

計畫編號：109 保發-11.1-保-01-06-001 (25)

**利用 GPS 連續站與現地監測系統分析深
層崩塌運動機制**

**Analyzing movement mechanisms of deep-
seated landslide by applying continuous
GPS and in-situ monitoring systems**

執行單位：國立成功大學、國立中央大學

執行期間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：饒瑞鈞 教授

共同主持人：曾佳漢 助理研究員

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 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)

利用 GPS 連續站與現地監測系統分析深層崩塌運動 機制

摘要

華梵大學所在的新北市石碇區大崙山順向坡，自 1995 年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 GPS 連續地表變形監測系統（包括 13 座單頻 GPS 與 2 座雙頻）與校園內既有之坡地監測系統（包括 SAA、地下水位計），透過分析降雨後地下水位上升，進而導致滑動塊體位移速度增加的相互時空關係，以期瞭解滑動塊體在有無降雨期間的運動模式，並找出其滑動機制。最終期望找出滑動塊體在不同降雨型態下可能的運動行為。

本計畫研究成果為，大崙山順向坡的位移類型分為長期型與短期事件型位移。在長期位移型方面，坡面整體一致向西南向方向—即下邊坡方向位移，平均速度為 13.0 mm/yr。而在短期事件性位移方面，發現皆和降雨事件有關，且最大位移速度達 0.138 mm/hr。另外再與地震訊號分析，發現在震度三級的情況下，地震力尚不足以造成坡體的永久性位移。

為了維持大崙山順向坡整體穩定性，以及 GPS 連續監測系統及其資料的穩定，本計畫給予主要建議如下：

- 1.國立成功大學與共同主辦機關國立中央大學改善 GPS 監測站的定位精度以及資料解算之誤差。為改善定位精度，將位於坡體中位移量較為明顯的部分單頻 GPS 監測站替換成雙頻 GPS 監測站，以期得到精度更高的位移量。
- 2.華梵大學應加強校園所在坡體內的排水建設，以降低地下水對削弱滑動塊體下滑阻抗力的貢獻。
- 3.大崙山為中等規模之典型順向坡，可作為研究其運動模式之良好範例。建議在既有的監測系統上，持續維護並增設新的監測設施，以精進邊坡運動的研究與邊坡災害的防治工程。

關鍵詞：大崙山、順向坡、深層滑動、全球定位系統、

Analyzing movement mechanisms of deep-seated landslide by applying continuous GPS and in-situ monitoring systems

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 gauges and rainfall gauges. 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 a continuous GPS monitoring system (including 13 single-frequency and 2 dual-frequency GPS stations) for ground deformation with the existing monitoring systems (including SAA and groundwater level gauges) within the campus. 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 understand sliding patterns of the sliding blocks during

rainfall and no-rainfall periods, as well as sliding mechanisms. Our final goal is to find out movement behavior of the sliding blocks owing to different types of rainfall.

The results of the study reveal that two types of slope displacement can be distinguished such long-term stable and short-term event-induced. For the long-term stable displacement, the slope surface moves down consistently southwestward at an average rate of 13.0 mm/yr. For the short-term event-induced displacement, the events are related to rainfall, and the max. displacement rate is about 0.138 mm/hr. Moreover, by comparing the GPS displacement and seismograph of an earthquake with the intensity of 3, the shaking force is not able to cause permanent displacement of the dip slope in the Dalun Mountain.

In order to maintain stability of the high precision GPS stations and the Dalun Mountain dip slope, suggestions are given as follows:

1. The National Cheng Kung University and the National Central University suggest to improve positioning precision and errors derived from data resolving of the GPS stations. To improve the positioning precision, the GPS stations with single-frequency, which are located at the parts of the dip slope where displacement is more obvious, shall be replaced by dual-frequency ones.
2. The Huaan University should add drainage constructions to enhance resistance to down-sliding of the sliding blocks which is lowered by groundwater.
3. The Dalun Mountain is a mid-scale and typical dip slope, and it can be a good example for slope movement study. It is suggested that based on existing monitoring systems, maintenance and addition of equipment and

devices should be done, so that the study of slope movement and slope disaster prevention engineering structures can be improved.

Keywords: Dalun Mountain dip slope, Deep-seated sliding, GPS

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	VI
表次.....	VIII
圖次.....	IX
第一章 前言.....	1-1
第一節 工作執行方法	1-1
第二節 工作執行步驟	1-4
第二章 大崙山坡地現況	2-1
第一節 地形與地質	2-1
第二節 地下水分佈	2-6
第三節 滑動區域	2-12
第三章 GPS 監測結果.....	3-1
第一節 觀測資料解算	3-1
第二節 大崙山坡地運動趨勢	3-4
第三節 即時動態 GPS 監測結果.....	3-12
第四章 討論.....	4-1
第一節 位移特性分類	4-1
第二節 週期性分析	4-5
第三節 事件性位移分析	4-7
第四節 大崙山順向坡的運動模式	4-21
第五章 結論與未來工作	5-1
第一節 結論	5-1
第二節 未來工作	5-2
參考文獻.....	參-1

附錄..... 附錄-1

表次

表 3-1 大崙山坡地中各 GPS 點位之位移特性	3-11
表 3-2 RTK 雙頻 GPS 之各種解算結果.....	3-16
表 4-1 大崙山坡地各 GPS 連續站總位移量位移和發生時間	4-3
表 4-2 大崙山坡地各 GPS 連續站長期運動速度	4-4
表 4-3 事件性位移之總結	4-13

圖次

圖 1-1 華梵大學校內監測儀器點位	1-6
圖 1-2 人工量測式傾斜觀測管的位移情況	1-6
圖 1-3 大崙山地區 GPS 連續站點位	1-7
圖 1-4 GPS 連續監測站（單頻 HF02 之天線部件）	1-7
圖 1-5 GPS 連續監測站（雙頻 HFAN 之天線部件）	1-8
圖 2-1 大崙山地區立體地形圖	2-4
圖 2-2 華梵大學校區地層層序與岩性	2-4
圖 2-3 新北市石碇區大崙山周邊地質敏感區位置圖	2-5
圖 2-4 華梵大學 DH-1(a)與 W-3(b) 岩芯中 A 斷層深度	2-6
圖 2-5 現有傾斜觀測管與鑽孔分佈圖	2-9
圖 2-6 大崙山區地下構造與地下水位分佈	2-10
圖 2-7 華梵大學校園內地下水體之分佈	2-11
圖 2-8 華梵大學校園內地下水流向	2-11
圖 2-9 人工量測式傾斜觀測管的位移情況	2-13
圖 2-10 華梵大學校園東南部份之滑動塊體	2-14
圖 2-11 編號 17-7 與 17-8 傾斜觀測管所量測到之變位	2-15
圖 2-12 華梵大學校園西部可能的滑動塊體之地表破裂	2-15
圖 3-1 大崙山坡地高精密 GPS 連續監測站分佈	3-6
圖 3-2 大崙山坡地之位移時間序列（南北向）	3-7
圖 3-3 大崙山坡地之位移時間序列（東西向）	3-8
圖 3-4 大崙山坡地之位移時間序列（垂直向）	3-9
圖 3-5 HF06 點位西側與南側之淺層破壞	3-10
圖 3-6 大崙山地區 GPS 地表位移速度場	3-12
圖 3-7 即時動態 GPS 監測結果—fix 解	3-14
圖 3-8 即時動態 GPS 監測結果—sps 解	3-15

圖 4-1 大崙山坡地各 GPS 連續站之位移圖	4-3
圖 4-2 大崙山坡地各 GPS 連續站之長期速度場	4-4
圖 4-3 2000 年到 2019 年之台灣與各地月平均雨量時間序列	4-6
圖 4-4 HF04 及測站 HF08 之乾濕季位移時間序列圖	4-6
圖 4-5 2016 年 10 月事件之水平方向累積位移及速度圖	4-12
圖 4-6 2016 年 10 月事件之水平方向位移量和速度	4-12
圖 4-7 2017 年 06 月事件之水平方向位移量和速度	4-13
圖 4-8 2017 年 10 月事件之水平方向位移量和速度	4-13
圖 4-9 2016 年 5 月 12 日地震之全台震度分佈	4-15
圖 4-10 2016512 地震震央、地震站與 GPS 連續站分佈	4-16
圖 4-11 華梵大學鄰近地震站的震波示意圖	4-18
圖 4-12 雙頻 GPS 測站 HFAN 及 SDHS 的速度訊號時間序列	4-19
圖 4-13 GPS (HFAN) 訊號及地震 (TWA) 訊號波型疊加	4-20
圖 4-14 GPS (SDSH) 訊號及地震 (TWA) 訊號波型疊加	4-21
圖 4-15 不同階段的坡地運動示意圖	4-24
圖 4-16 地表位移量與滑動面滑動量比較圖	4-25

第一章 前言

第一節 工作執行方法

本計畫參考既有的資料後已對當地的區域地形與地質情況有了基本的認知，然對於誘發大崙山順向坡的邊坡運動之機制(mechanism)及其運動模式(pattern)仍未完全釐清，尤其是與降雨型態以及其對應的地下水位變化所造成的坡體沿著滑動面之位移。因此，在瞭解大崙山坡地內已存在或新發育之地表張裂縫(tension crack)之情況，與邊坡運動有關的現象(如地表滲水(seep)、局部坡面隆起(bulge)與沉陷(settlement)等)以及可能相關之局部地質與地形特徵之後，本計畫將藉由彙整與分析現有的各項地表與地下的監測儀器所觀測到的坡體變形或位移資料，期望歸納出降雨量與其形態、地下水位變化與坡體位移的相互關係，並以數學關係經驗式表現之。本計畫的工作執行方法如下：

一、降雨量及其型態、地下水位變化與滑動面位移量之相關性

(一)降雨量與型態

目前華梵大學自有一座自動記錄式雨量站，其記錄頻率為每五分鐘一筆資料。利用其高頻率的記錄特性，搭配相對應之地水位資料，可在降雨期間時觀察降雨量變化與地下水位之關係(Jeng and Sue, 2016)。其設置地點為華梵大學校內南部、校門西側之公車調度亭頂，海拔高度約為 470 公尺。

(二)地下水位變化

目前華梵大學自有四座自動記錄式地下水位計，其記錄頻率為每一分鐘一筆資料。利用其高頻率的記錄特性，搭配雨量資料與滑動面位移資料（由 SAA 觀測所得），可以觀察到降雨量、地下水位與滑動面位移速度之相互關係（Jeng and Sue, 2016）。設置地點如圖 1-1 所示。

(三)地下滑動面位移

為監測已知滑動面的位移速度，華梵大學在編號 SIS-11 與 SIS-20 的傾斜觀測管內（圖 1-1），在已知滑動面深度上下共約 6 公尺處分別埋設了「多點式地中變位儀（SAA, Shape Acceleration Array）」。SAA 是以在傾斜觀測管內部裝設多支 IPI（In Place Inclinator）的方式，藉由個別的 IPI 之傾斜量與其裝設深度來計算出各深度之地層水平位移，其特性為記錄頻率高（每十分鐘一筆資料）、具連續性、量測變形量大、自動讀取紀錄等，可彌補傳統人工測量方式不足處（鄭清江與楊嘉瑜，2015）。除了自動記錄式的傾斜觀測管之外，華梵大學另有裝設了 29 支人工量測式傾斜觀測管（inclinometer），最深可量測到地下 70 公尺處的地層傾斜的情況（圖 1-2）。

二、坡地表面位移

為了監測大崙山順向坡的坡體變形行為，自 2016 年 5 月起在華梵大學校內外總共架設了 15 座的連續式（continuous）「全

球定位系統 (GPS, Global Positioning System)」。依照接收儀 (receiver) 所能夠接收的 GPS 衛星信號頻率之種類，15 個連續監測站中又分為 2 座雙頻 (dual-frequency, 即可接收 L1 (1575.42 Mhz) 及 L2 (1227.60 MHz) 兩種頻率之信號。HFAN 與 FTPL) 與 13 座單頻 (single-frequency, 僅能接收 L1 頻率。HF02–HF14) (圖 1-3、圖 1-4、圖 1-5。今年期中階段將其中 5 座單頻站替換成 RTK 雙頻站，見第三章說明)。2 座雙頻連續站因為接收 2 個 GPS 頻率，可以相互校正定位資料，故理論上雙頻站可以解算出較為精準的三度空間座標。因此，在解算其他 12 座的單頻連續站資料時，會分別以這 2 座雙頻站為參考站 (reference station, 即相對於該雙頻站之各站的位置)。對於單頻站的資料解算上，本計畫使用日本研發的 GPS 資料解算軟體「RTKLIB」(屬開源軟體 (open source) 中的「靜態定位 (static)」演算法 (Takasu, 2010)，使得由各個單頻站解算出的三度空間座標之精確度能夠幾乎等同雙頻站量測到的精確度。因此，不論是雙頻式或是單頻式的 GPS 連續站，兩者皆可以量測到精準的三度空間座標。

在記錄三度空間點位方面，2 座雙頻站與 12 座單頻站所設定的採樣率 (sampling rate, 或記錄頻率) 皆設定為 1 秒 (即 1 Hz)。

在如此高的記錄頻率下，坡體表面在極短時間內的變形情況都能夠被記錄下來。

本計畫將綜合 SAA 傾斜觀測管所記錄到滑動面位移、地下水位變化、累積降雨量變化等的時間序列資料（time series），以觀察大崙山滑動塊體在非降雨期間、長時降雨期間，以及強降雨期間的運動行為（圖 2-2），進而找出大崙山順向坡中的滑動塊體與地下水位、降雨量之間相互關係（數學經驗式）。

第二節 工作執行步驟

本計畫目標是要瞭解在降雨期間（包括強降雨以及長時降雨）所觸發的大崙山順向坡中滑動塊體的運動行為。因此，除了在無降雨（或低降雨量）時期做例行監測外，在降雨時期則根據華梵大學校園內外所有的監測儀器所得到之觀測資料與數據，進行以下執行步驟：

1. 以華梵大學現有之自動記錄式雨量計、地下水位計分別記錄降雨期間（強降雨以及長時降雨）的累積雨量以及地下水位之升降過程。
2. 以華梵大學現有自記式傾斜觀測儀（SAA）監測與記錄降雨期間（強降雨以及長時降雨）之可能的滑動面之位移情況。未裝設 SAA 之傾斜觀測管，則以人工測量的方式，量測降雨期前後（或期間內一至二次）之既存滑動面的位移變化，藉此推得降雨期間之滑動速度。

3. 解算既有之 GPS 連續測站所記錄降雨期間坡地表面的三維空間變形之時間序列。接著檢視初步解算成果，判斷是否需新增 GPS 測站（租用方式架設新站）以增加邊坡本體之監測密度。
4. 分析降雨期間的地表變形與地下滑動面位移速度，並藉此找出滑動塊體之變位行為與從降雨開始到地下水位上升至峰值期間的相互關係。
5. 分別記錄降雨開始到地下水位開始上升之時間（ T_1 ）、地下水位開始上升導致 GPS 記錄到地表開始加速位移之時間（ T_2 ）、地下水位開始上升導致滑動面開始加速位移之時間（ T_3 ）。
6. 綜合各項觀測參數：地下水變化（ dH ）、當地地質材料之滲透係數（ K ）、滑動面深度（ D_{sp} ）、滑動面之滑動速度（ R_{sp} ）、地表位移速度（ R_g ）以及三項時間（ T_1 、 T_2 、 T_3 ），推導出合理的經驗公式，以瞭解在某累積雨量情況下，可能的滑動塊體之位移潛勢。

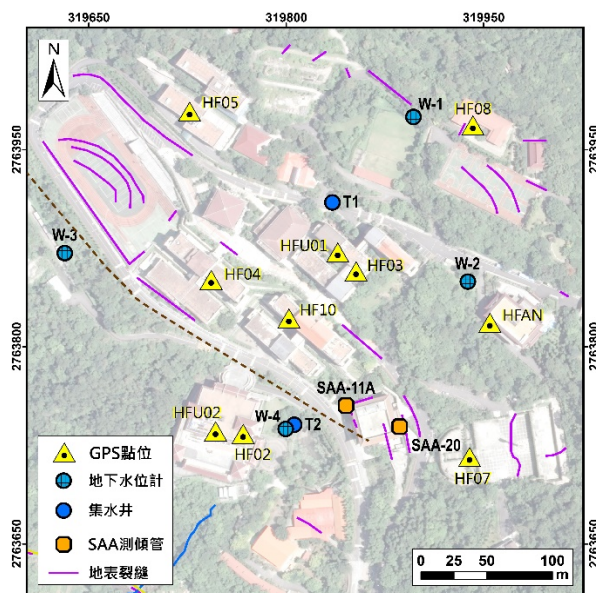


圖 1-1 華梵大學校內監測儀器點位

資料來源：本計畫

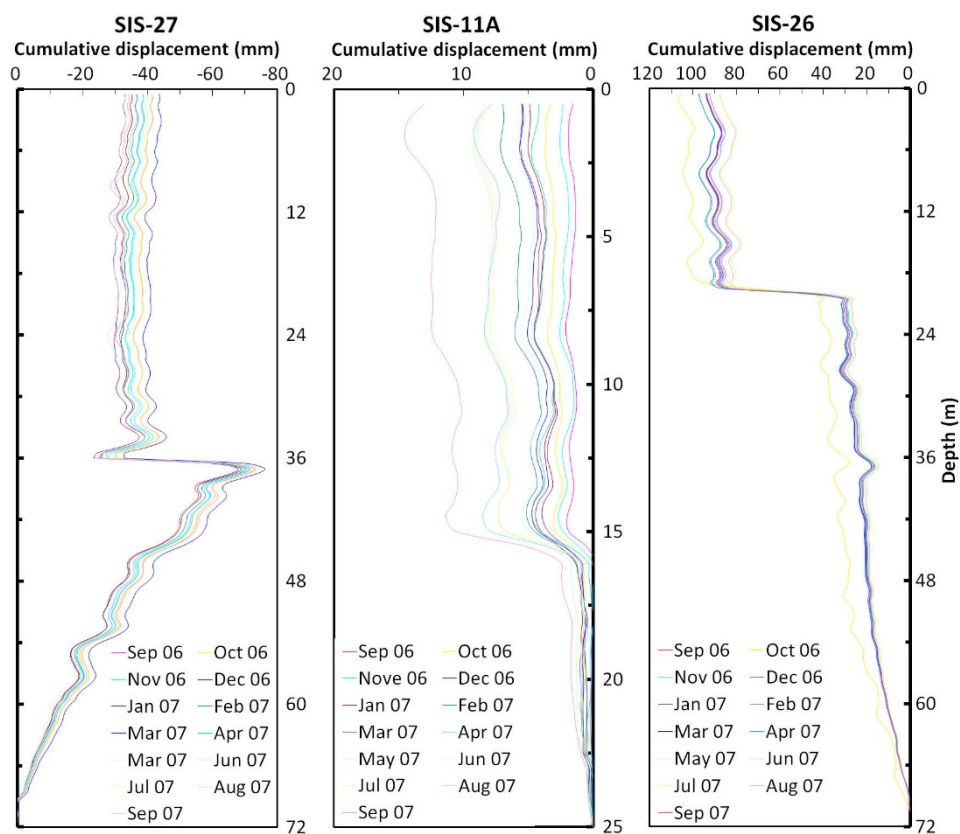


圖 1-2 人工量測式傾斜觀測管的位移情況

資料來源：本計畫

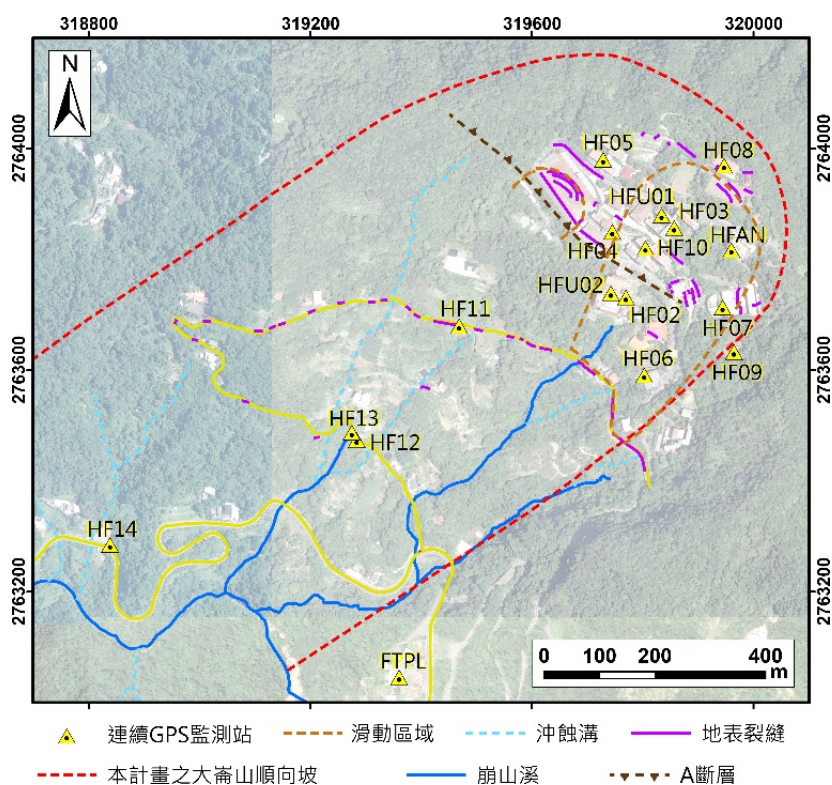


圖 1-3 大崙山地區 GPS 連續站點位

資料來源：本計畫



圖 1-4 GPS 連續監測站（單頻 HF02 之天線部件）

資料來源：本計畫



圖 1-5 GPS 連續監測站（雙頻 HFAN 之天線部件）

資料來源：本計畫

第三節 工作執行進度

本計畫預計於今年度完成各項工作項目，並分別將各個重要工作項目及預定進度內容，以累計百分比的型式列表如下：

109 年度工作項目與進度：

重要工作項目	工作比重 %	預 定 度	109 年度				備 註
			2-2 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月	
記錄降雨量、地下水位變化與滑動面位移量	15	工 作 或 內 容	定期雨量、地下水位、滑動面位移資料收集與彙整	定期雨量、地下水位、滑動面位移資料收集與彙整	定期雨量、地下水位、滑動面位移資料收集與彙整	定期雨量、地下水位、滑動面位移資料收集與彙整	遇強降雨或地震事件時，即記錄與彙整事件後上述各項資料。
		累 計 百 分 比	25	50	75	100	
		甘 特 圖					
GPS 連續測站設備	20	工 作 或 內 容	設備維護與資料收集	設備維護與資料收集	設備維護與資料收集	設備維護與資料收集	

維護與資料收集		累計百分比	25	50	75	100	
		甘特圖					
GPS 資料解算	50	工作量或內容	定期彙整解算 GPS 定位資料	定期彙整解算 GPS 定位資料	定期彙整解算 GPS 定位資料	定期彙整解算 GPS 定位資料	遇強降雨或地震事件時，即解算事件後之 GPS 資料。
		累計百分比	25	50	75	100	
		甘特圖					
各期報告書撰寫	15	工作量或內容	撰寫工作計畫執行書	彙整各項資料圖表與撰寫期中報告	彙整各項資料圖表與撰寫期中報告	彙整各項資料圖表與撰寫期末報告	
		累計百分比	25	50	75	100	
		甘特圖					

第二章 大崙山坡地現況

第一節 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 580 公尺（圖 2-1）；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

(一)地層分佈

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 2-2；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，惟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）。

Varnes(1978)對於山崩的研究，將山崩的類型分：落石(rockfall)、翻覆(toppling)、滑動(slide)和土石流(debris flow)等四種型態。

對照 Varnes 的分類與在大崙山區的現場調查以及岩芯資料，大崙山後山的木山層砂頁岩互層岩盤露頭處可以發現有局部小規模落石型崩塌。而根據大崙山前山部分（即順向坡區）的岩芯資料，砂頁岩互層中發育的平行層理之剪裂帶構造，表示有層間滑動發生，也就是平面型滑動（translational slide）的山崩型態。至於岩盤之上淺層的崩積層，則會發生因為降雨的侵蝕沖刷，導致淺層的弧型滑動；而這些崩塌的材料，如表土、岩屑、岩塊等，則會被沖刷進入沖蝕溝中產生小規模的土石流繼續往下邊坡處輸送。

（二）地質構造

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）。該斷層的向東南方傾斜約 60 度，切穿大崙山順向坡內岩層（圖 2-3）。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 2-3 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 1-3；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 2-4 所示。



圖 2-1 大崙山地區立體地形圖

資料來源：本計畫

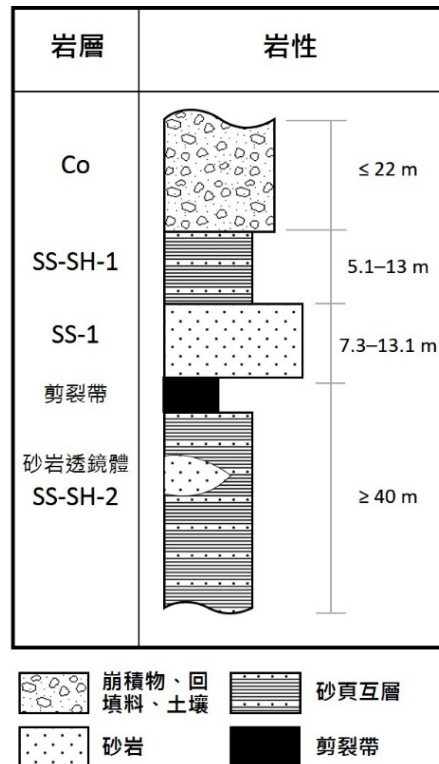


圖 2-2 華梵大學校區地層層序與岩性

資料來源：黃鑑水與鄭清江，2004

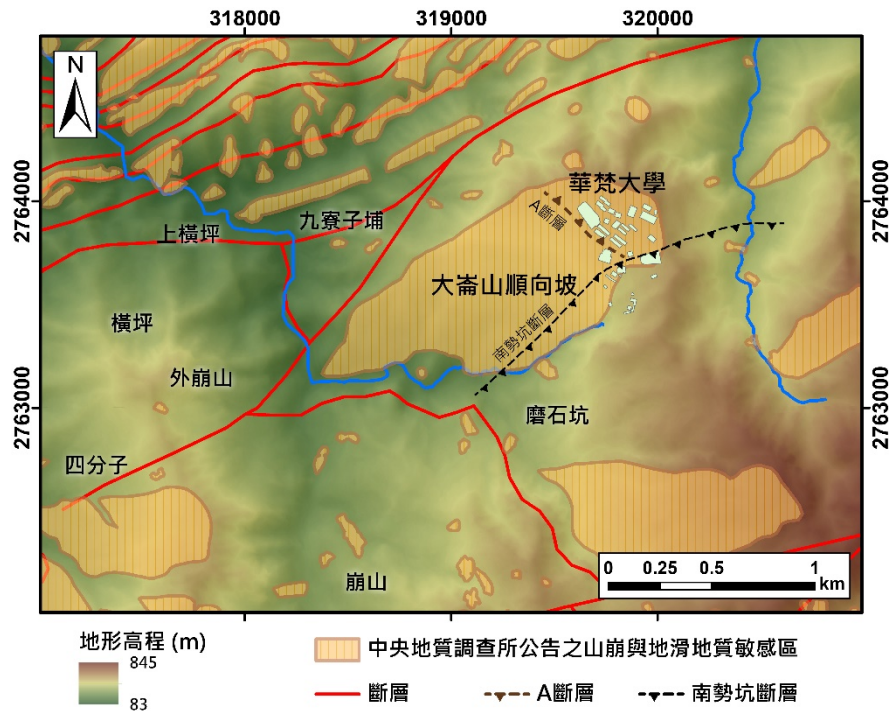


圖 2-3 新北市石碇區大崙山周邊地質敏感區位置圖

資料來源：中央地質調查所與本計畫



圖 2-4 華梵大學 DH-1(a)與 W-3(b) 岩芯中 A 斷層深度

資料來源：鄭清江等，2008

第二節 地下水分佈

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 2-5）。

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 2-6 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 至 30 公尺之間，即地層中最接近地表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，會持續往下入滲至土岩界面處，之後即沿著界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較大於其他的

地下水位觀測井的現象。如此之在接近坡頂或山脊的大幅升降之地下水位面，在國內外之文獻中尚未提及類似之案例，因為地形、地質與水文等各條件應該必須同時成立時才可能會造成如此的現象。

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，故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的原因。

根據 Jeng and Su (2016) 所發表的結果，在經由地電阻探測之後，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 2-7）。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 2-8）。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水位觀測井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。

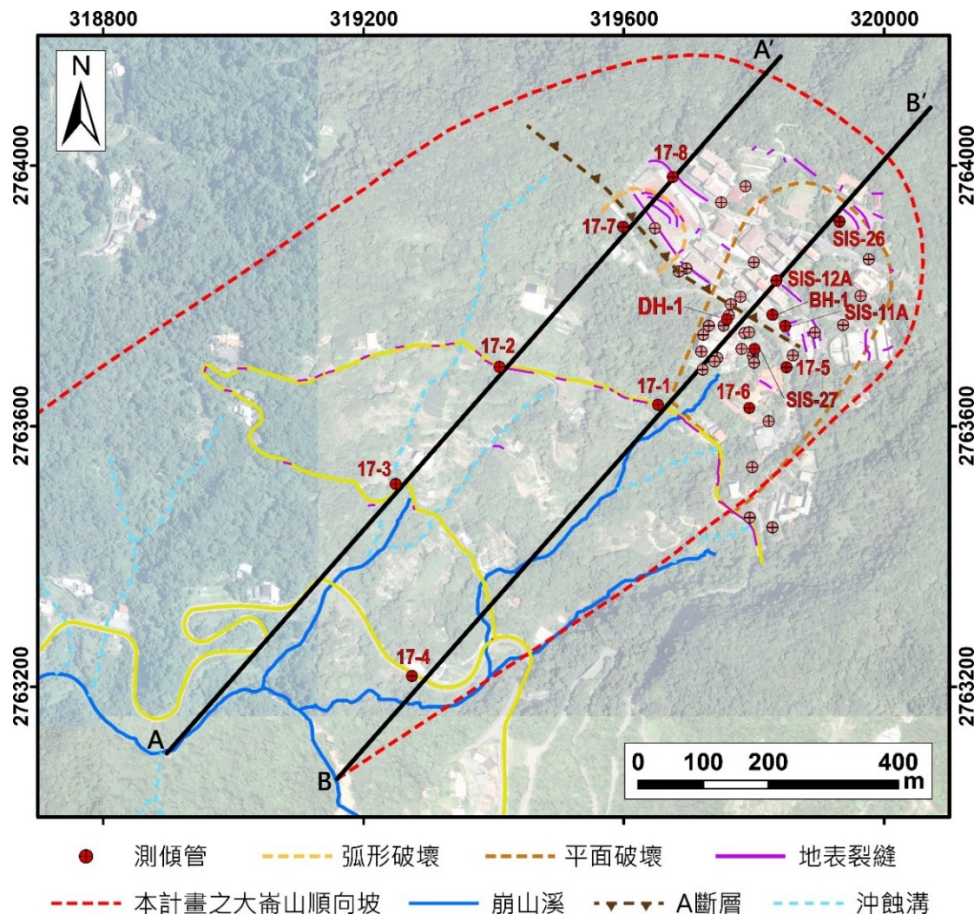


圖 2-5 現有傾斜觀測管與鑽孔分佈圖

資料來源：地質鑽探報告，2017；謝宗燁，2009

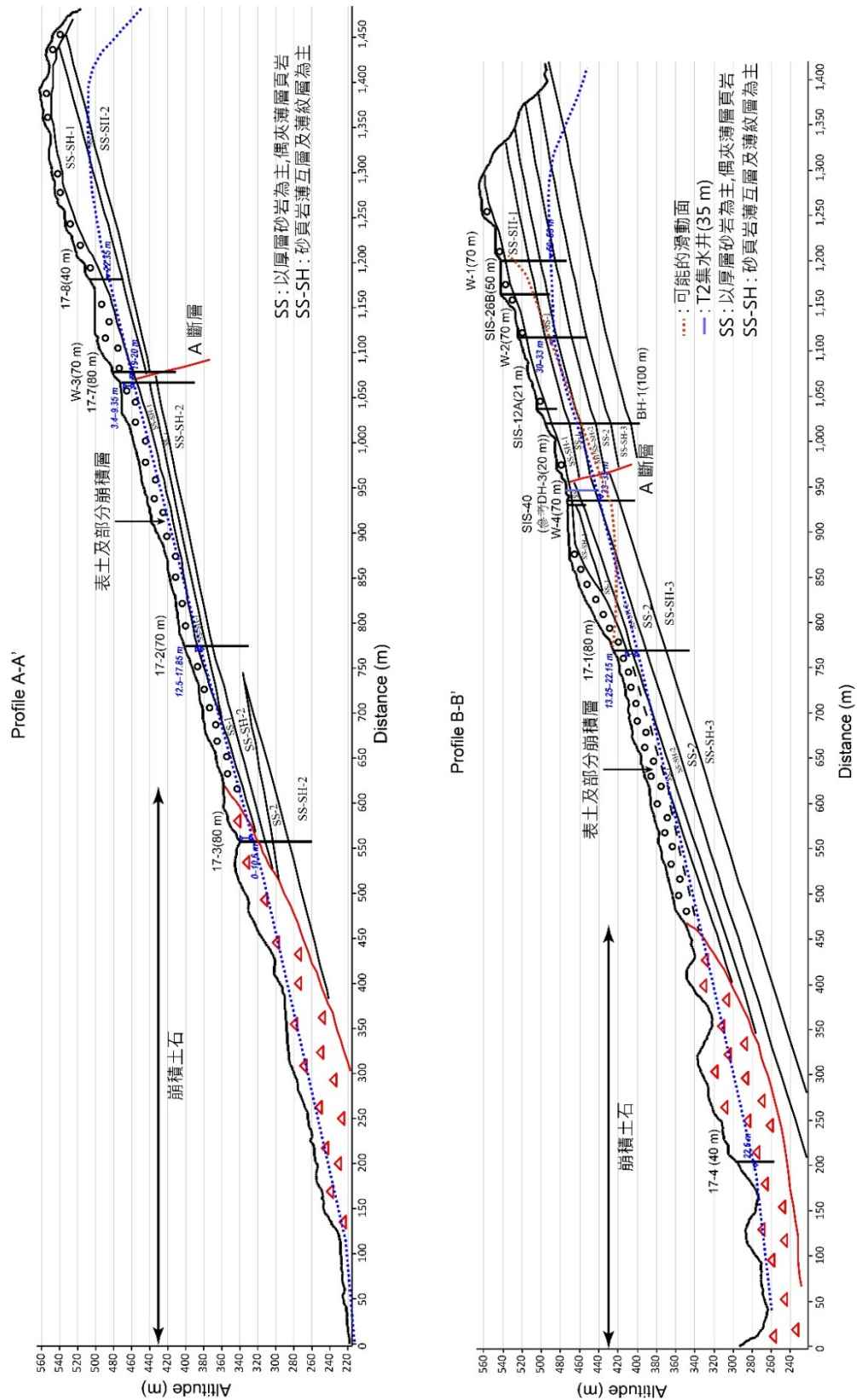


圖 2-6 大崙山區地下構造與地下水位分佈

資料來源：本計畫

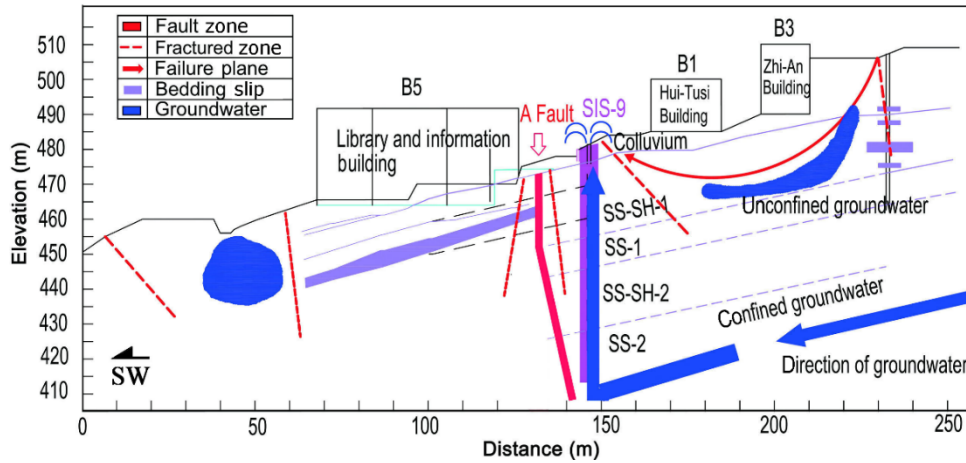


圖 2-7 華梵大學校園內地下水體之分佈

資料來源：Jeng and Su, 2016

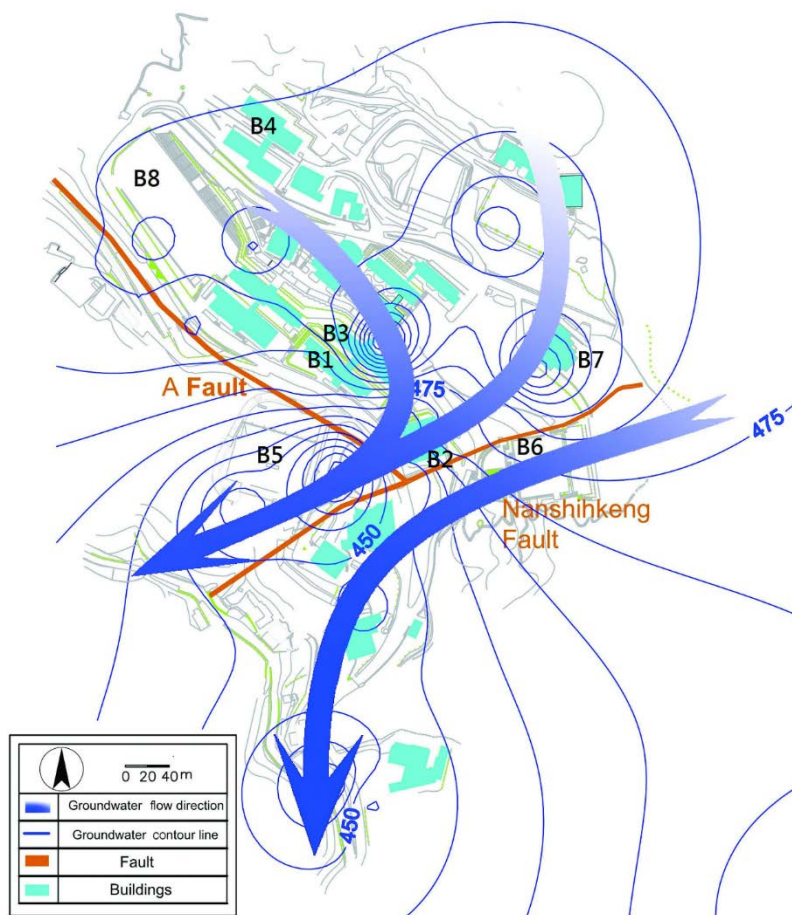


圖 2-8 華梵大學校園內地下水流向

資料來源：Jeng and Su, 2016

第三節 滑動區域

華梵大學自 1996 年起至 2017 年止，在校區內外共有 50 多組岩芯資料與人工量測之傾斜觀測管（圖 2-5），前者用以瞭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 2-5）。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 2-9）。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 2-10）。

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 2-11）；另再配合 17-7 與 17-8 兩孔岩芯判釋所得（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頭部張裂縫（圖 2-12），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。

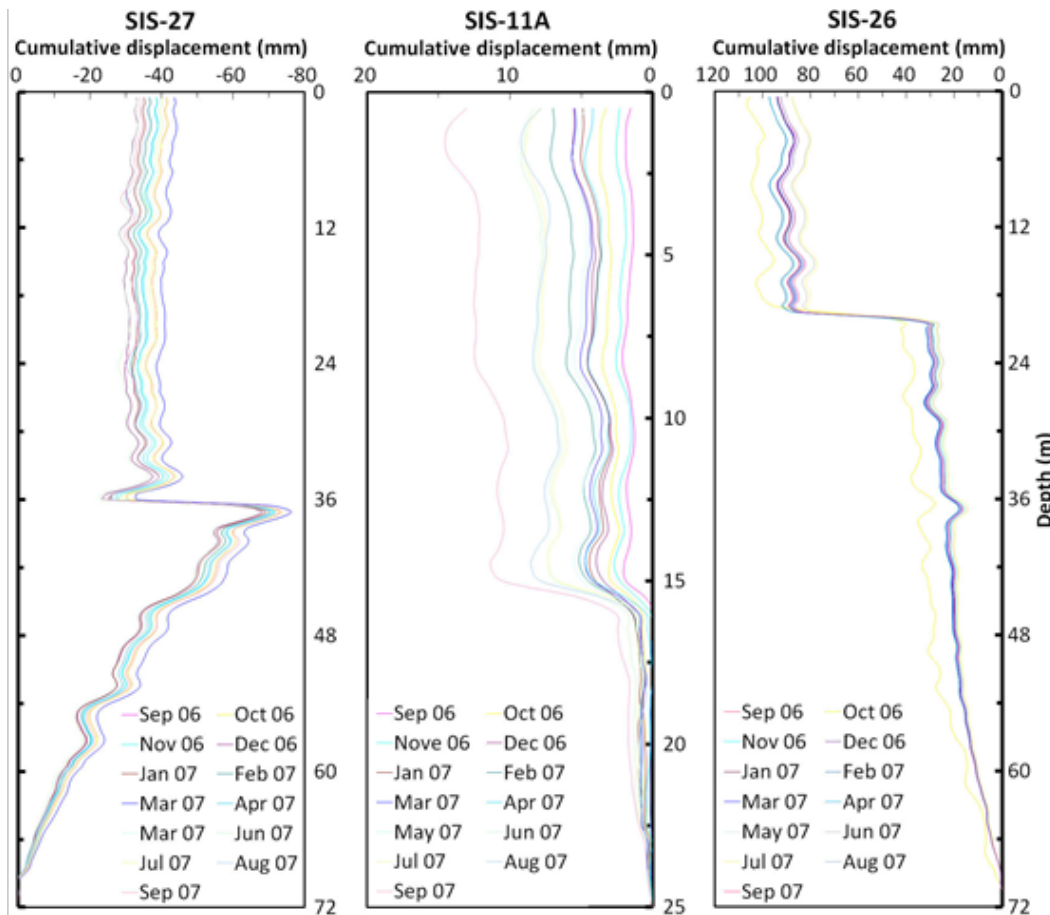


圖 2-9 人工量測式傾斜觀測管的位移情況

資料來源：Tseng et al., 2017

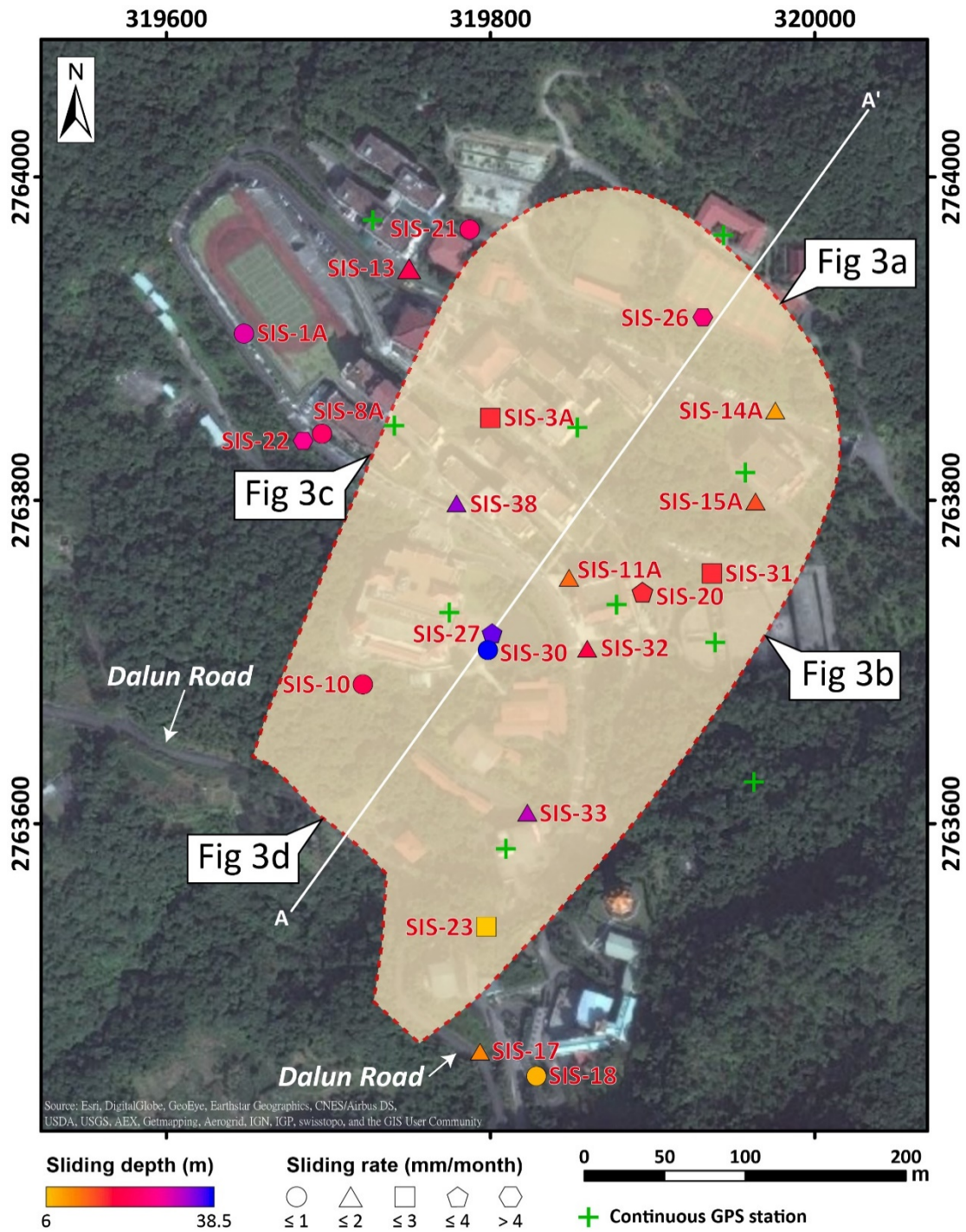


圖 2-10 華梵大學校園東南部份之滑動塊體

資料來源：Tseng et al., 2017

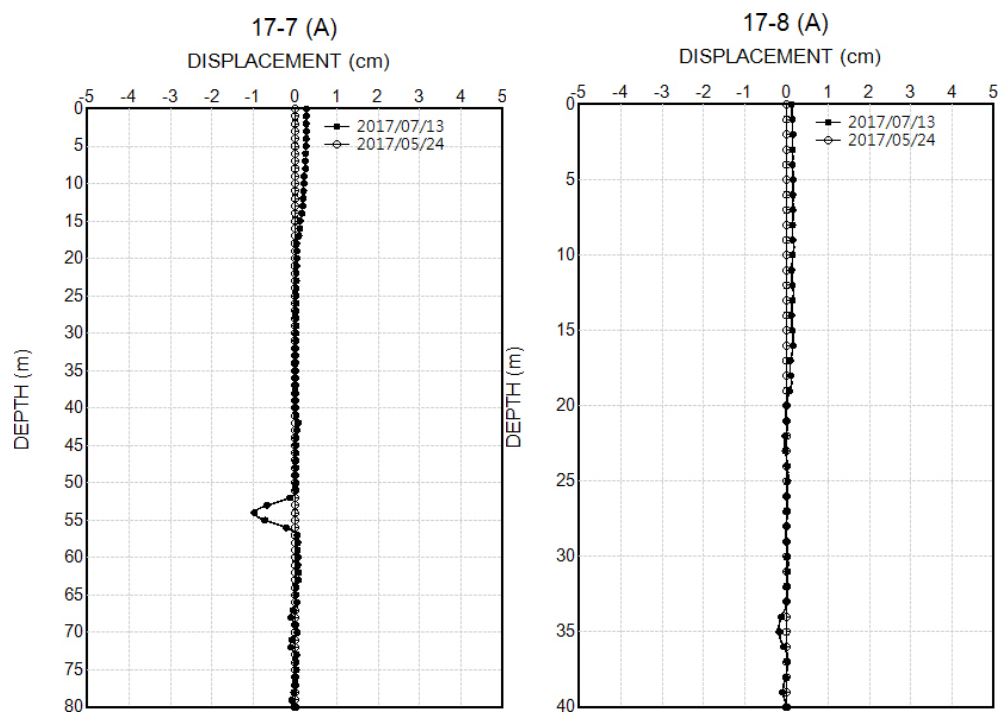


圖 2-11 編號 17-7 與 17-8 傾斜觀測管所量測到之變位

資料來源：地質鑽探報告，2017



圖 2-12 華梵大學校園西部可能的滑動塊體之地表破裂

資料來源：本計畫

第三章 GPS 監測結果

第一節 觀測資料解算

本計畫之 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，並具有圖形化界面（Graphical User Interface, GUI），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，另有即時解算定位功能，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座標資訊。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、解算步驟說明

本計畫選取大崙山坡地中的連續站（FTPL）做為計算大崙山之雙頻 GPS 連續站（HFAN）座標之約制站（或稱參考站），因該站位於大崙山地質敏感區（即順向坡）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（KMNM），選擇該測站資料主要是依據以下兩個標準：（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度。因此，在選取測站時必須避免觀測記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，會先進行約制站座標查核的步驟。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 至 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 1013.25 mbar，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 ITRF2014 座標系下之座標及速度場（Tsai et al., 2015），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 ITRF2014 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。

二、解算時間

本計畫所涉及之連續 GPS 資料解算分為「即時解算定位」與「後處理」兩種。在即時解算定位方面，本計畫所使用之解算軟體 RTKLIB 內建 RTK（Real Time Kinematic，即時動態定位技術）解算法，為利用 GPS 衛星即達到即時精準定位的一種技術。解算方式為同時在參考站（或稱基準站（base））與移動站（rover，或稱待測站）接收衛星資料，透過通訊設備（如網際網路或無線電），將參考站的觀測資料傳送給移動站，移動站再透過差分計算，可以在移動時即時獲得精確的定位坐標。然而，RTK 技術採用 GPS 衛星所發射之廣播星曆，其公佈之衛星軌道參數並不如精密星曆（發佈時間為測量當天的一星期後）精確，因此水平方向的定位精度目前最高為 1 公分。

為了能夠提升 GPS 定位精度，本計畫採用精密星曆作為資料解算之參數，定位精度即可提高到最佳的 5 mm。在資料解算所需時間方面，單日的觀測資料（記錄頻率為 1 Hz）以每日解（daily solution，即一天一個

定位點座標平均值) 做解算所需的時間約為五分鐘。然而，IGS 所編修與發佈之精密星曆參數需要一個星期，因此高精度的 GPS 定位結果無法如 RTK 技術可即時獲得，且必須經由人為後處理後，最快一星期後始可得到。

第二節 大崙山坡地運動趨勢

大崙山坡地上設置了 15 座高精密 GPS 連續監測站，其中包括 13 座單頻式 (single-frequency，編號為 HF02 至 HF10。HF01 已撤站，另增設 HF10) 連續監測站，以及 2 座雙頻式 (dual-frequency，HFAN 與 FTPL) 連續監測站 (圖 3-1)。本計畫蒐集了 2016 年 4 月至 2020 年 10 月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 3-2、圖 3-3 與圖 3-4 所示 (紅色資料為雙頻，藍色資料為單頻)。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運動所引發之地表位移。然而在 2018 年 3 月至 6 月期間，因為雙頻式連續監測站 FTPL 發生故障，導致無法記錄資料，故該段時間的資料不予展示。在解算時，所有單頻站皆已經扣除 FTPL 本身之位移量，以獲得純粹之邊坡運動所引發之地表位移。

在三方向分量的位移時間序列中，將解算出的每日解資料點做迴歸計算後可得到趨勢線（即紅色實線，圖 3-2~圖 3-4），即代表每一座單頻 GPS 連續監測站所量測到的長期地表位移趨勢。在 13 個點位中，HF05 的資料在 2018 年 9 月以後因離散程度過大而不予列出，其原因可能為天線盤故障（如白色塑膠保護殼破裂導致雨水或濕氣進入）；另 HF09 的位移時間序列顯示在連續監測的三年間皆呈現穩定無位移的情況。而由圖 3-1 的 GPS 連續監測站的位置分佈可知，HF09 點位位於順向坡的範圍之外的砂岩岩盤之上，顯示在順向坡以外的區域確實為穩定的情形。此外，雙頻 FTPL 點位同樣位於順向坡以外的砂岩岩盤之上，故在位移時間序列上也是穩定無變動的狀態。而在順向坡的範圍內，位移時間序列也呈穩定的單頻 HF08 點位是位於接近稜線且為滑動塊體之冠部以外。而在順向坡範圍內的其他單頻 GPS 點位，在三年間所記錄到的位移時間序列皆呈現向西南方向下滑的趨勢（表 3-1）。以大崙山坡地區塊來說，位於上邊坡的華梵大學校園呈現緩慢地位移，即為潛移（creeping）的型態，此現象應該與校園內較深的常時地下水位有直接的關係。但其中的 HF06 點位有較大的位移量（即向西沉陷），此情形可能與 HF06 點位南側與西側的淺層滑動有關（圖 3-5）。而在中下邊坡的 HF11 和 HF12 兩點位，其所記錄到的坡面位移量則更大。根據現地調查後，發現皆為既有的路面裂縫擴大所導致，其破壞機制亦應為淺層滑動，尤其在強降雨發生過後尤為明顯。值得

注意的是，位於大崙山順向坡趾部的 HF14 點位，其位移時間序列顯示該處坡地呈現穩定無位移的情況。此處為私人用地與公路之回填區，範圍內地表並無發現有裂縫發生，故研判此區塊並未有坡體運動之情形。本計畫將各 GPS 連續監測站在大崙山順向坡中的區位與所量測到的位移情形，以及點位所在的地質條件，彙整說明於表 3-1 中。

另外，將圖 3-2 與圖 3-2 之所有測站之水平方向分量時間序列取斜率，即可得到水平方向的位移速度，再將其繪製於平面度圖上即可得到大崙山區之 GPS 連續監測站所在地的位移速度場（圖 3-6），其結果於第四章進行討論。

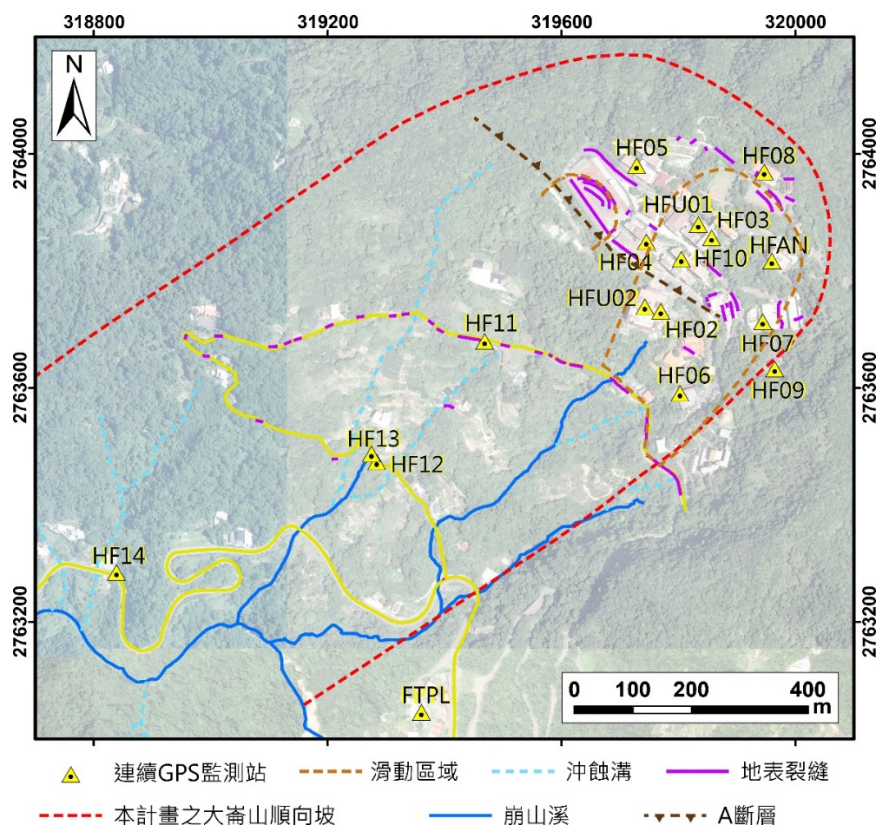


圖 3-1 大崙山坡地高精密 GPS 連續監測站分佈

資料來源：本計畫

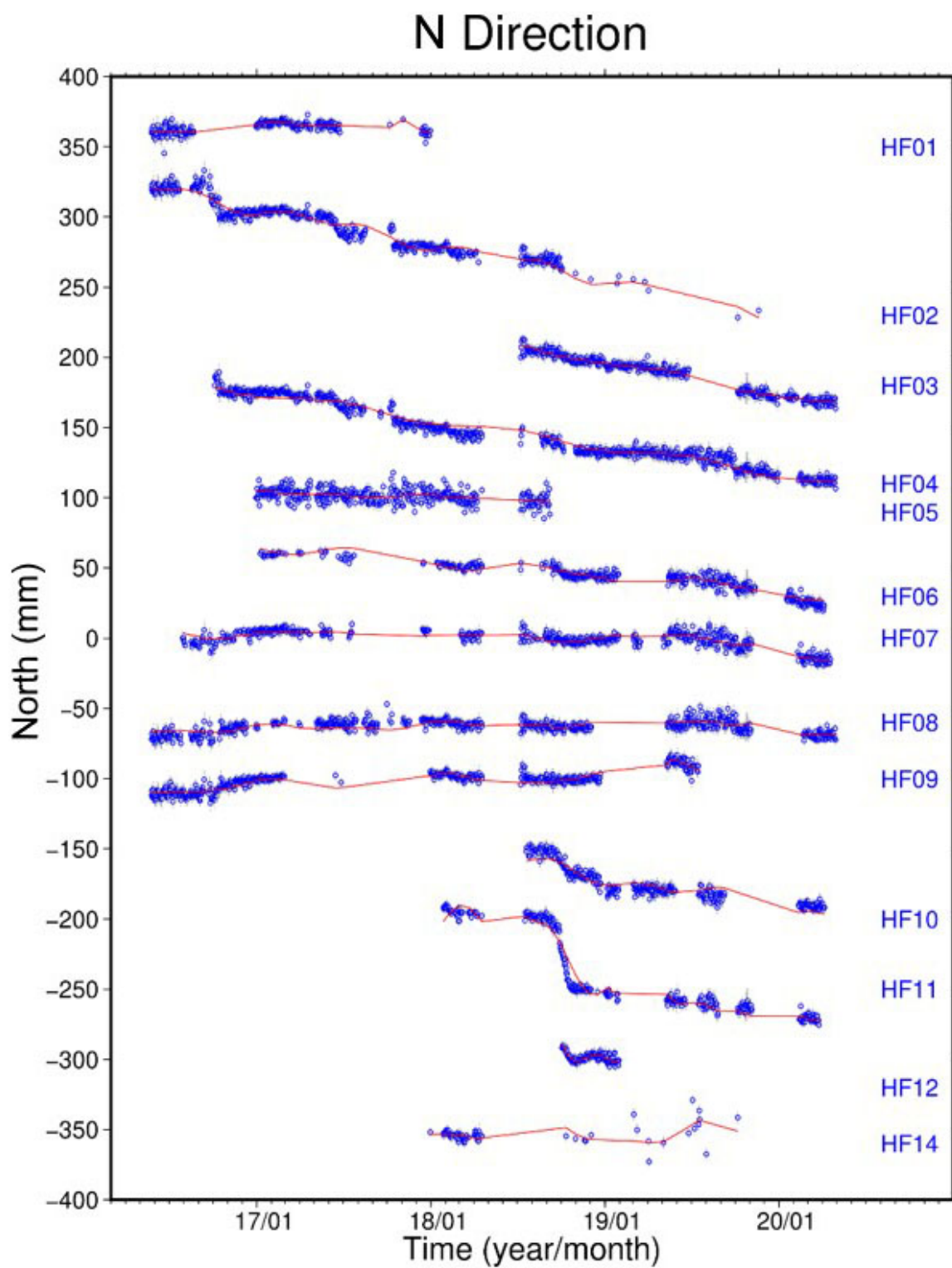


圖 3-2 大崙山坡地之位移時間序列（南北向）

資料來源：本計畫

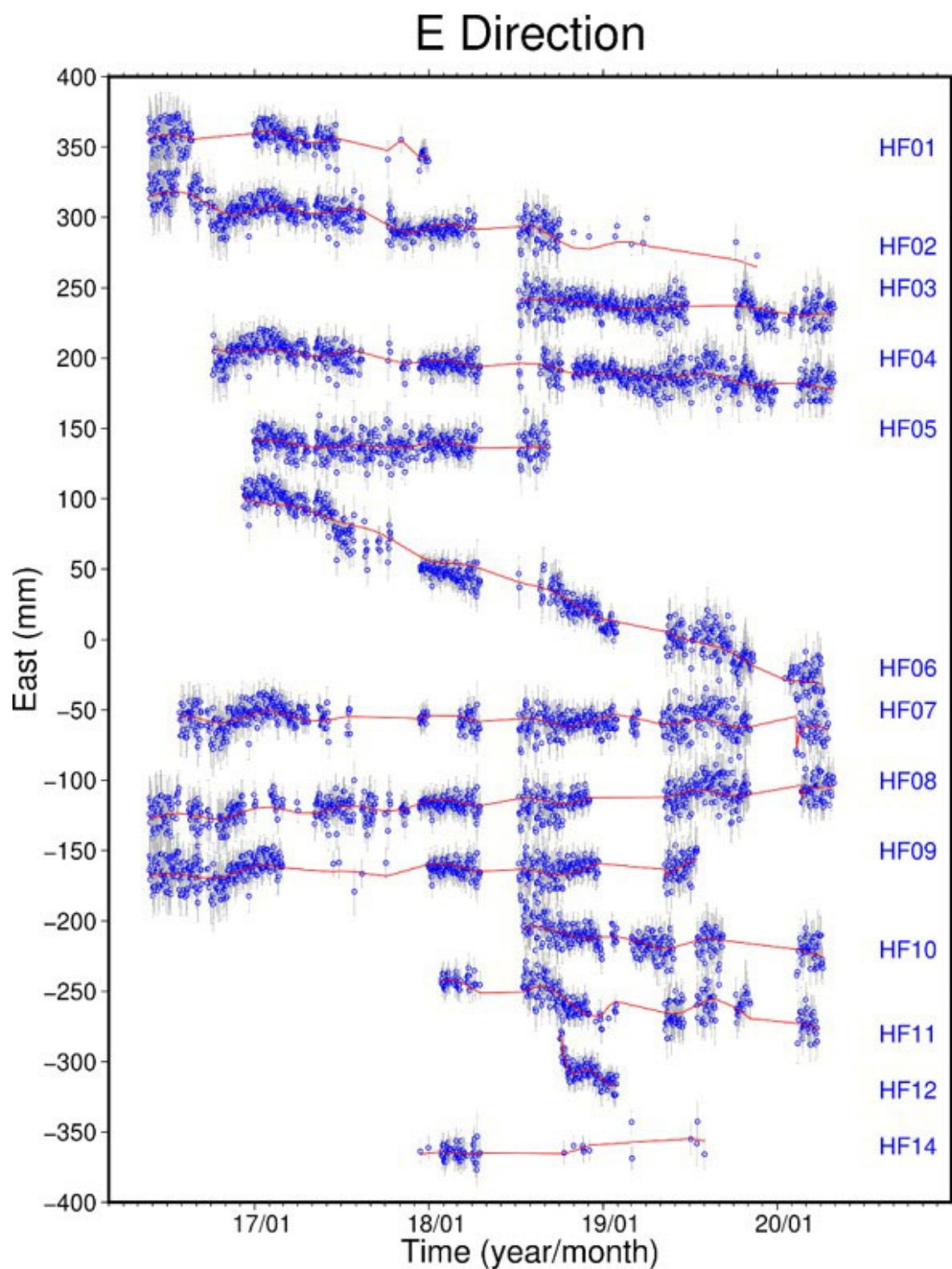


圖 3-3 大崙山坡地之位移時間序列（東西向）

資料來源：本計畫

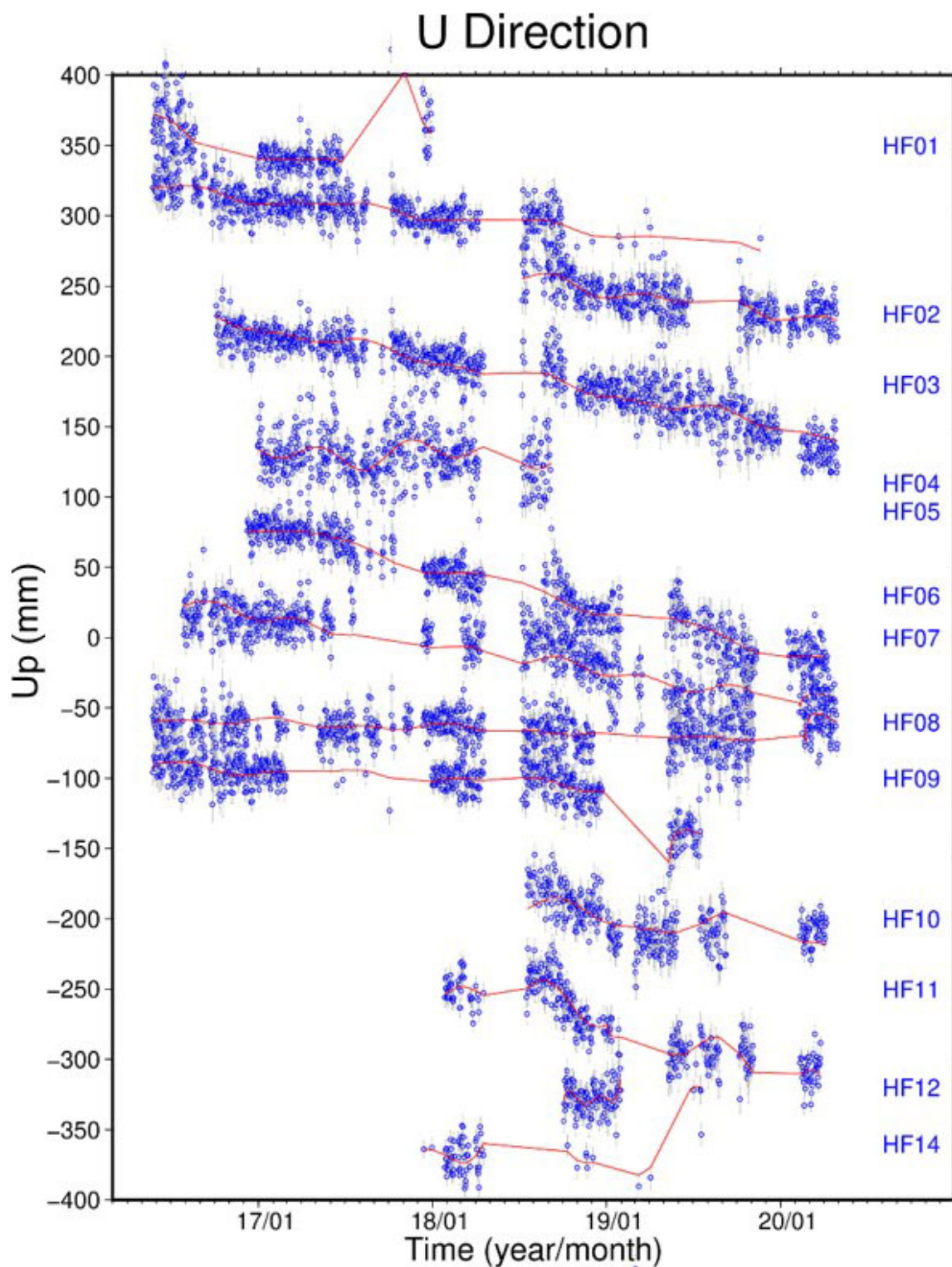


圖 3-4 大崙山坡地之位移時間序列（垂直向）

資料來源：本計畫



圖 3-5 HF06 點位西側與南側之淺層破壞

資料來源：本計畫

表 3-1 大崙山坡地中各 GPS 點位之位移特性

點位編號	坡面中區位	地質條件	位移趨勢	備註
HF08	順向坡冠部	滑動塊體之冠部以外、淺層回填層	穩定無位移	
HFAN	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	
HFU2	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	RTK 雙頻 GPS。2019 年 9 月新設
HF03	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	2018 年 5 月以前資料離散程度過大
HF07	順向坡上部	滑動塊體之邊界	西南向下滑	2020 年 5 月替換為 RTK 雙頻
HF10	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	2020 年 5 月替換為 RTK 雙頻 GPS
HF01	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	2017 年 6 月撤站
HF04	順向坡上部	滑動塊體之邊界	西南向下滑	2020 年 5 月替換為 RTK 雙頻 GPS
HF09	順向坡以外	斜交坡、岩盤	穩定無位移	
HFU1	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	RTK 雙頻 GPS。2019 年 9 月新設
HF02	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	2018 年 10 月後儀器故障
HF06	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	2020 年 7 月替換為 RTK 雙頻 GPS
HF11	順向坡中部	淺層回填層	西南向下滑	
HF13	順向坡中部	淺層回填層	尚無法判定	2018 年 7 月新設
HF12	順向坡中部	淺層崩積層	西南向下滑	2018 年 10 月淺層滑動
FTPL	順向坡以外	斜交坡、岩盤	穩定無位移	2018 年 3 月至 6 月間故障
HF14	順向坡趾部	淺層回填層	穩定無位移	

資料來源：本計畫

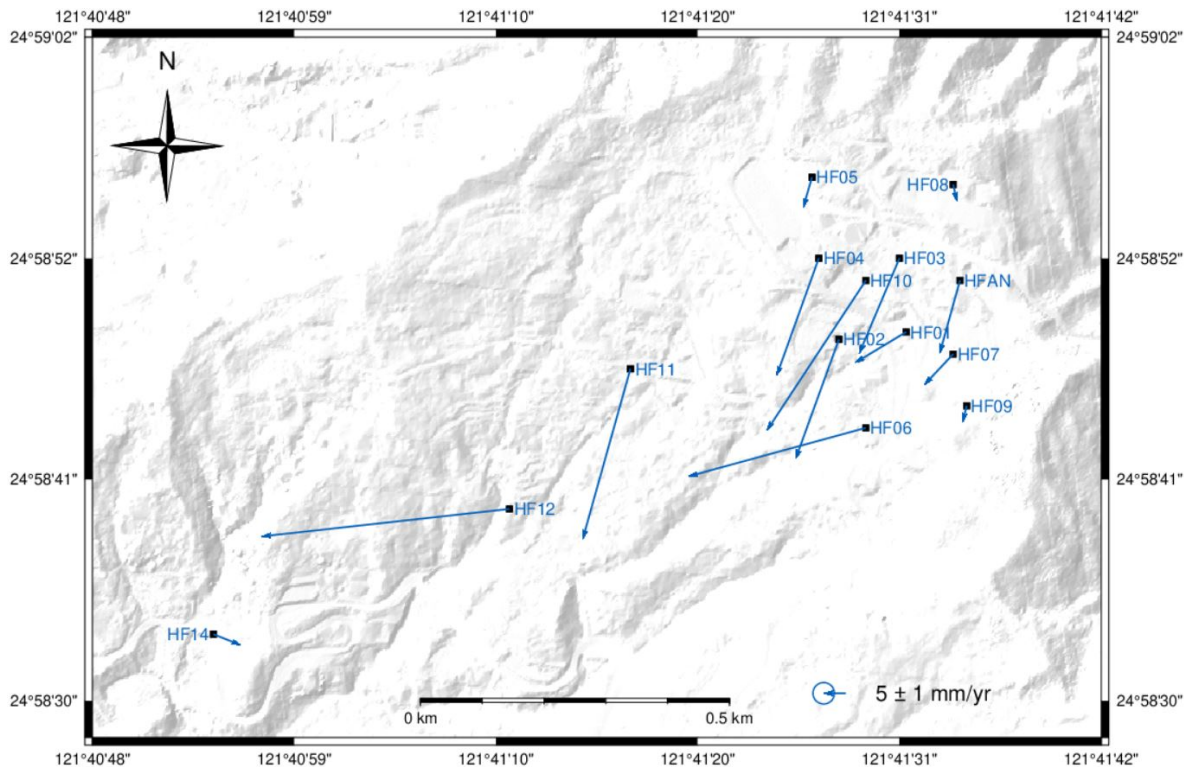


圖 3-6 大崙山地區 GPS 地表位移速度場

資料來源：本計畫

第三節 即時動態 GPS 監測結果

為了能夠即時呈現 GPS 的地表位移監測結果，在華梵大學校內除了既有的兩座具有 RTK 技術的雙頻 GPS 連續監測系統（架設於 HF02 與 HF03 旁，做為比較用。在圖 3-2、圖 3-3 與圖 3-4 中顯示為「HFU1」與「HFU2」），本計畫在本年度的期中階段將校園內的五座單頻 GPS 連續站，更換為與前述相同的 RTK 雙頻 GPS 連續站（即 HF04、HF05、HF06、HF07 與 HF10），記錄頻率同為 1 Hz。本 RTK 雙頻 GPS 接收儀中的核心晶片，內建有 RTK 解算技術，能即時解算所接收到的 GPS 衛星定位訊號（此階段需要納入 GPS 衛星發射之廣播星曆參數），並同時與所給定之

鄰近雙頻基準站（本計畫採用滑動區外的 FTPL 雙頻站）進行差分校正，即可得到精度在 1 公分以內的即時定位結果。待測站的 GPS 接收儀將已經由 RTK 技術解算出的三維座標資訊，以 4G 網路訊號的方式回傳至遠端伺服器中，再與基準站的傳來的定位資訊做差分運算，最後再將解算成果呈現於專屬網頁中（<http://140.121.130.58/HFU.aspx>）。其中呈現各種不同精度的解算成果，當衛星數充足、透空率良好，以及基準站與待測站的網路訊號穩定時，解算出的位移時間序列會呈現為綠色，即正常的 fix 解（圖 3-7）；若出現 GPS 信號或網路斷訊的狀況時，則無法進行即時解算，解算結果則呈現紅色。表 3-2 為說明不同顏色的解算結果之意義與可能的問題。

此外，在長期時間序列的解算結果方面，此兩座 RTK 雙頻 GPS 連續站由去年之 2019 年 9 月（圖 3-2、圖 3-3 與圖 3-4 中的「HFU1」與「HFU2」）起開始運作記錄坡地位移情形。由解算的結果得知，除了記錄到同樣的位移情形（HF02 站之接收移故障）外，即向西南方向潛移，該 RTK 雙頻 GPS 之誤差（灰色垂直線段，為正負 1 個標準差）與離散程度皆比在其旁的單頻 HF02 與 HF03 要小。因此，根據這樣的解算，本計畫團隊（含 RTK 雙頻 GPS 儀之研發團隊）所採用的這型 RTK 雙頻 GPS 有更高的精密度與更小的離散程度，甚至更優於 HFAN 與 FTPL 兩舊型雙頻連續站。這即為本計畫將滑動範圍的單頻 GPS 連續替換為此 RTK 雙頻 GPS 的原因。

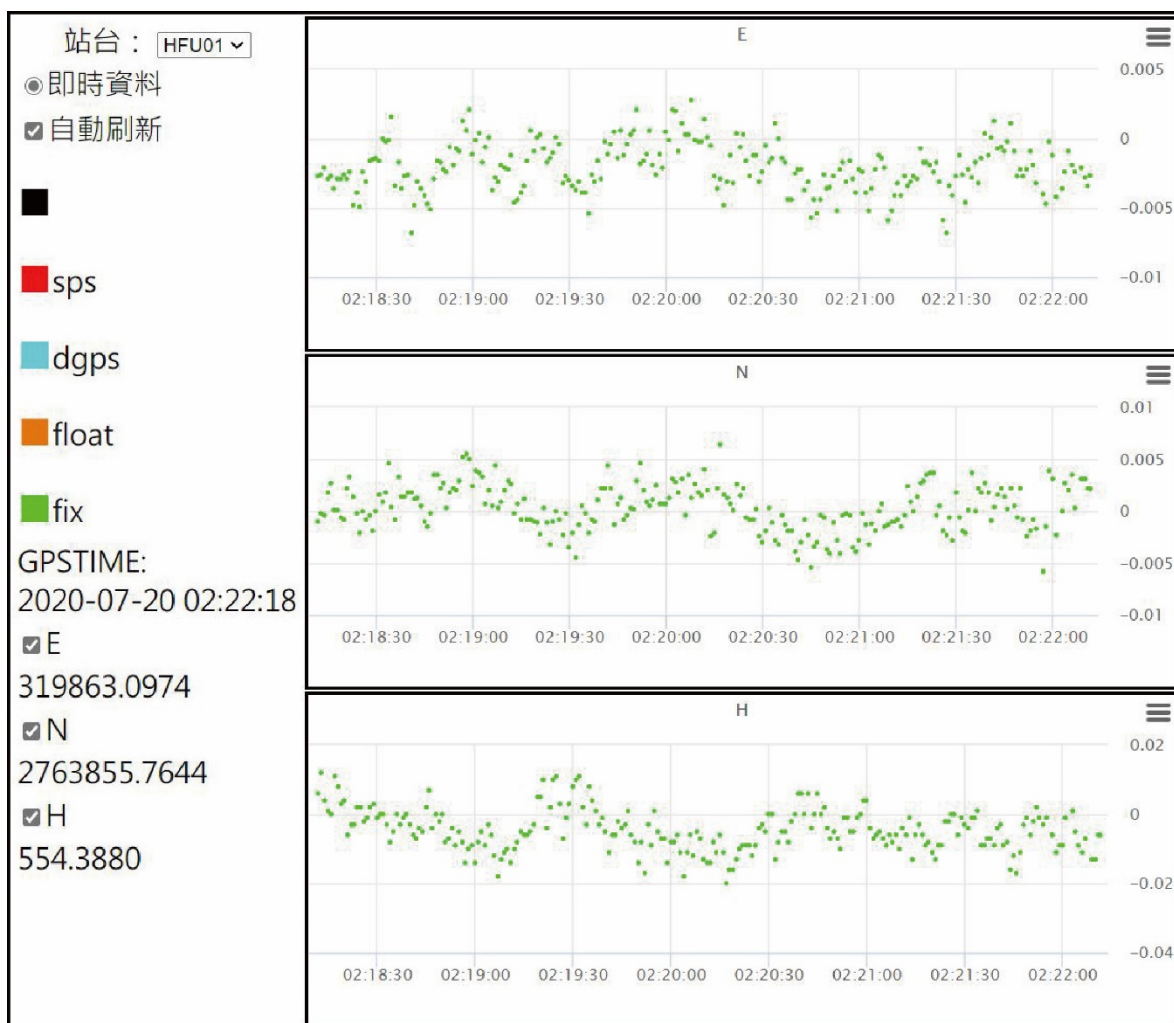


圖 3-7 即時動態 GPS 監測結果—fix 解

資料來源：本計畫

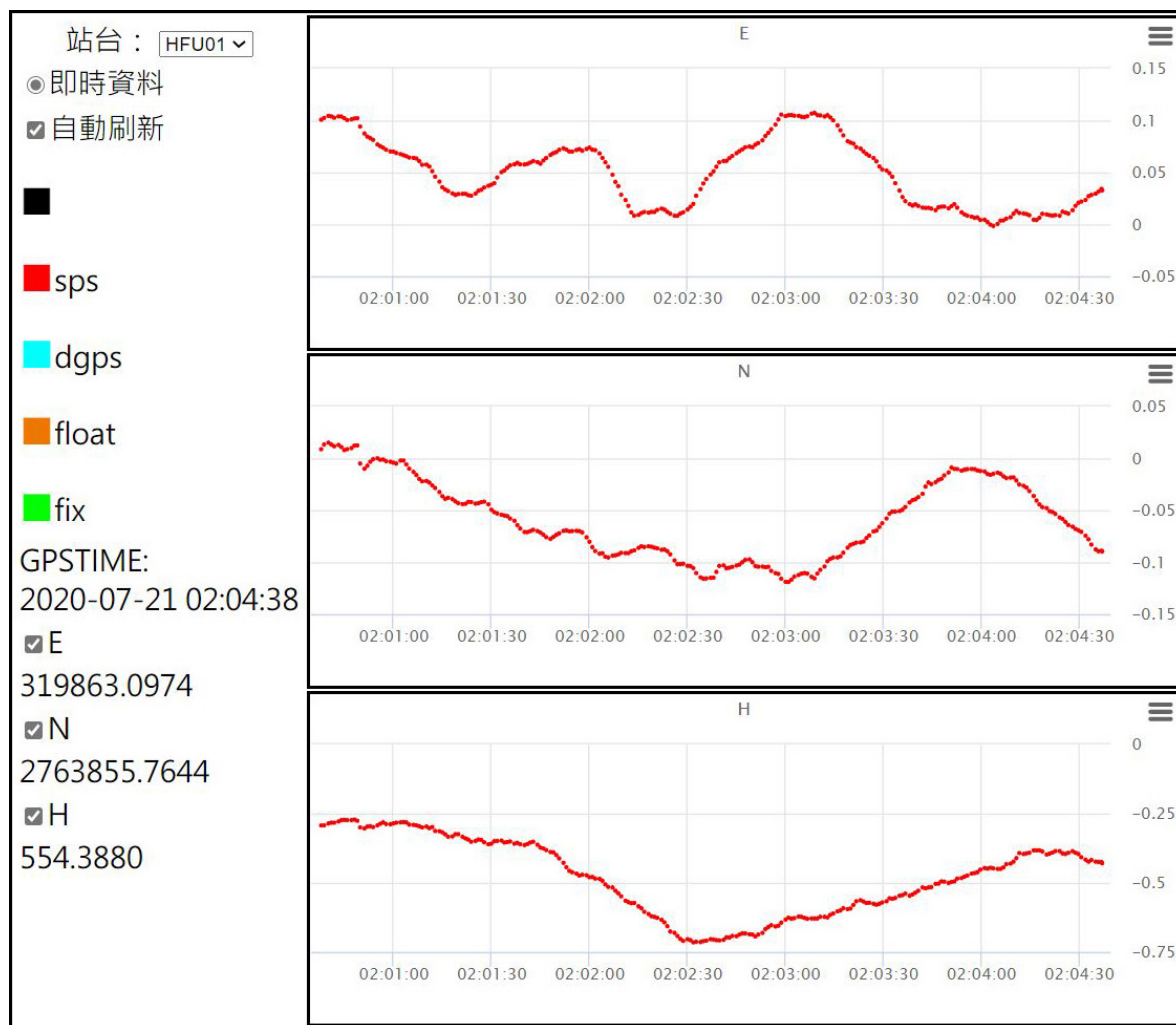


圖 3-8 即時動態 GPS 監測結果—sps 解

資料來源：本計畫

表 3-2 RTK 雙頻 GPS 之各種解算結果

解算結果	全名	意義	解釋
fix (綠色)	-	靜態定位狀態	基準站可透過無線電或 4G 網路傳送穩定有效的 RTCM 差分數據，以達到固定解
float (橘色)	-	浮動狀態	移動站與基準站之間的共用衛星數不足、共用衛星訊號不穩定，或接收到的 RTCM 差分數據不穩定，導致移動站的解算結果浮動不穩定，無法進入高精度定位狀態
dgps (水藍色)	differential GPS	差分定位	非即時定位，而是以精密星曆參數解算之結果
sps (紅色)	standard positioning service	標準定位服務	一般商業使用之解算結果，精度最佳僅達 10 公分

資料來源：本計畫

第四章 討論

第一節 位移特性分類

根據大崙山坡地上之 GPS 連續站之時間序列成果（圖 3-2、圖 3-3 及圖 3-4），可將其位移趨勢分為三類：第一類為在短時間內出現明顯位移，以紅色表示；第二類為無明顯位移，以藍色表示；第三類為記錄時間較短，無法判斷是否有明顯位移事件，以綠色表示，以下將依序討論。

一、第一類：事件性位移

第一類的測站有 HF02、HF04、HF06、HF11 和 HF12，這些測站除了有短時間內較大的西南方向位移之外，也有約往西南方向運動的長期趨勢。測站 HF02 的長期運動趨勢在水平方向上以 8.9 mm/yr 的速度向南運動、垂直方向上則以 8.2 mm/yr 沉陷，且在觀測期間中有記錄到三次的明顯位移，分別造成了往西南方向 30.3 mm、15.0 mm 和 13.8 mm 的總位移量。測站 HF04 在水平方向則是以 11.7 mm/yr 的速度往西南方向運動、垂直方向為 14.6 mm/yr 之速度沉陷，且有記錄到四次的明顯位移，皆是往西南方向位移，總位移量分別是 22.8 mm、11.7 mm、11.0 mm 和 11.4 mm。測站 HF06 在水平方向上以 10.2 mm/yr 之速度向南運動、垂直方向以每年 11.4 mm 的速度沉陷，有記錄到三次快速位移，分別造成了 68.1 mm、23.9 mm 及 24.1 mm 的總位移量。測站 HF11 以每年 8.0 mm/yr 的速度往西南方向運動、3.9 mm/yr 的速

度沉陷，記錄到三次的明顯位移，分別造成了 68.4 mm、18.4 mm 及 69.1 mm 的總位移量。測站 HF12 以 7.7 mm/yr 的速度往西南方向運動、垂直方向以 4.3 mm/yr 的速度沉陷，有兩次的明顯位移，總位移量分別是 117.3 mm 和 24.5 mm。位移時間與總位移量整理至圖 4-1 及表 4-1。

二、第二類：長期性位移

第二類的測站有 HF07、HF08、HF09、HF14 和 HFAN，其中測站 HF07 在水平方向以 7.6 mm/yr 之速度西南方向、垂直方向以 10.1 mm/yr 之速度沉陷。測站 HF08 以 1.6 mm/yr 之速度往西南方向運動、但在垂直方向上是以 4.7 mm/yr 抬升。而測站 HF09 以 2.5 mm/yr 之速度向西運動、垂直方向上以 2.1 mm/yr 速度抬升。測站 HF14 在水平及垂直位移上幾乎是穩定不動的狀態。測站 HFAN 以 14.9 mm/yr 之速度往西南方向滑動、垂直方向則是以 1.6 mm/yr 速度沉陷。這五個測站中，HF08、HF09 和 HF14 的長期運動趨勢相較於其他兩個測站來說，運動速度更慢且方向也有所不同。

三、其他

剩下的測站有 HF01、HF03 和 HF10，在上述位移發生的時段沒有資料記錄，故無法判斷是否有明顯位移的現象，但從有限資料中去計算長期運動趨勢。測站 HF01 以 9.3 mm/yr 往西南方向運動、垂直方向

則是以 20.9 mm/yr 沉陷。測站 HF03 以 16.3 mm/yr 之速度往西南方向運動、垂直方向為 3.3 mm/yr 沉陷。測站 HF10 以 27.5 mm/yr 之速度往西南方向運動、垂直方向為 12.6 mm/yr 沉陷。上述所有 GPS 連續測站長期速度整理至表 4-2 與圖 4-2。

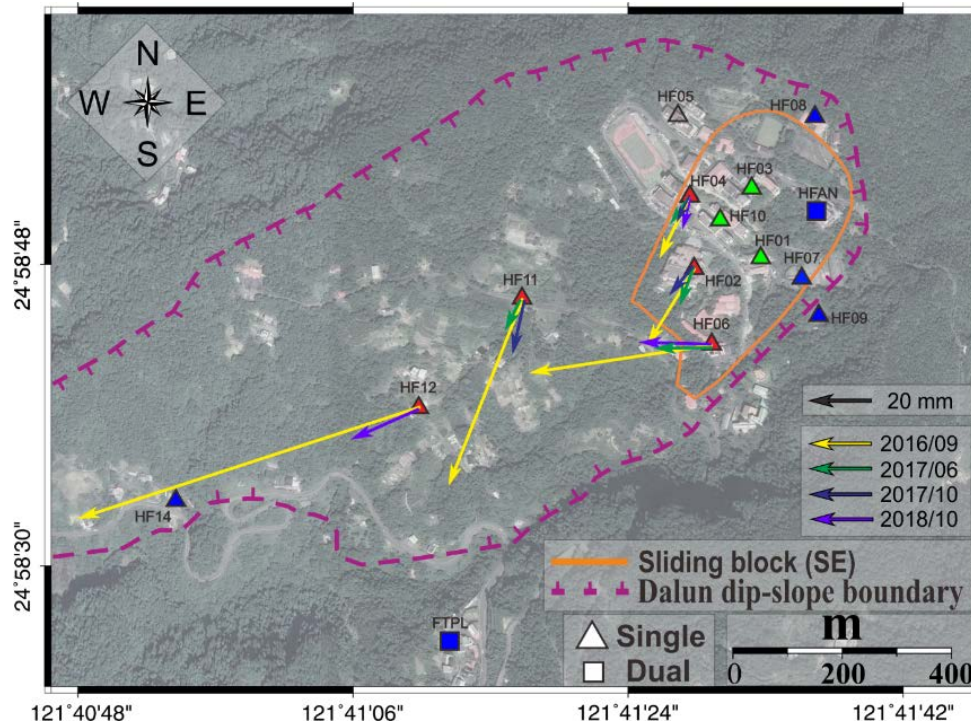


圖 4-1 大崙山坡地各 GPS 連續站之位移圖

資料來源：本計畫

表 4-1 大崙山坡地各 GPS 連續站總位移量位移和發生時間

站名	總位移量 (mm)	發生時間	站名	總位移量 (mm)	發生時間
HF02	30.3	2016/09	HF06	68.1	2016/09
HF02	15.0	2017/06	HF06	23.9	2017/06
HF02	13.8	2017/10	HF06	24.1	2018/10
HF04	22.8	2016/09	HF11	68.4	2016/09
HF04	11.7	2017/06	HF11	18.4	2017/06

HF04	11.0	2017/10	HF11	69.1	2017/10
			HF12	24.5	2018/10

資料來源：本計畫

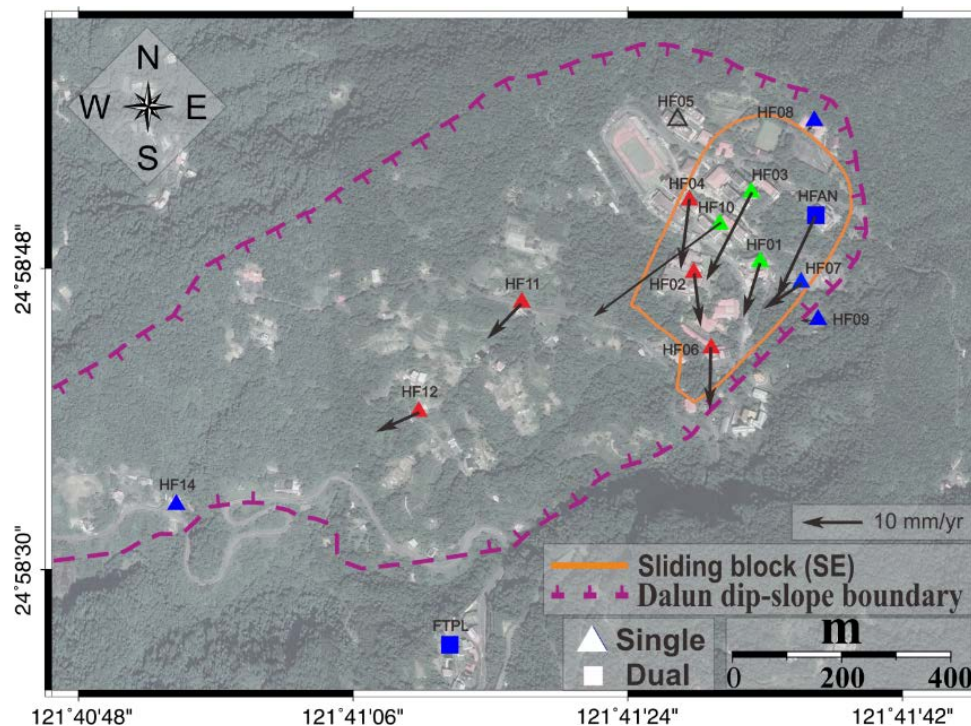


圖 4-2 大崙山坡地各 GPS 連續站之長期速度場

資料來源：本計畫

表 4-2 大崙山坡地各 GPS 連續站長期運動速度

站名	水平分量 (mm/yr)	垂直分量 (mm/yr)	站名	水平分量 (mm/yr)	垂直分量 (mm/yr)
HF01	9.3	-20.9	HF09	2.5	-0.5
HF02	8.9	-8.2	HF10	27.5	-12.6
HF03	16.3	-3.3	HF11	8.0	-3.9
HF04	11.7	-14.6	HF12	7.7	-4.3
HF06	10.2	-11.4	HF14	0.1	-0.6
HF07	7.6	-10.1	HFAN	14.9	-1.6
HF08	1.6	4.7			

資料來源：本計畫

第二節 週期性分析

根據全台雨量資料，選用與 GPS 連續站共站或附近有被完整記錄的雨量站，並取各雨量測站的每小時降雨量及其加總後的日降雨量供後續討論使用。統計全台雨量測站從 2000 年到 2019 年的平均月降雨量，如圖 4-3，其中可以發現約 70% 的降雨集中在每年的 5 月到 9 月，因此在本研究中，將 5 月到 9 月這段時間定義為濕季，而 10 月到隔年 4 月則定義為乾季。

依照上述之乾濕季定義，其中可以發現大崙山坡地的乾濕季週期性變化並不明顯，在水平方向上都是往西南方向滑動，而垂直方向上則是取決是否位於滑動塊體上，在滑動區塊上的測站是以下陷為主，滑動區塊外的測站則是有些許的抬升。且滑動區塊內的測站，如 HF04，比起滑動區塊外有較大的滑動速度，且乾濕季的滑動速度並無太大的差異，會造成滑動速度上有大幅度的改變通常是受到強降雨事件影響，如圖 4-4 之 A（灰色區塊為 5 月到 9 月之濕季）；至於滑動區塊外的測站，如 HF08，乾濕季的滑動速度同樣沒有明顯的變化，且其滑動速度非常緩慢，在垂直方向上不同於 HF04，是有緩慢抬升的趨勢，如圖 4-4 之 B。

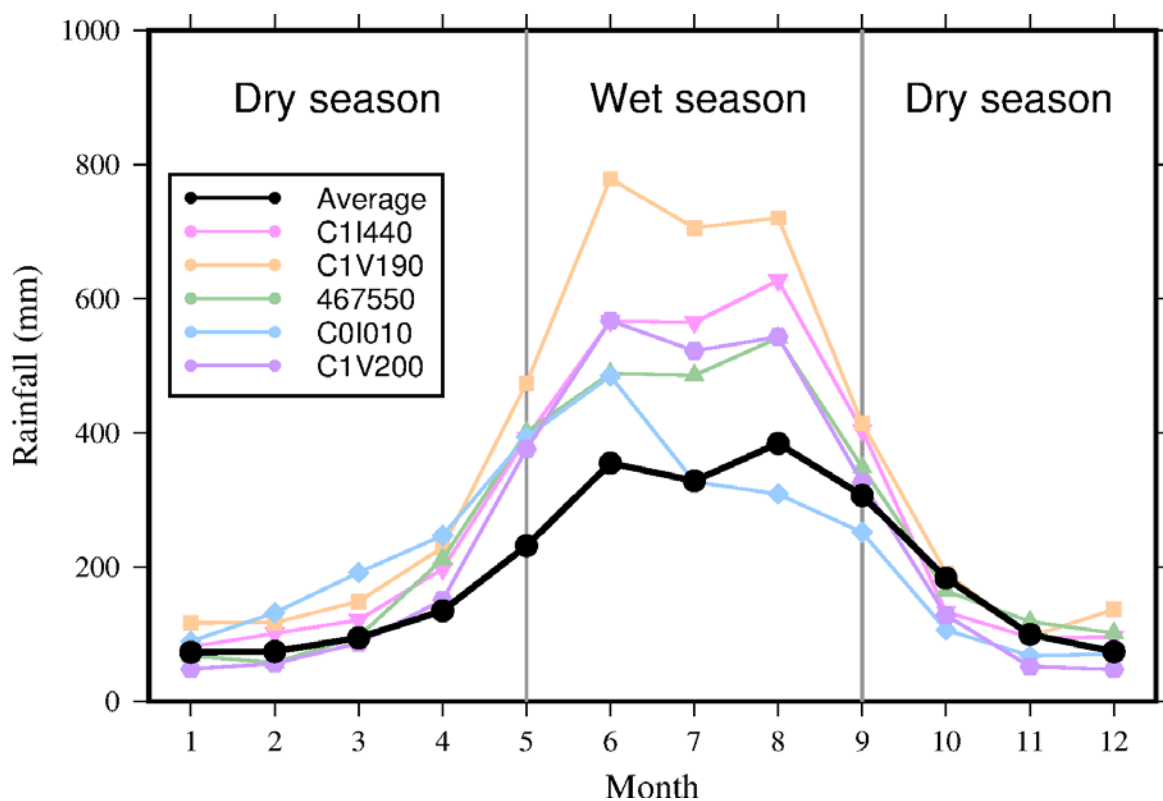


圖 4-3 2000 年到 2019 年之台灣與各地月平均雨量時間序列

資料來源：中央氣象局

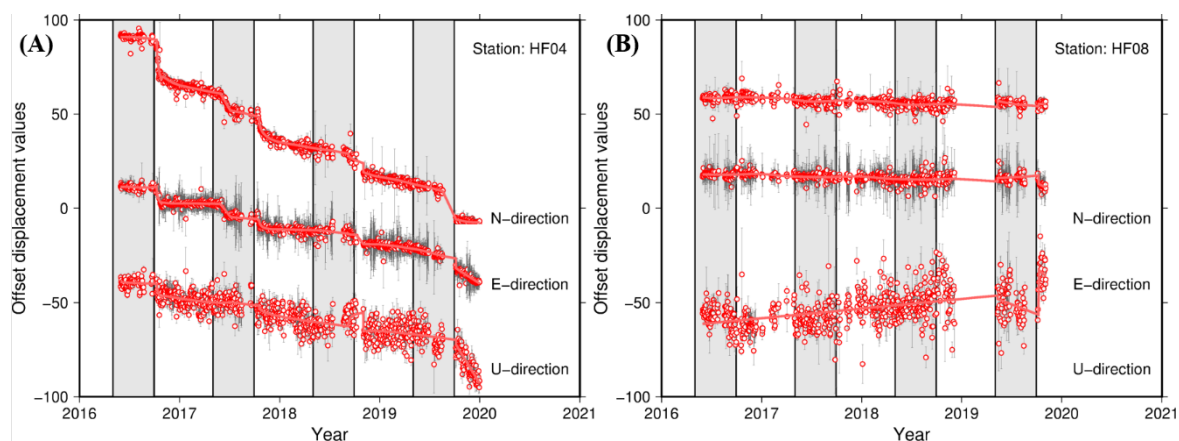


圖 4-4 HF04 及測站 HF08 之乾濕季位移時間序列圖

資料來源：本計畫

第三節 事件性位移分析

一、位移特性

將 GPS 測站所記錄之資料以每小時為單位取平均值，得各測站每小時之座標，並選用資料記錄相對完整的測站 HF02 和 HF04，其中有完整被記錄的位移事件共有三次，分別發生在 2016 年 9 月、2017 年 6 月和 2017 年 10 月，以下將各次事件分別討論。為了判斷各次滑動事件的開始與結束，本計畫運用 Savitzky-Golay filter_regression (Massey, 2010) 之方法先對水平方向的位移量進行資料擬合，之後再將水平方向的最佳擬合線結果進行微分，可得測站之每小時速度值。當速度大於一倍標準差時，在本研究中將其視為滑動的開始點，而當速度小於一倍標準差時則視為滑動的結束，並以兩測站共同比較，找出最早及最晚的時間點當作是該次事件滑動的開始與結束時間，以圖 4-5 為例。

2016 年 9 月之事件，GPS 記錄到兩階段的位移，第一階段因資料不完整而無法判斷開始時間點，但可以從上述的判斷方法得知測站 HF02 在約 9 月 30 日 09 時滑動結束；第二階段的位移則開始於 10 月 10 號 08 時並結束於 10 月 16 日 18 時，共持續滑動約六天，測站 HF02 和測站 HF04 所記錄到的水平方向位移量分別為 14.6 mm 及 8.7 mm。其中兩測站之滑動速度最大值分別發生在 10 月 13 日 23 時及 10 月 13 日 13 時，速度最

大值分別為 0.138 mm/hr 和 0.108 mm/hr，發生在開始滑動後的第三天，隨後即開始減速至滑動前的狀態，如圖 4-6。

2017 年 6 月之事件，GPS 所記錄的位移開始時間點為 6 月 13 日 08 時、結束時間點為 6 月 24 日 05 時，滑動持續約 11 天，所記錄之水平方向位移量分別為 6.2 mm 和 5.1 mm，滑動期間之測站 HF02 的速度最大值發生在 6 月 16 日 21 時，最大速度分別為 0.038 mm/hr，發生在滑動開始後約三天，之後維持在此速度持續滑動；測站 HF04 之速度最大值發生在 6 月 15 日 05 時，最大速度為 0.024 mm/yr，發生於滑動開始後一天，後減速至約 0.01–0.02 mm/hr 後持續緩動約 8 天，兩測站在該次事件中並無明顯的速度峰值，如圖 4-7。

2017 年 10 月之事件，GPS 所記錄之位移開始於 10 月 14 日 08 時結束於 10 月 25 日 01 時，持續滑動約 11 天，水平方向位移量分別為 7.0 mm 和 5.4 mm，運動期間兩測站的最大速度分別為 0.074 mm/hr 和 0.072 mm/hr，分別發生在 10 月 16 日 21 時及 10 月 16 日 23 時，約在滑動開始後的第二天，隨後減速至原先滑動前之狀態，如圖 4-8。

上述各次事件的總位移量、總滑動時間、最大速度及最大速度時間呈現於表 4.3。在第一次和第三次的事件中，滑動開始後會有一段持續加速的時期，到第三天左右會出現明顯的速度峰值，隨後持續減速至原先的位移速度，從位移量上可以看到 S 形的變化趨勢；而第二次事件比起另外兩

次事件，在最大位移速度的時候持續了較長的一段時間，是以等速的方式持續滑動，而後才減速至原先的速度。整體而言，兩個測站在這三次的事件中，其運動模式幾乎是一致的。另外，測站 HF02 與測站 HF04 相比有更大的總位移量以及較大的位移速度。

根據 Leroueil et al. (1996) 的分類，大崙山順向坡的運動模式可以視為階段三 (occasional reactivation) 或階段四 (active landslide)，屬於再活動階段，從岩芯的破碎程度以及井下傾斜管記錄來看，該滑動塊體的滑動面已經發育形成，結合 GPS 連續站和 SAA 所記錄到之結果，可以將該坡地破裂後潛移的運動模式分成兩種：第一種為滑動塊體自身的塑性變形，第二種為降雨所導致的滑動面滑動，以下將分別討論。

第一種的塑性變形行為可以從坡地長期的運動行為發現，時間序列上來看是坡地處於長時間穩定往下邊坡方向位移，且不受到乾、濕季變化的影響，在不考慮強降雨所造成的快速位移之下，滑動塊體上 GPS 連續站所記錄到地表的平均速度為 13.0 mm/yr，而 SAA 所記錄到的滑動面平均速度為 6.6 mm/yr，因此可以推測該滑動塊體除了滑動面滑動之外，還有額外的作用力造成坡地往下邊坡方向運動，從滑動的角度來看，GPS 連續站所記錄到地表位移的角度比滑動面的坡度來得陡，發生較陡的位移現象可能是滑動塊體長期受重力影響產生的自身變形所形成。

第二種運動模式是滑動塊體於滑動面上產生滑動的行為，通常是受到降雨及地下水體改變所影響，容易造成較大的位移情形，可從 GPS 連續站所記錄之地表位移量與 SAA 所記錄之滑動面滑動量相比得知，在降雨事件中，兩者有較為相同的位移量值，且其運動過程幾乎是同步進行，地表的位移角度也與滑動面平行。這類的運動模式會受到降雨型態的不同而有所變化，降雨所導致的地下水位上升和消退速度會控制坡地運動的速度，短延時、強降雨使得地下水位快速升高，因此造成坡地的位移量大但歷時較短，在滑動的過程中會有一個明顯的速度峰值，在速度達到峰值之後會立即減速；反之，長沿時降雨會讓地下水位上升及消退所經歷的時間增加，且從 2017 年 6 月之事件中可以看到，沒有明顯的速度峰值出現，在降雨期間是以等速度的方式運動。

二、位移誘發原因

在上述 GPS 連續監測站所記錄之大崙山地區地表位移時間序列中，本研究在此節中先探討地震力是否為誘發各事件性位移之原因。

根據中央氣象局歷年之地震事件資料，造成北台灣有最大震度達三級（圖 4-9）的地震事件為 2016 年 5 月 12 日 11 時 17 分，發生在宜蘭外海、芮氏規模為 6.1 的強震（圖 4-10）。本計畫首先將華梵大學鄰近的中央氣象局地震站（強震站）之加速度時間序列做一次積分得到地表速度時間序列；接著再將本計畫之大崙山與附近的雙頻 GPS 連續監測站（及 HFAN

與 SDSH（已於 2017 年撤站）所記錄到的同震地表位移做一次微分，亦得到地表速度時間序列（圖 4-12）。為了方便比較，再將 GPS 雙頻 HFAN（紅線）與地震站 TWA（藍線）之三分量速度時間序列並呈如圖 4-13（兩站距離 10.15 公里；藍紅條範圍分別為 GPS 訊號（紅色長條）及初達地震波訊號（藍色長條）進入時間）。可發現在地震波速最大的時間內，GPS 亦記錄到有較大的速度。而若是比較有較近距離的兩類測站之速度時間序列（即 SDSH 與 TWA，距離約 6.465 公里；圖 4-14），則發現兩類訊號的進入相當接近。

由兩者之速度時間序列比較分析顯示，在地表震度三級（8~25 gal（ cm/s^2 ））的情況下，兩類訊號在三方向分量上的位移速度皆不超過 1.5 cm/s；且在地震動能量消退之後，地表皆回到無移動速度的原始狀態。換句話說，三級的地震動能量尚不足以造成石碇地區與大崙山坡地的永久性位移，僅造成彈性位移。故若要引發大崙山順向坡的地震性邊坡坡壞，需要更多的能量，且可能必須為特定方向來源的地震波（「即路徑效應」）。因此，本研究推斷，降雨與地下水因素會是造成大崙山順向坡的事件性位移的因素。

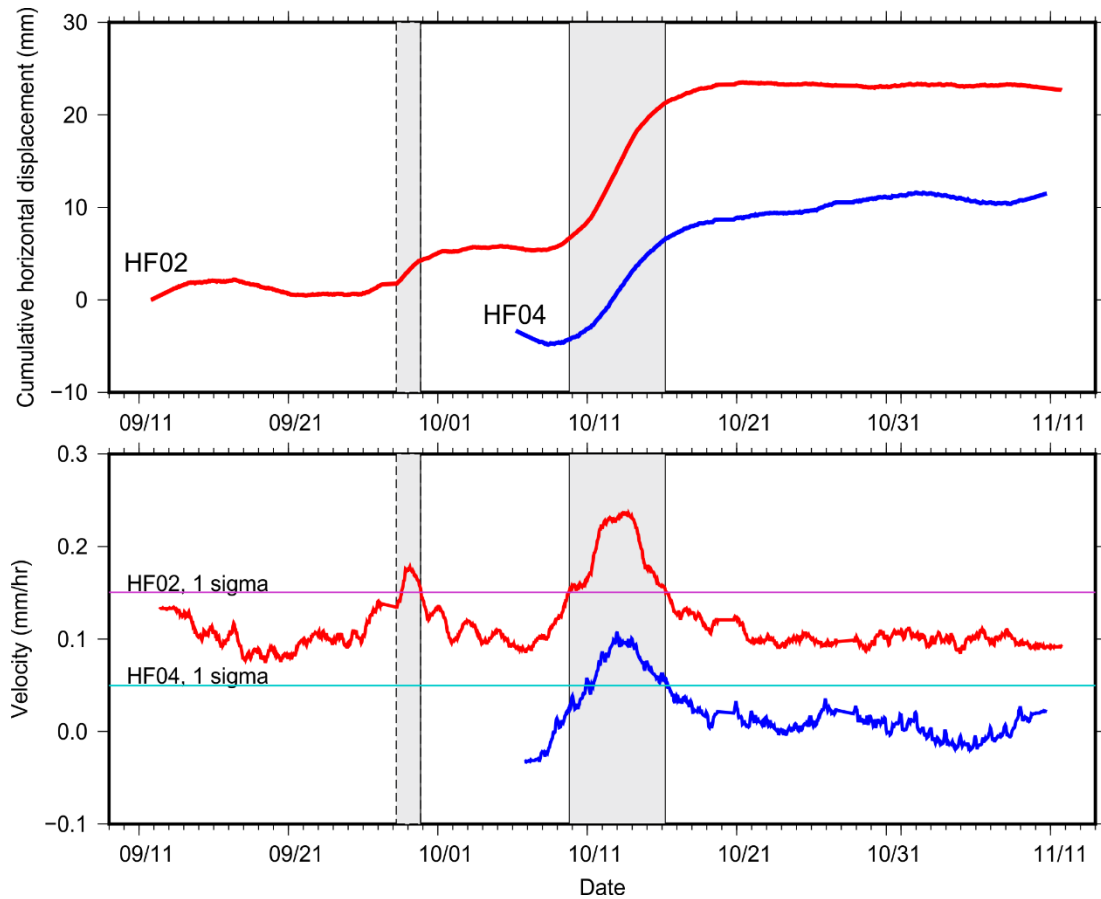


圖 4-5 2016 年 10 月事件之水平方向累積位移及速度圖

資料來源：本計畫

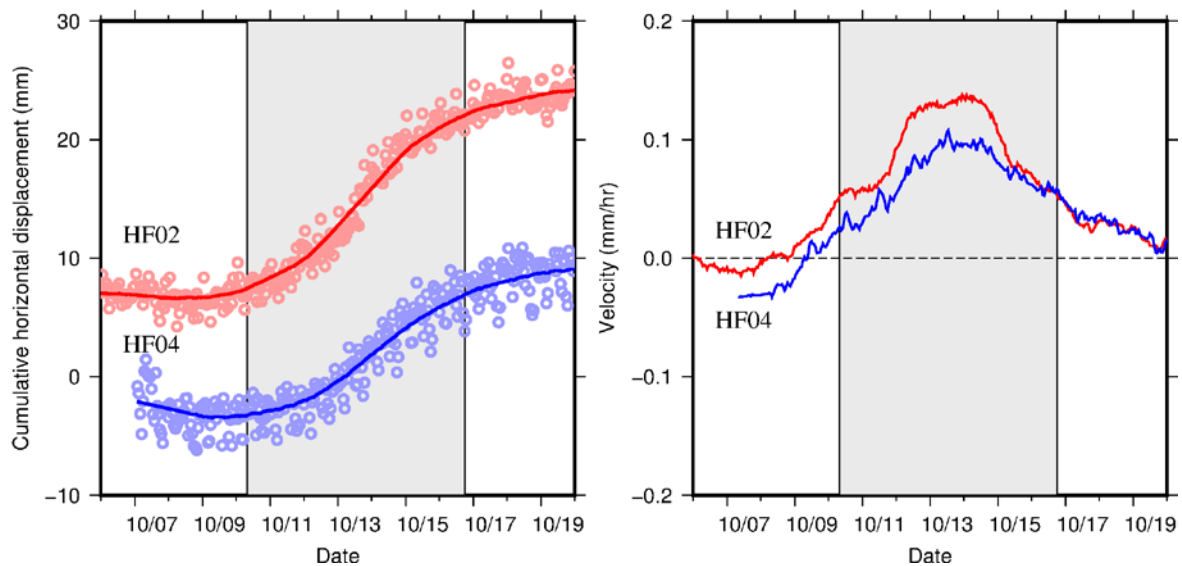


圖 4-6 2016 年 10 月事件之水平方向位移量和速度

資料來源：本計畫

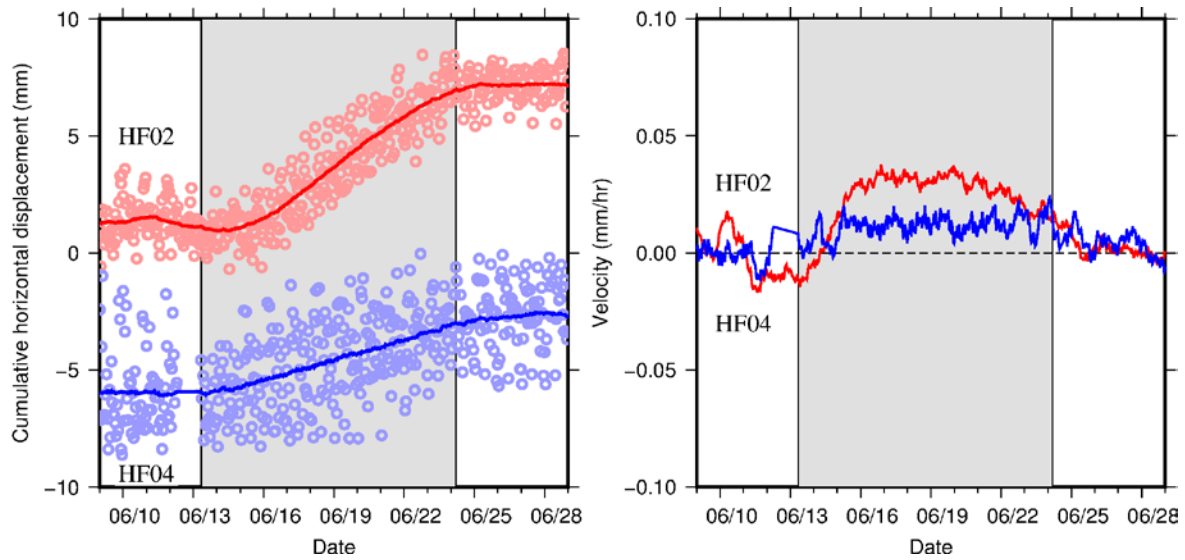


圖 4-7 2017 年 06 月事件之水平方向位移量和速度

資料來源：本計畫

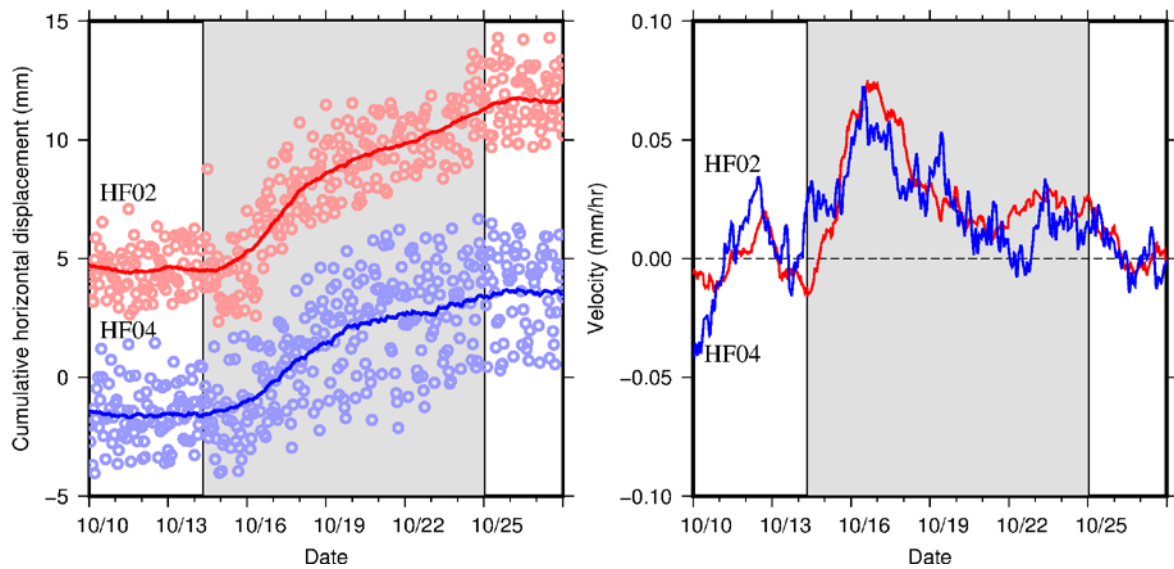


圖 4-8 2017 年 10 月事件之水平方向位移量和速度

資料來源：本計畫

表 4-3 事件性位移之總結

站名	2016 年十月之位移事件			
	位移量 (mm)	延時 (hours)	最大速度 (mm/hour)	最大速度發生 時間

HF02	14.6	154	0.138	23/10/13/2016
HF04	8.7	154	0.108	13/13/10/2016
	2017 年六月之位移事件			
	位移量 (mm)	延時 (hours)	最大速度 (mm/hour)	最大速度發生 時間
HF02	6.2	232	0.038	21/16/06/2017
HF04	5.1	232	0.044	05/14/06/2017
	2017 年十月之位移事件			
	位移量 (mm)	延時 (hours)	最大速度 (mm/hour)	最大速度發生 時間
HF02	7.0	257	0.074	21/16/10/2017
HF04	5.4	257	0.072	23/16/10/2017

資料來源：本計畫

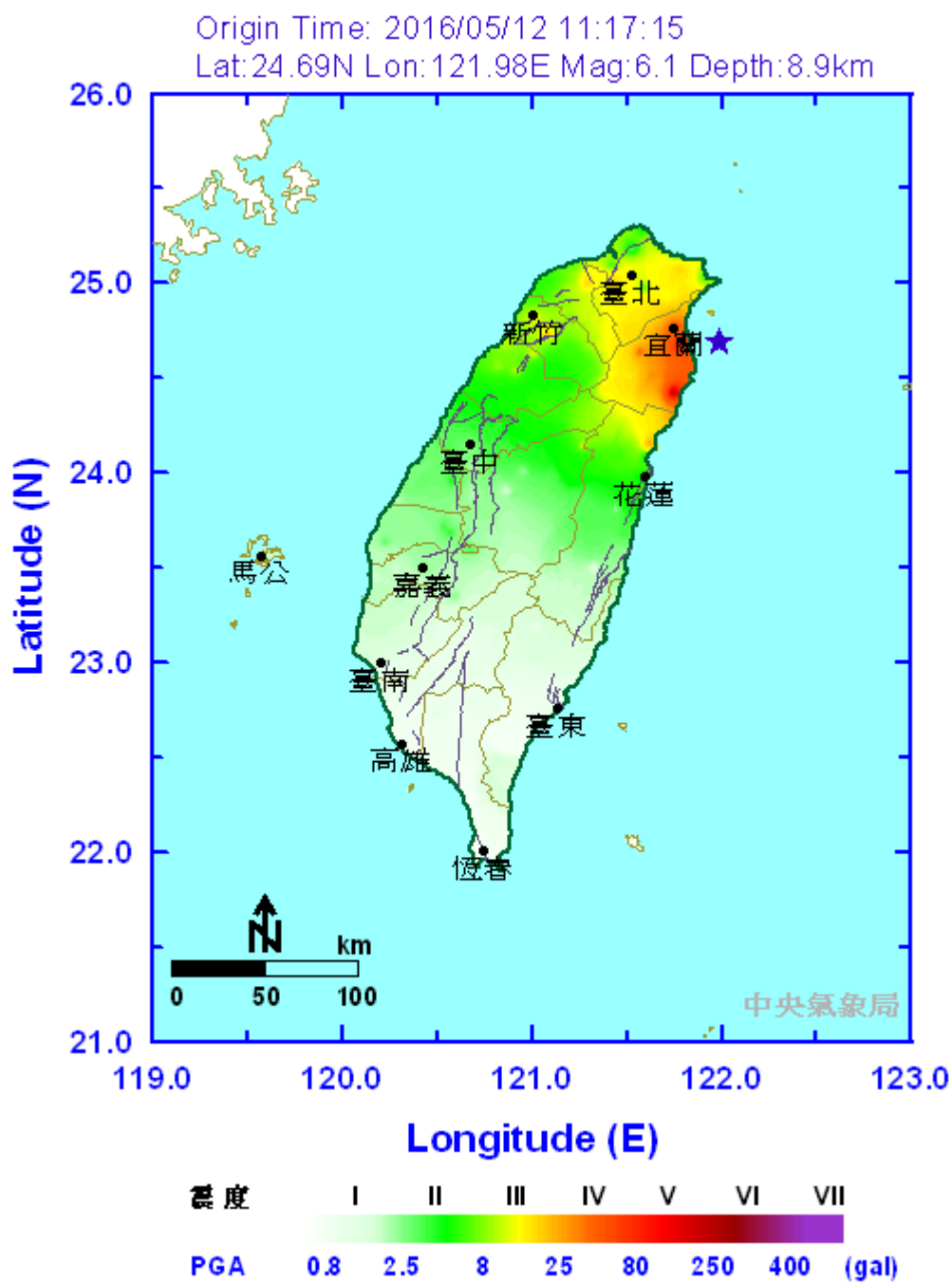


圖 4-9 2016 年 5 月 12 日地震之全台震度分佈

資料來源：中央氣象局地震測報中心

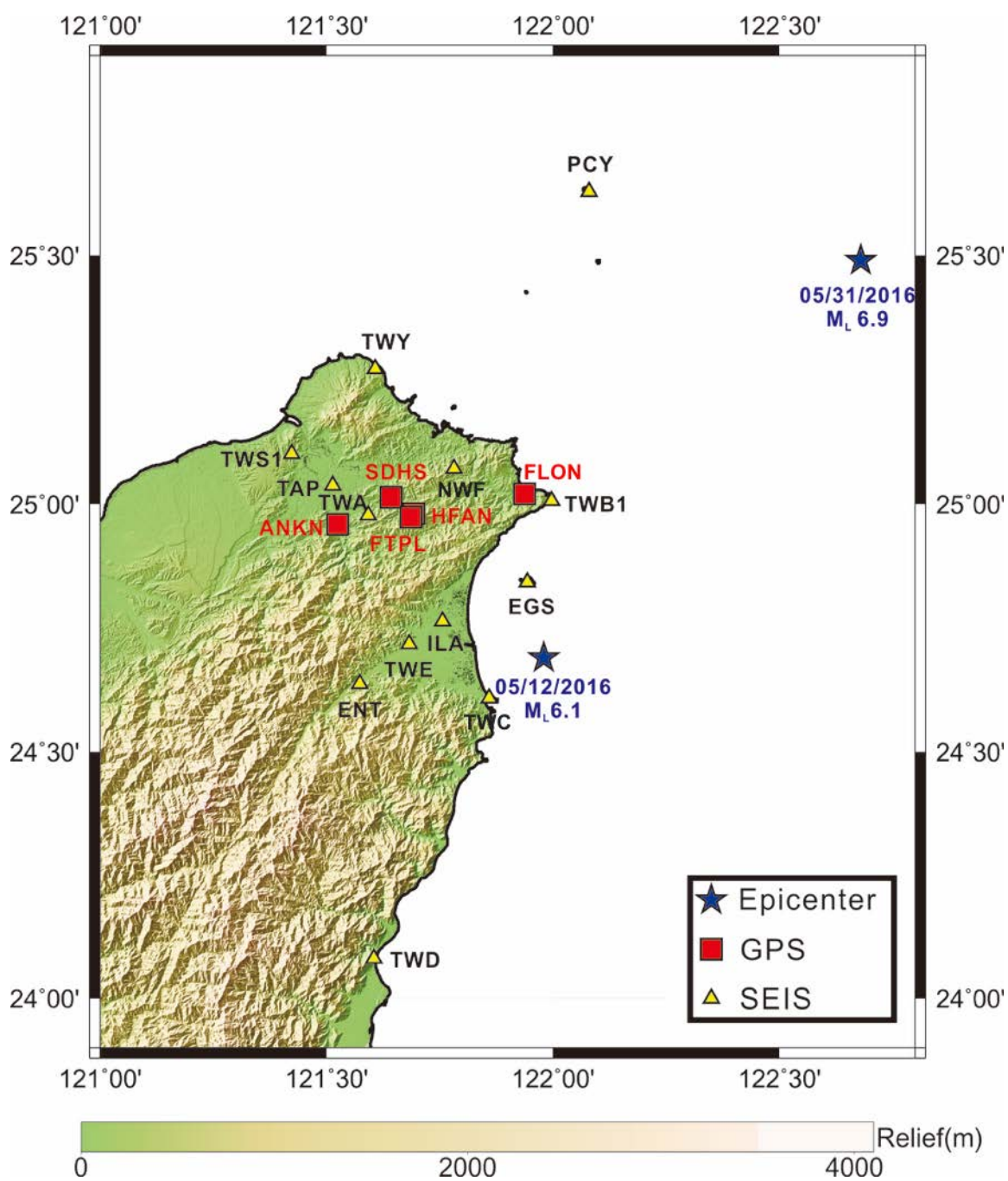
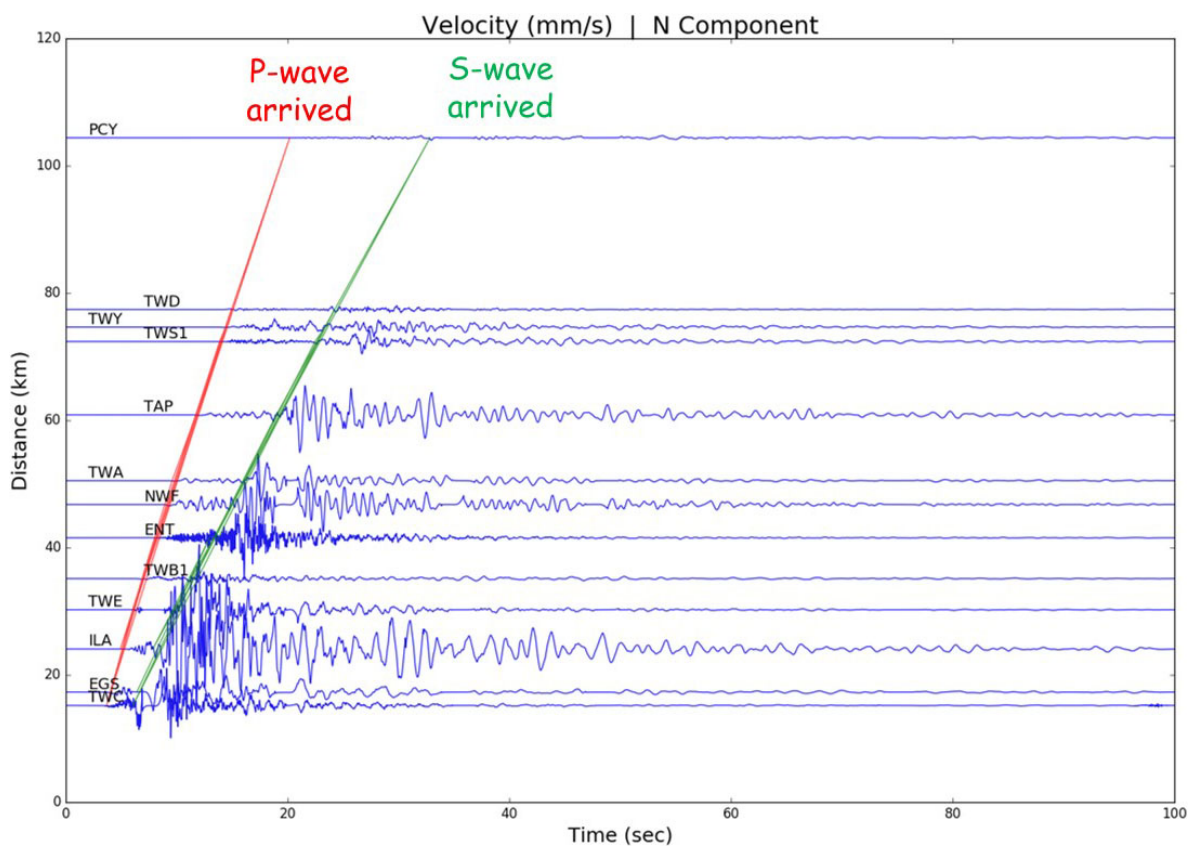
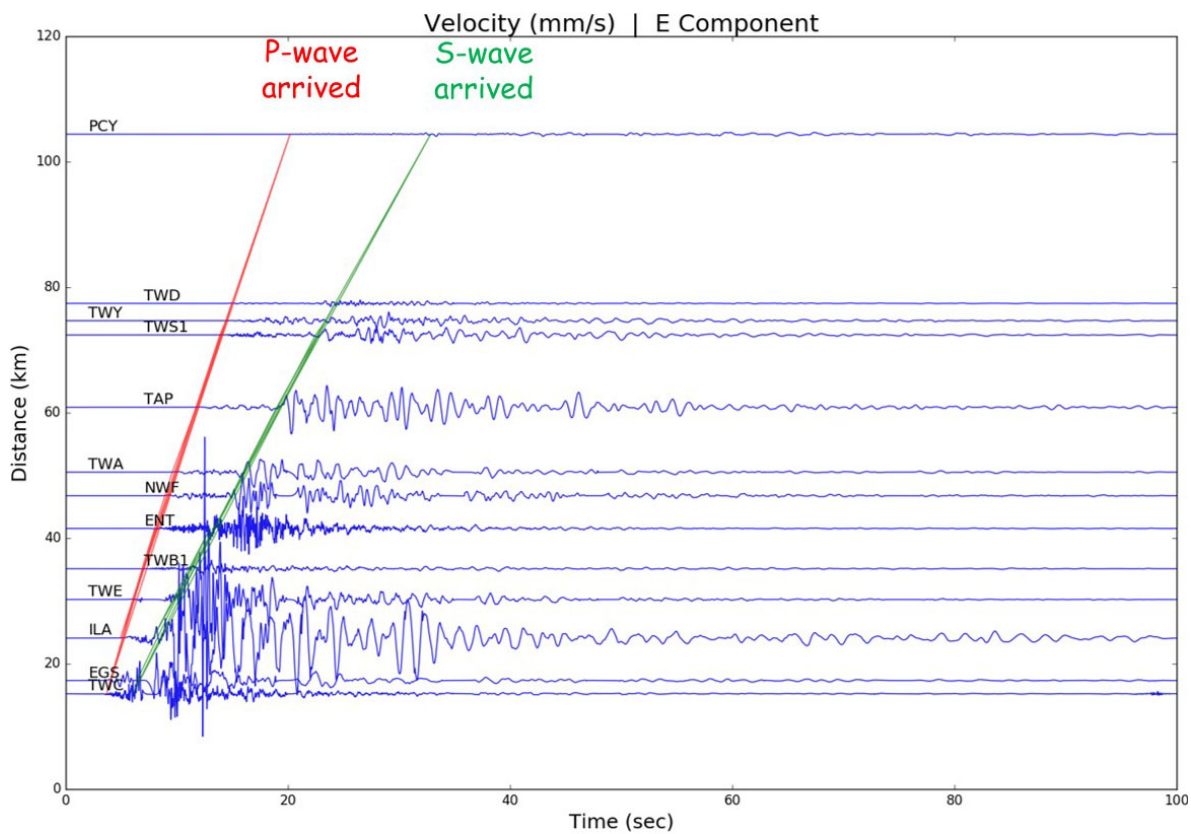


圖 4-10 2016512 地震震央、地震站與 GPS 連續站分佈

資料來源：中央氣象局與本計畫



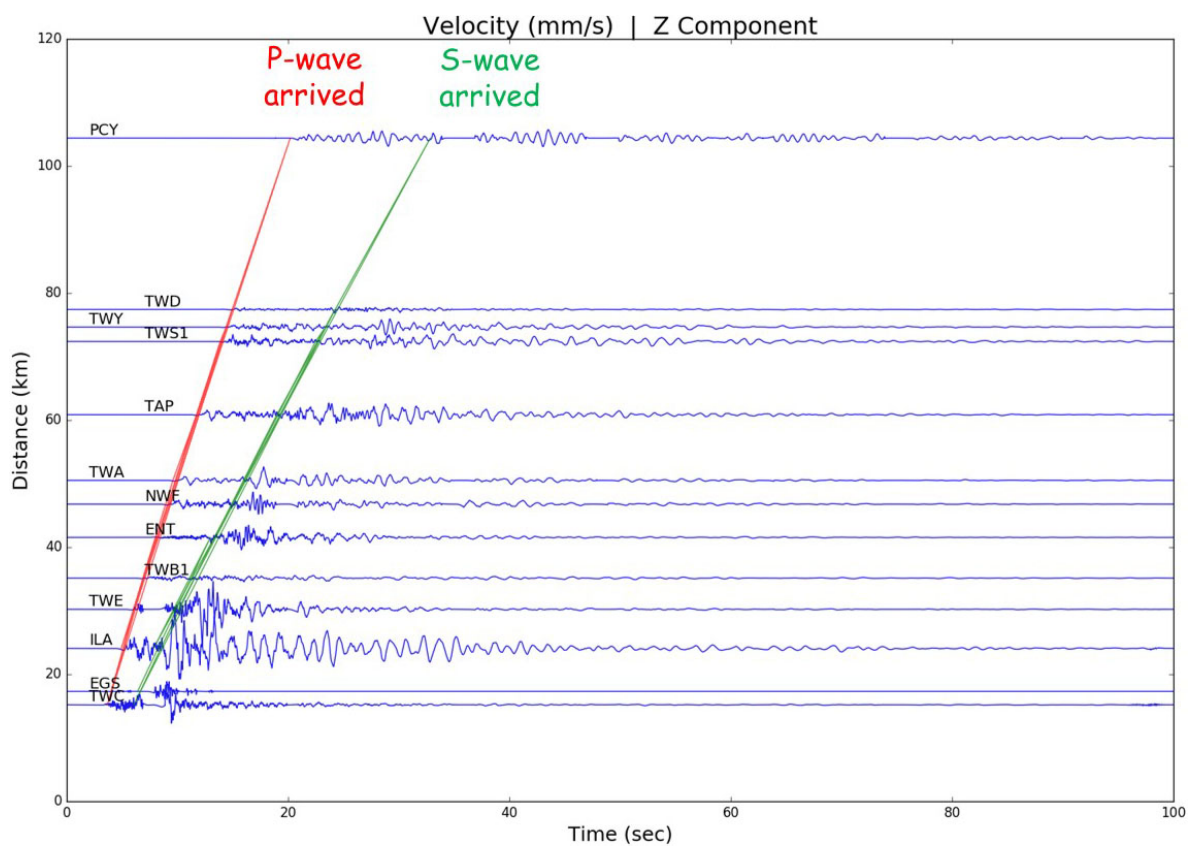


圖 4-11 華梵大學鄰近地震站的震波示意圖

資料來源：中央氣象局與本計畫

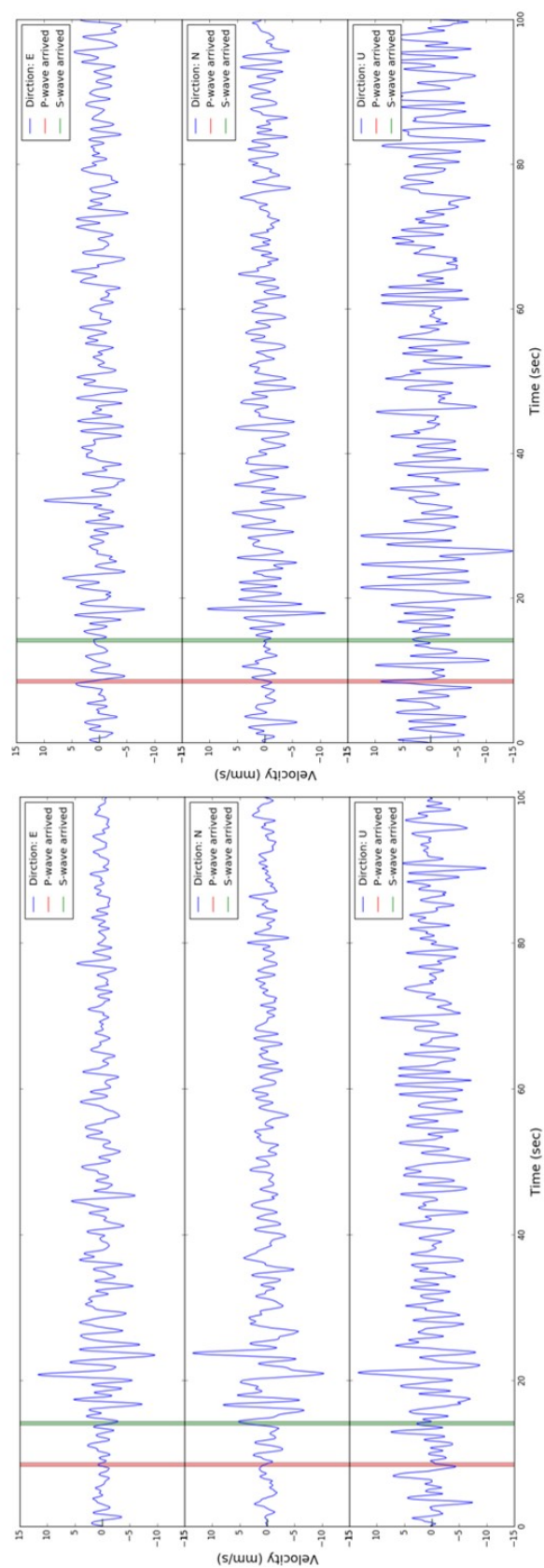


圖 4-12 雙頻 GPS 測站 HFAN 及 SDHS 的速度訊號時間序列

資料來源：本計畫

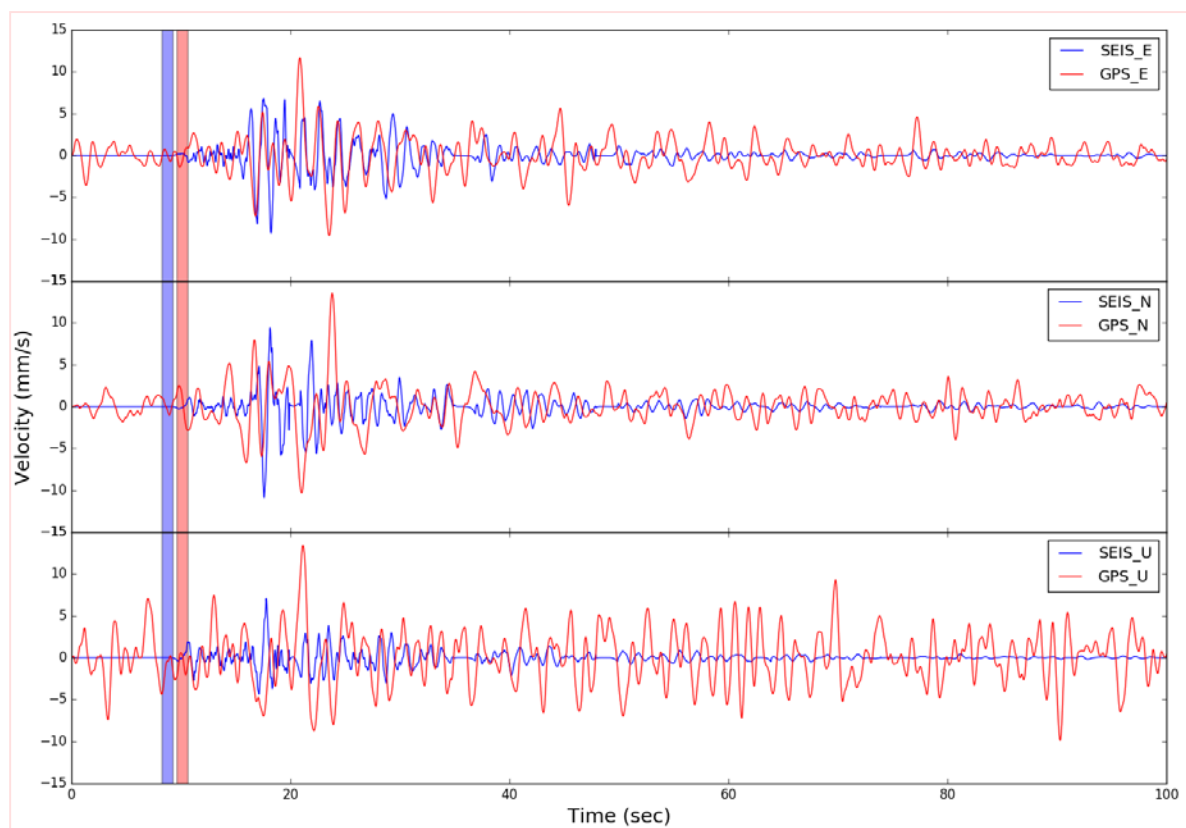


圖 4-13 GPS (HFAN) 訊號及地震 (TWA) 訊號波型疊加

資料來源：中央氣象局與本計畫

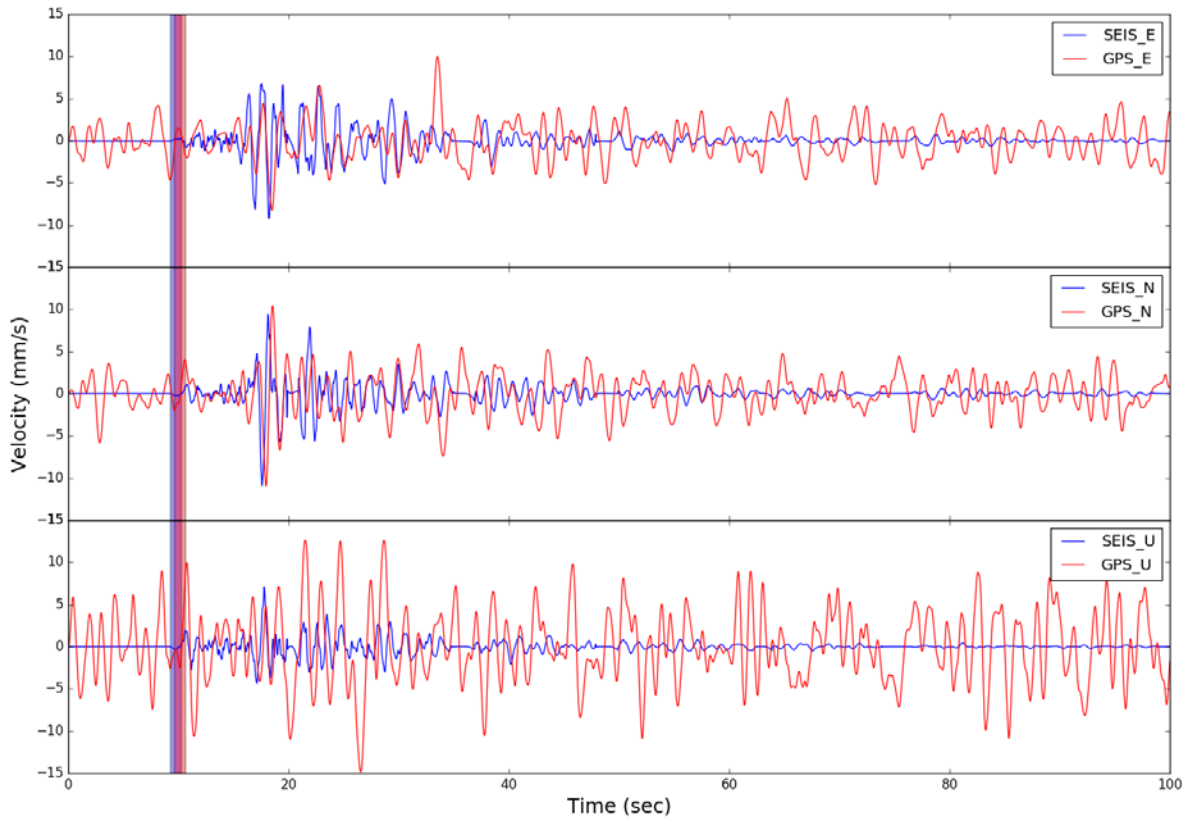


圖 4-14 GPS (SDSH) 訊號及地震 (TWA) 訊號波型疊加

資料來源：中央氣象局與本計畫

第四節 大崙山順向坡的運動模式

藉由坡地的運動模式分析可以用來瞭解坡地的變形過程。坡地的運動模式可以依照破壞 (failure) 的生成與否，亦即滑動面的發育與否分成四個階段。分別是破壞前階段 (pre-failure)、破壞後階段 (post-failure)、偶觸發階段 (occasional reactivation) 和活動邊坡階段 (active landslide) (Leroueil et al., 1996) (圖 4-15)。其中階段一和二 (pre-failure and post-failure) 是滑動面的形成、坡地材料逐漸產生破裂的過程，而階段三和四

(occasional reactivation and active landslide) 是坡地已受到破壞且會沿著一個或數個已存在的滑動面滑動。這兩個階段會表現出類似的運動模式，因此也被統稱為再活動階段 (the reactivation stage; Urciouli et al., 2007; Fell et al., 2000; Skempton 1985)。

大崙山順向坡中較活躍的運動區域有兩個部分，分別位於校區所在的順向坡頂部和順向坡中部。校區內 GPS 連續站的長期運動趨勢符合 Jeng and Sue (2016) 所定義的東南側的滑動塊體，其滑動塊體是持續約往西南方向位移，水平方向的速度從 7.6 mm/yr 到 27.5 mm/yr、垂直向的速度為 -3.3 mm/yr 到 -20.9 mm/yr。其中在滑動塊體的趾部區塊有記錄到降雨所觸發的快速位移，且越靠近滑動塊體趾部的位移量越大，因此研判坡地趾部區塊的破壞程度大於腹部及頭部。此外於大崙山順向坡中部，從 GPS 連續站的記錄中顯示該區域的水平方向速度約 7.9 mm/yr、垂直向速度約為 -4.1 mm/yr，同時也有記錄到因降雨所導致的快速位移，故研判該處有另一滑動塊體存在，然目前只能確定其範圍位於測站 HF11 和 HF12 附近，且沒有向下延伸到 HF14。

根據 Leroueil et al. (1996) 的分類，大崙山順向坡的運動模式可以視為階段三 (occasional reactivation) 或階段四 (active landslide)，屬於再活動階段，根據岩芯的破碎程度以及井下傾斜管記錄，該滑動塊體的滑動面已經發育形成。結合 GPS 連續站和 SAA 所記錄到之結果，可以將該坡

地破裂後潛移的運動模式分成兩種：第一種為滑動塊體的長期變形，第二種短時間內的快速位移，於以下分別討論。

第一種的長期變形行為可以從坡地長期的運動行為發現，時間序列上來看是坡地處於長時間穩定往下邊坡方向位移，且不受到乾、濕季變化的影響。在不考慮強降雨所造成的快速位移之下，滑動塊體上 GPS 連續站所記錄到地表的平均速度為 13.0 mm/yr，而 SAA 所記錄到的滑動面平均速度為 6.6 mm/yr，因此可以推測該滑動塊體除了深處的滑動面滑動之外，推測可能是再加上沿著淺部的滑動面之位移所造成。

第二種運動模式是滑動塊體於滑動面上產生滑動的行為，通常是受到降雨及地下水體改變所影響，容易造成較大的位移情形，可從 GPS 連續站所記錄之地表位移量與 SAA 所記錄之滑動面滑動量相比得知。以 2016 年的降雨事件為例，兩者有相近的位移量，且其運動的過程具有一致性。主要發生位移的期間階為 10 月 12 日到 10 月 16 日之間，且為降雨後期、地下水位上升至最高點後開始消退的期間，而坡地運動停止於地下水位消退至大約為常時地下水位面時（圖 4-16）。

GPS 連續站記錄到地表快速位移的位移方向以西南方向為主，與坡向一致，且在空間上的位移傾角（即水平位移向量與垂直位移向量取合向量，為 $7-28^{\circ}$ 之間）與滑動面的傾角 20° 將近，且位移量也差距不大（分

別為平均 22.8 mm 與 17.3 mm)。因此研判地表的快速位移即為滑動塊體沿著此滑動面運動所造成的結果。

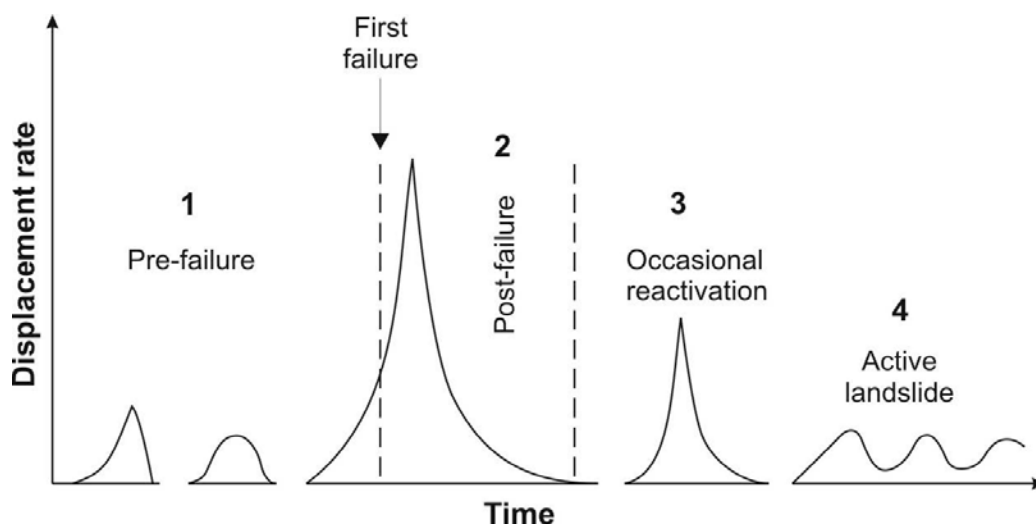


圖 4-15 不同階段的坡地運動示意圖

資料來源：Leroueil et al., 1996

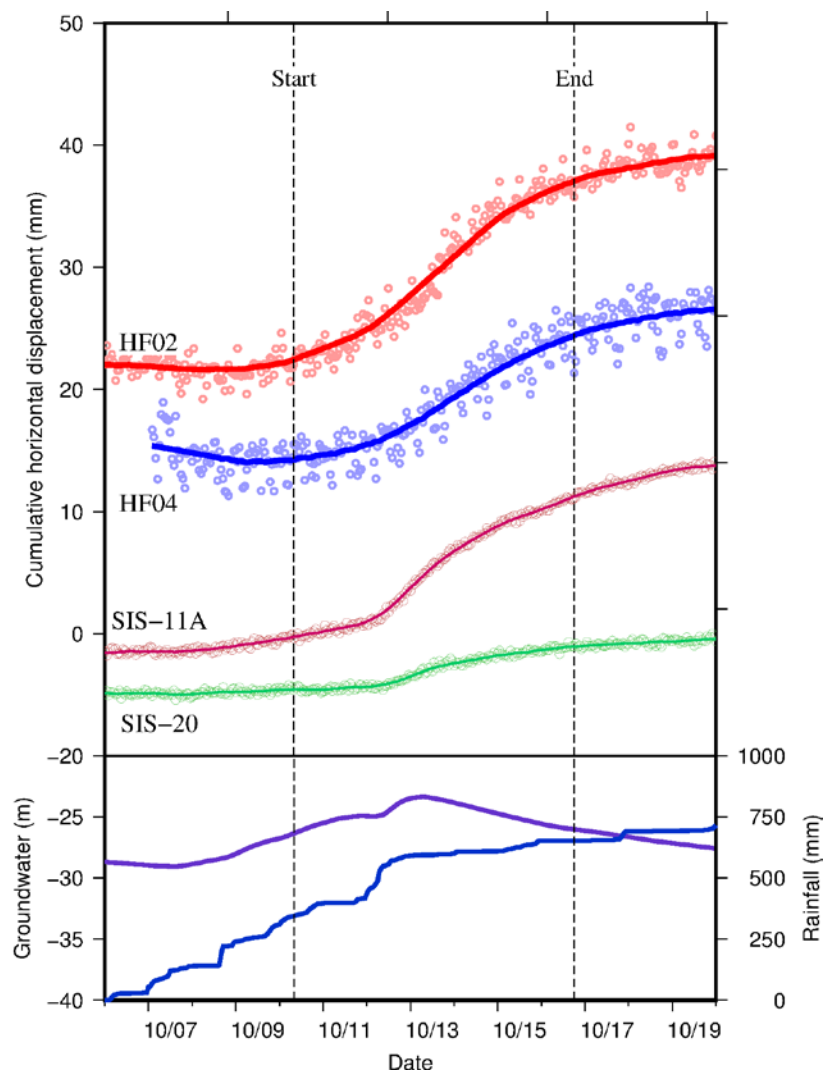


圖 4-16 地表位移量與滑動面滑動量比較圖

資料來源：本計畫

第五章 結論與未來工作

第一節 結論

本研究在期中階段為以 GPS 連續站觀測大崙山順向坡中的滑動塊體之地表的位移模式，並同時分析降雨量與的地下水位變化，以瞭解其相互間的關係。所得到結論如下：

1. 大崙山順向坡上最為活躍的區塊為校區東南區塊，其中的滑動塊體之運動模式屬於再活動階段；由坡面的 GPS 連續站所記錄到的地表速度為 12.1 mm/yr 到 30.2 mm/yr，屬於緩慢的破裂後潛移。其中滑動塊體的趾部區域、部份腹部和右翼區塊在降雨時容易發生較大的位移，因此這些區塊為滑動塊體中較不穩定的部位。
2. 大崙山順向坡中的該滑動塊體有兩種運動模式，分別是長期緩慢的潛移和受降雨事件影響的快速位移。長期緩慢的潛移是由滑動塊體自身的塑性變形和少量的滑動面滑動所共同影響；而降雨所觸發的快速位移主要是因降雨入滲導致的地下水位上升，上升的水位會影響滑動面，造成塊體沿著滑動面進行滑動。快速位移會有大致相同的加速、減速過程，整體運動的模式會因降雨型態的不同而有所改變。
3. 藉由分析近年來發生在北台灣最大的地震訊號（2016 年 5 月 12 日，芮氏規模 6.1，新北勢石碇區震度為三級），研判在三級的地表震度情況下，地震能量尚不足以導致大崙山順向坡地區發生永久性位移，而僅發生彈性

位移；即在地震能量消散後，地表即恢復原來的狀態。因此大崙山順向坡的不穩定仍然與降雨與地下水位有直接關係。

第二節 未來工作

本計畫所預期的最終目標為瞭解大崙山坡地中的滑動塊體在乾燥、長時降雨與強降雨時期，因相對應之地下水位變化產生的運動模式與機制。在期中階段，藉由 GPS 連續站之地表位移資料及其他各項監測資料，已分析歸納出大崙山坡地上的不同區塊之位移模式；在期末階段，本計畫預期歸納出的滑動塊體和雨量及地下水間的關係所造成的運動模式，並以數學關係經驗式的型式表現之。由於本計畫已在期中階段陸續將單頻 GPS 連續站更換為有更高精密度之 RTK 雙頻 GPS 連續站，因此未來的華梵大學校園內的坡地活動亦改為以該監測數據進行分析。

雖然鄭清江與楊嘉瑜（2015）與 Jeng and Su（2016）已經以「SAA 位移」和「累積雨量」兩參數迴歸兩者的關係，本計畫期望進一步納入 GPS 連續觀測的地表位移，連結地下滑動面的位移與累積降雨量的關係，也就是降雨所引發的滑動塊體運動，由地表的 GPS 連續站所觀測到的位移情形來反映。因為本計畫所應用的 GPS 連續站相較於地下觀測，要來的簡便與經濟，因此可以在坡地表上架設的數量更多。本計畫即希望能以簡便、經濟，甚至是即時的方式來監測坡地運動，俟未來分析技術成熟並系統化

後，可以用來推廣至其他山坡地案例，並加入到水保局的「大規模崩塌監測資料庫及整合查詢系統維運計畫」的線上展示平台中。

再者，本研究團隊將應用訊號分析之專長，計畫於下一年度之創新研究計畫中，加入分析地中微震動訊號。由於透過 GPS 以及 SAA 之連續監測記錄得知大崙山順向坡的滑動塊體活動性為持續性潛變（creeping），且會因為地下水的升降而有快慢之差異。因此，本研究團隊擬於下一年度於大崙山順向坡區域增加佈設多點位之「地震儀（seismograph）」，以濾出地下滑動面的訊號，並進一步嘗試解析訊號的來源（相當於深度）與震盪方向（相當於滑動方向）；同時也將會考慮地層構造特性，如地層層序、不連續面空間分佈等。本研究團隊計畫於下一年度整合地表 GPS 位移速度場與地中滑動面幾何及位移量，預期將可獲得大崙山順向坡中三度空間的滑動塊體之幾何模型。

參考文獻

1. 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。
2. 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，第 59-70 頁，2004。
3. 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。
4. 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。
5. A. W. Skempton, “Residual strength of clays in landslide, folded strata and the laboratory,” *Géotechnique*, 35(1), 3-18, 1985.
6. C. I. Massey, “The dynamics of reactivated landslide: Utiku and Taihape, North Island, New Zealand,” *Doctoral Dissertation*, Durham University, Durham, England, 2010.
7. C.-J. Jeng and D.-Z. Sue, “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.*, Vol. 16, pp. 1309-1321, 2016.

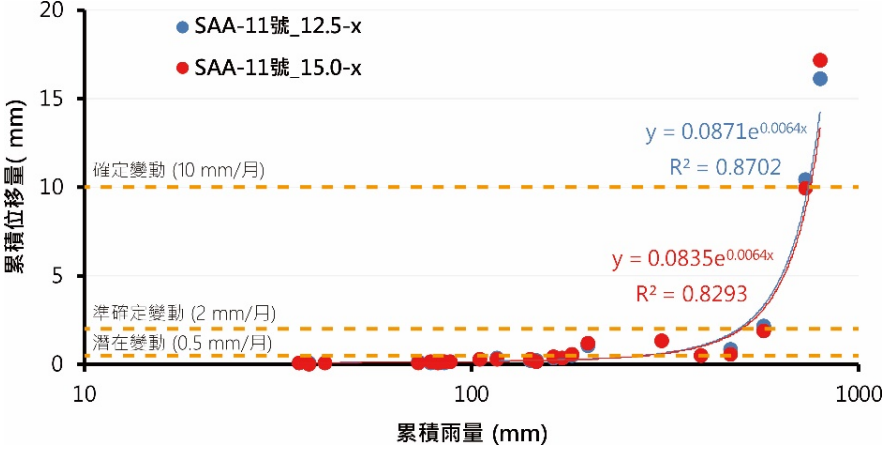
8. C.-H. Tseng, Y.-C. Chan, C.-J. Jeng and Y.-C. Hsieh, “Slip monitoring of a dip-slope and runout simulation by the discrete element method: a case study at the Huaan University campus in northern Taiwan,” *Natural Hazards*, Vol. 89, Iss. 3, pp. 1205-1225, 2017.
9. D. J. Varnes, “Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control” (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33, 1978.
10. G. Urciuoli, L. Picarelli, and S. Leroueil, “Local soil failure before general slope failure,” *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(1), 103-122, 2007.
11. J. Saastamoinen, “Contributions to the theory of atmospheric refraction,” *Bulletin Géodésique* (1946-1975), 107(1), 13-34, 1973.
12. M.-C. Tsai, S.-B. Yu, T.-C. Shin, K.-W. Kuo, P.-L. Chang, and M.-Y. Ho, “Velocity Field Derived from Taiwan Continuous GPS Array (2007-2013),” *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 26(5), 2015.
13. M. Helfin, W. Bertiger, G. Blewitt, A. Freedman, K. Hurst, S. Lichten, U. Lindqwister, Y. Vigue, F. Webb, T. Yunck, and J. Zumberge, “Global geodesy using GPS without fiducial sites,” *Geophysical Research Letters*, 19(2), 131-134, 1992.

14. R. O. Fell, O. Hungr, S Leroueil, and W. Riemer, “Keynote lecture-geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil,” ISRM, International Symposium, 2000.
15. S. Leroueil, J. Locat, L. Vaunat and R. Faure, “Geotechnical characterisation of slope movements,” Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides, Trondheim, Norway, Balkema, 53-74, 1996.
16. T. Takasu, “Real-time PPP with RTKLIB and IGS real-time satellite orbit and clock” , GS Workshop 2010, Newcastle upon Tyne, England, June 28 - July 2, 2010.

附錄

附錄一、期末審查暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	完成計畫成果。	謝謝委員提出之意見。
二	本局推動大規模崩塌黃色警戒試行，計畫針對新北市石碇區進行深層崩塌地區之降雨量與地下水位進行監測與運動分析，建議可針對該區域之降雨量或移動量提出警戒值，以提供相關大規模崩塌計畫參考。	謝謝委員提出之意見。根據本研究團隊於 107 度水保局創研計畫「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」之研究成果，大崙山坡頂之累積降雨量超過 120 mm 之後，W-1 中地下水位面即開始快速上升，幅度最高可達 30 公尺。在地下水位面上升時，會浸沒深度約 30 至 35 公尺的平面型滑動面，SAA 即記錄到該滑動面啟動加速滑移。滑動面的加速滑移亦會反映在地表位移。據 GPS 小時解結果，在高地下水位期間(21 公尺)，坡面在三分量方向上的位移皆將近 1 公分。 然須強調的是，該值係針對華梵校園內東半部的滑動塊體，且俟雨停且地下水位下降後，滑動即趨緩。故建議須擬定依據累積降雨的兩個層級以上之警戒門檻值，第一級為管理單位內之注意值(如 100-500 mm)，第二級始發佈公開警戒(如 500-750；參考下圖)，第三即以上則考慮應對之行動。

項次	審查意見	回覆辦理情形
		以上即為「分區分塊」之概念，即須針對已有明確變動情形之山坡地始進行警戒或發佈。
	 本團隊於 108 年度創研計畫「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(2)」之研究成果。	
三	如果可以將地面GPS檢測資料與雷達衛星InSAR觀測方法進行比對，則期望能反饋評估雷達應用於地表變形監測的可行性。	謝謝委員提出之意見。根據許多研究成果，InSAR 對於觀測地殼變動在都會區或是植被極為稀少之地表才有良好與精確之成果，即連續且大面積之變形(干涉環)。而在植被廣佈之台灣山區，並不具備這樣之條件，反射極為不佳；且雷達波反射好壞又取決於衛星面向崩塌潛勢區坡面之角度、雷達影像之像素大小(即地面解析度)。另雷達影像之拍攝時間間隔也為一限制(Sentinel-1 拍攝台灣間隔為 6 天，即可能剛好沒有拍攝到坡體位移)。因此本研究團隊認為，InSAR 於植被茂密之區域，僅適用長期觀測，且須要比對觀測區之地表觀測，始能達到較為可靠之結果。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	建議針對即時監測的部分 進研究。	謝謝委員提出之意見。本研究團隊已申請 110 年度之創研計畫，地表的監測資料大部分為具有即時解算與呈現功能的連續雙頻 GPS(http://140.121.130.58/HFU.aspx)。本團隊亦會在新一年度計畫中持續維護與精進該設備，期望得到可靠與精確的研究成果。
五	目前尚無明顯移動資料，多 為各分析工具比較為主，建 議持續監測。	謝謝委員提出之意見。本研究團隊已申請 110 年度之創研計畫，並加入新的地中觀測方法(即觀測波體位移產生之地中微地動)，期望由本研究團隊的地表與地中的觀測，配合華梵大學與大崙山現地既有的監測資料，得到與坡體特性相關的監測研究成果。