

# 雙頻多星系 GNSS 地表位移監測技術應用

## Monitoring of Ground Surface Displacements Using Dual-Frequency Multi-GNSS Technique

主管單位：內政部建築研究所

沈哲緯<sup>1</sup>

王禹翔<sup>1</sup>

吳笙緯<sup>1</sup>

張淵翔<sup>1</sup>

Shen, Che-Wei

Wang, Yu-Hsiang

Wu, Sheng-Wei

Jhang, Yuan-Siang

<sup>1</sup>興創知能股份有限公司

### 摘要

為了提升坡地安全長時間尺度的全域監控能力，本研究導入衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)，使用國內已研發的低成本 GNSS-IoT 自動化監測設備，於坡地社區試行系統化的即時監測作業，透過時序資料分析、觀測數據驗證，以及即時監控展示等內容來完善技術整合之成果，以做到更早的趨勢因應與大面積監控，加強坡地安全監控的活用性。

**關鍵字：**衛星導航系統、社區邊坡即時監測、地表位移時序分析

### Abstract

In order to improve the long-term global monitoring capabilities for slope safety, this study uses satellite navigation systems. (Global Navigation Satellite System, GNSS) and use the low-cost GNSS-IoT automated monitoring equipment to actually pilot systematic real-time monitoring operations in the slope community. Through time series data analysis, observation data verification, and real-time monitoring display, the results of technical integration are improved.

**Keywords :** GNSS, Hillside Community Real-time Monitoring, Ground Surface Displacement Analysis

## 一、前言

臺灣國土面積中，山地所佔比例高達 70%，在平地資源有限的情況下，山坡地過度開發使用的情形至為嚴重。為了提升坡地安全長時間尺度的全域監控能力，且近幾年消費型 GNSS 晶片蓬勃發展，逐漸成為具有優勢、低成本且適用於坡地社區監測之 GNSS-IoT 自動化監測設備，本研究應用國內已有的雙頻多星系 GNSS 設備研發技術成果，於坡地社區試行地表變形監測整合技術之研究，研析適用於坡地監測之主要定位解算方法，包含靜態測量(Static)、動態測量(Kinematic)等監測技術，並擇定一處坡地社區案場，依據過往的現地調查結果，在通訊、電力與透空無虞的環境下，為潛在崩移的社區地基，完成 3 站實地設備安裝與觀測數據之採集後，根據前述的解算策略完成精密定位測量；參照國內外既有 GNSS 數據監測處理方法，比較靜態測量(Static)與動態測量(Kinematic)的測量精度與差異，由時序觀測數據計算常見位移監測指標，評估待測社區地表位移之具體現況，最後透過串接現地 GNSS 觀測設備，搭配應用程式介面(Application Programming Interface, API)在 Web 網頁中即時呈現，除了時序的解算結果，亦包含長時間尺度的位移監測指標統計，配合建研所「山坡地社區智慧防災系統可行性研究—邊坡智能感測暨雲端運算」相關研究成果，初擬異常行動管理門檻，達成早期警戒目的。

## 二、研究方法概述

為了確實評估潛在地表變形問題對坡地社區的影響，本研究探討 GNSS 監測對山坡地社區之可行性，並建置自動化監測服務系統。茲就 GNSS 定位解算技術與研究場址說明如下：

### 2.1 GNSS 定位解算技術說明

精密坐標解算為 GNSS 地表變形監測之核心，除了透過硬體規格來滿足精度需求，也必須仰賴即時定位技術的應用。本研究採即時動態載波相位差分技術(Real Time Kinematic, 以下簡稱 RTK)，利用差分(Differential)定位的解算方式，有效消除大部分衛星與接收儀的定位時表誤差，達到近公分等級的定位精度。

而在硬體選擇上則使用 u-blox ZED-F9P 晶片模組，該晶片支援多個 GNSS 頻帶(L1/L2/L5)與多星系(GPS、GLONASS、BDS、GALILEO)，可在數秒內達到公分級準確度。將此模組與 Raspberry Pi 3 結合，並將定位解算的演算法安裝於中，整合為低成本多星系 GNSS 設備(圖 1)。使用靜態(Static)解算時，水平精度為 5mm+1ppm RMS、鉛直精度為 11mm + 1ppm RMS；若改以動態(Kinematic)解算，水平精度為 8 mm + 1ppmm RMS、鉛直精度為 15 mm+1ppm RMS。



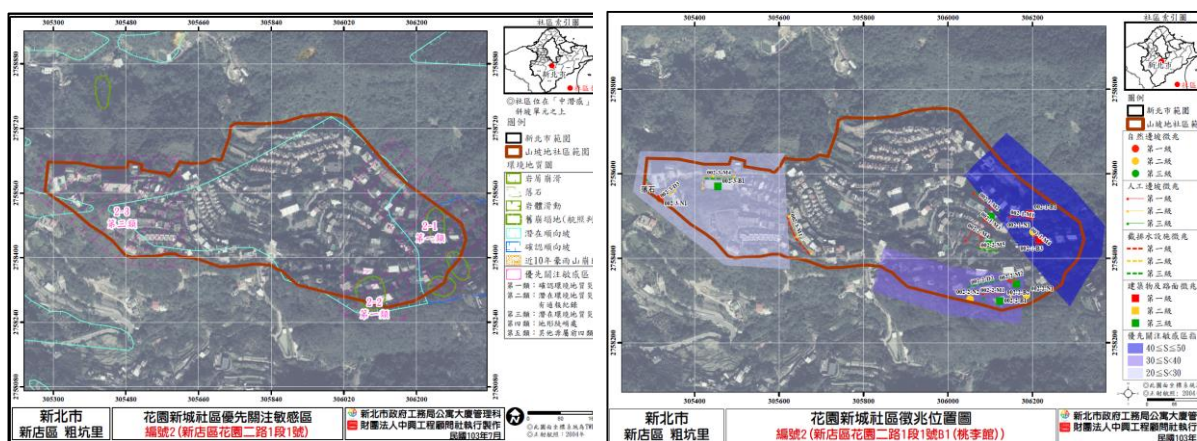
圖 1、本研究使用 GNSS 設備

## 2.2 研究場址說明

為了確實評估潛在地表變形問題對坡地社區的影響，本計畫以新北市新店區一處山坡地住宅社區為研究場域，實際安裝 1 站基站與 2 站固定站(待測站)，並監測至少半年數據後進行分析。以下就場域概述與設備安裝進行說明：

### 2.2.1 地理環境概述

花園新城社區位於新北市新店區粗坑里，社區範圍 28.53 公頃，為典型的山谷形，地形坡向朝北，主要由砂岩和厚層頁岩，或砂岩、頁岩互層所組成。其優先敏感及徵兆圖如圖 2 所示，多位於山崩與地滑地質敏感區內(順向坡及岩屑崩滑)，如果未來受到極端天氣事件之影響，可能造成嚴重龜裂以及土石掏空，危及整體建築物物件架構，故積極選擇此區域做為高度關注之監測場域。



(資料來源：山坡地社區災害風險管理委託專業服務案成果報告，2015)

圖 2、社區優先關注敏感圖(左)；社區徵兆位置圖(右)

### 2.2.2 現地調查與設備安裝

在了解試驗場址後，便要實地探查選擇適宜的安裝位置，包含(1)社區現況安全評估、(2)設備安裝意願溝通與(3)設備配置規劃設計等三大面向，以利研判是否適合進行實際安裝作業。

社區現況安全評估係依據既有坡地社區評估報告確認潛在危險區域，並安排基本調查與現況評估，用於確認影響範圍與建站建議數量；而社區安裝意願溝通則因安裝區域大多屬於私有土地，必須詳細溝通了解需求後取得居民同意，方能確認安裝數量與進場施工；最後的設備配置規劃則需研判天線盤安裝基礎是否穩固避免傾倒、環境透空度不宜低於 50%，並確認電力與通訊應是否穩定。待設備建置完成後，便能透過網路將監測資料回傳，進行後續分析。

依循既有的環境調查圖資(圖 2)搭配現地地表變形調查工作，並透過實地訪談，確認地表位移徵兆、顯著影響的潛在戶數，以及管委會及住戶的安裝意願後，本研究於社區內安裝了 3 站 GNSS，包含 1 座基站(TTL201)與 2 座固定站(TTL202、TTL203)，其點位分布如圖 3，完工照如圖 4 所示。



圖 3、各站 GNSS 安裝位置

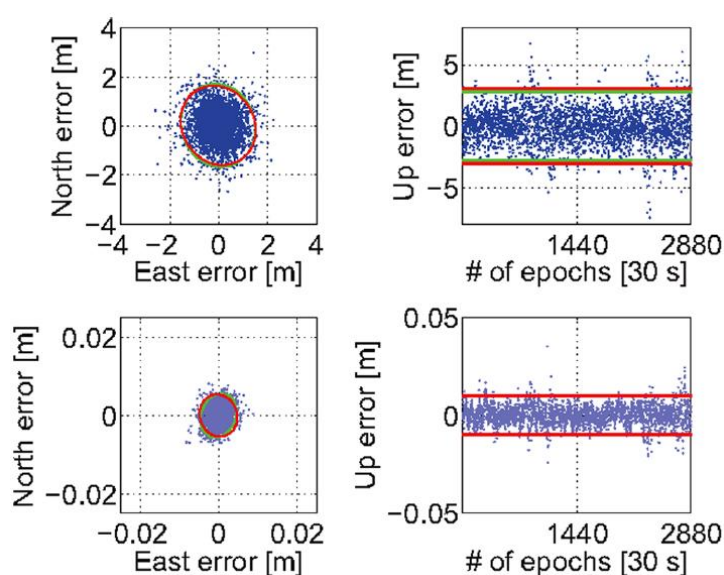


圖 4、GNSS 測站完工照

### 三、研究成果說明

#### 3.1 GNSS 定位技術研析

隨著定位技術的進步，GNSS 有了更廣的應用，如都市管理上可做到地籍測量與國有財產管理、數位城市建構與都市規劃、災害監測(邊坡、重要公共設施)與災害搶救等，且 GNSS 的定位技術從原有的單頻演進到雙頻，甚至可以達到 3 頻，使訊號接收儀擁有更多的衛星訊號來強化定位精度，公分級的定位將也不再是昂貴設備才能達成的，透過觀測誤差修正消費級晶片也能實現相似的定位精度(圖 5)。因此本研究運用消費級 GNSS 晶片籌組低成本衛星定位設備，並於示範區域內進行長達 6 個月(2022/06/01-2022/11/30)的固定站觀測，並自動化回傳解算後資料匯入資料庫，透過多種資料視覺化展示方式(包含資料列表、折線圖與衛星影像套疊圖等)呈現，達到即時預警之功能。



(資料來源：R. Odolinski1 and P. J. G. Teunissen, 2017)

圖 5、消費級 GNSS 晶片解算成果校正

#### 3.2 監測數據分析與驗證

##### 3.2.1 時間序列分析

本節針對 TTL202 與 TTL203 兩處固定站，分析自設備安裝完工以來 6 個月相對於 TTL201 基站之時間序列分析，並分別比較動態解算與靜態解算之差異。圖 6 為 2 個固定站動態解算時間序列成果，圖中每個點係將每日共 86,400 秒的即時觀測資訊平均計算成一日的定位結果，黃線則代表觀測期間兩起全台有感的強震(第 111086 號規模 6.4、第 111111 號規模 6.8)，其三分量之平均標準差均小於 1 公分，顯示長時間位移變化資料具備良好的穩定性。同樣的時間段區間，圖 7 為靜態解算時間序列成果，係使用 RTKLIB 軟體將每一秒的衛星資訊平均計算成每一日的定位結果所繪製，其三分量之平均誤差亦小於 1 公分，部分分量更只有動態解算一半，顯示靜態解算穩定性確實更高於動態解算。同時亦可發現，不論靜態解算或動態解算水平方向(E、N)表現均優於鉛直方向(U)，真實

反映出 GNSS 定位誤差之特性。此外也進一步分析 6 個月以來的位移變化趨勢。結果如表 1 所示，這段期間位移變化其實並不顯著，甚至比標準差計算結果來得更小，說明長達半年的觀測暫無顯著位移，但由於地表確實存在許多破裂徵兆，仍建議持續監控。

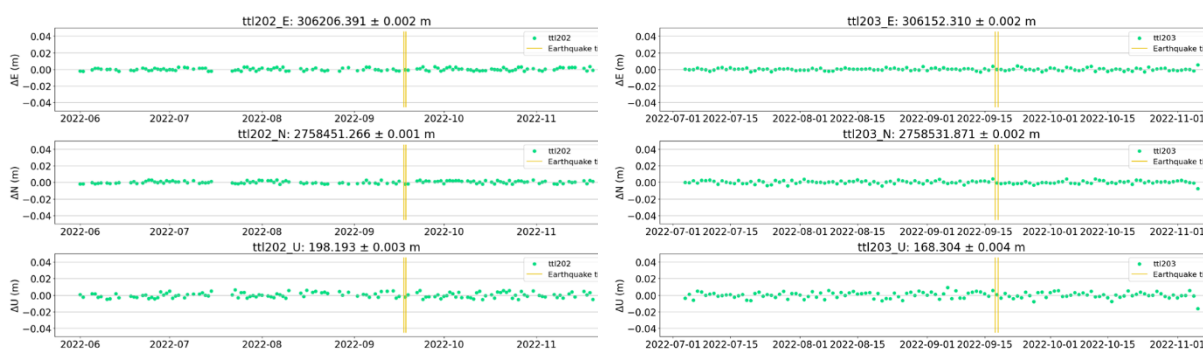


圖 6、累計 6 個月動態解算時序分析結果。左為 TTL202；右為 TTL203

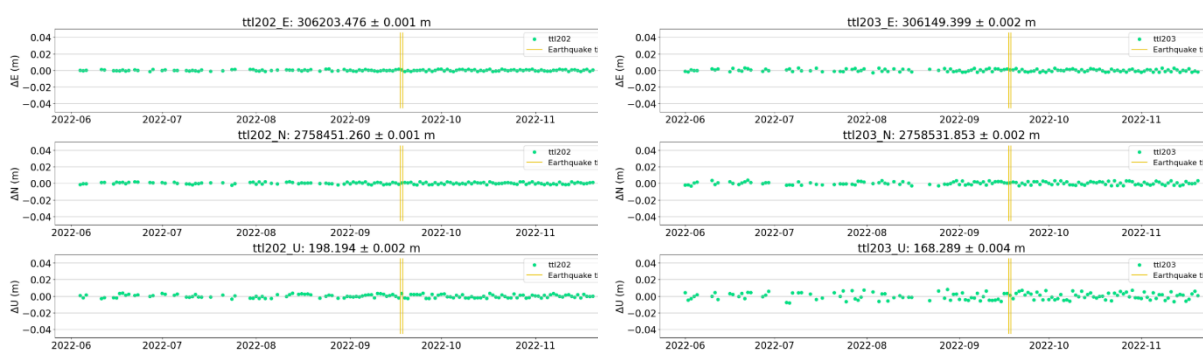


圖 7、累計 6 個月靜態解算時序分析結果。左為 TTL202；右為 TTL203

表 1 動態解與靜態解之差距

類別	方向	TTL202	TTL203
動態解(m)	E	306206.391	306152.306
	N	2758451.264	2758531.859
	U	198.192	168.285
動態 速度場(m/year)	E	0.002	0.000
	N	0.003	-0.001
	U	-0.001	-0.001
靜態解	E	306203.476	306149.400
	N	2758451.259	2758531.853
	U	198.195	168.290
靜態 速度場(m/year)	E	0.000	-0.001
	N	-0.001	0.001
	U	-0.001	0.000

### 3.2.2 現地資料驗證

除了時序分析外，本研究也透過現地人工測量距離方式，驗證 GNSS 設備資料品質之精度與正確性，方法為藉由 GNSS 測量點位後，利用捲尺量測點位間之距離，比較捲尺測得距離與點位計算所得距離之差，若誤差小於 1 公分，則視為 GNSS 的測量精度為可信的。

驗證之定位點如圖 8 所示，p1 到 p4 分別為木桌上 4 個點，使用 GNSS 分別量測 p1 到 p4 的位置，各定位點觀測期間的資料散佈如圖 9 所示；捲尺量測方法則如圖 10，分別於兩端點各量測一次從底座邊緣開始的邊長後扣除底座直徑並計算平均值，即可得到 GNSS 中心點之間的距離，點位計算距離與捲尺量測距離整理於表 2，從表中的距離差可發現，GNSS 測量結果與捲尺測量結果差距不到 1 公分，足見 GNSS 的精度為具備參考依據。

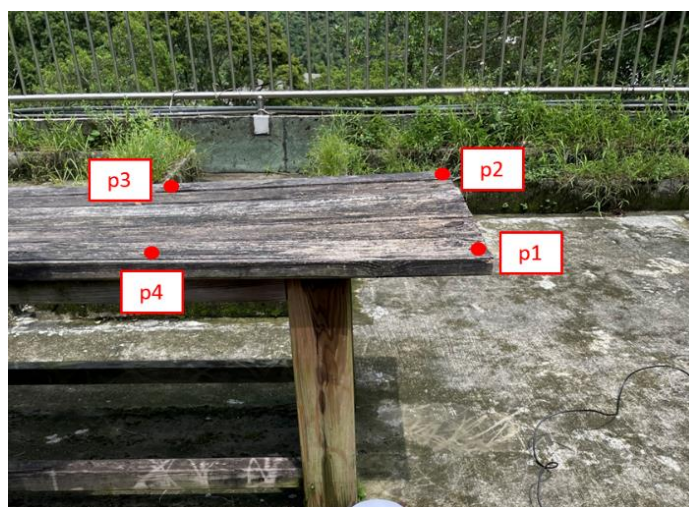


圖 8、現地精度驗證點位空間配置

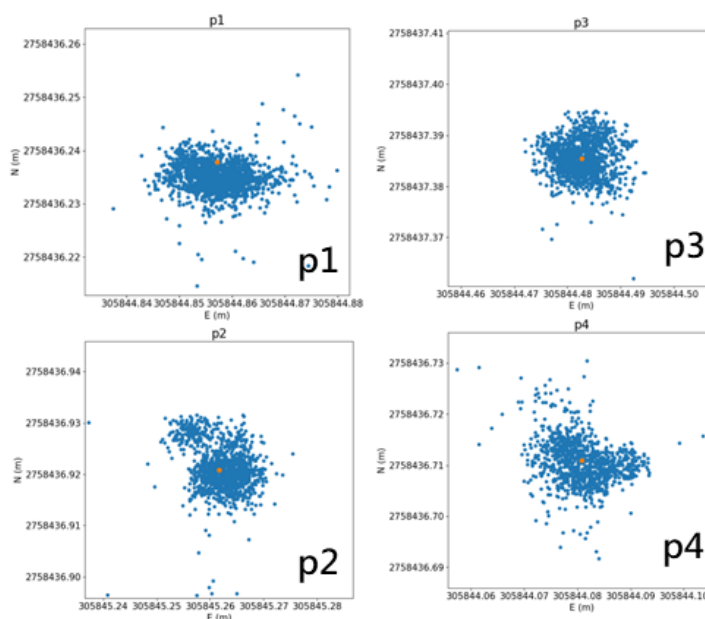


圖 9、現地精度驗證觀測點位分布



圖 10、捲尺實際量測方法展示

表 2 點位計算距離與捲尺量測距離比較

線段	GNSS 計算距離(m)	捲尺量測距離(m)	距離差
p1-p2	0.797	0.795	0.002
p2-p3	0.908	0.915	0.007
p3-p4	0.785	0.790	0.005
p4-p1	0.910	0.912	0.002

### 3.2.3 地震事件分析

驗證完 GNSS 資料的穩定度與精度後，本研究亦透過地震事件分析，進一步測試 GNSS 之觀測敏感度。在 2022 年 9 月中旬，臺灣發生了多起連續有感地震，其中最大規模的兩起地震分別發生於 9/17 與 9/18，地震規模為 6.4(第 111086 號)及 6.8(第 111111 號)，兩起地震皆在新店造成二級的最大震度紀錄。

實際觀察地震發生時間前後各 5 分鐘(每秒 1 筆)GNSS 資料監測情形如圖 11 與圖 12 所示，由於兩起地震震度在新店僅有二級，且測站距離震央甚遠，TTL203 測站的同震位移情況並不顯著，而 TTL202 測站則在第 111111 號地震發生後 15 秒左右的時間出現些許的地表瞬間變形，水平分量約 2 公分左右，鉛直分量約 5 公分左右，推測可能與地震有關。

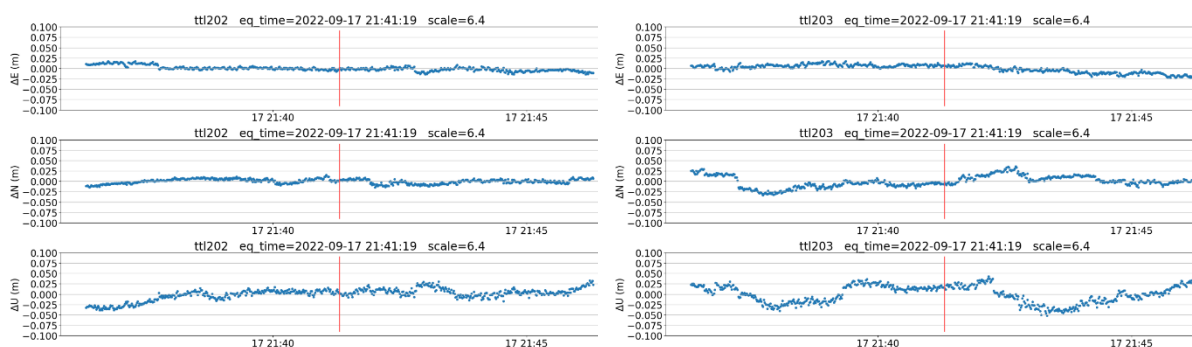


圖 11、111086 號地震前後 5 分鐘時序資料。左為 TTL202；右為 TTL203



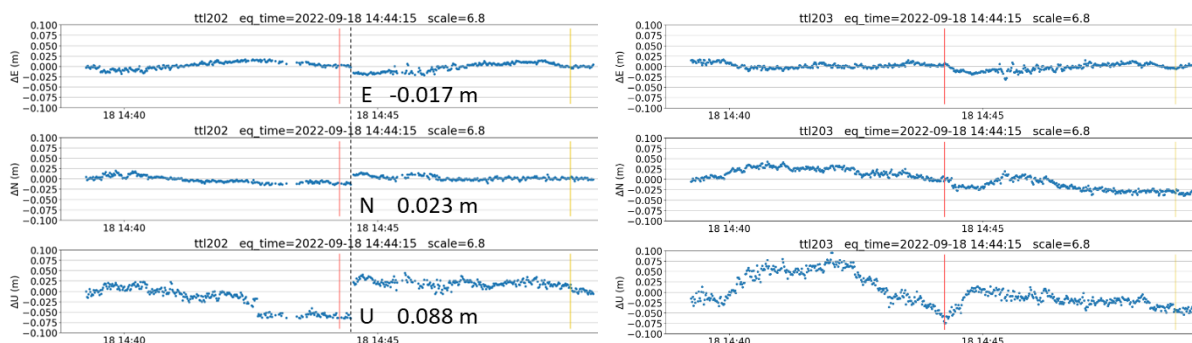


圖 12、111111 號地震前後 5 分鐘時序資料。左為 TTL202；右為 TTL203

### 3.3 即時服務系統建置

本研究除進行資料分析外，亦將分析成果整併至建研所既有的人工邊坡智慧監控系統，展示即時監測資料與相關分析成果。

系統畫面如圖 13 所示，畫面一共分為四大區塊，頂端的即時跑馬燈主要來自國家災害防救科技中心的民生示警公開資料平台 API，顯示即時的示警情資；主頁面中分為三個次區塊，左上角代表過去 7 天資料品質圓餅圖，包含穩定、尚可與斷線等狀態；畫面右上角，顯示 GNSS 設備的所在位置以地圖呈現，畫面下方預設紀錄過去七日的小時資料時序變化，用以掌握短時間發生的地表位移事件，若發現時序位移超過一定範圍，則會透過不同顏色呈現，提醒需加以關注該點位，如地震或降雨特殊事件所造成之影響；同時，該區塊也可切換至過去三個月日資料時序變化，用以了解長時間地表位移潛勢，例如順向坡潛移等問題。

在符合資安原則下，透過帳密管理系統限制閱覽者，僅提供社區管委會即時數據查詢，同時在計畫結束後的持續性監測規劃中，預計每半年提供監測數據揭露報告供管委會運用。

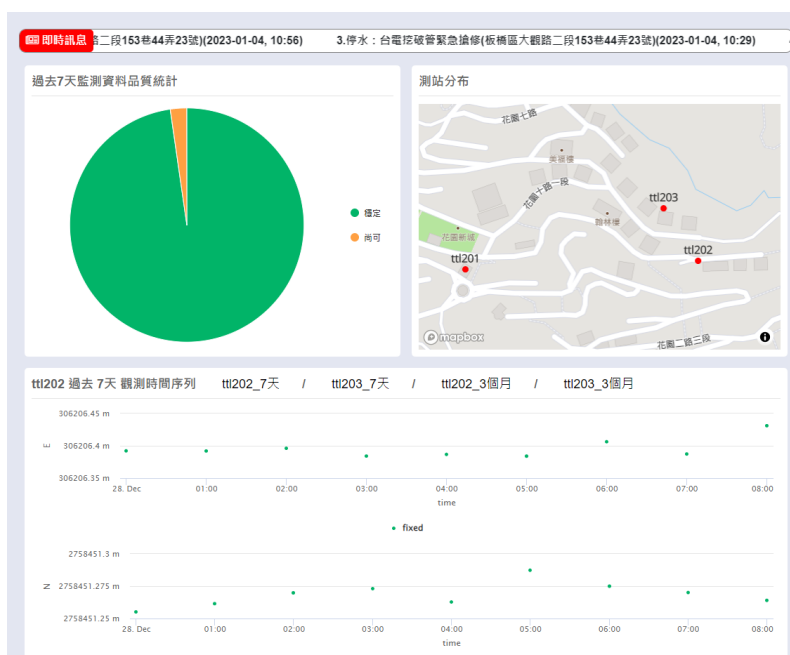


圖 13、建研所人工智慧邊坡智慧監測系統畫面圖

### 3.4 山坡地社區防減災技術落實應用

#### 3.4.1 警戒應用研究

在強烈地震發生時，山坡地社區往往承受較高的風險及損傷，特別是在一些斷層處或者鬆軟地層之山坡地敏感性範圍，如何透過建立有效之注意值、警戒值與行動值，評估社區之安全性並適時提供重要訊息，減少災害導致之傷亡與財產損失，是山坡地社區安全評估之重要課題之一。

根據廖瑞堂(2013)等人之研究內容(如表 3)，社區坡地樣態多元，位移標準變化大，無法有效制定相同之注意值、警戒值與行動值標準，亦無法適用統一量化方式管理，本研究研議透過裝設在花園新城社區之 GNSS 設備觀測資料，客製化社區設計注意值內容，以供未來當地社區居民及管委會同仁進行檢視。

由於警戒定義之困難性，目前僅使用注意值來提供動作評估，根據本研究 GNSS 設備精度測試之成果，現有的設備水平精度約 1 公分，鉛直精度約 2 公分。在短時間(7 日)的監測工作中，若連續 24 小時時平均位移，超出水平方向 2 公分，或鉛直方向 4 公分則達到注意值(圖 14 左)；在長時間(3 個月)的監測工作中，若連續 3 個月位移趨勢累積變化高達 $\pm 1$  公分/年則達到注意值(圖 14 右)。在上述情境中，若觀測期間發現觀測資料持續超過注意值標準範圍，則建議進行相關專業調查及現場勘驗，以利盡早執行防範處置，有效落實坡地社區防減災之作為與機制。

表 3、臺灣邊坡個案位移統計

案例	滑動型態	地表最大 滑移速率 (cm/日)	說明	
廬山溫泉北 側邊坡(T4)	地滑區 (深層滑動)	3.20	自動 監測	現況尚無 大崩壞
		1.81	手動 監測	
基隆立德街 社區(T16)	順向坡 (平面滑動)	0.04	破壞前62天量測 (最終發生崩壞)	
汐止大尖山 (T18)	回填邊坡 (圓弧滑動)	2.24	曾瀕臨崩壞，但已緊急 補強穩定	

(資料來源：廖瑞堂，2013)

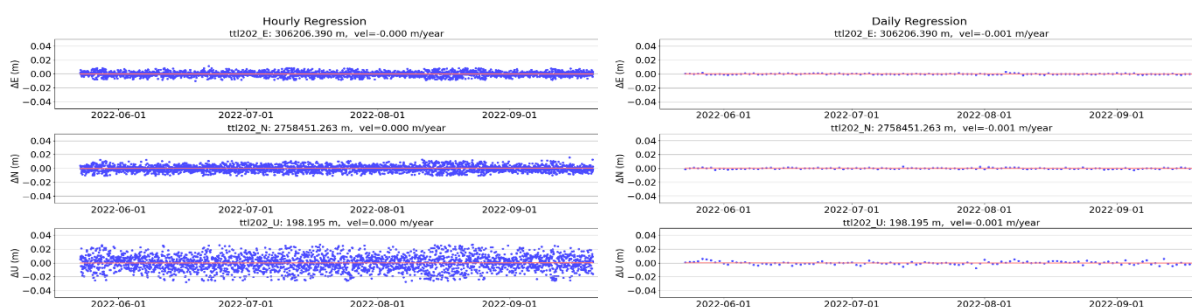


圖 14、注意值設計。左為短時間(7 日)；右為長時間(3 個月)

### 3.4.2 管理對策討論

過往山坡地社區土地開發或者物件變更時，均須特定土地使用分區及用地變更編定程序，方能進行山坡地社區建築使用。因此辦理相關開發計畫，除了需依「非都市土地開發審議作業規範」外，更涉及到「環境影響評估法」及「水土保持法」，需提送相關環境影響說明書、水土保持規劃書及計畫書與開發計畫，並且由地方縣市政府受理審查，由區域計畫委員會審議通過後，才能夠得到土地開發許可，並且允許辦理後續建造執造或雜項執照申請，並在建造完畢後，方能申請使用執造。

其中，新北市政府早在 2013 年起，就規定其縣市範圍內之山坡地在進行雜或雜併之建造申請時，除應提送專業技師簽章之管理維護計畫書外，並應經由專業技師依基地現況進行評估，設置施工中及永久性之監測儀器並訂定期監測之頻率；同時於使照申請階段，應特別檢附（一）基地地質、構造概述（二）永久性監測系統（三）施工期間監測分析報告（四）監測期三年以上之廠商合約文件（五）排水、擋土護坡等水保設施相關竣工圖說及其管理維護計畫（六）緊急應變防災計畫等內容。因此在此規範中，或許在未來可以將本研究所開發之 GNSS 設備系統一併納入前述監測儀器當中，作為指標性監測儀器，並且透過歷史觀測資料，建立符合當地山坡地之 GNSS 管理值，除了透過科技化方式制定安全規則外，也建議與地方政府進一步討論是否一併納入 GNSS 地表位移監測技術應用於整體山坡地建築物生命週期法律規範中，方能有效強化各縣市山坡地社區住宅之居住安全。

## 四、結論與建議

茲彙整研究結論與建議如下：

### 4.1 結論

#### 4.1.1 GNSS 定位技術研析

運用低成本 GNSS 設備與先進解算技術，提升坡地社區落地接受度，本研究完成一處位於新北市的坡地社區示範性監測，未來可望成為坡地社區安全的長時間監控手段之一，與其他既有的邊坡監測技術搭配使用，達到有效減災之目的。

#### 4.1.2 監測數據分析與驗證

本計畫使用消費型 GNSS 晶片，能支援雙頻多星系定位，其設備搭配 RTK 進行解算，長達 6 個月的連續監測，確實驗證了資料的可用性，具備公分級的觀測能力，適合應用於長時間的地表變形監測工作，用以監控坡地社區內潛在的自然邊坡、人工邊坡或建物結構破損。

#### 4.1.3 即時服務系統建置

本研究透過「建研所人工邊坡智慧監控系統」，能近即時地提供 GNSS 位移量測結果，除了提供監管單位進行安全性評估，同時也應提供社區用戶定期查閱。透過監測數據除了可以強化防災資訊之溝通，亦可作為法律議題探討之依據。

#### 4.1.4 山坡地社區防減災技術落實應用

本計畫參考國內、外邊坡監測之實際案例，注意值、警戒值與行動值目前尚未能有統一標準原則，當中涉及更縝密的邊坡調查與長時間監測，因此目前僅以 GNSS 設備的基本量測精度(水平 2 公分、鉛直 4 公分)為注意值，提醒使用者監測達門檻應安排進一步檢測，確認是否存在危險徵兆。除此之外，也完成兩場專家座談會之辦理，針對社區監測落地化方案、設備安裝評估原則、資料分析案例探討與管理政策研析...等多個議題，提出多個面向、跨領域的參考建議，預期作為未來坡地社區安全監控之具體方案。

## 4.2 建議

### 4.2.1 短期建議

包含本計畫 GNSS 設備在內，現行許多現地型的邊坡監測技術，多半屬於單點或多點的量測手段，往往受到場域內的諸多限制而無法有效發揮設備整合觀測的效益。此時若運用雷達衛星遙測的地表變形分析技術，可望補足大範圍邊坡監測之需求。

### 4.2.2 中長期建議

山坡地社區邊坡即時監測，除了保障社區鄰近住戶的居住安全，更希望運用低成本 GNSS 設備，提升廣布監測的可能性，從邊坡滑動或其破壞機制進行掌控，進一步發掘危險警戒值，了解各項行動基準值，方能有效降低潛在危機。

臺灣山坡地範圍約佔國土面積的 73%，面對大量的坡地社區安全監測需求，建議可透過相關管理政策的調整，來加速 GNSS 設備的廣佈監測應用，並透過長期驗證及確保品質之監測資料，在特定的執照審議過程，納入作為輔助依據資料，並建議從政府管理及民眾思考之角度，使用不同程度階段之強制或獎勵的手段，加深申請者自主監測之約束或意願。

## 參考文獻

1. 李孟羲(2017)。低成本 GNSS 即時動態定位系統之開發。未出版之碩士論文。國立師範大學機電工程學系，台北市。
2. 沈哲緯、冀樹勇、林郁雯(2017)。山坡地社區智慧防災系統可行性研究—邊坡智能感測暨雲端運算。內政部建築研究所委託研究報告。新北市：內政部建築研究所。
3. 林修國(2017)。新的 GNSS 與 Radar 技術與應用發展-新世代 GNSS 動態定位研究。行政院國家科學及技術委員會(原科技部)專題研究成果報告(編號：MOST 104-2221-E-019-006-MY3)。台北市：行政院國家科學及技術委員會。
4. 徐志磬(2018)。以低價 GPS 接收儀(GPS-721-MRTU)進行崩塌潛勢區地表位移監測。未出版之碩士論文。國立中興大學水土保持學系所，嘉義市。
5. 財團法人中興工程顧問社(2014)。山坡地社區災害風險管理委託專業服務案。新北市工務局委託研究報告。新北市：工務局。
6. 郭治平、鄧福宸、沈哲緯、林宛瑩、吳晉維(2019)。坡地社區減災營造與智慧防災系統整合研發—預力地錨破壞監測及整體系統穩定性之強化。內政部建築研究所委

- 託研究報告。新北市：內政部建築研究所。
7. 廖瑞堂、陳昭維、紀宗吉、林錫宏(2013)。由臺灣監測案例探討邊坡位移量之管理值。地工技術，(136)，59-70。
  8. 鄧福宸、郭治平、李威儀、吳偉杰、李奕緯(2018)。山坡地社區智慧防災系統精進－人工邊坡智能感測器研發與雲端系統擴充應用。內政部建築研究所委託研究報告。新北市：內政部建築研究所。
  9. 冀樹勇、沈哲緯、林郁雯、紀柏全、黃春銘、鄭錦桐(2016)。山坡地社區建築管理履歷資料庫建立與關鍵致災因子關聯性分析。內政部建築研究所委託研究報告。新北市：內政部建築研究所。
  10. Biagi, L., Grec, F. C., & Negretti, M. (2016). Low-cost GNSS receivers for local monitoring: Experimental simulation, and analysis of displacements. *Sensors*, 16(12), 2140.
  11. Cina, A., & Piras, M. (2015). Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5-7), 497-514.
  12. Odolinski, R., & Teunissen, P. J. (2017). Low-cost, high-precision, single-frequency GPS–BDS RTK positioning. *GPS solutions*, 21(3), 1315-1330.