

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發
整合應用計畫（二）協同研究計畫
第 1 案：人工智能火害判識應用於結構材
料現場火害探傷之研究」
資料蒐集分析報告

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 108 年 12 月

（本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

**「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發
整合應用計畫（二）協同研究計畫
第 1 案：人工智能火害判識應用於結構材
料現場火害探傷之研究」
資料蒐集分析報告**

計畫主持人：蔡綽芳
協同主持人：林俊宏
研究員：王天志、蘇鴻奇、陳佳玲、陳韋志
研究助理：王力平、陳煜
研究期程：中華民國 108 年 2 月至 108 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 108 年 12 月

（本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

目次

目次.....	I
表次.....	V
圖次.....	VII
摘要.....	XIII
ABSTRACT.....	XIII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的	1
第三節 本計畫之重要性	2
第四節 範圍與方法	3
第五節 研究報告之內容與流程	5
第二章 文獻回顧	7
第一節 國內外火害工程沿革	7
第一項 火害工程研究概述	8
第二項 建築物室內火災之溫度變化情形	12
第二節 混凝土材料熱損傷特徵	14
第一項 混凝土材料受高溫之性質變化	14
第二項 水泥基質材料之力學性質與升溫變數之關係	21
第三項 熱-固耦合作用下混凝土之力學行為	26
第三節 鋼筋混凝土傷損機制	32

第一項 混凝土之傷損	32
第二項 鋼筋之鏽蝕	34
第三項 握裹之損傷	39
第四節 人工智能分析	40
第五節 導波量測技術	46
第一項 導波之傳遞特性	46
第二項 導波量測技術於鋼筋混凝土之應用	52
第三項 多頻道表面波場分析之應用	59
第三章 研發應用方法與範圍	63
第一節 人工智能於火害資料庫之應用	63
第一項 火害變數相關性分析	63
第二項 人工智能分析	64
第二節 導波試驗	70
第一項 試驗變數規劃	70
第二項 擬真火害試驗	70
第三項 試驗方法與流程	72
第四項 試體材料與製備	74
第三節 火害現場結構材料探傷檢測系統韌體評估	77
第四章 研究成果	81
第一節 人工智能於火害數據之分析	81
第一項 人工智能於火害因果關係調查結果	81
第二項 數據分析成果與比較	85
第三項 AI 人工智能所得模型驗證	91

第二節 導波量測試驗結果	98
第一項 導波量測於握裹力傷損調查應用概念	98
第二項 火害受損深度調查應用	98
第三項 握裹力傷損段判釋方法	107
第三節 火害資料庫系統建置方法	110
第一項 權限	110
第二項 功能	110
第三項 資料庫建置成果	113
第四節 導波技術導入現有火害探傷檢測系統之評估	116
第一項 導波量測所需之量測系統	116
第二項 導波量測系統與現有火害探傷檢測系統之比較	118
第三項 硬體成本經費估算	119
第五節 桃園迴龍案場外業量測	121
第五章 結論與建議	127
第一節 結論	127
第一項 人工智能於火害數據之分析	127
第二項 以導波量測握裹力傷損判識法建立	128
第三項 火害資料庫系統建置	128
第四項 導波技術導入現有火害探傷檢測系統之評估	129
第二節 建議	129
附錄一 採購評選會議紀錄	131
附錄二 期中審查會議紀錄	133
附錄三 期末審查會議紀錄	139

附錄四 第一次工作會議紀錄	145
附錄五 第二次工作會議紀錄	149
附錄六 第三次工作會議紀錄	155
附錄七 第一次專家座談會會議紀錄	159
附錄八 第二次專家座談會會議紀錄	167
附錄九 超音波內業量測標準作業程序	175
附錄十 超音波外業量測標準作業程序	189
附錄十一 外業火害調查表	195
參考書目	203

表次

第一章

表 1.1 內業導波試驗範圍與方法之說明表	4
-----------------------------	---

第二章

表 2.1 國內外相關之文獻摘要	9
------------------------	---

表 2.2 火災發展歷程各階段之基本特性	14
----------------------------	----

表 2.3 水泥漿體受熱之變化說明	16
-------------------------	----

表 2.4 水泥漿體受熱之變化說明	34
-------------------------	----

第四章

表 4.1 輸入與輸出變數之關聯係數	84
--------------------------	----

表 4.2 輸出變數間之關聯性	85
-----------------------	----

表 4.3 使用交叉驗證 SMOREG 演算法最高溫度預測	94
-------------------------------------	----

表 4.4 使用交叉驗證 LINEAR REGRESSION 演算法最高溫度預測	94
--	----

表 4.5 使用交叉驗證 MULTILAYER PERCEPTRON 演算法最高溫度預測	95
--	----

表 4.6 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法最高溫度預測	95
--------------------------------------	----

表 4.7 使用交叉驗證 SMOREG 演算法強度折減預測	96
-------------------------------------	----

表 4.8 使用交叉驗證 LINEAR REGRESSION 演算法強度折減預測	96
--	----

表 4.9 使用交叉驗證 MULTILAYER PERCEPTRON 演算法強度折減預測	97
--	----

表 4.10 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法強度折減預測.....	97
表 4.11 既有火害探測檢測系統與導波系統比較表	118
表 4.12 導波系統硬體單價分析表.....	120

圖次

第一章

圖 1.1 火害探傷檢測系統韌體整合示意圖3

圖 1.2 計畫流程圖.....5

第二章

圖 2.1 近五年火災發生次數統計圖7

圖 2.2 室內火災之歷程曲線 13

圖 2.3 水泥漿體之溫度與長度變化關係 16

圖 2.4 矽質骨材的溫度與線性膨脹之關係 17

圖 2.5 混凝土於高溫作用下之變化 19

圖 2.6 混凝土於高溫作用下對相對強度之影響 19

圖 2.7 混凝土暴露於高溫下之性質變化 20

圖 2.8 慢速升溫下混凝土之強度折減與溫度關係 23

圖 2.9 快速升溫下混凝土之強度折減與溫度關係 24

圖 2.10 不同升溫梯度與高溫下試體中心升溫歷程 24

圖 2.11 不同高溫及持溫時間下混凝土(水灰比 0.55)之強度折減 25

圖 2.12 不同高溫及持溫時間下混凝土(水灰比 0.65)之強度折減 25

圖 2.13 工作載重作用下碳酸鹽骨材混凝土受溫度作用後之抗壓強度 27

圖 2.14 工作載重作用下矽質骨材混凝土受溫度作用後之抗壓強度	28
圖 2.15 作載重作用下輕質骨材混凝土受溫度作用後之抗壓強度 ...	28
圖 2.16 試驗(A)與試驗(B)的溫度與加載歷程	29
圖 2.17 不同工作載重下試體升溫過程之變形量	30
圖 2.18 (A)彈性模數於不同工作載重與高溫下之關係.....	31
圖 2.19 水泥漿體之溫度與長度變化關係(MINDESS, 1981).....	34
圖 2.20 矽質骨材的溫度與線性膨脹之關係(GORDON, 1996)	34
圖 2.21 鋼筋混凝土結構腐蝕 過程的漸進階段(ERVIN, 2009).....	38
圖 2.22 不同鋼筋腐蝕程度示意圖(ERVIN, 2009).....	38
圖 2.23 不同氧化程度鐵鏽之體積變化(陳育聖, 2018).....	38
圖 2.24 握裹力來源示意圖：(A)鋼筋與混凝土間之摩擦力 (B)竹節鋼 筋突出物與混凝土之相互作用力(趙元和, 2004)	40
圖 2.25 火害破壞特徵資料庫設計圖	45
圖 2.26 於均質均向板狀物體中之導波(BARTOLI, 2007).....	47
圖 2.27 鋼管中之導波示意圖(BOLT, 1976).....	47
圖 2.28 柱波之圓柱座標示意圖(ABRAMSON ET AL., 1958)	48
圖 2.29 柱波之頻散與多震態現象(LI ET AL., 2012).....	51
圖 2.30 柱波之反射與透射行為(RUCKA & ZIMA, 2015)	51
圖 2.31 鋼筋導波在混凝土包覆處之能量洩漏示意圖	52

圖 2.32 導波在鋼筋與混凝土包覆段之傳遞情形 (RUCKA & ZIMA, 2015).....	52
圖 2.33 鋼筋鏽蝕之數值模擬波形(ZHENG ET AL., 2014)	53
圖 2.34 導波能量與握裹長度消失比例的關係(LI ET AL., 2012)	54
圖 2.35 超音波導波對不同地錨長、厚度判識不顯著(ZIMA ET AL., 2017).....	55
圖 2.36 鋼筋握裹狀態與鏽蝕程度在導波能量上的反應.....	57
圖 2.37 腐蝕對導波的影響：(A)未損壞的鋼筋 (B)腐蝕的鋼筋.....	57
圖 2.38 混凝土內鋼筋之頻散曲線.....	58
圖 2.39 於 100 KHZ 下 L(0,1) 之位移模式形狀.....	58
圖 2.40 R 波反算 P 波隨深度變化之頻散曲線(KIM ET AL., 2006)	61
圖 2.41 接收器下方握裹缺陷之時頻圖判識：(A)有缺陷(B)無缺陷(許慧如, 2015).....	61
第三章	
圖 3.1 WEKA 圖示.....	65
圖 3.2 決策樹分類分析示意圖.....	66
圖 3.3 類神經網路示意圖	68
圖 3.4 支援向量機示意圖.....	69
圖 3.5 試體俯視圖、預火損之位置與熱偶線埋設處.....	71

圖 3.6 量測配置示意圖(X_B ：敲擊源與左邊界之距離； X_0 ：敲擊源與第一接收器(TRIGGER)之距離； ΔX ：接收器之間距).....	73
圖 3.7 試驗施測之移動方式示意圖	73
圖 3.8 試驗流程圖.....	74
圖 3.9 敲擊鋼珠(採用直徑 7 MM).....	75
圖 3.10 壓電式感應器 (型號：WD FO79).....	76
圖 3.11 型錄說明.....	76
圖 3.12 蜜蠟 (PCB 型號：080A24).....	76
圖 3.13 擷取介面器.....	76
圖 3.14 前置放大器(型號：1220C).....	76
圖 3.15 火害探傷檢測系統軟體整合	77
圖 3.16 UK-1401 乾點式超音波脈衝儀與壓、剪力波探頭.....	78
圖 3.17 PICO SCOPE 4224 訊號擷取器	79
圖 3.18 GETAC 強固式平板電腦.....	79

第四章

圖 4.1 使用交叉驗證 SMOREG 演算法最高溫度預測 (相關係數 0.7205 平均絕對誤差 69.2996 均方跟誤差 110.2713).....	87
圖 4.2 使用交叉驗證 LINEAR REGRESSION 演算法最高溫度預測	87
圖 4.3 使用交叉驗證類神經網路演算法最高溫度預測	88

圖 4.4 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法最高溫度預測.....	88
圖 4.5 使用交叉驗證 SMOREG 演算法強度折減預測	90
圖 4.6 使用交叉驗證 LINEAR REGRESSION 演算法強度折減預測	90
圖 4.7 使用交叉驗證類神經網路演算法強度折減預測	91
圖 4.8 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法強度折減預測.....	91
圖 4.9 火害受損深度調查資料分析流程 (A) 時間域前處理 (B) 頻散 曲線分析 (C) 1.5D 剪力波速剖面影像.....	100
圖 4.10 速度-頻率域圖(無鋼筋無分層混凝土試體).....	101
圖 4.11 位置-深度之波速圖(無鋼筋無分層混凝土試體)	101
圖 4.12 無鋼筋人工分層試體典型頻散曲線影像	103
圖 4.13 無鋼筋人工分層試體位置-深度之波速圖.....	103
圖 4.14 位於鋼筋正上方收錄之頻散曲線圖(鋼筋深度 3 CM)	104
圖 4.15 偏移鋼筋 3 公分有鋼筋混凝土試體之頻散曲線圖 (鋼筋深度 5 CM).....	105
圖 4.16 擬真火損試驗照片	106
圖 4.17 受火害影響之頻散曲線圖	107
圖 4.18 火損分層試體位置-深度之波速圖	107
圖 4.19 握裹力無傷損段試體之速度-頻率域圖.....	108
圖 4.20 握裹力無傷損段試體之速度-頻率域圖.....	109

圖 4.21 火害資料庫系統規畫概念圖(管理級權限)	112
圖 4.22 火害資料庫系統規畫概念圖(使用級權限)	112
圖 4.23 火害資料庫系統登入畫面	114
圖 4.24 火害資料庫系統使用者管理操作頁面(管理者權限).....	114
圖 4.25 火害資料庫系統資料管理與上傳操作頁面(管理者權限)...	115
圖 4.26 火害資料庫系統資料管理與上傳操作頁面(使用者權限)...	115
圖 4.27 導波量測系統架構圖	117
圖 4.28 導波量測系統主要硬體規劃.....	120
圖 4.29 火害現場實際情況與 RC 之燃燒情況.....	122
圖 4.30 現場火源位置及鑽心點位之 4F 平面圖	122
圖 4.31 現場火源位置及鑽心點位之 6F 平面圖	123
圖 4.32 4F 直/間接量測之 V_s/V_p & 火源距離	124
圖 4.33 6F 直/間接量測之 V_s/V_p & 火源距離	124
圖 4.34 本研究以 4F、6F 直/間接量測之 V_s/V_p 與實驗室之燒失量推 估最高溫度兩者與火源距離之比較	124
圖 4.35 使用四種預測模型最高溫度預測結果.....	125
圖 4.36 使用四種預測模型強度折減比例預測結果	126

摘要

關鍵詞：結構傷損判識、非破壞檢測、剪-壓波速比、導波量測、
資料庫、資料探勘

壹、 研究緣起

台灣主要建築與工程之結構系統為鋼筋混凝土(RC)結構物，火災發生後對其結構系統受火損之量化與質化調查(尋因)，與後續居安使用功能之評核(驗果)至關重要。內政部建築研究所曾於 107 年度進行火害現場結構材料探傷檢測系統軟體之開發，其可用於量測鋼筋混凝土結構材料之彈性波速，並根據 104-106 年度於實驗室與現場系列調查之數據所提出的「簡速非破壞性」之火損初勘量化評估方法，藉由正規化指標(剪-壓波速比)評估其火害相關之因果數據，如火場最高受溫分佈與柱-梁-版之混凝土強度折減率，可分別作為後續火場調查與構材火損判識。為進一步擴大既有之研究成果，導入人工智能分析，增加現場應用案例，並開發鋼筋握裹損傷判釋方法，而進行本年度之研究工作。

貳、 研究方法

本研究擬在前述成果基礎上，利用人工智能分析方式包括支援向

量機、線性回歸、類神經網路以及決策樹等演算法進一步對成果資料分析建立火害判識方法，且透過雲端資料庫系統的開發，增加資料庫的使用團隊，以利增加相關數據之累積速度；另一方面採室內試驗探討不同狀態下之火害受損深度與握裹力喪失特徵，建立運用導波於火害受損厚度與鋼筋握裹力狀態之評估方法，且藉已開發之設備功能，評估在既有硬體規格下導入導波量測分析應用的可行性。另一方面，持續增加現場的應用案例以掌握相關實務狀況與可能遭遇之問題。

參、 重要發現

1. 在人工智能與火害特徵調查之資料庫及資料探勘方面，因果關聯相關性顯示剪力波速、壓縮波波速、剪-壓波速比與最高溫度及強度折減比例有高度相關，將剪-壓波速比做為輸入，最高溫度與強度折減比例分別作為輸出，進行支援向量機、線性回歸、類神經網路以及決策樹 M5P 之預測模型建立，結果顯示在最高溫度與強度折減比例之預測模型上，採用決策樹 M5P 之演算法有最佳效果，其餘方法預測性較差且會有負值之不合理預測結果產生。

2. 在應用導波進行握裹力傷損調查判釋方法開發上，兩階段調查策略具有可行性，第一階段採用應用雷利波之表面波分析方法可獲得混凝土剪力波速剖面影像，以 10%之剪力波速折減作為特徵值可定義

受損範圍，判釋此受損範圍之分布特徵若呈現自表面向下延伸則顯示遭受火損，若此範圍超越保護層，則進入第二階段判釋。第二階段判釋採用距敲擊點 10 公分處之接收器進行時頻分析，在時頻譜上若呈現水滴狀能量分布則為正常，若呈現類靴狀且突出段在 40-100kHz 範圍則顯示可能有握裹力喪失之可能性，需進行殘餘握裹力調查。

肆、 主要建議意見

建議一：AI 人工智能端

1. 後續須蒐集更多數量與變數之內業數據，須包含正常強度混凝土 ($f'_c=210$ 、 $f'_c=280$ 及 $f'_c=350$) 以及更多階級之混凝土火害最高溫度 ($T_{max}=200^{\circ}\text{C}\sim T_{max}=800^{\circ}\text{C}$ ，每 50°C 階層漸進)
2. 針對 WEKA 軟體可以使用更多預測模型進行測測法之推估，尋找更適合之預測法，並了解其程式碼方便後續修改。
3. 針對大數據分析可以使用非監督式學習。使其預測法內自行尋找其特徵值與佔比權重，可使推估值更貼近現實情況。在此需求下應盡快建立資料庫雲端平台以及相對應之硬體設備，以有效增加有效之數據量。

建議二：握裹力傷損之導波量測判識方法

1. 導波檢測之判識方法已建立，但仍屬定性之方法，建議後續可

持續開發定量之評估方法，並進行實場測試以掌握在實場應用中可能面臨的問題。

2. 第一階段判識採用剪力波速影像圖受既有反算方法限制而使得深度解析度僅 1 公分，未來可針對此深度上解析度的提升進行進一步的改善研究。

建議三：導波量測系統建置

本研究對導波技術導入既有設備進行之評估結果顯示整合具有可行性，建議未來可將其組建並發展儀控軟件，搭配網路連接可有效發揮以建置之雲端資料庫系統之功用。

Abstract

Keywords: Damage detection of construction material, Non-destructive technique, Shear-compression wave velocity ratio (V_s/V_p), Guide wave measurement, Database,

Concerning Reinforced Concrete (RC) structure is the main system for buildings and constructions in Taiwan currently, the quality/quantity evaluation of fire-induced damage/degradation in RC structure is important for living safety. To establish a new working system which can be used to measure the fire-damage degree rapidly for both brittle and ductile of reinforced concrete structure. This study investigated the full-field fire damage characteristics of concrete and the interface bonding between concrete and steel using ultrasonic pulse (UP) and guide wave. The obtained results were used to construct the fire damage investigation firmware. It should be available to detect the degree of reduction of RC structural performance as well as maximum temperature. The obtained data can be provided to fire-prevention department and structure engineers to rebuild fire field and define structure recovery method respectively.

In this study, artificial intelligence analysis is used, subjoin more field application cases and establish the method of steel bond damage interpretation.

In terms of databases and data mining for artificial intelligence and fire hazard investigation, Causal correlation shows that shear wave velocity, compression wave velocity and wave-velocity ratio are highly correlated

with the maximum temperature and strength reduction ratio. The wave-velocity ratio is taken as the input, and the maximum temperature and strength reduction ratio are taken as the output respectively. Support vector machine, linear regression, neural network and decision tree m5p prediction model are established. The results show that the support vector machine algorithm is the best in the prediction model of the maximum temperature and strength reduction ratio. The other methods have poor predictability and negative and unreasonable prediction results.

The two-stage investigation strategy is feasible in the application of guided wave to the investigation and interpretation of bond damage, in the first stage, the shear wave velocity profile image of concrete can be obtained by using the surface wave analysis method of Rayleigh wave. With 10% shear wave velocity reduction as the characteristic value, the damage range can be defined. It can be judged that if the distribution characteristics of the damage range extend downward from the surface, it will show fire damage. If the range exceeds the concrete cover, it will enter the second stage. In the second stage, the time-frequency analysis is carried out. In the time-frequency spectrum, it is normal if there is a water drop like energy distribution; if there is a shoe like shape and the protruding section is in the range of 40-100kHz, it shows the possibility of loss of bond stress. Therefore, it is necessary to investigate the residual bond stress.

For immediate strategy:

The current evaluation standard is the identification of correlation coefficient, mean absolute error and root mean square error. In the future, it is suggested to integrate them into a composite index. In addition, the

identification method of guided wave detection has been established, but it is still a qualitative method. It is suggested that the quantitative evaluation method should be developed in the future, and the field test should be carried out to grasp the possible problems in the field application.

For long-term strategy:

Unsupervised learning can be used for big data analysis. Making the prediction method to find its own characteristic value and proportion weight can make the estimation closer to the reality.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

「安全」與「生活」為人類首要之追求。火災發生對人身安全與生活環境之影響劇烈，而災後又對結構物之安全性與功能性影響堪憂，故建物之耐火性能即扮演重要角色。為快速瞭解與提高評估研判受火害後鋼筋混凝土結構物(含地上、地下)構材之力學性質與其損傷程度、範圍之界定，因此本計畫擬建置「火害破壞特徵資料庫」，以人工智能方法判識火害現場災損特徵；再者，對於火害後鋼筋混凝土延-脆複合界面之殘餘握裹力學特徵，首度創立以導波方法探究之，相關研究成果比對本研究所建立之超音波速比傷損指標，可同時擴充火害破壞特徵資料庫之數據。

第二節 研究目的

本研究計畫以既有實驗室與現場系列調查量測火害傷損之研究成果，建立大數據資料庫，應用人工智能之數據分析作為火害判識之工具。而於內業實驗室之研究則建立導波量測於鋼筋混凝土火害受損厚度調查及鋼筋握裹力喪失段之評估方法，並評估導入導波量測成果於 107 年建研所開發之火害現場結構材料探傷檢測系統軟體之可行性。藉以評估地上鋼筋混凝土之脆性構材(混凝土) 與延-脆之交

界面(握裹) ，於不同熱驅歷程(升溫梯度、最高溫度、持溫時間、降溫方式) 條件之溫度與應力組合下作用，其材料破壞特徵，探究火害相關之因、果數據諸如：火場受溫分佈與柱-梁-版之混凝土強度折減率，可簡單快速進行火場調查與構材火損之初評，甚而對於後續詳評或結構補強設計與相關產物保險亦可提供量化資訊。

第三節 本計畫之重要性

以往為探求地上(RC建物)、地下(隧道) 結構體受熱驅作用後之傷損程度，常以鑽心方式進行試體取樣，並於試驗室中進行單軸壓縮破壞性試驗，以求取材料之強度折減；此方法除施作麻煩與耗時外，取樣過程更無疑是對結構體造成二次傷損，且取樣數目有限，僅可針對局部區域進行傷損評估，而以單一強度折減指標作為鑑定依據，又略嫌不足。再者，過往對於火害傷損程度以燒失量試驗方法評估之，為材料重量損失之評判方法，亦有其侷限性。本計畫依104-107年度累積實驗室及現場(外業量測) 系列資蒐與實作之調查數據，建置火害破壞特徵資料庫，進行人工智能分析；另外，以導波量測方法探視鋼筋混凝土握裹力之喪失程度，並針對建研所原已開發之火害現場結構材料探傷檢測韌體(如圖1.1)，在對硬體調整最小限度的前提下，導入導波量測系統之可能性評估。相關研究成果不但可簡易、快速應用於火

害現場結構材料非破壞檢測之初勘，未來可擴充應用於建物之震害與中性化之評估。

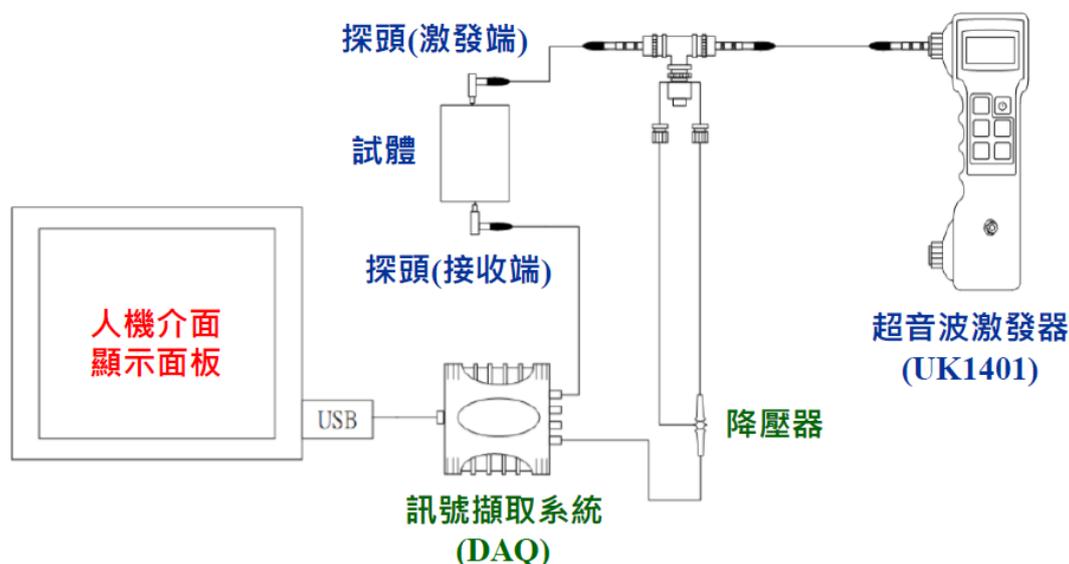


圖 1.1 火害探傷檢測系統軟體整合示意圖

第四節 範圍與方法

本研究整合104-107年之研究成果，透過火害傷損前、後構材(脆、延與延-脆介面) 之非破壞探傷，由已知損害程度之試樣，執行破壞性試驗，同步耦合內、外破壞之時(聲學) 空(光學) 資訊之非破壞檢測，建立具體而微之傷損演化，並建立正規化超音波速比之傷損指標與建立火害破壞特徵資料庫，藉以開發火害現場結構材料探傷系統軟體，以能快速、簡易評估RC建物材料(含地下結構物) 受火害後之安全性。

本年度計畫擴充軟體之功能性，首於內業進行導波試驗，探查鋼筋混凝土受火害之延-脆介面握裹損失特徵，試驗之範圍與方法如

表1.1所示，藉以評估導入韌體系統之可行性；而火害現場案例於本年度也持續調查量測，比對實驗室試驗數據，擴增資料庫內容，並以人工智能資料探勘，分析火害特徵，建立傷損預測模型。

表 1.1 內業導波試驗範圍與方法之說明表

材料 (material)	混凝土	定值	$f_c'(kgf/cm^2) = 420$
	鋼筋	變數	竹節： $f_y(N/mm^2) = 470$ 直徑(d_b, cm) = 1.9
			光面： $f_y(N/mm^2) = 570$ 直徑(d_b, cm) = 2.1
	鋼筋-混凝土之介面	定值	擬傷損段厚度($\Delta c, cm$) = 0.3 擬傷損段長度($\Delta l, cm$) = 30
變數		保護層厚度(c, cm)：1.5、4 正規化指標：厚徑比(c/d_b)： $1.5/1.9 = 0.79$ 、 $1.5/2.1 = 0.71$ 、 $4/1.9 = 2.11$ 、 $4/2.1 = 1.90$	
量測 (measure)	擊發接收之位置：混凝土表面		

第五節 研究報告之內容與流程

本計畫蒐整過去內業實驗數據與外業現場調查量測資料，建置火害傷損資料庫，並應用人工智能判識火損特徵，比對本研究過去工程迴歸統計研發成果，同時開發新型導波量測技術，針對脆性保護層材(混凝土)與延性拉伸材(鋼筋)之介面，探查鋼筋之握裹強度損失，並評估將技術導入已開發之火害現場探傷系統軟體之可行性，相關研究流程如圖1.2所示。

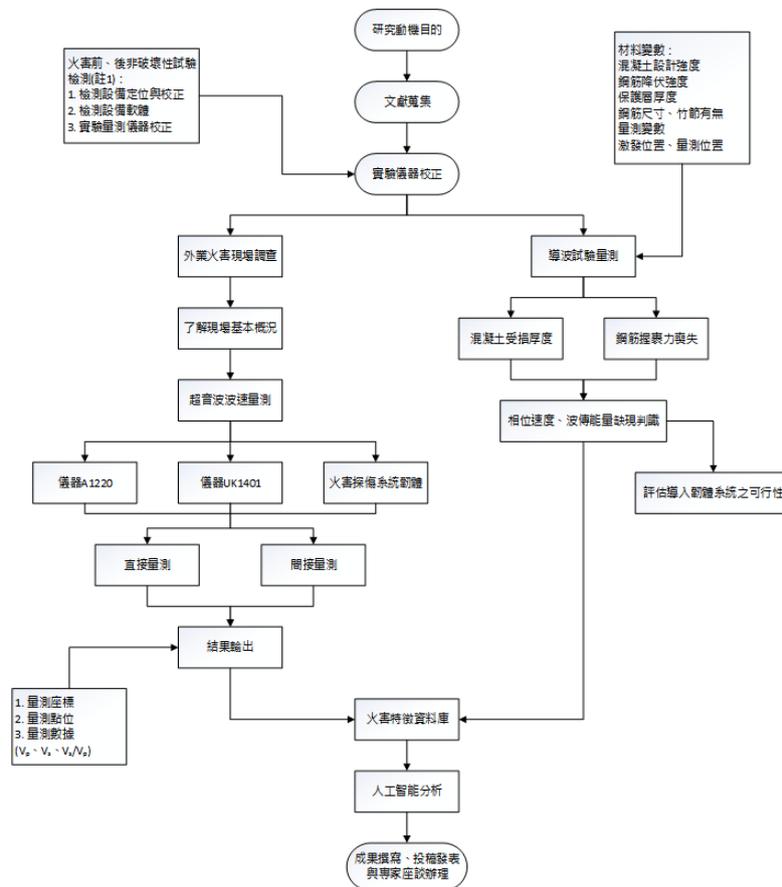


圖 1.2 計畫流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 文獻回顧

第一節 國內外火害工程沿革

根據內政部消防署民國 106 年全國火災統計分析指出民國 105 年中火災的發生次數高達 1856 次，相較於近 5 年全國火災統計分析火災發生次數有微幅成長之趨勢，如圖 2.1 所示其中各類火災中又以建築物火災發生次數高達 76.7 %。火害工程包含了災害發生時如何救火、排煙、逃生及災後建築物之評估其結構安全及補強等課題，而國內部分之火害工程研究起步相較於美、日、歐等國較晚。政府早期推動了大型防災科技研究，內容包含了防洪、防震、坡地及氣象災害，但政府投入火害工程經費與人員傷亡與損失卻成反比，儘管如此，國內多所大學與政府陸續也開始火害工程之基礎研究，本節綜整國內外火害工程發展沿革、建築物室內火災延燒情況與國內外研究概況，分述說明如下：

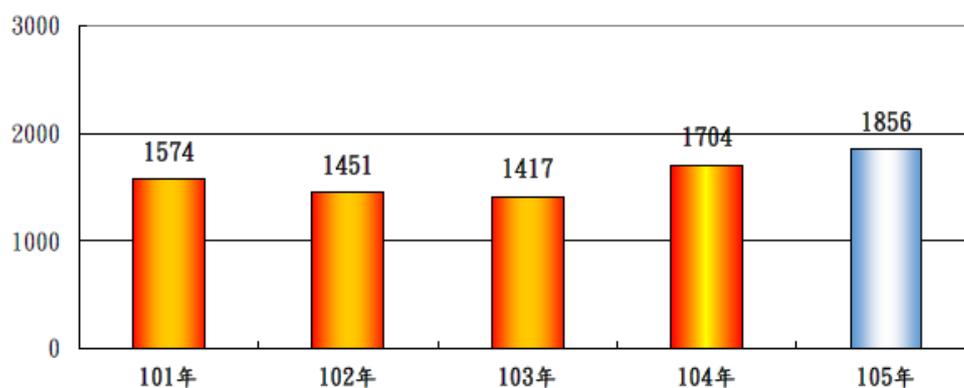


圖 2.1 近五年火災發生次數統計圖

第一項 火害工程研究概述

火害工程方面研究以美國、日本、加拿大、英國等國較早投入研究，其中又以美國波特蘭水泥協會(Portland Cement Association, PCA)，針對受火害之混凝土構件結構方面較豐碩，並於 1958 年時興建一棟大型中央自動控制的火害研究室，進行梁、版、牆等構件試驗，其火害研究室並無柱之火害試驗設備；於 1980 年開始與加拿大國家研究委員會合作(National Research Council Canada, NRCC)也建置了綜合大型火害實驗室，並興建了一可執行火害試驗時同時施加柱軸力之試驗設備；英國混凝土學會，於 1978 年曾提出一篇關於火害混凝土結構安全評估與混凝土構件火害程度目測分級，Tovey (1986)提供建議，可分為定性評估(目測評估)、定量評估(混凝土顏色變化、鑽心試驗、超音波試驗)、修補技術評估(混凝土強度折減與溫度之關係)，其中定性評估可作為現場快速檢測，而定量評估因當時試驗精度不甚理想，還有其改善空間(陳舜田，1999；羅柏易，2008)。

國內於構件部分，常因實驗設備缺乏，而進行縮小尺寸構件實驗，大型試驗反而較少，至於政府部門在推動火害工程研究，自 1989 年九月成立「建築研究所籌備處」；於 1992 年七月在台北五股成立防火實驗室；並於 1993 年提出「建築物防火性能試驗及應用研究五年計畫」；

於 2002 年 4 月建立防火實驗群，從台北五股遷至台南歸仁，除了進行梁、版、牆試驗，亦可進行梁柱複合爐耐火性能試驗，並彙整國內、外之相關文獻，如表 2.1。

表 2.1 國內外相關之文獻摘要

	作者	題目	概要	年代
國外	Sakumoto, Y., Okada, T., Yoshida, M., Taska, S.	Fire resistance of concrete-filled, fire resistant steel tube column	利用耐火鋼進行實尺寸耐火鋼管混凝土的防火實驗。試驗結果顯示，利用內灌混凝土之熱容量之特性，耐火鋼管混凝土僅需少量之防火被覆即能達到其優越耐火性。	1994
	Robert Černý	The effects of thermal load and forst cycles on the water transport in two high-performance concretes	使用混凝土建築核電廠，暴露高溫可達800°C，透過水分擴散係數之變化，研析高溫下混凝土之耐久性質。	2001
	Huang, Z.F., Tan, K.H.	Rankine approach for fire resistance of axially-and-flexurally restrained steel columns	利用Rankine Formula 並考慮潛變效應，建立一套鋼柱在火害高溫下的分析方法。	2003
	Choi, N.S.	Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading	反覆溫度作用下應用聲射法於複合材料，得到升溫時AE訊號產生，降溫則無，稱溫度凱薩效應。	2005
國內	陳舜田	雙H型鋼骨鋼筋混凝土柱火災後之強度評估	在不同的混凝土強度不同、保護層厚度及火害時程下，柱體內部混凝土、垂直筋及雙H型鋼之溫度分布狀況，並分析不同變量下混凝土強度之折減。	2003
	陳柏存	以表面波譜法與支持向量機評估高溫損傷混凝土	以不同爐石含量混凝土，探討高溫下材料損壞情況	2008

	土之性質		
危時秀	普通混凝土熱傳性質之研究	以粗骨材含量、C/W、含水量為變數，求高溫下熱傳係數	2009
李鎮宏	鋼骨鋼筋混凝土柱受軸力下防火性能設計指南研究	歷年已進行多次有關SRC柱於標準火害下之行為與研究，將多組實驗結果與相關性能設計比對，以做為國內構造防火性能設計	2012
張育誠	連續熱損顆粒材之破裂韌度與拉力強度及其聲光破壞演化	透過連續性高溫試體準備方式，獲得連續性材料破壞分佈後，近行間接拉力與破壞韌度試驗。	2013
陳誠直	箱型鋼管混凝土柱之防火性驗證技術研究	探討內灌混凝土箱型鋼柱與內含鋼筋混凝土箱型鋼柱於不同軸向載重之火害行為，並深入探討耐火性能影響參數。	2013
王天志	內填充鋼筋混凝土箱型鋼柱高溫加載試驗研究	探討箱型鋼柱內有無配置縱向主筋對其高溫載重行為之影響	2014
李其中	聚丙烯纖維自填充混凝土修復火害鋼筋混凝土柱在高溫中後之行為研究	以自充填混凝土及聚丙烯纖維自充填混凝土修復受火害的鋼筋混凝土柱，並探討柱之強度折減與混凝土強度。	2014
曹祖璟	脆、延性固材於熱力固力耦合下之巨-微觀破壞特徵及火害度判識	針對RC 構材中之脆性材與延性材，分別進行火害前、後之單壓與單拉試驗，佐以同步化聲-光耦合非破壞檢測，觀察材料「內、外」部破壞特徵，並以超音波脈衝量測技術之壓-剪波速比探討構材受熱傳破壞後之傷損狀況	2015
柯志揚	結合聲-光非破壞檢測於隧道環境遭熱驅破壞	以隧道工程支撐系統之脆、延性材受熱驅破壞	2016

		之傷損判識	後，引致材料之巨觀力學傷損及微觀破壞特徵演化之範疇進行系列研探，並以正規化波速指標「剪壓波速比 (V_s/V_p)」作為評估材料熱損程度之指標	
	黃崑瑋	以聲-光非破壞檢測判識隧道襯砌受熱-固傷損之力學行為	研析隧道結構(如襯砌結構)受溫度(如火害、地熱及其他溫差效應)與應力(大地、工作應力)同時作用後，其結構材料力學行為。應用主、被動式聲-光非破壞探傷技術，研析巨觀殘餘力學性能佐以微觀破壞演化之觀察，俾能作為實驗室及現場之傷損判識工具/方法。	2017
	林欣蓉	水泥基質材料受火害傷損之正規化超音波脈衝指標及其碳化特徵與燒失比對	針對RC 構材中之水泥基質材料，進行燒失量試驗，以超音波脈衝量測技術之剪-壓波速比探討構材受熱重量損失與體積變化之相關性。	2018
	楊佳嘉	以導波技術檢測鋼筋混凝土握裹介面傷損之初探	應用多頻道表面波震測分析法，研析結構材料受溫度(火害)作用其延-脆(鋼筋混凝土)介面之傷損情況與判識。	2018

第二項 建築物室內火災之溫度變化情形

陳弘毅 (2003)、陳榮收(2008)曾整理建築物之室內火災成長歷程，可用溫度與時間變化來說明。如圖 2.2 與表 2.2 所示，可分為第一成長期 (First Growth Period)、第二成長期 (Second Growth Period)、最盛期 (Fully-Developed Period)、衰退期 (Decay Period)四個階段，各階段的特色分別說明如下：

(1) 第一成長期(First Growth Period)

造成起火的原因非常廣泛，而火災從「火源」開始，通常必須經由「第一著火物」，甚至「第二著火物」等延燒媒介物之著火燃燒，此段時間又稱為「起火期」，在此階段中室內溫度尚不太高(室內溫度通常以室內中央上方靠天花板之位置測定之，而其時間之長短，亦隨著火源與著火物種類而有所不同)。

(2) 第二成長期(Second Growth Period)

一旦材料著火，其燃燒所產生的熱能向周圍擴散藉由輻射、對流、傳導等傳遞方式，加速可燃物燃燒，使得溫度逐漸上升。

(3) 最盛期 (Fully-Developed Period)

在火災持續成長過程中，在成長期末期當熱分解產生可燃性氣體會在室內高處蓄積，當該氣體與空氣之混合氣體濃度達到燃燒界線，

且此時溫度已達到多數材料之著火點或以上，此時火焰由版壁垂直向上竄，達到天花板後，即改向水平方向急速擴展，不久天花板全面引燃，頓時室內陷入火海，此種現象一般稱之為閃燃 (Flash-Over)，此時室內溫度亦達到最高點。

(4) 衰退期 (Decay Period)

隨著可燃物的燃燒殆盡，火勢亦開始衰退，此種情況若任其擱置，則現場附近將可以長時間繼續保持高溫，室內溫度亦一直維持在 $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 不易下降。

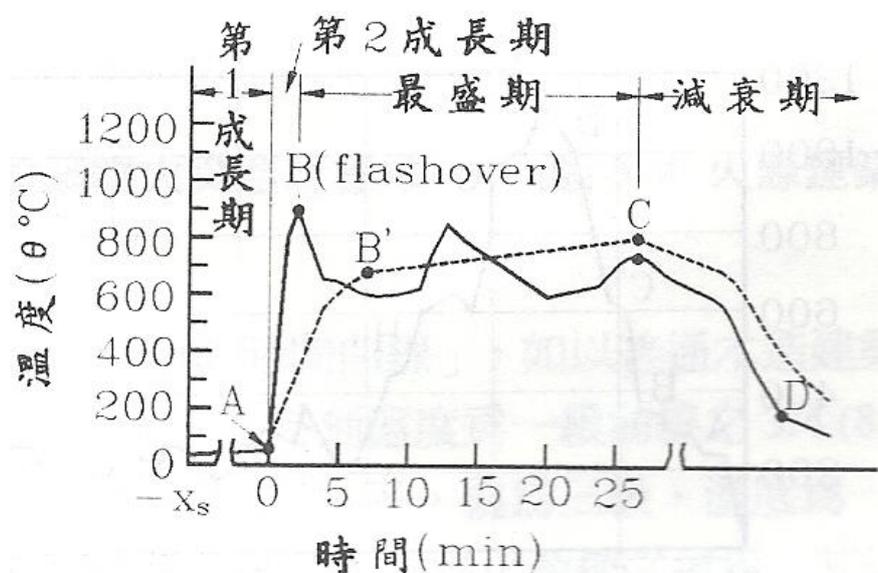


圖 2.2 室內火災之歷程曲線

(資料來源：陳弘毅，2003)

表 2.2 火災發展歷程各階段之基本特性

基本特性 火災歷程	經歷時間 (min)	室內空氣溫度 (°C)	火災現象與燃燒範圍
起火期	1-10	100	侷限火源附近
成長期	5-20	100-650	起火點向四面八方
閃燃	瞬間	至少 800	多數材料已達著火點以上
全盛期	不一定	通風控制燃燒: 600-900 燃料控制燃燒: 600-1200	所有可燃物皆燃燒
衰退期	不一定	約 200-300	火勢逐漸變小

(資料來源：陳榮收，2008)

第二節 混凝土材料熱損傷特徵

第一項 混凝土材料受高溫之性質變化

火害研究大多以混凝土為主，然而混凝土受火害後之性質變化與水泥砂漿極為類似，且混凝土之組成可分為膠結材(水泥砂漿)與顆粒材(骨材)兩部分探討，而其中水泥砂漿受熱後之物理、化學性質極為重要，因此本小節將回顧水泥砂漿受火害或高溫作用下之性質變化。

(1) 膠結材受熱之變化

Mindess (1980) 曾探討混凝土中之水泥漿體與骨材界面的物理及化學變化，藉以了解膠結材及顆粒材膠結情況對混凝土強度、耐久性之影響。危時秀 (2003)、施佩文 (2013) 曾探討混凝土組成中之膠結材與顆粒材於高溫作用下之變化，通常當加熱至 100~110 °C 材料內部的孔隙水及吸附水可全部消失，而位於水泥漿體中的礦物晶格中之結晶水扮演著結構的重要角色，結晶水是以中性水分子 (H₂O) 的形式存在於礦物晶格中，因受晶格的約束力比材料表面之吸附水大得多，一般都在 200~500 °C 間，而當水泥漿體超過 650 °C 時，分解後之水泥原料，會重新燒結成水泥熟料，產生化學變化使其重新具有鍵結力，如表 2.3 所綜整。然而除了水泥砂漿受熱後產生化學變化，在物理性質上亦有所變化，在水泥砂漿受熱 105 °C 初期，由於材料內部吸附水的消失而產生體積收縮，若持續加熱至 500 °C 其體積收縮率約 0.4 %，恐與顆粒材產生差異膨脹問題，並在膠結材與顆粒材之介面產生問題，如圖 2.3。

表 2.3 水泥漿體受熱之變化說明

溫度 (°C)	水化反應之產物
常溫 ~ 105	毛細水及吸附水蒸發
105 ~ 440	矽酸鈣水化物鍵結水之裂解 $C-S-H \rightarrow C-S + H$ (佔水泥漿體之 55%)
440 ~ 580	氫氧化鈣結晶水之裂解 $C-H \rightarrow C + H$
605 ~ 1000	碳酸鈣結構水分解 $C_aCO \rightarrow C_aO + CO$

(資料來源：沈進發與陳舜田，1999)

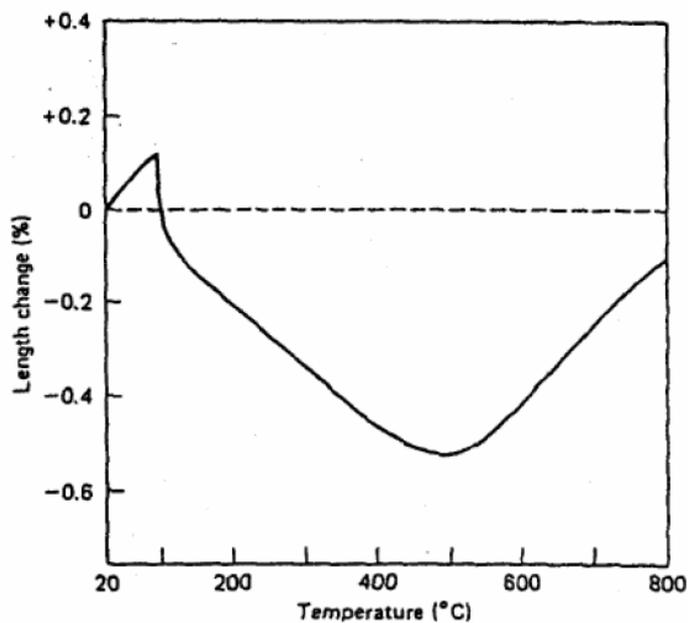


圖 2.3 水泥漿體之溫度與長度變化關係

(資料來源：Mindess,1981)

(2) 顆粒材之熱學性質

顆粒材在混凝土材料所佔體積比例相當大並扮演著重要角色，而顆粒材因產地區域不同而有不一樣的特性，一般依其成份可分為矽質骨材 (Siliceous Aggregate) 又稱為酸性骨材，及石灰質骨材 (Carbonate Aggregate) 又稱為鹼性骨材，矽質骨材之主要成分為石英礦物 (Quartz)，而石英是由二氧化矽所組成，由圖 2.4 中可知，當石英礦物受熱溫度達 500 °C 時，在體積變化上會產生約 0.85 % 的熱膨脹量，當溫度達 573 °C 時，會有晶相轉換 (Phase Transformation) 發生，由 α 相轉變至 β 相，熱膨脹量從 0.85 % 上升至 1.4 % 導致材料結構破壞；當溫度上升至 900 °C 體積膨脹趨於穩定不再增加。

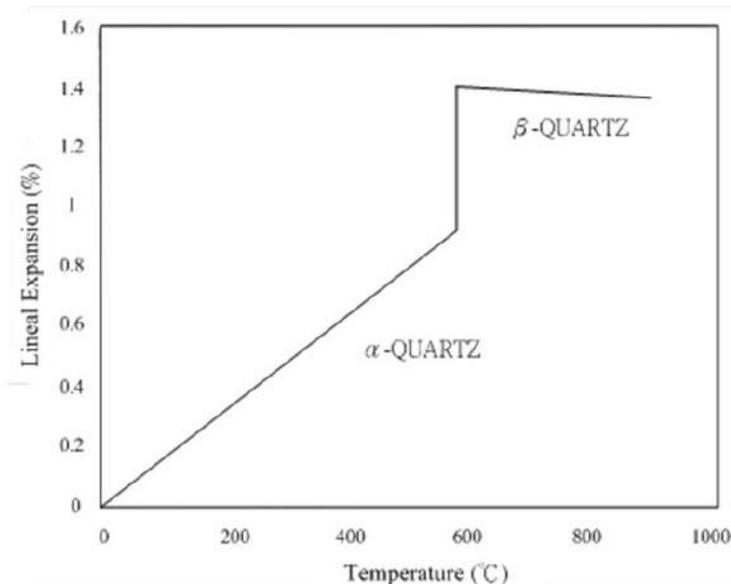


圖 2.4 矽質骨材的溫度與線性膨脹之關係

(資料來源：Gordon,1996)

(3) 強度

Georgali and Tsakiridis (2005)指出當火害溫度達300至600 °C時，混凝土的表面顏色會由正常顏色轉變為粉色偏紅色，當600至900 °C會呈現白灰色，900 °C以上時則呈現褐色，如圖2.5，而粉色的變化是由於混凝土中的膠結材或顆粒材中含有鐵的成分，並指出當溫度於200至250 °C時，其抗壓強度會開始產生下降；達300 °C其抗壓強度下降約15至40 %；550 °C時約下降55至70 %。

Arioz (2007)曾改變混凝土的顆粒材組成與水灰比，探討高溫作用對於壓力強度之影響，而由石灰質骨材組成的混凝土加熱至 600 °C時，其強度之變化轉變為快速下降，從圖 2.6 中觀察溫度達 600 °C其相對抗壓強度尚有 90 %，加熱至 800 °C時只剩下 37 %，而水灰比對於強度並無顯著的影響，矽質顆粒材在高溫作用下造成體積膨脹對於強度衰減有較顯著之變化。

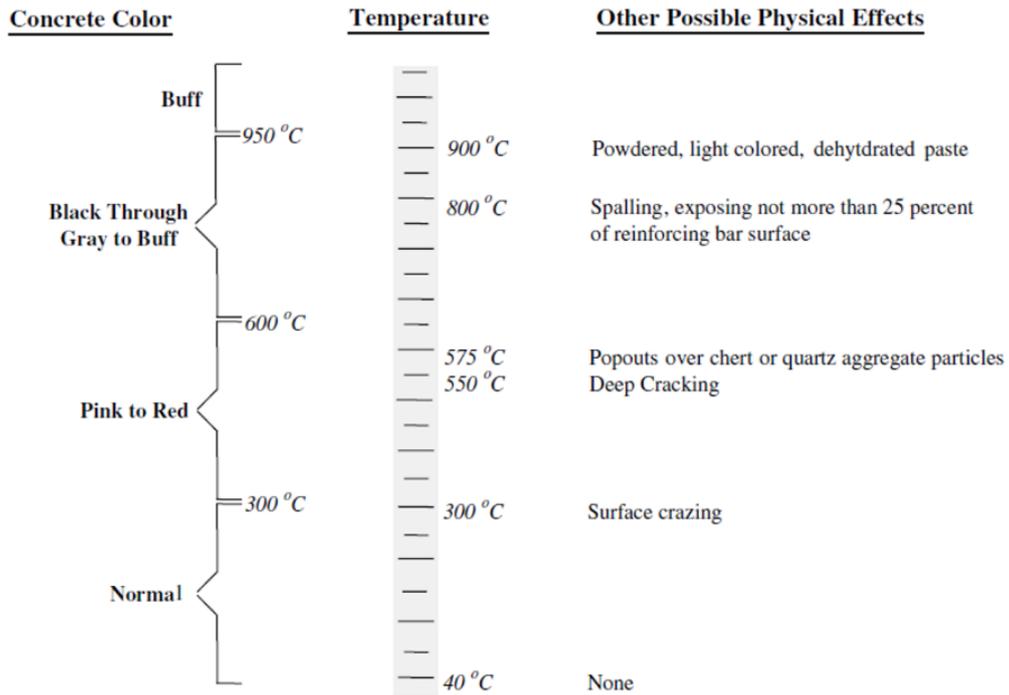


圖 2.5 混凝土於高溫作用下之變化

(資料來源：Georgali & Tsakiridis, 2005)

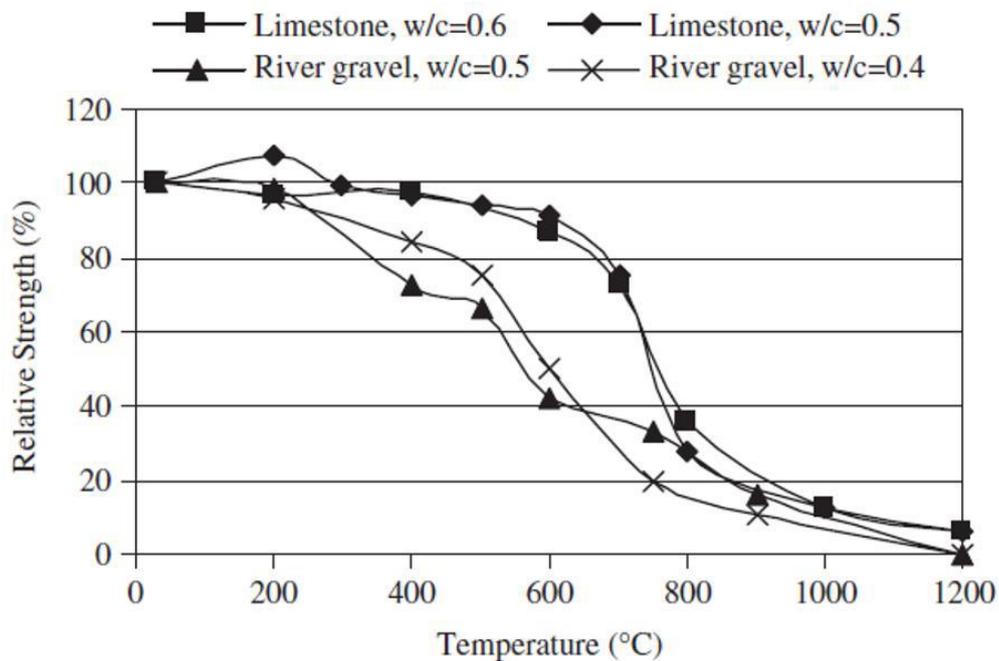


圖 2.6 混凝土於高溫作用下對相對強度之影響

(資料來源：Arioz, 2007)

(4) 彈性模數

於高溫環境作用下，混凝土的彈性模數 (Modulus of Elasticity) 將隨溫度升高而迅速降低，降低比例程度較單壓強度來得大(如圖 2.7 所示)，造成此現象主要係因混凝土內部存在一過渡結構(Interfacial Transition Zone)，當混凝土暴露於火害環境或高溫作用下，過渡區結構之微裂縫生成與擴展更為劇烈，因此造就了混凝土之勁度(變形模數)受熱驅作用之折減較強度折減為嚴重。

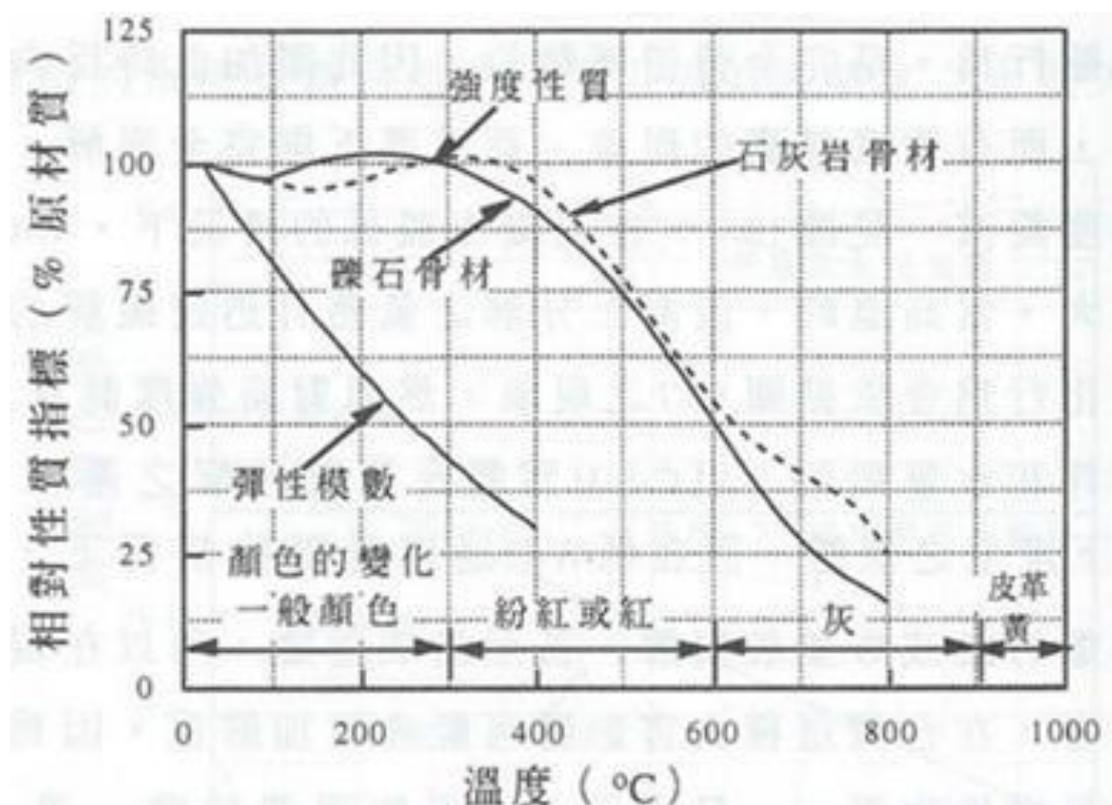


圖 2.7 混凝土暴露於高溫下之性質變化

(資料來源：黃兆龍，1988)

第二項 水泥基質材料之力學性質與升溫變數之關係

在溫度逐漸升高的過程中，水泥基質材料中膠結材與顆粒材之體積變化是大相逕庭的，整體而言，膠結材為收縮變形，顆粒材為分解膨脹，彼此間的差異變形使得材料界面微裂縫的滋長或延伸；而外部環境變數之完整升溫歷程又可分為：升溫速率、最高溫度、持溫時間、降溫梯度四大變數，其主要與強度折減之關係分述如下：

(1) 升溫速率(Rate of Heating, R_{heat})

升溫速率對混凝土抗壓強度折減，在低溫有顯著影響，但在高溫則較無影響。升溫速率快慢之影響，恐涉及混凝土暴露於高溫環境中之時間，使得混凝土內部之吸附水、鍵結水損失程度有所不同。但如升溫相當快，將使試體內部存在著相當大的溫度梯度，造成較大量之微裂縫生成或裂縫衍生，而對強度折減產生影響。溫度在600度以上，升溫速率對試體強度折減已無顯著影響。

(2) 最高溫度(Max Temperature, T_{max})

最高溫度是最直接影響強度折減的因素，因高溫將使膠結材之孔隙水、鍵結水消散，及顆粒材的相變與分解，於混凝土內部界面形成微裂縫，使強度折減，且通常最高溫度越高，則強度折減越大。

(3) 持溫時間(Exposure Time, t_e)

依文獻(Mohamedbhai, 1986及沈進發與陳舜田, 1993) 顯示，持

溫時間之首二小時為火害後混凝土抗壓強度折損主要區段，且在低溫(最高溫度小於 200°C)有顯著影響，但在高溫(最高溫度大於 700°C)則較無影響。其主要原因為，混凝土於高溫時，熱主要以輻射方式傳遞，傳遞速率較為快速，因此可以在較短的時間內對試體造成內部界面破壞；而暴露在低溫環境時，熱的傳遞主要藉由孔隙水、膠體、粒料進行傳遞，於此條件下持溫時間的增加，可消散較多混凝土內部的水分，並且可使熱能充分傳遞試體內部中心，而產生更多的裂縫。

由Mohamedbhai (1987)的試驗，對水灰比0.7之混凝土執行最高溫度 200 、 400 、 600 、 800°C 與 1 、 2 、 3 、 4 小時的持溫時間(以爐內溫度控制)的熱驅破壞試驗，並使用兩種升溫速率與降溫速率，探求混凝土於熱驅破壞後之巨觀強度行為；由試驗成果得知，混凝土之強度大部分折減在持溫時間 2 小時前發生，如圖2.8及圖2.9。

沈進發與陳舜田 (1993)針對持溫時間對強度之影響進行系列之研析，以水灰比 0.55 、 0.65 之混凝土施以常溫至 1000°C 之最高溫度與 0 至 120 分鐘之持溫時間的熱驅破壞試驗；有別於Mohamedbhai (1987)之試驗，沈進發與陳舜田 (1993)於試體中心埋設熱電耦線，加熱達控制之爐溫後，持續定溫至試體內部皆達控制之最高溫度(穩態條件)，定義此時段為 0 持溫時間，如圖2.10所示；由試驗成果得知(如圖2.11、圖2.12所示)，持溫時間對強度之影響主要發生於較低之最高溫度

(300~700°C)之間，於200°C下與700°C上之最高溫度區間，持溫效應對混凝土強度之影響並不顯著。

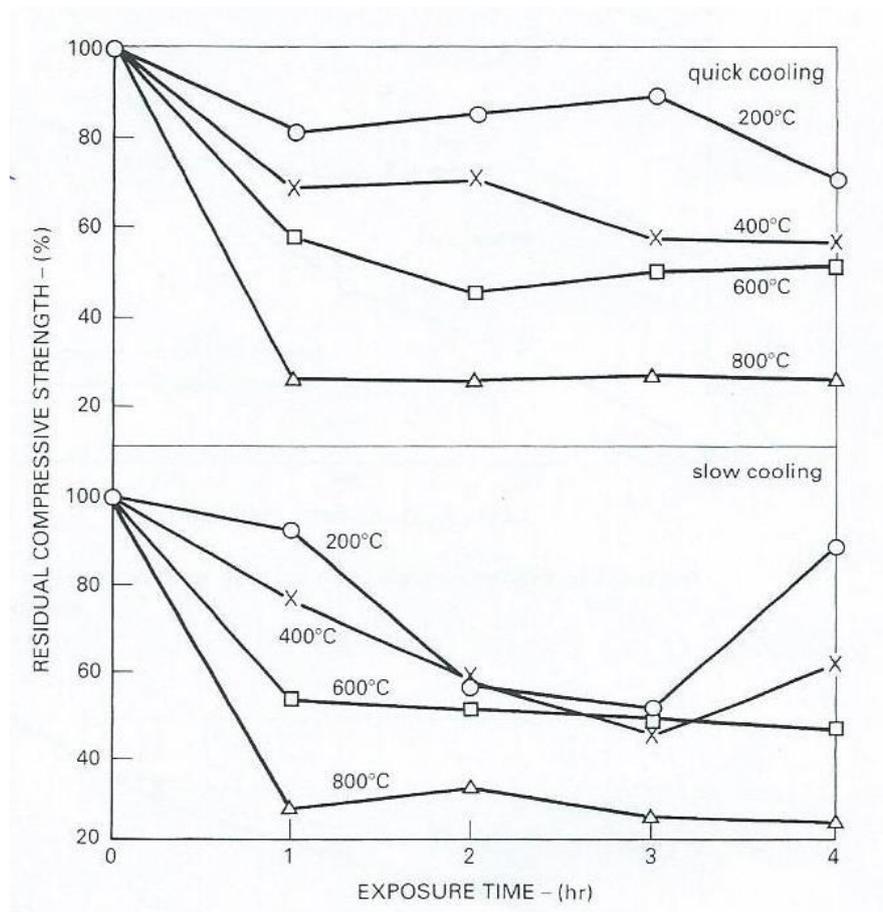


圖 2.8 慢速升溫下混凝土之強度折減與溫度關係

(資料來源：Mohamedbhai, 1986)

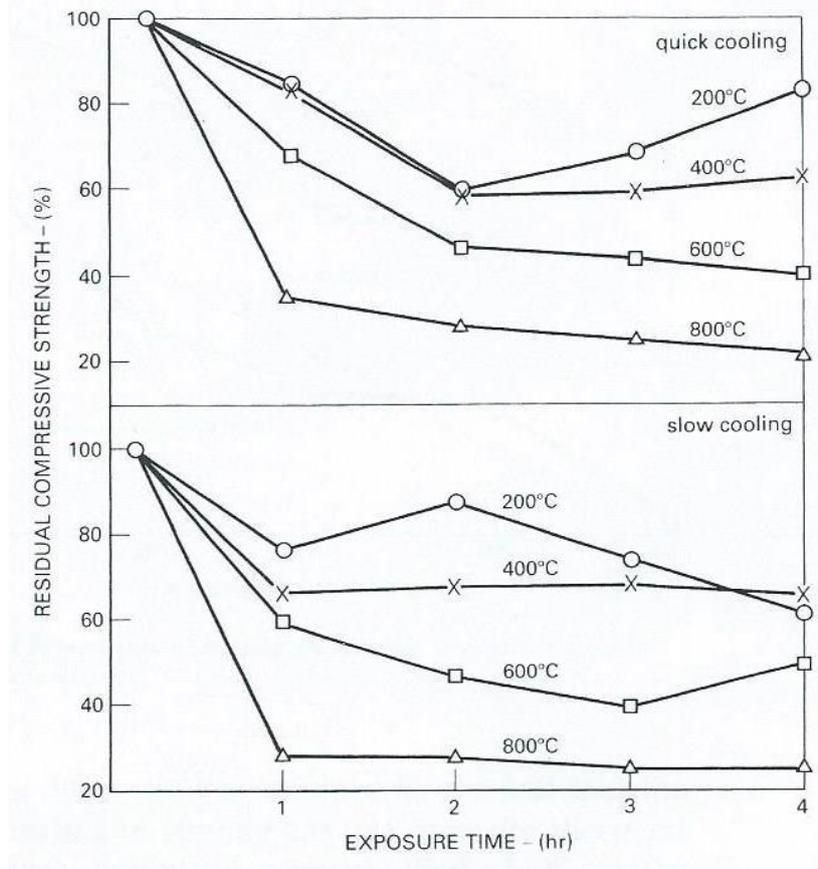


圖 2.9 快速升溫下混凝土之強度折減與溫度關係

(資料來源：Mohamedbhai, 1986)

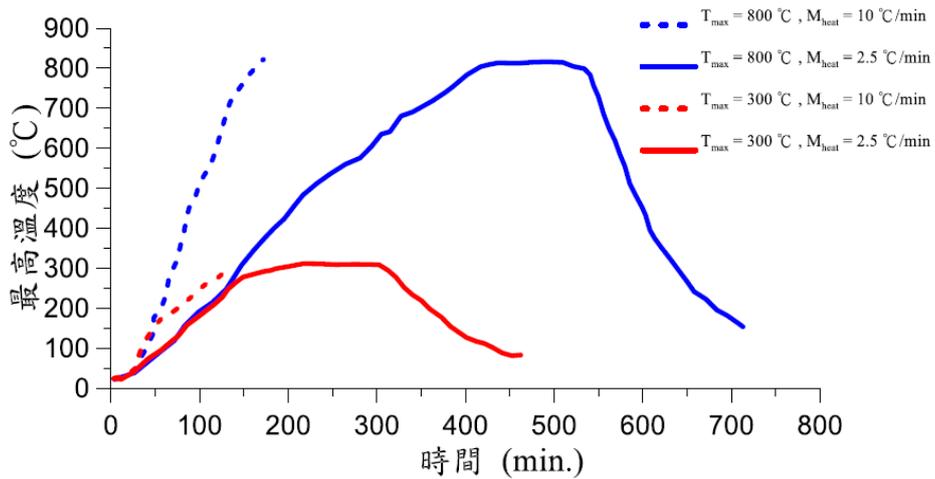


圖 2.10 不同升溫梯度與高溫下試體中心升溫歷程

(資料來源：沈進發和陳舜田，1993)

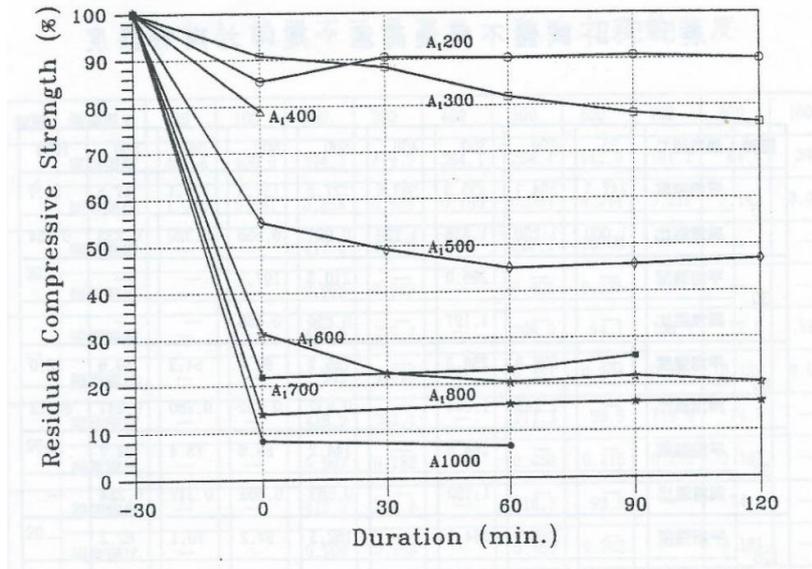


圖 2.11 不同高溫及持溫時間下混凝土(水灰比 0.55)之強度折減

(資料來源：沈進發和陳舜田，1993)

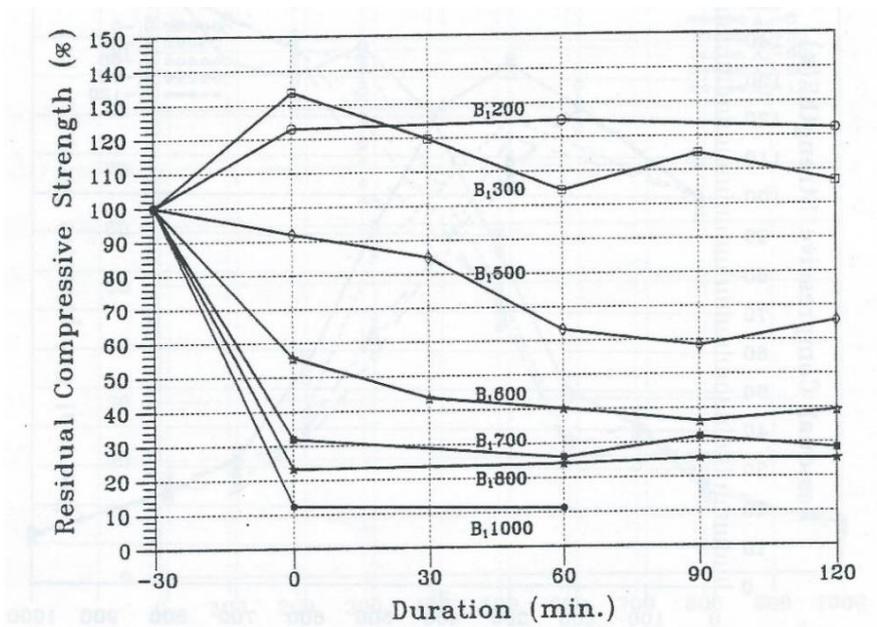


圖 2.12 不同高溫及持溫時間下混凝土(水灰比 0.65)之強度折減

(資料來源：沈進發和陳舜田，1993)

(4) 降溫方式(Cooling Condition, W_{cool})

降溫方式依降溫速率由慢到快排列，依序可區分為爐內冷卻(Cooling in Furnace, CIF)、室溫冷卻(Cooling in Air, CIA)、浸水冷卻(Cooling in Water, CIW)三種方式。然而，因混凝土中之膠結材與顆粒材之膨脹特性(熱膨脹係數)不同；於降溫過程中，如速率過快，將再次因變形不諧和而產生或衍生更多之二次裂縫、孔隙，而加劇熱損度。

第三項 熱-固耦合作用下混凝土之力學行為

鋼筋混凝土結構物受火災時，結構物之構材，混凝土與鋼筋不僅受火場溫度作用，也受結構之設計載重影響，然於火場中，混凝土為第一道承受火場高溫之材料，其於熱力與固力耦合下之力學行為，影響著結構物安全性能；本計畫案為建置簡速型火害傷損判識裝置，必然考慮混凝土材料於熱-固耦合後之力學行為發展；Abrams (1971)針對不同種類骨材之混凝土於高溫作用下施以工作載重，試驗其於熱力與固力耦合後之力學行為。其於高溫下受工作載重之試驗條件如下陳述：

(a) 施予0.4 fc'之工作載重，並於加熱至試體內部達均溫後，執行抗壓試驗。

- (b) 不施予工作載重，並加熱至試體內部達均溫後，執行抗試驗。
- (c) 不施予工作載重加熱至試體內部達均溫後，冷卻執行抗壓試驗。

試驗成果顯示，不論何種骨材之混凝土，受 $0.4 f_c'$ 之工作載重下承受高溫能力提升，其強度比未受工作載重條件下提升約25%，工作載重束制了裂縫的發展，導致其具有較高之抗壓強度；於冷卻後之混凝土，其強度折減小於另兩種試驗條件，原因為混凝土於降溫過程中，產生了變形不諧和，導致其受到二次傷損，強度折減降低。如圖2.13至圖2.15所示。

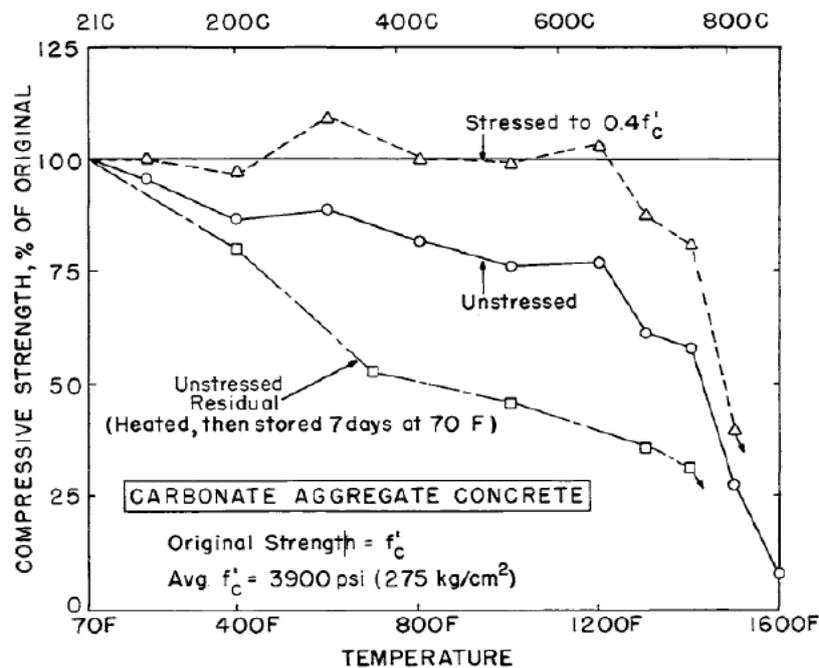


圖 2.13 工作載重作用下碳酸鹽骨材混凝土受溫度作用後之抗壓強度

(資料來源：ABRAMS，1971)

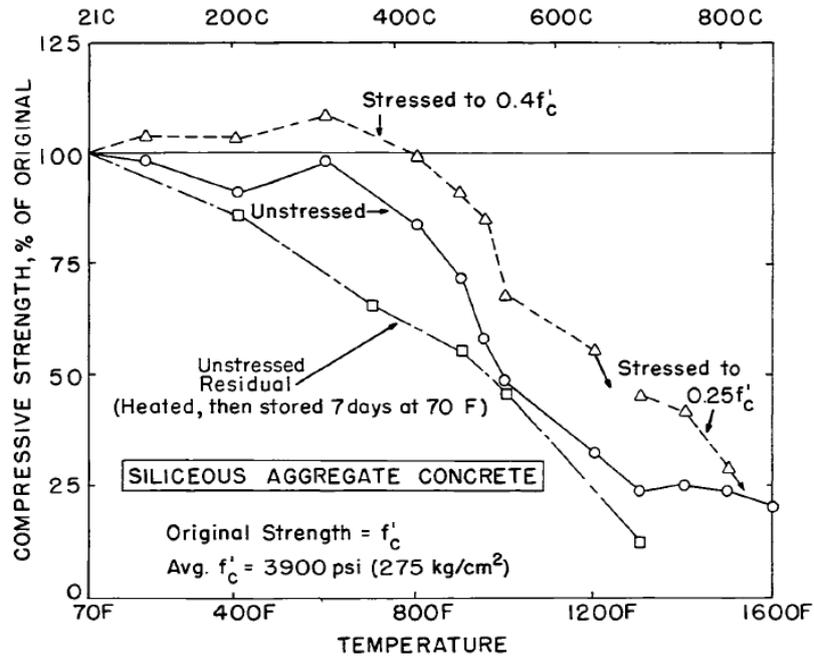


圖 2.14 工作載重作用下矽質骨材混凝土受溫度作用後之抗壓強度

(資料來源：ABRAMS，1971)

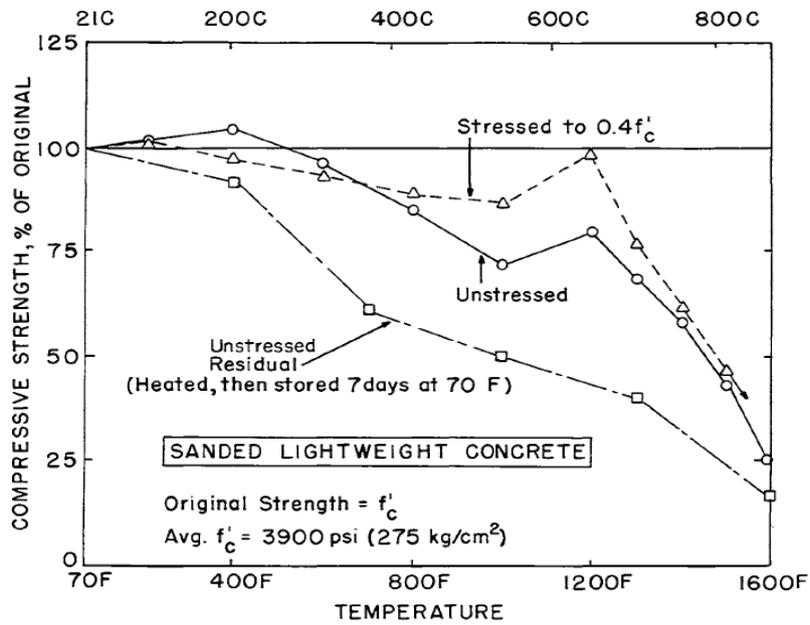


圖 2.15 作載重作用下輕質骨材混凝土受溫度作用後之抗壓強度

(資料來源：ABRAMS，1971)

Anderberg and Thelandersson (1976)曾探討受工作載重下混凝土承受高溫之行為，其試驗條件如下陳述(圖2. 16):

(a) 試驗(A)為受不同工作載重下，持續加溫直至試體破壞，探究其力量與變形行為之發展。

(b) 試驗(B)為受不同工作載重下，加溫至設定溫度後，持溫兩個小時，加載至破壞，探究其力學行為。

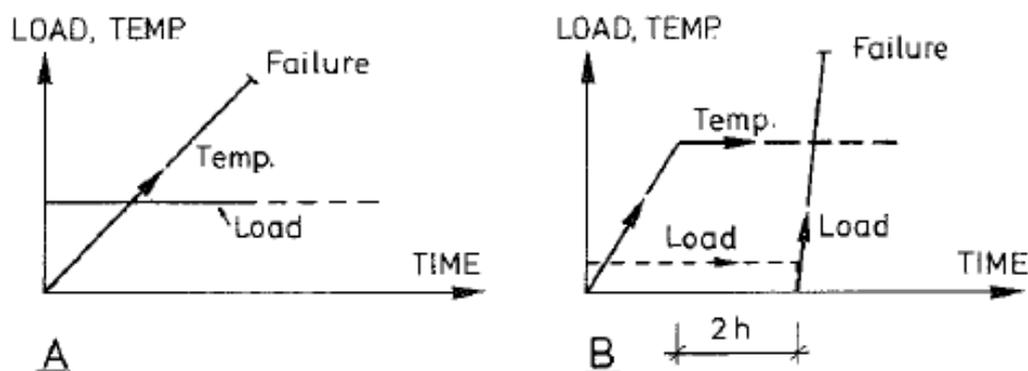


圖 2. 16 試驗(A)與試驗(B)的溫度與加載歷程

(資料來源：Anderberg and Thelandersson，1976)

試驗(A)成果顯示，於0%工作載重之試驗，其於高溫作用下，混凝土之熱膨脹變形量達1%；隨工作載重之增加，其熱膨脹與工作載重所產生之變形量逐漸變化，於工作載重為40%時，混凝土之熱膨脹變形量與工作載重引致之變形量互相抵銷；並隨工作載重愈高時，混凝土之耐溫能力隨之降低。如圖2. 17所示。

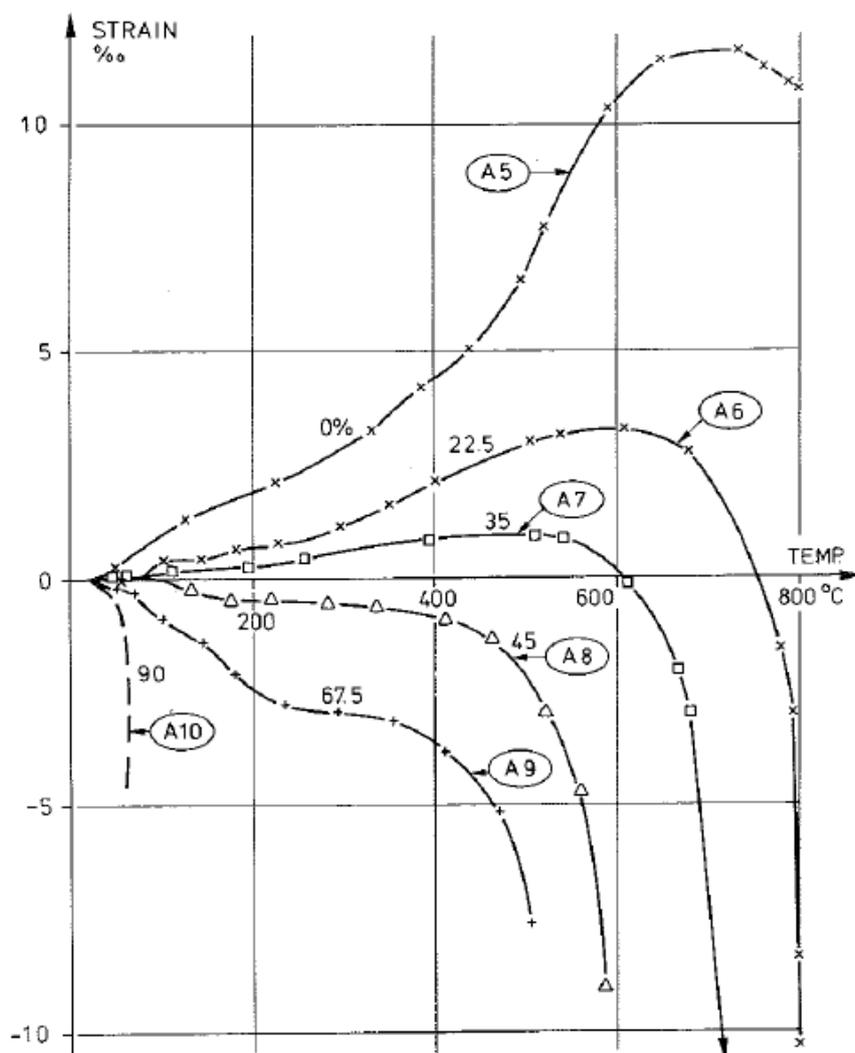


圖 2.17 不同工作載重下試體升溫過程之變形量

(在5 °C/min之試驗條件下)

(資料來源：Anderberg and Thelandersson，1976)

由試驗(B)之試驗成果顯示，工作載重對混凝土之彈性模數有顯著之影響，圖2.18中黑色實線表示在無工作載重下之力學行為，發現有工作載重之彈性模數皆高於無工作載重狀態下，工作載重之於彈性模數的影響顯著；然對強度而言，影響並不顯著，在工作載重為

10%~22.5%時，其強度分布在黑色實線上；於45%之工作載重時，因試驗之最高溫度為200°C，然於200°C時，混凝土之強度仍未折減，尚看不出工作載重對強度所造成之影響。

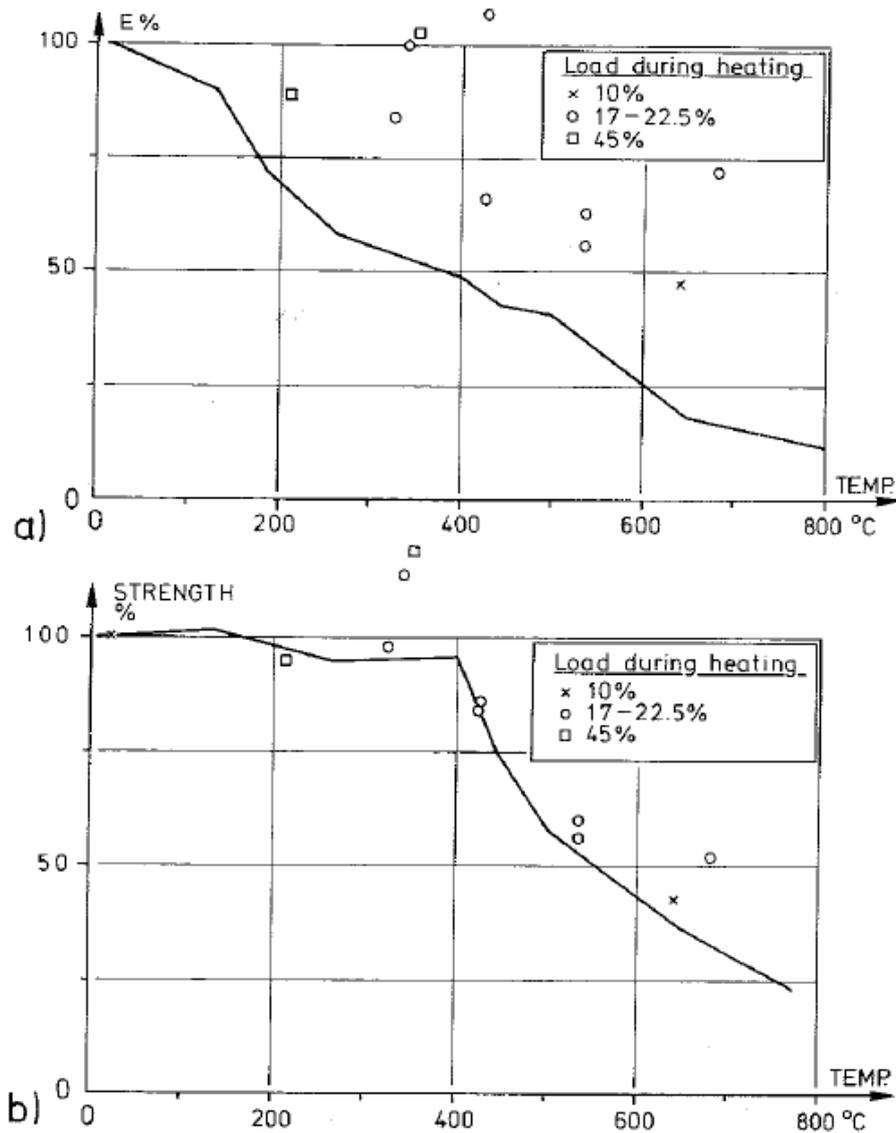


圖 2.18 (a)彈性模數於不同工作載重與高溫下之關係

(b)強度於不同工作載重與高溫下之關係

(資料來源：Anderberg and Thelandersson，1976)

第三節 鋼筋混凝土傷損機制

第一項 混凝土之傷損

鋼筋混凝土結構受外力傷損時，保護層功效是與鋼筋形成足夠的握裹能力，以保全整體結構之穩定(不破壞)。混凝土一旦破裂，外界之濕氣或氯化物將直接侵入與鋼筋接觸，造成鋼筋快速腐蝕，當裂縫的寬度愈大時，腐蝕將會加速。而在保護層之混凝土受火害之性質變化與水泥砂漿極為類似，混凝土之成分主以膠結材與顆粒材兩部分說明：

(1) 膠結材受熱之變化

探討混凝土組成中之膠結材與顆粒材於高溫作用下之變化，當加熱至100 ~ 110 °C材料內部之孔隙水及吸附水會全部消失(危時秀，2003；施佩文，2013)。而於水泥漿體中之結晶水於礦物晶格結構中有極重要性，其結晶水為中性水分子 (H_2O) 之形式存在於礦物晶格中，因受晶格之約束力大於材料表面之吸附水，一般都在200 ~ 500 °C間，而當水泥漿體超過650 °C時，分解後之水泥原料，會重新燒結成水泥熟料，產生化學變化使其重新具有鍵結力。沈進發與陳舜田 (1993) 以升溫關係將水泥漿體受熱變化作綜整，如表2.4。

(2) 顆粒材之熱學性質

混凝土材料之顆粒材所佔體積比例相當大且重要，而顆粒材因產地區域不同而有不一樣的特性，一般依其成份可分為矽質骨材 (Siliceous Aggregate) 又稱為酸性骨材，及石灰質骨材 (Carbonate Aggregate) 又稱為鹼性骨材，矽質骨材之主要成分為石英礦物 (Quartz)，而石英是由二氧化矽所組成，如圖 2.20 可知。當石英礦物受熱溫度達 500 °C 時，在體積變化上會產生約 0.85 % 的熱膨脹量，當溫度達 573 °C 時，有晶相轉換 (Phase Transformation) 發生，由 α 相轉變至 β 相，熱膨脹量從 0.85 % 上升到 1.4 % 導致材料結構破壞；當溫度上升至 900 °C 體積膨脹趨於穩定不再增加。以此可知鋼筋混凝土受火損後於物、化性變化上，其保護層之混凝土對鋼筋保護能力影響之大，得進一步往內 (延-脆材料介面) 研探傷損後鋼筋鏽蝕程度及整體握裹能力狀況，故此課題 (延-脆材料介面) 極為重要。

表 2.4 水泥漿體受熱之變化說明(沈進發、陳舜田，1993)

溫度 (°C)	水化反應之產物
常溫~ 105	毛細水及吸附水蒸發
105 ~ 440	矽酸鈣水化物鍵結水之裂解 $C-S-H \rightarrow C-S + H$ (佔水泥漿體之 55 %)
440 ~ 580	氫氧化鈣結晶水之裂解： $C-H \rightarrow C + H$
605 ~ 1000	碳酸鈣結構水分解： $C_aCO \rightarrow C_aO + CO$

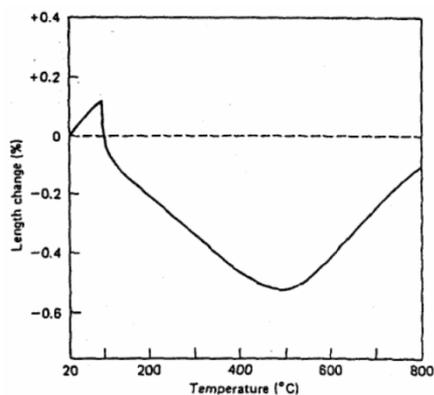


圖 2.19 水泥漿體之溫度與長度變化關係(Mindess, 1981)

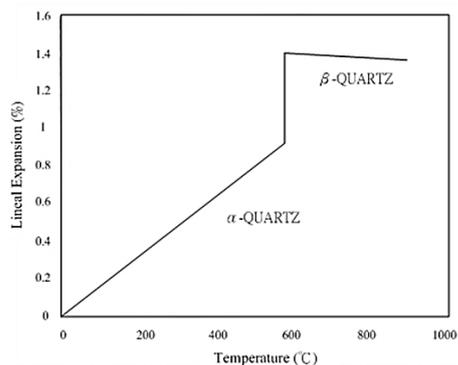


圖 2.20 矽質骨材的溫度與線性膨脹之關係(Gordon, 1996)

第二項 鋼筋之鏽蝕

鋼筋混凝土受災損後 (物、化性)，至終影響整體握裹能力之下

降，其成因甚為複雜。鋼筋混凝土材料受損後不僅於短期的混凝土物理性作用之傷損：如混凝土表面剝離、裂紋及裂縫；而在於化學性作用之傷損則有：高溫火害、混凝土中性化、鹼骨反應及鋼筋腐蝕等，對結構物之長期侵害。

本研究探討鋼筋混凝土內鋼筋導波波傳行為，若能了解鋼筋銹(腐)蝕之機理，故應能透過此應然於量測施作及分析上更為妥當。此鏽蝕機理從整體鋼筋混凝土來看分為：外部現象(表面)、內部現象(裡面)之侵蝕過程，如圖 2.21、圖 2.22。

(1) 外部現象—保護層之混凝土中性化：

在一般常態常溫 (25 °C) 下，因混凝土澆置過程發生水化作用 (Hydration，為物質與水發生化合的反應，又稱水合作用) 致混凝土產生強鹼性質，使內部之鋼筋在此強鹼環境下，鋼筋表面產生一層具有保護鋼筋防蝕功能之鈍態氧化膜 (Passivation)；而混凝土表面若受環境侵害影響時 (如震、火損)，其表面產生為裂隙(縫)且空氣中二氧化碳 (CO₂) 滲入其中後，(CO₂) 將會與具鹼性之氫氧化鈣 (Ca(OH)₂，為水泥水化產物) 作用，生成碳酸鈣化合物 (CaCO₃)，且由於碳酸鈣 (CaCO₃) 具有弱酸性，使保護鋼筋之鹼性環境逐漸消散。當保護環境之酸鹼值 (pH) 降至 9 以下，此時鋼筋表面之鈍態氧化膜 (Passivation)

將失去對鋼筋保護之作用，而使之易鏽蝕，即混凝土中性化（陳桂清，2006）。混凝土中性化引致鋼筋鏽(腐)蝕過程，其相關反應化學式如下：

中性化過程：



鋼筋鏽(腐)蝕過程之陽極（氧化反應）：



鋼筋鏽(腐)蝕過程之陰極（還原反應）：



(2) 內部現象—氯離子之侵蝕

若表面混凝土已龜裂、剝落，且結構物又座落於海岸旁（如臨海之山岳隧道），其受氯害環境影像甚為嚴重；氯離子（Cl⁻）對鋼筋之侵蝕乃是（Cl⁻）會破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，造成鐵離子（Fe⁺²）的溶出，並生成水溶性的氯化鐵（FeCl₂）錯合物。氯化鐵錯合物會溶解且離開鋼筋的表面，擴散進入混凝土的孔隙溶液中，與氫氧根離子（OH⁻）反應生成（Fe(OH)₂），同時釋放出（Cl⁻），而（Fe(OH)₂）會進一步與氧、水反應生成鐵銹。此一連反應，使鋼筋將不斷地產生腐蝕反應，使鐵離子溶出離開鋼筋表面，且由於反應中會再度釋放出（Cl⁻），使得（Cl⁻）可以反覆不斷地參與腐蝕反應，（陳桂清，2006）其侵蝕機

理與反覆過程如下：



鋼筋鏽蝕後之氧化產物將隨著時間與之俱增，其體積最大可增致6倍多，如圖 2.23，使鋼筋與混凝土介面逐漸剝離產生空隙，而混凝土表面亦產生裂縫，降低整體結構物之握裹能力（許慧如，2015）。故由此可知，若因為外在因素（客體）間接影響鋼筋與混凝土介面（延-脆介面）之握裹能力，而不查其之內隱，最終卻將直接成為影響鋼筋混凝土結構物（主體）安全性及穩定性之關鍵；以非破壞檢測技術研探鋼筋與混凝土介面之傷損程度，實為重要之研究課題。

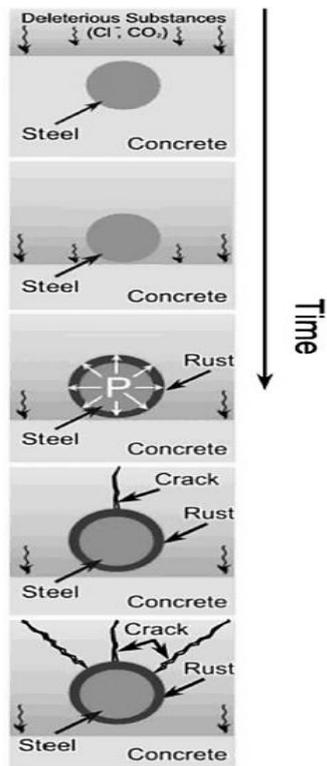


圖 2.21 鋼筋混凝土結構腐蝕過程的漸進階段(Ervin, 2009)

圖 2.22 不同鋼筋腐蝕程度示意圖(Ervin, 2009)

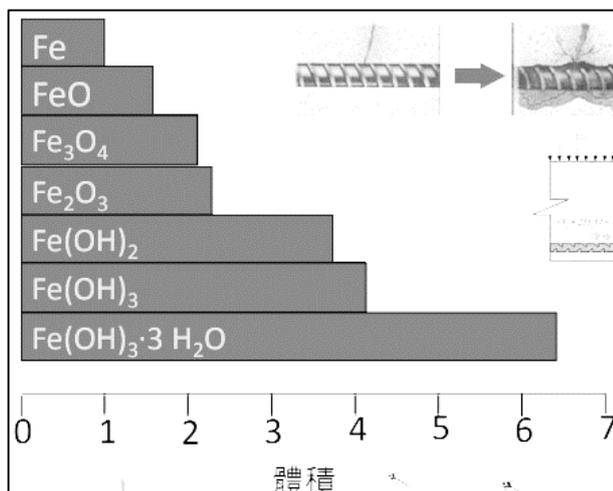


圖 2.23 不同氧化程度鐵鏽之體積變化(陳育聖, 2018)

第三項 握裹之損傷

造成鋼筋混凝土握裹傷損程度之原因，除了有因為鋼筋鏽蝕 (Corrosion) 產生之空隙外，亦有火損引混凝土孔隙增大，及震損震動使鋼筋與混凝土介面產生空隙等體積變化之敏感因素。

鋼筋與混凝土間之握裹力來源有三種 (趙元和，2004)：

- (1) 鋼筋與混凝土間，由化學作用所產生之黏附力 (adhesion force)：當僅承受低應力時，主要由黏附力提供握裹力，其提供之握裹強度約在 $14 \sim 21 \text{ kg/cm}^2$ ($200 \sim 300 \text{ psi}$)，但當鋼筋產生些微滑動時，此時黏附力即喪失。故黏附力不被視為提供握裹力之主力。
- (2) 鋼筋與混凝土間之摩擦力 (friction)：若因鋼筋與混凝土間之黏附力喪失，則由鋼筋與混凝土間之摩擦力及竹節鋼筋表面之突出物與混凝土間的相互作用力，共同提供握裹力如圖 2. 24(a)。
- (3) 竹節鋼筋表面之突出物 (ribs) 與混凝土間的相互作用力，此為握裹力之最後提供來源如圖 2. 24(b)。

故可知握裹傷損狀況為鏽蝕引起，則鋼筋與混凝土介面處 (延-脆介面) 可能將出現細裂縫 (Close) 或填充 (Filled) 之介質狀況；若握裹傷損狀況為混凝土或鋼筋受熱漲冷縮、外力衝擊等，使鋼筋與混凝土介面處 (延-脆介面) 產生開裂 (Opening) 之介質狀況，此時握裹

力傷損程度應比前者較為堪憂。由本小節可知，鋼筋混凝土握裹傷損可分為化學性之鋼筋鏽蝕程度，以及物理性之握裹情況，故本研究以後者為試驗控制方法。

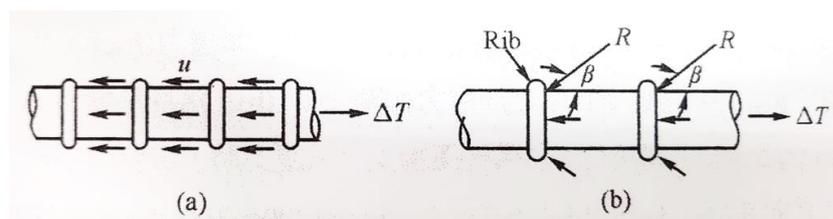


圖 2.24 握裹力來源示意圖：(a)鋼筋與混凝土間之摩擦力 (b)竹節鋼筋突出物與混凝土之相互作用力(趙元和，2004)

第四節 人工智能分析

本研究所使用的資料，包含經由本計畫實驗所得到的以及從文獻整理而來的資料，屬結構化資料，以採用「關聯式資料庫」作儲存資料，藉由支援標準關聯式資料庫語言的「資料庫管理系統」，透過適當的介面，可由其他程式，進行資料庫的資料存取。本研究的資料分析部分，除了傳統的統計分析外，並採用較新的資料探勘技術進行資料分析。

本研究採用跨產業資料探勘標準作業流程(Cross-Industry Process for Data Mining, CRISP-DM)。它可供各產業進行資料探勘(工作)專案時，做為參考的一個標準作業流程，相關六個步驟簡述如下：

(1) 業務理解(Business Understanding)

專注於需求端，即轉換相關專業知識以連結可與相配之資料探勘概念，並設定目標以及預期成果；本團隊致力研發簡速型災害現場傷損初勘工具/方法，即先以內業建置變數間之相關性。後於外業利用相關波速量測(壓縮波速、剪力波速、剪-壓波速比、導波特徵等)資料；進行推估構材(脆性材料：混凝土、延性材料：鋼材、延-脆複合介面：握裹)之熱損歷程(升溫梯度、最高溫度、持溫時間、降溫方式、工作應力比)；及災後之殘餘巨-微觀力學性能(巨觀：勁度、強度、韌度；微觀：叢聚、初裂、裂衍)。

(2) 資料理解(Data Understanding)

為資料分析與後續之建模，初步地蒐集資料，並盡可能地理解資料屬性與內容，盡可能地熟悉資料間之關係、特性及物理意義；基於上述，本團隊於內業將構材之試驗數據，先行建立資料庫，並將資料基於其屬性進行分類，即分成四大類：輸入(input)、輸出(output)、樣品(sample)、材料參數(material detail)。

(3) 資料準備(Data Preparation)

將資料進行前處理動作，包含資料清理(例如，刪除品質不佳的資料)、資料轉換，特徵的產生與選取。清理與轉換資料，以及產生特徵，皆可依賴專業知識。亦可使用演算法自動選取特徵。例如，可採用基

於相關性之選取演算法，剔除與所要探討的目標變數連結性較低之特徵，為後續建模執行資料進行轉換與淨化；本團隊先以波速與溫度作為目標，於試算表軟體進行線性迴歸檢視其相關性，然後利用資料探勘工具，使用基於相關性的特徵選取演算法，基於資訊增益的特徵選取演算法，還有主成分分析(Principal Component Analysis)，對變數進行選取。

基於資訊增益的特徵選取演算法，其基礎是資訊理論。它適用於離散數值，而離散的目標變數可稱為類別。針對一個數據紀錄的集合，一個特徵A對此數據集的分類能力，可用資訊增益來表示，也就是整個數據集的預期資訊減去A的熵，如式2.10所示；基於資訊增益的屬性選取演算法會計算各個屬性的資訊增益，進行排序，將資訊增益較高的屬性排在前面，即有較佳分類能力，而資訊增益偏低的屬性可被忽略。

$$\text{InfoGain}(A) = -\sum_{i=1}^m \left(\frac{s_i}{s} \times \log_2 \frac{s_i}{s} \right) - \sum_{j=1}^v \left(\frac{s_{1j} + s_{2j} + \dots + s_{mj}}{s} \times \left(-\sum_{i=1}^m \frac{s_{ij}}{s} \times \log_2 \frac{s_{ij}}{s} \right) \right) \quad (2.10)$$

式中，針對一個屬性A，具 $\{a_1, \dots, a_v\}$ 有 v 個值的特徵， s_{ij} 是類別 i 且在特徵A上的值為 a_j 的樣本數；等號右邊的第一項，以及第二項的第二個部分，表示一個數據集的預期資訊的定義。 s 是總樣本數， s_i 是類別 i 的樣本數， m 是類別個數；等號右邊的第二項，是熵的定義。

主成分分析(Principal Component Analysis)會將資料矩陣進行分解，找出特徵向量，也就是主成分，並找出特徵值，即為主成分的權重，而一個主成分是原來的資料軸的線性組合，全部主成分可以形成新的座標空間的軸，將原資料矩陣轉換為新的矩陣，而新矩陣會保留大多數(例如95%)，存在於原資料矩陣內的資料的變異量。

(4) 建立資料探勘模型(Modeling)

針對處理過、準備好的資料進行建模。測試多種適用的演算法，以最適當的演算法建立最佳模型，並藉由模型之產出，實際解決問題。本研究可能會用到的資料探勘技術，可分成兩大類：

- a. 分類(classification)：資料以標籤(離散數值)分類，以有預先分類好的資料(也就是有標籤的資料)建立模型，當有需要分類的新資料時，輸入模型，得到類別標籤，進行分類。若這裡的標籤換成連續數值，則是預測(prediction)，也就是基於連續性數值資料，得到未知數值相對應的輸出值，例如，統計的迴歸分析。
- b. 分群(clustering)：輸入資料時無標籤分類，依資料相似程度分群，即資料依據最大化之內相似性與最小化之外相似性進行聚集或分組。

本團隊以全部數據建模後做測試。一個例子是，以最高溫度作為類神經網路之輸出節點，即為推估之目標，圖2.25中之量測變數作為

類神經網路之輸入節點。

推估數值與實際數值的相關係數，代表模型的表現好壞—相關係數越高，模型越好。另外，MAE(Mean Absolute Error)和RMSE(Root Mean Squared Error)也可用來評估模型的好壞—數值越低，模型越好。另外，本團隊使用名為SMO(Sequential Minimal Optimization)的支援向量機去推估最高溫度，也是會以全部數據建模後做測試，最終由推估數值與實際數值的相關係數、MAE以及RMSE進行不同方法之推估成效評估。

(5) 評價模型(Evaluation)

一般進行模型之檢驗時，因為無法取得與模型違背之資料，所以必須要將可取得之資料進行切割，然而，不當的切割方式會導致模型本身過於適配或降低其成效，因此於此步驟評估與查核先前所建立之模型，並重複驗證模型以及檢視推估數值之可靠度，直至確定達到目標以及預測成果。

(6) 實施(Deployment)

將建立的模型，佈署至應用端，真正地使用於實際案例。

CRISP-DM是以資料為核心。除了最後一個步驟之外，每一個步驟都可能會被反覆執行。舉例來說，在建立模型的時候，可能需要回去對資料做其他處理；在評估之後，如結果不盡理想，可能需要從頭開始，

重新定義問題。



圖 2.25 火害破壞特徵資料庫設計圖

第五節 導波量測技術

本研究之目的，在於建立一套應用以導波的表面波傳量測技術，針對鋼筋混凝土受損後，其握裹傷損判釋與判識之量測方法。故於上一節已說明混凝土之波傳行為及特徵，此節接著說明鋼筋導波之特性及應用等，以此由外而內之波傳行為之程序作逐步說明；雖單就鋼筋為主之導波量測現今已有成熟之應用，但混凝土內有鋼筋之影響以致由混凝土表面探究鋼筋導波之波傳行為，亦有相當努力之空間，故茲就鋼筋導波特性及應用等於下說明。

第一項 導波之傳遞特性

導波一詞係指描述存在於邊界傳遞之應力波。導波存在可於半無限空間域之物體表面上傳遞（即雷利波，Rayleigh Wave），可於兩種不同之介質之間的介面上傳遞，亦可沿著板狀、層狀或對稱之圓柱狀行進，而所有描述於構件上之波傳統稱為波導（wave guide）。故導波之波導均為沿著縱軸之同方向傳遞，因此其於波導軸線上之任意點具有相同之物理及幾何特性（Bartoli, 2007）。如圖 2.26 所示，以超聲波導波於板狀物體為例，其導波構造是由縱波與橫波相互干擾所產生，由換能器產生之體波（縱波與橫波）與波導的邊界相互作用，發生多次反射和模式（Mode）轉換，直到它們疊加形成之波包即超聲波導波。

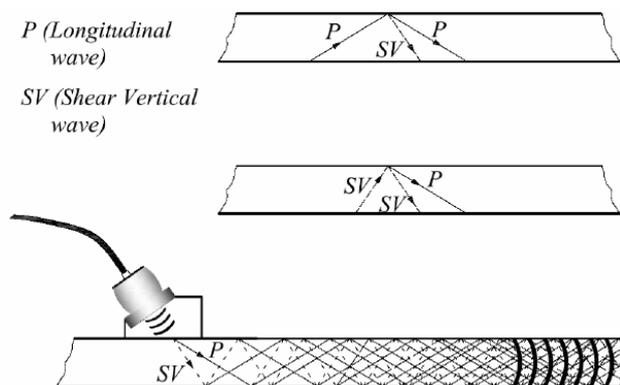


圖 2.26 於均質均向板狀物體中之導波(Bartoli, 2007)

當物體產生表面波之波長較物體為大時，其表現之波傳行為受到有限邊界的影響，將開始與前述無限邊界的情形有所不同，如在板狀物中，其將產生板波之行為；如在柱狀體中其將產生柱波之行為，此有限邊界的波傳即較為狹義之導波，其相位速度之特性與表面波相同，仍保有頻散現象。本研究所探究之鋼筋即可採用柱波之理論進行應用。

鋼筋之波導 (Wave Guide) 行為中有三種不同的運動模態如圖 2.27，分別是縱波 L (Longitudinal Wave)、扭波 T (Torsional Wave) 以及撓波 F (Flexural Wave)。

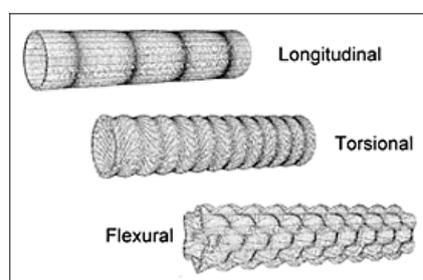


圖 2.27 鋼管中之導波示意圖(Bolt, 1976)

以下茲就鋼筋之波導 (柱波) 彈性理論作簡述，在此說明之觀點

視鋼筋為一 rods (圓柱狀或棒狀) 之彈性點 (elasticity point)，其座標如圖 2. 28。其首先研究此觀點理論的學者為 Pochhammer (1876) 及 Chree (1889)，故又可稱之 Pochhammer-Chree theory of rods。

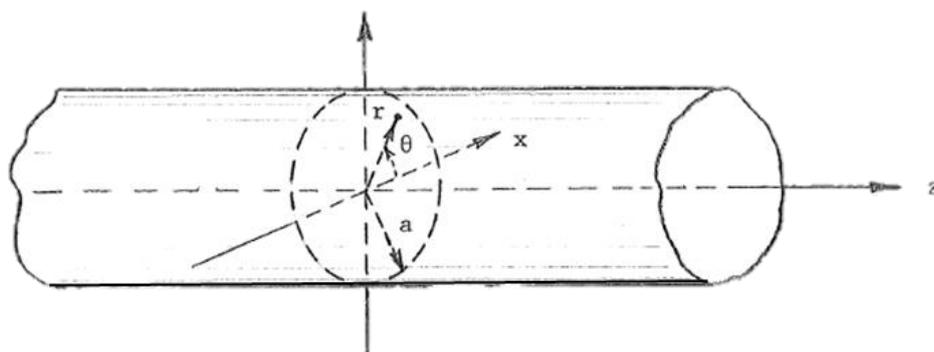


圖 2. 28 柱波之圓柱座標示意圖(Abramson et al., 1958)

其圓柱座標 (r, θ, z) 如下式：

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2. 11)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2. 12)$$

$$z = z \quad (2. 13)$$

在圓柱側向表面上之任意方向之應力均為應力自由邊界，其邊界

條件如式：

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad (2. 14)$$

$$r = a \quad (2. 15)$$

考慮於 z 方向沿圓柱行進之無限波傳，其位移函數如式：

$$u_r = U e^{i(kz - \omega t)} \quad (2. 16)$$

$$u_\theta = V e^{i(kz - \omega t)} \quad (2. 17)$$

$$u_z = W e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.18)$$

縱波主要是顆粒平行行進方向運動，其縱波位移函數如式：

$$U = U(r) \quad (2.19)$$

$$W = W(r) \quad (2.20)$$

$$V = 0 \quad (2.21)$$

扭波是垂直行進方向並在表面切線方向上運動，其扭波位移函數如式：

$$U = W = 0 \quad (2.22)$$

$$V = V(r) \quad (2.23)$$

撓波是垂直行進方向並在垂直表面的方向上運動，其撓波位移函數如式：

$$u_r = U(r) \cos \theta e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.24)$$

$$u_\theta = V(r) \sin \theta e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.25)$$

$$u_z = W(r) \cos \theta e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.26)$$

此三種不同型態之導波皆具備有頻散現象，亦即其相位速度會隨著頻率的不同而有所不同，除此之外，在每種型態的導波底下會有其不同震態的存在。如圖 2.29 所示，每種型態的波皆會有其相類之家族（多振態）存在，為清楚表示其間之差異通常會採用 A(m,n) 之方式進行分辨，其中 A 主要表示波的型態，分別以 L、T、F 代表縱波、扭波與撓波，而在其後之 (m,n) 表示其震動特性以及震態順序，m 可為 0、1、2、3...，其中 0 表示具對稱性之顆粒運動，其餘表示反對稱

性的顆粒運動，而 n 可為 1、2、3...，表示由從低頻到高頻的出現順序。

柱波在波導中移動時當其遭遇材料的阻抗改變時，在介面處會發生反射以及透射之行為，如圖 2.30。其阻抗之改變主要來自於材料性材之改變（如剪力波速下降），或是材料斷面的變化（如鋼筋受鏽蝕而斷面變小），如此會使得導波之訊號上有反射訊號存在。而當此波導之外圍有包覆物時，對於導波之行為最大影響主要來自於導波能量會透過此包覆物而洩漏，如圖 2.31，使得其訊號之振幅變小。以縱波為例（如圖 2.32），當導波在鋼筋中傳遞時，其能量集中，當其漸漸傳遞至有混凝土之包覆段時，在介面處會先發生有反射的行為，而進入到混凝土包覆段時，導波已不僅侷限於鋼筋中，會更進一步擴散至混凝土中，而使得在鋼筋中的能量開始有洩漏的情形。由此案例可知，透過觀察反射訊號之存在以及訊號振幅的變化將可有效獲得導波在波導材料（例如鋼筋）中傳遞過程之狀態變化。

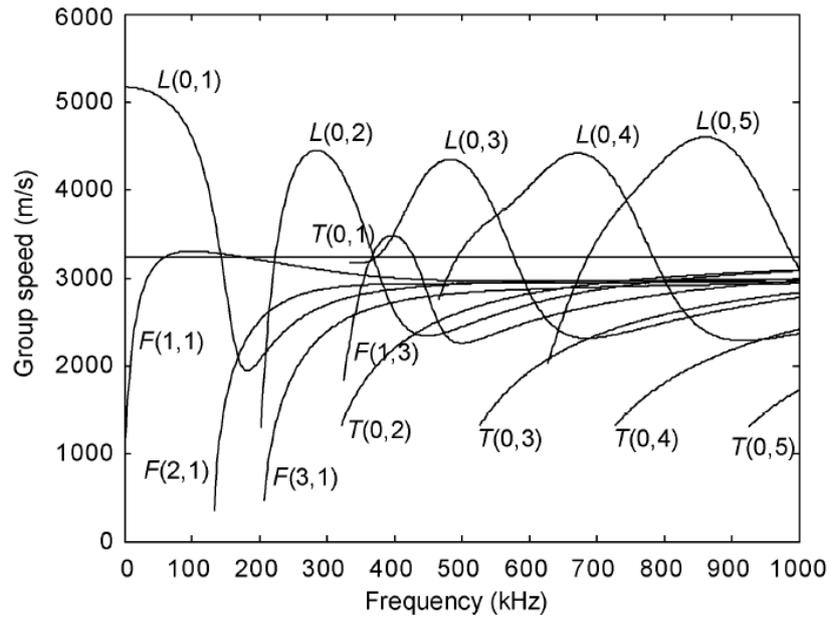


圖 2.29 柱波之頻散與多震態現象(Li et al., 2012)

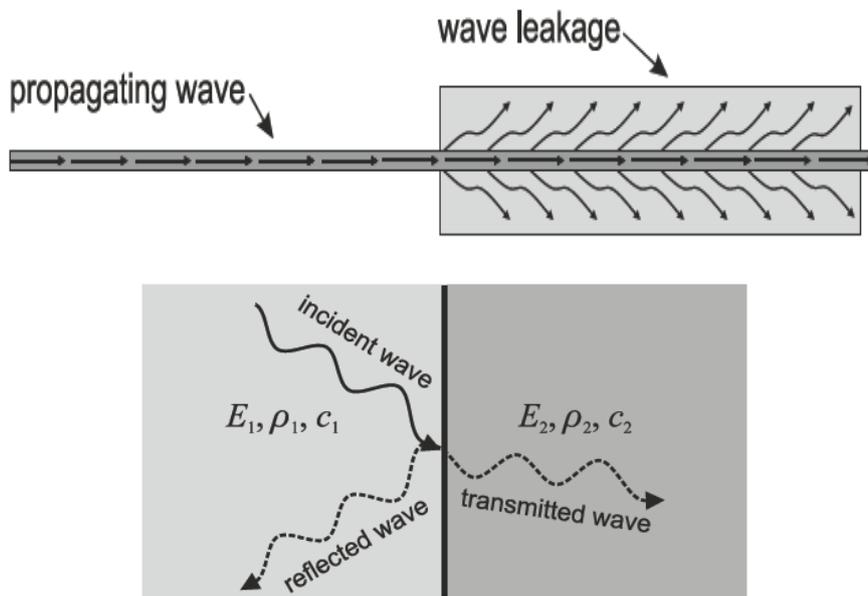


圖 2.30 柱波之反射與透射行為(Rucka & Zima, 2015)

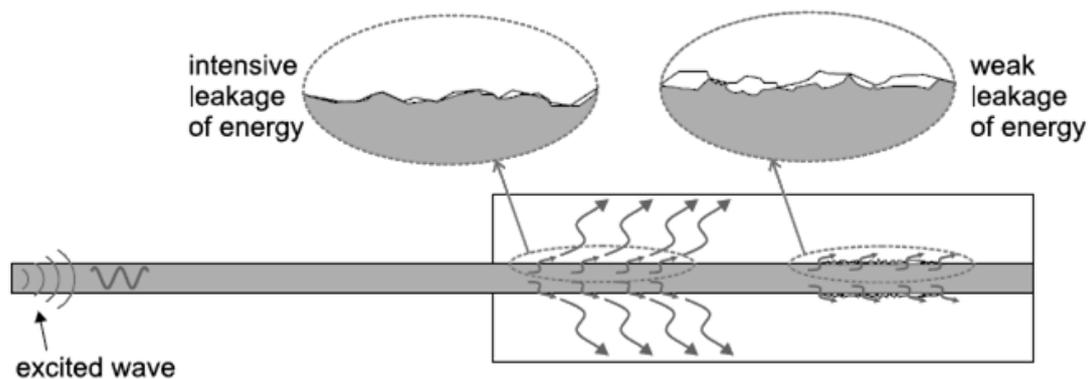


圖 2.31 鋼筋導波在混凝土包覆處之能量洩漏示意圖

(Rucka & Zima, 2015)



圖 2.32 導波在鋼筋與混凝土包覆段之傳遞情形

(Rucka & Zima, 2015)

第二項 導波量測技術於鋼筋混凝土之應用

因導波具有可長距離傳遞之特性，導波檢測技術目前已十分成熟地應用在金屬管路或水中構造物之完整性檢測上；相較而言，於鋼筋混凝土之應用為近幾年發展之新趨勢，目前已有大量的文獻透過室內實驗驗證其概念之可行性 (Ervin et al., 2009)。在應用的目的上主要有

兩個部分，一為鋼筋本身之鏽蝕程度 (Rucka & Zima, 2015)，另一為鋼筋與混凝土間之握裹狀況 (Li et al., 2012)。對於鏽蝕程度之檢測，一般是將鏽蝕的位置視為是鋼筋斷面的變化，利用此假設之模型進行數值模擬，獲得其鏽蝕訊號，如圖 2. 33 所示，可看到一能量較小的反射訊號存在，透過辨識此波之發生時間並估算導波波速即可得知其發生之位置，若欲更進一步瞭解其鏽蝕程度，則可透過該反射訊號之振幅大小進行推估。

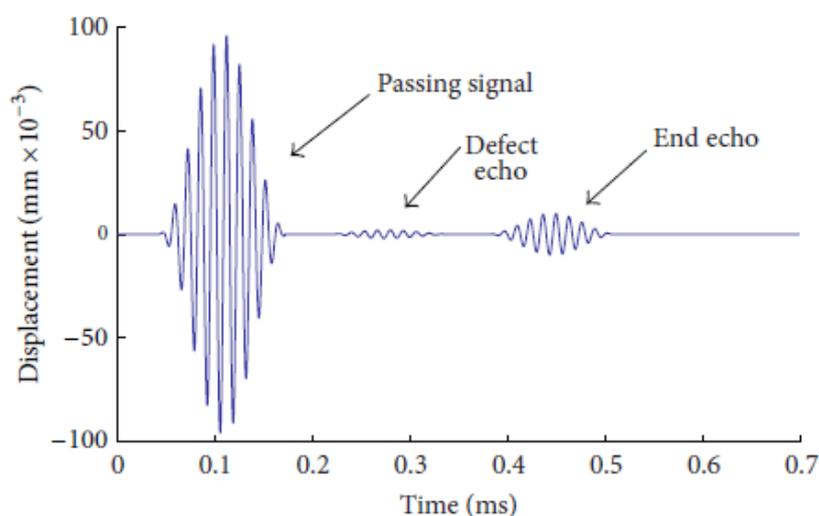


圖 2. 33 鋼筋鏽蝕之數值模擬波形(Zheng et al., 2014)

而在對於握裹狀況評估上，由於訊號上主要差異在於導波能量之洩漏 (溢散)，因此主要是以洩漏之能量比做為量化標準，例如 Li et al. (2012) 透過室內試驗討論導波之最大值與握裹長度消失的比例，如圖 2. 34 所示。其採用鋼筋一端產生導波另一端接收訊號 (pulse-

transmission 施作法)，因此當握裹消失的比例越大時，導波能量洩漏越低，會有較大導波能量被收錄到。但目前主要在於探討其握裹全部消失的長度，對於固定長度但握裹不同程度的降低並沒有較詳細的探討。而於大地工程上亦有應用導波量測探討邊坡地錨，Zima et al.(2017)於實驗室內以超音波導波之混凝土握裹長度程度與能量衰減，以反算錨體長度及錨體厚度比對理論數值模擬。如圖 2.35，結果顯示由衰減來看對其內部之鋼筋導波特徵確實可行，但因表面反射波與初始繞射波之干擾。

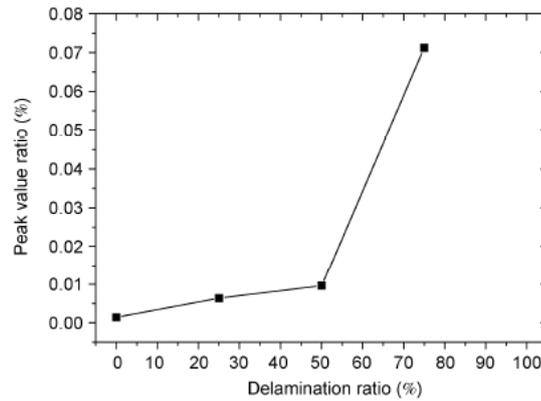
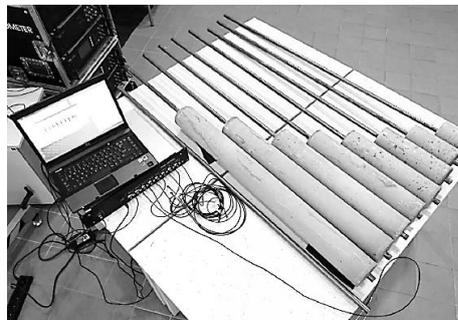


圖 2.34 導波能量與握裹長度消失比例的關係(Li et al., 2012)



Specimen	experimental h [cm]	numerical h [cm]
Anchor #1	7.0	1.8
Anchor #2	3.6	2.3
Anchor #3	4.6	2.1
Anchor #4	4.8	2.6
Anchor #5	2.0	2.7
Anchor #6	2.1	2.6
Anchor #7	2.8	2.0
Anchor #8	3.5	2.8

Specimen	L_b [cm]	experimental		numerical	
		L_b^{TOF} [cm]	$\Delta L_b = L_b^{TOF} - L_b $ [cm]	L_b^{TOF} [cm]	$\Delta L_b = L_b^{TOF} - L_b $ [cm]
Anchor #1	10.5	0	10.5	13.7	3.2
Anchor #2	20.5	15.5	5.0	17.5	3.0
Anchor #3	30	24.3	5.7	27.9	2.1
Anchor #4	40.5	34.5	4.0	34.8	5.7
Anchor #5	50	50.1	0.1	45.0	5.0
Anchor #6	60.5	62.0	1.5	55.9	4.7
Anchor #7	80.5	77.3	3.2	73.2	7.3
Anchor #8	100	103.1	3.1	90.4	9.7

圖 2.35 超音波導波對不同地錨長、厚度判識不顯著(Zima et al., 2017)

然而目前由室內實驗之成果來看，對於導波於鋼筋握裹應用最大之困難點應當在於該如何將握裹與鏽蝕之貢獻分離。如圖 2.36 所示，Sharma & Mukherjee (2010) 在室內利用加速鏽蝕的方式使試體自然產生缺陷，其同樣採用 pulse-transmission 施作法，其結果顯示，導波之能量一開始會受到握裹消失 (delamination) 的機制主控，但到了一定程度後，鏽蝕 (pitting) 所造成的影響將成為主控機制。這些現象最可能之原因為鋼筋腐蝕所影響之波導，其為在鋼筋整體長度與直徑為不變時，所形成光面之波導，而有鋼筋腐蝕時，因從粗糙表面發生散射，使波導受到干擾，如圖 2.37。如此一來，導波之能量與鋼筋之狀態便非一對一之關係，如何加以分辨成為未來應用之基礎上需要加以

建立的一部分。目前之應用可行性評估皆以室內實驗為主，在量測上採用 pulse-transmission 施作法居多，且不約而同皆以縱波為其導波型態，然而在實際的應用上，pulse-transmission 施作法需要在鋼筋的一端擊發震動另一端接收資料，這於現場不易辦到，需要另外尋求適合現場進行之導波擊發以及接收的方式。另一方面，根據 Sharma & Mukherjee (2010) 採用數值模型之方式對埋入混凝土內之鋼筋進行探討發現，不同擊發頻率會影響其產生的導波內涵並更進一步影響其在量測上的靈敏度，例如根據其鋼筋尺寸以及材料參數之設定，1 MHz 之震源較適合進行鏽蝕之量測，而對於握裹狀態之檢測應採用約 100 kHz 之震動會有較佳檢測靈敏度。如圖 2.38 ~ 圖 2.39，在頻率 100 kHz 下的 L(0,1) 的基態於介面處有顯著軸向位移及較低的能量衰減，可由此頻率來評估介面處之變化。因此，在決定敲擊方式或是擊發產生之導波型態後，應進一步檢討該導波型態在握裹狀態的檢查上最適切的擊發頻率。

因本研究採表面波震測於混凝土表面進行鋼筋導波量測，於上述文獻回顧可知握裹狀態之檢測應採用 100 kHz 之敲擊震動，而許慧如 (2015) 採用 MASW 作鋼筋混凝土內鋼筋周圍裂縫之檢測其可行性，以敲擊回音之敲擊鋼珠錘敲擊混凝土表面，其導入應力波頻率範圍可以達到 100 kHz。

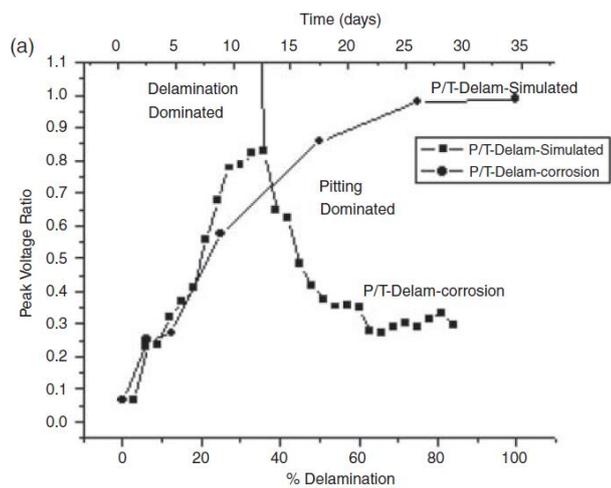


圖 2.36 鋼筋握裹狀態與鏽蝕程度在導波能量上的反應

(Sharma & Mukherjee, 2010)

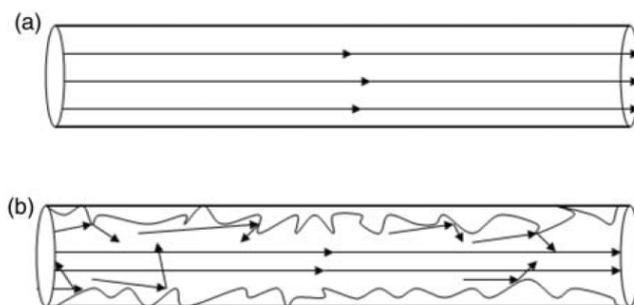


圖 2.37 腐蝕對導波的影響：(a)未損壞的鋼筋 (b)腐蝕的鋼筋

(Sharma & Mukherjee, 2010)

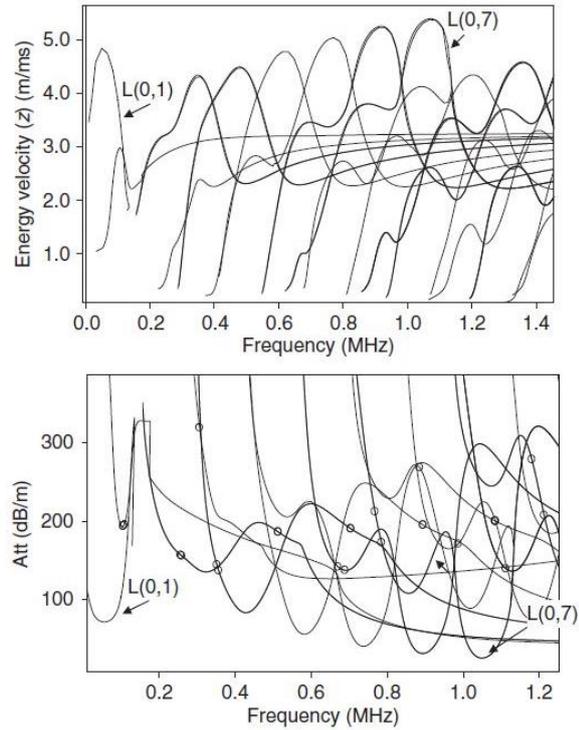


圖 2.38 混凝土內鋼筋之頻散曲線

(上：頻率域-能量速度；下：頻率域-衰減)

(Sharma & Mukherjee, 2010)

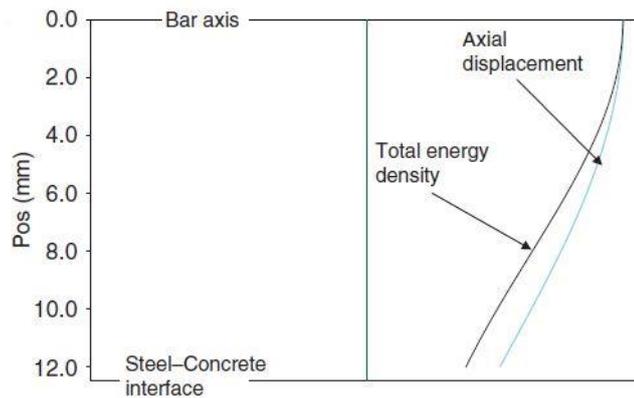


圖 2.39 於 100 kHz 下 L(0,1) 之位移模式形狀

(Sharma & Mukherjee, 2010)

第三項 多頻道表面波場分析之應用

表面波震測法 (Seismic Surface Wave) 最早應用於探測土層資料，並已有相當研究成就。其主要採用表面波中之雷利波來探測土層，因雷利波最容易產生且振幅最大之震波，以獲得各土層之頻散資料。當土層之剪力模數隨深度而變化時，造成波傳之速度與頻率或波長之不同而變化，此稱之為表面波頻散現象，波速與頻率 (或波長) 之相互關係稱之為頻散曲線。而由於雷利波速與剪力波速相近，利用土層波速變化與頻散曲線之關係，可反算獲得土層之剪力波速剖面與土層厚度。現今大多於土木領域中研究應用在大地工程、路面工程之剪力波速剖面之評估。但針對於震測方法對混凝土結構材料評估之研究，雖已有應用敲擊回音法 (Impact-Echo) 檢測厚度、蜂窩空隙及裂縫瑕疵等等。而對於混凝土內鋼筋傷損程度檢測之探究，如今依舊極具潛力發展之問題。故本研究為鋼筋混凝土試體作多頻道表面波震測，對延-脆介面之導波行為之初探，並以頻譜分析、波場分析判識頻散影像。

本節簡述目前針對以應力波檢測技術發展於混凝土與鋼筋混凝土探究其傷損狀況，而目前主要以敲擊回音法 (Impact-Echo) 為試驗方法，其源於 1980 年代由美國國家標準局 (NIST, National Institute of Standards and Technology) 所研發出的一種以機械性敲擊方式的混凝土缺陷檢測技術 (Carino, 2001)，其方法是以鋼珠錘作震源激發之

工具，並採以雙接收器於混凝土表面作接收表面正相位移，其應適用具有較高頻反應之接收器。以敲擊回音法敲擊於混凝土，其產入之應力波範圍約略可至 100 kHz，而一般於大地領域之表面波震測法之頻寬範圍大略均小於 1 kHz，且接收器大多以具有低頻反應之接收器為主（如：加速度計等）。敲擊回音法之分析只能於時間域上分析，無法有效地將表面波頻散特性納入。

Kim et al. (2006) 以敲擊回音法結合表面波譜法對混凝土埋入鋼筋深度之探究，藉由 R 波頻散特性反算 P 波識別缺陷位置並確認混凝土結構厚度，亦可判識鋼筋下方空隙（如圖 2.40）；許慧如（2015）又以此方法（IE-SASW）結合多頻道表面波震測之概念（非多頻道表面波譜法），並以時間-頻率域圖對鋼筋握裹缺失作判識之研究，觀察到鋼筋未產生握裹缺失時，其 R 波之波長越長之低頻波之波到時間較高頻波早到，而此現象當量測距量越增長其波速快慢越懸殊，反之則為鋼筋有產生握裹缺失時，且 R 波直行於測線上之能量，因受鋼筋缺陷之阻隔而有較大之趨勢，如圖 2.41。

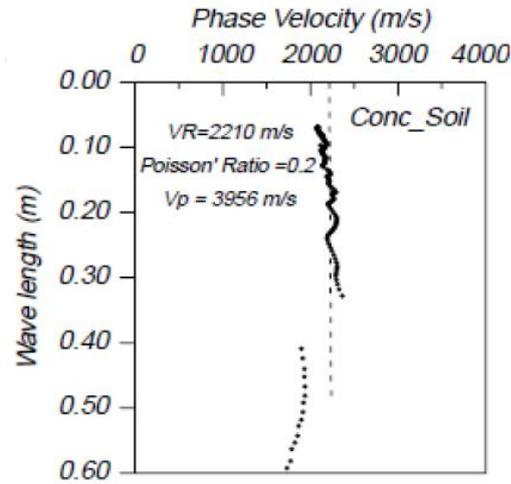
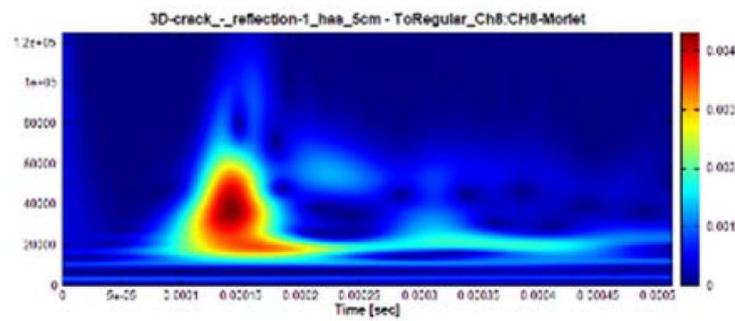
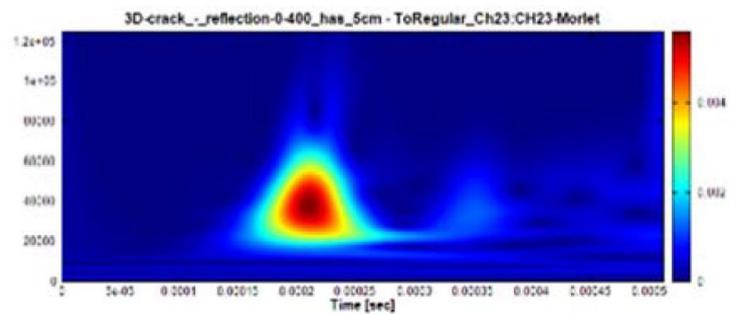


圖 2. 40 R 波反算 P 波隨深度變化之頻散曲線(Kim et al., 2006)



(a)



(b)

圖 2. 41 接收器下方握裹缺陷之時頻圖判識：(a)有缺陷(b)無缺陷

(許慧如，2015)

第三章 研發應用方法與範圍

第一節 人工智能於火害資料庫之應用

第一項 火害變數相關性分析

本研究對於火害資料進行人工智能分析前，首以資訊增益之特徵選取演算法及主成份分析(Principal Component Analysis)，進行火害變數間之相關聯性探討。其分析基礎是以統計上之相關性計算連續數值，找出式 3-1 之最大值；式中 $correl$ 為計算相關性函數， F 為輸入變數(自變數)， T 為輸出變數(應變數)。此法將於輸入變數裡，挑選出數個，然後放入一個集合裡面，此集合整體而言，對輸出變數之相關性高，視為高外部相關性，但集合內彼此之間的相關性低，視為低內部相關性。

分析由空集合開始，從尚未被挑選到的輸入變數裡遞迴，並挑出一個能增加外部相關性且可降低內部相關性的輸入變數，加入到集合裡。以此方法所選出來之輸入變數，不具順序，視為一整個體。若某一個輸入變數沒被選出，並不表示該輸入變數與輸出變數沒有相關性，而是有該輸入變數在內的集合，可能整體與輸出變數的相關性較低，或是該輸入變數與集合內的其他輸入變數有較高相關性。

$$\frac{\sum_i correl(F_i, T)}{\sum_i \sum_{j, j \neq i} correl(F_i, F_j)} \quad \text{式(3.1)}$$

第二項 人工智能分析

1.軟體介紹:

將最高溫度與強度折減視為目標，使用 WEKA (Waikato Environment for knowledge Analysis)程式，Weka 是一種使用 Java 語言編寫的資料採擷機器學習軟體，是 GNU 協定下分發的開放原始碼軟體。Weka 主要用於科研，教育和應用領域。Weka 是一套完整的資料處理工具，學習演算法和評價方法，包含資料視覺化的圖形化使用者介面，同時該環境還可以比較和評估不同的學習演算法的性能。測試選項(Test options)分類為四種：

- (1) 第一種為使用訓練集(Use training set)此方法為根據分類器再用來訓練的實例上的預測效果來評價它。
- (2) 第二種為提供測試集(Supplied-validation)此方法為從檔案載入的一組實例，根據分類器在這組實例上的預測效果來評價它。
- (3) 第三種為交換驗證(Cross-validation)此方法為使用交叉驗證來評價分類器，有時亦稱循環估計，是一種統計學上將數據樣本切割成較小子集的實用方法。於是可以先在一個子集上做分析，而其它子集則用來做後續對此分析的確認及驗證。一開始的子集被稱為訓練集。而其它的子集則被稱為驗證集或測試集。交叉驗證的目標是在訓練階段定義一組用於「測試」模型的數據集，以便減少

像過擬合的問題，得到該模型將如何衍生到一個獨立的數據集的提示，常用的方法為 K 折交叉驗證，將訓練集分割成 k 個子樣本，一個單獨的子樣本被保留作為驗證模型的數據，其他 k-1 個樣本用來訓練。交叉驗證重複 k 次，每個子樣本驗證一次，平均 k 次的結果或者使用其它結合方式，最終得到一個單一估測。這個方法的優勢在於，同時重複運用隨機產生的子樣本進行訓練和驗證，每次的結果驗證一次，10 次交叉驗證是最常用的。

- (4) 第四種方法為按比例分割(Percentage split)此方法為從資料集中按一定百分比取出部分資料放在一邊做測試用，根據分類器在這些實例上預測效果來評價它。



圖 3.1 WEKA 圖示

2. 預測方法

於變數相關性分析執行後，選出具高度相關之變數，進行人工智能訓練與預測模式建立，而採用之人工智能方法有(1)決策樹(2)線性迴歸(3)類神經網路(4)支援向量機，相關說明如下。

(1) 決策樹(Decision tree)

決策樹為一種用來決策問題之方法，其中有許多相關演算法，如 J48 常用來處理分類(Classification)的問題，而 M5P 則用來處理迴歸(Regression)的問題。如圖 3.2，圖中之節點表示評估欄位，每個分支表示欄位可能的輸出結果，每個樹葉節點表示不同分類之類別。決策樹優點為可將複雜之決策過程，分解成較簡單之決定，並產生相互獨立之群體，其結果容易解釋還有理解(Rasoul & David, 1991)。

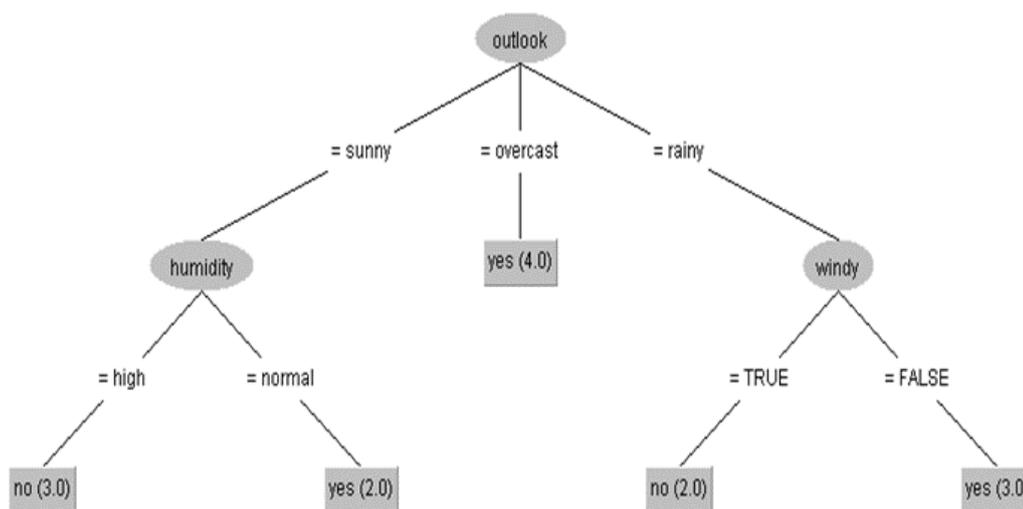


圖 3.2 決策樹分類分析示意圖

(2) 線性迴歸(LinearRegression)

線性迴歸 (Linear regression) 為統計學中用來處理迴歸分析之方法，以線性迴歸方程式的最小平方函數，建立單一或多個自變數及應變數之關係模型。此種函數為單一或多個迴歸係數模型參數之線性組

合。模型中只有一個自變數的情形為簡單迴歸，多於一個自變數的情形稱為多元迴歸。在線性迴歸中，使用線性預測函數建立數據模型，而數據中未知的參數也通過數據模型估計之，此模型稱線性模型。

最常用線性迴歸建模先給定 X 值的 y 條件，均值為 X 的仿射函數。在某些特殊情況，線性迴歸模型可以是一個中位數或一些其他給定 X 條件下 y 條件分布之分位數。另外，線性迴歸將焦點放在給定 X 值的 y 條件機率分布，並非為 X 和 y 的聯合機率分布。

線性迴歸為迴歸分析中第一種透過嚴謹研究過程，並被實際廣泛應用之人工智慧方法之一。原因為線性依賴於其未知參數的模型比非線性依賴於其未知參數的模型更容易擬合，且其產生的統計特性也更容易確定。

(3) 類神經網路(Neural network)

類神經網路之建構，是由動物的神經系統所啟發，為模擬動物之神經系統結構(如人類之大腦)，用近似函數以進行評估。類神經網路又稱多層感知機(Multilayer Perceptron)，為資料探勘中常見的演算法之一。類神經網路可以大致分為三個部分(如圖 3.3 所示)，第一個部分是輸入層，神經元在此層 (Neuron) 會接受大量非線形輸入訊息，而輸入之訊息則稱為輸入向量。第二層則是隱藏層，此階層在輸入層及輸出層之間作為感知器，若隱藏層有多層則稱為多層感知器。第三個

是輸出層，訊息在隱藏層中運算、評估後，顯示於此層上。

類神經網路通常由多層的神經元所組成，每一層神經元都擁有輸入層、隱藏層及輸出層，前一層的神經元輸出層為下一層神經元之輸入層，而神經元與神經元相連接的部分稱為突觸(Synapse)，在此數學模型中每個突觸都有一個加權數值，此加權數值稱為權重。

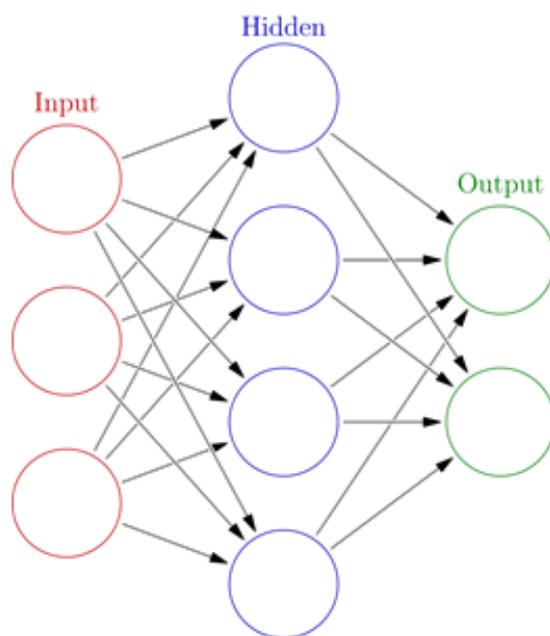


圖 3.3 類神經網路示意圖

(4) 支援向量機(support vector machine)

支援向量網路是在分類與迴歸分析中分析資料的監督是學習模型與相關的學習演算法。給定一組訓練實體，每個訓練實體被標記為屬於兩個類別中的一個或另一個，SVM 訓練演算法建立一個將新的實體分配給兩個類別之一的模型，使其成為非概率二元線性分類器。

SVM 模型是將實體表示為空間中的點，這樣對映就使得單獨類別的實體被儘可能寬的明顯的間隔分開。然後，將新的實體對映到同一空間，並基於它們落在間隔的哪一側來預測所屬類別，如圖 3.4。除了進行線性分類之外，SVM 還可以使用所謂的核技巧有效地進行非線性分類，將其輸入隱式對映到高維特徵空間中。當資料未被標記時，不能進行監督式學習，需要用非監督式學習，它會嘗試找出資料到簇的自然群集，並將新資料對映到這些已形成的簇。將支援向量機改進的群集演算法被稱為支援向量群集，當資料未被標記或者僅依些資料被標記時，支援向量群集經常在工業應用中用作分類步驟的預處理。

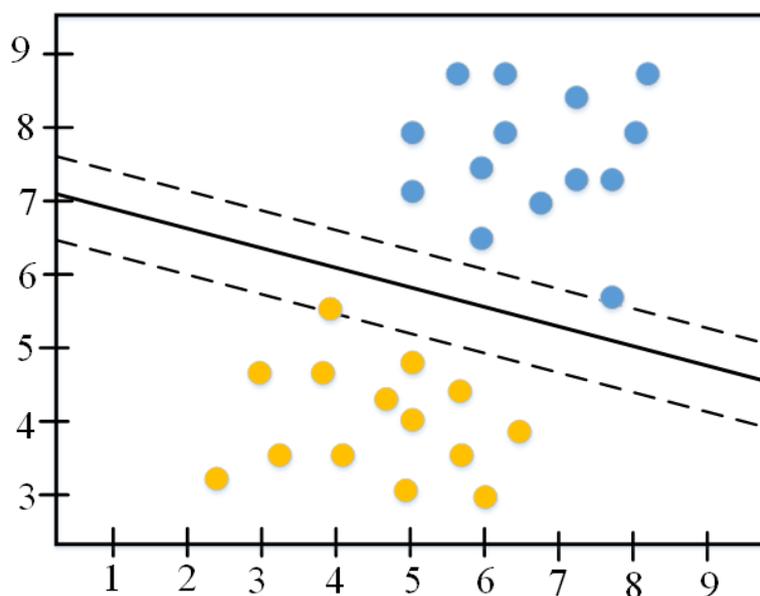


圖 3.4 支援向量機示意圖

第二節 導波試驗

第一項 試驗變數規劃

實驗中混凝土以設計強度 420 kgf/cm^2 、 210 kgf/cm^2 、 105 kgf/cm^2 之三種鋼筋混凝土為主體材料製作 $60 \times 20 \times 25 \text{ cm}$ 之長方試體，其鋼筋配置以保護層厚度： 1.5 、 4 cm 、鋼筋種類 (D19 竹節筋，其直徑為 1.91 cm)、正規化厚徑比 (c/d_b ，保護層厚度除以鋼筋直徑)、鋼筋傷損段總長度 (30 cm) 與傷損厚度 (0.3 cm)，其介面受損配置以保護層厚度： 5 cm 為實驗變數。以塑膠氣泡墊包覆鋼筋模擬其介面握裹完全開裂傷損 (Opening)，另外備置無塑膠氣泡墊包覆鋼筋之握裹良好長方試體，研擬使用實火升溫之擬真火害試驗以模擬實際火災現場效果；依鋼筋配置位置不同，共設計 5 種不同保護層之試體：無鋼筋面、有鋼筋面、有分層面、火損分層面、擬握裹傷損面。並作為導波量測傷損技術之初步研探。量測方法以多頻道表面波震測法為之，並搭配 2 至 6 顆寬頻接收器及敲擊鋼珠施作試驗。

第二項 擬真火害試驗

擬真火害試驗是為模擬實際火災現場，採用實火作為本試驗之升溫方式。試體邊界(長方向)往內 25 公分 為預火損區域，如圖 3.5 所示，意欲探討導波於未受火損之鋼筋混凝土試體至受火損區域之特徵變化。本研究所使用之升溫材料為燃燒歷時久且供溫穩定之炭精(木

炭), 試驗之鋼筋混凝土長方試體會以耐火泥與耐火氈妥善包覆試體, 只露出欲測試之表面; 並使用耐火磚架設生火台, 提升炭火燃燒效率、防止炭火外露, 減少其他諸環境之不確定因素。長方試體欲受火損混凝土保護層厚度訂定為 4 cm, 設計控制之最高溫度為 600°C, 並在此位置配置 3 條熱偶線監測溫度, 位置如圖 3.5 所示; 透過炭精(木炭)提供之熱能, 熱能從底面由下往上傳遞, 當位於欲受火損混凝土保護層厚度之熱偶線監測溫度達 600°C 或火損試驗時間達 30 分鐘, 則可移除炭精(木炭)並停止火損試驗。

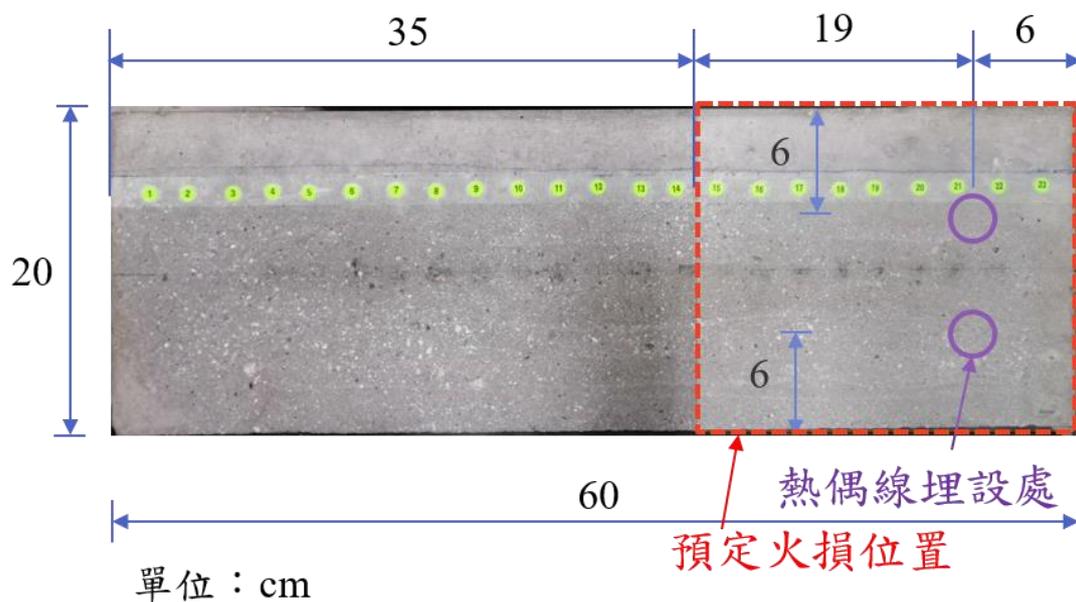


圖 3.5 試體俯視圖、預火損之位置與熱偶線埋設處

第三項 試驗方法與流程

本研究採以多頻道表面波震測法(Multi-channel Analysis of Surface Wave Method, MASW)，而本研究試驗用之寬頻接收器上有五個，故於施測方式上以每次敲擊作逐步移動(同寬頻接收器與敲擊源)方式做收錄。試驗之施測由表面擊發於混凝土產生導波，作試體表面激發及接收，即表面量測方式為導波震測法，震源敲擊位置距離試體邊界為 10 cm，於測線上固定一個接收器(作為啟動訊號接收點位)其距離震源位置為 5 cm，另一個接收器之第一點位距離震源 7.5 cm，接著每隔 2.5cm 擺一個接收器(可擺多個接收器)，則依每次敲擊完整組儀器含敲擊源向後移並重疊 1~2 顆接收器的位置(敲擊源皆位於第一接收器前 5cm)，至整組接收器到試體邊界為止，量測配置如圖 3.6 圖 3.7 所示。亦於延-脆介面處作人為製造傷損，形成握裹傷損之試體。探討材料變因之影響，以不同變因試體進行量測；故試驗之操作變因有：保護層厚度、鋼筋種類(有不同的鋼筋直徑)，並以其作正規化指標：保護層厚度 (c) 與鋼筋直徑 (d_b)，即厚徑比 (c/d_b)，試驗之施測步驟流程圖，如圖 3.8。

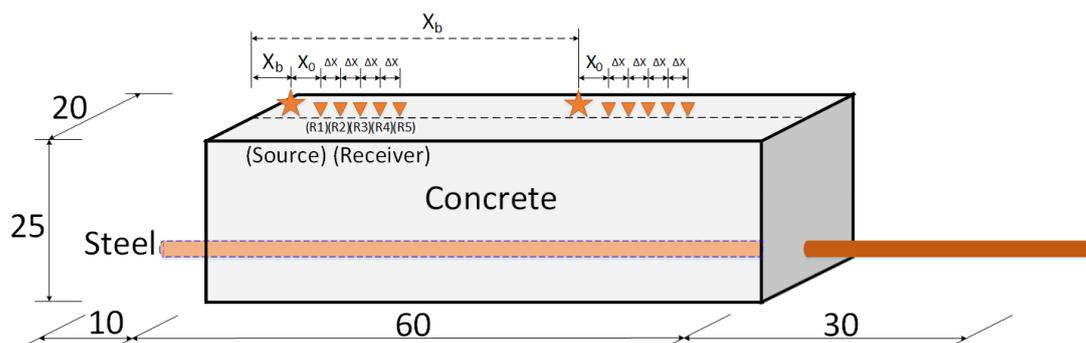


圖 3.6 量測配置示意圖(X_b ：敲擊源與左邊界之距離； X_0 ：敲擊源與第一接收器(Trigger)之距離； ΔX ：接收器之間距)

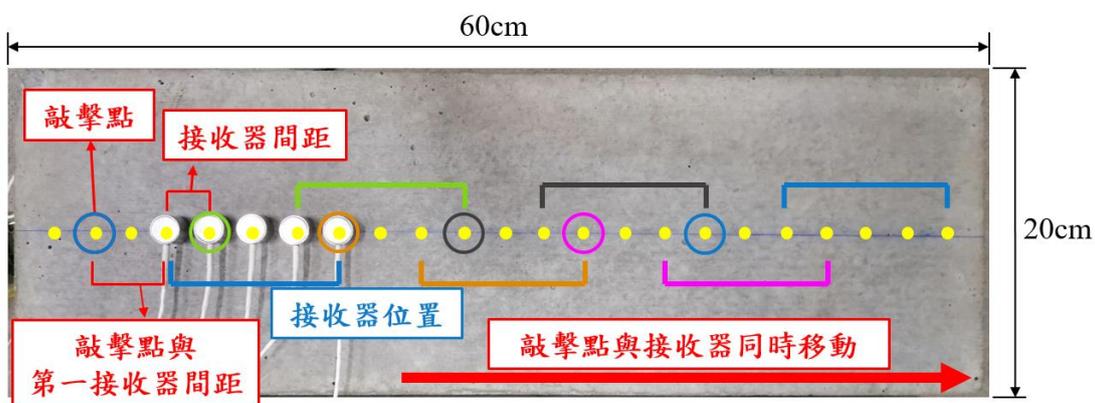


圖 3.7 試驗施測之移動方式示意圖

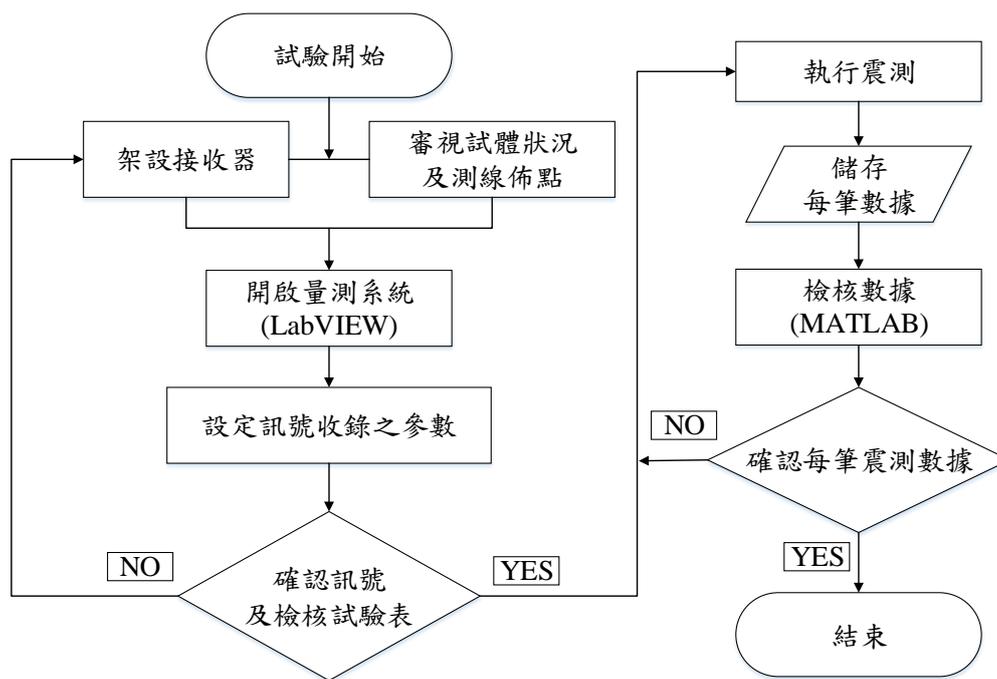


圖 3.8 試驗流程圖

第四項 試體材料與製備

(1) 敲擊源

固定頻率之超音波震源之頻寬較窄、能量較弱，震波經過混凝土保護層後，能量消散至相當微弱。一般來說，敲擊震源之產生方式有兩種，分別為衝擊式 (Impact Type) 與可控制激發式 (Controlled Excitation Type)。本研究採用敲擊鋼珠錘以產生較大頻寬之衝擊式震源，以 Sharma & Mukherjee (2010) 於 50~150 kHz 處作探討；衝擊式震源之頻寬段與為震源及敲擊物之接觸時間有關，而本研究以直徑 7 mm 之敲擊鋼珠錘為之，其敲擊之接觸時間大小，主要受控於敲擊器

之尺寸、質量、受測物質量與受測物之表面狀況。其所擊發產生之接觸時間大約為 22~29 μs ，如圖 3.9 所示。

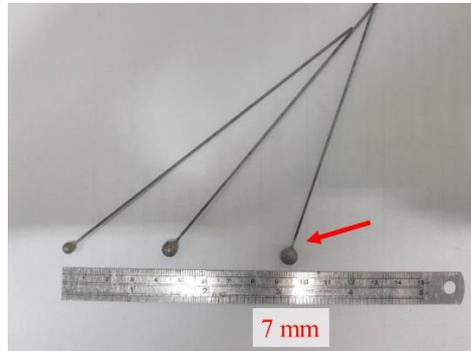


圖 3.9 敲擊鋼珠(採用直徑 7 mm)

(2) 接收器

一般應力波檢測應用於土層探測或道路鋪面檢測，其接收器之型式為低頻加速度計(規)，其頻寬一般約小於 1 kHz 以下。而應用於鋼筋混凝土上，因鋼筋混凝土結構之波速較快，其中混凝土適用之接收頻寬一般介於 10~200 kHz 左右，接收器型式為加速度計、寬頻位移計或其他偏高頻聲射接收器等 (Bowen, B.R.1992；Rosenblad et al.1995；Willcocks et al.2011；許慧如，2015；張宏毅，2017)。本試驗之接收器採用由 Physical Acoustics Corporation 公司生產，型號 WD FO79，頻寬為 100~900 kHz 之寬頻接收器，如圖 3.10 圖 3.11；而接受器與試體之耦合材料採用由 PCB 公司所製型號為 080A24 之蜜蠟，使接收器與試體表面緊密接觸，如圖 3.12 所示。



圖 3.10 壓電式感應器
(型號：WD FO79)



圖 3.12 蜜蠟

(PCB 型號：080A24)



WD Sensor
Wideband Differential Sensor

DESCRIPTION AND FEATURES
WD is a true differential wideband sensor with a very high sensitivity and bandwidth. It has a very good frequency response over the range of 100 - 900 kHz. Differential sensors differ from their general purpose counterparts by employing two sensing elements with opposite polarization directions. The two signal leads feed into a differential pre-amplifier which eliminates common-mode noise resulting in a lower noise output from the pre-amplifier. Noise improvements to the tune of 2 dB can be achieved using differential sensors over a single ended sensor. This sensor features a rugged steel construction with an integrated twin axial cable exiting on the side.

APPLICATIONS
This sensor is well suited for structural health monitoring of large structures like storage tanks, pipelines etc. This sensor is an ideal candidate for applications requiring high bandwidth for frequency analysis of the AE signals for noise discrimination and source identification. Wideband sensors are particularly well suited for research applications where a high fidelity AE response is required. It can be easily mounted using epoxy.

PRODUCT DATA SHEET

OPERATING SPECIFICATIONS

Dynamic
Peak Sensitivity, Ref V/(m/s) 56 dB
Peak Sensitivity, Ref V/μm/s 61 dB
Operating Frequency Range 125-1000 kHz
Resonant Frequency, Ref V/(m/s) 325 kHz
Resonant Frequency, Ref V/μm/s 400 kHz
Directivity +/- 1.5 dB

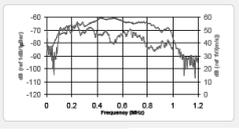
Environmental
Temperature Range -45 to 177°C
Shock Limit 500 g
Completely enclosed crystal for IP67/EM immunity

Physical
Dimensions 0.7" OD x 0.65" H
Weight 17.8 mm OD x 18.5 mm H
Case Material Stainless Steel
Face Material Ceramic
Connector BNC
Connector Locations Side

ORDERING INFORMATION AND ACCESSORIES

WD WD
Cable (specify length in "XX" m at end of PN) 1 m
Magnetic Hold-Down MHSTD
Pre-Amplifier O2/4, 2/4/6
Preamplifier System Cable (specify length in "XX") 226A
Amplifier Subsystems AE2A or AESA

Sensors include
NIST Calibration Certificate & Warranty



WORLDWIDE HEADQUARTERS
186 Cavendish Rd.
Plymouth, NH 03603 - USA
T: +1 603 774 6200 F: +1 603 774 3706
E: MAIL: sales@physical-acoustics.com

CANADA
T: +1 403 556 1300

CHINA
T: +86 16 8877 3631

FRANCE
T: +33 492 306265

GERMANY
T: +49 540 2002 4028

INDIA
T: +91 886 206051

JAPAN
T: +81 3 5461 2798

MALAYSIA
T: +60 210 2346 4074

HOLLAND
T: +31 210 246 0021

INDONESIA
T: +62 21 2246 2444

S. AFRICA
T: +27 11 5002 5111

UK
T: +44 117 973 396

RUSSIA
T: +7 495 750 4646

SCANDINAVIA
T: +46 81 322266

S. AMERICA
T: +56 11 5002 5111

USA
T: +1 603 774 6200

UK
T: +44 117 973 396

圖 3.11 型錄說明

(3) 訊號擷取系統

訊號擷取系統採用，PXINI-6115 資料擷取介面卡同步作接收觸。



圖 3.13 擷取介面器



圖 3.14 前置放大器(型號：1220C)

第三節 火害現場結構材料探傷檢測系統軟體評估

建築研究所整合 104-107 年之研究成果，已開發有火害現場結構材料探傷系統軟體，以能快速、簡易評估 RC 建物材料 (含地下結構物) 受火害後之安全性。本研究於今年度評估導波技術於，結合火害現場結構材料探傷軟體之可行性。已開發之軟體組合與功能說明如下：

火害探傷檢測系統軟體主要以三大硬體設備所組成，如圖 3.15 所示，其中第一部分為超音波之激發儀器、激發探頭及接收探頭；第二部分為訊號擷取系統(Data acquisition , DAQ)，用以擷取完整之波形訊號，並且搭配降壓器以免超音波激發過程產生過高電壓導致訊號擷取儀器之損壞；第三部分為人機介面顯示面板與分析軟體之整合。



圖 3.15 火害探傷檢測系統軟體整合

超音波激發儀器採用俄國製 UK-1401 乾點接觸式低頻超音波脈衝儀，如圖 3. 16(a)所示，其優點為量測時不需塗抹耦合劑；且超音波探頭為點接觸式，相較於傳統面接觸式超音波探頭，對於待測試體表面的不平整有較高之接受性，其可量測發射波至接收波時間範圍在 15~150 μ s，可量測波速範圍為 1000 至 9990 m/s，量測距離限制為 50~250 mm，而該設備附有兩組不同頻率之發射與接收探頭分別為 50 kHz 之剪力波探頭及 100 kHz 壓縮波探頭(如圖 3. 16(b)(c))。



(a) UK-1401 乾點接觸式
低頻超音波脈衝儀



(b) 壓縮波探頭 脈衝頻率 100 kHz



(c) 剪力波探頭 脈衝頻率 50 kHz

圖 3. 16 UK-1401 乾點式超音波脈衝儀與壓、剪力波探頭

超音波之激發與接收以 ADLINK 所出產之 USB DAQ (PicoScope 4224)為訊號擷取系統之建置，如圖 3. 17 所示。PicoScope 4224 具有 USB 2.0 之傳輸接頭，2 個接收頻道及 12 位元之訊號採集解析，32

MS 緩衝記憶體，支援 80MS/s 速度之同步採樣。



圖 3.17 PicoScope 4224 訊號擷取器

以 Getac 所產之強固式平板電腦為人機介面之顯示面板，作為資料運算、結果顯示與輸出之平台，如圖 3.18 所示。其可攜式與防震耐摔之設計，適合於於火害現場操作。



圖 3.18 Getac 強固式平板電腦

本研究先行盤點多頻道導波量測所需之系統內容，將其與既有系統比較，針對相異之處建議相關韌體，並加以評估初步建置費用。

第四章 研究成果

第一節 人工智能於火害數據之分析

第一項 人工智能於火害因果關係調查結果

本研究進行人工智能預測模式建立前，首先對於火害數據資料變數之關聯性進行分析，分析方法如本報告第三章第一節所述。火害變數關聯性分析以材料變數、熱變數，還有固力變數等為輸入變數；其中材料變數為設計強度(designed strength)，熱變數包含升溫速率(rate of heating)、最高溫度(maximum temperature)、持溫時間(exposure time)與降溫方式(cooling condition)，固力變數則有工作載重比(pre-existing loading level)以及加載速率。

在輸出(量測)變數部分，則分有超音波速、巨觀變數與微觀變數等三類；超音波速包含有 V_p (compression wave velocity; 壓縮波波速)、 V_s (shear wave velocity; 剪力波波速)、 V_s/V_p (wave-velocity ratio; 剪-壓波速比)、 ΔV_p (differential velocity of compression wave; 壓縮波速差)、 ΔV_s (differential velocity of shear wave; 剪力波速差)與 $\Delta V_s/\Delta V_p$ (differential wave-velocity ratio; 剪-壓波速差比)，巨觀變數則包含有勁度(stiffness)、勁度殘餘比率(reduced ratio of stiffness)、強度(strength)、強度殘餘比率(reduced ratio of strength)、峰前韌度(pre-peak

toughness)、峰後減峰前韌度(post-peak minus pre-peak toughness)，還有峰後韌度(post-peak toughness)。微觀變數包含叢聚(localization)、初裂(crack initiation)，還有裂衍(crack propagation)。

另外，尚有多個變數與設計強度有關，屬於細部試驗材料常數，包含混凝土分類、內幾何、外幾何與其他等類型變數。混凝土分類變數，包含混凝土類型(concrete type)及水泥型號(concrete number)。內幾何變數包含水灰(膠)比(water-cement ratio)及最大粒徑(maximum particle size)，而水泥(cement)、飛灰(fly ash)、爐石(slag)、矽灰(silica fume)、膠結材(binder)、骨材種類(type of aggregates)、粗骨材(coarse aggregate)、中骨材(medium aggregate)與細骨材(fine aggregate)之使用量也為此變數之一。外幾何變數則包含試體長(length)、寬(width)、高(height)、直徑(diameter)與長徑比(aspect ratio)。其他變數如形狀(shape)、養護齡期(curing age)、添加劑類型(additive type)、添加劑用量(additive content)、試驗條件(testing condition)等皆是。

總括本研究變數分類共有 46 種，而其中有 7 種，包含裂衍、矽灰、加載速率、水泥型號、中骨材、直徑、添加劑類型，因現有資料無數據或數據只有一種值，不具代表性，故於此不納入關聯性分析中。而分析使用數據共有 129 筆，其中 64 筆來自本研究歷年室內實驗成果，其餘 104 筆則來自文獻資料，分析結果列如表 1：表中相關係數

之絕對值若大於或等於 0.8，屬高度相關；若相關係數絕對值介於 0.6 至 0.8 之間(不等於 0.8)則為中高度相關。由表 4.1 可看出，火害最高溫度與壓縮波波速(V_p)、剪力波波速(V_s)、剪-壓波速比(V_s/V_p)、壓縮波速差(ΔV_p)、剪力波速差(ΔV_s)、勁度、勁度殘餘比率、強度、強度殘餘比率、峰前韌度。另外，也將輸出變數進行關聯性分析，結果如表 4.2 所示，可發現混凝土材料強度與壓縮波速、剪-壓波速比、勁度呈高度相關性。故本研究依此分析結果，配合外業實際量測可應用之便利性，以超音波之剪力波速、壓縮波速與剪-壓波速比進行火害人工智能分析模式建構，進行火害後混凝土強度折減與受火害最高溫度分析。

表 4.1 輸入與輸出變數之關聯係數

	壓縮 波速	剪力 波速	剪-壓 波速比	壓縮 波速差	剪力 波速差	剪-壓波 速差比	勁度	勁度殘 餘比率	強度	強度殘 餘比率	峰前韌 度	峰後減峰 前韌度	峰後 韌度	叢聚
設計強度	0.39	0.38	-0.30	0.40	0.39	-0.06	0.32	-0.31	0.35	-0.29	0.24	-0.44	-	0.30
最高溫度	-0.80	-0.62	0.72	-0.77	-0.68	0.07	-0.87	0.86	-0.86	0.95	-0.63	0.22	-0.58	-0.70
持溫時間	-0.47	-0.67	0.20	-0.48	-0.67	-0.15	-0.22	0.51	0.06	0.23	0.42	0.63	0.68	0.05
水灰比	-0.26	-0.26	0.19	-0.27	-0.26	0.04	-0.23	0.23	-0.23	0.21	-0.14	-0.44	0.00	-0.18
最大粒徑	-0.42	-0.41	0.35	-0.59	-0.59	0.10	-0.28	0.17	-0.42	0.21	-0.36	0.44	-	-0.49
水泥	0.03	0.03	0.01	-0.06	-0.07	0.02	0.07	-0.15	-0.01	-0.11	-0.08	0.44	-	-0.09
飛灰	0.43	0.41	-0.35	0.59	0.59	-0.10	0.29	-0.19	0.42	-0.21	0.36	-0.44	-	0.49
爐石	0.43	0.42	-0.34	0.54	0.53	-0.09	0.31	-0.23	0.41	-0.25	0.34	-0.44	-	0.43
膠結材	0.43	0.42	-0.34	0.53	0.52	-0.08	0.31	-0.24	0.41	-0.25	0.33	-0.44	-	0.42
粗骨材	-0.42	-0.41	0.35	-0.59	-0.59	0.10	-0.29	0.18	-0.42	0.21	-0.36	0.44	-	-0.49
細骨材	0.16	0.15	-0.16	0.31	0.32	-0.06	0.06	0.05	0.18	0.00	0.22	-0.44	-	0.27
長	-0.50	-0.69	0.22	-0.60	-0.75	-0.19	-0.32	0.41	-0.22	0.31	0.22	0.33	0.46	-0.40
寬	0.37	0.52	-0.15	0.44	0.58	-0.10	0.12	-0.18	-0.01	-0.08	0.07	-0.49	-0.53	-0.17
高	0.44	0.52	-0.27	0.59	0.68	-0.01	0.27	-0.24	0.27	-0.18	0.11	-0.57	-0.74	0.35
長徑比	0.33	0.31	-0.29	0.45	0.44	0.00	0.28	-0.19	0.40	-0.20	0.36	-0.13	0.12	0.62
養護齡期	-0.42	-0.41	0.35	-0.59	-0.59	0.10	-0.28	0.17	-0.42	0.21	-0.36	0.44	-	-0.49
添加劑用量	-0.36	-0.35	0.31	-0.56	-0.57	0.09	-0.22	0.10	-0.37	0.14	-0.35	0.44	-	-0.46

表 4.2 輸出變數間之關聯性

	剪力波速	剪-壓波速比	勁度	強度	峰前韌度	峰後韌度	叢聚
壓縮波速	0.85	-0.85	0.83	0.84	0.54	0.27	0.66
剪力波速		-0.46	0.57	0.52	0.21	0.10	0.47
剪-壓波速比			-0.82	-0.88	-0.69	-0.32	-0.67
勁度				0.88	0.57	0.25	0.73
強度					0.86	0.62	0.80
峰前韌度						0.86	0.58
峰後韌度							0.57

第二項 數據分析成果與比較

本研究此分析之資料包含 64 筆內業數據和 104 筆文獻數據，根據前項因果關係之成果，將鋼筋混凝土受火害後之最高溫度及強度折減視為最高目標，作為輸出 (Y)；另外，將外業現場即可量測之正規化指標剪-壓波速比 (V_s/V_p) 作為參數後，利用 WEKA 預測程式進行預測法模型建置與分析之成果表現。在此分析中，分別採用支援向量機法(SMOreg)、線性迴歸法、類神經網路法以及決策樹之 M5P 法進行人工智能分析。

(1) 火害最高溫度推估

推估火害後混凝土曾經遭受過之最高溫度之成果如圖 4.1 至圖 4.4 所示，圖中，剪-壓波速比為橫軸，最高溫度為縱軸，藍點圓形表示原始數值之火損最高溫度，紅點三角形為預測模型預測出火損之最高

溫度，將二者相對應比較。圖 4.1 為支援向量機之預測成果，成果顯示其整體預測之相關係數 0.7205，平均絕對誤差為 69 度，相關性維高度相關，且由圖中可見到，0.6-0.8 的剪-壓波速比區段預測所得之最高溫度與原始量測較為相符，對於剪-壓波速比 0.4-0.6 區間的資料沒有良好的推估成效，相關係數目前為四種預測模型最高；圖 4.2 為採用線性迴歸 Linear Regression 之預測成果，成果顯示其整體預測之相關係數 0.6949，平均絕對誤差為 71 度，相關係數只達到中度相關。圖 4.3 為採用類神經網路所獲得之預測結果，由結果可知此方法之相關係數 0.5183，平均絕對誤差 105 度，相關性為中度相關，且可反映出原始資料本身非線性的特性；圖 4.4 為使用決策樹 M5P 演算法之預測成果，相關係數 0.6949，平均絕對誤差 71.8，相關係數目前為四種預測模型中排行第二。比較四種成果可發現，SMOreg 演算法有較佳之推估成果，此演算法有一較大得問題為資料結果呈現性線。在類神經網路演算法有一較大問題在於其無法規範最高溫度的範圍(在 M5P 以及線性的演算法中亦有相同狀況)，如此使得推估出的溫度有可能低於室溫的情形存在，此為不合理現象，未來建議須針對此狀況進行進一步的演算法調整。

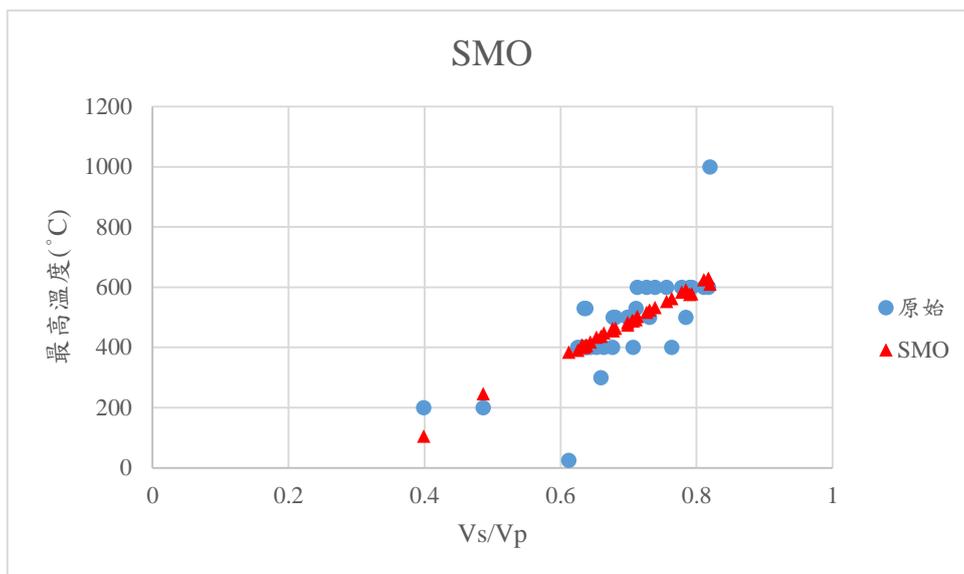


圖 4.1 使用交叉驗證 SMOreg 演算法最高溫度預測
(相關係數 0.7205 平均絕對誤差 69.2996 均方跟誤差 110.2713)

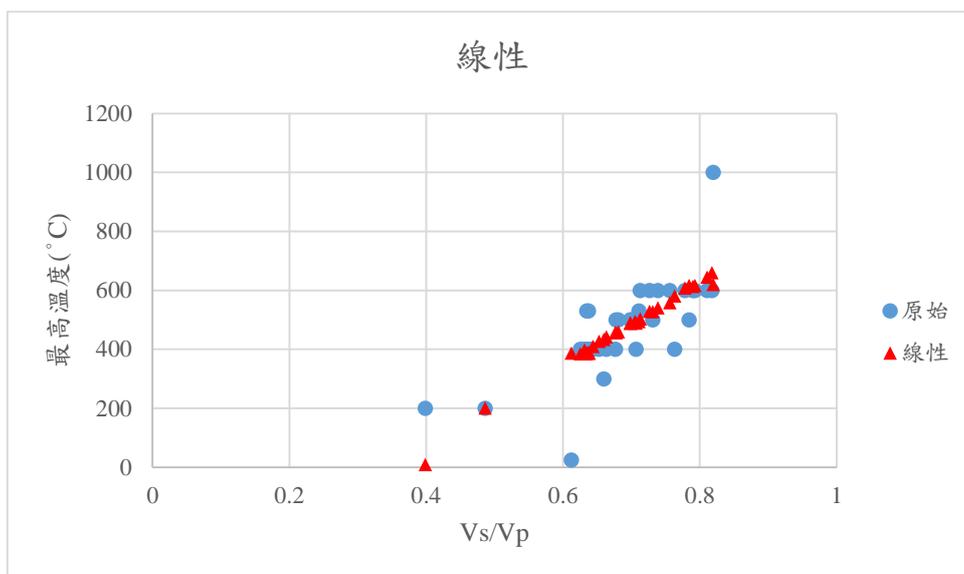


圖 4.2 使用交叉驗證 Linear Regression 演算法最高溫度預測
(相關係數 0.6949 平均絕對誤差 71.8875 均方跟誤差 114.9083)

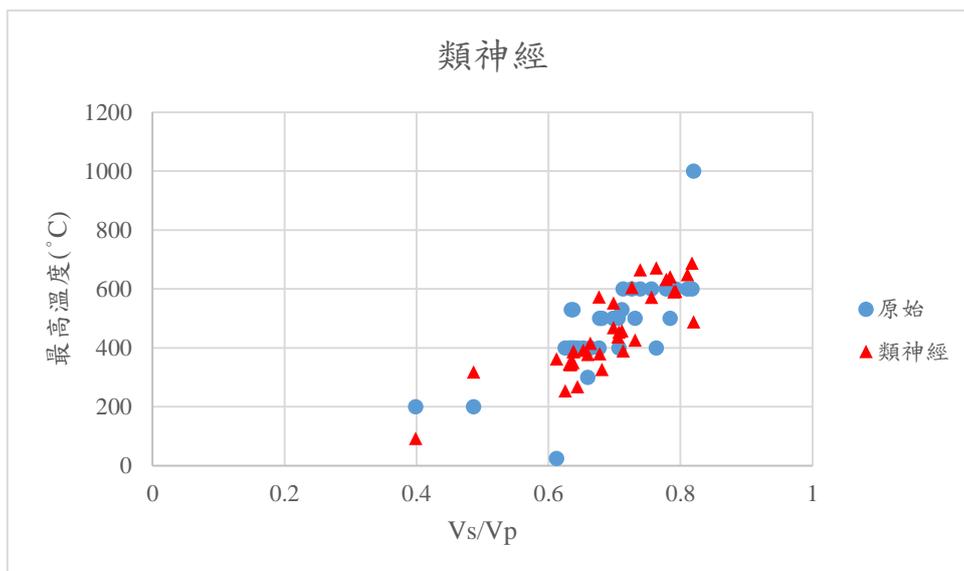


圖 4.3 使用交叉驗證類神經網路演算法最高溫度預測

(相關係數 0.5183 平均絕對誤差 105.0411 均方跟誤差 148.2347)

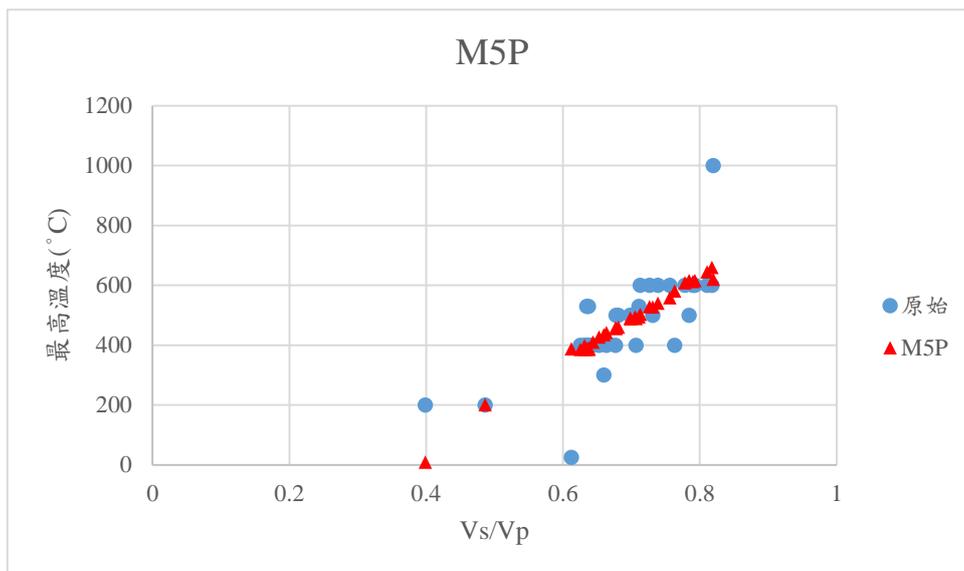


圖 4.4 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法最高溫度預測

(相關係數 0.6949 平均絕對誤差 71.8875 均方跟誤差 114.9083)

(2) 火害後混凝土強度折減百分比

在火害後混凝土強度折減百分比之推估上，其成果如圖 4.5 至圖 4.8 所示，圖中，剪-壓波速比為橫軸，最高溫度為縱軸，藍點圓形表示原始混凝土經過火害後之強度折減百分比，紅點為預測模型推估出混凝土經過火害後之強度折減百分比，將二者相對應比較。圖 4.5 為採用支援向量機推估之成果，相關係數 0.8174，平均絕對誤差 10.3%，相關性良好，對於剪-壓波速比 0.4-0.6 區間的資料沒有良好的推估成效，相關性為最高；圖 4.6 為採用線性迴歸方式推估之成果，相關係數 0.79，平均絕對誤差 12.5%，相關性良好，但與支援向量機一樣，在剪-壓波速比 0.55 附近的兩筆推估值明顯偏離實際資料的趨勢；圖 4.7 為採用類神經網路推估之成果，相關係數 0.81，平均絕對誤差 11.6%，相關性為高度相關，整體看可發現其主要掌握剪-壓波速比 0.6 之後的非線性特徵，對於剪-壓波速比 0.4-0.6 區間的資料沒有良好的推估成效；圖 4.8 為採用決策樹 M5P 的分析成果，相關係數 0.79，平均絕對誤差為 12.5%，相關性為第三高，推估成果雖理想但與最高溫度預測一樣的問題，預測值呈現分段線性，在剪-壓波速比 0.55 附近的兩筆推估值明顯偏離實際資料的趨勢，四種分析方式之成果，SMO 演算法所得之結果為最佳，類神經網路演算法可能受到資料

集中區的影響，而對於資料較少的區段無法進行有效的推估。同樣，再 SMO、線性迴歸演算法受到演算法的限制，強度折減仍會出現有負的推估值(即強度增加之意)，不甚合理。

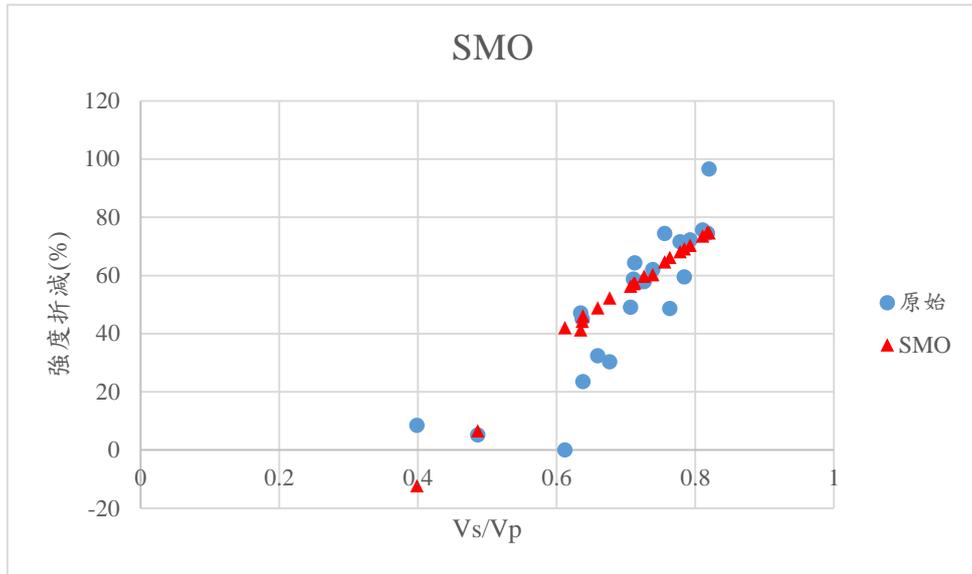


圖 4.5 使用交叉驗證 SMOreg 演算法強度折減預測

(相關係數 0.8174 平均絕對誤差 10.3636 均方跟誤差 14.7991)

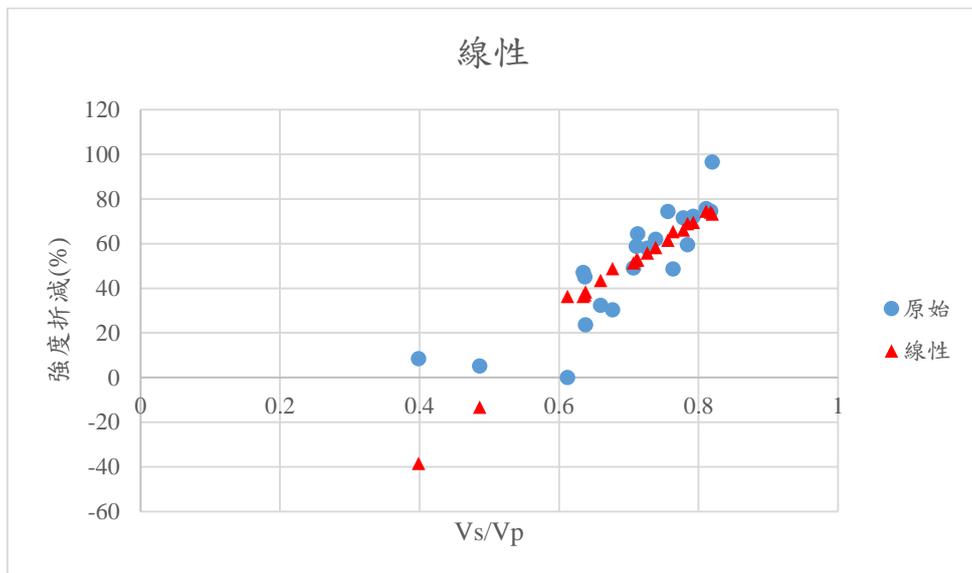


圖 4.6 使用交叉驗證 Linear Regression 演算法強度折減預測

(相關係數 0.797 平均絕對誤差 12.5291 均方跟誤差 16.9774)

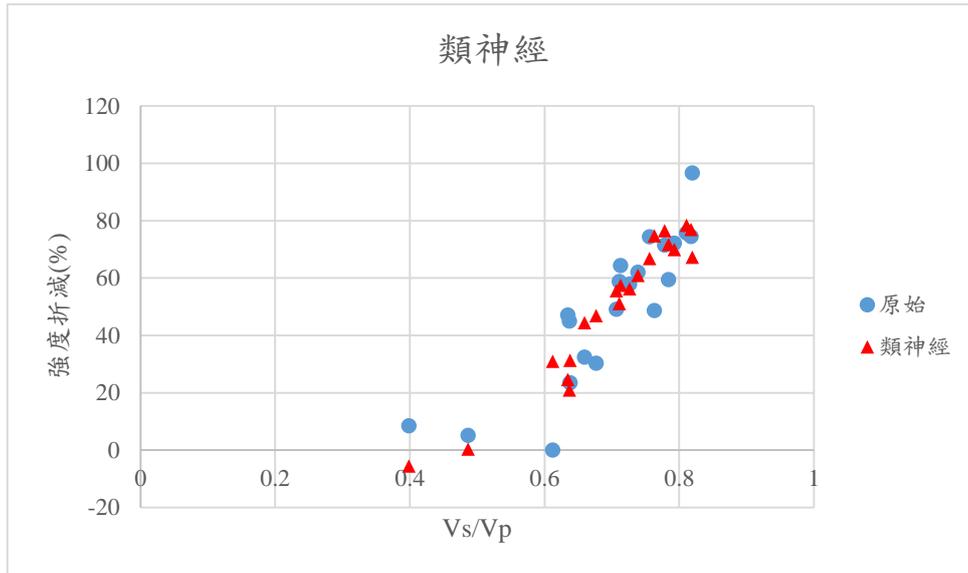


圖 4.7 使用交叉驗證類神經網路演算法強度折減預測

(相關係數 0.8172 平均絕對誤差 11.6218 均方跟誤差 14.9369)

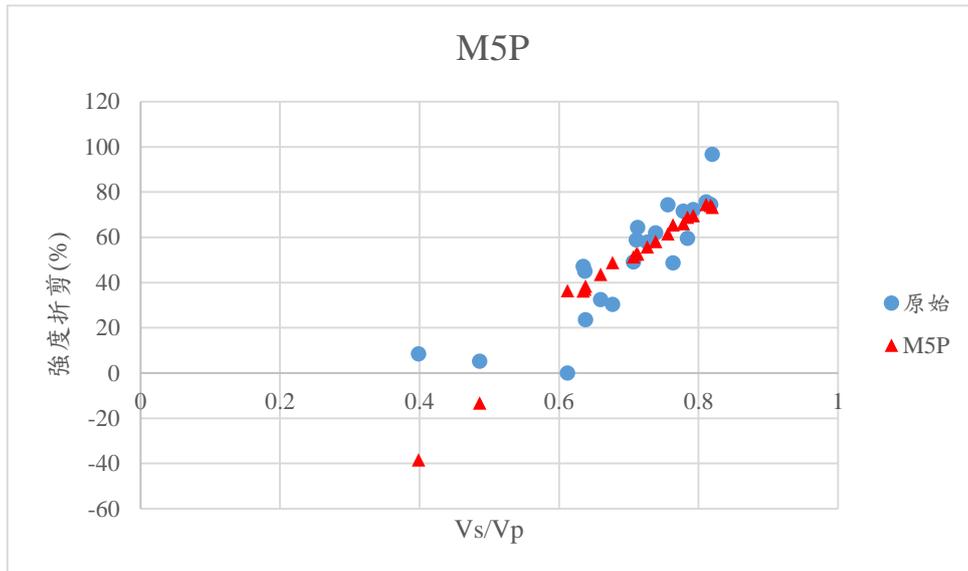


圖 4.8 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法強度折減預測

(相關係數 0.797 平均絕對誤差 12.5291 均方跟誤差 16.9774)

第三項 AI 人工智能所得模型驗證

一般進行模型之檢驗時，因為無法取得與模型違背之資料，所以

必須要將可取得之資料進行切割，然而，不當的切割方式會導致模型本身過於適配或降低其成效，為確保前述分析成果之可靠度，於此步驟進入評估與查核先前所建立之模型，並重複驗證模型以及檢視推估數值之可靠度，直至確定達到目標以及預測成果。本研究使用交叉驗證(Cross-validation)作為查核模型之方法，採三種型式交叉驗證進行校驗：

(a) Hold Out Set Cross-validation：於此法中，將資料分為兩種集合，以其中一資料集合進行建模，並以另一集合中之資料進行校驗，此法之優點於資料量足夠時，即具有效性；然資料量不足時，即取決於資料之切割方式，不同之切割方式恐會造成分析成果之變異性過大。

(b) K-fold Cross-validation：將資料分成 K 個集合，並以其他之 K-1 個集合作為先前建置之模型之測試樣本；此法之優點在於它降低資料劃分時造成的誤差，適用較小之資料量。

(c) Leave-one Cross-validation 假定資料之數量為 $N_v=1$ ，其餘之 N-1 皆為測試樣本；此法省略切割之問題，然每次皆以 N-1 個進行模型之校驗，過程較繁瑣。

當折數有差異時，數據預測法之結果與原始結果之相關性是否會因

為折數差異而有大幅度的跳動是待確認之因素之一，故本項目將數據使用交叉驗證法，摺疊數從 10 摺增加至 20 摺，觀察相關性與摺疊數的影響因素是否會對預測結果有影響。

檢核成果如表 4.3 至表 4.10 所示，由表中結果得知，無論在四種預測法 (SMOreg、Linear Regression、類神經網路 (Multilayer Perceptron)、M5P 樹狀迴歸演算法) 中使用交叉驗證時，摺疊數在 10 至 20 時，並不會因為切割使數據分成過大或是過小的部分資料，而使預測值與原始值之相關係數產生大幅度的跳動。且除了 M5P 樹狀迴歸演算法以外，在預測最高溫度與強度折減數值之最終平均皆在高度相關。M5P 在預測最高溫度與強度折減數值之最終平均時會有上下跳動以及相關係數偏低的情況。

表 4.3 使用交叉驗證 SMOreg 演算法最高溫度預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	°C	°C
10	0.8089	121.1002	165.4702
11	0.8101	121.1826	166.3957
12	0.7778	125.7841	176.3121
13	0.8043	122.097	166.8232
14	0.7974	123.8306	169.0072
15	0.7972	123.2201	169.5412
16	0.7897	124.8115	171.7517
17	0.7922	124.3632	170.8476
18	0.7888	124.7879	172.0189
19	0.7858	125.7425	173.1099
20	0.7855	125.5895	173.1444

表 4.4 使用交叉驗證 Linear Regression 演算法最高溫度預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	°C	°C
10	0.8194	125.2792	154.5851
11	0.8214	124.8872	153.7621
12	0.8046	128.2648	160.9667
13	0.8198	125.4902	154.483
14	0.8174	126.3616	155.4043
15	0.8165	126.2198	155.7636
16	0.8116	126.3408	155.757
17	0.8159	126.6001	156.0011
18	0.8149	127.2156	156.4595
19	0.8137	127.4788	156.8473
20	0.8155	127.1391	156.1418

表 4.5 使用交叉驗證 Multilayer Perceptron 演算法最高溫度預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	°C	°C
10	0.8614	108.7427	147.0397
11	0.8786	97.2822	132.1041
12	0.8913	88.5824	123.23
13	0.7545	106.1178	147.185
14	0.8861	97.0449	125.5416
15	0.8992	87.7587	119.1091
16	0.8552	116.0521	149.9523
17	0.8685	99.0228	135.4015
18	0.8972	92.2578	120.3927
19	0.9111	86.5746	112.4063
20	0.8812	100.7084	128.1658

表 4.6 使用交叉驗證 M5P 樹狀迴歸演算法最高溫度預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	°C	°C
10	0.1268	1023.1327	1103.9145
11	-0.0164	1025.6357	1117.3309
12	-0.0998	1073.4258	1165.4631
13	-0.0528	1049.5292	1140.0779
14	-0.3627	1146.456	1224.1912
15	-0.1409	1093.781	1172.855
16	-0.2146	1056.1493	1148.6748
17	-0.1435	1057.5088	1153.815
18	-0.151	1098.3763	1188.821
19	-0.1353	1062.9768	1159.2187
20	-0.2495	1114.0294	1206.9332

表 4.7 使用交叉驗證 SMOreg 演算法強度折減預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	%	%
10	0.8928	7.1865	12.6004
11	0.8924	7.0173	12.6295
12	0.8697	7.7473	14.6076
13	0.8968	6.8986	12.3197
14	0.8946	7.0741	12.4854
15	0.8923	6.9969	12.7005
16	0.8949	7.098	12.4582
17	0.8941	7.1065	12.5119
18	0.8867	7.3634	13.0945
19	0.8869	7.3772	13.0721
20	0.8874	7.3821	13.0682

表 4.8 使用交叉驗證 Linear Regression 演算法強度折減預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	%	%
10	0.8824	7.8697	13.0179
11	0.8842	7.6924	12.8957
12	0.8613	8.2913	14.5183
13	0.8819	7.8477	13.0337
14	0.8885	7.513	12.6757
15	0.8886	7.4753	12.6687
16	0.8864	7.686	12.8086
17	0.8835	7.7656	12.9584
18	0.8841	7.7662	12.9324
19	0.8834	7.7854	12.9696
20	0.8851	7.6987	12.8636

表 4.9 使用交叉驗證 Multilayer Perceptron 演算法強度折減預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	%	%
10	0.8982	9.0688	12.4349
11	0.8891	8.9713	12.8004
12	0.916	7.6118	11.1619
13	0.8683	9.3556	13.8277
14	0.8928	9.4896	13.0142
15	0.8779	10.193	14.3009
16	0.9005	8.8278	12.1539
17	0.8805	9.8209	13.6929
18	0.8596	8.205	14.3971
19	0.8939	7.8931	12.6226
20	0.887	9.1321	12.9201

表 4.10 使用交叉驗證 MSP 樹狀迴歸演算法強度折減預測

摺疊數	相關係數 Correlation coefficient	平均絕對誤差 Mean absolute error	均方根誤差 Root mean squared error
單位	無因次	%	%
10	0.3002	117.6474	130.4114
11	0.2537	121.2511	133.7476
12	0.217	127.1001	140.0404
13	0.1251	124.2939	138.4926
14	0.211	117.6731	132.5303
15	0.2528	102.6037	119.8316
16	0.2519	116.5037	129.7371
17	0.2734	118.7945	131.4468
18	0.424	106.9117	118.6363
19	0.3811	108.9868	120.6294
20	0.2089	116.1979	132.2584

第二節 導波量測試驗結果

第一項 導波量測於握裹力傷損調查應用概念

在導波量測應用於鋼筋混凝土構造物火害後握裹力傷損調查之應用上，本研究提出兩階段式的調查方法，相較於直接檢測握裹損傷，首先先確定火害是否有超越保護層範圍，若火害深度超越保護層，則再進一步檢視是否有握裹傷損之情形。而為了達到這樣的應用概念，在火害受損深度的調查上採用多頻道表面波震測方式，應用雷利波相位波速頻散的特性檢核鋼筋混凝土剪力波速隨深度的變化；其次，握裹力傷損調查的部分，為同時獲得時間、頻率與能量間的變化關係，採用時頻分析所獲得之時頻圖作為判釋用的特徵。

第二項 火害受損深度調查應用

本研究之火害受損深度調查採用多頻道表面波震測法(Multi-channel Analysis of Surface Wave Method, MASW)，試驗時採用 5 個寬頻接收器，施測方式以每次敲擊作逐步移動(同寬頻接收器與敲擊源)方式做收錄。每一次的敲擊資料(如圖 4.9a 所示)，其時間域振動資料中會同時存在多種類型的波，而在此分析中最主要以雷利波為主體，因此在進行頻散曲線分析前須將時間域資料的雷利波提取出來，在此，本研究採用較簡易進行的歸零動作，對於非目標波動皆將其直接歸零。

完整此前處理的動作後，再將其使用多頻道波場轉換法將時間域資料轉換至頻率-速度域進行頻散曲線分析，圖 4.9b 頻散曲線分析圖中，影像顏色代表該頻率相位速度下的能量，最大的能量處即為頻散曲線位置。在此頻散曲線分析中，為避免非雷利波的干擾，考量雷利波波長與接受器的布設參數有關(Lin and Chang, 2004)，因此設定最小波長為接收器間距(即下方線)，最大波長為測線展距(即上方線)，在此波長範圍間為後續分析用之頻散曲線。於此獲得之頻散曲線，本研究採用美國 Kansas Geologic Survey 所發展的 Surfseis 軟體進行反算以獲得混凝土之剪力波速垂直剖面。將此測線之中點作為此剪力波速剖面的空間位置，將不同敲擊點位之剪力波速結果根據空間位置呈現可組成 1.5D 之剪力波速剖面影像(圖 4.9c)，透過此剪力波速影像即可協助獲得火害受損深度。

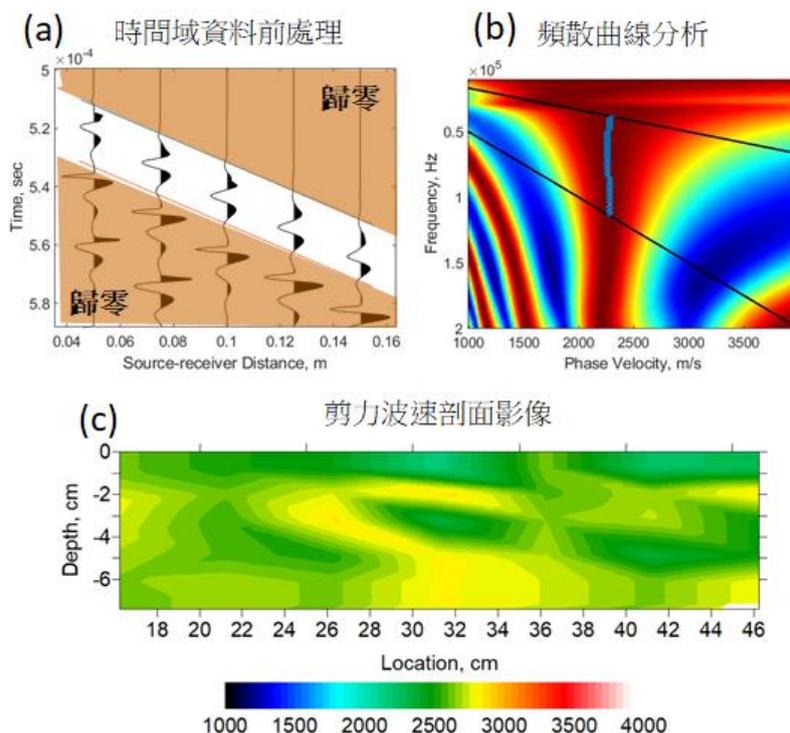


圖 4.9 火害受損深度調查資料分析流程 (a) 時間域前處理 (b) 頻散曲線分析 (c) 1.5D 剪力波速剖面影像

(1) 無鋼筋無分層混凝土試體

無鋼筋無分層混凝土試體之典型頻散曲線影像如圖 4.10，可看出頻散曲線之相位波速約為 2300m/s，在不同頻率下的波速皆極相近，這表示相位波速的不同的深度變化不大，將此頻散曲線進行反算即可獲得單一位置之剪力波速剖面，進一步將多個施測結果(剪力波速剖面)依照空間位置呈現可獲得剪力波速影像 (圖 4.11)，由圖中可以看出無鋼筋無分層混凝土試體整體波速均勻無太大變化，分析深度約 6 公分，整體之平均波速落在 2600m/s，標準差為 190m/s。

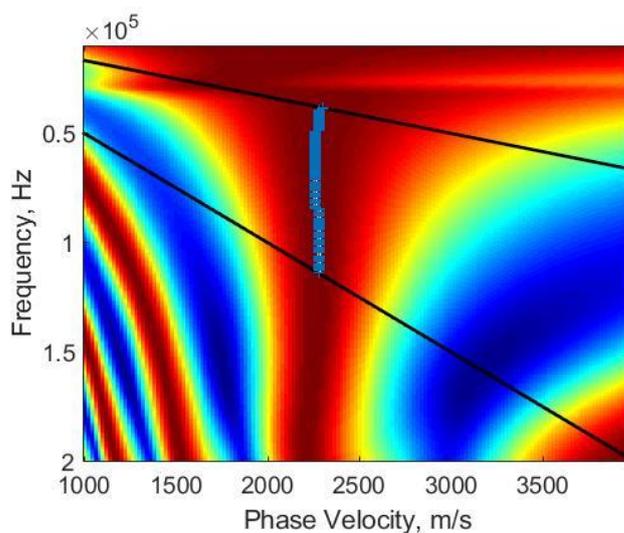


圖 4.10 速度-頻率域圖(無鋼筋無分層混凝土試體)

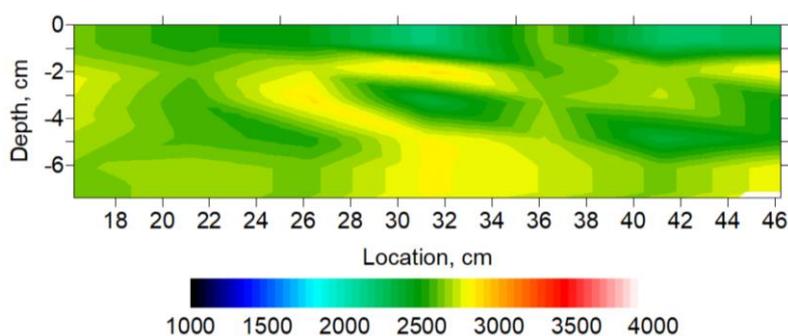


圖 4.11 位置-深度之波速圖(無鋼筋無分層混凝土試體)

(2) 無鋼筋人工分層試體

無鋼筋人工分層試體之典型頻散曲線如圖 4.12 所示，在有不同剪力波速存在的試體，獲得之頻散曲線便不會呈現單一相位波速的情形，而是隨著波長的增加(即頻率較低)相位波速會有所提升，而由圖中可再看到，在接受的波長範圍以外仍然有其他能量較大的相位速度集中區段，但在此並未加以採用，主要是因為在頻率 100k 以上的能

量最大位置所顯示的已是高次震態的頻散曲線，並非反算所需要的基態頻散曲線，這是在非均勻的混凝土試體中可能會出現需要注意的部分。將此獲得之頻散曲線進行剪力波速剖面反算，並將多個不同空間位置之成果以影像呈現可獲得之剪力波速影像如圖 4. 13 所示，分析深度約 7.5 公分，可明顯看到試體有明顯的波速差異存在，介面在深度 6.5 公分處，介面波速約 2700m/s。但本研究實際人工分層之介面位置在深度 5 公分處，由影像中判釋的介面與實際深度略有差異，造成此差異的一個可能性在於雷利波有隨著深度增加而降低解析度的特性，在反算過程中，理論模型的建立會假定每層厚度隨著深度增加，而本試驗之最佳解析度約為 2 公分(頻散曲線之最小波長)，當深度增加後其解析度還會變差，由此結果看來獲得之差異深度仍在此誤差內。未來可針對此深度上解析度的提升進行進一步的改善研究。

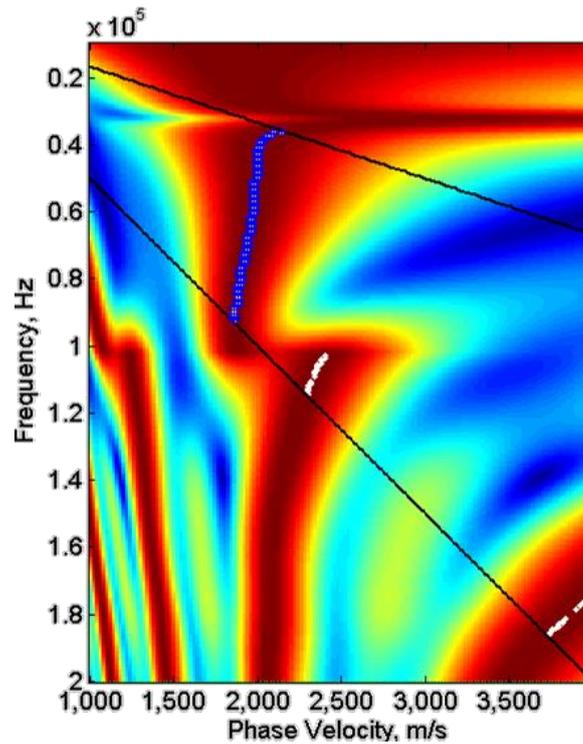


圖 4.12 無鋼筋人工分層試體典型頻散曲線影像

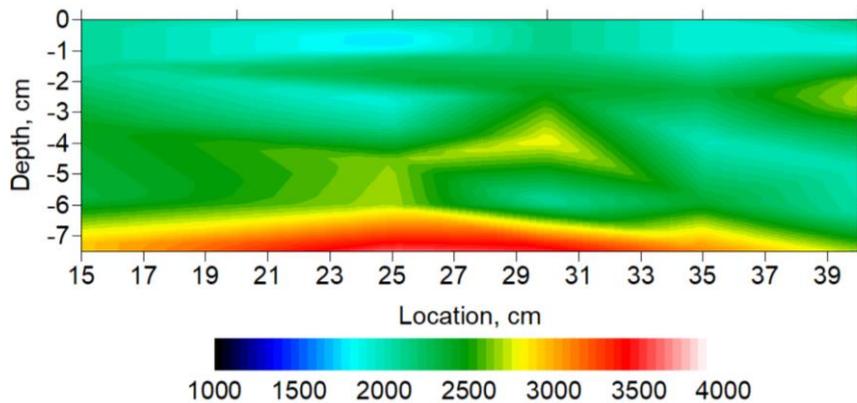


圖 4.13 無鋼筋人工分層試體位置-深度之波速圖

(3) 有鋼筋混凝土試體

透過有鋼筋混凝土試體欲確認鋼筋對於此量測技術之影響。在量測有鋼筋無分層混凝土試體(鋼筋深度 5 cm)之情況下之典型頻散曲線有兩類型，第一類型是其在特定頻率有能量消失的情形(如箭頭所

指)並且同時在高速側有明顯的另一頻散曲線存在(如圖 4. 14 (a)虛線所圍);而第二類型是僅有在特定頻率有能量消失的情形。第二類型之影響較為容易解決,由於表面波的影響深度與波長相關,大約是 1:1,因此只要透過對波長的限制(使其小於鋼筋深度)即可避開鋼筋的第二類型影響。而第一類型相對較為麻煩,由於較為高速之非混凝土行為頻散曲線的能量可能在我們有興趣的頻率段即超越混凝土之頻散曲線能量,如此會嚴重侷限混凝土頻散曲線的頻寬範圍,對於高頻側較小的頻寬範圍的降低將會造成反算所得之剪力波速在近表面處的準確度下降,因此仍有需要針對此類型可能造成的影響提出解決方案。

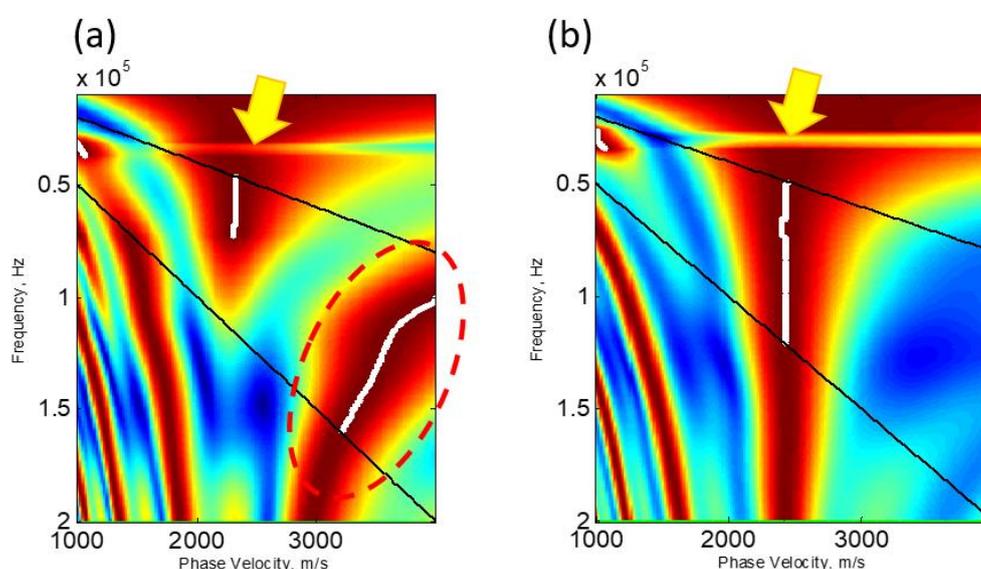


圖 4. 14 位於鋼筋正上方收錄之頻散曲線圖(鋼筋深度 3 cm)

(a)影響類型 1 (b)影響類型 2

為降低鋼筋的影響,本研究建議可透過偏移鋼筋正上方的做法。

將圖 4.14 (b)之量測測線由鋼筋正上方平移 3 公分，使其偏離鋼筋正上方，在進行資料之收錄，獲得之結果解析如圖 4.15 所示，類型 2 的影響大幅的下降，特定頻率下的能量下降情況有所改善，另一方面，類型 1 的影響在此已完全觀察不到，可以說明透過偏移鋼筋正上方的作法可有效的改善鋼筋可能造成的影響，但這也說明，應用本技術時應須先行確認鋼筋所在位置。

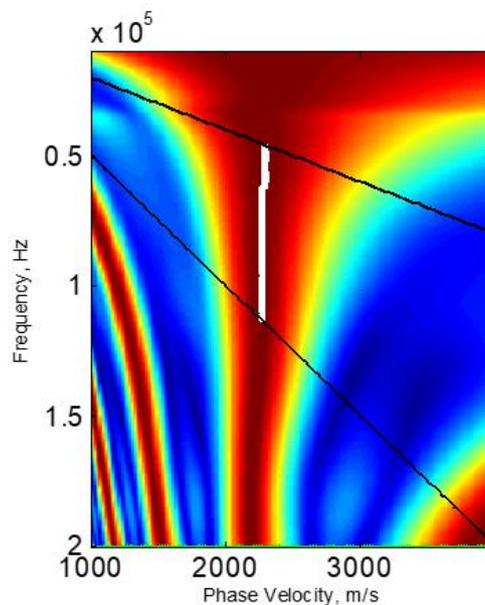


圖 4.15 偏移鋼筋 3 公分有鋼筋混凝土試體之頻散曲線圖

(鋼筋深度 5 cm)

(4) 擬真火損分層試體

擬真火損分層試體之設計是以模擬實際火災混凝土之受損情況如圖 4.16 (a)，此試體與其他試體之差異在於使用真實火焰讓混凝土之保護層直接受熱力破壞，進而使混凝土保護層隨火害深度產生隨溫

度變化之強度折減，再藉由本研究之導波檢測來探討擬真火損分層試體與無損及強度分層試體之間特徵的差異性。

擬真火損試驗後，試體表面保護層受火損後混凝土呈灰白色圖 4.16 (b)，左為未燒火區域，右為燒火區域，可明顯看出顏色有明顯差異；確認保護層已受損後，進行導波第一階段之量測，得以下速度-頻率域如圖 4.17 所示，由於試體表面至深層混凝土受損嚴重程度遞減，因此在速度-頻率域圖中可看出，介面波速偏慢，約 1700m/s，且隨深度增加波速持續變快。



(a) 試體燒火情況(試驗中)



(b) 試體燒火情況(試驗後)

圖 4.16 擬真火損試驗照片

將圖 4.17 獲得之頻散曲線進行剪力波速剖面反算，並將多個不同空間位置之成果以影像呈現可獲得之剪力波速影像如圖 4.18 所示，左為未受火損區域，右為火損區域，分析深度約 7 公分，可看到試體右側有明顯的波速差異存在；假定剪力波速折減幅度達 10% 為混凝土

之分層介面，如圖 4.18 之黑色線，位置 35 至 60 公分處之燒火範圍內，介面深度皆大於 3 公分且介面延伸至未燒火區域表面，但在位置 35 公分處有一低速區域深達 7 公分，對照圖 4.16 (b) 可吻合火燒嚴重之區域，後續可使用鑽心試驗再探討試體之內部情況。

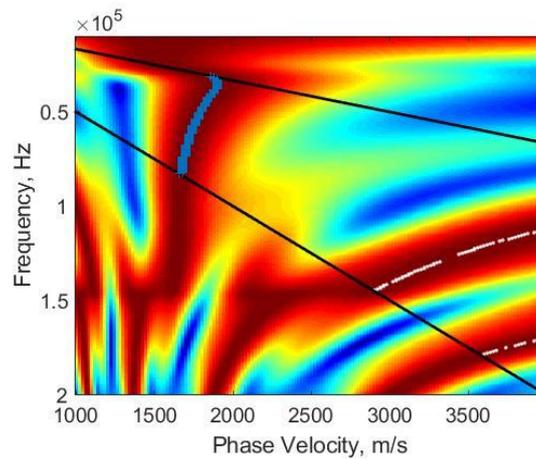


圖 4.17 受火害影響之頻散曲線圖

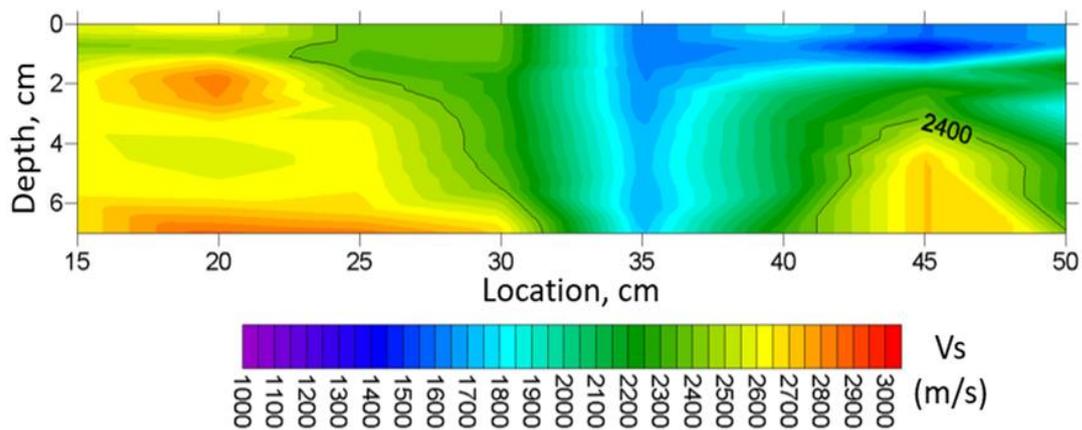


圖 4.18 火損分層試體位置-深度之波速圖

第三項 握裹力傷損段判釋方法

在導波量測應用於鋼筋混凝土構造物火害後握裹力傷損調查之

應用上分為兩階段，第一階段為判識火害傷損深度是否超過保護層範圍，若火害深度超過保護層，此時可設定火害已侵入鋼筋與混凝土之介面，則可進入第二階段，進一步檢視是否有握裹傷損之情形。在握裹力傷損調查的部分，透過頻率域、時間-頻率域、速度-頻率域的能量變化關係，在本研究之初步結果特徵因會出現在震源相對位置 10 公分之接收器，可由此判斷鋼筋-混凝土之介面是否有產生握裹傷損之特徵。

(1) 握裹力無傷損之特徵

在第一階段之分析過程以頻散曲線圖與位置-深度之波速圖判斷其受損深度超過鋼筋後，則以時間-頻率域圖判識有無握裹之傷損特徵，在無握裹傷損之鋼筋混凝土會顯示特徵如圖 4. 19 中可見能量集中於圖型中部(混凝土)，且能量未因傷損而消散，呈現水滴狀。

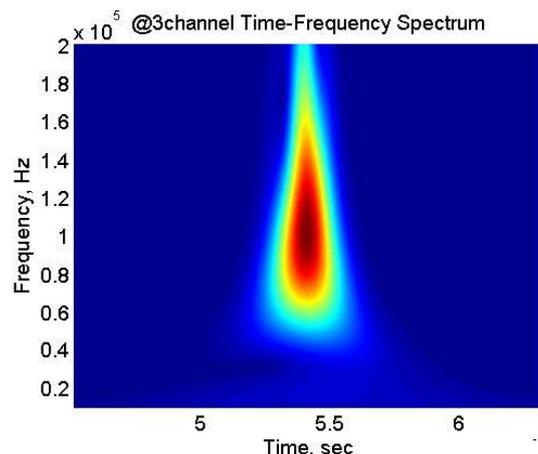


圖 4. 19 握裹力無傷損段試體之速度-頻率域圖

(2) 握裹力有傷損之特徵

接續初步判斷，在保護層受損超過鋼筋並產生握裹傷損之情況下，會產生圖 4. 20 之特徵，其頻率在 100kHz 能量會呈現部分消散，而 40~100kHz 產生能量集中之情況(如圖 4. 20 框選處)，其時間-頻率域圖之整體形狀類似靴子狀。

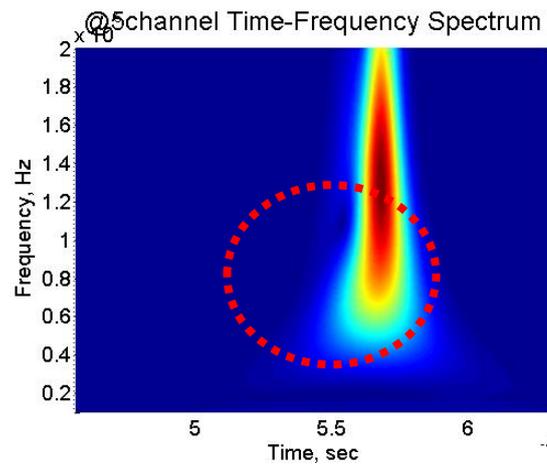


圖 4. 20 握裹力無傷損段試體之速度-頻率域圖

第三節 火害資料庫系統建置方法

為有效管理火害資料並為後續推廣期後由各使用者透過雲端傳送資料，將目前僅有研發團隊進行火害應用資料收集之情況拓展成眾多火害相關人員團體共同累積火害應用資料，有必要建立雲端/線上資料庫系統進行管理之工作。就現階段之目標，此資料庫系統之主要目標是其能協助有效透過雲端進行火害資料收集，並具有未來擴充性。在此主要目標下，配合實際使用需求，提出資料庫系統建置概念說明於以下各項。

第一項 權限

為有效管理資料庫內容，並避免不當之數據影響後續應用分析成果，因此將透過權限的差異進行功能上的使用管理，目前規劃分作兩等級之權限，分別是管理級以及使用級。管理級所針對的對象是建研所以及研發單位，具有使用全數功能之權限，而使用級所針對的對象是與建研所合作之合作單位。

第二項 功能

就功能面上，此資料庫系統基本涵蓋有三個部分，分別是資料登錄、資料試算以及資料下載(如圖 4.21 圖 4.22 所示)，根據權限的不同，各功能中可使用之項目將有所不同，分別說明如下：

1. 資料登錄：

在管理級權限下，在此功能中可進行人員新增/編輯以及資料新增/編輯，但使用級權限僅可新增資料或是編輯該登入帳號之資料；此外，在新增/編輯資料的欄位中，管理級權限可進行所有室內試驗以及現場量測之資料輸入，但使用級權限僅可針對剪力波速、壓縮波速、燒失量預估火場最高溫度以及鑽心強度進行新增/編輯。而在前述量測資料或是量測條件之輸入之外，量測所獲得之剪力波速波形以及壓縮波速波形亦為本研究的重要資料收集對象，因此會另採用資料上傳的方式將其統整在一個資料夾中，而此資料夾的另一個功用是將來將可作為與量測硬體設備回傳資料的鍵接點，將來量測硬體設備升級為具備聯網功能後，對於量測的資料將可雲端推送至本資料庫中，做為未來不同人工智能分析的基本資料。

2. 資料試算：

本研究工作有一部分重點在於透過持續增加火害剪-壓波速比的資料進行人工智能分析的預測式更新，現階段在量測硬體上尚不易達到此目的，且可能增加量測硬體對於主機運算能力的需求，因此透過此雲端系統是為較佳的過渡管道。所有的使用者只要能夠透過波速量測的設備獲得現場的剪力波速以及壓縮波速就可透過此功能獲得目前最新的評估式進行火場狀態(火場最高溫度以及強度折減比例)

的估計。

3. 資料下載：

如前所述，此資料庫之主要目的在於資料收集，此些收集所得之資料將用於對火害狀況的評估上，因此透過此功能將可把收集至資料庫內的資料根據需求下載進行進一步的分析使用。

為便利此資料庫之使用，此資料庫系統將以跨平台之方式進行操作介面之程式編撰工作，利用一般之網路瀏覽器即可進行瀏覽。

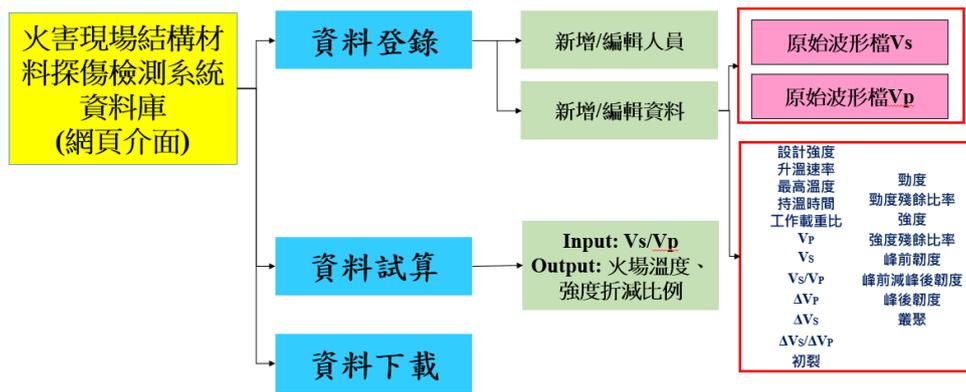


圖 4.21 火害資料庫系統規畫概念圖(管理級權限)

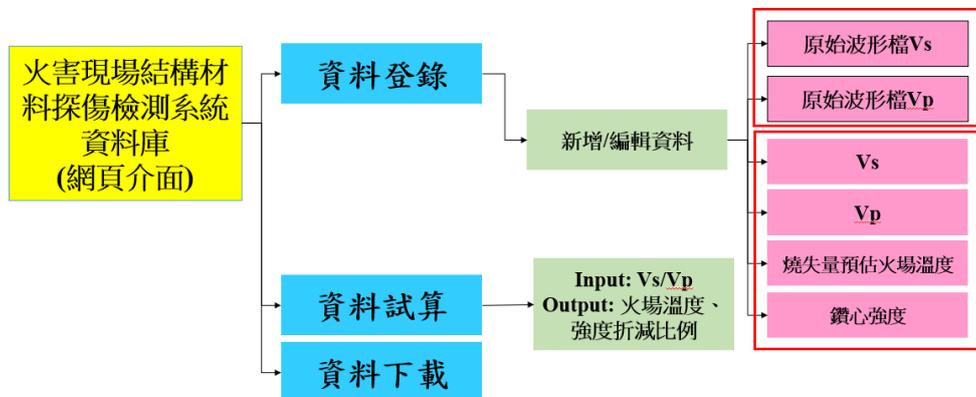


圖 4.22 火害資料庫系統規畫概念圖(使用級權限)

第三項 資料庫建置成果

根據前述兩項資料庫建置規劃，本研究採用微軟發展之免付費 Microsoft SQL Server 進行資料庫建置，為便利此資料庫之使用，前述之功能介面以跨平台之方式進行操作介面之程式編撰工作，利用一般之網路瀏覽器即可進行瀏覽，透過 ASP.NET 進行資料庫應用之程式撰寫。本系統以專管人員使用為目標進行系統操作頁面之設計，設有登入帳號。

一進入系統操作頁面後會出現使用者登入的畫面(如圖 4.23 所示)，根據不同的登入權限，將會進入不同的頁面。當使用管理者之權限登入後，將進入管理者權限制操作頁面(如圖 4.24 所示)，預設將直接進入使用者管理之頁面，在此頁面中可查詢、編輯以及新增使用者；若欲進行資料管理只需點擊頁面上方資料管理及上傳之分頁即可進入資料管理之操作頁面(如圖 4.25 所示)，於此頁面中可查詢、新增、修改資料庫中之資料，另外可上傳 V_s , V_p 之波形檔案做為未來進一步直接對波形進行人工智慧分析的資料庫內容，而若欲下載資料，只需點擊資料下載的按鈕即可下載以 CSV 格式儲存的資料庫全數資料。

使用者登入

帳號

密碼

圖 4.23 火害資料庫系統登入畫面

使用者管理 資料管理及上傳

查詢條件

使用者帳號 權限等級

姓名 所屬單位

使用者清單

#	操作	使用者帳號	權限等級	姓名	所屬單位
1	<input type="button" value="✎"/> <input type="button" value="✖"/>	Mark	合作單位	王小明	XXX
2	<input type="button" value="✎"/> <input type="button" value="✖"/>	Jacob	建研所、研發單位	陳大華	YYY
3	<input type="button" value="✎"/> <input type="button" value="✖"/>	Lane	系統管理者	蘇大仁	ZZZ

圖 4.24 火害資料庫系統使用者管理操作頁面(管理者權限)

圖 4.25 火害資料庫系統資料管理與上傳操作頁面(管理者權限)

相較於管理者，經由使用者權限登入之帳號，登入後的操作畫面如圖 4.26 所示，使用者之權限預設之頁面是進入資料管理頁面，使用者可查詢、新增、修改以及下載自己之資料，亦可上傳 Vs 以及 Vp 的波形檔案。

圖 4.26 火害資料庫系統資料管理與上傳操作頁面(使用者權限)

第四節 導波技術導入現有火害探傷檢測系統之評估

第一項 導波量測所需之量測系統

根據現有室內量測系統加以考量其活動性，導波量測系統主要包括震源、振動感測器(接收器)及訊號擷取器等，茲分別說明如次：

1. 震源：

用以製造人造震動，有鋼珠錘、衝擊錘以及超音波探頭等選擇，就本案所欲應用之火害混凝土而言，根據前期室內試驗之測試，採用鋼珠錘或是衝擊錘會是較佳的震源。

2. 振動感測器：

用以接收震源所產生的混凝土表面振動，能將振動轉為電壓值輸出。對於振動感測器之選用需考量其所接收的振動型式以及響應頻率，常見的振動感測器有位移式、速度式以及加速度式，依照不同的振動頻率需求而有不同的適用型式，根據前期室內試驗之測試結果顯示，採用加速度式可有較佳之量測成果；而由於本研究在導波的應用分析上採用多頻道分析法，因此在振動感測器上有多個的需求，根據過去經驗，以不少於 6 個的量測成果較佳。而由於此處採用加速度規，各個振動感測器需要額外的直流電供應以及訊號放大器。

3. 訊號擷取器：

用以紀錄接收器所接收到的地表振動訊號。在選用上此擷取器應要考慮其解析度以及其可提供之擷取頻率，解析度是用以描述該擷取器所能收錄之最小電壓反應，而擷取頻率是用以描述所能收錄訊號之最快速度，在使用上普遍希望可有較大的解析度以及有較快的擷取頻率，但隨著解析度的增加其擷取頻率將受到較大的限制，且在儀器費用上亦會明顯的增加，因此，為能在最經濟的情況下有最佳的擷取效果，本團隊將依火害混凝土之剪力波速特性加以選擇適用之訊號擷取器。

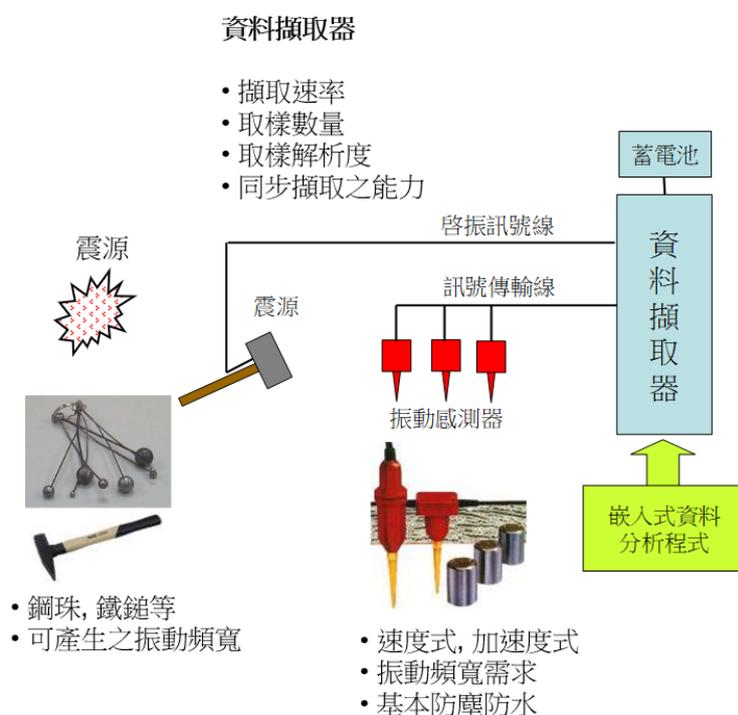


圖 4.27 導波量測系統架構圖

第二項 導波量測系統與現有火害探傷檢測系統之比較

在前項對於導波量測系統需求的理解後，接著將導波量測系統與現有火害探傷檢測系統進行比較，以利進行導入的系統評估。由文獻中已知火害探傷檢測系統的各項不同硬體設備，為更便利比較兩者的差異，將其以硬體需求進行列表，如表 4. 11 所示。由表中可見，導波系統所需要之硬體規格與數量上皆較既有檢測系統為高，對於推廣時所需建置基礎硬體時會有更高的經費需求；若將兩者結合，由表中可知目前主要差異是在於震源處，對於既有檢測系統來說，其需要透過函數產生器驅使超音波探頭產生震動。綜合兩者，對於將導波量測導入之量測系統硬體規格應具備有震源(超音波探頭、函數產生器、鋼珠錘/衝擊錘)、振動接收器(6 個加速度規、6 個放大器、6 個直流電供應器)以及具有 6 頻道的動態資料擷取卡。

表 4. 11 既有火害探測檢測系統與導波系統比較表

	既有火害探傷檢測系統	導波系統
震源	超音波探頭 x 1 函數產生器	鋼珠錘/衝擊錘
振動接收器數量	2	>6
放大器	無(內建)	需要，數量同接收器
直流電供應器	無(內建)	需要，數量同接收器
動態資料擷取器	雙頻道	需至少 6 頻道

第三項 硬體成本經費估算

由前項整理比較之結果，可知欲將導波量測導入目前既有已開發之系統至少需要振動接收器、放大器、直流電供應器以及動態資料擷取器，此外，由於導波量測的資料分析需要進行波場轉換以及時頻分析，有較大的計算量需求，需要較佳的作業系統，另一方面，考慮外出施作的可攜帶性以及工作便利性，應有整合性機箱與顯示螢幕。綜合此些必要性硬體，並且考量各硬體所需要的性能規格，載目前組構系統雛形的前提下，設備成本估算目前以穩定性以及整合性較良好的美國國家儀器所生產之硬體進行估算，在不考慮軟體開發的情況下，就硬體本身之成本為 88 萬 2 千 4 百元，詳細單價與系統型號如圖 4.28 及表 4.12 所示。其中，機箱是作為整合不同硬體之用；PXI 控制卡是作業系統，如同電腦之角色，在此規劃之型號是採用 windows 10 作為作業系統；資料擷取卡是作為訊號擷取使用，主要是連接接收器，在此規劃之型號其解析度可達 16 位元，並有 9 個頻道；接收器與放大器皆是本研究所使用之型號。



圖 4.28 導波量測系統主要硬體規劃

表 4.12 導波系統硬體單價分析表

項次	品名	單價	單位	數量	複價	備註
1	機箱	46,500	台	1	46,500	NI PXIe-1031
2	PXI 控制器	168,600	張	1	168,600	NI PXIe-8840
3	資料擷取卡	193,500	張	1	193,500	NI PXI-5105
4	可攜式顯示器	9,000	台	1	9,000	ASUS ZenScreen 16"
5	直流電供應器	50,000	台	1	50,000	安捷倫
6	電池	800	顆	1	800	車用電池
7	接收器	30,000	顆	6	180,000	PAC WD FO79
8	放大器	39,000	台	6	234,000	PAC 1220C
總計					882,400	

第五節 桃園迴龍案場外業量測

本案例地點為桃園市迴龍某工廠 4 樓及 6 樓鋼筋混凝土建物遭鄰房火災波及延燒 5 小時，現場實際狀況如圖 4. 29 火害案場實際情況與 RC 之燃燒情況所示。此建物為 RC 結構，延燒狀況相當嚴重，多處鋼筋混凝土之保護層已完全破壞露出鋼筋。現場火源位置及鑽心點位之平面圖如圖 4. 29 所示本研究團隊協同新北市土木技師公會至現場會勘，先以目視對火害後結構物做定性之傷損度判識，並於 RC 結構部分鑽心取樣有受火害之試體如圖 4. 30 之燒失量及抗壓點位。而本研究團隊以 A1220M 乾點式超音波脈衝量測儀及目前開發之火害探傷檢測系統軟體之雛形，配合 50kHz 乾點式超音波接收器及 100KHz 乾點式壓力波接收器，使用間接量測上述鑽心點位及附近 3 至 6 點位，並與當時之土木技師公會合作直接量測鑽心試體之剪-壓波速比，量測結果如圖 4. 32 圖 4. 33 所示。結果顯示結果顯示剪-壓波速比隨火源距離越遠而降低，呈現負相關性(除了少數因為悶燒較為嚴重之部分)。

最後用本研究之直/間接量測之 V_s/V_p 與實驗室鑒定之燒失量推估最高溫度與離火源距離比較，可以明顯的發現燒失量（重量敏感）相較於本研究之剪-壓波速比（體積敏感）不敏感許多（如圖 4. 34 圖 4. 31），再者鑽心試體之抗壓強度平均只剩下 158.8 kgf/cm^3 ，以強度推估最高溫度之範圍在 100 至 450°C 之間，數值不合理也不實際。



圖 4.29 火害現場實際情況與 RC 之燃燒情況

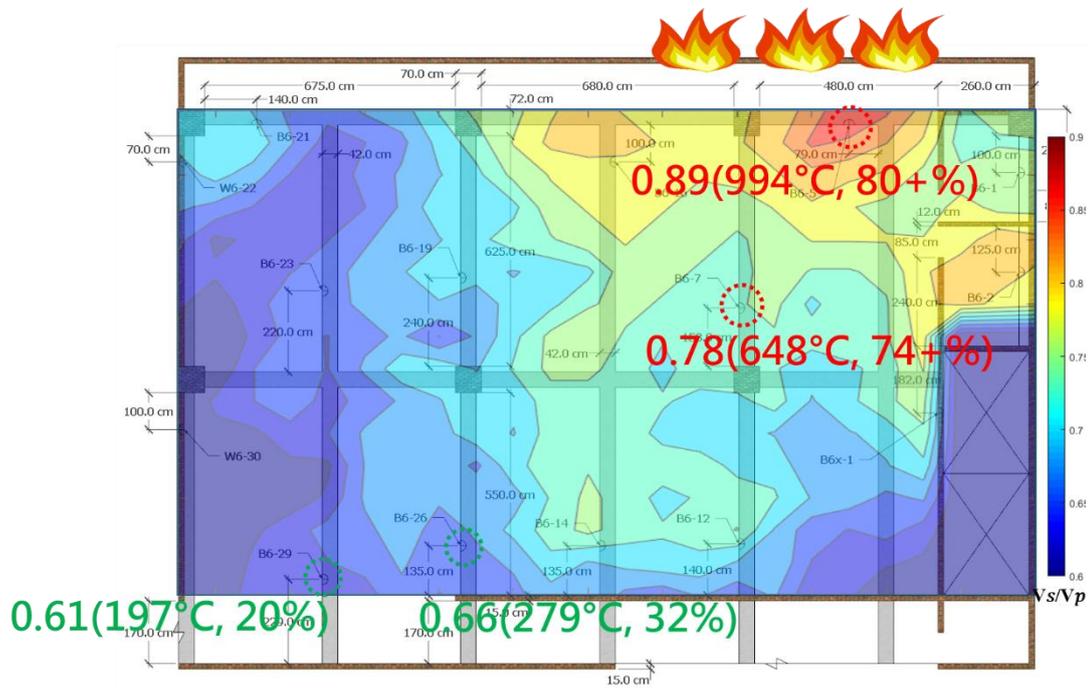


圖 4.30 現場火源位置及鑽心點位之 4F 平面圖

註：Vs/Vp(推估最高溫度，及強度折減)

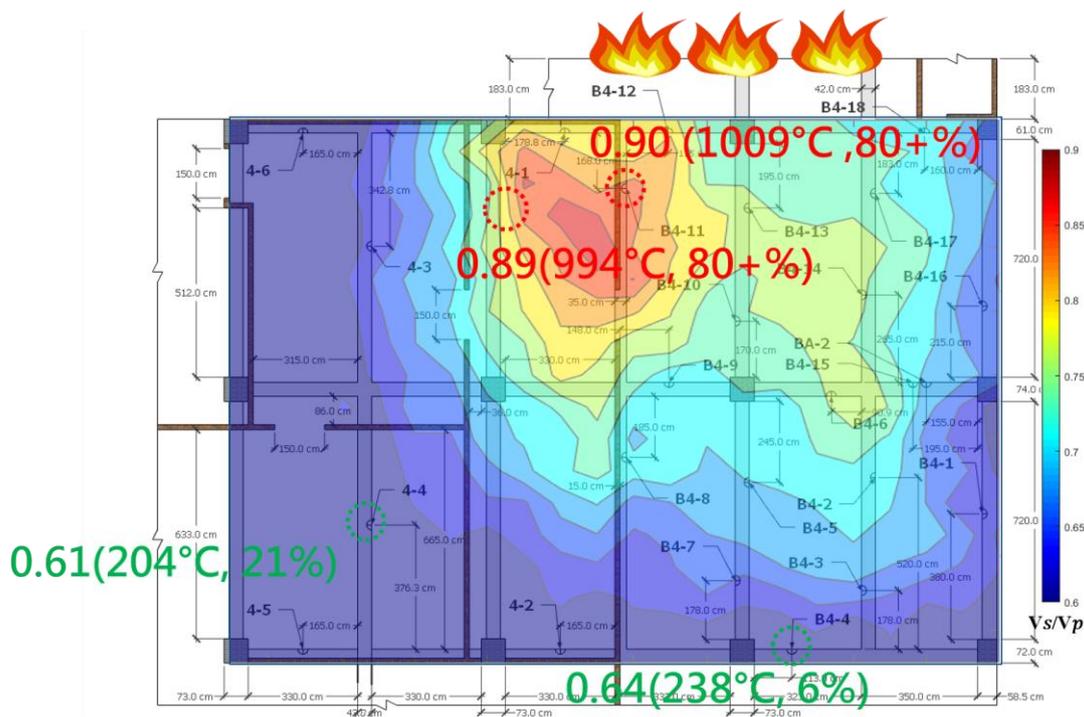


圖 4.31 現場火源位置及鑽心點位之 6F 平面圖

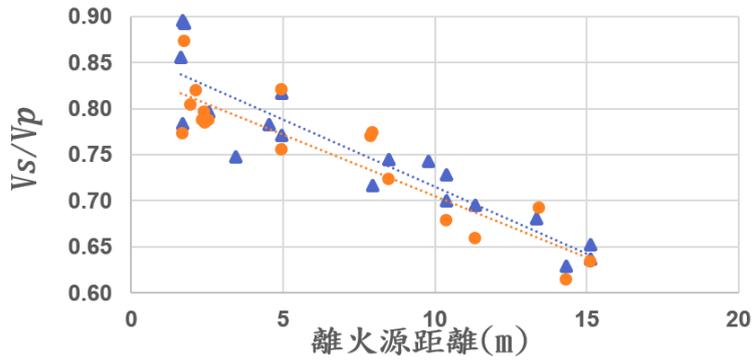


圖 4.32 4F 直/間接量測之 V_s/V_p & 火源距離

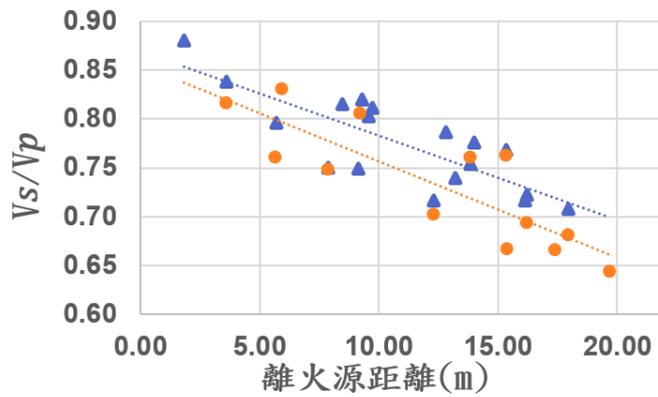


圖 4.33 6F 直/間接量測之 V_s/V_p & 火源距離

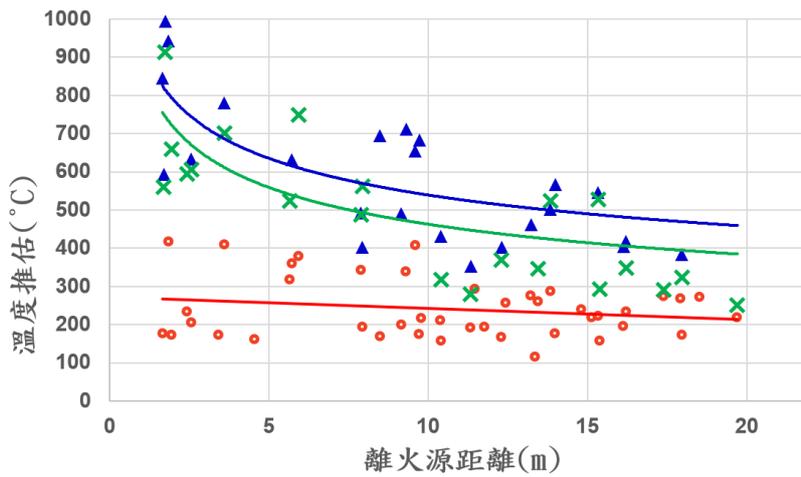


圖 4.34 本研究以 4F、6F 直/間接量測之 V_s/V_p 與實驗室之燒失量推估最

高溫度兩者與火源距離之比較

以下圖 4.35 圖 4.36 為預測模型推估外業現場數據，使用本團隊研究研發之剪-壓波速比推導出現在混凝土曾受過火害最高溫度迴歸線與混凝土強度折減迴歸線，使用剪-壓波速比推估外業之火害最高溫度。再使用內業資料為基準並當作訓練資料使用，將外業之剪-壓波速比帶入預測模型訓練後得出結果，並將本團隊推估之火害最高溫度與混凝土強度折減對照使用 Machine Learning 常用軟體 WEKA 預測預估值做比對，並將結果使用圖 4.35 在下列呈現。再使用四種預測模型做外業受火害最高溫度的推估時，在原始工程統計迴歸、線性與 SMO 預測結果呈呈現相似的狀態，而類神經則會在剪-壓波速比大於 0.75 時產生較為平緩之曲線，而 MSP 則維持分段式線性常數結果。

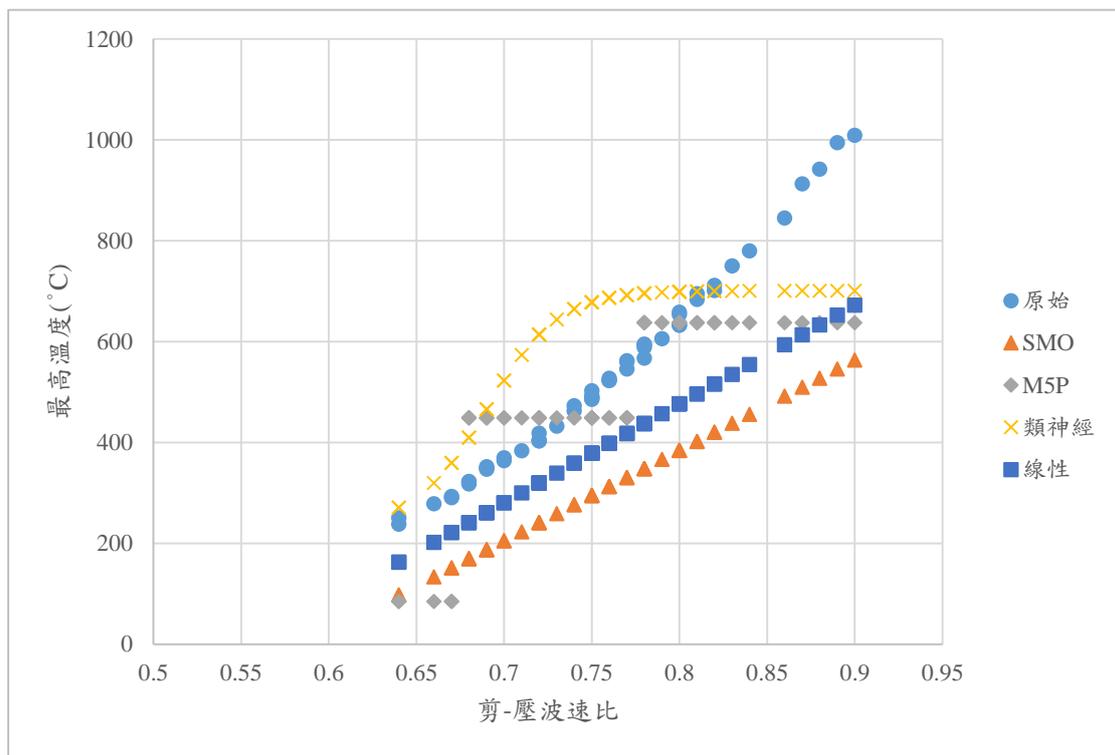


圖 4.35 使用四種預測模型最高溫度預測結果

後續本團隊使用剪-壓波速比推估外業之火害後混凝土之強度折減比例，再使用內業資料為基準並當作訓練資料使用，將外業之剪-壓波速比帶入預測模型訓練後得出強度折減比例，並將本團隊推估之混凝土強度折減對照使用 Machine Learning 常用軟體 WEKA 預測預估值做比對，並將結果使用圖 4.36 在下列呈現；使用四種預測模型做外業受火害混凝土產生強度折減推估時，無論是使用原始工程統計迴歸、SMO 與線性預測模型時皆產生高度相關之結果，而在類神經的預測模型中剪-壓波速比於 0.8 開始產生平滑之曲線，再 M5P 則維持分段式線性常數結果。

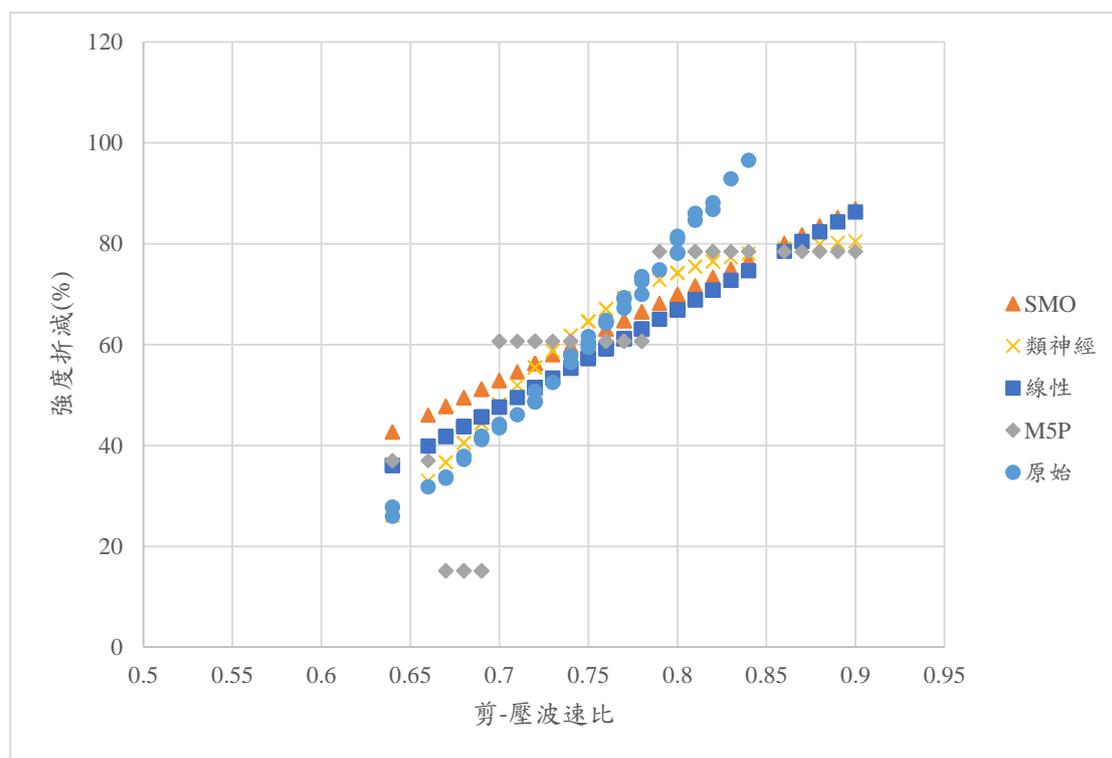


圖 4.36 使用四種預測模型強度折減比例預測結果

第五章 結論與建議

第一節 結論

第一項 人工智能於火害數據之分析

- (1) 有鑑於數據有限，本研究在進行人工智能應用時，先行針對 39 個火害相關變數，分析 129 筆數據，確認因果關聯性，而後再由高度相關之變數進行人工智能迴歸分析。
- (2) 因果關聯分析結果顯示剪力波速、壓縮波波速、剪-壓波速比與火害最高溫度、強度折減呈高度或中高度相關。
- (3) 將剪力波速、壓縮波波速以及剪-壓波速比做為輸入，火害最高溫度與強度折減比例做為輸出進行人工智能評估模式建構。
- (4) 人工智能評估模式使用開源軟體 WEKA 程式做預測模型與推估，共使用支援向量機、線性迴歸、類神經網路以及決策樹 M5P 演算法進行評估。
- (5) 人工智能評估模式結果顯示，在火場最高溫度之推估上採用支援向量機演算法有較佳之推估成果；而在混凝土強度折減比例之推估上，支援向量機演算法所得之結果近似且較佳但是此演算法有一較大問題在於其無法規範強度折減的範圍(在支援向量機以及 M5P 的演算法中亦有相同狀況)，如此使得推估折減比例有低於零的情形存在，此為不合理現象。但整體而言，採用二次式之工程統計所得結果在現階段仍優於採用人工智能之推估結果。
- (6) 未來評估預測模型之好壞標準，現行評斷標準為相關係數、

平均絕對誤差與均方根誤差之高低判識，未來建議可以融成一項複合式指標。

第二項 以導波量測握裹力傷損判識法建立

- (1) 本研究提出兩階段式之握裹力傷損判識調查方法，第一階段採用多頻道表面波量測獲得混凝土剪力波速影像剖面，進行火害傷損深度判斷，若傷損超過預估之保護層厚度則進行第二階段之分析；第二階段分析為採用時頻分析進行特徵分析，判斷是否有握裹傷損特徵存在。
- (2) 火害傷損深度以剪力波速之下降比例為判斷準則，採用調查深部之剪力波速平均值作為火害前剪力波速，整體剖面中剪力波速下降超過 10% 處列為傷損處，若列為傷損處由表面往下延伸且具有連續性，則顯示為火害造成。此分析有隨著深度降低解析度之限制，根據室內試驗測試在深度 5 公分處之誤差約高估 1 公分，位保守側。
- (3) 火害傷損深度調查之資料會受鋼筋影響，室內試驗顯示，避開鋼筋正上方 3 公分可有效降低鋼筋對受損厚度調查之影響。
- (4) 第二階段採用時頻圖做為特徵進行握裹力喪失分析，以距離敲擊點 10 公分處之波形時頻圖作為分析判識之特徵資料，當時頻圖出現類靴狀且突出處之頻率在 40-100kHz 間者即顯示握裹力有所喪失需考慮握裹力降低之影響。

第三項 火害資料庫系統建置

- (1) 本研究利用微軟免付費之 Microsoft SQL Server 建置雲端資料庫，並為便利操作，使用 ASP 進行操作介面建置，可採

用一般網頁瀏覽器即可遠端登入進行操作。

- (2) 為進行有效管理，對於資料庫使用之權限分為管理者與使用者，管理者為建研所以及本研究團隊，使用者為透過簽訂合作意向之合作廠商。

第四項 導波技術導入現有火害探傷檢測系統之評估

針對導波量測系統所需之硬體進行盤點，並將其與既有檢測系統分別針對接收器、資料擷取卡、放大器等硬體進行比對並分析所需建置成本，根據評估需求結果，整合後的量測系統之硬體需求成本估計為 88 萬 2 千 4 百元，若針對性商業生產可再進一步降低系統建置成本。

第二節 建議

建議一：AI 人工智能端

1. 後續須蒐集更多數量與變數之內業數據，須包含正常強度混凝土($f'_c=210$ 、 $f'_c=280$ 及 $f'_c=350$)以及更多階級之混凝土火害最高溫度($T_{max}=200^{\circ}\text{C}\sim T_{max}=800^{\circ}\text{C}$ ，每 50°C 階層漸進)。
2. 目前人工智能採用開源軟體 WEKA 進行分析，但以發展自有設備而言仍須自行建立演算法，並針對無法限制輸出值範圍之問題進行改善。
3. 針對大數據分析可以使用非監督式學習。使其預測法內自行尋找其特徵值與佔比權重，可使推估值更貼近現實情況。
4. 在此需求下應盡快建立資料庫雲端平台以及相對應之軟體設

備，以有效增加有效之數據量。未來雲端資料庫可以與韌體做結合與連線，使得量測資料可直接推播進入資料庫。

建議二：握裹力傷損之導波量測判識方法

1. 導波檢測之判識方法已建立，但仍屬定性之方法，建議後續可持續開發定量之評估方法，並進行實場測試以掌握在實場應用中可能面臨的問題。
2. 第一階段判識採用剪力波速影像圖受既有反算方法限制而使得深度解析度僅 1 公分，未來可針對此深度上解析度的提升進行進一步的改善研究。

建議三：導波量測系統建置

1. 本研究對導波技術導入既有設備進行之評估結果顯示整合具有可行性，建議未來可將其組建並發展儀控軟件，搭配網路連接可有效發揮以建置之雲端資料庫系統之功用。

附錄一 採購評選會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

項次	審查委員意見	廠商回應
1	軟體研發成果，預計有幾個實際案例的檢測？敬請補充。	年度目標為系統軟體研發及應用，預計至少有三處實際檢測案例，但仍取決於適法調查處所之提供(含相關校驗及檢核等)。同時持續執行室內試驗以增進精確度及可靠度，並作系統檢測驗證等；而人員培訓及相關規範依據，擬整合一項完備作業模式，並研擬系統軟體成果之操作手冊(標準作業程序)等；發展此系統在未來亦能夠使各執行單位於量測所得數據能夠回傳，作大數據式蒐整。此觀念不僅能讓供需兩端創造雙贏，可同時作為實測數據資料之持續性蒐集擴充，也可提供系統檢測精確度，此為軟體最終願景之一。於此年度完成可攜式之系統雛形，蒐集實際現場案例，將現場量測之數據與過去於內業(實驗室)所得之迴歸曲線作比對，以驗證其適確性。
2	現場檢測成果之誤差或可能爭議之預測和解決方式。	部分回應如意見問題 1 之回覆，預計爭議可能來自於內、外業之檢測環境之差別、儀器量測本身之校正及檢測人員之能力；解決方式為作內外業量測之比對、量測儀器之校驗及人員培訓等。
3	研究過程中，即可邀請可能使用對象一起參	本團隊持續與相關消防火調單位、建築師與技師公會等作後續推廣應用之結合。

	與，以利於後續技術移轉應用。	
4	請了解後續推廣應用的限制及相關法令規定。	相關技術推廣應用尚無強制性之法令規定，會納入研究內容及說明。
5	請確認能於本年度確實完成所有契約項目。	本團隊於此年度計畫會辦理數次工作小組會議及依計畫需求如質如期完成契約項目。
6	程式之輸入、分析及輸出應以實測進行查證其正確性。	研發之系統內容部分會作實測驗證，以查證其適確性。
7	請提出量測不確定度之評估參數、程序及評估結果。	依委員建議納入執行。
8	操作此套系統及結果分析人員其學經歷有無限制條件，須經那些項目之訓練，訓練時數及應否須經過 CNS13588 非破壞性測試人員資格之檢定及驗證。	本研究團隊後續會依相關規範研擬系統操作人員之限制等條件，以納入預期成果之作業手冊(或指南)。

附錄二 期中審查會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

審查委員	審查委員意見綜整	廠商統整回應
<p>I. 周建築師</p> <p>智中</p>	<p>1. 本研究案主要以”火災後”火害現場結構材料現場火害探傷之研究，建議接續其研究成果延伸至”火災時”火害現場結構材料火害探傷之探討。而後續將 AI 人工智能及導波試驗運用於”火災時”火害現場結構材料損傷，將更具獨特性、創新性，以利申請專利。</p>	<p>感謝建築師建議，在火害過程中量測會因救災、現場高溫以及現場因滅火之水淬的問題，現場量測會有很大的困難及不確定性，因此目前已災後量測為主。</p>
	<p>2. 結構材料的火害損傷因子，主要有：混凝土保護層厚度、握裹力、鋼筋等…，有關”鋼筋”部分，建議以”鋼筋強度”為主，而非鋼筋有無。</p>	<p>目前研究鋼筋有無是因為要跟”無鋼筋”和”有鋼筋且有握裹傷損”做出比對來判斷其有無握裹力傷損，並非純粹調查有無鋼筋。</p>
<p>II. 張教授</p> <p>大鵬</p>	<p>1. 章節編列可以使用舉例 1.2.1 之方式撰寫，較符合營建之傳統；呈現方式還有文獻對照需要改進。</p>	<p>感謝教授提醒，目前協同研究案依主任秘書提醒之後會修正成委託研究案之格式。</p>

	<p>2. 混凝土受火害後強度與鋼筋握裹力關係宜在研究中說明。</p>	<p>感謝委員之提醒，會將”受火害後強度與鋼筋握裹力關係”在後續的報告做更詳細之描述。</p>
<p>III. 嚴委員 定萍</p>	<p>1. 火災狀況非常複雜，尤其是破壞傷損以後狀況千變萬化，用導波來判斷鋼筋與混凝土之握裹傷損問題是很先進的技術。導波是否能應用於鋼架構之火害傷損的判別上？</p>	<p>感謝委員之提醒，團隊目前都已調查鋼筋混凝土之建材為主，此建議可加入未來研究項目討論。</p>
	<p>2. 有許多實驗儀器已年久，在多次量測後有可能會產生機械誤差，是否需要校正儀器參數？</p>	<p>感謝為委員建議，後續會新增在標準作業程序中並使用複數探頭減少多次量測的機械誤差。</p>
<p>IV. 樂副組長 中正</p>	<p>1. 火害資料庫與使用導波來檢測結構傷損是新穎的。建置這個資料庫火害破壞的影響能輸出之成果是否只有強度與勁度折減，能否輸出變形、位移、開裂位置之類的影響。</p>	<p>在使用導波檢測延-脆性材料(鋼筋混凝土)介面是否有產生握裹傷損判識的部分，能從訊號上確實沒辦法分辨是否有受到火害，但能從訊號上得知它有沒有握裹損失，強度是否有折減。但在握裹力判斷的部份之前我們還有加上一個分辨方式，透過探測脆性材料(混凝土)中混凝土有無產生變化來觀察它從表面到內部的判識圖形，求得火害受損的深度。我們在第一階段得</p>

		<p>知受損深度並沒有那麼深，就沒有那麼需要去判斷有沒有握裹喪失這件事情，因為其受損就並非火害所造成的。</p>
	<p>2. 現場實證可從檢定方獲取現地試驗資料，這樣對人工智能判識能獲得更高的精度。</p>	<p>感謝組長之建議，針對目前的成果，我們會再與技師公會和消防單位溝通，爭取進入火災案場量測數據的機會，同時內業試驗會再繼續進行研究，提升數據數量。</p>
<p>V. 張教授 清雲</p>	<p>1. 判斷混凝土強度折減通常都使用抗壓強度試驗與燒失量試驗為主，從實務界來看採用非破壞檢測是有其必要性。實務界是否能接受還需要後續討論。</p>	<p>感謝委員建議，針對目前的成果，在實務推廣應用上我們會與建研所及技師公會溝通及推廣。</p>
	<p>2. 人工智能需要大量的數據分析，但我們試驗數據好像不足以進行大數據分析。在實務上非破壞技術檢測是否也可以使用在新建之建物的現場？</p>	<p>團隊於本案配合技術之推廣建置雲端資料庫，藉由相關單位之實測應用，上傳數據至雲端藉以擴增案量。</p>
	<p>3. 導波量測握裹力之損失，試驗室試驗法建議採傳統加壓灌注環氧樹脂檢測驗證。</p>	<p>目前導波量測之握裹傷損試體是以氣泡紙隔開鋼筋與混凝土，人工製作有傷損之狀態，後續會有擬真(火燒)之狀況，會將委員之建議納入考量。</p>

	4. 報告書第 65 頁，第一、二段重複部分請刪除。	謝謝委員之提醒，以確實刪除多餘的段落。
VI. 李教授 訓谷	1. 在資料庫的部分樣本數有增加，也有找出關聯性，但要如何做人工智能，如何做大數據分析？在預測的部分數據量還是稍嫌不足。	感謝教授之提醒，一個是監督式學習，一個是非監督式學習，後者可能最少需要上萬筆的資料，在目前來看資料量還是不足夠的，目前只能使用監督式精確學習，提升結果輸出的精準度。
	2. 導波量測標準作業程序很重要，附錄確實有很多標準作業程序，但都不是很完整，建議可參考 ISO 17025 之規範來訂定標準作業程序。	感謝教授建議，在現場量測標準作業程序團隊中已有建立，會參考建議再做部分調整更嚴謹訂定。
	3. 有關於導波的部分有很多新穎的判斷方式，像是頻散圖，有別於傳統單一的分散數據，這裡有很大的突破，特別是利用 AI 的圖像辨識有很大發展的潛力。	感謝教授的建議，團隊會將其納入未來研究之選項中並持續努力。
VII. 中華民國全國 建築師公會	1. 使用導波來檢測是非常先進的，但必須要有相當大量的數據與破壞試驗進行比對，才能讓使用者有信	感謝建築師公會建議，針對目前的成果，導波試驗皆有搭配混凝土抗壓試驗做強度的比對，並且團隊會持續增加導

	心。	波試驗之內業及外業的數據。
VIII. 雷研究員 明遠	1. 使用導波檢測對於火害現場受損成程度判識是有幫助的，但是否也可以使用在火害後補強之品質檢測？	感謝研究員提醒，導波檢測也可應用於後續結構補強檢測，並比對補強前狀態，提升品質。
	2. 希望在結論能夠加強，畢竟是非常具有潛力的實驗，並補上推廣應用方式與普及。	本題與 V.-7.共同回答。
IX. 蔡組長 綽芳	1. 在非破壞檢測的部分希望能加強辦理技術移轉。	如組長建議，團隊後已與建研所之相關同仁研議相關作業。
X. 鄭主任秘書 元良	1. AI的部分數據量不夠，若在將來數據量足夠，要如何使用 AI 分析？	感謝委員提醒，AI 的應用有很多，像主席您說的應該是類神經網路的應用。需要先建立類神經網路的結構，雖然現在已有通用性的可以使用，但在未來要突出效果還是需要修改內部架構，才能最佳化。

附錄三 期末審查會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

審查委員	審查委員意見	廠商回應
I. 曾教授 俊達	1. 有關於期末報告題目與關鍵字似乎有點不相符，希望研究團隊多加注意。	感謝委員的建議，後續團隊會再做相關之討論並做修正。
	2. 請問 AI 人工智慧的部分數據內業 64 筆，文獻 104 筆，是否足以評估其推論之準確性？還請研究團隊說明。	數據在內業無法達到大數據分析所需要的量，故團隊會利用後續雲端資料庫的資料擷取功能取得大量外業數據資料後，持續執行相關的人工智能分析，使預測結果更加貼近現實情況之準確性上升。
	3. 在 AI 人工智慧使用參數的部分像強度折減、最高溫度等重要數據之間關係是否可說明，在研究報告看了許多科學、技術上的數據在轉換到實際應用時可能會有接軌的問題。	本團隊有將數據所使用之參數由相關係數與相關性進行比對分析，挑選出參數之間達到高度相關的參數再進行 AI 數據分析及模擬。在由研究轉換到實際應用上，已經有外業數據實際量測進行比對分析。
	4. 題目之結構材料看起來很不錯，平常之結構材料有很多種，像木構、鋼構、混凝土，但研究內容好像是針對鋼筋混凝土，建議可以做題目之修正。	因台灣建築材料有許多種，但是其普遍最常見的材料為鋼筋混凝土，故本團隊先對鋼筋混凝土進行研究剖析，在後續應用上如果有其他建築材料亦可進行比對研究。

	<p>5. 建議實驗計畫之內容(使用軟體)清楚呈現在報告書內，後續才能依據數據之評估方式與流程，方便內政部建築研究所推動及實際應用。</p>	<p>感謝委員之提醒，後續團隊會再新增軟體使用介面與方法說明，並在後續計畫中規劃出 SOP 方便後續推廣與應用。</p>
	<p>6. 建議後續研究計畫宜詳列實驗計畫內容，以強化實驗數據驗證評估模式與實際之應用。</p>	<p>感謝委員之提醒，團隊將會將建議納入後續研究再做討論。</p>
<p>II. 樂副組長 中丕</p>	<p>1. 後續之檢測與大數據評估需要很龐大之資料庫要處理，在這研究案已經提出火害資料庫這個系統與架構，但是未來此系統要如何操作與持續擴充？是否能提出一方法放入建議事項。</p>	<p>後續團隊會再新增軟體使用介面與方法說明，並在後續計畫中規劃出 SOP 方便後續推廣與應用，並在未來持續擴充方面先提出建議事項並持續完善功能。</p>
<p>III. 嚴委員 定萍</p>	<p>1. 本案在國內相關文獻之蒐集上非常詳實，但在國外的部分近年資料少，建議增加國外相關研究成果作分析、檢討，可做為後續申請專利之佐證。</p>	<p>感謝委員建議，在 AI 人工智能分析的數據中亦有加入國外文獻之數據，團隊會將建議納入後續研究再討論，以利專利申請發明之成果報告提出。</p>
	<p>2. 在火害現場結構材料探傷檢測系統的軟體評估方法，運用到一些軟體做火害的相關性分析研究，成果良好，建議再增加國內火場傷損之測試評估數據，作為以後國內建管單位之參考依據。</p>	<p>團隊會利用後續雲端資料庫的資料擷取功能取得大量外業數據資料後，持續執行相關的人工智能分析，使預測結果更加貼近現實情況之準確性上升。</p>

	<p>3. 導波技術的能量判識應建立方法，經費先排除在外，若國外導波分析方式已成熟，後續研究將事半功倍，若研究團隊要再精進，可在申請下一期之研究。</p>	<p>感謝委員建議，團隊會再後續查詢相關的國外導波量測分析方法並與團隊之研究成果比較分析。</p>
<p>IV. 張教授 清雲</p>	<p>1. 導波量測方法，主要是探討鋼筋握裹力喪失段判識方法建立，對於混凝土也是非常重要的。營建署有依照規定：發生大於 4 級之地震後，對於 7 日內新澆築之鋼筋混凝土需要做評估，其中最重要的部分是在於鋼筋握裹力的部分難以做評估；目前現行採用方法為在混凝土表面上鑽孔，灌注環氧樹脂，觀察壓力有無下降，來判斷握裹力有無喪失。若研究團隊之新導波判斷方法成熟，不僅限於火害，也可應用於地震受損之檢測。</p>	<p>現階段現場無論判識火災嚴重程度以及震災之方法皆會破壞現場結構性，本團隊研發出超音波量測之剪-壓波速比可以在現場就得出混凝土的強度折減比例，相關的研究成果可以推廣至非常多方面應用，像是地震災害導致混凝土受損，或是老舊房屋混凝土強度折減快篩都是未來推廣方向之一。</p>
	<p>2. 人工智能之判斷主要還是在於數據量，若數據要多，軟硬體的应用一定要廣，但畢竟不是每位技師、使用者都會使用，如何配合應用端建議研究團隊在推廣之餘做軟硬體操作之標準作業程序，檢測方法才能推廣開來。</p>	<p>感謝委員建議，後續團隊會再新增軟體使用介面與方法說明，並規劃出標準作業程序方便後續推廣與應用，並在理論以及實際操作推廣多加努力。</p>

	<p>3. 建議在應用端現場檢測的部分可訂定出檢測費用，讓當事人知道說增加此項目大概要多少費用；在後續推廣部分建議可發函給各鑑定單位說明此新創方法，並說明相關之費用。</p>	<p>感謝委員建議，檢測之技術移轉與推廣團隊已經持續與建研所討論協調，並提議幾個方案給長官們選擇討論其可行性，將於後續擬訂協助量測費用與相關使用的收費標準。</p>
	<p>4. 在雲端資料庫管理可新增使用者協議，讓使用者明白其操作方式，後續建議也可上傳燒失量數據持續新增、比對。</p>	<p>後續團隊會再新增軟體使用介面與方法說明，並規劃出 SOP 方便後續推廣與應用，至於未來上傳數據的選擇增加，團隊會在後續持續開發並相對應比較。</p>
<p>V. 李教授 訓谷</p>	<p>1. 儀器是否具有遠端無線發送之功能，建議加裝 AIOT 功能，若能連線在量測時可發送數據即時獲得分析結果。</p>	<p>感謝委員建議，本團隊研發的韌體已經規劃具有現場量測及網路遠端無線發送功能，未來可在現場即時發送資訊至雲端資料庫並接收回傳之結果，再反饋給案場之應用參考。</p>
	<p>2. 建議後續可結合 ABRI 所內之計畫與消防署現有之火場分析，應用團隊之研究成果，將案例增加，提高判斷之精準度與 AI - Machine Learning 之準確性。</p>	<p>團隊會在持續與相關單位聯絡，是否能進行增加火場數據量測與分析，以利後續雲端資料庫的數據量增加後再持續利用人工智能 AI 分析與預測。</p>
<p>VI. 楊建築師 檔巖</p>	<p>1. 在雲端資料庫數據之上傳如何表達數據之情況？(資料位置、火源距離)如何做簡化、明朗，建議研究團隊留意。</p>	<p>後續團隊會再新增軟體使用介面與方法說明，並規劃出 SOP 方便後續推廣與應用，至於未來上傳數據的選擇增加以及簡化輸入介面，讓使用者上傳意願增加以及明確表示現場之情況。</p>

<p>VII. 雷研究員 明遠</p>	<p>1. 在雲端資料庫之部分差不多已建置完成，可是未來如何與學術、工程實務界做參考應用？建議可盡早上網，以便推廣。</p>	<p>現在雲端資料庫已經可以使用電腦或是手機即可上網進入平台之頁面，只是在介面的表示上還有些許不足，後續團隊會再努力改善界面展示及友善操作。</p>
<p>VIII. 蔡組長 綽芳</p>	<p>1. 技術移轉的部分還請研究團隊加緊腳步；後續之推廣建議可做意願調查，蒐集與會人員的使用意願。</p>	<p>檢測之技術移轉與推廣團隊已經持續在與建研所討論協調，並提出幾個方案給長官們選擇討論，會在後續擬調查蒐集與會人員的使用意願。</p>
<p></p>	<p>2. 若應用端有廠商(公會)合作，在雲端資料庫部分要如何蒐集數據，如何合作？還請在年底前能提出方案。</p>	<p>未來如果有廠商要合作雲端資料庫的部分，團隊會先讓廠商登錄，使其能上傳資料供團隊蒐集並持續分析，在後續的合作上會再持續與建研所討論結果。</p>
<p>IX. 鄭主任秘書 元良</p>	<p>1. 在導波檢測技術部分還請研究團隊多加留意時間。</p>	<p>感謝委員建議，團隊在研究成果上已經有成果呈現，未來團隊會再持續增進努力，如期如質。</p>
<p></p>	<p>2. 計算投入經費及預估將來市場需求量以便商品化。</p>	<p>同前之張委員清雲第3項之回覆。</p>

附錄四 第一次工作會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

審查委員	審查委員意見綜整	廠商統整回應
I. 雷博士 明遠	1. 簡報第 13 頁右下之圖形，是否可以理解成溫度受損對於剖面上之應用？	此圖為速度-位置圖，可以初步判識表面波在不同深度的波速關係，從波速可以初步推估有無受損。
	2. 將導波放入韌體之評估系統之建立目前的目標規劃為何？	目前本計畫是進行未來導波系統放入韌體之可能性，首先評估其裝置之差異，因為接收頻道數量需求不同，目前應要各自獨立成不同韌體。建立費用，還需評估系統需要包含多少設備與組數，再嚴訂費用。
	3. 對於明年之目標歷年來都在約年終時提出，希望今年也可以順便提出明年之計畫方向(先提出題目即可)。	感謝雷博士之提醒，團隊會將今年所有會議之建議及想法詳記彙整，於下次會議討論。

<p>I. 雷博士 明遠</p>	<p>4. 建議團隊目前規劃的計畫議程中安排的第三次工作會議可在9月執行，第二次專家座談會可在10月執行，以便在執行專家座談會之前先行在工作會議上討論細節，並可以將推廣辦理時間可以提前，且把兩場合併為一場。</p>	<p>團隊會納入計畫會議之期程中討論。</p>
	<p>5. 技術移轉方面是否有操作手冊(包含服務)使用，方能快速推廣？</p>	<p>團隊技術推廣之簡報說明及手冊，應對不同聽眾群，從深刻與普及之不同面向出發，後續將更著重普及性。</p>
<p>II. 王研究員 天志</p>	<p>1. 過去外業有許多筆的數據，針對剪-壓波速比推估的火場溫度與鑽心取樣燒失量結果之對比需詳細的放入簡報。</p>	<p>感謝天志研究員之建議，簡報部分後續報告會再做更新。</p>

簽到表

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發
整合應用計畫(二)協同研究計畫」選用協
同研究人員

第1案「人工智能火害判識應用於結構材料現
場火害探傷之研究」第一次工作會議

時間：108年04月23日(二)上午10:00-12:00

地點：大坪林聯合開發大樓13樓 討論室(二)

協同主持人：林俊宏 教授

出席人員	單位	簽到處
蔡組長綽芳	內政部建築研究所	請假
雷研究員明遠	內政部建築研究所	雷明遠
王研究員天志	內政部建築研究所	王天志
林俊宏 協同主持人	國立中山大學	林俊宏
陳立憲 顧問	國立台北科技大學	陳立憲
陳韋志 研究員	國立台灣科技大學	陳韋志
黃仁佑 研究助理	國立台北科技大學	黃仁佑
陳煜 研究助理	國立台北科技大學	陳煜
王力平 研究助理	國立台灣科技大學	王力平
曾耀霆 研究助理	國立台灣科技大學	曾耀霆

附錄五 第二次工作會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

審查委員	審查委員意見	廠商回應
I. 蔡組長 綽芳	1. 請問剪-壓波速比與導波是否能互相比對？	感謝組長提醒，這兩個方法目所針對之量測對象的並不是一致，前者為針對表層的脆性材(混凝土保護層)，以間接量測估算混凝土受火害程度及剩餘強度。(混凝土扮演兩種角色分別為單壓強度的提供及鋼筋之保護層)；而後者是以量測破壞深度，若深度超過超保護層的厚度，再進一步判斷延-脆性材料介面有握裹無傷損。
	2. 另外一個研究案中有研發出可以自己尋找資料並計算，那此案子能自己抓資料分析嗎？	感謝組長提醒，必須要看他們的演算方式與目的，但這方法與人工智能分析方式並不相同，一個是 IOT，另一個是 AIOT(智能互聯網)。資料來源可以一樣，但分析的方式不一樣。
	3. 我們可以提供技術轉移的模式，可供立憲老師參考，幫助達成技術移轉。	希望建研所可以先提供過去技術轉移成功之案例及文件之審核文本的書面資料、開會紀錄等資料，讓團隊在做結合發展出適合的技術移轉。
	4. 簡報中所說強度的損失，一般會認為包含鋼筋損失的握裹強度，那這裡指的強度是指？	目前所說的強度損失為單一材料(脆性材)的強度損失，抗壓的混凝土與抗拉的鋼筋，握裹力為另外一個探討的性質，為延-脆介面混合材。

<p>5. 簡報第 10 頁相關性的物理意義，例如剪-壓波速比與最高溫度或是與強度之關係？</p>	<p>全世界都在看重量敏感，可是正常物理行為是體積敏感比較準確，但是因為體積敏感不好量測，那我們就使用間接量測。當全世界都在用重量比(因為好量測)本團隊確使用剪-壓波速比(體積敏感)。因為火害程度越大，剪力波與壓縮波的傳達時間差異就越大，而間接使用其正規化來推導其火害之最高溫度與強度折減之關係。</p>
<p>6. 簡報第 10 頁你們希望可以收這些多項參數，但卻只讓外部團隊輸入剪-壓波速比，那你們要如何蒐集這些資訊？</p>	<p>研發單位會做詳細的室內實驗，但現場只會做剪-壓波速比來增加其他參數，在外業無法清楚知道本身材料之原參數，故只收錄其剪-壓波速比及最高溫度，再以內業資訊(量少質精)，來扶持外業發展之收入資訊(量多質差)。</p>
<p>7. 針對其燒越久其溫度越高，高的太嚴重就沒法研判，在實際上火災調查是否能使用此辦法(剪-壓波速比)判斷出其起火源？</p>	<p>因燒越久其實其傷害程度越嚴重且越深，故配合其結構體受火害之延時與結構傷損，再加入四個參數變數(升溫梯度、最高溫度、持溫時間與降溫梯度)亦可判斷其傷害程度。</p>
<p>8. 量多的資訊才能做人工智能的分析，那需要多少的量？能否做一個定值？</p>	<p>人工智能所需的數據量如長官所說數量越大越好，而最基本的統計迴歸 30 至 40 筆數據就可以分析，每個方法與 DATA 數量有絕對的關係，需要多少的量本團隊會去嘗試，取出最少的數據產生的結果誤差在接受的範圍內。在監督試與非監督試的差異極大，非監督試的數量甚至需要上萬筆。</p>
<p>9. 在去做技術推廣的研討會時能否在特別註明或申明一下，此研究為建築</p>	<p>本團隊都有在 LINE 群組上邀請各位長官出席此技術之研討會並在研究中會申明為建築研究所共同研究成果，之後如需亦可再寄信提供與附件各位長官</p>

	研究所之成果。	共同出席。
II. 雷研究員 明遠	1. 導波圖形的部分是否可詳述分析過程？	感謝研究員提醒，一組量測會有多筆數據，圖形部分是由其分析檔組成的，而圖形差異在於維度，時間-頻率域會隨時間域、頻率域變動而變動。
	2. 簡報第 31 頁關於剪-壓波速比與火源距離推估圖中藍色的曲線(間接量測)為何會比綠色的曲線(直接量測)的數值都還要高？	藍色曲線為現場由技師工會鑽心取樣後對試體做直接量測得到的剪-壓波速比數據，因為本身以受火害傷損後又經過鑽心器械之擾動，且導致內部的結構鬆散且圍束效應的消失，加上運送中之受損，導致藍色曲線會比綠色曲線高，以這次的例子為高估 50 度，比較對於其原本溫度(800 度)為不到十分之一的溫度，在可以接受的範圍。
	3. 本次之火害外業案例的分布火害情形與取點位置在知其起火原的情況，其延燒情況是否有呈現輻射狀散出？	感謝委員提醒，此平面圖為示意圖，並未使用輻射狀方式量測，但有按照技師工會鑽心之區域量測剪-壓波速比，從而利用求得之數據繪製起火源與悶燒區域。
	4. 是否能以結構體的受熱來推估火災的延燒時間？	感謝研究員提醒，延燒時間可以搭配火調人員與現場民情獲得火調數據，進而比較結果。
	5. 簡報第 27 頁我們要新增導波的量測系統，鋼珠錘的部分是否能標準化？	感謝研究員提醒，後續可使用機械化具有讀數之敲擊錘作為敲擊源取代手動高不確定性的敲擊方式。
	6. 是否能量化導波系統的評估？	預估會在今年之研究後，往導波量化目標持續努力，會以可行性評估、市場性、設備金費性來多方面判斷。

<p>7. 我們取樣的地點是否都有避開注水過的地方？</p>	<p>無法得知，目前研究是以技師方配合之火害實驗室測出之抗壓強度、燒失量的是具與團隊測出之剪-壓波速比來比對判斷當時火場的情況。</p>
<p>8. 如果現場需要做補強，需要打掉多少厚度之混凝土材可達到其安全與經濟兼顧之結果？</p>	<p>本研究中可使用導波量測初步推估受損厚度，但詳細的計算方式與需要打掉多少厚度需要與其他專業領域人員合作。</p>
<p>9. 這個方法是否能成為未來保險公司評判的一個標準。富邦人壽比較有針對此方面著重處理(火險)，可以先從富邦來接觸。</p>	<p>針對這幾年當中的期中報告、前瞻計畫與成果分享也有許多金融界與保險業來了解與詢問，但是這對金融產業的損失更大(損害大賠的金額高)，是否會接受還需要進一步討論。</p>
<p>10. 去現場是否要兩個試驗一起做或是不一定都需要在現地做相關試驗？</p>	<p>因導波系統的經費較高，目前以剪-壓波速比為初勘篩選，若檢測之傷損程度很嚴重可能傷致鋼筋，在實施較大計算量的握裹傷損試驗。之後是否要假設條件，到達的話就兩個試驗皆要做亦可再做討論。</p>
<p>11. 現在做導波系統的評估皆是使用對比，那之後是否能加入其優缺點與可行性？</p>	<p>現在因為先討論其金費之問題，之後在討論加入之後會再評估其技術端之可行性，設備經費與市場性，在市場性是否會普及或是因為案場不夠而已推行需要再做討論。</p>
<p>12. 現場之溫度梯度是否可以量測？現場燒失量只取表面與現實是否有差異？</p>	<p>現場鑽心試體分直接量測與側向量測，直向量測可得隨深度變化之波速，進而推估出溫度梯度，而燒失量僅有量測表層之溫度。</p>

III. 王研究員 天志	1. 是否能將這次迴龍外業案場之完整的案例後續完成後提供給建築研究所，並放在消防月刊上？	如有需要，團隊很樂意提供相關資料，並且也可以幫助後續推廣。
	2. 本研究所提及的強度為其原本之強度或是其傷損之後的強度？	感謝研究員提醒，簡報中講之混凝土之強度為設計抗壓強度。
	3. 簡報第 15 頁相關係數的說明，與相關係數對本研究有何幫助？	關聯性分析為兩係數之相關連動性，再觀察其關聯性之高低，亦可做其平方法與 MAE 之後續處理。
	4. 相關係數之前已經做過，但是這次新加入許多 DATA，那在其結果的部分有何差異？那為何會造成這些差異？	因新加入許多 DATA，數據有些許浮動，但是其結果之相關性變異不大，且因為之前全是內業數據，現今加入外業數據之後會更加實際與貼切現實。

簽到表

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發
整合應用計畫(二)協同研究計畫」遴用
協同研究人員

第 1 案「人工智能火害判識應用於結構材料現
場火害探傷之研究」第二次工作會議

時間：108 年 07 月 09 日 (二) 上午 10:00-12:00

地點：大坪林聯合開發大樓 13 樓 討論室(一)

協同主持人：林俊宏 教授

出席人員	單位	簽到處
蔡組長綽芳	內政部建築研究所	蔡綽芳
雷研究員明遠	內政部建築研究所	雷明遠
王研究員天志	內政部建築研究所	王天志
林俊宏 協同主持人	國立中山大學	林俊宏
陳立憲 顧問	國立台北科技大學	陳立憲
陳韋志 研究員	國立台灣科技大學	陳韋志
黃仁佑 研究助理	國立台北科技大學	黃仁佑
陳煜 研究助理	國立台北科技大學	陳煜
王力平 研究助理	國立台灣科技大學	王力平
曾耀霆 研究助理	國立台灣科技大學	曾耀霆

江瑞年 研發替代役 內政部建築研究所 江瑞年

附錄六 第三次工作會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

審查委員	審查委員意見	廠商回應
I. 雷研究員 明遠	1. 往後的研討會或推廣，在提及過去研究鑽心取樣內容是否可避開名諱部分。	感謝研究員提醒，不論過去或往後的研討會，我們不會褒貶或批評過去鑽心取樣之昔見技術，會使用技術創新之說明方式報告。
	2. 是否會邀請消防署以及火調科參與會議？	感謝研究員提醒，再麻煩雷博士協助幫忙，後續會聯繫周博士以及簡組長參與座談會，近期團隊會在新北市政府火災調查科作推廣，若有機會也能到外縣市推廣說明。
II. 王研究員 天志	1. 在 Input 部分是否因為放進常溫的數據才導致預測出現 0 以下的溫度？	感謝您的建議，可能原因為常溫相對接近於 0 度，所以造成數據上出現 0 以下溫度的狀況，但若移除常溫會讓數據不合理，造成此情況之原因後續還需討論改進。
	2. 起火處是 6 樓還是 4 樓？隔壁棟？	起火處是個隔壁棟延燒至 4 樓，再從 4 樓向上竄燒至 6 樓，至於火場溫度分布團隊會依詳細延燒範圍配合新創之剪-壓波速比推求火場最高溫度繪製等溫線圖。
	3. M5P 的預測方式是否都呈現水平狀？是否能說明內、外業數據有差別之原因？	原因可能為 M5P 預測方式易受輸入數據多寡影響而產生似水平線性之結果，並不是只以線性呈現。而在內、外業數據差異的部分因場地、材料參數等因素數據呈現會有些微差別。

	<p>4. AI 用在探究混凝土火害深度後續是否有發展之空間？</p>	<p>感謝研究員提議，深度學習和機器學習是不同的，機器學習主要針對 1 維圖形，而深度學習可針對 2 維圖形作探討，團隊會嘗試將導波數據使用深度學習分析，但這方面還需要一段時間試驗及學習。</p>
--	-------------------------------------	--

簽到表

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發
整合應用計畫(二)協同研究計畫」遴用協同
研究人員

第 1 案「人工智能火害判識應用於結構材料現
場火害探傷之研究」第三次工作會議

時間：108 年 10 月 14 日 (一) 下午 14:00-17:00

地點：大坪林聯合開發大樓 13 樓 討論室(一)

協同主持人：林俊宏 教授

出席人員	單位	簽到處
蔡組長綽芳	內政部建築研究所	公假
雷研究員明遠	內政部建築研究所	雷明遠
王研究員天志	內政部建築研究所	王天志
林俊宏 協同主持人	國立中山大學	林俊宏
陳立憲 顧問	國立台北科技大學	陳立憲
陳韋志 研究員	國立台灣科技大學	陳韋志
黃仁佑 研究助理	國立台北科技大學	黃仁佑
陳煜 研究助理	國立台北科技大學	陳煜
王力平 研究助理	國立台灣科技大學	王力平
曾耀霆 研究助理	國立台灣科技大學	曾耀霆
曾畊嘉 研究助理	國立台北科技大學	曾畊嘉

附錄七 第一次專家座談會會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

專家委員	專家委員意見綜整	廠商統整回應
I. 李副局長 清安	1. 火災現場鑑定需要依據火場之嚴重度、現場擺設與延燒時間再來綜合判斷火源究竟在何處，依照火害受損最嚴重處判斷火源並不一定正確。	感謝副局長提供之意見，判斷火源之變數有很多，從過去【望】、【聞】、【敲擊回聲】、【剝離程度】，而目前團隊之剪-壓波速比調查方法可依現場狀況判斷火害最嚴重的點位及區域，可協助加速消防單位判斷火源，能成為更快速且有利的判斷條件，並可詳細判斷結構物的狀況。
	2. 會提供機會把相關量測人員聘為委員，這樣就可較方便在火害現場進出與調查。	感謝副局長給予這個機會，如有機會團隊定會努力爭取。
	3. 建議將現場火害量測製作成 SOP 與量測方式，方便求得剪-壓波速比與技術驗證，同時在推廣應用方面普及超音波儀器之量測方法與其功能，便於後續相關從業人員認識。	目前內業及外業之量測方法都已有訂定出量測的標準且詳細之作業程序，並且在外業的數量有持續新增且改進。

<p>4. 現場過去火調的判斷方法為目視，在100°~300°時混凝土呈現顏色無變化，在300°~600°時呈現顏色為粉紅色，這是目前比較主流之研調辦法。</p>	<p>此方法為目前主流之最初目視判別方法，而團隊中之剪-壓波速比及導波量測可以較精確判斷出其破壞之嚴重程度。</p>
<p>5. 在體積變化造成的特徵值，並利用剪-壓波速比來量測火災程度之最高溫度與強度折減，那造成剪-壓波速比變化的原因是否能簡易說明，讓大眾可以輕易去理解並接受。</p>	<p>目前團隊之簡報與專家建議之方向一致，皆是以深刻、普及為方向持續努力。</p>
<p>6. 建研所推廣戰略上，有分為操作面與執行面，在這兩個方面可以分別處理，但是在已經申請專利之後已確認理論、創新、技術驗證。再來要制定規範就比較不容易，且會讓人懷疑，較好之辦法是技術推廣時，也訂定指引條例增加後續技術轉移。</p>	<p>團隊除了計劃本身之研究外，也一直持續申請不同之專利，並在不同領域之演講及演討會推廣本研究方法，已讓更多人可以接觸及了解本方法。</p>

<p>II. 張董事長 清雲</p>	<p>1. 希望可以技術普及為重，建議廣開研討會介紹此方法與其優點，盡可以推廣至台灣各地甚至其他國家。</p>	<p>此題與 I-6 共同回答</p>
	<p>2. 在業界鑑定技士之間也會有競爭，在互相爭奪利益與權益之間，所以本方法可以在其中推廣與應用。</p>	<p>謝謝專家來自業界的經驗分享，後續會持續與技師公會一同推廣。</p>
	<p>3. 未來如果與實驗室合作，亦可與公會、技師合作，因為這些單位再去測量的時候通常也是請實驗室人員而非親自去現場測量。</p>	<p>目前也有與相關之火害實驗室共同量測之經驗，有持續聯絡及配合。</p>
	<p>4. 如果新的方法推出以後，保險業因為受到權益的損害會去申請並挑戰鑑定書，那要怎去應對？</p>	<p>後續專家座談及審查會議已有預計邀請保險業一同參與討論。</p>
	<p>5. 在技術服務方面，若有很多需量測之案場是否會有人手不足情形？且業主通常不會給予太多時</p>	<p>在後續技轉之後，量測方法持續推廣，更多的人使用。若各地都有需要量測之案場，也不須擔心人手不足之狀況。因可配合不同可以量測超音波之實驗室或視廠商即可量測剪-壓波速比，只需</p>

	間量測。	負擔部分技轉費用。
	6. 在後續應用推廣方面，可簽 MOU，並會讓底下人員參與受訓熟悉超音波儀器操作與原理，且能協助處理鑑定費用之問題。	謝謝專家之建議，團隊會持續配合協助建研所與技師公會簽訂並推廣及後端受訓。
III.黃教授 兆龍	1. 使用此剪-壓波速比之非破壞檢測技術實際火害現場案件可能不夠多。	感謝教授之提醒，團隊會持續與技師公會、消防體系及實驗室配合增加外業案場實測。
	2. 建議可將剪-壓波速比、最高溫度、強度折減圖再加上顏色軸，讓外部人員可較易辨識。	後續會持續增加並更新，讓圖可以越來越完整，更容易辨識。
	3. 建議在專業術語的部分可使用通俗語言描述，也可使用圖片解釋，因為人對圖像的敏感度遠大於對文字的敏感度。	團隊目前也正在朝向此方向努力，持續用圖片甚至於影片之方式，達到更普及易懂的效果，在幫助後續推廣。
	4. 現場有非常多影響的因素，像是混凝土之水灰比、或是火災是否均溫悶燒皆會嚴重影響判斷之結果。	此題與 I-1 共同回答

	<p>5. 現場有多少火害點位之數據可以提供讓剪-壓波速比方法與過去燒失量辦法做比較?</p>	<p>教授詢問之桃園外業案場，其案場有63個鑽心點位，火害實驗室用其中9個做為抗壓檢測，剩下之54個點位為做燒失量檢測，可與團隊之剪-壓波速比做比較。</p>
	<p>6. 希望有多種不同儀器能測量剪-壓波速比，如果能用民間都通用之儀器就可以測量出剪-壓波速比，那就可以讓這項發明夠快速的推廣出去。</p>	<p>本團隊研究出為方法，而測量剪-壓波速比之儀器方面地卻是依專家所說，以一般民間可量測橫波及縱波之超音波儀器及可量測。</p>
	<p>7. 剪-壓波速比是建研所合作開發出來的技術，如果可以成為建研所的(亮點)，像是發出新聞稿，利用客觀與快速的方法得到回應。</p>	<p>在發出新聞稿這方面，已有與建研所共同計畫可以在建研所內之消防期刊與其他相關之期刊發表。</p>
<p>IV. 陳經理 光宏</p>	<p>1. 在技術推廣的部分可以由官方主動推廣(MOU、研討會)，民間被動推廣(由新聞稿或檢測獲知資訊)，推廣速度較快。</p>	<p>此題與 II.-6 共同回答</p>
	<p>2. 如果有專利就沒辦法利用規範強制規定使用的辦法。</p>	<p>感謝經理相關知識的提醒，團隊會持續與建研所以及不同專家學者一起研究討論向關之規範及法條來做後續推廣。</p>

	<p>3. 推廣技術必須要有利潤才會有人幫忙推廣出去，因此我們可以分為主動與被動兩種方式，在主動的情況下可以申請加入鑑定委員會，在被動的情況下可以利用民間推廣，一般技術服務的利潤分為 3:7，管理費為全數費用之 5%~8%。</p>	<p>感謝經理來自業界的經驗分享，團隊會將其納入未來推廣方面的選項考量。</p>
<p>V. 雷研究員 明遠</p>	<p>1. 制定規範較為正式，並不適用於此技術，可使用”指引”作為檢測之 SOP 與方向。</p>	<p>感謝研究員提供之方案，後續如有規範申請部分也會朝向指引發展，並搭配現有內外業實驗之標準作業程序。</p>
	<p>2. 建議先從民間部分開始普及(新聞稿)，讓民間人員與企業獲知此技術方法，以便後續之技術轉移與應用推廣。</p>	<p>此題與 III.-7 共同回答</p>

簽到表

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發
整合應用計畫(二)協同研究計畫」遴用協
同研究人員

第 1 案「人工智能火害判識應用於結構材料現
場火害探傷之研究」第一次專家座談會

時間：108 年 08 月 21 日 上午 10 點至中午 12 點

地點：大坪林聯合開發大樓 13 樓 討論室(一)

協同主持人：林俊宏 教授

出席人員	單位	簽到處
蔡組長綽芳	內政部建築研究所	公假
雷研究員明遠	內政部建築研究所	雷明遠
王研究員天志	內政部建築研究所	公假
李副局長清安	新北市消防局	李清安
陳經理光宏	台灣整合防災工程 技術顧問有限公司	陳光宏
張董事長清雲	厚昇工程顧問公司	張清雲
黃教授兆龍	臺灣科技大學 營建工程系	黃兆龍
林俊宏 協同主持人	國立中山大學	林俊宏
陳立憲 顧問	國立台北科技大學	陳立憲

陳韋志 研究員	國立台灣科技大學	陳韋志
黃仁佑 研究助理	國立台北科技大學	黃仁佑
陳煜 研究助理	國立台北科技大學	陳煜
王力平 研究助理	國立台灣科技大學	王力平
曾耀霆 研究助理	國立台灣科技大學	曾耀霆
江瑞平 研究員	建研所	江瑞平

附錄八 第二次專家座談會會議紀錄

內政部建築研究所 108 年度

「火害現場結構材料探傷檢測系統軟體研發及應用研究」

委託研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

專家委員	專家委員意見綜整	廠商統整回應
<p>I. 陳建築師 澤修</p>	<p>7. 火害後房子怎麼辦？火害後鑑定非常重要，現場材料之強度剩餘多少、補強花多少費用，這些都是未來保險理賠部分重要的依據。</p>	<p>感謝陳建築師提醒，團隊在日後座談會邀請保險相關之專家討論，提前告知團隊之想法與了解保險相關事宜。</p>
	<p>8. 團隊之新技術對於第一線人員幫助大，也能節省時間，此新創技術與昔日之檢測方法數據相差多少？</p>	<p>感謝陳建築師之認可，在昔見技術燒失量之檢測因使用原理是重量變化而非體積膨脹(熱漲冷縮)，較易低估火害現場之最高溫度；溫度越高，此情況越明顯。</p>
	<p>9. 鋼筋與混凝土本身受火的膨脹係數不同，經過火燒後跟新灌材料握裹力必定有差異，產生之空隙現地常使用載重試驗量測剩餘之握裹力，導波量測方法是否能取代</p>	<p>在研究之部分團隊目前使用無握裹力喪失、握裹力全部喪失作初步之探究，雖屬定性之方法，但已能區分上述兩者之差別；在如何量化之部分後續團隊會繼續努力。</p>

	<p>載重試驗，還需業界去評斷。</p>	
	<p>10. 建議將來在應用端可商業化，量測部分可訂定費用標準。</p>	<p>感謝委員建議，檢測之技術移轉與推廣團隊已經持續與建研所討論協調，並提議幾個方案給長官們選擇討論其可行性，將於續擬訂協助量測費用與相關使用的收費標準。</p>
	<p>11. 鋼筋是否會對波傳量測產生影響？</p>	<p>鋼筋確實會對波傳產生影響：在實際量測部分可用鋼筋探測器判斷是否避開鋼筋量測，可藉此調整量測點位。</p>
<p>II. 吳博士 武泰</p>	<p>1. 簡報 P.9 對於相關係數中有兩個選項：峰前韌度與峰後韌度的定義說明不清楚。</p>	<p>韌度為材料試體(混凝土)受單軸壓縮試驗達峰值後遭受破壞曲線下之面積，在峰值之前曲線下面積為峰前韌度，在峰值之後曲線下面積為峰後韌度。</p>
	<p>2. 簡報 P.13 現場選用點位的標準為何？是否能說明選用那些點位的原因？</p>	<p>假如現場能很明確看出何處最為嚴重，將會增加在該處的檢測密度，並由該處向四周布設點位，方便後續對照受火害嚴重程度之差異。</p>

	<p>3. 在等溫線與平面圖的部分可加上圖例及比例尺，方便後續了解與應用。</p>	<p>感謝吳博士之建議，往後的等溫線與平面圖會附上圖例與比例尺。</p>
	<p>4. 體波、導波非破壞檢測分別是不同的進度的研究，在體波非破壞檢測已非常成熟，但是在導波部分還欠缺定量與實驗驗證，建議未來在推廣可分開進行，能讓大眾更快接受新型檢測辦法。</p>	<p>感謝吳博士之建議，目前的策略先將體波非破壞檢測技術進行推廣與應用，後續導波技術可定量後再加入前者之方法使其成為完善的現場非破壞檢測技術。</p>
	<p>5. 火災發生後結構鑑定是非常之重要的一環，將決定災後如何處置與責任歸屬以及牽涉保險相關之賠償，所以在新的技術推出以及損害到第二方的權益(保險業者)時，將會受到非常多的質疑與挑戰。</p>	<p>感謝陳建築師提醒，團段後續的推廣與應用會計劃加入邀請保險相關長官與業者，將新型非破壞檢測技術與推翻過去驗整的理念與想法逐漸推廣。</p>
<p>III. 周博士 鴻呈</p>	<p>1. P.15 在簡報中有提及延燒火源，因燃燒最嚴重並非皆為火源，是否能更改名稱使其不再讓人誤解。</p>	<p>感謝周博士的建議，團隊後續會將其改變為熱源位置(最高溫度)，並非起始燃燒點位。</p>

<p>IV. 黃理事長 科銘</p>	<p>1. 需加強現方法之結論，說服業界讓大眾使用，避免往後之保險或訴訟上衍生之問題。</p>	<p>感謝黃理事長相關經驗提供，團隊會將其納入未來考量。</p>
	<p>2. 導波目前可針對鋼筋混凝土握裹力傷損作量測，目前研究能定性，但在未來推廣與實際應用的情況下需定量，才不會遭受別人的質疑。</p>	<p>感謝黃理事長的提醒，因為研究需要按部進行，目前已經針對定性可以做出明顯的判斷與分析，未來團隊們將會針對定量的部分在做努力。</p>
	<p>3. 能否將目前團隊研究的成果直接與過去燒失量做比較，並將比對結果寫在成果報告中，凸顯出團隊研究與過去使用方法之差異。</p>	<p>團隊目前已經有做過許多的案場的研究與分析，也比對過團隊研究出剪-壓波速比與過去燒失量做對比，發現其嚴重低估的情形，但是如果直接發表寫出結論會嚴重損害到第二方的權益(保險業者)，團隊後續會嘗試將結果寫入結論當中。</p>
<p>V. 林科長 義承</p>	<p>4. 補充說明，若地方法院要法拍住宅，會先行跟地方火調科調取房子有無火災紀錄，而民眾買賣房屋前也能要求賣方提供。</p>	<p>感謝林科長相關經驗及法規之提供，但是目前只限定於行政執行成面會主動告知，如果私人交易就不會主動調查，雖然可以請賣方申請，但在普通民眾並沒有這方面的專業知識。</p>

	<p>5. 火災過後，救援時噴灑之水柱是否會影響燒失量之檢測？</p>	<p>感謝林科長的提醒，目前火災現場影響因素有很多種類，在水柱滅火確實會影響，但對於量測結果不會產生太大的差異。</p>
	<p>6. 調查出剪-壓波速比推估火場受火害最高溫度最高處並非等於起火源，但是如果能夠調查其溫度分布推估火場火流方向，會對火調科調查現場非常有幫助。</p>	<p>目前推估出最高溫度處並非直接認定為起火源，而是定義為熱源，會產生熱源的原因有很多像是易燃物堆放、通風處等。</p>
	<p>7. 在兩種情形下結案報告書以及起火原因等在結案前都不能公開，分別為有人死亡以及涉及故意縱火部分，因偵查不公開規定，排除這兩種案件後其餘民眾皆可以獨自向地方消防機關申請。</p>	<p>感謝林科長的建議，目前最欠缺的就是火害現場的資料蒐集，火調科或消防署若有疑慮，對於偵查不公開以及刑法部分若需簽保密協定團隊會配合處理。</p>
<p>VI. 蔡組長 綽芳</p>	<p>3. 在後續推廣之會議是否需要找保險專業相關之專家？</p>	<p>本題與 I.1 共同回答。</p>
	<p>4. 在火災後團隊何時介入量測時機很重要。</p>	<p>感謝蔡組長提醒，時機還需向火調科詢問可行時間，配合相關法規才能進入火場量測。</p>

VII. 雷研究員 明遠	1. 目前哪套繪圖軟體呈現效果最好，不會讓人懷疑其功能性與公信力。	感謝雷研究員提供建議，繪圖軟體有很多種，如 Matlab、Surfer 等皆能繪製並呈現較好之效果，且廣為大眾所知。
	2. 在火害現場量測的點位與數量的挑選中，如何到達精準量測與經濟實惠的雙贏局面？	量測時間之多寡還需配合火調科之行政作業程序，在現場如果時間允許就盡量量測較多的點位，使現場溫度分布精度提高。

簽到表

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發 整合應用計畫(二)協同研究計畫」遴用協 同研究人員

第 1 案「人工智能火害判識應用於結構材料現 場火害探傷之研究」第二次專家座談會

時間：108年12月03日 上午10點至中午12點

地點：大坪林聯合開發大樓13樓 討論室(一)

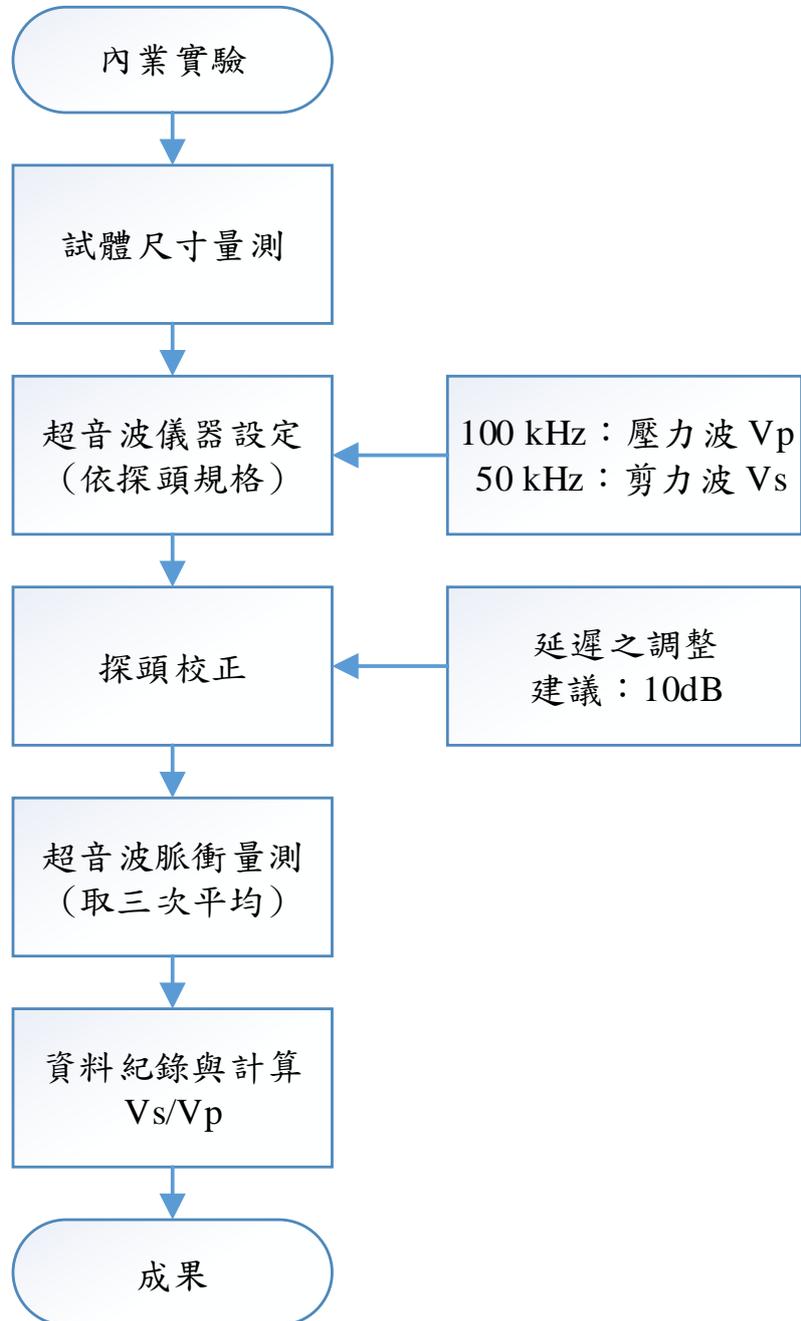
協同主持人：林俊宏 教授

出席人員	單位	簽到處
蔡組長綽芳	內政部建築研究所	蔡綽芳
雷研究員明遠	內政部建築研究所	雷明遠
王研究員天志	內政部建築研究所	王天志
吳博士武泰	行政院 災害防救辦公室	吳武泰
周博士鴻呈	內政部消防署 火災調查組	周鴻呈
林科長義承	台北市政府消防局 火災調查科	林義承
黃理事長科銘	台灣營建仲裁協會	黃科銘
陳建築師澤修	中華民國 全國建築師公會	陳澤修
林俊宏 協同主持人	國立中山大學	林俊宏
陳立憲 顧問	國立台北科技大學	陳立憲

陳韋志 研究員	國立台灣科技大學	請假
黃仁佑 研究助理	國立台北科技大學	黃仁佑
陳煜 研究助理	國立台北科技大學	陳煜
王力平 研究助理	國立台灣科技大學	王力平
曾耀霆 研究助理	國立台灣科技大學	曾耀霆
江瑞年 研發替代役	建研所	江瑞年

附錄九 超音波內業量測標準作業程序

實驗室直接量測

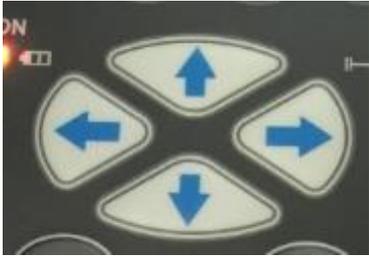


操作配置說明

使用此 A1220 超音波探傷儀需搭配一組訊號連接線及一組超音波量測探頭，對待量測物進行超音波探傷檢測。

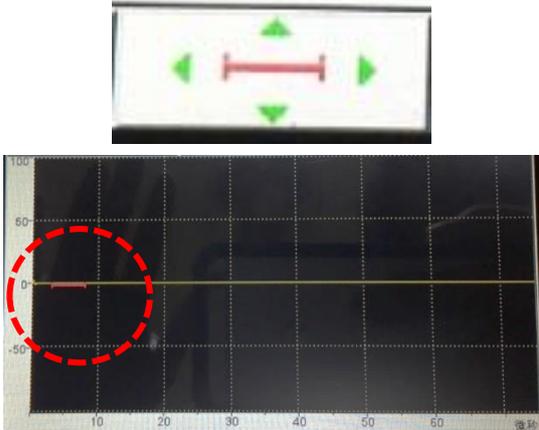
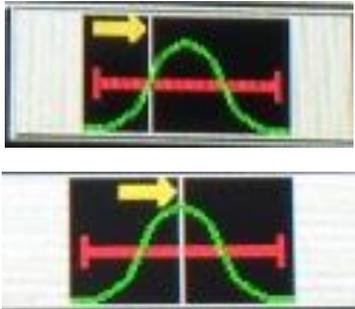


操作介面說明

圖示	功能
	<p>【電源燈】</p> <p>【充電顯示燈】</p>
	<p>【開/關機鍵】</p> <p>長按即可開機/關機。</p>
	<p>【畫面擷取鍵】</p> <p>擷取量測波形之畫面。</p>
	<p>【參數設定鍵】</p> <p>進入設定畫面。</p>
	<p>【方向鍵】</p> <p>1. 在量測畫面時：</p> <p>上、下：調整分貝大小。</p> <p>左、右：調整橫座標的最大值的大小。</p> <p>2. 在其他畫面時：移動鍵。</p>

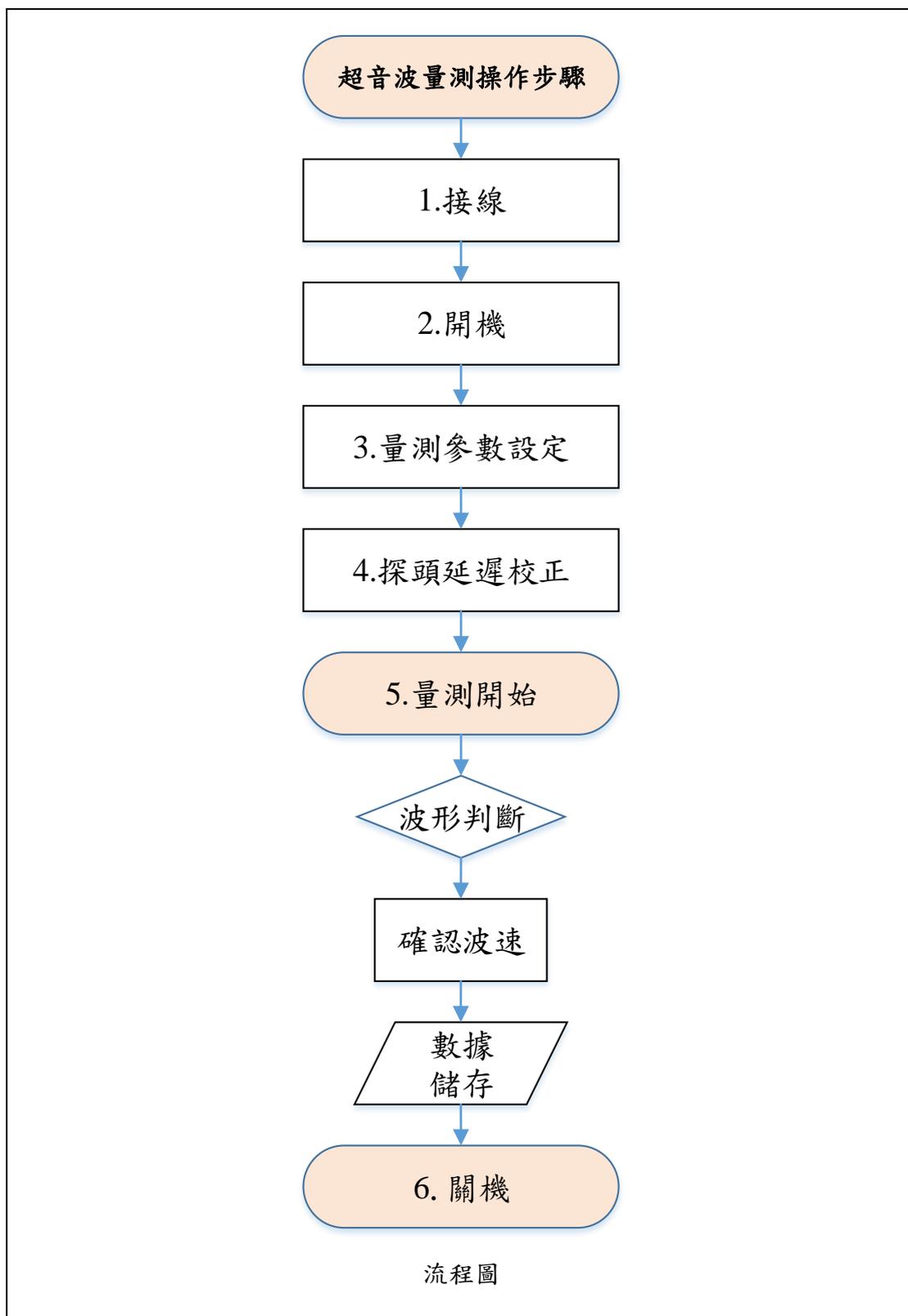
	<p>【Mode】 切換模式量測鍵，乾點式探頭量測模式或陣列式探頭量測模式。</p>
	<p>【進入鍵】 確認所操作之選項。</p>
	<p>【退出鍵】 離開當前畫面。</p>
	<p>【加減鍵】 減少或增加相關參數設定值。</p>
	<p>【選項鍵】 可選擇上方螢幕對應之圖示的選項。</p>

螢幕圖示說明

圖示	功能
	<p>【T】 顯示測得之波形時間點。</p>
	<p>【波形分析游標圖示】</p> <p>使用選項鍵  選取此圖示，可使用  來調整游標的長短，亦可以使用  來調整其位置。</p>
	<p>【波形分析位置圖示】</p> <p>使用選項鍵  調整以下兩個功能：</p> <p>(上)：訊號第一次超過頻閃值，</p> <p>(下)：頻閃在訊號最大值。</p>
	<p>【儲存圖示】</p> <p>於擷取畫面作儲存視窗。</p>
	<p>【開啟資料夾圖示】</p> <p>開啟檢視檔案。</p>

超音波量測操作步驟

以混凝土超音波量測為例。



1. 接線

➤ 線路用途說明：

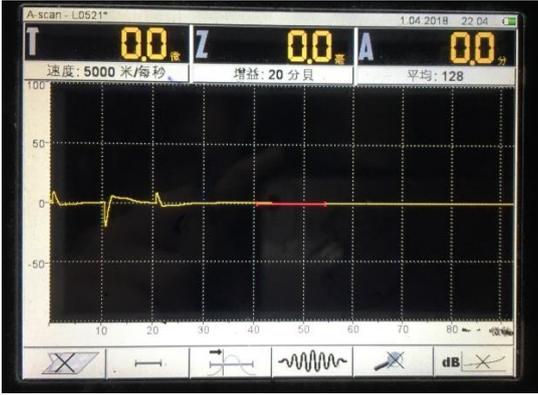
紅頭線路	超音波訊號發送端。
黑頭線路	超音波訊號接送端。

➤ 操作步驟：

順序	操作	圖例
1	依對應顏色將訊號線接上 A1220 之接頭處。	
2	依對應顏色將訊號線接上超音波探頭之接頭處。	

2. 開機

➤ 操作步驟：

順序	操作	圖例
1	 長按即可開機。	 (初始量測畫面)

3.量測參數設定

➤ 操作步驟：

順序	操作
1	首先先按  進入參數設定畫面。
2	進入畫面後以按  ，再由右側以  來選擇欲調整之項目，逐一進行各參數值設定。
3	完成參數設定後，再按  以返回量測畫面。

圖例

➤ 進行混凝土超音波量測之參數設定如下圖所示。



➤ 參數設定對照表：

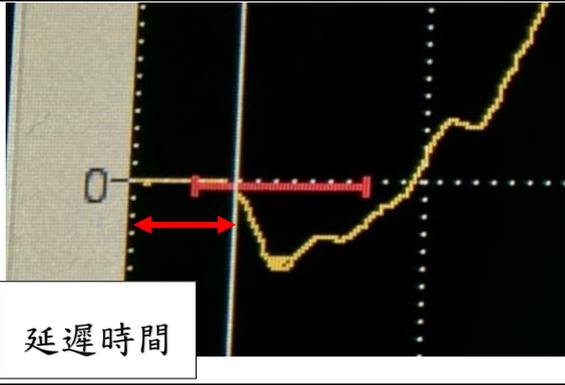
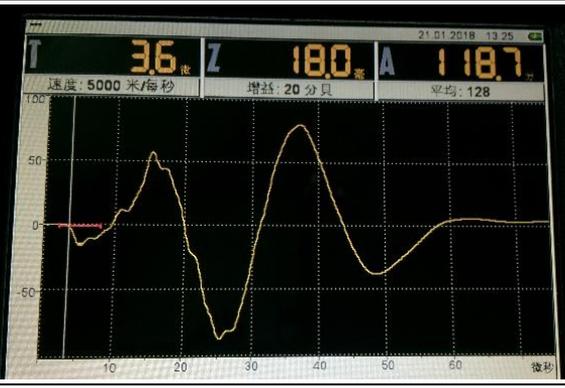
參數名稱	數值	說明
探頭型式	單晶/雙晶	設定壓電探頭型式
操作頻率 (kHz)	25~250，調整單位 5	設定超音波作業頻率
延遲 (μs)	0.0~100.0，調整單位 0.1	設定訊號延遲時間
增益 (dB)	0~100，調整單位 1	設定接受路徑放大
脈充電壓 (V)	20/100/200	設定量測脈衝振幅
周波數目	0.5~5.0，調整單位 0.5	設定量測脈衝周波數目
脈衝重覆率 (kHz)	5~45，調整單位 5	設定資訊顯示頻率
平均數量	1/2/4/8/16/32/64/128	設定暫存累積數量之平均
聲速 (m/sec)	500~15000	設定聲速。
基本 (mm)	關/10~15000	設定待測物之厚度。
TCG	開/關	切換 TCG 開/關
刻度	mm/μm	設定橫向刻度單位，定義訊號顯示參數。
讀值解析度(離散值)	0.1/1	設定量測結果顯示之離散值
游標	開/關	螢幕上的量測游標控制(垂直線，顯示量測的訊號參數位置)
輸入訊號過濾	開/關	設定雜訊過開/關

4.探頭延遲校正

因超音波量測上通常會有出達波延遲時間之問題，故於量測開始前必須進行探頭延遲校正。將探頭彼此直接相互連結時，所產生之反映波形上會有段時間沒有波形，即為延遲時間。

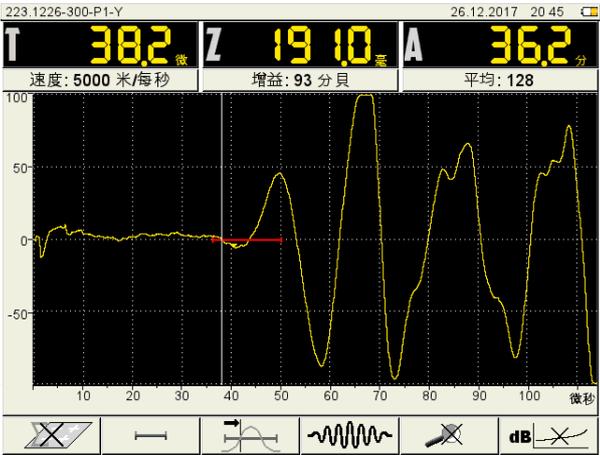
➤ 操作步驟：

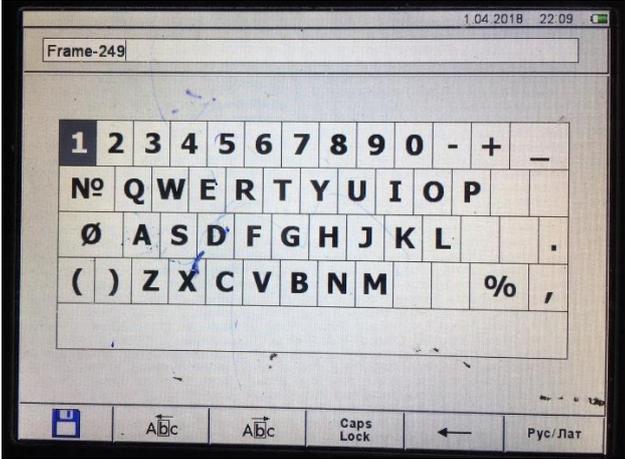
順序	操作	圖例
1	進入參數設定畫面，以上下按鍵將分貝調整至 10 或 20。	
2	再將探頭相互對著，以產生波形。	
3	以介面圖示選擇鍵選擇訊號第一次超過頻閃值之圖示。	

<p>4</p>	<p>再以介面圖示選擇鍵擷取鍵，並以上下左右方向鍵移動之，及以加減鍵調整長度，找到延遲時間。</p>	
<p>5</p>	<p>找到延遲時間後，再按一次擷取鍵，此時畫面上方之 T 格內數值即為延遲大小。</p>	
<p>6</p>	<p>再進入參數設定畫面內設定延遲時間，設定完成後返回量測畫面即可開始進行量測。</p>	

5.開始量測

➤ 操作步驟：

順序	操作	圖例
1	先將分貝調整至 80-90 上下。	
2	再將探頭對準中心點 (施加些微力道)，即可產生波形。	
3	此時若找不到波形，使用向右鍵整橫座標，並且用上下鍵判斷出雜訊波，且盡量避開選取到雜訊段。	
4	以介面圖示選擇鍵擷取鍵，並以上下左右方向鍵移動之，及以加減鍵調整長度，找尋初達波之位置。	
5	尋得初達波位置後，即可確認波速。	

6	按下畫面擷取鍵，即可擷取畫面。	
7	再以方向鍵移動選取框，按下畫面上的存檔鍵。	
8	進入檔名編輯畫面，進行編輯，之後再按一次存檔鍵即完成數據儲存。	
9	存檔完成後會跳回到擷取畫面，此時再按一次畫面擷取鍵，即可回到量測畫面。	

6. 關機

➤ 操作步驟：

順序	操作
1	長按  即可關機。

附錄十 超音波外業量測標準作業程序

火災建築物調查作業程序

一、調查作業行前確認

1、與聯絡及協商相關機關、廠商或關係人作行前確認。

A、確認火災概要

- (i.) 火災案發時間。
- (ii.) 火災案發地點。
- (iii.) 火災現場建築物結構類型。
- (iv.) 了解傷亡情況。

B、確認調查作業行程

- (i.) 調查日期與時間。
- (ii.) 調查當日之集合地點與時間。
- (iii.) 相關人員訪談流程。

C、確認調查表內容 (A 表~E 表)。

D、完成相關儀設準備。

二、調查作業步驟

1、觀察火場四周及了解現場概況

A、與相關人員 (火調科人員等) 討論現場情況，並記錄於 A 表。

B、了解火場範圍，由火場外圍多方向逐漸向中心處觀察受燒建物傷損情形及燃燒延燒方向作初步判識。

C、由至高處觀察現場全貌，了解建物結構與整體延燒塌毀及表面碳化變化情形。

D、拍攝現場全景、四周及各處火損特徵之照片。

2、擬定調查計畫

A、由起火處為中心劃分現場調查區域，並拍攝或圖示於 B 表。

B、了解各分區之構材種類及數目，並記錄於 B 表。

3、依序於各分區進行調查

A、拍攝或圖示構材表面狀況，填寫於 C 表。

B、標示待量測構材之點位，並拍攝之。

C、進行外業超音波量測，將數據填寫於紀錄白板與 C 表上。

D、將量測點位與已填寫數據之紀錄白板，一同拍攝之。

4、現場構材取樣

詢問相關人員（業主），該量測點位或該處構材剝落物是否可進行取樣，若可行即為之。

A、現場鑽心取樣

- (i) 如遇量測點位具現場鑽心之可行性，則依調查需求判斷是否進行取樣。

(ii.) 於取樣前、後拍攝樣體，並標示量測編號後放入取樣袋。

(iii.) 於 C 表上勾選「是否採集樣體」。

B、現場構材剝落物取樣

(i.) 如遇該量測處具收集可行性之構材剝落物，則依調查需求判斷是否進行取樣。

(ii.) 於取樣前、後拍攝樣體，並註記其現場位置及標示現場剝落物編號後放入取樣袋。

三、訪談

1、討論訪談事宜

A、詢問受訪人是否可於現場進行訪談，亦或於他處。

B、詢問是否可於訪談過程中進行錄音，若可即為之。

2、訪談過程

A、依事前羅列問題作提問，並隨時註記重點。

B、訪談後將其內容記錄於 D 表。

四、後續追蹤

1、詢問相關人員此災害之資訊

A、詢問可否留下相關人員(火場資料、結構圖說等...)。

B、詢問可否留下相關人員（消防員、土木技師等）名片，以便往後聯絡。

C、後續追蹤災後鑑定、復原進度。

五、樣體試驗

1、將樣體依序執行下列試驗，記錄於 E 表。

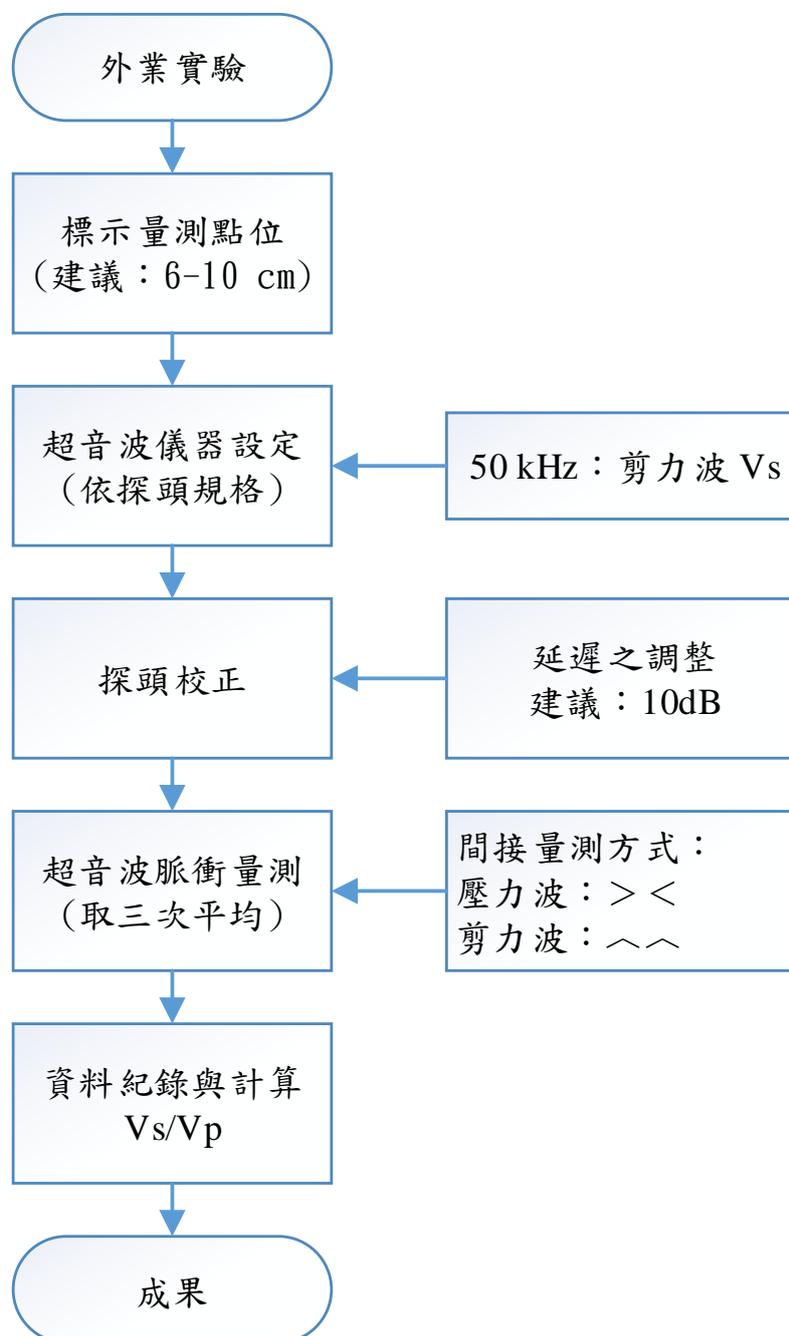
A、燒失量試驗

B、內業超音波量測

C、單壓試驗

超音波外業量測標準作業程序

現場間接量測



附錄十一 外業火害調查表

受火害結構物之初勘基本資料表 (A 表)

案件編號：_____

紀錄人：_____

初勘日期： 年 月 日

地址：_____

聯絡人	建物所有人	聯絡資訊
	中間聯繫人	聯絡資訊
構造類別 (複選)	<input type="checkbox"/> 鋼筋混凝土造 <input type="checkbox"/> 鋼骨構造 <input type="checkbox"/> 鋼骨鋼筋混凝土 <input type="checkbox"/> 輕鋼架造 <input type="checkbox"/> 加強磚造 <input type="checkbox"/> 木構造 <input type="checkbox"/> 其他	
	說明：_____	
樓層數	地上 _____ 層；地下 _____ 層	
用途	<input type="checkbox"/> 自用 <input type="checkbox"/> 租賃 <input type="checkbox"/> 借用 <input type="checkbox"/> 商用店鋪 <input type="checkbox"/> 餐飲業 <input type="checkbox"/> 百貨公司 <input type="checkbox"/> 辦公室 <input type="checkbox"/> 加工廠 <input type="checkbox"/> 貨品倉庫 <input type="checkbox"/> 物料倉庫 <input type="checkbox"/> 綜合使用大樓 <input type="checkbox"/> 飯店 <input type="checkbox"/> 住家／宿舍 <input type="checkbox"/> KTV <input type="checkbox"/> 三溫暖 <input type="checkbox"/> 戲、劇、影院 <input type="checkbox"/> 歌、舞廳 <input type="checkbox"/> 其他：_____	
	火災歷時 起火時間： 年__月__日__時__分 撲滅時間： 年__月__日__時__分	
燃燒情況	天候情況： <input type="checkbox"/> 炎熱 <input type="checkbox"/> 寒冷 <input type="checkbox"/> 大雨 <input type="checkbox"/> 小雨 <input type="checkbox"/> 強風 燃燒： <input type="checkbox"/> 有爆炸 <input type="checkbox"/> 有爆燃 <input type="checkbox"/> 其他情形：_____	
主要 燃燒物料	<input type="checkbox"/> 裝潢材料 <input type="checkbox"/> 油料 <input type="checkbox"/> 油漆材料 <input type="checkbox"/> 傢俱木料 <input type="checkbox"/> 布料 <input type="checkbox"/> 紙料 <input type="checkbox"/> 化學易燃材料 <input type="checkbox"/> 其他：_____	
	起火點 及 受火範圍 (複選) <input type="checkbox"/> 不明 <input type="checkbox"/> 可知，樓層： _____ 樓，位置： <input type="checkbox"/> 火燒路徑：	
備註：_____		

初勘分區標示簡圖 (B 表)

案件編號：_____

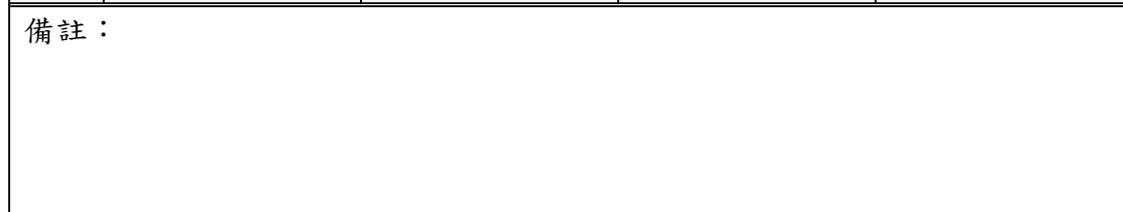
紀錄人：_____

現場勘查區位置簡圖(照片或簡圖)：



分區 代號	構材數目			
	梁	柱	板	牆

備註：



火災建築物調查—初勘調查表 (C 表)

分區代號：

紀錄人：

構材種類： 梁 柱 板 牆

	標示量測構材(照片或圖示)：
--	----------------

表面狀況

項目		(1) 顏色 變化	(2) 殘料 估計	(3) 裂紋 狀況	(4) 鋼筋外露狀 況	(5) 構材變形狀 況	(6) 受燒 面積
損 壞 等 級	輕微	<input type="checkbox"/>					
	中度	<input type="checkbox"/>					
	嚴重	<input type="checkbox"/>					

火災建築物調查—訪談紀錄表 (E 表)

訪談時間：

紀錄人：

訪談地點：

受訪談人		關係： <input type="checkbox"/> 屋主 <input type="checkbox"/> 參與救災者 <input type="checkbox"/> 機關主管 <input type="checkbox"/> 火場發現者 <input type="checkbox"/> 涉嫌火首 <input type="checkbox"/> 初期滅火者 <input type="checkbox"/> 避難者 <input type="checkbox"/> 其他
Q		
A		
Q		
A		
Q		
A		
Q		
A		
Q		
A		
Q		
A		
Q		
A		
Q		

A	
Q	
A	
Q	
A	
Q	
A	
<p>備註：常見問題</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 受訪談人與火場關係 2. 火災發生時刻及場所。 3. 初期燃燒狀況及概略燒毀經過。 4. 火災之滅火射水作業狀況。 5. 火災被發現之詳細經過。 6. 室內裝潢、房間佈置或管線配置情形。 7. 用火器具、溶劑等物品使用、放置、保管或製造情形。 8. 起火前後人員之出入情形。 9. 火災時燃燒特異事項。 10. 人員死傷狀況。 11. 火災後現場保存狀況。 12. 配電線路、用電設備之裝設及受損情形 13. 建築物之火災保險資料。 14. 建築物之消防安全設備及檢修申報資料。 15. 建築物之保全資料。 16. 其他相關之重要資料。 	

火災建築物調查—檢體試驗紀錄表 (F 表)

- 量測編號： _____ 現場剝落物編號： _____
 尺寸 (mm) 圓柱：直徑： _____ 高： _____
 方柱(切割)：長： _____ 寬： _____ 高： _____

一、燒失量試驗紀錄 (參考規範：CNS 1097)

試驗日期： 年 月 日

紀錄項目	重量 (g)
W _{坩堝}	
W ₀ + W _{坩堝}	
W ₁₀₅ + W _{坩堝}	
W ₁₀₀₇ + W _{坩堝}	
W ₁₀₅	
W ₁₀₀₇	

W_{坩堝} = 坩堝重

W₀ = 水泥漿體重(室溫)

W₁₀₅ = 水泥漿體重(105°C)

W₁₀₀₇ = 水泥漿體重(1007°C)

$$IL = \frac{W_{105} - W_{1007}}{W_{1007}} \times 100\%$$

試驗結果	
IL(%)	
推估最高溫度 (°C)	

二、內業超音波量測紀錄 (參考規範：ASTM C597)

試驗日期： 年 月 日

試驗結果	
Vs/Vp	

三、單壓試驗紀錄 (參考規範：CNS 1232)

試驗日期： 年 月 日

試驗結果	
單壓強度 (Kgf/cm ²)	

參考書目

1. 中華民國國家標準，2014，建築物構造構件耐火試驗法－第 1 部：一般要求事項，CNS 12514-1，經濟部標準檢驗局。
2. 中華民國國家標準，2014，混凝土圓柱試體抗壓強度檢測法，CNS 1232，經濟部標準檢驗局。
3. 中華民國國家標準，試驗室混凝土試體製作及養護法，CNS 1230，經濟部標準檢驗局，2005。
4. 中國民國國家標準，2014，「建築物構造構件耐火試驗法」，經濟部標準檢驗局。
5. 內政部建研所，2008，「建築物構造防火性能檢證技術手冊」，金友勝數位科有限公司。
6. 沈進發，陳舜田，1993，火害延時對混凝土材料性質之影響。
7. 湛淵源，黃兆龍，1988，模糊聚類法評估混凝土建物損傷之探討。
8. 內政部研建署，2012，「最新建築技術規則」，詹氏書局。
9. 陳舜田，建築物火害及災後安全評估法，科技圖書，台北，1999，第 85-166 頁。
10. 陳舜田，1999，建築物火害及災後安全評估法，科技圖書館，第 85~116 頁，台北。
11. 林俊宏，et al. Pseudo-section 概念於表面波震測應用之數值模擬

- 探討. 2004. PhD Thesis..
12. 黃兆龍，1988，火害建築物結構材料性質評估
 13. 王天志，內填充鋼筋混凝土箱型鋼柱高溫加載試驗研究，2014。
 14. 陳柏存，以表面波譜法與支持向量機評估高溫損傷混凝土之性質，2008。
 15. 胡成泓， et al. 以頻域及時頻分析輔助孔內震測走時分析自動化. 2011. PhD Thesis.
 16. 李鎮宏，鋼骨鋼筋混凝土柱受軸力下防火性能設計指南研究，2012。
 17. 張育誠，連續熱損顆粒材之破裂韌度與拉力強度及其聲光破壞演化，2013。
 18. 陳誠直，箱型鋼管混凝土柱之防火性驗證技術研究，2013。
 19. 李其中，聚丙烯纖維自填充混凝土修復火害鋼筋混凝土柱在高溫中後之行為研究，2014。
 20. 曹祖璟，脆、延性固材於熱力固力耦合下之巨-微觀破壞特徵及火害度判識，2015。
 21. 柯志揚，結合聲-光非破壞檢測於隧道環境遭熱驅破壞之傷損判識，2016。
 22. 黃崑瑋，以聲-光非破壞檢測判識隧道襯砌受熱-固傷損之力學行

- 為 2017。
23. 林欣蓉，水泥基質材料受火害傷損之正規化超音波脈衝指標及其碳化特徵與燒失比對，2018。
 24. 楊佳嘉，以導波技術檢測鋼筋混凝土握裹介面傷損之初探。
 25. 牛荻濤, 陈亦奇, & 于澍. (1995). 混凝土结构的碳化模式与碳化寿命分析. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 27(4), 365-369.
 26. 梁伯魁，氯離子與中性化對於鋼筋腐蝕影響之研究
 27. 陳榮收，2008，框組式木構造牆體覆蓋板材火害後強度之研究
 28. 危時秀，2003，普通混凝土熱傳導性質之研究
 29. 施佩文，2013，有限元素法研析擬脆材料受熱驅破壞之熱-固耦合
 30. 羅柏易，2008，鋼筋輕質骨材混凝土牆之耐火性能
 31. 陳永鵠，高性能混凝土火害溫度推測方法之研究，2016.
 32. ASTM C597-09(2009), Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials.
 33. ASTM E610-82(1999), Standard Definitions of Terms Relating to Acoustic Emission, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Material.
 34. ASTM E976-84(2000), Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials.

35. A. K. Tovey, Assessment and repair of fire-damaged concrete structures-an update, Special Publication, 1986.
36. Ahmet, S. KIRLANGIÇ, Maria A. POLAK, and Giovanni CASCANTE. "Application of Surface Waves for Condition Assessment of Cementitious Materials."
37. Anderberg, Yngve; Thelandersson, Sven, Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures. 2. Experimental Investigation and Material Behaviour Model, 1976.
38. Carino, Nicholas J. "The impact-echo method: an overview." Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey. 2001. 1-18.
39. Choi, N.S., Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading, 2005.
40. Committee, R. C. P. (1984). RILEM Draft Recommendation: measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18. Materials and Structures, 17(102), 435-440.
41. G. T. G. Mohamedbhai, 1986, Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete
42. Georgali and Tsakiridis, 2005, Microstructure of fire-damaged concrete. A case study
43. Huang, Z.F., Tan, K.H., Rankine approach for fire resistance of axially-and-flexurally restrained steel columns, 2003
44. Kim, D. S., et al. "Feasibility study of the IE-SASW method for nondestructive evaluation of containment building structures in nuclear power plants." Nuclear engineering and design 219.2 (2003):

- 97-110.
45. Kim, D. S., W. S. Seo, and K. M. Lee. "IE-SASW method for nondestructive evaluation of concrete structure." *NDT & E International* 39.2 (2006): 143-154.
 46. Li et al, Inspection of reinforced concrete interface delamination using ultrasonic guided wave non-destructive test technique, 2012.
 47. Li, D., Ruan, T., & Yuan, J. (2012). Inspection of reinforced concrete interface delamination using ultrasonic guided wave non-destructive test technique. *Science China Technological Sciences*, 1-9.
 48. Li, DongSheng, Tao Ruan, and JunHui Yuan. "Inspection of reinforced concrete interface delamination using ultrasonic guided wave non-destructive test technique." *Science China Technological Sciences* 55.10 (2012): 2893-2901.
 49. Lin, Chih-Ping, and Tzong-Sheng Chang. "Multi-station analysis of surface wave dispersion." *Soil dynamics and earthquake engineering* 24.11 (2004): 877-886.
 50. M.S. Abrams , *Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F*, Special Publication, 1971.
 51. Omer Arioz, 2007, *Effects of elevated temperatures on properties of concrete*
 52. Promat, 2008. *Tunnel Fire Protection For Tunnel Structures & Services*.
 53. Robert Černý, *The effects of thermal load and forst cycles on the water transport in two high-performance concretes*, 2001.
 54. Rucka, M., & Zima, B. (2015). *Elastic wave propagation for condition*

- assessment of steel bar embedded in mortar. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 20(1), 159-170.
55. Rucka, Magdalena, and Beata Zima. "Elastic wave propagation for condition assessment of steel bar embedded in mortar." *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 20.1 (2015): 159-170.
56. Sakumoto, Y., Okada, T., Yoshida, M., Taska, S. Fire resistance of concrete-filled, fire resistant steel tube column, 1994.
57. Sharma, S., & Mukherjee, A. (2010). Longitudinal guided waves for monitoring chloride corrosion in reinforcing bars in concrete. *Structural Health Monitoring*, 9(6), 555-567.
58. Sharma, Shruti, and Abhijit Mukherjee. "Longitudinal guided waves for monitoring chloride corrosion in reinforcing bars in concrete." *Structural Health Monitoring* 9.6 (2010): 555-567.
59. Shen, J.F.; Chen, S.T.; and Twu, Y.S. "Evaluation of the Fire Temperature Imposed on Concrete by the Ignition Loss Method," *The First Japan Symposium on Heat Release and Fire Hazard*, Tsukuba, 1993, pp. II 7-12"
60. Shevaldykin, V. G., Samokrutov, A. A., & Kozlov, V. N. (2003, September). Ultrasonic low-frequency short-pulse transducers with dry point contact. Development and application. In *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany*.
61. Shevaldykin, Victor G., Andrey A. Samokrutov, and Vladimir N. Kozlov. "Ultrasonic low-frequency short-pulse transducers with dry point contact. Development and application." *International*

- Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany. 2003.
62. Sidney Mindess, A review of the cement-aggregate bond, March 1980, Pages 277-286.
 63. Zheng, Z., Lei, Y., & Xue, X. (2014). Numerical simulation of monitoring corrosion in reinforced concrete based on ultrasonic guided waves. *The Scientific World Journal*, 2014.
 64. Zhupeng Zheng, Ying Lei, and Xin Xue, Numerical simulation of monitoring corrosion in reinforced concrete based on ultrasonic guided waves, 2014.
 65. Zima, Beata, and Magdalena Rucka. "Non-destructive inspection of ground anchors using guided wave propagation." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 94 (2017): 90-102.

前瞻建築防火避難及結構防火科技研發整合應用計畫(二)協同研究計畫

第 1 案： 人工智能火害判識應用於結構材料現場火害探傷之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：蔡綽芳、林俊宏、王天志、蘇鴻奇、陳佳玲、陳韋志

出版年月：108 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：978-986-5448-45-5 (平裝)