

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

利用紅外線熱成像強化混凝土橋梁表面剝落

檢測成效之初步研究

Preliminary Study on Enhancing Detection of Concrete Bridge

Surface Spalling by Infrared Thermography

蔣恩維

En-Wei Chiang

指導教授：曾惠斌 博士

Advisor: Hui-Ping Tserng, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July, 2023

## 誌謝



本次研究順利完成，首先非常感謝曾惠斌老師，在我研究遇到困難時，給予我鼓勵以及新的思路，並且親自示範拌和混凝土，令人敬佩。再來要感謝的是詹澄潔老師，願意提供設備給我的研究做使用。最後要感謝是以下這些夥伴：吳彬瑞、沈瑞陽、黃姿穎、邱民翰、王映捷、王柏喻、游承義、聶禎佑、黎錦輝、宋源璟、劉家揚、吳倫旺、林志璿等研究室的夥伴以及陳靜韋學姊，因本研究實驗需製作多個將近 100 公斤之混凝土試體，組模、備料、拌合混凝土、灌漿、養護、搬運以及最後的在日正當中進行拍攝，皆是非常艱辛且疲憊的工作。沒有他們無私的幫助我，就沒有這次研究豐碩的成果，非常感恩。

最後，我要感謝我的家人讓我可以沒有經濟壓力的環境下學習，在我需要幫助時，作為我的後盾，鼓勵我勇往直前，邁向屬於自己人生的道路。

## 中文摘要



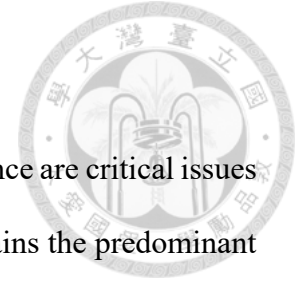
橋梁老化產生各種損傷和缺陷，會影響橋梁結構安全，因此，定期巡檢、有效管理、及時維護和補強是確保橋梁使用安全和品質的重要措施。目前世界各國仍普遍採用目視檢測作為橋梁檢測最主要的方式，惟目視檢測仰賴檢測人員的訓練素質、經驗和主觀認定，易產生判斷不一之情形。

國內外多項研究以深度學習技術應用於橋梁檢測，作為偵測裂縫的非接觸式量測方式，惟迄今 AI 影像辨識技術尚有瓶頸待突破。而過去文獻指出紅外線熱像儀可有效偵測混凝土橋梁表面剝落，本研究旨在探討以較低規格之紅外線熱像儀檢測混凝土橋梁表面剝落及輔助 AI 影像辨識技術，應用於橋梁檢測是否具有可行性。

經實驗室研究與橋梁實拍結果顯示，本研究所採用之紅外線熱像儀(FLIR E5)，最適當量測距離為 1 至 2 米，且可偵測出各式各樣形狀的剝落，但較不適合量測深度較淺及面積較小之缺陷尺寸；裂縫周圍有局部剝落時，有助於提高紅外線熱成像之偵測率，卻會降低 AI 影像辨識的偵測率；而 AI 影像辨識對於假缺陷之誤判率遠大於紅外線熱成像，因此利用較低規格之紅外線熱像儀檢測混凝土橋梁表面剝落及輔助 AI 影像辨識技術，應用於橋梁檢測具有可行性。

關鍵字：混凝土橋梁、紅外線熱成像、橋梁檢測、混凝土缺陷、被動紅外線熱成像技術、AI 影像辨識。

# ABSTRACT



Regular inspections, effective management, and timely maintenance are critical issues to ensure bridge safety and quality. Currently, visual inspection remains the predominant method employed worldwide for bridge inspection. However, visual inspection heavily relies on the training, experience, and subjective judgment of inspectors, leading to inconsistent assessments.

Several studies have utilized deep learning to detect cracks during bridge inspections. Nevertheless, there is still a significant challenge to overcome AI image recognition. Previous literature has highlighted the effectiveness of thermal imaging cameras in detecting concrete bridge surface spalling. This study aims to investigate the feasibility of employing low-standard infrared thermal imaging cameras to detect concrete bridge surface spalling and support AI image recognition technology in bridge inspections.

Based on laboratory research and on-site inspections of bridges, the FLIR E5 infrared thermal imaging camera has demonstrated the recommended measurement distance of 1 to 2 meters. While it may not be suitable for measuring shallow-depth and small-area defects, it excels in effectively detecting various shapes of spalling and supporting AI image recognition. Consequently, employing low-standard infrared thermal imaging cameras for the detection of concrete bridge surface spalling and integration with AI image recognition technology in bridge inspections appears to be a feasible approach.

**Keywords:** Concrete Bridges, Infrared Thermography, Bridge Inspection, Concrete Defects, Passive Infrared Thermography technology, AI Image Recognition.

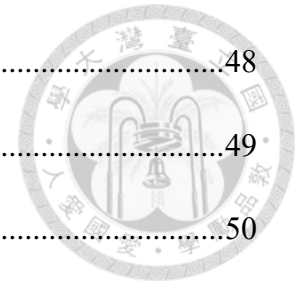
# 目錄



口試委員會審定書 .....	#
誌謝 .....	i
中文摘要 .....	ii
ABSTRACT .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	xi
<b>Chapter 1 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景及動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究範圍與限制 .....	2
1.4 研究架構與流程 .....	2
1.4.1 研究架構.....	2
1.4.2 研究流程.....	3
<b>Chapter 2 文獻回顧.....</b>	<b>5</b>
2.1 橋梁檢測 .....	5
2.1.1 橋梁常見缺陷形態 .....	5
2.1.2 橋梁檢測形式 .....	6
2.2 AI 影像辨識混凝土缺陷 .....	7
2.3 紅外線熱成像 .....	9
2.3.1 紅外線基本原理 .....	9



2.3.2	放射率 .....	10
2.3.3	熱傳遞理論 .....	11
2.3.4	紅外線熱像儀 .....	13
2.3.5	熱解析度 .....	14
2.3.6	熱靈敏度 .....	15
2.3.7	溫度擴散現象 .....	16
2.4	紅外線熱成像檢測 .....	16
2.4.1	被動紅外線熱成像技術 .....	17
2.4.2	主動紅外線熱成像技術 .....	18
2.4.3	ASTM-D4788 .....	19
2.4.4	過去之相關研究 .....	19
2.5	小結 .....	22
<b>Chapter 3</b>	<b>設備介紹與實驗規劃 .....</b>	<b>23</b>
3.1	使用設備 .....	23
3.2	軟體介紹 .....	25
3.3	試體製作 .....	28
3.4	小結 .....	31
<b>Chapter 4</b>	<b>利用紅外線熱像儀應用於橋梁表面缺陷之實驗與分析 .....</b>	<b>32</b>
4.1	第一階段實驗 – 剝落尺寸及量測距離 .....	33
4.1.1	實驗方法 .....	33
4.1.2	實驗一 – 探討剝落尺寸影響量測程度 .....	37
4.1.3	實驗二 – 探討適當量測距離與剝落尺寸 .....	42



4.1.4	缺陷尺寸誤差統計.....	48
4.1.5	小結.....	49
4.2	第二階段實驗－缺陷形狀與日照時間因子.....	50
4.2.1	實驗方法.....	50
4.2.2	實驗結果.....	51
4.2.3	小結.....	54
4.3	第三階段實驗－紅外線熱像儀與 AI 影像辨識.....	55
4.3.1	實驗方法.....	55
4.3.2	實驗結果.....	58
4.3.3	小結.....	64
<b>Chapter 5</b>	<b>利用紅外線熱像儀應用於橋梁實拍.....</b>	<b>65</b>
5.1	使用設備.....	65
5.2	橋梁選定.....	65
5.3	量測方法.....	66
5.4	實拍結果與分析.....	67
<b>Chapter 6</b>	<b>結論與建議.....</b>	<b>71</b>
6.1	結論.....	71
6.2	後續研究建議.....	72
	參考資料.....	73
	附錄 A.....	78
	附錄 B.....	94
	附錄 C.....	110

# 圖目錄



圖 1-1 研究流程圖 .....	4
圖 2-1 Deepcrack 裂縫數據集 .....	8
圖 2-2 電磁波光譜圖(單位: $\mu\text{m}$ ) .....	10
圖 2-3 熱傳遞的 3 種型式 .....	11
圖 2-4 FLIR T530 熱解析度 $320 \times 240$ .....	14
圖 2-5 FLIR T860 熱解析度 $640 \times 480$ .....	14
圖 2-6 熱靈敏度 200mK 之儀器畫面 .....	15
圖 2-7 熱靈敏度 100mK 之儀器畫面 .....	15
圖 2-8 熱靈敏度 60mK 之儀器畫面 .....	16
圖 2-9 溫度擴散現象之局部放大圖 .....	16
圖 2-10 混凝土在晝夜釋放之紅外線能量圖 .....	17
圖 3-1 FLIR tools/tools+ 軟體主頁面示意圖 .....	27
圖 3-2 編輯影像之頁面示意圖 .....	27
圖 3-3 FLIR tools 影像溫度值匯出於 excel 之示意圖 .....	27
圖 3-4 模板組立示意圖 .....	29
圖 3-5 拌合混凝土備料過程 .....	29
圖 3-6 所需材料秤重 .....	29
圖 3-7 缺陷之珍珠板示意圖 1 .....	30
圖 3-8 缺陷之珍珠板示意圖 2 .....	30
圖 3-9 拌合與灌漿 .....	30



圖 3-10 第一組試體設計平面圖 .....	31
圖 3-11 第一組試體 .....	31
圖 4-1 使用被動紅外線熱成像技術量測試體示意圖 .....	33
圖 4-2 量測試體之表面溫度示意圖 .....	34
圖 4-3 於可見光影像選取缺陷溫度值之範例 .....	35
圖 4-4 數位熱像儀影像模式中框取缺陷示意圖 .....	35
圖 4-5 紅外線影像模式中框取缺陷示意圖 .....	36
圖 4-6 紅外線影像模式中框取周圍示意圖 .....	36
圖 4-7 第一組試體 Excel 數據彙整示意圖 .....	38
圖 4-8 第一組試體之缺陷號碼 1 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖 .....	39
圖 4-9 第一組試體之缺陷號碼 1 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖 .....	39
圖 4-10 測距 1m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	40
圖 4-11 測距 2m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	41
圖 4-12 測距 3m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	41
圖 4-13 測距 4m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	41
圖 4-14 測距 5m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	42
圖 4-15 第二組試體平面圖 .....	43
圖 4-16 第二組試體 .....	43
圖 4-17 第二組試體 Excel 數據彙整示意圖 .....	44
圖 4-18 第二組試體缺陷號碼 1 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖 .....	45
圖 4-19 第二組試體缺陷號碼 1 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖 .....	45
圖 4-20 第二組試體缺陷號碼 5 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖 .....	45



圖 4-21 第二組試體缺陷號碼 5 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖 .....	46
圖 4-22 測距 1m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	47
圖 4-23 測距 2m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	47
圖 4-24 測距 3m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	47
圖 4-25 測距 4m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	48
圖 4-26 測距 5m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖 .....	48
圖 4-27 第二階段實驗使用被動紅外線熱成像技術量測試體示意圖 .....	50
圖 4-28 第三組試體 .....	51
圖 4-29 第三組試體 Excel 數據彙整示意圖 .....	52
圖 4-30 第三組試體缺陷號碼 4 在 3:00 p.m. 至 5:00 p.m. 於測距一米時之折線圖 ...	53
圖 4-31 第三組試體缺陷號碼 4 在 3:00 p.m. 至 5:00 p.m. 於測距二米時之折線圖 ...	53
圖 4-32 測距 1m 時不同缺陷形狀可被偵測比例之圓餅圖 .....	54
圖 4-33 測距 2m 時不同缺陷形狀可被偵測比例之圓餅圖 .....	54
圖 4-34 利用 Deepcrack AI 影像辨識第四組試體測距兩米之可見光圖 .....	55
圖 4-35 第三階段實驗缺陷溫度與周圍溫度取得方式 .....	56
圖 4-36 第四組試體 .....	57
圖 4-37 第五組試體 .....	57
圖 4-38 第四組試體缺陷號碼 2 折線圖 .....	58
圖 4-39 第五組試體缺陷號碼 2 折線圖 .....	58
圖 4-40 第四組試體假缺陷 2 折線圖 .....	59
圖 4-41 第五組試體假缺陷 2 折線圖 .....	59
圖 4-42 第四組試體與第五組試體之真裂縫辨識率直條圖 .....	60



圖 4-43 第四組試體與第五組試體之假裂縫誤判率直條圖 .....	61
圖 5-1 福和橋下橋墩多已被鋼板包覆圖 .....	65
圖 5-2 使用直尺量測缺陷尺寸 .....	66
圖 5-3 永福橋護欄拍攝之白板 .....	66
圖 5-4 使用紅外線溫度計 TECPEL-DIT300B 量測缺陷之表面溫度 .....	67
圖 5-5 於永福橋進行橋梁實拍示意圖 .....	67
圖 5-6 永福橋 1 於測距 1 米時之紅外線熱成像 .....	69
圖 5-7 永福橋 2 於測距 1 米時之紅外線熱成像 .....	69



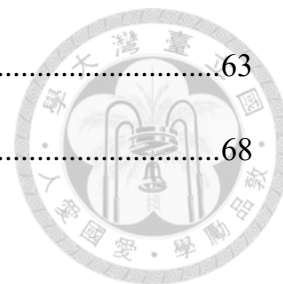
# 表目錄



表 2-1 混凝土橋梁常見缺陷之定義與成因 .....	5
表 2-2 橋梁定期檢測評等準則表 .....	7
表 2-3 放射率表 .....	10
表 2-4 熱像儀成像之品質 .....	15
表 2-5 過去紅外線熱成像檢測混凝土缺陷之相關研究彙整表 .....	20
表 2-6 過去紅外線熱成像檢測混凝土缺陷的相關研究使用之紅外線熱像儀 .....	21
表 3-1 測距儀之產品規格 .....	23
表 3-2 紅外線溫度計之量測規範 .....	24
表 3-3 FLIR E5 紅外線熱像儀產品規格表 .....	24
表 3-4 FLIR Tools/Tools+ 功能比較表 .....	26
表 3-5 普通混凝土之各齡期強度(單位 : kgf/cm <sup>2</sup> ).....	28
表 3-6 混凝土配比計算表(普通混凝土體積 0.042m <sup>3</sup> ，水灰比 0.55 所需材料).....	28
表 4-1 各測距下之尺寸誤差平均值 .....	49
表 4-2 第四組試體與第五組試體之真裂縫辨識率統計表 .....	60
表 4-3 第四組試體與第五組試體之假裂縫誤判率統計表 .....	61
表 4-4 混淆矩陣 .....	62
表 4-5 AI 影像辨識第四組試體之混淆矩陣 .....	62
表 4-6 AI 影像辨識第五組試體之混淆矩陣 .....	63
表 4-7 紅外線熱成像分析第四組試體之混淆矩陣 .....	63
表 4-8 紅外線熱成像分析第五組試體之混淆矩陣 .....	63

表 4-9 兩種方法在兩組試體上的綜合指標比較.....63

表 5-1 橋梁實拍結果.....68



# Chapter 1 緒論



## 1.1 研究背景及動機

橋梁因面臨颱風、豪雨、地震、腐蝕及超載等外來因素以及溫度變化、收縮、結構材料老化影響下，會產生各種損傷和缺陷，進而影響橋梁結構安全，因此定期巡檢、有效管理、及時維護和補強是確保橋梁使用安全和品質的重要措施。目前世界各國仍普遍採用目視檢測作為橋梁檢測最主要的方式，然而由於檢測人員的訓練素質、經驗和主觀判斷的差異，目視檢測結果常常存在不一致的現象，隨著極端氣候事件越來越頻繁，面臨更多的災害，因此提高橋梁檢測成效延長橋梁生命週期，成為一個亟待研究的課題。

隨著人工智慧的進步，深度學習技術在各個領域得到廣泛應用，許多國內外研究嘗試將人工智慧應用於橋梁檢測，作為偵測裂縫的非接觸式量測方式。根據文獻結果顯示，應用深度學習技術輔助橋梁裂縫辨識時，仍然存在一些影像無法清晰顯示裂縫位置的情況。例如，因為影像亮度不足、壁面紋理模糊、裂縫紋路不明顯或是其他干擾因素(如牆面剝落、污漬、噴漆、表面不平整等)，這些因素使得裂縫的位置無法被確定。另交通部運輸研究所(2021)對應用 AI 影像辨識於橋梁檢測之研究案做過初探，統整出國內外各項研究目前以偵測混凝土裂縫之模型居多，針對其他混凝土劣化型態則相對較少，且若是數據集(dataset)不夠大，其精確度則有待商榷。

而過去文獻指出紅外線熱像儀具有易搭載、感測範圍廣且屬非接觸性及非破壞性之特性，且紅外線熱成像為可有效偵測混凝土橋梁表面剝落之技術(Sherif Yehia；Osama Abudayyeh；Saleh Nabulsi；and Ikhlas Abdelqader，2007)，故本研究將探討利用紅外線熱成像強化混凝土橋梁表面剝落檢測成效之可行性。



## 1.2 研究目的

應用深度學習技術輔助橋梁裂縫辨識時，仍然面臨一些挑戰，其中一些影像可能無法清晰地顯示裂縫的位置，而紅外線熱像儀具非接觸、非破壞性特性，並且可以有效偵測混凝土橋梁表面剝落，且國內外研究大多使用較高規格之紅外線熱像儀，儀器價金也相對較高，較不具經濟性，故本研究目的如下：

1. 探討利用較低規格之紅外線熱像儀檢測混凝土橋梁表面剝落之可行性。
2. 利用較低規格之紅外線熱像儀分析結果輔助 AI 影像辨識橋梁表面缺陷之可行性分析。

## 1.3 研究範圍與限制

臺灣地區大多數橋梁類型為鋼筋混凝土橋及預力混凝土橋，劣化類型最多數為混凝土剝落、破碎、鋼筋外露及銹蝕，故本研究對象定為混凝土橋梁，並僅針對混凝土橋梁表面剝落進行研究，且實驗室研究之試體規劃為乾燥混凝土試體。不探討氣候、區域環境、日照時間、橋梁設計強度折減及結構中含有除混凝土以外材料對熱成像造成的影響，且不探討影像辨識技術。

## 1.4 研究架構與流程

### 1.4.1 研究架構

本次論文研究之架構說明如下：

#### 第一章 緒論

介紹本次論文研究之研究背景與動機、目的、範圍與限制以及架構與流程。



## 第二章 文獻回顧

本章節主要在介紹橋梁檢測、AI 影像辨識混凝土缺陷以及紅外線熱成像與其檢測技術之探討。

## 第三章 設備介紹與實驗規劃

本章節包含了本研究使用設備、軟體介紹以及試體製作。

## 第四章 利用紅外線熱像儀應用於橋梁表面缺陷之實驗與分析

本章節包含三個階段的實驗，並且對其進行分析及討論，以研判紅外線熱成像檢測混凝土橋梁表面缺陷及輔助 AI 影像辨識之可行性。

## 第五章 利用紅外線熱像儀應用於橋梁實拍

本研究之橋梁實拍與實驗室研究在研究流程中為同時進行，將使用與實驗室研究相同手法進行量測及熱成像分析。

## 第六章 結論與建議

彙整本研究各階段成果與分析，提出總結及建議未來研究方向。

### 1.4.2 研究流程

本研究先了解其臺灣橋梁檢測與紅外線檢測之背景後，敘述其研究動機、目的以及研究範圍與限制，再進行文獻回顧，蒐集過去國內外之相關研究以及相關理論。經過文獻回顧後，會同時進行實驗室實驗與橋梁實拍。在實驗室實驗中，會參考國內外多筆研究決定試體尺寸大小與缺陷尺寸，再按照臺灣混凝土橋梁實際配比(設計強度  $350\text{kgf/cm}^2$ )製作試體，其製作試體所有流程包含模板組立、備料、拌合、缺陷模型製作、灌漿以及最後養護皆自行施作。進行第一階段實驗時，將根據分析結果找到使用之設備之適合量測尺寸以及適合量測距離。第二階段實驗則主要會探討不同形狀的缺陷是否同樣能夠被偵測到。再於第三階段實驗，進



行熱成像分析輔助運行 Deepcrack AI 影像辨識之結果，得到最後的結論；而在橋梁實拍中，亦會運用相同之量測與分析手法，得到結果。最後再將兩者之結果綜合得到結論與建議。整體研究流程如圖 1-1 所示。

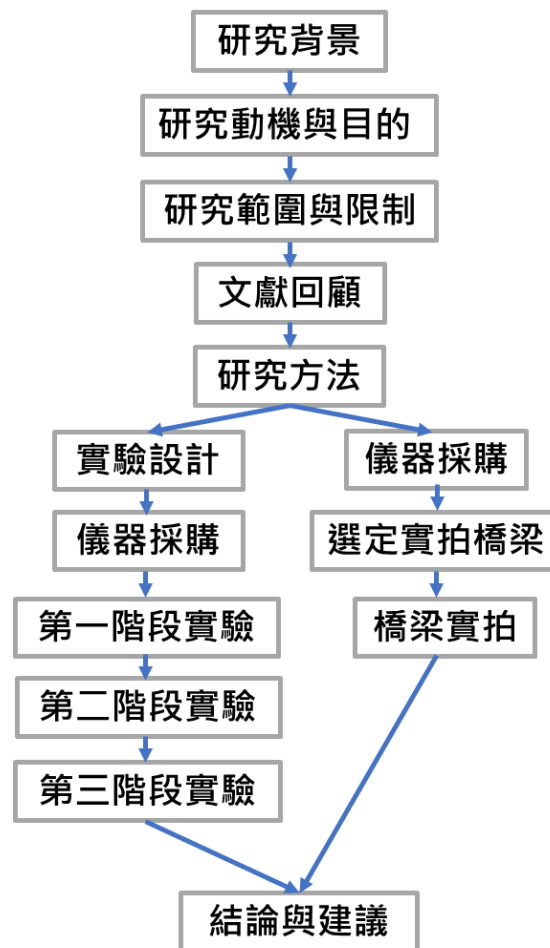


圖 1-1 研究流程圖

## Chapter 2 文獻回顧



本研究將應用紅外線熱像儀對混凝土橋梁進行非破壞式檢測，並輔助 AI 影像辨識之偵測結果。本章節將闡述橋梁檢測、AI 影像辨識混凝土缺陷、紅外線熱成像、紅外線熱成像檢測以及過去之相關研究，確立本研究之研究方法以及可行性。

### 2.1 橋梁檢測


#### 2.1.1 橋梁常見缺陷形態

常見的鋼筋混凝土橋梁之缺陷劣化主要有剝離、剝落、裂縫、蜂窩、鋼筋外露、鋼筋鏽蝕、表面侵蝕、分層等，目前臺灣橋梁構建種類約有 19 種，而劣化類型則有 35 種(中華顧問工程司，2012)，表 2-1 為混凝土橋梁常見缺陷之定義與成因。這些缺陷劣化將會使得混凝土橋梁產生潛在的風險，因此橋梁需要定期之檢測才能有效的維護人民的安全。

表 2-1 混凝土橋梁常見缺陷之定義與成因

缺陷	定義	成因
剝落(Spalling)	混凝土脫落並留下一小洞，形成一斷裂面。	內部裂縫因內部壓力不足而致。
鋼筋鏽蝕(Corrosion of reinforcement)	鋼筋因暴露於腐蝕性環境，而生電化學反應。	存在導電溶液、腐蝕劑和腐蝕。
裂縫(Cracking)	混凝土破裂至其結構不連續。	因收縮引起拉力、溫度變化、加載等而形成。
蜂窩(Honeycombing)	覆蓋於粗骨材之混凝土不足，而生之小孔。	級配差之混凝土配比，且拌合不當。
分層(Delaminations)	裂紋或斷裂平面位於或高於鋼筋層。	鋼筋鏽蝕，且水、氯化物含量高。

資料來源：Ryall，2003；Rhazi，2000；Alongi et al.，1992 及本研究整理



交通部運輸研究所(2021)對於劣化的類型進行分析，六都案例(臺北市)最多為混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕(44.8%)，其次為其他損傷(25.5%)，而後為混凝土結構裂縫(8.1%)、滲水、白華(6%)、襯墊片或端部構件損傷(2.9%)；非六都案例(嘉義市)最多為混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕(50.1%)，其次為其他損傷(27.1%)，而後為混凝土結構裂縫(10.2%)、滲水、白華(3.9%)、基礎沖刷裸露、掏空(2.2%)，由以上資料分析結果可知，劣化類型最多數為混凝土剝落(破碎、鋼筋外露、銹蝕)。

### 2.1.2 橋梁檢測形式

橋梁檢測之目的為提早發現結構之損傷，維護之並延長使用時間。在美國，橋梁檢測為一年兩次(GPO，2015)，而40%之橋梁被評估歸類為結構缺陷和無功能(Pines and Aktan，2002)。在巴西，根據NBR 9452，橋梁應每年檢測一次，卻只限於例行檢查(ABNT，2016)。超過三分之一的橋梁因為缺乏充分與及時的維護，所以有不少不良裂化缺陷(Mendes et al.，2012)。

而臺灣現行橋梁檢測規範主要分為三種，分別是定期檢測、特別檢測與詳細檢測三類。定期檢測方式主要以直接目視或間接目視檢測，檢測人員若無法接近欲測物，會搭乘橋檢車或是橋檢船，量測其缺陷大小，並以劣化狀態(D值)、劣化範圍(E值)、劣化情況對橋梁結構使用性及用路人安全性之影響(R值)和處置的急迫性(U值)評定其劣化狀況，(交通部，2020)可參考表 2-2。

表 2-2 橋梁定期檢測評等準則表

	0	1	2	3	4
D	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損壞
E	無法檢測*	10%以下	10%~30%	30%~60%	60%以上
R	無法判定重要性	微	小	中	大
U	無法判定急迫性	例行養護	3 年內維護或 持續追蹤	1 年內維護	緊急處置

\*E=0，為此構件裂化範圍無法直接目視評等，如地面以下之橋台基礎或橋墩基礎等構件。

資料來源：公路橋梁檢測及補強規範，2020

## 2.2 AI 影像辨識混凝土缺陷

近年來，人工智慧(Artificial Intelligence, AI)影像辨識技術在多個領域中有了重大突破和應用，主要是利用機器學習和深度學習使計算機能夠自動辨識和分析圖像中的對象、特徵以及模式。這項技術在醫學影像、安全監控、智能機器人、自動駕駛、土木工程等領域中皆有廣泛的應用前景。其中在土木工程的領域中，國內外有許多研究將其技術應用在混凝土缺陷的辨識上。

DeepCrack 是一種深度分層卷積神經網絡(CNN)，其使用了全卷積網絡(FCN)和深度監督網絡(DSN)以預測像素大小之混凝土裂縫分割，其裂縫數據集(dataset)如圖 2-1，使用了 537 張 RGB 彩色圖像，並分為兩個主要的子集，300 張圖像的訓練集(training set)和 237 張圖像的測試集(testing set)，研究結果顯示出 Deepcrack 優於其他幾種最先進之混凝土裂縫檢測，然而卻仍有難以檢測具有複雜形狀或低對比度之裂縫的問題，以及在某些情況可能出現過度分割或分割不足的現象，(Yahui Liu et al., 2019)。

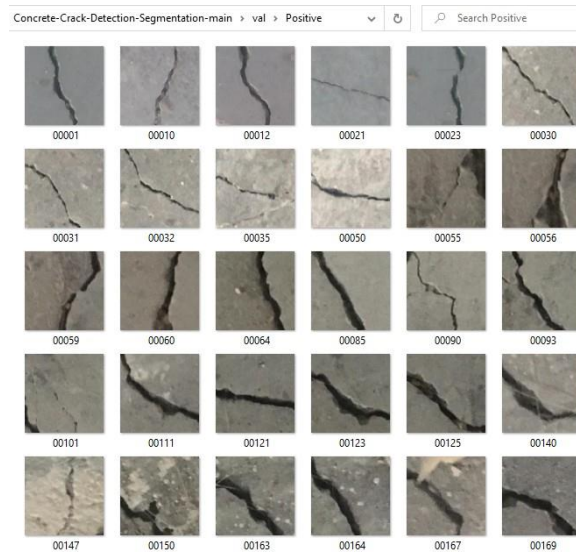


圖 2-1 Deepcrack 裂縫數據集

資料來源：Yahui Liu，2019

王姿樺等人 (2022) 使用深度學習技術來輔助橋梁裂縫辨識，選用了 Faster-RCNN 模型搭配 ResNet50 為骨幹的卷積神經網絡作為裂縫辨識的方法，成果之平均精度可達到 80.7%，測試成果可有效偵測到裂縫存在能協助橋梁檢測人員在定期檢測上使用，在測試集中有 84.94% 像能夠百分之百預測裂縫存在位置；另 10.11% 影像能夠辨識出 50% 以上裂縫存在；2.35% 影像僅能夠預測到部份裂縫；其中 2.58% 影像因礙於影像亮度、壁面紋理及裂縫紋路不明顯而無法判別出裂縫位置，另研究結果證實模型對於具有干擾因素的裂縫影像尚具一定辨識能力，測試集中含有 49 張具干擾裂縫辨識的影像資料，測試結果顯示 87.76% 影像能夠正確裂縫位置僅 12.24% 影像有產生誤判情形發生，對於具有干擾因素之裂縫影像尚具一定之辨識能力，但仍然存在誤差。

綜觀上述，可以得知目前再先進的 AI 影像辨識應用於橋梁檢測時仍然有盲點，尚有許多可改善之處以及使用紅外線熱像儀輔助之可能性。



## 2.3 紅外線熱成像

德國物理學家威廉赫雪爾(Friedrich Wilhelm Herschel, 1800)進行了一系列之光譜研究，希望了解不同顏色的光經過光柵後的分光特性。在實驗中，他發現除了肉眼可見之光線外，還存在了一種無法見光的輻射，可以傳遞熱能，即紅外線的輻射(科學 Online - 臺灣大學，2011)。他的發現引起了科學界的興趣，許多人開始投入探索紅外線的特性和應用，於 20 世紀加速發展，特別是在紅外線熱像儀和紅外線探測器的改進方面。如今，紅外線已經廣泛被世人應用於各個領域。

### 2.3.1 紅外線基本原理

紅外線是一種非可見光，自然界當中，所有溫度高於絕對零度( $-273^{\circ}\text{C}$ )之物體皆持續地輻射著紅外線，此現象稱為熱輻射，亦是紅外線熱像儀所測得之熱能量。

紅外線的基本原理是透過物體的分子振動產生之電磁輻射，當物體分子因熱能而振動時，會產生電荷分布變化，進而發出紅外線輻射。這種輻射的波長範圍介於可見光(Visible spectrum)和微波(Microwave)之間，約在  $0.78\mu\text{m}$  到  $1000\mu\text{m}$  之間，又可依波長將紅外線光譜分成三個波段：近紅外線( $0.75\mu\text{m}\sim 1.4\mu\text{m}$ )、中紅外線( $1.5\mu\text{m}\sim 4\mu\text{m}$ )、以及遠紅外線( $4\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ ) (那致中，2010)，如圖 2-2 所示。近紅外線波長較短、能量較高，常運用於軍事雷達及食品檢測之質譜分析；中紅外線應用範圍廣泛，常用於通訊與偵測系統，像是光纖中紅外線雷射、煙霧偵測等；遠紅外線又名生育之光，因人體所生之波長為  $8\mu\text{m}$  至  $14\mu\text{m}$ ，體內會產生共振效果至細胞始活化，常應用於淨水設備及醫學等(張順欽，2013)。

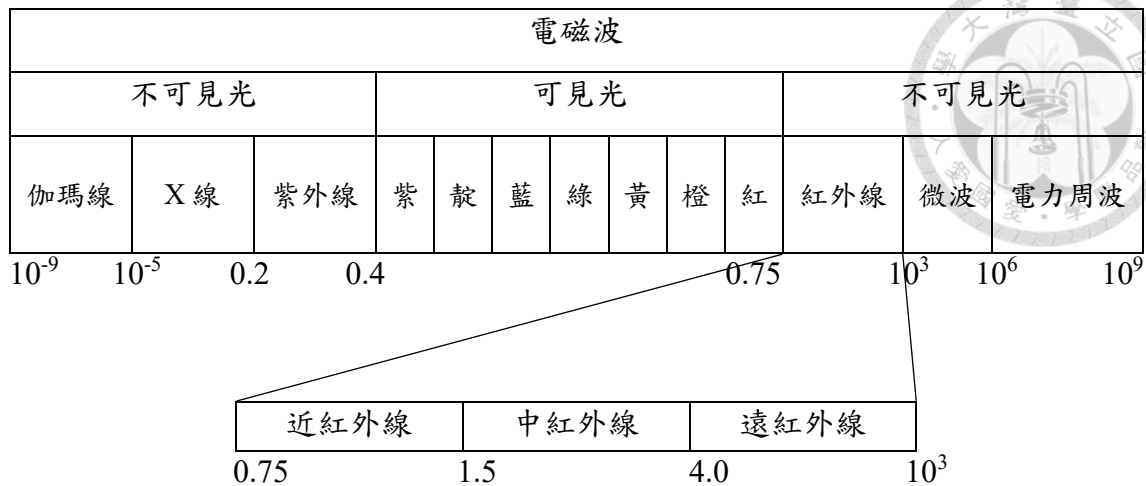


圖 2-2 電磁波光譜圖(單位:  $\mu\text{m}$ )

資料來源：林喻峰，2014

### 2.3.2 放射率

放射率這個概念源自於 1859 年德國物理學家格斯塔夫·羅伯特·克希荷夫 (Gustav Robert Kirchhoff) 提出的熱輻射定律，描述了在同樣的溫度下，物體對輻射能的放射率或吸收率與其表面的性質有關。若有一物體能夠在任何溫度下將輻射到其表面上之能量全部吸收，則稱之為絕對黑體(black body)，然而實際上並沒有絕對黑體，僅有物體是接近絕對黑體的，例如：無光澤的黑漆表面接近於黑體，其吸收率為 0.97~0.98 (林喻峰，2014)。表 2-3 可以發現雖然同屬混凝土，但不同規格(乾的、走道)之放射率仍有不同。本研究欲使用紅外線熱像儀去測量乾的混凝土試體，其放射率數值為 0.95。

表 2-3 放射率表

材料	規格	放射率
油漆	油，不同顏色	0.92-0.96
泥土	乾的	0.92
混凝土	乾的	0.95
混凝土	走道	0.974
爐渣	鍋爐	0.97~0.93

資料來源：FLIR Ex 系列說明書，2016



### 2.3.3 熱傳遞理論

熱傳遞是指熱量從一物體傳遞至另一物體的過程。其理論涉及熱傳遞的基本原理和相關數學模型，其主要分為三種型式，分別是熱傳導、熱對流以及熱輻射。如圖 2-3，當鍋子至於火源上，其鍋子裡面的水會產生「熱對流」，手在握把上會感覺到熱，即是「熱傳導」，而火堆散發出的熱，則是「熱輻射」。



圖 2-3 熱傳遞的 3 種型式

資料來源：唐和股份有限公司，2019

1. 熱傳導(Thermal Conductivity)：若一物體內有溫度梯度(Temperature Gradient)之存在，能量即會從高溫傳至低溫，此種傳遞方式稱為傳導。傳遞之介質主要是固體或液體，固體是以網狀結構連接，藉由原子相互連接的結構震動、撞擊傳遞熱量；液態則是直接靠分子撞擊來傳遞。每個物體有其不同的熱傳導性能，較好的像是金屬，因為它包括了自由電子之移動；較差的則像是石綿，可以做為熱絕緣材料。通常以熱導率  $k$  或熱傳導率作為材料傳導能力之指標，而熱導率是描述物質傳導熱量的特性之一，是指在單位時間內單位面積上熱量傳遞率與溫度梯度之間之比例，並且可藉由傅立葉熱傳導定律(Fourier's Law of Thermal Conduction)計算出其熱傳遞量之多寡：

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2-1)$$

$Q_x$ ：x 方向的熱傳遞率。





$k$ : 材料的熱導率。

$A$ : 正向面積。

$\frac{dT}{dx}$ : 熱流動方向之溫度梯度。

(2-1)式中的負號在傅立葉的熱傳導文章中有提及，一方向上的熱傳導速率與該方向的溫度梯度成正比，而熱會向溫度降低的方向傳遞，因此溫度隨  $x$  的增加而降低時，溫度梯度應為負值，故加入負號於等式中以使得正  $x$  方向有正值之熱傳遞量(林喻峰，2014)。

2. 熱對流(Thermal Convection): 熱量通過流體(液體或氣體)的流動傳遞之過程稱為熱對流，其可分為兩種型態，一種是自然對流(Natural Convection)，另一種則為強制對流(Forced Convection)。自然對流是由於溫度差異引起的流體自發運動，無需外部力驅動。當冷卻的流體變得密度更高，會下沉並代替上升的熱流體，形成循環。強制對流則是由外部力驅動的流體運動，像是風扇，外部力可以促使流體在系統中循環，加速熱量的傳遞。熱對流在許多領域中皆非常重要，像是在工程界，設計中的散熱器、冷卻系統和空調系統等是利用熱對流來加速熱傳遞，或像是在熱工程中，了解熱對流原理和特性以助於設計高效的熱傳導系統。熱對流的速率取決於流體之性質、流體速度、溫度差異、流體與固體界面的特性等因素，其所產生之熱量可由牛頓冷卻定律(Newton's Cooling Law)計算(林喻峰，2014)：

$$q_c = hA\Delta T \quad (2-2)$$

$q_c$ : 熱對流傳量。

$h$ : 對流係數。

$A$ : 對流接觸之熱傳面積。

$\Delta T$ : 兩處溫差。

3.熱輻射(Thermal Radiation)：熱輻射是指物體因其溫度而發出的電磁輻射，物體溫度愈高，單位時間輻射之熱量愈多，其性質與黑體輻射、克希荷夫熱輻射定律、普朗克輻射定律、斯蒂芬波茲曼定律皆有所關聯。不同的物體熱輻射特性由其表面的吸收能力和放射能力決定，也就是前述所提到之吸收率以及放射率，而就熱力學之觀點，黑體其能量放射率正比於該物體絕對溫度四次方，亦正比於其表面積，可用斯蒂芬波茲曼熱輻射定律表示(中國土木水利工程學會，2013)：

$$q_b = \sigma AT^4 \quad (2-3)$$

$q_b$ ：輻射量。

$\sigma$ ：斯蒂芬波茲曼常數，為  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ 。

$A$ ：表面積。

$T$ ：黑體的絕對溫度。

### 2.3.4 紅外線熱像儀

紅外線熱像儀(Infrared Thermal Imaging Camera)是一種使用紅外線技術來檢測及顯示物體表面溫度分布的儀器，其作用原理基於物體之熱輻射特性，能夠將物體發射之紅外線熱輻射轉換為可見之熱像圖，以顯示不同區域之溫度差異。紅外線熱像儀在不同領域皆有所應用，在工業領域中，常被使用於設備檢測、電氣系統故障檢測、建築結構檢查、能源之監測等；在醫學領域中，可用於體溫檢測、疾病診斷、熱區域之健康狀態評估等。現今廣為熟知的紅外線熱像儀品牌 FLIR，價格低至 300 美金以內，高至 6000 美金以上皆有，而這價錢天大的落差主要是反映在設備上的兩個規格，分別是熱解析度(IR Resolution)以及熱靈敏度(Noise Equivalent Temperature Difference)，皆為選擇熱像儀時必須考量到的重要指標，於 2.3.5 與 2.3.6 小節說明其重要性。



### 2.3.5 熱解析度

當紅外線熱像儀之熱解析度愈高，各像素之分辨能力愈精細，可拍攝範圍也愈廣，亦可代表其溫度點資訊愈多，像是 160×120 之熱解析度的熱像儀即代表熱成像上涵蓋著 19200 個溫度點資訊。解析度愈高之熱像儀其售價亦愈高，而一般常見之解析度為：80×60、160×120、320×240、640×480、1024×768 等。下圖 2-4 與圖 2-5 分別是熱解析度 320×240 以及 640×480，顯示出熱解析度較高者有較明顯輪廓、影像較為清楚(艾丁陞實業，2021)。



圖 2-4 FLIR T530 熱解析度 320×240

資料來源：艾丁陞實業，2021

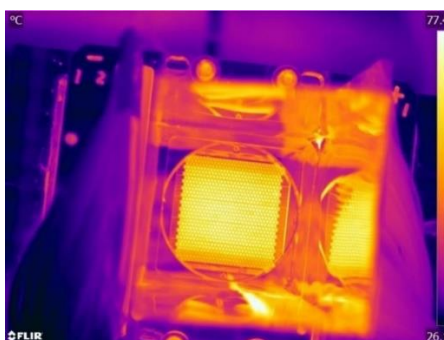


圖 2-5 FLIR T860 熱解析度 640×480

資料來源：艾丁陞實業，2021



### 2.3.6 熱靈敏度

熱靈敏度是用來說明紅外線感測器的訊號雜訊比，通常單位是 mK(1mK=0.001°C)，縮寫為 NETD。數值愈低，代表感測器愈靈敏，影像畫面也愈少雜訊，下表 2-4 可用來判定紅外線熱像儀成像的品質(艾丁陞實業，2021)。

表 2-4 熱像儀成像之品質

NETD	<20mK	<30mK	<40mK	<50mK	<60mK	<80mK
品質	特優	優	佳	好	尚可	普通

資料來源：艾丁陞實業，2021

圖 2-6、圖 2-7 以及圖 2-8 分別是熱靈敏度 200 mK、100 mK 以及 60 mK 之儀器拍攝畫面，可清楚看出熱靈敏度大小與畫面雜訊之多寡的關係。熱靈敏度較低者，如圖 2-8，明顯畫面雜訊較少，相比圖 2-6 與圖 2-7 清晰許多。

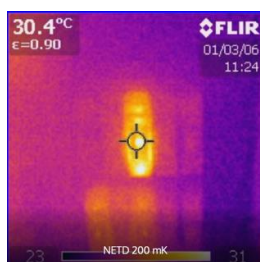


圖 2-6 熱靈敏度 200mK 之儀器畫面

資料來源：艾丁陞實業，2021

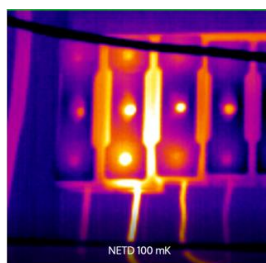


圖 2-7 熱靈敏度 100mK 之儀器畫面

資料來源：艾丁陞實業，2021

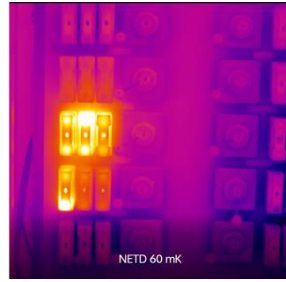


圖 2-8 熱靈敏度 60mK 之儀器畫面

資料來源：艾丁陞實業，2021

### 2.3.7 溫度擴散現象

陳宇欣(2005)提及紅外線熱成像中常見到溫度擴散現象，如圖 2-9，是因為在手部的周圍，手和環境的溫度融合，形成一類似沒有聚焦的模糊地帶，此現象會發生在畫面中較高溫或者較低溫的地方。本研究中，欲從熱成像中判斷其偵測之缺陷尺寸和真實尺寸的差異，並得出各個測距下量測之尺寸誤差，故須考量到溫度擴散現象。

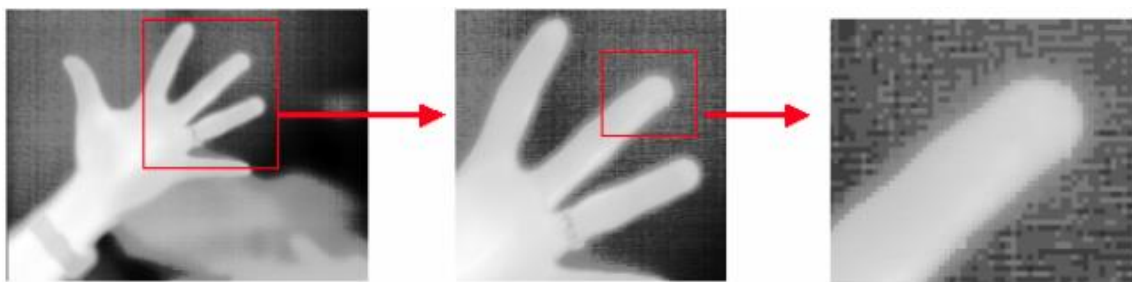


圖 2-9 溫度擴散現象之局部放大圖

資料來源：陳宇欣，2005

## 2.4 紅外線熱成像檢測

紅外線熱成像(IRT)是一種基於收集幅射表面溫度的技術，並將該溫度測量值轉換為視覺圖像，其在拍攝時並不會損壞到欲測物之結構性能和組織，故被歸類

於非破壞檢測(Nondestructive-Testing, NDT)。過去十年中，雷達、超聲波和衝擊回波等先進非破壞檢測(NDT)方法已可用於混凝土和磚石結構，並可用於評估現有結構，然而這些技術在計算 0 公分至 10 公分之間的近地表區域，仍會數據不足，因此需要使用紅外線熱成像去彌補之(Ch.Maierhofer et al., 2006)。紅外線熱成像檢測分為主動及被動紅外線熱成像，各有其優缺點，將於 2.4.1 與 2.4.2 說明。

#### 2.4.1 被動紅外線熱成像技術

本研究中，被動紅外線熱成像技術是指利用非人為之環境溫度變化或是太陽能以作為紅外線檢測之熱來源。此概念若是應用於混凝土橋梁檢測，會在熱成像中發現缺陷處溫度與周圍溫度不同。白天時，隨著溫度之升高，混凝土吸收熱量並開始發散輻射能，缺陷處會抵抗熱傳遞，並且會用相對於周圍完整處較快之速度升溫，因此缺陷處會顯示為熱區域於熱成像中；夜晚時，隨著溫度之降低，周圍完整處會以相對於缺陷處較低之速度散失熱量，因此缺陷處會顯示為冷區域於熱成像中(Washer et al., 2009)。見下圖 2-10，可清楚看出缺陷處之溫度與周圍溫度在白天與夜晚之關係。

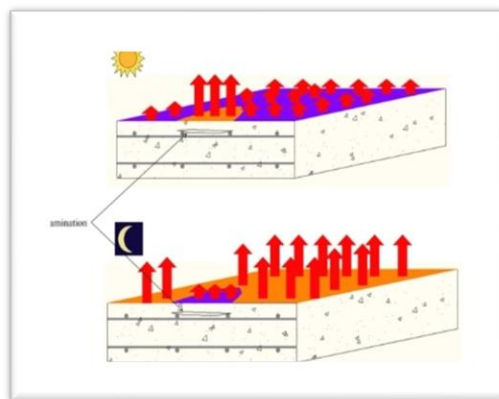



圖 2-10 混凝土在晝夜釋放之紅外線能量圖

資料來源：Washer et al., 2009



使用被動紅外線熱成像技術之優點為可檢測地下缺陷與分層、商業性、遙感偵測且易於蒐集資料和用圖像清楚說明，這些優點展現了使用此技術於定期橋檢帶來的好處(Ahlborn et al., 2012)。被動紅外線熱成像技術和主動紅外線熱成像技術比較的話，不需要額外準備加熱器，只需要一台紅外線熱像儀，其經費相對較低；使用被動紅外線熱成像技術之缺點則是需要考量到天氣因子，於天氣較差時，如下雨天，則無法進行此檢測技術。Washer et al.(2009)建議觀測時最好要在晴天，且持續曝曬於太陽光中能得到較好的成果。

#### 2.4.2 主動紅外線熱成像技術

主動紅外線熱成像技術主要是藉由外部加熱器(除了太陽或物體本身熱特性)進行加熱並測量，需要考量到瞬態傳熱現象，並將外部加熱器與物體發出的輻射能記錄下來，是和被動紅外線熱成像技術較為不同的地方。過程中，樣本是需先預熱使物體表面產生溫度梯度，並可在加熱或冷卻期間收集其紅外線熱成像(Khatereh Vaghefi, 2013)。

主動紅外線熱成像技術相比被動紅外線熱成像技術較不常被民用領域所應用。然而，Pollock et al. (2008) 研究了使用外部加熱器加熱預力混凝土之可能性。他考量了兩種方法運用在橋梁上，分別是將外部加熱器放置於預應力箱梁內部進行加熱與放置外部加熱器於升降車平台上對橋梁之橋箱樑下方進行加熱，這兩種方法皆顯示出檢測預應力樑之前景，然而成本和實行難度卻仍是需要再三考慮之因素。

使用主動紅外線熱成像技術之優點在於其容易收集數據、能夠儲存數據用以監測結構使用壽命期間之損傷成長過程(能夠更好地分配橋梁維修資金)以及不被天氣因子所限制，可以有更多允許的觀測時間，甚至使用此技術時，還可以觀測不受陽光直射之混凝土橋梁構件(大樑、橋面之底面) (Khatereh Vaghefi, 2013)。

然而，Hover et al. (2004) 提出雖然使用主動紅外線熱成像技術時不被天氣因子所限制，可以有更多允許的觀測時間，但是白天太陽光照射於橋面板上時，會干擾到現場獲得的結果，故此技術應用於橋梁檢測仍有其限制。



### 2.4.3 ASTM-D4788

美國材料和試驗協會國際組織(American Society for Testing and Materials, ASTM)是美國歷史最悠久且最具規模的非營利性標準學術團體之一，經過一個世紀之發展後，現有 33669 個會員，其出版之標準一直採用自願達成一致意見的制度。ASTM 標準的種類包含試驗方法、標準規範、標準規程、標準術語、標準指南以及標準分類，而本小節之 D4788 屬於試驗方法。

ASTM 美國材料和試驗協會國際組織(1997)發表了 D4788。D4788 是使用紅外線熱成像檢測橋面版的標準測試方法，詳註了其使用範圍、試驗方法、意義和用途、使用儀器、使用程序、顯示結果與繪圖以及精度和偏差等。在第 6 節使用程序中提及了若要識別熱成像中是否存在混凝土缺陷的關鍵，是檢測缺陷區域的溫度和相鄰區域溫度至少具  $0.5^{\circ}\text{C}$  之溫差，並將其作為本研究判別混凝土缺陷有無被熱成像偵測到的主要方法。另外，還提及到測量時，風速亦不能超過 50kph、不能再低於  $0^{\circ}\text{C}$  之環境進行量測和不能以超過 10mph 之速度蒐集數據等，然上述多項標準測試方法皆是由國外多項研究整理而出，本研究認為當此項測試方法用在臺灣時，因環境因素會有所不同，暫不引用。

### 2.4.4 過去之相關研究

國內外之研究方法、儀器、缺陷大小、缺陷形狀以及環境皆有所不同，每項因素皆會影響偵測結果。下表 2-5 為過去紅外線檢測混凝土缺陷之相關研究彙整表(J. H. A. Rocha et al., 2017)。



表 2-5 過去紅外線熱成像檢測混凝土缺陷之相關研究彙整表

作者	缺陷深度(cm)	缺陷面積(cm <sup>2</sup> )	偵測	建議觀測時間與方法
Sakagami and Kubo (2002)	2-3-5	10×10	是	主動紅外線熱成像
	10	10×10	否	
Maierhofer et al. (2006)	2-4-6-8	20×20	是	主動紅外線熱成像
	2-4-6-8	10×10	是	
Meola (2007)	1.5~7	12.5~78.5	是	主動紅外線熱成像
Abdel-Qader et al. (2007)	2.54~7	19.35~103	是	主動紅外線熱成像
	8.9~10.16	14.5~103	否	
Yehia et al. (2007)	1.9-2.5-5.1	3.8×3.8~10.3×10.2	是	10 a.m.~3 p.m.
	5.6-10.1	3.8×3.8~10.3×20.2	否	無缺陷可見
Cheng, Cheng and Chiang (2008)	0.5-1-1.5-2-3	10×10	是	主動紅外線熱成像
		5×5	是	
Washer, Fenwick and Bolleni (2009)	5.1	30×30	是	5~7 小時*
	7.6	30×30	是	7~9 小時*
Washer, Fenwick and Bolleni (2010)	2.5	30×30	是	5 小時又 40 分鐘*
	12.7	30×30	是	9 小時以上*
Washer (2012)	2.5	30×30	否	1 小時*
	5.1	30×30	否	1 小時 30 分鐘*
	7.6	30×30	否	2 小時*
Kee et al. (2012)	6.35	30.5×30.5	是	45 分鐘
		61×30.5	是	3 小時 45 分鐘*
		61×61	是	7 小時 45 分鐘*
Gucunski et al. (2013)	6.35	30.5×30.5 - 61×30.5 - 61×61	是	40 分鐘*
			否	中午
Vaguefi et al. (2015)	5.1-7.6	真實分層	是	中午
Watase et al. (2015)	1-2-3	30×30	是	中午
		30×30	是	午夜
Alfredo-Cruz et al. (2015)	2.5-5.0-7.5	15×15	是	8 a.m.~11 p.m.
Hiasa et al. (2016)	1.27-2.54-5.08	10.2×10.2	是	夜晚
	7.62	10.2×10.2	否	無缺陷可見

\*太陽升起以後

資料來源：J. H. A. Rocha et al.，2017 及本研究整理

高鵬雅(2020)研究使用無人機搭載紅外線熱像儀於混凝土橋梁檢測，使用之實驗室試體是以放射率相近之陶瓷代替混凝土。研究結果顯示其進行受損辨識時，使用溫度數值效果會比直接使用熱影像來的好，且對於表面未受損而內部已剝離的情形有一定的檢測能力。林喻峰等人(2014)應用紅外線熱像儀檢測混凝土內部裂縫深度，他們運用熱傳導試驗來推定其熱傳導係數，並以此熱傳導係數作為紅外線熱成像分析評估混凝土內部裂縫深度之依據。研究結果顯示水膠比較小之混凝土其熱傳導係數相對較大，且試體表面之溫度變化雖與瑕疵深度呈正比，但並非單純線性關係。

綜觀上述，提供了過去研究不同的試體尺寸以及多種建議方法，實為本研究之研究方法參考。而使用儀器方面，過去國內外之研究皆使用較高規格、較高售價之紅外線熱像儀，可參見下表 2-6，熱解析度皆為 320×240 以上且熱靈敏度多為 20mK~80mK 之規格，而根據表 2-4 熱像儀成像品質，熱靈敏度 20mK 為特優等級。

表 2-6 過去紅外線熱成像檢測混凝土缺陷的相關研究使用之紅外線熱像儀

儀器	熱解析度	熱靈敏度	價格(美金)
ThermaCam SC3000	320×240	20mK	\$6495
ThermaCam SC640	320×240	30mK	\$5500
FLIR S65	320×240	80mK	\$4800
FLIR SC5600M	640×512	20mK	>\$6495
T420	320×240	45mK	>\$6495
T650sc	640×480	35mK	>\$6495
NEC-TH7102	320×240	80mK	>\$5000

資料來源：彙整各設備官網資料

## 2.5 小結



總結上述文獻資料，可以整理出以下幾個要點：

1. AI 影像辨識混凝土缺陷時，難以檢測具有複雜形狀或低對比度之裂縫、具干擾裂縫辨識的影像資料會產生誤判情形且存在誤差。
2. 根據溫度擴散現象，紅外線熱成像中的物體尺寸會和真實物體尺寸有誤差，因此本研究將探討設備會造成的尺寸誤差。
3. 採被動或主動紅外線熱成像檢測技術皆可偵測混凝土有無缺陷，而本研究將採用被動紅外線熱成像技術，且會採用 ASTM-D4788 中提及缺陷溫度必須和相鄰區域溫度有至少  $0.5^{\circ}\text{C}$  之溫差，作為判斷有無混凝土缺陷之依據。
4. 與過去文獻不同之處，國內外多筆研究之紅外線熱像儀皆採用較高規格之設備且價格昂貴，本研究則採用低規格低價錢之設備，以探討偵測混凝土表面缺陷之可行性。

## Chapter 3 設備介紹與實驗規劃



### 3.1 使用設備

本研究依照實驗方法，主要採購物品有以下：紅外線熱像儀 FLIR E5、模板、水泥、粗細骨材、測距儀、直尺、紅外線溫度計、藍白帆布、磁磚、米袋、布手套、塑膠手套、珍珠板、封箱膠帶、推車等。

使用之測距儀型號為 UNI-T LM80，是用來確保熱像儀與被測物量測距離和傾角，見表 3-1；紅外線溫度計是用來測量試體各個時間之表面溫度，其型號採用 TECPEL-DIT300B，見表 3-2。

表 3-1 測距儀之產品規格

產品規格	內容
製造商	UNI-T
儀表類型	測距儀
使用的顯示屏類型	TN 2"
測量範圍	80m
測量分辨率	0.001m
主體直徑	122×52×29.5mm
測量單位	ft, in, m
測量	表面積
儀表種類	激光
存儲的測量結果數量	20
測量精準度	±2mm

資料來源 :Electronic Components，2023。



表 3-2 紅外線溫度計之量測規範

量測規範	內容
溫度範圍	-32~400°C
單位	°C/°F
精準度	±2%或+2°C
解析度	0.1
距離比(D/S Ratio)	12:1
反應時間	0.5 秒

資料來源：TECPEL 官網，2023。

本研究使用之紅外線熱像儀，參考了前述多筆研究，且考慮研究目的為欲使用較低規格、較低價錢之機型進行測量。進行多方訪價參考後，最後決定採用 FLIR E5，依照表 2-4，重要之規格參數熱解析度為 120×90 以及熱靈敏度為 100mK，故成像品質稍低於 80mK 的品質普通，價格約為五萬台幣，見下表 3-3。

表 3-3 FLIR E5 紅外線熱像儀產品規格表

產品規格	內容
紅外線感測器像素	120×90
MSX 像素	320×240
熱靈敏度	<0.10°C
鏡頭視野	45°×34°
對焦	定焦
影像更新頻率	9Hz
價格	約\$50000(NTD)
產品圖片	

資料來源：良興購物網，2023。

## 3.2 軟體介紹

本研究使用之軟體 FLIR tools 為 FLIR 開發之免費軟體，可於官網免費下載，亦可付費升級進階版本 FLIR tools+，兩版本皆可快速匯入熱成像、進行點線面和等溫線的溫度測量、測量溫度差、調整影像參數、繪圖資料匯出至 Excel 和將影像匯出為.csv 格式等，詳細功能可參照下表 3-4。本研究僅需要使用影像點線面溫度分析及溫度值匯出之功能。本軟體介面與基本功能操作步驟如下：

1. 首先將拍攝之影像匯入至 FLIR tools 後，於主頁面(圖 3-1)左側可看到匯入之資料夾，中間則為影像之縮圖，右側可進行影像預覽。
2. 滑鼠雙擊影像後，可進入編輯頁面(圖 3-2)，左側可使用量測工具列，包含點、線、面溫度分析功能；右側為影像相關資訊，包含量測溫度資訊、拍攝時間、相機規格、放射率、反射溫度、座標等；左上角則可以更改在多種不同的影像模式中操作，像是 MSX(多光譜動態成像)、紅外線、畫中畫(PiP)、紅外線混合以及數位熱像儀等。除此之外，於影像上點擊右鍵可將每個像素之溫度值匯出為.csv 檔，可使用 excel(圖 3-3)或 matlab 等外部軟體開啟，進行分析。

表 3-4 FLIR Tools/Tools+ 功能比較表

功能	FLIR Tools	FLIR Tools+
使用 USB 匯入影像	V	V
手動創建 IR 影像/可見光影像群組	V	V
點、線、面和等溫線測量溫度	V	V
測量溫度差	V	V
調整影像參數	V	V
查看即時影像	V	V
從即時影像中儲存熱圖像	V	V
錄製影片序列(.seq)		V
重新播放錄製的序列		V
將錄製的序列匯出為(.avi)		V
建立時間繪圖	V	V
將繪圖資料匯出至 Excel	V	V
將影像匯出為.csv 格式	V	V
建立全景影像		V
建立 PDF 報告	V	V
建立 Microsoft Word 報告		V
為熱像儀建立文字註解範本	V	V
新增/編輯文字註解與影像描述	V	V
聆聽紅外線影像語音註解	V	V

資料來源：FLIR Tools 官網，2023。

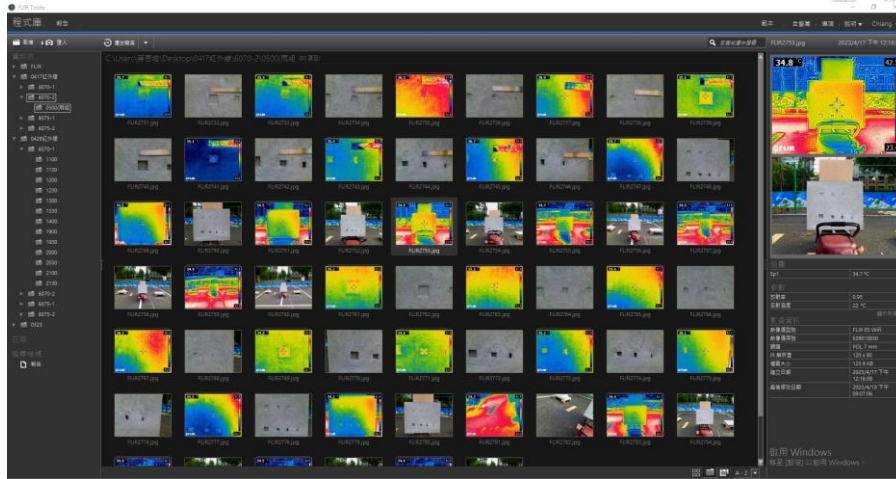
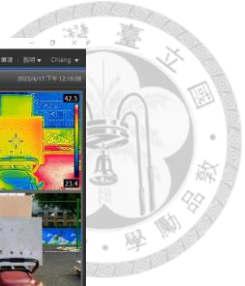


圖 3-1 FLIR tools/tools+ 軟體主頁面示意圖

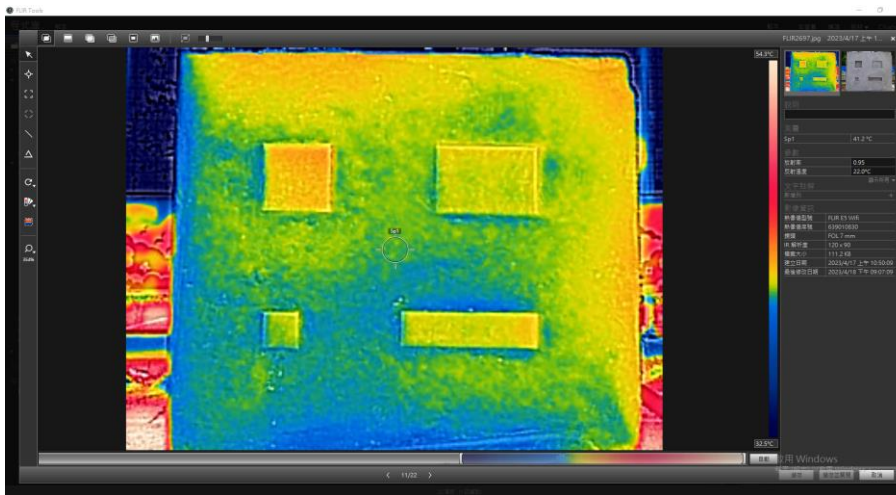


圖 3-2 編輯影像之頁面示意圖

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	檔案	CUUser\網通樓\Desktop\0438\工作目錄\070-U113\FLIR2303.jpg																								
2	2																									
3	3																									
4	4																									
5	5																									
6	6																									
7	7																									
8	8																									
9	9																									
10	10																									
11	11																									
12	12																									
13	13																									
14	14																									
15	15																									
16	16																									
17	17																									
18	18																									
19	19																									
20	20																									
21	21																									
22	22																									
23	23																									
24	24																									
25	25																									
26	26																									
27	27																									
28	28																									
29	29																									
30	30																									
31	31																									
32	32																									
33	33																									
34	34																									
35	35																									

圖 3-3 FLIR tools 影像溫度值匯出於 excel 之示意圖





### 3.3 試體製作

本研究之混凝土試體參考臺灣實際混凝土橋梁設計強度  $350\text{kgf/cm}^2$  來製作。試體製作時，因考量到拌合的工作性，故提高其設計強度，採用水灰比為 0.55，養護天數 14 天，得設計強度  $386.4\text{kgf/cm}^2$ ，可參照下表 3-5 (王映捷，2021)。

表 3-5 普通混凝土之各齡期強度(單位： $\text{kgf/cm}^2$ )

水灰比	3 天	7 天	14 天	28 天	56 天	91 天	180 天
0.38	332.0	446.1	528.4	569.0	581.4	629.2	689.9
0.42	310.4	396.0	449.3	507.5	520.8	501.3	563.8
0.46	259.0	365.3	437.0	482.0	505.9	521.8	544.8
0.50	285.1	335.8	407.1	435.4	477.6	504.7	534.0
0.55	271.1	329.1	386.4	417.8	426.0	477.3	494.6
0.59	198.8	263.1	295.5	344.5	375.9	392.2	417.9
0.61	186.8	236.1	268.9	315.7	359.0	369.7	381.4

資料來源：王映捷，2021

本研究製作之混凝土試體尺寸大小為  $60 \times 70 (\text{cm}^2)$ ，厚度為  $10 (\text{cm})$ ，缺陷尺寸會依據實驗階段有所不同，其模板組立可參見圖 3-4。混凝土配比採用水灰比 0.55，經計算過後得知需要備料水泥 18.9kg、水 11.1kg、大陸砂 29.9kg、三分石 41.2kg(見表 3-6)。備料時，使用米袋，並將各材料秤重分裝，見圖 3-5 與圖 3-6。缺陷部分則使用珍珠板(圖 3-7 與圖 3-8)，尺寸則會依據實驗階段有所不同，待拌合及灌漿(見圖 3-9)完成後再將其從試體表面取出。

表 3-6 混凝土配比計算表(普通混凝土體積  $0.042\text{m}^3$ ，水灰比 0.55 所需材料)

材料名稱	水泥	水	台灣砂	大陸砂	三分石
設計配比 ( $\text{kg/m}^3$ )	450	248	0	720	990
含水量回饋(kg) 拌合需求材料	18.9	11.1	0	29.9	41.2



圖 3-4 模板組立示意圖



圖 3-5 拌合混凝土備料過程



圖 3-6 所需材料秤重

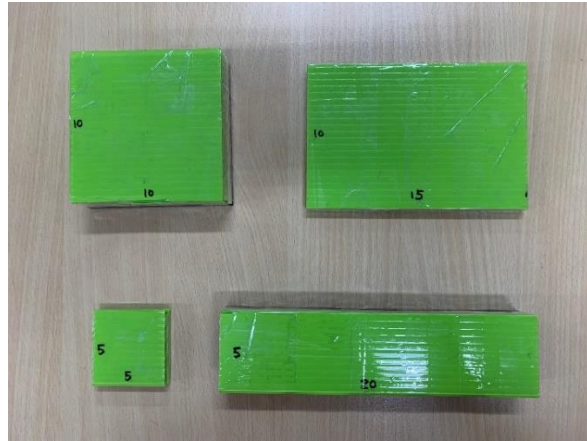


圖 3-7 缺陷之珍珠板示意圖 1



圖 3-8 缺陷之珍珠板示意圖 2



圖 3-9 拌合與灌漿



### 3.4 小結

一、本研究實驗之第一組試體大小為  $60 \times 70(\text{cm}^2)$  厚度為  $10(\text{cm})$ ，其製作方式參照 3.3 節。試體設計時，考量 Khatereh Vaghefi (2013) 曾提及缺陷需與邊緣留下足夠的距離，於缺陷和邊界留下了至少 15 公分之距離。第一組缺陷尺寸設計了四組不同的大小、深度(圖 3-10)，分別為以下：

1. 缺陷號碼 1 之面積為  $10 \times 10(\text{cm}^2)$  厚度為  $3(\text{cm})$ 。
2. 缺陷號碼 2 之面積為  $15 \times 10(\text{cm}^2)$  厚度為  $1(\text{cm})$ 。
3. 缺陷號碼 3 之面積為  $5 \times 5(\text{cm}^2)$  厚度為  $1(\text{cm})$ 。
4. 缺陷號碼 4 之面積為  $20 \times 5(\text{cm}^2)$  厚度為  $3(\text{cm})$ 。

圖 3-11 為第一組試體按照設計圖製作完成之照片。

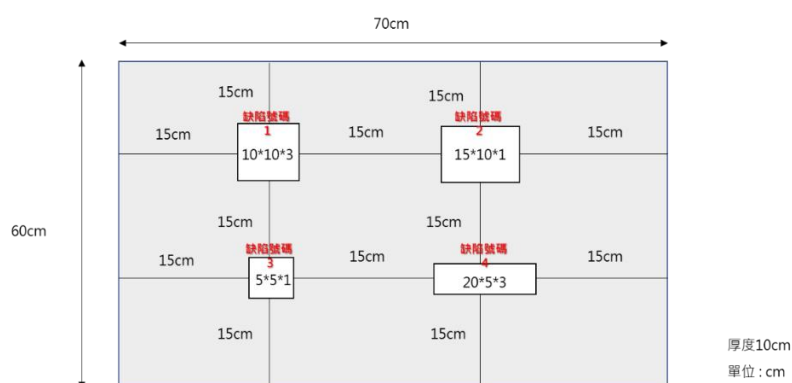


圖 3-10 第一組試體設計平面圖

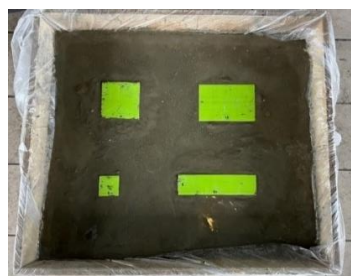


圖 3-11 第一組試體

二、後續階段試體將俟前階段試體實驗分析結果設計之。

## Chapter 4 利用紅外線熱像儀應用於橋梁表面缺陷之

### 實驗與分析



本研究之實驗室研究會包含三個實驗階段，在設計實驗方法時，參考了前述文獻回顧多項研究，其中在選用被動紅外線熱成像技術與主動紅外線熱成像技術時，考量到於真實橋梁中，要架設一外部熱來源，實屬困難且花費高，亦違本研究之動機，節省進行橋檢所需大量經費與開銷，故本研究將採用被動紅外線熱成像檢測技術，並將製作之試體平躺放置於無陰影且太陽直射處。依據 2.4.3 小節，ASTM 之 D4788 測試方法所載，識別熱成像中是否存在混凝土缺陷的關鍵，是檢測缺陷區域的溫度和相鄰區域溫度至少具  $0.5^{\circ}\text{C}$  之溫差，並將其作為本研究判別混凝土缺陷有無被熱成像偵測到的主要方法。

數據分析主要分為 3 個部分：

1. 折線圖：用以判別試體在不同時間點，缺陷處溫度與周圍溫度在白天與夜晚之關係是否符合文獻所載。
2. 圓餅圖：規劃量測第一組試體後，以圓餅圖分析紅外線熱像儀偵測缺陷，受深度或面積之影響，何者更巨。並依上開結果，據以規劃第二組試體缺陷之設計。量測第二組試體後，以圓餅圖分析，找出本研究所使設備最適當之量測距離及可量測之缺陷尺寸大小範圍。
3. 直條圖：用以比較紅外線熱像儀與 AI 影像辨識技術偵測真假裂縫之辨識度及誤判率，據以研判較低規格之紅外線熱像儀輔助 AI 影像辨識技術的可行性。



## 4.1 第一階段實驗 – 剝落尺寸及量測距離

### 4.1.1 實驗方法

欲探討缺陷深度或面積影響熱成像量測結果之相對程度，故第一階段主要目的為找出本研究所使用之設備 FLIR E5 之適合的量測缺陷尺寸、適合量測之距離以及該設備造成之尺寸誤差。進行拍攝時，會將混凝土試體立起，並使用紅外線熱像儀 FLIR E5 進行每半小時乙組之拍攝(見圖 4-1)，在進行紅外線熱成像拍攝時，會按照第 2.3.2 小節提及之放射率，將紅外線熱像儀的放射率參數更改為 0.95，為乾的混凝土之放射率。Washer et al (2009)提及拍攝試體之熱成像時，最好與之保持相機與試體垂直之角度，故拍攝時熱像儀會以測距儀 UNI-T LM80 確保其是垂直於試體本身，並且會使用紅外線溫度計 TECPEL-DIT300B 測量其試體之表面溫度(圖 4-2)。



圖 4-1 使用被動紅外線熱成像技術量測試體示意圖



圖 4-2 量測試體之表面溫度示意圖

第一階段之實驗時，每半小時拍攝之乙組會包含五個測距(1m、2m、3m、4m、5m)，試體拍攝時段為 11:00 a.m. 至 2:00 p.m. 和 7:00 p.m. 至 9:30 p.m.。

第一階段試體缺陷為模擬混凝土剝落之設計，其熱成像取得溫度數據方式會採用 FLIR tools，取得缺陷平均溫度值( $T_i$ )與缺陷周圍平均溫度值( $T_s$ )，步驟如下：

1. 將欲測之影像匯入 FLIR tools(以下使用缺陷號碼 1 作為演練)，雙擊影像點開後進入操作介面，並將影像模式調成數位熱像儀(可見光圖像)。
2. 於數位熱像儀影像模式中之可見光圖像將欲測量之缺陷利用面之溫度測量功能框選，便可獲得該缺陷之缺陷平均溫度值，以下使用第一組試體之缺陷號碼 1 作為演練(見圖 4-3)，可得缺陷號碼 1(Bx1)之平均溫度值( $T_1$ )為 42.5°C。



圖 4-3 於可見光影像選取缺陷溫度值之範例

3. 以本範例來說，框取之缺陷上顯示之  $40 \times 40$  (圖 4-4 與圖 4-5)，單位為像素，表示框取範圍內含了 1600 個溫度值，若將  $40 \times 40$  (像素) 與其缺陷真實尺寸  $10 \times 10 (\text{cm}^2)$  可得其 4:1 之比例。因此本研究皆以缺陷分布處外推 3 公分定義為該缺陷之周圍 (圖 4-6)，意即真實尺寸為  $16 \times 16 (\text{cm}^2)$ ，FLIR tools 尺寸為  $64 \times 64$  (像素)，以本範例來說，框取完畢後便可得  $64 \times 64$  (像素) 內之整體平均溫度 ( $T_A$ ) 為  $41.9^\circ\text{C}$  (圖 4-6 畫面上之 Bx2)。

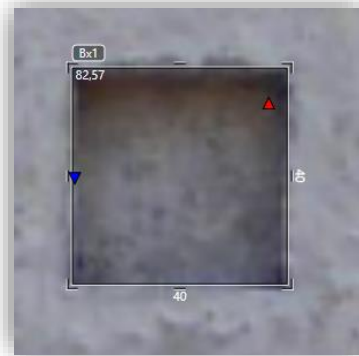


圖 4-4 數位熱像儀影像模式中框取缺陷示意圖



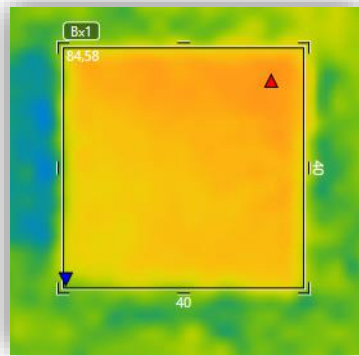


圖 4-5 紅外線影像模式中框取缺陷示意圖

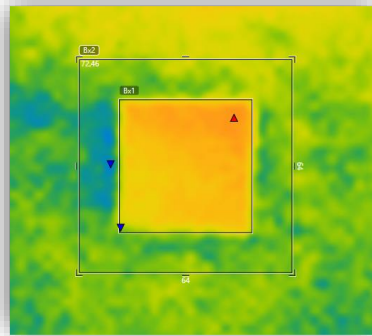


圖 4-6 紅外線影像模式中框取周圍示意圖

4. 然而，步驟 3 框取之  $64 \times 64$  (像素) 內之整體平均溫度值 ( $T_A$ ) 包含了缺陷本身之溫度，應將其扣除，才是本研究需要之缺陷周圍平均溫度 ( $T_S$ )，故藉由以下公式

(4-1):

$$T_S = \frac{T_A \times A_t - \sum_{i=1}^n T_i \times A_i}{A_t - \sum_{i=1}^n A_i} \quad (4-1)$$

$T_S$  : 缺陷周圍平均溫度(°C)

$T_A$  : 整體平均溫度(°C)

$T_i$  : 缺陷平均溫度(°C)

$A_t$  : 整體面積(像素)



$A_i$ : 缺陷分區框取面積(像素)

$i$ : 缺陷分區框取數量

可獲得缺陷周圍平均溫度( $T_s$ )為  $41.52^{\circ}\text{C}$ ，按照本研究採用之缺陷判斷方式，若要識別熱成像中有無混凝土缺陷，其缺陷溫度必須和相鄰區域溫度有至少  $0.5^{\circ}\text{C}$  之溫差，本範例演練之缺陷號碼 1 平均溫度( $T_1$ )減去缺陷周圍平均溫度( $T_s$ )意即溫度差異值( $\Delta_T$ )等於  $0.98^{\circ}\text{C}$ ，其值大於等於  $0.5^{\circ}\text{C}$ ，故可得知本範例之缺陷號碼 1 成功被偵測為缺陷。

$$\Delta_T = T_1 - T_s = 0.98 \geq 0.5 (^{\circ}\text{C}) \quad (4-2)$$

#### 4.1.2 實驗一 – 探討剝落尺寸影響量測程度

##### 折線圖分析

第一組試體於 11:00 a.m. 至 2:00 p.m. 和 7:00 p.m. 至 9:30 p.m. 每半小時一組 (五個量測距離) 共 13 組之拍攝後(熱成像圖詳如附錄 A)，將 13 組實驗數據經過上述方式計算後，再以 excel 彙整，其項目包含時間、環境溫度、表面溫度、測距、缺陷號碼、試體真實尺寸、缺陷溫度、整體溫度、周圍溫度、差異值溫度、尺寸誤差、偵測與否等(圖 4-7)。

60*70-1																	
時間	環境溫度	表面溫度	測距	缺陷號碼	試體真實尺寸(cm)			面積	缺陷溫度	整體溫度	周圍溫度	差異值溫度	溫度絕對值	可見光(pixels)		尺寸誤差(%)	偵測
					長	寬	深度							長	寬		
1100	29	41	1	1	10	10	3	100	39.2	39.1	39.03	0.17	0.2	40	40		
			1	2	15	10	1	150	38.2	38.1	38.02	0.18	0.2	58	40		
			1	3	5	5	1	25	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0	24	24		
			1	4	20	5	3	100	38.4	38.6	38.72	-0.32	0.3	87	21		
			2	1	10	10	3	100	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0	24	24		
			2	2	15	10	1	150	38.2	38	37.80	0.40	0.4	35	24		
			2	3	5	5	1	25	39.4	39.4	39.40	0.00	0.0	12	12		
			2	4	20	5	3	100	38.6	38.9	39.10	-0.50	0.5	47	12	3	y
			3	1	10	10	3	100	39.3	39.1	38.93	0.37	0.4	16	16		
			3	2	15	10	1	150	37.9	37.8	37.70	0.20	0.2	25	15		
			3	3	5	5	1	25	39.5	39.5	39.50	0.00	0.0	8	8		
			3	4	20	5	3	100	38.7	38.6	38.53	0.17	0.2	32	8		
			4	1	10	10	3	100	39.2	39.1	39.02	0.18	0.2	12	12		
			4	2	15	10	1	150	37.8	37.7	37.60	0.20	0.2	18	12		
			4	3	5	5	1	25	39.3	39	38.90	0.40	0.4	6	6		
			4	4	20	5	3	100	38.7	38.7	38.70	0.00	0.0	24	6		
			5	1	10	10	3	100	39.2	39.1	39.01	0.19	0.2	11	11		
			5	2	15	10	1	150	37.9	37.9	37.90	0.00	0.0	15	9		
			5	3	5	5	1	25	39.2	39.2	39.20	0.00	0.0	5	5		
			5	4	20	5	3	100	38.6	38.7	38.77	-0.17	0.2	20	5		

圖 4-7 第一組試體 Excel 數據彙整示意圖

依照 Excel 彙整之結果(詳如附錄 B)整理出縱軸為溫度(°C)，橫軸為時間之折線圖，並且有四個比較值，分別是缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度，總共 40 張折線圖。圖 4-8 與圖 4-9 分別為第一組試體缺陷號碼 1 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖和第一組試體之缺陷號碼 1 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖，說明了缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度於各個時段在測距一米時的溫度值，從下二圖中可以看出四條溫度線在白天與晚上走勢皆相近，缺陷溫度皆略大於等於周圍溫度，另外 38 張折線圖亦有相同結果(詳如附錄 C)。然而，晚上的缺陷溫度依據圖 2-10 所闡述的觀念「在夜晚時，隨著溫度之降低，周圍完整處會以相對於缺陷處較低之速度散失熱量，缺陷處之溫度會低於其周圍溫度。」本研究卻產生了不一樣的結果，雖非研究之範圍，但推測出其晚上缺陷溫度大於周圍溫度之可能原因如下：

1. 處在低光環境下，紅外線訊號薄弱，易造成失焦及多噪聲之現象。
2. 設備規格不夠。
3. 所在臺灣的環境與國外不同，臺灣之拍攝環境可能受地面熱輻射之影響。

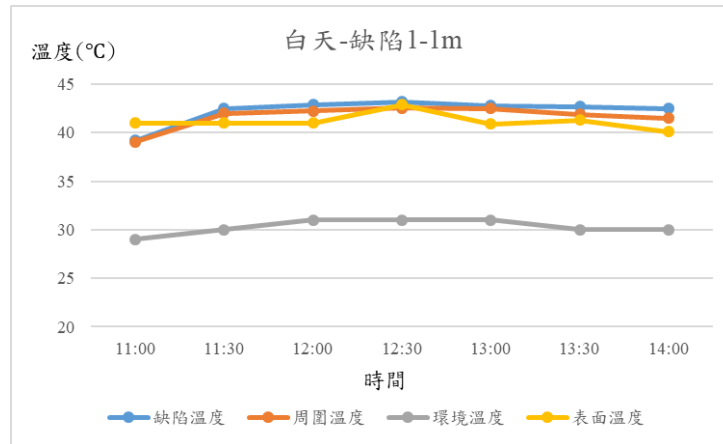


圖 4-8 第一組試體之缺陷號碼 1 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖

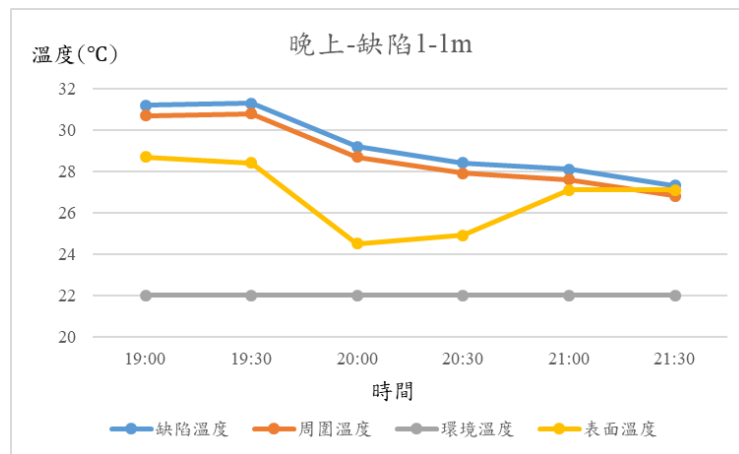


圖 4-9 第一組試體之缺陷號碼 1 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖

### 圓餅圖分析

下列五圖為本拍攝之結果彙整出各個測距下不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖，可以發現在測距為 1 米至 3 米時，各缺陷以缺陷號碼 1(尺寸為 10×10×3 立方公分)被偵測到的比例居上，其次為缺陷號碼 4(尺寸為 20×5×3 立方公分)，兩者皆為四個缺陷中面積較大、深度較深尺寸之缺陷。圖 4-10 中，測距 1 米時，四種缺陷尺寸皆有被偵測到的比例存在，然而在圖 4-11 中可看出於測距 2 米時，缺陷尺寸為 5×5×1 立方公分為四者中面積最小深度最淺之缺陷號碼 3(灰色區域)卻已經偵測不到。而測距 3 米至 5 米時，由圖 4-12、圖 4-13 及圖 4-14 中可看出僅

剩下缺陷號碼 1(尺寸為 10×10×3 立方公分)被偵測到，而缺陷號碼 2(尺寸為 15×10×1 立方公分)之面積比缺陷號碼 1 大，然而卻未被偵測到，爰此，可知深度影響偵測之結果。然而，缺陷號碼 4(尺寸為 20×5×3 立方公分)與缺陷號碼 1(尺寸為 10×10×3 立方公分)之尺寸面積皆為 100 平方公分，深度皆為 3 公分卻未被偵測到，判斷可能原因為其形狀不同，本研究不探討其原因，可作為後續研究發展。

綜觀以上圖表，可以得知缺陷尺寸深度影響偵測之結果，缺陷尺寸中面積大，但是深度不對依然偵測不到，故我們將設計第二組試體，欲找出由 FLIR E5 拍攝時，混凝土試體中的缺陷尺寸多小、多淺或多深會偵測不到，並試著找出量測尺寸邊界值。

測距1m可偵測總數	21				
缺陷號碼	1	2	3	4	總計
缺陷尺寸(cm)	10*10*3	15*10*1	5*5*1	20*5*3	
可偵測數	11	3	1	6	21
比例	52%	14%	5%	29%	100%

測距1m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

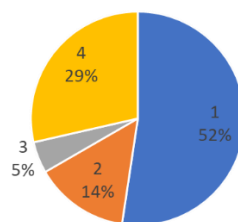


圖 4-10 測距 1m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖



測距2m可偵測總數	12				
缺陷號碼	1	2	3	4	總計
缺陷尺寸(cm)	10*10*3	15*10*1	5*5*1	20*5*3	
可偵測數	7	2	0	3	12
比例	58%	17%	0%	25%	100%

測距2m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

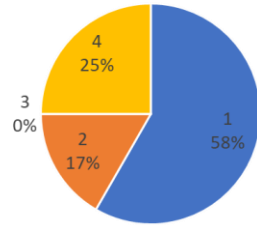


圖 4-11 測距 2m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

測距3m可偵測總數	1				
缺陷號碼	1	2	3	4	總計
缺陷尺寸(cm)	10*10*3	15*10*1	5*5*1	20*5*3	
可偵測數	1	0	0	0	1
比例	100%	0%	0%	0%	100%

測距3m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

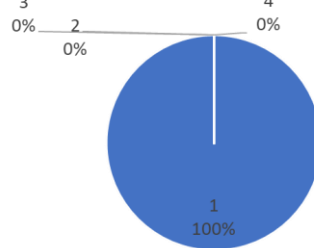


圖 4-12 測距 3m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

測距4m可偵測總數	2				
缺陷號碼	1	2	3	4	總計
缺陷尺寸(cm)	10*10*3	15*10*1	5*5*1	20*5*3	
可偵測數	2	0	0	0	2
比例	100%	0%	0%	0%	100%

測距4m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

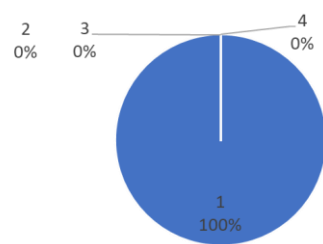


圖 4-13 測距 4m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖



測距5m可偵測總數	1				
缺陷號碼	1	2	3	4	總計
缺陷尺寸(cm)	10*10*3	15*10*1	5*5*1	20*5*3	
可偵測數	1	0	0	0	1
比例	100%	0%	0%	0%	100%

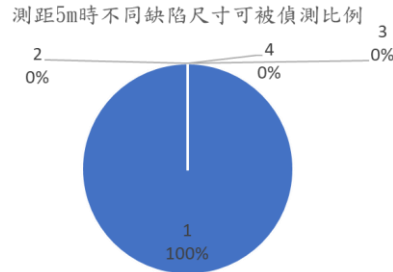


圖 4-14 測距 5m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

### 4.1.3 實驗二－探討適當量測距離與剝落尺寸

#### 試體規劃

本研究實驗之第二組試體大小為  $60 \times 70 (\text{cm}^2)$  厚度為  $10 (\text{cm})$ ，其製作方式參照 3.3 節。第二組試體缺陷設計為用來找出由 FLIR E5 拍攝時，混凝土試體中的缺陷尺寸多小、多淺或多深會偵測不到，故第二組缺陷尺寸設計了八組不同的大小、深度(見圖 4-17)。分別為以下：

1. 缺陷號碼 1 之面積為  $5 \times 5 (\text{cm}^2)$  厚度為  $0.5 (\text{cm})$ 。
2. 缺陷號碼 2 之面積為  $3 \times 3 (\text{cm}^2)$  厚度為  $0.5 (\text{cm})$ 。
3. 缺陷號碼 3 之面積為  $3 \times 1.5 (\text{cm}^2)$  厚度為  $0.5 (\text{cm})$ 。
4. 缺陷號碼 4 之面積為  $2 \times 0.5 (\text{cm}^2)$  厚度為  $0.5 (\text{cm})$ 。
5. 缺陷號碼 5 之面積為  $5 \times 5 (\text{cm}^2)$  厚度為  $3.5 (\text{cm})$ 。
6. 缺陷號碼 6 之面積為  $3 \times 3 (\text{cm}^2)$  厚度為  $3.5 (\text{cm})$ 。
7. 缺陷號碼 7 之面積為  $3 \times 1.5 (\text{cm}^2)$  厚度為  $3.5 (\text{cm})$ 。
8. 缺陷號碼 8 之面積為  $2 \times 0.5 (\text{cm}^2)$  厚度為  $3.5 (\text{cm})$ 。

圖 4-18 為第二組試體按照設計圖製作完成之照片。

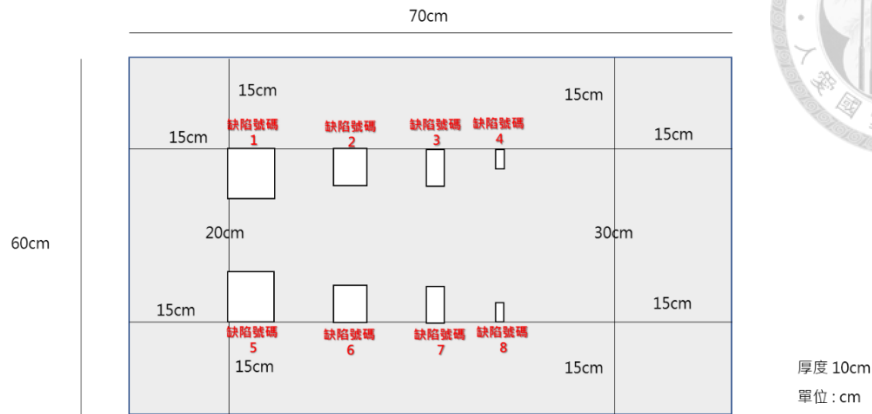


圖 4-15 第二組試體平面圖



圖 4-16 第二組試體

### 折線圖分析

第二組試體同樣於 11:00 a.m. 至 2:00 p.m. 和 7:00 p.m. 至 9:30 p.m. 每半小時一組(五個量測距離)共 13 組之拍攝後(熱成像圖詳如附錄 A)，將 13 組實驗數據經過上述方式計算後，再以 excel 彙整，其項目包含時間、環境溫度、表面溫度、測距、缺陷號碼、試體真實尺寸、缺陷溫度、整體溫度、周圍溫度、差異值溫度、尺寸誤差、偵測與否等(圖 4-17)。



60*70-2																			
時間	環境溫度	表面溫度	測距	缺陷號碼	試體真實尺寸(cm)			面積	缺陷溫度	整體溫度	周圍溫度	差異值溫度	溫度絕對值	可見光(pixels)		紅外線長	可見光長	尺寸誤差(%)	偵測
					長	寬	深度							長	寬				
1100	29		1	1	5	5	0.5	25	39.2	39.3	39.32	-0.12	0.1	18	18				
			1	2	3	3	0.5	9	38.3	38.4	38.41	-0.11	0.1	12	12				
			1	3	3	1.5	0.5	4.5	38.5	38.6	38.61	-0.11	0.1	12	6				
			1	4	2	0.5	0.5	1	39	39	39.00	0.00	0.0	11	2				
			1	5	5	5	3.5	25	39.5	40	40.11	-0.61	0.6	18	18	4.30	4.60	-6.52	y
			1	6	3	3	3.5	9	38.1	38.7	38.78	-0.67	0.7	12	12	2.50	2.90	-13.79	y
			1	7	3	1.5	3.5	4.5	37.6	38.3	38.35	-0.75	0.8	12	6	1.40	1.30	7.69	y
			1	8	2	0.5	3.5	1	38.5	38.7	38.71	-0.21	0.2	11	2				
			2	1	5	5	0.5	25	38.5	38.6	38.66	-0.16	0.2	18	18				
			2	2	3	3	0.5	9	37.6	37.7	37.73	-0.13	0.1	12	12				
			2	3	3	1.5	0.5	4.5	37.9	37.9	37.90	0.00	0.0	12	6				
			2	4	2	0.5	0.5	1	38.2	38.2	38.20	0.00	0.0	11	2				
			2	5	5	5	3.5	25	38.9	39.3	39.53	-0.62	0.6	18	18	4.40	4.50	-2.22	y
			2	6	3	3	3.5	9	37.6	38	38.13	-0.53	0.5	12	12	3.00	3.00	0.00	y
			2	7	3	1.5	3.5	4.5	37.4	37.7	37.76	-0.36	0.4	12	6				
			2	8	2	0.5	3.5	1	38.1	38.2	38.21	-0.11	0.1	11	2				
			3	1	5	5	0.5	25	38.9	39.1	39.28	-0.38	0.4	18	18				
			3	2	3	3	0.5	9	38.2	38.2	38.20	0.00	0.0	12	12				
			3	3	3	1.5	0.5	4.5	38.4	38.4	38.40	0.00	0.0	12	6				
			3	4	2	0.5	0.5	1	38.7	38.7	38.70	0.00	0.0	11	2				
			3	5	5	5	3.5	25	39.5	39.8	40.08	-0.58	0.6	18	18	4.30	4.00	7.50	y
			3	6	3	3	3.5	9	38.5	38.5	38.50	0.00	0.0	12	12				
			3	7	3	1.5	3.5	4.5	38.2	38.3	38.33	-0.13	0.1	12	6				
			3	8	2	0.5	3.5	1	38.6	38.7	38.72	-0.12	0.1	11	2				
			4	1	5	5	0.5	25	38.8	38.8	38.80	0.00	0.0	18	18				
			4	2	3	3	0.5	9	38.1	38.1	38.10	0.00	0.0	12	12				
			4	3	3	1.5	0.5	4.5	38.2	38.2	38.20	0.00	0.0	12	6				
			4	4	2	0.5	0.5	1	38.6	38.6	38.60	0.00	0.0	11	2				

圖 4-17 第二組試體 Excel 數據彙整示意圖

與第一組試體分析方法相同，依照 Excel 彙整之結果(詳如附錄 B)整理出縱軸為溫度(°C)，橫軸為時間之折線圖，並且有四個比較值，分別是缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度，總共 80 張折線圖。圖 4-18 和圖 4-19 分別為第二組試體缺陷號碼 1 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖和第二組試體之缺陷號碼 1 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖，說明了缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度於各個時段在測距一米時的溫度值，可看出四條溫度線在白天與晚上時的走勢相近，另外 78 張折線圖亦有相同走勢相近之結果(詳如附錄 C)。另外，從圖 4-18 和圖 4-19 中還可看出缺陷號碼 1 之缺陷溫度與周圍溫度之線近乎重疊，表示其兩者溫度並無明顯差異；而缺陷號碼 5 (圖 4-20 和圖 4-21)中的缺陷溫度與周圍溫度的線則分開的較為明顯，表示其兩者溫度差異值較缺陷號碼 1 大，可能被偵測到的較多，故接下來將探討其被偵測的比例，將繼續從下文之圓餅圖去做分析判斷。

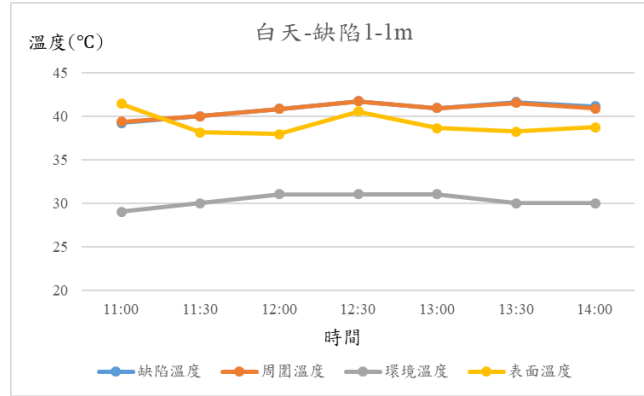


圖 4-18 第二組試體缺陷號碼 1 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖

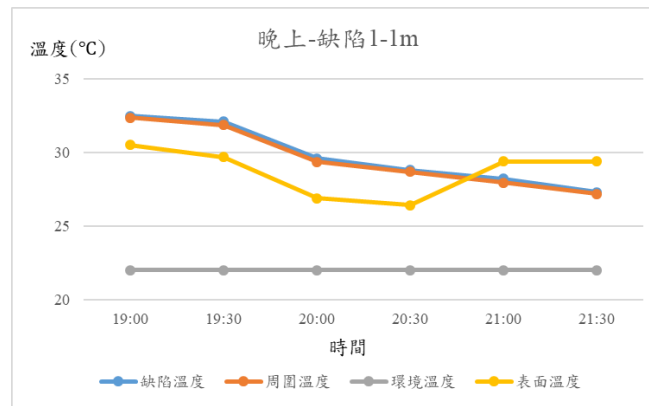


圖 4-19 第二組試體缺陷號碼 1 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖

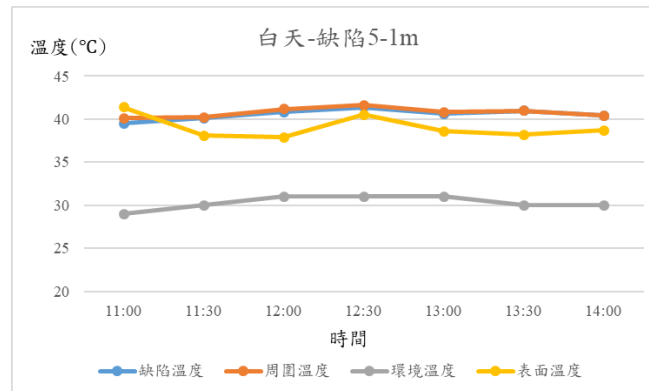


圖 4-20 第二組試體缺陷號碼 5 在 11:00 至 14:00 於測距一米時之折線圖

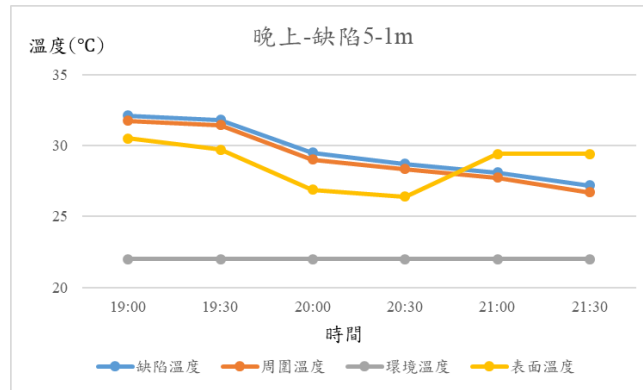


圖 4-21 第二組試體缺陷號碼 5 在 19:00 至 21:30 於測距一米時之折線圖

### 圓餅圖分析

下列五張圖為本拍攝之結果彙整出各個測距下不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖，由五張圖可發現缺陷深度為 0.5cm 的尺寸(缺陷號碼 1~4)是完全偵測不到的，可對應到上述圖 4-18 和圖 4-19，其缺陷溫度與周圍溫度的線近乎重疊。因此，與第一組試體實驗之結果比較可得知，缺陷深度低於 1 公分，FLIR E5 是不容易偵測到的。而圖上缺陷號碼 8(尺寸為 2×0.5×3.5 立方公分)雖然深度同缺陷號碼 5、6、7 皆為 3.5 公分，然而因面積太小為 1 立方公分，無法被偵測到，故在這樣的缺陷尺寸下，是不容易被 FLIR E5 偵測到的。在測距 2 米時，可從圖 4-23 發現缺陷號碼 7(尺寸為 3×1.5×3.5 立方公分)和缺陷號碼 8(尺寸為 2×0.5×3.5 立方公分)皆消失在圓餅圖上，故可知缺陷號碼 7(尺寸為 3×1.5×3.5 立方公分)在 2 米的距離，面積太小為 4.5 立方公分，是無法被 FLIR E5 偵測到的。而在測距 3 米和 4 米時，只剩下缺陷號碼 5(尺寸為 5×5×3.5 立方公分)，面積為 25 立方公分，能被偵測到了(圖 4-24 和圖 4-25)。在測距 5 米時，可以從圖 4-26 發現已經完全偵測不到所有缺陷了，因此從本研究找到了以這台 FLIR E5 的設備規格下，如此小的缺陷尺寸極端測距為 5 米。本設備較適當量測距離為 1 米至 2 米間。



測距1m可偵測總數	3								
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
缺陷尺寸(cm)	5*5*0.5	3*3*0.5	3*1.5*0.5	2*0.5*0.5	5*5*3.5	3*3*3.5	3*1.5*3.5	2*0.5*3.5	
可偵測數	0	0	0	0	1	1	1	0	3
比例	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	0%	100%

測距1m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

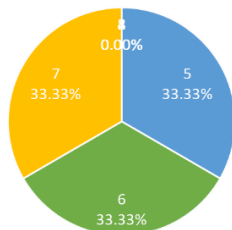


圖 4-22 測距 1m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

測距2m可偵測總數	2								
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
缺陷尺寸(cm)	5*5*0.5	3*3*0.5	3*1.5*0.5	2*0.5*0.5	5*5*3.5	3*3*3.5	3*1.5*3.5	2*0.5*3.5	
可偵測數	0	0	0	0	1	1	0	0	2
比例	0%	0%	0%	0%	50%	50%	0%	0%	100%

測距2m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

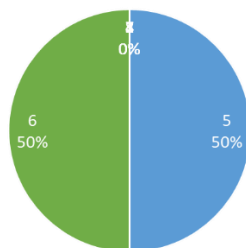


圖 4-23 測距 2m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

測距3m可偵測總數	1								
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
缺陷尺寸(cm)	5*5*0.5	3*3*0.5	3*1.5*0.5	2*0.5*0.5	5*5*3.5	3*3*3.5	3*1.5*3.5	2*0.5*3.5	
可偵測數	0	0	0	0	1	0	0	0	1
比例	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%

測距3m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

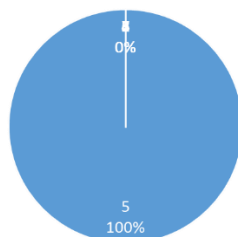


圖 4-24 測距 3m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

測距4m可偵測總數	1								
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
缺陷尺寸(cm)	5*5*0.5	3*3*0.5	3*1.5*0.5	2*0.5*0.5	5*5*3.5	3*3*3.5	3*1.5*3.5	2*0.5*3.5	
可偵測數	0	0	0	0	1	0	0	0	1
比例	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%

測距4m時不同缺陷尺寸可被偵測比例

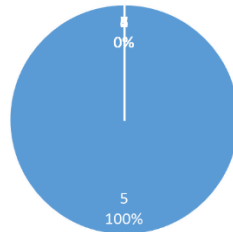


圖 4-25 測距 4m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

測距5m可偵測總數	0								
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
缺陷尺寸(cm)	5*5*0.5	3*3*0.5	3*1.5*0.5	2*0.5*0.5	5*5*3.5	3*3*3.5	3*1.5*3.5	2*0.5*3.5	
可偵測數	0	0	0	0	0	0	0	0	0
比例	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

測距5m時不同缺陷尺寸可被偵測比例



圖 4-26 測距 5m 時不同缺陷尺寸可被偵測比例之圓餅圖

#### 4.1.4 缺陷尺寸誤差統計

本研究使用 AutoCAD 將兩個試體各個測距下有被偵測到的缺陷尺寸於可見光圖與紅外線熱成像分別作尺寸丈量。測距 1 米有偵測到的缺陷共有 26 組，測距 2 米有偵測到的缺陷共有 17 組，測距 3 米有偵測到的缺陷共有 4 組，測距 4 米有偵測到的缺陷共有 4 組，測距 5 米有偵測到的缺陷共有 1 組。藉由以下缺陷尺寸誤差公式(4-3)得出表 4-1。由表 4-1 可發現測距在 3 米至 5 米時，其尺寸誤差平均值分別為 11.75%、13.84%與 13.21%皆已超過 10%，對於橋梁檢測實務上來說是較大的誤差，應不予採用。測距為 1 米和 2 米時，其誤差平均值為 2.94%和 5.61%，由此可知本設備較適當量測距離為 1 米至 2 米間。

$$\text{缺陷尺寸误差} = \frac{\text{红外线热成像测量长度} - \text{可见光图测量长度}}{\text{可见光图测量长度}} \times 100\%$$

(4-3)

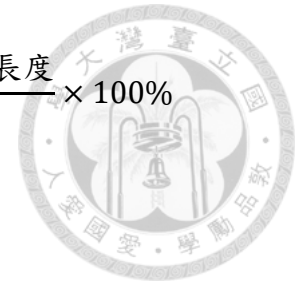


表 4-1 各测距下之尺寸误差平均值

测距(m)	1	2	3	4	5
误差平均(%)	2.94	5.61	11.75	13.84	13.21

綜觀以上圖表分析，可以得知在測距漸遠時，缺陷已經逐步偵測不到，且偵測到之誤差平均值亦不可觀，然而，橋梁檢測實務上之量測距離並不會這麼遠，並且對於前述深度較深、面積較大之缺陷尺寸，皆可在 2 米內被偵測到，故不影響將其應用於橋梁檢測實務。因此，本研究使用之設備，建議量測距離為 1 至 2 米，後續第二階段實驗方法將依照本階段之結果進行，然而，本階段之量測結果偵測率過低，考量為吸熱時間不足之因素，將於第二階段做調整，改良其偵測率。

#### 4.1.5 小結

第一階段實驗結果如下：

1. 缺陷的深度相對面積較易影響偵測結果，且深度低於 1 公分的尺寸較不易被本研究使用之紅外線熱像儀 FLIR E5 偵測到。
2. 深度 3.5cm 但面積小於 1cm<sup>2</sup> 之缺陷，不易被本研究設備偵測到。
3. 本研究使用之設備建議量測距離為 1 至 2 米，可偵測到的尺寸較多，量測之誤差平均值亦較小且低於 5%。
4. 本階段之實驗結果偵測率過低，研判為日照時間不足之因素，將於第二階段調整量測時間，以提高偵測率。



## 4.2 第二階段實驗 – 缺陷形狀與日照時間因子

### 4.2.1 實驗方法

因為真實橋梁剝落形狀並非單一形狀，故第二階段主要目的為利用製作含有不同形狀之缺陷的混凝土試體，去探討不同形狀之缺陷剝落能否同樣被 FLIR E5 偵測到。拍攝時，根據本研究第一階段實驗結果將測量時間更改為 3:00 p.m. 至 5:00 p.m.，每半小時量測乙組，而量測距離亦依照第一階段實驗結果的建議量測距離更改為 1 米和 2 米。

第一階段實驗須將試體立起來是因量測距離須至 5 米，然而本階段實驗的量測距離只需 1 米和 2 米，將改採於 A 字梯上向下垂直測量試體，其測量角度依然是利用測距儀 UNI-T LM80 確保紅外線像熱像儀 FLIR E5 垂直於試體，以得出最好的結果 (圖 4-27)，而第二階段實驗數據分析方式同第一階段實驗，詳參 4.1.1 小節。

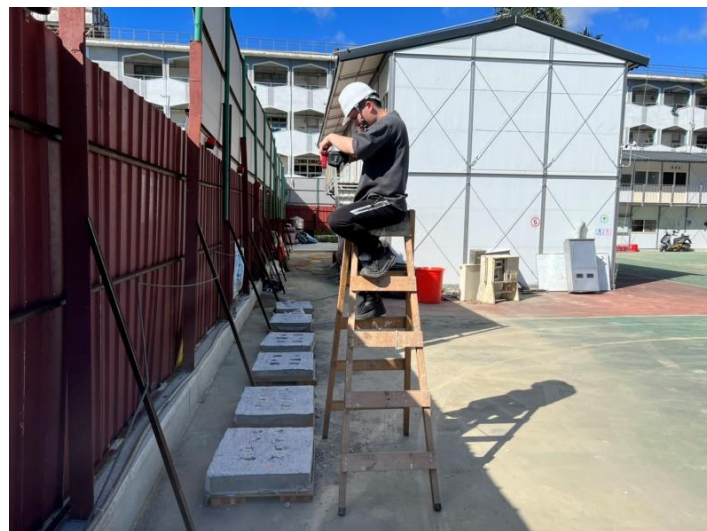


圖 4-27 第二階段實驗使用被動紅外線熱成像技術量測試體示意圖

## 試體規劃

本研究實驗之第三組試體大小為  $60 \times 70(\text{cm}^2)$  厚度為  $10(\text{cm})$ ，其製作方式參照 3.3 節。第三組試體缺陷設計為六種不同形狀、深度皆為 3.5 公分之剝落(圖 4-28)。

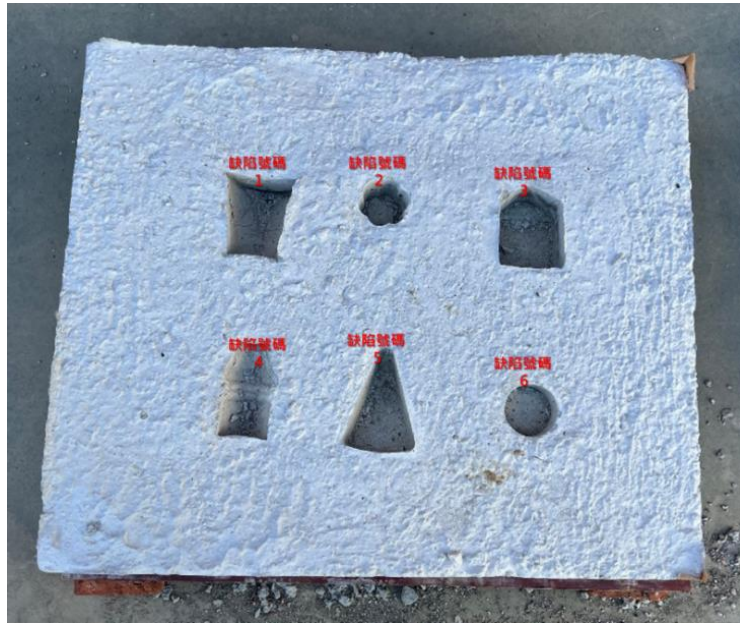


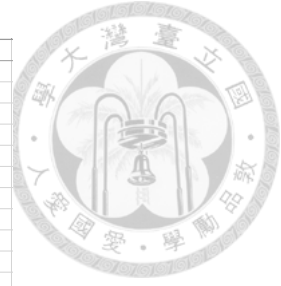
圖 4-28 第三組試體

## 4.2.2 實驗結果

### 折線圖分析

第三組試體於 3:00 p.m. 至 5:00 p.m. 每半小時一組(兩個量測距離)共 5 組之拍攝後(熱成像圖詳如附錄 A)，將 5 組實驗數據經過上述方式計算後，再以 excel 彙整，其項目包含時間、環境溫度、表面溫度、測距、缺陷號碼、缺陷溫度、整體溫度、周圍溫度、差異值溫度、偵測與否等(圖 4-29)。





60*70(不規則)												
時間	環境溫度	表面溫度	測距	缺陷號碼	缺陷溫度	整體溫度	周圍溫度	差異值溫度	溫度絕對值	偵測		
1500	31		1	1	39	38.4	38.14	0.86	0.9	y		
			1	2	38.9	38.6	38.59	0.31	0.3			
			1	3	38.6	38.4	38.24	0.36	0.4			
			1	4	40.1	39.5	39.17	0.93	0.9	y		
			1	5	40.4	39.7	39.36	1.04	1.0	y		
			1	6	40.2	39.7	39.45	0.75	0.7	y		
			2	1	39.5	39.2	39.02	0.48	0.5	y		
			2	2	39.3	39.2	39.14	0.16	0.2			
			2	3	39.2	39	38.87	0.33	0.3			
			2	4	40.6	40.2	39.96	0.64	0.6	y		
			2	5	40.8	40.4	40.16	0.64	0.6	y		
			2	6	40.6	40.2	40.06	0.54	0.5	y		
		1530	31		1	1	39.1	38.3	37.95	1.15	1.1	y
					1	2	39	38.5	38.48	0.52	0.5	y
	1			3	38.7	38.2	37.81	0.89	0.9	y		
	1			4	39.8	39.2	38.87	0.93	0.9	y		
	1			5	40.1	39.4	39.06	1.04	1.0	y		
	1			6	39.9	39.3	39.00	0.90	0.9	y		
	2			1	38.8	38.3	38.01	0.79	0.8	y		
	2			2	38.6	38.3	38.11	0.49	0.5	y		
	2			3	38.4	38.2	38.07	0.33	0.3			
	2			4	39.5	39.1	38.86	0.64	0.6	y		
	2			5	39.8	39.3	39.00	0.80	0.8	y		
	2			6	39.6	39.2	39.06	0.54	0.5	y		
1600	31				1	1	38.2	37.5	37.20	1.00	1.0	y
					1	2	38.3	37.8	37.78	0.52	0.5	y
			1	3	38	37.5	37.11	0.89	0.9	y		
			1	4	38.8	38.2	37.87	0.93	0.9	y		
			1	5	39.2	38.6	38.30	0.90	0.9	y		
			1	6	39.2	38.7	38.45	0.75	0.7	y		

圖 4-29 第三組試體 Excel 數據彙整示意圖

與第一階段分析方法相同，依照 Excel 彙整之結果(詳如附錄 B)整理出縱軸為溫度(°C)，橫軸為時間之折線圖，並且有四個比較值，分別是缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度，總共 12 張折線圖。圖 4-30 與圖 4-31 分別為第三組試體缺陷號碼 4 在 3:00 p.m. 至 5:00 p.m.於測距 1 米時之折線圖和第三組試體之缺陷號碼 4 在 3:00 p.m. 至 5:00 p.m.於測距 2 米時之折線圖，說明了缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度於各個時段在測距 1 米與 2 米時的溫度值，可看出四條溫度線不僅走勢相近，且缺陷溫度之線明顯高於周圍溫度之線，相比前一階段實驗結果，本階段實驗之缺陷處與周圍溫度差值較大，另外 10 張折線圖亦是如此(詳如附錄 C)。由此可見，本研究之設備 FLIR E5 於 15:00 至 17:00 使用被動紅外線熱成像技術進行量測，能得到較良好的結果，接下來將探討圓餅圖中，六個缺陷於測距 1 米及 2 米時可被偵測之比例，是否如折線圖般得到較好的結果。

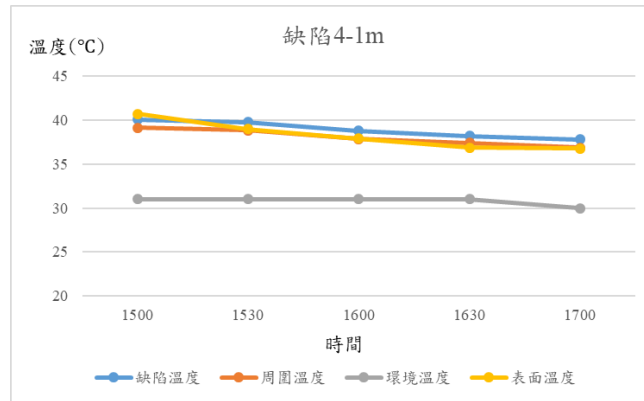


圖 4-30 第三組試體缺陷號碼 4 在 3:00 p.m. 至 5:00 p.m.於測距一米時之折線圖

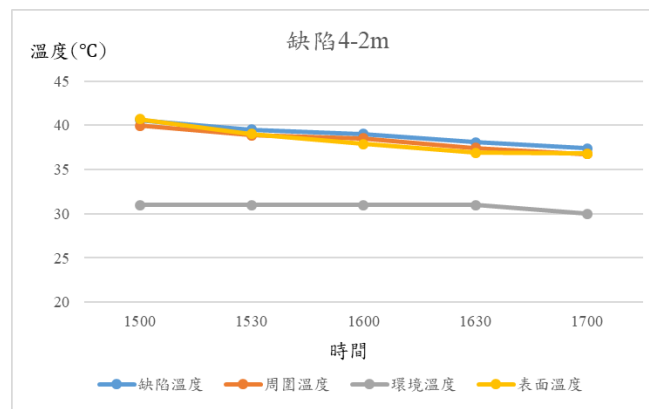


圖 4-31 第三組試體缺陷號碼 4 在 3:00 p.m. 至 5:00 p.m.於測距二米時之折線圖

### 圓餅圖分析

下列兩張圖為本拍攝之結果彙整出於測距 1 米與 2 米下不同缺陷形狀可被偵測比例之圓餅圖。

圖 4-32 可發現測距 1 米時之總測量數為 30 次之情況下，有 28 次是可以被偵測到，其可偵測數的比例相比前一階段實驗結果大幅提升為 93%；而六個缺陷之可被偵測比例非常相近分別為 17%、13%、13%、17%、17%、17%。

圖 4-33 可發現測距 2 米時之總測量數為 30 次之情況下，有 27 次是可以被偵測到，其可偵測數的比例相比前一階段實驗結果大幅提升為 90%；而六個缺陷之可被偵測比例非常相近分別為 17%、13%、10%、17%、17%、17%。

測距1m之總測量數	30						
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	總計
可偵測數	5	4	4	5	5	5	28
比例	17%	13%	13%	17%	17%	17%	93%



測距1m時不同缺陷形狀可被偵測比例

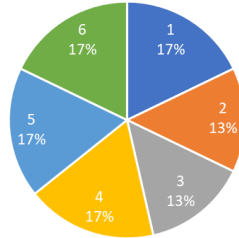


圖 4-32 測距 1m 時不同缺陷形狀可被偵測比例之圓餅圖

測距2m之總測量數	30						
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	總計
可偵測數	5	4	3	5	5	5	27
比例	17%	13%	10%	17%	17%	17%	90%

測距2m時不同缺陷形狀可被偵測比例

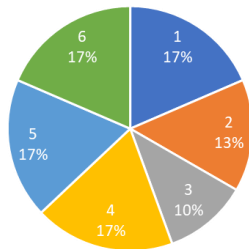


圖 4-33 測距 2m 時不同缺陷形狀可被偵測比例之圓餅圖

### 4.2.3 小結

第二階段的實驗結果如下:

1. 以本研究使用之熱像儀 FLIR E5 來說，由測距 1 米的可偵測數為 93%，測距 2 米的可偵測數為 90%，可知於 3:00 p.m. 至 5:00 p.m. 相較第一階段的 11:00 a.m. 至 2:00 p.m. 進行拍攝時，偵測率會大幅提升。
2. 本研究使用之熱像儀 FLIR E5 除了可以偵測矩形的缺陷，亦可偵測出不同形狀的缺陷，符合橋梁檢測實務應用。



## 4.3 第三階段實驗－紅外線熱像儀與 AI 影像辨識

### 4.3.1 實驗方法

本研究欲使用紅外線熱成像輔助 AI 影像辨識技術提高其精確度，故第三階段實驗加入 AI 影像辨識混凝土缺陷之模型 Deepcrack，並設計真假缺陷於混凝土試體，以了解兩者之偵測率及誤判率。

根據第一階段實驗結果建議量測距離為 1 至 2 米，本階段紅外線熱成像只探討量測距離為 1 米時之結果，測量時間為 3:00 p.m. 至 5:00 p.m.，每半小時量測乙組，其測量角度依然是利用測距儀 UNI-T LM80 確保紅外線熱像儀 FLIR E5 垂直於試體。本階段會先將兩組試體之紅外線熱成像數據做折線圖之比較，再將紅外線熱成像之偵測結果與 Deepcrack AI 影像辨識之偵測結果以直條圖比較偵測率與誤判率；以混淆矩陣比較不同方法的指標，其中 Deepcrack AI 影像辨識將會使用紅外線熱像儀 FLIR E5 以量測距離 1 米及 2 米拍攝的可見光圖，如圖 4-34。

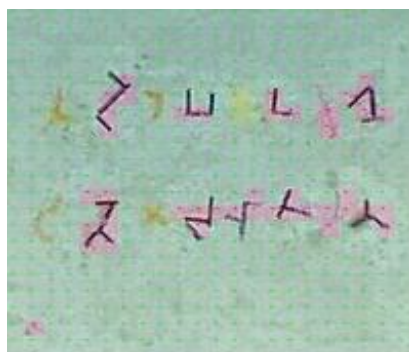


圖 4-34 利用 Deepcrack AI 影像辨識第四組試體測距兩米之可見光圖

本階段之紅外線熱成像取得溫度數據方式與 4.1.1 小節的方式相似，採以下方式(以第四組試體缺陷號碼 3 做說明)：

1. 將口字形分成三段框取，分別為 Bx1、Bx2 及 Bx3，其框取大小(單位為像素)分別為 13、16、13，溫度值分別是 39.2°C、39.4°C、39.2°C，而框取的周圍定

義與 4.1.1 小節相同，缺陷分布處向外推 3 公分定義為該缺陷之周圍，本範例 Bx4 即為 40×40(像素)，溫度值為 38.7°C。

2. 再將數值代入公式(4-1)，可得缺陷周圍平均溫度( $T_s$ )為 38.7°C，故溫度差異值( $\Delta_T$ )  $\geq 0.5$  (°C)，可得知本範例之缺陷成功被偵測。

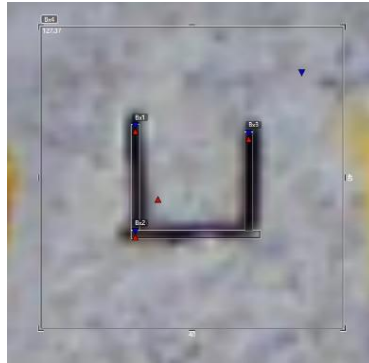


圖 4-35 第三階段實驗缺陷溫度與周圍溫度取得方式

### 試體規劃

本研究實驗之第四組試體與第五組試體大小皆為 60×70(cm<sup>2</sup>)厚度為 10(cm)，其製作方式參照 3.3 節。第四組試體為模擬裂縫設計八個狹長且不規則之缺陷及使用油漆、白板筆、奇異筆和針線以模擬假裂縫。其中假缺陷 1、假缺陷 2、假缺陷 5 以及假缺陷 6 為使用黃色油漆，假缺陷 3 為使用黃色白板筆，假缺陷 4 為使用紅色白板筆，假缺陷 7 為使用奇異筆，假缺陷 8 則為使用針線(見圖 4-36)；第五組試體為模擬裂縫和局部剝落設計八個狹長且不規則之缺陷及使用油漆、白板筆、奇異筆和針線以模擬假裂縫。其中假缺陷 1、假缺陷 2、假缺陷 5 以及假缺陷 6 為使用黃色油漆，假缺陷 3 為使用橘色白板筆，假缺陷 4 為使用紅色白板筆，假缺陷 7 為使用奇異筆，假缺陷 8 則為使用針線(圖 4-37)。



圖 4-36 第四組試體



圖 4-37 第五組試體



### 4.3.2 實驗結果

#### 折線圖分析

本階段拍攝之紅外線熱成像圖共 20 張(詳如附錄 A)，其折線圖取得方法為先以 excel 彙整，其項目包含時間、環境溫度、表面溫度、測距、缺陷號碼、缺陷溫度、整體溫度、周圍溫度、差異值溫度、偵測與否等，再依照 Excel 彙整之結果(詳如附錄 B)整理出縱軸為溫度(°C)，橫軸為時間之折線圖，並且有四個比較值，分別是缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度，與前述兩階段相同。

圖 4-38 為第四組試體缺陷號碼 2 於測距一米之折線圖，可看出缺陷溫度、周圍溫度、表面溫度以及環境溫度三條線之走勢非常相近，缺陷溫度與周圍溫度於各個時段皆有些微的差距，但相比圖 4-39，第五組試體缺陷號碼 2 之溫度差異則較為明顯，其原因可能在於第五組試體於裂縫旁加了一個小面積剝落，幫助其熱傳遞的作用，而兩組試體另外 7 組缺陷於其折線圖上相比之下亦有如此結果。

然而，圖 4-40 與圖 4-41 的假缺陷 2 可發現缺陷溫度與周圍溫度於各個時段幾乎完全重疊，另外七個假缺陷之折線圖(詳如附錄 C)亦呈現相同現象，由此可見，假缺陷並不會與其周圍溫度有過大的差異，表示溫度差異值( $\Delta_T$ ) 不會大於等於 0.5 (°C)，而誤判成缺陷。

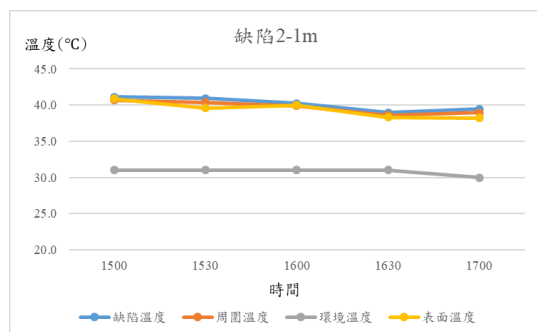


圖 4-38 第四組試體缺陷號碼 2 折線圖

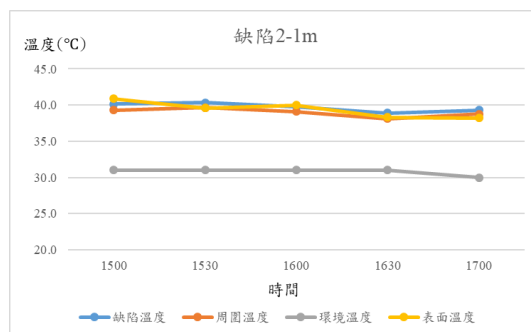


圖 4-39 第五組試體缺陷號碼 2 折線圖

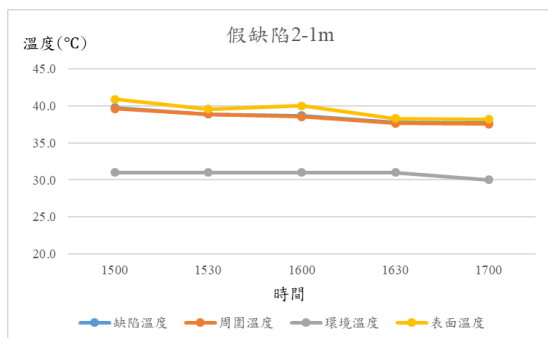
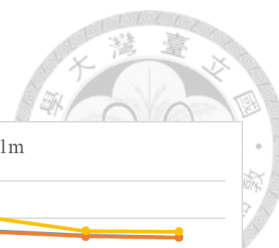


圖 4-40 第四組試體假缺陷 2 折線圖

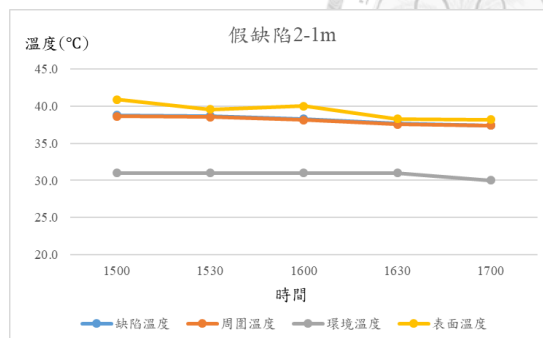


圖 4-41 第五組試體假缺陷 2 折線圖

### 直條圖分析

本研究之第三階段實驗紅外線總偵測數為 40 筆，AI 影像辨識總辨識數為 16 筆。表 4-2 為第四組試體(真裂縫)與第五組試體(真裂縫加局部剝落)經過紅外線熱成像分析與 Deepcrack AI 影像辨識後的辨識率統計表，可發現於紅外線熱成像分析中，第四組試體(真裂縫)的可偵測數比例為 38%，遠低於第五組試體(真裂縫加局部剝落)的可偵測數比例 88%。在 AI 影像辨識中，第四組試體(裂縫)的可偵測比例為 100%略高於第五組試體(裂縫加局部剝落)之可偵測比例 88%，可知局部剝落可能會降低 Deepcrack AI 影像辨識之偵測率。直條圖(圖 4-42)顯示 AI 影像辨識之辨識率皆大於等於紅外線熱成像之辨識率，然而，紅外線熱成像與 AI 影像辨識在假裂縫誤判率上則呈現不同的結果。

表 4-3 為第四組試體(假裂縫)與第五組試體(真裂縫加局部剝落)經過紅外線熱成像分析與 Deepcrack AI 影像辨識後的誤判率統計表，可發現在紅外線熱成像分析中，兩組試體的所有假裂縫皆未被判定為缺陷，故誤判率皆為 0%。AI 影像辨識於第四組試體(假裂縫)的誤判比例高達 63%；第五組試體(真裂縫加局部剝落)的誤判比例為 50%，見第四組試體與第五組試體之假裂縫誤判率直條圖(圖 4-43)。



表 4-2 第四組試體與第五組試體之真裂縫辨識率統計表

真裂縫辨識率									
紅外線_真裂縫									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
可偵測數	0	2	0	0	3	4	3	3	15
比例	0%	5%	0%	0%	8%	10%	8%	8%	38%
影像辨識_真裂縫									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
可偵測數	2	2	2	2	2	2	2	2	16
比例	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	100%
紅外線_真裂縫加局部剝落									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
可偵測數	5	5	5	0	5	5	5	5	35
比例	13%	13%	13%	0%	13%	13%	13%	13%	88%
影像辨識_真裂縫加局部剝落									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
可偵測數	1	2	1	2	2	2	2	2	14
比例	6%	13%	6%	13%	13%	13%	13%	13%	88%
紅外線總偵測數 40 筆									
影像辨識總辨識數 16 筆									

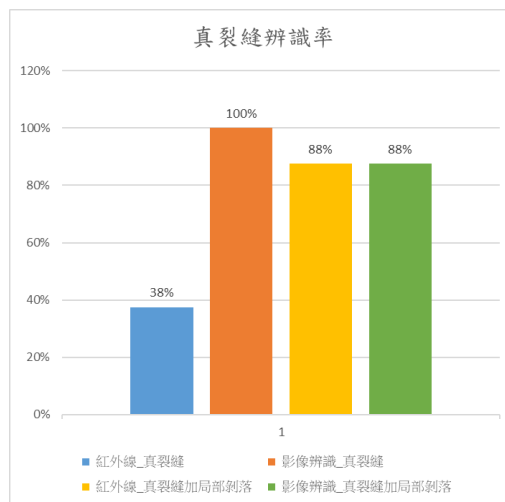


圖 4-42 第四組試體與第五組試體之真裂縫辨識率直條圖

表 4-3 第四組試體與第五組試體之假裂縫誤判率統計表

假裂縫誤判率									
紅外線_假裂縫									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
誤判數	0	0	0	0	0	0	0	0	0
比例	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
影像辨識_假裂縫									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
誤判數	1	1	0	2	1	1	2	2	10
比例	6%	6%	0%	13%	6%	6%	13%	13%	63%
紅外線_假裂縫加局部剝落									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
誤判數	0	0	0	0	0	0	0	0	0
比例	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
影像辨識_假裂縫加局部剝落									
缺陷號碼	1	2	3	4	5	6	7	8	總計
誤判數	1	1	1	1	1	1	1	1	8
比例	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	50%
紅外線總偵測數 40 筆									
影像辨識總偵測數 16 筆									

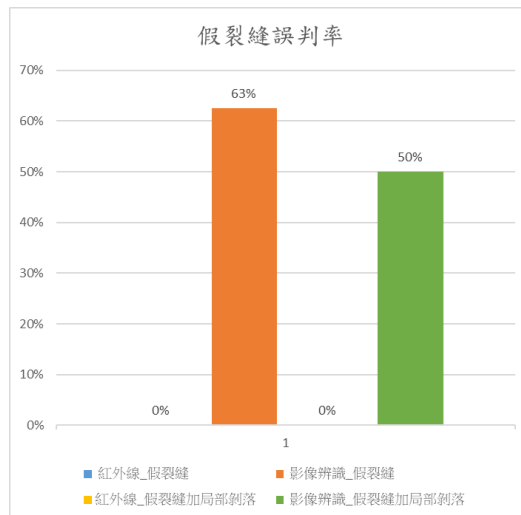


圖 4-43 第四組試體與第五組試體之假裂縫誤判率直條圖



## 混淆矩陣

「在機器學習領域和統計分類問題中，混淆矩陣是一個可視化工具，特別用於監督學習，在無監督學習一般叫做匹配矩陣，矩陣的每一列代表一個類的實例預測，而每一行表示一個實際的類的實例。混淆矩陣共分成四個元素 TP(True Positive)、FP(False Positive)、FN(False Negative)、TN(True Negative)」(張顥瀚，2021)，見表 4-4。

混淆矩陣通常會使用精確率(precision)、召回率(recall)、F1-score 來判別模型的好壞，表 4-9 為 AI 影像辨識與紅外線熱成像在兩組不同試體下的各個指標比較，可看出 AI 影像辨識於第四組試體的 F1-score 高於紅外線熱成像，然而，在第五組試體時，AI 影像辨識的 F1-score 卻是低於紅外線熱成像。

表 4-4 混淆矩陣

混淆矩陣	實際正例	實際反例
預測正例	TP(True Positive)	FP(False Positive)
預測反例	FN(False Negative)	TN(True Negative)

資料來源：張顥瀚，2021

表 4-5 AI 影像辨識第四組試體之混淆矩陣

	實際正例	實際反例
預測正例	16	10
預測反例	0	6



表 4-6 AI 影像辨識第五組試體之混淆矩陣

	實際正例	實際反例
預測正例	14	8
預測反例	2	8

表 4-7 紅外線熱成像分析第四組試體之混淆矩陣

	實際正例	實際反例
預測正例	15	0
預測反例	25	40

表 4-8 紅外線熱成像分析第五組試體之混淆矩陣

	實際正例	實際反例
預測正例	35	0
預測反例	5	40

表 4-9 兩種方法在兩組試體上的綜合指標比較

	召回率	精確率	F1-score
AI 影像辨識(第四組試體)	1	0.615	0.762
紅外線熱成像(第四組試體)	0.375	1	0.545
AI 影像辨識(第五組試體)	0.875	0.636	0.737
紅外線熱成像(第五組試體)	0.875	1	0.933

### 4.3.3 小結

第三階段的實驗結果如下：

1. 於紅外線熱成像辨識結果顯示，第四組試體(純裂縫)的辨識率為 38%，而第五組試體(裂縫加局部剝落)則為 88%，可知裂縫周圍有局部剝落時，有助於提高被動紅外線熱成像技術之偵測。
2. 由 Deepcrack AI 影像辨識中，第四組試體(裂縫)的可偵測比例為 100%高於第五組試體(裂縫加局部剝落)之可偵測比例 88%，可知局部剝落可能會降低 Deepcrack AI 影像辨識之偵測率。
3. Deepcrack AI 影像辨識在進行假缺陷辨識時，誤判率於第四組試體(純裂縫)和第五組試體(裂縫加局部剝落)分別為 63% 以及 50%，然而紅外線熱成像中對兩者之誤判率皆為 0%。
4. 在 Deepcrack AI 影像辨識中，第四組試體的 F1-score 為 0.762，高於紅外線熱成像的 0.545，表示在第四組試體的情況下，Deepcrack 是優於紅外線熱成像的；第五組試體的 F1-score 為 0.737，低於紅外線熱成像的 0.933，表示在第五組試體的情況下，紅外線熱成像是優於 Deepcrack 的。
5. 雖然在純裂縫的情況下，Deepcrack AI 影像辨識是優於紅外線熱成像，但實際橋梁缺陷並非單只有裂縫，常伴隨著其他不規則剝落，爰綜上可知，紅外線熱成像可有效地輔助 AI 影像辨識偵測缺陷。



## Chapter 5 利用紅外線熱像儀應用於橋梁實拍



### 5.1 使用設備

本研究之橋梁實拍主要使用設備有以下：紅外線熱像儀 FLIR E5、測距儀 UNI-TLM80、直尺、紅外線溫度計 TECPEL-DIT300B、捲尺、白板、白板筆等。

### 5.2 橋梁選定

本研究於永福橋、福和橋、秀朗橋、中正橋等臺灣混凝土橋梁先進行 Google 地圖街景服務調查後，再從中選取較有可能實行拍攝之地點進行勘查，發現多座橋梁並無足夠(兩米的量測空間)且安全之腹地進行量測，且較易量測之橋墩處大多數也已被鋼板包覆(圖 5-1)，實屬研究困難。爰此，本研究選定在較適合拍攝之永福橋車道護欄及秀朗橋車道護欄進行，並將根據其橋梁位址以及順序編號做為其缺陷名稱。



圖 5-1 福和橋下橋墩多已被鋼板包覆圖

資料來源：<https://www.boncollection.com/zh-hant/blog/item/2937-recommend-5-running-routes-in-taipei>



### 5.3 量測方法

本研究將先行橋梁選定後再對其進行拍攝，拍攝方法按照以下步驟：

1. 至欲拍攝橋梁進行勘查，確認其地點不影響交通且有足夠(兩米的量測空間)腹地。
2. 使用直尺測量其缺陷尺寸，包含缺陷長、缺陷寬、缺陷深度(圖 5-2)。



圖 5-2 使用直尺量測缺陷尺寸

3. 於白板寫下觀測之缺陷尺寸與地點等(圖 5-3)。



圖 5-3 永福橋護欄拍攝之白板

4. 利用測距儀 UNI-T LM80 量取紅外線熱像儀 FLIR E5 對欲測物之測距，並確保其測量角度為儀器垂直於預測物。

5. 使用紅外線溫度計 TECPEL-DIT300B 量測其欲測物之表面溫度(圖 5-4)。



圖 5-4 使用紅外線溫度計 TECPEL-DIT300B 量測缺陷之表面溫度

6. 使用紅外線熱像儀 FLIR E5 拍攝測距 1 米與 2 米之紅外線熱成像(圖 5-5)。



圖 5-5 於永福橋進行橋梁實拍示意圖

## 5.4 實拍結果與分析

本階段之熱成像溫度取得方式同實驗室研究。表 5-1 為橋梁實拍結果(詳如附錄 B)，包含 7 個缺陷的尺寸、量測距離、溫度差異值、以及偵測與否。從以下結



果可以發現，秀朗橋 1 於測距 1 米與 2 米時之溫度差異值分別為  $-0.18^{\circ}\text{C}$  和  $0.18^{\circ}\text{C}$ ，秀朗橋 2 於測距 1 米與 2 米時之溫度差異值分別為  $0^{\circ}\text{C}$  和  $-0.15^{\circ}\text{C}$ ，秀朗橋 3 於測距 1 米與 2 米時之溫度差異值分別為  $0.15^{\circ}\text{C}$  和  $0^{\circ}\text{C}$ ，秀朗橋 4 於測距 1 米與 2 米時之溫度差異值分別為  $0.28^{\circ}\text{C}$  和  $0.26^{\circ}\text{C}$ ，永福橋 3 於測距 1 米與 2 米時之溫度差異值分別為  $-0.14^{\circ}\text{C}$  和  $0.14^{\circ}\text{C}$ ，以上之值皆小於  $0.5^{\circ}\text{C}$ ，無法判定為缺陷。惟有永福橋 1 與永福橋 2 在測距 1 米與 2 米時可被偵測到，其中，永福橋 1 於測距 1 米時之差異值溫度為  $-2.67^{\circ}\text{C}$ ，永福橋 1 於測距 2 米時之差異值溫度為  $-2.39^{\circ}\text{C}$ ；永福橋 2 於測距 1 米時之差異值溫度為  $-3.7^{\circ}\text{C}$ ，永福橋 2 於測距 2 米時之差異值溫度為  $-3.0^{\circ}\text{C}$ ，以上之值均大於  $0.5^{\circ}\text{C}$ ，紅外線熱成像可清楚看見兩缺陷之樣態(圖 5-6 與圖 5-7)。

表 5-1 橋梁實拍結果

缺陷名稱	測距 (m)	缺陷長 (cm)	缺陷寬 (cm)	缺陷深度 (cm)	差異值溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	偵測
秀朗橋 1	1	12	12	0.5	-0.18	N
秀朗橋 1	2	12	12	0.5	0.18	N
秀朗橋 2	1	12	5	0.5	0.00	N
秀朗橋 2	2	12	5	0.5	-0.15	N
秀朗橋 3	1	6	5	0.4	0.15	N
秀朗橋 3	2	6	5	0.4	0.00	N
秀朗橋 4	1	5	4	1.5	0.28	N
秀朗橋 4	2	5	4	1.5	0.26	N
永福橋 1	1	9	4	1.2	-2.67	Y
永福橋 1	2	9	4	1.2	-2.39	Y
永福橋 2	1	35	16	3.5	-3.7	Y
永福橋 2	2	35	16	3.5	-3.0	Y
永福橋 3	1	5	3	2.2	-0.14	N
永福橋 3	2	5	3	2.2	0.14	N

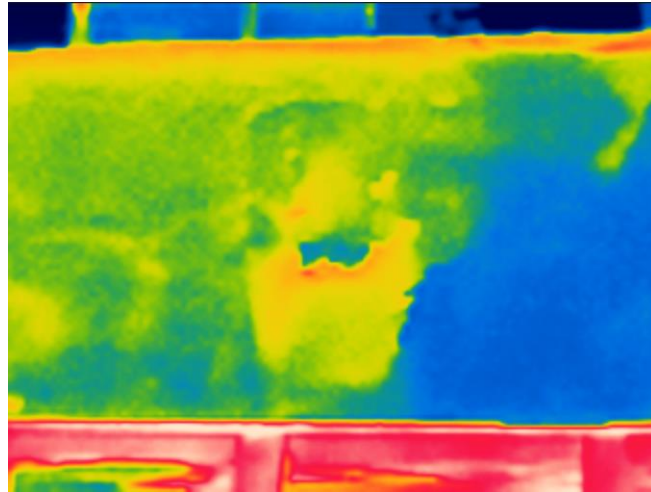


圖 5-6 永福橋 1 於測距 1 米時之紅外線熱成像

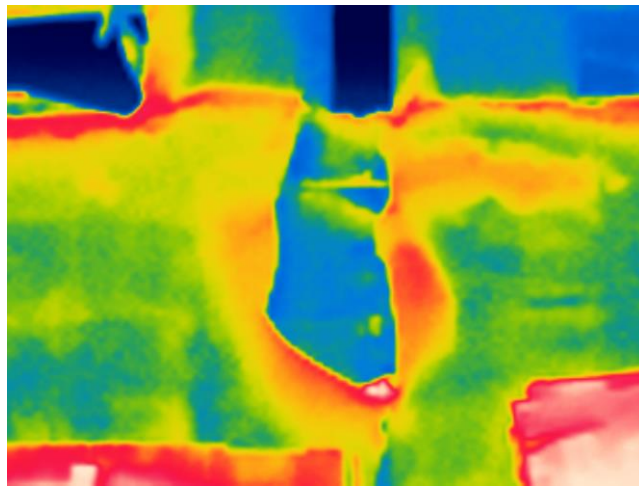



圖 5-7 永福橋 2 於測距 1 米時之紅外線熱成像

然而，永福橋 1 與永福橋 2 之溫度差異值皆為負值，實不符文獻回顧中(圖 2-10)所闡述之觀念「白天時，隨著溫度之升高，混凝土吸收熱量並開始發散幅射能，缺陷處會抵抗熱傳遞，並且會用相對於周圍完整處較快之速度升溫，因此缺陷處會顯示為熱區域於熱成像中」，雖非本研究之範圍，但推斷其可能原因為以下，可做為後續研究：

1. 陰影效應：混凝土缺陷處於建築物或其他物體陰影下，陽光無法直接照射到，導致其溫度較低。

- 
2. 水流影響：混凝土缺陷處附近存在水流，水的蒸發或冷卻效應可能導致缺陷處的溫度下降。
  3. 材料特性差異：即使材料相同，混凝土缺陷處可能存在微小的差異，例如：密度、結構或含水量的變化，這些差異可能導致溫度分布的不均勻。

另外，本研究認為於橋梁實拍時，缺陷深度太淺以及缺陷面積太小可能為無法被本研究使用之紅外線熱像儀 FLIR E5 偵測到之原因，因秀朗橋 1、秀朗橋 2、秀朗橋 3 其缺陷深度皆小於 1 公分，分別是 0.5cm、0.5cm、0.4cm；而秀朗橋 4 與永福橋 3 之缺陷面積為 20cm<sup>2</sup>與 15cm<sup>2</sup>。上述結果亦呼應到本研究於實驗室實驗第一階段之結果 1「缺陷的深度相對面積較易影響偵測結果，且深度低於 1 米的尺寸較不易被本研究使用之紅外線熱像儀 FLIR E5 偵測到」和結果 2「深度 3.5cm 但面積小於 1cm<sup>2</sup>之缺陷，不易被本研究設備偵測到」。然而，因為實務上並不需  
要檢測出深度太淺或面積太小的缺陷尺寸，反而需要找出較具危險性的大面積或  
深度較深之缺陷，因此，本研究使用之方法適合應用於橋梁檢測實務。

## Chapter 6 結論與建議



根據本研究中利用紅外線應用於橋梁表面缺陷之實驗與分析與利用紅外線熱像儀應用於橋梁實拍的結果，歸納出以下幾點結論與建議，提供後續研究做參考。

### 6.1 結論

1. 本研究依據實驗結果建議，使用紅外線熱像儀 FLIR E5 進行拍攝，最適當的量測距離為 1 至 2 米，此測距可有效偵測出較具危險性之較深、面積較大且多種形狀的缺陷。
2. 實驗室研究與橋梁實拍結果顯示，紅外線熱像儀 FLIR E5 較不適合量測深度較淺及面積較小之缺陷尺寸，然而，深度較淺及面積較小之缺陷尺寸並不會對橋梁安全性造成太大的影響。
3. 根據實驗結果顯示，3:00 p.m. 至 5:00 p.m. 相較 11:00 a.m. 至 2:00 p.m. 進行拍攝時，偵測率會大幅提升，故本研究建議於欲測物受熱時間充足的情況下使用被動紅外線熱成像技術偵測缺陷。
4. 本研究於實驗中發現，狹長且面積較小之缺陷型態像是裂縫，較不易被本研究使用之紅外線熱像儀 FLIR E5 偵測到，而裂縫周圍有局部剝落時，則有助於提高被動紅外線熱成像技術之偵測成效。
5. 由第三階段實驗中可知，裂縫周圍有局部剝落時，有助於提高被動紅外線熱成像技術之偵測率，卻會降低 AI 影像辨識的偵測率；而 AI 影像辨識對於假缺陷之誤判率遠大於紅外線熱成像。
6. 綜上所述，利用較低規格之紅外線熱像儀檢測混凝土橋梁表面剝落及輔助 AI 影像辨識技術，應用於橋梁檢測具有可行性。



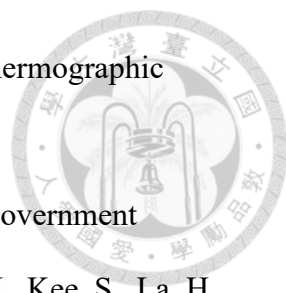
## 6.2 後續研究建議

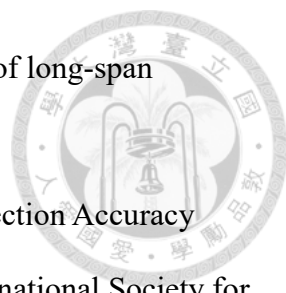
1. 本研究使用之紅外線熱像儀 FLIR E5 之規格較低，後續建議可以提高規格來研究偵測狹長型裂縫之可行性。
2. 本研究在實驗過程中，發現使用被動紅外線熱成像技術量測時之環境與日照時間等皆會影響實驗結果，且其牽扯到許多複雜的熱傳遞理論。因此，本研究建議後續可將各項環境因子如濕度、風速、光照等納入實驗模型，以找出最適合使用被動紅外線熱成像技術之環境與時間。
3. 目前臺灣混凝土橋梁之缺陷劣化有 35 種樣態，而本研究實驗的缺陷型態僅有模擬混凝土橋梁的表面剝落以及裂縫。因此，建議後續可研究使用被動紅外線熱成像技術可否成功偵測混凝土缺陷劣化的另外 33 種樣態。
4. 臺灣因地理位置、氣候變化、海洋及季風等影響，使得降雨成為一個顯著的氣候特點，因此臺灣的混凝土橋梁長時間處於含水狀態，然本次實驗室研究之試體規劃為乾燥混凝土試體，故建議後續研究可針對其含水量多寡對使用被動紅外線熱成像技術量測的影響。
5. 有關 AI 影像辨識，後續研究採用之模型建議以更多假裂縫圖像加強訓練提高判別精確度。
6. 紅外線熱像儀具有易搭載、感測範圍廣、非接觸性及非破壞性之特性，故後續研究建議可以無人機搭載紅外線熱像儀並結合無線感測儀器，不僅可搭配 AI 影像辨識，提高偵測混凝土橋梁缺陷之精確度，亦可同步蒐集橋梁監測數據，研判橋梁淘刷情形，精進橋梁檢測之效率及效益。

## 參考資料



1. ABNT (2016).NBR 9452.
2. Ahlborn, T. M., C. G. Gilbertson, H. Aktan and U. Attanayake (2005). Condition Assessment and Methods of Abatement of Prestressed Concrete Box-Beam Deterioration, Michigan Department of Transportation.
3. Carosena Meola , Giovanni M. Carlomagno (2010).Impact damage in GFRP: New insights with infrared thermography.
4. C.A. Balaras , A.A. Arigiriou, (2002). Infrared thermography for building diagnostics.
5. Chia-Chi Cheng, Tao-Ming Cheng, Chih Hung Chiang, (2008). Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves.
6. Ch. Maierhofer , R. Arndt , M. Roßlrig , C. Rieck , A. Walther , H. Scheel , B. Hillemeier (2006).Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures.
7. D4788 - 88(1997): Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography.
8. Electronice Components, (2023). <https://www.tme.eu/cn/zh/details/lm80/ce-ju-yi/uni-t/>.
9. G.D. Chown, K.N. Burn, (1983).Thermographic identification of building enclosure and deficiencies, Canadian Building Digest, CBD-229, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
10. Glenn Washer, Richard Fenwick, Naveen Bolleni, and Jennifer Harper(2009). Effects of Environmental Variables on Infrared Imaging of Subsurface Features of Concrete Bridges.

- 
11. Glenn Washer, Naveen Bolleni, and Richard Fenwick (2010). Thermographic Imaging of Subsurface Deterioration in Concrete Bridges.
  12. GPO. (2015). “Electronic Code of Federal Regulations”, U.S. Government Publishing Office, Subpart C, Title 23, 650.311, . Gucunski, N., Kee, S., La, H., Basily, B. and Maher, A. (2015), “Delamination and concrete quality assessment of concrete bridge decks using a fully autonomous RABIT platform”, Struct. Monit. Maint., 2(1), 19-34.
  13. H. Kaplan, Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment, 2<sup>nd</sup> Edition, International Society for Optical Engineering (SPIE), Bellingham, WA, 1992, 160 pp.
  14. Ikhlas Abdel-Qader , Solange Yohali , Osama Abudayyeh, Sherif Yehia (2008). Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks.
  15. Jenson, J.(2007). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective, Pearson Education, Inc.
  16. J. H. A. Rocha, Y. V. Povoas (2017). Infrared thermography as a non-destructive test. for the inspection of reinforced concrete bridges : A review of the state of the art.
  17. J.R. Snell, Infrared inspection of motors, Think Thermally, Snell Infrared’ s Newsletter, December 1997.
  18. Khatereh Vaghefi (2013). Infrared thermography enhancements for concrete bridge evaluation.
  19. Mendes, P., Moreira, M., Pimienta, P. (2012), Pontes de concreto armado: efeitos da corrosão e da variação do módulo de elasticidade do concreto. IBRACON de Estruturas e Materiais. 5(3):389-401.

- 
20. Pines and Aktan. (2002). Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States.
  21. R. P. Madding, Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations, in : Proceedings of the Thermosense XXI, International Society for Optical Engineering (SPIE), Orlando, FL, 1999, pp. 393-401.
  22. Sherif Yehia ; Osama Abudayyeh ; Saleh Nabulsi ; and Ikhlas Abdelqader (2007). Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using Nondestructive Evaluation Techniques.
  23. Takahide Sakagami , Shiro Kubo (2002).Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations.
  24. Vaghefi, K., T. M. Ahlborn, D. K. Harris and C. N. Brooks (2013). "Combined Imaging Technologies for Concrete Bridge Deck Condition Assessment." ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, Accepted April 2013,<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000465>.
  25. Vaghefi, K., R. C. Oats, D. K. Harris, T. M. Ahlborn, C. N. Brooks, K. Endsley, C. Roussi, R. Shuchman, J. W. Burns and R. Dobson (2012). "Evaluation of Commercially Available Remote Sensors for Highway Bridge Condition Assessment." ASCE Journal of Bridge Engineering, 17(6), pp. 886-895.
  26. Washer, G., R. Fenwick and N. Bolleni (2009). Development of hand-held thermographic inspection technologies. Final Report, Missouri Department of Transportation. RI06-038/OR10.007.
  27. Washer, G. (2010). Thermal Imaging of Damage in Bridge Soffits. NDE/NDT for Highways and Bridges Structural Materials Technology NYC.
  28. X. Maldague, Non-destructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography, Springer, London, 1993.



- 
29. Yahui Liu, Jian Yao, Xiaohu Lu, Renping Xie, Li Li (2019) .Deepcrack : A deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation.
30. 王映捷 (2021)。建立臺灣普通及摻料混凝土強度及彈性模數時間成長函數研究，國立臺灣大學學士論文。
31. 王姿樺，高書屏，林志憲 (2021)。應用深度學習技術輔助橋梁裂縫辨識。航測及遙測學刊。
32. 交通部 (2020)。公路橋梁檢測及補強規範。
33. 林呈 (2012)。橋梁水力災害學。臺北市：科技圖書。
34. 林宥任 (2014)。無線監測應用於橋梁管理之開發與實測。國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
35. 林喻峰 (2014)。應用紅外線熱像儀檢測混凝土內部裂縫深度之研究。科技部補助專題研究計畫成果報告 (計畫編號：NSC102-2221-E-270-007-)。
36. 高鵬雅 (2020)。無人機搭載紅外線熱像儀於混凝土橋梁檢測。國立中興大學未出版之碩士論文。
37. 陳宇欣(2005)，用紅外線影像之視覺監控，國立交通大學資訊科學與工程碩士論文。
38. 張顥瀚 (2021)。應用深度學習與影像處理偵測混凝土表面裂縫。國立聯合大學電機工程學系研究所碩士論文。
39. 張順欽 (2013)。添加遠紅外線粉末之多孔隙陶瓷開發與其植栽應用。
40. 那致中(2010)。面陣列熱影像特性之研究，國立政治大學地政學系碩士論文。
41. 臺灣大學(2011)。科學 Online。

42. FLIR (2016)。使用者手冊 FLIR EX 系列說明書。
43. 艾丁陞實業(2021)。 <https://etinstw.com/thermalclass-2minsguide/>。
44. FLIR Tools 官網(2023)。 <https://etinstw.com/flir-tools/>。
45. 良興購物網(2023)。 [https://www.eclife.com.tw/ups/moreinfo\\_159478.htm](https://www.eclife.com.tw/ups/moreinfo_159478.htm)。
46. TECPEL 官網(2023)。 <https://www.tecpel.com.tw/?model=DIT-300B>。
47. 唐和股份有限公司(2019)。 <https://www.donho.com.tw/news-detail/show-886766.htm>。



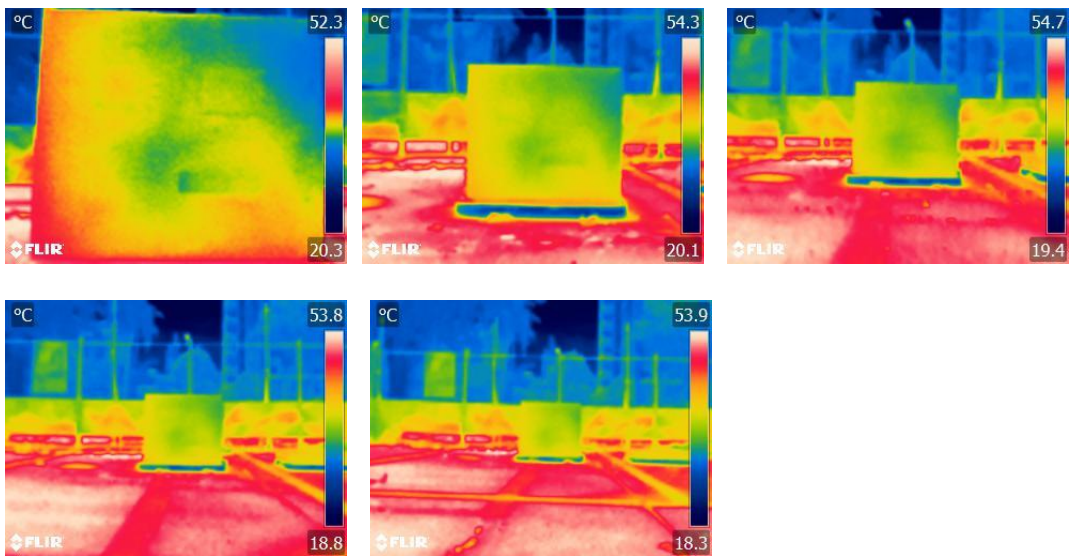
# 附錄 A



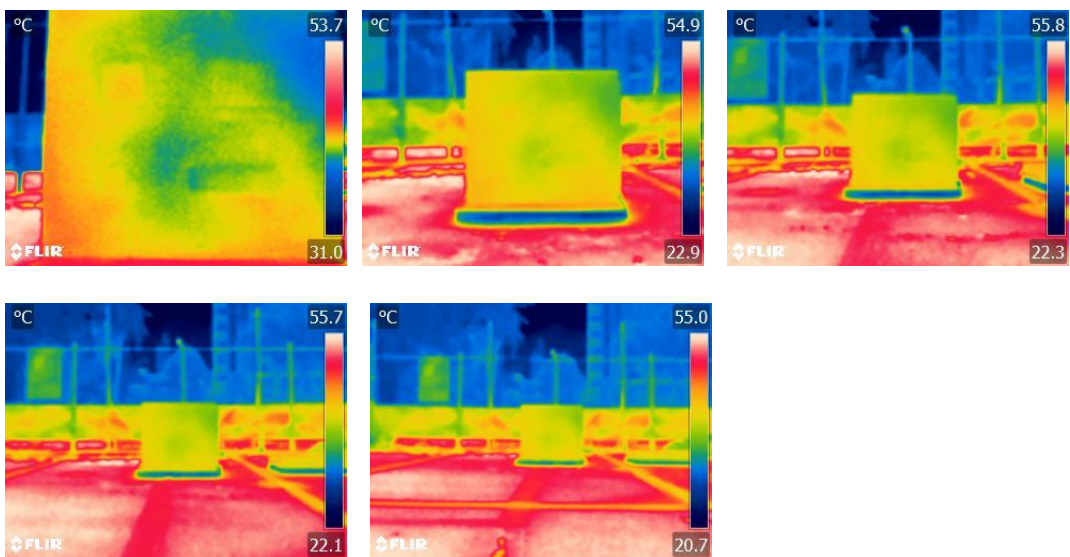
附錄 A 包含本研究中五組試體於不同時段及不同量測距離下使用 FLIR E5 拍攝與橋梁實拍之紅外線熱成像。

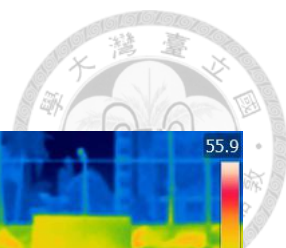
## 一、第一組試體於不同時段下，量測距離(1m~5m)之紅外線熱成像

### (1)11:00(量測距離按順序為 1m~5m)

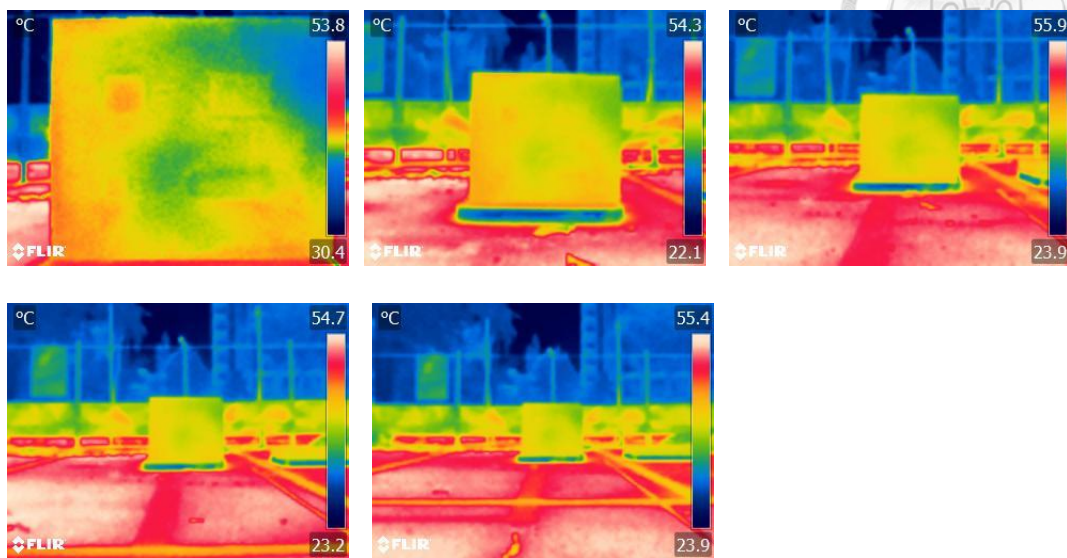


### (2)11:30(量測距離按順序為 1m~5m)

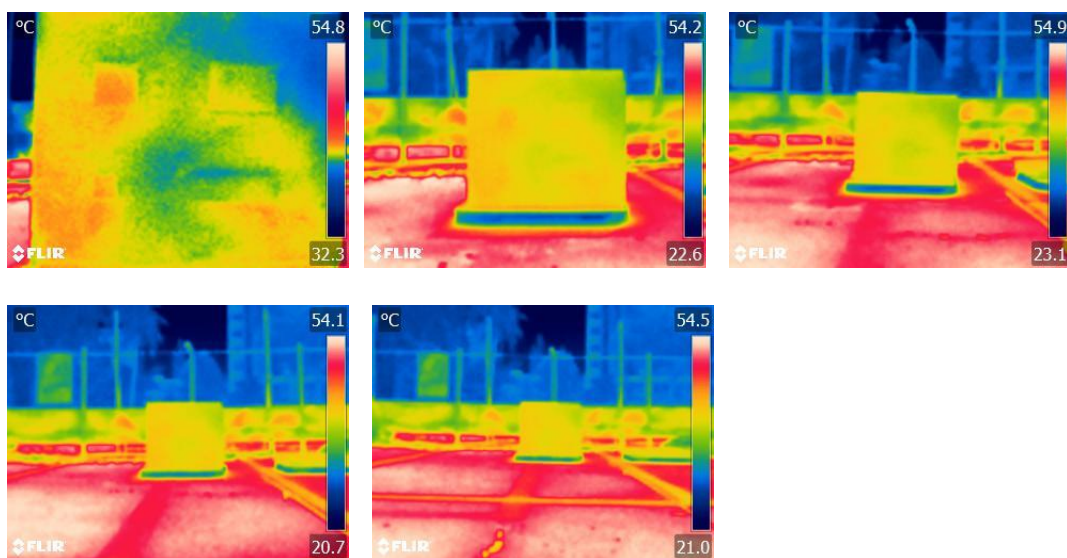




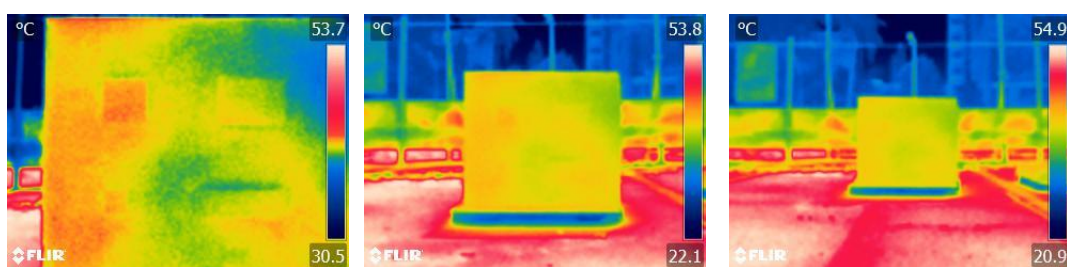
(3)12:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

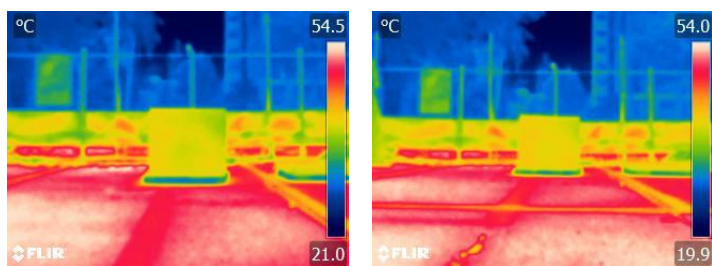


(4)12:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

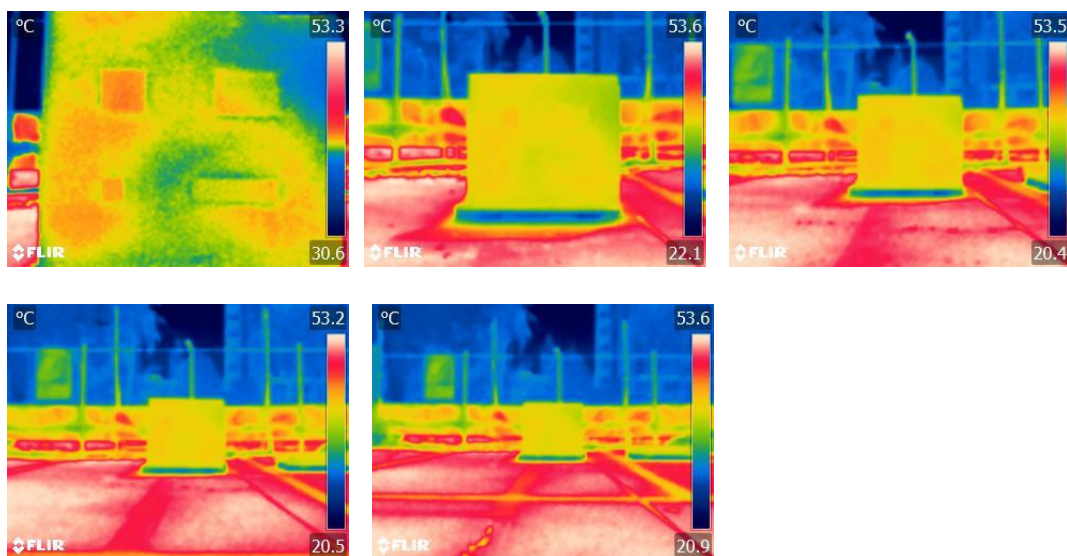


(5)13:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

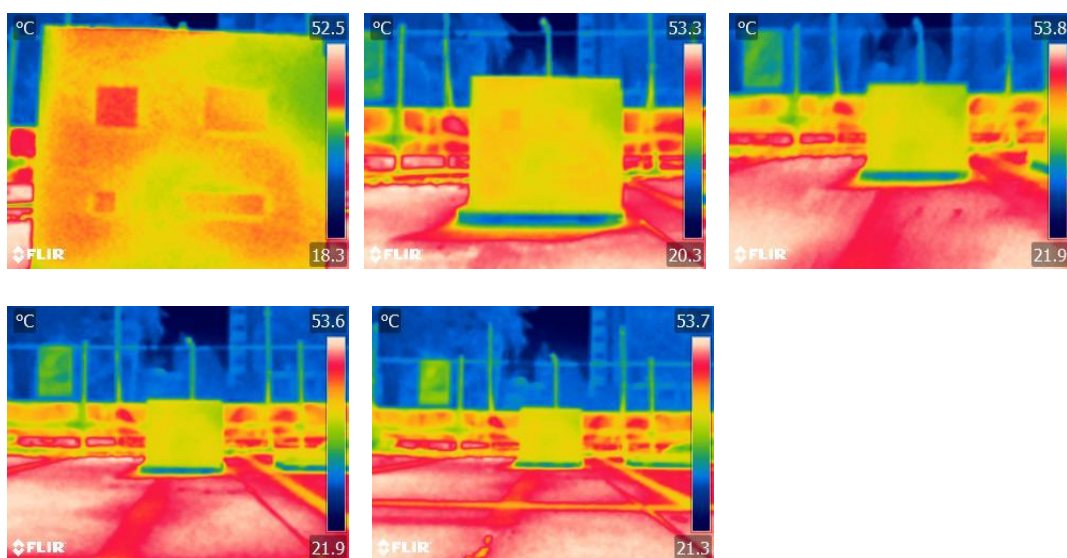


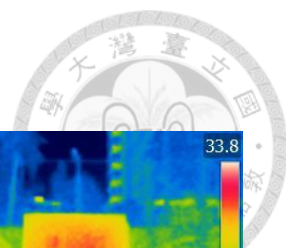


(6)13:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

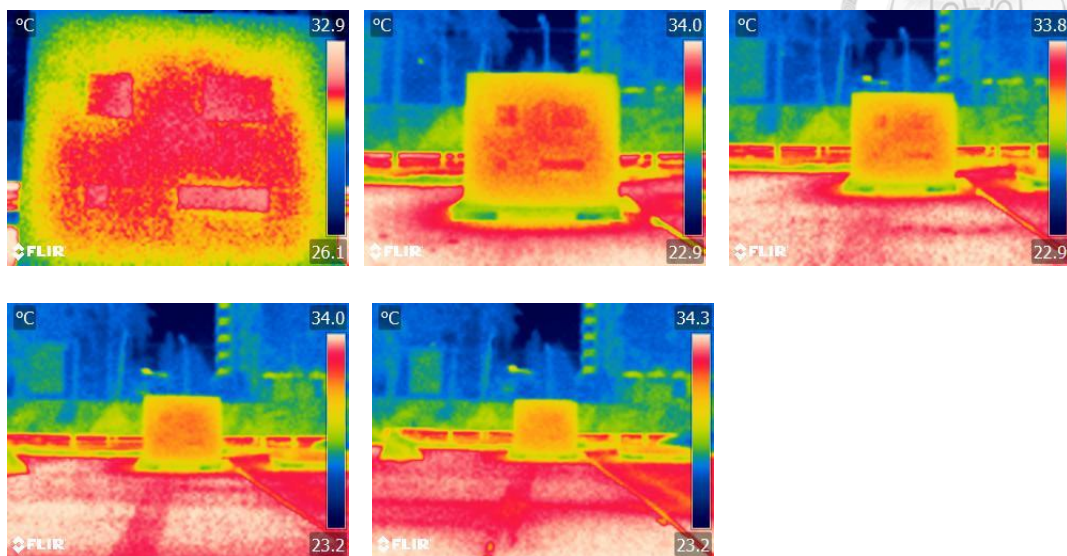


(7)14:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

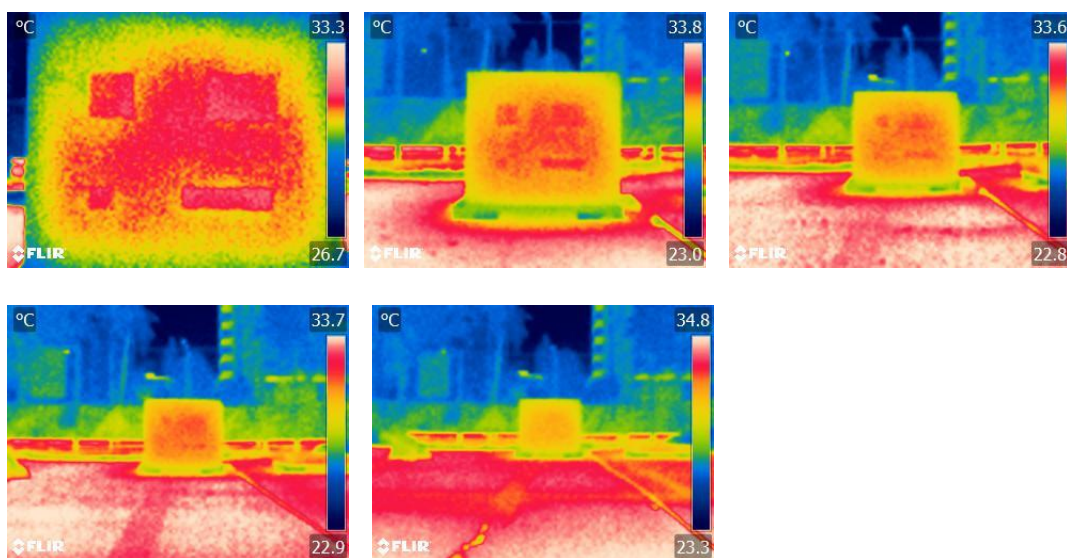




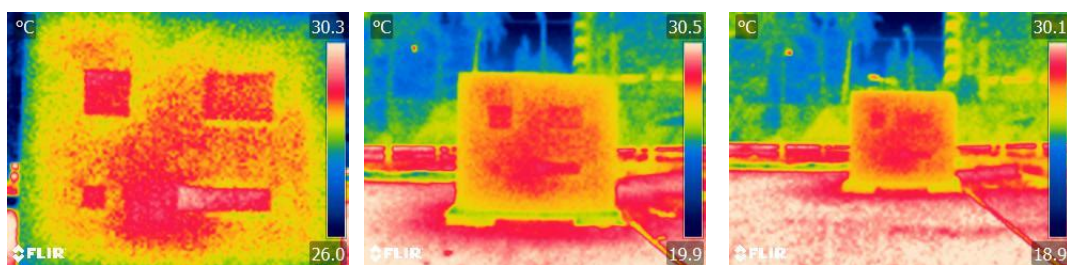
(8)19:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

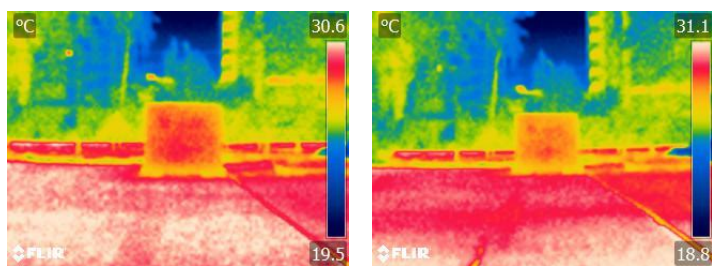


(9)19:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

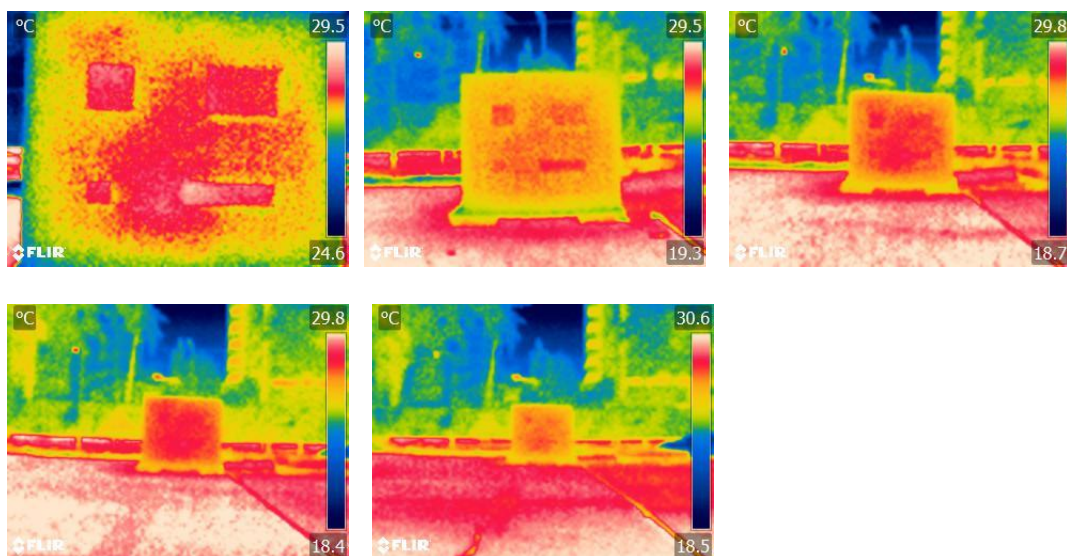


(10)20:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

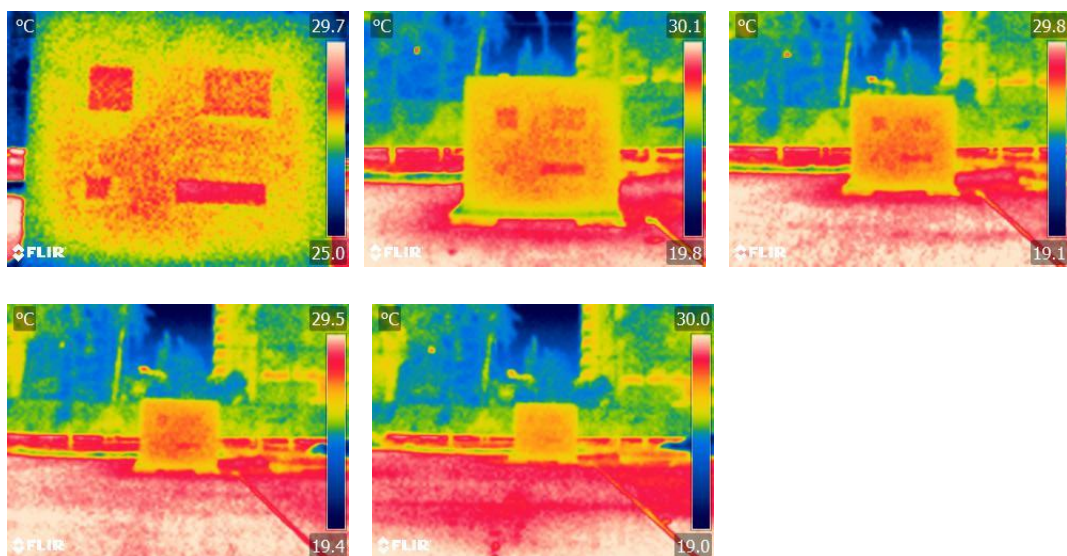


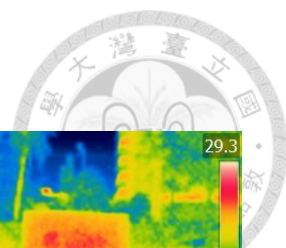


(11)20:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

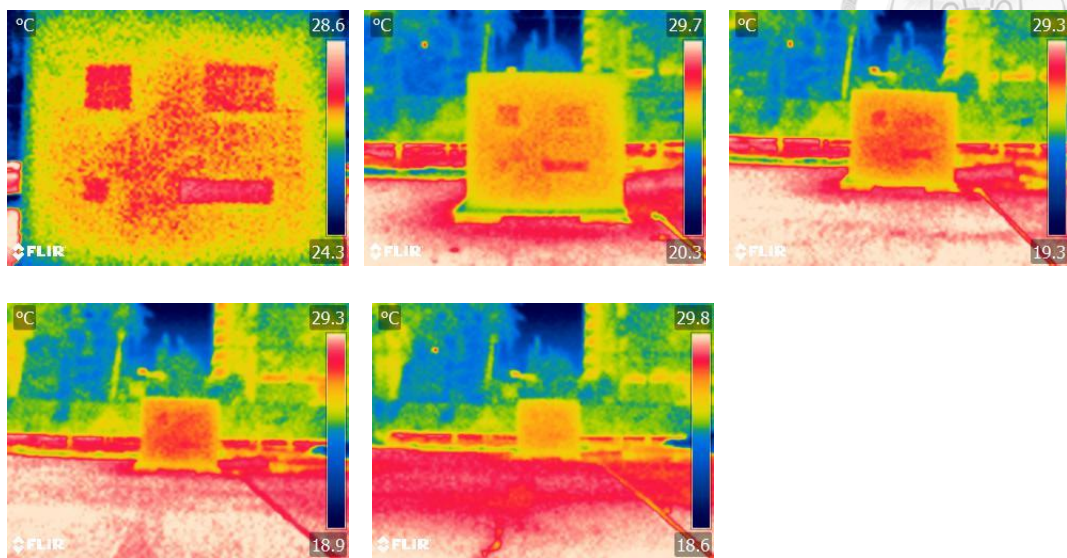


(12)21:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)



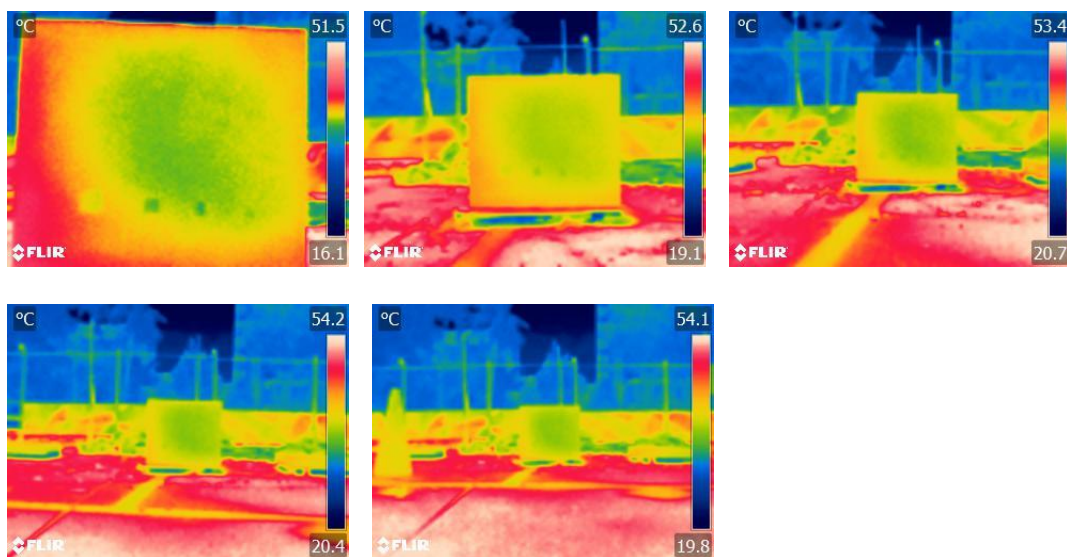


(11)21:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

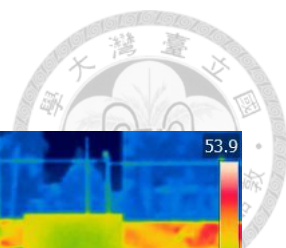


二、第二組試體於不同時段下，量測距離(1m ~ 5m)之紅外線熱成像

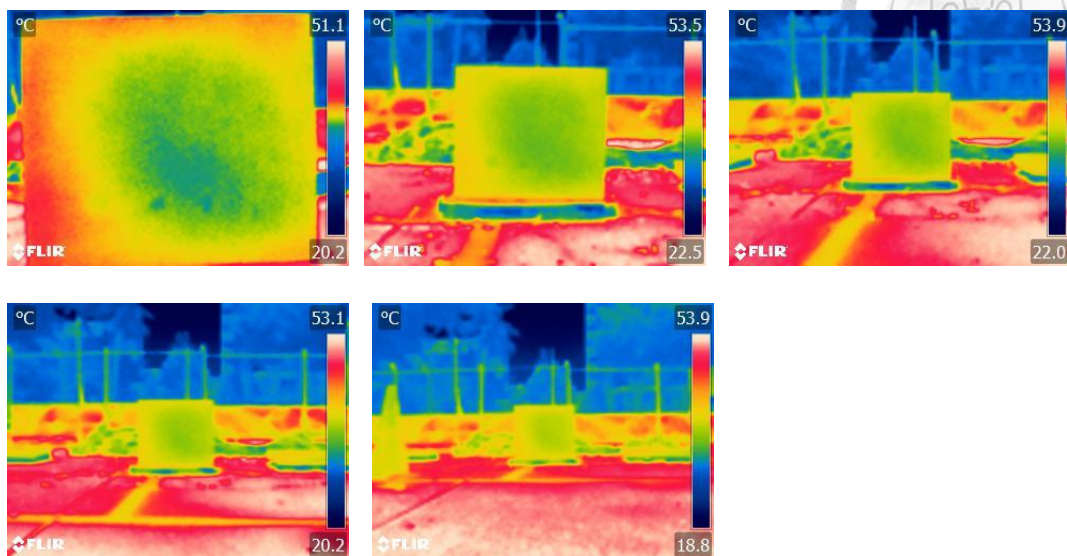
(1)11:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)



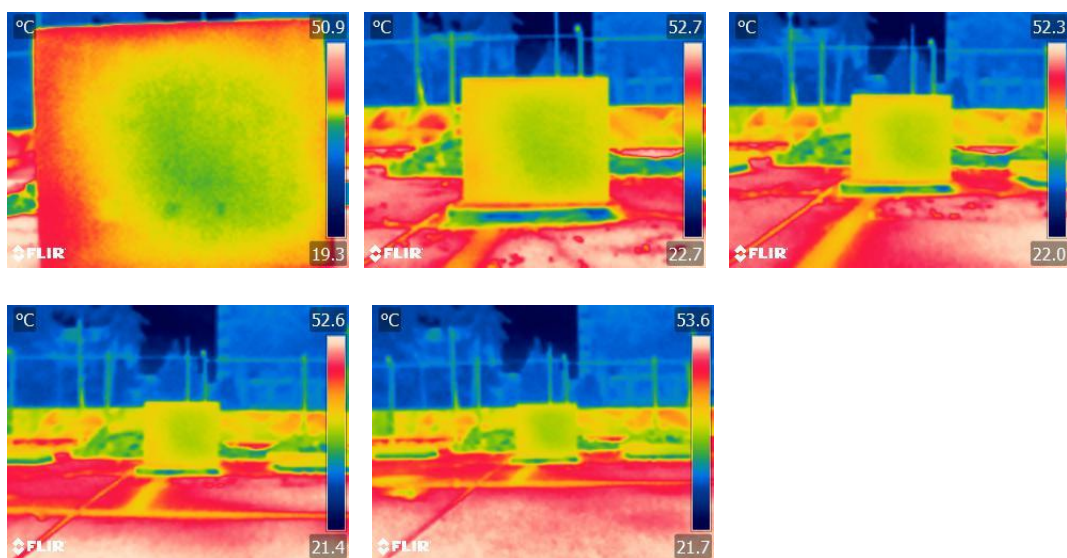




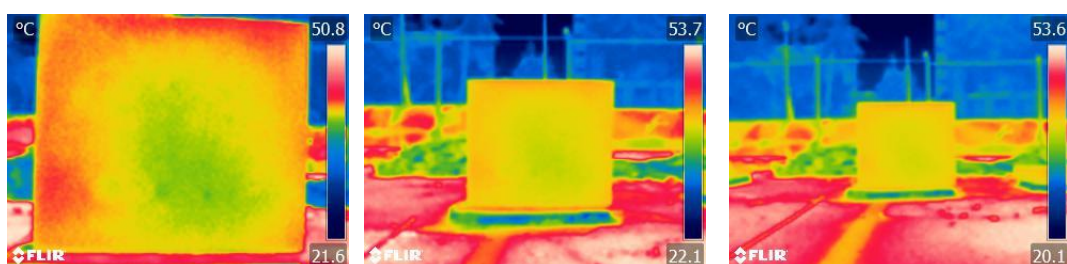
(2)11:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

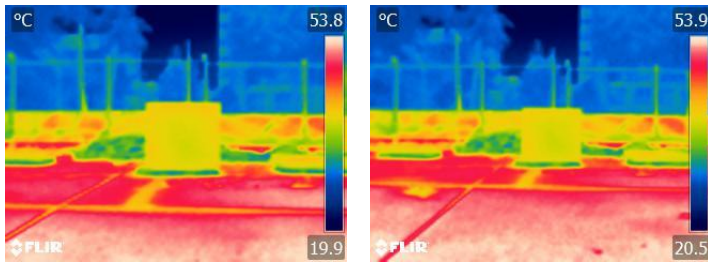


(3)12:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

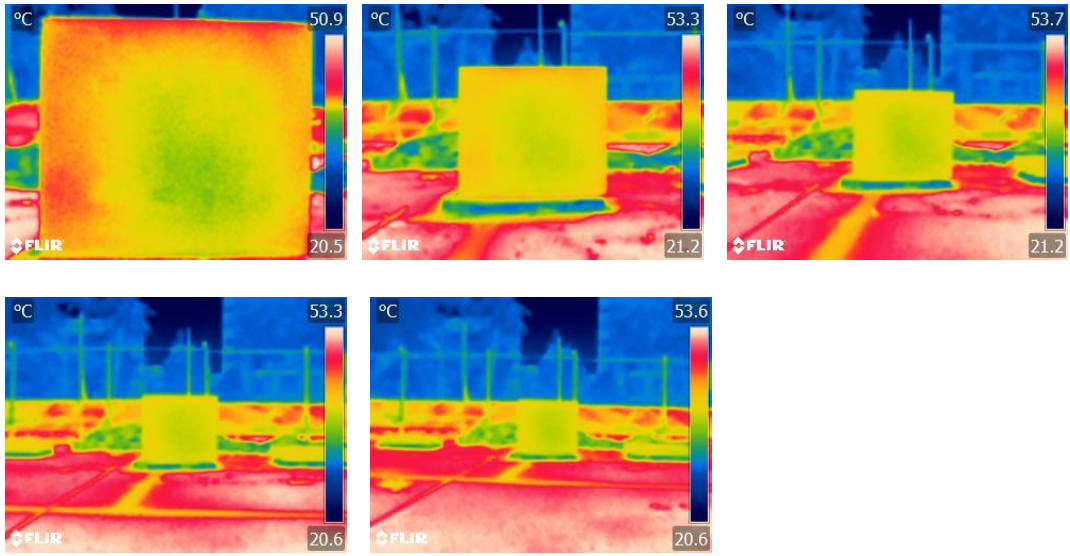


(4)12:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

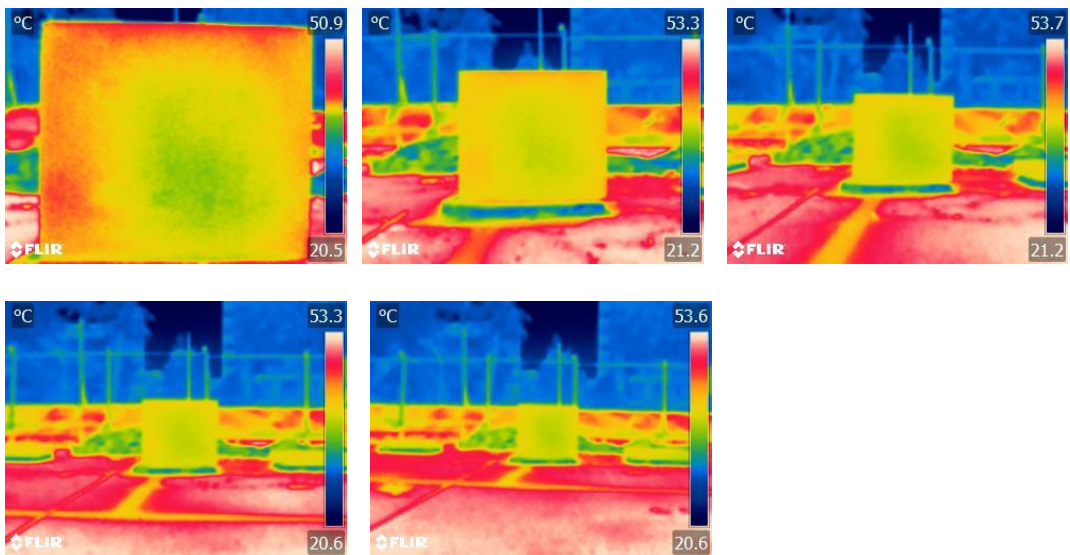


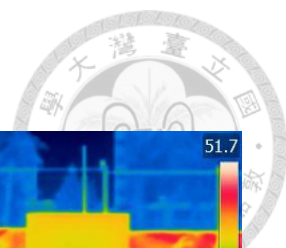


(5)13:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

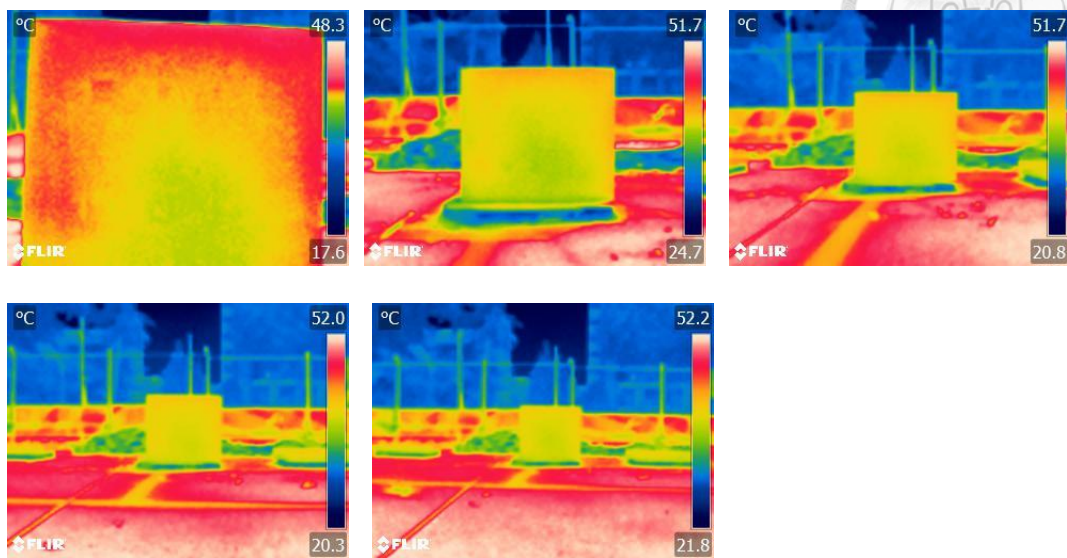


(6)13:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

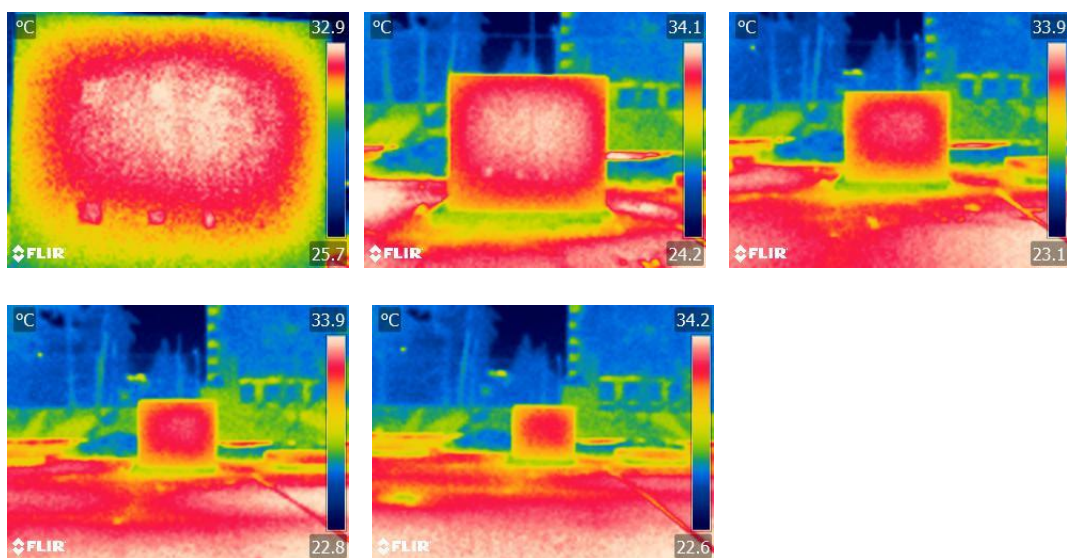




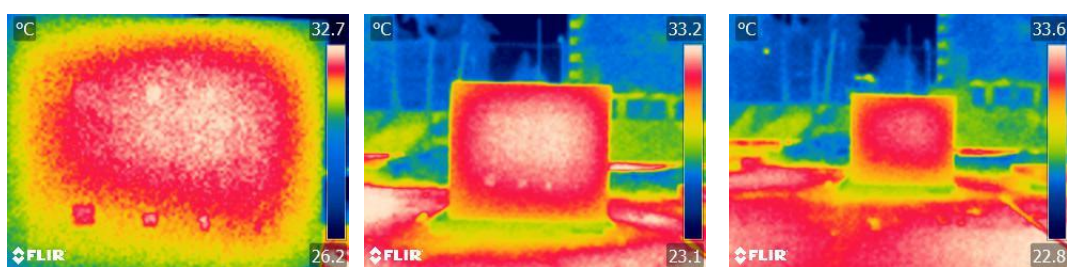
(7)14:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

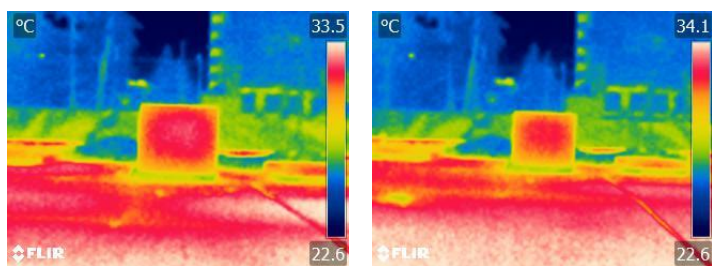


(8)19:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

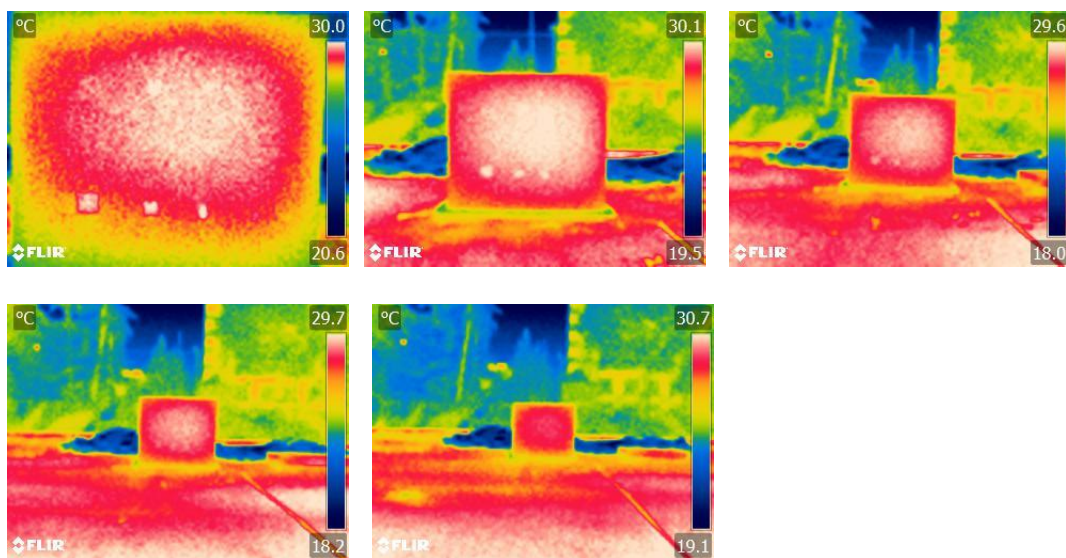


(9)19:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

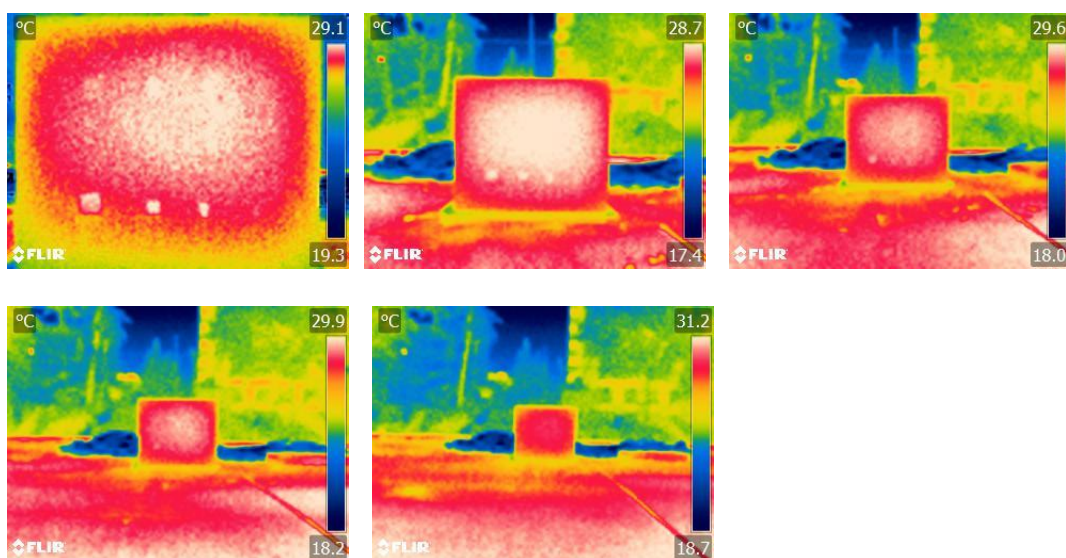


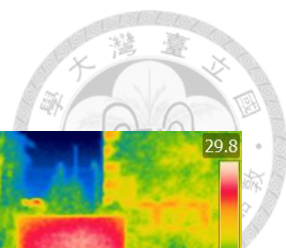


(10)20:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

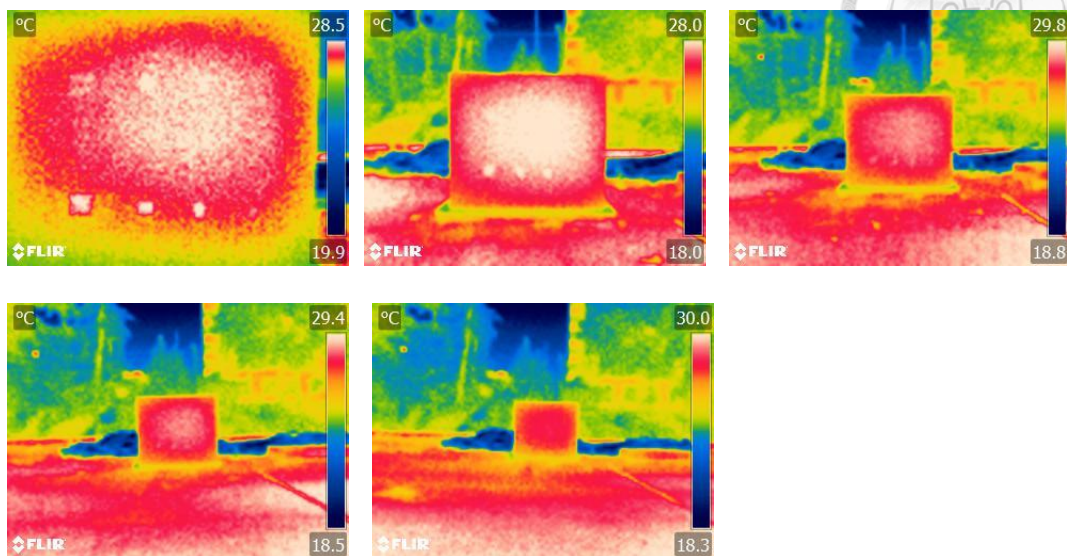


(11)20:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

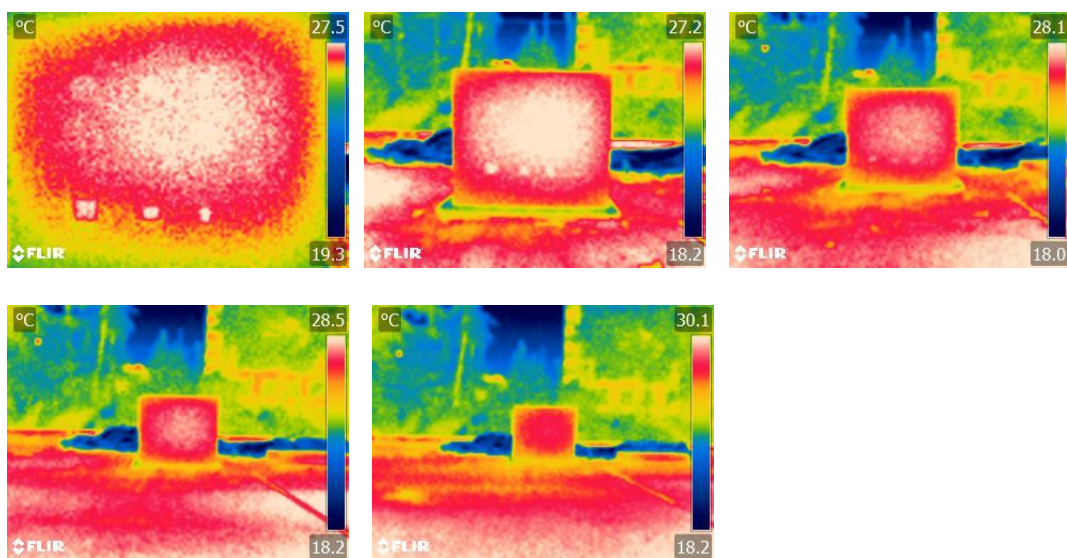




(12)21:00(量測距離按順序為 1m ~ 5m)

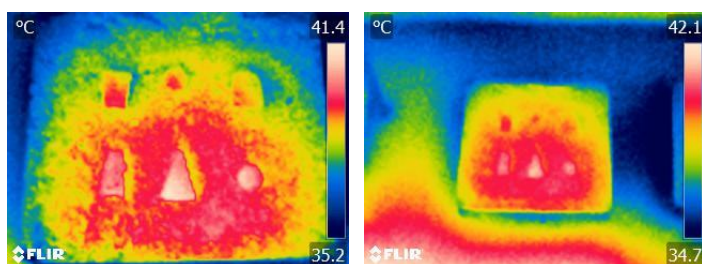


(11)21:30(量測距離按順序為 1m ~ 5m)



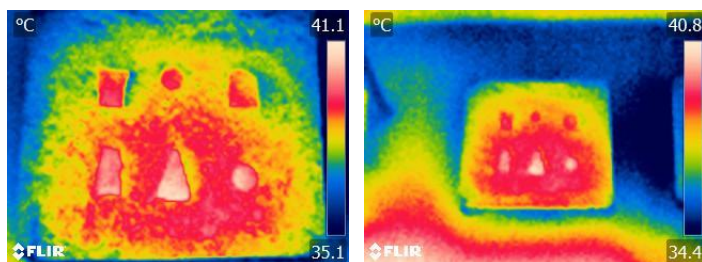
三、第三組試體於不同時段下，量測距離(1m ~ 2m)之紅外線熱成像

(1)15:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)

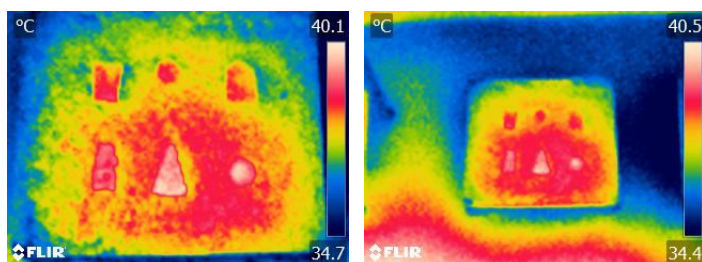




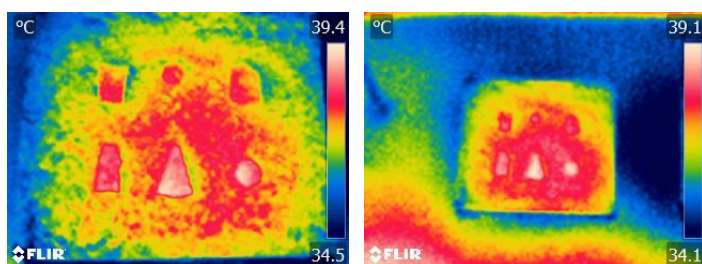
(2)15:30(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



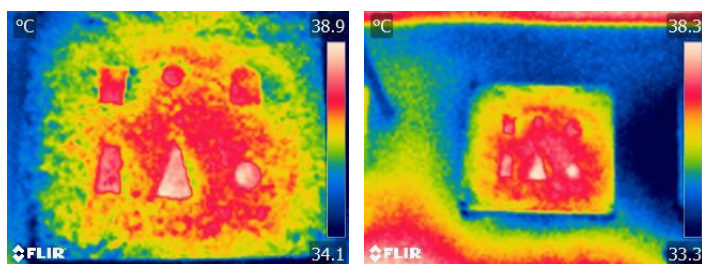
(3)16:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



(4)16:30(量測距離按順序為 1m ~ 2m)

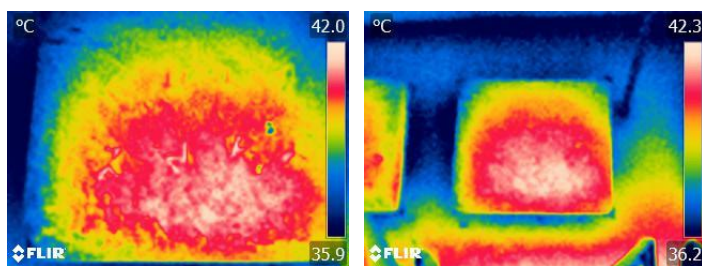


(5)17:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)

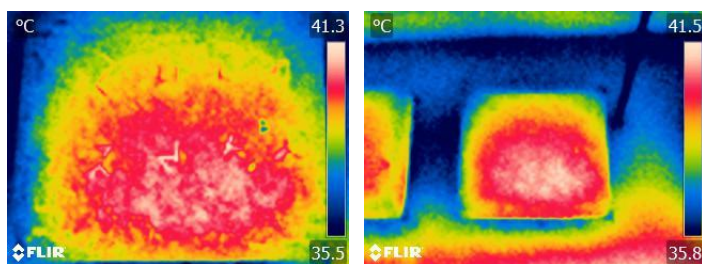


四、第四組試體於不同時段下，量測距離(1m ~ 2m)之紅外線熱成像

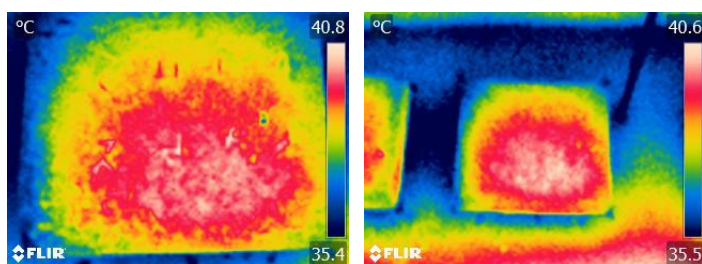
(1)15:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



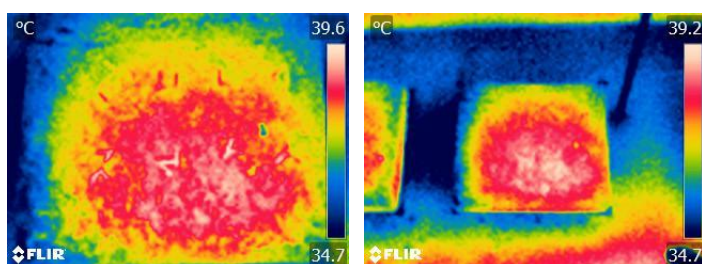
(2)15:30(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



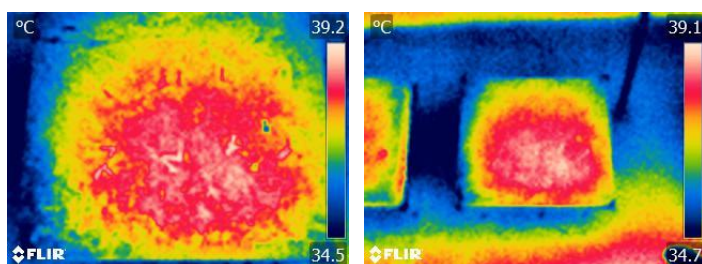
(3)16:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



(4)16:30(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



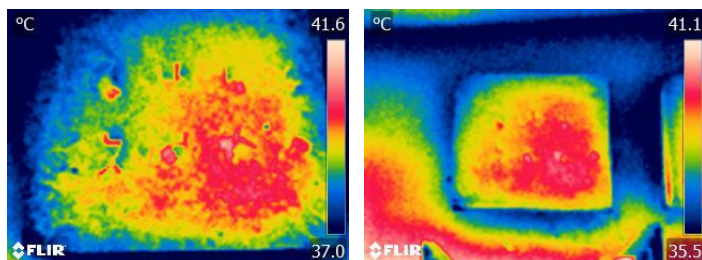
(5)17:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)



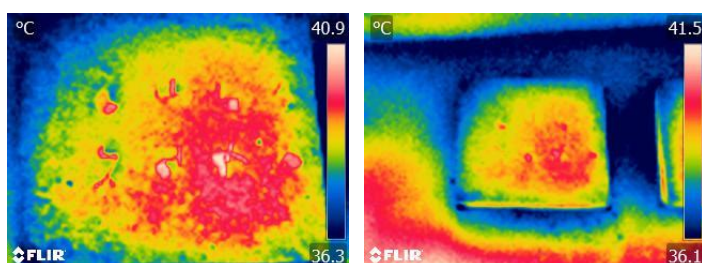


五、第五組試體於不同時段下，量測距離(1m~2m)之紅外線熱成像

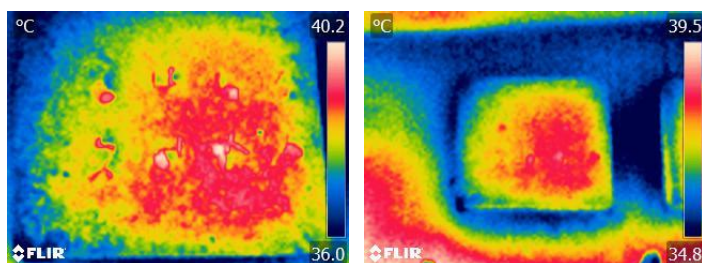
(1)15:00(量測距離按順序為 1m~2m)



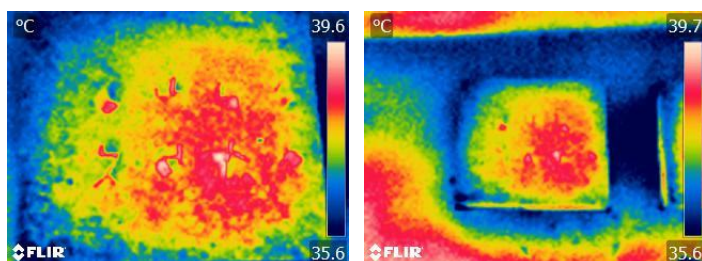
(2)15:30(量測距離按順序為 1m~2m)



(3)16:00(量測距離按順序為 1m~2m)

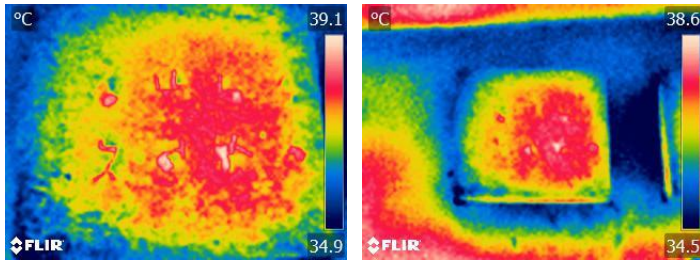


(4)16:30(量測距離按順序為 1m~2m)



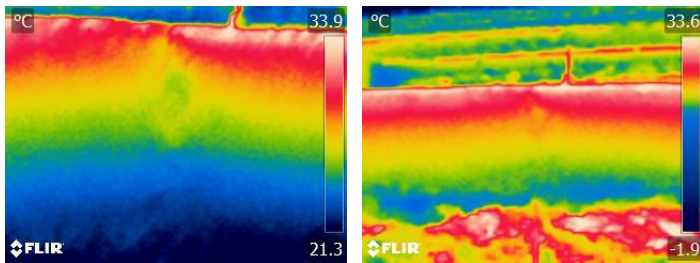


(5)17:00(量測距離按順序為 1m ~ 2m)

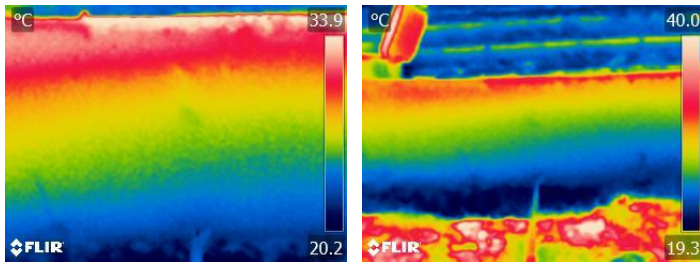


## 六、橋梁實拍於不同量測距離(1m ~ 2m)之紅外線熱成像

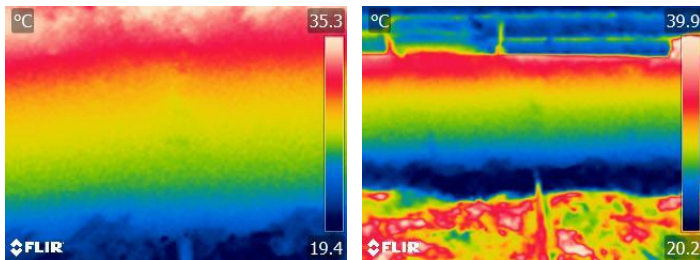
(1)秀朗橋 1



(2)秀朗橋 2

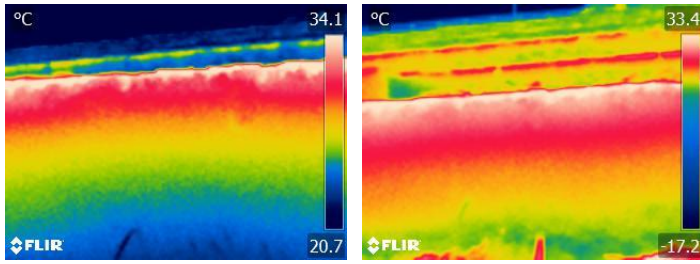


(3)秀朗橋 3

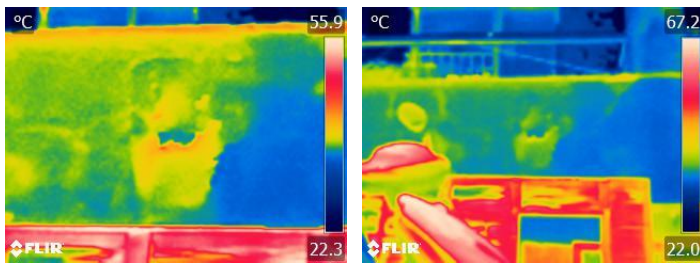




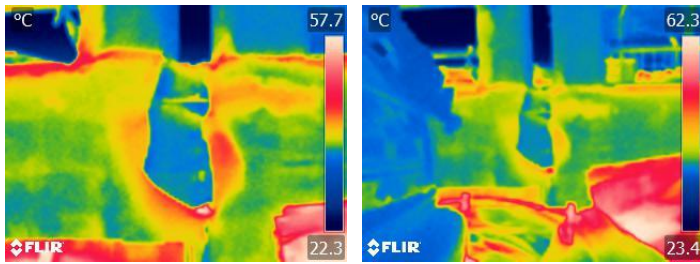
(4) 秀朗橋 4



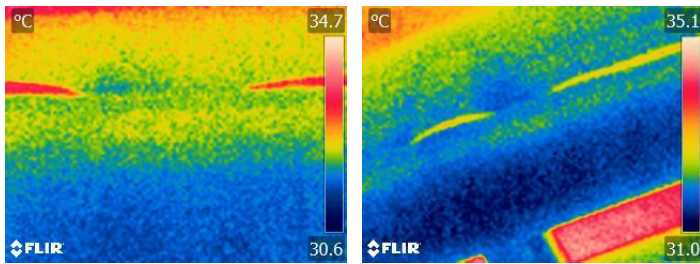
(5) 永福橋 1



(6) 永福橋 2



(7) 永福橋 3



# 附錄 B



附錄 B 包含本研究中五組試體與橋梁實拍經過 Excel 彙整後之數據。

## 一、第一組試體於各個時段之數據

時間	環境溫度(°C)	表面溫度(°C)	60*70-1		試體真實尺寸(cm)				面積(cm <sup>2</sup> )	缺陷溫度(°C)	整體溫度(°C)	周圍溫度(°C)	差異值溫度(°C)	溫度絕對值	尺寸誤差(%)	偵測
			測距(m)	缺陷號碼	長	寬	深度									
1100	29	41	1	1	10	10	3	100	39.2	39.1	39.03	0.17	0.2			
1100	29	41	1	2	15	10	1	150	38.2	38.1	38.02	0.18	0.2			
1100	29	41	1	3	5	5	1	25	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0			
1100	29	41	1	4	20	5	3	100	38.4	38.6	38.72	-0.32	0.3			
1100	29	41	2	1	10	10	3	100	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0			
1100	29	41	2	2	15	10	1	150	38.2	38	37.80	0.40	0.4			
1100	29	41	2	3	5	5	1	25	39.4	39.4	39.40	0.00	0.0			
1100	29	41	2	4	20	5	3	100	38.6	38.9	39.10	-0.50	0.5	3	y	
1100	29	41	3	1	10	10	3	100	39.3	39.1	38.93	0.37	0.4			
1100	29	41	3	2	15	10	1	150	37.9	37.8	37.70	0.20	0.2			
1100	29	41	3	3	5	5	1	25	39.5	39.5	39.50	0.00	0.0			
1100	29	41	3	4	20	5	3	100	38.7	38.6	38.53	0.17	0.2			
1100	29	41	4	1	10	10	3	100	39.2	39.1	39.02	0.18	0.2			
1100	29	41	4	2	15	10	1	150	37.8	37.7	37.60	0.20	0.2			
1100	29	41	4	3	5	5	1	25	39.3	39	38.90	0.40	0.4			
1100	29	41	4	4	20	5	3	100	38.7	38.7	38.70	0.00	0.0			
1100	29	41	5	1	10	10	3	100	39.2	39.1	39.01	0.19	0.2			
1100	29	41	5	2	15	10	1	150	37.9	37.9	37.90	0.00	0.0			
1100	29	41	5	3	5	5	1	25	39.2	39.2	39.20	0.00	0.0			
1100	29	41	5	4	20	5	3	100	38.6	38.7	38.77	-0.17	0.2			
1130	30	41	1	1	10	10	3	100	42.5	42.2	42.00	0.50	0.5	-1.7699	y	
1130	30	41	1	2	15	10	1	150	41.5	41.2	40.96	0.54	0.5	-1.4085	y	
1130	30	41	1	3	5	5	1	25	42.5	42.5	42.50	0.00	0.0			
1130	30	41	1	4	20	5	3	100	41.6	41.7	41.76	-0.16	0.2			
1130	30	41	2	1	10	10	3	100	42.3	42.1	41.94	0.36	0.4			
1130	30	41	2	2	15	10	1	150	41.3	41.1	40.90	0.40	0.4			
1130	30	41	2	3	5	5	1	25	42.3	42.3	42.30	0.00	0.0			
1130	30	41	2	4	20	5	3	100	41.4	41.6	41.73	-0.33	0.3			
1130	30	41	3	1	10	10	3	100	42.3	42.1	41.93	0.37	0.4			
1130	30	41	3	2	15	10	1	150	41.2	41.1	41.00	0.20	0.2			
1130	30	41	3	3	5	5	1	25	42.4	42.3	42.26	0.14	0.1			
1130	30	41	3	4	20	5	3	100	41.6	41.7	41.77	-0.17	0.2			
1130	30	41	4	1	10	10	3	100	42	42	42.00	0.00	0.0			
1130	30	41	4	2	15	10	1	150	40.9	40.7	40.50	0.40	0.4			
1130	30	41	4	3	5	5	1	25	42.2	42.2	42.20	0.00	0.0			
1130	30	41	4	4	20	5	3	100	41.3	41.4	41.47	-0.17	0.2			
1130	30	41	5	1	10	10	3	100	41.6	41.4	41.22	0.38	0.4			
1130	30	41	5	2	15	10	1	150	40.5	40.4	40.30	0.20	0.2			
1130	30	41	5	3	5	5	1	25	41.9	41.9	41.90	0.00	0.0			
1130	30	41	5	4	20	5	3	100	40.9	41	41.07	-0.17	0.2			
1200	31	41	1	1	10	10	3	100	42.9	42.5	42.24	0.66	0.7	-2.1739	y	
1200	31	41	1	2	15	10	1	150	41.7	41.6	41.52	0.18	0.2			
1200	31	41	1	3	5	5	1	25	42.5	42.4	42.37	0.13	0.1			
1200	31	41	1	4	20	5	3	100	41.8	42	42.00	-0.20	0.2			
1200	31	41	2	1	10	10	3	100	42.6	42.2	41.88	0.72	0.7	-14.286	y	
1200	31	41	2	2	15	10	1	150	41.5	41.2	40.90	0.60	0.6	-4.7619	y	
1200	31	41	2	3	5	5	1	25	42.5	42.4	42.37	0.13	0.1			
1200	31	41	2	4	20	5	3	100	41.6	41.7	41.77	-0.17	0.2			
1200	31	41	3	1	10	10	3	100	42.9	42.8	42.72	0.18	0.2			
1200	31	41	3	2	15	10	1	150	41.9	41.8	41.70	0.20	0.2			
1200	31	41	3	3	5	5	1	25	43	43	43.00	0.00	0.0			
1200	31	41	3	4	20	5	3	100	42.1	42.1	42.10	0.00	0.0			
1200	31	41	4	1	10	10	3	100	42.3	42.1	41.94	0.36	0.4			
1200	31	41	4	2	15	10	1	150	41.5	41.3	41.10	0.40	0.4			
1200	31	41	4	3	5	5	1	25	42.6	42.6	42.60	0.00	0.0			
1200	31	41	4	4	20	5	3	100	41.8	41.7	41.63	0.17	0.2			
1200	31	41	5	1	10	10	3	100	41.7	41.5	41.32	0.38	0.4			
1200	31	41	5	2	15	10	1	150	40.6	40.4	40.20	0.40	0.4			
1200	31	41	5	3	5	5	1	25	41.7	41.7	41.70	0.00	0.0			
1200	31	41	5	4	20	5	3	100	41.1	41.2	41.27	-0.17	0.2			
1230	31	42.9	1	1	10	10	3	100	43.2	42.8	42.54	0.66	0.7	-1.3986	y	
1230	31	42.9	1	2	15	10	1	150	42.2	42.1	42.02	0.18	0.2			
1230	31	42.9	1	3	5	5	1	25	43	42.8	42.73	0.27	0.3			

1230	31	42.9	1	4	20	5	3	100	42.2	42.2	42.20	0.00	0.0		
1230	31	42.9	2	1	10	10	3	100	42.8	42.5	42.26	0.54	0.5	-15.493	y
1230	31	42.9	2	2	15	10	1	150	41.7	41.6	41.50	0.20	0.2		
1230	31	42.9	2	3	5	5	1	25	42.6	42.5	42.47	0.13	0.1		
1230	31	42.9	2	4	20	5	3	100	41.7	41.8	41.87	-0.17	0.2		
1230	31	42.9	3	1	10	10	3	100	42.6	42.4	42.23	0.37	0.4		
1230	31	42.9	3	2	15	10	1	150	41.6	41.4	41.20	0.40	0.4		
1230	31	42.9	3	3	5	5	1	25	42.6	42.6	42.60	0.00	0.0		
1230	31	42.9	3	4	20	5	3	100	41.5	41.6	41.67	-0.17	0.2		
1230	31	42.9	4	1	10	10	3	100	42.1	42	41.92	0.18	0.2		
1230	31	42.9	4	2	15	10	1	150	41.2	41.1	41.00	0.20	0.2		
1230	31	42.9	4	3	5	5	1	25	42.1	42	41.97	0.13	0.1		
1230	31	42.9	4	4	20	5	3	100	41.3	41.3	41.30	0.00	0.0		
1230	31	42.9	5	1	10	10	3	100	42.1	42	41.91	0.19	0.2		
1230	31	42.9	5	2	15	10	1	150	41.1	41	40.90	0.20	0.2		
1230	31	42.9	5	3	5	5	1	25	42	42	42.00	0.00	0.0		
1230	31	42.9	5	4	20	5	3	100	41.5	41.6	41.67	-0.17	0.2		
1300	31	40.9	1	1	10	10	3	100	42.8	42.6	42.47	0.33	0.3		
1300	31	40.9	1	2	15	10	1	150	41.8	41.7	41.62	0.18	0.2		
1300	31	40.9	1	3	5	5	1	25	42.6	42.5	42.47	0.13	0.1		
1300	31	40.9	1	4	20	5	3	100	41.7	41.7	41.70	0.00	0.0		
1300	31	40.9	2	1	10	10	3	100	42.3	42.1	41.94	0.36	0.4		
1300	31	40.9	2	2	15	10	1	150	41.4	41.3	41.20	0.20	0.2		
1300	31	40.9	2	3	5	5	1	25	42.2	42.2	42.20	0.00	0.0		
1300	31	40.9	2	4	20	5	3	100	41.3	41.2	41.13	0.17	0.2		
1300	31	40.9	3	1	10	10	3	100	42.2	42.1	42.02	0.18	0.2		
1300	31	40.9	3	2	15	10	1	150	41.4	41.3	41.20	0.20	0.2		
1300	31	40.9	3	3	5	5	1	25	42.2	42.2	42.20	0.00	0.0		
1300	31	40.9	3	4	20	5	3	100	41.2	41.2	41.20	0.00	0.0		
1300	31	40.9	4	1	10	10	3	100	41.9	41.9	41.90	0.00	0.0		
1300	31	40.9	4	2	15	10	1	150	41.2	41.1	41.00	0.20	0.2		
1300	31	40.9	4	3	5	5	1	25	42.1	42	41.97	0.13	0.1		
1300	31	40.9	4	4	20	5	3	100	41	41	41.00	0.00	0.0		
1300	31	40.9	5	1	10	10	3	100	41.9	41.9	41.90	0.00	0.0		
1300	31	40.9	5	2	15	10	1	150	41.1	41.1	41.00	0.10	0.1		
1300	31	40.9	5	3	5	5	1	25	42	42	42.00	0.00	0.0		
1300	31	40.9	5	4	20	5	3	100	40.9	40.9	40.90	0.00	0.0		
1330	30	41.3	1	1	10	10	3	100	42.7	42.2	41.87	0.83	0.8	2.80374	y
1330	30	41.3	1	2	15	10	1	150	41.8	41.5	41.26	0.54	0.5	1.71429	y
1330	30	41.3	1	3	5	5	1	25	42.5	42.1	41.97	0.53	0.5	3.33333	y
1330	30	41.3	1	4	20	5	3	100	41.8	41.7	41.64	0.16	0.2		
1330	30	41.3	2	1	10	10	3	100	42.5	42.1	41.78	0.72	0.7	4.34783	y
1330	30	41.3	2	2	15	10	1	150	41.7	41.4	41.10	0.60	0.6	1.90476	y
1330	30	41.3	2	3	5	5	1	25	42.2	42	41.93	0.27	0.3		
1330	30	41.3	2	4	20	5	3	100	41.7	41.6	41.53	0.17	0.2		
1330	30	41.3	3	1	10	10	3	100	42.3	41.9	41.56	0.74	0.7	7.35294	y
1330	30	41.3	3	2	15	10	1	150	41.5	41.3	41.10	0.40	0.4		
1330	30	41.3	3	3	5	5	1	25	42.1	41.9	41.83	0.27	0.3		
1330	30	41.3	3	4	20	5	3	100	41.5	41.5	41.50	0.00	0.0		
1330	30	41.3	4	1	10	10	3	100	42.5	42.2	41.96	0.54	0.5	-7.1429	y
1330	30	41.3	4	2	15	10	1	150	41.6	41.5	41.40	0.20	0.2		
1330	30	41.3	4	3	5	5	1	25	42.1	42.1	42.10	0.00	0.0		
1330	30	41.3	4	4	20	5	3	100	41.9	41.8	41.73	0.17	0.2		
1330	30	41.3	5	1	10	10	3	100	42.4	42.2	42.02	0.38	0.4		
1330	30	41.3	5	2	15	10	1	150	41.6	41.5	41.40	0.20	0.2		
1330	30	41.3	5	3	5	5	1	25	42.1	42.1	42.10	0.00	0.0		
1330	30	41.3	5	4	20	5	3	100	42	41.9	41.83	0.17	0.2		
1400	30	40.1	1	1	10	10	3	100	42.5	41.9	41.51	0.99	1.0	1.5625	y
1400	30	40.1	1	2	15	10	1	150	41.5	41.2	40.96	0.54	0.5	1.04167	y
1400	30	40.1	1	3	5	5	1	25	42	41.7	41.60	0.40	0.4		
1400	30	40.1	1	4	20	5	3	100	41.6	41.3	41.12	0.48	0.5	-1	y
1400	30	40.1	2	1	10	10	3	100	42.4	41.9	41.50	0.90	0.9	2.43902	y
1400	30	40.1	2	2	15	10	1	150	41.4	41.2	41.00	0.40	0.4		
1400	30	40.1	2	3	5	5	1	25	42	41.8	41.73	0.27	0.3		

1400	30	40.1	2	4	20	5	3	100	41.6	41.5	41.43	0.17	0.2		
1400	30	40.1	3	1	10	10	3	100	42	42	42.00	0.00	0.0		
1400	30	40.1	3	2	15	10	1	150	41.1	41.1	41.10	0.00	0.0		
1400	30	40.1	3	3	5	5	1	25	41.9	41.9	41.90	0.00	0.0		
1400	30	40.1	3	4	20	5	3	100	41.8	41.8	41.80	0.00	0.0		
1400	30	40.1	4	1	10	10	3	100	42.5	42.2	41.96	0.54	0.5	2.40964	y
1400	30	40.1	4	2	15	10	1	150	41.6	41.4	41.20	0.40	0.4		
1400	30	40.1	4	3	5	5	1	25	42.1	42.1	42.10	0.00	0.0		
1400	30	40.1	4	4	20	5	3	100	41.8	41.7	41.63	0.17	0.2		
1400	30	40.1	5	1	10	10	3	100	42.5	42.2	41.92	0.58	0.6	13.2075	y
1400	30	40.1	5	2	15	10	1	150	41.5	41.4	41.30	0.20	0.2		
1400	30	40.1	5	3	5	5	1	25	41.9	41.9	41.90	0.00	0.0		
1400	30	40.1	5	4	20	5	3	100	41.9	41.9	41.90	0.00	0.0		
1900	22	28.7	1	1	10	10	3	100	31.2	30.9	30.70	0.50	0.5	1.20482	y
1900	22	28.7	1	2	15	10	1	150	31.2	31	30.84	0.36	0.4		
1900	22	28.7	1	3	5	5	1	25	31.3	31.1	31.03	0.27	0.3		
1900	22	28.7	1	4	20	5	3	100	31.4	31.1	30.92	0.48	0.5	0.48544	y
1900	22	28.7	2	1	10	10	3	100	31.2	30.9	30.66	0.54	0.5	2.66667	y
1900	22	28.7	2	2	15	10	1	150	31.3	31.1	30.90	0.40	0.4		
1900	22	28.7	2	3	5	5	1	25	31.3	31.1	31.03	0.27	0.3		
1900	22	28.7	2	4	20	5	3	100	31.4	31.1	30.90	0.50	0.5	1.63934	y
1900	22	28.7	3	1	10	10	3	100	31.1	30.9	30.73	0.37	0.4		
1900	22	28.7	3	2	15	10	1	150	31.2	31.1	31.00	0.20	0.2		
1900	22	28.7	3	3	5	5	1	25	31.2	31.1	31.06	0.14	0.1		
1900	22	28.7	3	4	20	5	3	100	31.3	31.1	30.96	0.34	0.3		
1900	22	28.7	4	1	10	10	3	100	31.3	31.1	30.94	0.36	0.4		
1900	22	28.7	4	2	15	10	1	150	31.3	31.2	31.10	0.20	0.2		
1900	22	28.7	4	3	5	5	1	25	31.4	31.3	31.27	0.13	0.1		
1900	22	28.7	4	4	20	5	3	100	31.4	31.3	31.23	0.17	0.2		
1900	22	28.7	5	1	10	10	3	100	31.1	31	30.91	0.19	0.2		
1900	22	28.7	5	2	15	10	1	150	31.4	31.3	31.20	0.20	0.2		
1900	22	28.7	5	3	5	5	1	25	31.3	31.2	31.17	0.13	0.1		
1900	22	28.7	5	4	20	5	3	100	31.4	31.3	31.23	0.17	0.2		
1930	22	28.4	1	1	10	10	3	100	31.3	31	30.80	0.50	0.5	1.21951	y
1930	22	28.4	1	2	15	10	1	150	31.4	31.3	31.22	0.18	0.2		
1930	22	28.4	1	3	5	5	1	25	31.3	31.2	31.17	0.13	0.1		
1930	22	28.4	1	4	20	5	3	100	31.5	31.2	31.02	0.48	0.5	0.48309	y
1930	22	28.4	2	1	10	10	3	100	31	30.8	30.64	0.36	0.4		
1930	22	28.4	2	2	15	10	1	150	31.2	31	30.80	0.40	0.4		
1930	22	28.4	2	3	5	5	1	25	31.1	31	30.97	0.13	0.1		
1930	22	28.4	2	4	20	5	3	100	31.3	31.1	30.97	0.33	0.3		
1930	22	28.4	3	1	10	10	3	100	30.9	30.7	30.53	0.37	0.4		
1930	22	28.4	3	2	15	10	1	150	31.1	30.9	30.70	0.40	0.4		
1930	22	28.4	3	3	5	5	1	25	31.1	31	30.96	0.14	0.1		
1930	22	28.4	3	4	20	5	3	100	31.1	31	30.93	0.17	0.2		
1930	22	28.4	4	1	10	10	3	100	30.9	30.7	30.54	0.36	0.4		
1930	22	28.4	4	2	15	10	1	150	31.2	31.1	31.00	0.20	0.2		
1930	22	28.4	4	3	5	5	1	25	31	31	31.00	0.00	0.0		
1930	22	28.4	4	4	20	5	3	100	31.2	31.1	31.03	0.17	0.2		
1930	22	28.4	5	1	10	10	3	100	31.1	31	30.91	0.19	0.2		
1930	22	28.4	5	2	15	10	1	150	31.3	31.2	31.10	0.20	0.2		
1930	22	28.4	5	3	5	5	1	25	31.3	31.3	31.30	0.00	0.0		
1930	22	28.4	5	4	20	5	3	100	31.4	31.3	31.23	0.17	0.2		
2000	22	24.5	1	1	10	10	3	100	29.2	28.9	28.70	0.50	0.5	-3.7383	y
2000	22	24.5	1	2	15	10	1	150	29	28.9	28.82	0.18	0.2		
2000	22	24.5	1	3	5	5	1	25	29.2	29	28.93	0.27	0.3		
2000	22	24.5	1	4	20	5	3	100	29.5	29.2	29.02	0.48	0.5	-1.4085	y
2000	22	24.5	2	1	10	10	3	100	28.5	28.2	27.96	0.54	0.5	-5.9406	y
2000	22	24.5	2	2	15	10	1	150	28.3	28.2	28.10	0.20	0.2		
2000	22	24.5	2	3	5	5	1	25	28.4	28.3	28.27	0.13	0.1		
2000	22	24.5	2	4	20	5	3	100	28.6	28.4	28.27	0.33	0.3		
2000	22	24.5	3	1	10	10	3	100	28.2	28	27.83	0.37	0.4		
2000	22	24.5	3	2	15	10	1	150	28.2	28	27.80	0.40	0.4		
2000	22	24.5	3	3	5	5	1	25	28.2	28	27.93	0.27	0.3		
2000	22	24.5	3	4	20	5	3	100	28.5	28.3	28.16	0.34	0.3		
2000	22	24.5	4	1	10	10	3	100	28.7	28.5	28.34	0.36	0.4		

2000	22	24.5	4	2	15	10	1	150	28.6	28.4	28.20	0.40	0.4		
2000	22	24.5	4	3	5	5	1	25	28.6	28.6	28.60	0.00	0.0		
2000	22	24.5	4	4	20	5	3	100	28.8	28.7	28.63	0.17	0.2		
2000	22	24.5	5	1	10	10	3	100	28.6	28.4	28.22	0.38	0.4		
2000	22	24.5	5	2	15	10	1	150	28.4	28.3	28.20	0.20	0.2		
2000	22	24.5	5	3	5	5	1	25	28.5	28.5	28.50	0.00	0.0		
2000	22	24.5	5	4	20	5	3	100	28.7	28.6	28.53	0.17	0.2		
2030	22	24.9	1	1	10	10	3	100	28.4	28.1	27.90	0.50	0.5	-4.2254	y
2030	22	24.9	1	2	15	10	1	150	28.3	28.1	27.94	0.36	0.4		
2030	22	24.9	1	3	5	5	1	25	28.3	28.1	28.03	0.27	0.3		
2030	22	24.9	1	4	20	5	3	100	28.6	28.3	28.12	0.48	0.5	0.48309	y
2030	22	24.9	2	1	10	10	3	100	27.1	26.8	26.56	0.54	0.5	-3.8462	y
2030	22	24.9	2	2	15	10	1	150	27	26.9	26.80	0.20	0.2		
2030	22	24.9	2	3	5	5	1	25	27.1	27	26.97	0.13	0.1		
2030	22	24.9	2	4	20	5	3	100	27.4	27.1	26.90	0.50	0.5	1.90476	y
2030	22	24.9	3	1	10	10	3	100	28	27.8	27.63	0.37	0.4		
2030	22	24.9	3	2	15	10	1	150	28	27.9	27.80	0.20	0.2		
2030	22	24.9	3	3	5	5	1	25	28.1	27.9	27.83	0.27	0.3		
2030	22	24.9	3	4	20	5	3	100	28.3	28.1	27.96	0.34	0.3		
2030	22	24.9	4	1	10	10	3	100	28.2	28.1	28.02	0.18	0.2		
2030	22	24.9	4	2	15	10	1	150	28.1	28	27.90	0.20	0.2		
2030	22	24.9	4	3	5	5	1	25	28.1	28.1	28.10	0.00	0.0		
2030	22	24.9	4	4	20	5	3	100	28.3	28.3	28.30	0.00	0.0		
2030	22	24.9	5	1	10	10	3	100	28.2	28	27.82	0.38	0.4		
2030	22	24.9	5	2	15	10	1	150	28	28	28.00	0.00	0.0		
2030	22	24.9	5	3	5	5	1	25	28.1	27.9	27.83	0.27	0.3		
2030	22	24.9	5	4	20	5	3	100	28.2	28.1	28.03	0.17	0.2		
2100	22	27.1	1	1	10	10	3	100	28.1	27.8	27.60	0.50	0.5	1.20482	y
2100	22	27.1	1	2	15	10	1	150	28	27.8	27.64	0.36	0.4		
2100	22	27.1	1	3	5	5	1	25	28.1	27.9	27.83	0.27	0.3		
2100	22	27.1	1	4	20	5	3	100	28.4	28.1	27.92	0.48	0.5	-2.4752	y
2100	22	27.1	2	1	10	10	3	100	27.6	27.4	27.24	0.36	0.4		
2100	22	27.1	2	2	15	10	1	150	27.5	27.4	27.30	0.20	0.2		
2100	22	27.1	2	3	5	5	1	25	27.7	27.6	27.57	0.13	0.1		
2100	22	27.1	2	4	20	5	3	100	27.9	27.7	27.57	0.33	0.3		
2100	22	27.1	3	1	10	10	3	100	27.5	27.3	27.13	0.37	0.4		
2100	22	27.1	3	2	15	10	1	150	27.4	27.3	27.20	0.20	0.2		
2100	22	27.1	3	3	5	5	1	25	27.6	27.5	27.46	0.14	0.1		
2100	22	27.1	3	4	20	5	3	100	27.8	27.6	27.46	0.34	0.3		
2100	22	27.1	4	1	10	10	3	100	27.2	27	26.84	0.36	0.4		
2100	22	27.1	4	2	15	10	1	150	27.1	27.1	27.10	0.00	0.0		
2100	22	27.1	4	3	5	5	1	25	27.3	27.2	27.17	0.13	0.1		
2100	22	27.1	4	4	20	5	3	100	27.4	27.3	27.23	0.17	0.2		
2100	22	27.1	5	1	10	10	3	100	27.2	27	26.82	0.38	0.4		
2100	22	27.1	5	2	15	10	1	150	27.2	27.1	27.00	0.20	0.2		
2100	22	27.1	5	3	5	5	1	25	27.2	27.2	27.20	0.00	0.0		
2100	22	27.1	5	4	20	5	3	100	27.5	27.3	27.16	0.34	0.3		
2130	22	27.1	1	1	10	10	3	100	27.3	27	26.80	0.50	0.5	-2.9126	y
2130	22	27.1	1	2	15	10	1	150	27.2	27.1	27.02	0.18	0.2		
2130	22	27.1	1	3	5	5	1	25	27.3	27.1	27.03	0.27	0.3		
2130	22	27.1	1	4	20	5	3	100	27.6	27.4	27.28	0.32	0.3		
2130	22	27.1	2	1	10	10	3	100	27.3	27.1	26.94	0.36	0.4		
2130	22	27.1	2	2	15	10	1	150	27.2	27.1	27.00	0.20	0.2		
2130	22	27.1	2	3	5	5	1	25	27.3	27.3	27.30	0.00	0.0		
2130	22	27.1	2	4	20	5	3	100	27.6	27.4	27.27	0.33	0.3		
2130	22	27.1	3	1	10	10	3	100	27.2	27	26.83	0.37	0.4		
2130	22	27.1	3	2	15	10	1	150	27.2	27.1	27.00	0.20	0.2		
2130	22	27.1	3	3	5	5	1	25	27.3	27.2	27.16	0.14	0.1		
2130	22	27.1	3	4	20	5	3	100	27.5	27.3	27.16	0.34	0.3		
2130	22	27.1	4	1	10	10	3	100	27.2	27	26.84	0.36	0.4		
2130	22	27.1	4	2	15	10	1	150	27.1	27.1	27.10	0.00	0.0		
2130	22	27.1	4	3	5	5	1	25	27.1	27.1	27.10	0.00	0.0		
2130	22	27.1	4	4	20	5	3	100	27.4	27.3	27.23	0.17	0.2		
2130	22	27.1	5	1	10	10	3	100	26.9	26.8	26.71	0.19	0.2		
2130	22	27.1	5	2	15	10	1	150	26.9	26.8	26.70	0.20	0.2		
2130	22	27.1	5	3	5	5	1	25	27	27	27.00	0.00	0.0		
2130	22	27.1	5	4	20	5	3	100	27.2	27.1	27.03	0.17	0.2		



1130	30	38.1	4	3	3	1.5	0.5	4.5	38.4	38.4	38.40	0.00	0.0
1130	30	38.1	4	4	2	0.5	0.5	1	38.8	38.7	38.68	0.12	0.1
1130	30	38.1	4	5	5	5	3.5	25	39.5	39.6	39.73	-0.23	0.2
1130	30	38.1	4	6	3	3	3.5	9	38.4	38.4	38.40	0.00	0.0
1130	30	38.1	4	7	3	1.5	3.5	4.5	38	38	38.00	0.00	0.0
1130	30	38.1	4	8	2	0.5	3.5	1	38.4	38.4	38.40	0.00	0.0
1130	30	38.1	5	1	5	5	0.5	25	39.2	39.2	39.20	0.00	0.0
1130	30	38.1	5	2	3	3	0.5	9	38.2	38.3	38.40	-0.20	0.2
1130	30	38.1	5	3	3	1.5	0.5	4.5	38.4	38.4	38.40	0.00	0.0
1130	30	38.1	5	4	2	0.5	0.5	1	38.8	38.7	38.67	0.13	0.1
1130	30	38.1	5	5	5	5	3.5	25	39.5	39.6	39.77	-0.27	0.3
1130	30	38.1	5	6	3	3	3.5	9	38.4	38.4	38.40	0.00	0.0
1130	30	38.1	5	7	3	1.5	3.5	4.5	38.1	38.1	38.10	0.00	0.0
1130	30	38.1	5	8	2	0.5	3.5	1	38.5	38.5	38.50	0.00	0.0
1200	31	37.9	1	1	5	5	0.5	25	40.8	40.8	40.80	0.00	0.0
1200	31	37.9	1	2	3	3	0.5	9	40	40	40.00	0.00	0.0
1200	31	37.9	1	3	3	1.5	0.5	4.5	40.3	40.2	40.19	0.11	0.1
1200	31	37.9	1	4	2	0.5	0.5	1	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1200	31	37.9	1	5	5	5	3.5	25	40.8	41.1	41.17	-0.37	0.4
1200	31	37.9	1	6	3	3	3.5	9	39.5	39.8	39.84	-0.34	0.3
1200	31	37.9	1	7	3	1.5	3.5	4.5	39.4	39.5	39.51	-0.11	0.1
1200	31	37.9	1	8	2	0.5	3.5	1	40	40	40.00	0.00	0.0
1200	31	37.9	2	1	5	5	0.5	25	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1200	31	37.9	2	2	3	3	0.5	9	39.6	39.6	39.60	0.00	0.0
1200	31	37.9	2	3	3	1.5	0.5	4.5	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1200	31	37.9	2	4	2	0.5	0.5	1	40	40	40.00	0.00	0.0
1200	31	37.9	2	5	5	5	3.5	25	40.6	40.7	40.76	-0.16	0.2
1200	31	37.9	2	6	3	3	3.5	9	39.3	39.5	39.57	-0.27	0.3
1200	31	37.9	2	7	3	1.5	3.5	4.5	39.1	39.2	39.22	-0.12	0.1
1200	31	37.9	2	8	2	0.5	3.5	1	39.5	39.5	39.50	0.00	0.0
1200	31	37.9	3	1	5	5	0.5	25	39.5	39.6	39.69	-0.19	0.2
1200	31	37.9	3	2	3	3	0.5	9	38.8	38.8	38.80	0.00	0.0
1200	31	37.9	3	3	3	1.5	0.5	4.5	38.8	38.8	38.80	0.00	0.0
1200	31	37.9	3	4	2	0.5	0.5	1	39	39	39.00	0.00	0.0
1200	31	37.9	3	5	5	5	3.5	25	39.9	40	40.09	-0.19	0.2
1200	31	37.9	3	6	3	3	3.5	9	38.8	38.9	38.96	-0.16	0.2
1200	31	37.9	3	7	3	1.5	3.5	4.5	38.5	38.5	38.50	0.00	0.0
1200	31	37.9	3	8	2	0.5	3.5	1	38.8	38.8	38.80	0.00	0.0
1200	31	37.9	4	1	5	5	0.5	25	39.5	39.6	39.73	-0.23	0.2
1200	31	37.9	4	2	3	3	0.5	9	38.7	38.6	38.52	0.18	0.2
1200	31	37.9	4	3	3	1.5	0.5	4.5	38.7	38.7	38.70	0.00	0.0
1200	31	37.9	4	4	2	0.5	0.5	1	38.9	38.9	38.90	0.00	0.0
1200	31	37.9	4	5	5	5	3.5	25	40.2	40.2	40.20	0.00	0.0
1200	31	37.9	4	6	3	3	3.5	9	39	39	39.00	0.00	0.0
1200	31	37.9	4	7	3	1.5	3.5	4.5	38.6	38.7	38.75	-0.15	0.1
1200	31	37.9	4	8	2	0.5	3.5	1	38.7	38.7	38.70	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	1	5	5	0.5	25	39.2	39.2	39.20	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	2	3	3	0.5	9	38.6	38.6	38.60	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	3	3	1.5	0.5	4.5	38.8	38.8	38.80	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	4	2	0.5	0.5	1	39	39	39.00	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	5	5	5	3.5	25	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	6	3	3	3.5	9	38.9	38.9	38.90	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	7	3	1.5	3.5	4.5	38.8	38.8	38.80	0.00	0.0
1200	31	37.9	5	8	2	0.5	3.5	1	38.9	39	39.03	-0.13	0.1
1230	31	40.5	1	1	5	5	0.5	25	41.7	41.7	41.70	0.00	0.0
1230	31	40.5	1	2	3	3	0.5	9	41.2	41.1	41.09	0.11	0.1
1230	31	40.5	1	3	3	1.5	0.5	4.5	41.4	41.3	41.29	0.11	0.1
1230	31	40.5	1	4	2	0.5	0.5	1	41.6	41.6	41.60	0.00	0.0
1230	31	40.5	1	5	5	5	3.5	25	41.4	41.6	41.65	-0.25	0.2
1230	31	40.5	1	6	3	3	3.5	9	40.2	40.4	40.43	-0.22	0.2
1230	31	40.5	1	7	3	1.5	3.5	4.5	40	40.2	40.21	-0.21	0.2
1230	31	40.5	1	8	2	0.5	3.5	1	40.7	40.8	40.80	-0.10	0.1
1230	31	40.5	2	1	5	5	0.5	25	41.8	41.8	41.80	0.00	0.0
1230	31	40.5	2	2	3	3	0.5	9	41.2	41.2	41.20	0.00	0.0
1230	31	40.5	2	3	3	1.5	0.5	4.5	41.4	41.4	41.40	0.00	0.0
1230	31	40.5	2	4	2	0.5	0.5	1	41.7	41.7	41.70	0.00	0.0



1230	31	40.5	2	5	5	5	3.5	25	41.5	41.6	41.66	-0.16	0.2
1230	31	40.5	2	6	3	3	3.5	9	40.5	40.6	40.63	-0.13	0.1
1230	31	40.5	2	7	3	1.5	3.5	4.5	40.3	40.4	40.42	-0.12	0.1
1230	31	40.5	2	8	2	0.5	3.5	1	41	41	41.00	0.00	0.0
1230	31	40.5	3	1	5	5	0.5	25	41.2	41.1	41.01	0.19	0.2
1230	31	40.5	3	2	3	3	0.5	9	40.8	40.7	40.64	0.16	0.2
1230	31	40.5	3	3	3	1.5	0.5	4.5	40.9	40.8	40.77	0.13	0.1
1230	31	40.5	3	4	2	0.5	0.5	1	41.2	41.1	41.08	0.12	0.1
1230	31	40.5	3	5	5	5	3.5	25	41	41.2	41.38	-0.38	0.4
1230	31	40.5	3	6	3	3	3.5	9	40.1	40.2	40.26	-0.16	0.2
1230	31	40.5	3	7	3	1.5	3.5	4.5	40	40	40.00	0.00	0.0
1230	31	40.5	3	8	2	0.5	3.5	1	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	1	5	5	0.5	25	40.8	40.8	40.80	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	2	3	3	0.5	9	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	3	3	1.5	0.5	4.5	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	4	2	0.5	0.5	1	40.9	40.9	40.90	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	5	5	5	3.5	25	40.6	40.6	40.60	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	6	3	3	3.5	9	39.8	39.9	39.98	-0.18	0.2
1230	31	40.5	4	7	3	1.5	3.5	4.5	39.8	39.8	39.80	0.00	0.0
1230	31	40.5	4	8	2	0.5	3.5	1	40.3	40.2	40.18	0.12	0.1
1230	31	40.5	5	1	5	5	0.5	25	41	41	41.00	0.00	0.0
1230	31	40.5	5	2	3	3	0.5	9	40.3	40.4	40.50	-0.20	0.2
1230	31	40.5	5	3	3	1.5	0.5	4.5	40.6	40.6	40.60	0.00	0.0
1230	31	40.5	5	4	2	0.5	0.5	1	40.8	40.7	40.67	0.13	0.1
1230	31	40.5	5	5	5	5	3.5	25	40.7	40.7	40.70	0.00	0.0
1230	31	40.5	5	6	3	3	3.5	9	39.8	39.8	39.80	0.00	0.0
1230	31	40.5	5	7	3	1.5	3.5	4.5	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1230	31	40.5	5	8	2	0.5	3.5	1	40.2	40.1	40.07	0.13	0.1
1300	31	38.6	1	1	5	5	0.5	25	40.9	40.9	40.90	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	2	3	3	0.5	9	40.4	40.3	40.29	0.11	0.1
1300	31	38.6	1	3	3	1.5	0.5	4.5	40.5	40.4	40.39	0.11	0.1
1300	31	38.6	1	4	2	0.5	0.5	1	40.7	40.7	40.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	5	5	5	3.5	25	40.6	40.8	40.85	-0.24	0.2
1300	31	38.6	1	6	3	3	3.5	9	39.6	39.7	39.71	-0.11	0.1
1300	31	38.6	1	7	3	1.5	3.5	4.5	39.5	39.6	39.61	-0.11	0.1
1300	31	38.6	1	8	2	0.5	3.5	1	40	40.1	40.10	-0.10	0.1
1300	31	38.6	2	1	5	5	0.5	25	40.8	40.8	40.80	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	2	3	3	0.5	9	40.3	40.3	40.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	3	3	1.5	0.5	4.5	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	4	2	0.5	0.5	1	40.7	40.7	40.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	5	5	5	3.5	25	40.5	40.7	40.81	-0.31	0.3
1300	31	38.6	2	6	3	3	3.5	9	39.7	39.8	39.83	-0.13	0.1
1300	31	38.6	2	7	3	1.5	3.5	4.5	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	8	2	0.5	3.5	1	40.1	40.2	40.21	-0.11	0.1
1300	31	38.6	3	1	5	5	0.5	25	40.7	40.7	40.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	2	3	3	0.5	9	40.1	40	39.94	0.16	0.2
1300	31	38.6	3	3	3	1.5	0.5	4.5	40.2	40.2	40.20	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	4	2	0.5	0.5	1	40.3	40.3	40.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	5	5	5	3.5	25	40.5	40.6	40.69	-0.19	0.2
1300	31	38.6	3	6	3	3	3.5	9	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	7	3	1.5	3.5	4.5	39.4	39.5	39.53	-0.13	0.1
1300	31	38.6	3	8	2	0.5	3.5	1	39.8	39.8	39.80	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	1	5	5	0.5	25	40.6	40.6	40.60	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	2	3	3	0.5	9	40	40	40.00	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	3	3	1.5	0.5	4.5	40.2	40.1	40.05	0.15	0.1
1300	31	38.6	4	4	2	0.5	0.5	1	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	5	5	5	3.5	25	40.5	40.6	40.73	-0.23	0.2
1300	31	38.6	4	6	3	3	3.5	9	39.6	39.7	39.78	-0.18	0.2
1300	31	38.6	4	7	3	1.5	3.5	4.5	39.5	39.5	39.50	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	8	2	0.5	3.5	1	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	1	5	5	0.5	25	40.2	40.2	40.20	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	2	3	3	0.5	9	39.6	39.6	39.60	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	3	3	1.5	0.5	4.5	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	4	2	0.5	0.5	1	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	5	5	5	3.5	25	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	6	3	3	3.5	9	39.5	39.5	39.50	0.00	0.0

1300	31	38.6	5	7	3	1.5	3.5	4.5	39.2	39.3	39.37	-0.17	0.2
1300	31	38.6	5	8	2	0.5	3.5	1	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	1	5	5	0.5	25	41.6	41.5	41.48	0.12	0.1
1300	31	38.6	1	2	3	3	0.5	9	41.1	41	40.99	0.11	0.1
1300	31	38.6	1	3	3	1.5	0.5	4.5	41.4	41.4	41.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	4	2	0.5	0.5	1	41.6	41.6	41.60	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	5	5	5	3.5	25	41	41	41.00	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	6	3	3	3.5	9	40	40.2	40.23	-0.23	0.2
1300	31	38.6	1	7	3	1.5	3.5	4.5	40.1	40.1	40.10	0.00	0.0
1300	31	38.6	1	8	2	0.5	3.5	1	40.8	40.7	40.70	0.10	0.1
1300	31	38.6	2	1	5	5	0.5	25	41.2	41.2	41.20	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	2	3	3	0.5	9	40.8	40.8	40.80	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	3	3	1.5	0.5	4.5	41	41	41.00	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	4	2	0.5	0.5	1	41.2	41.2	41.20	0.00	0.0
1300	31	38.6	2	5	5	5	3.5	25	40.6	40.7	40.76	-0.16	0.2
1300	31	38.6	2	6	3	3	3.5	9	39.9	40	40.03	-0.13	0.1
1300	31	38.6	2	7	3	1.5	3.5	4.5	39.8	39.9	39.92	-0.12	0.1
1300	31	38.6	2	8	2	0.5	3.5	1	40.5	40.4	40.39	0.11	0.1
1300	31	38.6	3	1	5	5	0.5	25	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	2	3	3	0.5	9	40.2	40.1	40.04	0.16	0.2
1300	31	38.6	3	3	3	1.5	0.5	4.5	40.3	40.3	40.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	4	2	0.5	0.5	1	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	5	5	5	3.5	25	40.3	40.3	40.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	6	3	3	3.5	9	39.5	39.6	39.66	-0.16	0.2
1300	31	38.6	3	7	3	1.5	3.5	4.5	39.4	39.4	39.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	3	8	2	0.5	3.5	1	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	1	5	5	0.5	25	40.6	40.5	40.37	0.23	0.2
1300	31	38.6	4	2	3	3	0.5	9	40.1	40.1	40.10	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	3	3	1.5	0.5	4.5	40.2	40.2	40.20	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	4	2	0.5	0.5	1	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	5	5	5	3.5	25	40.3	40.3	40.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	6	3	3	3.5	9	39.5	39.5	39.50	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	7	3	1.5	3.5	4.5	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	4	8	2	0.5	3.5	1	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	1	5	5	0.5	25	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	2	3	3	0.5	9	40	40.1	40.20	-0.20	0.2
1300	31	38.6	5	3	3	1.5	0.5	4.5	40	40	40.00	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	4	2	0.5	0.5	1	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	5	5	5	3.5	25	40.1	40.2	40.37	-0.27	0.3
1300	31	38.6	5	6	3	3	3.5	9	39.4	39.4	39.40	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	7	3	1.5	3.5	4.5	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0
1300	31	38.6	5	8	2	0.5	3.5	1	39.6	39.6	39.60	0.00	0.0
1400	30	38.7	1	1	5	5	0.5	25	41.1	40.9	40.86	0.25	0.2
1400	30	38.7	1	2	3	3	0.5	9	40.6	40.6	40.60	0.00	0.0
1400	30	38.7	1	3	3	1.5	0.5	4.5	40.7	40.7	40.70	0.00	0.0
1400	30	38.7	1	4	2	0.5	0.5	1	40.9	40.9	40.90	0.00	0.0
1400	30	38.7	1	5	5	5	3.5	25	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1400	30	38.7	1	6	3	3	3.5	9	39.6	39.6	39.60	0.00	0.0
1400	30	38.7	1	7	3	1.5	3.5	4.5	39.4	39.5	39.51	-0.11	0.1
1400	30	38.7	1	8	2	0.5	3.5	1	40	40	40.00	0.00	0.0
1400	30	38.7	2	1	5	5	0.5	25	41.2	41.1	41.04	0.16	0.2
1400	30	38.7	2	2	3	3	0.5	9	40.8	40.8	40.80	0.00	0.0
1400	30	38.7	2	3	3	1.5	0.5	4.5	41.1	41	40.98	0.12	0.1
1400	30	38.7	2	4	2	0.5	0.5	1	41.1	41.1	41.10	0.00	0.0
1400	30	38.7	2	5	5	5	3.5	25	40.7	40.7	40.70	0.00	0.0
1400	30	38.7	2	6	3	3	3.5	9	40	39.9	39.87	0.13	0.1
1400	30	38.7	2	7	3	1.5	3.5	4.5	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1400	30	38.7	2	8	2	0.5	3.5	1	40.4	40.4	40.40	0.00	0.0
1400	30	38.7	3	1	5	5	0.5	25	40.3	40.4	40.49	-0.19	0.2
1400	30	38.7	3	2	3	3	0.5	9	40.1	40.1	40.10	0.00	0.0
1400	30	38.7	3	3	3	1.5	0.5	4.5	40.2	40.2	40.20	0.00	0.0
1400	30	38.7	3	4	2	0.5	0.5	1	40.5	40.5	40.50	0.00	0.0
1400	30	38.7	3	5	5	5	3.5	25	39.9	40	40.09	-0.19	0.2
1400	30	38.7	3	6	3	3	3.5	9	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0
1400	30	38.7	3	7	3	1.5	3.5	4.5	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0
1400	30	38.7	3	8	2	0.5	3.5	1	39.9	39.8	39.78	0.12	0.1

1400	30	38.7	4	1	5	5	0.5	25	40.4	40.5	40.63	-0.23	0.2
1400	30	38.7	4	2	3	3	0.5	9	40.1	40.1	40.10	0.00	0.0
1400	30	38.7	4	3	3	1.5	0.5	4.5	40.2	40.2	40.20	0.00	0.0
1400	30	38.7	4	4	2	0.5	0.5	1	40.4	40.5	40.52	-0.12	0.1
1400	30	38.7	4	5	5	5	3.5	25	40	40.1	40.23	-0.23	0.2
1400	30	38.7	4	6	3	3	3.5	9	39.3	39.3	39.30	0.00	0.0
1400	30	38.7	4	7	3	1.5	3.5	4.5	39	39	39.00	0.00	0.0
1400	30	38.7	4	8	2	0.5	3.5	1	39.7	39.7	39.70	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	1	5	5	0.5	25	40.1	40.1	40.10	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	2	3	3	0.5	9	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	3	3	1.5	0.5	4.5	39.9	39.9	39.90	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	4	2	0.5	0.5	1	40.3	40.3	40.30	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	5	5	5	3.5	25	39.7	39.8	39.97	-0.27	0.3
1400	30	38.7	5	6	3	3	3.5	9	39.1	39.1	39.10	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	7	3	1.5	3.5	4.5	39.2	39.2	39.20	0.00	0.0
1400	30	38.7	5	8	2	0.5	3.5	1	39.6	39.7	39.73	-0.13	0.1
1900	22	30.5	1	1	5	5	0.5	25	32.5	32.4	32.38	0.12	0.1
1900	22	30.5	1	2	3	3	0.5	9	32.8	32.7	32.69	0.11	0.1
1900	22	30.5	1	3	3	1.5	0.5	4.5	32.7	32.6	32.59	0.11	0.1
1900	22	30.5	1	4	2	0.5	0.5	1	32.3	32.3	32.30	0.00	0.0
1900	22	30.5	1	5	5	5	3.5	25	32.1	31.8	31.73	0.37	0.4
1900	22	30.5	1	6	3	3	3.5	9	32.1	31.8	31.76	0.34	0.3
1900	22	30.5	1	7	3	1.5	3.5	4.5	32.3	31.9	31.87	0.43	0.4
1900	22	30.5	1	8	2	0.5	3.5	1	31.7	31.6	31.60	0.10	0.1
1900	22	30.5	2	1	5	5	0.5	25	33.3	33.2	33.14	0.16	0.2
1900	22	30.5	2	2	3	3	0.5	9	33.5	33.4	33.37	0.13	0.1
1900	22	30.5	2	3	3	1.5	0.5	4.5	33.5	33.4	33.38	0.12	0.1
1900	22	30.5	2	4	2	0.5	0.5	1	33.2	33.2	33.20	0.00	0.0
1900	22	30.5	2	5	5	5	3.5	25	33	32.8	32.69	0.31	0.3
1900	22	30.5	2	6	3	3	3.5	9	33.1	32.9	32.83	0.27	0.3
1900	22	30.5	2	7	3	1.5	3.5	4.5	33.1	33	32.98	0.12	0.1
1900	22	30.5	2	8	2	0.5	3.5	1	32.8	32.8	32.80	0.00	0.0
1900	22	30.5	3	1	5	5	0.5	25	32.2	32.1	32.01	0.19	0.2
1900	22	30.5	3	2	3	3	0.5	9	32.5	32.4	32.34	0.16	0.2
1900	22	30.5	3	3	3	1.5	0.5	4.5	32.5	32.5	32.50	0.00	0.0
1900	22	30.5	3	4	2	0.5	0.5	1	32.1	32.1	32.10	0.00	0.0
1900	22	30.5	3	5	5	5	3.5	25	32	31.8	31.62	0.38	0.4
1900	22	30.5	3	6	3	3	3.5	9	32	31.9	31.84	0.16	0.2
1900	22	30.5	3	7	3	1.5	3.5	4.5	32	31.9	31.87	0.13	0.1
1900	22	30.5	3	8	2	0.5	3.5	1	31.9	31.8	31.78	0.12	0.1
1900	22	30.5	4	1	5	5	0.5	25	31.9	31.9	31.90	0.00	0.0
1900	22	30.5	4	2	3	3	0.5	9	32.3	32.2	32.12	0.18	0.2
1900	22	30.5	4	3	3	1.5	0.5	4.5	32.4	32.3	32.25	0.15	0.1
1900	22	30.5	4	4	2	0.5	0.5	1	32.1	32.2	32.22	-0.12	0.1
1900	22	30.5	4	5	5	5	3.5	25	31.8	31.7	31.57	0.23	0.2
1900	22	30.5	4	6	3	3	3.5	9	31.9	31.9	31.90	0.00	0.0
1900	22	30.5	4	7	3	1.5	3.5	4.5	32	32	32.00	0.00	0.0
1900	22	30.5	4	8	2	0.5	3.5	1	31.8	31.8	31.80	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	1	5	5	0.5	25	31.6	31.6	31.60	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	2	3	3	0.5	9	32.1	32.1	32.10	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	3	3	1.5	0.5	4.5	32.2	32.2	32.20	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	4	2	0.5	0.5	1	31.9	31.9	31.90	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	5	5	5	3.5	25	31.3	31.3	31.30	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	6	3	3	3.5	9	31.5	31.5	31.50	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	7	3	1.5	3.5	4.5	31.6	31.6	31.60	0.00	0.0
1900	22	30.5	5	8	2	0.5	3.5	1	31.7	31.7	31.70	0.00	0.0
1930	22	29.7	1	1	5	5	0.5	25	32.1	31.9	31.86	0.25	0.2
1930	22	29.7	1	2	3	3	0.5	9	32.5	32.3	32.28	0.23	0.2
1930	22	29.7	1	3	3	1.5	0.5	4.5	32.4	32.3	32.29	0.11	0.1
1930	22	29.7	1	4	2	0.5	0.5	1	32.1	32	32.00	0.10	0.1
1930	22	29.7	1	5	5	5	3.5	25	31.8	31.5	31.43	0.37	0.4
1930	22	29.7	1	6	3	3	3.5	9	32	31.6	31.55	0.45	0.4
1930	22	29.7	1	7	3	1.5	3.5	4.5	32	31.7	31.68	0.32	0.3
1930	22	29.7	1	8	2	0.5	3.5	1	31.8	31.7	31.70	0.10	0.1
1930	22	29.7	2	1	5	5	0.5	25	32.4	32.3	32.24	0.16	0.2
1930	22	29.7	2	2	3	3	0.5	9	32.8	32.7	32.67	0.13	0.1

1930	22	29.7	2	3	3	1.5	0.5	4.5	32.8	32.8	32.80	0.00	0.0		
1930	22	29.7	2	4	2	0.5	0.5	1	32.5	32.5	32.50	0.00	0.0		
1930	22	29.7	2	5	5	5	3.5	25	32.2	32	31.89	0.31	0.3		
1930	22	29.7	2	6	3	3	3.5	9	32.2	32	31.93	0.27	0.3		
1930	22	29.7	2	7	3	1.5	3.5	4.5	32.4	32.1	32.04	0.36	0.4		
1930	22	29.7	2	8	2	0.5	3.5	1	32	31.9	31.89	0.11	0.1		
1930	22	29.7	3	1	5	5	0.5	25	31.9	31.8	31.71	0.19	0.2		
1930	22	29.7	3	2	3	3	0.5	9	32.3	32.2	32.14	0.16	0.2		
1930	22	29.7	3	3	3	1.5	0.5	4.5	32.4	32.4	32.40	0.00	0.0		
1930	22	29.7	3	4	2	0.5	0.5	1	32.2	32.1	32.08	0.12	0.1		
1930	22	29.7	3	5	5	5	3.5	25	31.7	31.5	31.32	0.38	0.4		
1930	22	29.7	3	6	3	3	3.5	9	31.8	31.7	31.64	0.16	0.2		
1930	22	29.7	3	7	3	1.5	3.5	4.5	31.9	31.8	31.77	0.13	0.1		
1930	22	29.7	3	8	2	0.5	3.5	1	31.6	31.6	31.60	0.00	0.0		
1930	22	29.7	4	1	5	5	0.5	25	31.8	31.7	31.57	0.23	0.2		
1930	22	29.7	4	2	3	3	0.5	9	32.1	32.1	32.10	0.00	0.0		
1930	22	29.7	4	3	3	1.5	0.5	4.5	32.2	32.2	32.20	0.00	0.0		
1930	22	29.7	4	4	2	0.5	0.5	1	31.8	31.8	31.80	0.00	0.0		
1930	22	29.7	4	5	5	5	3.5	25	31.4	31.3	31.17	0.23	0.2		
1930	22	29.7	4	6	3	3	3.5	9	31.5	31.4	31.32	0.18	0.2		
1930	22	29.7	4	7	3	1.5	3.5	4.5	31.5	31.5	31.50	0.00	0.0		
1930	22	29.7	4	8	2	0.5	3.5	1	31.5	31.5	31.50	0.00	0.0		
1930	22	29.7	5	1	5	5	0.5	25	31.7	31.6	31.43	0.27	0.3		
1930	22	29.7	5	2	3	3	0.5	9	32	32	32.00	0.00	0.0		
1930	22	29.7	5	3	3	1.5	0.5	4.5	32	31.9	31.83	0.17	0.2		
1930	22	29.7	5	4	2	0.5	0.5	1	31.8	31.8	31.80	0.00	0.0		
1930	22	29.7	5	5	5	5	3.5	25	31.4	31.4	31.40	0.00	0.0		
1930	22	29.7	5	6	3	3	3.5	9	31.5	31.5	31.50	0.00	0.0		
1930	22	29.7	5	7	3	1.5	3.5	4.5	31.6	31.6	31.60	0.00	0.0		
1930	22	29.7	5	8	2	0.5	3.5	1	31.4	31.4	31.40	0.00	0.0		
2000	22	26.9	1	1	5	5	0.5	25	29.6	29.4	29.36	0.25	0.2		
2000	22	26.9	1	2	3	3	0.5	9	30	29.8	29.78	0.23	0.2		
2000	22	26.9	1	3	3	1.5	0.5	4.5	30	29.8	29.79	0.21	0.2		
2000	22	26.9	1	4	2	0.5	0.5	1	29.7	29.6	29.60	0.10	0.1		
2000	22	26.9	1	5	5	5	3.5	25	29.5	29.1	29.01	0.49	0.5	2.78	y
2000	22	26.9	1	6	3	3	3.5	9	29.5	29.2	29.16	0.34	0.3		
2000	22	26.9	1	7	3	1.5	3.5	4.5	29.7	29.3	29.27	0.43	0.4		
2000	22	26.9	1	8	2	0.5	3.5	1	29.3	29.2	29.20	0.10	0.1		
2000	22	26.9	2	1	5	5	0.5	25	29.8	29.7	29.64	0.16	0.2		
2000	22	26.9	2	2	3	3	0.5	9	30	30	30.00	0.00	0.0		
2000	22	26.9	2	3	3	1.5	0.5	4.5	30.2	30.1	30.08	0.12	0.1		
2000	22	26.9	2	4	2	0.5	0.5	1	29.9	29.9	29.90	0.00	0.0		
2000	22	26.9	2	5	5	5	3.5	25	29.7	29.4	29.23	0.47	0.5	6.90	y
2000	22	26.9	2	6	3	3	3.5	9	29.8	29.6	29.53	0.27	0.3		
2000	22	26.9	2	7	3	1.5	3.5	4.5	29.8	29.6	29.56	0.24	0.2		
2000	22	26.9	2	8	2	0.5	3.5	1	29.5	29.4	29.39	0.11	0.1		
2000	22	26.9	3	1	5	5	0.5	25	28.7	28.6	28.51	0.19	0.2		
2000	22	26.9	3	2	3	3	0.5	9	29	29	29.00	0.00	0.0		
2000	22	26.9	3	3	3	1.5	0.5	4.5	29	29	29.00	0.00	0.0		
2000	22	26.9	3	4	2	0.5	0.5	1	28.8	28.8	28.80	0.00	0.0		
2000	22	26.9	3	5	5	5	3.5	25	28.7	28.4	28.12	0.58	0.6	7.14	y
2000	22	26.9	3	6	3	3	3.5	9	28.8	28.6	28.49	0.31	0.3		
2000	22	26.9	3	7	3	1.5	3.5	4.5	28.7	28.7	28.70	0.00	0.0		
2000	22	26.9	3	8	2	0.5	3.5	1	28.4	28.4	28.40	0.00	0.0		
2000	22	26.9	4	1	5	5	0.5	25	28.7	28.6	28.47	0.23	0.2		
2000	22	26.9	4	2	3	3	0.5	9	29	29	29.00	0.00	0.0		
2000	22	26.9	4	3	3	1.5	0.5	4.5	29.1	29	28.95	0.15	0.2		
2000	22	26.9	4	4	2	0.5	0.5	1	28.9	28.9	28.90	0.00	0.0		
2000	22	26.9	4	5	5	5	3.5	25	28.6	28.5	28.37	0.23	0.2		
2000	22	26.9	4	6	3	3	3.5	9	28.8	28.7	28.62	0.18	0.2		
2000	22	26.9	4	7	3	1.5	3.5	4.5	28.9	28.8	28.75	0.15	0.1		
2000	22	26.9	4	8	2	0.5	3.5	1	28.5	28.5	28.50	0.00	0.0		
2000	22	26.9	5	1	5	5	0.5	25	28.9	28.9	28.90	0.00	0.0		
2000	22	26.9	5	2	3	3	0.5	9	29.2	29.2	29.20	0.00	0.0		
2000	22	26.9	5	3	3	1.5	0.5	4.5	29.3	29.3	29.30	0.00	0.0		
2000	22	26.9	5	4	2	0.5	0.5	1	28.9	28.9	28.90	0.00	0.0		

2000	22	26.9	5	5	5	5	3.5	25	28.9	28.8	28.63	0.27	0.3		
2000	22	26.9	5	6	3	3	3.5	9	28.9	28.9	28.90	0.00	0.0		
2000	22	26.9	5	7	3	1.5	3.5	4.5	29.1	29.1	29.10	0.00	0.0		
2000	22	26.9	5	8	2	0.5	3.5	1	28.7	28.7	28.70	0.00	0.0		
2030	22	26.4	1	1	5	5	0.5	25	28.8	28.7	28.68	0.12	0.1		
2030	22	26.4	1	2	3	3	0.5	9	29.1	29	28.99	0.11	0.1		
2030	22	26.4	1	3	3	1.5	0.5	4.5	29.2	29.1	29.09	0.11	0.1		
2030	22	26.4	1	4	2	0.5	0.5	1	28.8	28.8	28.80	0.00	0.0		
2030	22	26.4	1	5	5	5	3.5	25	28.7	28.4	28.33	0.37	0.4		
2030	22	26.4	1	6	3	3	3.5	9	28.9	28.5	28.45	0.45	0.4		
2030	22	26.4	1	7	3	1.5	3.5	4.5	28.9	28.6	28.58	0.32	0.3		
2030	22	26.4	1	8	2	0.5	3.5	1	28.5	28.5	28.50	0.00	0.0		
2030	22	26.4	2	1	5	5	0.5	25	28.5	28.5	28.50	0.00	0.0		
2030	22	26.4	2	2	3	3	0.5	9	28.8	28.7	28.67	0.13	0.1		
2030	22	26.4	2	3	3	1.5	0.5	4.5	28.8	28.8	28.80	0.00	0.0		
2030	22	26.4	2	4	2	0.5	0.5	1	28.5	28.6	28.61	-0.11	0.1		
2030	22	26.4	2	5	5	5	3.5	25	28.4	28.1	27.93	0.47	0.5	16.67	y
2030	22	26.4	2	6	3	3	3.5	9	28.5	28.3	28.23	0.27	0.3		
2030	22	26.4	2	7	3	1.5	3.5	4.5	28.6	28.4	28.36	0.24	0.2		
2030	22	26.4	2	8	2	0.5	3.5	1	28.3	28.2	28.19	0.11	0.1		
2030	22	26.4	3	1	5	5	0.5	25	28.8	28.7	28.61	0.19	0.2		
2030	22	26.4	3	2	3	3	0.5	9	28.9	28.9	28.90	0.00	0.0		
2030	22	26.4	3	3	3	1.5	0.5	4.5	29.1	29.1	29.10	0.00	0.0		
2030	22	26.4	3	4	2	0.5	0.5	1	28.8	28.7	28.68	0.12	0.1		
2030	22	26.4	3	5	5	5	3.5	25	28.7	28.4	28.12	0.58	0.6	25.00	y
2030	22	26.4	3	6	3	3	3.5	9	28.6	28.5	28.44	0.16	0.2		
2030	22	26.4	3	7	3	1.5	3.5	4.5	28.7	28.6	28.57	0.13	0.1		
2030	22	26.4	3	8	2	0.5	3.5	1	28.3	28.3	28.30	0.00	0.0		
2030	22	26.4	4	1	5	5	0.5	25	29	29	29.00	0.00	0.0		
2030	22	26.4	4	2	3	3	0.5	9	29.5	29.3	29.14	0.36	0.4		
2030	22	26.4	4	3	3	1.5	0.5	4.5	29.4	29.4	29.40	0.00	0.0		
2030	22	26.4	4	4	2	0.5	0.5	1	29.1	29.1	29.10	0.00	0.0		
2030	22	26.4	4	5	5	5	3.5	25	28.8	28.7	28.57	0.23	0.2		
2030	22	26.4	4	6	3	3	3.5	9	28.9	28.8	28.72	0.18	0.2		
2030	22	26.4	4	7	3	1.5	3.5	4.5	29	29	29.00	0.00	0.0		
2030	22	26.4	4	8	2	0.5	3.5	1	28.8	28.8	28.80	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	1	5	5	0.5	25	29.2	29.2	29.20	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	2	3	3	0.5	9	29.6	29.6	29.60	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	3	3	1.5	0.5	4.5	29.7	29.7	29.70	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	4	2	0.5	0.5	1	29.4	29.4	29.40	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	5	5	5	3.5	25	29	29	29.00	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	6	3	3	3.5	9	29.2	29.1	29.00	0.20	0.2		
2030	22	26.4	5	7	3	1.5	3.5	4.5	29.2	29.2	29.20	0.00	0.0		
2030	22	26.4	5	8	2	0.5	3.5	1	29.1	29	28.97	0.13	0.1		
2100	22	29.4	1	1	5	5	0.5	25	28.2	28	27.96	0.24	0.2		
2100	22	29.4	1	2	3	3	0.5	9	28.5	28.4	28.39	0.11	0.1		
2100	22	29.4	1	3	3	1.5	0.5	4.5	28.6	28.4	28.39	0.21	0.2		
2100	22	29.4	1	4	2	0.5	0.5	1	28.2	28.2	28.20	0.00	0.0		
2100	22	29.4	1	5	5	5	3.5	25	28.1	27.8	27.73	0.37	0.4		
2100	22	29.4	1	6	3	3	3.5	9	28.2	27.9	27.86	0.34	0.3		
2100	22	29.4	1	7	3	1.5	3.5	4.5	28.4	28	27.97	0.43	0.4		
2100	22	29.4	1	8	2	0.5	3.5	1	28	27.9	27.90	0.10	0.1		
2100	22	29.4	2	1	5	5	0.5	25	27.8	27.7	27.64	0.16	0.2		
2100	22	29.4	2	2	3	3	0.5	9	28.1	28	27.97	0.13	0.1		
2100	22	29.4	2	3	3	1.5	0.5	4.5	28.1	28	27.98	0.12	0.1		
2100	22	29.4	2	4	2	0.5	0.5	1	27.8	27.8	27.80	0.00	0.0		
2100	22	29.4	2	5	5	5	3.5	25	27.7	27.5	27.39	0.31	0.3		
2100	22	29.4	2	6	3	3	3.5	9	27.9	27.8	27.77	0.13	0.1		
2100	22	29.4	2	7	3	1.5	3.5	4.5	28	27.8	27.76	0.24	0.2		
2100	22	29.4	2	8	2	0.5	3.5	1	27.5	27.5	27.50	0.00	0.0		
2100	22	29.4	3	1	5	5	0.5	25	28.5	28.5	28.50	0.00	0.0		
2100	22	29.4	3	2	3	3	0.5	9	28.9	28.8	28.74	0.16	0.2		
2100	22	29.4	3	3	3	1.5	0.5	4.5	29	28.9	28.87	0.13	0.1		
2100	22	29.4	3	4	2	0.5	0.5	1	28.7	28.7	28.70	0.00	0.0		
2100	22	29.4	3	5	5	5	3.5	25	28.4	28.3	28.21	0.19	0.2		
2100	22	29.4	3	6	3	3	3.5	9	28.5	28.4	28.34	0.16	0.2		

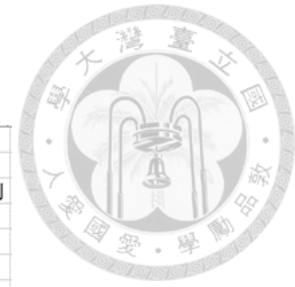
2100	22	29.4	3	7	3	1.5	3.5	4.5	28.7	28.6	28.57	0.13	0.1		
2100	22	29.4	3	8	2	0.5	3.5	1	28.4	28.3	28.28	0.12	0.1		
2100	22	29.4	4	1	5	5	0.5	25	28.2	28.1	27.97	0.23	0.2		
2100	22	29.4	4	2	3	3	0.5	9	28.4	28.4	28.40	0.00	0.0		
2100	22	29.4	4	3	3	1.5	0.5	4.5	28.4	28.4	28.40	0.00	0.0		
2100	22	29.4	4	4	2	0.5	0.5	1	28.4	28.3	28.28	0.12	0.1		
2100	22	29.4	4	5	5	5	3.5	25	28.1	27.9	27.64	0.46	0.5	30.43	y
2100	22	29.4	4	6	3	3	3.5	9	28.3	28.2	28.12	0.18	0.2		
2100	22	29.4	4	7	3	1.5	3.5	4.5	28.3	28.2	28.15	0.15	0.2		
2100	22	29.4	4	8	2	0.5	3.5	1	28	28	28.00	0.00	0.0		
2100	22	29.4	5	1	5	5	0.5	25	28	28	28.00	0.00	0.0		
2100	22	29.4	5	2	3	3	0.5	9	28.3	28.2	28.10	0.20	0.2		
2100	22	29.4	5	3	3	1.5	0.5	4.5	28.2	28.2	28.20	0.00	0.0		
2100	22	29.4	5	4	2	0.5	0.5	1	27.9	28	28.03	-0.13	0.1		
2100	22	29.4	5	5	5	5	3.5	25	27.8	27.8	27.80	0.00	0.0		
2100	22	29.4	5	6	3	3	3.5	9	27.9	27.9	27.90	0.00	0.0		
2100	22	29.4	5	7	3	1.5	3.5	4.5	28	28	28.00	0.00	0.0		
2100	22	29.4	5	8	2	0.5	3.5	1	27.8	27.8	27.80	0.00	0.0		
2130	22	29.4	1	1	5	5	0.5	25	27.3	27.2	27.18	0.12	0.1		
2130	22	29.4	1	2	3	3	0.5	9	27.6	27.5	27.49	0.11	0.1		
2130	22	29.4	1	3	3	1.5	0.5	4.5	27.6	27.5	27.49	0.11	0.1		
2130	22	29.4	1	4	2	0.5	0.5	1	27.3	27.3	27.30	0.00	0.0		
2130	22	29.4	1	5	5	5	3.5	25	27.2	26.8	26.71	0.49	0.5	7.69	y
2130	22	29.4	1	6	3	3	3.5	9	27.3	27	26.96	0.34	0.3		
2130	22	29.4	1	7	3	1.5	3.5	4.5	27.4	27.1	27.08	0.32	0.3		
2130	22	29.4	1	8	2	0.5	3.5	1	27	26.9	26.90	0.10	0.1		
2130	22	29.4	2	1	5	5	0.5	25	27.1	27	26.94	0.16	0.2		
2130	22	29.4	2	2	3	3	0.5	9	27.3	27.2	27.17	0.13	0.1		
2130	22	29.4	2	3	3	1.5	0.5	4.5	27.4	27.3	27.28	0.12	0.1		
2130	22	29.4	2	4	2	0.5	0.5	1	27.1	27.1	27.10	0.00	0.0		
2130	22	29.4	2	5	5	5	3.5	25	27.1	26.8	26.63	0.47	0.5	7.41	y
2130	22	29.4	2	6	3	3	3.5	9	27.1	26.9	26.83	0.27	0.3		
2130	22	29.4	2	7	3	1.5	3.5	4.5	27.3	27.1	27.06	0.24	0.2		
2130	22	29.4	2	8	2	0.5	3.5	1	26.8	26.7	26.69	0.11	0.1		
2130	22	29.4	3	1	5	5	0.5	25	27	27	27.00	0.00	0.0		
2130	22	29.4	3	2	3	3	0.5	9	27.3	27.3	27.30	0.00	0.0		
2130	22	29.4	3	3	3	1.5	0.5	4.5	27.4	27.3	27.27	0.13	0.1		
2130	22	29.4	3	4	2	0.5	0.5	1	27.2	27.1	27.08	0.12	0.1		
2130	22	29.4	3	5	5	5	3.5	25	27	26.8	26.62	0.38	0.4		
2130	22	29.4	3	6	3	3	3.5	9	27	27	27.00	0.00	0.0		
2130	22	29.4	3	7	3	1.5	3.5	4.5	27.2	27.1	27.07	0.13	0.1		
2130	22	29.4	3	8	2	0.5	3.5	1	26.9	26.9	26.90	0.00	0.0		
2130	22	29.4	4	1	5	5	0.5	25	27.3	27.3	27.30	0.00	0.0		
2130	22	29.4	4	2	3	3	0.5	9	27.7	27.6	27.52	0.18	0.2		
2130	22	29.4	4	3	3	1.5	0.5	4.5	27.7	27.7	27.70	0.00	0.0		
2130	22	29.4	4	4	2	0.5	0.5	1	27.4	27.4	27.40	0.00	0.0		
2130	22	29.4	4	5	5	5	3.5	25	27.3	27.2	27.07	0.23	0.2		
2130	22	29.4	4	6	3	3	3.5	9	27.5	27.5	27.50	0.00	0.0		
2130	22	29.4	4	7	3	1.5	3.5	4.5	27.7	27.7	27.70	0.00	0.0		
2130	22	29.4	4	8	2	0.5	3.5	1	27.2	27.3	27.32	-0.12	0.1		
2130	22	29.4	5	1	5	5	0.5	25	27.9	27.9	27.90	0.00	0.0		
2130	22	29.4	5	2	3	3	0.5	9	28.3	28.3	28.30	0.00	0.0		
2130	22	29.4	5	3	3	1.5	0.5	4.5	28.4	28.3	28.23	0.17	0.2		
2130	22	29.4	5	4	2	0.5	0.5	1	28.1	28.1	28.10	0.00	0.0		
2130	22	29.4	5	5	5	5	3.5	25	27.7	27.6	27.43	0.27	0.3		
2130	22	29.4	5	6	3	3	3.5	9	27.9	27.9	27.90	0.00	0.0		
2130	22	29.4	5	7	3	1.5	3.5	4.5	28	28	28.00	0.00	0.0		
2130	22	29.4	5	8	2	0.5	3.5	1	27.7	27.7	27.70	0.00	0.0		

三、第三組試體於各個時段之數據



時間	60*70-3				缺陷	整體	周圍	差異值	溫度	偵測
	環境溫度(°C)	表面溫度(°C)	測距(m)	缺陷號碼	溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)	絕對值	
1500	31	40.7	1	1	39	38.4	38.14	0.86	0.9	y
1530	31	39	1	1	39.1	38.3	37.95	1.15	1.1	y
1600	31	37.9	1	1	38.2	37.5	37.20	1.00	1.0	y
1630	31	36.9	1	1	37.6	37	36.74	0.86	0.9	y
1700	30	36.8	1	1	37.3	36.7	36.44	0.86	0.9	y
1500	31	40.7	2	1	39.5	39.2	39.02	0.48	0.5	y
1530	31	39	2	1	38.8	38.3	38.01	0.79	0.8	y
1600	31	37.9	2	1	38.4	37.9	37.61	0.79	0.8	y
1630	31	36.9	2	1	37.7	37.2	36.91	0.79	0.8	y
1700	30	36.8	2	1	37	36.6	36.36	0.64	0.6	y
1500	31	40.7	1	2	38.9	38.6	38.59	0.31	0.3	
1530	31	39	1	2	39	38.5	38.48	0.52	0.5	y
1600	31	37.9	1	2	38.3	37.8	37.78	0.52	0.5	y
1630	31	36.9	1	2	37.8	37.3	37.28	0.52	0.5	y
1700	30	36.8	1	2	37.5	37	36.98	0.52	0.5	y
1500	31	40.7	2	2	39.3	39.2	39.14	0.16	0.2	
1530	31	39	2	2	38.6	38.3	38.11	0.49	0.5	y
1600	31	37.9	2	2	38.4	38	37.74	0.66	0.7	y
1630	31	36.9	2	2	37.6	37.3	37.11	0.49	0.5	y
1700	30	36.8	2	2	37	36.7	36.51	0.49	0.5	y
1500	31	40.7	1	3	38.6	38.4	38.24	0.36	0.4	
1530	31	39	1	3	38.7	38.2	37.81	0.89	0.9	y
1600	31	37.9	1	3	38	37.5	37.11	0.89	0.9	y
1630	31	36.9	1	3	37.6	37.2	36.89	0.71	0.7	y
1700	30	36.8	1	3	37.3	36.9	36.59	0.71	0.7	y
1500	31	40.7	2	3	39.2	39	38.87	0.33	0.3	
1530	31	39	2	3	38.4	38.2	38.07	0.33	0.3	
1600	31	37.9	2	3	38.3	37.9	37.64	0.66	0.7	y
1630	31	36.9	2	3	37.6	37.3	37.11	0.50	0.5	y
1700	30	36.8	2	3	37.1	36.8	36.61	0.50	0.5	y
1500	31	40.7	1	4	40.1	39.5	39.17	0.93	0.9	y
1530	31	39	1	4	39.8	39.2	38.87	0.93	0.9	y
1600	31	37.9	1	4	38.8	38.2	37.87	0.93	0.9	y
1630	31	36.9	1	4	38.2	37.7	37.42	0.78	0.8	y
1700	30	36.8	1	4	37.8	37.2	36.87	0.93	0.9	y
1500	31	40.7	2	4	40.6	40.2	39.96	0.64	0.6	y
1530	31	39	2	4	39.5	39.1	38.86	0.64	0.6	y
1600	31	37.9	2	4	39	38.7	38.52	0.48	0.5	y
1630	31	36.9	2	4	38.1	37.7	37.46	0.64	0.6	y
1700	30	36.8	2	4	37.4	37	36.76	0.64	0.6	y
1500	31	40.7	1	5	40.4	39.7	39.36	1.04	1.0	y
1530	31	39	1	5	40.1	39.4	39.06	1.04	1.0	y
1600	31	37.9	1	5	39.2	38.6	38.30	0.90	0.9	y
1630	31	36.9	1	5	38.5	38	37.75	0.75	0.7	y
1700	30	36.8	1	5	38.1	37.6	37.35	0.75	0.7	y
1500	31	40.7	2	5	40.8	40.4	40.16	0.64	0.6	y
1530	31	39	2	5	39.8	39.3	39.00	0.80	0.8	y
1600	31	37.9	2	5	39.4	39	38.76	0.64	0.6	y
1630	31	36.9	2	5	38.5	38.1	37.86	0.64	0.6	y
1700	30	36.8	2	5	37.8	37.3	37.00	0.80	0.8	y
1500	31	40.7	1	6	40.2	39.7	39.45	0.75	0.7	y
1530	31	39	1	6	39.9	39.3	39.00	0.90	0.9	y
1600	31	37.9	1	6	39.2	38.7	38.45	0.75	0.7	y
1630	31	36.9	1	6	38.6	38.1	37.85	0.75	0.7	y
1700	30	36.8	1	6	38	37.6	37.40	0.60	0.6	y
1500	31	40.7	2	6	40.6	40.2	40.06	0.54	0.5	y
1530	31	39	2	6	39.6	39.2	39.06	0.54	0.5	y
1600	31	37.9	2	6	39.2	38.8	38.66	0.54	0.5	y
1630	31	36.9	2	6	38.5	38.1	37.96	0.54	0.5	y
1700	30	36.8	2	6	37.7	37.3	37.16	0.54	0.5	y

四、第四組試體於各個時段之數據



		60*70-4			缺陷	整體	周圍	差異值	溫度	
時間	環境溫度(°C)	表面溫度(°C)	測距(m)	缺陷號碼	溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)	絕對值	偵測
1500	31	40.9	1	1	39.4	39.2	39.19	0.25	0.3	
1530	31	39.6	1	1	40.0	38.6	38.54	1.42	1.4	y
1600	31	40	1	1	39.6	38.2	38.15	1.45	1.4	y
1630	31	38.3	1	1	39.0	37.4	37.33	1.69	1.7	y
1700	30	38.2	1	1	40.8	37.2	37.04	3.75	3.7	y
1500	31	40.9	1	2	41.1	39.6	39.53	1.59	1.6	y
1530	31	39.6	1	2	40.9	39	38.93	1.99	2.0	y
1600	31	40	1	2	40.3	38.7	38.64	1.61	1.6	y
1630	31	38.3	1	2	39.0	37.8	37.76	1.21	1.2	y
1700	30	38.2	1	2	39.5	37.5	37.40	2.06	2.1	y
1500	31	40.9	1	3	39.2	39.3	39.31	-0.16	0.2	
1530	31	39.6	1	3	38.5	38.8	38.81	-0.26	0.3	
1600	31	40	1	3	40.1	38.6	38.50	1.64	1.6	y
1630	31	38.3	1	3	40.7	37.6	37.41	3.32	3.3	y
1700	30	38.2	1	3	40.5	37.4	37.28	3.18	3.2	y
1500	31	40.9	1	4	39.7	38.8	38.76	0.98	1.0	y
1530	31	39.6	1	4	38.6	38.3	38.29	0.28	0.3	
1600	31	40	1	4	39.2	38.1	38.03	1.12	1.1	y
1630	31	38.3	1	4	38.7	37.2	37.12	1.53	1.5	y
1700	30	38.2	1	4	38.3	36.9	36.82	1.53	1.5	y
1500	31	40.9	1	5	39.7	40.3	40.34	-0.62	0.6	y
1530	31	39.6	1	5	40.2	39.7	39.68	0.52	0.5	y
1600	31	40	1	5	40.0	39.2	39.17	0.79	0.8	y
1630	31	38.3	1	5	39.4	38.1	38.02	1.37	1.4	y
1700	30	38.2	1	5	37.6	37.8	37.81	-0.18	0.2	
1500	31	40.9	1	6	38.2	40.7	40.84	-2.69	2.7	y
1530	31	39.6	1	6	38.0	40.2	40.27	-2.27	2.3	y
1600	31	40	1	6	37.5	39.7	39.81	-2.29	2.3	y
1630	31	38.3	1	6	38.5	38.7	38.71	-0.19	0.2	
1700	30	38.2	1	6	39.2	38.3	38.26	0.91	0.9	y
1500	31	40.9	1	7	38.9	40.4	40.46	-1.55	1.6	y
1530	31	39.6	1	7	38.3	39.9	39.97	-1.65	1.6	y
1600	31	40	1	7	37.4	39.5	39.59	-2.21	2.2	y
1630	31	38.3	1	7	37.8	38.5	38.52	-0.69	0.7	y
1700	30	38.2	1	7	37.8	38.1	38.11	-0.36	0.4	
1500	31	40.9	1	8	37.1	39.9	40.03	-2.93	2.9	y
1530	31	39.6	1	8	38.2	39.3	39.36	-1.16	1.2	y
1600	31	40	1	8	38.8	38.9	38.90	-0.07	0.1	
1630	31	38.3	1	8	38.5	37.9	37.87	0.64	0.6	y
1700	30	38.2	1	8	38.1	37.6	37.58	0.50	0.5	y



五、第五組試體於各個時段之數據



時間	60*70-5				缺陷	整體	周圍	差異值	溫度	偵測
	環境溫度(°C)	表面溫度(°C)	測距(m)	缺陷號碼	溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)	絕對值	
1500	31	40.9	1	1	39.0	38.3	38.17	0.85	0.8	y
1530	31	39.6	1	1	39.4	38.2	38.11	1.29	1.3	y
1600	31	40	1	1	39.9	37.8	37.60	2.34	2.3	y
1630	31	38.3	1	1	38.8	37.3	37.17	1.59	1.6	y
1700	30	38.2	1	1	39.5	37	36.84	2.63	2.6	y
1500	31	40.9	1	2	40.1	38.9	38.72	1.42	1.4	y
1530	31	39.6	1	2	40.3	38.8	38.63	1.69	1.7	y
1600	31	40	1	2	39.8	38.4	38.14	1.63	1.6	y
1630	31	38.3	1	2	38.9	37.8	37.69	1.24	1.2	y
1700	30	38.2	1	2	39.3	37.5	37.40	1.92	1.9	y
1500	31	40.9	1	3	39.9	39.3	39.25	0.65	0.6	y
1530	31	39.6	1	3	38.8	39.3	39.33	-0.55	0.5	y
1600	31	40	1	3	39.4	38.7	38.67	0.69	0.7	y
1630	31	38.3	1	3	40.0	38.2	37.93	2.06	2.1	y
1700	30	38.2	1	3	40.3	37.8	37.50	2.81	2.8	y
1500	31	40.9	1	4	39.7	38.4	38.23	1.44	1.4	y
1530	31	39.6	1	4	38.8	38.5	38.46	0.38	0.4	
1600	31	40	1	4	38.9	38	37.95	0.94	0.9	y
1630	31	38.3	1	4	39.4	37.6	37.47	1.89	1.9	y
1700	30	38.2	1	4	38.4	37.1	37.03	1.34	1.3	y
1500	31	40.9	1	5	38.8	38.9	38.91	-0.14	0.1	
1530	31	39.6	1	5	39.4	38.7	38.61	0.81	0.8	y
1600	31	40	1	5	39.5	38.2	38.08	1.39	1.4	y
1630	31	38.3	1	5	39.4	37.6	37.34	2.02	2.0	y
1700	30	38.2	1	5	38.3	37.2	37.04	1.23	1.2	y
1500	31	40.9	1	6	38.3	39.4	39.47	-1.20	1.2	y
1530	31	39.6	1	6	38.7	39.2	39.24	-0.52	0.5	y
1600	31	40	1	6	37.9	38.7	38.76	-0.84	0.8	y
1630	31	38.3	1	6	38.2	38.1	38.09	0.12	0.1	
1700	30	38.2	1	6	38.8	37.7	37.51	1.33	1.3	y
1500	31	40.9	1	7	38.9	39.7	39.78	-0.83	0.8	y
1530	31	39.6	1	7	38.7	39.5	39.67	-1.02	1.0	y
1600	31	40	1	7	37.7	38.9	39.03	-1.28	1.3	y
1630	31	38.3	1	7	38.0	38.3	38.31	-0.30	0.3	
1700	30	38.2	1	7	38.4	37.9	37.86	0.57	0.6	y
1500	31	40.9	1	8	37.4	39.2	39.31	-1.92	1.9	y
1530	31	39.6	1	8	37.8	39.1	39.17	-1.36	1.4	y
1600	31	40	1	8	38.2	38.7	38.76	-0.61	0.6	y
1630	31	38.3	1	8	38.4	38	37.96	0.48	0.5	y
1700	30	38.2	1	8	38.0	37.4	37.32	0.65	0.6	y

## 六、橋梁實拍之數據



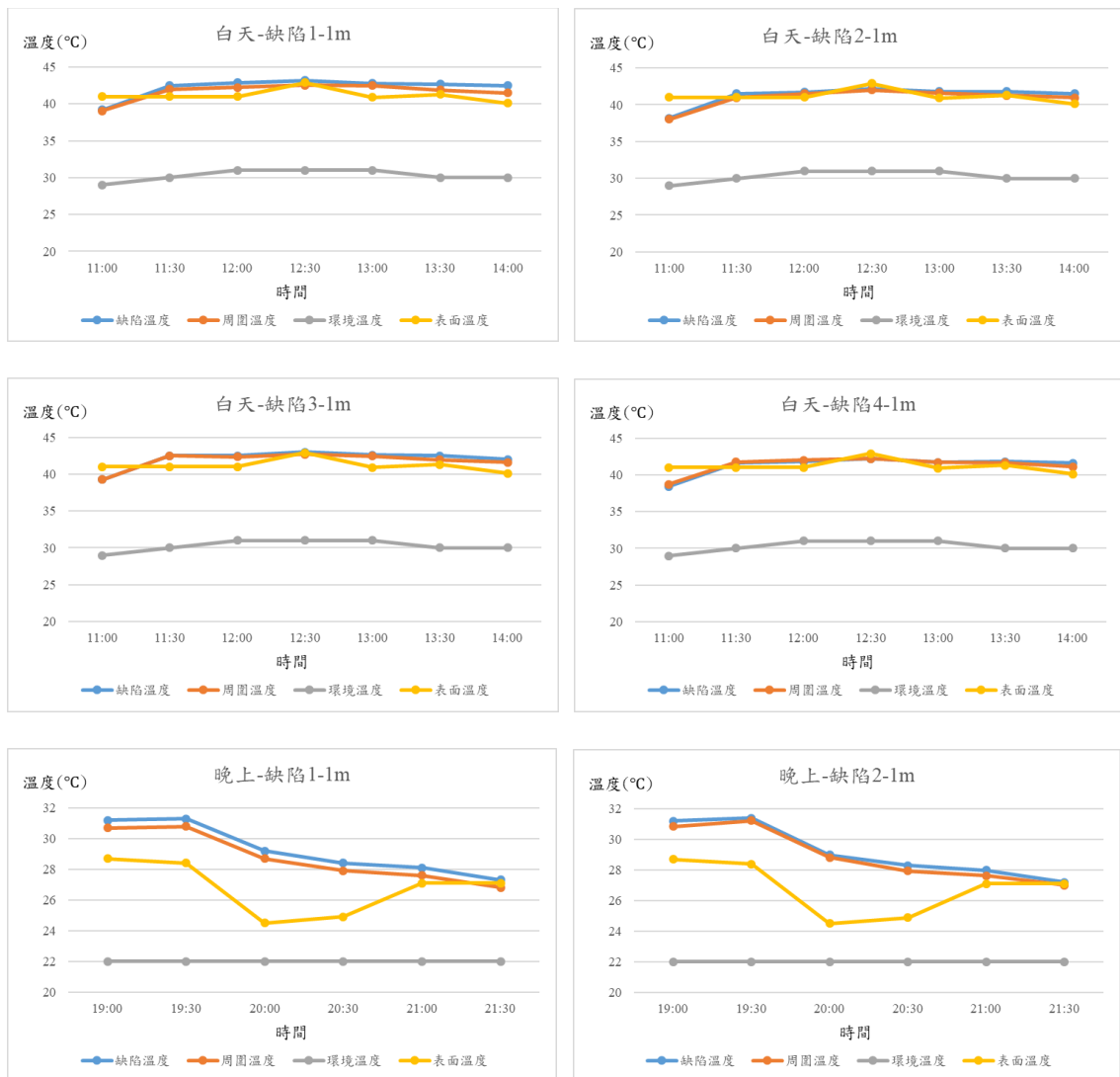
時間	橋梁實拍													缺陷-整體-面積	缺陷-面積	缺陷-面積	偵測			
	環境溫度(°C)	表面溫度(°C)	測距	缺陷名稱	試體真實尺寸(cm)			面積(cm <sup>2</sup> )	缺陷			差異值	溫度					缺陷	整體	整體-缺陷
					長	寬	深度		溫度(°C)	溫度(°C)	溫度(°C)									
1403	21	25.8	1	秀朗橋1	12	12	0.5	144	26.2	26.3	26.38	-0.18	0.2	1680	3780	2100				
1403	21	25.8	2	秀朗橋1	12	12	0.5	144	25.6	25.5	25.42	0.18	0.2	660	1458	798				
1359	21	27.6	1	秀朗橋2	12	5	0.5	60	27.9	27.9	27.90	0.00	0.0	1298	2738	1440				
1359	21	27.6	2	秀朗橋2	12	5	0.5	60	27.9	28	28.05	-0.15	0.2	240	700	460				
1354	21	30.1	1	秀朗橋3	6	5	0.4	30	30.4	30.3	30.25	0.15	0.2	288	837	549				
1354	21	30.1	2	秀朗橋3	6	5	0.4	30	30.3	30.3	30.30	0.00	0.0	70	238	168				
1352	21	28.7	1	秀朗橋4	5	4	1.5	20	29.4	29.2	29.12	0.28	0.3	130	460	330				
1352	21	28.7	2	秀朗橋4	5	4	1.5	20	28.9	28.7	28.64	0.26	0.3	35	154	119				
1300	31	41.1	1	永福橋1	9	4	1.2	36	37.8	40	40.47	-2.67	2.7	330	1890	1560	y			
1300	31	41.1	2	永福橋1	9	4	1.2	36	37.5	39.2	39.89	-2.39	2.4	90	312	222	y			
1310	31	38.2	1	永福橋2	35	16	3.5	560	38.6	40.2	42.30	-3.70	3.7	6944	12240	5296	y			
1310	31	38.2	2	永福橋2	35	16	3.5	560	38.5	40.4	41.50	-3.00	3.0	1650	4488	2838	y			
1320	31	31.9	1	永福橋3	5	3	2.2	15	32.2	32.3	32.34	-0.14	0.1	189	680	491				
1320	31	31.9	2	永福橋3	5	3	2.2	15	32.2	32.1	32.06	0.14	0.1	27	98	71				

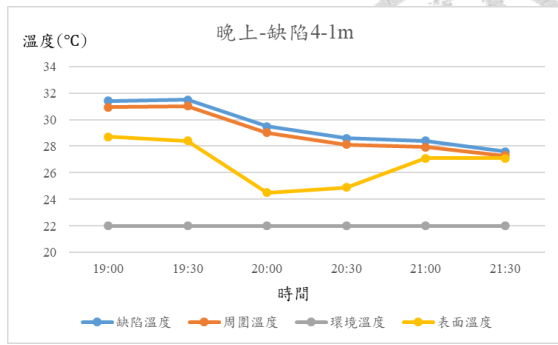
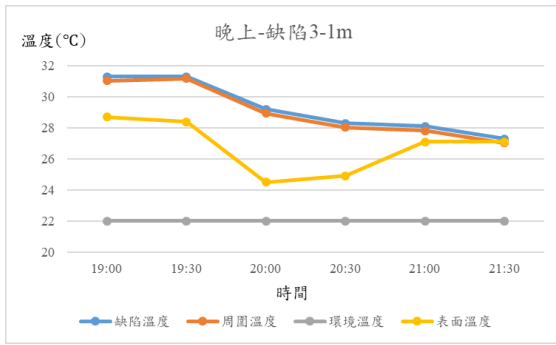
## 附錄 C



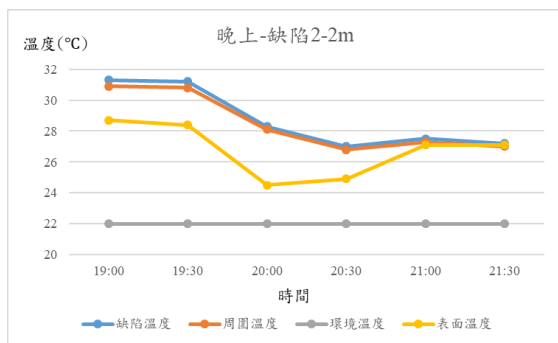
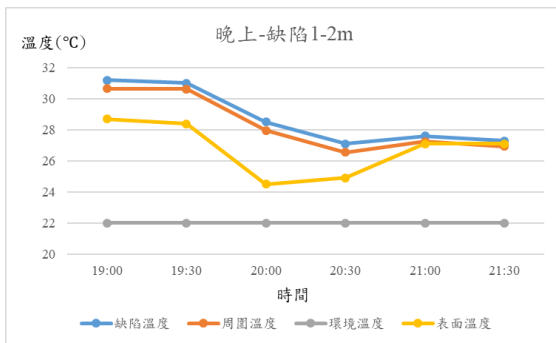
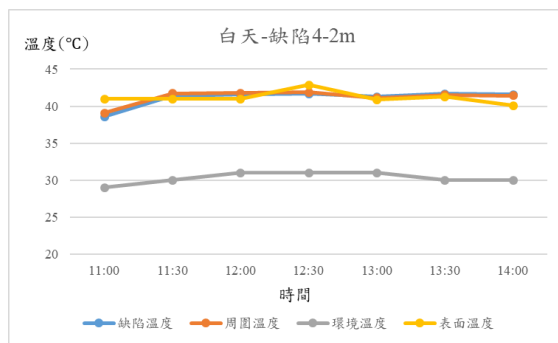
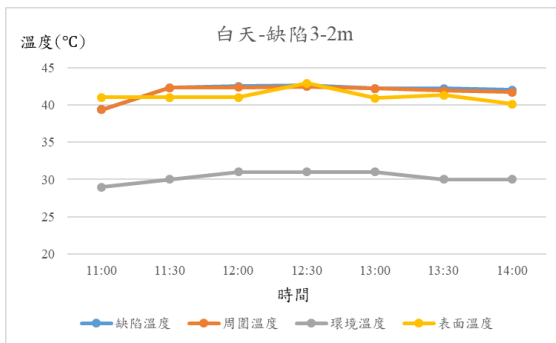
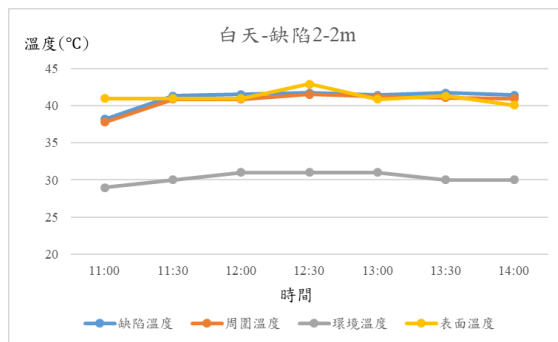
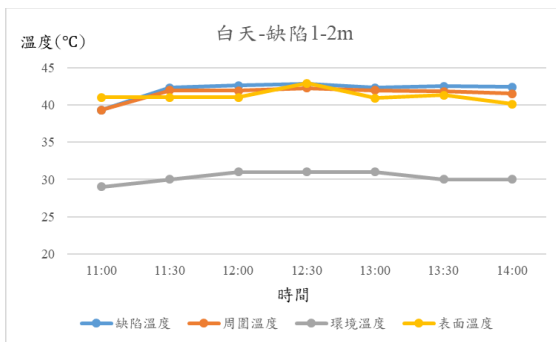
附錄 C 包含本研究中五組試體之各個缺陷於不同測距下之折線圖，其縱軸為溫度(°C)，橫軸為時間，並且有四個比較值，分別是缺陷溫度、周圍溫度、環境溫度以及表面溫度之折線圖。

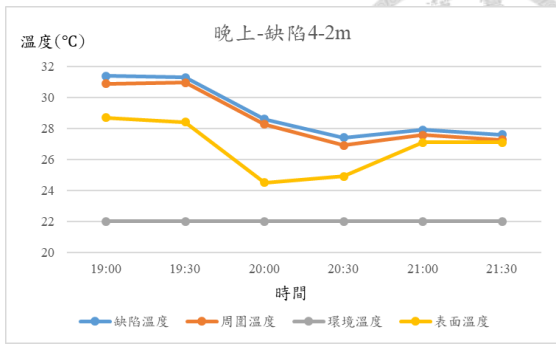
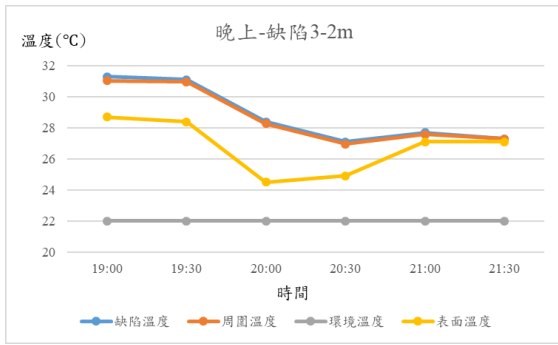
### 一、第一組試體各個缺陷於測距 1 米時之折線圖



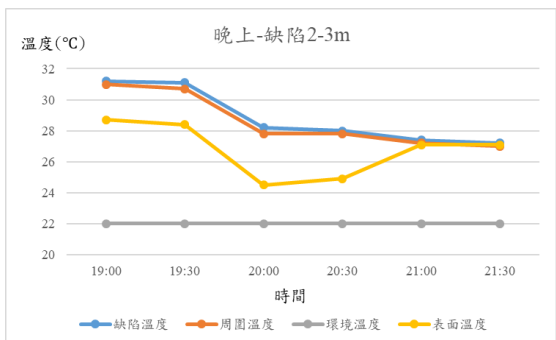
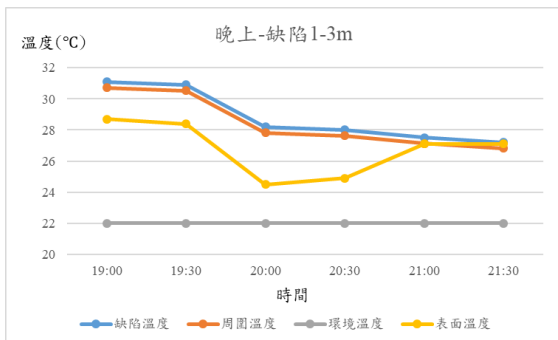
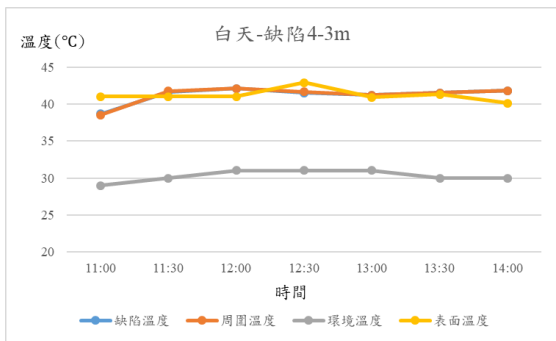
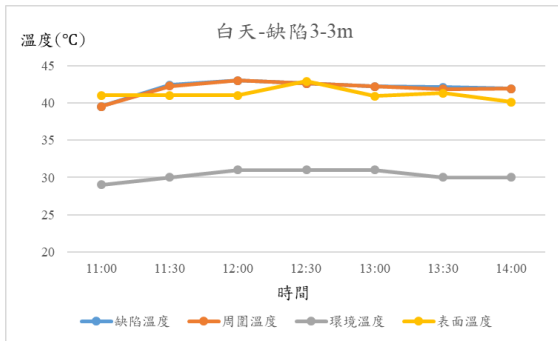
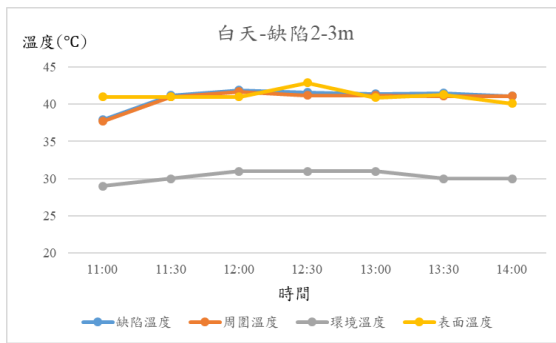
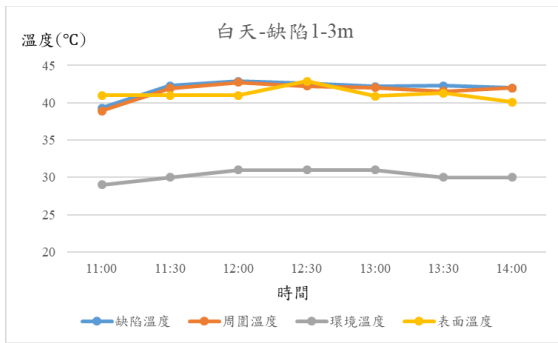


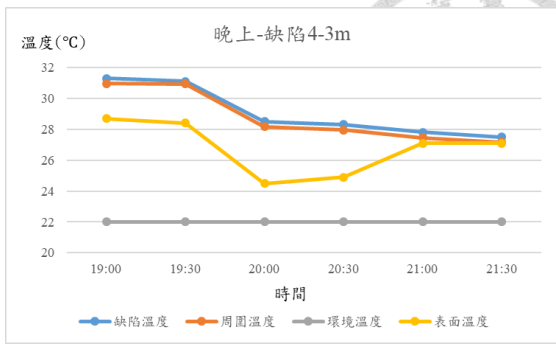
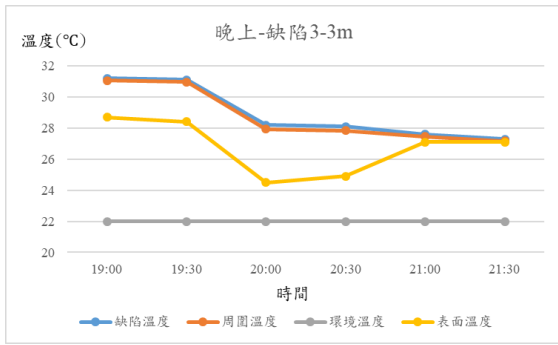
## 二、第一組試體各個缺陷於測距 2 米時之折線圖



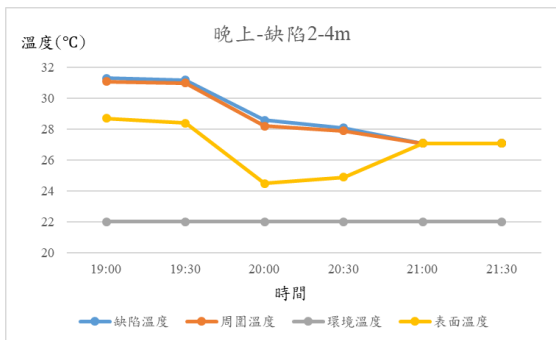
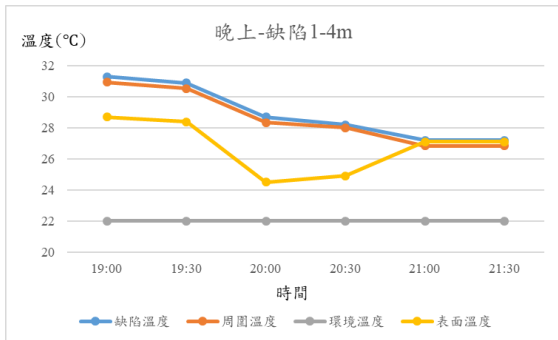
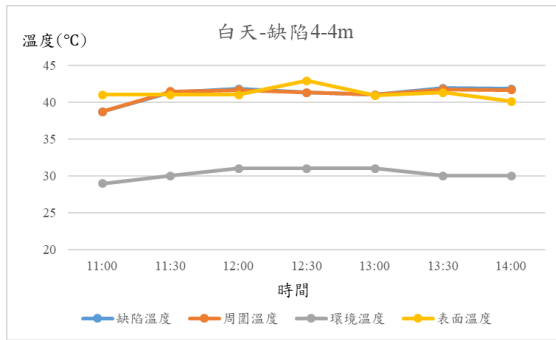
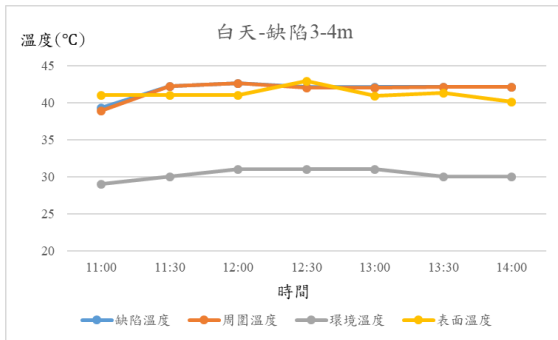
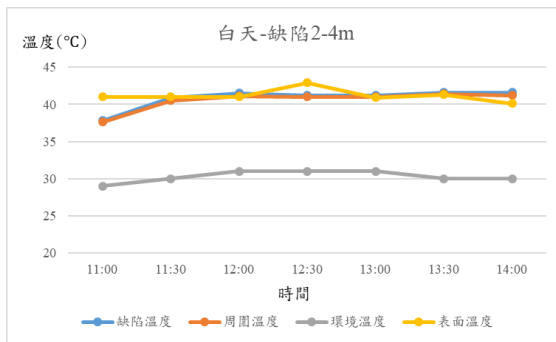
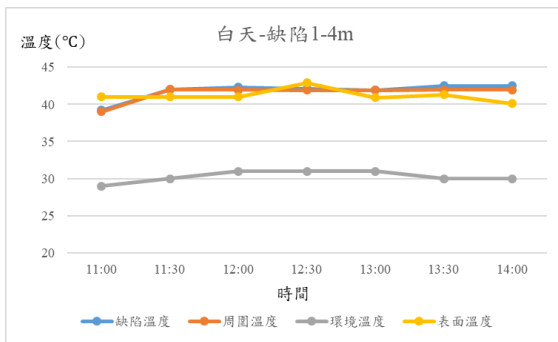


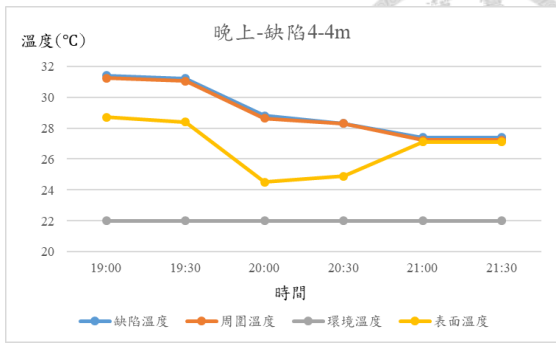
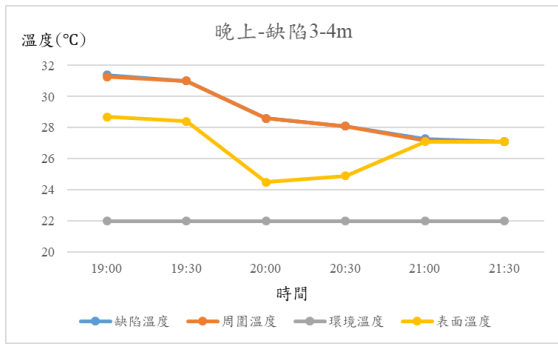
### 三、第一組試體各個缺陷於測距3米時之折線圖



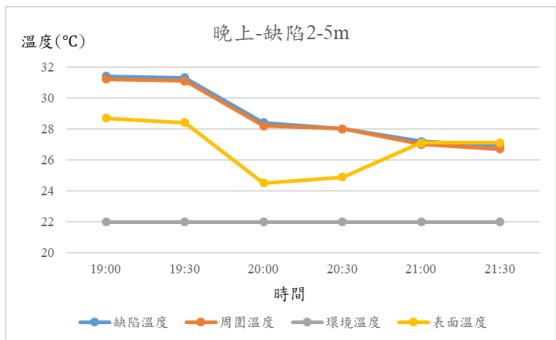
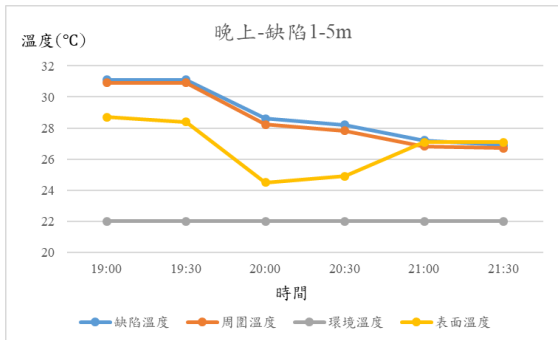
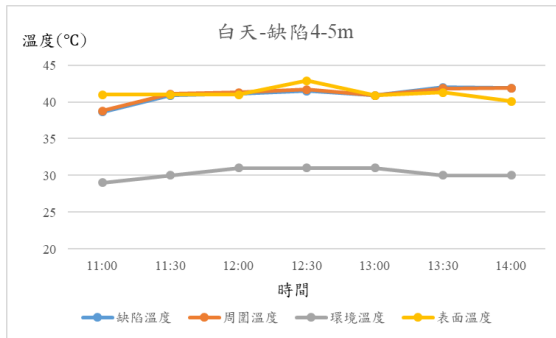
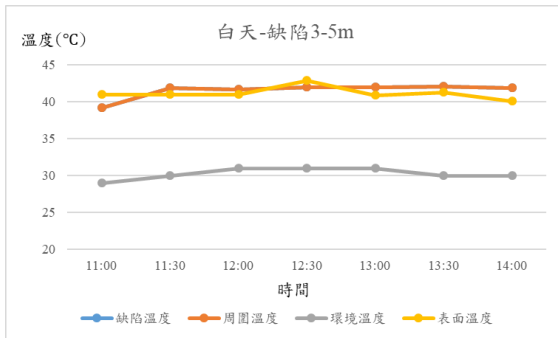
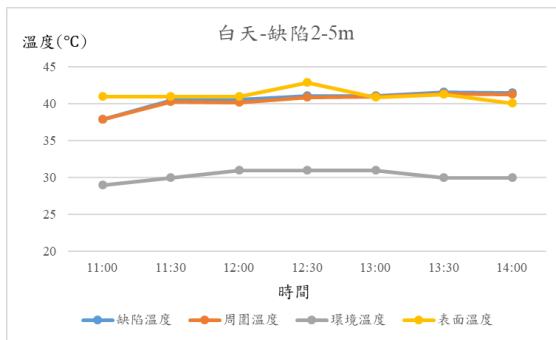
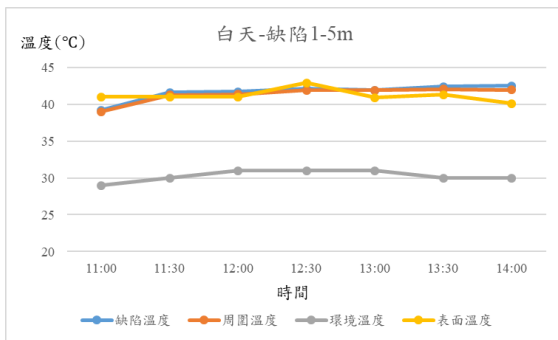


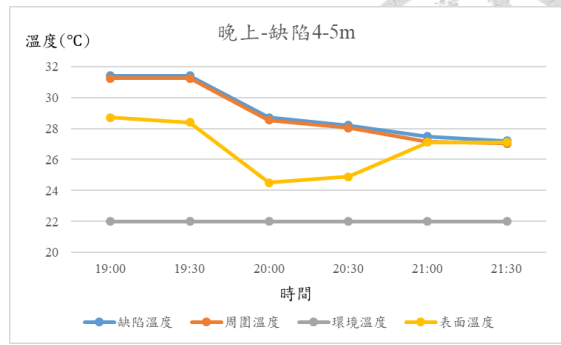
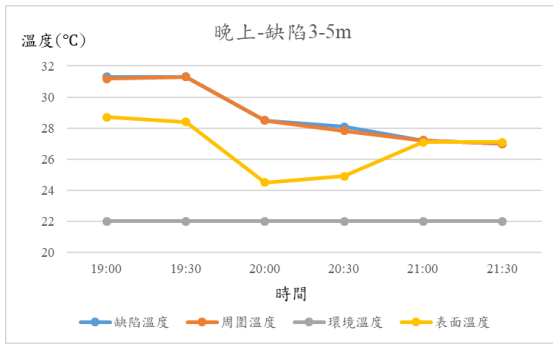
四、第一組試體各個缺陷於測距4米時之折線圖



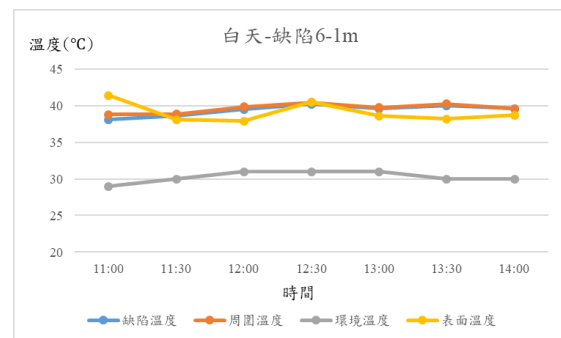
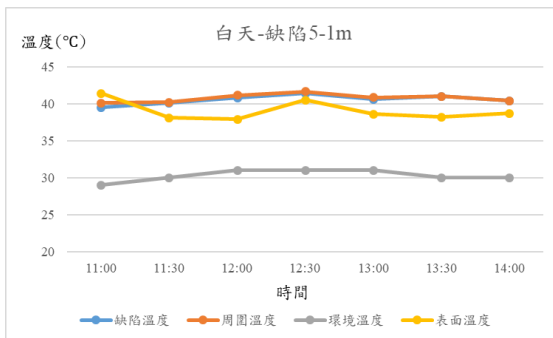
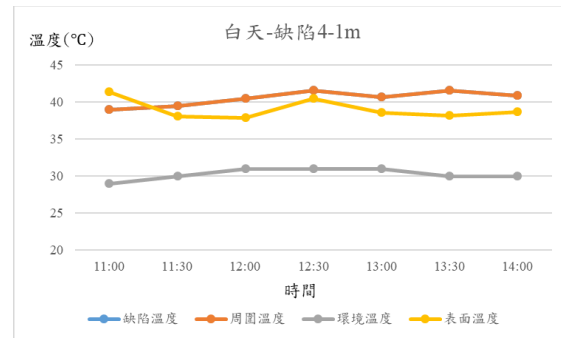
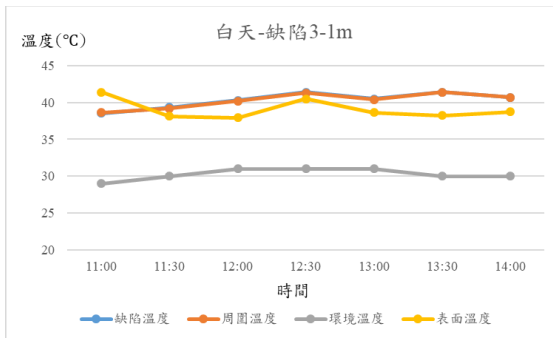
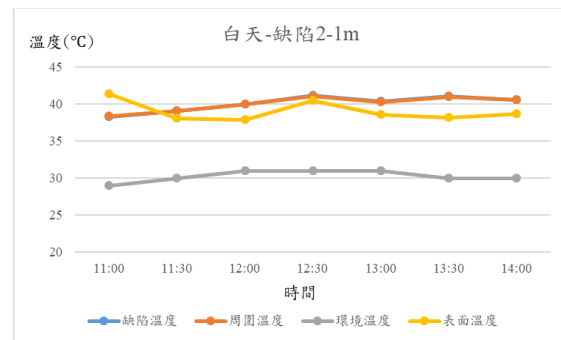
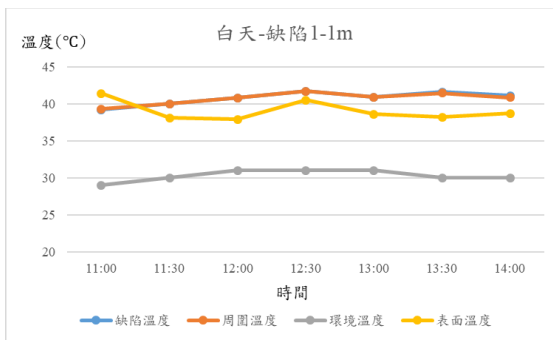


五、第一組試體各個缺陷於測距 5 米時之折線圖

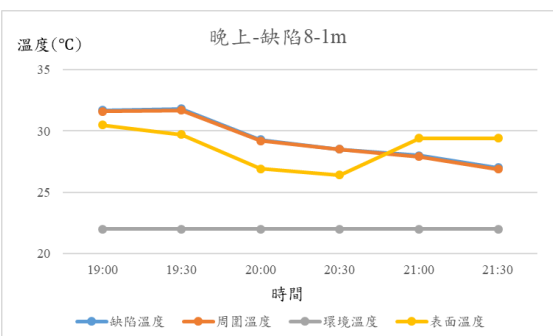
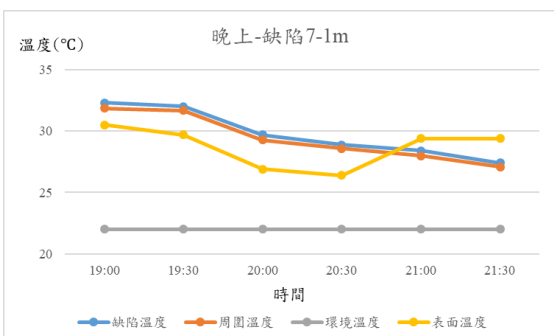
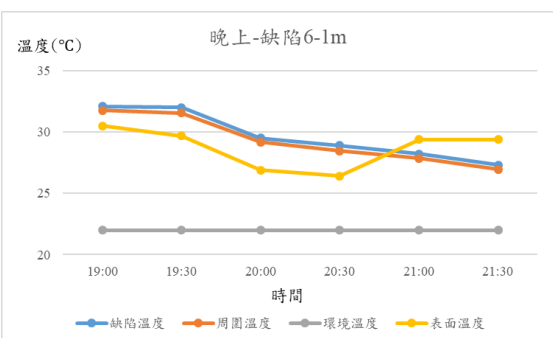
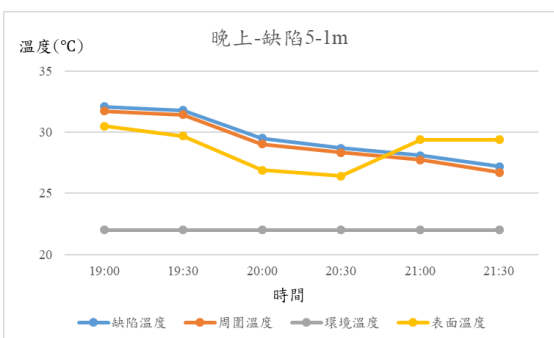
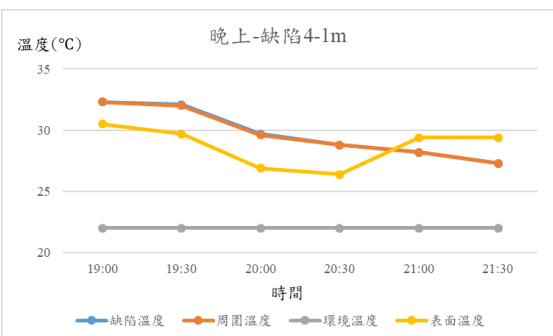
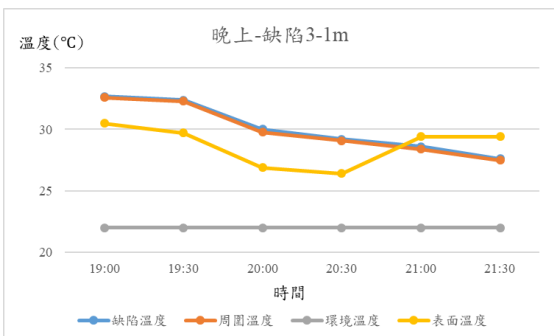
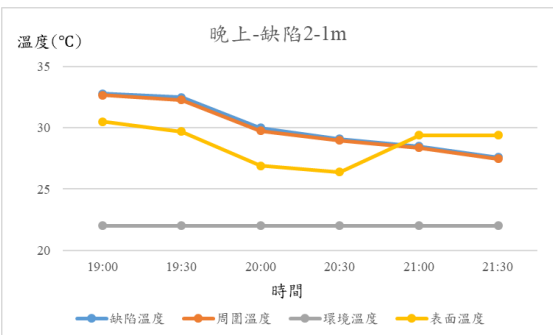
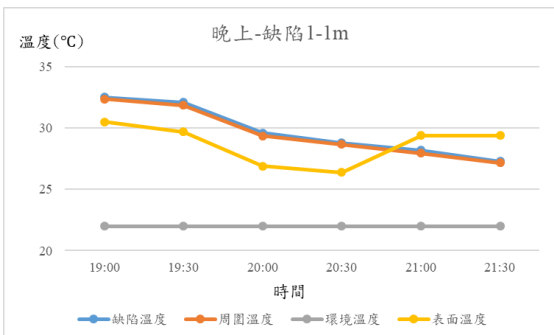
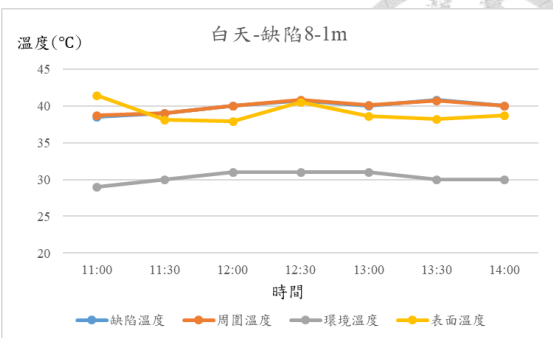
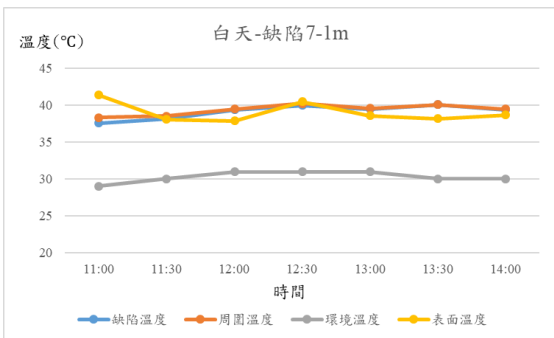
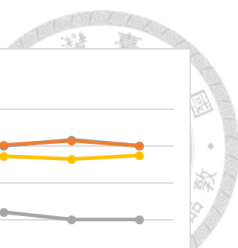


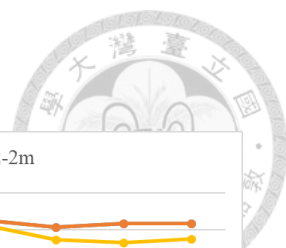


## 六、第二組試體各個缺陷於測距 1 米時之折線圖

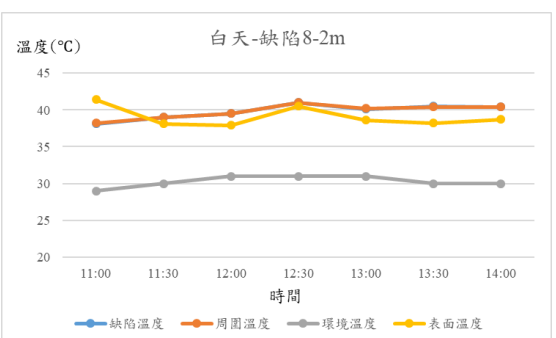
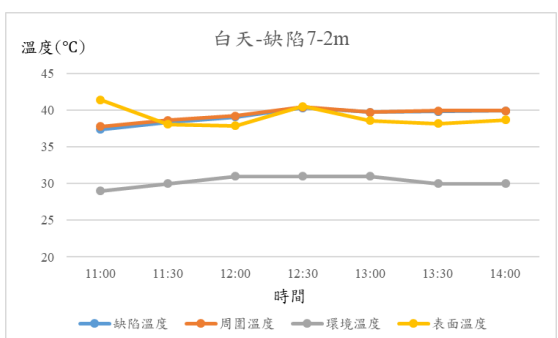
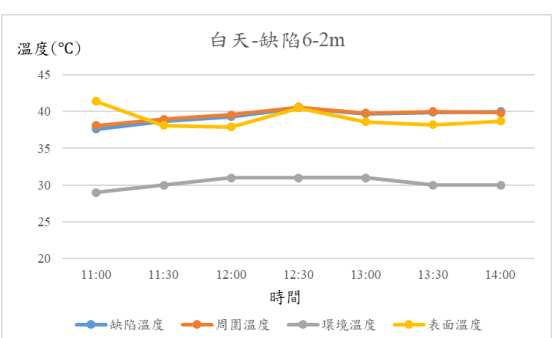
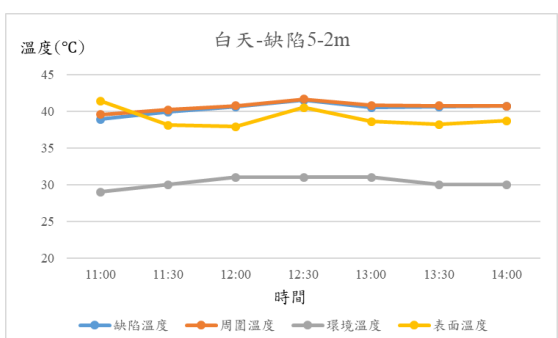
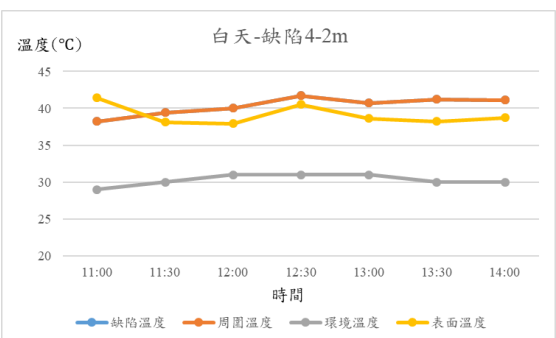
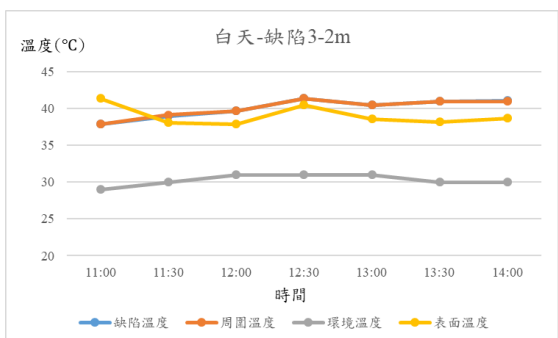
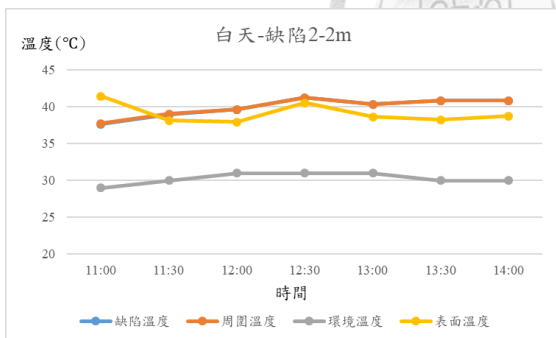
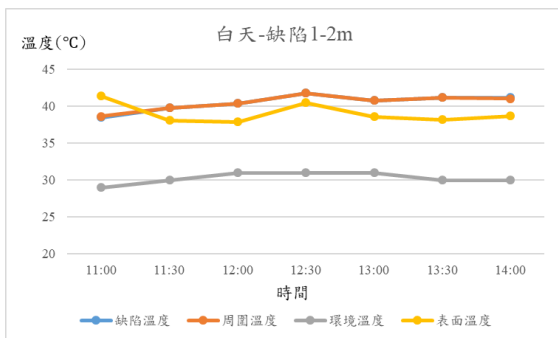


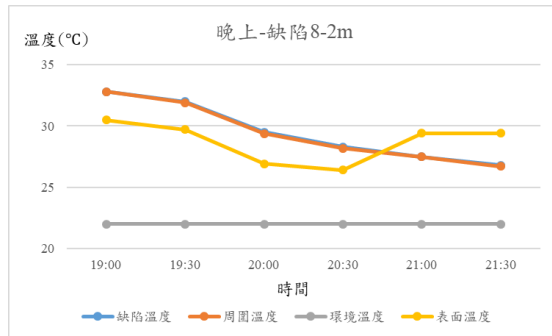
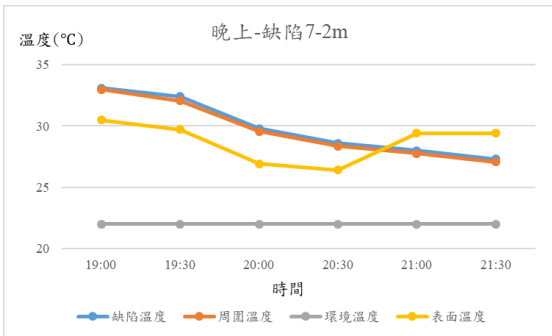
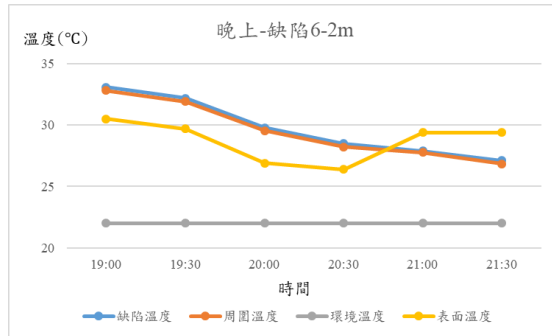
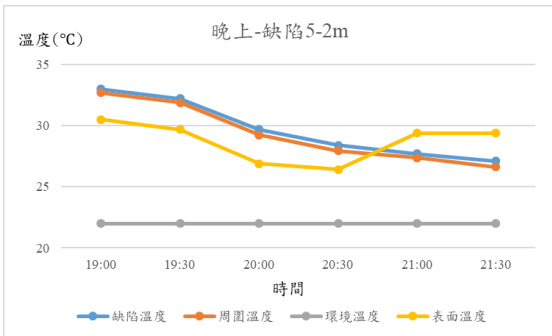
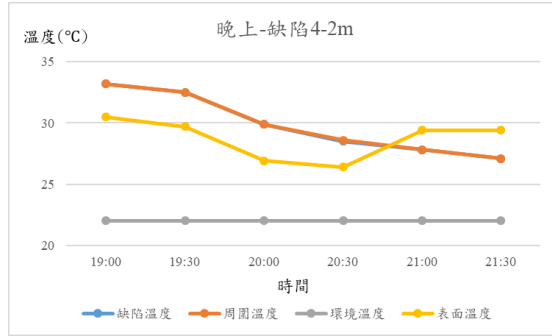
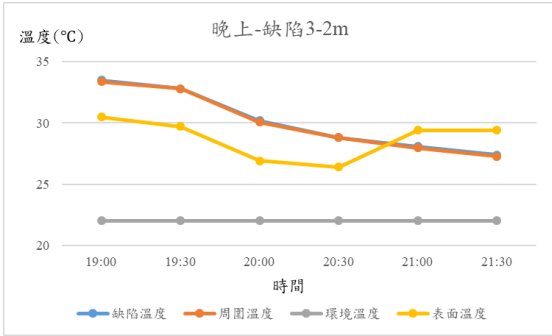
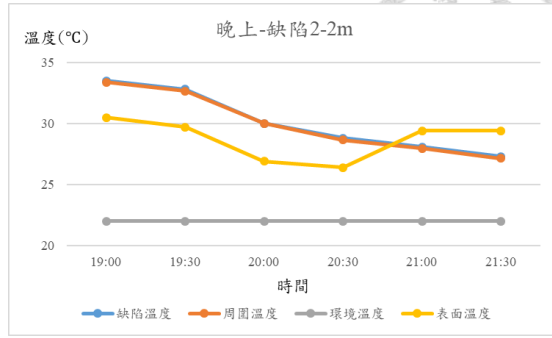
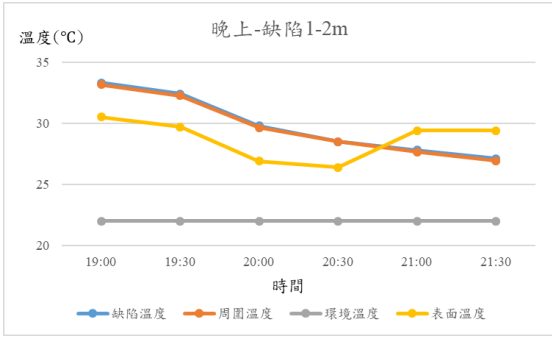
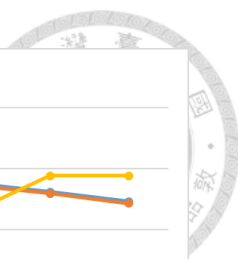


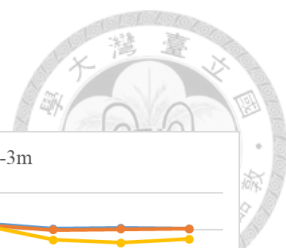




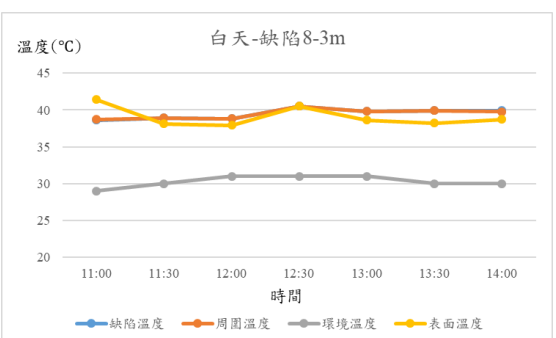
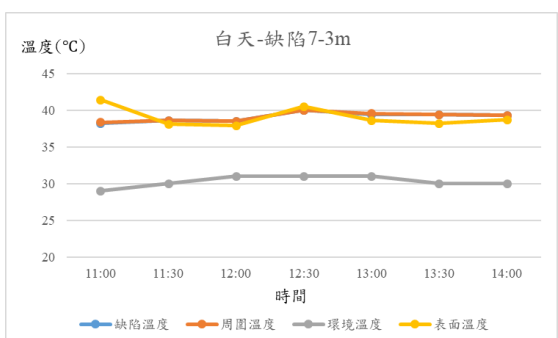
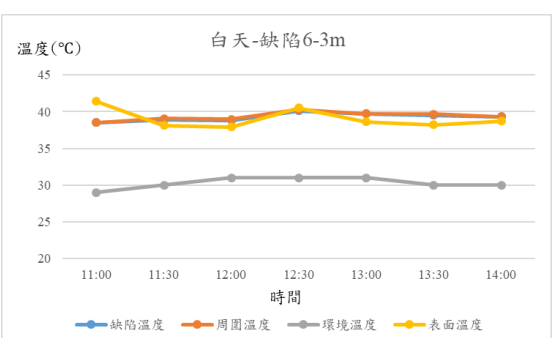
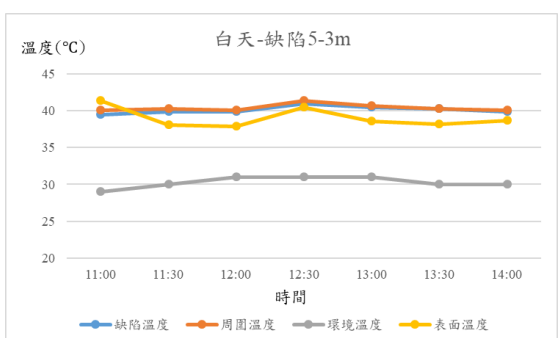
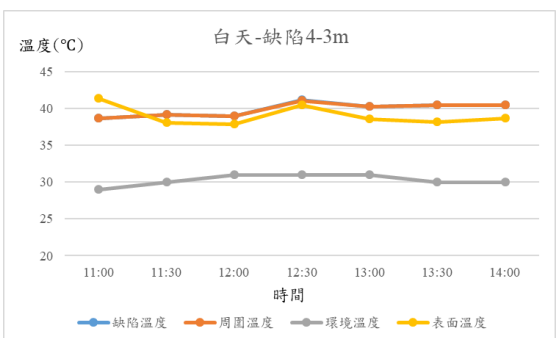
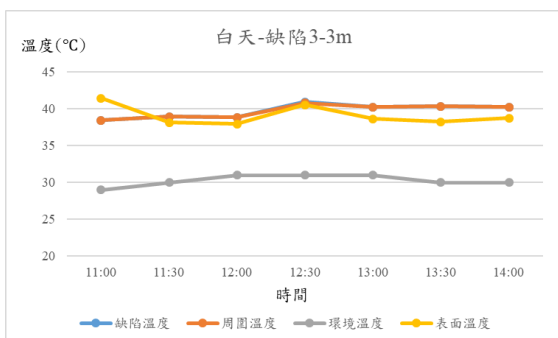
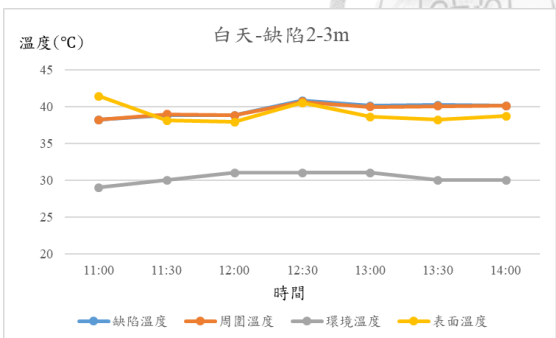
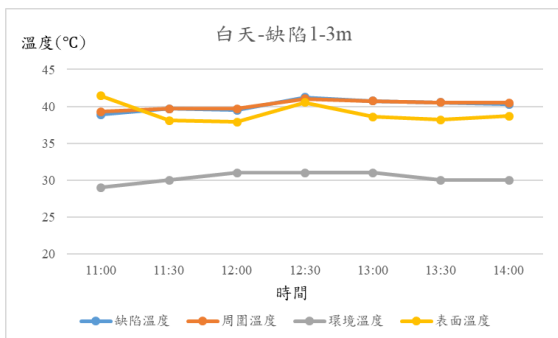
七、第二組試體各個缺陷於測距 2 米時之折線圖

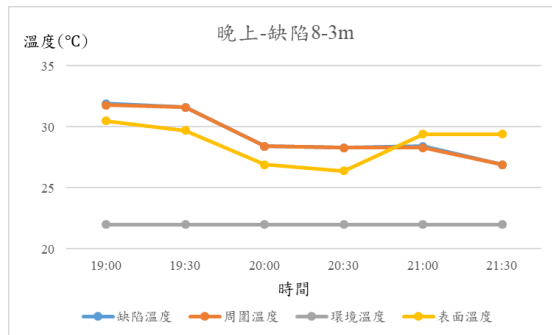
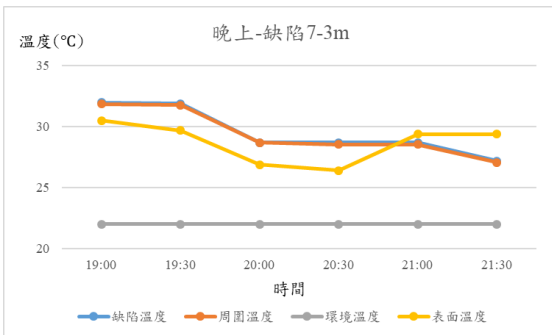
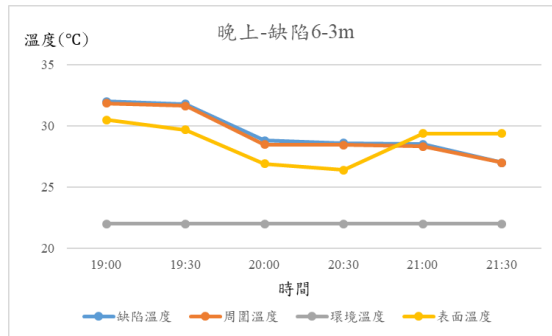
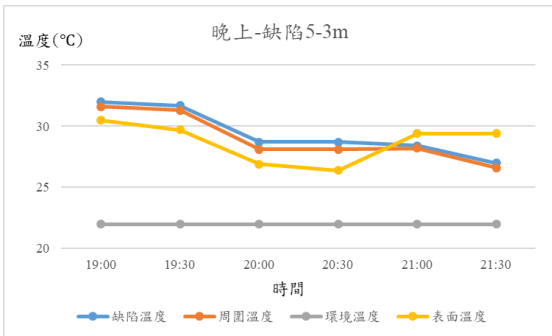
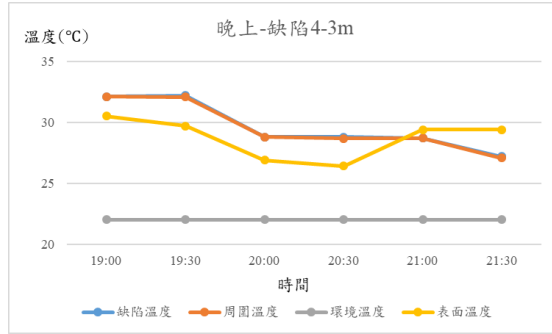
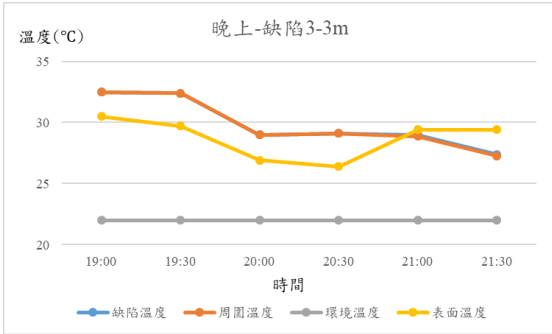
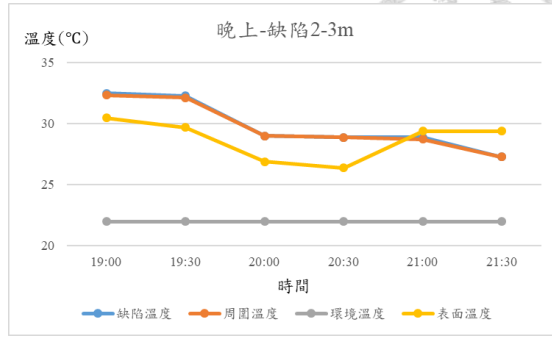
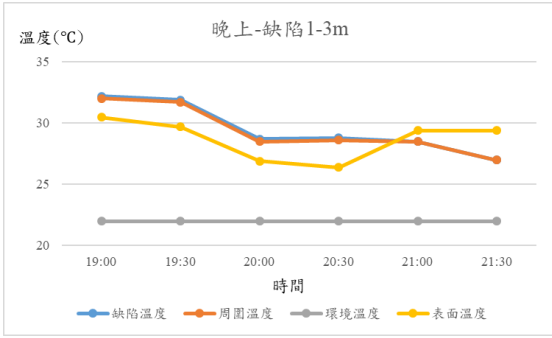
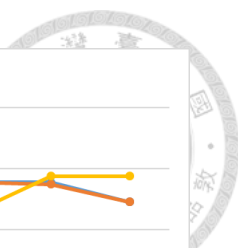


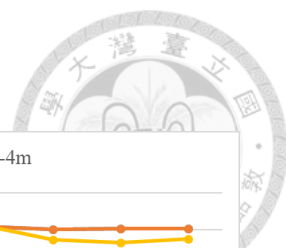




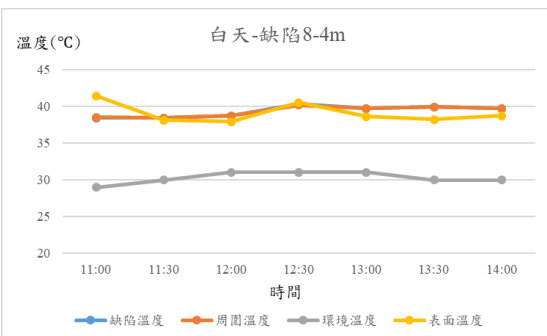
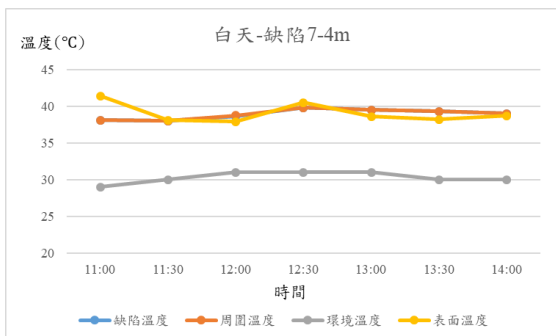
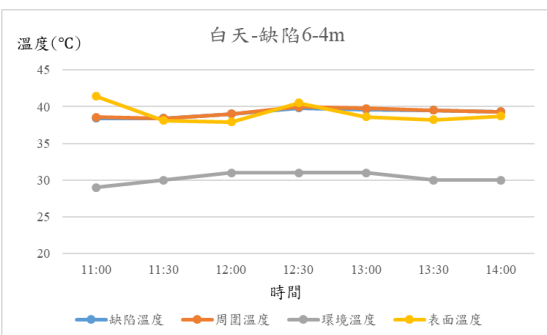
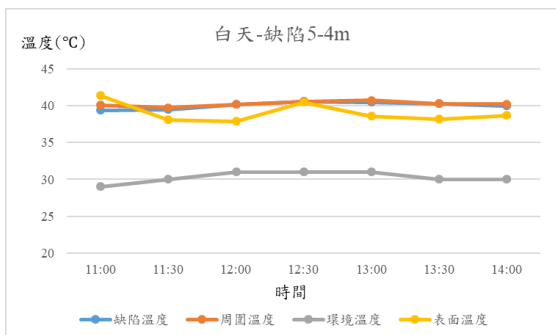
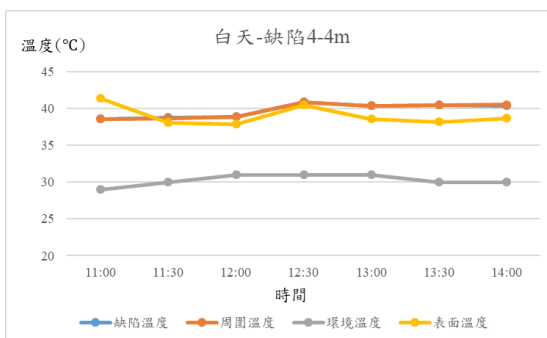
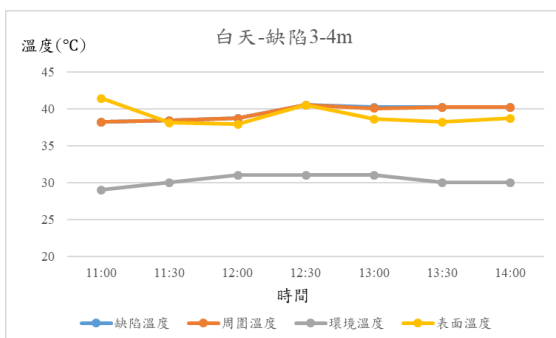
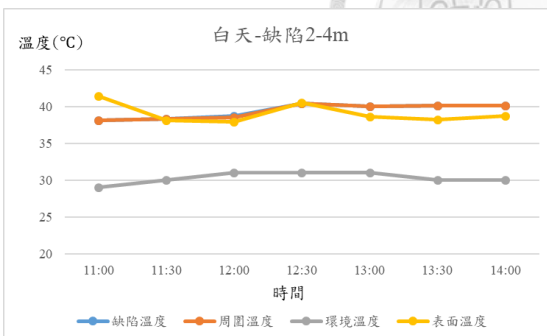
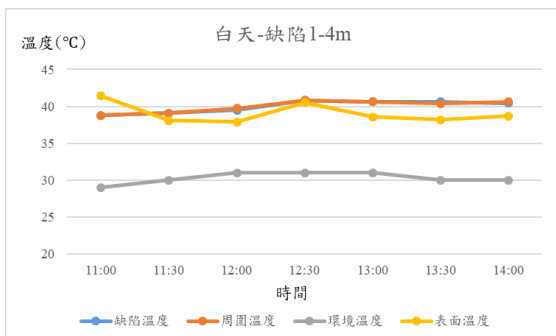
八、第二組試體各個缺陷於測距 3 米時之折線圖

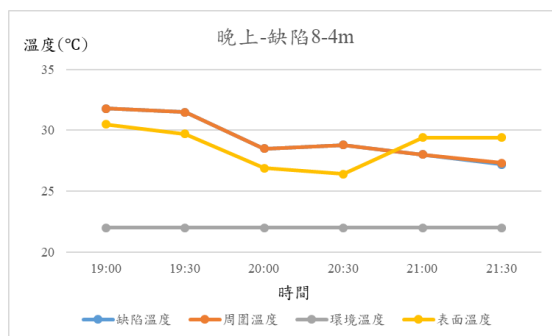
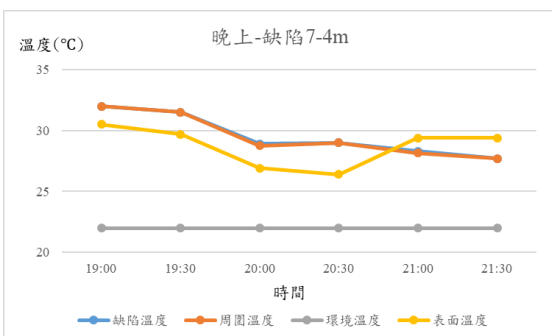
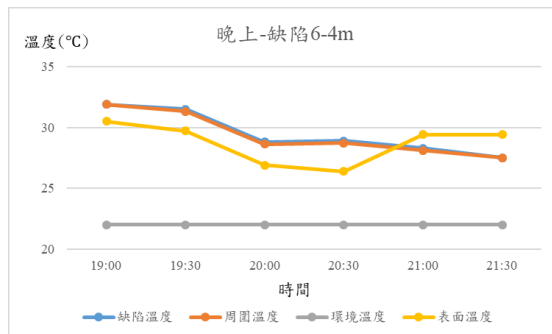
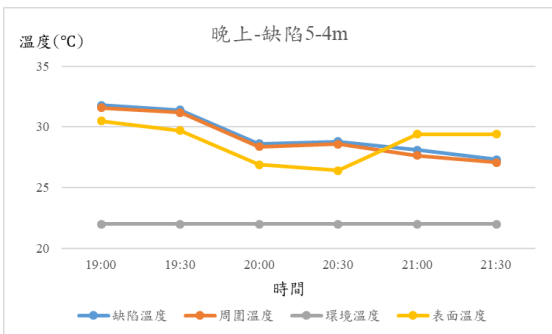
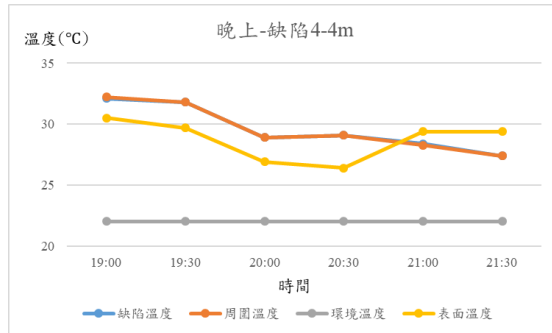
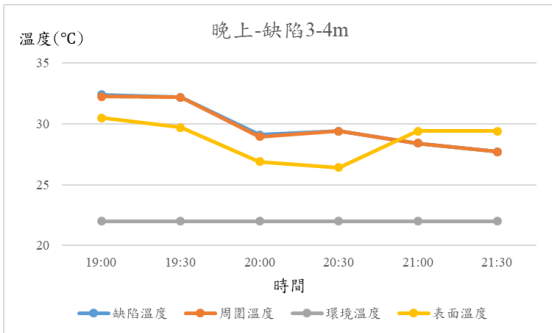
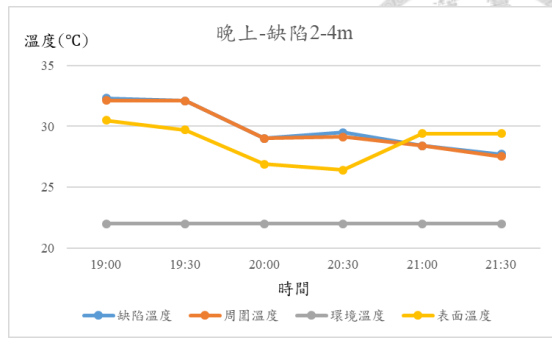
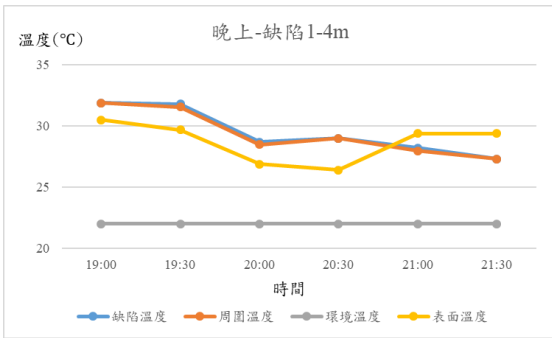
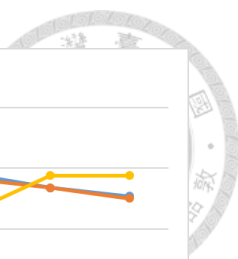






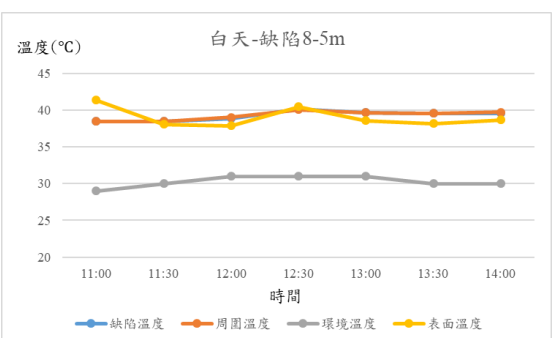
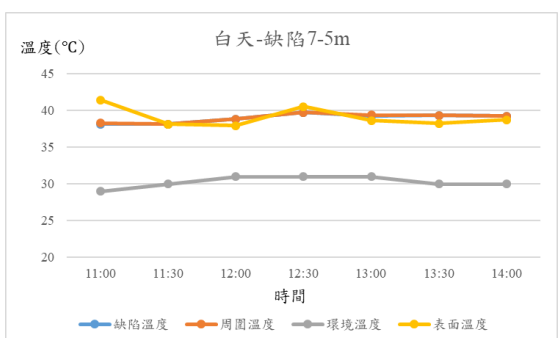
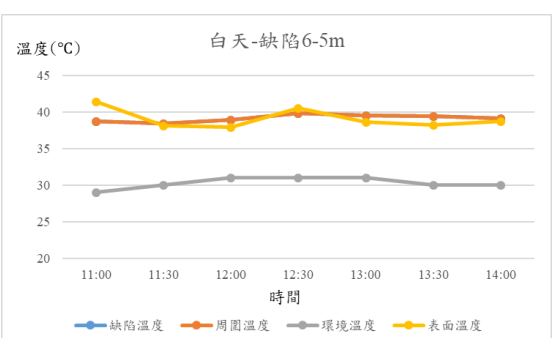
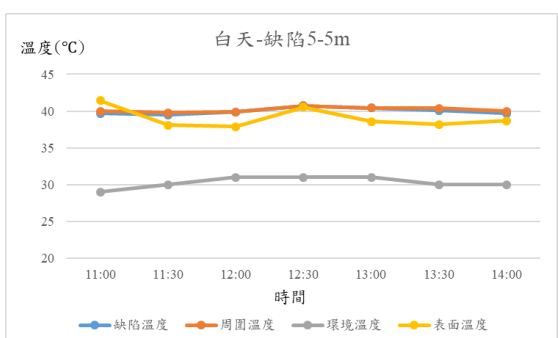
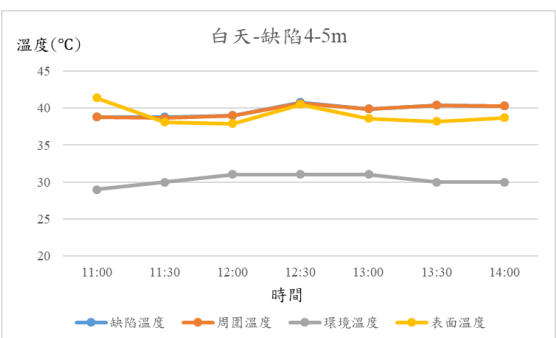
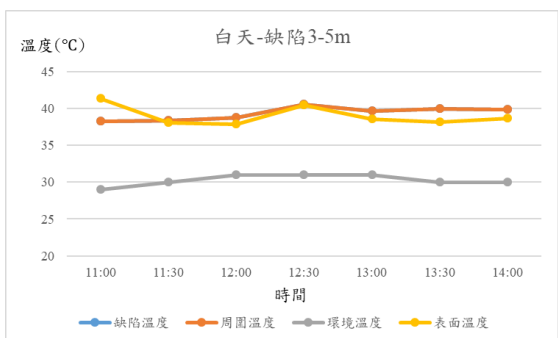
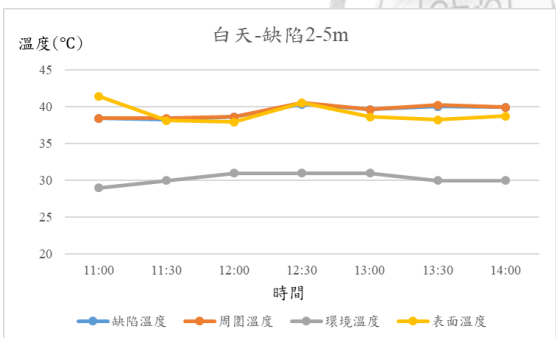
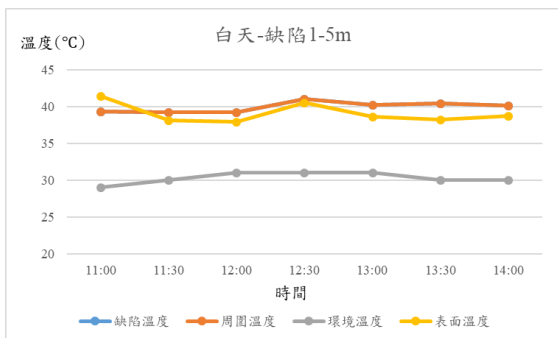
九、第二組試體各個缺陷於測距 4 米時之折線圖



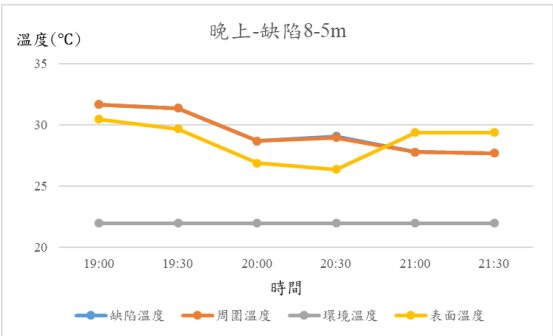
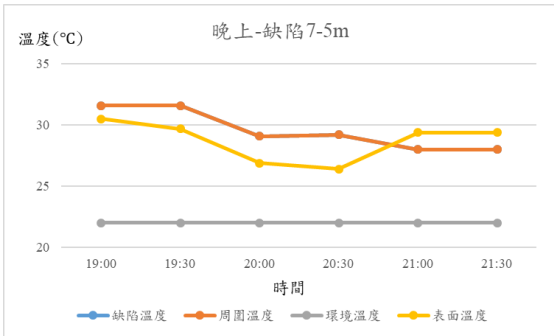
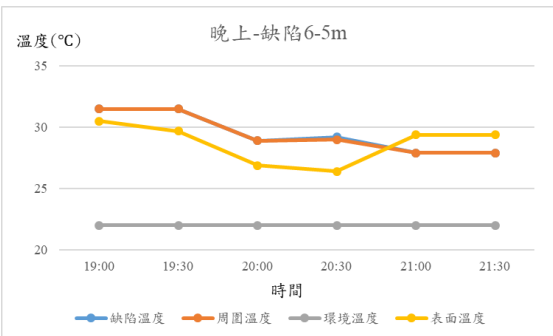
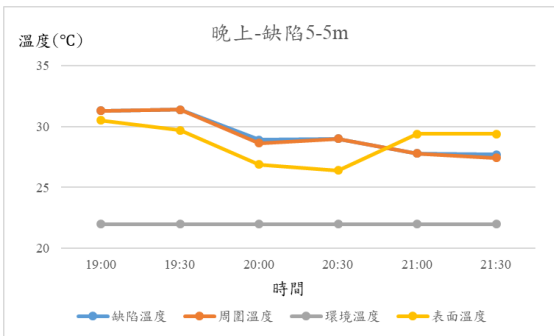
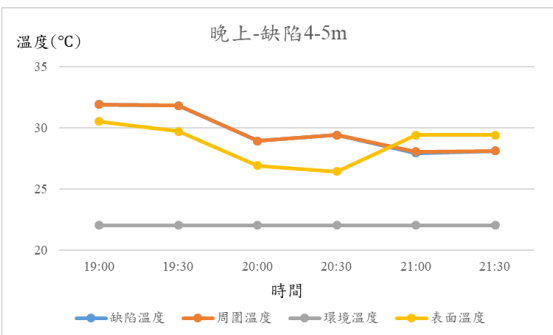
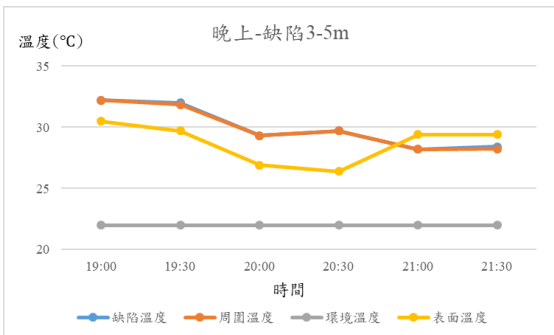
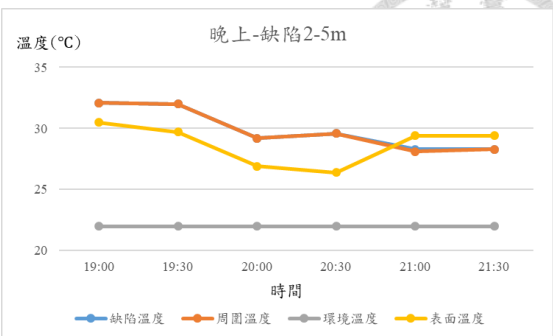
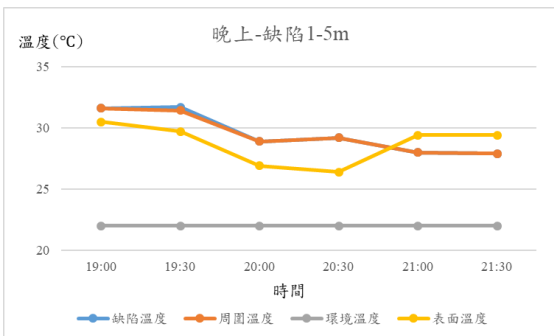
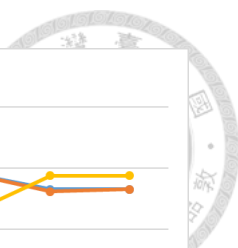




十、第二組試體各個缺陷於測距 5 米時之折線圖

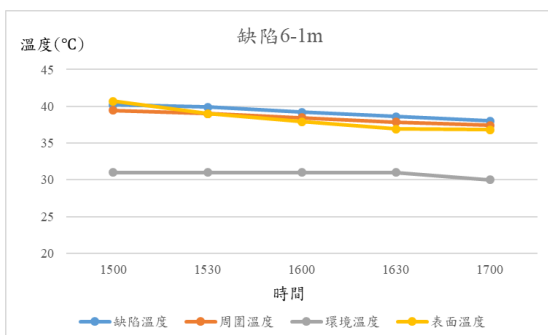
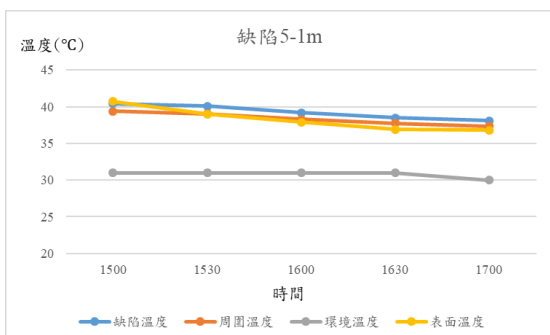
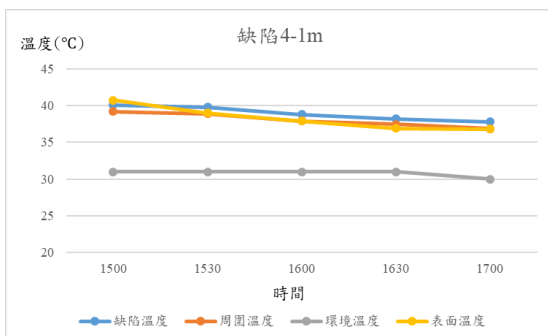
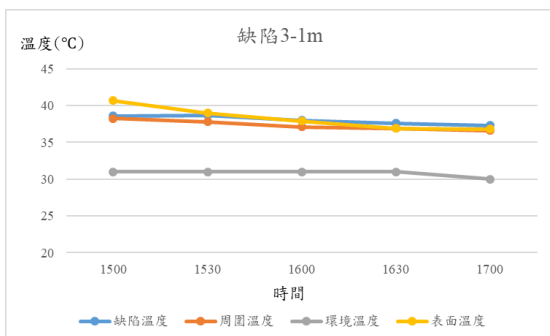
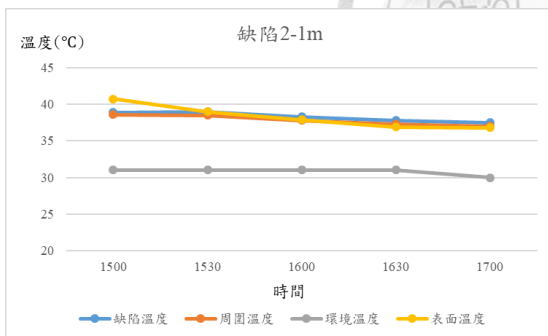
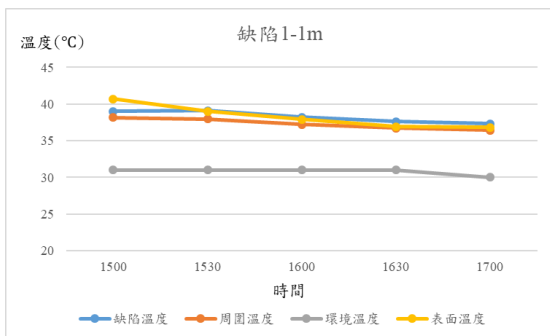




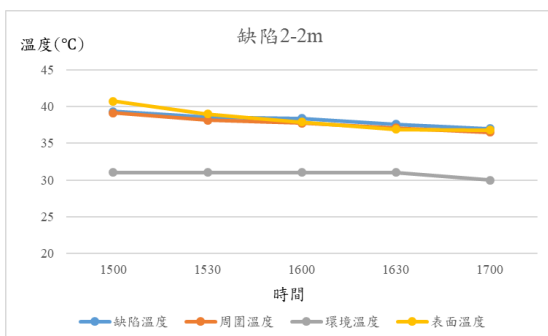
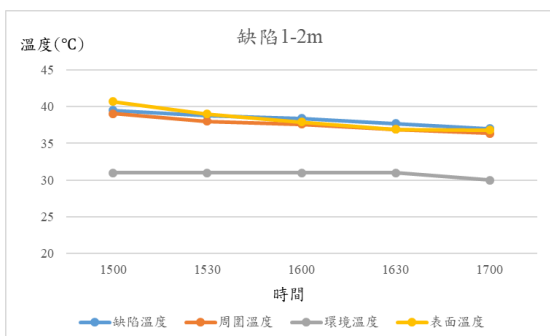


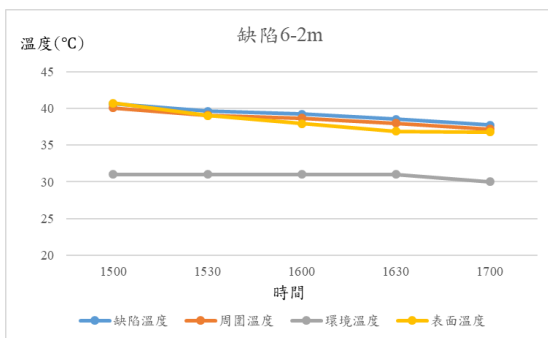
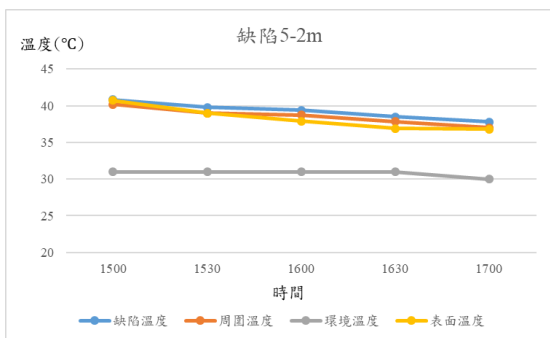
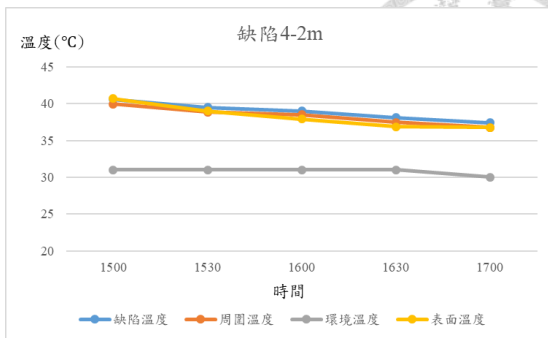
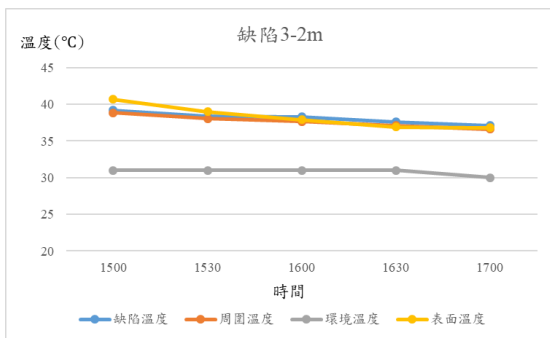
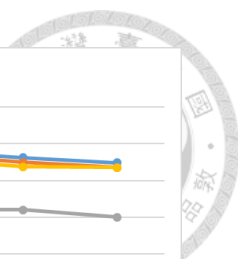


### 十一、第三組試體各個缺陷於測距 1 米時之折線圖

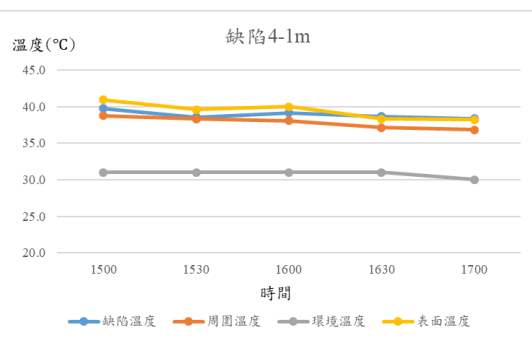
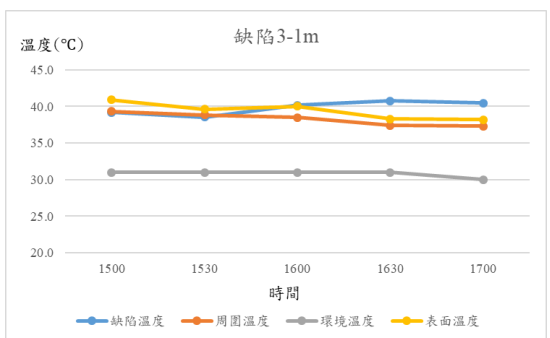
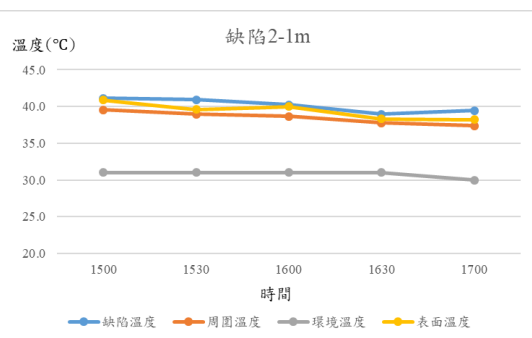
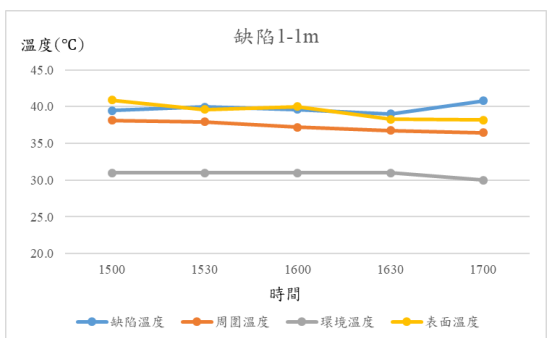


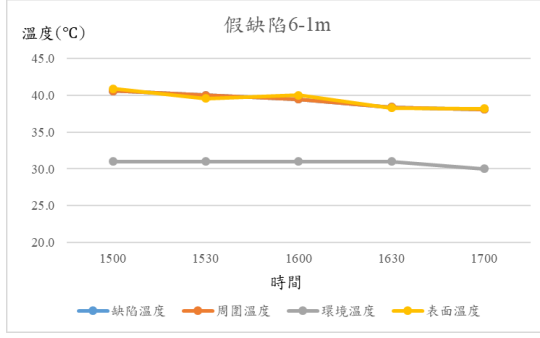
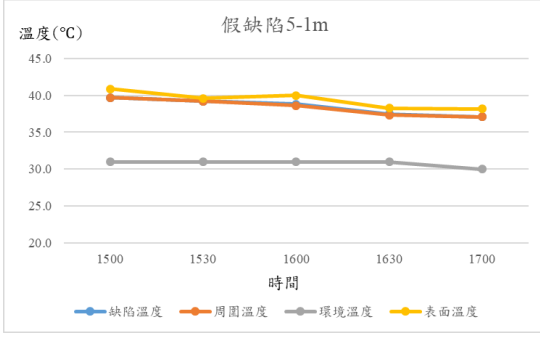
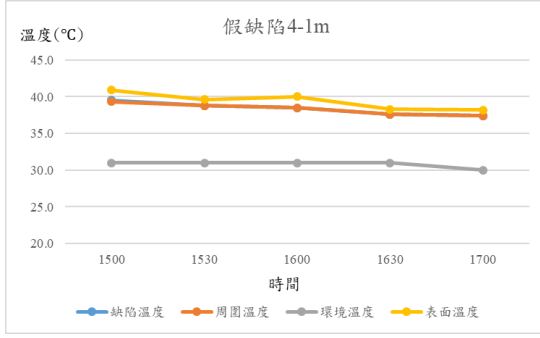
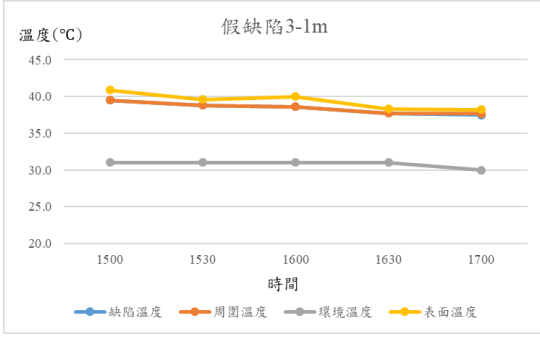
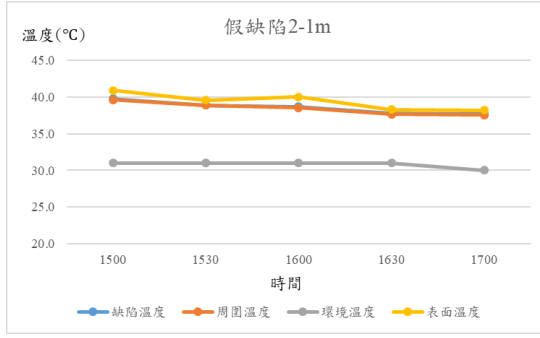
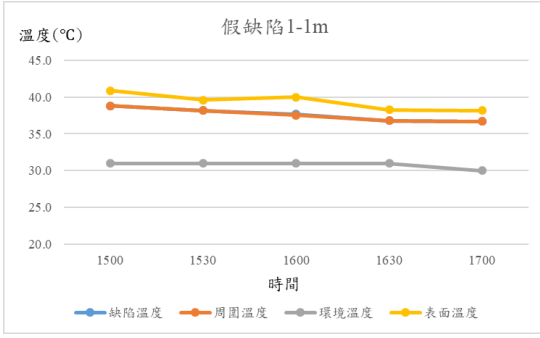
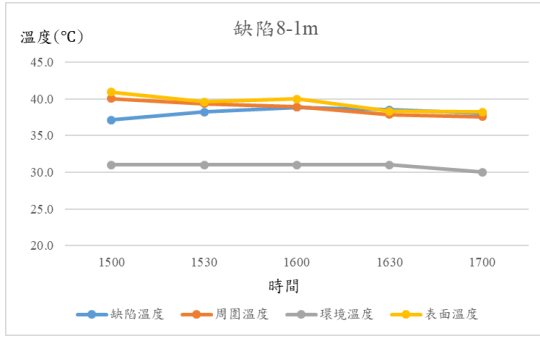
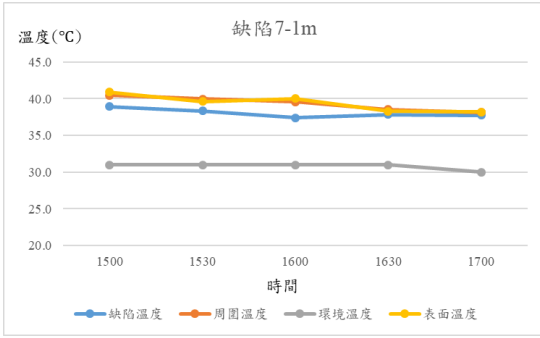
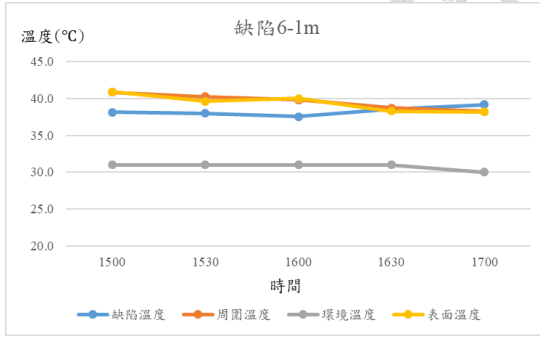
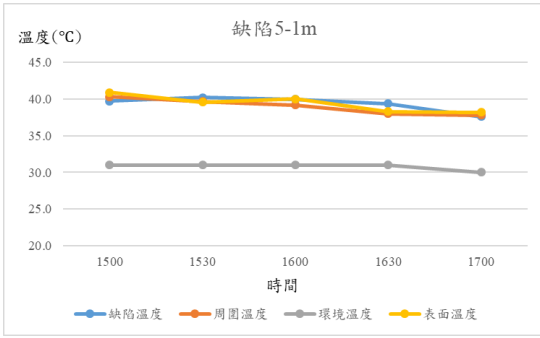
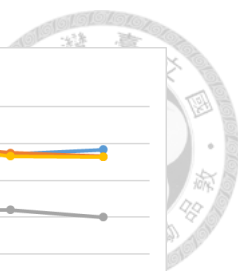
### 十二、第三組試體各個缺陷於測距 2 米時之折線圖

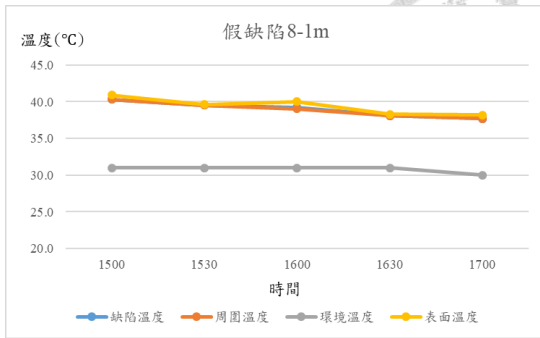
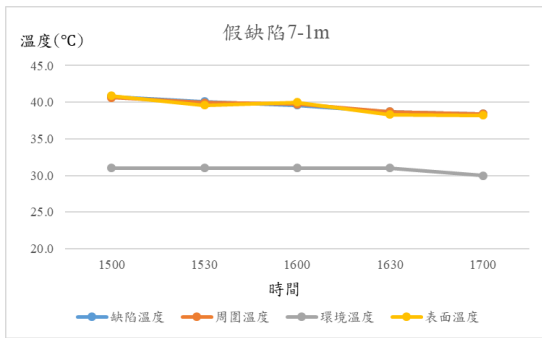




十三、第四組試體各個缺陷於測距 1 米時之折線圖







十四、第五組試體各個缺陷於測距 1 米時之折線圖

