SWCB-108-222

淺層崩塌可犧牲式元件與深層型時域反射邊坡監測技術之整合研發

成果報告



行政院農業委員會水土保持局編印

中華民國 108 年 12 月

計畫編號：SWCB-108-222

淺層崩塌可犧牲式元件與深層型時域反射邊坡監測技術之整合研發

Development and integration of sacrificed sensors enhanced by TDR for shallow and deep-seated landslide monitoring

執 行 單 位：國立中央大學

執 行 期 間：108 年 2 月 20 日至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：鐘志忠 助理教授

行政院農業委員會水土保持局編印

日期： 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）

淺層崩塌可犧牲式元件與深層型時域反射邊坡監測技術之整合研發

摘要

臺灣由於具有獨特且年輕之地質條件，加上近來天候極端變化，降雨強度集中（時間域與地域），邊坡坍崩問題頻傳。考量淺/深層崩塌之複合型事件為未來面臨之趨勢，且整合型之監測技術為重點方向，因此本研究進行單頻 GNSS RTK 之實驗室初步評估測試，藉以提昇其 GNSS RTK 定位精度，並維持可犧牲式元件成本，其實驗顯示 L1 與 L5 雙頻 GNSS 手機之方案不甚穩定，但 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片於長期穩定性應屬可行；第二，本研究嘗試建立國內首座時域反射儀（Time Domain Reflectometer, TDR）於離心機之應用，目前已提出較適宜之纜線以供離心機測試使用，並完成初步離心機實際運轉之整合測試，正持續安排使用離心機剪動模型評估 TDR 與側傾管共構之行為。最後透過阿里山五灣仔現場監測案例，將三軸加速度計與單頻 GNSS 加入既有的 TDR 監測系統中，輔以監測淺層邊坡位移，而形成三道判斷邊坡滑動的判斷機制。因此本研究根據現有成果，綜合提出淺層崩塌可犧牲式元件與深層時域反射邊坡監測技術之整合建議。

關鍵字： GNSS、時域反射儀、離心機、淺層崩塌、深層滑動

Development and integration of sacrificed sensors enhanced by TDR for shallow and deep-seated landslide monitoring

Abstract

Due the unique and young geological conditions of Taiwan, and recent extreme changes in weather leading the intensity of rainfall much concentrated in time domain and regional area, the problem of slope collapse is frequent. Considering the shallow/deep-seated landslide would couple in the future, and the integrated monitoring technology is the key direction, this study, therefore, conducts a preliminary evaluation of the single-frequency GNSS RTK in laboratory to improve the positioning accuracy. The cost of sacrificial components can be beneficial in practice. The results of experiment show that the schemes of L1/L5 dual-band GNSS in mobile phones are not stable, but the long-term stability tracking of ublox F9P dual-frequency GNSS chips should be feasible. Secondly, this study attempts to establish the integration method of Time Domain Reflectometer (TDR) in centrifuges by proposing an appropriate cable and completes the integration test of the actual operation of the centrifuge. It is continuously arranging the use of the shear model to evaluate TDR jointed with a inclinometer casing. Finally, through the on-site monitoring of Alishan Wuwanzi, the three-axis accelerometer and single-frequency GNSS were added to the existing TDR monitoring system, supplemented by monitoring the shallow slope displacement. The judgment mechanisms for detect the slope slip were formed with three criteria. Therefore, based on the existing results, this study comprehensively proposes the integration of shallow/deep-seated landslide with sacrificial components and TDR monitoring techniques.

Keywords: GNSS; Time Domain Reflectometer, TDR; Sallow landslide; Deep-seated landslide

目次

摘要 i
Abstract ii
目次 iii
表次 v
圖次 vi
第一章 緒論 1
第二章 計畫目標 5
第三章 實施方法與步驟 6
3.1 相關文獻回顧評析 6
3.1.1 淺層崩塌可犧牲式元件開發 6
3.1.2 單頻 GNSS 定位應用 13
3.1.3 時域反射邊坡監測技術 20
3.1.4 離心模型試驗 25
3.2 L1+L5 頻段 GNSS RTK 測試規劃 28
3.3 TDR 與測傾管共構於離心機測試規劃 32
3.4 現地觀測站測試與淺/深層監測整合設置 35
第四章執行成果 43
4.1 GNSS RTK 初步測試成果 43
4.1.1 小米 L1+L5 頻段 GNSS 測試 43
4.1.2 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片測試 50
4.2 TDR 與測傾管共構於離心機初步測試成果 53
4.2.1 纜線選擇測試 53
4.2.2 TDR 與離心機整合 64
4.2.3 TDR 於離心機實際測試 66
4.3 現地觀測站測試與淺/深層監測整合初步成果 74
4.3.1 TDR 觀測建置與成果 74
4.3.2 淺層監測系統建置與成果 84
4.3.3 L1 GNSS 監測初步成果 90

4.3.4 TDR 與 GNSS 監測系統建議 105
第五章 結論與建議 109
5.1 結論 109
5.2 建議 109
第六章 參考文獻 111
附錄一 執行計劃書審查意見回覆 116
附錄二 期中報告書審查意見回覆 120
附錄三 期末報告書審查意見回覆 122

表次

表 3.1 超短基線 Static 解算方法比較：後退計算(Backward)與前進計算(Forward) ..... (單位：mm，時間格式：GNSST) 17
表 3.2　離心模型與原型之縮尺比 27
表 3.3 歷年平均月雨量表(水利署) 38
表 4.1 離心機試驗用之 TDR 同軸纜線規格 54
表 4.2 淺層邊坡位移系統成本分析 106

圖次

圖 1.1 坡地運動圖 4
圖 1.2 大規模崩塌特徵示意圖(修改自 Varnes, 1978) 4
圖 3.1 SMARTCONE 系統(Lee et al. 2017) 8
圖 3.2 日本坡地簡易傾度量測元件示意圖 (Uchimura et al. 2011)..... 9
圖 3.3 日本坡地簡易傾度量測系統 (Uchimura et al. 2011)..... 10
圖 3.4 日本坡地簡易傾度量測系統之物理模型試驗 (Uchimura et al. 2010) 10
圖 3.5 本坡地簡易傾度量測系統於大陸長江測試場址 (Uchimura et al. 2011) 11
圖 3.6 日本坡地簡易傾度量測系統於大陸長江監測歷時資料 (Uchimura et al. 2011) 11
圖 3.7 （左）Arduino Fio（右）Arduino Pro Mini 12
圖 3.8 RTC 迴圈控制與 SD 卡模組讀取數據測試架構圖 13
圖 3.9 以 RTC 控制睡眠及 SD 卡讀寫感測器模組測試接腳圖 13
圖 3.10 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 02:56:35~2018/05/31 03:56:34 [GNSST] 18
圖 3.11 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 03:56:35~2018/0531 04:56:32 [GNSST] 18
圖 3.12 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 04:56:34~2018/05/31 05:56:26 [GNSST] 19
圖 3.13 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 05:56:35~2018/05/31 06:56:33 [GNSST] 19
圖 3.14 時域反射儀之基本架構 23
圖 3.15 利用 TDR 感測技術建構地工結構監控與損傷感應神經系統 .23

圖 3.16　時域反射纜線與測傾管共構之數模網格設定（賴煜勳，2017）.....24
圖 3.17　時域反射纜線大型直剪盒（賴煜勳，2017）.....24
圖 3.18 中央大學土木系之地工離心機.....27
圖 3.19 離心機模型模擬概念圖.....28
圖 3.20　GNSS 不同頻段示意.....30
圖 3.21　GNSS L5 頻段適用性差異比較.....30
圖 3.22　Android GNSS Logger and GNSS Analysis.....31
圖 3.23　RTKLIB DGNSS L1+L5 Analysis.....31
圖 3.24 L1&L5 超短基線線性定位精度檢核實驗架構.....32
圖 3.25 離心機錯動模擬試驗箱.....34
圖 3.26 U 型迴圈路徑實降法示意圖.....34
圖 3.27　TDR 纜線於離心機坡地滑動模擬配置(Xu and Pierce, 2013).35
圖 3.28　NCU 離心機軸心位置既有資料擷取器主機.....35
圖 3.29 歷年平均月雨量(水利署).....38
圖 3.30 五彎仔地區地滑區塊（公路總局）.....39
圖 3.31 五彎仔地區 A-A 地質剖面（陳世達等人 2008）.....39
圖 3.32 五彎仔地區 B-B 地質剖面（陳世達等人 2008）.....40
圖 3.33 五彎仔地區前後期高程變異圖（王鐘緯 2017）.....40
圖 3.34 五彎仔地區地滑區塊與現有相關監測儀器平面配置圖（公路總局).....41
圖 3.35 五彎仔地區 N4 地滑區東邊邊緣表面噴混擬土工程（2017/12/8 與 2018/9/14 拍攝）.....42
圖 4.1 2019/05/19 即時 L1+L5 頻段 GNSS RTK Kinematic 解算成果(基準站 TWTF).....44

圖 4.2 2019/05/29 即時 L1+L5 頻段 GNSS RTK Kinematic 解算成果(基準站 TWTF) 44
圖 4.3 2019/05/10 阿里山測站 RTK Static 配合 VBS 解算成果 (左) L1+L5 頻段，(右) L1 頻段 45
圖 4.4 2019/07/15 阿里山測站 RTK Static 配合 VBS 解算成果 (左) L1+L5 頻段，(右) L1 頻段 45
圖 4.5 2019/07/15 阿里山測站 L5 頻段衛星接收數量 46
圖 4.6 定位精度檢核實驗- Mi8 固定站之 RTK 解算結果 47
圖 4.7 定位精度檢核實驗- Mi8 移動站之 RTK 解算結果 48
圖 4.8 定位精度檢核實驗- ublox M8 移動站之 RTK 解算結果 49
圖 4.9 新式 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片模組 49
圖 4.10 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片中基線(基站 TWTF) Static 解算成果 51
圖 4.11 ublox F9P 中基線(基站 TWTF) 於滑軌 kinematic 解算成果 . 52
圖 4.12 TDR 纜線之簡易直接剪動試驗 54
圖 4.13 實際剪動過程之 TDR 波形反應 55
圖 4.14 波形下降程度( )與剪動變位關係 55
圖 4.15 TDR 纜線之簡易壓痕試驗 56
圖 4.16 實際壓痕過程之 TDR 波形反應 56
圖 4.17 波形下降程度( )與壓痕應力關係 57
圖 4.18 RG174, RG316 修正型纜線示意圖 58
圖 4.19 未改良與改良後纜線灌漿試體進行簡易直接剪動試驗 59
圖 4.20 未改良纜線灌漿試體於簡易直接剪動試驗結果 60
圖 4.21 第一型改良纜線灌漿試體於簡易直接剪動試驗結果 61
圖 4.22 第二型改良纜線灌漿試體於簡易直接剪動試驗結果 62

圖 4.23 (a) RG 174 與 (b) RG 316 纜線於不同改良下之靈敏度分析..63
圖 4.24 TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱 64
圖 4.25 TDR3000 與離心機擷取系統整合關聯性 65
圖 4.26 TDR3000 自動化擷取程式 65
圖 4.27 離心機物理模型實際配置圖 67
圖 4.28 1g 重力場下之剪動測試 68
圖 4.29 1g 重力場下剪動測試之 TDR 波形結果 69
圖 4.30 河堤模型試驗於 80g 重力場下之配置. 71
圖 4.31 河堤模型試驗試驗過程 72
圖 4.32 河堤模型試驗第一支基礎於不同重力下之 TDR 波形結果 73
圖 4.33 河堤模型試驗第二支基礎於不同重力下之 TDR 波形結果 73
圖 4.34 河堤模型試驗第三支基礎於不同重力下之 TDR 波形結果 74
圖 4.35 鑽孔位置圖(公路總局).....75
圖 4.36 阿里山監測現場照(2019/6/27).....76
圖 4.37 阿里山之工業型電腦接收資料架構圖 76
圖 4.38 阿里山之工業型電腦儲存資料機制流程圖 77
圖 4.39 阿里山公路 45K 7/1 至 7/5 TDR 變位型監測資料 78
圖 4.40 阿里山公路 45K 7/16 至 7/31 TDR 變位型監測資料 79
圖 4.41 阿里山公路 45K 8 月份 TDR 變位型監測資料 80
圖 4.42 阿里山公路 45K 10 月份 TDR 變位型監測資料 82
圖 4.43 阿里山公路 45K 11 月份 TDR 變位型監測資料 83
圖 4.44 阿里山 Arduino 系統架構圖 85
圖 4.45 阿里山 Arduino 系統運作流程圖 85
圖 4.46 阿里山公路 45K 測站三軸加速度計方向(Google Map).....86
圖 4.47 中央氣象局奮起湖測站位置 86

圖 4.48 7 月份阿里山公路測站現場端接收之溫度資料與氣象局比較圖 87
圖 4.49 8～10 月份阿里山公路測站現場端接收之溫度資料與氣象局比較圖 87
圖 4.50 7 月份阿里山公路測站現場端接收之濕度資料與氣象局比較圖 88
圖 4.51 8～10 月份阿里山公路測站現場端接收之濕度資料與氣象局比較圖 88
圖 4.52 7 月份阿里山公路測站現場端接收之 Roll 資料 89
圖 4.53 8～10 月份阿里山公路測站現場端接收之 Roll 資料 89
圖 4.54 7 月份阿里山公路測站現場端接收之 Pitch 資料 90
圖 4.55 8～11 月份阿里山公路測站現場端接收之 Pitch 資料 90
圖 4.56 阿里山公路 45K 測站 GNSS 資料解算後 Google Earth 呈現圖 (Google Earth) 91
圖 4.57 阿里山公路 45K 6/28 到 7/16 GNSS 資料 RTK 解算位置圖 92
圖 4.58 阿里山公路 45K 7/17 到 7/23 GNSS 資料 RTK 解算位置圖 93
圖 4.59 阿里山公路 45K 7/24 到 7/30 GNSS 資料 RTK 解算位置圖 94
圖 4.60 阿里山公路 45K 6/28 到 7/16 測站 GNSS 資料 RTK 算時間軸 95
圖 4.61 阿里山公路 45K 7/17 到 7/23 測站 GNSS 資料 RTK 算時間軸 96
圖 4.62 阿里山公路 45K 7/24 到 7/30 測站 GNSS 資料 RTK 算時間軸 97
圖 4.63 阿里山公路 45K 測站 GNSS 資料以虛擬測站解算位置圖 98
圖 4.64 阿里山公路 45K 測站 GNSS 資料以虛擬測站解算時間軸 99
圖 4.65 嘉義竹崎固定站距阿里山五彎仔 GNSS 測站基線距離 100
圖 4.66 配合竹崎固定站之 RTK Static 8～10 月定位結果（東西向） 102

圖 4.67 配合竹崎固定站之 RTK Static 8～10 月定位結果（南北向）
..... 103
圖 4.68 配合竹崎固定站之 RTK Static 8～10 月定位結果（高度）.. 104
圖 4.69 TDR 邊坡監測流程建議(Chung and Lin, 2019)..... 107
圖 4.70 邊坡滑動判斷機制研擬流程圖 108

第一章 緒論

臺灣由於具有獨特且年輕之地質條件，加上近來天候極端變化，降雨強度集中（時間域與地域），臺灣之邊坡坍崩問題頻傳，以水庫集水區為例，坍崩產生之土石將導致水庫庫容淤積問題（辜炳寰等人，2009），而山區道路邊坡或社區之災害，也將致使人命財產損傷。坡地崩塌型式依其移動方式可分為墜落(fall)、傾翻(topple)、滑動(slide)、轉動(slump)、流動(flow)與潛移(creep)等六種，如圖 1.1 所示。而大部分之因降雨造成之邊坡滑動或轉動大多可區分為深層與淺層坡地滑動。其中淺層坡地滑動一般多發生於坡度較陡、地質材料膠結不良、缺乏植披或舊有崩塌地層的邊坡，滑動面常發生於土層與岩層交界面之上，或僅發生於土層中，滑動破壞的土體厚度不大、厚度均勻，一般約介於 1～3 m 間（周南山，2005）。淺層滑動常因降雨雨水入滲土層，提升土壤含水量並降低基質吸力（Matric suction），進而使得土體穩定性降低（Fredlund, 1987； 蕭新財，2011； 鄭清江等人，2009； 林德貴等人，2007）。

由於近年來臺灣山區極易產生土石流災害而危急民眾生命財產安全，因此土石流觀測系統成為目前主要研究課題之一。國內土石流相關監測研發已有一定規模與應用可供上述淺層崩塌監測參考，從依循 OGC (Open Geospatial Consortium)之各項標準規範建置之資訊平台（周天穎，2012；竇其仁，2012；林志鴻，2012），以及現場無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN），包含無線感測平台以及對應之無/有線感測器（李秉乾，2012；Lee et al., 2010; Lee et al. 2017），但如何進一步延伸至現場應用並取得有效監測數據以供淺層崩塌之課題使用，還需進一步檢測驗證。另外日本也提出簡易式之坡地監測系統 (Uchimura et al., 2010; 2011) ，以及國內類似參考的研發作業（交通部運輸研究所 2017）。

另外深層(Deep-seated)的邊坡滑動為另一個重要關注課題，目前國內大規模崩塌的定義係指崩塌地的崩塌面積大於 10 公頃或崩塌體積大於 10 萬立方公尺或崩塌深度大於 10 公尺（水土保持局）。大規模崩塌的發生機制複雜，其大規模崩塌地形大致可以分為冠部、陷落區和隆起區，如圖 1.2 所示。而造成大規模崩塌的成因大致可分為地震與降雨，其中豪雨引發的崩塌在物理機制和上述之淺層崩塌相同（陳樹群等人，2013），雨水滲入地下使得地表土層、岩盤內的孔隙水壓上升（地下水位上升），進而減少崩滑面附近地表土層和岩盤有效應力的降低是為最主要的原因。而現地目前有效之監測模式大致可分為 4 種，雨量警戒、地中變位、地表傾斜與變位加速度。地中變位、地表傾斜與變位加速度屬於變形監測，係以直接監測岩層的穩定度，分別以地層滑動量、傾斜量與變位加速度判斷地層有無變形，並作為警戒指標。水文監測(雨量與地下水位)與變形監測(地表與地下變形)資料較容易觀測，實務上考量又以雨量為最常使用的崩塌警戒指標。

本計畫主持人之科技部研究階段成果（鐘志忠，2018），已初步於阿里山五灣仔之崩塌地建置基礎監測站，首先以單頻 GNSS RTK 測站，並結合簡易型坡地之傾度變化，優先作為淺崩塌滑動可犧牲式監測元件，目前也嘗試規劃加入時域反射（Time Domain Refletometry, TDR）之淺崩塌多點深度含水量監測桿；另一方面，此站也建置 100 m 之 TDR 地滑纜線監測，深層滑動所導致之地表表徵，也可作為上述淺層崩塌研究之比較參考。

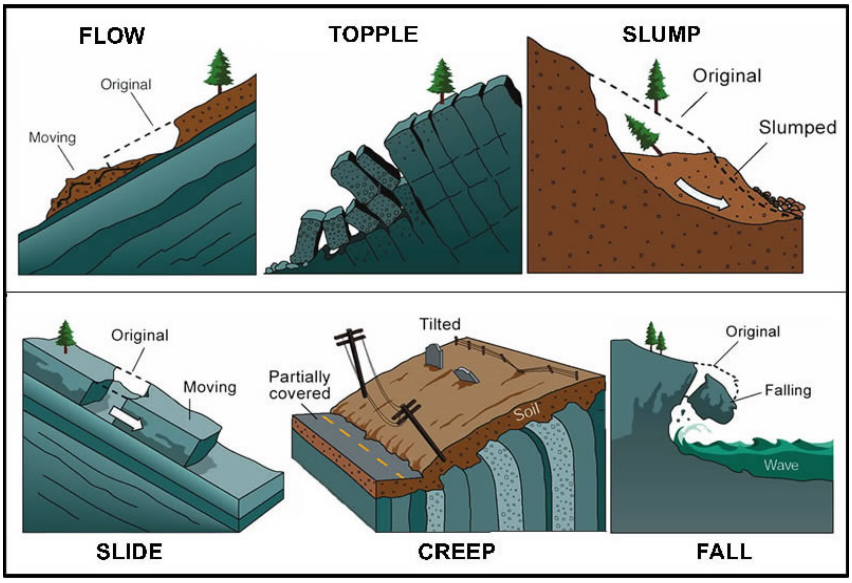
基於上述說明，本研究考量淺/深層崩塌之複合型事件為未來面臨之趨勢，因此整合型之監測技術為重點方向，但相關方法仍須再做進一步測試與驗證，延伸本計畫欲解決之課題如下：

1. 單頻 GNSS RTK 目前僅採用 L1 頻段進行測量，對於電離層影響仍有其定位精度上的限制，唯現有 L1+L5 頻段晶片已開發應用（https://ccc.technews.tw/2017/09/28/broadcom-GNSS/），**本計畫將擬定**

進行實驗室初步評估測試，藉以提昇其定位精度，並維持可犧牲式元件成本。

2. 深層 TDR 地滑纜線監測為一監測優勢，但實務上鑽孔費用仍佔大宗，本計畫主持人共同參與之科技部研究階段成果採用數值模擬方式加上大型剪力物理模型進行與測傾管共構的可行性評估（賴煜勳，2017）。其研究之數值模擬與物理模型實驗皆顯示，將纜線放在測傾管之 B 向且將兩者距離拉遠對於纜線的反應較靈敏，而小管徑的測傾管與纜線靈敏度較大，而現地測試之資料顯示邊坡於初期產生訊號時共構纜線仍有反射訊號。考量物理模型之尺度效應以及現場測試之成本，本計畫研擬配合本學研機構之離心機模型試驗，輔以斷層錯動的模型機具（Chang et al. 2013; 洪汶宜等人，2014），**嘗試建立國內首座 TDR 於離心機之整合測試，以探討 TDR 與測傾管共構的精進評估。**

3. 透過現有的現場監測站(以阿里山五彎仔為例)，嘗試整合 TDR 深層監測資料與淺層滑動觀測比對，加上現有其他測傾管與地下水位資料輔助，**提供淺層崩塌可犧牲式元件與深層時域反射邊坡監測技術之整合建議**。



圖片來源:Geoscience Australia, http://www.ga.gov.au/hazards/landslide/causes.jsp

圖 1.1 坡地運動圖

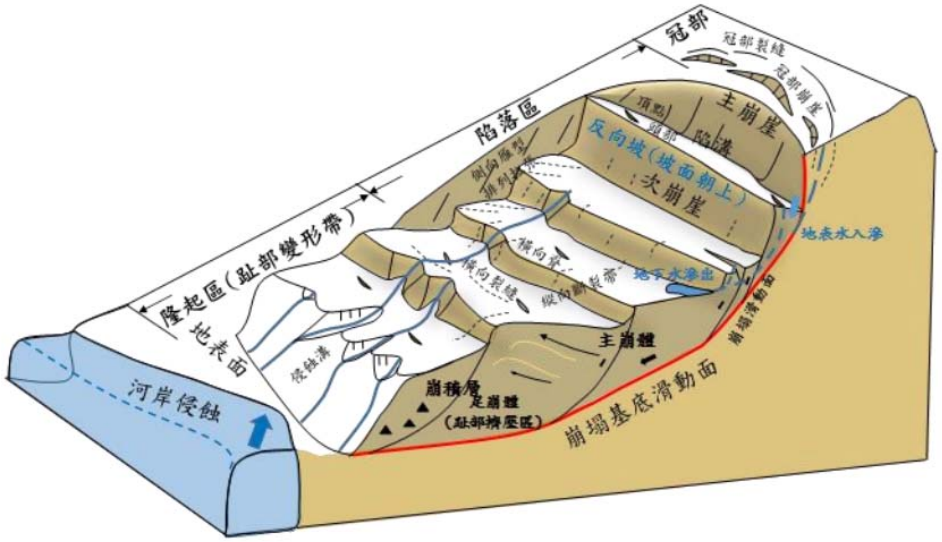


圖 1.2 大規模崩塌特徵示意圖(修改自 Varnes, 1978)

第二章 計畫目標

1. 擬定進行單頻 GNSS RTK L1+L5 頻段之實驗室初步評估測試，藉以提昇其 GNSS RTK 定位精度，並維持可犧牲式元件成本。
2. 嘗試建立國內首座 TDR 於離心機之整合測試，以探討 TDR 與測傾管共構的精進評估。
3. 淺層崩塌可犧牲式元件與深層時域反射邊坡監測技術之整合建議。

第三章 實施方法與步驟

3.1 相關文獻回顧評析

3.1.1 淺層崩塌可犧牲式元件開發

感測器網路(Sensor Network)常被應用於大時間與空間尺度的環境監測。大規模感測器陣列如 ARGOS 浮標網[1] 和世界氣象組織(World Meteorological Organization)的氣象網路。近年來，許多機構如全球綜合地球觀測系統(Global Earth Observation System of Systems, GEOSS)和美國國家海洋和大氣管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)海洋綜合觀測系統(The U.S. Integrated Ocean Observing System, IOOS)，提出以全球資訊網路(World Wide Web, WWW)連結這些感測器陣列，讓使用者可通過全球資訊網路訪問位於世界各處的感測器和感測器產生的資料。隨著開放標準定義的資料模型和網路協定，感測器和感測器數據可經由互操作化(interoperable)的方式集合起來提供給使用者，這就是現今全球感測器網路的主要概念(Botts et al. 2007; Bröring et al. 2011a; Liang and Huang 2013)。

感測器的技術發展逐漸成熟，低成本的感測器網路使科學家們可獨立客製化及運作中小規模的感測器陣列。當有足夠的電力支援時，感測器可自動地持續觀測各種環境現象，並可透過無線通訊(Wireless Communication)方式，如 RF、Wi-Fi、Bluetooth 等進行連結，甚至使用 RFID 或 ZigBee 進行格點網絡化並串聯，並且將收集的資料回傳至資料整合平台(Platform)作後續的分析，形成所謂之無線感測網路(Wireless Sensor Network, WSN)。因此，感測網強大的監測能力吸引越來越多領域的研究者開始廣泛使用感測器於不同的應用，包括大規模

[1] http://www.argos-system.org

環境監測(Hart and Martinez, 2006; Stasch et al., 2012)、土木結構健康狀況監測(Xu, 2002)、道路監測(Hsieh, 2004)、動物棲息地監測(Mainwaring et al., 2002)、農業灌溉(Kim et al., 2008)、警急應變系統(Kassab et al., 2010)，以及目前熱門的 PM 2.5 監測 (Ray 2016)等。而感測器的種類多樣，從道路攝影機網路到火柴盒大小的感測器節點網路，甚至是空載或衛載相機皆可輸出各式感測資料。這些感測資料將可提供不同應用大時間與空間尺度的環境監測能力，進而發掘到以前無法觀測到的現象。

土石流觀測系統為目前台灣主要研究課題之一，掌握土石流發生時之流動動態，有助於土石流各項學理之發展；另外即時獲得現場變異資訊，可以大幅提升防災應變之能力。劉格非與李欣輯(1999）將觀測儀器之預報型式分為三大類，第一類為長期(以目前主要監測項目比對，包含雨量計、土壤含水量或 EC 導電度監測儀器等)，此類型儀器需要長時間之監測，以獲得相關數據資料來加以分析預測；第二類為中期(如地聲與 TDR 地滑監測等)；第三類為短期(如影像判識、鋼索檢知器、荷重計與光遮斷器等)，此類型之儀器因屬事發型觀測，故其應變時間較短但準確度高。

上述不同觀測儀器中，李秉乾（2012）採用以無線感測網路為基礎的土石流監測系統，其感應器主要包括事前型的雨量計、土壤含水計及事發型的地聲。經由適量佈建 WSN 監測系統，以供長時間分析土石流發生與未發生之資料，進而建立土石流預報系統。土石流監測另一特色在於地聲量測，許家銘（2013）運用顆粒運動時所散發聲音之特性進行土石流之次聲監測，找出土石流發生時顆粒撞擊時之音頻特性，並區分由空氣傳播之次聲類型(如土石流引起、風聲引起)與音頻特性之關係，以了解顆粒運動或環境風聲引起發聲機制。但降雨造成之淺層崩塌與

土石流滑動仍有不同，因此使用地聲量測可能實際適用性不佳。Lee et al. (2017)提出低工耗之 SMARTCONE 系統（圖 3.1），透過使用加速度規偵測震動而啟動 GNSS 系統之設計，用於長期坡地位移監測使用。此一模式可作為後續參考。

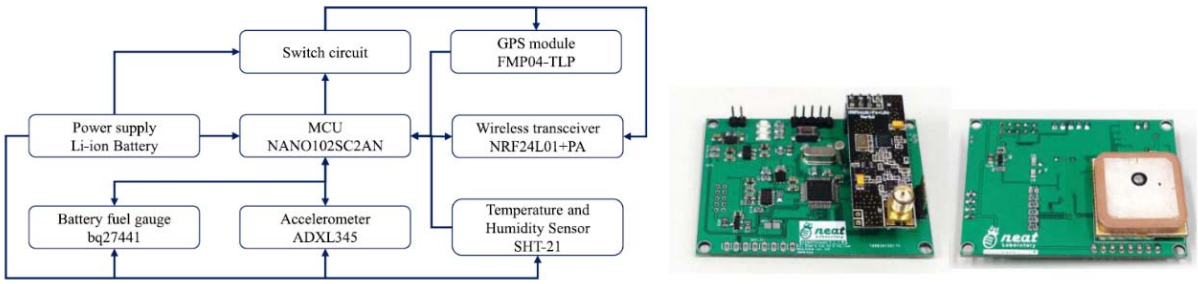


圖 3.1 SMARTCONE 系統(Lee et al. 2017)

Uchimura et al. (2010; 2011)提出一淺層坡地傾度量測元件（如圖 3.2），主要考慮其簡易便利之設置理念，以及採用坡地傾度變化以監測穩定與否，以進行快速且大範圍之淺層坡地化動監測使用。其現場監測端系統採用電池供電，主要感應元件為一 MEMS(Micro-electro-mechanical system)製程之傾度計(Tiltmeter)，並且整合一體積土壤含水量計(Volumetric soil water content sensor)。相關之日本坡地簡易傾度量測系統如圖 3.3 所示，主要各現場監測端(Sensor node)採用 RF 無線通訊之方式與接收主機進行聯繫，再配合手機網路訊號進行每十分鐘之資料擷取後回傳。

由於上述之坡地簡易傾度量測系統只能量測坡地之傾度變化，與實際之坡地滑動位移量比對則透過物理模型試驗進行初步測試，如圖 3.4 所示，其初步測試成果顯示坡地之傾度變化大致能反應坡地滑動位移量，傾度量測甚至可以提早反應，惟警戒值訂定與現場坡地材料有關，需特別因應不同場址狀況制訂(Uchimura et al. 2010)。

日本坡地簡易傾度量測系統於大陸長江測試場址與監測歷時資料分別如圖 3.5 與圖 3.6 所示。透過坡地傾角之變化量紀錄，可於圖 3.6 明顯發現當傾角之變化速率顯著增加時，意味著淺層坡地滑動逐漸加劇。目前其相關研究初步訂定警戒值為傾角之變化量> 0.005 deg/ hr，而行動值則是傾角之變化量> 0.1 deg/ hr。

Uchimura et al. (2010) 建議除坡地傾角之變化量外，也應結合坡地之土壤含水量資訊，提供進階警戒分析使用。Renzi et al. (2014) 則針對日本坡地簡易傾度量測系統與 Perugia 大學提出之降雨監測警戒系統進行比較分析，其研究指出降雨監測警戒系統需配合統計資料進行預警判釋，而簡易傾度量測系統則可明確反應坡地異常狀態。

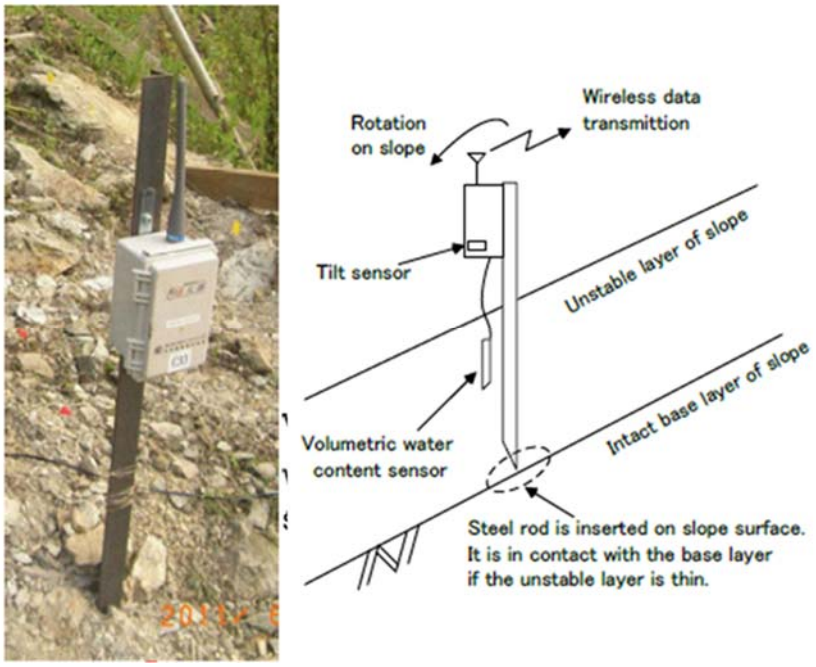


圖 3.2 日本坡地簡易傾度量測元件示意圖 (Uchimura et al. 2011)

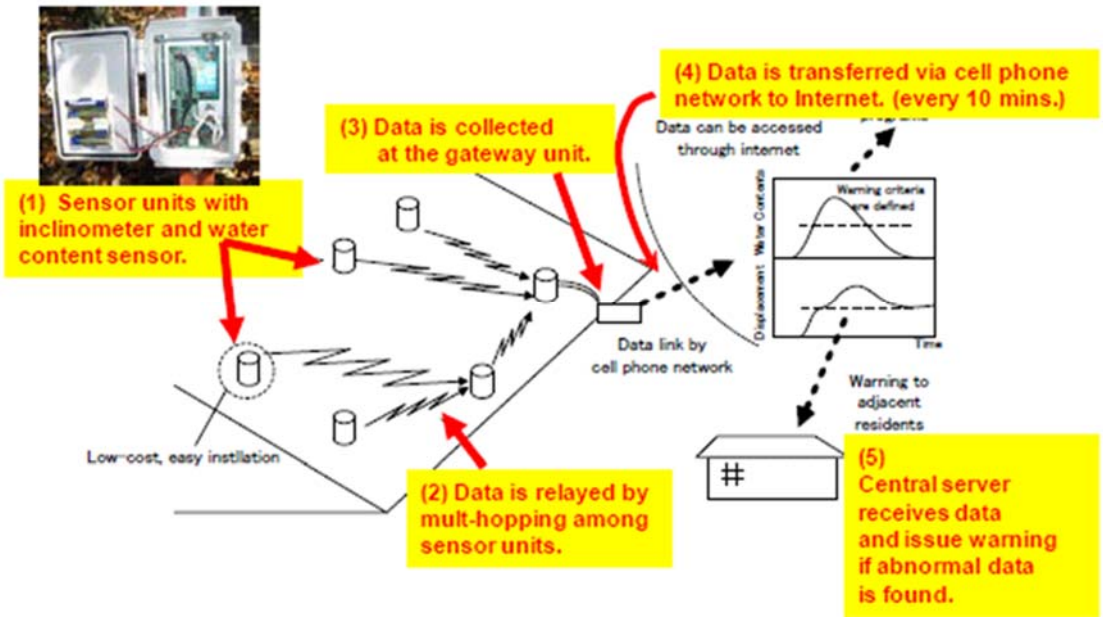


圖 3.3 日本坡地簡易傾度量測系統 (Uchimura et al. 2011)

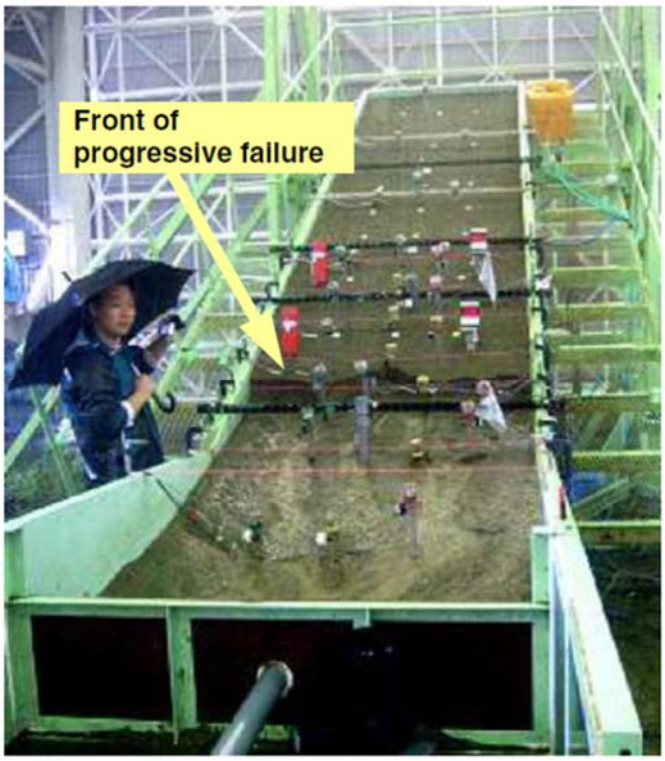


圖 3.4 日本坡地簡易傾度量測系統之物理模型試驗 (Uchimura et al. 2010)

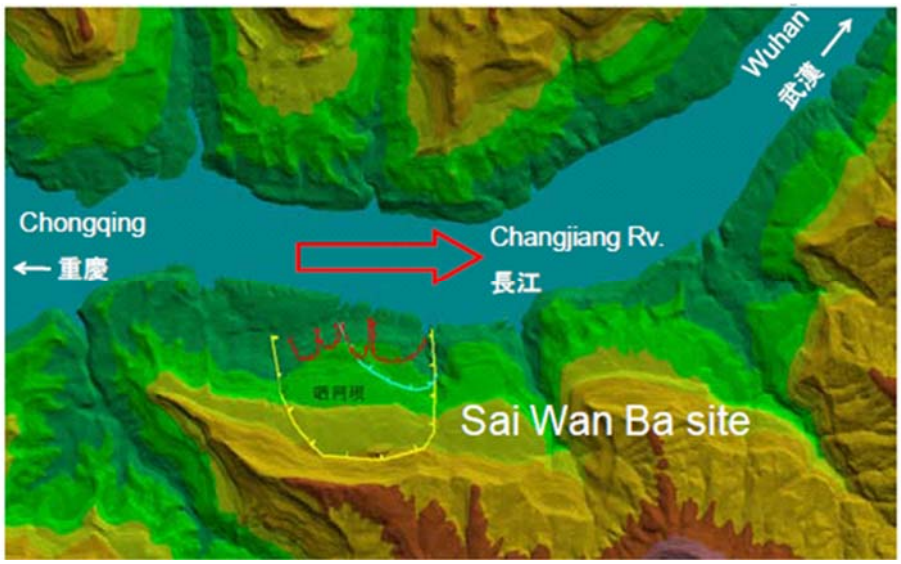


圖 3.5 本坡地簡易傾度量測系統於大陸長江測試場址 (Uchimura et al. 2011)

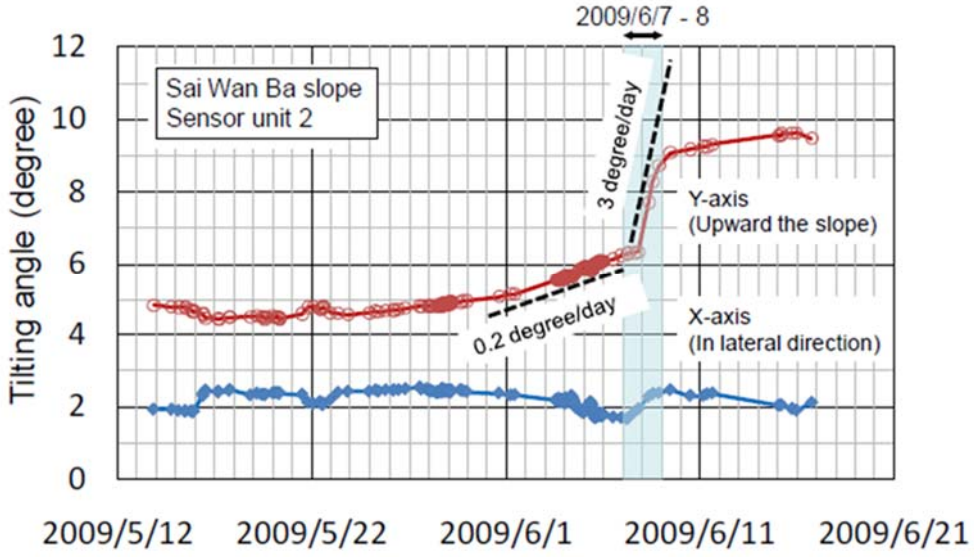


圖 3.6 日本坡地簡易傾度量測系統於大陸長江監測歷時資料 (Uchimura et al. 2011)

為了較傳統方法更快速與全面地收集坡地淺層崩塌資訊，本計畫主持人已經初步設計及建造一個以 Arduino 單晶片微電腦為基礎之感測端平台（鐘志忠，2018），藉以彙整上述相關感測器，以持續觀測相關的環境現象。坡地監測感測網將包含感測節點(sensor node)以及位於節點附近的閘道器(gateway)。當感測節點週期性地產生感測資料時，感測

節點會將資料透過在地網路(如：ZigBee、RFID、藍芽、或 Wi-Fi，甚至是 LoRa) 傳輸至閘道器，閘道器再將收到的感測資料透過網際網路上傳至中央管理系統。其研究基於相關計畫執行經驗，認為現有的 Arduino Uno 版本，使用為 5VDC，功耗較高且有斷電後無法自行啟動之疑虞，因此本研究嘗試採購 Arduino Fio 以及 Pro Mini 兩種版本，如圖 3.7 所示，其主要特性在於使用 3.3VDC 供電，因此功耗較低。

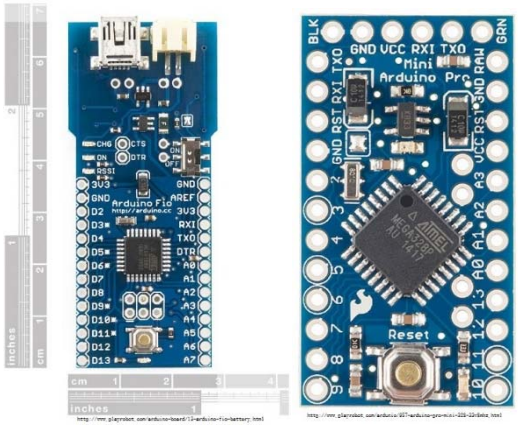


圖 3.7 （左）Arduino Fio（右）Arduino Pro Mini

電力來源對於許多環境監測環境而言，是一項重要考量因子，因此上述研究以RTC模組作為迴圈控制模組，對電力進行有效控制與管理。然而，凡進行無線傳輸方法進行測試，就需要考量傳輸可靠性以及穩定性，目標是對不穩定邊坡進行監測，因此要面對許多不可抗力因素(例如：颱風、土石崩落、意外等)，造成訊號中斷，而期望能在邊坡滑動事件或例外狀況發生後，仍能回到現場將先前掉包的資料重新取回，因此將 SD 卡模組納入未來研究發展考量之一。綜合上述，後續將兩者結合並以進行相關測試，該實驗架構如圖 3.8，該實驗將資料接收設定為每半小時接收一筆數據(程式碼已將 DHT22 與 TSL2561 彙整為一筆字串資料)，接腳圖配置請參考圖 3.9。

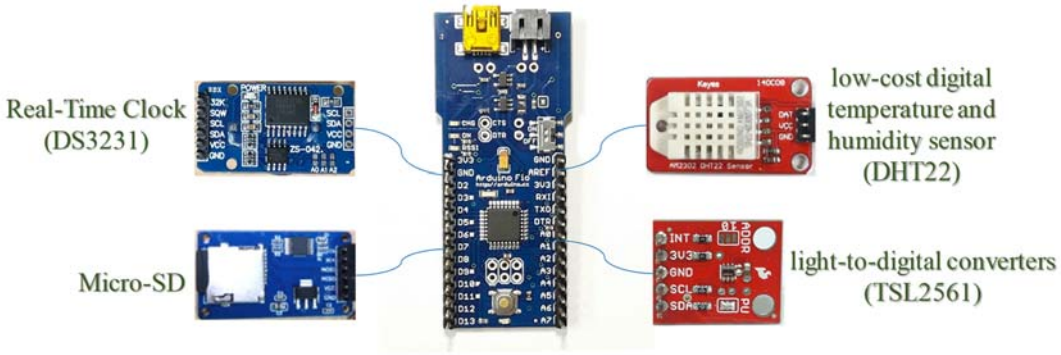


圖 3.8 RTC 迴圈控制與 SD 卡模組讀取數據測試架構圖

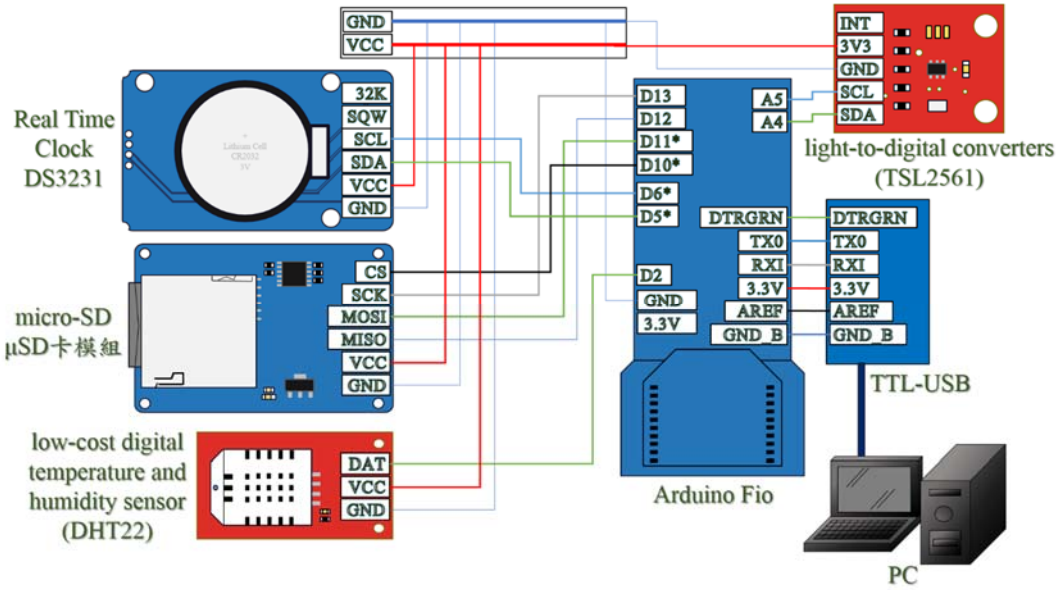


圖 3.9 以 RTC 控制睡眠及 SD 卡讀寫感測器模組測試接腳圖

3.1.2 單頻 GNSS 定位應用

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，現今有非常多的技術可以被用於崩塌位移偵測，如地表全球導航定位系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)，乃至遙感探測的被動/主動式方法(光學，雷達，光達等)。這些地表變形監測可以產生迅速的三維觀測，且達到公釐等級的精度與一小時內的觀測頻率（交通部運輸研究所，2011）。然而這些方法往往只提供點狀的觀測值，空間解析力較低。另一方面，

遙測方法如地面光達(LiDAR) 提供密集的位移場，卻沒有高時間解析力，精度也僅止於數公分至數十公分。再者，雖然干涉合成孔徑雷達(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR)也逐漸應用於崩塌位移監測（Chaussard et al. 2015; Tai and Chang 2015），其精度可能達到數毫米精度，然而限制於垂直的變形(Yin et al. 2010)。

因此，利用 GNSS 接收儀的佈置，包含 Static GNSS (Campaign Mode) 靜態測量模式，或是 Continuous GNSS (CGNSS)連續追蹤站模式，以及 Real-Time Kinematic (RTK) 或 e-GNSS 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 15–30 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 GNSS 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。

為了將 GNSS 網應用於崩塌觀測，並作為可犧牲式元件之一，每個接收器的單價需要降低，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-GNSS 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)。

此外，在過去數年中，單頻 GNSS 晶片(在此僅以美國的 GNSS 系統為例，其他還有如俄羅斯的 GLONASS 也可使用)可以記錄原始載波資料，且具低能量消耗特性，在市場上的價格大約新台幣 3000～5000 元左右。這些低成本的晶片可用於記錄 L1 頻率的資料，降低取得觀測成本，然而，天線較小且較容易受多路徑效應影響，精度也因此稍微降低 (Basilio et al., 2007)。不過，因為機動性高，用電率低，因此可以快速裝置於現地進行連續性的資料觀測。結合無線電連接這些接收器可以進行即時的資料交換。

小型低成本的 GNSS 晶片，其消耗電量低，並提供了原始的載波觀測值，可利用於符合本研究需求的準確定位。前期計劃將基於 Arduino 單晶片微電腦系統，嘗試結合下列數種硬體介面。首先在儀器規格方面，要達成在區域性接收器網路中有數公分等級相對定位精度的能力必須先進行精確計時(在標準運作模式時小於 10-4 秒)，且將所有網內的感測器同步(Synchronize)在單一個時間。因此初步訂定之基本需求為(1)　低電功率。(2)　衛星搜尋至鎖定時間(Time-To-First-Fix, TTFF)。(3)　　輸出之 L1 觀測量種類。使用的 GNSS 晶片為 u-blox 公司生產的 NEO-M8T 與 NEO M8P-2 系列。

其超短基線測試實驗先以連續之 1 小時(共 4 小時)資料長度進行解算方法評估，由 RTKLIB 之 Static 模式為基礎分別以後退計算(Backward)與前進計算(Forward)兩種方法進行對照實驗，其中，後退法為青綠色資料部分，而前進法則以藍色資料呈現。三軸座標(Position)精度，請見圖 3.10、圖 3.11、圖 3.12 和圖 3.13，而前者方法之精度於平面方向標準差分別為：East-West: 0.4mm、0.4mm、0.7mm 和 1.1mm，North-South: 0.6mm、1.6mm、0.8mm 和 1.1mm，後者之精度於平面方向標準差分別為：East-West: 0.4mm、0.9mm、

0.4mm 和 0.2mm，North-South: 1.0mm、1.5mm、0.5mm 和 0.4mm。於 Up-Down 方向兩者各別為 1.5mm、1.4mm、0.5mm、7.9mm 與 1.9mm、11.5、1.5mm、0.9mm，可見前進法於該方向有較差之成果。資料時間：2018/05/31 02:56:35~06:56:33 [GNSST]。

表 3.1 可以見得兩種解算方法中後退計算(綠色)較前進計算(藍色)所能獲取之 Q1 等級精度較差從前者資料品質逐漸隨時間而下降，雖然其平面精度雖一開始優於後者，但從資料 Q1 等級百分比迅速下降(95.1%~1.9%)看來，前進計算法其成果相對較穩定其 Q1 品質亦較佳。

此外，該觀測時段為 11:00~14:00 UTC+8，與前述零基線實驗之成果有部分謀合之處，而許多研究皆提出接近中午時段之觀測數據易受電離層誤差影響，再加上其研究已於前述實驗提出相關疑問，因此，未來納入消除電離層誤差之解算方法勢必為一重要目標。

表 3.1 超短基線 Static 解算方法比較：後退計算(Backward)與前進計算(Forward)　(單位：mm，時間格式：GNSST)

Data time	Data Quality Item	Backward	Forward
2018/05/31 02:56:35 ~ 2018/05/31 03:56:34	East-West	0.4	0.4
	North-South	0.6	1.0
	Up-Down	1.5	1.9
	Quality Level 1(%)	95.1	88.9
2018/05/31 03:56:35 ~ 2018/0531 04:56:32	East-West	0.4	0.9
	North-South	1.6	1.5
	Up-Down	1.4	11.5
	Quality Level 1(%)	47.2	73.0
2018/05/31 04:56:34 ~ 2018/05/31 05:56:26	East-West	0.7	0.4
	North-South	0.8	0.5
	Up-Down	0.5	1.5
	Quality Level 1(%)	2.6	41.6
2018/05/31 05:56:35 ~ 2018/05/31 06:56:33	East-West	1.1	0.2
	North-South	1.1	0.4
	Up-Down	7.9	0.9
	Quality Level 1(%)	1.9	41.4

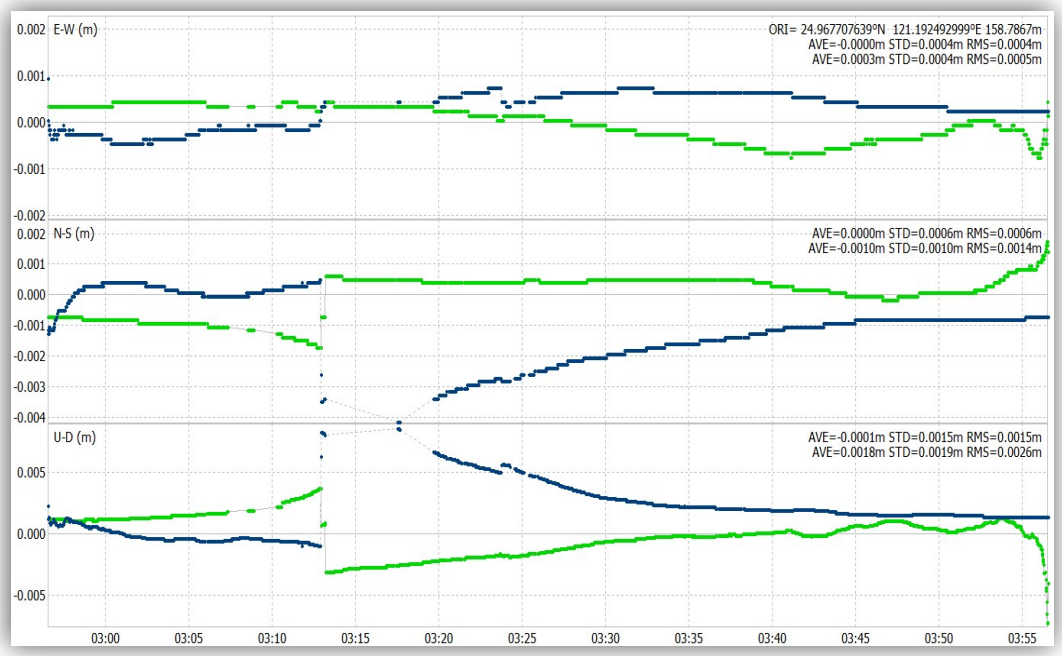


圖 3.10 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 02:56:35~2018/05/31 03:56:34 [GNSST]

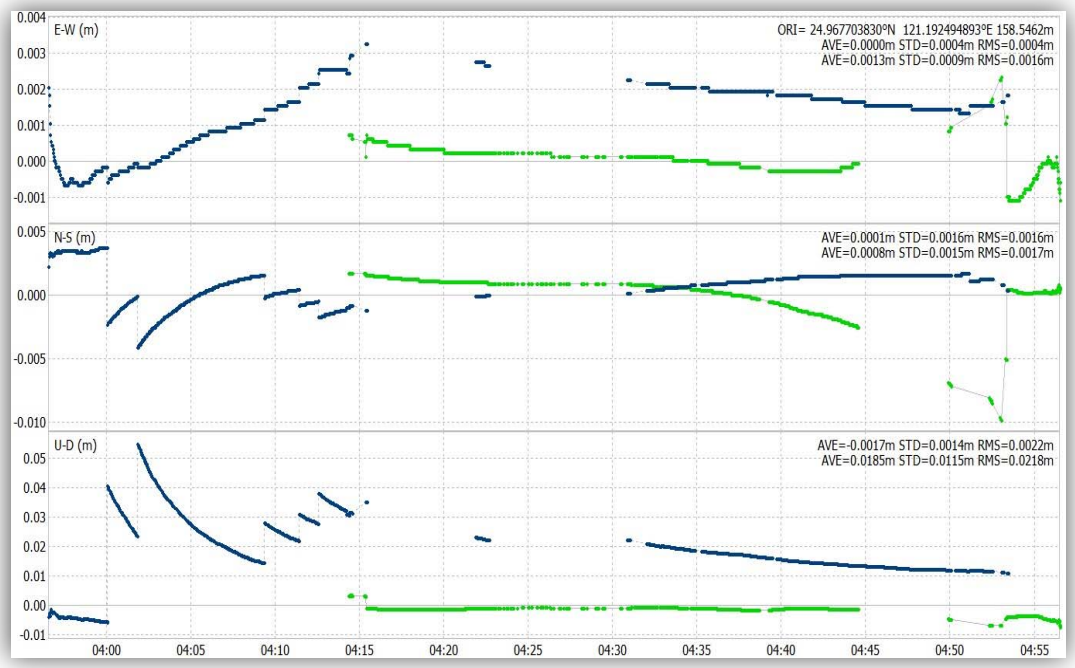


圖 3.11 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 03:56:35~2018/0531 04:56:32 [GNSST]

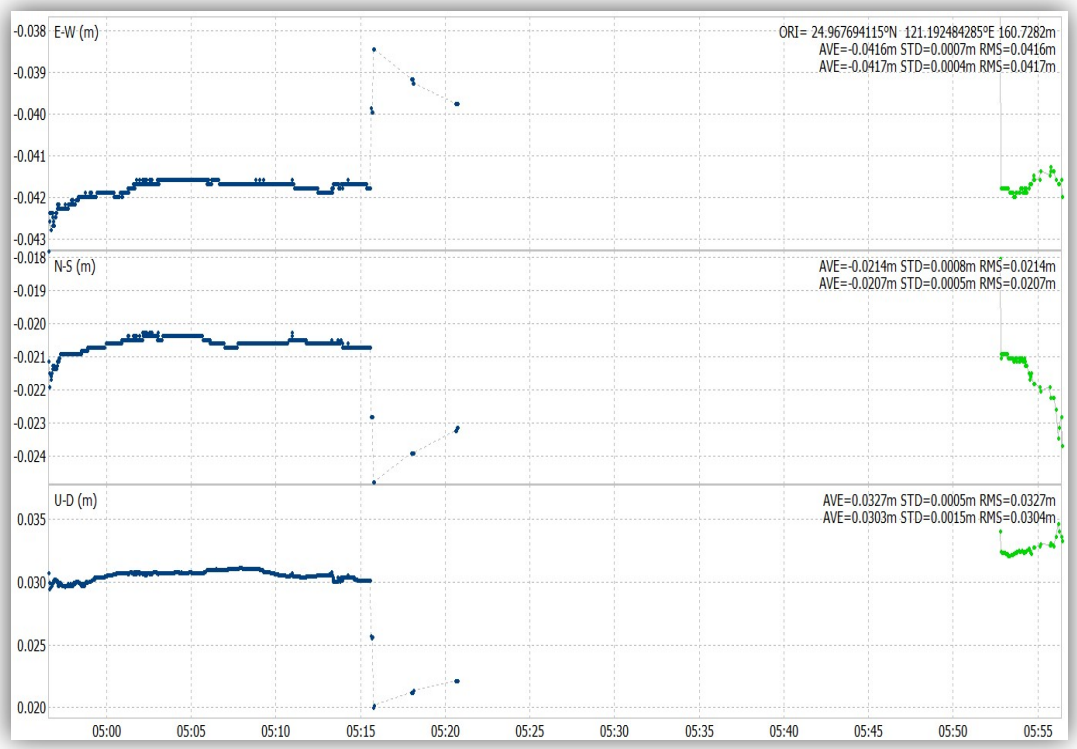


圖 3.12 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 04:56:34~2018/05/31 05:56:26 [GNSST]

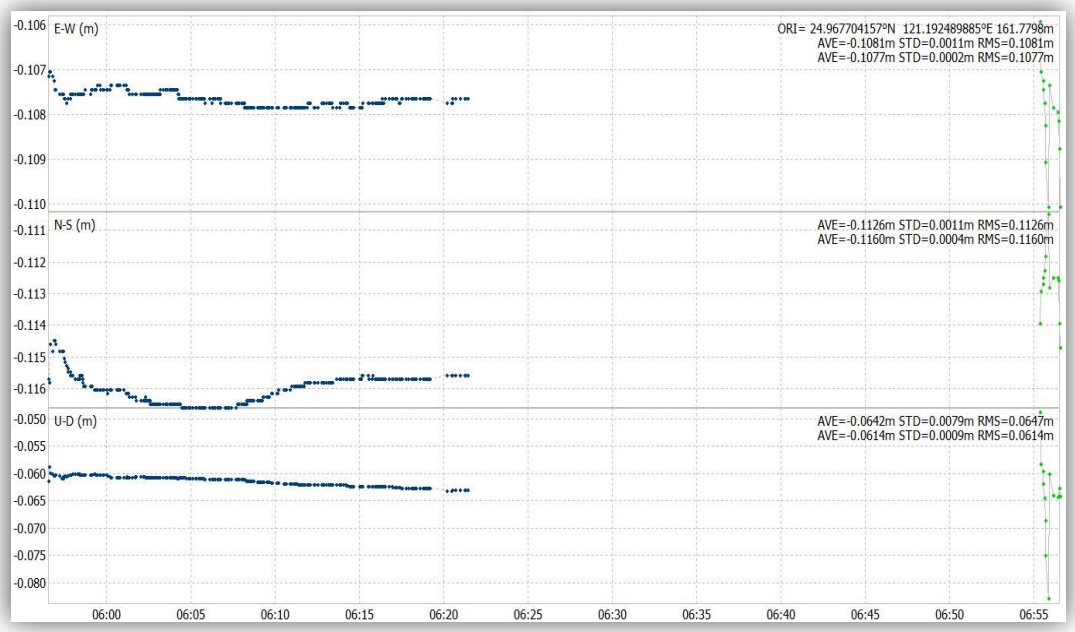


圖 3.13 超短基線 Static 解算定位座標(Position)成果，資料時間 2018/05/31 05:56:35~2018/05/31 06:56:33 [GNSST]

3.1.3 時域反射邊坡監測技術

時域反射儀（Time Domain Reflectometer）主要由階躍脈衝電壓產生器（step generator）、訊號採樣器(sampler) 與示波器(oscilloscope)組成，TDR 之基本原理與雷達相同，由製波器（step generator）發射一電磁脈衝進入同軸電纜（coaxial cable）及感測導波器（sensing waveguide），並由示波器記錄因感測導波器斷面變化或介質改變所產生之反射訊號，如圖 3.14 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線（同軸纜線）與感測導波器，導波器為同軸纜線之延伸，同時作為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可藉由反射訊號得知環境變化參數。透過不同感測導波器之設計與分析方法，TDR 技術可應用在不同的監測項目：

變形監測：

透過 TDR 纜線本身之幾何形狀改變造成反射訊號為原理，則可提供邊坡滑動位置定位監測 (Dowding et al. 1988；Dowding and Pierce 1994；Lin et al. 2009)，TDR 地滑計可以有效彌補傳統傾斜觀測管這方面的限制，對於薄的錯動面具有良好的檢測能力，可有效偵測滑動面位置，且有容易自動化之優點。雖然目前 TDR 地滑計之滑動位移量化部分受限於地層剪動模式與材料互制的複雜性與纜線電阻的影響，但可基於自動化與變形趨勢之定性觀察，以能提供即時預警之優勢。

介質界面型：

係利用 TDR 之反射訊號量測不同介質之界面位置，例如水位之監測(空氣與水界面)或土壤沖蝕監測(河流與河床土壤之界面)（Hollywood 1997; Yankielun and Zabilansky 1999; 楊培熙 2003）。目前計畫計畫主持人所研發之水位監測元件也以成功應用於中港大排抽水站水位監測使用（Chung et al. 2013）；Lin and Tang (2005) 則利用不同阻抗之界面移動發明一種 TDR 伸縮計。

介電分析型：

係將所欲研究之材料作為感測導波器內部介質，利用反射訊號之走時與導波器之長度計算電磁波速及相對應之介電度（Dielectric constant）（Topp et al. 1980），利用反射訊號大小量測材料之導電度（Electrical conductivity）(Lin et al. 2008)，由土壤的電學性質可進一步推估土壤之含水量（Lin 2003）或水中的含砂濃度（Chung et al. 2011），其中含砂濃度已經有效地提供河川泥砂觀測，以及水庫異重流行為掌握（Chung et al. 2013）。

時域反射法為傳輸線式監測技術，其應用範圍甚至比傳統電子感應器更廣，從地層的位移、錯動變形、土壤之含水量與電阻率、到水中的含砂濃度與導電度、河床沖刷、地下水位、孔隙水壓及雨量等（林志平等 2011）。因 TDR 監測主機置於地面或水面上，埋置於地下或水下的感測器為簡易機械的傳輸線或導波器，具有耐久性，且錯動變形感測具有大範圍分佈式監測功能。利用單一 TDR 主機透過多工器同時進行各種感測器的量測，形成一具成本效益與可靠度的整合型監測系統，宛如在地工結構中建構監控與損傷感應神經系統，再利用嵌入式系統與通訊模組構成智慧型的擷取、分析、

通報控制中心，形成完整的監控體系。以邊坡監測為例，圖 3.15 所示之監測系統概念包含了 TDR 邊坡錯動變形監測、TDR 地表與孔內伸縮計、TDR 雨量計以及地下水位計、另外也包含了 TDR 土壤含水量測；由於地下水位以及降雨等因素常造成岩石或土壤邊坡滑動，因此利用 TDR 可同時多工監測許多環境因子以及邊坡滑動歷時，以進一步達到邊坡滑動預警效果及破壞機制探討。

TDR 可以自動化地感應沿線任何位置是否產生錯動變形(localized deformation)，雖無法分辨錯動方向，但錯動深度可明確地獲得，錯動量亦可有效估計(Lin et al., 2009)，此為 TDR 技術之限制。但因邊坡穩定性問題主要關心錯動變形，而滑動方向通常可由地形與地質條件合理研判， 或藉由多孔的 TDR 監測達到 3D 滑動塊體的決定(Thuro et al., 2010)，因此其建置成本低、可一機多孔連續自動化監測，成為邊坡監測實務上很好的替代方案，或與傾度管達到良好的互補效果，且利用 TDR 連續監測之波形反射係數變化，可達到類似滑動速率之研判，更能有效作為預警門檻之參考。

本計畫主持人共同參與之科技部研究階段成果採用數值模擬方式加上大型剪力物理模型進行與測傾管共構的可行性評估（賴煜勳，2017），其研究之數值模擬概念以及纜線該放置於相對測傾管的 A 向或是 B 向如圖 3.16 所示。物理模型直剪盒設計概念需考量纜線受剪時影響範圍與受剪力影響長度，提供足夠大的直剪盒避免有邊界效應之產生，實體如圖 3.17 所示。

數值與物理模型實驗皆顯示，將纜線放在測傾管之 B 向且將兩者距離拉遠對於纜線的反應較靈敏；而小管徑的測傾管與纜線靈敏度較大；現地測試之資料顯示邊坡於初期產生訊號時共構纜線仍有反射訊號。

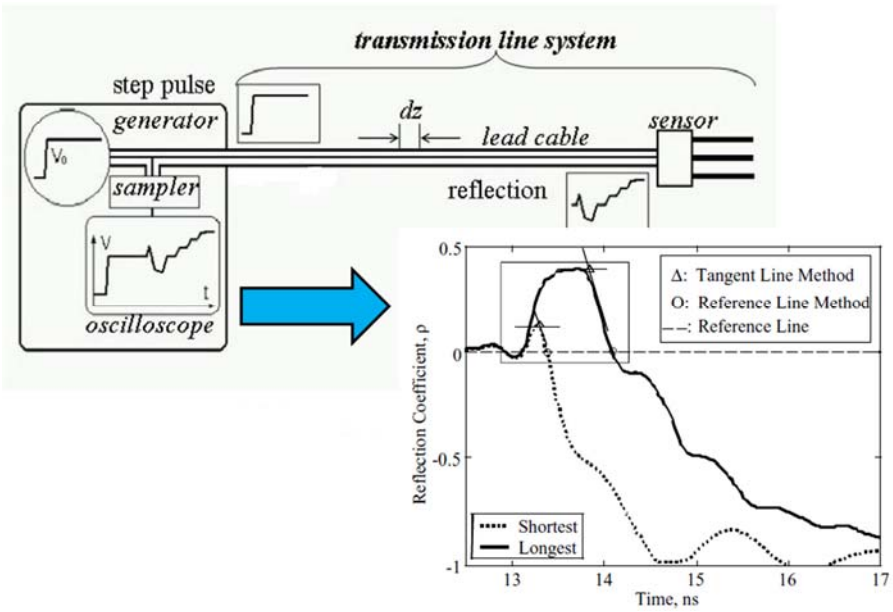


圖 3.14　時域反射儀之基本架構

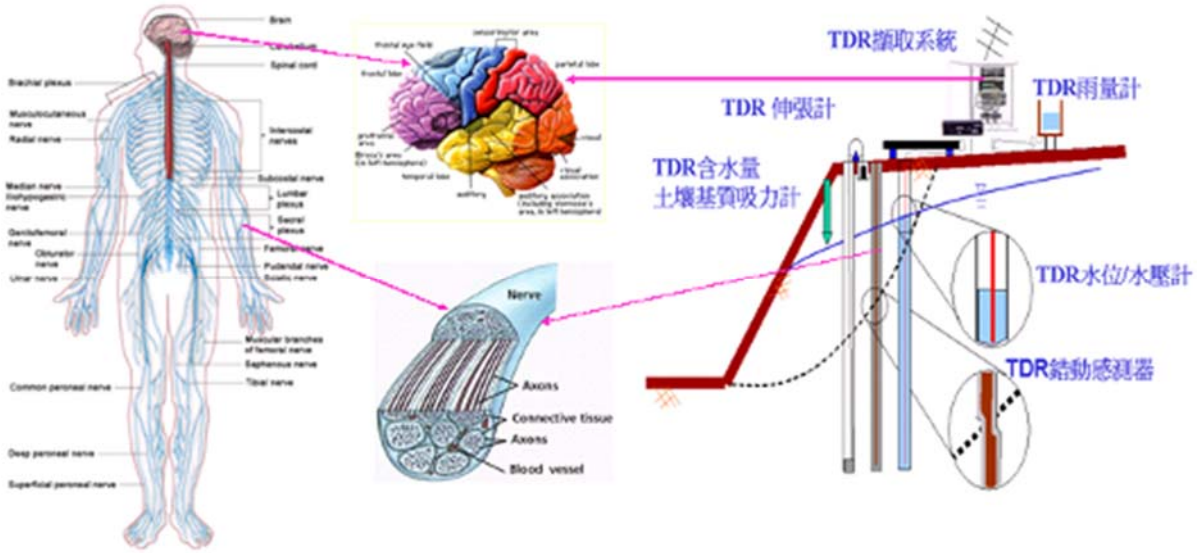


圖 3.15 利用 TDR 感測技術建構地工結構監控與損傷感應神經系統

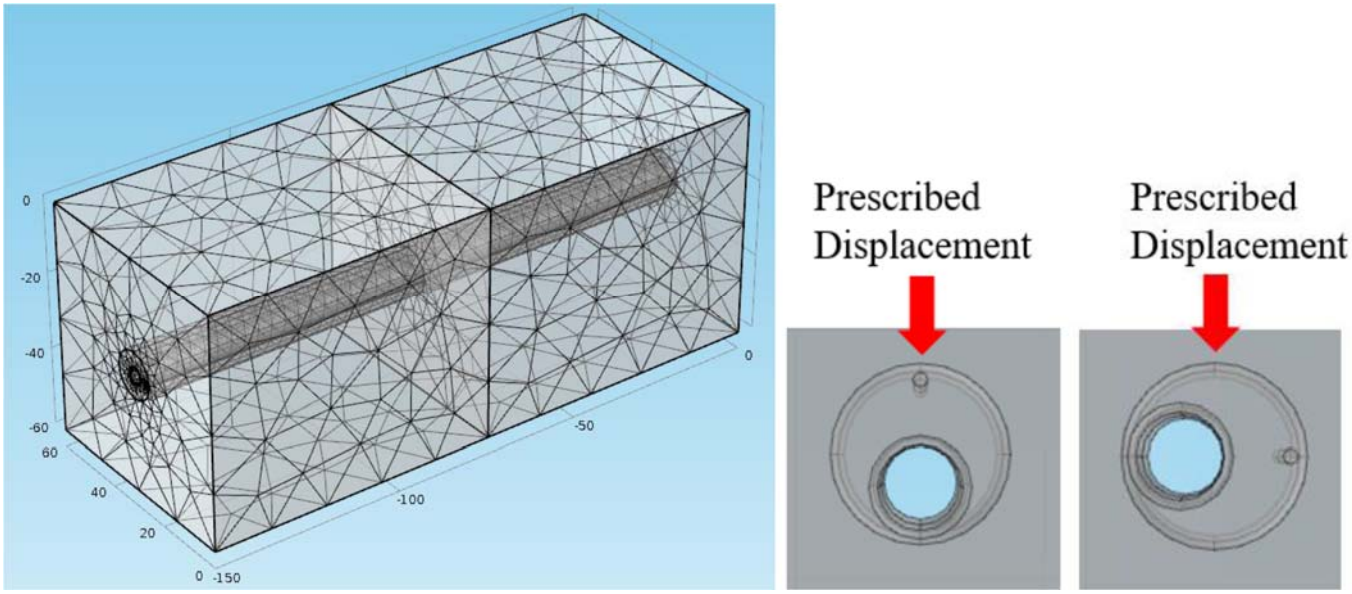


圖 3.16　時域反射纜線與測傾管共構之數模網格設定（賴煜勳，2017）

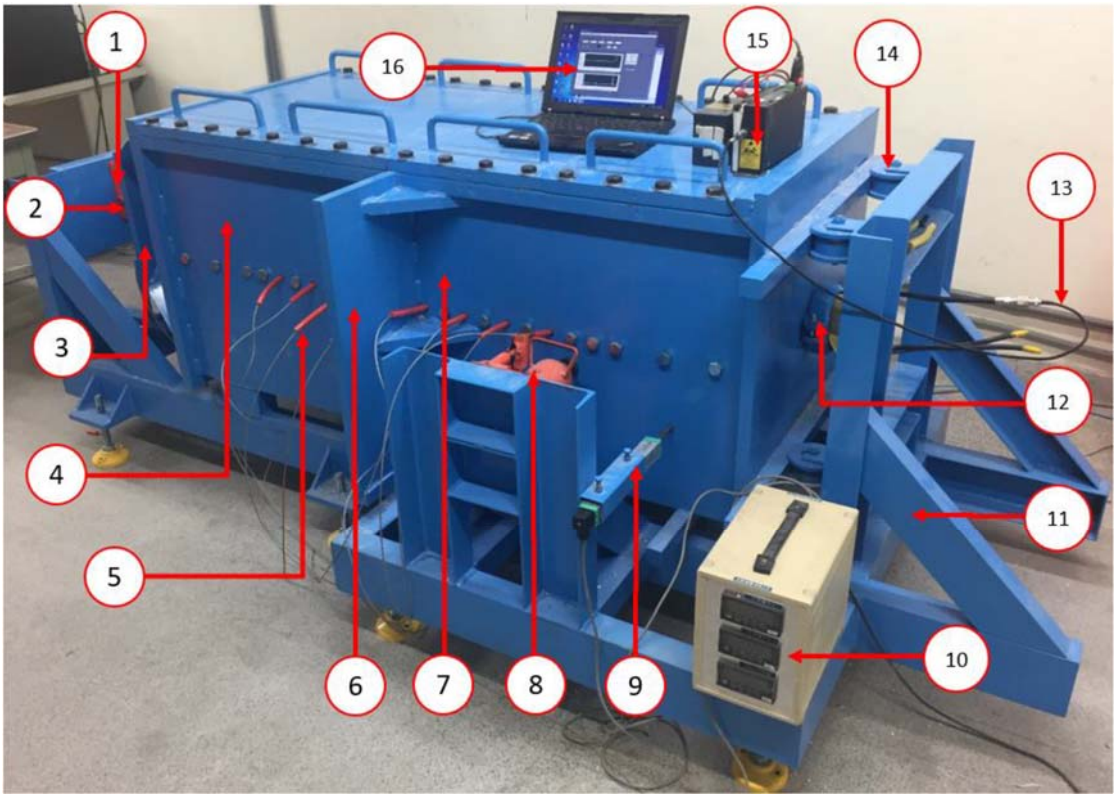


圖 3.17　時域反射纜線大型直剪盒（賴煜勳，2017）

3.1.4 離心模型試驗

圖 3.18 是國立中央大學土木系的地工離心機（NCU centrifuge），其容量為 100 g-ton，標稱旋轉半徑（nominal radius）3 m，屬於中尺度的地工離心機。配合離心機掛台空間（1 m 長、0.55 m 寬、0.72 m 高）及 4 kN 掛台載重的限制。試驗設備可分為離心機機械主體(Centrifuge Mechanical Assembly)、電源供應系統(Power Supply System)、操作者使用之桌面控制系統(Operator Desk Controller)三個部分，其中控制系統於 2017 年更新，能更有效率的進行離心模型試驗。

重力係使大地工程結構物受力變形與破壞的最主要因素，根據模型模擬相似性條件，模型內材料的應力狀態必須與原型(Prototype)材料的應力狀態相同，這是大地結構模型的主要特點，也是施作大地工程相關模型試驗的困難處。離心模型試驗乃利用人造離心力場，提升工程結構縮尺模型的自重，使其符合原型狀態，根據以下兩項物理原理，應證離心模型理論之正確性：

(1). 根據近代相對論，牛頓提出的重力及慣性力是等效的，所以原型承受重力場與縮尺模型承受離心慣性力場，兩者皆適用相同的物理效應。

(2). 材料的力學性質主要由電子雲內的電磁力控制，然而電磁力比重力及離心力大的許多，因此改變離心力場並不會使土壤之力學性質改變。

物理模型可以觀察破壞機制、檢核數值或理論模型的正確性且具重複性，但仍然存在尺度效應(Scale Effect) 此一缺點。為克服此缺點，在進行縮尺模型試驗時，必需使模型與原型的應力條件完全相同，才能使模型的受力行為與原型一致。離心模型與原型之縮尺

比詳列如表 3.2。本研究使用甲基纖維素(Methocel Cellulose Ether, MCE)製作不同黏滯度的水溶液，取代純水作為模型的孔隙流體。MCE 溶液的密度與純水幾乎相同，所以浮力效應與純水亦幾乎相同。進行動態試驗時，MCE 溶液的加入不會使砂土的剪力模數改變，然而當剪應變超過時，黏滯阻尼的影響亦可忽略，

模型模擬(Modeling of Models)的概念，是指將原型以不同比例之縮尺模型分別於對應的 g 值進行離心模型試驗，探討影響離心模型試驗之誤差，模型模擬的概念可以圖 3.19 表示。假設現地基礎其寬度為 1,000 cm，即圖中之 A1 點，以 1/10 縮尺模型(基礎模型寬度 100 cm)在 10g 的離心力場或以 1/100 縮尺模型 (基礎模型寬度 10 cm)在 100g 的離心力場中進行離心模型試驗，即圖中的 A2 與 A3，則 A2 為 A1 的模型，同理 A3 為 A2 以及 A1 的模型，所以 A2 與 A3 的力學行為應該都與原型 A1 相同。但是當試驗土壤顆粒的大小未經縮尺時，各基礎模型所接觸的砂顆粒數量就會不相同，這會影響到模型表現的力學行為。於不同尺寸的模型，其顆粒尺寸效應不盡相同，因此利用離心模型試驗的結果來解釋原型之力學行為，即為一種模型模擬的途徑。

除了物理模型以外，亦可利用現地之觀測資料來進行回饋分析，但是現地試驗的工程浩大且浪費資源，因此利用模型模擬來檢核較為可行。圖 3.2-16 中，C2、B2、A2 代表在 10g 的離心力場中，分別進行基礎寬度為 1 cm、10 cm 以及 100 cm 的模型試驗會有尺寸效應。圖 3.19 中的 C1、B2、A3 代表 1/100 縮尺模型分別在 1g、10g 以及 100g 進行模型試驗則會有應力大小不同的效應。一個完整有用的離心模型試驗，必須考慮模型尺寸效應及應力大小效應，利用模型模擬預測原型的力學行為。

整體而言，離心模型試驗具有下列幾項優點：

(1). 降低模型尺寸。

(2). 模型與原型承受相同的應力狀態與應力路徑。

(3). 可與數值模擬之結果相互驗證。

表 3.2　離心模型與原型之縮尺比

物理量	單位	縮尺比 (離心模型/原型)
應力(Stress)	kPa	1
應變(Strain)	-	1
長度(Linear Dimension)	m	1/N
面積(Area)	m^2	$1/N^2$
體積(Volume)	m^3	$1/N^3$
質量(Mass)	kg	$1/N^3$
密度(Density)	kg/ m^3	1
單位重(Unit Weight)	N/ m^3	N
力(Force)	N	$1/N^2$
壓密時間(Time: Diffuse)	sec	$1/N^2$
時間(Time: Dynamic)	sec	1/N
加速度(Acceleration)	m/sec^2	N
頻率(Frequency)	1/s	N



圖 3.18 中央大學土木系之地工離心機

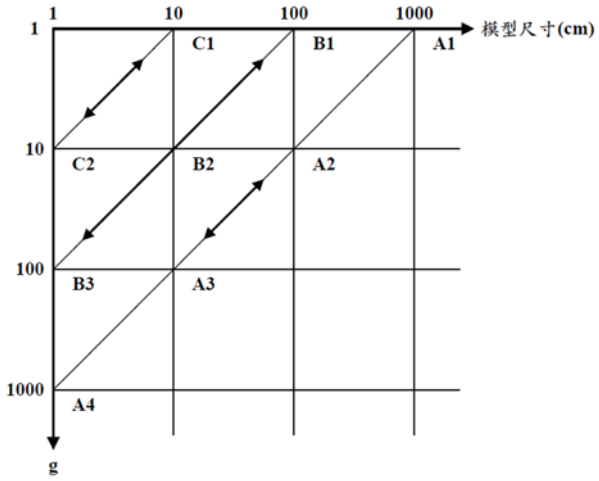


圖 3.19 離心機模型模擬概念圖

3.2 L1+L5 頻段 GNSS RTK 測試規劃

目前 GNSS 衛星訊號有兩組分別是 L1 及 L2 頻率，L1 是民用（對大眾公開）、L2 是軍用（不公開），新的 GNSS 衛星則發送第三組民用訊號(L5)，如 圖 3.20 所示。GNSS、Galiao、QZSS 等支援 L5/E5 10Mhz 的衛星總數到達了三十顆。 半導體大廠博通（Broadcom）表示代號為 BCM47755 的 GNSS 晶片，支援下列頻段接收：

(1). GPS—L1 C/A + L5

(2). Galileo—E1 + E5a

(3). QZSS—L1 + L5

(4). GLONASS—L1

(5). BeiDou—B1

相較 L1 的定位訊號，L5 在都市中造成的多重路徑傳播影響較小，如圖 3.21 所示。小米 9/8（https://www.mi.com/tw/mi9/）所採用的 L1+L5 雙頻觀測量主要為消除電離層延遲，利用消電離層組合的虛擬觀測量來進行單點定位能夠有效提升定位的精度。

透過 android Raw GNSS Measurements 協作平台（https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss），可以利用 GNSS Logger APP (圖 3.22) 取得小米 9/8 手機之 GNSS 原始相位資料；另外如 Geo++ RINEX Logger 等 App 也支援 L1+L5 雙頻資料收錄；加上目前 RTKLIB 新版程式已顯示可選擇 GNSS RTK L1+L5 以及 L1+L2+L5 定位選項（圖 3.23），因此本研究將參考之計畫主持人之階段性成果(鐘志忠，2018)，將進行初步 GNSS RTK L1+L5 超短基線測試說明如下：

(1). 本項實驗初期是以靜態模式進行衛星訊號資料接收試驗，該項規劃是為確認能否穩定資料確認，而其中，為避免毗鄰兩組天線盤中較高的一組干擾低者，特意使兩者保持一段距離，除了避免遮蔽訊號狀況發生，更是降低多路徑效應的風險。

(2). 本實驗以線性滑軌，進行定位精度檢核實驗。本實驗以一固定長度(約100cm)之可搬動式滑軌，並將規格相同之成對 GNSS 天線分別固鎖於一對可移動鎖入式基座，請見圖 3.24。因滑軌雖於垂直於軸心線方向具側向刻度，但是該實驗架設計本身具側向自由度，須由基座兩側之長螺絲進行高程調整，因此藉由圓形水準氣泡儀輔以控制側向傾角，期望兩者能於對空方向具有相同之傾角，達到減少衛星訊號接收傾度不一致所造成之系統誤差。

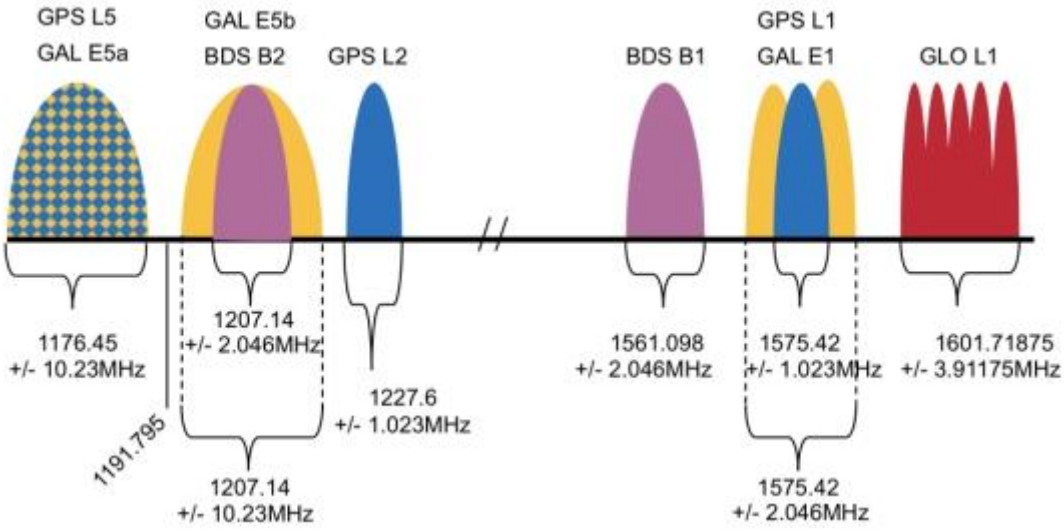


圖 3.20　GNSS 不同頻段示意

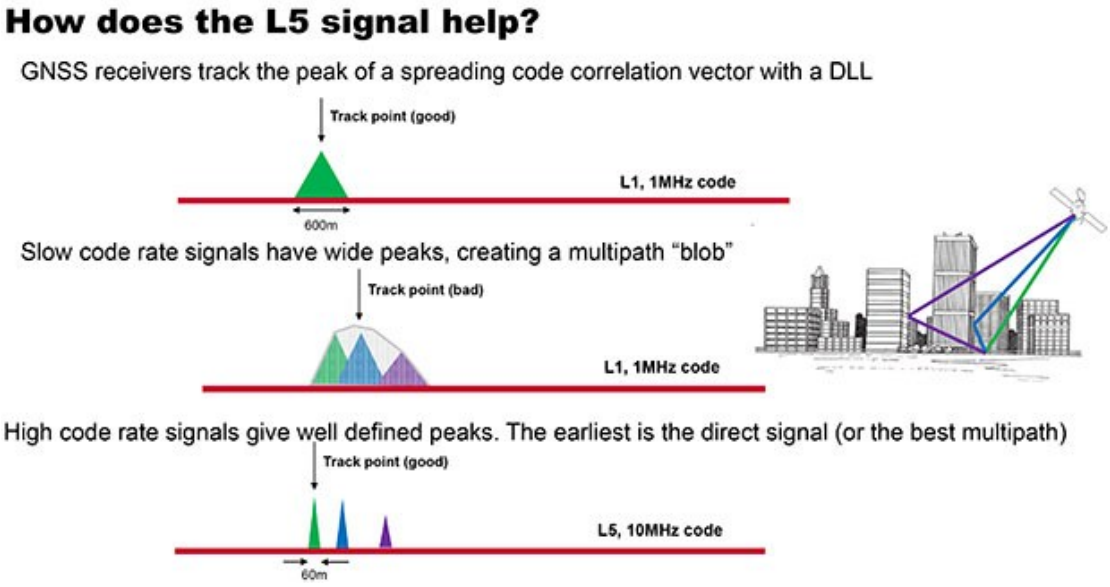


圖 3.21　GNSS L5 頻段適用性差異比較

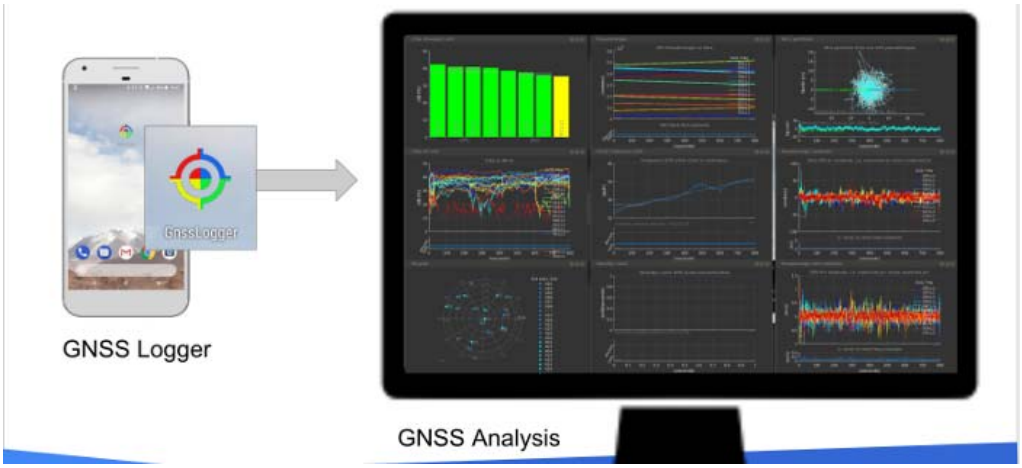


圖 3.22 Android GNSS Logger and GNSS Analysis

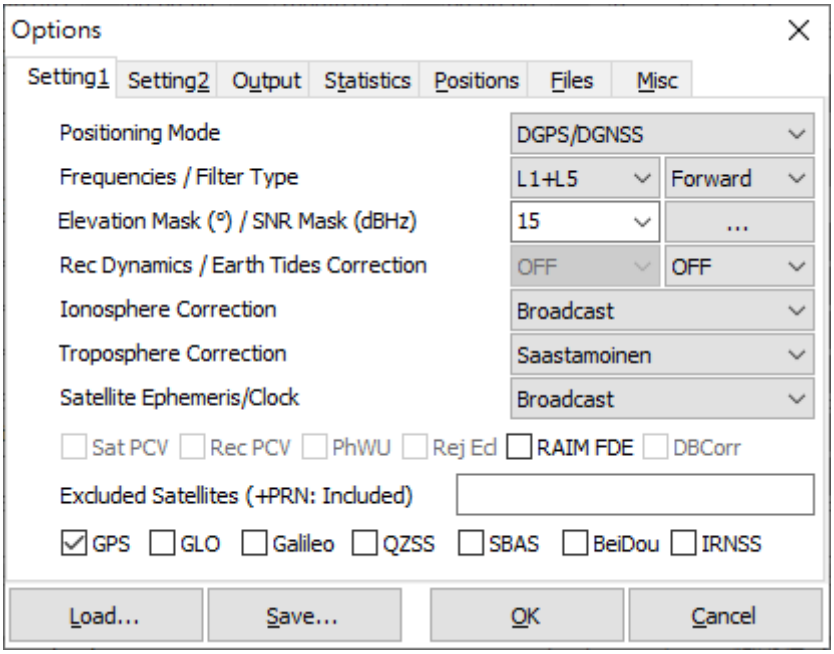


圖 3.23 RTKLIB DGNSS L1+L5 Analysis

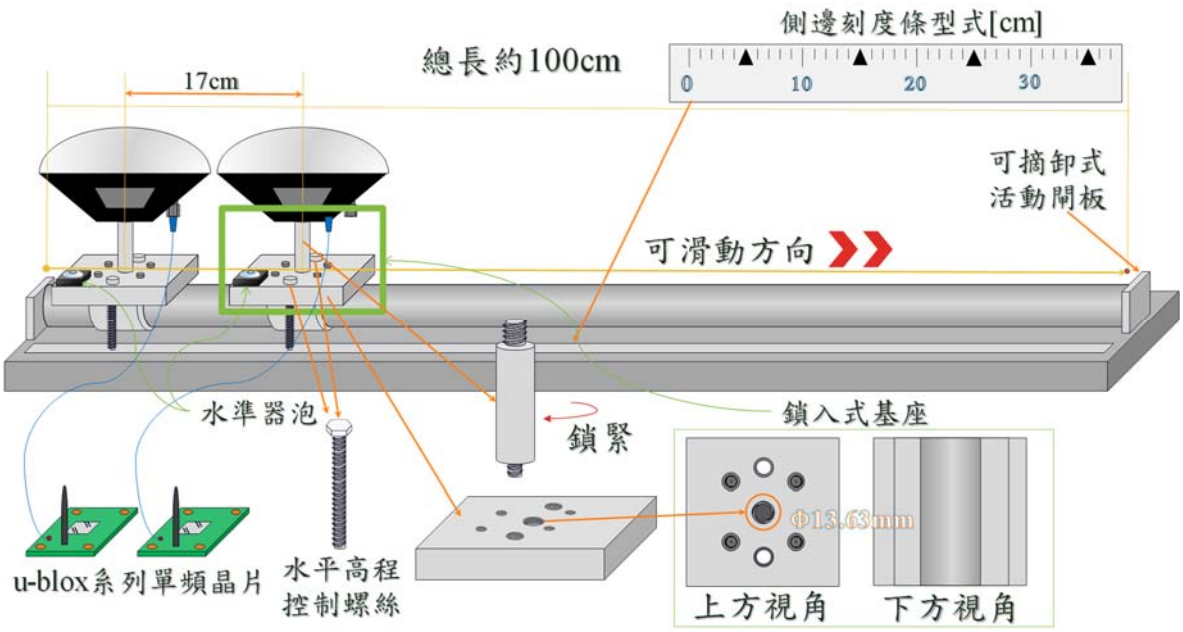


圖 3.24 L1&L5 超短基線線性定位精度檢核實驗架構

3.3 TDR 與測傾管共構於離心機測試規劃

本研究所沿用之錯動模擬試驗箱如圖 3.25 所示（洪汶宜等人，2014），最大外部尺寸為 1 m 長、0.53 m 寬、0.68 m 高，試驗箱內部土壤裝盛區尺寸為 0.74 m 長、0.30 m 寬、0.33 m 高，L 型推板尺寸為長度 0.15 m、寬度 0.30 m、高度 0.25 m，試驗箱側壁板配置 0.60 m 長、0.28 m 寬、0.035 m 厚之壓克力觀景窗，供試驗過程進行攝影觀測或試驗完成後之剖面描繪與拍照。為達到堅固與輕量化的目的，除了觀景窗以外，箱體其餘部分皆由鋁合金材料製成。

此一錯動模擬試驗箱訂製前，箱體的長側板、短側板、底板與壓克力觀景窗皆以數值軟體進行分析（洪汶宜等人，2014），瞭解箱體於 80 g 離心力場並受到 300 mm 厚砂土之土壓力時，鋁合金箱壁的最大變形量皆小於受力側板高的一百分之一，避免土壤因箱體側向變形造成土壓力的改變。

錯動模擬試驗箱使用伺服馬達，可調整模擬滑動速率介於 0-2.5 mm/min 間，上下垂直錯動位移可達到 550 mm，可模擬沿 60 度傾角滑動。現場建

物依縮尺原理製作離心縮尺模型，從 1 g 至高倍地球重力場之離心力場中進行物理模型模擬。

試體製作利用空氣霣降法製作砂土模型試體，以移動式霣降儀配合固定落距進行試體製作，製作之方法及步驟將敘述於下：

(1). 製作試體之前，事先確定需埋設之感測器個數。

(2). 將組立好的模型試驗箱置於在可升降之推車上，並置於鋼管下方，微調鋼管出口至試體表面的距離，調整時避免柔性塑膠管有彎曲或折到的情形，以此為砂土霣降高度。

(3). 將試驗用砂土，倒入霣降儀漏斗內，待裝入足夠之砂土後，開啟鋼管管口開始進行霣降。

(4). 霣降路徑採用 U 型迴圈路徑法，如圖 3.26 所示。

(5). 使各層之土壤表面保持平整，以確保霣降高度維持一定。

(6). 霣降至預定高度時，放置孔隙水壓計，並確定感測器之軸向與試驗箱長軸平行，並小心固定訊號線。重複步驟 3、4、5 直到砂土層達到預定高度為止。

(7). 由吊秤量得模型試驗箱內之砂土重，再計算得模型砂土層整體之相對密度。

本計畫預定採用的 TDR 纜線與模擬用之測傾管則是透過如圖 3.16 之不同配置方式進行後續的貫入，從不同的斷層位移控制進行 TDR 波形的擷取，藉以瞭解共構行為。TDR 系統與離心機整合可參考 Xu and Pierce (2013) 經驗進行改良，如圖 3.27，以新式 TDR3000 之設備透過目前光纖資料擷取系統進行資料整合，如圖 3.28 所示，嘗試建立國內首座 TDR 於離心機之整合測試，以 3D 印表機列印相關配置，探討 TDR 與測傾管共構的精進評估。

本試驗採用的黏滯液體是由甲基纖維素與自來水等比例調和而成，而所

用之甲基纖維素為工業級的甲基纖維素。藉由奧士瓦黏度計試驗(Ostwald`s Viscometer)來測定黏滯倍數與工業級甲基纖維素的重量百分濃度之關係，當黏滯度要為水的黏滯係數 80 倍時，甲基纖維素與水需以 0.46%的重量百分濃度比例混和。

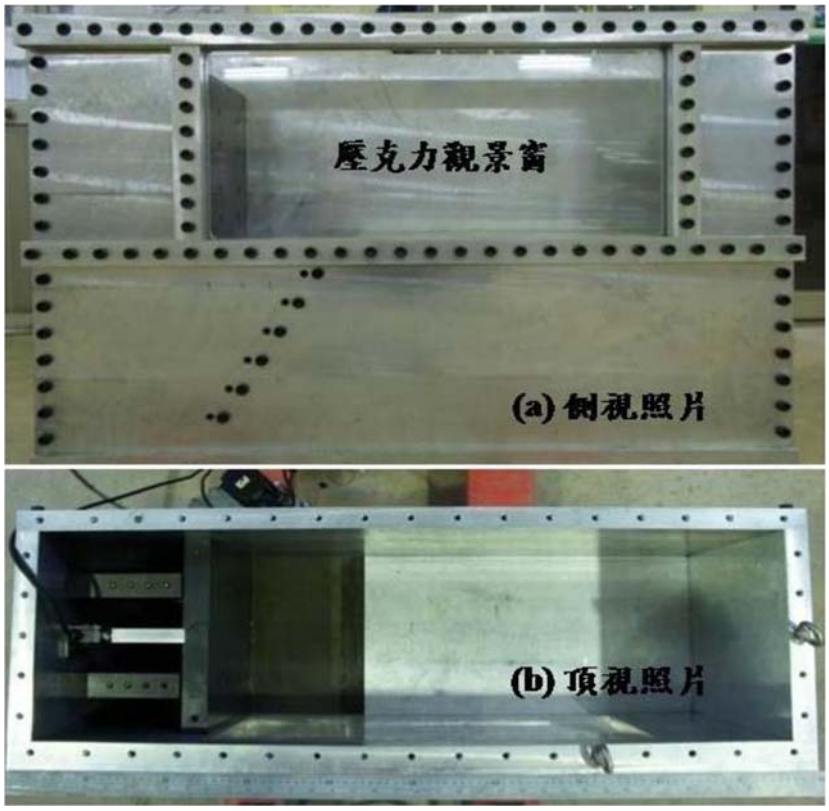


圖 3.25 離心機錯動模擬試驗箱

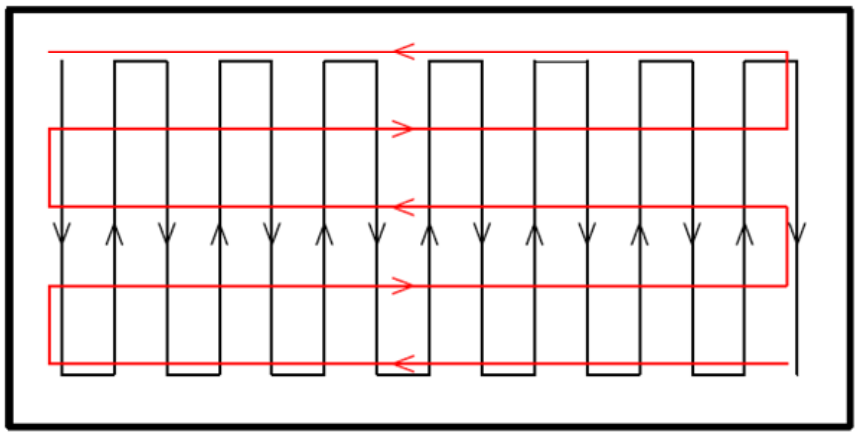


圖 3.26 U 型迴圈路徑實降法示意圖

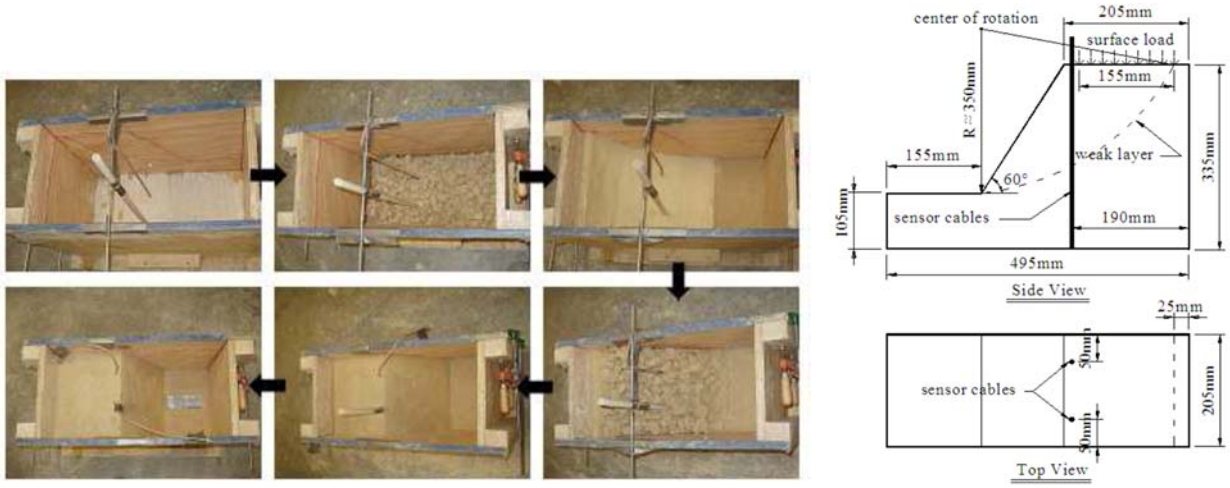


圖 3.27　TDR 纜線於離心機坡地滑動模擬配置(Xu and Pierce, 2013)



圖 3.28　NCU 離心機軸心位置既有資料擷取器主機

3.4 現地觀測站測試與淺/深層監測整合設置

本計畫主持人目前之現地試驗場址為阿里山之坡地，阿里山於 2009 年莫拉克颱風期間，因強降雨與高累積雨量，使得多處位置山崩，造成對外橋樑與道路中斷，因此建立阿里山地區邊坡災害預警機制，為目前相關研究主要標的。阿里山地區範圍包含雲嘉地區之古坑、梅山、竹崎、番路、阿里山，

以及信義鄉等鄉鎮高。其高程主要分佈在 1,000～1,500 m 之間；若依「水土保持技術規範」坡度分為七級之分類標準，上述區域內四與五級坡高達該區總面積一半以上。地質方面，上述區域之地質分佈以桂竹林層與南莊層分佈最廣，接著為卓蘭層、錦水頁岩等地層，地層分佈較廣之南莊層為砂岩和頁岩互層（李嶸泰等人，2012）。

以中央氣象局小公田雨量站 1967~2015 年平均雨量資料，推估本研究區附近之年平均雨量約 3217.2 mm，如表 3.3 及圖 3.29 所示。平均年降雨日數超過 150 天。約 70%的年降雨量集中在 4~9 月的雨季，此現象與台灣梅雨季及夏季颱風有關;為誘發地滑災害之季節；相較於 10 月~隔年 3 月為乾季，為地滑活動較少之季節(張佑新，2008)。

台 18 線(阿里山公路)近年來以莫拉克風災影響之最，五彎仔路段(台 18 線 42K~46K)為公路中持續位移的地滑區，2003 年 6 月發生大規模崩塌導致道路中斷，因此道路主管機關進行台 18 線改線工程，從原有的五彎演變成現今的七彎（圖 3.30）。陳世達等人（2008）蒐集相關鑽探資料，描繪出 A-A 與 B-B 線段之地質剖面圖，如圖 3.31 與圖 3.32 所示。N2 區塊其滑動深度約 25m，滑動塊體 N3 滑動深度約 50m 處，屬於深層滑動。

王鐘緯（2017）以基本高程差異圖為概念，搭配 2010、2014 年兩時期台 18 線五彎仔地區空載光達掃描資料為主體（圖 3.33），藉 GIS 地理資訊系統軟體分析各滑動塊體流失土方量做為判斷對台 18 線影響嚴重性之依據；再輔以該地區傾斜管監測資料（圖 3.34）判釋地層變化情形。其結果顯示高程的變化集中於 N2、N3、N4 等兩滑動塊體；N1 滑動塊體根據近期的現地監測成果，目前位移趨勢並不明顯，是處於一個相對穩定的狀態；N2 與 N4 滑動塊體係包含於 N3 滑動塊體內，深度相對較淺，但 3 者滑動現象最為明顯。

青山工程顧問有限公司(2014)基於五彎仔地下水位（圖 3.34）量測結果

顯示，04-5 與 B-9 在汛期前後地下水位相差甚大，而兩觀測管距離相距甚近，約在 40~50m，代表該地區在汛期有大量地下水補注，目前已完成多處集水井進行地下水排水使用。另外 N2 塊體在經歷 2016 梅姬颱風後台 18 線舊四彎及下邊坡產生大範圍的塌陷。

基於上述相關基本資料，本計畫主持人已進行實際現場試驗場址之踏勘（圖 3.35），因 N2 與 N4 滑動塊體雖然受 N3 滑動塊體深度滑動影響，但因地層表層仍有崩積土之影響，加上歷史降雨事件與強度顯著，初步建議於 N2 與 N4 滑動塊體間或是上邊坡邊緣建置淺層崩塌行為監測。另外前期研究提出之單頻 GNSS 定位因需有至少一處不動或已知參考點，因此可初步建議於延伸現地監測計畫（公路總局）所使用之 G-1、G-2 與 G-3 觀測點規劃作為參考點位置。

本研究加入 TDR 地滑監測，嘗試除既有淺層滑動監測之外，也一併透過系統並用方式，延伸 TDR 深層自動化滑動監測，提高預警效果。由於坡地各有其地質特殊性，且 TDR 對於位移量化之轉換仍有其限制，因此目前主持人相關研究已經初步建議透過 TDR 即時監測之優勢，利用高取樣頻率特性(以每三小時為例)以及資料自動化流程，可針對當 TDR 波形反射係數前後時間差異量增加，意即山崩滑動持續，提出連續警戒直到反射係數變化趨緩。GNSS 雖可得到坡地表面位移，但其警戒值訂定方向也將以 TDR 方法為借鏡，同步透過即時監測方式探討變化趨勢。

因此基於上述 TDR 反射係數變化與位移趨勢變化之意見回覆，本研究將以 TDR 之反射係數變化作為第一階段之基本警戒門檻，其 TDR 優勢可以兼顧淺深層滑動監測：後續建議可配合淺層崩塌之傾度量測為地表位移表徵(由於傾度量測取樣頻率較 GNSS 高)，作為第二階段之警戒確立；更甚者結合 GNSS 位移以及趨勢資訊(由於預期 GNSS 解算關係，其資料頻率一天僅有 1~2 筆)，作為第三階段之警戒確立。如此一來能以不同階段進行警

戒，提高實際邊坡滑動之行為判釋準確度。以本計畫執行範疇，可初步進行淺層與深層監測成果彙整，藉以回饋相關監測整合參考。

表 3.3 歷年平均月雨量表(水利署)

	一月	二月	三月	四月	五月	六月
月平均雨量(mm)	32.1	52.2	79.7	138.2	425	544.3
	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
月平均雨量(mm)	609.6	756.7	414.8	104	29.4	31

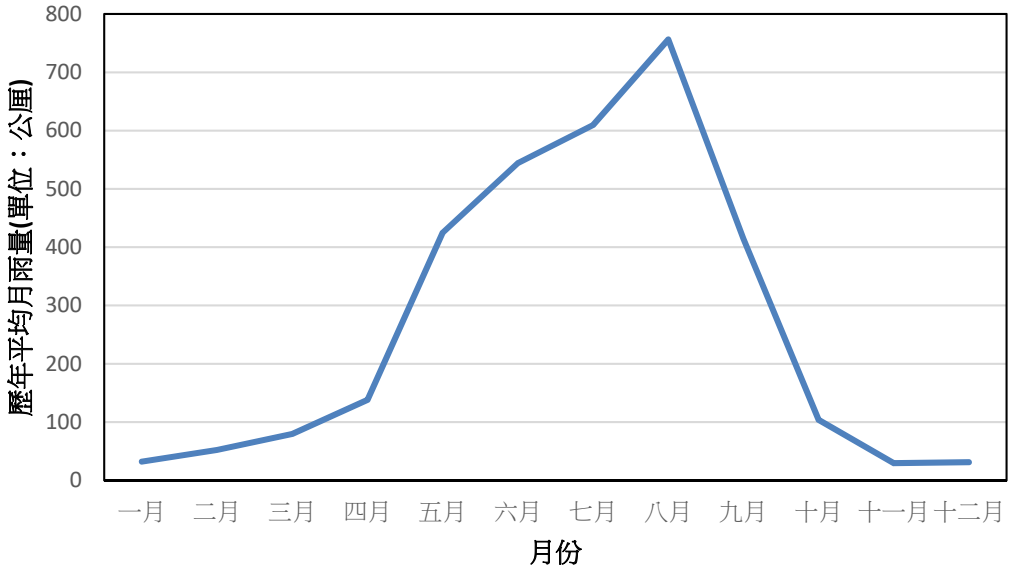


圖 3.29 歷年平均月雨量(水利署)

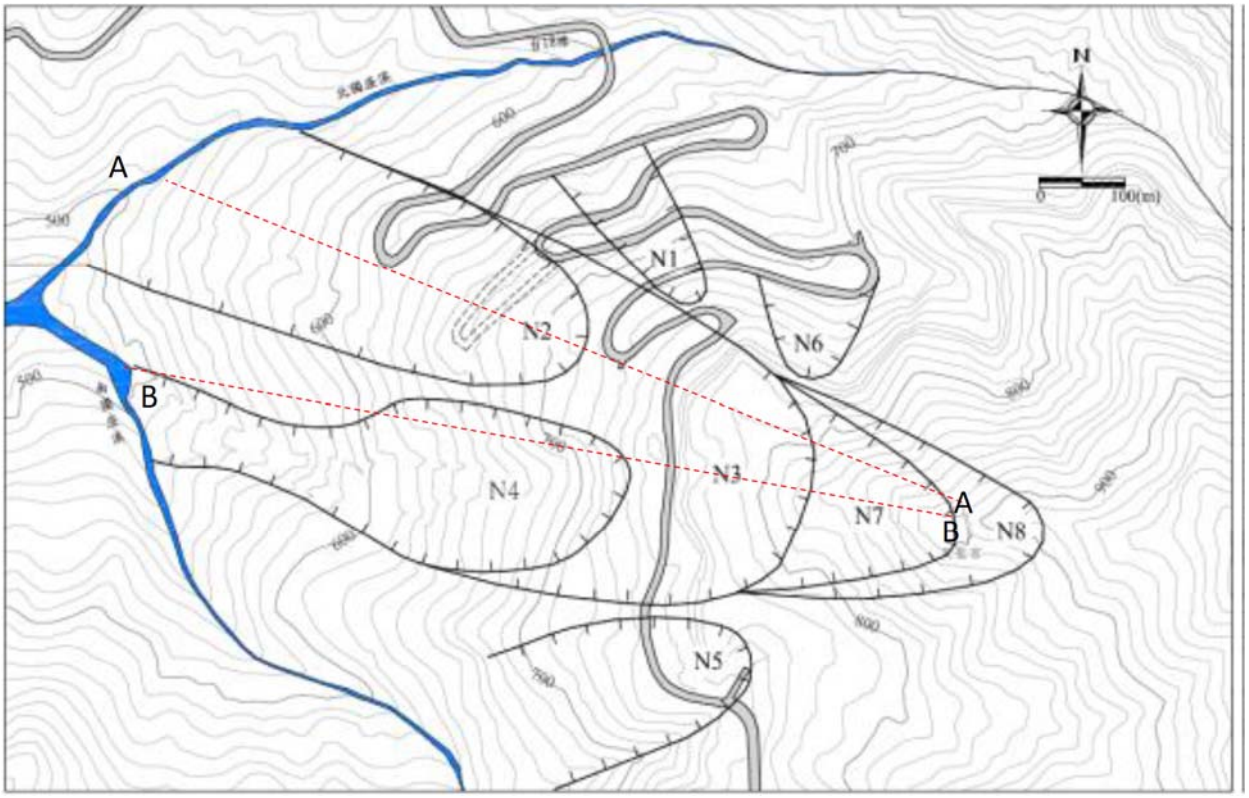


圖 3.30 五彎仔地區地滑區塊（公路總局）

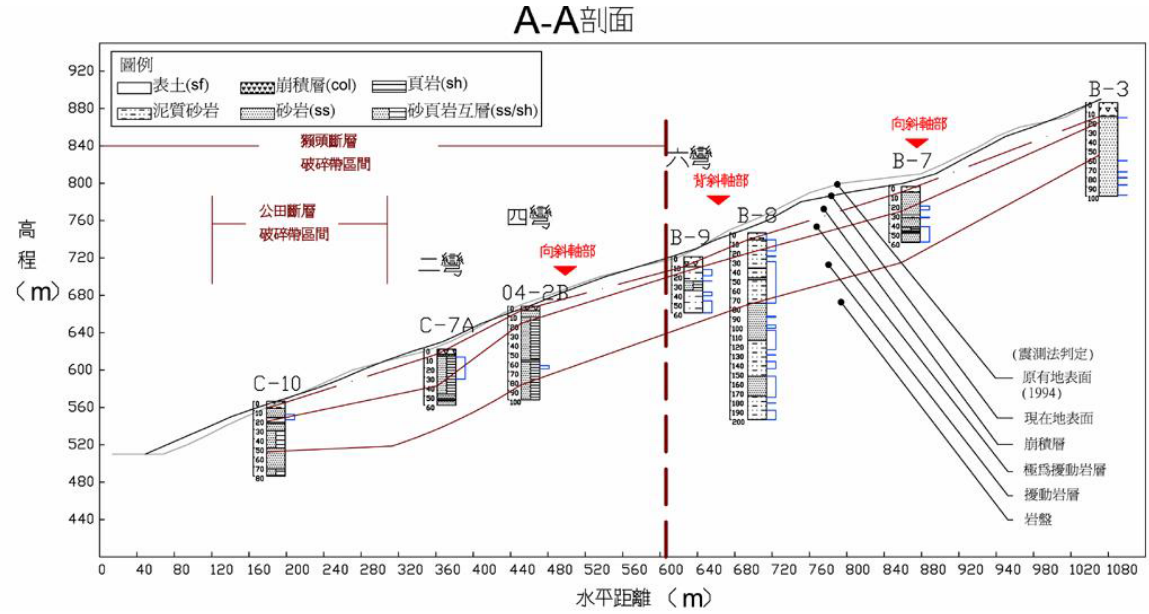


圖 3.31 五彎仔地區 A-A 地質剖面（陳世達等人 2008）

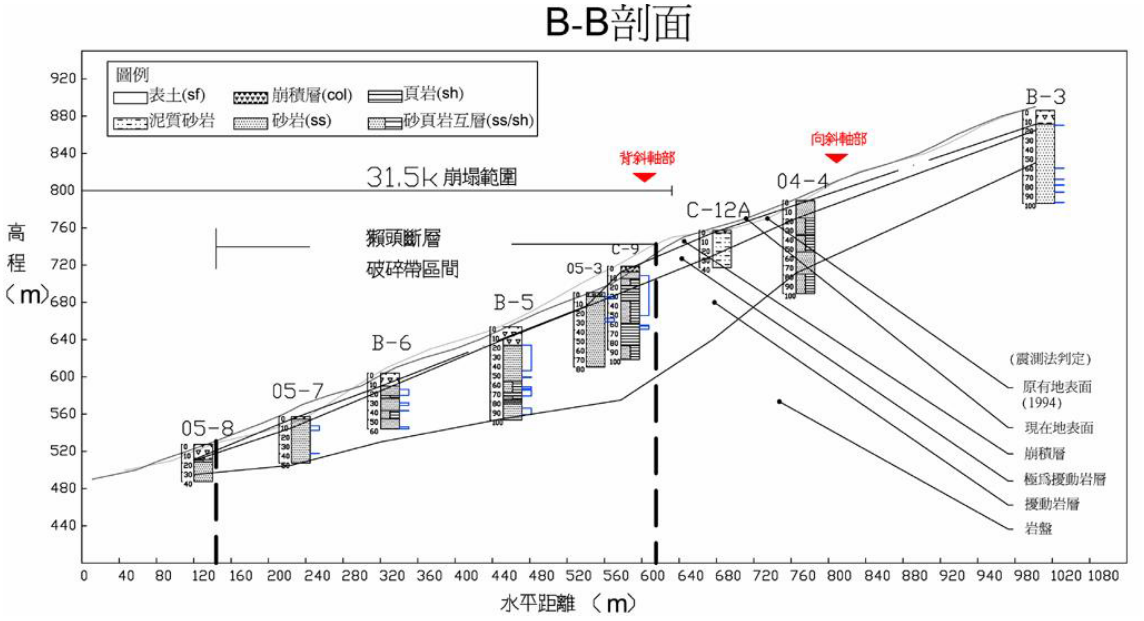


圖 3.32 五彎仔地區 B-B 地質剖面（陳世達等人 2008）

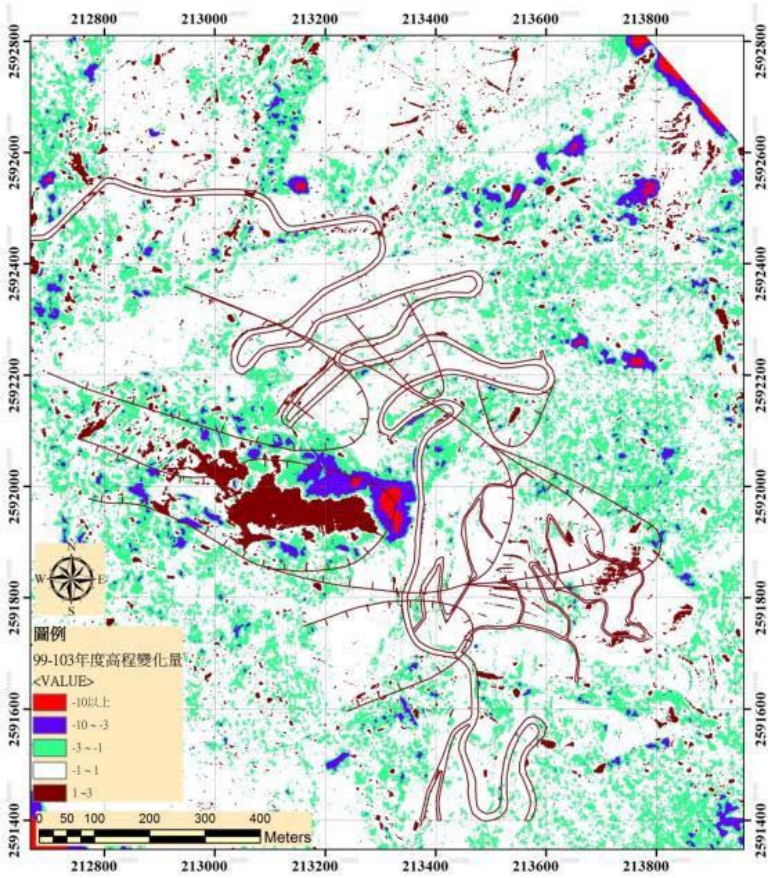


圖 3.33 五彎仔地區前後期高程變異圖（王鐘緯 2017）

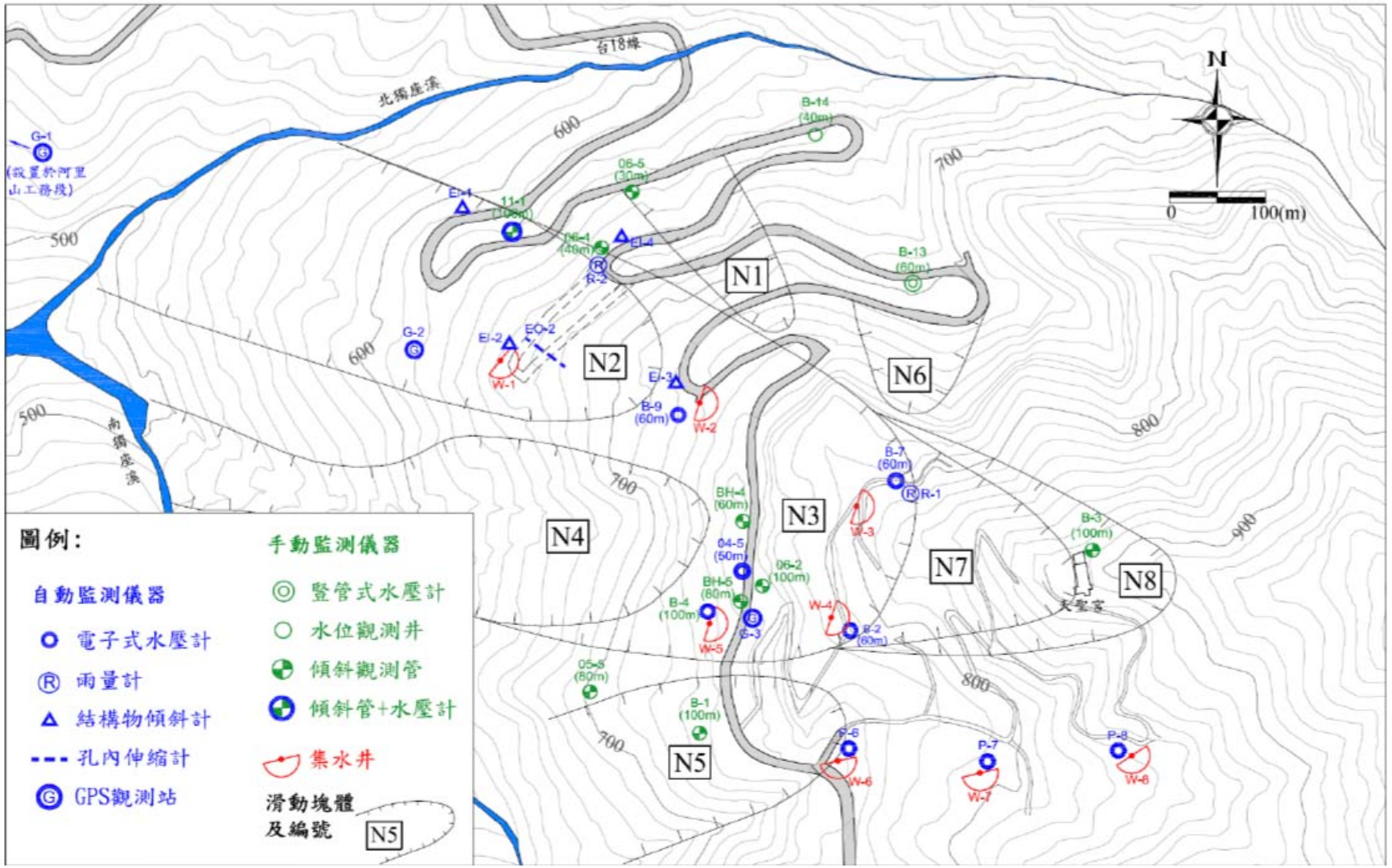


圖 3.34 五彎仔地區地滑區塊與現有相關監測儀器平面配置圖（公路總局)



圖 3.35 五彎仔地區 N4 地滑區東邊邊緣表面噴混擬土工程（2017/12/8 與 2018/9/14 拍攝）

第四章執行成果

4.1 GNSS RTK 初步測試成果

4.1.1 小米 L1+L5 頻段 GNSS 測試

本研究初步使用小米 Mi8 手機進行 L1 與 L5 雙頻 GNSS 之可行性評估，首先針對即時 RTK kinematic 定位解算部分(基準站使用 TWTF)，本案使用車載方式進行測試，測試之路線包含由桃園經雪山隧道至蘇澳，其 RTK 解算成果如圖 4.1 所示，大至 GNSS 點位資料均有 Q2(83.3%)至 Q1(16.7%)精度，因此套疊至 google map 上，均可有效與高速公路以及地方公路線型吻合；第二測試之路線由桃園經高速公路至南投水保局，其 RTK 解算成果如圖 4.2 所示，大至 GNSS 點位資料均有 Q2(90%)至 Q1(10%)精度，因此套疊至 google map 上，同樣其解算成果與高速公路以及地方公路線型吻合。

本研究另外也基於小米 Mi8 手機，於 2019/05/10 以及 2019/07/15 在阿里山公路 45K 旁測站位置進行 RTK static 解算，其基準站採用虛擬基準站（Virtual Base Station，VBS）做為 RTK 主站使用，其 VBS 之卡式座標為-2984620.568, 5038385.238, 2520733.084，約略座在阿里山公路 45K 道路。兩次 RTK 解算成果如圖 4.3 與圖 4.4，其中 2019/05/10 使用 L1 與 L5 解算成果，其標準偏差(STD)約略好於單獨使用 L1 解算成果，然而 2019/07/15 測試部分則無顯著差異，主要因為當天測試除受限於手機因過熱保護機制而停止了 GNSS 紀錄動作外，實際上 L5 觀測衛星數量僅有四組，如圖 4.5 所示，因此 L1 與 L5 解算成果優勢不彰。

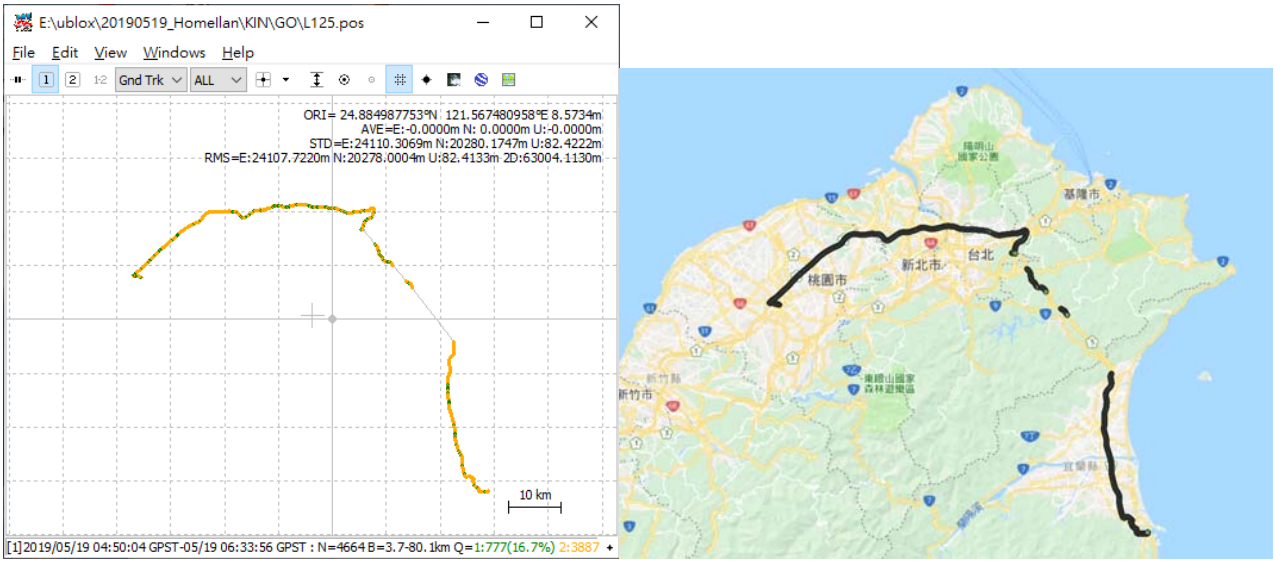


圖 4.1 2019/05/19 即時 L1+L5 頻段 GNSS RTK Kinematic 解算成果(基準站 TWTF)

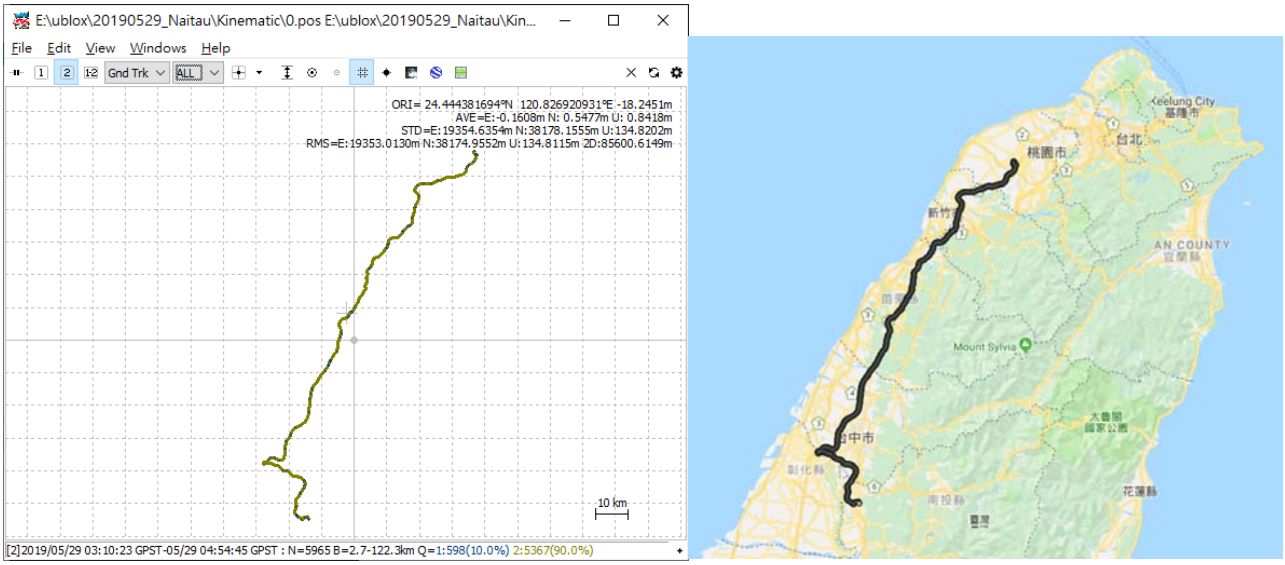


圖 4.2 2019/05/29 即時 L1+L5 頻段 GNSS RTK Kinematic 解算成果(基準站 TWTF)

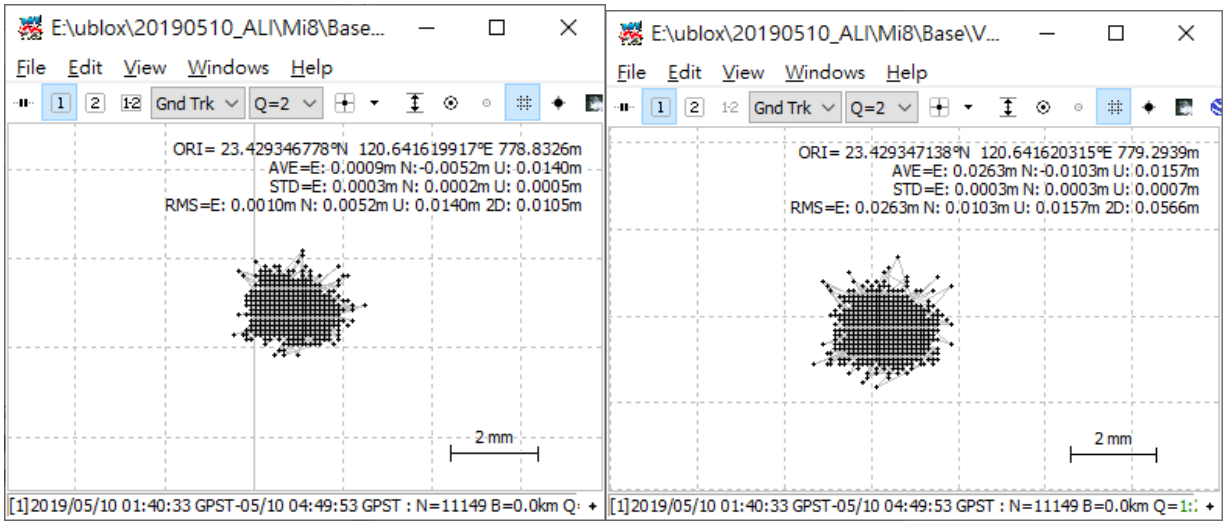


圖 4.3 2019/05/10 阿里山測站 RTK Static 配合 VBS 解算成果 (左) L1+L5 頻段，(右) L1 頻段

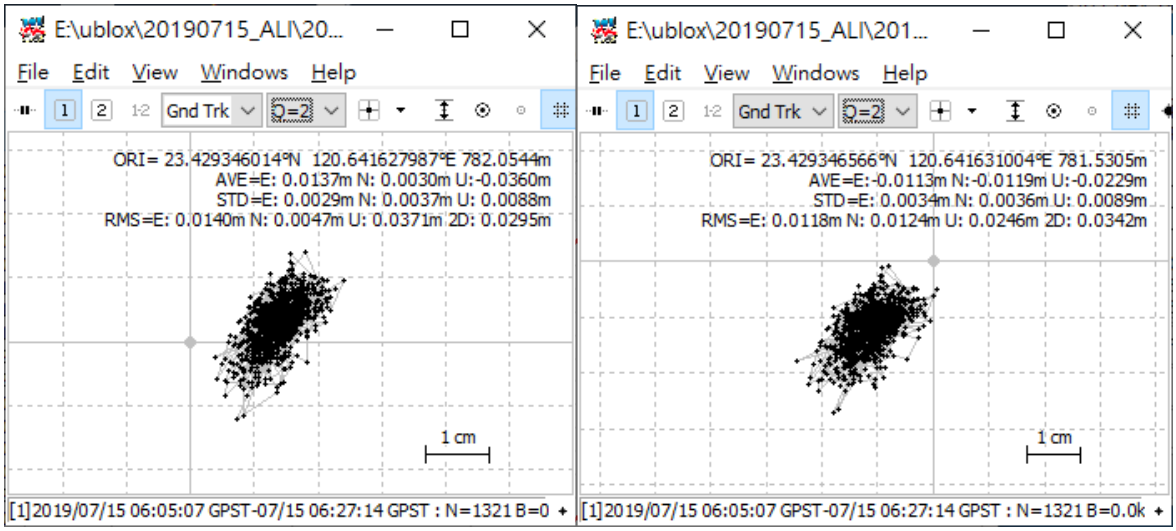


圖 4.4 2019/07/15 阿里山測站 RTK Static 配合 VBS 解算成果 (左) L1+L5 頻段，(右) L1 頻段

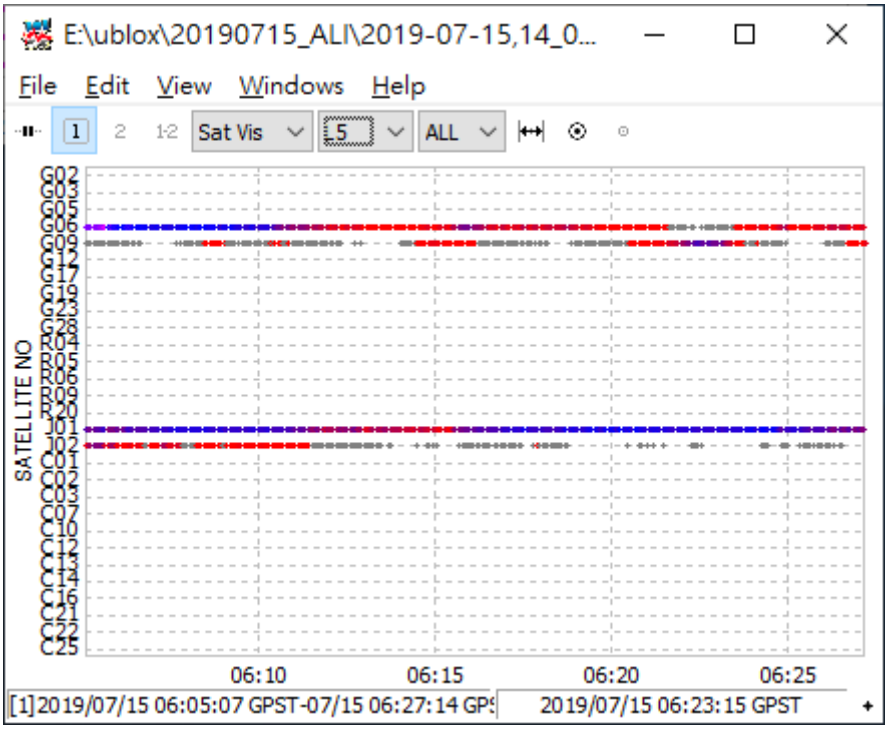


圖 4.5 2019/07/15 阿里山測站 L5 頻段衛星接收數量

本研究基於 3.2 節所提出之 L1&L5 超短基線線性定位精度檢核實驗架構，使用兩組小米 Mi8 進行定位測試，但由於目前相關 APP 於 GNSS RAW 資料擷取部分，尚無法提供有效之 rinex navigation 檔案，因此暫且改採 TWTF 為固定測站方式進行中長基線 RTK 解算使用。圖 4.6 為 Mi8 固定組之 RTK static 解算結果，其中已經包含考量 L5 與否之軌跡，但相差不明顯。圖 4.7 為 Mi8 移動站之 RTK kinematic(forward)解算結果，目前看來似乎解算成果不佳，相較於前期利用 ublox M8 超短基線線性定位精度檢核成果(如圖 4.8 所示)有顯著之差異。因此本研究初步共識認為小米 Mi8 所擁有之 L1&L5 GNSS 晶片部分，初步可做為 RTK kinematic 應用，但實際用於坡地滑動定位，除需考量手機因過熱保護機制外，確切之量測精度部分尚須進一步檢覈。

本研究將於下節進行新款 ublox F9 晶片[2] (如圖 4.9 所示) 之採購與

[2] https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module

測試規劃，透過 L1&L5 超短基線線性定位試驗先檢覈量測精度。後續也將進一步納入現場觀測系統中進行實務驗證。

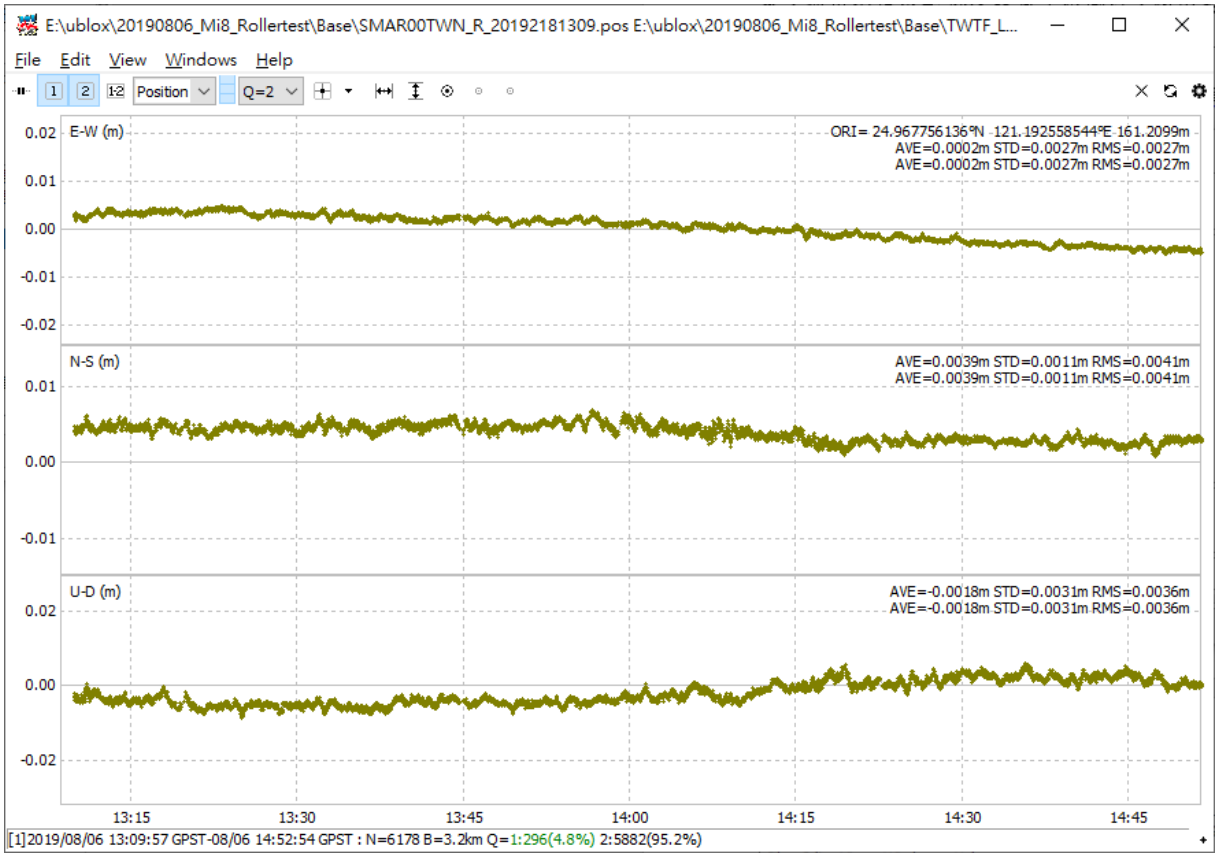


圖 4.6　定位精度檢核實驗- Mi8 固定站之 RTK 解算結果

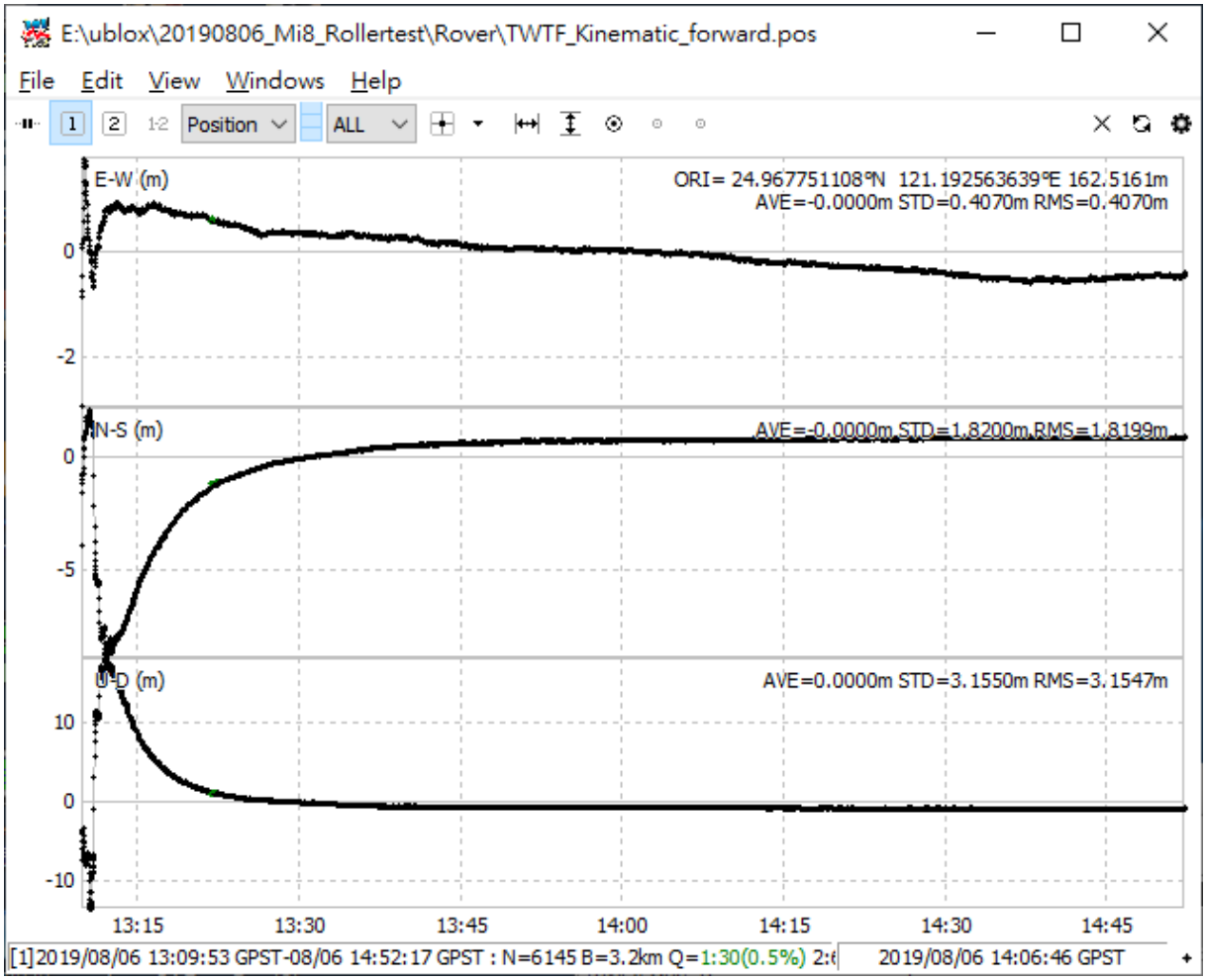


圖 4.7　定位精度檢核實驗- Mi8 移動站之 RTK 解算結果

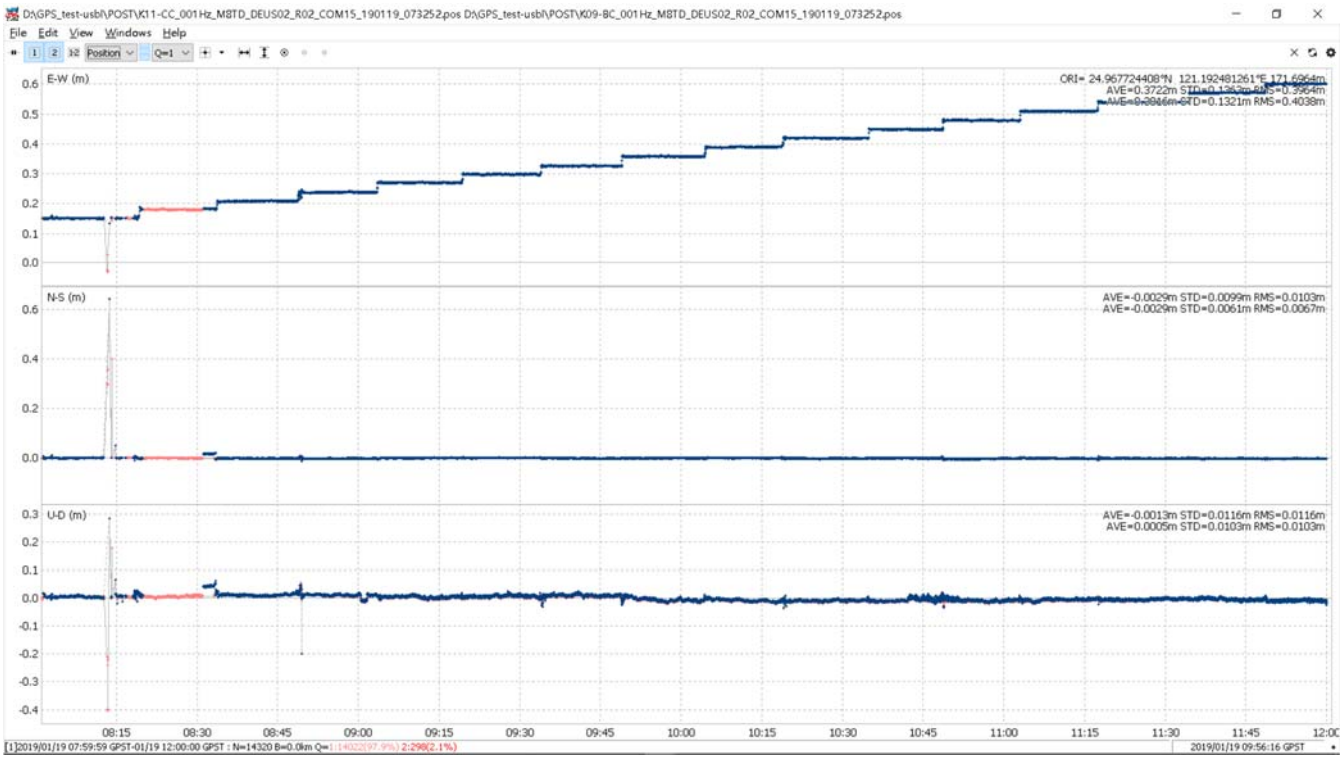


圖 4.8　定位精度檢核實驗- ublox M8 移動站之 RTK 解算結果



圖 4.9 新式 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片模組[3]

[3] https://www.csgshop.com/product.php?id_product=263

4.1.2 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片測試

有鑑於上述小米手機初步測試成果，本研究另行採購新式 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片，其標榜能接收 BeiDou、Galileo、GLONASS、GPS / QZSS 之 L2OF、L2C、E1B/C、B2I、E5b、L1C/A、L1OF 與 B1I 頻段資料。為先評估 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片量測穩定性，本研究使用其雙頻資料，並配合由中壢中華電信研究所 TWTF 為基站(直線距離中央大學工一館距 2.8 km 下，屬中短基線長度)，其 RTKLIB L1+L2 Static 解算成果如圖 4.10 所示，在其一小時多之測試時間內，其 Rover 站固定不動並採用 Static 解算之東西向標準偏差僅有 0.9 mm，南北向標準偏差僅有 1.1 mm，高程標準偏差僅有 5.9 mm，且高達 98%以上資料屬於 Q1 鎖定品質，因此採用 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片於長期穩定性追蹤，應屬可行。

後續本研究配合 TWTF 中基線長度下，進行滑軌定位測試，起初為一小時靜止後，後續每 20 分鐘往東西向移動 10 cm 之調整下，重複進行 6 次滑軌移動試驗，其 kinematic 解算成果如圖 4.11 所示，其趨勢大致有符合滑軌移動量，但因解算資料多數僅有 Q2 浮動定位精度，所以實際上定位精度尚須透過超短基線配合測試驗證，這部份後續本研究將採購第二組 ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片進行測試，另外本研究也將嘗試進行 ublox F9P 內建之 RTK 解算功能，檢核其量測可行性與精度。

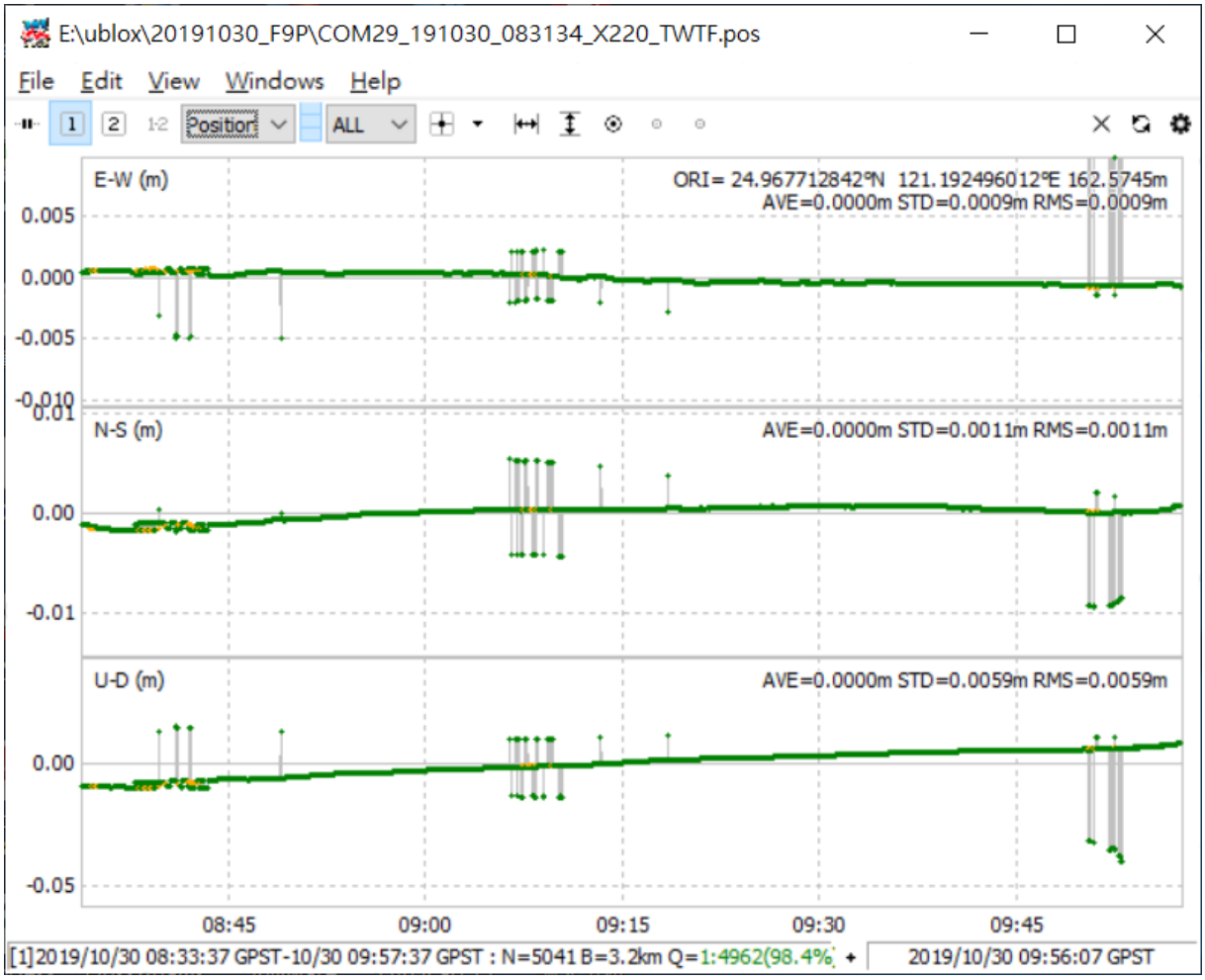


圖 4.10　ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片中基線(基站 TWTF) Static 解算成果

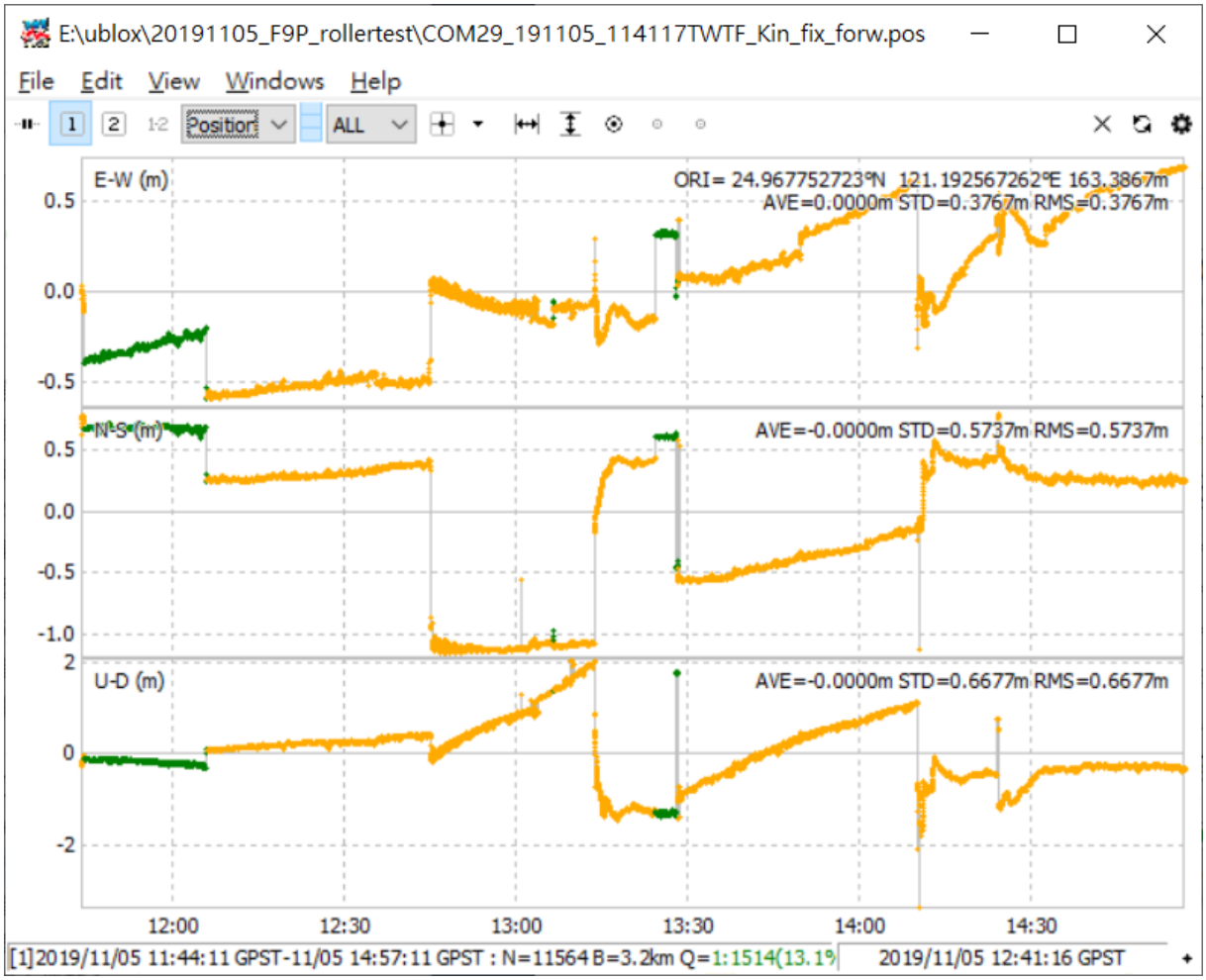


圖 4.11 ublox F9P 中基線(基站 TWTF) 於滑軌 kinematic 解算成果

4.2 TDR 與測傾管共構於離心機初步測試成果

4.2.1 纜線選擇測試

本試驗首先針對離心機施作需求，必須將現有實際監測用之纜線(RG-8)尺寸縮小，因此目前選用之纜線種類規格如表 4.1 所列。為能確認實際進行離心機模型剪動試驗時,其纜線能有良好的 TDR 反應行為,本研究採用以下兩種試驗模式進行初步評估。首先各纜線將直接置放於簡易直接剪動試驗儀下，如圖 4.12 所示，透過步進馬達進行不同剪動量下之 TDR 波形反應記錄，實際剪動過程之波形反應如圖 4.13 所示，茲將剪動過程之波形下降程度(Δρ)與剪動變位關係繪製如圖 4.14,可以明顯發現 RG174 之反應較為顯著，意即有較高之剪動靈敏度。

第二種試驗則是將各纜線將直接置放於簡易壓痕試驗儀下，如圖 4.15 所示，透過步進馬達進行不同應力下之 TDR 波形反應記錄，實際壓痕過程之波形反應如圖 4.16 所示，茲將過程之波形下降程度(Dr)與壓痕應力關係繪製如圖 4.17，同樣可以明顯發現 RG174 之反應較為顯著，意即有較高之剪動靈敏度。基於上述初步研究測試，後續研究將使用 RG174 纜線並配合灌漿材料進行同樣簡易直剪與壓痕試驗測試。

表 4.1 離心機試驗用之 TDR 同軸纜線規格

Cable Type	**RG 174 Coaxial cable**	**RG 316 Coaxial Cable**	**0.81mm Coaxial Cable**
Conductor	+Material Copper Strand +Diameter 0.48 mm	+Material Silver-Coated Copper clad steel +Diameter 0.53 mm	+Material Silvered Copper +Diameter 0.15 mm
Insulation	+Material XLPE +Thickness 0.535mm +Diameter 1.55 mm	+ Material FEP + Thickness 0.51 mm +Diameter 1.53mm	+Material PFA ‘ + Thickness 0.125mm + Diameter 0.4 mm
Braid Shield	+Material Tinned Copper Wire	+Material Silver-Coated Copper	+Material Annealed Tinned Copper
Jacket	+Material PVC +Thickness 0.325mm +Diameter 2.7mm	+ Material FEP + Thickness 0.3 mm + Diameter 2.53mm	+Material PFA + Thickness 0.08 mm + Diameter 0.81 mm
Impedance	50 ± 5 Ω (10MHz~3GHz)	50 ± 5 Ω	50 Ω
Capacitance	1 KHz Between Conductor and Shielding 100 ± 8 pF/m	95.8 pF/M	Capacitance 96 pF/m(nominal)
Conductor Resistance	Max. 142.6 Ω/km at 20°C	Max. 281 Ω/km at 20°C	Conductor Resistance 1400 Ω/km(maximun)
Attenuation at Frequency (GHz)	100 MHz 359 dB/Km 1 GHz 1175 dB/Km 3GHz 2103 dB/Km	100 MHz 340 dB/Km 1.8 GHz 1800 dB/Km 2.4GHz 2060 dB/Km	1.GHz 3.57 dB/m 2 GHz 5.23 dB/m 3 GHz 6.52 dB/m

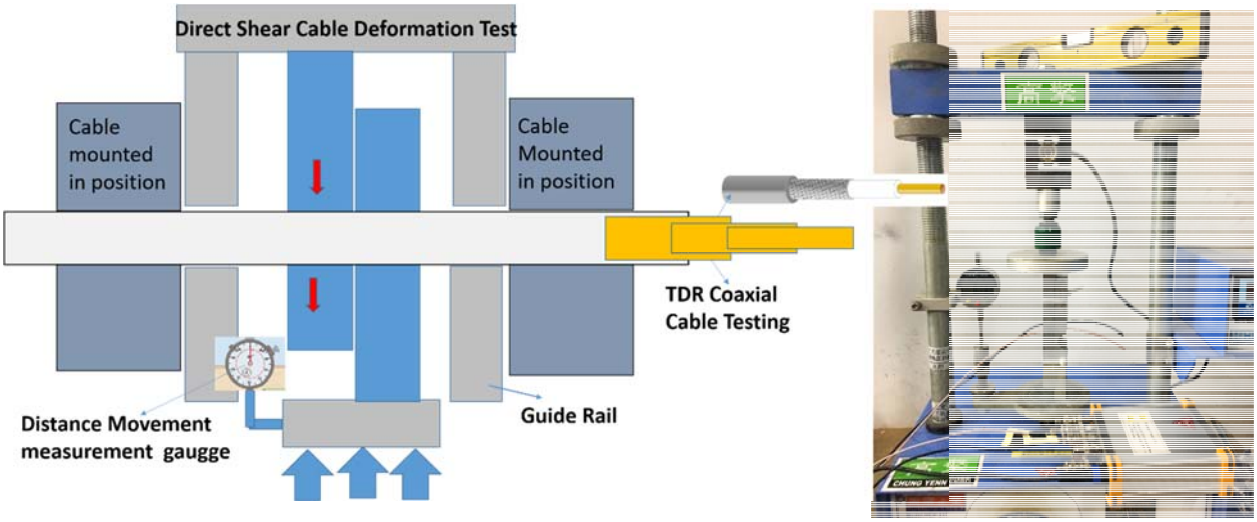


圖 4.12 TDR 纜線之簡易直接剪動試驗

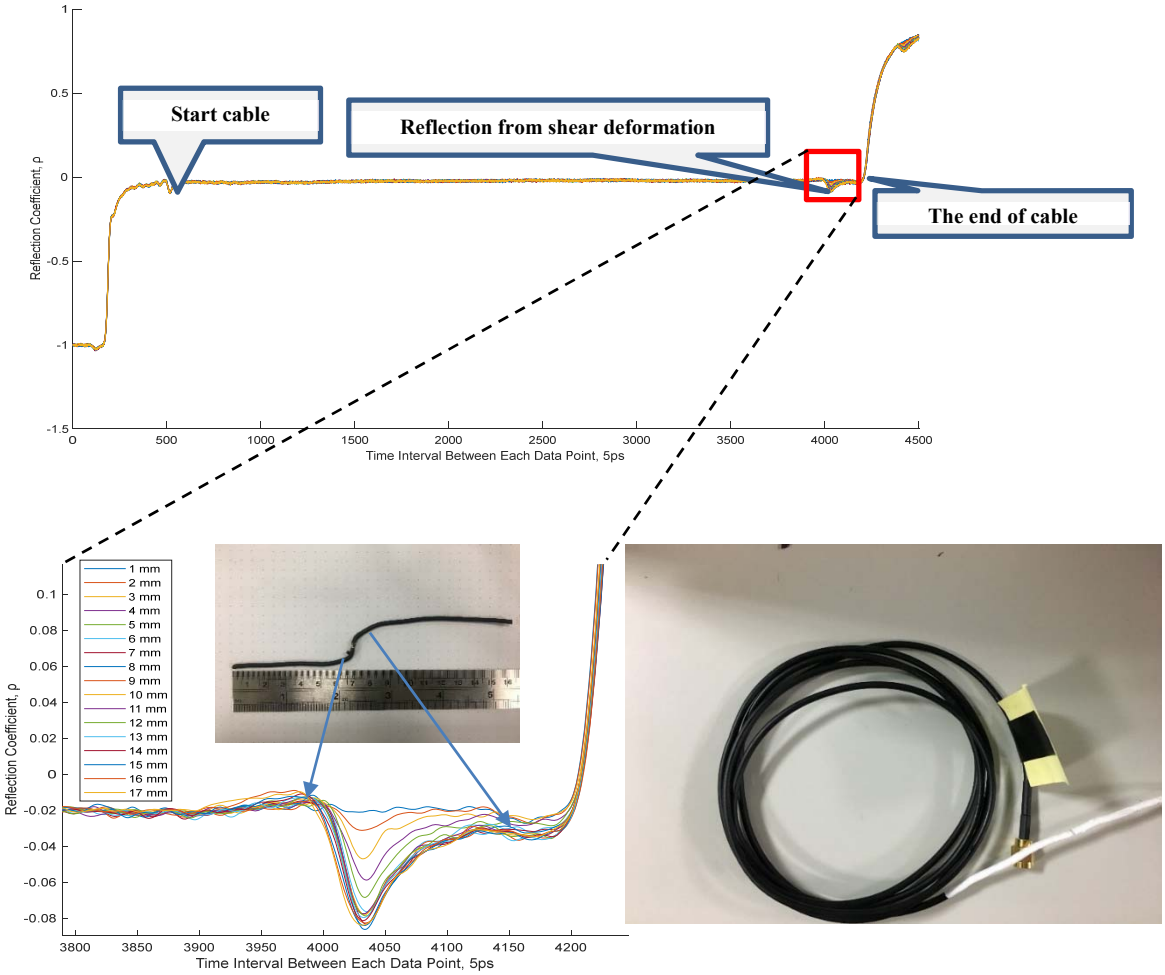


圖 4.13 實際剪動過程之 TDR 波形反應

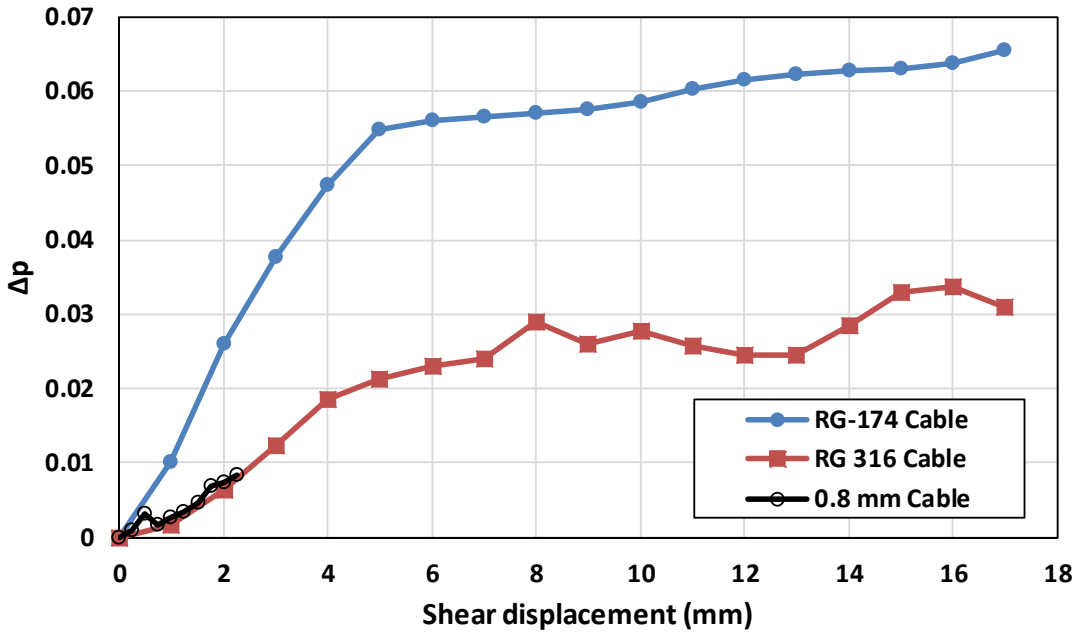


圖 4.14 波形下降程度(Δρ)與剪動變位關係

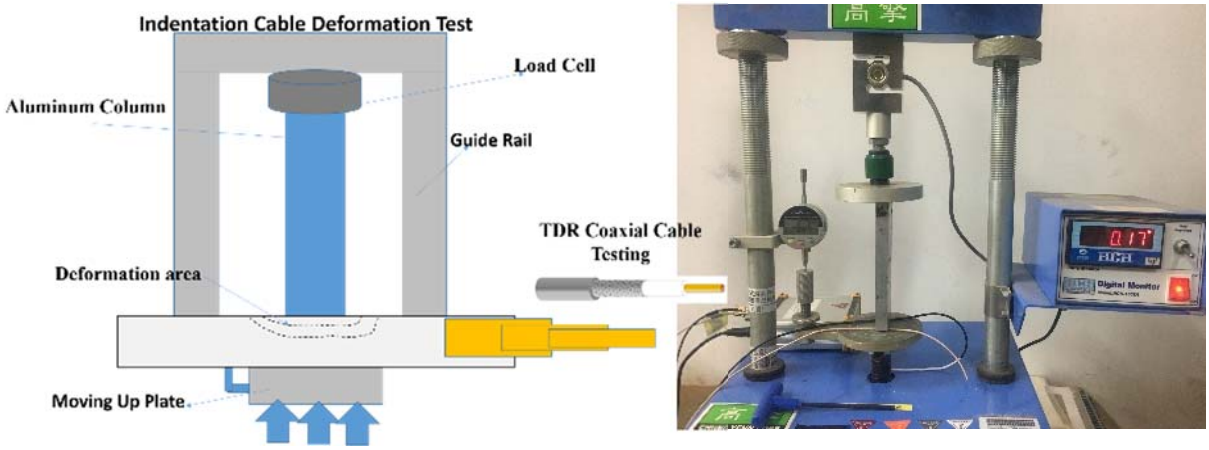


圖 4.15　TDR 纜線之簡易壓痕試驗

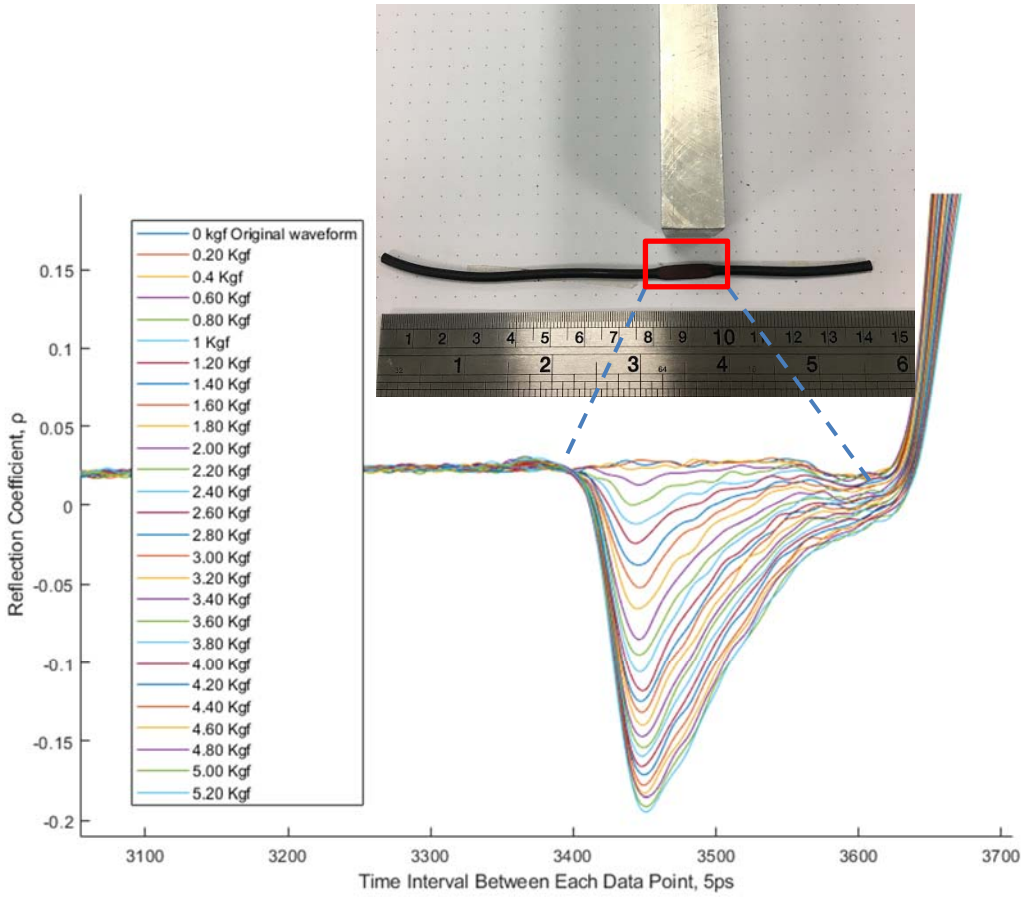


圖 4.16 實際壓痕過程之 TDR 波形反應

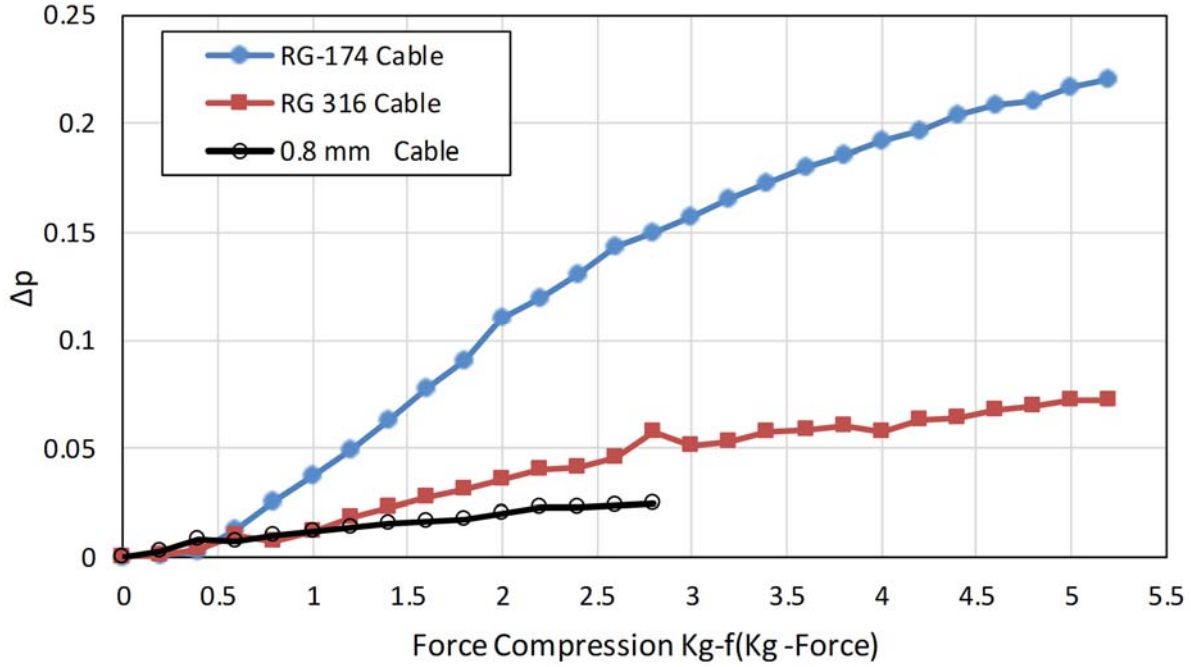
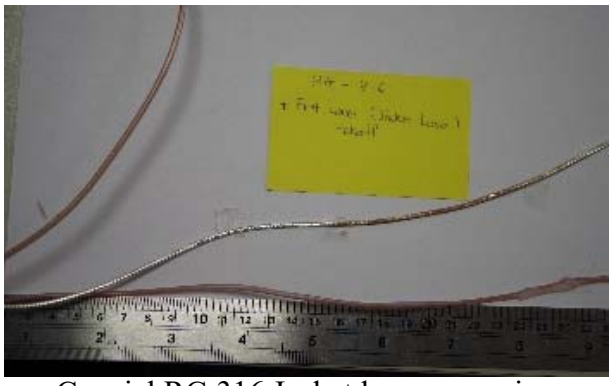


圖 4.17 波形下降程度(Δρ)與壓痕應力關係

本研究為進一步提升上述纜線之靈敏度，嘗試提出 RG316 和 RG174 兩種類型的電纜之改良設計，其同軸電纜結構如圖 4.18 所示，共有 4 層，包括外護套，編織屏蔽層(外導體)，內絕緣層和內導體層。第一種修改電纜類型的方法是，除去電纜的外護套層，並用螺紋密封帶代替。第二種修改電纜類型是同時替換外護套和內絕緣層，如圖 4.18 所示。改良電纜後，將改良電纜進行灌漿，灌漿為水泥，水，高嶺土和水的混合物。然後改良電纜則進行簡易直接剪動測試，如圖 4.19 所示，剪切位移受設備位移控制，從 0.25 到 1mm 逐漸增加，並同時擷取 TDR 波形。第一型與第二型改善纜線測試結果分別如圖 4.18 和圖 4.19 所示，從原來的電纜灌漿和電纜護套改善來看，其受剪後之反射係數略有變化，圖 4.23 則進一步進行靈敏度分析，其結果表明兩種電纜於修改後的靈敏度有了顯著提高，因此本研究將初步採用第二型改良電纜用於執行物理模型測試，如後續 4.2.3 節說明。

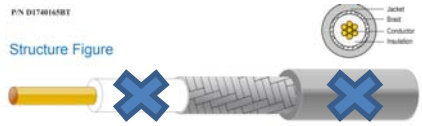




Coaxial RG 316 Jacket layer removing



Coaxial RG 174 Jacket layer removing

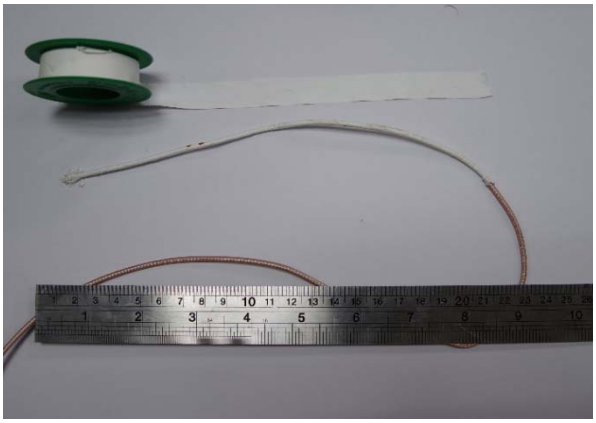




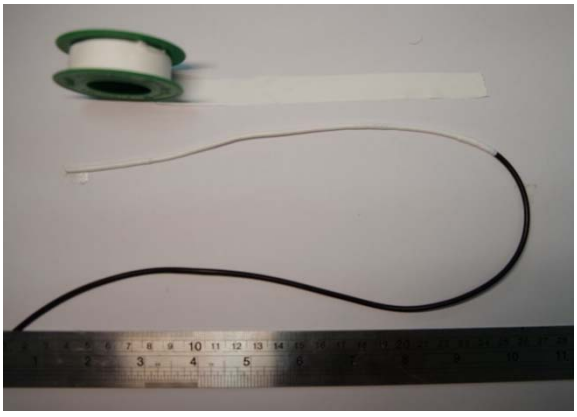
Coaxial RG 316 Jacket and insulation layer removing



Coaxial RG 174 Jacket and insulation layer removing



Coaxial RG 316 Cable modify cover by thread seal tape



Coaxial RG 174 Cable modify cover thread seal tape

圖 4.18 RG174, RG316 修正型纜線示意圖

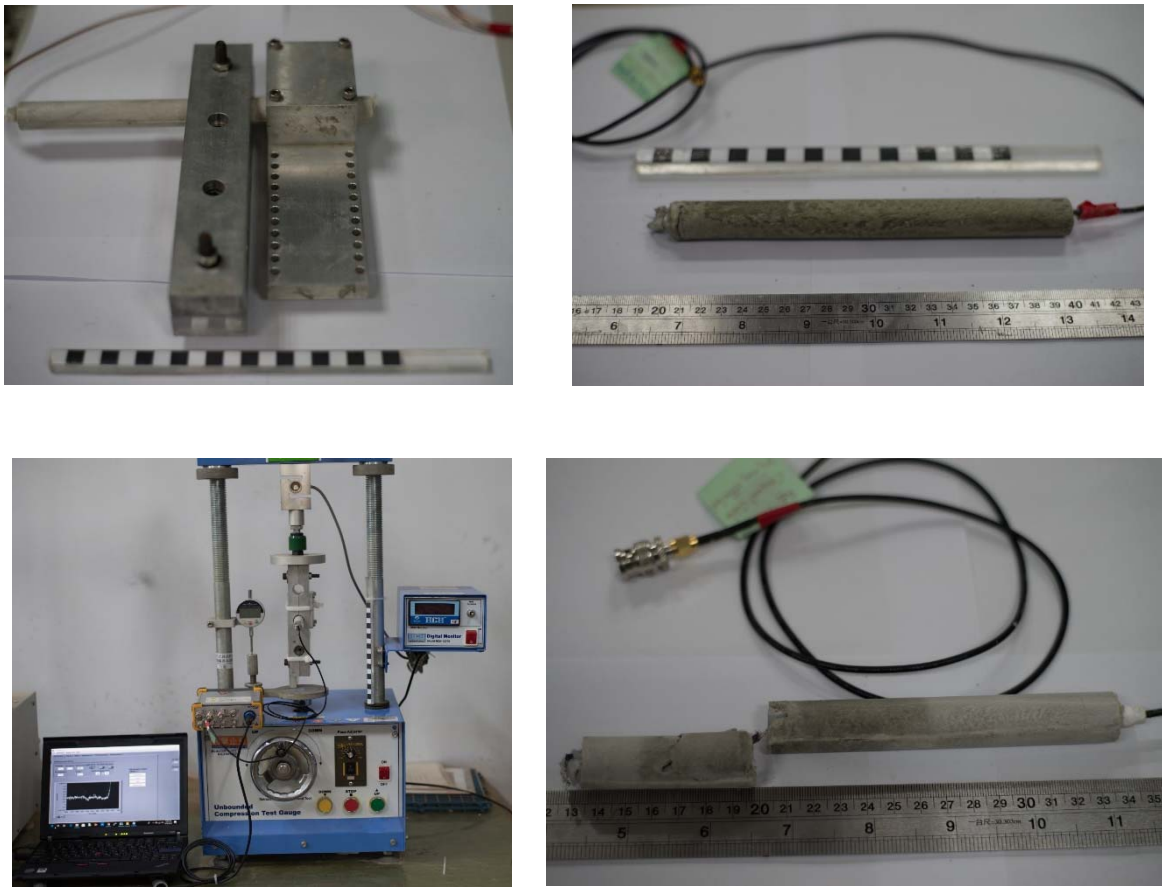


圖 4.19　未改良與改良後纜線灌漿試體進行簡易直接剪動試驗

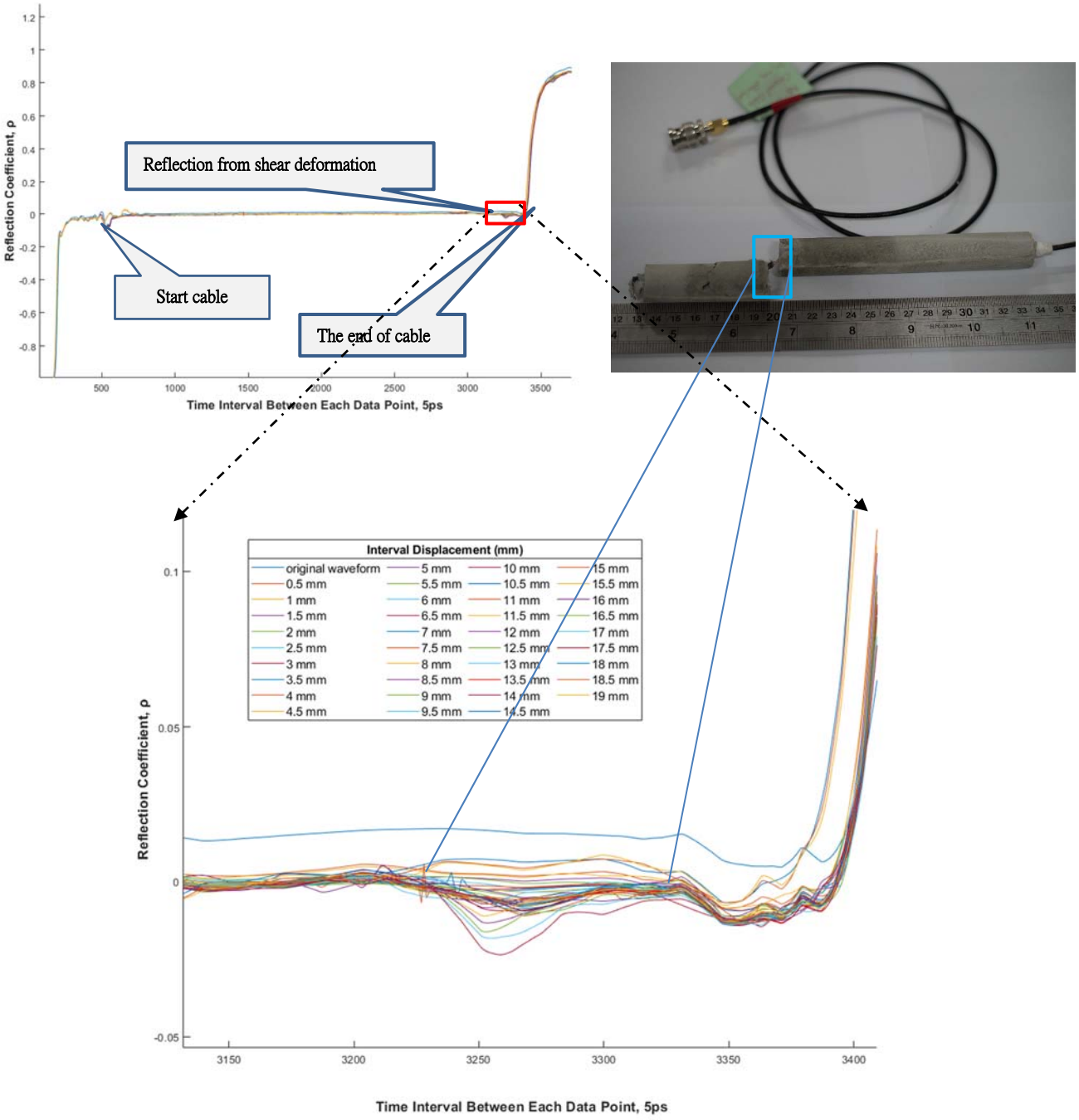


圖 4.20 未改良纜線灌漿試體於簡易直接剪動試驗結果

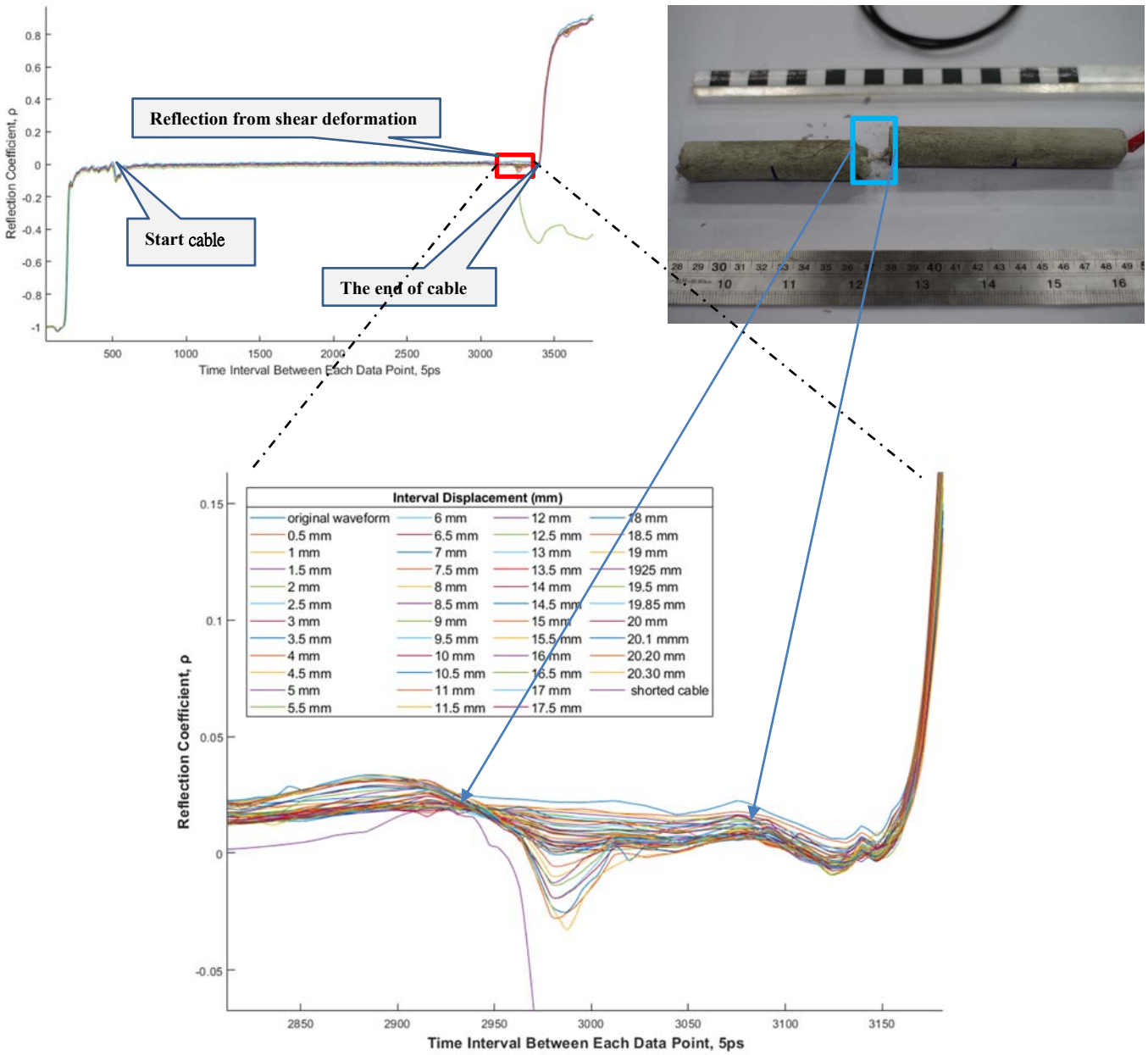


圖 4.21 第一型改良纜線灌漿試體於簡易直接剪動試驗結果

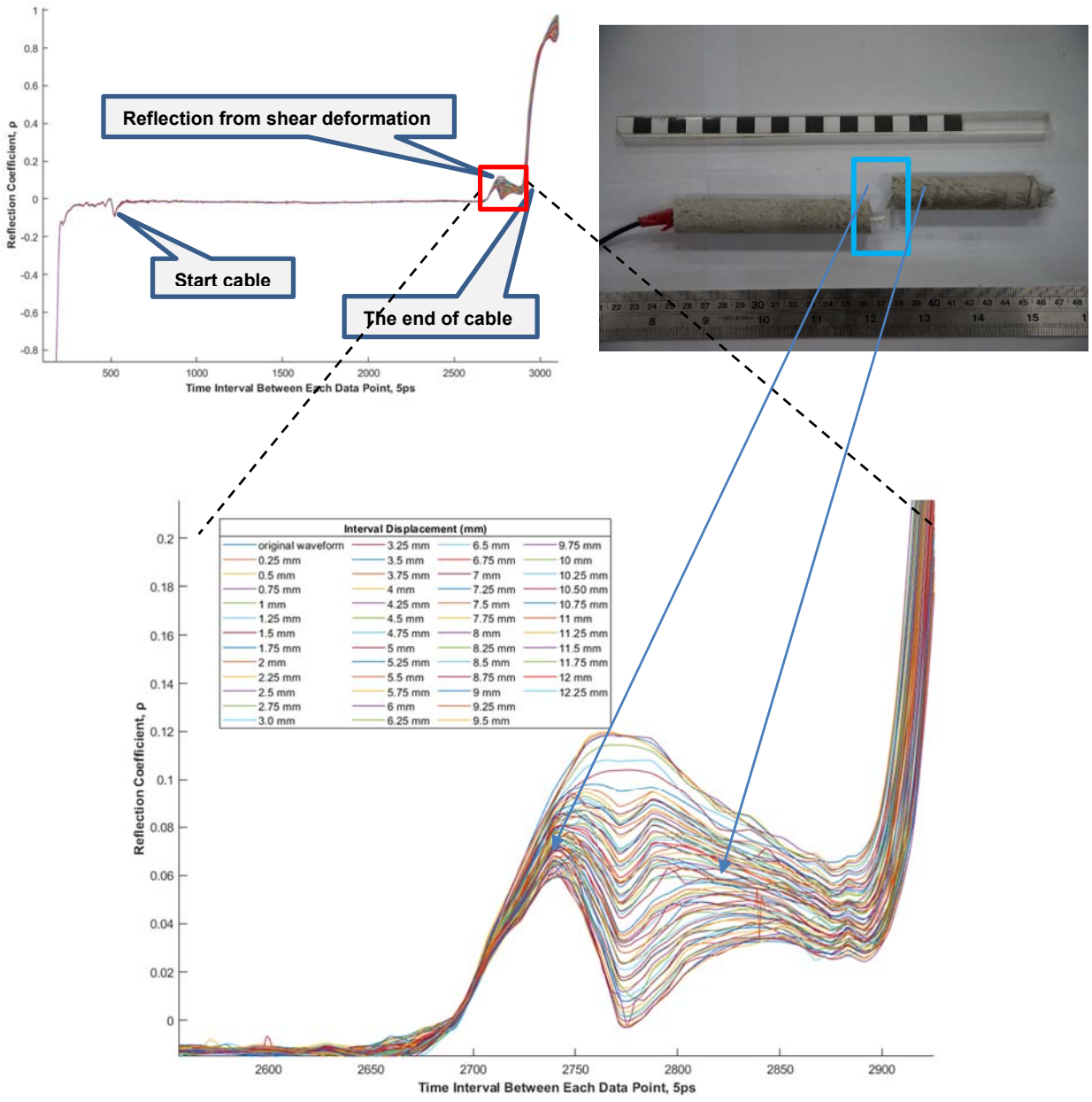
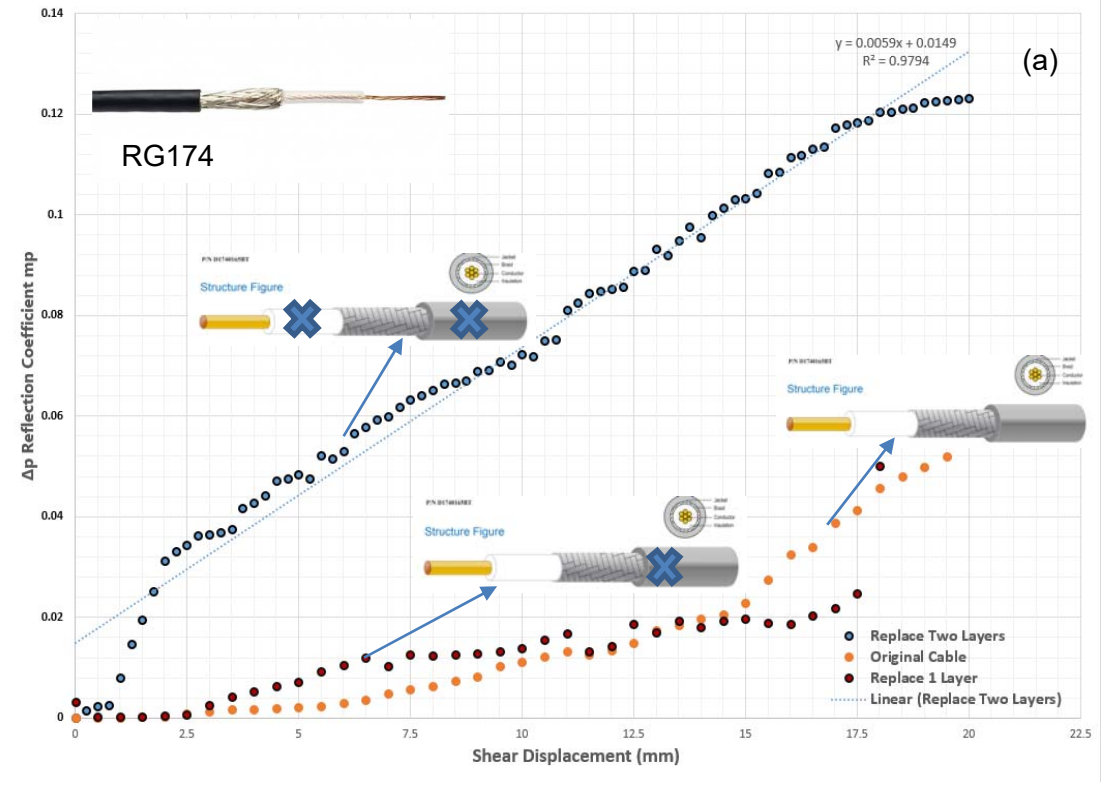


圖 4.22 第二型改良纜線灌漿試體於簡易直接剪動試驗結果



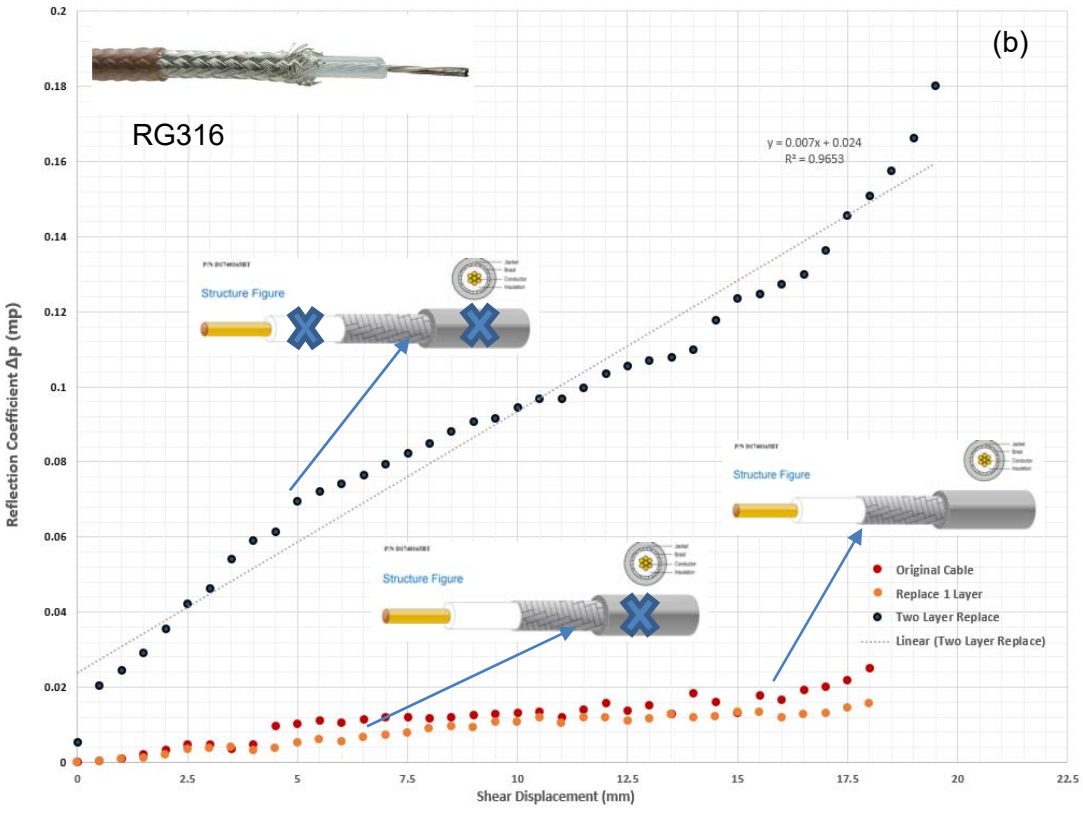


圖 4.23 (a) RG 174 與 (b) RG 316 纜線於不同改良下之靈敏度分析

4.2.2 TDR 與離心機整合

基於前述 TDR 系統與離心機規劃，本研究以新式 TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱中，如圖 4.24 所示，並透過目前光纖資料擷取系統進行資料整合，相關系統關聯性如圖 3.28 所示，配合本研究開發之 Labview 擷取程式如圖 4.26 所示，目前初步已可於離心機控制室進行 TDR3000 之操作。



圖 4.24 TDR3000 之設備主機放置於離心機之中置擷取器箱

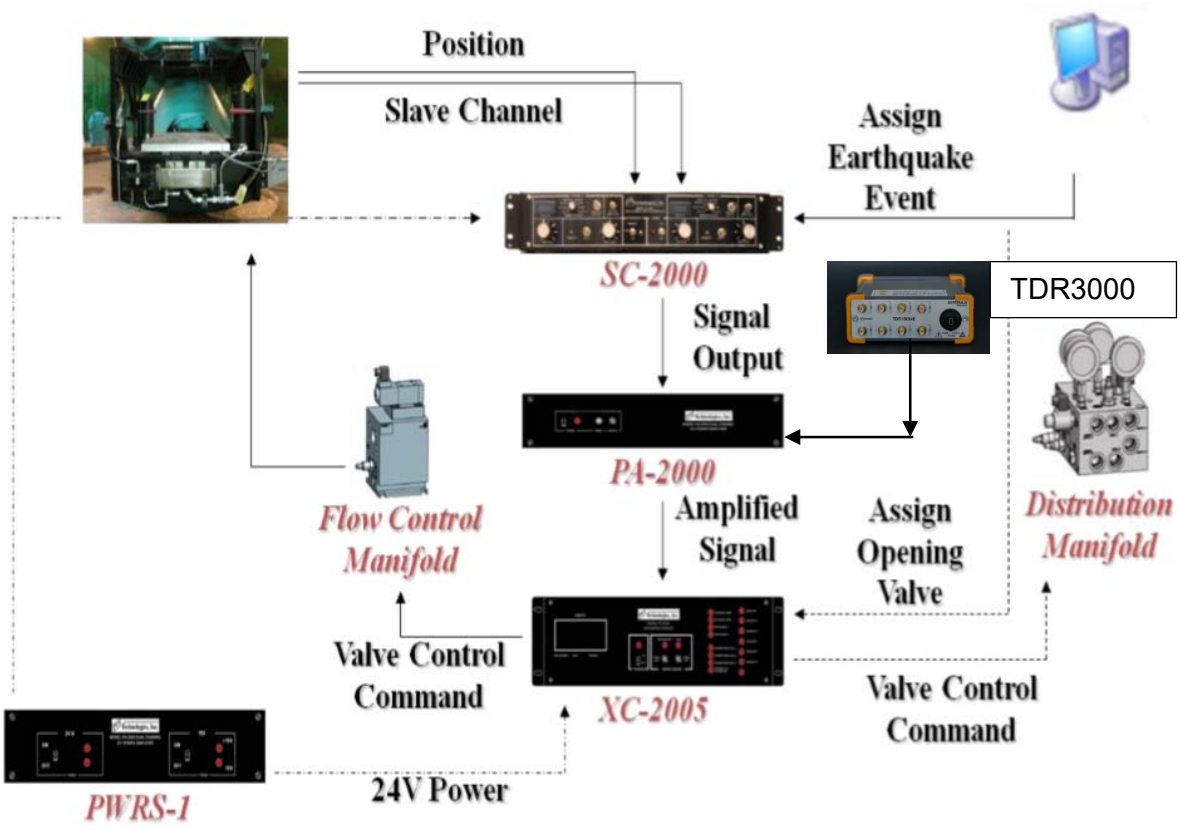


圖 4.25 TDR3000 與離心機擷取系統整合關聯性

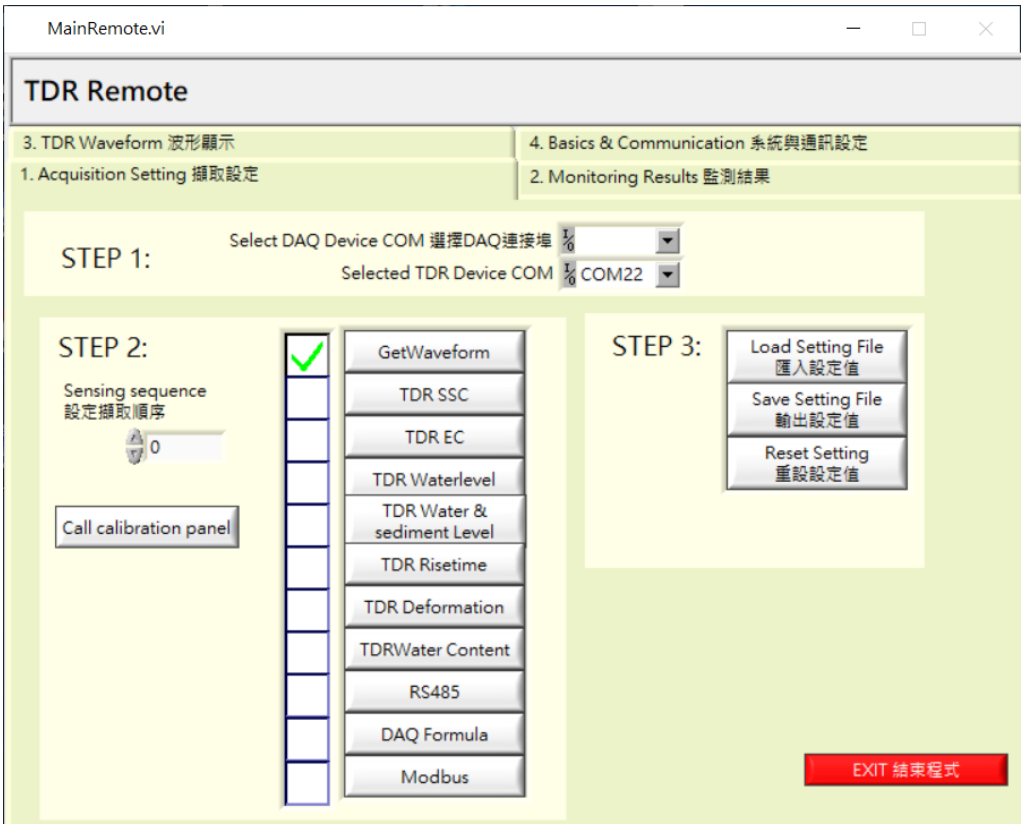


圖 4.26 TDR3000 自動化擷取程式

4.2.3 TDR 於離心機實際測試

4.2.3.1 物理模型設置

本試驗所採用之離心機物理模型尺寸為 710 mm x 255 mm x 310 mm（長度，高度，寬度），原本主要用於逆斷層模擬試驗，如圖 4.27 所示，為有效測試 TDR 纜線以及側傾管共構受剪，先採用逆斷層模型之油壓剪動機制模擬剪動試驗。本模型測試材料是用細砂製成的，並且使用黑色染砂將模型分為 10 個不同的層，如圖 4.27 所示。每層厚度為 20mm，其中灰色砂為 17mm，黑色砂為 3mm，從下向上構建層，並預定嵌入 3 根上述第二型修改電纜，每根電纜之間的距離為 50 mm。嵌入的電纜按一定比例進行灌漿，例如 40（g）細砂，70（g）粘土，50（g）水泥和 80（g）水，其灌漿過程主要先利用細塑膠管嵌入模型中，再將第二型修改電纜插入，然後灌漿後抽出塑膠管以完成直徑為 21 mm 的回填材。

該離心機模型設計為反向容器，容器底部設計為可移動（向上和向下）；容器可以以 0-2.5mm / min 的位移速度模擬正向/反向滑動。 LVDT 用於監測沿剪切面增加的垂直位移。 TDR 波形將以 3 mm 的位移間隔記錄，預定每條電纜總共將記錄 17 組波形，而本試驗將由 1g 重力場下先進行測試，試驗過程如圖 4.28 所示，TDR 波形如圖 4.29 所示。從第一個測試結果來看，TDR 存在非常小的反射相關性，可能主要原因為灌漿勁度強於底部剪切板產生的剪切力，因此後續測試中水泥漿的百分比將減少，從而降低灌漿的強度。

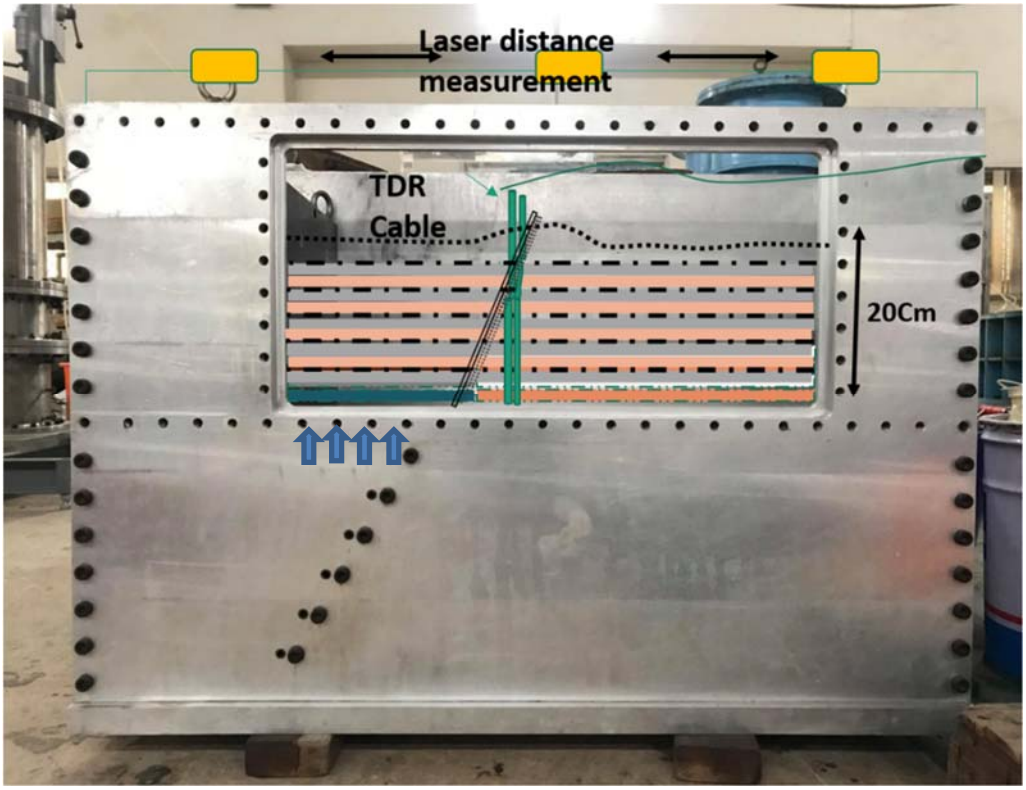
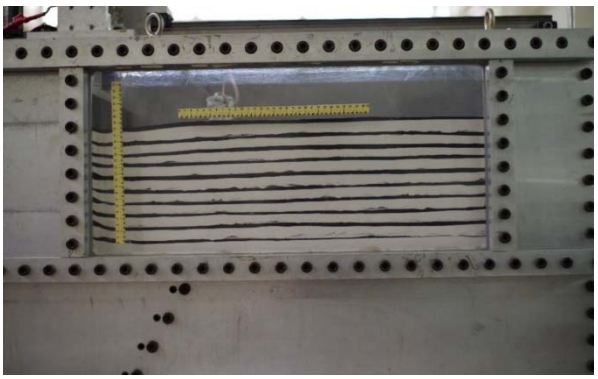
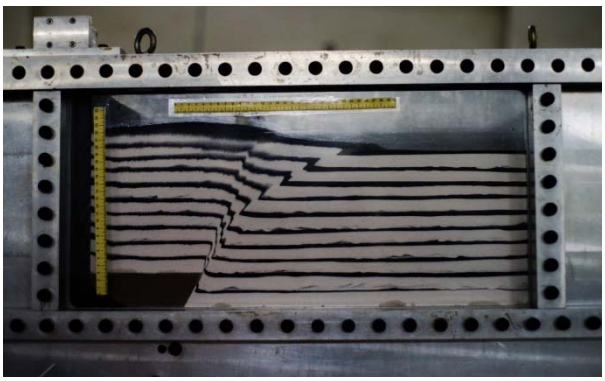


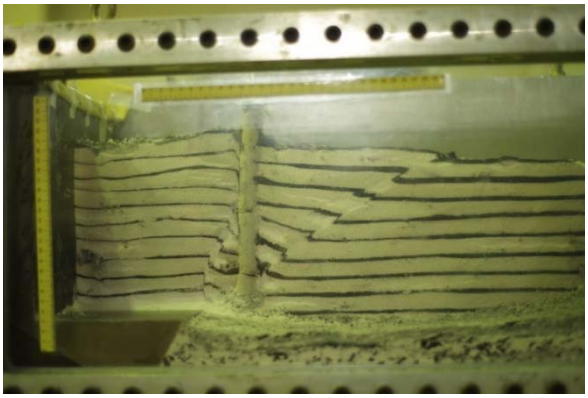
圖 4.27　離心機物理模型實際配置圖



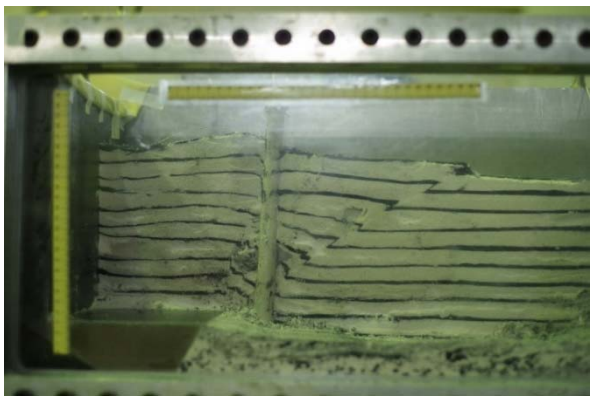
Physical model before testing



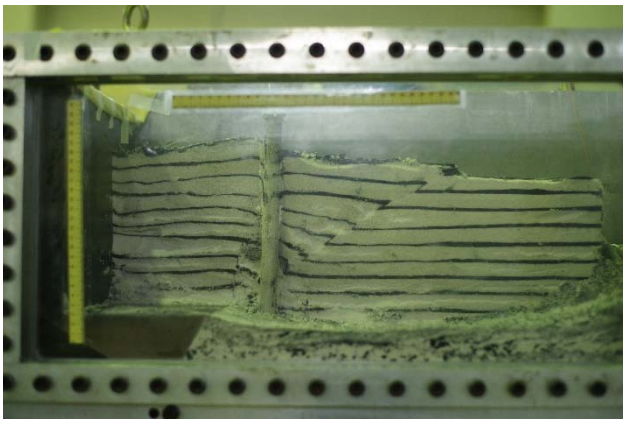
Model after testing



Cutting profile cable 1 after testing



Cutting profile cable 2 after testing



Cutting profile cable 3 after testing

圖 4.28 1g 重力場下之剪動測試

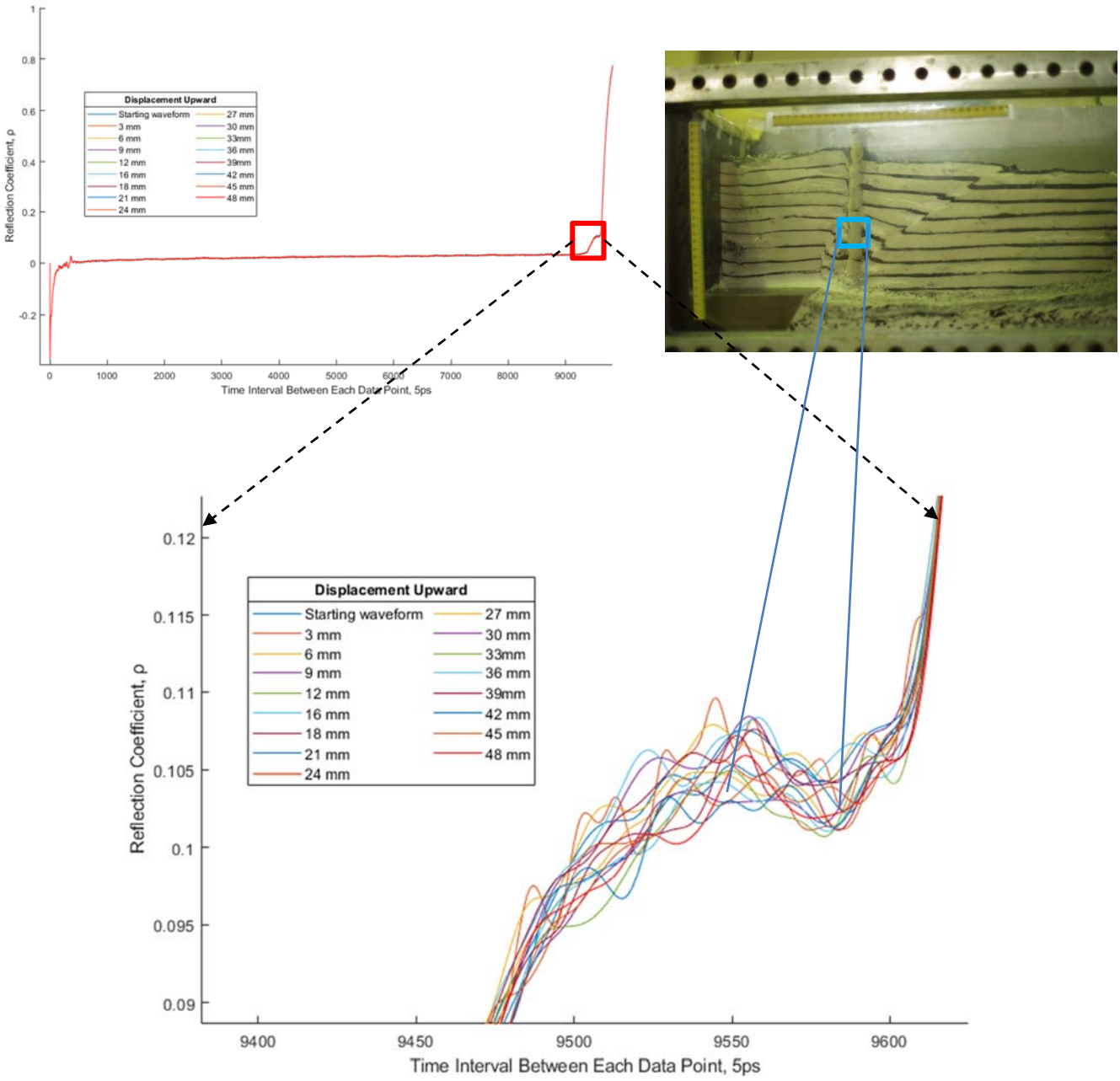


圖 4.29 1g 重力場下剪動測試之 TDR 波形結果

4.2.3.2 配合河堤模型之測試驗證

本試驗主要配合其他計畫項目，於內部尺寸為 76 7mm x400 mm x 355 mm（長度，高度和寬度）的鋁製容器中建造土堤模型，如圖 4.30 所示，土壤材料使用軟高嶺土與細砂。模型層分為三層，第一層是基礎砂層，厚度為 50mm；第二層是軟粘土層，厚度為 603mm，液限限度 LL 為 40，塑性限度 PL 為 1，密度 16 kN/m^3；第三層路堤是細砂層，層厚為 120 mm，密度為 20kN / m^3。該模型從下往上分層構建，其基樁分別嵌入了第二型修改 RG316 電纜，每根基樁之間的距離為 44.4 mm。電纜回填灌漿之配比為 20 g 細砂、60 g 粘土、50 g 水泥和 80 g 水。本試驗為配合模型施作，於圖 4.30 之基樁鑽一個直徑為 21 mm 的孔，然後再將上述之灌漿電纜傳感器插入模型基樁中。模型試驗準備步驟如圖 4.31 所示，該模型設計用於預定的河堤，並通過在 80g 重力場下找出可能之破壞面。TDR 波形將以每 10 g 的增量記錄，每個數據點之間的波形分辨率為 5 ps，每個波形為 10000 個數據點。

測試結果顯示第一組基樁內電纜於 40g 至 80 g 重力場下逐漸變形，如圖 4.32 所示；第二組基樁內電纜於 50g 至 80g 重力場下逐漸變形，如圖 4.33 所示，最後一組基樁內電纜從 10g 至 80g 重力場下變形量較小，如圖 4.34 所示。完成測試後之切割模型輪廓顯示三組基樁傾斜到一側，第一組有最大彎曲，第二列彎曲度較小，最後第三列彎曲最小，表明電纜反射係數與基樁傾斜變形有高度相關，另一方面本試驗也初步驗證 TDR 已可整合應用於離心機高重力場下之量測。

基於上述初步成果，本研究將持續進行利用剪力模型探討 TDR 與傾斜管共構於 40g 與 80g 重力場測試。

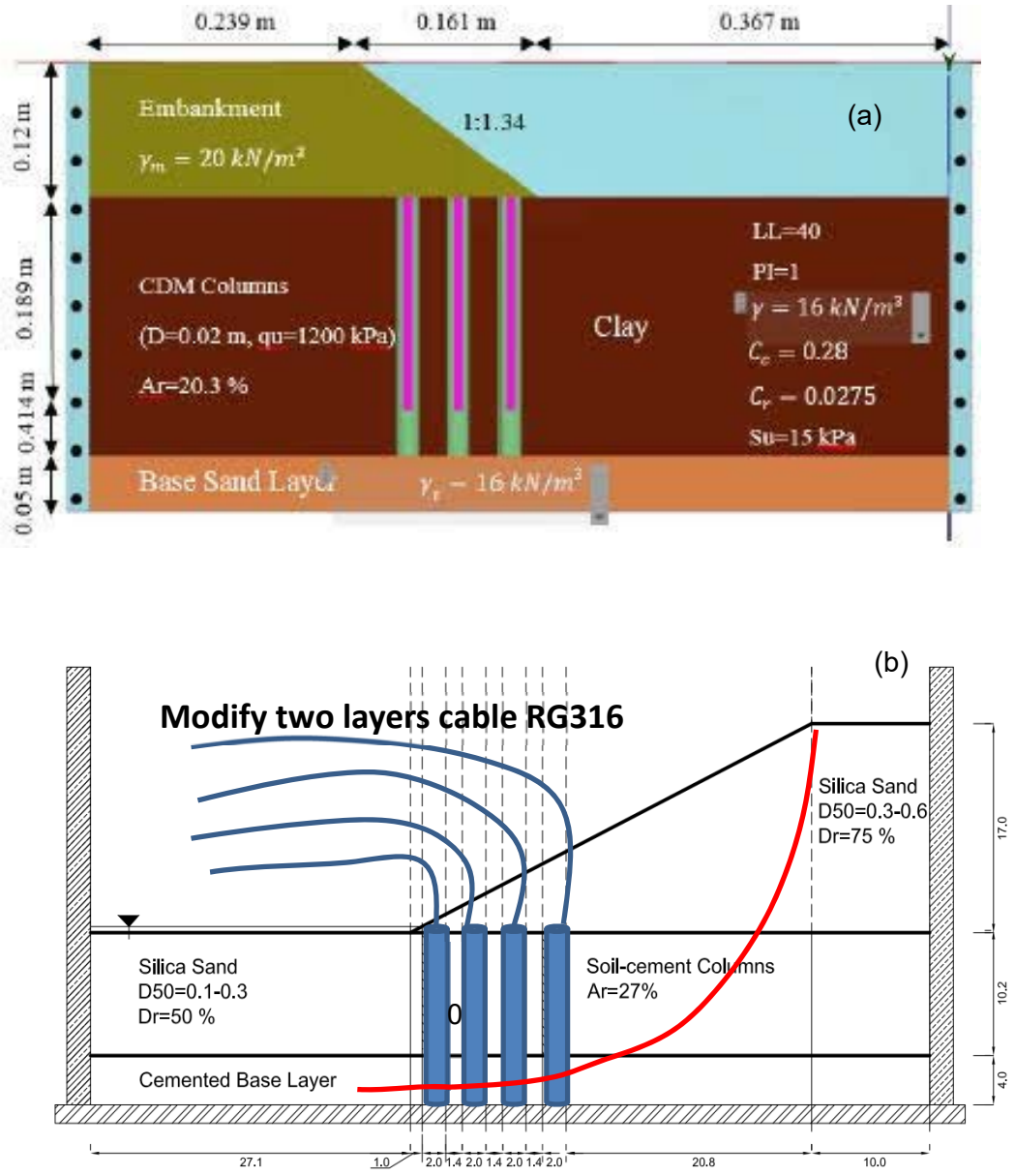
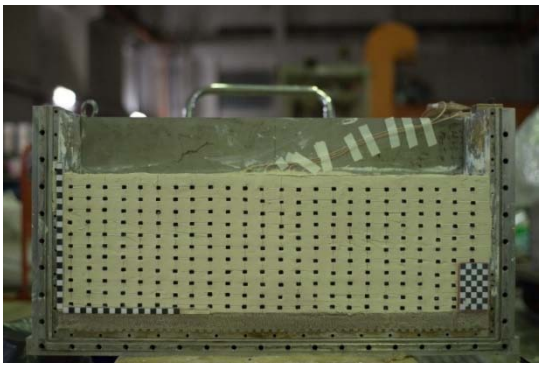


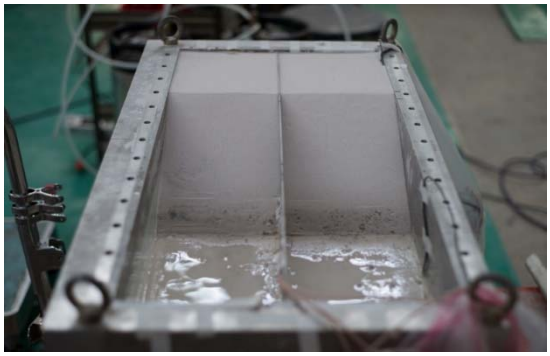
圖 4.30 河堤模型試驗於 80g 重力場下之配置.



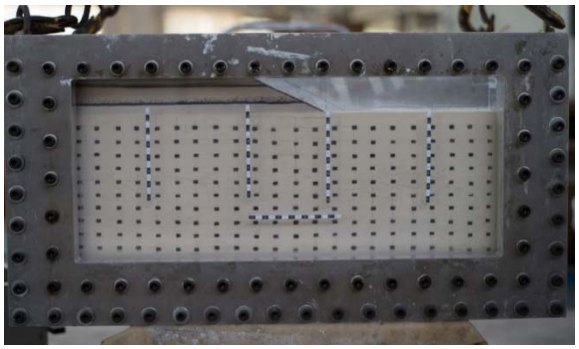
Preparing soft clay layer and Insert modify 2 layer cable grouted into clay layer



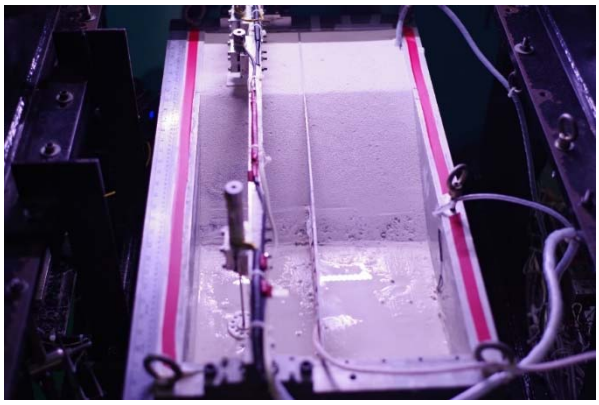
Preparing mark point in soft clay layer



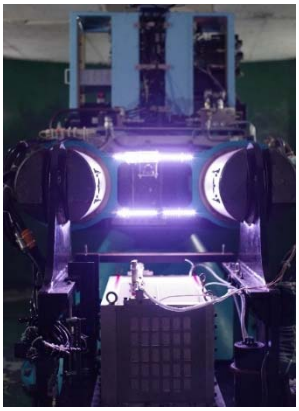
Building embankment on top of soft clay layer



Front side view of the model



Model install LVDT measurement settlement



Model view on centrifuge machine

圖 4.31 河堤模型試驗試驗過程

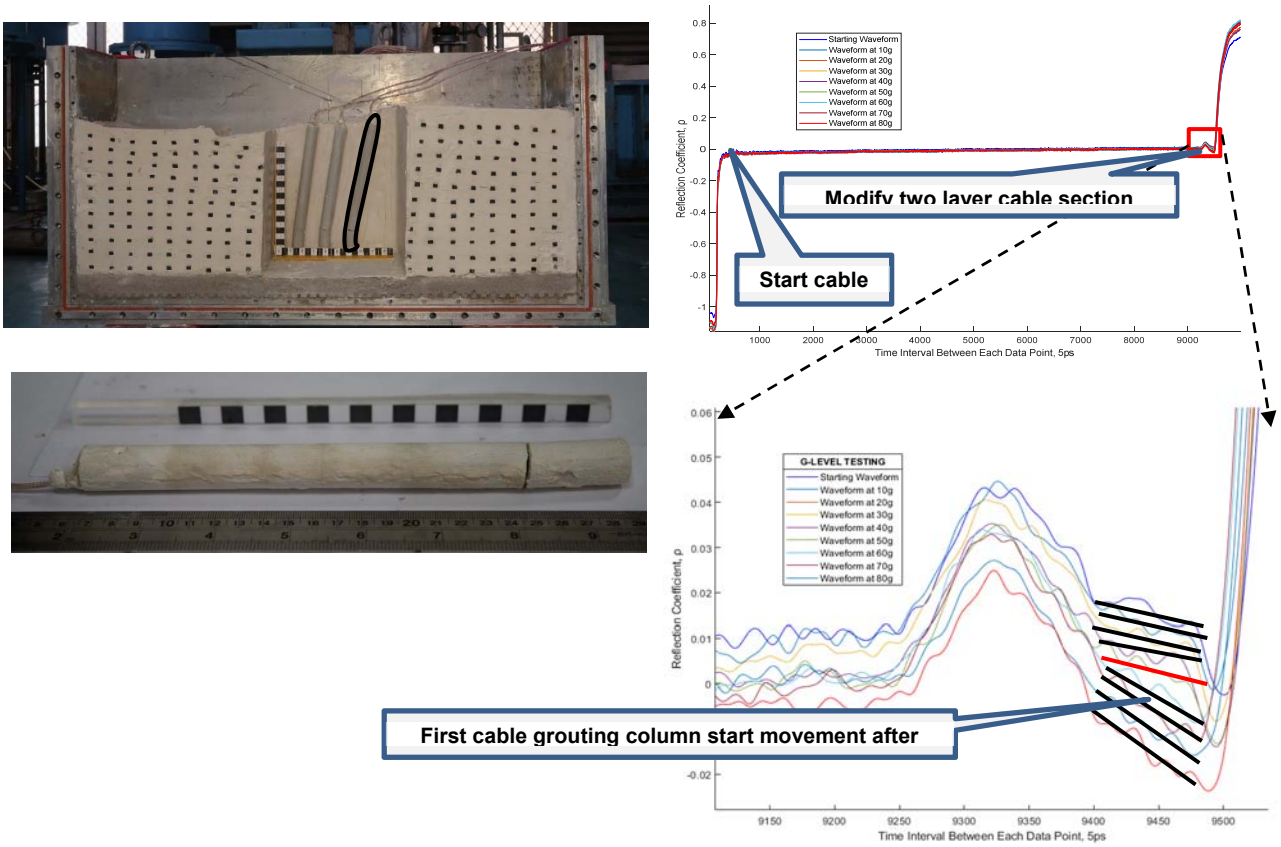


圖 4.32 河堤模型試驗第一支基礎於不同重力下之 TDR 波形結果

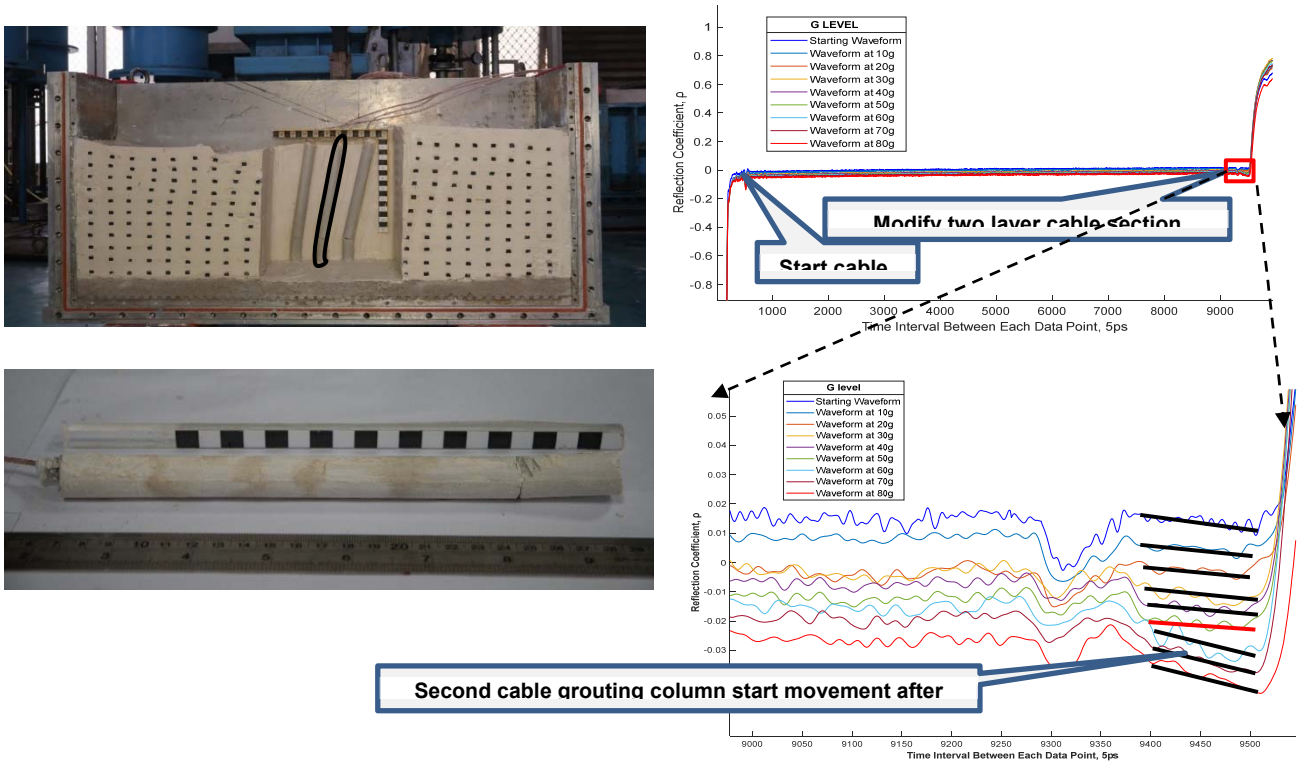


圖 4.33 河堤模型試驗第二支基礎於不同重力下之 TDR 波形結果

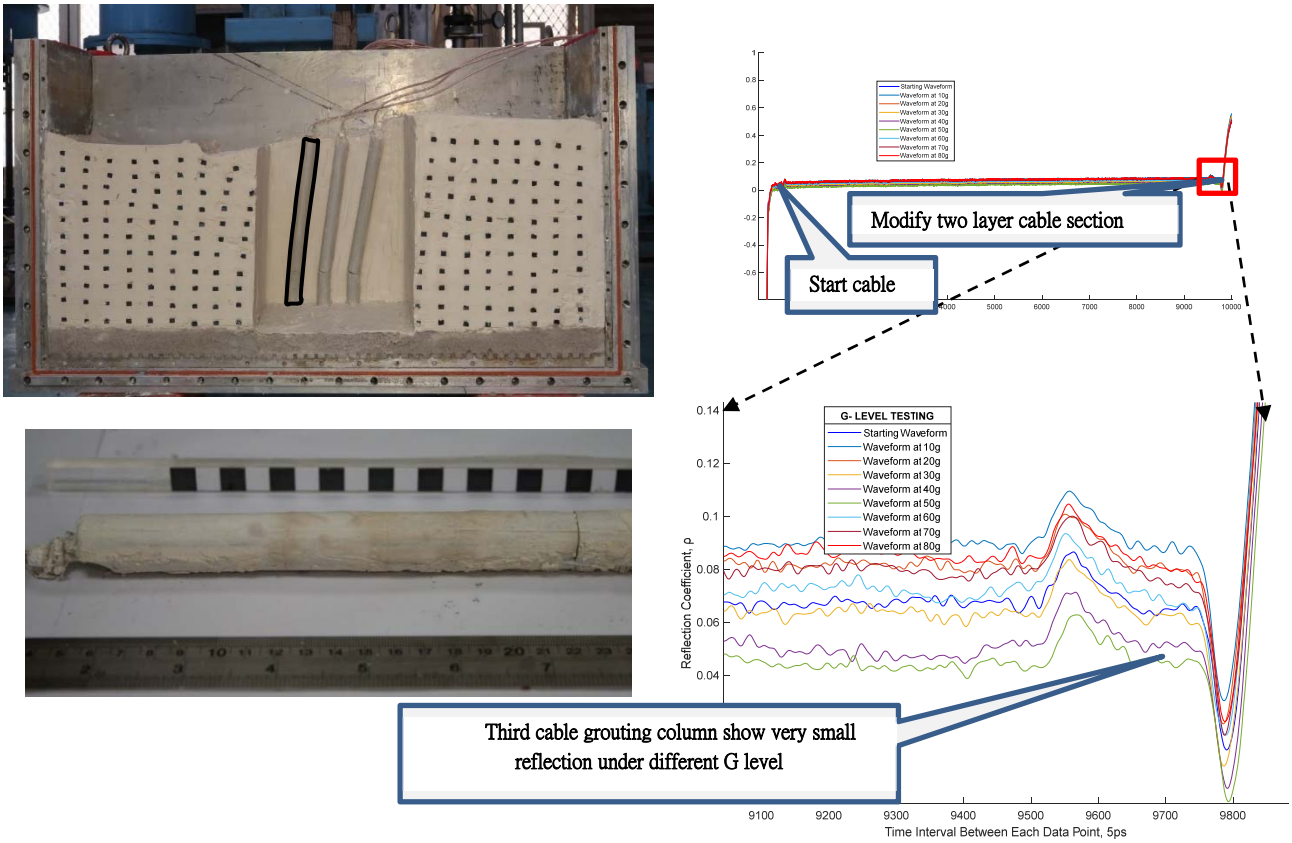


圖 4.34 河堤模型試驗第三支基礎於不同重力下之 TDR 波形結果

4.3 現地觀測站測試與淺/深層監測整合初步成果

4.3.1 TDR 觀測建置與成果

為進行阿里山五灣仔崩塌地區邊坡滑動監測，本研究已於公路 45K 旁安裝 TDR 100 m 深之地滑監測系統，以探討於淺層與深層處是否有明顯滑動，另外淺層滑動部分則由本研究開發之淺崩塌物聯網系統，進一步輔助探討是否有淺層滑動的現象。上述 TDR 鑽孔位置如圖 4.35 所示，現場設置主機如圖 4.36 所示，主要配置一台工業主機與 TDR 主機，以每小時監測頻率進行資料擷取，並由 4G 網路模組將資料以 FTP 同步方式上傳至中大主機，其電腦接收資料系統整體架構如圖 4.37 所示，運作流程圖如圖 4.38 所示。其中工業電腦並配置一組單頻 L1 GNSS，設定每日晚上六點整點收集 4 小時的 GNSS 資料。分別存檔後再以 FTP 軟體服務同步檔案回服務端。

期中報告於 7/1 至 7/15 所監測到的 TDR 變位型資料如圖 4.39 所示，7/16 至 7/31 如圖 4.40 所示。而目前至期末報告初稿繳交前，8 月至 11 月之 TDR 資料如圖 4.41 至圖 4.43 所示，目前尚無顯著之滑動跡象。

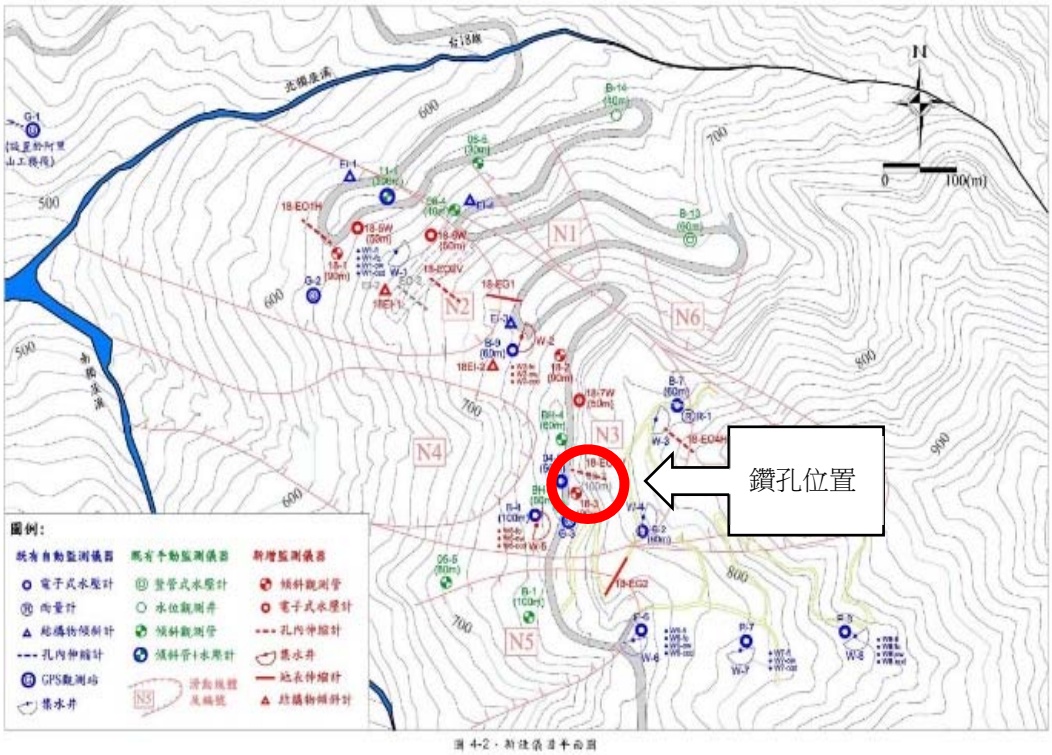


圖 4.35 鑽孔位置圖(公路總局)



圖 4.36 阿里山監測現場照(2019/6/27)

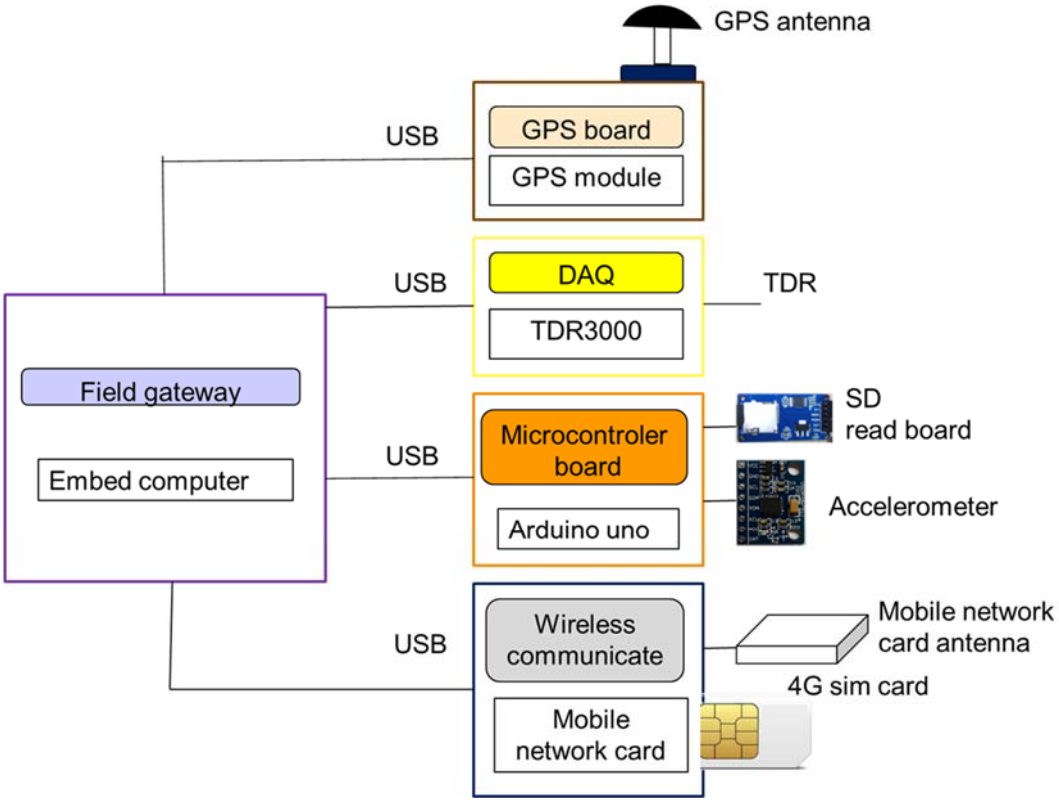


圖 4.37 阿里山之工業型電腦接收資料架構圖

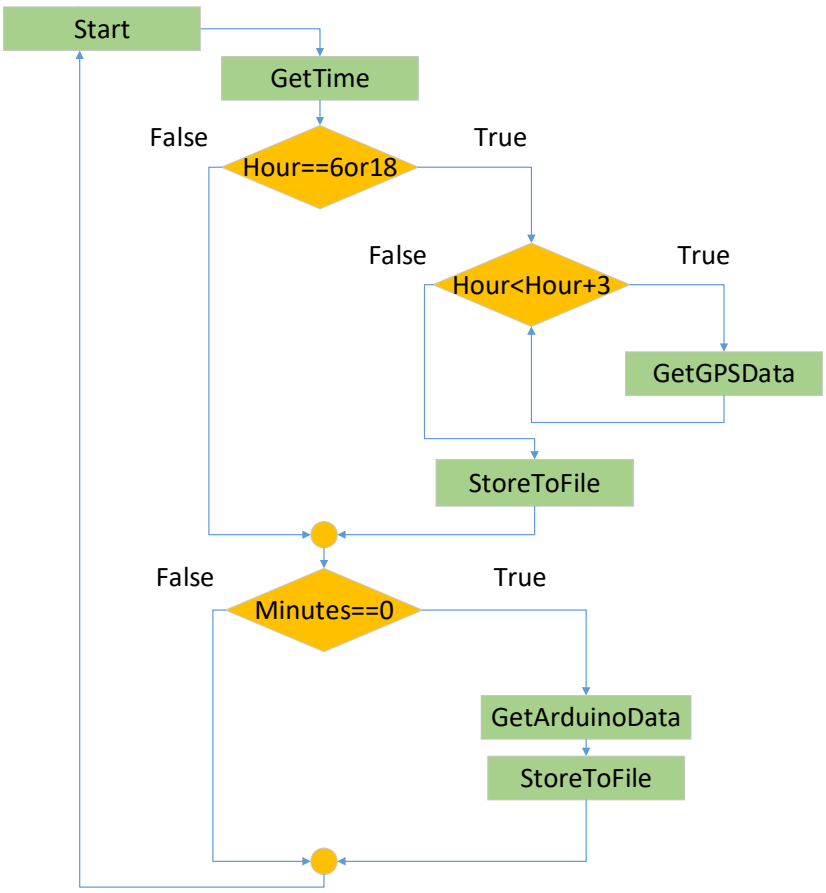


圖 4.38 阿里山之工業型電腦儲存資料機制流程圖

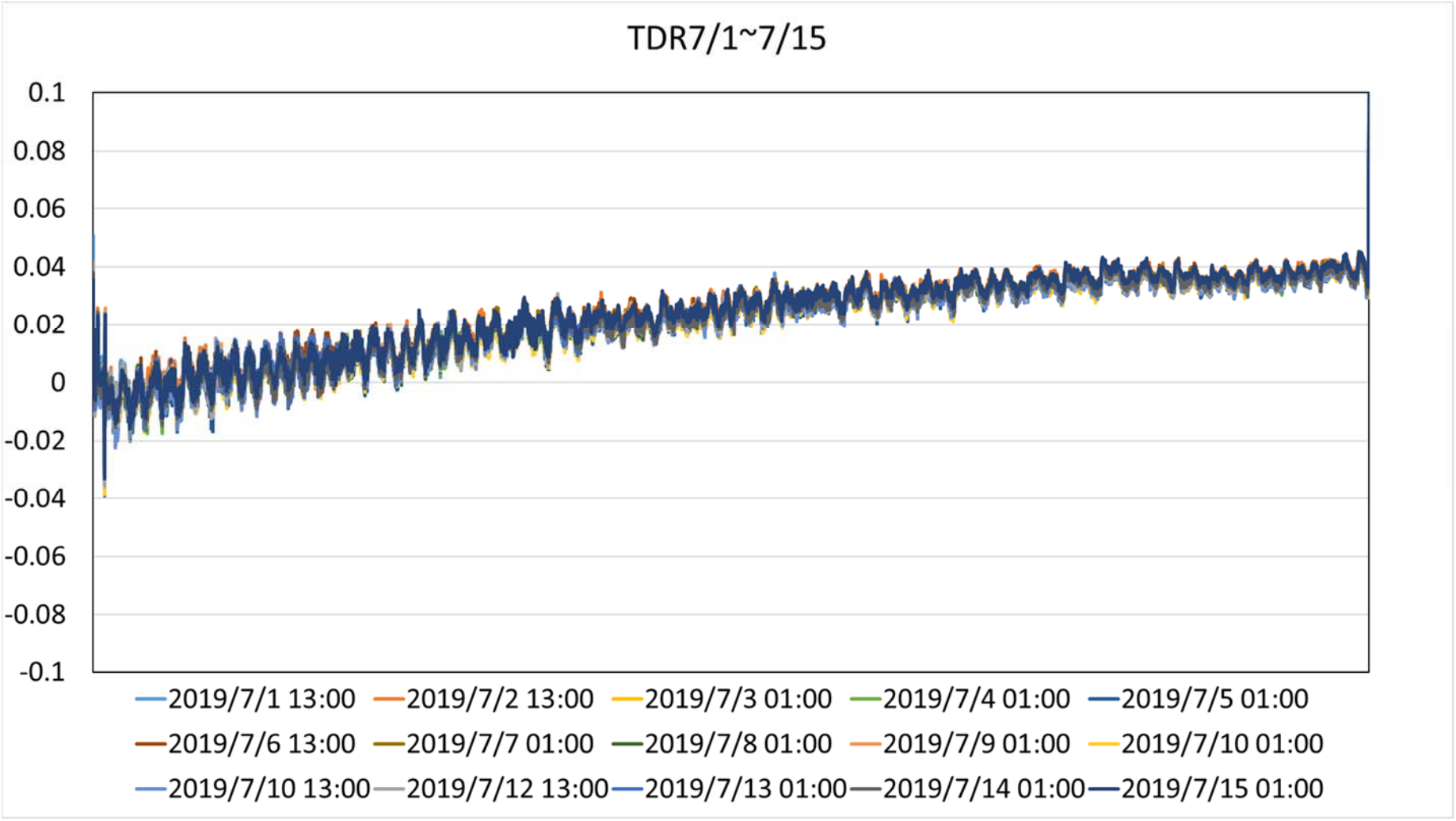


圖 4.39 阿里山公路 45K 7/1 至 7/5 TDR 變位型監測資料

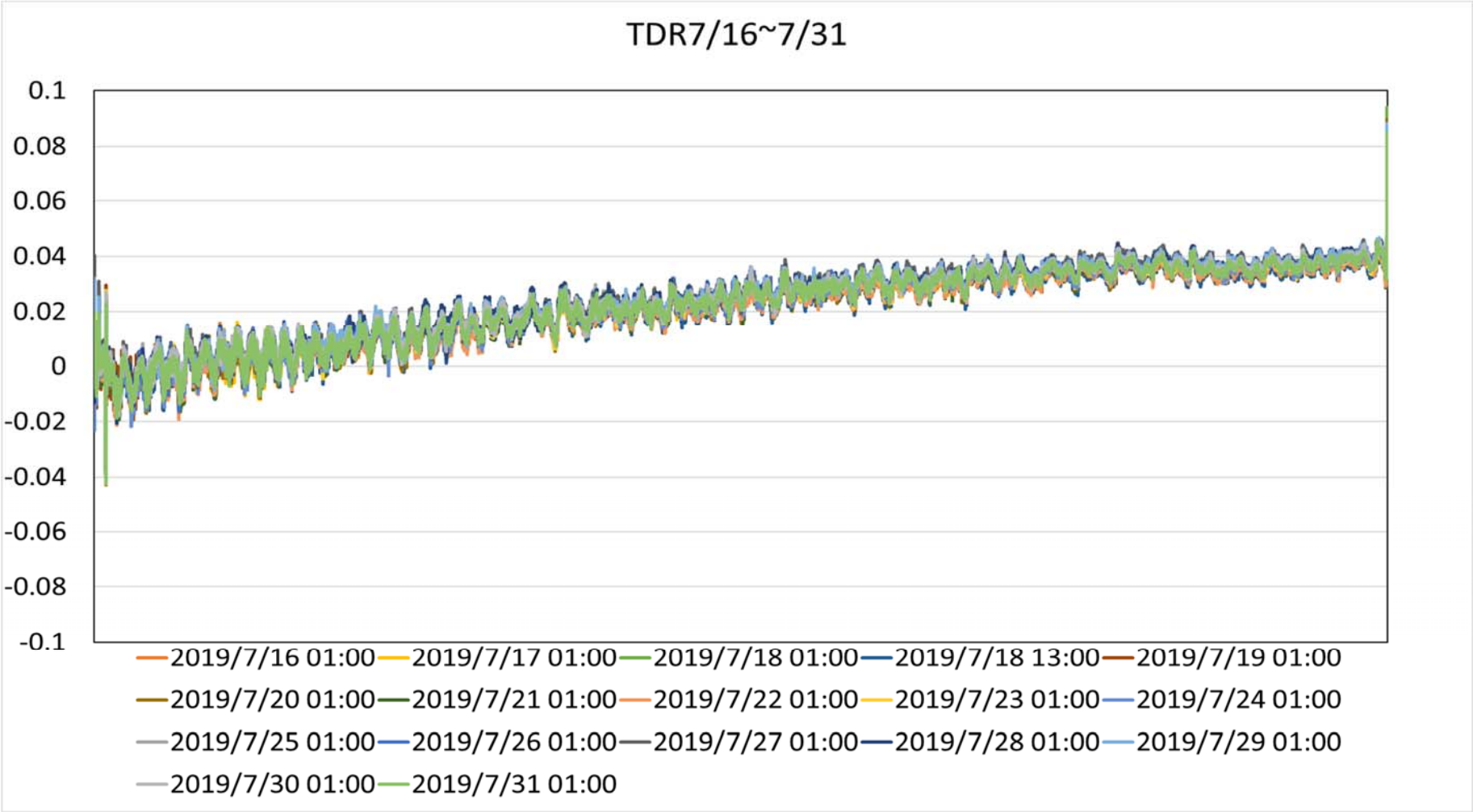


圖 4.40 阿里山公路 45K 7/16 至 7/31 TDR 變位型監測資料

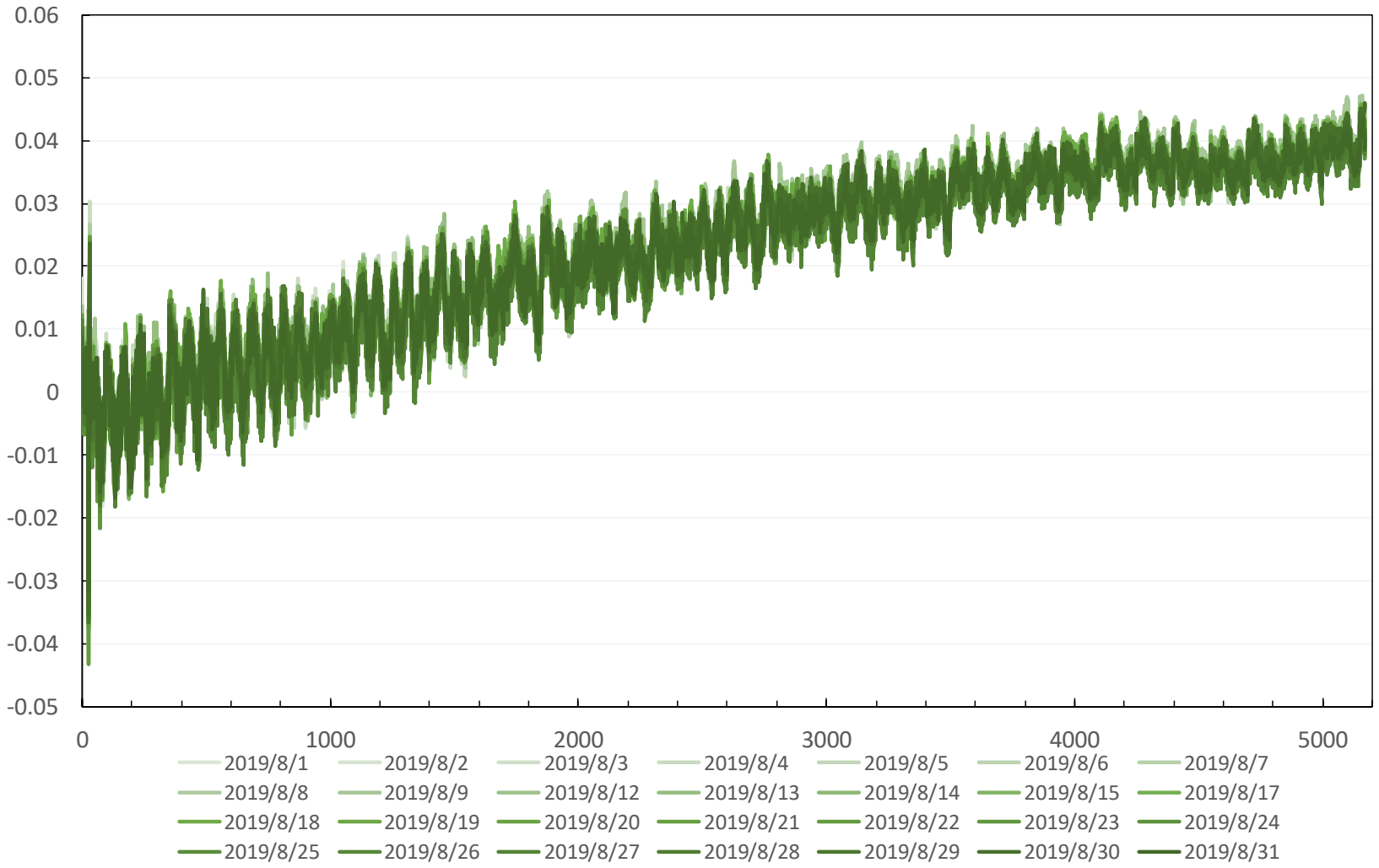


圖 4.41 阿里山公路 45K 8 月份 TDR 變位型監測資料

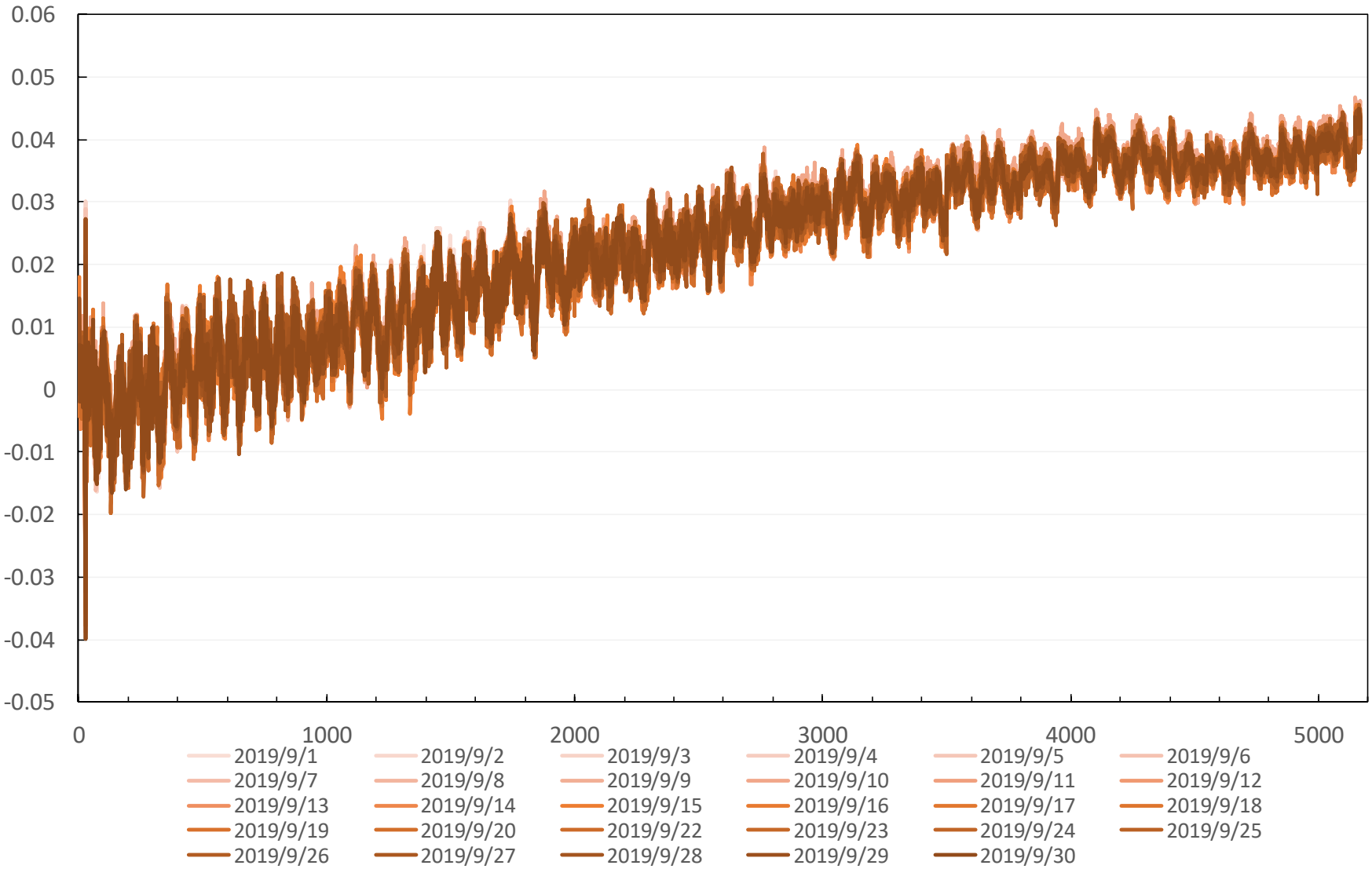


圖 4.23 阿里山公路 45K 9 月份 TDR 變位型監測資料

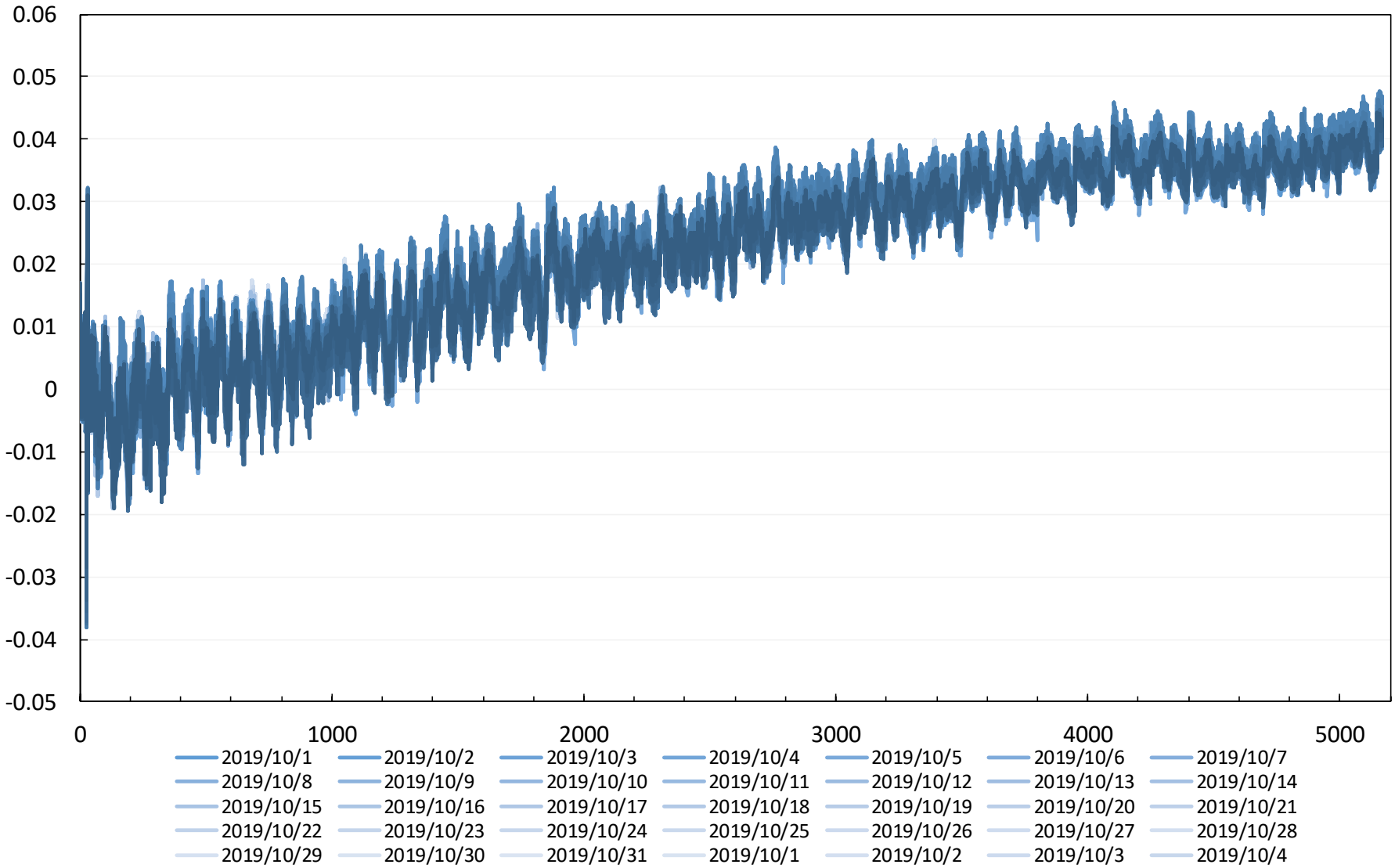


圖 4.42 阿里山公路 45K 10 月份 TDR 變位型監測資料

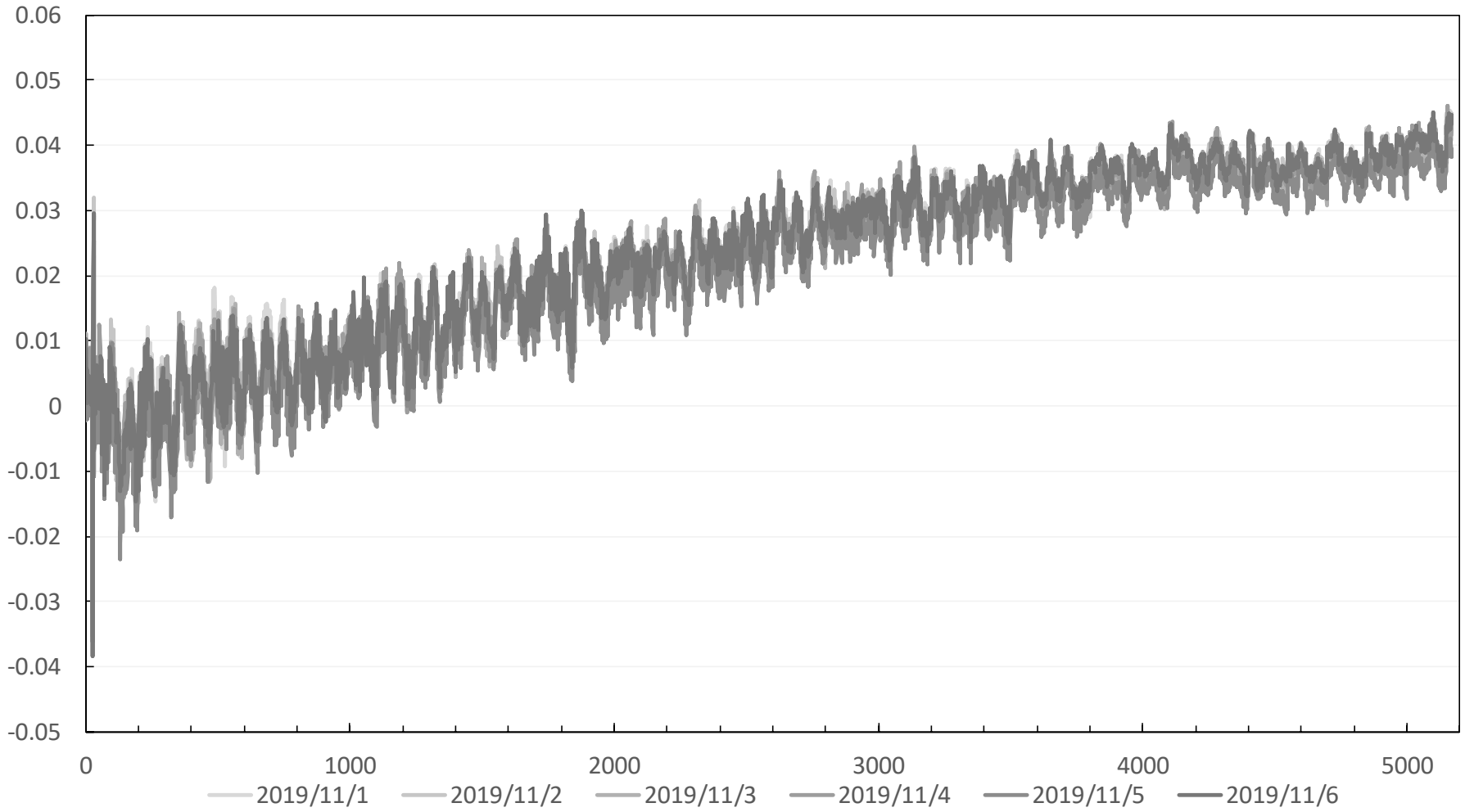


圖 4.43 阿里山公路 45K 11 月份 TDR 變位型監測資料

4.3.2 淺層監測系統建置與成果

承接上述 TDR 使用嵌入式電腦進行資料接收的工作，相關淺層觀測系統則毋須於 Arduino 系統加上傳輸模組，整體架構如圖 4.44 所示，監測流程圖如圖 4.45 所示，其中嵌入式電腦收集完資料後，透過 GoodSync 軟體的 FTP 備份功能，將阿里山現地監測資料檔案備份回服務端。Arduino 監測系統中三軸加速度計中 X 軸方向為大致約為由東向西、Y 軸為由北向南，即 Roll 為測量繞著東西向旋轉矩陣、Pitch 維繞著南北向旋轉矩陣，如圖 4.46 所示。

基於阿里山公路測站 Arduino 主要由現場工業型電腦供電與接收資料，其接收到的資料與氣象局所提供的奮起湖測站(測站位置如圖 4.47 所示)天氣資料兩相比較如下：

(1) 阿里山公路測站溫度部分由於悶在儀器箱，且箱內包含長時間運作之工業型電腦，整體溫度較高是可預期的狀況，如圖 4.48 與圖 4.49 所示。

(2) 濕度部分反而是氣象局資料皆高於 Arduino 所接收到的濕度資料，如圖 4.50 與圖 4.51 所示，溫度及濕度的上升、下降趨勢是大致上與氣象局提供的天氣資料吻合。

(3) Roll 與 Pitch 的資料可看出在 6/27 日、7/15 日以後大幅變化，主要是因為本研究團隊當日有前往現場重新組裝過箱內固定設備用的鍍鋅，導致 Roll 與 Pitch 監測到的數據有跳動之現象，如圖 4.52 及圖 4.54 所示。另外 7/15 前電池無法於半夜無太陽能時持續穩定供應電力，因此本計畫已於 7/15 更換電池，後續系統穩定持續運作。圖 4.53 為 8～10 月 Roll 仍大約保持一定趨勢，但圖 4.54 顯示 8～10 月 Pitch 資料於 8 月中有一小幅度跳動，但仍屬於量測誤差範圍內。

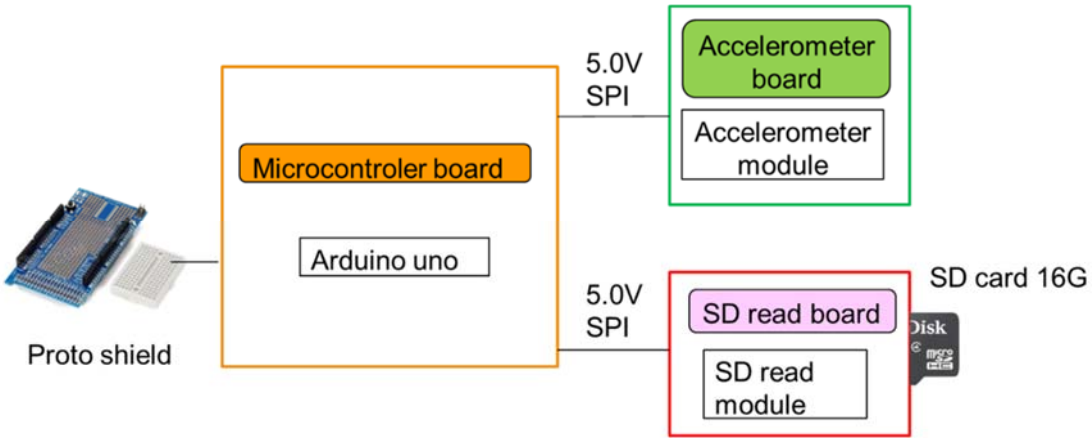


圖 4.44 阿里山 Arduino 系統架構圖

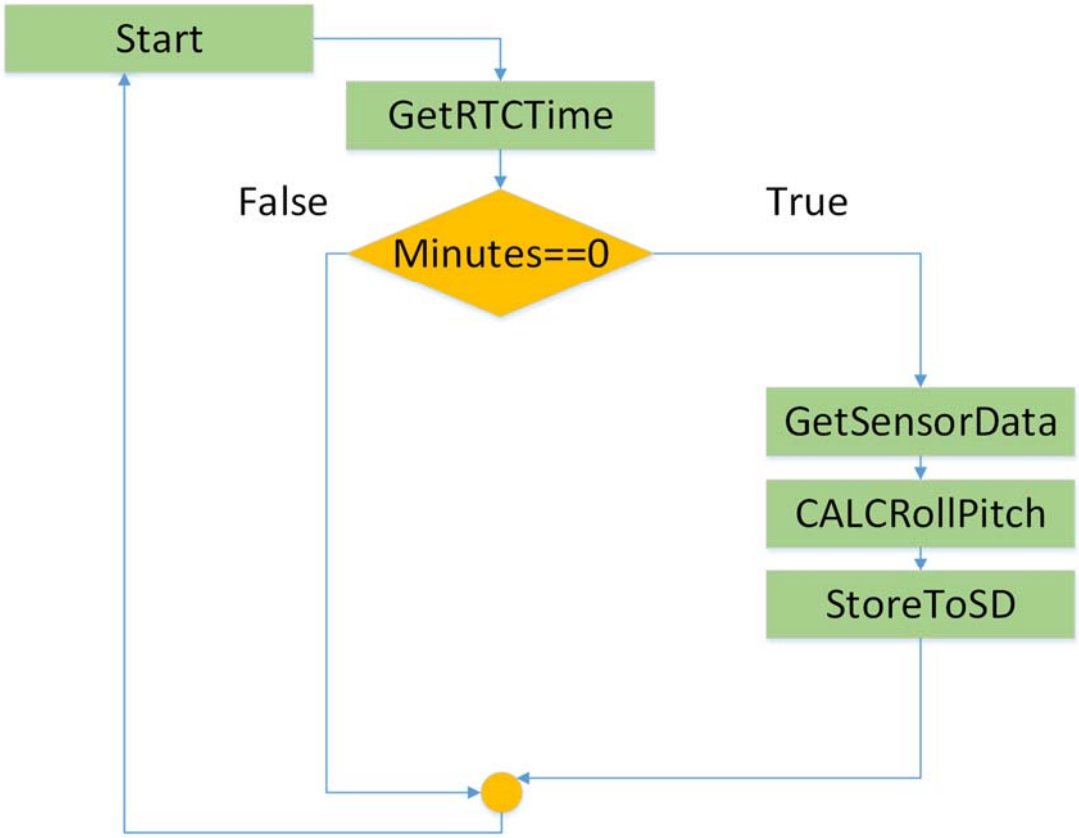


圖 4.45 阿里山 Arduino 系統運作流程圖



圖 4.46 阿里山公路 45K 測站三軸加速度計方向(Google Map)



圖 4.47 中央氣象局奮起湖測站位置

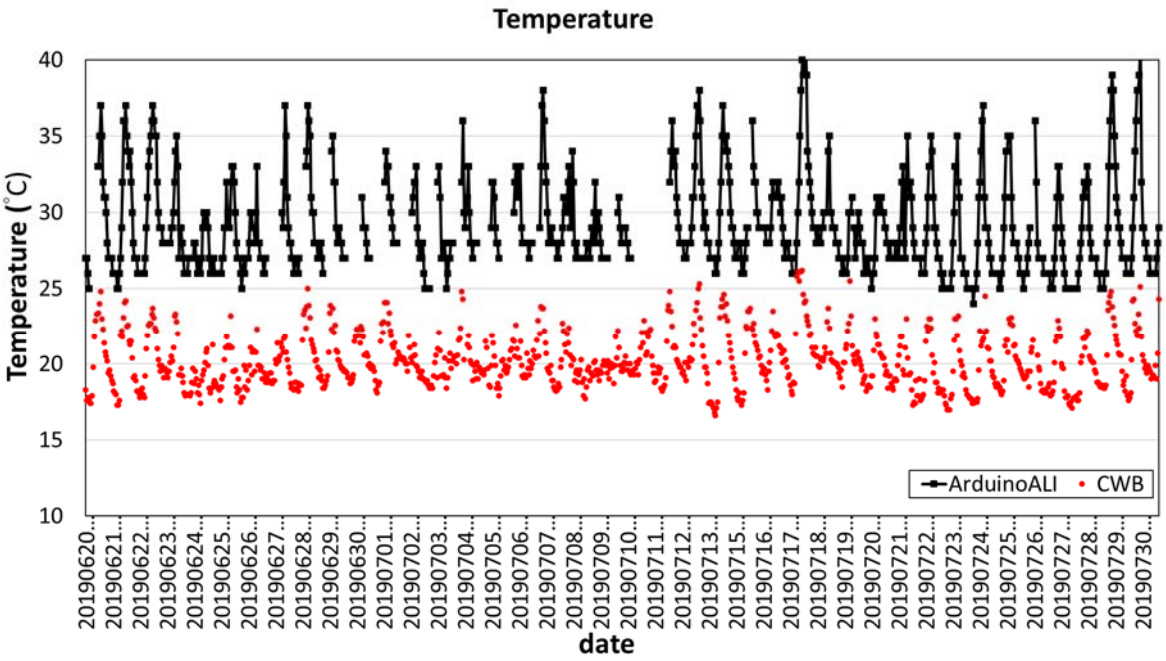


圖 4.48 7 月份阿里山公路測站現場端接收之溫度資料與氣象局比較圖

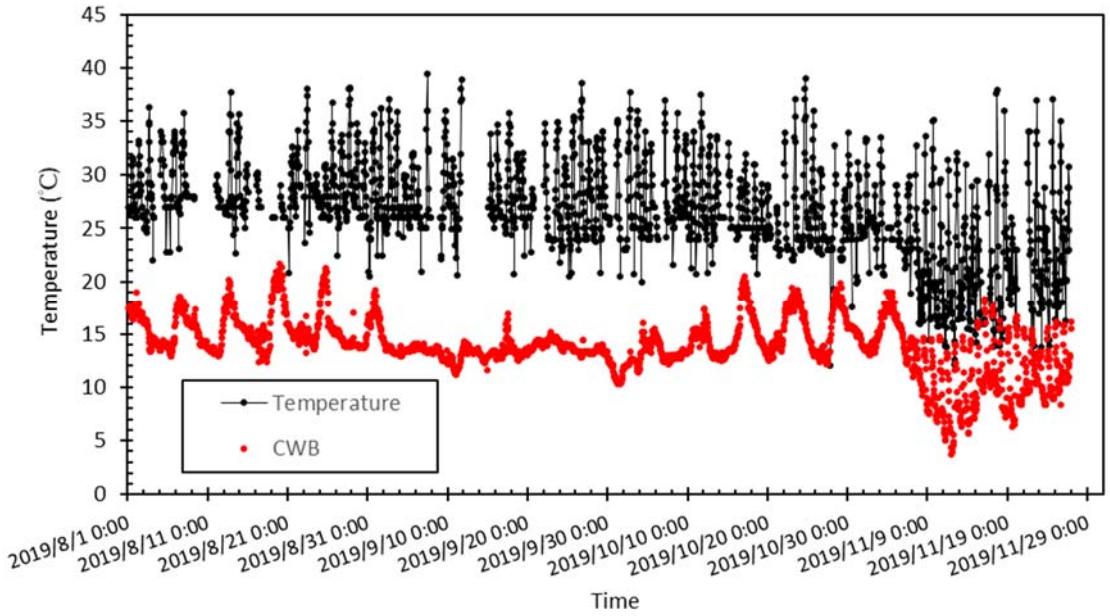


圖 4.49 8～11 月份阿里山公路測站現場端接收之溫度資料與氣象局比較圖

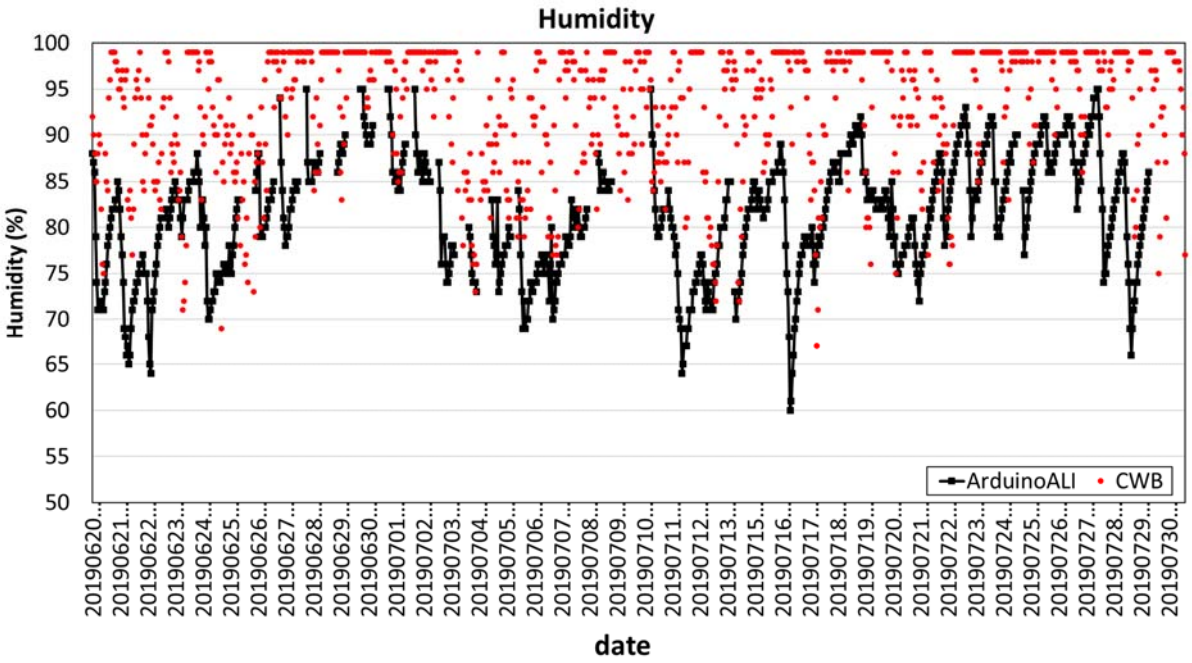


圖 4.50 7 月份阿里山公路測站現場端接收之濕度資料與氣象局比較圖

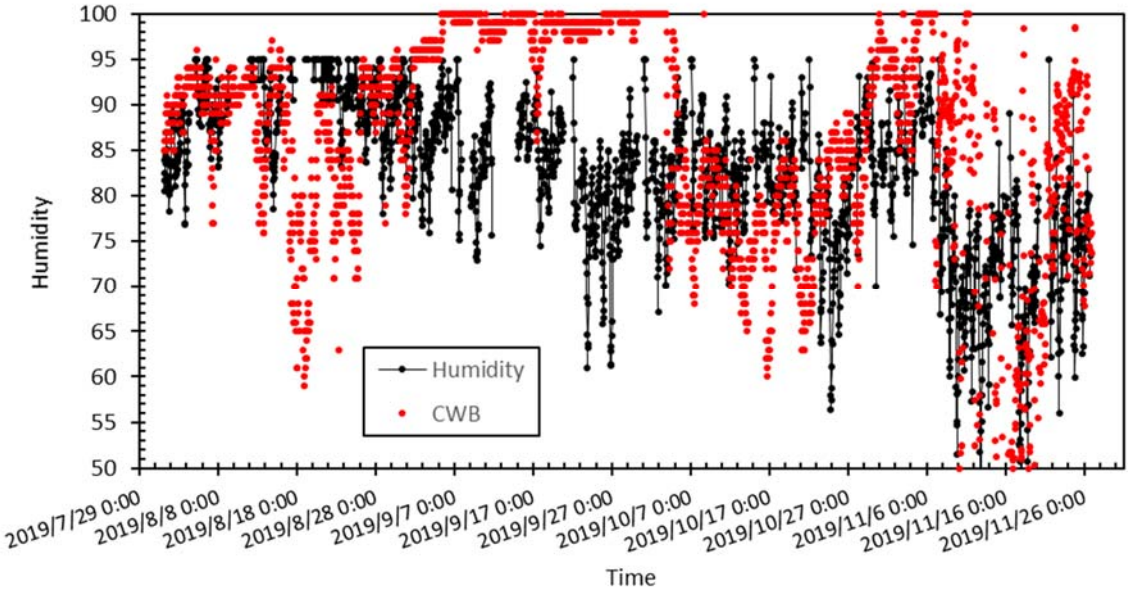


圖 4.51 8～11 月份阿里山公路測站現場端接收之濕度資料與氣象局比較圖

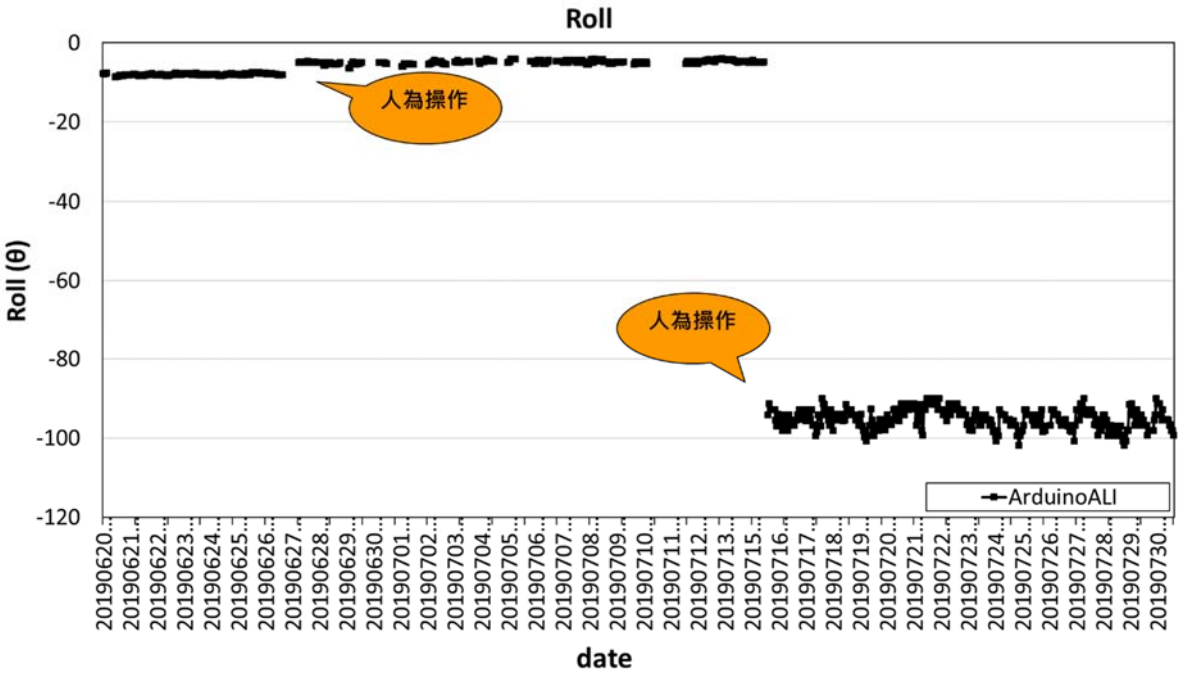


圖 4.52 7 月份阿里山公路測站現場端接收之 Roll 資料

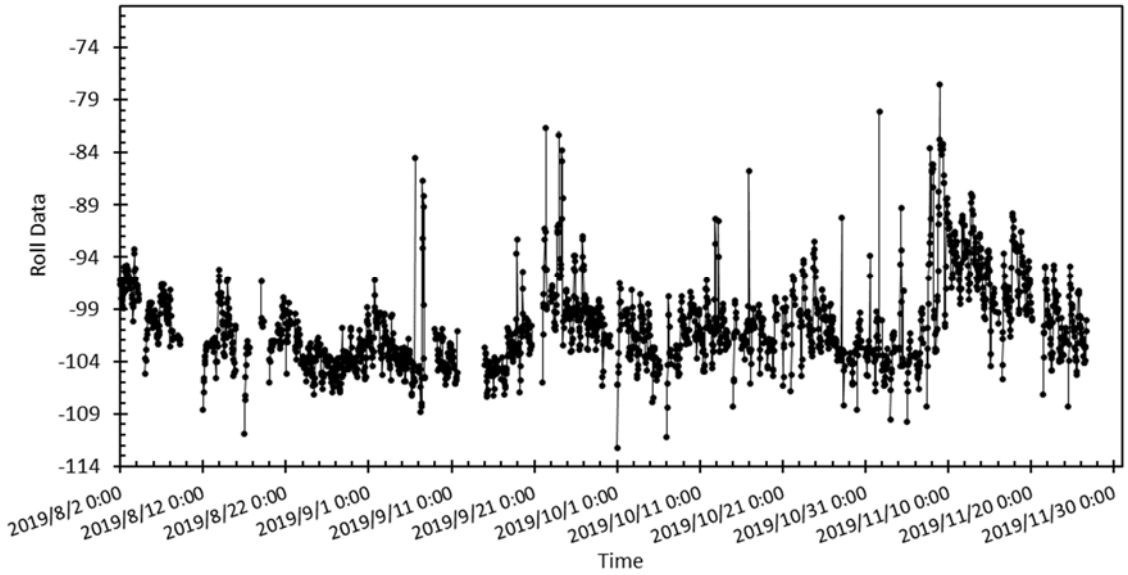


圖 4.53 8～11 月份阿里山公路測站現場端接收之 Roll 資料

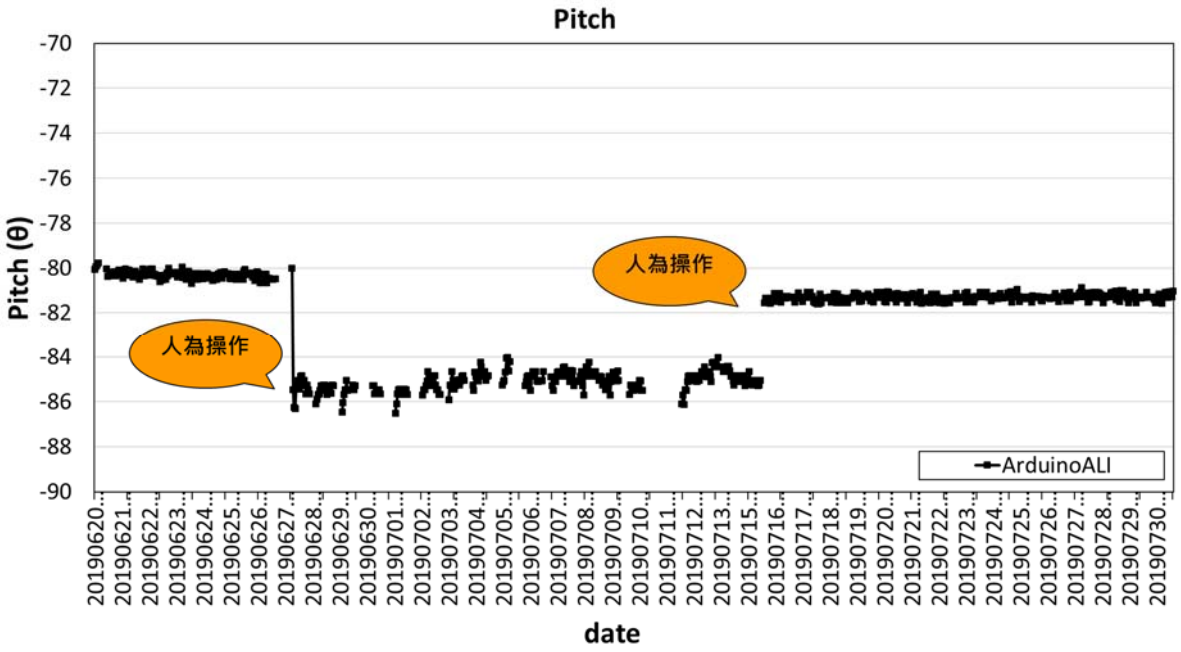


圖 4.54 7 月份阿里山公路測站現場端接收之 Pitch 資料

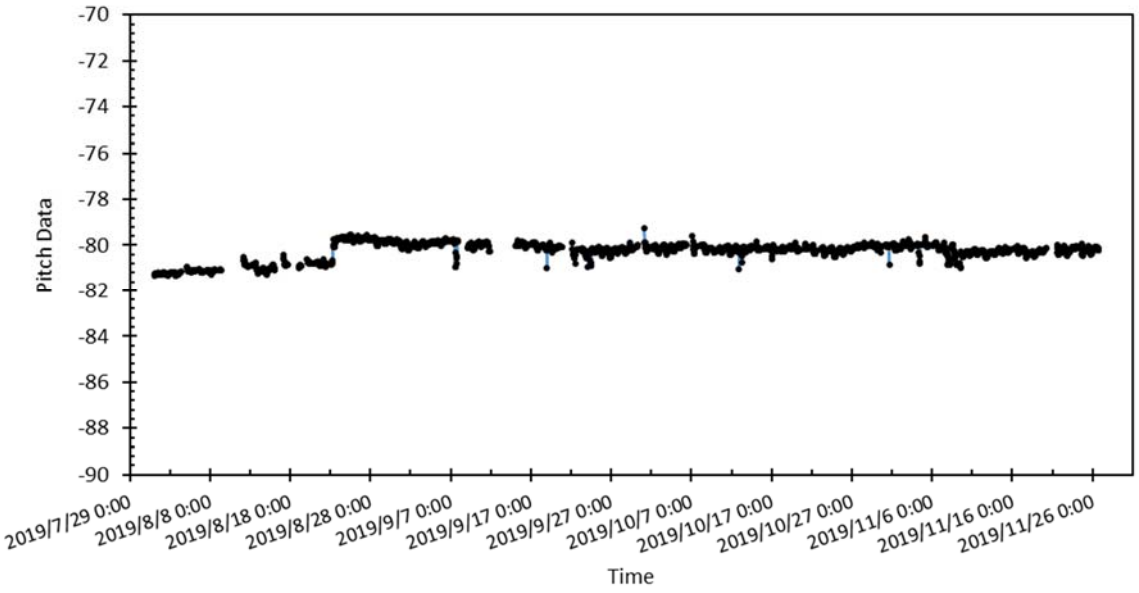


圖 4.55 8～11 月份阿里山公路測站現場端接收之 Pitch 資料

4.3.3 L1 GNSS 監測初步成果

阿里山公路 45K 現場端工業型電腦接收之 GNSS 訊號先以 TWTF 測站作為基準站進行解算，但受限於 RTKLib 軟體之記憶體可用範圍限制，單次合併解算的資料約以總共 28 小時，如一天四小時最大資料解算天數為 7 天。因此以 RTKLib 解算後，6/28 至 7/31 座標於 Google Earth

上呈現如圖 4.56 所示，解算資料位置圖分別 6/28 至 7/16 如圖 4.57 所示；7/17 至 7/23 如圖 4.58 所示；7/24 至 7/30 如圖 4.59 所示，時間軸變化分別 6/28 至 7/16 如圖 4.60 所示；7/17 至 7/23 如圖 4.61 所示；7/24 至 7/30 如圖 4.62 所示。

由於 RTK 解算是以 20 公里以內為較佳解算距離，但 TWTF 基準站坐落於桃園，距離阿里山超過 100 公里，解算結果雖顯示現地可能有滑動的跡象，但其可信度不佳。故本研究嘗試以虛擬基站(VBS)做為解算的基站(如 4.1 節所示)，VBS 基站位置模擬設置於測站旁的路上。解算結果位置如圖 4.63 所示，時間軸如圖 4.64 所示，與上述 TWTF 作為基準站解算之資料相比，並未有顯著滑動的趨勢。但必須提醒上述配合 VBS 虛擬基站下解算成果僅有 Q2 浮動定位精度，因此後續本研究嘗試採用嘉義竹崎固定站，僅距阿里山五彎仔 GNSS 測站基線距離約 13.3 km，屬中長基線距離來進行 RTK 解算。

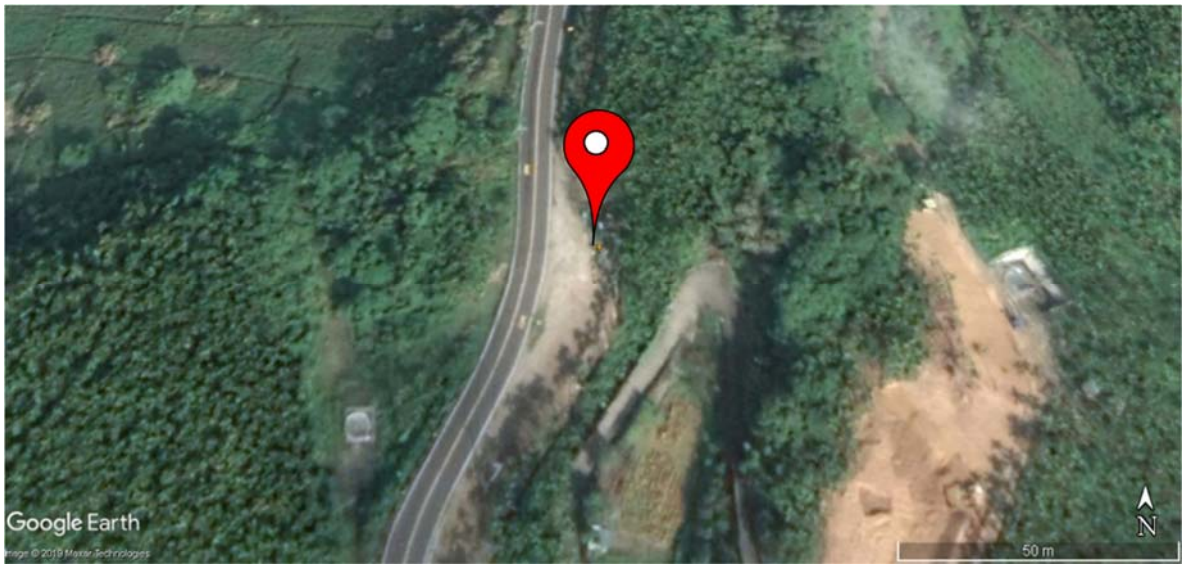


圖 4.56 阿里山公路 45K 測站 GNSS 資料解算後 Google Earth 呈現圖 (Google Earth)

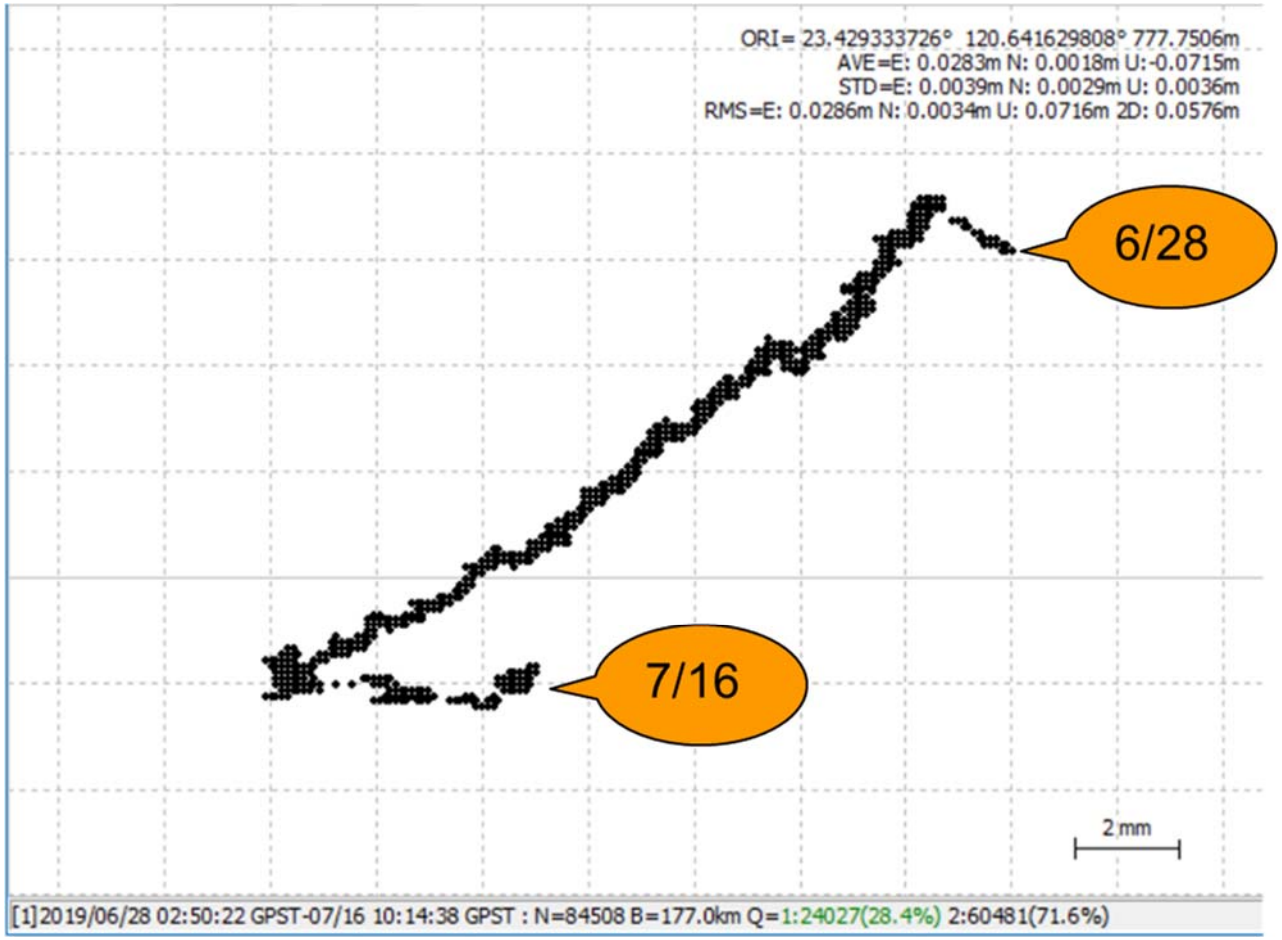


圖 4.57 阿里山公路 45K 6/28 到 7/16 GNSS 資料 RTK 解算位置圖

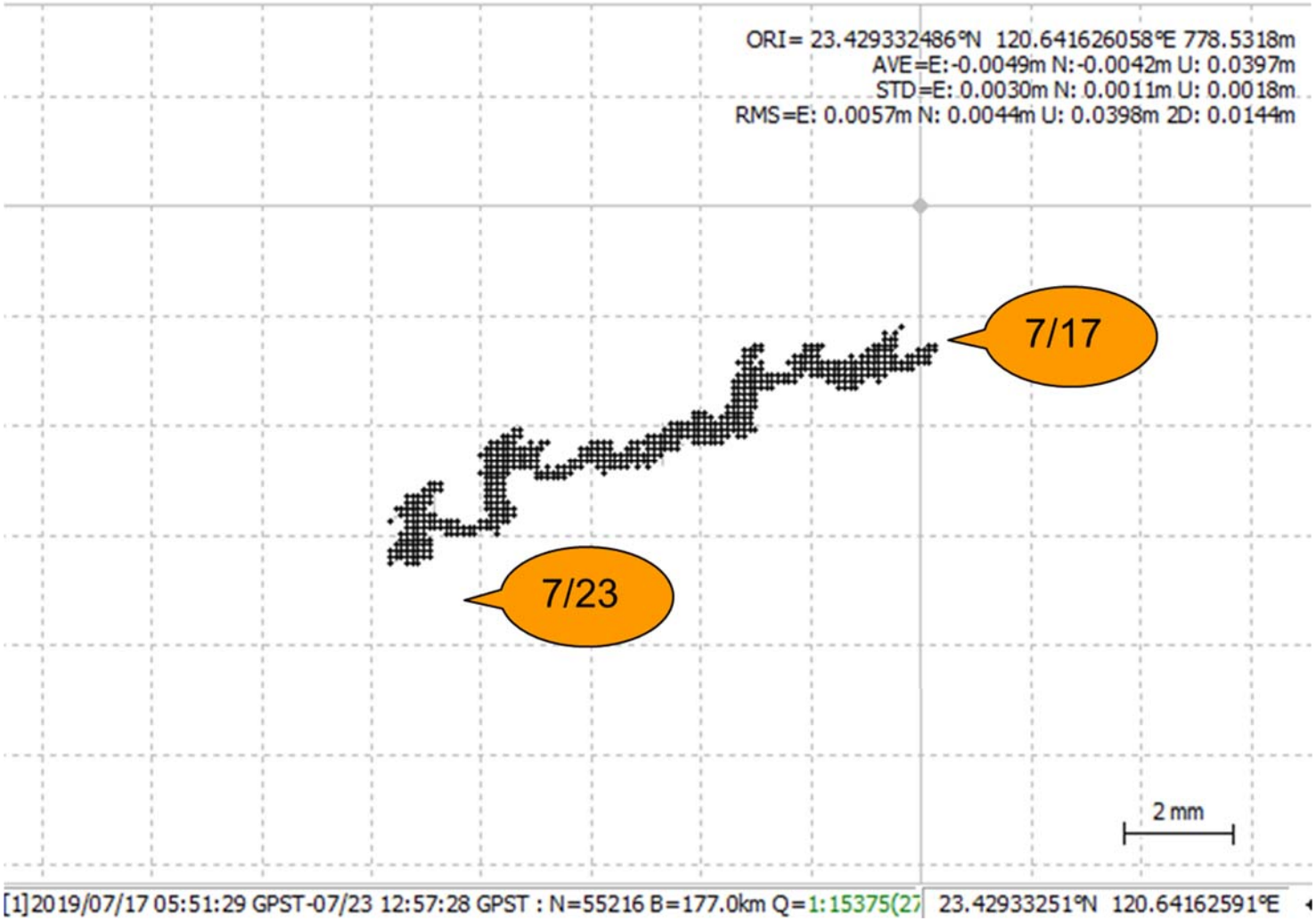


圖 4.58 阿里山公路 45K 7/17 到 7/23 GNSS 資料 RTK 解算位置圖

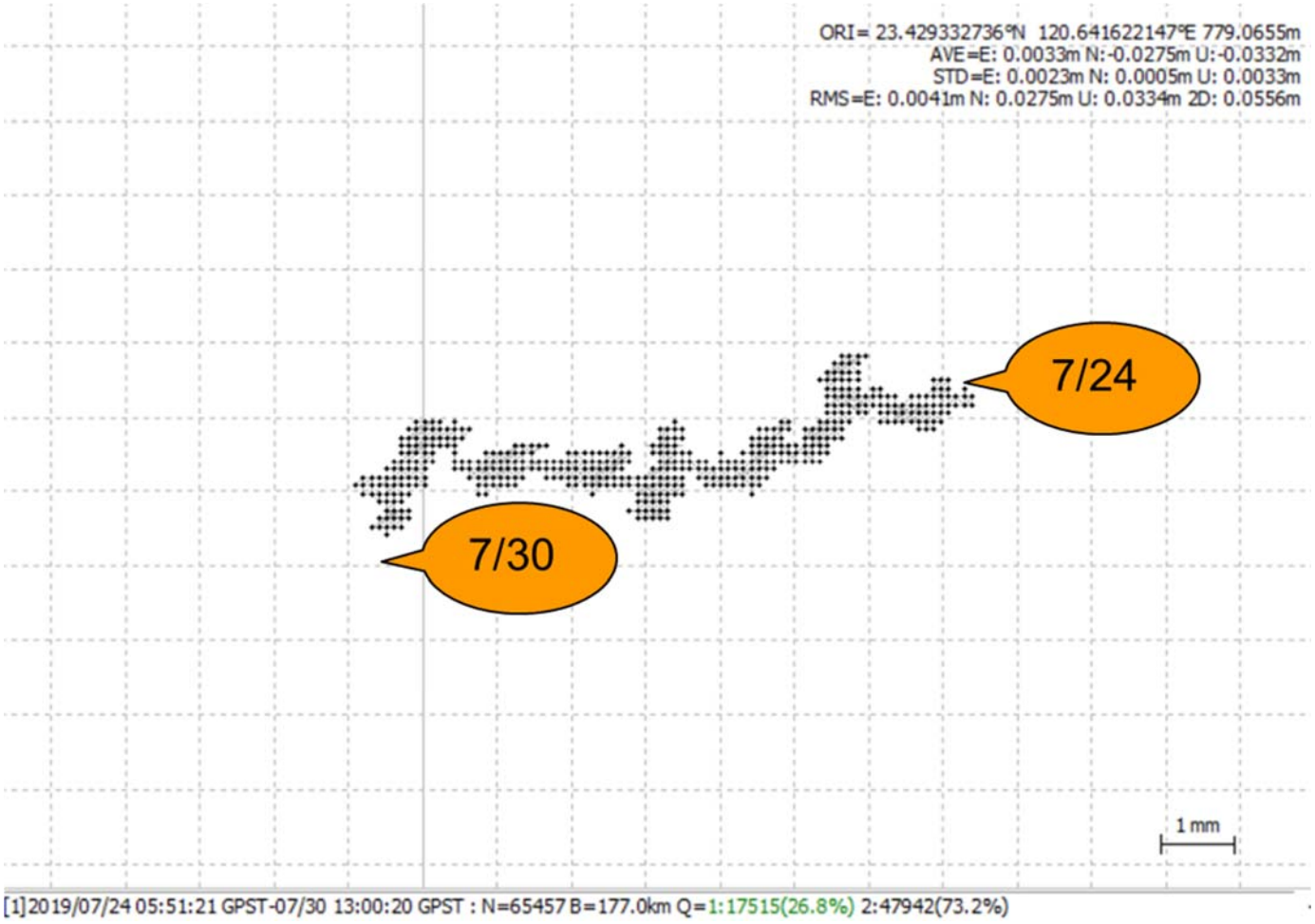


圖 4.59 阿里山公路 45K 7/24 到 7/30 GNSS 資料 RTK 解算位置圖

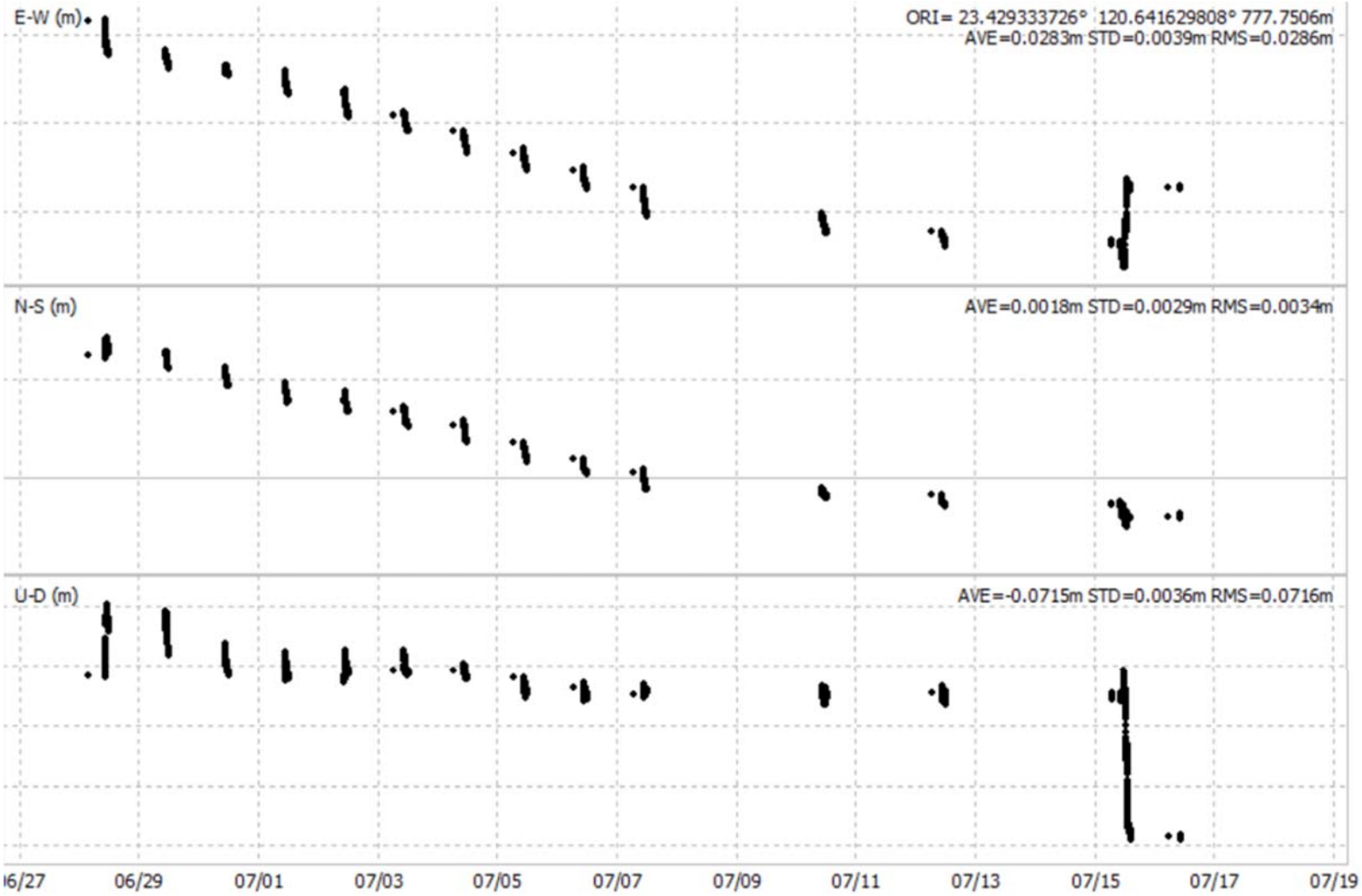


圖 4.60 阿里山公路 45K 6/28 到 7/16 測站 GNSS 資料 RTK 算時間軸

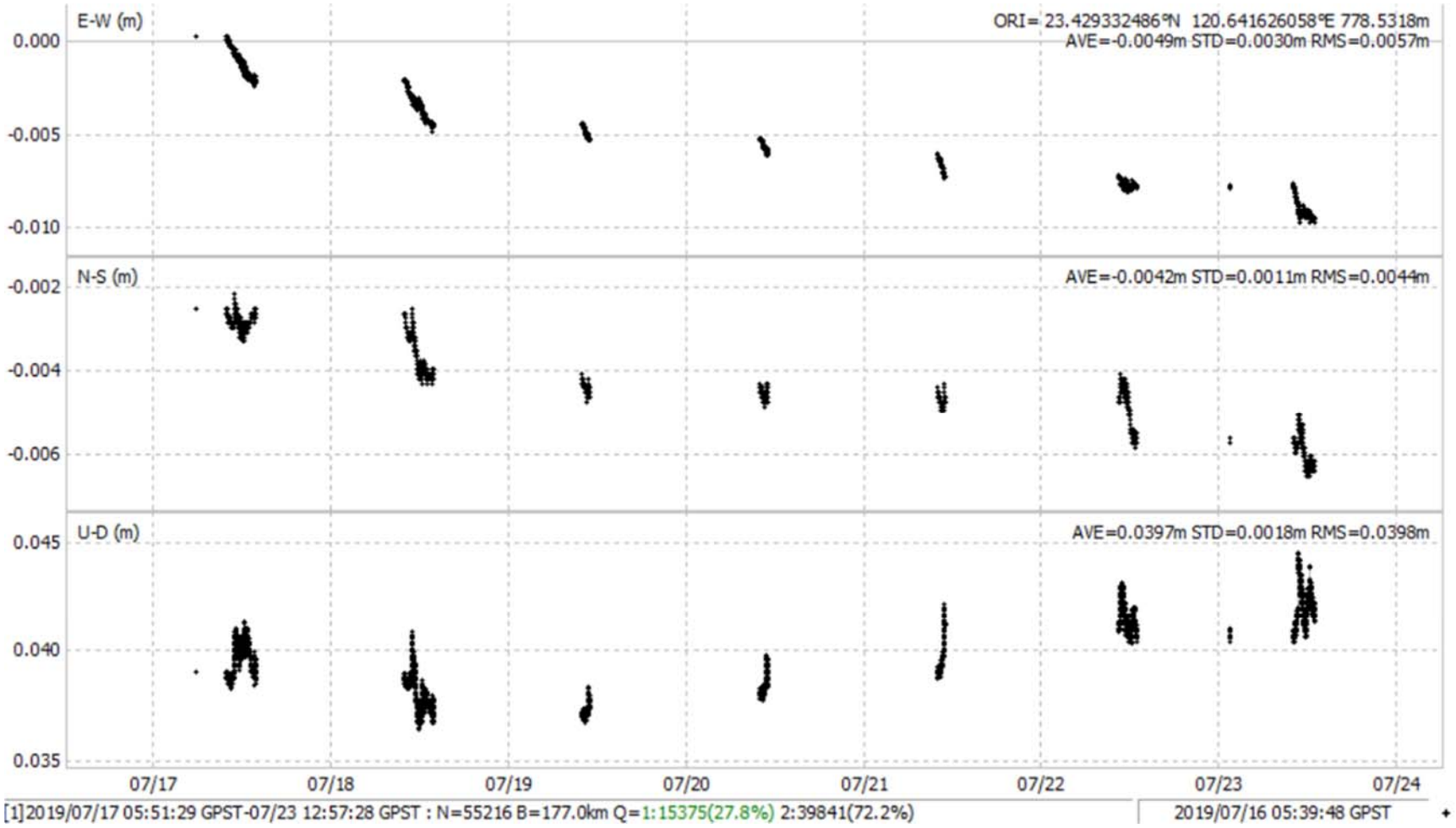


圖 4.61 阿里山公路 45K 7/17 到 7/23 測站 GNSS 資料 RTK 算時間軸

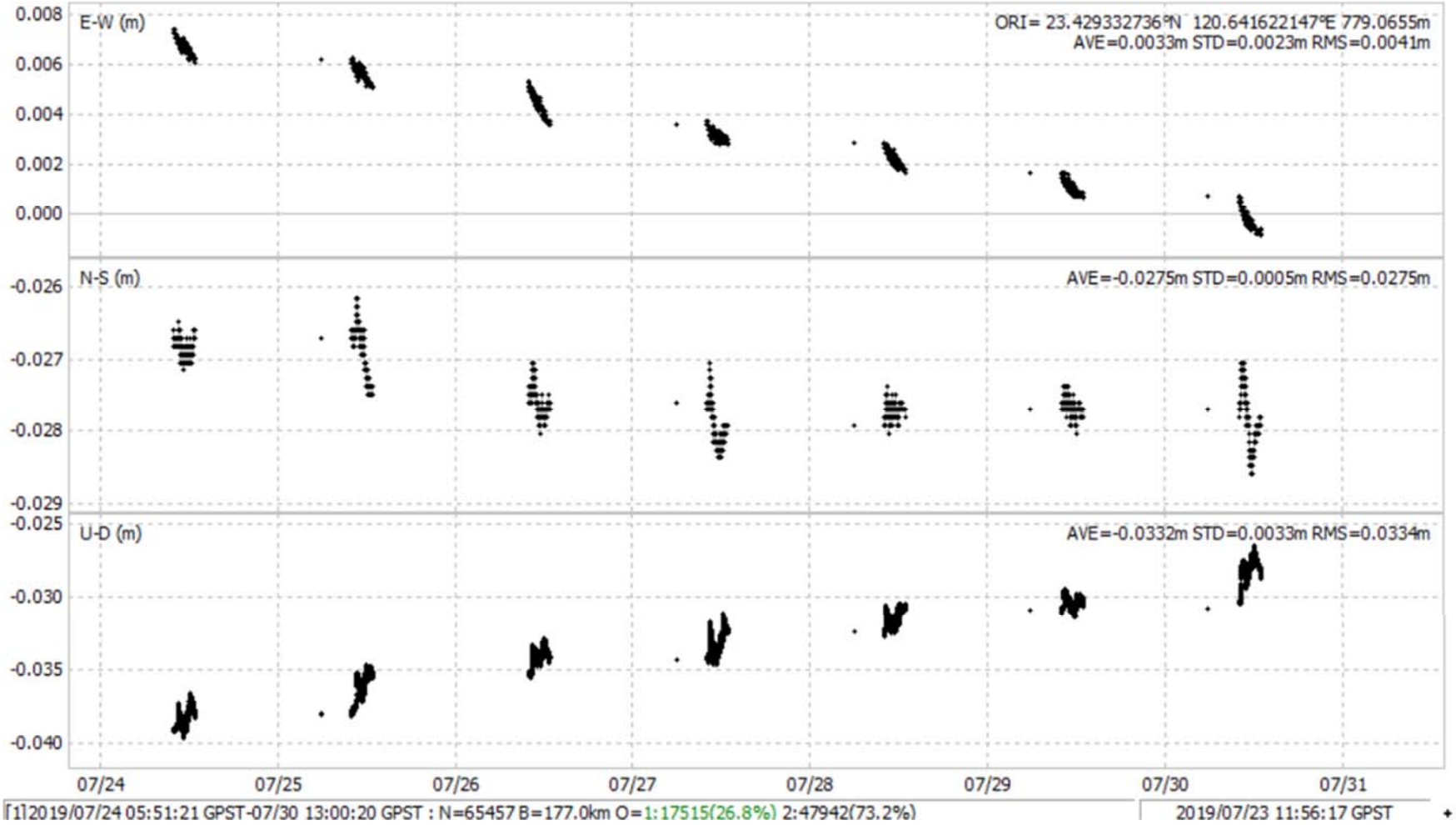


圖 4.62 阿里山公路 45K 7/24 到 7/30 測站 GNSS 資料 RTK 算時間軸

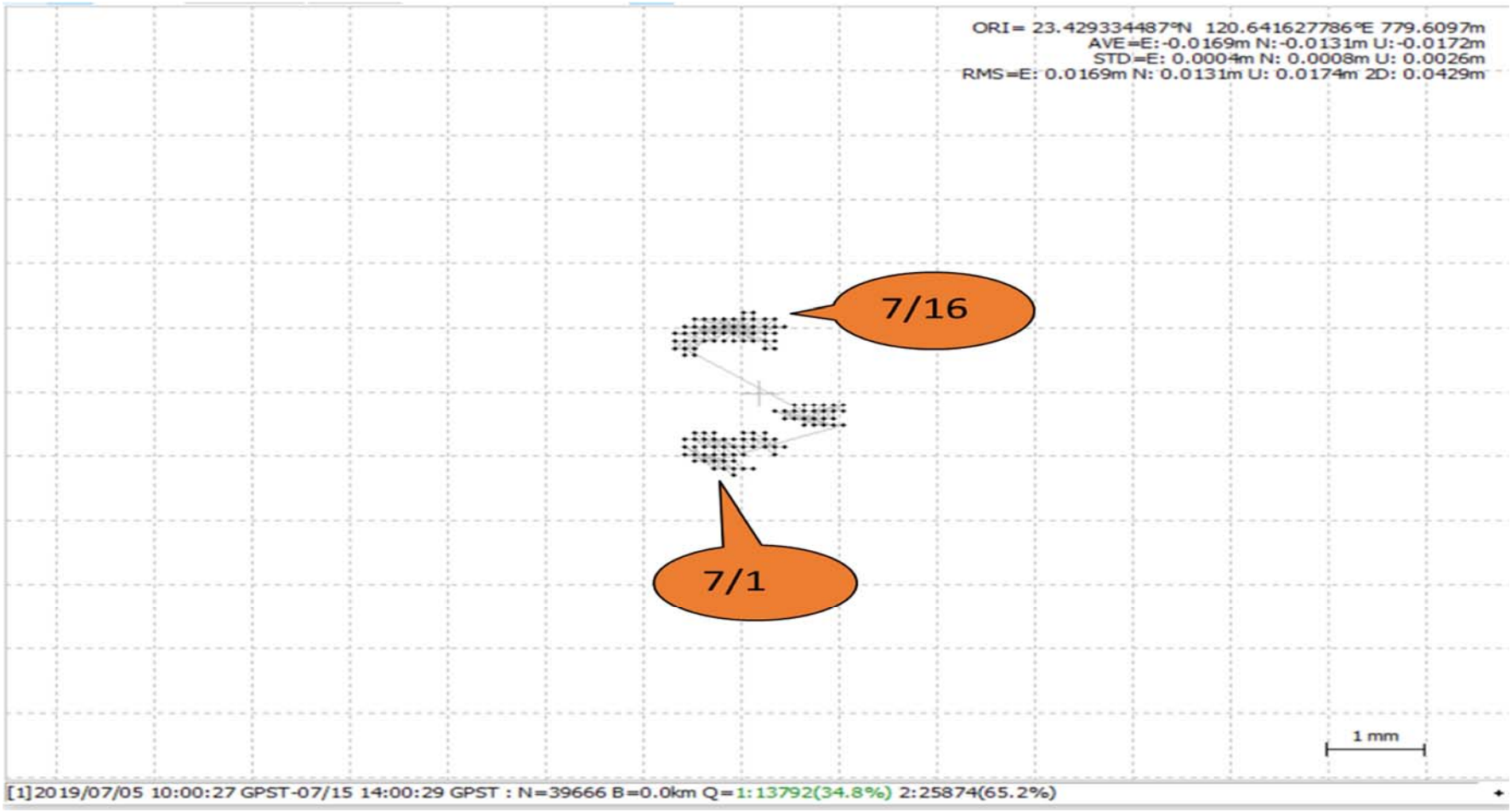


圖 4.63 阿里山公路 45K 測站 GNSS 資料以虛擬測站解算位置圖

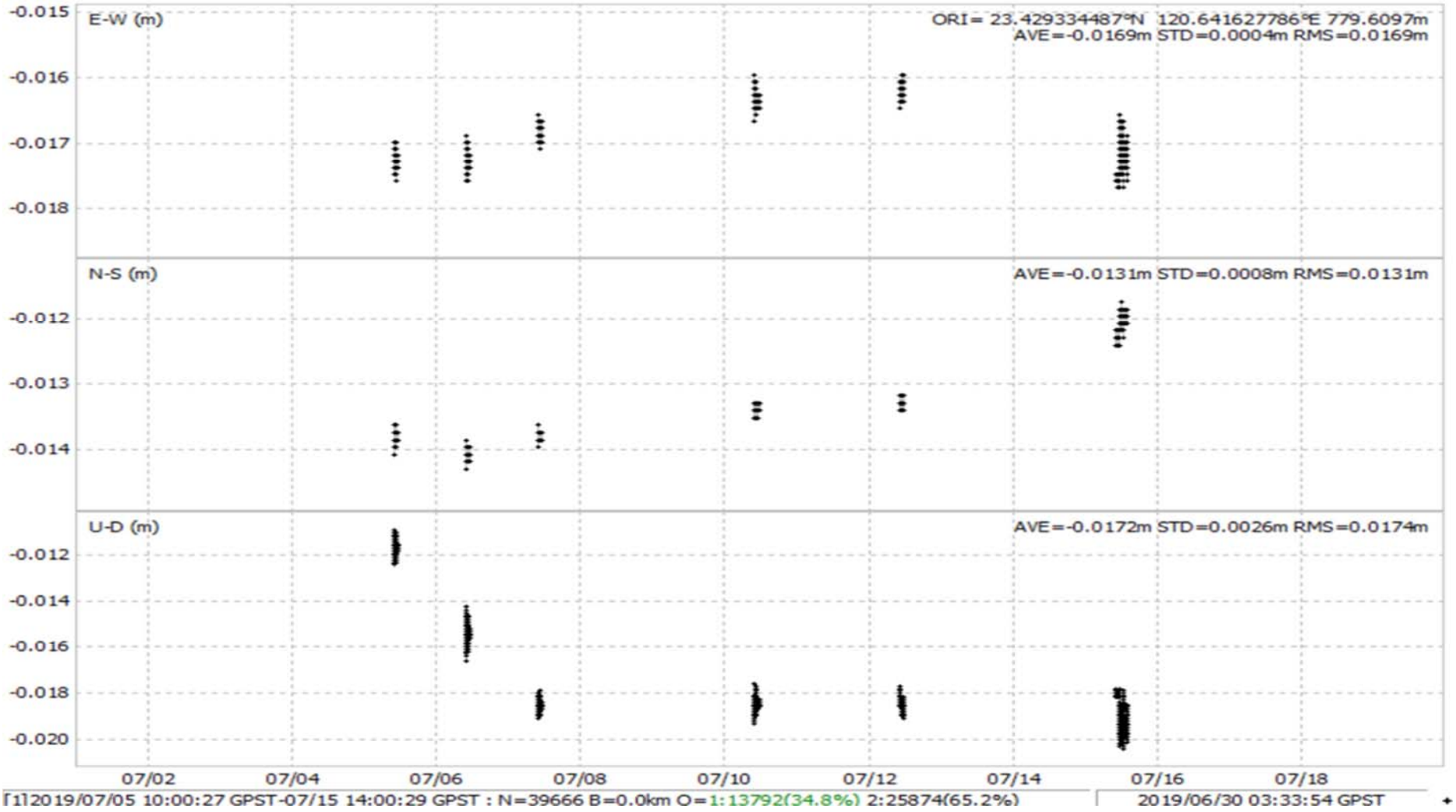


圖 4.64 阿里山公路 45K 測站 GNSS 資料以虛擬測站解算時間軸

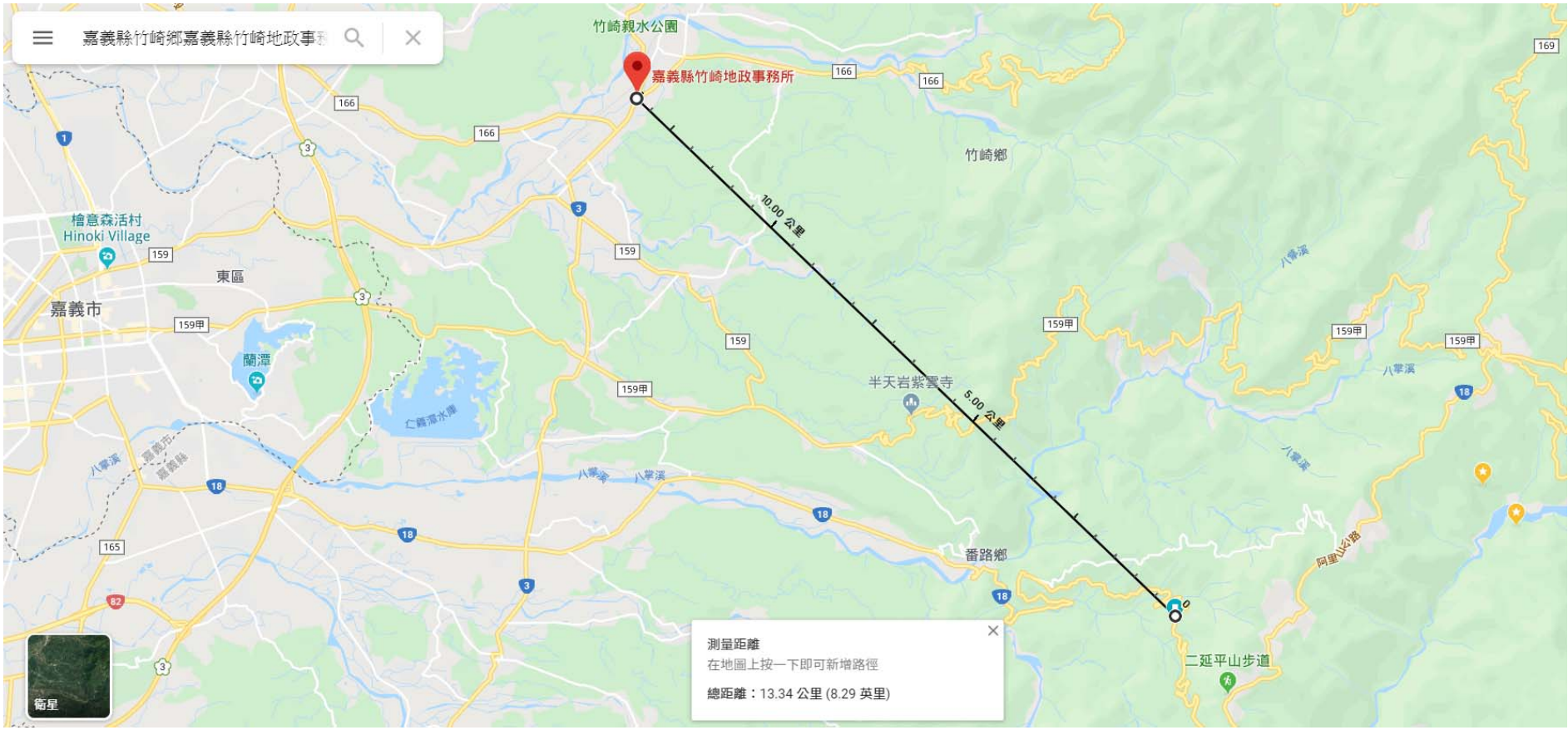


圖 4.65 嘉義竹崎固定站距阿里山五彎仔 GNSS 測站基線距離

採用嘉義竹崎固定站進行 RTK 解算之成果如圖 4.66 至圖 4.68，其中各點資料為每小時之平均點位（已先去除顯著之偏移資料），結果顯示除部分較為離散之資料外，整體東西與南北向趨勢大至持平，而高度方面仍受限 GNSS 精度，約有誤差偏量。整體而言應可有效配合竹崎固定站而進行單頻 GNSS 定位使用。

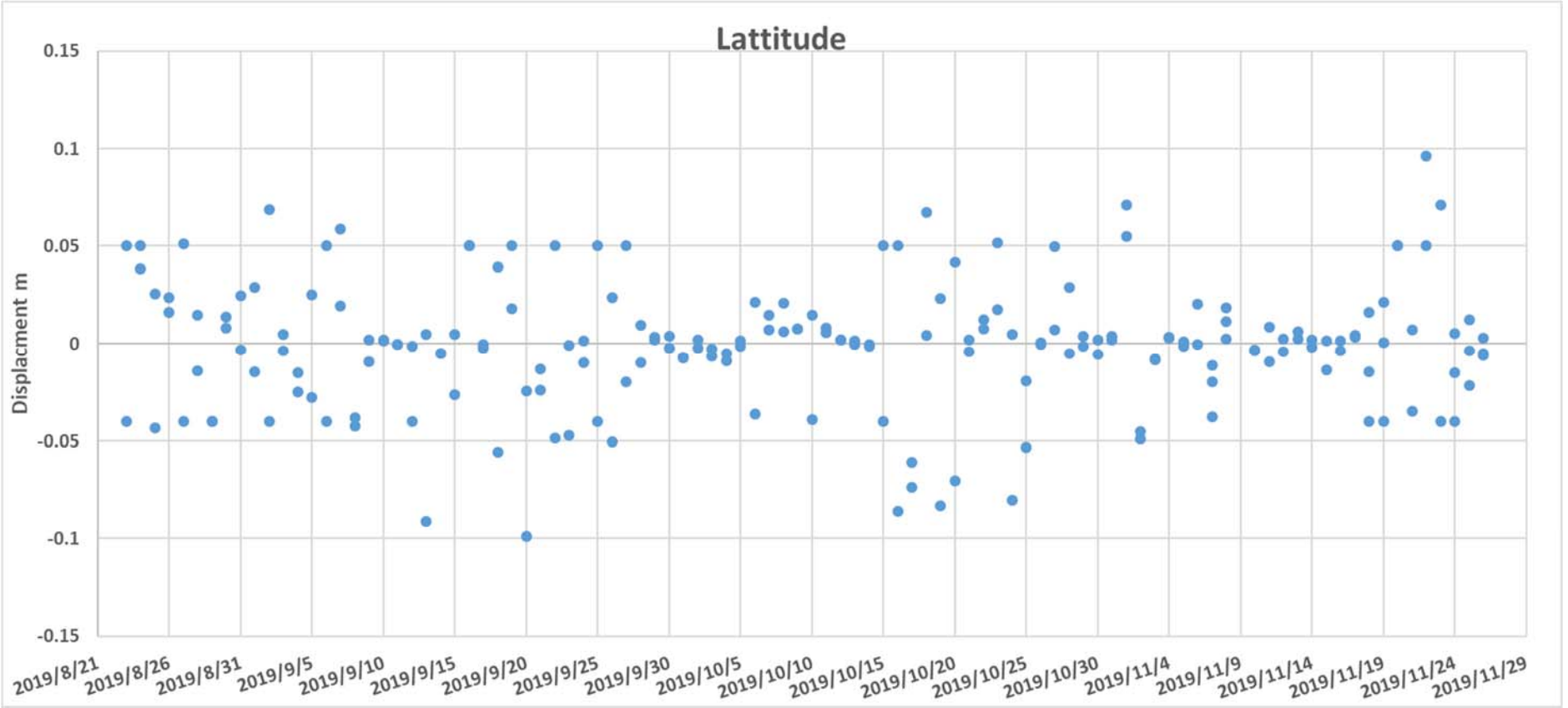


圖 4.66 配合竹崎固定站之 RTK Static 8～11 月定位結果（東西向）

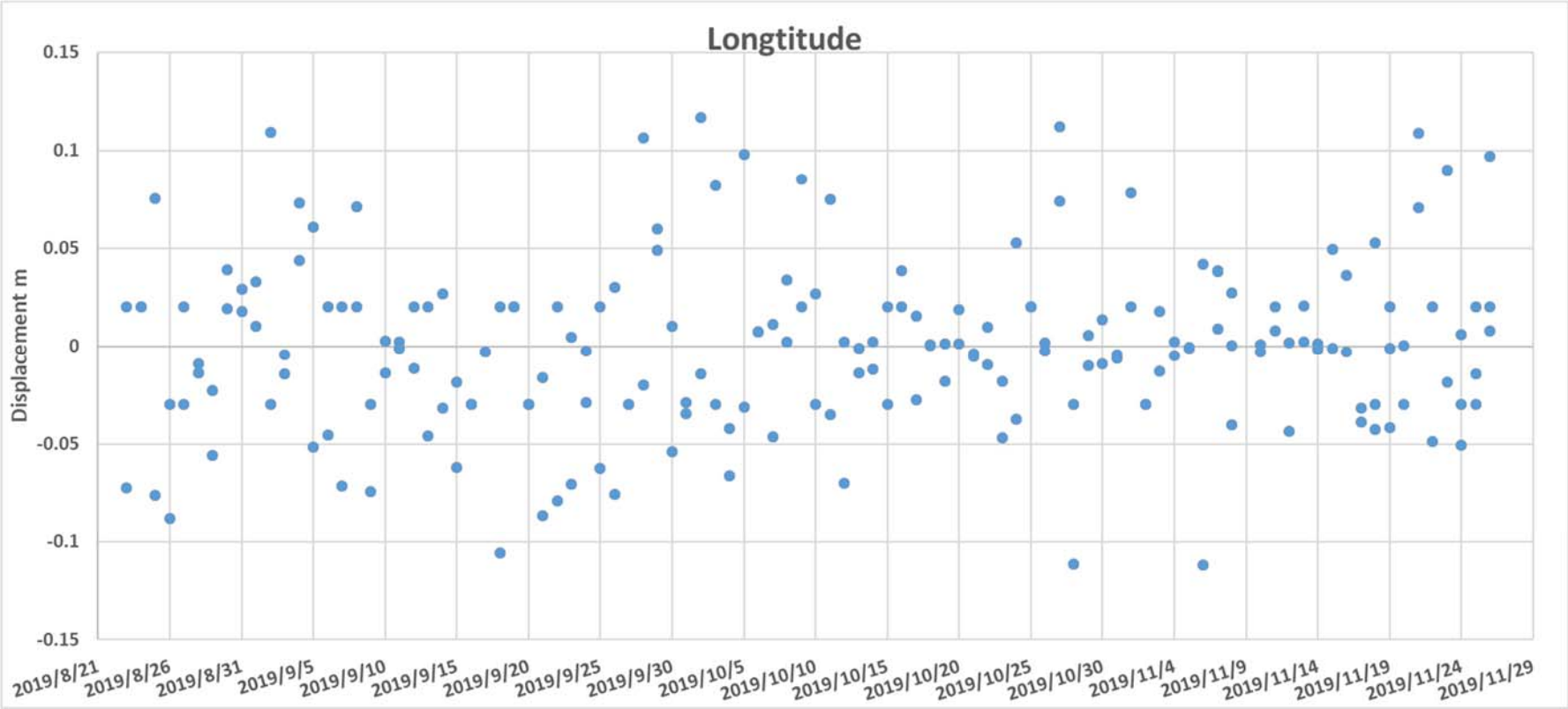


圖 4.67 配合竹崎固定站之 RTK Static 8～11 月定位結果（南北向）

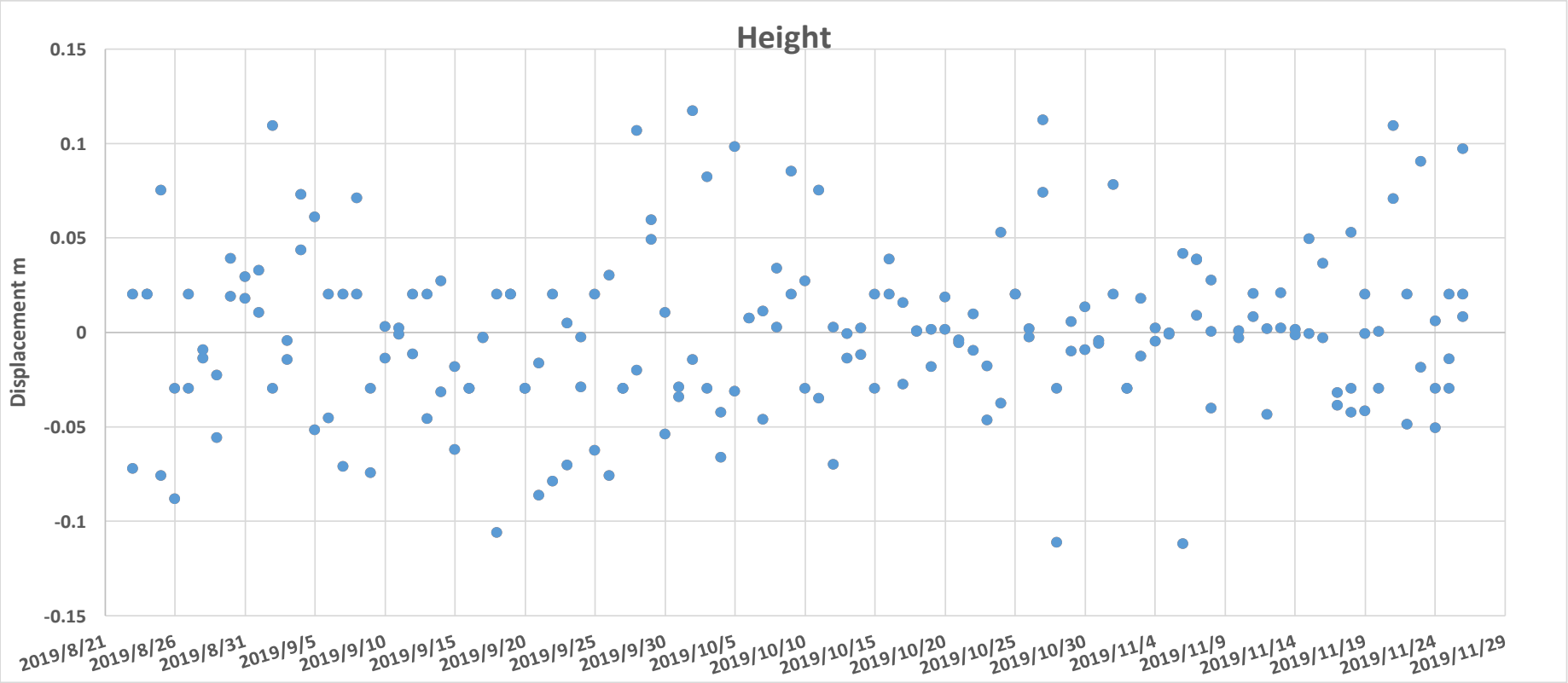


圖 4.68 配合竹崎固定站之 RTK Static 8～11 月定位結果（高度）

4.3.4 TDR 與 GNSS 監測系統建議

既有 TDR 變位型技術已可監測現場淺層至深層邊坡滑動，其 TDR 安裝規劃從纜線的選擇、鑽孔回填、滑動面的研判，乃至於簡易型滑動反射量隨時間之變化檢測，可參考圖 4.69 之流程進行(Chung and Lin, 2019)。

但現地狀況往往較為複雜，不可單靠單一感測器監測結果即作為判斷邊坡滑動之依據。本研究目標將三軸加速度計與單頻/雙頻 GNSS 加入既有的 TDR 監測系統中監測淺層邊坡位移，而形成三道判斷邊坡滑動的判斷機制，如圖 4.70 所示。以下為主要判斷程序建議：

1. 首先於 TDR 監測數據監測深層與淺層是否發生位移，加上透過連續觀測滑動趨勢（圖 4.69），可先掌握邊坡滑動警戒狀況；
2. 基於上述，可同步再檢覈三軸加速度計監測淺層邊坡是否發生傾角的狀況，變化量警戒門檻標準設定為傾角之變化量為 >0.005deg/hr，但仍需增加 Filter 功能，或增加現場收錄資料筆數平均之將雜訊狀況降低，提高資料穩定性；
3. 最後由於現有 GNSS 基準站公開資料需隔一日後才會供使用者下載，因此現地坡地 GNSS 移動站將作為最後一道判斷機制，若是前兩者其一發生警戒狀況，則於隔日以 GNSS 資料解算並與 TDR、三軸加速度資料交互比對，如此形成三道重複檢驗之多元判斷邊坡滑動機制。

本研究所提出之淺層邊坡位移系統，其主要成本分析如表 4.2，後續若可進一步大量採購並透過電路整合，其成本應可更進一步降低，相較於傳統雙頻 GNSS 價格（約 20 萬），應可形成犧牲式多點分布感測元件，提升邊坡穩定判釋。

表 4.2 淺層邊坡位移系統成本分析

項目	價格(元)	備註
控制主機板		Arduino 需含 RTC 元件與 SD 卡
Arduino	1300~1500	Raspberry 需含 SD 卡
Raspberry PI 3B+	2000~2200	
GNSS 晶片		
單頻 M8T	3000～4000	
雙頻 F9P	7000～9000	
GNSS 天線		
單頻	1500～2000	
雙頻	2000～3000	
電力供應	5000	含 40W 太陽能板與 20A 電池
儀器保護箱	10000	儀器箱 50*30*30 cm 含立柱與框架
簡易型三軸加速度規	1500	

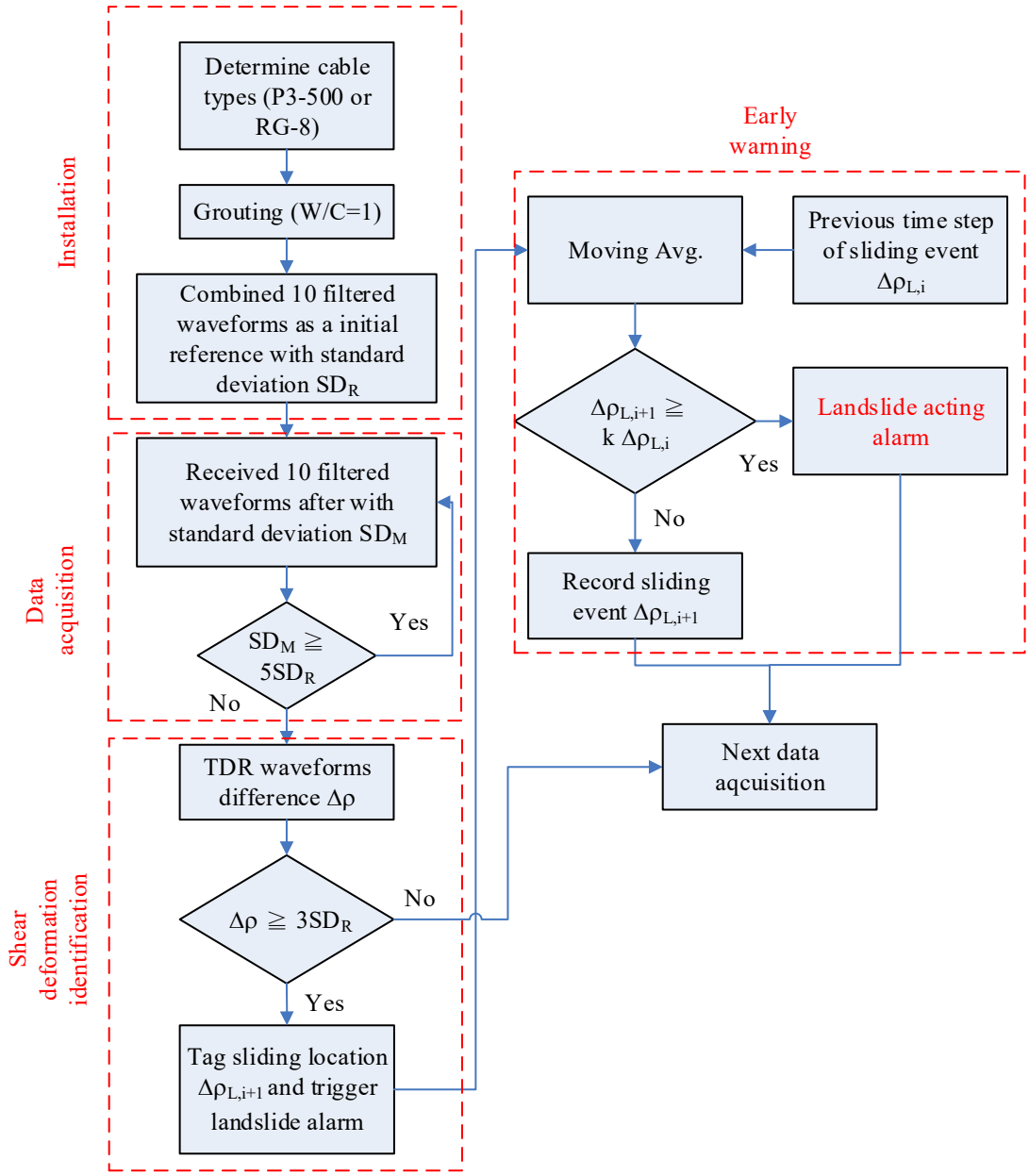


圖 4.69 TDR 邊坡監測流程建議(Chung and Lin, 2019)

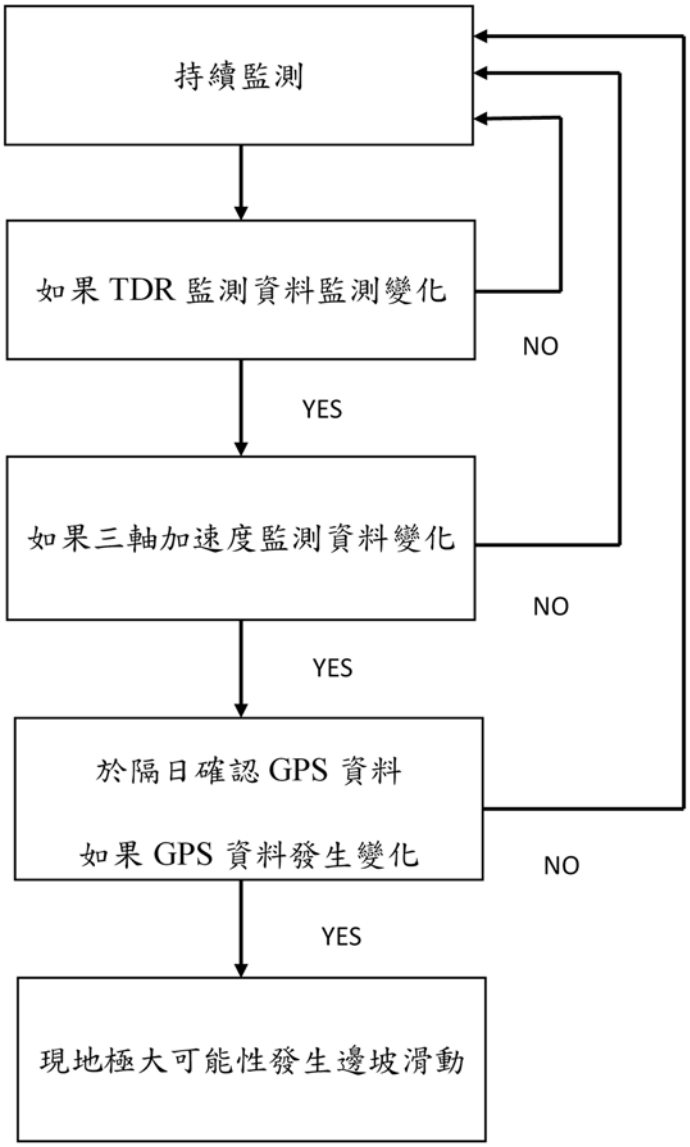


圖 4.70 邊坡滑動判斷機制研擬流程圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

既有 TDR 變位型技術已可監測現場淺層至深層邊坡滑動，但現地狀況往往較為複雜，不可單靠單一感測器監測結果即作為判斷邊坡滑動之依據。本研究目標將三軸加速度計與單頻 GNSS 加入既有的 TDR 監測系統中監測淺層邊坡位移，而形成三道判斷邊坡滑動的判斷機制。目前初步測試成果如下說明：

1. L1 與 L5 雙頻 GNSS 適用性已有初步測試成果，但目前使用手機之方案不甚穩定，ublox F9P 雙頻 GNSS 晶片於長期穩定性追蹤應屬可行。但實際上定位精度尚須透過超短基線配合測試驗證，另外本研究也將建議進行 ublox F9P 內建之 RTK 解算功能，檢核其量測可行性與精度。
2. 本研究初步完成 TDR 主機與離心機之整合，目前也提出較適宜之纜線以供離心機後續測試使用，並完成初步離心機整合測試，正持續安排使用剪動模型評估 TDR 與側傾管共構之行為。
3. 阿里山現場監測系統已逐步上軌道，包含 TDR、加速度計以及 GNSS 均可提供有效之觀測資料。後續可建議改採 ublox F9 雙頻 GNSS 進行實務適用性探討。

5.2 建議

1. 本研究目標將三軸加速度計與單頻/雙頻 GNSS 加入既有的 TDR 監測系統中監測淺層邊坡位移，而形成三道判斷邊坡滑動的判斷機制，但目前尚須實際滑動案例藉以驗證。
2. 未來則可建議採用雙頻 GNSS 雲端解算，並透過自動化方式將解算時

程提升到每小時運算，如此一來便可有效地提供邊坡滑動之多道門檻檢驗。

第六章 參考文獻

1. 劉格非、李欣輯 .（1999） 地聲探測器之初步研究， 第二屆土石流研討會論文集，84~93。
2. 楊培熙(2003)，TDR 水位量測技術在大地/水利工程之應用，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
3. 周南山 (2005)，山區道路邊坡災害防治，森林遊憩設施規劃設計與施工研習會。
4. 林德貴，陳啟天，徐森彥，蘇苗彬（2007），梨山地滑區降雨滲流及穩定性分析，水土保持學報，第 39 (4) 期，419 - 451 頁。
5. 陳世達、張睦雄、劉桓吉、王熙松、王天南（2008），利用地質鑽探與地球物理資料釐清阿里山公路五彎仔地滑區之地質構造，工程地質探勘資料庫系統研討會，125-136 頁。
6. 辜炳寰，蕭震洋，林伯勳，梁惠儀，鄭錦桐，(2009)，數位影像相關係數法於擋土牆監測之應用，中華民國第 14 屆大地工程研討會。
7. 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅（2009），莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例，地工技術，第 122 期，133-142 頁。
8. 陳鶴欽、饒瑞鈞、王敏雄、劉正倫 (2009) 結合低價單頻 GNSS 接收儀與虛擬基準站定位精度之研究，中正嶺學報，第三十八卷，第一期，115-126 頁。
9. 沈力洋、揚名、陳鶴欽 (2010) GNSS/Galileo 單頻即時動態定位效能分析，地籍測量，第廿九卷第 2 期，第 1-13 頁。
10. 蕭新財 （2011），不飽和崩積土壤淺層水文特性對邊坡穩定影響之研究，國立臺灣科技大學碩士論文。
11. 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)。
12. 林志平、鐘志忠、吳瑋晉、陳弘宇 (2011)，利用時域反射技術建構地工結構損傷感應神經，土木水利，第 38:3 卷，第 34-41 頁。
13. 李秉乾(2012) 開放式土石流無線感測網路平台及前瞻性預測模式應用研究---子計畫：無線感測網路在土石流預測模式之應用，行政院國家科學委員會。
14. 周天穎(2012) 開放式土石流無線感測網路平台及前瞻性預測模式應用研究---子計畫：建立以開放標準為基礎的土石流防災資訊平台，行政院國家科學委員會。
15. 林志鴻 (2012) 一個具適應性之全流域土石流早期預警網際網路地理資訊系統平台，逢甲大學資訊電機工程碩士在職專班碩士論文。
16. 李嶸泰、張嘉琪、詹勳全、廖珮妤、洪雨柔 （2012），應用羅吉斯迴歸法進行阿里山地區山崩潛勢評估，中華水土保持學報，第 43(2)期，167-176 頁。
17. 許家銘 (2013) 三義火炎山土石流現地監測資料之分析與判釋，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
18. 陳樹群、周憲德、陳聯光、劉哲欣、吳亭燁、林聖琪，2013，大規模崩塌災害集水區尺度評估作業，國家災害防救科技中心。

19. 林昊、范景辉、洪友堂、涂鹏飞、郭小方 (2014) 单频静态 GNSS 在滑坡监测中的高程精度分析，国土资源遥感，第 26 卷，第 2 期，第 74-79 頁。

20. 洪汶宜、李崇正、張有毅、黃文昭、黃文正、 林銘郎、林燕慧，2014，以離心模型試驗探討正逆斷層引致的地表變形與剪裂帶發展，經濟部中央地質調查所特刊第二十八號，第 129-151 頁。

21. 青山工程顧問公司、交通部公路局第五區工程處，台 18 線五彎仔路段既設及新設監測管理系統維護、更新委託技術服務監測報告，阿里山工務段(2014~2017)。

22. 交通部運輸研究所 (2017)，公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)。

23. 王鐘緯（2017），應用空載光達技術於台 18 線五彎仔地滑區判釋之研究，國立嘉義大學土木與水資源工程系碩士論文。

24. 賴煜勳，(2017)，TDR 地滑監測系統與測傾管共構可行性探討，國立交通大學土木工程系碩士論文。

25. 鐘志忠，(2018)，淺層崩塌降雨警戒基準與檢監測技術評估研究--子計畫:降雨引發淺層崩塌之可犧牲式監測元件研發(II) 報告，科技部。

26. Basilio, L. I., Chen, R. L., Williams, J. T., & Jackson, D. R., (2007). “A new planar dual-band GNSS antenna designed for reduced susceptibility to low-angle multipath,” Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 55(8), 2358-2366.

27. Benoit, L. Briole, P., Martin, O., Thom, C., Malet, J.P., and Ulrich, P. (2015). “Monitoring landslide displacements with the Geocube wireless network of low-cost GNSS,” Engineering Geology, 195, 111–121.

28. Botts, M., Percivall, G., Reed, C., and Davidson, J., (2007). “OGC® sensor web enablement: overview and high level architecture (OGC 07–165),” Open Geospatial Consortium White Paper, 28 December 2007.

29. Bröring, A., Echterhoff, J., Jirka, S., Simonis, I., Everding, T., Stasch, C., Liang, S., Lemmens, R., (2011a). “New generation sensor web enablement,” Sensors, 11, 2652-2699.

30. Cina, A., Piras, M, and Bendea, H.I., (2013). “Monitoring of landslides with mass market GNSS: an alternative low cost solution,” The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W3, The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk, 27 – 28 February 2013, Padua, Italy.

31. Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang, W.C., Huang, W.J., Lin, M.L., Hung, W.Y., Lin, Y. H., 2013. Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip, International Journal of Civil Engineering, 11(2), 79-89.

32. Chaussard, E., Bürgmann, R., Cohen-Waeber, J., and Delbridge, B. (2015). “Landslide monitoring with InSAR,” <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/besr/miscellaneous/Landslides-Feb2015/Chaussard2015.pdf>

33. Chung, C.-C. and Lin, C.-P., (2011) “High concentration suspended sediment measurements using time domain reflectometry,” Journal of Hydrology, 401, 134-144.

34. Chung, C.-C., Lin, C.-P. (2019) A Comprehensive framework of TDR landslide monitoring and early warning substantiated by field examples, Engineering Geology, 262, 105330, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.

35. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Chen, P.-H., Wu, I-L., and Tsay, T.-K., (2013a) “New TDR

waveguide and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage," Journal of Hydrology, 505, 346-351.

36. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Wu, P.-L., Hsien, S.-L., and Wu, C.-H., (2013b). "Monitoring of sediment transport in a reservoir using time domain reflectometry," 35th IAHR World Congress, Sep. 8-13, Chengdu, China.
37. Dowding, C. H., Su, M. B., and O'Connor, K. M., (1988). "Principles of time domain reflectometry applied to measurement of rock mass deformation," Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 25, 287-297.
38. Dowding, C. H. and Pierce, C. E., (1994). "Use of time domain reflectometry to detect bridge scour and monitor pier movement," Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmenal, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston, Illinois, Sept 7-9, U.S. Bureau of Mines, Special Publication SP 19-94, NTIS PB95-105789, 579-587.
39. Fredlund, D. G., (1987). "Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction," Slope Stability, Edited by Anderson, M. G. and Richards, K. S., John Wiley and Sons Ltd.
40. Hart, J.K., Martinez, K., (2006). "Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science," Earth Science Review, 78, 177–191.
41. Hsieh, T.T., (2004). "Using sensor networks for highway and traffic applications," IEEE Potentials, 23, 13-16.
42. Hollywood, P. M. (1997). "TDR level measurement," Meas. Control, 31(6), 94–98.
43. Huang, S-Q. and Wang, J-X., (2015), "New data processing strategy for single frequency GNSS deformation monitoring," Survey Review, 47, Iss. 344.
44. Kassab, A., Liang, S., and Gao, Y., (2010). "Real-time notification and improved situational awareness in fire emergencies using geospatial-based publish/subscribe," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12 (6), 431-438.
45. Kim, Y., Evans, R.G., and Iversen, W.M. (2008). "Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57(7), 1379-1387.
46. Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., Anderson, J., (2002). "Wireless sensor networks for habitat monitoring," In the 2002 ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, (Atlanta, GA, USA, 28 September 2002).
47. Lee, H.C., Fang, Y.M., Lee, B.J., and King, C.T. (2010). "Design of a multifunctional wireless sensor for in-situ monitoring of debris flows," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59(11), 2958-2967.
48. Lee, H.C., Ke, K.H., Fang, Y.M., Lee B.J., and Chan, T.C. (2017). "Open-source wireless sensor system for long-term monitoring of slope movement." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 66, 4, pp 767~775.
49. Liang, S.H.L. and Huang, C.Y., (2013). "GeoCENS: A geospatial cyberinfrastructure for the world-wide sensor web," Sensors, 13(10), 13402-13424.
50. Lin, C.-P. (2003). "Frequency domain versus traveltime analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements," Soil Sci. Soc. Am. J., 67(3), 720-729.
51. Lin, C.-P., Chung, C.-C., Huisman, J. A., and Tang, S.-H., (2008) "Clarification and calibration of reflection coefficient for electrical conductivity measurement by time domain

reflectometry," Soil Sci. Soc. Am. J., 72, 1033-1040.

52. Lin, C.-P. and Tang, S.-H. (2005). " Development and calibration of a TDR extensometer for geotechnical monitoring," Geotechnical Testing Journal, 28(5), Paper ID: GTJ12188.
53. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, W.-C., and Chung, C.-C., (2009). "Quantification of cable deformation with TDR: implications to landslide monitoring," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(1), 143-152.
54. Lytvyn, M., Pollabauer, C., Troger, M., Landfahrer, K., Hormann, L., Steger, C., (2012) "Real-Time Landslide Monitoring Using Single-Frequency PPP: Proof of Concept," 2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, (NAVITEC), 5-7 Dec.
55. Ray, P.P. (2016) "Internet of things cloud based smart monitoring of air borne PM2.5 density level," International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)-2016.
56. Renzi, V., Uchimura, T., Lo presti, D., Liu, B., and Eto, I., (2014). "A comparison between two different approaches toward landslide monitoring," International Symposium of Geohazards: Science, Engineering and Management, Nov. 20-21, Kathmandu, Nepal.
57. Stasch, C., Foerster, T., Autermann, C., Pebesma, E., (2012). "Spatio-temporal aggregation of european air quality observations in the sensor web," Towards A Geoprocessing Web, 47, 111-118.
58. Tai Y.H. and Chang, C. P., (2015). "Application of radar interferometry for monitoring the landslide creeping of Jiufen area, Northern Taiwan," EGU General Assembly, 12-17 April, Vienna, Austria.
59. Thuro, K., Singer, J., Festl, J., Wunderlich, T., Wasmeier, P., Reith, C., Heunecke, O., Glabsch, J., and Schuhba¨ck, S., (2010). "New landslide monitoring techniques – developments and experiences of the alpEWAS project." Journal of Applied Geodesy, 4, 69-90.
60. Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines," Water Resource Research, doi.org/10.1029/WR016i003p00574.
61. Uchimura, T, Towhata, I., Anh, T.T.L., Fukuda, J., Bautista, C.J.B., Wang, L., Seko, I., Uchida, T., Matsuoka, A., Ito, Y., Onda, Y., Iwagami, S., Kim, M.S., and Sakai, N., (2010). "Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface, "Landslides, 7, 351–357.
62. Uchimura, T, Towhata, I., Wang, L., and Qiao, J., (2011). "Validation and interpretation of monitored behavior of slopes vulnerable to failure," Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.
63. Wang, G.Q., (2013), "Millimeter-accuracy GNSS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico," Journal of Geodetic Science, 3(1), 22-31
64. Xu, N., (2002). "A survey of sensor network applications," IEEE Communications Magazine, 40, 102-144.
65. Xu, Z. Pierce, C.E., 2013. TDR-based shear deformation measuring system for slope failure modeling. Advanced Materials Research, 639-640, 1155-1161.
66. Yankielun, N. E. and Zabilansky, L. (1999). "Laboratory investigation of time-domain

reflectometry system for monitoring bridge scour," Journal of Hydraulic Engineering, 125, 1279-1283.

67. Yin, Y., Zheng, W., Liu, Y., Zhang, J., and Li, X. (2010). "Integration of GNSS with InSAR to monitoring of the Jiaju landslide in Sichuan, China," Landslides, 7(3), 359-365.

附錄一 執行計劃書審查意見回覆

委員意見	意見回覆
1. P28 文謂”…因此本研究就將參考之計畫主持人之階段性成果”所指為何?	感謝委員建議，本計畫主持人前期於科技部執行「淺層崩塌降雨警戒基準與檢監測技術評估研究－子計畫:降雨引發淺層崩塌之可犧牲式監測元件研發」,其相關研究成果延續至本計畫改良執行。
2. 兩組衛星訊號接收，相隔多少才可避免干擾?	感謝委員建議，目前以小米手機為例，其 GNSS 天線距離甚近，因此研判無顯著干擾問題。
3. P35 文謂之“04-5 與 B-9”在圖 35 何處?該圖模糊應改善。	感謝委員建議，相關圖例解析度已改善。
4. TDR 對位移量轉換有何意義，能以之推求地表位移量否？	感謝委員建議，TDR 可以自動化地感應沿線任何位置是否產生錯動變形(localized deformation)，雖無法分辨錯動方向，但錯動深度可明確地獲得，錯動量亦可大略估計(Lin et al., 2009)，此為 TDR 技術之限制。 但因邊坡穩定性問題主要關心錯動變形，而滑動方向通常可由地形與地質條件合理研判， 或藉由多孔的 TDR 監測達到 3D 滑動塊體的決定(Thuro et al., 2010)，因此其建置成本低、可一機多孔連續自動化監測，成為邊坡監測實務上很好的替代方案，或與傾度管達到良好的互補效果，且利用 TDR 連續監測之波形反射係數變化，可達到類似滑動速率之研判，更能有效作為預警門檻之參考。

	因此基於 TDR 連續觀測優勢，加上本研究提出之地表傾度或位移感測，應可有效提供相關多道的山崩警戒機制。
5. P9 坡地簡易傾度量測元件圖示與後面試驗貼地的不相同，應有一定要求，可增加討論	感謝委員建議，P9 日本坡地簡易傾度量測元件主要透過立桿的方式(Uchimura et al. 2011)加強因為淺層坡地滑動造成大幅度傾度變化。因此後續相關研究與應用大多建議朝向立桿方式進行監測，但前提立桿須能有效與坡地互制，立桿至少應該深入一米以上。
6. P17 超短基線座標解算要到什麼程度才算合格標準，另準度如何評量亦請補充說明。	感謝委員建議，目前零基線之解算要求必須達 1mm 以內，但超短基線或是中短基線等解算應用，則是端看應用標的。以本計畫山坡地之位移觀測，建議 GNSS 量測精度應該至少為 10 mm 等級。
7. 五彎仔地區由不同滑動區塊組成或連動，如何由監測進一步說明及應用，請補充	感謝委員建議，基於現有相關監測成果與現況了解(青山工程提供)，目前五彎仔地區地滑區塊(如圖 3.29)，以 N4 仍有顯著之淺層崩塌現象，另外 N3 延伸之區塊仍有潛在深層滑動面，因此本計畫除了於 N4 坡頂安裝淺層傾度與 GNSS 位移觀測外，也包含 100 m 深之 TDR 觀測，藉以評估淺層崩塌可犧牲式元件與深層型時域反射邊坡監測技術之整合。
8. 離心機在高速轉動時會不會因為振動而造成試驗啟動後穩定性的影響，亦請留意。	感謝委員建議，目前 TDR 主機為單板設計，無其他模組因附掛而受振動影響，但部分較大體積之電容或供電模組受離心力需要再確認。另外配合主機外殼設計，本計畫將

	TDR 主機直接鎖固於離心機中軸之固定支架上，應該可以有效減少離心力效應。
9. TDR 結合離心機試驗應確認不同情況下配置，其應包含不同動力與對應剪動模式能與實務結合。	感謝委員建議，目前本研究將先以設備整合為優先，包含先由纜線選擇，乃至於初步模型測試後，再建議後續計畫能對於不同動力與對應剪動模式進行評估。
10. 單頻 GNSS L1+L5 與 RTK 之精度大約差多少百分比?	感謝委員建議，目前相關 GNSS 解算均採用 RTK 方法，而傳統單頻 GNSS L1 與 GNSS L1+L5 解算比較差異如 4.1 節所述，其精度差異不顯著，主要因為目前 L5 頻段接收衛星數量尚不足提供有效精度提升，建議可持續比對兩者差異性。
11. 計畫中建議針對單頻 GNSS 成本效益與精度進行分析，並與目前地工上常用之儀器進行比較。	感謝委員建議，有關單頻 GNSS 成本效益與精度正持續分析中，後續將於期末報告呈現與目前地工上常用之儀器比對結果。
12. 單頻 GNSS 系統取樣與傳輸系統為何?傳輸成本為何?另其取樣頻率為何? 是否能做到即時監測預警？	感謝委員建議 (1). 有關單頻 GNSS 取樣頻率可由 1 秒至數秒，但配合 RTK 解算方式，其取樣總長度須至少 15 分鐘至數小時，方能有較佳之穩定性。 (2). 由於目前 GNSS 解算使用其 RAW 資料，因此得採用 4G 模組 (成本約為 2000~3000 NTD) 進行資料傳輸，一般大約每月需 400~500 NTD 門號租賃成本。 (3). GNSS 由於需要一定時間取樣以做高精度位移解算，另外考量現場設備電力功耗之問題，因此以監測預警時效上而言，建議

	GNSS 以天為單位，因此無法提供小時內之即時預警需求，但本研究所提出之 TDR 與傾度觀測，則可輔助即時監測預警需求，因此透過多道空間與時間上不同警戒門檻，應可有效提供預警需求。 未來則可建議採用 L1&L5 雙頻 GNSS 雲端解算，並透過自動化方式將解算時程提升到每小時運算，如此一來便可有效地提供邊坡滑動之多道門檻檢驗。

附錄二 期中報告書審查意見回覆

委員意見	意見回覆
1. 本期中報告應檢附中英文摘要及其關鍵字。	感謝委員建議，本報告已檢附中英文摘要及其關鍵字。
2. 請確認新式 L1/L5 GNSS 晶片之精度。	感謝委員建議,L1 與 L5 雙頻 GNSS 適用性已有初步測試成果，但目前使用手機之方案不甚穩定，本計畫後續持續改採 ublox F9 雙頻（L1+L2）晶片之模組進行實務驗證，如 4.1.2 節所示。
3. 請檢核適用於離心機試驗的纜線型別與安裝模式。	感謝委員建議，本研究針對離心機試驗的纜線型別提出之測試程序與安裝模式請參考 4.2.1 節所示。
4. 請預測 TDR 主機於離心機試驗之可行性。	感謝委員建議，本研究初步配合其他研究計畫進行河堤模型於離心機試驗，初步已可運用至 80 g 的重力場，後續本研究也將進行利用剪力模型探討 TDR 與傾斜管共構於 40g 與 80g 重力場測試。
5. 請比較本開發之監測設備與傳統儀器間的優勢與成本。	感謝委員建議，本研究開發之監測設備與傳統儀器間的優勢與成本請參考 4.3.4 節說明。
6. 本案提升單頻 GNSS 其定位精度及探討 TDR 與傾斜管共構的評估，其監測成果可納為本局推動大規模崩塌監測之參考。	感謝委員建議，本研究初步提出 ublox F9 雙頻（L1+L2）晶片架構建議，與 TDR 監測方法程序請參考請 4.3.4 節說明。
7. 建議加強分析研究地區之基地分析。	感謝委員建議，阿里山五彎仔地區之基地分析如 3.4 節所示，礙於篇幅與重點說明，茲將相關參考文獻表列整理於第六章。

8. P18、19 圖 3.10-圖 3.13，何以觀測數值均為不連續之情況?建議可補充說明。	感謝委員建議，其 GNSS 解算先以 Q1(fixed) 代表定位已有鎖定之成果呈現為優先，其他資料品質較差之定位資料則先忽略，因此造成相關圖示於定位數值不連續之狀況。

附錄三 期末報告書審查意見回覆

委員意見	意見回覆
1. 時域反射邊坡監測技術對於滑動方向如何間接求得。	感謝委員建議，目前單孔的 TDR 無法求得滑動方向，必須採用三組孔位以確認同一滑動面之滑動方向。
2. 分階段研究警戒門檻可值得應用。	感謝委員，後續將建議三軸加速度計與雙頻 GNSS 加入既有的 TDR 監測系統中，而形成三道判斷邊坡滑動的判斷機制，實際應用於現地事件。
3. 以 TDR、GNSS 及傾度量測等綜合研判應可加強崩塌研判準確率，只是樣本可再加幾區，可以更加強可信度。	感謝委員建議，目前礙於經費限制，將申請後續計畫以增加雙頻 GNSS 於阿里山五彎仔現地應用範例，藉以確認整合可性度。
4. 計畫中 GPS 在各方面（三維）之量測精度為何?監測頻率多少?其在佈設時，佈點如何考量？（針對淺層崩塌監測而言），另其是否有潛力應用至大規模崩塌地表位移監測。	感謝委員建議，現有單頻 GNSS 於阿里山五彎仔案例東西向精度約為 2~3 cm，南北與垂直向 3~4 cm。 GNSS 監測頻率為 1 秒，但本計畫一天收錄三小時，並將每小時內之較大偏移資料剃除後平均輸出。 GNSS 應該用於各項地表面之位移監測，包含淺層與深層崩塌地，但點位之選取還是須回歸至專業大地與地質研判後選擇合適且具代表性之位置。
5. 計畫中 GPS 於現場如何即時傳輸訊號至後端基地站，以發揮即時應變之用。	目前本計畫採用 4G 手機訊號進行即時資料傳輸，但現有 GNSS RTK 計算仍以國家 e-GNSS 固定站為主，因此分析上較無法即時，後續建議應於阿里山工務段位置架設一參考固定站，以做即時之 RTK 定位解算。

6. GNSS RTK 目前應用除監測邊坡滑動情形，針對目前公共工程應用，有那些？是否監控結構損壞情形。	感謝委員建議，除坡地監測之外，GNSS RTK 於國外案例已經使用於橋樑與水庫大壩結構安全監測。另外也可用於道路人孔、維生管線等動態檢測之定位使用。 目前 UAV 無人機也採用 GNSS RTK 做精密定位，藉以提供較為精確之正射影像或 DSM 地圖。
7. GNSS 衛星 L1/L2 頻率的精度為何?是否可在實際上運用。	感謝委員建議，目前於本計畫初步測試之成果，於校內固定站測試之精度可達 1 cm 等級以內，但實務上仍需要配合現場的天空透視條件，以及 RTK 基線長度進行評估因此後續將申請延伸雙頻晶片於阿里山五彎仔之測試評估，藉以確認實際量測精度。
8. 地表 GPS 與 TDR 要如何配置，其關連性為何?	本計畫主要採用 TDR 作為地下之變化即時預警使用，此為第一道預警關卡，後續則配合地表加速度計確認即時地表傾斜變化與否，此位第二道關卡；後續則由 GNSS 針對較長時間尺度進行地表位移確認，此為第三道關卡。如此一來應該可大幅增加坡地安全預警準確性。
9. TDR 電纜之耐久性遠比現今電子晶片式感測計高，若應用於長期（或十數年）的監測，其技術有相當佳之前景，該科技值得投資。	感謝委員建議，若相關 TDR 監測主機在預算許可支持下，TDR 地下之變形纜線應可以達到長期監控需求。
10. GNSS 晶片雜訊高，精度太低(±5 公分，±2 公分位移誤差）且解算速度慢，尚無足夠監測能力。	感謝委員建議，目前阿里山五彎仔實際測試為單頻 GNSS 系統，因此精度本就較低，但目前礙於經費限制，將申請後續計畫以增加雙頻 GNSS 於阿里山五彎仔現地應用範例，藉以確認監測可性度。

11. 各類電磁波元件均宜加以溫度，濕度校正。	感謝委員建議，目前以 TDR 主機而言，其規格以達工業等級，加上使用案例經驗，應該可充分用於現地而無溫度與濕度影響問題；本計畫所提出之單頻 GNSS 晶片也已用於現地長達半年，應可確認其現地適用性。唯樹梅派等主機尚須進一步評估確認。
12. TDR 與測傾管共管之離心機實驗，應遵循相似律之要求。	感謝委員建議，本研究考量離心機其相似律要求，已經進行微型纜線之改良與測試，另外側傾管之選定也將依循相似律之要求。
13. TDR 之主要應用仍為深層崩塌，淺層滑動深度太小，不易設置，故難以兼顧。	感謝委員建議，目前 TDR 於相關案例顯示可應用於地表覆土層(3m)之滑動現象，因此只要 TDR 纜線能與鑽孔周圍土層互制良好，就可反映實際淺層至深層之滑動行為。

14.	

15.	

行政院農業委員會水土保持局
與您一起打拼

行政院農業委員會水土保持局
南投市中興新村光華路 6 號
http://www.swcb.gov.tw