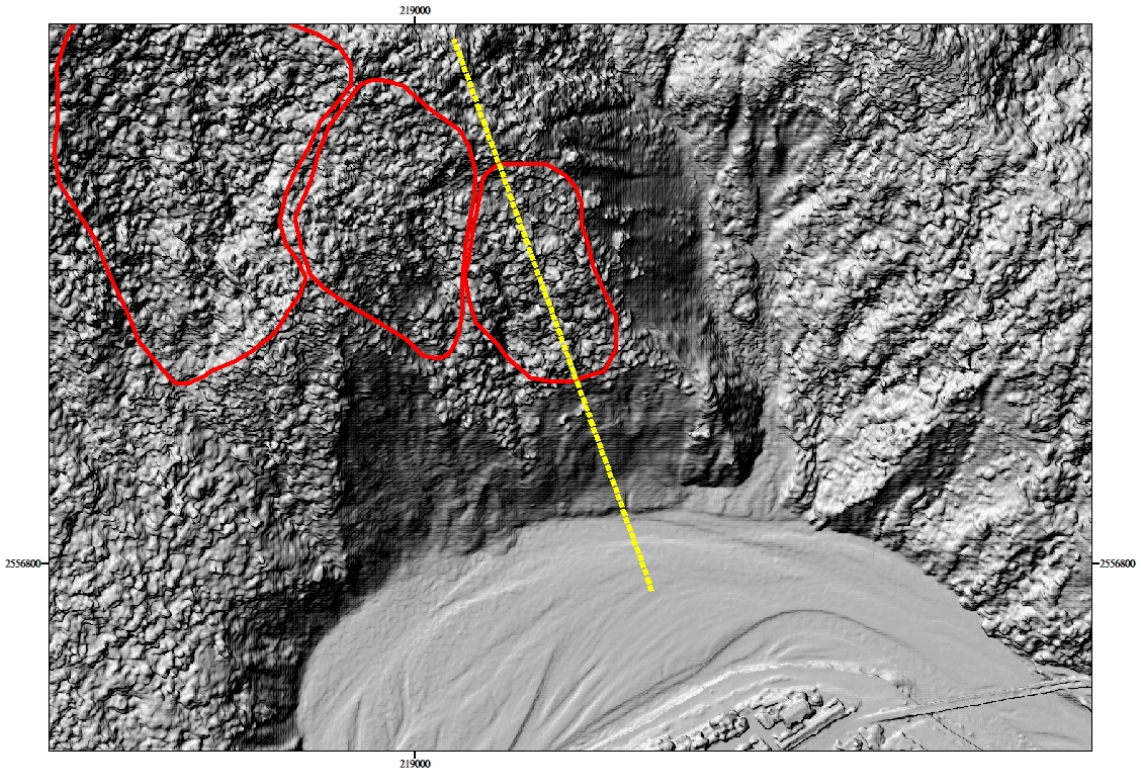


圖 5-13 區域 1 和區域 2 於 2015 年間地表高程變化圖



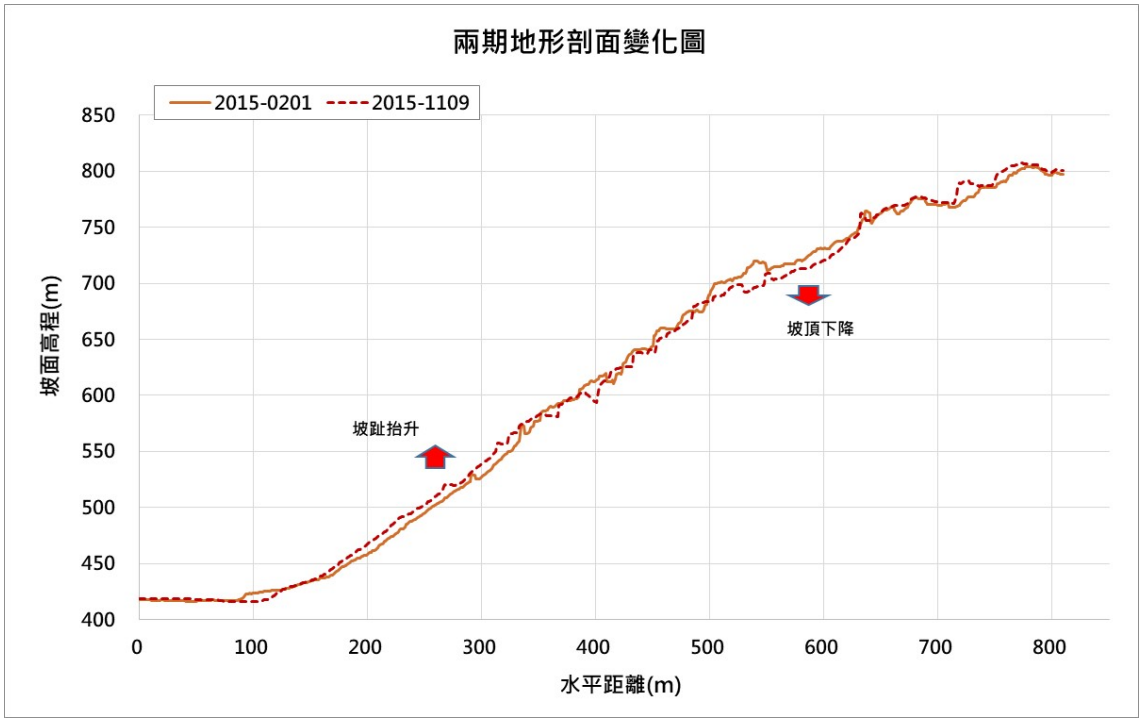


圖 5-13 區域 1 兩期地形剖面切取位置(上)及其地形剖面變化(下)圖

持續進行兩期地形之比較，使用 2015 年 11 月 9 日和 2016 年 6 月 6 日的 UAV 產製數值地形比較，如圖 5-14，可見區域內坡面土體仍在持續的滑落。同樣看到區域 1 地形剖面之變化，如圖 5-15，頂部持續下滑和坡趾持續抬升。然而，高中(2)雨量站於此期間觀察到的最大一日降雨僅有 45 mm/day，其發生時間為 2016 年 4 月 14 日。由於此段期間並無顯著之降雨，本計畫假設區域 1 係受重力影響產生之滑動現象。

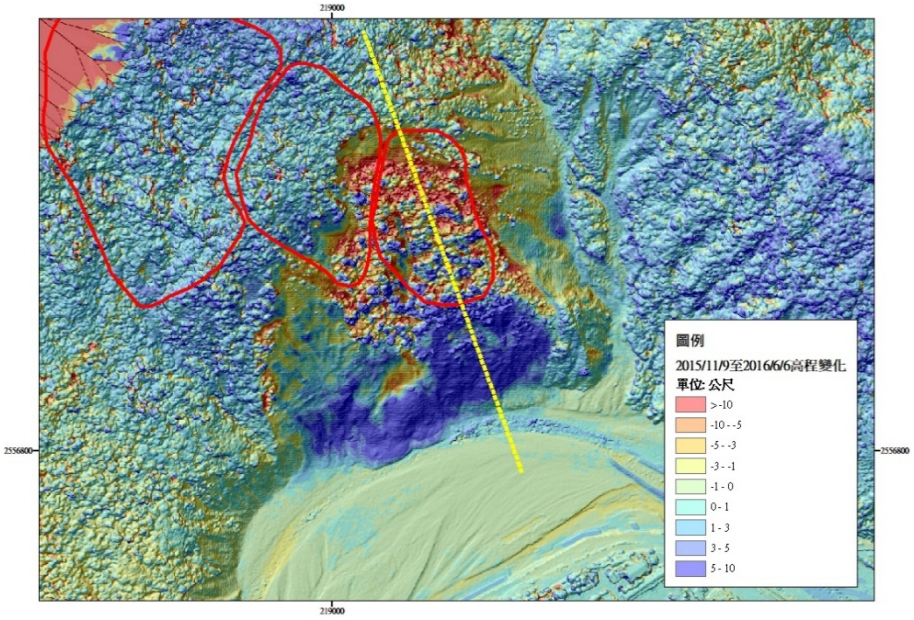


圖 5-14 區域 1 和區域 2 從 2015 年底至 2016 年中之間地表高程變化圖

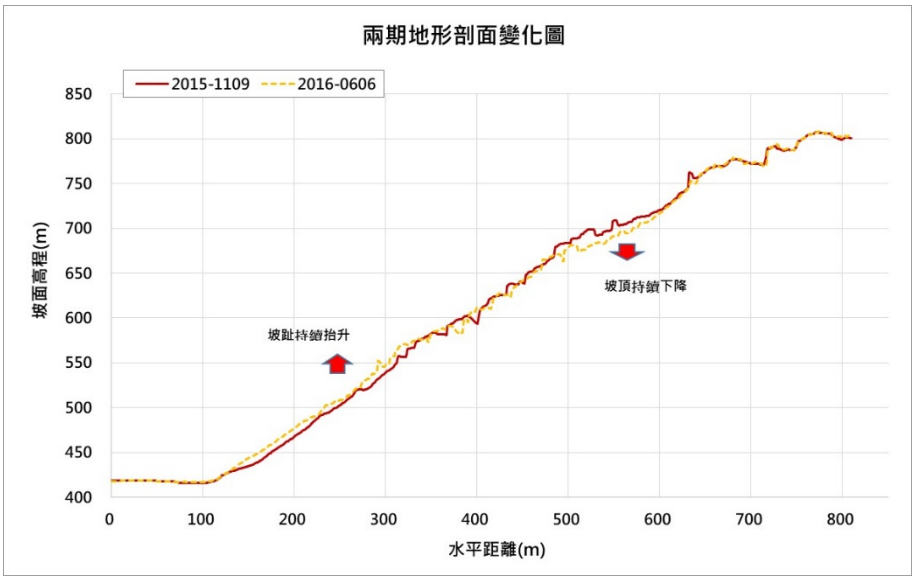


圖 5-15 區域 1 地形剖面從 2015 年底至 2016 年中之間變化圖

同樣方法比較 2016 年 6 月 6 日和 2016 年 11 月 18 日的 UAV 產製數值地形比較，如圖 5-16，可見崩塌從區域 1 擴大到區域 2 的範圍，且區域 1 內左側蝕溝有明顯刷深的現象。同樣看到區域 1 地形剖面之變化，如圖 5-17，剖面頂部土體仍然持續滑動，但此次坡趾僅有些微變化。同樣係參考高中(2)雨量站的觀測資料，此段期間的最大一日降雨發生於 2016 年 9 月 27 日，其一日降雨量為 414 mm/day。本計畫假設區域 2 的擴大及左側蝕溝刷深係受到降雨事件的影響。

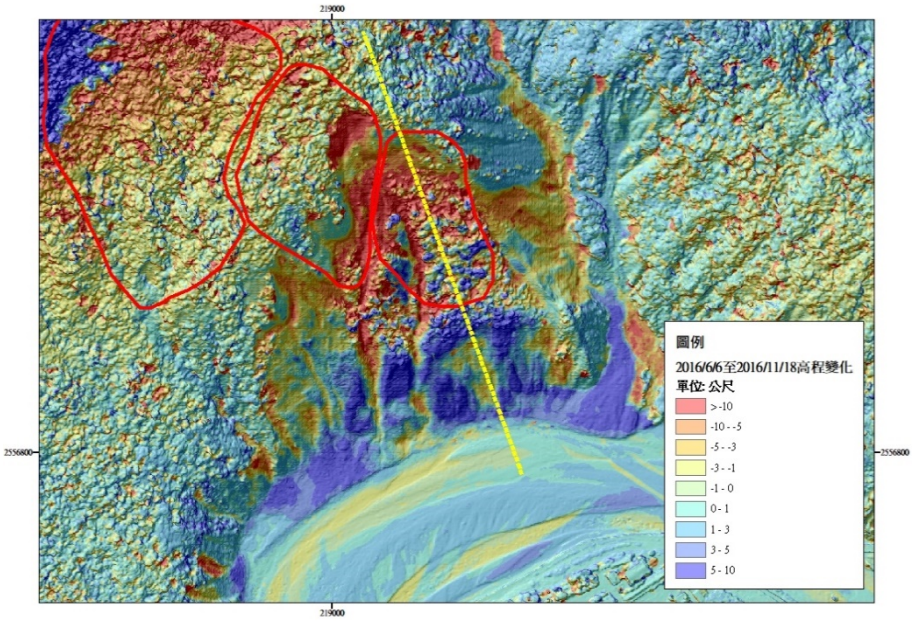


圖 5-16 區域 1 和區域 2 從 2016 年中至 2016 年底之間地表高程變化圖

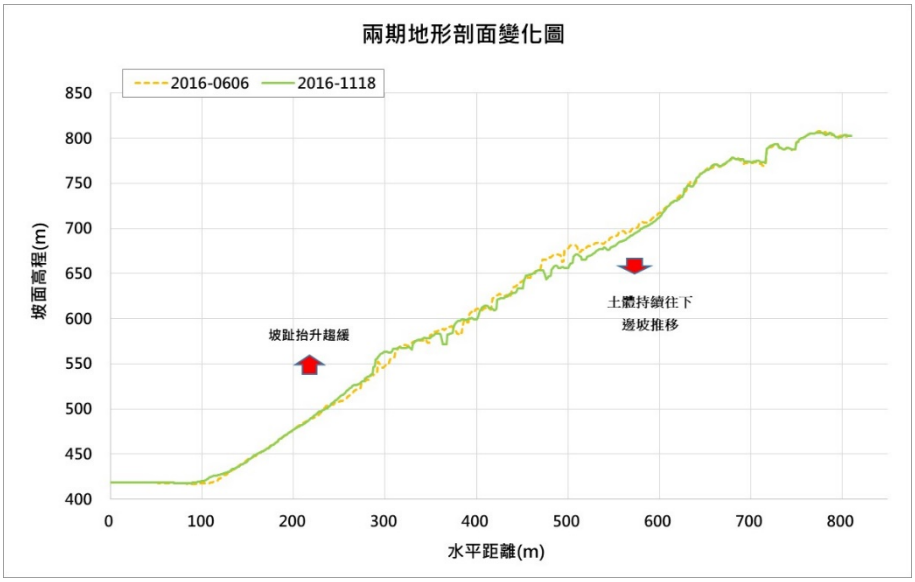


圖 5-17 區域 1 地形剖面從 2016 年中至 2016 年底之間變化圖

同樣拿 2016 年 11 月 18 日和 2017 年 7 月 8 日的 UAV 產製數值地形比較，如圖 5-18，區域內土體仍然持續滑動，但其規模明顯變小。同樣看到區域 1 地形剖面之變化，如圖 5-19，可見剖面頂部土體持續滑動的規模變小，且坡腹和坡趾的地形接僅有些微變化。同樣依據高中(2)雨量站的觀測資料，此段期間的最大一日降雨為 237mm/day，發生於 2017 年 6 月 3 日。由於發生的降雨事件規模小於前期最大一日降雨規模，本計畫假設區域 1 於此段時間的滑動係受重力影響。

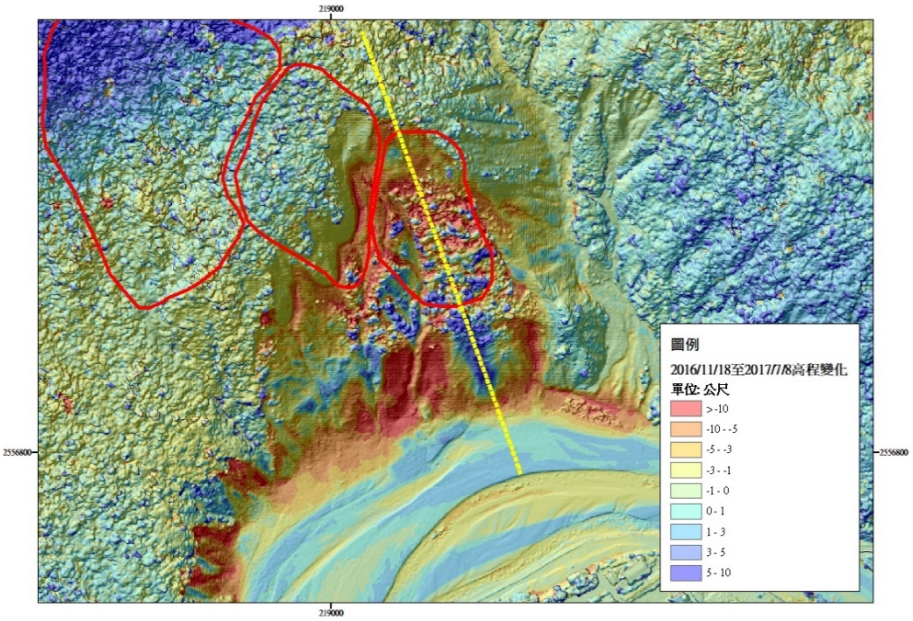


圖 5-18 區域 1 和區域 2 從 2016 年底至 2017 年中之間地表高程變化圖

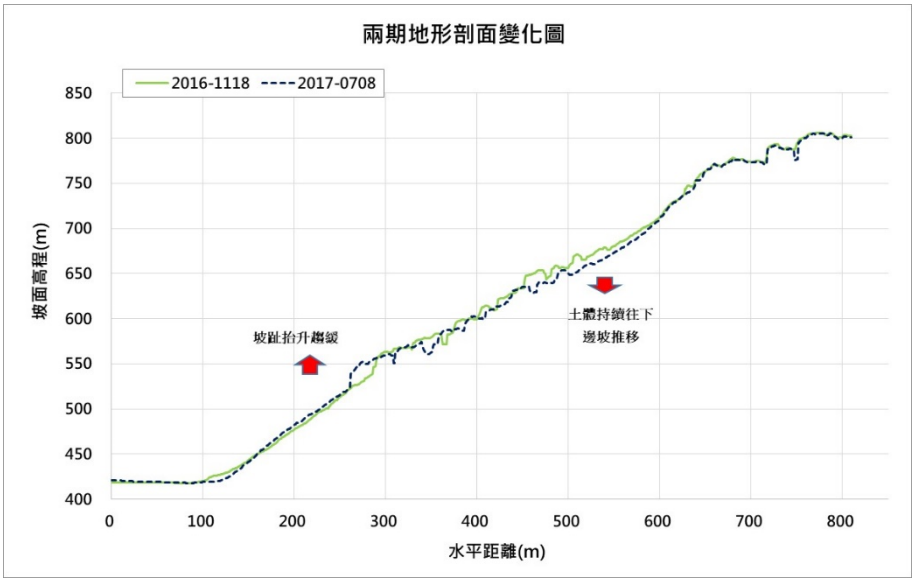


圖 5-19 區域 1 地形剖面從 2016 年底至 2017 年中之間變化圖

最後，比較 2017 年 7 月 8 日和 2017 年 9 月 24 日的 UAV 產製數值地形比較，如圖 5-20，區域 1 的地形變化極微，主要地形變動發生於區域 1 外的坡趾處。同樣看到區域 1 地形剖面之變化，如圖 5-21，剖面地形的變化已經趨於穩定。此段時間雖然較短，不到三個月的時間，但高中(2)雨量站曾觀測到 2017 年 7 月 31 日發生過一次達 325 mm/day 的最大一日降雨。

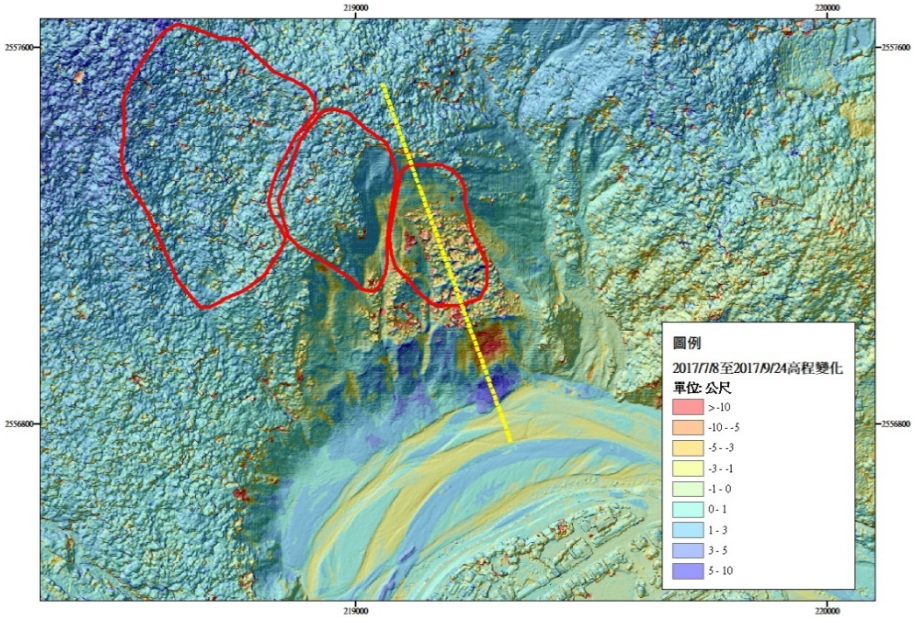


圖 5-20 區域 1 和區域 2 從 2017 年中至 2017 年底之間地表高程變化圖

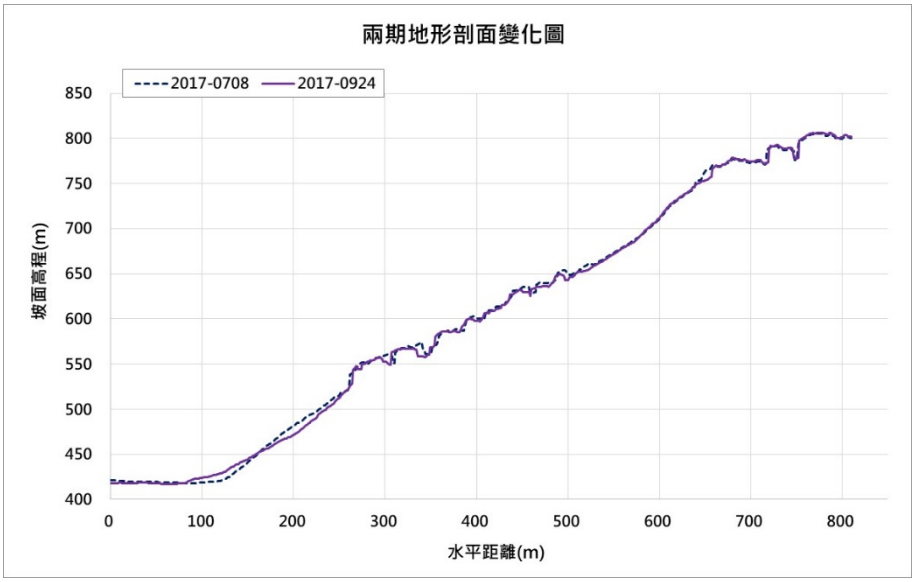


圖 5-21 區域 1 地形剖面從 2017 年中至 2017 年底之間變化圖

透過上述多期 UAV 產製數值地形的比較研判，本計畫可知 2015 年至 2017 年期間，區域 1 發生過顯著之崩塌事件，如圖 5-22，滑動土體推估其長度至少 250m 和其深度至少 50m。

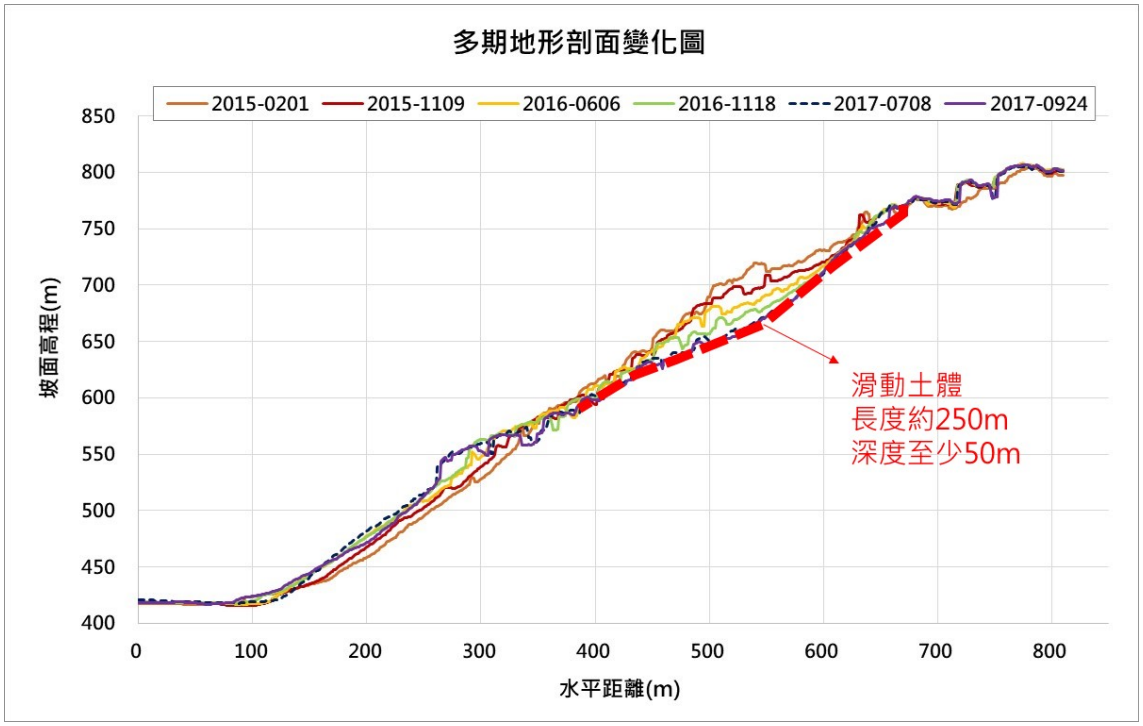


圖 5-22 區域 1 多期地形剖面(2015 年至 2017 年)比較圖

本計畫透過農林航測所(AFASI 圖台)來查看區域 1 的最新航空照片資料，如圖 5-23。放大到看到區域 1 坡面頂部的裸露處，可見一個非常平滑的表面，此次的崩塌可能已經深入到岩盤表面。此外，圖 5-22 顯示從高程 770 公尺往上處，多期地形中並沒有見到明顯的變化，鄰近此區域之地質應為高強度的岩盤。本研究以黑色虛線來連線上述區域，如圖 5-24，本研究認為圖中黑色虛線的下方應為完整的岩盤，而黑色虛線上方則為較破碎或風化的材料。同樣藉由區域 1 的最新航空照片，如圖 5-23，可見坡趾處有數條發育顯著之蝕溝，其蝕溝內的土體顏色又較蝕溝外的土體顏色來的鮮明，代表平常有水流沖蝕著土體表面。本計畫假設蝕溝之源頭，如圖 5-23 右下藍色虛線處，係為地下水的出流處，將此區域對應於圖 5-24 中，本計畫得以將坡面滲水之位置標示出來。

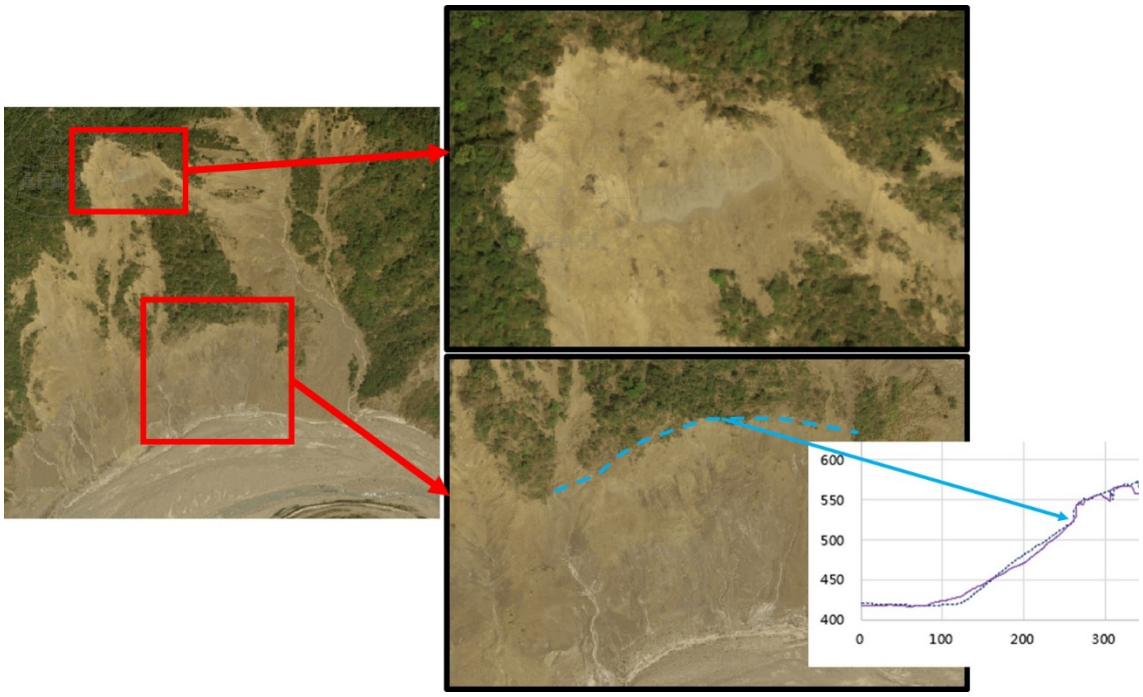


圖 5-23 農林航測所(AFASI 圖台)顯示區域 1 最新之航空照片圖

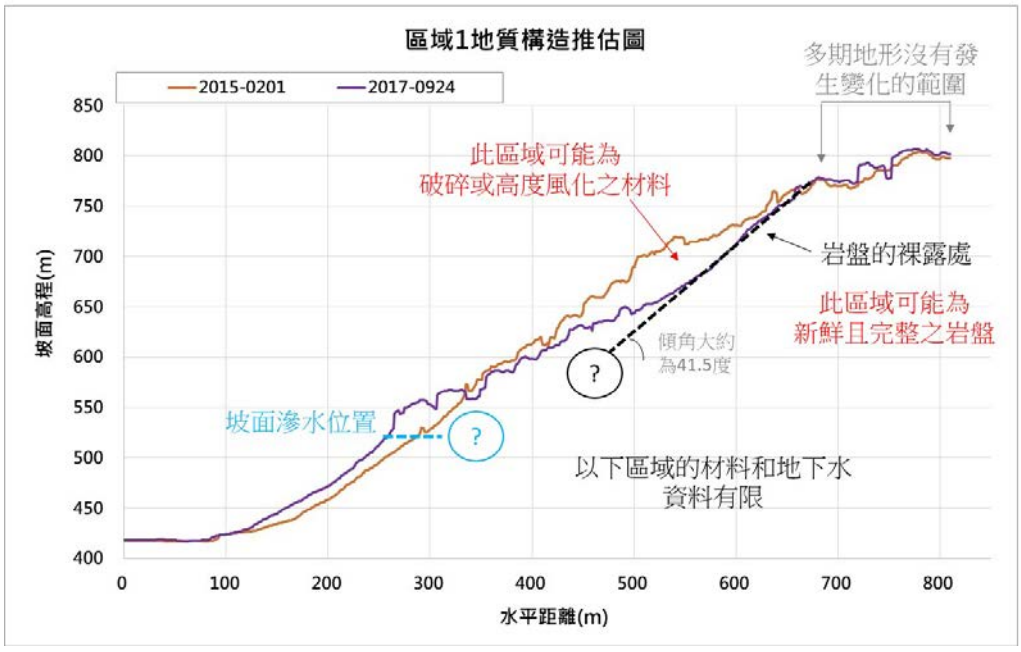


圖 5-24 區域 1 地質構造假設圖

第六章 研究區域發生條件與影響範圍分析

本計畫待研究區域分區分塊分析完成後，將取得不穩定坡面的幾何參數，相關參數將作為模式的建模依據，並用來模擬崩塌從發生到流出的過程。Anura 模式的執行流程如圖 6-1 所示。本計畫預定透過多期數值地形來得到研究區域的幾何參數，並以前期邊坡剖面做為建模依據。然後透過鄰近區域的地質調查報告來取得材料參數。降雨有關之邊界條件將依據鄰近雨量站的觀測資料來進行設計。最後初始條件係指地下水位位置的給定。當完成上述模式設定後即可進行模擬，模擬結果將與後期邊坡剖面作為建模依據。

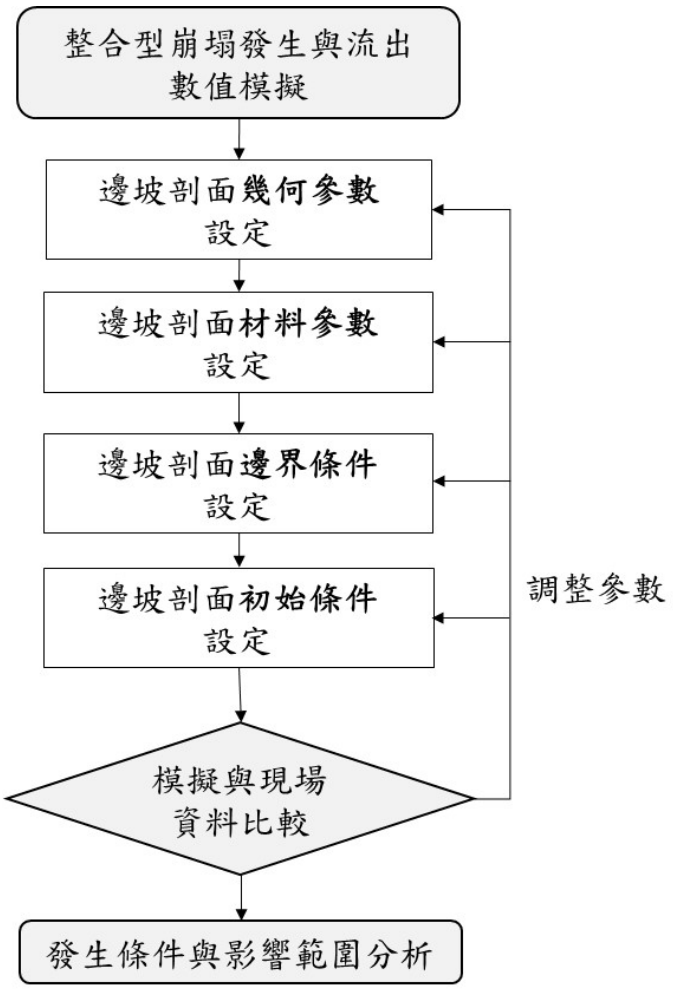


圖 6-1 整合型崩塌發生與流出數值模擬及後續應用流程圖

第一節 香港柴灣翡翠路崩塌事件

本研究曾以 1995 年 8 月 13 日香港柴灣翡翠路發生的崩塌事件進行案例研究，當坡面幾何參數條件已知時，如圖 6-2 所示，將可以前期地形資料做為模式建置之依據，其模型建置而成的範例如圖 6-3 所示。

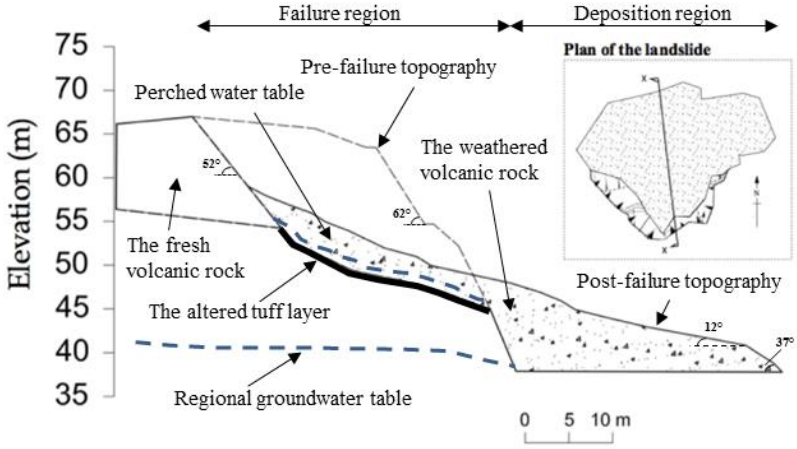


圖 6-2 香港翡翠路崩塌發生前後地形比較圖 (knill 1996)

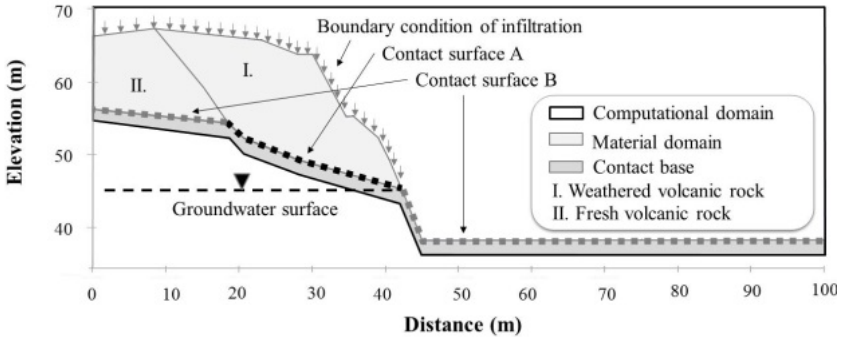


圖 6-3 Anura 建置香港翡翠路崩塌事件模型圖

當上述模型完成建置之後，接著為材料參數的給定，以此案例來說，必須給定的參數包括有土體密度、液體密度、孔隙率、水力傳導係數、液體體積模數、彈性模數、柏松比、凝聚力、材料摩擦角、未飽和水力傳導方程式(van Genuchten-Mualem)。此案例給定一場 10 分鐘的連續降雨，其降雨強度已達地表積水條件，並於坡腳處給定一個初始地下水位。完後上述設定後即可進行模擬，所得到的預期成果為邊坡隨時間變形的變化圖，

如圖 6-4 所示。模擬結果將與後期地形剖面進行比對，若與資料不符合即回到前面材料參數、邊界條件和初始條件等參數的設定，透過相關參數的調整來取得與實際現象接近的模擬結果，並探討相關參數的合理性。

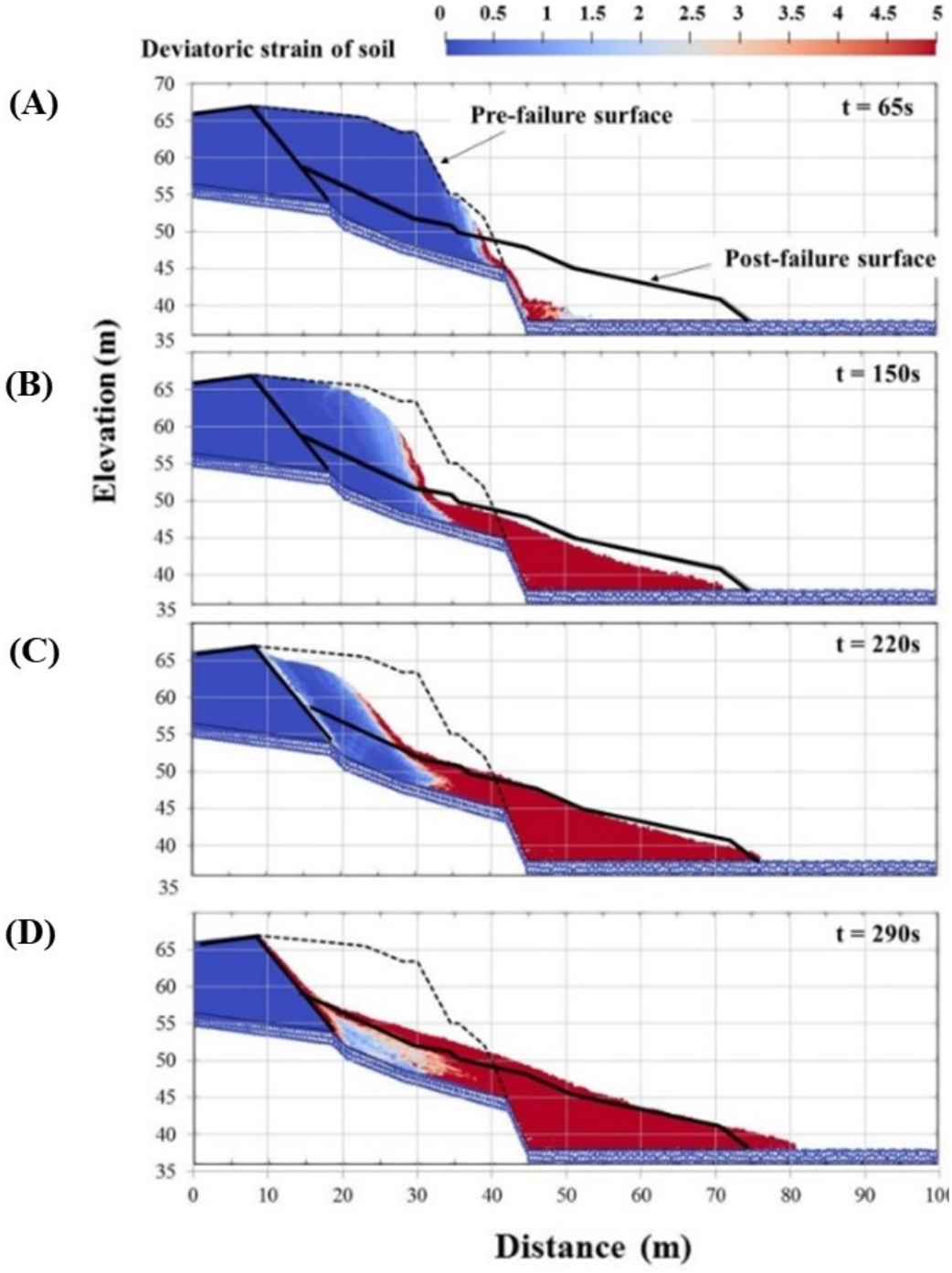


圖 6-4 Anura 模擬香港翡翠路崩塌過程體積應變分布變化圖

第二節 台灣高雄寶來里荖濃溪右岸之坡面

本研究將參照第四章研究區域基本資料蒐集和第五章研究區域分區分塊分析等結果，使用第三章所提出之整合型崩塌發生及流出模式為工具，依照圖 6-1 的研究流程來進行台灣高雄寶來里荖濃溪右岸坡面崩塌之模擬。

一、 邊坡剖面幾何參數設定

首先為邊坡剖面模型的建置。本研究依據第五章第三節研究區域不安定邊坡地形變化分析的結果，以圖 5-24 中 2015 年 2 月 1 日之地形剖面做為崩塌發生前地形，建模的初步結果如圖 6-5 所示。由於此區域並無鑽探資料佐證地質構造，僅能透過多期地形變化、航遙測圖資和裸露地資料等來研判可能之地質構造，如圖 5-24。因為本研究已經知道崩塌發生後之地形變化，是故本研究得以假設三種不同情境之地質構造，然後透過模式來探討不同地質構造情境下的崩壞行為，並藉此來找出此區域最有可能之地質構造。因為鑽井係為經費高昂的調查方法，若能透過模式來研判可能之地質構造，然後再鑽井予以比對和修正，將能提高坡面調查的成果精度和執行成效。基於上述理由，本研究依據圖 5-24 提出以下三種可能之地質構造情境。

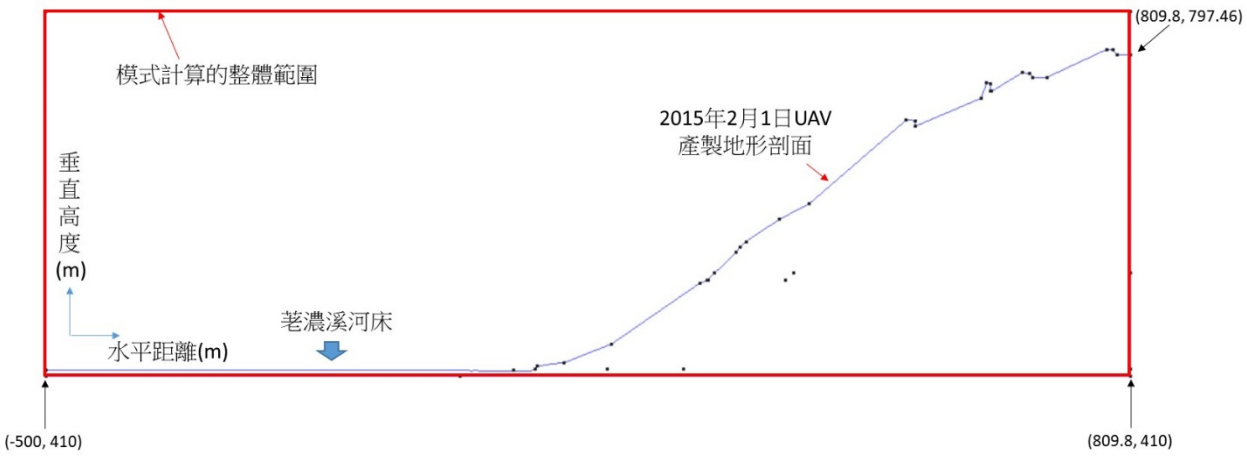


圖 6-5 Anura 模式建置研究區域的過程圖(1)

地質構造情境一，本研究假設剖面整體為均勻之鬆散材料，且其區域內並不具有完整的岩盤，如圖 6-6 所示。此外，假設此坡面座落在一個堅固的地盤上方，當崩塌發生運動時，崩塌滑動的最深不會超過此岩盤的絕對高程。於此情境下，坡面土體之最大厚度可高達 385.16 公尺。



圖 6-6 研究區域地質構造情境一之概念圖

由於地質構造情境一的假設過於理想，其所假設的情況通常僅出現在室內實驗的條件。是故，本研究依據圖 5-24 中標示多期地形沒有發生變化的範圍，以及航空照片拍到岩盤裸露之位置，假設坡面內存在一個完整的岩盤，以及岩盤上方座落著鬆散風化之岩體，如圖 6-7 所示。於此情境下，坡面土體之最大厚度將不會超過 100 公尺。

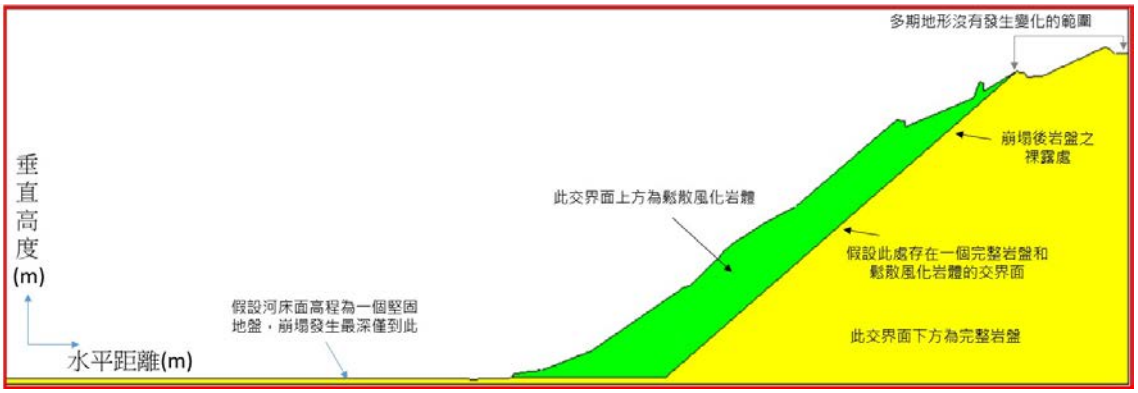


圖 6-7 研究區域地質構造情境二之概念圖

本研究從圖 5-22 的多期地形剖面變化發現，崩塌發生時坡面隆起之位置為高程約 550 公尺處，並非鄰近河床面的坡趾處(高程約 418 公尺處)，此結果說明 2015 年至 2017 年期間坡面高程 418 公尺至 550 公尺係處於安定狀態，此區域坡面下之地質構造似乎與坡面高程 550 公尺以上具有不同之特性。基於上述理由，本研究提出第三種地質構造情境，如圖 6-8，假設岩盤於高程於 550 公尺以下之深度較淺，調整時，假設高程 550 公尺以下岩盤之傾角與高程 550 公尺以上岩盤之傾角一致，僅有所在位置深度之差異。

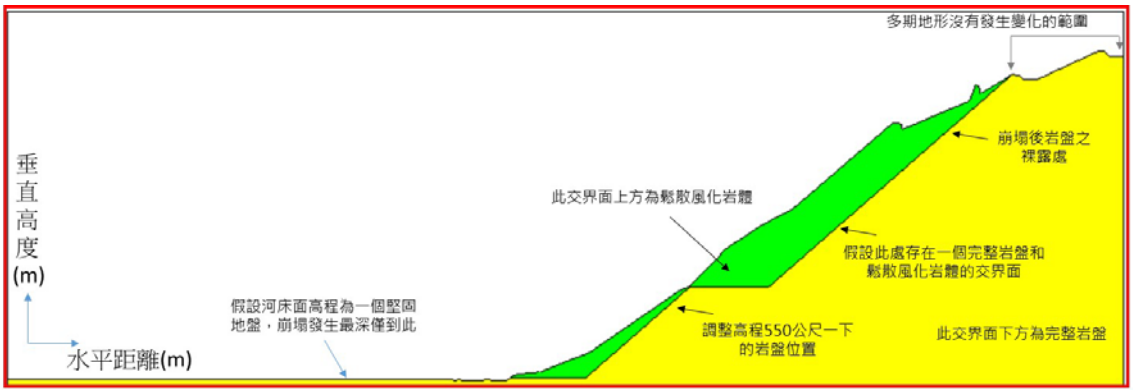


圖 6-8 研究區域地質構造情境三之概念圖

二、 邊坡剖面材料參數設定

從第四章研究區域基本資料蒐集可知，研究區域的地質分區為長枝坑層，如圖 4-6，其地層主要以砂頁岩互層為主，其比重約 2.60~2.61，凝聚力 0.15-0.45kgf/cm²，靜摩擦角 27.5 度至 32.5 度之間，透水係數則為 1.12×10^{-6} m/sec 到 5.0×10^{-6} m/sec 間。

詹恕齊 (2008)和潘昱維 (2009)透過超音波試驗從長枝坑層採樣回來之砂岩樣本，試驗結果顯示長枝坑砂岩的單壓強度落在 100~230MPa 之間，其柏松比則落在 0.2~0.3 之間。

有關長枝坑層的土壤保水曲線參數，國內鮮少相關試驗報告與研究。參考 Carsel 和 Parrish 等人(1998)提出典型材料的土壤保水曲線參數及水力傳導係數，如表 6-1，本研究假設長枝坑層風化材料之性質近似砂子(sand)，參考其數據做為模式設定使用。

表 6-1 各種材料的土壤保水曲線參數和水力傳導係數

material	S_{min}	S_{max}	λ	P_0(kPa)	k_l^{sat}(m/s)
sand	0.105	1	0.627	0.677	$8.25\text{x}10^{-3}$
loam	0.181	1	0.359	2.725	$2.89\text{x}10^{-4}$
silt	0.074	1	0.27	6.131	$6.94\text{x}10^{-5}$
clay	0.179	1	0.083	12.263	$5.55\text{x}10^{-5}$

三、 邊坡剖面邊界條件設定

針對三種地質構造情境，本研究給定之邊界條件如圖 6-9、6-10、6-11 等。位移邊界條件設定部分，統一給定側邊水平方向固定條件及底部給定完全固定條件。地下水邊界條件設定部分，統一給定側邊滲流條件和底部給定不透水條件。

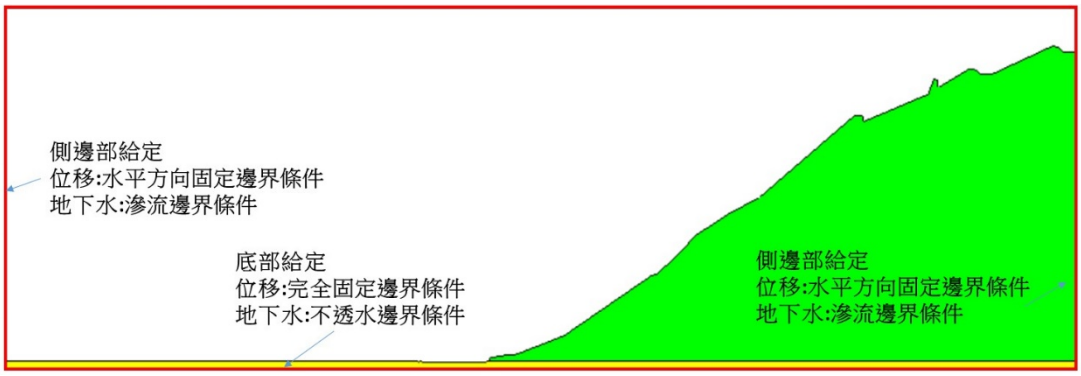


圖 6-9 地質構造情境一之邊界條件

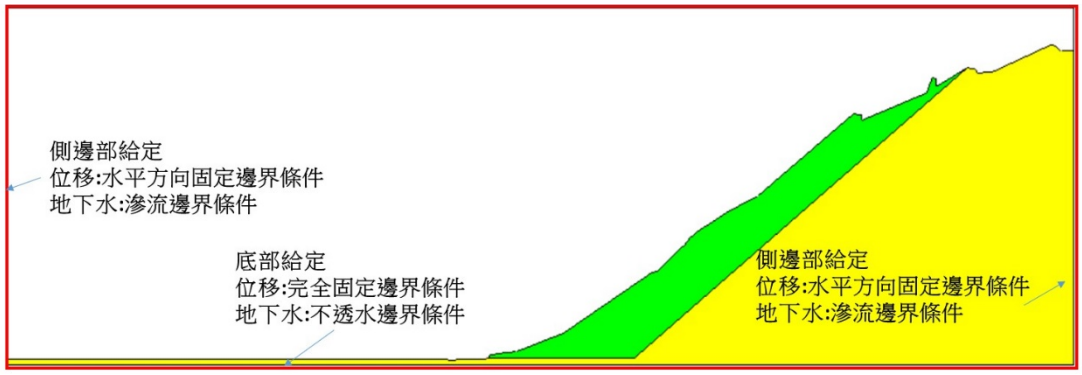


圖 6-10 地質構造情境二之邊界條件

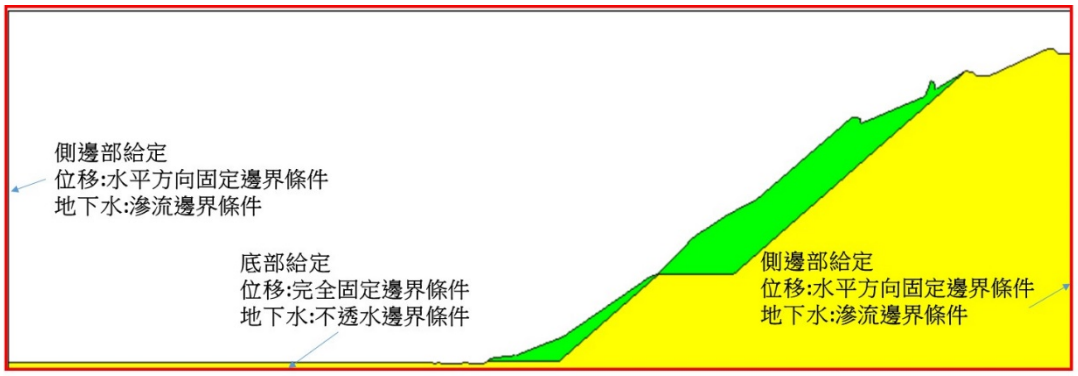


圖 6-11 地質構造情境三之邊界條件

四、 邊坡剖面初始條件

本研究依據圖 5-23 和圖 5-24 研判可能之坡面滲水位置在高程約 535 公尺處。雖然現場未有任何的鑽井或水位監測資料，因著坡面滲流常為地下水流出土體之現象，本研究高程 535 公尺處為潛在地下水面的所在位置，如圖 6-12。因此，於邊坡初始孔隙水壓分布給定時，地下水面高程以下給定靜水壓分布之孔隙水壓值，而在地下水面高程以上則給定靜水壓分布之吸力值。由於自然邊坡土體之吸力存在著上限值，因此當模式推估吸力值時，設定不超過 100 kPa。

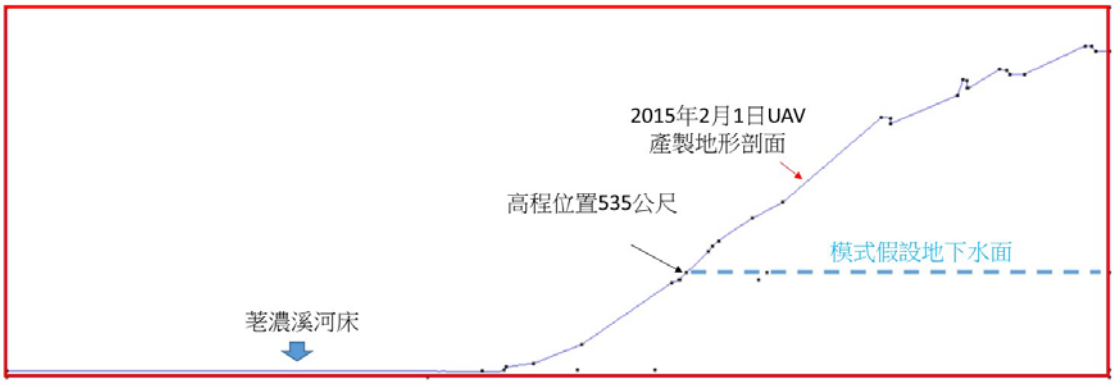
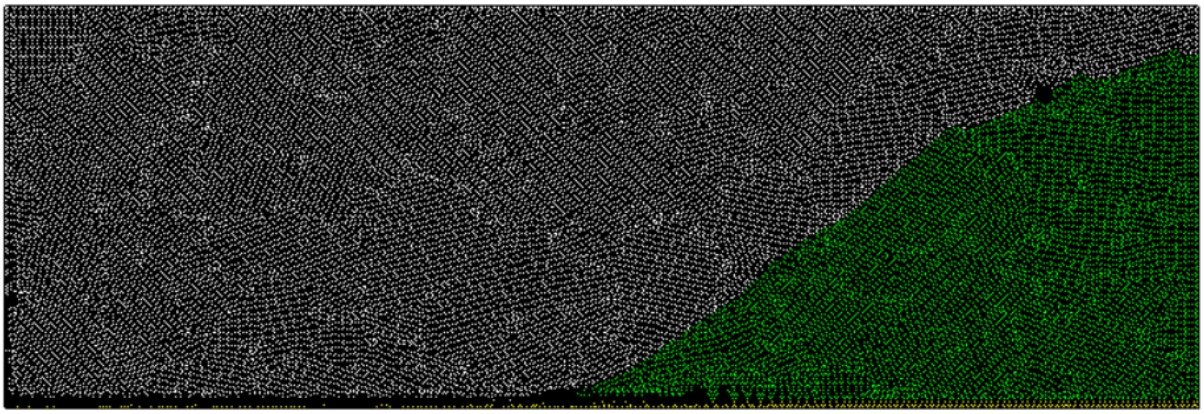


圖 6-12 研究區域假設地下水面位置圖

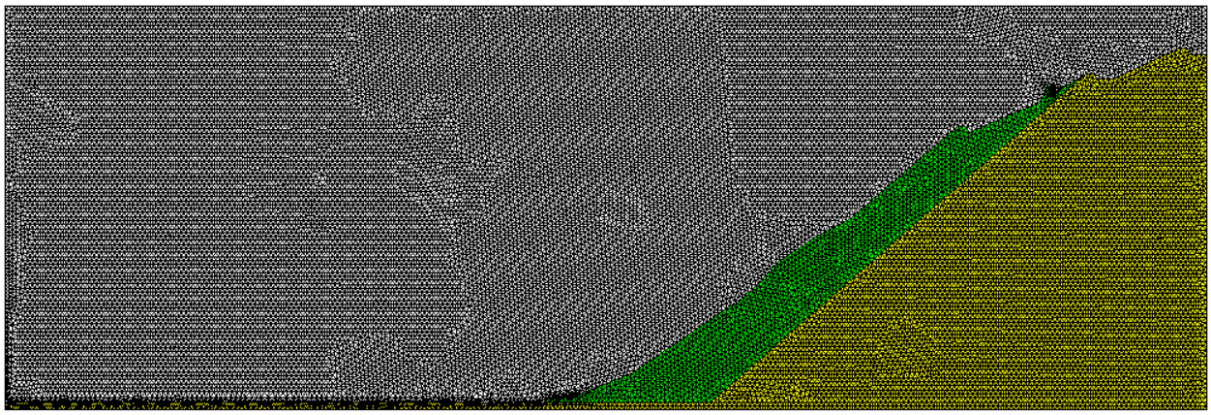
邊坡土體初始應力分布給定部分，因為邊坡土體的幾何形狀與土體單位重量已經知道，模式參考 PLAXIS 直接以土壓係數 K_0 來給定邊坡土體初始應力。此方法可直接給定邊坡土體的初始應力分布，快速得到結果為此方法之優點。但是，此方法並未檢核邊坡土體之初始應力是否任意位置皆達平衡狀態，此亦為該方法之缺點。

五、 模式網格之配置

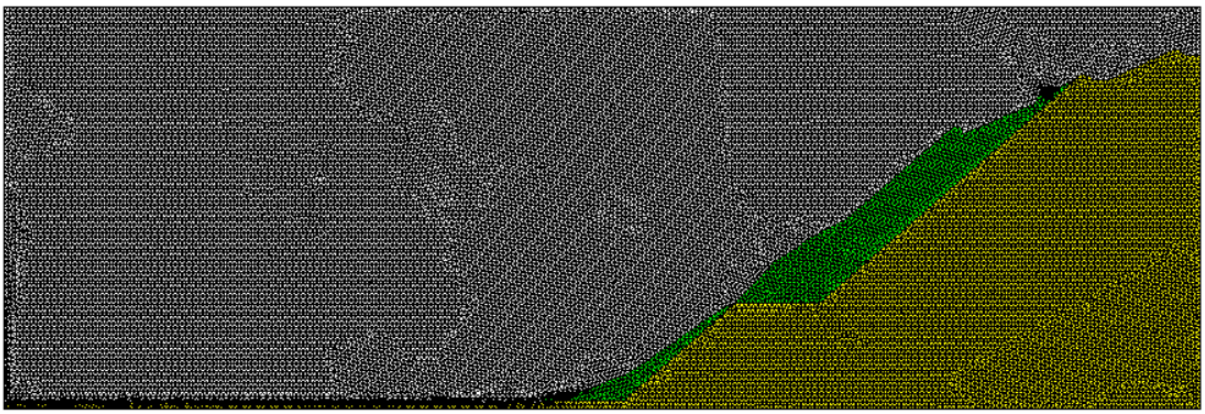
本研究以 5 公尺做為三角網格劃設的最大長度，屬於鬆散風化材料之網格，每格給予 25 個材料點之配置，屬於岩盤之網格，每隔給予 12 個材料點配置。模式總計產製 53534 個三角網格，網格之間節點共計生成 107803 點，如圖 6-13。



（情境一）



（情境二）



（情境三）

圖 6-13 研究區域網格配置圖

六、 模擬結果

地質構造情境一的模擬結果如圖 6-14。圖中黑色虛線為崩塌發生前地形剖面(2015 年 2 月 1 日)，黑色實線為崩塌發生後地形剖面(2017 年 9 月 24)。圖中為 Anura 模式模擬地質構造情境一下，崩塌發生後土體應變量分布，以及崩塌後土體堆積狀況。透過 Anura 模式模擬可以，寶來里荖濃溪右岸坡面之地質構造不符合均勻土體之假設條件。因為崩塌發生於此條件時，坡址處(高程約 410 公尺)的坡面土體經擠壓後往荖濃溪河床處推擠，同時，坡面頂部(高程約 760 公尺)的坡面土體開始下沉，將此模擬結果與實際崩塌發生後地形比對並不相符，實際崩塌發生時，高程 550 公尺到 410 公尺處的坡面呈現穩定狀態，以及高程 760 公尺以上坡面地形實際上亦沒有發生下沉。

透過地質構造情境一的模擬結果，亦證明寶來里荖濃溪右岸坡面底下勢必存在有一個完整的岩盤，才得以確保坡面高程 760 公尺以上之地形沒有因崩塌而產生任何變化。

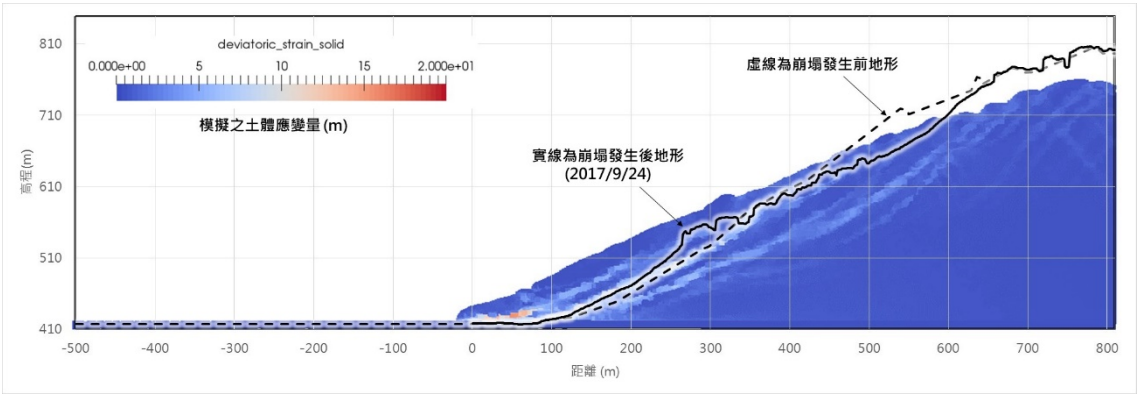


圖 6-14 地質構造情境一模擬結果圖

地質構造情境二的模擬結果如圖 6-15。於此情境下，本研究假設坡面高程 760 公尺處與崩塌後裸露地位置的連線為岩盤和鬆散土體劃分的交界面，如圖 6-7。於此條件下，圖中可得到地質構造情境二的模擬結果，包括崩塌發生後土體應變量分布，以及崩塌後土體堆積狀況。於此條件下，於高程 610 公尺以上之坡面處，可得到實際崩塌後地形近似之結果，如圖中黑色實線。模擬結果同樣顯示高程 760 公尺以上沒有任何地形的變化量，而在坡面高程 610 到 760 公尺之間，因著崩塌之發生，此處地形出現大幅度的下降，且於崩塌發生後，有部分的鬆散土體堆積在岩盤上，其堆積後所形成之地表與實際崩塌後地形相當近似。透過此模擬結果說明，本研究於高程 610 公尺以上所假設之岩盤確有存在之可能性。

透過模擬結果顯示，於此情境下的崩塌發生，同樣係因為高程 410 公尺處之土體不穩定所導致，當此處受到擠壓往芣農溪河床處移動，並使得高程 610 公尺以上之坡面失去支撐而下滑。但此模擬結果與實際崩塌現象並不吻合，從圖中崩塌後地形顯示(黑色實線)，崩塌發生期間，高程 410 公尺到 510 公尺處之坡面仍保持穩定。由此可知，於高程 410 公尺到 510 公尺處坡面下必定存在保持此處坡面穩定之地質構造。

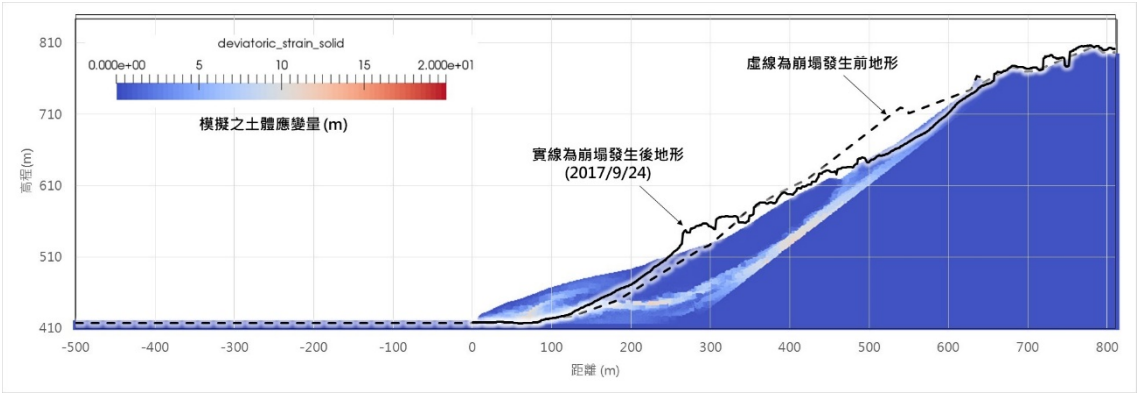


圖 6-15 地質構造情境二模擬結果圖

地質構造情境三的模擬結果如圖 6-16。於此情境下，本研究除保留情境二中假設存在之地盤，在進一步假設高程 410 公尺到 510 公尺處之地表下存在一個離地表較淺處且形成一個台地狀之地盤來穩定此處的坡面。於此條件下，於高程 610 公尺以上之坡面處，可得到實際崩塌後地形(2015 年 11 月 9 日)近似之結果，如圖中黑色實線。如圖中黑色實線。模擬結果顯示高程 610 公尺到 710 公尺出現一個近似平行破壞的滑動面，將整個狀似長條狀的土體從原本高程 710 公尺處往下滑落至大約高程 700 公尺。情境三與情境二模擬結果的差異性主要來自於假設於高程 410 公尺到 510 公尺處一個較淺的地盤構造，說明此假設可能較貼近坡面的真實情況。

透過模擬結果顯示，坡面高程 410 公尺處仍然有大量土方之堆落，然則在實測地形剖面上並未有相似的結果。本研究認為降雨形成之地表逕流和荖濃溪主流上升之水位是將此處堆積土體帶走的可能原因，唯此論述尚須作進一步的求證。

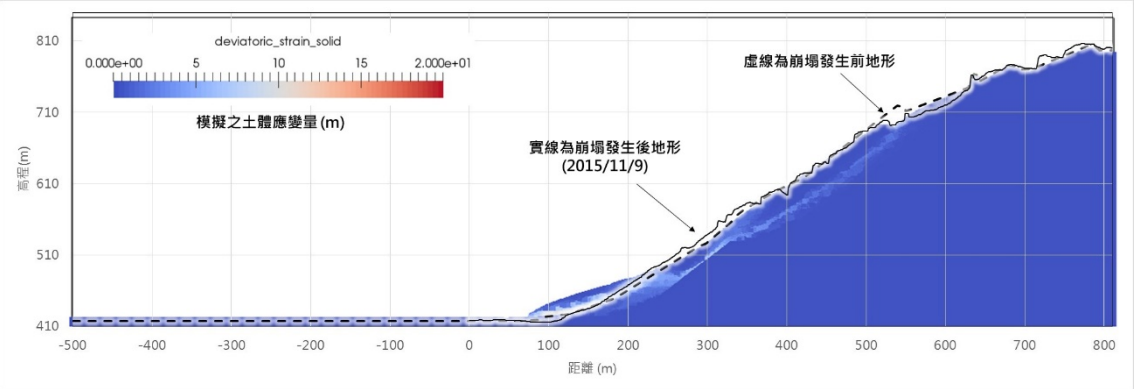


圖 6-16 地質構造情境三模擬結果圖

第七章 結論與建議

本計畫嘗試以 Yoshino 和 Uchida (2019)的研究結果建置對大規模崩塌潛勢區內任意邊坡剖面的穩定性分析方法，透過此方法將得以分析潛勢區域內不穩定的邊坡位置，其所得到的分析結果將做為整合型崩塌發生與流出數值模式的建模依據。

目前本計畫選定的研究區域為荖濃溪寶來段右岸邊坡，分析區域約分析面積約 252 公頃，並針對研究區域內地形、地質資料進行相關調查成果之蒐集，另亦完成研究區域內歷年衛星影像資料蒐集與比對分析，針對本區近 15 年之變化情形進行探討，而數值地形部分則完成 1989 年、2005 年之航測地形、2011 年之光達地形及 2008 年至 2020 年之 10 次 UAV 地形。

本計畫利用蒐集之 2011 高精度地形進行潛在大規模崩塌區之判釋，並利用不安定塊體分析公式及相關地文參數圈繪研究區域內不安定材料之分布位置，結果顯示利用 2011 年之數值地形所圈繪之不安定區域與 2017 年之擴大區域符合，顯示本研究所提公式之可行性，並利用各期 UAV 產製之地形資料進行分析，追蹤研究區域內不穩定區域之變化情形，做為後續數值模擬剖面之參考。

此外，本計畫已與荷蘭三角洲研究機構以材料質點法來發展整合型崩塌發生與流出數值模式(Anura)，其模式的發展理論與數值計算流程已於報告中進行說明。此模式過去已經有國外崩塌案例的應用研究，如 1995 年香港柴灣翡翠路崩塌事件，成大防災研究中心亦為此研究案的執行團隊，相關成果摘要說明於第六章第一節中。此外，本計畫依據第四章研究區域基本資料蒐集和第五章研究區域分區分塊分析之結果，於研究區域內擇定一個鄰近荖濃溪主流右岸之坡面，然後使用本計畫提出之整合型崩塌發生與流出數值模式(Anura)來進行應用研究，模擬相關之結果和討論已完成並呈現於第六章第二節中。

透過本計畫所提出之方法與工具,將能協助辦理大規模崩塌潛勢區的相關業務單位，於細部調查開始前，例如鑽井、地球物理探測等，和於監測設備裝設前，例如水位、側傾管等，提供更多有關坡面分區分塊、地質構造和材料參數等推估資訊,這些資訊將有助於細部調查和監測設備等施行的規劃,除能更準確掌握調查和設備裝設位置外，也能降低調查和設備設置的成本。

參考文獻

1. 李威霖，博士論文，”入滲過程中孔隙水壓變化及其對邊坡穩定影響之研究”，國立成功大學水利及海洋工程學系，2020。
2. 詹恕齊，碩士論文，”長枝坑層砂岩室內預應力試驗推估方法之研究”，成功大學土木工程學系，2008。
3. 潘昱維，”內鑽試體應用在砂岩預應力評估之研究”，成功大學土木工程學系，2009。
4. Bandara, S., Ferrari, A., & Laloui, L. ,“Modelling landslides in unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration using material point method.”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 40(9), 1358p-1380p, 2016.
5. Bishop, A. W., “The principle of effective stress.”, Teknisk ukeblad, 39, 859p-863p, 1959.
6. Hamad, F., “Formulation of a dynamic material point method and applications to soil-water-geotextile systems.” Universität Stuttgart Inst. f., Geotechnik, 2014.
7. Hillel, D., “Soil and water: Physical principles and processes.”, Academic Press, New York. Soil and water: Physical principles and processes. Academic Press, New York, 1971.
8. Knill, S. J., “Report on the Fei Tsui road landslide of 13 August 1995.”, Government Printer, South Africa, 1996.
9. Lee, W. L., Martinelli, M., & Shieh, C. L., “Modelling rainfall-induced landslides with the material point method: the Fei Tsui Road case.” In XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iceland, 2019a.
10. Lee, W. L., Martinelli, M., & Shieh, C. L., “Numerical Analysis of the Shiaolin Landslide Using Material Point Method.”, 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk 2019, Taiwan, 2019b.
11. Mualem, Y., “A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous me-dia.” Water resources research, 12(3), 513p-522p, 1976.

12. Sulsky, D., Chen, Z., & Schreyer, H. L., “A particle method for history-dependent materials.”, Computer methods in applied mechanics and engineering, 118(1-2), 179p-196p, 1994.
13. Sulsky, D., Zhou, S. J., & Schreyer, H. L., “Application of a particle-in-cell method to solid mechanics.” Computer physics communications, 87(1-2), 236p-252p, 1995.
14. Sulsky, D., Schreyer, H., Peterson, K., Kwok, R., & Coon, M., “Using the material point method to model sea ice dynamics.” Journal of Geophysical Research: Oceans, 112(C2), 2007.
15. Van Genuchten, M. T., “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.”, Soil science society of America journal, 44(5), 892p-898p, 1980.
16. Wang, B., Vardon, P. J., & Hicks, M. A., “Rainfall-induced slope collapse with coupled material point method.”, Engineering Geology, 239, 1p-12p, 2018.
17. Yoshino, K., & Uchida, T., “Estimating mechanical slope stability to predict the regions and ranges of deep-seated catastrophic landslides.”, The 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Golden, Colorado, USA, 2019.
18. Yoshino, K., Uchida, T., Ishizuka, T., & Mizuyama, T., “Study on developing process of water channel by landslide dam overtopping erosion.” Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 66(2), 3-9, 2013.

附錄

附錄一、期初審查意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、潛在大規模崩塌分區分塊方法建立相關建議		
一	圖3-4之圖例和圖3-5之圖示線條不符，應修正。	謝謝委員指正，原圖 3-4 和 3-5 已經重新編號為圖 2-4 和 2-5，圖例與圖不符合之處已經修正。(對應頁碼 2-6)
二、整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發相關建議		
一	以材料力學之彈塑性變形作為崩塌發生與流出判斷條件，是否改以塑流性之變形作為其臨界條件，較符合實況。可再詳加檢討。	謝謝委員建議，本研究修正崩塌前後應力應變關係的定義說明，於崩塌發生前，應力應變遵循線性關係，採用彈性變形的法則，於崩塌發生後，應力應變為非線性關係，於此採用與速度梯度有關的法則(Jaumann rate)。崩塌發生前後的判斷則採用摩爾庫論破壞發則。(對應頁碼 3-4)
二	理論依據、計算流程之說明詳細，進行數值解析應屬可行，為如何驗證宜有腹案。	謝謝委員建議，針對未飽和入滲現象的模擬，係透過不同模式比較來做校正。本計畫已與 PLAXIS 比較未飽和入滲現象的模擬結果，並具有一致性。請參照第三章第三節。(對應頁碼 3-14~3-16)
三	本計畫擬以材料質點法(MPM)發展分析大規模崩塌及崩塌流出之數值分析方法。本計畫案與荷蘭學者合作一起研究。本計畫具有學術性及國際合作，研究成果有利於國內進行大規模崩塌流動範圍之模擬，研究成果具有應用性。	謝謝委員肯定。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	惟數值模式採用材料質點法(MPM)所需之地文及水文資料很多，待定的相關參數也不少，若要應用到國內，建議列出本土化的相關參數適用值的參考表。	謝謝委員提醒，由於此模式正處與發展與推廣階段，短時間內無法完整列出本土化的相關參數適用值。但本計畫會開始進行相關參數適用值的文獻回顧，並於期末提出初步結果。目前整理的資料如附錄三。
五	本計畫使用之MPM模式，其軟件為商業付費或開源軟體，宜補充說明，後續是否可技轉水保局?	謝謝委員意見，此模式目前尚未成熟到成為商業付費軟體或是完整開放任意使用者使用。現階段僅提供給與荷蘭三角洲研究機構合作之對象得以使用。未來如何透過成大防災中心將其技轉給水保局，還須後續的討論與研議。
六	模式所需蒐集之參數或參數建議值宜補充整理。	謝謝委員提醒，本計畫會開始進行相關參數適用值的文獻回顧，並於期末提出初步結果。目前整理的資料如附錄三。
三、其他相關建議		
一	計畫審查意見及回覆，請附於各期報告書之附錄。	謝謝委員意見，依指示辦理。

附錄二：期中審查意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、潛在大規模崩塌分區分塊方法建立相關建議		
一	P.2-1第一節為坡面穩定曲線建立，惟該節內容似未述及穩定曲線如何建立？另，公式宜附加公式號次。	謝謝委員提點，本計畫所提之坡面穩定曲線評估方程式，係直接引用 Yoshino 和 Uchida (2019)的研究結果，相關推導過程已經發表於 Yoshino 等人(2013)的研究文章，上述文章已經列入參考文獻，請參閱。公式號次缺漏之處已經補齊(對應頁碼 2-1~2-2)。
二	圖2-3,何以崩塌區之分佈位在陡坡與緩坡之間，相對高度較大與較小之間？另崩塌區之安定分析係依崩塌前或崩塌後之坡面地形分析，宜加以說明、論述。	謝謝委員意見，圖 2-3 中用來判斷穩定與否的臨界線，其所代表之意義為其所在高程發生崩塌的臨界坡度，當所在高程的坡度小於此臨界坡度時，邊坡即處於穩定狀態。於圖 2-3 中，因為從長殿地區得到的實際剖面中，於高程較高處的坡度未達崩塌發生的臨界坡度，因此在圖 2-3 中才顯示出相對高度較高反而沒有發生崩塌的現象。本研究所提之穩定性分析方法，係提供使用者一個可於崩塌發生前坡面地形上快速尋找潛在不穩定坡面的方法，因此在分析使用上係使用崩塌前坡面地形。崩塌後地形資料係做為本研究所提方法之驗證資料，其結果請參考圖 2-5(對應頁碼 2-3~2-5)。
三	研究區不安定邊坡分析所取	謝謝委員意見。研究剖面之

項次	審查意見	回覆辦理情形
	之坡面方向是否依最大坡度方向選取，或如何選取，請補充。	選取如圖 2-2 所示，使用者先選取一個坡面(或集水區)的低點後，然後依此低點來繪製大量剖面，直到所有剖面得以覆蓋設定之目標坡面，接著將剖面所得到之地形做為本研究所提穩定分析之數據即可。因為這是一個快速評估的方法，即便剖面的數量很多，仍然可以在短時間內完成，於此優點下，剖面之選取上並無必要之限制條件。有關剖面線劃設的方法請參照第二章第二節(對應頁碼 2-3)。
四	使用剖面線尋找不穩定區域時，剖面線坡趾之頂點處之選擇，有何限制或規則？	謝謝委員意見，因為這是一個快速評估的方法，可選取任意坡面(或集水區)最低點和最高點的連線做為剖面，因此在使用上並於必要之限制或規則。有關剖面線劃設的方法請參照第二章第二節(對應頁碼 2-3)。
二、整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發相關建議		
一	P.3-14圖3-5土壤水分特性曲線是在吸水狀態或排水狀態，請補充。	謝謝委員意見。本研究所提之未飽和滲流理論，無法反映土壤吸水和排水過程中，於土壤水分特性曲線之差異性，因此在模式的計算過程中，無論是土壤之吸水或排水狀態，皆採用 P.3-14 圖 3-5 中的土壤水分特性曲線。感謝委員指出模式的使用限制。(對應頁碼 3-14)。
二	使用Anura模式時，初始地下水位及土體內初始孔隙水壓分布應如何設定？是否有參	謝謝委員意見。於 Anura 模式中，土體的初始孔隙水壓分布，可先透過初始地下水

項次	審查意見	回覆辦理情形
	考或建議原則？	面線給定後，然後以靜水壓分布來反算土體其他位置的初始孔隙水壓值。此方法也係常見之大地工程軟體的設定方式，例如 PLAXIS、GeoSutio。
三	P.6-2使用Anura模擬香港翡翠路崩塌事件，是否使用真實情境之降雨？且模擬之崩塌發生時間、規模、土砂流動情形是否與真實狀況相符？請說明。	謝謝委員意見。根據香港翡翠路崩塌災後調查報告，崩塌係發生於坡面降雨強度達地表積水條件之後，所以本案例之模擬係直接從此降雨條件下開始進行模擬。此案例模擬結果與災後地形之比較如圖 6-4，透過比較，模擬在土砂運動之距離和堆積厚度上與真實狀況有近似之結果(對應頁碼 6-3)。
三、研究區域基本資料蒐集相關建議		
一	P4-4，文中透水"細"數誤植，請更正。	謝謝委員指正，文字勘誤已經修正(對應頁碼 4-4)。
二	P4-5，文中第二行成果如圖，圖號不見，請修正。	謝謝委員指正，圖號缺漏已經補正(對應頁碼 4-5)。
三	於P1-3計畫執行架構圖中，有關基本資料和地質參數蒐集一項，配合總計畫之UAV產製地形資料，後續請團隊於期末報告補充數值模式所使用之地質及模式材料參數，以利後續多時期模擬分析比較。	謝謝委員提醒，總計畫提供之 UAV 產製數值地形資料已經補充至第四章第三節中(對應頁碼 4-12,4-16 ~ 4-25)。數值模式所使用之材料參數資料則說明於第六章內()。
四、研究區域分區分塊分析相關建議		
一	P5-2，不安定區域分析剖面分析成果缺少區域5，請團隊補	謝謝委員指正，不安定區域分析剖面分析成果中勘誤的

項次	審查意見	回覆辦理情形
	充。	部分已經於期末報告時修正(對應頁碼 5-3~5-5)。
二	P5-5，於圖5-8中，如何決定判釋不穩定區域點位，再請團隊補充說明。	謝謝委員意見。圖 5-8 於期末報告中已被重新編號為圖 5-9，其圖中不穩定區域點位的判釋係依據圖 5-4~圖 5-8 的成果來得到。以圖 5-4 為例，本計畫判斷區域 1 的不穩定坡面主要發生在高程超過 220m 以上之地方，僅有一處發生在高程為 100m 處，因此於圖 5-9 中區域 1 之不穩定區域皆發生於高程較高之處，僅有一點發生於坡面中間位置。再以圖 5-6 為例，本計畫判斷區域 3 所有坡面皆處於穩定狀態，是故於圖 5-9 中區域 3 沒有任何不穩定區域。(對應頁碼 5-3~5-5)。

附錄三：期末審查意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	使用坡面穩定曲線來評估不穩定坡面，是否有限制坡面之尺度或是災害類型(淺崩、深崩) ？	本研究所題分析公式係針對地形特徵進行分析，因此對於坡面尺度並無限制，但對於崩塌類型則無法判別。
二	整合崩塌發生與流出模式，是否只有 2D，且國內如導入使用之費用為？	整合性模式具有3D地形的模擬功能，目前已經納入未來的研究規劃中。模式目前尚在發展測試階段，相關的開發費用與人力係由參與開發的研究團隊來共同承擔，待模式完成測試後，會以open soure的形式提供給有興趣的人使用，預定提供的時間為後年(2022)。
三	採用不同剖面對分析結果影響如何？在未知崩塌地時，建議如何選取適當剖面？	本研究提出之方法主要係透過不同剖面之高程差與地文參數進行分析，得到不安定區域分布位置，因此不同剖面確實會有不同成果。 目前剖面之選取係根據坡面單元之坡頂邊界與坡趾最低點進行連線，因此在未崩塌地區，可以參考同樣方法進行。
四	本計畫為整合型計畫之一，宜說明本子計畫目標和其他子計畫間之相關性及貢獻。	本計畫主要目標為整合計畫提出多期地形成果之加值應用，可增加地形資料之應用範圍，另本計畫成果亦可與子計畫一分析成果進行比對，評估不同方法對於不穩定區域評估之差異。
五	本研究計畫模擬成果甚佳，可供未來相關研究參考，惟模擬成果與實際情況能否比較驗證，差異性如何？建議加強說明以及未來進一步研究之建議。	本研究係透過崩塌滑動後期地形來與模擬成果比對，與本研度的研究成果中，模擬得到的地形變化近似崩塌後地形，唯有坡趾堆積土方部份，模擬結果較實際高估，本研究研判

項次	審查意見	回覆辦理情形
		實際地形的坡趾受沖刷影響，部份土方可能被水流帶走。本研究所提之整合性模式亦能對地底下的變形進行模擬，未來若有鑽井及地底下變位量測資料，亦可用來做為模式的驗證資料之一。
六	P.2-4，第 5 行，”點為”應是”點位”之誤植，請修正。	檢視相關文字並修正。
七	第三章部分頁碼錯誤，請修正。	檢視相關文字並修正。
八	P.3-4，倒數第 5 行，”和為摩擦角”應有漏字；倒數第 2 行，”必續”應是”必須”之誤植，請修正。	檢視相關文字並修正。
九	圖 4-1 研究區域範圍圖之圖內標示，宜修正。	檢視相關文字並修正。
十	P.4-4，第 2 行，”細粒沙岩”應是”細粒砂岩”之誤植，請修正。	檢視相關文字並修正。
十一	P.4-5，文內所蒐集之衛星影像年份應詳細說明所蒐集年份，與文中所述之”至 2004 年至今各年度”不符，請修正。	檢視相關文字並修正。
十二	P.5-2，描述研究區域內不安定地區多發生於滑動區之頂部位置，建議後續研究可探討其為崩塌冠部或崩塌主崩崖位置?	本研究所提供分析方法可透過數值地形找出相對不穩定之區域，分析成果可再與崩塌機制進行交互比對，增加分析成果之可應用性。
十三	P.5-6, 圖號 5-9 與 P5-5 圖號重覆，請修正。	檢視相關文字並修正。
十四	圖 5-5 不安定區域 2 之分析成果對應於圖 5-9 與圖 5-10 時，位於區域內右側並未顯	圖5-5之分析，係根據區域2往坡趾河道部分之分析成果，而實際崩塌範圍為該區域往茗

項次	審查意見	回覆辦理情形
	示出不安定點位，但由圖 5-10 發現有部分區域崩塌現象，再請團隊補充解釋?	濃溪方向，因此建議後續分析時應同時考慮不同方法之剖面，避免類似此種誤差之發生。

附錄四：模式中材料常用參數對照表

針對本研究所提之整合型崩塌發生與流出模式(Anura)，模式中需要使用到一些材料的參數，列出不同材料參數的常用對照表，為避免引用資料經過翻譯後造成讀者的誤解，本文保留原文，以利讀者閱讀。

表 II-1 各種材料的彈性模數(Young's modulus)

Type of Soil		young's modulus (MPa)
Clay	Very soft	2–15
	Soft	5–25
	Medium	15–50
	Hard	50–100
Sand	Loose	10–24
	Dense	48–81
Silt		2–20

*Subramanian, N. (2008). Design of steel structures. Oxford University Press.

表 II-2 各種材料的柏松比(Poisson's ratio)

Type of Soil		Poisson's ratio
Clay	saturated	0.4 – 0.5
	unsaturated	0.1 – 0.3
Sand	dense	0.2 – 0.4
Silt		0.3 – 0.35

*Subramanian, N. (2008). Design of steel structures. Oxford University Press.

表 II-2 各種材料的摩擦角(Angle of Repose)

Material (condition)	Angle of repose
Clay (dry lump)	25–40°
Gravel (crushed stone)	45°
Gravel (natural w/ sand)	25–30°
Sand (dry)	34°
Sand (water filled)	15–30°
Sand (wet)	45°

*Al-Hashemi, H. M. B., & Al-Amoudi, O. S. B. (2018). A review on the angle of repose of granular materials. Powder Technology, 330, 397-417.

表 II-3 各種材料的土壤保水曲線參數和水力傳導係數

material	$S_{\min}$	$S_{\max}$	λ	$P_0(\mathrm{kPa})$	$k_l^{sat}(\mathrm{m/s})$
sand	0.105	1	0.627	0.677	8.25×10^{-3}
loam	0.181	1	0.359	2.725	2.89×10^{-4}
silt	0.074	1	0.27	6.131	6.94×10^{-5}
clay	0.179	1	0.083	12.263	5.55×10^{-5}

*Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water resources research, 24(5), 755-769.