
**基於多深度水壓觀測之自動化邊坡滑動監
測預警系統之研發與現地測試**
**Development and Field Test of Automatic
Slope Sliding Monitoring and Early
Warning System Based on Multilevel
Groundwater Pressure Monitoring**
(成果報告)

執行單位：國立台灣大學

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：蔡瑞彬 副教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 11 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)



基於多深度水壓觀測之自動化邊坡滑動監測預警系統 之研發與現地測試

摘要

一般天然邊坡的淺層崩塌主要與降雨所造成的孔隙水壓上升有關，如何有效、經濟且持續的針對邊坡內各分層水壓變化進行量測為本計畫擬解決之核心問題。為能初步瞭解此問題，需先建立適用於邊坡之多深度水壓監測系統，因此本計畫發展一新型自動化分層水壓量測系統，針對邊坡多深度孔隙水壓變化進行觀測，將自動化量測系統在室內進行調整與測試後，於現地安裝並進行初步測試與調整。

根據期中初步觀測結果得知本計畫所使用之方法及試驗設備可成功於現地量測降雨入滲所產生之地下水位變化，且感測器所量測之數據與降雨事件發生之時間點有明顯的相關性。但本計畫也發現部分感測器及管路放置於現地期間受外力影響(日曬或泥沙等因素)受損，影響數據量測，但也因此更進一步改善與優化觀測系統。在設備改善更新後，觀測系統已可於野外長時間觀測，然而更新設備後至目前並無降雨量較大且持續時間較長之降雨事件發生。為檢驗觀測系統是否可量測邊坡地下水位面之上的水位變化，本團隊使用水車灑水的方式模擬降雨事件，觀測結果顯示本系統在未飽和帶及飽和帶皆可成功量測到

入滲事件所引起之水壓變化，此結果說明本團隊建立之系統於邊坡進行分層孔隙水壓觀測的可行性，最後本研究建立此分層觀測系統的安裝與標準使用流程。

關鍵詞：多深度水壓觀測、光纖光柵感測器、邊坡水位監測



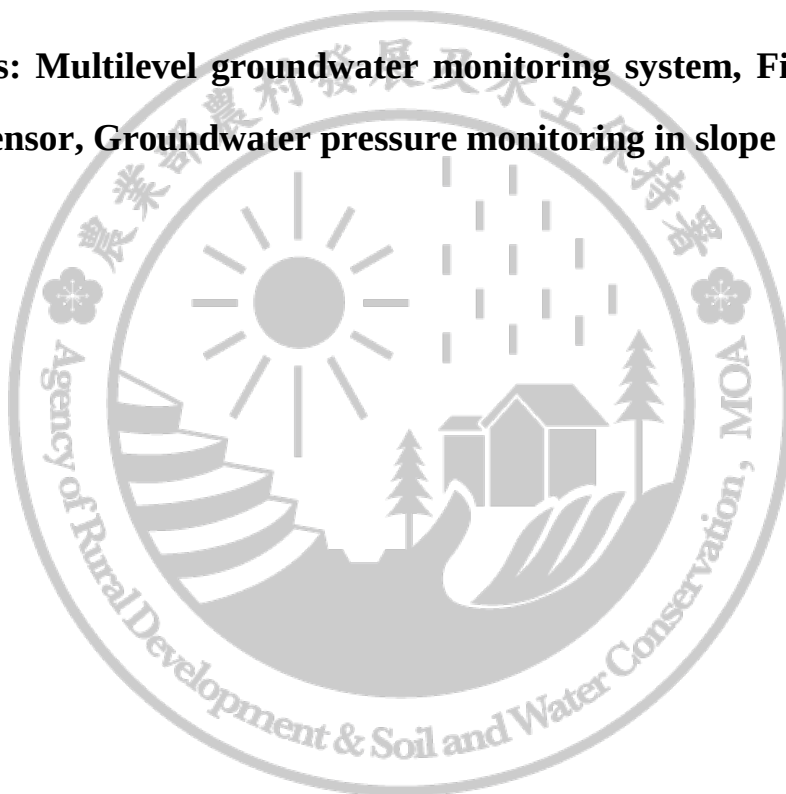
Development and Field Test of Automatic Slope Sliding Monitoring and Early Warning System Based on Multilevel Groundwater Pressure Monitoring

Abstract

The natural shallow slope failure is highly correlated to the rise in pore water pressure caused by rainfall. The crucial issue addressed in this project is the effective, economical, and continuous measurement of groundwater pressure variations in different layers within the slope. Establishing a suitable multi-depth groundwater pressure monitoring system for slopes is essential to cope with this issue. Therefore, this study has developed a novel automatic monitoring system for measuring groundwater pressure in the slope composed of multi-stratum, aiming to observe the variations of pore water pressure at multiple selected depths in slopes. After testing and refining the automated monitoring system in the laboratory, this system was installed in the chosen site for field tests. This system was further adjusted based on the preliminary test results. The results present that the proposed approach successfully measures the groundwater level variations caused by rainfall infiltration since the measured groundwater level variations are highly correlated to rainfall events. However, during the on-site period, the fiber Bragg grating sensor and wires were subject to damage from external forces such as exposure to sunlight or sediment, resulting in unexpected data. Nevertheless, it led us to further improvements and optimization of the monitoring system. After

the improvements and optimization, monitoring system can now be used for long-term field observations. Due to the lack of the heavy rainfall and long duration event after replaced the equipment to present. Thus, water sprinkling was used to simulate the rainfall event. According to the observation results, this system can successfully measure the variations of pore water pressure caused by infiltration events in the unsaturated zone and saturated zone. Above results validated the feasibility of this system in monitoring multilevel pore water pressures in slopes, and established the on-site sensing system installation and standard operating procedures.

Keywords: Multilevel groundwater monitoring system, Fiber Bragg grating sensor, Groundwater pressure monitoring in slope



目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	VIII
第一章 緒論.....	1-1
第一節 計畫目的.....	1-1
第二節 邊坡崩塌成因及預警方式	1-1
第三節 分層水壓與溫度感測器	1-4
第二章 工作執行方法與步驟.....	2-1
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖.....	3-1
第二節 場址介紹.....	3-3
第三節 系統室內調整與校正	3-3
第四節 地電阻施測.....	3-5
第五節 鑽井及配管過程	3-7
第六節 多深度觀測站建立及感測器配置	3-12
第七節 觀測結果說明	3-18
第八節 觀測系統安裝說明	3-38
第四章 結論與建議	4-1
第一節 結論.....	4-1
第二節 建議.....	4-2
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附-1

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附-1

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附-8



表次

表 3-1 計畫甘特圖	3-1
表 3-2 A 組試驗紀錄表	3-32
表 3-3 B 組試驗紀錄表	3-35



圖次

圖 1-1 地下水在地層內土壤與岩盤中流竄示意圖 (Johnson and Sitar, 1990)	1-2
圖 1-2 單組 FBG 分層水壓計實體.....	1-5
圖 2-1 工作流程	2-2
圖 3-1 FBG 量測系統整體示意圖.....	3-2
圖 3-2 試驗場址位置圖	3-3
圖 3-3 FBG 感測器訊號校正過程.....	3-4
圖 3-4 封塞器壓力測試過程(1)	3-4
圖 3-5 封塞器壓力測試過程(2)	3-4
圖 3-6 地電阻佈線位置圖	3-5
圖 3-7 地電阻佈線過程(1)	3-6
圖 3-8 地電阻佈線過程(2)	3-6
圖 3-9 電阻電極安裝過程.....	3-6
圖 3-10 地電阻主機架設.....	3-6
圖 3-11 地電阻結果及建議鑽井位置.....	3-7
圖 3-12 實際鑽井位置	3-8
圖 3-13 鑽井機具進場.....	3-8
圖 3-14 鑽井機具確認位置及水平.....	3-8
圖 3-15 鑽井過程(1)	3-9
圖 3-16 鑽井過程(2)	3-9
圖 3-17 地質圖元	3-10
圖 3-18 PVC 管	3-11
圖 3-19 開篩段保護工程	3-11
圖 3-20 套管安裝過程	3-11

圖 3-21 濾料回填過程	3-11
圖 3-22 套管及濾料分布示意圖	3-12
圖 3-23 自動化系統於現場之照	3-13
圖 3-24 空壓機於現場之照片	3-13
圖 3-25 管路配置及自動化系統相對位置圖	3-14
圖 3-26 線路放置於水溝內(1)	3-14
圖 3-27 線路放置於水溝內(2)	3-14
圖 3-28 線路放置於 PVC 管內	3-15
圖 3-29 線路轉角處	3-15
圖 3-30 周圍線路(1)	3-15
圖 3-31 周圍線路(2)	3-15
圖 3-32 周圍線路(3)	3-16
圖 3-33 封塞器及感測器放置位置示意圖(1)	3-17
圖 3-34 封塞器及感測器放置位置示意圖(2)	3-17
圖 3-35 感測器組裝圖(1)	3-17
圖 3-36 感測器組裝圖(2)	3-17
圖 3-37 試驗場址與新北站之相對位置圖	3-19
圖 3-38 感測器及降雨資料分析圖	3-20
圖 3-39 張力計、含水量計及降雨資料分析圖	3-21
圖 3-40 氣管龜裂(紅圈內)	3-23
圖 3-41 黑色水管包住氣管	3-23
圖 3-42 重新進行管路配置	3-23
圖 3-43 封塞器及感測器放置位置示意圖(1)	3-25
圖 3-44 封塞器及感測器放置位置示意圖(2)	3-25
圖 3-45 新北站降雨量圖	3-27

圖 3-46 新北站降雨量圖(續)	3-28
圖 3-47 封填黏土測試	3-29
圖 3-48 封填黏土過程(1)	3-29
圖 3-49 封填黏土過程(2)	3-29
圖 3-50 皂土回填於地表	3-30
圖 3-51 地表開挖	3-30
圖 3-52 開挖坑洞灑水及積水圖	3-31
圖 3-53 石英砂回填圖	3-31
圖 3-54 A 組試驗結果圖	3-34
圖 3-55 B 組試驗結果圖	3-36



第一章 緒論

第一節 計畫目的

在只考慮降雨因素的條件下，當邊坡孔隙水壓上升時，其有效正向應力將減少，土壤阻抗下降，使其應力路徑逐漸往破壞包絡線移動，增加邊坡破壞機率（Cascini et al., 2010）。為在邊坡破壞之前發出預警，本計畫提出以新型自動化分層水壓量測系統，以監測邊坡孔隙水壓變化，及分析孔隙水壓與邊坡穩定性之關係，找出邊坡破壞對應之孔隙水壓門檻值，建立邊坡預警系統。為達此目的，本年度計畫需先建立適用於邊坡之多深度水壓監測系統，本計畫內容係發展與應用新型自動化分層水壓量測系統，以監測邊坡孔隙水壓變化與邊坡穩定性之關係，將現有之自動化量測系統進行調整與測試後，將此系統放置於現地進行初步測試與水位分層量測，以作為下一年度預警系統建立之基礎。

第二節 邊坡崩塌成因及預警方式

依據過去的經驗可知，在沒有地震力產生的情況下，一般天然邊坡淺層主要是因為降雨造成地層內水壓的增加而造成崩塌。淺層邊坡崩塌通常發生於原地岩石風化之土層或崩積層（Anderson and Sitar, 1995），而長期深層滑動則與長期水壓之累積有明顯關係（Bonzanigo et

al., 2007)。圖 1-1 顯示降雨期間邊坡地層內之水壓與滲流現象是土壤力學與地下水動力學互制的複雜行為。Johnson and Sitar(1990)指出地層內可能存在植物根系生長與壞死所遺留之孔隙、動物坑道或破裂岩層等，稱之為巨大孔隙或土管，故水力傳導係數與周圍地層相差甚大，這些區域所量得之水壓分佈並非靜水壓分佈。此外，邊坡地層內之滲流特性不僅存在區域特性，在同一地點也可能因降雨型態與上邊坡地層之入滲特性或地層內滲流管道之堵塞等因素而隨時間改變(Johnson and Sitar, 1990)。



圖 一-1 地下水在地層內土壤與岩盤中流竄示意圖 (Johnson and Sitar, 1990)

因邊坡崩塌可能造成生命與財產之嚴重損失，研究人員一直在尋求有效之邊坡崩塌預警方法。在降雨所導致坡地崩塌的預警方法中，目前多為使用降雨強度與降雨延時的經驗法則建立門檻值(Keefer et al., 1987)，但是降雨與邊坡崩塌在力學上並無直接關係，且未飽和層

土壤含水量分布(臨前條件)對於降雨入滲過程亦有相當程度之影響，故此方法之可靠度仍然有限(Johnson and Sitar, 1990)。

另一種預警方式是選擇使用測傾儀量測地層位移並訂立預警值(Green and Mickelsen, 1988)。地層位移與邊坡崩塌在時間上並沒有直接的理論關係，因此無論是使用累積位移量或位移速度來訂定邊坡崩塌預警值也都是屬於經驗法則，缺乏可以廣泛使用的可靠性。Johnson and Sitar (1990)指出若要評估與邊坡穩定相關之水力行為，必需在潛在不穩定區域監測孔隙水壓，而在孔隙水壓之監測上，傳統水壓量測大多使用觀測井與水壓計，然而由於井管內封層不易等問題，在直徑約 100mm 之觀測井內通常僅能安裝 2~3 個水壓計，對於構造複雜的地層而言，較難觀測到各個分層的水壓變化，僅能觀察到單井井管開篩段之平均水位，因而低估水位變化，造成傳統觀測井在預警功能上大打折扣。

電子式感測器具有容易受潮損壞、易受電磁波干擾及雷擊破壞、與不易串接成多點分佈式量測的缺點。近年來光纖感測技術發展迅速，已被廣泛地應用在各種物理量的量測(Dong et al., 2005; Kashyap, 1999; Kojima et al., 2003; Liu et al., 2000; Xu et al., 1993; Zhao et al., 2004)。

光纖感測技術相對於傳統電子感測技術的優點包括(1)體積小—光纖直徑一般為 250 μm 左右；(2)耐久性高—光纖之主要成份是矽(silica)

為非金屬，可以長期埋在地下而不易腐蝕或改變其性質；(3)光纖訊號可長（數十公里）距離傳輸而不受電磁波干擾或衰減；(4)可以在同一光纖上做多點分佈式的監測。這些感測器能夠與傳統現地監測系統匹配，同時可以單獨或多種感測器做交互性串接成列，做地層內相關物理量剖面之監測。與電腦及通訊系統結合，監測數據可以做即時傳輸或紀錄。

第三節 分層水壓與溫度感測器

本研究團隊已完成「可重複利用光纖布拉格光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)分層水壓與溫度感測器」雛形開發，其實體如圖 2 所示。FBG 分層水壓與溫度感測器可以分層量測地層內水壓與溫度變化，其使用方式是將 FBG 感測器放入地下水觀測井的 PVC 套管內，然後使用空壓機對上、下封塞器同時進行充氣，使封塞器（效用即為分層阻隔器，packer）可以緊貼 PVC 管壁。此封塞器可抵抗 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 水壓力，因此將其打氣撐開後可有效阻絕井管內之垂向水流，故配合管外皂土封層將可長時間量測特定深度區間的水壓與水溫，而量測到的訊號則以特製的多點式光纖光柵訊號接頭將訊號傳送至地表，並可進行感測器多段連接與量測。目前可重複使用 FBG 分層水壓計可適用於直徑 5 公分之 PVC 管（兩吋管）內量測，每一組分層 FBG 感測器包含兩端各 1 個封塞器與中間 1 組 FBG 水溫水壓計(圖 1-2)。

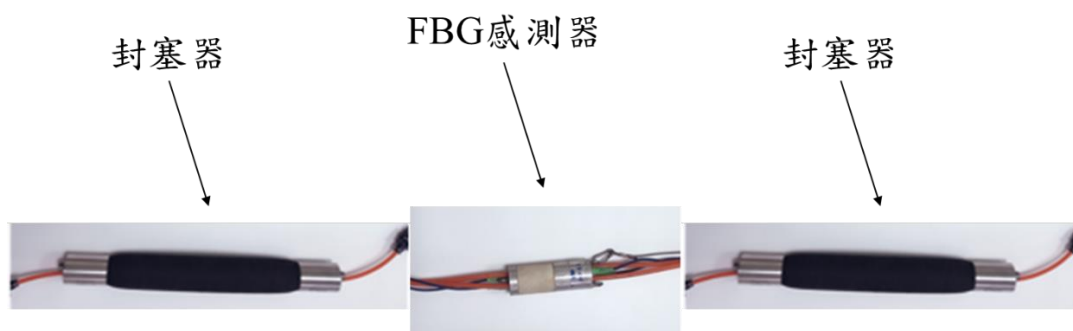


圖 一-2 單組 FBG 分層水壓計實體





第二章 工作執行方法與步驟

本計畫依據欲完成之計畫目的進行工作流程擬定，所擬定之工作流程如圖 2-1 所示，可分為兩大區塊，分別為分層水壓感測系統室內組裝與調整，以及現地安裝與測試。

在室內組裝與調整部分，本計畫首先將感測器及封塞器於室內進行訊號及壓力測試，測試完成後再與分層水壓感測系統進行連結並進行系統測試與修正，以確保訊號及系統皆可正常運作。待於室內完成後，本計畫將系統移至試驗場址進行安裝與建置。現地安裝與測試部分需先選定適合本計畫之試驗場址，為了確認試驗場址具有多層地質分層，本計畫在鑽井前事先在試驗場址內進行地電阻施測，以選定觀測井位置。接著在觀測井開鑿及濾水管安裝完成後，本計畫將感測器及封塞器安裝至觀測井內，並依照現場情況進行管路配置及感測器調整與訊號測試。待上述流程完成後，現地觀測系統即完成建置，最後本計畫將持續搜集與分析計畫期間內所收集之數據，檢驗本系統在邊坡場域進行現地多深度地下水位觀測之可行性。

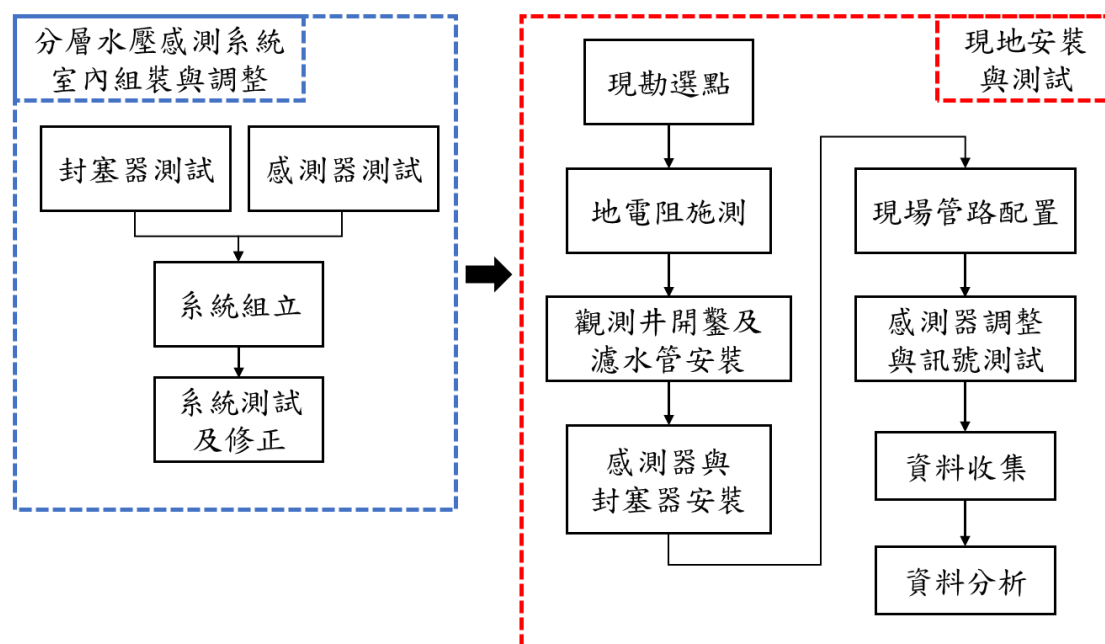


圖 二-1 工作流程



第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本研究之計畫預定甘特圖如下所示，目前為十一月，本計畫已於現地順利完成建井、FBG 觀測系統安裝、測試，以及觀測，整體而言進度符合預期。

表 三-1 計畫甘特圖

重要工作項目		112										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
分層水壓感測系統室內組裝與調整	觀測系統設計											
	感測系統與封塞器測試與組裝											
	整體系統測試											
	整體測試修正											
現地安裝與測試	資料收集與現勘選點											
	安裝設計											
	初步安裝測試											
	測試調整與量測											

資料來源：本計畫

本研究團隊已完成現場多深度地下水位自動化觀測系統整合，系統整體示意圖如圖 3-1 所示，其中工業電腦的主要功能包含遠端傳輸設定、光纖光柵解讀儀與 CR1000X 解讀儀資料傳輸與儲存介面設定，同時可將光纖光柵水壓計、土壤張力計及土壤含水量計所量測之數據經由解讀儀存入電腦中，另外可透過網路遠端方式確認 FBG 感測器訊號、含水量計及張力計訊號是否異常。本團隊於試驗場址內規劃於 1 個鑽孔內放置 2 組新型 FBG 分層水溫水壓計，同時配合自動化系統進行現地分層水壓水溫量測，另將土壤張力計及土壤含水量計分別埋設於地表下 5 至 10 公分處，作為輔助判斷地下水位變化之依據。

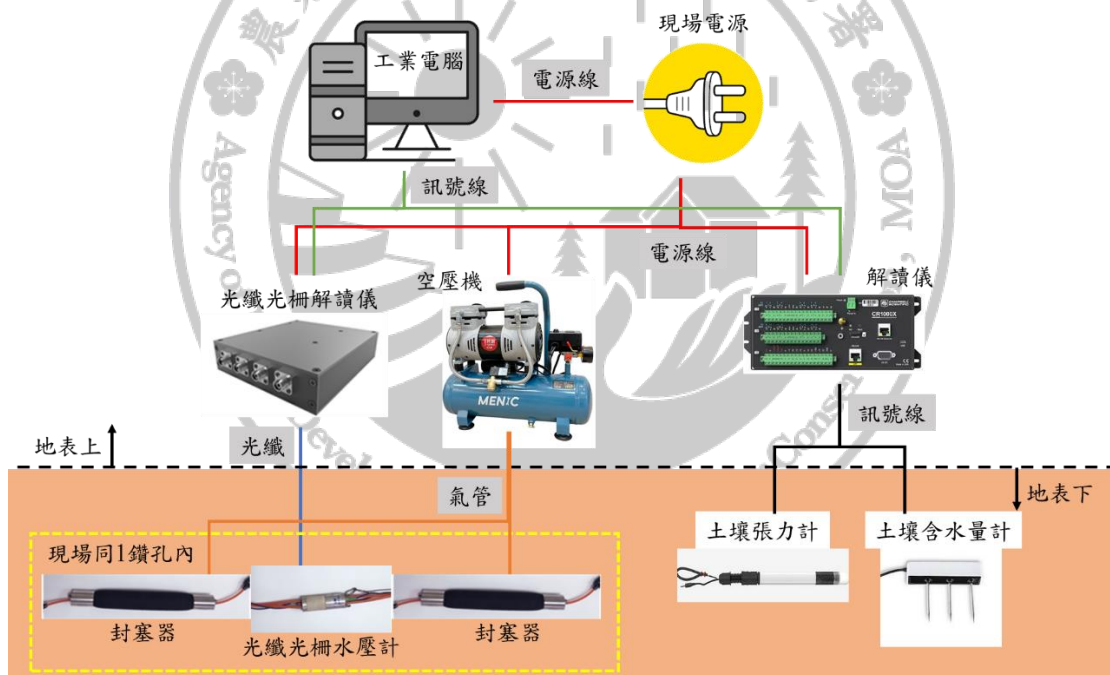


圖 三-1 FBG 量測系統整體示意圖

第二節 場址介紹

本計畫選用之試驗場址為台灣大學生農學院附設農業試驗場安康分場二場內一處農地，位於新北市新店區莒光路 104 號，試驗場址之 TWD97 座標為(302664.6222, 2760910.1792)，此場址為一邊坡地，地勢由南向北傾斜，鑽井地點位於地勢相對較低之區域。



圖 三-2 試驗場址位置圖

第三節 系統室內調整與校正

本計畫使用 FBG 感測器量測地下水位與水溫，再由光纖將光訊號傳送至解讀儀進行訊號之讀取(詳細說明於第一章第三節)。為確保感測器可在現場正常運作，本團隊先於室內進行 FBG 感測器訊號的確認及解讀儀的校正(圖 3-3)。由於封塞器需能完整充氣才能有效阻絕井管內之垂向水流，因此封塞器同樣需先於室內進行壓力測試，其

壓力測試照片如圖 3-4 及圖 3-5 所示，將封塞器打氣後靜置 30 分鐘，確認無漏氣與漏水情況產生方可帶至現地進行試驗。在完成感測器與封塞器之測試後，本團隊依照分層觀測規劃，在調整光纖與氣管之長度後，串接兩組感測器元件，並進行訊號測試，待測試完成後再將整個感測器系統移至現地觀測井安裝。

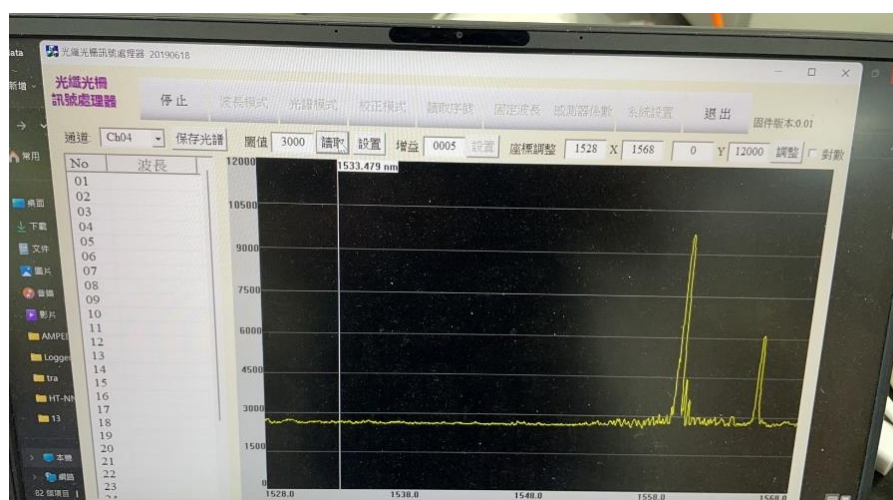


圖 三-3 FBG 感測器訊號校正過程



圖 三-4 封塞器壓力測試過程(1) 圖 三-5 封塞器壓力測試過程(2)

第四節 地電阻施測

為能先了解試驗場址地下的淺層水文地質架構，本團隊先於試驗場址進行地電阻探測，取得其電性架構作為鑽井之參考。地電阻探測屬於地球物理探勘方法之一，利用將電流導入地下並量測地下相對應的電壓變化，藉以推測地下的地電阻率變化，再經由反演算方法推估出地下的真實地電阻率構造，以判斷地層分層構造。本計畫採用溫納陣列(Wenner Array)方式進行施測，地電阻佈線方式採用橫向佈線 100 米(圖 3-6)，經換算後其縱向深度之解析度為 20 米，地電阻施作過程如圖 3-7 至圖 3-10 所示，待施測完畢後依據反演算之結果(圖 3-11)選取建議鑽井位置及分層開篩深度。



圖 三-6 地電阻佈線位置圖



圖 三-7 地電阻佈線過程(1)



圖 三-8 地電阻佈線過程(2)



圖 三-9 電阻電極安裝過程

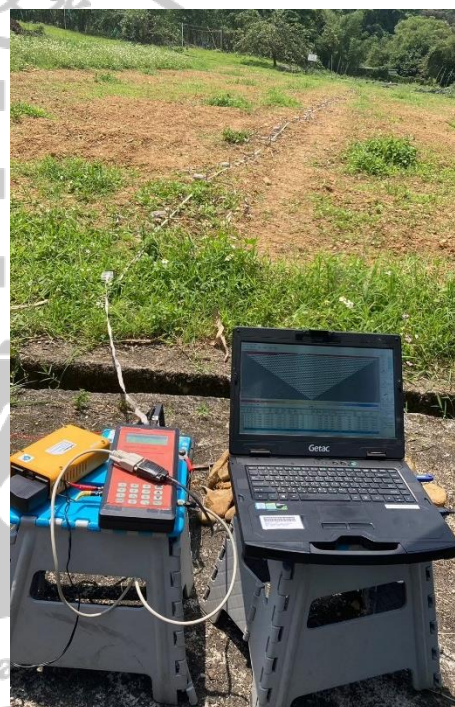


圖 三-10 地電阻主機架設

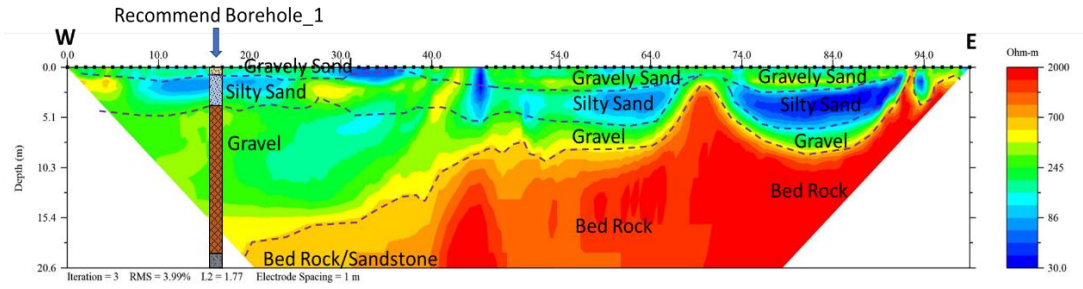


圖 三-11 地電阻結果及建議鑽井位置

第五節 鑽井及配管過程

本團隊參考上述地電阻剖面選定實際鑽井位置(圖 3-12)，鑽井位置的 TWD97 座標為(302664.6222, 2760910.1792)，並建立深度達 20 米、直徑為兩吋之觀測井。於鑽井過程中(圖 3-13 至圖 3-16)，參考鑽井師傅經驗及鑽井機具所排出之碎屑進行該口井之地層構造研判繪製地質圖元(圖 3-17)。由圖 3-17 可知，在地表下 1.5-3.5m 間有一礫石夾泥層，而在 12-13m 間有一礫石夾泥層，此為可能之分層深度，考量此處之淺層應較少地下水，故本團隊以 12-13m 之分層做為參照，建立兩層分層的觀測，第一層感測器安裝深度在 5-6.8m (觀測上層礫石夾粉土層)，第二層則在 13.2-15m，觀測下層之礫石夾粉土層 (圖 3-17)。



圖 三-12 實際鑽井位置



圖 三-13 鑽井機具進場



圖 三-14 鑽井機具確認位置及水平



圖 三-15 鑽井過程(1)



圖 三-16 鑽井過程(2)



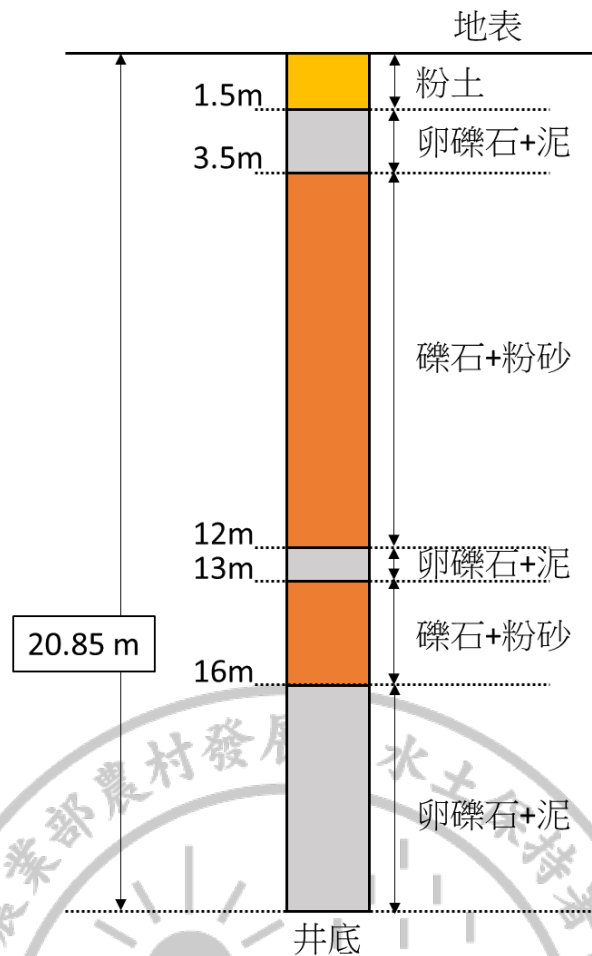


圖 三-17 地質圖元

觀測井套管安裝過程如圖 3-18 至圖 3-21 所示，套管開篩段及封閉段分別使用有開孔洞之 PVC 管做為開篩段(圖 3-18 左)及未開孔洞之 PVC 管做為封閉段(圖 3-18 右)。有開孔之 PVC 管外側使用網布進行保護(圖 3-19)，其目的為避免濾料及雜物進入管內。依據地質圖元及套管配置圖作為濾料回填深度與種類之參考，本次回填之濾料選用七厘石及皂土，並依據不同深度進行分層回填，回填過程及濾料分布圖分別如圖 3-20 及圖 3-21 所示。七厘石用於回填上下開篩段，分別為地表下 0 米至 6.8 米處及 13.2 米至 20.85 米(井底)處，皂土回填於

中間封閉段(地表下 6.8 米至 13.2 米)用以對上下開篩段進行阻隔。依據上述判斷進行觀測井套管之配置並繪製套管配置圖(圖 3-22)，作為感測器放置深度之依據。



圖 三-18 PVC 管



圖 三-19 開篩段保護工程



圖 三-20 套管安裝過程



圖 三-21 濾料回填過程

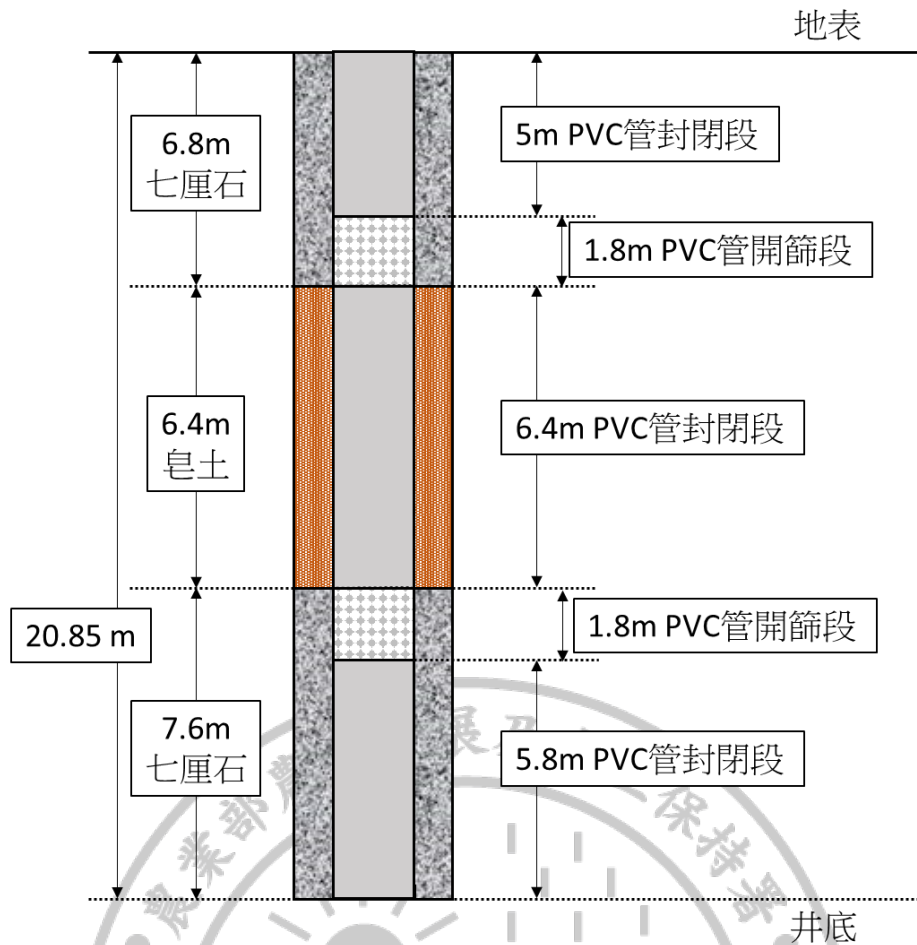


圖 3-22 套管及濾料分布示意圖

第六節 多深度觀測站建立及感測器配置

待觀測井建置完成後，本團隊以觀測井位置做為起始點對規劃佈線區域進行長度測量，並同時確定自動化系統(工業電腦與解讀儀等)及空壓機等設備放置位置(圖 3-23 及圖 3-24)，以確認感測器到解讀儀之間所使用之氣管及光纖配線方式及所需長度，以作為管線配置之參考。圖 3-25 為各種線路配置分布及其相對應位置，藍線為光纖，紅線為氣管，黃線為保護位於地面纜線之 PVC 管位置。

在取得農場允許後，本研究將所有纜線放置於交界處水溝內側，若無法放置於水溝內的線路則放置於 PVC 管內，以確保線路不會被農場機具拉扯損毀，各線路放置方式如圖 3-26 至圖 3-32 所示。

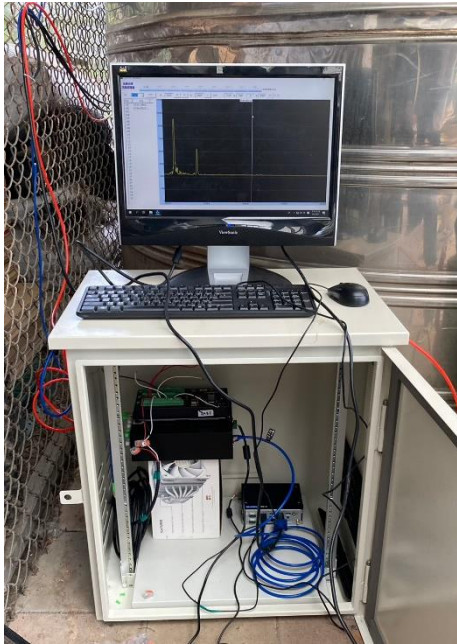


圖 三-23 自動化系統於現場之
照



圖 三-24 空壓機於現場之照片

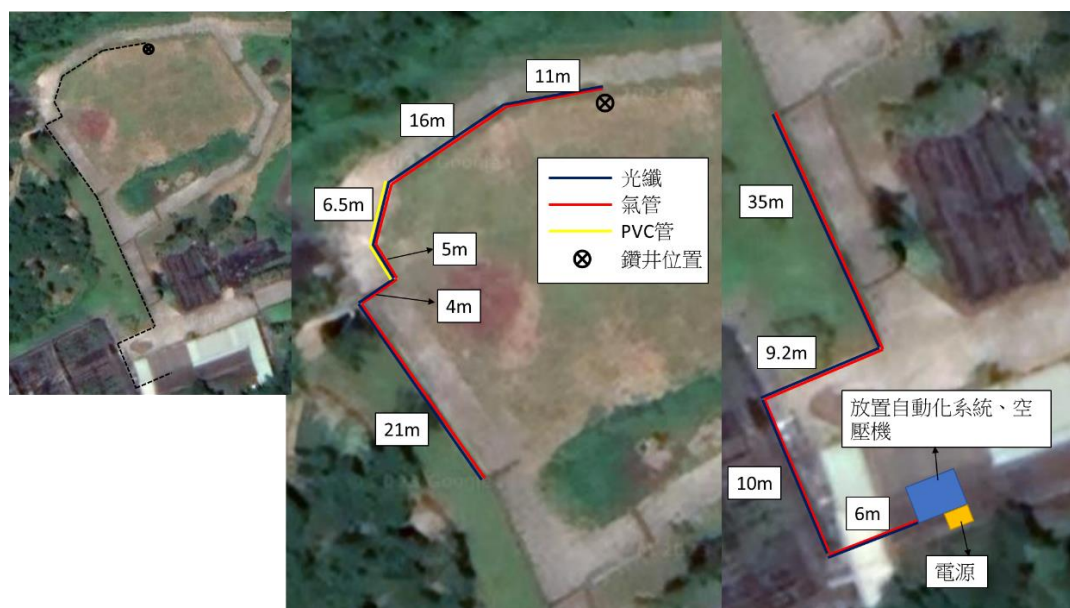


圖 三-25 管路配置及自動化系統相對位置圖

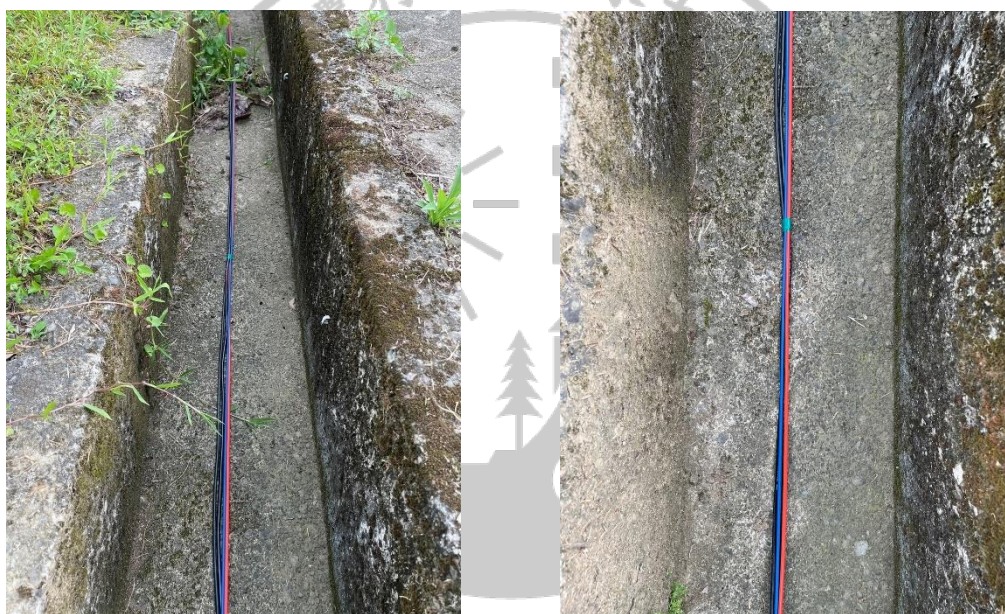


圖 三-26 線路放置於水溝內(1) 圖 三-27 線路放置於水溝內(2)



圖 三-28 線路放置於 PVC 管內



圖 三-29 線路轉角處



圖 三-30 周圍線路(1)

(三角錐為觀測井位置)

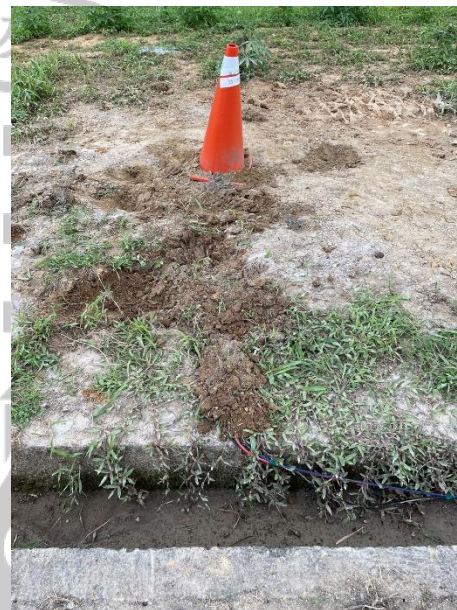


圖 三-31 周圍線路(2)

(三角錐為觀測井位置)



圖 三-32 周圍線路(3)

(三角錐為觀測井位置)

為能有效達成多深度水壓量測之效果，本團隊依據套管及濾料分布圖進行感測器分層配置(圖 3-33)，本計畫採用兩組感測器進行串聯，目的在將 FBG 水壓計放置於 PVC 管之開篩段深度，搭配 FBG 水壓計上下方之封塞器進行阻隔，其串聯示意圖及組裝過程如圖 3-34 至圖 3-36 所示。本計畫分別於地表下深度 6 米及 14 米處放置兩組感測器，以量測不同分層之水壓變化，並於地表下 5 公分處放置含水量計及張力計量測土壤水分及張力之變化，作為後續水位資料分析之參考。將上述儀器設置完成後，本團隊先於現場利用工業電腦進行訊號確認，以確保訊號正常且有持續進行資料收取。

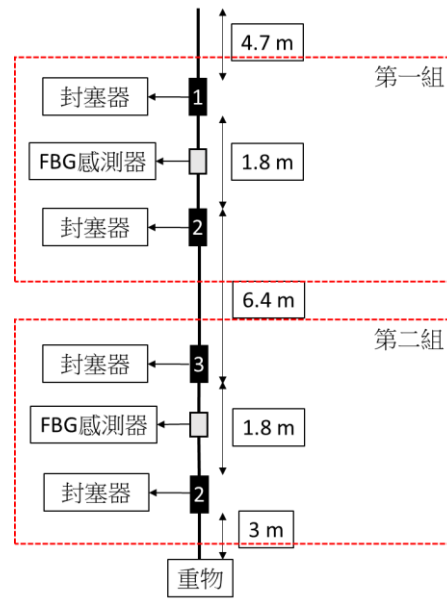
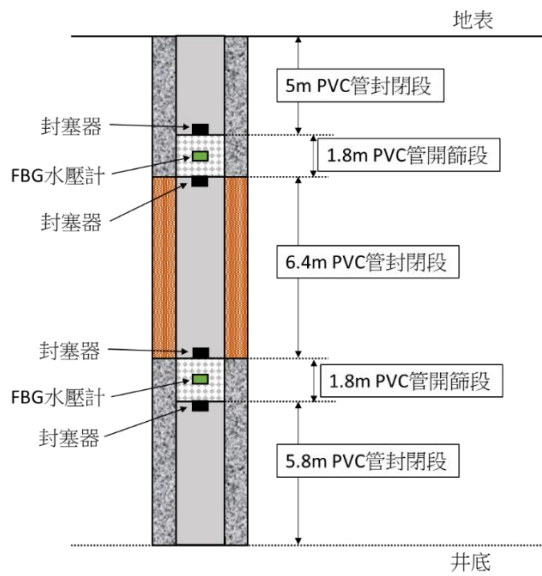


圖 三-33 封塞器及感測器放置位置示意圖(1) 圖 三-34 封塞器及感測器放置位置示意圖(2)



圖 三-35 感測器組裝圖(1)



圖 三-36 感測器組裝圖(2)

第七節 觀測結果說明

一、期中成果說明

本團隊於 112 年 6 月 15 日完成現地感測器設置與自動化系統測試，並透過網路遠端方式確認 FBG 感測器訊號、含水量計及張力計訊號是否異常，於 112 年 6 月 29 日進行感測器的清潔與保養及系統修正，並分析此段時間內所收集之數據。

依據訪問農場經理得知，試驗場址不會進行澆水或灌溉等動作，因此降雨事件的發生成為此處入滲之主要原因。為此，本計畫選用中央氣象局之雨量站作為降雨事件之參考依據，將位於試驗場址西北方直線距離約 500 公尺處之新北站作為參考，其 TWD97 座標為 (302506.5425, 2761370.1369)，試驗場址與新北站之相對位置如圖 3-37 所示。



圖 三-37 試驗場址與新北站之相對位置圖

圖 3-38 為上層 FBG 感測器(藍線)、下層 FBG 感測器(紅線)及降雨量(黑線)之分析數據，由圖中可發現當有降雨事件發生時，紅色線會隨著降雨事件的時間點(箭頭處)開始上升並逐漸緩慢下降，此一數據變化可說明下層 FBG 感測器(紅線)有記錄到降雨入滲至土壤的現象，但上層 FBG 感測器(藍線)並未記錄到此一現象。

由於現場感測器所放置的位置是位於斜坡最低處，本團隊研判此現象為斜坡上方較薄土層可能有快速通道能直接對地下水水位面進行補注，導致下層的水位計(紅線)受到側向補注而產生水位抬升之現象。因此，試驗區域內降雨所造成的入滲現象有可能是由斜坡上方入滲至土層後因地形高低落差或有快速通道直接進入到下層感測器區域。上層的水位計(藍線)於期中報告時未量測到入滲現象，因此研判圖 3-38 中藍色線的變化應為大氣壓力之氣壓變化。

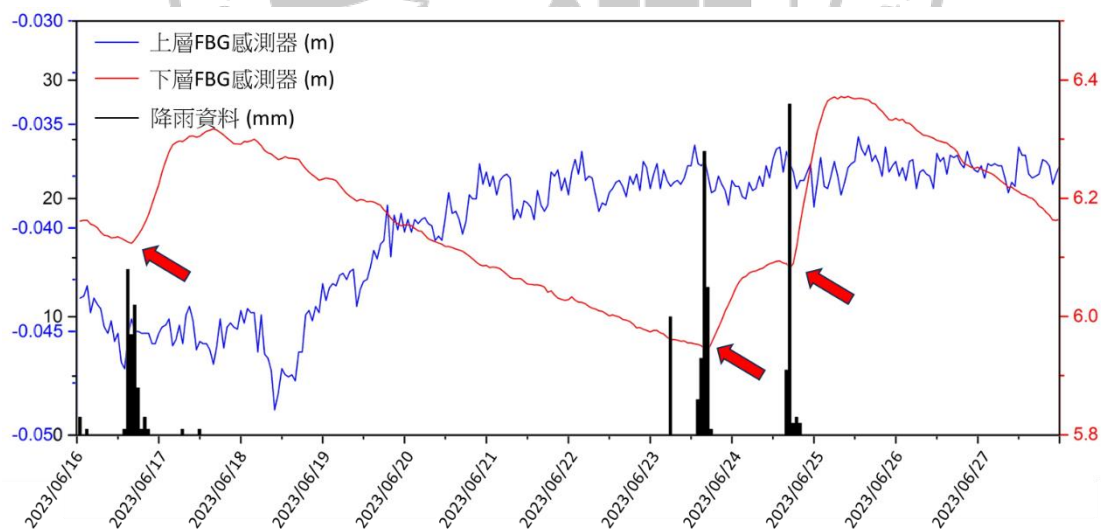


圖 三-38 感測器及降雨資料分析圖

為確認上層 FBG 感測器之數據是否有異常，本團隊使用土壤張力計及含水量計之數據變化(圖 3-39)作為輔助判斷之依據。圖 3-39 中顯示張力計(藍線)及含水量計(紅線)皆隨著降雨事件的發生而產生變化，此變化可作為降雨入滲至土壤的證據。然而張力計的數據於 6 月 23 日後出現異常且訊號消失，但仍可從含水量計的變化說明 6 月 23 日後降雨有入滲至土壤的現象。

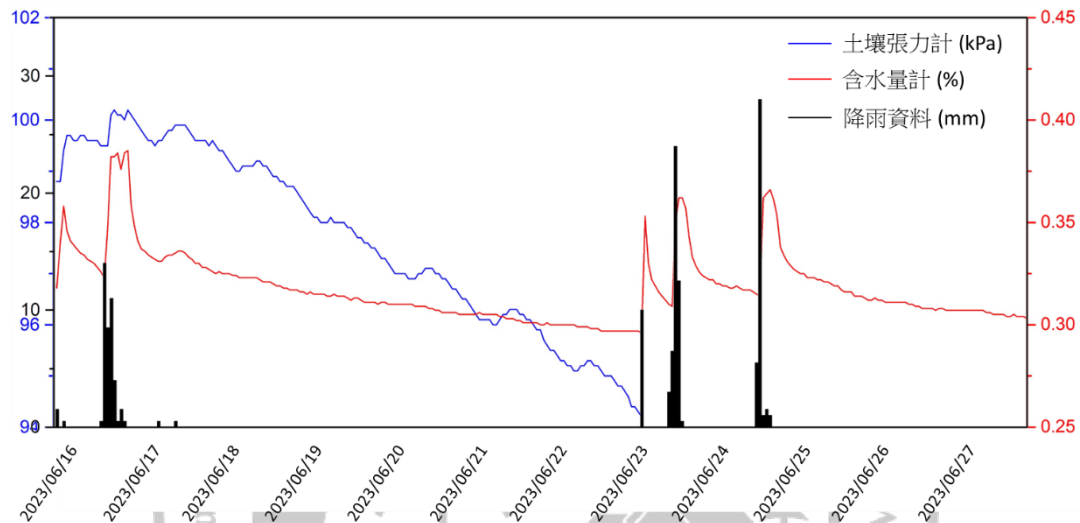


圖 三-39 張力計、含水量計及降雨資料分析圖

藉由上述輔助資料說明確實有降雨入滲至土壤的現象發生，但上層 FBG 訊號並未反應出降雨產生之對應變化，因此本團隊針對上層 FBG 感測器進行檢測，於檢測過程中發現上層感測器表面卡土造成汙損的情況，此情況可能導致感測器異常進而造成記錄數據產生問題。在發現問題後，本團隊已將其清潔與校正完畢，並於 7 月 6 日重新放置於觀測井內，持續進行觀測中。

二、期末成果說明

(一) 期中後事件紀錄及說明

本團隊於7月6日(四)重新將FBG感測器進行檢測及清理並放回於觀測井內進行觀測；7月19日(三)及7月28日(五)由農場經理告知放置於農場內之空壓機於短時間內密集進行作動，經討論後請農場經理先行多加留意；8月4日(五)下午被農場經理告知空壓機持續作動且沒有停止，因此請農場經理先行將空壓機關閉避免危險發生；8月7日(一)本團隊前往農場檢查整體系統情況，發現原先放置於水溝內用於提供封塞器氣體之氣管因長時間經太陽曝曬後有多處龜裂(圖 3-40 紅圈內)導致氣體外洩，造成封塞器無法正常運作。同時，數據讀取時發現舊有FBG感測器出現異常，因此聯繫廠商購置新的FBG感測器、更換新的氣管(原先為橘色氣管，新購入氣管為白色，具有更高的抗紫外線能力)及黑色水管，新購入之氣管耐曬及耐拉扯能力較高，黑色水管則用來包裹住白色氣管以保護氣管避免太陽曝曬(圖 3-41 所示)；9月1日廠商完成新的FBG感測器測試；9月8日完成新氣管及黑色水管的線路配置(圖 3-42 所示)後將新的FBG感測器放入觀測井內進行觀測，並配合農場經理要求更換空壓機避免因其運轉所發出的噪音影響附近居民；9月26日早上配合農場經理要求加裝獨立電表，並於該日中午發現空壓機內的啟動馬達損毀，導致氣體無法

順利送達封塞器，造成封塞器無法正常運作，本團隊於當日下午進行空壓機之更換。



圖 三-40 氣管龜裂(紅圈內)



圖 三-41 黑色水管包住氣管



圖 三-42 重新進行管路配置

9 月 26 日除進行空壓機更替外，同時進行第一次感測器配置更換，此次更換內容為調整第一組感測器所放置的位置，更換示意圖如圖 3-43 所示，由於原先第一組 FBG 感測器放置在 PVC 管開篩段中間位置(即距離 1 號即 2 號封塞器皆為 90 公分處)，但考量到該區域降雨事件較少的情況，因此本團隊將第一組的 FBG 感測器和 2 號封塞器往下移動，其餘的設備皆保持原本的配置。此次改動是將第一組 FBG 感測器的底端放置與 PVC 管開篩段的底部齊平(即第一組 FBG 感測器底端改放置於距地表 6.8 公尺處，圖 3-44 所示)，並縮短第一組 FBG 感測器底部與 2 號封塞器頂段的距離，從原先的 90 公分縮短至 50 公分，其目的在於減少 FBG 感測器產生水位變化訊號所需的反應時間，本團隊於配置改動完成後將整組感測器放回觀測井內繼續進行觀測。

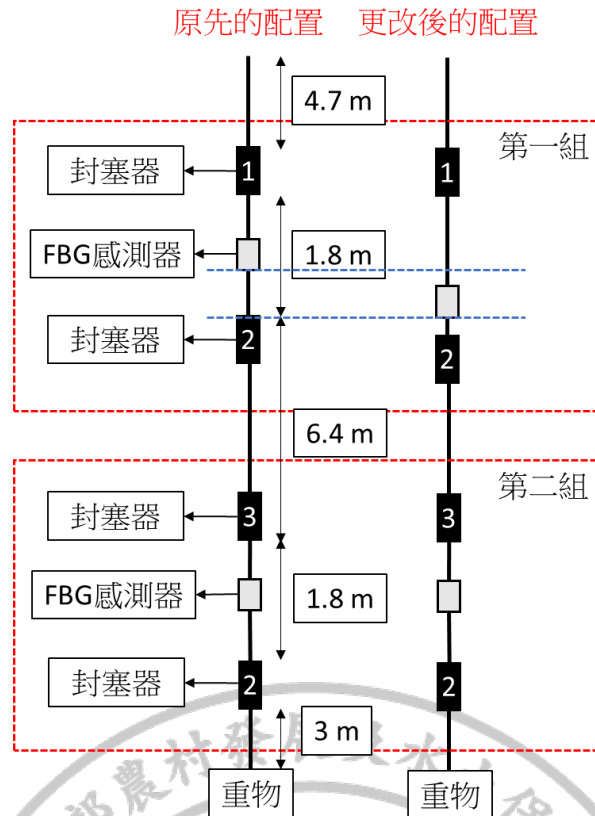


圖 三-43 封塞器及感測器放置位置示意圖(1)

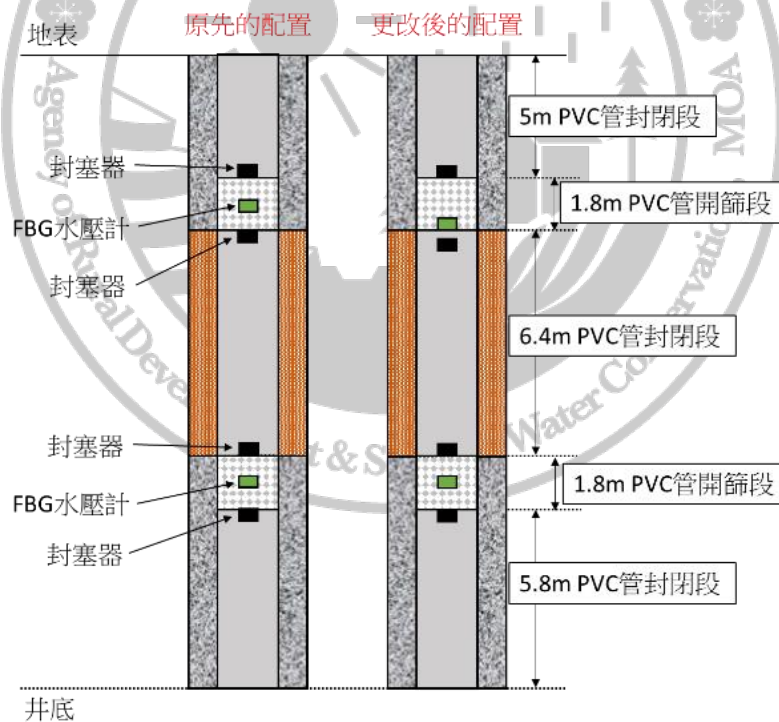


圖 三-44 封塞器及感測器放置位置示意圖(2)

經過第一次配置更換後，試驗場址於 9 月 26 日至 10 月 30 日期間內無明顯降雨事件發生(圖 3-45 所示)且 FBG 感測器沒有量測到水位變動之反應，因此於 10 月 31 日決定進行第二次配置更換。因為研究區域在本時期罕見的較少降雨事件發生，因此地下水位面較難以抬高到第一個 FBG 感測器位置，因此本團隊嘗試以地面注水的方式，證實第一個 FBG 感測器在有水流入時可以正常的發揮量測效果。

因為第一個 FBG 目前位在地下水水位面之上，感測器周圍之土壤為未飽和情況，為確保灌注之後 FBG 可立即反映到灌注至地層的水量，本團隊減少 FBG 感測器到封塞器頂部之距離，提升水位量測的反應速率。本團隊於第一組 FBG 感測器與 2 號封塞器間的線路進一步縮短，但因為光纖與氣管等線路無法再縮短，故本團隊改為使用黏土充填第一組 FBG 感測器與 2 號封塞器間的空間，減少感測器到封塞器間的空隙。本團隊完成黏土充填後，先於透明壓克力管中進行提升水位測試(圖 3-46 所示)，經測試後發現黏土能有效阻絕空隙，僅需少量注水即可快速提升管內水位高度。因此，本研究將長度約為 40 公分的黏土固定於 2 號封塞器的頂端(圖 3-47 及圖 3-48 所示)，將原本第一組 FBG 感測器與 2 號封塞器間的 50 公分縮短為 10 公分，意即井管內的水位從原先需要累積 50 公分才能使 FBG 感測器產生訊號縮短為僅需累積 10 公分便可使 FBG 感測器產生訊號。因為感測器

內部需達到飽和方能量到土層中的水壓(即地層孔隙水與感測器間為水力連通),在減少感測器內部達到飽和的時間後,即可有效縮短 FBG 感測器產生水位變化訊號所需的反應時間。

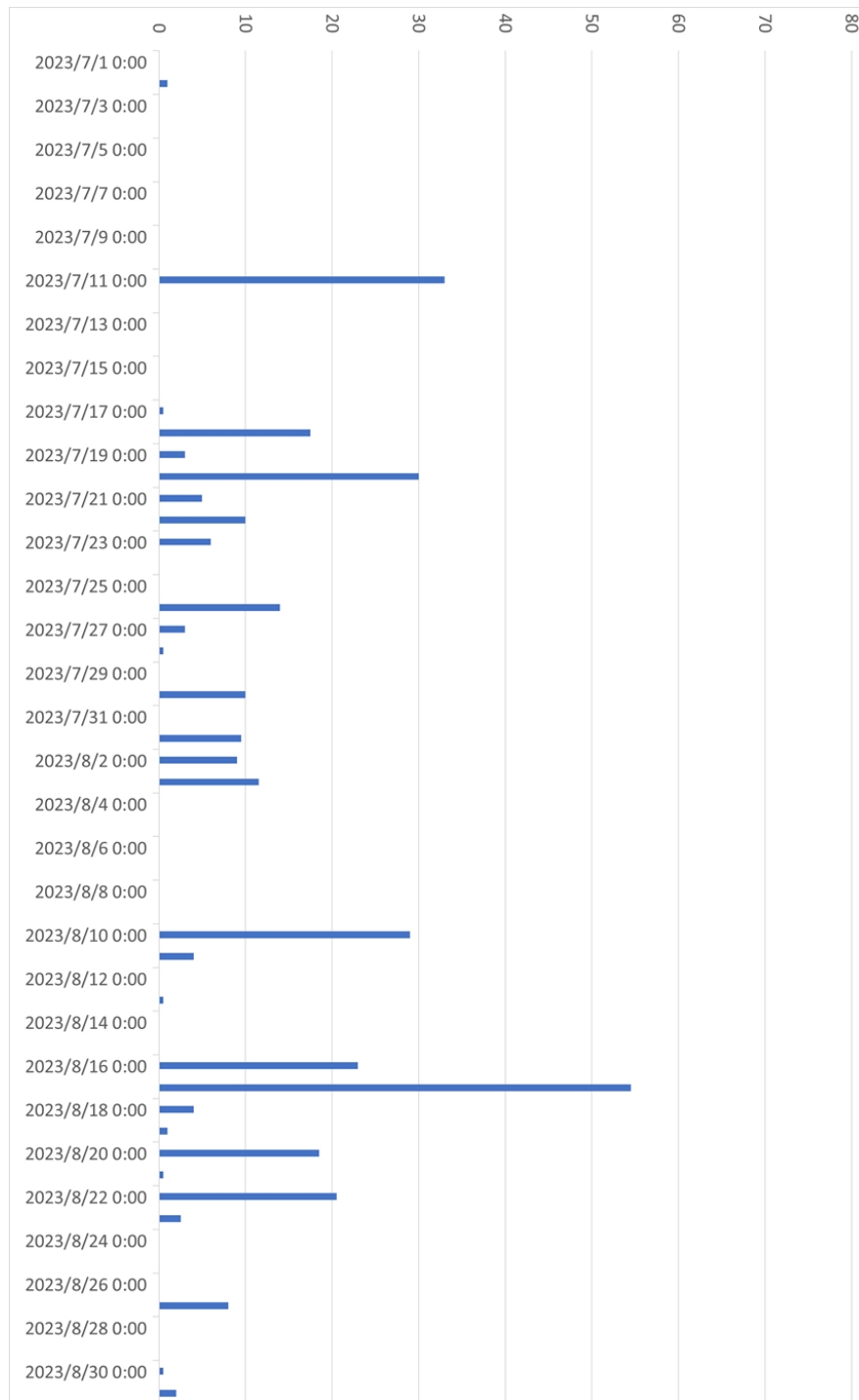


圖 三-45 新北站降雨量圖

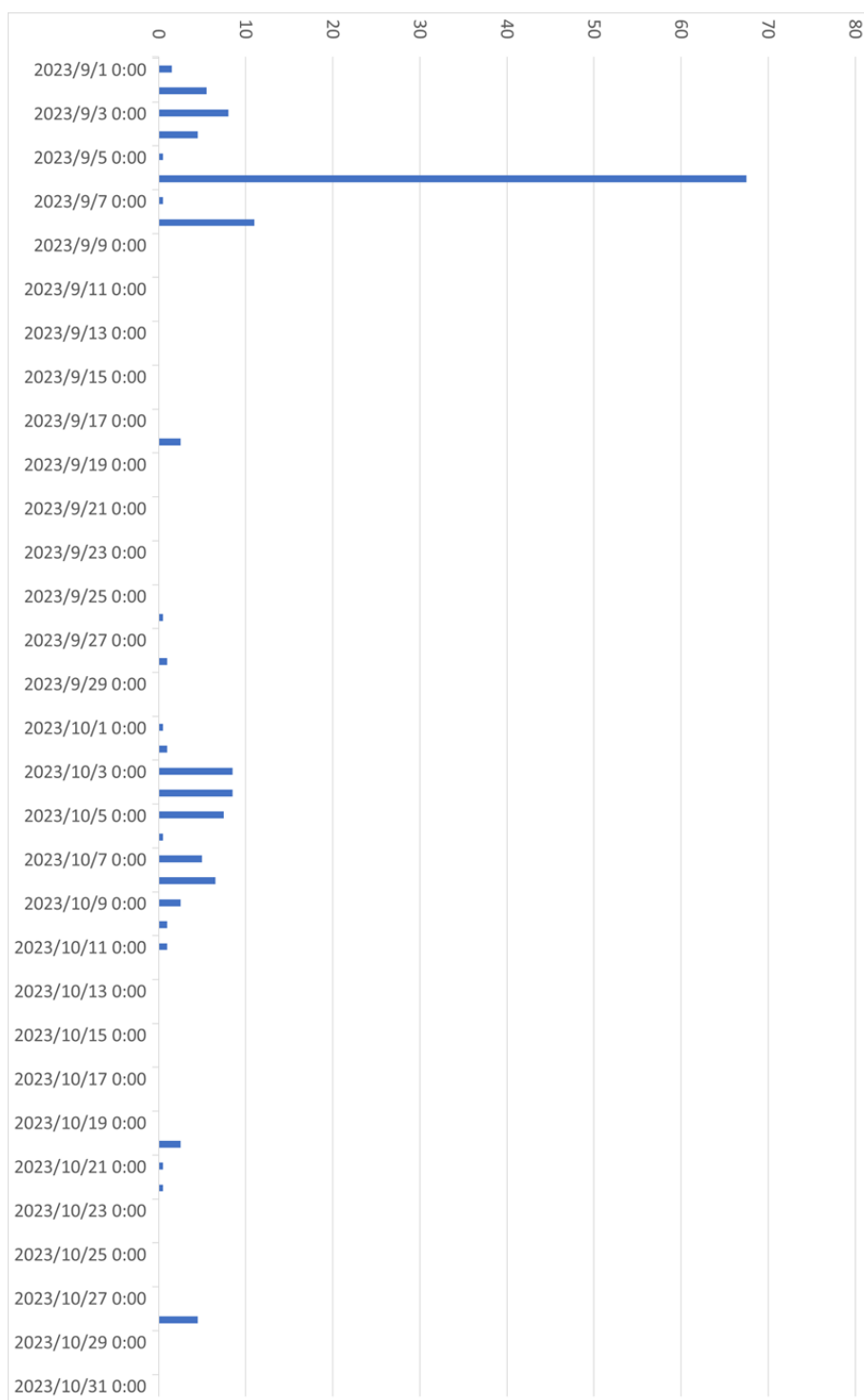


圖 三-46 新北站降雨量圖(續)



圖 三-47 封填黏土測試



圖 三-48 封填黏土過程(1)



圖 三-49 封填黏土過程(2)

(二) 灑水試驗說明

因為 9 月 26 日至 10 月 31 日期間該試驗場址多為弱降雨，延時多為 1-2 個小時，並未出現長時間的降雨事件發生，雨水入滲之情況不足以抬升地下水位，讓上層(未飽和帶)之 FBG 感測器量測到水位變化，因此，本團隊於井口周遭以水管連接花灑的方式進行注水，模擬降雨事件發生之試驗，花灑的流量約為 150~200 毫升/秒。

本團隊於進行模擬降雨試驗前發現鑽井施工團隊並未如濾料配置圖(圖 3-22)於地表回填七厘石，而是使用皂土於地表進行回填(圖 3-49 所示)，為避免皂土影響灑水試驗，本團隊於試驗開始前先行將井邊的土壤及皂土進行開挖，直到可看見七厘石為止(圖 3-50 所示)，其目的在於幫助水流加速入滲至第一個感測器的位置，開挖坑洞的深度約為 40 至 50 公分深。



圖 三-50 皂土回填於地表

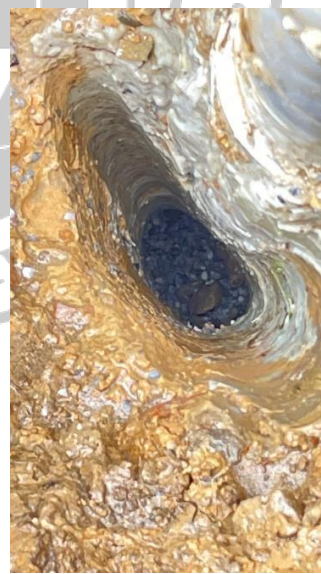


圖 三-51 地表開挖

灑水試驗分成 A、B 兩組分別進行，A 組試驗為直接對坑洞進行灑水(圖 3-51 所示)，B 組試驗為將坑洞回填石英砂後進行灑水(圖 3-52 所示)。於試驗開始前本團隊將感測器組綁上 levellogger 水壓計，以作為 FBG 感測器之參照，levellogger 水壓計與 FBG 感測器資料紀錄間隔皆為 10 秒鐘一筆。

A 組試驗內分別進行 4 次灑水動作，每次灑水時間為 10 分鐘，其開始及停止時間如下表所示，由於坑洞於灑水過程中會逐漸積水(圖 3-52 所示)，因此，在下一次灑水動作前會先等到積水完全消退且靜置 5 分鐘後繼續進行。



圖 三-52 開挖坑洞灑水及積水



圖 三-53 石英砂回填圖

圖

表 三-2A 組試驗紀錄表

A 組試驗	狀態	時間
第 1 次灑水	開始灑水	13:21
	停止灑水	13:31
	積水完全消退	13:35
第 2 次灑水	開始灑水	13:40
	停止灑水	13:50
	積水完全消退	13:54
第 3 次灑水	開始灑水	14:00
	停止灑水	14:10
	積水完全消退	14:15
第 4 次灑水	開始灑水	14:20
	停止灑水	14:30
	積水完全消退	14:35

資料來源：本計畫

A 組試驗結果如圖 3-53 所示，橘色線及藍色線分別為 FBG 感測器與 levellogger 水壓計之數據，由圖中可發現兩者所量測出來的數據幾乎重疊，由此可說明 FBG 感測器可正常運作，可證明第一個 FBG

感測器在有水流入時，一樣可正常運作，也說明本系統可應用於現地多深度觀測。此外，在 A 組試驗進行前，本團隊先在坑洞內注水以確定 FBG 感測器與 levellogger 水壓計是否有量測到數據，因此圖 3-53 中起始水位值不為 0。

於第 1 次灑水的過程中可發現水壓快速上升，且坑洞內的水並沒有滿出坑洞造成地表逕流，水位於停止灑水後仍有持續上升的情況，直到坑洞內積水完全消退後才逐漸下降。第 2、第 3 及第 4 次水壓上升的幅度皆沒有第 1 次灑水期間來的明顯且變化幅度也較小，水壓變化皆於灑水期間的前四分鐘內快速上升後趨於平緩，直至停止灑水後開始逐漸下降，此三次的灑水過程中有觀察到坑洞內的水有滿出坑洞造成地表逕流，此一現象推斷為土壤入滲速度較第 1 次灑水期間慢，因此坑洞內的水位累積速度大於向下入滲的速度進而造成地表逕流的產生。

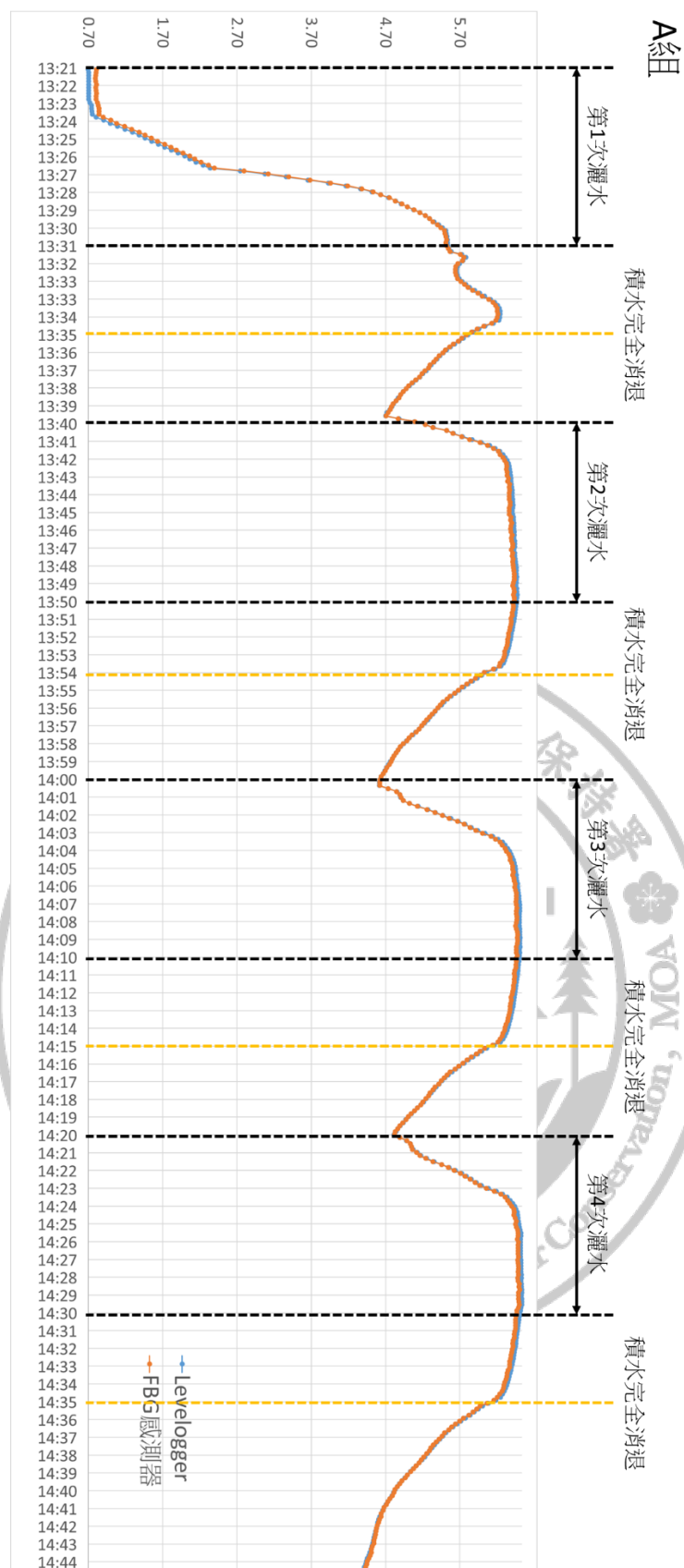


圖 三-54 A 組試驗結果圖

B 組試驗分別進行 2 次灑水動作，灑水流程及時間皆與 A 組試驗相同，其開始及停止時間如下表 3-3B 所示。

表 三-3B 組試驗紀錄表

B 組試驗	狀態	時間
第 1 次灑水	開始灑水	14:45
	停止灑水	14:55
	積水完全消退	15:02
第 2 次灑水	開始灑水	15:10
	停止灑水	15:20
	積水完全消退	15:31

資料來源：本計畫

B 組試驗結果如圖 3-54 所示，橘色線及藍色線分別為 FBG 感測器與 levellogger 水壓計之數據，圖中兩者所量測出來的數據也與 A 組試驗數據一樣幾乎重疊。

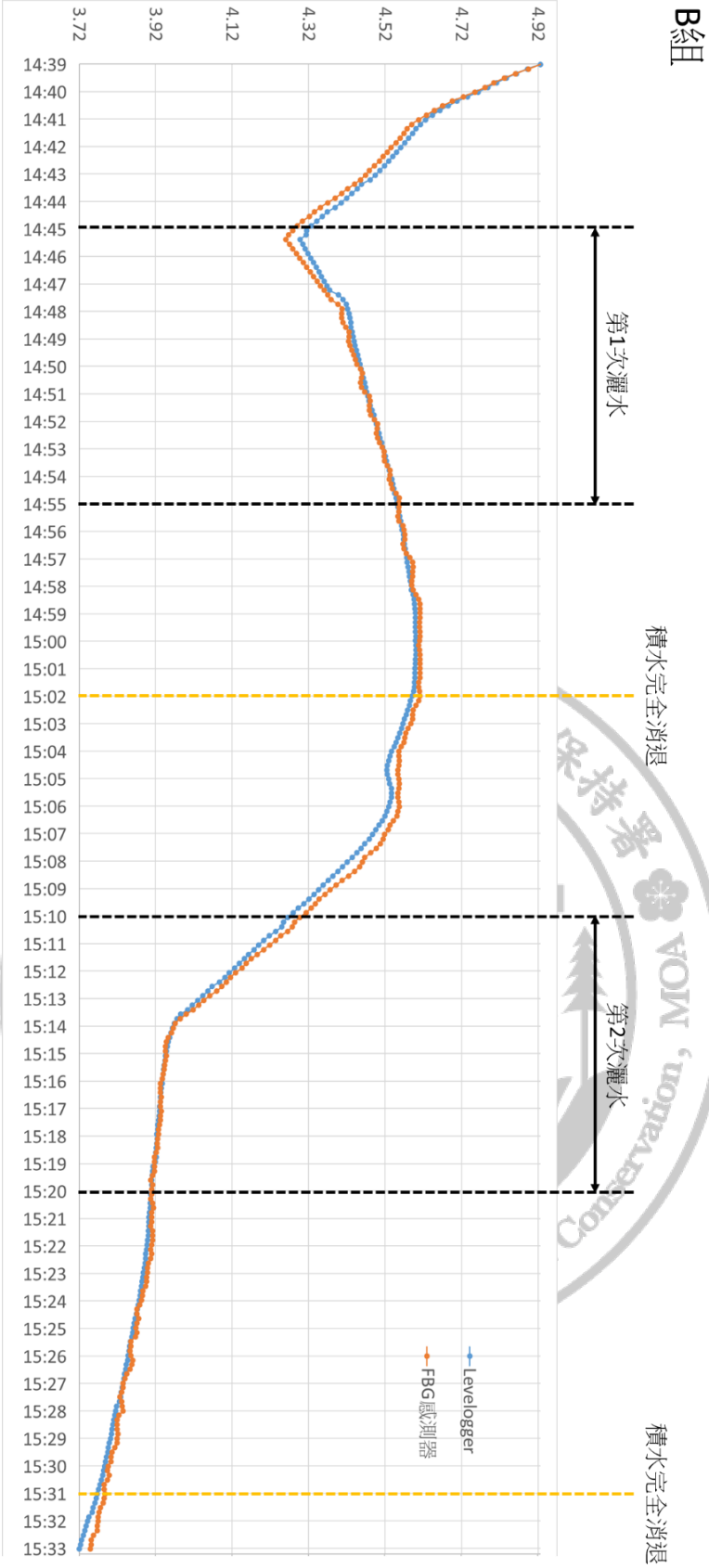


圖 三-55 B 組試驗結果圖

由於 B 組試驗為 A 組試驗後 10 分鐘接續進行，因此起始水位值不為 0，且 B 組試驗為水位下降的狀態開始進行。由圖中發現第 1 次灑水進行時，水壓並沒有即時的上升，而是在灑進行水後約一分鐘才逐漸上升。由圖中觀察到水壓上升的斜率於灑水階段的前三分鐘與後七分鐘的有所不同，且在灑水的過程中有地表逕流的情況產生，相較於直接灑水於坑洞的情況，有石英砂覆蓋在坑洞上的水壓上升的較為緩慢，積水完全消退時間也較 A 組來的長，水壓同樣於積水完全消退後開始下降。第 2 次灑水期間可觀察到水壓並沒有上升的趨勢反而是呈現持續下降的趨勢，水壓的斜率於灑水階段的前四分鐘與後六分鐘有明顯的不同，前四分鐘水壓下降的斜率與第 1 次灑水後水壓下降的斜率相同，此一現象推斷為 FBG 感測器並未於前四分鐘量測到入滲的情況，且坑洞內入滲速度大幅減慢使得大多數的灑水變成地表逕流，此應與回填石英砂過程中，部分的砂進入七厘石的濾料層有關；在入滲開始後第五分鐘，FBG 開始觀察到入滲的情況，因此下降斜率逐漸趨緩。

由期中報告結果可知，較深的第二個 FBG 感測器可量測到降雨期間的地下水位變化，說明該試驗場址確實有降雨入滲至土壤的現象，但因期中報告時上層(非飽和帶)的感測器異常進而造成記錄數據產生問題。因此期末報告主要針對上層感測器進行觀察，確認上層感測

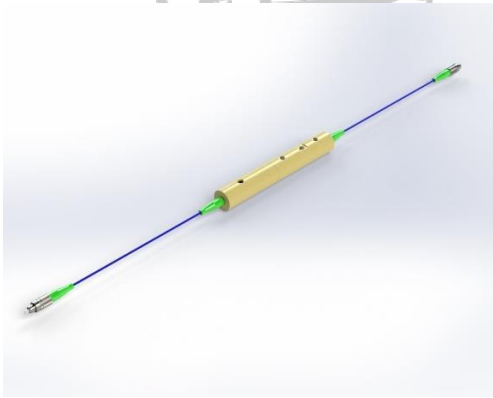
器可正常運作，但因該試驗場址沒有降雨量大且持續時間較長之事件發生，使得本團隊需使用灑水的方式來模擬降雨事件。由灑水後的觀測結果可證明 FBG 感測器能反應出注水所產生的水位變化，目前觀測系統仍程序運作中，將持續進行觀測直到計畫結束。

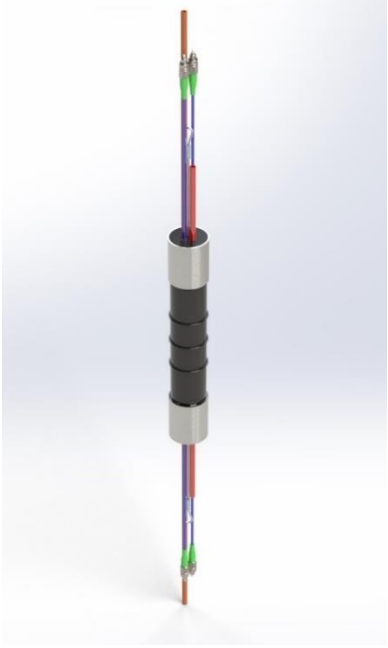
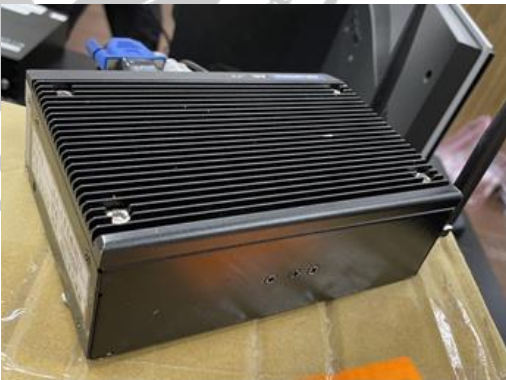
第八節 觀測系統安裝說明

一、系統標準操作手冊(Standard Operating Procedures, SOP)

本節主要說明自動化系統標準操作手冊(Standard Operating Procedures, SOP)，內容將分為設備與材料、硬體操作與軟體操作三部份，內容分別敘述如下。

(一) 設備與材料

光纖光柵水壓計 1 式	Levellogger 水壓計 1 式
	
封塞器 1 式	

	
空壓機 1 台	儲氣筒 1 台
	
解讀儀 1 台	工業電腦 1 台
	
光纜 1 式	氣管 1 式

	
鋼纜 1 式	黑色水管 1 式
	
工業延長線 1 台	



(二) 硬體連接與操作方式

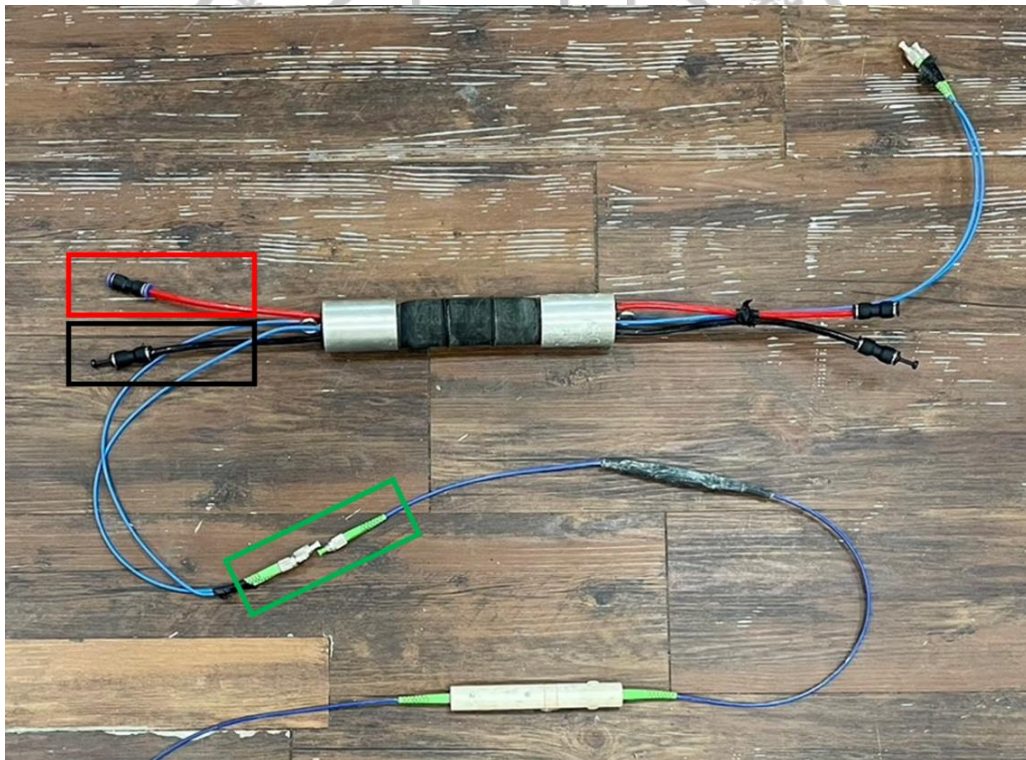
以下詳細說明各項硬體及其連接方式：

封塞器管路連接：

紅色管為氣管(紅框內)連接空壓機、黑色管(黑框內)為水管(因本次無使用，故將接頭塞住避免進水)、光纖接頭(綠框內)與封塞器上的光纖接頭進行連接。

光纖光柵水壓計線路連接：

光纖光柵水壓計接頭前後依上述步驟按照需求接上封塞器，最後將光纖接頭連接至光纖解讀儀進行訊號傳遞。



封塞器與光纖光柵水壓計依照需求進行串聯，下為封塞器-感測器-封塞器串聯之完成圖。



解讀儀電源線與通訊線連接：

光纖解讀儀，共有 16 個通道，解讀儀後面板連接電源線與 RJ/45 網路傳輸線，RJ/45 與工業電腦連接，傳輸訊號。



光纖解讀儀光纖訊號連接：

解讀儀前面板通道連結至封塞器或光纖感測器的光纖接頭。



工業電腦連接：

連接電源線，額外供電，並將網路線連接 FBG 解讀儀，外接螢幕及鍵鼠組使用。



空壓機連接：

空壓機開關保持開啟，供氣至儲氣筒後利用調壓閥控制封塞器之氣壓。



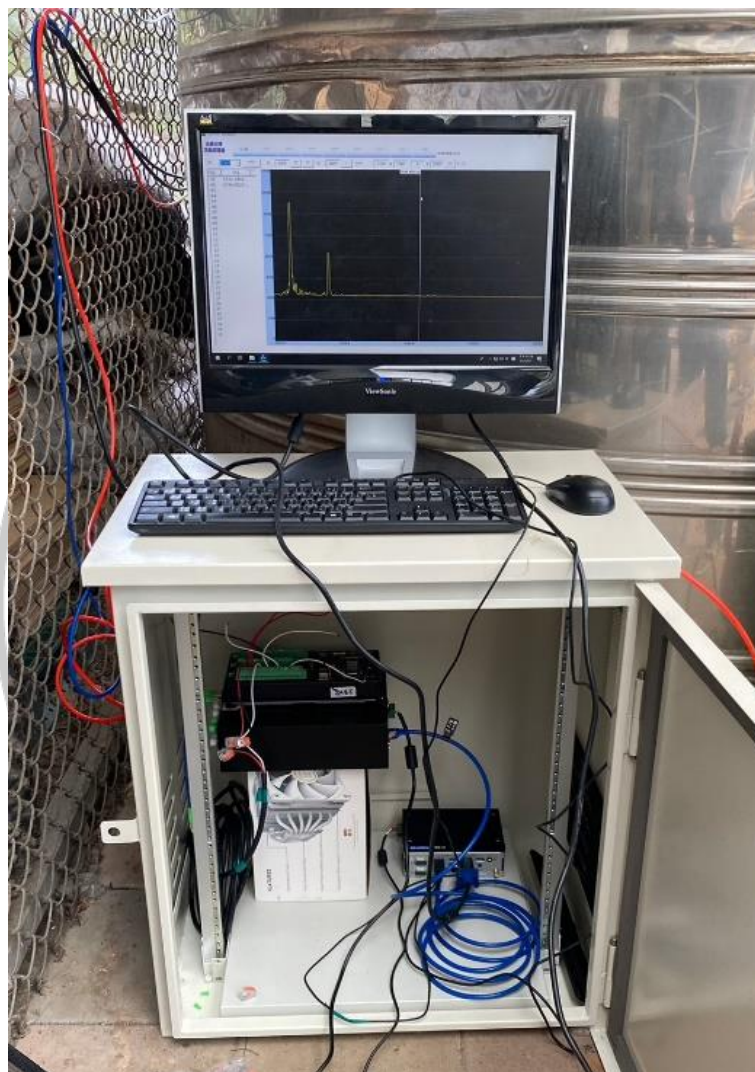
現場完成所有線路連接後進行軟體操作。



(三) 軟體各項功能與操作方式

以下詳細說明各項功能與操作步驟：

待上述儀器連接完成後，將工業電腦及光纖光柵解讀儀開啟，於解讀儀程式內確認光纖光柵訊號及開啟自動存檔功能，以便訊號資料進行紀錄。



第四章 結論與建議

第一節 結論

本計畫已成功將一新型自動化分層水壓量測系統安裝於邊坡中進行多深度孔隙水壓變化即時觀測，並依據現地測試結果進行系統軟硬體之修正與優化，使其更適用於邊坡長期觀測。本研究已完成項目如下：

1. 已完成自動化解讀儀整體觀測系統之設計。
2. 已於室內完成感測系統與封塞器組裝與測試，並對感測器進行校正與調整。
3. 已於室內完成軟硬體系統整合與測試及問題修正，包含 FBG 感測器、解讀儀、通訊系統、工業電腦的整合與測試。
4. 已完成試驗場址選址並蒐集試驗場址之相關資料。
5. 已於試驗場址完成鑽井與整體系統安裝。
6. 已完成現地系統應用、測試與效能驗證，並針對軟硬體設備進行優化調整，包含感測器訊號測試與調整、連接線路(管材)更替、自動化系統測試。
7. 已完成提供標準安裝流程與使用說明書(SOP)。

第二節 建議

1. 本研究開發出的產品，除了可應用於邊坡分層水壓量測之測試之外，也可以將相同技術應用於土木工程、邊坡防災與地層下陷等其它需要地層多深度水位資訊的產業。
2. 未來可藉由本計畫所開發的量測系統，建立一物聯網平台，藉由收集相關數據與進行大數據分析，提供後續相關研究的分析資料基礎。
3. 由於較難尋獲合適的試驗場址，建議當局可提供一多功能的試驗場地讓各單位可進行不同種類的試驗，以節省尋找及接洽場地之時間。



參考文獻

1. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flow," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.121, No.7, pp.544-552.
2. Bonzanigo, L., Eberhardt, E., and Loew, S. (2007). "Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, pp.1157-1180.
3. Dong, X., Shum, P., Yang, X., Lim, M. F., and Chan, C. C., 2005," Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter with chirped-fiber Bragg gratings", *Optics Communications*, Vol. 259, Issue. 2, pp. 645-648.
4. Green, G.E., and Mickelsen, P. E., 1988, "Deformation Measurements with Inclinoimeters", *Transportation Research Record* 1169, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-15.
5. Johnson, K.A., and Sitar, N. (1990). "Hydrologic Conditions Leading to Debris-Flow Initiation," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.789-801.
6. Kashyap, R., 1999, "Fiber Bragg gratings," Academic Press, San Diego, 458p.
7. Kojima, S., Hishida, Y., Fukuchi, K., and Hongo, A., 2003, "Optical fiber sensor using fiber Bragg grating for river management", 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan, pp. 112-115.

8. Liu, Y. Q., Guo, Z. Y., Zhang, Y., Liu, Z. G., and Dong, X. Y., 2000, “Research on the simultaneous measurement of pressure and temperature using one fiber grating ”, Chin J Lasers A, Vol. 27, pp. 1002–6.
9. Xu, M. G., Reekie, L., Chow, Y. T. and Dakin, J. P., 1993, “Optical in-fiber Grating High pressure sensor”, Electron Lett., Vol. 29, pp. 398-399.
10. Zhao, Y., Yu, C., and Liao, Y., 2004, “Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement”, Optics & Laser Technology, Vol. 36, pp. 39 – 42.



附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	請加強說明分層水壓感測系統所量測結果如何應用在自動化邊坡滑動之預警系統。	謝謝委員意見，已參考委員建議，將計畫目的說明進行以下修改，修改後文字如下：「在只考慮降雨因素的條件下，當邊坡孔隙水壓上升時，其有效正向應力將減少，土壤阻抗下降，使其應力路徑逐漸往破壞包絡線移動，增加邊坡破壞機率（Cascini et al., 2010）。為在邊坡破壞之前發出預警，本計畫提出以新型自動化分層水壓量測系統，以監測邊坡孔隙水壓變化，及分析其與邊坡穩定性

項次	審查意見	回覆辦理情形
		之關係，找出邊坡破壞對應之孔隙水壓門檻值，建立邊坡預警系統。」
二	鑽井地點與邊坡滑動是否相關,請說明。	謝謝委員意見，鑽井地點為臺大農場安康分場之斜坡，旁邊有過去邊坡滑動之自然跡象，雖然無立即崩塌之危險，但可作為邊坡地下水位觀測之理想試驗場址。本年度之研究重點在於針對邊坡分層地下水位觀測系統進行測試，因此透過此邊坡建立觀測系統進行長期觀測，用以測試系統的穩定度與觀測精度，此為本研究本年度之主要目的，故此試驗場址之挑選應屬合理。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	圖 3-2、3-12 及 3-37 請補充 TWD97 座標。	謝謝審查委員之意見，已將 TWD97 座標標註於文內。 新北雨量站之 TWD97 座標： (302506.5425, 2761370.1369) 試驗場址之 TWD97 座標： (302664.6222, 2760910.1792)
四	請補充岩心箱照片對照圖 3-17。	謝謝委員意見，因為本年度的重點在於地下水位監測，而非邊坡破壞的臨界孔隙水壓分析，故無須進行岩心採樣及三軸試驗，因此現場鑽井並未取樣，由鑽井師傅以鑽井碎屑判斷岩性後再由團隊進行紀錄，因此無岩心箱照片。後續待下一期計畫，選定崩塌場址後，將進行岩心採樣，並進行三軸試驗，用以分析試體的孔隙水壓變化與正向力的應力路徑，找

項次	審查意見	回覆辦理情形
		出破壞時的水壓門檻值，以之作為預警之用。
五	感測器主要量測入滲,請加強說明量測結果如何應用在邊坡滑動。另地下水位是否與滑動有關?	謝謝委員意見，感測器主要在量測邊坡地下水位變化，以作為邊坡滑動預警之用。Cascini et al.(2010)指出，在只考慮降雨因素的條件下，當邊坡孔隙水壓上升時，土壤阻抗下降，使其有效正向應力持續降低（亦即有效應力＝總應力－孔隙水壓），且其應力路徑將逐漸往破壞包絡線移動，當應力路徑到達破壞包絡線時，邊坡將產生破壞。因此邊坡的滑動與地下水位有關。而本研究下一期計

項次	審查意見	回覆辦理情形
		畫將選定崩塌場址進行岩心採樣，並進行三軸試驗，求得地層內部不同地質分層的土壤參數，分析試體的孔隙水壓變化與正向力的應力路徑，找出破壞時的水壓門檻值，以之作為預警之用。
六	試驗場所似坡度較緩,後續對於運用於大規模崩塌潛勢區之監測是否具代表性或造成誤差?	謝謝委員意見，本年度計畫主要測試整套監測系統的標準安裝程序、穩定度與精度等，測試系統與原理等不會因為現場坡度變化而需要修正或造成誤差。另外，對於大規模崩潛勢區，建議可以於圍繞單一崩塌地邊界鑽 4~6 孔，將所量測之水壓數據與地下水流動分析模式結合，即可進行大規模崩塌

項次	審查意見	回覆辦理情形
		潛勢分析。因為試驗場地取得不易，故選用本校於新店山區之校地進行試驗。此試驗場址為一農場，因此協調農場中無灑水灌溉之區域作為研究場域，該場域位於邊坡下方相對平緩的區域，也相對較容易進行施工。雖然此場地並非崩塌地，但仍屬於邊坡地，故本研究才選取此場地進行觀測系統的測試。本年度之測試重點在於此系統可否觀測到邊坡之地下水位變動，因此如果此場域內可行，在崩塌地亦可安裝此系統進行地下水位量測，其原理相同，故不會因為場地改變而造成額外的地下水位量測誤

項次	審查意見	回覆辦理情形
		差。
七	為因應機關組織改造,機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」,報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫,相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載。	謝謝審查委員之提醒，已將內文及封面的機關名稱修正。

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本研究的儀器設備對於各種地質的適用性為何？	謝謝委員建議，本研究所使用的儀器設備適用於兩吋井管，管壁需於量測的深度進行開孔，因此本儀器設備並不會因為不同地質而有適用性問題。
二	於感測器及降雨資料分析圖，入滲延時約差半天且無降雨但表層發生入滲現象，再請補充說明。	謝謝委員建議，已經此說明補充於報告中。本團隊研判斜坡上方較薄土層可能有快速通道能直接對地下水水位面進行補注，導致下層的水位計(紅線)受到側向補注而產生水位抬升之現象。上層的水位計(藍線)於期中報告時未量測到入滲現象，因此研判圖 3-38 中藍色線的變

項次	審查意見	回覆辦理情形
		化應為大氣壓力之氣壓變化。
三	目前現場感測器是否因土層入滲路徑影響上層感測器未紀錄，但下層有降雨入滲現象，再請補充說明。	謝謝委員建議，已將此說明補充於報告中。由於現場感測器所放置的位置是位於斜坡最低處，試驗區域內降雨所造成的入滲現象有可能是由斜坡上方入滲至土層後因地形高低落差或有快速通道直接進入到下層感測器區域。
四	本計畫運用空壓機氣管進行監控，惟其氣管之耐用度似仍受限強度，如何克服其強度條件以應用於各項災害工程之監測工作。	謝謝委員建議，由於期中報告時所使用之氣管因太陽紫外線照射產生破裂，因此經廠商建議後更換為較耐曬氣管，更換的氣管管壁較硬且厚實，本團隊於重新佈線過程中針對氣管外圍進一步包覆黑色水管，以

項次	審查意見	回覆辦理情形
		避免太陽光直射造成破裂。依據目前使用狀況，新更換的氣管並未出現破裂及漏氣的現象產生。
五	試區範圍大，是否於區域內另擇合適場址鑽井設置儀器作為對照，更全面掌握現地情形。	謝謝委員建議，本團隊於鑽井前有使用地電阻進行地層掃描，但礙於實驗過程中需配合農場作物種植、機具路面通行及需要滿足斜坡等考量，因此才將觀測井設於該點位。此外，由於本年度計畫經費有限，因此無法規劃多口監測井，未來若有經費將可參照委員意見新增觀測井，以便更全面掌握現地情形。
六	試區外的農耕行為是否有排除其影響？請說明。	謝謝委員建議，於觀測井設立前有先與農場經理再三進行確

項次	審查意見	回覆辦理情形
		認，觀測井所設立之斜坡上方並未有任何農耕行為，故不會於該區域進行澆水或灌溉，因此降雨事件的發生成為此處入滲之主要原因。
七	第一層感測器因未降雨採灑水方式，除第1次水壓於停水後持續上升外，其餘3次則於停水後逐漸下降，對於各次灑水的量及水壓力否相同。	謝謝委員建議，於 A 組試驗中四次灑水皆為 10 分鐘且相同的流量，因此各次灑水的量及注水壓力應相同。由於進行第 1 次灑水時，地層下的孔隙為未飽和狀態，因此停止灑水後水壓仍持續上升。其餘三次灑水時，地層下的孔隙皆達飽和狀態，因此停水後水位便逐漸下降。