
地震後誘發山崩降雨警戒值變化之研究
A study on change of rainfall triggering
slope failure due to earthquake
(成果報告)

執行單位：台灣科技大學營建系

執行期間：112年02月08日至112年12月31日

計畫主持人：盧之偉 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 12 月



地震後誘發山崩降雨警戒值變化之研究

摘要

台灣地處歐亞大陸板塊與菲律賓板塊之交接地帶，屬於環太平洋地震帶，造山運動劇烈，地形陡峭、地質構造複雜。再加上特殊的海島型氣候，夏季常有颱風暴雨來襲，雨量集中在五月至九月之間，形成台灣特殊的地質水文環境，因此時而有發生山崩、地滑與土石流等土砂災害，引發重大危險之災情。在中國大陸與鄰近國日本以及東南亞多國也屬類似地質與水文狀況。也因此預防山崩土石流災害上，台灣與諸國皆用相當高的標準進行各項措施，也有產生一定的效果也累積相當多不錯的經驗。惟在地震過後，山崩降雨警戒值的變化上，目前仍無一個更好的解決方案，但卻是一個刻不容緩的重要工作。

由諸多國內外文獻可見，地震後對山坡地崩塌有相當之影響，使坡地內部產生變形，而震後降雨，會使得崩塌事件更容易發生，因此其雨量警戒值勢必得做出調整。日本學者專家根據日本近數十年的地震後降雨對邊坡影響之變化進行大數據的統計，但由於利用大數據分析，其無法充分控制變因甚多，且台灣地形與地質變異性大，不同地區的降雨型態也不同，使得各地區適用的雨量警戒值基準出現差異。

有鑑於此，本計畫將從文獻蒐集與資料整理中，使用不同的坡度與土壤性質，針對不同坡地情境在經歷相對應的大、中、小震動後，利用數值模式探討坡地內部的關鍵滑動面岩土強度之變化反應，分析不同情境下的邊坡穩定性，推導出山崩降雨之變化，建立各個情境下適應的促崩雨量警戒值調整機制，預期成果可供相關單位應用此標準斷面/岩土性質/地震波大小應用於台灣各地區之對應類似之坡地於受震後的降雨警戒值變化之參考依據。

關鍵詞：大規模崩塌、地震、邊坡穩定、雨量警戒值



A study on change of rainfall triggering slope failure due to earthquake

Abstract

Taiwan is located at the junction of the Eurasian Plate and the Philippine Sea Plate, belonging to the Circum-Pacific seismic zone. It experiences intense tectonic activity, with steep topography and complex geological structures. Additionally, its unique maritime climate brings frequent typhoons and heavy rainfall, concentrated from May to September, creating a distinct geological and hydrological environment. As a result, Taiwan is prone to soil and debris hazards, including landslides, slope failures, and debris flows, which can pose significant risks. Similar geological and hydrological conditions are also found in mainland China, neighboring countries like Japan, and several Southeast Asian nations. Therefore, Taiwan and these countries have implemented stringent measures to prevent and mitigate landslide and debris flow disasters, accumulating valuable experiences.

However, there is currently no optimal solution for adjusting the rainfall warning thresholds for landslide occurrence following earthquakes. This is an urgent and crucial task. Numerous domestic and international studies have demonstrated the significant impact of earthquakes on slope instability and subsequent rainfall-induced landslides. Therefore, adjustments to the rainfall warning thresholds are necessary. Japanese scholars and experts have conducted extensive statistical analyses on the

effects of post-earthquake rainfall on slope stability based on decades of data. However, due to the inherent limitations of using big data analysis, which involves numerous uncontrollable variables, and the considerable variability in Taiwan's topography, geology, and rainfall patterns across different regions, variations in rainfall warning thresholds have emerged.

In light of these circumstances, this project aims to collect relevant literature, compile data, and analyze different slope scenarios with varying heights and soil properties. By subjecting these scenarios to corresponding levels of strong, moderate, and mild seismic activities and using numerical models, we will investigate the changes in critical slip surface soil strength within the slopes and analyze the stability of different scenarios. We will derive the variations in rainfall-induced landslide occurrence and establish mechanisms for adjusting the rainfall warning thresholds to adapt to different scenarios. The expected outcome is to provide reference guidelines for relevant agencies to apply these standardized sections/soil properties/earthquake wave magnitudes to assess the changes in rainfall warning thresholds for similar slopes across different regions in Taiwan following seismic events.

Keywords: Landslide, Earthquake, Slope stability, Rainfall warning thresholds

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	IV
第一章 緒論	1-1
第一節 研究動機	1-1
第二節 研究目的	1-2
第三節 計畫執行狀況說明	1-4
第二章 文獻回顧	2-1
第一節 震後降雨邊坡破壞機制回顧	2-2
第二節 國內外雨量警戒值制定與調整方案回顧	2-3
第三節 邊坡穩定分析與區域安全係數法回顧	2-10
第三章 工作項目與執行方法	3-1
第一節 現地勘查與研究	3-1
第二節 數值分析方法	3-7
第三節 局部安全係數計算	3-19
第四節 邊坡受震後雨量警戒值探討	3-21
第五節 邊坡震後強度恢復時間探討	3-23
第四章 工作執行成果	4-1
第一節 現地調查結果	4-1
第二節 數值分析模式執行成果	4-13
第三節 局部安全係數計算結果	4-23
第四節 邊坡受震後雨量警戒值探討成果	4-32

第五節 邊坡震後強度恢復時間探討成果	4-39
第五章 結論與建議	5-1
第一節 結論	5-1
第二節 建議	5-4
參考文獻.....	參-1
附錄一、計劃書之內容審查意見暨回覆辦理情形	附-1
附錄二、期中書面審查意見暨回覆辦理情形	附-5
附錄三、期末書面審查意見暨回覆辦理情形	附-7



表次

表 1-1 工作進度表.....	1-4
表 2-1 災害與雨量警戒值調整目錄(資料來源:野村康裕, 2013)	2-8
表 2-2 各區域的捕捉災害件數(資料來源:野村康裕,2013)	2-9
表 3-1 土壤材料參數表	3-11
表 3-2 地震震度與加速度的關係	3-13
表 3-3 步階狀況.....	3-16
表 4-1 粗顆粒土壤安全係數矩陣	4-23
表 4-2 中等緊密砂土安全係數矩陣	4-26
表 4-3 粉土安全係數矩陣	4-28
表 4-4 粉土質砂土安全係數矩陣	4-30
表 4-5 粗顆粒土壤安全係數變化	4-33
表 4-6 中等緊密砂土安全係數變化	4-34
表 4-7 粉土安全係數變化	4-35
表 4-8 粉土質砂土安全係數變化	4-36

圖次

圖 1-1 計畫流程圖	1-3
圖 2-1 不同情境下的土壤強度變化 (重繪自鳥居宣之， 2007)	2-2
圖 2-2 大規模崩塌之發生歷程 (資料來源：KANEDA AND KANO, 2017)	2-4
圖 2-3 大規模崩塌之應變-時間關係圖 (資料來源： M.SAITO, 1960)	2-4
圖 2-4 大規模崩塌發生之臨界雨量線 (資料來源：蔡元 融，2020)	2-5
圖 2-5 大規模崩塌雨量警戒線 (資料來源：蔡元融，2020)	2-5
圖 2-6 日本土砂災害警戒模式示意圖(摘自陳振宇，2013)	2-8
圖 2-7 淺層崩塌 FS 與震後降雨量之關係圖	2-9
圖 2-8 深層崩塌 FS 與震後降雨量之關係圖	2-9
圖 3-1 新北市-汐止區-D003 潛勢區範圍	3-4
圖 3-2 南投縣-國姓鄉-T002 潛勢區範圍	3-5
圖 3-3 屏東縣-來義鄉-T001 潛勢區範圍	3-6
圖 3-4 邊坡模型示意圖	3-12
圖 3-5 地震加速度歷時圖	3-13
圖 3-6 數值網格模型	3-14
圖 3-7 垂直有效應力受震前後之變化	3-17
圖 3-8 側向剪應變受震前後之變化	3-17
圖 3-9 側向位移受震前後之變化	3-18

圖 3-10 垂直位移受震前後之變化	3-18
圖 3-11 局部安全係數分布示意圖	3-19
圖 3-12 輸出網格應力變化圖	3-20
圖 3-13 安全係數變化圖	3-22
圖 3-14 受震期間應力與孔隙水壓變化	3-23
圖 3-15 受震期間有效應力變化	3-24
圖 3-16 強度恢復時間示意圖	3-24
圖 4-1 現勘地點位置圖(摘自大規模崩塌潛勢統計區)	4-1
圖 4-2 汐止區東山里現勘位置	4-3
圖 4-3 土壤狀態	4-3
圖 4-4 崩塌潛勢區航照圖	4-4
圖 4-5 崩塌潛勢區航照圖(側視)	4-4
圖 4-6 潛勢區內植生狀況	4-5
圖 4-7 南投縣國姓鄉南港村現地調查位置	4-7
圖 4-8 震爆點岩土與植生現況	4-7
圖 4-9 大崩塌區域岩土與植生現況	4-8
圖 4-10 九份二山地區航照圖	4-8
圖 4-11 九份二山地區航照圖(側視)	4-9
圖 4-12 屏東縣來義鄉現地調查位置	4-11
圖 4-13 潛勢區岩土與植生狀況	4-11
圖 4-14 崩塌潛勢區航照圖	4-12
圖 4-15 崩塌潛勢區航照圖(側視)	4-12
圖 4-16 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨)	4-14
圖 4-17 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)	4-14

圖 4-18 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-16
圖 4-19 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-16
圖 4-20 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-18
圖 4-21 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-18
圖 4-22 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-20
圖 4-23 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-20
圖 4-24 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-22
圖 4-25 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-22
圖 4-26 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨).....	4-24
圖 4-27 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨).....	4-24
圖 4-28 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨).....	4-25
圖 4-29 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨).....	4-25
圖 4-30 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨).....	4-27
圖 4-31 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨).....	4-27
圖 4-32 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨).....	4-29
圖 4-33 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨).....	4-29
圖 4-34 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨).....	4-31
圖 4-35 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨).....	4-31
圖 4-36 箱線圖示意圖	4-37
圖 4-37 整體安全係數變化圖	4-38
圖 4-38 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-40

圖 4-39 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-40
圖 4-40 粗顆粒土壤安全係數變化圖	4-41
圖 4-41 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-42
圖 4-42 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-43
圖 4-43 中等緊密砂土安全係數變化圖	4-43
圖 4-44 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-44
圖 4-45 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-45
圖 4-46 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-45
圖 4-47 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨).....	4-46
圖 4-48 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-47
圖 4-49 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨).....	4-47
圖 5-1 震後雨量警戒值調整量	5-2
圖 5-2 震後強度恢復時間	5-3



第一章 緒論

第一節 研究動機

臺灣地處於歐亞板塊與菲律賓板塊的交界處，屬於環太平洋地震帶，造山運動激烈，地形陡峭，地質構造複雜，再加上特殊的海島型氣候，夏季常有颱風或暴雨來襲，雨量時空分布不均，集中在每年五月至九月間，形成臺灣特有的地質水文環境，因此時有山崩、土石流等土砂災害發生，引發重大災害。其中，降雨警戒值在災害管理和防災工作中扮演著重要的角色。

降雨警戒值常做為疏散避難啟動之依據、災害風險評估與整備物資之依據、災害風險意識建議與教育推廣之依據和災害重建與二次災害評估之依據。由此可知，降雨警戒值之給定對災害防救工作之推動影響深遠。然則，邊坡的強度必然受到地震效應影響而衰退，是故震前與震後之降雨警戒值必然不同。現行降雨警戒值隨地震事件後的調整多採用經驗法則，尚未有一套以物理模型為基礎之降雨警戒值調整方案，是故成為本研究之執行動機。

第二節 研究目的

降雨警戒值與邊坡穩定性息息相關，而邊坡穩定與否，受諸多因素影響，例如：坡角、坡高、邊坡材料等。此外，不同震度對邊坡穩定度也會造成影響。本計畫擬解決震後坡地發生崩塌之降雨警戒值的變化。針對不同類型的邊坡情境，根據其受震後的反應，探討其促崩雨量警戒值之變化，解決各類型邊坡促崩雨量警戒值的兩大關鍵問題：

- (一)震後降雨誘發山崩的降雨警戒值之改變量；
- (二)震後降雨誘發山崩的降雨警戒值之恢復時間。

本年度計畫將於數值分析模式中規劃四種邊坡受震情境，五種不同土壤性質，以探討坡地在受到不同震度後，其關鍵滑動面之岩土強度變化，進而推導出對應的震後促崩降雨警戒值之變化，後續再針對關鍵滑動面之岩土強度恢復進行分析，推導出震後促崩降雨警戒值的恢復時間。計畫預計執行流程圖如圖 1-1 所示，茲將計畫預計完成目標說明如下：

- (一)依據現地調查規劃設計邊坡形狀以模擬不同邊坡受震情境；
- (二)輸入五種不同土壤參數以模擬不同地質情境；
- (三)透過數值模式分析地震前後之關鍵滑動面土壤強度的變化；
- (四)根據模擬得到之土體強度變化推導出地震前後促崩降雨警戒值的變化與恢復時間；
- (五)比較不同坡地情境的降雨警戒值變化，給予災害預警與災害風險評估的建議。

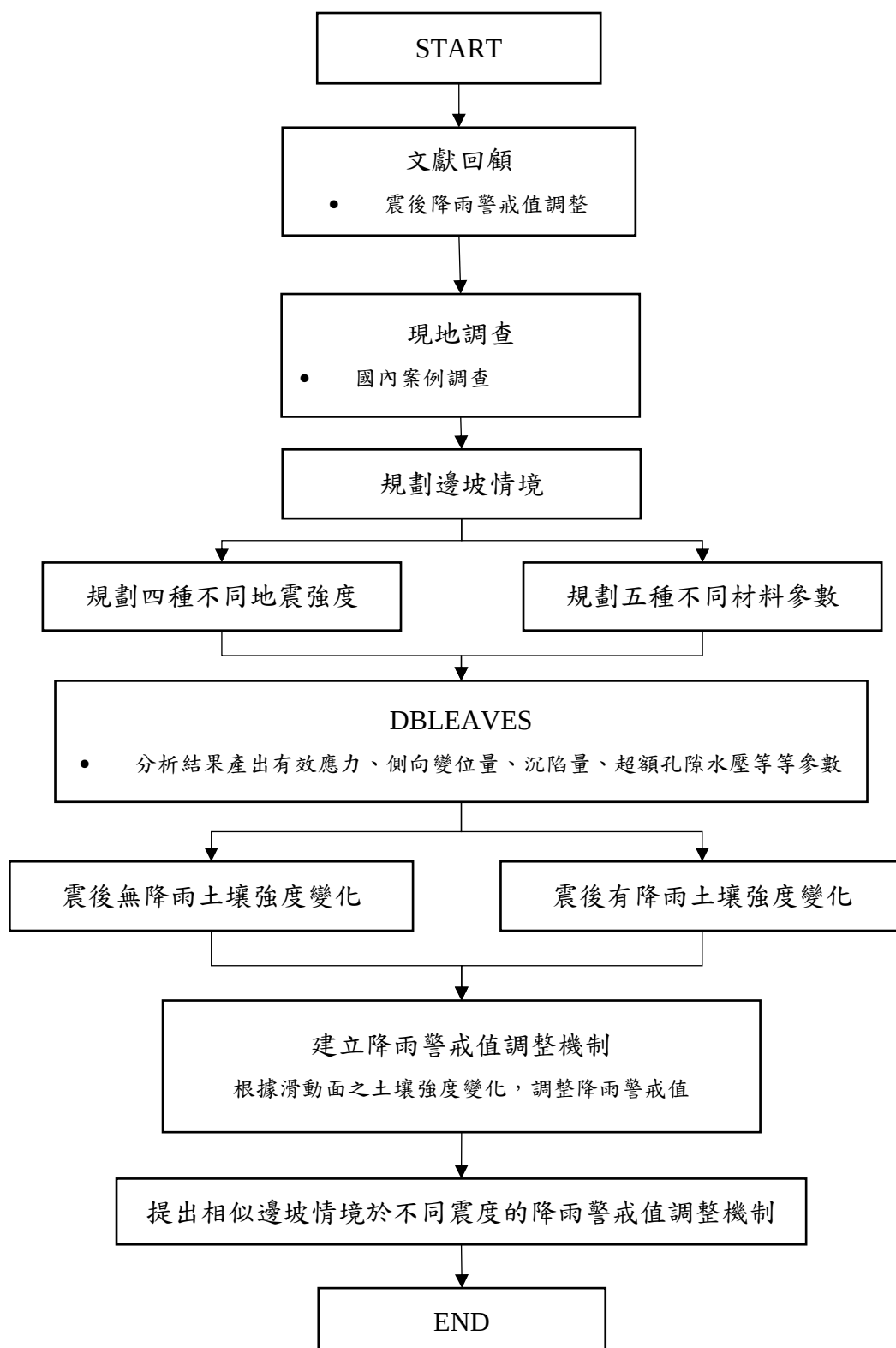


圖 1-1 計畫流程圖

第三節 計畫執行狀況說明

本計畫之現地調查工作於 10 月 15 日完成，進度達 100%；文獻蒐集與回顧進度於 10 月 31 日完成，進度達 100%；數值模式於不同情境之分析工作於 10 月 31 日完成，進度達 100%；邊坡穩定性分析於 10 月 31 日完成，進度達 100%；報告書撰寫於 11 月 6 日完成期末報告，進度達 90%。累計總計度達預期進度之 95%。

表 1-1 工作進度表

重要工作項目	工作比重%	預定進度	112			
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
現地調查	20	工作量或內容	北部地區現勘	中南部地區現勘		
		累計百分比	40	70	100	100
文獻蒐集	20	工作量或內容	文獻蒐集	文獻蒐集	文獻蒐集	
		累計百分比	40	70	100	100
邊坡穩定性分析	20	工作量或內容	邊坡穩定性分析	邊坡穩定性分析		
		累計百分比		70	100	100
數值分析與成果整合	30	工作量或內容	架構數值尺寸，分析參數	數值分析	分析與成果整合	分析與成果整合
		累計百分比	30	60	80	100
報告與論文撰寫	10	工作量或內容	期中報告書撰寫			期末與成果報告書撰寫
		累計百分比		60		100
累計總進度	百分比		37	66	92	100

第二章文獻回顧

本章將回顧國內外震後降雨警戒值調整之相關文獻，首先了解邊坡在震後降雨的破壞機制，再說明國內現行大規模崩塌災害雨量警戒值制定模式，最後將過往發生大型地震後的降雨警戒值調整案例的經驗納入本研究的參考項目，並蒐集與現地調查相關案例之土壤參數，整合過去對於邊坡穩定與降雨警戒值的相關研究，初步擬定降雨警戒值的調整機制。文獻回顧的主軸內容列點如下：

- 震後降雨邊坡破壞機制回顧
- 國內外降雨警戒值制定與調整方案回顧
- 邊坡穩定分析與區域安全係數法回顧



第一節 震後降雨邊坡破壞機制回顧

根據烏居宣之(2007)的研究，以地震發生前且無降雨時的土壤強度為基準，在地震前發生降雨的情境下，會使得土壤強度降低 35%；在地震發生後，土壤強度會降低 18%；而在地震後且發生降雨的情境下，土壤強度會下降 44%，如圖 2-1 所示。由上述文獻可得出一個結論：地震發生後，土壤因地震運動導致剪應變產生，當剪應變到達一定程度時，土顆粒間的結構遭到破壞，使得土顆粒間的凝聚力下降，抗剪強度隨之降低。又因後續降雨，雨水隨裂縫滲入邊坡，使得土壤的飽和度上升，導致土顆粒間的視凝聚力下降，引起進一步的抗剪強度下降，而這一連串的土壤強度下降，即會更易引發邊坡崩塌事件。

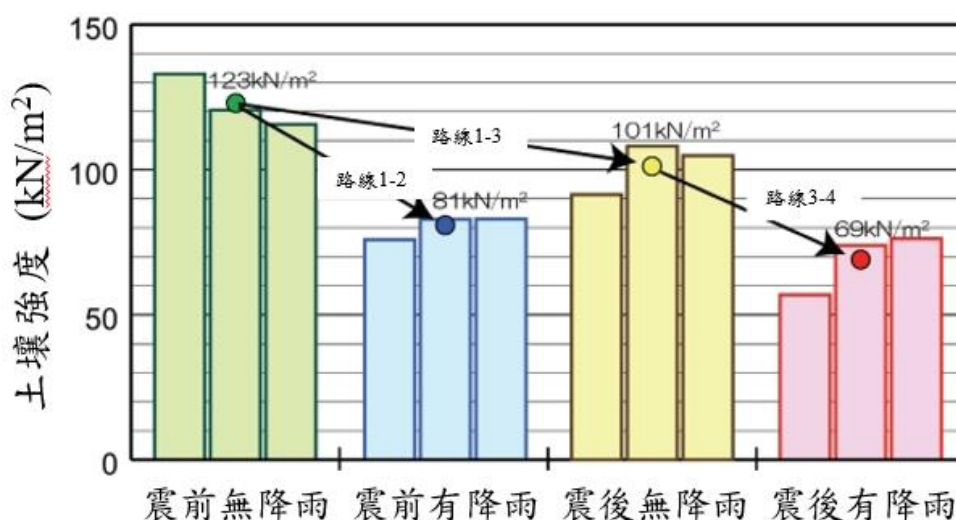


圖 2-1 不同情境下的土壤強度變化 (重繪自烏居宣之，2007)

第二節 國內外雨量警戒值制定與調整方案回顧

一般而言，坡面因受到重力影響而逐漸產生變形，隨著時間增加，變形量持續增大，邊坡內部的破壞面也逐漸發育，當遭遇重大事件，如颱風、豪雨或地震等，由於先前產生的變形，邊坡整體強度已相對較弱，此時極有可能發生局部破壞，甚至發生大規模崩塌事件；而在局部破壞的狀況下，滑動面在重力影響下持續發育，也可能在後續發生重大事件時，發生大規模的崩塌事件，大規模崩塌之發生歷程如圖 2-2 所示。大規模崩塌發生機制複雜，同時與時間具有相關性，不同階段的警戒系統，應考慮不同階段的特性而制定，其應變-時間關係如圖 2-3 所示。

針對促崩雨量警戒值，行政院農業委員會水土保持局利用寬頻地震網得到之訊號進行分析，從民國 90-105 年間之降雨事件找出 28 筆有具體發生時間的新生大規模崩塌案例，並利用其發生時刻對應之累積雨量進行分析，建立大規模崩塌發生臨界雨量線如圖 2-4 所示，以此作為潛勢區發生崩塌之評估依據，在利用另外 79 筆大規模崩塌案例進行驗證，確認臨界雨量線的合理性。後續再針對疏散避難之考量，將臨界雨量線轉換成大規模崩塌發生之雨量警戒線，如圖 2-5 所示，供設定警戒值之參考。

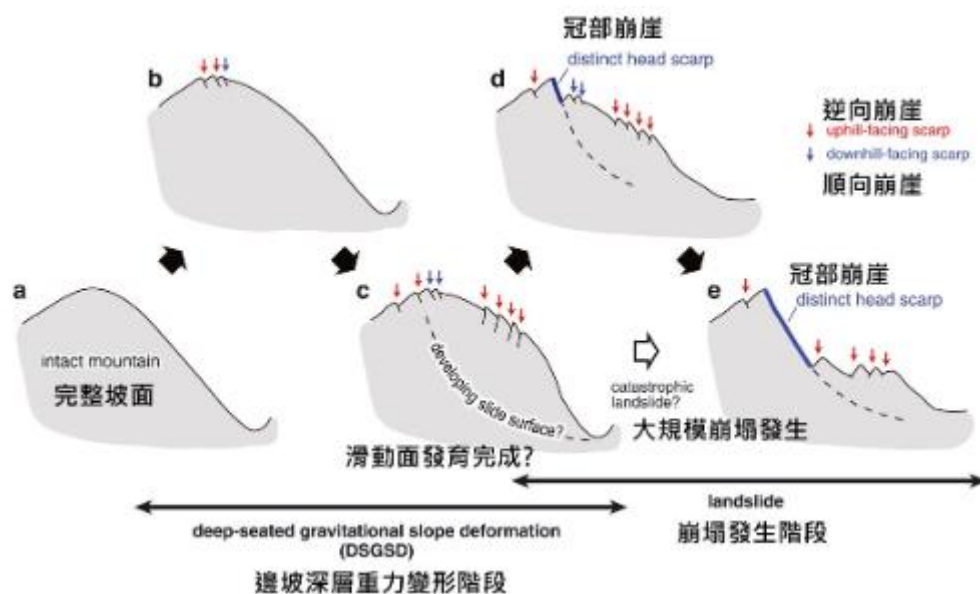


圖 2-2 大規模崩塌之發生歷程 (資料來源：Kaneda and Kano, 2017)

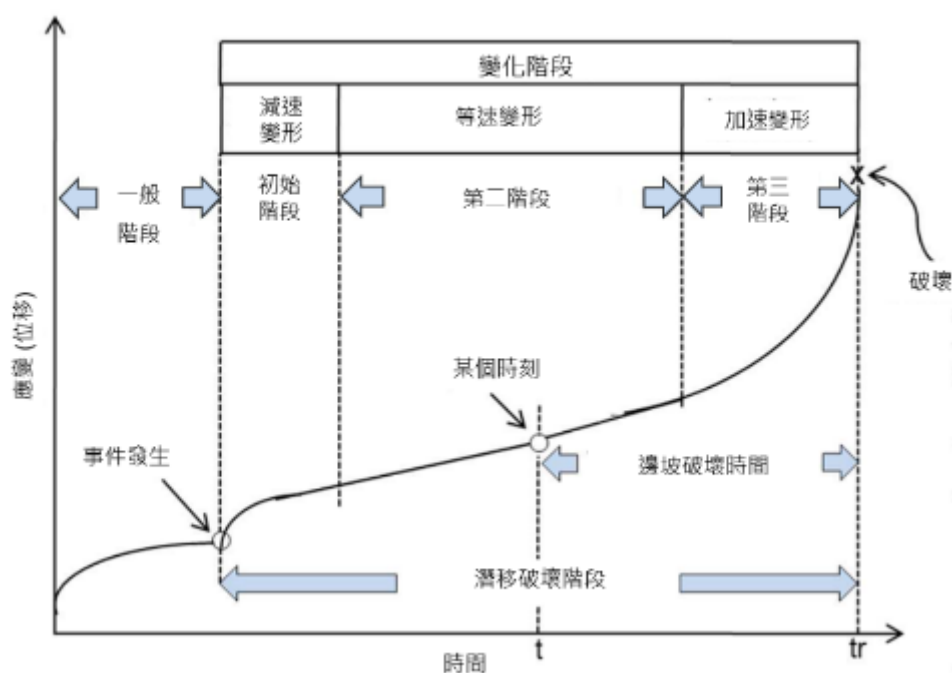


圖 2-3 大規模崩塌之應變-時間關係圖 (資料來源：M.SAITO, 1960)

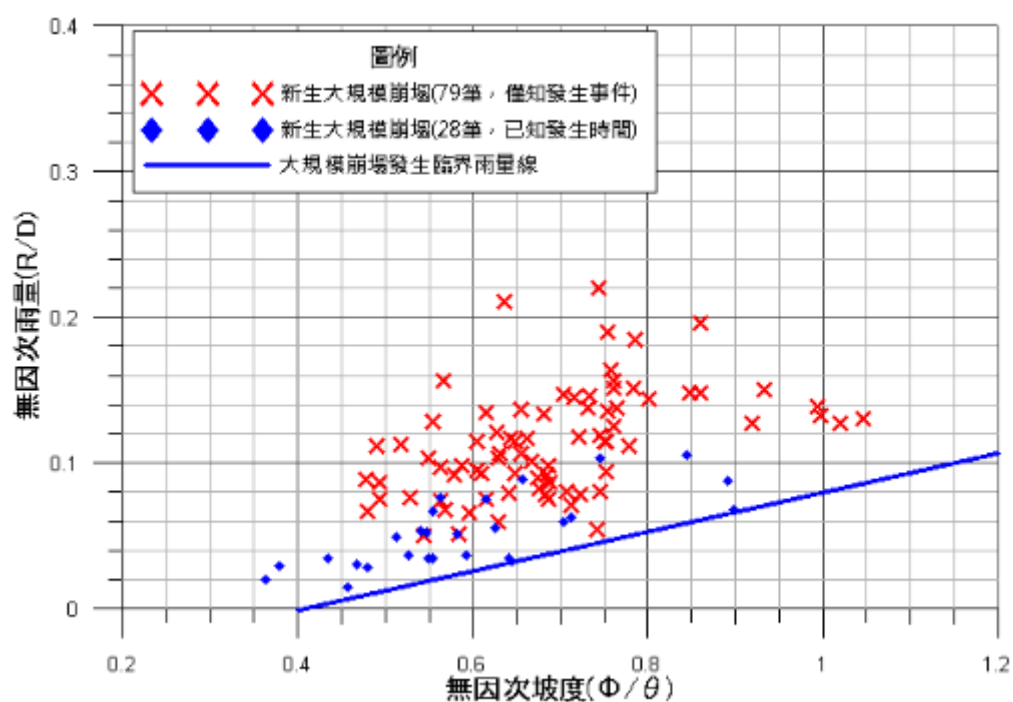


圖 2-4 大規模崩塌發生之臨界雨量線 (資料來源：蔡元融，2020)

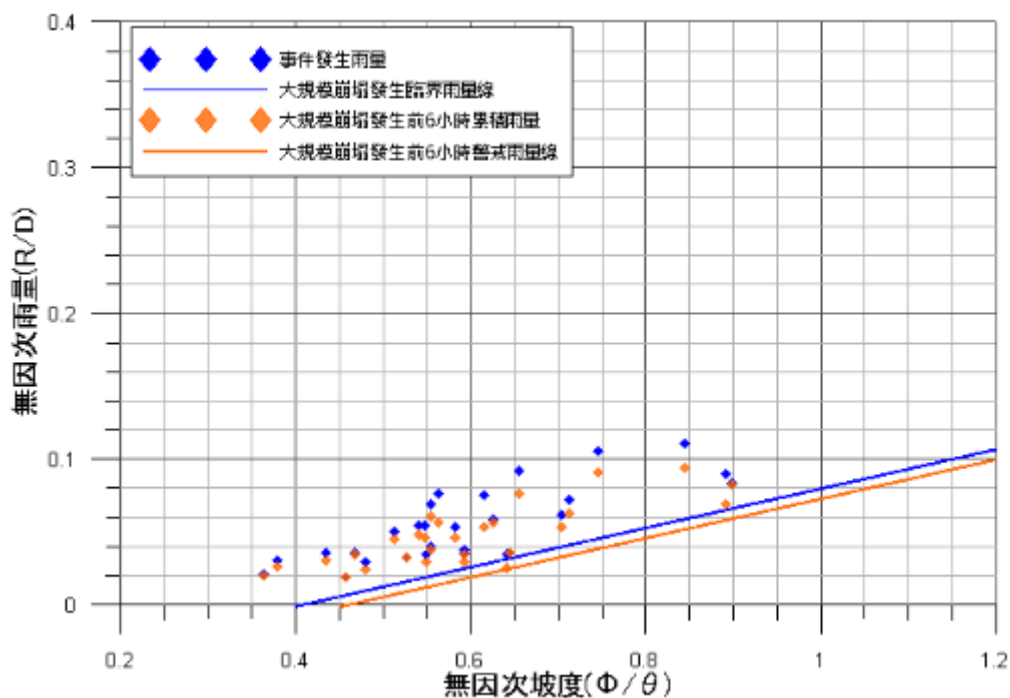


圖 2-5 大規模崩塌雨量警戒線 (資料來源：蔡元融，2020)

在台灣，許多地區常有降雨分布時空不均以及遭遇大小地震發生的問題，過往謝正倫等(2004)與陳樹群及吳俊鉉(2004)針對九九峰地區在九二一大地震後長達五年的監測資料進行各種變化的研究。其中可以發現，2000 年、2001 年與 2004 年為雨量較為豐沛的年份，而 2002 年與 2003 年則為雨量較為短缺的年份，且每年的主要降雨都集中在四月至九月。而該地區乾溪河川流量約為 0.07~0.09cms，但當颱風或豪雨來臨時，河川流量可暴漲至 36.9cms。由監測資料可以明顯觀察出，在邊坡遭逢重大事件(降雨或地震)後，有出現邊坡鬆動或產生裂縫等情況。此時，即使降雨量較平常少，也發生了大規模崩塌，故須針對地震後之促崩雨量警戒值進行調整。

日本於 1984 年起即開始發展以雨量為指標的土砂災害警戒系統，使用短期雨量指標及長期雨量指標來劃設土砂災害的警戒臨界線(Critical line, CL)，其中，在警戒線左下方為安全區，右上方為危險區，示意圖如圖 2-6 所示。而野村康裕等人(2013)在東北太平洋近海地震(2011 年 3 月 11 日)發生後，將日本東北、關東和東海地區量測到震度 5 強以上的區域納入研究範圍，並收集該區域的震度分布、降雨量、災害類別與臨時 CL 進行探討，災害發生事件整理如表 2-1。文獻中以實際或預報降雨量做為縱軸，每小時累積雨量或土壤雨量指數做為橫軸繪製成圖表，並將圖表分為三個區域：(1)超過原始 CL(2)超過臨時 CL 未超過原始 CL(3)未超過臨時 CL。可藉此來比較原始 CL 與臨時 CL 的災害捕捉率。研究結果整理如表 2-2，以原始 CL 作為警戒值(區域 1)，可以捕捉到 68.8%的災害；以臨時 CL 作為警戒值可以捕捉到 87.6%的災害。而在日本，使用原始 CL 的災害捕捉率為 75%，可證明臨時 CL 的有效性。根據其研究結果可得出一結論：在震度為 5

強時，可將臨時 CL 調整至原始 CL 的 80%，在震度為 6 弱時，可將臨時 CL 調整至原始 CL 的 70%。對於降雨警戒值恢復時間，可根據地震發生時有無崩塌產生及後續降雨的經驗再取消臨時警戒值。並於取消臨時警戒值的情況下，探討其災害捕捉率，比較與未取消臨時警戒值時的差異，若災害捕捉率不變，即可取消臨時警戒，並可蒐集該經驗，進而精進指標之準確性。

此外，久保田哲也(2012)通過雨水滲透的耦合數值分析和使用 FEM 的穩定性分析來探討震後促崩雨量警戒值。由於東北太平洋近海地震導致邊坡出現裂縫，這些裂縫容易被雨水滲透，也有可能在未来因降雨而導致地下水位與孔隙水壓升高，另外，土壤也因產生變形而導致其尖峰強度降低，未來可能在降雨量低於警戒值的情況下發生災害。其研究結果指出，對於淺層崩塌，在沒有裂縫的情況下，發生強降雨的安全係數仍會大於 1；若在震後坡頂出現裂痕，會使得雨水更容易滲入，隨著裂縫增大，此情況下，即使降雨量為原來的 10%也可能發生崩塌，如圖 2-7 所示；對於深層崩塌，地震引起的變形，會導致土壤強度下降，此時之促崩雨量為原來的 50 至 60%，如圖 2-8 所示，其中 FS 為抗剪強度與邊坡承受應力的比值，當 FS 大於 1 時，邊坡處於穩定狀態；FS 小於 1 時，代表邊坡呈現不穩定狀態。

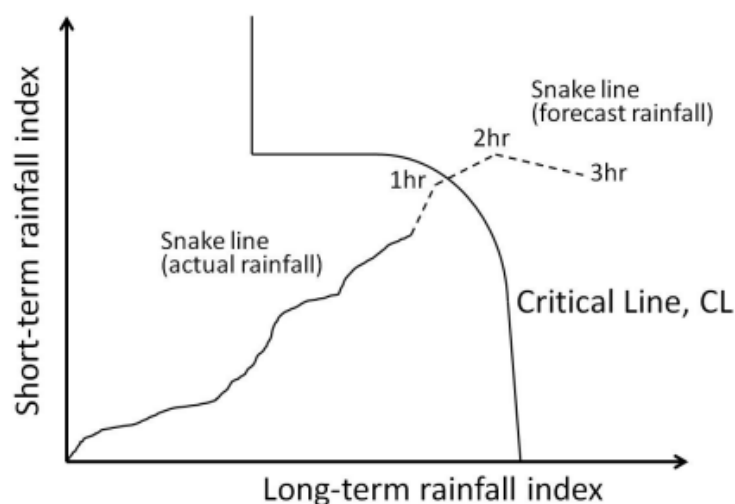


圖 2-6 日本土砂災害警戒模式示意圖(摘自陳振宇，2013)

表 2-1 災害與雨量警戒值調整目錄(資料來源：野村康裕，2013)

時間	災害類別	特殊氣象	縣市名稱	臨時基準	地震震度	區號
2011年6月24日	邊坡滑動		秋田縣	70%	5強	1
2011年6月24日	邊坡滑動		秋田縣	70%	5強	1
2011年5月30日	邊坡滑動		宮城縣	60%	6強	2
2011年9月21日	土石流	15號颱風	宮城縣	60%	6弱	1
2011年9月21日	土石流	15號颱風	宮城縣	60%	6強	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6強	2
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6強	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6強	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6強	2
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6弱	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6弱	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	60%	6弱	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	福島縣	80%	6弱	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	茨城縣	50%	6強	1
2011年6月15日	邊坡滑動		茨城縣	50%	6強	3
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	茨城縣	70%	6弱	1
2011年7月30日	山腰崩塌		栃木縣	60%	6強	3
2011年8月7日	土石流		栃木縣	80%	5強	2
2011年9月2日	土石流	12號颱風	栃木縣	80%	6弱	1
2011年9月21日	土石流	15號颱風	栃木縣	80%	5強	1
2011年9月22日	邊坡滑動	15號颱風	栃木縣	80%	6弱	1
2011年6月22日	邊坡滑動	梅雨季	千葉縣	50%	6強	3
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	千葉縣	50%	6強	3
2011年9月22日	邊坡滑動	15號颱風	千葉縣	50%	6強	2
2011年7月6日	山腰崩塌	梅雨季	新潟縣	70%	6強	2
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	山梨縣	70%	5強	1
2011年9月21日	邊坡滑動	15號颱風	山梨縣	70%	5強	1
2011年9月21日	土石流	15號颱風	靜岡縣	50%	6強	1
2011年9月21日	土石流	15號颱風	靜岡縣	50%	6強	1
2011年9月22日	土砂流	15號颱風	靜岡縣	50%	6強	1
2011年9月22日	土砂流	15號颱風	靜岡縣	50%	6強	1
2011年9月22日	土砂流	15號颱風	靜岡縣	50%	6強	1

表 2-2 各區域的捕捉災害件數(資料來源：野村康裕，2013)

區域	各震度的災害件數				合計	比例(%)
	震度5強	震度6弱	震度6強	震度7		
1	5	8	9	0	22	68.8
2	1	0	5	0	6	18.8
3	0	0	4	0	4	12.5
合計	6	8	18	0	32	

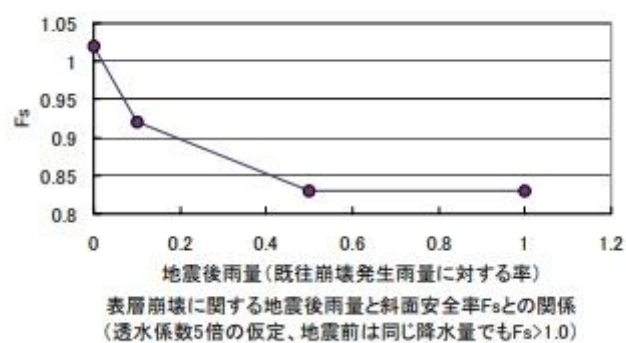


圖 2-7 淺層崩塌 FS 與震後降雨量之關係圖

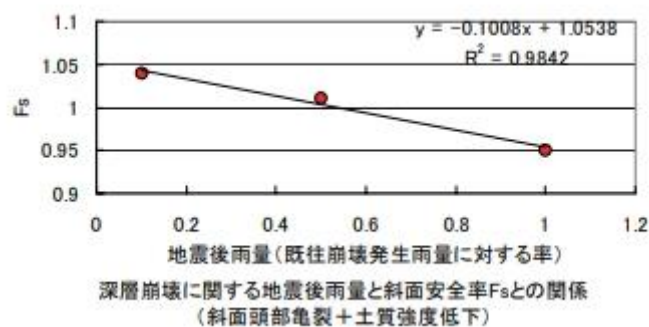


圖 2-8 深層崩塌 FS 與震後降雨量之關係圖

第三節 邊坡穩定分析與區域安全係數法回顧

根據前人經驗，邊坡穩定性分析主要透過識別或假設潛在的破壞表面並評估該表面的安全係數 (FS) 來進行。這種將單一安全係數分配給潛在不穩定斜坡的方法幾乎無法了解破壞的起始位置或滑坡破裂面的最終幾何形狀和位置。Ning Lu (2012) 提出一種基於庫倫應力和由降雨滲透導致的應力狀態向失敗方向的轉變概念來量化 FS 的方法。邊坡內的每一點的 FS 稱為局部安全係數 (LFS)，定義為在當前應力狀態下的庫倫應力與在莫爾-庫倫標準下潛在失敗狀態的庫倫應力比，如公式 2-1 所示。

$$F_{LFS} = \frac{\tau^*}{\tau} = \frac{2 \cos \varphi'}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \left[c' + \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \tan \varphi' \right] \quad \text{式 2-1}$$

其中， σ'_1 和 σ'_3 代表最大主應力與最小主應力， c' 和 φ' 代表有效凝聚力與有效摩擦角。

此方法與極限平衡和混合有限元極限平衡方法的比較評估顯示，所提出的 LFS 與這些方法一致。其中 LFS 具有解決 FS 分析方法的傳統限制之潛力，例如：滑動面的形狀、邊坡穩定性的低估等。而該篇文獻中的成果顯示，即使在某個坡度的情境下計算出的整體 FS 為 2.39，仍有可能發生局部破壞。對於陡坡，儘管極限平衡方法在坡趾區域附近產生類似的滑動面幾何形狀，但它們無法捕捉中部和靠近山頂的區域滑動面的幾何形狀。對於緩坡，極限平衡方法無法捕捉滑動面的幾何形狀以及它們在近地表環境中的發生。此方法使用基於應力場來量化不同飽和條件下邊坡的潛在不穩定區域，可以為邊坡穩定性分析的方法提供新的觀點。

第三章 工作項目與執行方法

第一節 現地勘查與研究

本研究從台灣北、中、南各分區內選擇 1 處大規模崩塌潛勢區進行調查，以潛勢區的範圍作為調查重點區域，利用航照圖調查該區域現今整體地形、周遭區域概況，作為數值分析模型的設計依據，而土壤概況則透過實地調查方式配合地質探勘資料庫之資料進行，了解土壤性質之概況。針對現地調查內容，以下逐項說明。

一、現地勘查內容與研究方法說明

(一)調查土壤概況

土壤性質概況調查之工作內容主要為初步判斷土壤的種類。考量到實際判斷操作可行性，對土壤進行視覺觀察，了解土壤的顏色、質地、結構、粒徑大小、水分狀況等特徵，接著進行手感觀察，用手觸摸土壤，了解土壤質地、細膩度與潮溼度，綜合以上兩種觀察，初步判斷土壤種類。此外，透過案例蒐集與地質資料庫之資料獲得詳細土壤參數，可搭配後續數值模式分析之結果，針對相似地質情境提出雨量警戒值調整機制。

(二)地形

由於邊坡的範圍通常相當廣大，為了更全面地了解邊坡的地形特徵，將採用航照圖來進行調查。航照圖是由航空器拍攝而成的空中影像，能夠提供高解析度和廣視角的地形影像資料。透過航照圖，可以觀察到邊坡的整體形狀、地勢變化、地表覆蓋情況等重要信息，也可以對了解整體邊坡地形特徵有所幫助。

(三)周遭區域概況

周遭區域概況調查的主要內容為觀察植生狀況、水文狀況等，由於以上兩種調查內容皆會對邊坡穩定性有所影響，也有調查的必要性。針對植生狀況，主要為觀察邊坡上的植被覆蓋狀況，檢查植被的生長狀態和根系狀況；針對水文狀況，主要以蒐集該區域的水文狀況，包含地下水位、表面逕流等水文環境因素。



二、各區大規模崩塌潛勢區調查地點

本計畫將以臺灣全島之北、中、南進行分區，於各分區內各選擇一處由行政院農業委員會水土保持局所規劃的大規模崩塌潛勢區進行現地調查，針對該潛勢區內的土壤性質概況、整體地形、周遭區域概況進行調查並記錄，除此之外，也將就現地土壤進行取樣，以利判釋潛勢區內土壤之概略分類狀況，以下為各區選擇進行現地調查的大規模崩塌潛勢區及其背景介紹。

(一)北部區域(新北市汐止區東山里)

新北市汐止區東山里於民國111年受尼莎颱風影響，曾發生土石流崩塌，而在民國112年，農委會水土保持局公告位於該里的鵠鵠崙聚落屬高潛勢區，將該區列為大規模崩塌潛勢區優先辦理區，潛勢區範圍如圖3-1所示，大規模崩塌編號為新北市-汐止區-D003，附近重要地標為鵠鵠崙聚落，周圍有兩個雨量參考站，第一參考站為鵠鵠崙，第二參考站為汐止，根據土石流與大規模崩塌防災資訊網，該大規模崩塌潛勢區之促崩雨量警戒值為300 mm/天。根據新北市農業局表示，新北市由於先天環境及地質條件影響，有多處坡地災害潛勢區，每當豪雨來臨，容易達到黃色警戒標準，故此次北部區域現地調查地點，選擇鵠鵠崙聚落作為調查地點。

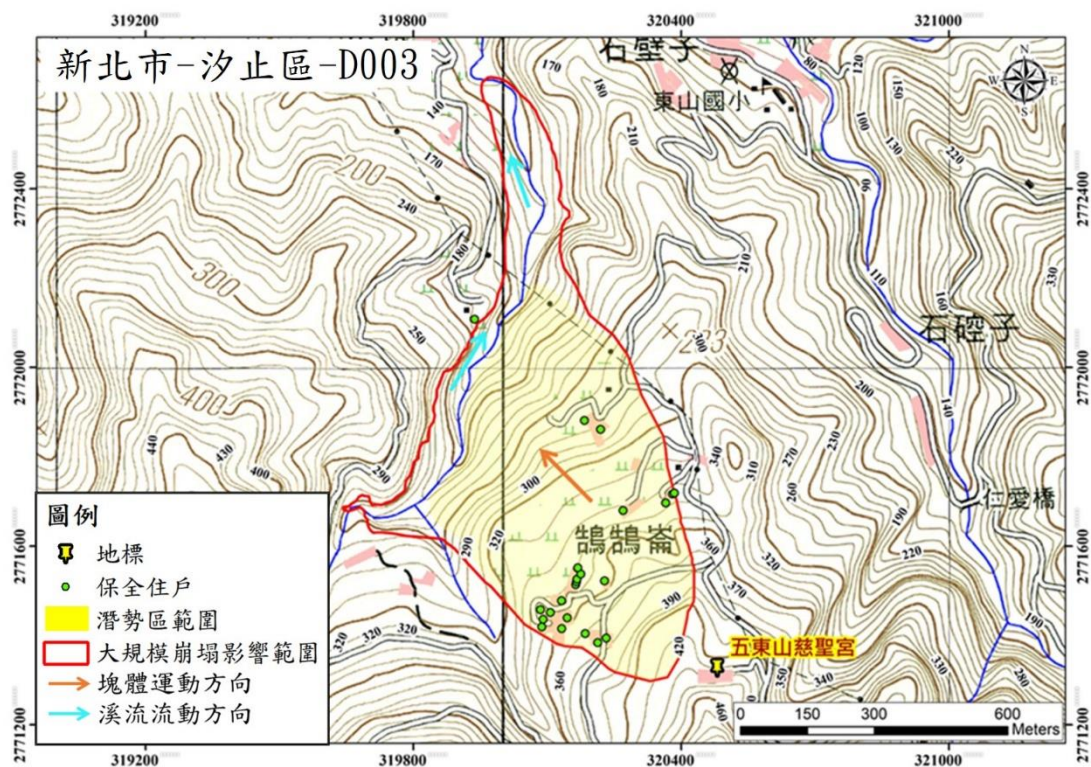


圖 3-1 新北市-汐止區-D003 潛勢區範圍



(二) 中部區域(南投縣國姓鄉南港村)

南投縣國姓鄉南港村內的九份二山為民國88年九二一大地震的發生點，地震發生後，引發大規模走山達2公里，崩塌土石量達3500萬立方公尺，因此也被列入了農委會水土保持局公告的大規模崩塌潛勢區，潛勢區範圍如圖3-2所示，大規模崩塌編號為南投縣-國姓鄉-T002，周圍區域重要地標為九份二國家地震紀念地，周圍的雨量參考站為九份二山，該大規模崩塌潛勢區之促崩雨量警戒值為350 mm/天。該地區於民國110年也曾因為連日降雨而達到大規模崩塌紅色警戒，說明當連日降雨或豪雨等情況發生時，該地區有高機率發生大規模崩塌。

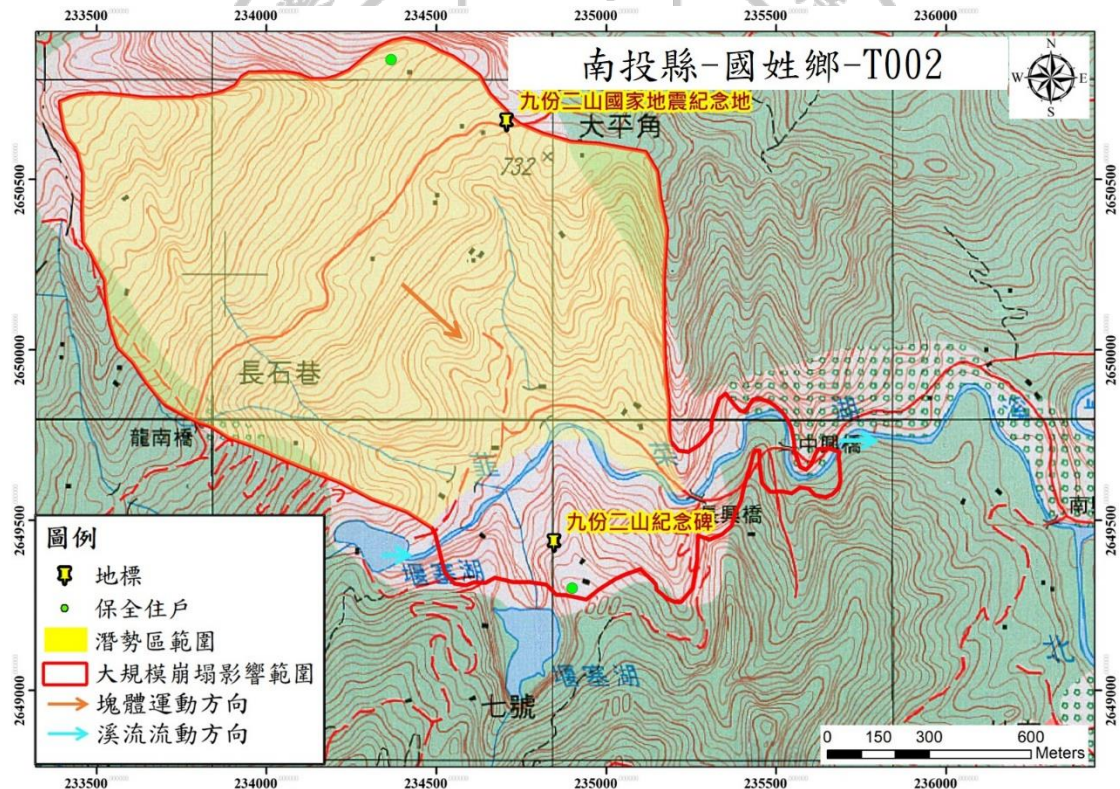


圖 3-2 南投縣-國姓鄉-T002 潛勢區範圍

(三)南部區域(屏東縣來義鄉來義村)

臺灣南部區域的降雨特性為降雨時空不均，全年降雨集中在夏季，常有颱風、豪雨等致災性降雨型態發生，夏季的午後常有短時間強降雨，容易造成大規模崩塌、土石流事件發生。而此次的現地調查地點屏東縣來義鄉來義村，也被列入農委會水土保持局公告的大規模崩塌潛勢區，潛勢區範圍如圖3-3所示，大規模崩塌便號為屏東縣-來義鄉-T001，周遭區域重要地標為屏東縣警察局信義派出所，鄰近有兩個雨量參考站，第一參考站為來義，第二參考站為新來義，該大規模崩塌潛勢區之促崩雨量警戒值為450 mm/天。來義村曾於民國110年，因連日降雨而造成土石崩落覆蓋道路等情形，為南部經常列入警戒的區域。

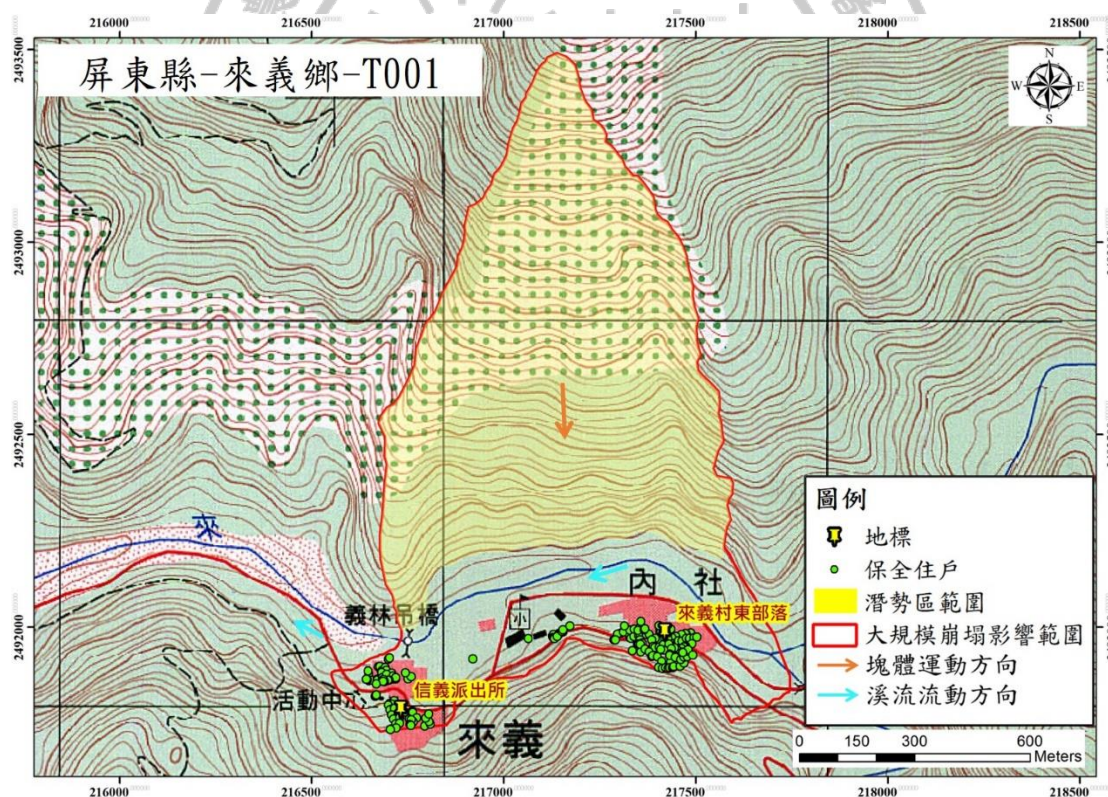


圖 3-3 屏東縣-來義鄉-T001 潛勢區範圍

第二節 數值分析方法

本節將針對本計畫所選用之 DBLEAVES 研究型軟體進行詳細說明，透過該軟體中的 Cyclic Mobility 模型(CM-model)來模擬震後邊坡降雨的情境，以提出震後促崩雨量警戒值的調整機制。而分析中所使用的材料參數皆由文獻蒐集與鑽探資料決定。

一、DBLEAVES

DBLEAVES 為日本京都大學、名古屋工業大學等所聯合開發出之二維、三維靜力與動力有限元分析程序，此程序常用於進行土-水耦合 FD-FE 分析。在分析中利用有限元素法(FEM)將固相、液相及氣相離散化，利用有限差分法(FDM)將時域離散化。近年來，已有許多研究人員已經針對 DBLEAVES 的準確性和適用性進行詳細的研究與報告。例如 Ye(2007)使用振動台試驗和 DBLEAVES 對砂土的反覆液化壓密進行了實驗和數值模擬，發現試驗和數值分析之間具有良好的一致性。Hamayoon 等人(2016)對現有群樁基礎的抗震性能進行了 3D 動態有限元分析和 1g 振動台試驗，在乾燥條件下的部分改造地基中，證實 DBLEAVES 的準確性。Kheradi 等人(2017)對非線性軟弱土與樁結構相互作用進行了數值分析，並通過 1g 振動台試驗對其進行了驗證，並確認 DBLEAVES 的實用性。DBLEAVES 不僅可以描述自然界複雜的靜態與動態行為，同時可以解決不同土壤和土壤與結構間相互作用的問題。

在地震後土壤行為變化之反應研究中，動力本構模型是一個重要問題。用於描述循環荷載作用下之土壤本構關係理論框架早已提出，例如黏彈性模型、多重屈服面模型、邊界面模型、廣義塑性模型、多重剪切機構模型和結構性模型等。在本計畫中，為了更好地描述複雜應力路徑下土體動力特性，基於超固結邊界面概念、Armstrong-Frederick 型非線性移動硬化準則和非關聯流動準則，採用反覆彈塑性模型來描述動荷載作用下砂土的循環活動性以及液化強度特徵。本次計畫所採用之 Cyclic Mobility Model 為一有效應力模型，該土壤模型是由 Oka 在彈塑性力學理論以及大量試驗資料的基礎上提出，以 CamClay model 為基礎構成的彈塑性力學模型，可自動滿足排水及不排水的條件，此模型透過動態三軸壓縮等試驗參數，可針對應力誘發之異向性、土壤密度、土壤結構、加載條件及排水條件等因素對於土壤行為變化的影響進行模擬，得出良好的模擬結果，且已成功應用於不少地震後土壤行為變化相關的研究中。

本計畫將以 DBLEAVES 數值分析技術，分析不同情境下的關鍵滑動面強度變化，並探討不同情境下的邊坡穩定度，根據其穩定性建立出一套於不同地震強度、不同邊坡情境與不同土壤種類下的震後促崩雨量警戒值調整機制，以供相關單位於類似情境下的雨量警戒值調整作為參考。

二、模型材料參數與條件設定

由於 Cyclic Mobility 模型所需之參數不易取得，故本計畫透過文獻回顧蒐集五種不同的材料參數，其中包含中等緊密砂土、鬆散粉土、粗顆粒土壤、崩積土與粉土質砂土，詳細土壤參數如表 3-1 所示。並利用四種不同的地震強度作為地震加速度輸入資料，以下逐項說明分析模型的配置條件：

(一)材料參數

本計畫使用之 Cyclic Mobility 模型，所需要的參數依序為：破壞時主應力比 R_f 、波松比 ν 、參考狀態 ($P=98\text{kPa}$) 的孔隙比 e_0 、固結係數 λ 、膨脹係數 κ 、初始結構比 R_0^* 、過壓密狀態衰減參數, m 、結構物衰減參數, a 、土體異向性變化參數, br ，以下對參數進行說明：

1. 破壞時應力比(R_f)

破壞時主應力比是一種衡量材料或土壤破壞的指標，它是指在破壞發生時，主應力的比值。主應力是指在材料或土壤中作用的三個主要應力方向的應力值。主應力比通常表示為 σ_1/σ_3 ，其中 σ_1 為最大主應力， σ_3 為最小主應力。

2. 壓縮指數(λ)、膨脹指數(κ)

於三軸壓縮試驗，其加載、卸載及再加載過程中土的應力應變關係，於孔隙比-應力增量對數圖之斜率。

3. 阻尼係數(h_1 、 h_2)

用於描述波動在地下岩土中傳播時的能量損失情況的參數。衰減係數 h_1 表示波動在垂直方向上的能量損失情況。它通常與材料的阻尼特性相關，表示波動隨著深度增加而逐漸減弱的程度；衰減係數 h_2 表示波動在水平方向上的能量損失情況。它通常與材料的滑動耗能特性相關，表示波動在水平方向上隨著傳播距離增加而逐漸減弱的程度。

4. 初始結構比(R_0^*)

乃表示自然土壤之初始結構狀態變量，其物理意義與靈敏度是一致的，只是計算方法和數量不同，當今 $R_0^* = 1.0$ 即表示該土沒有任何結構特性，是標準的重模土。

5. 過壓密比(OCR)

OCR為土壤過去承受之最大應力與現在土壤應力的比值，可以用來判斷土壤的壓縮特性和固結狀態。

6. 過壓密狀態衰減參數(m)

控制剪切或壓縮時過壓密衰減速度的參數

7. 結構物衰減參數(a)

控制剪切或壓縮時結構衰退速度的參數

8. 土體異向性變化參數(br)

控制剪切或壓縮時各向異性發展速率的參數

表 3-1 土壤材料參數表

土壤種類	粗顆粒 土壤	粉土	中等緊 密砂土	崩積 土	粉土質 砂土	黏土
Compression index, λ	0.17	0.207	0.024	0.01	0.05	0.06
Swelling index, κ	0.0052	0.035	0.0048	0.007	0.012	0.005
Poisson's ratio, ν	0.3	0.35	0.3	0.37	0.34	0.32
Critical state parameter, R_f	4.81	3.50	3.46	3.48	3.52	1.25
Void ratio, e_0	0.537	0.77	0.5	0.86	0.85	1.0
Degradation parameter of overconsolidation state, m	1.0	3.8	0.1	0.3	0.1	3.0
Degradation parameter of structure, a	1.5	0.5	2.2	1.2	1.5	0.01
Degradation parameter of anisotropy, b_r	8.5	0.1	1.5	1.2	1.5	1.5

(二)坡地模型

本計畫所設計的邊坡模型如圖3-4所示，其中坡地高度(H)固定不變，透過改變不同底部寬度(B)使得坡角(β)不同。此外，為了有效模擬真實現地情況，DBLEAVES在進行動態分析時，邊坡下方需要一定深度之結構使地震傳播。因此將兩側邊界範圍延伸至3倍邊坡底部寬(3B)，以消除振波抵達邊界後再反射回土體所造成之干擾影響。本次選用坡地模型為坡角60度的坡地進行分析，其中地盤材料為黏土，邊坡主體由文獻蒐集獲得的五種土壤組成。邊坡主體底部寬度(B)為55.64m，高度為30m，頂部寬度為21m；地盤寬度為7倍的邊坡底部寬度，達389.48m，地盤深度為30m。

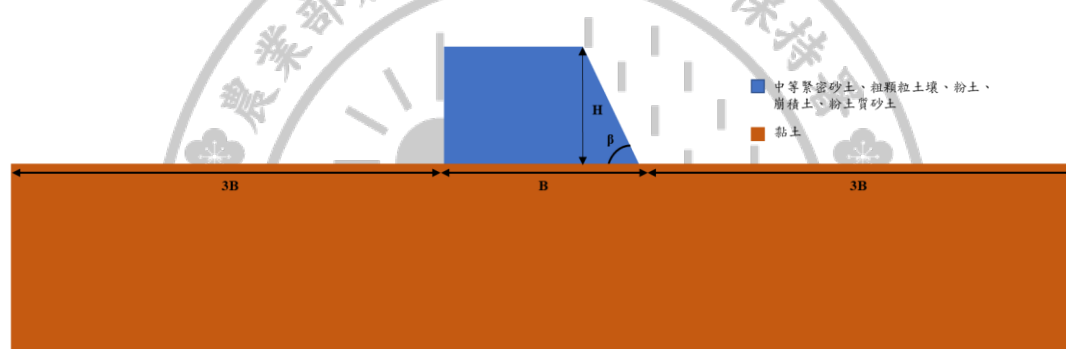


圖 3-4 邊坡模型示意圖

(三)輸入地震波

本計畫使用0.1g、0.2g、0.3g和0.4g的1赫茲非恆等振幅正弦波作為輸入地震波，其最大地動加速度(PGA)對應到不同震度階級，如表3-2所示。此外，作用時間皆為10秒，如圖3-5所示。

表 3-2 地震震度與加速度的關係

震度 階級	0級	1級	2級	3級	4級	5弱	5強	6弱	6強	7級
PGA (cm/sec^2)	<0.8	0.8~ 2.5	2.5~ 8.0	8.0~ 25	25~ 80	80~ 140	140~ 250	250~ 440	440~ 800	>800

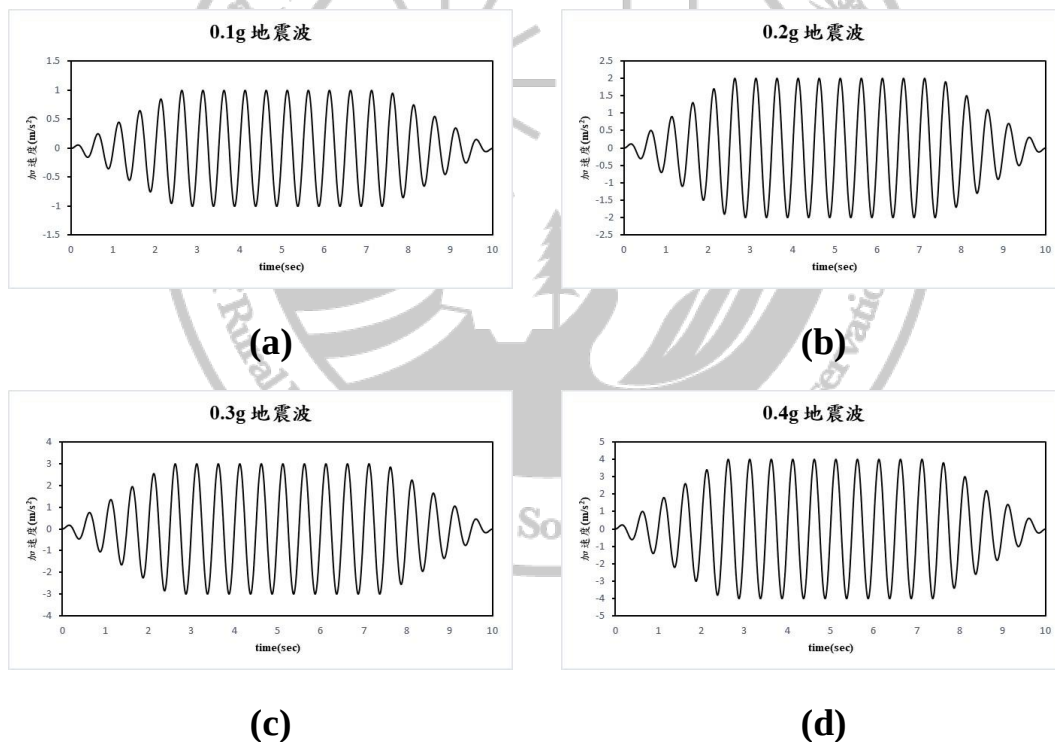


圖 3-5 地震加速度歷時圖

三、數值分析步驟

(一)模型建立

利用SAP2000建立FEM法網格數值模型，模型以設定之60度邊坡形狀設計。設定網格密度時，依據輸出資料需求，於分析區域增加網格密度。將邊坡切分成10層，邊坡底部以下地盤(B)亦切分成10等分，延伸之地盤寬度則以一個邊坡底部寬度(B)切分，將延伸之地盤切分成10等分。如圖3-6所示。

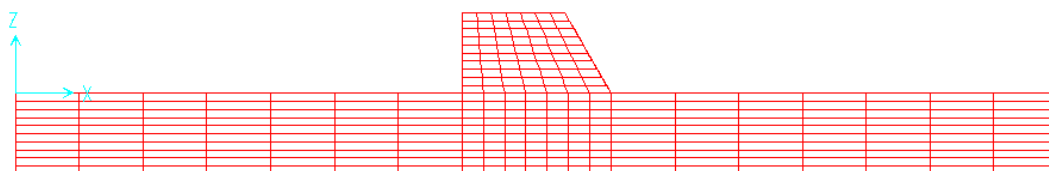


圖 3-6 數值網格模型

(二)輸入模型資料與材料參數

將模型之節點(Node)與單元(Element)資料輸入數據文件檔，接著，設定X、Y、Z三向度之自由度，由於地盤底部需固定，故將模型底部之節點自由度設為固定，使其不移動不轉動，其餘節點之自由度則設定為Y方向固定；另將單元(Element)資料輸入，並設置其對應的材料參數。

(三)邊界條件

為了模擬無限遠邊界之地盤受震現象，針對同高度的兩側設定等位移邊界條件(equal-displacement boundaries)，即在模型的左右兩側使其位移相等。而在排水邊界設定上，需根據地下水位面所在位置設定為排水邊界，將地下水位面以上單元設定為排水，其餘單元設定為不排水。

(四)初始應力場設定

利用SAP2000建立之FEM網格數值模型，並輸入對應的土壤參數，即可獲得各單元的初始應力並添加至輸入檔中。

(五)動態與靜態分析之步驟

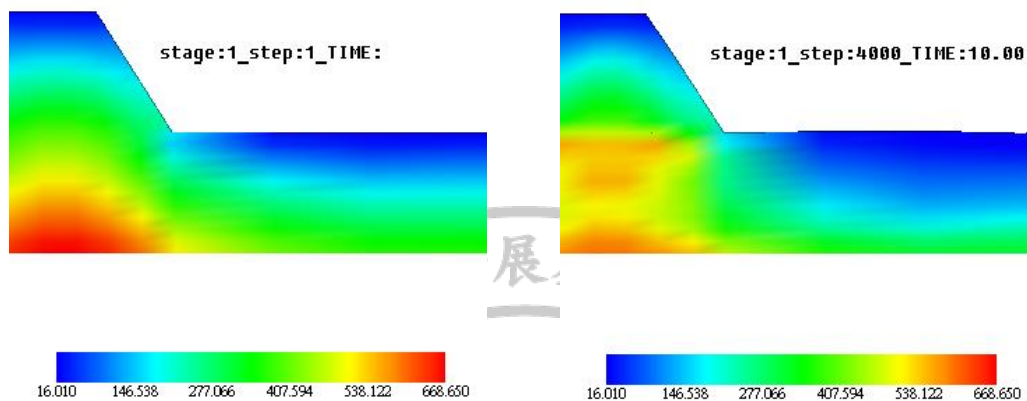
本計畫使用的分析步驟為先進行受地震波作用的動態分析，後續進行不同時間間距的靜態分析。為了觀察邊坡材料的有效應力與超額孔隙水壓隨時間的變化，在動態分析的步驟，以每0.0025秒為間距記錄一次數據，步數為4000步，共計10秒；而在靜態分析的步驟，依照地震發生後不同時間設定不同的分析速率，主要針對邊坡材料之有效應力與超額孔隙水壓變化速率進行設定，分成4種不同分析速率，設定累積時間達6個月。整體分析流程之步階歷程如表3-3所示。

表 3-3 步階狀況

STAGE	工項	最大加速度反應 (g)	時間(秒)	分析速率 (秒/次)	計算步數 (次)	累積 時間
1	振動	0.1/0.2/0.3/0.4	10	0.0025	4000	約共 1 天
2	靜置 壓密	0	5000	5	1000	
3	靜置 壓密	0	81400	100	814	
4	靜置 壓密	0	2505600	86400	29	1 月
5	靜置 壓密	0	12960000	2592000	5	6 月

(六)輸出節點、單元數據

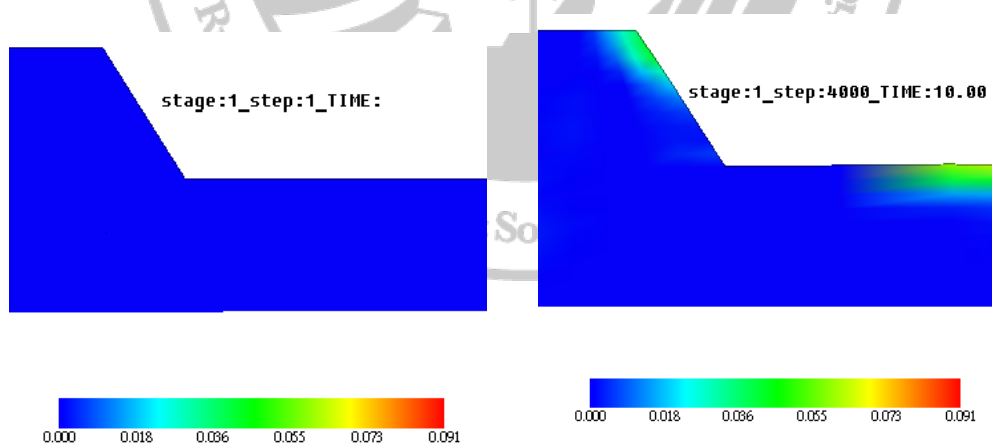
執行數值模式計算分析後，輸出組成邊坡的所有單元，利用各單元紀錄之數據，如應力、應變、位移與超額孔隙水壓等參數，呈現各參數在不同時間點的整體分布情況，如圖3-7~10所示。供確認分析成果的合理性與後續針對邊坡穩定性進行分析，探討其安全係數的變化。



(a)受震前

(b)受震後

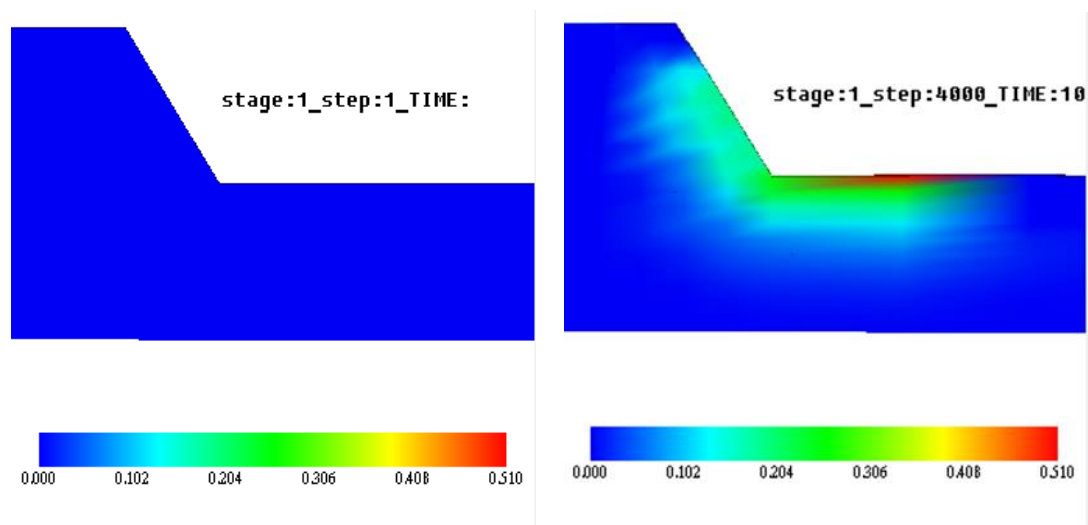
圖 3-7 垂直有效應力受震前後之變化



(a)受震前

(b)受震後

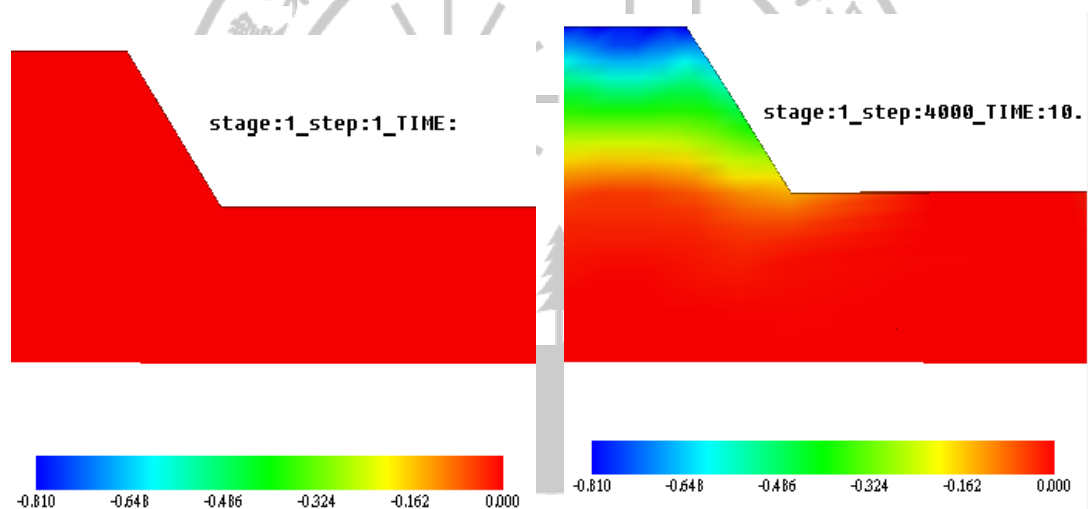
圖 3-8 側向剪應變受震前後之變化



(a)受震前

(b)受震後

圖 3-9 側向位移受震前後之變化



(a)受震前

(b)受震後

圖 3-10 垂直位移受震前後之變化

第三節 局部安全係數計算

根據 Ning Lu (2012) 所使用的局部安全係數 (LFS) 計算公式，即公式 4-1，結合文獻回顧中收集的土壤強度參數與輸出單元中的應力歷時資料，獲得受震前後的有效應力變化，代入公式 4-1，即可得到不同時間和空間位置的邊坡各個單元的局部安全係數分布如圖 3-11 所示，可藉由該圖判釋具有代表性的單元，並輸出該單元的資料，如圖 3-12 所示，用於進行後續分析，以研究在不同邊坡情境下安全係數的變化。

$$F_{LFS} = \frac{\tau^*}{\tau} = \frac{2 \cos \varphi'}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \left[c' + \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \tan \varphi' \right] \quad \text{式 4-1}$$

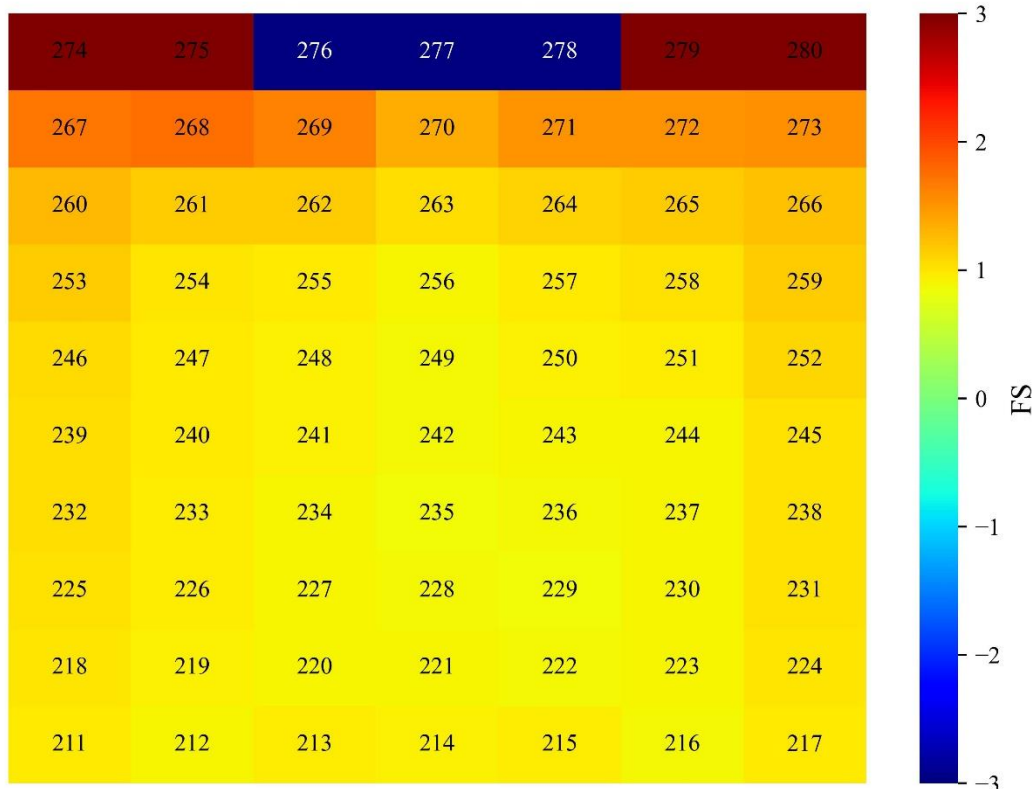


圖 3-11 局部安全係數分布示意圖

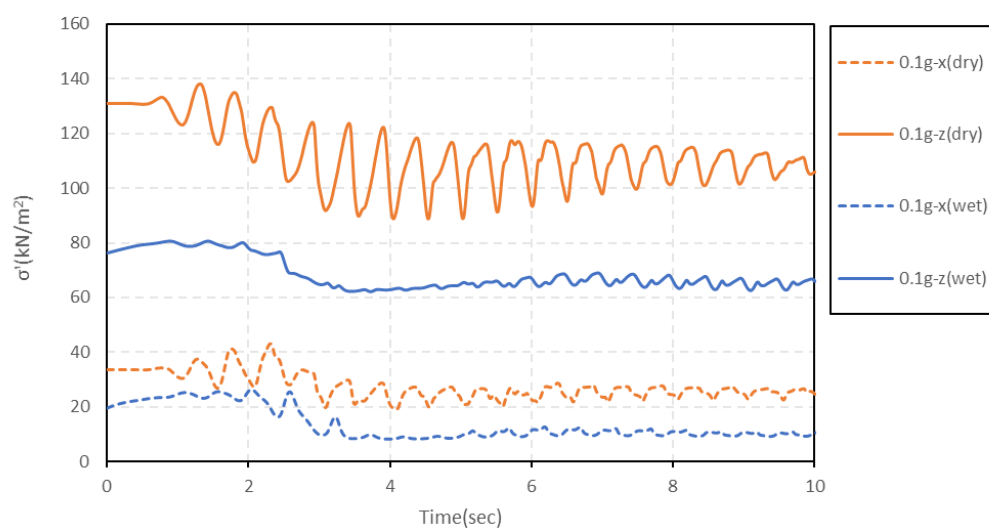


圖 3-12 輸出網格應力變化圖



第四節 邊坡受震後雨量警戒值探討

鳥居宣之(2007)將邊坡模擬情境分為震前未降雨、震前有降雨、震後未降雨和震後有降雨等四個情境，如圖 2-1 所示。本計畫在設定模擬情境時參考了這份文獻的設定，並參照了該文獻中各情境下土壤強度的變化趨勢，作為選擇具有代表性單元的依據，從各單元的局部安全係數變化趨勢中得到資料。接著，將同一坡度在不同邊坡情境下使用不同的材料和震度的安全係數繪製成箱型圖，如圖 3-13 所示，用以顯示該坡度安全係數的整體變化情況。

以 FS 等於 1 為界，大於 1 的情境為地震前後無降雨，而安全係數下降，代表邊坡強度的下降幅度，並以此推導出對應的雨量警戒值調整機制；小於 1 的情境為地震前後有降雨，安全係數下降，代表邊坡破壞的影響程度，以此推導出破壞程度增加的幅度。透過不同邊坡情境下安全係數下降的幅度，可以推導出對應的雨量警戒值調整機制。



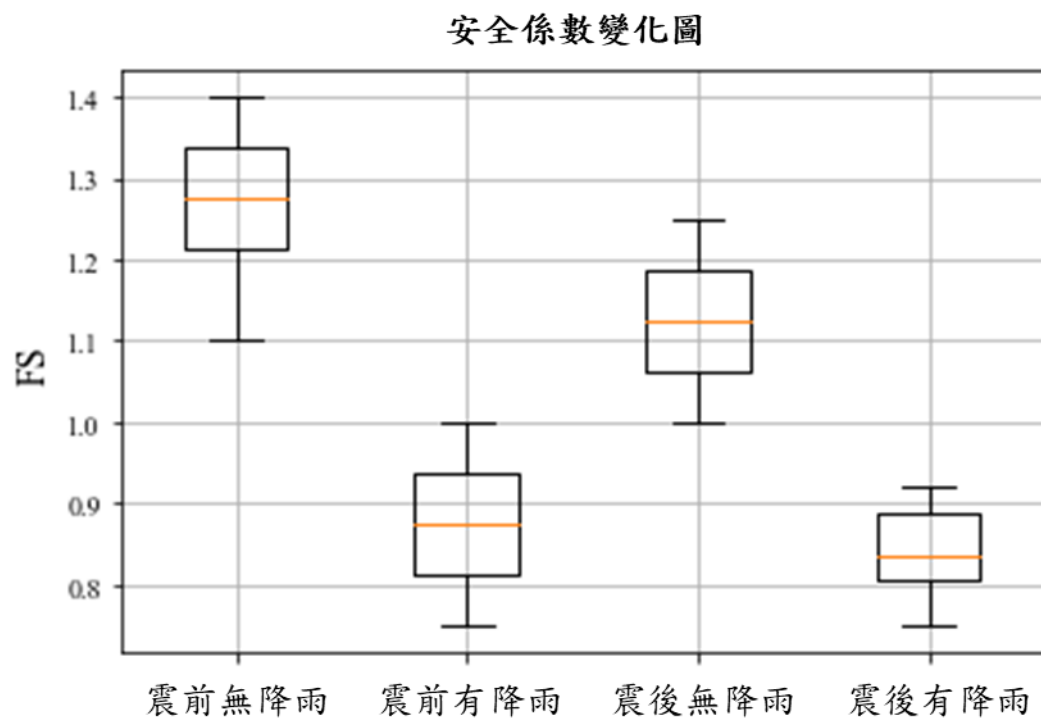


圖 3-13 安全係數變化圖



第五節 邊坡震後強度恢復時間探討

當地震發生時，邊坡內部會因受震而引發超額孔隙水壓激發，使得有效應力逐漸下降；而在地震發生後，超額孔隙水壓會逐漸消散，有效應力也會逐漸恢復，如圖 3-14~15 所示。但因地震影響，邊坡的結構會發生改變，內部的有效應力可能無法回到遭遇地震前的強度。根據本計畫數值模式分析之結果，可追蹤邊坡內部的有效應力與超額孔隙水壓變化達六個月。考量受震後邊坡結構受到的影響，定義邊坡之強度達受震前的 95%，即為強度恢復，而對應的時間，即為強度恢復所需時間，如圖 3-16 所示。

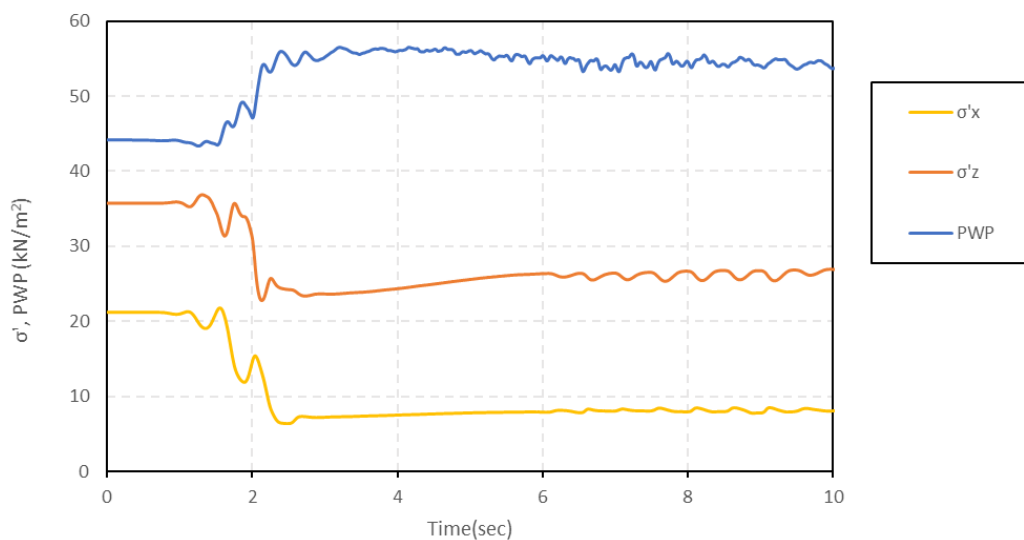


圖 3-14 受震期間應力與孔隙水壓變化

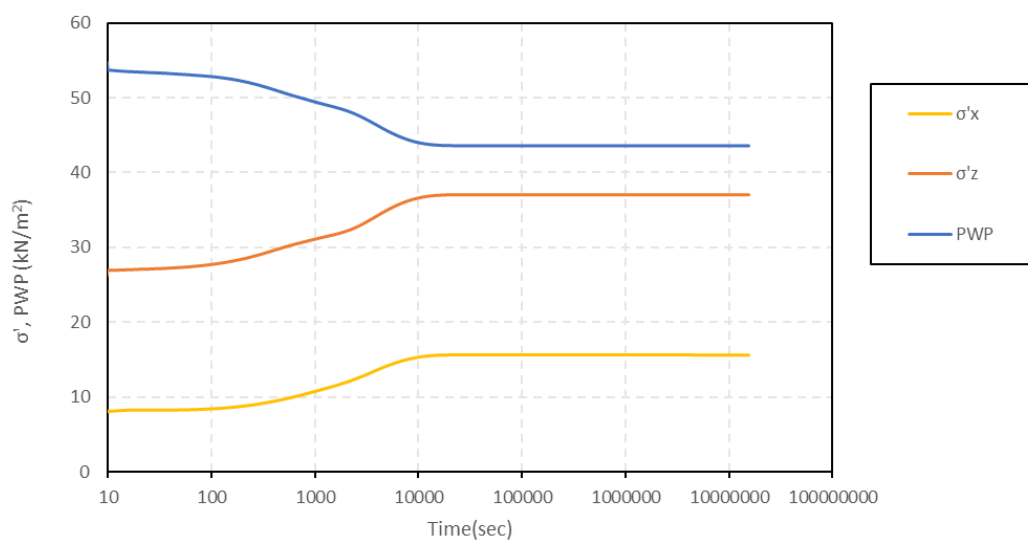


圖 3-15 受震期間有效應力變化

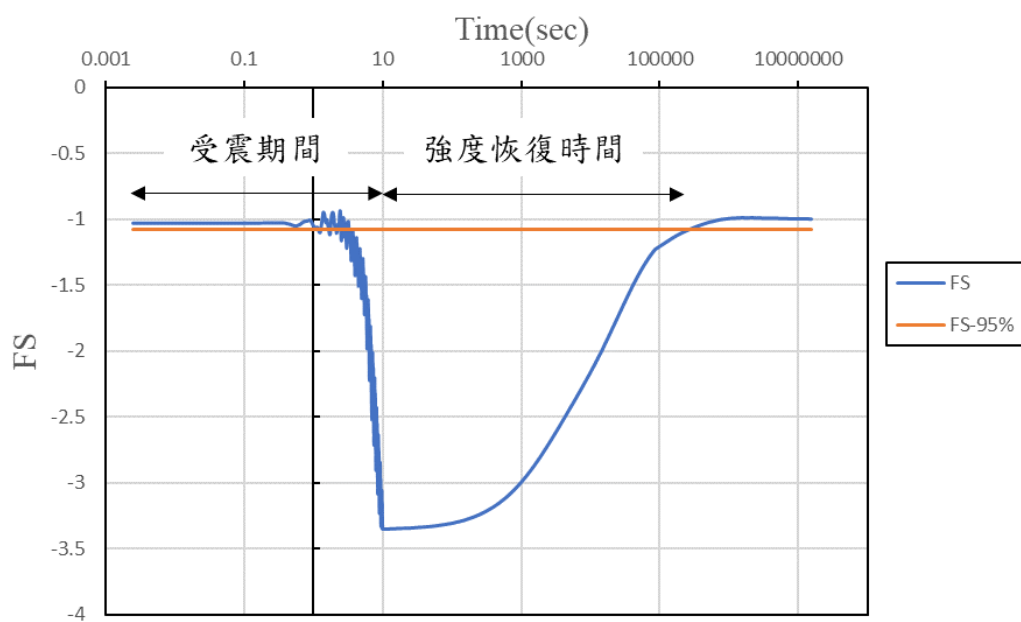


圖 3-16 強度恢復時間示意圖

第四章工作執行成果

第一節 現地調查結果

本節將呈現現地調查之成果。農業部農村發展及水土保持署針對有聚落、道路或橋樑地區，同時運用合成孔徑雷達影像（InSAR）分析上述地區之活動度、發生度、保全度後，篩選出 98 處風險較高之大規模崩塌潛勢區，如圖 4-1 所示，圖中標示位置為本計畫選定之現勘地點分布位置圖。

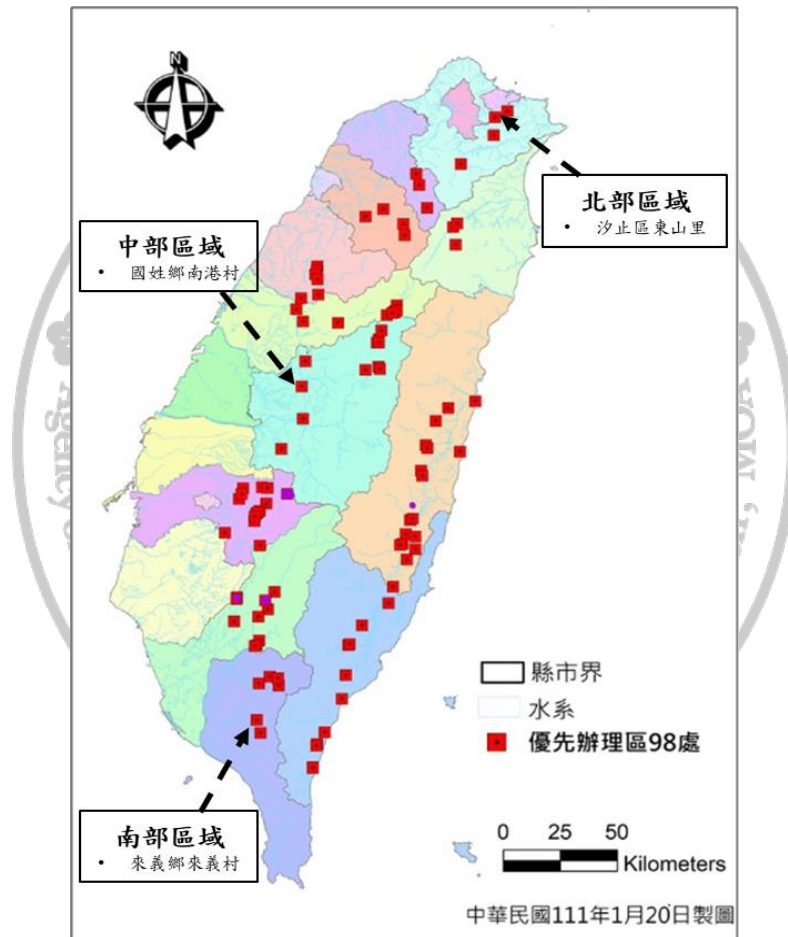


圖 四-1

圖 4-1 現勘地點位置圖(摘自大規模崩塌潛勢統計區)

一、北部調查結果

汐止區介於臺北市和基隆市之間，西以大坑溪、基隆河、內溝溪與臺北市相鄰，東則以丘陵地與基隆市相鄰。地形多為山坡地區，在基隆河沿岸有狹長平原，氣候屬常年多雨，受到地質和氣候等多重因素的影響，每當有豪雨或颱風來臨，容易發生災害。

本次現地調查點位鄰近鵠鵠崙聚落，如圖 4-2 所示，該區域被列為大規模崩塌高潛勢區，民國 111 年 10 月因尼莎颱風影響，造成汐止區山坡地多處崩塌，而鵠鵠崙地區也在該次颱風後發生局部崩塌。此次現地調查，發現土壤狀態如圖 4-3 所示，因近日有雨，故表層以下較為潮濕，以手觸摸，質地細密，有少許結塊，輔以工程地質探勘資料庫的地質資料，該區域材料由黃棕色基質材料與岩屑組成。

圖 4-4~4-5 為潛勢區的航照圖，可得知潛勢區屬於由陡坡-平地組成的坡地，而近期發生災害事件也多為局部崩塌；而植生情況也可從航照圖發現，整體坡地被植生覆蓋，現地調查之植生狀況如圖 4-6 所示。

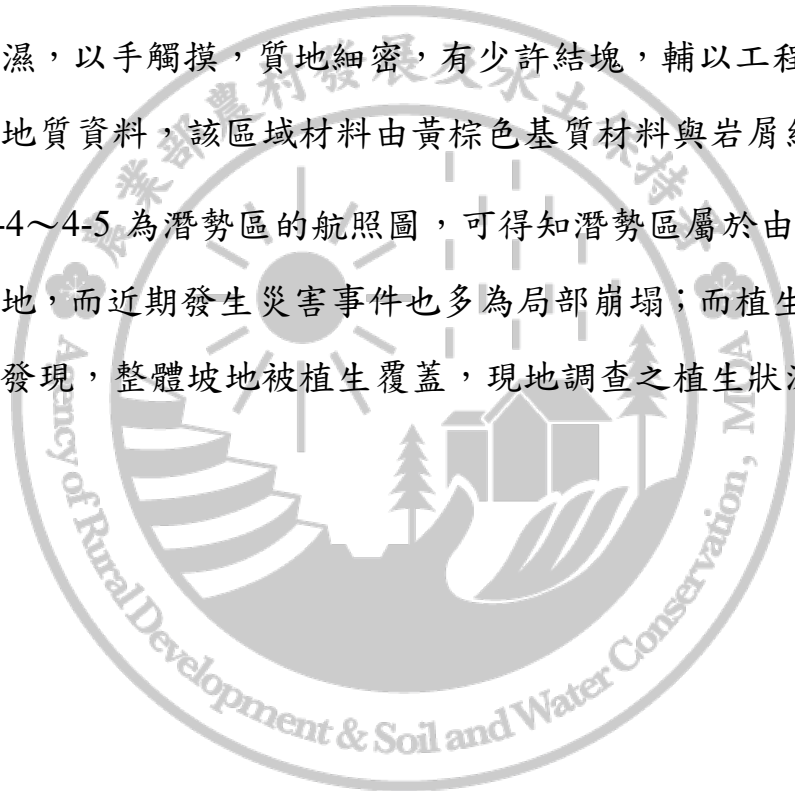




圖 4-2 汐止區東山里現勘位置



圖 4-3 土壤狀態

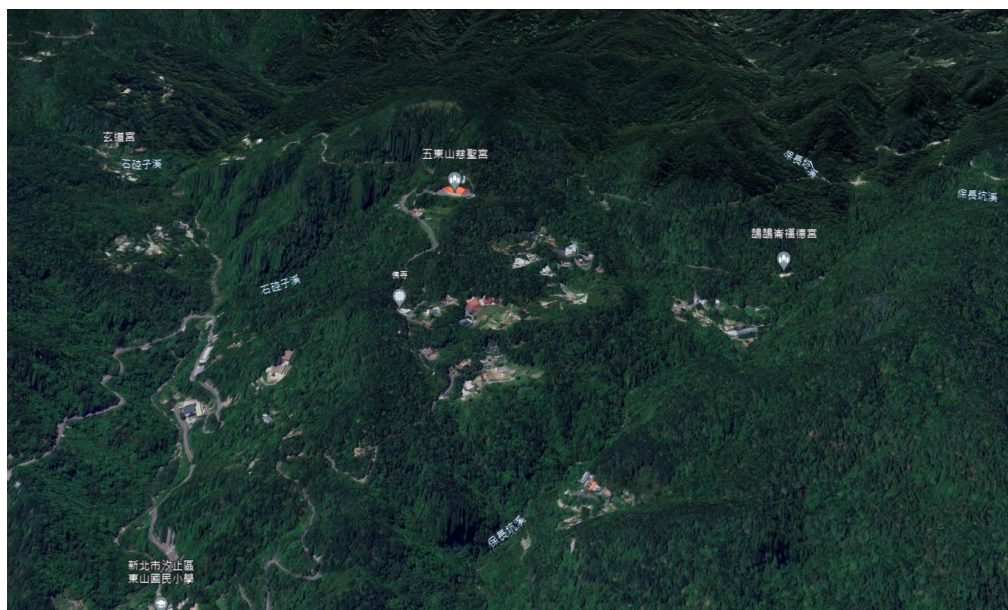


圖 4-4 崩塌潛勢區航照圖

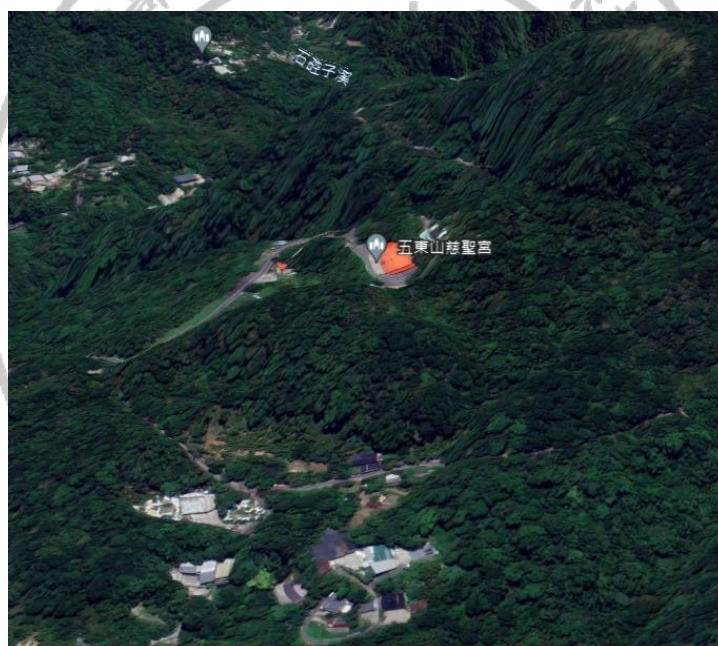


圖 4-5 崩塌潛勢區航照圖(側視)



圖 4-6 潛勢區內植生狀況



二、中部現地調查成果

國姓鄉位於中部區域南投縣西北部，屬中央山脈系統之丘陵地帶，四面環山，中有北港、南港兩溪匯流於柑子林，改稱烏溪。沿溪狹長之河谷盆地，為人口聚居處。該區域主要地形為山地與丘陵，氣候四季分明，夏季常受到颱風影響，易發生災害。

本次現地調查點位位於九份二山國家地震紀念地，如圖 4-7 所示，該地區為民國 88 年的九二一大地震震爆點，受地震影響而引發的岩爆現象造成巨大走山斷層，使得較高處海拔降低 400 公尺，土石掩埋面積超過 180 公頃。由於地震，使得該地區地貌變得陡峭，民國 90 年的桃芝颱風和民國 93 年的敏督利颱風也對該地區造成一定的災害，所幸震後已有施作防災設施，使災害影響程度降到最低。

此次現地調查於 9 月 15 日前往現場進行調查工作，以下說明發現土壤情況：其中震爆點區域的地質多為頁岩，地貌崎嶇，表面覆蓋些許植被如圖 4-8 所示；而大崩塌發生區域，表層大多為裸露區域並有水流情況，部分區域覆蓋植被，土壤狀況較為潮濕，如圖 4-9 所示。

圖 4-10~11 為該地區的航照圖，可得知該地區為地形較為陡峭，植生狀況不佳，表面多處裸露，當颱風或豪雨發生時，雨水滲透進行表層土，表層恐有滑動之風險。

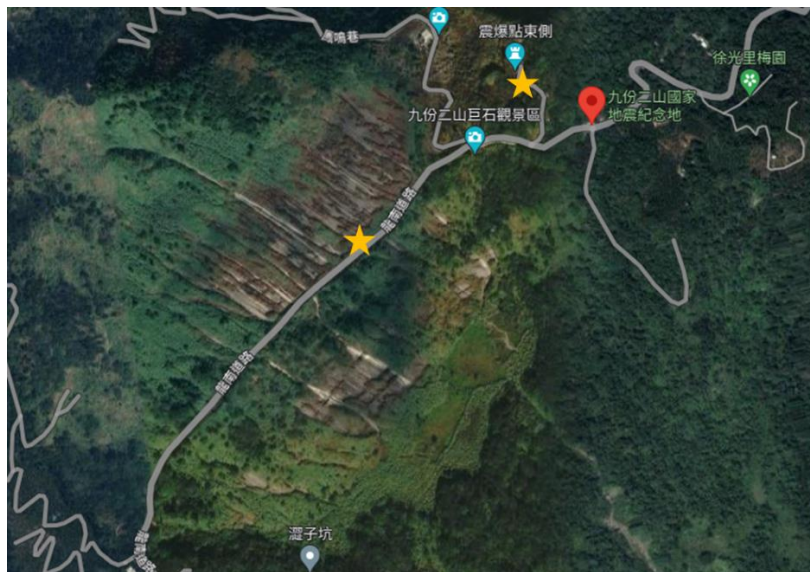


圖 4-7 南投縣國姓鄉南港村現地調查位置



圖 4-8 震爆點岩土與植生現況



圖 4-9 大崩塌區域岩土與植生現況

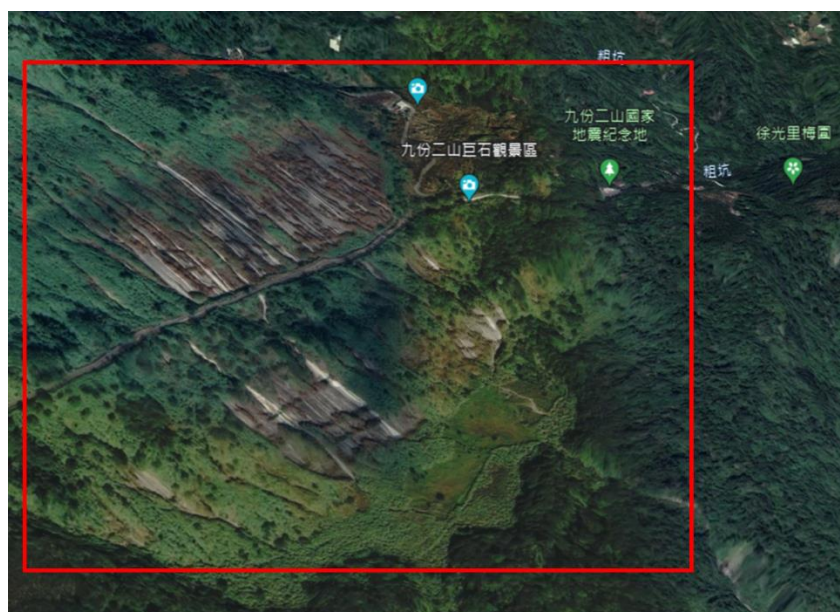


圖 4-10 九份二山地區航照圖



圖 4-11 九份二山地區航照圖(側視)



二、南部現地調查結果

來義鄉位於臺灣屏東縣內東部中段，地處中央山脈以西，海拔平均在 300 公尺以上，主要溪流為林邊溪。該區域地勢起伏較大，山高谷深，該地區降雨時空分配不均，多集中在夏季，颱風或豪雨來臨，易發生土石流。

本次現地調查地點鄰近屏東縣信義派出所，位於林邊溪沿岸，如圖 4-12 所示。該區域於民國 98 年與 99 年先後遭遇莫拉克颱風與凡那比颱風的影響，發生山崩與土石流等災害。近年來，也常因連日降雨而發生土石崩落等現象，常列為警戒區域。

本次現地調查於 10 月 14 日前往現場進行調查工作，以下說明土壤情況。由於執行調查工作當天，現場雨勢較大，故裸露區域表面較為潮濕，表面少有植生覆蓋，其中坡底可明顯看出曾有崩塌發生的跡象，如圖 4-13 所示。配合工程地質探勘資料庫的地質資料，該區域多為礫石、砂土及黏土，現地多為岩石裸露與表層土壤堆積於岩盤之上。

圖 4-14~15 為崩塌潛勢區的航照圖，可發現該區域為陡坡，且有大規模崩塌發生的歷史。除此之外，表面區域多為裸露，夏季常發生豪雨事件，有再次發生大規模崩塌事件的風險。



圖 4-12 屏東縣來義鄉現地調查位置



圖 4-13 潛勢區岩土與植生狀況



圖 4-14 崩塌潛勢區航照圖



圖 4-15 崩塌潛勢區航照圖(側視)

第二節 數值分析模式執行成果

本次報告參考烏居宣之(2007)中的邊坡模擬情境進行模擬，本節將呈現數值模式之分析結果，例如：水平與垂直方向有效應力隨時間之變化、孔隙水壓隨時間之變化等，將結果整理繪製成圖表，並提供後續局部安全係數計算所需的參數。以下將呈現不同土壤材料與震度，在不同情境下的模擬成果。

一、粗顆粒土壤

在地震前後無降雨的情境下，應力變化如圖 4-16 所示，地震期間，垂直有效應力會隨著震度增加而出現較大幅度的變化，處於較不穩定的狀態；但在地震發生後，承受較大震度的垂直有效應力反而呈現最大值，推測原因可能為承受較大震度，使得土壤變得更加緊實，故垂直有效應力增加，水平有效應力的趨勢則呈現應力下降。

而在地震前後有降雨的情境下，應力與孔隙水壓變化如圖 4-17 所示，地震期間，垂直有效應力的下降幅度與時間隨著震度增加而提早，同時，孔隙水壓也依相同的趨勢上升，地震結束後，承受較大震度的垂直有效應力呈現最小值，推測原因可能為承受較大震度，使得土壤內部的孔隙水壓力迅速增大，導致其有效應力降低，此時的土壤強度也會減小。

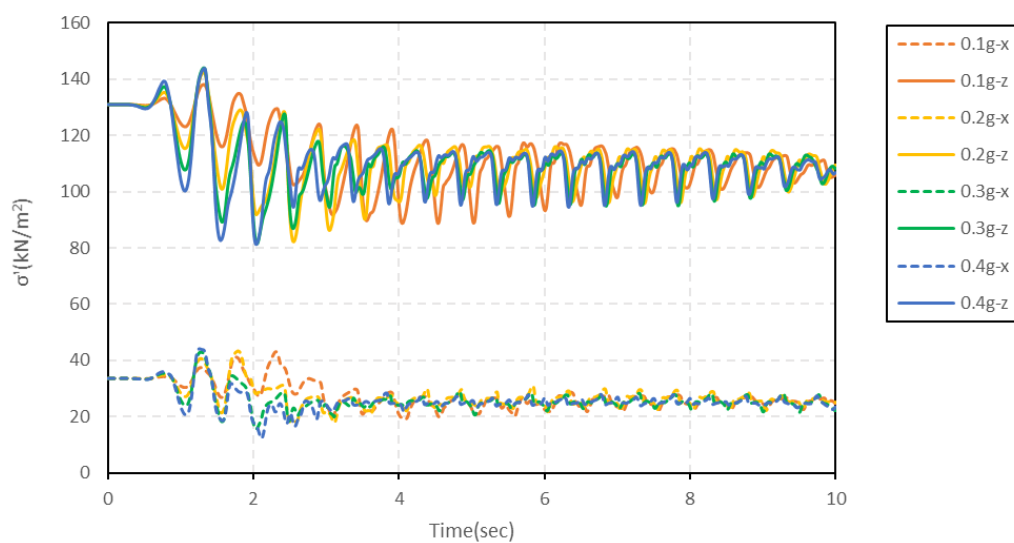


圖 4-16 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨)

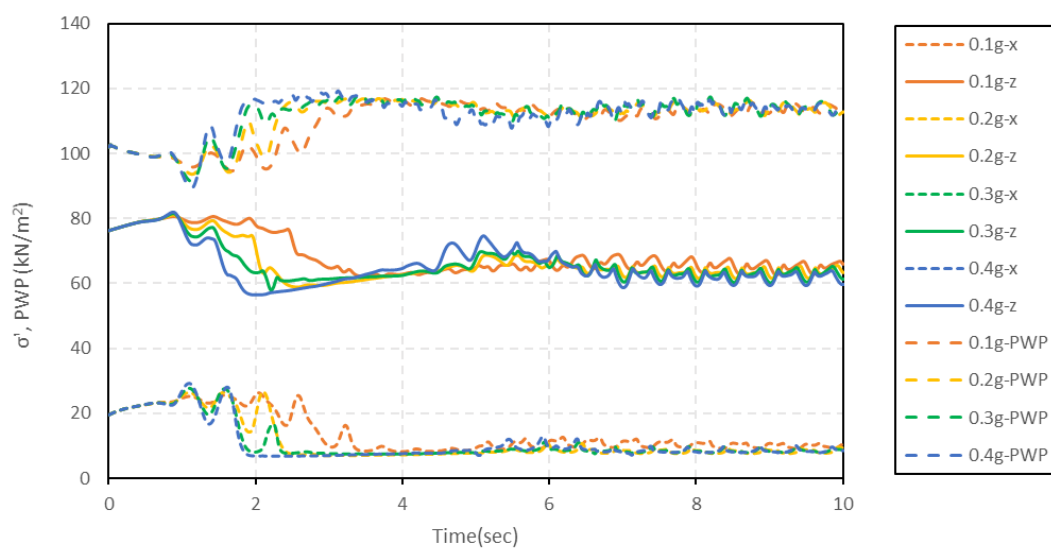


圖 4-17 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

二、崩積土

在地震前後無降雨的情境下，應力變化如圖 4-18 所示，邊坡在任何震度的地震作用下，都會發生崩壞，原因應是在 60 度陡坡的情境下，崩積土本身的結構強度不足，故受震動後即會出現破壞的現象。值得注意的是，在 0.2g 的地震作用下，邊坡破壞的時間最早，並非隨地震強度增加而提前破壞，推測原因為邊坡因為 0.2g 的地震引起了邊坡內部的變形，導致其崩壞；然而，在 0.4g 的地震作用下，雖然地震引起的振動更強，但土壤本身的阻尼效應減少了振動能量，因此邊坡的崩壞時間較晚。

在地震前後有降雨的情境下，應力與孔隙水壓變化如圖 4-19 所示，邊坡在 0.1g、0.2g 的地震強度作用期間，因土壤內部存在孔隙水，地震對於邊坡造成的震動有所減緩，邊坡並沒有產生破壞，受 0.3g、0.4g 的地震作用期間，邊坡因受到強烈震動而導致破壞。在 0.1g 的地震強度作用期間，內部孔隙水壓可能因崩積土滲透係數較大的特性，受震後孔隙水排出而出現水壓下降的情形，有效應力隨之上升；而 0.2g 的地震強度作用期間，可能因為土壤的阻尼效應，使得孔隙水壓變化不明顯，進而導致土壤的有效應力沒有發生劇烈的變化。

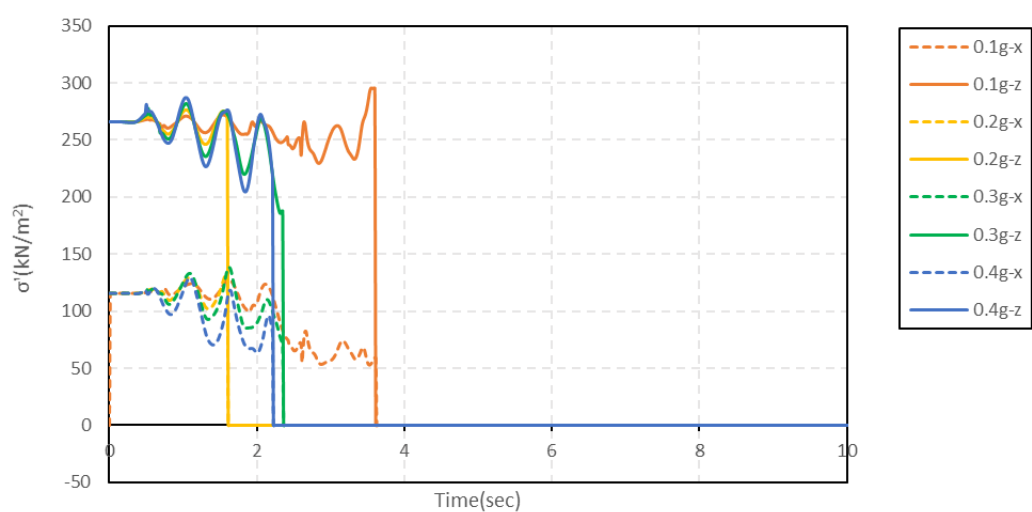


圖 4-18 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨)

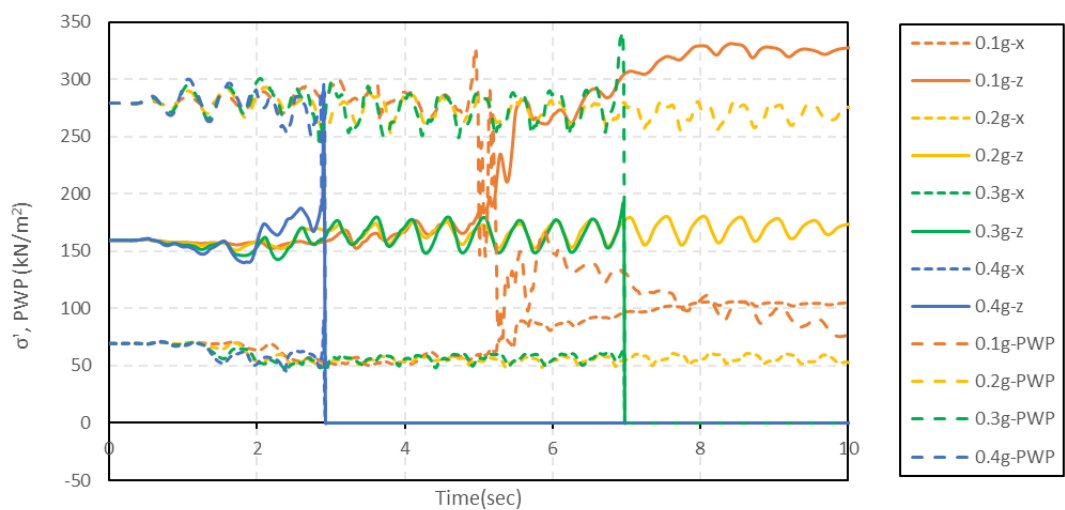


圖 4-19 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

三、中等緊密砂土

在地震前後無降雨的情境下，應力變化如圖 4-20 所示。在受震期間，垂直有效應力隨著地震起伏，變化幅度隨著震度增加而增大，地震發生後，受 0.4g 地震強度作用的垂直有效應力呈現最大值，垂直有效應力大小隨地震強度而遞減，推測原因為受較大震度影響，土壤的緊實度增加。而水平有效應力在受震期間隨地震起伏，整體呈現些微下降的趨勢。

在地震前後有降雨的情境下，應力與孔隙水壓變化如圖 4-21 所示。受震期間，垂直與水平有效應力的下降時間與幅度隨震度增加而增加，與孔隙水壓增加的時間點一致，土壤強度因此降低，整體邊坡變得更加不穩定。



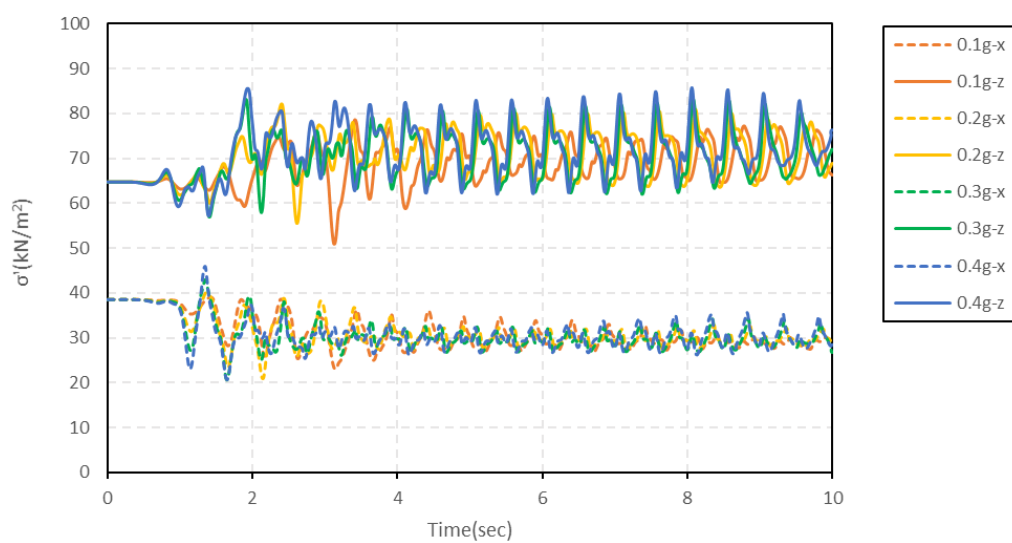


圖 4-20 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨)

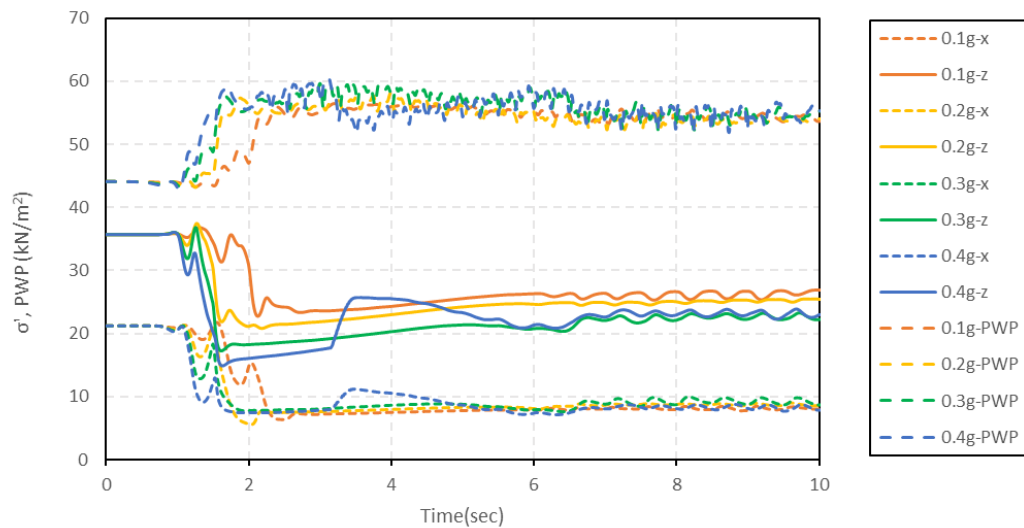


圖 4-21 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

四、粉土

在地震前後無降雨的情境下，應力變化如圖 4-22 所示。水平與垂直有效應力隨地震作用而呈現起伏不定的狀態，受較大震度的情況下，有效應力的變化也會出現較大的起伏。在地震作用後，垂直有效應力整體呈現些微上升的趨勢，但水平有效應力幾乎沒有變化。

在地震前後有降雨的情境下，應力與孔隙水壓變化如圖 4-23 所示。垂直與水平有效應力隨著地震出現規律的起伏，值得注意的是，不同於其他土壤材料，粉土呈現的下降趨勢為緩慢下降，而非到達一臨界值後突然下降；而孔隙水壓也隨著地震規律的起伏並逐漸上升，趨勢與有效應力雷同。而在地震作用後，有效應力下降的程度與承受震度大小成正比，此時的土壤強度較為不足。



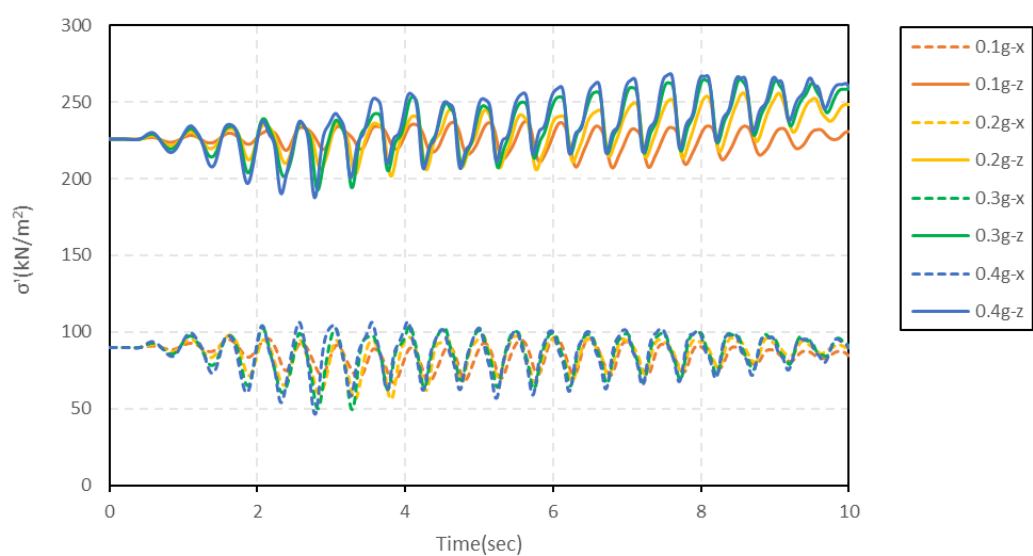


圖 4-22 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨)

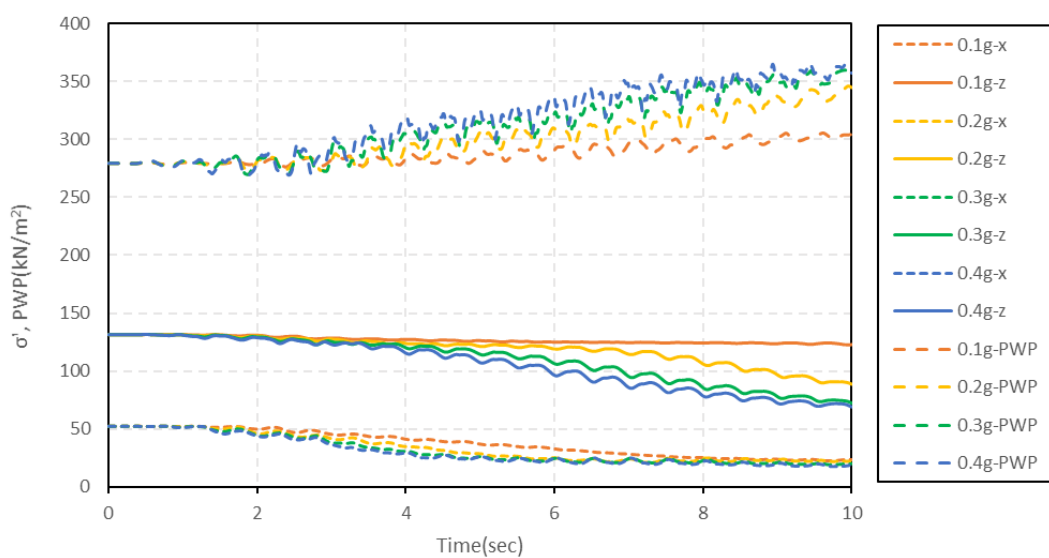


圖 4-23 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

五、粉土質砂土

在地震前後無降雨的情境下，應力變化如圖 4-24 所示。垂直與水平有效應力隨地震起伏，受較大震度的地震作用下，有效應力的起伏也隨之增加，垂直有效應力整體的變化趨勢輸入地震波相似，與受震前相比，只有些微變大，但水平有效應力整體呈現略小於地震前的趨勢。

在地震前後有降雨的情境下，應力與孔隙水壓變化如圖 4-25 所示。垂直與水平有效應力隨地震作用而逐漸減小，同時孔隙水壓也逐漸增加，受較大震度的地震作用，會使得有效應力下降的幅度隨之增加，此時的土壤強度較為不足，整體變化趨勢與粉土相似。



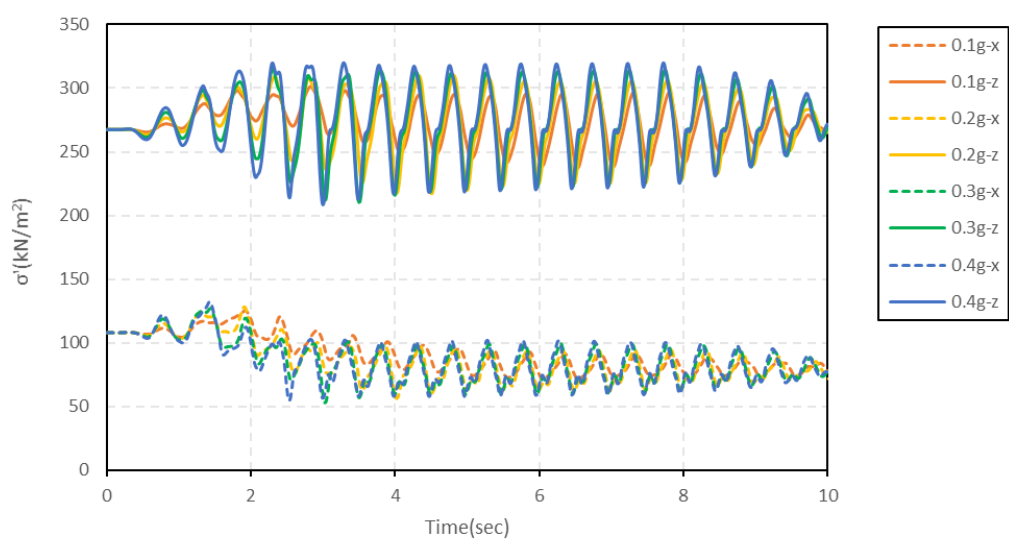


圖 4-24 受震期間應力變化圖(地震前後無降雨)

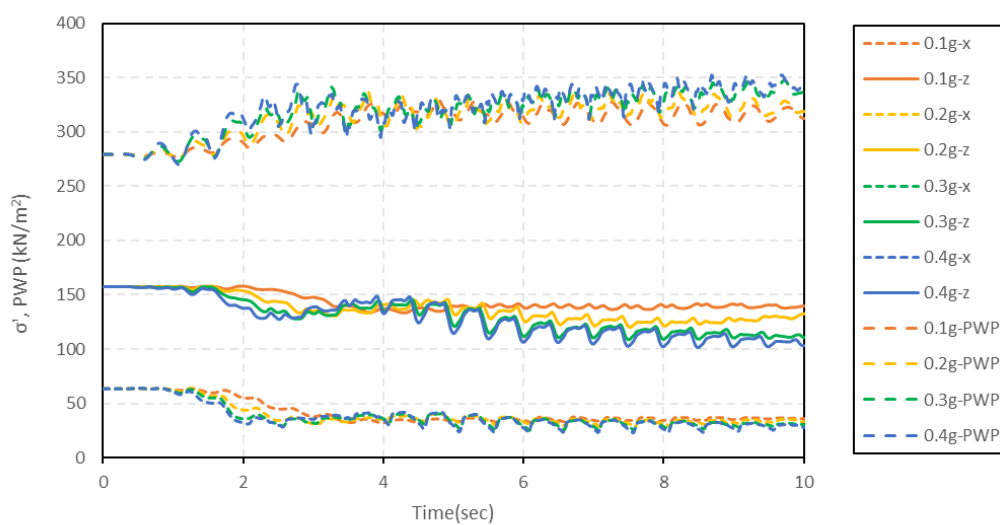


圖 4-25 受震期間應力&孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

第三節 局部安全係數計算結果

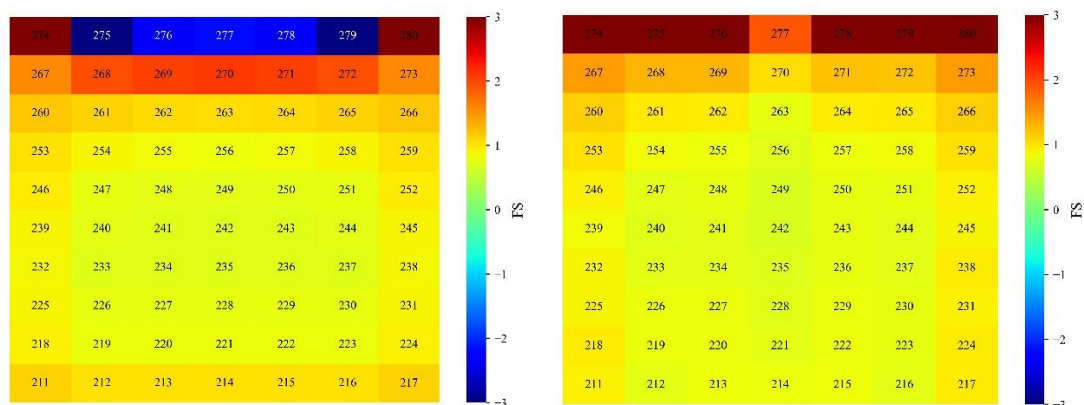
本節將透過上一節所呈現的受地震前後有效應力變化，搭配由 Ning Lu (2012)提出的局部安全係數(LFS)的計算公式，計算不同情境下不同震度與不同土壤材料的局部安全係數，選出符合鳥居宣之(2007)中提出的四種情境的強度大小排列順序的單元，並將該單元的安全係數製成一安全係數矩陣，觀察不同條件下的安全係數變化。

一、粗顆粒土壤

在四種不同的情境下，土壤材料為粗顆粒土壤，透過公式計算得出的局部安全係數分布如圖 4-26~27 所示，經篩選後，選擇編號 253 的單元作為代表性單元，並將單元之安全係數彙整成安全係數矩陣如表 4-1 所示。

表 4-1 粗顆粒土壤安全係數矩陣

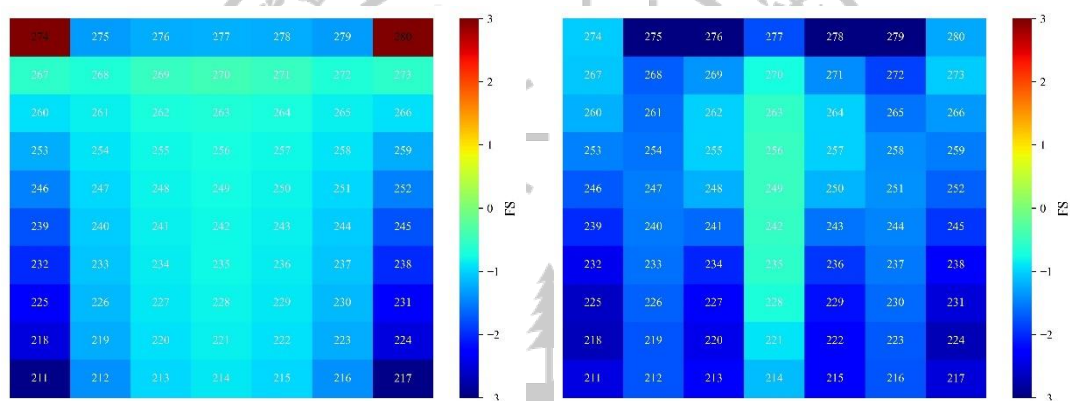
	震前無降雨	震前有降雨	震後無降雨	震後有降雨
0.1g	1.268	-1.228	1.225	-1.765
0.2g	1.268	-1.228	1.213	-1.870
0.3g	1.268	-1.228	1.154	-2.002
0.4g	1.268	-1.228	1.190	-2.089



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-26 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨)



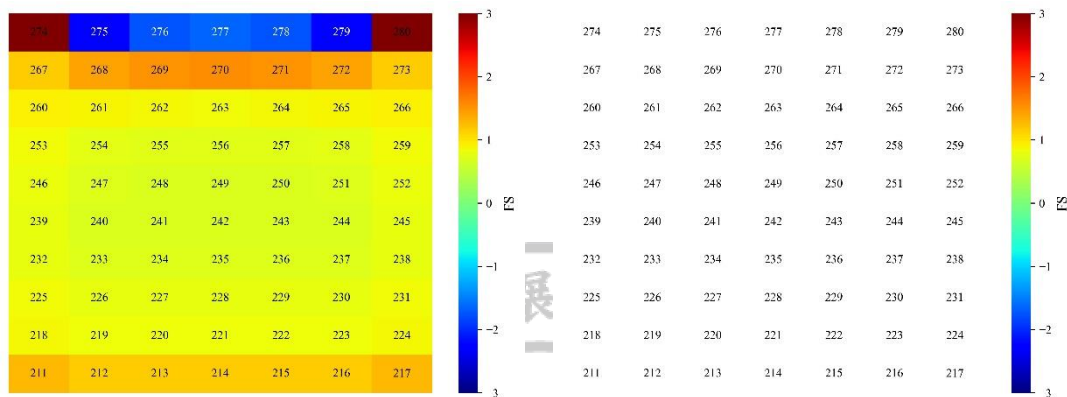
(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-27 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨)

二、崩積土

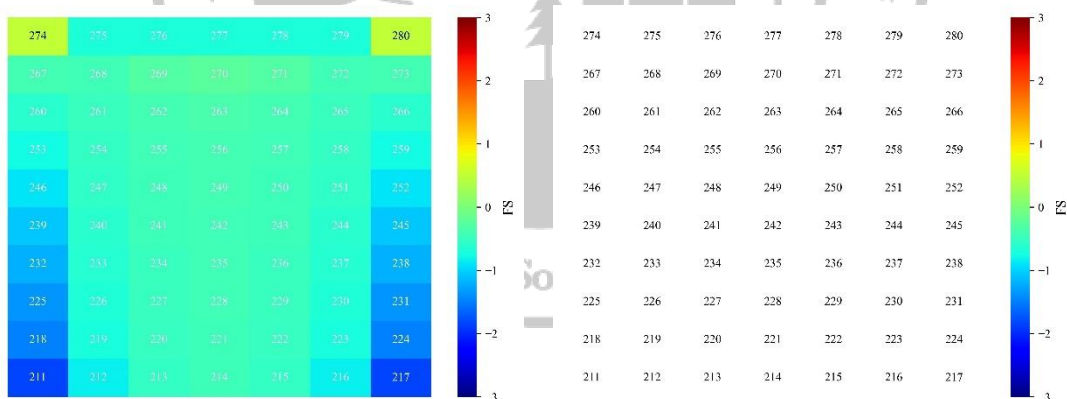
在四種不同的情境下，土壤材料為崩積土，透過公式計算得出的局部安全係數分布如圖 4-28~29 所示。由於在此情境下，邊坡受震後大多會崩壞，無法篩選出適當的單元並彙整成安全係數矩陣。



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-28 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨)



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

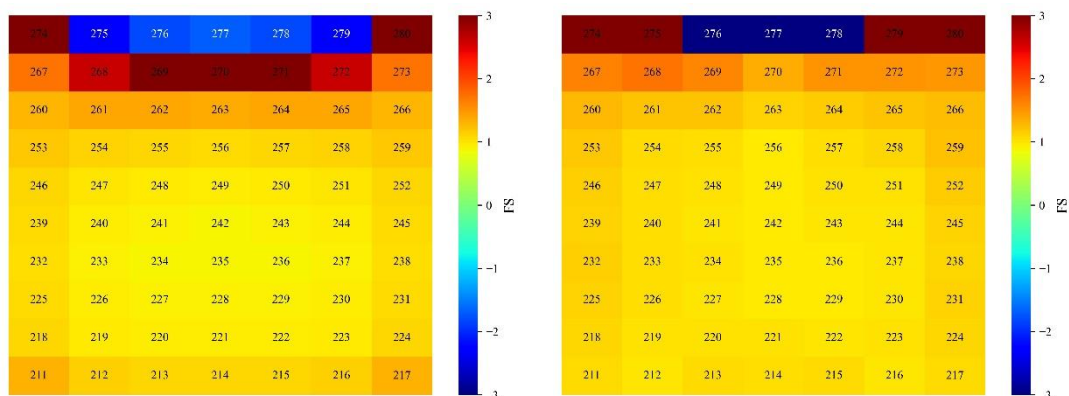
圖 4-29 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨)

三、中等緊密砂土

在四種不同的情境下，土壤材料為中等緊密砂土，透過公式計算得出的局部安全係數分布如圖 4-30~31 所示。經篩選後，選擇編號為 268 的單元作為代表性單元，並將單元之安全係數彙整成安全係數矩陣如表 4-2 所示。

表 4-2 中等緊密砂土安全係數矩陣

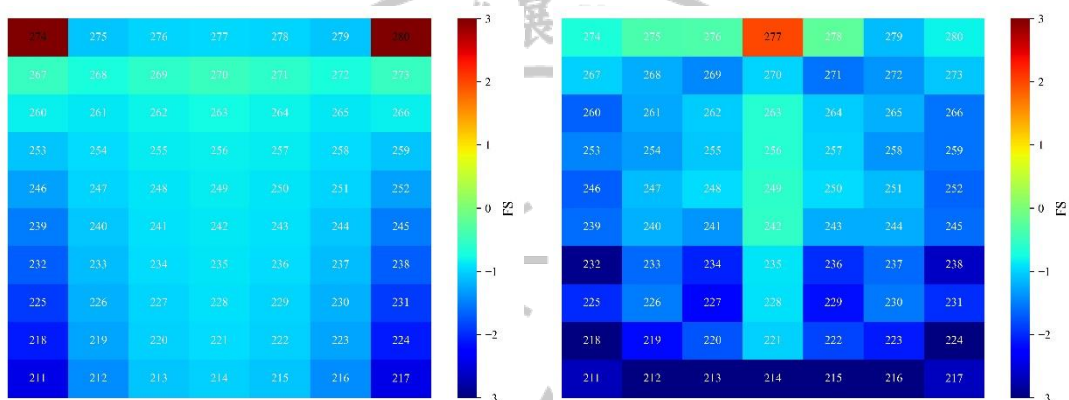
	震前無降雨	震前有降雨	震後無降雨	震後有降雨
0.1g	2.623	-0.711	1.725	-1.831
0.2g	2.623	-0.711	1.626	-2.108
0.3g	2.623	-0.711	1.461	-2.85
0.4g	2.623	-0.711	1.455	-2.564



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-30 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨)



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

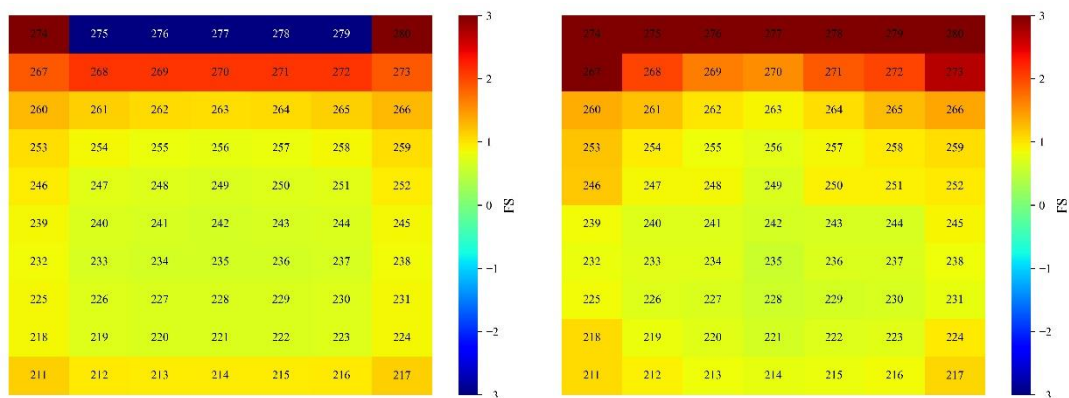
圖 4-31 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨)

四、粉土

在四種不同的情境下，土壤材料為粉土，透過公式計算得出的局部安全係數分布如圖 4-32~33 所示。經過篩選後，選擇編號為 211 的單元作為代表性單元，並將單元之安全係數彙整成安全係數矩陣如表 4-3 所示。

表 4-3 粉土安全係數矩陣

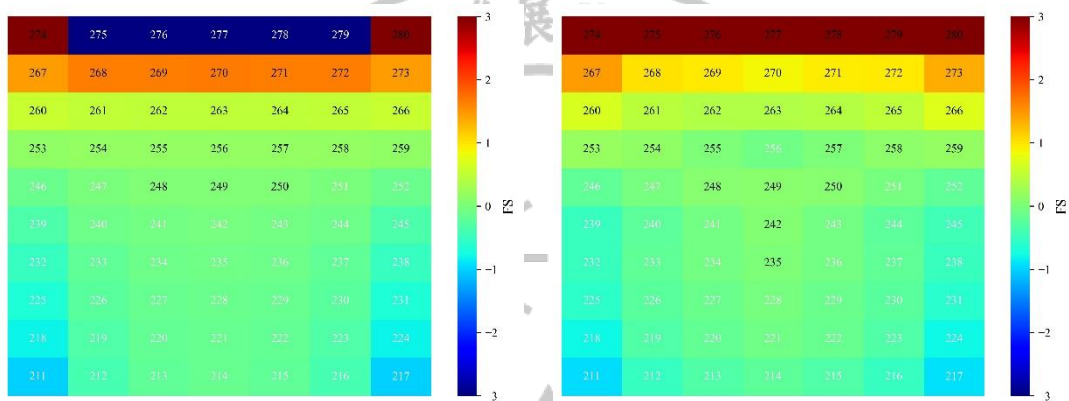
	震前無降雨	震前有降雨	震後無降雨	震後有降雨
0.1g	1.140	-1.026	1.059	-1.117
0.2g	1.140	-1.026	1.020	-2.262
0.3g	1.140	-1.026	0.996	-3.153
0.4g	1.140	-1.026	0.977	-3.344



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-32 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨)



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

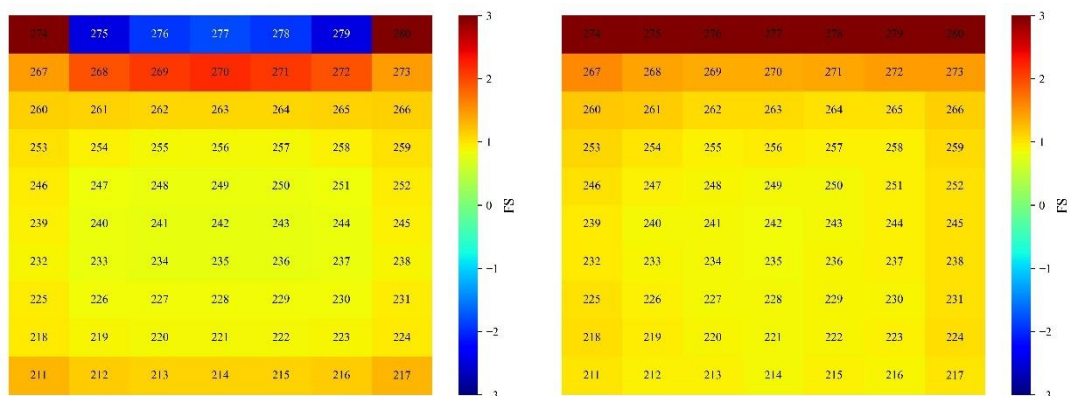
圖 4-33 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨)

五、粉土質砂土

在四種不同的情境下，土壤材料為粉土質砂土，透過公式計算得出的局部安全係數分布如圖 4-34~35 所示。經過篩選後，選擇編號為 217 的單元作為代表性單元，並將單元之安全係數彙整成安全係數矩陣如表 4-4 所示。

表 4-4 粉土質砂土安全係數矩陣

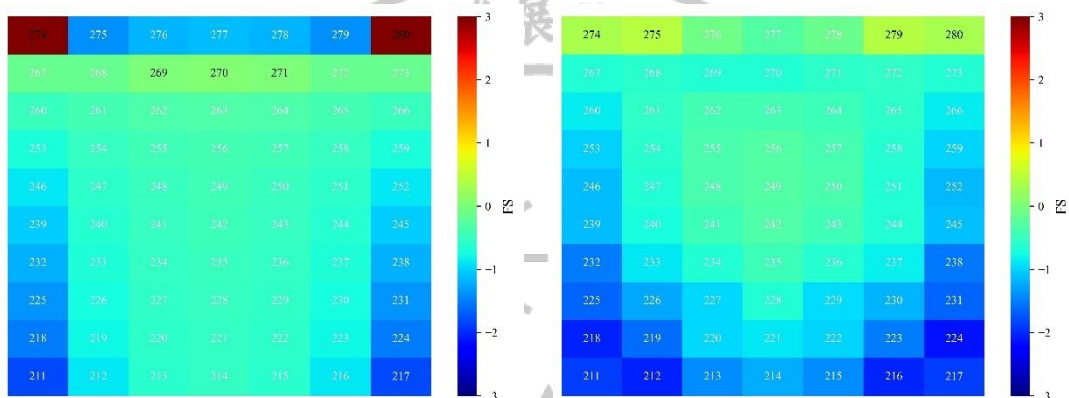
	震前無降雨	震前有降雨	震後無降雨	震後有降雨
0.1g	1.300	-1.813	1.011	-2.215
0.2g	1.300	-1.813	0.967	-2.429
0.3g	1.300	-1.813	1.005	-3.411
0.4g	1.300	-1.813	0.994	-3.824



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-34 局部安全係數分布圖(地震前後無降雨)



(a)震前局部安全係數分布圖

(b)震後局部安全係數分布圖

圖 4-35 局部安全係數分布圖(地震前後有降雨)

第四節 邊坡受震後雨量警戒值探討成果

本節將透過整合上節在四種不同情境下不同受震條件、不同材料條件計算出的局部安全係數變化，量化邊坡整體強度的下降程度，探討邊坡強度的變化與邊坡破壞後的影響程度，並依安全係數的變化程度推導降雨警戒值的調整機制。

一、各種土壤材料的安全係數變化

下列將根據上一節計算獲得的不同情境、不同震度下的安全係數變化，以觀察各種土壤材料受震後的強度變化。地震前後無降雨的情境，安全係數多數仍大於 1，可以此代表邊坡強度的降低程度；而地震前後有降雨的情境，安全係數多數小於 1，說明邊坡以呈現不穩，因此在受震後，安全係數會持續減小，對應的即是破壞程度的增加，故以此為依據來判斷邊坡破壞後的影響範圍。



(一)粗顆粒土壤

粗顆粒土壤受震後的安全係數變化如表4-5所示。在地震前後無降雨的情境下，粗顆粒土壤受震後安全係數下降幅度較小，安全係數整體變化趨勢仍隨震度增加而呈現下降幅度增加；在地震前後有降雨的情境下，隨著地震強度增加，邊坡的破壞程度也隨之增加，範圍約在受震前的1.4~1.7倍。由此可發現，粗顆粒土壤的抗震能力相對較佳。

表 4-5 粗顆粒土壤安全係數變化

	震前無降雨	震後無降雨	震前有降雨	震後有降雨
	土壤強度改變程度		衝擊程度改變程度	
0.1g	100%	96.61%	100%	143.73%
0.2g	100%	95.66%	100%	152.28%
0.3g	100%	91.01%	100%	163.03%
0.4g	100%	93.85%	100%	170.11%

(二) 中等緊密砂土

中等緊密砂土受震後的安全係數變化如表4-6所示。在地震前後無降雨的情境下，安全係數下降幅度非常大，受0.1g的地震作用後，安全係數下降至震前的65%，整體變化趨勢隨地震強度增加而下降幅度增加，受0.4g的地震作用時，安全係數的下降幅度約為震前的50%；而在地震前後有降雨的情境下，當地震強度達0.3g時，影響範圍會呈現倍數型成長，隨著地震強度增加，邊坡破壞程度也隨之增加，影響範圍可達震前的2.5~4倍。

表 4-6 中等緊密砂土安全係數變化

	震前無降雨	震後無降雨	震前有降雨	震後有降雨
	土壤強度改變程度		衝擊程度改變程度	
0.1g	100%	65.76%	100%	257.52%
0.2g	100%	61.99%	100%	296.48%
0.3g	100%	55.70%	100%	400.84%
0.4g	100%	55.47%	100%	360.62%

(三)粉土

粉土受震後的安全係數變化如表4-7所示，在地震前後無降雨的情境下，粉土受震後安全係數下降幅度小，相較於粗顆粒土壤仍較大，安全係數整體變化趨勢仍隨震度增加而呈現下降幅度增加；在地震前後有降雨的情境下，隨著地震強度增加，邊坡的破壞程度也隨之增加，影響範圍的變化幅度可達震前的3倍以上。

表 4-7 粉土安全係數變化

	震前無降雨 震後無降雨		震前有降雨 震後有降雨	
	土壤強度改變程度		衝擊程度改變程度	
0.1g	100%	92.89%	100%	108.87%
0.2g	100%	89.47%	100%	220.47%
0.3g	100%	87.37%	100%	307.31%
0.4g	100%	85.70%	100%	325.93%

(四)粉土質砂土

粉土質砂土受震後的安全係數變化如表4-8所示。在地震前後無降雨的情境下，整體下降幅度不如其他類土壤隨地震強度增加而增加，維持約25%的下降幅度；在地震前後有降雨的情境下，安全係數下降程度隨地震強度增加而小幅增加，在承受0.4g的地震作用後，影響程度達震前的2倍。

表 4-8 粉土質砂土安全係數變化

	震前無降雨	震後無降雨	震前有降雨	震後有降雨
	土壤強度改變程度		衝擊程度改變程度	
0.1g	100%	77.79%	100%	122.17%
0.2g	100%	74.41%	100%	133.98%
0.3g	100%	77.33%	100%	188.14%
0.4g	100%	76.49%	100%	210.92%

二、總體安全係數變化

關於所有土壤材料在不同情境、不同震度下的整體變化趨勢，將以箱線圖的方式呈現，關於箱線圖的判釋，如圖 4-36 所示，可分為三部分。首先，箱體本身代表的是數據的四分位數的範圍，底邊代表的是第一四分位數，頂邊代表第三四分位數，箱體內部的橫線代表中位數。接著是箱體上下的鬚線，上方代表數據的最大值，下方代表數據的最小值，在兩者範圍之外的點則為離群值，在本節中呈現的箱線圖，會將離群值去除，主要探討合理範圍內的趨勢，避免離群值對解釋造成不合理的影響。

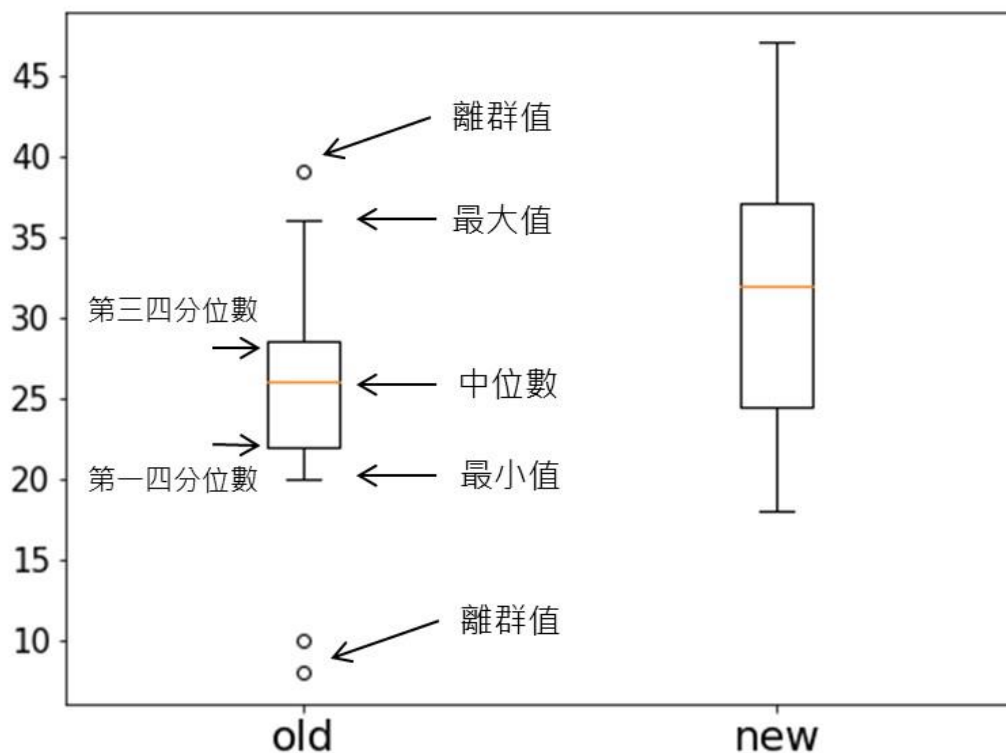


圖 4-36 箱線圖示意圖

以下呈現局部安全係數的整體下降趨勢，如圖 4-37 所示。在不考慮土壤材料種類的前提下，無降雨的情境受震後，其安全係數下降的幅度相當有限，以安全係數最小值為例，震前無降雨的安全係數最小值大約為 1.140，而震後無降雨的安全係數最小值大約為 0.967，整體下降幅度約為 15%。

整體而言，地震發生前後有降雨的安全係數變化幅度相對於無降雨的情境要大的許多，在考量到降雨入滲的因素後，邊坡內部的應力變化行為會變得更加複雜，使得邊坡受震後的安全係數區間變得相對較大，若以安全係數最小值做為考量依據，震前安全係數最小值約為 -1.813，震後的安全係數最小值約為 -3.824，下降幅度為 210%，換句話說，在邊坡受震又降雨的情況下，其影響範圍會較震前增加接近 2.1 倍。

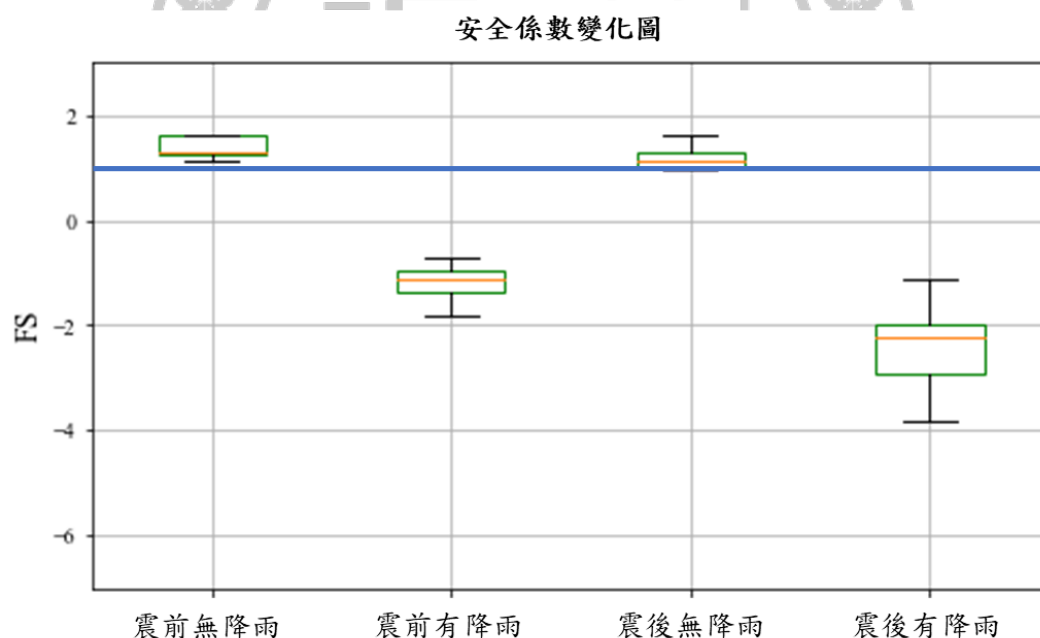


圖 4-37 整體安全係數變化圖

第五節 邊坡震後強度恢復時間探討成果

本節將根據第四章第三節計算得出的安全係數歷時資料，透過安全係數隨時間之變化，觀察是否達受震前強度的 95%，判斷為強度恢復所需時間。此外，崩積土在受地震作用的情況下多數已崩壞，故本節不予討論。

一、粗顆粒土壤

粗顆粒土壤受地震作用後的有效應力變化如圖 4-38~39 所示，在地震前後無降雨的情境下，有效應力在受震結束後幾乎保持定值；而地震前後有降雨的情境下，水平有效應力在地震作用後即快速上升並保持定值，而垂直有效應力則在震後約 20 秒間快速恢復，後續隨時間些微增加。粗顆粒土壤的安全係數隨時間之變化如圖 4-40 所示，約在地震發生後約 20 秒，安全係數即回到地震前安全係數的 95%；如同前節所述，根據受震後的安全係數下降幅度即可得知，粗顆粒土壤的抗震能力相對較佳，即使遭遇較大強度的地震，仍可以維持一定的強度，安全係數下降幅度仍小於 10%；此外，得利於本身較好的排水特性，故可以在震後短時間內即逐漸恢復內部有效應力，使得安全係數得到提升。

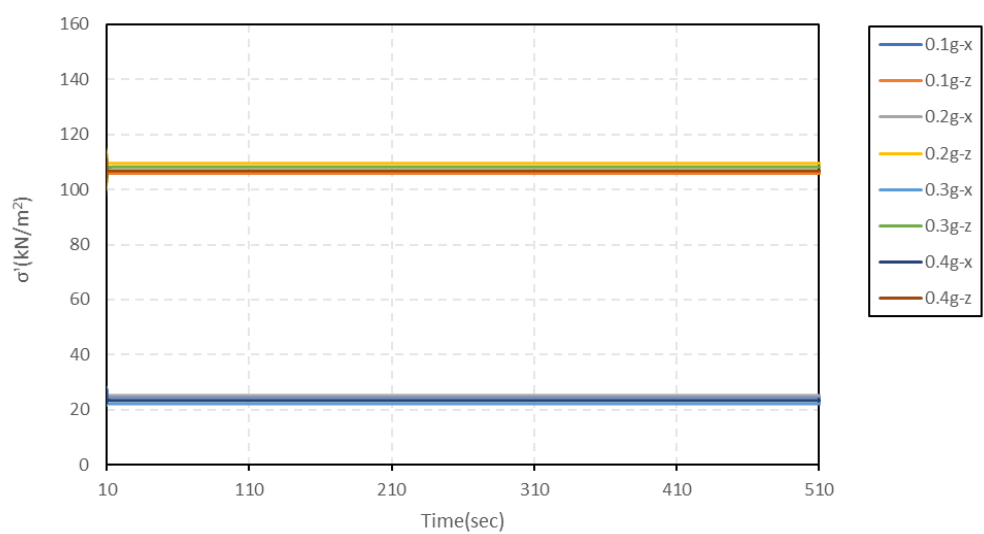


圖 4-38 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨)

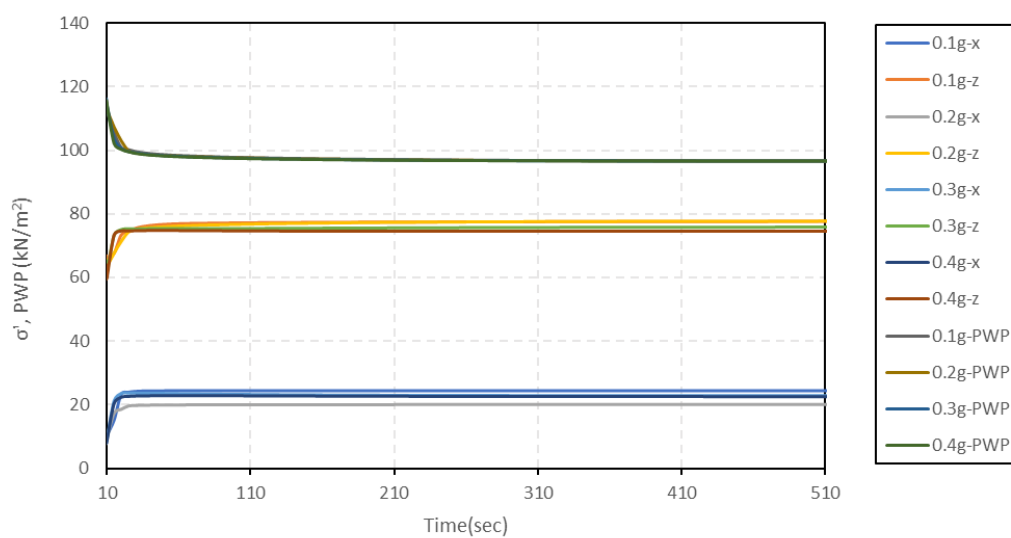


圖 4-39 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

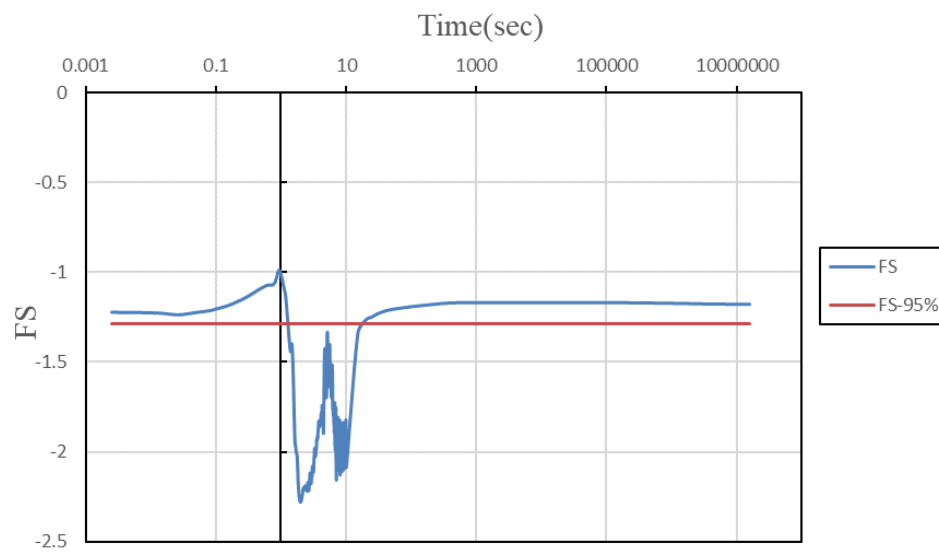


圖 4-40 粗顆粒土壤安全係數變化圖



二、中等緊密砂土

中等緊密砂土受地震作用後的有效應力變化如圖 4-41~42 所示，在地震前後無降雨的情境下，有效應力在受震結束後保持定值；而地震前後有降雨的情境下，有效應力逐漸恢復並在震後 3 小時呈現定值，其中受震強度較低的情境下，有效應力的恢復後呈現最大值。而中等緊密砂土的安全係數隨時間之變化如圖 4-43 所示。在地震作用後，安全係數約在 3.5 小時後回升至震前安全係數的 85%，持續追蹤至 6 個月後，安全係數雖仍有小幅回升，但無法達到震前安全係數的 95%，不符合強度恢復的定義，應是因為受地震影響後，材料內部遭受嚴重破壞，即使其排水性相對較佳，仍無法回升至震前強度，關於中等緊密砂土的強度恢復時間需持續地追蹤方能得知。

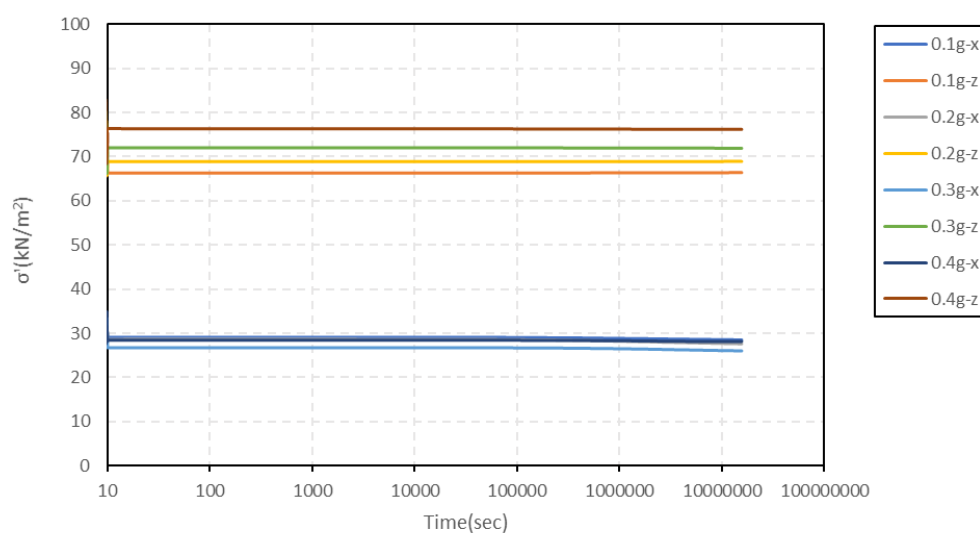


圖 4-41 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨)

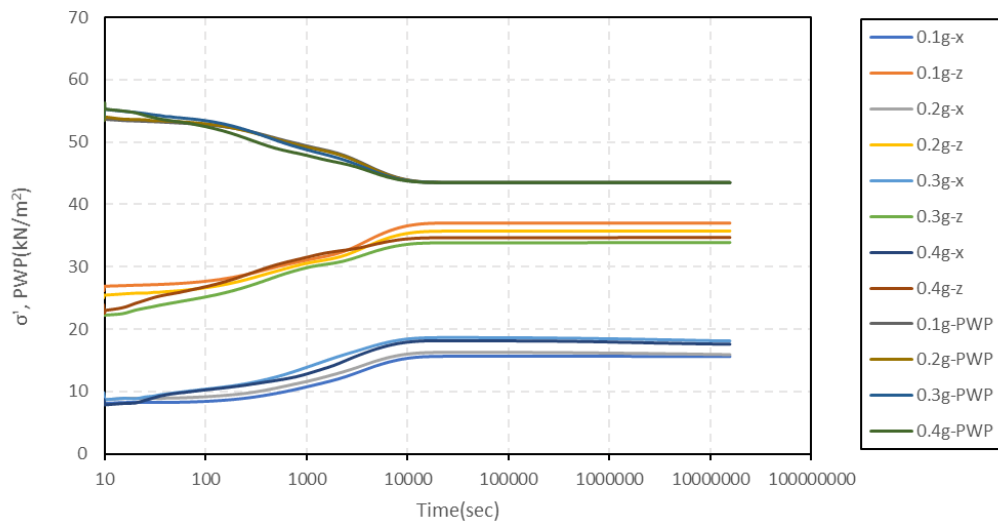


圖 4-42 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

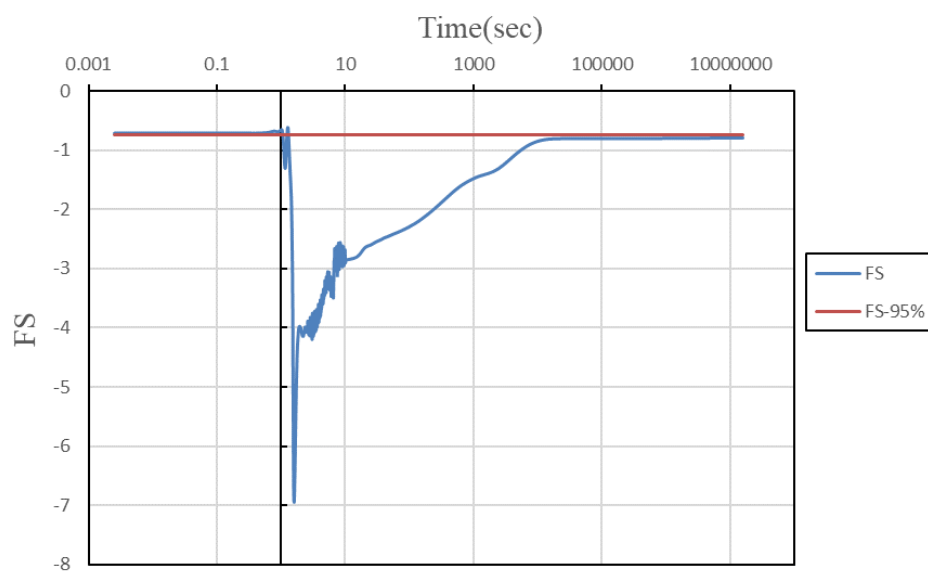


圖 4-43 中等緊密砂土安全係數變化圖

三、粉土

粉土受地震作用後的有效應力變化如圖 4-44~45 所示，在地震前後無降雨的情境下，有效應力在受震結束後保持定值；而地震前後有降雨的情境下，有效應力逐漸恢復並在震後 10 小時呈現定值，承受較大地震力作用的情境，有效應力的恢復呈現最小值。粉土的安全係數隨時間之變化如圖 4-46 所示，在地震作用後約 4 天後才回到震前安全係數的 95%，達到強度恢復的標準，故粉土的強度恢復時間為 4 天。由此可發現，粉土受地震的影響後，安全係數下降的幅度相較於中等緊密砂土不算太大，然而，由於排水性相對不佳，內部有效應力恢復速度較為緩慢，但卻需要近 4 天的時間才能回到震前安全係數的 95%，可見粉土的震後恢復能力較差。

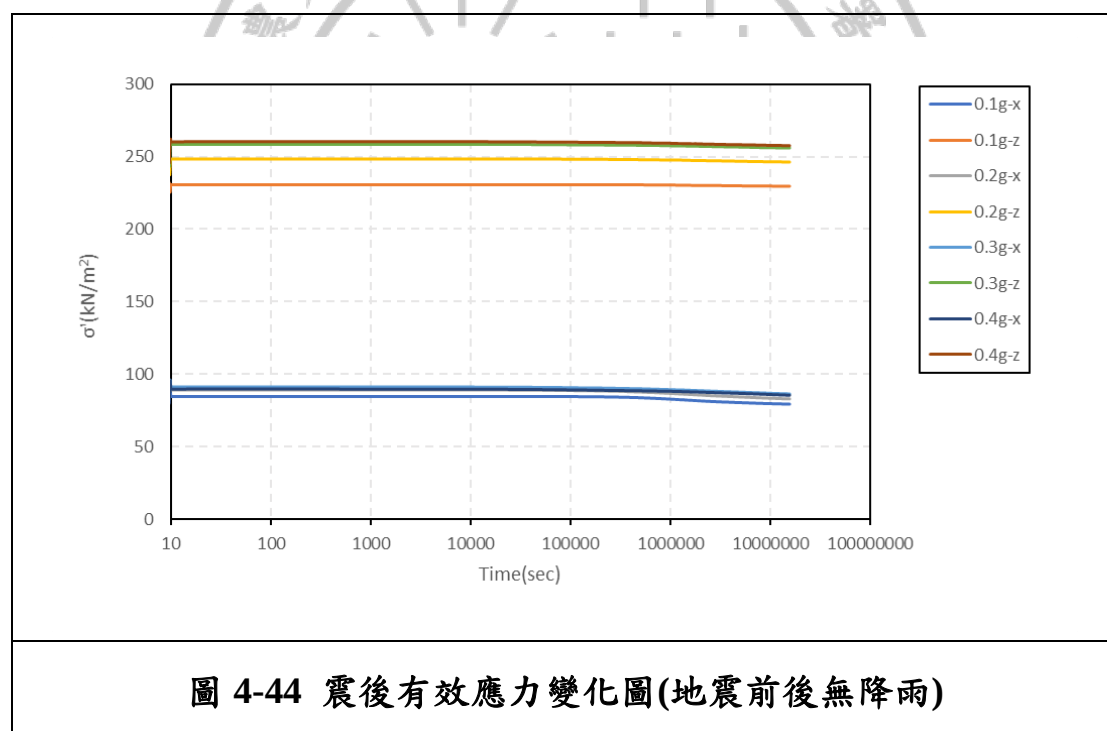


圖 4-44 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨)

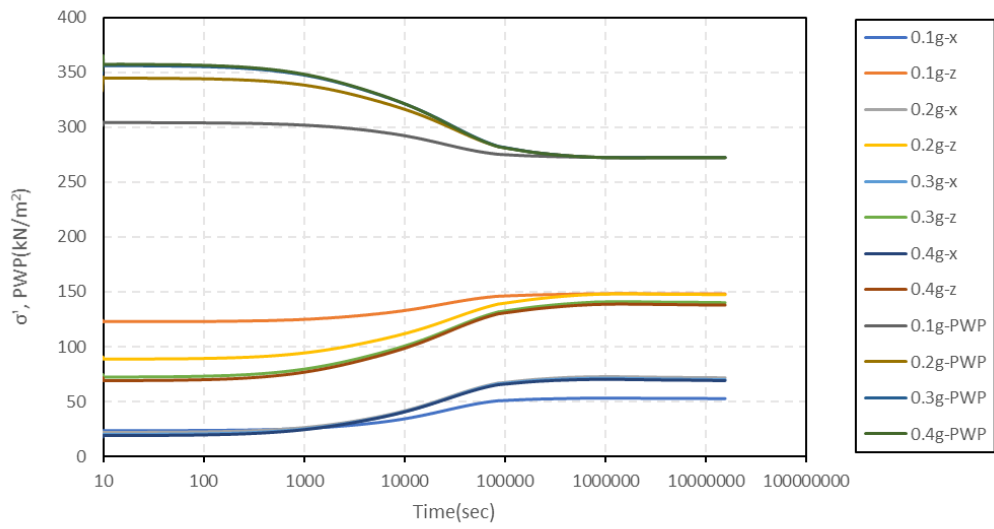


圖 4-45 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

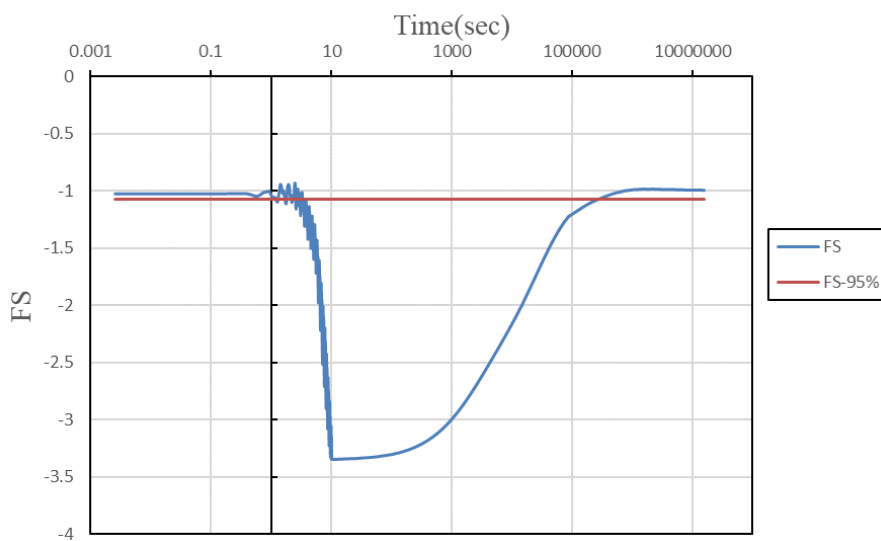


圖 4-46 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

四、粉土質砂土

粉土受地震作用後的有效應力變化如圖 4-47~48 所示，在地震前後無降雨的情境下，有效應力在受震結束後保持定值；而地震前後有降雨的情境下，有效應力逐漸恢復並在震後 15 分鐘即呈現定值。粉土質砂土的安全係數隨時間變化如圖 4-49 所示，在地震作用後約 85 秒，安全係數即恢復到震前安全係數的 95%，推測應是在參數設定階段，過壓密比設定較大，整體較為緊實，故粉土的強度恢復時間相對較短。

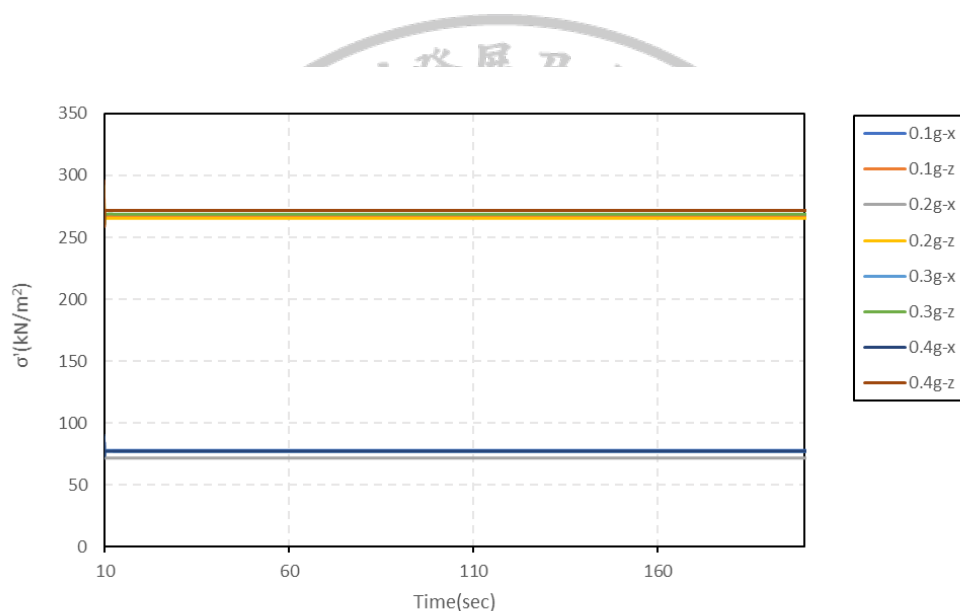


圖 4-47 震後有效應力變化圖(地震前後無降雨)

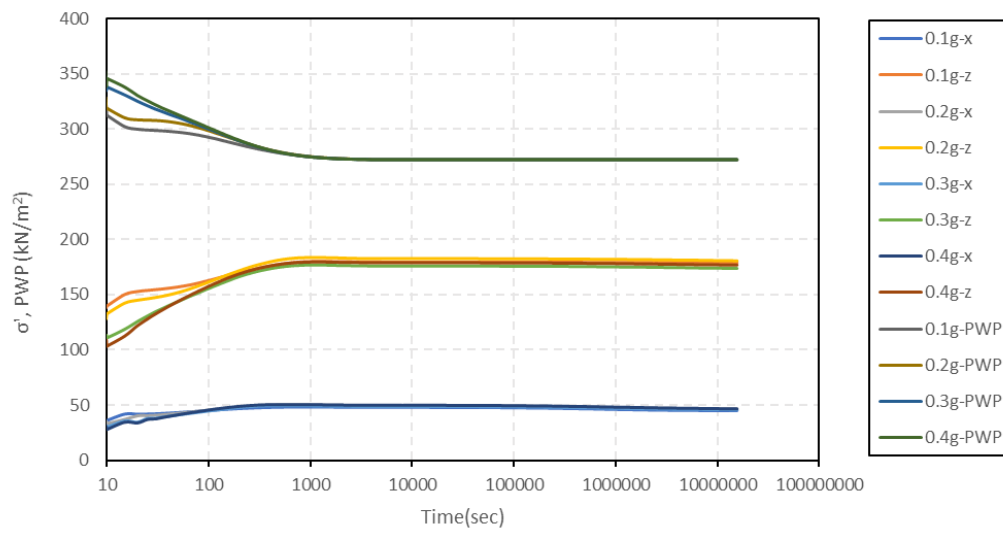


圖 4-48 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)

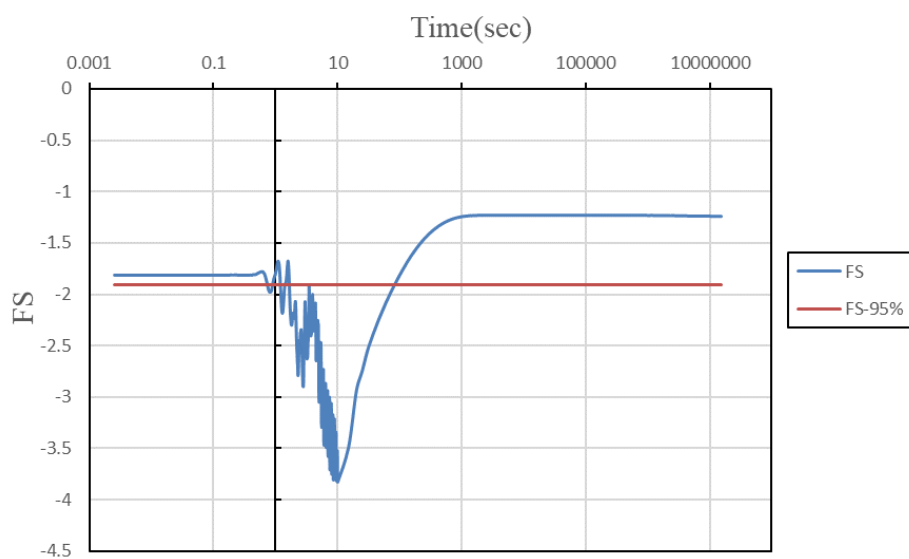


圖 4-49 震後有效應力與孔隙水壓變化圖(地震前後有降雨)



第五章 結論與建議

第一節 結論

為探討震後山崩降雨警戒值之影響及邊坡強度恢復時間，本研究透過物理模式來做探討。依據現場調查結果來設計邊坡幾何條件，給定常見之五種材料參數，並進行 4 種不同受震情境之模擬，透過京都大學發展之物理模式(DBLEAVES)完成降雨警戒值與邊坡強度恢復時間之探討。

根據地震前後無降雨情境之模擬結果顯示，粗顆粒土壤組成之邊坡受震後強度下降程度介於 87%~97%，中等緊密砂組成之邊坡受震後強度下降程度介於 55%~84%，粉土組成之邊坡受震後強度下降程度介於 85%~97%，粉土質砂土組成之邊坡受震後強度下降程度介於 74%~92%。在不同地震強度作用下，土壤強度變化程度也會有所不同。結果說明，中等緊密砂組成之邊坡受震後的強度變化最大，其邊坡強度之下降最大接近 45%，換言之此類邊坡震後促崩雨量警戒值的調整可以原始值的 40%~50%作為修正參考；次要邊坡受震後強度變化之組成材料為粉土質砂土，其邊坡強度下降最大接近 25%，是故邊坡震後促崩雨量警戒值的調整可以原始值的 20%~30%作為修正參考；其他兩類，粗顆粒土壤或粉土等兩類型，邊坡受震後強度下降最大僅接近 15%，是故邊坡震後促崩雨量警戒值的調整可以原始值的 10%~20%作為修正參考，整體調整機制統整如圖 5-1 所示。

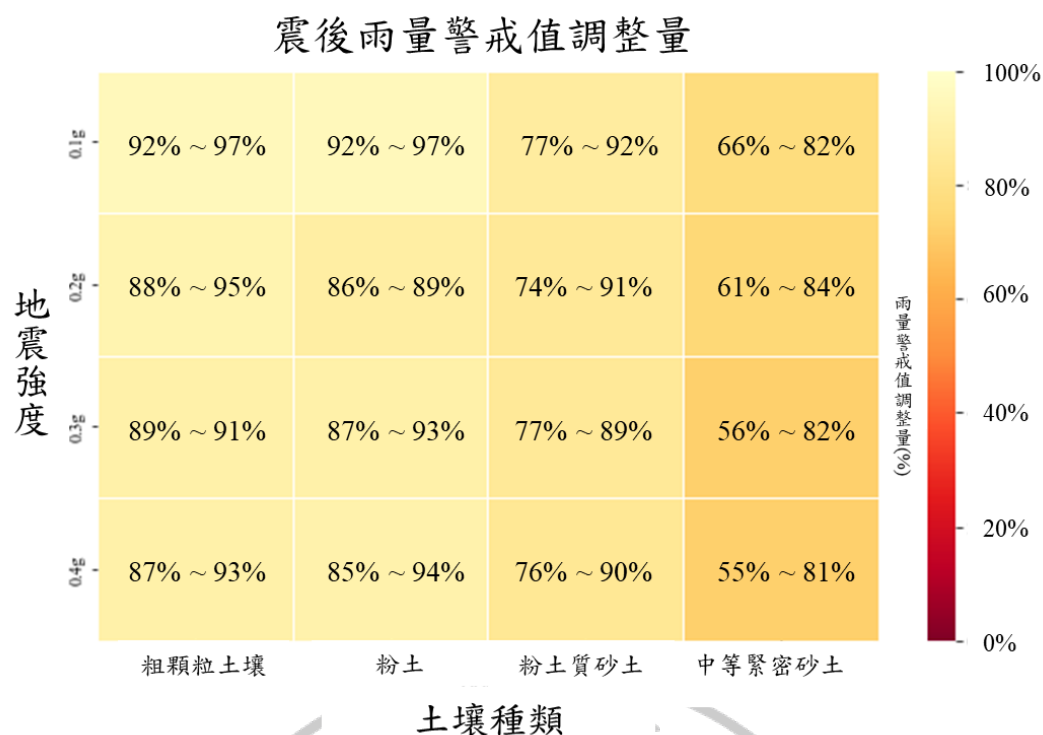


圖 5-1 震後雨量警戒值調整量

將不同土壤條件下的強度恢復時間整理可知，粗顆粒的抗震能力較佳，即是受到震度大的地震作用，安全係數下降幅度仍小於 10%，在受震後短時間內，安全係數即恢復到震前的 95%；中等緊密砂土受到震度較大的地震作用後，安全係數出現大幅下降，震後安全係數雖有逐漸回升的趨勢，但在長達半年的監測，恢復程度仍無法達到震前的 95%；粉土受地震作用時，內部有效應力隨地震起伏且呈現緩慢減小的趨勢，即使受到震度較大的地震作用，安全係數至多下降 15%，受震後需要一周至一個月左右的時間才能達到強度恢復的標準；粉土質砂土受地震作用後，安全係數下降幅度不若其他土壤隨震度增加而增加，而是呈現約 25% 的平均下降幅度，受震後數小時內安全係數即可恢復，達到強度恢復的標準，整體強度恢復時間統整如圖 5-2 所示。

總結而言，與粗顆粒土壤和粉土質砂土相比，中等緊密砂土和粉土的強度恢復時間較長，需要數周至數月的時間。換言之，這類邊坡在地震後需要較長時間的監測，才能解除降雨警戒值的調整。而對於粗顆粒土壤和粉土質砂土，雖然其強度恢復時間較短，但在實際條件的影響下，兩者的強度恢復時間可能會延長。因此，在確定警戒值解除時間時，建議以較保守的方法和其他因素進行綜合考量，以獲得更準確的結果。

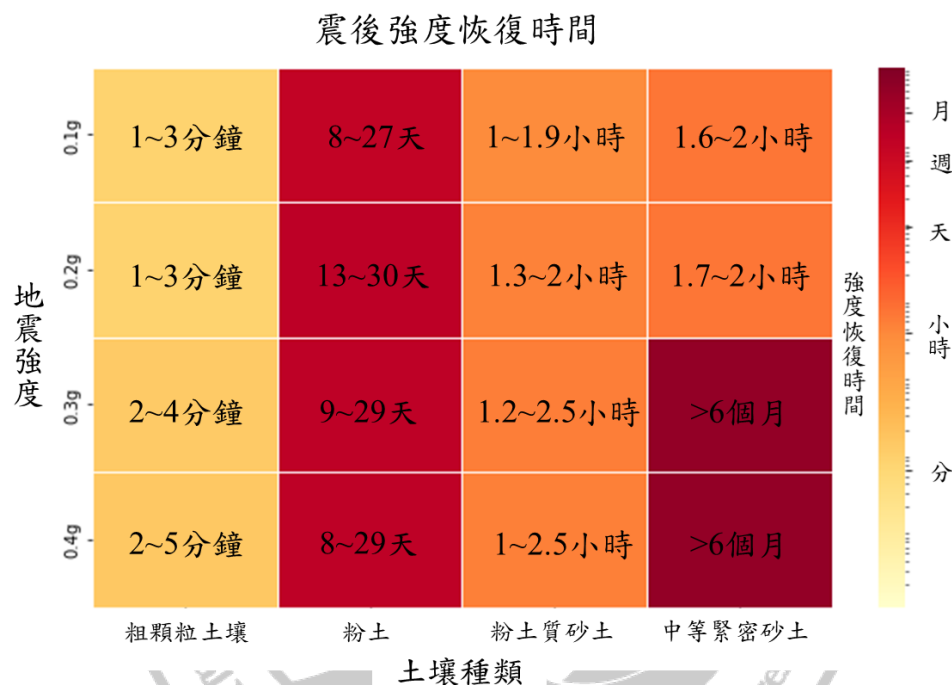


圖 5-2 震後強度恢復時間

第二節 建議

本研究為針對該議題之初步研究，相較傳統之歷史事件來探討警戒值之調整，本研究以物理模式作為探討依據，初步探討單一地質情境的雨量警戒值調整機制，於實務上，可將複合性地質情境適當簡化為具代表性的單一地質情境，並套用相似地質的雨量警戒值調整機制。然則，現場實際條件較本研究探討之情境更為複雜，未來可增加模擬情境之條件，如：土壤分層、降雨延時、降雨量等因子，對降雨警戒值做更深入的探討。

本研究初步僅選用一種模式進行探討，研究成果可供作為署內未來業務應用之參考，然則，模式發展與應用皆有其假設條件與適用性，未來可在納入不同模式進行進一步的比較，探討各模式於不同情境下的適用性。



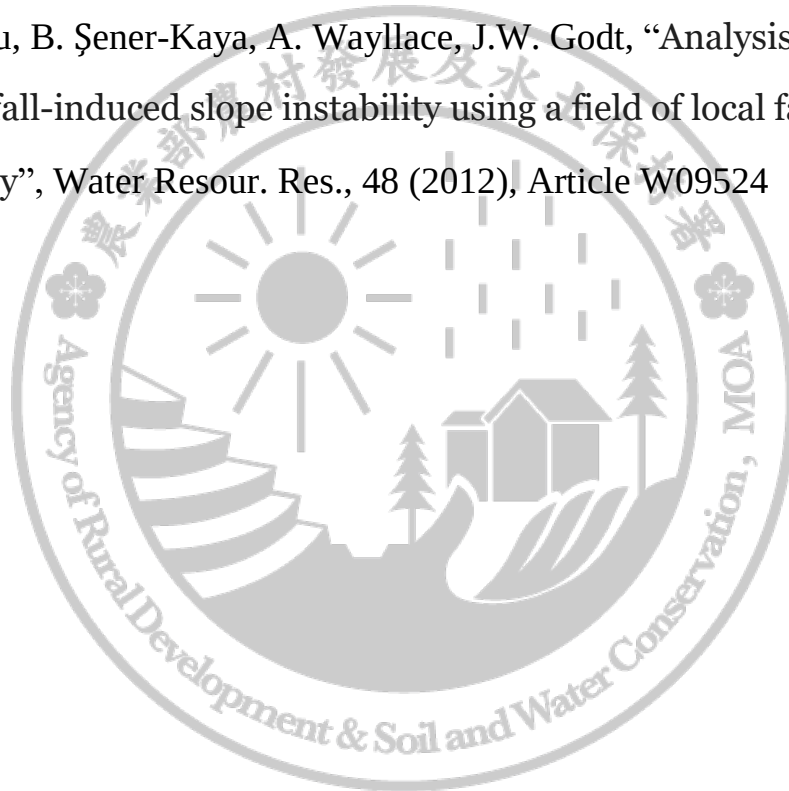
參考文獻

1. 盧之偉，110 年水保局創新研究計劃，「不同地震強度區農塘之壩體受震災害潛勢判釋研究」，國立台灣科技大學，2020。
2. 沈哲緯等人，「新北市汐止區山坡地社區坡地災害衝擊評估之研究」，建築學報，2017。
3. 鳥居宣之、沖村孝、加藤正司，「地震後の降雨による斜面崩壊発生機構に関する 実験的検討」，土木学会論文集 C Vol.63 No.1, 140-149，2007。
4. 林德貴、王勝賢、張光宗，「地震誘發坡地崩塌之數值模擬及穩定性評估」，中華水土保持學報，40(1)：1-21，2009。
5. 久保田哲也，「地震により亀裂を生じた森林斜面の崩壊危険雨量」，日本砂防學會，R3-03，2012。
6. 野村康裕、岡本敦，「地震時の斜面崩壊危険度評価と警戒避難降雨基準の検討」，土木技術資料，55-4 號：22-25，2013。
7. 謝正倫、陳俞旭、謝明霖，「九九峰地震崩坍區棲地及生物多樣性變化之監測—植生對土石流發育影響之研究」，九九峰地震崩坍區棲地及生物多樣性變化之監測成果論文集，78-96，2004。

9. 陳樹群、吳俊鉉，「九九峰於集集大地震之土砂產量及後續崩塌趨勢之研究」，九九峰地震崩坍區棲地及生物多樣性變化之監測成果論文集，68-77，2004。
10. 蔡元融等人，行政院農業委員會水土保持局委辦計畫，「潛在大規模崩塌區影響範圍劃設檢討與雨量警戒推動規劃」，財團法人成大研究發展基金會，2020。
11. 沈哲緯等人，「自然與人工邊坡安全簡易評估與巡勘案例探討——以中坪部落為例」，中華防災學刊 Vol.4, No.1，2012
12. 陳億璇等人，「不同廣域降雨促崩分析模式於山崩預警應用之探討」，大地工程研討會刊，2011。
13. 楠田侑平、川村志麻，“降雨後の地震動のような外力を受けた火山灰質土斜面の崩壊現象とその評価”，地盤工学会，2019。
14. Bin Ye, Guanlin Ye, Feng Zhang, Atsushi Yashima, “Experiment and Numerical Simulation of Repeated Liquefaction-Consolidation of Sand”, Soils and Foundations Volume 47, Issue 3, June 2007, Pages 547-558.
15. Koichi Hashiguchi, Tatsuya Mase & Yuki Yamakawa, “Elaborated subloading surface model for accurate description of cyclic mobility in granular materials”, Acta Geotechnica volume 17, 2022, pages 699-719.

17. Feng Zhang, Bin Ye, Toshihiro Noda, Masaki Nakano, Kentaro Nakai, “Explanation of Cyclic Mobility of Soils: Approach by Stress-Induced Anisotropy” , Soils and Foundations Volume 47, Issue 4, August 2007, Pages 635-648.
18. Bin Ye, Guanlin Ye, Feng Zhang, “Numerical modeling of changes in anisotropy during liquefaction using a generalized constitutive model” , Computers and Geotechnics Volume 42, May 2012, Pages 62-72.
19. 森河由紀弘、包小華、前田健一、今瀬達也、張鋒，「余震による再液状化を考慮した液状化評価の重要性」，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.2，389-397，2012。
20. Zhi-Fan Xia, Guan-Lin Ye, Jian-Hua Wang, Bin Ye, Feng Zhang, “Fully coupled numerical analysis of repeated shake-consolidation process of earth embankment on liquefiable foundation” , Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 30, Issue 11, November 2010, Pages 1309-1318
21. Linlin Gu, Zhen Wang, Wenxuan Zhu, Boan Jang, Xianzhang Ling, Feng Zhang, “Numerical analysis of earth embankments in liquefiable soil and ground improvement mitigation” , Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 146

23. Feifan Ren, Jiangyang He, Feng Zhang, Guan Wang, Qihua Zhao,
“Numerical investigation of the influence of non-uniform factors
on the monotonic/cyclic behavior of coarse-grained soil” ,
Computers and Geotechnics Volume 103, November 2018, Pages
115-137.
24. Xiaohua Bao, Guanlin Ye, Tao Luo, Bin Ye, Feng Zhang, “Soil-
water coupling analysis on seismic behavior of an alternately layered
sand-silt ground with different foundation system”, Japanese
Geotechnical Society Special Publication,(2016).
25. N. Lu, B. Şener-Kaya, A. Wayllace, J.W. Godt, “Analysis of
rainfall-induced slope instability using a field of local factor of
safety”, Water Resour. Res., 48 (2012), Article W09524



附錄

附錄一、計劃書之內容審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	請詳細說明，本計劃是否只是使用日本京都大學所開發的 DBLEAVES 模式作為分析工具？沒有特別要開發的程式或其他工具？	本計畫擬採用研究型數值模式 DBLEAVES 與商用數值模式 PLAXIS 進行分析。
2.	請問日本京都大學所開發的 DBLEAVES 模式是否開源？計劃執行後，水土保持局是否可以自行使用這套工具進行其他相關研究？	DBLEAVES 為日本土壤液化協會擁有的數值模式，尚需授權程序，故目前無法開源。

3.	請問本研究究竟要如何驗證分析的成果是否正確？請從過去實際的案例中，挑選幾個例子，用實際的數據來定量評估等研究分析的準確性。	感謝委員寶貴的建議，本研究將會透過文獻回顧的方式，蒐集過往案例，並將其導入數值模式進行相關分析，並將分析結果與實際情況進行比對，定量評估此研究的準確性。
4.	就算是沒有辦法直接和實際地震事件兩側的資料來比對，也應該設計一些數值模式自我評估精度的方法，例如挑選某些參數進行敏感度分析，或者是引進一些簡化的條件，和其他常用的數值模型來比較。	感謝委員寶貴的建議，本研究將會使用多種數值模式進行分析，並將結果進行比較，以確認分析結果的準確性。
5.	地震後確實會改變地層特性與構造，投入該領域研究具創新的思維。	感謝委員的肯定

6.	因為地震規模的差異，對地層的影響有規模大小的潛在差異，如何量化因地震後，新產生的張力裂縫？	感謝委員寶貴的意見，針對張力裂縫，可參閱相關文獻或使用開放圖資，針對地震前後所產生的張力裂縫進行分析，收集其發生位置和地震規模，予以分析量化。
7.	地震後會影響孔隙水壓，地下水位，惟孔隙水壓、地下水位下降速度也快，是否會持續造成崩塌降雨警戒值的影響？	是，在地震後，孔隙水壓上升，會降低土壤強度，而降雨入滲也會導致地下水位升高，因此須採取降低促崩雨量警戒值的標準；在經過一段時間後，孔隙水壓消散，地下水位逐漸降低，預期即可將雨量警戒值調整至原先標準。
8.	目前採用的模式，考量反覆作用力對地層土壤液化的評估。對於地震引起崩塌警戒值的研究仍有很長的距離。	感謝委員指教，希望可以透過此研究，在崩塌警戒值這方面有進一步的發展。

9.	地震後警戒值調降為本局行之有年之方式，惟尚缺科學化論證，本計畫所投之研究，似可補足調降之科學依據，值得支持。	感謝委員的肯定。
----	--	----------



附錄二、期中書面審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	請加強文獻蒐集與彙整，並說明各方法模式之限制與適用性。	感謝委員意見，針對這方面的補充已新增於第二章。
2.	請加強說明為何選用 DBLEAVES 軟體中之 CM-model，其限制條件與適用性為何？	感謝委員意見，針對 CM-model 的補充說明已新增於第三章第二節。
3.	請加強說明 CM-model 中各參數如何取得？是否適用於現地案例模擬參數，又現地調查結果如何應用於模式參數使用。	感謝委員的意見，CM-model 的參數取得較為不易，參數取得需進行動態三軸試驗，故本計畫以文獻蒐集的方式取得土壤參數並輸入數值模式中進行分析；而在數值模式中的模型建立主要根據現地調查的結果進行設計。

4.	第三章第二節數值分析方法是否適用於現地案例？第四章第二節北部地區調查結果與表4-1參數之相關性為何？模擬結果無法看出與研究主題之相關性。	感謝委員的建議，本計畫之數值模式分析方法僅為初步之研究，透過現地調查設計分析模型，透過不同土壤類型的分析結果，以供相似地質情境的案例作為參考，如需針對特定區域進行調查分析，需要更加完整的工作安排與規劃。
5.	北中南三區選點建議條選二型大崩地型，因依型之警戒值與土石流警戒值相同，與本研究之方向有不同(土石流警戒值較低：300~600，大崩警戒值較高：600~900)，選二型較為單純。	感謝委員寶貴的建議。

附錄三、期末書面審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	本計畫以單一土質作為試驗對象，惟對應災害潛勢區多為複合性地質，故本研究成果如何運用至災害潛勢區，建議納入結論與建議篇章。	感謝委員的意見，相關說明已呈現於結論與建議篇章。
2	根據研究結果，對警戒值現行因地震調整機制是否可視為0.2g為啟動點？	感謝委員的提問，根據本計畫之成果，是否啟動調整機制須根據該區域的土壤與邊坡幾何形狀進行考量，無法透過單一地震強度判斷。
3	土壤強度回復所需時間的機制為何(是退水或是結構改變?)？在回復過程一定會走向穩定還是有破壞可能性？	感謝委員的提問，影響土壤強度恢復時間之主因為土壤內部變形，而在受震後，在無其他事件發生的前提下，強度應會逐漸趨向穩定狀態。

項次	審查意見	回覆辦理情形
4	以中等緊密砂土震後土壤可含水率降低(恢復時間變長)，則其是否為入滲量減少或因地下水位升高之影響。	感謝委員的提問，中等緊密砂土的恢復時間變長，其原因應是受到強震影響，內部會出現較大的剪脹變形，使得強度不易恢復。
5	數值模式是否可納入地下水的因子。	感謝委員的意見，在數值模式中  可以設定地下水位的高度，而本計畫中僅簡化為將地下水位設定於地表與邊坡頂部，並探討不同土壤與地震強度的影響。後續研究亦可將地下水位納入影響因子並進行探討。
6	強度恢復是指 100%恢復或是恢復多少%就算恢復？	感謝委員的提問，本計畫針對強度恢復的定義為恢復至震前的 95%，於第三章第五節中有說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	考慮降雨時間之短延時及長延時不同，在相同總雨量下，何者對安全係數影響大，再請補充說明。	感謝委員的意見，本計畫簡化降雨條件之設定，針對降雨延時並無討論，針對此條件之影響仍需進一步的研究探討。
8	本案結果，以中等緊密土砂受震後影響最大，其無法回復震前強度，是因結構發生改變或是發生液化所致，請補充說明。	感謝委員的意見，中等緊密砂土在受到較大地震作用後，會發生相對較大之剪脹變形，導致其強度變化較大，後續強度雖有小幅恢復，但仍無法達到受震前的 95%。
9	本案模擬安全係數受降雨影響，其對降雨量或降雨時間係以何者影響程度大，請再補充說明。	感謝委員的意見，本計畫並沒有針對雨量與降雨時間納入影響因子，簡化為地震前後是否有降雨，並考量不同土壤與地震強度之影響，後續研究可將兩者納入影響因子進行探討。