



農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA

計畫編號：ARDSWC-112-045

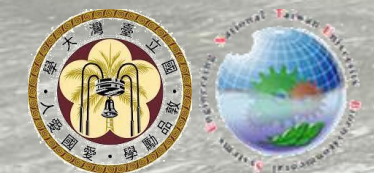
基於多深度水壓觀測之自動化邊坡滑動監測 預警系統之研發與現地測試

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

計畫主持人：蔡瑞彬 博士

國立台灣大學 生物環境系統工程學系 副教授

2024/08/20





簡報大綱

計畫緣起及目的

工作進度與交付項目

工作執行方法與步驟

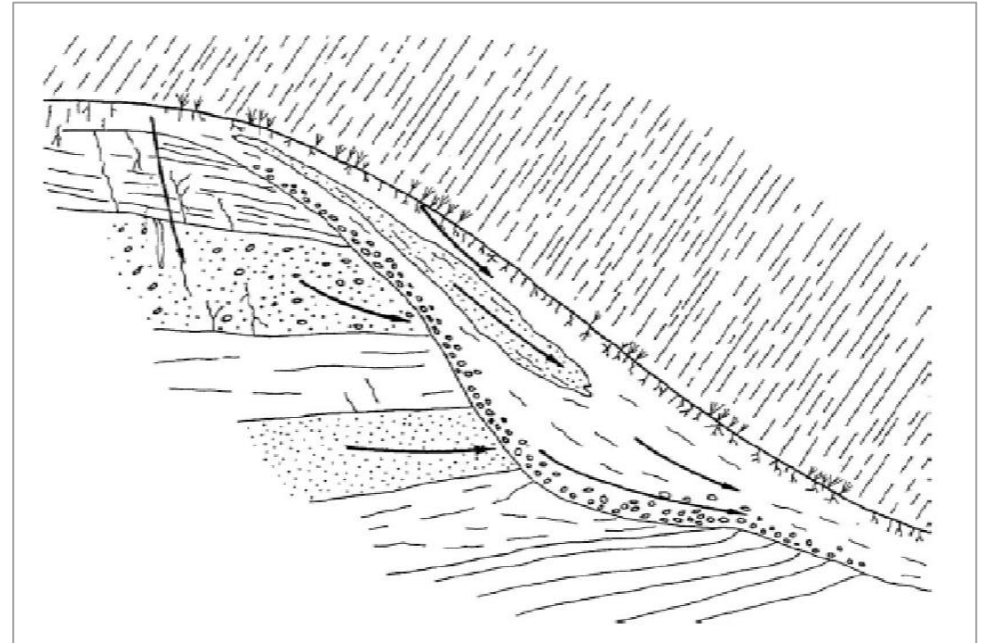
觀測結果說明

結論及建議



計畫緣起及目的

- 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。
- 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）。
- 降雨期間坡地層內之水壓分布並非單一靜水壓分布，受到地層結構、降雨型態與上邊坡地層之入滲特性或地層內滲流管道是否堵塞等因素而隨時間改變(Johnson and Sitar, 1990)。





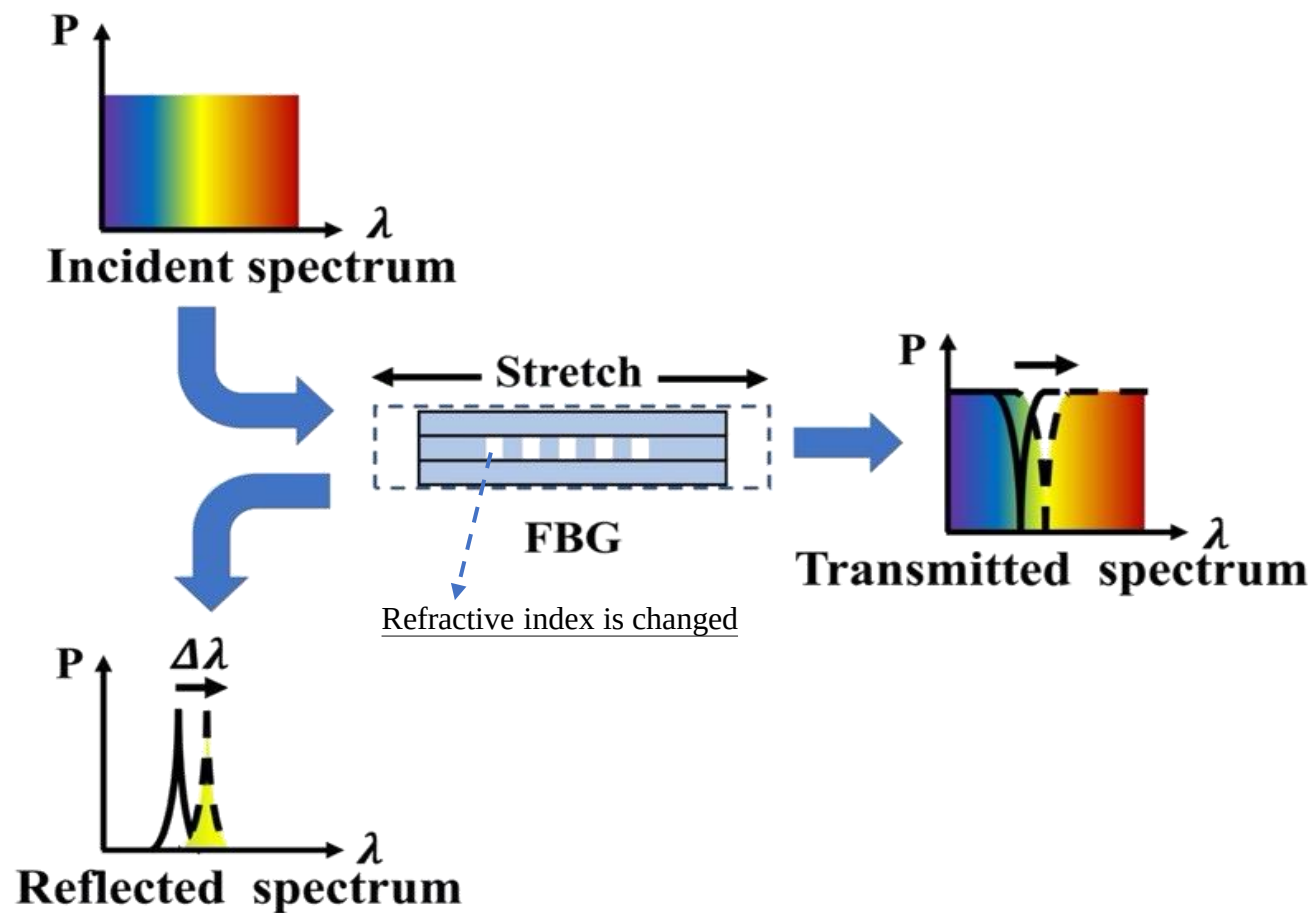
計畫緣起及目的

- 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****監測邊坡孔隙水壓變化**，並設立預警水位，建立預警系統。
 - 本年度(第一年度)計畫目的為測試新型自動化分層孔隙水壓量測系統是否可長期觀測坡地分層水壓
 - 透過現地測試，滾動式調整系統配備，使其適用於邊坡長期監測。



工作執行方法與步驟---光纖感測器理論

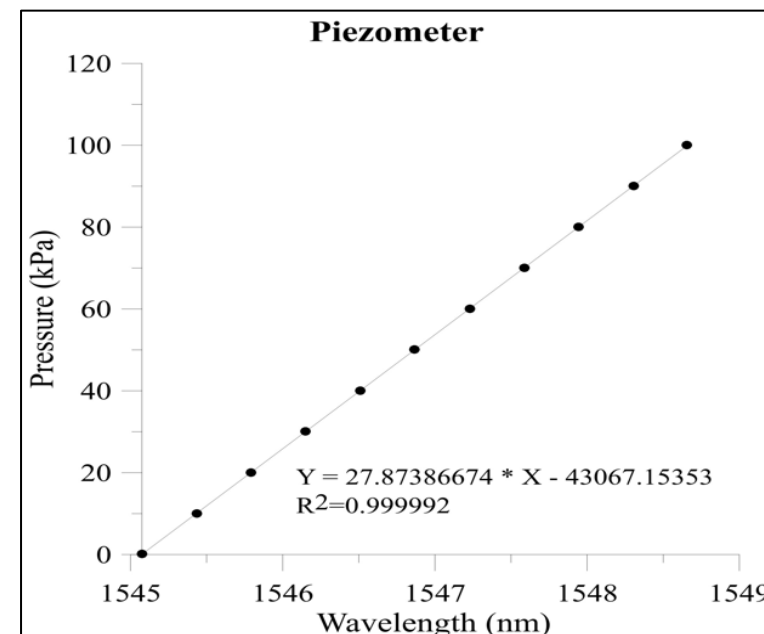
• Fiber Bragg grating (FBG) sensor



$$e = \frac{Dl}{l} = \frac{D /_B}{ /_B}$$

e : strain
 $/_B$: wave length

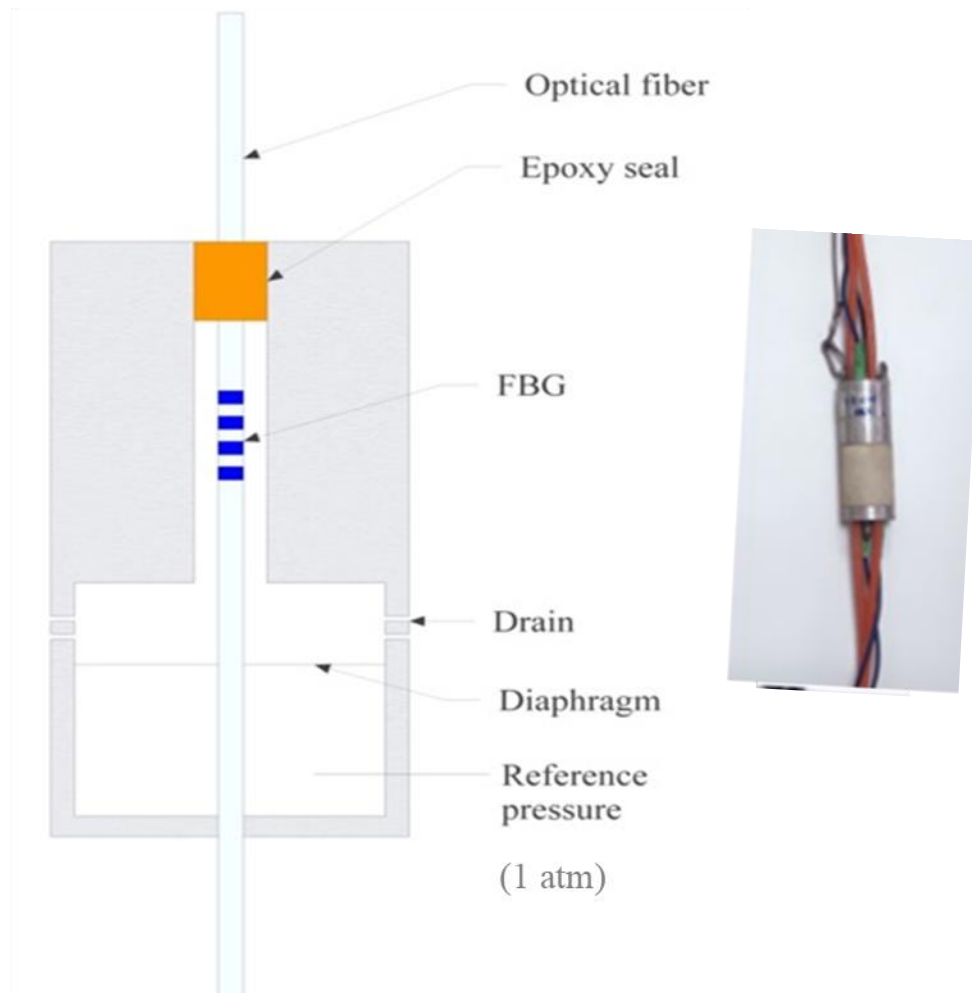
Huang, An-Bin, et al. "Stability monitoring of rainfall-induced deep landslides through pore pressure profile measurements." *Soils and Foundations* 52.4 (2012): 737-747.





工作執行方法與步驟---光纖感測器理論

Laboratory test - FBG piezometer

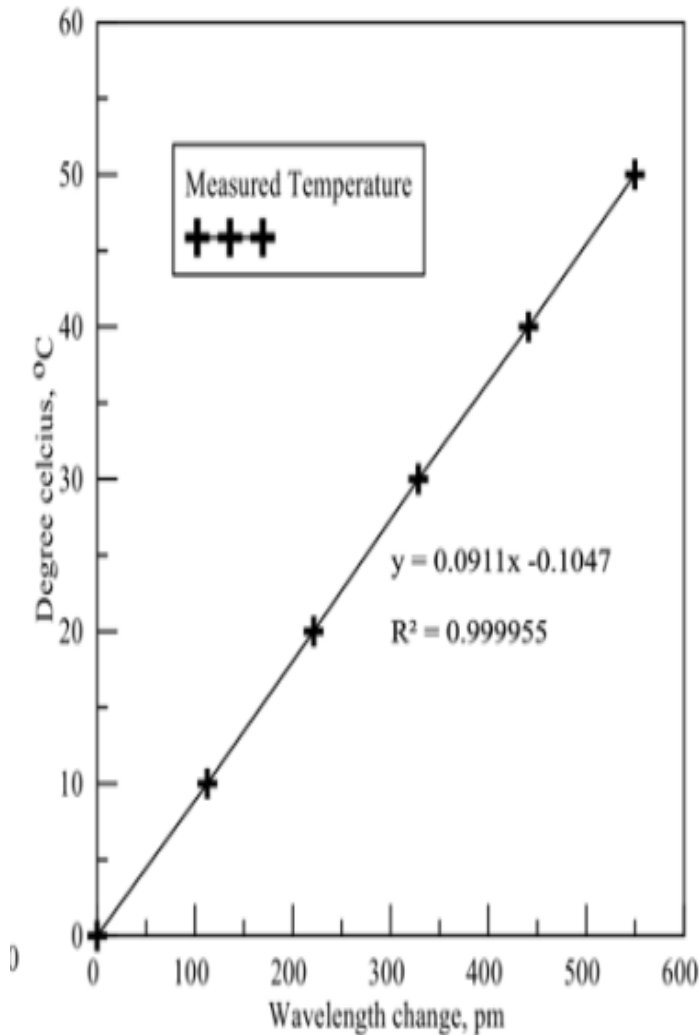
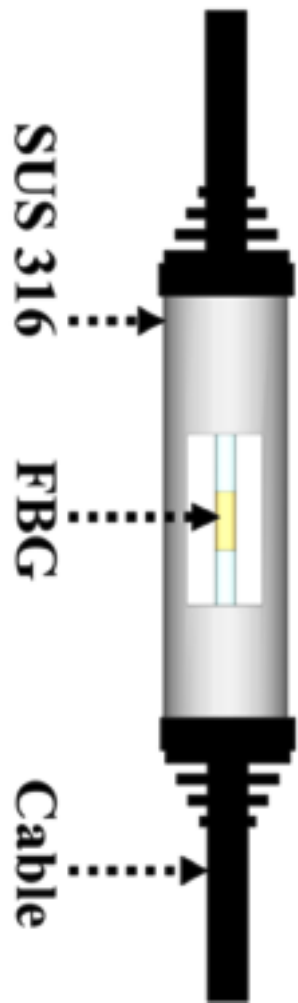


- Measurement ranges: 0 – 400 kPa (40.8 mH₂O)
- Diameter: 36 mm
- Weight: 500-600 g
- Resolution : 0.1 kPa
- Accuracy : 0.2% FS
- Wavelength range: 1520-1570 nm
- Manufactured by Citpo Tech



工作執行方法與步驟---光纖感測器理論

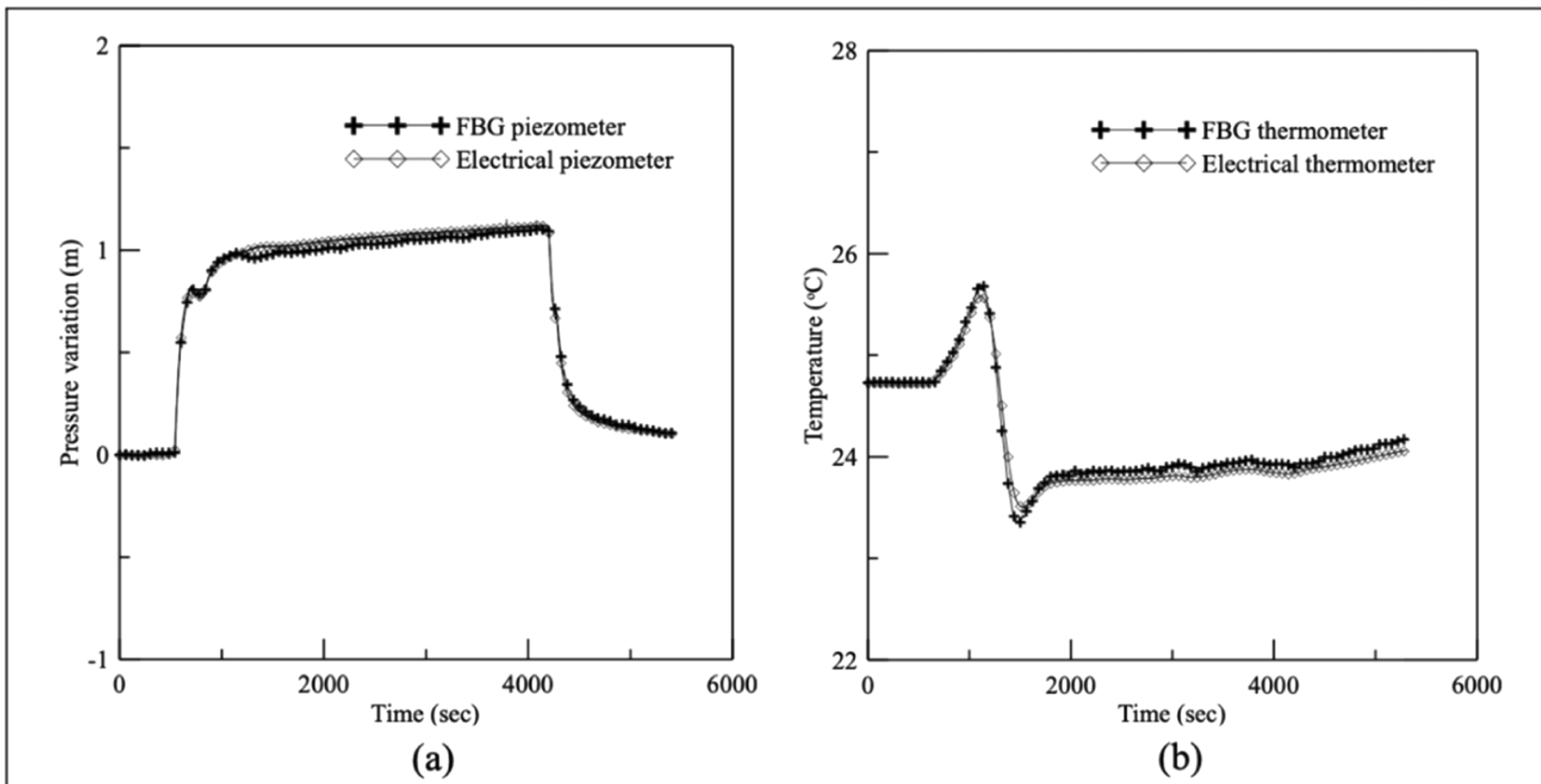
Laboratory test - FBG thermometer



- Measurement ranges: 0–50°C
- Length: 50-60 mm
- Weight: 10-20 g
- Resolution : 0.1 °C
- Accuracy : 0.4% FS
- Wavelength range: 1520-1570 nm
- Manufactured by Citpo Tech



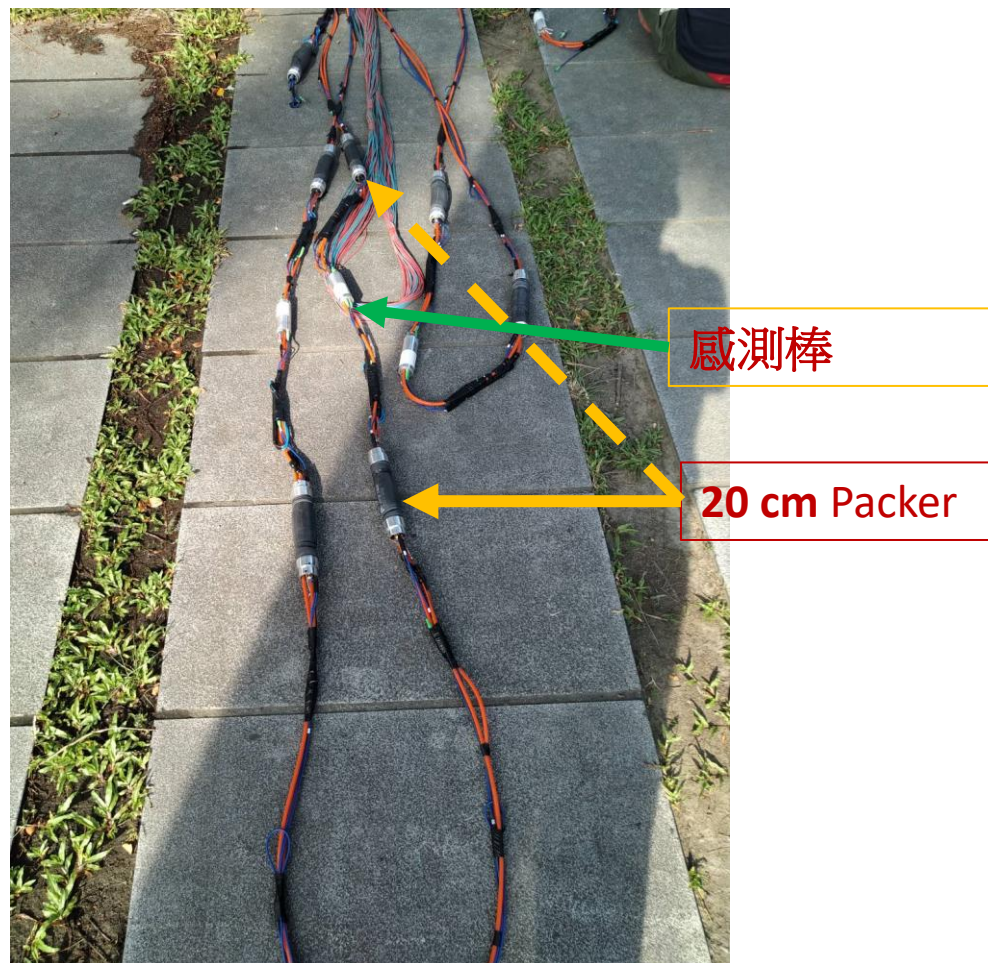
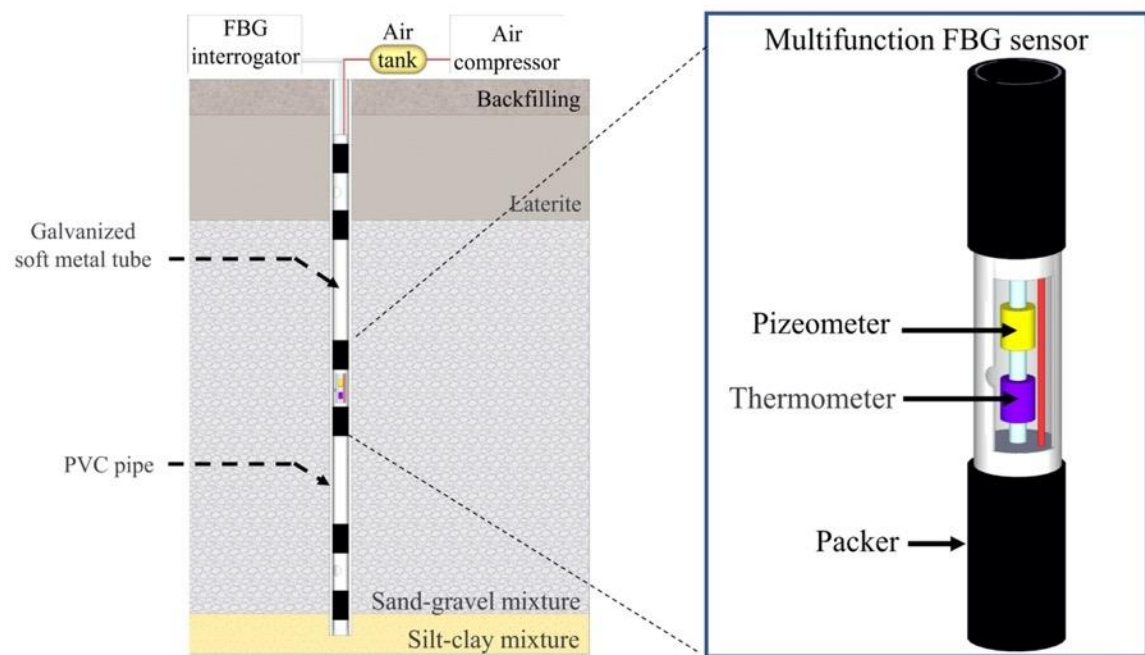
工作執行方法與步驟---光纖感測器理論





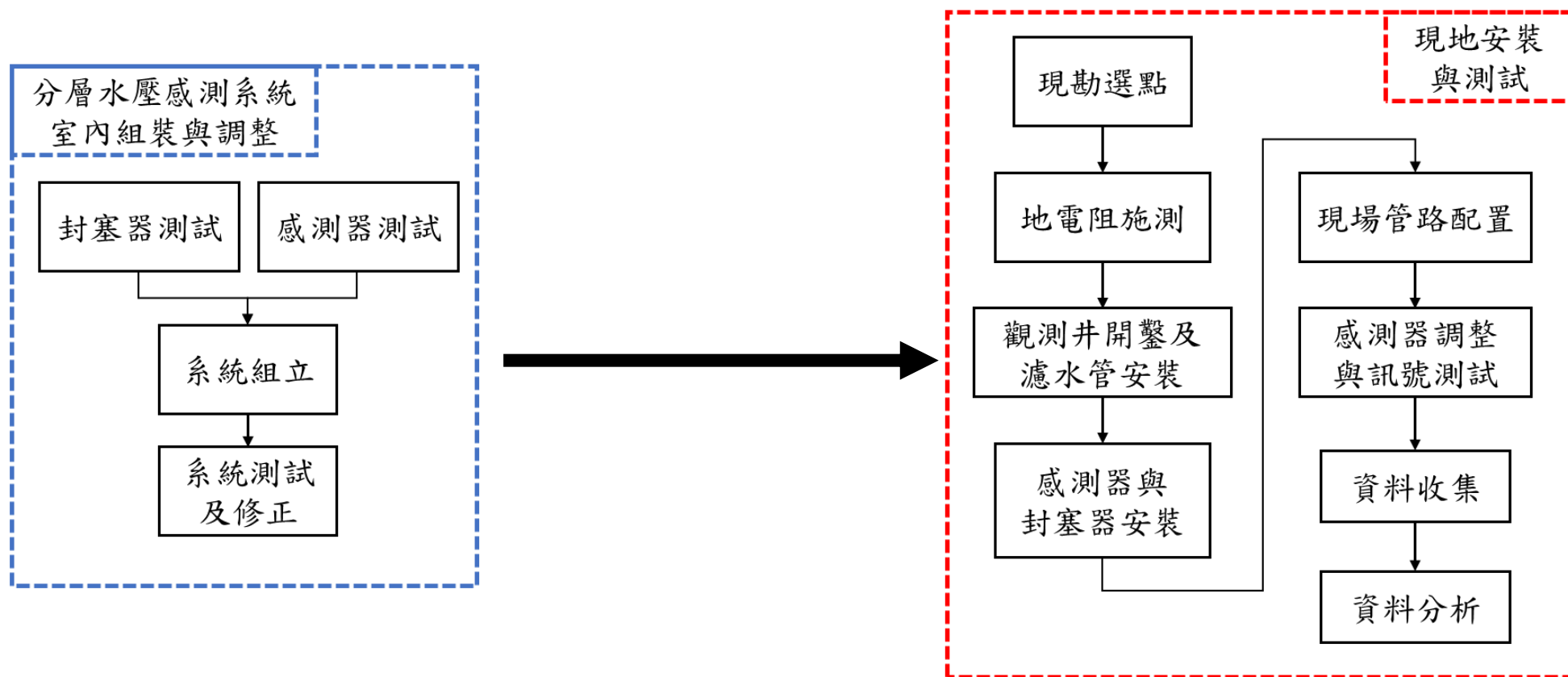
工作執行方法與步驟---新型多深度觀測井

- 光纖光柵（Fiber Bragg grating, FBG）多深度觀測系統
- FBG水溫水壓感測器



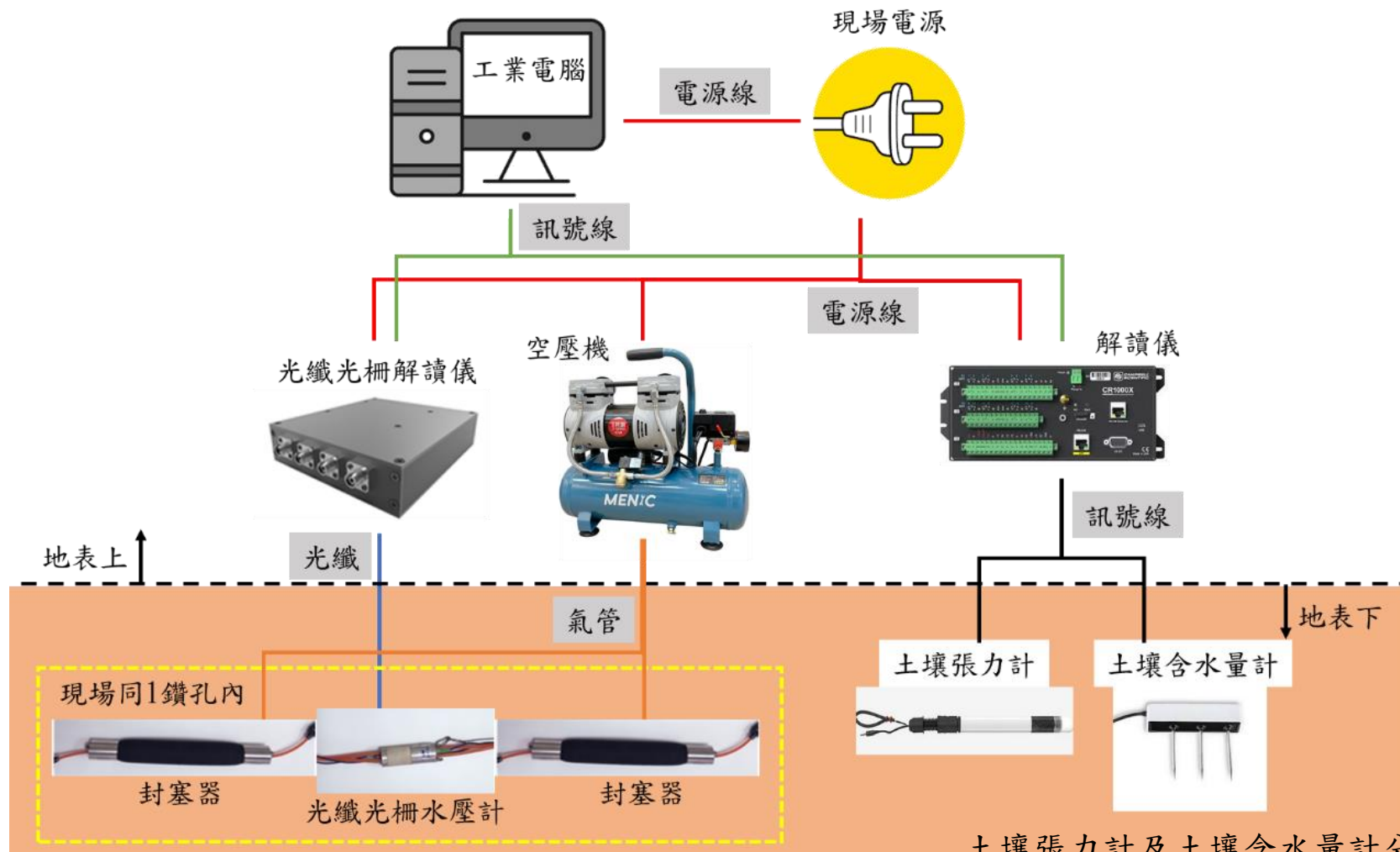


工作執行方法與步驟---研究流程





工作執行方法與步驟---系統整合



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。



工作執行方法與步驟---場址介紹



- 試驗場址為台灣農業試驗場安康分場農地
- 場址為一坡地，地勢由南向北傾斜，鑽井地點位於地勢相對較低區域。
- 由於試驗場址不會進行澆水或灌溉等動作，因此降雨為此處水位變化的主要原因。





工作執行方法與步驟---地電阻施測

地電阻佈線位置圖

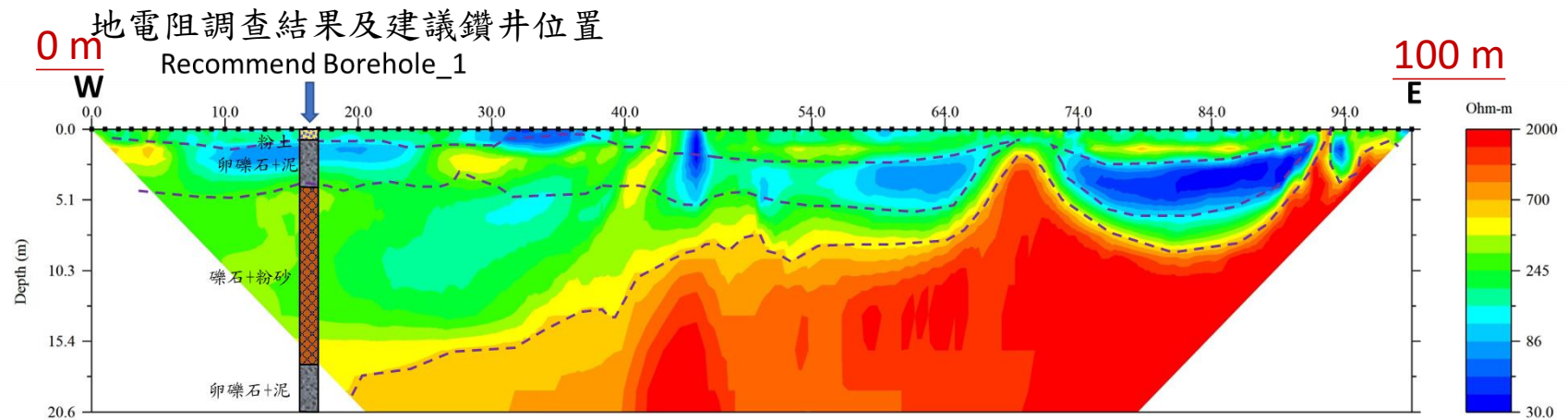


- 本團隊先於試驗場址進行地電阻探測，取得其電性架構作為鑽井之參考。
- 採用溫納陣列(Wenner Array)方式進行施測，地電阻佈線方式採用橫向佈線100米，經換算後其縱向深度之解析度為20米，待施測完畢後依據反演算之結果選取建議鑽井位置及分層開篩深度。

地電阻佈線過程



地電阻主機架設





工作執行方法與步驟---鑽井及配管過程



- 本團隊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**。
- 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，七厘石用於回填上下開篩段，皂土回填於中間封閉段用以對上下開篩段進行阻隔。



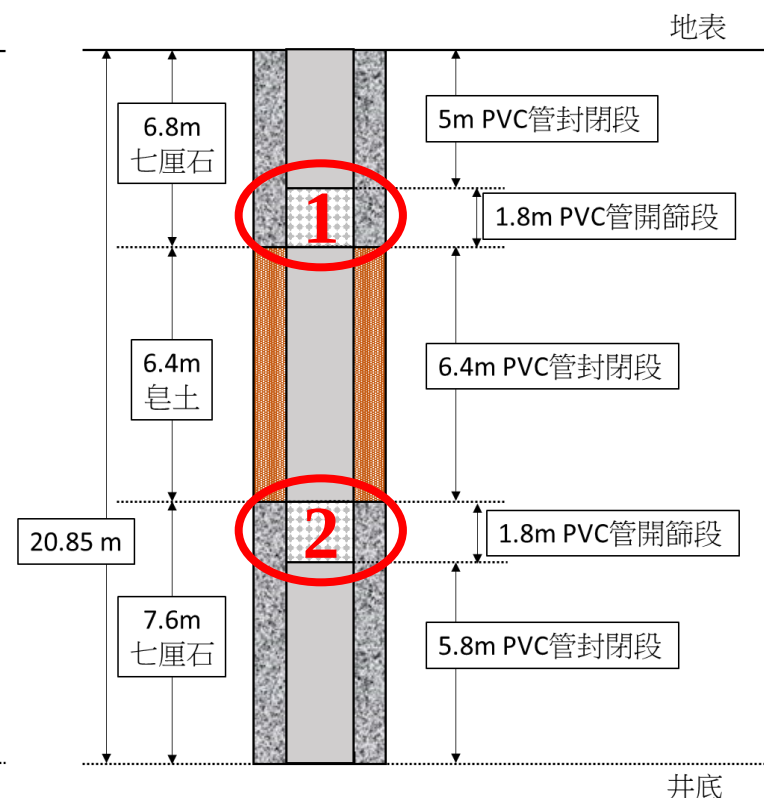
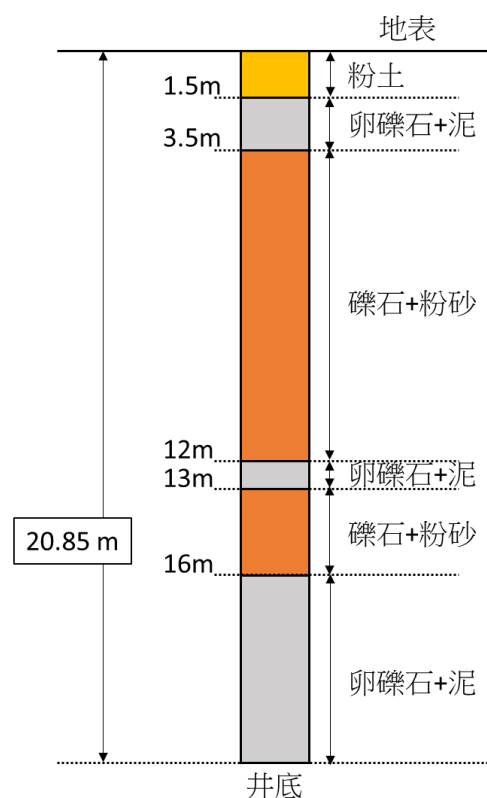
鑽井過程



套管開篩段

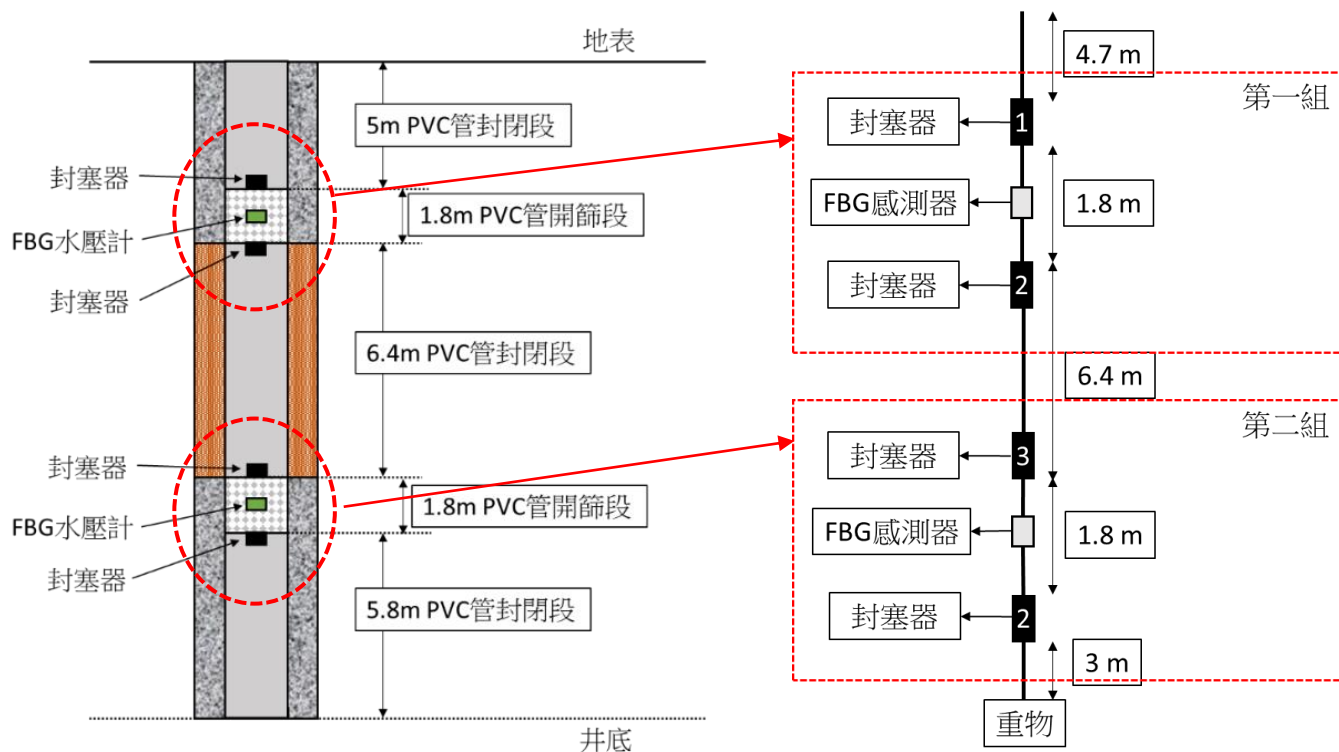


濾料回填過程





工作執行方法與步驟---感測器配置

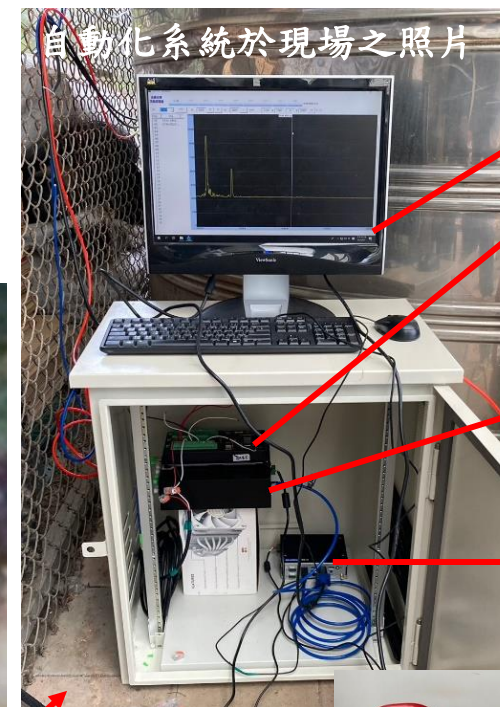
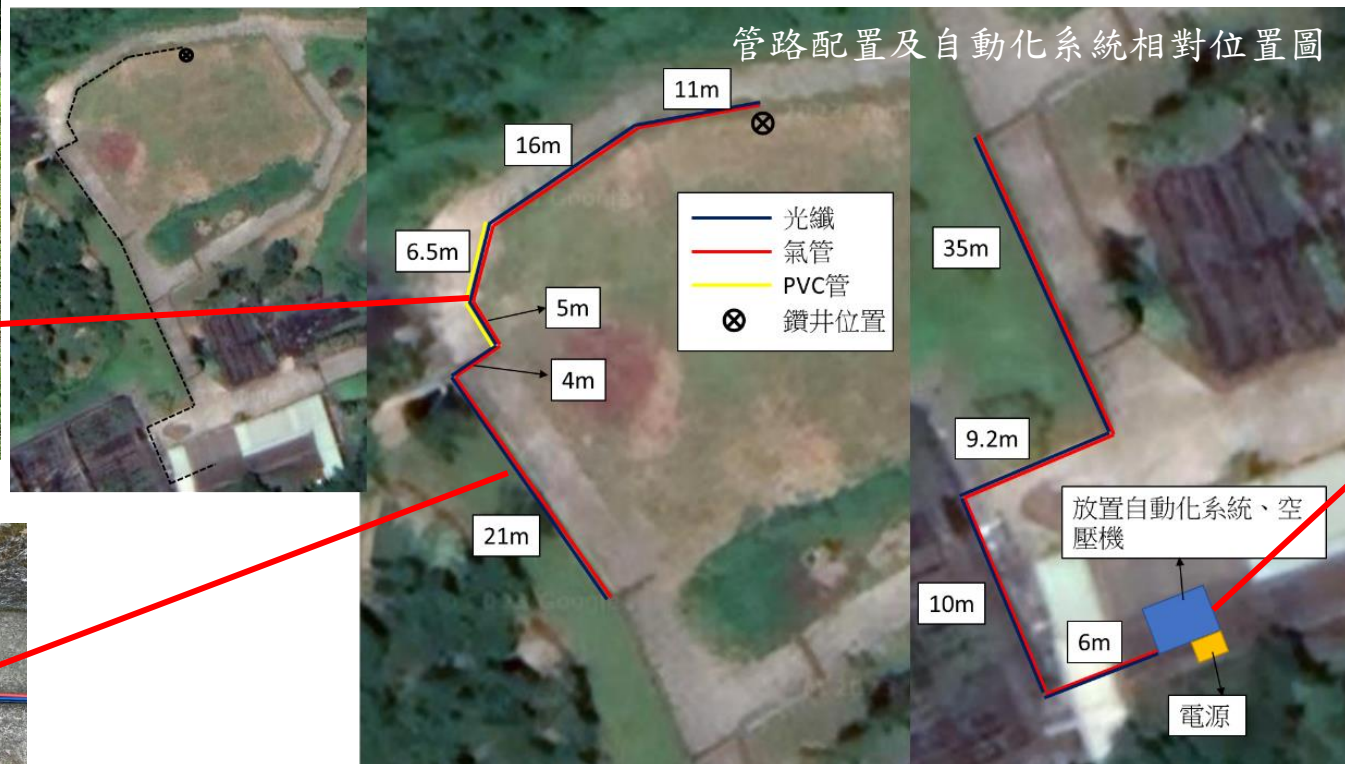


- 本團隊依據鑽探岩屑及地電阻資料進行感測器分層配置，採用兩組感測器進行串聯，目的在將FBG水壓計放置於PVC管之開篩段深度，搭配FBG水壓計上下方之封塞器進行阻隔。
- 本計畫分別於地表下深度6米及14米處放置兩組感測器，以量測不同分層之水壓變化。



工作執行方法與步驟---多深度觀測站建立

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，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**。系統距離井點長度約為125米。



螢幕

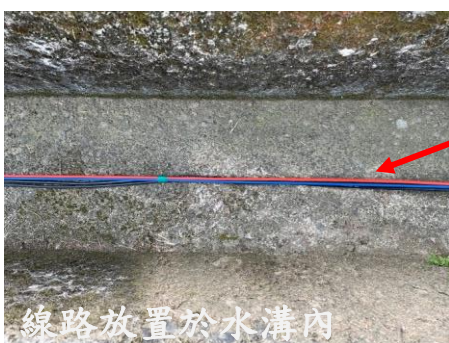
CR1000X
解讀儀

光纖光柵
解讀儀

工業電腦

空壓機

穩壓鋼瓶





觀測結果說明---期中階段

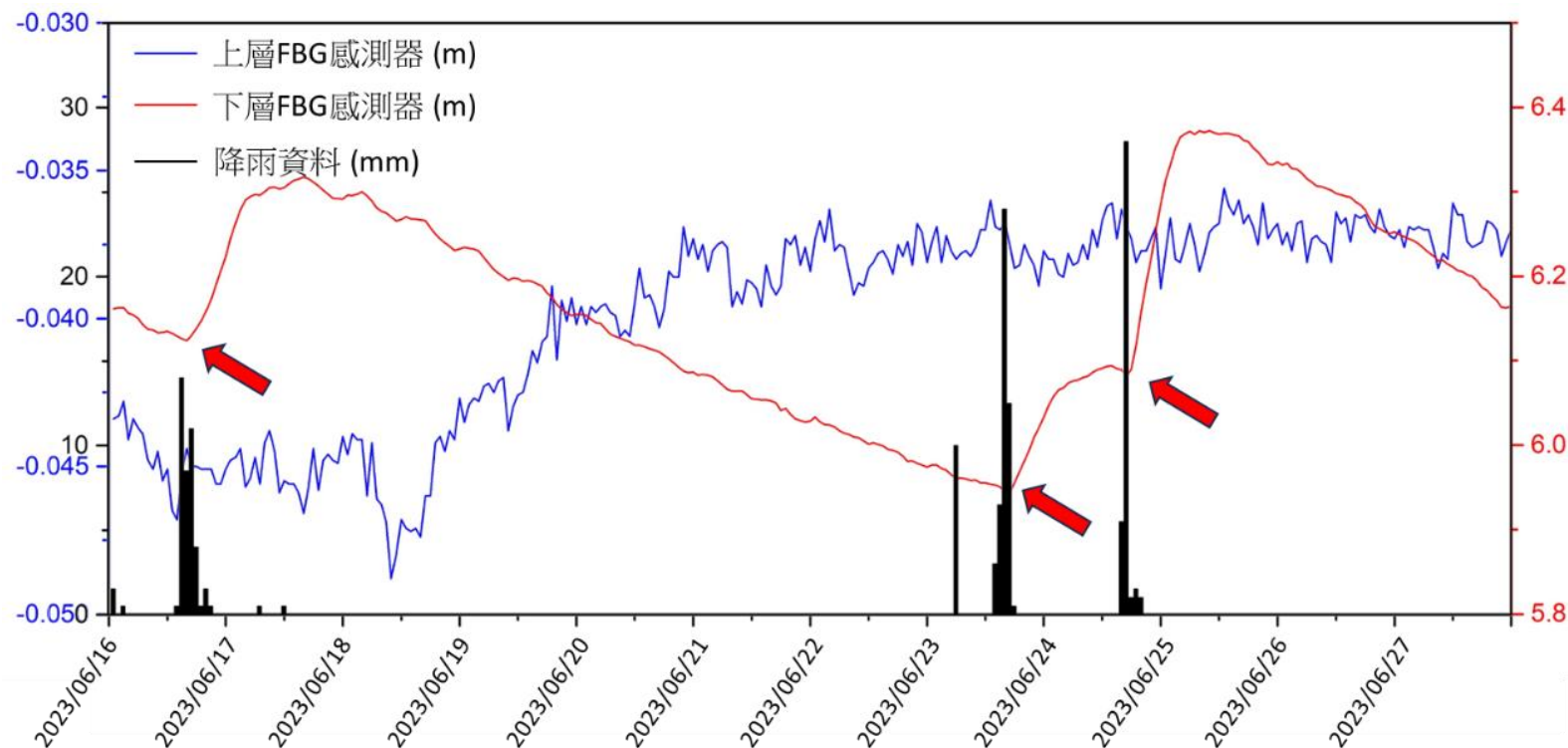


- 本團隊於112年6月15日完成現地感測器設置與自動化系統測試，內容包含：
 - 網路遠端連線測試
 - FBG感測器訊號測試
 - 含水量計及張力計訊號測試
- 於112年6月29日進行感測器的清潔與保養及系統修正，並分析此段時間內所收集之數據。
- 本計畫選用中央氣象局之雨量站作為降雨事件之參考依據，其TWD97座標為(302506.5425,2761370.1369)，將位於試驗場址西北方直線距離約500公尺處之新北站作為參考。



觀測結果說明---期中階段

上層FBG感測器(藍線)、下層FBG感測器(紅線)及降雨量(黑線)

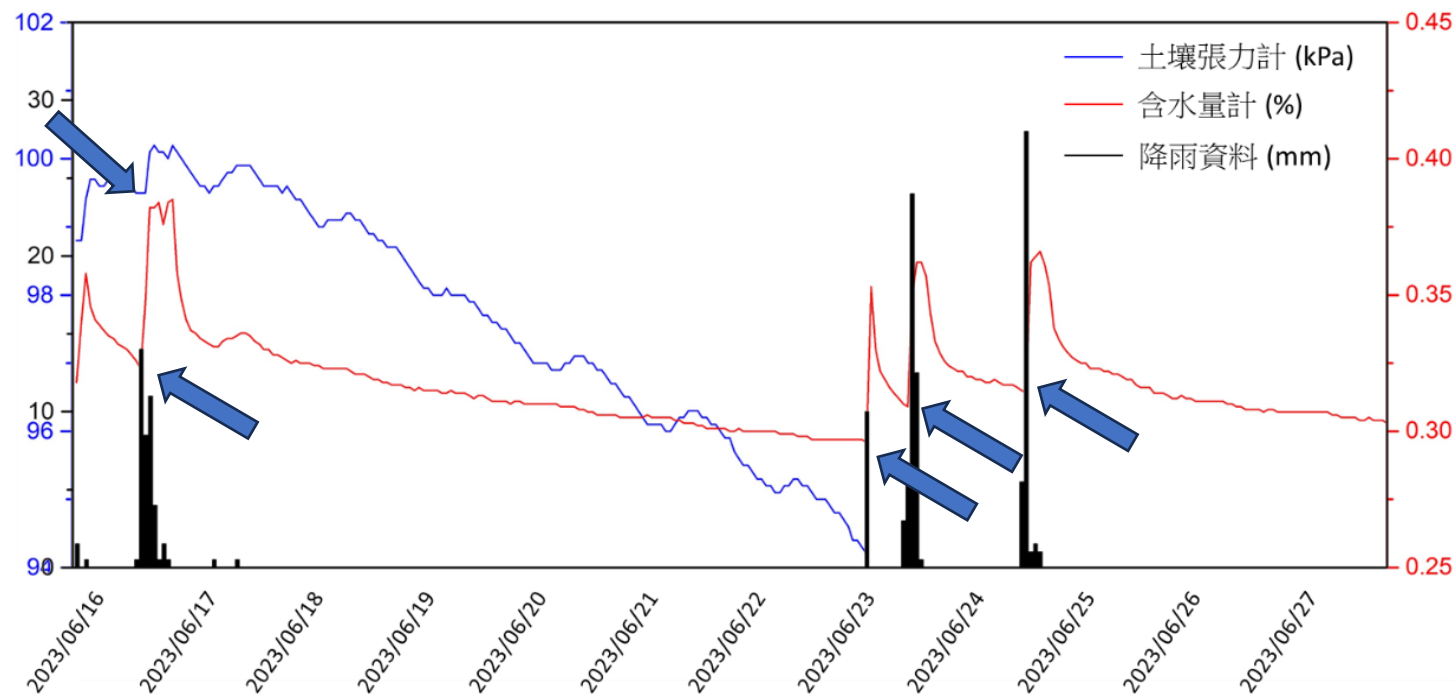


當有降雨事件發生時

- 下層FBG水位 (紅線) 隨著降雨事件(箭頭處)顯著改變，代表記錄到降雨補注
- 上層FBG感測器(藍線)並未記錄到此一現象。



觀測結果說明---期中階段



- 圖中顯示張力計(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。
- 因上層FBG訊號並未與降雨變化一致，推測可能上層FBG處在未飽和帶，尚未受到降雨補注。
- 觀測井處之地下水補注並非垂向補注，可能受到側向補注
 - 下層FBG量測水壓變化與降雨變化一致



觀測結果說明---期中後各事件紀錄說明



發現氣管因長時間經太陽曝曬，導致多處龜裂使氣體外洩，造成封塞器無法正常運作。

依農場要求加裝獨立電表，同時發現空壓機內的啟動馬達損毀，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。

進行第一次感測器配置修正

10/31

因研究區域較少降雨事件發生，本團隊嘗試以地面注水的方式，以證實第一個FBG感測器在有水流入時可以正常的發揮量測效果。

進行第二次感測器配置修正

空壓機於短時間內密集進行啟動。

FBG清潔與校正完畢後，重新將感測器放回。

9/8

9/26

8/7

8/4

7/19~7/28

7/6

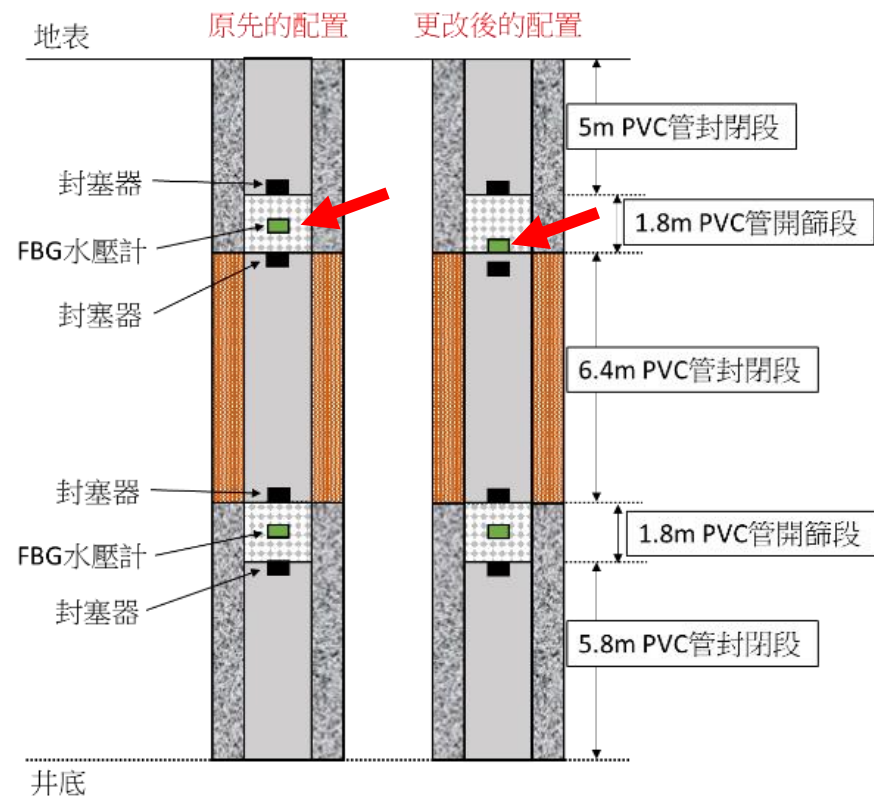
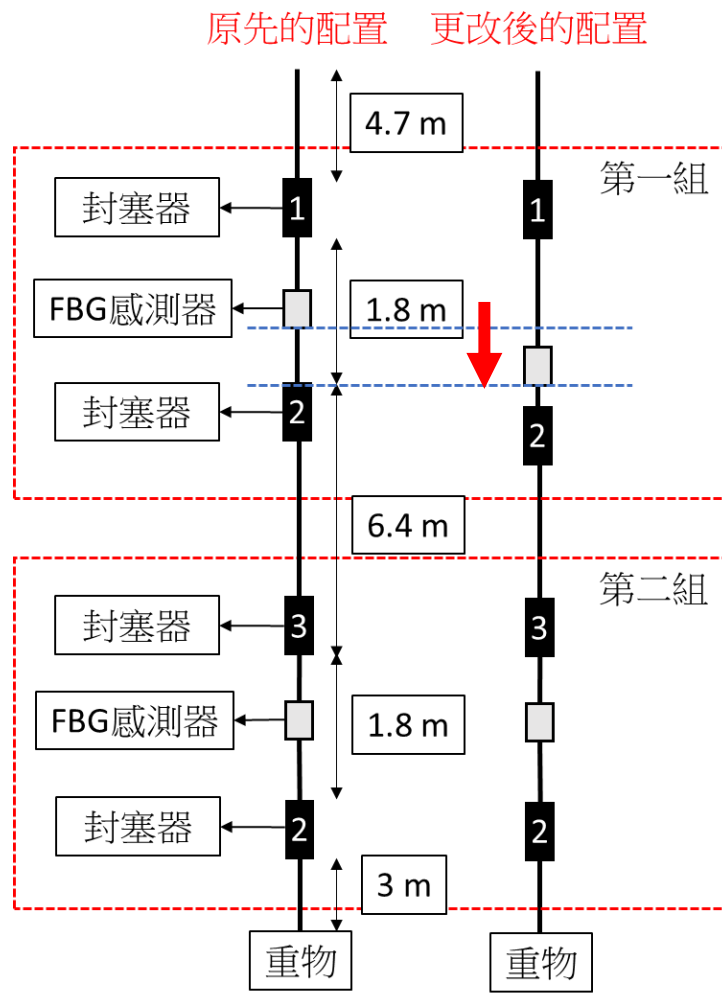
空壓機持續作動且沒有停止，因此將空壓機關閉避免危險發生。

進行氣管更換：經詢問廠商及測試後購入較耐曬及耐拉扯能力較高之氣管，並以黑色水管包裹保護避免太陽曝曬。





觀測結果說明---第一次感測器配置修正

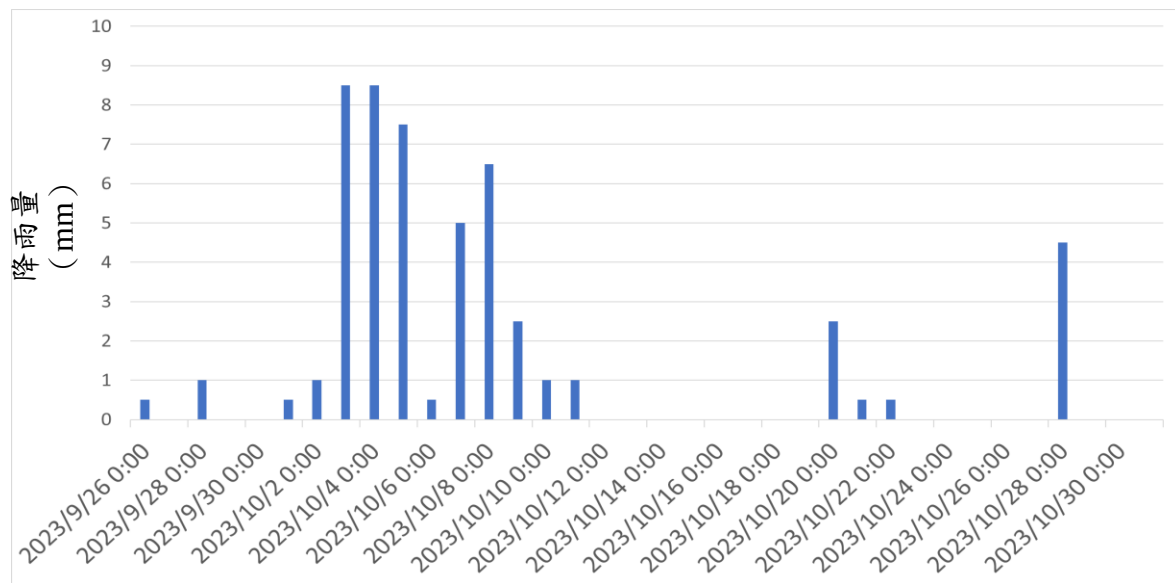


試驗場址降雨事件較少，為減少淺部FBG感測器產生水位變化訊號所需的水量(管內需飽和)與反應時間，因此調降感測器位置，使其與下方封塞器距離由原先90公分縮短為50公分，。



觀測結果說明---第二次感測器配置修正

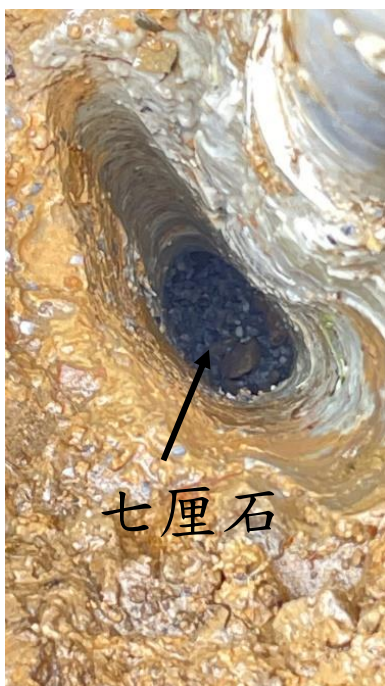
- 經第一次配置更換後，系統持續量測。
- 9月26日至10月30日內降雨事件少且非連續降雨，加上試驗地點為斜坡，降雨多以地表逕流方式流走，導致淺部FBG感測器未量測到水位變動，因此進行第二次配置更換。
- 因光纖與氣管等線路無法再縮短，故改為使用黏土充填以減少感測器到封塞器間的空隙。
- 將40公分的黏土固定於2號封塞器的頂端，50公分的距離縮短為10公分，
 - 原先井管內的水從原先需要累積50公分才能使FBG感測器產生訊號
 - 現僅需累積10公分便可使FBG感測器產生訊號。





觀測結果說明---灑水試驗說明

- 為證明淺部感測器可正常運作，本團隊進行人工降雨試驗
- 本團隊於人工灑水前，先將井頂皂土開挖，直到七厘石位置，坑洞深度約為40至50公分深。
- 本團隊於井口周遭以水管連接花灑進行注水，模擬降雨事件，花灑的流量約為150~200毫升/秒。



A組試驗

直接對坑洞進行灑水



B組試驗

將坑洞回填石英砂後進行灑水





觀測結果說明---試驗說明

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

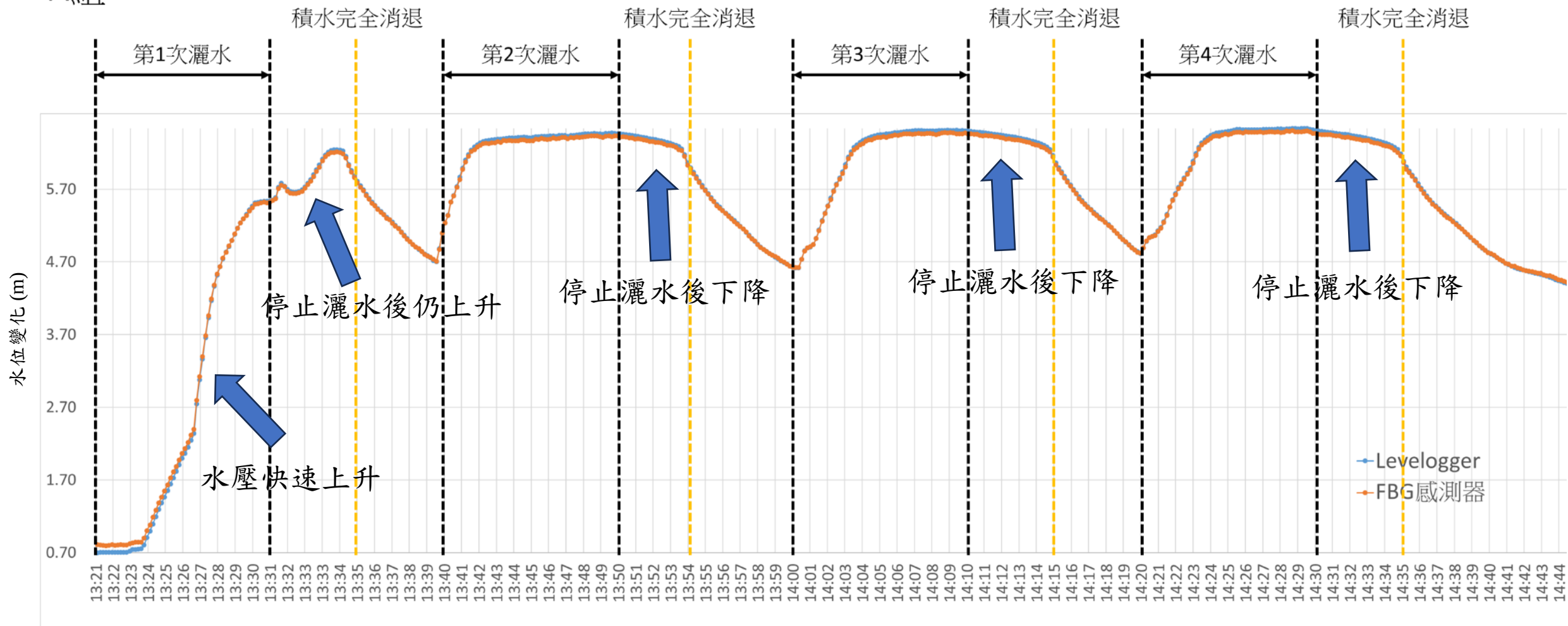
- A組試驗內分別進行4次灑水動作，每次灑水時間為10分鐘，由於坑洞於灑水過程中會逐漸積水，因此，在下一次灑水動作前會先等到積水完全消退且靜置5分鐘後繼續進行。
- B組試驗分別進行2次灑水動作，灑水流程及時間皆與A組試驗相同。

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



觀測結果說明---A組試驗結果

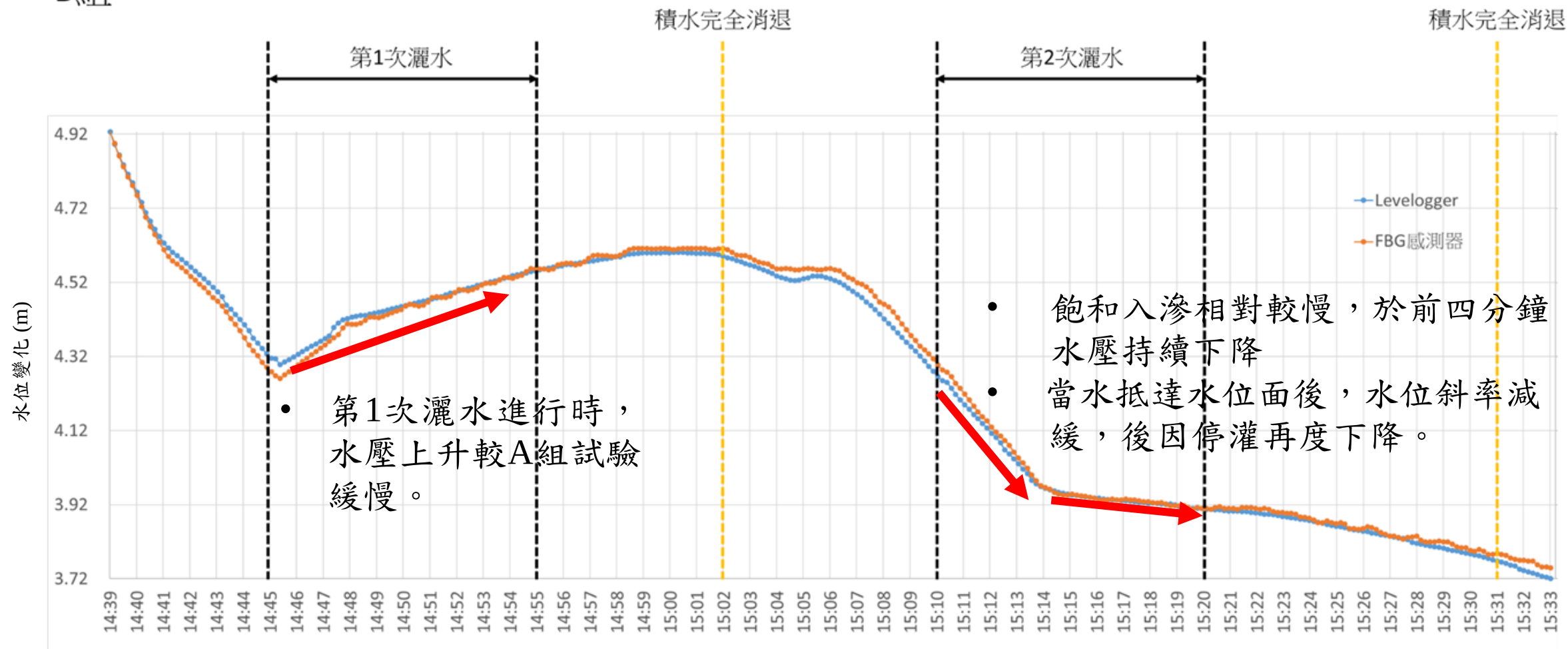
A組





觀測結果說明---B組試驗結果

B組



結論

- 本計畫已**成功將新型自動化分層水壓量測系統安裝於邊坡**，且進行**多深度孔隙水壓變化之即時觀測**。
- 依據現地測試結果進行**系統軟硬體之修正與調整**，使此系統**更適用於邊坡之長期觀測**。
- **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，但第一個感測器則否，顯示可能存在側向補注。**
- 為了驗證上層感測器可自動觀測水壓變化，本團隊以灑水的方式模擬降雨事件，結果說明**淺部的第一個FBG感測器能準確觀測注水所產生的水壓變化。**
- 本計畫已建立多深度觀測系統的現地安裝使用SOP。

建議

- 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。
- 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。
- 本計畫所建立之系統除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。



Thank You

