
**利用衛星即時動態定位與陀螺儀以長距離低功耗
無線傳輸技術進行地層變化監測之研發
Research and Development on Ground
Monitoring Using GYRO Sensor and GNSS With
Lora Transmission Technology
成果報告書**

執行單位：國立雲林科技大學

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：郭治平副教授

研究人員：劉美君專案經理、廖至銘研究助理、蔡博丞研究助理、
周庭億研究助理、荷凱睿研究助理、楊承諭研究助理、
曾小瑄研究助理

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考）

利用衛星即時動態定位與陀螺儀以長距離低功耗無線傳輸技術進行地層變化監測之研發

摘要

坡地災害發生前、中、後期，監測系統能否有效將待測之訊號有效傳遞到後台伺服器並順利即時上傳至雲端，一直是防災技術中關鍵的課題。長距離低功耗廣域網路為近年發展之通訊技術，在都會區之應用已經日趨成熟與廣泛；然而在坡地，受制於幅員遼闊、電力供應與基地台架設限制，長距離(Long-range, LoRa)低功耗廣域網路(Low Power Wide Area Network, LPWAN)之功能與穩定性更為重要且須受到驗證。

107 年度計畫開始本系列研究，發現 LoRa 耗電量極低，一般通訊頻率約 10 分鐘一次，則電力滿載後開始服務約可持續 816 天；採用之 LoRa 在明新科大校園後山小規模崩塌地、南投縣信義鄉神木村土石流觀測站與宜蘭縣大同鄉四季聚落皆可獲得穩定好通訊效果；在通訊路徑上有 1M 厚之混凝土塊障礙物時，仍有良好通訊品質；本實驗採用之 LoRa 在空曠處至少可達 2.5KM 之通訊效果；通訊品質以陰天最佳、晴天次之、雨天最差。

108 年度計畫持續進行 107 年度計畫之試驗方式，發現相對於地形與天候，植被可能對通訊品質的影響更高。此外該年度順利開發以雙機分工方式，以 P2P 方式通訊，經接收發射端訊號後轉發至接收端，達到中繼站橋接訊號的目的。經實地測試，在同樣的環境條件下可大幅降低訊號漏失率。此一作法相較開發單機雙工成本為低，也國內外為業界首創。然而因初步開發，為克服現場氣候條件而採用工業級電腦，成本高且耗電(60W)，因此 109 年度計畫已採用較高傳輸效能、更穩定系統以及能耗更低之 LoRa 模組，於神木村與祝山停機坪間進行傳輸測試，直線距離約 4 公里，可順利傳輸，然穩定性仍需持續探究。另外 NB-IoT 過去已於新北市新店區被評估且分析漏失率，然效果不佳。本期計畫改於神木村進行測

試，針對不同電信業者進行比較，初步成效較有進步。109 年度計畫重點項目除持續於現地進行長時間測試外，於明新科大校園打造模擬不同域之通訊品質實驗場域，透過灑水系統模擬不同之天候、不同樹葉之樹種模擬植被干擾，以測試各種可能之現地情境。並進一步探討不同擺設高度、角度對通品質之影響。

110 年度計畫結合過去歷年之豐富經驗，選定神木土石流觀測站作為示範場域，於該溪流上游之土砂產生處、中上游之土砂運移處、進影響範圍前之溢流口處進行以低功耗廣域網路執行土石流潛勢溪流流域土砂與崩塌地變化防災監測網之建置與驗證研究，可於各種天候下以極少的漏失率進行監測資料的回傳，目前掛載的監測裝置有裂縫計、傾斜儀以及雨量計，是為邊坡監測中最常見也最能及時安裝即時監測的設備，在 LoRa Node 於每 2 分鐘發送一次之頻率下，整體電力系統中可完全負載。

無法安裝地層變位監測的邊坡，地表變位監測便顯得更為重要，若能大量部署且於無通訊與電力供應之邊坡能穩定運作，可提供不少邊坡變位資訊。111 年度計畫著眼於開發與精進利用全球導航系統以長距離低功耗無線傳輸技術進行地表變化監測之研發，以期能分攤現行 GNSS 需大量電力與 4G 通訊之需求或克服完全無電力與 4G 場域之地表變位監測需求，並於新竹縣尖石鄉秀巒崩塌地獲得良好之驗證，精度優於 1cm，並於某次崩塌事件中量到完整運動軌跡。

坡地滑動監測技術日新月異，地層內部變化監測之成本相當高，隨著深度越深費用大幅提高。在無法安裝地層內部監測儀器(例如傾斜管、IPI、SAA 等)的邊坡，例如新竹縣尖石鄉秀巒崩塌地、桃園縣復興鄉光華崩塌地等，即需設法透過地表變化，推估地層內部之變化。衛星定位及時解算系統 GNSS 可以取得地表座標進而推估地表變化，但無法推估可能之滑動面深度；地表傾斜儀或加速度計僅能獲得地表傾斜變化，但無法推估可能之地表變化。若能將上述兩者結合，將有助於推估地層內部之變化，例如滑動面深度、滑動速度等資訊。上述兩種感測器

皆需大量電力與通訊服務，才能實現其功能，然而現地之電力與通訊品質往往受到大量限制，因此導入長距離低功耗廣域網路傳輸技術將有助於 GNSS、傾斜儀結合進行地層內部變化調查，特別是在類似新竹縣尖石鄉秀巒崩塌地、桃園縣復興鄉光華崩塌地等交通電力通訊受限大規模崩塌潛勢區域。

本年度於桃園市復興鄉光華崩塌地持續監測到約 0.2° 之地表傾斜、2cm 之地表位移，初步監測設置點位推估滑動面深度距地表約 5.7m 深，但仍需透過增設監測點以獲得更接近時狀況之成果。

關鍵詞：坡地災害、監測系統、全球導航系統、傾斜儀、長距離低功耗廣域網路、物聯網、雲端大數據

Research and Development on Ground Monitoring Using GYRO Sensor and GNSS With Lora Transmission Technology

ABSTRACT

The monitoring system's ability to effectively transmit the test signal to the backend server and upload it to the cloud in real-time before, during, and after slope disasters has always been a critical issue in disaster prevention technology. Long-range low-power wide-area network (LPWAN) communication technology has been increasingly mature and widely used in urban areas in recent years. However, in sloped areas, the functionality and stability of LPWAN, particularly Long-range (LoRa) technology, are crucial and need to be verified due to the vast terrain, limited power supply, and base station deployment restrictions.

In the year 2018's project, it was found that LoRa has extremely low power consumption, with a general communication frequency of approximately once every 10 minutes, allowing it to sustain service for about 816 days at full load. Stable communication effects were observed using LoRa in small-scale landslide areas in the Minghsin University campus, the debris flow observation station in Shinmu Village, Nantou County, and the Siji settlement in Datong Township, Yilan County. Even with a 1-meter thick concrete obstacle along the communication path, good communication quality was maintained. The experiment showed that LoRa can achieve communication effects of at least 2.5 km in open areas, with communication quality being best on overcast days, followed by clear days, and worst on rainy days.

In the year 2019's year project, the experiment method from the former year was continued, and it was found that vegetation may have a higher impact on communication quality compared to terrain and weather. Additionally, a dual-machine division method

was successfully developed, using a peer-to-peer (P2P) communication approach to relay signals from the transmitting end to the receiving end, effectively reducing signal loss rates in the same environmental conditions. This method, compared to the development of single-machine dual work, has lower costs and is a pioneering effort in the industry. However, due to the initial development, industrial-grade computers were used to overcome on-site weather conditions, resulting in high costs and power consumption (60W). Therefore, in the year 2020's project, a higher transmission efficiency, more stable system, and lower power consumption LoRa module were adopted for transmission testing between Shinmu Village and Zhushan Heliport, covering a distance of approximately 4 kilometers, which was successful, but stability still needs further exploration. Furthermore, NB-IoT had been evaluated and analyzed for signal loss rates in Xindian District, New Taipei City, with unsatisfactory results. The current project aimed to conduct tests in Shinmu Village, comparing different telecommunications operators, showing initial progress.

The year 2021's project's key focus, in addition to continuing long-term testing on-site, was to create a simulated communication quality experimental site at the Minghsin University campus, simulating different weather conditions and vegetation interference through a watering system to test various possible on-site scenarios. Furthermore, the project aimed to explore the impact of different installation heights and angles on communication quality.

In the year 2022's project, based on the rich experience from previous years, the Shinmu debris flow observation station was selected as a demonstration site to establish and verify a low-power wide-area network for monitoring potential landslide areas, including the generation of soil and debris in the upper reaches of the stream, the

transportation of soil and debris in the middle and upper reaches, and the overflow outlet before the affected area. The monitoring devices currently installed include crack meters, inclinometers, and rain gauges, which are the most common and timely monitoring equipment in slope monitoring. With a LoRa Node frequency of once every 2 minutes, the overall power system can be fully loaded.

For slopes where it is not possible to install ground displacement monitoring equipment, surface displacement monitoring becomes more important. If it can be deployed in large numbers and operate stably in slopes without communication and power supply, it can provide a significant amount of slope displacement information. The year 2023's project aimed to develop and improve the use of global navigation systems and long-range low-power wireless transmission technology for surface change monitoring, with the goal of sharing the current GNSS's high power and 4G communication requirements or overcoming the need for surface change monitoring in areas without power and 4G communication. It obtained good verification in the Shuiluan landslide area in Jianshi Township, Hsinchu County, with an accuracy of less than 1cm, and recorded the complete movement trajectory in a landslide event.

The monitoring technology for slope movements is constantly evolving, and the cost of monitoring changes within the ground is quite high, increasing significantly with depth. In slopes where it is not possible to install internal ground monitoring instruments (such as inclinometers, IPI, SAA, etc.), such as the Shuiluan landslide area in Jianshi Township, Hsinchu County, and the Guanghai landslide area in Fuxing Township, Taoyuan County, it is necessary to estimate internal ground changes through surface changes. The satellite positioning and real-time calculation system GNSS can obtain surface coordinates and estimate surface changes, but cannot estimate the depth of

possible sliding surfaces. Surface inclinometers or accelerometers can only obtain surface slope changes but cannot estimate possible surface changes. Combining the two will help estimate internal ground changes, such as sliding surface depth and speed. Both of these sensors require a large amount of power and communication services to function, but on-site power and communication quality are often heavily restricted. Therefore, the introduction of long-range low-power wide-area network transmission technology will help with GNSS and inclinometer integration for internal ground change investigations, especially in large-scale potential landslide areas with limited transportation, power, and communication, such as the Shuiluan landslide area in Jianshi Township, Hsinchu County, and the Guanghua landslide area in Fuxing Township, Taoyuan County.

目次

摘要.....	I
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	IX
第一章 研究計畫內容.....	1-1
第一節 研究計畫之背景.....	1-1
第二節 通訊技術簡要回顧.....	1-4
第二章 全球導航系統.....	2-1
第一節 全球導航系統.....	2-1
第二節 即時動態定位系統.....	2-2
第三節 全球導航系統應用於地表變化監測	2-5
第三章 實驗方法.....	3-1
第一節 研發與精進之系統.....	3-1
第二節 地表傾斜量測.....	3-4
第三節 LoRa 傳輸良率分析方法.....	3-6
第四節 RTK-GNSS 定位與傳輸良率分析方法	3-7
第四章 現地實作場域與分析成果.....	4-1
第一節 實作場域介紹.....	4-1
第二節 秀巒 Rover (GL003).....	4-11
第二節 光華崩塌地.....	4-16
第五章 結論與建議.....	5-1
第一節 結論.....	5-1
第二節 建議.....	5-1

參考文獻.....	參-1
附錄一 111 年度計畫成果摘要.....	附錄-1
附錄二 期初審查意見與回覆.....	附錄-23
附錄三 期中審查意見與回覆.....	附錄-29
附錄四 期末審查意見與回覆.....	附錄-31

表次

表 1-1 不同 LPWAN 通訊技術之傳輸能力比較	1-7
表 3-1 RSSI 與發射接收品質關係	3-6
表 4-1 光華傾斜計最大起伏彙整表	4-23

圖次

圖 1-1 國內目前較大電信商基地台訊號涵蓋範圍示意圖(取自各電信公司官方網站).....	1-2
圖 1-2 萬物聯網概念 (Internet of Things, IoT)與 LPWAN 通訊技術圖	1-3
圖 1-3 各種通訊方式數據傳輸率與傳輸距離關係圖	1-5
圖 1-4 長距離星型架構示意圖	1-9
圖 1-5 NB-IoT 頻寬與 LTE-4G 頻寬示意圖	1-11
圖 1-6 NB-IoT 執行以 M2M 實現 IoT 之概念圖.....	1-12
圖 1-7 不同世代之傳輸速度與頻寬示意圖	1-13
圖 2-1 RTK 基本架構的示意圖(吳俊民 2017).....	2-4
圖 2-2 RTK 基本運作方式的示意圖.....	2-4
圖 3-1 本研究預計開發與精進之設備	3-2
圖 3-2 本研究設備運作示意圖	3-2
圖 3-3 本研發成果於崩塌地大量部署地表變動監測網	3-3
圖 3-4 本研發成果於崩塌地大量部署防災低供耗無線網路監測網	3-3
圖 3-5 雙軸傾斜儀照片與規格	3-5
圖 3-6 即時解算畫面	3-7
圖 3-7 解算初期成果	3-8
圖 3-8 解算後期成果(精度提高).....	3-8
圖 4-1 計畫區域崩塌地照片(團隊於 2021.09.14 拍攝)	4-2
圖 4-2 計畫區域崩塌地空拍照片(水保署於 2021.09.16 拍攝)	4-2
圖 4-3 研究區域正射影像(水保署於 2021.09.13 空拍產製)	4-3
圖 4-4 秀巒雨量站紀錄(水利署).....	4-4
圖 4-5 計畫區立體地形圖(水保署).....	4-5

圖 4-6 本計畫範圍區域地質圖(資料來源：五萬分之一臺灣地質圖幅土場圖幅(草圖)2008)	4-7
圖 4-7 計畫範圍環境地質圖(底圖取自地質調查所).....	4-8
圖 4-8 光華地區崩塌機制示意圖(水保署).....	4-8
圖 4-9 研究區域鄰近雨量站紀錄	4-10
圖 4-10 新竹縣尖石鄉秀巒村 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK 傳輸測站位置	4-11
圖 4-11 LoRa-GNSS+GNSS-RTK Base (GW)	4-12
圖 4-12 Rover (GL003).....	4-12
圖 4-13 Rover LoRa-IoT 成果圖.....	4-13
圖 4-14 Rover GL003 GNSS-RTK 成果圖	4-14
圖 4-15 Rover 測站距離與衛星數量圖	4-15
圖 4-16 Rover TWD97 座標圖.....	4-15
圖 4-17 光華儀器配置圖	4-16
圖 4-18 各傳輸測站裝設成果圖	4-17
圖 4-13(a) Rover011 站 LoRa-IoT 成果圖	4-18
圖 4-13(b) Rover013 站 LoRa-IoT 成果圖	4-18
圖 4-14(a) Rover011 站 GL003 GNSS-RTK 成果圖	4-19
圖 4-14 (b) Rover 013 站 GL003 GNSS-RTK 成果圖	4-20
圖 4-15 (a) Rover011 站測站距離與衛星數量圖	4-21
圖 4-15 (b) Rover 013 站測站距離與衛星數量圖	4-21
圖 4-16 (a) Rover011 站 TWD97 座標圖	4-22
圖 4-16(b) Rover013 站 TWD97 座標圖	4-22
圖 4-17(a) Rover 013 站傾斜計數據	4-23
圖 4-17(b) Rover 013 站傾斜計數據	4-23

第一章 研究計畫內容

第一節 研究計畫之背景

一、 邊坡監測面臨之大量且低功耗之通訊需求

台灣為一高山島，人口眾多，土地資源卻十分有限，在地狹人稠的人口壓力之下，有限的國土資源往往過度開發利用。平原與盆地地區的開發無法滿足國人生活需求的情況下，乃擴張至丘陵山區開發。但在需求甚殷之下，往往過度地擴張，許多山坡地不當地開發為建地，破壞了原有的水土保持，進而對台灣自然環境與台灣民眾生命財產造成重大衝擊與危害。此外，因為山坡地大自然的條件屬於破碎地質，加上地震與颱風的誘因，所以山坡地的開發所形成的聚落，成為重要的保全對象。因此，如何兼顧國土開發利用與環境保育，以維護台灣自然山林生態以及確保民眾生命財產安全，已成為台灣社會當前最重要的環境課題。台灣地質構造複雜為全世界地殼變動最激烈地區之一，頻繁的地震、每年頻繁之颱風侵襲加上人為土地開發不當，經常造成山崩、地層滑動、地盤下陷、房屋傾斜龜裂、土石流等嚴重災害，導致人民生命財產嚴重的傷害與損失。1999 年 921 地震、2001 年桃芝颱風、2001 年納莉颱風、2004 年敏督利颱風、2009 莫拉克颱風、2010 年梅姬颱風、2012 蘇拉颱風、2013 蘇拉颱風、2016 年美濃地震、2017 年蘇迪勒颱風、2018 八二三水災、2019 五月暴雨、2021 盧碧颱風暨 0806 水災等重大災害後，凸顯出防災科技研究對防減災工作之重要性。

特別是上述事件都曾經遭遇到災區斷訊問題，不但監測訊號無法記錄傳出，一般之通訊也都中斷數時數日，使災區成為通訊孤島。國內目前較大電信商基地台訊號涵蓋範圍如圖 1-1 所示，大部分山區仍無法提供無線通訊。另一方面一旦電力中斷，原本採用高耗電之傳輸方法(如 4G)將無法發揮繼續

傳輸或儲存監測資料功能。另一方面，在邁入多感測器(萬物聯網)時代，長距離低功耗之通訊方式，勢必為較低成本且在災害來臨前、中、後之重要維持通訊方式。然而低功耗之傳輸方式較可能受到外在因素干擾，需針對坡地監測應用深入探討，此為國內較少探討部分。

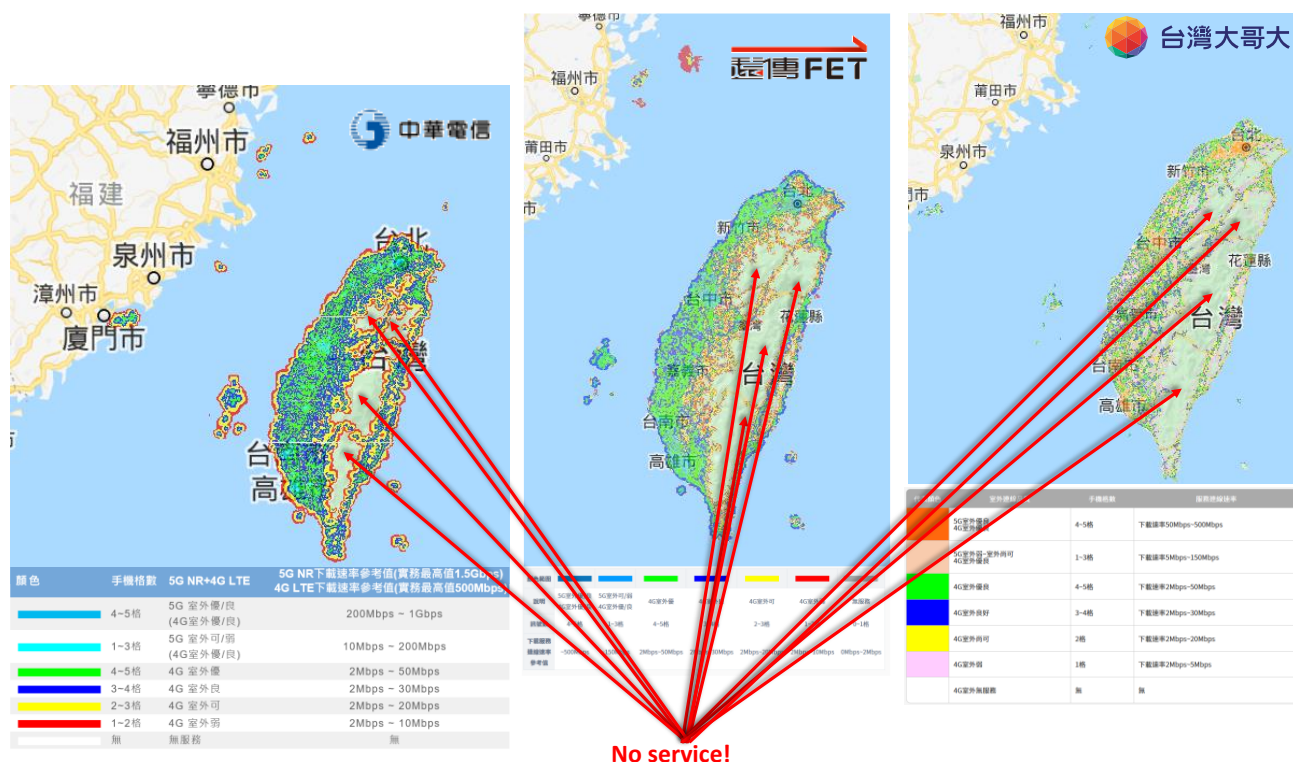


圖 1-1 國內目前較大電信商基地台訊號涵蓋範圍示意圖(取自各電信公司官方網站)

二、坡地監測萬物聯網概念

隨著資訊及通訊技術(Information and Communication, ICT)的發展，無線監測網域(Wireless Sensor Network, WSN)，指在場域內分散佈建特殊功能的感應及傳輸元件，用來監測和記錄環境的現況資訊，並將資料透過通訊技術蒐集到遠端伺服器來進行分析、判斷及反應，一直都是國內外相關產官學研界積極投入研究發展的領域，早期希望各種監測設備所蒐集之資訊能透過不同的無線平台傳輸，如 Zigbee、WiFi、2G、3G 或 4G 等，但多受到傳輸距

離、消耗電力及傳輸費用之限制，而無法在廣大的區域來佈建。

近 2~3 年來，如圖 1-2 所示，新發展的低耗能長距離廣域無線網路技術 (Low Power Wide Area Network, LPWAN)，包含 LoRa、Sigfox、NB-IoT、Weightless 等無線通信技術皆已逐漸成熟，全球的物聯網與通訊廠商也積極廣設各種跨域或獨立的 LPWAN 基地台，將長距離、高覆蓋率、低功耗、低成本優勢與高端傳感器和智慧裝置結合，開始提供相關創新服務。因此，如能透過此新一代萬物聯網概念 (Internet of Things, IoT) 並透過 LPWAN 通訊技術加以實證，將可大幅擴展物聯網的應用情境，包含應用於各種生活需求，改善生活環境。



圖 1-2 萬物聯網概念 (Internet of Things, IoT)與 LPWAN 通訊技術圖

第二節 通訊技術簡要回顧

一、長距離低功耗傳輸技術之發展

隨著物聯網迅猛發展，以及應用的日益增多，無線傳輸協議也越來越受到技術人員和大眾的關注，例如藍牙、WiFi、Thread、Zigbee、4G、5G 等等的物聯網和無線通信傳輸協議。其中 WiFi、Zigbee、4G 是目前在邊坡監測系統較常使用之通訊方式，然而電力需求、通視性高，是目前使用瓶頸。這些協議各有優缺點，也有各自的應用場景，但是對於長距離，低功耗，只需要少量數據傳輸的應用場景，目前還沒有能夠很好的滿足要求的無線傳輸協議，這也就是 LPWAN 技術產生的原因。

LPWAN 三大陣營 NB-IoT、LoRa、Sigfox 脫離試運行的實驗網階段，2018 年大舉投入商轉，肩負海量物聯網基礎建設的重責大任，相關技術與廠商都卯足全力在最近投入網路、產品、服務等佈局，希望能搶占物聯網廣大商機。低功耗廣域網路(Low Power Wide Area Network, LPWAN)2017 下半年將陸續投入商轉，NB-IoT、LoRa、Sigfox 三大陣營脫離試運行的實驗網階段。NB-IoT 經過 R13 與 R14 版本的強化，技術架構逐漸完善；LoRa 聯盟會員已經突破 500 大關，周邊商品陸續問世；Sigfox 全球網路覆蓋達 32 個國家。NB-IoT 各大電信營運商陸續宣布開台，並投入公共事業、共享經濟、智慧城市等相關服務；LoRa 在智慧讀表、智慧農業、工業物聯網具備優勢；Sigfox 領先取得國內二類電信執照，並於跨國大範圍的智慧讀表、智慧監測等應用持續發展。

圖 1-3 為各種通訊方式數據傳輸率與傳輸距離關係，可看出為實現低成本之物聯網，通訊方式勢必得朝關係圖面左上方邁進。

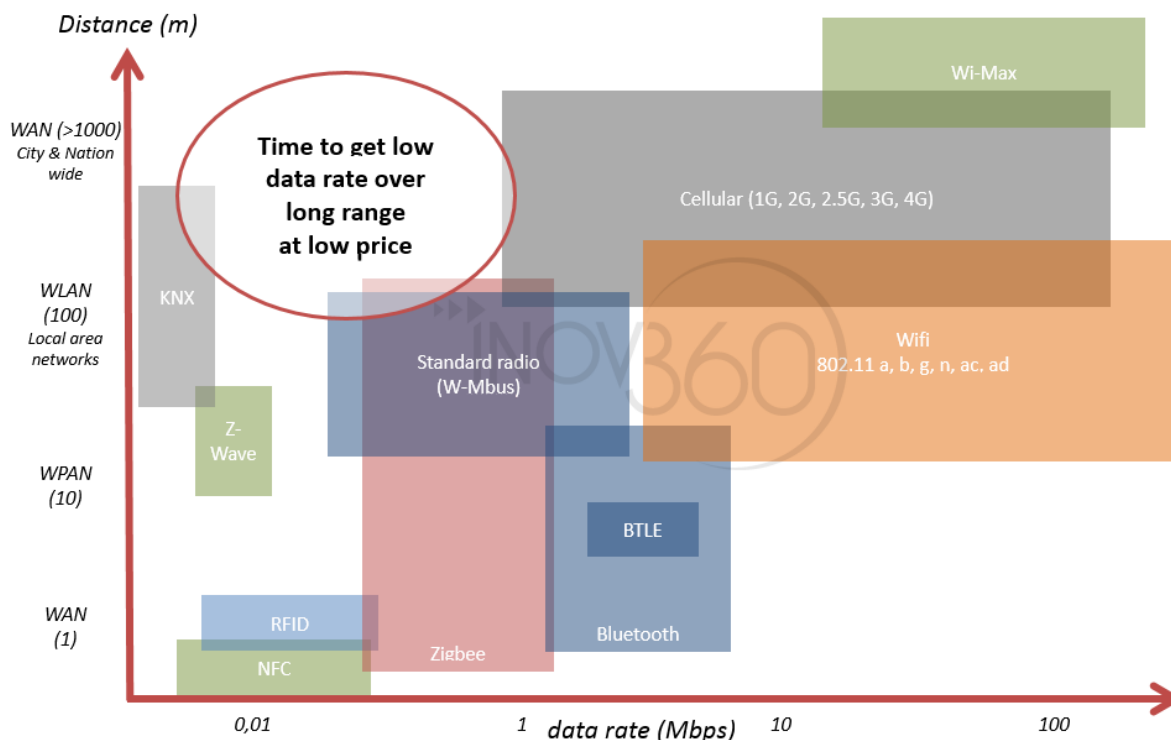


圖 1-3 各種通訊方式數據傳輸率與傳輸距離關係圖

(圖片來源於：<https://www.inov360.com/en/sim-less-networks-the-new-eldorado-of-m2m-and-internet-of-things/>)

二、 現行常見長距離低功耗傳輸技術之比較

低功耗廣域網路專為機器對機器(M2M)應用而設計，這些應用通常對應偏遠地區需求，由於偏遠地區數據傳輸率相對較低，需要較長的電池續航時間，以及可長期在無人看管的情況下運行。對水保署進行防災業務而言相當重要，特別是人力無法時常到達之處。

從針對 LPWAN 所推出的三大蜂巢式技術看來，三項技術皆被定位為 LPWAN 範圍，彼此之間似乎相互競爭，但仔細看規格的話，可了解其市場定位有所差異。例如，EC-GSM-IoT 主要由 2G 技術演變而來，因此應用大多承接 2G 市場；LTE-M 則是針對需要用到 LTE 技術，但數據傳輸資料量偏低的應用，換言之，若需要使用 Mbit/s 等級的傳輸量，須使用 LTE-M；若只需要 kbit/s 數據傳輸，GSM 即綽有餘裕。

上述 LPWAN 技術各自有著不同特點，業界多預測未來其中一項技術將會力壓群雄，成為一枝獨秀。然而，正如 LoRa 創始人之一 Olivier Hersent 曾說過的，互相合作的共存關係更可能帶領未來技術走向新的發展。事實上，物聯網應用領域百百款，這幾種技術的特點也對應了不同領域的特殊需求。比如 NB-IoT，使用授權頻段和 LTE 技術，其網路不限制傳輸訊息次數，所能攜帶的資料量也更高，因此適用於重視網路傳輸穩定性和即時性的智慧工業領域，或者是需要聲音、影像檔等高資料傳輸的 IoT 裝置。相對地，NB-IoT 的功耗也高於 LoRa 技術，電池壽命的損耗較大。同時與電信業者的協作模式，在向使用者推廣時會更為快速、簡便，從另一角度來看，也受限於硬體成本(晶片)和月租成本。未來應發展多元搭配使用，以因地制宜。

初步針對 LoRa 與 NB-IOT 之比較如下幾點(表 1-1 所列)：

- (1).LoRa 功耗比較低(NB-IOT 耗電量至少 10 倍以上)
- (2).LoRa 網絡部屬可獨立建立(NB-IOT 必須依照營運商為主)
- (3).LoRa 頻段可以自行選擇(NB-IOT 必須依照營運商為主)
- (4).LoRa 模組成本比較低(NB-IOT 必須依照營運商為主)

表 1-1 不同 LPWAN 通訊技術之傳輸能力比較

	LoRa	NB-IOT
創立時間	2015	2016
推動者	LoRa Alliance	3GPP
使用頻譜	非授權頻譜 Sub~1GHz ISM	1GHz 以下授權頻譜(營運商)
使用頻寬	125~500KHz	180KHz
最遠傳輸距離	20KM	20KM
傳輸速率	300bps~50kbps	50kbps
可連接數量	25 萬	10 萬
優勢	1. 營運成本低 2. 功耗較低 3. 資料傳輸速率彈性 4. 可與多電信營運商串接	1. 使用授權頻譜，干擾較小 2. 使用現有 4G 電信基地台
耗電量	待機 0.005W、發射瞬間約 0.15W	發射瞬間約 1W

三、 LoRa 之技術發展

隨著物聯網迅猛發展，以及應用的日益增多，無線傳輸協議也越來越受到技術人員和大眾的關注，例如藍牙、WiFi、Thread、Zigbee、4G、5G 等等的物聯網和無線通信傳輸協議。其中 WiFi、Zigbee、4G 是目前在邊坡監測系統較常使用之通訊方式，然而電力需求、通視性高，是目前使用瓶頸。這些協議各有優缺點，也有各自的應用場景，但是對於長距離，低功耗，只需要少量數據傳輸的應用場景，目前還沒有能夠很好的滿足要求的無線傳輸協議，這也就是 LoRa 技術產生的原因。

LoRa 技術是為了創建長距離通信連結的物理層無線調製方式。許多傳統的無線系統使用物理層頻移鍵控(FSK)調製，因為它是十分高效的低功耗方案。LoRa 技術基於線性 Chirp 擴頻調製，延續了頻移鍵控調製的低功耗特性，但是大大增加了通信範圍。Chirp 擴頻調製已經在軍事和航天通信方面應用了幾十年，因為它具有長距離傳輸與較佳的抗干擾性，而 LoRa 則是它第一次用作商業用途。

許多部署好的網絡都採用網狀架構。在一個網狀網絡中，每個單獨的端結點傳遞信息到其他結點，增加通信範圍以及網絡的小區容量。當結點增加的時候，它也增加了複雜度，減少了網絡容量，也減少了電池壽命，因為結點要收發從他們不相干的結點傳遞來的信息。長距離星型架構，由於長距離連接性，從而減少了電池壽命，如圖 1-4 所示。

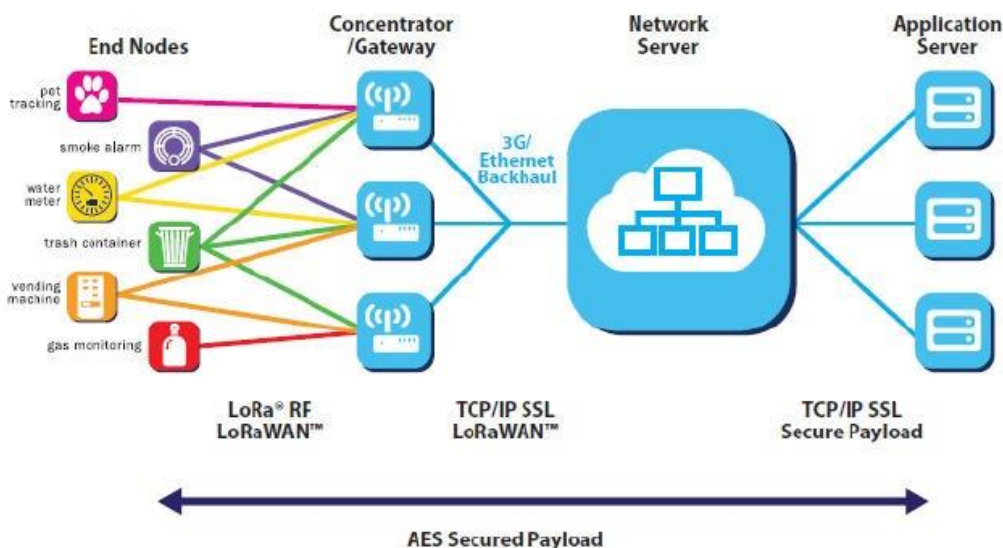


圖 1-4 長距離星型架構示意圖

(圖片來源於：lora-alliance.org)

LoRaWAN 的網絡結點不和特定網關相綁定，通過結點傳輸的數據，被多個網關接受。每個網關，通過一些信號隧道(例如蜂窩網、乙太網、衛星網、Wi-Fi)將從端結點收到的數據包發向雲端。由網絡伺服器理解和處理複雜任務，包括管理網絡、過濾冗餘數據包、進行安全性檢查、通過優化的網關進行調度確認、執行自適應數據率等。

LoRaWAN 網絡的結點採用異步通信，並且當它們有數據準備發送的時候，會採用事件驅動，或者調度機制進行通信。這個協議採用了阿羅哈法。在一個網狀網絡或者一個異步網絡中，例如蜂窩網，結點必須頻繁的被喚醒，來同步網絡和檢查消息。這種同步，大大的消耗了能量，成為電池壽命減少的一個重要原因。在最近的 GSMA 對於 LPWAN 空間的各項技術研究和對比中，LoRaWAN 比其他技術要優 3 到 5 倍。為了保證星型網絡的可行，網關必須有能力處理大量來自各個結點的信息。LoRaWAN 的高網絡容量通過利用自適應的數據率，以及網關內多通道多數據機的收發器來實現。最重要

的因素，是並發通道數，數據率，負載長度，已經結點間傳輸數據頻度。因為 LoRa 是擴頻基礎上的調製，所以每個信號基本上是正交的。當擴展因子變化的時候，有效的數據率也跟著改變。網關利用這種性能，能夠在同時在同一信道上接受不同的數據率。如果一個結點具有一個好的連接，並且靠近網關，網關當然可以利用最小的數據率，並且填充必須要更長的可用的頻譜。通過將數據率提高，空中的時間將被縮短，開放更多的潛在時間來傳輸。自適應的數據率也優化了結點的電池壽命。（以上改自原文網址：<https://read01.com/5xzLQE.html>）

LoRa/LoRaWAN 之推動者為 LoRa 聯盟，成員為 Cisco、IBM、Semtech、Microchip 等公司。特色為傳輸範圍號稱達 15~20KM，然而於坡地之穩定傳輸為本研究案探討重點之一、資料量 50kbps(足夠一般防災監測之數據檔)、電力壽命 10 年，亦為為本研究案探討重點之一。

四、NB-IOT 之技術發展

NB-IoT 窄帶物聯網(Narrow Band Internet of Things)是依據 3GPP 國際標準規範所研發的新技術，基於授權頻譜的頻段，可直接部署於 LTE 網路，更可說是 5G 的前導技術與 LPWA 低功耗廣域網(Low Power Wide Area)中的解決方案。

國內電信業者積極佈局 5G，以 700MHz 頻寬的電信級網路提供 NB-IoT 通訊服務，NB-IoT 具有低功耗、低成本、廣覆蓋、大連接等特性，更適合用於建設智慧城市的各項發展，目前遠傳已陸續推出包括：車聯網、智慧路燈、智慧停車、智慧大樓、環境/空汙偵測、電池電量監控、資產追蹤與人身定位(穿戴裝置管理)...等智慧應用服務。

窄頻 IoT(NB-IoT)技術不僅擁有低功耗廣域傳輸的特性，更能與一般電信商基地台的蜂巢式網路架構一同運作，換句話說，相關製造商僅須傾注於

設計的理念與功能性的完整性，毋須再擔心基礎架構的問題。也就是說 NB-IoT 可利用大部分現有的基地台，直接升級作為傳資料的媒介，相較於 LoRa 或 Sigfox 這些未授權(Unlicensed)頻段技術來說，擁有極大的優勢。

不過同樣都是藉由電信商的基地台傳輸訊號，為何 NB-IoT 的聲勢卻較 LTE-M 來得更高？根據市場研究報告指出，原因在於 NB-IoT 擁有較低的晶片成本與較高性能，且可透過 OTA(Over-the-air)即時更新；使得 NB-IoT 在短期內超越 LTE-M 需求。NB-IoT 資料是透過 4G，甚至於未來的 5G 訊號回傳，以現行的 4G 網路為利，NB-IoT 用的是 4G 破碎的頻段傳輸資訊，服務提供商或是一般用戶在使用資費上也不若手機月租費那麼昂貴。然而在台灣大部分山區 4G 基地台較針對聚落多處架設，位於人口少通訊需求較低之山坡地或林班地，訊號廣布率較低，因此 NB-IoT 在坡地防災監測之可行性，亦需透過本研究進行深入評估。

圖 1-5 與圖 1-6 分別為 NB-IoT 傳輸頻帶與頻寬在 LTE-4G 頻帶中之示意圖、NB-IoT 執行以 M2M 實現 IoT 之概念圖。

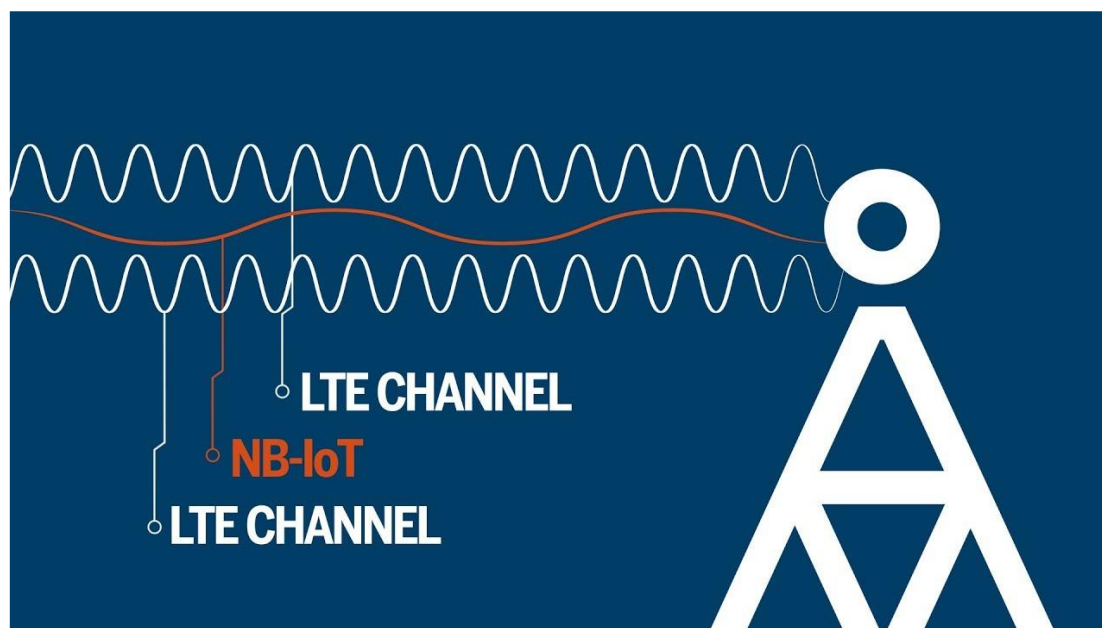


圖 1-5 NB-IoT 頻寬與 LTE-4G 頻寬示意圖

(圖片來源：<https://3smarket-info.blogspot.com/2018/08/emtc-nb-iot.html>)

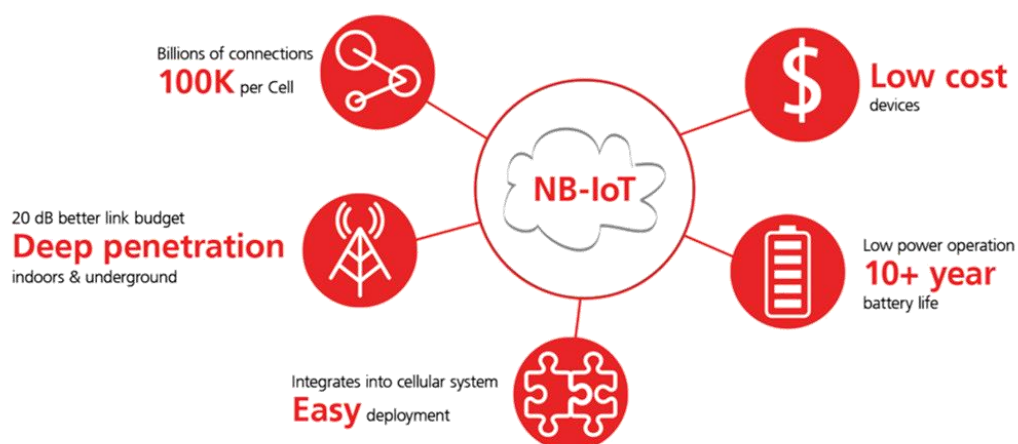


圖 1-6 NB-IoT 執行以 M2M 實現 IoT 之概念圖

(圖片來源：<https://www.cicicom.gr/pages/nb-iot/>)

五、 未來與 5G 通訊方式之結合

第五代行動通訊系統(5th generation mobile networks 或 5th generation wireless systems)，簡稱 5G，是指第五代行動通訊技術，是 4G 系統後的延伸。美國時間 2018 年 6 月 13 日，聖地牙哥 3GPP 會議訂下第一個國際 5G 標準。由於物理波段的限制，也將會與其他通訊技術並用，包含長距離的其他傳統電信波段。5G 與 4G 相比概念是連線容量有著巨大提升，並仰賴物聯網的需求而建設成形。屆時所有物品之間的連結均可容納，舉個直觀一點的例子，就是除了電源，外部連結線均可以剪掉。不同世代之傳輸速度與頻寬示意圖如圖 1-7 所示。

下一代行動網路聯盟(Next Generation Mobile Networks Alliance)定義了 5G 網路的以下要求：以 10Gbps 的資料傳輸速率支援數萬用戶；以 1Gbps 的資料傳輸速率同時提供給在同一樓辦公的許多人員；支援數十萬的並發連接以用於支援大規模傳感器網路的部署；頻譜效率應當相比 4G 被顯著增強；覆蓋率比 4G 有所提高；信令效率應得到加強；延遲應顯著低於 LTE。

5G 在 2020 年陸續推出，以滿足企業和消費者的需求。除了簡單的提供更快的速度，他們預測 5G 網路還需要滿足新的使用案例需求，如物聯網(網路裝置建築物或 Web 存取的車輛)、廣播類服務，以及在發生自然災害時的生命線通訊。

對於智慧硬體廠商而言，他們還希望 5G 能夠同時連接數千個低功耗物聯網(IoT)設備，並支援設備到設備(D2D)連接方式，以實現附近設備之間的低延遲連接。既能在降低延遲的同時還可以達到更快的網路傳送速率，這將需要大量的多輸入多輸出(MIMO)天線系統，更多的載波頻寬和頻譜，以及很可能使用極高頻率的 mmWave(經常被稱為解決方案)頻譜。其中，5G 最大的難點在於找到提高可用頻寬的頻譜。



圖 1-7 不同世代之傳輸速度與頻寬示意圖

(圖片來源於：<https://cic.org.sa/2018/05/al-khobar-city-of-saudi-arabia-becomes-first-recipient-of-5g-network-among-mena-cities-2/>)

由於 5G 技術將可能使用的頻譜是 28GHz 及 60GHz，屬極高頻(EHF)，比一般電信業現行使用的頻譜(如 2.6GHz)高出許多。雖然 5G 能提供極快的傳輸速度，能達到 4G 網路的 40 倍，而且時延很低，但訊號的繞射能力(即繞過障礙物的能力)十分有限，且傳送距離很短，這便需要增建更多基站以增

加覆蓋。

因此在邊坡防災監測的應用上，基地台的普及率仍是最大關鍵，甚至需求高於 4G。如此一來，建置 LPWAN 後再與 5G 基地台連結更為重要的技術發展方向。

第二章 全球導航系統

第一節 全球導航系統

全球導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)包括美國全球定位系統(Global Positioning System, GPS)、俄國的系統(Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, GLONASS)、中國北斗衛星導航系統(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)與歐盟的伽利略定位系統(Galileo)等，衛星導航系統就存在日常生活中，例如手機定位、交通導航、測時等，當多個衛星系統共同合作，就能互補互足，造福人民。

GPS 為由美國國防部設計，是一個全地球、全天候、24 小時工作的立體定位系統，運用於交通導航、工程施工測量等等，提供精確的位置、時間，進而推導運動速度與方向。GPS 主要分為三部份：太空、控制與用戶。太空部份由 24~32 顆衛星環繞地球組成；控制部份由遍佈全球的監控站組成，負責掌控衛星在軌道上的位置與校正衛星時鐘的誤差；用戶部份則是指所有使用 GPS 接收衛星訊號者，例如汽車導航、手機 GPS 定位等。GPS 的定位原理很為由訊號接收器接收來自至少 3 顆 GPS 衛星的電磁波訊號，接著藉由訊號傳遞時間計算出接收器與個別衛星間的距離，進而解算出用戶的位置與海拔高度，通常用戶端的 GPS 接受器會接收到 4 顆(或以上)的衛星的電磁波訊號，能夠再解算出接收時間及更多接收器與個別衛星間的距離，藉由交互檢核，使定位更加精準。GLONASS 為俄羅斯國防需要而發展出的定位系統，後來才普及於民間使用，一樣是全球性、全天候 24 小時運作。主要構成與 GPS 相同，定位原理也與 GPS 類似，都是藉由距離的量測來進行定位。但 GLONASS 與 GPS 系統在時間、座標系統以及訊號傳送方式不同。GLONASS 系統目前總共有 24 顆衛星在宇宙中運行，衛星主要分布於高緯度地區，與分布於中、低緯度的 GPS 正好互相合作，完成整個地球的定位工

作。北斗衛星系統(北斗二代)(BDS)為中國獨立建設的衛星系統。目前已發射 16 顆衛星，預計最終會有 35 顆衛星。北斗衛星除了提供全球定位服務外，還特別加強亞太地區的定位服務，目前中國的漁船、公車等交通運輸工具都已使用 BDS。伽利略衛星系統(Galileo)由歐盟製造，獨立於 GPS 與 GLONASS 系統，Galileo 主要作為民用，而非軍事用途。Galileo 目前仍在發展中，預計將會完成共 30 顆衛星的發射。因為歐洲緯度高，因此 Galileo 特別加強高緯度地區的覆蓋。Galileo 系統因更能抵抗衛星訊號干擾與反射，因此能提供較其他衛星系統精準的定位。未來 GNSS 在新興產業應用上，具有相當大的潛力，包括智慧城市、物流運輸、大數據分析與物聯網通訊等。

第二節 即時動態定位系統

根據吳俊民(2019)指出，隨著多空間維度之無人載具的快速發展，使得高精度定位的需求日趨重要。而目前能夠達到近公分等級的定位精度有即時動態定位(Real Time Kinematic, RTK)核心技術。吳俊民(2019)主要就即時動態定位技術建置系統整合驗證平台，並使用高傳輸且穩定的網路通訊，如 4G 或 5G 網路來鏈結參考台與行動台進行定位解算。從測試結果中可以發現目前動態的定位精度可準確定位於行駛車道上，可達車道級定位(Lane-level Positioning)，藉由開發的預測補償機制可以補償遮蔽區域的定位結果以達到行進軌跡不中斷。

為了提升全球導航衛星系統定位的精準度至近公分等級的水準，GNSS 動態定位資料大多結合地面固定觀測站(或稱參考台)的觀測資料進行差分(Differential)的解算定位，稱之為即時動態(Real Time Kinematic, RTK)定位技術(Ebadi and Chapman 1997)。即時動態定位技術利用差分定位的解算方式，可以有效消除大部分衛星與接收機的定位時表誤差，對於參考台與接收機間的短基線範圍(約 10 公里內)的動態定位而言，能夠達到近公分等級的動態定位精度，這種技術對於區域性之動態定位的量測上有很大的助益(Lichti 2002, Zhang and Forsberg

2007)。但是隨著基線範圍增長，即時動態定位的定位精度也隨之降低，以致無法應用於較大範圍的高精度定位應用需求。此外，即時動態定位必須建置固定式的參考台來追蹤衛星，不僅增加建置的成本也降低其定位效率與便利性。

目前這近公分等級的動態定位技術必須使用到行動通訊進行資料傳輸與即時解算定位，因此維持穩定的 4G/5G 通訊網路是系統運作的基礎。

此外，影響這兩大技術動態定位精度的主要誤差包含衛星軌道誤差、衛星與接收機時表誤差、大氣層影響之延遲誤差及未知整數周波數求解誤差等。為提升定位精度，如何取得高精度的衛星軌道資訊、時表修正量或使用篩選品質較佳的衛星觀測資料來降低大氣層等誤差影響，也都是提高動態定位精度的研究方向。RTK 是最先發展、也是目前最被廣泛運用的 GNSS 近公分等級定位精度測量方法，RTK 主要採用了載波相位(Carrier Phase)與動態即時差分技術進行解算定位，可以達到在戶外場域即時取得近公分等級的定位精度，為高精準定位需求的應用，例如高精度圖資或各種高精度工程控制量測等提供解決方案。

以載波來傳送訊號，由於載波波長遠短於電碼，因此要達到高精度定位勢必要使用載波相位的觀測值，而 RTK 定位技術就是基於載波相位觀測值的即時動態定位技術，可以即時提供接收機的三維定位結果並達到近公分等級的定位精度。RTK 基本架構如下圖 2-1 所示，主要將地面參考台(Base)所收集到的接收衛星觀測值與參考台精確座標等資訊，透過行動網路傳送到使用者的接收機(或稱行動台 Rover)進行差分定位解算，而行動台除了接收參考台的資訊之外，自身同時也收集 GNSS 觀測資料，並在系統內組成差分觀測值進行即時性的處理加以消除時表誤差，同時解算出精準的定位結果，解算的取樣率則視接收機而定，吳俊民(2017)使用瑞士 U-blox 公司所開發的 M8T 單頻多星系的接收模組進行驗證，其取樣率最高可達 10Hz(每 100ms 可提供一次定位結果)。

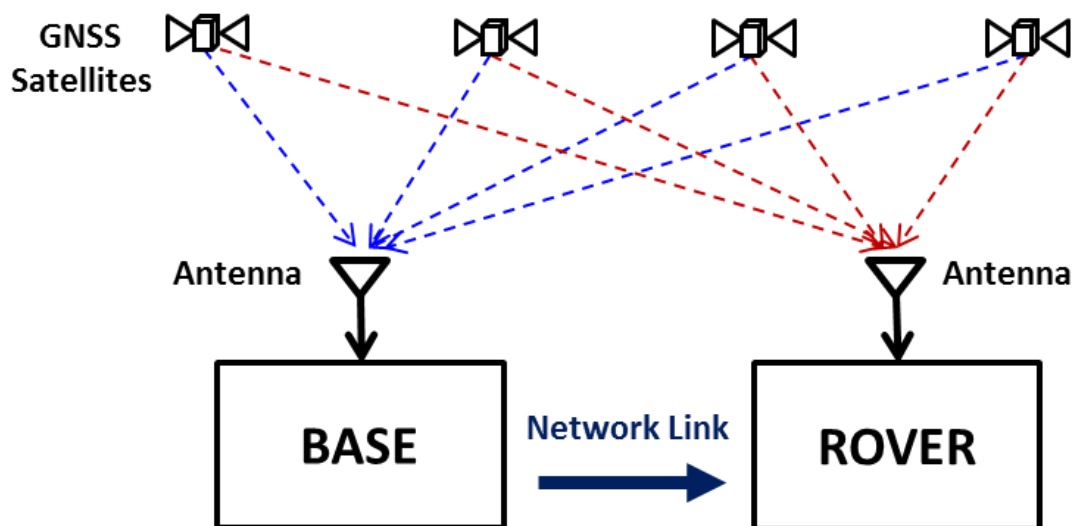


圖 2-1 RTK 基本架構的示意圖(吳俊民 2017)

如下圖 2-2 所示，為 RTK 基本運作方式的示意圖。行動台對於載波相位的觀測值進行二次差分運算消除大部分衛星與接收機時表誤差後，經過最小平方法 (Least-square) 估算得到近似的數據浮點解(Float)，並在動態環境下進行未知整數周波數模糊度解析(Ambiguity resolution)(Bertiger et al., 2010)。在未知整數周波數解析後，即可計算出固定解(Fixed)後，即可即時的解算定位出近公分等級的定位結果。RTK 技術的關鍵在於使用載波相位觀測量，並利用了參考台和行動台之間觀測誤差的空間相關性，通過差分的方式除去行動站觀測資料中的大部分誤差，進而實現即時動態的高精度定位。

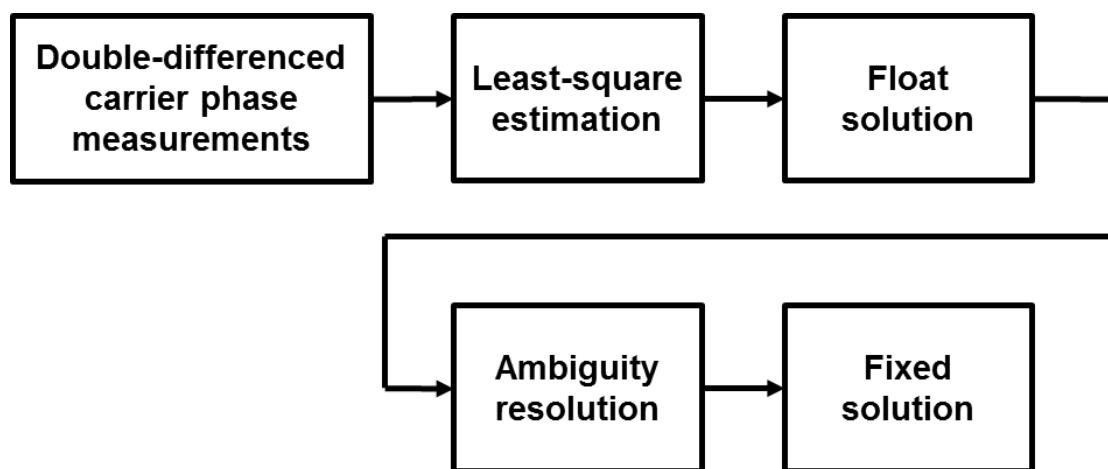


圖 2-2 RTK 基本運作方式的示意圖

RTK 技術所面臨的主要挑戰包括下述兩點，一為 RTK 技術的關鍵在於資料

處理與傳輸技術，RTK 定位時參考台必須即時而快速的透過穩定的行動通訊網路把衛星觀測資料及已知參考台資料傳輸至行動台，而 4G LTE 行動網路的普遍性、穩定性與高資料傳輸率特點足以做為 RTK 技術無線傳輸之用。二是參考台與行動台間校正資料的有效作用距離，或稱為基線(Baseline)。由於 GNSS 誤差的空間相關性會隨著基線的增長而失去線性關係，因此在較長距離(單頻接收有效最大距離約 10 公里)情況下，即使經過差分處理後的使用者資料仍存在著較大的觀測誤差以致定位精度降低或無法解算。為改善這個問題，有研究者提出網路 RTK 技術，使用多個參考站組成的 GNSS 網路來估計一個區域範圍的 GNSS 誤差模型，為範圍內的使用者提供修正資料，且使用者收到的也不再單單是由某單一實際參考台的觀測資料，而是產生一個虛擬參考台(Virtual Base)和距離自己位置較近的某個參考格線的修正資料來解算定位(Rizos 2002)，雖然可以改善 RTK 技術的測量範圍，但基礎系統建置成本與操作便利性仍待強化。

第三節 全球導航系統應用於地表變化監測

一般而言，偵測與辨識可能的淺層崩塌徵兆，需要高頻率的觀測以及非常高精度的位移量測，利用 GNSS 接收儀的佈置，包含 Static GPS (Campaign Mode) 靜態測量模式，或是 Continuous GPS (CGPS)連續追蹤站模式，以及 Real-Time Kinematic (RTK) 或 e-GPS 之即時動態測量模式，可以同時解決時空的限制，同時也不受到天氣的影響。然而，一般廣泛使用的雙頻 GNSS 接收器所費不貲，每台約須 15 到 30 萬元。置於滑動帶上的觀測將無法避免可能的裝備損失，會限制到觀測點的數量以及觀測區域。雖然目前相關計畫提出利用單一 GPS 主機配合多工器連接多組天線使用(交通部運輸研究所 2011)，但其實可拉線距離與實際現場監測狀況有關，可能也無法大範圍佈設。

使用較便宜的單頻 GNSS 接收器可應用於崩塌觀測，因為其體積較小，可以使用短基線進行相對定位(通常小於 5 公里)，並利用差分技術消除大部分媒介的

誤差(如電離層干擾)，或與 e-GPS 相對解算，如此一來，僅利用 L1 頻率的相位觀測將可以做為定位使用 (Lytvyn et al. 2012; Huang and Wang 2015)，而相關國內外研究也確認 L1 頻率點位可以解析到平面位置數公分等級的變動(陳鶴欽等，2009；沈力洋等，2010；Cina et al. 2013)，甚至於高程解析上也有相近的精度(林昊等，2014)。而這樣的觀測系統在文獻中也曾成功用於崩塌觀測任務中(Wang 2013; Benoit et al., 2015)。

第三章 實驗方法

第一節 研發與精進之系統

本研發設備技術供應商塏固工程有限公司與雲科大團隊(以下稱本團隊)將透過本計畫，進行系統效能精進。前文提到現行以 RTK 進行 GNSS 解算定位之方法，因需不斷透過 4G/5G 連網解算，因此無論在 Rover 端甚至 Base 端都將消耗大量電力，且一般皆以 1 小時為解算完成所需時間，亦即監測地表變為間隔為 1 小時，可能會漏失部份短時間內發生之地表變動細節。

因此本研究案重點為下列幾項：

1. 發展以 LoRa 傳輸 GNSS-RTK 之 GNSS Rover 與 Base；
2. Rover 收到之衛星資料直接傳到 Base 端解算後回饋給 Rover，即可獲得 Rover 之位置，與上一次解算成果差即為這段時間 Rover 所在處變位；
3. 解算工作可於 2 分鐘內完成；
4. Rover 與 Base 電力可自給自足；
5. 降低漏失率以提高定位準確度。

本研究開發之設備如圖 3-1 所示，現地部署與運作方式如圖 3-2 所示。本系統另一優勢為 1 座 Base 可對應多座 Rover，所需之 SIM 卡僅 1 張供 Base 上傳資料或運算成果至雲端伺服器進行後續加值應用。

未來應用期能如於崩塌地大量部署地表變動監測網，如圖 3-3 所示，由 Base 迅速計算每個 Rover 於 2 分鐘期間之變化；並能串皆其他監測儀器，如地表傾斜、雨量、水位等，形成一完整以 LoRa 架構之防災間測低供耗無線網域，如圖 3-4 所示。其資料傳輸流量 GNSS-RTK plus LoRa-IoT 測站模組收集之資料約為<120 bytes，其中 LoRa-IoT 資料量為 33 bytes；包括模組 ID、2 組電壓訊號、1 組雨量

計數訊號和 1 組溫度計訊號等；GNSS-RTK 資料量為 75 bytes 以上：包括 UTC 時間、WGS84 N/E/H、RTK 狀態、RTK Ratio 值、衛星接收數量、測站與基站距離、測站與基站角度和 LoRa RSSI 等。

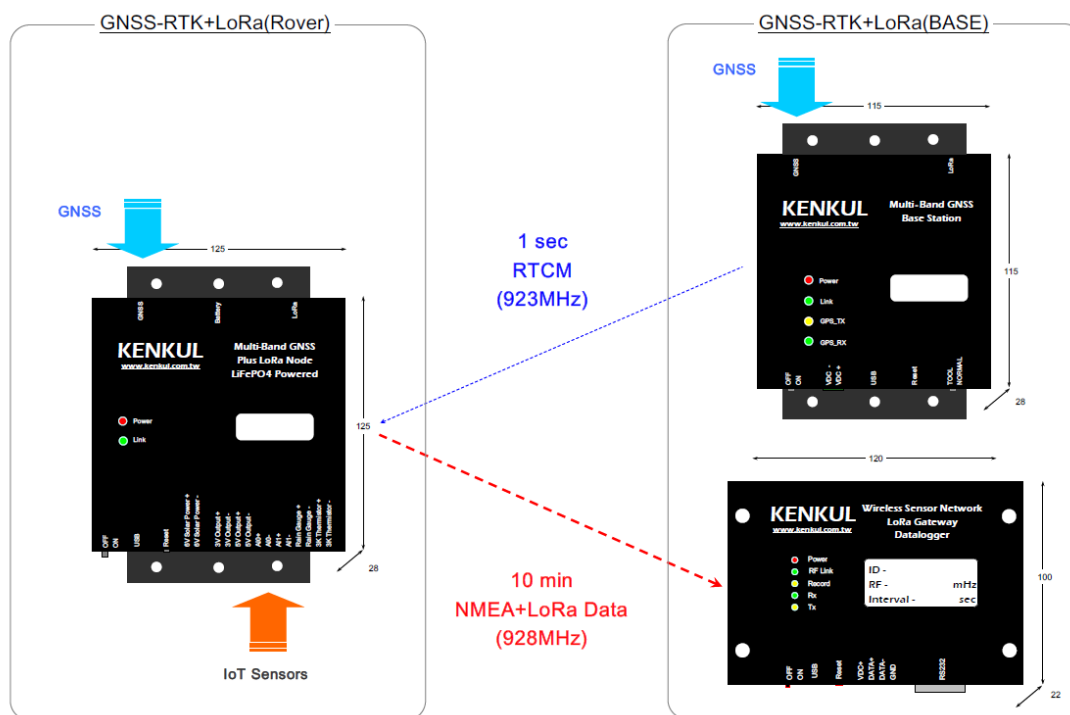


圖 3-1 本研究預計開發與精進之設備

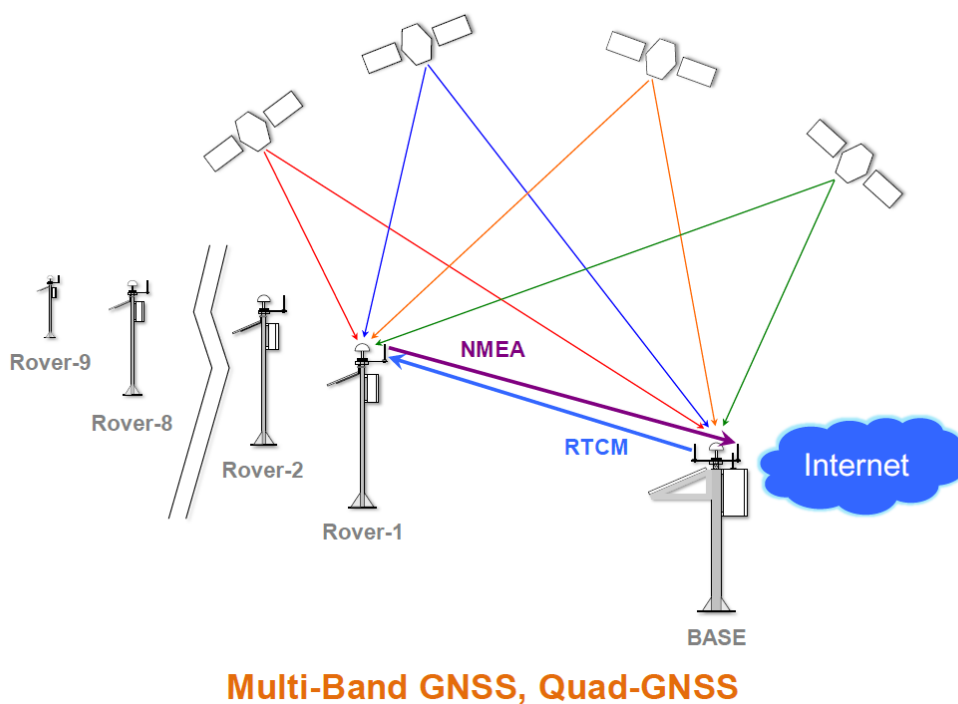


圖 3-2 本研究設備運作示意圖

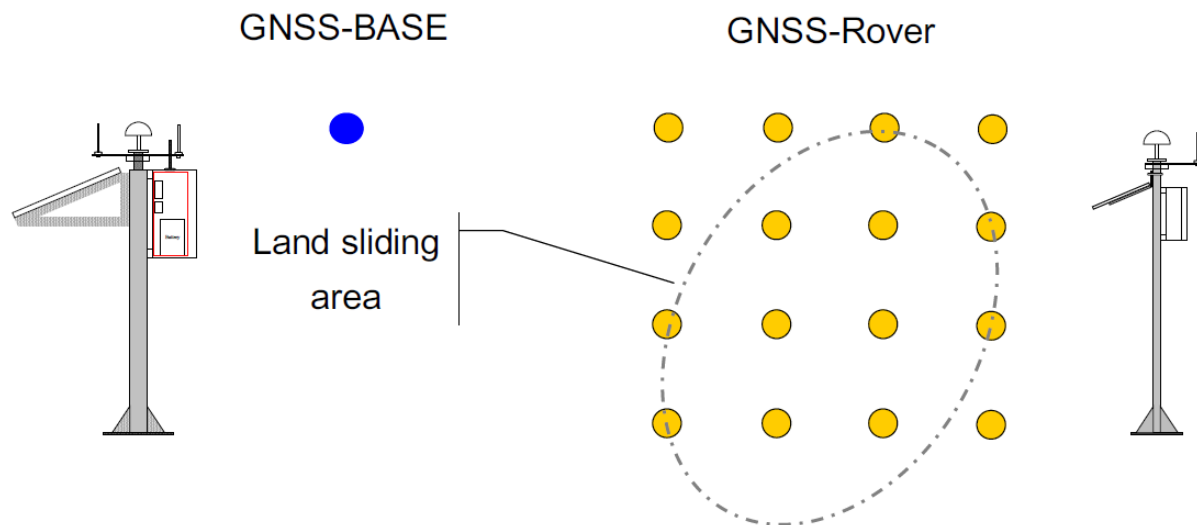


圖 3-3 本研發成果於崩塌地大量部署地表變動監測網

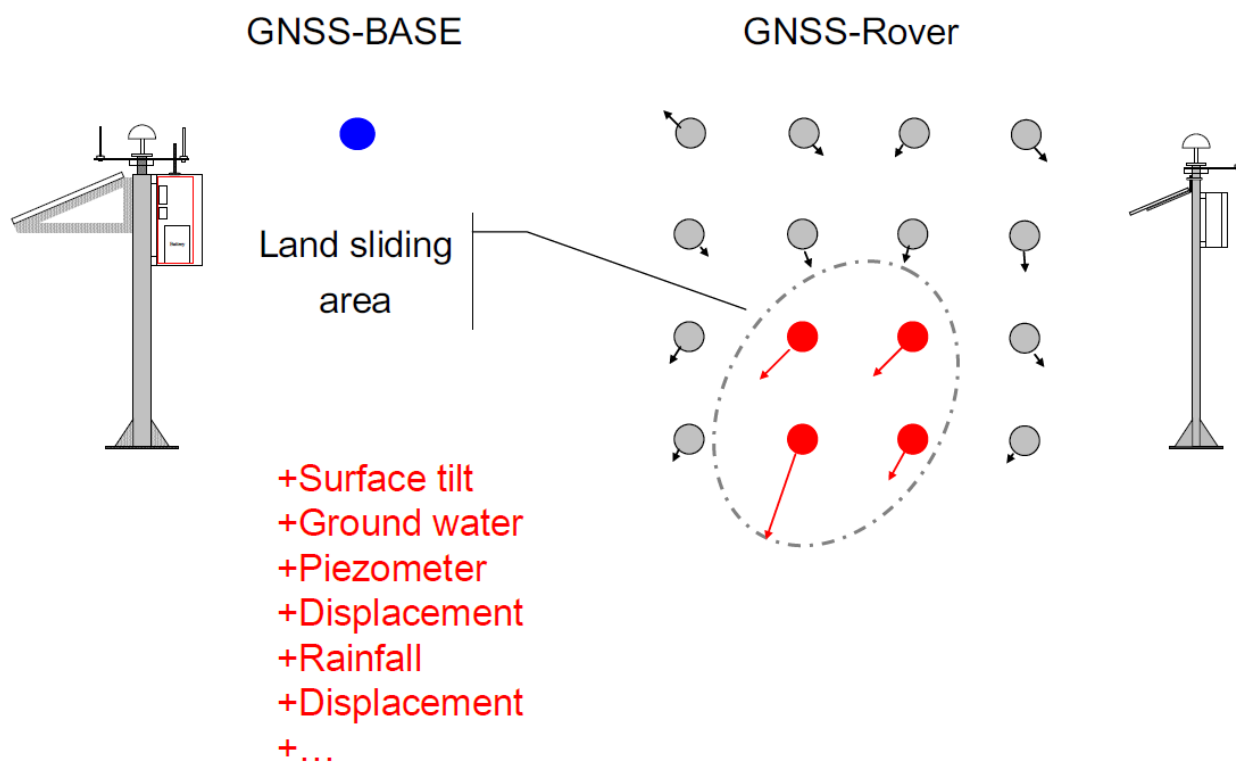


圖 3-4 本研發成果於崩塌地大量部署防災低供耗無線網路監測網

第二節 地表傾斜量測

陀螺儀(gyroscope,GYRO)，是一種基於角動量守恆的理論，用來感測與維持方向的裝置。陀螺儀主要是由一個位於軸心且可旋轉的轉子構成。由於轉子的角動量，陀螺儀一旦開始旋轉，即有抗拒方向改變的趨向。陀螺儀多用於導航、定位等系統。

陀螺儀的裝置，一直是航空和航海上航行姿態及速率等最方便實用的參考儀錶。基本上陀螺儀是一種機械裝置，其主要部分是一個對旋轉軸以極高角速度旋轉的轉子，轉子裝在一支架內；在通過轉子中心軸上加一內環架，那麼陀螺儀就可環繞飛機兩軸作自由運動；然後，在內環架外加上一外環架；這個陀螺儀有兩個平衡環，可以環繞飛機三軸作自由運動，就是一個完整的空間陀螺儀（space gyro）。

陀螺儀用在飛機飛行儀錶的心臟地位，是由於其兩個基本特性：一為定軸性（inertia 或 rigidity），另一是逆動性（precession），這兩種特性都是建立在角動量守恆的原則下。

在運轉中的陀螺儀，如果外界施一力在轉子上，此力對支點的力矩當可分解為順軸方向和垂直於軸方向兩個分力矩；前者使陀螺加速、減速，但不會改變轉軸方向；後者的時間積分將會逐漸改變轉動方向（通常是短時較小而隨時間逐漸積累增大），並產生相對於原軸的章動（新的旋轉軸原軸旋轉，如轉速降低時陀螺受重力作用時的非垂直旋轉）。

在運轉中的陀螺儀，如果外界施一作用或力矩在轉子旋轉軸上，則旋轉軸並不沿施力方向運動，而是順著轉子旋轉向前 90 度垂直施力方向運動，此現象即是逆動性。逆動性的大小也有三個影響的因素：外界作用力愈大，其逆動性也愈大；轉子的質量慣性矩（moment of inertia）愈大，逆動性愈小；轉子的角速度愈大，逆動性愈小。而逆動方向可根據逆動性原理取決於施力方向及轉子旋轉方向。

本團隊原預計採用 EPSON 公司出產之 MA-352 晶片，該晶片採用石英振盪壓電式產生激勵訊號，促進陀螺儀內之三軸加速度計與傾斜儀進行運作，比起目前市面上大部分之產品穩定與省電。然而因為預算不足無法取得，故改採用傾斜儀作為量測地表傾斜之設備。

傾斜變位計/微機電式傾斜計主要應用於水庫、水壩、堤防之傾斜變位長期觀測；鄰近開挖工地之建物傾斜監測；連續壁施工監測；橋樑或高架道路之墩柱及橋面傾斜監測；超抽地下水或潛盾施工引致之地表差異沉陷引發結構傾斜監測等。本計畫規畫裝設雙軸傾斜儀，為微機電式 MEMS 傾斜變位計(Micro-Electro-Mechanical-Systems)的設計目的在於永久裝設在結構物上以求觀測該結構物之長期傾斜變位量。

儀器照片如圖 3-5 所示，以自動量測方式，頻率為每 10 分鐘至少 1 次，若監測期間傾斜儀 10 分鐘變化幅度大於 1 度時，則改以頻率為每 2 分鐘 1 次。



型號	9350-5	9350-10	9350-15	
量測範圍	±5°	±10°	±15°	
外徑 x 高度	32 x 193			mm
重量	510			g
精度	0.1			%FS
操作溫度	-20~80			°C
電纜線材質規格	4 芯 / 22 AWG / PE 絕緣 / PVC 外被			
電纜線長度	標配 3m (長度可客制化)			
本體材質	300 系列不鏽鋼			
對應測讀儀型號	VW405 / VW406 / SD101 / 9020			
零配件選購	單軸固定架、雙軸固定架、不鏽鋼防護罩			

圖 3-5 雙軸傾斜儀照片與規格

第三節 LoRa 傳輸良率分析方法

發送器與接收器之連結能力，以 RSSI(接收訊號強度指數)、資料成功率(漏失率補數)關係進行評估。接收訊號強度指數(Received-signal-strength-indication，縮寫為 RSSI)是一個負的 dBm，表示 RF 信號的數值。信號越強，表示連線品質越好。因此，RSSI 越接近 0 越好。LoRa 發射與接收品質，將由 RSSI 評估，如表 3-1 所示。

表 3-1 RSSI 與發射接收品質關係

RSSI [dBm]	信號強度
-50 ~ 0	強
-100 ~ -50	中
-100 ~ -140	弱
< -140	極微(斷訊)

根據過去計畫之實驗經驗，以及文獻中 Augustin et al.,於 2016 研究 LoRa 傳輸效果指出，SF=12 時，超過 80%資料可於 2,800M 外被成功接收。本研究採用 SF=7，頻寬較高，理論上成功率可能較低。

第四節 RTK-GNSS 定位與傳輸良率分析方法

LoRa 傳輸穩定性將影響 RTK-GNSS 及時解算力，本研究預計以圖 3-6 所示之介面檢視 Rover 與 Base 收到之衛星數與資料品質，進行解算與分析後，逼近資料集中數(圖 3-6~圖 3-8)，以獲得未來逐時地表變位變化趨勢。

GNSS 資料會依 RTK Type 及 RTK Ratio 值(=10)過濾,測值越接近 10 表示:接收衛星仰角>35 度，並且 GNSS 衛星數量(>30 顆)及 CN 值(>40)；其結果會提高資料解算之準確度。

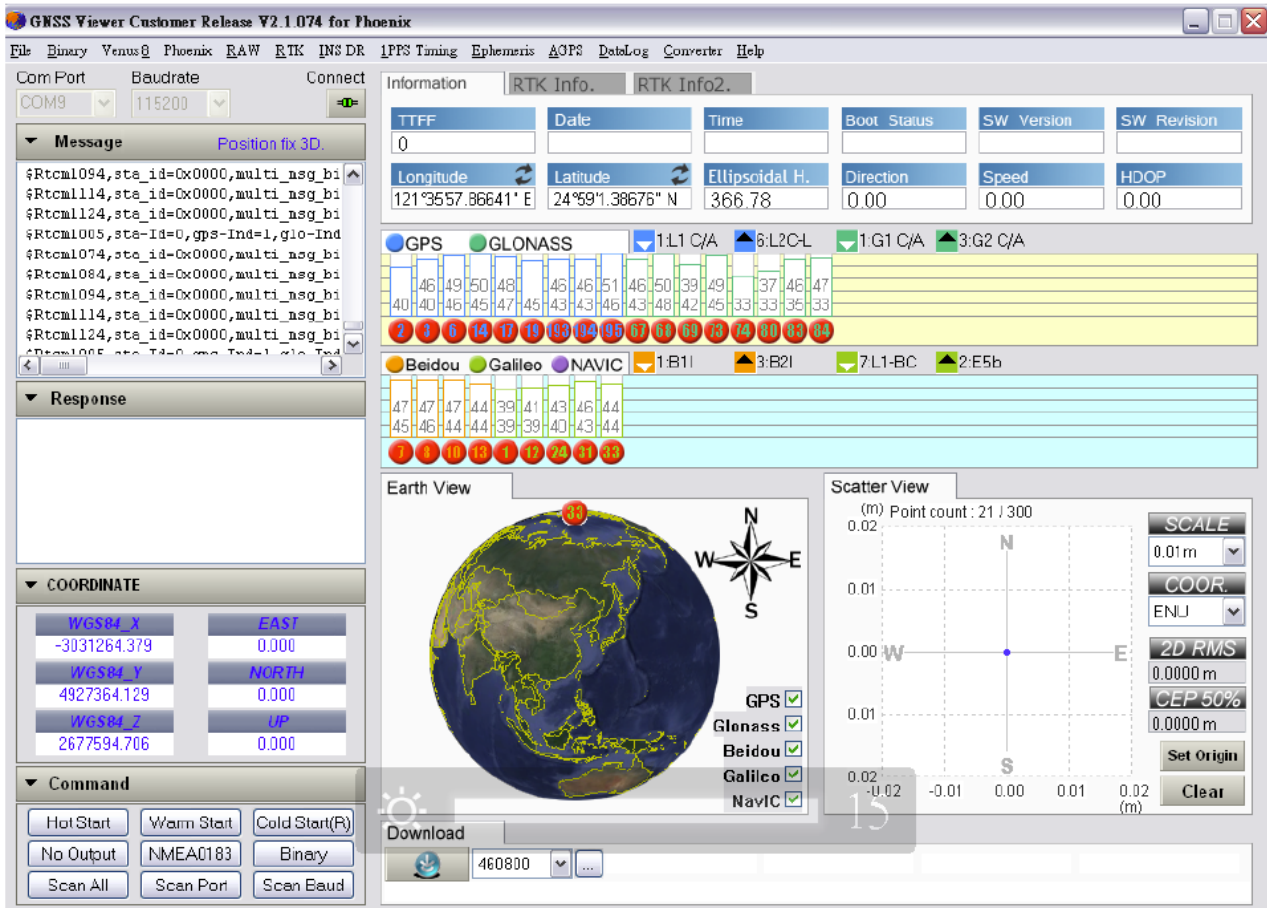


圖 3-6 即時解算畫面

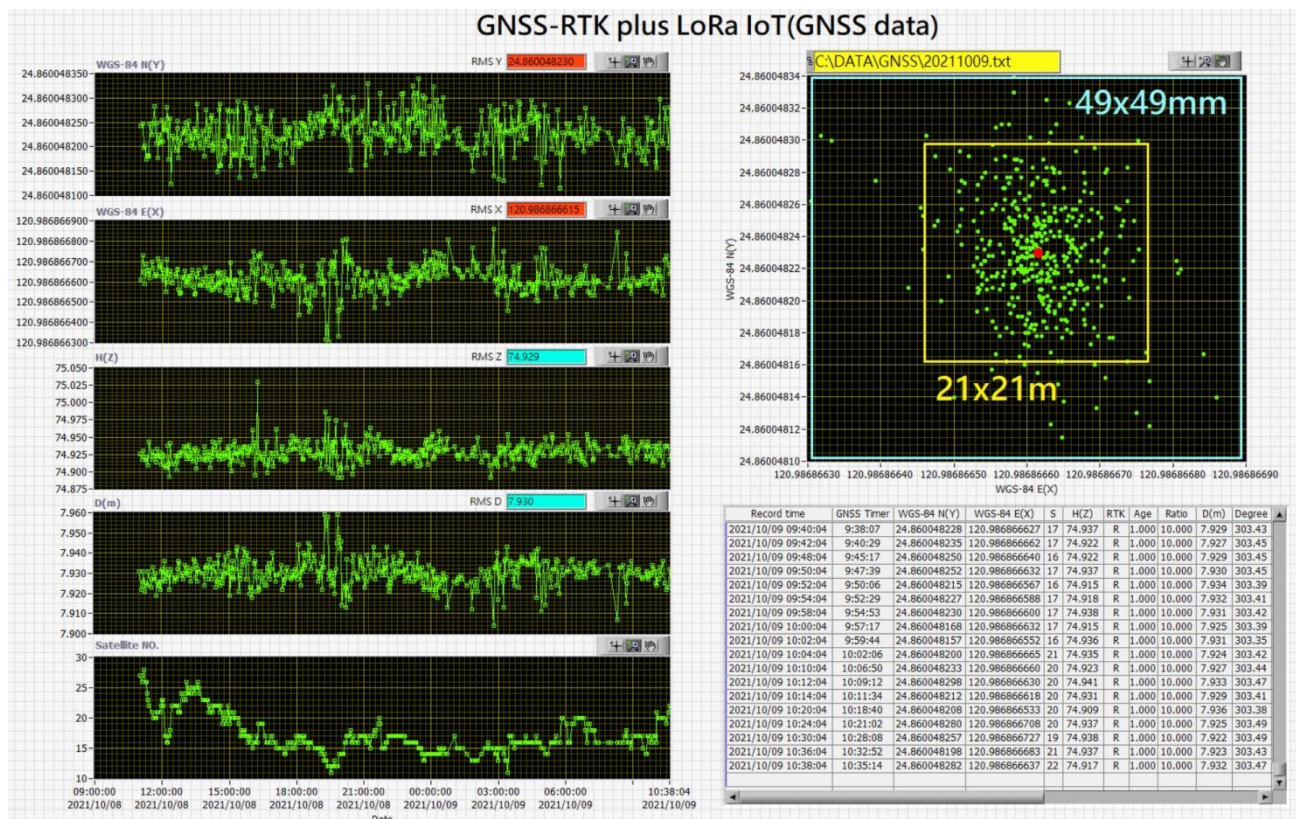


圖 3-7 解算初期成果

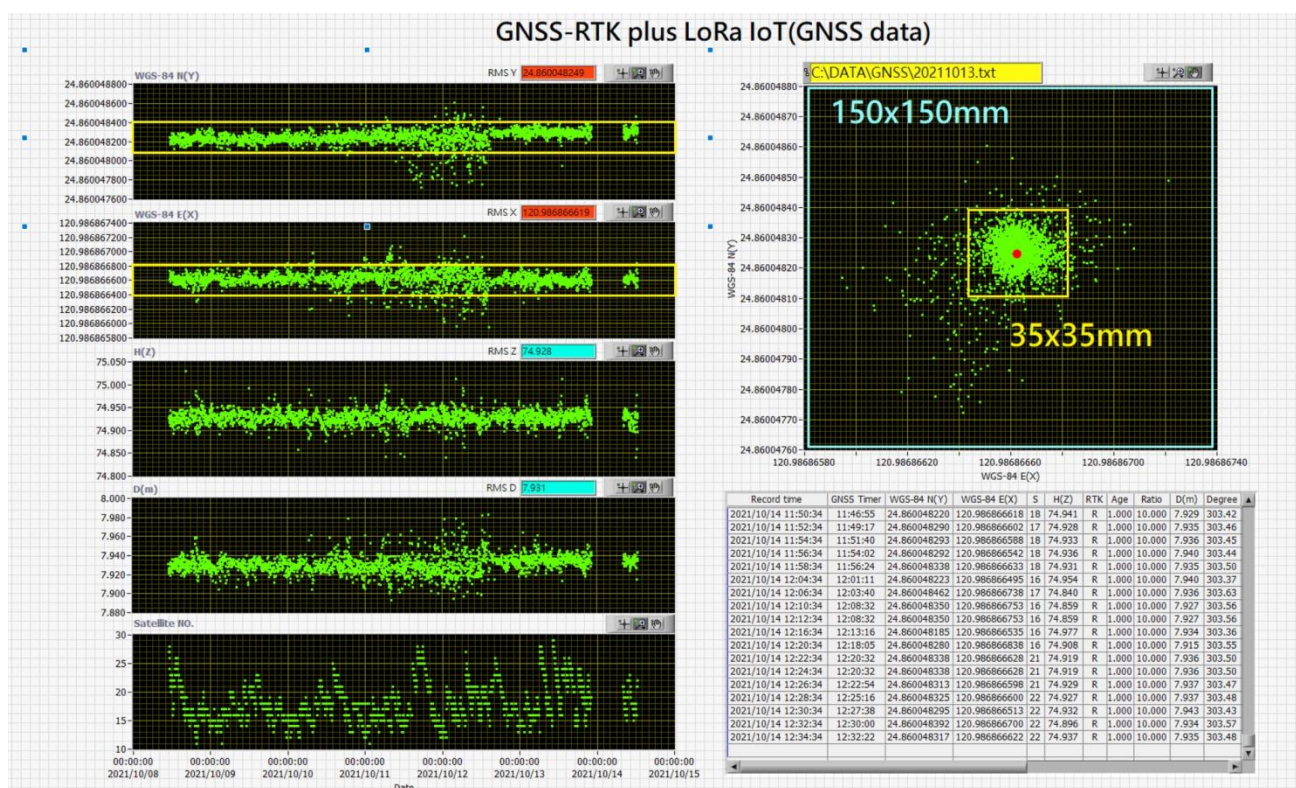


圖 3-8 解算後期成果(精度提高)

第四章 現地實作場域與分析成果

第一節 實作場域介紹

根據水土保持署 112 年公布的土石流潛勢溪流資料顯示，全台目前共有 1,731 條土石流潛勢溪流，分布於 17 縣（市）、159 鄉（鎮、市、區）、690 村（里）、原住民地區計 782 條。為了強化土石流防災監測及分析土石流產生的相關因子，以提升土石流預警能力。自民國 91 年起，水土保持局在土石流發生的高潛勢溪流重點區建置固定式土石流觀測站，利用各式觀測設備(攝影機、鋼索、雨量計、地聲及土壤含水量計等)，執行現地觀測任務及掌握周遭場域的環境狀況。民國 88 年 921 大地震後中部地區山崩地滑更嚴重，加上民國 90 年至 91 年間桃芝及納莉颱風侵襲，造成台灣部分地區地層鬆動、地質條件改變，提高了引發土石流事件發生的頻率及規模。因此水土保持局於民國 91 年時，首先建置白布帆、九份二山、神木、上安、郡坑及豐丘 6 處土石流觀測示範站。上述各式儀器以有線(非對稱數位用戶線路，ADSL)或是無線網路(衛星通訊或是 4G)傳輸方式，透過各固定式觀測站接收電腦主機將即時觀測數據回傳至土石流防災應變中心進行研判。並視觀測區域內儀器數值是否超過警戒值，及依據攝影機影像或是相關儀器(如鋼索檢知器及地聲檢知器)判斷土石流或崩塌災害的產生，發出警戒訊息告知相關應變人員。

然而這些場域經常遭受有線或無線網路的限制，傳輸效果不如預期穩定，導致觀測資料無法順利完整及時傳至雲端伺服器供相關管理或治理決策判斷參考。

1. 新竹縣尖石鄉秀巒崩塌地

新竹縣尖石鄉秀巒村裝設區域於 2021 年 09 月 13 日 10 時許發生坡面崩塌，崩落土石淤積於白石溪河道與左岸竹 60 線道路，造成交通中斷及溢流溪水漫淹民宅。計畫區域崩塌地正面照片如圖 4-1 所示、空拍照片如圖 4-2

所示(水保署提供)、正射影像如圖 4-3 所示(水保署提供)。



圖 4-1 計畫區域崩塌地照片(團隊於 2021.09.14 拍攝)



圖 4-2 計畫區域崩塌地空拍照片(水保署於 2021.09.16 拍攝)

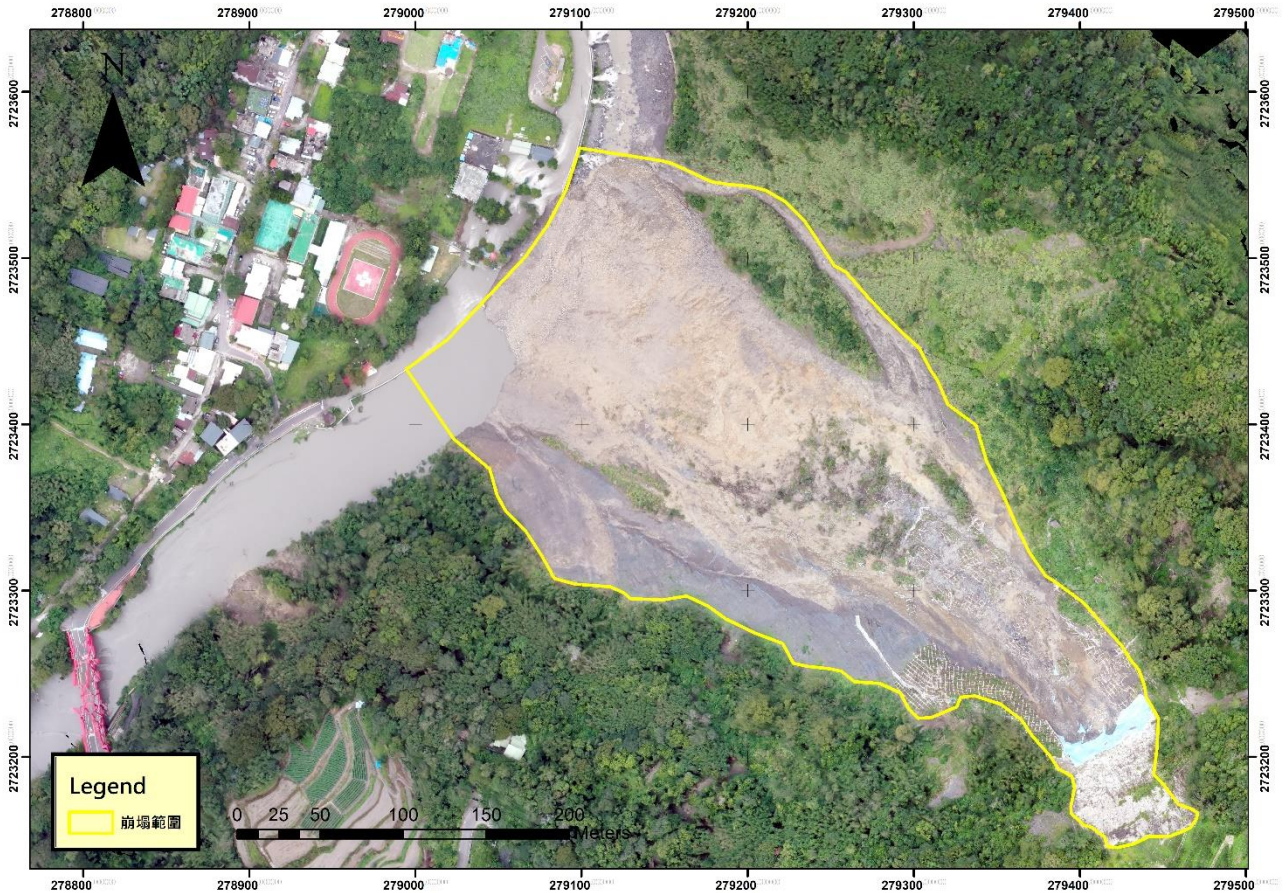


圖 4-3 研究區域正射影像(水保署於 2021.09.13 空拍產製)

研究地區地層主要為巴陵層(Pl)與木山層(Ms)，其岩性以暗灰色至灰色之硬頁岩及板岩組成為主，下段偶含灰色細粒泥質薄層砂岩，砂岩中偶可見交錯層構造。風化後之碎片呈球狀風化或鉛筆狀構造。地質構造由五萬分之一臺灣地質圖幅土場圖幅(草圖)可見，秀巒崩塌地有一無名背斜通過。

水利署於計畫區域新竹縣尖石鄉秀巒村(秀巒國小斜對面)設有秀巒雨量站(水利署站號 1140P006；氣象局站號 21D140)，蒐集近 10 年雨量資料如圖 4-4 所示，年平均降雨量約 1,932mm，每年降雨多集中在 5~9 月梅雨季節與夏季颱風影響期間；冬季因受東北季風影響，亦常有降雨情形，屬於全年皆降雨地區。



註：紅字部分為資料缺測或不採用。

圖 4-4 秀巒雨量站紀錄(水利署)

2. 桃園市復興區光華崩塌地

根據水土保持局臺北分局委辦各年度雪霧鬧等地區潛在大規模崩塌地調查監測計畫(青山工程顧問公司執行)內容，光華地區附近地勢高點為西側之無名山(海拔 1,320m)，光華地區之立體地形圖如圖 4-5 所示。大致由西側之無名山(海拔 1,320m)向東降至光華道路(海拔 993m)。光華地區所在邊坡，其坡趾前緣北側及南側各有一座無名山，海拔分別約 1,130 及 1,135m，使得光華地區坡趾前緣為地勢相對較低之谷地，大致呈東口狀地形。

水系方面，光華地區北側及南側各有一條蝕溝通過，於下邊坡匯流成同一條蝕溝，匯流至三光溪、並向大漢溪匯流。

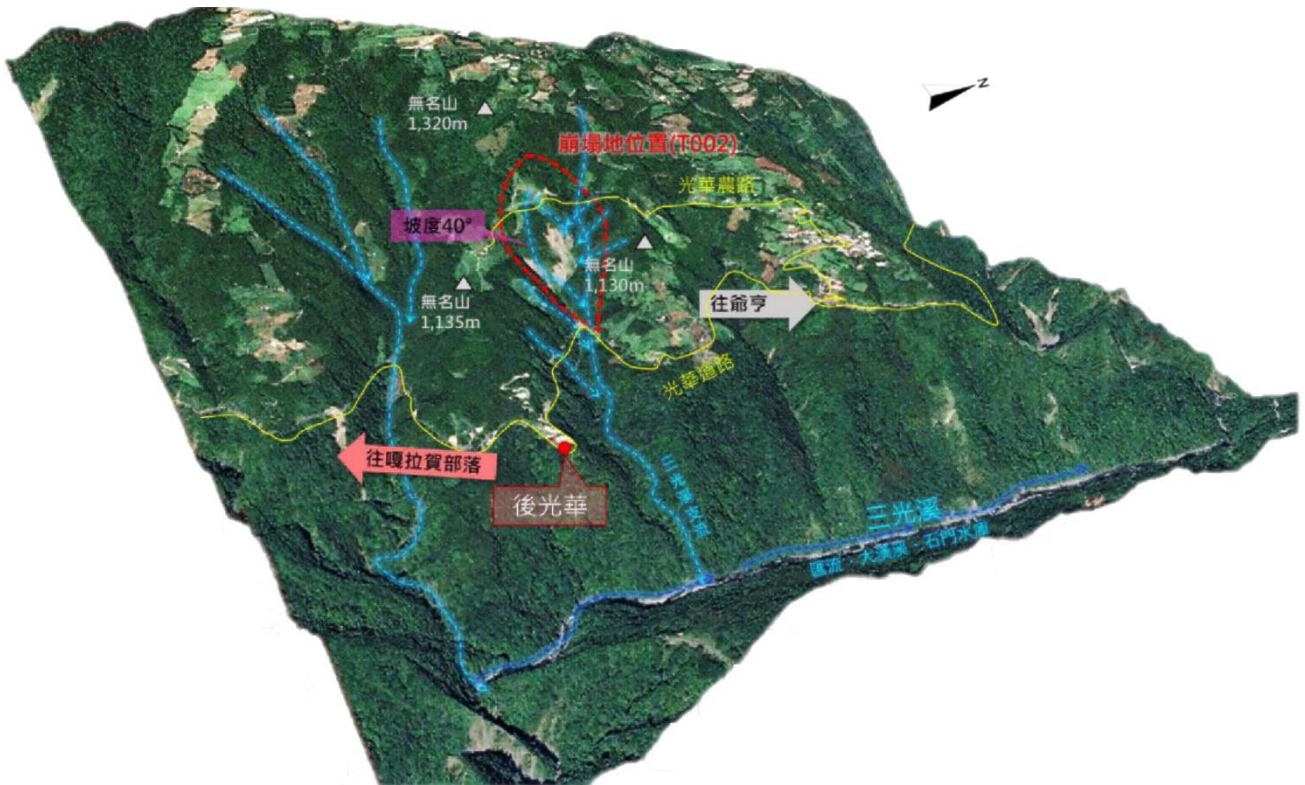


圖 4-5 計畫區立體地形圖(水保署)

光華地區地層主要為巴陵層(P1)，其岩性以暗灰色至灰色之硬頁岩及板岩組成為主，下段偶含灰色細粒泥質薄層砂岩，砂岩中偶可見交錯層構造。風化後之碎片呈球狀風化或鉛筆狀構造。地質構造主要為無名背斜及檜山斷層，位於光華地區東側約 80m，為一東北-西南走向之逆斷層。檜山斷層上、下盤皆為巴陵層。雖由五萬分之一臺灣地質圖幅土場圖幅(圖 4-6)可見，光華地區有一無名背斜通過，但此無名背斜之量測位態距離光華地區甚遠，且地質調查量測露頭位態發現背斜並未穿過調查區。參考經濟部中央地質調查所(2009)二萬五千分之一環境地質基本圖及地質災害潛勢圖得知，光華地區位於高潛勢之地滑區，如圖 4-7 所示。因此如圖 4-8 所示，崩塌機制初步研判如下：

- (1) 厚層岩屑材料堆積，岩層破碎具高角度裂隙：坡面有厚度 15~36m 不等之岩屑材料暫積，且岩層部分深度之岩體較破碎，普遍具高角度裂隙，為邊坡活動時可能的滑動面及不利邊坡穩定的地質條件。

(2)趾部裸露區易受環境影響，不穩定性高：趾部裸露區域易受環境影響，造成坡面不穩定材料再次崩落，擴大裸露範圍，進而影響整體邊坡穩定。

(3)地下水：區域地下水具流徑特性且複雜，區域內地下水可分為兩層，一位於岩屑層內，二位於岩層裂隙內，於降雨後，地下水位自頭部區外補注進塊體內，不利邊坡穩定。

坡面上具厚層岩屑材料堆積，岩層部分深度破碎且具高角度裂隙，存有多個滑動深度，透過地表地形調查、地質鑽探、監測成果及配合集水管作業中回饋之地中資料，光華地區主要崩塌類型為岩屑層內滑動，滑動深度約地表下 5~27m 處。

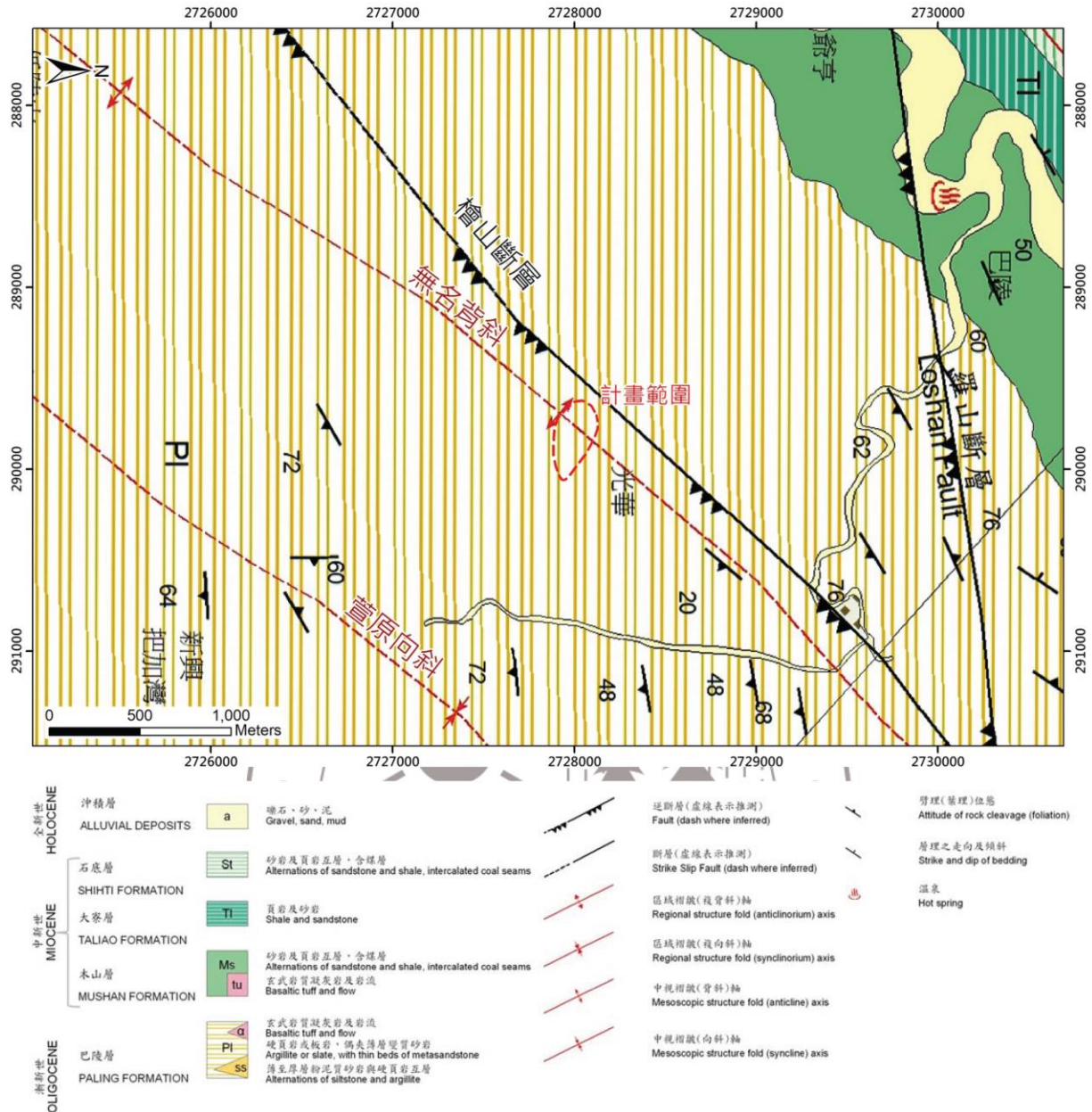


圖 4-6 本計畫範圍區域地質圖(資料來源：五萬分之一臺灣地質圖幅土場圖幅(草圖)2008)

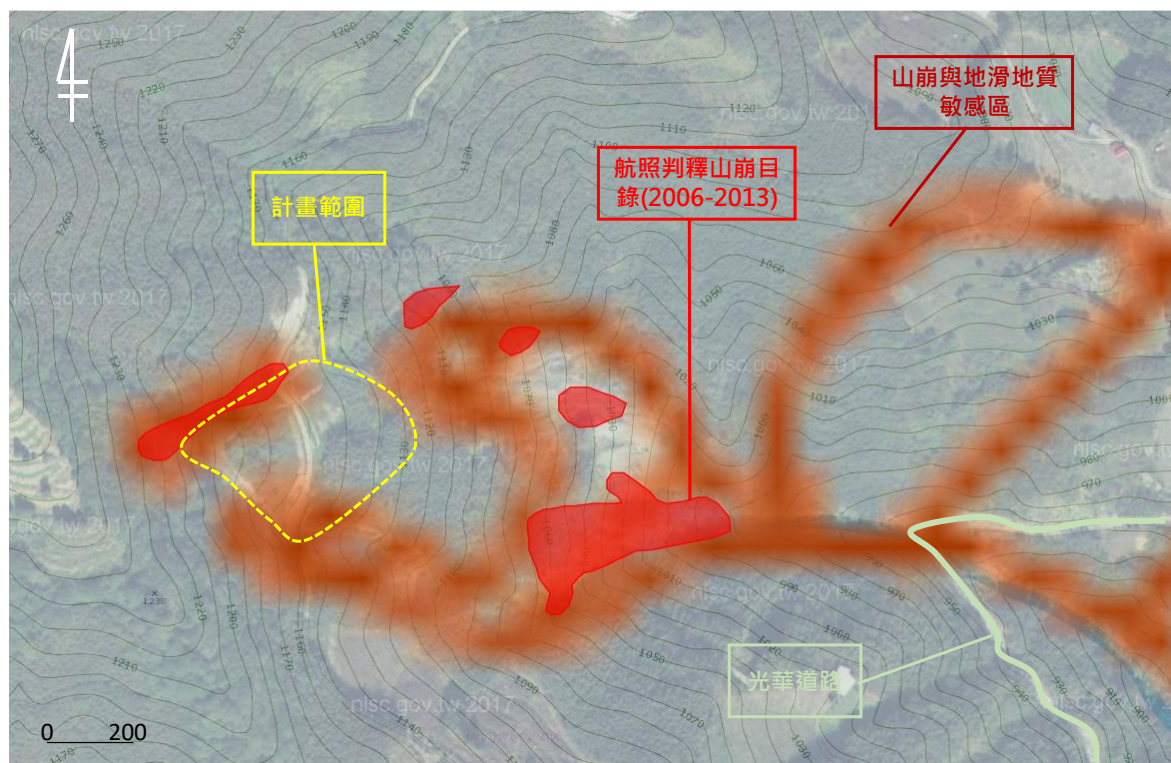


圖 4-7 計畫範圍環境地質圖(底圖取自地質調查所)

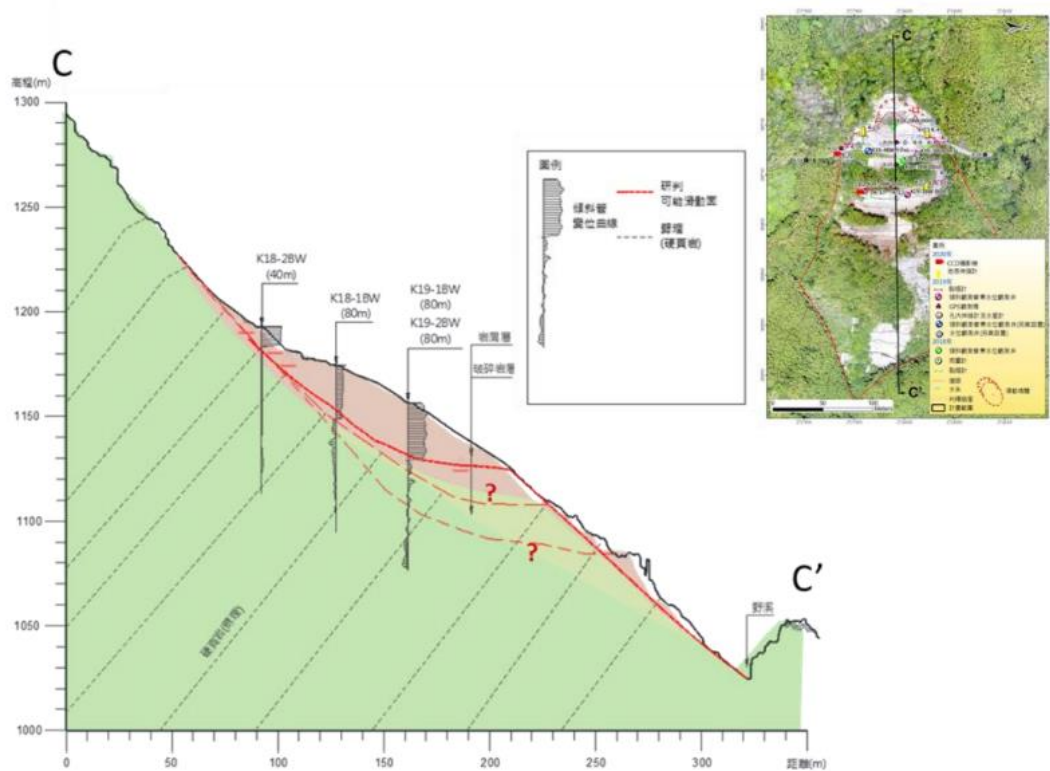
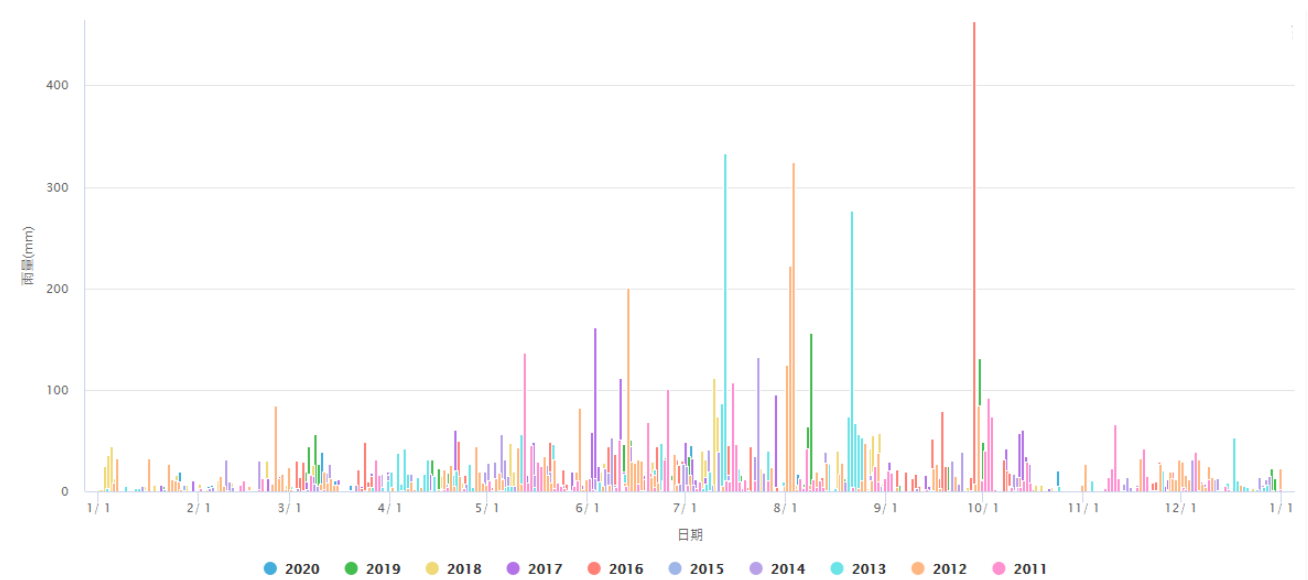


圖 4-8 光華地區崩塌機制示意圖(水保署)

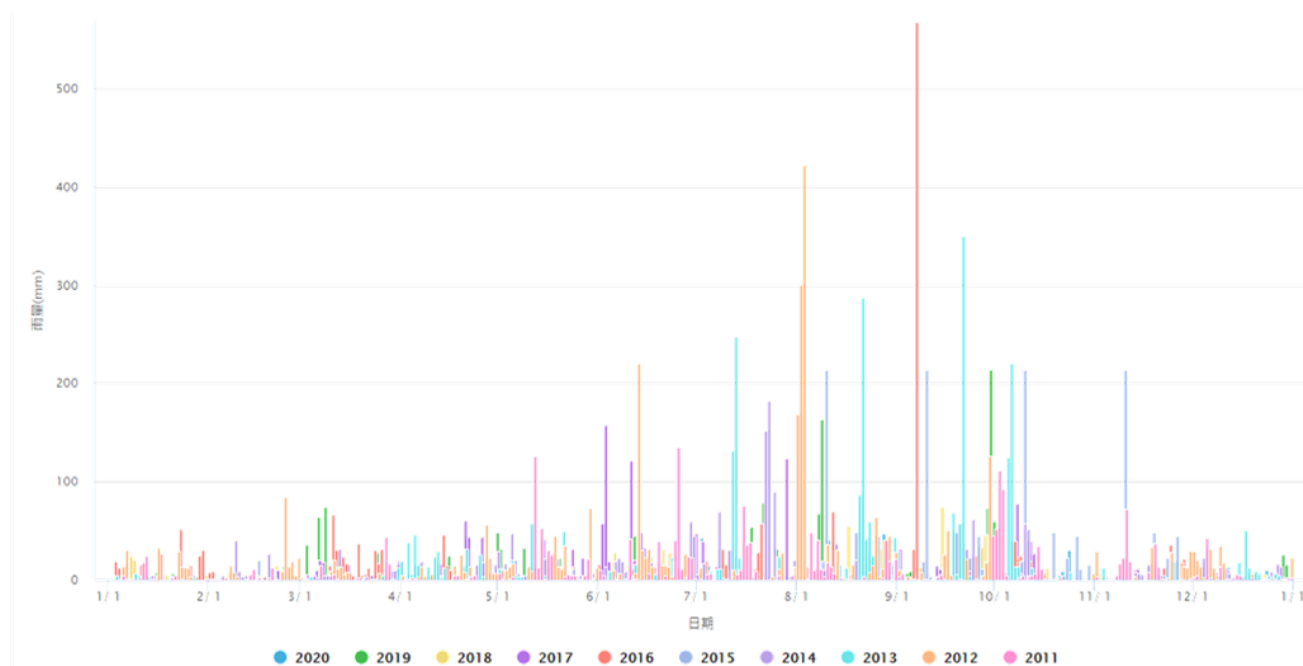
水利署於光華地區西方約 1.5KM、東北方約 2.7KM 分別設有三光雨量站(站

號：21C150)與巴陵雨量站(站號：21C070)，蒐集近 10 年雨量資料如圖 4-9 所示，年平均降雨量約 2,300mm，每年降雨多集中在 5~10 月梅雨季節與夏季颱風影響期間；冬季因受東北季風影響，亦常有降雨情形，屬於全年皆降雨地區。

光華地區於 2005 年 8 月馬莎颱風、2008 年薔蜜颱風、2012 年天秤颱風及 2015 年 7 月蓮花昌鴻颱風影響期間，區域內之邊坡曾發生嚴重土砂災害，造成大規模崩塌，四次颱風當月雨量分別為 1,136mm、1,571mm、920mm 及 2,332mm；而其他較大之降雨紀錄為 2015 年 8 月蘇迪勒及 2016 年 9 月梅姬颱風等，當月累積雨量分別為 861mm 及 867mm。



(a)三光雨量站雨量紀錄



(b)巴陵雨量站雨量紀錄
圖 4-9 研究區域鄰近雨量站紀錄

第二節 秀巒 Rover (GL003)

因本站於前期計畫最後成果顯示位移 5 公分，並有持續移動之趨勢，故經團隊考量將持續監測未將此處儀器拆除，所以此處將擷取 GL003(O)安裝完成後至迄今之資料進行分析(2022/07/27~2023/11/06)。

本團隊監測系統於 2022 年 07 月 27 日進行安裝(圖 4-12)，開始監測時間為 2022 年 07 月 27 日 13:01，其測試監測頻率 5min/次進行解算與資料傳遞，RTCM 頻帶採用 900 MHz；NMEA 頻帶採用 915MHz。

BASE 設定模式資料分析坡頂 GL003 站 data 樣本共 102,906 筆，因 2023 年 2 月 15 日至 4 月 13 日伺服器遷移並維護並無紀錄，扣除無紀錄其中漏失 1,982 筆資料漏失率為 1.85%。



圖 4-10 新竹縣尖石鄉秀巒村 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK 傳輸測站位置



圖 4-11 LoRa-GNSS+GNSS-RTK Base (GW)



圖 4-12 Rover (GL003)

1. LoRa-IoT 部分(如圖 4-13)

- 類比輸入通道：S1 及 S2 沒有接入感測器訊號，測值反應為 Float VDC，不具意義。
- 測站電壓：約在 3.30 ~3.63VDC，屬正常使用及充電範圍。
- 測站溫度：沒有接入感測器訊號不具意義。
- 測站 RSSI：GL003(0) -80~-90 間；GL003-85~95 間，<-100 為訊

號良好之狀態。期間經歷了尼莎、瑪娃、杜蘇芮、卡努、蘇拉、海葵及小犬颱風，颱風期間通訊情況穩定，並無斷訊情況發生。

- 測站累積雨量：雨量計為 112 年 9 月 21 日加裝。

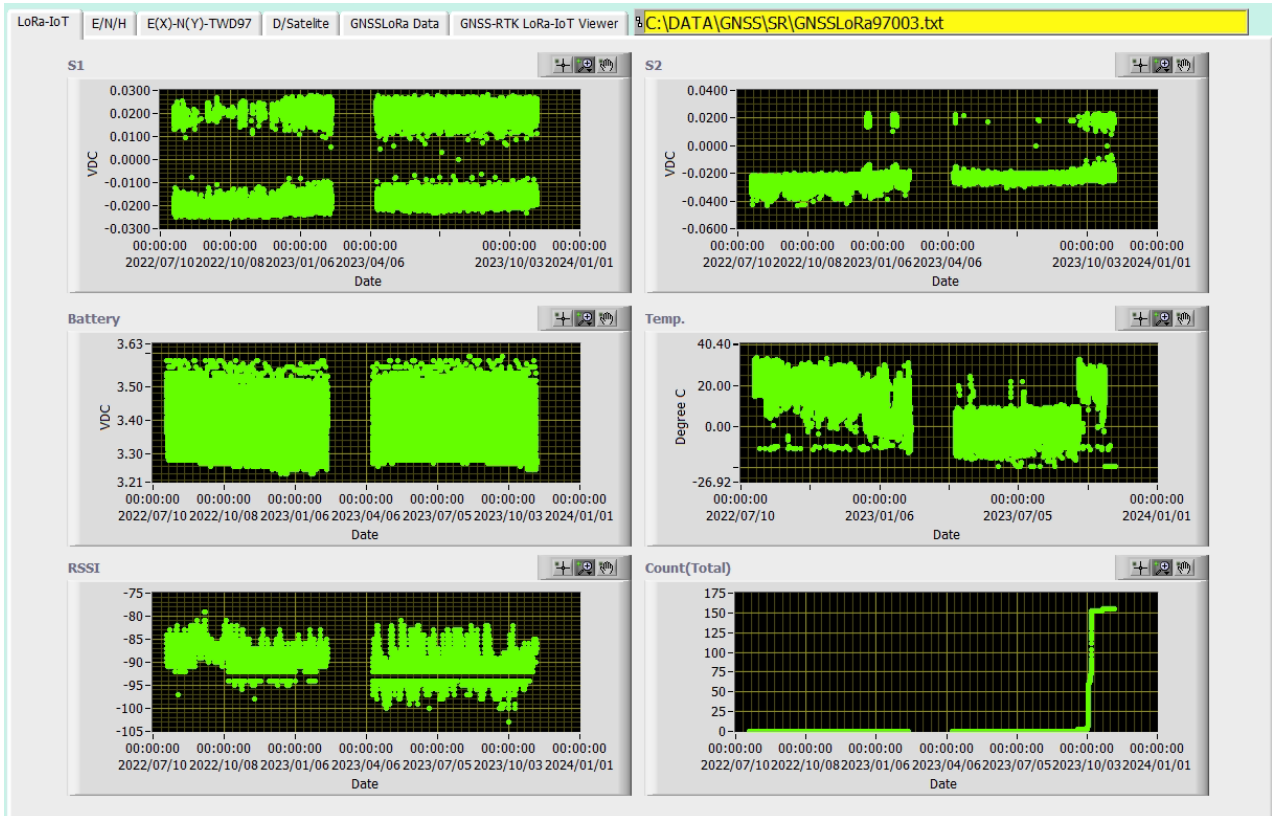


圖 4-13 Rover LoRa-IoT 成果圖

2. GL003(0)GNSS-RTK 部分(如圖 4-14)

- TWD-97 E(X):約在 279431.04~279430.90 間。
- TWD-97 N(Y):約在 2723150.57~2723150.70 間。
- H(Ellipsoidal):約在 1204.35~1204.60m 間。



圖 4-14 Rover GL003 GNSS-RTK 成果圖

GL003(0)測站和基站距離為 766.445~766.759m 間，GL003(0)測站衛星數量約有 22~30，如圖 4-15 所示。

GL00(0)3 測站將 WGS-84 座標轉為 TWD-97 後展現測站定位，以 RMS 當中心點（紅點為原始位置）。資料點明顯大部份開始偏移黃框往左上方位移（如圖 4-16），目前總位移量為 7 公分。

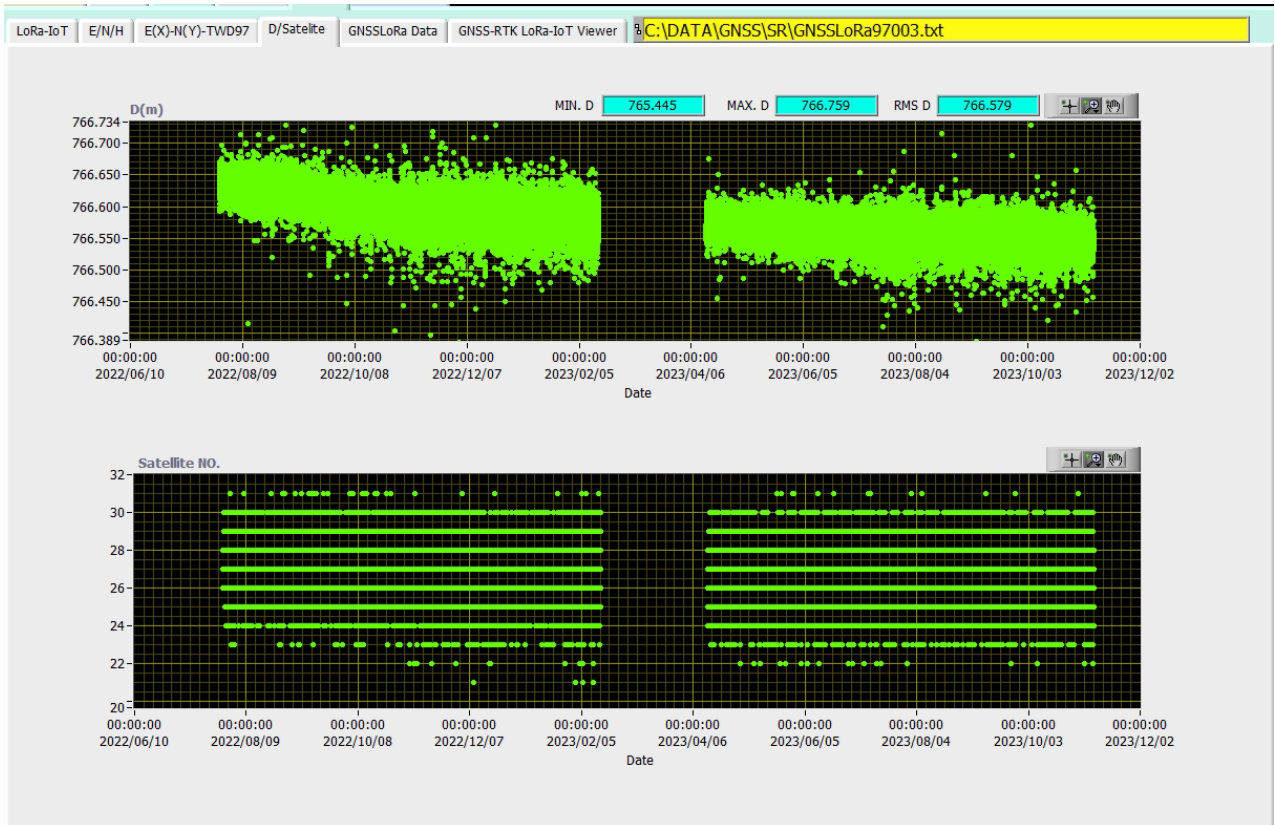


圖 4-15 Rover 測站距離與衛星數量圖

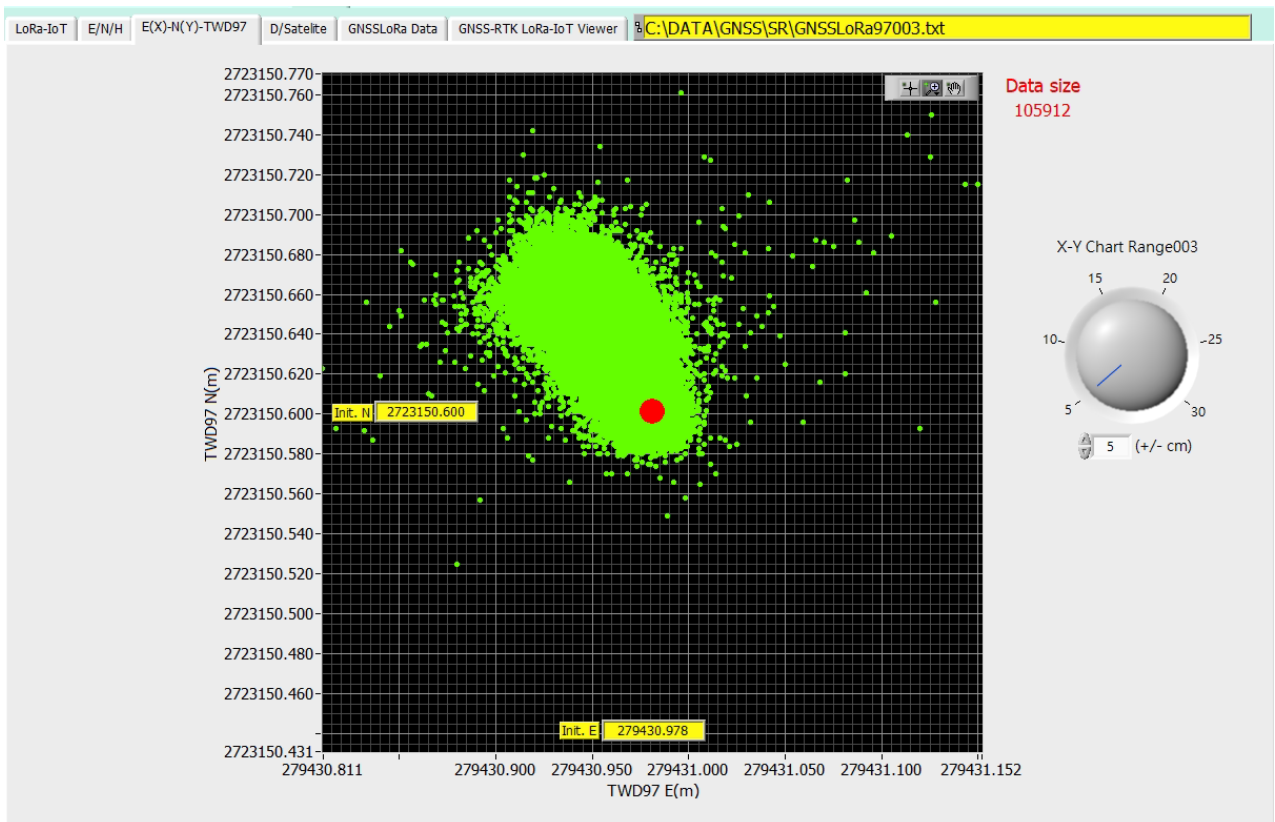


圖 4-16 Rover TWD97 座標圖

第二節 光華崩塌地

本團隊於桃園市復興鄉光華崩塌地實際裝設現地穩定性測試之場域，進行驗證氣候與地形對本系統之影響。並於 2023 年 06 月 21 日至光華崩塌地進行 GNSS-RTK 訊號測試，經測試可行後於 2023 年 07 月 13 日進行安裝將 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK Rover 端設置於桃園市復興區哈嘎灣段，LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK Base 則分別安裝於光華崩塌地西南方位中間(013)和底部(011)，各測站配置圖和安裝成果如圖 4-17 和圖 4-18 所示。開始監測時間為 2022 年 07 月 13 日 11:14，其測試監測頻率 5min/次進行解算與資料傳遞，RTCM 頻帶採用 900 MHz；NMEA 頻帶採用 915MHz。

BASE 設定模式資料分析 011 和 013 測站(2022/07/13~2023/11/06)，011 站 data 樣本共 17,596 筆，扣除無紀錄其中漏失 1,887 筆資料漏失率為 10.72%；013 站 data 樣本共 20,387 筆，扣除無紀錄其中漏失 2,303 筆資料漏失率為 11.05%



圖 4-17 光華儀器配置圖



LoRa-GNSS+GNSS-RTK Base(GW)



Rover(011)



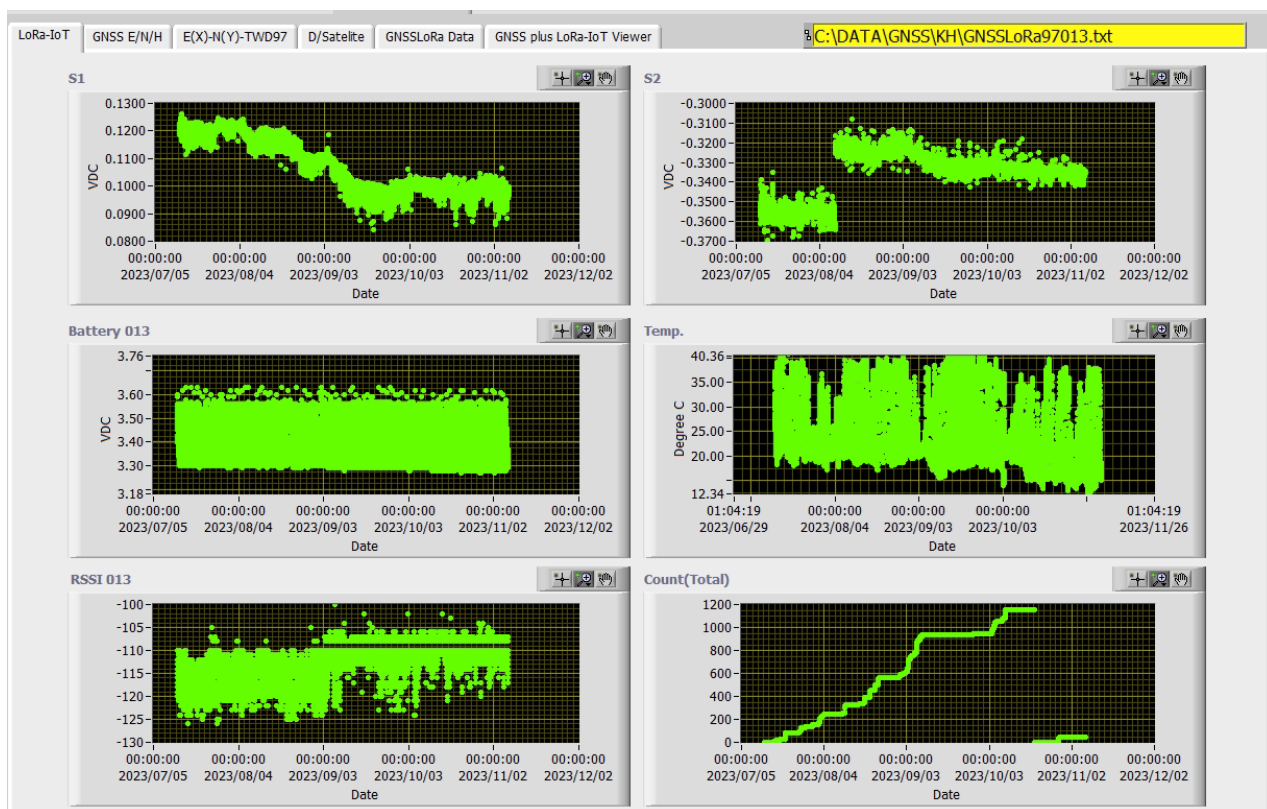
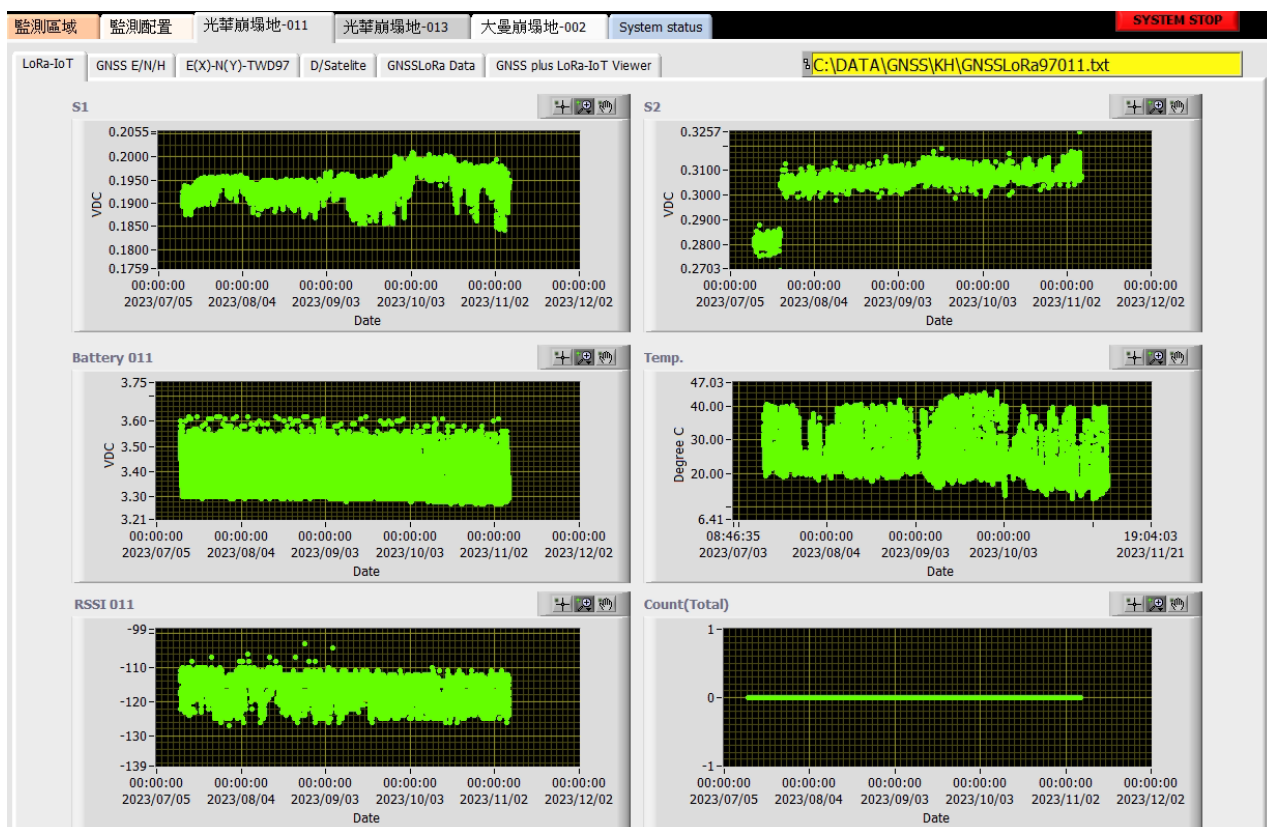
Rover(013)

圖 4-18 各傳輸測站裝設成果圖

3. LoRa-IoT 部分(如圖 4-13)

- 類比輸入通道：S1 及 S2 為雙軸傾斜計電壓。
- 測站電壓：約在 3.30~3.63VDC，屬正常使用及充電範圍。
- 測站溫度：011 站約在 15~40 度之間。
- 測站 RSSI：011 站 -110~-125 間；013 站-105~-125 間，>-100 為訊號較弱之狀態。期間經歷了杜蘇芮、卡努、蘇拉、海葵及小犬颱風，雖然 RSSI 較弱但颱風期間通訊情況仍穩定，並無斷訊情況發生。
- 測站累積雨量：011 站未安裝雨量，013 站雨量於 112 年 10 月 19

日進行雨量筒維護，故雨量累計歸 0。



4. GNSS-RTK 部分(如圖 4-14)

- TWD-97 E(X):011 站約在 289755~289765 間；013 站約在 289728~289738 間。
- TWD-97 N(Y): 011 站約在 2727992.00~2728000.10 間；013 站約 2728010~在 2728017 間。
- H(Ellipsoidal): 011 站約在 1120~11140m 間;013 站約在 1120~1160 間。

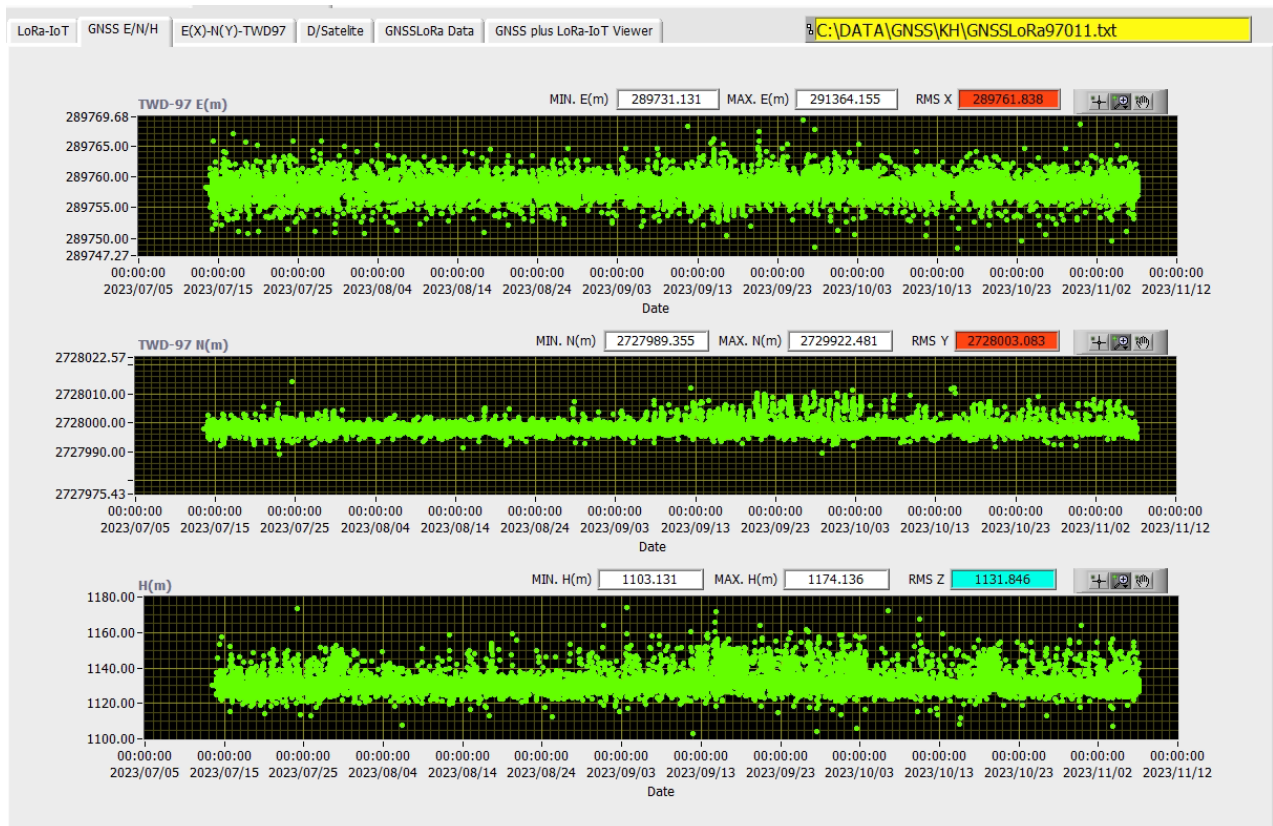


圖 4-14(a) Rover011 站 GL003 GNSS-RTK 成果圖

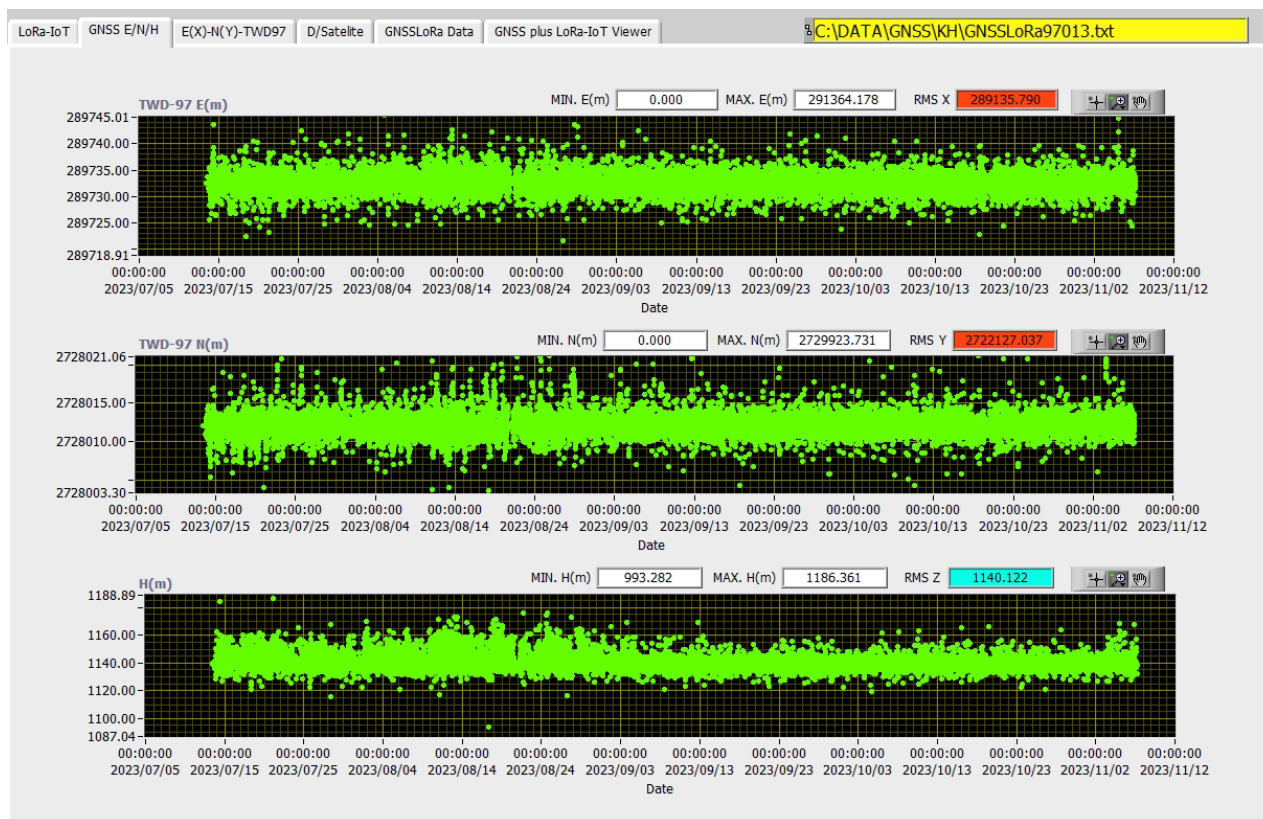


圖 4-14 (b) Rover 013 站 GL003 GNSS-RTK 成果圖

011 測站和基站距離為 704~708m 間，測站衛星數量約有 12~22，如圖 4-15(a)所示；013 測站和基站距離為 710~716m 間，測站衛星數量約有 12~22，如圖 4-15(b)所示。

測站將 WGS-84 座標轉為 TWD-97 後展現測站定位(以 RMS 當中心點)白框範圍: $\pm 1\text{cm}$ ；黃框範圍: $\pm 2\text{cm}$ 。資料點明顯大部份開始偏移於黃框右方位移(如圖 4-16)，目前總位移量為 2 公分。



圖 4-15 (a) Rover011 站測站距離與衛星數量圖

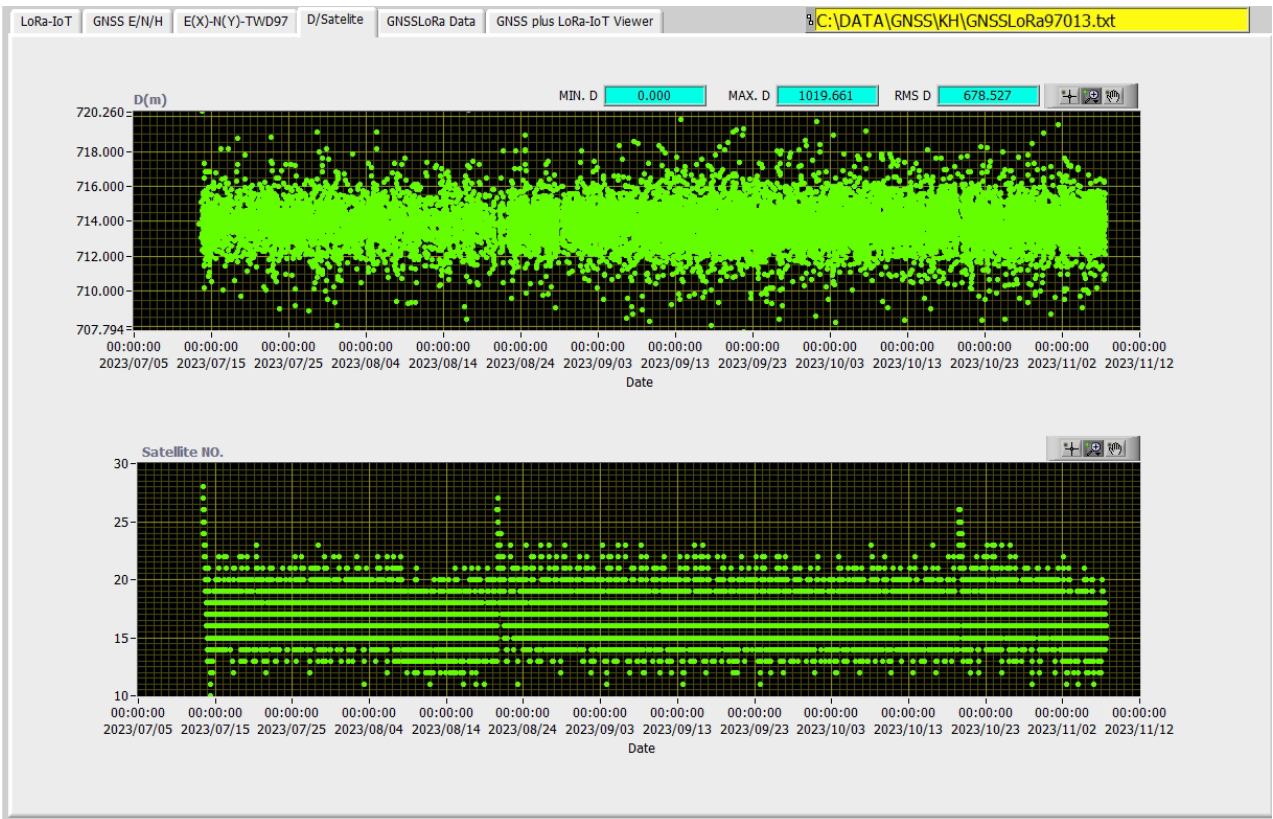


圖 4-15 (b) Rover 013 站測站距離與衛星數量圖

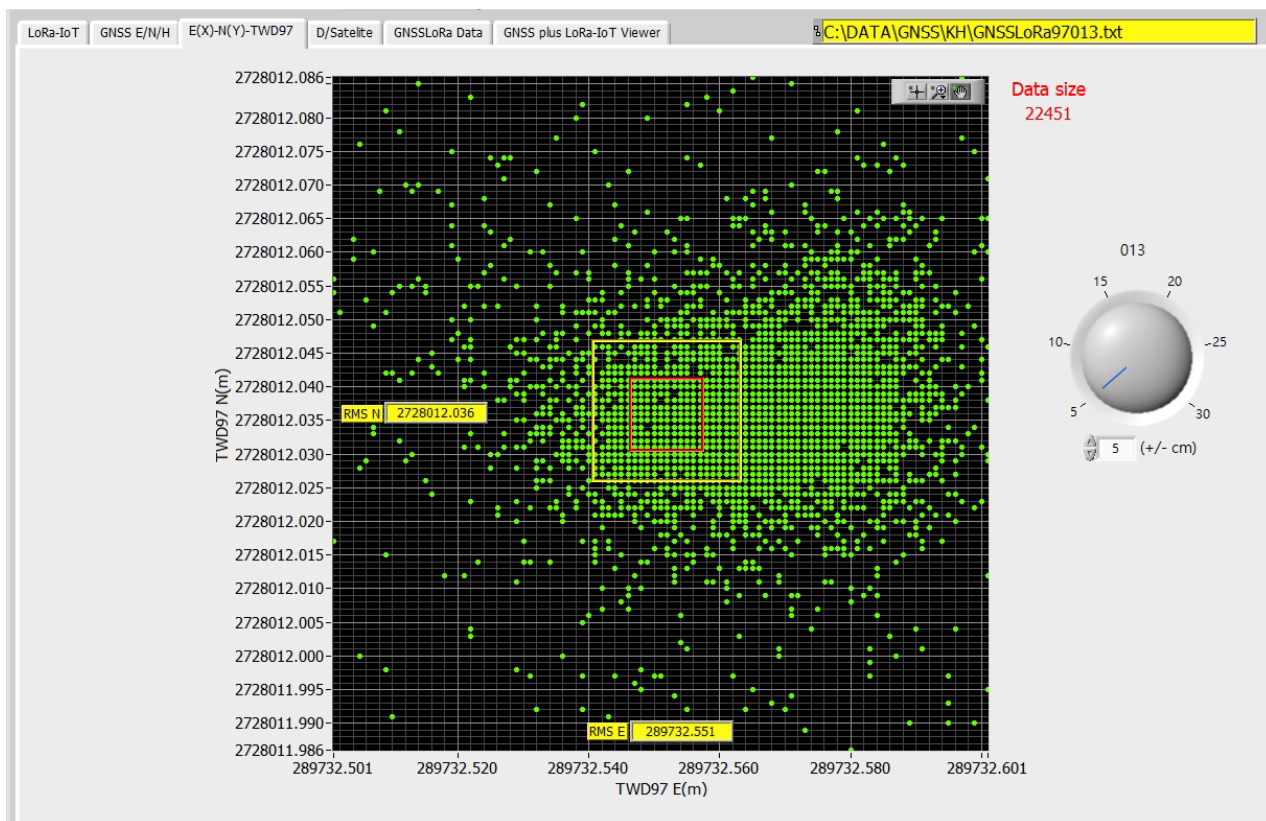


圖 4-16 (a) Rover011 站 TWD97 座標圖

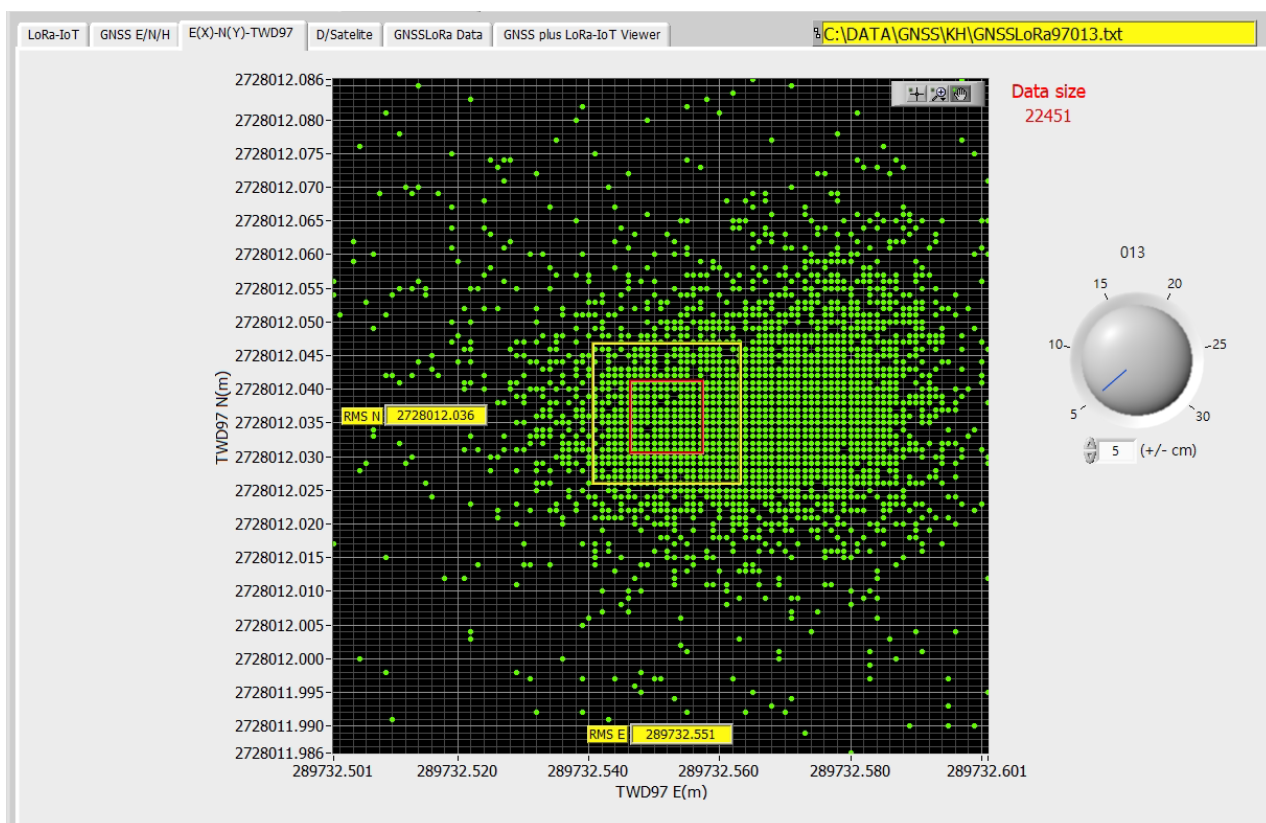


圖 4-16(b) Rover013 站 TWD97 座標圖

5. 傾斜儀

自 112 年 7 月 13 日裝設完成後，即將資料紀錄並回傳，112 年 7 月 13 日至 112 年 11 月 6 日之回傳數據，其傾斜儀監測之 A、B 方向如圖 4-17 所示，由觀測資料所示 Rover011 和 013 兩向持續隨著時間有位移的傾向，可持續觀察，其 A 向與 B 向最大起伏如表 4-1 所示。

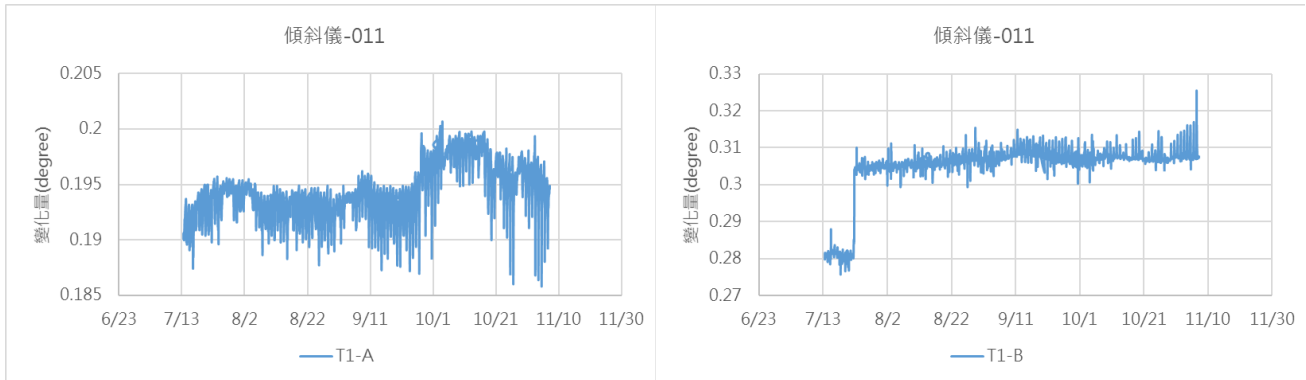


圖 4-17(a) Rover 013 站傾斜計數據

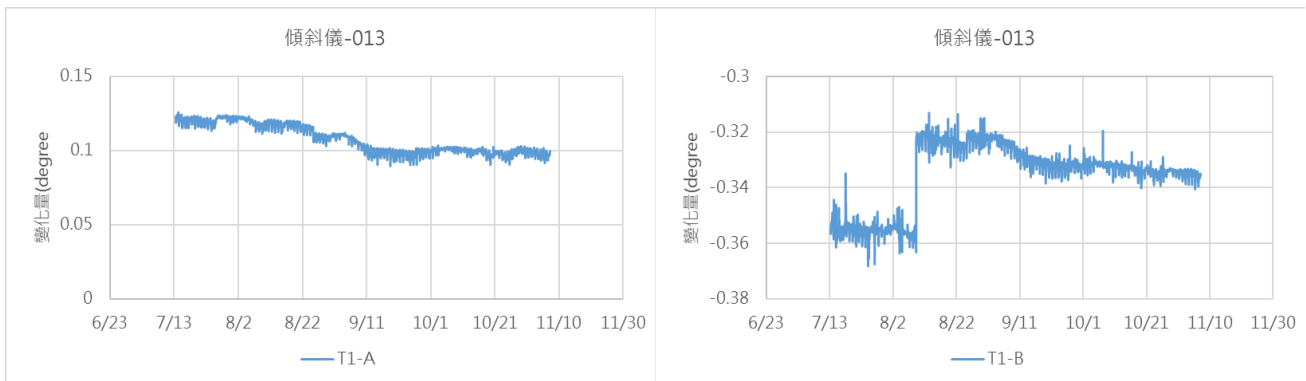


圖 4-17(b) Rover 013 站傾斜計數據

表 4-1 光華傾斜計最大起伏彙整表

測站	A 向	B 向
011 站	0.1949°	0.3077°
013 站	0.0994°	0.3350°

第五章 結論與建議

第一節 結論

- 一、現階段所採用之 LoRa 傳輸模組搭配 RTK-GNSS，在常時天氣狀態下，搭配良好的裝設方法與地點，可以極少的漏失率(最大約 11%)進行監測資料的回傳。
- 二、在 LoRa 傳輸測試中，因座標程式的轉換易出現漏失。
- 三、在無線傳輸測試中，本研究所使用之 LoRa 及 RTK-GNSS 系統，經現地設置於新竹縣尖石鄉秀巒村處與桃園市復興鄉光華崩塌地光華場址進行測試，於颱風期間資料仍穩定傳輸，並無斷訊情況發生，資料並無因為較大之降雨影響品質，其成果證實資料可穩定進行回傳。
- 四、本系統於秀巒崩塌地現場裝設完後逐時紀錄到約 7cm 之地表位移；桃園市復興鄉光華崩塌地持續監測到約 2cm 之地表位移。
- 五、本系統於桃園市復興鄉光華崩塌地持續監測到約 0.2° 之地表傾斜，初步推估監測點位滑動面深度距地表約 5.7m 深，與水保署台北分署執行之監測計畫推估成果大致接近(K18-28W)。

第二節 建議

- 一、目前經實測可正常運行 LoRa 無線傳輸及 RTK-GNSS 系統之監測設備，但相同設備的情況下，其資料傳輸距離差約 50m，於秀巒崩塌地和光華崩塌地其漏失率分別為 1.85%和 11.85%，傳輸間因植被與通視率而影響 RSSI，未來可朝向更換不同天線和頻率，改善其品質。
- 二、由於透過地表變化推估地層深度不易，未來需建置更多監測點位供提高精度。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所(2011)，全球衛星定位與自動化監測系統在坡地防災之應用 (4/4)。
2. 吳俊民(2019)，「即時動態定位系統之整合與驗證測試」，工業技術研究院電腦與通訊工業研究所電腦與通訊 177 期。
3. 陳鶴欽(2009)，「結合低價單頻 GPS 接收儀與虛擬參考站定位精度之研究」，成功大學博士論文，台南。
4. 沈力洋、楊名和陳鶴欽(2009)，「GPS/Galileo 單頻即時動態定位效能分析」，地籍測量：中華民國地籍測量學會會刊 29 卷 2 期 (201006) Pp. 1-13
5. 郭治平(2022)，「利用全球導航系統即時動態定位以長距離低功耗無線傳輸技術進行地表變化監測之研發」，農業部農村發展及水土保持署 2022 創新研究計畫。
6. Ebadi, H. and M. A. Chapman, 1998, GPS-controlled strip triangulation using geometric constraints of man-made structures, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, No. 4, pp. 329-333.
7. Bertiger W, Desai S, Dorsey A, Haines B, Harvey N, Kuang D, Sibthorpe A, Weiss J (2010) Sub-centimeter precision orbit determination with GPS for ocean altimetry. Mar Geod Spec Issue (submitted)
8. Chris Rizos, 2002, Network RTK Research and Implementation: A Geodetic Perspective, Journal of Global Positioning Systems 1(2):144-150.
9. Lichti, D. D., 2002, The interpolation problem in GPS-supported aerial triangulation, Photogrammetric Record, Vol. 17, No. 99, pp.
10. Zhang, X. and R. Forsberg, 2007, Assessment of long-range kinematic GPS

positioning errors by comparison with airborne laser altimetry and satellite altimetry,
J. Geodesy, Vol. 81, pp.201-211.

附錄一 111 年度計畫成果摘要

第一節 地表不動區域進行系統校正

本團隊於 2022/06/02~2022/06/29 期間在明新科技大學校園進行設置一會移動之點位架設 GNSS-RTK+LoRa Rover，以 VBS-RTK 或經緯儀、全測站觀測其變位量，藉此調校本研究開發之系統。Rover 端因其天線受到女兒牆之干擾，故於 2022/06/13 移動位置為確保後續接收資料之品質。其 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK Base 和 Rover 架設照片如圖 1 所示。



LoRa-GNSS+GNSS-RTK Base



LoRa-GNSS+GNSS-RTK Rover (001)



LoRa-GNSS+GNSS-RTK Rover (002)



LoRa-GNSS+GNSS-RTK Rover (003)

圖 1 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK Base 和 Rover 端設備架設

將 Rover 設於不動點(以經緯儀確認)後，在測試期間(2022/06/13~2022/06/29)以測試監測頻率 5min/次進行解算與資料傳遞，BASE 設定模式資料分析 001 站 data 樣本共 4263 筆，其中不等於 RTK

Age=1,RTK Ratio=10 的資料有 1.21%；002 站 data 樣本共 4715 筆，其中不等於 RTK Age=1,RTK Ratio=10 的資料有 4.73%測試期間衛星數量 11~29；003 站 data 樣本共 4715 筆，其中不等於 RTK Age=1，RTK Ratio=10 的資料有 1.40%測試期間衛星數量 11~29；大約精度如下：

- >99% E(X): ± 25 mm,N(Y): ± 15 mm,H(Z): ± 25 mm;D: ± 15 mm
- >80% E(X): ± 10 mm,N(Y): ± 10 mm,H(Z): ± 10 mm;D: ± 10 mm

施測期間 Rover(001)和 Rover(003)分別共移動三次位置，其移動方式如圖 2 和圖 3 所示 1 為原始位置，依序 2.3.4 移動，其移動時間點如下所示：

- 2022/06/16 Rover (003)移至位置 2
- 2022/06/20 Rover (001) 移至位置 2 和 Rover(003) 移至位置 3
- 2022/06/27 Rover (001) 移至位置 3 和 Rover(003) 移至位置 4
- 2022/06/28 Rover (001)移至位置 4

變位施測成果如圖 4 和圖 5 所示，經短期測試要是測試夠久，應該可以符合 ± 2 cm 誤差內；以 003 觀察位置 1>2>3>4 移動後，1 和 4 之座標幾乎沒變，顯示系統再現性相當不錯。

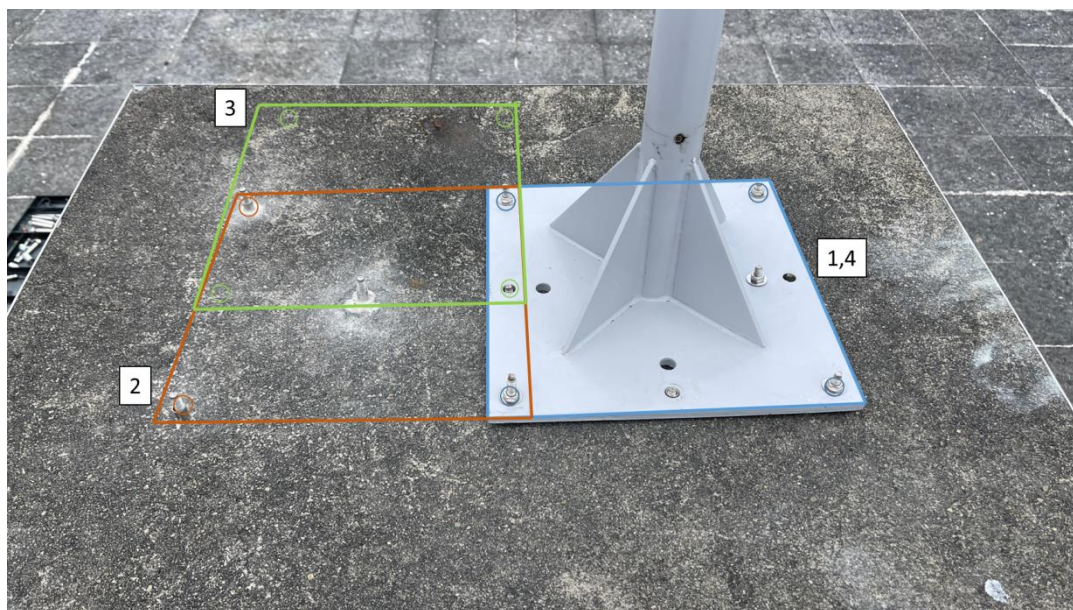


圖 2 Rover(001)移動位置示意圖

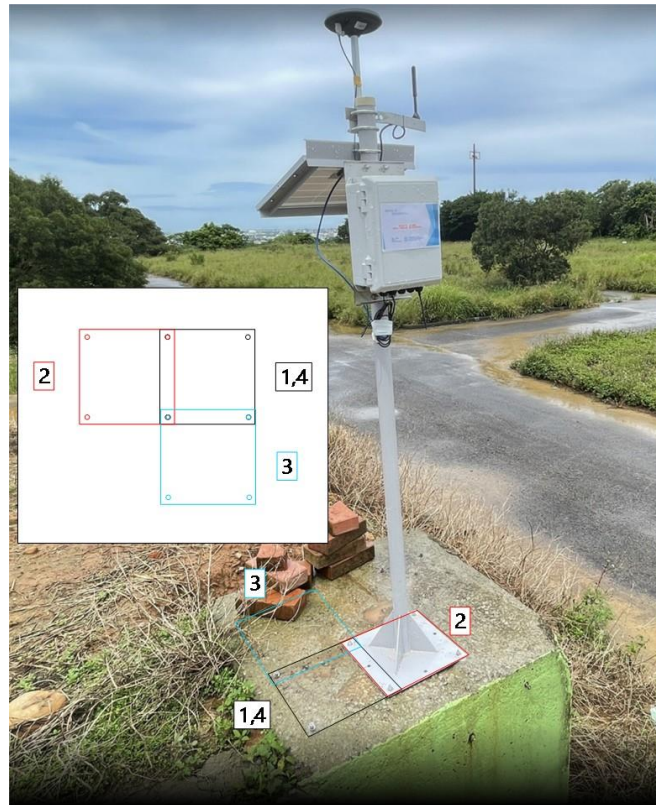


圖 3 Rover(003)移動位置示意圖

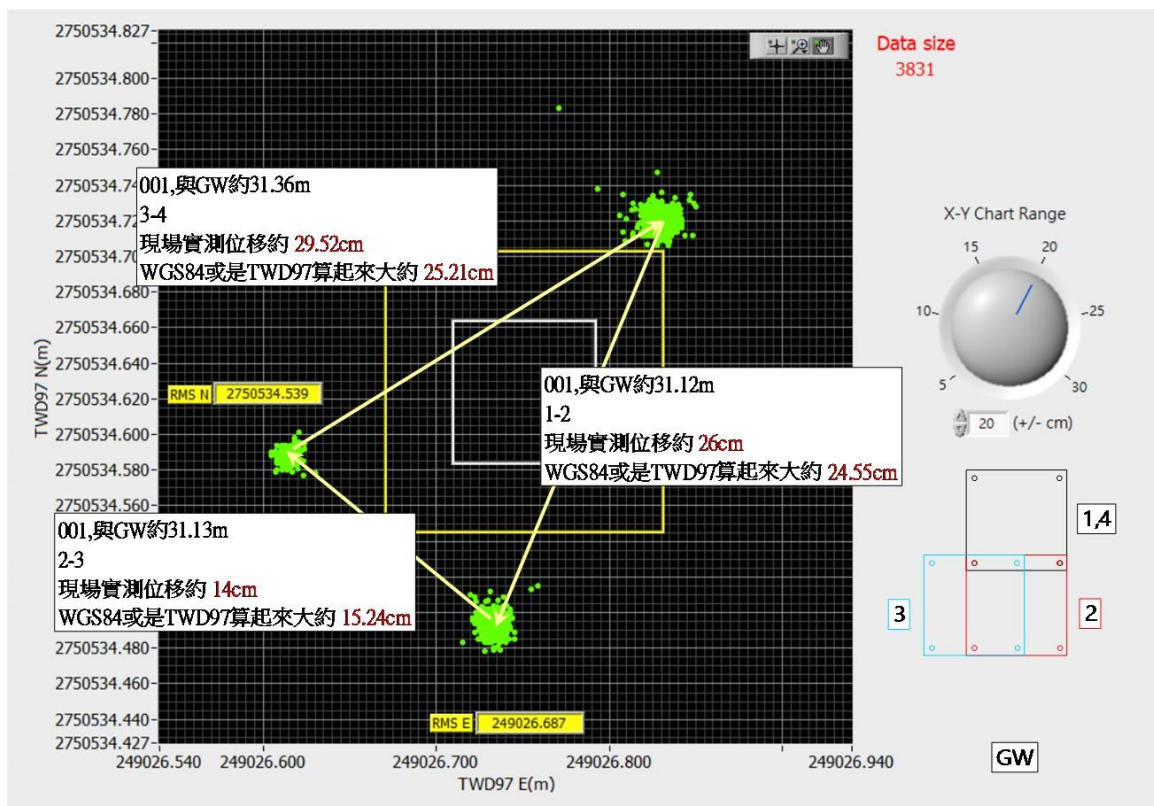


圖 4 Rover(001) 變位試驗成果圖

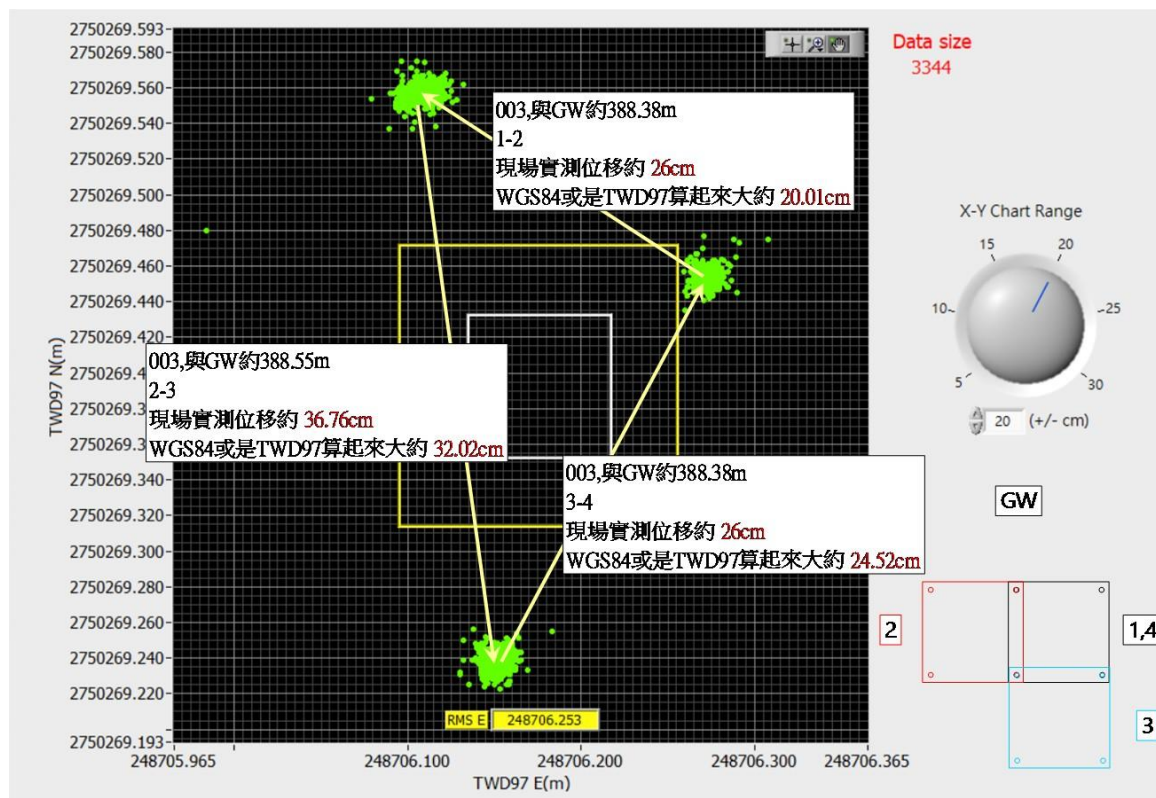


圖 5 Rover(003) 變位試驗成果圖

第二節 實作場域試驗

1. 實作場域介紹與儀器配置

新竹縣尖石鄉秀巒村裝設區域於 2021 年 09 月 13 日 10 時許發生坡面崩塌，崩落土石淤積於白石溪河道與左岸竹 60 線道路，造成交通中斷及溢流溪水漫淹民宅。計畫區域崩塌地正面照片如圖 6 所示、空拍照片如圖 7 所示(水保署台北分署提供)。



圖 6 計畫區域崩塌地照片(團隊於 2021.09.14 拍攝)



圖 7 計畫區域崩塌地空拍照片(水保署台北分署於 2021.09.16 拍攝)

本團隊於新竹縣尖石鄉秀巒村實際裝設現地穩定性測試之場域，進行驗證氣

候與地形對本系統之影響。將 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK Rover 端設置於新竹縣尖石鄉公所秀巒村辦公處頂樓，LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK Base 則分別安裝於秀巒崩塌地頂部(001)、防洪牆(002)以及轉運站(003)，各測站配置圖和安裝成果如圖 8 和圖 9 所示，其測站安裝時定位紀錄如表 1 所示。

此系統於 2022/06/30 進行安裝，開始監測時間為 2022/06/30 16:42，其測試監測頻率 5min/次進行解算與資料傳遞，RTCM 頻帶採用 900 MHz；NMEA 頻帶採用 915MHz。



圖 8 新竹縣尖石鄉秀巒村 LoRa-GNSS 與 GNSS-RTK 傳輸測站位置



LoRa-GNSS+GNSS-RTK Base(GW)



Rover(GL001)



Rover(GL002)



Rover(GL003(O))



Rover(GL003)

圖 9 各傳輸測站裝設成果圖

表 1 各傳輸測站定位紀錄

安裝位置	站號	WGS84(N)	EGS(E)	Ellipsoidal H
安裝後設定座標(基站)				
鄉公所頂樓	GW	24.6189373	121.2855763	882.290
安裝後設定座標(測站)				
坡頂	GL001	24.6148637	121.2905896	1203.735
河堤	GL002	24.6187934	121.2874400	839.720
轉運站	GL003(O)	24.6188915	121.2872566	841.114
坡頂	GL003	24.6148568	121.2906685	1204.510

2. 實作成果：秀巒 Rover(GL001)崩塌事件

本團隊發現監測系統於 2022 年 07 月 07 日 00:22 監測資料中斷，經現場驗證後其 GL001 因地形崩塌而中斷監測，擷取 GL001 安裝完成後至中斷區間之資料進行分析(2022/06/30~2022/07/07)：

1. LoRa-IoT 部分(如圖 10)

- 類比輸入通道：S1 及 S2 沒有接入感測器訊號，測值反應為 Float VDC，不具意義。
- 測站電壓：約在 3.35~3.60VDC，屬正常使用及充電範圍。
- 測站溫度：約在 17~30 度間。
- 測站 RSSI：-86~-91 間，<-100 為訊號良好之狀態。
- 測站雨量：沒有安裝雨量計，Count=0



圖 10 Rover(GL001) LoRa-IoT 成果圖

2. GNSS-RTK 部分(如圖 11)

- WGS-84 E(X):約在 121.29058920~121.29058980 間。
- WGS-84 N(Y):約在 24.61456336~24.61486480 間。
- H(Ellipsoidal):約在 1203.70~1203.80m 間。
- 特別變動時間點為:2022 年 07 月 06 日 20:07。

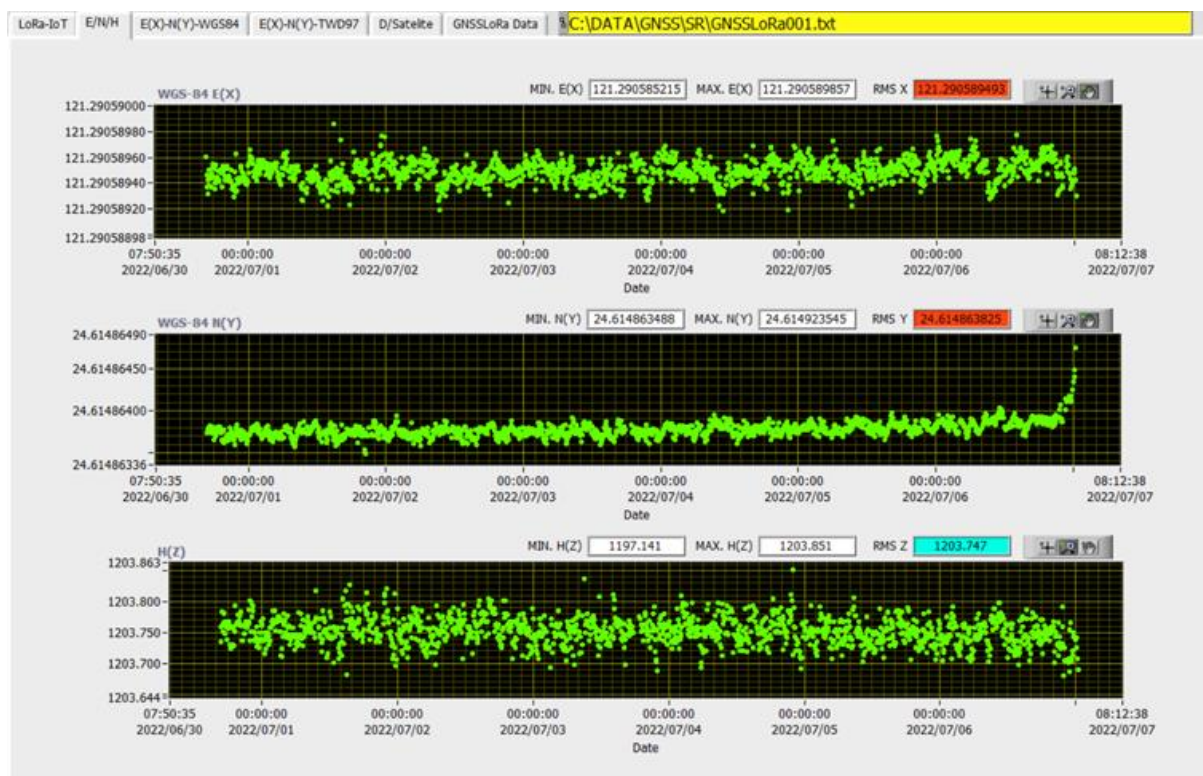


圖 11 Rover(GL001) GNSS-RTK 成果圖

GL001 測站和基站距離為 679.00~679.15m 間，GL001 測站衛星數量約有 23~31，如圖 12 所示。將 WGS-84 座標轉為 TWD-97 後展現測站定位(以 RMS 當中心點時)白框範圍: $\pm 1\text{cm}$ ；黃框範圍: $\pm 2\text{cm}$ (如圖 13)，以結果觀察 WGS-84Y 方向約在 2022 年 07 月 04 日開始變為緩慢增加(如圖 14)，由向量變位圖(圖 15)顯示在 2022 年 07 月 06 日 20:07:03 有一筆相對變動較大之測值後，變位行為即逐漸擴大。由圖 16 所示基站 Rover(GW 鄉公所樓頂)和測站 GL001(坡頂)間之距離變動約在 2022 年 07 月 06 日 20:00:00 以後有相對明顯之變動。其崩塌前後對比照如圖 17 所示。



圖 12 Rover(GL001)測站距離與衛星數量圖

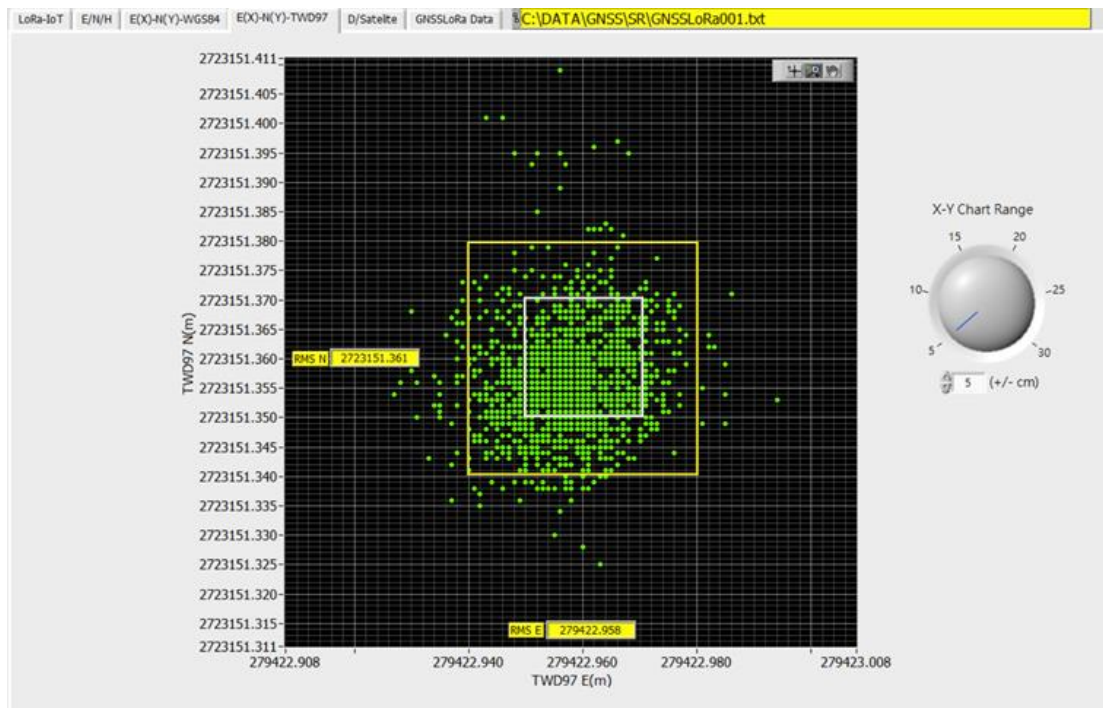


圖 13 Rover(GL001)TWD97 座標圖

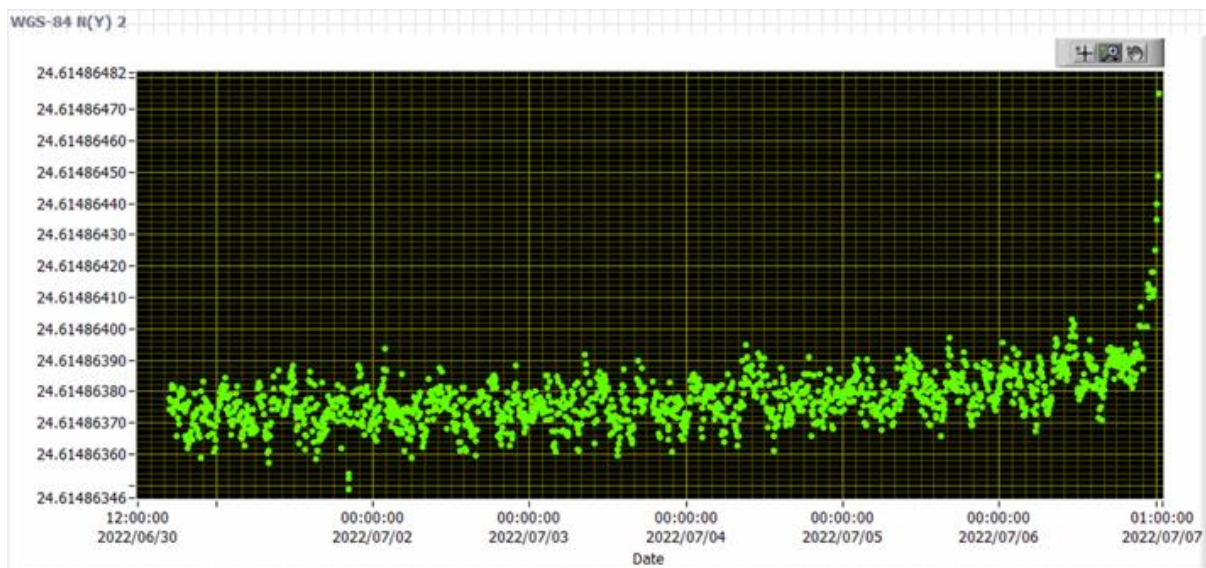
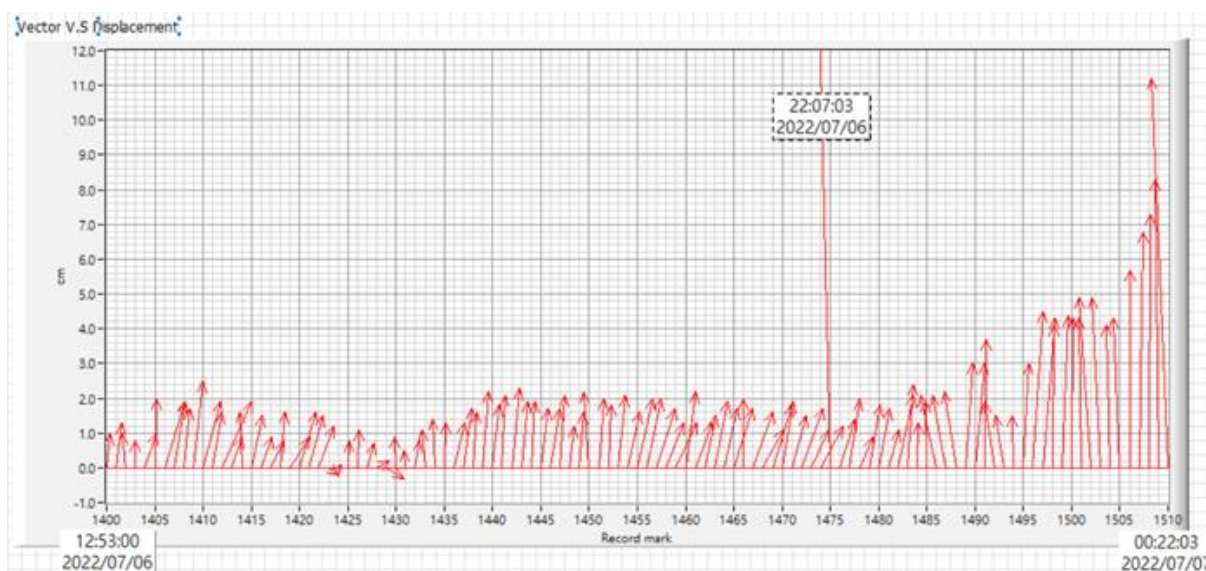


圖 14 Rover(GL001) WGS-84Y 方向圖



LoRa-IoT	E/N/H	E(X)-H(Y)-WGS84	E(X)-H(Y)-TWD97	D/Satellite	GNSSLoRa Data	C:\DATA\GNSS\SR\GNSSLoRa001.bt											
Date	GNSS Timer	GLID	S1(VDC)	S2(VDC)	Counter	Temp.	Battery	X(WGS-84)	Y(WGS-84)	Satellite	H	RTK	Ratio	BS L	BS C	RSSI	LV Timer
2022/07/06	19:42:03	001	0.0199	-0.0242	00000	19.91	3.38	24.614863875	121.290589615	27	1203.755	R	10.000	760.473	131.63	-089	3739952523
2022/07/06	19:47:03	001	0.0205	-0.0239	00000	19.91	3.38	24.614863887	121.290589685	28	1203.758	R	10.000	760.478	131.63	-090	3739952823
2022/07/06	19:57:03	001	0.0179	-0.0240	00000	19.91	3.38	24.614863830	121.290589645	27	1203.768	R	10.000	760.484	131.63	-089	3739953423
2022/07/06	20:02:03	001	0.0208	-0.0246	00000	19.91	3.38	24.614863843	121.290589693	27	1203.759	R	10.000	760.482	131.63	-088	3739953723
2022/07/06	20:07:03	001	0.0201	-0.0232	00000	19.91	3.38	24.614923545	121.290585215	26	1197.141	R	10.000	753.299	131.24	-089	3739954023
2022/07/06	20:12:03	001	0.0182	-0.0255	00000	19.82	3.38	24.614863862	121.290589627	27	1203.701	R	10.000	760.450	131.63	-089	3739954323
2022/07/06	20:17:03	001	0.0187	-0.0239	00000	19.82	3.38	24.614863915	121.290589568	29	1203.719	R	10.000	760.451	131.63	-089	3739954623
2022/07/06	20:22:03	001	-0.0197	-0.0246	00000	19.54	3.37	24.614863812	121.290589610	29	1203.743	R	10.000	760.471	131.63	-088	3739954923
2022/07/06	20:27:03	001	0.0204	-0.0233	00000	19.63	3.37	24.614863895	121.290589577	28	1203.752	R	10.000	760.467	131.63	-089	3739955223
2022/07/06	20:37:03	001	0.0158	-0.0235	00000	19.73	3.37	24.614863893	121.290589578	27	1203.745	R	10.000	760.465	131.63	-088	3739955823
2022/07/06	20:42:03	001	0.0193	-0.0234	00000	19.45	3.37	24.614863835	121.290589578	26	1203.728	R	10.000	760.461	131.63	-089	3739956123
2022/07/06	20:47:03	001	0.0191	-0.0232	00000	19.45	3.37	24.614863927	121.290589628	28	1203.732	R	10.000	760.460	131.63	-089	3739956423

圖 15 Rover(GL001)向量變位圖

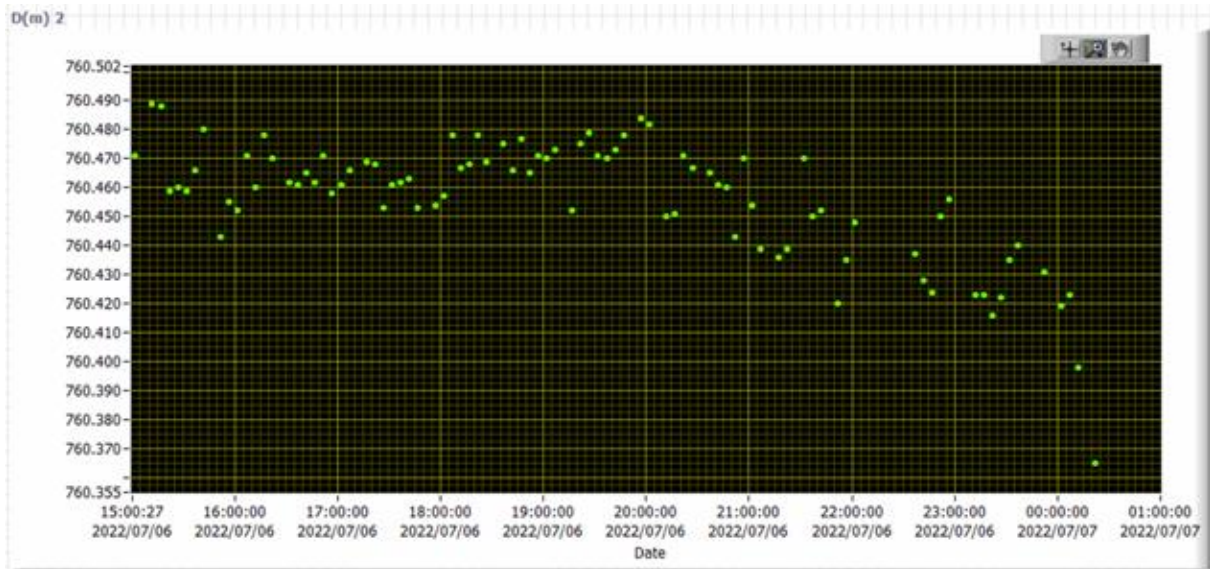


圖 16 Rover(GL001)與 Base(GW)距離變化圖



崩塌前(攝於 2022/06/30)



崩塌後(攝於 2022/07/07)

圖 17 Rover(GL001)崩塌前後對照圖

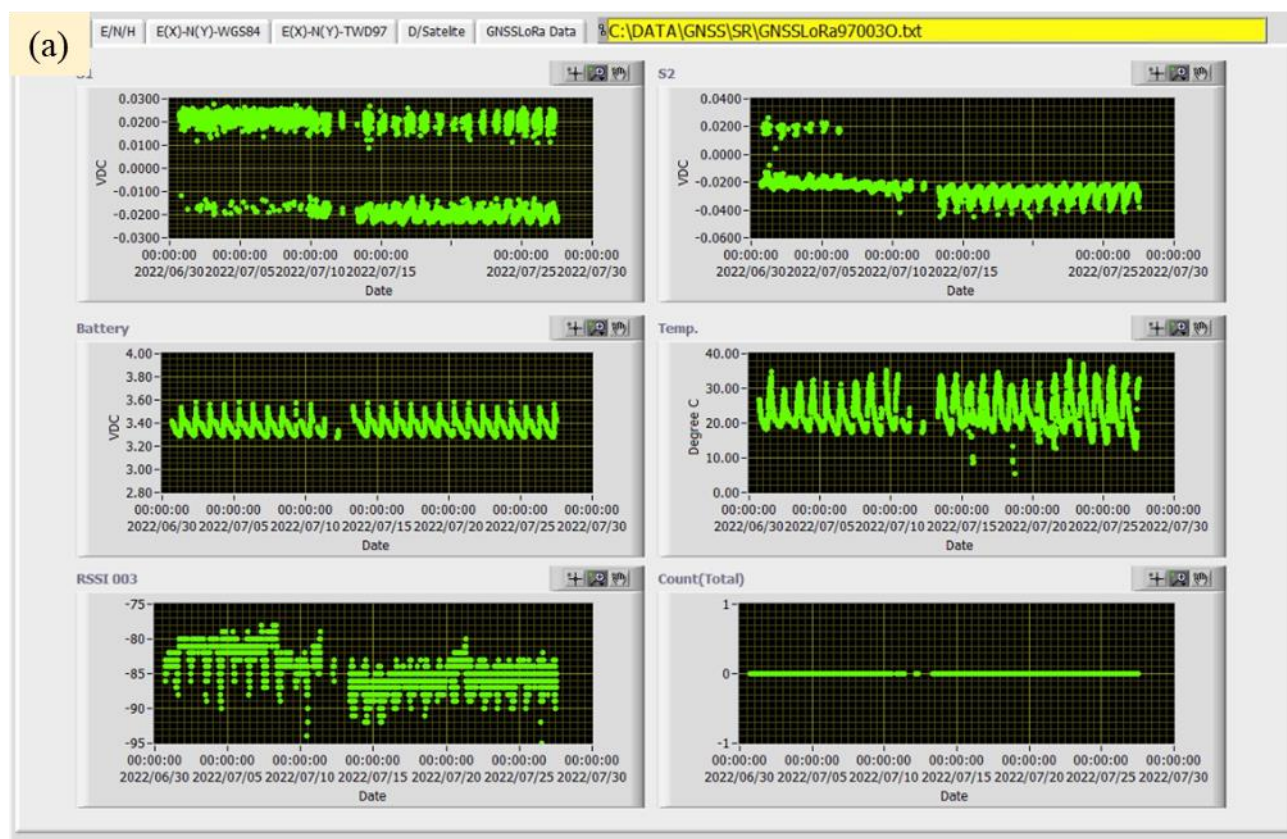
3. 實作成果：秀巒 Rover(GL001)崩塌事件後續監測

本團隊監測系統於 2022 年 06 月 30 日進行安裝，開始監測時間為 2022 年 06 月 30 日 16:42，其測試監測頻率 5min/次進行解算與資料傳遞，RTCM 頻帶採用 900 MHz；NMEA 頻帶採用 915MHz。擷取 GL003 安裝完成後至迄今之資料進行分析(2022/06/30~2022/11/11)，其中因 GL001 崩塌故將 GL003 於 2022 年 07 月 27 日移至坡頂，並將原轉運站點名改為 GL003(O)。

BASE 設定模式資料分析 GL003(O)站(原轉運站)data 樣本共 6,810 筆，其中漏失 677 筆資料漏失率為 9.94%，其中不等於 RTK Age=1，RTK Ratio=10 的資料有 672 筆佔 9.87%；坡頂 GL003 站 data 樣本共 28,362 筆，其中漏失 960 筆資料漏失率為 12.36%，其中不等於 RTK Age=1，RTK Ratio=10 的資料有 1,033 筆佔 3.64%

1. LoRa-IoT 部分(如圖 18)

- 類比輸入通道：S1 及 S2 沒有接入感測器訊號，測值反應為 Float VDC，不具意義。
- 測站電壓：約在 3.25~3.60VDC，屬正常使用及充電範圍。
- 測站溫度：GL003(0)約在 19~30 度間；GL003 約在 10~31 度間。
- 測站 RSSI：GL003(0) -80~-90 間；GL003 -85~-95 間，< -100 為訊號良好之狀態。
- 測站雨量：沒有安裝雨量計，Count=0



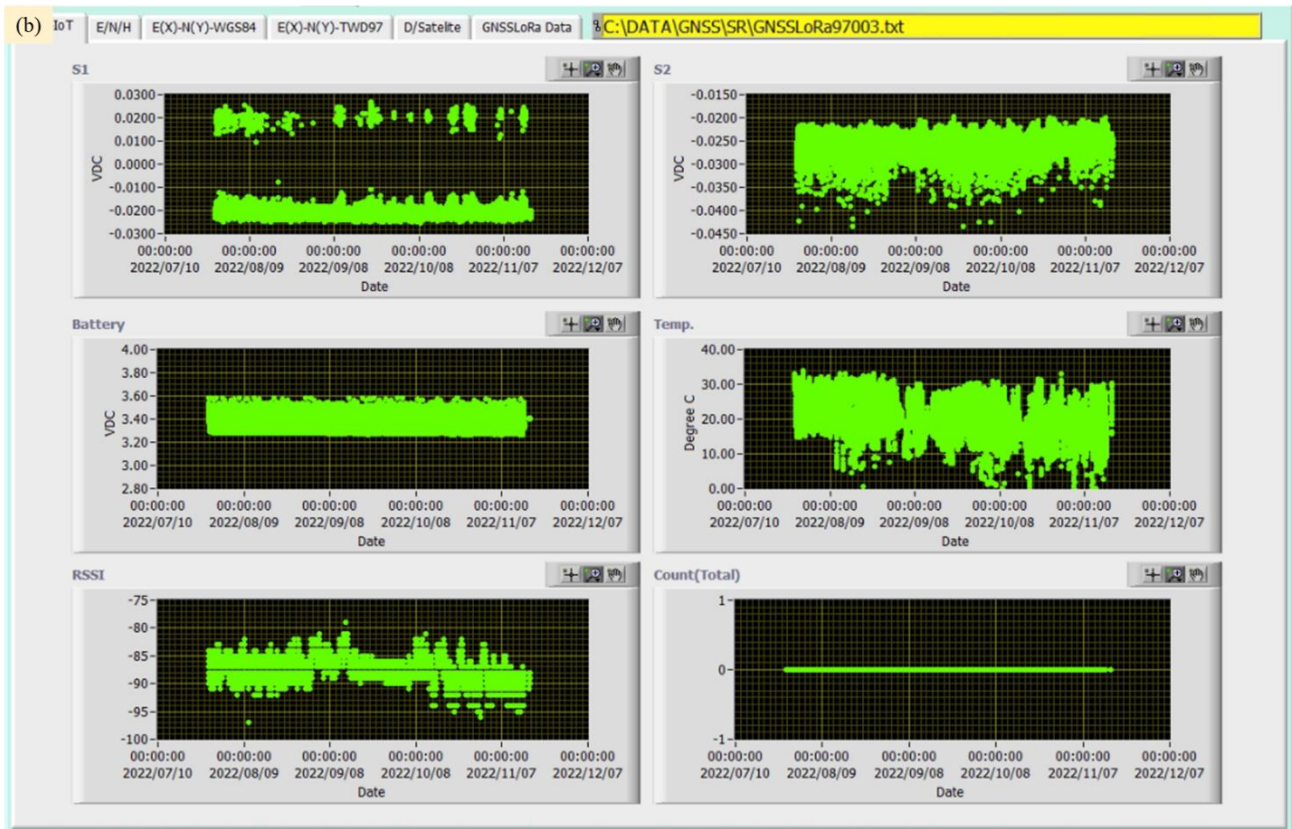


圖 18 Rover LoRa-IoT 成果圖(a)GL003(O) (b)GL003

2. GL003(O)GNSS-RTK 部分(如圖 19)

- TWD-97 E(X):約在 279084.55~279084.57 間。
- TWD-97 N(Y):約在 2723596.73~2723596.76 間。
- H(Ellipsoidal):約在 841.05~841.15m 間。



圖 19 Rover GL003(O) GNSS-RTK 成果圖

3. GL003GNSS-RTK 部分(如-20)

- TWD-97 E(X):約在 279430.90~279431.05 間。
- TWD-97 N(Y):約在 2723150.57~2723150.67 間。
- H(Ellipsoidal):約在 1204.20~1204.60m 間。

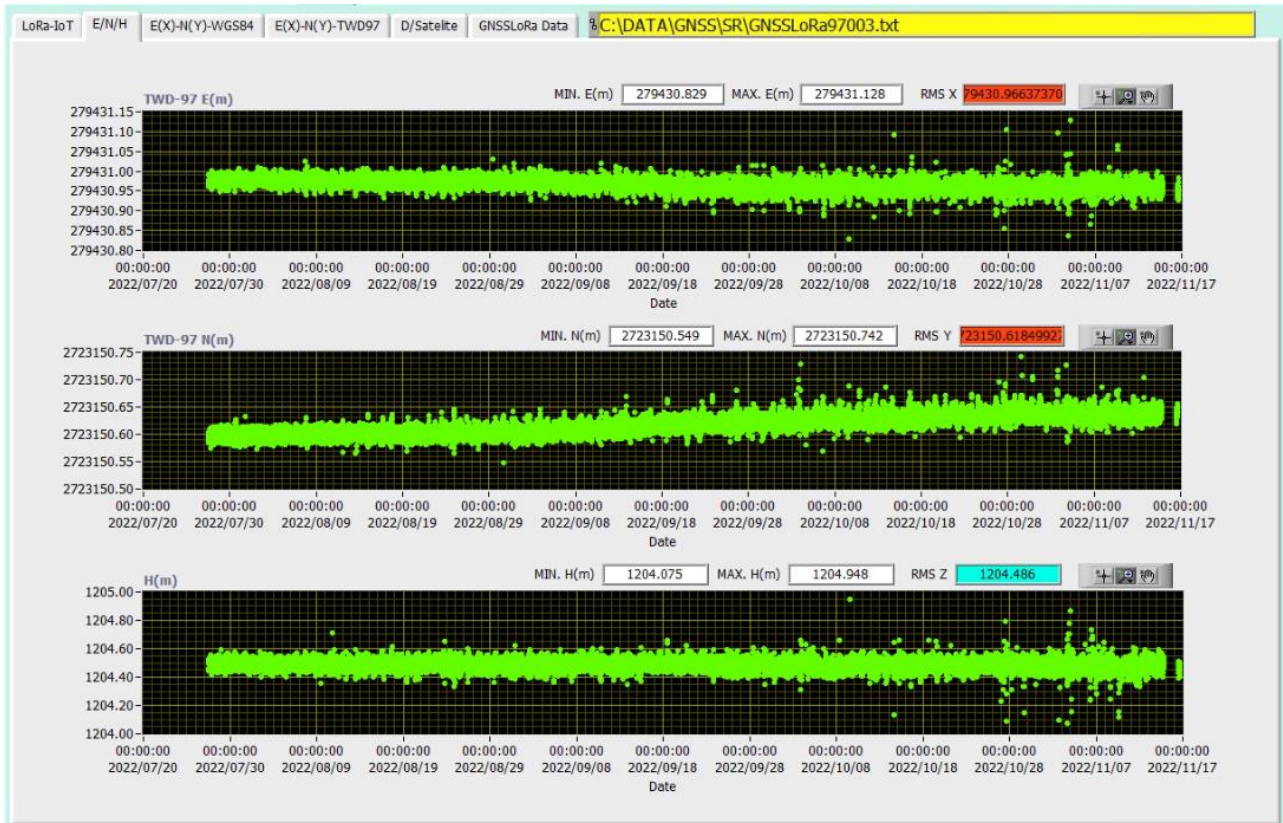


圖 20 Rover GL003 GNSS-RTK 成果圖

GL003(O)測站和基站距離為 170.20~170.25m 間，GL003(O)測站衛星數量約有 22~30，如圖 21(a)所示；GL003 測站和基站距離為 685.60~685.65m 間，GL003(O)測站衛星數量約有 23~31，如圖 21(b)所示。

GL003(O)和 GL003 測站將 WGS-84 座標轉為 TWD-97 後展現測站定位(以 RMS 當中心點時)白框範圍: $\pm 1\text{cm}$ ；黃框範圍: $\pm 2\text{cm}$ (如圖 22 (a))，以結果觀察顯示 GL003(O)資料點大部份位於黃框範圍之內，較無明顯之變動；GL003 測站，資料點明顯大部份並不位於黃框範圍之內，結果觀察 TWD-97X 方向緩慢移動，目前位移約 2.5 公分；TWD-97Y 方向約為緩慢移動，目前位移約 5 公分，如圖 23 所示。

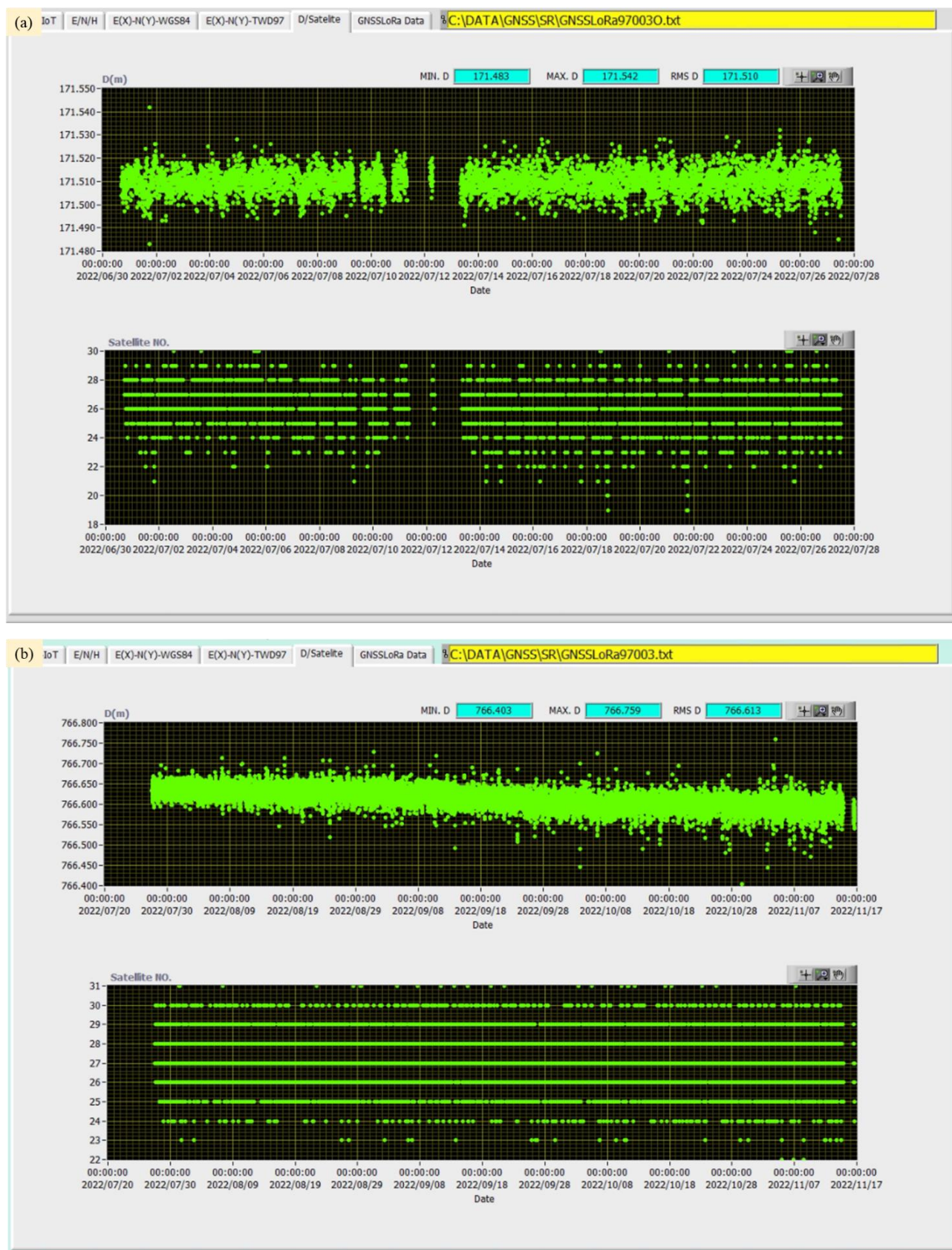


圖 21 Rover 測站距離與衛星數量圖(a)GL003(O) (b)GL003

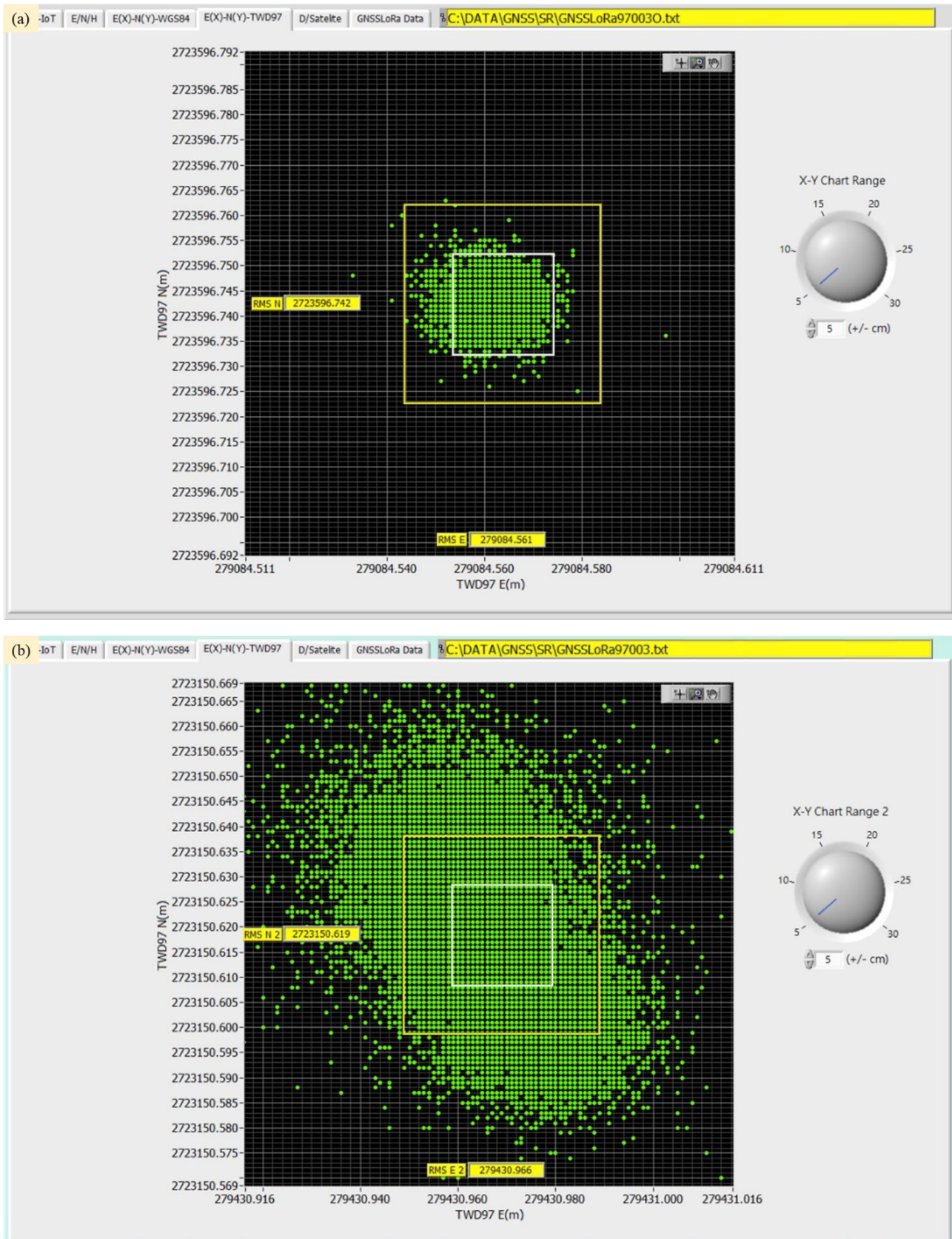


圖 22 Rover (GL003)TWD97 座標圖(a)GL003(O) (b)GL003

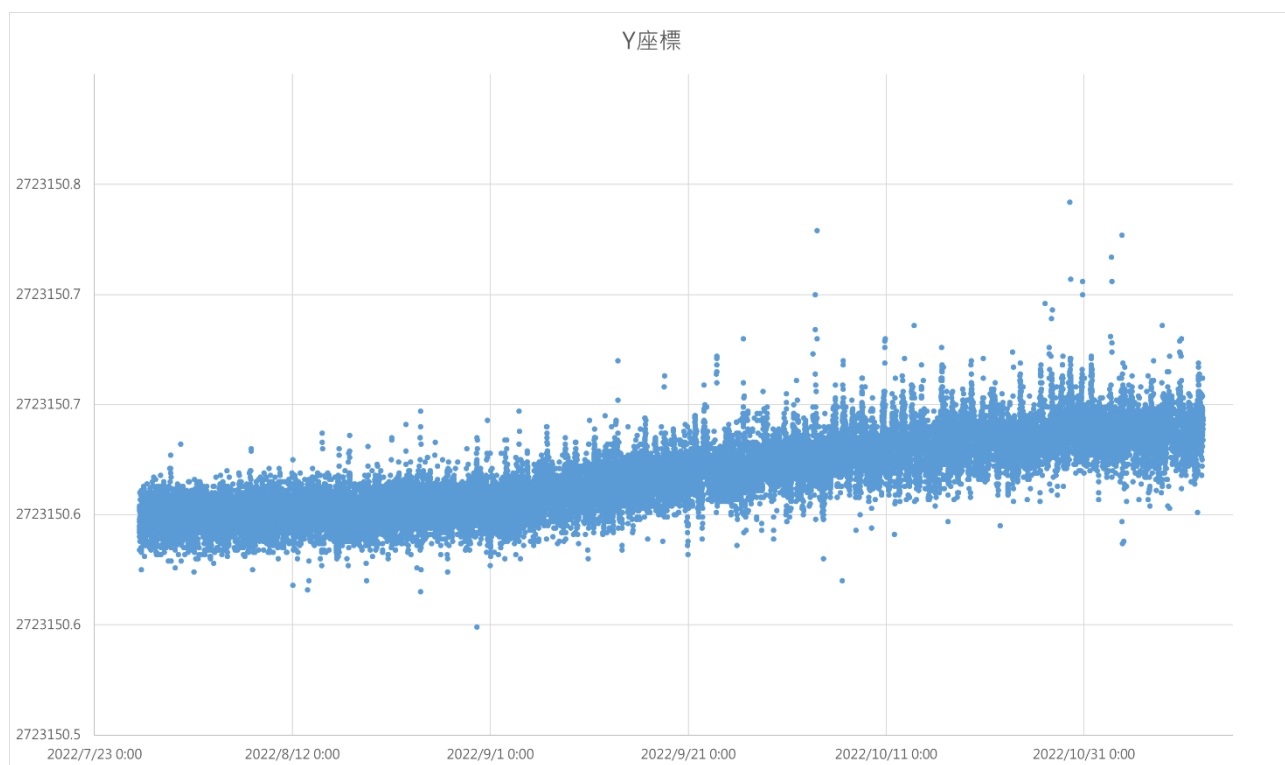
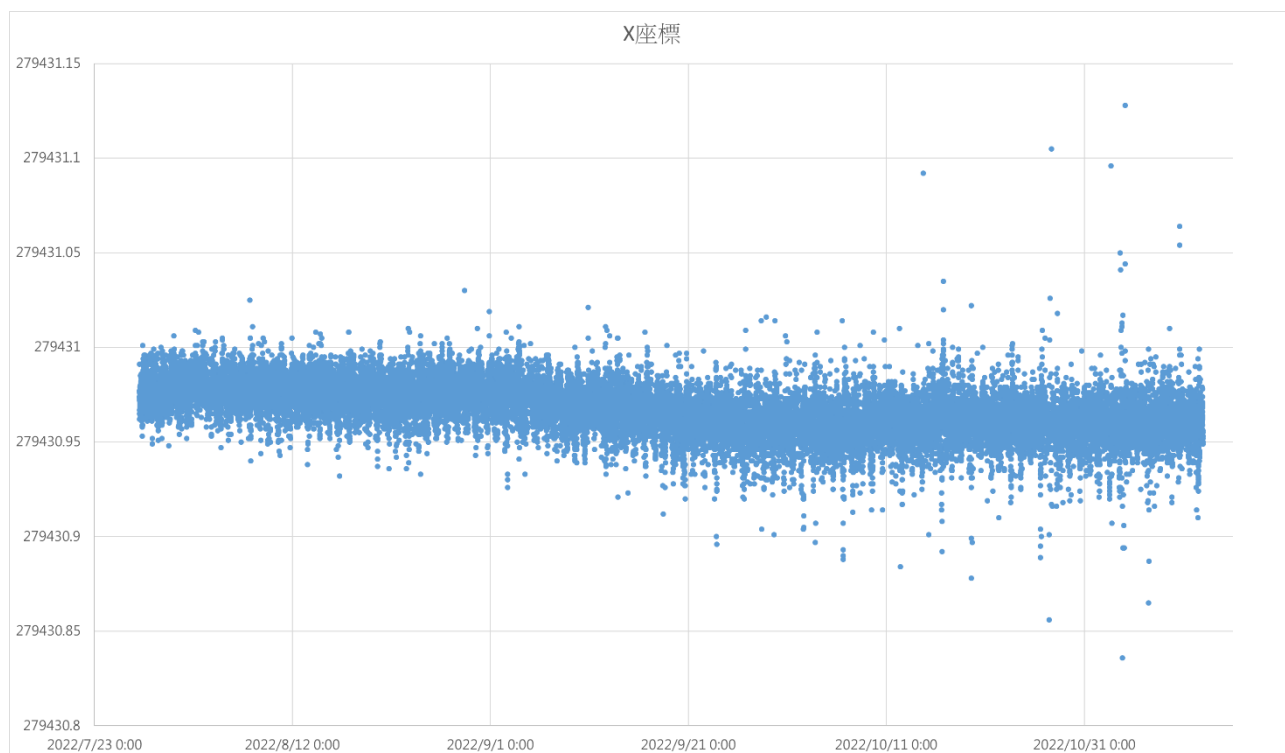


圖 23 Rover(GL003)TWD97 方向圖

4. 實作成果：妮莎颱風

本研究監測系統，監測期間歷經 111 年 10 月 15 至 17 日泥沙颱風，這區間雨量如表 2 所示，RSSI 變化如圖 24 所示，其結果顯示 RSSI 範圍遲於-80~-90 之間，屬於良好傳輸品質。

表 2 鳥嘴山雨量

日期	日降水量(mm)
111.10.15	54
111.10.16	179.5
111.10.17	27.5

註：資料來源中央氣象局觀測氣象查系統

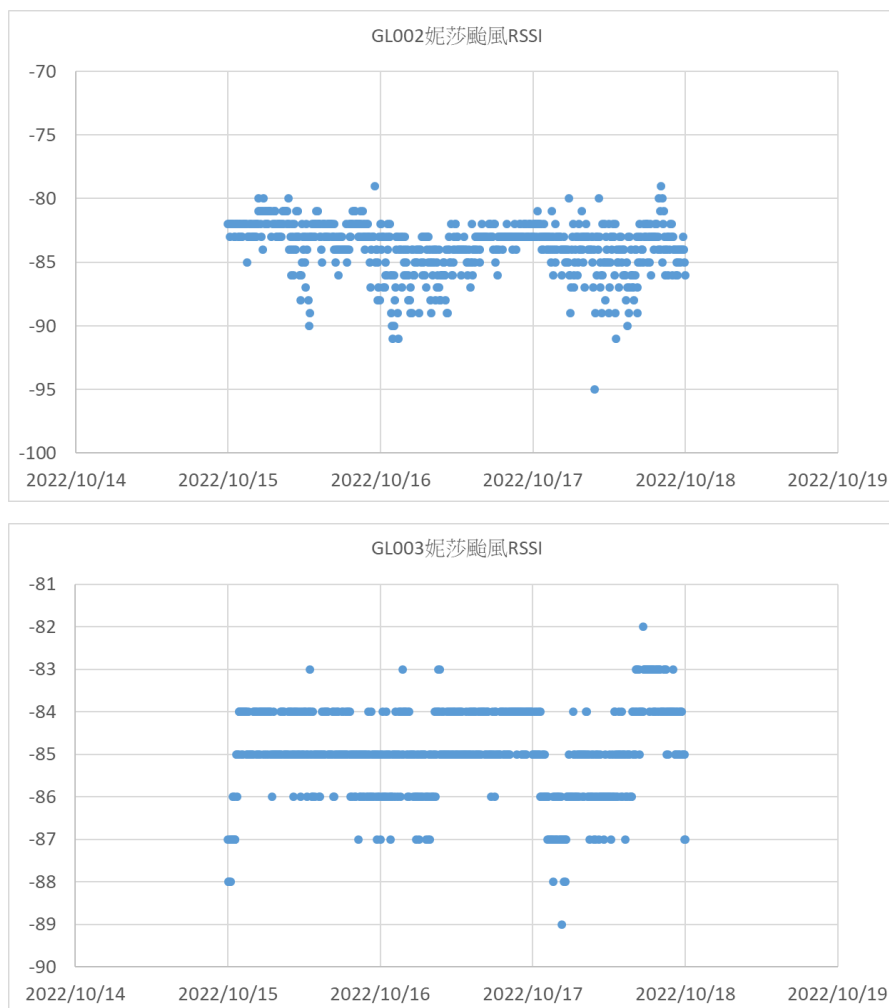


圖 24 RSSI 雨量影響

5. 111 年度成果初步結論

- 一、現階段所採用之 LoRa 傳輸模組搭配 RTK-GNSS，在常時天氣狀態下，搭配良好的裝設方法與地點，可以極少的漏失率進行監測資料的回傳。
- 二、在 LoRa 傳輸測試中，因座標程式的轉換易出現漏失。
- 三、在無線傳輸測試中，本研究所使用之 LoRa 及 RTK-GNSS 系統，經現地設置於新竹縣尖石鄉秀巒村處場址進行測試，其成果證實資料可穩定進行回傳。
- 四、本系統在明新科大校園實測可得到之監測精度為 1cm，至秀巒崩塌地現場實測發現已測得一次崩塌發生之逐時紀錄與後續持續監測到約 2.5cm 之地表位移。

附錄二 期初審查意見與回覆

審查意見	意見回復
1. 對於研究所欲採用之 EPSON 公司出產之 MA-352 晶片及本研究開發而成的監測盒子的定位誤差，建議是否能在室內外利用已知的運動位移方式，用傳統測量方法量測比對，說明其精度與誤差範圍。	感謝委員意見，由於受到預算調整與經費限制，已無法如預期使用 EPSON 公司出產之 MA-352 晶片。
2. 請補充說明歷年創新研究計畫執行成果之關聯性與創新性。	感謝委員意見。 107 年計畫成果： ● LoRa 耗電量極低，僅約 0.005W。 ● 一般通訊頻率約 10 分鐘一次，電力約可持續 816 天。 ● 資料漏失率絕大多數於 5% 以內，部分可達 20% 者，研判為受環境干擾所致。 ● 本實驗採用之 LoRa 在空曠處至少可達 2.5KM 之通訊效果。 108 年計畫成果： ● 同樣環境(地形地貌)條件，傳輸方向成果有差異(例如：上對下發比下對上發佳)，由高處向低處之接收站發送時，傳輸距離增加至 600m 之水平距離

審查意見	意見回復
	對資料漏失率影響較低 ● 原以 LoraWAN 之傳遞方式漏失率 20%處之測試點，改以 LoRa P2P 之橋接傳遞方式可進行訊號橋接後最降低至 0% ● 人工構造物如房屋、道路、擋土牆對訊號遮蔽影響較高；樹林遮蔽影響則較低。因此於現地裝設天線時，盡可能垂直地面並放置於高處。 109 年計畫成果： ● 經本計畫室內試驗證明，LoRa 模組在植被之茂密程度越高處，其訊號強度 RSSI 越弱，未來如有需裝設於有植被影響處，且有一定距離下，需盡可能將天線高過植被，以減少植被對訊號的遮蔽所影響。 ● 在多次 LoRa 現地裝設試驗中，天線的架設地點對傳輸影響甚鉅，相較於間隔距離，即使距離短，也可能因天線架設方式而造成訊號強度差。 ● LoRa 傳輸頻率部分，為補足接收站與發射站之間傳輸時差造成之漏失，至少須將接收頻率調整為發射頻率之兩

審查意見	意見回復
	倍，且在長距離傳輸中，適當依現場需求增加接收頻率的間隔時間，可有效提高傳輸成功率。 ● 室內降雨對 LoRa 傳輸測試中，似乎因傳輸距離較短，無法明顯觀察出降雨對 RSSI 直接的影響，但經由長期現地測試後，可確定降雨期間將明顯降低訊號強度，而長距離傳輸時，甚至可能因此發生資料漏失，因此在設置規劃時，需評估設置地點 RSSI 是否過低，否則在降雨期間可能無法傳輸。 ● LoRa 長期設置試驗後，可確認本團隊之 LoRa 模組之耐候性已可應對長期監測之條件，太陽能電力供應也相當充足且穩定。 110 年計畫成果： ● 現階段所採用之 LoRa 傳輸模組，在常時天氣狀態下，搭配良好的裝設方法與地點，可以極少的漏失率進行監測資料的回傳，而降雨對通信品質指標 RSSI 之影響由測試結果觀察並無明顯干擾。 ● 目前可掛載的監測裝置有裂縫計、

審查意見	意見回復
	傾斜儀以及雨量計，是為邊坡監測中最常見也最能及時安裝即時監測的設備，在 LoRa Node 於每 2 分鐘發送一次之頻率下，整體電力系統中可完全負載。 ● 在 LoRa 傳輸測試中，例如地聲計等需連續傳輸大筆資料時，因資料封包過大，易出現漏失。 ● 本研究所使用之 LoRa 以及 2.4G WSN 通信系統，經現地設置於神木村、明霸克露橋以及光華崩塌地三處場址進行測試，漏失率皆低於 1%，其成果證實資料可穩定進行回傳。 111 年計畫成果 ● 現階段所採用之 LoRa 傳輸模組搭配 RTK-GNSS，在常時天氣狀態下，搭配良好的裝設方法與地點，可以極少的漏失率進行監測資料的回傳。 ● 在 LoRa 傳輸測試中，因座標程式的轉換易出現漏失。 ● 在無線傳輸測試中，本研究所使用之 LoRa 及 RTK-GNSS 系統，經現地設置於新竹縣尖石鄉秀巒村處場址進行測試，其成果證實資料可穩定進行回

審查意見	意見回復
	傳。 ● 本系統在明新科大校園實測可得到之監測精度為 1cm，至秀巒崩塌地現場實測發現已測得一次崩塌發生之逐時紀錄與後續持續監測到約 2.5cm 之地表位移。 ● 妮莎颱風降雨期間，仍可持續進行監測並未中斷。
3. 請加強說明方法應用之限制及預期成果之實用性。	感謝委員意見，本方法需要能在接收衛星訊號較佳處，將於本計畫一併測試。
4. 本年度預計利用衛星即時動態定位與地表傾斜儀(陀螺儀)等地表監測成果，研發地中地層變化評估法(滑動面深度、滑動速度等)；其實施方法與步驟為何？如何驗證及避免誤判？	感謝委員意見，初期將光華崩塌地進行現場資料蒐集，再於校內驗證。
5. 長距離低功耗無線傳輸技術，對於山區通訊較差地區，可處理監測資料不易傳輸問題，對於災害監測與管理甚為重要。	感謝委員支持。

附錄三 期中審查意見與回覆

審查意見	意見回覆
1. 因預算不足，無法進行陀螺儀之研究十分可惜，建議委託單位未來能夠對通過的計畫在預算額度範圍內，提供合理的預算，避免此一情況的再度發生。	感謝委員意見，團隊會再注意預算部分。
2. 初步結論中所提及的現階段所採用之 LoRa 傳輸模組搭配 RTK-GNSS，在常時天氣狀態下，搭配良好的裝設方法與地點，可以極少的漏失率進行資料的回傳。對於在颱風的豪雨情況下的回傳情形，期盼在期末報告中也加以統論與評析，畢竟颱風的豪雨情況下的回傳才是本監測研究的重點。	感謝委員意見，已於第四章說明。
3. 對於雙軸傾斜儀的監測成果，請在期末報告中也加以討論與評析。	感謝委員意見，已於第四章說明。
4. 計畫執行期間年份應為 112 年，請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
5. 第二章為 111 年度計畫成果摘要，係為參考資料，建議應編列於報告書附件飲用即可，請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
6. P53，請更新為 112 年份及土石流潛勢溪流數目，請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
7. 初步結論中，說明經”現地設置於新竹縣尖石鄉秀巒處場址進行測試”，但檢視報告書 P63 內容，為 112 年現地觀測資料並進行分析，請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
8. 為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔	謝謝提醒，已修正。

審查意見	意見回復
案請至本署電子圖書管理中心下載。	

附錄四 期末審查意見與回覆

審查意見	意見回復
1. 本案傳輸距離可否由增設中繼站方式延長，再請補充說明。	感謝委員意見，本研究是以 GNSS-RTK 架構進行監測，理論上 BASE(基準站) 和 Rover(測站)是同步收到衛星訊號後實時進行差分運算，中間若是用中繼站進行延長距離需要花時間轉換，恐讓系統無法進行有效之差分運算，最好之方式為在需要延長地點另設 BASE(基準站) 服務比較遠之 Rover(測站)，另外 Rover(測站)與 BASE(基準站)距離越大，其量測誤差也會放大，因此無法增設中繼站。
2. 天候因素對漏失率的影響為何？	感謝委員意見，理論上降雨時空氣中之濕度會增加，會提高無線通訊之噪訊比，會使無線訊號功率降低。
3. 在通視或不通視的情況下對漏失率的影響為何？	感謝委員意見，以本研究為例，秀巒 (GL003) 為通視的情況下直線距離 766m，其漏失率為 1.85%；光華崩塌地為不通視的情況下直線距離 710m，011 測站和 013 測站的漏失率分別為 10.72%和 11.05%。
4. 儀器常時資料傳輸與颱風豪雨期	感謝委員意見，如果 BASE(基準站)和

審查意見	意見回復
間目前差異可降低到什麼程度?另距離拉長到多少，還能保有可接受品質?	Rover(測站)是通視，以本系統使用 LoRa-RTK 技術是可以達 15km，但當基 BASE(基站)與 Rover(測站)地點距離到 15km 時，若 BASE(基站)和 Rover(測站)無法通視則距離會縮短，縮短之距離受環境因素影響很大，也無法量化，因 LoRa 無線訊號會隨環境繞射，建議以 LoRa-RTK 架構並且通視狀況下，建議距離仍以不超過 4KM 較為適當(考量 RTK 以後之精度)；以目前光華 013 雨量測站(非通視)資訊為例，取強降雨量時間(8/31-9/8，每 5min 資料到達率 57%)和無降雨時段(9/8-9/17，每 5min 資料到達率 63%)期間比較，強降雨時間的漏報率大約比無降雨質量降低約 7%。
5. 本技術已研究多年，目前如欲於大規模崩塌區推廣，其面臨最大挑戰可能是那些?	感謝委員意見，由於採用 LoRaWAN 除了 Node 端不需要市電與電信通訊服務外，Gateway 端還是需要有線或無線電信通訊服務才能將 Node 端監測資料傳到雲端。目前最大挑戰應該是如果大規模崩塌區域周邊沒有品質良好的有線或無線電信通訊服務，那麼 LoRa 漏失

審查意見	意見回復
	率再低可能也只能透暫存再傳出。另外由於 LoRa 頻寬限制，其資料率從 0.3 Kbps 到 27.0Kbps，依擴散因子而定；目前經團隊測試如地聲計、三軸加速度規、串流影像，仍如法透過一對一 LoRa 傳輸。
6. 本計畫監測基地可能布設災害發生地點，故災害發生過程是否影響其安全，等致資料遺失。	感謝委員意見，由於根據經驗，LoRa 傳輸之低漏失率、低功耗與穩定性之特點在此種情況下可充分發揮；可在完全遭受破壞前將災害發生過程透過 LoRa 傳輸被詳實紀錄。