

跨河谷吊橋之大地安全監測介紹

廖慧菁 財團法人臺灣營建研究院 / 組長
 張嘉峰 財團法人臺灣營建研究院 / 所長
 廖振程 財團法人臺灣營建研究院 / 主任
 徐力平 財團法人臺灣營建研究院 / 副院長
 黃鑑水 應用地質技師

摘要

山區跨河谷吊橋因不在溪床落墩，則吊橋兩端的邊坡穩定及地質狀況攸關吊橋本體的安全，目前一般藉由定期的吊橋檢測以達到發現缺失適時維護的目的，然而在各縣市政府吊橋觀光產業的推動下遊客眾多，加以吊橋多位於深山險峻的位置，為能即時掌握常時或颱風與地震過後吊橋的安全情況，以達到人員管制避免生命財產損失，必須仰賴即時安全監測，本文藉由跨河谷實際吊橋案例由地質調查、吊橋型式選擇、吊橋及周遭大地環境的監測配置，及後續維運期間之橋體例行檢測與維護、3D 雷射掃描與橋體主索震動頻率、地錨預力、邊坡步道位移等監測資料，說明安全監測於吊橋管理單位維護管理的應用。

一、前言

根據內政部國土測繪中心民國 99 年至 110 年之測製資料，在將近 3.6 萬平方公里的臺灣面積中，海拔 500 m 以上占 46.8%、1,000 m 以上占 31.9%，而超過海拔 3,000 m 則占 1.2%（其中涵蓋 268 座高山），是全世界高山密度極高的島嶼之一，如圖 1，山區中並有許多早期住民通行的古道，而早期河谷兩側之住民往來除涉溪橫渡外，常見的方式即是架設人行吊橋橫跨山谷兩側。近來各縣市政府為活絡原住民經濟，山區跨河谷吊橋成為熱門的觀光景點，除早期既有的舊吊橋外，並陸續經建大規模的人行觀光吊橋如南投縣「雙龍瀑布七彩吊橋」

長度 342 m、嘉義縣「太平雲梯」長度 281 m、屏東縣「山川琉璃吊橋」長度 262 m 等，在吊橋多位於深山險峻的地點及台灣多颱風及地震的環境下，如何確保吊橋的安全避免危及當地

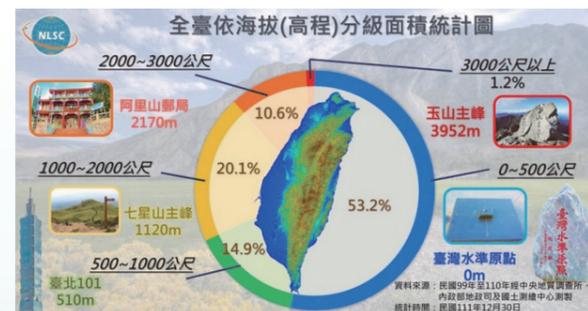


圖 1 臺灣海拔分級面積圖 (圖片來源:內政部國土測繪中心)

住民與光觀客的生命財產為一重要課題，本文藉由屏東縣「山川琉璃吊橋」為案例說明吊橋管理單位為即時掌握吊橋安全狀況的安全監測作為。

瑪家鄉、三地門鄉及內埔鄉水門村早期重要的聯絡道路三地門吊橋於民國 78 年完工，民國 98 年莫拉克颱風期間，三地門吊橋因不堪風雨侵襲，橋台基礎裸露，成為危橋。經屏東縣政府進行三地門吊橋結構補強評估，發現除三地門吊橋結構體老舊，部分主索鋼纜斷裂外，當初設計缺少抗風索等設施，不符現行法規安全規範要求，而且三地門吊橋三地門端引道遭隘寮溪水冲刷，部分已坍塌滑落河道，建議採易地重建，由瑪家端原住民族文化園區停車場新建吊橋至三地門端富谷灣飯店後方，新建的「山川琉璃吊橋」於 103 年 9 月 5 日開工後，104 年 12 月完工，於 105 年試營運，正式營運後開放至今，吊橋長度 262 m，寬度 4 m（淨寬 1.2 m），二端高程約 183.0 m，中央高程則約 168.0 m，距河床高度平均約 45 m，串連三地門鄉與瑪家鄉（如圖 2），具有兩地通行之實用性與推動在地觀光產業興盛之價值，亦為屏東縣熱門觀光景點，其日遊客量最高可達 5,000 ~ 7,000 人，以下針對本文案例「山川琉璃吊橋」的吊橋場址地質調查、吊橋型式及棧道選址及安全監測配置與現況作介紹。



圖 2 山川琉璃吊橋位置圖

二、吊橋場址地質調查

依據經濟部地質調查及礦業管理中心全球資訊網—地質資料整合系統查詢，距基地最近之地質構造為平頂山斷層及潮州斷層，分別距基地約 1.7 公里及 3.6 公里，如圖 3 所示。因此，依經濟部地質調查及礦業管理中心「台灣活動斷層概論」，本基地不受活動斷層之相關法規（建築技術規則，第十三章第 262 條），地震規模 $M > 7$ ，斷層帶兩側各 100 公尺不得開發建築之限制。其區域地質圖如圖 4 所示，本基地屬隘寮河流域，地層以板岩為主，本基址所在地區出露地層以中新世中之潮州層 (Cc) 為主，鄰近區域尚有第四紀臺地堆積層 (t) 與第四紀沖積層 (a)。其中，潮州層以板岩、硬頁岩及變質砂岩與板岩互層為主，臺地堆積層及沖積層則以礫石、砂及黏土為主。

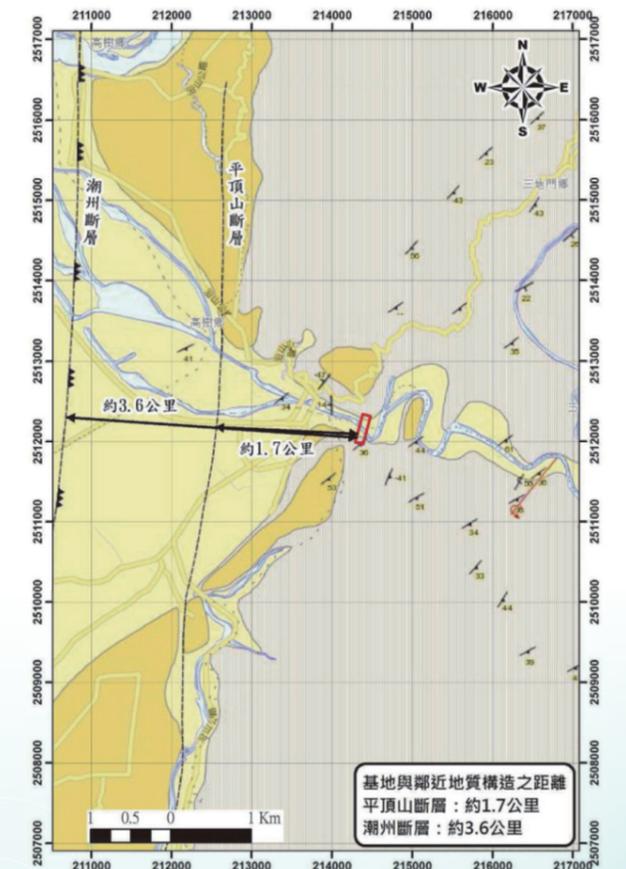


圖 3 計畫位置與活動斷層關係圖



圖 4 區域地質圖

本地區最大的地質構造為西側呈南北延伸的潮州大斷層。潮州大斷層為東側中央山脈山地與西側平原地區之主要分界線，為一斷面傾向東的逆衝斷層，它運動的方式是東側中央山脈地塊沿此斷層向西上衝於屏東谷地之上，由於壓縮逆衝作用影響而致上盤地區（即吊橋位置附近）在岩盤內形成眾多大小不等的褶曲及小斷裂，寬達數百公尺，稱為拖曳褶皺帶（詳圖 5 及圖 6）。潮州大斷層之斷層帶約位於吊橋西側 1 公里以上。由於潮州斷層以東之中央山脈受擠壓相對上升，致東側隘寮溪兩側多分布有高程不等的河階地

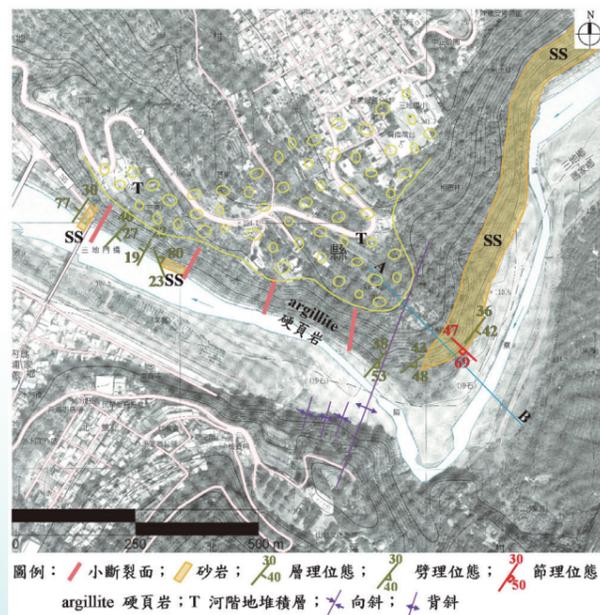


圖 5 基地地質圖

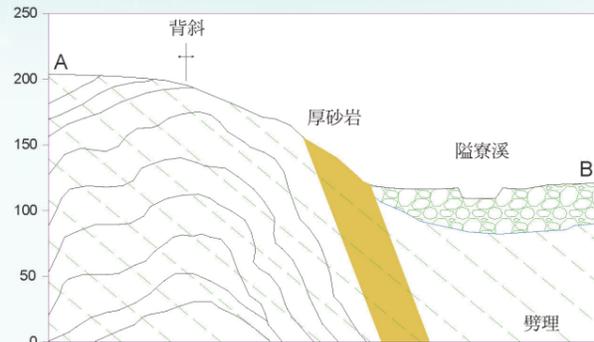


圖 6 地質剖面圖 (AB 剖面)

（台地，瑪家鄉及三地門鄉聚落均位於此等上升河階地上）。

由接近連續露頭的觀查可發現本段屬潮州大斷層上盤之拖曳褶皺帶，除了各種大小、規模及形狀不同之拖曳褶皺（詳圖 7、圖 8）之



圖 7 南岸之褶皺



圖 8 北岸之褶皺近照

外，並夾有甚多小斷裂面或帶，由詳細之觀查，吊橋軸線所經之處似與一條拖曳褶皺背斜軸線一致，詳圖 6。本地區岩層（體）主要的不連續面為發育於岩層內之劈理（cleavage），係岩層在受到大地壓縮應力後垂直於主應力軸方向的一種不連續面，岩層易沿此不連續之劈理面張裂，這種劈理面普遍發育於岩層內，且位態約略一致為北東走向，向東南方傾斜約 40° 至 80°。此外，在厚層砂岩內偶可見 2~3 組節理，最主要的節理位態大致為北西走向，向西南傾斜 69°，此與岩層或劈理之走向大致為垂直，應屬縱向節理，另有略平行於地形面（尤其是平行於河谷兩側陡壁坡面）發展的解壓節理等。以上兩組主要節理面均屬高傾角，當其逐漸張裂而掉落時，為造成陡立邊坡零星落石之來源。

綜整基地地質調查資料則本地區邊坡大略可以分為兩段加以分析，即以隘寮溪原由北往南突然作 90° 向西大轉彎流出之轉折點為界，可區分為西側向南傾下之邊坡及東側向東傾下之邊坡兩段。

(1) 向南傾下之邊坡

本邊坡主要由隘寮溪河道所切割出的北面陡坡，其上接平緩之三地門河階地。陡坡部分露出硬頁岩及板岩岩層。因邊坡之走向與岩層層理或劈理之走向接近垂直，為一側交坡，理論上應屬岩盤穩定區，不致有順向坡大量岩層滑動災害，但因岩層受風化侵蝕影響，在各種不連續面

逐漸張裂情況下，易有零星或局部落石災害，使陡坡緩慢向後退縮。

(2) 向東傾下之邊坡

此邊坡即指三地門鄉河階地東側向隘寮溪傾下之陡坡，邊坡走向接近南北高或北微偏東，因岩層層理或劈理之走向與邊坡走向較接近（夾角小於 30°），且均向東或東南東方向傾斜，故結構上屬於較敏感之順向坡。若一順向坡之坡腳受到人為或自然力的破壞下，易引致順向坡岩層大量沿層理面或劈理面向下滑動而造成災害。惟本順坡上半段之坡度遠小於岩層或劈理之傾角，故本順向坡之坡腳並無見光現象，故目前屬於一安全穩定之邊坡，此現象主要因本邊坡之坡腳（面臨河流之直接攻擊）由一層厚層堅硬抗蝕力極強的砂岩構成，因河流向西侵蝕受阻而改道南下，故形成坡腳之穩固屏障，間接保護三地門鄉台地之安全，如圖 5 及圖 6 所示。其他可能地質災害包含因地形坡度陡，表土或崩積土石通常較薄，易引起局部落石或落屑現象，及地表逕流之侵蝕下易有表土層流失或沖蝕現象，惟面積、規模不大。

三、吊橋基本資料

為減少大型橋塔與大面積垂吊索對景觀之影響，以及考量兩岸橋台高程不同之需求採吊床式之吊橋型式設計，基本資料如表 1，橫斷面圖如圖 9 所示，現況照片如圖 10。

表 1 山川琉璃吊橋基本資料

地點	屏東縣三地門鄉、瑪家鄉	援建單位	中華民國紅十字會總會
開工日期	103.09.05	完工日期	104.12
橋梁長度	262 m	橋梁寬度	4 m (淨寬 1.2 m)
吊橋型式	吊床板式	橋梁高程	二端 183.0 m · 中央 168.0 m
主索錨碇座型式	預力地錨	抗風索錨碇座型式	預力地錨
主索錨碇座 (瑪家端)	10.4 m × 9.6 m · 高 4.7 m · 施設長度 20 m · 預力 60 T 之預力地錨計 20 支 · 亦為防震索、欄杆索錨碇座。	主索錨碇座 (三地門端)	110.8 m × 9.6 m · 高 6.3 m · 施設長度 20 m · 預力 60 T 之預力地錨計 20 支 · 亦為防震索、欄杆索錨碇座。
抗風索錨碇座 (瑪家端)	2.0 m × 2.0 m · 高 2.0 m · 施設預力地錨計 4 支 · 地錨長度 20 m · 預力 60 T。	抗風索錨碇座 (三地門端)	2.5 m × 2.5 m · 高 2.5 m · 施設預力地錨計 4 支 · 地錨長度 20 m · 預力 60 T。

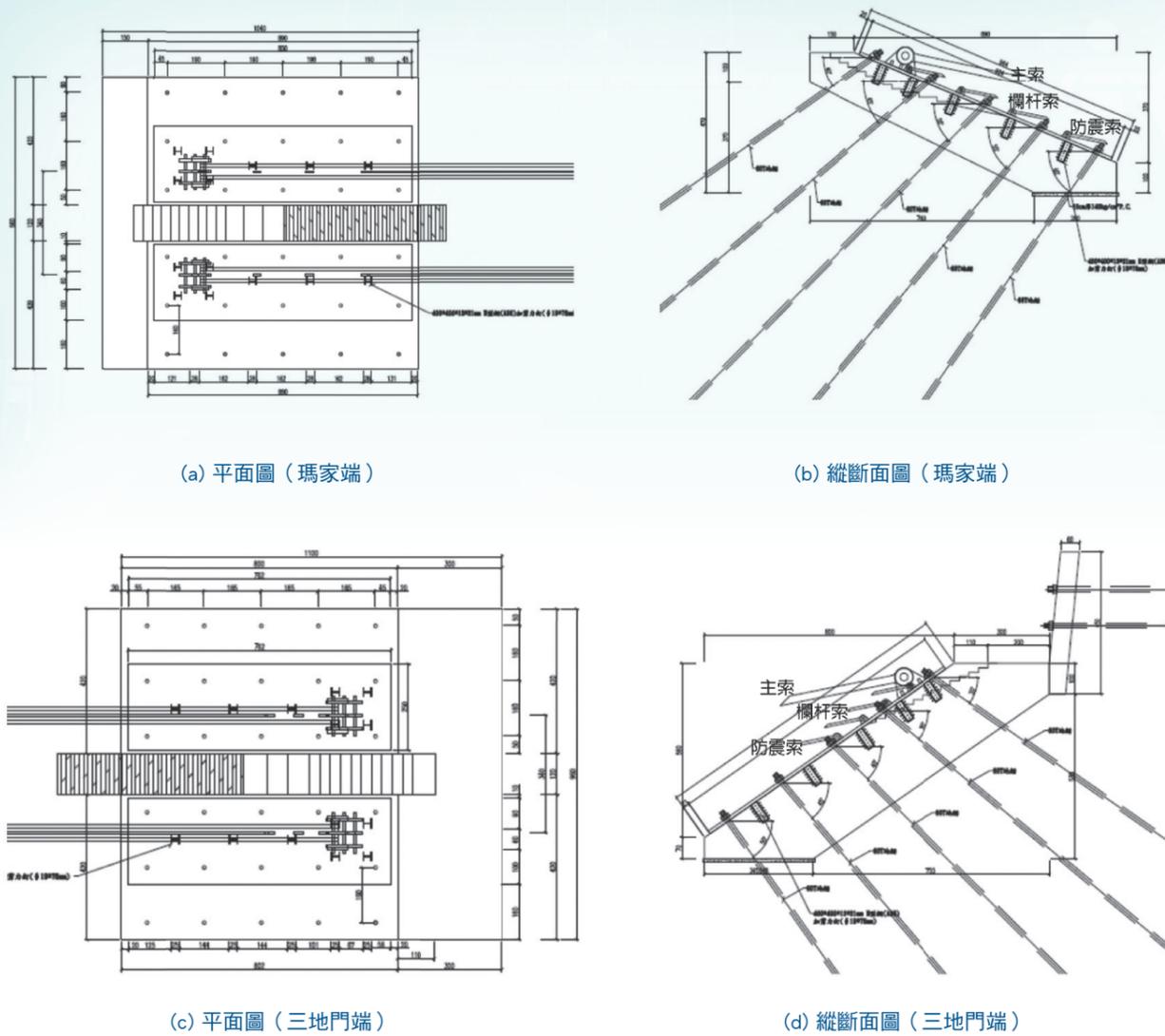


圖 9 主索錨碇座圖

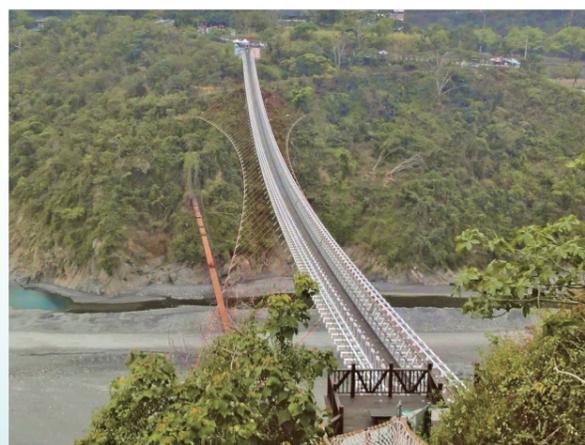


圖 10 山川琉璃吊橋現況照片

四、安全監測配置與現況

本案吊橋及周遭大地環境的安全監測可區分為定期人工檢測與自動化即時監測兩部分，其中定期人工檢測主要是針對吊床式吊橋本體整體結構的變化量測包含 3D 雷射光達掃描與全橋測量，自動化即時監測則包含地錨預力、無限加速規及無線傾度等。

4.1 3D 雷射光達掃描

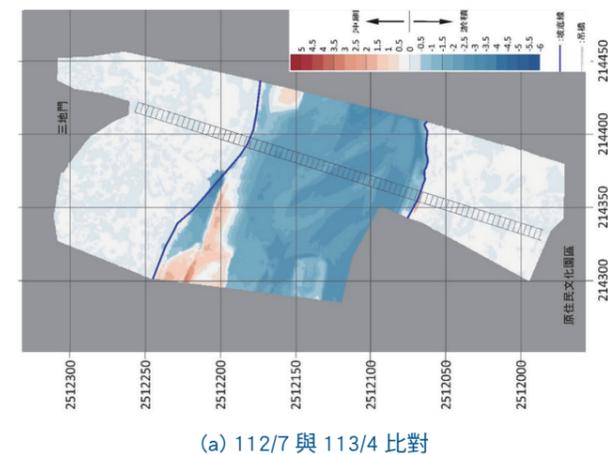
光達或稱激光雷達，主要為利用雷射光束進行測距或量測物體物理特性的光學遙測技術，

其工作原理為雷射發射器所發出的脈衝雷射光，由載具射出至地面上，打到植生或建物後引起散射和反射。一部分光波經由反向散射返回到載具上的接收器中，將光信號轉變為電信號記錄下來。同時由搭配的計時器，記錄同一個脈衝光信號由發射到被接收的時間，即可得到載具到目標物的距離。

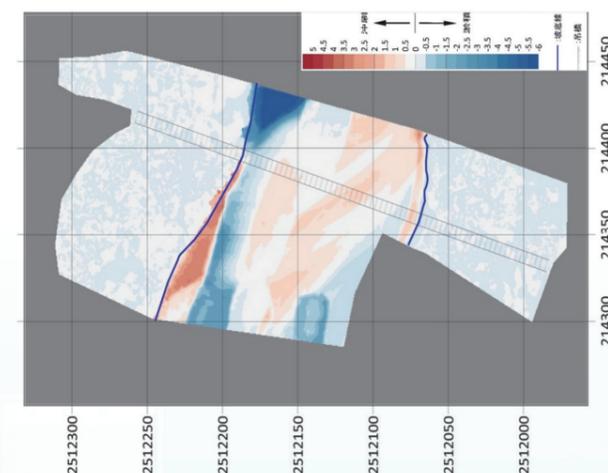
由吊橋點雲資料比對，顯示 112/07 與 113/04 之掃描成果如圖 11(a)，其顯示三地門端之河床有沖刷現象，其平均沖刷深度約 1.0 ~ 1.5 m，最大沖刷深度約 3.5 m，瑪家端河道則有輕微之淤積，最大淤積變位約 3.0 m，二端邊坡則皆無明顯之變化；113 年 4 月與 113 年 8 月之掃描成果比對如圖 11(b)，其顯示三地門端下游側

河床及河道中央有沖刷現象，其平均沖刷深度約 1.0 ~ 1.5 m，最大沖刷深度約 3.5 m，三地門端上游側河床及二端河道邊緣則有淤積現象，最大淤積變位約 6.0 m，惟淤積範圍不大，二端邊坡則皆無明顯之變化。

由三地門端崩塌處點雲資料比對，三地門端邊坡之鄰近區域雖分別於 105 年、108 年發生表層沖蝕與土石坍塌現象，惟透過後續掃描成果進行比對，將該區域切數個剖面，並比對個剖面之點雲資料如圖 12 所示，其顯示該處崩塌邊坡下方自 113/04 ~ 113/08 有部份土石持續因沖刷滑落（最大位移量約 6 m），然無較大崩塌發生。



(a) 112/7 與 113/4 比對



(b) 113/4 與 113/8 比對

圖 11 113 年點雲資料比對成果

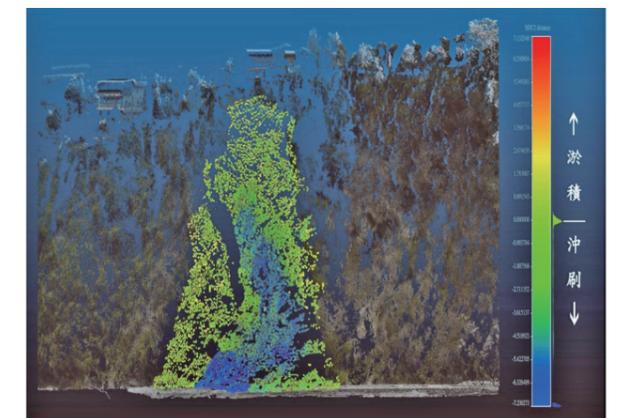


圖 12 三地門端下游側沖蝕邊坡現況比對 (113/4 與 113/8)

4.2 全橋測量

依據地面光達資料，將點雲資料轉繪 AutoCAD，並以 Autodesk Land Dsektop 地形圖繪製軟體繪製 1/1000 地形圖，如圖 13 所示，換算山川琉璃吊橋全橋各纜繩長度，再與歷次光達掃描資料進行比較，並透過繪製歷次掃描之主索長度變化圖研判主索預力的影響程度。以光達掃描進行全橋測量，並換算山川琉璃吊橋全橋各纜繩長度，除列出 105/11 本橋援建單位測量之資料供參考外（因測量與換算之標準不同，無法比較之），並與本橋 104/12 開放通行前及歷年光達掃描資料進行比較，由 3D LiDar 掃描結果顯

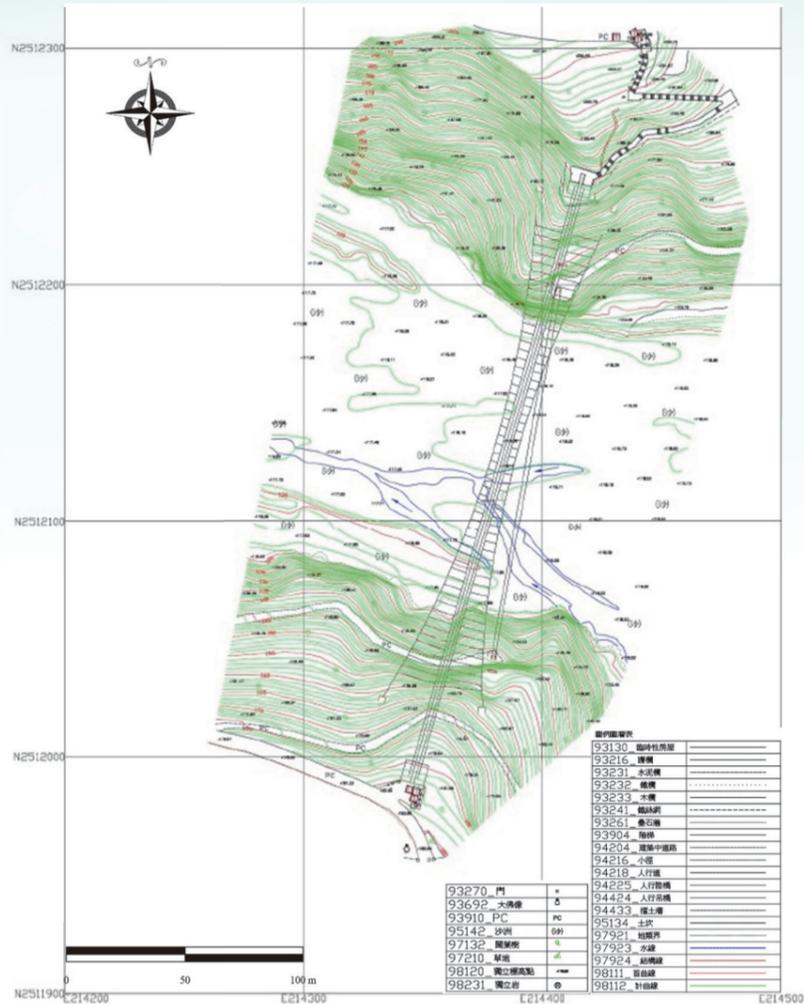


圖 13 本吊橋周圍 1/1000 地形圖(縮圖)

示，本橋主索增長約 -31 mm ~ 39 mm，其增長比例約為 -0.012% ~ 0.015% (負表示縮短)，因本橋之主索長達 264 m，因此，主索之長度變化量對主索預力無顯著影響；抗風支索增長約 -43 mm ~ 51 mm，其增長比例約為 -1.02% ~ 1.20%；垂吊索增長約 -16 mm ~ 17 mm，其增長比例約為 -1.41% ~ 1.47%。此外，考量本橋掃描作業二端可佈設測站之距離遠，測站佈設不易，致部份抗風索、抗風支索及垂吊索為吊橋其他構件或樹木所遮蔽，或距離過遠致點雲資料不易判讀，而造成掃描成果之誤差較大，因此抗風支索及垂吊索長度於此處僅供參考。繪製歷次掃描之主索長度變化圖，如圖 14 所示，顯示主索之長度變化不大，研判對主索預力尚無顯著影響。

4.3 即時監測系統

即時自動化監測包含「地錨監測系統」、「傾度盤監測系統」、「動態量測系統」、「伺服器資料庫(加速規)」、「瑪家端票亭太陽能系統」、「網路通訊模組」等。伺服器接收到現場監測資料時，以網頁方式直接呈現即時監測結果，維護管理單位可以使用一般電腦或智慧型手機以連結網路方式瀏覽，以達可隨時進行監測之目的。

1. 地錨預力監測

吊床式吊橋其主索及抗風索皆利用預力地錨以錨碇於山谷兩側邊坡岩體上，無論是吊橋結構本體或地錨本身構造所造成地錨預

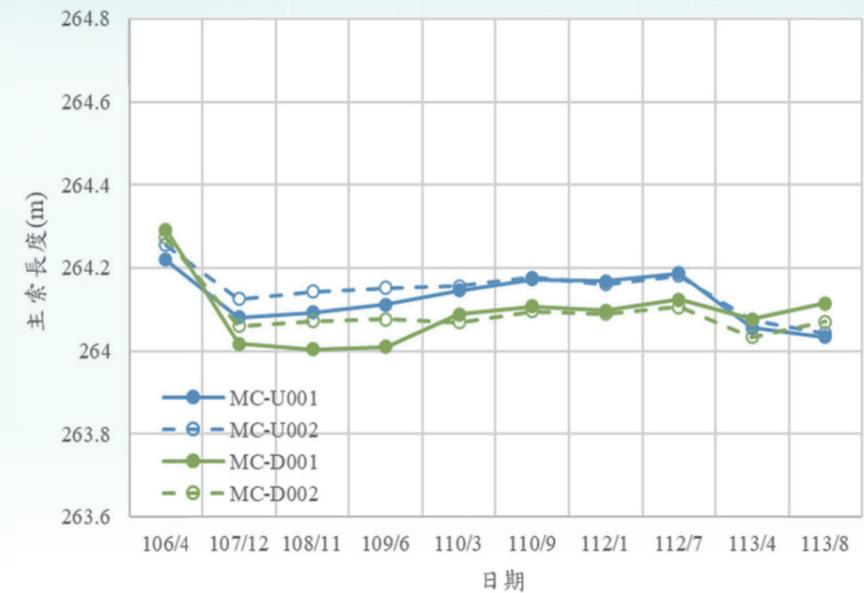


圖 14 主索長度變化圖

力的改變，皆攸關吊橋及兩側邊坡的穩定，因此地錨預力的即時監測為有效提供事先預警防災的必要手段，地錨監測配置包含瑪家端(文化園區側)、三地門端主索錨碇塊各 4 組地錨荷重計，透過資料擷取器、無線通訊單元與遠端伺服器對荷重計之受力狀況，進行自動資料擷取與傳輸，以監測地錨之預力變化如圖 15 與圖 16。

地錨荷重計安裝及測試完成後，即進行初值量測與設定，每支地錨之預力設計為 60 噸，而 S1 ~ S8 計 8 支地錨荷重計之初值分別為 S1 : 60.60 噸；S2 : 59.29 噸；S3 : 63.15 噸；S4 : 57.04 噸；S5 : 61.50 噸；S6 : 61.40 噸；S7 :

60.95 噸；S8 : 61.90 噸。考量山川琉璃吊橋主索錨碇之地錨預力皆為 60 噸，因此，本計畫監測警戒值暫訂為地錨設計預力值之 1±20%，由圖 17 與圖 18 可得知，地錨預力監測系統除瑪家端 S4 以外，於量測期間內皆正常穩定運作，112 年 10 月 ~ 113 年 12 月中旬之監測成果顯示山川琉璃吊橋之地錨預力監測數值皆小於監測警戒值，亦即橋梁處於穩定狀態。

2. 無線加速規

本案採用無線三軸加速規安裝在吊橋主索

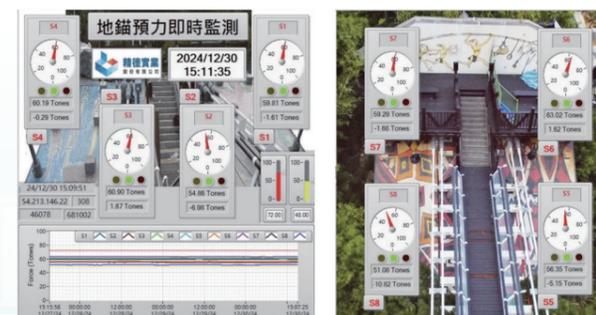


圖 15 山川琉璃吊橋地錨監測系統畫面

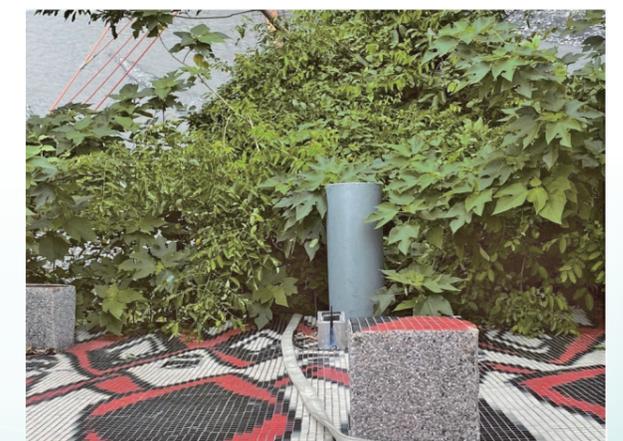


圖 16 山川琉璃吊橋地錨監測照片



圖 17 瑪家端預力地錨監測成果(112/10/1 ~ 113/12/15)



圖 18 三地門端預力地錨監測成果(112/10/1 ~ 113/12/15)

鋼纜上進行無線動態量測，如圖 19 所示，總計安裝 6 個無線加速規，無線通訊距離約 100 m ~ 200 m，每日定時進行 3 次動態量測，取樣頻率為 200 Hz，每次取樣 200 秒執行快速富利葉轉換 (FFT)，所得頻譜解析度為 0.005 Hz。圖 20 為量測到之吊橋自然振動頻率，從頻譜上可以很清楚識別出前 3 個振動模態之頻率，而第 4 與第 5 自然振動頻率也可以在頻譜上找到。後續利用監測到之吊橋鋼纜振動頻率可進行鋼纜之拉力分析與預測，圖 21 顯示主索水平振動 (y 向) 可清楚觀察到兩類特徵；第一類為與鋼纜張力無關之橋體吊桿與質量所形成之單擺類



圖 19 加速規之現場安裝與監測照片

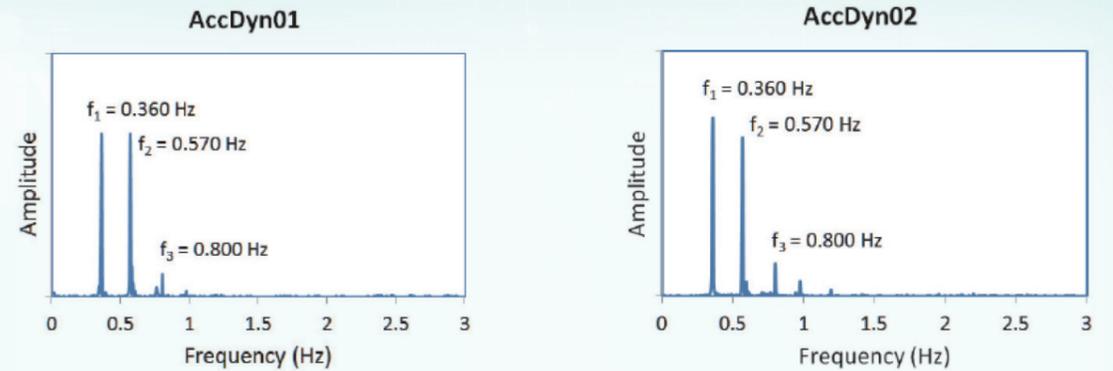
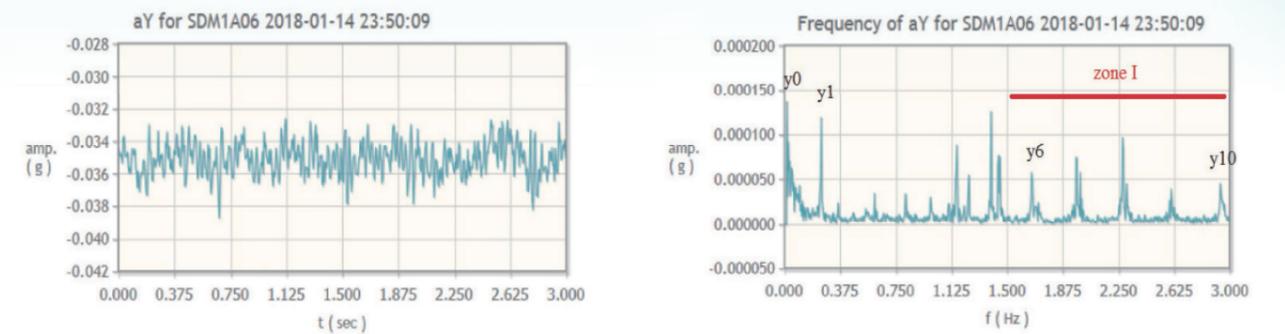


圖 20 吊橋鋼纜之加速規頻譜圖



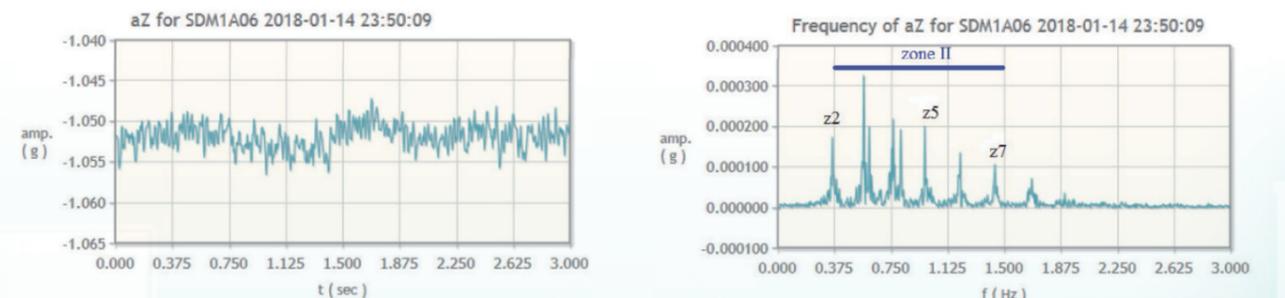
(a) 加速度歷時

(b) 加速度頻譜

圖 21 典型 y 方向 (水平) 加速度歷時圖與頻譜圖

擺動訊號，標示為 y_0 ，此行為發生在極低頻；第二類為 x-y 平面上之直線鋼纜振動行為，標示為 y_i ，i 代表振態序，此 x-y 平面之振動行為主要由主索張力控制。圖 22 顯示橋體垂直振動 (z 向)，可觀察到標示為 zone II 範圍內明確之連續規則尖峰，標註為 z_i ，此為 x-z 平面之下垂傾斜鋼纜振動行為。此振動行為由主索及防震

索共同組合的張力控制，亦受抗風索系統影響，資料顯示具有振態超越的現象，因此判讀時需以對應之分析方式應對。此垂直向振動行為可反映整體吊牆縱斷面系統之幾何改變及支索束制變化之程度，輔以上述 y 向訊號所得主索資訊後，可做為分析與診斷吊橋整體及個別組合系統特徵的參考依據。



(a) 加速度歷時

(b) 加速度頻譜

圖 22 典型 z 方向 (垂直) 加速度歷時圖與頻譜圖

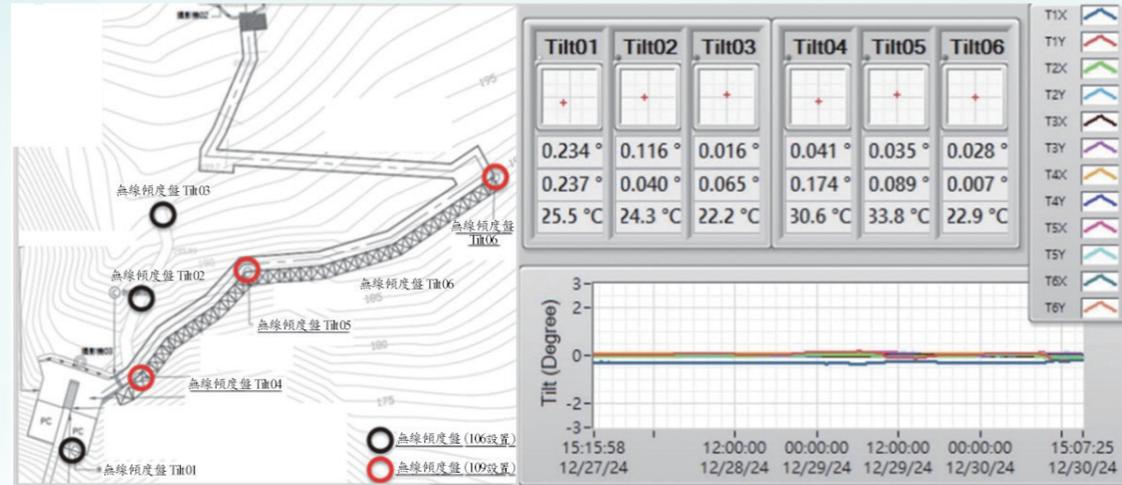


圖 23 傾度盤安裝位置（三地門端步道）與監測系統畫面

3. 無線傾度盤

於三地門端邊坡與步道設置 6 處傾度盤，其中 1 組安裝於三地門端主索錨碇塊，2 組安裝於舊木棧道基礎，3 組安裝於新步道基礎，其安裝位置圖如圖 23 及圖 24 所示，以即時掌握該邊坡與步道基礎之狀況，另依據「建築物基礎構造設計規範 (90.10.02)」表 - 解 4.4.1 角變量與建築物損壞程度，在考量本計畫傾度盤裝設於邊坡之步道，傾斜量易因邊坡表層坍塌而增加，故取 $\pm 8^\circ$ 為警戒值、 $\pm 10^\circ$ 為行動值，圖 25 與圖 26 顯



圖 24 無線傾度盤裝置照片

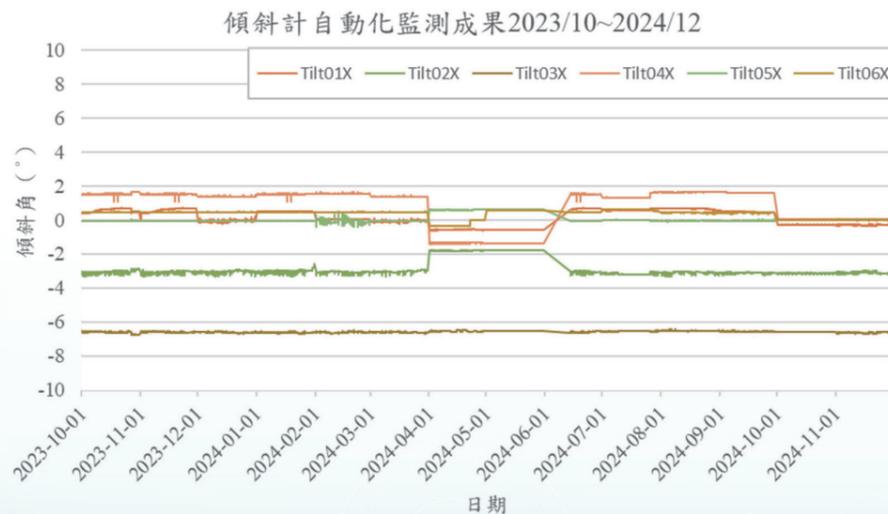


圖 25 傾度盤 x 向監測成果(112/10 ~ 113/12)



圖 26 傾度盤 y 向監測成果(112/10 ~ 113/12)

示 113/7/28 ~ 113/8/1 因通訊線路遭山區獼猴破壞致部份監測值異常跳動 (約 3.06°)，惟各點位變異皆在 1.57° 以內，經人員至現場檢視儀器紀錄原始檔及查看邊坡現況後，確認三地門端邊坡處於穩定狀態。

五、結語

山區跨河谷吊橋尤其是吊床式吊橋，其主要索及抗風索多固定山谷兩側邊坡岩體上，因此就邊坡岩體而言吊橋為施加在邊坡上的載重，故於防災預警監測規劃除吊橋本體的結構安全監測外，亦須涵蓋兩側邊坡的大地安全監測，本文案例為國內少見整合吊橋結構與大地領域的安全監測，除利用常見的自動化監測儀器外，並運用 3D 雷射光達掃描及全橋測量的定期檢測資料，以掌握吊橋全生命週期的安全穩定情形供維護管理單位應用。

誌謝

「山川琉璃吊橋」檢監測暨維護計畫與三地門端新闢棧道路線評估計畫承蒙屏東縣政府交通旅遊處提供相關經費與執行中的行政支援，特此表達感謝之意。

參考文獻

- 偉域工程實業股份有限公司 (2012)，『三地門吊橋結構安全檢測委託技術服務案』地質鑽探工作報告書。
- 財團法人台灣營建研究院 (2014)，「屏東縣三地門吊橋新建工程」竣工報告書，中華民國紅十字會總會。
- 財團法人台灣營建研究院 (2024)，「111 年吊橋檢測及步道設施維護委託專業服務 (後續擴充)」總結報告書，屏東縣政府。
- 財團法人台灣營建研究院 (2017)，「山川琉璃吊橋三地門端新闢棧道路線評估」總結報告書，屏東縣政府。
- 大宇地工技術有限公司 (2014)，「屏東縣瑪家鄉三地門吊橋工程地質調查及鑽探工程」地質鑽探報告書，屏東縣政府。
- 冠達工程顧問有限公司 (2014)，『屏東縣三地門吊橋新建工程』設計圖說。
- 昌佑工程技術顧問有限公司，『三地門吊橋周邊引道、琉璃意象及光雕計畫』竣工驗收圖說。
- 摩爾土壤基礎材料試驗工程有限公司 (2016)，『山川琉璃吊橋旅客服務中心及景觀綠美化工程』地基調查報告書。