
**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）**
**Case study of high precision GPS and
in-situ monitoring systems applied to deep-
seated sliding dip slope (2)**

執 行 單 位：華梵大學、國立中央大學應用地質研究所

執 行 期 間：108 年 02 月 20 日至 108 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 108 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）

摘要

本計畫結合大崙山坡面上高精密 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。並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。

根據本計畫去年度的研究結果，得知大崙山順向坡內的地下水位面主要是沿著地下 10 至 30 公尺間之上邊坡的滑動面，以及下邊坡之崩積土與下伏木山層岩盤之土岩交界面兩處分佈。在上邊坡部分，當地下水完全浸沒 20–30 公尺深之平面滑動型之滑動面時，該滑動塊體即開始以平均 1 mm/天的速度滑動，大於平時與無強降雨的潛移速度（2–3 mm/月）。而地表的雙頻與單頻 GPS 連續監測系統因精度皆在 5 mm 的情況下，量測到地表的水平位移為西南方 8 mm，垂直向位移

則約為 7 mm，符合 SAA 所記錄到之滑動面位移速率。再者，GPS 亦記錄到校外更大的由強降雨引發的地表位移，搭配現場調查，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。藉此則可推斷大崙山順向坡中有小規模的淺層滑動塊體。

而本計畫在今年度，納入測試具有即時動態定位功能的雙頻 GPS 連續監測系統。因其相對低廉的價格，且能即時顯示坡體當下之情形，將來可考慮將該系統納入坡地連續即時監測的方式之一。另一方面，藉由分析多場降雨事件之降雨型態與累積雨量，並配合 GPS 與 SAA 的地表與滑動面位移的監測成果，累積降雨量與滑動面位移的關係經驗式已初步求出。藉由此經驗式，得知在累積降雨量超過 490 mm 後，滑動面將會快速位移。因此建議增設坡體內之集水井，以將常時地下水位降低至滑動面以下，以減低滑動面遇水弱化之情形。

關鍵詞：大崙山、順向坡、深層滑動、全球定位系統、即時動態定位、長期監測

Case study of high precision GPS and in-situ monitoring systems applied to deep-seated sliding dip slope (2)

Abstract

In the project, we attempt to combine the high precision GPS monitoring systems for ground deformation monitoring with existing monitoring systems and local geological investigations within the Huafan University campus. By analyzing the spatial-temporal relationship 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 non-rainfall periods, as well as sliding mechanisms. Our final goals are to derive experience formulas for the slope movements from the parameters acquired from the analyses, and to obtain results of macro- and microscopic slope movements.

According to the results of our project last year, the groundwater level in the Dalun Mountain dip slope is found to exist on the sliding surface at depth from 10 to 30 m in the upper part of the slope, and on the interface of the colluvium and the bedrock in the lower part of the slope. In the upper part of the slope, when the sliding surface at depths from 20 to 30 m is entirely immersed in the groundwater, the sliding mass starts to slide at a rate of 1 mm/day, being larger than the creeping rate in the non-rainfall

period (2–3 mm/month). With the precision of 5 mm, the dual- and single-frequency continuous GPS systems on the slope surface record horizontal displacement of 8 mm toward southwest and vertical displacement of about 7 mm, being consistent in the displacement rate recorded by the SAA of the same rainfall event. In addition, the GPS systems also record larger displacement of the slope surface outside the campus induced by strong rainfall. After surveying the sites, the displacement is the sliding of the local and shallow poorly cemented weathered material or colluvium. It is hence inferred that there are shallow and small-scale sliding blocks in the Dalun Mountain dip slope.

In the project this year, we apply new dual-frequency continuous GPS systems with real-time kinematic positioning. The systems have relatively lower price and can display real-time condition of the dip slope, so it is suggested to be applied for one of the monitoring systems in the future. On the other hand, by analyzing the rainfall types and cumulative rainfall of many rainfall events, as well as monitoring results from the GPS and SAA for the slope surface and sliding surface, the experience equation for the relationship between the cumulative rainfall and the displacement of the sliding surface has been acquired. By applying this experience equation, it is acquired that once the cumulative rainfall exceeds 490 mm, the sliding surface would accelerate its sliding speed. Therefore, we suggest that extra drainage wells should be added within the slope body, so that the normal groundwater table can lower below the sliding surface, in order to eliminate the weakening when the sliding surface immerses the groundwater.

Keywords: Dalun Mountain, Deep-seated sliding, GPS, RTK, Long-

term monitoring

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	VI
表次.....	VIII
圖次.....	IX
第一章 緒論.....	1 -1
第一節 計畫緣起	1 -1
第二節 計畫目標	1 -2
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
第三章 GPS 監測資料解算與分析	3 -1
第一節 GPS 資料解算	3 -1
第二節 大崙山順向坡之位移情形	3 -4
第四章 數值模擬分析與位移預測模型	4 -1
第一節 GEOSTUDIO 數值模擬分析	4 -1
第二節 坡地位移與降雨量之關係	4 -8
第五章 討論、結論與建議	5 -1
第一節 討論	5 -1
第二節 結論	5 -6
第三節 建議	5 -8

參考文獻..... 參-1

附錄..... 附錄-1

附錄一、期末聯合審查暨回覆辦理情形 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 4-1 SAA-11 坡地位移與累積雨量數據	4-11
表 4-2 地層變動管理值	4-12
表 4-3 中央氣象局雨量分級表	4-13
表 5-1 廬山北坡各部位之 GPS 觀測位移量	5-4
表 5-2 大崙山順向坡各部分之 GPS 觀測位移量	5-5
表 5-3 日本與台灣之地層與地表變位管理值	5-6

圖次

圖 1-1 大崙山地區立體地形圖	1 -3
圖 1-2 大崙山順向坡之 GPS 連續監測站分佈	1 -4
圖 2-1 華梵大學校區地層層序與岩性	2 -4
圖 2-2 新北市石碇區大崙山周邊地質敏感區位置圖	2 -5
圖 2-3 華梵大學 DH-1(a)與 W-3(b)岩芯中 A 斷層深度	2 -6
圖 2-4 現有傾斜觀測管與鑽孔分佈圖	2 -9
圖 2-5 大崙山區地下構造與地下水位分佈	2 -10
圖 2-6 華梵大學校園內地下水體之分佈	2 -11
圖 2-7 華梵大學校園內地下水流向	2 -11
圖 2-8 人工量測式傾斜觀測管的位移情況	2 -13
圖 2-9 華梵大學校園東南部份之滑動塊體	2 -14
圖 2-10 編號 17-7 與 17-8 傾斜觀測管所量測到之變位	2 -15
圖 2-11 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 大崙山坡地之位移時間序列(南北向)	3 -8
圖 3-2 大崙山坡地之位移時間序列(東西向)	3 -9
圖 3-3 大崙山坡地之位移時間序列(垂直向)	3 -10
圖 3-4 單頻 HF06 點位西側與南側之淺層破壞	3 -12
圖 3-5 單頻 HF12 處之淺層破壞	3 -12

圖 3-6 大崙山順向坡之 GPS 水平位移速度場	3-13
圖 3-7 華梵大學圖資大樓南側之土方崩坍	3-14
圖 4-1 大崙山順向坡地層剖面	4-4
圖 4-2 華梵大學校區 SEEP/W 模型	4-4
圖 4-3 水分特性曲線	4-5
圖 4-4 水力傳導係數曲線	4-5
圖 4-5 2017 年 1-12 月各監測資料之時間序列	4-6
圖 4-6 大崙山順向坡之地下水位變化模擬結果	4-6
圖 4-7 大崙山上邊坡之地下水位變化模擬結果	4-7
圖 4-8 地下水位變化之模擬與觀測結果比較	4-7
圖 4-9 累積降雨量導致坡體位移門檻值曲線	4-11
圖 4-10 SAA-11 坡地累積位移與累積雨量關係圖	4-12
圖 4-11 大崙山順向坡土壤飽和水力傳導圖	4-13
圖 4-12 地表位移、滑動面位移與地下水位時間序列	4-14
圖 5-1 廬山 GPS 測站位置與地表位移速度場	5-3
圖 5-2 廬山單頻 GPS 測站時間序列(LS14)	5-4

第 1 章 緒論

第一節 計畫緣起

華梵大學所在的新北市石碇區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。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（圖 1-1）。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（圖 1-2）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。

第二節 計畫目標

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（圖 1-2），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：

一、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。

二、本年度目標

- 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。



圖 1 -1 大崙山地區立體地形圖

資料來源：本計畫

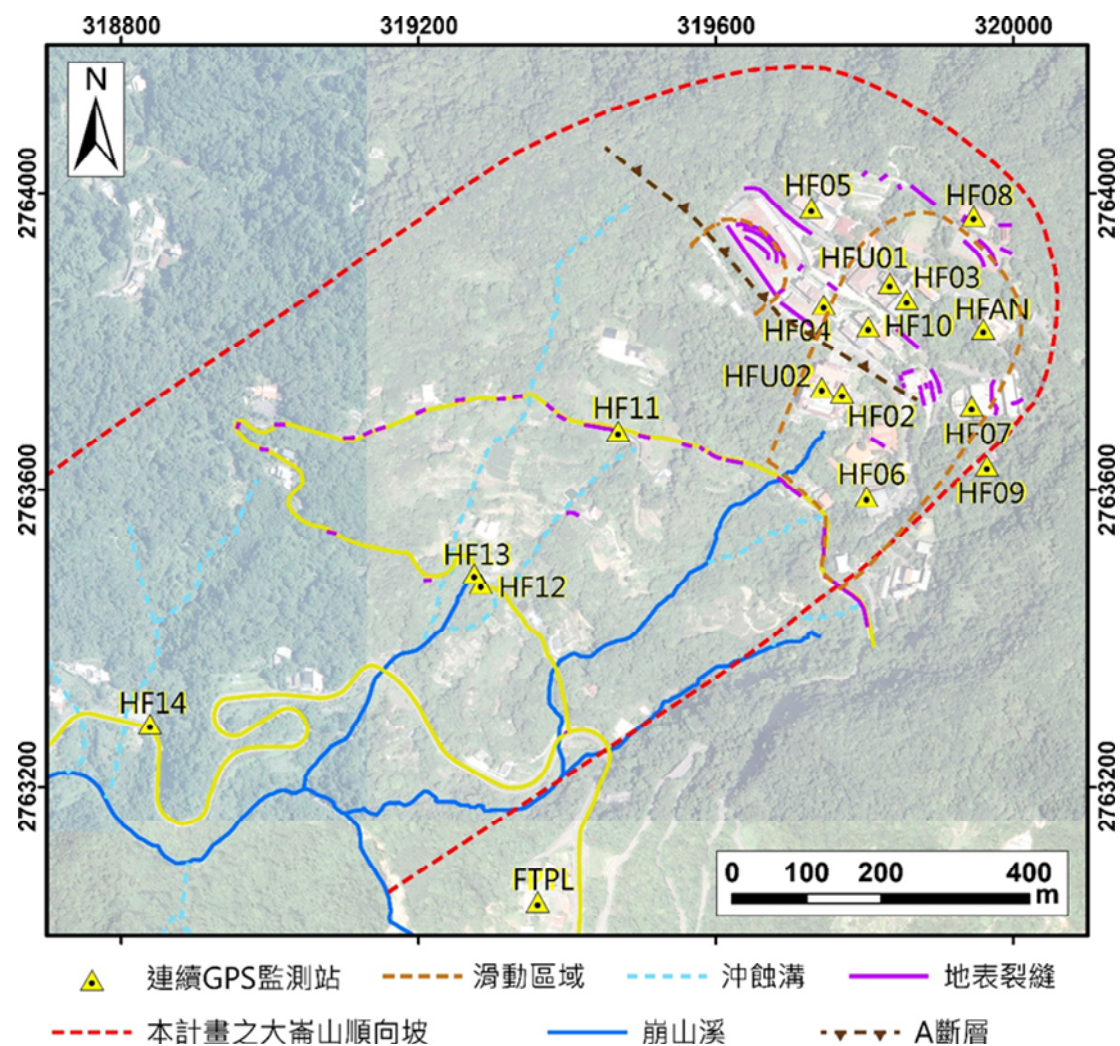


圖 1-2 大崙山順向坡之 GPS 連續監測站分佈

資料來源：本計畫

第2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 1-1）；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

1.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 2-1；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）。

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)等四種形式。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)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，導致淺層的弧形滑動，而這些崩坍的材料，則會進入沖蝕溝中產生小規模的土石流。

2.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 2-2)。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 2-2 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 2-2；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 2-3 所示。

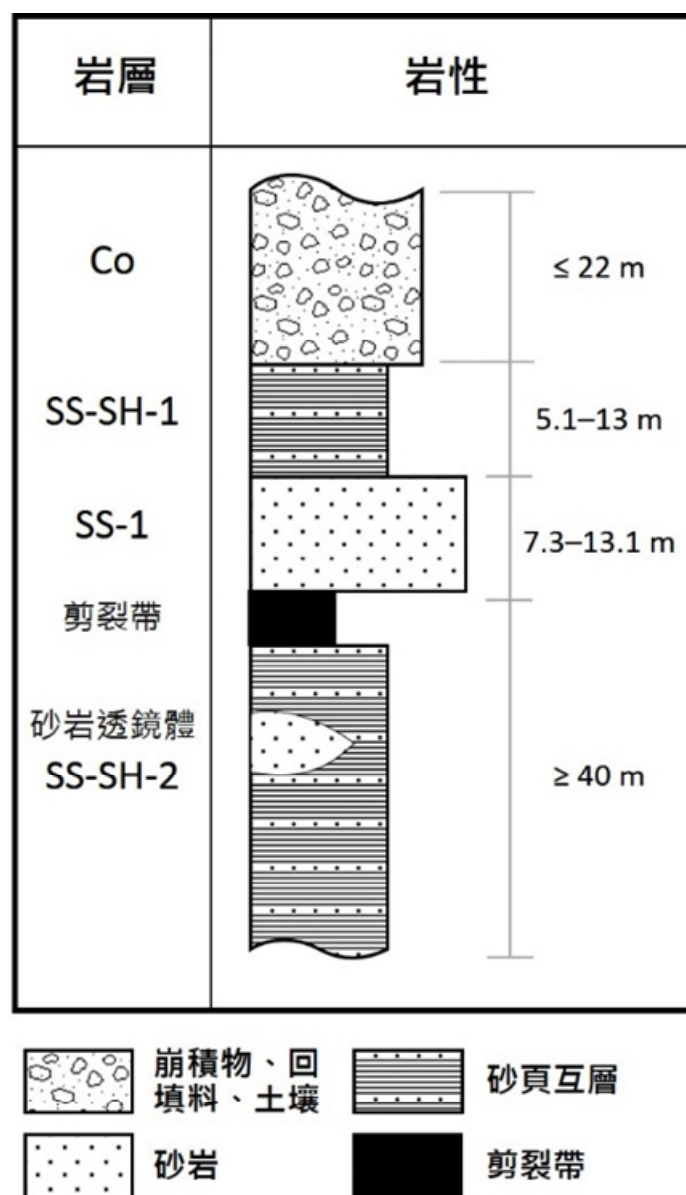


圖 2-1 華梵大學校區地層層序與岩性

資料來源：黃鑑水與鄭清江，2004

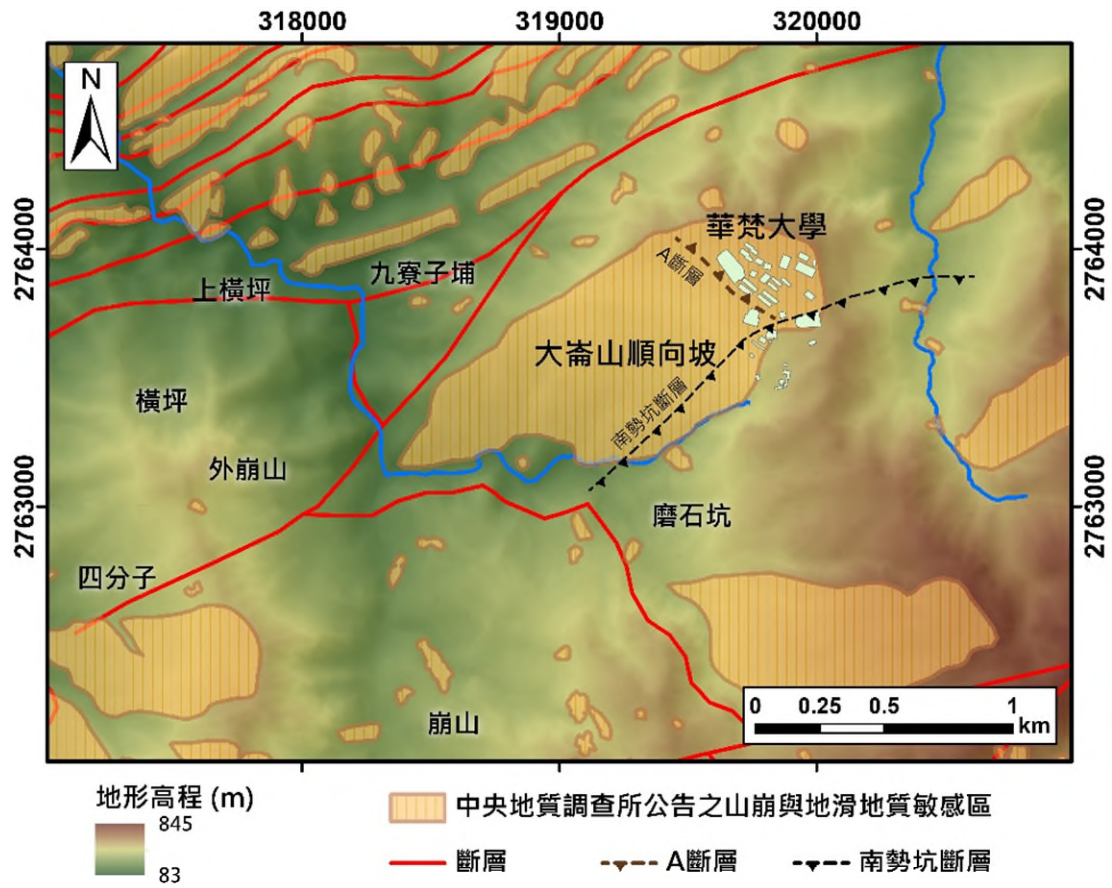


圖 2-2 新北市石碇區大崙山周邊地質敏感區位置圖

資料來源：中央地質調查所與本計畫

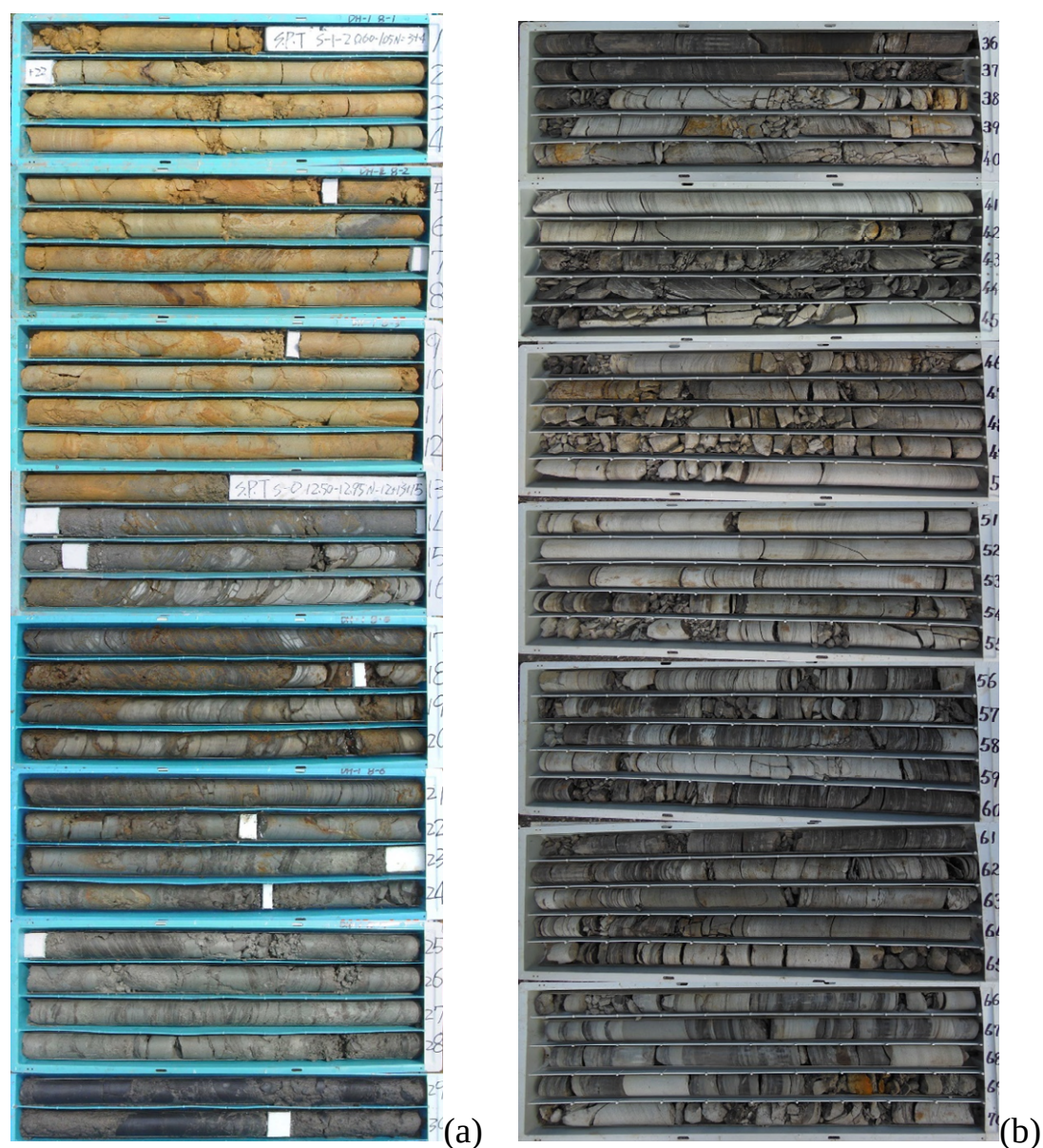


圖 2-3 華梵大學 DH-1(a)與 W-3(b)岩芯中 A 斷層深度

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 2-4）。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 2-5 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 2-6)。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 2-7)。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。

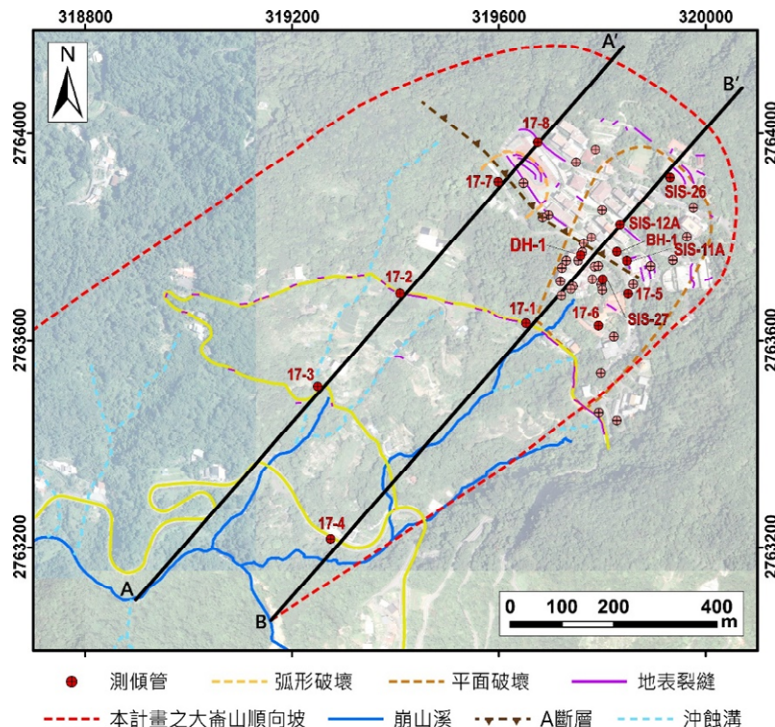


圖 2-4 現有傾斜觀測管與鑽孔分佈圖

資料來源：地質鑽探報告，2017；謝宗燁，2009

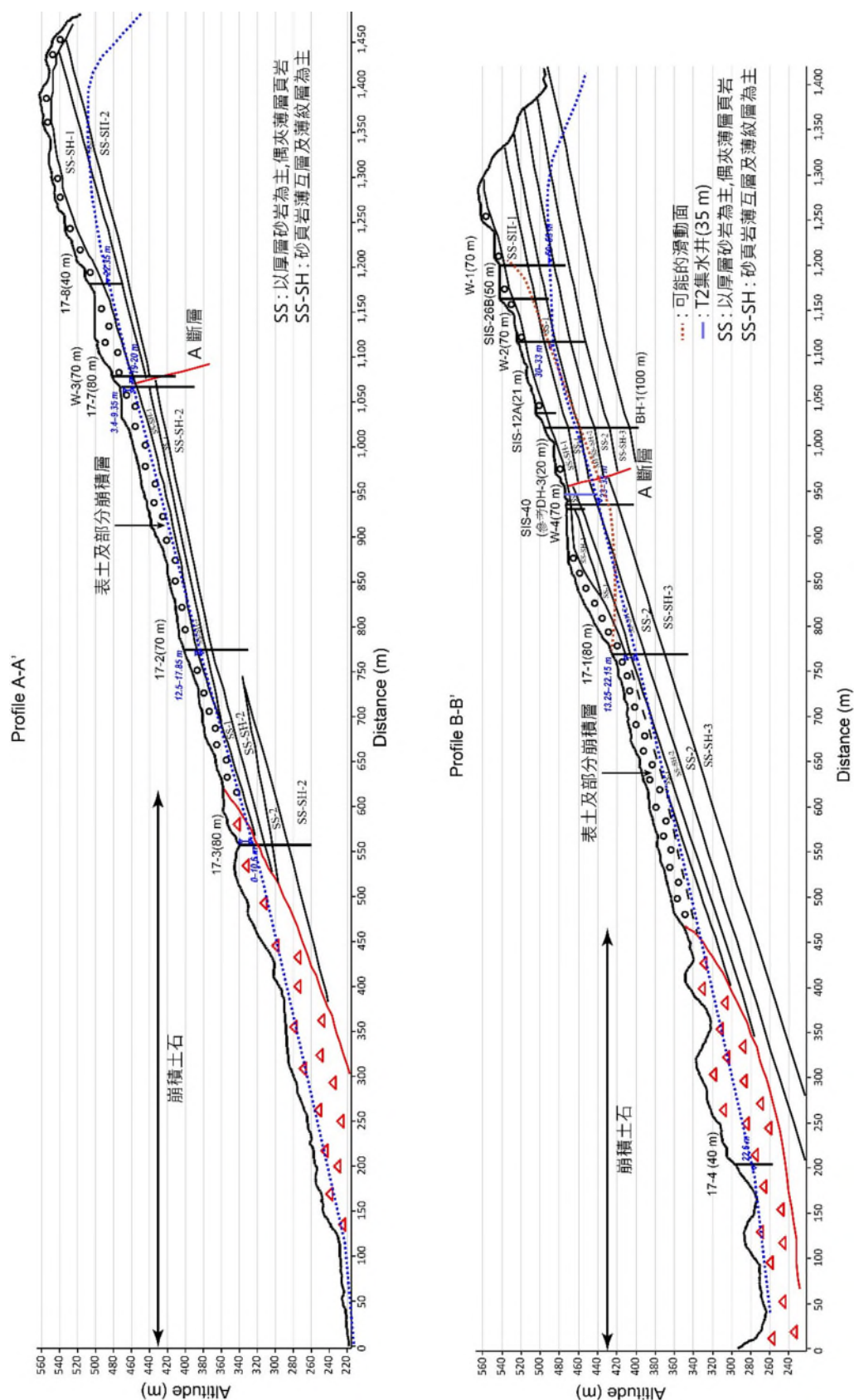


圖 2-5 大崙山區地下構造與地下水位分佈

資料來源：本計畫

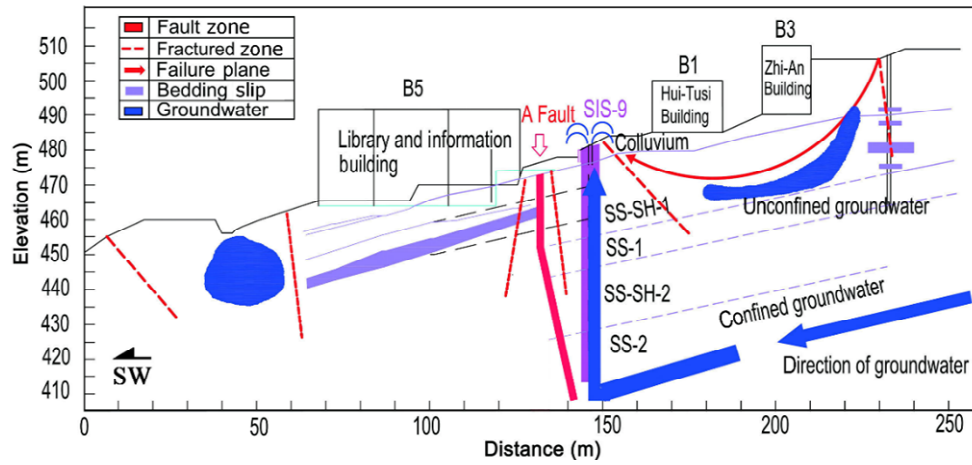


圖 2-6 華梵大學校園內地下水體之分佈

資料來源：Jeng and Su, 2016

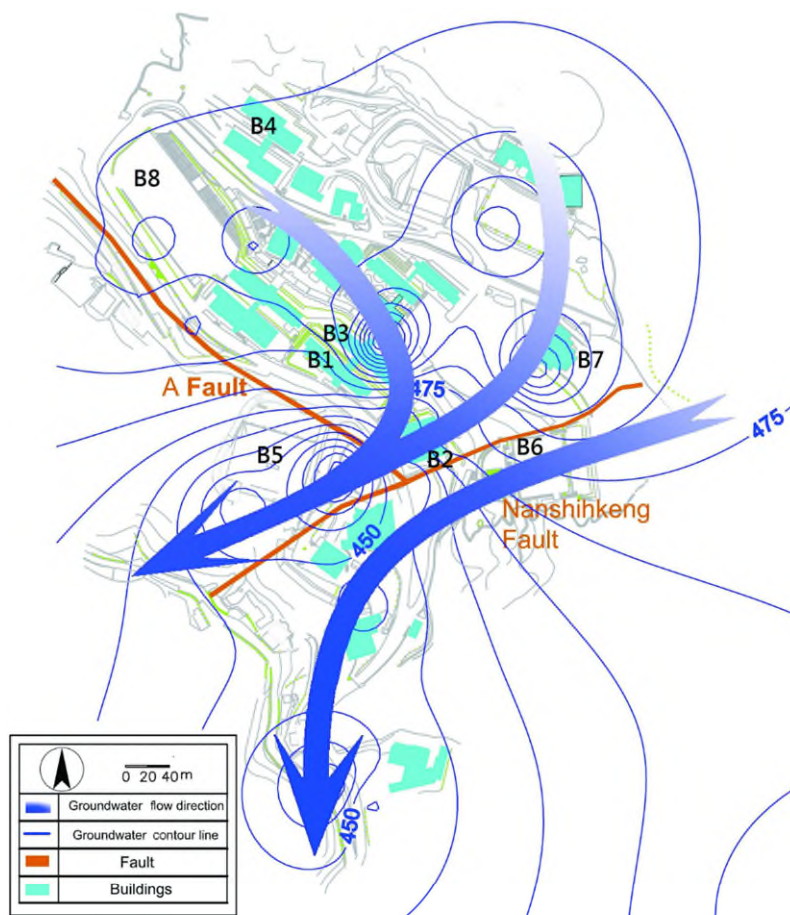


圖 2-7 華梵大學校園內地下水流向

資料來源：Jeng and Su, 2016

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 2-4），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 2-4）。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 2-8）。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 2-9）。

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 2-10）；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冠部張裂縫（圖 2-11），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。

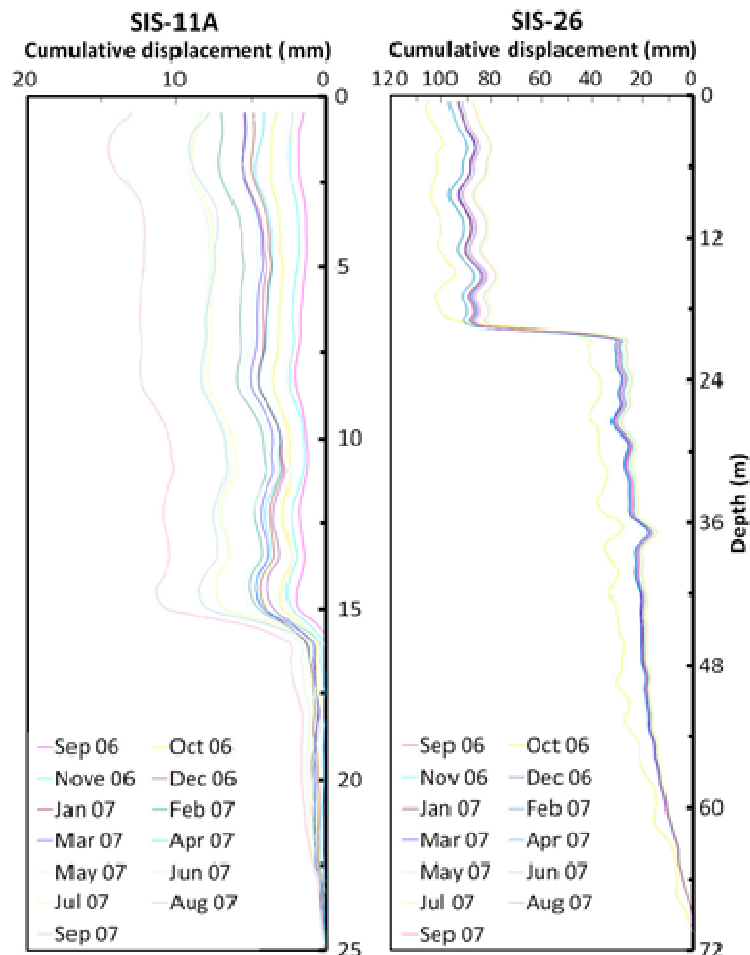


圖 2-8 人工量測式傾斜觀測管的位移情況

資料來源：Tseng et al., 2017

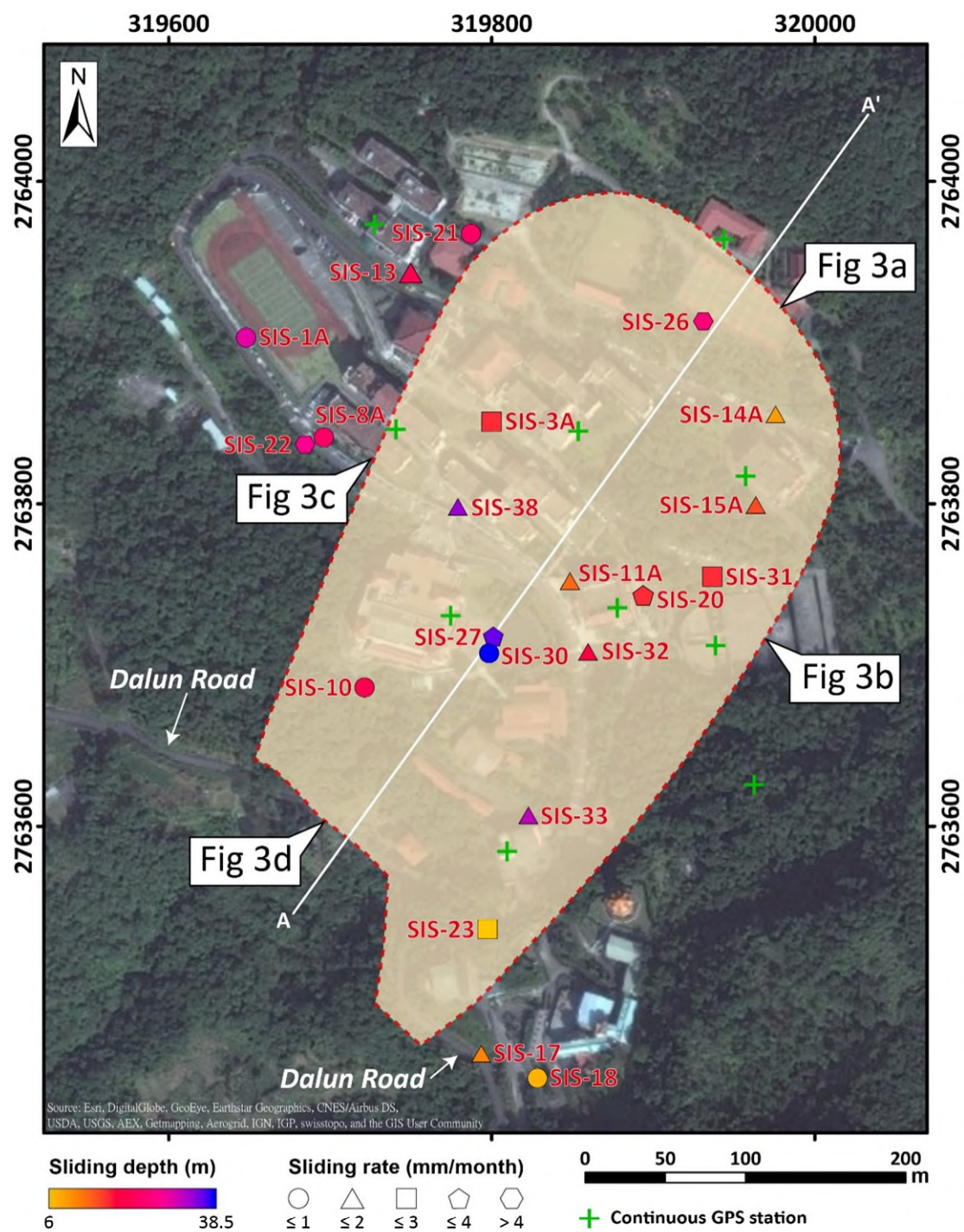


圖 2-9 華梵大學校園東南部份之滑動塊體

資料來源：Tseng et al., 2017

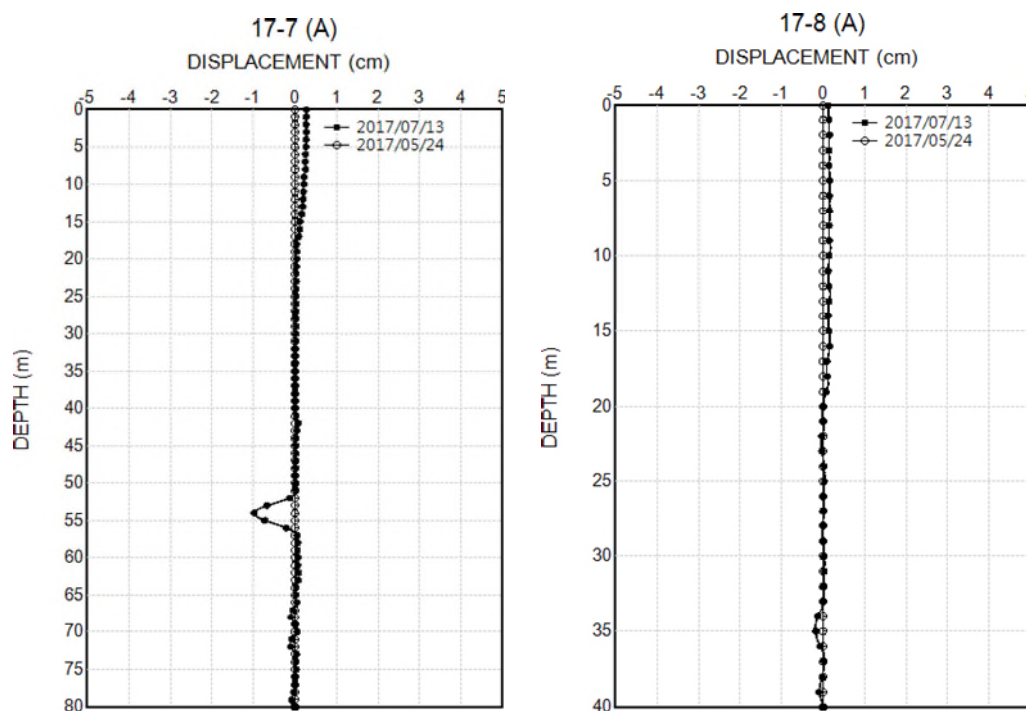


圖 2-10 編號 17-7 與 17-8 傾斜觀測管所量測到之變位

資料來源：地質鑽探報告，2017



圖 2-11 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 3 章 GPS 監測資料解算與分析

第一節 GPS 資料解算

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（Takasu, 2013）。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，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，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 1013.25 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 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。

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 station））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。然本計畫設備並無無線電以及固定 IP 可供基準站與待測站間之通訊，故無法達成即時解算定位；再者，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（發佈時間為一星期後）精確，因此水平方向的定位精度目前最

高為 1 cm。

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 大崙山順向坡之位移情形

大崙山坡地上設置了 15 座高精度 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 HF10）連續監測站，以及 2 座雙頻式（dual-frequency，HFAN 與 FTPL）連續監測站（圖 1-2）。本計畫蒐集了 2016 年 4 月至 2019 年 5 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 3-1、圖 3-2 與圖 3-3 所示。該位移時間序列中同時顯示日雨量（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使用。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運動所引發之地表位移。然而在 2018 年時，因為雙頻式連續監測站 FTPL 發生故障，導致無法記錄資料，故改以 HFAN 做為參考站。在解算時，所有單頻站皆已經扣除 HFAN 本身之位移量，以獲得純粹之邊坡運動所引發之地表位移。

一、位移時間序列

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（綠色實線），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 個單頻點位中（HF05 與 HF13 的資料因離散程度過大而不予列出），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 1-2 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 3-4）。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（圖 3-5）。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。

二、位移速度場

位移速度場為將研究區域內所選取之 GPS 連續監測站的位移資料，求取在某監測時間段內之位移情形。本計畫取從 2016 年 4 月至 2019 年 9 月之時間段，以加權最小二乘法（weighted least squares method）對該時間段內的 GPS 連續監測站之各分量時間序列做線性迴歸，以求得各方向之速度。之後再將南北向與東西向之速度量值求

合向量，即可得到水平方向的速度向量。將各 GPS 連續監測站之速度向量繪製於研究區域內的地圖中，即可得到研究區的 GPS 地表水平位移速度場，如圖 3-6 所示。在圖 3-6 中，在綠色潛在滑動區塊之內的各 GPS 水平速度向量，大致上符合坡向為西南方向的位移方向，且位移速度差異不大。然而，滑動區塊內的局部地區則可能因受到小規模的淺層破壞影響，則有不同的位移方向，如 HF02（圖資大樓南側土方的淺層崩塌（圖 3-7））、HF04（世學館東北側門口之地表破裂）、HF06（公車調度亭西南側的地表破裂；大崙山地區（新北市-石碇區-T001）潛在大規模崩塌區調查及治理規劃，2019）。在華梵大學校區以外的單頻 HF12 也有類似的情形（圖 3-5）。至於 HF05 的位移量與方向皆與其他各站有顯著的不同，則可能是該站本身儀器的問題，唯目前尚未釐清。

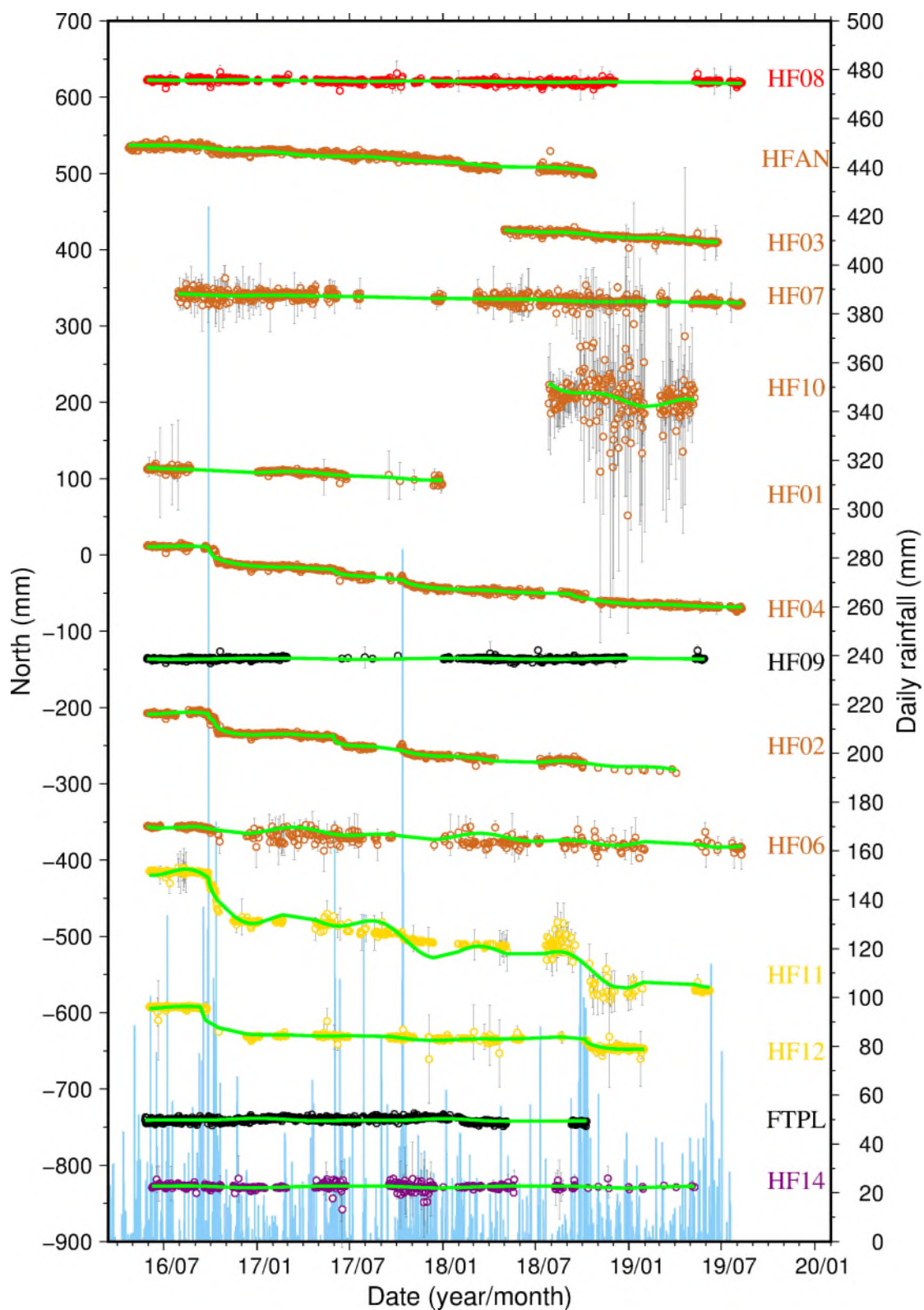


圖 3-1 大崙山坡地之位移時間序列（南北向）

資料來源：本計畫

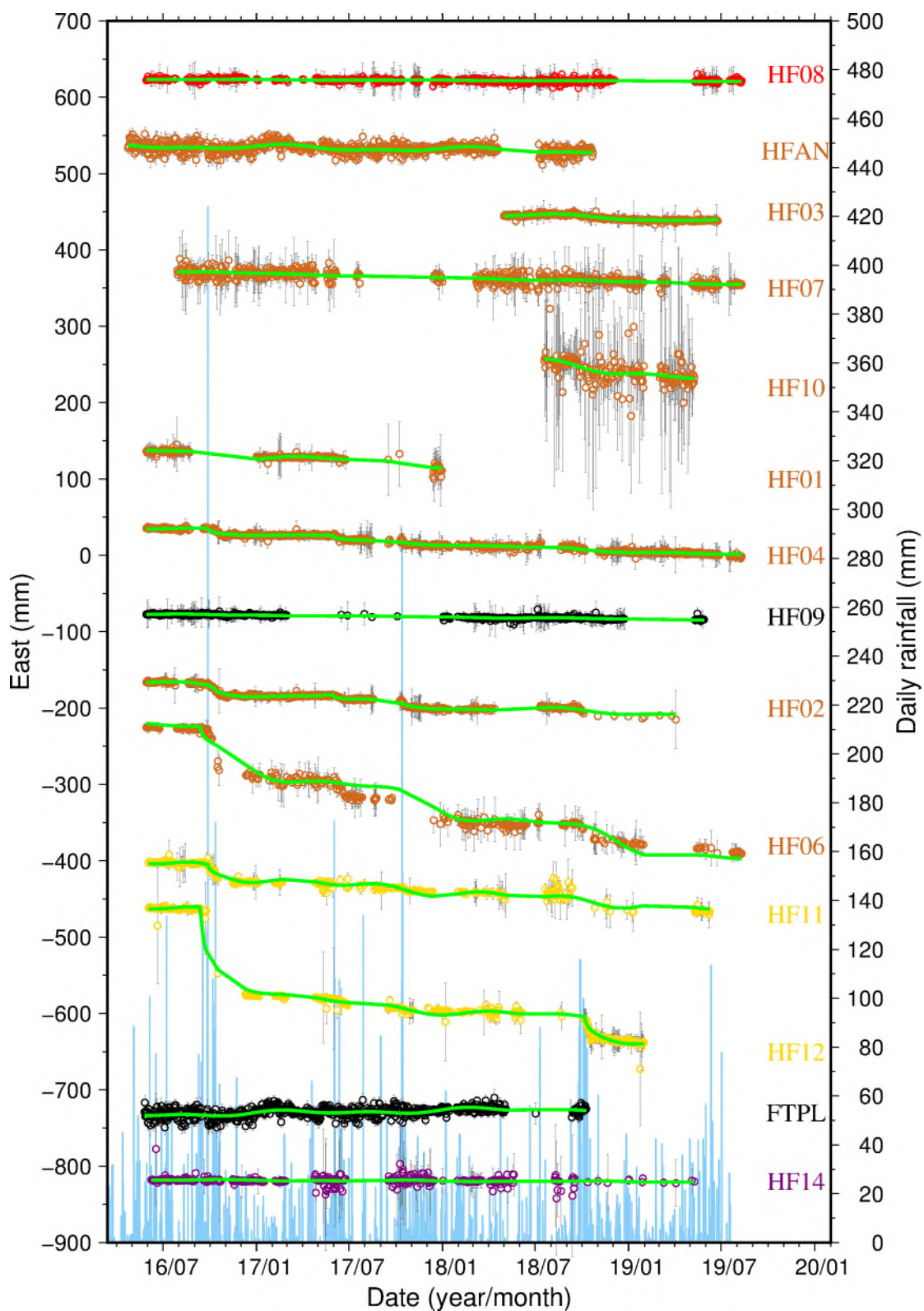


圖 3-2 大崙山坡地之位移時間序列（東西向）

資料來源：本計畫

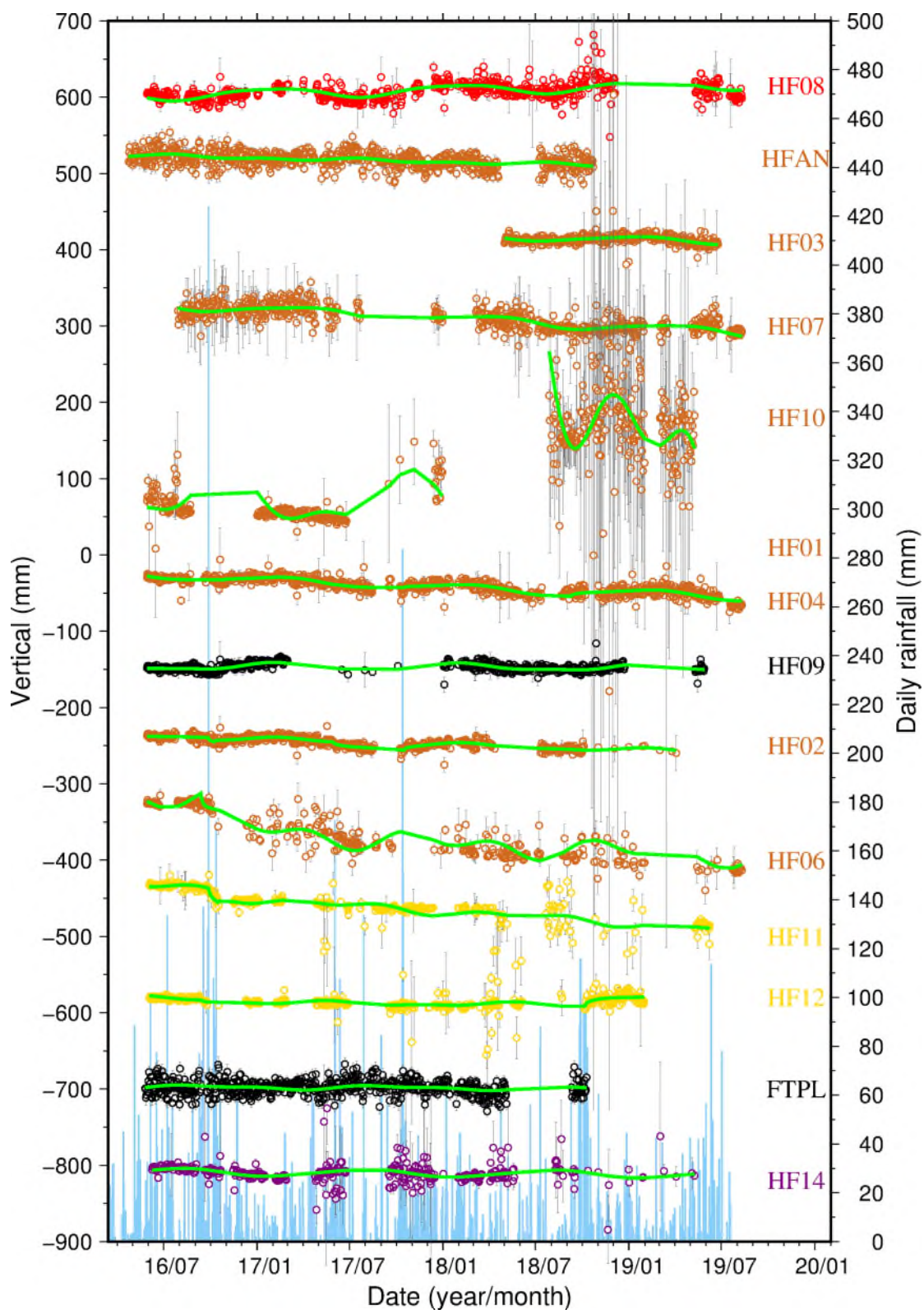


圖 3-3 大崙山坡地之位移時間序列（垂直向）

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	
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	
HF10	順向坡上部	淺層回填層	西南向下滑	
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	
HF09	順向坡以外	斜交坡、岩盤	穩定無位移	
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	
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	
HF14	順向坡趾部	淺層回填層	穩定無位移	

資料來源：本計畫



圖 3-4 單頻 HF06 點位西側與南側之淺層破壞

資料來源：本計畫



圖 3-5 單頻 HF12 處之淺層破壞

資料來源：本計畫

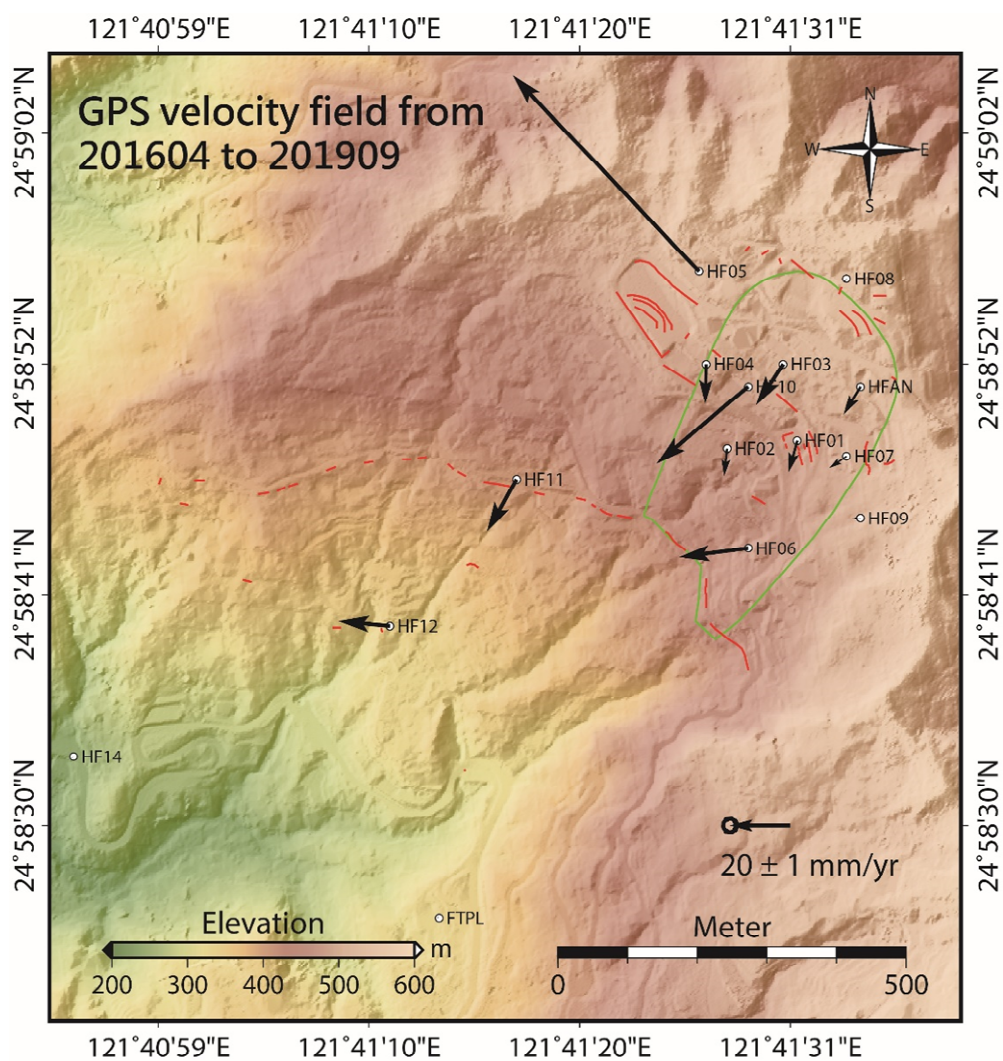


圖 3-6 大崙山順向坡之 GPS 水平位移速度場

資料來源：本計畫



圖 3-7 華梵大學圖資大樓南側之土方崩坍

資料來源：本計畫

第 4 章 數值模擬分析與位移預測模型

第一節 GeoStudio 數值模擬分析

本計畫嘗試將大崙山順向坡之地質和水文資料，輸入二維有限元素（Finite Element）大地工程數值分析商用套裝軟體 GeoStudio 中之 SEEP/W 地下水滲流分析模組進行大崙山向坡中地下水滲流分析，並將模擬結果和監測資料進行比較，分析降雨對邊坡產生之影響。其分析過程主要利用達西定律（Darcy's Law）計算各個網格點於穩態（steady-state）或暫態（transient）中之流速變化，並根據流量平衡以計算水分於飽和、未飽和以及過飽和土壤中之流動行為。本模型是採用穩態滲流分析進行模擬降雨前的常時地下水位；穩態滲流分析是根據代表地下水來源之左右定水頭邊界，以及代表前期入滲（antecedent infiltration）之坡面定流量邊界（ q_0 ），計算模型中各元素皆呈現入流量與出流量平衡時之坡體滲流狀態。開始降雨之後的模擬，則使用暫態滲流進行分析。

在 SEEP/W 模型中之地層模型，係依照本計畫所得之大崙山順向坡剖面中之地層分佈與地質構造進行建構（圖 4-1）。該模型分析初始條件設定以及降雨滲流邊界條件如圖 4-2 所示。其中，AB 為下邊坡定水頭邊界，總水頭高程設定為 258 m；CD 為上邊坡定水頭邊界，總水頭高程設定為 525 m。BC 為不透水邊界（ $Q=0$ ）；AD 為降雨入

滲邊界，也就是坡地表面。最初輸入之各岩層材料水力傳導係數 k 值的說明如下：崩積土層（Co）為壓力鍋試驗（pressure plate extractor test）所得（圖 4-2），而其水分特性曲線則採用 GeoStudio 內建之典型材料特性曲線（圖 4-3），此後再由水分特性曲線公式經轉換為水力傳導係數（圖 4-4）；砂岩（SS）與砂頁岩互層（SS-SH）之水力傳導係數 k 值則是參考一般水力特性，以及現地岩芯資料中所呈現之破碎情況予以調整。至於斷層帶之水力傳導係數 k 值，則是以相對不透水為原則給予設定。在雨量參數方面，本模擬以 2017 年 10 月之卡努颱風之外圍環流期間雨量資料（圖 4-5），與四個自記式水位計之地下水位變化（W-1、W-2、W-3、W-4），以分析該期間雨量與地下水位變化間之關係。

本數值模型的目的，是要模擬大崙山順向坡內之地下水水位，從常時水位因開始降雨後而上升，至降雨停止後回歸到常時水位的變化歷程，並藉此繼續以 GeoStudio 軟體之 SIGMA/W 模組進行坡地的位移與應變情形，並同時與地表 GPS 監測到之坡面位移量與地下 SAA 記錄到之滑動面位移量對照，以修正所輸入之參數，最終則了解大崙山順向坡因降雨所造成的坡體或滑動塊體之運動情形。若模擬結果與現地監測記錄相符，則可以預測未來在不同的降雨量時，大崙山順向坡地或滑動塊體可能的運動情形。

在地下水滲流分析階段，在不斷地調整各地層之 k 值的情況下，模擬結果皆顯示與現地監測不同的情況。亦即，在 A 斷層以上的上邊坡模擬地下水位變化，皆能符合 W-1 所記錄到之情形（圖 4-6、圖 4-7、圖 4-8）；然而在 A 斷層以下之下邊坡區塊，模擬地下水位在降雨量減少與停止後，皆無法如 W-4 所記錄到之回歸到常時水位（圖 4-8）。探究其原因可能為以下幾項：（1）無法確知各地層之水力傳導係數 k 值；（2）地下構造並非模型中之簡單與均質；（3）實際降雨入滲與地下水流出並非單純只經由上、下邊界。由於我們只能在最表層之土層，經由實驗得知坡地地表附近之水力傳導係數。對於地下深處各種不同岩性地層之 k 值，即使有岩芯樣本可供試驗，然地下深處之構造，譬如節理或斷層分佈、局部區域之地層材料情形仍無法得知，因此大崙山順向坡地下水的滲流情形應該比我們目前所知道之情形複雜許多。因此，在地下水水位變化無法模擬出與現地觀測資料一致的情況之下，即暫停下一階段的 SIGMA/W 位移與應變分析。待進一步修正各項參數或釐清模型結構後，再重新進行 SEEP/W 滲流模擬分析。

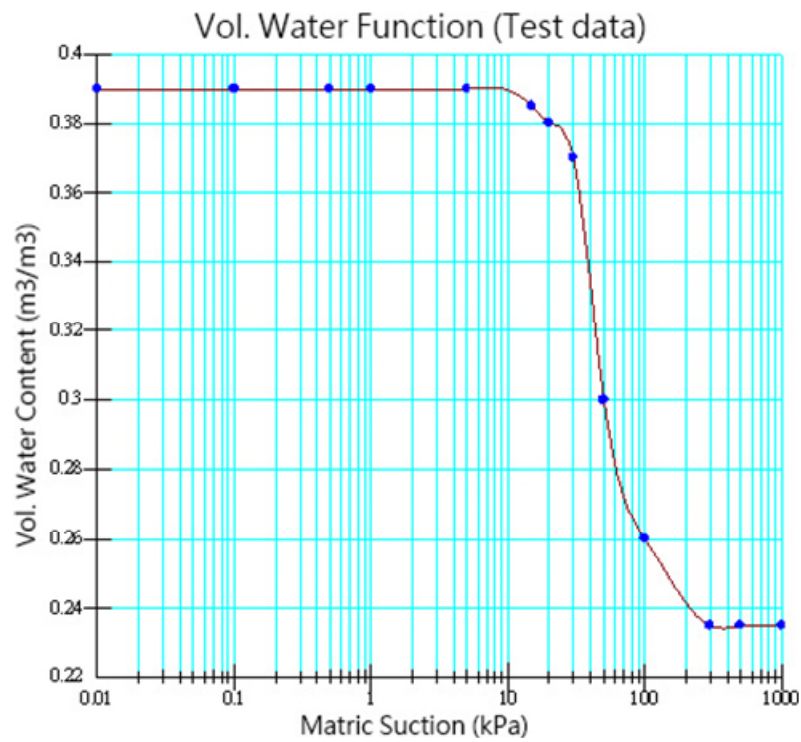


圖 4-3 水分特性曲線

資料來源：本計畫

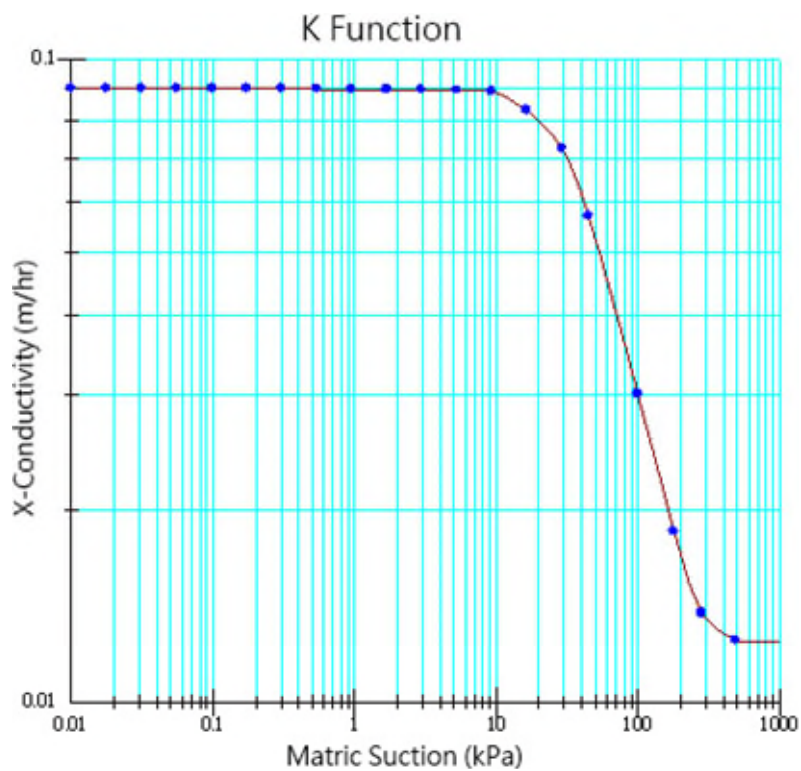


圖 4-4 水力傳導係數曲線

資料來源：本計畫

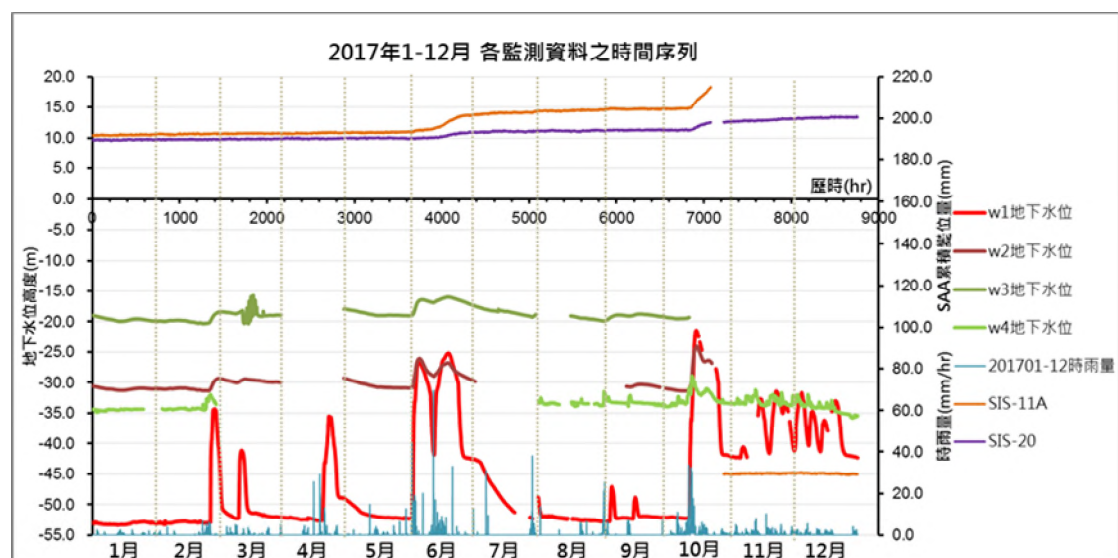


圖 4-5 2017 年 1-12 月各監測資料之時間序列

資料來源：本計畫

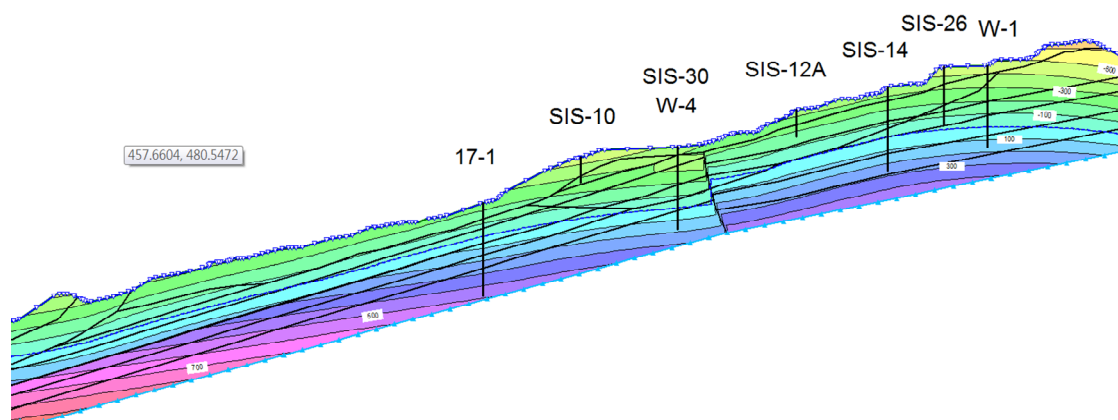


圖 4-6 大崙山順向坡之地下水位變化模擬結果

資料來源：本計畫

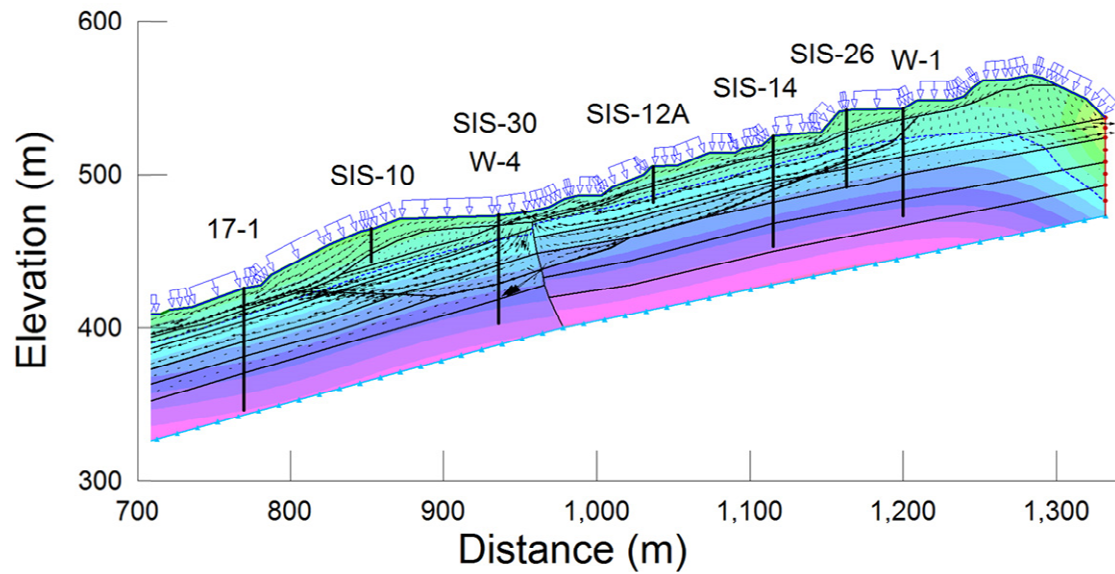


圖 4-7 大崙山上邊坡之地下水位變化模擬結果

資料來源：本計畫

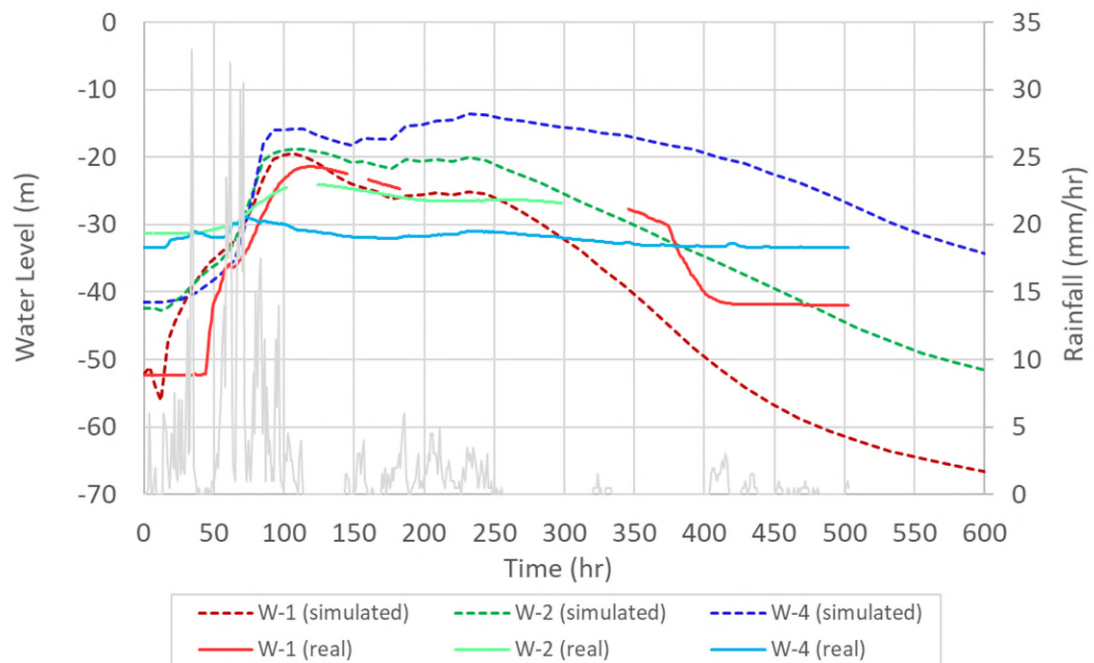


圖 4-8 地下水位變化之模擬與觀測結果比較

資料來源：本計畫

第二節 坡地位移與降雨量之關係

本計畫在今年的最終目標為，歸納出大崙山順向坡中的滑動塊體，因降雨而最終導致位移以及所需時間的經驗公式。此經驗公式將會配合 Jeng and Su 於 2016 年所提出的「累積降雨量導致坡地位移的門檻值」（圖 4-9），於並預期此經驗公式能夠成為華梵大學校方建立坡地災害防治之重要措施的依據，亦可做為發佈預警之依據。

本計畫已在期中報告中，採用 2016 年與 2017 之降雨資料，如各主要颱風降雨雨場的累積降雨量、降雨延時，以及其所造成的滑動面位移量（由 SAA-11 觀測所得；表 4-1），整理出累積雨量與滑動面累積位移的關係（圖 4-10），並歸納出其關係經驗式：

$$y = 0.0871e^{0.0064x}$$

且判定係數為， $R^2 = 0.8702$

其中 y 為滑動面的累積位移量， x 為累積降雨量。在圖 4-10 中，亦加入月位移量之地層變動管理值(表 3-2;地すべり對策技術協會,1978)。藉由圖 4-10 中之關係式，可推算出造成滑動面發生不同程度變動之累積雨量門檻值(即變動速度變化點)分別為：累積降雨量為 273 mm 以上為「潛在變動」、490 mm 以上為「準確定變動」，以及 741 mm 以上為「確定變動」。分析各變動區間門檻值，發現。因此，由該圖即可看出，當大崙山區之累積降雨量超過 490 mm 時（當月位移量為 2 mm 時），華梵校園內之滑動面的位移速度將會加速升高。而當累

積降雨超過 600 mm 時（即該曲線之反曲點），累積位移量將以更快速度升高，可視為位移量的加速度變化點。此時坡地中除了深層的滑動面有位移外，表層的崩積土或人工回填土亦將會有明顯位移（GPS 連續監測站可記錄到）。因此，當氣象局已預報石碇地區可能會有超大豪雨的雨量時（表 4-3），校方可考慮發出警報，或做出相對應之防護措施。

在降雨導致滑動塊體位移之因子方面，降雨下落至地面後，部分的雨水形成地表逕流，另一部分則入滲至地表附近的土壤中。整體而言，累積雨量多、最大時雨量及平均降雨強度大時，地表逕流則增多，且同時入滲量也多。在此條件下，地下水位開始上升的時間縮短，上升至最高水位的時間亦短，上升的幅度也大。而在現實狀況中，坡地中有不同的地質、地形與土壤性質，每場降雨也不同的型態。此外，降雨入滲量也與坡地材料的水力傳導係數有直接關係，會影響地下水位上升量以及所需時間。若有現地的實際量測值，則可幫助改善研判與計算降雨導致地下水位上升所需的時間。曹舜評（2016）使用測滲計於大崙山上邊坡區塊，選取數處坡地量測土壤飽和水力傳導係數（圖 4-11），得知華梵大學校園內之數值介於 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$ cm/sec，屬於粉砂質的類別。

再者，本計畫以圖 2-9 所示之明確滑動塊體做為分析案例。降雨

事件取 2017 年 10 月 11 日至 10 月 31 日期間，卡努颱風所引發之強降雨。其降雨型態為中峰型，累積降雨為 635 mm，降雨延時為 5 日。W-1 記錄地下水在降雨後的第 1 天開始上升，並於第 5 日上升至頂峰，隨後開始下降。後續雖地下水位資料缺失，但根據 11 月 1 日之地下水位在深度 42.1 公尺，且期間並無降雨，因此推測地下水約在降雨結束的 23 日回復至常時水位。HF02 所記錄到之強降雨期間之地表位移達 1 公分，而 SAA-11A 記錄到滑動面之位移在同期間達 5–6 mm。

將 HF02 號單頻 GPS 連續監測站所量測到的地表位移（紅色位移量時間序列）、W-1 之地下水位變化（藍色點線時間序列）以及 SAA 自動記錄式傾斜觀測管之 SIS-11A 號之滑動面位移時間序列並置對照（圖 4-12）。其中，地下水位上升導致滑動面位移與坡地面位移的時間幾乎為一致，故可將此兩參數合併。而此現象除可確認該滑動類型為深層滑動的順向坡外，亦可反映 GPS 連續監測站的高精確度與可靠度，且 GPS 連續監測站的相對低廉費用可較 SAA 自動式與人工式傾斜觀測管。

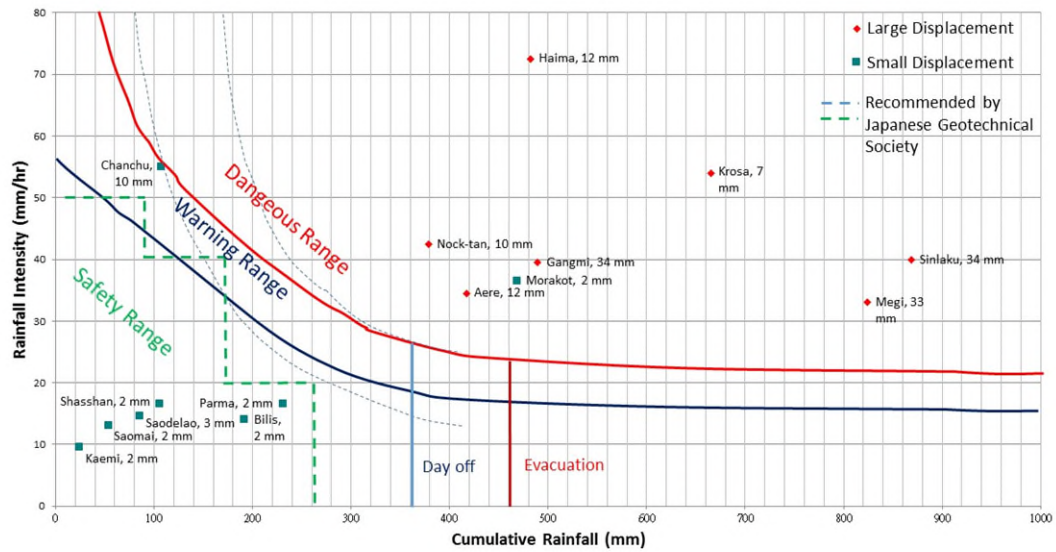


圖 4-9 累積降雨量導致坡體位移門檻值曲線

資料來源：Jeng and Su，2016

表 4-1 SAA-11 坡地位移與累積雨量數據

累積雨量	降雨延時	12.5-x 永久變位	15-x 永久變位	備註
36	2	0.05	0.07	
38	2	0.06	0.04	
42	3	0.06	0.05	
73	5	0.17	0.09	
78.5	5	0.11	0.18	
82	3	0.11	0.08	
88.5	1	0.1	0.13	
105	6	0.14	0.18	
116.5	2	0.27	0.3	
142	5	0.34	0.27	後峰型
147	4	0.24	0.26	前峰型
163	3	0.39	0.46	
172	6	0.38	0.37	
182.5	3	0.52	0.54	
200.5	6	1.08	1.21	前峰型
311	3	1.32	1.35	前峰型
391.5	5	0.51	0.52	

404	25	0.85	0.59	後峰型
467	11	2.18	1.88	颱風、後峰型
570.5	3	2.18	1.88	
728.5	10	10.45	9.96	颱風、中峰型
794	17	16.13	17.18	颱風、後峰型

資料來源：本計畫

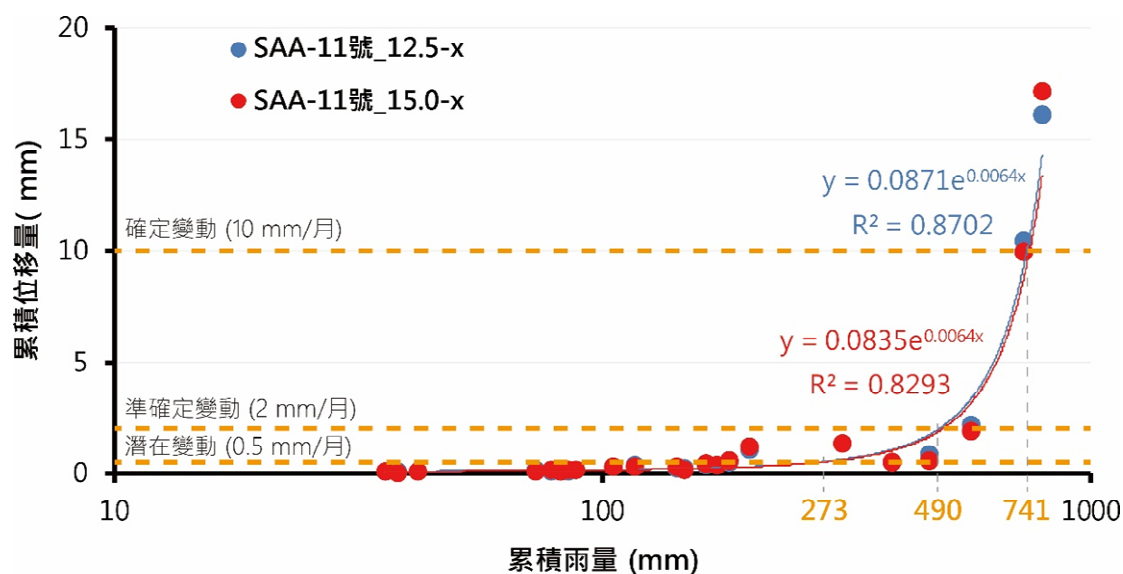


圖 4-10 SAA-11 坡地累積位移與累積雨量關係圖

資料來源：本計畫

表 4-2 地層變動管理值

變動種類	日位移量 (mm)	月位移量 (mm)	一定方向 累積傾向	活動性判 斷	摘要
緊急變動	20 以上	500 以上	非常顯著	急速崩壞	崩壞型、泥流 型
確定變動	1 以上	10 以上	顯著	活潑運動 中	崩積土滑動、 深層滑動
準確定變 動	0.1 以上	2 以上	略顯著	緩慢運動 中	黏土滑動、回 填土滑動
潛在變動	0.02 以上	0.5 以上	稍稍有	有待繼續 觀察	黏土滑動、崖 錐滑動

資料來源：地すべり對策技術協會，1978

表 4-3 中央氣象局雨量分級表

特報種類	雨量分級	新定義	警戒事項
大雨特報	大雨	24 小時累積雨量達 80 毫米以上，或時雨量達 40 毫米以上之降雨現象。	山區：可能發生山洪暴發、落石、坍方。 平地：排水差或低窪地區易發生積淹水。
豪雨特報	豪雨	24 小時累積雨量達 200 毫米以上，或 3 小時累積雨量達 100 毫米以上之降雨現象。	山區：山洪暴發、落石、坍方、土石流。 平地：易發生積淹水。
	大豪雨	24 小時累積雨量達 350 毫米以上之降雨現象。	山區：山洪暴發、落石、坍方、土石流、崩塌。 平地：積淹水面積擴大，河川中下游防河水溢淹。
	超大豪雨	24 小時累積雨量達 500 毫米以上之降雨現象。	山區：大規模山洪暴發、落石、坍方、土石流、崩塌。 平地：易有大範圍積淹水。

資料來源：交通部中央氣象局

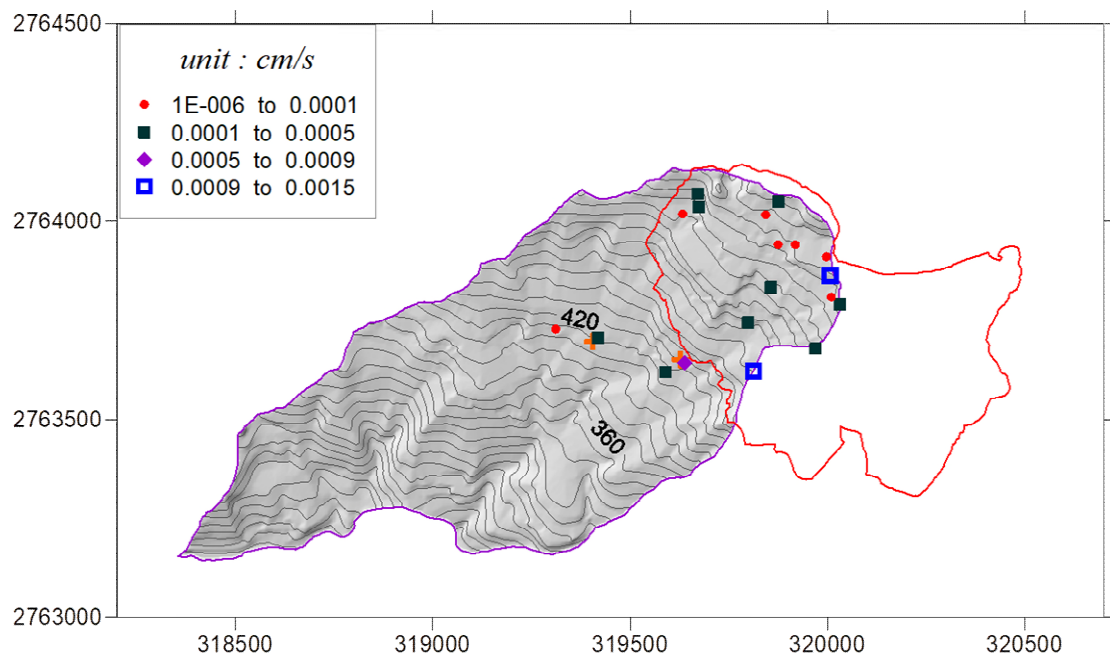


圖 4-11 大崙山順向坡土壤飽和水力傳導圖

資料來源：曹舜評，2016

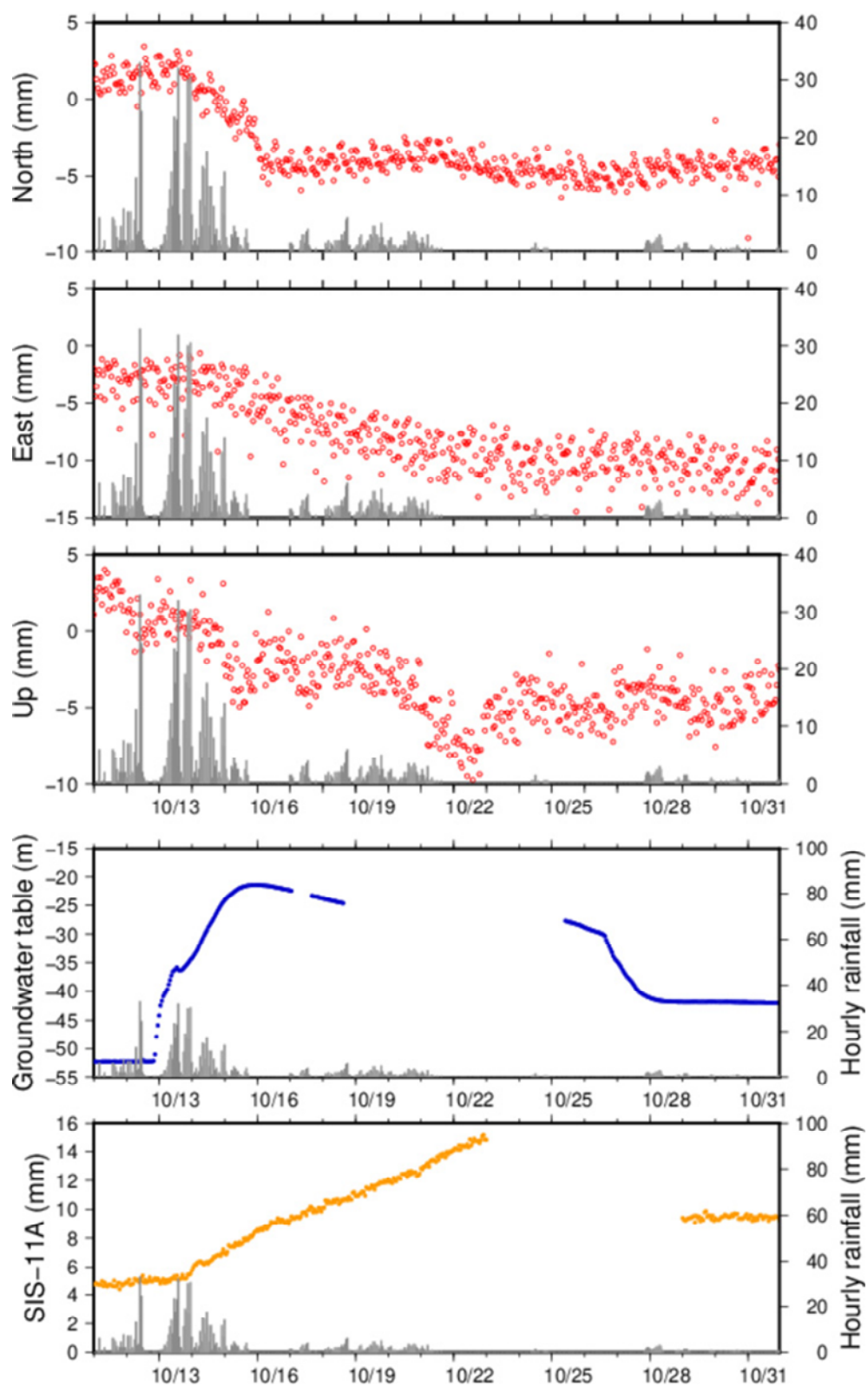


圖 4-12 地表位移、滑動面位移與地下水位時間序列

資料來源：本計畫

第 5 章 討論、結論與建議

第一節 討論

一、案例比較

除了新北市石碇區之大崙山順向坡中有本計畫所設置之 GPS 連續監測系統，在國內其它順向坡即時監測案例中，屬南投縣仁愛鄉之廬山最為完整。在廬山溫泉區之塔羅灣溪對岸之廬山北坡，經濟部中央地質調查所之研究指出，該坡地為中度至高度滑動潛勢之崩塌地（經濟部中央地質調查所，2010）。再者，單頻 GPS 有足夠精度與條件用以監測潛在崩塌地之滑動行為（Squarzoni et al., 2005），因此國立成功大學地球科學系選定廬山北坡，架設 11 站（在主崩塌面中央、下部及兩側共架設 7 站、並在非主崩塌面共架設 4 站（圖 5-1））與本計畫所使用同樣規格之單頻 GPS 連續監測儀，並透過各 GPS 連續站之速度場結果來分析其崩塌機制（饒瑞鈞，2016）。

廬山地區的地層為中新世廬山層，岩性為板岩及變質砂岩與板岩薄互層。該區域節理發達，岩體因此較為破碎，故透水性佳。穿越該區主要的地質構造線為稜線西側約 500 公尺的霧社複向斜，是一呈東北-西南向且西翼較陡、東翼較緩，並向西南傾沒的複向斜構造（經濟部中央地質調查所，2014）。強降雨亦是造成廬山溫泉區災害的主要因素，如 2008 年之辛樂克颱風及薔蜜颱風，與 2009 年莫拉克颱風皆帶

來了 500 mm 以上的降雨量，導致塔羅灣溪上游多處崩塌，廬山北坡也出現下滑的現象（Liming Engineering Consultants Co., 2006, 2008; Land Engineering Consultants Co., 2008, 2009, 2010, 2011）。由以鑽井資料與 Varnes 分類表（1978）得知，廬山北坡為一多重弧型滑動（饒瑞鈞，2017）。此種類型的山坡多是由破碎岩體所組成，內部的岩層形成各種不同深度的破碎帶（千木良，2011），地表面因而少有小溝蝕及水的流動，降雨入滲即成為廬山邊坡變形最主要的因素。

在 GPS 連續觀測期間（2013 年 11 月至 2016 年 7 月），廬山北坡之長期位移速度場於圖 5-1 所示。參考站 LSC1 及雙頻站 CHIG 無明顯移動，而廬山地區整體呈現緩慢的下陷及朝坡面方向移動，另外滑動面兩側有較大的位移量（紅色箭頭為地表位移速度；水藍色三角形代表地表抬升、倒三角形代表地表下陷，其大小均表示為位移速率）。表 5-1 為廬山北坡上，各部位之 GPS 連續觀測之坡面位移量，其中正值表示垂直向上抬升，負值為垂直向下。圖 5-2 為廬山北坡上單頻 GPS（LS14）之時間序列。

本計畫之新北市石碇區大崙山順向坡之 GPS 連續位移整理於表 5-1 中，觀測期間從 2016 年 5 月 29 日起，至 2019 年 4 月至 6 月不等。將兩順向坡案例相比較得知，大崙山順向坡在觀測期間的水平與垂直位移量，在坡面的主體與下邊坡區位均大於廬山北坡。造成此現

象的主要因素為台灣北部的降雨量與降雨期間較台灣中部為多且平均。廬山地區有較為明顯的乾濕期間，因此 GPS 所觀測到的地表位移有週期性之變化；而大崙山地區為台灣北部的冬季迎風面，同期之降雨量遠多於台灣中南部，因此並無明顯之乾濕季節之分別。導致坡地內之地下水充沛，地下水位面高，使得坡地中之滑動塊體保持潛移（creep）的狀態。

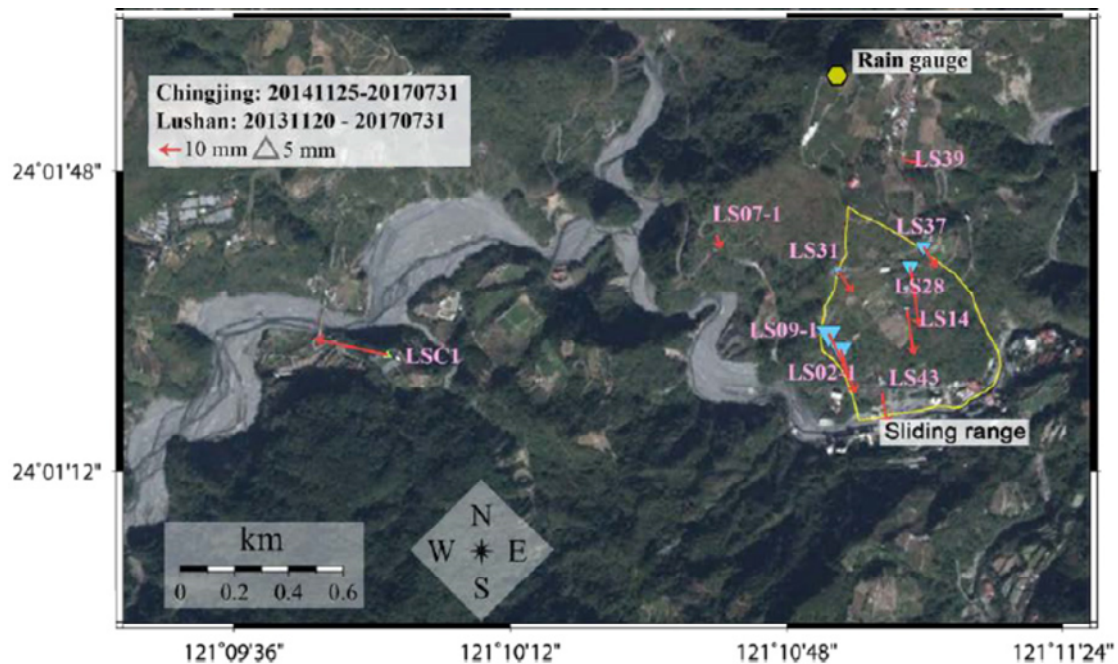


圖 5-1 廬山 GPS 測站位置與地表位移速度場

資料來源：饒瑞鈞，2016

表 5-4-1 廬山北坡各部位之 GPS 觀測位移量

	坡面各部位位移量 (mm/yr)			
觀測期間	水平方向	中央主體	中央底部	兩側
無降雨期 (10 月至 1 月)	15-25	-40	-5	30
降雨初期 (2 月至 4 月)	105	125	5	-55
降雨期 (5 月至 9 月)	25-40	-85	-10	-10

資料來源：饒瑞鈞，2016

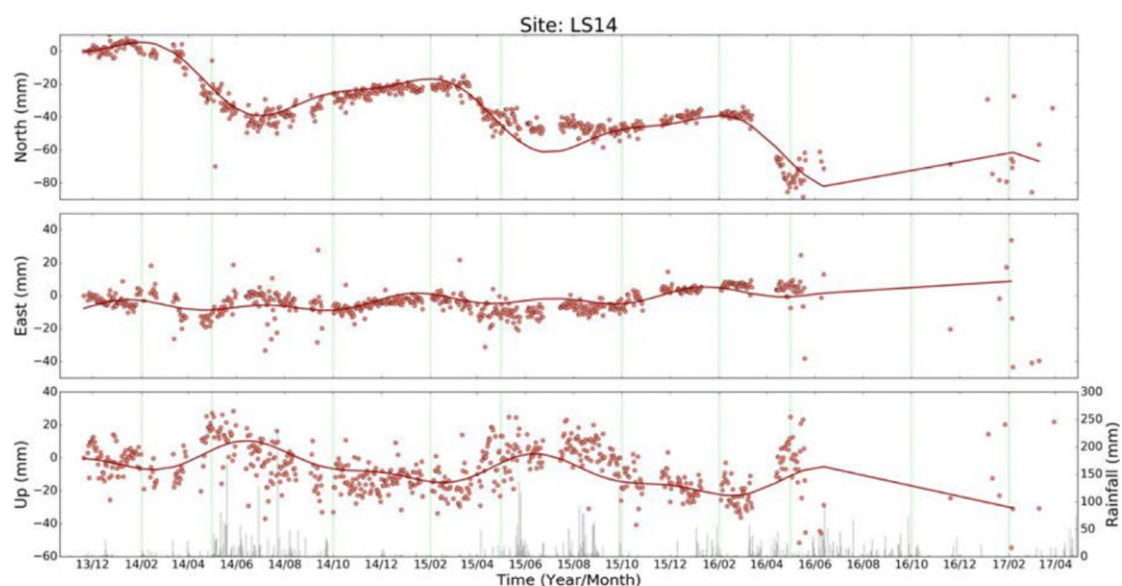


圖 5-2 廬山單頻 GPS 測站時間序列 (LS14)

資料來源：饒瑞鈞，2016

表 5-5-2 大崙山順向坡各部分之 GPS 觀測位移量

點位 編號	E (mm)	N (mm)	U (mm)	起訖日期	水平位移速率 (mm/月)	備註
HF08	-0.82	-3.34	0.72	2016/5/29 2019/5/29	0.1	順向坡 冠部
HF03	-6.02	-15.8	-3.58	2018/5/1 2019/5/29	0.5	順向坡 上部
HF07	-15.1	-10.29	-9.545	2016/7/29 2019/5/29	0.5	順向坡 上部
HF10	-27.4	-4.4	-1.62	2018/7/20 2019/5/9	0.8	順向坡 上部
HF01	-10.96	-9.8	-28.4	2016/5/29 2017/6/26	1.2	順向坡 上部
HF04	-34.4	-80.28	-27.04	2016/5/29 2019/5/29	2.4	順向坡 上部
HF09	-6.56	-0.98	-1.9	2016/5/29 2019/5/29	0.2	順向坡 以外
HF02	-46.1	-75.38	-18.82	2016/5/29 2019/4/4	2.5	順向坡 上部
HF06	-156.28	-26.1	-87.06	2016/5/29 2019/5/29	4.4	順向坡 上部
HF11	-63.84	-157.46	-51.34	2016/6/4 2019/5/29	4.7	順向坡 中部
HF13	-	-	-	-	-	離散程 度過大
HF12	-176.86	-54.96	-6.46	2016/6/4 2019/1/31	5.8	順向坡 中部
HF14	-0.64	-1.06	-10.34	2016/6/9 2019/4/4	0.04	順向坡 趾部
HF05	-	-	-	-	-	離散程 度過大

資料來源：本計畫

二、地表變位管理值

在前述之第三章第二節中，已就大崙山順向坡中滑動塊體之滑動面的位移量，對應於日本地滑對策技術協會所制定之「地層變動管理值」，以將滑動塊體的位移速度分為四個等級並分別判斷其活動性。而本計畫至今亦已累積了三年的大崙山順向坡坡面之 GPS 連續監測所記錄之地表位移，並找出當累積降雨量超過 120 mm 之門檻值，因

而導致地下水位開始上升進而引發的滑動塊體位移或變位。本計畫因此擬採用廖瑞堂等人（2013）所建立之地滑管理值（表 5-3。基於比較台灣與日本在分析不同的地滑案例後所建立），將大崙山順向坡上由 GPS 所記錄之地表變位對應於其中由「地表伸縮計」量測到之地表變位與管理值。由表 5-2 中之水平方向平均速率，華梵大學校園內大部份區位屬於「注意值」的管理值，而在大崙山順向坡之中部區位，則是屬於「警戒值」的管理值（HF06、HF11、HF12）。然須注意的是，當強降雨或長時降雨之累積降雨超過門檻值後，滑動塊體的變位皆會達到警戒值以上。

表 5-6-3 日本與台灣之地層與地表變位管理值

比較項目 管理值	日本案例		台灣案例	
	地表伸縮計	傾斜觀測管	地表伸縮計	傾斜觀測管
注意值 (注意體制)	1-4 mm/時	無此項目	0.5-1 mm/月	0.5-2 mm/月
警戒值 (警戒體制)	1-10 mm/時	無此項目	2-10 mm/月 ; 20 mm/7 日 ; 0.5 mm/日	2-20 mm/月
行動值 (避難體制)	4-40 mm/時	10 mm/時 (孔內傾斜計)	1-32 mm/日	1-5 mm/日 ; 10mm/月

資料來源：廖瑞堂等人，2013

第二節 結論

高精度 GPS 連續監測儀在地殼變形監測領域已有相當成熟的應用。藉由研究區域內之數組監測儀在各自的固定點位中，連續不斷地

以高頻率記錄該點位的瞬時三維座標。當觀測資料經由各項參數與誤差修正後，水平方向的觀測誤差可達 0.5 公分，在鉛直方向上亦可達到 1 公分，如此低離散度的定位能力，即為高精密 GPS 在監測地殼變形的優勢。因此，本計畫利用此一優點，將 15 座高精密 GPS 連續監測站，其中包括 13 座單頻式以及 2 座雙頻式連續監測站，架設於新北市石碇區的大崙山坡地上，以連續不斷地觀察該坡地的運動行為。

大崙山坡地為中央地質調查所認定之地質敏感區，即該坡地位於易發生邊坡破壞的地質條件區塊中：層理面的傾斜方向與其坡面的傾斜方向大致平行。而坐落在大崙山冠部的華梵大學，以及在坡地上其他區塊的當地住戶，也都經歷其房舍與路面有破裂縫不斷擴大的情況，尤其在降雨量累積到某一過後，裂縫擴大的情況更為顯著。華梵大學校方為了師生安全，即在校區內外裝設各項監測儀器，如傾斜觀測管（包含自記式 SAA 兩座以及手動式二十餘座）、自記式地下水位計（四座）與自記式雨量計（一座）。

本計畫應用 GPS 連續監測儀記錄坡地表面的位移資料，比較坡地內滑動面位移量、地下水位變化與降雨量，發現當累積降雨超過約 120 mm 以後，地下水位會快速上升。而當地下水位完全浸沒 20-30 公尺深之平面滑動型之滑動面時，將會使原本處在潛移 (creeping) 狀態的滑動塊體加速位移。在地下水位的高水位期間，GPS 記錄到該滑

動塊體以平均 1 mm/天的速度滑動，大於平時與無強降雨的潛移速度（2-3 mm/月）。除了在已知滑動深度的滑動塊體測得位移行為外，亦在校區內外發現具有不同滑動量的滑動塊體，另外也藉由幾乎無位移的 GPS 記錄，界定出大崙山順向坡中大致的滑動區塊。

本計畫亦整理過去華梵大學所記錄到因颱風降雨而引發的坡地位移，歸納得出累積降雨量與滑動面累積位移量的關係經驗式。結論為，當累積降雨量達 490 mm，滑動塊體會加速其位移的情況。因此，雖然華梵大學已在 2015 年完成兩座坡地內的集水井，亦將常時地下水位降低 10 公尺，但當累積降雨量超過本計畫所整理出的降雨門檻值後，滑動塊體仍然會加速位移。

本計畫亦在本年度與國立成功大學地科系，引進具有即時定位解算功能晶片之雙頻 GPS 連續監測站（Real-Time Kinematic GPS on dual-frequency）。在透空度與通訊信號皆良好的情況下，即可得到精度在 1 公分以內的即時定位結果。然目前該新型儀器仍處於研發階段，待長期測試並與其他既有之單、雙頻站之解算資料相比較後，未來該新型儀器的應用性將可大為提升。

第三節 建議

據本計畫的研究結果，雙頻與單頻 GPS 連續監測系統的量測精

度皆在 1 公分之內；再者，單頻 GPS 系統本體的價格較 SAA 自動記錄式傾斜觀測管低廉，且儀器系統的架設也較為便捷。因此在透空度與電力條件皆合適的情況下，建議可以 GPS 為主、SAA 或人工傾斜管為輔，用於監測已知在滑動中的山坡地。另一方面，具有即時解算功能的雙頻 GPS 以及其相對低廉的價格，亦為將來可考慮納入的坡地監測方式之一。

藉由分析多場降雨事件之降雨型態與累積雨量，並配合 GPS 與 SAA 的地表與地下滑動面位移的監測成果，累積降雨量與滑動面位移的關係經驗式已初步歸納出。在類似的地質與地形條件下，對於不同的邊坡案例建議可考慮做分析以同樣的方法做分析與探討，以期精進對於各邊坡案例的防治手段。而其中最為重要的防治手段，即是降低坡體內的地下水位，如在上、中、下邊坡區塊皆設置集水井，以確保常時地下水位低於已經存在或潛在的地下滑動面，減小滑動面遇水弱化的情況，將滑動塊體潛移的速度降至最低。

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. 經濟部中央地質調查所，“國土保育之地質敏感區調查分析計畫—莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析（1/3）”，經濟部中央地質調查所 99 年度委辦計畫，共 243 頁，2010。
4. 經濟部中央地質調查所，“山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書—L0002 南投縣—01”，共 17 頁，2014。
5. 廖瑞堂、陳昭維、紀宗吉、林錫宏，“由台灣監測案例探討邊坡位移量之管理值”，地工技術，第 136 期，第 59-70 頁，2013。
6. 饒瑞鈞，“精緻化坡地大規模崩塌調查、監測技術及潛勢與影響分析研究—以荖濃河流域及廬山地區板岩帶為例—子計畫：利用單頻 GPS 連續站觀測分析深層崩塌變形機制（III）”，科技部補助專題研究計畫成果報告 期末報告，共 45 頁，2016。
7. 青山工程顧問股份有限公司，“大崙山地區(新北市-石碇區-T001)潛在大規模崩塌區調查即治理規劃”，期中報告書，2019。
8. T. Takasu, “PPP Ambiguity Resolution Implementation in RTKLIB

- v 2.4.2, PP-RTK & Open Standards Symposium,” Frankfurt am Main, Germany, 2013.
9. M. Heflin, 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*, Vol. 19, 131–134, 1992.
 10. J. Saastamoinen, “Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction,” *Bulletin Géodésique*, Vol. 107, 13–34, 1973.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Land Engineering Consultants Co., Ltd., “Simulation and monitoring in areas susceptible to landslide hazard,” Rep. (1/4), Central Geological Survey, MOEA, p. 173, 2008.
 14. Land Engineering Consultants Co., Ltd., “Final report to monitoring, expansion and maintenance of warming system for the north slope of

- Lunshan hotspring area,” Rep. Central Geological Survey, MOEA, p. 99, 2009.
15. Land Engineering Consultants Co., Ltd., “Final report to monitoring, expansion and maintenance of warming system for the north slope of Lunshan hotspring area,” Rep. Central Geological Survey, MOEA, p. 53, 2010.
16. Land Engineering Consultants Co., Ltd., “Final report to monitoring, expansion and maintenance of warming system for the north slope of Lunshan hotspring area,” Rep. Central Geological Survey, MOEA, p. 63, 2011.
17. Liming Engineering Consultants Co., Ltd., “Final report to investigations, managements, and planning projects of Lushan landslide area,” Rep. Soil and Water Conservation Bureau, p. 270, 2008.
18. Varnes, D. J, “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.
19. 地すべり対策技術協會，“地すべり対策技術設計實施要領”，第六章，1978。

附錄

附錄一、期末聯合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	此研究於坡地位移與累積雨量關係圖有不錯關聯性，建議可進一步探討變位之加速度變化點。	謝謝委員提出之意見。藉由圖4-10中之關係式，可推算出造成滑動面發生不同程度變動之累積雨量門檻值（即變動速度變化點）分別為：273 mm以上為潛在變動、490 mm以上為準確定變動，以及741 mm以上為確定變動。而累積雨量約600 mm時，是累積位移加速上升的門檻值。該相關描述補充於第四章第二節中。
二	高精密度GPS應用於順向坡深層滑動，提高監測之準確率為何？請說明。	謝謝委員提出之意見。既有且成熟的坡地運動現地監測方法中，在坡地內滑動面監測方面，由於鑽孔與自記式傾斜觀測的費用高昂，因此往往在一坡地中僅一至三座，但如此少量之監測無法反映坡地其他部位之運動情形，即屬於區域性微觀的監測方法；再者，當傾斜管因滑動面位移而彎折的角度過大時，即廢管無法繼續觀測（大於 12° ），固有監測期限。為提高順向坡深層滑動之監測準確率及以宏

項次	審查意見	回覆辦理情形
		觀的角度監測坡地運動，本研究計畫應用GPS連續監測站（盡可能）平均架設在大崙山順向坡坡面上，並配合地下SAA監測結果，證實了GPS連續監測深層順向坡的可行性。此外，由於GPS的費用相對低廉許多且精密度高，因此可在坡地表面佈設數座；且因是架設在地表面故不會受滑動面過度位移之影響，所以可長期觀測。因此，在綜合以上優點（長期連續、費用低、廣域性、數量多），對於監測深層順向坡的準確率即可提高。
三	藉由GPS測得之位移變動，是否結合通知或預警系統？請說明。	謝謝委員提出之意見。本計畫所建置之14座單頻GPS連續監測站所測得的坡地位移變動，皆是經過後處理解算之結果。而為了得到高精度之解算結果，幾項重要修正參數皆須仰賴IGS所提供，如精密星曆、衛星時錶以及導航參數，而這些參數可獲得之時間，至少始測量當天之後一個星期使可獲得。因此，以單頻GPS連續站之監測結果作為預警系統有時效上之問題。而本計畫合作研發之雙頻具RTK

項次	審查意見	回覆辦理情形
		功能之GPS連續站，因其有即時解算並展示之功能，且解算之誤差在5公厘以內。因此該GPS系統確實可考慮結合通知或預警系統。
四	此研究以成熟設備及技術監測邊坡，惟宜在資料分析、合理性及後續邊坡整治建議部分再加強。	謝謝委員提出之意見。關於資料分析與合理性部分，已補充說明於第四章第二節與第五章第一節中。至於後續邊坡整治建議部分，並非為本研究計畫之預定範疇，故僅以就觀測分析結果，即地下水位深淺導致滑動面位移與否，提出以集水井、防止地表入滲等整治工程以降低常時地下水位之建議。
五	此計畫於監測上已有豐碩成果，後續建議可設定防災警戒值與行動值。	謝謝委員提出之意見。本研究計畫已歸納出累積降雨量與滑動面累積位移之關係式，並在該關係圖中（圖4-10）標示出地層變動管理值，以作為華梵大學校方日後於氣象局發布降雨預報後，對於校園內坡地變動之因應措施。
六	此研究是否有降雨強度與位移變動之比較？請說明。	謝謝委員提出之意見。本計畫主持人於其他研究中曾比較降雨強度與位移變動之關係，然因降雨抬升水位至驅動位移，期間均有時間滯後效應，且降雨強度可直

項次	審查意見	回覆辦理情形
		接反映於累積降雨量，結果顯示累積雨量相較於降雨強度，對位移變動相關性更高。根據現地觀測結果，華梵大學校園內深層滑動順向坡之位移與累積降雨量呈正相關。當累積降雨量達到120 mm時，地下水位會開始上升。之後若降雨持續，則因而導致地下水上升並完全浸沒滑動面後，滑動面即開始加速位移，此關係可由圖4-10顯示。因此本計畫認為比較累積降雨與位移變動之關係即可了解坡地運動之情形。
七	此研究是否有加入時序變動與位移變化之關係？請說明。	謝謝委員提出之意見。GPS所記錄到之地表時序變動與SAA記錄到之滑動面位移變化之關係敘述於第四章第二節，並於圖4-12表示之。