

計畫編號：107 保發-11.1-保-01-06-001(31)

**高精密 GPS 與現地監測系統應用於順
向坡深層滑動之案例研究**
**Case study of high precision GPS and
in-situ monitoring systems applied to
deep-seated sliding dip slope**

執行單位：華梵大學、國立中央大學

執行期間：107 年 02 月 09 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人：鄭清江 教授

共同主持人：曾佳漢 博士後研究

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 107 年 12 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)

高精度 GPS 與現地監測系統應用於順向坡深層滑動 之案例研究

摘要

華梵大學所在的新北市石碇區大崙山順向坡，自建校以來即發現校園內存在邊坡破壞的現象，如鋪面上與校舍牆上發育中的裂縫，以及校內外道路的龜裂、陷落與隆起。因此，校方陸續在校園內設置坡地穩定性監測系統，如定期量測之傾斜觀測管、位移沉陷觀測點、建築物傾度盤、地下水位計以及雨量站；同時也建置各項護坡工程，如地錨與擋土牆。華梵大學雖然有超過十年的校內監測資料，但是校園以外之大崙山坡地並非校方用地，故無法設置如校內密集的調查與監測。

本計畫結合大崙山坡面上高精度 GPS 地表變形監測系統與校園內既有之坡地監測系統，加以定點局部地質踏勘作業。透過分析降雨後地下水位上升，進而導致滑動塊體位移速率增加的相互時空關係，以期找出滑動塊體的範圍以及瞭解其在有無降雨期間的運動模式，並找出其滑動機制。最終期望結合上述的時空關係中的各項參數，推導出大崙山順向坡中之滑動塊體運動的經驗公式，以得到宏觀與微觀的邊坡運動研究成果。

本計畫預計執行間為兩年，而第一年度之研究成果與結論如下：

大崙山順向坡中地下水面在累積降雨量 120 mm 左右即開始快速上升，原因應為降雨透過逕流方式於大崙山後山入滲進入岩盤中，致使地下水快速補注。俟地下水位浸沒位於 20–30 公尺深處之滑動面，該順向坡滑動塊體即加速向下邊坡滑動。高精密之 GPS 連續監測站也在地表記錄到坡面與地下 SAA 記錄到之滑動面相同的變位量，證明 GPS 之高精密特性已能夠應用在坡地活動監測中。唯若欲獲得詳細與精密之整體邊坡之運動行為，設置於地表坡面與地下滑動面之連續且高解析之監測儀器必須兼備。

關鍵詞：大崙山、順向坡、深層滑動、全球定位系統、長期監測

Case study of high precision GPS and in-situ monitoring systems applied to deep-seated sliding dip slope

Abstract

Phenomena of slope failure have been found on the Dalun Mountain dip slope where Huafan University is located in the Shihding District, New Taipei City, such as cracks on the roads and building walls and local ground uplift and settlement within and outside the campus. Accordingly, the university has set up monitoring systems for the slope stability, for example, inclinometers, displacement and settlement observation points, building tiltmeters, and groundwater gauge and rainfall gauge. Structures for slope retaining have also been constructed, like ground anchors and retaining walls. Although the Huafan University possesses the monitoring data for more than ten years, the rest part of the Dalun Mountain does not belong to the campus, so that intensive survey and monitoring cannot be carried out.

In the project, we attempt to combine the high precision GPS monitoring system for ground deformation with existing monitoring systems within the campus, including local geological investigations. By analyzing the time-space relation between the rise of groundwater table resulting from rainfall and the increasing sliding rate induced by the groundwater table rising, we expect to find sliding areas and understand sliding patterns of the sliding blocks during rainfall and no-rainfall

periods, as well as sliding mechanisms. Our final goal is to derive experience formulas for the slope movements from the parameters acquired from the analyses, and to obtain results of macro- and microscopic slope movement.

The period of time of this project is set to be two years, and the research results of the first year are as follows:

The groundwater table within the dip slope in the Dalun Mountain would rise rapidly once the cumulative rainfall comes to 120 mm. The mechanism can be that rainfall infiltrates as runoff into the Mushan Formation bedrock, leading to the rapid recharge of the groundwater. As long as the sliding surface in the depth of 20–30 m is submerged by the groundwater, the sliding block of the dip slope then accelerates the downslope sliding rate. The high precision and continuous GPS stations applied in the project record displacement amount of the slope surface which is consistent with that of the sliding surface recorded by the SAA. This phenomenon proves that the feature of high precision and the continuous GPS devices are capable of being applied to monitor the slope movement. However, in order to obtain detailed and high precision movement behavior of a slope, both monitoring devices being set on the surface and underground of the slope must be executed.

**Keywords: Dalun Mountain, Dip slope, Deep-seated sliding, GPS,
Long-term monitoring**

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 計畫緣起	1-1
第二節 計畫工作目標	1-2
第三節 研究區域基本資料	1-3
第二章 邊坡現況.....	2-1
第一節 校區中滑動塊體之分佈	2-1
第二節 大崙山區地下構造	2-9
第三節 華梵校區之地下水體分布	2-12
第三章 既有監測資料研析	3-1
第一節 2018 年度各監測資料	3-1
第二節 降雨型態與地下水位之關係	3-3
第四章 GPS 監測結果分析.....	4-1
第一節 GPS 資料解算步驟.....	4-1
第二節 大崙山順向坡之運動趨勢	4-3
第三節 降雨事件期間之地表位移	4-10
第五章 結論及建議	5-1
第一節 結論與建議	5-1
第二節 下一年度工作	5-4
參考文獻.....	參-1

附錄.....	附錄-1
附錄一、期末報告書審查意見回覆辦理情形	附錄-1

表次

表 1-1 計畫重要檢核點管制表.....1-8

表 3-1 大崙山區歷次降雨之各項資訊.....3-10

(以下略)

圖次

圖 1-1 新北市石碇區大崙山周邊地質敏感區位置圖	1-2
圖 1-2 大崙山地區立體地形圖	1-6
圖 1-3 華梵大學校區地層層序與岩性	1-6
圖 1-4 華梵校區岩芯 DH-1(A)與 W-3(B)所顯示 A 斷層 通過深度	1-7
圖 2-1 現有傾斜觀測管與岩芯分佈圖	2-3
圖 2-2 人工量測式傾斜觀測管的位移情況	2-4
圖 2-3 華梵大學校園東南部份之滑動塊體	2-5
圖 2-4 17-7 與 17-8 兩傾斜觀測管所量測到之變位情形.....	2-6
圖 2-5 岩芯 17-7 與 17-8 所呈現地層材料情形.....	2-7
圖 2-6 華梵大學校園西北部份可能的滑動塊體之地表 破裂	2-8
圖 2-7 驅動滑動塊體位移之降雨量門檻值.....	2-8
圖 2-8 大崙山區地下構造與地下水位分佈.....	2-11
圖 2-9 華梵大學校園內地下水位分佈	2-13
圖 2-10 華梵大學校園內地下水流向	2-14
圖 3-1 現有地下水位計與 SAA 測傾管分佈	3-2
圖 3-2 2018 年 1 - 10 月各監測資料之時間序列	3-3
圖 3-3 2016 年 1 - 12 月各監測資料之時間序列	3-7
圖 3-4 2017 年 1 - 12 月各監測資料之時間序列	3-7
圖 3-5 2017 年 2 月下旬各監測資料之時間序列	3-8
圖 3-6 2017 年 10 月中旬各監測資料之時間序列	3-8
圖 3-7 各種雨型分佈.....	3-9
圖 3-8 水位上升量與累積降雨量之關係	3-11

圖 3-9 水位上升量與最大降雨量之關係	3-11
圖 3-10 水位上升量與最大降雨前之雨量之關係	3-12
圖 3-11 延遲時間與累積雨量之關係.....	3-12
圖 3-12 延遲時間與最大雨量之關係	3-13
圖 3-13 延遲時間與最大降雨前之雨量之關係	3-13
圖 3-14 集水井施工前後 W-1 常時地下水水位深度變化	3-14
圖 4-1 現有高精密 GPS 連續監測站分佈	4-6
圖 4-2 2016 年 4 月至 2018 年 9 月大崙山 GPS 時間序列 (南北分量).....	4-7
圖 4-3 2016 年 4 月至 2018 年 9 月大崙山 GPS 時間序列 (東西分量).....	4-8
圖 4-4 2016 年 4 月至 2018 年 9 月大崙山 GPS 時間序列 (垂直分量).....	4-9
圖 4-5 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖 (HFAN).....	4-13
圖 4-6 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF02)	4-14
圖 4-7 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF04)	4-15
圖 4-8 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖 (HFAN).....	4-16
圖 4-9 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF02)	4-17
圖 4-10 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖 (HF04)	4-18

(以下略)

第一章 緒論

第一節 計畫緣起

華梵大學所在的大崙山地區為經濟部中央地質調查所公告之山崩與地滑地質敏感區(圖 1-1)，加上本校自建校以來，即發現在校園內外之坡地與建物中存有持續發育的裂縫與變形，前者如本校蒼萃樓之樓板傾斜與門框變形，以及後者的大崙山下邊坡趾部之 106 乙線路面有持續性之隆起與陷落。故本校從 1997 年起，陸續於校園內建置各項護坡工程，如地錨與擋土牆；另外亦有坡地穩定之監測系統，如定期量測之傾斜觀測管、位移沉陷觀測點、建築物傾度盤、地下水位計以及雨量站，並有數孔岩芯資料以研判可能的地下滑動面位置。至今本校累積超過十年的校內監測資料。然校園以外之大崙山坡地並非本校之用地，故無法設置如校內密集的調查與監測系統。因此，除了過去已向水保局申請經費鑽取兩孔岩芯，與近期本校之自籌經費所鑽取數孔岩芯外，尚無其他監測系統。為了瞭解大崙山整體坡面之坡地運動與相關之地下構造，本計畫擬以「高精密 GPS 與現地監測系統應用於順向坡深層滑動之案例研究」為題，結合於地表坡面設置之高精密 GPS 監測系統和定點局部地質探勘作業，與校園內既有之坡地監測系統，期望得到宏觀與微觀的邊坡運動研究成果。

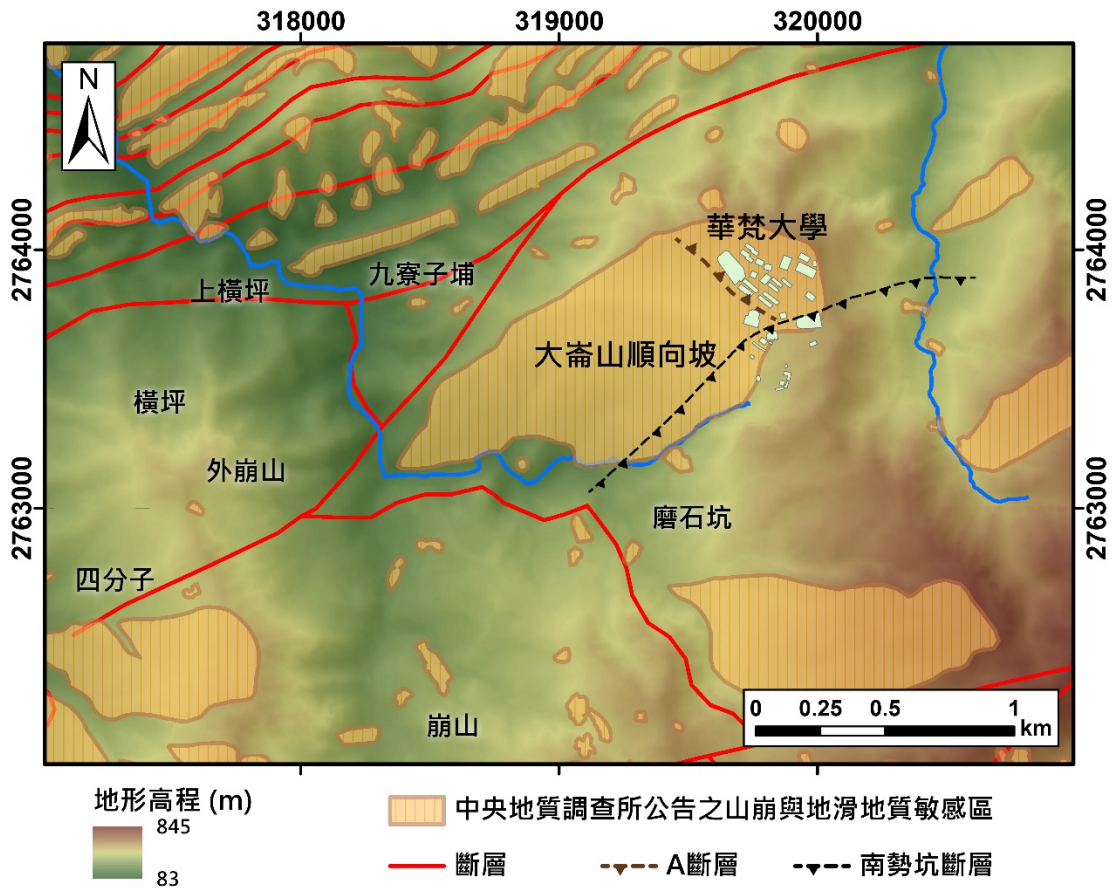


圖 1-1 新北市石碇區大崙山周邊地質敏感區位置圖

資料來源：中央地質調查所與本計畫

第二節 計畫工作目標

本計畫所預期的最終成果為了解邊坡滑動塊體在乾燥、降雨與強降雨時期的運動模式與機制，故需要在兩年期間內，對照第一年與第二年分別的乾、濕季與颱風季(強降雨)時，由高精度 GPS 地表變形監測成果配合其他各項監測資料，所歸納出的滑動塊體運動模式，並期望以經驗公式的型式表現之，再建立一標準安全性評估之完整案例。因此，將本計畫欲達成的目標分兩年闡述與達成：

全程目標

藉由綜合分析大崙山地區的地形、地質、地下水分佈，與坡地變

位監測之長期且連續性資料，除了減緩大崙山順向坡之滑動塊體於降雨期間的滑動速率外，並期能為國內地質敏感區基地的地質調查與安全評估等立下一套標準與完整案例以供參考。

(一) 107 年度目標

- (1) 辨識大崙山順向坡中，可能的滑動範圍與滑動塊體之數量。
- (2) 了解強降雨與長時降雨(高累積降雨量)期間，各滑動塊體的滑動行為歷程。

(二) 108 年度目標

- (1) 找出各滑動塊體與地下水位之相互關係。
- (2) 推導出與滑動塊體位移速率、降雨時間以及地下水位變化時間相關之經驗公式。

本年度目標

- (1) 辨識大崙山順向坡中，可能的滑動範圍與滑動塊體之數量。
- (2) 了解強降雨與長時降雨(高累積降雨量)期間，各滑動塊體的滑動行為歷程。

第三節 研究區域基本資料

一、地理位置

本計畫的研究區域大崙山坡地，位於新北市石碇區石碇區公所之東南東方約 3 公里處。由石碇區公所前的 106 乙線往坪林方向，至華梵路左轉上山即可到達華梵大學校區(圖 1-2)。大崙山坡地的西南方坡趾處，即為西北東南向的國道五號。

二、地形與地質

(一) 地形

大崙山區位於西部麓山帶的基隆—竹東丘陵區，從坡趾到山頂的海拔約 240 至 580 公尺。其地形特徵受到當地的岩性分佈及地質構造所控制。本區屬壯年期地形，侵蝕與堆積作用大致已趨於穩定平衡(黃鑑水與鄭清江，2004)。

大崙山區可以區分為三個地形單元。第一個單元為主要華梵大學校舍所在的大崙山緩斜坡，此坡地為順向坡，因為所在之中新世早期木山層岩盤層理面與地形坡面一致向南或西南傾斜約 10 至 20 度(林朝宗，2000; Tseng et al., 2017)。本地形單元的頂端為一面向西南方之畚箕形山脊，其中最高峰海拔約 568 公尺(圖 1-2)；最低點接近畚箕開口之豐田溪(又稱崩山溪)溪谷，華梵大學的主要校舍則建立於此順向坡之上半部靠近山脊部分。第二個地形單元位於校門口慈蓮院至大崙攬勝拱門以東之陡峻區，有兩層厚砂岩分佈。此部份地形坡向與岩層傾向成高角度相交，屬高角度斜交坡(黃鑑水與鄭清江，2004)。第三個地形單元為校園後山地區，顯現逆向坡陡峭地形，坡向與岩層傾向相反。此部分為南勢坑溪及西勢坑溪上源小侵蝕溪溝所分佈(黃鑑水與鄭清江，2004)。大崙山順向坡的集水區範圍即為地形上類似畚箕形貌的山稜線之範圍。

(二) 地質

大崙山區所在之木山層為中新世最底部的含煤地層，主要岩性特徵為白色細粒至粗粒砂岩特別發達，多成厚層或塊狀，通常具有明顯的交錯層沉積構造(黃鑑水與鄭清江，2004)。灰黑色頁岩或砂頁岩薄互層發達，常與厚層砂岩交替出現而成互層。其另一岩性特徵為白色粉砂岩或細砂岩與灰黑色頁岩所成之薄互層

或薄葉紋層(圖 1-3；黃鑑水與鄭清江，2004)。木山層全層厚度約七百公尺，華梵大學校地主要位於木山層中段的岩層之上。在大崙斜坡的順向坡上，所觀察到的岩層大部分為頁岩及砂頁岩薄互層，僅偶而在小溪溝內可見到頁岩之下厚未達四公尺之砂岩露出。在東南方斜交坡上可找出二層厚砂岩及夾於其間的頁岩、砂頁岩薄互層(黃鑑水與鄭清江，2004)。

在固結岩層上之地表，普遍發育有厚薄不等的表土覆蓋層或崩積層。大崙順向坡上有較厚的表土覆蓋層，故僅於侵蝕溪溝內或人工開挖面可找到岩層露頭；而後山逆向坡上表土覆蓋層則甚薄或岩層直接出露；東南側之斜交陡坡上，表土覆蓋層亦較薄，唯在頁岩出露地方或緩坡下，有較厚的崩積層或崖錐堆積物分佈(黃鑑水與鄭清江，2004)。

經由現場地質詳查，發現有一延伸方向為東北東之逆斜移斷層通過後山之南勢坑及校園大崙攬勝拱門稍東之山脊鞍部(命名為南勢坑斷層)，並向西南沿小溪谷通過行政大樓之東緣後續向西南延伸(黃鑑水與鄭清江，2004)。該斷層為向東南方傾斜約 60 度，切穿大崙山順向坡內岩層(圖 1-1)。此外，經由鑽孔岩芯及二維地電阻影像剖面探測的觀察比對，配合地形特徵及各種地質現象的研判，發現有一條呈西北向的斷層存在，其位置約略平行大學之道並位於大學之道的南側，如圖 1-1 所示。此斷層暫命名為 A 斷層，其通過鑽孔 DH-1(13 至 25 公尺)與 W-3(54 至 66 公尺)，可能屬於一條斜移斷層(oblique-slip fault)，它的東南端可能在五明樓東南隅止於南勢坑斷層(圖 2-1；鄭清江等，2008)。其位態約為 $N50^{\circ}W, 75^{\circ}N$ ，其通過深度與所造成的岩層破碎情形如圖 1-4 所示。



圖 1-2 大崙山地區立體地形圖

資料來源：本計畫

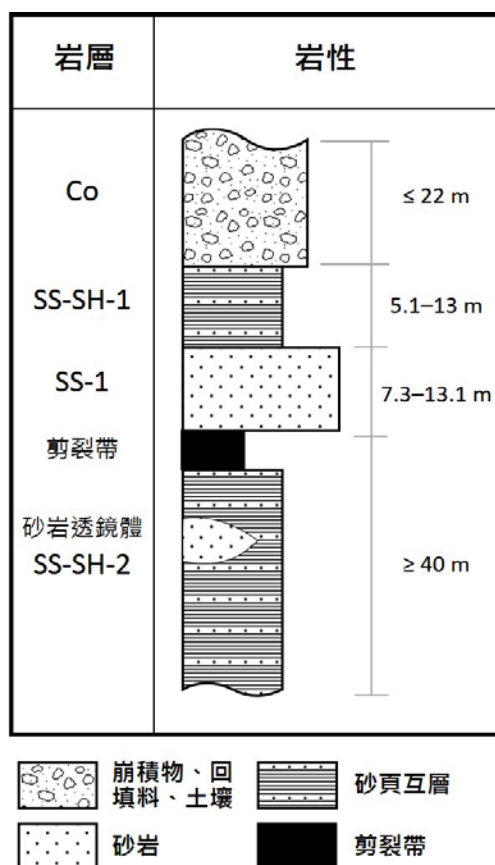


圖 1-3 華梵大學校區地層層序與岩性

資料來源：黃鑑水與鄭清江，2004

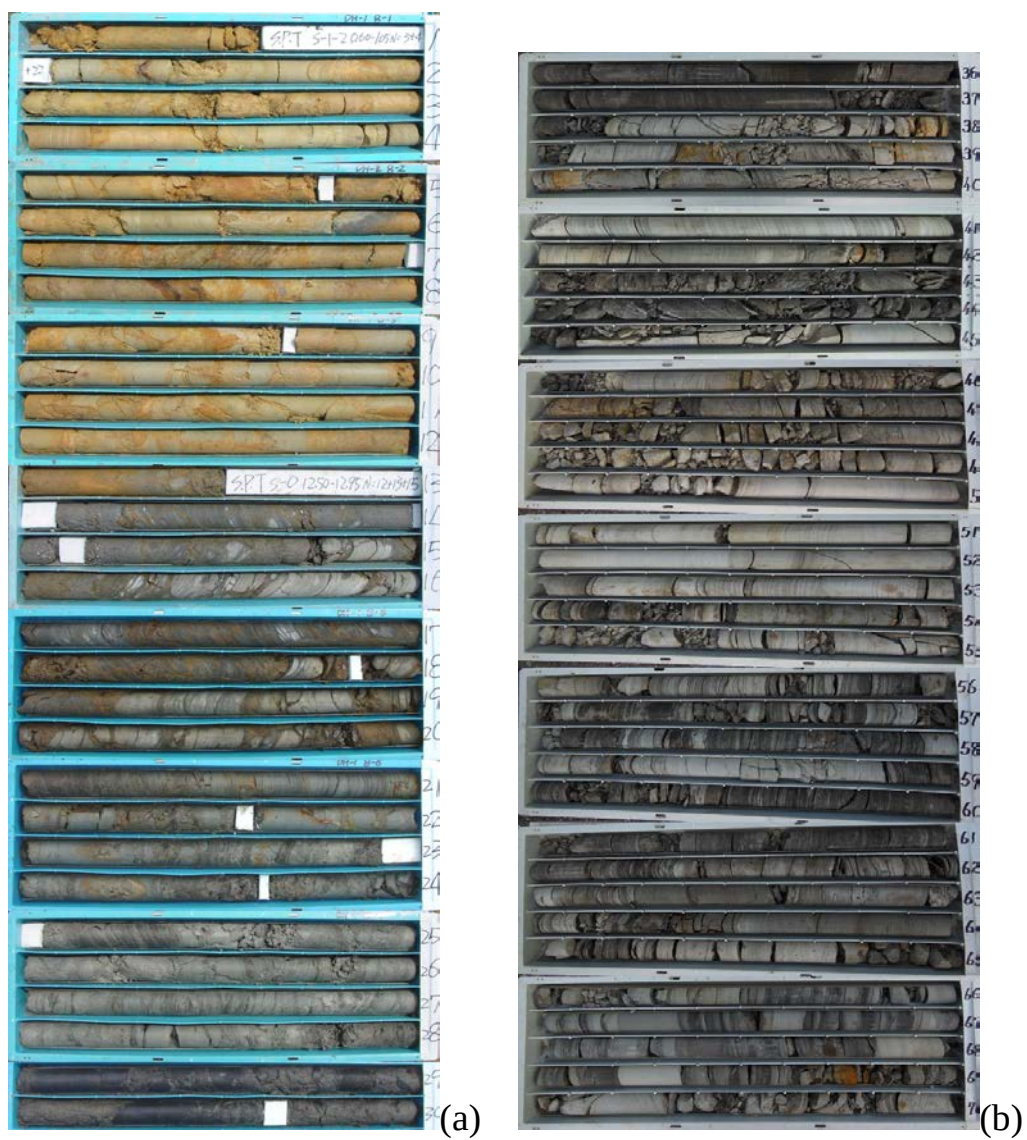


圖 1-4 華梵校區岩芯 DH-1(a)與 W-3(b)所顯示 A 斷層通過深度

資料來源：鄭清江等，2008

表 1-1 計畫重要檢核點管制表

檢核點	預計日期	交付項目	數量	備註
M1	5 月 2 日(三)	工作計畫執行書	正本 10 份	
M2	8 月 7 日(二)	期中報告書	正本 6 份	
M3	11 月 15 日(四)	期末報告書	正本 10 份	
M4	11 月 20 日(二)	期末報告書 電子檔、摘要 報 書 電 子 檔、計畫自評 表		
M5	11 月 27 日(二)	期末報告簡 報檔(ppt)		
M6	12 月 4 日(二)	期末聯合審 查會議		
M7	12 月 20 日(四)	成果報告、會 計報告	正本 5 冊	

資料來源：本計畫

第二章 邊坡現況

第一節 校區中滑動塊體之分佈

華梵大學自 1996 年起至 2017 年止，在校區內外共有 50 多組岩芯資料與傾斜觀測管，前者用以了解大崙山坡體內地層層序以及可能的滑動面(或剪裂帶)的深度，後者則用以監測滑動面(或剪裂帶)變位的情形。其中最深達 100 公尺(BH-1；圖 2-1)。根據所鑽得之岩芯並加以判釋(地質鑽探工作報告書，2017)，得知在深度 16.6 公尺與 24 公尺處，分別為碎裂帶與剪裂泥，其分佈與層理平行，且發育於砂頁互層中的頁岩層中，屬於層間滑動中的剪裂帶；該岩芯情況與鄰近之 SIS-11A 相同，且由定期量測之傾斜觀測管所量測之資料顯示(SIS-11A)，在深度 16.6 公尺處為具有潛移行為的滑動面(圖 2-2)。再者，基於過去在華梵大學校園內之岩芯判釋以及傾斜觀測管的地下滑動面監測資料，得知在華梵大學校園東南部份存有一深層滑動之平面型破壞的滑動塊體(圖 2-3)。另外，根據既有的傾斜觀測管監測資料顯示(如圖 2-2)，圖 2-3 中的滑動塊體(紅色虛線)之滑動面滑動速率，除了在冠部附近量測到超過 4 mm/month (SIS-26)之外，整體平均的滑動速率(sliding rate)為 2–3 mm/month (Tseng et al., 2017)。至於垂直方向的坡面沉陷情況，Jeng and Su (2016)根據地面的位移沉陷觀測點的十年監測成果，發現在該滑動塊體的中央部位(即 SIS-11A 附近)之累積沉陷量已達超過 10 公分之多。Jeng and Su (2016)進一步將長期監測所得的坡體位移量與累積降雨量做比對分析(即 2003 年至 2010 年)，歸納出某降雨事件的降雨強度(單位為時雨量)與累積降雨導致坡體位移加速的警戒門檻值(圖 2-7)。即某降雨事件的累積降雨降為

360–460 mm 區間時，訂定為警戒，表示坡體的位移有緩慢加速的現象。而當累積降雨量超過 460 mm 時，即訂定為危險，表示坡體位移更加快速，有致災的危險性。

而在校區西北部份，既有的傾斜觀測管監測資料顯示，在深度 20 公尺處亦有潛移的現象發生(圖 2-4)；另再配合 17-7 與 17-8 兩孔岩芯判釋所得(圖 2-5；地質鑽探報告，2017)，於同樣深度處為表層崩積層(CO)與下伏岩盤(SS-SH-1)的交界面。因此，根據上述兩項資料研判，華梵大學西北部份之地下約在 20 公尺深處，亦有一滑動面存在，且為土岩交界面上之潛移行為。其滑動塊體應為膠結不佳之崩積土，或者為建校初期時作為操場平台用之回填土。另外，由於該滑動塊體為潛移之行為，因此可解釋在此處之操場地面與其北側宿舍區之地面存有緩慢擴大之地表裂縫；該地表裂縫可判釋為該滑動塊體之冠部張裂縫(圖 2-6)，且這些張裂縫應可延伸至地下 20 公尺處之滑動面。根據 Varnes (1978)對邊坡破壞所定義之分類，此處的滑動類型應屬於弧形破壞(rotational failure)之崩移(slump)，其範圍推測為 17-8 號孔往下邊坡到 17-7 號孔之包含整座操場面積之區塊。

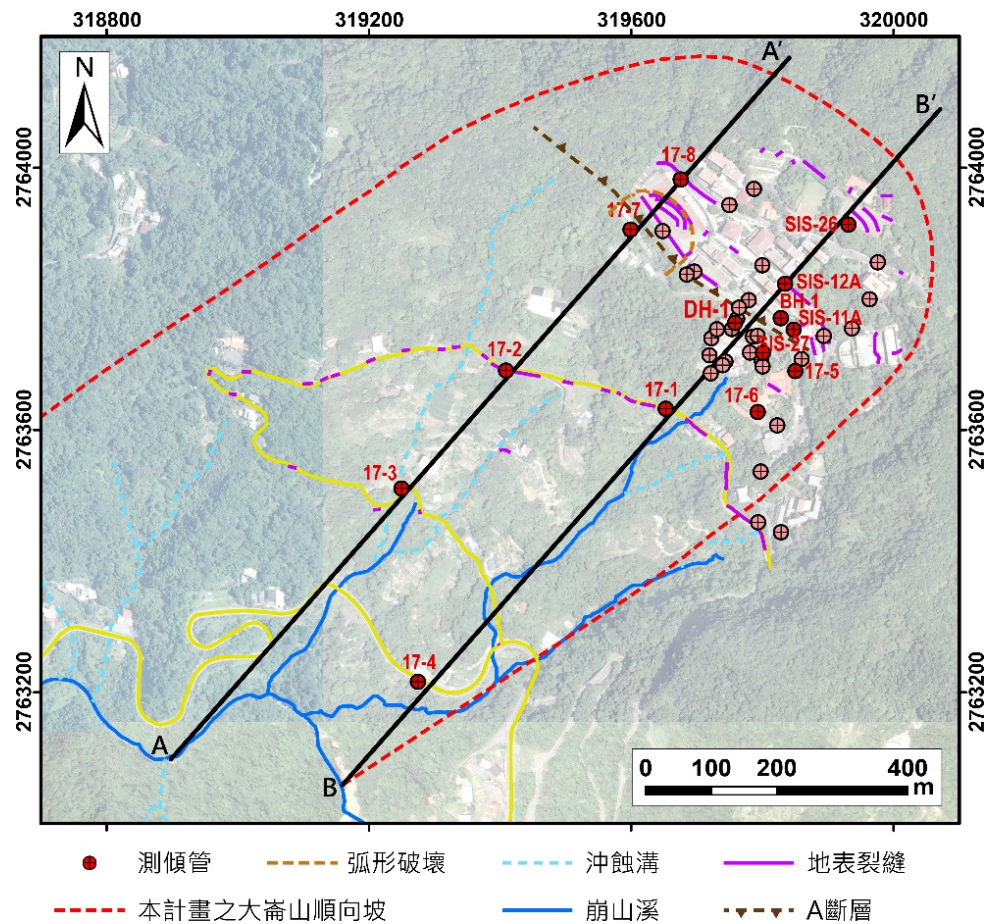


圖 2-1 現有傾斜觀測管與岩芯分佈圖

資料來源：地質鑽探報告，2017；謝宗燁，2009

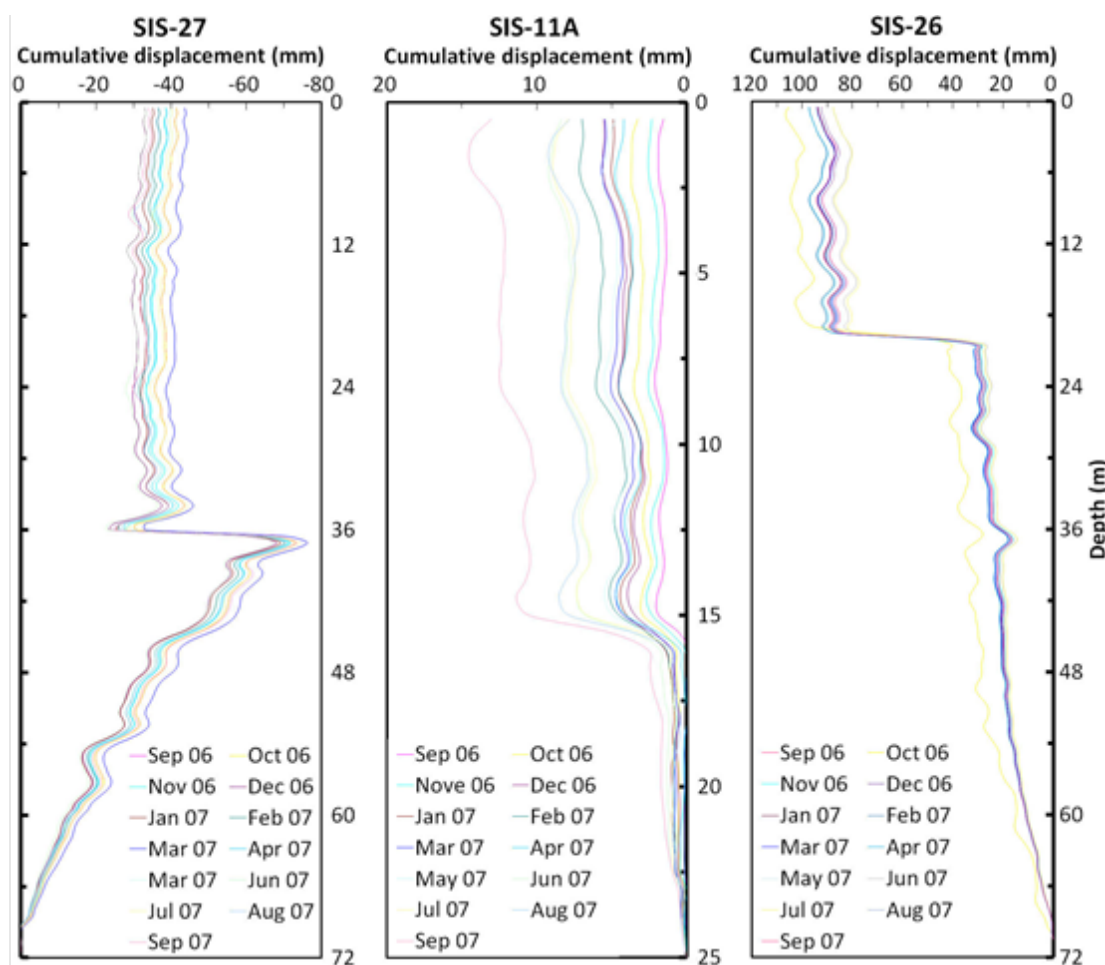


圖 2-2 人工量測式傾斜觀測管的位移情況

資料來源：Tseng et al., 2017

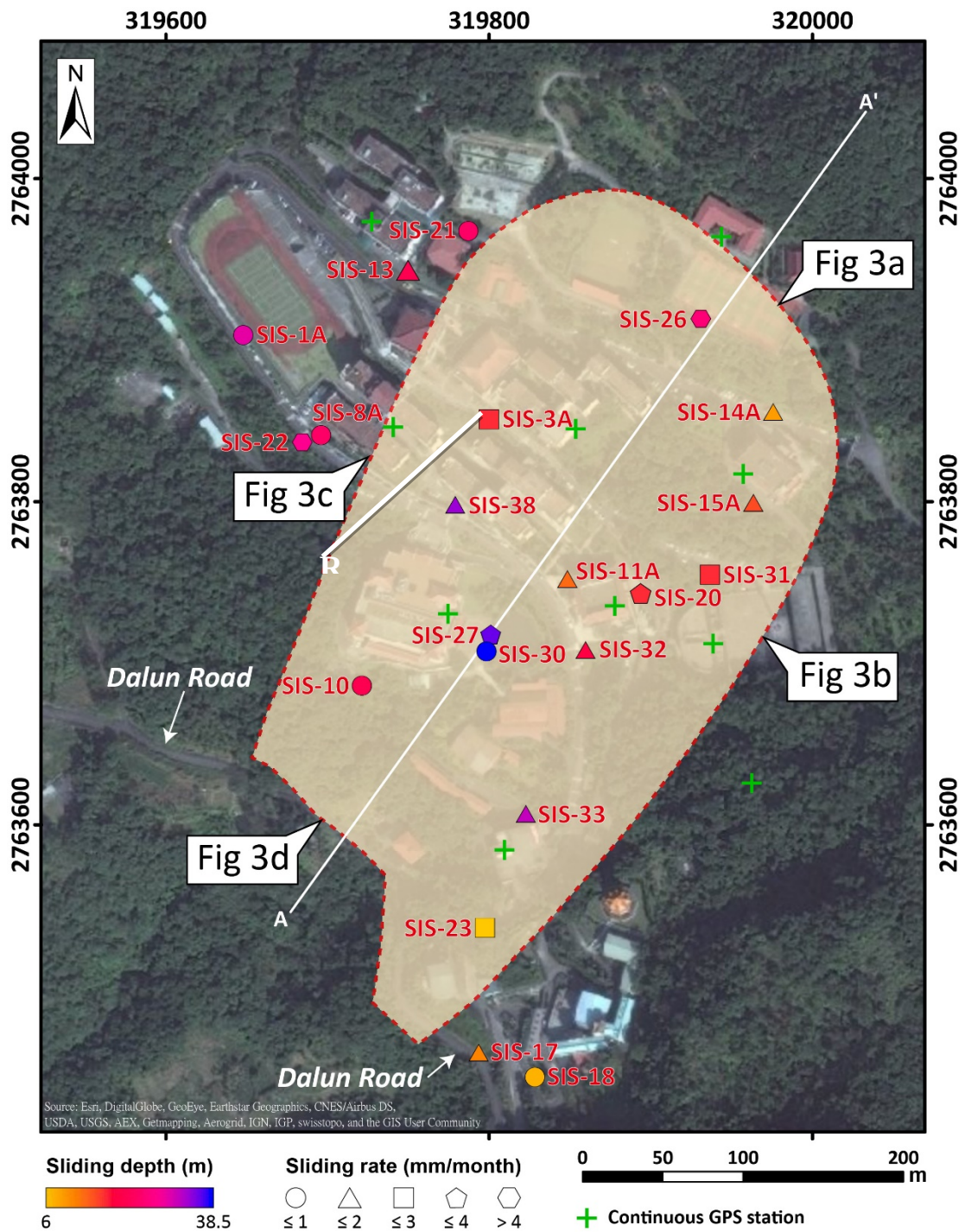


圖 2-3 華梵大學校園東南部份之滑動塊體

資料來源：Tseng et al., 2017

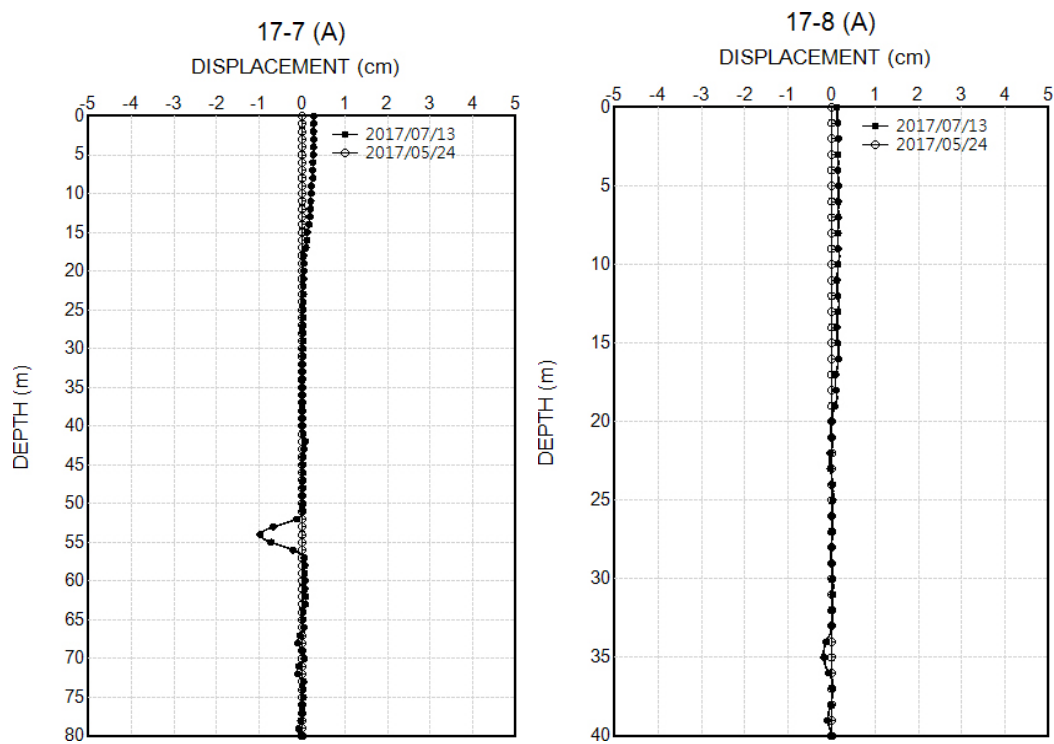


圖 2-4 17-7 與 17-8 兩傾斜觀測管所量測到之變位情形

資料來源：地質鑽探報告，2017



圖 2-5 岩芯 17-7 與 17-8 所呈現地層材料情形

資料來源：地質鑽探報告，2017



圖 2-6 華梵大學校園西北部份可能的滑動塊體之地表破裂

資料來源：本計畫

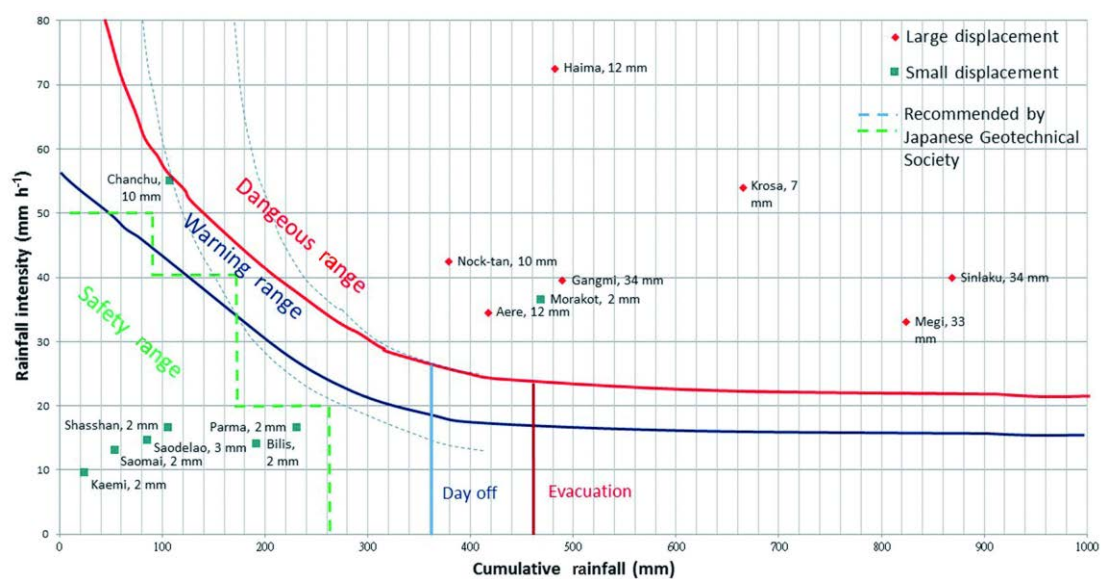


圖 2-7 驅動滑動塊體位移之降雨量門檻值

資料來源：Jeng and Su, 2016

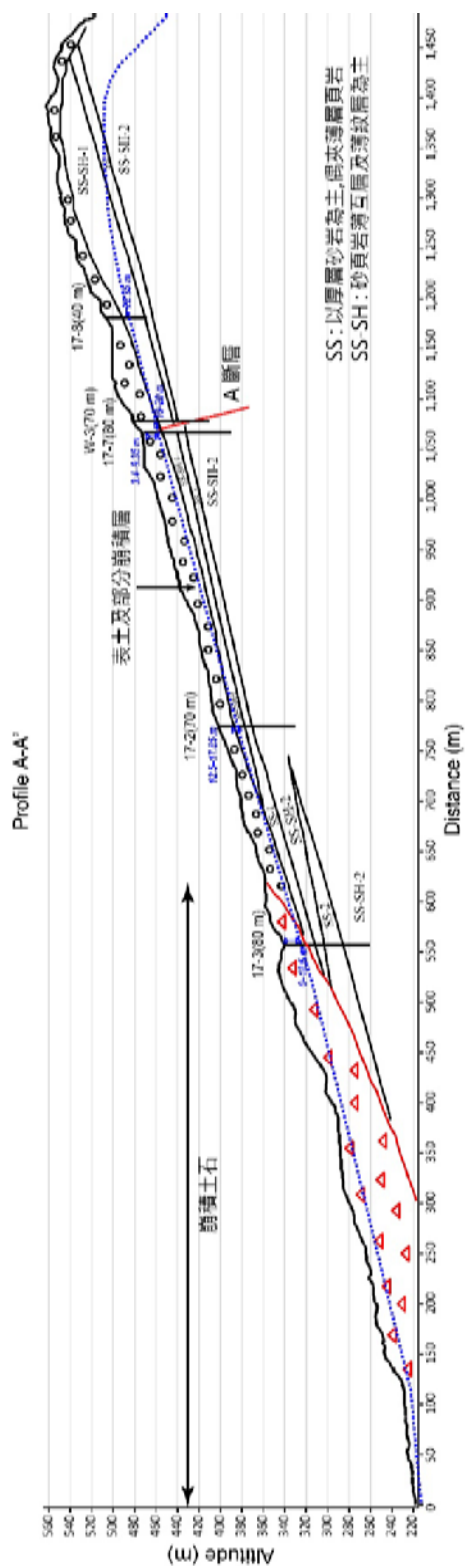
第二節 大崙山區地下構造

2017 年之 9 孔岩芯資料(17-1 至 17-8，以及 BH-1)，其中 4 孔位於校區之外的大崙山中、下邊坡處(即 17-1、17-2、17-3 與 17-4；圖 2-1)。這些岩芯孔位在鑽井時皆有記錄當時的地下水水位，且判斷為常時水位，因施工期間為 2017 年 3 月 8 日至 2017 年 5 月 2 日，期間只有一次降雨事件。因此，將各個觀測井之地下水水位標記於地層之中，並推斷可能的大崙山順向坡中地下水水位面，如圖 2-8 所示。

藉由各個地下水位觀測井的資料推測，大崙山順向坡內的常時地下水位面位於地表下深度 10–30 公尺之間，即地層中最表層的崩積土層與下伏的岩盤間的交界面上。這是由於崩積土的孔隙度高於岩盤，因此滲透性佳，當降雨入滲進崩積土後，會持續下滲至土岩介面處，之後即沿著介面往下邊坡方向流動，最終流入崩山溪河水中。至於華梵大學校園中的地下水位面較大崙山中、下邊坡的地下水位面為深，是因為校園位於大崙山的山頂處，常時地下水位面自然較深；再者，華梵大學校園內裝設有地下集水井，可持續將地下水集中於中央管道後，導入校園南界外的沖蝕溝中，因此可再降低大崙山上邊坡之地下水位面。值得注意的是，藉由過去的岩芯資料與地電阻影像剖面推斷(鄭清江等，2008)，華梵大學校園內推測存在有一西北-東南走向之高角度傾斜、且尚未正式命名之斷層(暫名：A 斷層)。該斷層的組成為剪裂泥及角礫，為相對不透水材料，因此有阻隔地下水流通的作用。由於校園大部分位處此 A 斷層的北側，因此當雨水入滲於地層後，因下邊坡有此斷層阻隔，以至於校園內的自由地下水面主控於降雨量，因此可解釋位於最接近山稜線(加上後山逆向坡坡面的入滲雨水的補注)的 W-1 之地下水位面的變化甚大於其他的地下水位觀測

井。

另外一方面，大崙山順向坡的地層中含有兩層深度不一的厚砂岩層(SS-1 與 SS-2)。由於砂岩層的孔隙度比頁岩層高，且厚度皆約為 10 公尺，固可蘊含大量的地下水；再者，該砂岩層推測應出露於後山逆向坡之坡面，故可直接接受降雨以及地表逕流之入滲。因此，經由以上所做現地觀察與監測資料，推斷出大崙山順向坡含有豐沛地下水的原因。



資料來源：本計畫

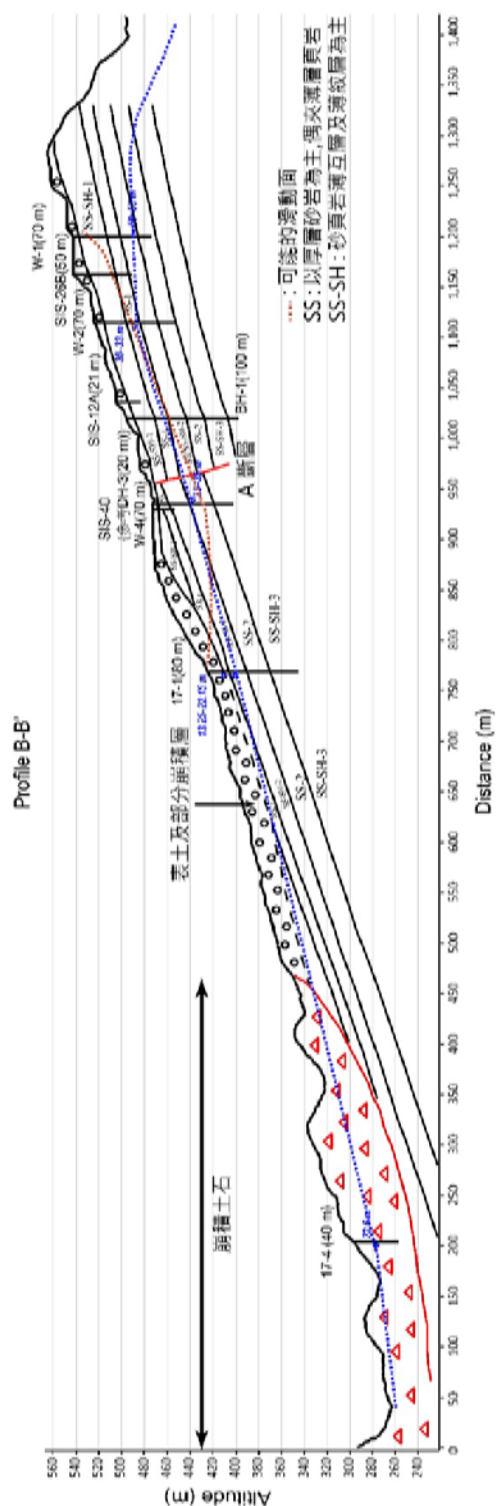


圖 2-8 大崙山區地下構造與地下水位分佈

第三節 華梵校區之地下水體分布

根據 Jeng and Su (2016)所發表的結果，在經由地電阻探測之後(測線位置與長度標示於圖 2-3 中之 RIP-1)，華梵校區的地下水體主要存在於 A 斷層沿線之地下深處(圖 2-8)。而其它部位的地下水體則分佈於淺部砂頁岩互層內的自由含水層中，以及深部的受壓含水層內；而該地下水體的流動方向則受控於岩盤層理面與斷層剪裂帶。因此當降雨入滲到自由含水層後，會由上邊坡的大崙山稜線，在較為透水的砂岩層內順著層面往西南方向的下邊坡流動；再者，因 A 斷層的組成材料為斷層泥與角礫，為相對的阻水層，因此地下水會在 A 斷層的上盤沿著斷層帶往南流動(圖 2-9 與圖 2-10)。地下水流在接觸到南勢坑斷層剪裂帶時就再度轉向西南方，往下邊坡的方向流去。由於有兩條斷層剪裂帶發育在華梵校區的岩盤內，控制了地下水的流路，因此或能為位於接近山稜線的 W-1 地下水位觀測井之地下水位變化相對於其它三處較為劇烈的原因之一。

由地電阻剖面資料發現，華梵校區內的地下水體確有分佈不均的情況，其原因可能為校園內的大部分地表皆為混凝土或瀝青鋪面，因此降雨在校園內無法直接入滲至地下，而僅能經由零星散布的自然林地之表土層下滲。事實上，大崙山區靠近華梵大學的居民即有反應，在華梵大學建校後，賴以為生的地下水變得相對難以汲取使用，因大部分校區內的降雨皆為地表排水溝渠直接導引到校外的沖蝕溝中排放。

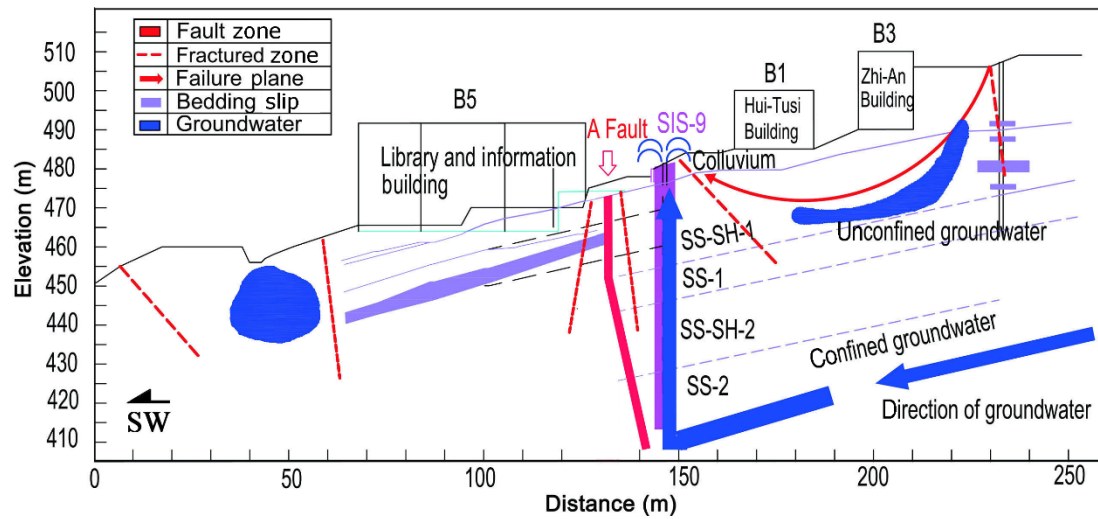


圖 2-9 華梵大學校園內地下水體分布

資料來源：Jeng and Su, 2016

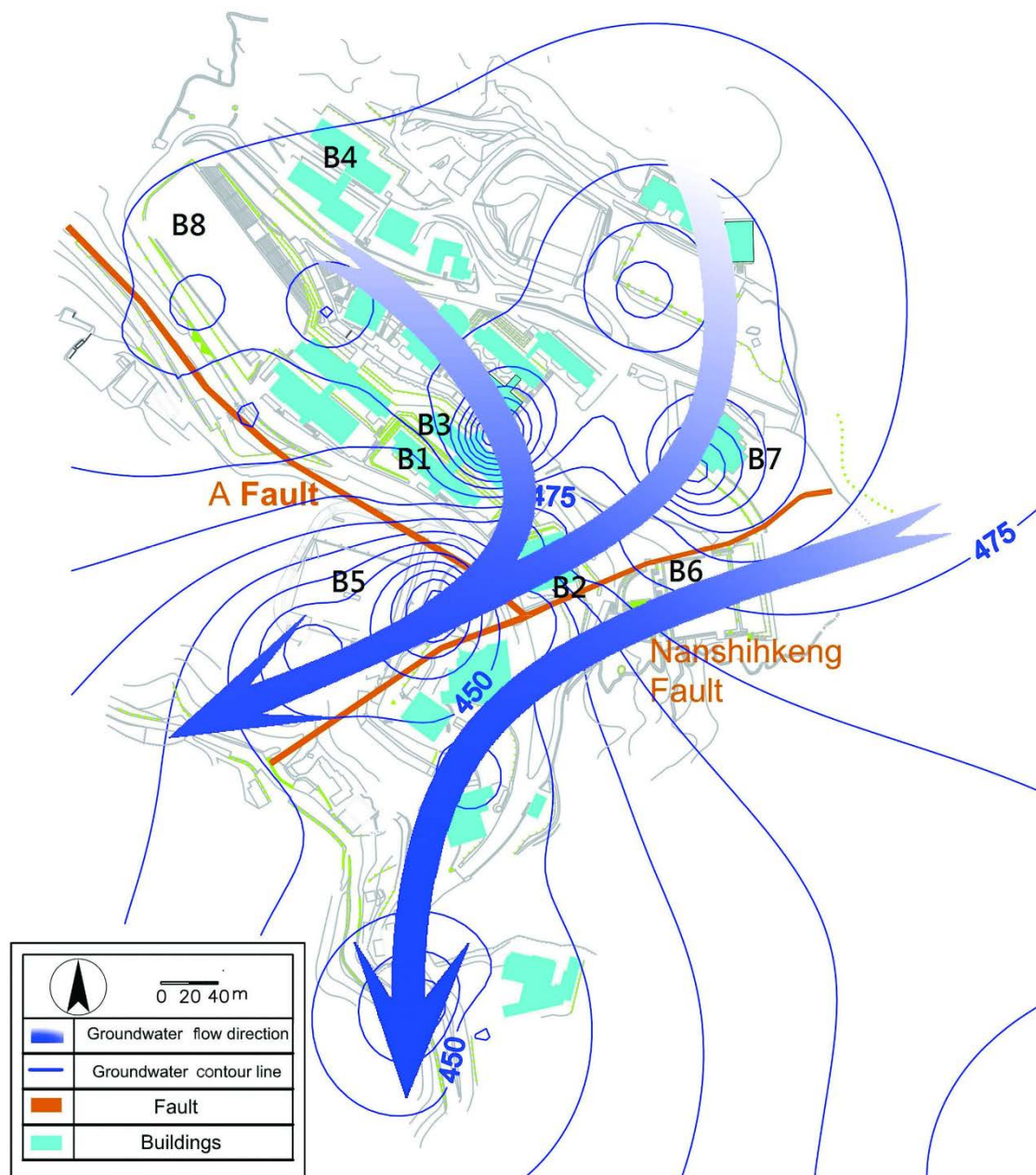


圖 2-10 華梵大學校園內地下水流向

資料來源：Jeng and Su, 2016

第三章 既有監測資料研析

第一節 2018 年度各監測資料

華梵大學校園內共有 4 座自動記錄式地下水位觀測井，以及 2 座自動記錄式傾斜觀測管(SAA，Shape Accel Array)，其位置如圖 3-1 所示。該自動記錄式裝置之記錄頻率為每小時記錄一次，並儲存當下所量測到的地下水位面深度以及傾斜觀測管的變位數據。本計畫之研究目的為蒐集包括 4 座地下水位觀測井與 2 座 SAA 監測資料，並將其繪製成時間序列圖以便於了解地下水位以及滑動面變位情形與降雨量之間的關係。華梵大學亦擁有一座自動記錄式雨量站，其記錄頻率同樣為每小時記錄一次當下之降雨量。在執行本計畫的今年度期間，蒐集了 1 月至 10 月之監測資料，如圖 3-2 所示。

其中的 W-1 自計式水位計自今年 4 月下旬至 8 月中顯示無資料，此為故障之情形。爾後有短暫恢復記錄功能到 9 月上旬，但之後又有近一個月的故障期，到了 10 月上旬修復得以正常運作。雖然運作時間間斷，但仍記錄到 9 月下旬的長時降雨事件(9/23 23:00 – 9/29 15:00 共降雨 137 小時，累積雨量達 517 mm，最高時雨量為 11.5 mm)所導致的地下水位大量上升之現象。然因無完整之地下水位變化記錄，故無法做詳細量化分析。其它時期因累積雨量並無超過約 120 mm 之門檻值，因此 SAA 並無記錄到滑動面有加速變位之情況。

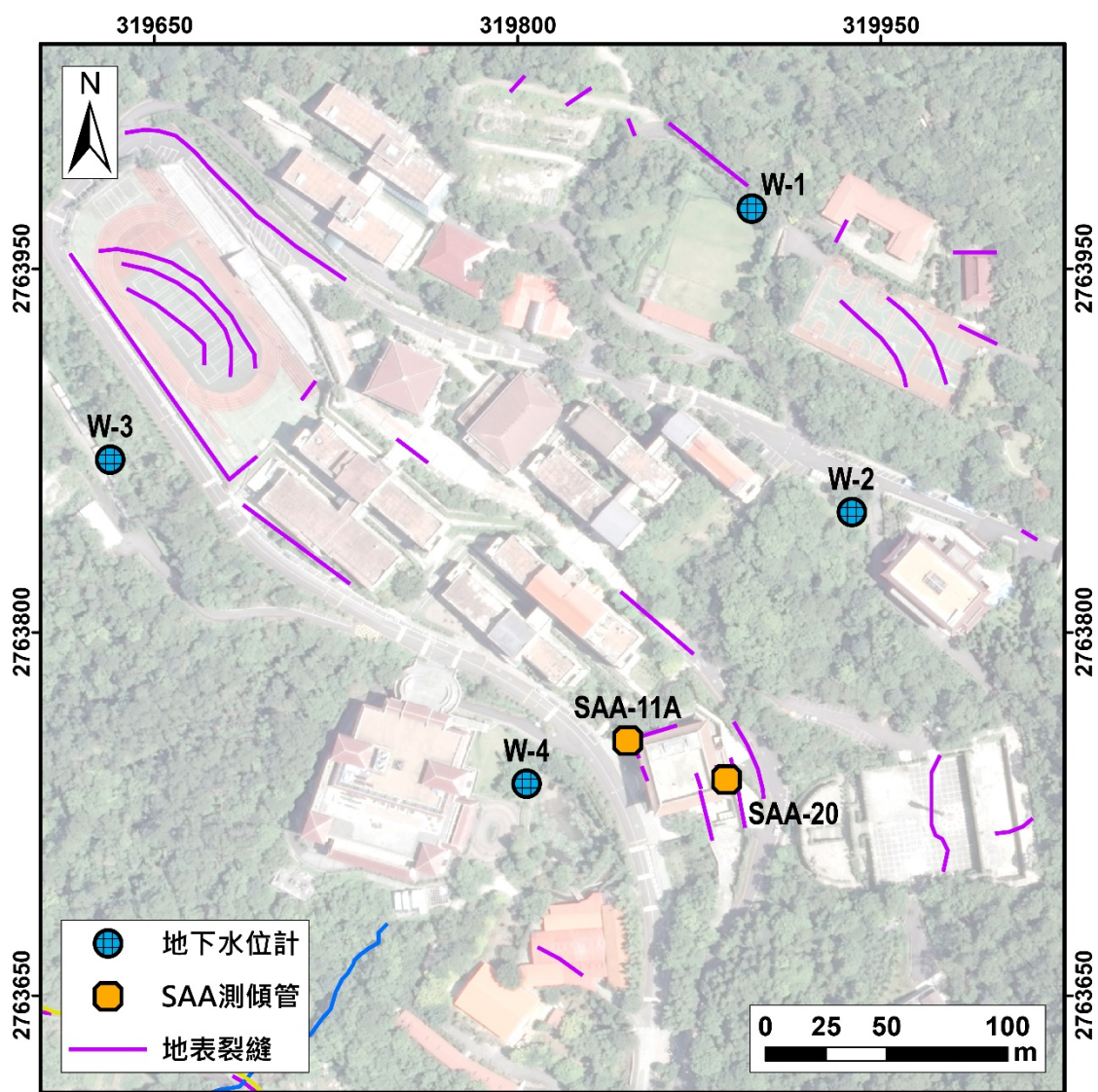


圖 3-1 現有地下水位計與 SAA 測傾管分佈

資料來源：本計畫

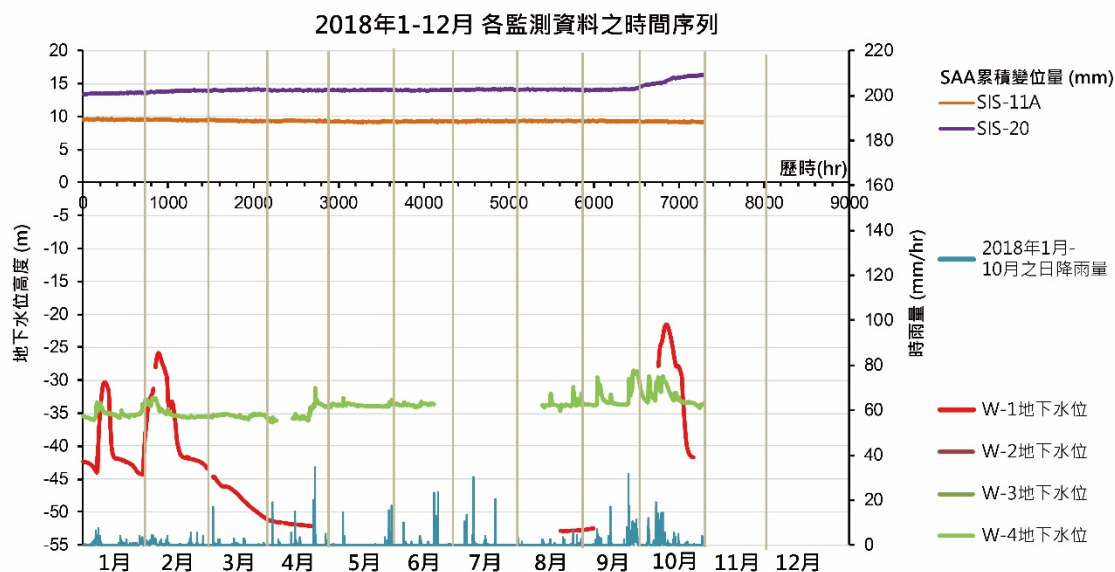


圖 3-2 2018 年 1-10 月各監測資料之時間序列

資料來源：本計畫

第二節 降雨型態與地下水位之關係

根據 2016 年 1 月至 2018 年 10 月的監測資料(圖 3-3、圖 3-4)，可得知各個地下水位觀測井的常時水位面，也就是無強降雨或連續性降雨而導致地下水位上升的情況時之地下水位面，分別為：W-1 號井約為-53 公尺、W-2 號井約為-30.7 公尺、W-3 號井約為-21.3 公尺，以及 W-4 號井約為-33.6 公尺¹。譬如，以自 2016 年年底至 2017 年 2 月中的這段期間為例，都是零星的間歇性降雨，且最高時雨量不超過 4 mm，其所量測到的地下水位面皆在穩定無變化之狀態。然而，到 2017 年 2 月下旬時，先以該單一降雨事件為例，降雨型態轉變為連

1 華梵大學於 2015 年 10 月 17 日至 11 月 10 日期間，於校區地下施作 T1 集水井。此後自 2016 年 2 月下旬起，常時從集水井施作前的-42 公尺降至目前的-53 公尺，降幅超過 10 公尺(圖 3-14)。

續性降雨(最高時雨量不超過 6 mm),且累積降雨量在 77 小時內達 120 mm時(圖 3-5, 2017/2/23 02:00 至 2/26 07:00),以 W-1 水位觀測井為例,地下水位即從-53.03 公尺處(第 78 小時開始)快速上升,並於第 125 個小時後上升至最高的-34.31 公尺。而在同時間內,W-2 與 W-3 號地下水位觀測井也有 2-3 公尺的上升量。雖然目前尚未得知華梵大學校區的地下淺層地質材料之滲透性,但仍可歸納出,在單一連續性降雨型態中,從一開始下雨起算到之後的第四天初,W-1 地下水位觀測井即會從常時水位開始迅速上升。這表示連續性的降雨過程中(平均時雨量小),降雨需花較長時間入滲至地下水體中。

而在其他的事件性降雨型態中,累積降雨量在更短的時間內達到 120 mm 之後,地下水位即開始快速上升。例如 2017 年 10 月中旬(圖 3-6),累積降雨量在開始下雨後的第 21 小時後即超過 120 mm (139.5 mm),而在下雨後的第 30 小時後,W-1 地下水位開始快速上升,到了第 116 小時後上升至最高水位-21.43 公尺,此後地下水位開始下降。在地下水位下降期間仍有連續降雨,但因為是屬於少量的降雨,因此只是減緩地下水位下降的速度。這樣的降雨與地下水位變化關係(平均時雨量大),表示降雨僅需 9 個小時即可入滲至地下水體中。

曹舜平與林惠鈴(2016)分析過去幾個影響華梵大學校區較為顯著的颱風降雨事件,整理出各颱風降雨的降雨分佈型態(石棟鑫,

2001；圖 3-7)，以及降雨延時(hr)、地下水位上升量(m，以W-1 地下水位觀測井為分析對象)與累積降雨量(mm)等各參數，製成表 3-1。本計畫亦將 2017 年 2 月之長時降雨與 10 月之短時強降雨事件²列入表中以進行量化分析。曹舜評與林惠鈴(2016)將表 3-1 中的前三項參數，即累積雨量(mm)、最大降雨量(mm)及最大降雨前之雨量(mm)，分別對地下水位上升量(m)及延遲時間(hr，最大降雨量至水位尖峰之時間)兩項參數，做相關性分析，並以圖 3-8、圖 3-9、圖 3-10、圖 3-11、圖 3-12 與圖 3-13 呈現分析結果。本計畫將 2017 年的長時降雨及短時強降雨事件之參數，以代入圖中之線性關係式之方式，分析該兩降雨事件是否符合該六組關係。。

分析結果顯示，在華梵大學校區的範圍內，累積降雨量每增加 100 mm，地下水位上升量增加 4.8 m，延遲時間則縮短 23 小時；最大降雨量每增加 10 mm，地下水位上升量增加 2.1 m，延遲時間則減少 8.7 小時；最大降雨前之累積雨量每增加 100 mm，地下水位上升量增加 4.3 m，延遲時間則減少 15 小時。根據分析結果，2017 年的長時降雨事件之降雨特徵大致符合上述五項參數間相互關係。然而，2017 年的短時強降雨事件，除了在地下水位上升量與累積降雨量關

2 該次降雨事件為 2017 年 10 月 12 日生成之卡努颱風，之外圍環流與東北季風所產生之共伴效應所挾帶之豪大雨與豪雨。該卡努颱風的暴風圈當時並無接觸台灣本島。

係中有良好正相關性，但在其它五項相關性中則似為離群值(outlier)。其原因可能為，所分析的歷次颱風事件的總雨量並未如卡努颱風之外圍環流(635 mm)，其中有最高累積降雨量的杜鵑颱風僅 392 mm，而卡努颱風外圍環流在 32 小時內之累積降雨量即達 383.5 mm。此外，在實際水文現象中，延遲時間與累積降雨量之關係受到降雨型態之影響，而在此六項相關性分析中，並未深入探究降雨型態對地下水位變化之影響，(曹舜評與林惠鈴，2016)。因此若將本計畫擬雙峰型短時強降雨(卡努颱風外圍環流)之後峰值代入各項相關性分析中，則發現各項相關係數都相對提高，且其中的「地下水位上升量對於最大降雨前之雨量」之相關性更好。儘管如此，為了釐清降雨型態與地下水位變化之關係，就需要分析更多的降雨事件，以達到更佳的統計結果。

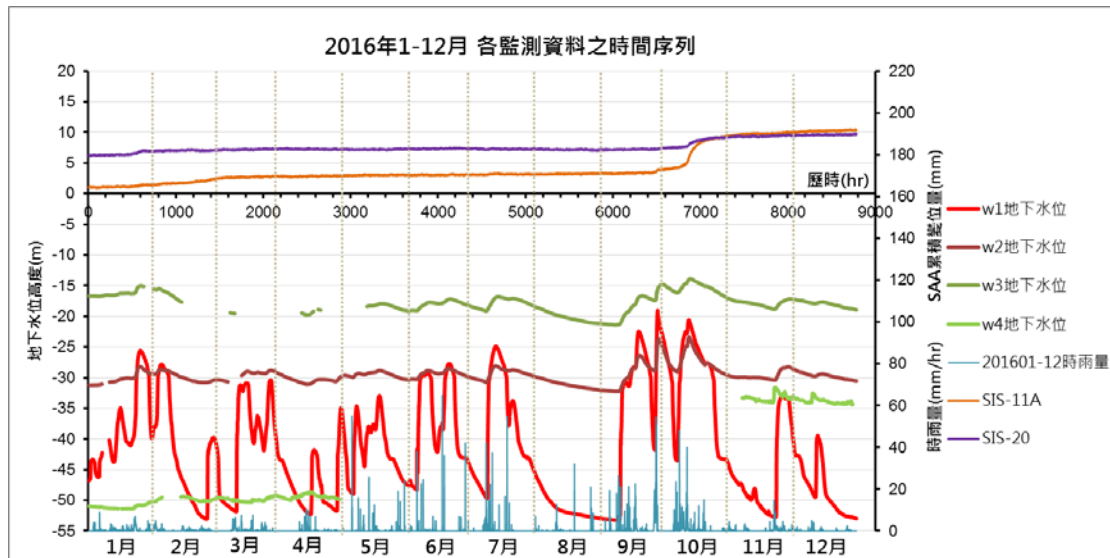


圖 3-3 2016 年 1-12 月各監測資料之時間序列

資料來源：本計畫

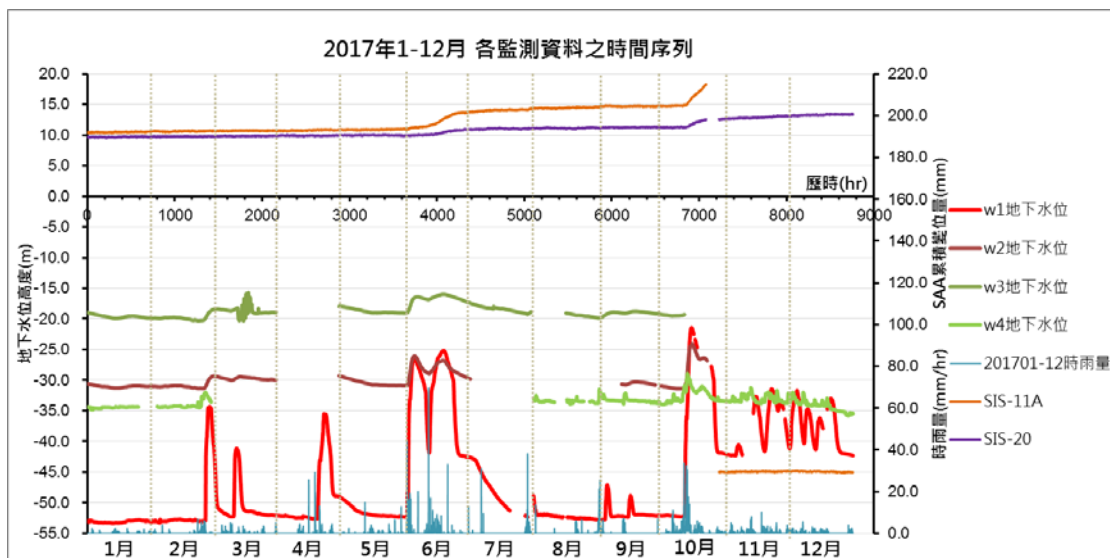


圖 3-4 2017 年 1-12 月各監測資料之時間序列

資料來源：本計畫

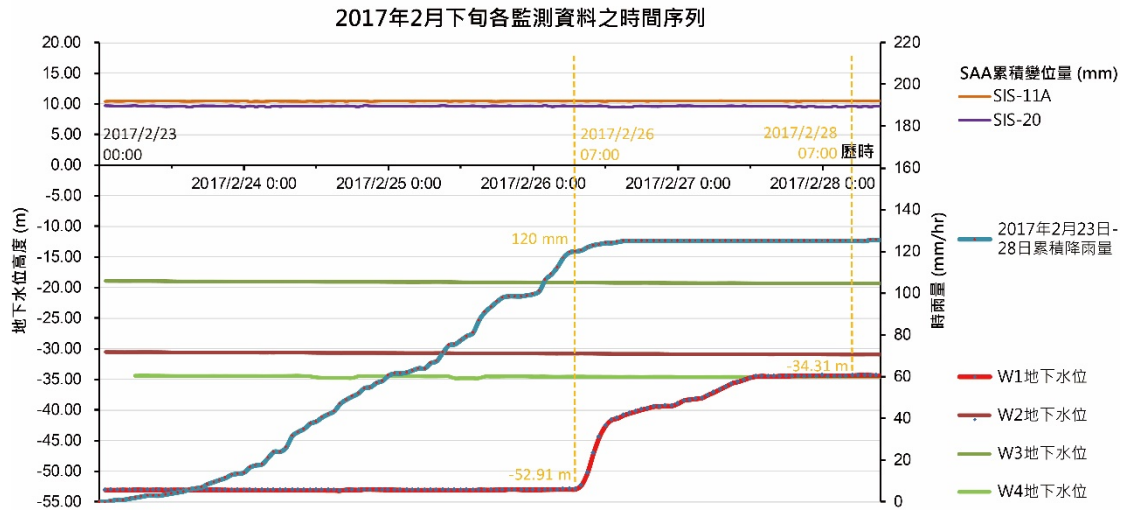


圖 3-5 2017 年 2 月下旬各監測資料之時間序列

資料來源：本計畫

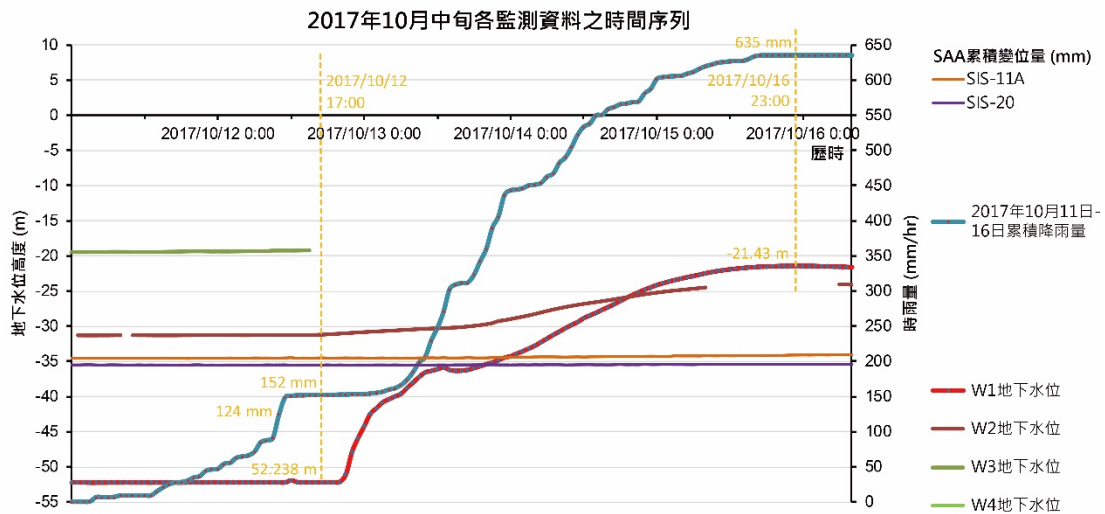


圖 3-6 2017 年 10 月中旬各監測資料之時間序列

資料來源：本計畫

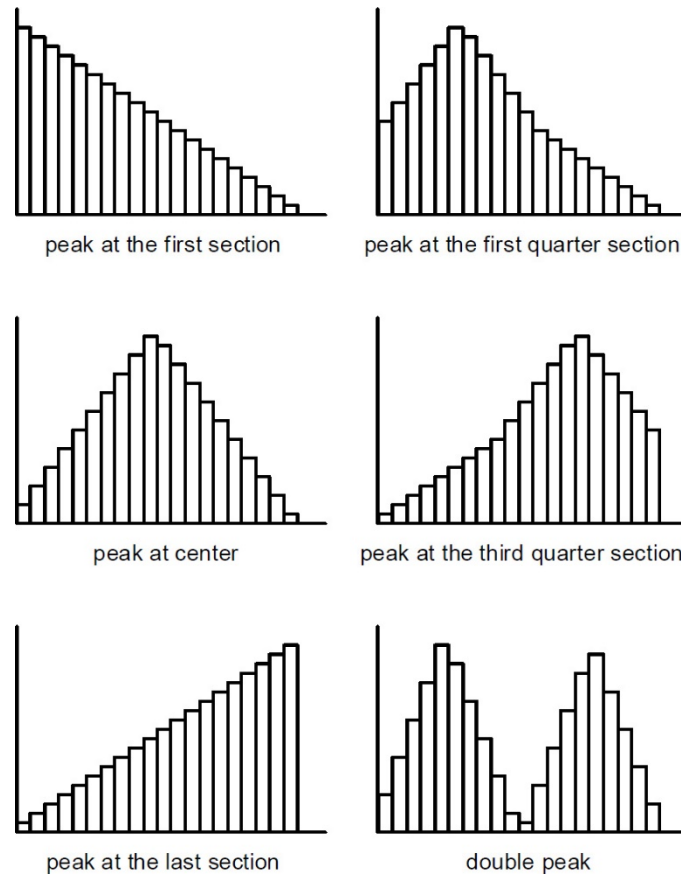


圖 3-7 各種雨型分佈

資料來源：石棟鑫，2001

表 3-1 大崙山區歷次降雨之各項資訊

颱風雨或 降雨事件	蘇力	潭美	天兔	菲特	蘇迪勒	杜鵑	卡努颱風 外圍環流	長時降雨
降雨分布 型態	擬後峰型	中央集中 式	擬後峰型	擬雙峰型	中央集中 式	擬後峰型	擬雙峰型	擬後峰型
累積雨量 (mm)	366	344.5	301	235	342.5	392	635	125
最大降雨 量(mm)	47.5	37	28	16.5	51	33.5	33、30.5	6
最大降雨 前之雨量 (mm)	161	204	195	60、118	220	250.5	91、406	81
降雨最大 →水位最 高(延時 hr)	45	58	72	63、49	31	27	85、48	64
水位上升 量(m)	20.16	20.66	19.28	13.89	23.1123	21.3561	30.73	18.31
降雨開始 →水位開 始上升 (延時 hr)	17	22	44	26	18	29	38	77
降雨開始 →最大降 雨(延時 hr)	19	37	97	23、37	35	49	31	61
降雨開始 →水位最 高點(延 時 hr)	64	95	169	86	66	76	116	125
降雨最大 →水位最 高(雨量 mm)	205	158.5	106	175、117	122.5	141.5	544	44
降雨延時 (hr)	26	64	133	72	65	61	110	85

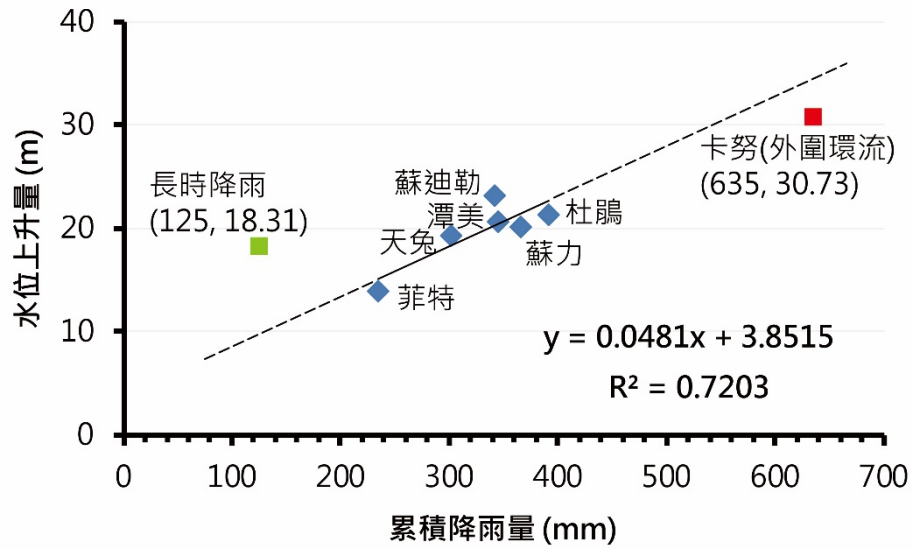


圖 3-8 水位上升量與累積降雨量之關係

資料來源：本計畫；曹舜評與林惠鈴，2016

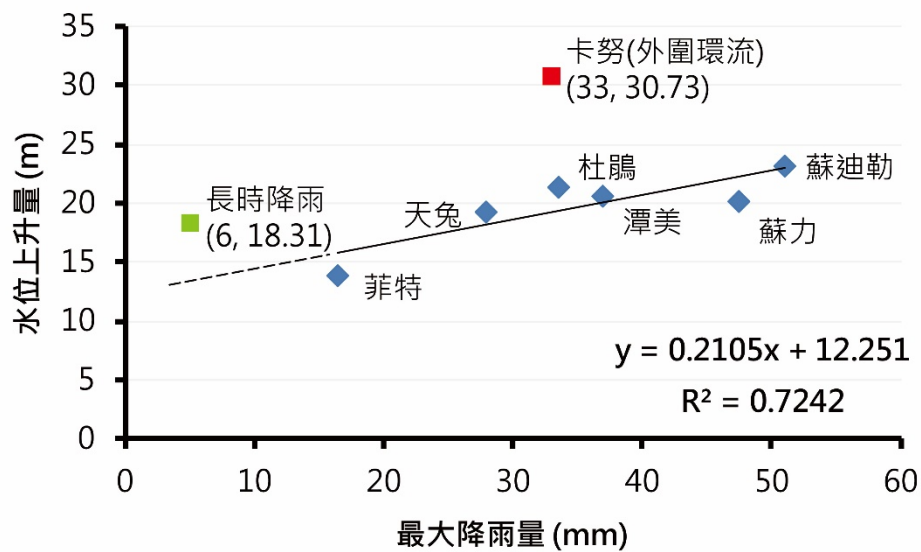


圖 3-9 水位上升量與最大降雨量之關係

資料來源：本計畫；曹舜評與林惠鈴，2016

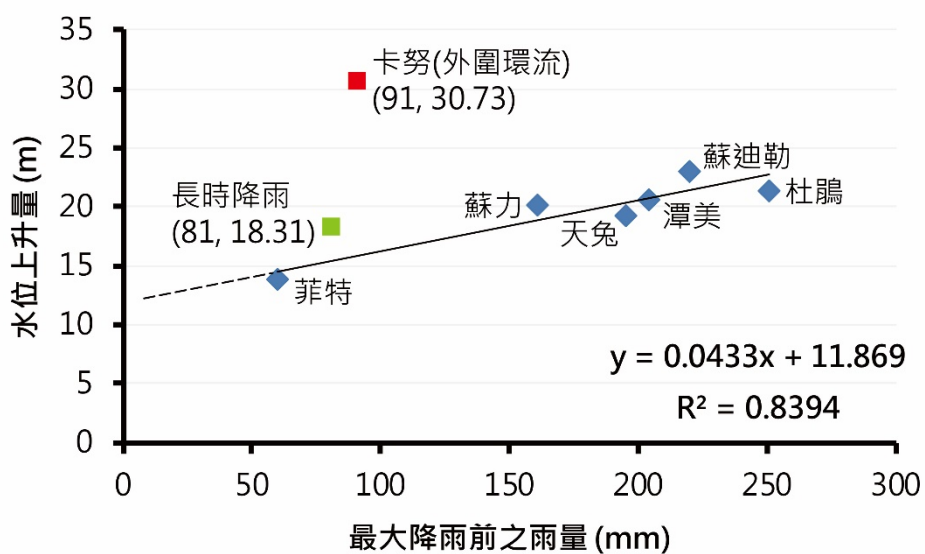


圖 3-10 水位上升量與最大降雨前之雨量之關係

資料來源：本計畫；曹舜評與林惠鈴，2016

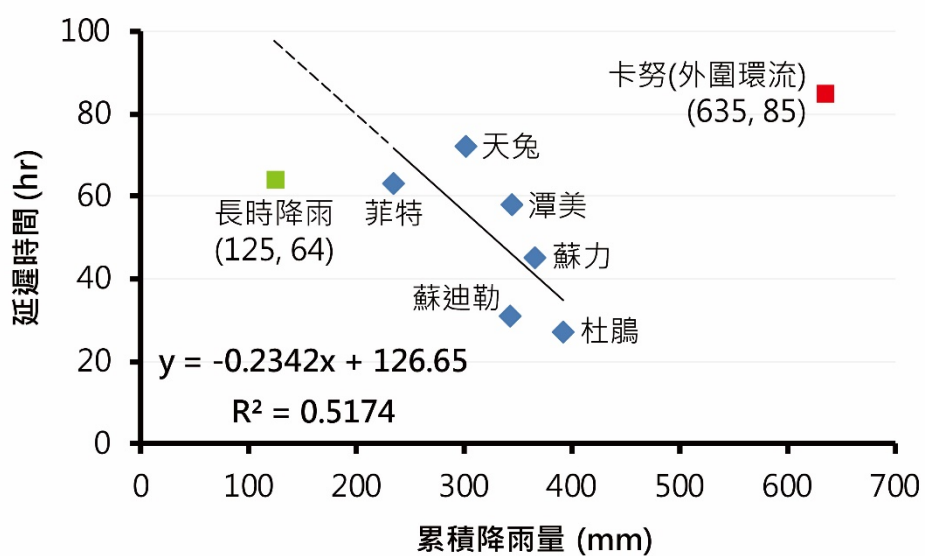


圖 3-11 延遲時間與累積雨量之關係

資料來源：本計畫；曹舜評與林惠鈴，2016

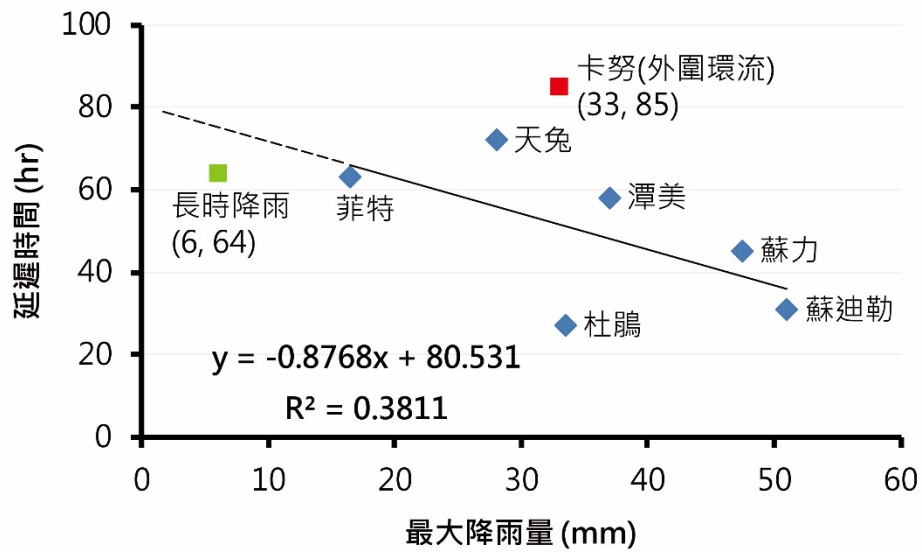


圖 3-12 延遲時間與最大雨量之關係

資料來源：本計畫；曹舜評與林惠鈴，2016

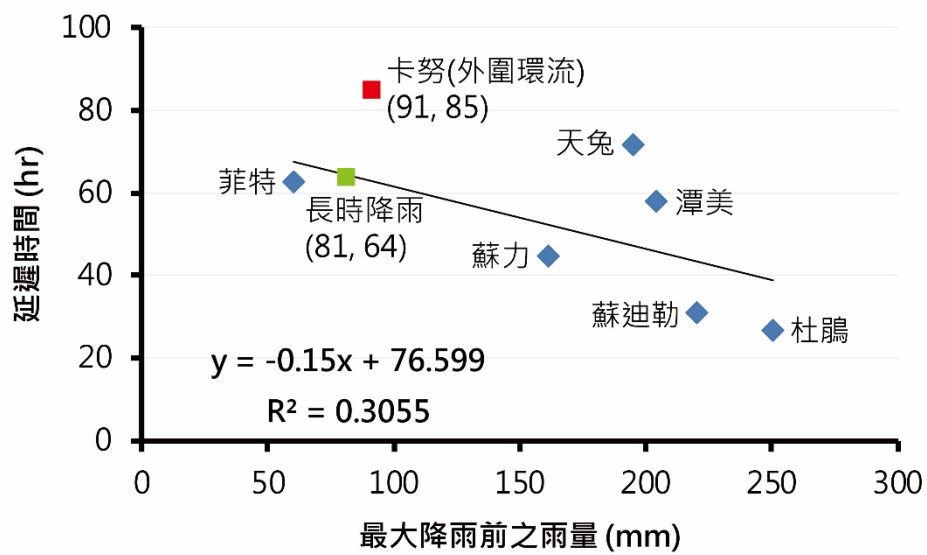


圖 3-13 延遲時間與最大降雨前之雨量之關係

資料來源：本計畫；曹舜評與林惠鈴，2016

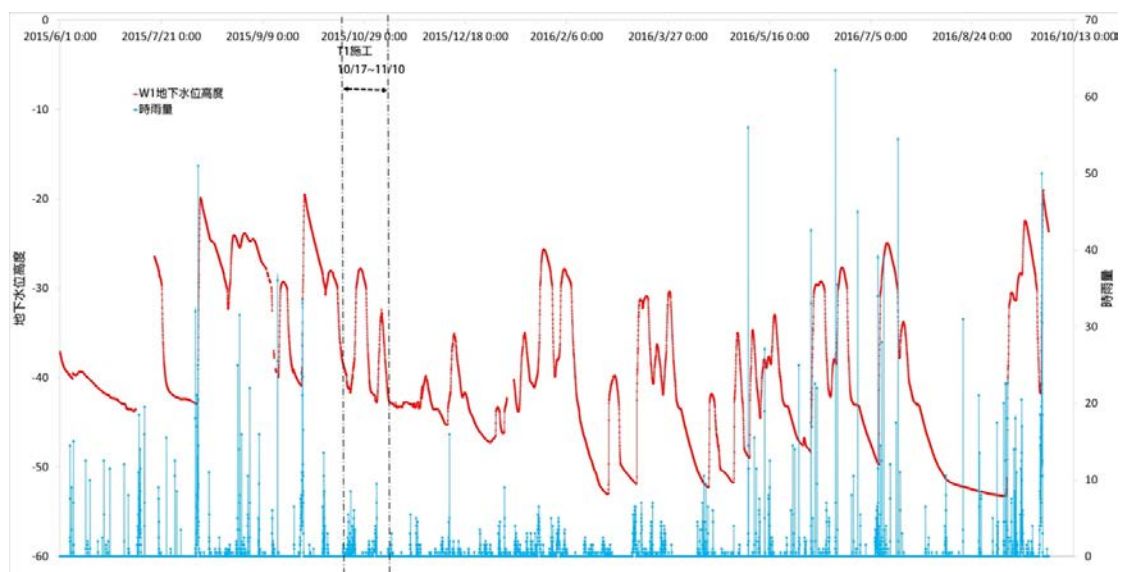


圖 3-14 集水井施工前後 W-1 常時地下水水位深度變化

資料來源：本計畫

第四章 GPS 監測結果分析

第一節 GPS 資料解算步驟

本計劃之 GPS 資料處理是使用日本東京海洋大學(Tokyo University of Marine Science and Technology)的高須知二(Tomoji Takasu)研究員所開發之 GPS 資料計算軟體—RTKLIB 2.4.3 求解 GPS 測站之精密座標。RTKLIB 為一款開源軟體(open source)，不須安裝，並具有圖形化介面(Graphical User Interface)，因此操作簡易。其優勢為具有多種可控制計算參數，且不須透過網際網路即可批次處理大量資料。除了一般性的 GPS 處理功能外，另有即時定位功能，只要 GPS 測站擁有固定的網路位置(IP address)，即可即時呈現該站當下的空間資訊。為求得資料處理時所需的軌道資料，可使用 RTKLIB 內建之下載功能下載並輸入 IGS (International GNSS Service)提供的精密星曆、廣播星曆、衛星導航資料與衛星時錶資料。

一、資料整理

第一步為整理 GPS 觀測資料。首先利用 Trimble 和 Alliscom 公司所提供的轉檔程式，將 GPS 的 Binary 的觀測檔(T00、T01 或 T02 檔)轉成 Rinex (Receiver Independent Exchange Format)格式，也就是 O 檔。接著批次修改檔案名稱及格式以符合 RTKLIB 之需求，再使用由 UNAVCO (University NAVSTAR Consortium) 所發展的

TEQC(Translate, Edit, and Quality Check) 編輯軟體 (Estey and Meertens, 1999)來做 GPS 觀測資料的檔頭編修工作，其中包含每一個測站的接收儀和天線盤的名稱及型號、點位名稱、點號、天線盤高度等，待所有資料修正完成後再進行第二步的解算。

二、資料解算

本計畫選取大崙山連續站(FTPL)做為計算大崙山之雙頻 GPS 連續站(HFAN)座標之約制站，因該站位於大崙山地質敏感區之外，因此為相對穩定的觀測站。而 FTPL 站之約制站則選取金門的 IGS 觀測站，選擇該測站資料主要是依據以下 2 個標準：(1)觀測資料蒐集時間要長。(2)測站資料幾乎不受大地震的影響。由於地震的發生，除了會造成顯著的同震位移，更有可能會產生複雜的震後變形，甚至改變地殼移動速率。因此，在選取測站時必須避免觀測紀錄出現複雜的震後變形。為了避免此連續站實際座標與理論座標之差異過大而造成解算成果的系統性偏差，在每次座標求解前，會先進行約制點座標查核的步驟。首先，根據前人研究與先前觀測資料計算得知 KMNM 測站之座標與速度場之資訊以線性關係式推出此連續站於該觀測時刻之理論座標，進而推估約制站與鄰近固定的 2-3 個連續站間的理論基線長。若實際基線長和理論基線長的差值小於 $2\text{ mm} + 0.002\text{ ppm}$ 基理論線長(Heflin et al., 1992)，才會利用該約制站的觀測資料求解其他連

續站之座標。為避免在低仰角度觀測時伴隨的較大雜訊(noise and multi-path)所造成之影響，GPS 觀測資料選定仰角 25° 以上之部份。對流層折射效應對於 GPS 定位測量的高程效應有著顯著的影響，本計畫採用 Saastamoinen model (Saastamoinen, 1973)，以海平面標準氣象資料，溫度 18°C ，相對溼度 50%，大氣壓力 1013.25mbar，推求各測站的對流層改正起始值，並引用大氣資料進行對流層折射影響量的改正參數。以各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式，加以吸收殘留的對流層折射誤差。

第二階段為求解計畫區域 GPS 觀測站之座標時間序列。採用約制站於 ITRF2008 座標系下之座標及速度場，以線性關係式推出這些約制連續站於觀測時刻之座標，並將計畫區域內雙頻 GPS 連續站以最小約制法約制 FTPL 之座標，進而求解計畫區域內各 GPS 觀測站於 ITRF2008 座標系之座標。此外單頻測量資料中由於只有一個載波相位訊號(L1)，故在解算過程只使用 L1 的訊號進行解算，並利用全球電離層圖(Global Ionospheric Maps)來改正電離層延遲效應。

第二節 大崙山順向坡之運動趨勢

大崙山順向坡上設置了 15 座高精密GPS地殼變形連續監測站，其中包括 13 座單頻式(single-frequency, HF01 至 HF09)連續監測站(最新一座為 2018 年 7 月 18 日架設)，以及 2 座雙頻式(dual-frequency，

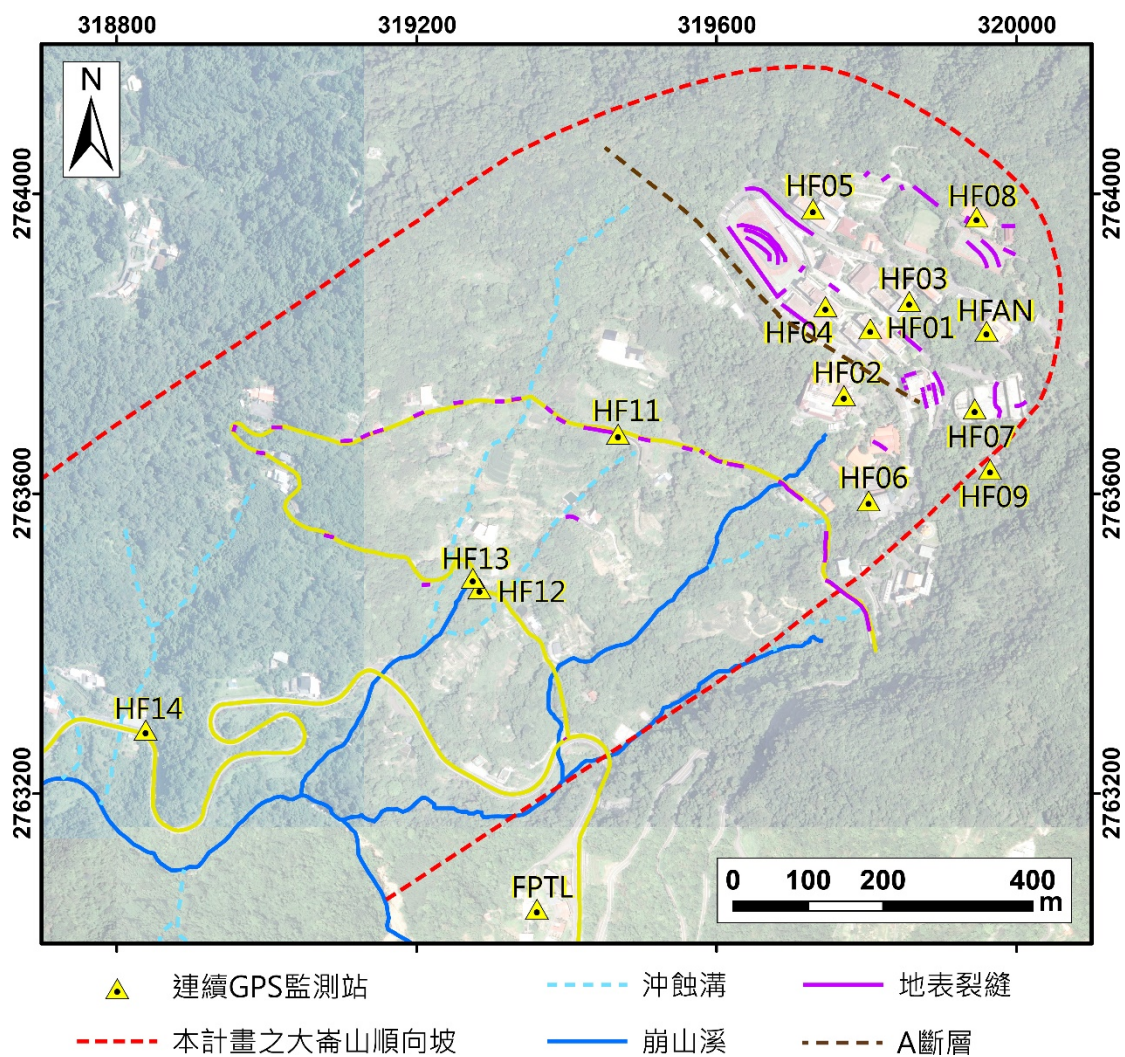
HFAN與FTPL)連續監測站(圖 4-1)。本計畫蒐集了自設站起到 2016 年 4 月初之已解算完成的在三方向(即南北向、東西向以及垂直向)分量上的每日平均GPS定位資料(即每日解)，並繪製成位移時間序列以探究大崙山順向坡地表之變形行為，如圖 4-2、圖 4-3 與圖 4-3 所示³。該位移時間序列之圖中同時繪製該年度之日雨量(灰色直條線段)，以供發生較大地表位移之前或期間的降雨量做對照用。所有的單頻式連續監測站皆以相對穩定之雙頻式連續監測站FTPL為參考站，以獲得大崙山順向坡內因為邊坡作用所引發之地表位移。然而在 2018 年時，因為雙頻式連續監測站FTPL發生儀器本身之故障，導致無記錄資料，故改以HFAN做為參考站。在解算時，所有單頻站皆有扣除 HFAN本身之位移量，以獲得純粹之邊坡運動所引發之變形。

由各年度之位移時間序列得知，當 GPS 連續監測站記錄到較大位移量時，皆與強降雨或連續性降雨事件有關，譬如 2016 年 9 月底至 10 月初分別發生超過 400 mm 之單日強降雨與長時間之連續性降雨事件、2017 年 6 月之長時間連續性降雨與 10 月發生之單日強降雨事件，以及 2018 年 1 月底至 2 月初的連續性降雨事件。在降雨事件發生後 1 至 2 日內，地表即向西南向之下邊坡方向位移，譬如 HF02

3 在 13 座單頻式連續測站中，有三站(HF03、HF05 以及 HF06)之部分解算成果予以去除不展示，原因為其資料太過於離散，即誤差皆超過三倍標準差，以至於無法得到合理迴歸曲線。今年 7 月中旬已經使用本計畫之經費購買品質較佳之訊號電纜線材汰舊換新，並縮短接收儀與天線的距離，以求獲得較為穩定之解算成果。

測站以及 HFAN 測站與 SAA 自記式傾斜觀測管同步記錄到在 2016 年 9 月下旬到 10 月上旬有明顯的地表與地下滑動面位移；此現象應該可反映校園內滑動塊體的整體性運動。大體上而言，幾乎所有的華梵大學校園內之 GPS 連續監測站皆顯示向西南方向的位移趨勢，也就是大崙順向坡的坡向。其中值得注意的是，HF09 號連續監測站位於順向坡範圍之外，其在 2016 年期間呈現穩定不動的情況(2017 年間因為接收儀故障導致無記錄資料)；然而在 2018 年之 1 月與 2 月出現短暫南向的位移，其原因尚待釐清。從 2018 年 2 月到資料結束為止，各站所監測到的地表為相對穩定情況，與 SAA 所記錄到情況一致，即 2018 年內在大崙山的累積降雨量並無超過 120 mm 的門檻值，因此地下水位也保持相對穩定，使順向坡整體維持穩定的狀態。

在華梵大學校園外的部分，即 HF11 以及 HF12 架設在大崙路旁的水泥護欄上，在 2016 年的 10 月初時該 2 站記錄到了大量的永久性位移。在現場調查後發現，GPS 連續監測站所站的路面連同水泥護欄與護坡，皆發生了明顯的裂縫與傾斜。因此，由位移時間序列與現場調查可斷定該處發生了淺層的小規模邊坡破壞，也就是常見的路基掏空的現象。然而此時間內的大量位移現象卻無法代表大崙山順向坡深層崩坍的運動行為，若要了解深層崩坍的運動過程，則需要觀察長期趨勢的位移時間序列，並且同時檢核地底下的滑動面之變位情形。



資料來源：本計畫

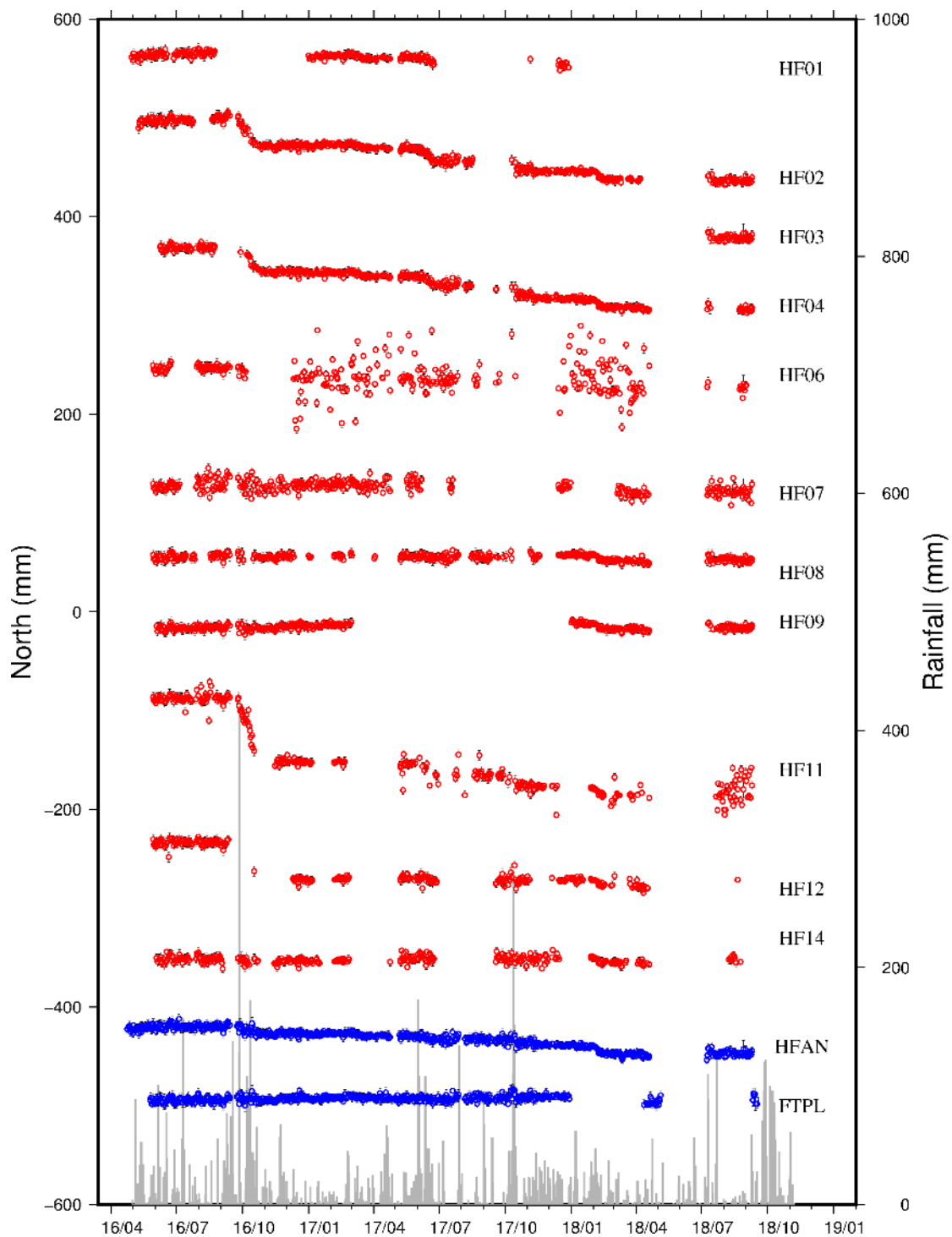


圖 4-2 2016 年 4 月至 2018 年 9 月大崙山 GPS 時間序列(南北分量)

資料來源：本計畫

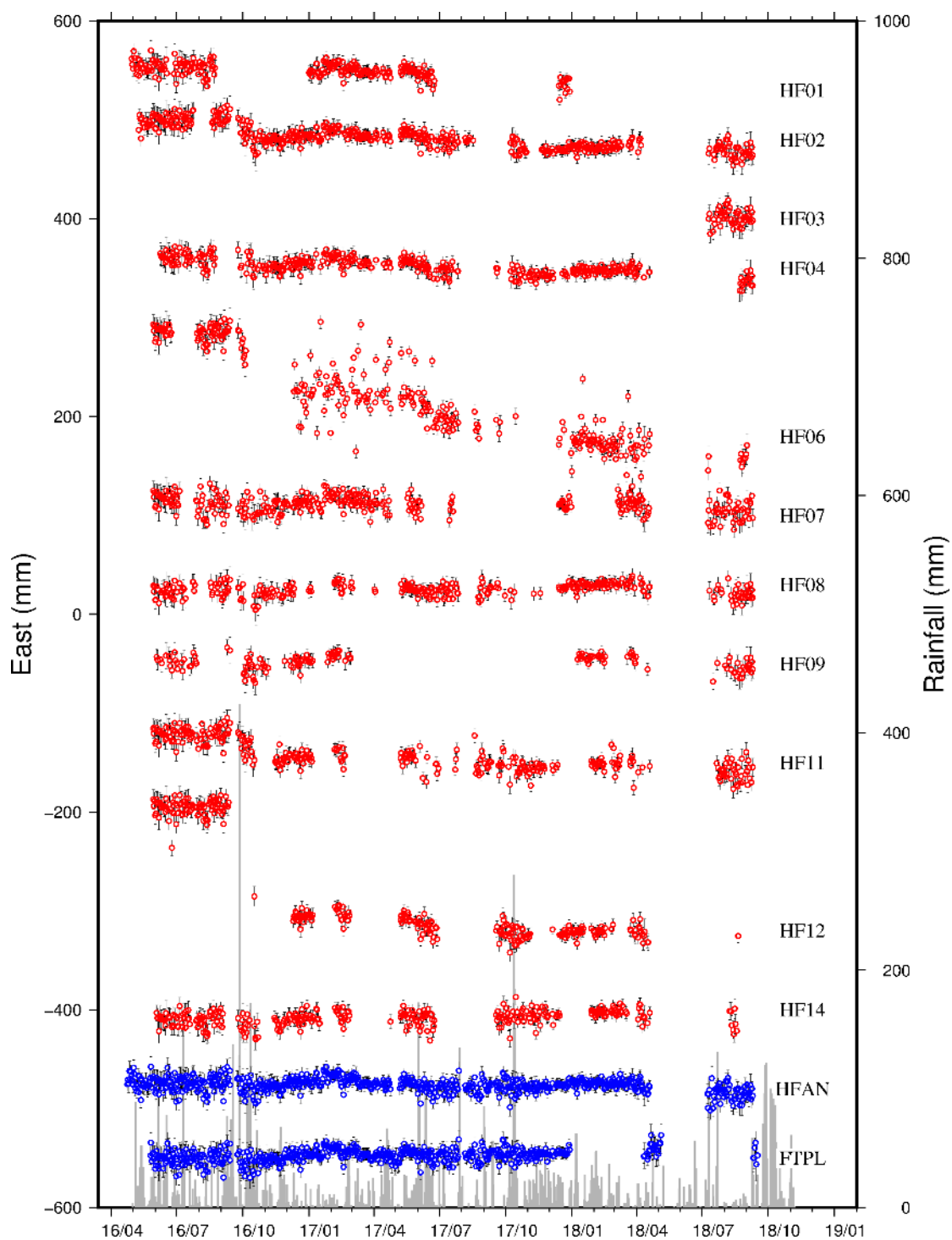


圖 4-3 2016 年 4 月至 2018 年 9 月大崙山 GPS 時間序列(東西分量)

資料來源：本計畫

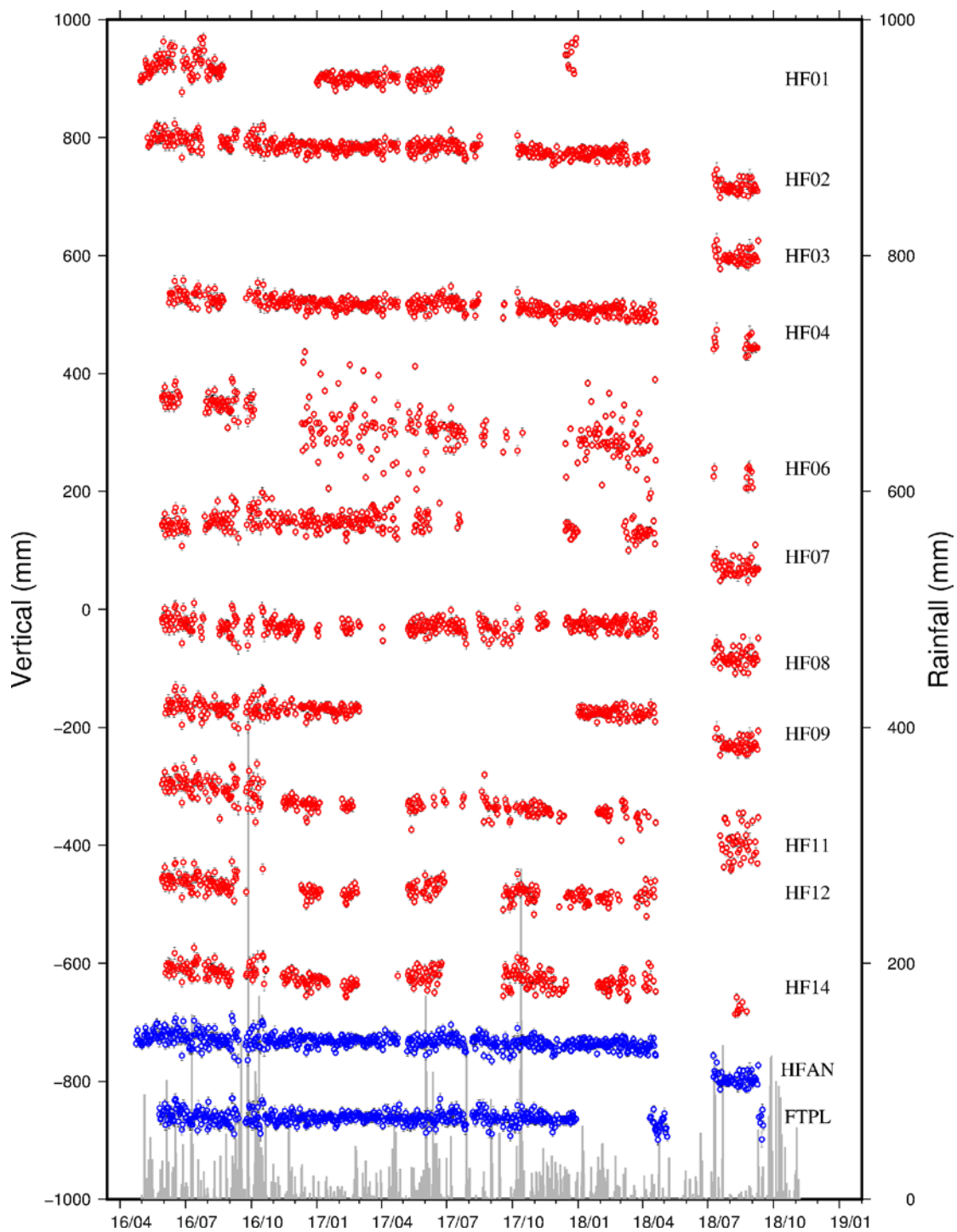


圖 4-4 2016 年 4 月至 2018 年 9 月大崙山 GPS 時間序列(垂直分量)

資料來源：本計畫

第三節 降雨事件期間之地表位移

為了瞭解在上一節中所述之降雨期間內，GPS 測站與 SAA 自記式傾斜觀測管分別同步觀測到的地表與滑動面位移現象，本計畫將採樣率為 1 Hz 的 GPS 觀測資料，解算為每小時一個資料點的平均值(稱為「小時解」)，以配合同為每小時一個資料點的降雨量與 SAA 觀測資料。本計畫分別對 2017 年 6 月 10 日至 6 月 23 日與 2017 年 10 月 11 日至 10 月 31 日期間，地表與地下滑動面因降雨而產生位移的事件做進一步分析。由圖 4-2、圖 4-3 與圖 4-4 的時間序列(每日解)得知，測站 HFAN(雙頻)、HF02(單頻)與 HF04(單頻)三站的資料最為連續且有記錄到上述的降雨事件，即中斷無記錄資料的情況最少，並且是最為接近 SAA 傾斜觀測管，因此在本節中僅呈現該三站的分析結果。

首先分析在 2017 年 6 月 10 日至 23 日期間之情形。在 6 月 12 日 15:00–16:00 的一小時內，時雨量達到 69 mm，而在下一個小時內時雨量則有 33.5 mm。三站的水平分量顯示在該降雨結束後的一天內並無位移產生(圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7)，推論為因地下水位(取用 W-1 之資料)雖處於上升的過程(圖中的藍色點線)，但尚未完全浸沒滑動面(圖 2-7 中的紅色虛線)。俟地下水位上升至-31.6 公尺時，兩單頻站(HF02 與 HF04)記錄到地表開始往西南方位移，而 HF02 的位移速率略高於 HF04。而在 HFAN 所記錄到的位移方面，雖然水平方向是持

續向南，但卻有些微向東之後再轉向西。而在垂直方向上，兩單頻站所記錄到的是相對穩定的情況，而 HFAN 卻是有稍大的垂直向跳動，但最後仍是為向下的趨勢。整體而言，在此次降雨期間 GPS 連續測站記錄到了地表面因為地下水位上升而浸沒了地下滑動面，導致有向西南方向並向下位移的現象，也就是說，向下邊坡方向位移了約 5 mm。此位移量與圖 4-5、圖 4-6 與圖 4-7 中之 SAA(SIS-11A)所記錄到之位移量大致相同，也約為 5 mm。

接著分析 2017 年 10 月 11 日至 31 日間的短時強降雨期間(累積雨量達 635 mm)的地表位移情況。由圖 3-4 得知，這段期間的地下滑動面位移速度較 6 月時快，且 W-2 與 W-4 水位觀測井也記錄到了更高的地下水位。三個 GPS 連續測站也同樣記錄到在 60 小時內地表就水平向西南位移了 5 mm 之多(圖 4-8、圖 4-9、圖 4-10)，且在 W-1 地下水位上升至 -36.3 m 時就開始啟動位移。至於垂直方向，三個 GPS 測站所記錄到的位移趨勢皆不相同。以 HF02 而言，有明顯的垂直向下位移，降雨結束後位移達 1 公分；HF04 則在強降雨結束時有大幅度向上跳動，之後則保持穩定的狀態；而 HFAN 甚至顯示出數次的約 1 公分的大幅度跳動，且在該期間的趨勢則為向上位移。此位移量與圖 4-8、圖 4-9 與圖 4-10 中之 SAA(SIS-11A)所記錄到之位移量大致相同，也約為 1 cm。

整體而言，水平方向的位移速度與幅度與短時內的強降雨量為正相關，這是因為短時的強降雨會使得降雨區域內的地下水位一同快速且大量上升，因而推斷地下滑動面會因此有更大的範圍是完全浸沒在地下水中，使得滑動塊體內的有效應力下降更多，反映出整個滑動塊體的較為快速與顯著的位移。另外一方面，地表與地下滑動面的滑動量一致之情況，亦可說明了平面形破壞的運動特徵。本研究區域之大崙山順向坡之地表面坡度與地下木山層岩盤之層理傾斜角度近乎一致(約為 20° ，如圖 2-7 所示)，因此在只有存在該單一平面型滑動面情況下，該順向坡滑動塊體會整體同時向下邊坡位移，且坡面與地下滑動面的位移量與方向會呈現一致之現象。

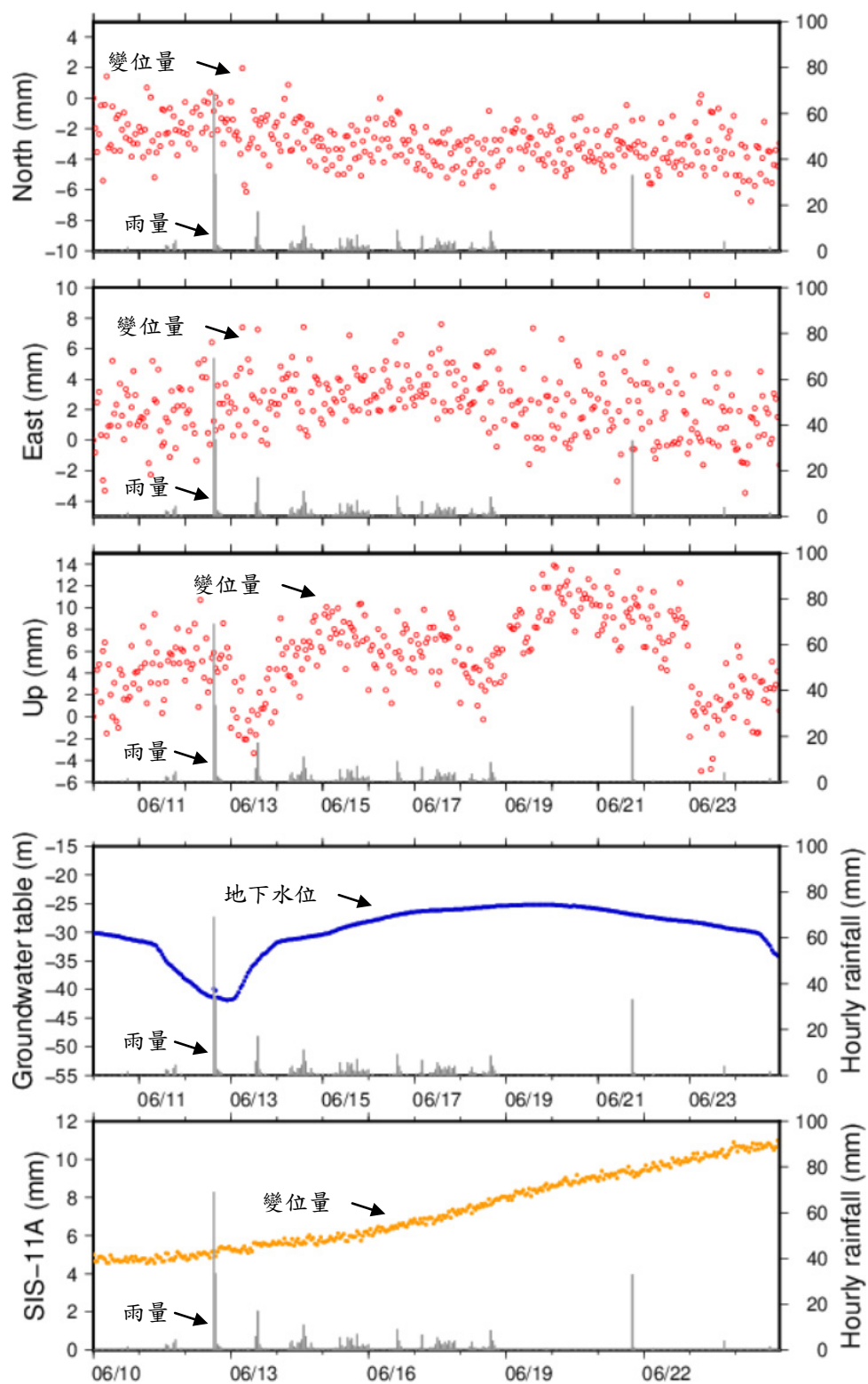


圖 4-5 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HFAN)

資料來源：本計畫

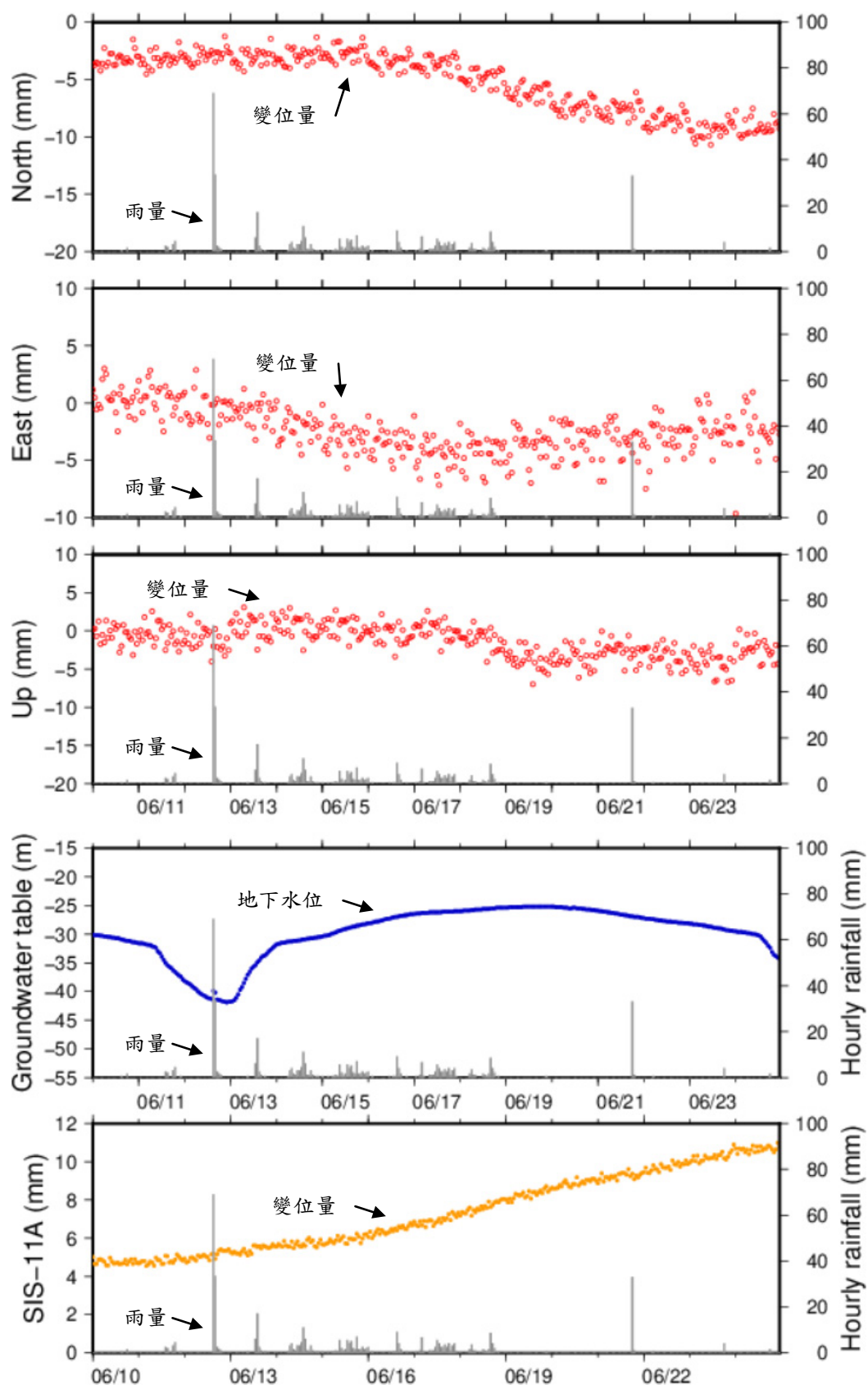


圖 4-6 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF02)

資料來源：本計畫

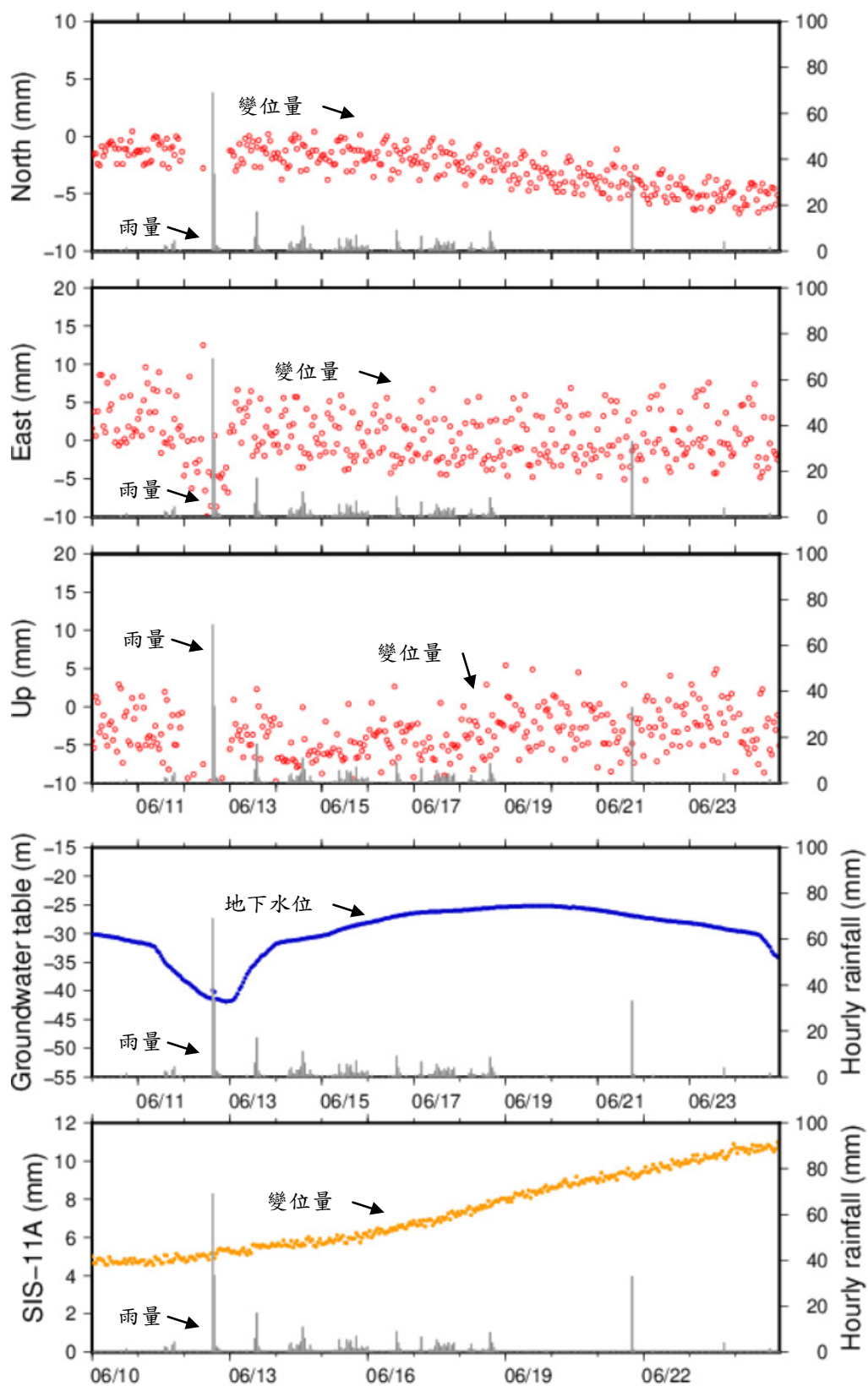


圖 4-7 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF04)

資料來源：本計畫

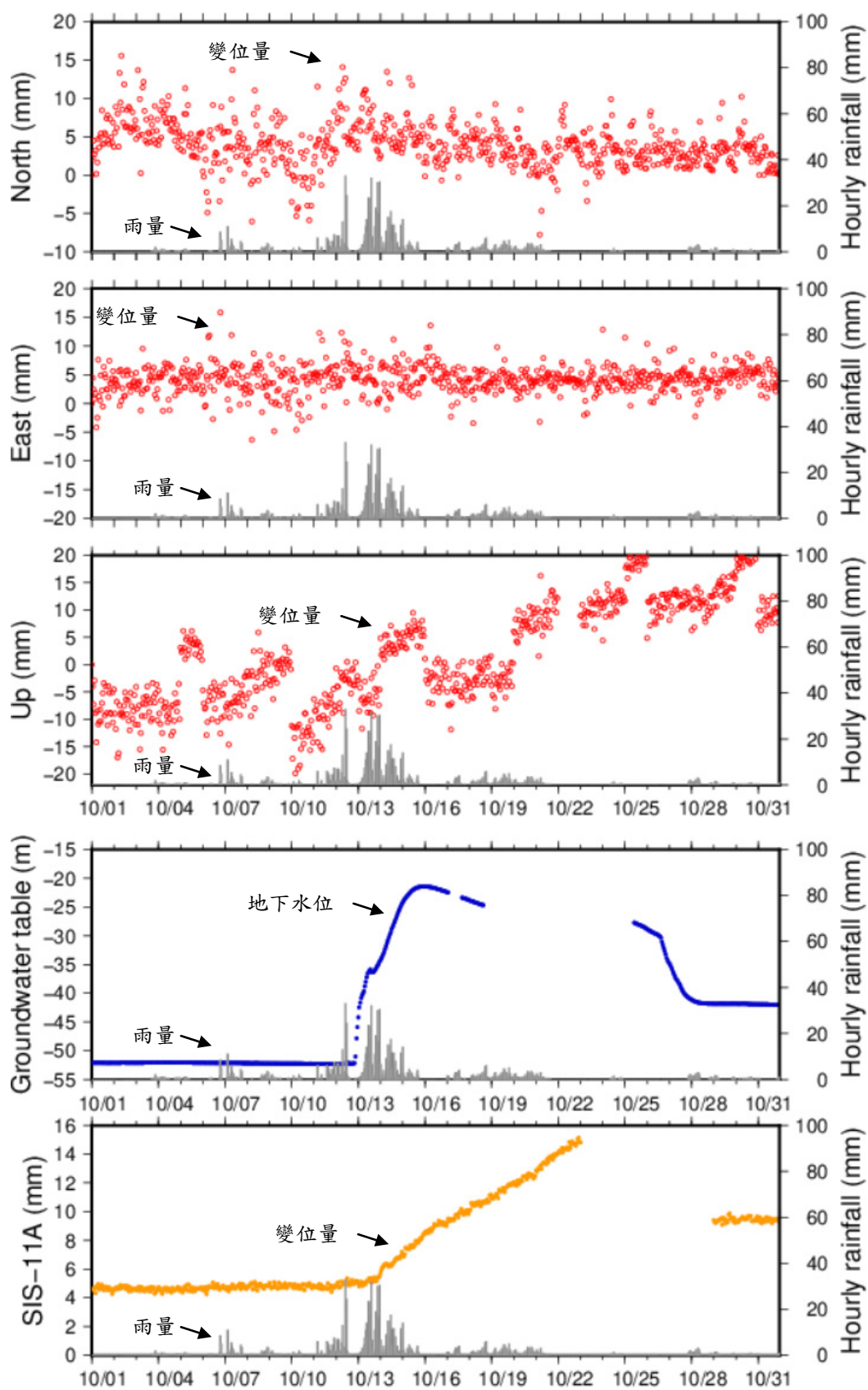


圖 4-8 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HFAN)

資料來源：本計畫

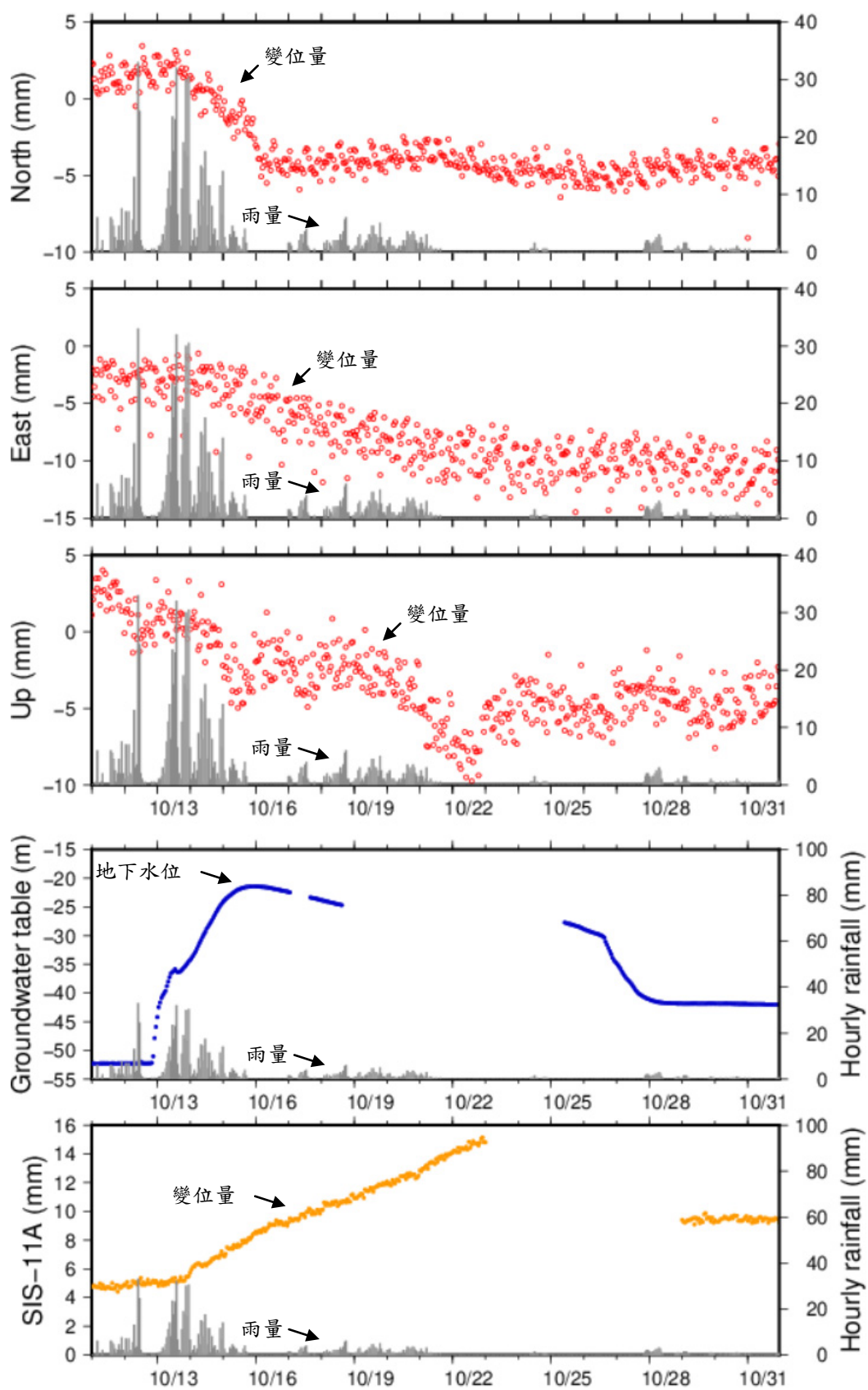


圖 4-9 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF02)

資料來源：本計畫

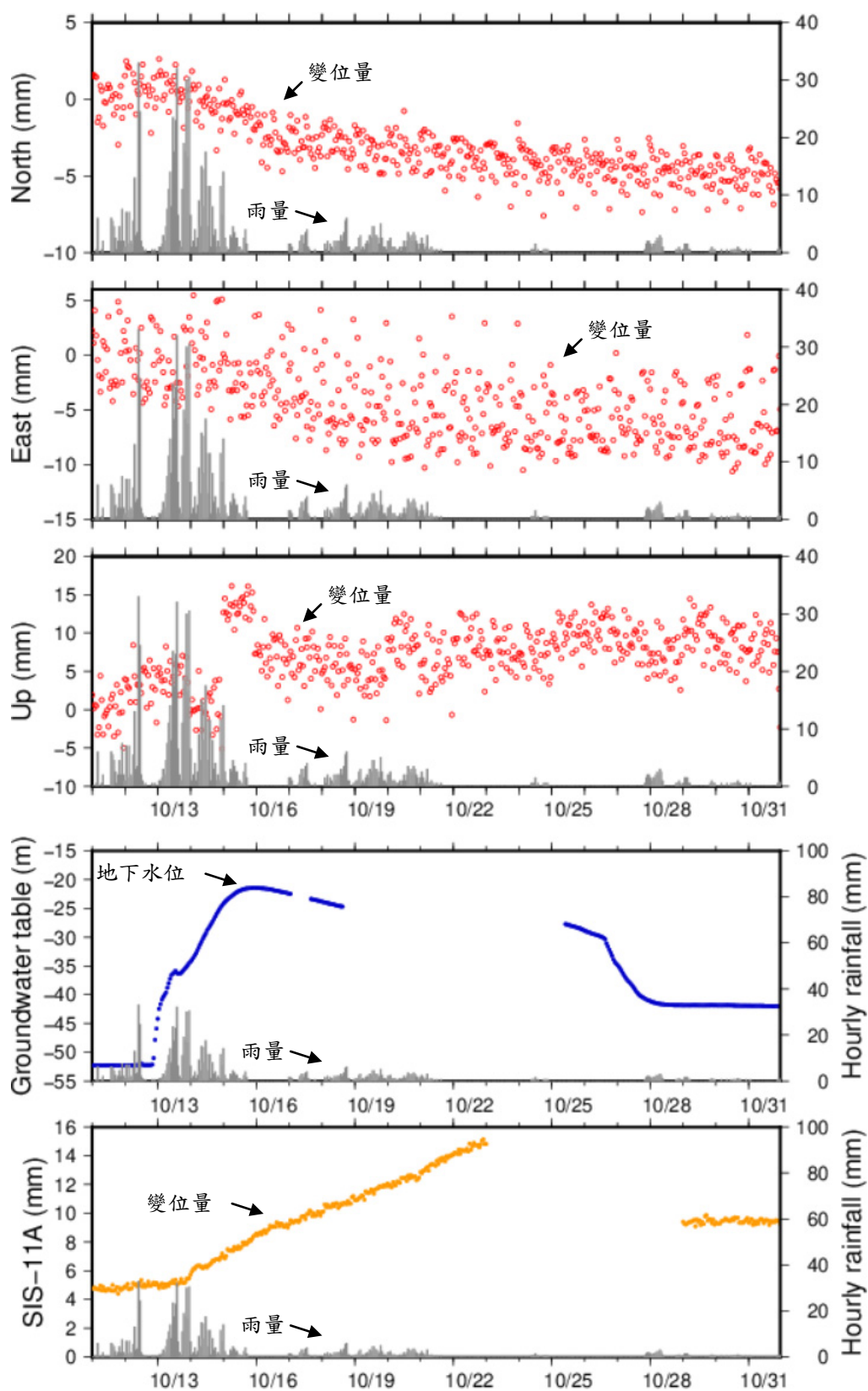


圖 4-10 GPS 時間序列(及地下水位)與雨量關係圖(HF04)

資料來源：本計畫

第五章 結論及建議

第一節 結論與建議

本計畫的研究目的為利用華梵大學與大崙山區既有的自記式連續性監測儀器，如 SAA 傾斜觀測管與地下水位計，以及坡地表面的雨量站與 GPS 地殼變形監測站，所得之長期性或事件性監測資料，探討大崙山順向坡中之滑動塊體的範圍、數量、滑動面深度及其幾何形貌，並更進一步研究該滑動塊體的滑動機制。

本計畫先蒐集並研析 2016 年起至 2018 年 10 月的雨量記錄、地下水位面時間序列、滑動面變位時間序列，以及 GPS 量測到之地表位移時間序列，並分析既有的校內外岩芯資料與地表裂縫分佈，得到以下數點結論：

1. 經研判大崙山區之岩芯資料與地下水位記錄，得知大崙山順向坡內的地下水位面主要是沿著表層崩積土與下伏木山層岩盤之土岩交界面分佈。該介面位於地下 10 至 30 公尺間，依崩積土層的厚度而定。

2. 華梵大學校內位置最高的 W-1 地下水位觀測井內之地下水位，受控於降雨量與降雨持續時間、地下水體之分佈，以及地下岩盤層理位態與斷層剪裂帶的分佈，因而有劇烈且快速的升降變化。藉由歸納降雨特性與累積降雨量對於地下水位上升的關係，得知累積降雨

量達 120 mm 時地下水位即會開上升。若是在單一連續性降雨型態下，降雨至少要經過 3 天的時間才會入滲至地下水體；而在強降雨事件中，降雨僅需 9 小時就會入滲至地下水體內。

3. W-1 地下水位觀測井記錄到快速且劇烈的地下水位升降，判斷其機制為地下的兩層厚砂岩層含水層出露於大崙山後山之逆向坡地表，因此降雨與地表逕流直接入滲進入該後砂岩層，使地下水量快速增加。再者，校園西南部推測有一西北走向之高角度斷層通過，其碎裂與泥質的組成特性會阻隔地下水之流通並導引地下水由西北往東南方向流動，為地下水位上升另一機制。

4. 藉由量化分析單一的長時降雨與短時強降雨事件發現，最大降雨前之累積雨量與地下水位上升量有正相關之關係。然在降雨型態為擬雙峰雨型時，是否改以後峰最大雨量為量花分析基準，仍需較多降雨事件納入分析始可確定。

5. 由岩芯資料與傾斜觀測管量測的變位深度，得知華梵大學校區之地表面下 20–30 公尺深處有一潛移性的滑動面。而當地下水位面因累積降雨量達到門檻值時，地下水即浸沒該滑動面，使得滑動面上的有效應力下降，下滑力提高，導致有較大的位移產生。另外根據既有資料得知，當累積降雨量超過 460 mm 後，滑動面上的位移速度將達到最快，故有致災的危險性。

6. 由大崙山區之 GPS 連續監測站記錄到的自 2016 年至 2018 年的地表位移時間序列資料分析，大崙山順向坡的整體滑動趨勢為西南向，也就是平行該順向坡的坡向(或岩層位態的傾斜方向)。

7. 在單一強降雨事件方面，在華梵大學校園內由 GPS 連續監測站所記錄到因降雨而引發的地表位移，時間上是與地下滑動面的位移期間相同。此現象可說明校區內應有深層崩坍的滑動塊體。

8. 在華梵大學校區外大崙路旁的 GPS 連續監測站記錄到較校區更大的由強降雨導致地表位移。經現場勘查，發現是局部地表淺層之膠結不良崩積土或風化材料的位移，與深層的滑動面位移無關。

9. 由 GPS 的 1Hz 高採樣率資料解算成每小時為一位置點(小時解)的位移趨勢分析，在短時強降雨期間(2017 年 10 月中旬)，地表位移的速度與位移量確實皆大於累積降雨量不及一半之降雨事件(2017 年 6 月中旬)。此一現象與 SAA 所記錄的地下滑動面變位情形相一致，而該現象亦可說明了平面形破壞的運動特徵。

10. GPS 原為監測大尺度的地殼變形之重要且精確的工具，在輔以地下岩芯或震測剖面資料，以及區域性地形的情況時，可以推斷出研究區域的地體構造與地殼變形速率。本研究是在已裝設有現地監測儀器與資料(如岩芯與滑動面位移)的邊坡上，增設點位高密集度與量測高精密度的 GPS 連續測站，使得對該研究對象之坡體的整體變位

行為有更進一步之了解。因此，根據本計畫的研究結果，若欲獲得詳細與精密之整體邊坡之運動行為，設置於地表坡面與地下滑動面之連續且高解析之監測儀器必須兼備。

第二節 下一年度工作

華梵大學校區內已設置有相對齊全的坡地監測系統，且皆能夠在短時間內記錄滑動面位移、地下水位面與降雨量資訊，並且立即回傳至本校之坡地中心伺服器儲存。本計畫的主要研究方法—高精度 GPS 連續地表監測站，則是以更高的記錄頻率監測校園內外的坡面變動情形。儘管是高記錄頻率，但過去仍然是將資料儲存在接收儀本身的記憶體中，之後再定期前往 GPS 接收儀的所在現地收取資料。然而，如此並無法在發生特殊事件後立即得知坡地的變動情形，譬如短時間內發生的暴雨或是地震等。在沒有 WIFI 訊號的校內外環境下，本計畫將裝置月租型 SIM 卡，以 4G 的傳輸模式將資料回傳至伺服器中。然當前解算 GPS 資料的程序繁複，仍必須以人工的方式先將原始資料轉換格式後，再以統計方法將轉換完成之資料進行合併，最後再以 GPS 專屬解算軟體解算成三維座標值。以目前完整的作業所花費的時間估計，包含資料轉換與解算每個單獨 GPS 連續監測站之每日解，大約為 10 至 15 分鐘。為節省分析時間與人力，本計畫將在下年度將

部分單頻測站升級成具有自動即時回傳(透過 4G SIM 卡)與解算功能之雙頻測站(如 HF03、HF05 與 HF06)，以改善過於離散之監測結果。

另一方面，水保局已在大崙山中、下邊坡區域發包新建兩孔集水井(整治計畫)，以期能再將地下水位降低，減緩大崙山區可能的地滑潛能。而在工程前的地質調查中，已有 8 至 9 處的地質鑽探調查。因此屆時將會取得下邊坡的地層與水文資料，期望對整體大崙山有更深入的了解。基於上述各項監測與新的地質資料，期望最終能夠達成本計畫的目標，即為推導出邊坡運動的經驗公式(參數有降雨量、岩層材料滲透係數 K 、地下水上升量與延遲時間，以及地表與地下滑動面之位移量)，以達到最終之防災整治之目的。

參考文獻

1. 石棟鑫，碩士論文，台灣地區颱風與降雨型態之分析研究，國立中央大學，2001。
2. 地質鑽探報告，“華梵大學校區坡地安全整體評估”，青山工程顧問股份有限公司，2017。
3. 地質鑽探工作報告書，“華梵大學蒼萃地質鑽探工程”，通傑工程有限公司，2017。
4. 林朝宗，五萬分之一地質圖幅及說明書，經濟部中央地質調查所，新店圖幅圖幅第九號，2000。
5. 曹舜評、林惠鈴，“華梵校區颱風降雨與地下水位關係之初步探討”，2016 設計與文化學術研討會，五月十三日，華梵大學，台北，台灣，2016。
6. 黃鑑水、鄭清江，“大崙地區地質之再調查與分析”，華梵藝術與設計學報，第一期，59-70 頁，2004。
7. 鄭清江、黃鑑水、謝宗燁，“華梵校區鑽探地質與二維地電阻影像探測調查之邊坡穩定應用案例分析”，華梵藝術與設計學報，第四期，1-15 頁，2008。
8. 鄭清江、楊嘉瑜，“降雨引致地下水位變化及坡地變位之案例探討”，華梵藝術與設計學報，第十期，A1-A15 頁，2015。

9. 謝宗燁，碩士論文，坡地監測滑動面判釋分析與整治對策之案例研討，華梵大學，2009。
10. C.-H. Tseng, Y.-C. Chan, C.-J. Jeng and Y.-C. Hsieh, “Slip monitoring of a dip-slope and runout simulation by the discrete element method: a case study at the Huaan University campus in northern Taiwan,” *Natural Hazards*, Vol. 89, Iss. 3, pp.1205-1225, 2017.
11. C.-J. Jeng and D.-R. Su, “Characteristics of ground motion and threshold values for colluvium slope displacement induced by heavy rainfall: a case study in northern Taiwan. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 16:1309-1321, 2016.
12. DJ Varnes, “Slope Movement Types and Processes,” In, R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.), *Landslides: Analysis and Control*, National Research Council Transportation Research Board Special Report Special Report 176, National Research Council, Washington, D.C. pp. 11-33, 1978.
13. J Saastamoinen, “Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction,” *Bulletin Géodésique*, 107, 13-34, 1973.
14. L Estey and CM Meertens, “TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data,” *GPS Solutions* 3(1), 42-49, 1999.
15. M Heflin, W Bertiger, G Blewitt, A Freedman, K Hurst, S Lichten, U Lindqwister, Y Vigue, F Webb, T Yunck, J Zumberge, “Global

geodesy using GPS without fiducial sites,” Geo R Letters 19(2),
131-134, 1992.

附錄

附錄一、期末報告書審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本計畫探討大崙山地區，為本局大規模崩塌之計劃區域，有關地表、地下位移，地下水位及雨量監測及觀測，現場的地質情形，應持續辦理調查，以做為未來警戒值訂定及疏散避難規劃。	謝謝委員提出之意見。本創研計畫的目的為將各式現地監測儀器之數據做綜合研判與分析(包括地表與地下滑動面之變形行為與降雨量及地下水位面升降之關係)。藉此我們將會延續第一年之研究成果，提出第二年期之創研計畫，最終目標為提出相應之經驗公式，並期望該公式可推廣至其他大規模崩塌之案例，俾達成貴局之防災與整治之規劃目標。
二	此區有多年監測資料，其平均位移量為何？累積滑動量多少？本研究是否以訂定致災門檻移動量？	謝謝委員提出之意見。關於此意見之說明已詳述於第二章第一節中。
三	GPS為地表變形監測，建議與地表下監測資料進一步比較。	謝謝委員提出之意見。已修改圖4-5至圖4-10，即在其中增加SAA(SIS-11A)所記錄到之與GPS同期間之滑動面變位情形以表現其關聯性。另相關之說明與分析已詳述於第四章第三節中，包含地下水位與SAA之監測數據。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	GPS屬地表位移，建議與地層滑動做對照，以表現其關聯性。	謝謝委員提出之意見。已修改圖4-5至圖4-10，即在其中增加SAA(SIS-11A)所記錄到之與GPS同期間之滑動面變位情形以表現其關聯性。另相關之說明與分析已詳述於第四章第三節中。
五	本研究結果如何運用到其他相似案例，請提出建議。	謝謝委員提出之意見。關於此意見之說明與分析已詳述於第五章第一節第十項中。