

南華大學科技學院永續綠色科技碩士學位學程

碩士論文

Master Program of Green Technology for Sustainability

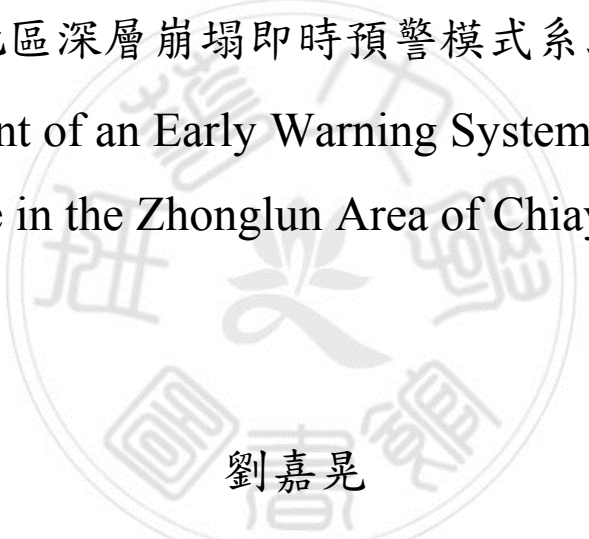
College of Science and Technology

Nanhua University

Master Thesis

嘉義中心崙地區深層崩塌即時預警模式系統建立之研究

The Establishment of an Early Warning System for Deep-Seated
Landslide in the Zhonglun Area of Chiayi County



劉嘉晃

Chia-Huang Liu

指導教授：洪耀明 博士

Advisor: Yao-Ming Hong, Ph.D.

中華民國 111 年 6 月

June 2022

南華大學

永續綠色科技碩士學位學程

碩士學位論文

嘉義中心崙地區深層崩塌即時預警模式系統建立之研究
The Establishment of an Early Warning System for Deep-Seated
Landslide in the Zhonglun Area of Chiayi County

研究生：劉嘉是

經考試合格特此證明

口試委員：_____

陳柏青
洪耀明
姜煒秀

指導教授：洪耀明

系主任(所長)：洪耀明

口試日期：中華民國 111 年 6 月 20 日

誌 謝

從事營造工作四十餘年渾渾噩噩對於專業知識一知半解,也曾動心過是否再去上點課,但環境及家庭因素當然主要是自己疲懶缺乏信心與上學的動力幾度的動心起念終究沒有實行。

於屆退休年齡前夕蒙高工學弟斗南桂田材料實驗室主任吳建陞引薦得以認識洪耀明教授,經與洪教授一番談話、鼓勵抱著儘力試試看的心態先在水保學分班修習上課,於水保班修課四個學期蒙授課教授對我的包容、耐心,上課中不斷的提點總會在每一章節結束時特別問我:這樣可以嗎?這樣懂嗎?所有教授對我的關照給了我動力四個學期沒缺課沒遲到、早退,每次上課早上 5 點多出門下課到家已是晚上 8 點多,身體雖很累但老師給的關心讓我甘之如飴,心裡從未萌起退卻的想法,直到最後一堂課我保持著第一堂課的精神心態認真上完,在此我要特別感謝學弟吳建陞的引薦、洪耀明教授的鼓勵與賞識南華大學同意我的入學申請、水保班唐琦教授、黃隆明教授、林信輝教授、張光宗教授、游繁結教授、高原技師當然還有洪耀明教授,承蒙你們的不棄耐心指導不厭其煩的解說演練在此衷心致謝,也要感謝老婆阮美鈴於水保班每次上課前夕總是不斷聒噪提醒我上課資料準備好了嗎?鬧鐘時間...。

第二階段學校永續班上課同學相處融洽、禮讓、鼓勵僅此致謝;也許是年紀大,上課時教授總是給予機會互動,讓自己更有興趣上課雖只短短一年半時間但獲益良多我從幾年前的缺乏信心到如今的興致勃勃,陳柏青院長、林文賜教授、洪耀明教授的指導給了我人生的自信,我從試試看能走到今天完成畢業論文除了感謝所有教授我還要特別感謝老天爺祂讓我有機會遇到這麼多這麼好的教授翻轉我的人生,大大改變我的心態走向正向人生觀。

碩班最後階段論文口試感謝姜委員燁秀博士、陳院長柏青博士、指導教授洪耀明博士抬愛對本論文研究內容的不吝指導專業上的多處指正 特此誌謝

劉嘉晃 謹誌於南華大學科技學院

中華民國 111 年 06 月 20 日

中文摘要

由於氣候變遷導致極端氣候，過多降雨導致地下水位上升，進而誘發崩塌災害，若能及早預知地下水是否達到崩塌臨界值，應能發揮早期預警機制，減少生命財產損失。

本研究發展深層崩塌之地下水位預測模式，首先建立無限邊坡理論與試驗驗證，推得深層崩塌臨界地下水位及位置，再採用線性水庫，以降雨量及地下水位觀測資料，預估下一小時地下水位。

並以嘉義縣中心崙崩塌地，收集地文、降雨及地下水位，先以無限邊坡理論，計算理論臨界地下水位，再以線性水庫模式，找出降雨與地下水位關係較佳之監測站，測試後於選擇模擬較佳之二處測站，進行線性水庫及類神經網路模式比較，將可提供主管機關做為早期大規模崩塌預警之依據。

關鍵詞：深層崩塌、地下水位、無限邊坡理論、線性水庫

ABSTRACT

Due to extreme weather caused by climate change, excessive rainfall rises the groundwater level, and induces landslide. If the prediction of groundwater level can be realized, an early warning mechanism may reduce the loss of life and property.

This research develops a groundwater level prediction model for deep-seated landslide. First, the infinite slope theory and experimental verification are established, and the critical groundwater level and location of deep-seated landslide are deduced. Then, a linear reservoir model is used to predict the groundwater level in the next hour based on the observation data of rainfall and groundwater level.

The geology, rainfall and groundwater level are collected from the landslide in the Chiayi County. First, the infinite slope theory is used to calculate the theoretical critical groundwater level, and then the linear reservoir model is used to find out the monitoring station with a better relationship between rainfall and groundwater level. After selecting the two stations with the best simulation results, a comparison of the linear reservoir and the neural network model will be carried out, which will provide the competent authority as a basis for early warning of large-scale collapse.

Keywords: deep-seated landslide, groundwater level, infinite slope theory, linear reservoir

目 次

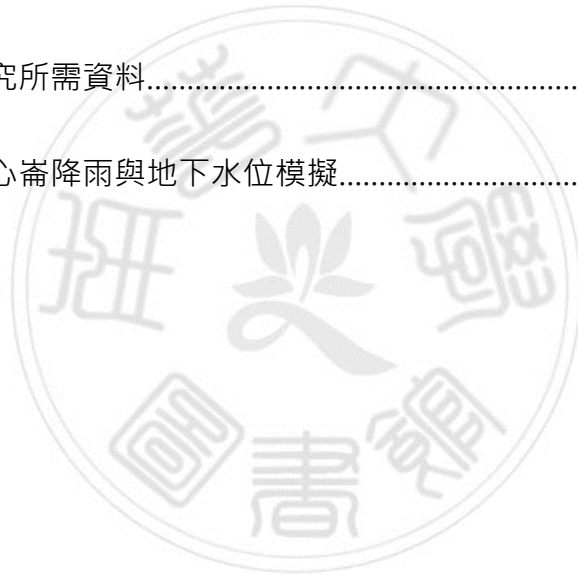
誌 謝.....	I
中文摘要.....	III
ABSTRACT.....	IV
目次.....	V
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機及目的.....	1
1.2 研究地點與架構.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 土層破壞公式.....	3
2.2 防治邊坡崩塌災害方法.....	4
2.3 降雨與地下水位關係之建立.....	5
第三章 研究方法.....	6
3.1 中心崙試區.....	6
3.1.1 監測設施.....	7
3.1.2 地下水流向.....	9
3.1.3 地表伸縮計監測.....	10
3.1.4 孔內伸縮計監測.....	14
3.2 崩塌臨界地下水位.....	15
3.3 地下水位擾動方程式推導.....	24
3.3.1 降雨入滲率.....	25
3.3.2 地下水流率.....	27
3.3.3 數值方法求解.....	29
3.4 資料收集.....	31
第四章 研究結果與討論.....	34
4.1 臨界地下水位預測.....	34
4.2 中心崙地區降雨與地下水位特性.....	35
第五章 結論與建議.....	41
參考文獻.....	42

圖目錄

圖 1 中心崙推估滑動塊體分佈圖.....	7
圖 2 雨量筒遷移位置圖.....	8
圖 3 地下水位計位置圖.....	9
圖 4 地下水流向分佈成果圖.....	10
圖 5 地表伸縮計 JSL-EL-3 位置圖.....	11
圖 6 現場儀器配置與監測地表現況.....	12
圖 7 地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖.....	12
圖 8 孔內伸縮計示意圖.....	14
圖 9 降雨導致地下水位升高示意圖.....	15
圖 10 影響無限邊坡滑動之因子.....	16
圖 11 地下水流動概念圖.....	26
圖 12 暴雨期間地下水位擾動變化.....	28
圖 13 中心崙崩塌地地質平面及剖面圖.....	35
圖 14 JSL2 訓練及模擬成果	39
圖 15 JSL4 訓練及模擬成果	40

表目錄

表 1 2013 至 2018 年降雨與逕流量統計表.....	1
表 2 中心崙自動監測站.....	8
表 3 各類土壤之內摩擦角.....	18
表 4 土壤內聚力.....	20
表 5 地質參數建議值.....	23
表 6 邊坡穩定地質參數.....	23
表 7 研究所需資料.....	32
表 8 中心崙降雨與地下水位模擬.....	37



第一章 緒論

1.1 研究動機及目的

台灣四面環海，山高坡度陡峭，雨季大多集中在 5 到 10 月份的汛期，年雨量平均約 2,500mm，2013 至 2020 年雨量及流量如表 1，豐枯懸殊集中的強降雨使得地下水位上升。山坡地崩塌使民眾生命財產損失，例如 2009 年莫拉克颱風重創中南部，導致以小林村 398 人死亡引起世人震驚。

表 1 2013 至 2018 年降雨與逕流量統計表

年限	年平均降雨量(毫米)	歷年(38~資料年限)平均降雨量(毫米)	年逕流量(億立方公尺)
102 年	2,738	2,506	709.88
103 年	1,921	2,510	461.05
104 年	2,206	2,501	542.21
105 年	3,278	2,496	880.55
106 年	2,601	2,509	731.40
107 年	2,423	2,508	614.73
108 年	2,450	2,507	649.21
109 年	2,012	2,507	482.24

資料來源：經濟部水利署

由於氣候變遷導致極端氣候，台灣山崩災害不斷發生，本研究以降雨量及地下水位觀測資料，預估下一小時地下水位，並以無限邊坡

理論，估算臨界地下水，作為未來建立即時預警系統依據，保障生命財產安全。

1.2 研究地點與架構

本研地點為嘉義縣竹崎鄉中心崙崩塌地(T003) 搭配現場完善之降雨、地下水等儀器監測數據，及已經設置之地下水位即時預警系統，以建立整體坡面即時預警系統。本研究架構如下：

第一章 緒論

- 研究動機、目的與架構

第二章 文獻回顧

- 土層破壞公式
- 防治邊坡崩塌災害方法
- 降雨與地下水位關係之建立

第三章 研究方法

- 中心崙試區
- 崩塌臨界地下水位
- 地下水位擾動方程式推導
- 資料收集

第四章 結果與討論

- 臨界地下水位預測
- 中心崙地區降雨與地下水位特性

第五章 結論與建議

第二章 文獻回顧

2.1 土層破壞公式

依據堆積土層之基本物理性質，以無限邊坡分析為基礎土層內任意水位之條件下，進而推導出土層破壞公式，為常用來研究土砂災害發生機制之方法。例如以靜力平衡觀點，分析作用於土層之推移力及土層抵抗力，推導出飽和土層受地表逕流之作用下，將土砂運動區分為土層未破壞區、土砂顆粒個別傳輸區、不完全土石流區及土石流發生區等四種土砂運動情況『Takahashi(1978)』(游繁結教授·(1987))依據 Takahashi 之理論，加入滲流力理論，推導出在任意水位下，土層破壞之臨界公式(黃宏斌教授 (1993))，考慮土層飽和及非飽和之土粒比重，推導出在任意水位下，土層破壞之臨界公式(林炳森等(1993))考慮滲流力作用於土層，推導出在任意水位下，土層破壞之臨界公式；(連惠邦(1997))以水砂混合體中固體顆粒及液相水體間之驅動能量關係，分別建立泥砂體積濃度及溪床坡度兩參數之臨界公式，以作為鑑別礫石型土石流之定量關係式(張守陽(1998))藉由水槽實驗研析不同材料與粒徑組成下土石流發生之現象，經由迴歸分析及因次分析方法，探討逕流類土石流發生機制(陳晉琪(1999))探討土層於局部及全部破壞下，推導出在任意水位下，土層破壞之臨界坡度條件(Tarantino

and Bosco (2000))舉出地滑所造成之土石流常發生於短暫延時之大降雨強度下、長延時之小雨，甚至發生於降雨停止後數小時內。Casadei et al. (2003)利用邊坡穩定分析結合水文模式，以建立淺層地滑預警模式，進而預測其坡地災害發生時間與位置，研究中並以加州 Montara Mountains 之 1950-1998 年所發生歷史坡地災害事件進行預測比對，結果顯示其預測結果與紀錄大致相符。

2.2 防治邊坡崩塌災害方法

從國內外研究發表文獻防止邊坡崩塌文獻，最有效方法為降低地下水位，如台灣梨山地滑地及霧社水庫下游崩場地，為降低地下水位均設置排水廊道，於降雨期間將地下水由地下廊道排出，以降低地下水位，排水廊道工程行為有如管湧通道，排除地下水以增加臨界剪應力，天然管湧會將細顆粒泥砂排出，無法有效支撐管湧通道之結構，會造成邊坡崩塌；人工排水廊道，不會排出砂礫，並有支撐管道之設施，為邊坡穩定之重要因素；因此降低水力坡降為避免邊坡產生管湧破壞之辦法。自然邊坡崩塌之後，會形成一處堆積土體，此時若持續下雨，使得土體含水量增加，地下水位上升，會使得土體再次滑動，形成土石流。參考文獻: (詹連昌、蘇苗彬(2002)，梨山地區地層滑動整治計畫之五-成效評估與後續處理，農委會水土保持局梨山地區地層滑動整治計畫成效評估研討會論文集)

2.3 降雨與地下水位關係之建立

坡地產生崩塌或地滑等土石流動之主要因素係降雨導致地下水位上升及土壤內磨擦角降低，導致土體破壞，例如 Caris & Van Asch (1991) 研究法國 Alps 山區一小塊崩塌地，發現地下水位上升至離地表 4 公尺時就有可能發生崩塌；Van Asch et al., (1999) 發現深層崩塌 (5–20m 深) 大部份係因為滑動面地下水位上升，產生向上孔隙水壓所導致；Mantovani et al., (2000) 認為崩塌與地下水位突然上升有關；Trigo et al., (2005) 及 Ray and Jacobs (2007) 則認為崩塌係因為地下水位上升及土壤剪應力降低。若能藉由長期觀測降雨、地下水位及地滑之關係，或能建立降雨與地下水位關係式，並找出產生山崩、地滑或土石流之危險地下水位。取得即時降雨與地下水位資料後，可預測下一單位小時之地下水位，若地下水位預測值已達到警戒值，則可對相關單位提出警告，達到即時預警的目的。

第三章 研究方法

3.1 中心崙試區

本研究以行政院農業委員會水土保持局(下稱水土保持局)位於嘉義縣竹崎鄉中心崙崩塌地之即時監測資料，進行全面性檢核降雨與地下水位之連動關係，再擇定關係較佳者，進行分析。

依「110 年度中心崙崩塌地調查與多尺度監測計畫」成果報告書(水土保持局，2021)，中心崙計畫區為嘉義縣-竹崎鄉-T003 潛在大規模崩塌區，位於嘉義縣竹崎鄉白杞村，次依「109 年度中心崙崩塌地潛在大規模崩塌調查監測計畫」監測成果顯示，該計畫區已有明確滑動徵兆，屬高潛勢崩塌區。根據歷年監測成果，中心崙區域佈設 GPS 固定觀測點及地層觀測儀器，以掌握 M1、M2 塊體坡面滑動特性及更大範圍之 L 深層滑動。坡腹處劃分為 M1 滑動塊體及 M2 滑動塊體，皆屬淺層滑動，透過歷年傾斜管之觀測資料，地層整體向北方及北北西方向滑動，其崩塌地及高崩塌潛勢邊坡面積約 32.62 公頃(如圖 1)。

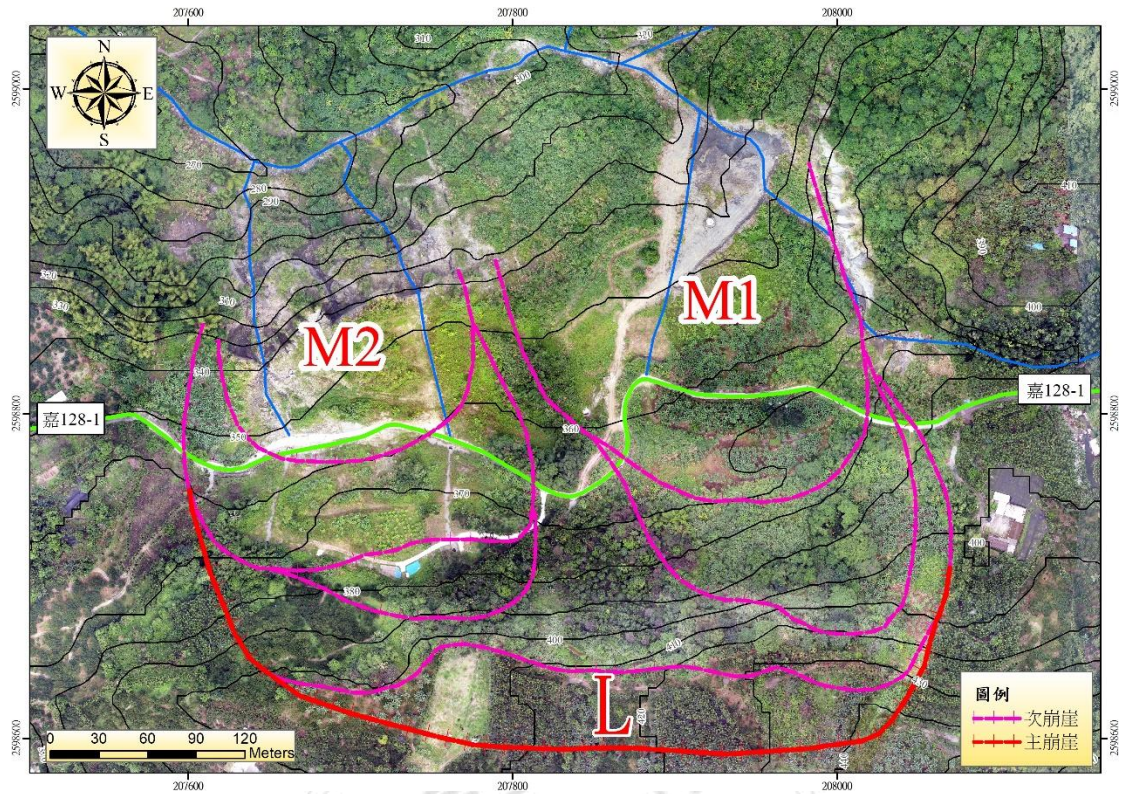


圖 1 中心崙推估滑動塊體分佈圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩塌地調查與多尺度監測計畫成果報告書

3.1.1 監測設施

既有雨量筒原位於本計畫區東側邊界上，由於鄰近有植生，考量 M1 滑動塊體既有監測站附近地勢較為平緩，且鄰近無樹木遮蔽，因此，將雨量筒移至 M1 滑動塊體之監測站(如圖 2)，110 年將水位計改為電子式水位計(如圖 3)，編號 JSL-OW5。

表 2 中心崙自動監測站

監測項目	數量	儀器編號
水位計	5 處電子式水位計(自動)	JSL-OW1、JSL-OW2、JSL-OW3、 JSL-OW4、JSL-OW5
雨量筒	1 處	JSL-R1

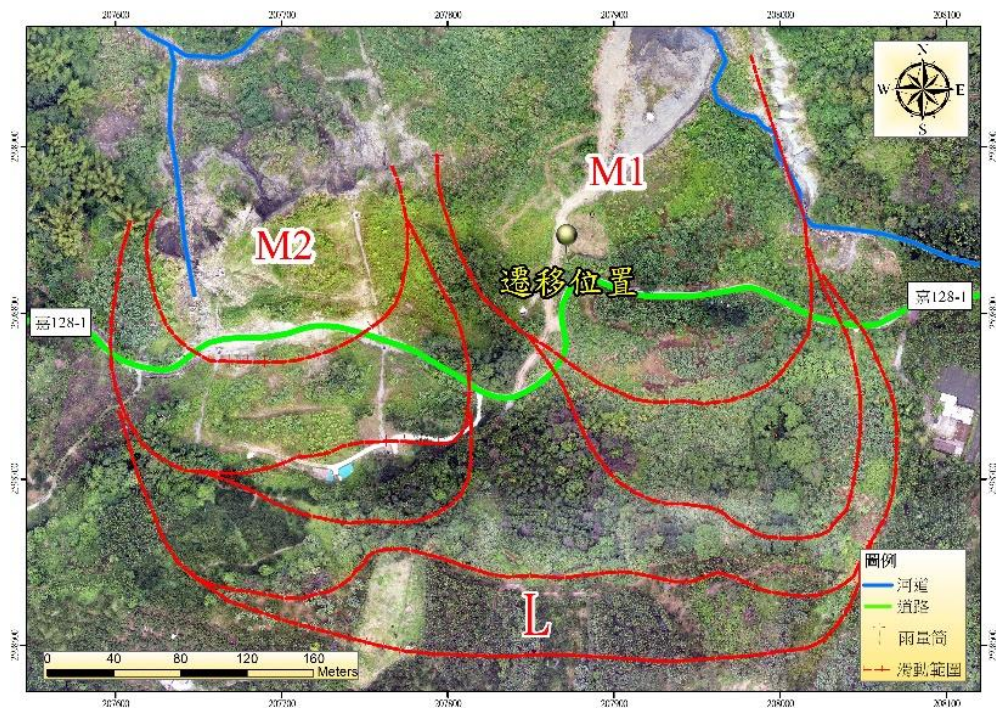


圖 2 雨量筒遷移位置圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩場地調查與多尺度監測計畫成果報告書



圖 3 地下水位計位置圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩場地調查與多尺度監測計畫成果報告書

3.1.2 地下水流向

為評估中心崙地區邊坡地下水流向系統，蒐集歷年中心崙地區鑽孔資料(水土保持局，109)，以鑽孔水位高程，進行區域地下水流向 3D 模擬，坡趾處則以嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流之河道高程加以控制，使用 GIS 系統之 Kriging 內插法，對鑽孔資料進行分析及研究，並透過 ArcView 的空間分析，以網格水頭的高低，判釋其水流的方向。地下水流向判釋後，可評估阻水層以及基盤所產生之影響，判釋地下水流向的概念化模式，其成果如圖 4 所示。

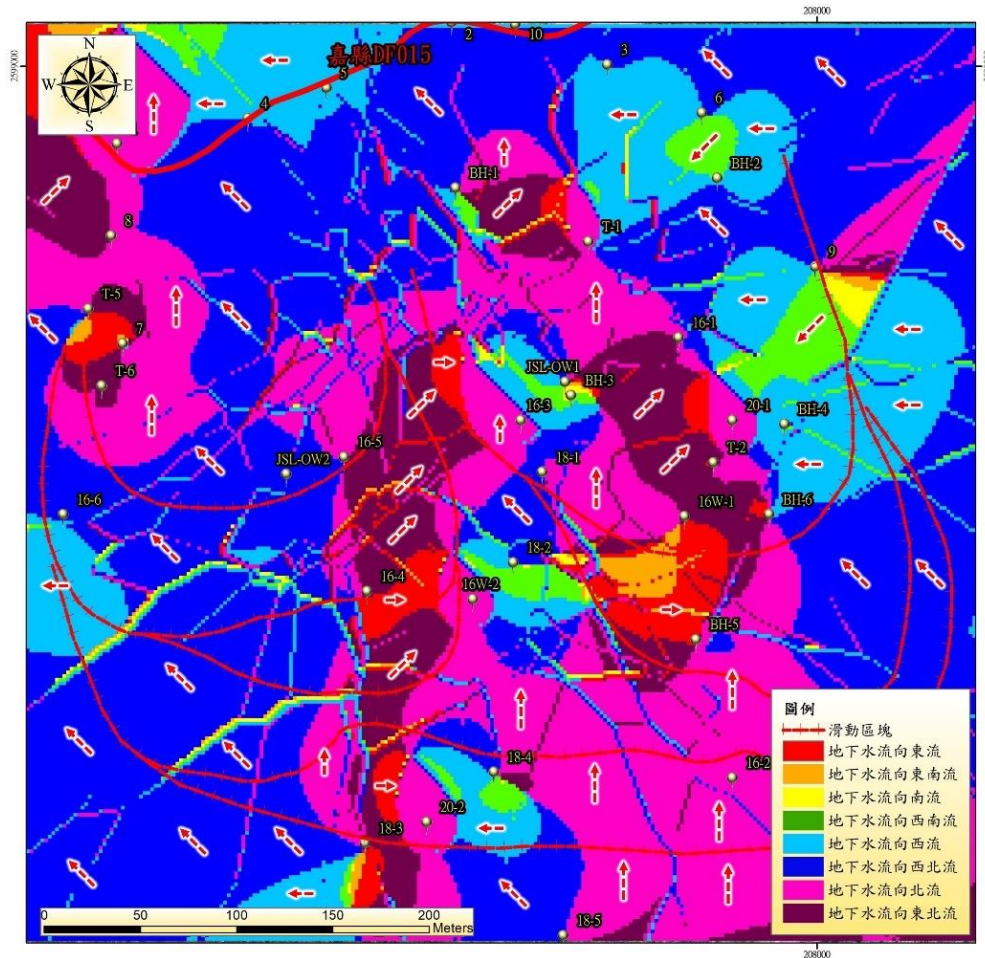


圖 4 地下水流向分佈成果圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩場地調查與多尺度監測計畫成果報告書

3.1.3 地表伸縮計監測

目前現場有既有地表伸縮計監測 1 處，並與即時監測系統串連。為有效進行追蹤及掌握坡頂狀況，針對 L 滑動塊體較顯著之張力裂縫兩端位置安裝地表伸縮計，地表伸縮計係於地表面置入鋼索，並與固定不動端相連繫，一旦邊坡滑動時，可透過鋼索受拉之拉伸量，測得地表與固定點間之相對位移量，配合即時自動化觀測，掌握邊坡穩定性。地表伸縮計之儀器編號為 JSL-EL-3，裝設位置如圖 5 所示，現場

設置如圖 6 所示。圖 7 為地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖，自 2019 年架設至 2020 年約有 20 公分變位量。

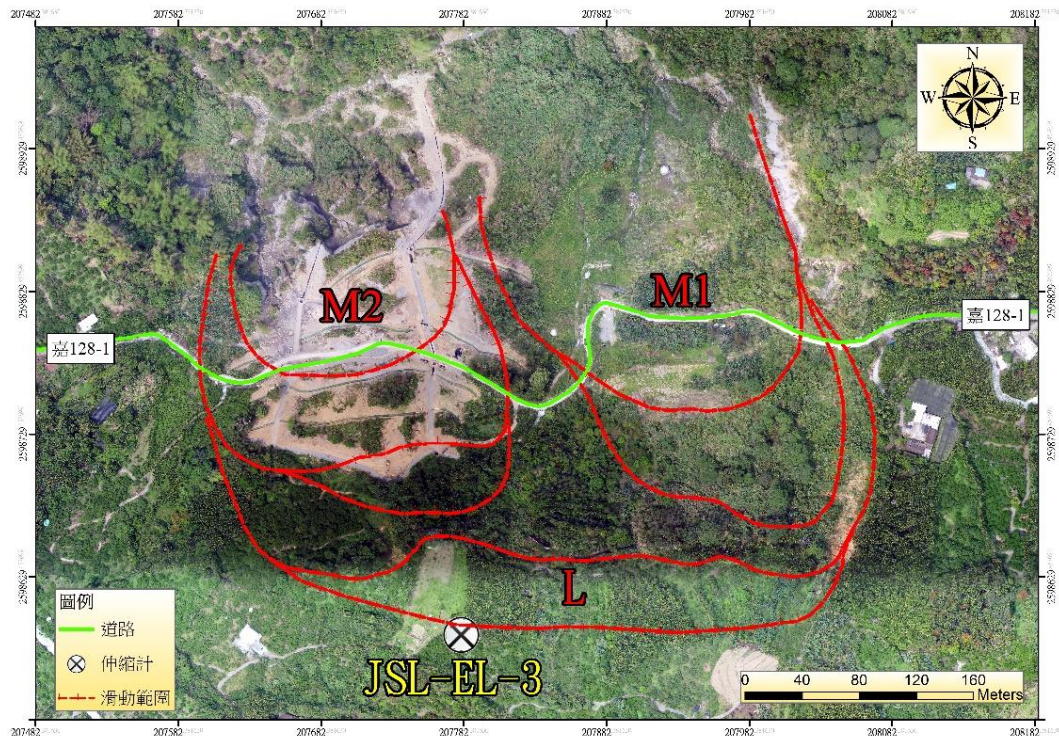


圖 5 地表伸縮計 JSL-EL-3 位置圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩場地調查與多尺度監測計畫成果報告書



圖 6 現場儀器配置與監測地表現況

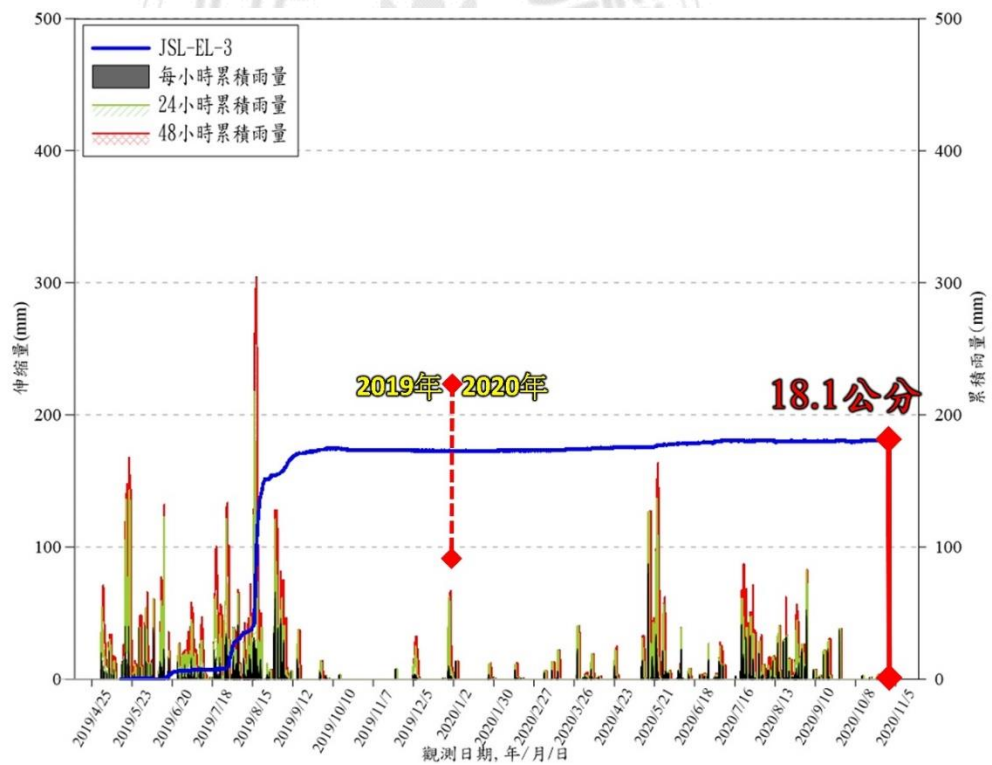


圖 7 地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩場地調查與多尺度監測計畫成果報告書



3.1.4 孔內伸縮計監測

既有孔內伸縮計監測 2 處，另新增孔內伸縮計 2 處，並與即時監測系統串連，圖 8 為孔內伸縮計設置示意圖。

既有 2 處孔內伸縮計分別位於 M1、M2 滑動塊體，M1 滑動塊體孔內伸縮計編號為 JSL-EL-1，M2 滑動塊體則為 JSL-EL-2。新設之孔內伸縮計 1 處位於 L 滑動塊體，編號為 JSL-EL-4，1 處位於 M1 滑動塊體靠近東側處，編號為 JSL-EL-5。

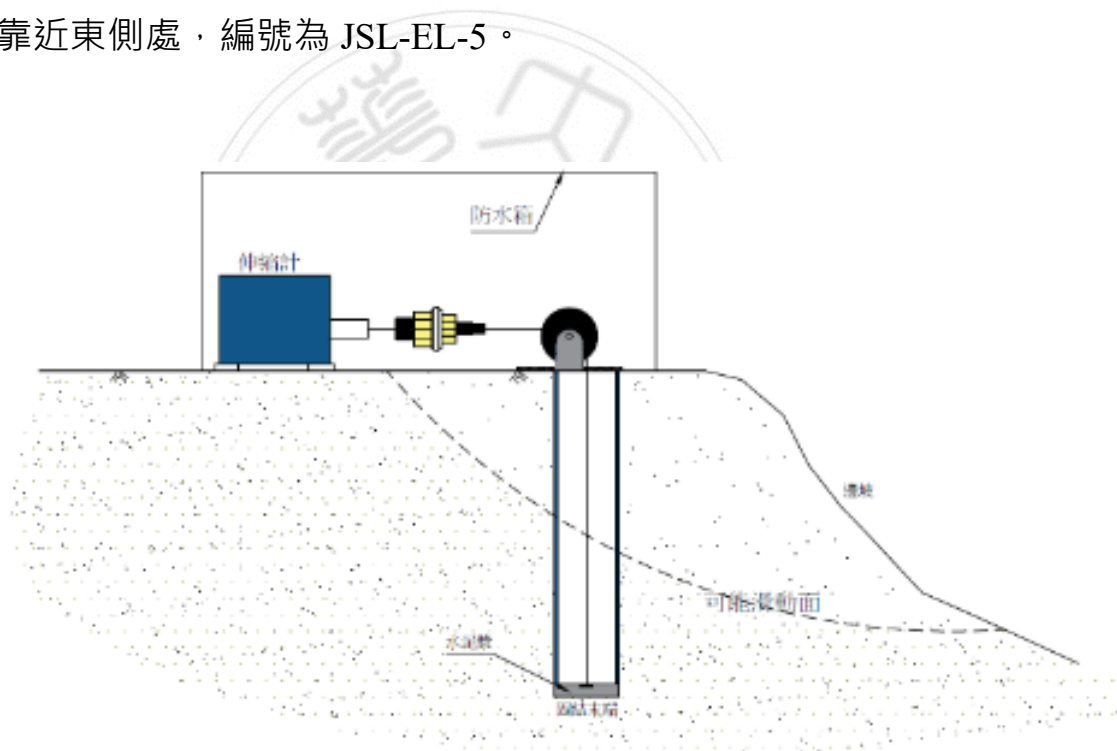


圖 8 孔內伸縮計示意圖

資料來源：水土保持局(2021)·110 年度中心崙崩場地調查與多尺度監測計畫成果報告書

3.2 崩塌臨界地下水位

Hong (2017) 認為山坡地深層崩塌之地下水位於降雨期間，因地下水水位上升，使得邊坡下滑力增加，導致崩塌可能性增加如圖 9。

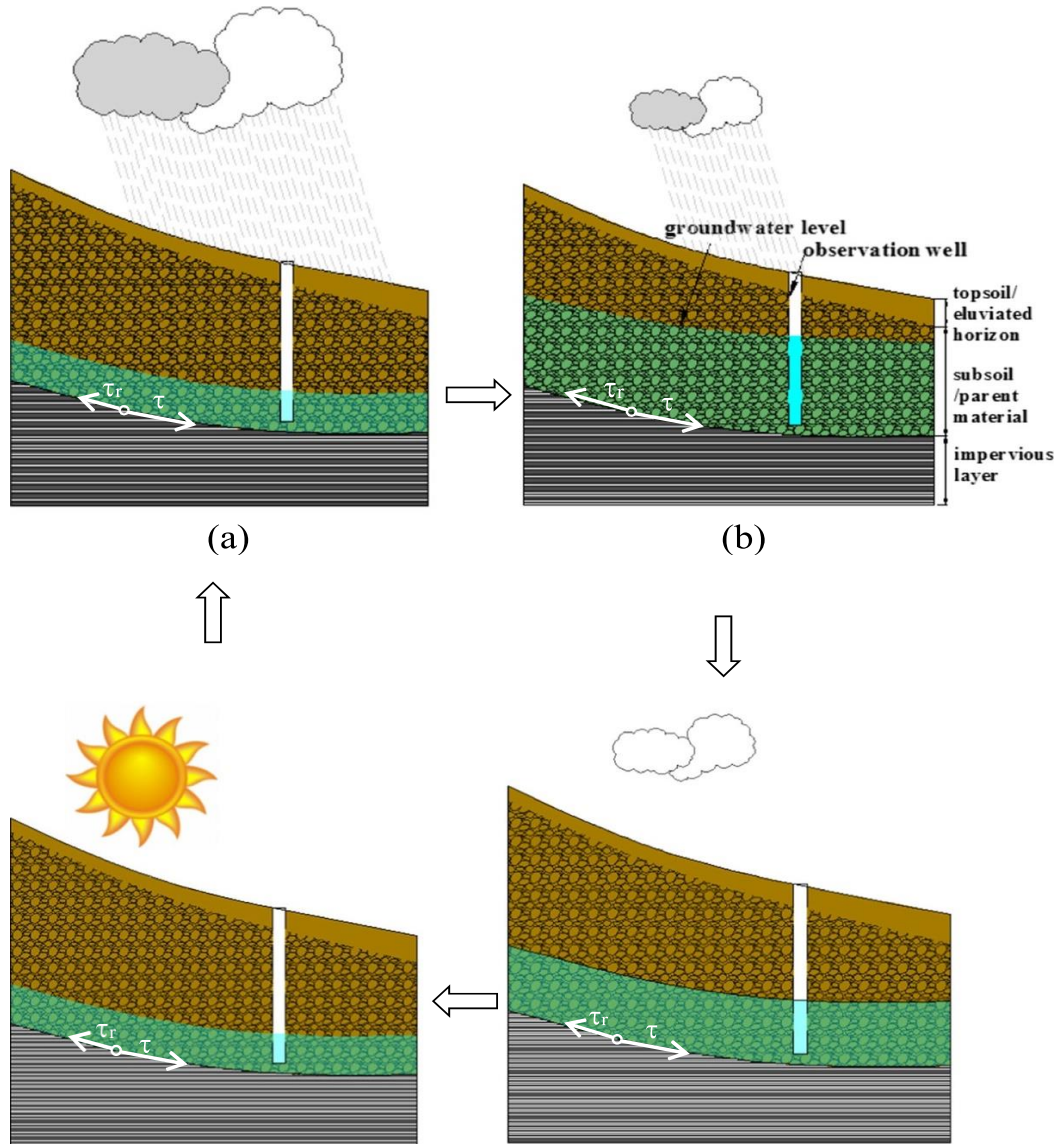


圖 9 降雨導致地下水水位升高示意圖

資料來源：Hong (2017)

由上圖可知，降雨、入滲至地下水水位提高，會有一定時間差，因此，發生崩塌之時間，通常會發生在最大降雨之後，且地下水流動會

將泥沙往下游帶動而形成滲流，最後導致崩塌。圖 10 顯示重力效應、地下水及滲流對於無限邊坡假設條件下，造成滑動之影響因子，推導控制方程式如下：

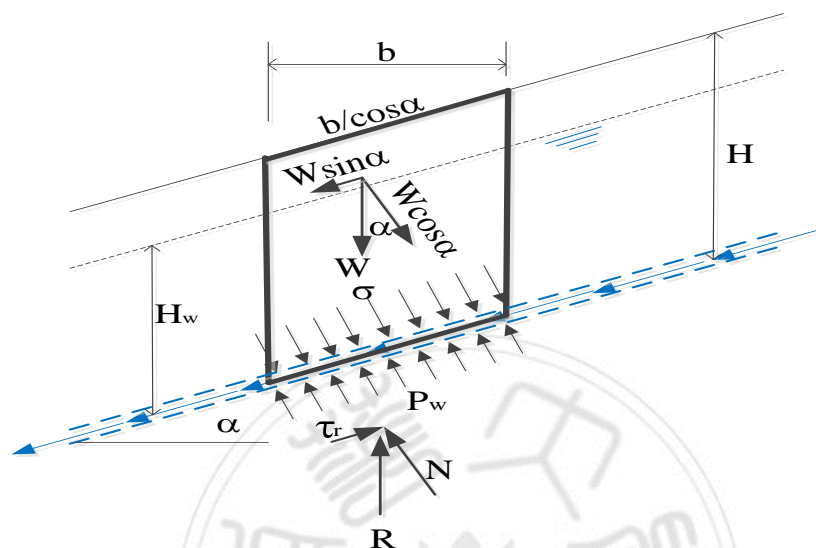


圖 10 影響無限邊坡滑動之因子

資料來源：洪耀明(2019)

假設土壤及水之重力為影響邊坡穩定之主要因子，當下滑力(τ)等於抵抗力(τ_r)時，稱為臨界條件，正向力、上舉力及剪應力之關係如下：

$$\sigma = \frac{W \cos \alpha}{b / \cos \alpha} = \frac{\gamma b H \cos \alpha}{b / \cos \alpha} = \gamma H \cos^2 \alpha \quad (1a)$$

$$p_w = \frac{\gamma_w H_w \cos \alpha}{b / \cos \alpha} = \gamma_w H_w \cos^2 \alpha \quad (1b)$$

$$\tau = \frac{S}{b / \cos \alpha} = \frac{\gamma b H \sin \alpha}{b / \cos \alpha} = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha \quad (1c)$$

式中 α 為滑動面角度； g 為單位重； H 為滑動面至地表面高度； H_w 為滑動面至水面高度。抵抗力採用 Mohr-Coulomb 條件，歸納如下：

$$\tau_r = c + (\sigma - p_w)\tan\varphi = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \alpha \tan \varphi \quad (2)$$

式中 c 為土壤內聚力； φ 為內摩擦角(Corominas et al. 2005)。高地下水位將增加 p_w ，降低 τ_r 導致地滑，(2)式改寫為如下：

$$P_{wc} = \sigma - (\tau - c) / \tan \varphi \quad (3a)$$

$$H_{wc} = (\gamma/\gamma_w)H - (\gamma H \sin \alpha \cos \alpha - c) / (\gamma_w \cos^2 \alpha \tan \varphi) \quad (3b)$$

(3b)式顯示 H_{wc} 為水及固體比重、抵抗力、土壤內聚力、破壞面角度及內摩擦角之函數，根據(3b)式，推算邊坡臨界地下水位。

表 3 為各類土壤之內摩擦角，表 4 為內聚力(Geotechdata.inf, 2013)，可提供現地使用依據。

表 3 各類土壤之內摩擦角

土壤特性	ŪŞ Ş 分類		土壤內摩擦角[°]		
	mīn	mā	Şlê īrī nāluê		
Ş êll ūrādêd ūrānêl, şāṇḍü ūrānêl, sīth lītłê őr nō rīnêş	ŪŞ		33	40	
Ļōōrlü ūrādêd ūrānêl, şāṇḍü ūrānêl, sīth lītłê őr nō rīnêş	ŪĻ		32	44	
Şāṇḍü ūrānêlş - Ļōōşê	(ŪŞ , ŪĻ)				35
Şāṇḍü ūrānêlş - Dêṇşê	(ŪŞ , ŪĻ)				50
Şīłtū ūrānêlş, şīłtū şāṇḍü ūrānêlş	ŪM		30	40	
lāüëü ūrānêlş, lāüëü şāṇḍü ūrānêlş	Ū		28	35	
Ş êll ūrādêd şāṇḍş, ūrānêllü şāṇḍş, sīth lītłê őr nō rīnêş	ŞŞ		33	43	
Ş êll-ūrādêd lēān şāṇḍ, ūrānêllü şāṇḍş - ōmlā tēd	ŞŞ		-	-	38
Ş êll-ūrādêd şāṇḍ, āṇüülār ūrāiṇş - Ļōōşê	(ŞŞ)				33
Ş êll-ūrādêd şāṇḍ, āṇüülār ūrāiṇş - Dêṇşê	(ŞŞ)				45
Ļōōrlü ūrādêd şāṇḍş, ūrānêllü şāṇḍş, sīth lītłê őr nō rīnêş	ŞĻ		30	39	
Ļōōrlü-ūrādêd lēān şāṇḍ - ōmlā tēd	ŞĻ		-	-	37
Ūñīrōrm şāṇḍ, rōuṇḍ ūrāiṇş - Ļōōşê	(ŞĻ)				27
Ūñīrōrm şāṇḍ, rōuṇḍ ūrāiṇş - Dêṇşê	(ŞĻ)				34
Şāṇḍ	ŞŞ , ŞĻ		37	38	
Ļōōşê şāṇḍ	(ŞŞ , ŞĻ)		29	30	

土壤特性	ŪŞ Ş 分類		土壤內摩擦角[°]		
	mīñ	mā	Şlê īrī nālūê		
Āēđīūm şāñđ	(ŞŚ , ŞĻ)		30	36	
Āēñşê şāñđ	(ŞŚ , ŞĻ)		36	41	
Şīļtū şāñđş	ŞĀ		32	35	
Şīļtū ļāūs, şāñđ-şīļt mī ōmĻā tēđ	ŞĀ		-	-	34
Şīļtū şāñđ - Ļōōşê	ŞĀ		27	33	
Şīļtū şāñđ - Āēñşê	ŞĀ		30	34	
ļāüêü şāñđş	Ş		30	40	
ālūêü şāñđş, şāñđü- ļāü mī - ōmĻā tēđ	Ş				31
Ļōāmü şāñđ, şāñđü ļāü Ļōām	ŞĀ, Ş		31	34	
Īñōŗūāñī şīļtş, şīļtū ōŗ ļāüêü řīñê şāñđş, şīth şīūht Īļāştī īt ü	ĀĻ		27	41	
Īñōŗūāñī şīļt - Ļōōşê	ĀĻ		27	30	
Īñōŗūāñī şīļt - Āēñşê	ĀĻ		30	35	
Īñōŗūāñī ļāūs, şīļtū ļāūs, şāñđü ļāūs ōŗ ļōś Īļāştī īt ü	Ļ		27	35	
ļāūs ōŗ ļōś Īļāştī īt ü - ōmĻā tēđ	Ļ				28
Ōŗūāñī şīļtş āñđ ōŗūāñī şīļtū ļāūs ōŗ ļōś Īļāştī īt ü	ŌĻ		22	32	
Īñōŗūāñī şīļtş ōŗ ħīūh Īļāştī īt ü	ĀĤ		23	33	
ļāüêü şīļtş - ōmĻā tēđ	ĀĤ				25
Şīļtş āñđ ļāüêü şīļtş - ōmĻā tēđ	ĀĻ				32
Īñōŗūāñī ļāūs ōŗ ħīūh Īļāştī īt ü	Ĥ		17	31	

土壤特性	ŪŞ Ş 分類		土壤內摩擦角[°]		
	mīn	mā	Şlê irī nālūê		
lāüş oṛ hīûh İlāştī it ü - om̄lā tēḍ	H				19
Ōṛûānī lāüş oṛ hīûh İlāştī it ü	ŌH		17	35	
Lōām	M̄L, ŌL, M̄H, ŌH		28	32	
Şīlṭ Lōām	M̄L, ŌL, M̄H, ŌH		25	32	
lāü Lōām, Şīlṭü lāü Lōām	M̄L, ŌL, L, M̄H, ŌH, H		18	32	
Şīlṭü lāü	ŌL, L, ŌH, H		18	32	
lāü	L, H, ŌH, ŌL		18	28	
Lēāt ānḍ oṭhêṛ hīûhlü oṛûānī şoīlş	L̄t		0	10	

表 4 土壤內聚力

土壤特性	USCS 分類	土壤內摩擦角[°]		
		min	max	Specific value
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	33	40	
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	32	44	
Sandy gravels - Loose	(GW, GP)			35
Sandy gravels - Dense	(GW, GP)			50
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	30	40	
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	28	35	

Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	33	43	
Well-graded clean sand, gravelly sands - Compacted	SW	-	-	38
Well-graded sand, angular grains - Loose	(SW)			33
Well-graded sand, angular grains - Dense	(SW)			45
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	30	39	
Poorly-graded clean sand - Compacted	SP	-	-	37
Uniform sand, round grains - Loose	(SP)			27
Uniform sand, round grains - Dense	(SP)			34
Sand	SW, SP	37	38	
Loose sand	(SW, SP)	29	30	
Medium sand	(SW, SP)	30	36	
Dense sand	(SW, SP)	36	41	
Silty sands	SM	32	35	
Silty clays, sand-silt mix Compacted	SM	-	-	34
Silty sand - Loose	SM	27	33	
Silty sand - Dense	SM	30	34	
Clayey sands	SC	30	40	
Clayey sands, sandy-clay mix - compacted	SC			31
Loamy sand, sandy clay Loam	SM, SC	31	34	
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	27	41	
Inorganic silt - Loose	ML	27	30	

Inorganic silt - Dense	ML	30	35	
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	27	35	
Clays of low plasticity - compacted	CL			28
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	22	32	
Inorganic silts of high plasticity	MH	23	33	
Clayey silts - compacted	MH			25
Silts and clayey silts - compacted	ML			32
Inorganic clays of high plasticity	CH	17	31	
Clays of high plasticity - compacted	CH			19
Organic clays of high plasticity	OH	17	35	
Loam	ML, OL, MH, OH	28	32	
Silt Loam	ML, OL, MH, OH	25	32	
Clay Loam, Silty Clay Loam	ML, OL, CL, MH, OH, CH	18	32	
Silty clay	OL, CL, OH, CH	18	32	
Clay	CL, CH, OH, OL	18	28	
Peat and other highly organic soils	Pt	0	10	

本研究整理邊坡穩定地質參數建議如表 5。同時詹連昌及蘇苗彬(2002)建議梨山地區之邊坡穩定地質參數建議如表 6，本研究採用表 6 進行計算。

表 5 地質參數建議值

建議值	參數	Dt	W3~W2	W1~RF	滑動面		
		(崩積層)	(高度至中度風化)	(輕度風化至岩盤)	Dt	W3-W2	W1-RF
蘇苗彬	C	0				2.1~3.8	
	ϕ	35				9~16	
亞新顧問	C	0					
	ϕ	29~34.5					
林炳森	C	0.17~1.6				1.3~2.9	
	ϕ	33~38				18.2~18.5	
蔡光榮	C	1.9~3.9				1.8~4	
	ϕ	33.5~35				25~45	
工業技術研究院	C	0.1~2.2	2~6	30		0~20	
	ϕ	15~45	36~39	40		20~23	
中華顧問	C					0.5~1.1	0.3~1.8
	ϕ					28.7~30.9	28.5~31.3
中華顧問反算	C				0.5	0~5	3
	ϕ				28	15~31	33
中華顧問建議	C	0.5~1	3	30	0.5~1	2	3
	ϕ	28~32	28	33	28~32	20	33

表 6 邊坡穩定地質參數

土/岩層種類	比重	單位重	C	ϕ
崩積土層	2.73	2.06	0.50	28

強至中度風化 板岩	2.76	2.69	3.00	33
弱風化至新鮮 板岩	2.76	2.70	30.00	37
滑動面(反算分 析)	2.76	2.69	1.00	16.7

3.3 地下水位擾動方程式推導

本研究採用 Hōnū & Š ān (2011)之線性水庫模式，來預測地下水如下：

圖 11 為降雨至水流流入河川之過程，可用水文連續方程式 [\(Chw et al. 1988\)](#) 描述水在土壤之移動過程。

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (5)$$

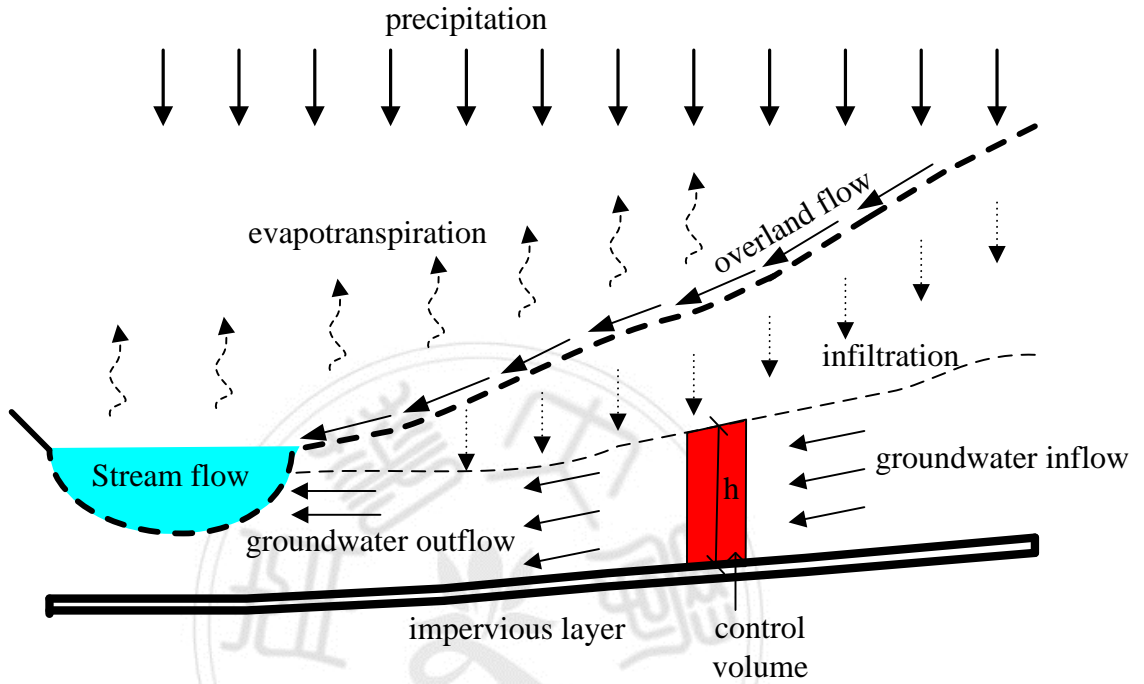
式中 S 為水之儲蓄體積； I 為入流率，包括地下水流入及入滲； O 為地下水出流率。 S 可用單位面積 L 之含水量表示如下(Rasmussen & Andreassen, 1959):

$$S = phL \quad (6a)$$

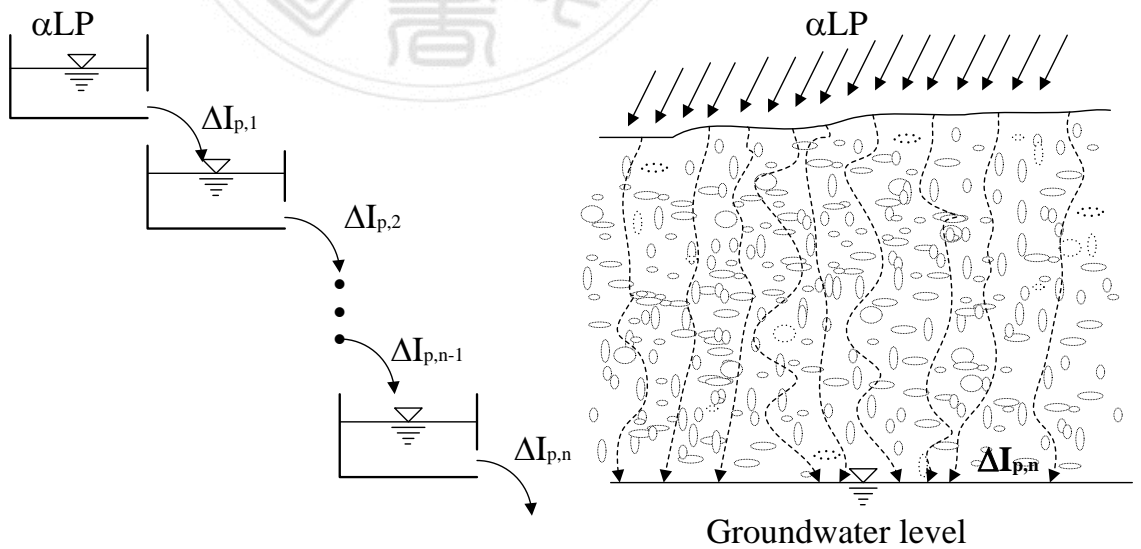
式中 p 為單位面積孔隙率， h 為水深(Maréchal et al. 2006; Park & Parker 2008; Sophocleous 1991)， S 對時間微分為

$$\frac{dS}{dt} = pL \frac{dh}{dt} \quad (6\tilde{n})$$

3.3.1 降雨入滲率



(a) Water travel process from precipitation to stream



(b) Conceptualization of infiltration process using a series of identical linear reservoirs

圖 11 地下水流動概念圖

圖 11 顯示水之入流可表示如下：

$$I = I_p + I_g \quad (7a)$$

式中 I_g 為地下水入流； I_p 為入滲率，為降雨量 P_r 減蒸發散量 E_r 、漫地流 O_r 及窪蓄量 S_r 如下

$$I_p = [P_r - (E_r + O_r + S_r)]L \quad (7b)$$

[Wu et al. \(1996\)](#) 透過迴歸分析，推得降雨與入滲關係如下

$$I_{p,e} = 0.87(P_{r,e} - 5.25) \quad (7c)$$

式中 $I_{p,e}$ 為個別降雨事件之入滲量(mm)， $P_{r,e}$ 為降雨量(mm)，
5.25 mm 為個別降雨事件門檻值，低於此值則無入滲量。

[Park & Parker \(2008\)](#) 則假設每日入滲率 $I_{p,d}$ 與每日降雨量 $P_{r,d}$ 之間，可用係數表示如下

$$I_{p,d} = \alpha P_{r,d} L \quad (7d)$$

式中 α 代表降雨量之入滲比率。

本研究採用線性水庫模擬降雨入滲至地下水位過程，降雨至入滲補注地下水之時間藉由 n 個線性水庫來表示，每個水庫有相同的儲蓄

常數 β ，圖 3(b) 為線性水庫概念圖，第一個線性水庫流量 為入滲率除以儲蓄常數，將(7d)式代入，可推得降雨量之函數：

$$\Delta I_{p,1}(t) = \frac{\alpha LP(t)}{\beta} \quad (7\hat{e})$$

採用水文連續方程式，將(7e)代入(5)式，則可推得第 n 個水庫流出率為：

$$\Delta I_{p,n}(t) = \frac{\alpha LP(t)}{\beta(n-1)!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\beta}} = \alpha LP(t)H(t) \quad (7\bar{f})$$

式中 $H(t) = \frac{1}{\beta(n-1)!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\beta}}$ 為入滲率之單位脈衝函數，對 $H(t)$

微分，可獲得最大入滲率 H_p 及入滲時間 t_p

$$t_p = \beta(n-1) \quad (7\hat{u})$$

$$H_p = \frac{1}{\beta(n-1)!} (n-1)^{n-1} e^{-(n-1)} \quad (7\hat{h})$$

(7 \hat{u})式可知 β 及 n 越大，則 t_p 越大且 H_p 越小。

將時間離散成許多 Δt ，設 P_m 為介於 $(m-1)\Delta t$ 及 $m\Delta t$ 間之降雨深度，

$t = N\Delta t$ 之入滲率為

$$\begin{aligned} I_{p,N}(t) &= \alpha L(P_1 H(N\Delta t) + P_2 H[(N-1)\Delta t] + \dots + P_m H[(N-m+1)\Delta t] + \dots + P_N H[\Delta t]) \\ &= \alpha L \sum_{m=1}^N P_m H[(N-m+1)\Delta t] \end{aligned} \quad (7\bar{i})$$

式中 N 為因為 n 及 β ，導致入滲結果之影響區間

3.3.2 地下水流率

圖 12 說明地下水控制體積，入滲率 I_p 、地下水入流 及出流率之相互關係，圖 4(b)-(e)，則說明交互作用導致地下水位上升及下降之其過程。

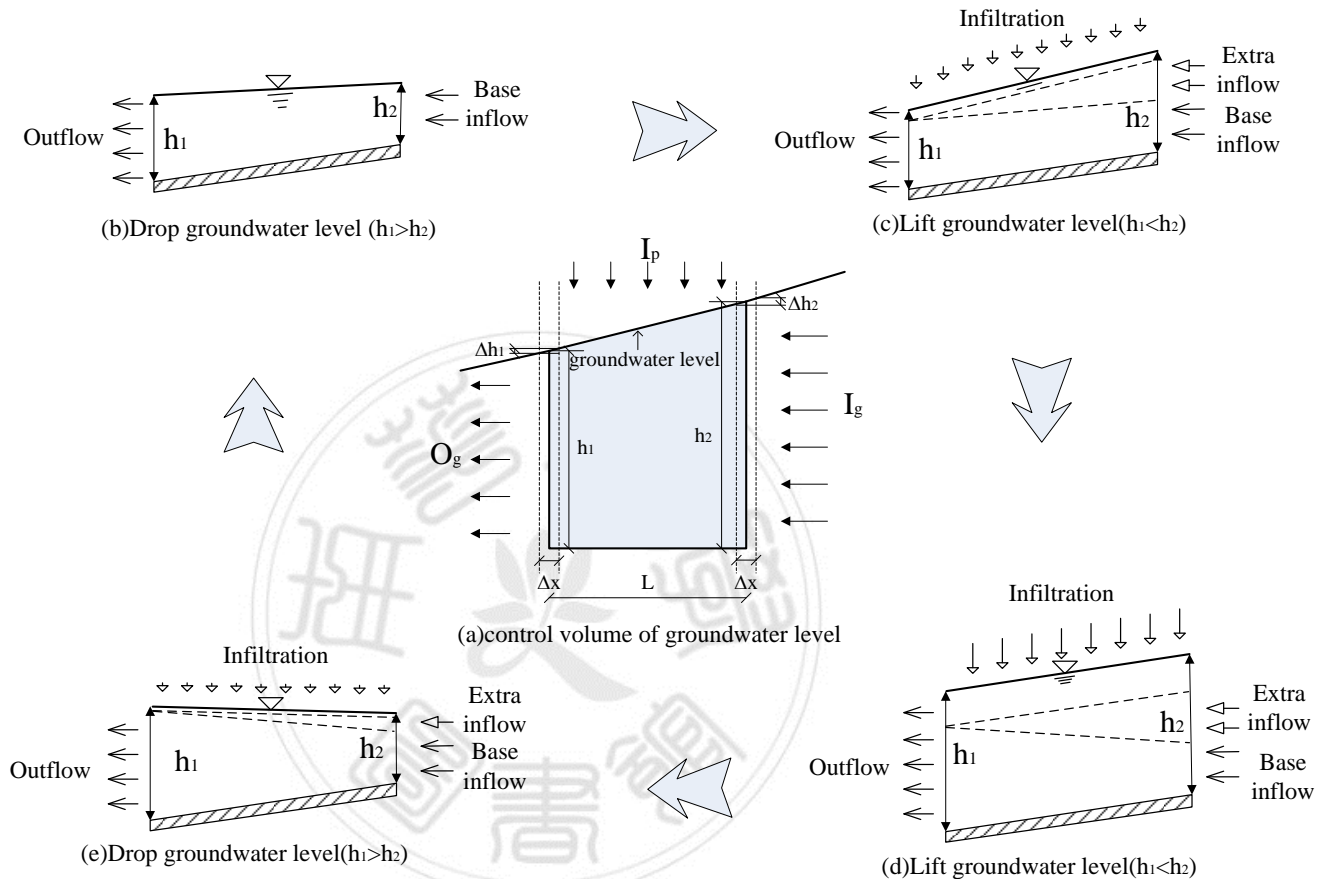


圖 12 暴雨期間地下水位擾動變化

經由 Darcy's law · 地下水入流率可表示為

$$I_g = k \frac{\Delta h_2}{\Delta x} h_2 \quad (8\tilde{a})$$

式中 k 為水力傳導係數； $\frac{\Delta h_2}{\Delta x}$ 為入流水力梯度； h_2 為入流單位寬度之水深，地下水流出率為

$$O_g = k \frac{\Delta h_1}{\Delta x} h_1 \quad (8\tilde{b})$$

式中 $\frac{\Delta h_1}{\Delta x}$ 為出流水力梯度； h_1 出流單位寬度之水深。假設局部水力梯度等於區域水力梯度，即 $\frac{\Delta h_2}{\Delta x} = \frac{\Delta h_1}{\Delta x} = \frac{\Delta h}{\Delta x}$ ，則入流率 I_g 與出流率

O_g 差值為

$$I_g - O_g = k \left(h_2 \frac{\Delta h_2}{\Delta x} - h_1 \frac{\Delta h_1}{\Delta x} \right) = -kL \frac{\Delta h}{\Delta x} \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right) = -kLi \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (8c)$$

式中控制體積平均水力梯度 $i = \frac{h_1 - h_2}{L}$ ，[Park & Parker \(2008\)](#) 假設淨儲存體積改變量與儲存體積之間之關係如下

$$I_g - O_g = KS = KpLh \quad (8d)$$

式中 $K = \frac{-ki \Delta h}{ph \Delta x}$ 為地下水傳輸參數，假設 $L \cong \Delta x$ 及 $(h_1 - h_2) \cong \Delta h$ ，則 $\frac{\Delta h}{\Delta x} \cong i$ ， $K = -\frac{ki^2}{ph}$ ，因為 i^2 ， k ， p 及 h 為正值， K 則為負值。

整合入滲及側向入流，則連續方程式可寫成下式：

$$I - O = KpLh + A\alpha L \sum_{m=1}^N P_m H [(N - m + 1)\Delta t] \quad (8e)$$

式中 A 為集水區面積

3.3.3 數值方法求解

將(6b)、(7i)及(8e)式代入(5)式，再除以 pL ，可推得下式

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = Kh + I \sum_{m=1}^N P_m H [(N - m + 1)\Delta t] \quad (9a)$$

式中 $I = \frac{\alpha}{p}(A+1)$ ，為大於 0 之值，定義為上升數(Rise Number)，

而 $I \sum_{m=1}^N P_m H[(N-m+1)\Delta t]$ 為入滲及地下水入流， K 定義為下降數(Sink Number)，為小於 0 之值。 Kh 為地下水水頭損失。

(9a)式為一階線性微分方程式，可用 4 階 Runge-Kutta 數值模式求解(Anderson, & Woessner 1992; Chapra & Canale 1988; Hong 2008; Hong 2010)，首先(9a)式可推導如下

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = f(t, h) \quad (9\tilde{n})$$

定義 $t_i = \Delta t \times i$ ，其對應地下水位為 h_i ，則

$$C_1 = f(t_i, h_i) = Kh_i + I \sum_{m=1}^N P_m H[(N-m+1)\Delta t] \quad (9c)$$

$$\begin{aligned} C_2 &= f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, h_i + \frac{\Delta t}{2} C_1\right) \\ &= K\left(h_i + \frac{\Delta t}{2} C_1\right) + \frac{1}{2} \left(I \sum_{m=1}^N P_m H[(N-m+1)\Delta t] + I \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N-m+1)\Delta t] \right) \end{aligned} \quad (9d)$$

$$\begin{aligned} C_3 &= f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, h_i + \frac{\Delta t}{2} C_2\right) \\ &= K\left(h_i + \frac{\Delta t}{2} C_2\right) + \frac{1}{2} \left(I \sum_{m=1}^N P_m H[(N-m+1)\Delta t] + I \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N-m+1)\Delta t] \right) \end{aligned} \quad (9f)$$

$$C_4 = f(t_i + \Delta t, h_i + \Delta t C_3) = K(h_i + \Delta t C_3) + I \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N-m+1)\Delta t] \quad (9g)$$

式中 P_{N+1} 為 $N\Delta t$ 時間之降雨率，進一步分析，於 $t_i + \frac{\Delta t}{2}$ 之降雨深度未知，因此 $\frac{1}{2} \left(I \sum_{m=1}^N P_m H[(N-m+1)\Delta t] + I \sum_{m=2}^{N+1} P_m H[(N-m+1)\Delta t] \right)$ 可視為在 $t_i + \frac{\Delta t}{2}$ 時間之入滲率及額外入流率。根據 4 階 Runge-Kutta 演算法，於時間 t_{i+1} 之地下水位 h_{i+1} 為

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta t}{6} (C_1 + 2C_2 + 2C_3 + C_4) \quad (9h)$$

(9h)式說明於 t_{i+1} 時間之地下水位可以由 t_i 時間之降雨求得。

3.4 資料收集

收集即時地下水位及雨量區域等資料，包含地文及水文資料如表 7 所示，說明如下。將採集試驗現場破壞面之土樣，進行 Darcy 定律之 K 值試驗、破壞力之三軸試驗，推得無限邊坡理論公式所需參數。並以無沖蝕濾料試驗驗證，推得臨界水壓力，據以計算滲流長度。包括現地滲流點位置，造成崩塌地位移之地下水位、位移量、破壞面土壤粒徑、滲透係數、土壤內聚力、內摩擦角等歷史資料，據以作為臨界地下水位及滲流長度驗證參考依據。

表 7 研究所需資料

名稱	使用目的	格式
即時雨量	進行即時地下水位 預測用	小時雨量
即時地下 水	進行即時地下水位 預測用	小時地下水位
即時位移	驗證臨界地下水位 用	小時資料
歷史降雨	進行地下水位預測 模式建立	(1)至少兩場暴雨，前期發生之第一場暴雨為訓練樣本，第二場暴雨為驗證樣本。 (2)需為小時降雨資料。
歷史地下 水位	進行地下水位預測 模式建立	(1)伴隨兩場暴雨之地下水位，降雨與地下水位需有明顯關係，前期發生之第一場暴雨為訓練樣本，第二場暴雨為驗證樣本。 (2)需為小時地下水位資料。
鑽孔位置	位移歷史資料	根據現場傾斜管或 TDR 研判是否發生位移

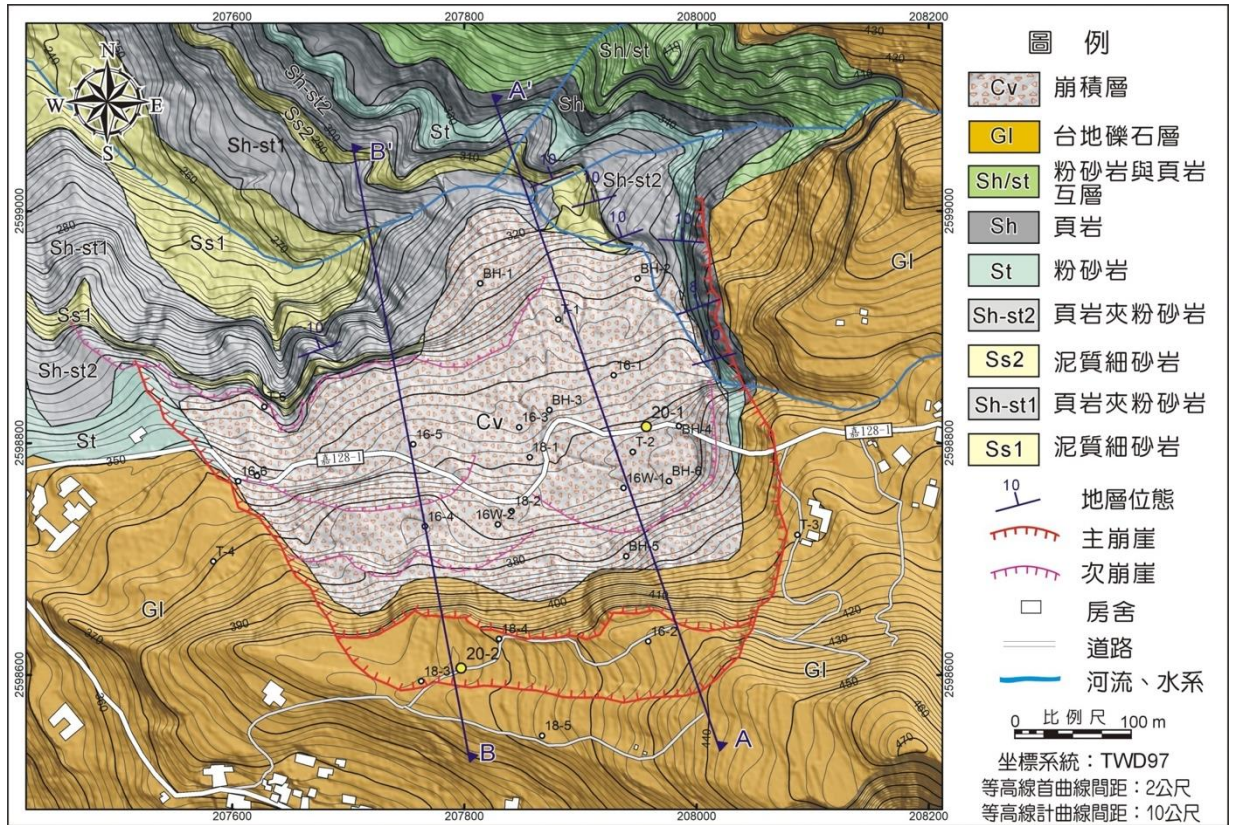
地下水位 警戒值	與本研究成果比較	需為破壞面往上高程
破壞面土 壤粒徑	進行臨界滲流壓力 試驗	需為破壞面粒徑篩分析及機械分 析結果
滲透係數	計算臨界滲流壓力	地下水位井位置資料
土壤內聚 力	推算無限邊坡理論 臨界水位	需為破壞面位置資料
內摩擦角 φ	推算無限邊坡理論 臨界水位	需為破壞面位置資料

第四章 研究結果與討論

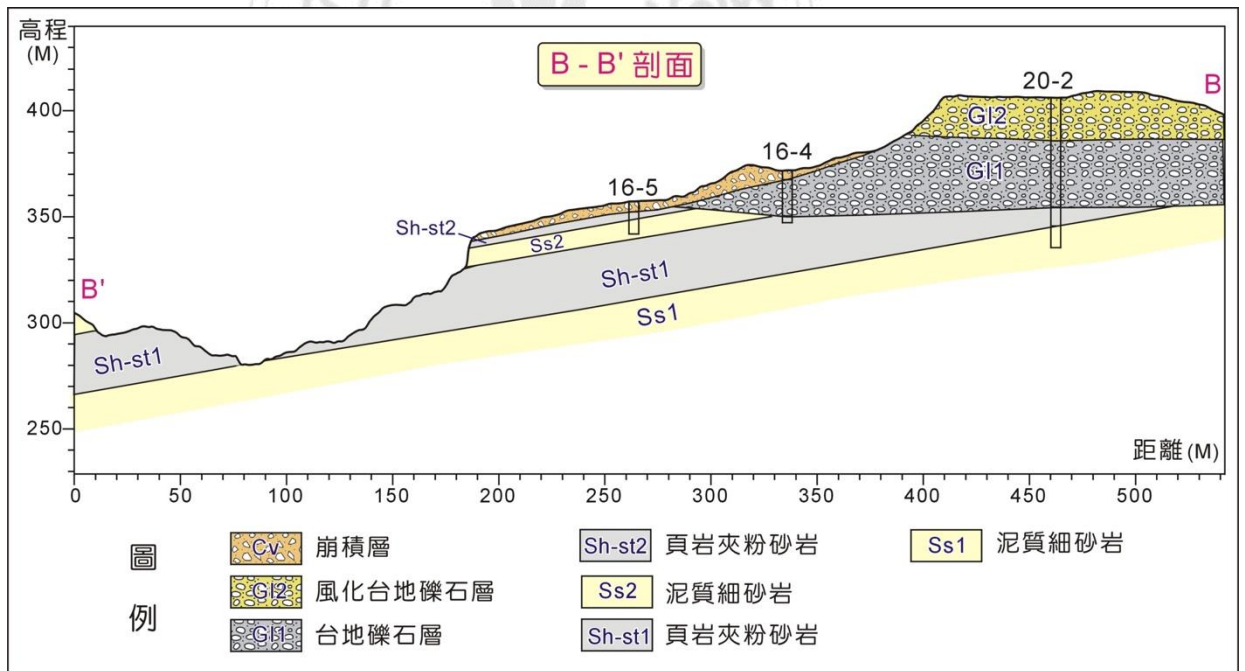
4.1 臨界地下水位預測

根據農委會水土保持局(2020)「109 年度中心崙崩塌地調查與多尺度監測計畫」成果報告書，井深度 15 公尺，注意值為地表下 3 m，警戒值為水位地表下 2 m，現場 GPS 量測結果，高程 375.67 公尺。

中心崙崩塌地地質平面及剖面圖如圖 13，崩積層下方為頁岩夾粉砂岩，主要滑動面為崩積層，其厚度為 5.7 公尺，採用表 8，邊坡穩定地質參數，岩盤邊坡斜度為 15.38%，則推得臨界水位高度為 9.31m，較地表高度高出 3.61m，但因為下方邊坡為陡坡，使得土壤下方無支撐，因此會持續滑動，與理論公式計算方式不同，若改為連結至最低點計算，坡度改為 40%，計算結果臨界地下水位為 4.01 公尺，高程 373.98 公尺。



(a) 中心崙崩塌地地質平面圖



(a) 中心崙崩塌地地質剖面圖(B-B')

圖 13 中心崙崩塌地地質平面及剖面圖

4.2 中心崙地區降雨與地下水位特性

中心崙地區之降雨與地下水位模擬結果如表 8，說明如下：

1. 達西定律入滲係數 K

K 越大，表示入滲率越高，模擬結果以 JSL5 最大，而 JSL5 在崩塌地上方，顯示該區入滲發達，需注意排水。其餘區域之 K 值均很小，表示應有夾雜黏土等層面，導致入滲率較小。

2. 線性水庫參數

α 為儲蓄常數，越大表示儲蓄率越高，以 JSL1 及 JSL2 最大，n 為線性水庫，越多表示流出越慢，模擬結果以 JSL1 最大。

3. 降雨量之入滲比率

模擬結果，以 JSL5 及 JSL3 完全入滲最高，兩區位於崩塌地上游，入滲率較大。

4. 模擬誤差

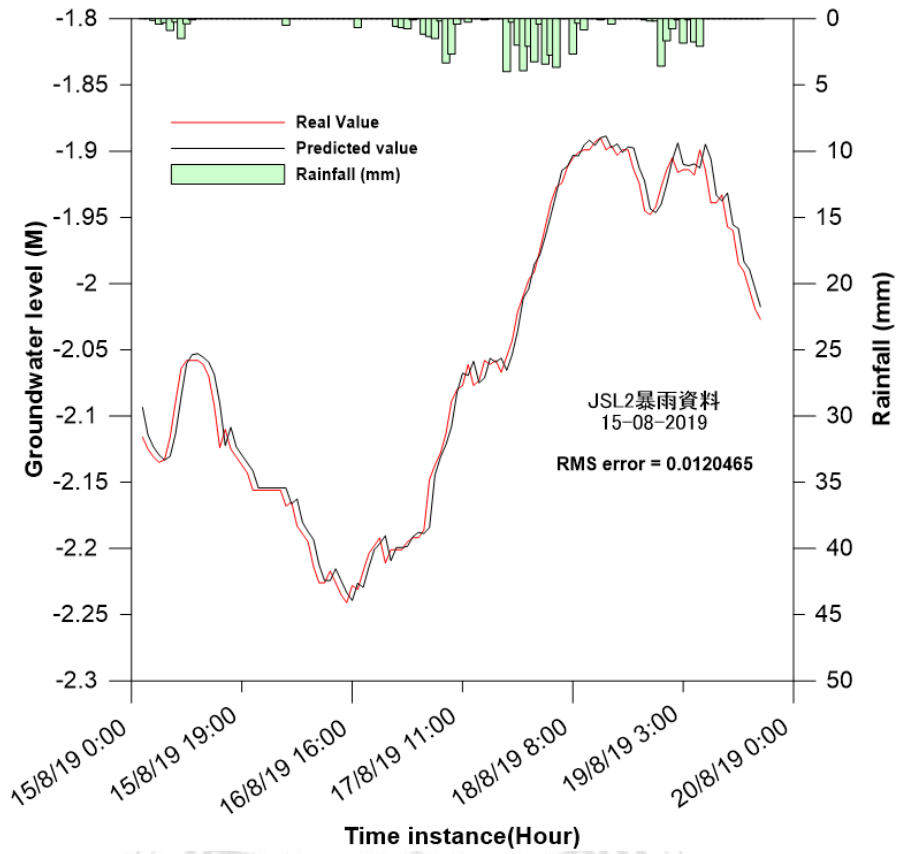
模擬結果，均方根誤差(RMSE)排序為 JSL2 < JSL4 < JSL3 < JSL5 < JSL1，顯示 JSL2 降雨與地下水關係最明顯，JSL4 次之，未來本區可以 JSL2 及 JSL4 作為主要模擬對象。

表 8 中心崙降雨與地下水位模擬

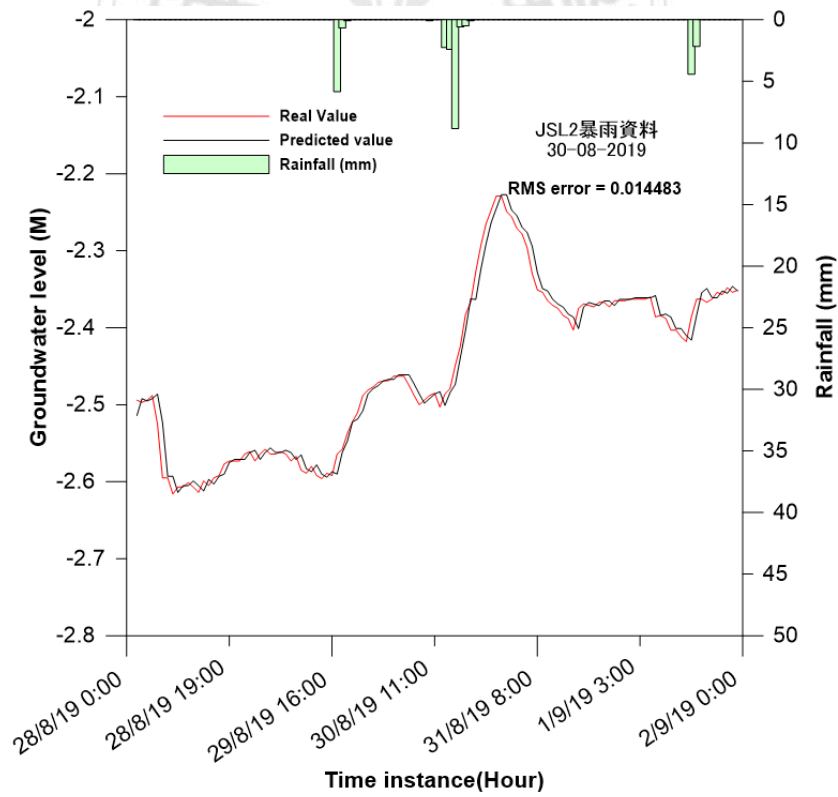
站名	K	α	n	β	類別	降雨日期 (日/月/年)	24 小時累積 暴雨 (mm)	RMSE
JSL1	-0.00075	4	5	0.5	訓練	15/8/19	60.417	0.112157
					模擬一	30/8/19	27.916	0.299379
					模擬二	22/5/20	28.248	0.087641
JSL2	-0.00075	4	3	0.5	訓練	15/8/19	60.417	0.012047
					模擬一	30/8/19	27.916	0.029938
					模擬二	22/5/20	28.248	0.014483
JSL3	-0.00075	3	3	1	訓練	15/8/19	60.417	0.102235
					模擬一	30/8/19	27.916	0.137909
					模擬二	20/7/20	16.083	0.037707
JSL4	-0.00075	2	3	0.5	訓練	15/8/19	60.417	0.036406
					模擬一	30/8/19	27.916	0.105361
					模擬二	22/5/20	28.248	0.07474
JSL5	-0.00375	3	2	1	訓練	15/8/19	60.417	0.111942
					模擬一	30/8/19	27.916	0.098259
					模擬二	22/5/20	28.248	0.157555

將成果較佳之 JSL2 及 JSL4 訓練及模擬一小時預測結果成

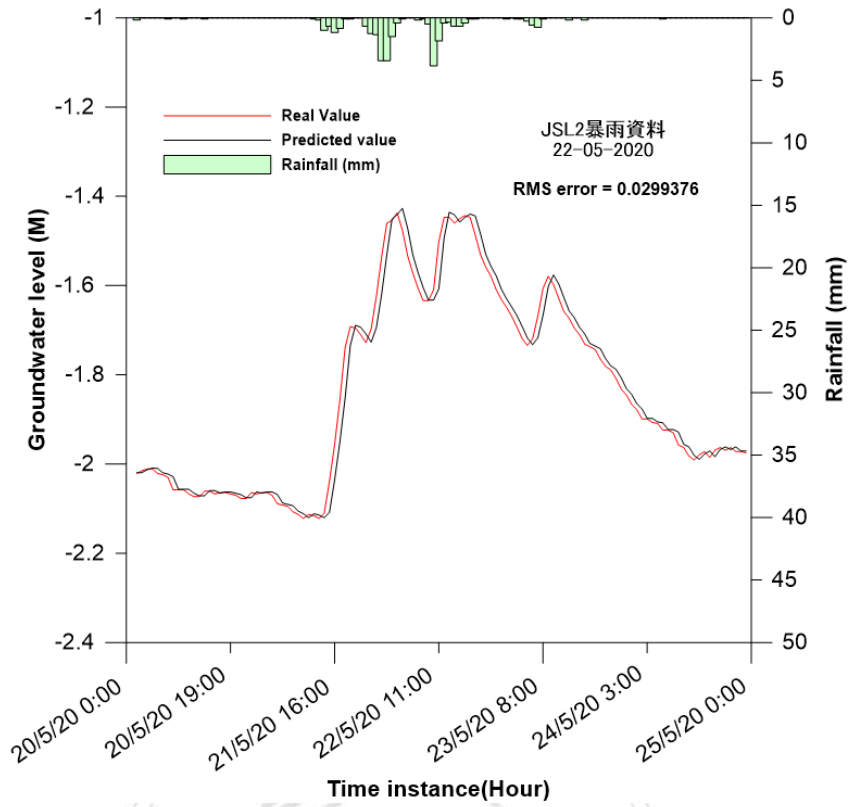
果如圖 14。



(b) 訓練成果

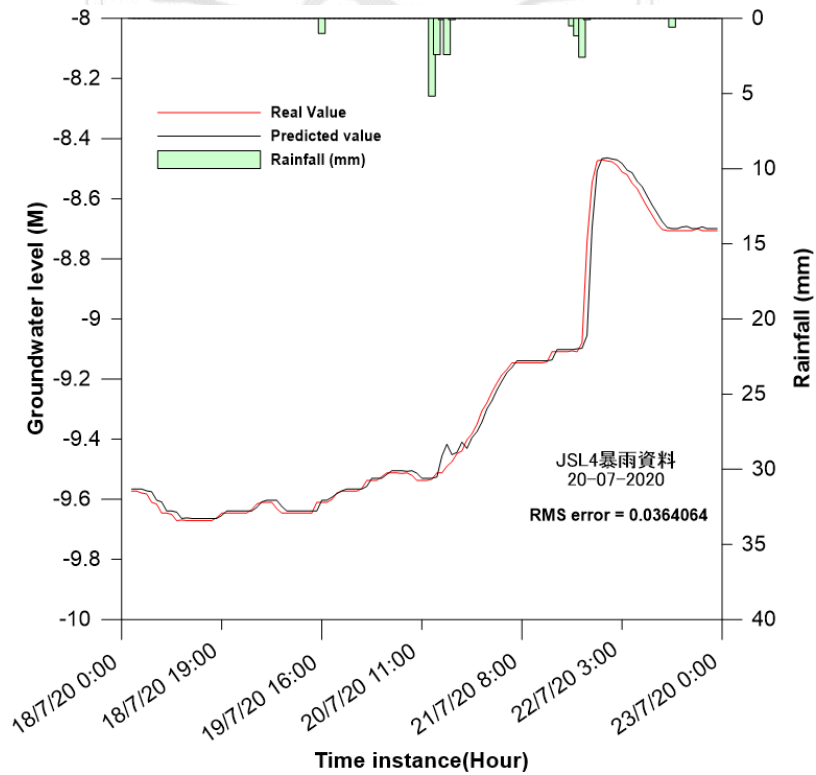


(b) 模擬一成果

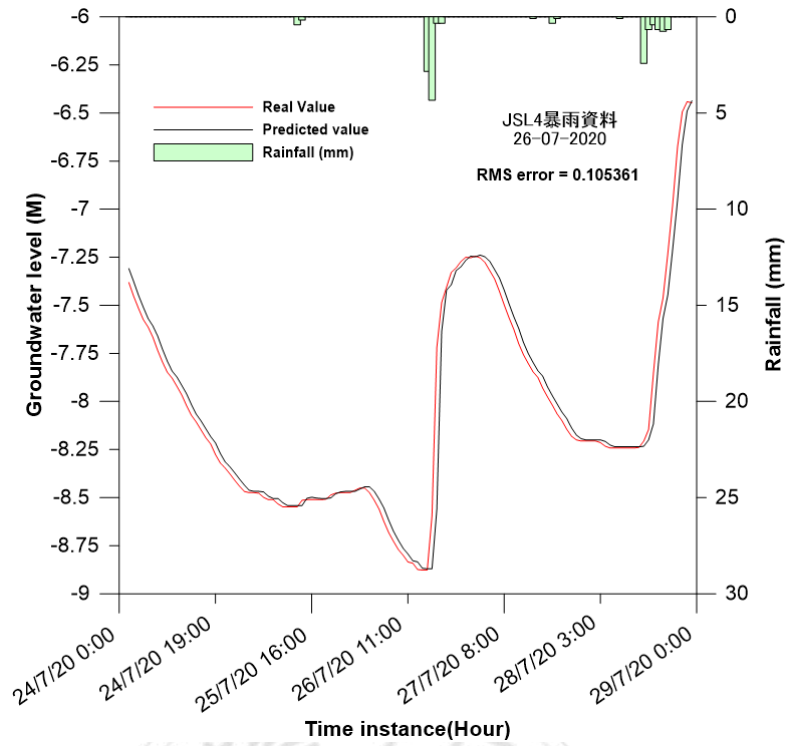


(c)模擬二成果

圖 14 JSL2 訓練及模擬成果

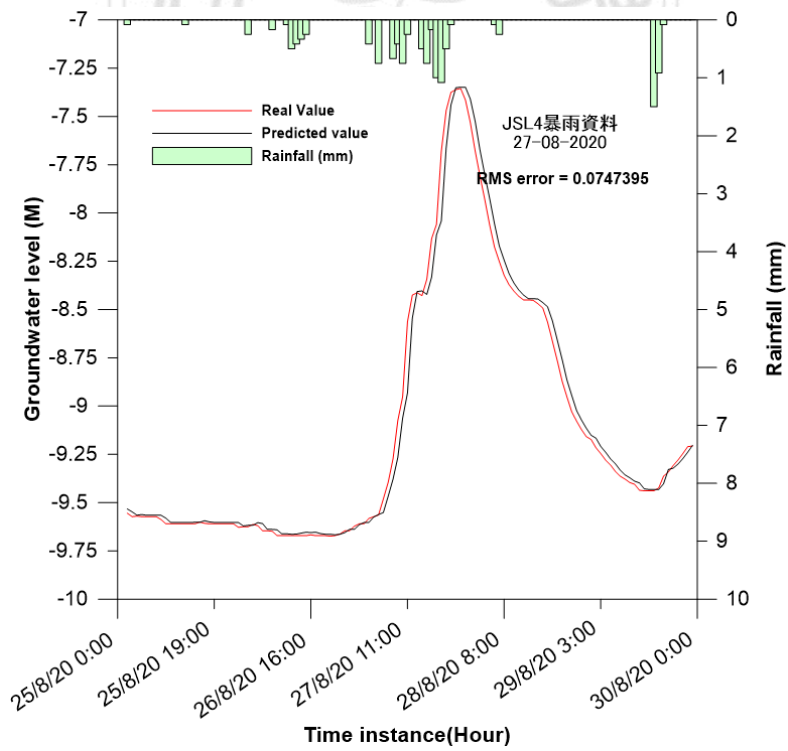


(a)訓練成果



(b) 模擬一成果

圖 15 JSL4 訓練及模擬成果



(c) 模擬二成果

第五章 結論與建議

本研究分析中心崙大規模崩塌地區域，推算崩塌地臨界地下水位，並進行訓練及模擬，推得如下結論與建議：

1. 以線性水庫模式進行降雨與地下水位關係篩選，推得中心崙 JSL2，暴雨期間模擬誤差小於 10cm，其餘測站誤差大。
2. 本研究採用理論公式計算臨界地下水位，可作為發布警戒值之依據，若推估之地下水位達到警戒值，可據以發布警戒。
3. 可將模擬程序，整合為執行檔案，並與網頁整合，透過即時網站，預測暴雨期間下一小時地下水位，作為防災預警之用。

參考文獻

1. Corominas J, Moya J, Ledesma A, Lloret A, Gili JA (2005) Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (eastern Pyrenees, Spain). *Landslides* 2(2):83-96
2. Geotechdata.inf (2013), <http://www.geotechdata.info/parameter/permeability.html>
3. Hong Y. M., Shiuan Wan (2011), "Forecasting groundwater level fluctuations for rainfall-induced landslide" , *Natural Hazards*, 57, 167-184
4. Hong, Y. M. (2017). Feasibility of using artificial neural networks to forecast groundwater levels in real time. *Landslides*, 14(5), 1815-1826.
5. WASHINGTON FOREST PROTECTION ASSOCIATION, <http://www.wfpa.org/news-resources/blog/deep-seated-landslides-shallow-landslides-washington/>
6. 詹連昌、蘇苗彬(2002)·梨山地區地層滑動整治計畫之五-成效評估與後續處理·農委會水土保持局梨山地區地層滑動整治計畫成效評估研討會論文集。
7. 農委會水土保持局(2016)·105 年度大梨山地區地滑地監測管理及系統維護資料分析。
8. 農委會水土保持局(2019)·108 年度大梨山地區地滑地監測管理及系統維護資料分析。
9. 行政院農業委員會水土保持局(2018)·107 年度中心崙崩塌地調查監測計畫成果報告書。

10. 農委會水土保持局(2020) ，109 年度中心崙崩塌地調查與多尺度監測計畫成果報告書。

