

計畫編號：110 保發-8.1-保-01-06-001(Z)

以 UAV 搭載高解析熱像儀於水工構
造物及邊坡穩定工程等構造物之巡檢
**Inspections of hydraulic and slope
stability structures with UAV-based high
definition thermal camera**

執行單位：逢甲大學

執行期間：110 年 2 月 17 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：黃亦敏 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 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)

以 UAV 搭載高解析熱像儀於水工構造物及邊坡 穩定工程等構造物之巡檢

摘要

近年受氣候變遷影響，台灣常出現短延時、強降雨之降雨型態，導致潛在危險性區域災情發生或既有災害區域擴大等情形，然而針對水工構造物及邊坡穩定工程等構造物巡檢，常受限現場環境條件導致人員難以接近水工構造物進行檢測，且構造物於目視檢測或可見光影像中，常無法準確觀察損壞情形。

本計畫使用 UAV 搭載可見光及高解析熱感影像相機，針對南投偏遠山區進行拍攝，以熱感影像為主，正射影像及數值地表模型為輔，進行影像分析獲取構造物之裂縫資訊之可行性研究評估與驗證，另藉由本計畫建立 UAV 應用於水工構造物巡檢之標準作業流程，期望提高水工構造物巡檢效率與降低人員巡檢之危險性，並克服巡檢人員為現場環境所限制。

關鍵詞：UAV、熱像儀、水工構造物、裂縫檢測

Inspections of hydraulic and slope stability structures with UAV-based high definition thermal camera

Abstract

Due to the global climate change in recent years, Taiwan often suffered from short-delayed and heavy participation. It may lead to the occurrence of regional disasters or expansion of already-existed disaster areas. Inspections to hydraulic and slope stabilization structures have been carried out. However, those inspections were often restricted by on-site environmental factors which make it difficult to reach. Furthermore, some of the structural damages cannot be observed with visible light images. Therefore, this project aims to apply UAV with high-resolution visible light and thermal-sensing camera to inspect the structural deterioration and overcoming the environmental limitations.

This project mainly studies the hydraulic structures located at Nantou mountainous area. Thermal images were used as the fundamental evidence and proven by the visible light orthophotos and digital surface model (DSM). The key objectives are to establish the Standard Operation Procedures (SOP) of UAV inspections, determine the possibilities of UAV inspections in hydraulic structures and prove the hydraulic structural damages by the UAV-based high definition visible light and thermal-sensing camera.

Keywords: UAV, Thermal-sensing camera, hydraulic structure, crack inspection

目次

第 1 章	緒論	1
第 1 節	研究動機與目的	1
第 2 節	擬解決問題	1
第 3 節	研究限制	2
第 4 節	研究區域	2
第 2 章	文獻回顧	3
第 3 章	工作執行方法與步驟	16
第 1 節	UAV 應用於巡檢之標準作業流程建置	16
第 2 節	熱像儀應用於水工及邊坡穩定工程構造物 毀損偵測之可行性擬定與驗證	20
第 4 章	結論與建議	51
第 5 章	工作進度與交付項目	52
第 1 節	計畫甘特圖	52
第 2 節	計畫交付項目	53
參考文獻		參-1
附錄一、	驗證區域影像檔案	附-1
附錄二、	期初審查意見	附-6
附錄三、	期中審查意見	附-9
附錄四、	期末審查意見	附-11

表次

表 3-1 飛行驗證地點.....	22
表 3-2 渲染色譜.....	25
表 3-3 九分二山觀測站的日累積雨量統計	35
表 3-4 九分二山觀測站 7 月 6 日的每小時雨量統計(從 1 時到 18 時).....	35
表 3-5 第三期驗證區域大範圍影像	36
表 3-6 本計畫驗證混凝土缺失總表	44
表 5-1 計畫甘特圖.....	52

圖次

圖 2-1 普通相機所拍攝之影像	3
圖 2-2 熱影像儀所拍攝之影像	3
圖 2-3 熱影像圖徵(91/08/01 09:35).....	4
圖 2-4 熱影像各點歷時溫度變化圖	4
圖 2-5 C 點位置	4
圖 2-6 D 點位置	4
圖 2-7 E 點位置	5
圖 2-8 E 點外柱裂縫放大圖	5
圖 2-9 草嶺地區公路 149 乙 6.5K 自然邊坡(90/9/12).....	5
圖 2-10 草嶺地區公路 149 乙 6.5K 熱影像圖徵接合圖(90/9/12 8:00).6	
圖 2-11 草嶺地區公路 149 乙 6.5K 熱影像圖徵接合圖(90/9/12 15:00).....	6
圖 2-12 西子灣隧道紅外線檢測實例	7
圖 2-13 大關山隧道紅外線檢測實例	7
圖 2-14 建物外牆檢測結果	8
圖 2-15 建物外牆檢測結果 II.....	8
圖 2-16 縱向裂縫之熱影像&光學影像對照圖	9
圖 2-17 橫向裂縫之熱影像&光學影像對照圖	9
圖 2-18 龜裂之熱影像&光學影像對照圖	9
圖 2-19 版厚 8CM 與 10CM 完全顯像 3D 溫差分佈圖	10
圖 2-20 空洞深 5CM 與 10CM 完全顯像 3D 溫差分佈圖	11
圖 2-21 實驗一堤防坡面熱影像&光學影像對照圖	12
圖 2-22 實驗二堤防坡面熱影像&光學影像對照圖	12
圖 2-23 實驗三堤防坡面熱影像&光學影像對照圖	12

圖 2-24 大樓外表剝落磁磚熱影像&光學影像對照圖	13
圖 2-25 熱像儀檢測混凝土橋樑圖	14
圖 2-26 熱像儀監測混凝土水霸圖	14
圖 3-1 國姓南港村飛行驗證 3 處.....	22
圖 3-2 信義鄉潭南村飛行驗證 4 處.....	23
圖 3-3 區域 4 A~D 分布位置圖	26
圖 3-4 區域 4 A 處紅外線熱影像圖	27
圖 3-5 區域 4 A 處可見光影像圖	27
圖 3-6 區域 4 B 處壩翼紅外線熱影像圖	28
圖 3-7 區域 4 B~D 處壩翼可見光影像圖	28
圖 3-8 區域 4 A 處以 FLIR TOOL 分析溫度高低差	29
圖 3-9 110 年 2 月拍攝影像(左圖以鐵色渲染，右圖以高量彩虹渲染).....	30
圖 3-10 110 年 7 月拍攝影像(左圖以鐵色渲染，右圖以高量彩虹渲染)	30
圖 3-11 110 年 7 月拍攝壩柱轉角處溫度不均(左圖為鐵色渲染，右圖 以高量彩虹渲染).....	31
圖 3-12 110 年 7 月壩柱可見光影像與放大圖片	31
圖 3-13 區域 2 A~B 分布位置圖	32
圖 3-14 區域 2 的 A 處期初(2 月)拍攝熱感影像	33
圖 3-15 區域 2 的 A 處期中(7 月)拍攝熱感影像(左)與可見光影像 (右).....	33
圖 3-16 區域 2 的 B 處期中拍攝熱感影像	34
圖 3-17 區域 2 的 B 處期中拍攝可見光影像	35
圖 3-18 第三期拍攝分布地點	36

圖 3-19 第三期驗證區域 1 可見光影像.....	39
圖 3-20 第三期驗證區域 1 熱感影像.....	39
圖 3-21 第三期驗證區域 2 可見光影像.....	40
圖 3-22 第三期驗證區域 2 熱感影像.....	40
圖 3-23 第三期驗證區域 12 可見光影像.....	41
圖 3-24 第三期驗證區域 12 熱感影像.....	41
圖 3-25 第三期驗證區域 10 可見光影像.....	42
圖 3-26 第三期驗證區域 10 熱感影像.....	42
圖 3-27 AI 人工智能判識成果圖	50

第1章 緒論

水工構造物或邊坡穩定工程經常位於山區、河床或道路上下邊坡，檢測人員無法輕易到達或是無法近距離檢查之位置，故此團隊以 UAV 掛載高解析度可見光攝影機與熱感攝影機嘗試提高巡檢之可行性與可靠性。

第1節 研究動機與目的

近年 UAV 技術發展迅速，透過空中觀察的方式，可補足人員無法到達或接近的地點，大幅降低人員安全疑慮、提高作業效率。且 UAV 除可掛載一般高解析可見光(RGB)相機，進行拍照、錄影外，更可搭載其他各式感測器，如熱像儀、近紅外光感測器、溫濕度計等，可偵測其他可見光以外之光譜值，輔助判釋肉眼所無法觀測之現象。

又水工構造物或邊坡穩定工程所座落位置，經常位於河床或道路上下邊坡人員無法輕易到達之處，且鋼筋混凝土構造物表面剝落、裂縫等情形需要依賴近距離拍攝或高解析相機才能分辨。又或許構造物本身表面上或許並無損壞，但內部鋼筋無法利用一般肉眼直接透過可見之光譜值觀察之損毀情形。

故本計畫希望利用 UAV 之優勢，搭載高解析熱像儀，以非破壞性檢測方式，應用於水工構造物以及邊坡穩定工程之巡檢，達到人員安全、快速偵測、精確判釋等效果。若能藉由新科技及新技術達到構造物損壞判釋的目標，則將會大幅提高無人機應用的可行性，以及縮短人工檢測時間，對業管單位而言，能提昇管理能量及作業效率。

第2節 擬解決問題

鑑於近年氣候異常，引發潛在危險性區域災情發生或既有災害區域擴大等情形，針對水工構造物及邊坡穩定工程等構造物進行巡檢。但由於構造物經常位於人員無法到達或環境狀況難以接近之區域，難以近距離接近設施進行檢查。若構造物老舊，常常於外表一般可見光影像，觀察不出內部結構損壞情況。故本計畫嘗試利用空拍機搭載可見光及高解析熱感影像，針對人員無法接近之混凝土構造物進行拍攝，並利用人工智慧進行裂縫判釋，期能做到劣化程度評定。

第3節 研究限制

本研究利用無人機搭載可見光與熱像儀，進行水工構造物影像裂縫判釋，考量野外條件及天候狀況，以及作為初期熱像儀應用嘗試，提出本研究之分析限制，做為未來研究計畫參考：

1. 於現地驗證時，無人機雖可深入人員無法到達之區域，但部分被植物擋住之區域，仍無法進行拍攝。
2. 於文獻中顯示，熱影像只能看到構造物表面的裂縫長度與破損範圍，對於構造物劣化程度還需要搭配其他評估因子（例如裂縫深度、混凝土保護層厚度等），故本研究僅針對水工構造物表面破損形式於熱影像上的呈現型式加以探討。

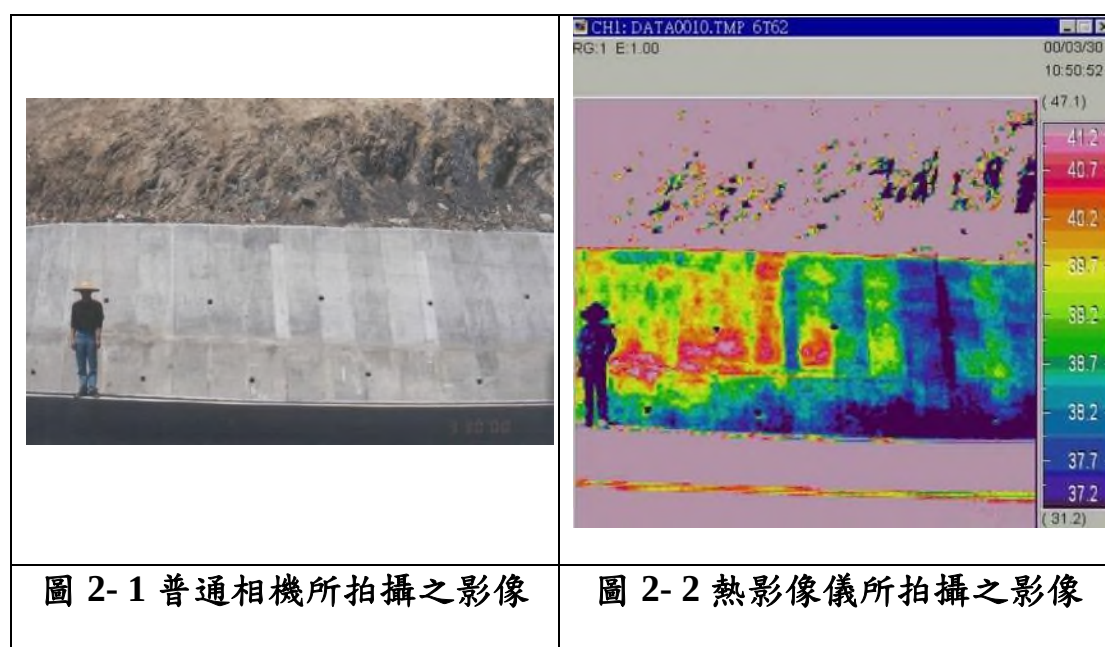
第4節 研究區域

本計畫主要針對南投山區山坡地範圍內之潛勢溪流或野溪，其水工構造物及邊坡穩定工程，如護岸、擋土牆及箱涵等鋼筋混凝土構造物。

第2章 文獻回顧

紅外線熱影像儀的應用因其擁有能夠快速實施表面檢測、能夠簡單將溫度數值化並且具有熱影像容易解讀的優點，故此技術在非破壞檢測上迅速地受到大家的重視與廣泛的應用。

李德河(2000)^[1]運用熱紅外線影像拍攝南橫公路甲仙至梅山路段數處保護設施與邊坡，結果顯示以熱影像儀可明確測出混凝土擋土牆後的地下水集中處和擋土牆面龜裂處，如圖 2- 1、圖 2- 2 所示，其對檢測混凝土擋土牆的安全性具有一定功效。



田坤國(2002)^[2]運用紅外線熱影像儀於不同的時段拍攝正修技術學院校區建築物，並且進行比對分析，於結果顯示紅外線熱影像儀具有非接觸、全面式大面積檢測、快速的取得相關熱影像、並可進行連續性偵測等特性；其先排除建築物受到環境特性因素影響所產生的異常溫度分布位置，再藉由傍晚、中午、清晨不同時段的熱影像圖進行分析判釋，如圖 2- 3~圖 2- 8 所示。

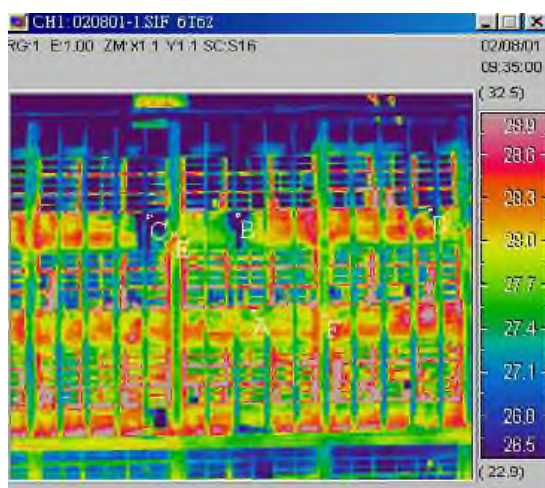


圖 2- 3 熱影像圖徽(91/08/01 09:35)

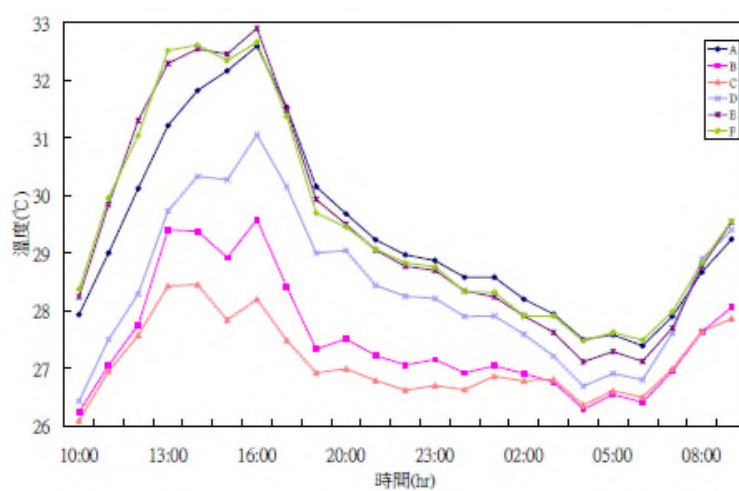


圖 2- 4 熱影像各點歷時溫度變化圖



圖 2- 5 C 點位置



圖 2- 6 D 點位置



圖 2-7 E 點位置

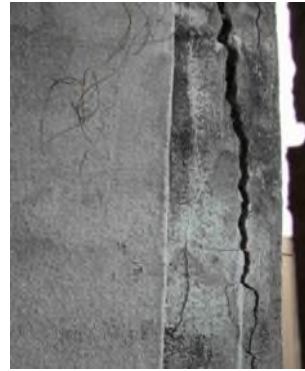


圖 2-8 E 點外柱裂縫放大圖

其結果顯示在裂縫的位置、材料差異部位、孔洞、水分聚集處、牆背透空或牆背後與樑接觸等部位，均可顯示出與周圍相異之溫度圖徵，即可找出建築物問題部位。

吳秉晃(2002)^[3]運用熱影像探測方式，嘗試尋找公路邊坡二次災害潛能較高的邊坡，再以透地雷達技術輔助探測噴漿護坡內部完好與否，並對照透地雷達探測及熱影像溫差圖進行驗證，如圖 2-9~圖 2-11 所示。

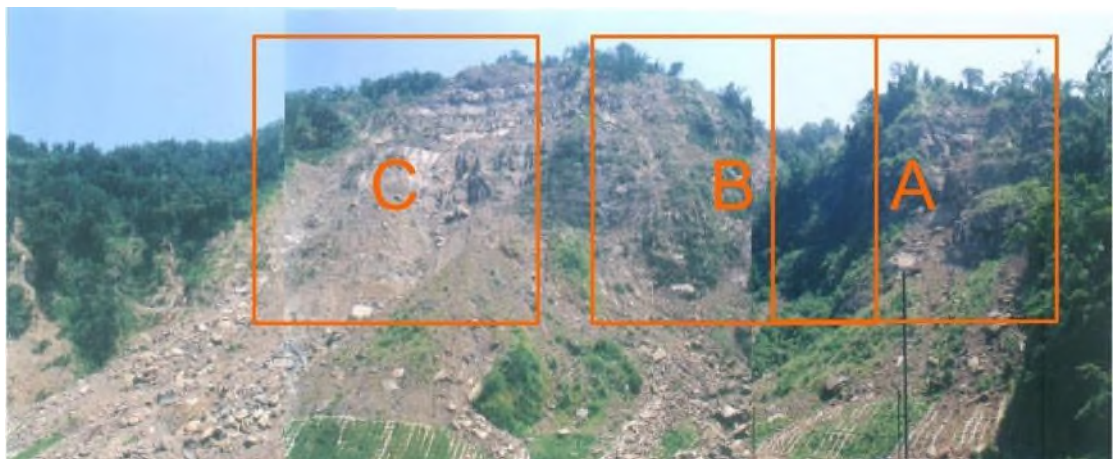


圖 2-9 草嶺地區公路 149 乙 6.5K 自然邊坡(90/9/12)

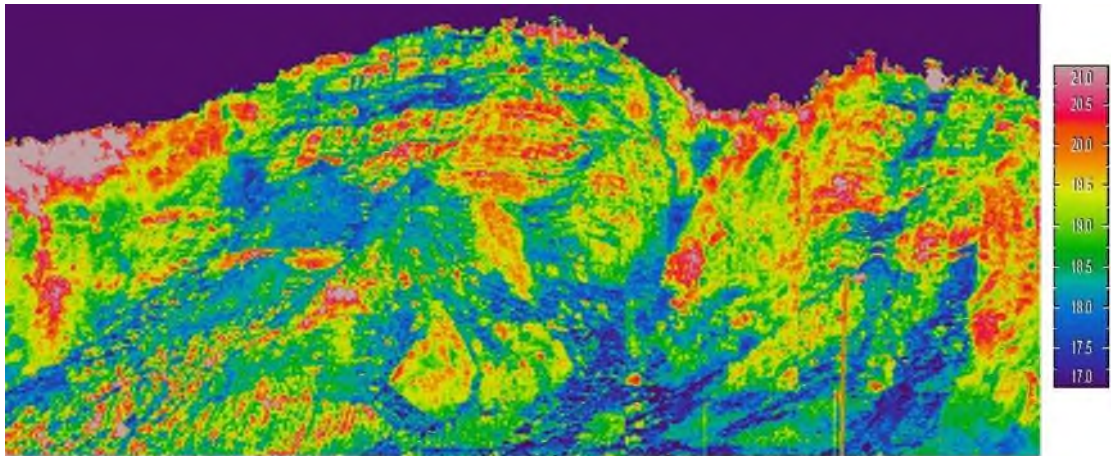


圖 2- 10 草嶺地區公路 149 乙 6.5K 熱影像圖徵接合圖(90/9/12 8:00)

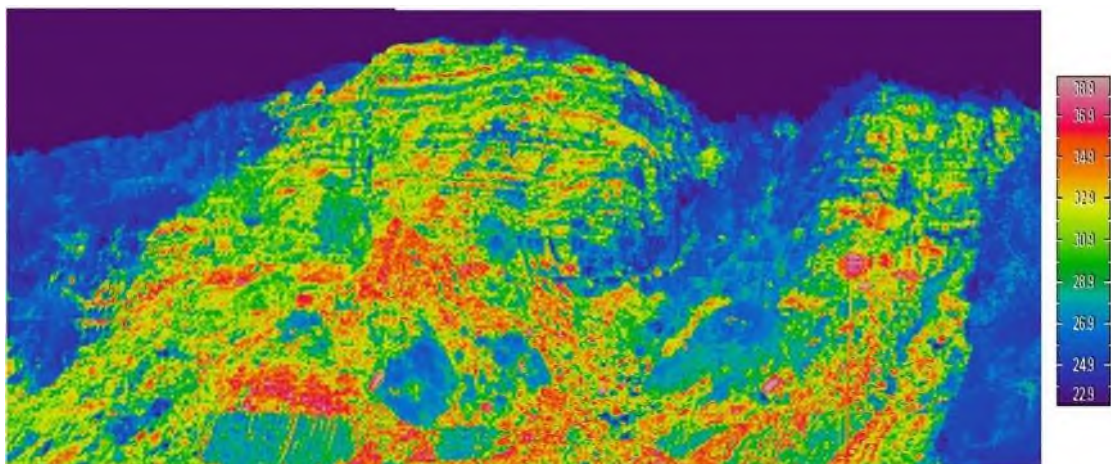


圖 2- 11 草嶺地區公路 149 乙 6.5K 熱影像圖徵接合圖(90/9/12 15:00)

其結果顯示於不同時間拍攝，會因邊坡上物質溫度變化不同而產生差異，且不同天氣條件亦會造成熱影像圖徵的差異，故若能夠排除這些因素的影響，才能正確比較不同時期拍攝之熱影像圖徵，於實驗結果顯示於清晨未受太陽光影響下的熱影像圖徵，可以避免地形、陽光、天候的影響，較利於不同時期間的相互探討比對；並且於結果顯示熱影像技術易於找出邊坡表面水流處，可辨識出豪雨侵襲時可能因表面水流沖刷而挾帶土石崩落的位置。

張真良(2002) [4] 運用紅外線熱影像分析技術評估隧道之襯砌品質，其針對西子灣隧道及大關山隧道為對象，利用紅外線測溫熱影

像分析儀進行實地檢測後，再以分析軟體進行解析，如圖 2- 12~圖 2- 13 所示。

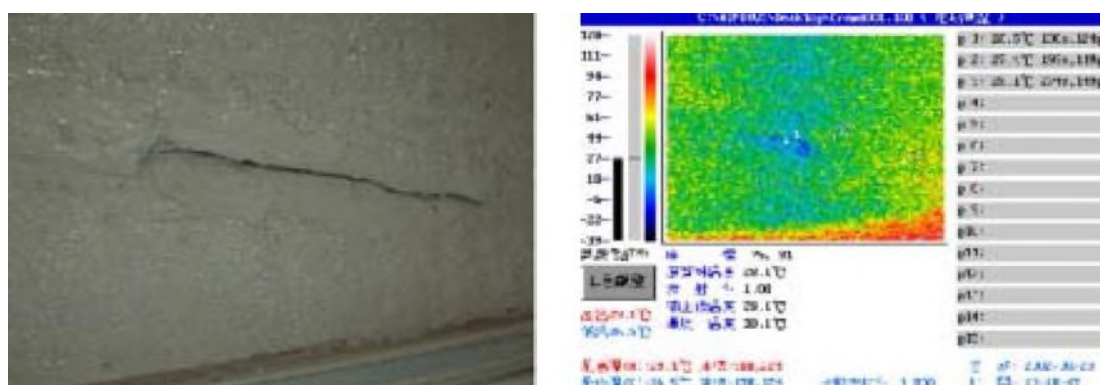


圖 2- 12 西子灣隧道紅外線檢測實例

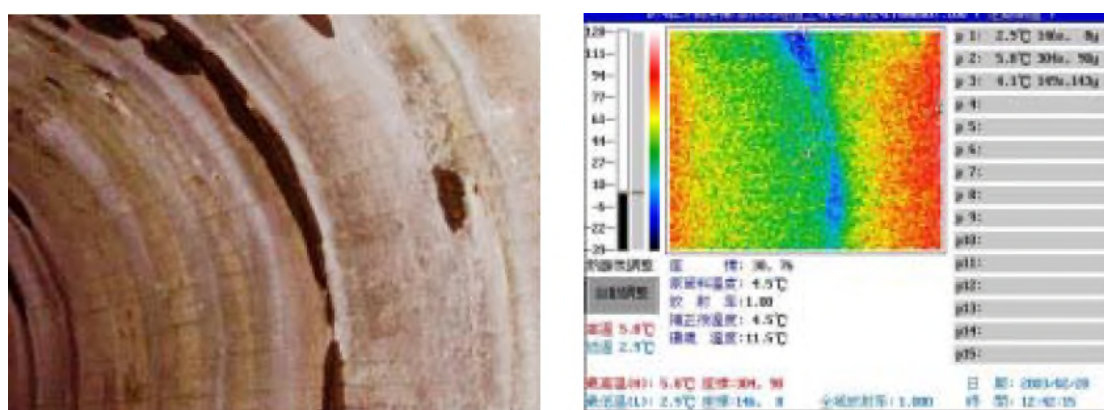


圖 2- 13 大關山隧道紅外線檢測實例

試驗結果呈現若襯砌表面滲水或內部結構有孔隙，都會導致熱傳受阻而使溫度降低，並且認為曾修補過之隧道襯砌結構，可利用紅外線熱影像分析，檢查修補工程品質是否確實。

鄭子揚(2005)^[5]運用鎖相熱影像法對各類型試體進行實驗並結合數值分析法，尋求觀察任何深度缺陷的最佳時間，最後再在現有建築物中，套入實驗與數值分析所得到的資訊加以分析，如圖 2- 14~圖 2- 15 所示。

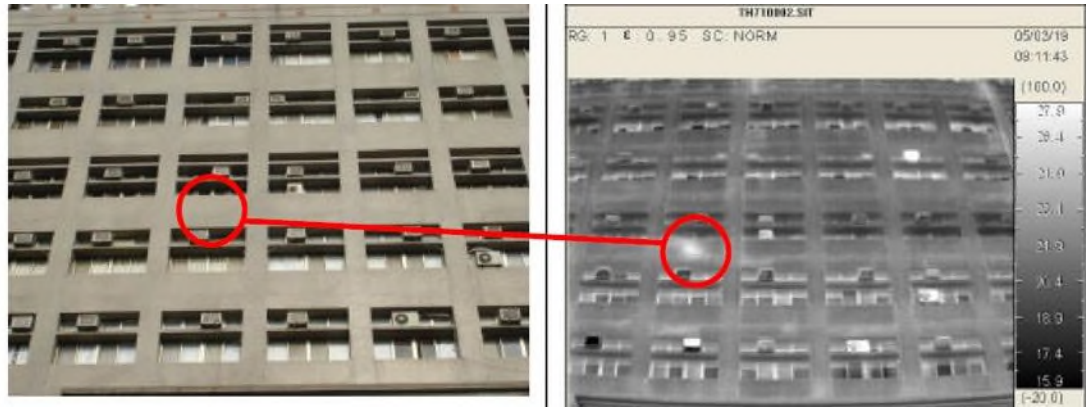


圖 2-14 建物外牆檢測結果

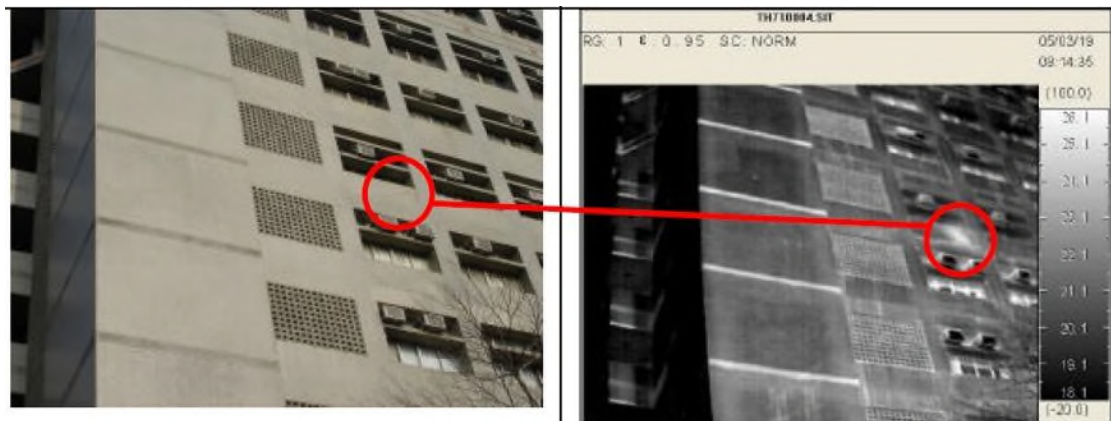


圖 2-15 建物外牆檢測結果 II

其結果顯示欲使用紅外線熱影像法檢測，最佳檢測時間於太陽照射時或太陽照射後數小時內，受測物在處於吸放熱的狀態時，含有缺陷之區域才會因為熱物性的差異而顯現出來，並且指出不論受測物是否含水，紅外線熱影像皆可檢測到混凝土表面下的缺陷。

何坤居(2006)^[6]運用紅外線熱影像測溫儀取代傳統人工目測方式進行檢測，利用現地不同大小之裂縫進行 24 小時紅外線熱影像儀連續性拍攝，最後分析其溫度變化與評估破壞類型等關係，如圖 2-16~圖 2-18 所示。

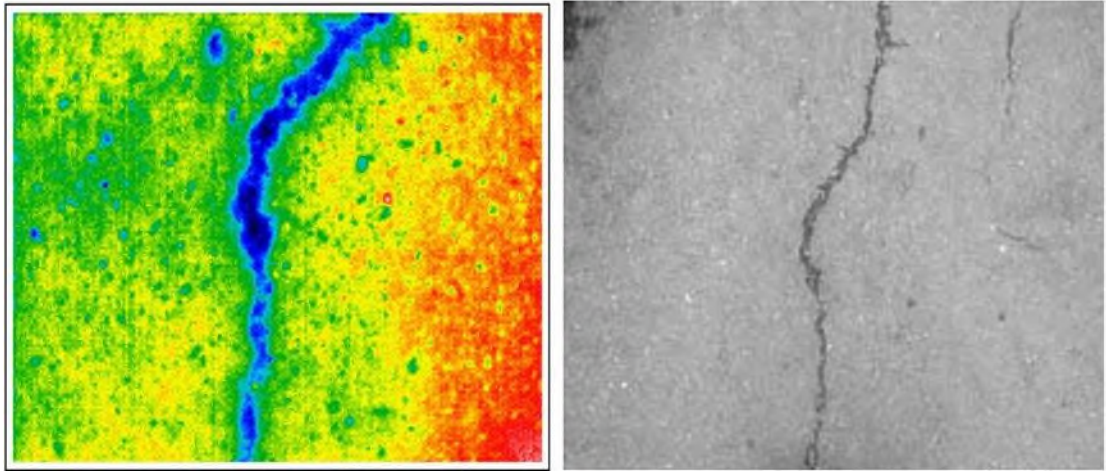


圖 2- 16 縱向裂縫之熱影像&光學影像對照圖

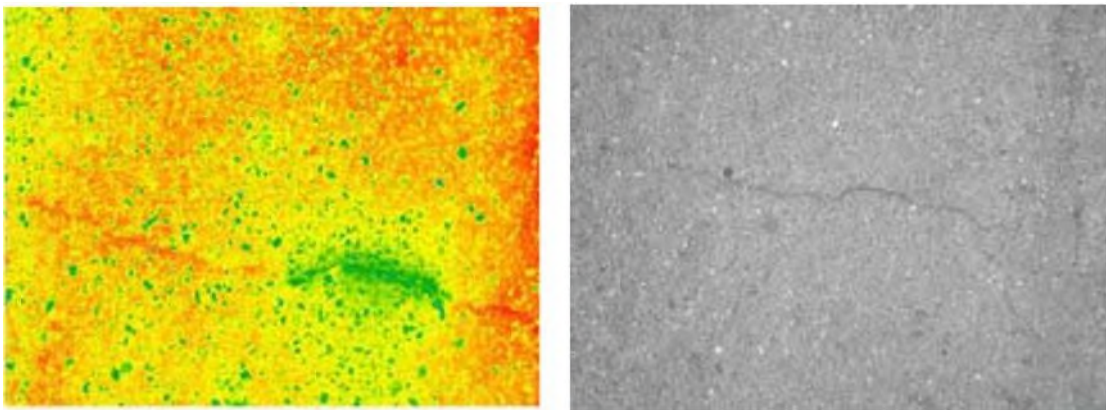


圖 2- 17 橫向裂縫之熱影像&光學影像對照圖

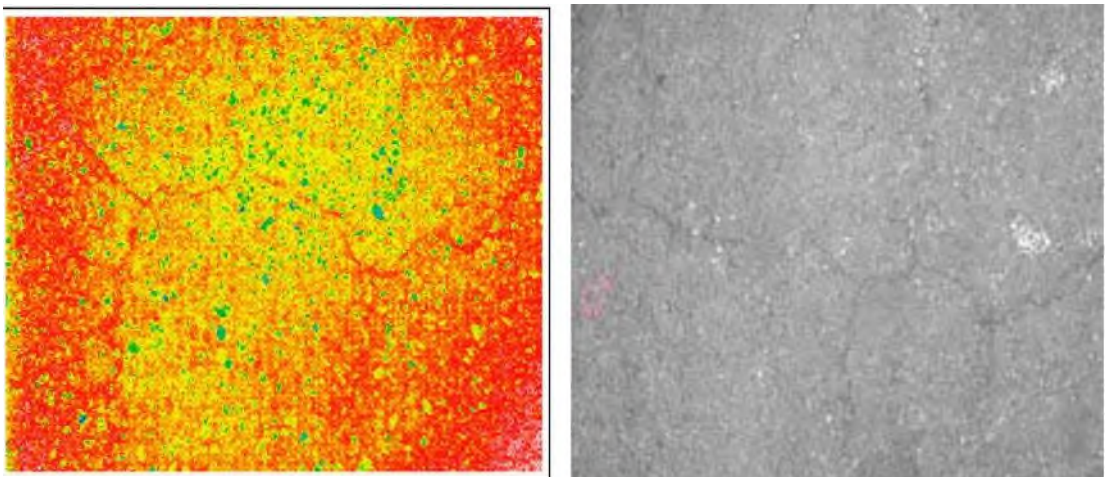


圖 2- 18 龜裂之熱影像&光學影像對照圖

結果顯示藉由熱影像圖可有效辨識熱影像特徵，對於 2~5mm 之裂縫能有效判斷，裂縫面積較小者具有較大的熱惰量，其溫度上升

較慢，可用以推知裂縫等級的依據。

而對於鋪面材質的溫度歷時變化的實驗結果以裂縫溫度變化幅度最高、瀝青次之，骨材變化幅度最小；並且於實驗後建議紅外線拍攝時間以早上 0:00~4:00 受周遭影響為最低。

李春輝(2008)^[10]運用紅外線熱影像儀，以熱源注入方式檢測地面下空洞的位置與大小，探討不同混凝土強度、版厚、空洞深度、土層以及有無配筋等條件下，紅外線熱影像儀可探測的溫差變化情形，其為使圖形與空洞位置配合以利觀察比較，故將溫差值乘負號，並建置 3D 溫差分佈圖，如圖 2- 19~圖 2- 20 所示。

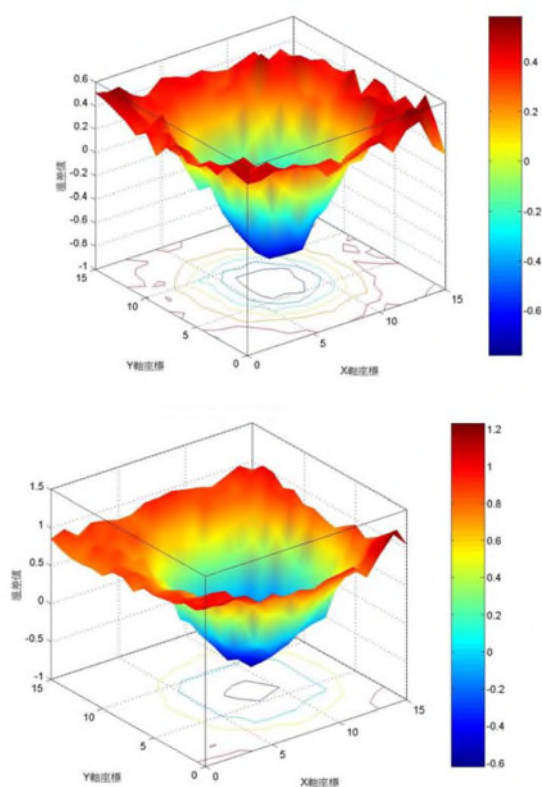


圖 2- 19 版厚 8cm 與 10cm 完全顯像 3D 溫差分佈圖

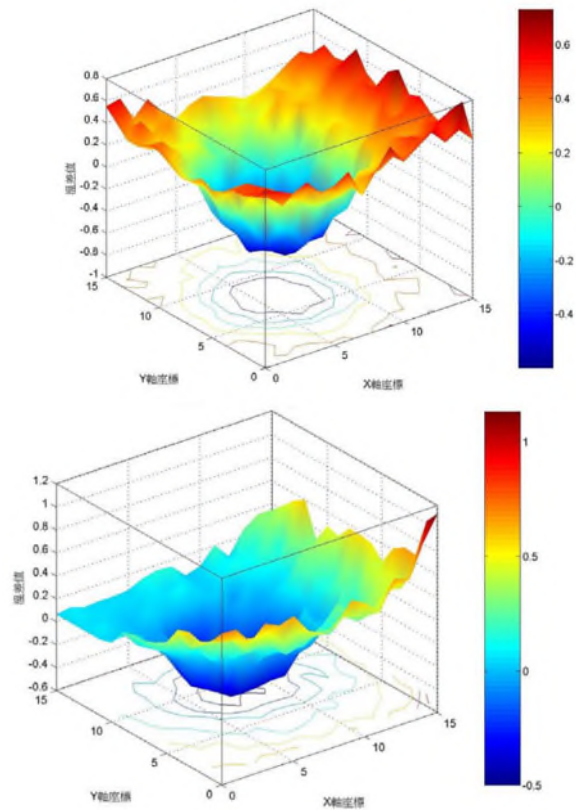


圖 2- 20 空洞深 5cm 與 10cm 完全顯像 3D 溫差分佈圖

於結果顯示，使用紅外線熱影像儀探測，對於不同土壤、混凝土配筋以及不同的混凝土版強度下的空洞準確度未呈現顯著之差異；而對於混凝土版厚與空洞深度，則有明顯的顯著差異，並由此試驗中呈現透過計算溫差處理，可判別空洞的位置。

莊雯茹(2011)^[11]運用紅外線熱影像儀輔以加熱爐對於三處堤防坡面進行檢測，再進行影像處理並分析比較，如圖 2- 21~圖 2- 23 所示。

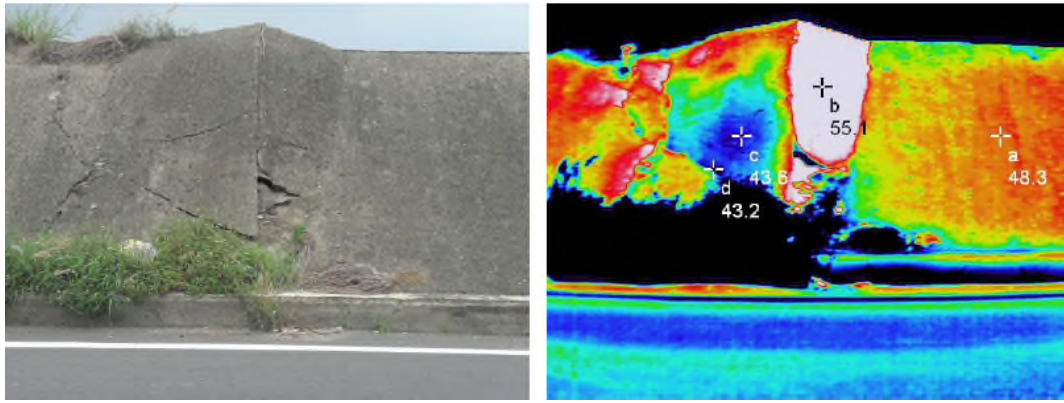


圖 2-21 實驗一堤防坡面熱影像&光學影像對照圖

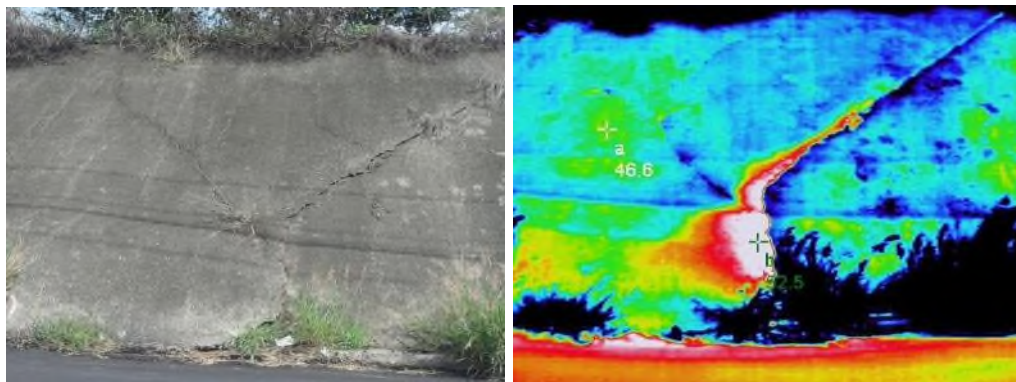


圖 2-22 實驗二堤防坡面熱影像&光學影像對照圖

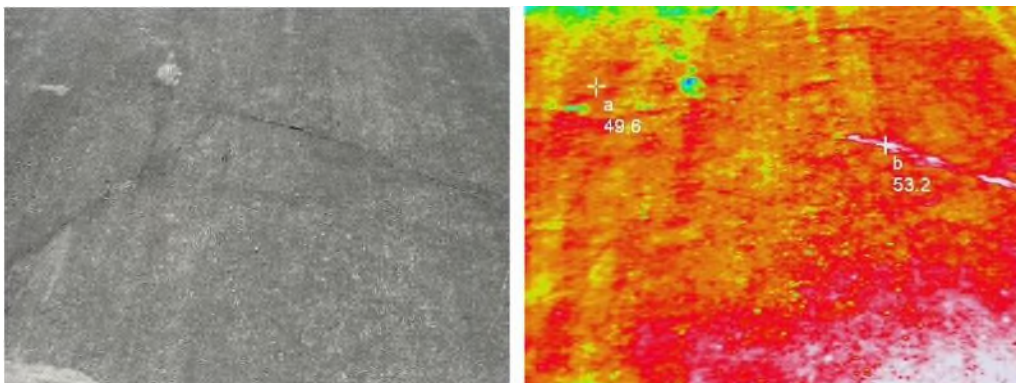


圖 2-23 實驗三堤防坡面熱影像&光學影像對照圖

於結果顯示運用紅外線熱影像儀拍攝後進行影像處理重建，可以有效降低資料儲存量，並且可明顯顯示出熱影像中明顯的特徵。

孫禾穎(2013)^[12]運用紅外線熱影像儀，檢測 AC 鋪面的溫度，並配合目視調查與鋪砂法對鋪面溪離程度進行驗證，根據其試驗結果，運用熱影像儀拍攝會受到拍攝時段的天氣及氣溫狀況以及拍攝

對象溫度的不同而相對影響析離程度的參考指標，故建議於不同時段進行拍攝，方可建立出各溫度範圍的參考指標值。

石明哲(2016)^[13]運用紅外線熱影像儀，檢測國立臺灣大學使用十三溝面磚的老舊建築物，並以此建立「建築物外牆磁磚紅外線診斷評估方法」，以評估建築物外牆磁磚之劣化程度，而結果顯示，劣化位置周圍磁磚溫度較普通磁磚溫度高，於此可推論劣化位置，進而評估修繕整建之必要性，並其於結論指出紅外線熱影像法可清楚具體呈現大小範圍之黏貼不完整處的範圍及位置，提供做為判斷之準則並使檢測人員易於判讀。

陳瑞鈴(2017)^[14]中結合紅外線鏡頭與無人飛行載具進行大樓外表瓷磚檢測，以在實驗室中實驗所得之磁磚有/無缺陷表面溫度變化結果，經由溫度差異分析比對後，再藉由無人飛行載具搭載小型紅外線鏡頭進行現地高樓建築拍攝，如圖 2- 24 所示。

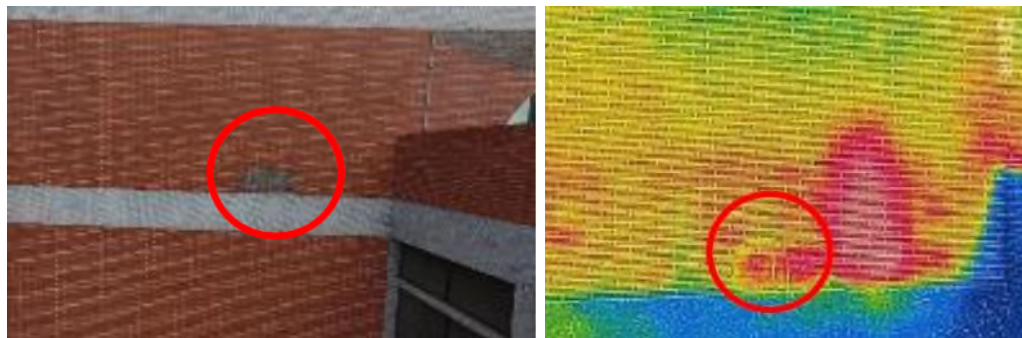


圖 2- 24 大樓外表剝落磁磚熱影像&光學影像對照圖

結果顯示以紅外線無人飛行載具熱顯像系統於飛行模式進行磁磚缺陷檢測，由差異化處理可分辨磁磚缺陷脫層大致範圍。

Michal Janku(2019)^[15]使用熱像儀進行混凝土橋樑的老化檢測，並與透地雷達和超聲波脈衝回波的測量效果互相比對。結論說

明使用熱像儀檢測能找出接近表面的受損材質，而檢測效率也是最快的。

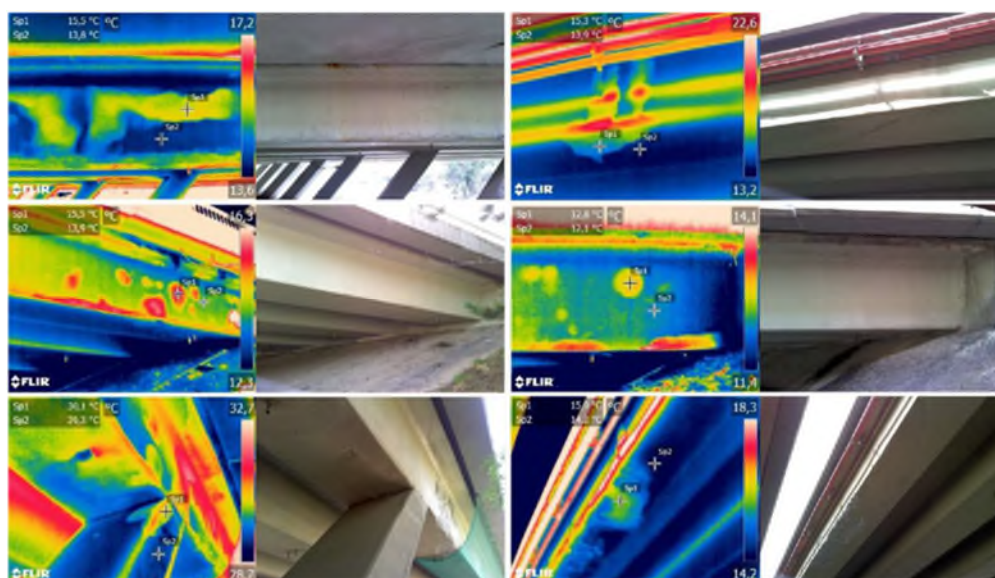


圖 2- 25 熱像儀檢測混凝土橋樑圖

Maria J. Henriques (2015) [16] 展示了以熱像儀監測混凝土水霸的細微受損和滲漏狀況，結論表示與水有關的滲漏容易被熱像儀檢測，由於即時能看出結果，現場人員可以快速決定跟進工作，效果良好。

Maria João Henriques and Pedro Ramos

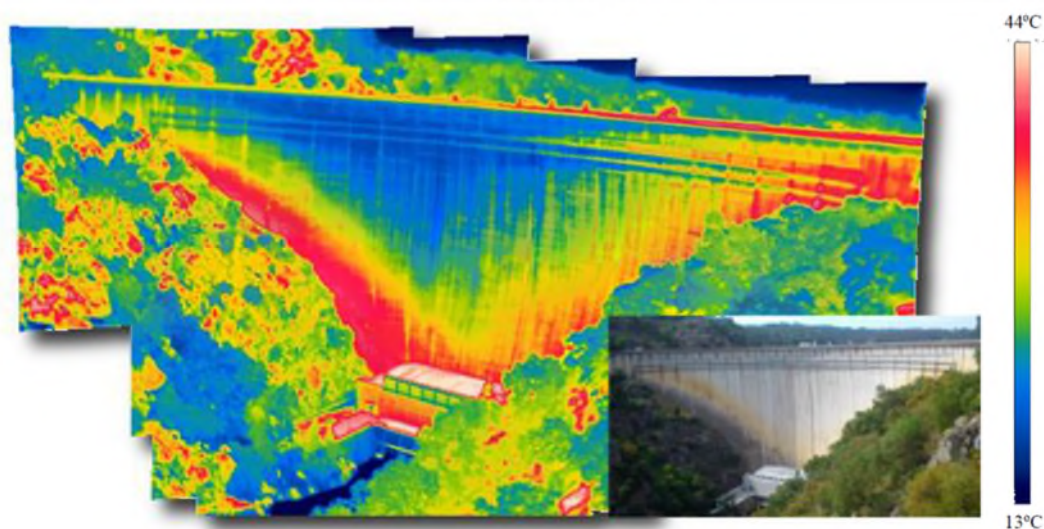


圖 2- 26 熱像儀監測混凝土水霸圖

基於文獻回顧內容，本研究可參考非破壞檢測中透地雷達和超聲波脈衝回波方法的研究架構，嘗試建立水工構造物表面或接近表面之混凝土中性化或破損型式，在熱像儀中所呈現之樣態進行映射比對，並建立樣態資料庫。另參考何坤居(2006)文中所呈現熱影像，混凝土同一裂縫中所呈現溫度深淺不同，可能為裂縫深度不同所造成，本研究過程中若發現類似情況，將加以探討。

第3章 工作執行方法與步驟

第1節 UAV 應用於巡檢之標準作業流程建置

1、場域確認

本計畫目的為巡檢水工構造物及邊坡穩定工程等構造物，嘗試以熱感攝影機判識構造物之結構性問題，故此本團隊先從水保局轄內年代較久遠的水工構造物開始研究，期望能找到較明顯缺陷地點，學習熱感判識的特徵，從而把學習過程轉移到廣大一般構造物。

團隊從水保文件中找尋合適研究對象，如查看水保工程調查報告與集水區現況調查報告，再於 Google Earth 圖台上進行作業可行性評估，從而選出可研究場域。

然而，從報告中尋找合適研究地點，或從網路圖台上作評估，往往會跟現實狀況有差距，因此實地考察是非常重要的。選定地點後，團隊會進行實地調查，主要考查的重點如下：

(1) 構造物的植物覆蓋率

熱感攝影機的原理是以被動方式接收物體表面所釋放、折射、透射、反射的熱輻射，可是攝影機影像無法穿透在鏡頭前的植物，倘若構造物被大量植物覆蓋，所測量的溫度將會是植物表面的溫度而不是構造物本身的溫度，會對檢測結果造成誤判，因此場勘的其中一個重點是構造物的主要部份不能有植物覆蓋。

(2) 構造物周邊的障礙物

水工構造物及邊坡穩定工程等構造物往往在山區地形複雜之地，飛行空間狹窄、植物叢生對飛行安全造成威脅，因此場勘需要以多角度判斷近距離的飛行可行性。

(3) 場域的地形與訊號狀況

複雜地形會阻礙遙控控制與圖像傳送訊號的流暢性，造成飛行安全的隱憂，因此團隊需要以經驗實時判斷訊號穩定度以確保飛行安全。

2、空拍任務前置作業

空拍任務需依照目標區之地勢走向，規劃可執行拍攝作業時間。一般而言，上午為較佳之作業時間，可避開中午 GPS 衛星訊號較差等因素之影響。為有效提昇空拍作業之精準度，須先行蒐集空拍地點環境基本資訊，並進行拍攝區域確認，以正確執行空拍任務。

針對指定或優先拍攝區域，先行蒐集拍攝地區相關資訊，包括地形、水文、交通、行政區界等環境基本資料、前期遙測影像資訊、其他資訊等，並將上述蒐集之環境基本向量資料與遙測影像資料，進行圖資套疊，以利於空拍任務執行前，先行對於任務區域有基本的了解，並可做為後續現地勘查與航線規劃之參考依據。

此外，團隊需要充份考量天氣因素，因為下雨天與強風除了對飛行安全帶來不利因素外，也會影響熱感攝影機的成像與判識。

3、空域申請

依交通部民用航空局無人機之規定，於任務前 15 天需於遙控無人機管理資訊系統進行空域申請作業，約 15 至 30 天待審核通過後才可執行任務，但執行期間可為一段長時間如 3 個月之久，且若為政府機關執行公務所需，則更可申請延長。

活動申請需輸入作業名稱、用途、承辦人、現場負責人、協調人、作業日期與時間區間，以及活動區域範圍坐標等資料，即可完成活動申請之作業。若任務區域位於禁航區，則建議由業主函文至

民航局，說明其任務之必要與重要性，以利空域申請通過。

4、航線規劃

擬定 UAV 飛行航線、航高及空域活動申請等規劃。並依任務需求考慮選用定翼、單旋翼或多旋翼無人機。因目前市場占有率最高之機型為四軸多旋翼，且符合業務之大部分業務需求，故本研究以四軸多旋翼為主。

5、空拍作業

至任務現場後，確認現場環境安全後，即可開始飛行任務。另於空拍作業現場執行任務前，需於民航局遙控無人機管理資訊系統進行「登載」動作，並於結束任務後進行「報離」動作。

6、影像後處理

空拍任務完成後，將照片取出並匯入 PhotoScan 軟體進行影像後處理，經過載入空拍照片(*.jpg)、空中三角解算(Align Photos)、加入地面控制點(GCP)、產製點雲模型(Build Dense Cloud)、建置三角網格模型(Build Mesh)及建置紋理資訊(Build Texture) 等步驟，即可輸出正射影像(*.tif 格式)及數值地表模型(*.tif 格式)，使其成果為具空間相位關係之數位資訊。

7、影像分析

透過高解析影像，於電腦進行構造物毀損情況檢視分析及記錄。

(1) 可見光攝影機

本團隊將會使用可見光攝影機拍攝並拼接廣角影像。攝影機擁有 2000 萬有效像素，檔案格式為 MP4 或 MOV，能拍攝影像垂直解析度逾 2K，且影格率逾 24fps，詳細記錄並供以後數據分析之用。

(2) 熱感攝影機

本團隊使用業界唯一被列為管制級的 FLIR DUO PRO 640R 高階熱感攝影機作重點研究拍攝，檔案格式為 TIF 或 R-JPG。熱能紅外光能有效分別出一般可見光影像不能判釋的損壞資訊，提高資料可靠性。事實上國外已把熱感攝影機廣泛地應用在建物檢測，效果優異。

(3) 新一代熱感攝影無人機

為更精準、有效率與安全執行水工構造物及邊坡穩定工程等構造物之巡檢與研究，本團隊於 2021 年 3 月從原廠下訂美國無人機廠牌 Autel Robotics 的 EVO II Dual 640T。EVO II Dual 640T 是專業級雙鏡頭無人機，配備行業中最高規格的熱感鏡頭，解析度為 640x512；可見光鏡頭可以拍攝 8K 影像，解析度為 8000x6000。EVO II Dual 640T 為高整合性測量無人機，飛行穩定、抗風性高，而且配備全方向障礙物感知系統，能滿足山區複雜地形、植物叢生、需要視距外飛行等的嚴苛飛行條件。此外，無人機上的圖傳系統能夠從可見光與熱感鏡頭中切換畫面，使操控人員在飛行途中能初步因應熱感畫面上可疑地點進行詳細拍攝。

由於這台無人機配備高規格的熱感鏡頭，進口處理上手續繁複，在進口文件準備妥當的情況下海關仍需要很長的處理時間，最終本團隊於 2021 年 10 月成功取得無人機並進行任務作業。



第2節 熱像儀應用於水工及邊坡穩定工程構造物毀損偵測之可行性擬定與驗證

期初階段，本團隊於 2021 年 2 月 22 日和 2021 年 3 月 31 日進行了兩次飛行任務，在南投縣分別選定了七個區域進行初步驗證；而在期中階段，團隊以期初成果，選定當中的兩個區域於 2021 年 7 月 6 日重點驗證，並依據第一節中「UAV 應用於巡檢之標準作業流程建置」步驟驗證，任務內容並結果詳細如下：

1. 場域與驗證內容確認

到達驗證場地後，團隊先行判斷構造物有否被植物覆蓋、覆蓋率是否低於能接受程度、周邊的障礙物會否影響飛行安全、地形有否影響無線訊號狀況及找尋合適安全等。經過勘查後，團隊決定表 3-1 所列七個地點適合進行飛行驗證。

每個地點初步規劃欲觀察的內容如下：

第一地點欲觀察內容為觀察到混凝土壩體留有水流痕並有白華現象，且於混凝土結構物接縫中有雜草生長情況，故欲觀察此處在熱影像中所呈現的影像與水流痕以及白華現象之關聯。

第二區域欲觀察內容為混凝土壩體之接壤處、排水孔以及鑽心試驗孔洞於熱影像上的呈現，並且藉由觀察熱影像的呈現嘗試辨別是否為裂縫。

第三區域欲觀察內容為混凝土堤岸疑似有剝落的現象，故欲觀察其在熱影像上的呈現，並且藉由觀察熱影像嘗試辨別是否有裂縫或是表面破損之處，以及嘗試以熱影像辨別已剝落處與完好堤岸之分界。

第四區域欲觀察內容為混凝土壩翼，嘗試藉由熱影像的範圍呈現觀察壩翼於熱影像中不同溫度分布，並且探究熱影像不同溫度呈現之成因（如裂縫、混凝土接壤處、孔洞或是植被覆蓋等因素）。

第五區域至第七區域觀察內容則為混凝土固床工設施，此三處固床工設施疑似皆多有裂縫或白華現象的情況，故欲觀察其在熱影像上的呈現情況，並且嘗試拍攝與觀察不同固床工混凝土設施，以獲取較多樣本可進行分析。

表 3- 1 飛行驗證地點

地點	日期	地點	座標
1	2021/02/22	國姓南港村	23°57'03.3"N 120°51'17.4"E
2	2021/02/22	國姓南港村	23°57'03.8"N 120°51'19.3"E
3	2021/02/22	國姓南港村	23°57'01.6"N 120°51'54.1"E
4	2021/03/31	信義鄉潭南村	23°49'28.1"N 120°56'19.4"E
5	2021/03/31	信義鄉潭南村	23°49'40.6"N 120°56'41.3"E
6	2021/03/31	信義鄉潭南村	23°49'40.4"N 120°56'41.9"E
7	2021/03/31	信義鄉潭南村	23°49'40.1"N 120°56'43.0"E

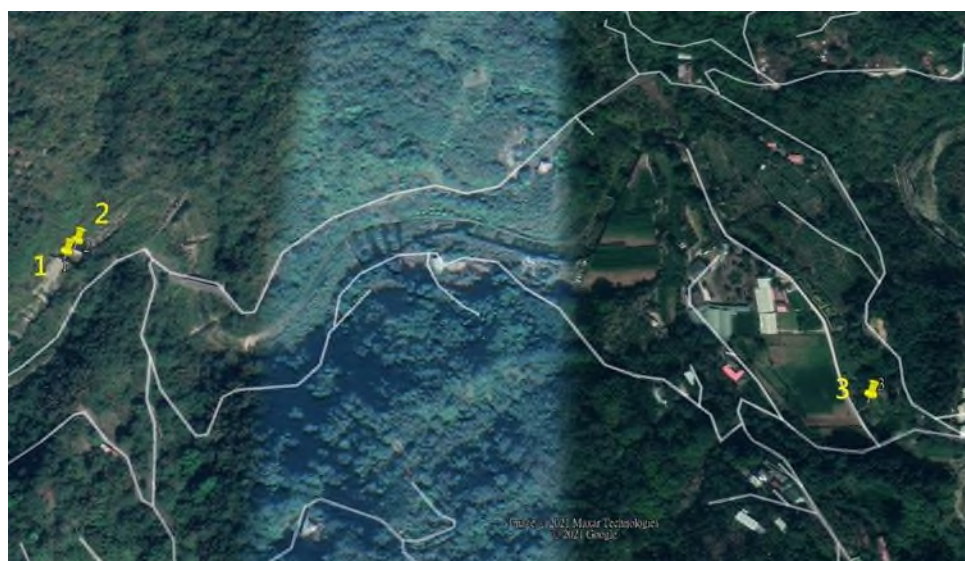


圖 3- 1 國姓南港村飛行驗證 3 處



圖 3-2 信義鄉潭南村飛行驗證 4 處

2. 空拍任務前置作業

在計畫空拍任務時，團隊翻查執行地區一星期內的天氣狀況，包括雨量、平均風速、陣風風速等。今年從六月雨季開始，山區下雨量大而且延續時間長，水工構造物表面難以保持乾燥狀態。熱感攝影機的偵測原理是接收物體表面的熱輻射，假若表面佈滿水分，會把不同表面的溫度平均化，造成整個水工構造物的溫度接近，無法以溫度差研究結構。造排除多個不利飛行和影像分析的日子，期中驗證於 2021 年 7 月 6 日進行。

3. 空域申請

依交通部民用航空局無人機之空域規範中，台灣空域分為禁航區(紅區)、限航區(黃區)和一般區域(綠區)，是次選定飛行驗證區域皆為綠區，因此並無空域申請的需要。

4. 航線規劃

經過詳細研究後，這兩次的飛行驗證地點的空間狹窄，而且需要低空精準飛行，加上山區落山風問題嚴重，自動飛行的危險性較高，因此團隊依照預先計畫航線與航高手動飛行，以多角度、近距離拍攝。

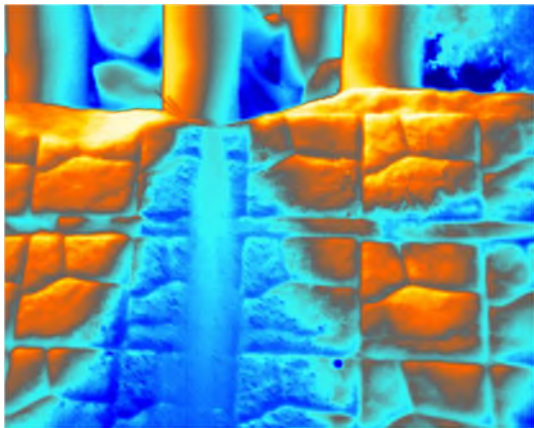
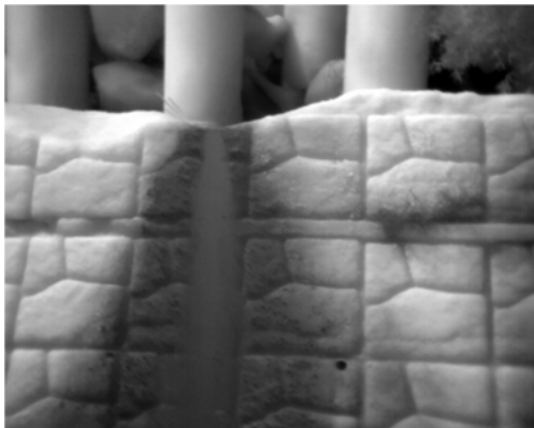
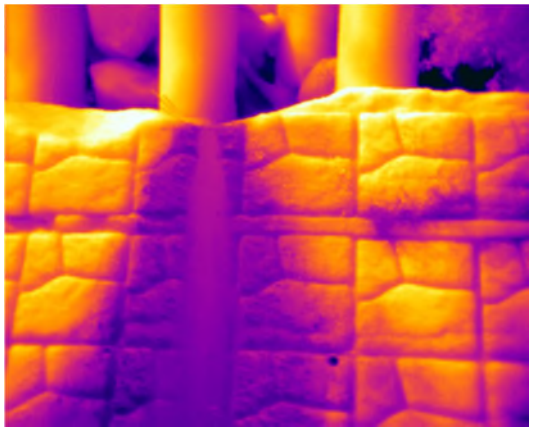
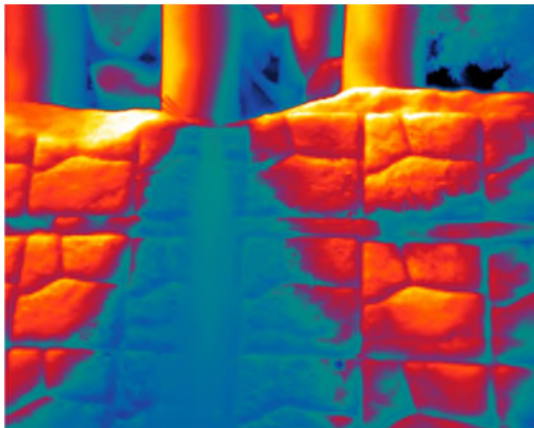
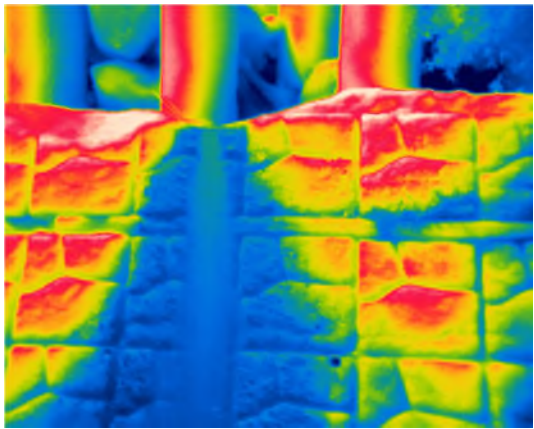
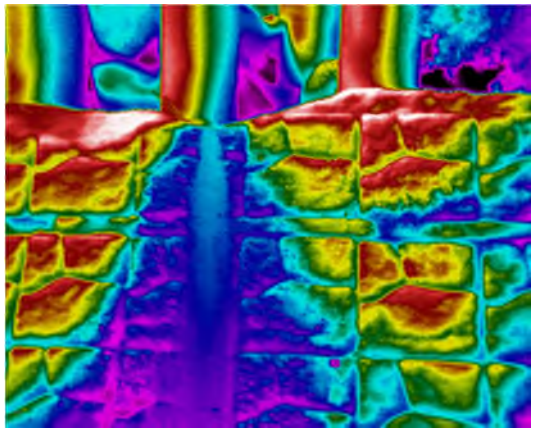
5. 空拍作業

由於飛行區域位於綠區，故此不需於民航局遙控無人機管理資訊系統進行「登載」動作。現場人員工作分別為飛機控制員、觀察員和場地管理員。飛機控制員負責航線飛行與相機操作；觀察員負責為控制人員注意四周障礙物和飛機狀態；而場地管理員則負責現場設備管理、車輛管理等場務。

6. 影像後處理

熱感攝影機拍攝後的原始檔為灰階檔 (greyscale)，圖像裡每一位元都包含一個溫度數據，為了使灰階檔可以成為易於辨識的彩色影像，團隊把原始熱感檔案導入專業分析軟體 FLIR TOOL，依照溫度高低進行渲染處理。軟體中渲染色譜分為極地(Arctic)、灰階(Grey)、鐵色(Iron)、岩漿(Lava)、彩虹(Rainbow)、高量彩虹(Rainbow HC)六種類，經過期初審查後，團隊依照委員意見增加參考渲染色譜高量彩虹(Rainbow HC)以突出觀察點，渲染色譜圖像分別如表 3-2 所示。

表 3- 2 渲染色譜

極地(Arctic)	灰階(Grey)
	
鐵色(Iron)	岩漿(Lava)
	
彩虹(Rainbow)	高量彩虹(Rainbow HC)
	

7. UAV搭載可見光相機及高解析熱像儀應用於構造物毀損偵測之驗證

本計畫針對南投山區七個區域的水工結構物（包含護岸、梳子壩、固床工等形式）進行 UAV 搭載可見光相機與熱像儀拍攝，經由影像處理後，7 個區域之初步比對成果表列於附錄一。

(1) 第一期驗證

其中區域4（信義鄉潭南村）發現之疑似裂縫點位較多共有4處（A~D），以區域4進行詳細分析，分布位置如圖3-3所示。



圖 3- 3 區域 4 A~D 分布位置圖

觀察區域 4 的熱感影像 A 處(如圖 3- 4 所示)，圖中第(1)及第(2)處呈現不規則線型，另外在梳子壩壩柱上第(3)及第(4)處有較為暗沉的色塊與線型，經由比對可見光影像(如圖 3- 5)後，發現(1)、(2)疑似有裂縫的情況，(3)、(4)則可能為混凝土補強的情形。

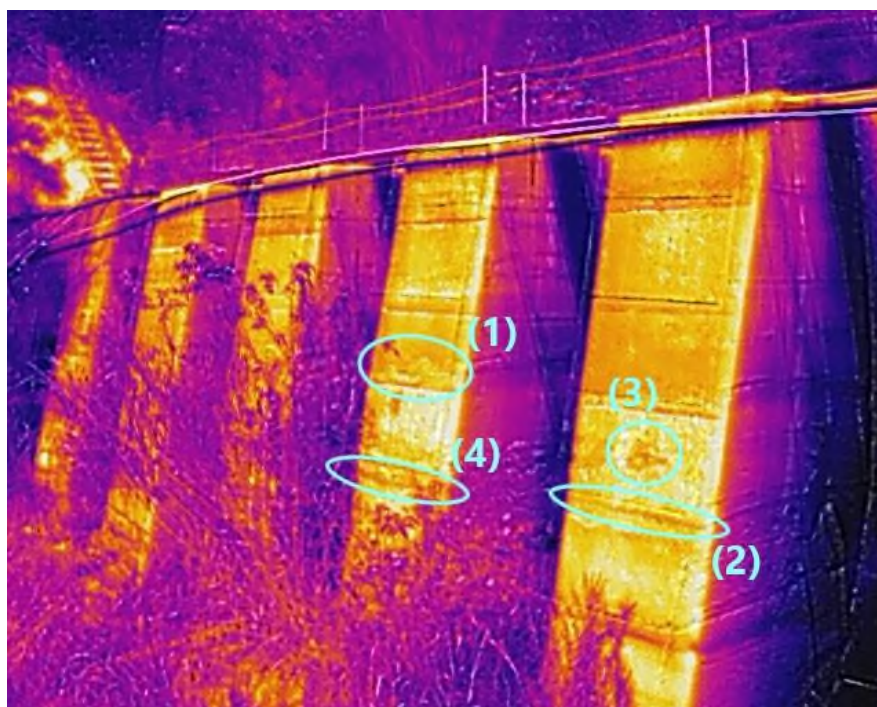


圖 3- 4 區域 4 A 處紅外線熱影像圖



圖 3- 5 區域 4 A 處可見光影像圖

而觀察區域 4 的 B~D 處熱感影像(如圖 3- 6 所示)，B 處出現數個暗色圓形，C、D 處亦呈現不規則線型，經由比對可見光影像後(圖 3- 7)，發現 B 處為排水孔、而 C、D 處則疑似有裂縫的情況。

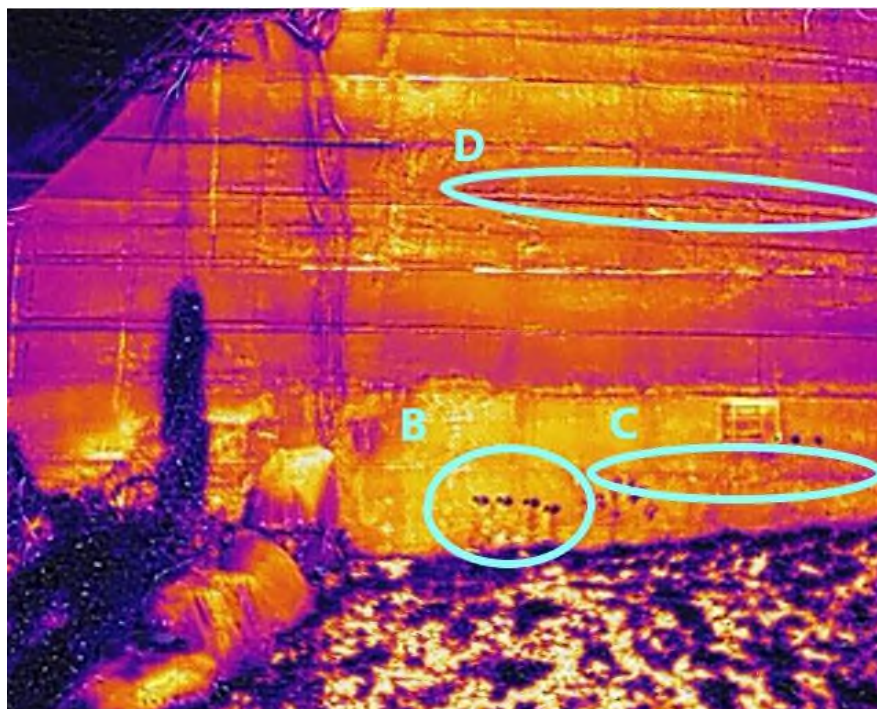


圖 3- 6 區域 4 B 處壩翼紅外線熱影像圖



圖 3- 7 區域 4 B~D 處壩翼可見光影像圖

本團隊於 2021 年 7 月 6 日，在同一地點進行第二次拍攝與比

對。這次拍攝方式以重點式區域拍攝為主，針對期初飛行拍攝所得，疑似結構問題部份作仔細記錄，並且探討以下因素對影像呈現的影響：

I. 天氣因素

七月份普遍天氣炎熱，山區常有午後雷陣雨，本團隊選定雨勢較為減弱的七月上旬進行，拍攝時間為上午時段，避開中午天氣開始變得不穩定的時間。拍攝當天為陰天多雲天氣，風速約為一級，陣風兩級。

拍攝完成後以專用軟體 FLIR TOOL 分析(如圖 3-8 所示)，比較相同位置不同天氣狀況下的最高和最低溫度差異，結果顯示在陽光普照的環境下，高低溫差為 11.2°C ；而在第二次飛行的陰天多雲的天氣情況下，高低溫差為 5.3°C 。

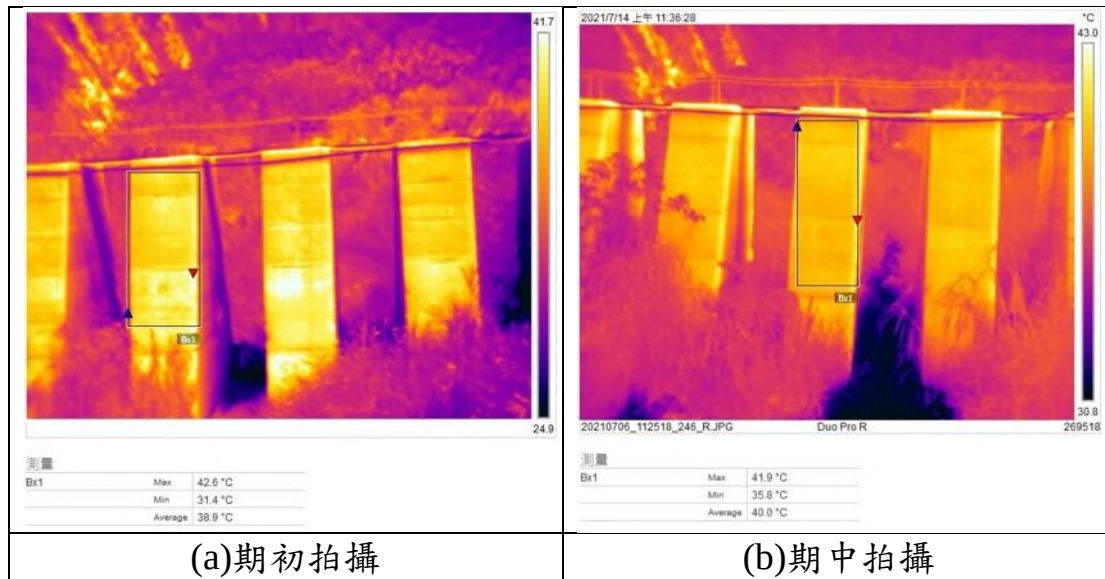


圖 3-8 區域 4A 處以 FLIR TOOL 分析溫度高低差

II. 兩次飛行拍攝影像的差異

在期中飛行驗證(7月6日)裡，區域4A處疑似有裂縫的情況與

混凝土補強的情形跟期初飛行(2月22日)時比較，熱影像中變得不
太明顯(如圖 3-9、圖 3-10 所示)。

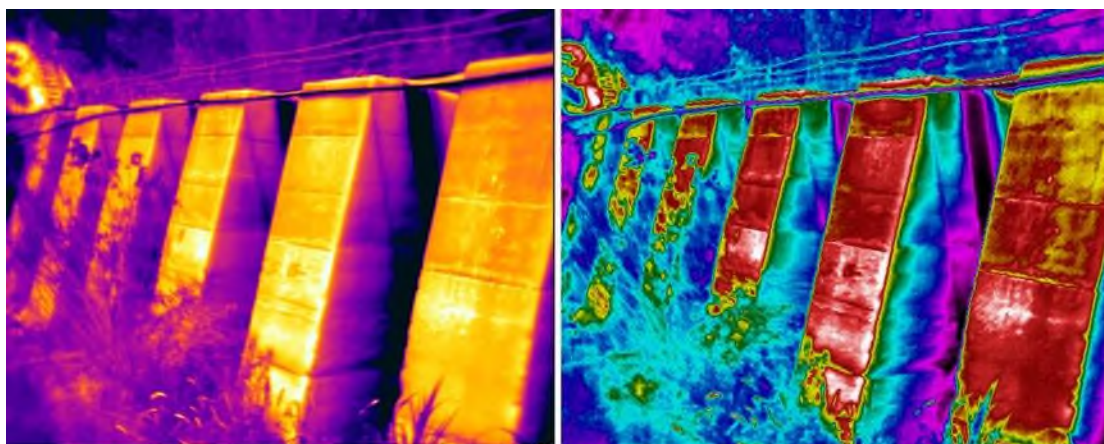


圖 3-9 110 年 2 月拍攝影像(左圖以鐵色渲染，右圖以高量彩虹渲染)

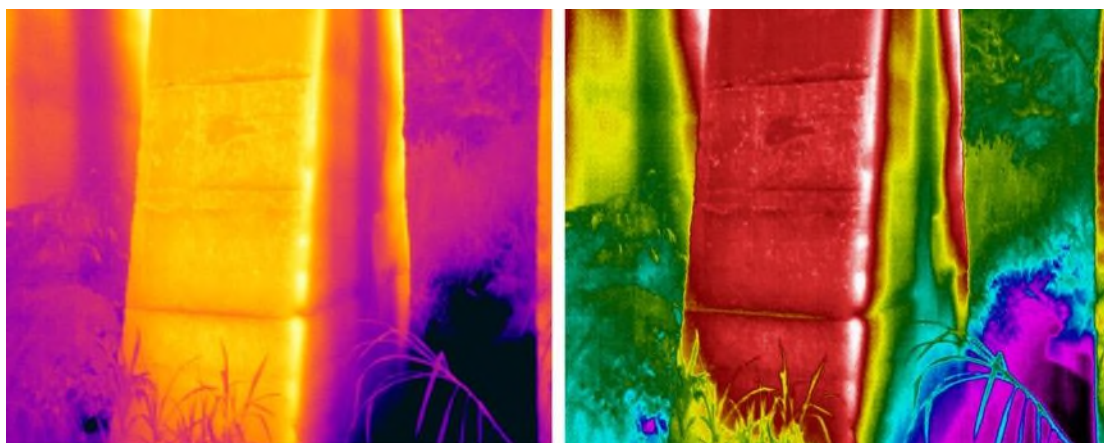


圖 3-10 110 年 7 月拍攝影像(左圖以鐵色渲染，右圖以高量彩虹渲染)

III. 其他研究發現

在人工檢視照片時，團隊發現梳子壩上其中一根壩柱轉角有溫度不均的情況出現(如圖 3-11 所示)，高低溫差約為 4°C ，故使用可見光照像作對比(如圖 3-12 所示)。團隊發現為低溫的點為混凝土損毀以至鋼筋外露，推斷為外露的鋼筋在天陰天氣下散溫比混凝土快，因此在熱感影像中顯示為深顏色，與附近較高溫的淺顏色有所反差。

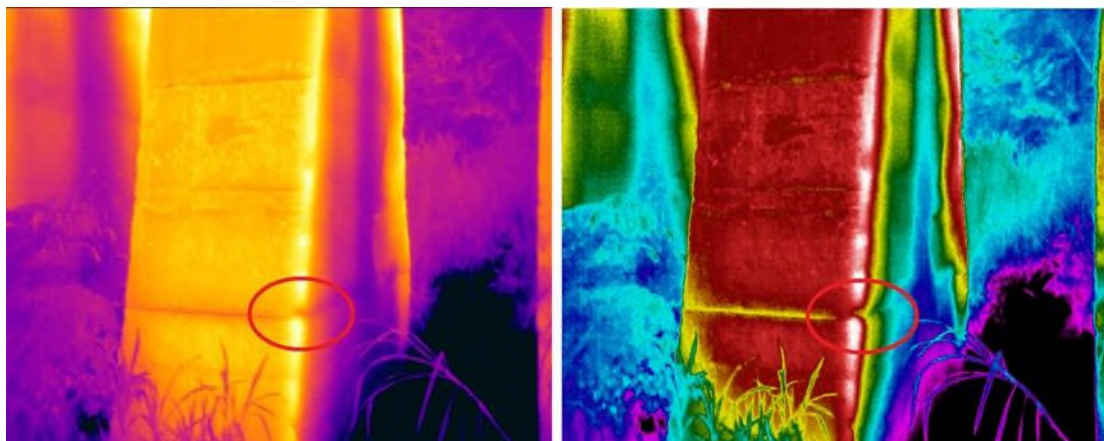


圖 3-11 110 年 7 月拍攝壩柱轉角處溫度不均(左圖為鐵色渲染，右圖以
高量彩虹渲染)



圖 3-12 110 年 7 月壩柱可見光影像與放大圖片

(2) 第二期驗證

本團隊在 2021 年 7 月 6 日於區域 2（國姓南港村）進行第二次飛行拍攝。由於在期初拍攝時團隊發現有一處懷疑是表層滲水，因此在期中飛行拍攝時重覆查證，並發現另外一處疑似表層滲水（A~B），第二處驗證成果以區域 2 進行詳細分析，分布位置如圖 3- 13 所示。



圖 3- 13 區域 2 A~B 分布位置圖

觀察區域2的熱感影像A處(如圖3-14所示)，期初拍攝日期為2021年2月22日，久未下雨所以流量低。圖中黑色與深紫色部份為流水，而紅圈圈起部份呈現一系列低溫影像，由於此低溫處並沒有與旁邊流水連接，因此可以排除是流水橫向流動所做成。然而，在期中(7月)拍攝時，因為已經經過連場大雨，流量大，混凝土表面大面積呈現溼潤狀態，圖3-15紅圈圈起部份所示，原先懷疑表層滲水的地方已經無法再次查證。

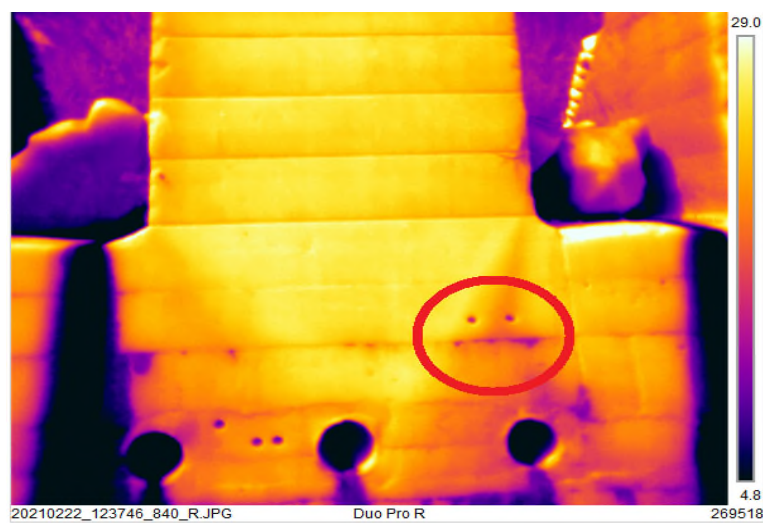


圖3-14 區域2的A處期初(2月)拍攝熱感影像

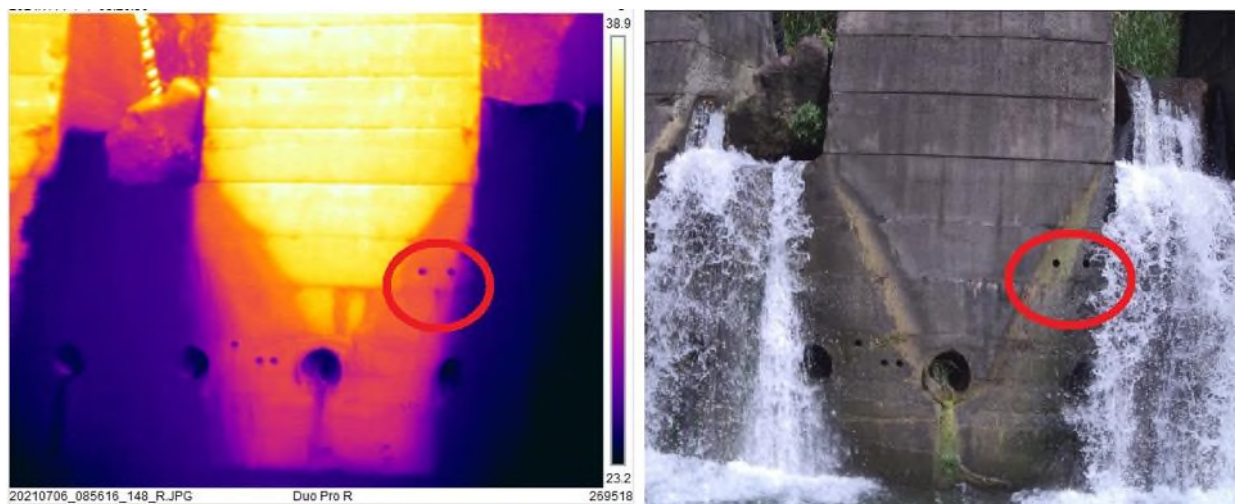


圖3-15 區域2的A處期中(7月)拍攝熱感影像(左)與可見光影像(右)

而觀察區域 2 的 B 處熱感影像(如圖 3- 16 所示)，深色處為流水，相對梳子壩壩柱上的表面溫度為低，然而團隊發現在 B 處出現一個不規律的低溫範圍，以軟體分析高低溫超過 7°C 而低溫面積的始點並沒有與旁邊流水直接相連。

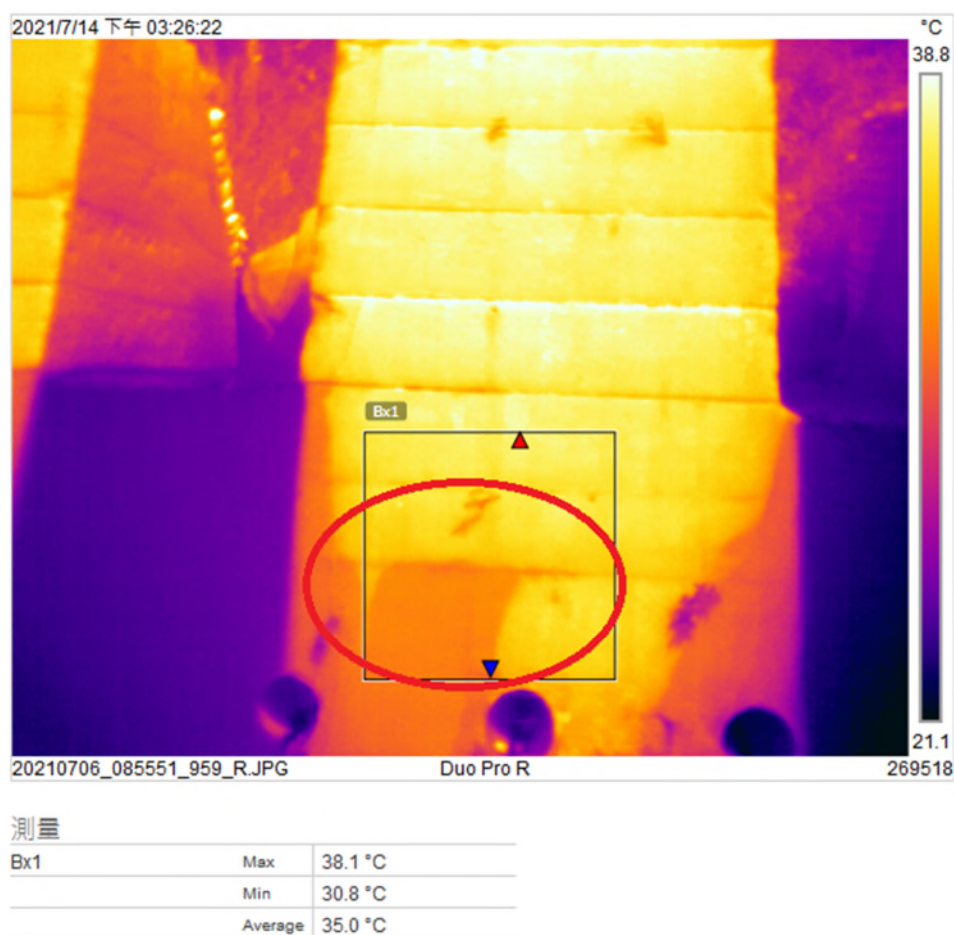


圖 3- 16 區域 2 的 B 處期中拍攝熱感影像

經由比對可見光影像後(如圖 3- 17 所示)，本團隊可以判定低溫範圍為表面水份。翻查農業氣象觀測網監測系統中九分二山觀測站的日累積雨量統計(如表 3- 3 所示)與九分二山觀測站 7 月 6 日的每小時雨量統計(如表 3- 4 所示)，拍攝的三天前有 29mm 的雨量記錄，而拍攝前兩天和一天前日累積雨量統計分別為 0.5mm 和 0mm；拍攝

當天中午前皆沒有下雨記錄，因此團隊推斷混凝土表面的水是下雨過後的雨水機會不高，並推斷為表層滲水的情況。由於滲水區域一直延綿往下，而且寬度達一公尺，因此壩柱內部可能滲水嚴重。經過水份長時間浸泡，混凝土的質量會越來越差，耐久性與構造物的使用年期會隨之降低。



圖 3-17 區域 2 的 B 處期中拍攝可見光影像

表 3-3 九分二山觀測站的日累積雨量統計

日期	7/1	7/2	7/3	7/4	7/5	7/6
日累積雨量(mm)	0	0	29	0.5	0	60.5

表 3-4 九分二山觀測站 7 月 6 日的每小時雨量統計(從 1 時到 18 時)

觀測時間(hour)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
降水量(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
觀測時間(hour)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
降水量(mm)	0	0	0	0	1.5	0.5	3.5	34.5	12.5

(3) 第三期驗證

本團隊在 2021 年 10 月與 11 月期間分別於南投縣信義鄉民和村、豐丘村與仁愛鄉中興大學實驗林林道等三個鄉鎮（如圖 3-18），共 9 區驗證區域（如表 3-5 所示）。進行飛行拍攝。第三期以前述最新採購之高解析熱影像空拍機大量收集水工構造物的熱感影像，建立資料庫和人工判識訓練模組。

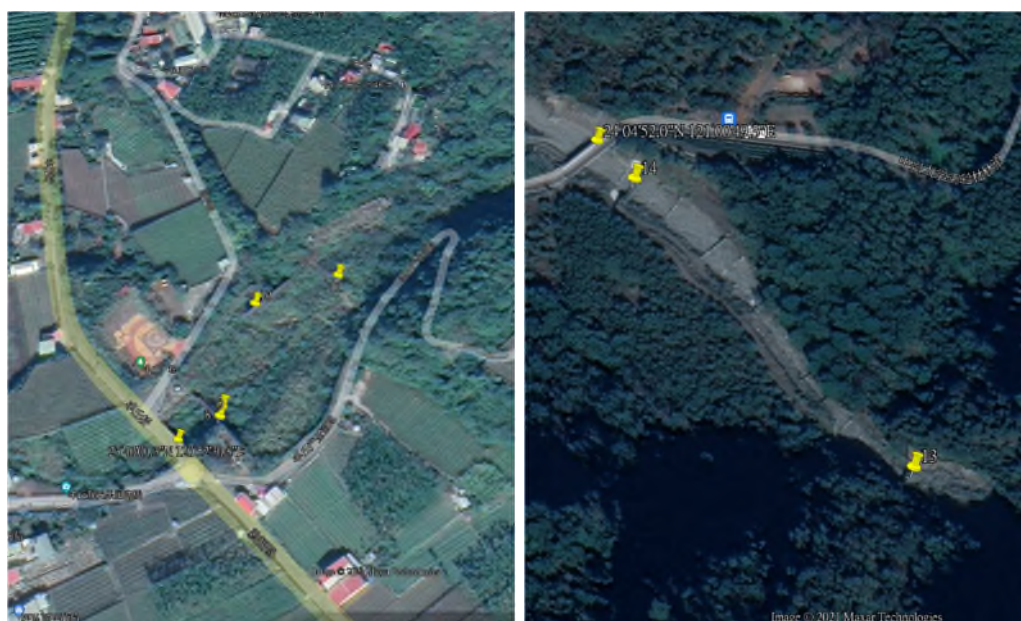
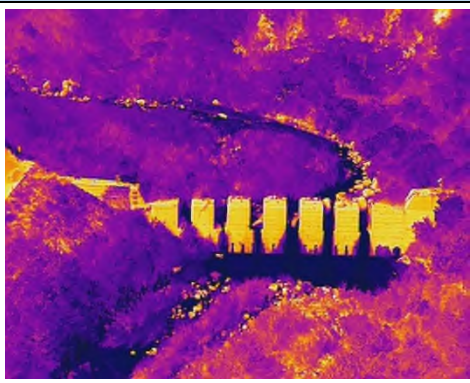
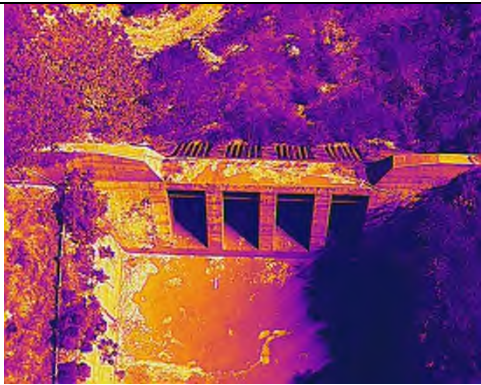
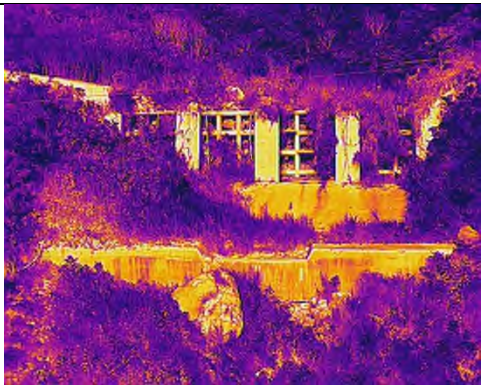
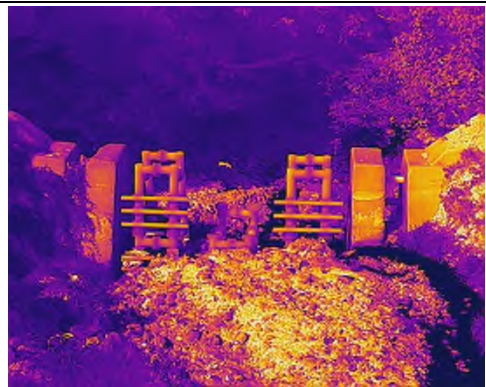
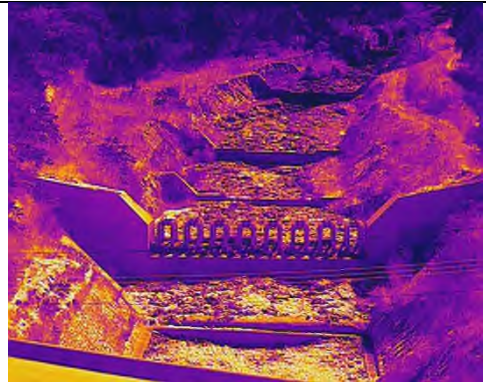
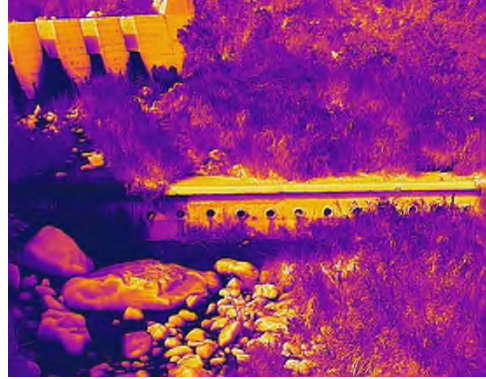


圖 3-18 第三期拍攝分布地點

表 3-5 第三期驗證區域大範圍影像

日期	地點	可見光影像	熱感影像
2021/ 11/02	4.南投縣 國姓鄉 南港村 九份二山 (區域 2 第二次)		

2021/ 10/27	10.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域 8)		
2021/ 10/27	11.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域 9)		
2021/ 10/27	12.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域 10)		
2021/ 10/27	13.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域 11)		

2021/ 10/27	14.南投縣 信義鄉 民和村 (區域 12)		
2021/ 11/02	15.中興大學實 驗林林道 (區域 13)		
2021/ 11/02	16.中興大學實 驗林林道 (區域 14)		
2021/ 11/02	17.南投縣 國姓鄉 南港村 九份二山 (區域 15)		

由第三期驗證區域 1 影像，如圖 3- 19~圖 3- 20 所示，可清楚發現於壩體上有明顯的裂縫產生，而對比可見光影像亦可發現已有滲水的現象，此種裂縫可初步判釋該處可能有裂縫滲水情況，有造成結構物破壞的疑慮。



圖 3- 19 第三期驗證區域 1 可見光影像

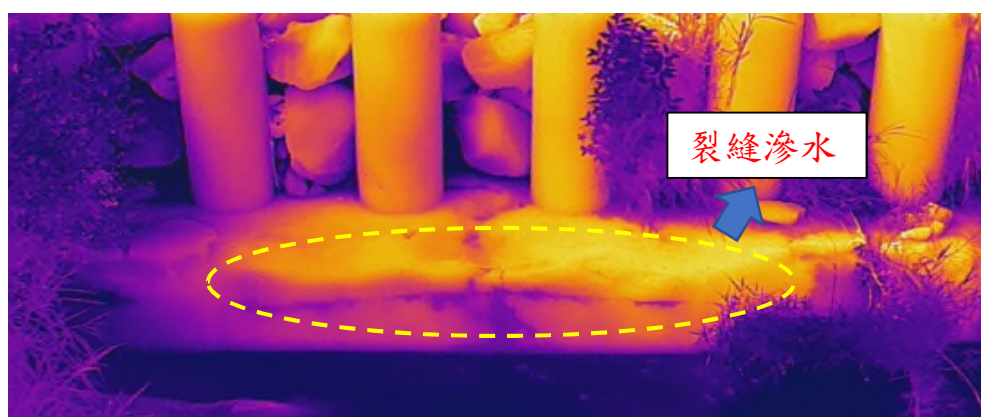


圖 3- 20 第三期驗證區域 1 熱感影像

第三期驗證區區域 2 影像，由熱影像可以清楚判釋壩體施工縫，如圖 3- 21~圖 3- 22 所示，此種間縫對於結構物安全較無直接影響；惟第三期驗證區區域 12 熱影像中可發現，施工間縫中有滲水現象發生時，如圖 3- 23~圖 3- 24 所示，則須注意滲水情況，可能造成混凝土破壞疑慮。

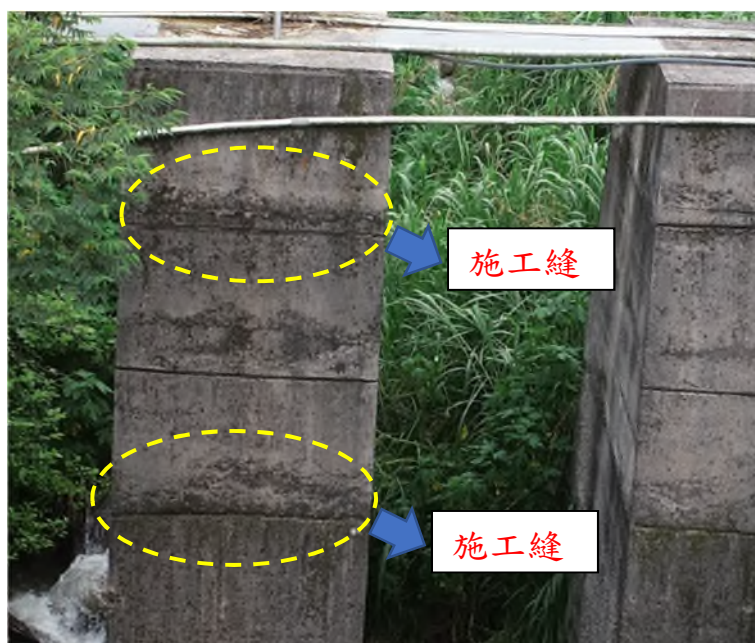


圖 3- 21 第三期驗證區域 2 可見光影像

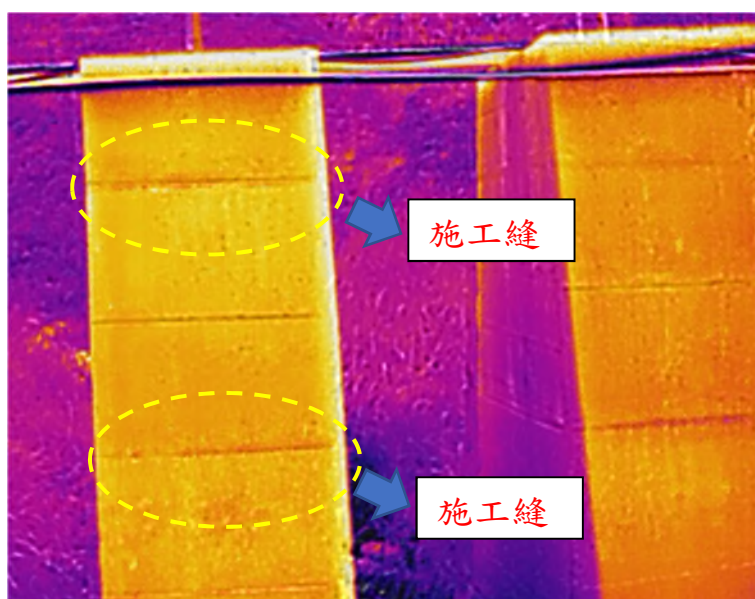


圖 3- 22 第三期驗證區域 2 熱感影像

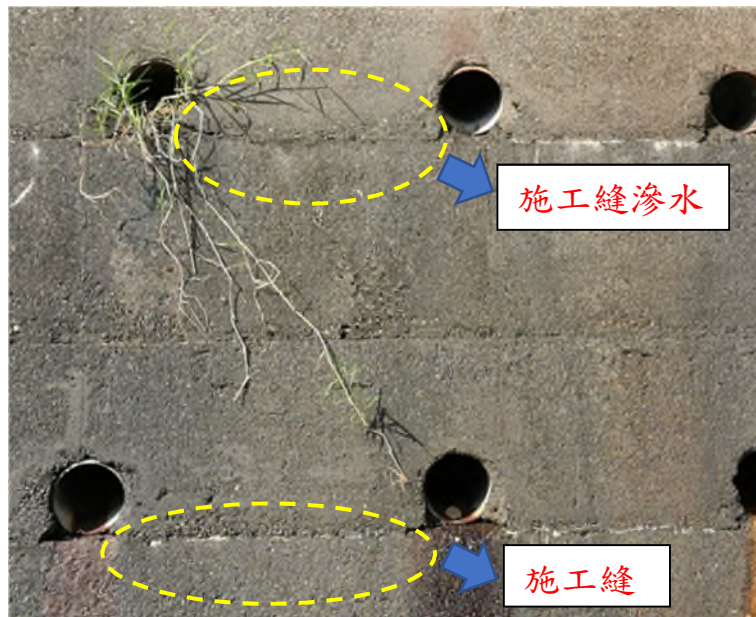


圖 3-23 第三期驗證區域 12 可見光影像

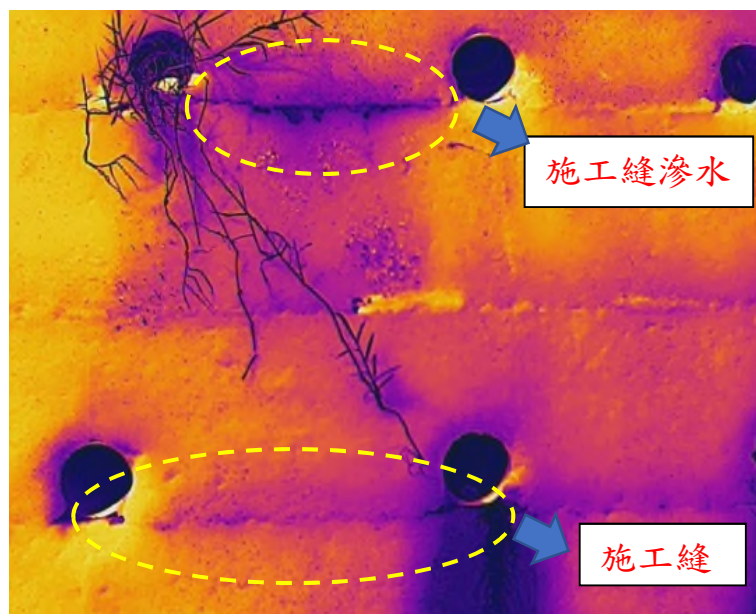


圖 3-24 第三期驗證區域 12 熱感影像

第三期驗證區區域 10 影像則可對比施工縫與裂縫之區別，由圖 3-25~圖 3-26 所示，熱像圖中可較清楚發現施工縫呈現規則線型而裂縫則為較不規則形狀，其中施工縫對於結構物安全較無直接影響而裂縫則為混凝土破壞的前期徵兆；然而無論是施工縫或是裂縫滲水，皆須注意滲水情況，皆有可能造成混凝土侵蝕與破壞之疑慮。

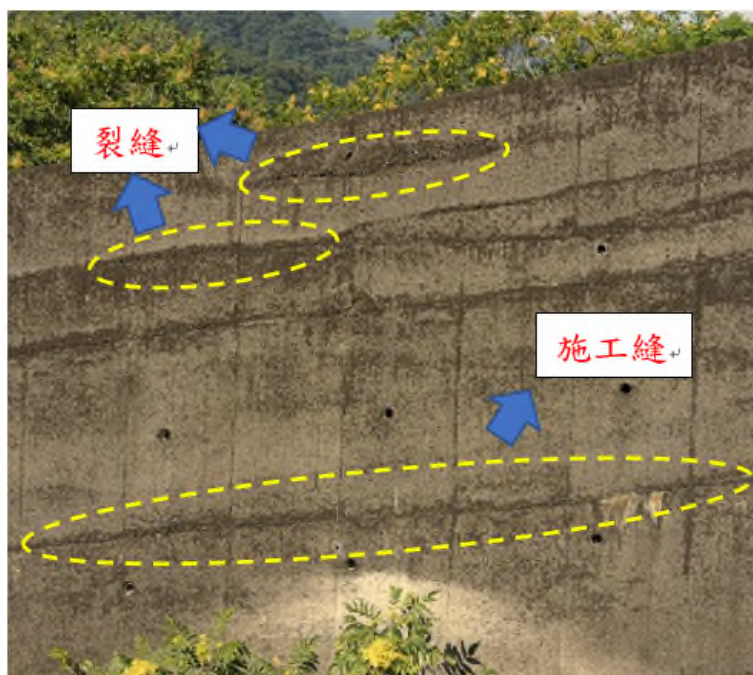


圖 3- 25 第三期驗證區域 10 可見光影像

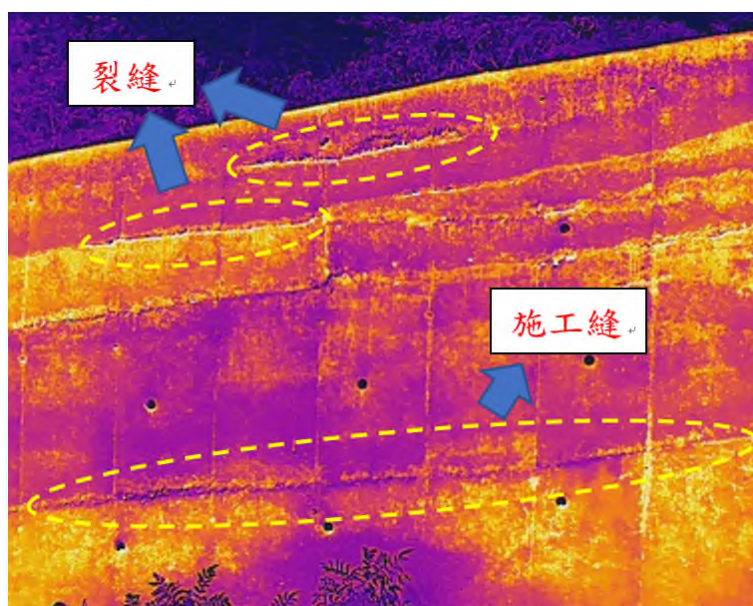


圖 3- 26 第三期驗證區域 10 熱感影像

8. 小結

第一期拍攝成果以區域 4 為例，第一次拍攝（2 月 22 日）後，藉由高解析熱像儀所拍攝之熱感影像，發現水工構造物之混凝土分

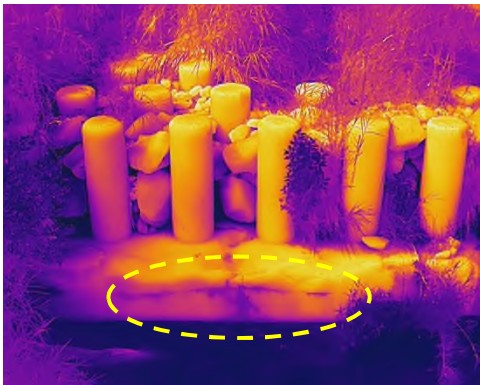
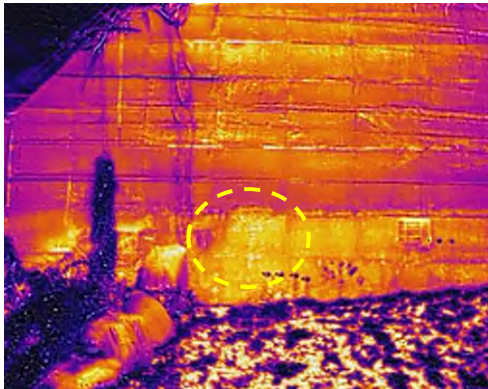
層現象、排水孔位置以及疑似裂縫位置，並且因植被遮蔽程影響，造成影像呈現不同暗沉程度；而藉由熱感與可見光影像的比對，可以初步判釋當熱感影像出現不規則線型時，該處便可能為有裂縫的情況；並且當熱感影像中於較亮的區域出現較為暗沉的色塊，該處便可能為有水泥補強之情況。

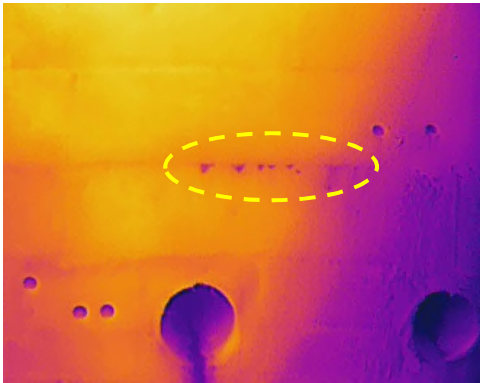
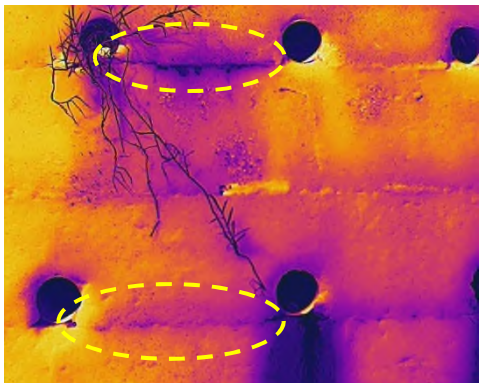
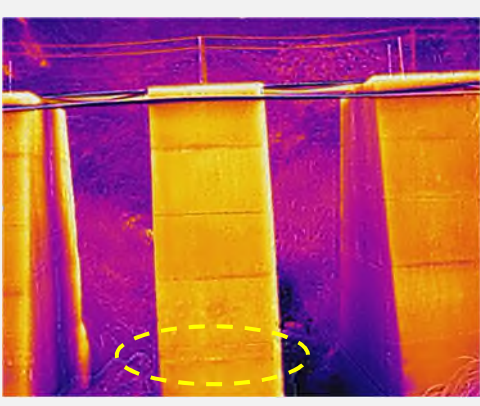
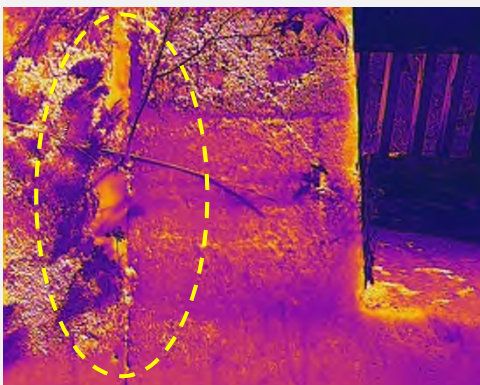
第二期拍攝(7月6日)成果中，熱感影像呈現鋼筋外露與四周混凝土的溫度差，藉由與可見光影像的比對，可證實水工構造物的結構受損。且由拍攝結果得知，第二次飛行拍攝天氣為陰天多雲，在溫度分析中發現，陰天拍攝之整體溫差（不同材質間）比晴天拍攝時溫差相較不明顯，不易作出分析比對。

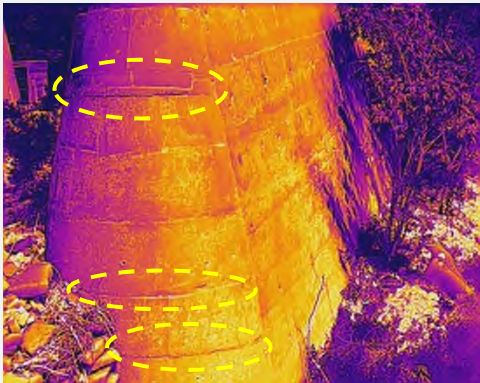
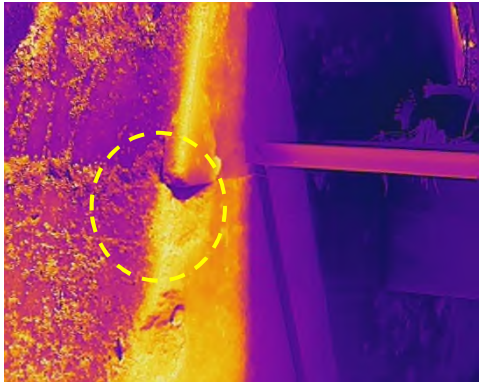
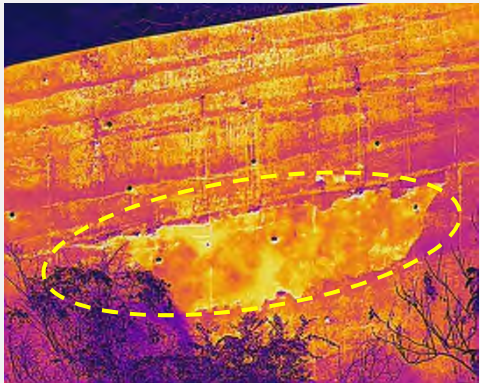
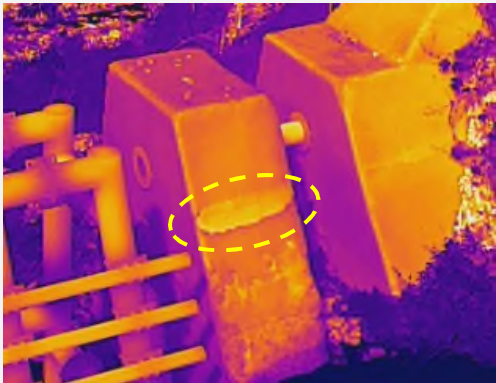
第三期挑選護岸、攔砂壩與潛壩等多種型式之構造物共 13 個拍攝區域，從中發現較明顯若干處疑似混凝土缺失，包含施工裂縫、裂縫滲水、表面補強、表面毀損、裂縫長草以及基底掏刷等樣態類型。

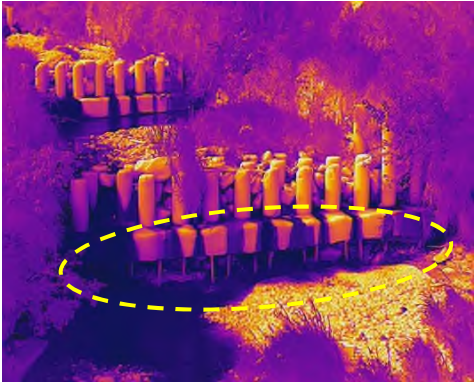
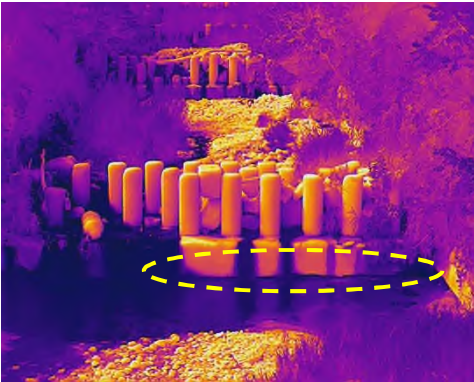
本計畫將第一期~第三期中，由熱感影像上所觀察到的混凝土缺失統整成一張總表如表 3-6，並將其分類為裂縫滲水、施工縫、混凝土破損、混凝土表面修補與基礎淘刷等樣態。而裂縫滲水與混凝土破損及基礎淘刷等情況，可能有造成結構物破壞的疑慮。施工縫對於結構物安全較無直接影響，但須注意是否有滲水情況，若有則應注意造成混凝土侵蝕與破壞之疑慮。另本計畫混凝土缺失之樣態判釋成果，已經由相關專家學者確認後調整。

表 3-6 本計畫驗證混凝土缺失總表

類型	區域	可見光	熱影像
1 裂縫 滲水	1		
	1		

類型	區域	可見光	熱影像
	2		
	12		
2 施工 縫	2		
	8		

類型	區域	可見光	熱影像
	10		
3 混凝土破損	8		
4 混凝土表面修補	10		
	13		

類型	區域	可見光	熱影像
5 基礎 淘刷	1		
	1		

9. 成本分析

本研究計畫執行費用包含人事費、業務費及其他雜支，本節僅依單次任務羅列所需費用，以及設備購買價格供參。

A. 設備含保險：

I. 第一期及第二期使用之雙鏡頭高解析熱像儀（FLIR DUO PRO 640R）約 33 萬元。

II. 第三期使用之紅外熱像雙鏡頭無人機（EVO II Dual 640T）約 27 萬元。

B. 人力差旅：單趟任務兩人 6 千元、汽車租金油料 2 千元，共約 8 千元。

C. 資料分析人力：約 2 千*5 日=1 萬元。

以上單次任務成本請酌參。

10. AI人工智能判識初步成果

本研究計畫試以無人機搭載熱感儀對水工構造物進行巡檢，收集熱感影像，建立資料庫並從中建立人工智能訓練模型，以深度學習方式定義不同結構缺失，從而減少人工判識時間，提升判讀準確度。

本團隊運用 YOLO 演算法，框列出影像中的每一個物件，從而執行物件偵測、判斷以及追蹤。YOLO 是「You only look once」的簡稱，工程師訓練一個網路模型，讓電腦系統「看」一眼，就能判讀照片、以及影像裡的物件類別與位置，大大提升辨識速度。經過資訊類別載入和預訓練模型之後，隨即可以使用預先定義的函式來執行動作，工程師可以定義一個函式來預測邊界框並在影像上標記邊界框，然後得出判識結果。

從已有的熱影像中選取訓練樣本，分別為施工裂縫、表面修補、裂縫滲水以及混凝土破損等，數目共約 50 筆。經訓練後初步驗證結果如圖 3- 27 所示，藍色框為判釋結果範圍，數字代表可靠度，結果顯示較明顯裂縫或混凝土表面補強效果較好，可靠度高於 0.7 以上。裂縫滲水樣態則可靠度低於 0.4 以下，可能原因為樣本數太少，未來若增加樣本數應可改善 AI 判釋效果。

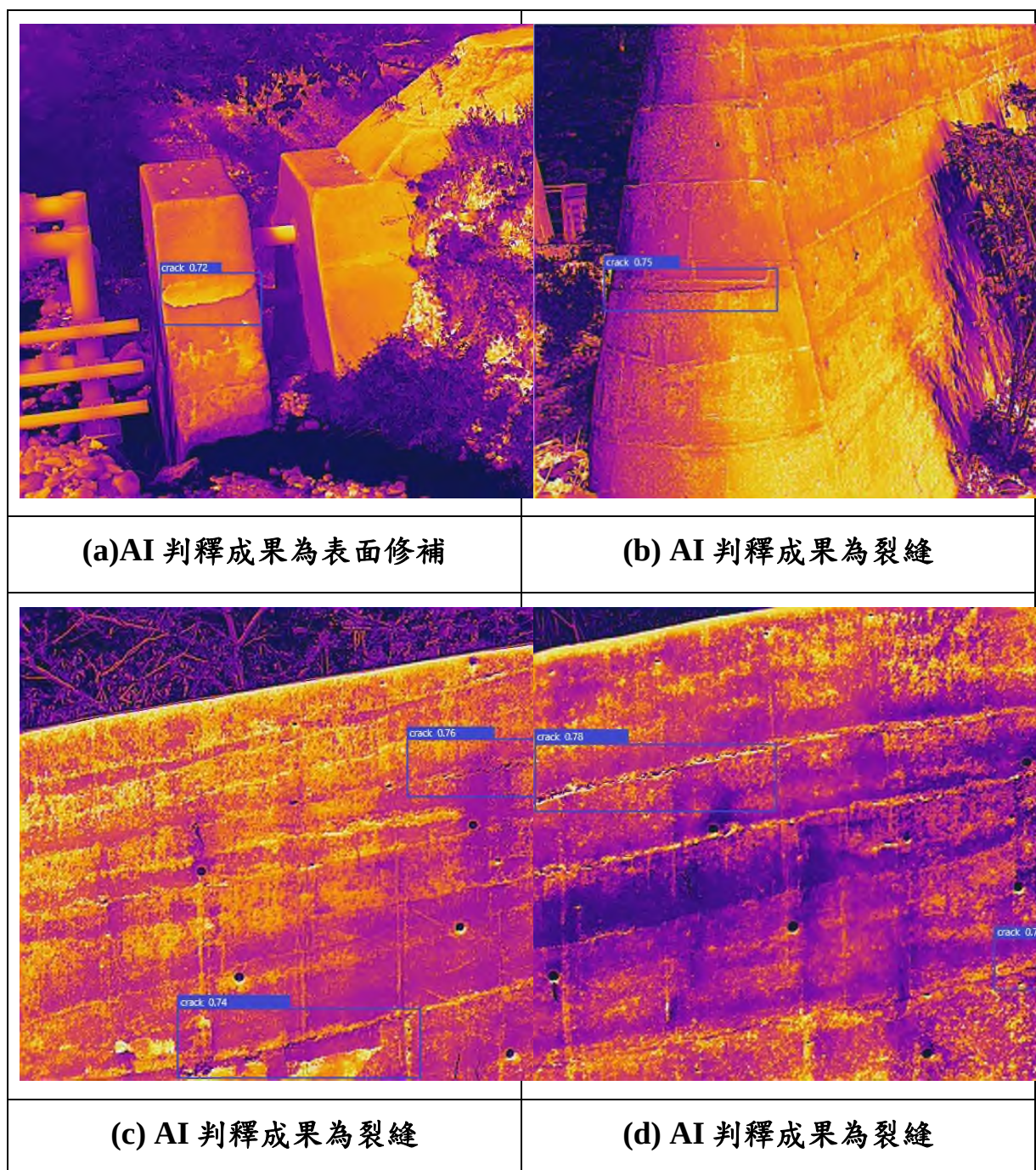


圖 3- 27 AI 人工智能判識成果圖

第4章 結論與建議

本計畫前兩期選取 7 個區域之水工構造物，利用 UAV 搭載可見光像機與高解析熱像儀，依據本團隊提出之標準流程以近距離方式進行拍攝，蒐集大量 RGB 及熱感影像資訊，以人工方式快速搜尋水工構造物表面疑似發生裂縫或混凝土損壞之點位。因區域 4 發現之疑似裂縫點位較多，故優先針對第 4 個區域進行詳細影像比對分析，且找出 4 個點位作進一步之影像分析結果與實際情況之探討。初步研究發現在結構體上游端(背填側)地下水位高於檢測點條件下，可藉由熱顯影像判釋出混凝土施工分層層縫滲水、排水孔洩水等滲漏排水情形，並可推測結構體內可能有貫穿式滲排水路徑存在。另疑似混凝土分層、排水孔位置、混凝土補強及疑似裂縫之情形，可於熱感影像上明顯分辨出來，整體而言利用 UAV 搭配熱感進行水工構造物之應用初步效果良好。

在第二期驗證飛行中，本團隊針對在期初飛行時發現的疑似混凝土滲漏部份作詳細拍攝，作出影像分析結果與實際情況之探討，初步研究發現疑似裂縫之情形。然而期中驗證飛行已經進入汛期及雨季，部份水工構造被流水覆蓋，使熱感儀無法正常拍攝分析。第三期拍攝前則預先參考天氣預測，確保拍攝前 3 至 5 天皆無下雨，減少大量流水對熱影像的影響。藉由前兩期拍攝後影像分析成果之經驗，針對不同構造物型式，挑選疑似混凝土缺施之點位進行影像比對，分析後發現，確實可由熱感影像明顯顯示缺失，但於可見光影像並不易發覺。

本研究提出之熱影像拍攝方式與影像分析結果，可供未來應用於人員無法到達或環境狀況難以接近之水工構造物，混凝土缺失相關判釋之參考。

第5章 工作進度與交付項目

第1節 計畫甘特圖

本計畫工作期程為自 110 年度決標日起至民國 110 年 12 月 31 日完成，共計約 12 個月工作時程，其相關工作項目期程如表 5-1 所示

表 5-1 計畫甘特圖

步驟	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1	場域確認	◆		◆									
2	空拍任務前置作業	◆		◆									
3	空域申請	◆		◆									
	第一處驗證	◆		◆									
4	航線規劃			◆		◆							
5	空拍作業			◆		◆							
	第二處驗證			◆		◆							
6	影像後處理						◆		◆				
	第三處驗證						◆		◆				
7	影像分析									◆		◆	
	整體分析									◆		◆	
累計總進度(百分比)		20		40		60		100					

第2節 計畫交付項目

本計畫交付項目如下：

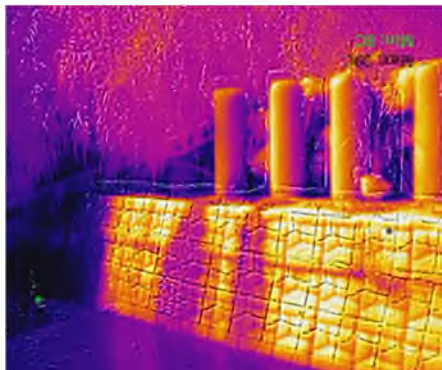
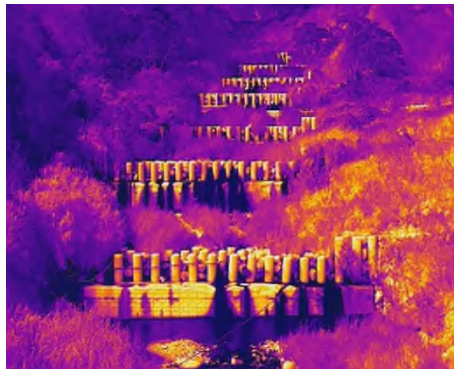
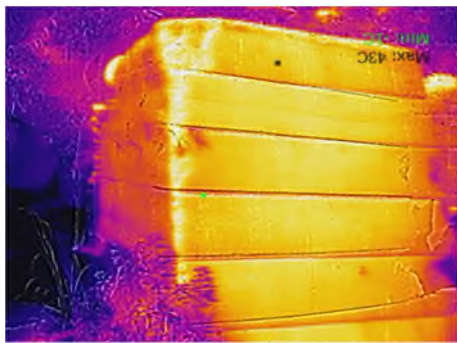
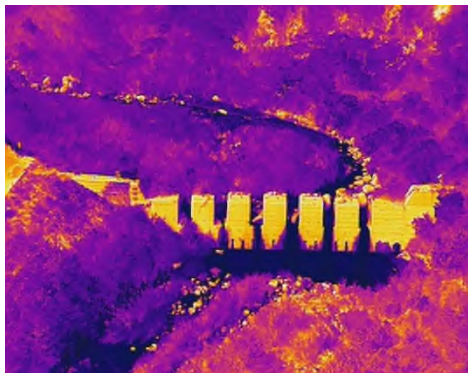
1. UAV應用於巡檢之標準作業流程建立。(完成100%)
2. 熱像儀用於水工及邊坡穩定工程構造物毀損偵測之可行性擬定。(完成100%)
3. UAV搭載可見光相機及高解析熱像儀應用於構造物毀損偵測之驗證。(完成超過100%)

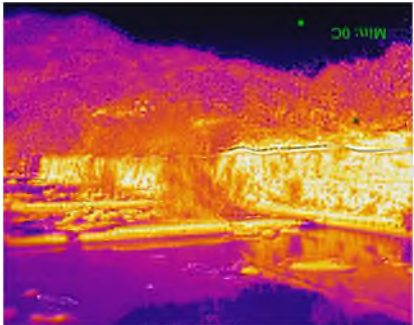
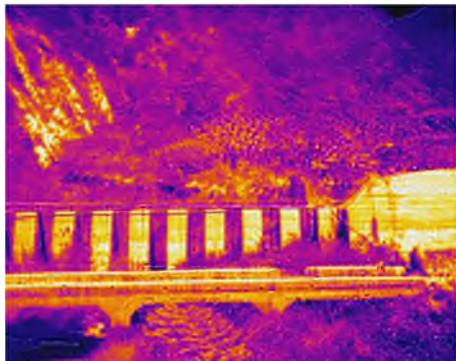
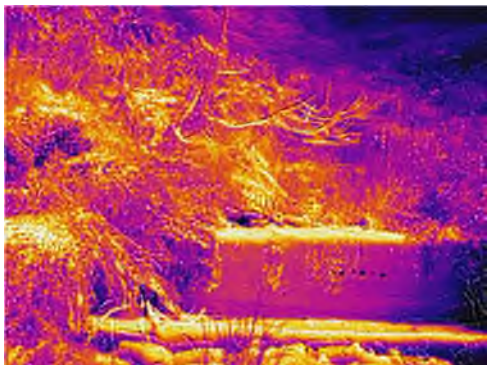
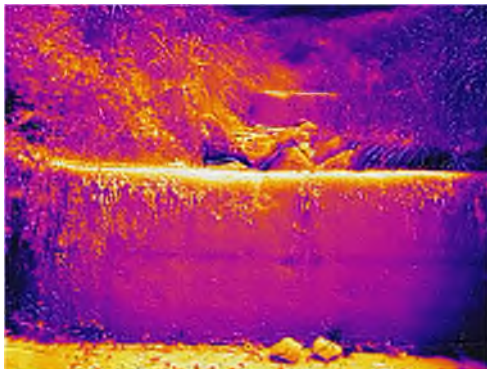
參考文獻

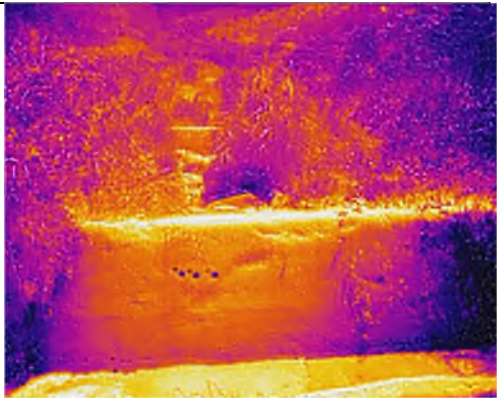
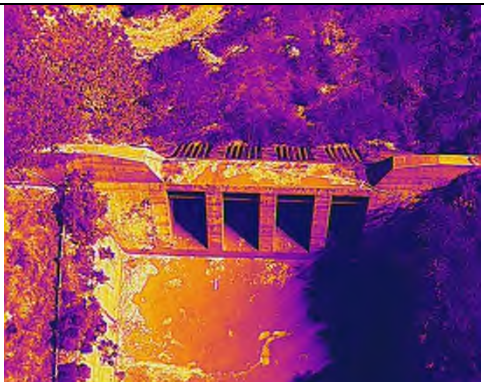
1. 李德河，「邊坡保護設施成效評估與改善方法之研究」，專題研究計畫，2000。
2. 田坤國，「紅外線熱影像於正修校區建築物評估之研究」，專題研究計畫，2002。
3. 吳秉晃，「集集地震後阿里山地區公路邊坡之崩壞行為與熱影像特性研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2002。
4. 張真良，「紅外線熱影像分析探討隧道襯砌之劣化情形」，行政院國家科學委員會專題研究計畫，2002
5. 鄭子揚，「建築物之紅外線熱影像法檢測」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，2005。
6. 何坤居，「熱紅外線影像檢測鋪面破壞之可行性評估」，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，2006。
7. 李洲亘，「紅外線熱影像法參數設定與表層混凝土火害受損區域檢測」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，2006
8. 方啟任，「熱影像技術與類神經網路應用於海堤淘空之研究」，碩士論文，2007
9. 連韋慶，「非破壞檢測技術於建築物缺陷檢測之應用研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2008
10. 李春輝，「應用熱像儀檢測地下空洞之研究」，碩士論文，國立屏東科技大學土木工程系，2008
11. 莊雯茹，「堤防與混凝土結構物的熱像法檢測」，碩士論文，

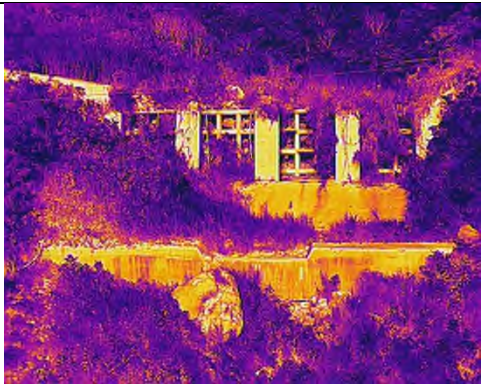
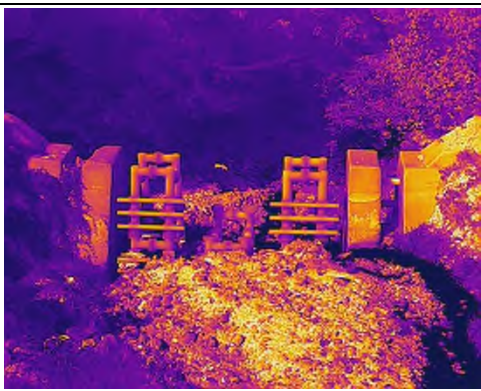
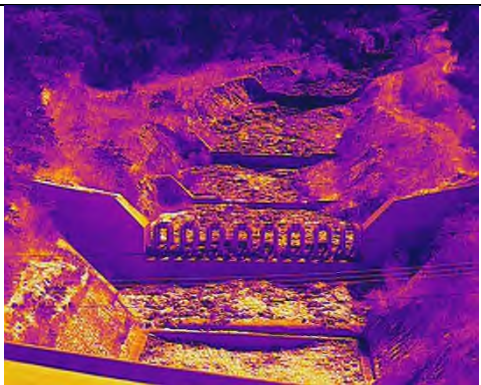
- 朝陽科技大學營建工程系，2011。
12. 孫禾穎，「以紅外線熱影像檢測 AC 鋪面析離程度之研究」，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，2013
 13. 石明哲，「應用熱影像辨識技術於十三溝面磚劣化診斷基準之研究」，碩士論文，國立臺灣大學工學院土木工程學系，2016
 14. 陳瑞鈴，「建築外牆磁磚非破壞性檢測之研究－以紅外線熱顯像技術結合無人飛行載具為例」，內政部建築研究所協同研究報告，2017。
 15. Michal Janku, Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges (Construction and Building Materials, Volume 225, Pages 1098-1111),2019.
 16. Maria J. Henriques, Thermal Imaging of Concrete Dam Surfaces to Support the Control of the Evolution of Pathologies,2015.

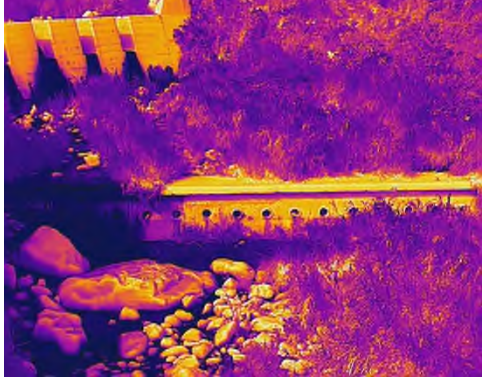
附錄一、驗證區域影像檔案

日期	地點	可見光影像	熱感影像
2021/ 02/22	1.南投縣 國姓鄉南港村 (區域1 第一次)		
2021/ 11/02	2.南投縣 國姓鄉 南港村 九份二山 (區域1 第二次)		
2021/ 02/22	3.南投縣 國姓鄉南港村 (區域2 第一次)		
2021/ 11/02	4.南投縣 國姓鄉 南港村 九份二山 (區域2 第二次)		

2021/ 02/22	5.南投縣 國姓鄉南港村 (區域3)		
2021/ 03/31	6. 南投縣信義鄉 潭南村(區域4)		
2021/ 03/31	7. 南投縣信義鄉 潭南村(區域5)		
2021/ 03/31	8. 南投縣信義鄉 潭南村(區域6)		

2021/ 03/31	9. 南投縣信義鄉 潭南村(區域7)		
2021/ 10/27	10.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域8)		
2021/ 10/27	11.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域9)		
2021/ 10/27	12.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域10)		

2021/ 10/27	13.南投縣 信義鄉 豐丘村 (區域 11)		
2021/ 10/27	14.南投縣 信義鄉 民和村 (區域 12)		
2021/ 11/02	15.中興大學實 驗林林道 (區域 13)		
2021/ 11/02	16.中興大學實 驗林林道 (區域 14)		

2021/ 11/02	17.南投縣 國姓鄉 南港村 九份二山 (區域 15)		
------------------------	--	---	---

附錄二、期初審查意見

編號	委員意見	回覆意見
1	熱像儀常用於判釋熱源，例如暖氣或冷氣外洩是比較有優勢的，另外是有熱慣性。目前以構造物裂縫為主要目標。建議要藉由實驗歸納出真正的特徵，未來可以用 AI 快速分析。	感謝委員意見，在本計畫引用的文獻中已有相關實驗成果，後續會在本計畫報告中詳列，並且於期末時提出 AI 自動判釋之建立流程。
2	建議加入變量分析，兩期要校正，達成巡檢目標。	感謝委員意見，本計畫預計針對相同研究地點進行汛期前、汛期後各進行一次拍攝，以期進行變量分析與校正。
3	護岸、防砂壩等水工構造物破壞最常見的原因多是基礎因水流淘刷造成基腳不穩固造成的，本計畫藉由使用之熱像儀是否適用？	感謝委員意見，本計畫為使用熱像儀進行結構物裂縫判釋為主；結構物基礎受水流淘刷等則仍以可見光影像進行判釋。
4	建議本計畫可考慮以 UAV 空拍影像進行高解析度影像分析(裂縫)與使用熱像儀分析間之異同點評估比較優劣。	感謝委員意見，於本計畫期末會進行可見光影像分析與熱像儀分析之整體異同優劣評估並且提供相關評估報告。
5	如何以熱影像建立裂縫與結構物安全程度或是否達到修復程度之關聯性？	感謝委員意見，本計畫以熱像儀進行裂縫判釋為主，然裂縫為結構物安全評估要素之一，故評估結構物安全或判斷達到修復程度與否仍須考量其他要素（如基礎淘刷，結構物傾斜等）才能進行全面性評估。
6	團隊中建議加入工程品質領域專家，以確認解讀資訊之正確性。	感謝委員意見，本團隊已邀請嘉義大學土木與水資源工

編號	委員意見	回覆意見
		程學系吳振賢老師擔任品質領域顧問。
7	水工結構物之安全性，可分為結構性（裂縫、破損）及非結構性（如基礎淘空）的因素，後續分析宜釐清。	感謝委員意見，後續會再進行結構性與非結構性之釐清。
8	UAV 拍攝之高度、時間（早、中、晚）、流水之影響等及操作注意事項，建議一併提出建議。	感謝委員意見，於後續 UAV 拍攝中會記錄相關現場環境因子(拍攝時間、現場流水情況等)與 UAV 拍攝基本資訊（拍攝高度等）並且於本計畫期末時提出 UAV 現場拍攝時應注意事項。
9	山區各項工程構造物常受到植被遮蔽，如何克服宜有解決對策。	感謝委員意見，目前 UAV 可見光與熱像儀受結構物表面遮蔽限制，故仍以未受植被遮蔽之工程構造物巡檢為主。
10	所拍攝之影像宜朝自動判釋研發。	感謝委員意見，本計畫所拍攝影像皆以建立樣本資料庫為目的，並且於期末時會提出 AI 自動判釋之建立流程。
11	由自然(可見光)影像即可利用經驗判釋，熱像儀影像之加值應用宜有具體說明。	感謝委員意見，於本計畫期末會進行可見光影像分析與熱像儀分析之整體異同優劣評估並且提出相關具體說明。
12	宜有專家參與異常影像之分級，俾達實務推廣之目的。	感謝委員意見，將會嘗試進行異常影像之分級並且將相關初步成果與專家進行討論。
13	建議能於現場安排尋找合適有對照組及實驗組之對象。	感謝委員意見，後續會視現場狀況進行對照組與實驗組之拍攝。

編號	委員意見	回覆意見
14	建議試 Rainbow HC Reader 方式繼續測試其效果。	感謝委員意見，後續會提供相關呈現方式以測試其效果。
15	建議定義此研究能達成之土工構造物異常之限制。	感謝委員意見，後續將於本計畫報告中定義此研究所能達成之土工構造物之限制。
16	建議後續朝向較自動化方式辨識土工構造物變化甚至異常。	感謝委員意見，本計畫於期末時會提出完整 AI 自動判釋之分析模式。

附錄三、期中審查意見

編號	委員意見	回覆意見
1	不宜以單一特徵(指標)判釋，宜以複合特徵加以評估，如裂縫及水痕作綜合判斷依據。	謝謝委員意見，已加入水痕之判釋。
2	圖 3-6 及圖 3-7 之排水孔應為試體鑽孔。	謝謝委員意見，已調整內文。
3	圖 3-15 可能為流量大時，旁邊水位提升之水痕所致，為青苔乾掉造成，其角度之分布為兩側長期水流所形成。	謝謝委員意見，遵照辦理。
4	圖 3-17 宜注意植物入侵處是否有裂縫。	謝謝委員意見，植物入侵處確實有裂縫。
5	建議後續之影像特徵判釋，宜朝複合指標及 AI 自動判釋方向研究。	謝謝委員意見，遵照辦理。
6	附錄一之區域 1 之熱感影像與可見光影像，請儘量以相同視角及距離拍攝，以利對照。	謝謝委員意見，爾後探討之處皆以同樣角度及距離拍攝。
7	期初後至 7 月中之進度似乎僅增加 2 處空拍驗證，進度似有不足？	本計畫第三期已增加十處之拍攝驗證。
8	依期初意見回復內容，期末擬完成 AI 自動判釋模式，以目前拍攝及分析之案例數量，似不足以作為訓練樣本數？	謝謝委員意見，第三期已增加多處驗證與樣本數，已有初步判釋成果說明於第三章第九節。
9	P28 內文「發現 B 處為排水孔」，該處應為工程品質混凝土鑽心所留，非排水孔；且圖 3-7 之 C、D 處是裂縫或是施工不良所造成的冷	謝謝委員意見，已修正內容。

	縫，宜有明確的判斷依據或有近拍之影像佐證。	
10	依 P42 規劃進度，至期末止全部僅驗證 3 處，此數量是否具有代表性？且選擇之標準為何？	截至期末已拍攝十五個區域，混凝土缺失之樣態已大致呈現。
11	建議針對使用熱像儀進行水工構造物巡檢之可行性進行完整評估，包括儀器成本、維運經費、儀器操作維運難易度、UAV 搭載熱像儀飛航技行門檻及風險、辨識有效性…等，提供水保局未來評估參考。	本計畫大約成本羅列如本文第三章
12	建議計畫深入探究水土保持防砂工程主要破壞之原因，例如基礎淘空等，同時蒐集相關破壞案例進行熱像儀分析，以期達到自動判釋防災結構物安全性之目的。	本研究針對混凝土構造物表面缺失之探討，判釋構造物安全有其困難，尚需加入其他因素複合式評估。
13	部分工程構造物孔洞為鑽心試驗之痕跡，建議可於現勘或拍攝時一併確認是否為排水孔，或鑽心痕跡、後續可能之滲水破壞，以及可能對溫差產生反應之特徵解讀等。	謝謝委員建議，已邀請鋼筋混凝土相關背景之老師擔任本計畫之顧問，部分排水孔經討論後已調整為鑽心。
14	汛期之間對於河床之水工構造物可能受降雨與常流水等影響，導致熱像特徵不足，目前選定區域中是否有邊坡穩定構造物等較不受常流水影響，可進行相關之熱像判釋與可能之破損評估？	謝謝委員建議，於第三期拍攝內容已加入護岸構造物。

附錄四、期末審查意見

編號	委員意見	回覆意見
1	本研究技術可否應用於大量快速判識並減少肉眼檢視舊有構造物鋼筋裸露或滲水或裂縫等可能性？	本研究計劃實驗證明熱感儀對於顯示鋼筋裸露、滲水或裂縫有較為明顯效果，只要收集大量相關數據，建立資料庫，匯入人工智慧深度學習，將來是有大規模智慧辨識的可能性，並逐漸降低依賴人工肉眼檢視。
2	團隊於後期引入相關新型機型應用，建議可增加熱感相機相關可量測之水平距離，以及相關解析度。以及計畫中採用 AI 辨識與人工辨識結果上，建議說明無人機與構造物之建議適當距離與最低需求熱感應解析度。	基於熱像儀的物理限制，與可見光鏡頭相比熱像儀的解析度一般低很多。建議熱像儀的解析度不能低於 640x480，否則細微缺失不容易被發現。因為熱像儀影像是顯示相對表面溫度，水平距離會影響整體溫度但比較不會影響相對溫度，所以只是平衡影像清晰性與飛行安全性便是合理距離，建議合理之水平距離為五米。
3	現場驗證之構造物毀損或瑕疵特徵，普遍大小分布有無統計，以及有無建議後續朝單一構造物近距離巡檢，或發展大範圍快速巡檢等方向？	謝謝委員提問，目標是近距離或大範圍快速巡檢皆可，目前建議先收集夠多的影像資料，建立資料庫，訓練自動判釋流程，以利於大量運用。