SWCB(104.7 版)

計畫編號：111 保發-8.1-保-01-06-001(19)

深層崩塌即時預警模式
Real-Time Early Warning Model of Deep-Seated Landslide
成果報告書

執 行 單 位：南華大學

執 行 期 間：111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：洪耀明 教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國一一一年十一月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

深層崩塌即時預警模式

摘要

極端降雨造成山坡地深層崩塌，水土保持局大規模崩塌防治計畫，在崩塌地裝設雨量計、地下水位計及位移量測設備，監測坡地位移量測。本研究目的為利用現場歷史觀測紀錄，建立深層崩塌預警模式，預警原理為計算崩塌地臨界地下水位，並發展地下水位預測模式，當預測之地下水達到臨界值時，則可發布預警機制。

本年度選擇嘉義縣中心崙崩塌地，連結現場雨量計、地下水位計及位移量建立資料庫，並連結至中央氣象局劇烈天氣監測系統Qpesum，取得下一小時預測雨量，再以發展之地下水位預測模式，預測一小時及兩小時後地下水位。同時建立理論模式及二維數值演算模式，推算臨界地下水位剖面。分析結果顯示，一小時後地下水位預測結果均方根誤差為 4cm，依據五場暴雨資料顯示，Qpesum 能預測是否發生降雨，但一小時預測降雨量較實際降雨大 58%以上，使預測地下水位高於實際地下水位，並以理論分析模式計算觀測井臨界地下水位，並利用二維數值演算，計算臨界地下水位剖面。

關鍵詞：深層崩塌、臨界地下水位、中央氣象局劇烈天氣監測系統、崩塌地預警系統

Real-Time Early Warning Model of Deep-Seated Landslide

Abstract

Extreme rainfall caused deep landslides on hillslope. The Soil and Water Conservation Bureau planned a large-scale landslide prevention and control plan to install rainfall gauges, groundwater level gauges, and displacement measurement equipment at the landslide area to monitor slope displacement measurements. The purpose of this study is to establish a deep-seated landslide early-warning model using historical observation records. The early-warning principle is to calculate the critical groundwater level of the landslide and develop a groundwater-level prediction model. When the predicted groundwater reaches a critical value, an early-warning mechanism can be issued.

This year, the Zhonglun landslide in Chiayi County was selected, and a database was established by linking the on-site rain gauge, groundwater level gauge and displacement, and connected to the severe weather monitoring system Qpesum (quantitative precipitation estimation and segregation using multiple sensors) of the Central Meteorological Bureau to obtain the forecasted rainfall for the next hour, and then use the developed groundwater level to predict groundwater levels one hour and two hours later. At the same time, a theoretical model and a two-dimensional numerical calculation model are established to calculate the critical groundwater level profile. The analysis results show that the root mean square error of the groundwater level prediction results after one hour is 4cm. According to the data of five rainstorms, Qpesum can predict whether rainfall will occur, but the one-hour predicted rainfall is more than 58% larger than the actual rainfall, which makes the predicted groundwater level higher than the actual groundwater level, and the critical groundwater level of the observation well is calculated in the theoretical analysis mode, and the critical groundwater level profile is calculated by two-dimensional numerical calculation.

Keywords: Deep collapse, critical groundwater level, severe weather monitoring system of Central Meteorological Bureau, collapse warning system

目次

摘要 II

ABSTRACT III

目次 I

表次 IV

圖次 V

第一章　緒論 1

第一節　計畫目標 1

一、 全程目標 1

二、 本年度目標 1

三、 前期成果摘要 1

四、 歷年計畫成果及未來規劃 4

第二節　計畫甘特圖 7

第三節　計畫交付項目 8

第二章　實施方法與步驟 9

第一節　理論發展 10

一、 深層崩塌臨界地下水位及位置 10

二、 地下水位預測 10

第二節　資料收集 11

一、 地文資料 11

二、水文資料 12

第三節　預警系統建立 14

一、 預測流程 14

第三章　理論分析 16

第一節　崩塌地理論臨界地下水位及滲流長度 16

一、 無限邊坡理論模式推導.....17
二、 產生滲流沖刷之最長流線長度.....22
第二節 二維有限元素模式.....28
第三節 線性水庫模式預測地下水位.....30
一、 地下水位擾動方程式推導.....30
二、 數值方法求解.....35
第四章 驗證場域.....37
第一節 水文及地文.....37
一、 地理位置及交通.....37
二、 水文.....38
三、 區域地質及環境地質概述.....40
四、 災害歷史.....42
第二節 崩塌監測.....45
一、 崩塌潛勢.....45
二、 監測設施.....46
三、 地下水流向.....47
四、 地表伸縮計監測.....48
五、 孔內伸縮計監測.....51
第五章 即時系統建置.....52
第一節 資料庫架構.....52
一、 系統建置.....52
二、 監測項目.....53
三、 資料庫建置.....53
第二節 即時資料輸入.....55
一、 現場資料.....55
二、 中央氣象局資料.....56

第三節　網頁展示.....61
一、 首頁地圖.....61
二、 監測站資料查詢.....62
第四節　預測系統.....73
一、 預測系統操作方式.....74
二、 預測系統程式操作.....76
三、預測系統介面.....78
第六章　預測與分析成果.....83
第一節　臨界地下水位及模擬.....83
一、歷史事件一小時降雨模擬.....83
二、 Qpesum 降雨準確度分析.....85
三、 2022 年一小時地下水及地表伸縮量預測.....85
四、 兩小時後地下水位預測.....93
第二節　坡面臨界地下水位預測.....97
第七章 結論與建議.....100
第一節　結論.....100
第二節　建議.....100
參考文獻.....101
期初審查會議回覆表.....103
期中審查會議回覆表.....109
期末審查會議回覆表.....112

表次

表 1 深層崩塌預警計畫成果與展望.....4
表 2 計畫甘特圖.....7
表 3 計畫所需資料.....11
表 4 各類土壤之內摩擦角.....18
表 5 土壤內聚力.....19
表 6 飽和滲流係數.....27
表 7 有限元素法參數.....29
表 8 嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流資訊.....39
表 9 區域歷年災害說明.....43
表 10 中心崙自動監測站.....46
表 11 感測器與對應地區關係表.....53
表 12 資料庫表單說明.....54
表 13 JSL-EL-3 點位地下水模擬參數.....83
表 14 預測暴雨誤差計算.....85
表 15 一小時預測.....86
表 16 兩小時地下水位預測.....93

圖次

圖 1 降雨導致地下水位升高示意圖.....9

圖 2 QPESUMS 資料.....13

圖 3 影響無限邊坡滑動之因子.....16

圖 4 臨界沖蝕試驗.....23

圖 5 實際邊坡滑動面.....27

圖 6 地下水流動概念圖.....31

圖 7 暴雨期間地下水位擾動變化.....34

圖 8 白杞村地理位置圖.....38

圖 9 中心崙崩塌地地理位置圖.....38

圖 10 集水分區圖.....39

圖 11　嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流位置圖.....40

圖 12 五萬分之一區域地質圖.....42

圖 13 歷年災害點位分布圖.....45

圖 14 中心崙推估滑動塊體分佈圖.....46

圖 15 雨量筒遷移位置圖.....47

圖 16 地下水位計位置圖.....47

圖 17 地下水流向分佈成果圖.....48

圖 18 地表伸縮計 JSL-EL-3 位置圖.....49

圖 19　現場儀器配置與監測地表現況.....50

圖 20 地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖.....50

圖 21 孔內伸縮計示意圖.....51

圖 22 孔內伸縮計分佈圖.....51

圖 23 系統架構圖.....53

圖 24 資料庫架構圖.....54

圖 25 中心崙監測原始資料 XML 網頁圖.....55

圖 26 中心崙即時監測原始資料讀檔程式執行圖.....56

圖 27 監測站首頁切換.....62

圖 28 即時預測系統構想.....74

圖 29 工作執行步驟.....76

圖 30 訓練程式.....77

圖 31 模擬程式.....78

圖 32 地表變位、地下水位模擬及降雨關係.....84

圖 33 崩塌地分區.....97

圖 34 M1 二維分析結果.....98

圖 35 M2 二維分析結果.....99

第一章 緒論

大規模崩塌往往導致大量生命財產損失，本計劃希望發展即時崩塌預警系統，計畫目標及實施方法與步驟如下。

第一節 計畫目標

一、全程目標

以位於嘉義縣之中心崙崩塌地為例，搭配現場完善的降雨、地下水等儀器，及已經設置之地下水位及時預警系統，建立整體坡面完善之及時預警系統。

二、本年度目標

持續進行五處地下水井之即時地下水位預測系統維護及精度改善。研判區域二維滑動面，以研判整體地下水位上升趨勢，並據以精準推估臨界地下水位。

三、前期成果摘要

本研究為新提計畫，在 2019-2021 年，連續三年，執行 “整合地文與水文資訊之深層崩塌即時預警模式”，深層崩塌係因為地下水位達到臨界值，導致大規模崩塌發生。水土保持局已針對大規模崩塌區，設立降雨、地下水位及位移之監測站，有部分地區已觀測到發生崩塌之地下水位。根據多年資料，建立以降雨及地下水位為基礎之即時崩塌預警系統，可預估大規模崩塌預警。檢核梨山及中心崙兩處大規模崩塌地，利用線性水庫模式，找出與降雨有關之地下

水位井。建立即時地下水位預測系統，即時進行地下水位運算，可透過網頁查詢下一小時之地下水位。

2019 年至 2021 年前三期成果摘要如下：

(一)2019 年

本研究建立深層崩塌臨界地下水位及臨界滲流長度理論及計算模式，並發展地下水位即時預測系統。首先發展深層崩塌滑移之臨界地下水位及滲流長度理論，建立可能發生位移之地下水位及滲流長度，再應用類神經網路模式，建立以 24 小時降雨及即時地下水位，預測一小時、兩小時後之地下水，並以梨山松茂地區 S1 觀測站為例，進行歷史資料收集及現場土壤採樣，於實驗室進行臨界地下水位及滲流長度理論參數分析，並應用類神經網路，採用 24 小時降雨及即時地下水位，預測一小時、兩小時及三小時後之地下水位。

分析結果如下臨界地下水位分析結果與過去研究結果相近，臨界滲流位置為模擬破壞面上游，需進一步檢核下邊坡主要滲流出口位置。一小時及兩小時地下水位模擬結果預測準確，而三小時預測較不準確，顯示降雨到達地下水位時間少於三小時，未來若能先得知預測降雨量，應可提供較準確預測。

關鍵詞：深層崩塌、臨界地下水位、臨界滲流長度、類神經網路、即時預測

(二)2020 年

本研究發展深層崩塌之地下水位預警系統，首先透過無限邊坡及滲流分析理論與試驗驗證，推得深層崩塌臨界地下水位及

位置，再採用線性水庫及類神經網路兩方式，發展下一小時、兩小時及三小時地下水位。並建立即時水文資料接收系統，即時接收來自崩塌地現場之降雨及地下水位，以建立整合現場雨量及地下水位之崩塌預測系統。

分析結果顯示，線性水庫演算演算在尖峰地下水位，容易高估，其原因可能為滲透係數 K 值高估。前饋式倒傳遞類神經網路一小時及兩小時模擬結果，均方根誤差小於 0.2m，三小時之均方根誤差大於 0.5m，顯示可用於短時間預測。外因輸入非線性自迴歸回饋神經網路，因為有自迴歸回饋，使得一至三小時預測均方根誤差約為 0.25m，可用於三小時預測。

關鍵詞：深層崩塌、地下水位、即時預警系統、線性水庫、類神經網路

(三)2021 年

本研究發展深層崩塌之地下水位預警系統，首先透過無限邊坡及滲流分析理論與試驗驗證，推得深層崩塌臨界地下水位及位置，再採用線性水庫及類神經網路兩方式，發展下一小時、兩小時及三小時地下水位。並建立即時水文資料接收系統，即時接收來自崩塌地現場之降雨及地下水位，以建立整合現場雨量及地下水位之崩塌預測系統。

本年度建立梨山及中心崙即時降雨及地下水位即時接收資料庫及預警網站，先以線性水庫模式，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三處測站，進行線性水庫及類神經網路模式比較，並透過即時分析與即時圖形呈現，建

立即時建立崩塌地即時地下水位預警系統，當預測地下水位達到警戒值，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、即時預警系統、即時分析

四、歷年計畫成果及未來規劃

統整過去三年成果，及未來三年計畫如下，期待成果能被廣泛應用於深層崩塌預警。

表 1 深層崩塌預警計畫成果與展望

計畫名稱	年度	重要成果/預期成果
整合地文與水文資訊之深層崩塌即時預警模式	2019	(1) 研究方法 A. 臨界地下水位：深層崩塌臨界地下水位及臨界滲流長度理論及計算模式。 B. 地下水位即時預測系統：前饋式倒傳遞類神經網路，預測下一小時水位。 (2) 研究地點：梨山崩塌地 (3) 研究結論：模式可準確預測地下水位。
	2020	(1) 研究方法 A. 臨界地下水位：深層崩塌臨界地下水位及臨界滲流長度理論及計算模式。 B. 地下水位即時預測系統：前饋式倒傳遞類神經網路、外因輸入非線性自迴歸回饋神經網路及線性水庫，預測下一小時水位。

		(2) 研究地點：梨山及萬山崩塌地 (3)研究結論：增加三種地下水位演算模式，提高預測地下水位準確性。
	2021	(1) 研究方法 A. 臨界地下水位：深層崩塌臨界地下水位及臨界滲流長度理論及計算模式。 B. 地下水位即時預測系統：線性水庫，整合即時雨量建立即時運算系統，預測下一小時及兩小時水位。 (2) 研究地點：梨山及中心崙崩塌地 (3) 研究結論： A. 建立即時預測地下水位網站，可即時精準預測下一小時地下水位，搭配臨界地下水位，作為發布預警參考。 B. 檢討整治後關係，找出地下水位與降雨關係不明顯之地下水位井。
深層崩塌即時預警模式	2022	(1) 研究方法 A. 臨界地下水位二維剖面：新增二維有限元素法演算模式。 B. 地下水位即時預測系統：線性水庫，整合即時雨量、一小時 Qpesum 預測雨量，提高兩小時後地下水位預測準確性。 (2) 研究地點：中心崙崩塌地 (3)預期結論：

		A. 提高兩小時地下水位預測準確度。 B. 建立二維整體滑動面預測。
	2023	(1) 研究方法 A. 臨界地下水位三維剖面：新增三維有限元素法演算模式。 B. 地下水位即時預測系統：全面性驗證及檢討水土保持局已裝設地下水位計區域。 C. 即時預測成果 APP 程式撰寫。 (2) 研究地點： A. 臨界地下水位：中心崙崩塌地。 B. 地下水位即時預測系統：中心崙崩塌地。 C. 地下水位計檢討:全面性檢討全台灣坡面整治前後，線性水庫參數變化，確認整治成效。 (3)預期結論： A. 提高兩小時地下水位預測準確度。 B. 建立三維整體滑動面預測。 C. 大規模崩塌地整治成效評估。 D. 即時成果 APP 程式。
	2023	(1) 研究方法 D. 臨界地下水位三維剖面：新增三維有限元素法演算模式。

		E. 地下水位即時預測系統：全面性連線水土保持局降雨與地下水位關係明顯區域。 (2) 研究地點： A. 臨界地下水位:降雨與地下水位關係明顯區域。 B. 地下水位即時預測系統:降雨與地下水位關係明顯區域。 (3)預期結論： A. 提供大規模監測即時預測資料，及危險程度評估。 B. 即時預測 APP 回傳。

第二節 計畫甘特圖

預計執行進度如下表所示，預計本年度能夠建立即時預測系統，提供使用。

表 2 計畫甘特圖

任務名稱	日期											
	1 月 27 日	3 月 1 日	4 月 1 日	5 月 1 日	6 月 1 日	7 月 1 日	8 月 1 日	9 月 1 日	10 月 1 日	11 月 1 日	12 月 1 日	12 月 31 日
試區資料收集與決定												
水文資料庫建立												
深層崩塌模式建立												

期中報告撰寫												
臨界地下水位決定												
即時預測系統												
即時地下水位預測發展完成												
期末成果撰寫及修正												

第三節 計畫交付項目

預計交付一套即時地下水位預警系統，內容包括

(1) 即時及歷史水文資料庫：即時及歷史降雨、水位及災害資料庫查詢系統建置。

(2) 歷史地表變位資料庫：收集中心崙區域歷史資料，分析並建立資料庫。

(3) 臨界地下水位：透過模式及歷史資料，建立中心崙臨界地下水位。

(4) 即時地下水位預測：中心崙之地下水位即時預測，預計預測一、二、三小時水位。

(5) 即時地下水位預測系統：即時分析與即時圖形呈現，當預測地下水位達到警戒值，可即時發布警戒。

第二章 實施方法與步驟

Hong (2017) 認為深層崩塌山坡地地下水位在降雨期間，會因為地下水位上升，使得邊坡下滑力增加，導致崩塌可能性增加如圖 1。

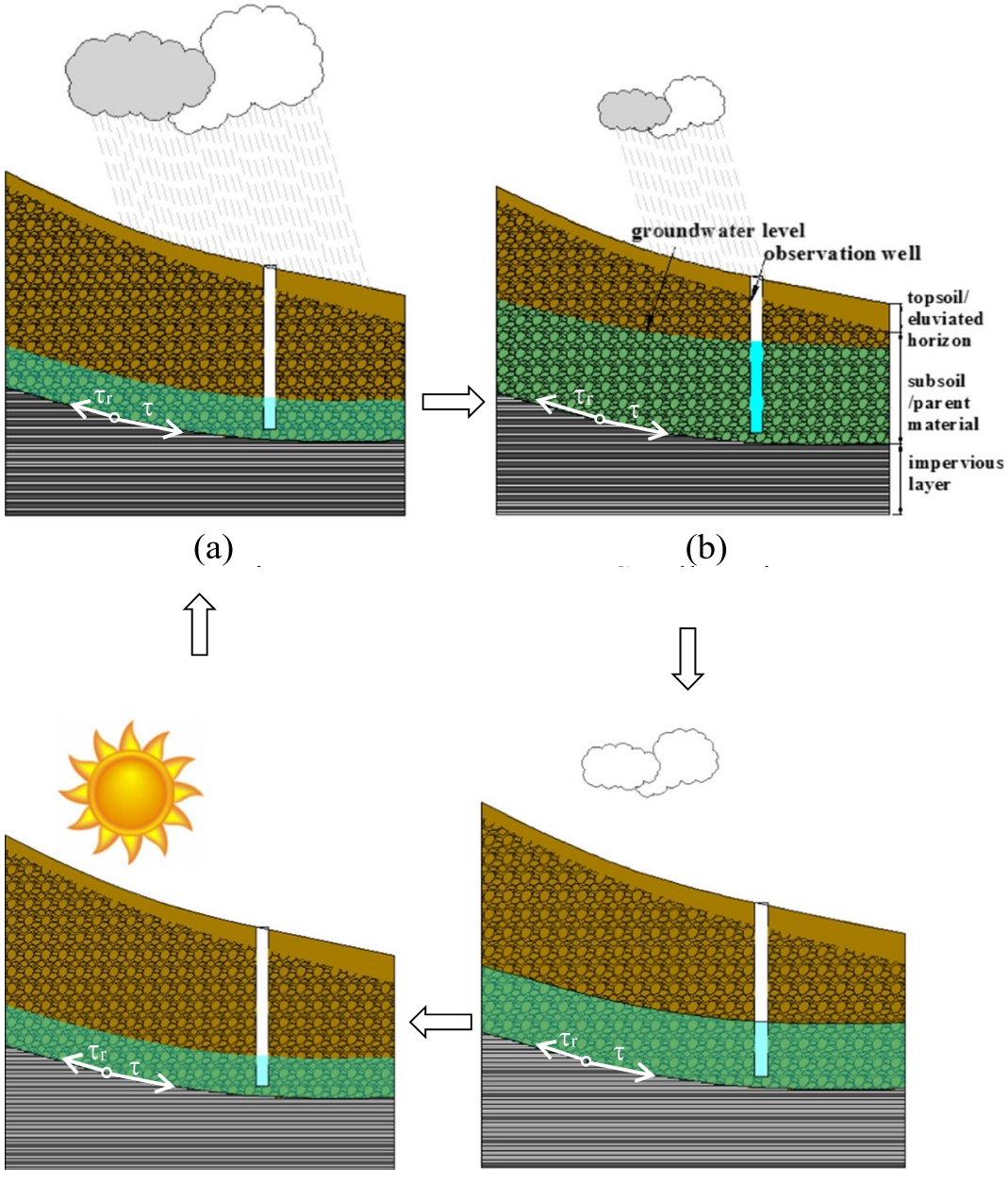


圖 1 降雨導致地下水位升高示意圖

(資料來源：Hong, 2017)

由圖 1 可知，降雨、入滲至地下水位提高，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。

本研究延續前兩年之成果，發展以降雨及地下水預測即時大規模崩塌模式，說明如下：

第一節 理論發展

一、深層崩塌臨界地下水位及位置

(一) 臨界地下水位

以重力理論之無限邊坡理論，推導臨界地下水位。

(二) 滲流長度推估

以無沖蝕濾料試驗，推估泥砂臨界流動之流速，反推崩積層產生滲流最長流線長度，小於或等於滲流長度之土體，為可能移動土體。

二、地下水位預測

(一) 白盒分析：線性水庫模式

線性水庫地下水位預測採用筆者已發表於 nature Hazards 期刊之線性水庫物理模式，收集歷史資料，建立各區域地下水位即時預測模式。

(二) 黑盒分析：類神經網路模式

應用類神經網路模式，包括採用模式包括前饋式倒傳遞類神經網路(Feedforward Back-Propagation Neural Network, FBPNN)

及外因輸入非線性自迴歸(Nonlinear Autoregressive With external Input, NARX)、回饋神經網路(Feedback Neural Networks)。發展預測地下水位模式。

第二節 資料收集

收集目前有即時地下水位及雨量區域，包含地文及水文資料如表 1 所示，說明如下。

一、地文資料

(一) 現場土樣收集

將採集試驗現場破壞面土樣，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。

(二)歷史變位資料收集

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 3 計畫所需資料

名稱	使用目的	格式
預測雨量	預測下二及三小時雨量用	中央氣象局劇烈天氣監測系統 Qpesum
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 c	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

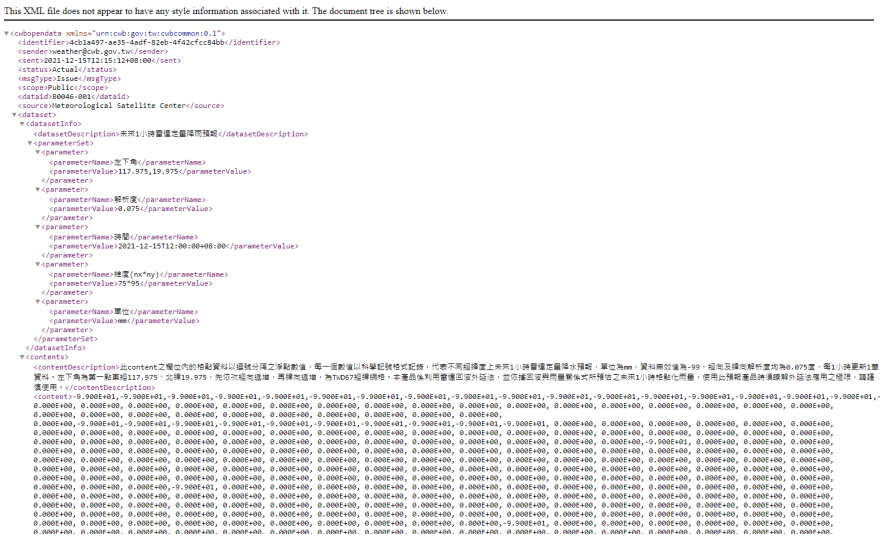
二、水文資料

(一) 中央氣象局劇烈天氣監測系統系統

QPESUMS 1 小時定量降雨預報格點資料，目前已開放下載，下載網址 https://opendata.cwb.gov.tw/dataset/forecast/F-B0046-001，可下載 xml 於瀏覽器開啟，帶入模式，提高預測準確度。



(a)查詢網頁


This XML file does not appear to have any style information associated with it. The document tree is shown below.
<cwbopendata xmlns="urn:cwbigov:tw:cwbcommon:0.1">
<identifier>4cb1a497-ae35-4adf-82eb-4f42cfcc84bb</identifier>
<sender>weather@cwb.gov.tw</sender>
<sent>2021-12-15T12:15:12+08:00</sent>
<status>Actual</status>
<msgType>Issue</msgType>
<scope>Public</scope>
<dataid>B0046-001</dataid>
<source>Meteorological Satellite Center</source>
<dataset>
<datasetInfo>
<datasetDescription>未來1小時雨量定量降雨預報</datasetDescription>
<parameterSet>
<parameter>
<parameterName>左下角</parameterName>
<parameterValue>117.975,19.975</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>解析度</parameterName>
<parameterValue>0.075</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>時間</parameterName>
<parameterValue>2021-12-15T12:00:00+08:00</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>維度(nx*ny)</parameterName>
<parameterValue>75*95</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>單位</parameterName>
<parameterValue>mm</parameterValue>
</parameter>
</parameterSet>
</datasetInfo>
<contents>
<contentDescription>此content之欄位內的格點資料以逗號分隔之浮點數值，每一個數值以科學記號格式記錄，代表不同經緯度上未來1小時雨量定量降水預報，單位為mm，資料無效值為-99，經向及緯向解析度均為0.075度，每1小時更新1筆資料，左下角為第一點資料117.975，光緯19.975，先依次經向遞增，再緯向遞增，為TWD67經緯網格，本產品係利用雷達回波外延法，並依據回波與雨量關係式所預估之未來1小時格點化雨量，使用此預報產品時須瞭解外延法應用之極限，謹請慎使用。</contentDescription>
<content>-9.900E+01,-
0.000E+00, 0.000E+00,
0.000E+00, 0.000E+00,
0.000E+00,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00,
0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00, 0.000E+00

本年度選定有歷史及即時降雨、地下水位及位移監測站，且將與與地下水位資料之測站，即時讀取資料，建立資料庫網站，透過所發展模式進行即時預測。

第三節 預警系統建立

即時預測系統建立採用筆者發表於Environ Monit Assess之即時監測系統，建立即時預測程式如下：

一、預測流程

(一)警戒值訂定

根據理論模式，算出地下水位警戒值，並與原有收集資料相互比對。同時推算最長滲流長度，比對原有破壞面假設滲流位置，並至現場勘查確認歷史滲流位置，確認滲流是否在最長滲流長度之上，藉以推估可能移動土體。

(二) 資料庫建置

將所選定之現場，收集現場地下水位及雨量即時及歷史資料，建立二階正規劃即時資料庫，提供即時地下水位演算之用。

(三) 地下水位即時預測

先將現場地下水位及雨量歷史資料，代入本研究所發展之雨模式，經過校準(Calibration)、驗證(Verification)及確認

(Validation)之後，推得模式所需參數，輸入即時地下水位、雨量，預測下一小時、兩小時及三小時預測地下水位。

(四) 即時預警平台建置

1. 利用預先已經模擬成功之參數，帶入即時水位及降雨資料，預測一、二、三及四小時之地下水位，並於系統上即時做地下水位圖形及數據展示。
2. 整合收集之地文、水文資料及即時分析資料，完成線上即時預警平台，提供直接預警用途。
3. 若地下水位已達警戒值，則於網頁上提出警戒值。

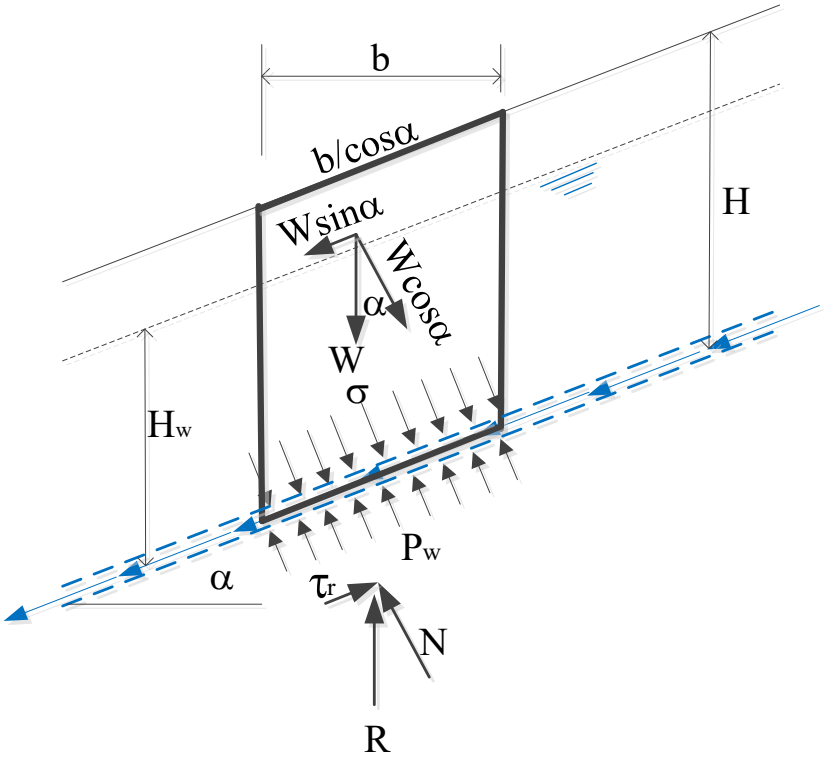
第三章 理論分析

第一節 崩塌地理論臨界地下水位及滲流長度

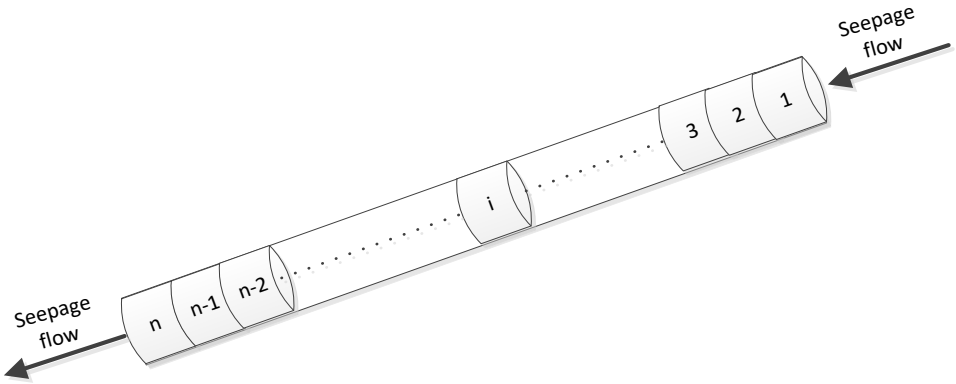
圖 3 影響無限邊坡滑動之因子，顯示重力效應、地下水及滲流

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



(a) Infinite slope



(b) Seepage erosion occurring in the slip surface

圖 3 影響無限邊坡滑動之因子

一、無限邊坡理論模式推導

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)等於阻抗力(τ_r)時，稱為臨界條件，正向力、上舉例及剪應力之關係如下：

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

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

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

式中α為滑動面角度；γ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、阻抗力、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 4 各類土壤之內摩擦角

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-garded 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	
Calyey 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	

表 5 土壤內聚力

土壤特性	USCS 分類	內聚力 Cohesion [kPa]		
		min	max	Specific value
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	-	-	0

Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	-	-	0
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	-	-	0
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	-	-	20
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	-	-	0
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	-	-	0
Silty sands	SM	-	-	22
Silty sands - Saturated compacted	SM	-	-	50
Silty sands - Compacted	SM	-	-	20
Clayey sands	SC	-	-	5
Clayey sands - Compacted	SC	-	-	74
Clayey sands -Saturated compacted	SC	-	-	11
Loamy sand, sandy clay Loam - compacted	SM, SC	50	75	
Loamy sand, sandy clay Loam - saturated	SM, SC	10	20	
Sand silt clay with slightly plastic fines - compacted	SM, SC	-	-	50
Sand silt clay with slightly plastic fines - saturated compacted	SM, SC	-	-	14
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	-	-	7
Inorganic silts and clayey silts - compacted	ML	-	-	67
Inorganic silts and clayey silts - saturated compacted	ML	-	-	9
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	-	-	4
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity - compacted	CL	-	-	86
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity - saturated compacted	CL	-	-	13
Mixture if inorganic silt and clay - compacted	ML-CL	-	-	65

Mixture if inorganic silt and clay - saturated compacted	ML-CL	-	-	22
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	-	-	5
Inorganic silts of high plasticity - compactd	MH	-	-	10
Inorganic silts of high plasticity - saturated compacted	MH	-	-	72
Inorganic silts of high plasticity	MH	-	-	20
Inorganic clays of high plasticity	CH	-	-	25
Inorganic clays of high plasticity - compacted	CH	-	-	103
Inorganic clays of high plasticity - satrated compacted	CH	-	-	11
Organic clays of high plasticity	OH	-	-	10
Loam - Compacted	ML, OL, MH, OH	60	90	
Loam - Saturated	ML, OL, MH, OH	10	20	
Silt Loam - Compacted	ML, OL, MH, OH	60	90	
Silt Loam - Saturated	ML, OL, MH, OH	10	20	
Clay Loam, Silty Clay Loam - Compaced	ML, OL, CL, MH, OH, CH	60	105	

Clay Loam, Silty Clay Loam - Saturated	ML, OL, CL, MH, OH, CH	10	20	
Silty clay, clay - compacted	OL, CL, OH, CH	90	105	
Silty clay, clay - saturated	OL, CL, OH, CH	10	20	
Peat and other highly organic soils	Pt	-	-	

二、產生滲流沖刷之最長流線長度

對於具備鬆軟土石且滲流發達之邊坡，滲流沖刷往往導致崩塌原因之一，滲流流過土壤時，若壓力不大則不會引起土壤流失，若水壓力過大，則產生管湧沖蝕(piping erosion)，造成土壤流失，例如Okeke & Wang (2016)進行實驗室崩塌邊坡試驗，找出滲流導致崩塌破壞之滲流梯度。若崩塌地土壤為砂質土壤，則滲流沖刷為造成邊坡崩塌之主要因素，因此以無沖蝕濾料試驗(No Erosion Filter Test, NEFT)設備(Hong et. al., 2011)，進行產生滲流沖刷之臨界沖蝕試驗（Critical Erosion Test, CET），如圖 4 臨界沖蝕試驗，為 CET 標準構造，上方施加壓力 P1，為使壓力平均分佈，土壤上下方均設置一層礫石實驗時先在土體中心插一針頭大小的縫，當土壤產生滲流破壞，便會於中心產生較大孔隙，並形成管道破壞。

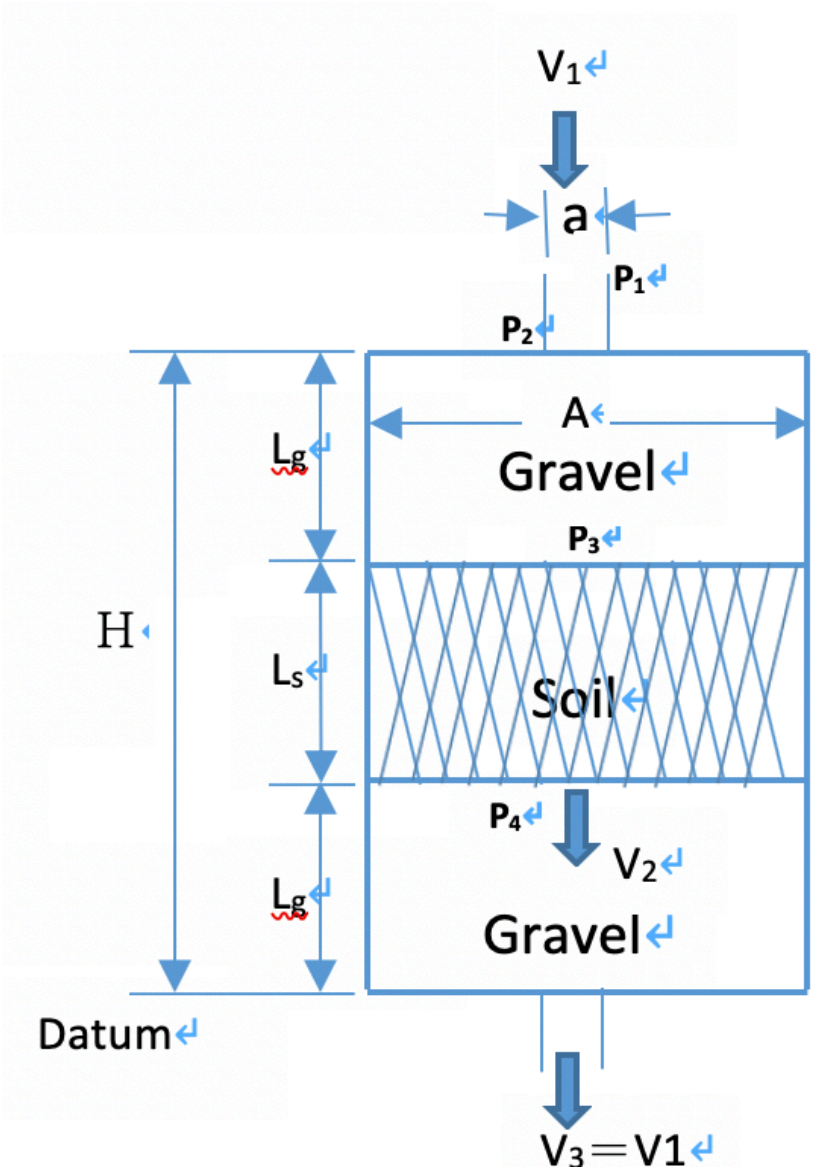


圖 4 臨界沖蝕試驗

依據伯努利定理(Bernoullis Equation)，可推得

$$\frac{P_1}{\gamma}+H+\frac{V_1^2}{2g}=\frac{P_2}{\gamma}+H+\frac{V_2^2}{2g}+\Delta H$$

假設由入口管路放大至試驗柱體能量損失ΔH忽略不計，推得

$$\Rightarrow\frac{P_2}{\gamma}=\frac{P_1}{\gamma}+\frac{1}{2g}(V_1^2-V_2^2)$$

根據連續方程式，$V_1a=V_2A$，推得下式

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}\left[1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2\right] \qquad (4a)$$

進一步由總水頭能量經過上方礫石、土壤、下方礫石及出口管路之後，總水頭出口壓力為 0，根據能量方程式，推得

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + \mathrm{H} = \Delta H_g + \Delta H_s + \Delta H_g + \Delta H_f + \frac{V_3^2}{2g} \qquad (4b)$$

式中ΔH_g、ΔH_s、ΔH_g、ΔH_f分別為流經上方礫石、土壤、下方礫石及管路損失，設管路損失不計，$L_g=H_g$, $L_s=H_s$。根據達西定律，可推得流速公式及水頭損失如下：

$$V_2 = K_g \frac{\Delta H_g}{L_g} = K_s \frac{\Delta H_s}{L_s}$$

$$\Rightarrow \Delta H_g = \frac{L_g V_2}{K_g}, \Delta H_s = \frac{L_s V_2}{K_s}$$

帶入(4b)式，推導如下：

$$\Rightarrow \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + H = \left(\frac{2L_g}{K_g} + \frac{L_s}{K_s}\right) V_2 + \frac{V_3^2}{2g} + \Delta H_f$$

$$\Rightarrow \frac{P_2}{\gamma} = \left(\frac{2L_g}{K_g} + \frac{L_s}{K_s}\right) V_2 + \frac{1}{2g}(V_3^2 - V_2^2) + \Delta H_f - H \qquad (4c)$$

(4a)式等於(4c)式，且 $V_1=V_3$，消除共通項，可推得

$$\Rightarrow \frac{P_1}{\gamma} = \left(\frac{2L_g}{K_g} + \frac{L_s}{K_s}\right) V_2 + \Delta H_f - H \qquad (4d)$$

P_3 亦可由伯努利定理(Bernoulli’ s Equation)，推算如下：

$$\frac{P_2}{\gamma}+H+\frac{V_2^2}{2g}=\frac{P_3}{\gamma}+(H-H_g)+\frac{V_2^2}{2g}+\Delta H_g$$

推得

$$\boxed{\frac{P_3}{\gamma}=\frac{P_2}{\gamma}+H_g-\frac{V_2 L_g}{K_g}} \quad (4e)$$

將(4a)帶入(4e)式，最後推得施於土體之壓力為

$$\boxed{\frac{P_3}{\gamma}=\frac{P_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}\left[1-\left(\frac{a}{A}\right)^2\right]+H_g-V_1\frac{L_g}{K_g}\left(\frac{a}{A}\right)} \quad (4f)$$

此外，土體下方 P_4 可推算如下：

$$\boxed{\frac{V_2^2}{2g}+\frac{P_3}{\gamma}+(\mathrm{H}_s+\mathrm{H}_g)=\frac{P_4}{\gamma}+\Delta H_s+\mathrm{H}_g+\frac{V_2^2}{2g}}$$

實際施加於土體之壓力，可由 P_3 與 P_4 之壓力差獲得如下式：

$$\boxed{\frac{\Delta P_s}{\gamma}=\frac{P_3}{\gamma}-\frac{P_4}{\gamma}=H_s+\Delta H_s}$$

$$\boxed{\frac{\Delta P_s}{\gamma}=\mathrm{H}_s\left(1+\frac{V_2}{K_s}\right)} \quad (4g)$$

$$\boxed{\frac{\Delta P_s}{\gamma}=\mathrm{H}_s\left(1+\frac{aV_1}{AK_s}\right)} \quad (4h)$$

當量測出產生管湧的流速，便可以由(4h)式，推得直接施加於土體臨界壓力ΔP_s。ΔP_s 可定義為流經土體高度及長度均為 H_s，產生滲流破壞之臨界壓力，與流經土體高度差、土壤達西定律滲透係數及滲流速度有關。

但實際上流經邊坡，滲流方向如圖 4，假設滲流速度不變，可由能量方程式建立下式

$$\frac{P}{\gamma}+\frac{V^2}{2g}+H_p=\frac{V^2}{2g}+\Delta H \tag{4i}$$

(4i)式中，壓力水頭$\frac{P}{\gamma}=H_w$，H_p為位置水頭，為量測水位位置底部與坡底高差，ΔH為水頭損失，可用達西定律推估得$\Delta H=\frac{LV}{K_s}$，L 為滲流長度，V 為滲流速度，帶入(4i)式，推得

$$L=\frac{K_s}{V}\left(H_w+H_p\right) \tag{4j}$$

(4j)式為滲流長度，當流速達到滲流破壞強度，則產生滲流破壞，此時 L 為滲流破壞最長長度,若滲流流線長度短於 L,則產生滲流破壞。(4j)式可解釋為，邊坡破壞若考慮管湧導致之滲流破壞現象，則須考慮流線長度，流線長度可由實驗室獲得臨界啟動流速、達西定律滲流係數，與無限邊坡理論整合，推得產生滲流之最長邊坡流線長度，若滲流長度小於(4j)式，則崩塌可能性增加，若滲流長度比(4l)式長，則降低崩塌可能性，實務解釋上，例如增加擋土牆，讓流路變長，則會使流線長度變長，防止崩塌產生，而推估滑動面以下土體，則與滑動破壞無關，不過本研究假設為均勻土體，為理想假設，現地往往為混

合土、砂及石頭堆積，且土壤壓密度不一，因此理論值僅提供參考，需到現場近一步踏勘驗證。

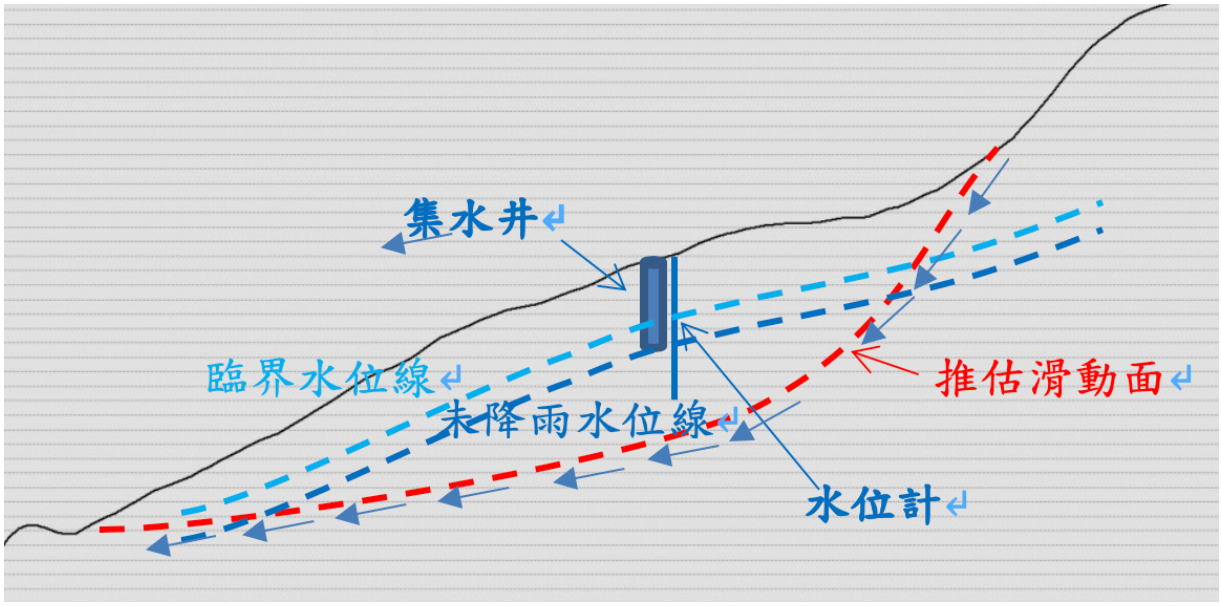


圖 5 實際邊坡滑動面

表 6 為飽和滲透壓（Geotechdata.inf, 2013），可提供未來現地土壤飽和滲透係數使用依據。而引起滲流之臨界壓力，目前尚無相關資料可以參考，本年度將持續研究，建立不同種類土壤之滲流速度，提供滲流破壞長度分析依據。

表 6 飽和滲流係數

土壤特性	USCS 分類	最小滲透係數 min (m/s)	最大滲透係數 max (m/s)
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	5.00E-04	5.00E-02
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	5.00E-04	5.00E-02
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	5.00E-08	5.00E-06
Alluvial sand and gravel	(GM)	4.00E-04	4.00E-03

Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	5.00E-09	5.00E-06
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	1.00E-08	1.00E-06
Very fine sand, very well sorted	(SW)		
Medium sand, very well sorted	(SW)		
Coarse sand, very well sorted	(SW)		
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	2.55E-05	5.35E-04
Clean sands (good aquifers)	(SP-SW)	1.00E-05	1.00E-02
Uniform sand and gravel	(SP-GP)	4.00E-03	4.00E-01
Well graded sand and gravel without fines	(GW-SW)	4.00E-05	4.00E-03
Silty sands	SM	1.00E-08	5.00E-06
Clayey sands	SC	5.50E-09	5.50E-06
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	5.00E-09	1.00E-06
Inorganic clays, silty clays, sandy clays of low plasticity	CL	5.00E-10	5.00E-08
Organic silts and organic silty clays of low plasticity	OL	5.00E-09	1.00E-07
Inorganic silts of high plasticity	MH	1.00E-10	5.00E-08
Inorganic clays of high plasticity	CH	1.00E-10	1.00E-07
Compacted silt	(ML-MH)	7.00E-10	7.00E-08
Compacted clay	(CL-CH)	-	1.00E-09
Organic clays of high plasticity	OH	5.00E-10	1.00E-07
Peat and other highly organic soils	Pt	-	-

第二節 二維有限元素模式

採用 COMSOL Multiphysics 模式，以有限元素法進行二維模式分析，來比較上節所計算出之臨界地下水位之數值差異，以求得更符合本計畫區之臨界地下水位位置，而本新增方法係以達西定律代表地下水之流動，採用無限邊坡理論，應用 Mohr-Coulomb 模式及安全係數(Factor of safety, FOS)，使用剪以達西定律代表地下水之流動，應用

無限邊坡理論，應用 Mohr-Coulomb 模式及安全係數(Factor of safety, FOS)，使用剪力折減法(Shear Strength Reduction Method, SSRM) 如以下公式：

$$C' = \frac{C}{FOS} \tag{1}$$

$$\emptyset' = \text{atan}\left(\frac{\tan \emptyset_u}{FOS}\right)(p < 0) + \text{atan}\left(\frac{\tan \emptyset_s}{FOS}\right)(p \geq 0) \tag{2}$$

式中，C 為內聚力(cohesion)，C'為折減內聚力(reduced cohesion)，∅' 為折減內摩擦角(angle of friction)，Φ_u 為非飽和土壤內摩擦角，Φ_s 為飽和土壤內摩擦角，p 為孔隙水壓(pore water pressure)，(2)式表示於非飽和土壤，孔隙水壓小於 0，飽和土壤時孔隙水壓大於 0。

本法所用參數如表 2，除土壤單位重、內摩擦角及土壤剪力強度，引入孔隙率(Porosity)、楊氏模數(Young's modulus)、泊松比(Poisson's ratio)及安全係數(Factor of Safety)

表 7 有限元素法參數

參數名稱	數值	參數說明
E_soil	100[MPa]	Young's modulus
nu_soil	0.5	Poisson's ratio
rho_soil	2100[kg/m^3]	Soil density
rho_wat	1000[kg/m^3]	Water density

psi	0.3[1]	Porosity
c	0[kPa]	Cohesion
phi_sat	28[deg]	Friction angle for saturated soil
phi_un	27[deg]	Friction angle for unsaturated soil
FOS	1	Factor of Safety

第三節 線性水庫模式預測地下水位

本研究採用計畫主持人發展(Hong & Wan, 2011)之線性水庫模式，來預測地下水如下：

一、地下水位擾動方程式推導

圖 6(a)為降雨至水流流至河川之過程，可用水文連續方程式(Chw et al. 1988) 描述水在土壤移動過程

$$\frac{dS}{dt} = I - O \tag{5}$$

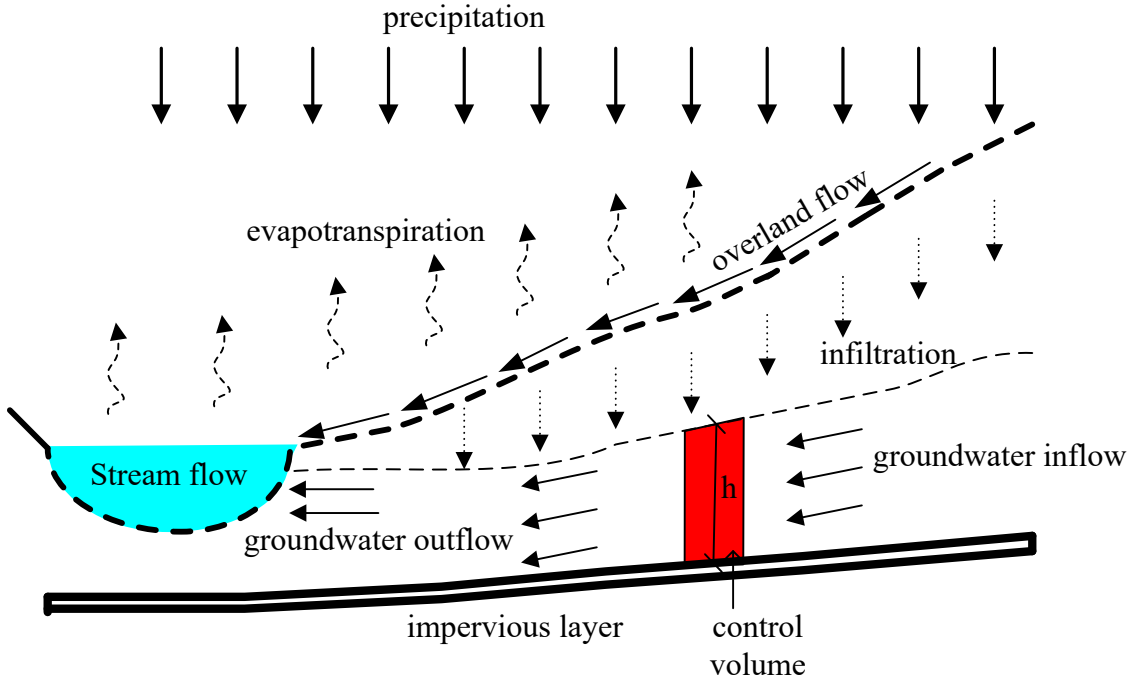
式中 S 為水之儲蓄體積; I 為入流率，包括地下水流入及入滲；O 為地下水出流率。 S 可用單位面積 L 之含水量表示如下(Rasmussen & Andreasen, 1959):

$$S = phL \tag{6a}$$

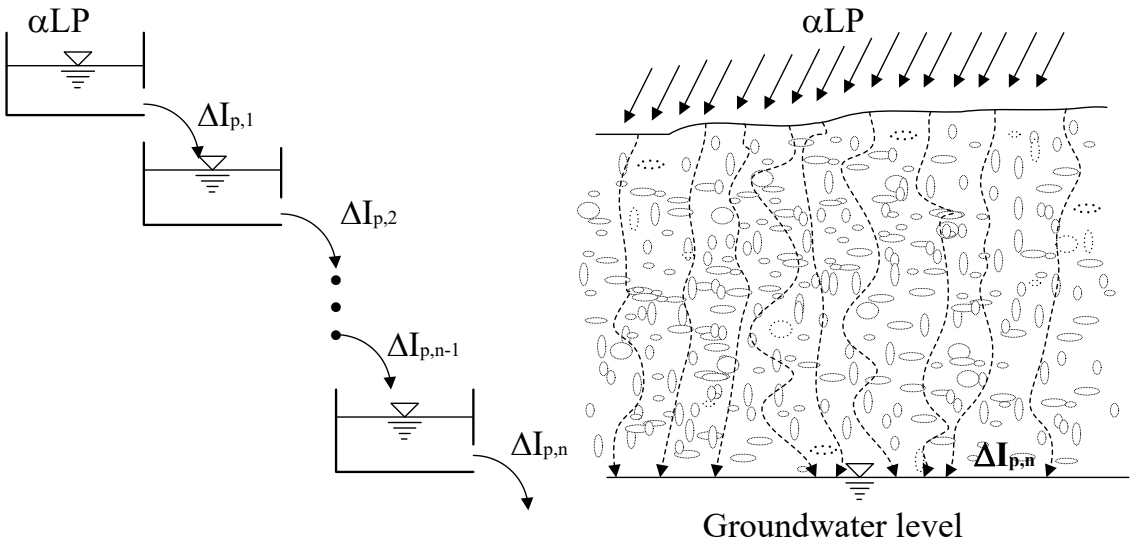
式中 p 為單位面積孔隙率，h 為水深(Maréchal et al. 2006; Park & Parker 2008; Sophocleous 1991)，S 對時間微分為

$$\frac{dS}{dt} = pL\frac{dh}{dt} \tag{6b}$$

(一)降雨入滲率



(a) Water travel process from precipitation to stream



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

圖 6 地下水流動概念圖

圖 6(a)顯示水之入流可表示如下：

$$I = I_p + I_g \tag{7a}$$

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

$$I_p = \left[P_r - \left(E_r + O_r + S_r\right)\right]L \tag{7b}$$

Wu et al. (1996) 透過迴歸分析，推得降雨與入滲關係如下

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

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

$$I_{p,d} = \alpha P_{r,d} L \tag{7d}$$

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稽由 n 個線性水庫來表示，每個水庫有相同的儲蓄常數β. 圖 6(b)為線性水庫概念圖，第一個線性水庫流量$\Delta I_{p,1}(t)$ 為入滲率除以儲蓄常數，將(7d)式代入，可推得降雨量之函數$\alpha LP(t)$:

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

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：

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

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

$$t_p=\beta(n-1) \tag{7g}$$

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

(7g)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

$$I_{p,N}(t)=\alpha L\left(P_1H(N\Delta t)+P_2H[(N-1)\Delta t]+\ldots+P_mH[(N-m+1)\Delta t]+\ldots+P_NH[\Delta t]\right)$$

$$=\alpha L\sum_{m=1}^{N}P_mH[(N-m+1)\Delta t] \tag{7i}$$

式中 N 為因為 n 及 β ，導致入滲綠結果之影響區間。

(二) 地下水流率

圖 7(a)說明地下水控制體積，入滲率 I_p、地下水入流 I_g 及出流率 O_g 之相互關係，圖 7(b)-(e)，則說明交互作用導致地下水位上升及下降之其過程。

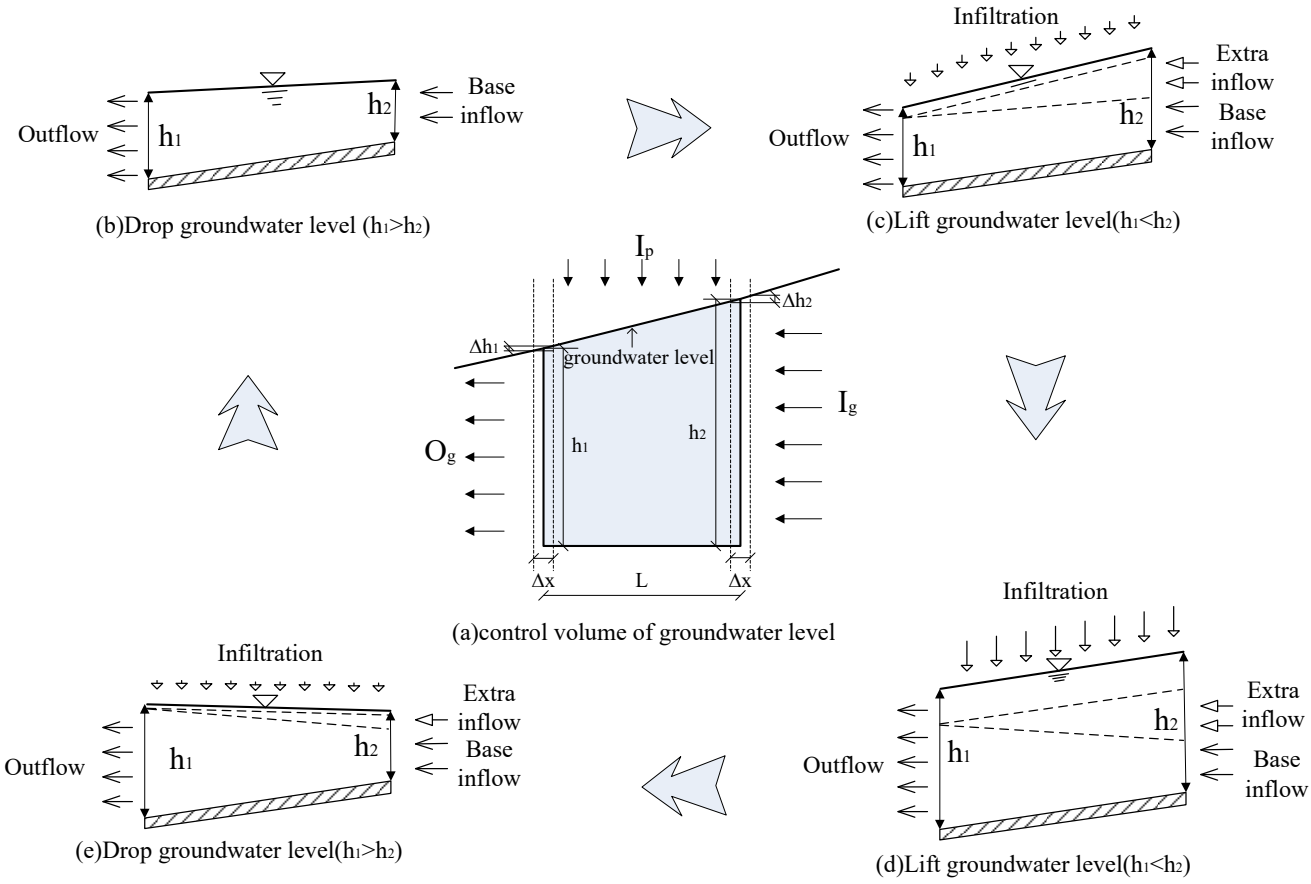


圖 7 暴雨期間地下水位擾動變化

經由 Darcy’s law，地下水入流率可表示為

$$I_g = k\frac{\Delta h_2}{\Delta x}h_2 \tag{8a}$$

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

$$O_g = k\frac{\Delta h_1}{\Delta x}h_1 \tag{8b}$$

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 0_g 差值為

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

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

$$I_g - O_g = KS = KpLh \tag{8d}$$

式中 $K=\frac{-ki}{ph}\frac{\Delta h}{\Delta x}$ 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：

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

式中 A 為集水區面積

二、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

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

式中 $I=\frac{\alpha}{p}(A+1)$ ，為大於 0 之值，定義為上升數(Rise Number)，而 $I\sum_{m=1}^{N}P_m H\left[(N-m+1)\Delta t\right]$ 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

$$\frac{\Delta h}{\Delta t}=f(t,h) \tag{9b}$$

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

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

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

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

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

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 $\frac{1}{2}\left(I\sum_{m=1}^{N} P_m H\left[(N-m+1)\Delta t\right] + I\sum_{m=2}^{N+1} P_m H\left[(N-m+1)\Delta t\right]\right)$ 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

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

(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。

第四章 驗證場域

本計畫引用水土保持局位於嘉義縣中心崙之即時監測站，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，並建立即時預警系統。摘錄水土保持局(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，簡述中心崙地區如下：

第一節 水文及地文

一、地理位置及交通

中心崙崩塌地位於嘉義縣竹崎鄉白杞村內，位處於竹崎鄉南方，東鄰文峰村，東南鄰桃源村，西南隔濁水溪與內埔村為鄰，北鄰塘興村，如圖 8 白杞村地理位置圖所示，位於非都市計畫區內，境內屬山村型態，其聚落位置較為分散，聚落則包括有學仔、溪坪、田中央、大園、田仔坑、後山、大坪、六火灶、後山田、井仔頭、嶺尾、湖仔嶺及本計畫區之中心崙。

計畫區域係位於阿里山山脈西側之嘉義丘陵地區，區域內東南側無名山(海拔 468 公尺)，該山峰為區域地形之相對高點，本案之區域地形如下圖所示。地勢分別由其朝向北、西北漸低，其中朝北方漸低至樟樹坪溪，地形高差從 265~440 公尺，地勢平緩平均坡度約 15~30%左右。

交通方面，本計畫區域之交通以公路及產業道路為主，可由嘉義縣竹崎鄉內埔村沿鄉道嘉 128 線向東而行，經濁水溪而過仁博橋約 100 公尺，轉鄉道嘉 128-1 線(樟樹坪路)行約 2 公里後而抵達本案計畫區域；每逢颱風豪雨過後，常造成崩塌地內之道路下陷，而無法通

行，因此本區之替代道路為東邊南北方向之鄉道嘉 119 線道路及南邊東西方向之鄉道嘉 128 線道路。



圖 8 白杞村地理位置圖

(修改自嘉義縣竹崎戶政事務所網頁)



圖 9 中心崙崩塌地地理位置圖

二、水文

本計畫區域屬朴子溪支流之塘下寮子集水區(編號：1550002)，如圖 10 集水分區圖所示，集水區分區由塘下寮、樟腦寮、大竹圍與朴子溪下游組成，坡趾處則為朴子溪上游支流樟樹坪溪，亦為嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流，該溪流於坡趾處由東向西通過本計畫區域北側，根據行政院農業委員會水土保持局「土石流防災資訊網」，相關資訊如表 8 嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流資訊及圖 11 嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流位置圖所示。

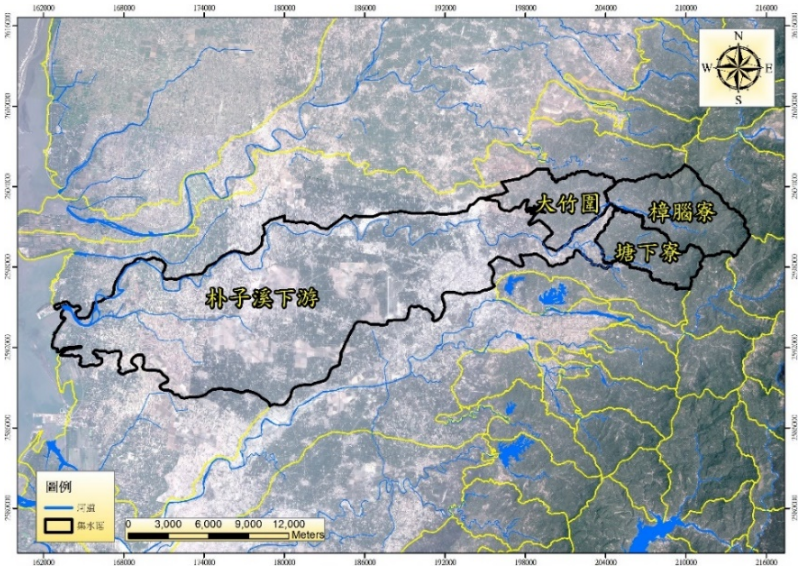


圖 10 集水分區圖

表 8 嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流資訊

座標(TW97)	(207211, 2599242)	長度(m)	3,252
地標	仁淵橋	型式	溪流型
警戒值(mm)	350	集水面積(公頃)	223.8
土地類別	山坡地	岩性	砂岩、粉砂岩、頁岩、泥岩
風險潛勢等級	高	初估保全對象	無

資料來源：行政院農業委員會水土保持局「土石流防災資訊網」



圖 11 嘉縣 DF015 土石流潛勢溪流位置圖

資料來源：行政院農業委員會水土保持局-土石流防災資訊網

三、區域地質及環境地質概述

參考經濟部中央地質調查所「集水區地形及地質資料庫」成果查詢系統，如圖 12 五萬分之一區域地質圖所示，概述本計畫之區域地質如下。

(一)地質材料

本計畫區域主要出露岩層為六重溪層，年代為上新世晚期至更新世早期，岩性上以細粒至粉砂質層狀砂岩為主，顏色淡灰至灰色，風化後常呈黃棕色。砂岩多純淨，局部含泥質。

(二) 地層構造

本計畫附近區域構造(斷層及背斜)，其走向大致為北北東，顯見區域內之大地應力方向應來自東南方，惟部分區段因受西北向之橫移斷層截切及西北側北港高區影響，而異常向西或向南北方向彎

曲突出。本計畫區域主要地質構造為觸口斷層及水道背斜，茲說明如下：

1.觸口斷層

本計畫區域附近之主要斷層為觸口斷層，其斷層略呈南北走向，距離本案東方約 1 公里左右。觸口斷層為台灣西南部一條重要之的構造線，在地質上為台灣西部麓山帶內褶皺衝斷帶與外褶皺衝斷帶的界線，地形上為東側覆瓦狀逆衝斷層山地與西側丘陵平原區間的分界線。觸口斷層在近地表處為一高角度逆斷層，但在竹崎以東斷層斜切上盤地層而呈一低角度衝上斷層，故在局部地點斷層面傾角不致太大，且被認為在地下可能趨於平緩而成為一低角度之基底斷層(耿文溥，1986)。

2.水道背斜

水道背斜呈南北走向通過本調查區，地層傾向以 10~15 度約略向北傾沒。另本案區域邊坡坡向朝北，與地層傾向大致一致，屬於順向坡。

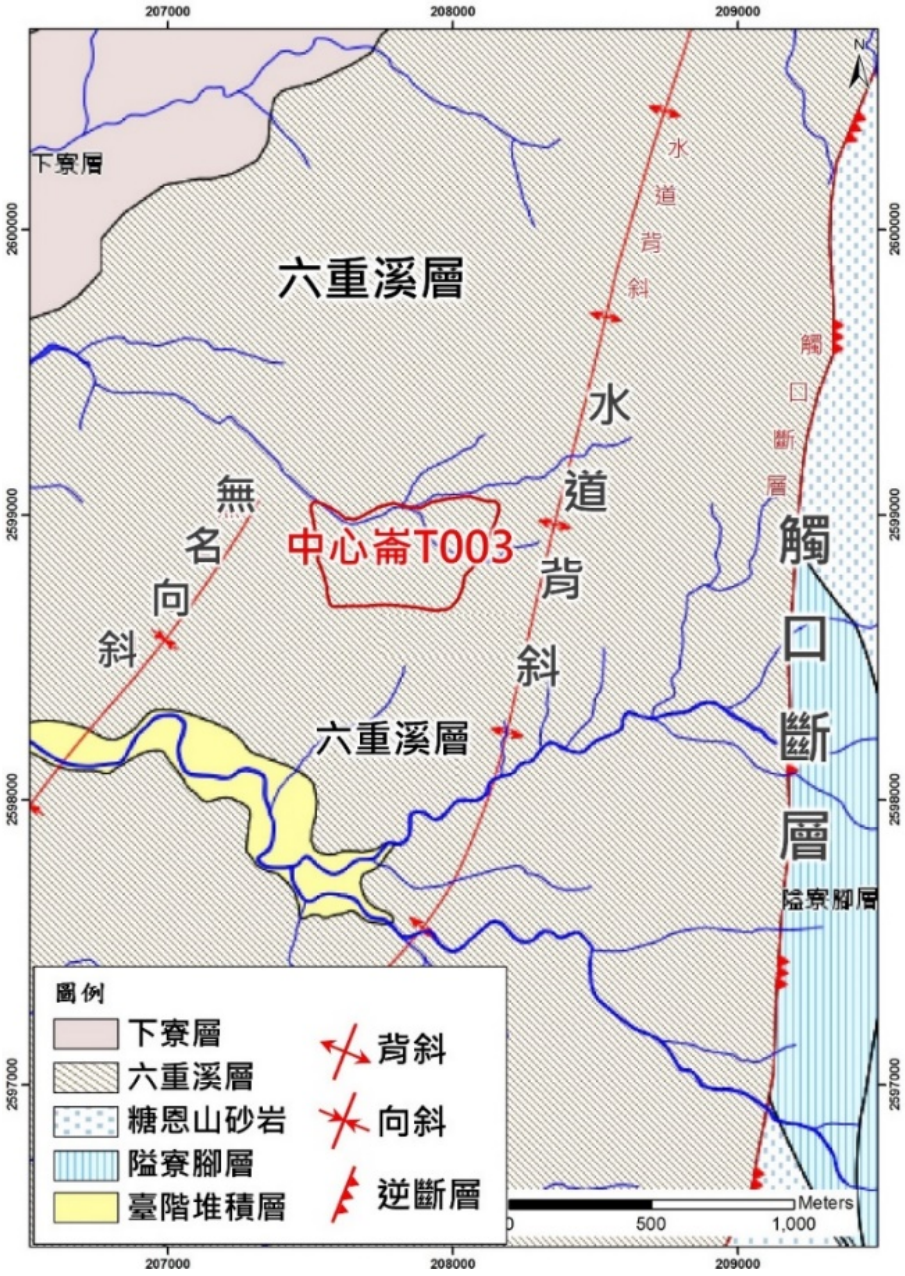


圖 12 五萬分之一區域地質圖

修改來源：中央地質調查所，集水區地形及地質資料庫-成果查詢系統

四、災害歷史

經由水土保持局南投分局長官、學者及當地居民口述，於民國 70 年代即開始有災害發生，由於年代久遠無照片資料保存，綜整本案 2006~2020 年相關大降雨及颱風等災情資料，如表 9 區域歷年災害說明所示。

其中歷經 2006 年 0609 超大豪雨事件，使鄉道嘉 128-1 線道路產生大規模損毀；2009 年辛樂克及薔蜜颱風期間，高強度降雨造成多處崩塌；於 2012 年蘇拉颱風帶來之豪雨，引起之邊坡滑動；2017 年 0601 大雨事件，造成區域內部份道路產生損壞；2018 年 0823 熱帶低壓影響，部份道路及邊坡產生崩塌災害(發生於未進行坡面排水改善區域為主)；2019 年梅雨期間，集水井水位異常升高及地表發生張力裂縫；2019 年 0813 豪雨期間，鄉道嘉 128-1 線道路下陷毀損、土石籠靜水池基礎淘刷；2020 年中心崙計畫區年雨量約 1,500 公釐，相較於歷年雨量約少了 700 公釐，地表及地層變化相對歷年監測值亦小了許多。由災害歷史顯示本計畫區經重大颱風及降雨事件後，區域邊坡造成多處較大規模崩塌災害及道路中斷等災害，除影響主要鄉道嘉 128-1 線道路(樟樹坪路)之通行安全外，亦對居民生命財產造成潛在威脅。

表 9 區域歷年災害說明

災害名稱	年份(西元)	發生時間	主要災情概述
‧中心崙崩塌潛勢區由 1977 年航空影像顯示，邊坡有滑動跡象。			
0609 超大豪雨事件	2006	06/09~06/10	‧農路道路產生較大規模損壞
碧利斯颱風		07/12~07/15	‧局部邊坡裸露、崩塌 ‧農路道路局部毀損
辛樂克颱風	2008	09/11~09/16	‧局部邊坡裸露、崩塌 ‧農路道路局部毀損
薔蜜颱風		09/26~09/29	‧嘉 128 線、嘉 128-1 線，道路上、下邊坡崩塌 ‧道路嚴重錯動破損，部分擋土牆傾倒損壞，規模約 20 公頃
莫拉克颱風	2009	08/05~08/10	‧局部邊坡裸露、崩塌 ‧農路道路局部坍塌，影響交通
蘇拉颱風	2012	07/30~08/03	‧道路下邊坡嚴重塌陷，多處裂縫明顯擴大趨勢
蘇力颱風	2013	07/11~07/13	‧農路道路持續位移、下陷

災害名稱	年份(西元)	發生時間	主要災情概述
康芮颱風		08/27~08/29	‧農路道路持續位移、下陷
蘇迪勒颱風	2015	08/06~08/09	‧上下邊坡較嚴重滑動現象 ‧農路道路嚴重損毀
0611 大雨事件	2016	06/09~06/13	‧連續降雨坡面產生滑動 ‧集水井工程約於地下 5 公尺滑動剪斷
梅姬颱風		09/28~09/29	‧嘉 128-1 線全長約 500 公尺嚴重損毀，道路中斷，規模約 15 公頃
0601 大雨事件	2017	06/01~06/03	‧嘉 128-1 線全長約 200 公尺道路嚴重龜裂，道路中斷
尼莎、海棠颱風		07/29~07/31	‧嘉 128-1 線全長約 200 公尺嚴重損毀，道路中斷
0619 大雨事件	2018	06/18~06/20	‧嘉 128-1 線道路局部出現龜裂、破損
0823 熱帶低壓		08/23~08/24	‧上邊坡持續崩塌,且有新增崩塌 ‧嘉 128-1 線仍有多處路段損毀
2019 年梅雨季	2019	5、6 月	‧集水井水位異常上升 ‧集水井周圍產生張力裂縫
2019 年 0813 豪雨	2019	08/13~08/16	‧鄉道嘉 128-1 線道路下陷、毀損。 ‧土石籠靜水池基礎淘刷流失

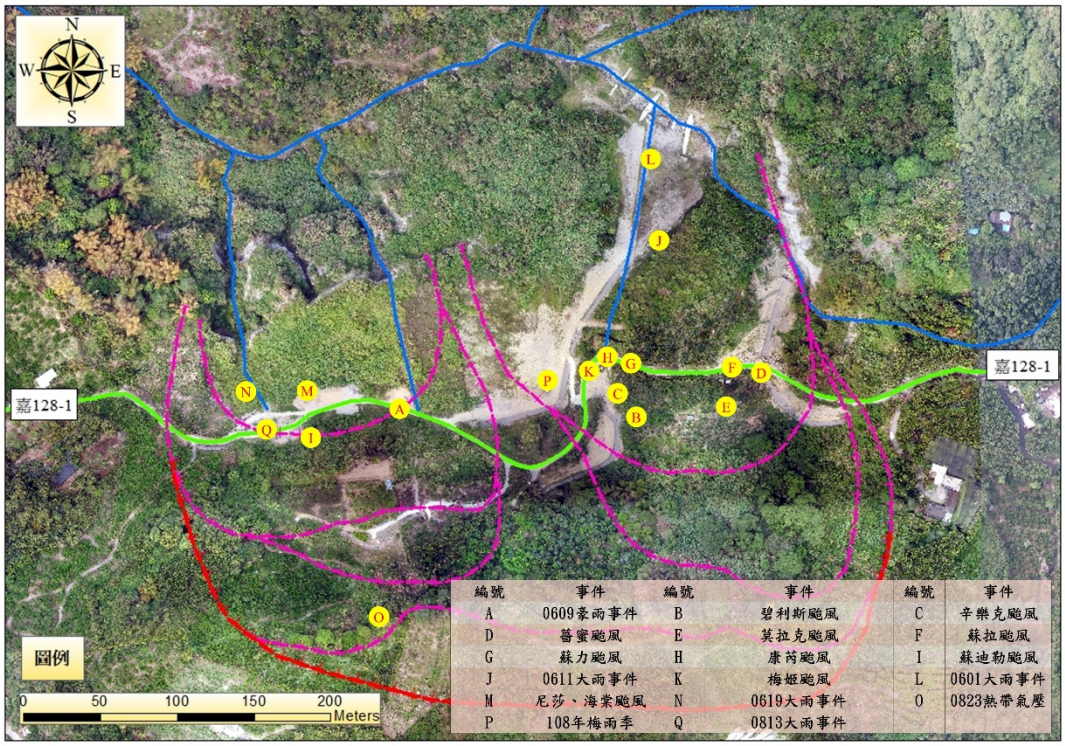


圖 13 歷年災害點位分布圖

第二節 崩塌監測

一、崩塌潛勢

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，根據「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，計畫區已有明確滑動徵兆，已屬高潛勢崩塌區。根據歷年經測成果，中心崙區域佈設 GPS 固定樁觀測點及地層觀測儀器以掌握 M1、M2 塊體坡面滑動特性，更大範圍之 L 深層滑動，坡腹處劃定了 M1 滑動塊體及 M2 滑動塊體，兩處塊體屬淺層滑動，經由歷年傾斜管觀測成果資料，地層整體向北方及北北西方向滑動，崩塌地及高崩塌潛勢邊坡面積約 32.62 公頃。

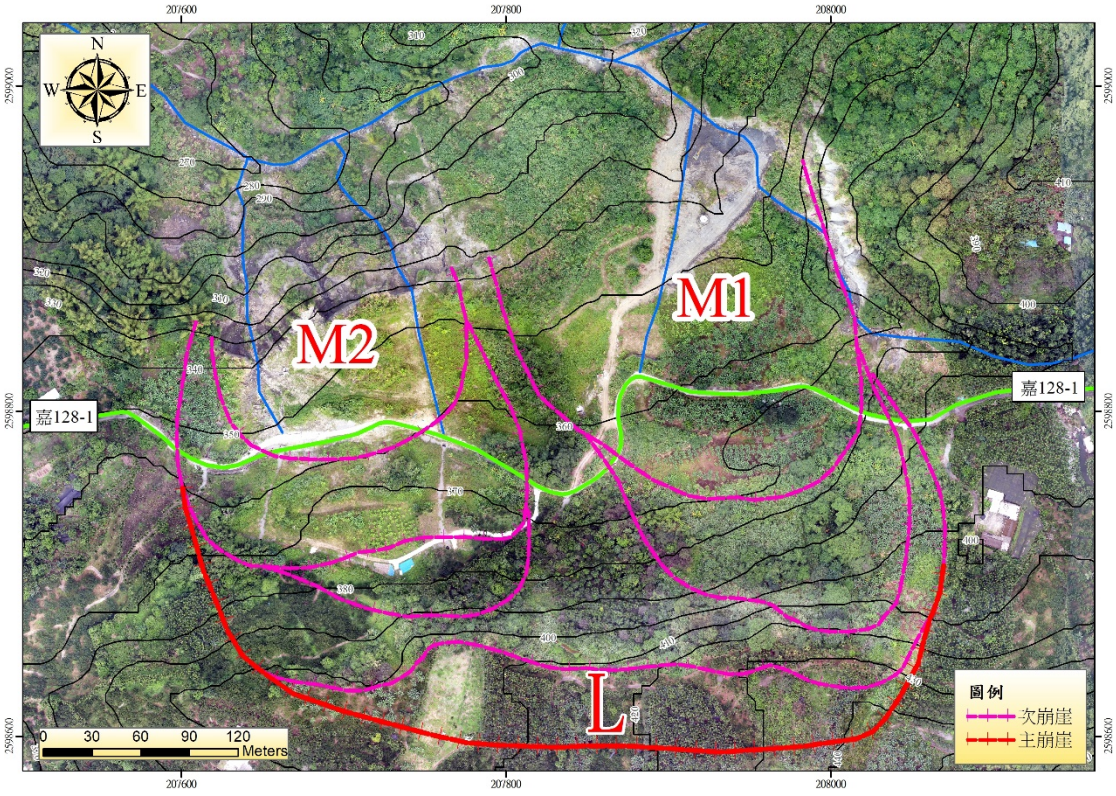


圖 14 中心崙推估滑動塊體分佈圖

二、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 15 雨量筒遷移位置圖，110 年將圖 16 地下水位計位置圖改為電子式水位計，編號 JSL-OW5。

表 10 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

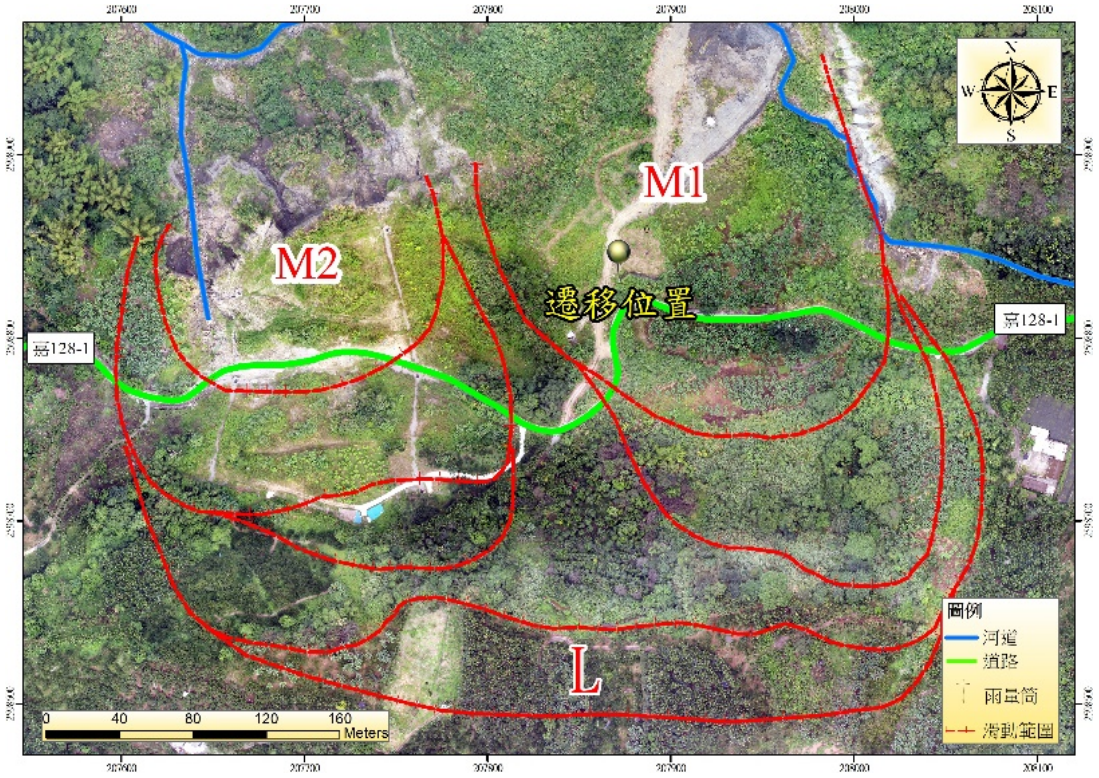


圖 15 雨量筒遷移位置圖

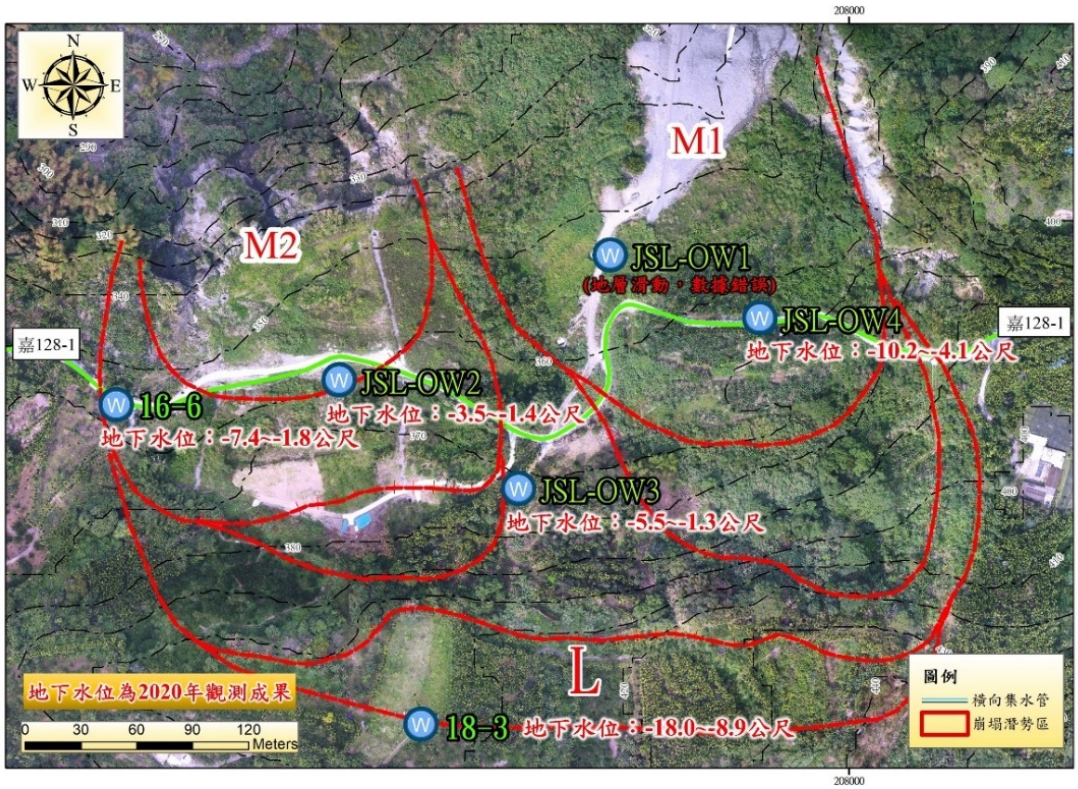


圖 16 地下水位計位置圖

三、地下水流向

為評估中心崙地區邊坡地下水流向系統，根據水土保持局(109)蒐集歷年中心崙地區鑽孔資料，以鑽孔水位高程來進行區域 3D 地下水流向模擬，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，並經由 ArcView 的空間分析，採網格水頭的高低判釋其水流的方向，在判釋地下水流向後，可提供考慮阻水層以及基盤所產生的影響，判釋地下水流向的概念化模式，其成果如圖 17 地下水流向分佈成果圖所示。

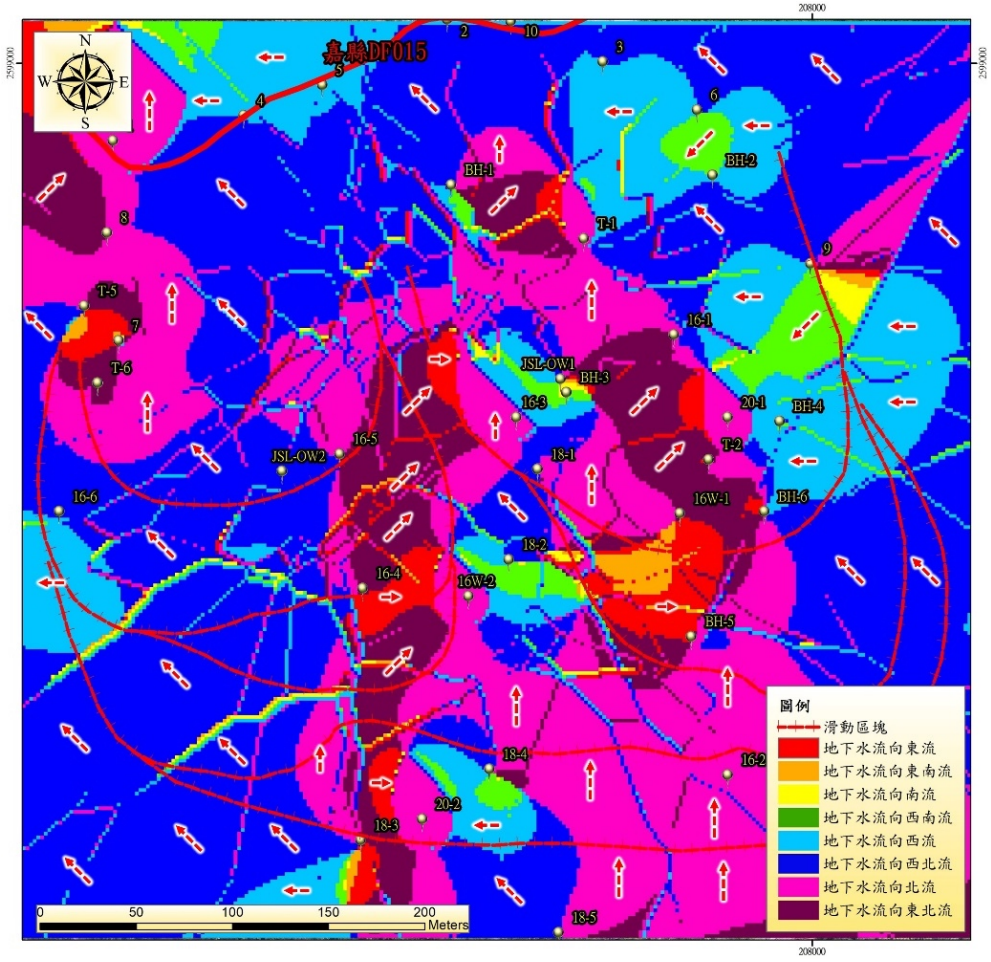


圖 17 地下水流向分佈成果圖

四、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，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，地表伸縮計儀器編號為 JSL-EL-3，裝設位置如**圖 18 地表伸縮計 JSL-EL-3 位置圖**所示，現場設置如**圖 19 現場儀器配置與監測地表現況**所示。**圖 20 地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖**，從 2019 年架設至 2020 年約有 20 公分變位量。

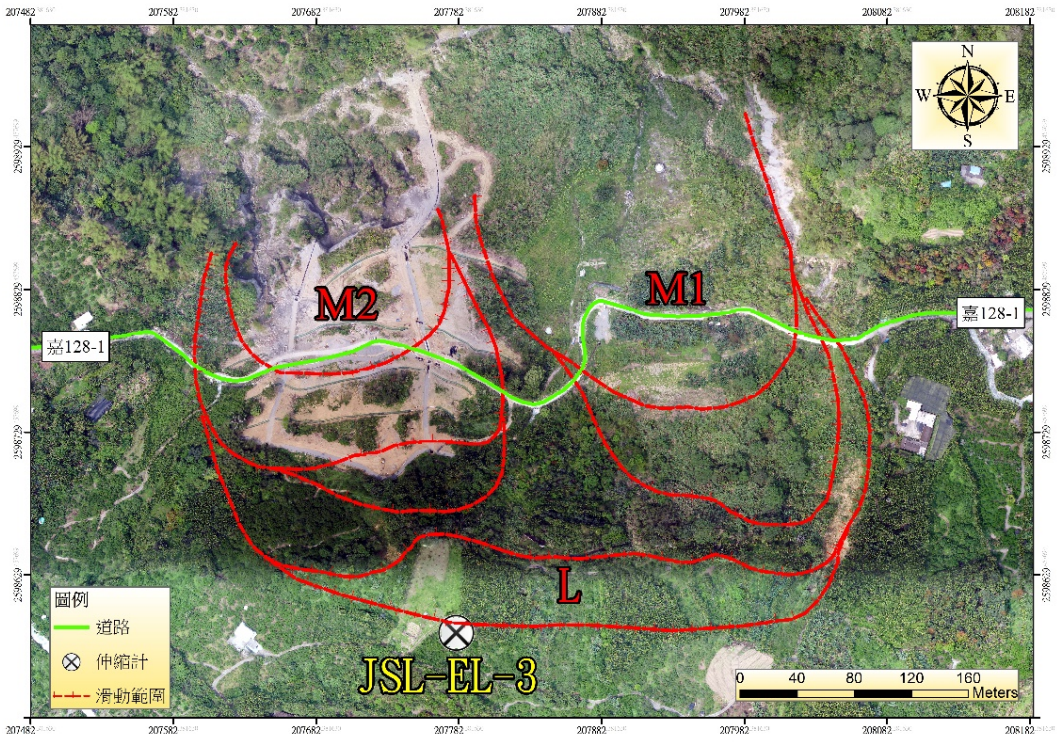


圖 18 地表伸縮計 JSL-EL-3 位置圖



圖 19 現場儀器配置與監測地表現況

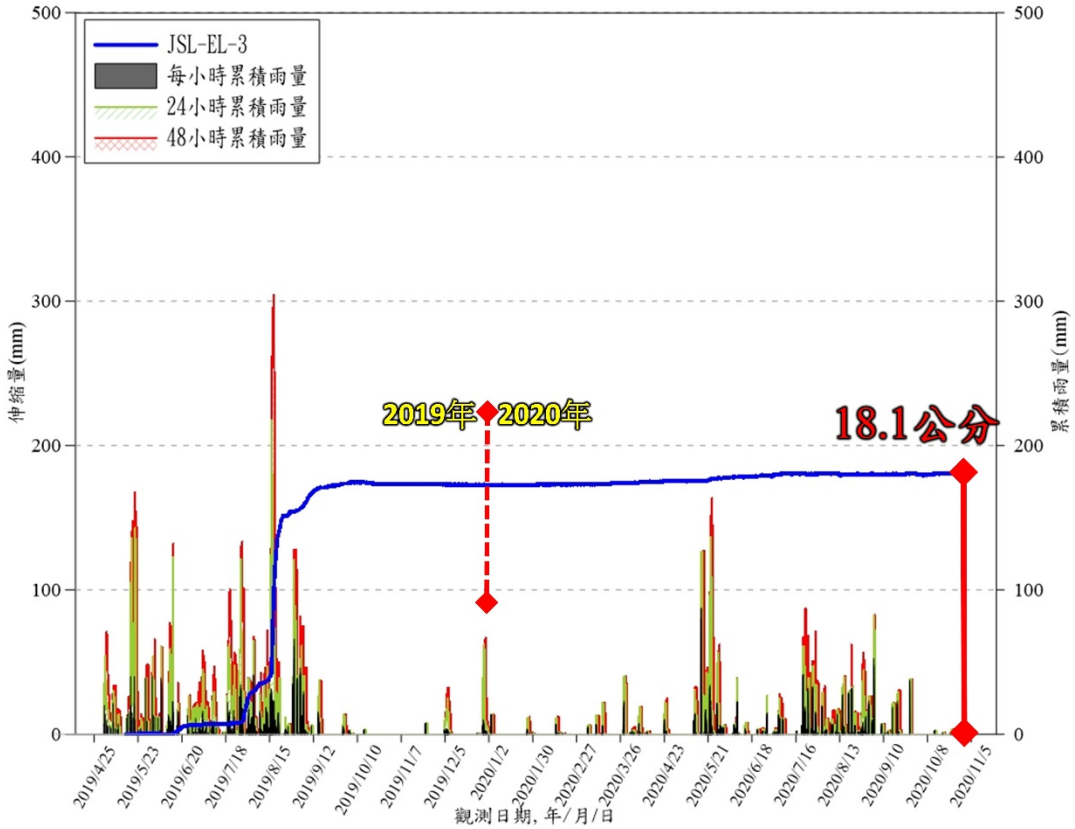


圖 20 地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖

五、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，如**圖 21 孔內伸縮計示意圖**。

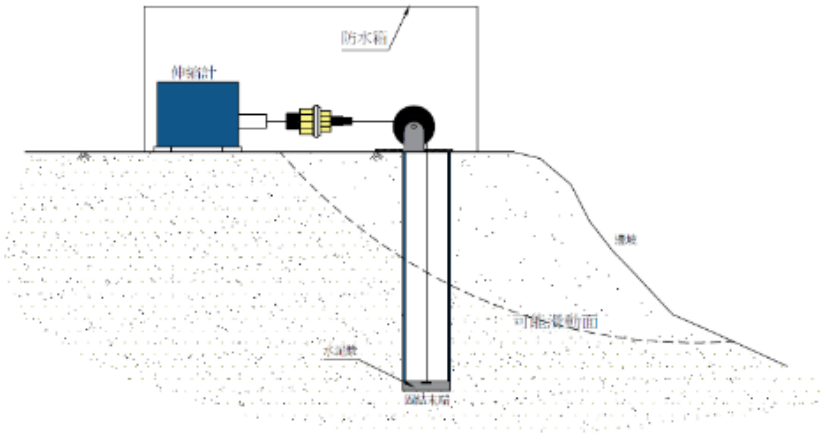


圖 21 孔內伸縮計示意圖

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。

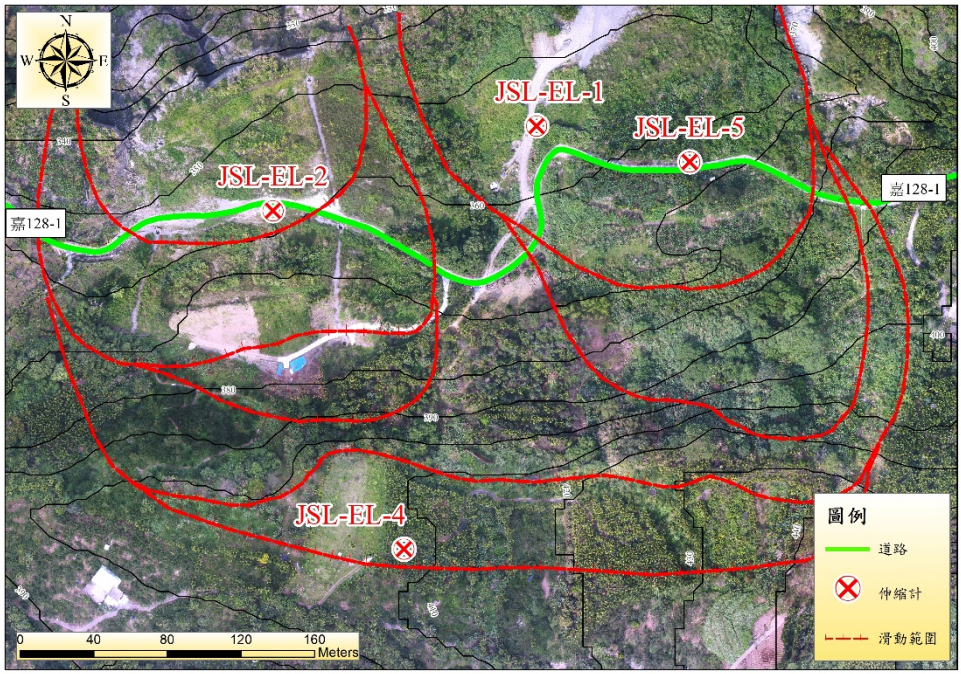


圖 22 孔內伸縮計分佈圖

第五章 即時系統建置

本年度建立即時地下水位預測系統如圖 28 即時預測系統構想，110 年已完成資料接收及儲存系統，本年度新增地表伸縮計，說明如下。

第一節 資料庫架構

建置計畫所需歷史及即時之降雨、地下水位資料，若未來能取得降雨預測資料，再補充至水文資料庫。

一、系統建置

本計畫以 WAMP(Windows + Apache + PHP + MySQL)的架構開發。WAMP 是基於 Windows、Apache、MySQL 和 PHP 的資源開放網路開發平台；Apache 是最通用的網路伺服器；MySQL 是帶有網路管理附加工具的資料庫，MySQL 資料庫體積小、速度快、總體擁有成本低，開源、支援多種作業系統，資料庫提供的介面支援多種語言連線操作。靈活地為使用者提供服務，而不過多的系統資源。上述各自獨立的程式，因為常被放在一起使用，擁有相當高的兼容性，共同組成強大的網路發展平台。優點是沒有頻寬流量限制、沒有空間限制、沒有設定上的限制。系統架構圖如下：



圖 23 系統架構圖

二、監測項目

監測來源包括中心崙的地表伸縮計一處、地下水位計五處與雨量資料一處，對應編號如下表所示。

表 11 感測器與對應地區關係表

儀器名稱	編號
雨量計	JSL-R1
地下水位計	JSL-OW1、JSL-OW2、JSL-OW3、JSL-OW4、JSL-OW5
地表伸縮計	JSL-EL-3

三、資料庫建置

資料庫包含地區、感測器標號、時間與雨量及地下水位資料，資料庫架構如下圖。

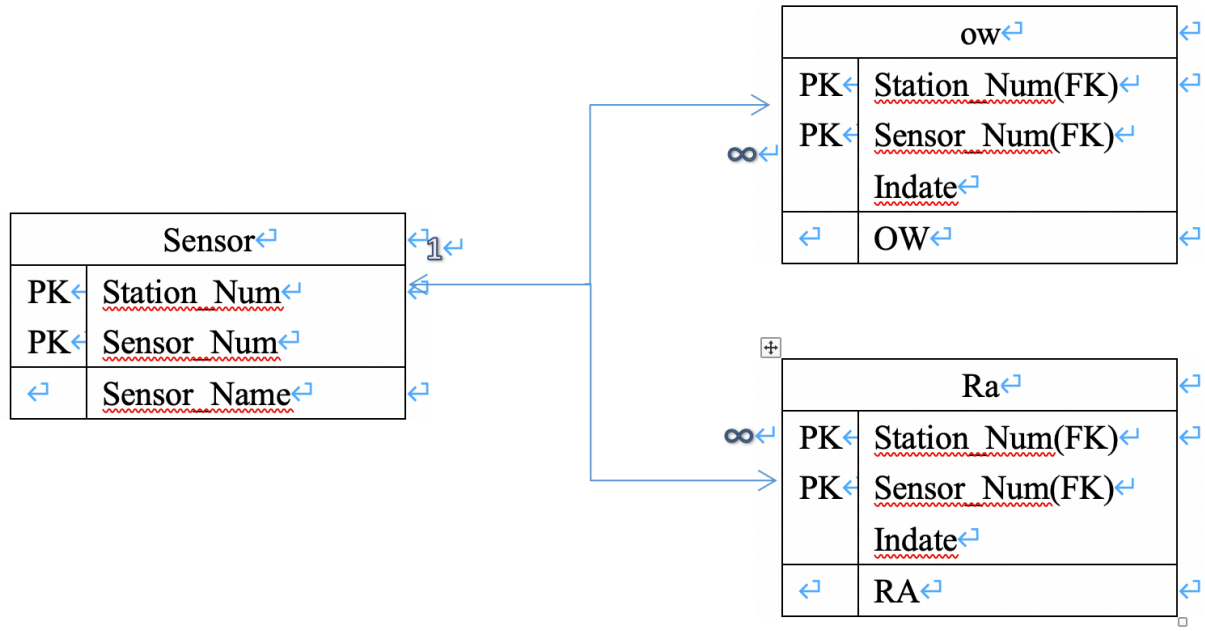


圖 24 資料庫架構圖

資料庫與表單欄位說明如下表。

表 12 資料庫表單說明

表單名稱	表單說明	欄位名稱	欄位說明
Sensor	定義站與感測器關係表	Station_Num	主鍵(Primary Key, PK) 監測站編號
		Sensor_Num	主鍵(Primary Key, PK) 感測器編號
		Sensor_Name	感測器名稱
OW	監測站地下水位資料表	Station_Num	外部鍵(Foreign Key, FK) 監測站編號
		Sensor_Num	外部鍵(Foreign Key, FK) 監測站編號
		indate	日期時間
		OW	感測器紀錄地下水位資料
RA		Station_Num	外部鍵(Foreign Key, FK)

	監測站雨量資料表		監測站編號
		Sensor_Num	外部鍵(Foreign Key, FK) 感測器編號
		indate	日期時間
		RA	感測器紀錄雨量資料

第二節 即時資料輸入

一、現場資料

本計畫連結中心崙即時監測原始資料 XML 網頁，如圖 20 及圖 21。利用讀檔程式每十分鐘抓取一筆即時資料寫進資料庫，中心崙抓取 JSL1、JSL2、JSL3、JSL4、JSL5 監測站即時雨量、地下水位及地表變位資料，如圖 22 及 23。

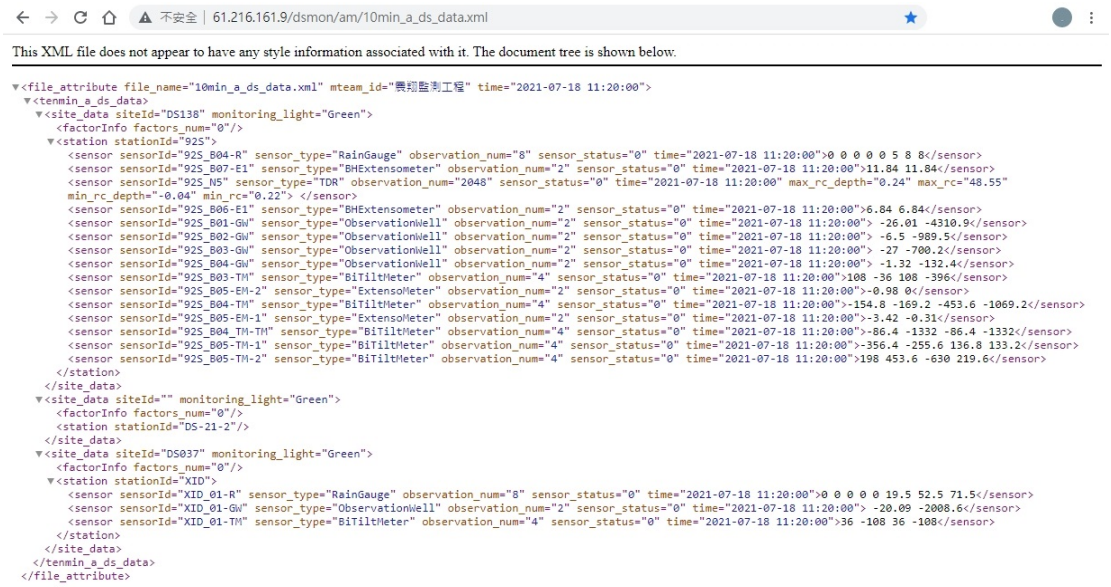


圖 25 中心崙監測原始資料 XML 網頁圖

(http://61.216.161.9/dsmon/am/10min_a_ds_data.xml)

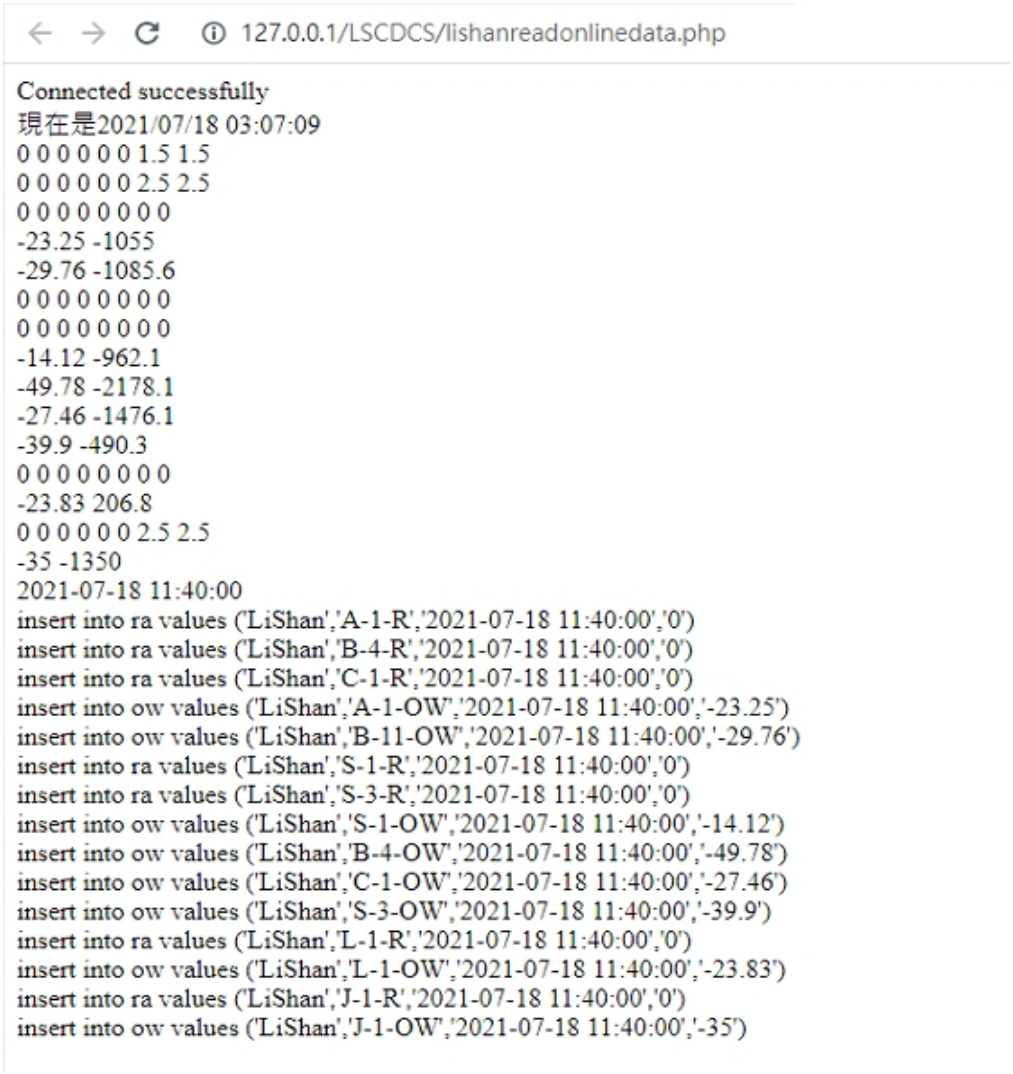


圖 26 中心崙即時監測原始資料讀檔程式執行圖

二、中央氣象局資料

(一)抓取預測未來 1 小時雨量

1. 氣象開放平台

在氣象開放平台(https://opendata.cwb.gov.tw/)中註冊會員帳號可取得使用授權碼，如下圖所示。



2. 1 小時雨量預測網頁

在氣象開放平台網頁上方選項點選資料主題中的預報，從中尋找點選 1 小時雨量預測-QPESUMS 1 小時定量降雨預報格點資料，再下載檔案抓取資料即可獲得 1 小時雨量預測資料，如下圖所示。



3. 1 小時雨量預測值檔案

下載檔案開啟 F-B0046-001.xml 檔案，從中抓取的時間及雨量預測值。檔案中的敘述為

格點資料以逗號分隔之浮點數值，每一個數值以科學記號格式記錄，代表不同經緯度上未來 1 小時雷達定量降水預報，單位為 mm，資料無效值為-99，經向及緯向解析度均為 0.075 度，每 1 小時更新 1 筆資料，左下角為第一點東經 117.975、北緯 19.975，先依次經向遞增，再緯向遞增，為 TWD67 經緯網格，如下圖所示。


This XML file does not appear to have any style information associated with it. The document tree is shown below.
<cwbopendata xmlns="urn:cwb:gov:tw:cwbcommon:0.1">
<identifier>e305f575-90d8-443f-93d0-aab1ea8f76e1</identifier>
<sender>weather@cwb.gov.tw</sender>
<sent>2022-03-31T02:45:09+08:00</sent>
<status>Actual</status>
<msgType>Issue</msgType>
<scope>Public</scope>
<dataid>B0046-001</dataid>
<source>Meteorological Satellite Center</source>
<dataset>
<datasetInfo>
<datasetDescription>未來1小時雷達定量降雨預報</datasetDescription>
<parameterSet>
<parameter>
<parameterName>左下角</parameterName>
<parameterValue>117.975,19.975</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>解析度</parameterName>
<parameterValue>0.075</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>時間</parameterName>
<parameterValue>2022-03-31T02:20:00+08:00</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>維度(nx*ny)</parameterName>
<parameterValue>75*95</parameterValue>
</parameter>
<parameter>
<parameterName>單位</parameterName>
<parameterValue>mm</parameterValue>
</parameter>
</parameterSet>
</datasetInfo>
<parameterName>單位</parameterName>
<parameterValue>mm</parameterValue>
</parameter>
</parameterSet>
</datasetInfo>
<contents>
<contentDescription>此content之欄位內的格點資料以逗號分隔之浮點數值，每一個數值以科學記號格式記錄，代表不同經緯度上未來1小時雷達定量降水預報，單位為mm，資料無效值為-99，經向及緯向解析度均為0.075度，每1小時更新1筆資料，左下角為第一點東經117.975，北緯19.975，先依次經向遞增，再緯向遞增，為TWD67經緯網格，本產品係利用雷達回波外延法，並依據回波與雨量關係式所預估之未來1小時格點化雨量，使用此預報產品時須瞭解外延法應用之極限，請謹慎使用。</contentDescription>
<content>-9.900E+01,-9.900E+01,-9.900E+01,

4. 抓取中心崙 1 小時雨量預測值

在 F-B0046-001.xml 檔案 contents 欄位共有 75*95 網格為 7125 筆資料，左下角為第一點東經 117.975、北緯 19.975 為第一筆資料，先依次經向遞增，再緯向遞增，增加的度數為 0.075 度。下圖為中心崙雨量站座標東經 120.589、北緯 23.491，依座標差計算 contents 欄位中 7125 筆資料第幾筆資料為中心崙雨量預測值。

120.589-117.975=2.614
2.614/0.075=34.85

左下角第一筆資料經度 117.975 至中心崙經度 120.589 從左至右約為第 35 個。

23.491-19.975=3.516
3.516/0.075=46.88

左下角第一筆資料緯度 19.975 至中心崙緯度 23.491 從下至上約為第 47 個。意思為從下往上算第 47 排，從左往右算第 35 筆資料。

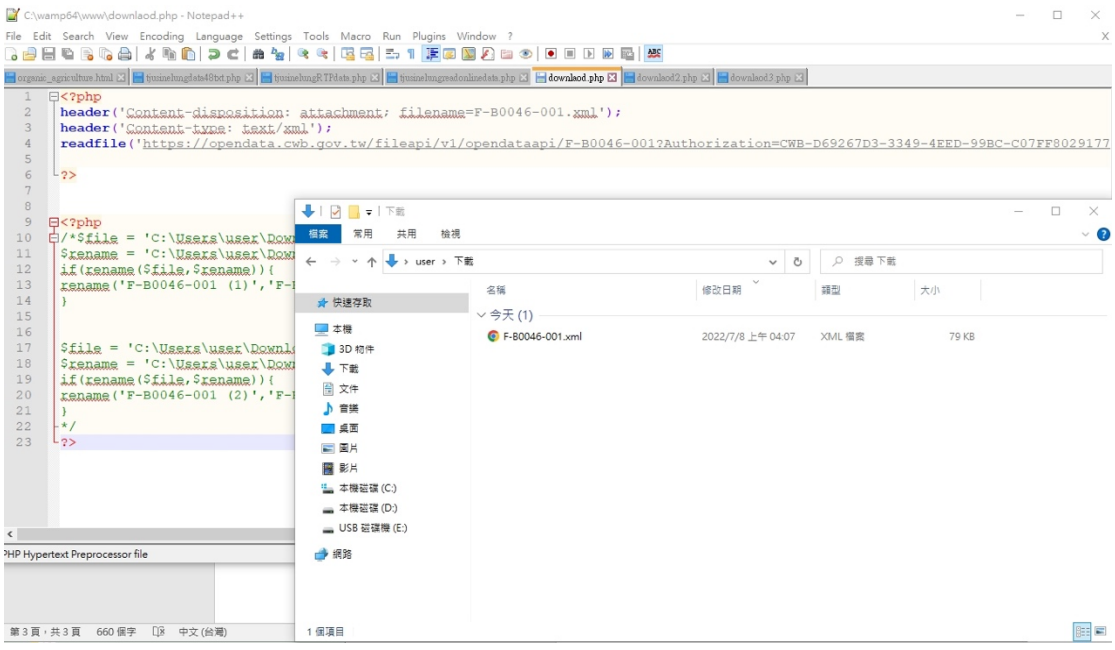
46*75+35=3485

意思為 contents 欄位中 7125 筆資料第 3485 筆資料為中心崙雨量預測值。

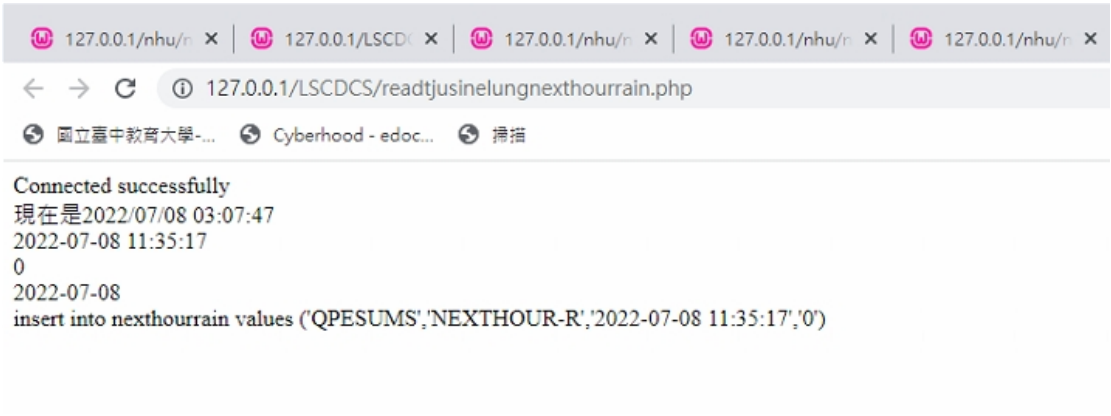
儀器類型	RainGauge
儀器編號	JSL-R1
建置時間	2019/6/6 上午 12:00:00
完整率	100%
坐標	緯度: 23.49174481 經度: 120.5895078

(二) 建立自動抓取預測未來 1 小時雨量程式

先分成兩個部分，第一個程式為抓取氣象開放平台之 1 小時雨量預測-QPESUMS 1 小時定量降雨預報格點資料，下載網址為 https://opendata.cwb.gov.tw/fileapi/v1/opendataapi/F-B0046-001?Authorization=CWB-D69267D3-3349-4EED-99BC-C07FF8029177&format=XML，可下載預測未來 1 小時雨量原始資料之 F-B0046-001.xml 檔案，如下圖所示。



為讀取預測未來 1 小時雨量原始資料之 F-B0046-001.xml 檔案，抓取 F-B0046-001.xml 資料中第 3485 筆資料為中心崙雨量預測值，如下圖所示。



第三節 網頁展示

目前展示項目包括監測站說明，讓使用者了解監測基本資料，及即時資料查詢，功能包括兩大項，說明如下：

一、首頁地圖

中心崙地區如下圖。



圖 27 監測站首頁切換

二、監測站資料查詢

(一)中心崙雨量站

以查詢中心崙雨量資料為例，說明如下。

Step1. 選擇中心崙

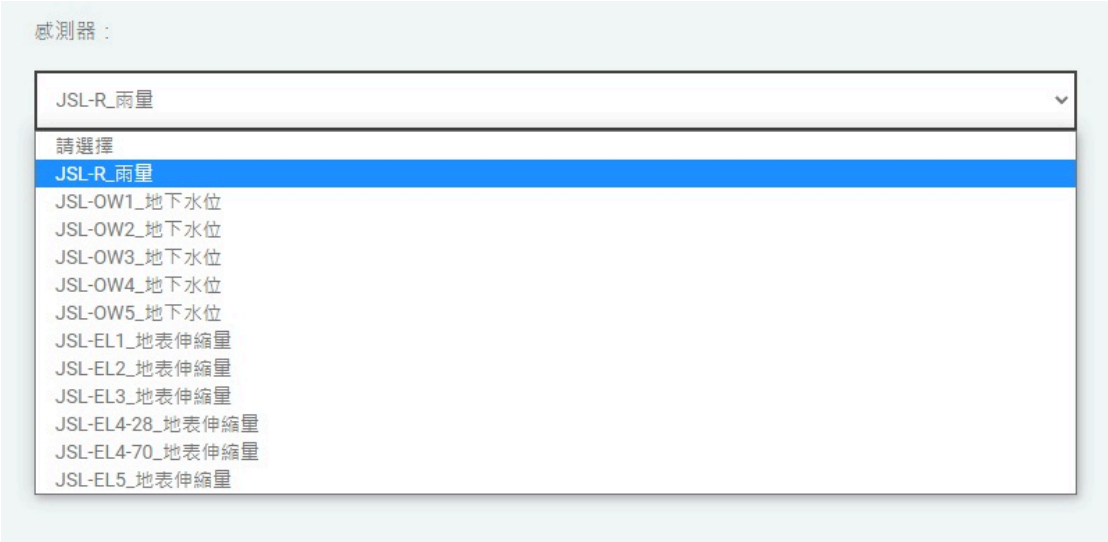


Step2. 選擇起始時間與結束時間



Step3. 選擇感測器

目前中心崙資料中依下圖顯示有 1 處雨量、5 處水位感測器及 6 處地表伸縮量感測器，其中水位感測器 JSL-OW3 與 JSL-OW5 正常運作中，其餘水位感測器停止觀測。而範例選擇 JSL-R_雨量。



Step4. 選擇時間區段

可以選擇雨量小時、日、月的平均值或是日與月的平均最大值，最後再按下提交按鈕送出即可。



Step5. 功能顯示

下圖是為時間區段選擇小時平均，時間為 2022-07-11 至 2022-07-14 的 JSL-R_雨量資料。

感測器: JSLR_雨量	時間: 2022-07-11~2022-07-14	單位: mm	
監測站	感測器	時間	記錄值
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 00:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 01:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 02:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 03:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 04:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 05:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 06:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 07:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 08:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 09:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 10:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 11:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 12:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 13:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 14:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 15:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 16:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 17:00:00	4
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 18:00:00	13
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 19:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 20:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 21:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 22:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-11 23:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-12 00:00:00	0
Tjusinelung	JSL-R	2022-07-12 01:00:00	0

(二) 中心崙地下水位資料

Step1. 選擇中心崙

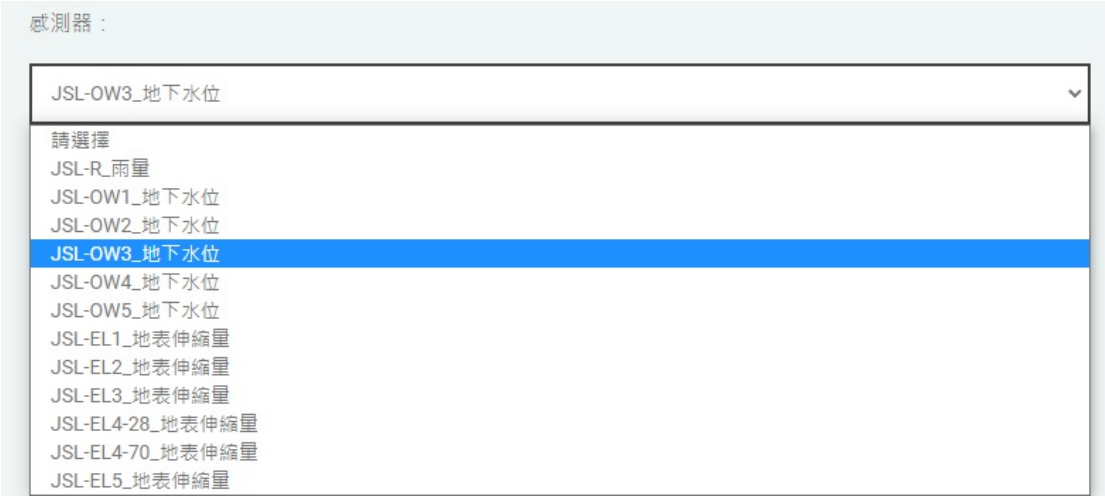


Step2. 選擇起始時間與結束時間



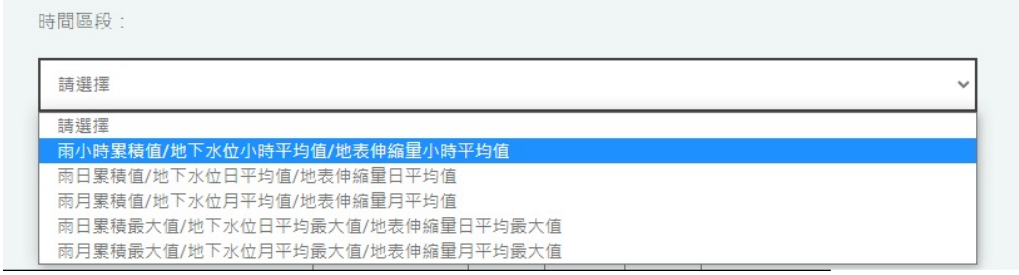
Step3. 選擇感測器

中心崙資料中選擇 JSL-OW3 地下水位。



Step4. 選擇時間區段

可以選擇地下水位小時、日、月的平均值或是日與月的平均最大值，最後再按下提交按鈕送出即可。



Step5. 功能顯示

下圖是為時間區段選擇小時平均，時間為 2022-07-11 至 2022-07-14 的 JSL-OW3 地下水位資料。

感測器: JSLOW3_地下水位	時間: 2022-07-11~2022-07-14	單位: M	
監測站	感測器	時間	記錄值
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 00:00:00	-15.95
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 01:00:00	-15.935
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 02:00:00	-15.945
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 03:00:00	-15.962
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 04:00:00	-15.987
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 05:00:00	-15.985
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 06:00:00	-16.02
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 07:00:00	-16.06
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 08:00:00	-16.08
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 09:00:00	-16.14
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 10:00:00	-16.16
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 11:00:00	-16.21
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 12:00:00	-16.23
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 13:00:00	-16.267
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 14:00:00	-16.297
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 15:00:00	-16.328
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 16:00:00	-16.36
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 17:00:00	-16.365
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 18:00:00	-16.423
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 19:00:00	-16.417
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 20:00:00	-16.417
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 21:00:00	-16.445
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 22:00:00	-16.455
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-11 23:00:00	-16.48
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-12 00:00:00	-16.503
Tjusinelung	JSL-OW3	2022-07-12 01:00:00	-16.513

(三) 中心崙地表伸縮量

以查詢中心崙地表伸縮量資料為例，說明如下。

Step1. 選擇中心崙

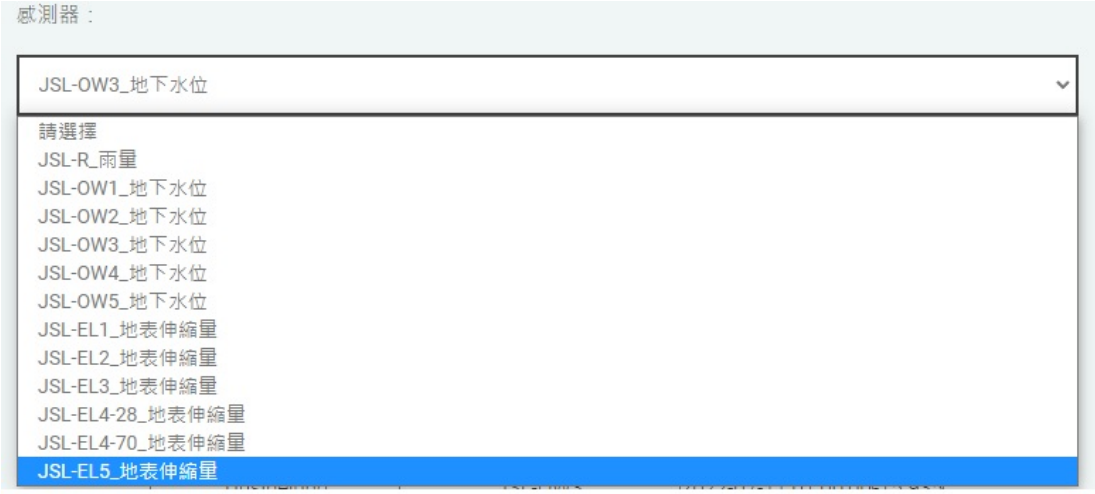


Step2. 選擇起始時間與結束時間



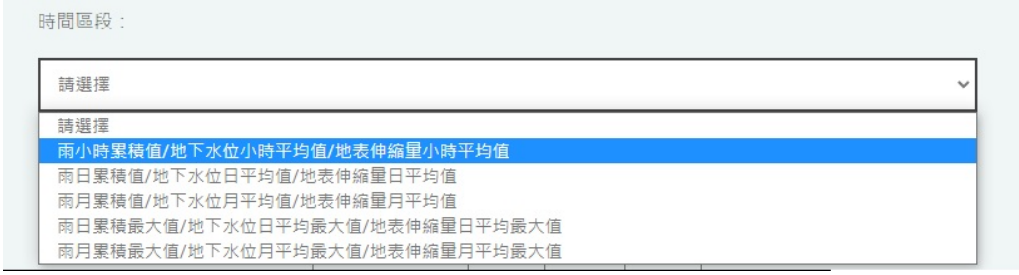
Step3. 選擇感測器

中心崙資料中選擇 JSL-EL5 地表伸縮量。



Step4. 選擇時間區段

可以選擇地表伸縮量小時、日、月的平均值或是日與月的平均最大值，最後再按下提交按鈕送出即可。



Step5. 功能顯示

下圖是為時間區段選擇小時平均，時間為 2022-07-11 至 2022-07-14 的 JSL-EL5 地表伸縮量資料。

感測器:	時間: 2022-07-11~2022-07-14	單位:	
監測站	感測器	時間	記錄值
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 00:00:00	9.997
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 01:00:00	9.997
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 02:00:00	10.058
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 03:00:00	10.12
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 04:00:00	10.12
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 05:00:00	10.12
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 06:00:00	10.12
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 07:00:00	10.058
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 08:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 09:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 10:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 11:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 12:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 13:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 14:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 15:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 16:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 17:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 18:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 19:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 20:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 21:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 22:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-11 23:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-12 00:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-12 01:00:00	9.75
Tjusinelung	JSL-EL5	2022-07-12 02:00:00	9.75

(四) 中央氣象局預測下一小時雨量資料

以查詢中心崙預測下一小時雨量資料為例，說明如下。

Step1. 在預測資料中選擇中央氣象局-中心崙



Step2. 選擇起始時間與結束時間



Step3. 選擇感測器

目前中央氣象局-中心崙有 1 處雨量。而範例選擇 1 小時雨量預測-QPESUMS 雨量，最後再按下提交按鈕送出即可。。



Step4. 功能顯示

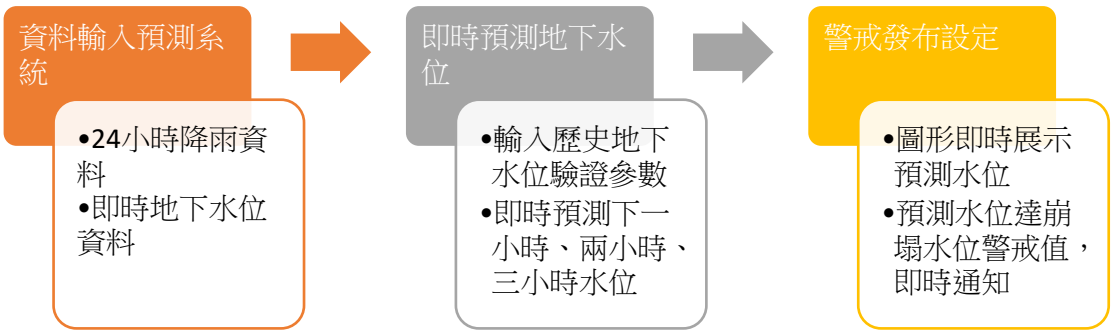
下圖是時間為 2022-07-11 至 2022-07-14 的 1 小時雨量預測-QPESUMS 資料。

站別: QPESUMS	時間: 2022-07-11~2022-07-14	雨量單位: mm
站別	時間	預測下一小時雨量資料
QPESUMS	2022-07-11 00:05:05	0
QPESUMS	2022-07-11 00:15:06	0
QPESUMS	2022-07-11 00:25:08	0
QPESUMS	2022-07-11 00:35:09	0
QPESUMS	2022-07-11 00:45:10	0
QPESUMS	2022-07-11 00:55:12	0
QPESUMS	2022-07-11 01:05:13	0
QPESUMS	2022-07-11 01:15:14	0
QPESUMS	2022-07-11 01:25:16	0
QPESUMS	2022-07-11 01:35:17	0
QPESUMS	2022-07-11 01:45:18	0
QPESUMS	2022-07-11 01:55:20	0
QPESUMS	2022-07-11 02:05:21	0
QPESUMS	2022-07-11 02:15:22	0
QPESUMS	2022-07-11 02:25:04	0
QPESUMS	2022-07-11 02:35:05	0
QPESUMS	2022-07-11 02:45:06	0
QPESUMS	2022-07-11 02:55:08	0
QPESUMS	2022-07-11 03:05:09	0
QPESUMS	2022-07-11 03:15:10	0
QPESUMS	2022-07-11 03:25:12	0
QPESUMS	2022-07-11 03:35:13	0
QPESUMS	2022-07-11 03:45:14	0

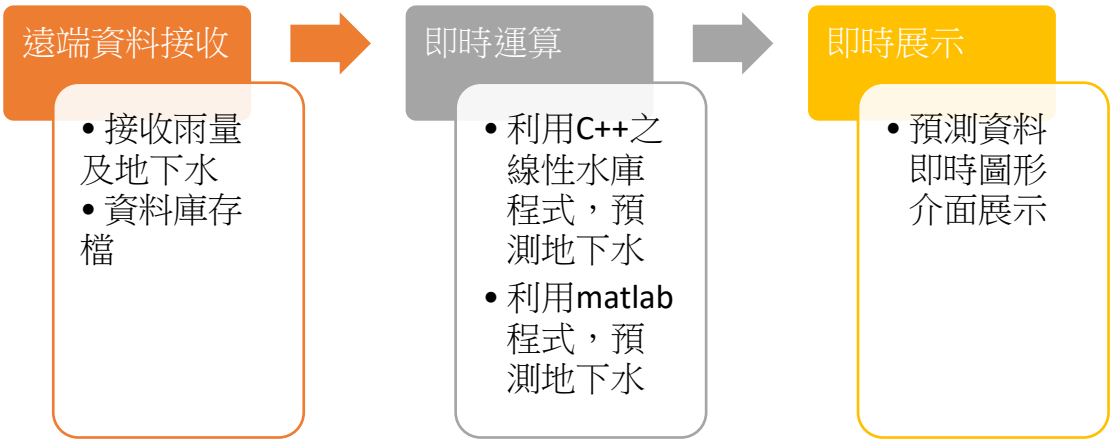
第四節 預測系統

於既有水文資料庫網站之下，將現場驗證成果，增加於即時預測系統，運作構想如圖 28 即時預測系統構想，首先透過接收前端監測站資料，包括降雨及地下水位，輸入水文資料庫網站，然後透

過已完成之預測系統，預測地下水位，當地下水位達到警戒值，就可以設定發布大規模崩塌警戒。



(a)整體系統運作構想



(b)預測系統操作方式

圖 28 即時預測系統構想

一、預測系統操作方式

而預測系統操作方式，首先由水文資料庫網站，進行即時資料接收，然後即時運算，運算項目包括(1)利用 C++之線性水庫程式，

及(2)利用 matlab 程式，撰寫 ANN 模式，來預測地下水，並透過圖形介面，做即時展示。

即時系統工作執行流程如圖 **29** 工作執行步驟，分為五部分，首先由收集之水保局大規模崩塌區，挑選降雨與地下水位關係密切之四至六處試驗區，收集試驗區歷史資料；然後由已介接現場監測資料之水文資料庫網站，進行歷史資料驗證；進行地下水預測，確認模式適用性，模式包括包括產生崩塌之臨界地下水位、崩塌土體預估及預測未來地下水位。然後架構即時系統，完成後隨時待命，當暴雨來臨時，就啟動系統。



圖 29 工作執行步驟

二、預測系統程式操作

以線性水庫為例說明，預警系統由兩個程式組成，分別為訓練及模擬。由最大一場暴雨及地下水位資料，包含雨量及地下水位訓練參數，訓練程式可得參數寫入 coeff.txt，如下圖 27 所示。



(a)預警系統文件配置圖

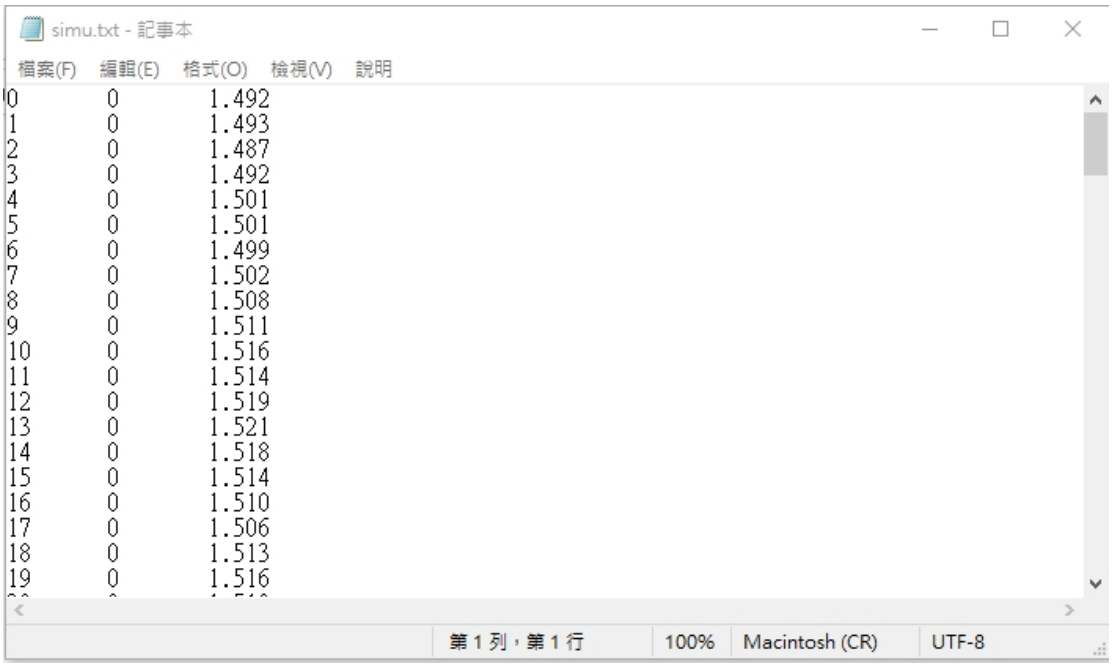


(a) coeff 文件訓練參數圖

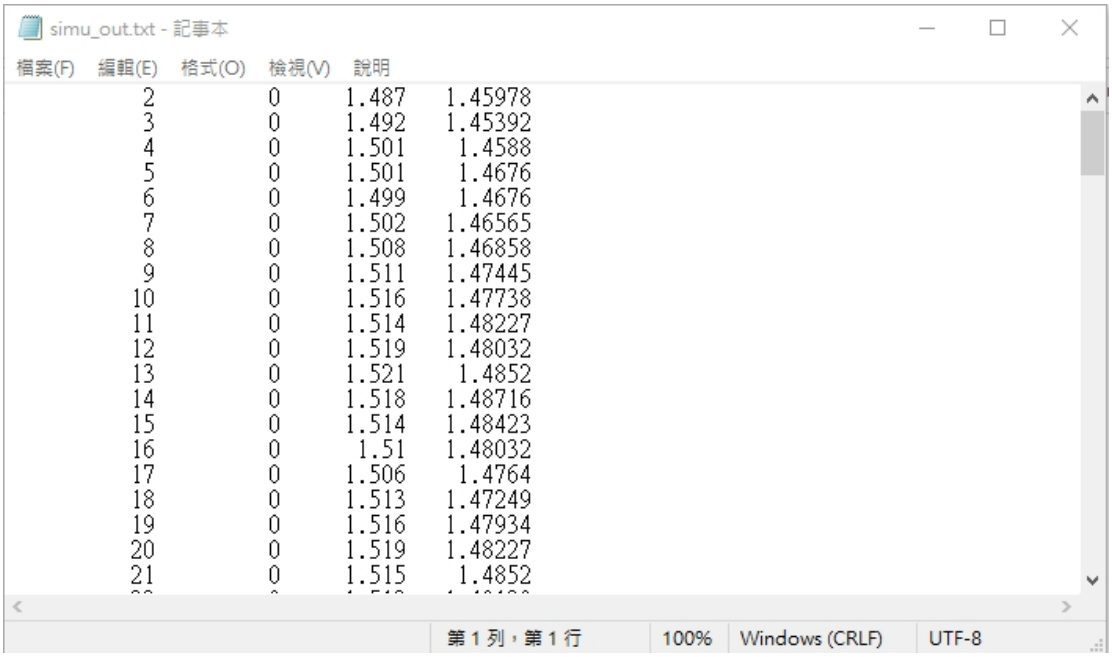
圖 30 訓練程式

simu.txt 為抓取當天算起前 48 小時的雨量及地下水位資料，simu.txt 第一列為時間，第二列資料為雨量，第三列資料為地下水位，如圖 28(a)，simu.exe 執行會帶入 coeff.txt 及 simu.txt 生成 simu_out.txt，simu_out.txt 第一列為時間，第二列資料為雨量，第三列資料為地下水位，第四列資料為模擬下一個小時的地下水位，如圖 28(b)。本計畫以程式抓取當下時間至前兩天的降雨資料，每小時自動寫入 simu.txt。利用 window 排程每小時執行 simu.exe，simu.exe 執行會帶入 coeff.txt

及 simu.txt 生成 simu_out.txt，再以讀檔程式自動讀取 simu_out.txt 寫入資料庫，將模擬資料展示於網頁上，達到預警的效果。



(a) simu 文件資料圖

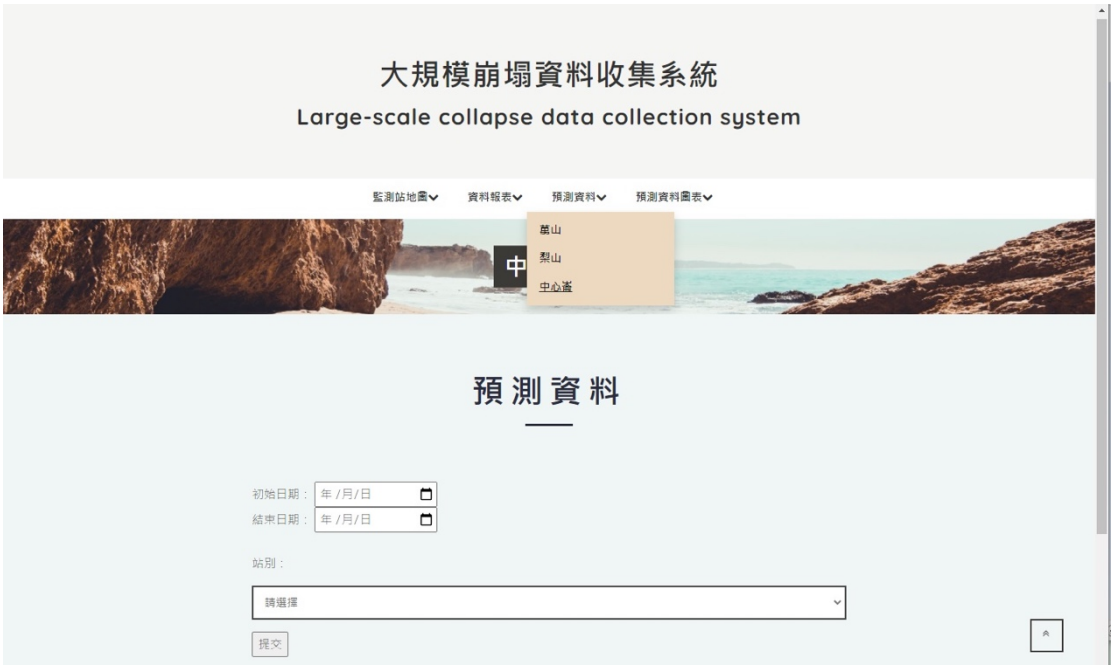


(b) simu_out 文件資料圖

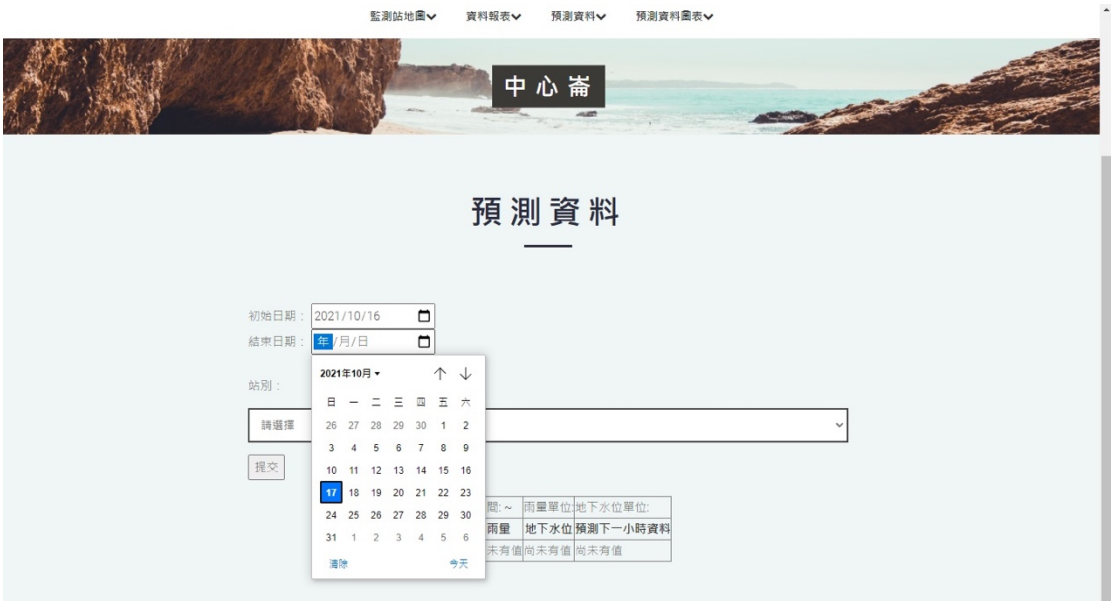
圖 31 模擬程式

三、預測系統介面

預測資料皆為執行 simu.exe 程式取得 simu_out.txt，將 simu_out.txt 資料匯入資料庫。預測資料網頁為展示出預測資料清單。

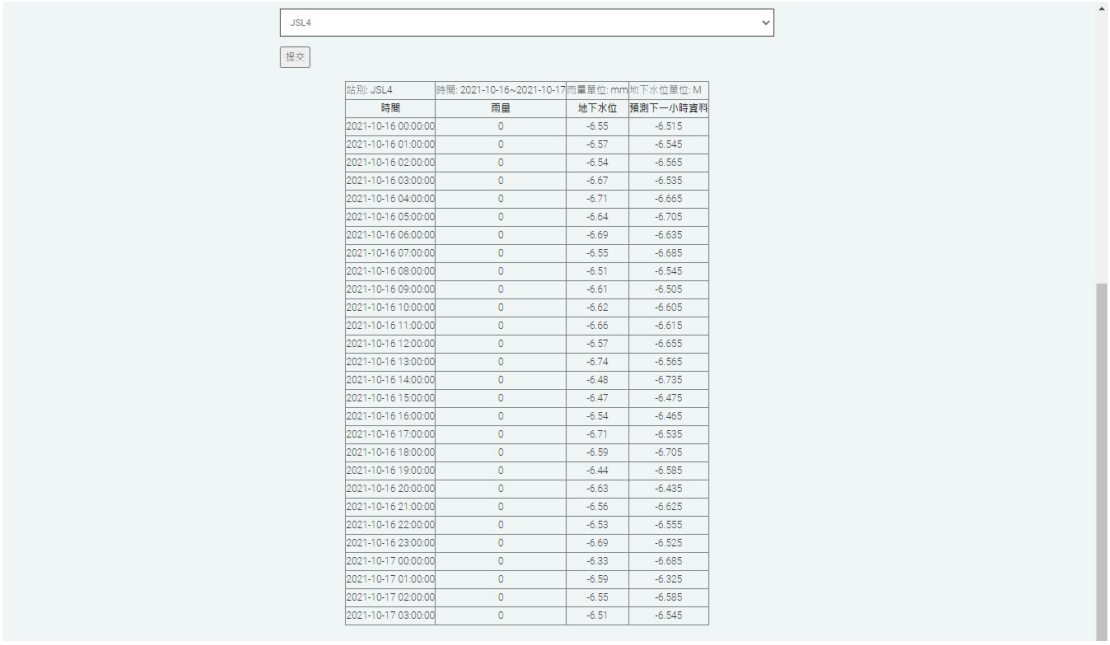


使用中心崙為本次案例。先選日期及站別，下圖使用 2021-10-16 至 2021-10-16 區間資料，選擇 JBL4 站別。



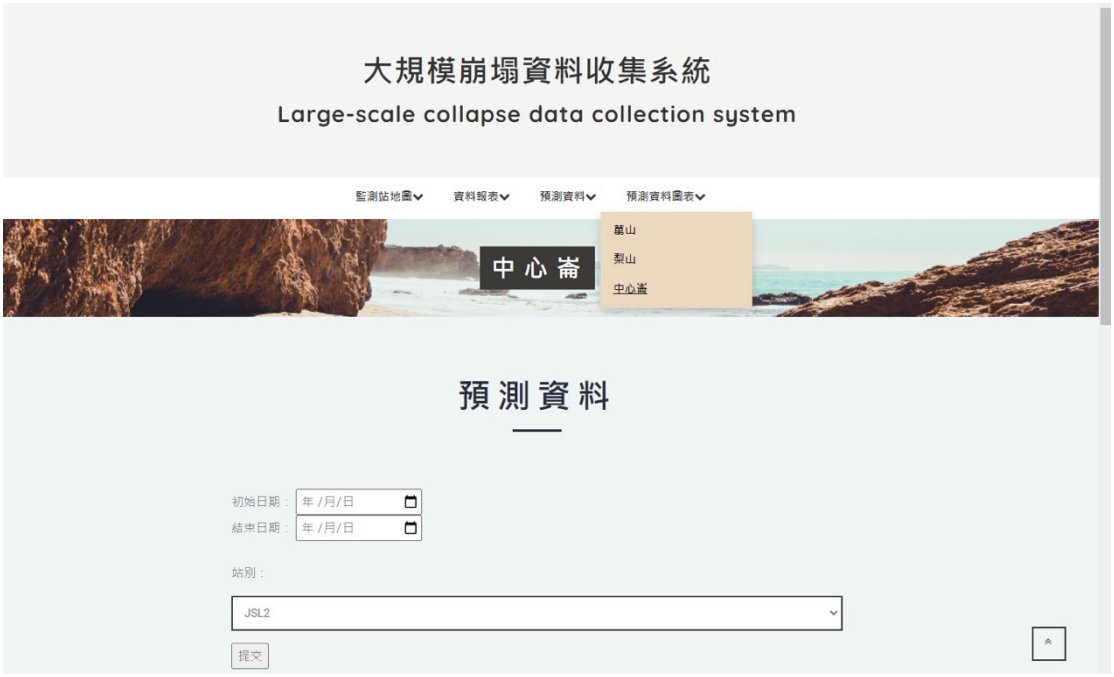


按下提交，展示出 JBL4 的 2021-10-16 至 2021-10-16 區間資料，其中包含雨量，地下水位及地下水位下一小時之預測值。

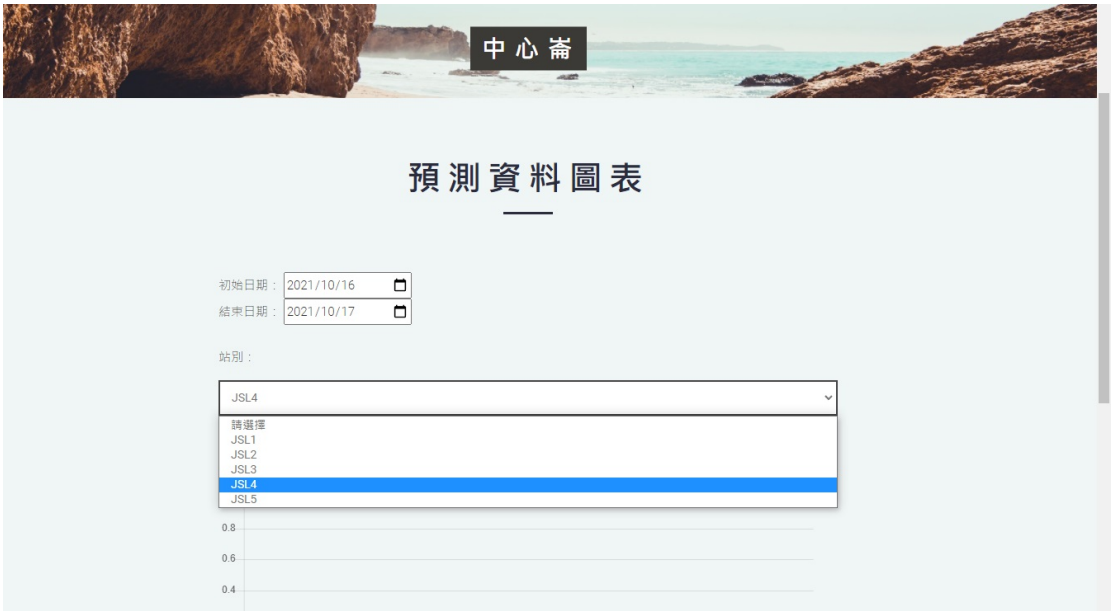


站別: JSL4	時間: 2021-10-16~2021-10-17	雨量單位: mm	地下水位單位: M
時間	雨量	地下水位	預測下一小時資料
2021-10-16 00:00:00	0	-6.55	-6.515
2021-10-16 01:00:00	0	-6.57	-6.545
2021-10-16 02:00:00	0	-6.54	-6.565
2021-10-16 03:00:00	0	-6.67	-6.535
2021-10-16 04:00:00	0	-6.71	-6.665
2021-10-16 05:00:00	0	-6.64	-6.705
2021-10-16 06:00:00	0	-6.69	-6.635
2021-10-16 07:00:00	0	-6.55	-6.685
2021-10-16 08:00:00	0	-6.51	-6.545
2021-10-16 09:00:00	0	-6.61	-6.505
2021-10-16 10:00:00	0	-6.62	-6.605
2021-10-16 11:00:00	0	-6.66	-6.615
2021-10-16 12:00:00	0	-6.57	-6.655
2021-10-16 13:00:00	0	-6.74	-6.565
2021-10-16 14:00:00	0	-6.48	-6.735
2021-10-16 15:00:00	0	-6.47	-6.475
2021-10-16 16:00:00	0	-6.54	-6.465
2021-10-16 17:00:00	0	-6.71	-6.535
2021-10-16 18:00:00	0	-6.59	-6.705
2021-10-16 19:00:00	0	-6.44	-6.585
2021-10-16 20:00:00	0	-6.63	-6.435
2021-10-16 21:00:00	0	-6.56	-6.625
2021-10-16 22:00:00	0	-6.53	-6.555
2021-10-16 23:00:00	0	-6.69	-6.525
2021-10-17 00:00:00	0	-6.33	-6.685
2021-10-17 01:00:00	0	-6.59	-6.325
2021-10-17 02:00:00	0	-6.55	-6.585
2021-10-17 03:00:00	0	-6.51	-6.545

預測資料圖表網頁為將預測資料轉化為可視覺化圖表，以折線圖表示。



本次案例同樣使用中心崙。先選日期及站別，下圖使用 2021-10-16 至 2021-10-16 區間資料，選擇 JBL4 站別。



按下提交後，展示出 JBL4 的 2021-10-16 至 2021-10-16 區間資料圖表。上圍表為原始資料圖表，下圖表為預測資料圖表。


JSL4
提交
地下水位
-6.30
-6.35
-6.40
-6.45
-6.50
-6.55
-6.60
-6.65
-6.70
-6.75
2021-10-16 00:00:00
2021-10-16 04:00:00
2021-10-16 08:00:00
2021-10-16 12:00:00
2021-10-16 16:00:00
2021-10-16 20:00:00
2021-10-17 03:00:00
下一小時預測值
-6.30
-6.35
-6.40
-6.45
-6.50
-6.55
-6.60
-6.65
-6.70
-6.75
10-16 00:00:00
10-16 04:00:00
10-16 08:00:00
10-16 12:00:00
10-16 16:00:00
10-16 20:00:00
10-17 03:00:00

第六章 預測與分析成果

第一節 臨界地下水位及模擬

一、歷史事件一小時降雨模擬

根據圖 20 地表伸縮計 JSL-EL-3 位移變化歷時曲線圖，本區於 2019 年發生滑移，為確認滑移與地下水位關係，本研究首先進行地下水位訓練與模擬，計算出線性水庫參數如表 13 JSL-EL-3 點位地下水模擬參數，可準確模擬地下水位。

表 13 JSL-EL-3 點位地下水模擬參數

Station	K	β	n	α	RMSE	
					Training	Simulation 1
JSL-OW-3	-0.00075	1	5	0.5	0.043744	0.0395443

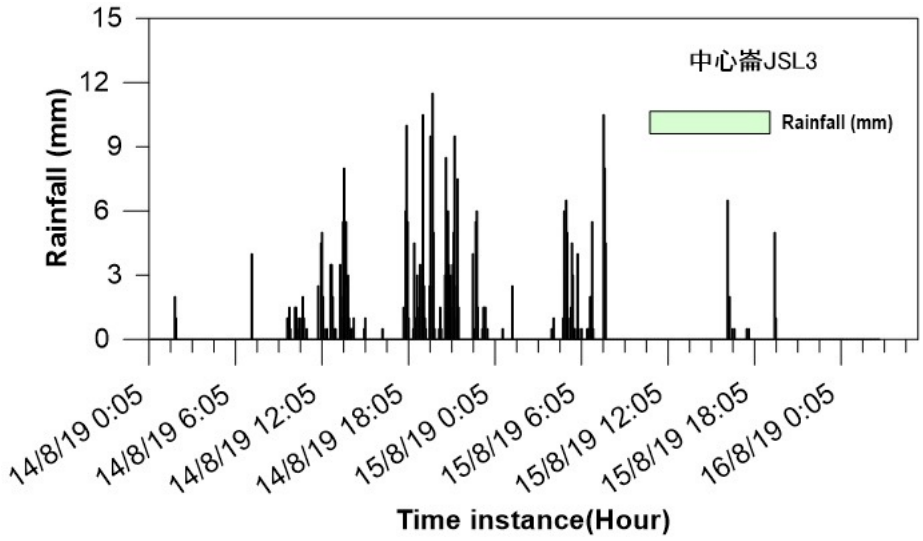
同時由圖 32 地表變位、地下水位模擬及降雨關係，可發現降雨驅動地下水位上升，在達到最高地下水位之後，開始持續滑動，最大滑移時間，是在持續高地下水位 24 小時之後，此時地下水位已經持續下降，經過快速滑移後，地下水位迅速降低一公尺，達到穩定狀態，本區域案例明確表示以下特性：

(1) 降雨影響地下水位高度

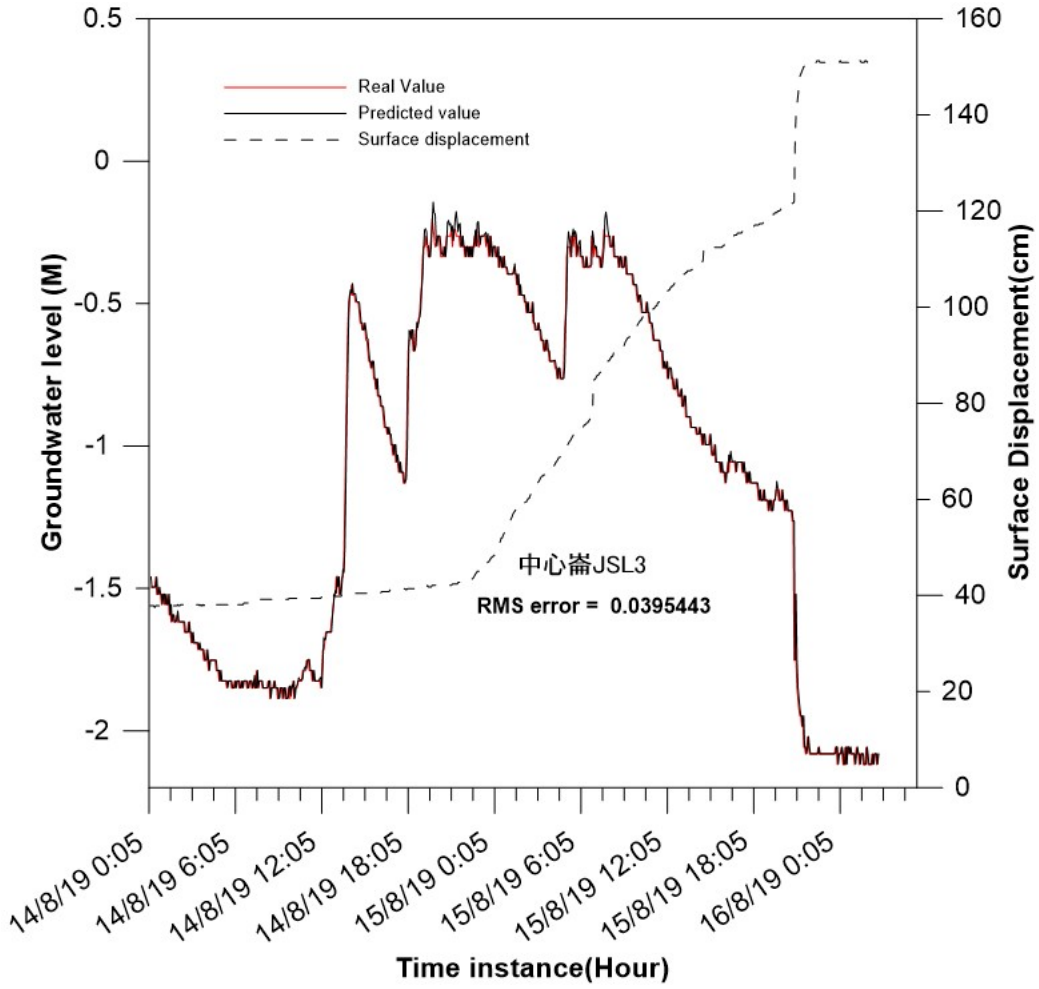
(2) 地下水位高度上升導致邊坡滑移。

(3) 邊坡快速滑移會快速降低地下水位。

(4) 地下水位可以精確模擬。



(a)降雨量量測



(b) 地下水模擬與地表變位關係

圖 32 地表變位、地下水位模擬及降雨關係

二、Qpesum降雨準確度分析

為瞭解 Qpsum 一小時降雨資料，與實際資料之差異，分析本年度試驗區降雨資料。本計畫先採用發生於 7 月 8 日至 11 日，共五場降雨分析預測與實際值降雨總量如下，誤差率介於 60%至 3522%之間，預測值均高於實際降雨量。當有實際降雨，則均有預測值，但有預測降雨，實際上不一定發生降雨。

表 14 預測暴雨誤差計算

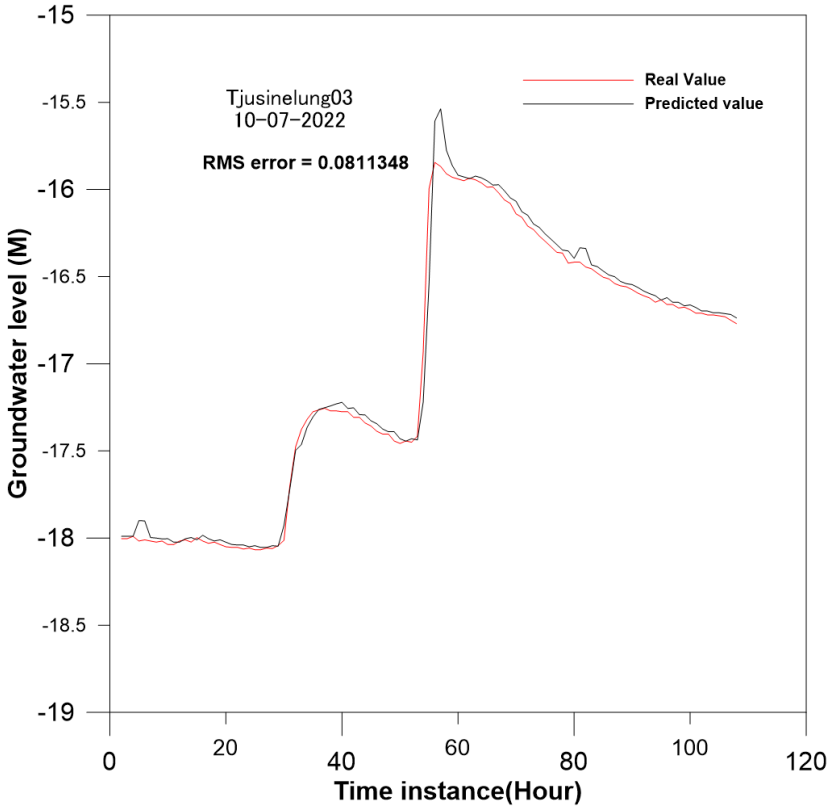
日期	降雨延時	實際總量(mm)	預測總量(mm)	誤差百分率(%)
20220708	3.33	20.5	171	734.15
20220709	1.83	64	113	76.56
20220709	5.67	9	326	3522.22
20220710	4.67	151	532	252.32
20220711	1.83	17	27	58.82

三、2022年一小時地下水及地表伸縮量預測

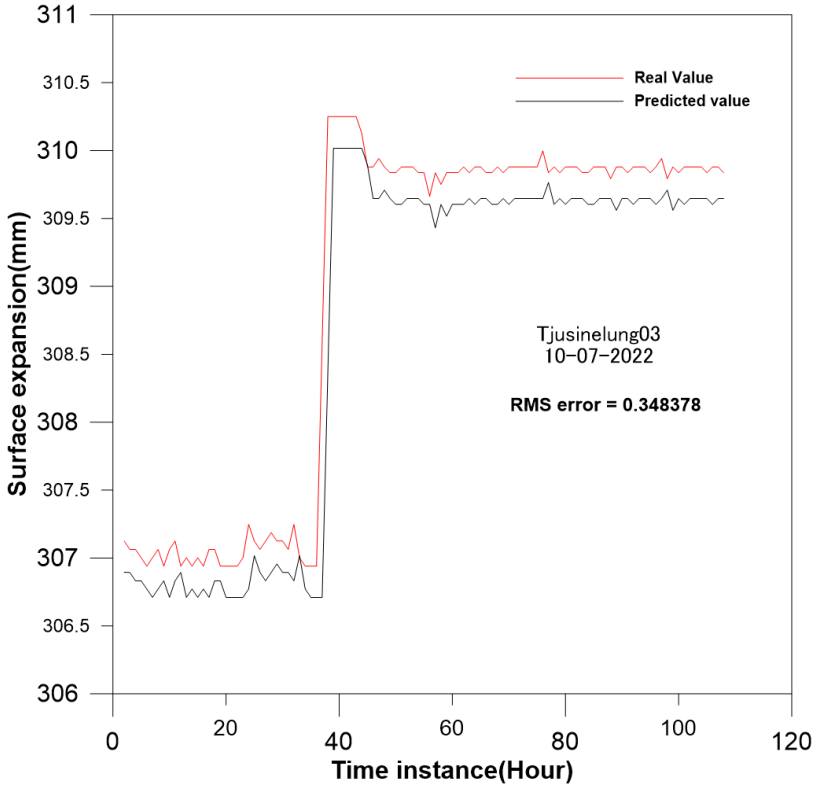
表 15 為一小時預測，根據 RMSE 來看，雨量與地下水位關係良好，而雨量預測地表伸縮量，或地下水位預測地表伸縮量，效果差不多，OW-5 號井預測較準確。顯示地表變位，可以用降雨量或地下水位，直接預測。

表 15 一小時預測

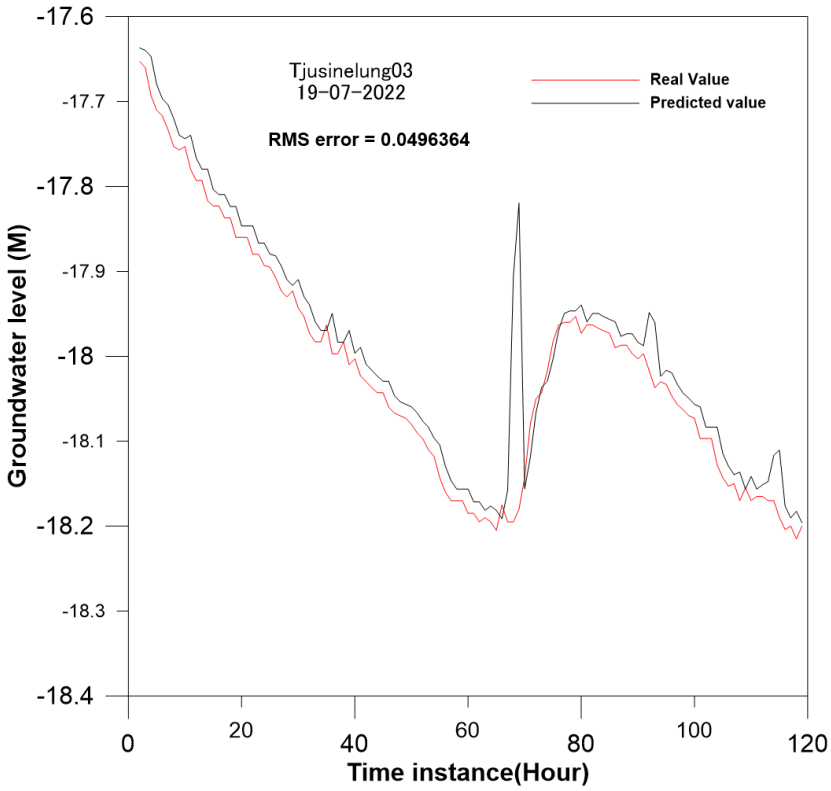
集水井	預測項目	K	β	n	α	類別	降雨日期 (日/月/年)	RMSE
JSL-OW-3	雨量預測地下水位	-0.00075	1	5	0.5	訓練	10-07-2022	0.0811
						模擬一	19-07-2022	0.0496
						模擬二	09-07-2022	0.0909
	雨量預測地表伸縮量	-0.00075	3	3	0.5	訓練	10-07-2022	0.3417
						模擬一	19-07-2022	0.1408
						模擬二	09-07-2022	0.3659
	地下水位預測地表伸縮量	-0.00075	4	5	0.5	訓練	10-07-2022	0.3484
						模擬一	19-07-2022	0.14224
						模擬二	09-07-2022	0.3739
JSL-OW-5	雨量預測地下水位	-0.00225	4	5	0.5	訓練	10-07-2022	0.0270
						模擬一	19-07-2022	0.46367
						模擬二	09-07-2022	0.0274
	雨量預測地表伸縮量	-0.00075	4	4	1	訓練	10-07-2022	0.0690
						模擬一	19-07-2022	0.0612
						模擬二	09-07-2022	0.0764
	地下水位預測地表伸縮量	-0.00075	4	5	0.5	訓練	10-07-2022	0.0690
						模擬一	19-07-2022	0.0616
						模擬二	09-07-2022	0.0764



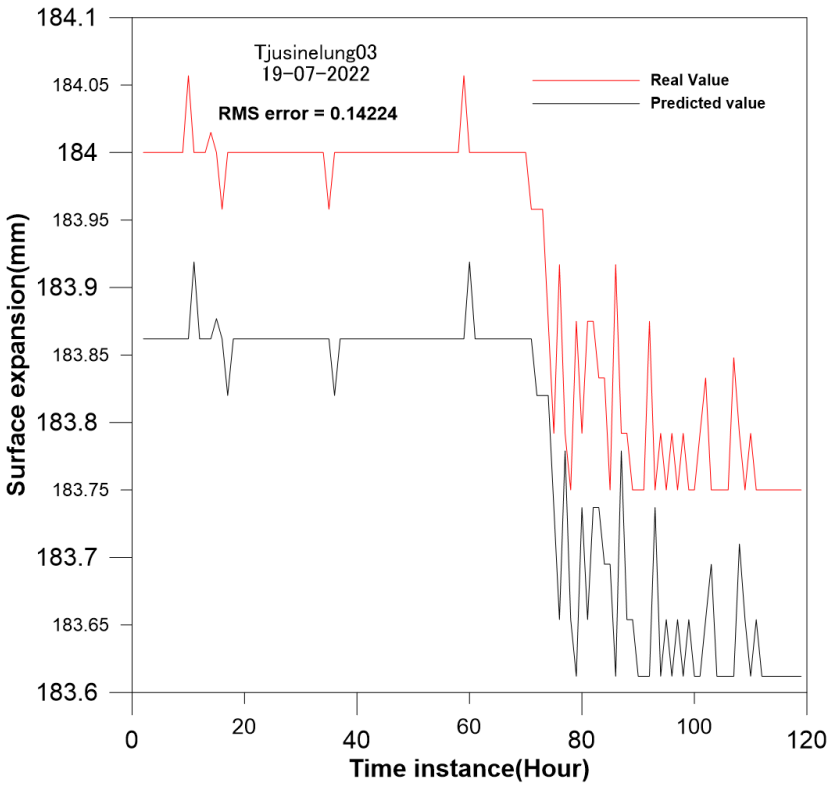
(a) Graph for Training data of JSL-OW-3



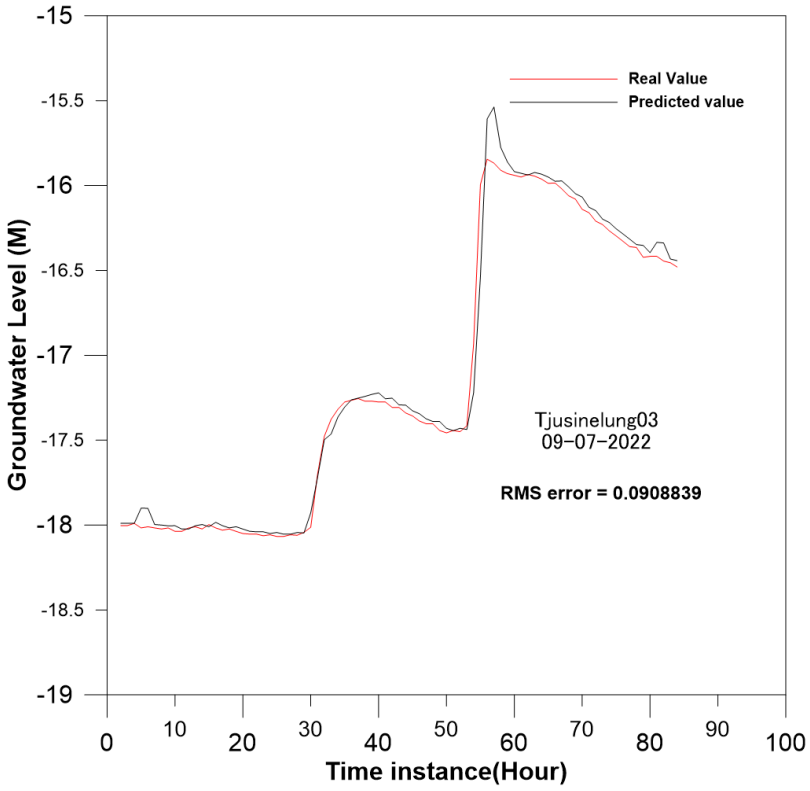
(b) Graph for training data of JSL-OW-3



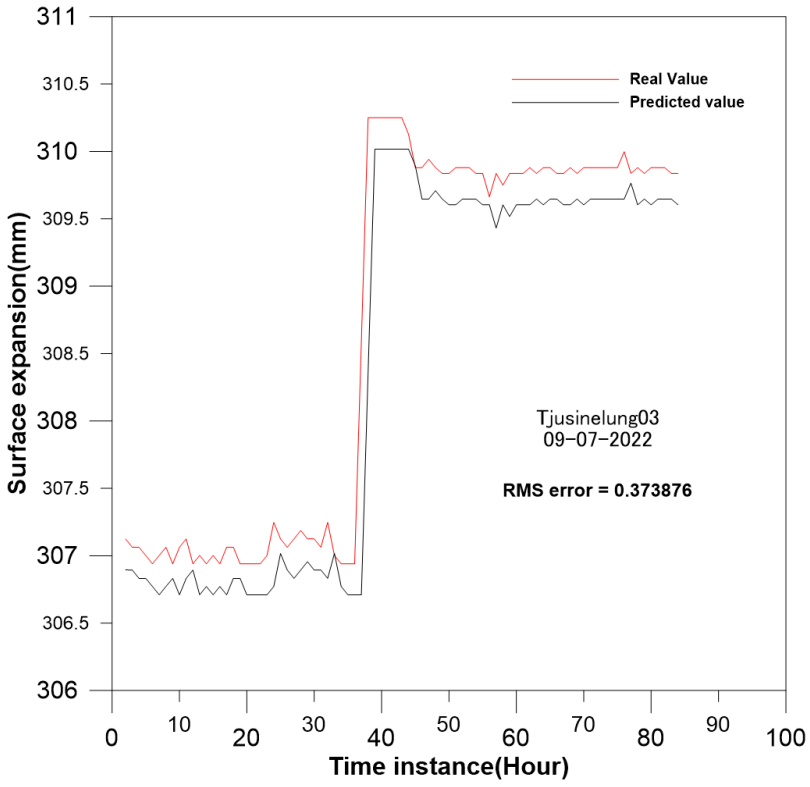
(c) Graph for simulation 1 data of JSL-OW-3



(d) Graph for simulation 1 data of JSL-OW-3

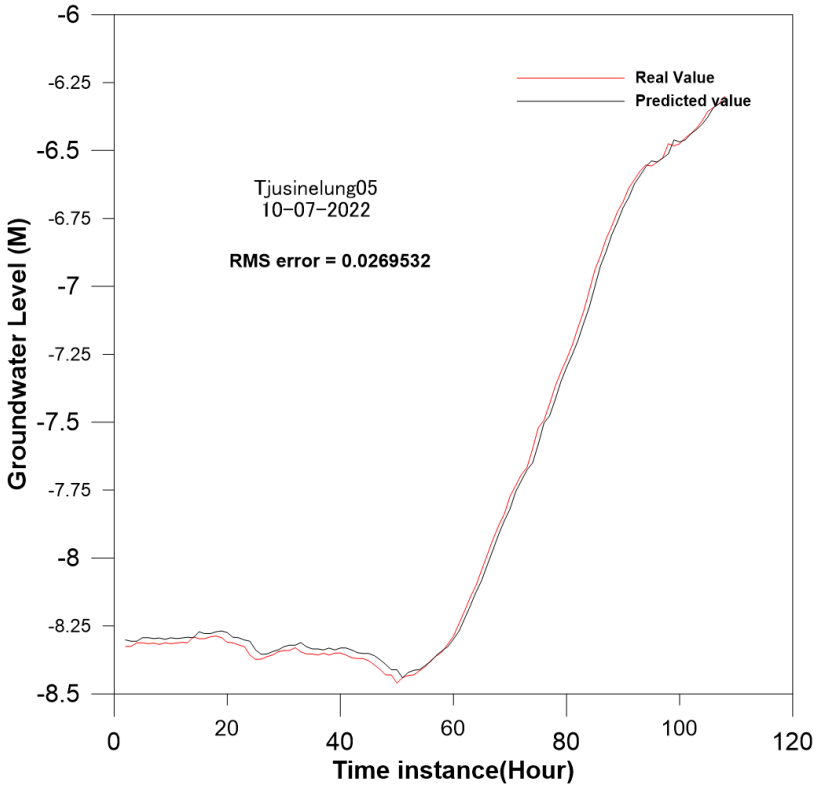


(e) Graph for simulation 2 data of JSL-OW-3

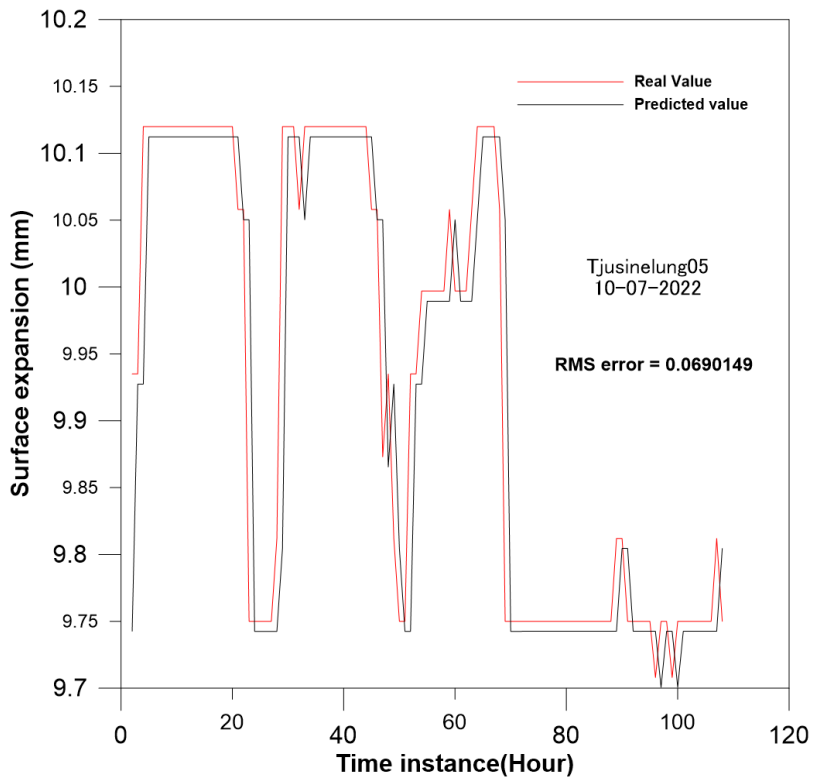


(f) Graph for simulation 2 data of JSL-OW-3

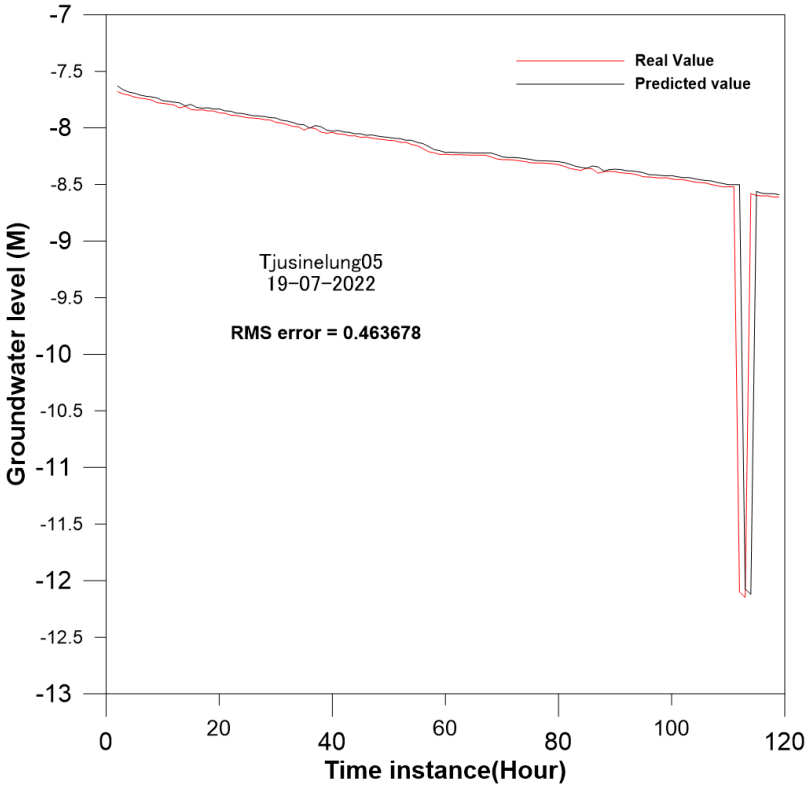
圖 33 三號井預測成果



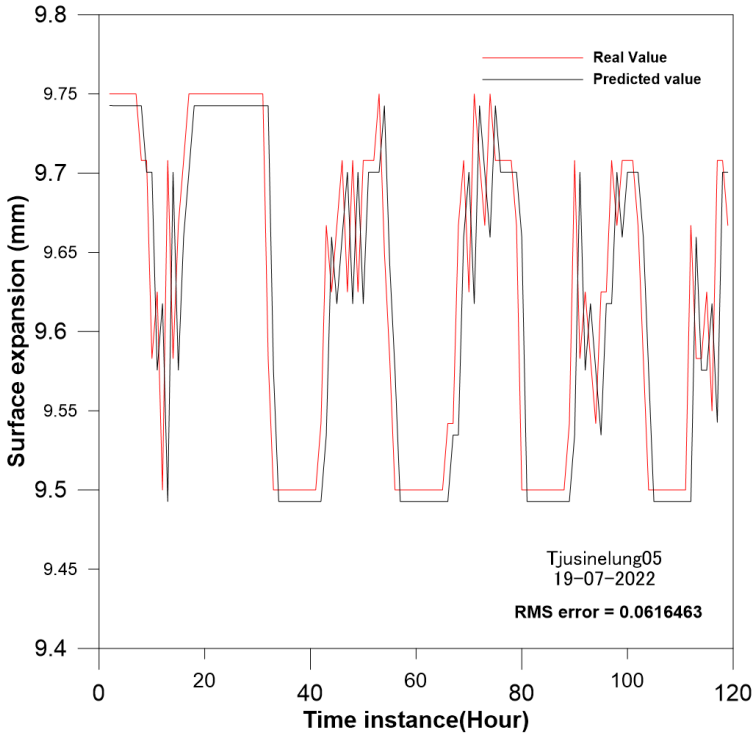
(a) Graph for training data of JSL-OW-5



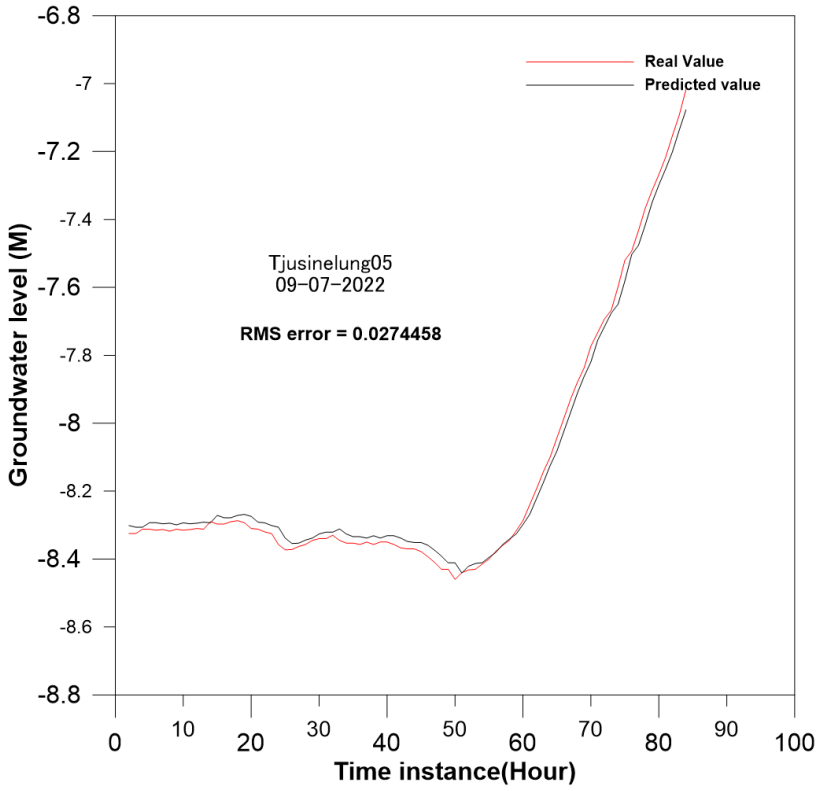
(b) Graph for simulation 1 data of JSL-OW-5



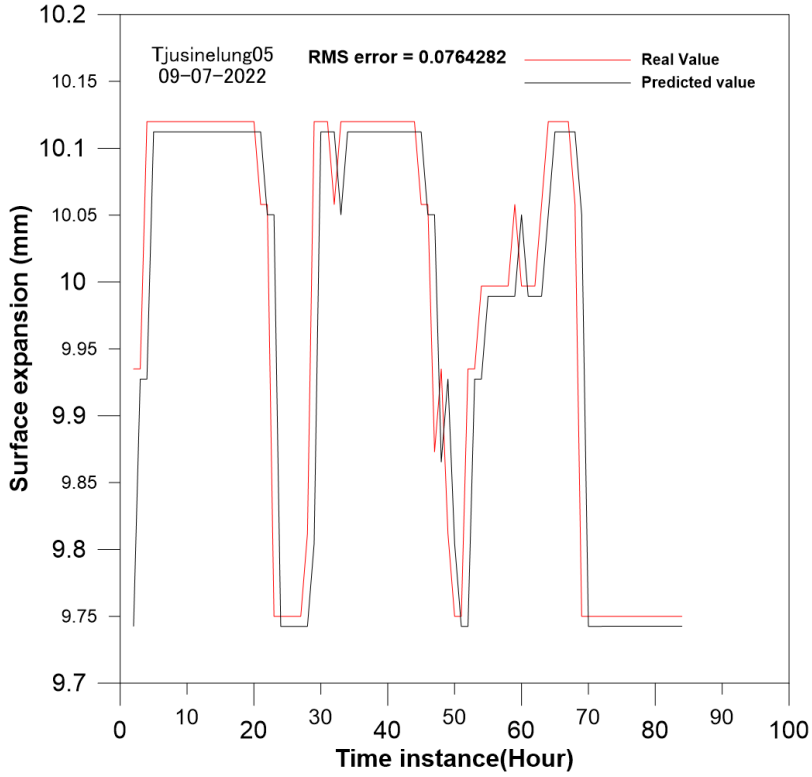
(c) Graph for simulation1 data of JSL-OW-5



(d) Graph for simulation 1 data of JSL-OW-5



(e) Graph for simulation2 data of Tjusinelung05 Station



(f) Graph for simulation 2 data of Tjusinelung05 Station

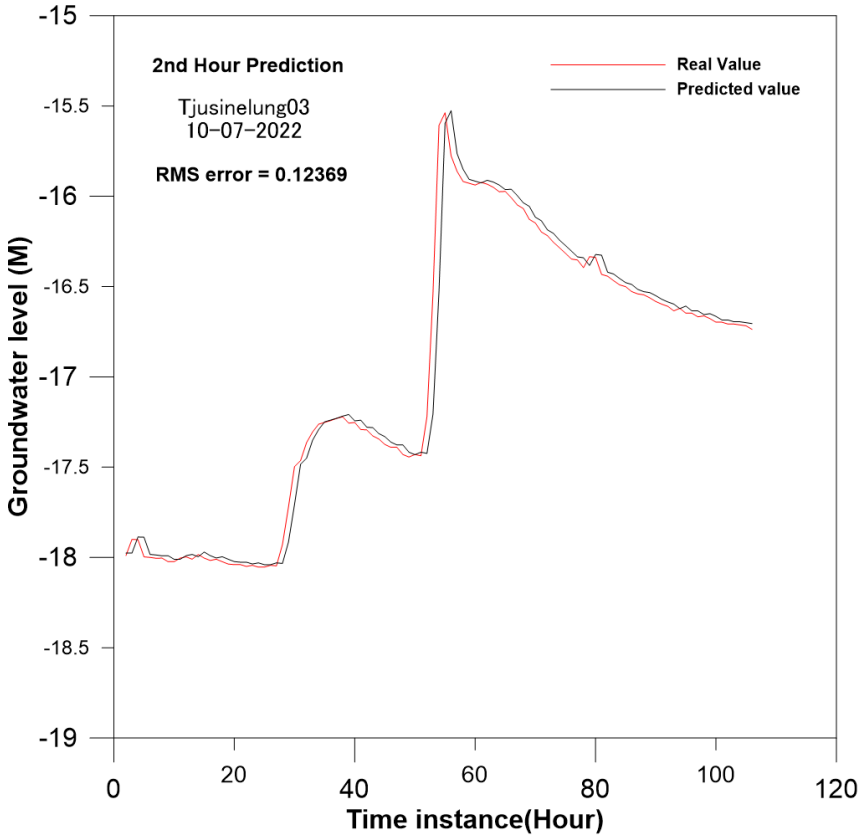
圖 34 五號井預測成果

四、兩小時後地下水位預測

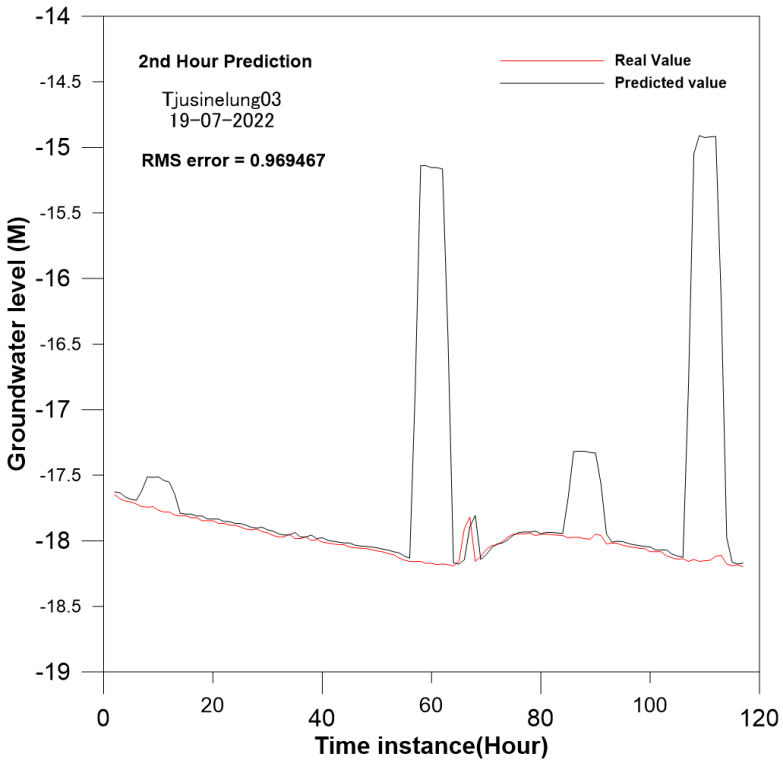
定義既有實測降雨資料 P_t，及實測地下水位 H_t，推估下一小時地下水位 H_{t+1}，再以 Qpsum 預測之一小時後降雨資料 P_{t+1}，及推估一小時後地下水位 H_{t+1}，推估兩小時後之地下水位 H_{t+2}。因預測降雨量均大於實際降雨量，預測地下水位，高於實際地下水位。預測結果如表16，結果顯示誤差擴大，但是五號集水井預測成果尚可。

表 16 兩小時地下水位預測

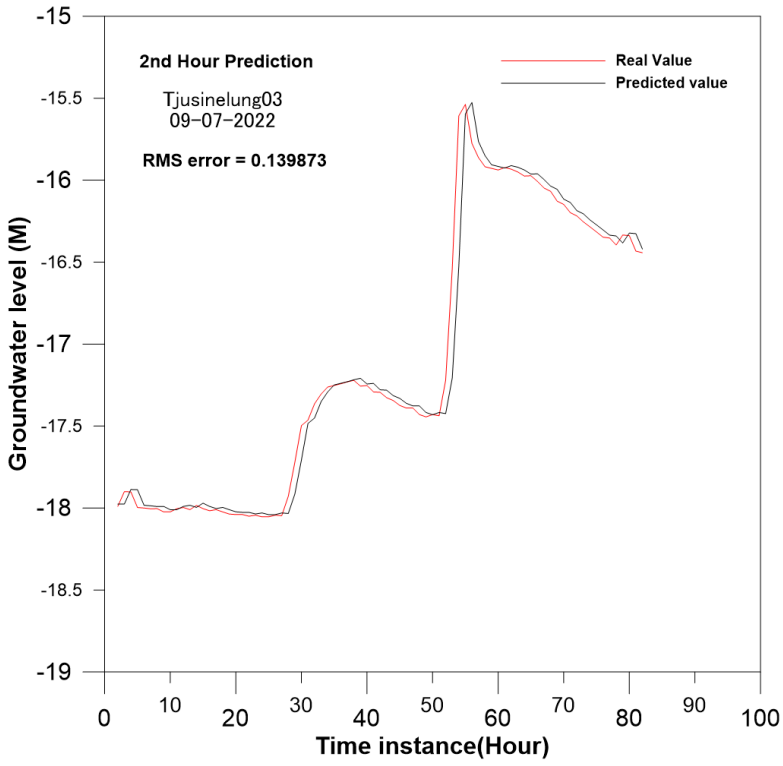
集水井	兩小時預測	K	β	n	α	類別	降雨日期 (日/月/年)	RMSE
JSL-OW-3	地下水位	-0.00075	1	2	0.5	訓練	10-07-2022	0.12369
						模擬一	19-07-2022	0.969467
						模擬二	09-07-2022	0.139873
JSL-OW-5	地下水位	-0.00225	1	2	0.5	訓練	10-07-2022	0.0270103
						模擬一	19-07-2022	1.11488
						模擬二	09-07-2022	0.0274147



(a) Graph for 2nd hour prediction training data of JSL-OW-3

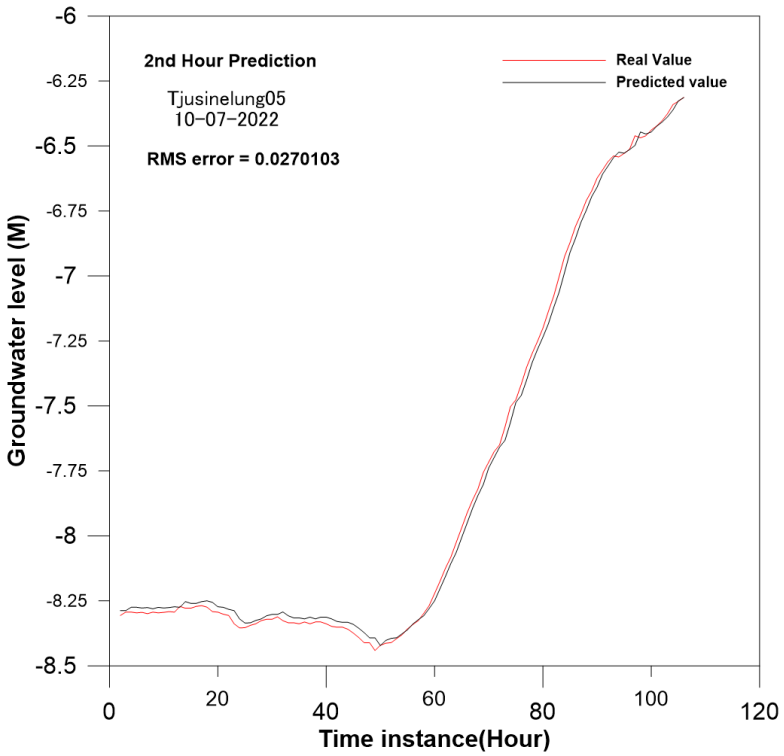


(b) Graph for 2nd hour prediction simulation 1 data of JSL-OW-3

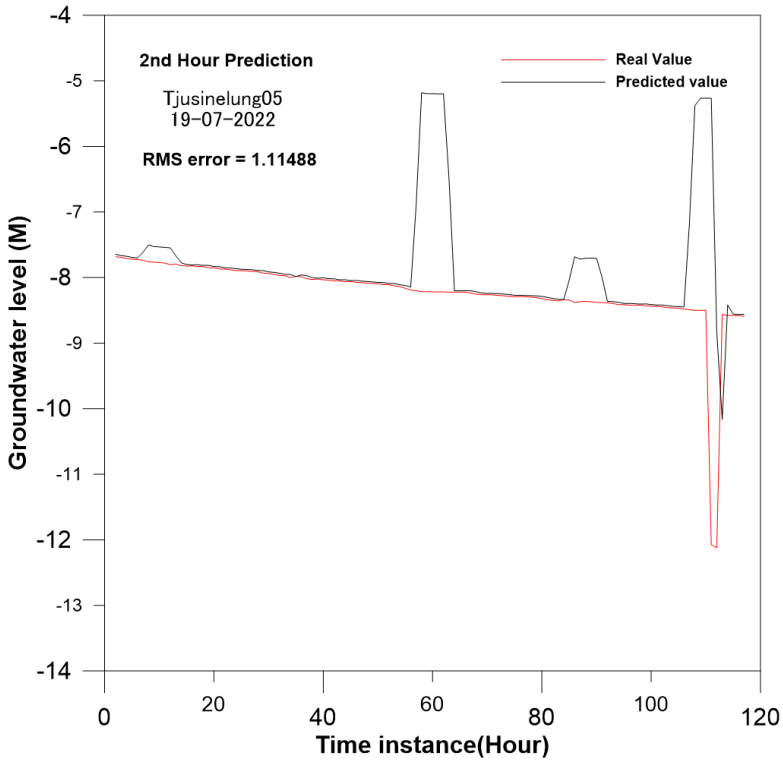


(c) Graph for 2nd hour prediction simulation 2 data of JSL-OW-3

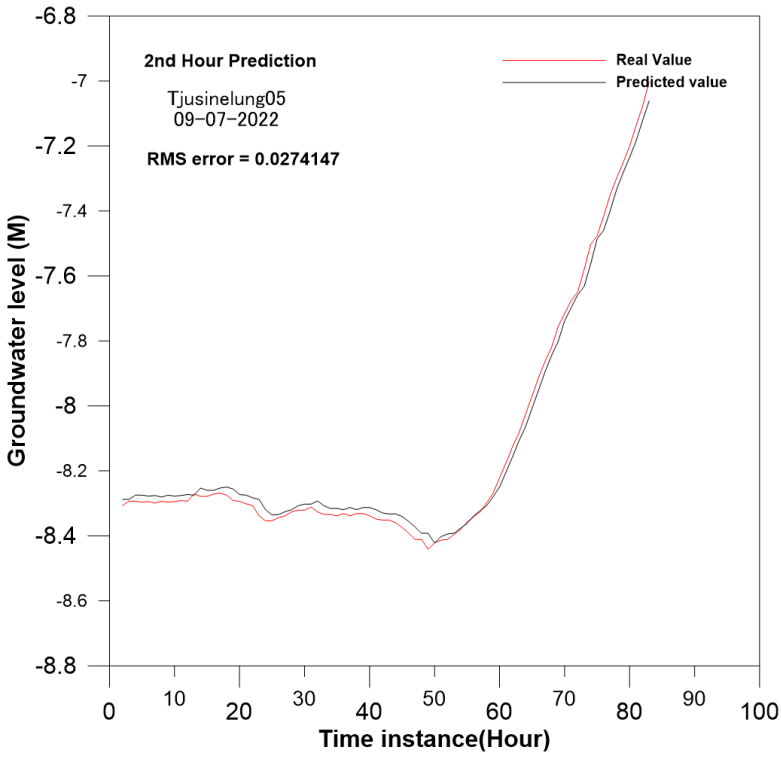
圖 35 三號井地下水位兩小時預測



(a) Graph for 2nd hour prediction training data of JSL-OW-5



(b) Graph for 2nd hour prediction simulation1 data of JSL-OW-5



(c) Graph for 2nd hour prediction simulation2 data of JSL-OW-5

圖 36 五號井兩小時地下水位預測

第二節坡面臨界地下水位預測

本計畫將此區域分割為三區，分別是 M1、M2 區域，分別計算如下：

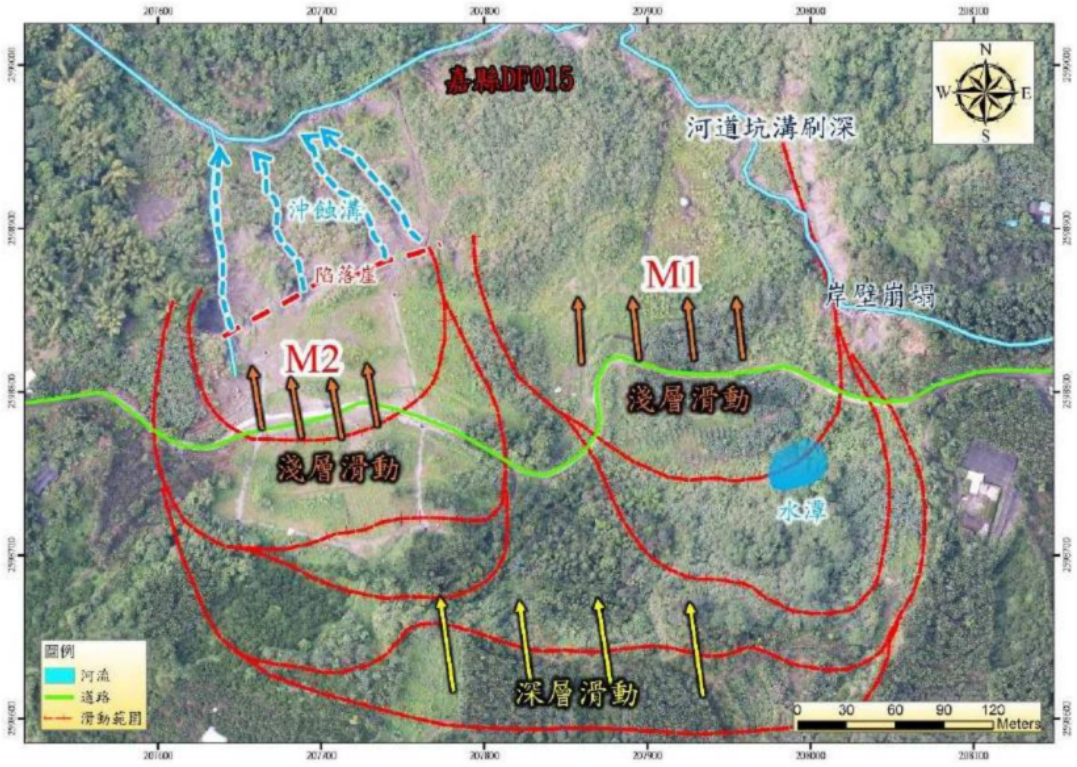
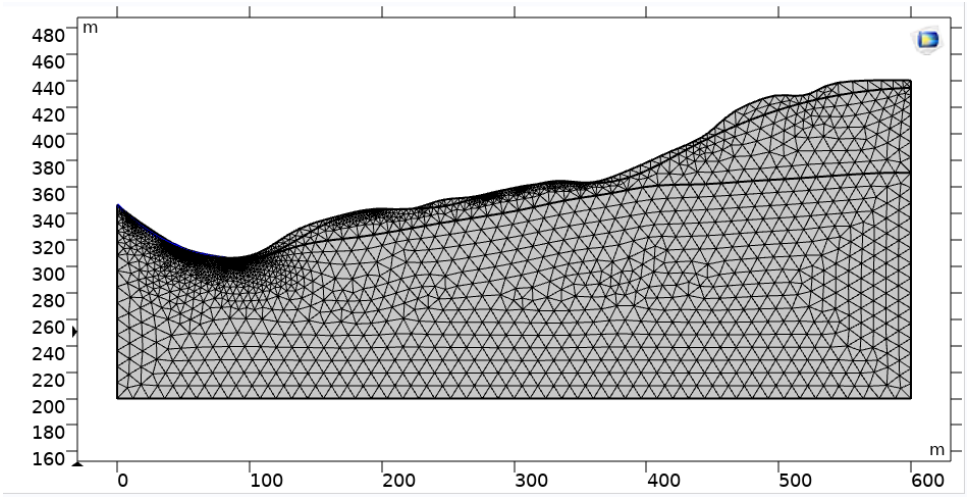
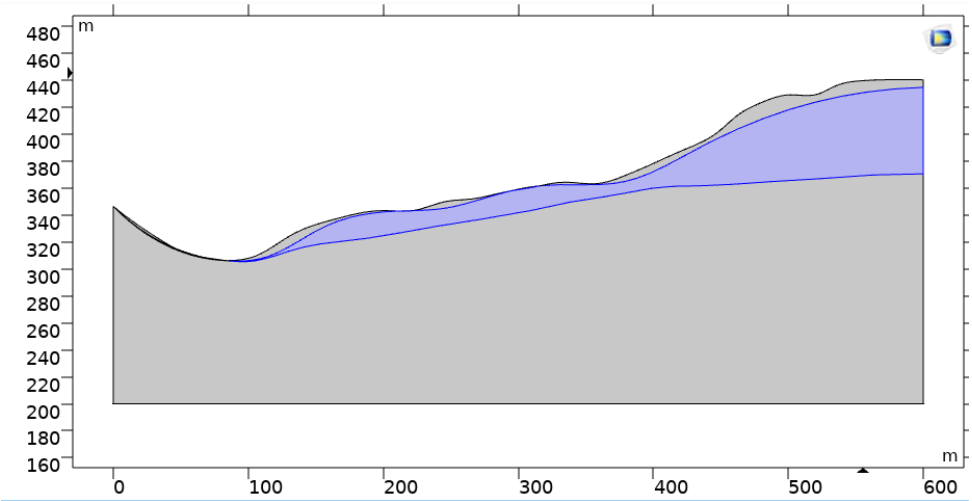


圖 37 崩塌地分區

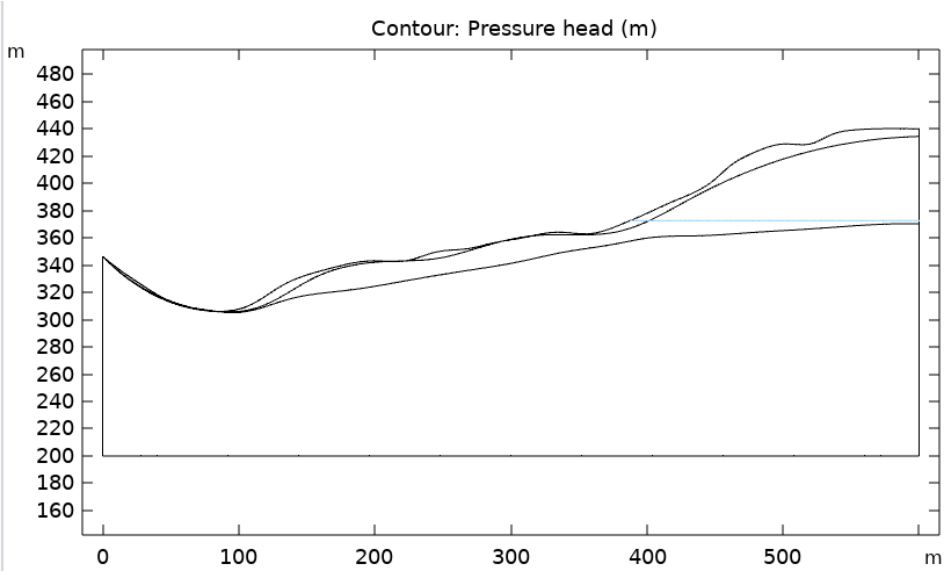
本計畫將此區域分割為兩區，分別是 M1、M2。根據地質調查分析，土層分佈依序由上而下為崩積層、卵礫石層、泥岩層。因此將區域分成三層，進行分析。M1 區域採用 JSL-OW4 水位井分析，M2 區域採用 JSL-OW2，分析結果如圖 38 及 39 所示。



(a)二維有限元素網格

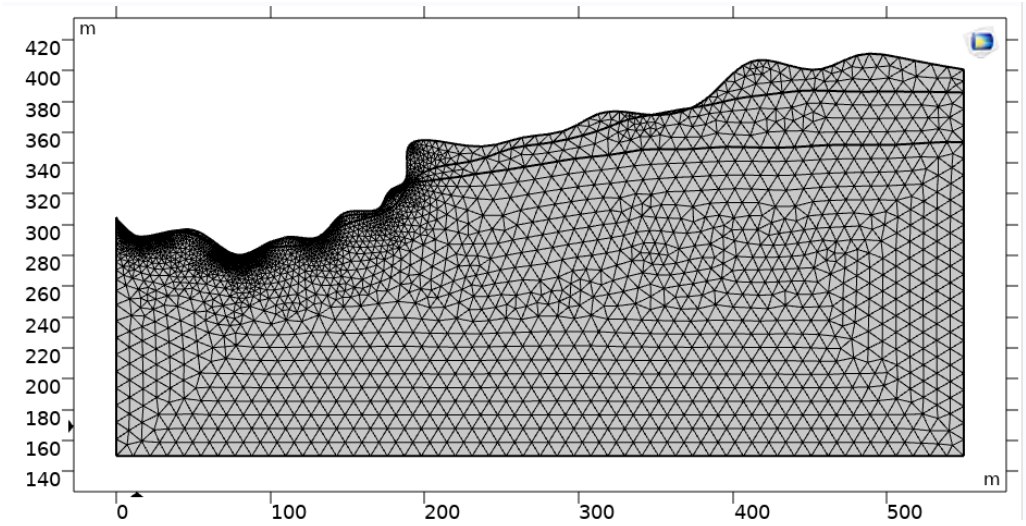


(b)暴雨期間地下水位

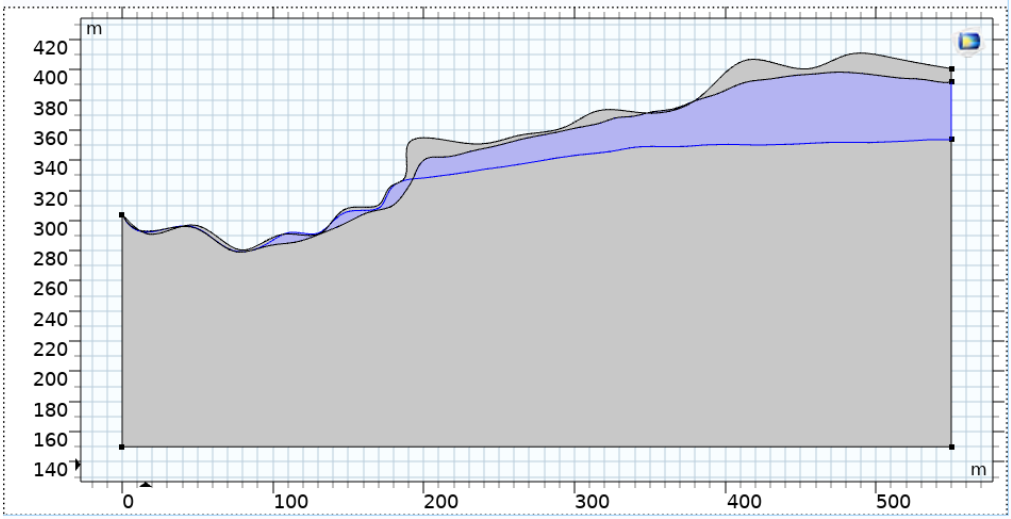


(c) 臨界地下水位

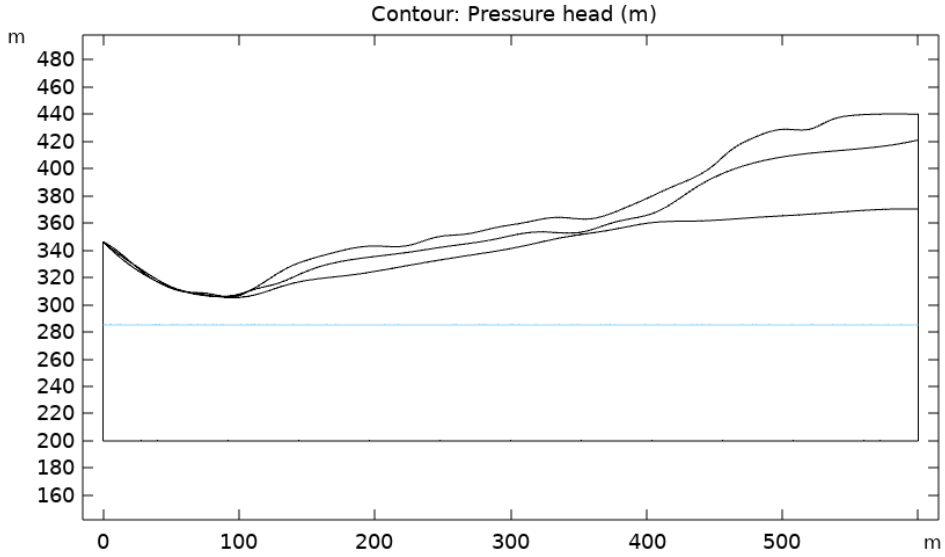
圖 38 M1 二維分析結果



(a) 二維有限元素網格



(b)暴雨期間地下水位



(c)臨界地下水位

圖 39 M2 二維分析結果

第七章 結論與建議

第一節 結論

本研究目的為利用現場歷史觀測紀錄，建立深層崩塌預警模式，選擇嘉義縣中心崙崩塌地，連結現場雨量計、地下水位計及位移量建立資料庫，並連結至中央氣象局劇烈天氣監測系統，取得下一小時預測雨量，再以發展之地下水位預測模式，預測一小時及兩小時後地下水位。同時建立理論模式及二維數值演算模式，推算臨界地下水位剖面。分析結果顯示，一小時後地下水位預測結果均方根誤差為 4cm，依據五場暴雨資料顯示，Qpesum 能預測是否發生降雨，但一小時預測降雨量較實際降雨大 58%以上，使預測地下水位高於實際地下水位，並以理論分析模式計算觀測井臨界地下水位，並利用二維數值演算，計算臨界地下水位剖面。

第二節 建議

本研究結果顯示兩小時臨界地下水位預測能力，受限於 Qpesum 預測降雨較實際降雨量高，導致兩小時後之地下水位預測高估，因此未來可投入 Qpesum 將與預測校正研究，提高降雨預測準確性，以便提高兩小時地下水位預測能力。同時根據有限的地下水位井，採用數值演算模式，發展二維地下水位剖面，未來可再整合二維剖面，發展三維地下水位預測模式。

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。

期初審查會議回覆表

委員	審查意見	回覆意見
周憲德	(一)臨界沖蝕試驗中,式(4a)忽略突擴管(由 a—A)之水頭損失,請加以檢核。	感謝指正，本研究假設入口管路放大至試驗柱體無能量損失，將於期末加入突擴損失量。
	(二)滲流長度及滲流速度之估算中,如何假定滲流之斷面積?如何驗證其正確性?	滲流之斷面積在公式中，已經透過忽略突擴損失量刪除。正確性可由實驗加壓，確認試體是否破壞，確認臨界長度。
	(三)請補充即時監測站中心崙崩塌地集水區之地質、地貌及地下水特性。	補充於第四章第一節
	(四)如何由無限邊坡滑動面推估實際滑動面與滲流長度及滑動量位置,請補充說明。	(1)需選定流入點，再研判流出點，本研究曾於梨山地區測試，但無法於洪水期間確認流出點是否正確。

		(2)本試區因為滑動面明確，滲流流出點明確，且可據以推定入滲點，將於期末選定斷面補充說明。
劉正千	(一)深層崩塌即時預警是非常重要的工作,本項計畫已針對這個主題,連續獲得多年的經費資助,也完成了一些具體成果。建議製作一個總表,詳列各年工作與完成項目,同時也詳加規劃未來各年要做的內容,讓我們比較瞭解目前可以做到什麼?未來何時可以做到什麼?	謝謝建議，藉由統整過去成果，及未來能推動方向，讓本計畫能夠完善的規劃對於深層崩塌預警能夠提出之貢獻，目前規劃詳見表 1。
	(二) P-9 使用 QPESUM 資料,但現在中央氣象局使用的是 CWB QPE 資料了,建議採用最新最好的預報資料以提升準確率。	經比對 QPESUM 及 CWB QPE，確認來源資料相同，CWB QPE 主要為圖形化及客製化加值應用，兩者準確度相同。

	(三)目前線上預警系統介面為何?如何使用以及和其他圖資套疊?建議將成果以 API 發布,可以介接到水保局 BigGIS 上,提高使用效能。	目前介面為獨立研發，輸出為一小時後之地下水位預測值，未來可以直接將座標、地下水位預測值提供給水保局，BigGIS 可以根據資料，透過圖形套疊，直接應用。
張德鑫	(一)降雨與地下水水位之變化與地下水位深度、土壤入滲特性、地質構造、地表坡度等有關,故有其個別場址之差異性,目前採用線性水庫是否其線性水庫數量與參數都不同,其降雨與地下水水位數值模擬何者較為合宜。	每個集水區的每個點位其線性水庫數量與參數都不同，需依據實際資料模擬來確定，同時如果進行地下水抽出如集水井或排水廊道設置，則參數也會隨之改變，同時由模擬結果，也可以看出降雨與地下水位關係是否明顯。
	(二)目前僅能針對水位觀測井做參數調教,其後續針對 2 維或 3 維度如何推估或模擬,請補充說明。	將於期末完成詳細分析說明

	(三)其深層崩塌採用有限元素法數值模擬推估臨界地下水位及可能崩塌面,有無結合降雨入滲一地下水水位變化,結合邊坡穩定數值模擬一起模擬。	感謝建議，將嘗試模擬。
李明熹	(一)請於第一章補充前幾年之重要研究成果與本年度之相關性之創新性。	以補充於第一章第一節
	(二)地下水位預測值與實際值準確率為何?若全年再加上QPESUM 預測雨量是否會增加預測誤差?	預期會增加誤差，但可提供多一小時預警。
	(三)模式中之參數如率定?不同地區是否適用?	不同地區，參數不同，需重新率定。
	(四)崩塌地量測資料(地表伸縮量、孔內伸縮量及地下水位等)如何確認資料之正確性?	本計畫仰賴水保局委辦公司於現場裝設設備，提供資料，再撰寫程式存入資料庫，詳閱年度成果報告，建議計畫能增加儀器率定章

		節，定期率定設備，保持資料正確性。
黃效禹	(一)本計畫 P46 圖 16 地表伸縮計資料可見 2019 年 7 月至 8 月間有 1 較大變位,去年已選擇嘉義中心崙為試驗區, 是否有利用此歷史資料嚐試演算結果與模擬比較?	初步完成模擬於第六章第一節，將於期末完成 1.應用 Qpsums 即時降雨資料，預測兩小時後地下水位。 2.採用理論公式及二維有限元素法，計算整體坡面臨界地下水位。
	(二) 此預警系統之模式,是否可能反饋應用在工程治理提供設置後可提升穩定之評估。	可以用以下方式評估治理效益 1. 整治前及整治後訓練及模擬，推得線性水庫參數，即可了解整治後，地下水位上升趨勢是否變慢，變慢表示整治效益。

		2. 建議可提供全台灣裝設水位計及雨量計資料，進行全面性檢討。

期中審查會議回覆表

審查意見	回覆意見
1. 請修正 P.23 中公式之壓力關係式，並修正入口之能量損失(即無法適用伯努利定理)。	修改入口管路放大至試驗柱體能量損失ΔH
2.中心崙即時監測站之位移量只有地表伸縮計嗎?(圖 20)孔內伸縮計之位移資料也請一併列出?此場域之滑動深度及滑動範圍為何?	列於期末報告說明
3. 圖 20(P.50)中不同時距之雨量不易辨別，文中並未說明降雨與位移量之關係，請補充。	於期末報告說明
4. 圖 21(P.51)之示意圖剖面請在圖 22 中標示清楚。	於期末報告說明

5. 表 11(P.53)應為中心崙之感測器，並未列出梨山之感測器，請補 充。	本年度以中心崙為對象
6. P.81 之測站誤植為”新中崙”，請更正為”中心崙”。	已更正
7. P.83 地下水位上升歷程與滑動歷程之相關性，除 2019 8/14~8/16 之時段外，參照圖 20，是否有其他時段之地下水位變化可供驗証， 請補充說明。	目前暫時無其他變動資料
8. 本計畫研究中心崙大規模崩塌地區，建立崩塌即時預警模式，在 採用理論公式及二維有限元素法計算整體坡面臨界地下水位時， 是否需先有鑽探及了解滑動面深度，	本計劃採用現場鑽探資料，劃設滑動面，於期末報告補充。

才能計算整體坡面臨界地下水位。	
9. 使用即時降雨資料預測二小時后之地下水位部分，有無機會針對 24 小時內(例如 6hrs，12hrs，18hrs)之地下水位變化預測並對應 於崩塌的預(警)測?	此區域對於地下水位敏感度高，將嘗試預測 6 小時後地下水位。

期末審查會議回覆表

審查意見	回覆意見
1. 於崩即時預警的信賴度有多少?有沒有機會在不久的未來應用在行政作為上?	目前精準度高，可參考報告書P.83－92，預計未來提升Qpesums 精確度，可以透過雨量直接預測地表變位。
2. 請問此系統有無應用限制?未來有期待整合更多資訊嗎?	本系統需先檢測降雨是否能反應地下水及地表變位增量，若關係良好，則可以應用。未來將整合Qpesums 修正資料，及實際山坡地集水井、改善工程等地紋資訊，提供更精確預測。
3. 計畫成果具備可行性。	感謝認同。